2

FYSIK

ERGO

JAN PÅLSGÅRD · GÖRAN KVIST · KLAS NILSON

Liber

2

FYSIK

ERGO

JAN PÅLSGÅRD GÖRAN KVIST KLAS NILSON

LIBER

Förord

Ergo Fysik 2 är skriven för gymnasieskolans kurs Fysik 2 och motsvarande kurser inom vuxenutbildning och basår.

Kursboken bygger på Ergo Fysik B, men innehåller även ämnesplanens nya moment. I flera kapitel visas exempel på fysikens arbetssätt. Dessa avsnitt behandlar även modellering och matematiska metoder. Genomgående ges exempel på moderna tillämpningar inom vardag och teknik. I boken behandlas till exempel läsplattor, digital fotografering och medicinsk avbildning.

Boken är rikt illustrerad och vi har gjort ändringar för att göra innehållet mer tillgängligt och lättläst. Det centrala i ämnesplanen återges i början av kapitlen och viktiga samband och exempel lyfts sedan fram i texten. Efter varje teoriavsnitt finns kontrollfrågor som testar förståelsen. Svar till vissa av dessa finns längst bak i boken.

Alla kapitel avslutas med en sammanfattning och uppgifter av varierande karaktär (räkna, diskutera och uppskatta fysik). Här finns även ett test och förslag på hemlaborationer.

Uppskattad tidsåtgång för de olika kapitlen (80–100 utlagda klocktimmar):

Kap	1	2	3	4	5	6	7	8
Tim	10–15	10–12	8–11	12–15	10	10	10–13	10–14

Lärarmaterial på webben (pdf)

Lärarmaterialet innehåller: Tips på upplägg och enkla demonstrationer, ledningar och lösningar, laborationsförslag och redigerbara kapitelprov till Ergo Fysik 1, Ergo Fysik A och Ergo Fysik B. Material till Ergo Fysik 2 kommer 2013.

Lärare och elever kan utan kostnad ladda ner lösningar till Ergo Fysik 1 på www.liber.se. Lösningar till Ergo Fysik 2 publiceras under hösten 2012 och våren 2013.

På www.liber.se kan du läsa mer om lärarmaterialet. Där kan du också köpa aktiveringskoder. Materialet får du sedan tillgång till genom portalen www.liberonline.se.

Liber och författarna vill rikta ett stort tack till alla de lärare och elever som kommit med synpunkter och förslag till förändringar och förbättringar av Ergo.

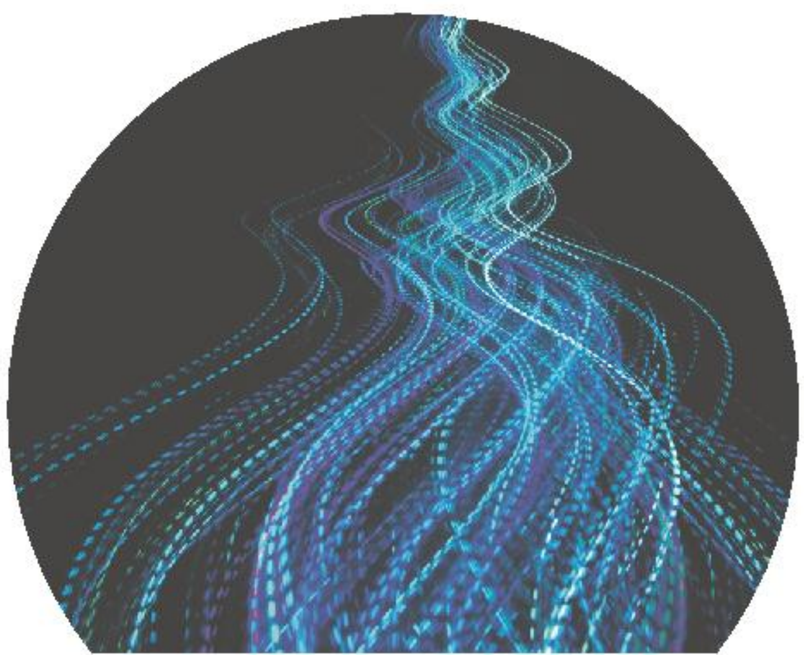
1 Mekaniska vågor

Svängningar och vågor 8
Reflektion och brytning 22
Böjning och interferens 26
Ljud 34
Uppgifter 47



2 Ljusvågor

Reflektion och brytning 57
Böjning och interferens 69
Det elektromagnetiska spektret 82
Uppgifter 86



3 Kvantfysik

Bohrs modell för väteatomen 95
Emission och absorption 102
Fotoelektrisk effekt 109
Fotonens rörelsemängd 118
Partiklar eller vågor? 120
Hade Newton fel? Kommer det att visa sig att Einstein hade fel? 129
Uppgifter 131

4 Kraft och rörelse

Kraftmoment 139
Kast 142
Cirkelrörelse 148
Tvådimensionell rörelse och numerisk modellering 160
Uppgifter 168





5 Fält

Gravitationsfält 179
Elektriska fält 183
Potentiell energi 187
Magnetiska fält 189
Strömledare i magnetfält 192
Magnetfält runt strömledare 199
Uppgifter 203

6 Rörelse i fält

Rörelse i gravitationsfält 215
Laddade partiklar i elektriska fält 218
Laddade partiklar i magnetfält 222
Elektronmassan 230
Orsakerna till magnetism 232
Uppgifter 235

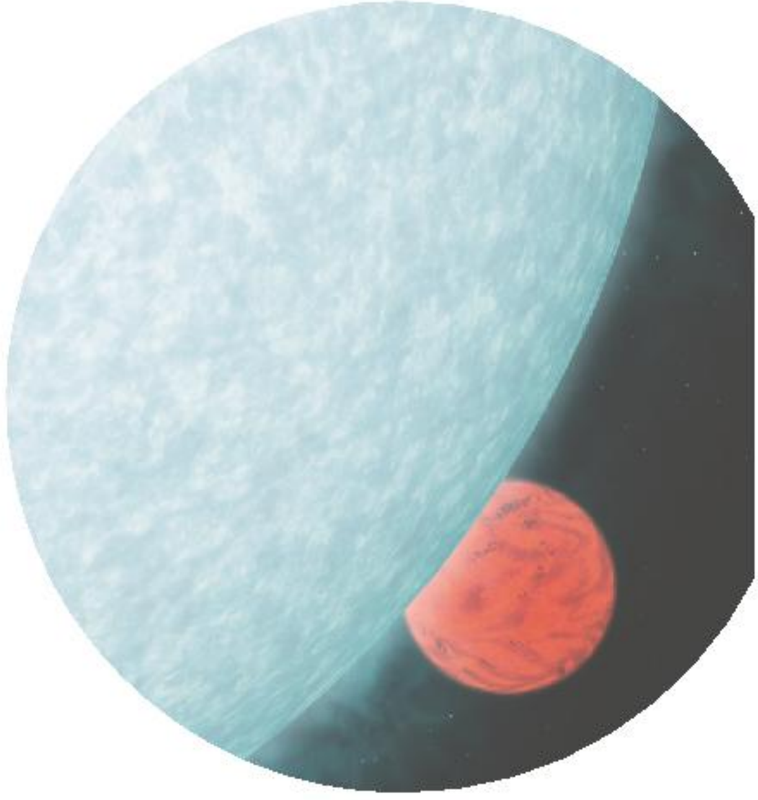


7 Induktion

Induktionsfenomenet 243
Inducerad spänning 248
Faradays induktionslag 251
Växelspänning 257
Elektromagnetiska vågor 266
Uppgifter 274

8 Astrofysik

Avstånd till stjärnorna 287
Stjärnspektra 291
Stjärnutveckling 297
Exoplaneter 310
Galaxer 316
Kosmologi 323
Uppgifter 337



Svar till kontrollfrågorna 340

Facit med kommentarer 341

Register 350

1 Mekaniska vågor

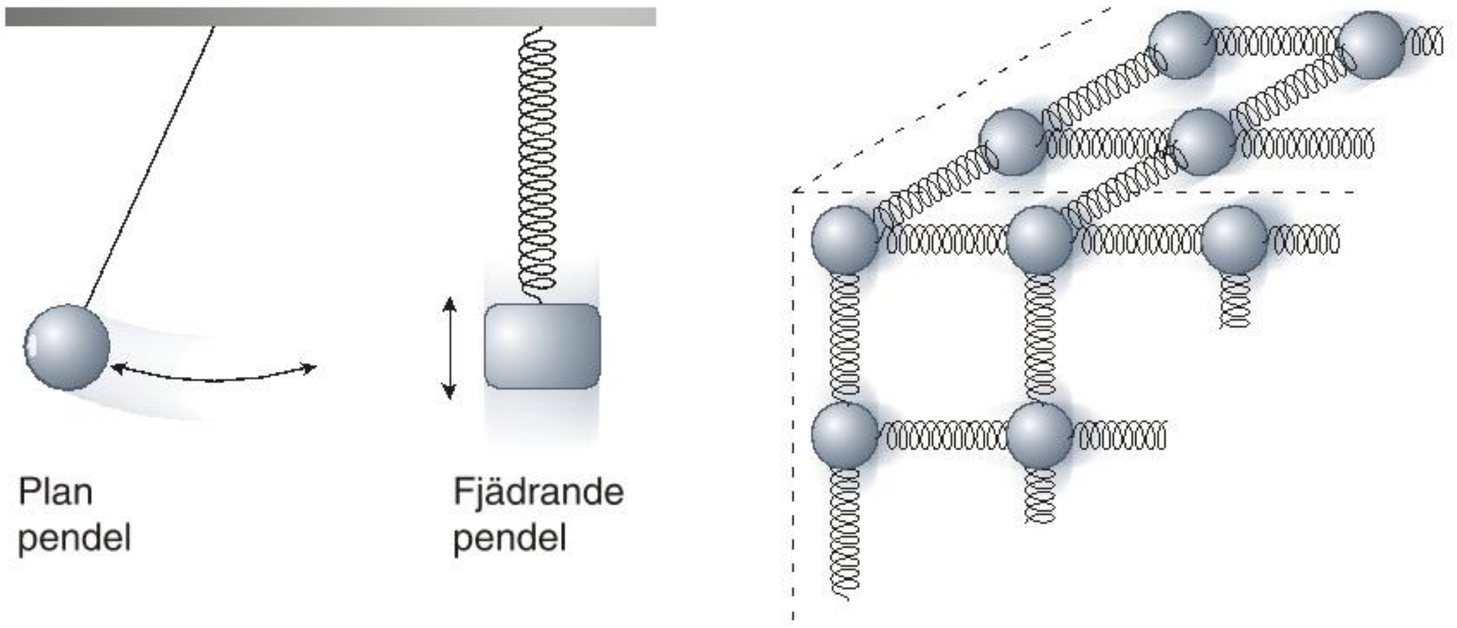
Undervisningen i kursen ska behandla:

- **Harmonisk svängning som modell för att beskriva fenomen inom vardag och teknik**
- **Reflektion, böjning, brytning och interferens av mekaniska vågor**
- **Stående vågor och resonans med tillämpningar inom vardag och teknik**
- **Orientering om ljudstyrka**
- **Det experimentella arbetets betydelse för att testa, omvärdera och revidera hypoteser, teorier och modeller**
- **Bearbetning av data och resultat med hjälp av regressionsanalys, analys av grafer, enhetsanalys och storleksuppskattningar**
- **Utvärdering av resultat och slutsatser genom analys av metodval, arbetsprocess, felkällor och mätosäkerhet.**

Svängningar och vågor 08
Reflektion och brytning 22
Böjning och interferens 26
Ljud 34
Uppgifter 47

När vi hittills har pratat om rörelse och krafter, har vi menat rörelse hos *partiklar* eller *föremål* och krafter i samband med det. Men det finns också en annan typ av rörelse, nämligen *vågrörelse*.

Den mesta informationen om världen får vi genom vågor. Ögonen tar emot ljus, som är elektromagnetiska vågor. Öronen tar emot ljud, som är tryckvågor i luften. Vattenvågor omfattar allt från små krusningar i en vattenpuss till enorma havsvågor, som orsakas av havsbottnens rörelser i samband med jordbävningar. Sådana jättevågor kallas tsunamis. Vi hittar vågor överallt. Modern atomfysik visar oss att till och med atomerna kan beskrivas med hjälp av en vågmodell.



1.1 Tre exempel på svängningssystem. I molekyler och fasta ämnen är det som om atomerna eller molekylerna är sammanbundna med fjädrar. svängningssystem.

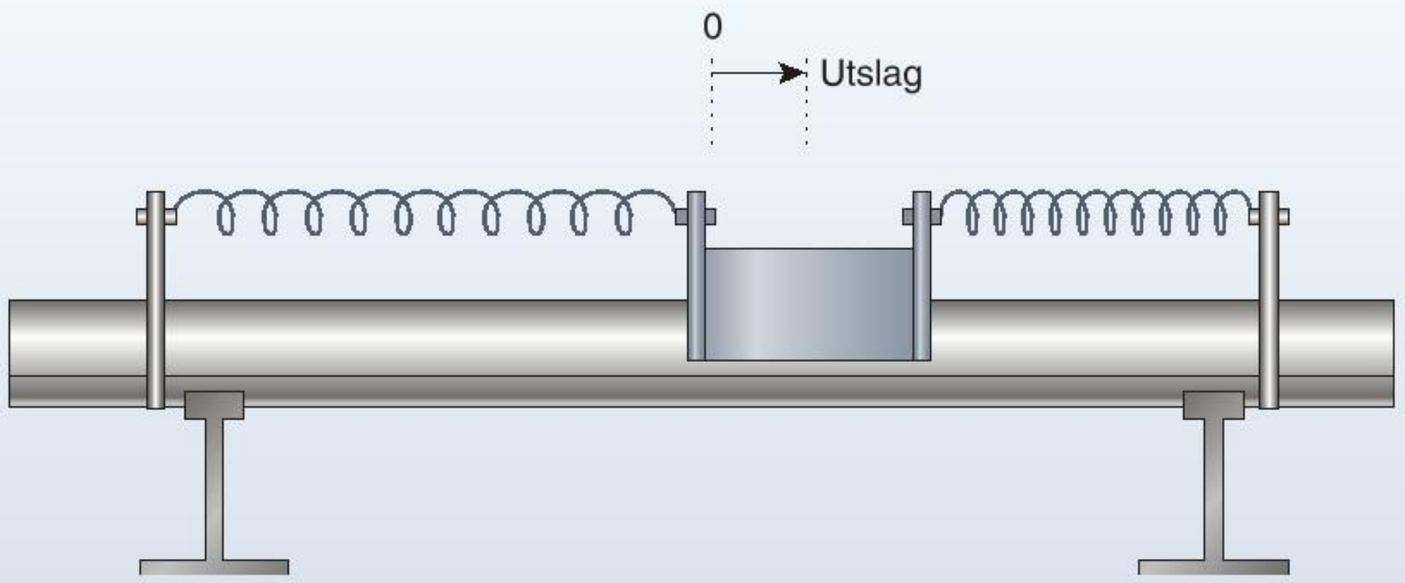
1.1 Svängningar och vågor

Svängningar

Svängningar är vanliga både i vårt moderna samhälle och i naturen. Se figur 1.1. Under en promenad kan du se många exempel på detta. Träd som svajar i vinden, bilar som gungar upp och ned efter att ha kört över ett farthinder. Barn som gungar, ja till och med dina egna armar utför en svängningsrörelse under tiden du promenerar.

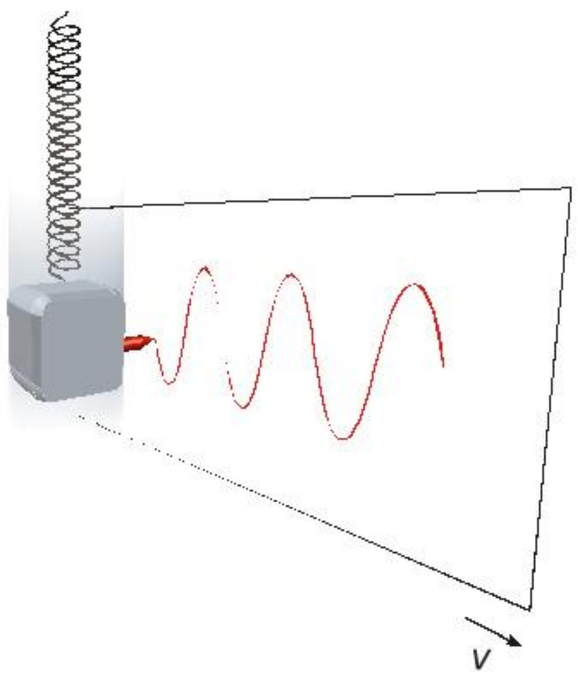
Inom fysiken säger vi att en *svängning* är en *periodisk* rörelse mellan två ytterlägen. Periodisk betyder att samma rörelse sker om och om igen. Ett speciellt läge mellan ytterlägena är *jämviktsläget*. Om ett svängningssystem placeras i jämviktsläget, förblir det i vila. Utanför jämviktsläget påverkas systemet av en kraft som verkar tillbaka mot jämviktsläget.

EXEMPEL 1 **Svängande släde på luftkuddebana**



1.2 Luftkuddebana med elastiska fjädrar fästade vid släden.

Vi kan tillverka ett svängningssystem på en luftkuddebana genom att fästa elastiska fjädrar i en släde. Vi fäster fjädrarna så att de drar släden åt var sitt håll. Se figur 1.2. Jämviktsläget är markerat med 0. Det är det ställe där släden kan vara i vila. När vi drar släden åt sidan och släpper den, börjar den att svänga fram och tillbaka kring jämviktsläget. Svängningarna fortsätter eftersom fjädrarna drar tillbaka släden mot jämviktsläget. På grund av trögheten fortsätter släden förbi jämviktsläget. Rörelsen är periodisk. Den sker om och om igen.



1.3 En skrivande fjäderpendel.

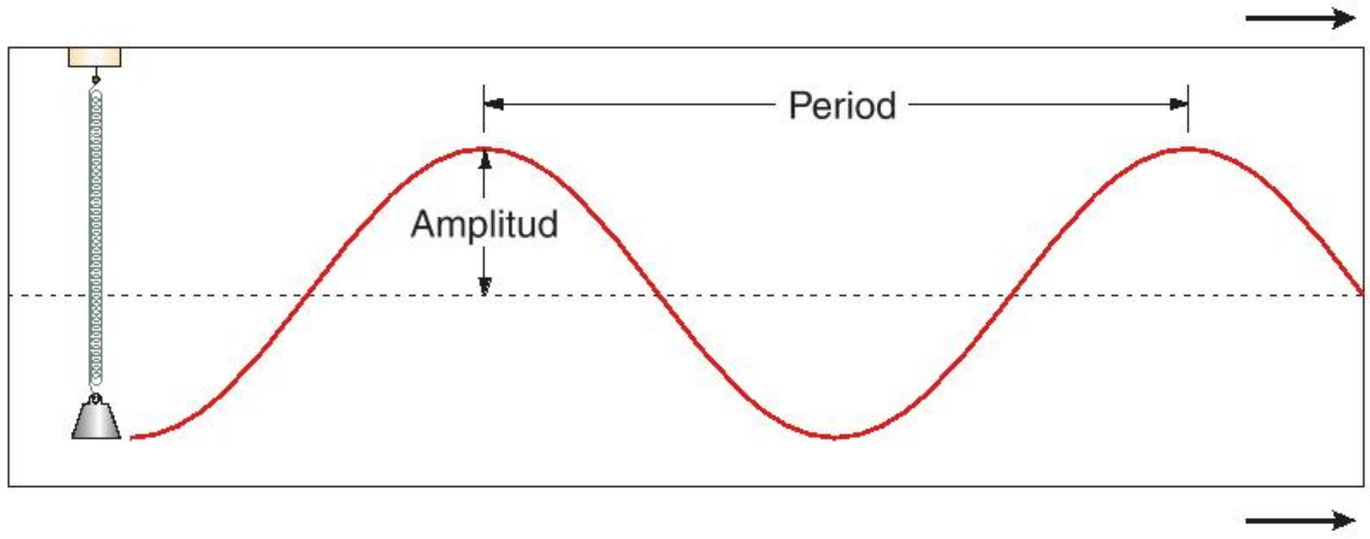
Harmonisk svängning

Den enklaste och mest regelbundna av alla periodiska rörelser kallas *harmonisk svängning*. I figur 1.3 ser du en vikt som hänger i en svängande fjäder. En penna är fäst vid vikten och vi drar ett papper förbi pendeln med konstant hastighet. Den kurva som pennan ritar visar hur viktens avvikelse från jämviktsläget varierar med tiden.

En svängningsrörelse som den i figuren kallas harmonisk om den fortsätter utan att dämpas. Kännetecknande för den harmoniska svängningen är att hastigheten varierar – rörelsen är accelererad.
Det betyder att en varierande kraft verkar på systemet. Kraften verkar alltid in mot jämviktsläget. Det innebär att hastigheten är störst när systemet passerar jämviktsläget. I ytterlägena är hastigheten lika med noll.

En harmonisk svängningsrörelse är naturligtvis en idealiserad modell av verkligheten, eftersom verklighetens svängningsrörelser nästan alltid dämpas snabbt om de inte tillförs ny energi.

Frekvens och period



1.4 Regelbunden svängningsrörelse. Periodtiden (T) är den tid som används för en hel svängning, från ett ytterläge och tillbaka igen till samma ytterläge. Amplituden (A) är det största utslaget.

Heinrich Hertz (1857–94)
Enheten hertz är uppkallad efter den tyske fysikern Heinrich Hertz.

Som framgår av figur 1.3 behöver föremålet som svänger en viss tid för att svänga fram och tillbaka. Den tid som används för en hel svängning, från ett ytterläge och tillbaka igen till samma ytterläge, kallar vi svängningstiden eller *perioden T*. Se figur 1.4. Antalet svängningar per tidsenhet kallar vi *frekvensen f*. Enheten för frekvens är *hertz* (Hz).

SAMBAND MELLAN FREKVENS OCH PERIOD

Sambandet mellan *frekvensen f* och *perioden T* är

$$f = \frac{1}{T}$$

Enheten för frekvens är *hertz* (Hz). 1 Hz = en svängning per sekund.

När svängningarna är snabba, är T liten och f stor. En *hög frekvens* motsvarar en *kort period*.

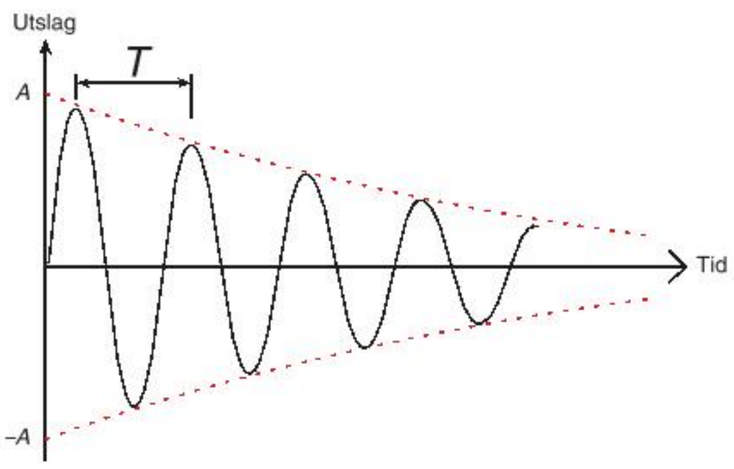
EXEMPEL 2 **Ett svängningssystem**

Ett svängningssystem gör 60 svängningar på 30 sekunder. Det motsvarar en frekvens på

$$f = \frac{60}{30}\ \text{Hz} = 2\ \text{Hz}$$

Detta betyder 2 svängningar per sekund, som ger perioden

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2}\ \text{s}$$



1.5 Dämpade svängningar.

Dämpad svängning

När ett system svänger, kallar vi avståndet från jämviktsläget för *utslaget*. Utslaget varierar med tiden. Det största utslaget heter *amplituden*. Amplituden är lika med avståndet från jämviktsläget till ett ytterläge. Se figur 1.5.

Om ett svängningssystem överlåts åt sig självt sedan det satts i gång, dör svängningarna ut efter hand. Amplituden går mot noll, och vi säger att svängningen *dämpas*. Det beror på krafter som motverkar rörelsen och tar energi från systemet, till exempel friktion.

Resonans

När ett system överlåts åt sig själv sedan svängningarna satts i gång, säger vi att systemet svänger fritt. Frekvensen för ett system som svänger fritt, kallar vi *egenfrekvensen*. Ett intressant fall är när ett svängningssystem utsätts för en periodisk kraft, och denna kraft har samma frekvens som systemets egenfrekvens. Då uppstår *resonans*: Svängningarna får större och större amplitud. Om amplituden blir för stor, kan svängningssystemet bryta samman.

EXEMPEL 3 **Exempel på resonans**

När ett system kommer i resonans, kan det ibland gå illa. År 1850 marscherade 487 soldater taktfast ut på en bro vid Angers i Frankrike. Marschtakten ledde till resonans i bron. Den föll ner, och 226 soldater omkom.

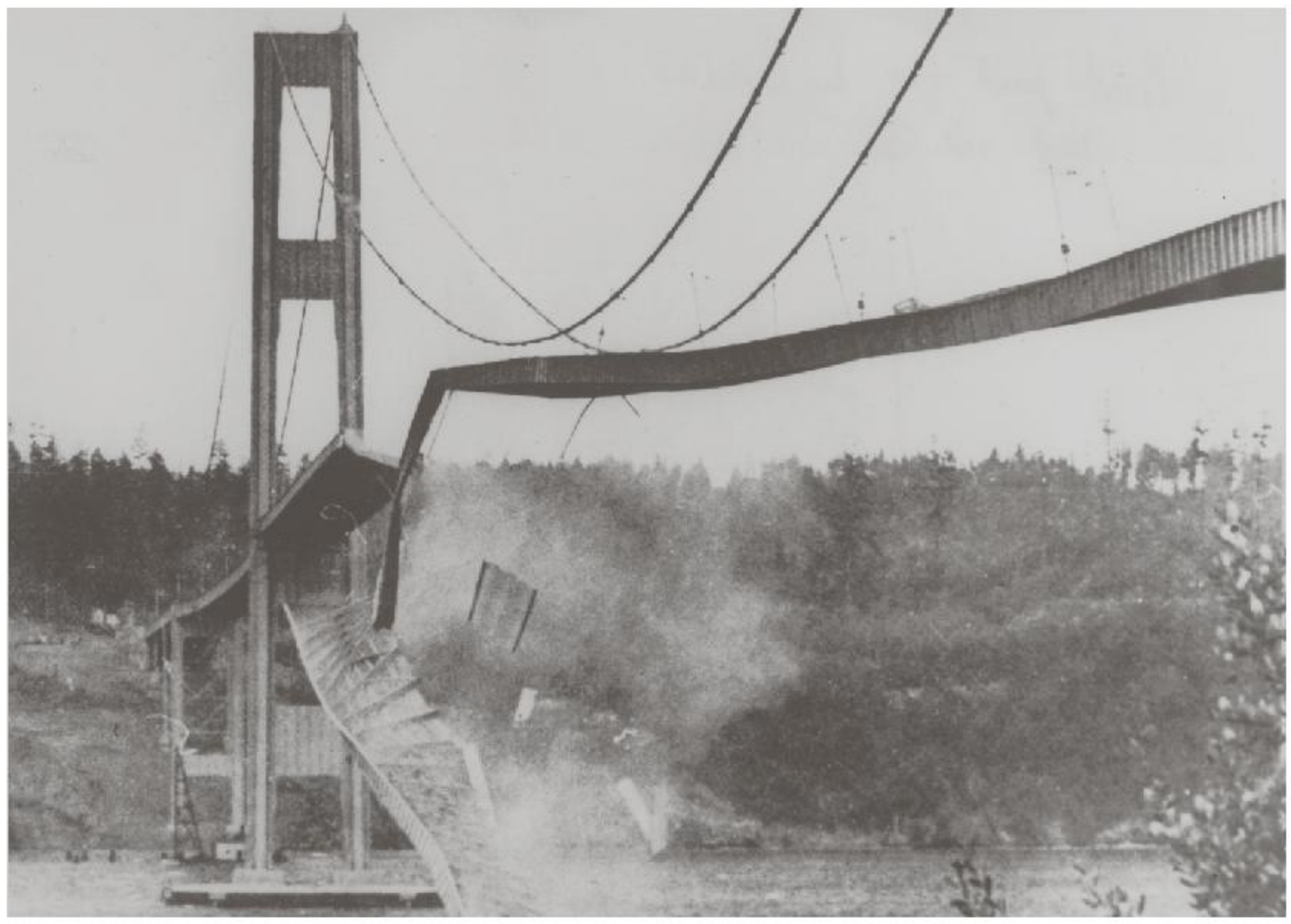
Ingenjörer måste vara uppmärksamma på faran med resonans. Ett obalanserat hjul på en bil kan ge resonans vid vissa hastigheter. Bilen måste vara konstruerad så att ingen av de rörliga delarna har en egenfrekvens lika med motorns normala frekvens. Oljeplattformarnas tunga strukturer får inte ha en egenfrekvens som kan överensstämma med frekvensen hos vågorna i havet.

Om du gnider med ett vått finger mot kanten på ett kristallglas kan det komma i svängning. Då hör du en ton med glasets egenfrekvens. En operasångerska som sjunger samma ton mot glaset kan få det att sprängas i bitar.

Korta personer har ofta ett snabbare gångsätt än långa personer. Det beror på att det är lättast att låta benet svänga med sin egenfrekvens. Korta ben har en högre egenfrekvens än långa ben.

Redan som barn lärde du dig att hantera resonans i lekparkens gunga. För att öka amplituden var du tvungen att sträcka ut och dra in benen och kroppen med samma frekvens som resonansfrekvensen. Men det var nog inte så du uttryckte det …



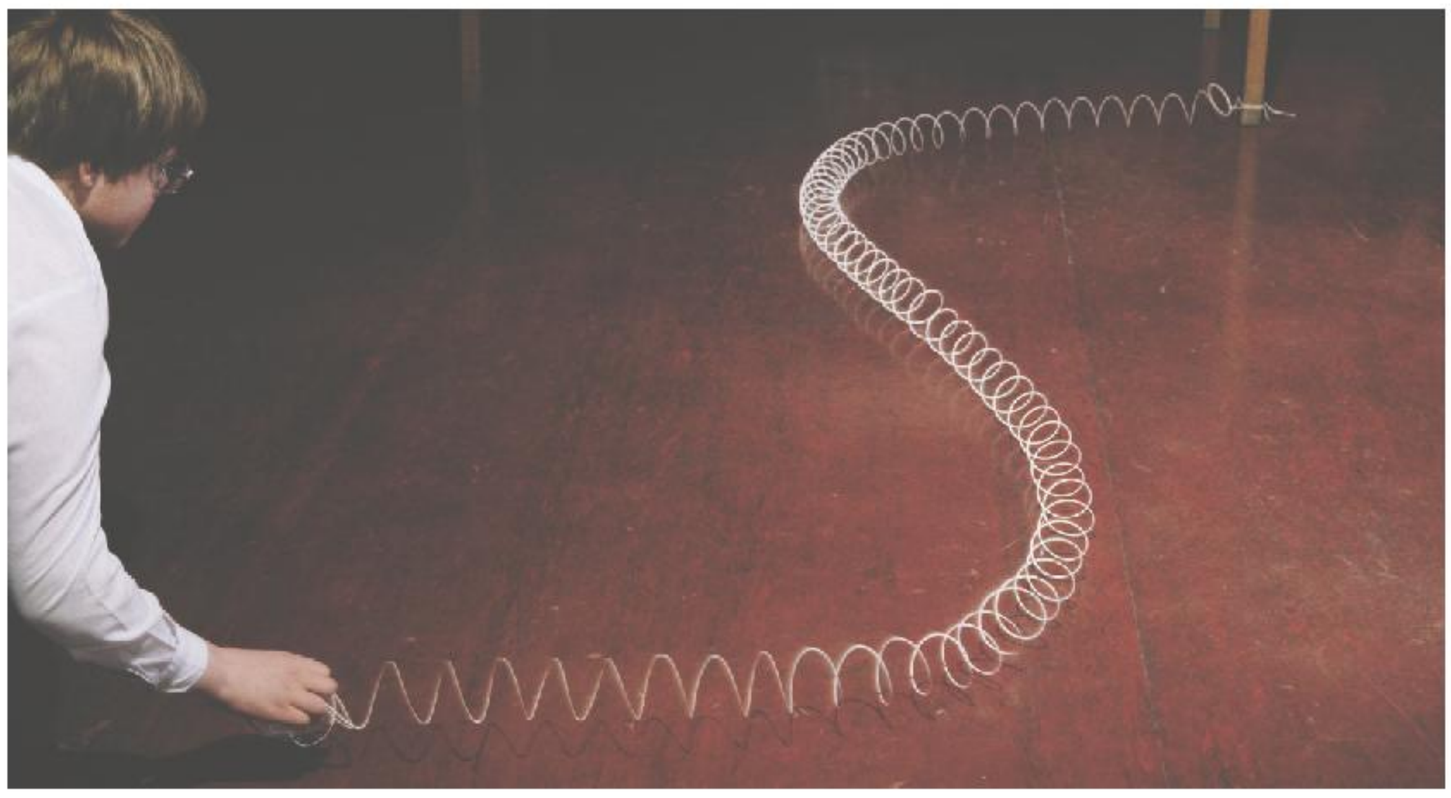


1.6 Resonanseffekter kan uppstå även när ett system utsätts för en kraft som inte är periodisk. 1940 kollapsade Tacoma Narrows Bridge efter att ha utsatts för en stark vind som bidrog till att bron hamnade i en form av egensvängning. Katastrofen förändrade i ett slag ingenjörernas sätt att bygga broar.

Vågor

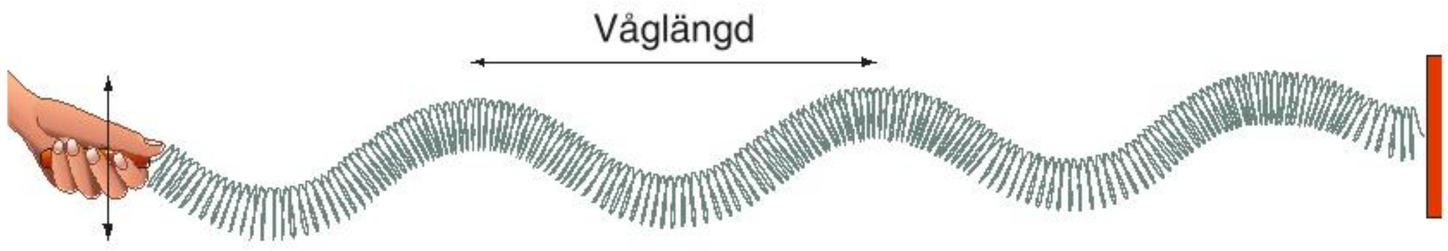
På samma sätt som en svängning inte kan existera i ett ögonblick så kan inte en *våg* existera i en enda punkt. En våg är en svängning som breder ut sig från ett ställe till ett annat i rummet. I många fall, som med ljud och ljus, kan vi varken känna eller se själva vågorna. Men erfarenheterna från vattenvågor gjorde att fysikerna kunde känna igen vågegenskaper hos ljud och ljus. Av detta drog de slutsatsen att också ljud och ljus är vågfenomen.

Vattenvågor kan vi se och uppleva direkt, men vad är det som svänger i ljud- och ljusvågor? Innan vi besvarar den frågan, måste du få lite mer erfarenhet av vågor som du kan se. Du kan själv göra en undersökning med hjälp av en spiralfjäder där du fäster ena änden av fjädern i en vägg. Se figur 1.7



1.7 Om du rör handen snabbt, till vänster och till höger, kommer en puls flytta sig genom fjädern.

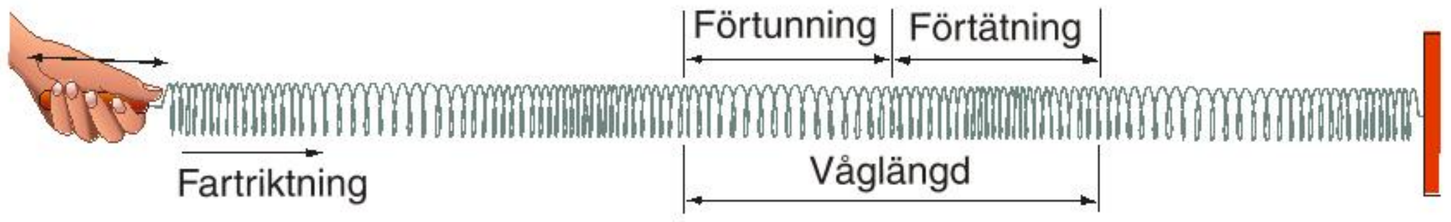
Om du håller i den andra änden av fjädern och gör en snabb rörelse upp och ned kommer du att se att en *puls* rör sig genom fjädern. Om du nu låter handen röra sig i snabba periodiska rörelser kommer du att se att en *våg* breder ut sig. Se figur 1.8.



1.8 Vågor i en spiralfjäder.

Den riktning som en våg breder ut sig i, kallar vi för vågens *hastighetsriktning*. Vågen i spiralfjädern breder ut sig längs fjädern, men varje punkt på fjädern rör sig upp och ned. Här svänger alltså fjädern tvärs emot vågens hastighetsriktning. En sådan våg kallar vi en *transversell* våg.

Du kan också åstadkomma en våg i hastighetsriktningen i fjädern genom att föra handen fram och tillbaka. En sådan våg kallar vi en *longitudinell* våg. Figur 1.9 visar en longitudinell våg i en spiralfjäder. Längs fjädern finns förtätningar och förtunningar i stället för utslag på tvären.



1.9 Ögonblicksbild av longitudinella vågor i en spiralfjäder.

TRANSVERSELLA OCH LONGITUDINELLA VÅGOR

Transversella vågor **svänger på tvärs mot vågens hastighetsriktning.**

Longitudinella vågor **svänger längs med vågens hastighetsriktning.**

Frekvens, våglängd och våghastighet

Låt oss titta på spiralfjädern en gång till. Varje enskild punkt på fjädern svänger med frekvensen f och perioden $T = 1/f$.

Dessa storheter kallar vi också frekvens och period för *vågen*. De bestäms av frekvensen och perioden hos vågkällan.

Om du fortsätter att svänga handen periodiskt fram och tillbaka så kan du se att samma svängningstillstånd återkommer med jämna mellanrum längs fjädern. Du kan se ställen på fjädern som svänger i *fas*. Det betyder att de har samma utslag och samma svängningsriktning vid samma tidpunkt. Ett tydligt exempel är två vågtoppar. Alla punkter på fjädern som har samma inbördes avstånd som mellan två närliggande vågtoppar, är i fas med varandra. Avståndet mellan en punkt på fjädern till nästa punkt som svänger i samma fas, kallar vi *våglängden* λ. Avståndet mellan två närliggande vågtoppar är alltså λ.

VÅGLÄNGD

Våglängden λ **är avståndet mellan en punkt i en våg och nästa punkt som svänger i samma fas.**

Ämne	Ljudets hastighet *v*/(m/s)
Luft	340
Bly	1 200
Vatten	1 500
Järn	5 100
Diamant	18 000

Ljudets hastighet i några olika ämnen.

Svängningarna flyttar sig genom fjädern med konstant hastighet. Det är *våghastigheten v*. Under loppet av en period T flyttar vågen sig en våglängd λ. Då blir våghastigheten

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

där $f = 1/T$ är frekvensen. Detta är den mest grundläggande formeln i vågfysiken. Formeln gäller både för longitudinella och transversella vågor.

VÅGHASTIGHET

Våghastighet = frekvens · våglängd, $v = f\,\lambda$.

EXEMPEL 4 Ljudvågor i luft och järn

Normaltonen ettstrukna a har frekvensen 440 Hz oavsett medium. Hur stor våglängd har normaltonen i luft och i järn?

Lösning: Av formeln $v = f\,\lambda$ får vi våglängden λ_1 i järn och λ_2 i luft:

$$\lambda_1 = \frac{v_1}{f} = \frac{5100}{440}\,\text{m} \approx 11{,}6\ \text{m} \quad \text{och} \quad \lambda_2 = \frac{v_2}{f} = \frac{340}{440}\,\text{m} \approx 0{,}77\ \text{m}$$

Mekaniska vågor

Det som en våg breder ut sig genom, kallar vi ett *vågmedium*. Både fasta, flytande och gasformiga ämnen kan vara medium för vågor av många olika slag. Dessa kallas *mekaniska vågor*. Ljudvågor är ett exempel på mekaniska vågor. Utan ett ämne uppstår inget ljud. En pistol avfyrad i vakuum är helt ljudlös!

Ljud breder ut sig som longitudinella vågor genom olika ämnen. Vågorna efter en jordbävning (seismiska vågor) är ett annat exempel på mekaniska vågor.

Till skillnad från ljudvågor är *elektromagnetiska vågor* ickemekaniska eftersom de tar sig fram genom vakuum. I de elektromagnetiska vågorna är det elektriska och magnetiska variationer som breder ut sig. Ljus och radiovågor är två exempel på elektromagnetiska vågor. Och visst kan de här vågorna gå genom vakuum! Vi kan ju se ljuset från solen och andra stjärnor trots det enorma tomrummet som skiljer oss från dem.

Vågor och energi



1.10a En cirkelformad våg brer ut sig efter ett stenkast i lugnt vatten.

Tänk dig att du sitter vid en tjärn en stilla sommarkväll. Vattenytan är spegelblank. Så kastar du ut en sten i vattnet. Då utgår cirkelformade vågor från det ställe där stenen träffade vattenytan. Det ser ut som om en liten vall av vatten breder ut sig på vattenytan. Se figur 1.10a.

Ett blad som flyter på vattenytan guppar upp och ned. Men när vågorna har passerat, ligger bladet kvar på samma ställe som tidigare. Vågorna flyttar sig, men de tar varken bladet eller vattnet med sig. Det som vågorna för med sig är *energi*. Energi är något du inte kan se, men vågorna berättar för dig att den finns där. När vågorna breder ut sig, blir *vågfronten* längre och längre, och energin blir mer och mer "förtunnad". Om vågor ska fortsätta att spridas på vattenytan, så måste du hela tiden kasta nya stenar eller doppa något upp och ner i vattnet. Du måste använda energi; du måste ha en *vågkälla*.

En *cirkelformad våg* på ett stilla vatten utbreder med samma fart i alla riktningar från vågcentrum. Amplituden avtar med avståndet från vågkällan eftersom energin sprids över en cirkelformad vågfront som blir längre och längre.



1.10b En sfärisk våg brer ut sig när en nyårsraket exploderar.

En *sfärisk* våg är en våg där vågfronterna är sfäriska ytor. När en nyårsraket exploderar uppe i luften, utbreder sig ljudet som sfäriska vågor från explosionsstället. Se figur 1.10b. Här fördelas energin i vågfronten på en sfärisk yta som blir större och större.

På mycket stort avstånd från vågcentrum kan cirkelvågor och sfäriska vågor se ut som om de är plana. Om vi bara är intresserade av en liten del av vågen på stort avstånd från vågkällan, kan därför en plan vågmodell vara tillräckligt bra.

Om vi vill använda lite energi när vi sänder vågor till en bestämd plats, så bör vi se till att de inte sprids i två eller tre dimensioner. En av flera fördelar med att sända ljusvågor genom fiberkablar är att energin följer vågorna genom kabeln utan att läcka ut. Om du vill sända vågor *utan* ledning, bör du i varje fall koncentrera energin så mycket som möjligt, till exempel genom att använda en megafon, en strålkastare eller en parabolantenn.

Vi avslutar det första avsnittet med ett exempel som visar hur du kan arbeta praktiskt med en fysikalisk frågeställning. Att arbeta på ett naturvetenskapligt sätt innebär att man använder sig av kända begrepp, teorier och modeller. Dessutom använder man systematiska arbetsmetoder för att få fram bra resultat vid sina undersökningar.

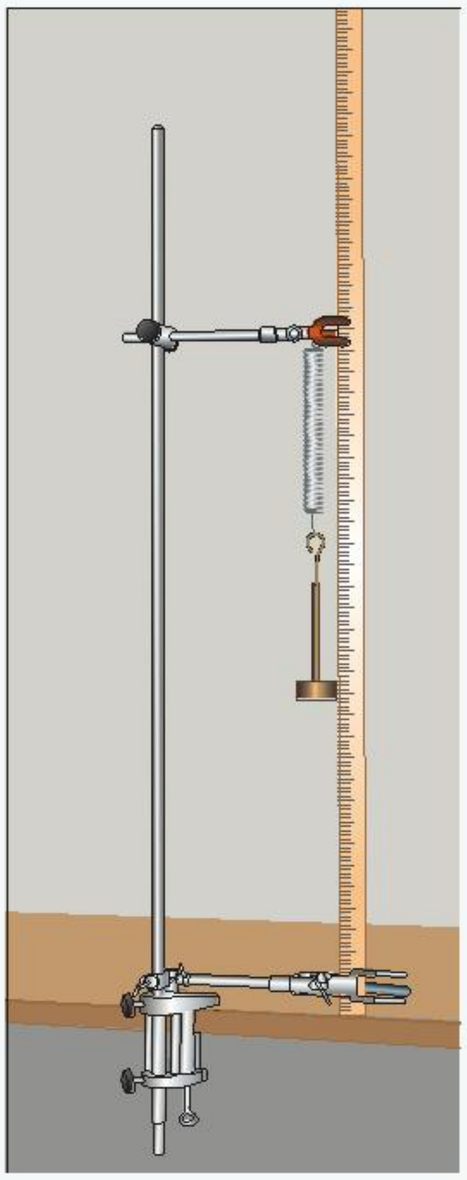
SPIRALFJÄDERFORSKNING

Syfte: Målet var att undersöka vilka faktorer som påverkar svängningstiden för en vertikalt hängande spiralfjäder som belastas med en vikt.

Hypotes: Vår hypotes var att svängningstiden påverkas av följande faktorer: amplituden, fjäderkonstanten och viktens massa. Vi kunde inte komma på några fler möjliga faktorer.

Utförande: Försöket ställdes upp som i figuren. Vi försökte variera en av variablerna i taget medan de övriga två hölls konstanta.

Att arbeta systematiskt kan bland annat innebära att man försöker att isolera hur var och en av variablerna påverkar modellen.



Försöksuppställning.

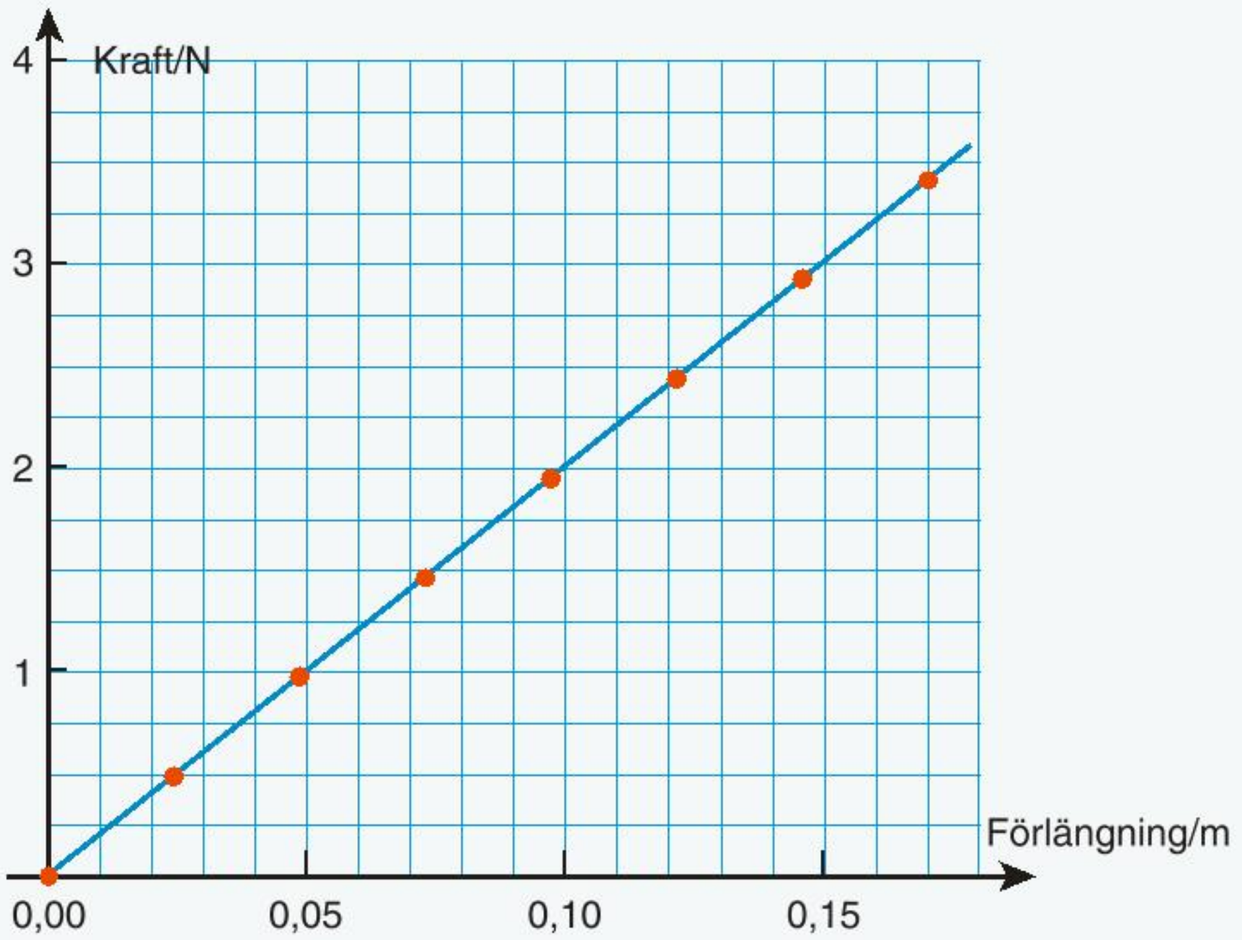
Ta gärna med ett foto eller rita en skiss.

Vi tyckte det var viktigt att först undersöka om *Hookes lag*, $F = kx$, verkligen gällde för vår fjäder.

Hookes lag säger att förlängningen av en fjäder är proportionell mot den kraft fjädern utsätts för.

Sambandet kan skrivas, $F = kx$ där F är dragkraften, x förlängningen och *k fjäderkonstanten.* Fjäderkonstanten är ett mått på hur hård fjädern är.

Vi hängde vikter med olika massor i änden på fjädern och mätte förlängningen.



Fjädern ser verkligen ut att följa *Hookes lag*, det vill säga dragkraften är proportionell mot förlängningen, $F = kx$. Fjäderkonstanten k, den räta linjens lutning, är 20,3 N/m.

För ”vår” fjäder fann vi alltså modellen

$$F(x) = 20{,}3 \cdot x$$

Amplitudens betydelse för svängningstiden

Vi hängde en 400 g-vikt i fjädern och markerade jämviktsläget för vikten. Så satte vi vikten i svängning. Vi lät svängningarna börja med en amplitud av 8 cm och tog tiden på 10 svängningar. Vi upprepade försöket med mindre amplitud. De uppmätta tiderna dividerade vi med 10 för att få svängningstiden. Resultat:

Amplitud/m	0,08	0,07	0,06	0,04	0,02
Tid/s	1,00	0,98	0,99	0,98	0,99

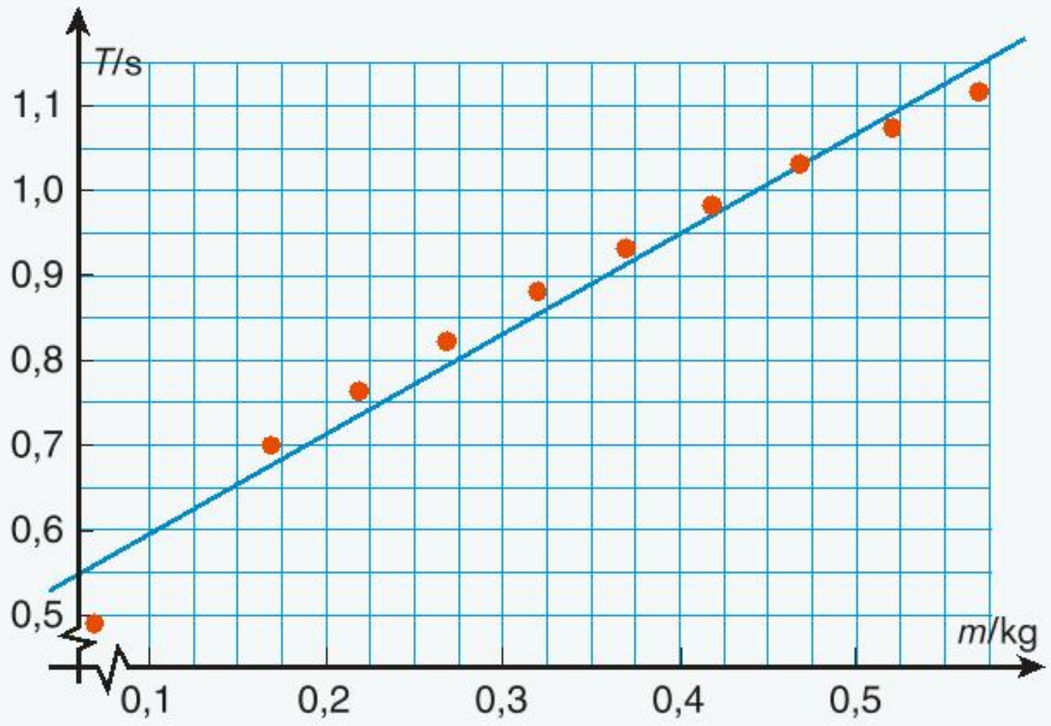
Våra mätningar tydde på att *svängningstiden är oberoende av amplituden* i intervallet 0 m till 0,08 m.

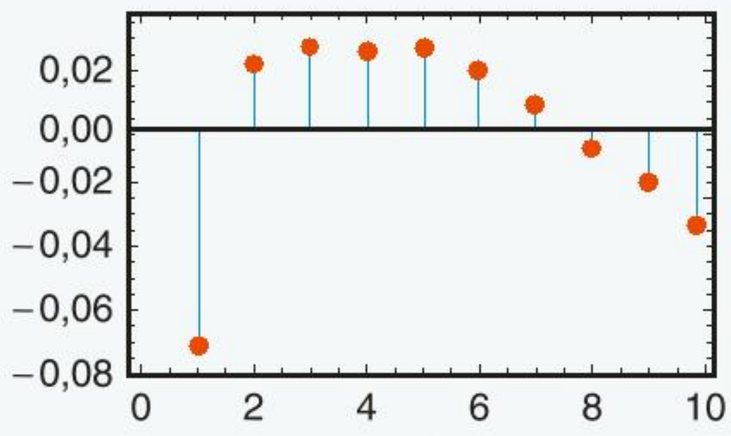
Svängningstidens beroende av viktens massa

Fjädern belastades sedan med olika vikter och systemet sattes i vertikala svängningar med olika massor. Vi tog tiden för 20 svängningar och räknade därefter ut svängningstiden:

m/kg	0,07	0,17	0,22	0,27	0,32	0,37	0,42	0,47	0,52	0,57
T/s	0,49	0,70	0,76	0,82	0,88	0,93	0,98	1,0	1,07	1,11

Vi såg att svängningstiden ökade med massan. Men hur?
Här ser vi regressionslinjen för punkterna:



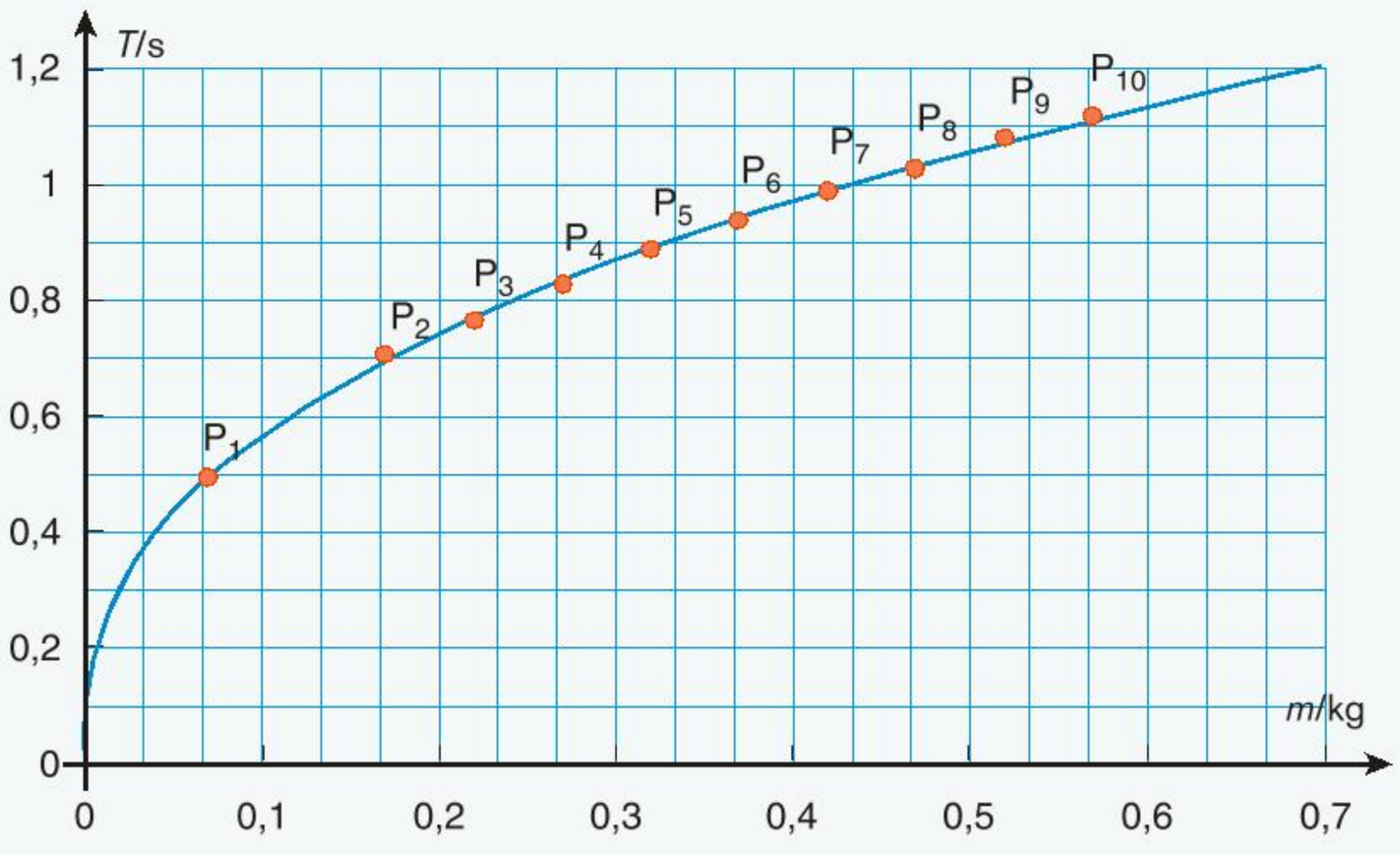


Diagrammet visar hur mycket punkterna avviker från den anpassade linjen.

Det verkade uppenbart att svängningstiden *inte* var en linjär funktion av massan. Med hjälp av ett regressionsprogram fann vi däremot en potensfunktion

$$T(m) = 1{,}37 \cdot m^{0{,}4}$$

som såg ut att passa riktigt bra.



Enhetsanalys

Vi kom inte på någon fysikalisk förklaring till att exponenten skulle vara just 0,4 i vår potensfunktion. I de formler som vi stött på tidigare hade den alltid varit ett heltal eller ± 0,5 (som svarar mot en kvadratrot i täljare och nämnare). Vi bestämde oss för att undersöka saken lite närmare med hjälp av enhetsanalys.

Om vi antar att det är fjäderkonstanten k och massan m som bestämmer svängningstiden, (amplituden hade ju ingen betydelse) så kan vi skriva

$$T \propto k^{\alpha} \cdot m^{\beta}$$

Enheten för T är sekunder.

Sambandet betyder att svängningstiden T är proportionell mot fjäderkonstanten, upphöjd till okänd exponent α, multiplicerad med massan, upphöjd till en annan okänd exponent β.

Fjäderkonstanten har enheten

$$[k] = \mathrm{N/m} = \frac{\mathrm{kgm}}{\mathrm{s}^2} / \mathrm{m} = \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}^2}$$

Enhetsanalysen bygger på att det måste vara samma enhet på båda sidor i uttrycket, i det här fallet sekunder. Här gäller det att bestämma exponenterna α och β så att hela uttrycket på högersidan får enheten sekunder.

Sätter vi in enheterna i uttrycket för svängningstiden så får vi

$$T \propto k^{\alpha} \cdot m^{\beta} = \left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}^2}\right)^{\alpha} \cdot (\mathrm{kg})^{\beta} = \frac{\mathrm{kg}^{\alpha} \cdot \mathrm{kg}^{\beta}}{\mathrm{s}^{2\alpha}} = \frac{\mathrm{kg}^{\alpha+\beta}}{\mathrm{s}^{2\alpha}}$$

För att vi ska få enheten sekunder *måste* exponenten 2α vara -1, och då är $\alpha = -0{,}5$.

$$\left[\frac{1}{\mathrm{s}^{2\alpha}} = \frac{1}{\mathrm{s}^{(2\cdot(-0{,}5))}} = \frac{1}{\mathrm{s}^{-1}} = \mathrm{s}\right]$$

För att det ska gå att förkorta bort enheten kg så att vi bara får sekunder kvar *måste*

$\alpha + \beta = 0$, det vill säga

$-0{,}5 + \beta = 0$

$\beta = 0{,}5$

Enhetsanalysen säger alltså att exponenten β ska vara 0,5 och inte 0,4. Om det är riktigt så är svängningstiden omvänt proportionell mot kvadratroten ur fjäderkonstanten:

$$\mathrm{T} \propto \frac{1}{\sqrt{k}}$$

Vi undersökte den hypotesen i sista delen av vårt försök.

Svängningstidens beroende av fjäderkonstanten *k*

Vi varierade fjäderkonstanten genom att seriekoppla likadana spiralfjädrar. Under tiden höll vi dragkraften konstant genom att använda samma vikt genom hela mätserien.

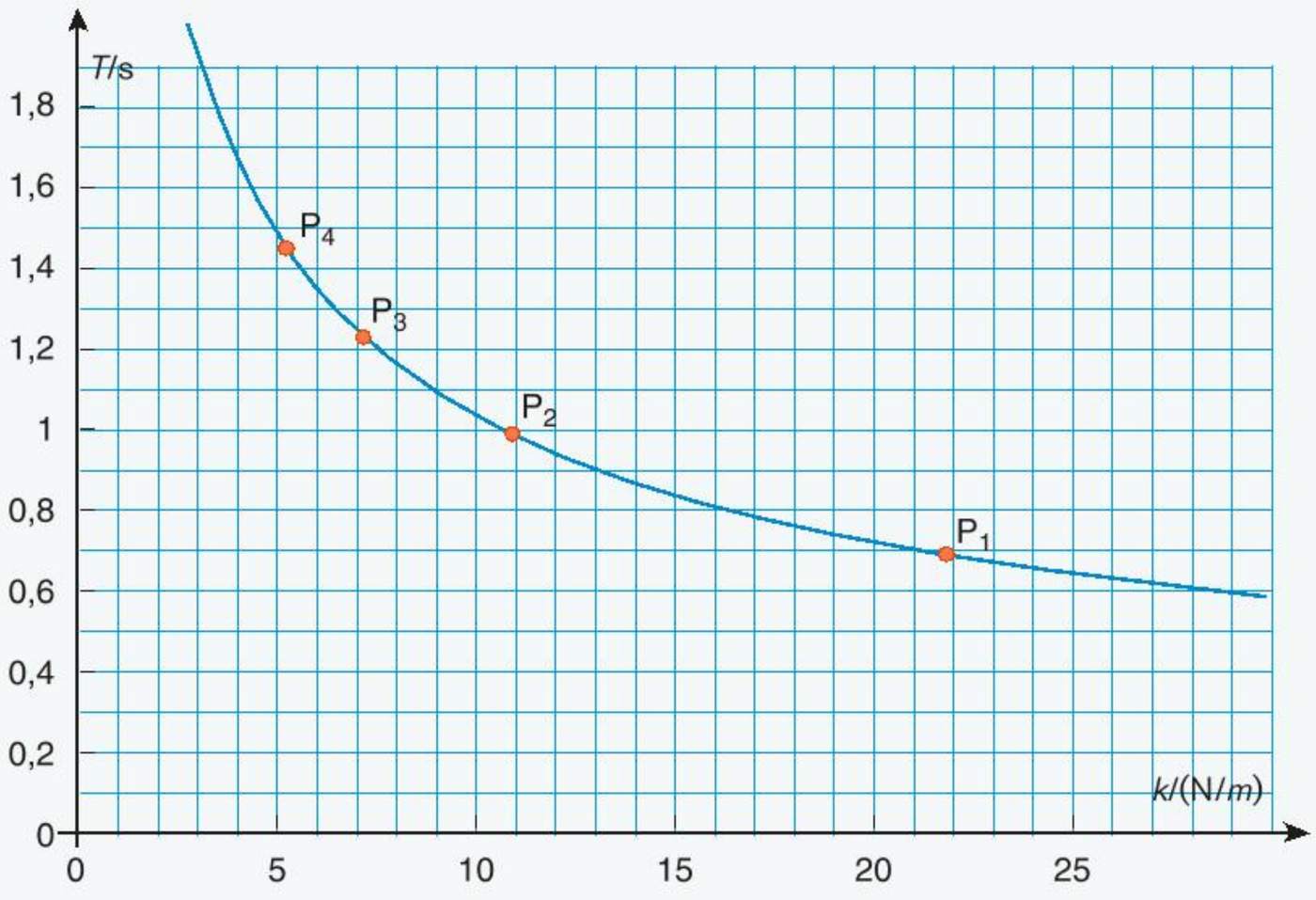
Vi hängde alltså en 170 g-vikt i änden på 1, 2, 3, och 4 likadana seriekopplade spiralfjädrar och såg på förlängningen och mätte därefter svängningstiden:

Antal fjädrar	1	2	3	4
Förlängning/m	0,045	0,09	0,137	0,185
Fjäderkonstant/(N/m)	$21{,}8 = k$	$10{,}9 = \frac{1}{2}k$	$7{,}2 \approx \frac{1}{3}k$	$5{,}2 \approx \frac{1}{4}k$
Svängningstiden/ s	0,695	0,985	1,23	1,445

Vi satte in värdena i ett regressionsprogram och fick potensfunktionen

$$T = 3{,}35 \cdot k^{-0{,}51} \approx \frac{3{,}35}{\sqrt{k}}$$

Denna funktion såg ut att passa mycket bra till våra mätvärden.



Slutsats: De faktorer som påverkar svängningstiden för en vertikalt hängande spiralfjäder som belastas med en vikt är viktens massa och fjäderkonstanten, men inte amplituden. Våra försök visar att en bra modell för en fjäderpendels svängningstid T kan skrivas

$$T = r \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Rum

Människor har också funderat mycket över vad *rum* egentligen är. Är rummet ändligt eller oändligt? Har rummet alltid existerat? Är rum bara *avstånd mellan föremål,* eller finns rummet oberoende av om det finns materia? Är det kontinuerligt? Är det *någonting*? Hur många dimensioner har det?

Så kunde vi fortsätta att fråga. Men de stora tankarna om rummet skulle bli ganska tomma om vi inte började med enklare frågor om hur vi mäter längd.

Historiskt sett var *människan* utgångspunkten för längdmått. Mått som tum, fot och aln är kända i de flesta kulturer och förekommer fortfarande i många länder. Stora avstånd mättes i dagsresor. Det var tillräckligt. Men dagens vetenskap och teknik kräver mycket noggrannare mätningar, mätningar som inte är beroende av vem som mäter, om han är lång eller kort, eller hur snabb häst han har.



2.3 Efter den franska revolutionen 1789 infördes metern som ett standardmått för längd. Så småningom tillverkades en meterstav av en platina-iridium-legering. Vid vardera änden hade staven en tunn skåra, och en meter definierades som avståndet mellan skårorna. Bilden visar en standardmeter som placerades på Luxembourg Palace i Paris.

Numera definieras standardmåttet meter med hjälp av ljusets rörelse.

METER

En *meter är* den sträcka som ljuset rör sig i vakuum under bråkdelen 1 /299 792 458 av en sekund.

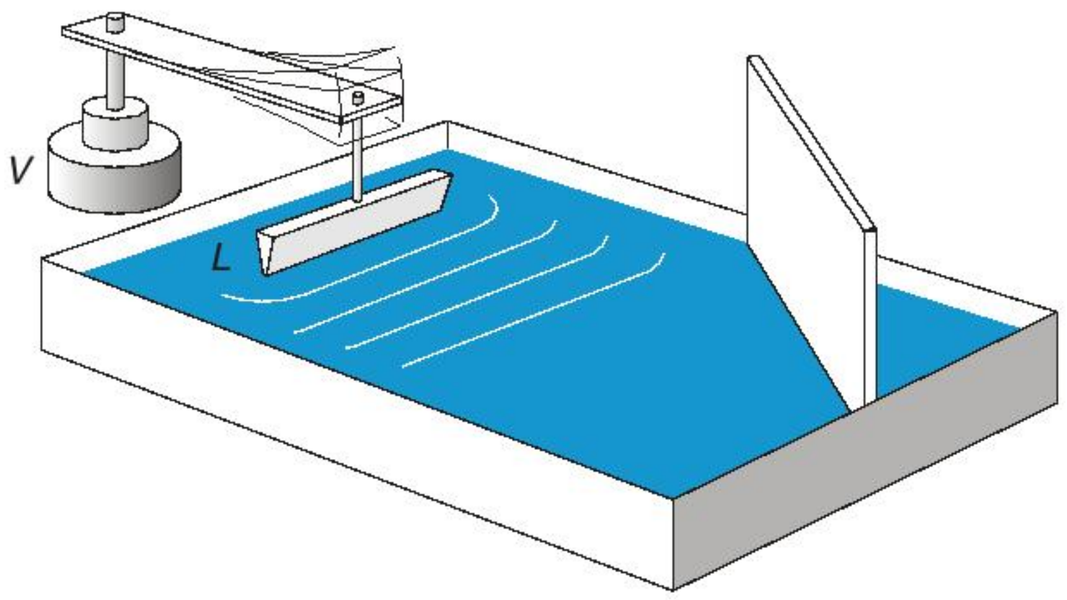
Definitionen av metern hänger alltså ihop med definitionen av sekunden. Det kan den göra eftersom ljushastigheten i vakuum har samma värde oavsett var eller när vi mäter den, och oavsett hur ljuskällan rör sig i förhållande till oss. Tänk över det!

1.2 Reflektion och brytning

Nu ska vi i tur och ordning behandla fyra vanliga vågfenomen, först *reflektion* och *brytning*, och därefter *böjning* och *interferens*. Dessa fenomen kan du själv studera på ett lugnt vatten. De är ofta lättare att observera där än i skolans fysiklaboratorium.

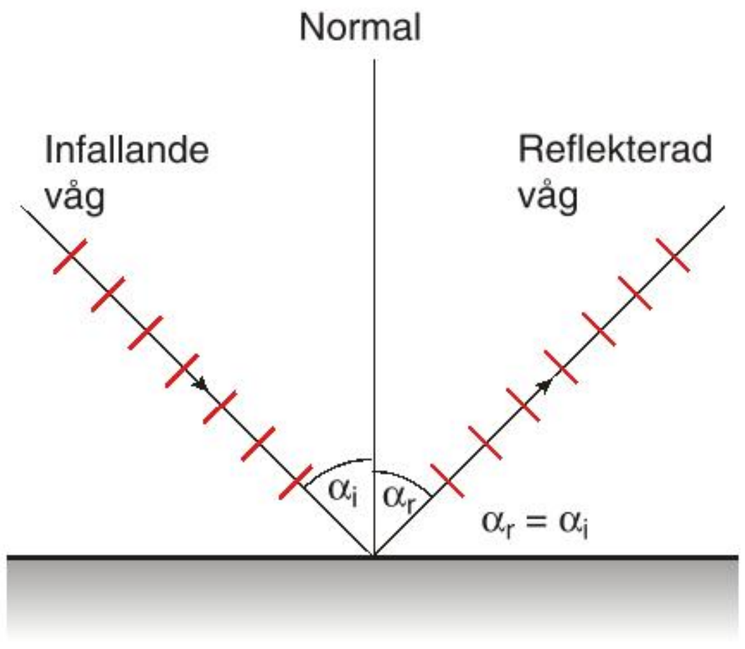
Reflektion

Vi börjar med reflektion. En våg som träffar en fast vägg, sänds tillbaka. Den *reflekteras*. Vi kan se det med hjälp av vattenvågor i en vågapparat. Se figur 1.11.



1.11 Apparat för visning av vågor på en vattenyta. *V* är en vibrator. *L* är en liten linjal som guppar upp och ned i vattnet och fungerar som vågkälla.

Vi låter en liten linjal doppa upp och ned i vattnet och sticker ned en lodrät vägg i vattenytan en bit bort. Då får vi en plan *infallande våg* mot väggen och en plan *reflekterad våg* ut från väggen. Se figur 1.12. När plana vågor kommer snett in mot en lodrät vägg, så reflekteras plana vågor snett ut från väggen.



1.12 Reflektion av plana vågor.

En rät linje som går vinkelrätt ut från väggen, kallar vi en *normal*. Vinkeln mellan normalen och hastighetsriktningen för de infallande vågorna är *infallsvinkeln*, α_i. Vinkeln mellan normalen och hastighetsriktningen för de reflekterade vågorna är *reflektionsvinkeln*, α_r. Noggranna försök visar att de två vinklarna alltid är lika stora.

REFLEKTIONSLAGEN

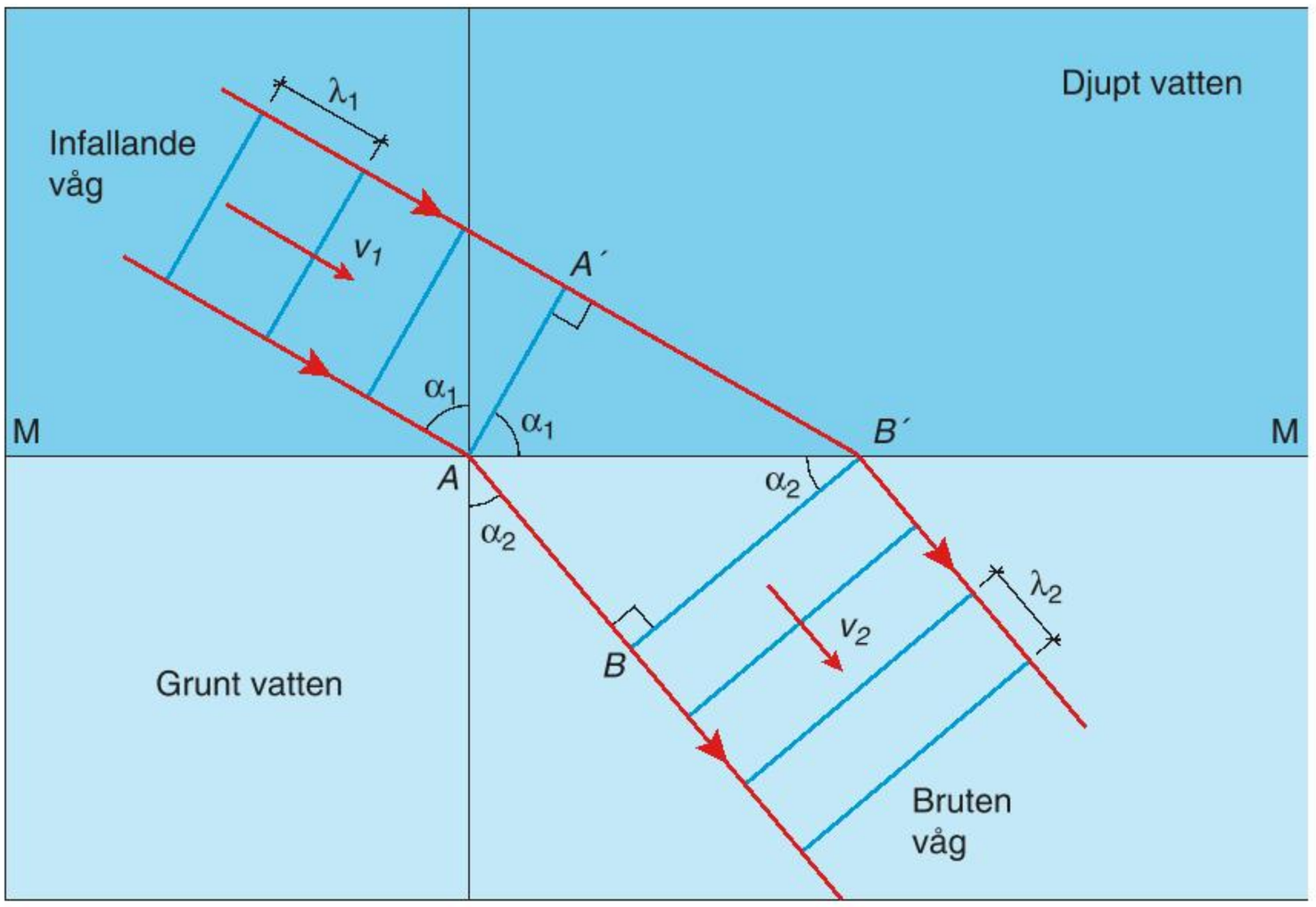
Reflektionsvinkeln är lika med infallsvinkeln, $\alpha_r = \alpha_i$.

Brytning

Har du funderat på varför vågorna på havet nästan alltid kommer in rakt mot stranden, oavsett vindriktningen? Efter detta avsnitt kommer du att veta lite mer om det och liknande fenomen.

Vi använder samma vågapparat som vi använde för att studera reflektion. Nu lägger vi en jämntjock glasskiva på kärlets botten, på så sätt att kärlet får ett område med djupt vatten och ett område med grunt vatten. Vi låter gränsen mellan grunt och djupt vatten gå snett mot vågriktningen.

När vågorna går från djupt vatten till grunt vatten, ändrar de riktning. Vi säger att vågorna *bryts,* och fenomenet kallar vi *brytning.* Se figur 1.13.



1.13 Brytning av vågor som går från djupt vatten till grunt vatten, sett ovanifrån. De röda linjerna visar vågornas rörelseriktning. De blå linjestyckena föreställer vågfronter.

Brytning uppstår som regel när vågmediet ändrar egenskaper. En linje vinkelrät mot gränslinjen kallar vi en *normal.* Vinkeln mellan normalen och hastighetsriktningen för de inkommande vågorna är *infallsvinkeln,* α_1. Vinkeln mellan normalen och hastighetsriktningen för de brutna vågorna är *brytningsvinkeln,* α_2. När vågorna går från det djupa till det grunda vattnet, så bryts de *mot* normalen. Då är brytningsvinkeln mindre än infallsvinkeln.

$$\alpha_2 < \alpha_1$$

Om du tittar noga, kan du se att våglängden på grunt vatten är mindre än våglängden på djupt vatten,

$$\lambda_2 < \lambda_1$$

Frekvensen bestäms av vågkällan och är *densamma* på båda sidorna om gränslinjen. Under varje sekund går lika många vågor bort från gränslinjen på den ena sidan som det kommer in mot gränslinjen på den andra sidan. Annars skulle vågor hopa sig, och det ser vi inga tecken på. Vi har alltså $f_2 = f_1$.

Av formeln $v = f\,\lambda$ följer då att våghastigheten är mindre på grunt vatten än på djupt vatten,

$$v_2 < v_1.$$

Brytning av vågor beror på att våghastigheten ändrar sig när vågorna går från ett medium till ett annat.

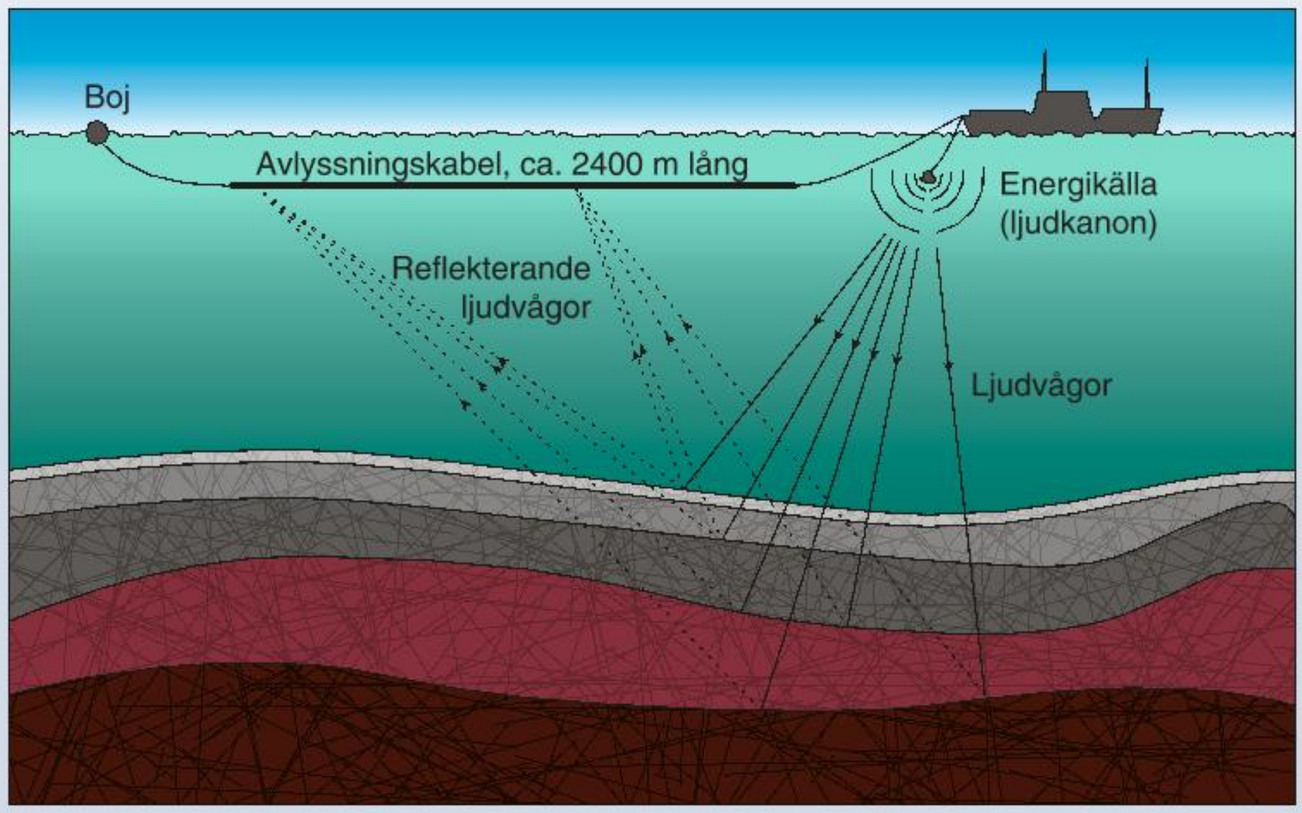
Att vattendjupet minskar in mot en strand, medför att vågmediet ändrar sig gradvis. Vattenvågorna bryts därför gradvis in mot stranden. Det faktum att vattenvågor går långsammare på grunt vatten än på djupt vatten, är också orsaken till bränningar. Vågtopparna får nämligen högre hastighet än vågdalarna.



Principen för oljeletning
En ljudkanon sänder ut ljudvågor i havet. I berggrunden finns gränsytor mellan olika bergarter. När ljudvågorna träffar en gränsyta mellan olika lager, kommer de att delvis reflekteras, delvis brytas. De ljudvågor som passerar genom gränsytan, uppdelas på samma sätt vid nästa gränsyta. Hur stor del av vågenergin som bryts, och hur stor del som reflekteras vid en sådan gränsyta, beror på densiteten hos de två bergarterna.

EXEMPEL 5 **Geologisk kartläggning**

Geologerna kan kartlägga skikten i jordskorpan med hjälp av seismiska vågor, som är ljudvågor. Metoden kallas *reflektionsseismik* och används bland annat vid oljeletning.



Ljudvågor som reflekteras från de olika bergarterna fångas upp av avlyssningskablar. Ljudvågorna omformas och registreras med hjälp av en elektronisk utrustning. Därefter tolkas och analyseras registrerade data. På så sätt kan möjliga oljefält upptäckas.

Det finns mycket att tänka på vid sådana undersökningar, bland annat risken för att skada liv i havet.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad menas med att en våg reflekteras?
- Vad menas med normal, infallsvinkel och reflektionsvinkel?
- Vad säger reflektionslagen?
- Vad menas med att en våg bryts?
- Hur förklarar man att vågor bryts?
- Vad menas med brytningsvinkel?
- Vad vet vi om frekvensen hos vågor som bryts?

1.3 Böjning och interferens

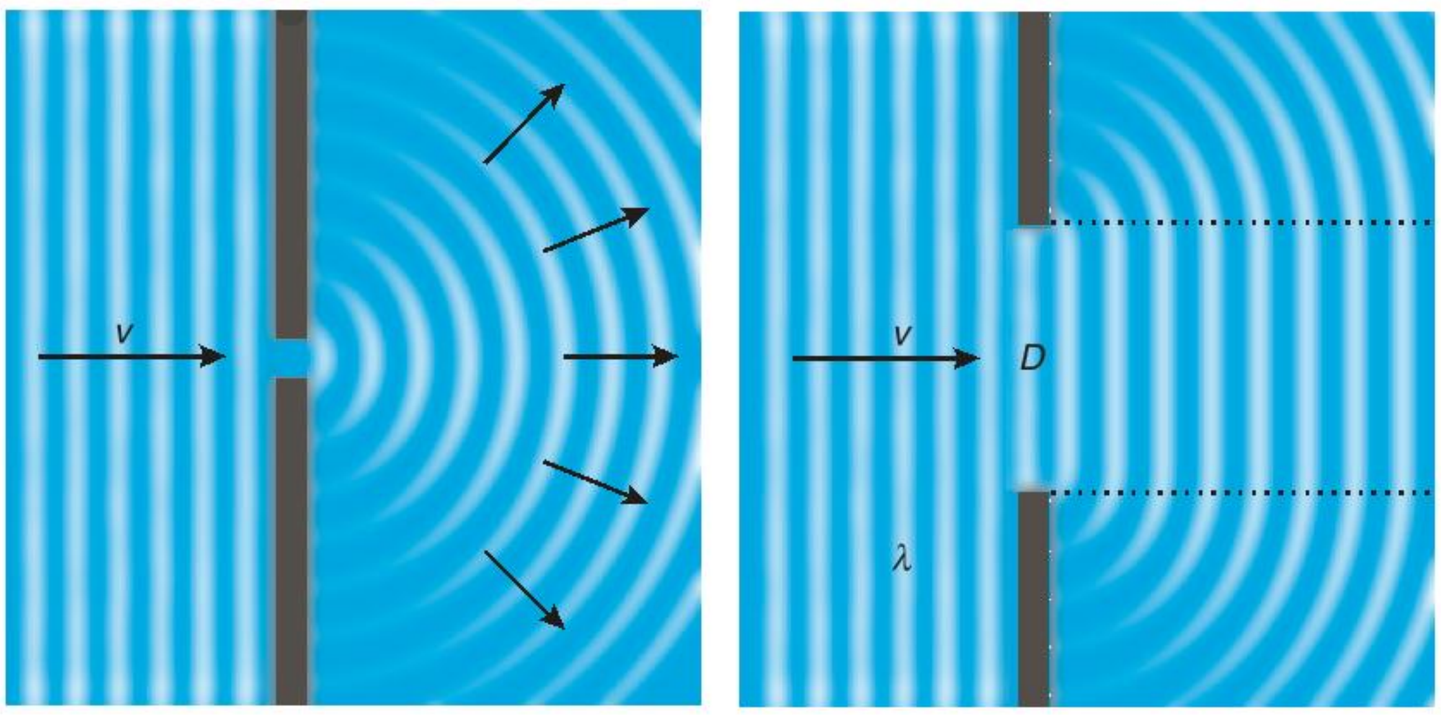
Böjning

Vi gör ett nytt försök med vågapparaten. Vi alstrar plana vågor med en liten linjal, men nu placerar vi en vägg tvärs över kärlet, parallellt med vågfronterna. Mitt på väggen finns det en smal öppning. Se figur 1.14. När vågorna kommer fram till väggen, slipper de igenom bara i öppningen. Nu kan vi se ett märkligt fenomen: När vågorna har passerat öppningen i väggen, breder de ut sig som cirkelformade vågor! Om vi gör öppningen i väggen större, så blir vågorna plana på mitten och cirkelformade åt sidorna. Att vågor som passerar en smal öppning breder ut sig åt sidorna, kallar vi *böjning*.

Hur stor får öppningen vara för att den ska ge böjning? Vi varierar bredden på öppningen systematiskt. Då finner vi att det som är avgörande för om vi får en tydlig böjning eller inte, är hur bred öppningen är i förhållande till våglängden. En grov regel är att böjning uppkommer om

$$D \leq \lambda$$

där D är bredden på öppningen och λ är våglängden.



1.14 Böjning av vattenvågor i en smal öppning. Plana vågor kommer in från vänster och träffar en vägg med en smal öppning. Åt höger, från väggen, utgår cirkelvågor med centrum i öppningen.

Interferens

Kustfiskare har upplevt ett fenomen som kallas *interferens*. När dyningar rullar in mot små öar som ligger på rad längs kusten, kommer smala öppningar mellan öarna att fungera som vågkällor. På insidan av öarna skapar vågorna en del områden där det är relativt *lugnt*, och andra områden där det finns vågor med stor amplitud. Det har hänt att fiskare har fått hål uppslagna i båten när en djup vågdal har blottlagt ett grund.

INTERFERENS

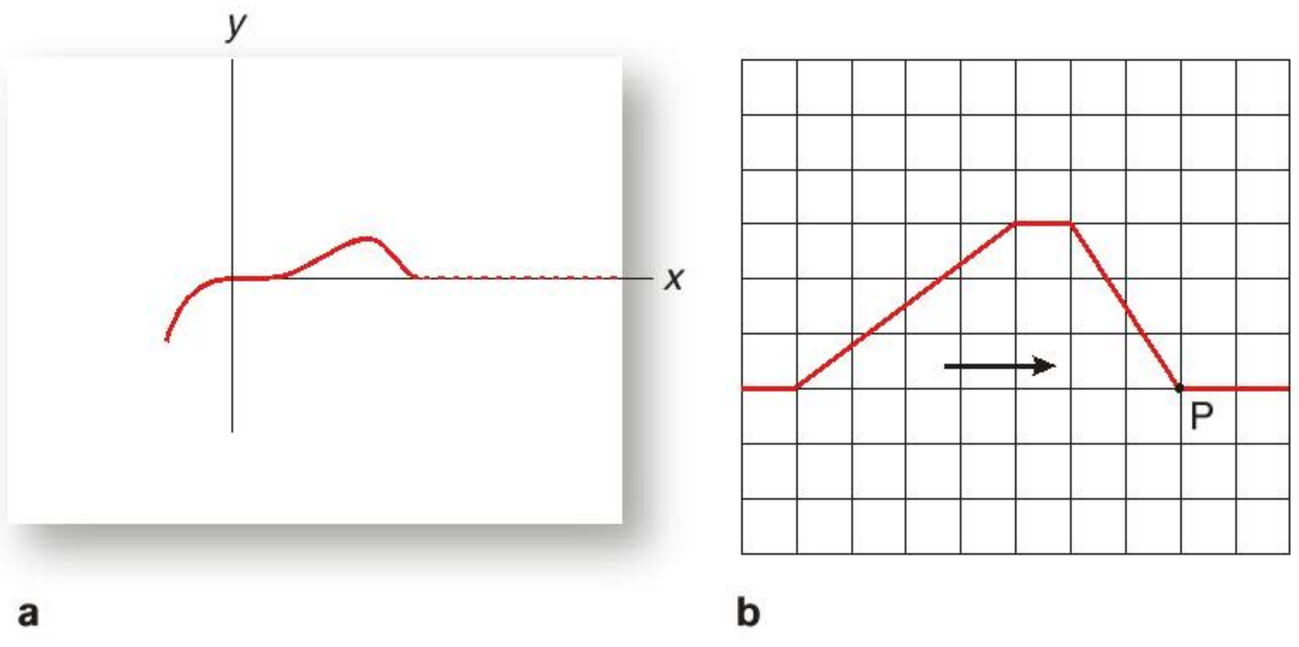
Två vågor kan befinna sig på samma ställe vid samma tidpunkt. Vågorna interfererar när de samverkar och bildar en enda våg.

När två vågor interfererar, bildar de ett gemensamt utslag som är lika med summan av utslagen hos var och en av vågorna, med hänsyn tagen till tecken. Vi skriver det gemensamma utslaget som

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t)$$

där $y_1(t)$ och $y_2(t)$ är utslagen hos de enskilda vågorna vid tidpunkten t. Utslagen kan vara positiva, negativa eller noll.

Vi har tidigare beskrivit en våg som en svängning som breder ut sig från ett ställe i rummet till ett annat. För att göra interferensbegreppet lite tydligare ska vi nu titta på *en* sådan svängning som vi kan kalla för en *puls*. Se figur 1.15.



1.15a En enstaka puls som rör sig längs ett sträckt rep. En punkt på repet kommer först att röra sig uppåt när pulsen kommer för att sedan röra sig nedåt igen då pulsen passerar.
b Pulsen har för enkelhets skull ritats med raka konturer och vassa hörn.

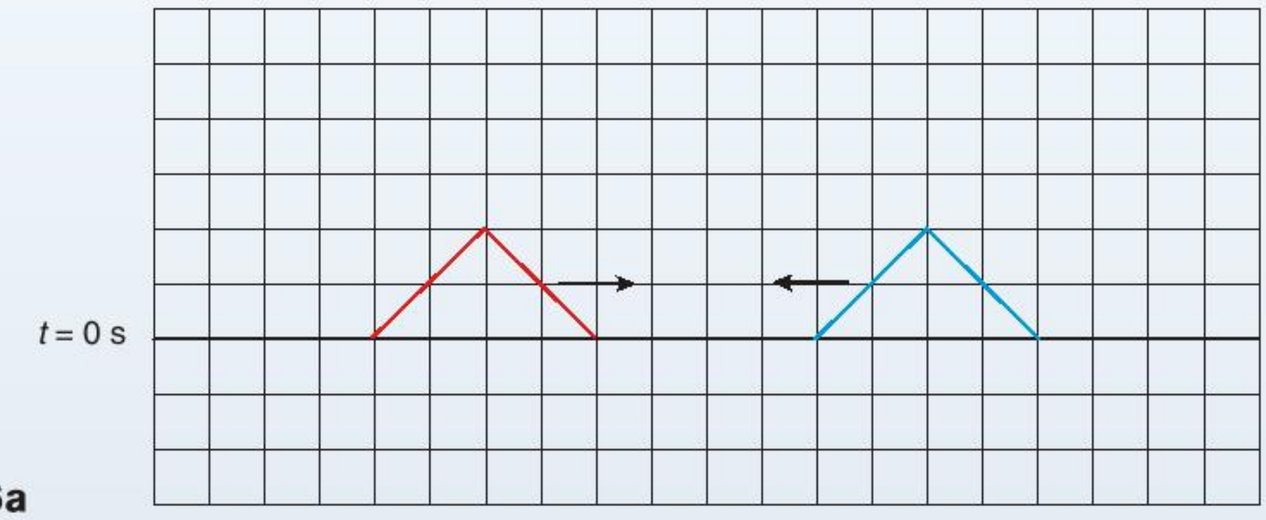
EXEMPEL 6 **Möte med en puls**

Beskriv vad som händer med en partikel i punkten P då en puls passerar. Se figur 1.15 b. Pulsen rör sig till höger i figuren med hastigheten 1 cm/s. En ruta motsvarar 1 cm.

Lösning: Under de två första sekunderna rör sig partikeln 3 cm rakt uppåt i figuren. Under den följande sekunden rör den sig inte alls. Under de fyra följande sekunderna rör den sig 3 cm nedåt. När pulsen har passerat är partikeln tillbaka på samma plats som från början.

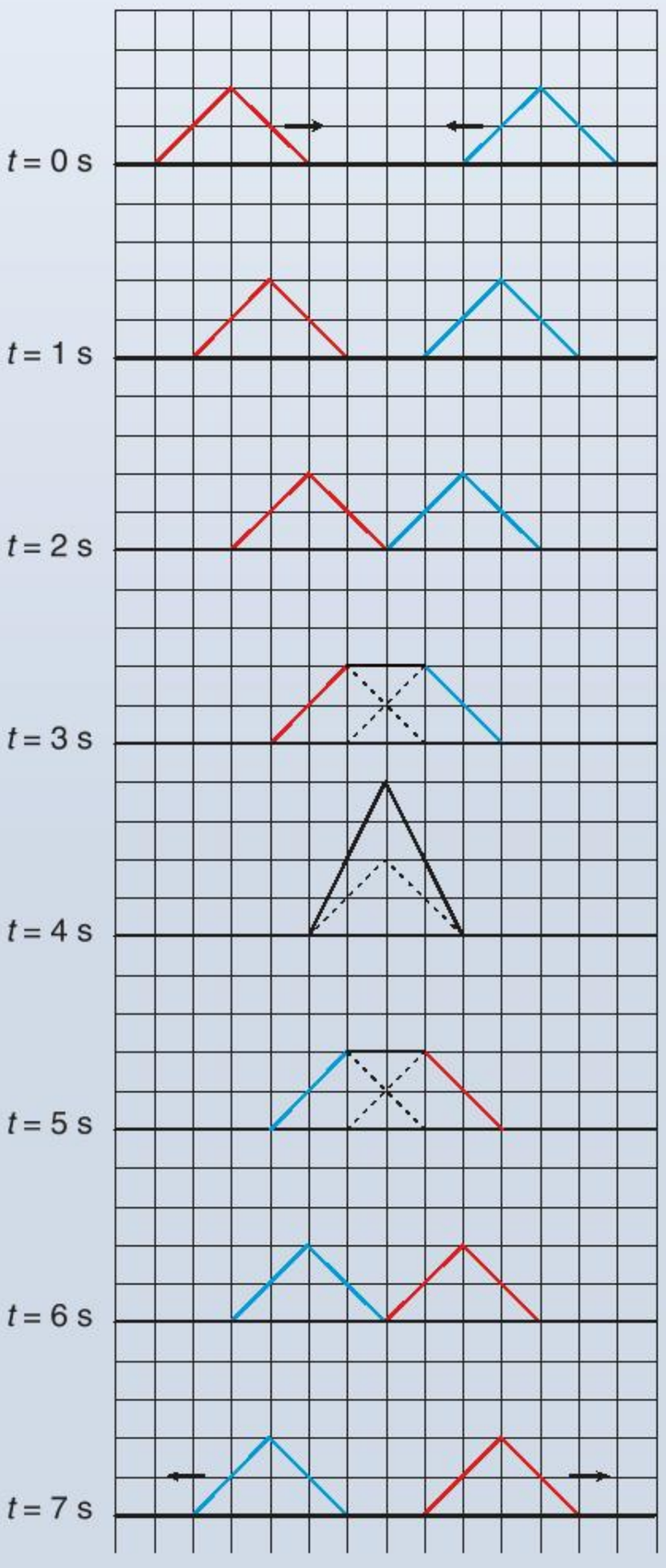
EXEMPEL 7 **Pulser som möts**

Beskriv vad som händer när de två pulserna i figur 1.16a möts. Båda pulserna rör sig mot varandra, med farten 1 ruta per sekund.

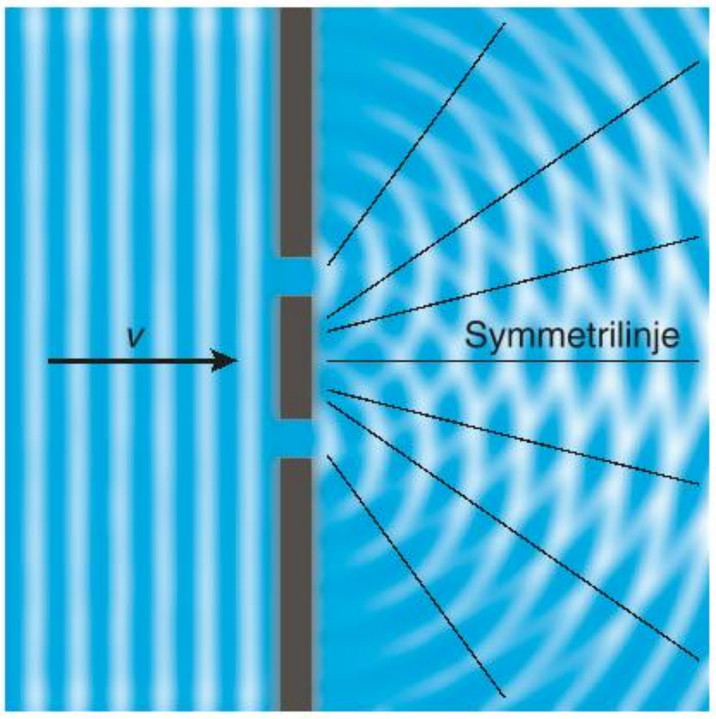


1.16a

Lösning: Titta på figur 1.16b. I de tre första bilderna händer ingenting mer än att pulserna närmar sig varandra. Efter 2 s möter framkanterna på pulserna varandra. För att ta reda på den resulterande pulsens utseende därefter måste du lägga ihop amplituderna. De streckade linjerna anger formen på de ursprungliga pulserna och den heldragna linjen visar den resulterande pulsens utseende.
I de två sista bilderna har pulserna passerat varandra och går åt var sitt håll.



1.16b



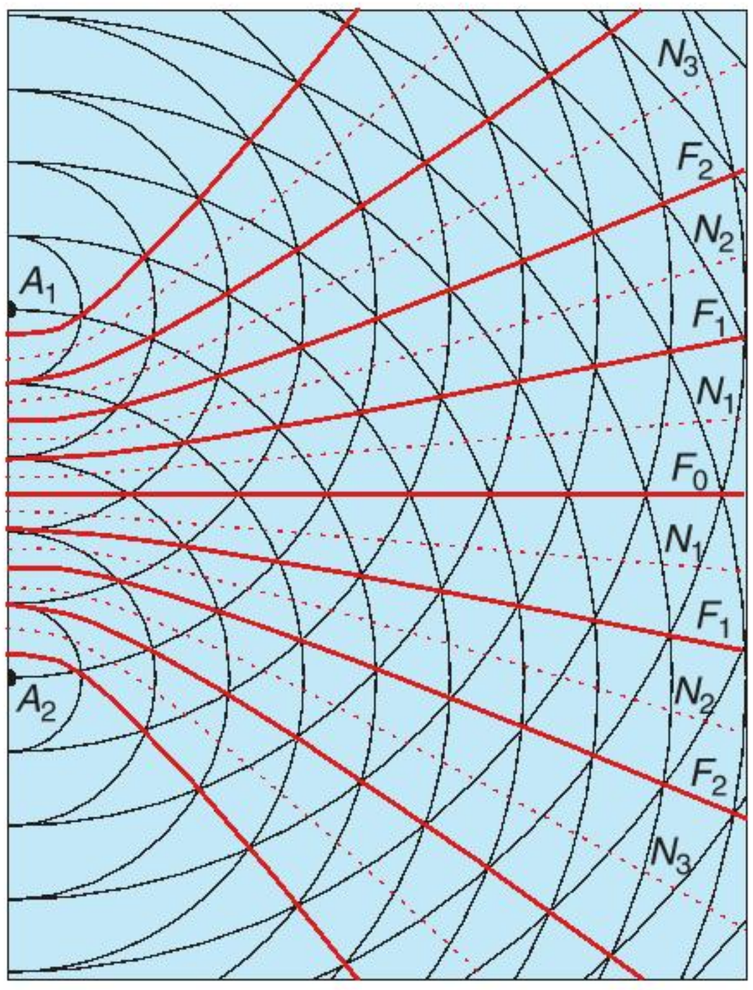
1.17 Vattenvågor böjs i två smala öppningar i en vägg, och interfererar åt höger från väggen. Områden med konstruktiv interferens har markerats med svarta linjer.

Vi kan även studera interferens med vågapparaten. I apparaten finns det fortfarande en liten linjal som alstrar plana vågor. Parallellt med vågfronterna placerar vi nu en vägg med *två* smala öppningar. Se figur 1.17. Vardera öppningen fungerar som en ny vågkälla. På baksidan av öppningarna ser vi ett mönster som vågorna bildar när de interfererar med varandra. På vissa ställen förstärker de varandra, och på andra ställen försvagar de varandra. Vi kallar det för *konstruktiv* och *destruktiv* interferens.

På en del ställen kommer vågorna från de två öppningarna att mötas i samma fas. Det betyder att till exempel vågtoppar från båda öppningarna kommer dit samtidigt. På sådana ställen får vi konstruktiv interferens, och vågamplituden blir stor. Det är sådana ställen innanför öarna som kustfiskarna måste undvika.

Mellan områdena med konstruktiv interferens är vattnet lugnt. Här möts vågorna från de två källorna i motfas. Det betyder att en vågdal från den ena vågkällan möter en vågtopp från den andra. Där får vi destruktiv interferens, och vågamplituden blir noll hela tiden.

Vi kan göra en modell av försöket med hjälp av två genomskinliga ark. Se figur 1.18. På båda arken har vi ritat likadana koncentriska cirklar som representerar vågfronter. Avståndet mellan en cirkel och nästa är lika med en våglängd. De två cirkelcentra representerar två vågkällor. När vi lägger arken på varandra, med cirkelcentrum A_1 och A_2 lite vid sidan om varandra, får vi den typ av mönster som du ser i figuren. Längs de heldragna röda linjerna har vi konstruktiv interferens. Där är amplituden maximal. Dessa linjer kallas förstärkningslinjer och är i figuren betecknade med F_0, F_1 och F_2. På linjen F_0 är vågorna alltid i fas eftersom de har färdats lika lång väg. På linjen F_1, har den ena vågen färdats en hel våglängd extra. Övertyga dig själv om detta genom att räkna antalet vågtoppar från A_1 till F_1 och från A_2 till F_1. Vad gäller för F_2?



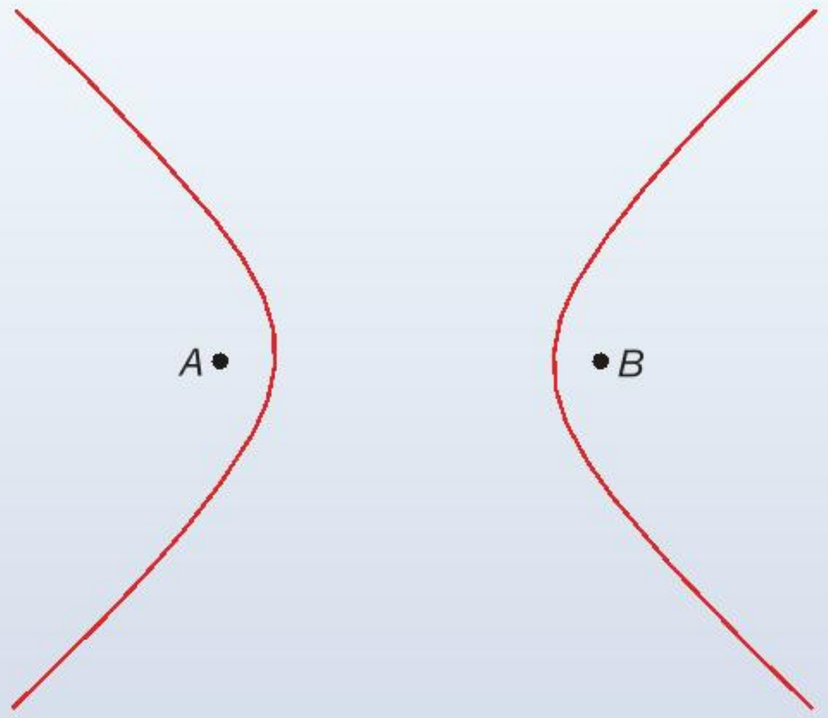
1.18 En enkel modell för interferens mellan två cirkelformade vågor.

Längs de röda streckade linjerna har vi destruktiv interferens. Där är amplituden lika med noll. Dessa linjer kallas nodlinjer och är i figuren betecknade med N_1, N_2 och N_3. På linjen N_1 är vågorna i motfas, eftersom den ena vågen färdats en halv våglängd extra. Övertyga dig också om detta och tänk sedan ut vad som gäller för N_2.

Om du är på ett ställe på sjön där det är konstruktiv interferens, kommer du att uppleva vågor som är större än var och en av de enskilda vågorna. Om du ror till ett ställe med destruktiv interferens, kommer du att vara på lugnt vatten.

EXEMPEL 8 **Destruktiv interferens**

A och B i figuren är två stavar som doppas ned i vattnet samtidigt, de svänger i fas med varandra. De två linjerna i figuren visar på de enda ställen i vattnet där vattnet är stilla. Beräkna vattenvågornas våglängd. Figuren är i naturlig storlek.



Identifiera det fysikaliska fenomenet.

Elevlösning:

Fenomenet som figuren illustrerar är interferens, närmare bestämt destruktiv interferens.

Kommentera valet av metod.

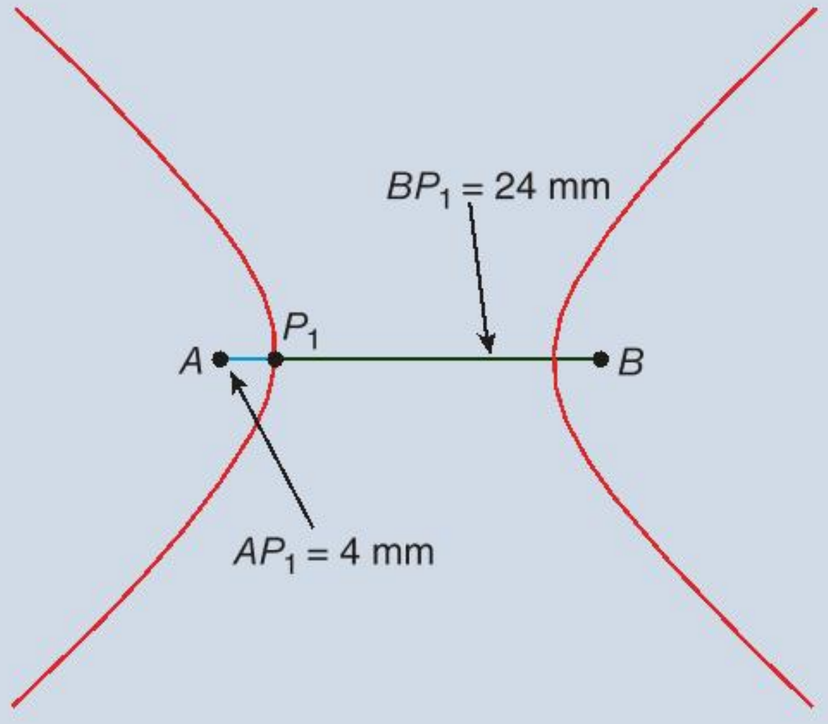
Eftersom figuren är i naturlig storlek kan vi mäta direkt i figuren med linjal. Det är bara två nodlinjer i figuren.

Alla punkter på de två nodlinjerna har det gemensamt att det är en halv våglängds avståndsskillnad från en punkt på noden till var och en av de två vågkällorna. Jag kan alltså välja att mäta avstånden från vågkällorna till vilken som helst punkt på en av nodlinjerna, men väljer en punkt P_1 mellan de två vågkällorna på den ena av nodlinjerna. Jag mäter upp: $AP_1 = 4$ mm och $BP_1 = 24$ mm. Det leder till ekvationen:

$$BP_1 - AP_1 = \lambda / 2 \quad \text{d.v.s.} \quad 24\ \text{mm} - 4\ \text{mm} = \lambda/2 \Rightarrow \lambda = 40\ \text{mm}$$

En tydlig figur som stödjer och illusterar texten i lösningen. Ofta börjar man med figur för att förstå uppgiften.

För säkerhets skull kontrollerade jag svaret med en annan punkt P_2 och fick ungefär samma svar.



EXEMPEL 9 **Interferens på räknaren**

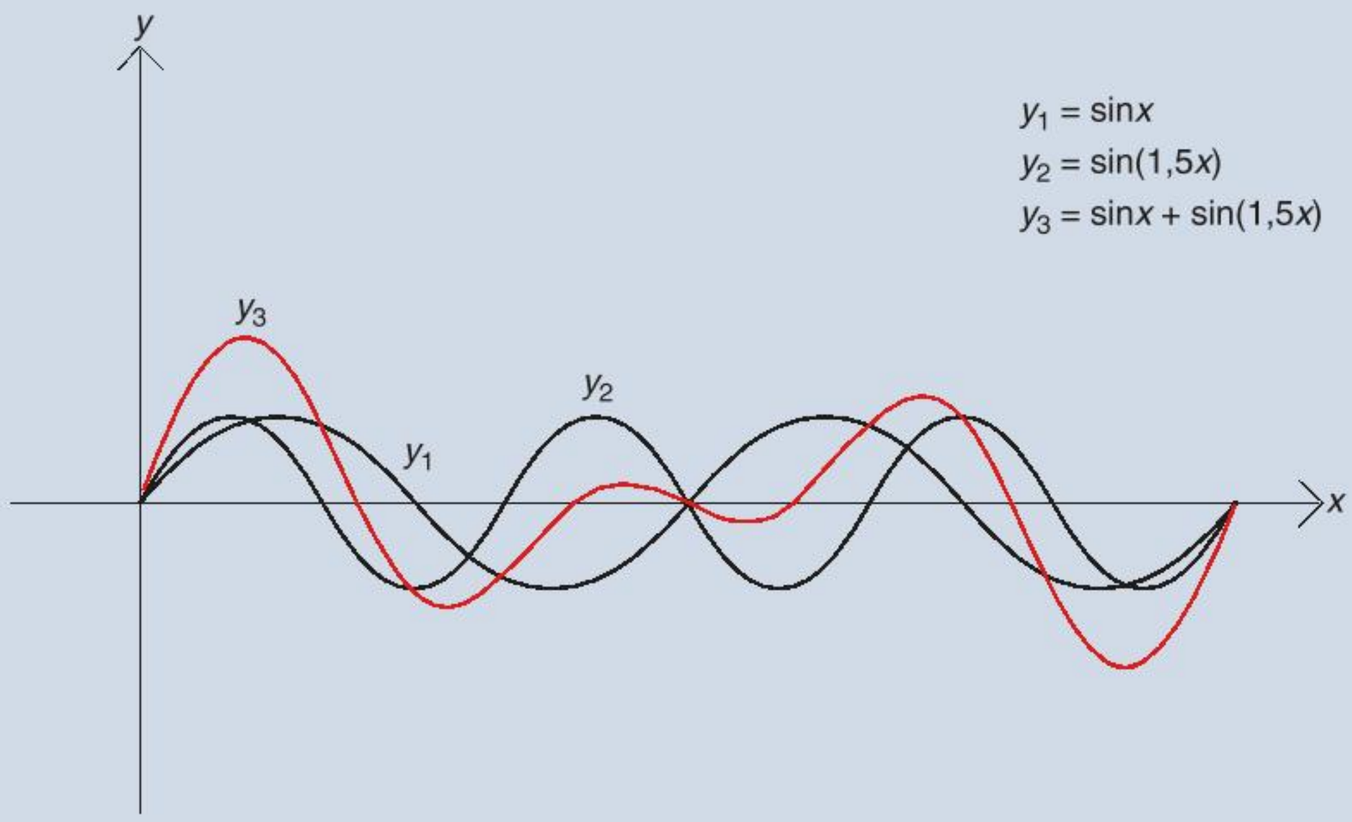
Du kan skapa en modell av interferens med hjälp av räknaren. Knappa in de två funktionerna

$$y_1 = \sin x \quad \text{och} \quad y_2 = \sin(1{,}5x)$$

Ställ in räknaren på grader och sätt $x_{\min} = 0$, $x_{\max} = 720$, $y_{\min} = -4$ och $y_{\max} = 4$. Du får då två vågformade kurvor på skärmen. Knappa därefter in funktionen

$$y_3 = \sin x + \sin(1{,}5x)$$

Då ser du att räknaren ritar en våg som är lika med summan $y_1 + y_2$. Det svarar mot att vågorna y_1 och y_2 interfererar.



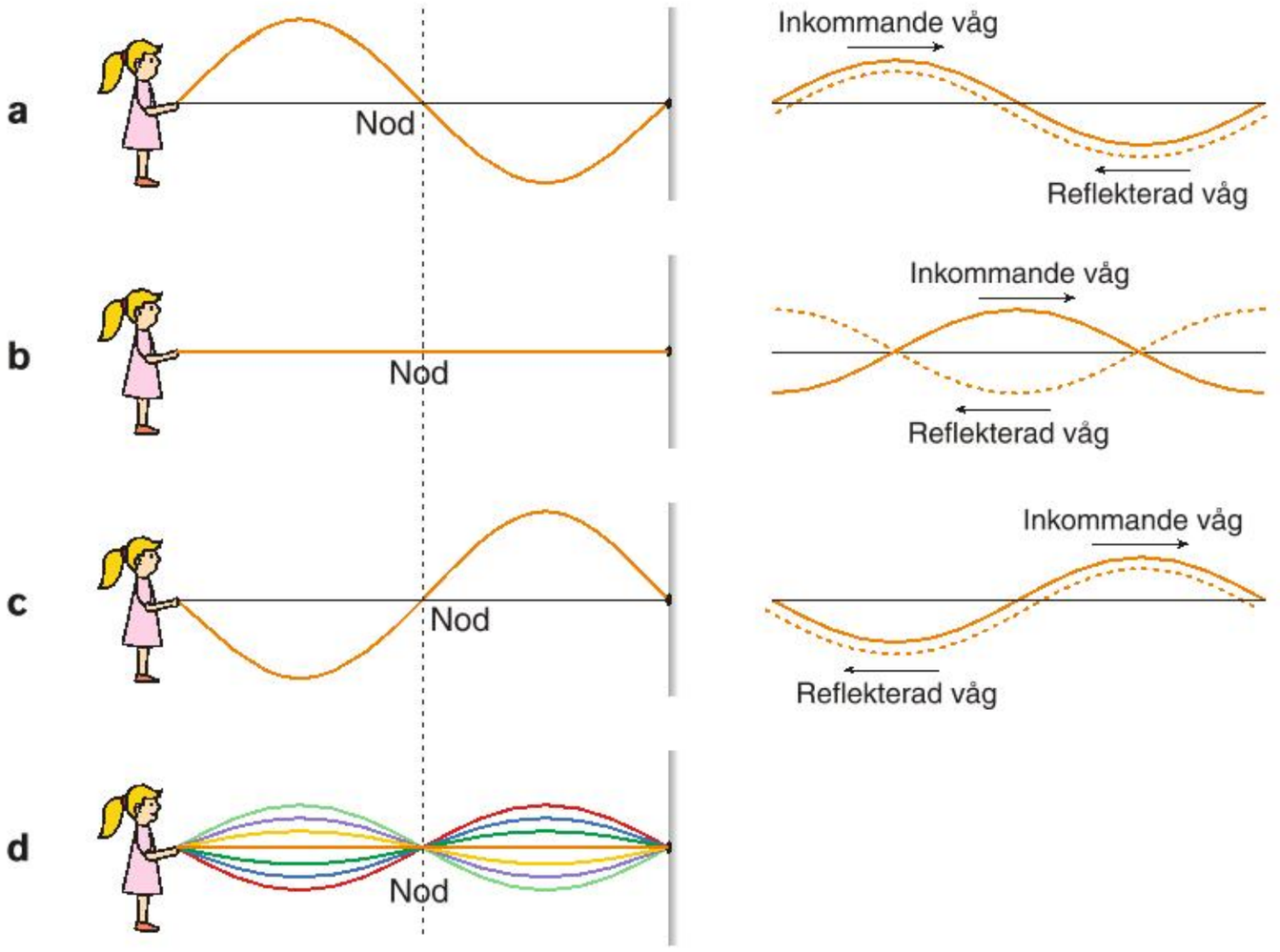
Du kan utvidga modellen till

$$y_1 = A_1 \sin(k_1 x) \text{ och } y_2 = A_2 \sin(k_2 x)$$

och välja olika värden på konstanterna A_1, A_2, k_1 och k_2.

Stående våg

Bind fast ett ganska långt rep i en vägg. Om du nu rör handen upp och ned, sänder du iväg ett antal vågpulser genom repet.



1.19 Den inkommande och den reflekterade vågen *interfererar*. Resultatet blir en stående våg.

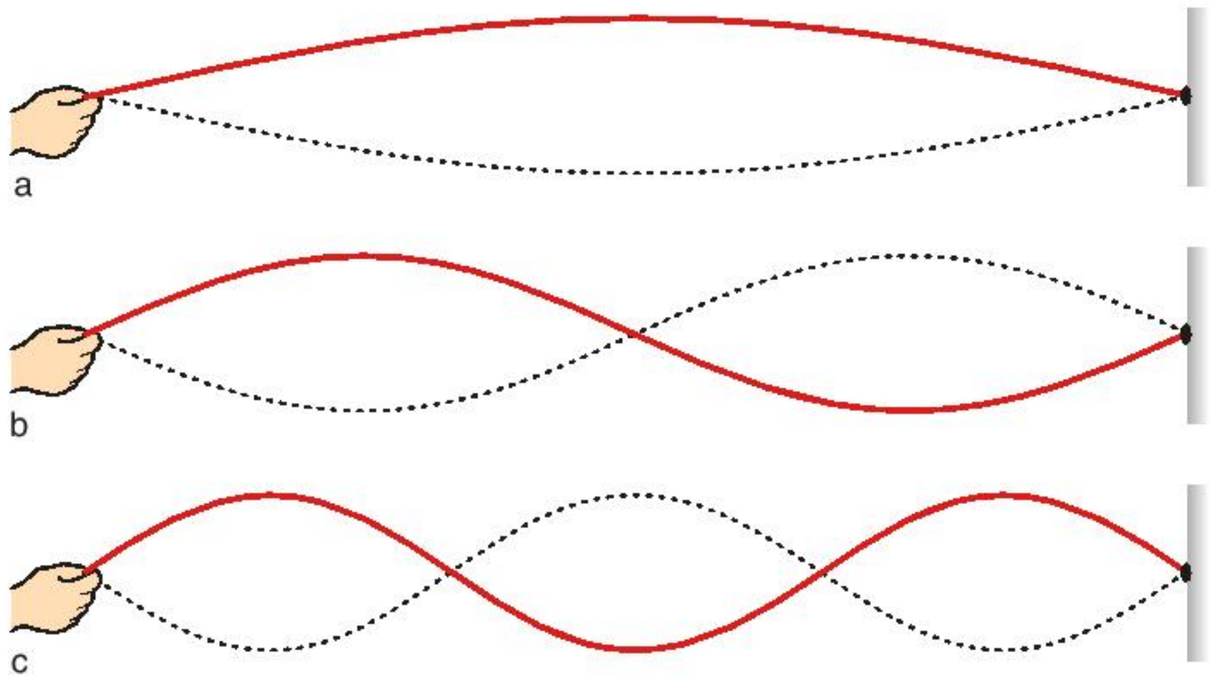
Väggen är för kraftig för att sättas i svängning av repet och därför kommer pulserna att reflekteras. Om du rör handen precis så fort att den inkommande och reflekterade vågen sammanfaller som i figur 1.19 a eller c kommer den resulterande vågens amplitud att öka eftersom vågorna *interfererar konstruktivt*. Man säger att vågorna är i fas. Om däremot vågorna kommer i motfas, som i figur *b*, kommer vågorna att släcka ut varandra. Vågorna kallas *stående vågor*, eftersom den resulterande vågen inte rör sig fram genom repet. Punkterna som står stilla kallas *noder* och punkterna som rör sig mest kallas *bukar*.

Hur stort är avståndet mellan 2 noder? Om du jämför de vänstra och högra bilderna i figur 1.19 så ser du att avståndet mellan 2 noder är precis en halv våglängd. Samma sak gäller mellan 2 bukar.

Du kan få olika utseende på den stående vågen genom att röra handen olika fort. Se figur 1.20. Om du jämför med figur 1.20 a måste du röra handen dubbelt så fort för att få utseendet som i figur b och tre gånger så fort för att få utseendet i figur c.

Det är stående vågor som bildas på olika sätt i musikinstrument, när du slår till strängen på en gitarr eller ett piano. Det bildas även stående vågor i andra instrument, som i orgelpiporna, i trumpeten eller klarinetten. Detta ska du få läsa mer om i nästa avsnitt.

1.20 Du kan göra egna stående vågor genom att röra handen upp och ned.



KONTROLLFRÅGOR

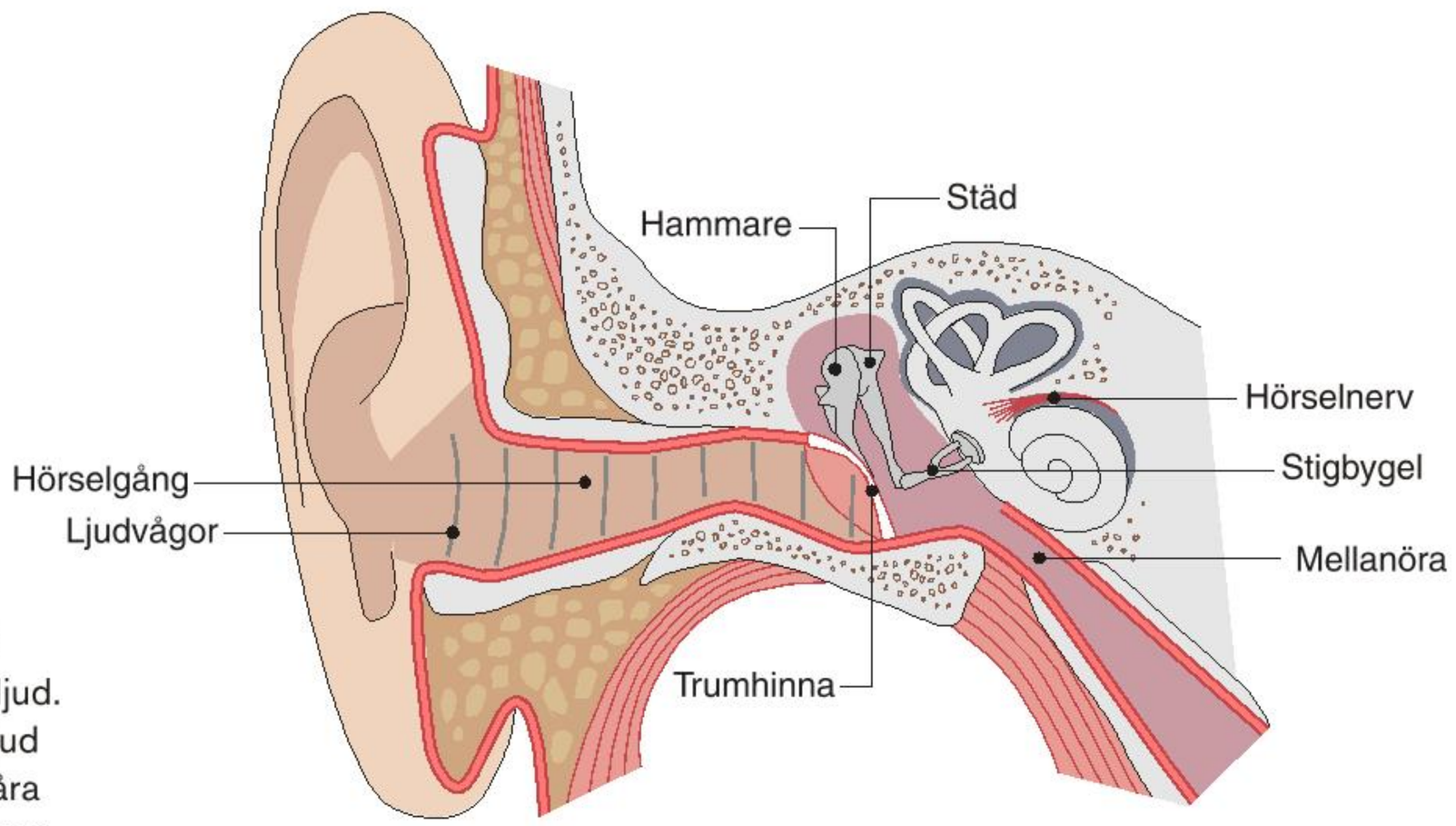
- Vad menas med att en våg böjs?
- Vilket är villkoret för att vågor ska böjas i en öppning?
- Vad menas med att två vågor interfererar?
- Vad menas med konstruktiv interferens?
- Vad kan du säga om amplituden där två likadana vågor interfererar konstruktivt?
- Vad menas med destruktiv interferens?
- Vad kan du säga om amplituden där två likadana vågor interfererar destruktivt?
- Vad säger additionsregeln för vågutslag?
- Hur skulle du beskriva det interferensmönster som uppstår när man sänder plana vattenvågor genom två smala öppningar i en vägg?
- Beskriv hur det kan bildas en stående våg.
- En punkt på första nodlinjen ligger 4 cm från den ena vågkällan och 7 cm från den andra. Båda vågkällorna är i fas med samma frekvens. Bestäm våglängden.
- Två vågkällor svänger i fas. Våglängden är 8 cm. En punkt på andra nodlinjen befinner sig 15 cm från en av källorna. Hur långt bort är punkten från den andra vågkällan?
- I en stående våg är avståndet mellan två nodpunkter 3,5 cm. Bestäm våglängden.
- Avståendet mellan tredje och femte buken i en stående våg är 5,8 cm. Hur stor är våglängden?

1.4 Ljud

I vårt moderna samhälle är vi nästan alltid omgivna av ljud. Av orsaker som vi ännu inte känner till, upplever vi vissa ljud som speciellt behagliga. Till exempel musik. Musik i en eller annan form skapas i alla kända kulturer. Det tyder på att det finns ett genetiskt element i vårt avnjutande av musik. Vår hjärna är "konstruerad" så att den njuter av musik.

Vi vet att ljudvågor från oljud och från toner är olika. Men varför vår hjärna reagerar så olika på oljud och på toner, det vet vi inte.

Vad är ljud? Om du lägger handen på struphuvudet när du sjunger en ton, eller på en högtalare, kan du känna vibrationer. Vibrationer är snabba svängningar, och vibrationerna i stämbanden eller i högtalaren alstrar tryckvariationer i luften. Tryckvariationerna breder ut sig genom luften till trumhinnan i ditt öra och får trumhinnan att vibrera med samma frekvens. Via de tre hörselbenen, hammaren, städet och stigbygeln, som är kroppens minsta ben, fortplantas vibrationerna till snäckan där de omformas till elektrokemiska signaler. Det är just dessa som till sist motsvarar det ljud du "hör". Hörselintryck skulle alltså i princip kunna skapas utan ljud, bara med hjälp av signaler i hjärnan.



Ljudvågor i luft får trumhinnan i våra öron att vibrera. Då hör vi ljud. Frekvensen bestämmer vilket ljud vi hör. På samma sätt är det i våra ögon, där nervcellerna registrerar ljusets frekvens.

Musikinstrument

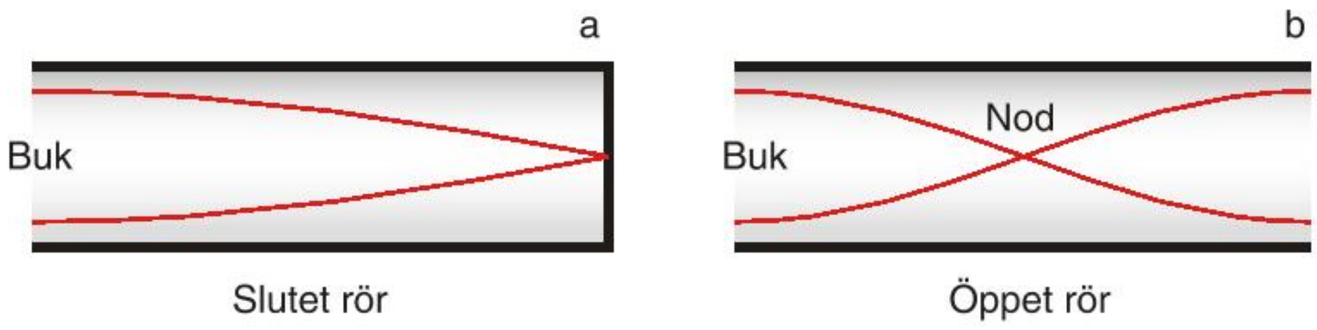
Att bygga musikinstrument som låter vackert är en svår konst som människan har hållit på med sedan urminnes tider. I princip består ett instrument av två delar. En del som *alstrar* svängningarna som behövs för att det ska uppstå ljud och en del som *förstärker, omformar* och *för fram* svängningarna. Hos en fiol är det strängarna som ger upphov till svängningarna och lådan som omformar ljudet och för ut det. Grovt sett kan man dela in musikinstrument i tre grupper: blåsinstrument, stränginstrument och slagverksinstrument.

Blåsinstrument

Om du sätter en trumpet till munnen och blåser så hörs ingen ton alls. Det kan vara ganska knepigt första gången man försöker, men efter ett tag kommer man på att man måste blåsa så att läpparna vibrerar. Det som händer då är att läpparna sätter luftpelaren inuti trumpeten i svängning med ett antal olika frekvenser. De frekvenser som alstrar stående vågor i instrumentet kommer att förstärkas och vi hör en ton. Principen att sätta en luftpelare i svängning är likadan för alla blåsinstrument. Det finns otroligt många lösningar på hur instrumenten och deras munstycken är utformade. Instrument som orgelpipor och flöjter av olika slag har oftast rör som är öppna i båda ändar. Däremot har rörbladsinstrument, t ex klarinett, och olika trumpetinstrument rör som är slutna i munstycksänden.

I figur 1.21 ser du den enklaste formen av stående vågor i ett slutet och ett öppet rör. Tänk dig att du blåser över kanten till ett provrör. På ungefär samma sätt som när du svängde repet i figur 1.20 a kommer nu ljudvågen att träffa botten av provröret. Precis som repet inte förmådde sätta väggen i rörelse kommer inte heller luftmolekylerna att kunna sätta provrörsväggen i rörelse. Vågen reflekteras därför och det bildas en nod vid väggen. Vid rörets öppning däremot bildas en buk eftersom luftmolekylerna där rör sig maximalt.

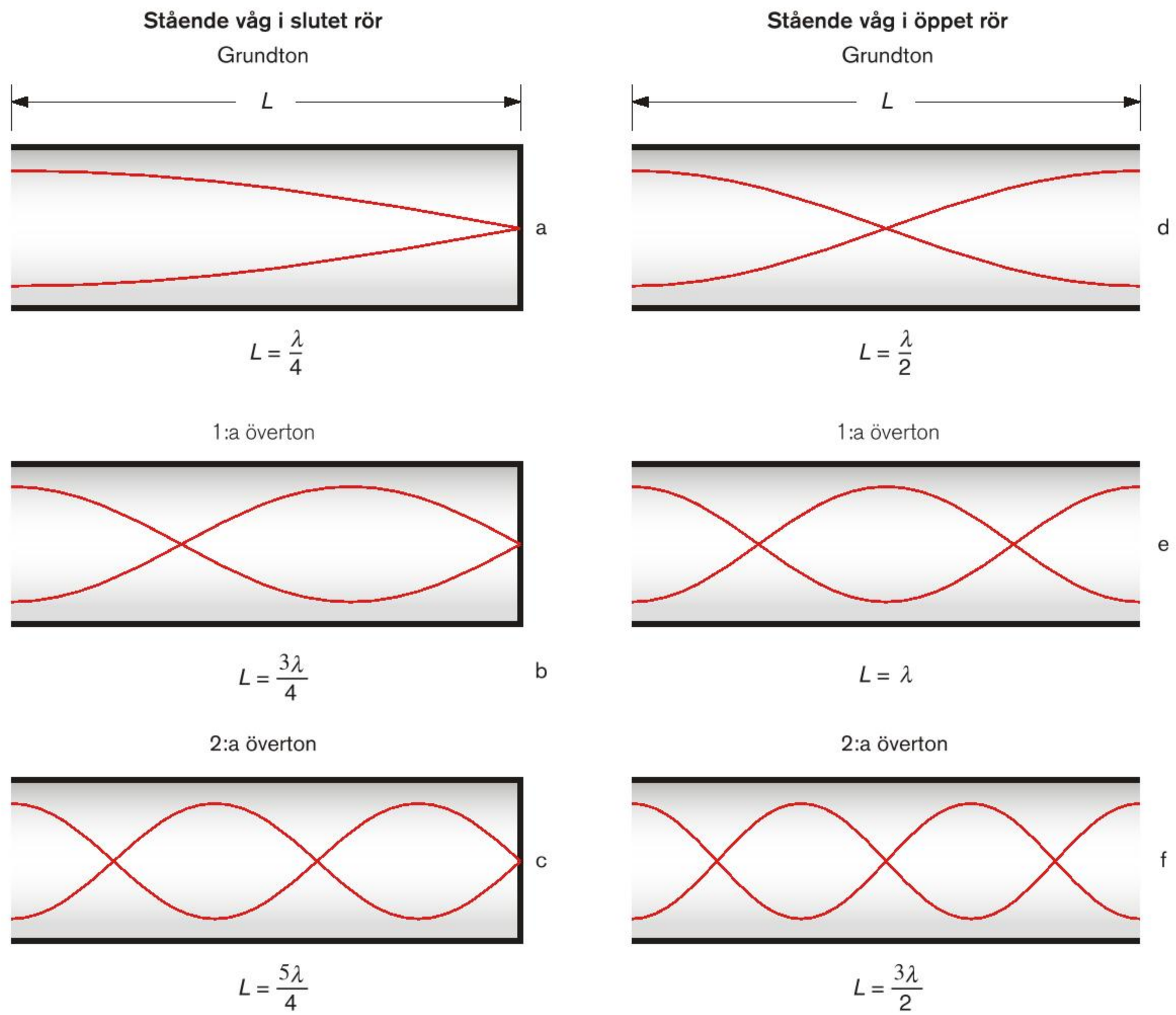
Om röret är öppet i båda ändar måste den enklaste svängningen se ut som i figur 1.21 b. De här båda tonerna kallas *grundtoner.*



1.21 Stående vågor i rör. Ljudvågor är en longitudinell vågrörelse som består av förtätningar och förtunningar, men för att bilden ska bli tydligare ritar vi vågorna som tidigare.

Du som någon gång har provat på att spela något blåsinstrument vet att man kan få olika toner genom att blåsa på olika sätt utan att använda hål, klaffar eller ventiler. Det gör man genom att helt enkelt blåsa en snabbare luftström som i sin tur får luftpelaren att vibrera snabbare. För att få en ton måste det bildas en stående våg och därför kan man bara få fram vissa toner på det här sättet. Se figur 1.22. De övriga tonerna får man fram genom att använda hålen i en flöjt, klaffarna på en klarinett eller ventilerna på en bastuba. Då går luften en annan väg. Den svängande luftpelaren får en annan längd och då bildas andra toner. Klangen i instrumentet beror på att det samtidigt bildas en mängd *övertoner*. När en violin eller ett piano spelar samma ton avger de alltså samma grundton, men vi kan ändå höra vilket instrument det är. Det beror på den karakteristiska klangen som i sin tur beror på övertonerna.

1.22 Grundtoner och övertoner i rör.



Kromatisk skala	
Ton	*Frekvens (Hz)*
C	262
C# eller D♭	277
D	294
D# eller E♭	311
E	330
F	349
F# eller G♭	370
G	392
G# eller A♭	415
A	440
A# eller B♭	466
B	494
C′	



EXEMPEL 10 Orgelspel

Vilken frekvens har grundtonen i en öppen orgelpipa som är 34 cm lång?

Lösning: Ljudets hastighet i luft är 340 m/s. Enligt figur 1.22 d motsvarar pipans längd en halv våglängd. Vi kan skriva $L = \frac{\lambda}{2}$ eller $\lambda = 2L = 2 \cdot 0{,}34 \text{ m} = 0{,}68 \text{ m}$. Grundtonens frekvens är:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{0{,}68}\text{Hz} = 500 \text{ Hz}$$

Stränginstrument

Stränginstrument kan jämföras med repet i figur 1.20. Eftersom strängen är fastsatt i båda ändar bildas där noder. Figur 1.23 visar grundton och övertoner för en sträng. Gitarrsträngar är lika långa men olika grova. En sträng med större massa har större tröghet och svänger långsammare än en lika hårt spänd sträng med samma längd. En hårt spänd sträng är som en hård fjäder och svänger snabbare än samma sträng när den är slakare. Det är ju med hjälp av spänningen man stämmer en gitarrsträng.

Basfiolens strängar är av samma anledning mycket grövre än gitarrsträngarna. En sträng låter också olika beroende på var du slår an tonen. Detta beror på att den då svänger med olika antal övertoner.

EXEMPEL 11 **Fiolspel**

D-strängen på en violin har en grundton med frekvensen 294 Hz. Genom att flytta ett finger längs strängen kan violinisten spela tonen G (392 Hz). Var ska fingret placeras?

Lösning: Enligt figur 1.23 a motsvarar strängens längd en halv våglängd. Detta gäller båda tonerna eftersom båda är grundtoner. Eftersom den svängande delen av strängen förändras så ändras också våglängden.

För tonen D gäller: $L_1 = \frac{\lambda_1}{2} \Leftrightarrow \lambda_1 = 2L_1$ och $v = f_1 \cdot \lambda_1$

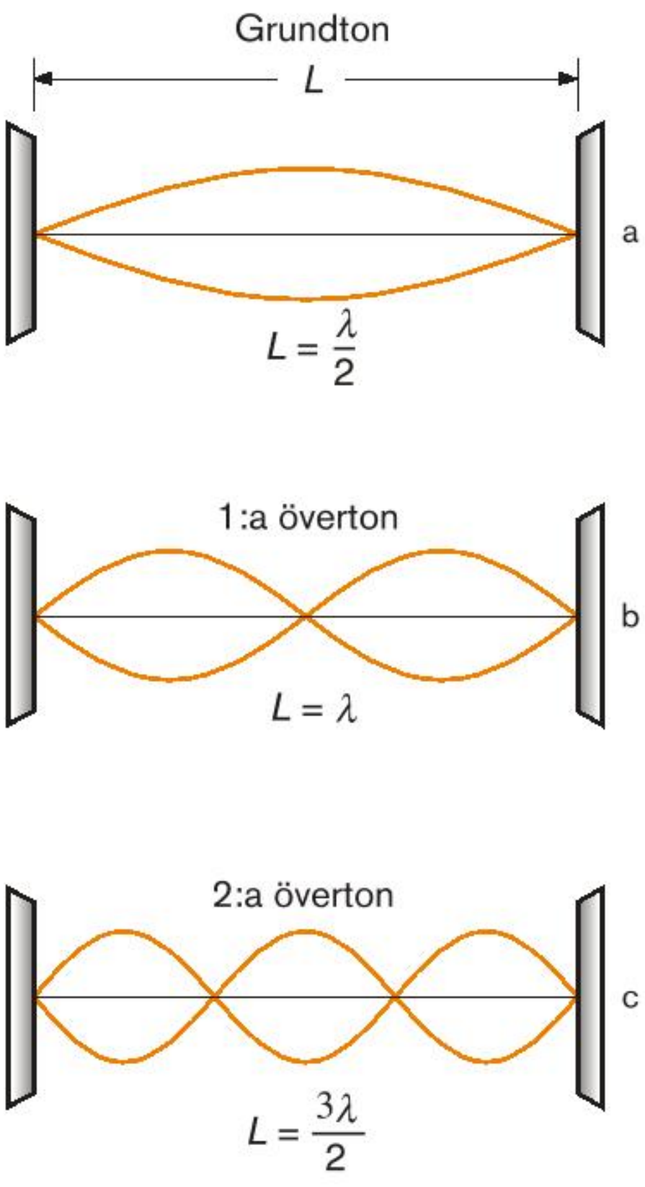
För tonen G gäller: $L_2 = \frac{\lambda_2}{2} \Leftrightarrow \lambda_2 = 2L_2$ och $v = f_2 \cdot \lambda_2$

Eftersom det är samma sträng måste v vara lika för båda tonerna. Då gäller:

$$f_1 \cdot \lambda_1 = f_2 \cdot \lambda_2 \Leftrightarrow \frac{f_1}{f_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{2L_2}{2L_1} \qquad \frac{L_2}{L_1} = \frac{294}{394} = \frac{3}{4}$$

Detta betyder att fingret ska placeras 1/4 från ändpunkten så att 3/4 av strängen svänger.





1.23 Stående vågor i en sträng.

Resonans i musikinstrument

Om du slår an en sträng på en elgitarr utan att ha strömmen tillslagen så blir det inte mycket till ton. Detsamma gäller om du jämför tonen när du blåser i ett provrör med tonen från en trumpet. Det är här instrumentmakarnas skicklighet kommer in i bilden. En vibrerande gitarrsträng kan inte sätta tillräckligt mycket luft i rörelse för att ge en önskvärd ljudstyrka. Strängens svängningar överförs i stället till gitarrlådan. När gitarrlådans lock börjar svänga kan en tillräcklig mängd luft komma i svängning. Det är valet av träslag och lådans utformning med mera som är helt avgörande för hur gitarren kommer att låta. Samma princip gäller för blåsinstrument.

Vilka frekvenser kan vi uppfatta?

De ljud du kan höra när du är ung, innehåller frekvenser från 20 Hz till 20 kHz. Vågor som har högre frekvens kallar vi *ultraljud*. Ju äldre vi blir, desto sämre hör vi höga frekvenser. Folk i 40-årsåldern hör normalt inte frekvenser högre än 14 kHz. Hundar, katter och spädbarn kan höra upp till 40 kHz. Fladdermöss kan höra frekvenser som är högre än 100 kHz.

Med hjälp av en elektrisk tongenerator, som vi kopplar till en högtalare, kan vi alstra ljud med den frekvens vi önskar. Vi upplever höga frekvenser som höga toner, och låga frekvenser som djupa toner. Tonhöjden bestäms alltså av frekvensen.

EXEMPEL 12 **Blixt och dunder**

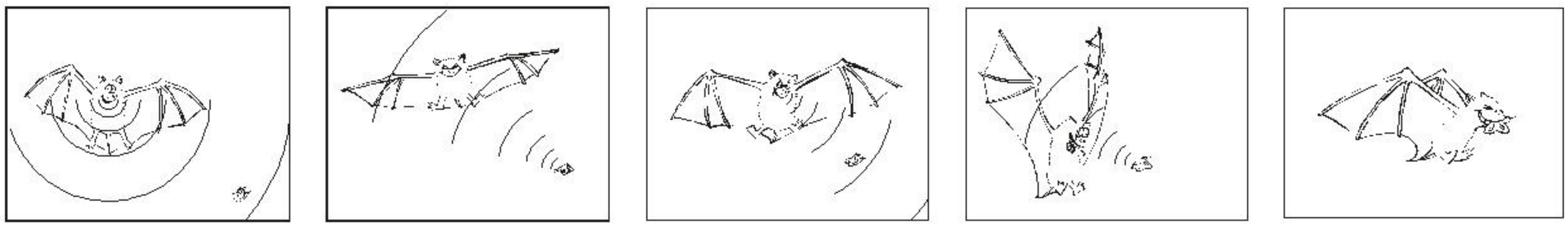
En blixt är en elektrisk urladdning i atmosfären. Urladdningen leder till en kraftig temperaturstegring och tryckhöjning längs den bana som blixten följer. Tryckhöjningen utbreder sig som ljudvågor från blixten. Blixten och tryckhöjningen sker ungefär samtidigt. Blixtljuset utbreder sig med ljushastigheten, medan åskdundret utbreder sig med ljudhastigheten. Ljudet går mycket långsammare än ljuset. Därför hör du åskdundret *efter* att du sett blixten.

En dag ser du en blixt och hör åskknallen 5,0 sekunder efteråt. Hur långt borta blixtrade det?

Lösning: Om lufttemperaturen är 20 °C, är ljudhastigheten lika med 340 m/s. Du kan bortse från den tid ljuset behöver för att nå dig. Avståndet till blixten blir

$$s = vt = 340 \cdot 5{,}0 \text{ m} = 1{,}7 \text{ km}$$

En tumregel för beräkning av avståndet till en blixt: Efter blixten räknar du hur många sekunder som går innan du hör knallen, och dividerar antalet sekunder med 3. Då får du avståndet i kilometer. Själva blixten går oerhört snabbt, men smällen är ändå utdragen till ett muller. Vad kan det bero på?



1.24 Fladdermusen använder ekolod för att hitta insekter i mörker.

När vi ser ett föremål, beror det på att det reflekterar ljusvågor som därefter träffar våra ögon. När en fladdermus "ser" insekter, sker det med hjälp av ekolod. Fladdermusen skickar ut en kort ljudsignal, och hör ekot från insekter eller andra föremål framför sig. Se figur 1.24. För att ett föremål ska ge ett eko, måste det vara *större än halva våglängden*.

EXEMPEL 13 **Fladdermus på jakt**

Fladdermusen använder alltså eko för att orientera sig och hitta mat i mörker. En fladdermus kan ge ifrån sig en ljudsignal på 120 kHz. Hur små insekter kan den upptäcka med hjälp av ekot?

Lösning: Våglängden är

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{120 \cdot 10^3}\ \text{m} = 2{,}83 \cdot 10^{-3}\ \text{m} \approx 2{,}8\ \text{mm}$$

Bara insekter som är drygt 1 mm, ger ifrån sig ett eko.

Ekolod ombord på fiskebåtar bygger på samma princip. Ljudsignaler som träffar ett fiskstim, ger ifrån sig ett eko som registreras av fiskebåten. Det är bland annat användningen av ekolod som har lett till utfiskning av många havsområden i världen.

Det har också utvecklats ekolod för blinda. Den blinde utrustar sig med en sändare för ultraljud. Ljudpulserna reflekteras av omgivningen och tas emot av en mottagare. Mottagaren omvandlar pulserna till hörbart ljud i hörtelefoner. På det sättet kan den blinde "se" stolpar, staket och annat som är i vägen.

Medicinska tillämpningar med ultraljud

I början av 1950-talet lyckades hjärtläkaren Inge Edler och fysikern Hellmuth Hertz studera ett hjärtas rörelser med hjälp av ultraljud. Vid den här tiden hade det blivit möjligt att operera vissa typer av hjärtfel och därför fanns det ett behov av att först få en riktig diagnos. Ultraljudstekniken utvecklades snabbt och har nu blivit en mycket viktig diagnostisk metod.

I undersökningsinstrumentet utnyttjar man att ljud reflekteras när kroppsvävnaden skiftar karaktär, ungefär som i exemplet med ljudkanonen på sidan 25. Instrumentet kan både sända ut och ta emot ultraljudsvågor. Efter signalbehandling i en dator kan man få en bild av det undersökta området. Se figur 1.25.

1.25



Många av våra inre organ kan undersökas på det här sättet. Tekniken utvecklas hela tiden och numera kan man även undersöka leder, muskler, senor, blodkärl och blodförsörjningen till olika organ. Vid graviditetsundersökningar kan man genom 3D-teknologi få en bra bild av hur barnet verkligen ser ut. Undersökningen kan göras snabbt och tekniken är billig.

Förutom undersökningar kan även behandlingar utföras med ultraljud. Ett exempel är borttagning av tandsten hos tandhygienisten. Ett annat exempel är när man krossar njurstenar med ultraljud som har hög effekt.

Ljudintensitet och ljudstyrka

De ljud du kan höra beror inte bara på ljudets frekvens utan även på ljudets intensitet, som är ett mått på energin i ljudvågen. Om inget hindrar ljudet kommer det att breda ut sig fritt i alla riktningar som ett expanderande klot. Energin kommer att fördela sig på klotytan vilket innebär att ljudet blir svagare och svagare ju längre från ljudkällan vi befinner oss. Ett användbart mått i detta sammanhang är begreppet *ljudintensitet*. Eftersom arean av ett klot är $4\pi r^2$ minskar energin per ytenhet omvänt proportionellt mot r^2.

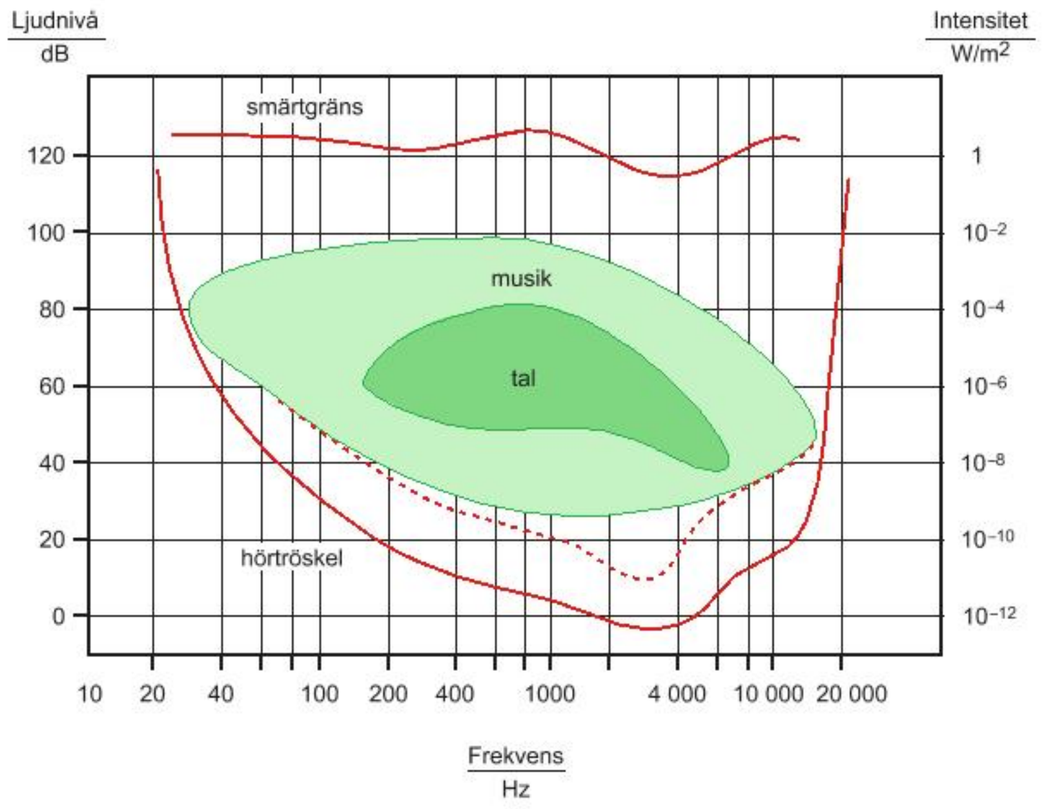
LJUDINTENSITET

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

där *P* är effekten (energi per sekund) och *A* är klotets area.

Enheten för ljudintensitet är W/m^2.

Om du lyssnar på en ton och sänker intensiteten kommer du till slut inte att höra något alls. Då har du nått den så kallade *hörtröskeln*. Se figur 1.26.



1.26 Örats känslighet för ljud är beroende av frekvensen. Örat är känsligast för frekvenser mellan 2 000 och 4 000 Hz. Vi uppfattar alltså toner med samma ljudintensitet men olika frekvens som olika starka. Ljudintensitet kan man därför inte använda sig av för att mäta ljudstyrka.

Om man ökar ljudintensiteten kommer vi att uppfatta en allt starkare ton. Då intensiteten närmar sig 1 W/m^2 kommer det att börja göra ont i örat och vi har då nått *smärtgränsen*. Som du ser i diagrammet är smärtgränsen i stort sett oberoende av frekvensen.

I samband med vår upplevelse av ljud använder man sig oftast inte av absolut ljudintensitet. För praktiska mätningar använder man istället en jämförelse mellan den uppmätta ljudintensiteten och värdet



Gratis appar kan till exempel laddas ner från arbetsmiljöverkets hemsida.

10^{-12} W/m^2 som är hörtröskeln vid frekvensen 1000 Hz. Eftersom örat, i likhet med våra andra sinnen, har en logaritmisk känslighet för stimuli är det lämpligare att använda en logaritmisk skala än en linjär. Vi inför nu begreppet *ljudnivå* (L) för att uttrycka ett ljuds styrka.

LJUDNIVÅ

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

där I_0 är ljudintensiteten 10^{-12} W/m^2. Enheten för ljudnivå är decibel (dB).

Många människor, inte minst ungdomar, lever i en värld ständigt fylld av höga ljudnivåer. Detta innebär att du ofta riskerar att drabbas av olika typer av hörselskador. Numera finns det gratis mobilappar att ladda ned så att du lätt kan mäta ljudnivån i din omgivning.

EXEMPEL 14 **Ljudnivån under ett samtal**

Du har mätt upp en ljudintensitet under ett vanligt samtal till 1 μW/m^2. Vilken ljudnivå motsvarar detta?

Lösning: Vi får

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \frac{1 \cdot 10^{-6}}{10^{-12}} = 10 \lg 10^6 = 60$$

Ljudnivån under samtalet är 60 dB.

KONTROLLFRÅGOR

- Vilken typ av vågrörelse är ljud?
- Hur stor del av en våglängd är det i grundtonen i ett öppet respektive slutet rör?
- Hur stor del av en våglängd är det i grundtonen i en sträng?
- Vad är det som bestämmer klangen i ett instrument?
- Vilken uppgift har resonanslådan i en gitarr?
- Inom vilket frekvensintervall ligger din hörsel?
- Vad menas med ultraljud?
- Ange några tillämpningar av ultraljud.
- Hur mäter man ljudnivå?
- Vilken är enheten för ljudnivå?
- Vilken frekvens har grundtonen i en pipa som är 17 cm lång om pipan är öppen i ena änden? Båda ändarna? Sätt ljudhastigheten till 340 m/s.
- En 68 cm lång gitarrsträng har grundfrekvensen 330 Hz. Vilken frekvens har första övertonen? Andra övertonen? Sätt ljudhastigheten till 340 m/s.
- Vid prassel av löv är ljudintensiteten ungefär 10^{-11} W/m^2. Vilken ljudnivå motsvarar detta?
- Ljudnivån vid smärtgränsen är ca 135 dB. Vilken ljudintensitet motsvarar detta?

SAMMANFATTNING

Mekaniska vågor

Svängningar och vågor

Svängningar är regelbundna rörelser fram och tillbaka mellan två ytterlägen.

Varje svängningssystem har sin *egenfrekvens*.

Resonans får vi när ett svängningssystem påverkas av en periodisk kraft med en frekvens som är lika med systemets egenfrekvens.

Vågor är svängningar som breder ut sig. Vågorna transporterar energi bort från vågkällan.

- *Transversella vågor* svänger på tvärs mot vågens hastighetsriktning.
- *Longitudinella vågor* svänger längs med vågens hastighetsriktning.

Mekaniska vågor kan bara utbreda sig i ett ämne eller längs gränsytan mellan två ämnen.

Våghastigheten är lika med frekvensen multiplicerad med våglängden, $v = f\lambda$.

Reflektion och brytning

Reflektionslagen: Reflektionsvinkeln är lika med infallsvinkeln,

$$\alpha_r = \alpha_i.$$

Brytning av vågor beror på att hastigheten ändras.

Böjning och interferens

Vågor som träffar en smal öppning, *böjs* och utbreder sig som ringvågor bakom öppningen.

Två vågor *interfererar* när de är på samma ställe samtidigt och bildar en enda våg.

Det samlade vågutslaget är då lika med summan av de enskilda utslagen, med hänsyn till tecken.

I en stående väg är avståndet mellan två noder en halv våglängd. Avståndet mellan två bukar är också en halv våglängd.

Ljudvågor

Ljudvågor är mekaniska longitudinella vågor i ett ämne.

Tonhöjden bestäms av frekvensen.

Den minsta svängning som kan uppstå i ett musikinstrument kallas grundton. För grundtonerna gäller följande samband.

- I ett öppet rör motsvarar rörets längd en halv våglängd.
- I ett slutet rör motsvarar rörets längd en kvarts våglängd.
- I en sträng motsvarar strängens längd en halv våglängd.

Ultraljud är vanligt ljud med en frekvens över 20 000 Hz.

Ultraljud har många medicinska tillämpningar, både inom diagnostik och inom behandling.

För att få reda på ett ljuds styrka mäter man ljudnivån L.

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

där I är den uppmätta ljudintensiteten och $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$.

Enheten för ljudnivå är decibel (dB).

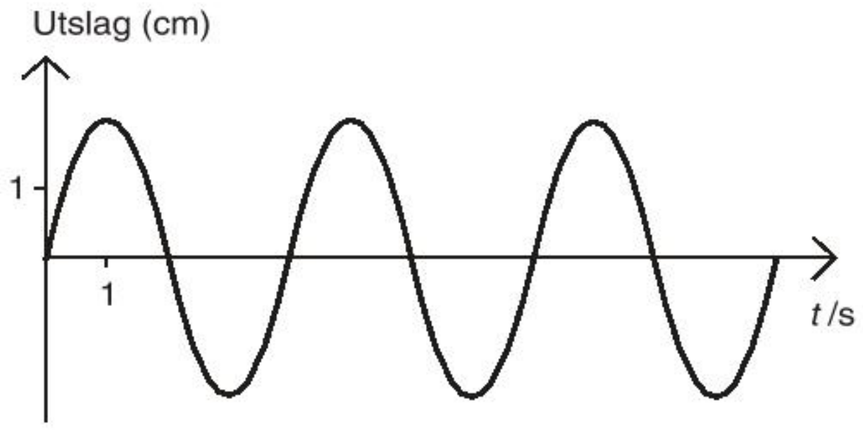
RÄKNA FYSIK

Svängningar och vågor

1.01 **a** Ett pendelur har en pendel som gör 30 hela svängningar varje minut. Beräkna perioden och frekvensen.

b Växelströmmen hemma svänger med frekvensen 50 Hz. Beräkna perioden.

1.02 Beräkna amplituden, perioden och frekvensen för svängningen i figuren.



1.03 I gymmet på skolan finns det en fjäder som används för att stärka armmusklerna. En dag tar Åsa med sig fjädern till fysiklektionen. Tillsammans med läraren undersöker Åsa fjädern. De kommer fram till att det behövs en kraft på 85 N för att dra ut fjädern 2,5 dm.

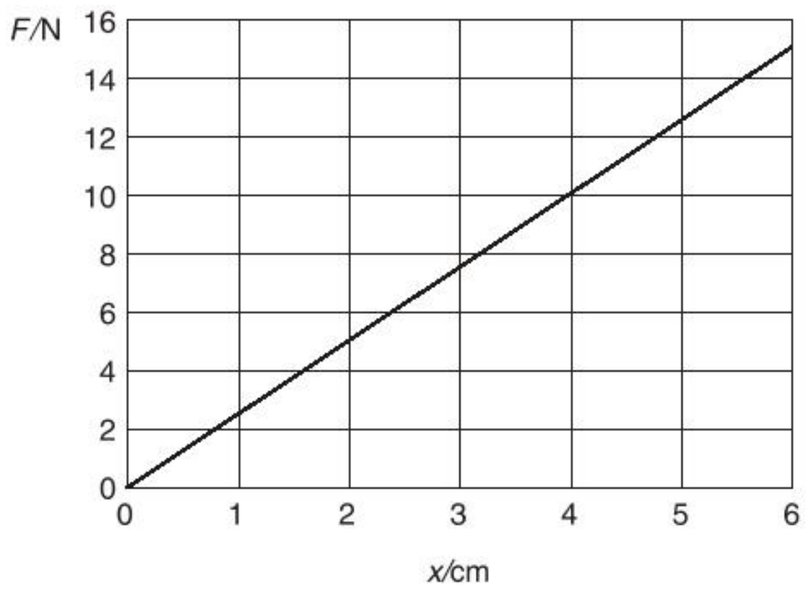
a Bestäm fjäderkonstanten för denna fjäder.

b Hur stort arbete har de uträttat när de dragit ut fjädern 2,5 dm?

1.04 Man bestämmer fjäderkonstanten k för en fjäder genom att mäta förlängningen x vid olika belastningar. Resultatet illustreras i diagrammet.

a Hur stor är fjäderkonstanten k?

b Hur stort arbete behövs för att förlänga fjädern 4,5 cm?



1.05 ★ Inomhussprinters stannar genom att springa in i elastiska mattor. Vid ett tillfälle då Johan sprang 60 m i DM konstaterade hans kompis Åke att mattan trycktes ihop 0,25 m. Med tanke på Johans sluttid i loppet uppskattade de att han hade en hastighet på 9,5 m/s när han träffade mattan. Johan, som är en välbyggd sprinter, väger 87 kg.

Betrakta mattan som en ideal fjäder (uppfyller Hooks lag) och beräkna

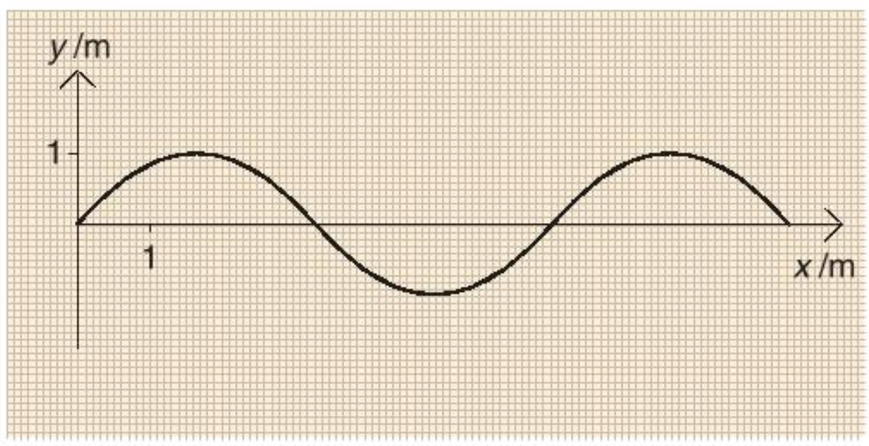
a fjäderkonstanten för mattan

b maximala kraften som mattan påverkar Johan med.



1.06 En centrifug full med kläder skakar kraftigt vid 150 varv per minut. Detta är ett resonansfenomen. Beräkna resonansfrekvensen.

1.07 Figuren visar en ögonblicksbild av en våg som rör sig åt höger med hastigheten 3,1m/s. Beräkna amplituden, våglängden, frekvensen och perioden.



1.08 **a** Beräkna våglängden för vågor som har hastigheten 1,6 m/s och frekvensen 0,85 Hz.

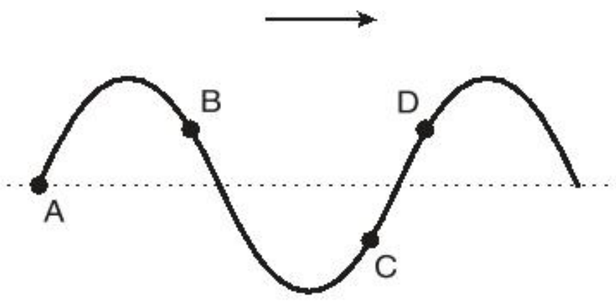
b Dyningar rullar in mot en strand med 4,5 sekunders mellanrum. Avståndet mellan dyningarna är 12 m. Beräkna våghastigheten.

1.09 Figuren visar en ögonblicksbild av en våg som rör sig åt höger längs ett rep.

a Bestäm hastighetsriktningen i detta ögonblick för var och en av punkterna *A*, *B*, *C* och *D* på repet.

b Märk ut en punkt på repet som svänger i fas med *A*. Märk ut en annan punkt som svänger i fas med *B*. Kan du märka ut en punkt som svänger i fas med *D*?

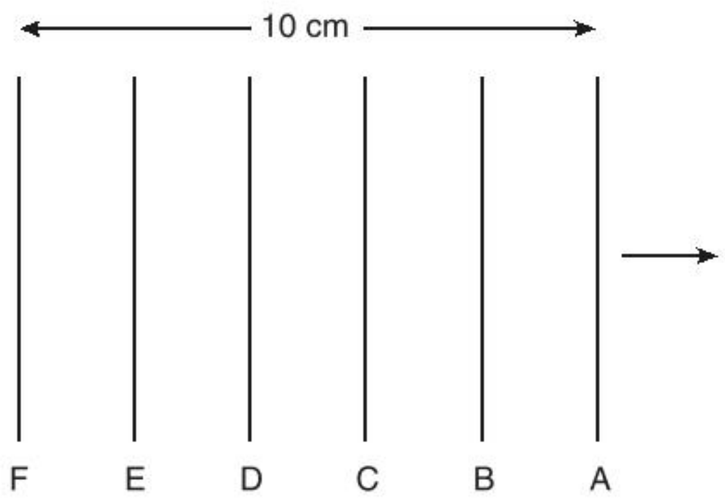
c Vågen har frekvensen 1,6 Hz. Hur lång tid använder punkten *A* för en svängning? Vad gäller för de andra punkterna på repet?



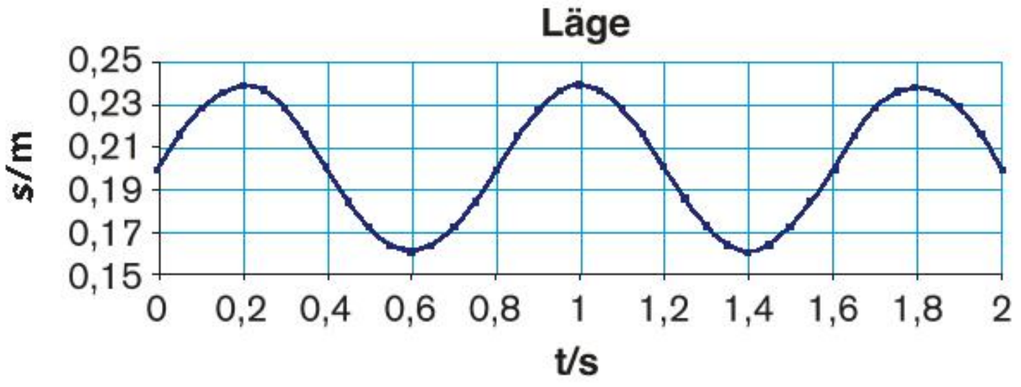
1.10 **a** En våg har frekvensen 40 Hz och våglängden 0,25 m. Hur lång tid behöver vågen för att flytta sig 500 m?

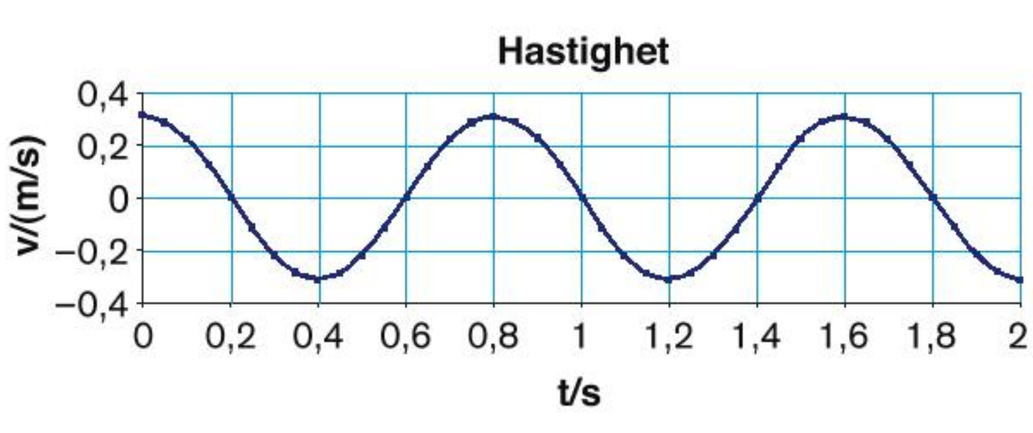
b En annan våg med samma frekvens rör sig 30 m på 5,0 s. Bestäm våglängden.

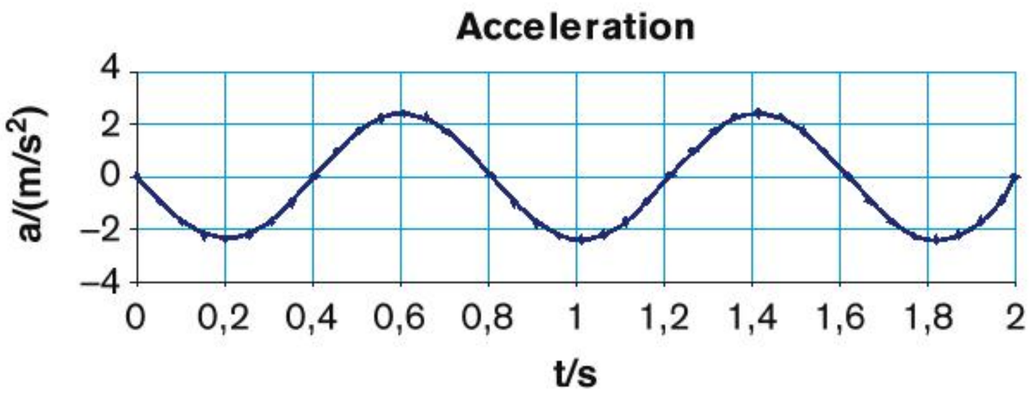
1.11 Figuren visar en ögonblicksbild av vågtopparna i en plan våg som rör sig åt höger. Vågtopp A hade 0,50 s tidigare samma position som vågtopp F har nu. Beräkna våglängden, våghastigheten och frekvensen.



1.12 ★★ Figurerna visar läge, hastighet och acceleration som funktion av tiden för pendeln i figur 1.4. Positiv riktning är uppåt i figuren. Pendeln väger 0,45 kg.







a Bestäm svängningens amplitud, period och frekvens.

b Hur stor är hastigheten och accelerationen vid $t = 1{,}0$ s? Var är pendeln då?

c Finns det någon annan tidpunkt som pendeln har samma hastighet och acceleration som i b?

d Var befinner sig pendeln när hastigheten är 0?

e Var är pendeln när hastigheten är som störst? Minst?

f Hur stor är hastigheten när accelerationen är som störst? Var är pendeln då?

g Var befinner sig vikten när kraften är riktad uppåt? Nedåt?

h Hur stor är den maximala kraften?

i Bestäm fjäderkonstanten.

Reflektion och brytning

1.13 Plana vattenvågor är på väg mot en lodrät vägg. Hastighetsriktningen bildar 35° vinkel med väggen. Vågorna reflekteras.

a Hur stor är infallsvinkeln? Hur stor blir reflektionsvinkeln? Rita figur.

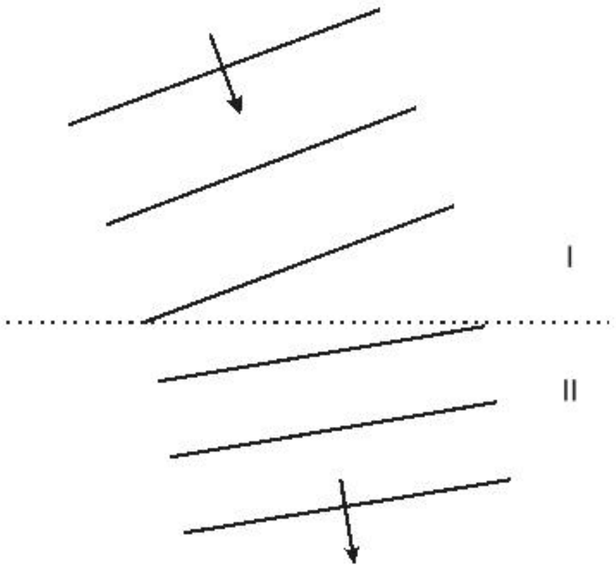
b Våglängden är lika stor före och efter reflektionen. Hur kan vi veta det?

1.14 Ekolodet på en fiskebåt registrerar eko från ett fiskstim 42 ms efter det att ljudsignalen sändes ut. Ljudhastigheten i havsvatten är $1{,}53 \cdot 10^3$ m/s. Hur djupt går fiskstimmet?

1.15 Figuren visar plana vattenvågor som går från område I till område II.

a Avgör om våglängden, frekvensen och våghastigheten är störst i område I, störst i område II eller lika stora i båda områdena.

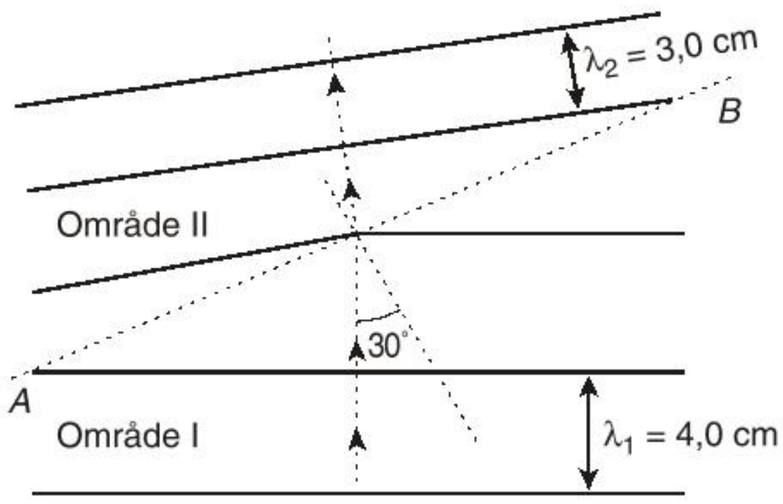
b Är vattendjupet störst i område I eller i område II?



1.16 ★ Figuren visar plana vågor som rör sig från ett område I över till ett annat område II. Linjen *AB* markerar skiljelinjen mellan de två områdena. Våghastigheten i område I är 2,0 m/s.

a Visa att vågorna har frekvensen 50 Hz.

b Beräkna våghastigheten i område II.

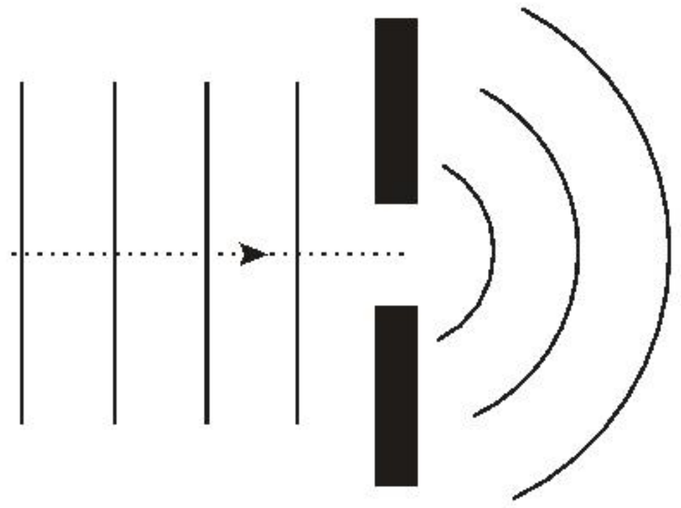


Böjning och interferens

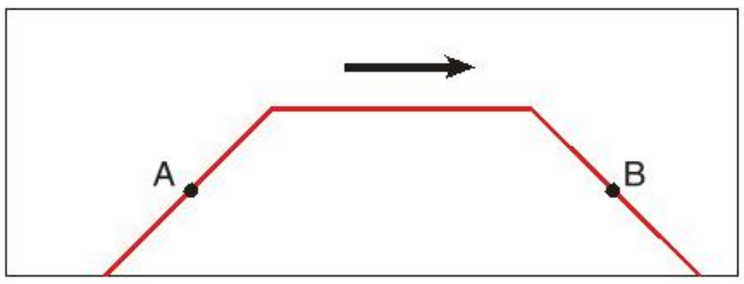
1.17 Figuren visar plana vattenvågor som passerar en öppning där vågorna böjs.

a Avgör om böjningen blir mer eller mindre markerad med samma vågor när vi gör öppningen 1) smalare, 2) bredare.

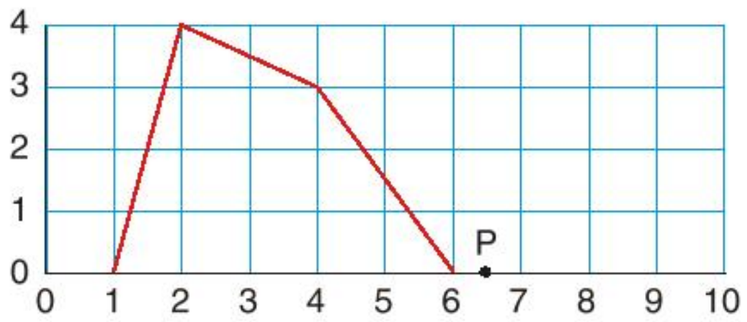
b Avgör om böjningen blir mer eller mindre markerad med samma öppning när våglängden blir 1) mindre, 2) större.



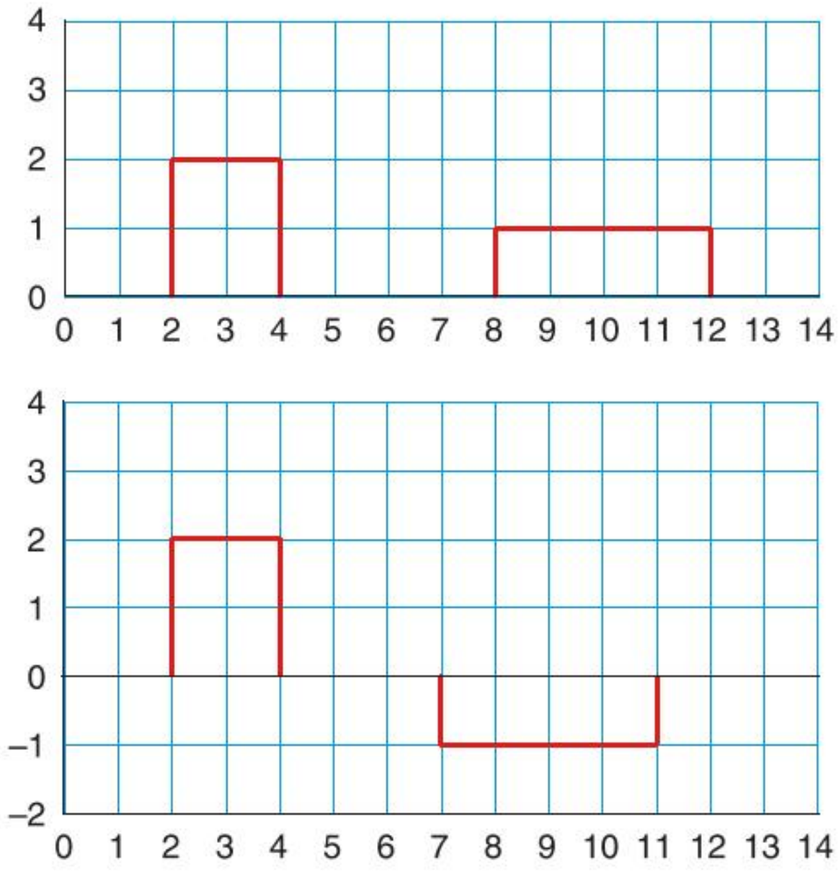
1.18 I figuren visas en puls som rör sig åt höger. Åt vilket håll kommer punkterna A och B att röra sig?



1.19 I figuren visas en puls som rör sig åt höger. Hur långt kommer punkten P att ha rört sig när pulsen har passerat?



1.20 Två pulser rör sig mot varandra med samma hastighet, 2 rutor/s, se figur nedan. Rita hur pulserna och den resulterande pulsen kommer att se ut efter 1 s, 2 s respektive 3 s.



1.21 Två vågor kan befinna sig på samma ställe vid samma tid. Det samlade vågutslaget kan vi studera med räknaren. Vi låter den ena vågen ge utslaget y_1 och den andra vågen utslaget y_2. Det samlade vågutslaget blir då $y_3 = y_1 + y_2$. På räknaren sätter du $x_{min} = 0$, $x_{max} = 720$, $x_{scale} = 45$, $y_{min} = -2{,}5$, $y_{max} = 2{,}5$, $y_{scale} = 0{,}5$ och angle: DEG.

Rita vågutslagen y_1, y_2 och y_3 och kommentera resultaten (kom ihåg att x mäter tid)

a när $y_1 = \sin x$ och $y_2 = \sin x$
b när $y_1 = \sin x$ och $y_2 = \sin (x + 180)$
c när $y_1 = \sin x$ och $y_2 = \sin 0{,}5x$
d när $y_1 = \sin x$ och $y_2 = \sin 2x$

Nu kan du själv välja y_1 och y_2 och experimentera vidare på egen hand.

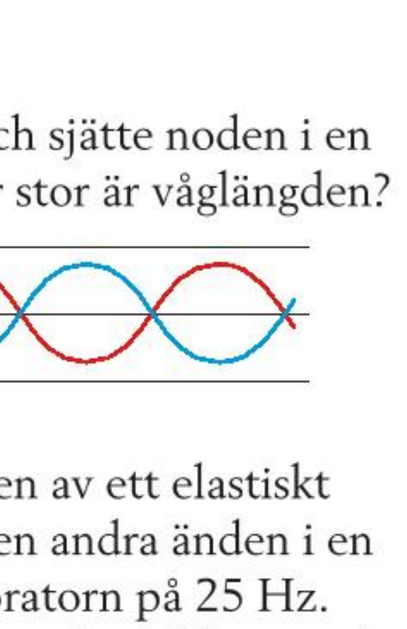
1.22 Detta är en fortsättning på uppgift 1.21. Rita det samlade vågutslaget $y_3 = y_1 + y_2$ när $y_1 = \sin 10x$ och $y_2 = \sin 11x$.

Hur vill du beskriva vågutslaget y_3? Du kan till exempel tänka dig att det är två ljudvågor som har interfererat.

1.23 ★ Två stavar doppas samtidigt ned i vattnet i samma takt. Det bildas då vågor med våglängden 26 cm.

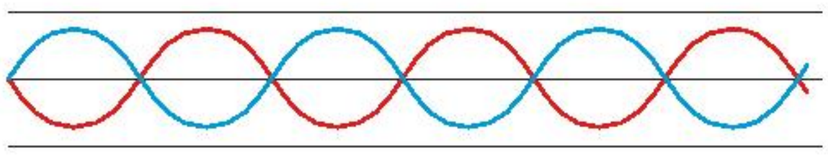
a En liten korkbit placeras på första nodlinjen så att avståndet till den ena staven är 57 cm. Hur långt bort från den andra staven kan då korkbiten befinna sig?
b Korkbiten placeras sedan på den andra nodlinjen så att avståndet till den ena staven är 72 cm. Hur långt bort från den andra staven kan då korkbiten befinna sig?

1.24 ★ Figuren visar de nodlinjer, dvs linjer som sammanbinder punkter med destruktiv interferens, som bildas när två små pinnar, A och B, svänger upp och ner i en vattenyta. Vågkällorna A och B svänger i fas. Punkten K ligger på det vi kallar första nodlinjen och där differensen mellan KB och KA är 3,0 cm.



a Hur stor är skillnaden mellan KB och KA uttryckt i våglängder?
b Bestäm våglängden för vattenvågorna.
c Hur stor är skillnaden mellan LB och LA uttryckt i cm?
d Hur stor är skillnaden mellan MB och MA uttryckt i cm?

1.25 Avståndet mellan andra och sjätte noden i en stående våg är 45 cm. Hur stor är våglängden?



1.26 Anette sätter fast ena änden av ett elastiskt rep i dörrhandtaget och den andra änden i en vibrator. Hon ställer in vibratorn på 25 Hz. Repet börjar då svänga så att det bildas en stående våg med våglängden 18 cm.

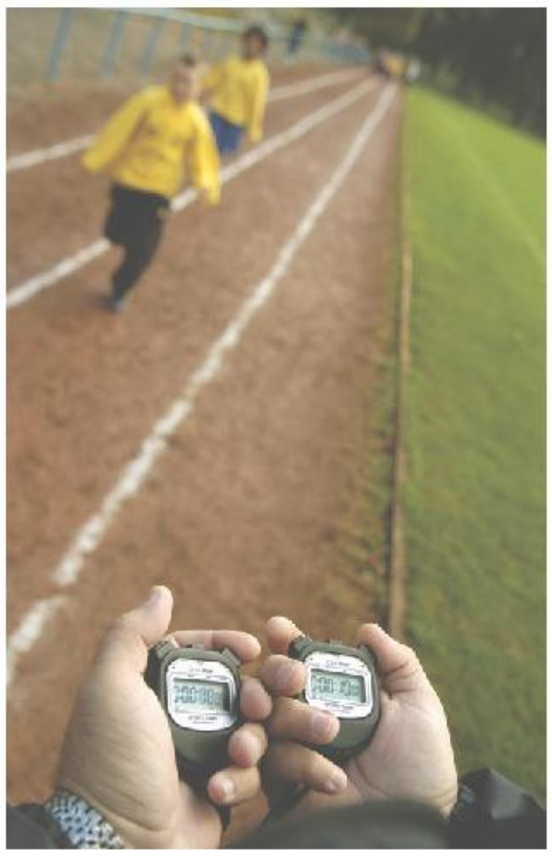
a Hur stort blir avståndet mellan två närliggande noder?
b Hur stort blir avståndet mellan två närliggande bukar?
c Hur stor är vågens hastighet?

Ljud

Ljudhastigheten i luft sätter vi lika med 340 m/s.

1.27 **a** En stämgaffel sänder ut tonen 512 Hz i luft. Bestäm våglängden.
b Barn kan höra ljud med frekvenser från 20 Hz till 20 kHz. Vilket våglängdsområde i luft motsvarar detta?

1.28 Tidtagaren vid ett 100-meterslopp står vid mållinjen. Han startar stoppuret när han hör startskottet. Hur stort blir felet i tidtagningen på grund av detta? Blir tiden för kort eller för lång?



1.29 Vid ultraljudsundersökning av gravida används frekvensen 2,0 MHz. Ljudhastigheten i kroppsvävnaden sätter vi lika med 1,5 km/s (som i vatten). Hur stor våglängd får ultraljudet i kroppsvävnaden? Ungefär hur små detaljer kan man teoretiskt "se" vid en sådan undersökning?

1.30 Från en sprängning 750 m under jord märker vi att tryckvågorna når oss 2,0 s snabbare genom marken än genom luften. Beräkna våghastigheten i berggrunden.

1.31 Orvar blåser i en öppen pipa, varvid det hörs en ton med frekvensen 380 Hz (grundtonen). Han täpper till öppningen och blåser igen. Vilken är nu grundfrekvensen?

1.32 Vilka toner är möjliga i en öppen orgelpipa som är 2,4 m lång?

1.33 ★ En öppen orgelpipa ger ifrån sig frekvenserna 375 Hz, 450 Hz och 525 Hz men inga frekvenser däremellan. Däremot kan eventuellt lägre och högre frekvenser förekomma. Vilken är pipans grundton?

1.34 En 34,0 cm lång fiolsträng har grundfrekvensen 380 Hz.
a Vilken är frekvensen för första övertonen?
b Vilken är frekvensen för andra övertonen?
c Hur stor är våghastigheten i strängen?



1.35 Vilken är grundtonen för en 80,0 cm lång gitarrsträng om våghastigheten i strängen är 520 m/s?

1.36 Ljudintensiteten från Måns dammsugare är 10 $\mu W/m^2$. Vilken ljudnivå motsvarar detta?

1.37 När Ulrika viskar är ljudnivån ungefär 20 dB. Vilken ljudintensitet motsvarar detta?

1.38 ★ Hur många dB ökar ljudnivån om intensiteten hos en ljudkälla ändras från 1,0 $\mu W/m^2$ till
a 2,0 $\mu W/m^2$
b 10 $\mu W/m^2$
c 1 mW/m^2?

1.39 ★ Effekten från en högtalare är 12 W. Ljudet från högtalaren sprids likformigt åt alla håll.
a Vilken ljudintensitet uppfattar Cecilia 8,0 m från högtalaren?
b Vilken ljudnivå motsvarar detta?

DISKUTERA FYSIK

1 Barn leker ibland med en hemmagjord telefon som är gjord av ett långt snöre som är fastsatt i två plastmuggar. När snöret är sträckt och ett barn pratar i den ena muggen kan ljudet höras i den andra. Förklara hur ljudet kan höras i den andra muggen.

2 Ett barn sitter på en gunga. Framför henne står hennes pappa och blåser i en visselpipa. I vilket läge hör barnet den högsta frekvensen? Lägsta?

3 En hammare hängs i en spiralfjäder och får utföra en harmonisk svängning med amplituden A. Hur långt rör sig hammaren under en period?

4 Om klassrumsdörren är öppen, även om det är bara lite grann, kan du höra ljud som kommer utifrån korridoren. Men du kan inte se vad som händer i korridoren. Varför är det en skillnad?

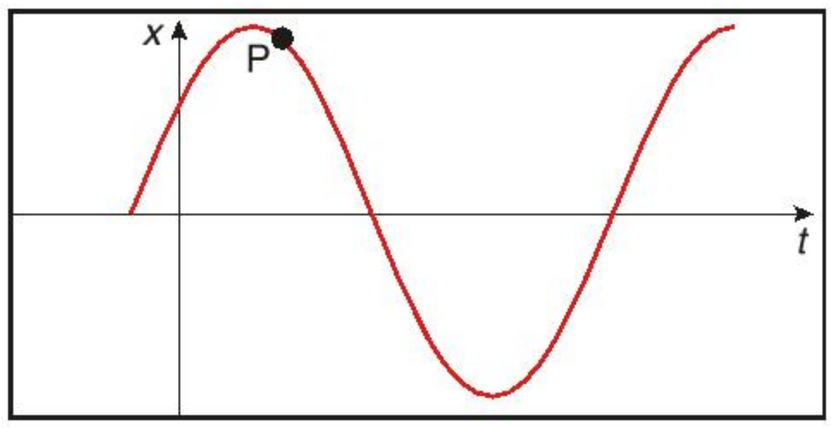
5 **a** En person A som ser en person B hugga ved, lägger märke till att synintryck och motsvarande ljudintryck inte sammanfaller. Vad beror det på?

b Med hjälp av enkla hjälpmedel ska A bestämma ljudhastigheten i luft i detta fall. Redogör för en metod som A kan välja, och vilka hjälpmedel han behöver. Diskutera felkällorna med den metod A har valt.

6 En vind som normalt inte är stark nog att välta ett träd, kan ändå välta trädet eller knäcka stammen när vinden kommer i byar med en bestämd rytm. Vad kan förklaringen vara?

RESONERA FYSIK

1 Vågor utbreder sig längs en sträng så att den svänger fram och tillbaka. Ett litet föremål sätts fast på strängen. Dess läge som funktion av tiden ges i figuren nedan.



I punkten P har föremålet

I positiv hastighet och positiv acceleration
II positiv hastighet och ingen acceleration
III positiv hastighet och negativ acceleration
IV negativ hastighet och positiv acceleration
V negativ hastighet och ingen acceleration
VI negativ hastighet och negativ acceleration
VII ingen hastighet och ingen acceleration.

Vilket alternativ är korrekt?

2 Två strängar som är olika tjocka förbinds så att de bildar en lång sträng. En våg utbreder sig längs strängen och passerar förbindelsepunkten mellan de två strängarna. Vad ändras när vågen passerar förbindelsepunkten?

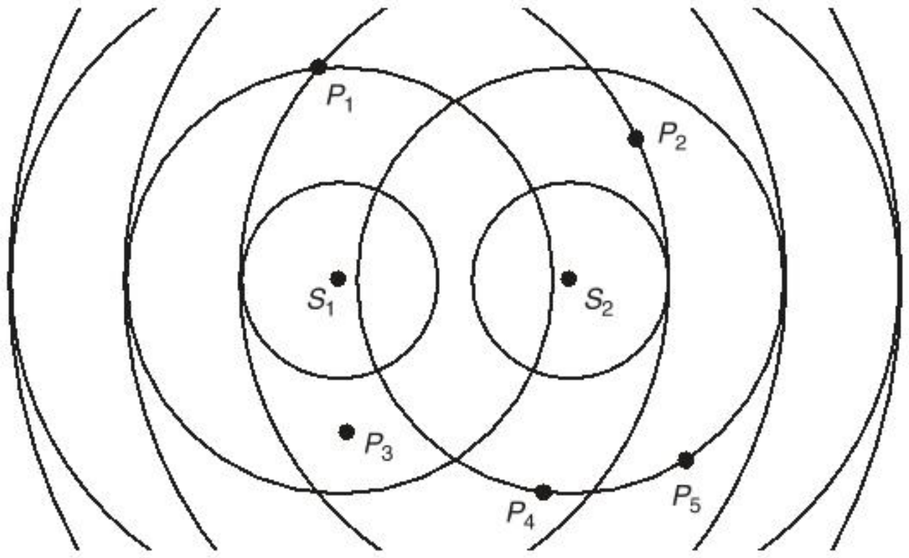
I Frekvensen
II Perioden
III Våglängden
IV Våghastigheten

3 Vilken av nedanstående vågor skiljer sig fundamentalt från de andra?

A Ljudvågor
B Röntgenstrålar
C Gammastrålar
D Ljusvågor
E Radiovågor

4★ a Figuren visar en ögonblicksbild av cirkulära vågor som utgår från två vågkällor S_1 och S_2. Cirklarna visar vågtoppar med inbördes avstånd på en våglängd.

Avgör för var och en av punkterna P_1, P_2, P_3, P_4 och P_5 om det i punkten är dubbel vågtopp, dubbel vågbotten, nollutslag eller ingetdera.

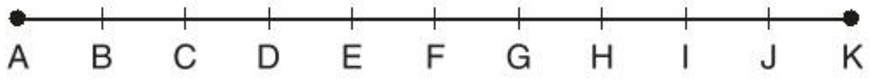


b Tänk dig att cirklarna visar vågbottnar, inte vågtoppar. Vad kan du då säga om vågutslaget i de fem punkterna?

5 ★★ Två små vågkällor A och K, som svänger i fas, befinner sig 10,0 cm ifrån varandra. Vågkällorna alstrar vågor med våglängden 4,0 cm. Mellan A och K kommer det att finnas punkter med konstruktiv och destruktiv interferens. I vilken/vilka av punkterna är det

a konstruktiv interferens?

b destruktiv interferens?



UPPSKATTA FYSIK

1 I en figur på sidan 43 visas örats hörselområde. Utgå från figuren och uppskatta hur lång öronkanalen är hos en människa. Betrakta örat som ett rör med en öppen och sluten ände.

Vissa studier indikerar att den högsta frekvens vi kan höra bestäms av trumhinnans diameter. Gör en uppskattning av denna diameter.

2 Du undrar vilken effekt din mikrovågsugn har. Du letar i bruksanvisningen men hittar ingenting. Du bestämmer dig då för att göra en uppskattning genom att värma en kopp vatten i ugnen. Du antar att all energi som produceras av mikron går åt till att värma vattnet. Uppskatta uppvärmningstiden och bestäm mikrovågsugnens effekt.

3 Eva och Stina är på besök i en kyrka och får genast upp ögonen på den vackra orgeln i kyrkan. De ser att det finns många pipor i orgeln och börjar fundera på vilka toner orgeln kan ge ifrån sig. De börjar med att försöka uppskatta vilken grundton den öppna pipan längst till vänster avger. Hjälp dem med uppskattningen.



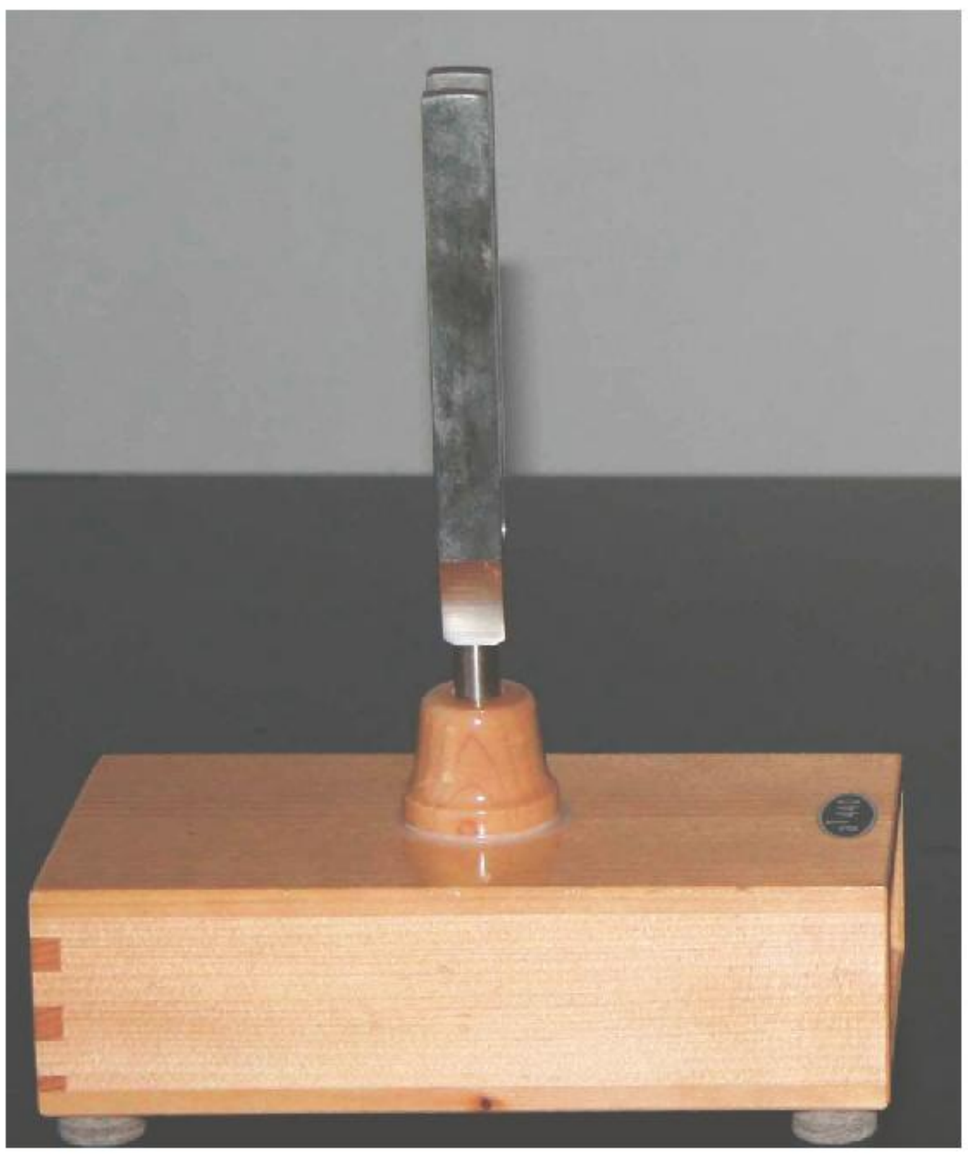
4 Du har bestämt dig för att bygga en orgel i ditt rum genom att använda plaströr. Kan du bygga en orgel som kan täcka hela det mänskliga hörselintervallet utan att böja piporna?

TESTA DIG I FYSIK

1 En våg med våglängden 48 cm och frekvensen 0,45 Hz utbreder sig med amplituden 4,4 cm längs en fjäder. När börjar en punkt 0,96 m från startpunkten att svänga?

2 En stämgaffel med frekvensen 440 Hz slås an. Hur många svängningar har skänklarna på stämgaffeln hunnit göra, då ljudet nått 30 m från stämgaffeln?

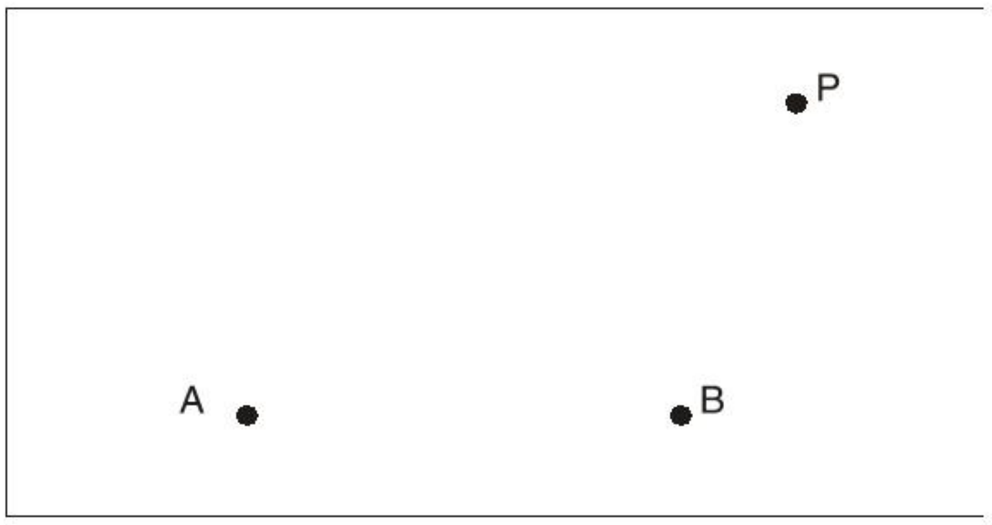
3 På en resonanslåda, som är öppen i ena änden, placeras en stämgaffel som har frekvensen 440 Hz. Hur lång bör lådan vara?



4 Då en sträng ger den andra övertonen är avståndet mellan noderna i den stående vågen 28,0 cm. Vilken våglängd har strängens grundton?

5 ★ Ljudnivån från en maskin i en verkstad är 75 decibel. Från en annan maskin är ljudintensiteten 8 gånger högre. Bestäm decibeltalet för denna maskin?

6 Två oscillatorer för vattenvågor A och B svänger i takt med frekvensen 15 Hz. Punkten P ligger på andra nodlinjen från mittpunktsnormalen till sträckan AB, se figur. Gör mätningar i figuren och beräkna vågornas utbredningshastighet. Figuren är ritad i skala 1:2.



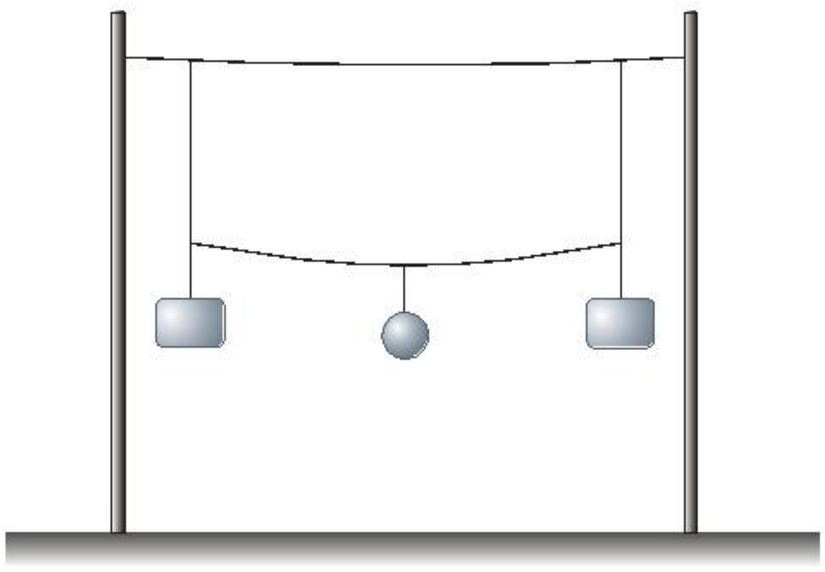
7 ★ Ett lodrätt rör fylls delvis med vatten. Ovanför den öppna änden på röret håller man en stämgaffel, som svänger med frekvensen 2150 Hz. Om man sakta sänker vattenytan i röret kommer man vid vissa tillfällen höra att ljudet från stämgaffeln försvagas. Hur mycket har vattenytan i röret sjunkit mellan två sådana tillfällen? Sätt ljudhastigheten till 340 m/s.

8 ★ När en musiker slår an en gitarrsträng som är 84,0 cm lång hörs en grundton med frekvensen 220 Hz. Genom att trycka ner strängen på ett annat ställe, så att den blir kortare, kan man få en grundton med högre frekvens. Var ska man trycka för att få en grundton på 262 Hz?

HEMLABORATIONER

Pendeln

Leta upp två likadana vikter (t.ex. två muttrar) och en något mindre vikt. Knyt ett snöre mellan t.ex. två stolar. Knyt fast vikterna i två trådar och fäst trådarna i snöret mellan stolarna. Knyt sedan ett snöre mellan de två trådarna med de tyngre vikterna och fäst den lilla vikten där, så som figuren visar. Variera längden på den ena vertikala tråden och undersök vad som händer när du sätter igång den andra vikten som en pendel. Låt pendelrörelsen vara vinkelrät mot förbindelsesnöret mellan de två vertikala trådarna.



Linjalen

Håll fast en linjal mot ett bord så att hälften av linjalen sticker ut över kanten. För ner linjalens fria ände, släpp den och se hur den vibrerar. Låt sedan en mindre del av linjalen sticka ut över bordskanten och sätt linjalen i vibration. Upprepa försöket för flera olika längder. Hur ändras frekvensen för vibrationen?

Vinglaset

Ta fram ett inte alltför fint vinglas. För ditt finger runt längs kanten på glaset och se om du kan få glaset att ljuda. Det brukar gå lättare med ett fuktat finger. Förklara uppkomsten av ljudet.

Gummibanden

Leta reda på några likadana gummiband av något grövre typ. Om vi antar att Hookes lag är en bra modell för gummibandets elasticitet kan vi hänga en vikt i ett av gummibanden och bestämma dess fjäderkonstant. Knyt sedan ihop 2 likadana, och speciellt lika långa gummiband och bestäm fjäderkonstanten för de två gummibanden tillsammans. Upprepa försöket med fler och fler gummiband. Vilket samband för fjäderkonstanten kommer du fram till?

Häng sedan vikten i två gummiband som inte är hopknutna. Vad blir fjäderkonstanten? Upprepa försöket med fler gummiband. Vilket samband för fjäderkonstanten kommer du nu fram till?

Gungan

Gå till en lekplats där det finns en gunga. Sätt fart på gungan och bestäm gungans svängningstid. Låt sedan någon sätta sig på gungan och bestäm återigen svängningstiden. Upprepa försöket men låt nu personen stå på gungan. Blir det samma svängningstid i alla försöken? Försök att ställa upp en hypotes om orsaken till eventuell likhet eller olikhet. Hur kan hypotesen testas?



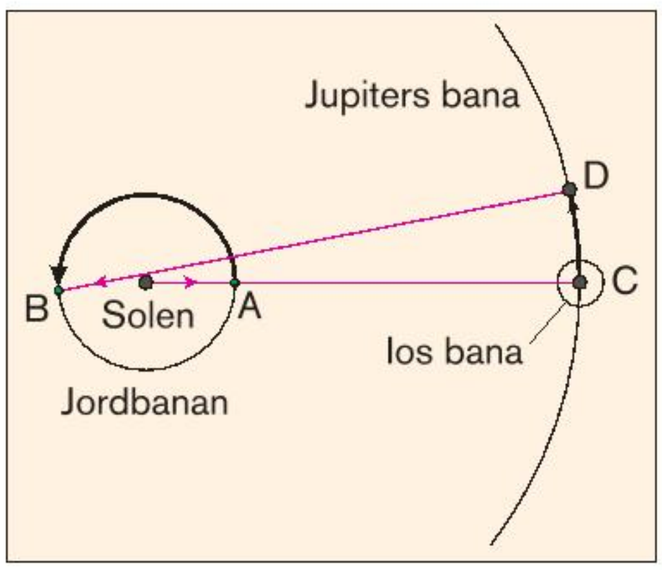
2 Ljusvågor

Undervisningen i kursen ska behandla:

- **Reflektion, böjning, brytning och interferens av ljus**
- **Orientering om elektromagnetiska vågors utbredning**
- **Planering och genomförande av experimentella undersökningar och observationer samt formulering och prövning av hypoteser i samband med dessa**

Reflektion och brytning 57
Böjning och interferens 69
Det elektromagnetiska spektret 82
Uppgifter 86

2.1 Reflektion och brytning



2.1 På sex månader har jorden gått från A till B, medan Jupiter har gått från C till D. Månen Io går i bana runt Jupiter med en konstant period. Med hjälp av perioden kan vi göra en tidtabell. Men det ser ut som om tidtabellen inte stämmer. Orsaken är att ljuset från Io använder ca 20 minuter längre tid från D till B än från C till A. Skillnaden BD – AC är lika med jordbanans diameter.

Vad är ljus, och hur kan vi se? Under forntiden trodde många att ljuset strålade ut från ögonen. Det är en uppfattning som finns kvar i dagligt tal när vi säger att vi kastar en blick på något. Först i modern tid kom man fram till att ljuset kommer till ögat från vår omgivning.

På 1600-talet upptäckte den danske astronomen Ole Römer att ljuset inte har oändligt hög hastighet. Han observerade ljuset från jupitermånen Io och upptäckte att ljuset behövde ca 20 minuter för att färdas en sträcka lika med jordbanans diameter. Se figur 2.1. Ljushastigheten var alltså mycket stor, men inte oändligt stor. När han använde de kända avstånden – kom han fram till ungefär 230 000 km/s.

I dag vet vi att ljushastigheten är cirka 300 000 km/s i vakuum.

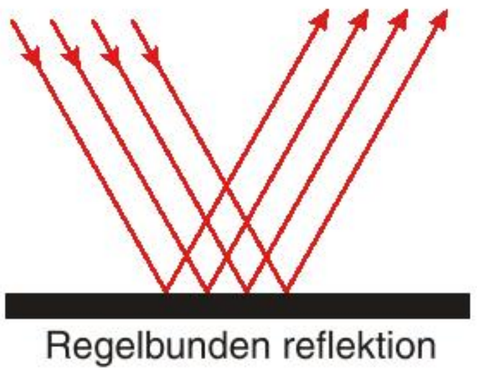
Men vad är egentligen ljus? Frågan har sysselsatt många. Efter mycket experimenterande med reflektion och brytning kom Newton fram till att ljus var partiklar som sändes ut från ljuskällan och rörde sig enligt mekanikens lagar. Andra samtida vetenskapsmän ansåg att ljus var vågor. Newtons teori dominerade under 1700-talet, mycket på grund av Newtons auktoritet. Men efter hand upptäckte man att ljuset har vågegenskaper och under 1800-talet var ljusläran i stort sett en lära om vågor. Detta var en mycket framgångsrik modell som beskrev till exempel ljusets böjning och interferens.

Tidigt på 1900-talet upptäckte fysikerna att varken partikelmodellen eller vågmodellen är tillräckligt bra för att beskriva ljuset. Vissa försök tyder på att ljus har partikelegenskaper, andra försök tyder på att ljus har vågegenskaper.

Vi kan se genom att ljuspartiklar träffar ögat, men vi kan inte se ljuspartiklarna. Vi kan observera att ljus har vågegenskaper, men vi kan inte observera vågorna.

Astro-logiskt

– Vilken himlakropp är viktigast, solen eller månen?
– Månen, så klart. Den lyser ju om natten när det är mörkt, medan solen lyser på dagen när det ändå är ljust.



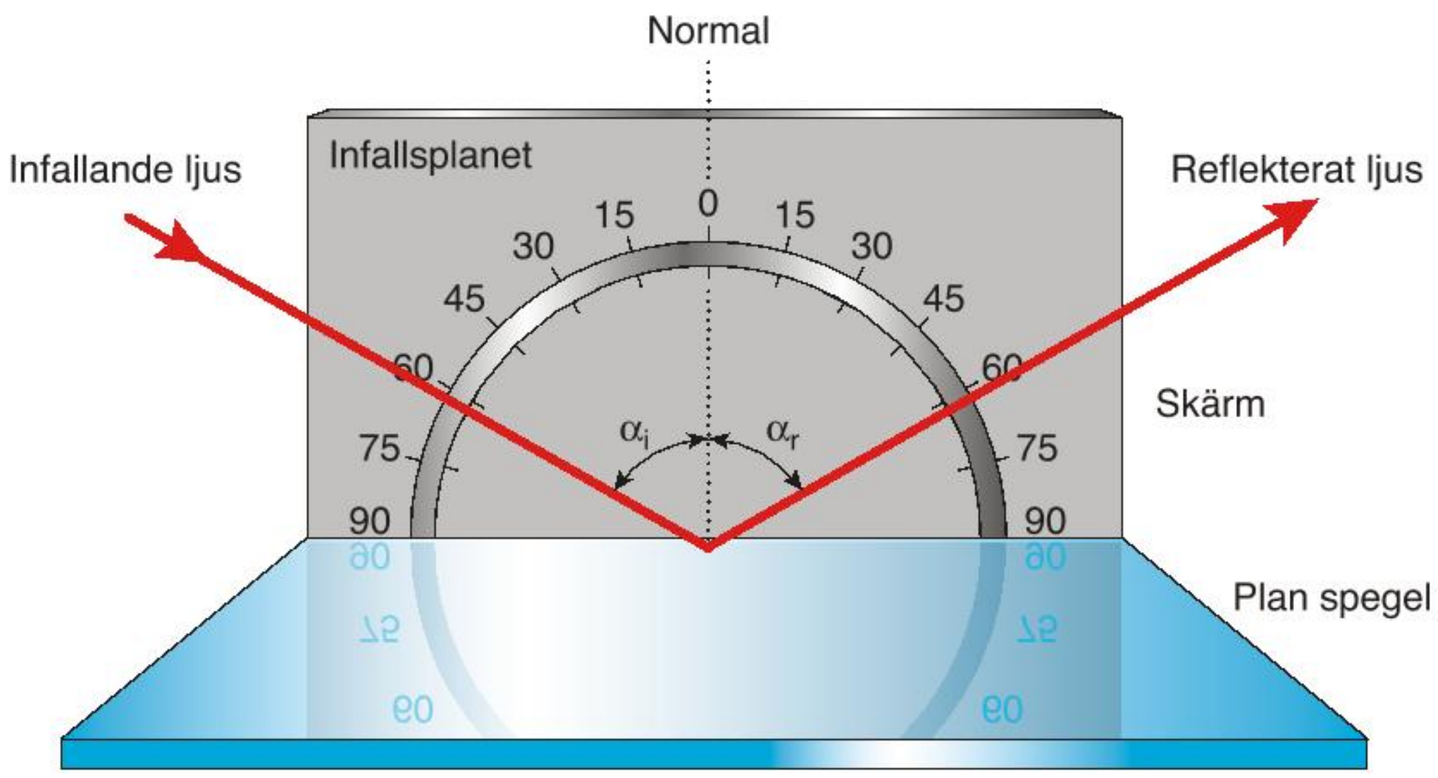
2.2 Regelbunden reflektion och diffus reflektion.

Reflektion

När du tittar ut genom ett fönster kan du se dig själv i fönstret, och någon där ute kan se dig genom fönstret. Vilken egenskap hos glaset är det som gör detta möjligt?

När du ser din egen spegelbild i ett fönster beror det på reflektion. Regelbunden reflektion sker från en slät yta och förvränger inte bilden. Diffus reflektion sker när ljuset reflekteras i alla riktningar från ojämna ytor. Det är det vanligaste. Se figur 2.2. När du till exempel ser en blomma, en fågel eller en person, så är det ett resultat av diffus reflektion – ljusstrålarna reflekteras i många olika riktningar i förhållande till infallsriktningen.

Ljuset från en strålkastare eller en ficklampa breder ut sig i en ljuskägla som blir bredare och bredare. Tänk dig i stället en ljuskägla som är så smal att den ser ut som ett tunt streck. En sådan ljuskägla kallar vi en ljusstråle.



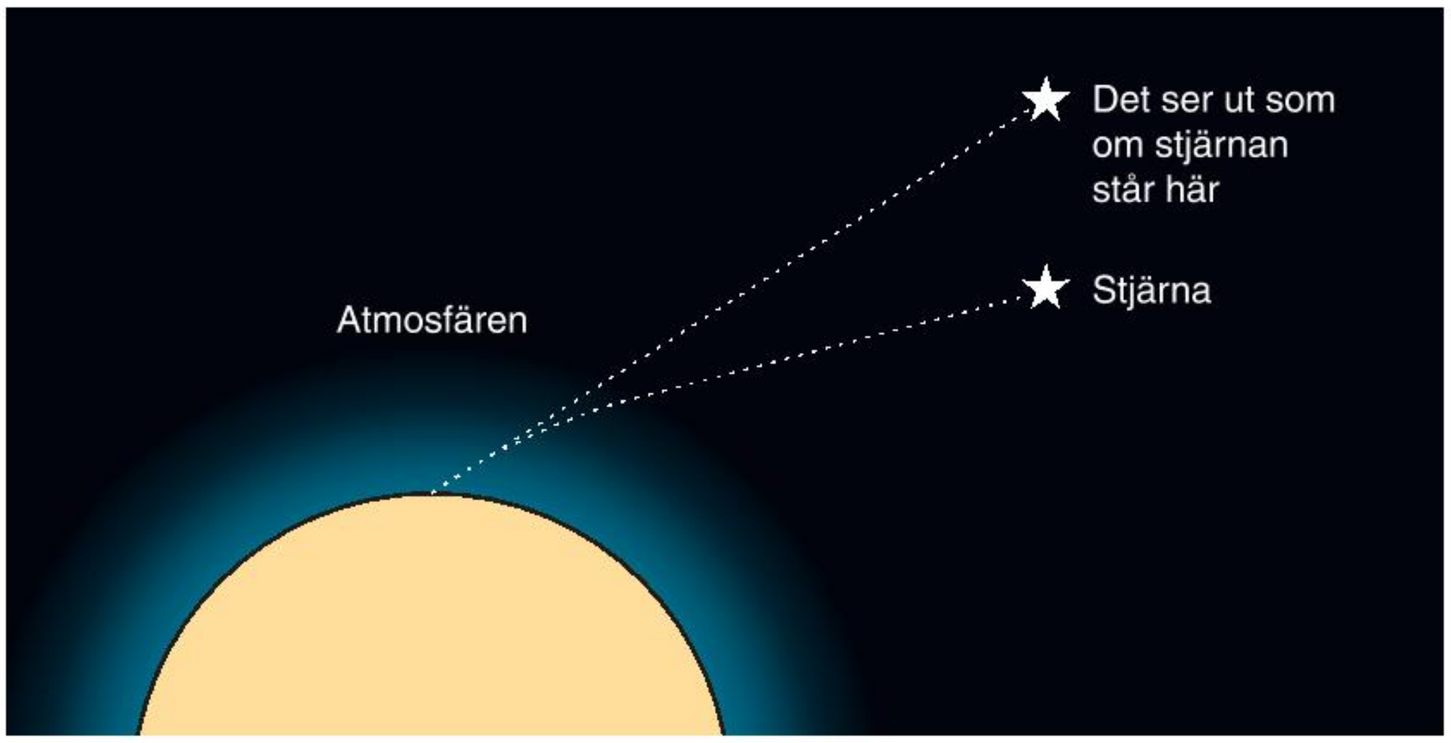
2.3 Försök som visar reflektionslagen.

En ljusstråle träffar en reflekterande yta i en bestämd punkt. Se figur 2.3. Normalen är en linje som bildar en rät vinkel mot spegelytan i denna punkt. Infallsvinkeln α_i är vinkeln mellan normalen och den infallande strålen, och reflektionsvinkeln α_r är vinkeln mellan normalen och den reflekterade strålen. Den reflekterade strålens riktning får vi ur reflektionslagen:

REFLEKTIONSLAGEN

När en ljusstråle reflekteras är reflektionsvinkeln lika stor som infallsvinkeln, $\alpha_r = \alpha_i$.

Brytning

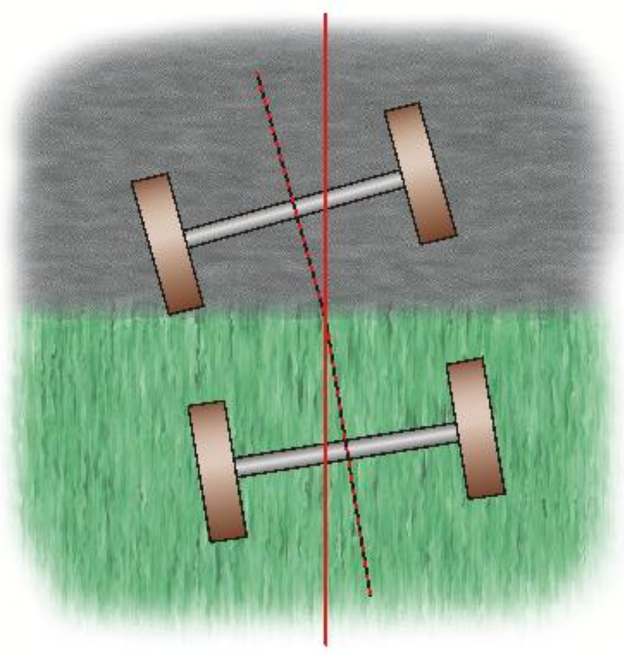


2.4 Brytning av ljus genom atmosfären. Solen och stjärnorna verkar stå högre på himlen än de gör i verkligheten. Ljusbrytningen i figuren är starkt överdriven.

När ljus går från ett medium till ett annat, ändrar det vanligtvis riktning. Vi säger att ljuset *bryts*. Se figur 2.4. Ljusbrytning har också varit känd ända sedan forntiden. Grekerna och romarna tillverkade bränglas genom att fylla en glaskula med vatten. De visste även att ljuset från stjärnorna bryts när det passerar jordatmosfären, och att brytningen ändrar den position en stjärna har på himlen. Det tycks som om stjärnan står lite högre på himlen än vad den gör i verkligheten. Kunskap om ljusbrytning är nödvändig när vi ska tillverka kikare, mikroskop och glasögon. Så varför bryts egentligen ljus?

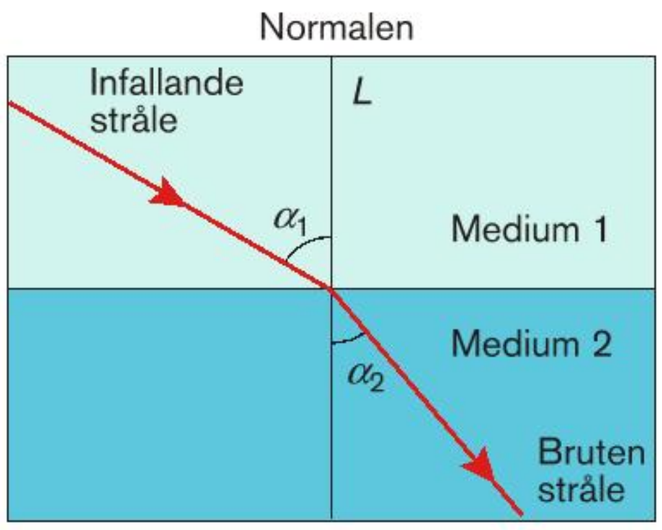
Vi har tidigare sagt att ljushastigheten är ungefär 300 000 km/s i vakuum. Vakuum betyder i praktiken en väldigt låg täthet av atomer. Atomer fungerar ungefär som små antenner som fångar upp och återutsänder ljuset. Det är det som fördröjer ljuset när det inte råder vakuum. När ljuset ska gå genom till exempel luft, glas eller vatten blir därför ljusets medelhastighet lägre än i vakuum.

Låt oss ta till en liknelse för att förklara varför en ljusstråle bryts bara för att hastigheten blir lägre:



2.5 "Farkosten" svänger.

Föreställ dig ett par hjul från en leksaksbil som rullar nedför en asfaltbelagd gång in på en gräsmatta. Se figur 2.5. Den streckade linjen visar i vilken riktning hjulen rör sig. Eftersom hjulen rullar trögare på gräset kommer hjulens hastighet att minska. Det vänstra hjulet i figuren kommer att sakta in först eftersom det först når gräset. Då det högra hjulet snurrar fortare kommer hela farkosten att svänga. Detta motsvarar att ljusstrålen bryts, se figur 2.6. Nu kanske du tänker att det bara gäller om hjulen kommer in snett mot gräset och då har du tänkt alldeles rätt! Ljus som kommer in längs normalen bryts inte!



2.6 En ljusstråle bryts i gränsytan mellan två medier. Infallsvinkeln är α_1, och brytningsvinkeln är α_2. I detta fall är α_2 mindre än α_1 och vi säger att strålen bryts mot normalen.

Nu återstår frågan om hur mycket ljusstrålen kommer att brytas. Idén som ligger bakom följande resonemang kallas Fermats princip.

FERMATS PRINCIP

Fermats princip innebär att ljuset följer den väg mellan två punkter som tar kortast tid.

Lägg märke till att Fermats princip inte ger någon förklaring till varför ljuset väljer den väg som tar kortast tid och inte heller hur ljuset bär sig åt för att avgöra vilken väg som tar kortast tid.

Brytningsindex för ett medium är förhållandet mellan ljushastigheten i vakuum och ljushastigheten i mediet.

Medium	**Brytningsindex *n***
Luft	1,0003
Vatten	1,33
Ögat	1,38
Glas	1,5
Rubin	1,76
Diamant	2,4

BRYTNINGSINDEX

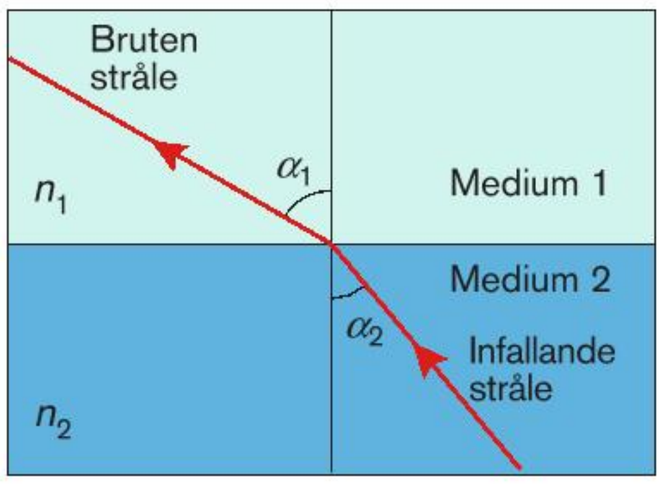
$$\text{brytningsindex} = \frac{\text{ljusets hastighet i vakuum}}{\text{ljusets hastighet i ett medium}} \quad \text{eller} \quad n = \frac{c}{v}$$

Sambandet mellan infallsvinkel och brytningsvinkel för ljus som passerar från ett medium till ett annat medium kallar vi för *brytningslagen*. Titta igen på figur 2.6. Ljusstrålen bryts i gränsytan mellan de två medierna. Normalen är L. Infallsvinkeln är α_1. Brytningsvinkeln α_2 är vinkeln mellan den brutna strålen och normalen. I figuren är brytningsvinkeln mindre än infallsvinkeln. Då säger vi att ljuset bryts mot normalen. När brytningsvinkeln är större än infallsvinkeln säger vi att ljuset bryts från normalen. Om vi använder beteckningarna från figur 2.6 gäller följande samband, som vi kallar brytningslagen för ljus.

BRYTNINGSLAGEN FÖR LJUS

När en ljusstråle bryts vid övergången mellan två medier gäller

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$$



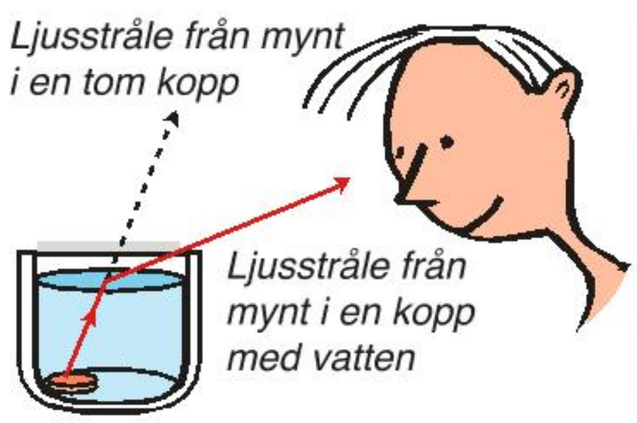
2.7 En stråle som går ut från medium 2 med infallsvinkeln α_2, bryts bort från normalen med en vinkel α_1. Den omvända strålen går samma väg.

I den här formen är brytningslagen lätt att minnas och lätt att använda. Vinkeln mellan ljusstrålen och normalen är *minst* i det medium som har *störst* brytningsindex.

Brytningslagen gäller både när ljuset går från medium 1 till medium 2, och när det går från medium 2 till medium 1. Den omvända ljusstrålen tar samma väg. Se figur 2.7.

EXEMPEL 1 **Partytrick – försök att se myntet utan att flytta huvudet eller koppen!**

En tom kopp med ett mynt på botten placeras framför dig. Koppen står så långt in på bordet att du inte kan se dess botten. Hur kan du från den vinkeln ordna så att du ser myntet utan att flytta dig själv eller koppen. Spegel är naturligtvis fusk.



2.8 Du tittar ner i en tom kopp så att du inte kan se myntet på botten. Om du fyller koppen med vatten så kan du se myntet.

Lösningen visas i figur 2.8. Orsaken är att ljusstrålen bryts när den lämnar vattnet. Gör försöket själv för att övertyga dig om att det stämmer. Utmana mamma eller pappa!

EXEMPEL 2 **Från plast till vatten**

En ljusstråle går från en viss sorts plast till vatten. Infallsvinkeln i plasten är $\alpha_1 = 45{,}0°$. Och brytningsvinkeln i vattnet är $\alpha_2 = 35{,}0°$. Brytningsindex för vatten är $n_1 = 1{,}33$. Beräkna brytningsindex n_2 för plasten.

Lösning: Låt oss använda brytningslagen,

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$$

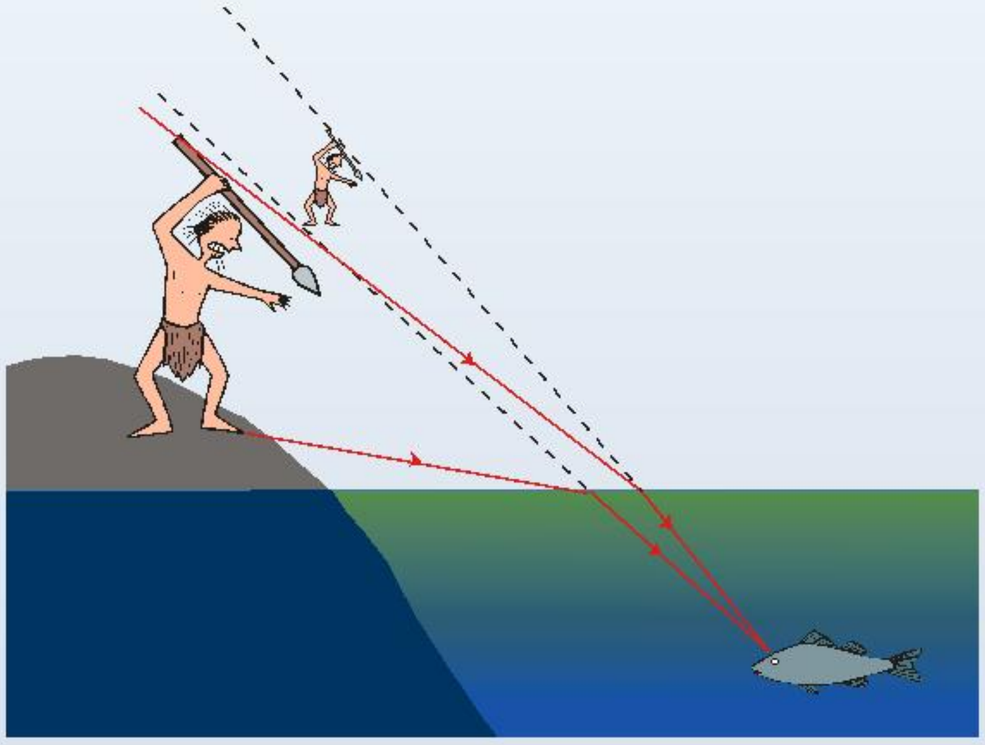
vilket ger $n_1 = \dfrac{n_2 \cdot \sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}$ när du löser ut n_1.

Detta ger $n_1 = 1{,}08$. Brytningsindex för den här plasten är således 1,08.

EXEMPEL 3 **En fiskehistoria**

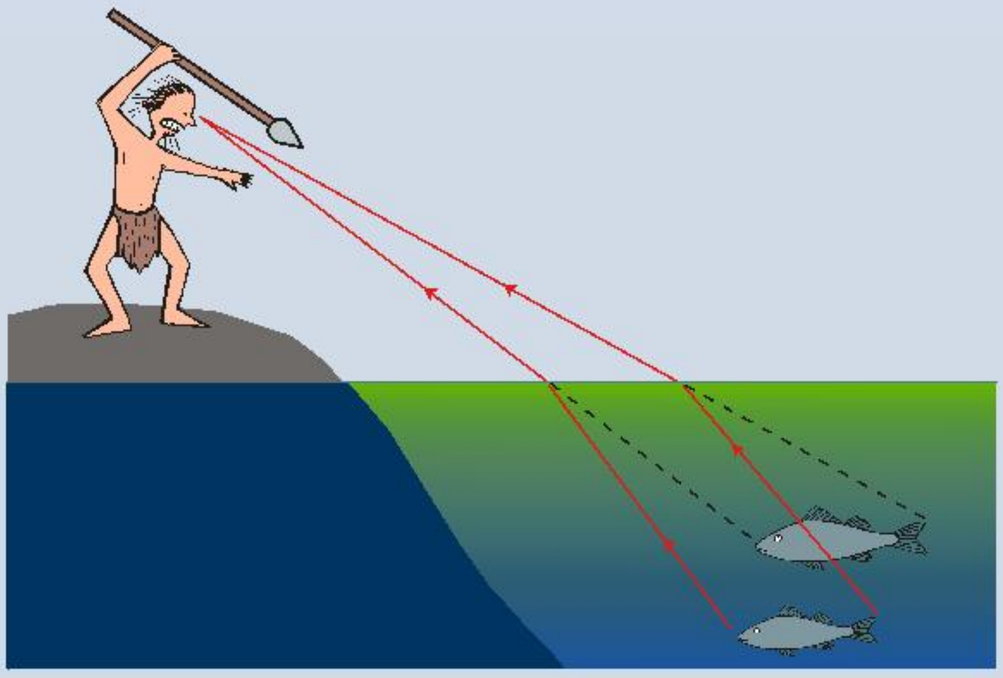
Har du fiskat någon gång? Då har du kanske undrat över om fisken kan se dig, och hur världen ovanför vattnet ser ut i fiskperspektiv.

En jägare står och fiskar. Vattnet är stilla, och vi ska titta på situationen ur både fiskens och jägarens perspektiv.



2.9 Jägaren sedd ur fiskens perspektiv.

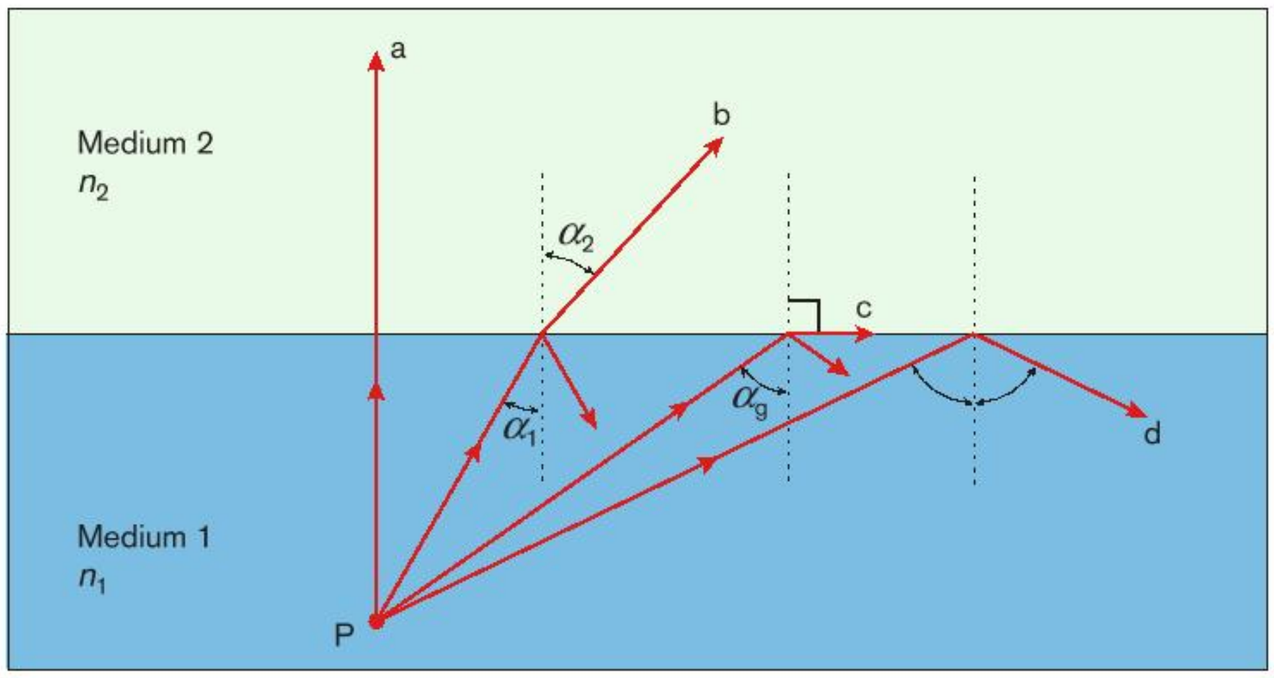
Figur 2.9 visar situationen ur fiskens perspektiv. Vi har streckat den riktning som mannen verkar vara i. En ljusstråle från jägarens fötter bryts mer är en ljusstråle från huvudet. Resultatet blir att jägaren ser ut att stå högre upp än vad han egentligen gör.



2.10 Fisken sedd ur jägarens perspektiv.

Figur 2.10 visar situationen ur jägarens perspektiv. Vi har streckat den riktning som fisken ser ut att vara i. Det verkar som om fisken står längre ut från land än den egentligen gör. Som synes i figurerna ser jägaren en förstorad bild av fisken, medan fisken ser en förminskad bild av jägaren.

Totalreflektion och fiberoptik



2.11 Brytning och totalreflektion. Medium 1 har större brytningsindex än medium 2, $n_1 > n_2$. Från punkten P har det ritats fyra strålar a, b, c och d med olika infallsvinklar. Stråle a bryts inte. Stråle b blir dels bruten och dels reflekterad. Stråle c har en infallsvinkel som är lika med gränsvinkeln α_g. Stråle d totalreflekteras.

När ljuset går från ett medium 1 till ett medium 2 som har lägre brytningsindex, bryts ljuset bort från normalen. Det betyder att brytningsvinkeln α_2 är större än infallsvinkeln α_1. Se figur 2.11. Den största brytningsvinkeln ljuset kan få, är $\alpha_2 = 90°$. Det motsvarar en infallsvinkel α_g som vi kallar *gränsvinkeln*. Gränsvinkeln bestäms alltså av

$$n_1 \cdot \sin \alpha_g = n_2 \cdot \sin 90°$$

Eftersom $\sin 90° = 1$, får vi

$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1}$$

Om infallsvinkeln i medium 1 är *större* än gränsvinkeln, kan inget ljus brytas. Allt ljus reflekteras. Det blir *totalreflektion*.

EXEMPEL 4 **Totalreflektion**

Du har säkert själv upplevt totalreflektion någon gång. Om du sitter i en båt eller ligger på en brygga, så kan du se både växter och eventuella fiskar som befinner sig under vattenytan. Men om du däremot tittar på vattenytan ett stycke bort så ser du bara vattenytan som en spegel. Titta på figur 2.11 igen och låt oss beräkna hur stor gränsvinkeln är då ljuset går från vatten till luft. Formeln ovan ger uttrycket

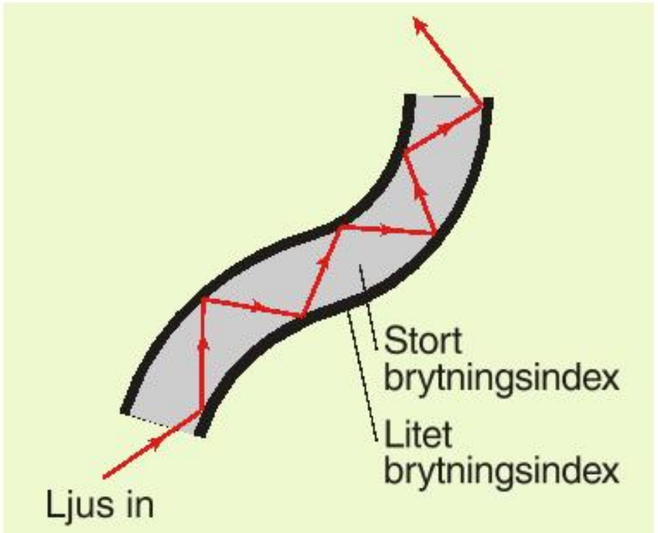
$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,00}{1,33}$$

som ger gränsvinkeln $\alpha_g = 48,8°$. Undervattensljus som träffar vattenytan med en infallsvinkel som är större än 48,8°, totalreflekteras alltså.

TOTALREFLEKTION

En ljusstråle kan totalreflekteras när den träffar gränsytan till ett medium som har mindre brytningsindex. Infallsvinkeln måste vara större än gränsvinkeln α_g.

Totalreflektion används till att skicka ljus genom tunna fibrer av glas eller plast. Tekniken kallas *fiberoptik*. Figur 2.12 visar hur en ljusstråle totalreflekteras och byter riktning när den går genom en fiber. På så sätt följer ljusstrålen fibern, även om fibern inte är rak.

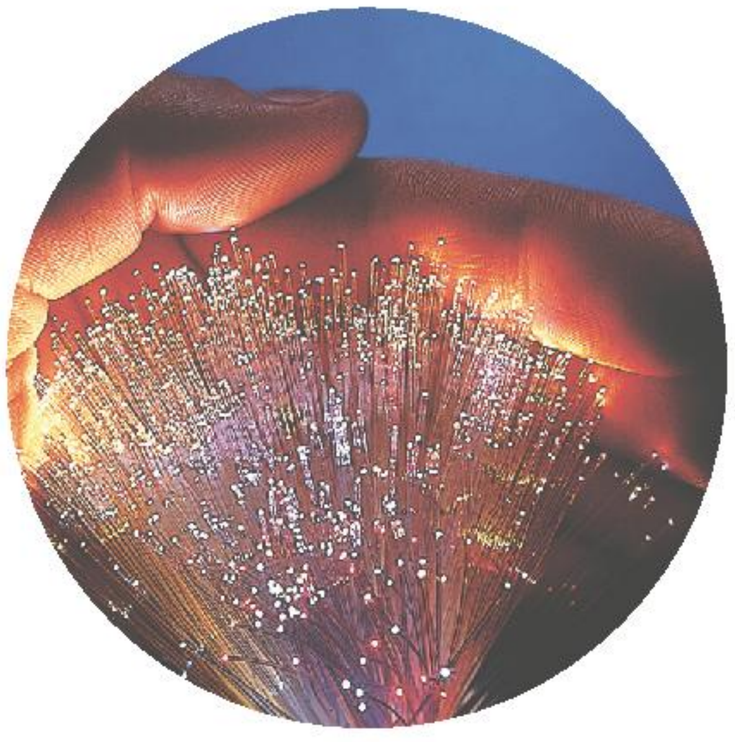


2.12 En optisk fiber av plast är inkapslad i en annan typ av plast som har lägre brytningsindex.

För att ljussignalen inte ska försvagas, är själva fibern inkapslad i en plast som har lägre brytningsindex än fibern. Totalreflektionen sker därmed i det inre av fibern. Intensiv forskning ger oss ständigt renare fibrer. För att vi ska kunna sända signaler över stora avstånd genom optiska kablar, måste signalerna förstärkas med jämna mellanrum. I dag har fibrerna blivit så bra att ljuset kan färdas 100 km innan signalen måste förstärkas! Det måste vara en sällsynt klar dag för att vi ska kunna se så långt i luft.

Som jämförelse måste elektriska signaler i kopparledningar förstärkas för varje 1,5 km. Det kostar. En annan fördel med optiska kablar är att ljusvågorna inte påverkar varandra. Tiotusentals samtal kan överföras samtidigt i en fiber så tunn som ett människohår!

Fiberoptik används inte bara till kommunikation, utan också inom medicinen. Fiberoptik kan till exempel användas för att se eller fotografera detaljer inne i kroppen utan att göra några kirurgiska ingrepp. Ett fiberknippe förs in i kroppen, till exempel genom halsen eller en blodåder. En del av fiberknippet leder ljus fram till det aktuella stället, den andra delen leder reflekterat ljus tillbaka. I änden av fiberknippet finns ett system av små linser.

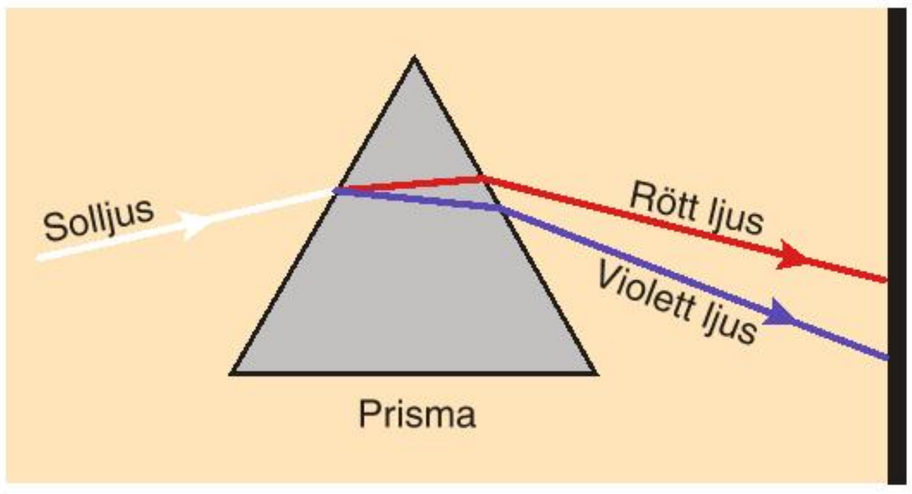


2.13 Ett knippe optiska fibrer.

Spektrum av synligt ljus

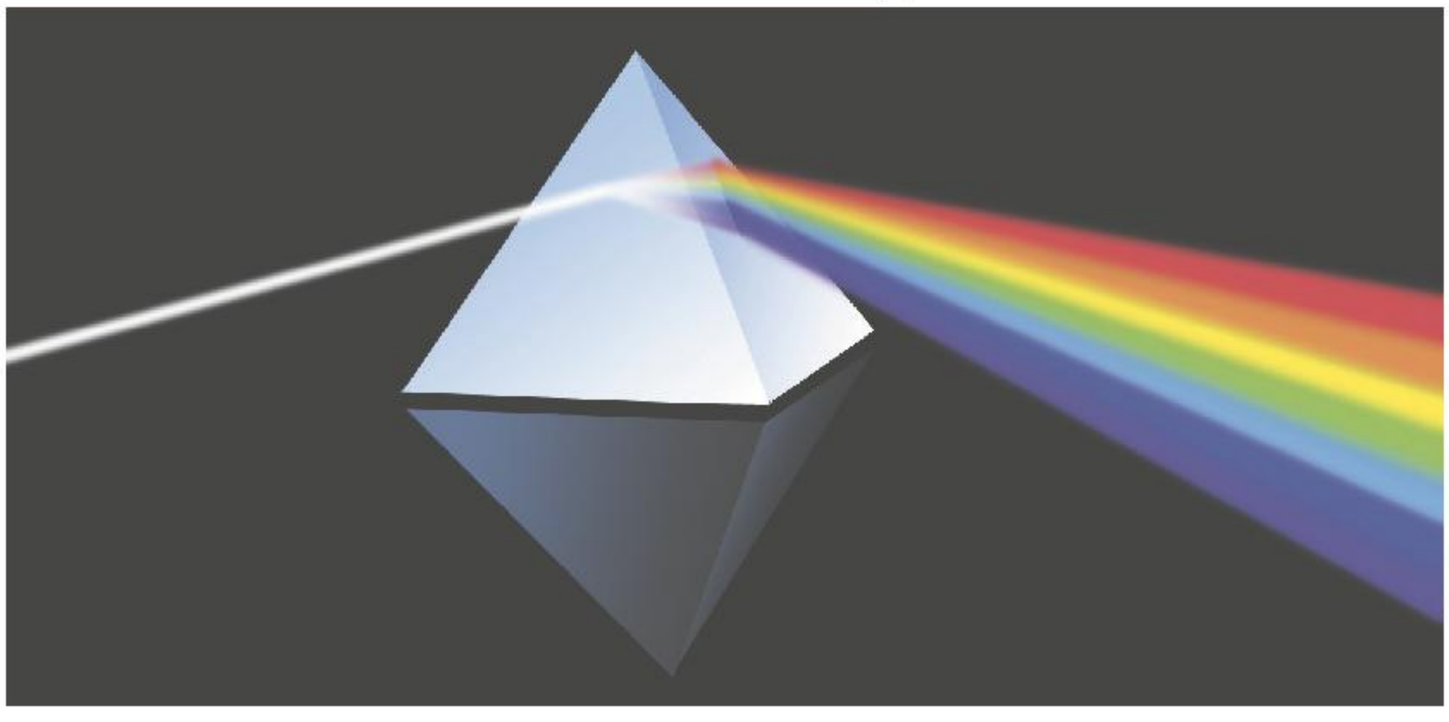
Har du hört om skatten vid regnbågens ände? Det är den skatten vi söker, men aldrig finner. Regnbågen flyttar sig när vi rör oss mot den, precis som våra framtidsdrömmar. Hur uppkommer egentligen regnbågens färger?

Newton var också intresserad av det. Hans första vetenskapliga arbete (1672) beskriver olika experiment med ljus. Ett av de mer berömda experimenten var när han lät solstrålar passera genom ett glasprisma med triangulärt tvärsnitt. Se figur 2.14 och 2.15.



2.14 Solljus kommer in mot ett glasprisma. Ljuset bryts och delas upp i olika färger. Rött ljus bryts minst, och violett ljus bryts mest. De andra färgerna ligger mellan rött och violett.

2.15



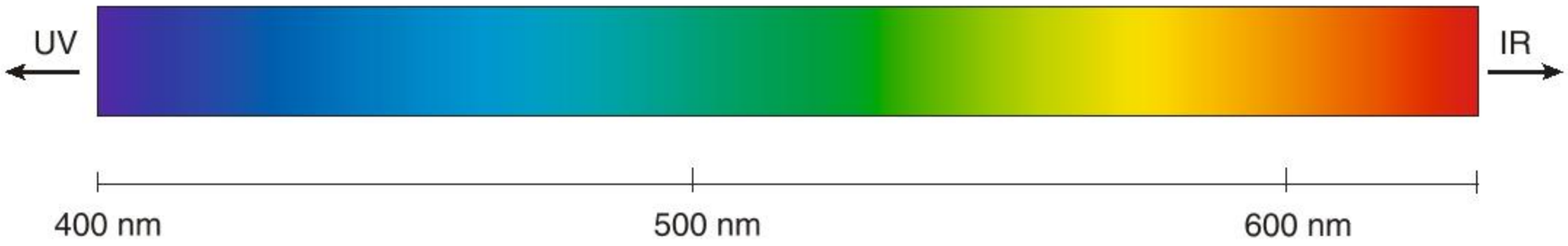
Strålarna bröts i prismat och träffade därefter en vit skärm där de skapade en färgbild. Färgbilden visade regnbågens alla färger, från rött till violett. Han kallade färgbilden för ett *spektrum*. Lägg märke till att ljuset bryts två gånger på sin väg genom prismat. En gång när ljuset går in i glaset (ljuset bryts mot normalen) och nästa gång när ljuset kommer ut från glaset (ljuset bryts från normalen). Resultatet blir i båda fallen att ljuset bryts nedåt i förhållande till den inkommande strålen vilket förstärker spektaluppdelningen. Men Newton kunde inte veta om ljuset hade ”färgats” på sin väg genom glaset eller om det *bestod* av alla regnbågens färger? Han lyckades samla spektralfärgerna igen och resultatet blev – vitt ljus! Alltså: Vitt ljus består av alla spektrets färger.

Vi brukar säga att spektret innehåller sju huvudfärger, nämligen *rött, orange, gult, grönt, blått, indigo* och *violett*.

Begynnelsebokstäverna ROGGBIV ger oss en minnesregel.

SYNLIGT LJUS

Synligt ljus i vakuum har våglängder från 400 nm för violett ljus till 700 nm för rött ljus.



Som du säkert vet är det våglängden på ljuset som bestämmer dess färg. Ljus som har kortare våglängd än 400 nm kallas för ultraviolett ljus (UV-ljus) och ljus med längre våglängd än 700 nm kallas för infrarött ljus (IR-ljus).

Vad beror det då på att ljuset delas upp i olika färger?

Eftersom de olika färgerna bryts olika mycket så måste de olika våglängderna ha olika brytningsindex. För det synliga ljuset gäller att ju kortare våglängd desto högre brytningsindex. Violett ljus bryts mest och rött ljus bryts minst. Själva fenomenet kallas ljusets *dispersion* eller färgspridning.

I dagsljus ser du att föremålen runt dig har olika färger trots att de belyses av samma vita solljus. Vad kan det bero på? För att svara på det måste vi komma ihåg att det är reflekterat ljus från föremålen som träffar våra ögon. Vissa ytor reflekterar *alla* färger. Då ser de vita ut i vitt ljus. Andra ytor absorberar ljus av vissa våglängder och reflekterar andra. De absorberade färgerna saknas i det reflekterade ljuset. Den färgblandning som återstår uppfattar hjärnan som en bestämd färg. Om vi lade till de absorberade våglängderna igen skulle vi återfå det vita ljuset. En yta som absorberar *alla* färger blir *svart*.

SVART OCH VITT

En svart yta absorberar ljus med alla våglängder.

En vit yta reflekterar ljus med alla våglängder.

De flesta färger som du ser i naturen är blandningsfärger. Gröna plantor ser gröna ut därför att de absorberar rött och lite blått ljus. Vitt ljus minus rött och lite blått *uppfattar* vi som grönt. Färg är alltså inte en fysikalisk storhet, utan något som uppstår i vår hjärna när den tolkar det ljus som träffar ögonen. Våglängd däremot är en fysikalisk storhet.

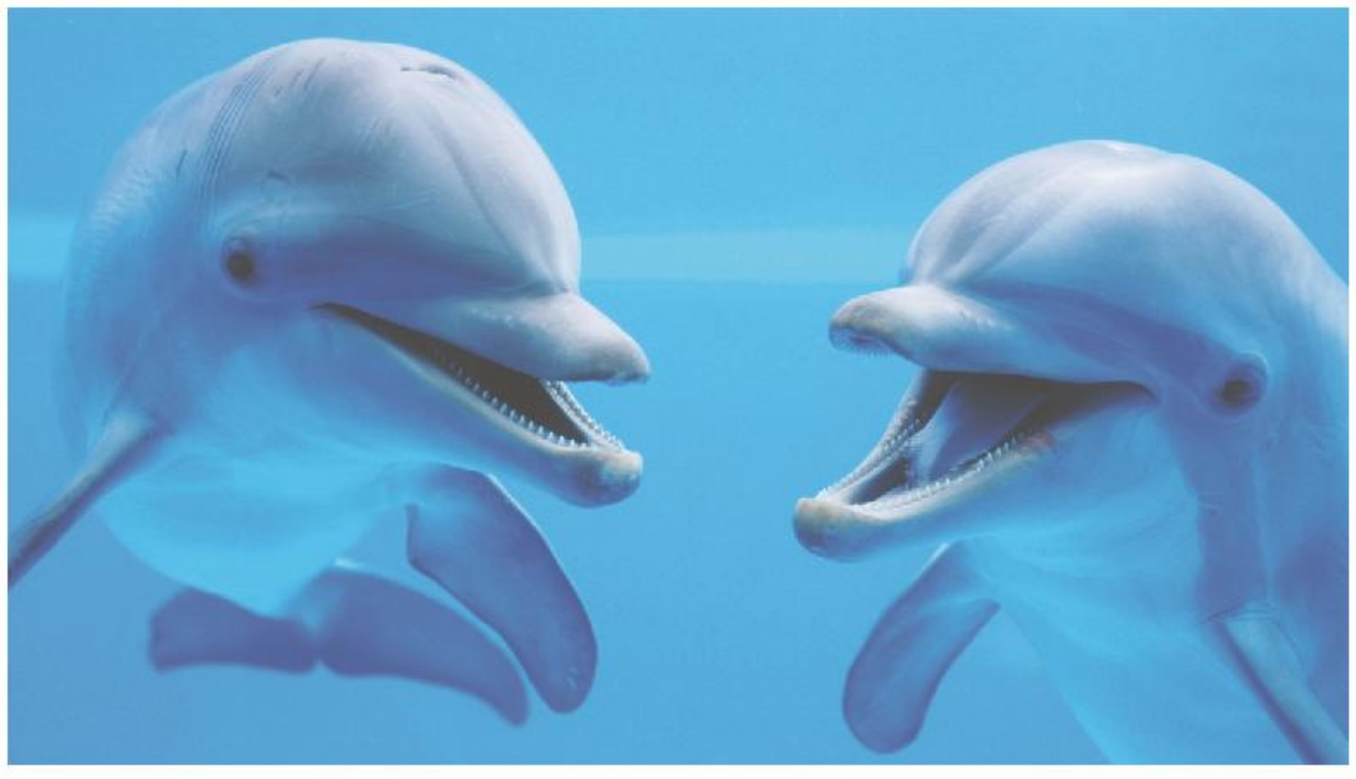
"Akustiskt dagsljus"

Vi avrundar detta avsnitt med ett något ovanligare exempel. En delfin i en forskningsbassäng i USA undersöktes med avseende på sin förmåga att finna föremål genom ekolodning. Den hade förbundna ögon. Genom att ge ifrån sig skarpa klick och lyssna efter eko kunde den bilda sig en uppfattning om hur det såg ut i bassängen och finna föremål i den. På delfinens huvud och runtom i bassängen fanns mikrofoner som detekterade klicken.

Efter en försöksserie kastade en av skötarna ned en levande fisk i bassängen. Utan ett ljud simmade delfinen rakt på den flyende fisken och slukade den! Försöket upprepades med samma resultat. Hur klarade delfinen detta – utan ett klick och utan att kunna se?

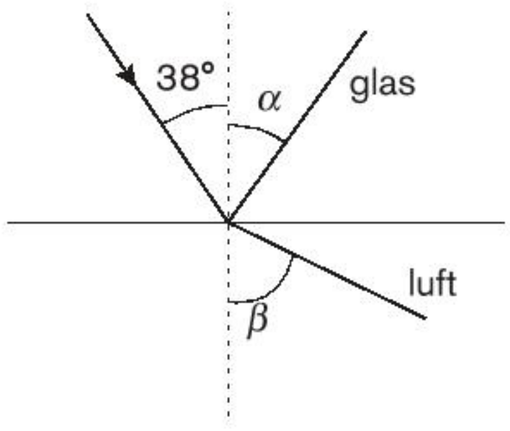
Man tror att delfiner kan se i något som skulle kunna kallas "akustiskt dagsljus". Normalt är bassängen fylld av ljudet av bubblor som spricker eller vågor som skvalpar. En normal havsmiljö har ännu fler sådana ljud. Ljuden "belyser" undervattensmiljön på samma sätt som det vita solljuset belyser vår miljö. Olika fiskar absorberar vissa våglängder mer än andra. Dessa fiskar reflekterar därför med en annan "akustisk färg " än bakgrundsljuden. Det innebär också att de kan "ses " med ett "gott öra".

Ännu har forskarna inte kunnat bekräfta att det här sinnet finns hos delfinerna, men få tvivlar på att de har det.



KONTROLLFRÅGOR

- Vad menas med regelbunden reflektion? Diffus reflektion?
- Är det sant att man inte ser någon spegelbild vid diffus reflektion?
- Vad menas med, infallsvinkel och reflektionsvinkel?
- Vad säger reflektionslagen?
- Vad innebär det att en ljusstråle bryts?
- Vad är orsaken till att en ljusstråle bryts?
- Vad menas med brytningsvinkel?
- Vad säger brytningslagen?
- Vad menas med brytningsindex för ett ämne?
- Är det sant att brytningsindex är större än 1 för alla andra medier än vakuum?
- Hur ser brytningslagen ut?
- Är det sant att en ljusstråle bryts bort från normalen när brytningsindex är störst i det medium som ljusstrålen kommer in i?
- Vad är totalreflektion?
- Vad menas med gränsvinkeln för totalreflektion?
- Vad går fiberoptik ut på?
- Vilken är ordningen på de sju "huvudfärgerna" i ett spektrum?
- Förklara ordet dispersion.
- Varför har föremålen omkring oss olika färger i dagsljus?
- Vad är UV-strålning och vad är IR-strålning?
- Ljushastigheten i en sorts plast är $2{,}40 \cdot 10^8$ m/s. Hur stor är brytningsindex för plasten?
- En ljusstråle går från luft till glas. Infallsvinkeln är 64° och brytningsvinkeln är 32°. Bestäm brytningsindex för glaset.
- En ljusstråle går från glas ($n = 1{,}42$) till luft. Bestäm vinklarna α och β i figuren?



- När infallsvinkeln är större än 39,8° för en stråle som går från glas till luft sker totalreflektion. Beräkna brytningsindex för glaset.

2.2 Böjning och interferens

Du sitter i vardagsrummet och vill lyssna på musik från ljudanläggningen som står på ditt rum. Du kan då enkelt gå in på rummet och justera volymen så att du hör bra även ifrån vardagsrummet. Du kan alltså höra musiken även om du inte kan se ljudanläggningen. Ljudvågorna böjs av i dörröppningen och breder ut sig åt alla håll, men ljusvågorna gör inte det. Du kan inte tända en stark lampa på ditt rum så att det blir ljust i vardagsrummet. Även om lampan ger ett starkt vitt ljus så kommer bara ljuset att gå rakt fram genom dörröppningen.

Om vi ska få ljus att böja av, behöver vi en *smal* spalt och inte en bred dörröppning. Om vi sänder laserljus direkt mot en vit skärm, ser vi en liten ljusfläck på skärmen. Men om vi sätter en smal justerbar spalt mellan lasern och skärmen kommer ljusfläcken att bli bredare än tidigare när spalten blir mycket smal. Detta är svårt att förstå utifrån en partikelmodell för ljus. (Föreställ dig själv hur träffbilden skulle ändras om du sköt med luftgevär genom en springa som blev allt smalare.) Utifrån vågmodellen kan vi förklara att ljusfläcken blir bredare när spalten blir smalare. Vi använder samma förklaring som för avböjning av vattenvågor i avsnitt 1.3.

Interferens med dubbelspalt

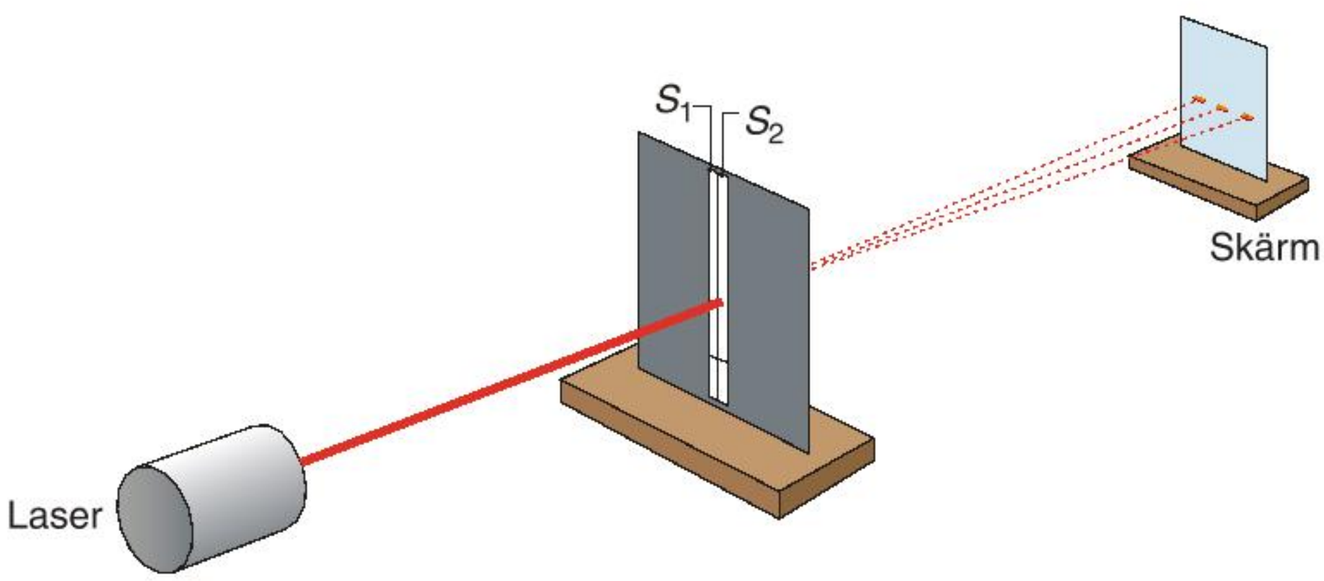
Den engelske fysikern Thomas Young visade år 1807 att ljus kan skapa interferensmönster. Ljus uppför sig på samma sätt som andra vågor. Youngs försök tyder alltså på att ljus har vågegenskaper, men det säger inget om vilken slags vågor det handlar om. Ljud genom luft är ju tryckvågor. Vattenvågor är höjdvariationer på vattenytan. Men vad är det som svänger i ljusvågor?

Som vi har sagt tidigare interfererar två vågor när de samverkar och skapar en enda våg. Då blir utslaget lika med summan av utslagen från de två vågorna var för sig. När vi skickar plana vågor vinkelrätt in mot en vägg med två öppningar, fungerar öppningarna som vågkällor som svänger i takt med samma frekvens. Två sådana vågkällor är *koherenta*.

KOHERENTA VÅGKÄLLOR

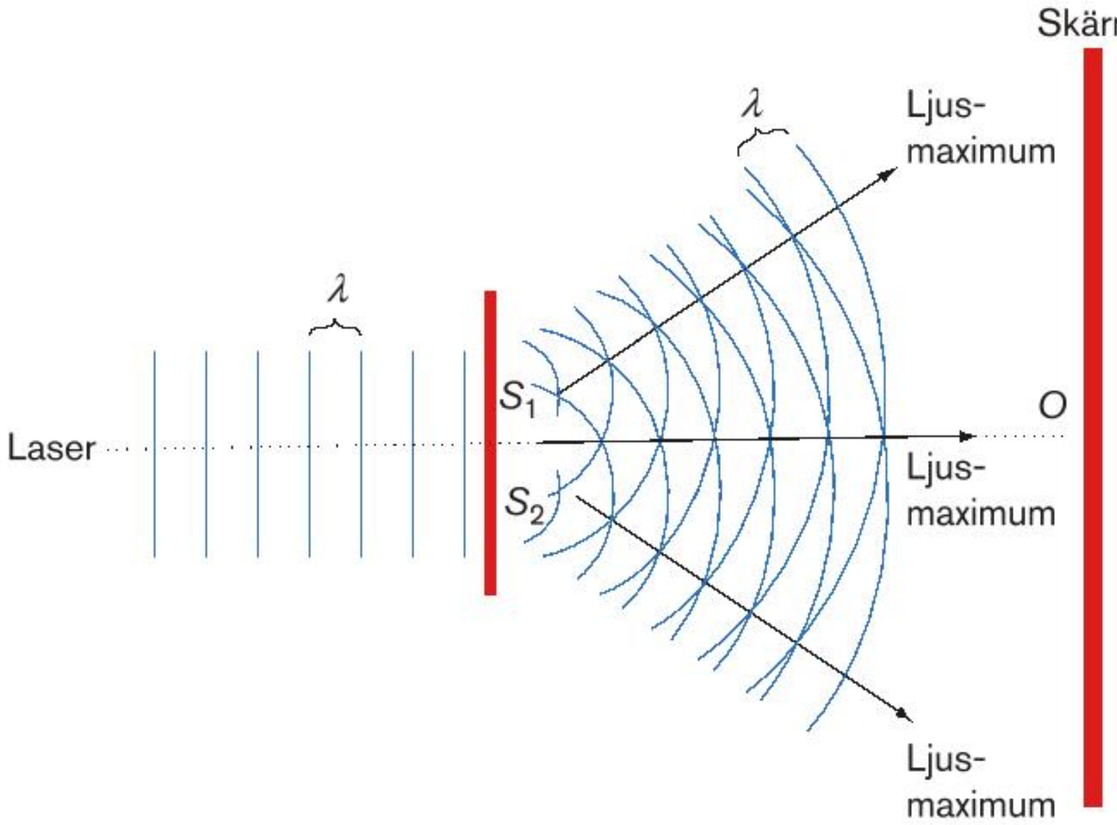
Koherenta vågkällor **svänger i takt med samma frekvens.**

Vanliga glödlampor består av en stor mängd ljuskällor, atomer, som inte är koherenta. De svänger oberoende av varandra, och frekvensen kan variera från atom till atom. För interferensförsök med ljus behöver vi koherenta ljuskällor, och det måste vi ordna på ett speciellt sätt.



2.16 Interferensförsök med laser och dubbelspalt.

I vår version av Youngs försök använder vi laser och får då ett mycket tydligare resultat. Se figur 2.16. De två spalterna S_1 och S_2 träffas samtidigt av samma vågfront från lasern. Ljuset böjs av i spalterna, på så sätt att spalterna S_1 och S_2 fungerar som två koherenta ljuskällor. Se figur 2.17. På skärmen uppstår ett interferensmönster med ljusmaximum runt punkten O. Denna punkt ligger på symmetriaxeln mellan de två spalterna och kallas centralmaximum. Avstånden OS_1 och OS_2 är lika stora, så att vågorna från de två spalterna möts i fas i O. Vågtopp från S_1 möter vågtopp från S_2, och motsvarande för vågdalarna. Maximal vågamplitud uppstår i O.



2.17 Skiss av ett interferensförsök med två spalter. Ljuskällan är en laser.Vågor från lasern träffar spalterna S_1 och S_2. Avståndet S_1S_2 är starkt överdrivet. Från spalterna utgår nya vågor som bildar ett interferensmönster på skärmen till höger. Där vågorna från de två spalterna möts i fas, blir det ljusmaximum. Tre riktningar med ljusmaximum visas i figuren.

Nu ska vi bestämma var på skärmen det uppstår ljusmaximum och var det blir mörkt på skärmen. Se figur 2.18. Linjen AO är symmetriaxel, och P är en punkt på skärmen. Differensen $\Delta s = S_1P - S_2P$ är vägskillnaden för ljusvågorna från de två spalterna. Om Δs är lika med noll eller ett helt antal våglängder, så kommer vågorna från de två spalterna att vara i fas och ge konstruktiv interferens när de når punkten P.

I en punkt P uppstår ljusmaximum när vägskillnaden Δs är lika med $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \ldots$, alltså när

$$\Delta s = n\lambda \text{ där } n \geq 0.$$

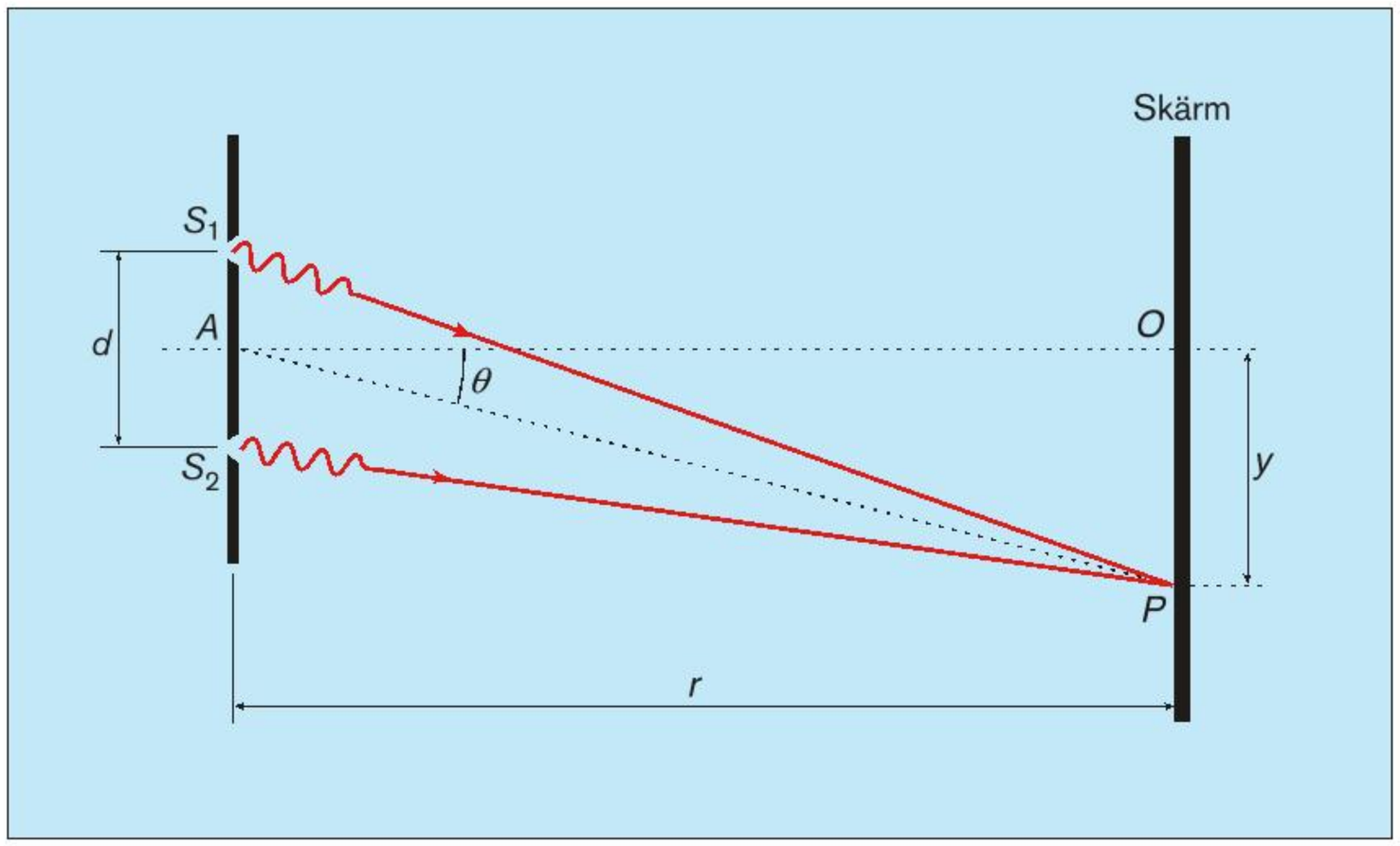
Talen n kallar vi ordningstalen för *ljusmaximat*.

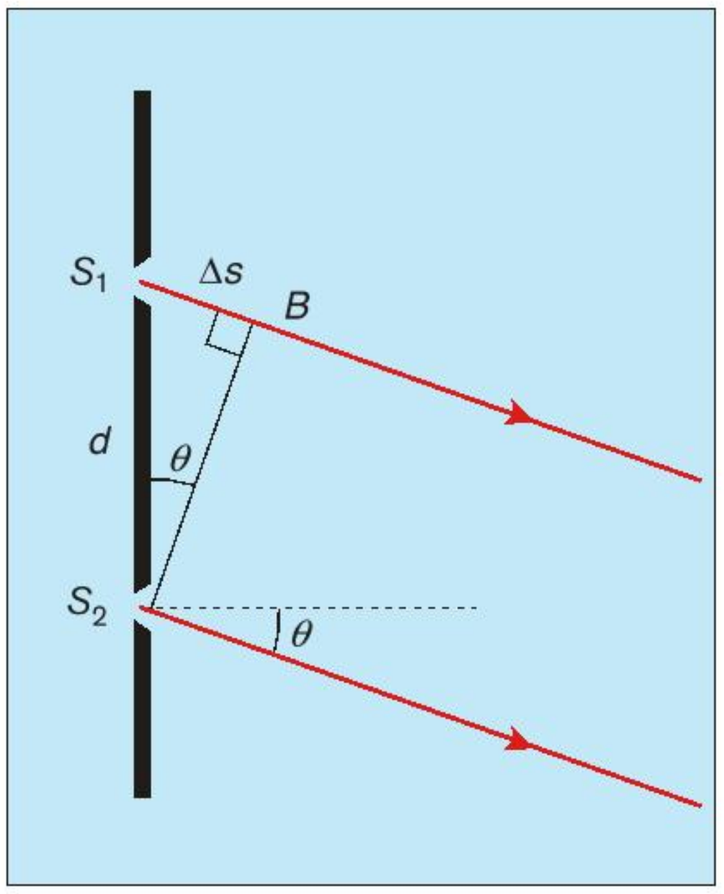
Mitt i interferensmönstret ligger ett ljusmaximum som motsvarar $n = 0$. Där är $\Delta s = 0$. Detta centrala ljusmaximum kallar vi *nollte* ordningens maximum. På ömse sidor om det ligger första ordningens ljusmaxima. Där är $\Delta s = 1\lambda$. På båda sidorna om första ordningens ljusmaxima ligger andra ordningens maxima där $\Delta s = 2\lambda$, och så vidare.

Om vägskillnaden Δs är en halv våglängd eller ett udda tal multiplicerat med halva våglängden, så kommer de två vågorna att ha motsatt fas och ge destruktiv interferens när de träffar P. Vågorna släcker ut varandra, och det blir mörkt i P. I punkten P blir det mörkt när vägskillnaden är lika med $1/2\lambda, 3/2\lambda, 5/2\lambda, 7/2\lambda, \ldots$, alltså när

$$\Delta s = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \text{ där } n \geq 1$$

2.18 Från S_1 och S_2 är ljusstrålar till en punkt P på skärmen ritade. Vi kan tänka oss att ljusstrålarna är radier i två cirkelformade vågor som utgår från S_1 och S_2. Spaltavståndet d är starkt överdrivet i figuren. I verkligheten är $r >> d$, så att de två strålarna S_1P och S_2P är praktiskt taget parallella.





Hur kan vi beräkna vägskillnaden Δs? Vi tittar lite närmare på figur 2.18. Avståndet r från spalterna är mycket stort i förhållande till avståndet d mellan spalterna. Det betyder att strålarna S_1P och S_2P är praktiskt taget parallella. Därför är triangeln S_2BS_1 i praktiken rätvinklig. Vidare är $\angle BS_2S_1 = \angle OAP = \theta$. Vi får att sin $\theta = \Delta s/d$, som ger vägskillnaden $\Delta s = d \sin \theta$. Vi har alltså kommit fram till följande resultat:

LJUSMAXIMUM OCH LJUSMINIMUM MED DUBBELSPALT

Villkoret för ljusmaximum ges av

$$d \sin \theta = n\lambda \qquad \text{där } n \geq 0$$

Villkoret för ljusminimum (mörker) är

$$d \sin \theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{där } n \geq 1$$

Vinkeln θ är riktningsvinkeln till ljusmaximum eller ljusminimum med ordningstalet n, och d är spaltavståndet.

EXEMPEL 5 **Våglängden för laserljus**

Vid ett försök med laserljus är spaltavståndet lika med $1{,}20 \cdot 10^{-5}$ m, och riktningsvinkeln för femte ordningens ljusmaximum mäts till 15,3°. Beräkna våglängden för laserljuset.

Lösning: För femte ordningens ljusmaximum gäller: $d \sin \theta = 5\lambda$.

Det ger våglängden

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{5} = \frac{1{,}20 \cdot 10^{-5} \cdot \sin 15{,}3°}{5}\,\text{m} = 6{,}33 \cdot 10^{-7}\,\text{m}$$

Vilket innebär att laserljusets våglängd är 633 nm.

Optiskt gitter

Har du någon gång stått under ett gatljus en mörk regnig kväll och sett mot gatljuset genom paraplyet? Då har du kanske sett ett rutnät av lysande punkter, som om det fanns en massa gatljus där uppe. Paraplyduken fungerar som ett *optiskt gitter* i två dimensioner. Här ska vi göra det lite enklare och studera ett optiskt gitter i en dimension.

Vi skickar laserljus mot ett optiskt gitter som har *många* spalter med samma inbördes avstånd. Avståndet d mellan två grannspalter kallar vi *gitterkonstanten*. Se figur 2.19. På en vit skärm bakom gittret ser vi en rad ljusfläckar som är mycket skarpare än de ljusmaxima vi fick med dubbelspalten.

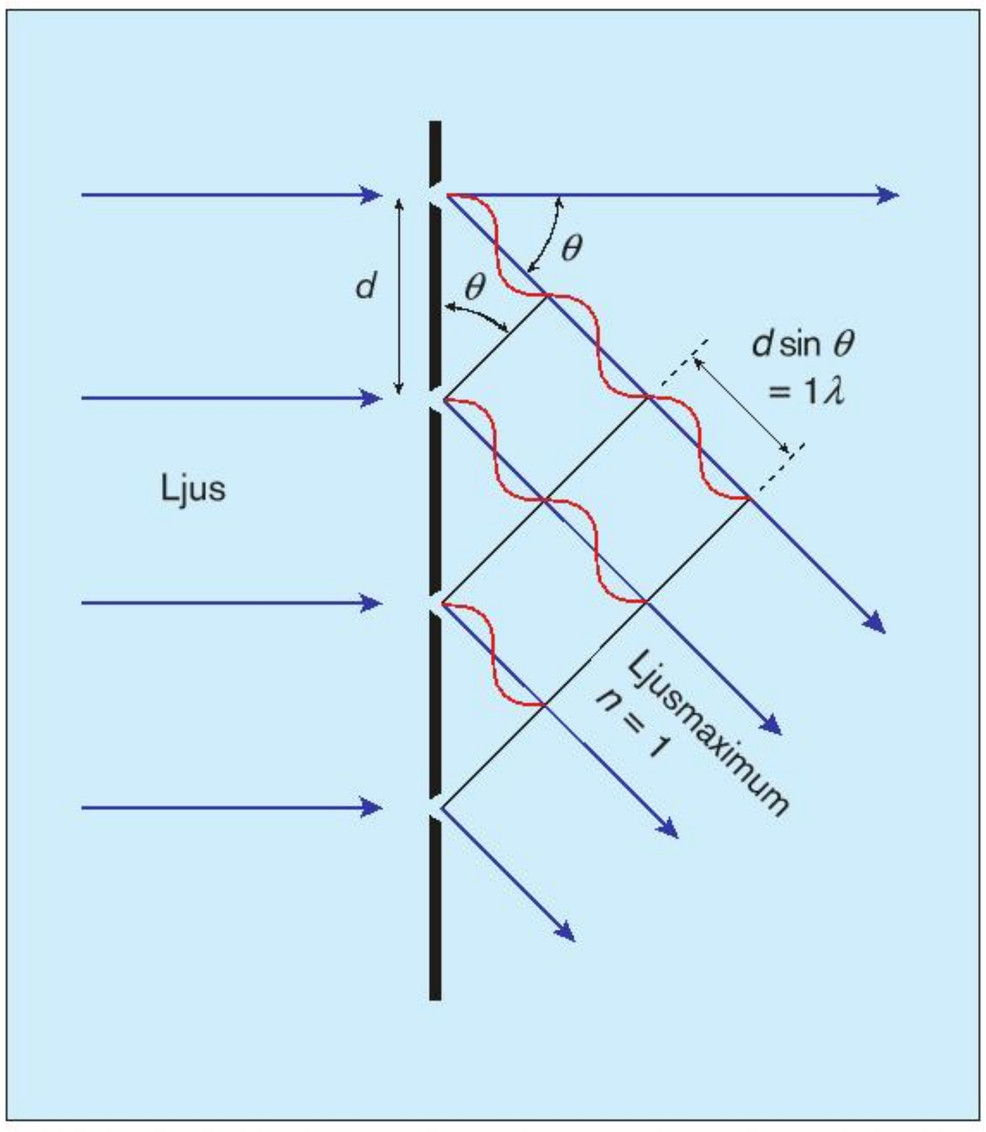
I vågmodellen för ljus förklarar vi försöket på samma sätt som vi förklarade dubbelspaltförsöket. Plana vågor träffar alla gitteröppningarna samtidigt. Öppningarna fungerar som koherenta vågkällor. Vågorna interfererar bakom gittret och ger skarpa ljusmaxima i bestämda riktningar. Ljusmaxima uppstår i riktningar där vägskillnaden Δs för ljus från två grannspalter är lika med noll eller ett helt antal våglängder, 0, λ, 2λ, 3λ, …. Vägskillnaden Δs för ljus från två grannspalter är lika med $d \sin \theta$. Alltså:

LJUSMAXIMUM MED GITTER

Ett optiskt gitter ger ljusmaxima i de riktningar som ges av

$$d \sin \theta = n\lambda \text{ där } n \geq 0$$

Talet n är ordningstalet, och d är gitterkonstanten.



2.19 Interferens med gitter. Teckningen visar en riktning för ett ljusmaximum. Här är vägskillnaden för ljus från två grannspalter $\Delta s = \lambda$. Då ser vi ljusmaximum med $n = 1$.

EXEMPEL 6 **Elevuppgift – Laserljus genom gitter**

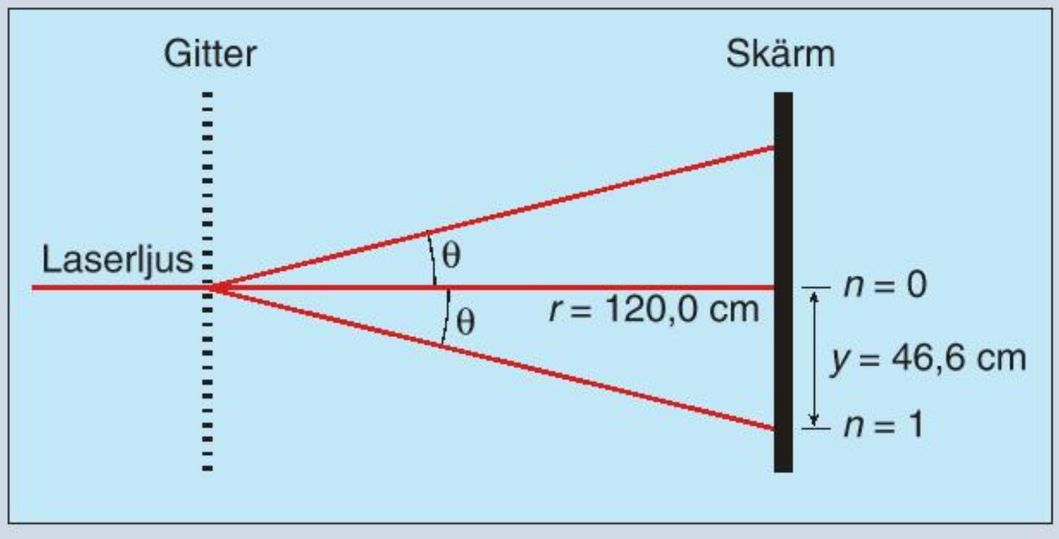
Experimentell uppgift: Vi fick något av läraren som såg ut som en gammaldags diabild, men filmen var helt genomskinlig och färglös. Vår uppgift var att undersöka diabilden och ta reda på så mycket vi kunde om den.

Observationer: När vi tittade mot ett ljus genom diabilden såg vi ljuset där det skulle vara med sina naturliga färger. Men i vissa vinklar på båda sidor om det såg vi flera kopior som hade spektralfärger, speciellt i kanterna.



Hypotes: Vår hypotes var att det vi såg berodde på interferens. I så fall skulle diabilden vara ett gitter. Om vår hypotes var riktig så skulle vi kunna se det genom att utföra en variant av Youngs försök. Vi bestämde oss för att sända laserljus genom diabilden. Då borde vi kunna se ett interferensmönster på en skärm som vi placerade på avståndet 120,0 cm från diabilden. Enligt texten på utsidan av lasern var våglängden 641 nm, dvs det vi uppfattar som rött ljus.

Resultat: På skärmen kunde vi se tre röda prickar. En i mitten omgiven av en på varje sida. Vi tolkade det som interferens. Om diabilden verkligen var ett gitter så skulle vi nu kunna ta reda på den så kallade gitterkonstanten, det vill säga avståndet mellan två närliggande spalter.



Undersökning av gitter med hjälp av laserljus.

Vi utgick från interferensrelationen:

$$d \cdot \sin\theta = n\lambda$$

Vi mätte avståndet mellan 1:a ordningens maximum på båda sidor om centralmaximum. För att räkna ut vinkeln θ dividerade vi avståndet med 2. Det visade sig vara 46,6 cm.

$$\tan\theta = \frac{y}{r} = \frac{46,6}{120,0} \Rightarrow \theta = 21,2°$$

$$d \cdot \sin\theta = n\lambda \Rightarrow d = \frac{641 \cdot 10^{-9}\,\text{m}}{\sin 21,2°} = 1,77 \cdot 10^{-6}\ \text{m}$$

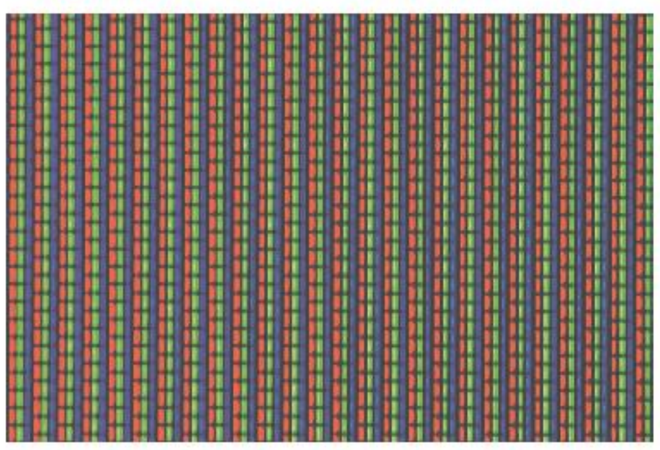
Gitterkonstanten d var alltså $1,77 \cdot 10^{-6}$ m. Det innebär $1/1,77 \cdot 10^{-6} = 5,65 \cdot 10^{5}$ spalter, det vill säga 565 spalter per mm. Inte konstigt att de inte syns!

Till sist försökte vi förstå varför ljusets spektralfärger hamnade i den ordning de gjorde, med violett innerst och rött ytterst. Men det var ju naturligt. Sambandet $d \cdot \sin\theta = n\lambda$ säger ju att om våglängden blir mindre samtidigt som d är konstant så måste ju vinkeln bli mindre.

Om vi skickar ljus med olika färger mot ett optiskt gitter, visar det sig att de olika färgerna ger ljusmaxima i olika riktningar.

Av formeln $d \sin\theta = n\lambda$ ser vi att vinkeln θ ökar när våglängden λ ökar och d är konstant. Av $\lambda_{\text{rött}} > \lambda_{\text{violett}}$ får vi då att $\theta_{\text{rött}} > \theta_{\text{violett}}$.



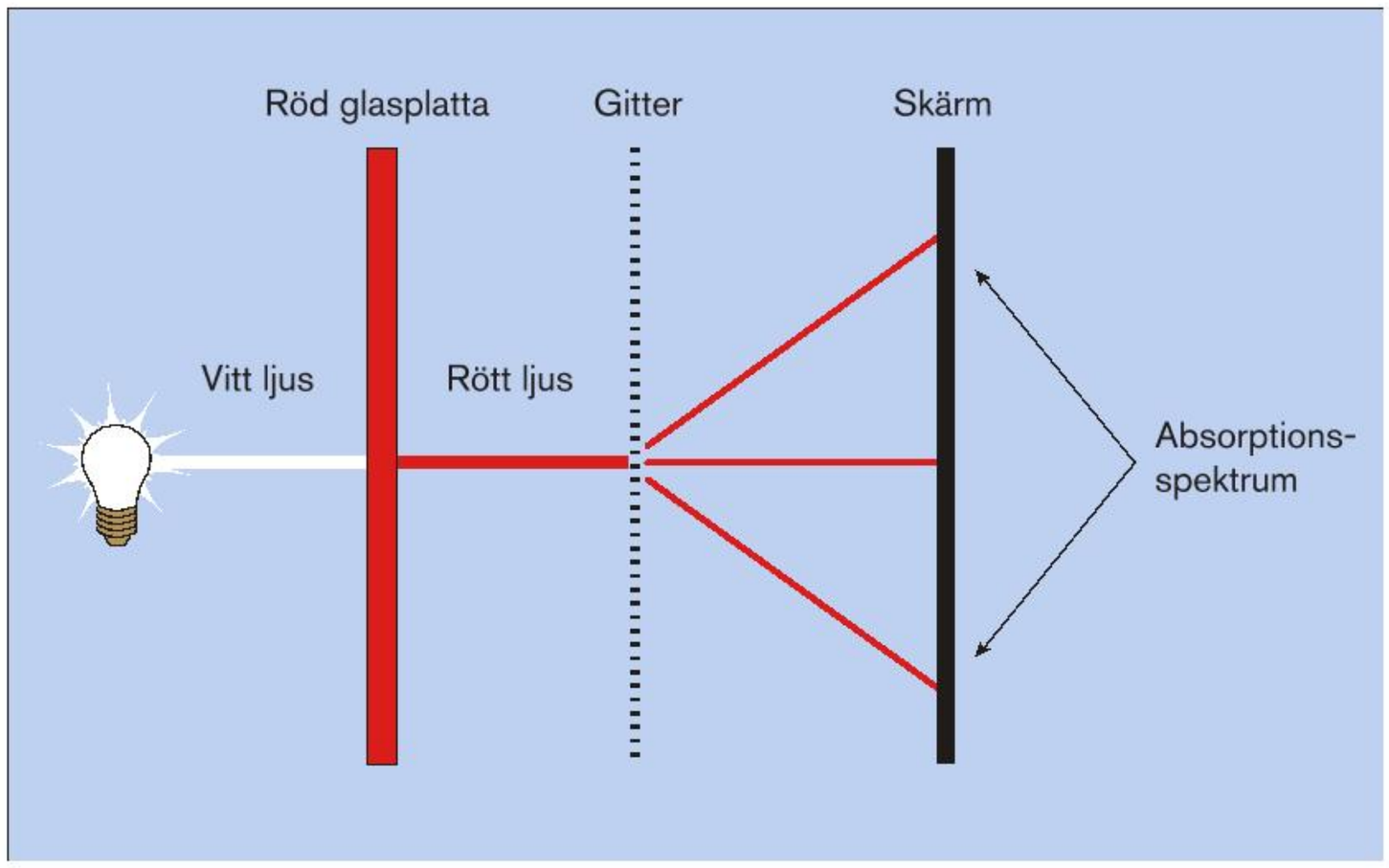


För det mesta är även de ”rena” färgerna vi ser sammansatta av flera olika frekvenser. Som du säkert vet kan man ”lura” vårt färgseende till att se vilken som helst av hundratals olika färgnyanser med hjälp av bara tre grundfärger. Det beror på att näthinnan har tre typer av färgkänsliga tappar som detekterar intensiteten i tre överlappande frekvensområden. Eftersom en tillsynes ren färg således kan bestå av en eller flera olika frekvenser måste vi använda oss av gitter eller prisma snarare än vårt färgseende om vi ska bestämma ljusets frekvens.

Med utgångspunkt i vårt färgseende kan vi utveckla färgbildsteknologi, alltså teknologi som vill ge oss en rik färgupplevelse med hjälp av tre grundfärger, till exempel rött, grönt och blått (RGB). Här ser du en ”färgbild”. På lite avstånd ser vi inte att den är uppbyggd av små enfärgade ”pixlar” som bara består av en av de tre grundfärgerna.

Blandningsfärger

Ljus som passerar ett ämne, blir mer eller mindre försvagat. Vi säger att ljuset *absorberas*. Luft, fönsterglas och vatten absorberar lite ljus, de är genomskinliga. *Genomskinliga* ämnen släpper igenom synligt ljus av alla frekvenser.

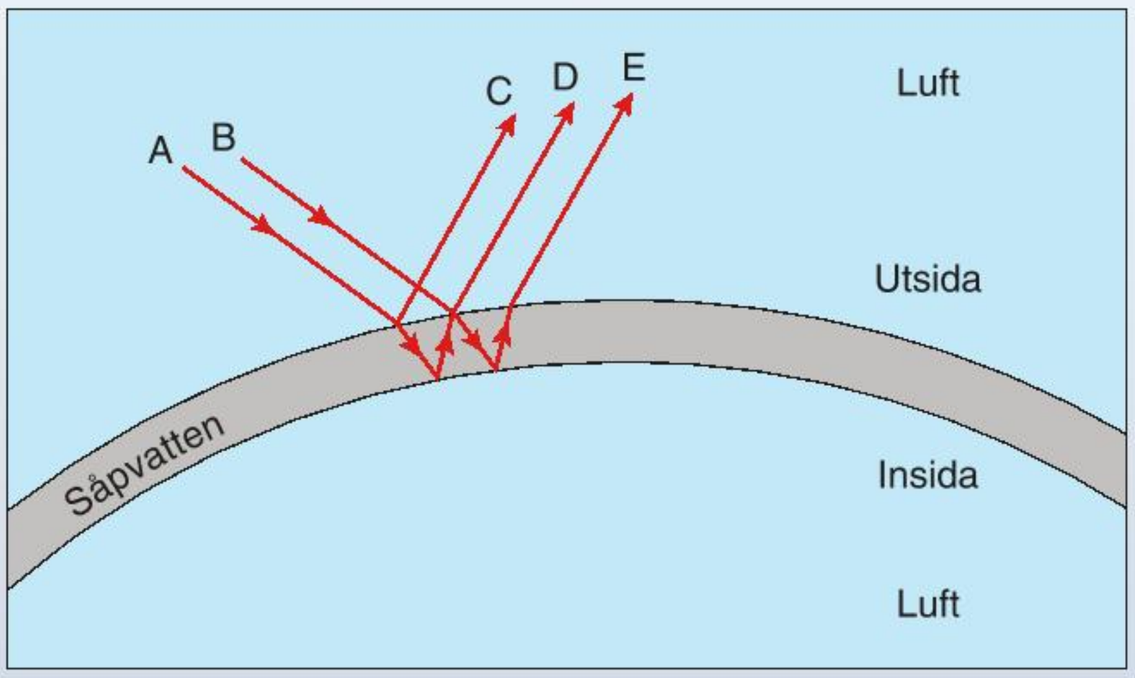


2.20 Absorption av ljus.

Färgat glas släpper bara igenom ljus med bestämda frekvenser. Det kan vi visa med ett enkelt försök. Se figur 2.20. Vi skickar först vitt ljus genom ett gitter och vidare mot en vit skärm. Då ser vi ett kontinuerligt spektrum på skärmen. Sedan placerar vi i tur och ordning olika färgade glasskivor framför gittret. Glasskivorna absorberar delar av ljuset. Spektret av det ljus som slipper igenom kallar vi ett *absorptionsspektrum*. Rött rubinglas släpper igenom rött ljus, resten absorberas. Blått koboltglas släpper igenom blått ljus och lite gult ljus, resten absorberas. Lägg märke till att språkbruket är lite underligt här. Ett absorptionsspektrum är ett spektrum av ljus som har *gått igenom* ett ämne. Det betyder att absorptionsspektret visar det ljus som inte absorberas av ämnet!

EXEMPEL 7 **Färger i disken**

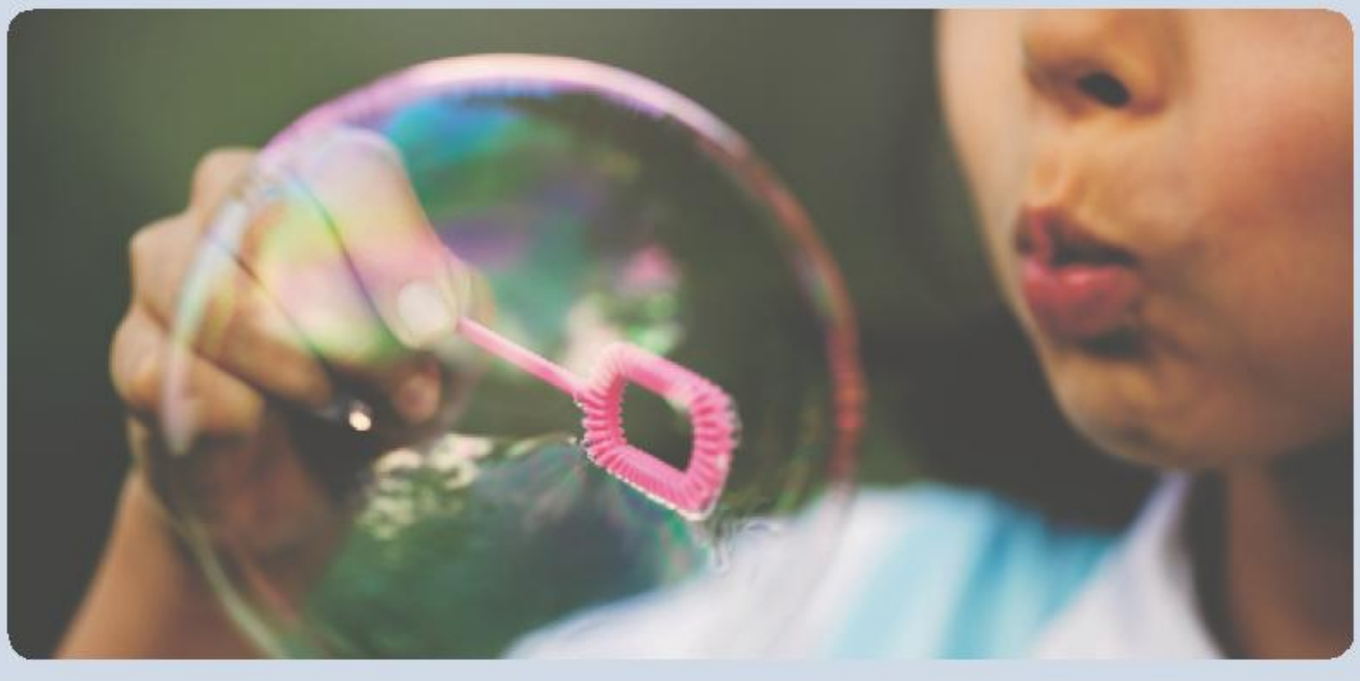
När du har diskat i starkt vitt ljus, har du säkert sett det vackra färgspelet på såpbubblor. Samma typ av färgspel kan du se på en vattenyta med oljespill. Vad beror färgspelet på? Vad har såpbubblor och olja på vatten gemensamt?



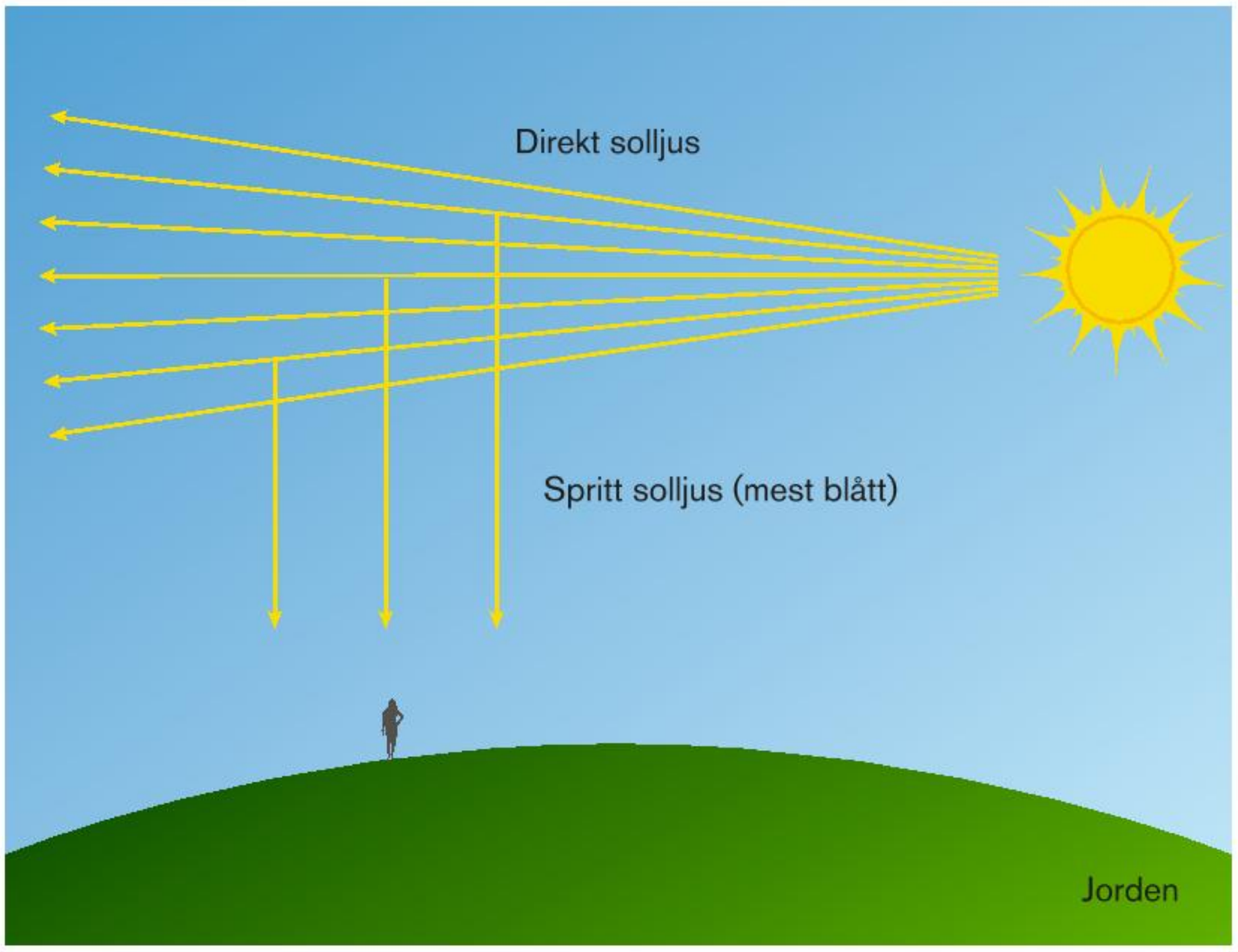
2.21 Väggen i en såpbubbla är en tunn hinna av såpvatten. Vitt ljus träffar såpbubblan och reflekteras delvis från den yttre ytan och delvis från den inre. Vi har bara tagit med två strålar, A och B. Stråle A ger en yttre reflex C och en inre reflex D. Stråle B ger en yttre reflex D och en inre reflex E. Den utgående strålen D består av en yttre reflex av B och en inre reflex av A. Dessa två reflexer ger interferens.

Lösning: Låt oss först titta på såpbubblan. Se figur 2.21. En såpbubbla är en sfärisk luftmängd som omges av en hinna av såpvatten. När det vita ljuset träffar såpbubblan, reflekteras en del från den yttre ytan. En del av ljuset bryts in i hinnan, reflekteras från den inre ytan och går ut igen. Dessa två reflexer interfererar med varandra. Om reflexen från den inre ytan och reflexen från den yttre ytan interfererar destruktivt för en *viss* spektralfärg, försvagas *denna* färg. Och när vitt ljus mister en färg, blir det reflekterade ljuset färgat. Vilken färg som försvagas beror på från vilket håll bubblan ses och såpbubblans tjocklek.

Ett tunt oljelager på vatten består också av en yttre och en inre yta. Interferens mellan reflekterat ljus från den yttre och den inre ytan skapar färgerna.



Vitt ljus kan bilda färger på andra sätt också. Ett exempel är den blå himlen en molnfri dag. Du vet att vågor inte sprids av föremål som är mycket mindre än våglängden. Blått ljus har mindre våglängd än rött ljus. Den blå delen av solljuset har våglängder som i högre grad än den röda delen "märker" att atmosfären består av små luftmolekyler. På sin väg genom atmosfären sprids den blå delen av solljuset i högre grad av luftmolekylerna och sänds ut i alla riktningar. Se figur 2.22. För oss på marken ser det ut som om detta blåa ljus kommer från alla delar av himlen. Därför ser himlen blå ut.



2.22 De kortare våglängderna i solljuset sprids i atmosfären. Det ser ut som om det spridda ljuset kommer från alla håll.

Läsplattor

I Sverige använder vi mer än 50 kg papper per person och år, bara till dagstidningar. Både miljömässigt och kostnadsmässigt vore det därför värdefullt om vi kunde ersätta mycket av vårt läsande på papper med annan teknik, inte minst eftersom vi ofta bara läser tidningen en liten stund för att sedan kasta bort den.

Våra bärbara datorer är alldeles för otympliga och obekväma att läsa på i längden och läsytan på våra smartphones är obekvämt liten. Därför har den elektroniska läsplattan, e-papperet, fått stor uppmärksamhet under de senaste åren.

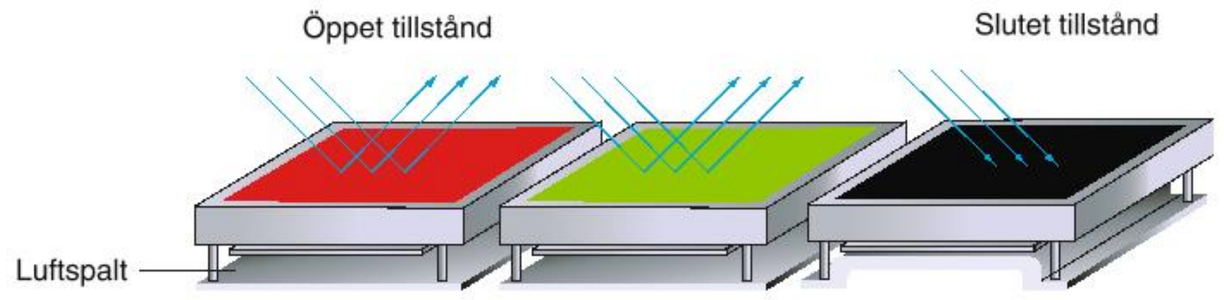
En läkare använder en läsplatta för att läsa en patients journal.



Skärmen som går att bära med sig, är bekväm att läsa på, rymmer tusentals tidningar och böcker och drar extremt lite ström. Fortfarande finns det dock problem med tekniken som måste bli ännu bättre innan vi kan förvänta oss att papperstidningarna helt kan ersättas. För att uppnå detta måste vi ha läsplattor i färg som både är snabba, hållbara och billiga både att köpa och att använda. Helst ska de också vara lätta och ta liten plats. Kanske ska de också gå att rulla ihop. Allt detta finns redan som demonstrationsexemplar men ännu så länge är tekniken inte tillräckligt utvecklad för massproduktion.

EXEMPEL 8 **Bildskärmsteknik**

En intressant bildskärmsteknik kallas iMOD (interferometric modulator). Här har inspirationen kommit från naturen som man gör sitt bästa för att härma. Många fjärilar, fåglar och fiskar lyser i starka färger utan att ha några egna färgpigment. Istället finns små strukturer av samma storlek som ljusets våglängd. Färgerna hos en del fjärilar uppkommer genom att ljuset reflekteras i olika ytor i vingarnas struktur så att det reflekterade ljuset interfererar ungefär som i såphinnan. Vissa våglängder förstärks och andra släcks ut. För att imitera detta använder man sig av mikromekanik.
Se figuren.



I det öppna tillståndet finns en luftspalt mellan färgytan och ytan som reflekterar ljuset. Avståndet motsvarar våglängden hos en viss färg och skapar interferens. Genom att lägga på en spänning kan man få ytorna att attrahera varandra. På det viset kan man variera luftgapet och därmed färgen som uppfattas av ögat. När luftgapet har slutits helt absorberas allt ljus och ytan uppfattas som svart. Genom att använda grundfärger i olika kombinationer kan man nu få ögat att uppfatta alla de olika färgerna vi ser i naturen.

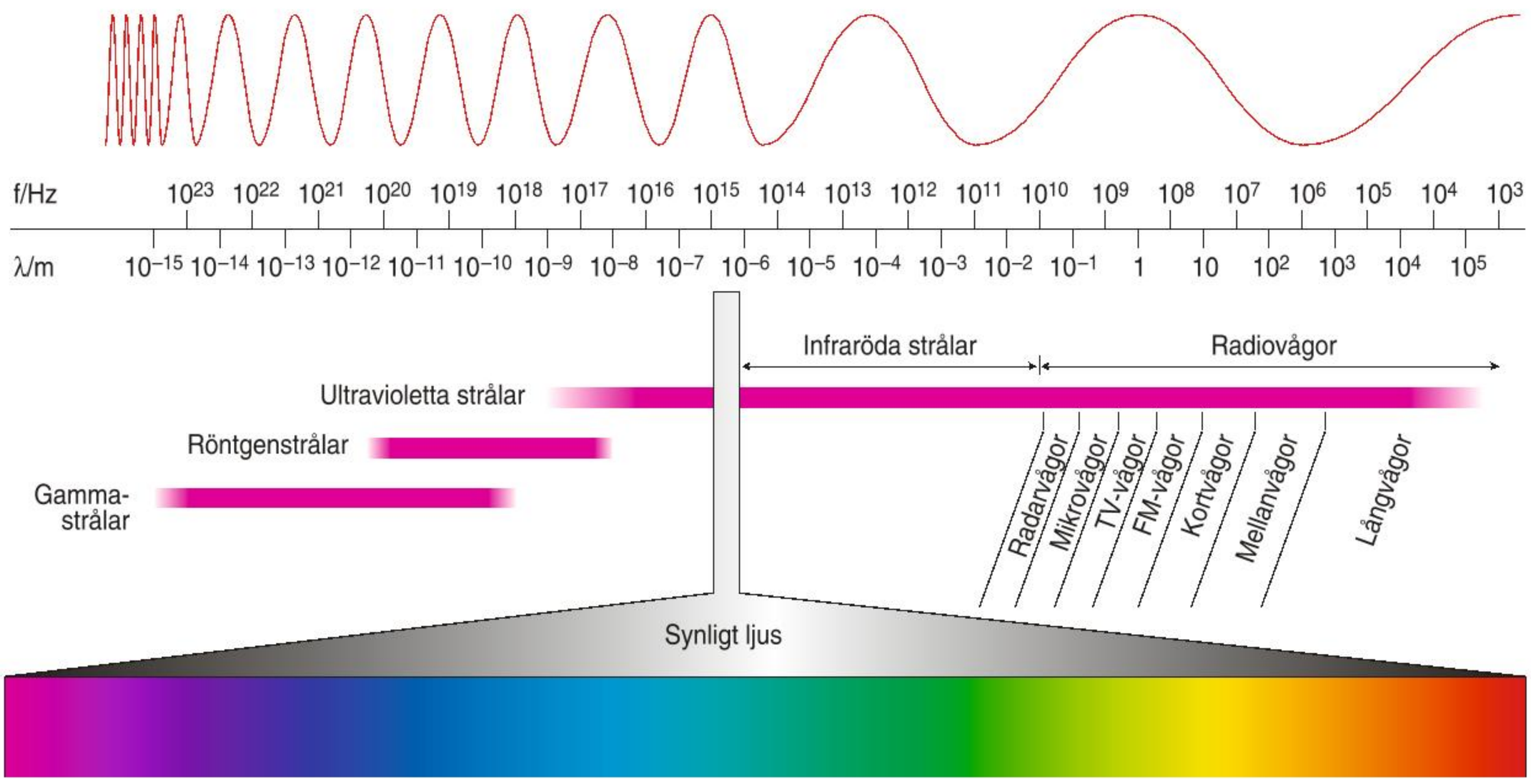
Ett sådant element som visas i figuren har en storlek på mellan 10 och 100 µm. Dessa sätts sedan samman till pixlar som i sin tur bygger upp en hel bildskärm.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad krävs för att ljus ska böjas av i en spalt?
- Vad menar vi med att två ljuskällor är koherenta?
- Hur skaffar vi oss koherenta ljuskällor till interferensförsök?
- Vad går Youngs dubbelspaltförsök ut på?
- Vad menar vi med vägskillnad i ett dubbelspaltförsök?
- Vilket villkor måste vägskillnaden uppfylla för att det ska bli ljusmaximum i en punkt?
- Vilken formel ger oss riktningarna till ljusmaxima i ett dubbelspaltförsök? Förklara alla symbolerna i formeln.
- Hur kan ljusvågor ge mörker i ett dubbelspaltförsök?
- Vad är ett optiskt gitter?
- Vilken formel ger oss riktningarna till ljusmaxima i ett gitterförsök?
- Hur visar ett gitterförsök att rött ljus har större våglängd än violett ljus?
- Hur kan vi åstadkomma spektrum av vitt ljus? (Två sätt.)
- Vad menar vi med spektralfärg?
- Är det sant att de flesta färger vi ser runt oss är spektralfärger?
- Hur förklarar vi att föremålen runt oss har olika färger i dagsljus?
- Varför är himlen blå en molnfri dag?
- Ett gitter har 300 spalter per mm. Hur stort är avståndet mellan spalterna?
- För ett gitter är gitterkonstanten $1{,}7 \cdot 10^{-6}$ m. En spektrallinje observeras 22,1° grader från centrallinjen. Vilken våglängd motsvarar den?
- Ett gitter med 800 spalter per mm belyses med ljus med våglängden 560 nm. Hur stor blir avlänkningen för första ordningen? Andra?
- Laserljus med våglängden 633 nm träffar ett gitter med 500 spalter per mm. Vilken är den högsta ordningens ljusmaximum som kan förekomma?

2.3 Det elektromagnetiska spektret

År 1864 utvecklade fysikern James Clerk Maxwell en matematisk modell för elektricitet *och* magnetism. Tidigare hade man trott att elektricitet och magnetism var två separata fenomen, men Maxwell visade att de är olika sidor av samma fenomen. Modellen innebär att en elektrisk laddning som svänger fram och tillbaka, fungerar som en källa för elektromagnetiska vågor. Maxwell kunde visa att vågorna breder ut sig i rummet med samma hastighet som ljuset. Att de elektromagnetiska vågorna hade samma utbredningshastighet som ljus kunde inte vara någon slump, ansåg Maxwell. Det måste betyda att ljus är *elektromagnetiska vågor.* År 1887 lyckades Heinrich Hertz åstadkomma osynliga elektromagnetiska vågor i laboratoriet efter Maxwells recept – och detektera dem flera meter därifrån. Hertz visade att vågorna hade våglängden 66 cm och verkligen färdades med samma hastighet som ljuset. Därmed blev Maxwells elektromagnetiska teori bekräftad. Fysiker från många länder kastade sig över de nya vågorna. Vi surfar fortfarande på vågorna efter Maxwells elektromagnetiska revolution.



2.23 Hela det elektromagnetiska spektret. Alla vågorna är av samma natur, det är bara frekvenserna som är olika.

Radiovågor

I början av 1900-talet försökte italienaren Guglielmo Marconi (1874-1937) sända radiovågor över Atlanten. De flesta fysiker trodde av goda skäl att detta var omöjligt eftersom det krävde att vågorna skulle följa jordens krökning istället för att gå rätlinjigt som de borde. Försöken utfördes, och radiovågorna gick verkligen från England till Amerika! Det som räddade försöken var *jonosfären*, ett joniserat luftlager som ligger 50–100 km över jordytan och som fungerar som en spegel för radiovågor. Aldrig mer skulle någon behöva vara helt isolerad någonstans på jordens yta! 1912 kunde världen höra nödsignalerna från den sjunkande Titanic i Nordatlanten. 705 människor kunde räddas. Sedan dess har vi fått radio- och TV-sändare som med elektromagnetiska vågor knyter människorna närmare varandra.

EXEMPEL 9 Radar

På samma sätt som fladdermössen använder sig av ekot från ljud för att hitta sitt byte använder vi oss av *radar*, ”ekot” från radiovågor. Det är den reflekterade pulsen som registreras som gör det möjligt att upptäcka fartyg eller flygplan. Numera använder man även väderradar för att till exempel kunna upptäcka nederbördsområden. Även här är det så att ju högre frekvensen är desto mindre föremål kan man registrera. Radar kan användas både på korta och långa avstånd. Bilindustrin har under senare år arbetat med att försöka förhindra kollisioner genom att bygga in system i bilarna som ska göra automatiska inbromsningar då bilen närmar sig något föremål. NASA arbetar på att konstruera en kraftfull radar som ska kunna registrera föremål utanför solsystemet.

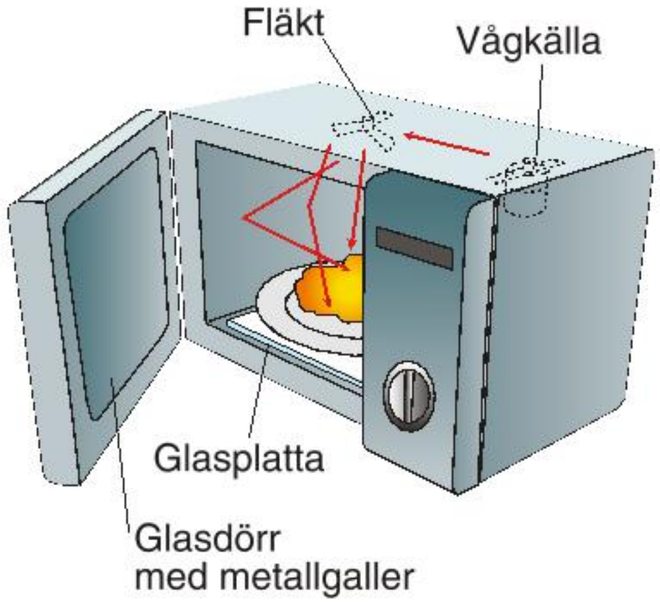
Efter hand har fysikerna kartlagt hela det elektromagnetiska spektret, från långa radiovågor via mikrovågor och infraröd strålning till synligt ljus, och vidare till ultraviolett strålning, röntgenstrålning och gammastrålning. Se figur 2.23.

Bin kan se ultraviolett strålning, och skallerormar kan uppfatta infraröd strålning. Varmblodiga djur sänder ut infraröd strålning. Det betyder att skallerormen kan se en varm mus, även i mörker. Också vi kan utnyttja infraröd strålning. Med hjälp av en IR-kamera kan vi fotografera hus för att ta reda på var de ”läcker” värme.

Som du förstår är det massor av till synes helt olika fenomen som ryms under begreppet elektromagnetisk strålning. Det enda som skiljer dessa fenomen åt är vågornas frekvens. Gemensamt för alla är att strålningen sänds ut när en elektrisk laddning, till exempel en elektron, accelereras. Radiovågor sänds till exempel ut av de svängande laddningarna i en sändarantenn och röntgenstrålning sänds ut när snabba elektroner bromsas upp i materia.

EXEMPEL 10 **Mikrovågsugnen**

I köket hittar du mycket bra fysik. Här ska vi titta på *mikrovågsugnen*. Se figur 2.24. Mikrovågor är elektromagnetiska vågor med en frekvens runt 10^9 Hz. I mikrovågsugnen värms maten upp av mikrovågor med frekvensen 2,45 GHz. Vågkällan skickar vågorna mot en roterande fläkt som reflekterar vågorna ned i ugnen. Ugnens väggar är av metall och reflekterar vågorna ut i ugnen igen. Du minns kanske från kemin att vattenmolekylen är en dipol, den har med andra ord en positiv och en negativ pol. De elektromagnetiska vågorna sätter vattenmolekylen i svängning. När molekylsvängningarna ökar, stiger temperaturen i maten. Även fettmolekyler är dipoler och bidrar till uppvärmningen.



2.24 En mikrovågsugn.

KONTROLLFRÅGOR

- Hur bildas en elektromagnetisk våg?
- Vad är det som tyder på att ljus kan vara elektromagnetiska vågor?
- Vad är UV-strålning, och vad är IR-strålning?
- Har UV-strålning högre eller lägre frekvens än IR-strålning?
- Vad kallas vågorna som ligger i ytterkanterna av det elektromagnetiska spektret?
- Hur kan mikrovågorna värma upp maten i en mikrovågsugn?

SAMMANFATTNING

Ljusvågor

Ljus har partikelegenskaper i vissa experiment och vågegenskaper i andra experiment.

Reflektion och brytning

Ljushastigheten i vakuum är $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s.

Reflektionslagen: När en ljusstråle reflekteras är reflektionsvinkeln lika med infallsvinkeln.

Fermats princip: Ljuset följer den väg mellan två punkter som tar kortast tid.

Brytningsindex för ett medium är förhållandet mellan ljushastigheten i vakuum och ljushastigheten i mediet.

$$n = \frac{c}{v}$$

n = brytningsindex

c = ljusets hastighet i vakuum

v = ljusets hastighet i ett medium

Brytningslagen: Riktningen för den brutna strålen kan beräknas genom sambandet:

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2$$

Totalreflektion kan uppstå när en ljusstråle träffar gränsytan mot ett medium som har lägre brytningsindex. Infallsvinkeln måste vara större än gränsvinkeln.

Synligt ljus i vakuum har våglängder från 400 nm för violett ljus till 700 nm för rött ljus.

Interferens

Böjning uppstår när ljus passerar en smal öppning.

Dubbelspaltförsök med ljus ger ljusmaximum i de riktningar som fås av

$$d \sin\theta = n\lambda \quad n \geq 0$$

och mörker i riktningar som fås av

$$d \sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad n \geq 1$$

Optiskt gitter har många spalter som ligger tätt, och ger koncentrerade ljusmaxima i de riktningar som fås av

$$d \sin\theta = n\lambda \quad n \geq 0$$

Spektralfärger: Varje spektralfärg har sin bestämda frekvens. Blandningsfärger är sammansatta av flera spektralfärger.

Det elektromagnetiska spektret

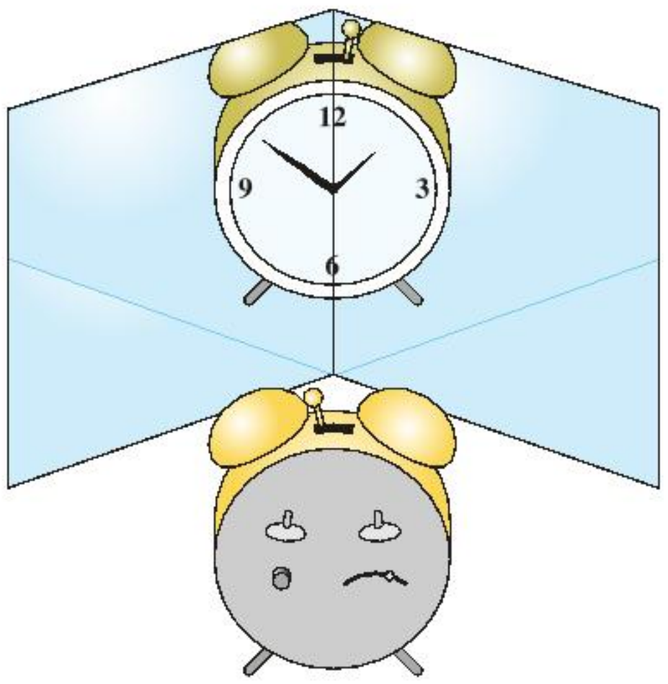
Det elektromagnetiska spektret sträcker sig från radiovågor via synligt ljus till gammastrålar. Elektriska laddningar som svänger sänder ut elektromagnetiska vågor.

RÄKNA FYSIK

Reflektion och brytning

2.01 I ett reflektionsförsök mäter vi upp en vinkel på 132° mellan den reflekterade och den infallande ljusstrålen. Beräkna infallsvinkeln och reflektionsvinkeln.

2.02 Två speglar ställs upp så att vinkeln mellan dem är rät. En väckarklocka placeras framför speglarna, se figur. Hur mycket visar den?

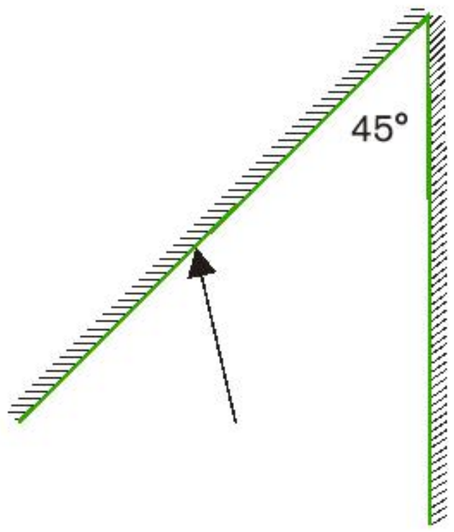


2.03 Två ljusstrålar reflekteras från en spegel. Infallsvinklarna är 42° och 58°. Hur stor blir vinkeln mellan de två reflekterade strålarna?

2.04 En ljusstråle genom *P* reflekteras från spegeln och passerar Q. Rita den verkliga strålgången.



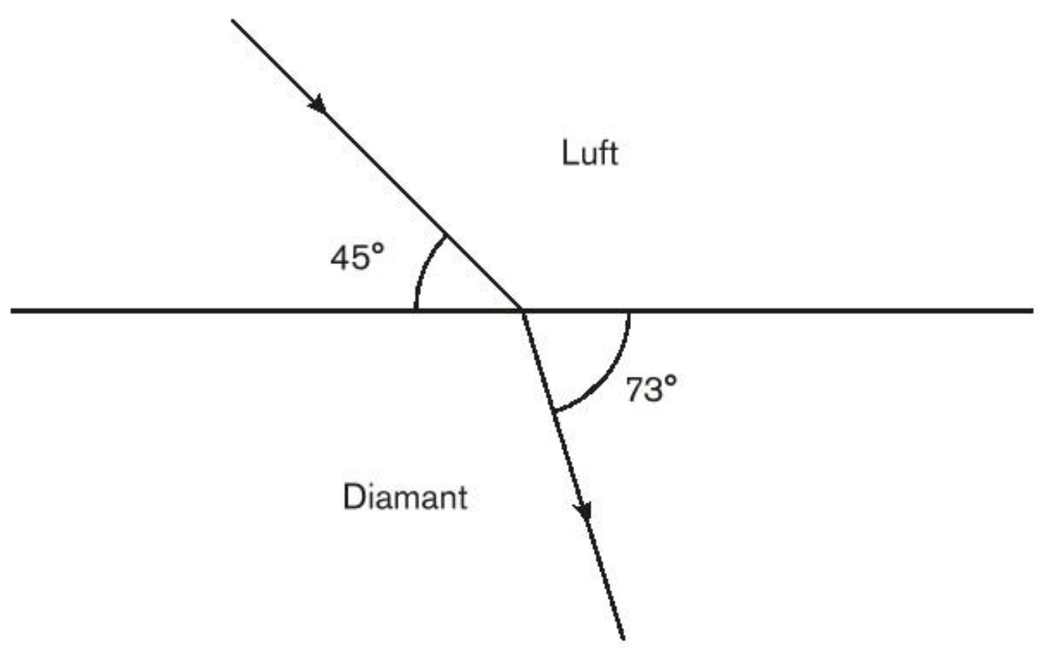
2.05 ★ Två plana speglar placeras sida vid sida så att vinkeln mellan dem blir 45°. En ljusstråle träffar den ena spegeln med en infallsvinkel på 30° och reflekteras mot den andra spegeln. Hur stor blir reflektionsvinkeln i den andra spegeln?



2.06 En ljusstråle går från luft till plast. Infallsvinkeln är 50,0° och brytningsvinkeln är 28,6°.
- **a** Beräkna brytningsindex för plasten.
- **b** Hur stor blir brytningsvinkeln i plasten om infallsvinkeln är 25,0°?

2.07 Ljushastigheten i en viss glassort är 86 % av ljushastigheten i vatten ($n = 1{,}33$). Hur stort är glasets brytningsindex?

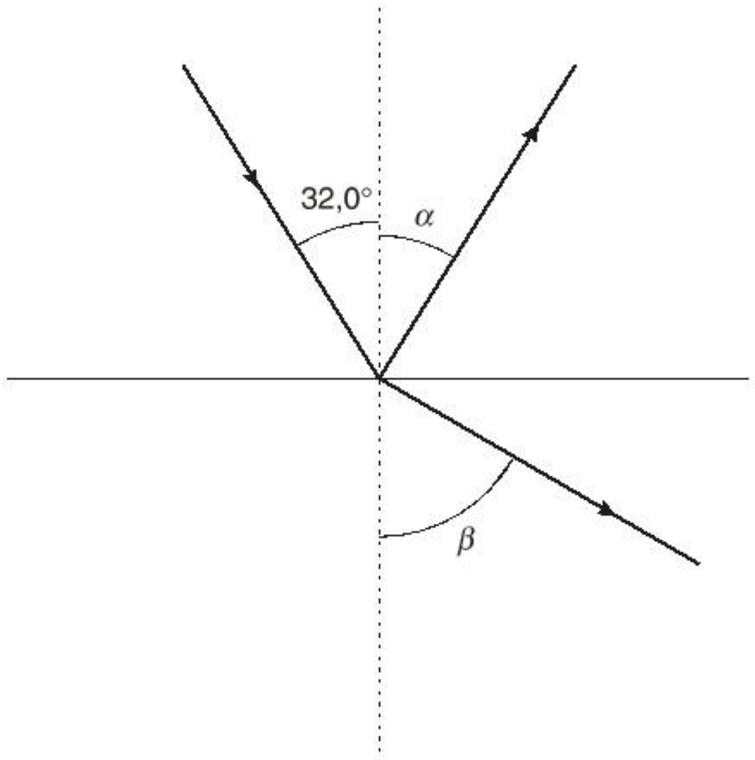
2.08 En ljusstråle går från luft till diamant, som figuren visar.
- **a** Beräkna infallsvinkeln och brytningsvinkeln.
- **b** Beräkna brytningsindex för diamant.



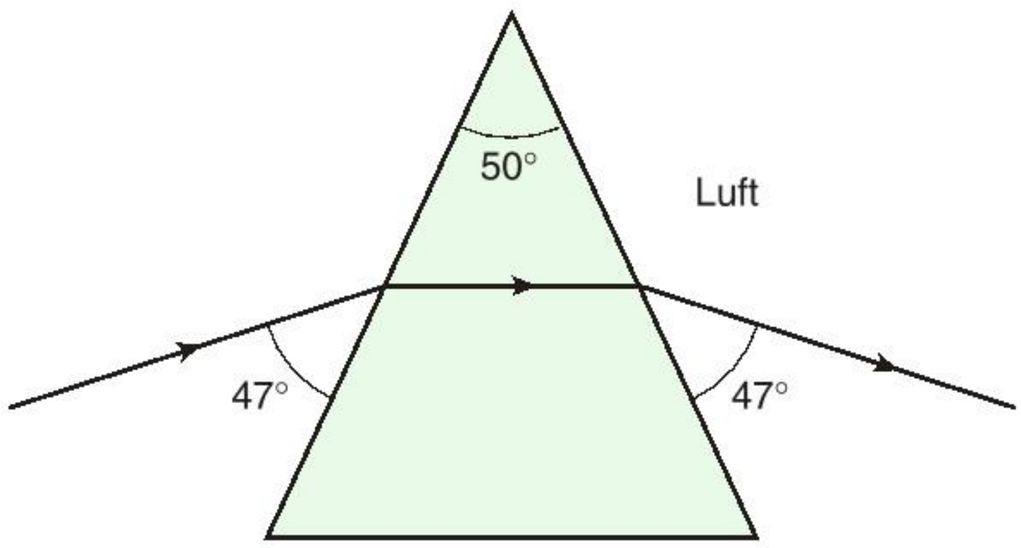
2.09 En ljusstråle träffar gränsytan mellan luft och glas. Glaset har brytningsindex 1,50. En del av strålen reflekteras och en del bryts. Se figuren.

a Ligger den infallande strålen i luften eller i glaset?

b Bestäm vinklarna α och β.



2.10 ★ Figuren visar en ljusstråle som går genom ett likbent glasprisma. Räkna ut glasets brytningsindex.

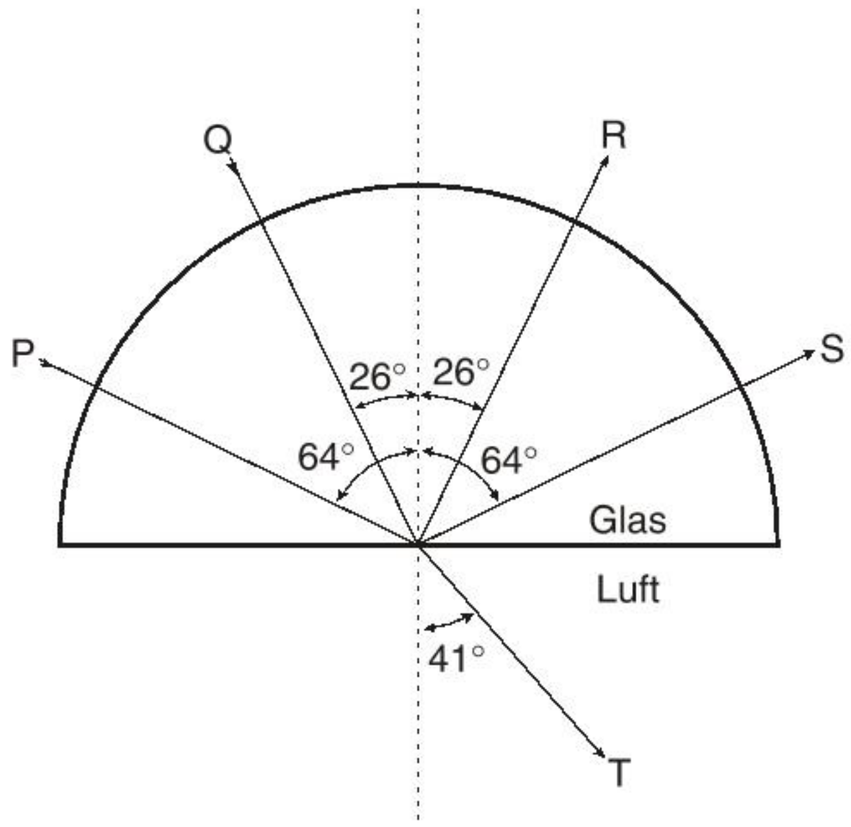


2.11 Figuren visar två ljusstrålar *P* och Q som går in i en halvcirkelformad glasskiva. Ljusstrålarna kommer ut som *R*, *S* och *T*.

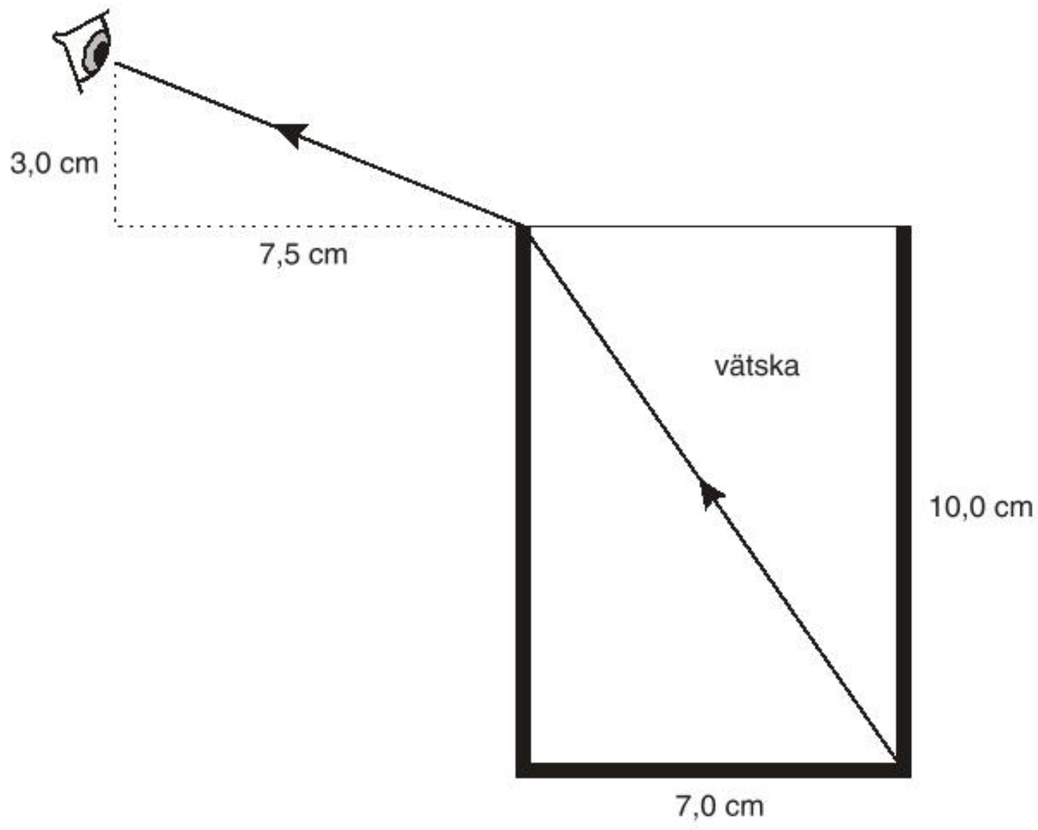
a Vilken eller vilka av strålarna *R*, *S* och *T* försvinner om vi täcker över stråle *P*?

b Vilken eller vilka av strålarna *R*, *S* och *T* försvinner om vi täcker över stråle Q?

c Räkna ut brytningsindex för glaset.

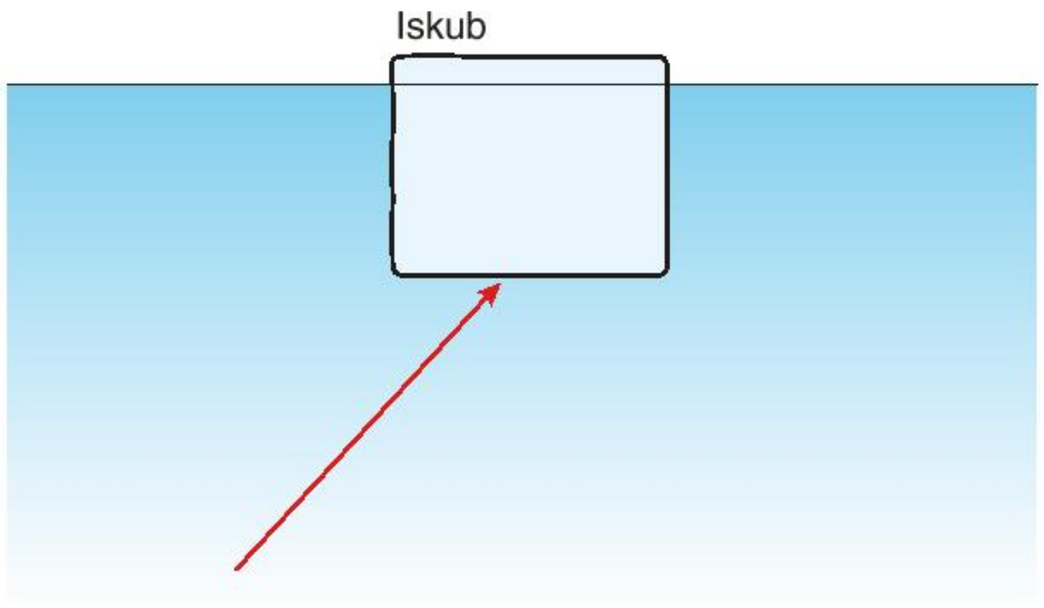


2.12 ★ Vi ska bestämma brytningsindex för en vätska. Vi häller vätskan i ett litet kärl, som figuren visar. Om vi rör huvudet lite upp och ner ser vi precis bakkanten på botten när vi håller ögat som figuren visar. Beräkna brytningsindex för vätskan.



2.13 En ljusstråle som går från plast till luft totalreflekteras när infallsvinkeln är större än 43,6°. Beräkna brytningsindex för plasten.

2.14 För ljus av en viss våglängd är brytningsindex i vatten 1,333 och i is 1,311. Bestäm gränsvinkeln för totalreflektion när ljuset går från vatten till is.



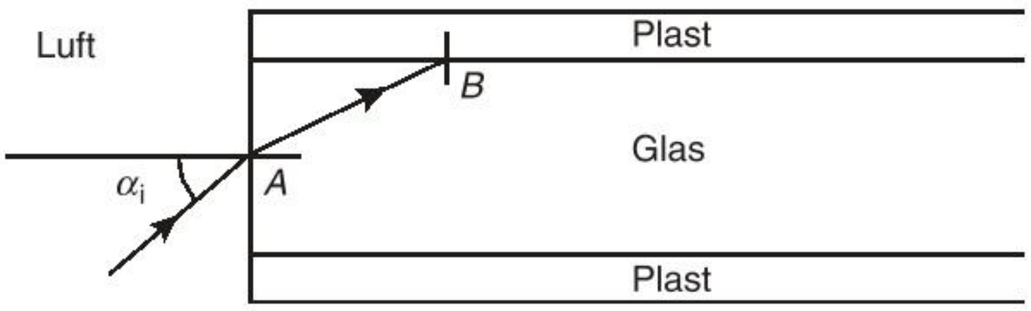
2.15 ★ Gränsvinkeln för totalreflektion för en ljusstråle som går från glas till luft är 38,3°. Hur stor är gränsvinkeln för totalreflektion när ljusstrålen går från glas till vatten (n=1,33)?

2.16 ★★ En optisk fiber av glas (med brytningsindex 1,50) har ett yttre plastlager med brytningsindex 1,45. Se figuren.

a Beräkna gränsvinkeln för totalreflektion i glaset.

b Beräkna infallsvinkeln vid A när infallsvinkeln vid B är lika med gränsvinkeln.

c Förklara varför ljusstrålen totalreflekteras i fibern även när infallsvinkeln α_i vid A är mindre än den du fick fram i b. Gör en skiss som visar hur en sådan ljusstråle fortsätter genom fibern.



Böjning och interferens

2.17 I ett interferensförsök med dubbelspalt enligt Young använder vi ljus med våglängden 550 nm. Spaltavståndet är 0,120 mm. Beräkna riktningen θ för ljusmaximum av

a första ordningen

b femte ordningen

c tionde ordningen.

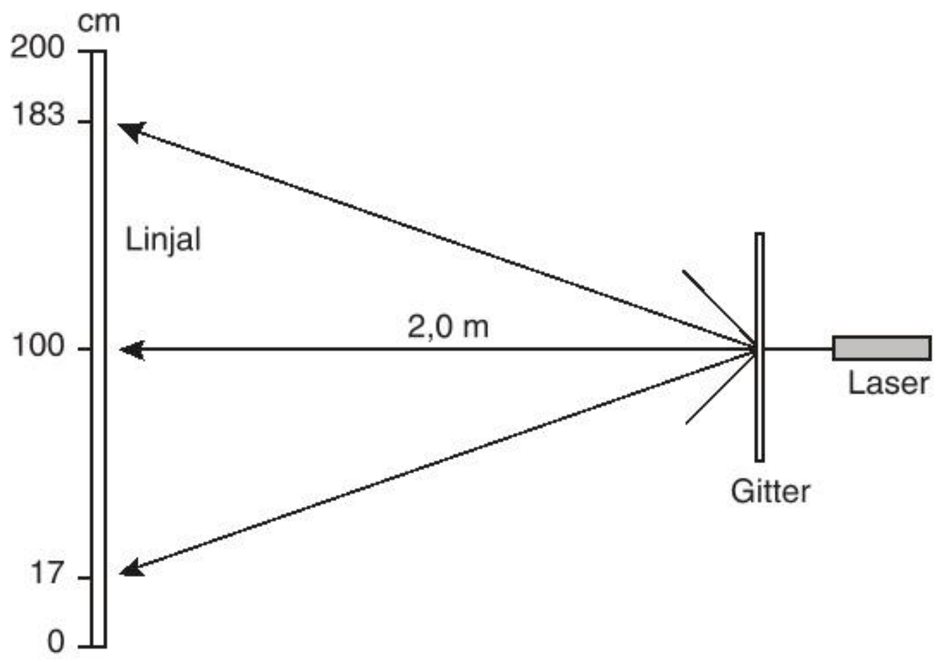
2.18 Med hjälp av laserljus med våglängden 633 nm ska vi bestämma spaltavståndet i en dubbelspalt. Avståndet mellan de två första ordningens linjer är 1,66 m på en skärm som är 9,00 m från dubbelspalten. Beräkna spaltavståndet.

2.19 Laserljus med våglängden 633 nm träffar vinkelrätt mot ett gitter med gitterkonstanten $2{,}00 \cdot 10^{-6}$ m.

a Beräkna riktningen för andra ordningens ljusmaximum.

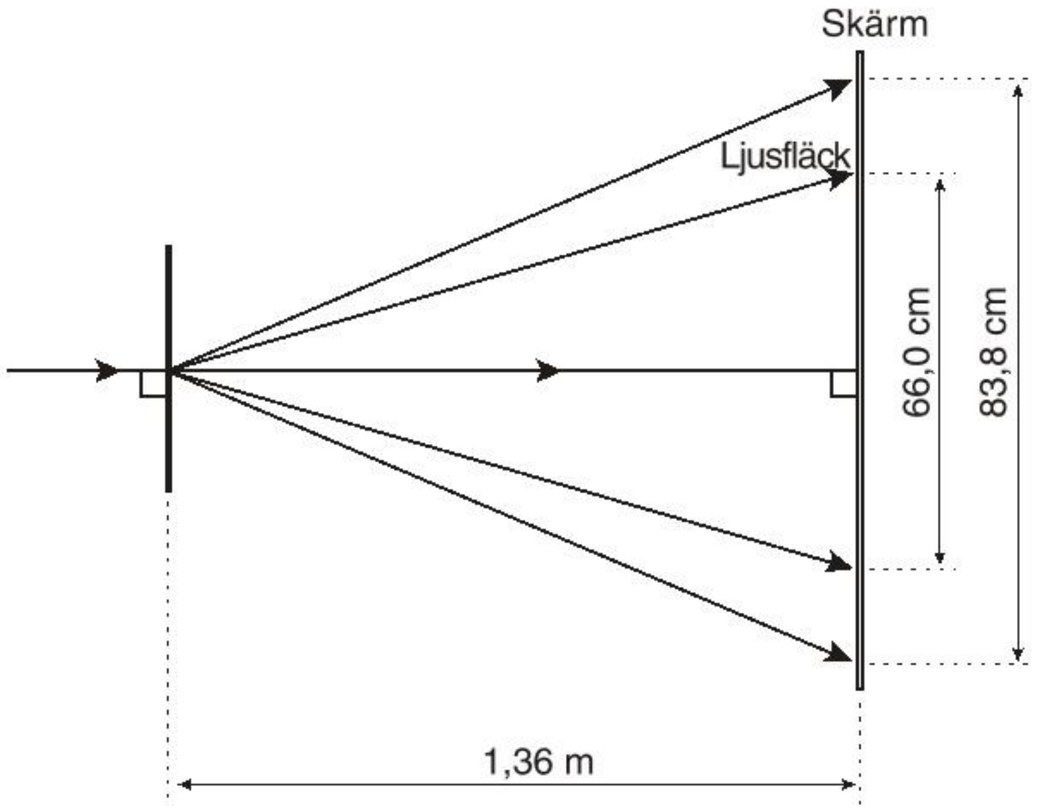
b Blir det något fjärde ordningens ljusmaximum?

2.20 Ett gitter står vinkelrätt mot strålriktningen från en laser som sänder ut ljus med våglängden 633 nm. På en skala på avståndet 2,00 m från gittret ser vi tre röda ljusfläckar som figuren visar. Beräkna gitterkonstanten.



2.21 Vi sänder enfärgat ljus vinkelrätt mot ett gitter som har 655 spalter per mm. Vinkeln mellan de två strålarna i andra ordningens ljusmaximum är 79,5°. Beräkna våglängden för ljuset. Vilken färg har ljuset?

2.22 ★ En ljuskälla sänder ut ljus med två våglängder. Den största våglängden är 628 nm. Den andra våglängden är okänd. Vi sänder ljuset genom ett gitter och mot en skärm. Se figuren. På skärmen ser vi två ljusfläckar av första ordningen på var sin sida om den centrala ljusfläcken. Beräkna den okända våglängden.



2.23 ★ Vi sänder gult ljus med våglängden 589 nm genom ett gitter som har 500 spalter per mm. Hur många ljusfläckar kan det maximalt bli i detta försök?

2.24 ★ Vi skickar vitt ljus mot ett gitter med gitterkonstanten $d = 5{,}00 \cdot 10^{-6}$ m. Vi antar att vitt ljus innehåller alla våglängder från 400 nm (violett) till 700 nm (rött).

a Förklara varför nollte ordningens ljusmaximum blir vitt.

b Beräkna riktningarna för ljusmaximum i första ordningens spektrum för ljus med våglängderna $\lambda_v = 400$ nm och $\lambda_r = 700$ nm.

c Räkna ut hur brett första ordningens spektrum blir på en skärm på avståndet 1,50 m från gittret.

Det elektromagnetiska spektret

2.25 **a** I mikrovågsugnar används frekvensen 2,45 GHz. Beräkna våglängden för mikrovågorna.

b Mikrovågsugnen är konstruerad så att den inte ska kunna vara påslagen när luckan är öppen. Vad kan orsaken till det vara?

2.26 Spiralarmarna i vår galax – Vintergatan – har kunnat kartläggas genom att vätgas i dess armar sänder ut strålning med våglängden 21,1 cm.

a Vilken sorts elektromagnetisk strålning är det?

b Beräkna strålningens frekvens.

DISKUTERA FYSIK

1 En 30 cm lång linjal är fastsatt på en spegel. Per ställer sig 2 m framför spegeln och håller en likadan linjal i handen invid kroppen. Han ser bilden av sin linjal bredvid linjalen som är fastsatt på spegeln. Hur stor ser längden av hans linjal ut jämfört med den som är fastsatt på spegeln?

2 Varför kan vi se den nedgående solen när den i verkligheten är precis under horisonten?

3 En bilförare som kör på natten när det regnar ser bara precis det som är framför honom? Varför ser han mer av omgivningen en kväll när det inte regnar?

4 När du tittar ut genom en glasruta på kvällen ser du ibland en dubbel bild av dig själv. Varför?

5 När man tittar på stjärnorna en klar natt, tycks de blinka. Astronauter som observerar stjärnorna från en rymdfärja ser emellertid inte att de blinkar. Varför inte?

6 Du ser dig själv i en spegel som är monterad på en vägg. Från den plats där du står kan du se toppen på ditt huvud och ner till bröstet. Om du går bakåt kommer den del av kroppen som du ser i spegeln att minska, öka eller vara oförändrad? Illustrera svaret med strålgångar.

7 Hur kan du bestämma ljushastigheten i en glasplatta?

8 Varför får man inget interferensmönster från de två billyktorna på en avlägsen bil?

9 Om Youngs dubbelspaltexperiment skulle utföras under vatten hur skulle det påverka interferensmönstret?

10 När du röntgar din bröstkorg passerar röntgenstrålarna förbi flera parallella ben, revbenen. Kommer revbenen att fungera som ett gitter för röntgenstrålarna? Kommer de i så fall att "förstöra" bilden något?

11 Två lika starka sändare för radionavigation sänder radiovågor med samma frekvens över ett havsområde. Fartyg i området registrerar att signalen från sändarna blir mycket svag i vissa positioner. Vad kan orsaken vara?

12 Vi sänder laserljus genom en dubbelspalt och får ett interferensmönster på en skärm en bit bort.
- **a** Hur ser interferensmönstret ut? Hur förklarar vi att mönstret blir så?
- **b** Hur förändras interferensmönstret på skärmen
  - **1** om vi ökar våglängden?
  - **2** om vi ökar spaltavståndet?
  - **3** om vi ökar avståndet mellan dubbelspalten och skärmen?

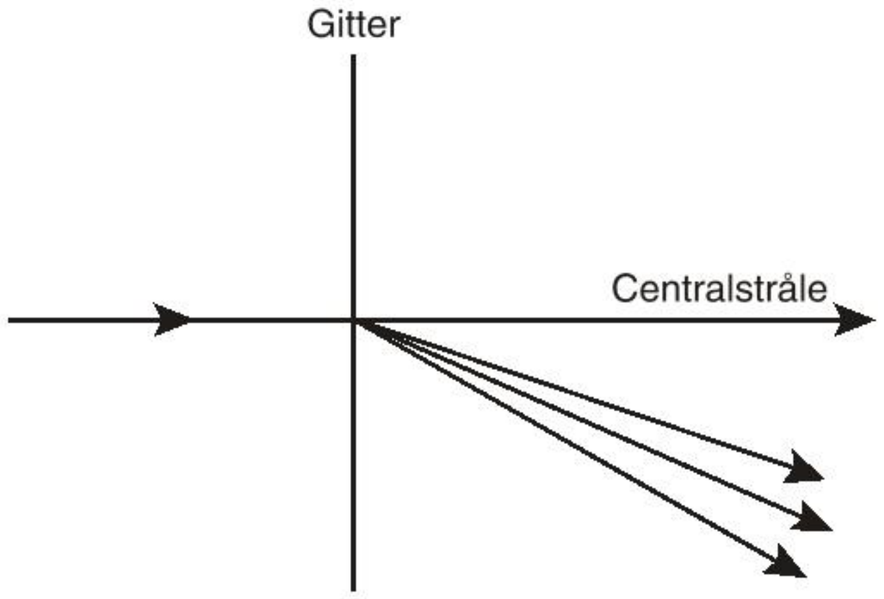
RESONERA FYSIK

1 Du ser dig i själv i en plan fickspegel. Du flyttar sedan spegeln längre bort ifrån dig. Du ser då
- **a** mer av dig själv
- **b** mindre av dig själv
- **c** lika mycket av dig själv.

2 Om du önskar träffa en röd fisk i vattnet med en röd laserstråle från land, hur ska du sikta på fisken för att kompensera för ljusets brytning?
- **a** Direkt i den riktning som fisken observeras
- **b** Ovanför den riktning som fisken observeras
- **c** Under den riktning som fisken observeras.

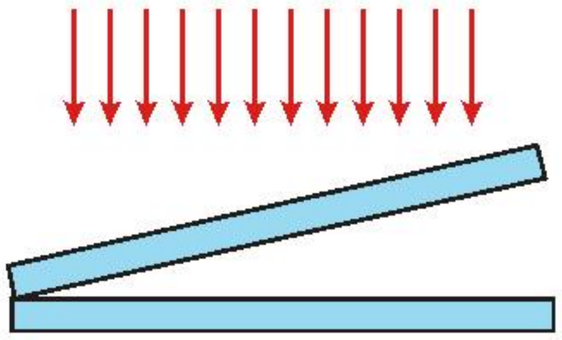
3 Du promenerar mot en spegel med en viss hastighet. Den relativa hastigheten mellan dig och din spegelbild är
- **a** hälften av din egen hastighet
- **b** samma som din egen hastighet
- **c** dubbelt så stor som din egen hastighet
- **d** omöjlig att bestämma.

4 In mot ett gitter kommer ljus som innehåller tre spektralfärger: blått, gult och rött. Figuren visar ljuset i första ordningens spektrum på den ena sidan av centralstrålen.
- **a** Varför får de tre strålarna olika riktning när de har passerat gittret?
- **b** Skriv rätt spektralfärg på var och en av de tre strålarna.



5 Två små identiska tunna glasskivor belyses med ljus av en våglängd. Skivorna placeras så att det bildas en liten vinkel mellan plattorna, se fig. Man kan då observera mörka och ljusa partier. Vad händer med partierna om vinkeln mellan plattorna minskas?

I Avståndet mellan partierna ökar
II Avståndet mellan partierna minskar
III Avståndet ändras inte.



6 Ett gitter belyses med gult ljus. På en skärm bakom gittret syns tre gula punkter, en rakt fram och en på vardera sidan om mittpunkten i 45°. Gittret belyses sedan också med rött ljus med samma intensitet och med samma riktning som det gula ljuset. Hur kommer det nya mönstret att se ut?

I Oförändrat
II Punkterna har ändrat färg till rött
III Punkterna har ändrat färg till orange
IV Gul punkt rakt fram och röda vid sidorna
V Orange punkt rakt fram och röda vid sidorna
VI Orange punkt i mitten och 2 gula punkter som tidigare och 2 röda punkter "utanför" dessa
VII Orange punkt i mitten och 2 gula punkter som tidigare och 2 röda punkter "innanför" dessa.

7 En stråle av ljus med en bestämd våglängd riktas mot ett gitter. Bakom gittret uppstår då på en skärm ett mönster med maxima och minima. Kommer avståndet mellan maxima att öka, minska eller vara oförändrat om

a ljusintensiteten minskar
b gitterkonstanten minskar
c våglängden minskar
d avståndet mellan gitter och skärm minskar.

UPPSKATTA FYSIK

1 En av författarna berättar: Under min rundresa i Kenya stannade jag en natt till i en by med en egen swimmingpool. På kvällen när jag tog ett svalkande bad i poolen fann jag att jag inte bottnade och att poolen i stort sett var fylld upp till brädden. Under natten funderade jag på hur djup den verkligen var och bestämde mig för att undersöka det nästa morgon. Efter en rejäl frukost mätte jag upp poolens mått till 8 m x 3,5 m. Sedan ställde jag mig mitt på poolens längsta sida och släppte ner en liten rödmålad sten i poolen så att den hamnade inne vid poolkanten. Med några raska steg var jag mitt över på andra sidan poolen och kunde se stenen ligga på bottnen. Därefter gick jag baklänges rakt ut från poolen tills jag inte kunde se stenen längre. Jag hade då gått 6,8 m rakt ut från poolkanten. Nu kunde jag göra en beräkning av djupet i poolen. Vilket ungefärligt djup kom jag fram till?

2 Ungefär hur stor del av Sveriges yta är täckt av personbilar?

3 Hur många A4-papper behövs det för att helt fylla klassrummet?

TESTA DIG I FYSIK

1 För att se hela sig själv behöver en flicka som är 1,0 m lång en spegel som är minst
- **a** 0,25 m lång.
- **b** 0,50 m lång.
- **c** 0,75 m lång.
- **d** 1,00 m lång.
- **e** beror på hur långt bort flickan är från spegeln.

2 Om du önskar träffa en blå fisk i vattnet med en röd laserstråle från land, hur ska du sikta på fisken för att kompensera för ljusets brytning?
- **a** Direkt i den riktning som fisken observeras.
- **b** Ovanför den riktning som fisken observeras.
- **c** Under den riktning som fisken observeras.

3 Ett 2,4 cm brett gitter innehåller totalt 15 000 spalter. Hur stor är gitterkonstanten?

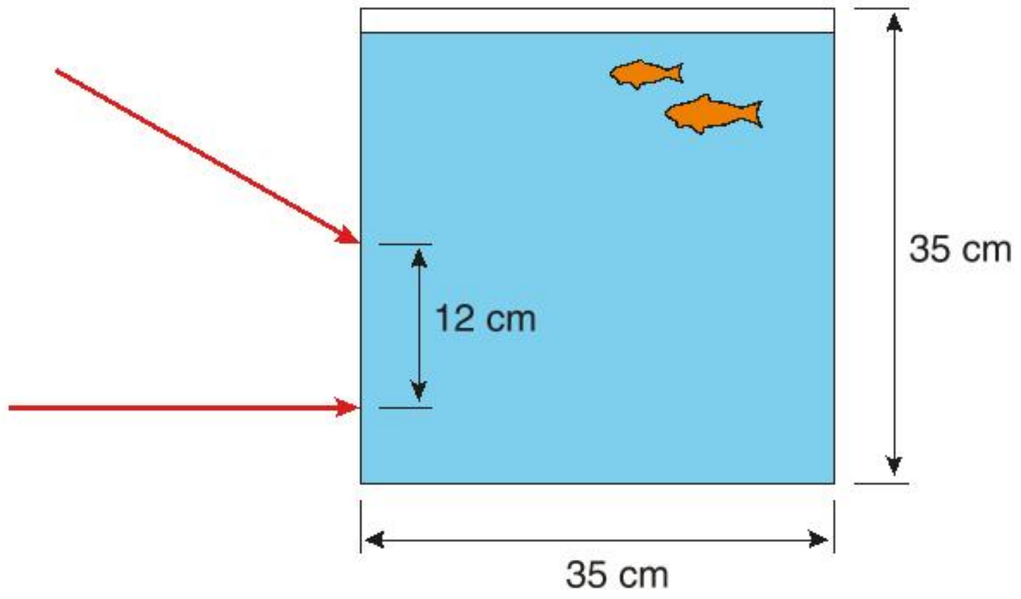
4 Hur stort är brytningsindex hos ett ämne om brytningsvinkeln är 38° då infallsvinkeln från luft är 47°?

5 I vilket medium går ljuset fortast, i ett med en gränsvinkel för totalreflektion på 24° eller i ett med 29°? Reflektionen sker i båda fallen mot luft. Hur stor är ljushastigheten i detta medium?

6 En dubbelspalt belyses med grönt ljus med våglängden 542 nm. På en skärm 1,20 m bakom spalterna observerar man ett interferensmönster där avståndet mellan första ordningens maxima är 1,4 cm. Hur stort är avståndet mellan spalterna?

7 Mot ett gitter med 5 000 spalter/cm skickas vitt ljus. Hur stor är vinkeln mellan det röda ljuset (650 nm) och det blå ljuset (450 nm) i första ordningens spektrum?

8 ★ Två ljusstrålar i samma vertikalplan träffar under olika vinklar ena sidan av ett vattenfyllt akvarium. Figuren visar hur en person ser det från sidan. Vilken infallsvinkel har den övre strålen om de två strålarna möts precis vid en punkt på akvariets motstående sida?



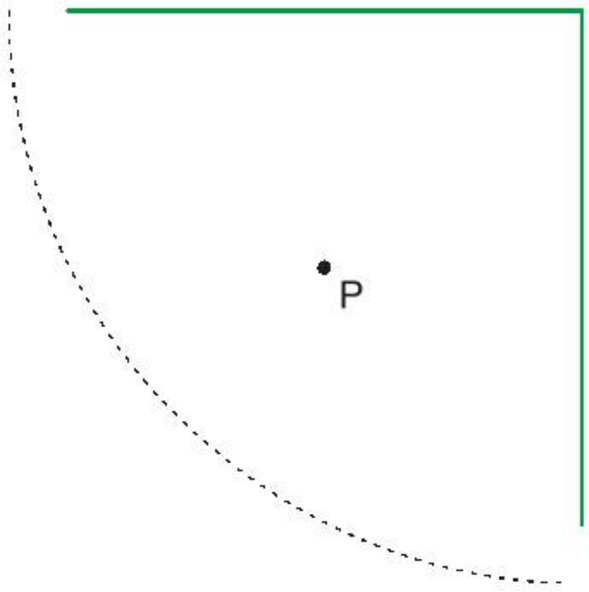
9 ★★ När ett gitter belyses med vitt ljus (400–700 nm) kommer alltid andra och tredje ordningens spektrum att delvis överlappa. Vilka är de våglängder i tredje ordningen som överlappas?

10 ★★ Ett gitter med 1 500 spalter/mm stoppas ner i ett akvarium fyllt med vatten. Blått ljus med $\lambda = 460$ nm riktas mot gittret. På ett papper fastsatt på akvariets ena sida, 3,4 dm bakom gittret, observeras ett antal ljusa fläckar. Hur stort blir avståndet till centralmaximum från den första ljusa punkten?

HEMLABORATIONER

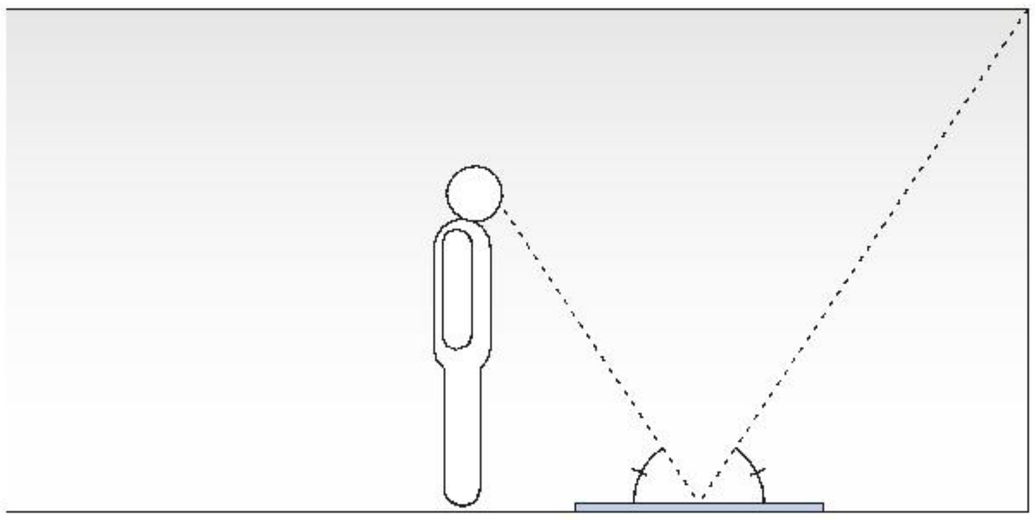
Speglarna

Två likadana speglar placeras så att de bildar en rät vinkel (se figur). På skärningen mellan de två speglarnas mittpunktsnormaler, punkten *P*, placerar du en knappnål. Placera ditt öga vid olika punkter på den streckade linjen och undersök hur många spegelbilder du kan se. Markera detta på linjen. Utför därefter bildkonstruktioner och se efter om ditt resultat stämmer.



Takhöjden

Din uppgift är bestämma takhöjden i ditt rum därhemma med hjälp av en spegel. Lägg spegeln på golvet och ställ dig så att du i spegeln kan se en lämplig punkt i taket. Se figur. Vilka sträckor är lämpliga att mäta (ej takhöjden direkt).



Blinda fläcken

I den del av näthinnan där synnerven leder ut från ögat finns varken stavar eller tappar. Om ljus fokuseras där kan du inte se någonting.

Håll upp boken framför dig på normalt läsavstånd. Stäng nu vänster öga och stirra på flickans hand. Flytta boken långsamt närmare ögat och den lilla råttan försvinner.





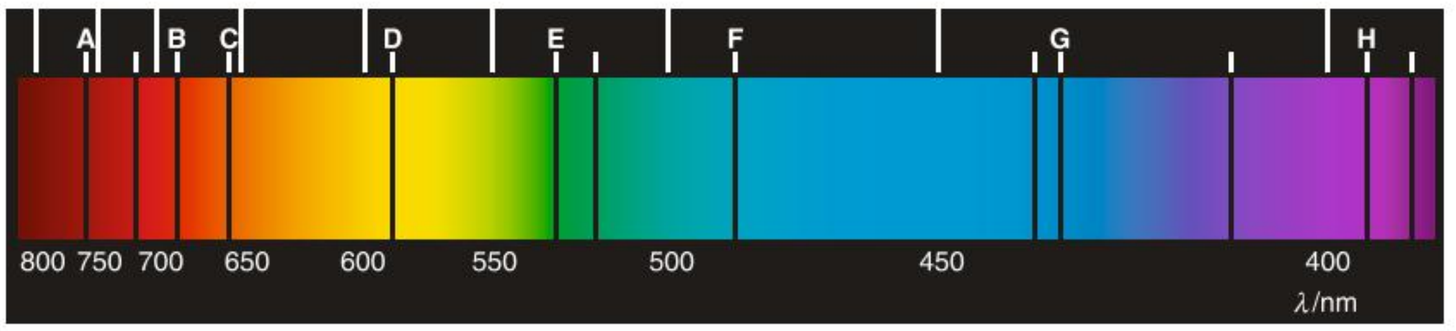
3 Kvantfysik

Undervisningen i kursen ska behandla:

- **Atomens elektronstruktur samt absorptions- och emissionsspektra**
- **Fotoelektriska effekten och fotonbegreppet**
- **Våg- och partikelbeskrivning av elektromagnetisk strålning**
- **Materiens vågegenskaper: de Broglies hypotes och våg-partikeldualism**
- **Modeller och teorier som förenklingar av verkligheten. Modeller och teoriers giltighetsområden samt hur de kan utvecklas, generaliseras eller ersättas av andra modeller och teorier över tid.**

Bohrs modell för väteatomen 95
Emission och absorption 102
Fotoelektrisk effekt 109
Fotonens rörelsemängd 118
Partiklar eller vågor? 120
Hade Newton fel? Kommer det att visa sig att Einstein hade fel? 129
Uppgifter 131

Tidigt under 1800-talet hade fysikerna observerat några tunna mörka linjer på bestämda platser i solspektret. Den tyske optikern Joseph Fraunhofer blev intresserad av fenomenet, och år 1814 bestämde han våglängden för de tydligaste av linjerna med hjälp av en spektrometer som han själv hade tillverkat. Ingen visste vad de mörka linjerna berodde på. Ingen anade att dessa så kallade fraunhoferlinjer skulle bli nyckeln för att öppna dörren till atomernas värld. Se figur 3.1.



3.1 Solspektrum med fraunhoferlinjer. Fraunhofer fann mer än 500 mörka linjer och satte bokstäver från A till H på de 8 tydligaste linjerna.

3.1 Bohrs modell för väteatomen

Du kommer kanske ihåg att det var Max Planck som lade grunden till kvantfysiken. Han studerade glödande material och kom fram till att de glöder med samma färg vid samma temperatur oavsett vilket ämne de består av. Planck tvingades anta att atomerna bara kan utväxla ”paket” eller kvanta av energi.

KVANTHYPOTESEN

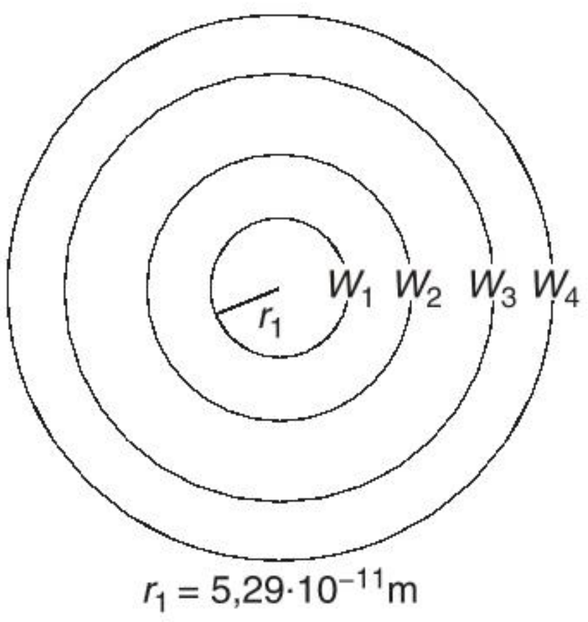
En atom kan bara sända ut eller ta emot energi i bestämda portioner eller energikvanta:

$$W = hf$$

där $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Js är en konstant och f är strålningsfrekvensen. Konstanten h kallar vi Plancks konstant.

Einstein tog sedan kvanthypotesen mycket längre. Enligt Einsteins fotonteori kan vi betrakta ljus och annan elektromagnetisk strålning som en ström av energikvanta, eller fotoner, där varje foton har energin $W = hf$.

Niels Bohr (1885-1962) kände väl till Plancks kvanthypotes och Einsteins fotonteori och det var naturligt för honom att fortsätta arbetet med dessa teorier. Bohr gjorde som fysiker ofta gör när de ställs inför komplicerade problem. Han koncentrerade sig på det enklast möjliga fallet, väteatomen. Den består av en atomkärna omgiven av endast en elektron. Bohrs atommodell, som vi presenterade i kurs 1, kallas ofta för skalmodellen.



Bohrs atommodell.

Bohr föreställde sig att elektronen kunde gå som en satellit i olika banor runt atomkärnan. Men i stället för tyngdkraften är det den elektriska attraktionen mellan elektronen och kärnan som håller elektronen i sin bana. Precis som satelliter kan "lyftas" ut till banor med större mekanisk energi föreställde han sig att även elektronerna kunde lyftas ut till högre *energinivåer.*

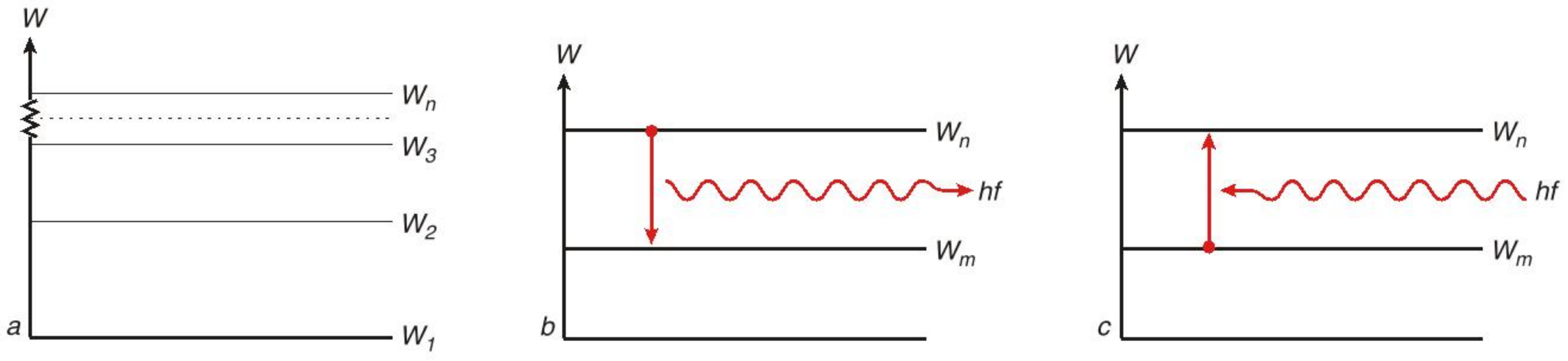
I stället för att försöka ge en fysikalisk förklaring till att elektronerna bara kunde hoppa mellan vissa bestämda energinivåer, formulerade Bohr det som postulat.

BOHRS POSTULAT

1. **En atom kan existera i många olika tillstånd utan att sända ut energi. I varje tillstånd har atomen en bestämd energi: W_1, W_2, W_3 …**
2. **En atom kan gå från ett tillstånd med energin W_n till ett annat tillstånd med lägre energi W_m. Vid övergången sänds energiskillnaden ut som en foton med energin $W = hf$, där**

$$hf = W_n - W_m$$

h är Plancks konstant och f är strålningsfrekvensen. m och n är heltal; $n > m$.



3.2 a) Energitillstånden i en atom.
b) Atomen avger energin
$W_n - W_m = hf$.
c) Atomen mottar energin
$W_n - W_m = hf$.

Till skillnad från satelliter som kan lyftas till vilken energinivå som helst är atomernas energinivåer kvantiserade. När en atom sänder ut ljus, tar atomen ett språng från en högre energinivå till en lägre energinivå. När atomen absorberar ljus, hoppar den från en lägre till en högre energinivå. Se figur 3.2.

Varje språng ger upphov till ljus med en bestämd frekvens. Ljuset från ett sådant språng kallas *spektrallinje*.

Om vi ska få atomer att sända ut ljus, måste vi *excitera* dem till nivåer över grundtillståndet. Detta kan vi göra på flera olika sätt.

- Vi kan värma upp atomerna, till exempel i en gaslåga. Då tänker vi oss att atomerna blir exciterade när de kolliderar med varandra.
- Eller så kan vi sända en ström genom en gas, som vi gör i lysrör. Då är det kollisioner med elektronerna i strömmen som exciterar gasatomerna.
- En tredje möjlighet är att sända ljus genom gasen. En atom kan då absorbera en foton från strålningen och använda energin för att komma upp i en högre energinivå. Atomerna absorberar bara fotoner som har samma energi som energidifferensen mellan två energinivåer. Alla andra fotoner passerar genom gasen.

SI-prefixet a
a (uttalas atto) a = 10^{-18} och används av fysiker över hela världen. Ordet är bildat av det danska ordet "atten" (arton), efter antalet nollor

Bohrs postulat är *generella* och gäller för alla atomer. Men Bohr gjorde en *speciell* modell för väteatomen som är den enklaste atomen. Med hjälp av sina postulat och sin atommodell härledde han följande samband.

ENERGINIVÅERNA I VÄTEATOMEN

Energinivåerna i väteatomen fås av

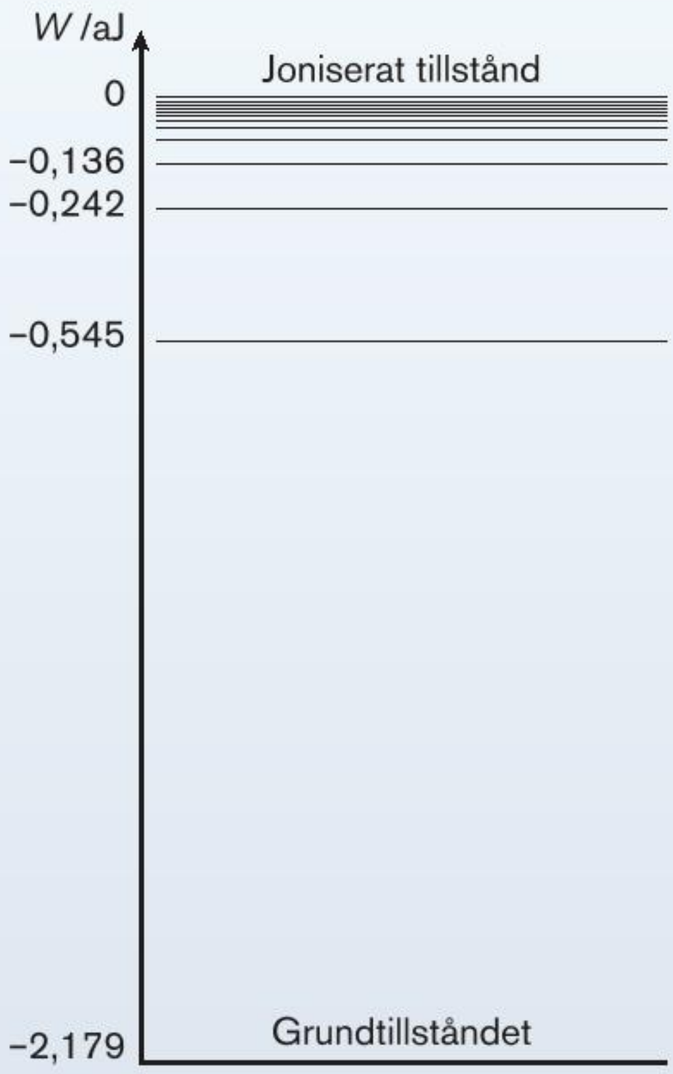
$$W_n = -\frac{13{,}60}{n^2}\ \text{eV eller}\ W_n = -\frac{2{,}179 \cdot 10^{-18}}{n^2}\ \text{J} = -\frac{2{,}179}{n^2}\ \text{aJ} \quad n \geq 1$$

Elektronvolt
En elektronvolt är den energi som behövs för att flytta en elektron mellan två punkter i ett elektriskt fält, där spänningen mellan punkterna är 1 volt.
1 eV = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J.

I grundtillståndet är $n = 1$ som ger väteatomen energin –13,60 eV eller –2,179 aJ.

EXEMPEL 1 **De lägsta energinivåerna i väteatomen**

Låt oss beräkna de sju lägsta energinivåerna i väteatomen:



3.3 Energinivåerna i väteatomen.

$$W_1 = -\frac{2{,}179}{1^2}\ \text{aJ} = -2{,}179\ \text{aJ} = \frac{-2{,}179 \cdot 10^{-18}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}}\ \text{eV} = -13{,}60\ \text{eV}$$

$$W_2 = -\frac{2{,}179}{2^2}\ \text{aJ} = -0{,}545\ \text{aJ} = -3{,}40\ \text{eV}$$

$$W_3 = -\frac{2{,}179}{3^2}\ \text{aJ} = -0{,}242\ \text{aJ} = -1{,}51\ \text{eV}$$

$$W_4 = -\frac{2{,}179}{4^2}\ \text{aJ} = -0{,}136\ \text{aJ} = -0{,}85\ \text{eV}$$

$$W_5 = -\frac{2{,}179}{5^2}\ \text{aJ} = -0{,}087\ \text{aJ} = -0{,}54\ \text{eV}$$

$$W_6 = -\frac{2{,}179}{6^2}\ \text{aJ} = -0{,}061\ \text{aJ} = -0{,}38\ \text{eV}$$

$$W_7 = -\frac{2{,}179}{7^2}\ \text{aJ} = -0{,}044\ \text{aJ} = -0{,}28\ \text{eV}$$

Du kan se att energinivåerna ligger tätare ju större n blir. När n växer så närmar sig W_n noll underifrån. Alla tillstånd där elektronen är bunden till kärnan har alltså negativ energi. Se figur 3.3.

EXEMPEL 2 **Vätets jonisationsenergi**

Den högsta energi som väteatomen kan ha, är $W = 0$. Då har elektronen frigjort sig från kärnan. Det betyder att atomen är joniserad. För att jonisera en atom som befinner sig i grundtillståndet behövs det energin W_{jon}.

$$W_{jon} = W - W_1 = 0 - (-2{,}179)\ \text{aJ} = 2{,}179\ \text{aJ}$$

Den energin kallar vi *jonisationsenergin* för väteatomen. Atomen kan joniseras vid en kraftig kollision med en annan atom eller en elektron, eller om atomen absorberar en foton med energin lika med eller större än jonisationsenergin.

Nu ska vi titta på en väteatom där elektronen hoppar från en hög energinivå W_n till en lägre energinivå W_m. Enligt Bohrs andra postulat måste väteatomen då skicka ut en foton med energin

$$hf = W_n - W_m = \left(-\frac{2{,}179}{n^2}\right) - \left(-\frac{2{,}179}{m^2}\right) = 2{,}179\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

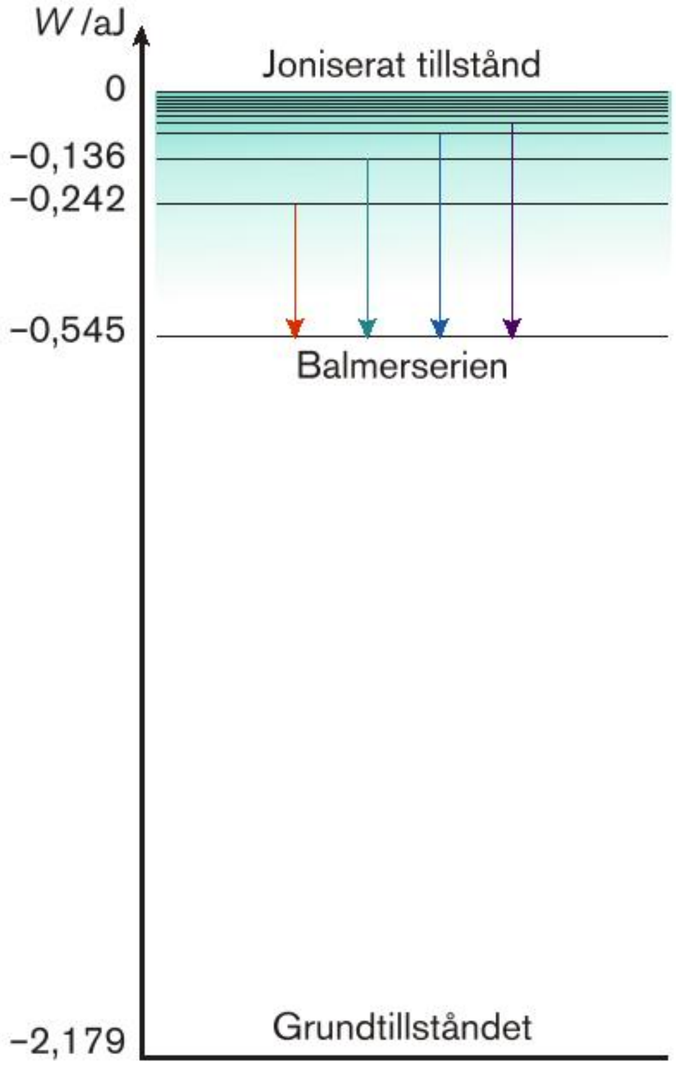
År 1885 fann den schweiziske läraren Johann Balmer en formel för våglängderna för de fyra synliga linjerna i vätespektret genom att leka med tal. Efter honom har linjerna fått namnet *balmerserien*. Formeln stämde på en hundradels promille när med de uppmätta våglängderna och var därmed den noggrannaste formel som någon funnit för fysikaliska fenomen.

Balmerseriens linjer uppstår när elektroner övergår till det näst lägsta energitillståndet ($m = 2$) från högre energitillstånd.

Om vi sätter $m = 2$ får vi

$$hf = 2{,}179\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Fem år efter Balmers upptäckt fann den svenske fysikern Janne Rydberg från Lund ett samband som inte bara gällde för väte, utan för alla spektralserier. Rydberg hade liksom Balmer ingen djupare fysikalisk förklaring till sin formel. Men detta ändrades 1913 då Niels Bohr kom med sin modell för väteatomen som också resulterade i ett teoretiskt värde på Rydbergs konstant.



EXEMPEL 3 **Balmerserien**

Vi ska beräkna de fem minsta energisprången, frekvenserna och våglängderna i balmerserien. Vi börjar med att beräkna energisprånget då elektronen hoppar från nivå 3 till nivå 2. Vi får

$$hf = 2{,}179\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)\text{aJ} = 0{,}303\text{ aJ}$$

I exempel 1 har vi redan beräknat de olika energinivåerna och vi kan därför förenkla beräkningarna till

$$hf = W_3 - W_2 = -0{,}242 - (-0{,}545)\text{ aJ} = 0{,}303\text{ aJ}$$

Om du dividerar med h får du frekvensen

$$f = \frac{0{,}303 \cdot 10^{-18}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}}\text{ Hz} = 4{,}57 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$$

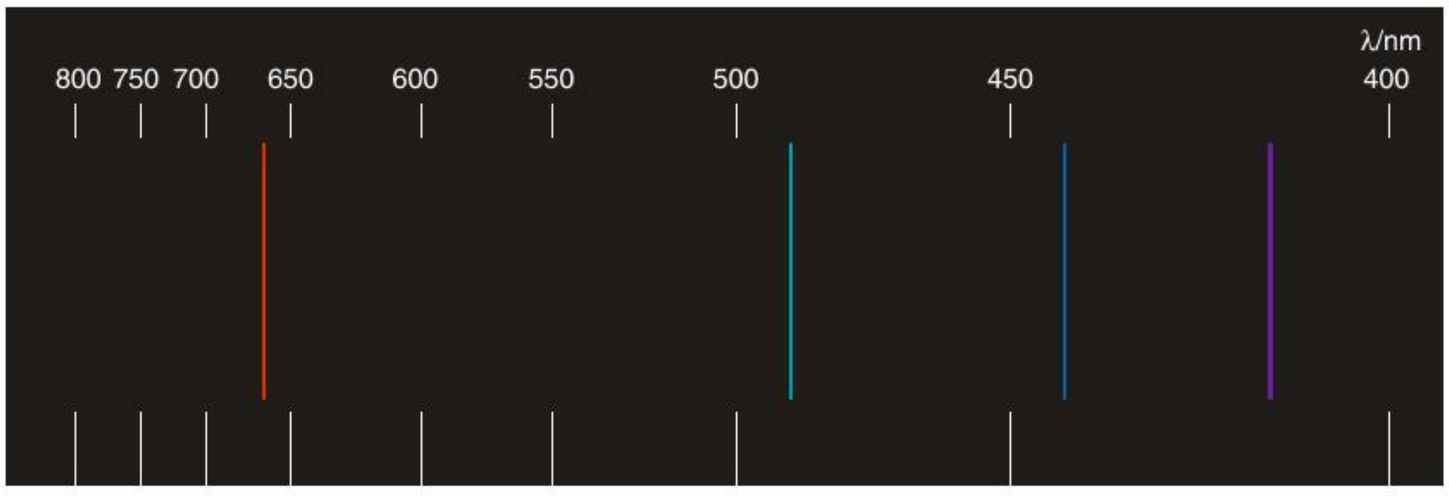
Våglängden får du ur sambandet $\lambda = c / f$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3{,}00 \cdot 10^{8}}{4{,}57 \cdot 10^{14}}\text{ m} = 6{,}56 \cdot 10^{-7}\text{ m} = 656\text{ nm}$$

Resultaten av beräkningarna visas i tabellen nedan.

N	W_n (aJ)	$W_n - W_2$ (aJ)	f (THz)	λ (nm)	Färg
3	−0,242	0,303	457	656	Röd
4	−0,136	0,409	617	486	Blågrön
5	−0,087	0,458	691	434	Indigo
6	−0,061	0,484	730	410	Violett
7	−0,044	0,500	754	397	inte synligt ljus

Synligt ljus ligger inom våglängdsintervallet 400–700 nm.
Det betyder att de fyra minsta balmersprången ger synligt ljus.
Se figur 3.4.



3.4 De fyra synliga linjerna i balmerserien.

När väteatomer hoppar från en hög energinivå till energinivån W_3 uppstår infraröd strålning. Denna spektralserie upptäcktes av den tyske fysikern Friederich Paschen, och vi kallar den *paschenserien*.

När väteatomer hoppar från en hög energinivå till grundtillståndet W_1 uppstår ultraviolett strålning. Serien upptäcktes av den amerikanske fysikern Theodore Lyman, och vi kallar den *lymanserien*.

Hur bra är Bohrs modell?

En olycka?
Bohr blev tidigt medveten om att hans atommodell inte var tillräckligt bra. Han sa själv att det var olyckligt att modellen stämde så bra för väte. Modellen ledde atomfysiken in i en återvändsgränd, som det tog mer än 10 år att komma ur. I gengäld var Bohr en av de viktigaste aktörerna när kvantteorin utarbetades i slutet av 1920-talet.

Bohrs teori var en stor succé för väte. Den gav även användbara resultat för joner som bara har en elektron, till exempel He^+ och Li^{++}. Även för atomer med en valenselektron fungerade Bohrs teori som en hyfsad approximation när man ser den "skärmade" kärnladdningen genom "molnet" av inre elektroner. Men teorin räckte inte till för atomer med fler än en elektron.

Likafullt kunde teorin säga *något* också om flerelektronatomer. Även sådana atomer utsänder ljus med ett karakteristiskt linjespektrum. Till och med molekyler har ett spektrum som är karakteristiskt för varje molekyltyp, även om spektra är mycket komplicerade. Det tyder på att Bohrs *postulat* håller.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad betyder att excitera en atom?
- Hur kan man excitera en atom?
- Kan en atom i grundtillståndet sända ut en foton?
- Kan en atom i ett exciterat tillstånd sända ut en foton?
- Vad betyder att en atom är joniserad?
- Gäller Bohrs postulat för alla atomer eller bara för väteatomen?
- Gäller energiformeln $W_n = -2{,}179/n^2$ för alla atomer eller bara för väteatomen?
- Hur stor är energiskillnaden mellan det lägsta (W_1) och näst lägsta energitillståndet (W_2) i väteatomen?
- Hur stor våglängd har den foton som sänds ut då väteatomen övergår från energinivån W_2 till energinivån W_1 i väteatomen?
- En foton med energin 12,75 eV sänds ut från väteatomen. Sluttillståndet är W_1. Vilket är starttillståndet?

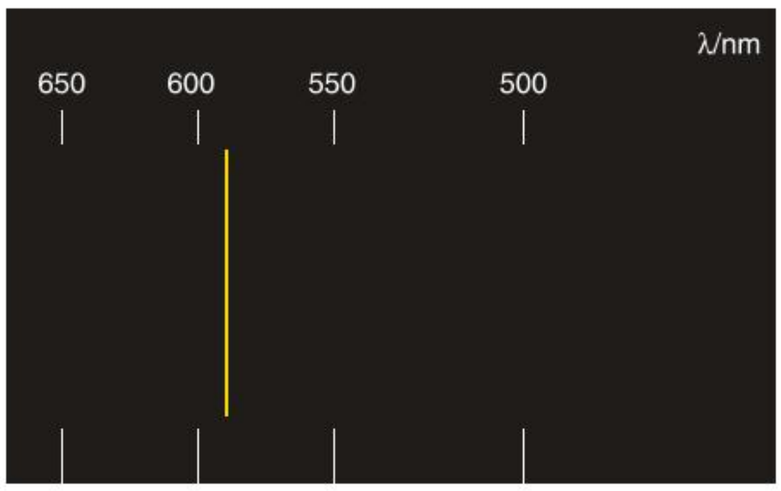
3.2 Emission och absorption

Emission av ljus från atomer och molekyler

emission betyder sända ut

Emission betyder att en atom sänder ut energi i form av en foton. De enklaste emissionsspektra får vi från enatomiga gaser. En lysande enatomig gas ger ett linjespektrum som är karakteristiskt för atomerna i gasen.

Alla ämnen övergår till enatomig gasform när temperaturen blir tillräckligt hög. Atomerna kolliderar och exciteras. De exciterade atomerna utsänder fotoner när de hoppar till lägre energinivåer. Det är det som gör att gaser lyser när de har hög temperatur.



3.5 Spektrum från lysande natriumgas.

EXEMPEL 4 **Emissionsspektret från natrium**

Vi för in lite natriumsalt i en gaslåga och tittar på lågan genom ett optiskt gitter. Då ser vi en gul linje. Se figur 3.5. Genom mätningar finner man att våglängden är $\lambda = 589$ nm. Det motsvarar frekvensen

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3{,}00 \cdot 10^{8}}{589 \cdot 10^{-9}}\ \text{Hz} = 5{,}09 \cdot 10^{14}\ \text{Hz} = 509\ \text{THz}$$

och fotonenergin

$$W = hf = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 509 \cdot 10^{12}\ \text{J} = 0{,}337\ \text{aJ} = 2{,}11\ \text{eV}$$

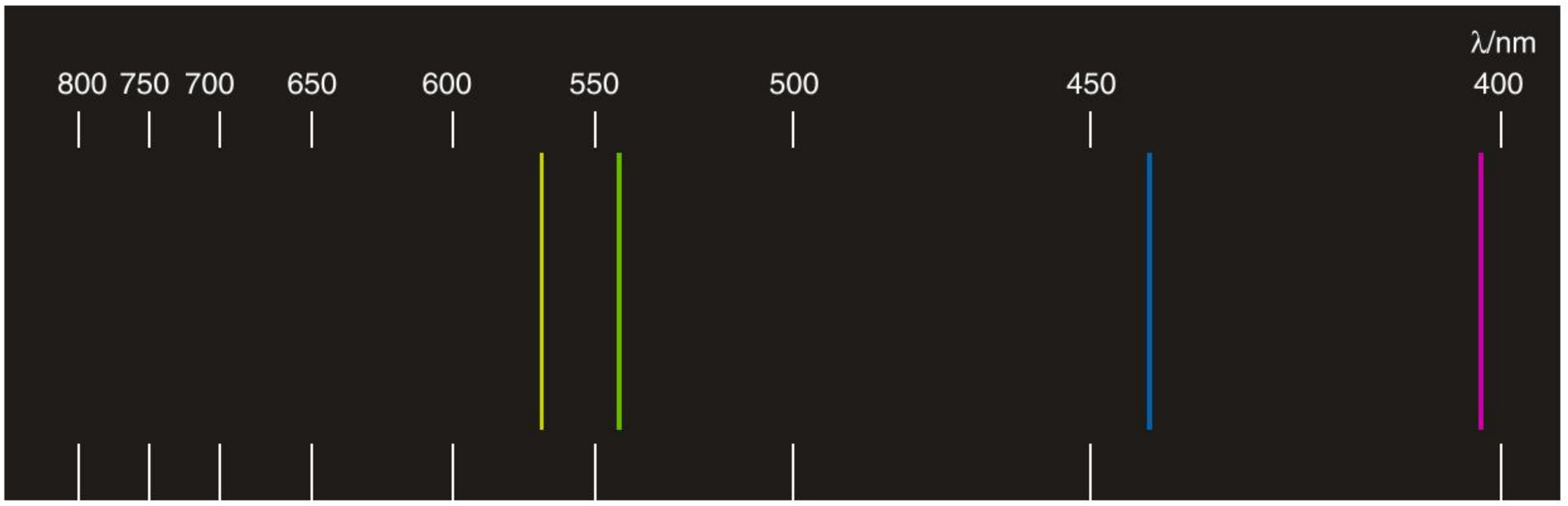
Har du sett lampor som ger gult natriumljus?

EXEMPEL 5 **Emissionsspektret från kvicksilver**

I en kvicksilverlampa exciteras kvicksilveratomerna inne i glasröret av elektroner som skickas genom röret. Om vi låter ljuset från lampan passera genom ett gitter, blir de tydligaste linjerna:

– en gul linje med	$\lambda = 577$ nm och $f = 520$ THz
– en grön linje med	$\lambda = 546$ nm och $f = 549$ THz
– en blå linje med	$\lambda = 436$ nm och $f = 688$ THz
– en violett linje med	$\lambda = 405$ nm och $f = 741$ THz

Se figur 3.6.



3.6 Spektrum från lysande kvicksilvergas.

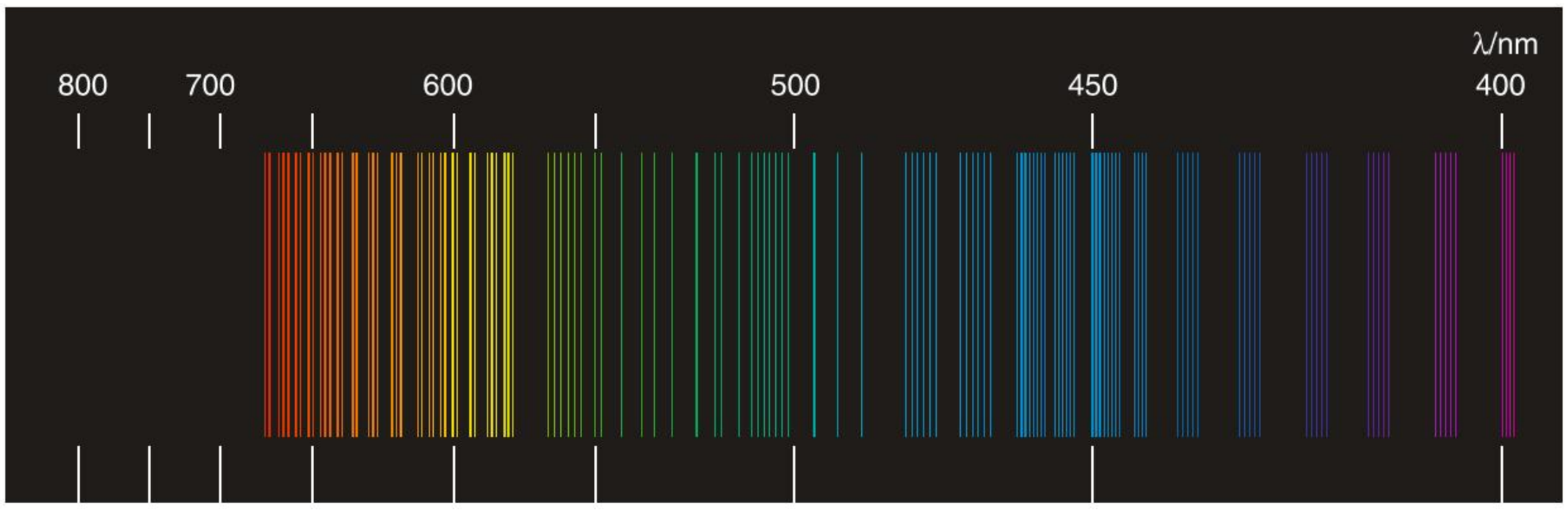
ALLA ÄMNEN ÄR UNIKA

Varje grundämne har sitt karakteristiska linjespektrum, som bestäms av energinivåerna hos atomerna i grundämnet.

Spektrum från molekyler

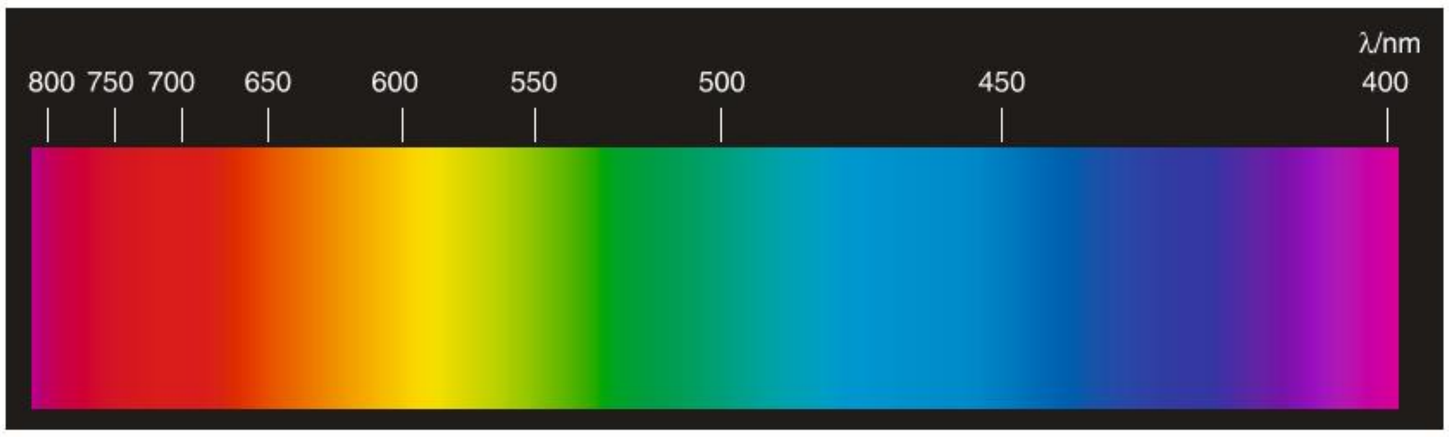
När atomer slår ihop sig till molekyler deltar de yttersta elektronerna i molekylbindningarna. Spektra från molekyler ser därför annorlunda ut än spektra från fria atomer. Precis som atomerna har också molekylerna sina karakteristiska spektra genom att elektronerna kan hoppa mellan olika energinivåer. Men energin hos en molekyl kan även ändras på andra sätt. I och med att den består av flera atomer kan den ha olika energitillstånd genom att vibrera och rotera. Därför finns det hos molekyler, många linjer som ligger så tätt att de ser ut som breda band. Sådana spektrum kallar vi för *bandspektrum*. Se figur 3.7.

3.7 Bandspektrum från lysande kvävgas.



Spektrum från fasta ämnen

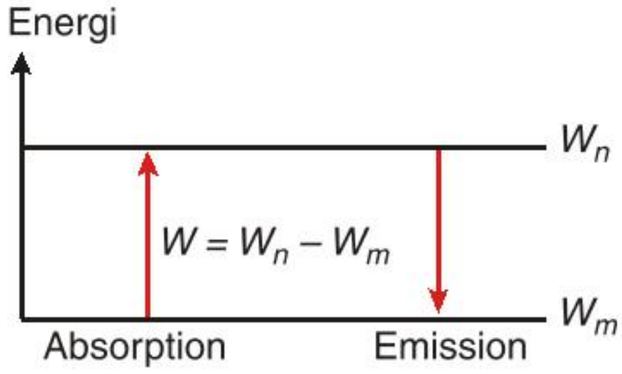
Ljuset från glödande fasta ämnen eller vätskor ger kontinuerliga spektra. Exempel på detta är ljuset från en vanlig glödlampa, eller ljuset från en flytande metall som rinner ut från en smältugn. Fria atomer i en tunn gas påverkar inte varandra. De har därför skarpa energinivåer och skickar alltså ut ljus som bildar ett linjespektrum. Molekylerna eller atomerna i de glödande fasta ämnena eller vätskorna sitter så tätt ihop att de påverkar varandras energinivåer. Man får därför breda band i stället för skarpa tillstånd. Övergångar mellan banden ger ett kontinuerligt spektrum. Se figur 3.8.



3.8 Kontinuerligt spektrum.

Absorption av ljus

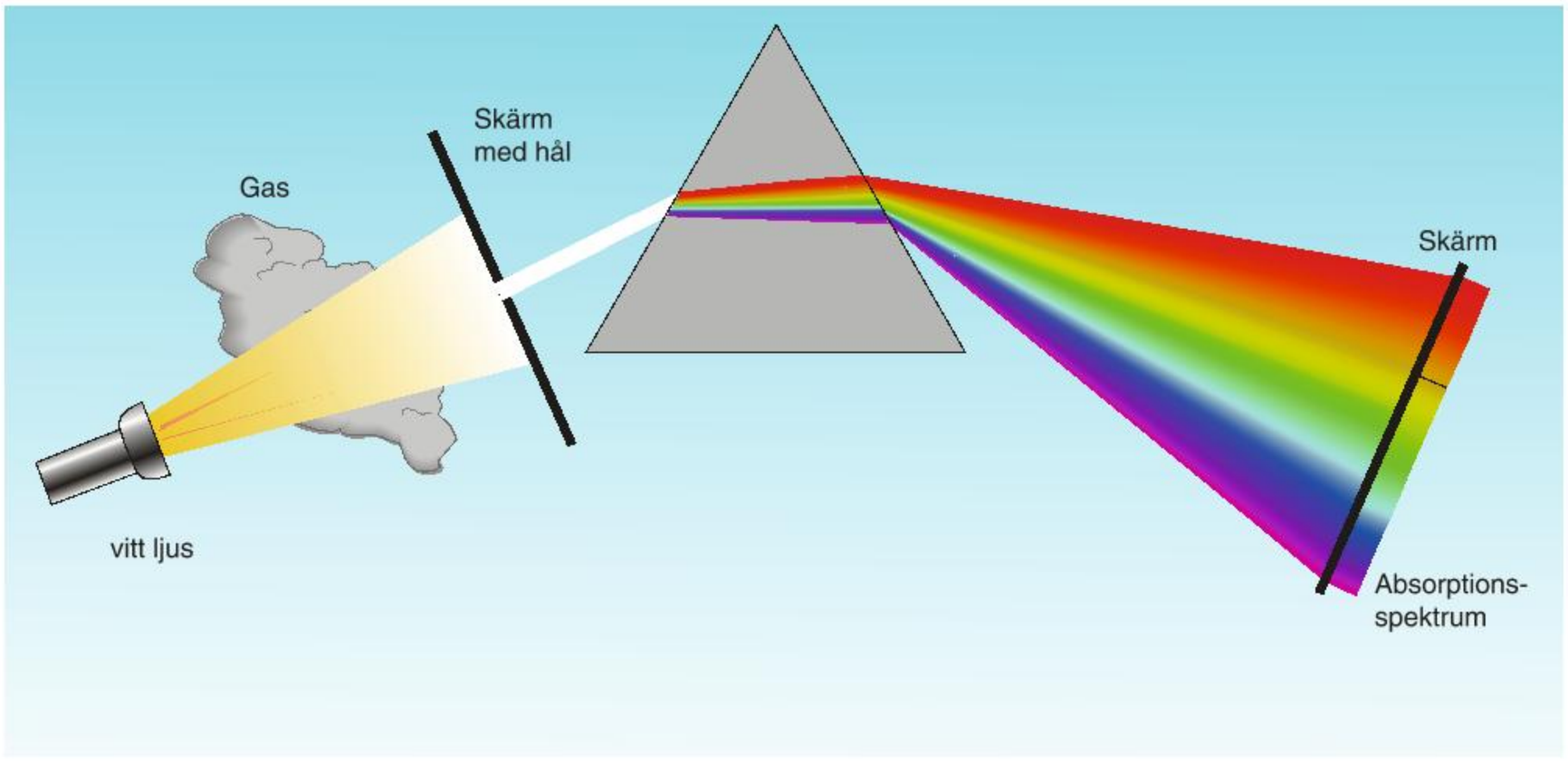
Vid absorption mottar en atom energi i form av en foton. Därmed försvinner fotonen. När vitt ljus passerar genom en gas, absorberas en del av ljuset. Det ljus som har passerat genom gasen ger ett absorptionsspektrum. De mörka linjerna ligger exakt där de ljusa emissionslinjerna för samma gas skulle ha legat. Se figur 3.9.



3.9 Absorption och emission av ljus. Energikvantat $W = W_n - W_m$ är lika stort i båda fallen.

Men kommer inte en atom som har absorberat en foton att falla tillbaka till det ursprungliga energitillståndet, och därmed sända ut en foton med samma energi och frekvens? Hur kan det då bli en mörk absorptionslinje?

Strålningen som absorberas har en bestämd riktning, medan ljuset som emitteras sänds ut i *alla* riktningar. Därmed försvagas de absorberade frekvenserna i den *ursprungliga* riktningen. Se figur 3.10.



3.10 Hur vi får mörka absorptionslinjer.

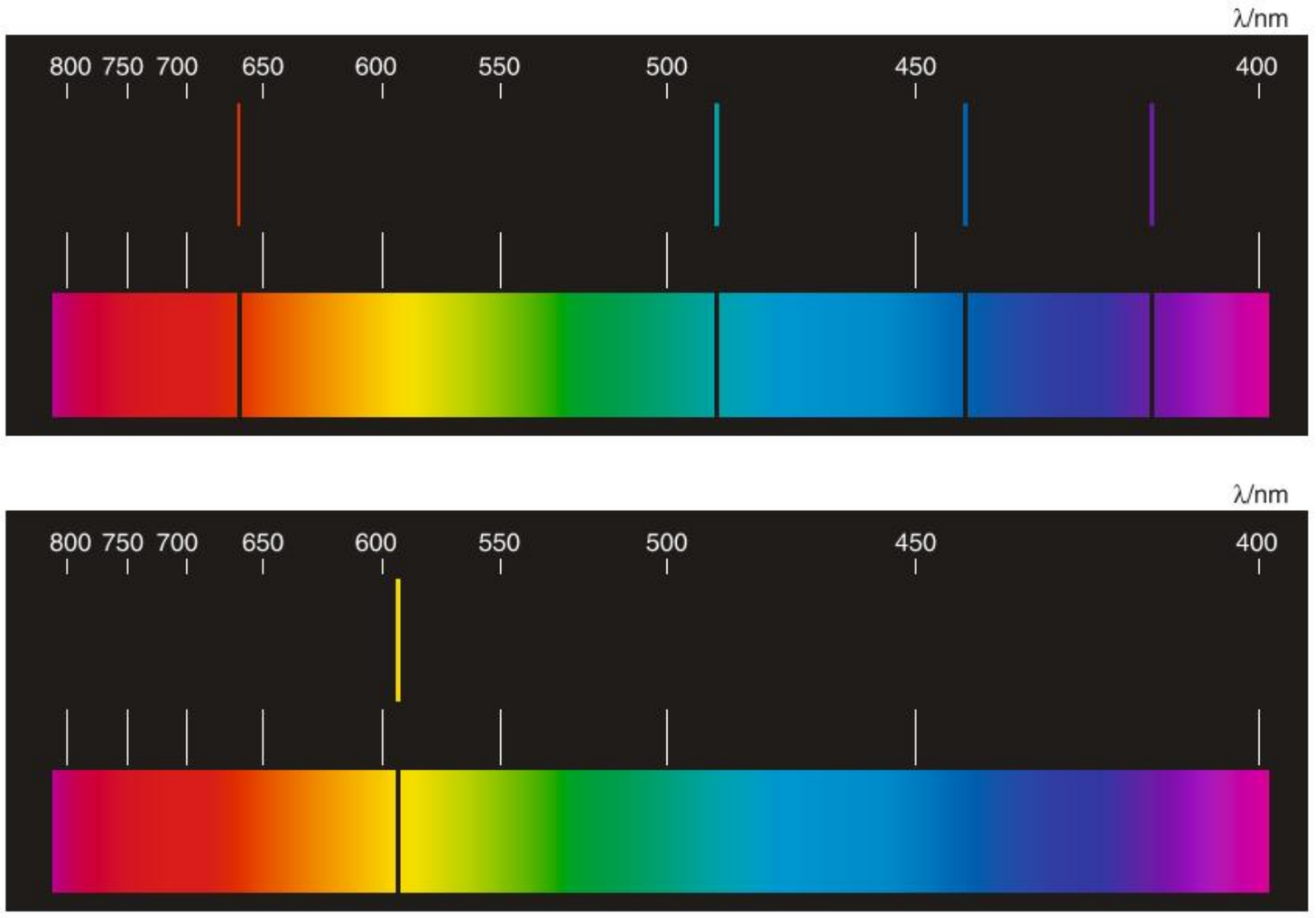
Figur 3.11 visar emissions- och absorptionsspektret för vätgas och natriumånga. De mörka linjerna i absorptionsspektret ligger precis på de ställen där det finns ljusa linjer i emissionsspektret.

EMISSIONS- OCH ABSORPTIONSLINJER

Ett grundämne som kan sända ut ljus med en viss våglängd, kan även absorbera ljus med samma våglängd.

Ett spektrum med ljusa emissionslinjer kallas emissionsspektrum.

Mörka linjer i ett kontinuerligt (sammanhängande) spektrum kallar vi absorptionslinjer.

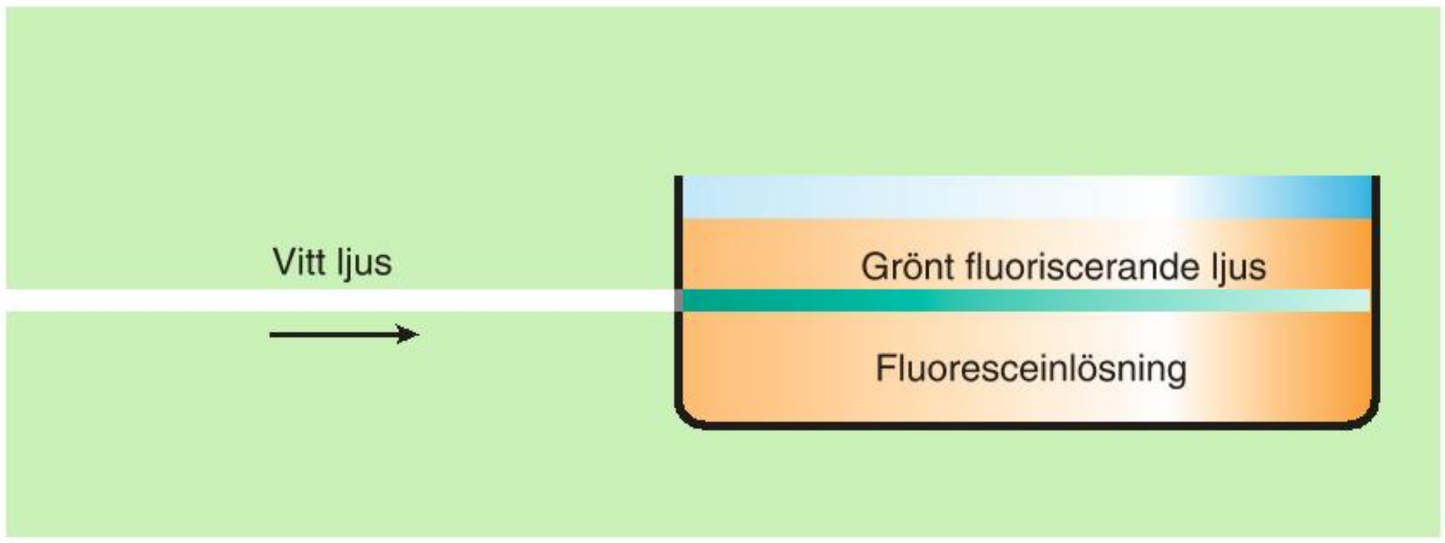


3.11 Emissionsspektrum och absorptionsspektrum för
a) väte och
b) natrium.

Luminiscens

Varför lyser TV-skärmen? Skärmen är ju kall. Detta är ett exempel på "kallt ljus". Ljusemission vid låg temperatur kallar vi *luminiscens*.

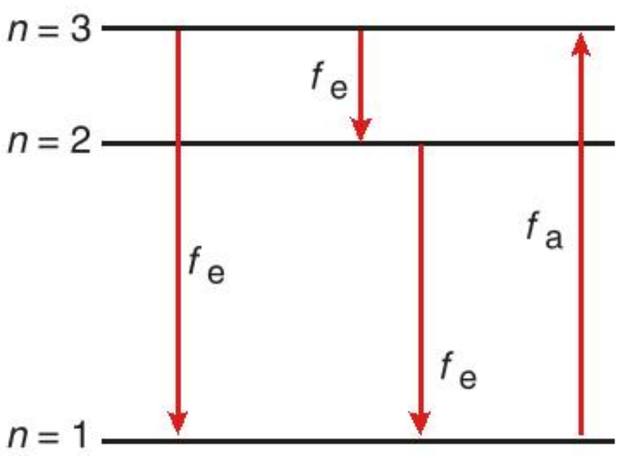
Låt oss illustrera fenomenet genom ett försök: I ett kärl med vatten droppar vi några droppar av en lösning med fluorescein. Se figur 3.12. Om vi skickar en stråle vitt ljus genom vattnet, ser vi en grön, lysande stråle i vattnet. Om vi skickar en blå ljusstråle så är ljuset i kärlet fortfarande grönt. Men om vi i stället skickar in rött ljus, så försvinner det gröna ljuset i kärlet. Vad är det som händer?



3.12 Demonstration av en typ av luminiscens.

Jo, när ljus absorberas i ett luminiscerande ämne, så går en del av energin åt till att excitera atomer i ämnet. De exciterade atomerna sänder då strax ut ljus igen, det är det som är luminiscensljuset. När en atom har absorberat en foton, har atomen bara så mycket energi att den kan sända ut fotoner med lika stor eller lägre energi. Det betyder att den emitterade frekvensen måste bli lägre än eller lika hög som den absorberade frekvensen.

$$f_e \leq f_a$$

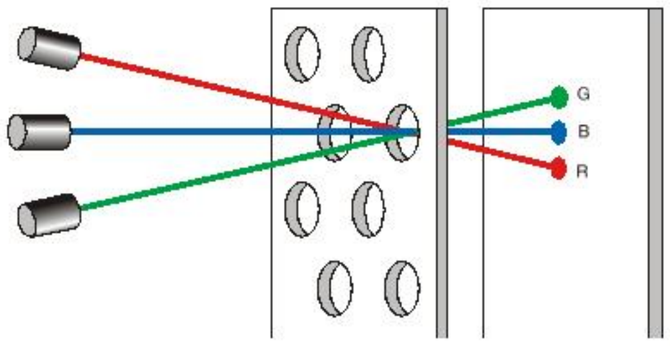


3.13 Energisprång vid luminiscens.

När $f_e \leq f_a$ har de exciterade atomerna gått tillbaka till grundtillståndet via mellanliggande tillstånd. Blått ljus innehåller fotoner som har tillräckligt hög energi för att excitera fluoresceinet, så att det kan sända ut grönt ljus. Men fotonerna i rött ljus har för låg energi. Se figur 3.13.

Vissa lampor har ett tunt skikt av ett luminiscerande ämne på insidan av glaset. Inne i ett lysrör blir kvicksilver- och argonatomer exciterade av en elektronstråle. Den exciterade gasen utsänder strålning, till stor del i det ultravioletta området. Denna strålning får det luminiscerande ämnet på insidan av röret att sända ut synligt ljus.

Energirika elektroner kan också excitera atomerna i vissa luminiscerande ämnen. Det är det som händer på insidan av en lite äldre TV- eller datorskärm. Se figur 3.14.



3.14

EXEMPEL 6 **Insidan av en gammaldags TV-monitor**

Du har säkert sett TV-monitorer eller PC-monitorer som inte har platta skärmar. Monitorerna genomgick en femtioårig evolution från svartvita bilder av dålig kvalitet till färgbilder av ganska hög kvalitet. Hur fungerar en färgmonitor? Jo, en elektronstråle sveper fram och tillbaka över skärmen 25 gånger per sekund. Det betyder att bilden skiftar 25 gånger per sekund,och ger ett intryck av levande bilder. Elektronstrålen mot en färgskärm består egentligen av tre strålar. Skärmens insida är täckt med en mask med många små hål. De tre strålarna har inte samma riktning, men de går genom samma hål och träffar var sin luminiscerande punkt: en som luminiscerar i rött, en i grönt och en i blått. Punkterna ligger så tätt att de tre färgerna upplevs som en. Intensiteten hos var och en av strålarna kan varieras, så att intensiteten hos de tre punkterna också varierar. På så sätt kan skärmen visa alla slags färger. … eller snarare lura ögat till att *tro* att alla färger är representerade. Tittar du på en testbild med ett förstoringsglas kan du avslöja ”bluffen”! Men … hur fungerar då vårt färgseende? Sök på ”Colourvision”.

Spektret och fysikens lagar

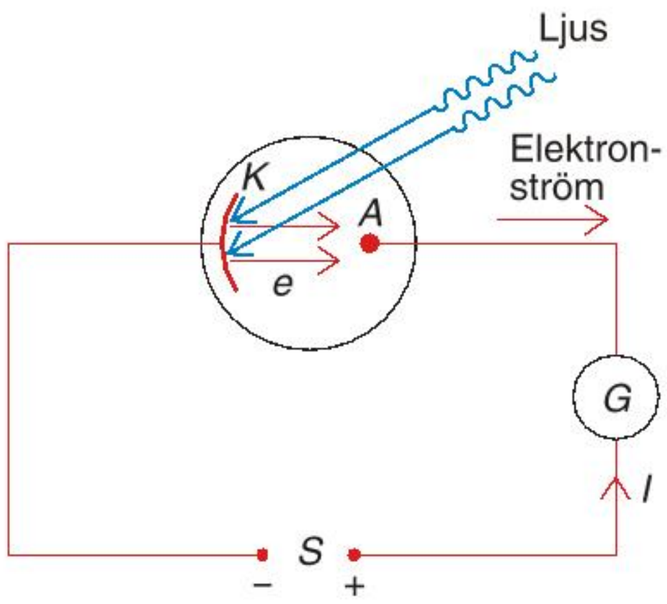
Vi inledde med att berätta om de mörka fraunhoferlinjerna i solspektret. Orsaken till dessa är att det vita ljuset från solen passerar igenom solatmosfären på sin väg till jorden. De mörka linjerna i solspektret avslöjar alltså vilka gaser som finns i solatmosfären. Spektra från andra stjärnor visar motsvarande mörka linjer från de gaser som finns i stjärnatmosfären. Det uppstår också mörka linjer i spektret när ljuset från stjärnorna passerar genom gasmoln på vägen genom världsrymden. Analyser av spektra har visat att alla grundämnen och en stor mängd molekyler finns ute i universum. Där ute har man till och med funnit några av de organiska molekyler som utgör livets byggstenar. Dessa spektra är en guldgruva för kunskap om förhållandena på andra ställen i universum.

I spektret från fjärran galaxer kan vi alltså återfinna de mörka linjerna vi såg på laboratoriet, men nu som en följd av att ljuset från galaxerna passerade vätgas miljarder ljusår från jorden. Det berättar för oss att fysikens lagar var desamma där och då som de är här och nu. Fysikens lagar har alltså varit desamma i flera miljarder år, och de är desamma överallt i universum.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad menas med emission?
- Vad menas med absorption?
- Hur ser emissionsspektret för ett grundämne ut?
- Hur ser absorptionsspektret för samma grundämne ut?
- Kan du förklara sambandet mellan emissionsspektret och absorptionsspektret för ett grundämne?
- Vad menas med luminiscens?
- Vilken regel gäller för luminiscensljusets frekvens?
- Hur uppstår fraunhoferlinjerna i solspektret?
- Vad kan de mörka spektrallinjerna berätta för oss om förhållandena på andra ställen i universum?
- Våglängden för en spektrallinje i kvicksilver är 404,7 nm. Beräkna energiskillnaden mellan de båda nivåerna i kvicksilveratomen som detta motsvarar.

3.3 Fotoelektrisk effekt



3.15 En fotocell kopplad till en likspänningskälla.

Redan år 1887 hade Heinrich Hertz observerat det fenomen som vi nu kallar *fotoelektrisk effekt:* När ljus träffar en metall, kan metallen sända ut elektroner. Men det var svårt att förklara detta fenomen med hjälp av klassisk vågteori.

Vi har en *fotocell,* som är ett lufttomt glasrör med en katod K och en anod A. Se figur 3.15. Katoden har ett blankputsat lager av metallen kalium. Elektroderna är kopplade till en variabel likspänningskälla S, så att det uppstår ett elektriskt fält mellan elektroderna. I strömkretsen har vi också kopplat in en känslig amperemeter G.

När vi sänder vitt ljus mot katoden, gör amperemetern utslag. Det flyter alltså en elektrisk ström i kretsen $SGAK$. Varifrån kommer den strömmen? Jo, när ljuset träffar katoden, sänder katoden ut elektroner. Det elektriska fältet drar elektronerna mot anoden. Där fångas de in och strömmar genom amperemetern till spänningskällan. Så långt är det inte någon allvarlig konflikt med klassisk vågteori.

Gränsfrekvens

Nu sänder vi *enfärgat* ljus mot katoden. När ljuset är blått, går det ström i kretsen. Men när ljuset är rött, går det *ingen* ström. Blått ljus har högre frekvens än rött ljus. Det visar att katodens förmåga att sända ut elektroner är beroende av *ljusfrekvensen*.

I klassisk fysik visste man att ökad frekvens betydde ökad energi. När man ökade ”vågornas” energi började alltså katoden att sända ut elektroner. Inte så konstigt? Men vi kan också öka energin genom att öka intensiteten utan att förändra frekvens. Alltså genom att öka ljusstyrkan men behålla färgen. Över en viss frekvens, den så kallade *gränsfrekvensen* f_g, så sände katoden ut elektroner. Ökades intensiteten vid frekvenser över gränsfrekvensen så ökade antalet elektroner. Ökades frekvensen ytterligare så ökade elektronernas kinetiska energi. Men under gränsfrekvensen spelade det ingen roll hur mycket man ökade intensiteten – inga elektroner sändes ut!

Detta är mycket svårt att förklara klassiskt. Varje metall har sin bestämda gränsfrekvens. För kalium ligger gränsfrekvensen i den gröna delen av spektret.

GRÄNSFREKVENS

För att ljus ska kunna slå loss elektroner i en metall, måste ljusfrekvensen vara minst lika stor som gränsfrekvensen för metallen,

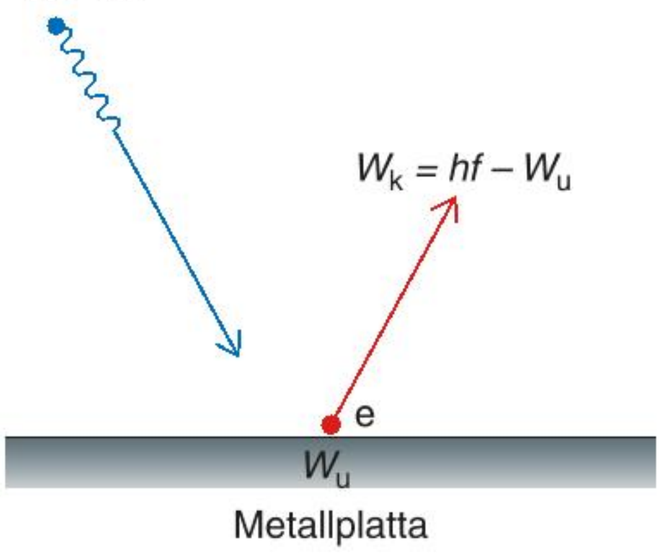
$$f \geq f_g$$

Den klassiska vågteorin för ljus kan inte förklara existensen av en gränsfrekvens.

Einsteins förklaring

Einstein förklarade den fotoelektriska effekten utifrån fotonmodellen. Det är fotoner i ljuset som slår loss elektroner från metallen. Så här går det till: *En foton* avger hela sin energi till bara *en* elektron, och elektronen får energi bara från denna enda foton.

Om ljusfrekvensen är f, har fotonen *energin* $W = hf$. Det arbete som behövs för att riva loss en elektron från metallen, kallar vi *utträdesarbetet* W_u. Utträdesarbetet varierar från metall till metall och talar om hur starkt ledningselektronerna är bundna till metallatomerna. Om fotonenergin W är större än utträdesarbetet W_u, far elektronen ut från metallen med en kinetisk energi W_k som är lika med energiöverskottet $W - W_u$. Se figur 3.16. Einstein kom alltså fram till följande *energiformel* för fotoelektrisk effekt:



3.16 Einsteins förklaring till fotoelektrisk effekt.

EINSTEINS FOTOELEKTRISKA FORMEL

När en foton river loss en elektron, går fotonenergin åt till att riva loss elektronen och ge elektronen kinetisk energi,

$$hf = W_u + W_k$$

För att en elektron ska rivas loss från metallen, måste *en foton* ha tillräcklig energi. Denna energi kallas utträdesarbete.

$$hf \geq W_u$$

Gränsfrekvensen f_g är den frekvens som *nätt och jämt* ger fotoelektrisk effekt:

$$hf_g = W_u$$

Försök med fotoceller hade också visat att ju högre frekvens ljuset har, desto större kinetisk energi får de lossrivna elektronerna. Även detta kan Einsteins formel förklara. Den ger

$$W_k = hf - W_u$$

som visar att den kinetiska energin är en linjär funktion av ljusfrekvensen.

Om enfärgat ljus river loss elektroner, visar det sig att antalet varierar med ljusintensiteten. Det betyder att fler fotoner leder till fler lossrivna elektroner *utan* att den kinetiska energin hos varje enskild elektron förändras.

EXEMPEL 7 **Fotoelektrisk effekt med kalium**

Försök visar att gränsfrekvensen för kalium är $f_g = 555$ THz, som ligger i den gröna delen av spektret. Utträdesarbetet för kalium blir

$$W_u = hf_g = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 555 \cdot 10^{12}\ \text{J} = 3{,}68 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Vi kombinerar Einsteins energiformel $hf = W_u + W_k$ med formeln $W_u = hf_g$ för utträdesarbetet. Då får vi

$$W_k = hf - hf_g = h(f - f_g)$$

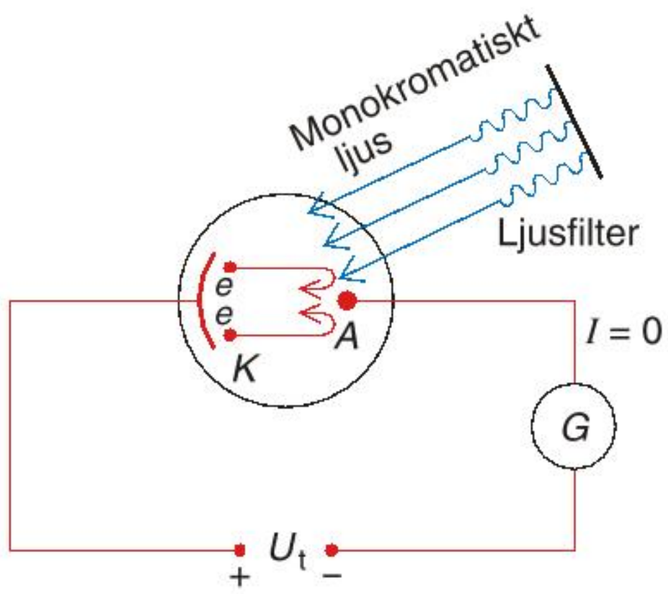
Du ser att elektronernas kinetiska energi är lika med noll när ljusfrekvensen är lika med gränsfrekvensen, och att den kinetiska energin ökar när ljusfrekvensen ökar.

Blått ljus med frekvensen $f = 650$ THz kan ge fotoelektrisk effekt från kalium. Elektronerna kommer ut från metallen med kinetiska energin

$$W_k = h(f - f_g) = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot (650 - 555) \cdot 10^{12}\ \text{J} = 6{,}3 \cdot 10^{-20}\ \text{J}$$

Violett ljus med frekvensen $f = 750$ THz ger elektroner med kinetiska energin

$$W_k = h(f - f_g) = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot (750 - 555) \cdot 10^{12}\ \text{J} = 12{,}9 \cdot 10^{-20}\ \text{J}$$



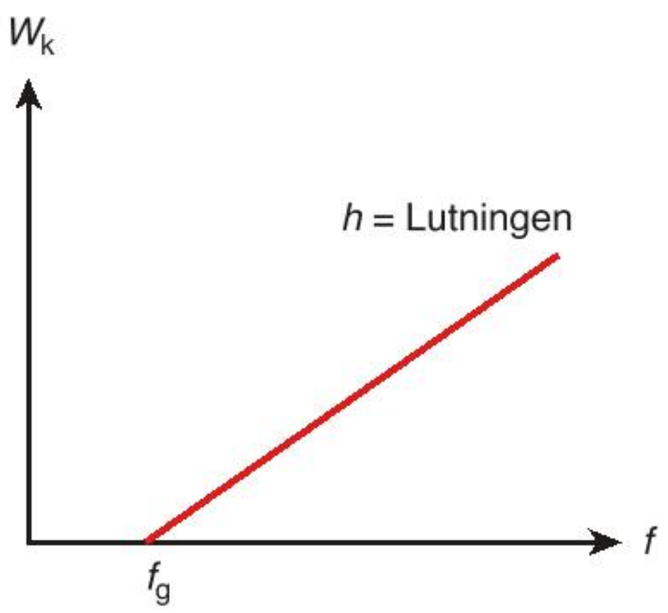
3.17 Mätning av tröskelspänningen vid fotoeffekt. Elektronerna vänder strax innan de kommer fram till anoden.

Mätning av Plancks konstant

Nu kopplar vi fotocellen till spänningskällan så att *katoden blir positiv* och anoden negativ. Se figur 3.17. Då måste elektronerna från katoden röra sig *mot* den elektriska kraften. Vi varierar spänningen U tills vi finner *tröskelspänningen* U_t. Det är den spänning som är sådan att elektronerna från katoden vänder precis vid anoden. Då kommer inga elektroner fram till anoden, och strömmen genom amperemetern blir lika med noll.

Vid katoden har en elektron den kinetiska energin W_k. Vid anoden har den en potentiell energi $W_p = eU_t$ där e är elementarladdningen. Eftersom totalenergin är konstant, får vi

$$W_k = eU_t$$



3.18 Fotoelektronernas kinetiska energi som funktion av ljusfrekvensen.

Genom att mäta tröskelspänningen kan vi alltså finna den kinetiska energi elektronerna har när de kommer ut från katoden.

Vi sänder i tur och ordning ljus med olika frekvenser mot katoden. Vi mäter sammanhörande värden på frekvens f och tröskelspänning U_t och beräknar den kinetiska energin W_k med hjälp av formeln ovan. Därefter ritar vi W_k som funktion av f. Se figur 3.18. Kurvan blir en rät linje som skär f-axeln vid en viss frekvens, nämligen gränsfrekvensen f_g.

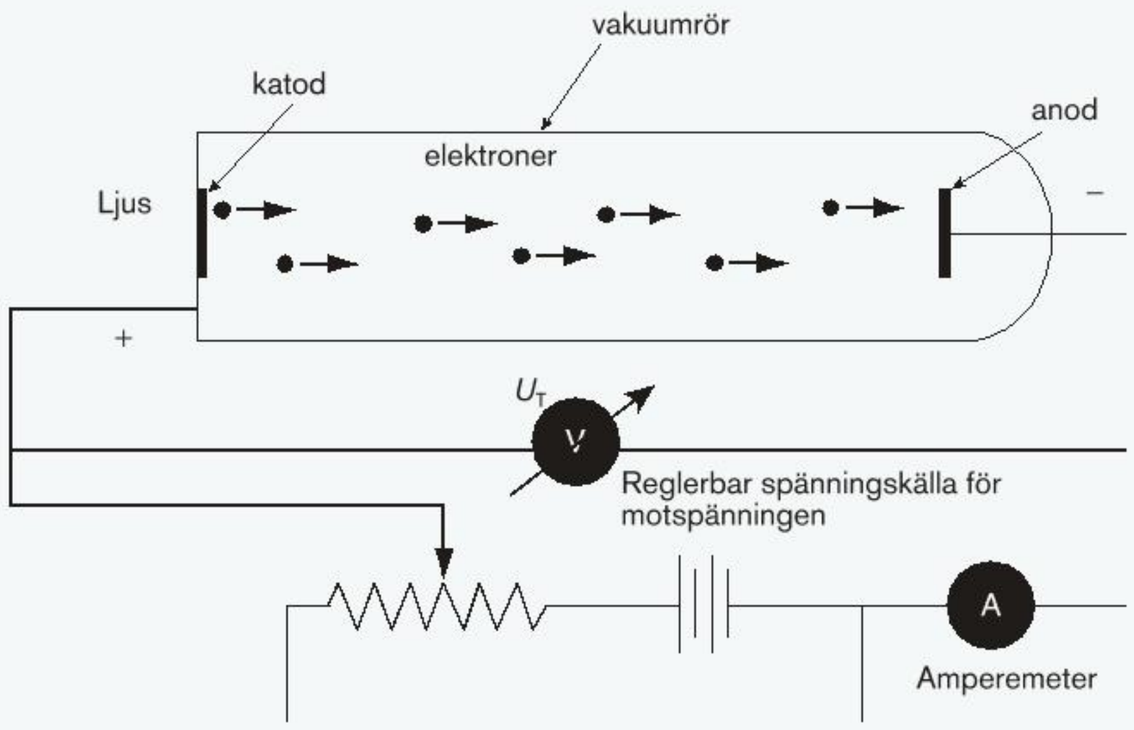
Einsteins fotoelektriska formel ger oss

$$W_k = hf - W_u$$

Den kinetiska energin är alltså en *linjär funktion* av ljusfrekvensen, med Plancks konstant h som lutning.

BESTÄMNING AV EN METALLS UTTRÄDESARBETE

Försök: Vi har fått en märklig liten låda som vi inte kan se in i. Men vi vet att det är en apparat som den i figuren. Inne i lådan finns en lampa som kan sända ljus med olika frekvens och intensitet mot en metallplatta, katoden. Vi kan ställa in ljusets frekvens och intensitet. En amperemeter visar strömstyrkan. Genom att justera upp motspänningen så att den blir lika stor som tröskelspänningen, kan vi ta reda på hur mycket kinetisk energi de frigjorda elektronerna har. Vår uppgift är dels att använda uppställningen till att mäta Plancks konstant, dels att försöka mäta metallens utträdesarbete och därmed försöka gissa vilken metall vi har i katoden.



Uppställning: Figuren visar vad som finns inne i vår svarta låda. Men vi vet inte vad det är för metall i vår katod.

Teori: Vi använde oss av Einsteins formel för den fotoelektriska effekten:

$$hf = W_u + W_k$$

där hf är fotonernas energi, W_u är utträdesarbetet och W_k de frigjorda elektronernas kinetiska energi.

När vi justerade motspänningen så att elektronerna nästan nådde fram till anoden fick vi

$$W_k = U \cdot e.$$

Sätter vi in detta uttryck i Einsteins formel får vi

$$hf = W_u + U \cdot e$$

som vi kan omforma till:

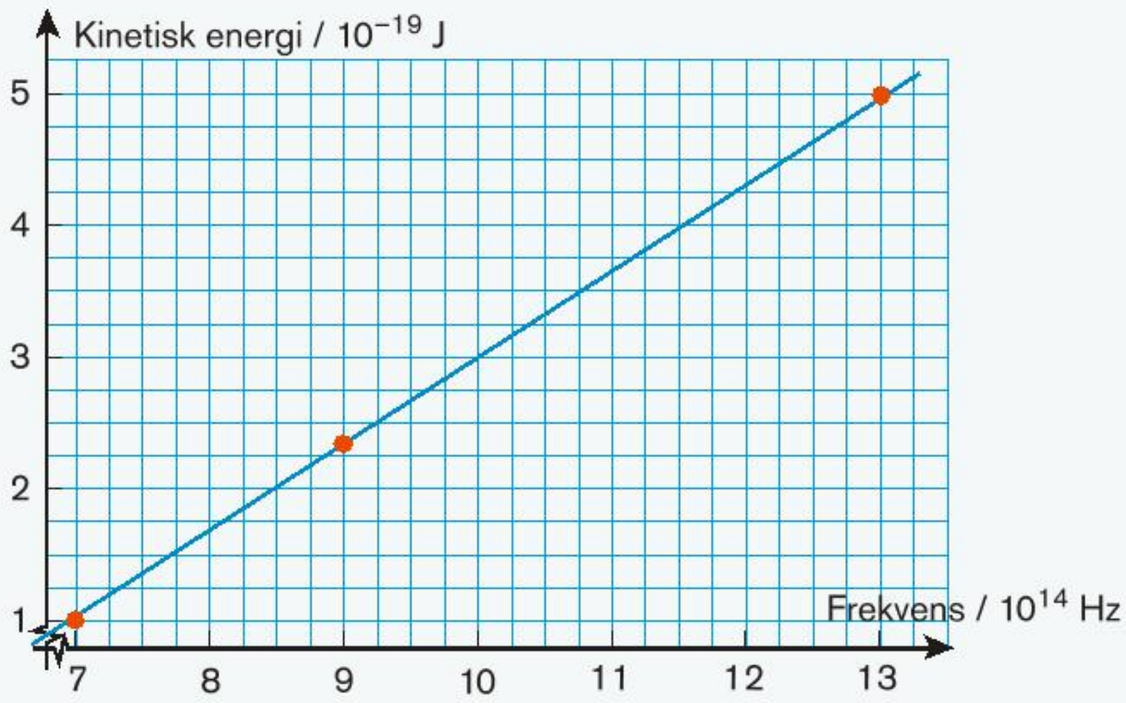
$$U \cdot e = hf - W_u$$

vilket är ekvationen för en rät linje med lutning h som skär den lodräta axeln i $-W_u$.

Utförande: Vi sände i tur och ordning violett ljus med frekvensen $f_1 = 700$ THz och ultraviolett strålning med två olika frekvenser, $f_2 = 900$ THz och $f_3 = 1\,300$ THz, mot katoden och mätte tröskelspänningarna.

Resultat:

Frekvens/Hz	$7 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{14}$	$13 \cdot 10^{14}$
Kinetisk energi, $(U \cdot e)$/J	$1{,}02 \cdot 10^{-19}$	$2{,}34 \cdot 10^{-19}$	$4{,}96 \cdot 10^{-19}$



Med hjälp av linjär regression fick vi fram ekvationen för den räta linjen och därmed Plancks konstant och utträdesarbetet:

$$y = 6{,}56 \cdot 10^{-34} \cdot x - 3{,}57 \cdot 10^{-19} \qquad \text{d.v.s.}$$

$$h = 6{,}56 \cdot 10^{-34}\ \text{Js} \quad \text{och} \quad W_u = 3{,}57 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Eftersom utrustningen var en svart låda vet vi inte så mycket om osäkerheten. Men jämfört med tabellvärdet för Plancks konstant, $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$, var vårt värde endast 1 % fel.

Det betyder kanske att vi kan lita på ”vårt” utträdesarbete. Vi hade en tabell där utträdesarbetet gavs i eV. Vi räknade om vårt resultat och fick

$$W_u = 3{,}57 \cdot 10^{-19}\ \text{J} = \frac{3{,}57 \cdot 10^{-19}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}\ \text{eV} = 2{,}2\ \text{eV}$$

Detta utträdesarbete stämmer ganska bra för Kalium, Natrium och Cesium. Det verkar som om utträdesarbetet för olika metaller ligger mellan 2,1 eV för Cesium till 6,35 eV för Platina.

Användning av fotoelektrisk effekt

Fotoelektrisk effekt används till att omvandla ljussignaler till elektriska signaler och till att omvandla strålningsenergi till elektrisk energi.
Exempel:

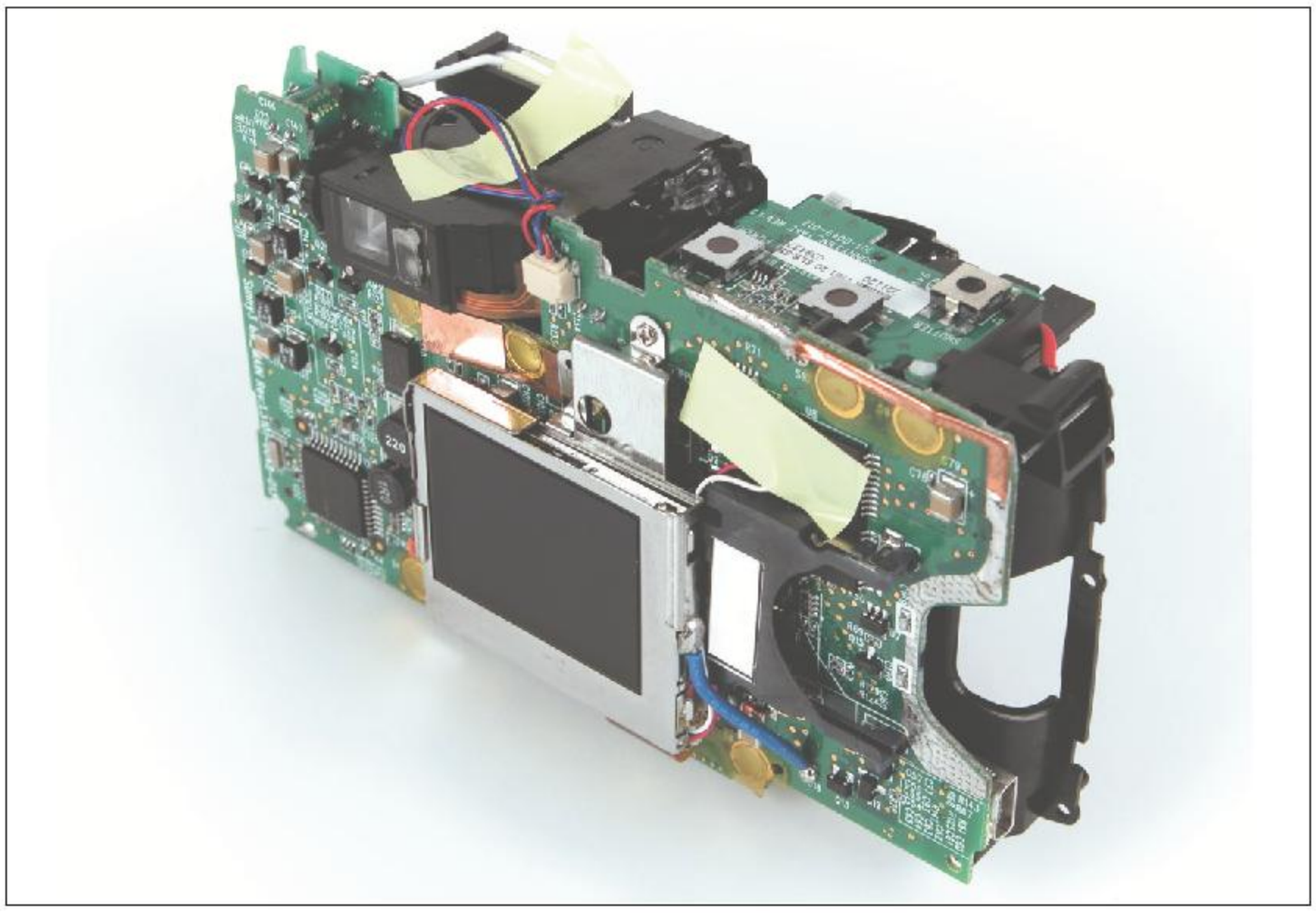
- automatiska dörröppnare
- larmsystem
- streckkodsläsare
- tändning och släckning av vägbelysning
- solcellspaneler
- ljusmätare i kameror

Digital fotografering

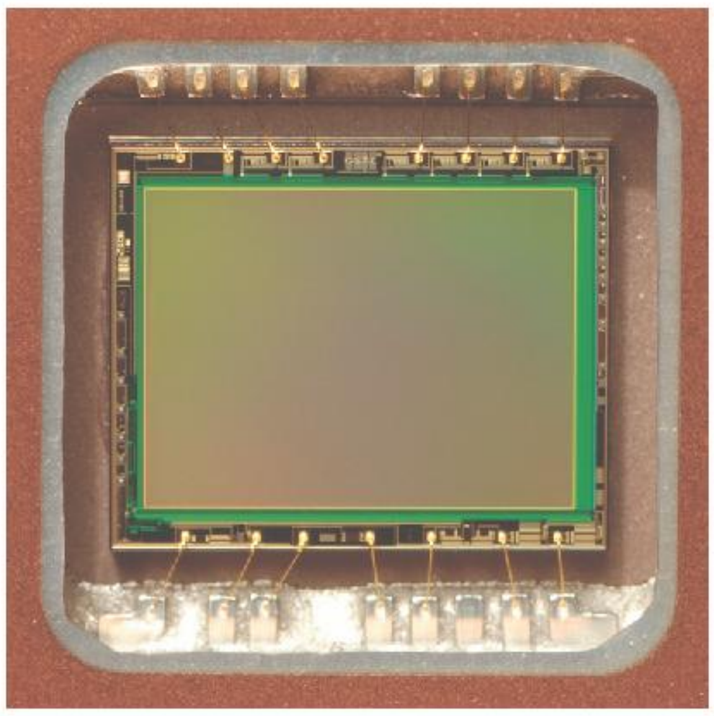
Det var under 1990-talet som digitalkamerorna gjorde sitt genombrott. Tidigare handlade fotografering om filmrullar som skulle lämnas in för framkallning om man inte var så lyckligt lottad att man hade tillgång till ett mörkrum med framkallnings – och fixeringsvätskor, förstoringsapparater och torkmaskiner. På den tiden var kamerorna *analoga*. Bilden registrerades genom att ljuset som släpptes in genom linsen reagerade med silverhaltiga salter på filmens yta. Silversalterna omvandlades sedan i framkallningsprocessen till svart silver i förhållande till hur mycket ljus de absorberat. Motivets mörka delar blev då ljusa och de ljusa delarna blev mörka, man fick alltså en negativ bild som var uppbyggd av svarta silverkorn. I en digitalkamera har en digital ljusdetektor ersatt filmrullen.



a) Analog kamera



b) Digital kamera



3.19 En CCD-enhet är ett rutnät som består av små ljuskänsliga komponenter. När de träffas av fotoner så konverteras ljuset till elektroner. Ju fler elektroner desto större ljusintensitet. I flera steg översätts de elektriska laddningarna till bilder.

Den digitala ljusdetektorn som används i digitalkameror är en så kallad *charged- coupled device* (CCD). Detta gav upphovsmännen Willard S. Boyle och George E. Smith 2009 års nobelpris i fysik. Se figur 3.19.

Utan denna mycket ljuskänsliga sensor som finns i varje digitalkamera eller mobiltelefon skulle vi inte ha den explosion av bild- och filmmaterial som numera finns i våra hem och på Internet. När ljuset träffar CCD-enheten exciteras elektroner som flyttas i kretsen som om de vore hopkopplade i en kedja. Efter en tid hamnar laddningarna i en förstärkare som skapar en signal som därefter kan bearbetas för att skapa en bild.

Upplösning

När vi jämför digitalkameror, är det ofta tal om antal *megapixlar*. En pixel är en punkt på bilden, alltså signalen som kommer från en enskild diod i CCD-enheten.

En kamera på 1 megapixel har en CCD-enhet med en miljon bildpunkter medan en kamera på fem megapixlar har fem miljoner bildpunkter. När vi tar bilder av samma motiv med kameror med olika antal pixlar kommer kameran med flest pixlar att registrera flest detaljer i bilden. Vi säger att kamerorna ger olika *upplösning*. Om en bild ska förstoras mycket och skrivas ut i stort format, bör den ha hög upplösning för att vi inte ska se de enskilda pixlarna. Men det är inte alltid det är bäst med en hög upplösning. Bilder med hög upplösning tar mer lagringsutrymme och minneskortet i kameran blir därför fortare fullt. Dessutom är en del kameror med hög upplösning utsatta för ”signalbrus”, det vill säga falska signaler som sänker den effektiva upplösningen. Kameratillverkarna konkurrerar med att ange antalet megapixlar men det finns alltså flera andra faktorer som påverkar en sensors upplösning. Ytterligare några av dessa faktorer är storleken på sensorn och objektivets kvalitet. Om man vill ha en kamera med hög upplösning är det alltså viktigt att även objektivet är av hög kvalitet.



Samma motiv fotograferat med olika upplösning.
Bilden till vänster har högst upplösning och visar flest detaljer.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad är fotoelektrisk effekt?
- Vilken förklaring gav Einstein på fotoelektrisk effekt?
- Vilken formel gav Einstein för fotoelektrisk effekt?
- Vilket samband gäller mellan utträdesarbetet och gränsfrekvensen?
- Vad menas med tröskelspänningen för en fotocell?
- Vilket samband gäller mellan tröskelspänningen och den kinetiska energin för de lossrivna elektronerna?
- Vad är en megapixel?
- Vad menas med upplösning?
- Utträdesarbetet för silver är 4,64 eV. Hur stor är gränsfrekvensen?
- En foton med energin 5,80 eV slår ut en elektron från en silverplatta. Hur stor rörelseenergi får den utslagna elektronen?

3.4 Fotonens rörelsemängd

I förra avsnittet berättade vi om Einsteins tolkning av den fotoelektriska effekten. Den fotoelektriska effekten visar sig när vi bestrålar en metall med ljus. Om ljusets våglängd är kort nog så avger metallen elektroner. Elektronernas hastighet är bara beroende av ljusets våglängd. Einstein tog Plancks kvanthypotes, det att ljuset består av energikvanta, $E = hf$, på fullt allvar. Han antog att ljuset har partikelegenskaper. Dessa visar sig i den fotoelektriska effekten genom att en ljuspartikel, en foton, avger hela sin energi, hf, till en elektron.

Man kan undra hur det förhåller sig med fotoner i relativitetsteorin? De uppvisar partikelegenskaper, men har ingen massa och rör sig med ljusets hastighet.

En relation som kan härledas ur definitionen av rörelsemängd är

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

Relationen ger ett samband mellan totalenergin, rörelsemängden och viloenergin för en partikel. Som vi redan har sett kan partiklar med massa aldrig uppnå ljushastigheten. Men fotoner då? Låt oss följa Einstein, som 1916 var den förste att föreslå att fotoner också kunde ha rörelsemängd. Partiklar med massa kan inte röra sig med ljushastigheten. Men då måste fotoner som ju alltid rör sig med ljusets hastighet vara masslösa. Med $m = 0$ reduceras relationen över till $E^2 = p^2c^2$, eller helt enkelt

$$E = pc$$

som alltså gäller för masslösa partiklar. Om vi kombinerar det här med kvanthypotesen får vi $hf = pc$. Men $f = \frac{c}{\lambda}$ så vi finner att $\frac{hc}{\lambda} = pc$. Förkortar vi bort c så finner vi att

$$p = \frac{h}{\lambda}.$$

FOTONENS RÖRELSEMÄNGD

Rörelsemängden hos en foton är lika med energin dividerad med ljushastigheten,

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Här är f frekvensen och λ våglängden för strålningen.

EXEMPEL 8 **Laserljuset**

Fotoner i rött laserljus har energin $E = 3{,}14 \cdot 10^{-19}$ J. Rörelsemängden blir därför

$$p = \frac{E}{c} = \frac{3{,}14 \cdot 10^{-19}}{3{,}00 \cdot 10^{8}}\ \text{kgm/s} = 1{,}05 \cdot 10^{-27}\ \text{kgm/s}$$

Det är en oerhört liten rörelsemängd. Men oerhört många fotoner som verkar över lång tid kan förmedla en högst märkbar rörelsemängd. I framtiden kommer man kanske till och med att kunna driva en rymdsond med ett speglande ljussegel. Genom att bestråla seglet med laser skulle man kunna *accelerera* ut sonden ur solsystemet. Lasern kommer att befinna sig på jorden, och då har man samtidigt löst problemet med bränslet som ska driva en interstellär rymdsond.

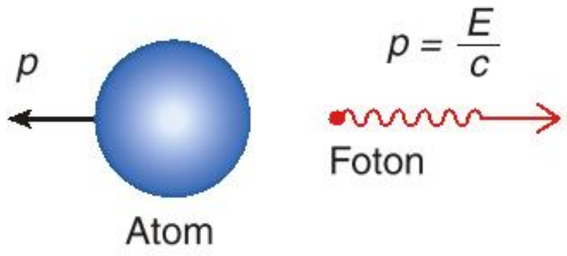
EXEMPEL 9 **Gammastrålning**

En radioaktiv atomkärna med massan $m = 210$ u är i vila och sänder ut en foton med energin $E = 8{,}5 \cdot 10^{-13}$ J. Se figur 3.20. Fotonen har rörelsemängden

$$p = \frac{E}{c} = \frac{8{,}5 \cdot 10^{-13}}{3{,}00 \cdot 10^{8}}\ \text{kgm/s} = 2{,}8 \cdot 10^{-21}\ \text{kgm/s}$$

Atomkärnan får en lika stor rörelsemängd i motsatt riktning. Atomkärnans hastighet blir därför

$$v = \frac{p}{m} = \frac{2{,}8 \cdot 10^{-21}}{210 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}}\ \text{m/s} = 8{,}1\ \text{km/s}$$



3.20 Atomkärnan sänder ut en foton och får rörelsemängd i motsatt riktning.

KONTROLLFRÅGOR

- Vilka formler har vi för rörelsemängden hos en foton?
- Vad vet vi om energin och rörelsemängden hos en foton i högfrekvent strålning jämfört med en foton i lågfrekvent strålning?
- Kan en foton ha en rörelsemängd som är lika med noll?
- Vad kan du säga om viloenergin hos en foton?
- Hur stor är rörelsemängden för en foton med energin 5,34 aJ?
- Hur stor är våglängden för en foton med rörelsemängden $1{,}82 \cdot 10^{-27}$ kgm/s?

3.5 Partiklar eller vågor?

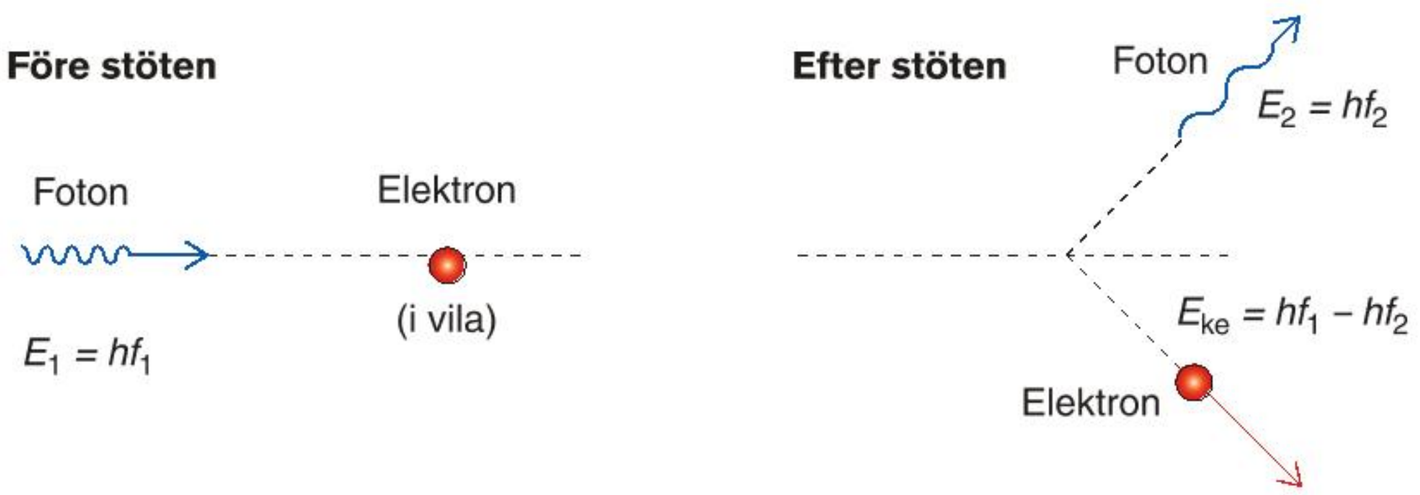
Det var alltså Einstein som år 1917 framkastade hypotesen att de masslösa fotonerna inte bara har energi utan även *rörelsemängd*. När Einstein presenterade fotonmodellen, som går ut på att ljus har partikelegenskaper, var det inte många som följde honom. I hundra år hade försök visat att ljus har vågegenskaper. Att förkasta allt detta på grund av Plancks strålningslag och fotoelektrisk effekt var fysikerna inte så villiga till. Till och med Niels Bohr, en av de mest kvantrevolutionära, nekade att tro på foton-*partikeln*. Men när allt fler experiment visade fenomen som enklast kunde tolkas som att fotoner har rörelsemängd lät sig fysikerna motsträvigt övertalas.

Det var framförallt en serie experiment som utfördes 1923 av den amerikanske fysikern Arthur Compton (1892–1962) som avgjorde saken. Experimenten som senare belönades med nobelpriset visade ett fenomen som fick namnet *Comptoneffekten:* När vi sänder röntgenstrålar eller gammastrålar genom ett ämne avböjs en del av strålningen, och frekvensen blir lägre. Compton förklarade fenomenet med hjälp av Einsteins fotonhypotes:

En foton i strålningen stöter mot en elektron i det ämne strålningen går genom. Se figur 3.21. Stöten mellan fotonen och elektronen är elastisk, så att både energin och rörelsemängden bevaras. Fotonen ger ifrån sig en del av sin energi till elektronen och fortsätter med reducerad energi och rörelsemängd i en ny riktning. Vi kallar den första fotonen för 1, elektronen för *e* och den andra fotonen för 2. Bevarandelagarna för energi och rörelsemängd kan då skrivas som

$$hf_1 = E_{ke} + hf_2 \text{ och } p_1 = p_e + p_2$$

Fotoelektrisk effekt och comptoneffekt är typiska exempel på att *elektromagnetisk strålning uppträder som partiklar* med bestämd energi och bestämd rörelsemängd. Vi kan inte förklara dessa fenomen med hjälp av klassisk vågteori. Men vi kan heller inte förklara ljusets interferens med hjälp av klassisk partikelteori. Tidigt under 1900-talet trodde fysikerna att det var omöjligt att komma över motsättningen mellan de två ljusteorierna.



3.21 Comptoneffekt: Elastisk stöt mellan en foton och en elektron.

Partiklar eller vågor?

Problemet blev ännu större när fysikerna upptäckte att partiklar har *vågegenskaper*. Den franske fysikern Louis de Broglie (1892–1981) presenterade år 1924 hypotesen att *en partikel som rör sig, kan beskrivas som en våg*. Han tänkte så här: När ljus med våglängden λ har rörelsemängden

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

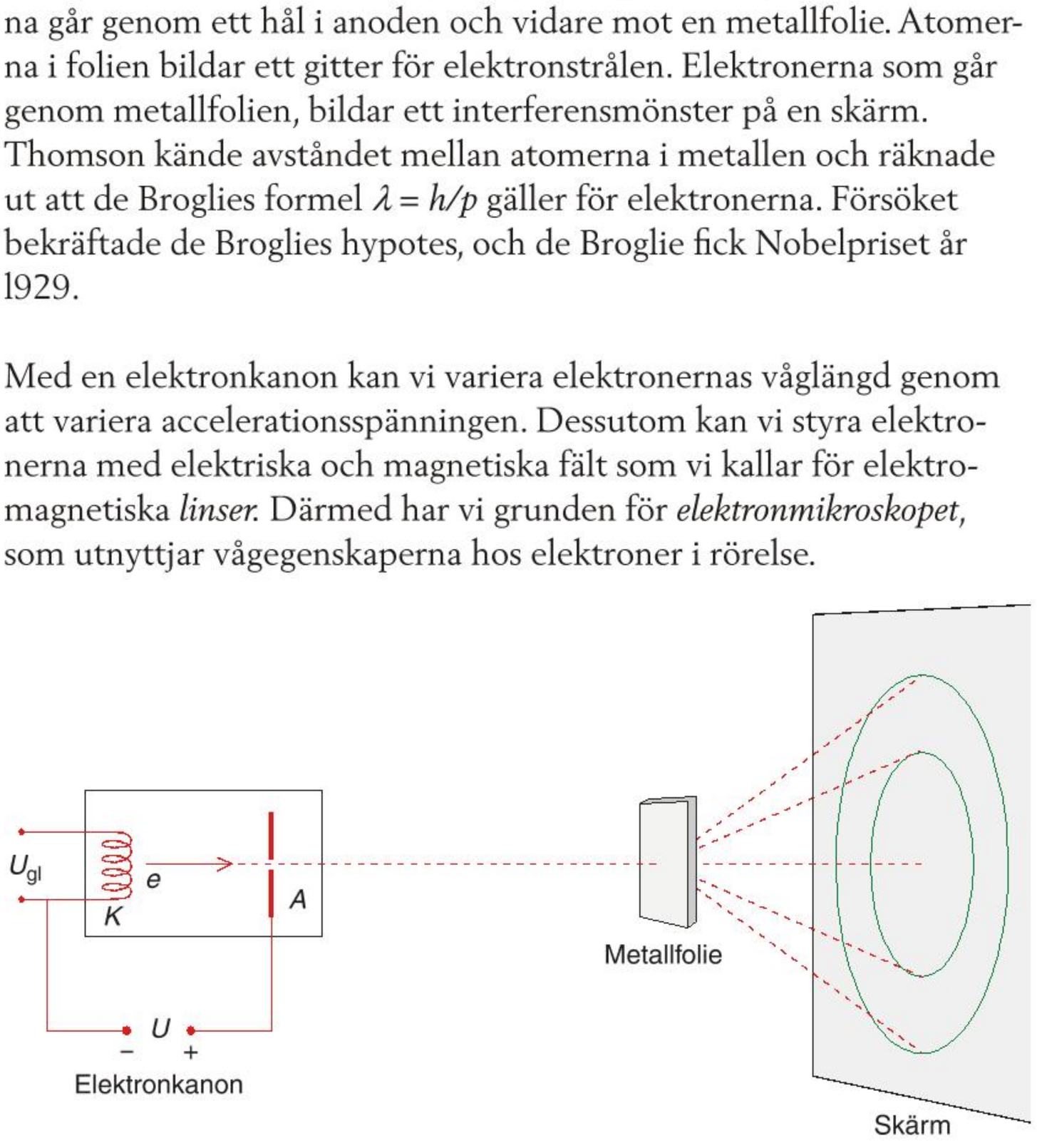
så kan kanske partiklar med rörelsemängden p ha våglängden

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Också detta var svårsmält för många fysiker. Men år 1927 visade den engelske fysikern George Thomson (1892–1975) att elektroner som går genom tunna metallfolier, avböjs på liknande sätt som ljus i ett gitter. Se figur 3.22. Glödkatoden *K* sänder ut elektroner som accelereras mot anoden *A* med hjälp av spänningen *U*. Några av elektronerna går genom ett hål i anoden och vidare mot en metallfolie. Atomerna i folien bildar ett gitter för elektronstrålen. Elektronerna som går genom metallfolien, bildar ett interferensmönster på en skärm. Thomson kände avståndet mellan atomerna i metallen och räknade ut att de Broglies formel $\lambda = h/p$ gäller för elektronerna. Försöket bekräftade de Broglies hypotes, och de Broglie fick Nobelpriset år 1929.

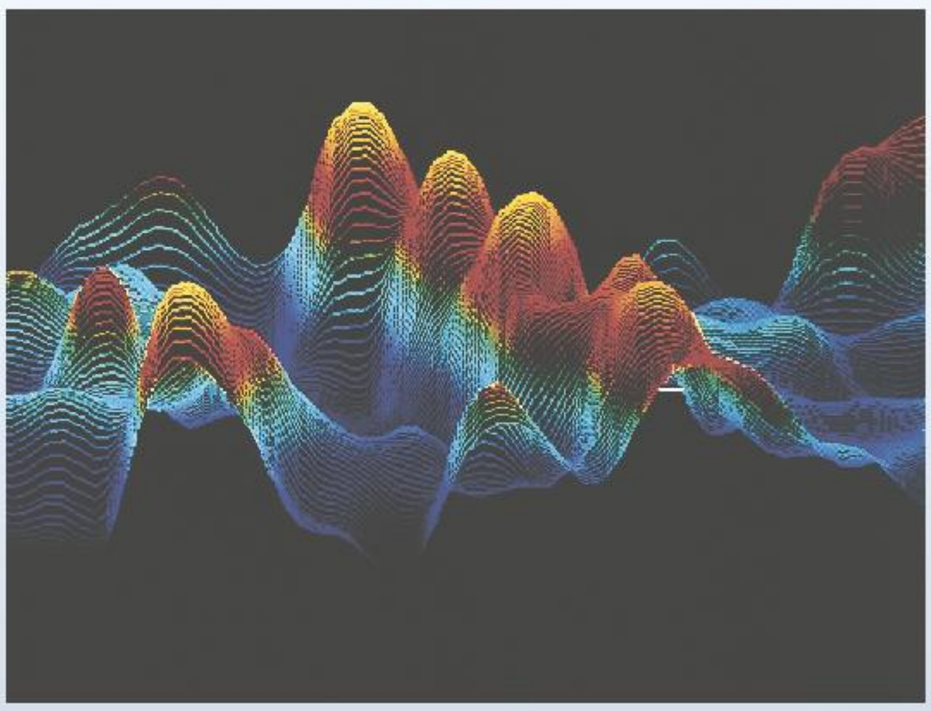
Med en elektronkanon kan vi variera elektronernas våglängd genom att variera accelerationsspänningen. Dessutom kan vi styra elektronerna med elektriska och magnetiska fält som vi kallar för elektromagnetiska *linser*. Därmed har vi grunden för *elektronmikroskopet*, som utnyttjar vågegenskaperna hos elektroner i rörelse.

3.22 Thomson visade att elektronerna har vågegenskaper.



Ju mindre format tekniska komponenter har, desto större betydelse får ytan. På de minsta tänkbara komponenterna tillhör alla atomerna ytan. Det blir därför allt viktigare att kartlägga ytstrukturer på atomnivå. Det kan göras med hjälp av ett s.k. *sveptunnelmikroskop,* STM. Den del som "ser" består av en mycket tunn nål som sveper bara någon atomdiameter över provytan. På detta avstånd *tunnlar* en del elektroner över till nålen; ju mindre avståndet är mellan nålen och ytan, desto fler elektroner passerar. Man kan variera nålens höjd när den sveper över provet så att tunnelelektronströmmen hålls konstant. Då kommer nålens varierande höjd att visa ytans atomära topografi längs sveplinjen. För att gå från 1-d (en linje) till 2-d (ett plan) låter man nålen svepa fram och tillbaka längs linjer som ligger mycket nära varandra.

EXEMPEL 10 Sveptunnelmikroskop



Bilden visar en sveptunnelmikroskopbild av en DNA-molekyl i form av en dubbelspiral, där spiralens slingor syns som orange/gula toppar i mitten av bilden. Det genomsnittliga avståndet mellan varje topp är 3,5 nm. Förstoring: 1 500 000 gånger. Sveptunnelmikroskopet bygger på tunneleffekten. Om tunneleffekten var verksam även i vår skala skulle vattnet i ett glas på bordet plötsligt kunna bilda en pöl bredvid glaset. Energin är bevarad om man bara betraktar begynnelse och slutresultat – problemet är hur vattnet kunde ta sig över/genom glasväggen. Tunneleffekten ligger också bakom t.ex.alfa-sönderfall där en alfapartikel plötsligt tar sig ur atomkärnan, sitt "glas".

EXEMPEL 11 Elektronmikroskop

Ett elektronmikroskop har en spänning på 200 kV och kan förstora 850 000 gånger. Med en sådan förstoring kan man åtskilja punkter som ligger 0,28 nm från varandra.

Låt oss beräkna elektronernas våglängder i detta elektronmikroskop. När accelerationsspänningen är U, får elektronerna den kinetiska energin $E_k = eU$. Nu måste vi räkna relativistiskt. I Fysik 1 fick du lära dig sambandet för kinetisk energi i relativitetsteorin:

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2,$$

där gammafaktorn är

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Vi får

$$(\gamma - 1)mc^2 = eU$$

Det ger gammafaktorn

$$\gamma = 1 + \frac{eU}{mc^2} = 1 + \frac{1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}00 \cdot 10^5}{9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot \left(3{,}00 \cdot 10^8\right)^2} = 1{,}39$$

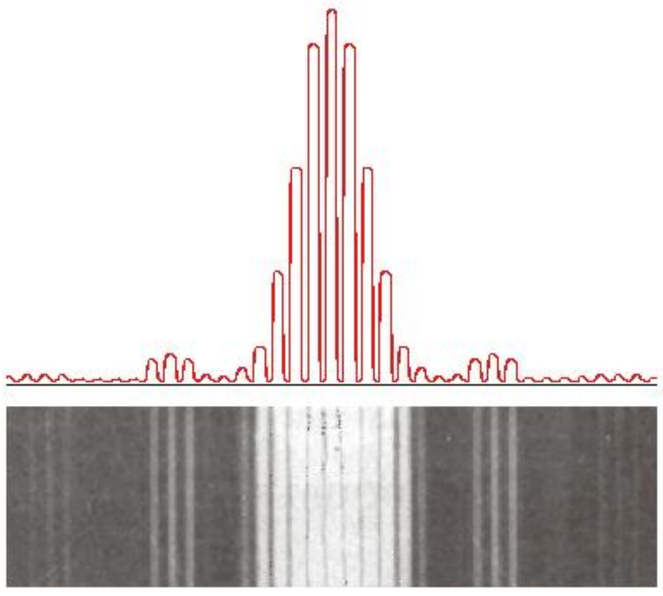
Av formeln för gammafaktorn får vi

$$v = c\sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}} = 3{,}00 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{1-\frac{1}{1{,}39^2}}\ \text{m/s} = 2{,}08 \cdot 10^8\ \text{m/s}$$

Eftersom v är 70 % av ljushastigheten måste vi även räkna med den relativistiska formeln $p = \gamma mv$ för rörelsemängden. Elektronernas våglängd blir därför

$$\lambda = \frac{h}{\gamma mv} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34}}{1{,}39 \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot 2{,}08 \cdot 10^8}\ \text{m} = 2{,}5 \cdot 10^{-12}\ \text{m}$$

Denna våglängd är ungefär en tiondel av diametern för en atom.



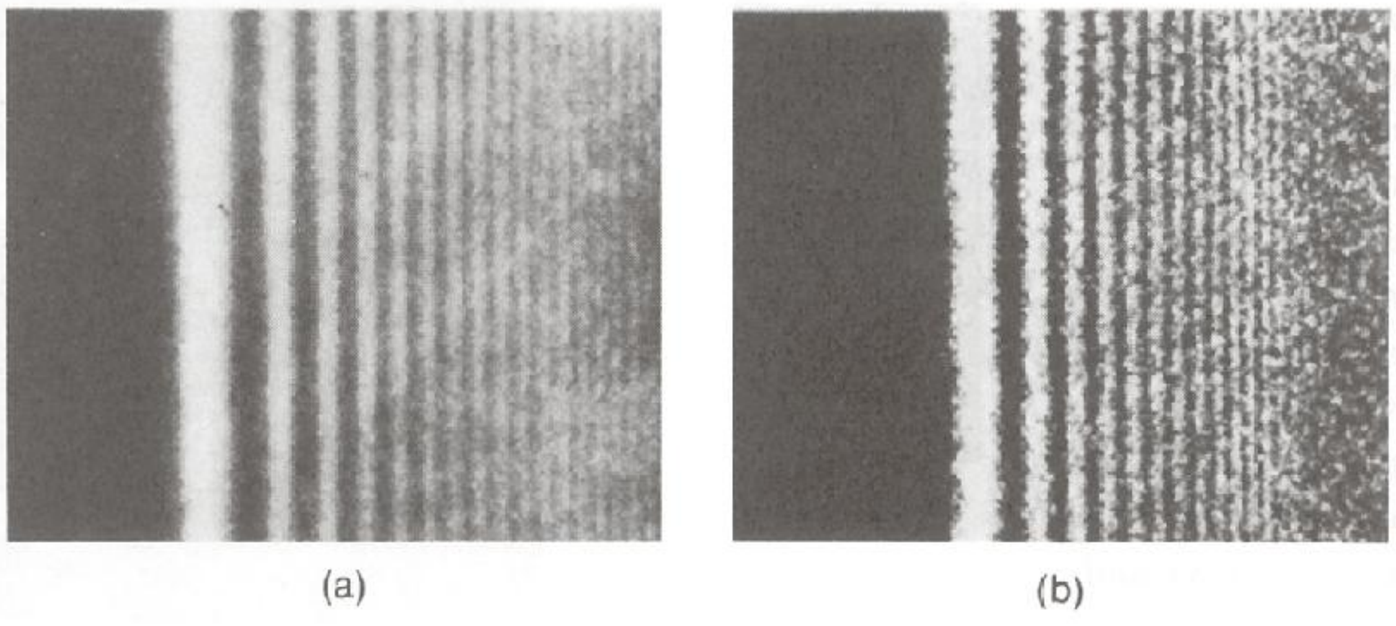
3.23 Youngs försök med fotoner eller elektroner. Interferensbilden blir densamma i båda fallen.

Kvantparadoxen

Vi påminner om Youngs interferensförsök: När vi sänder enfärgat ljus mot två smala spalter, får vi interferensränder på en skärm bakom spalterna. Se figur 3.23. Den mittersta randen är starkast, och ränder-nas ljusstyrka avtar utåt mot båda sidorna.

Men vad händer när vi sänder *en foton i taget* mot spalterna? Fotoner-na möter spalterna en och en när ljusintensiteten är tillräckligt liten. Till att börja med ser det ut som om fotonerna träffar skärmen slumpartat. Vi ser inte något mönster. Men efter hand bildar träff-punkterna samma interferensmönster som vi känner till från Youngs försök. Träffpunkterna fördelar sig så att det uppstår ett mönster med maxima och minima på skärmen. Klassisk vågteori förklarar mönstret som interferens mellan två vågor. Men fotonerna passerar spalterna en och en och kan inte interferera med varandra.

År 1961 gjorde den tyske fysikern Claus Jönsson ett motsvarande försök med elektroner. En skur av elektroner som hade lika stor rörelsemängd, sändes mot två parallella spalter. På en skärm fick han interferensränder, precis som i Youngs försök med ljus. Senare har det gjorts motsvarande försök där elektronerna sänds *en och en* mot spalterna. När bara några få elektroner har träffat skärmen, kan man inte se något mönster. Men efter hand som fler och fler elek-troner träffar skärmen, framträder interferensmönstret tydligt.
Se figur 3.24.



3.24 Dubbelspaltförsök
a) Mönster bildat av synligt ljus.
b) Mönster bildat av elektroner.

Du ser alltså att fotoner och elektroner ger samma resultat i dubbel-spaltförsök: Det uppstår interferensränder på en skärm, som om foto-nerna och elektronerna *utbreder sig som vågor* genom rummet. Men vi vet att fotoner och elektroner *sänds ut som partiklar.* Denna skenbara motsättning kallas ofta *kvantparadoxen.* Den är ett slående exempel på att verkligheten är mycket mer komplicerad än vad den klassiska

fysiken beskriver för oss. Om vi ska ge en enkel formulering av kvantparadoxen, kan vi säga det på följande sätt:

KVANTPARADOXEN

Elektroner och fotoner uppträder som partiklar, men vi måste använda vågor för att beskriva hur partiklarna rör sig.

IT
It travels like a wave and hits like a particle. *Robert Mills*

När vi säger att de "uppträder som partiklar", menar vi att de *observeras som partiklar* i våra mätapparater.

Oskärpa

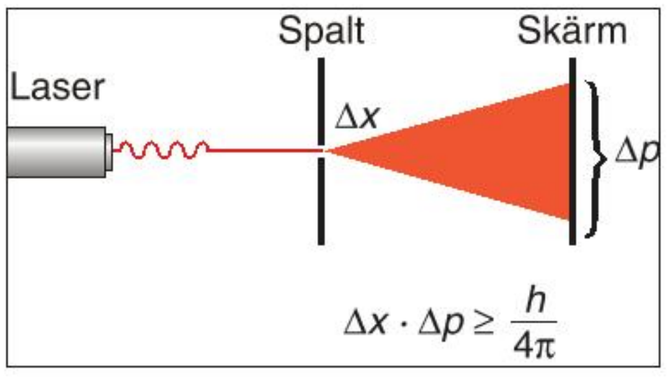
År 1927 lanserade Werner Heisenberg en princip som har betytt mycket för vår förståelse av naturen. Principen säger att *det är omöjligt att helt exakt mäta både position och rörelsemängd för en partikel*. Principen säger också att *ju mer exakt vi vill mäta energin för en partikel, desto mer tid behöver vi*. Matematiskt formuleras principen i *Heisenbergs obestämdhetsrelationer*

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \qquad \text{och} \qquad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

där Δp är oskärpan i rörelsemängd, Δx i position, ΔE i energi och Δt i tid.

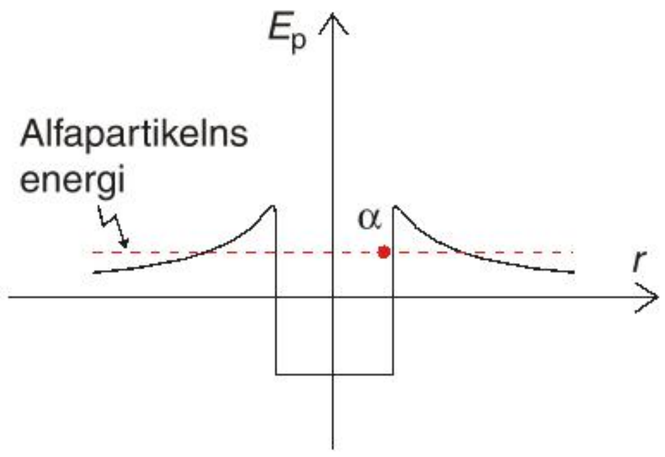
Heisenbergs obestämdhetsrelationer säger oss att det finns en grundläggande oskärpa i naturen, det vill säga en oskärpa som inte har med mätteknik att göra. Den oskärpan ger plats för en tillfällighet som det är omöjligt att komma runt.

Om vi till exempel mäter positionen mycket noggrant, kan vi få Δx mycket litet. Men då blir Δp förhållandevis stor, så att mätningen av rörelsemängden blir oskarp. Och omvänt: Om Δp är litet, blir Δx förhållandevis stort. Oavsett hur bra mätinstrument vi använder, kan vi aldrig mäta rörelsemängd och position mer exakt än vad obestämdhetsrelationen säger.



3.25 Ljus från en laser går genom en variabel spalt. Spaltbredden är ett mått på oskärpan i fotonernas position när de passerar spalten.

Vi låter ljuset från en laser gå genom en variabel spalt och träffa en skärm bakom spalten. Se figur 3.25. På skärmen ser vi ett interferensmönster med en bred mittrand och smalare och svagare ränder på båda sidorna. När vi gör spalten smalare, blir mittranden bredare. Och omvänt: När vi gör spalten bredare, blir mittranden smalare.



3.26 Tunneleffekt. En alfapartikel är nere i en*"energigrop"* i atomkärnan.Om den bara kunde låna lite energi en stund, skulle den kunna komma över kanten och falla ned på utsidan. Där skulle alfapartikeln kunna betala tillbaka energin. Från utsidan skulle det se ut som om alfapartikeln frigjort sig från atomkärnan samtidigt som energilagen var uppfylld.

Fotonerna som träffar skärmen, har gått genom spalten. Spaltbredden är ett mått på oskärpan Δx i fotonens position när den passerar spalten. När vi gör spalten smalare, *minskar* oskärpan Δx. Samtidigt *ökar* oskärpan Δp i fotonens rörelsemängd parallellt med spalten, och interferensmönstret blir bredare.

Den andra obestämdhetsrelationen handlar om energi och tid. För en partikels energi är oskärpan beroende av hur länge energitillståndet varar. Ju kortare observationstiden är, desto större blir oskärpan ΔE i energin. Det är detta som möjliggör tunneleffekten. Se figur 3.26. Under en kort tid Δt kan en partikel bryta mot energilagen. Den kan "låna" energin ΔE så att den kan ta sig genom energibarriären. När partikeln väl är ute, måste energilagen vara uppfylld.

Denna relation har även betydelse för bredden av spektrallinjer. Om det exciterade tillståndet kan vara mycket länge, svarar det till en mycket stor Δt som innebär att ΔE kan vara mycket liten. Det sista betyder att frekvensen är mycket noga bestämd vilket ger en smal spektrallinje.

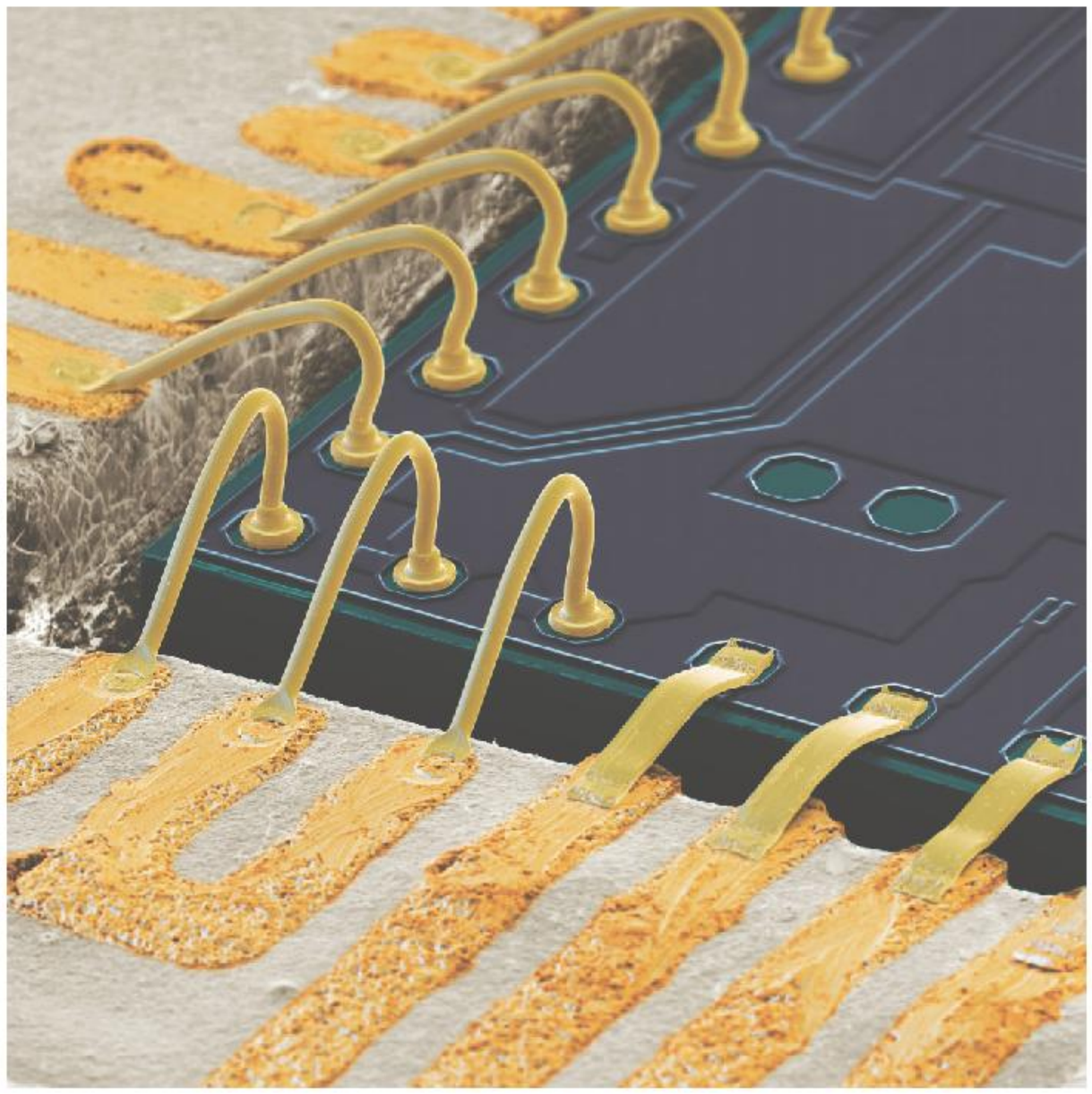
Vad har kvantfysik med oss att göra?

I en kort notis i New York Times kunde man den 1 juli 1948 läsa följande:

"En liten elektrisk komponent, kallad transistor, som kan användas till mycket inom radiotekniken, där man annars använder vakuumrör, demonstrerades i går för första gången vid Bell-laboratorierna. … Den behöver inte vara instängd i glas, den kräver inte vakuum. … Den behöver ingen uppvärmningstid eftersom den till skillnad från vakuumrören inte utvecklar värme."

Det sista är väsentligt. Eftersom den utvecklade mycket lite värme, kunde den göras mindre. Många transistorer kunde placeras tätt intill varandra.

Vad kunde det bli av det? Jo, *bärbara* radioapparater. Så kallade transistorapparater blev en sensation som var och en kunde skaffa sig för en billig penning. Men det fanns även andra användningsområden för transistorerna. Ett laboratorium i USA hade en kolossal dator, en av de allra första. Med sina tusentals vakuumrör fyllde den ett par rum och utförde beräkningar som förr hade krävt en armé av mänskliga räknare. Så länge maskinen fungerade! Med så många vakuumrör var det jämt något som gick sönder och spolierade den beräkning som



Svepelektronmikroskopbild av ett chip. Förstoring 100 ggr.

utfördes just då. När vakuumrören ersattes med transistorer, tog datorn mindre plats och blev mer driftsäker.

Efter hand gjordes transistorerna mindre och mindre, och billigare och billigare. Jack Kilby, som fick Nobelpriset i fysik 2000, och Robert Noyce startade kiselrevolutionen. De fick ungefär samtidigt och oberoende av varandra idén att tillverka komponenterna, inkluderat transistorerna, i ett enda sammanhängande block – en *integrerad krets* eller ett *chip* – i stället för att tillverka dem var för sig.

I din miniräknare finns det tusentals transistorer, i en PC finns det miljontals. De finns i satelliter, mobiltelefoner och bankomater. När en pojke träffar en flicka på Internet, så är det några miljoner transistorer som har kopplat samman dem. Transistorerna möjliggjorde IT-revolutionen. Det vore intressant att veta vilka nyheter redaktionen på New York Times ansåg vara viktigare den där julidagen år 1948?

Sedan dess har miniatyriseringen fortsatt i en våg av nyskapande på bred front, från chipstillverkning till så kallad nanoteknologi, där man miniatyriserar såväl elektriska som mekaniska komponenter. Som en del i utvecklingen blir kvantfysiken allt viktigare. Idag ingår kvantelektronik som en del av ingenjörsutbildningen.

Moores lag
På 60-talet lade Gordon Moore märke till det som nu kallas Moores lag. Det innebär att antalet transistorer på ett chips fördubblas var 18:e månad utan att priset stiger. Den utvecklingen har faktiskt fortsatt till i dag!

I dagens transistor, som är mindre än de flesta bakterier (0,25 µm), är det bara ett tusental elektroner som gör jobbet. I framtiden, om utvecklingen fortsätter som hittills, kommer vi ned till enstaka elektroner. Då behövs en helt ny teknologi som kräver att kvantfysiken genomsyrar alla nivåer, till och med programmeringsspråken.

På universiteten och forskningsinstitutionerna, där den här framtiden just nu dröms fram, talas det bland annat om *elektronspinndatorer*. Informationsbitarna, *qu*bits, kan då bestå av tillståndet hos enstaka atomer.

Om just de här drömmarna kommer att utgöra den handfasta verkligheten om några decennier vet vi inte. Det vet ingen. Det måste vara jättespännande att som forskare eller student befinna sig på en sådan plats där framtiden skapas. Kanske något för dig?

Många, också sådana fysiker och ingenjörer som använder den dagligen, anser att kvantteorin är obegriplig - men användbar. Den är abstrakt och matematisk. De teoretiska beräkningarna stämmer med de experimentella resultaten, och det har tillverkats komplicerade maskiner som bygger på kvantteorin. Kan vi kräva mer av en teori?

KONTROLLFRÅGOR

- Vad går de Broglies våghypotes ut på?
- Hur går det med en partikels våglängd när hastigheten ökar?
- Vilket slags interferensmönster alstrar en elektronstråle som sänds genom en dubbelspalt?
- Vad menas med oskärpa när vi observerar en fysikalisk storhet?
- Vad säger Heisenbergs obestämdhetsrelationer?
- Vad går kvantparadoxen ut på?
- Vilken våglängd har en proton med hastigheten $3{,}0 \cdot 10^{6}$ m/s?
- Hur stor hastighet har en proton med våglängden $1{,}0 \cdot 10^{-13}$ m?
- Vad blir oskärpan i position för en proton med hastigheten $3{,}0 \cdot 10^{6}$ m/s där oskärpan i hastighet är 0,1 promille?

3.6 Hade Newton fel? Kommer det att visa sig att Einstein hade fel?

Var det alltså på det sättet att Newton och hans efterföljare fram till 1905 hade fel och att Einstein visade det? Det talas ofta om vetenskapliga revolutioner eller paradigmskiften. Men i fysikvetenskapliga sammanhang kan de inte få den betydelse som många vill ge dem.

Newtons teori har ett *giltighetsområde* som (i vår bok) når upp till 10 % av ljushastigheten och täcker alla vardagliga situationer inom mekaniken. *Inom* sitt giltighetsområde är den fortfarande god nog för att sända rymdsonder på decennielånga interplanetariska resor. Einstein visade att inom sitt giltighetsområde är Newtons teori en god approximation för en bättre och mer generell teori, *den speciella relativitetsteorin*. Denna teori gjorde elektrodynamiken enklare och generaliserade mekaniken till stora hastigheter. Einsteins speciella relativitetsteori har sedan länge varit förenad med kvantteori i den så kallade *standardmodellen*, som beskriver de kända partiklarna med alla sina växelverkningar.

Men är även detta fantastiska teoribygge bara är en tillfällig milstolpe längs vägen mot en mer fullkomlig teori? Javisst! Den speciella relativitetsteorin begränsar sig ju till att beskriva händelser relativt i tröghetssystem. Einstein själv publicerade redan 1915 den *allmänna relativitetsteorin*. Denna teori går vidare genom att beskriva fenomen i accelererade system och system som befinner sig i gravitationsfält. Men den allmänna relativitetsteorin är oförenlig med standardmodellen på mikronivå. Här måste en ny teori byggas. Många har stor tillit till den just nu framväxande *"strängteorin"*. Vi får se.

Det är ju svårt att smälta många av relativitetsteorins utsagor, och ju mindre man vet desto lättare är det att avvisa den. Modern GPS innebär emellertid en bekräftelse som når långt in bland ickefysikernas skaror. Utan relativitetsteori skulle den ursprungliga versionen av GPS ha fått en ackumulerad felvisning på 10 km per dag. GPS visar dessutom att radiosignalernas hastighet är densamma för oss som för satelliterna, trots att satelliterna har en fart på omkring 10 km/s relativt oss.

Lägg emellertid märke till att den nya teorin som eventuellt skulle ersätta standardmodellen och den allmänna relativitetsteorin måste överensstämma med dessa inom deras respektive giltighetsområden, på precis samma sätt som relativitetsteorin och Newtons teorier överensstämmer inom den newtonska fysikens giltighetsområde.

Det är utmärkt, och precis som det ska vara, att vetenskapsfolk angriper och bygger om de etablerade teorierna. Ofta är det just denna välvilja inför kritik som skiljer vetenskap från övertro och humbug.

Man kan nog tryggt spå att även framtidens fysikelever måste gå samma väg som ni, via Newton och Einstein, mot gränserna för sin tids fysikvetenskap.

SAMMANFATTNING

Kvantfysik

Bohrs modell för väteatomen

Energitillstånden för väteatomen ges av

$$W_n = -\frac{2{,}179}{n^2}\ \text{aJ} = \frac{-13{,}60}{n^2}\ \text{eV}\quad \text{där } n \geq 1$$

Frekvenserna i strålningen från väteatomer ges av

$$hf = B\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

Emission och absorption

Emission betyder att en atom sänder ut energi i form av en foton.

Emissionsspektrum är spektrum av den strålning som ett ämne sänder ut. Lysande enatomiga gaser ger *linjespektra* medan gaser som består av molekyler ger *bandspektrum*. Glödande fasta ämnen och vätskor ger *kontinuerliga spektra*.

Absorption betyder att en atom tar emot energi från en foton eller en elektron.

Absorptionsspektrum är spektrum från vitt ljus sedan det har passerat genom ett ämne. Absorptionsspektret för en gas innehåller mörka linjer i ett för övrigt kontinuerligt spektrum, exakt vid de frekvenser där samma gas har ljusa linjer i emissionsspektret.

Solspektret är ett absorptionsspektrum. Vitt ljus från det inre av solen passerar genom gaserna i solatmosfären där en del av ljuset absorberas.

Fotoelektrisk effekt

När ljus träffar en metall, kan metallen sända ut elektroner. En foton avger hela sin energi till bara en elektron, och elektronen får energi bara från denna enda foton.

Fotonenergin går åt till att riva loss elektronen och till att ge elektronen kinetisk energi

$$hf = W_\text{u} + W_\text{k}$$

Gränsfrekvensen f_g är den frekvens som nätt och jämt ger fotoelektrisk effekt: $hf_\text{g} = W_\text{u}$.

Fotonens rörelsemängd

En atom emitterar eller absorberar elektromagnetisk strålning som energikvanta med energin $E = hf$. Elektromagnetisk strålning utbreder sig som fotoner med energin $E = hf$.

Rörelsemängden hos en foton är lika med energin dividerad med ljushastigheten

$$p = E/c = hf/c = h/\lambda$$

Partiklar eller vågor

En partikel med rörelsemängden p har vågegenskaper med våglängden $\lambda = h/p$.

Elektroner och fotoner observeras som partiklar, men vi måste använda vågegenskaperna för att beskriva hur partiklarna kan röra sig.

Heisenbergs obestämdhetsrelationer: Det är inte möjligt att observera både position och rörelsemängd för en partikel helt exakt, $\Delta p \cdot \Delta x \geq h/4\pi$, inte heller både energi och tid för ett system helt exakt, $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$.

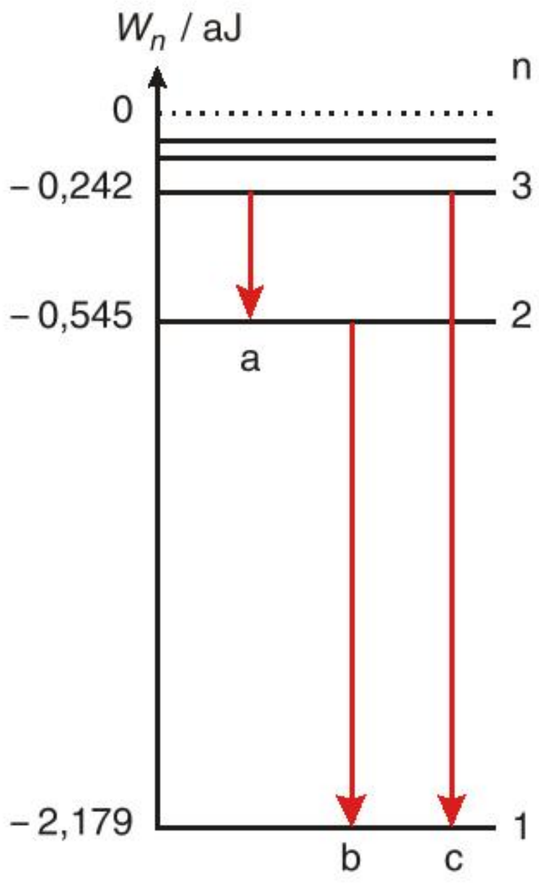
RÄKNA FYSIK

Bohrs atommodell

3.01 **a** En elektron har rörelseenergin 1,64 aJ. Hur stor är rörelseenergin uttryckt i eV?
b En foton har energin 3,54 eV. Vad blir fotonens energi uttryckt i J?

3.02 En elektron accelereras över en spänning på 150 V. Hur stor blir elektronens kinetiska energi om
a den är i vila från början?
b den har 35 eV i kinetisk energi från början?
c ★ den rör sig med hastigheten $4{,}5 \cdot 10^6$ m/s från början?

3.03 Figuren visar tre energitillstånd hos en väteatom.
a Från vilka tillstånd kan atomen sända ut en foton?
b Hur stor energi får den foton som sänds ut vid vart och ett av de tre energisprången i figuren?
c Vilken frekvens får motsvarande strålning?



3.04 Heliumatomer går från ett tillstånd med energin –0,240 aJ till ett tillstånd med energin –0,636 aJ.
a Hur stort energisprång gör en He-atom?
b Vilken frekvens och våglängd har den strålning som sänds ut?

3.05 I helium-neonlasern uppstår laserstrålning med våglängden 632,8 nm när neonatomer övergår från energinivån $W_5 = -0{,}144$ aJ till energinivån W_3. Beräkna W_3.

3.06 Balmerserien i strålningen från väte bildas av energisprång ner till W_2.
a Beräkna den högsta och den lägsta frekvensen i balmerserien.
b Beräkna den lägsta frekvensen i lymanserien som uppkommer vid energisprång ner till W_1.
c Synligt ljus har frekvenser från 375 THz till 750 THz. Förklara varför energisprång ner till W_1 inte kan ge synligt ljus.

3.07 ★ **a** Hur stor energi måste vi tillföra en väteatom i grundtillståndet för att den ska joniseras?
b Hur hög hastighet måste en fri elektron ha för att den ska ha tillräckligt stor kinetisk energi för att kunna jonisera en väteatom som är i grundtillståndet?

3.08 ★ I ett stängt glasrör finns det vätgas där alla väteatomerna är i grundtillståndet. När vi skickar elektroner genom gasen får vi den att lysa. Studerar vi ljuset genom ett optiskt gitter, ser vi att gasen utsänder alla de fyra synliga spektralfärgerna i vätespektret.
a Hur kan vi vara säkra på att elektronerna har exciterat väteatomer minst till energinivå W_6?
b Hur stor kinetisk energi måste en elektron ha för att excitera en väteatom från grundtillståndet till energitillståndet W_6? Hur stor hastighet har en sådan elektron?
c Istället för att skicka ut elektroner kan vi skicka ut vitt ljus med alla frekvenser från 425 THz till 750 THz genom vätgasen. Alla atomer i vätgasen befinner sig i grundtillståndet. Kan vi få gasen att lysa på detta sätt? Fundera innan du svarar!

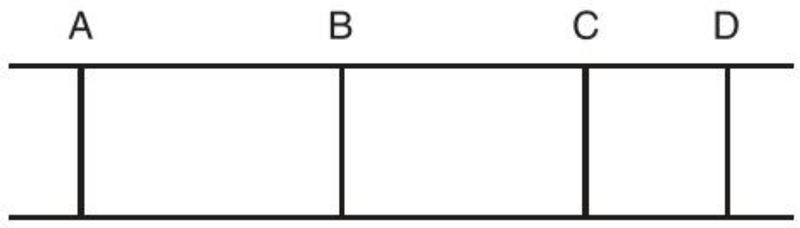
Emission och absorption

3.09 Figuren visar ett spektrum av ljuset från en gas. De lysande linjerna har vi ritat svarta i figuren.

a Hur förklarar vi att spektret består av åtskilda linjer?

b Hur kan det komma sig att linjerna A och C lyser starkare än andra?

c För att gasen ska lysa måste den hela tiden tillföras energi. Varför?



3.10 Den yttersta elektronen i natriumatomen kan bland annat befinna sig på följande energinivåer:

(1) –0,221 aJ (2) –0,311 al
(3) –0,485 aJ (4) –0,823 aJ.

a Vilket energisprång ger det gula natriumljuset som har våglängden 589 nm? (Tips: Bestäm först fotonenergin i Na-ljuset.)

b Natriumatomer kan också absorbera fotoner och exciteras från den lägsta till den högsta av de fyra energinivåerna. Hur stor är våglängden i strålning som har sådana fotoner? Är strålningen synlig?

3.11 Tabellen nedan visar de tre lägsta energinivåerna för talliumatomen (Tl).

N	1	2	3	∞
$W_n/10^{-18}$J	−0,979	−0,825	−0,453	0

a Rita ett energinivådiagram.

b En av energiövergångarna mellan de tre lägsta energinivåerna ger en synlig spektrallinje. Räkna ut våglängden för spektrallinjen. Vilken färg har linjen?

c Hur stor är joniseringsenergin för en talliumatom i grundtillståndet?

d Vilken energiövergång ger den kortaste våglängden i talliumspektret. Beräkna denna våglängd.

3.12 I solspektret ser vi en mörk fraunhoferlinje med våglängden 691 nm.

a Hur förklarar vi den mörka linjen?

b Vilket grundämne kan vara orsaken till den mörka linjen? (Använd fysiktabellen.)

3.13 I spektret från fjärran galaxer ser vi en mörk vätelinje.

a Hur uppstår den mörka vätelinjen?

b Vad kan det säga oss om naturlagarna?

3.14 ★ En atom har energinivåerna W_1, W_2 och W_3. Vid övergången $W_3 \rightarrow W_1$ utsänds ljus med våglängden 400 nm. Vid övergången $W_3 \rightarrow W_2$ utsänds ljus med våglängden 600 nm. Vad blir våglängden när atomen går från W_2 till W_1?

Fotoelektrisk effekt

3.15 Ljus med våglängden 360 nm faller in mot en ren kaliumyta. Utträdesarbetet för kalium är $3{,}68 \cdot 10^{-19}$ J.

a Vilken energi har fotonerna?

b Vilken energi och hastighet har elektronerna som slås ut från kaliumytan?

c Hur stor är gränsfrekvensen för kalium?

3.16 Vi sänder ultraviolett strålning med frekvensen $1{,}25 \cdot 10^{15}$ Hz mot en volframplatta. Då frigörs elektroner med kinetiska energin $1{,}12 \cdot 10^{-19}$ J.

a Beräkna utträdesarbetet för volfram.

b Kommer violett ljus med våglängden 400 nm att riva loss elektroner från volframplattan?

3.17 ★ Vid ett försök med fotoelektrisk effekt bestämdes den kinetiska energin W_k för de frigjorda elektronerna. Tabellen visar sambandet mellan W_k och frekvensen f för det infallande ljuset:

$f/(10^{14}$ Hz)	5,0	7,0	9,0	11,0
$W_k/(10^{-18}$ J)	0,07	0,19	0,30	0,43

a Rita en kurva som visar W_k som funktion av f och använd kurvan till att bestämma ett värde på Plancks konstant.
b Använd kurvan till att bestämma gränsfrekvensen och utträdesarbetet.

Fotonens rörelsemängd

3.18 En UV-lampa sänder ut strålning med våglängden 300 nm. Beräkna energin och rörelsemängden hos UV-fotonerna.

3.19 En radiosändare har frekvensen 89,1 MHz och sänder ut $2{,}00 \cdot 10^{29}$ fotoner per sekund. Hur stor är den sammanlagda rörelsemängden för alla fotonerna som sänds ut per sekund i radiostrålningen?

3.20 I en viss typ av ultraviolett strålning har varje foton rörelsemängden $5{,}45 \cdot 10^{-27}$ kgm/s. Beräkna fotonens energi, och strålningens frekvens och våglängd.

Partiklar eller vågor?

3.21 Jämför våglängden hos en foton och en elektron när fotonen och elektronen har samma rörelsemängd.

3.22 **a** Vilken våglängd har en neutron som har hastigheten $3{,}75 \cdot 10^3$ m/s?
b Hur stor hastighet har en elektron när våglängden är 5,0 nm?
c Vilken våglängd har en proton som accelereras från vila av en spänning på 100kV?

3.23 En elektron har våglängden 0,100 nm.
a Beräkna elektronens kinetiska energi. (Du kan räkna klassiskt.)
b Elektronen accelererades från vila av en spänning U. Beräkna U.
c Hur måste vi justera U för att elektronen ska få större våglängd?

3.24 Vad blir rörelsemängden och hastigheten hos en elektron som har våglängden 1,00 pm? Du måste räkna relativistiskt.

3.25 I denna uppgift räknar vi med en oskärpa på 5,0 % i rörelsemängden. Vad blir då oskärpan i positionen
a för en insekt med massan 1,0 g när den flyger med hastigheten 0,50 m/s?
b för en elektron som har hastigheten $2{,}0 \cdot 10^6$ m/s?

3.26 Om vi ska kunna säga att en elektron går i en väldefinierad bana i en atom, måste oskärpan i rörelsemängd vara mycket mindre än rörelsemängden, samtidigt som oskärpan i position måste vara mycket mindre än bandiametern.

En väteatom i grundtillståndet har en diameter på 0,10 nm. Elektronen har en kinetisk energi på $2{,}18 \cdot 10^{-18}$ J.
a Visa att elektronen har rörelsemängden $1{,}99 \cdot 10^{-24}$ kgm/s.
b Sätt oskärpan i position lika med 0,010 nm och beräkna oskärpan i elektronens rörelsemängd.
c Jämför svaren på a- och b-uppgiften, och ge en kommentar.

DISKUTERA FYSIK

1 Hur kan vi avgöra om det finns syre på solen?

2 När ljus passerar genom vätgas vid rumstemperatur kan absorptionslinjer som motsvarar Lyman-serien observeras. Varför syns inte de andra serierna?

3 Varför har klor och jod liknande egenskaper?

4 Om vi håller en sked koksalt NaCl i en gaslåga, lyser flamman gul. Om vi skickar gult ljus från en natriumlampa genom den gula flamman, ser vi att flamman kastar en mörk skugga. Hur kan gult ljus genom en gul låga ge en mörk skugga?

5 Varför blir vissa frimärken självlysande när vi lyser på dem med en UV-lampa? Pröva själv.

6 En del tvättmedel innehåller såkallat optiskt vitmedel. Vad är anledningen till det?

7 Lyman-serien är ljusskarpare än Balmer-serien eftersom denna series sluttillstånd är grundtillståndet. Varför upptäcktes ändå Balmer-serien först?

8 Jonisationsenergin för neon (Z = 10) är 21,6 eV och för natrium (Z = 11) är 5,1 eV. Förklara den stora skillnaden.

9 Mörkrum för framkallning av svart och vit film lyses ofta upp av en röd lampa. Varför röd? Skulle en sådan lampa fungera för framkallning av färgkort?

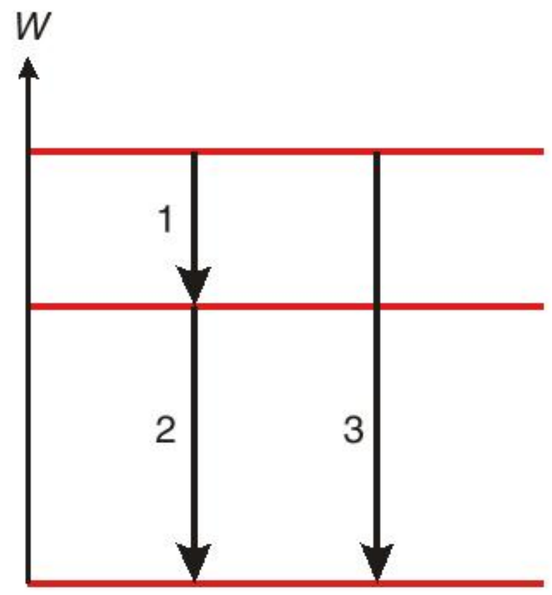
10 Om en foton sprids mot en elektron ändras dess våglängd. Kommer den att minska eller öka?

11 I både den fotoelektriska effekten och i Comptonspridningen har vi en foton som kolliderar med en elektron och orsakar att elektronen "sticker" iväg. Vad är skillnaden mellan de två processerna?

12 Om en elektron och en proton rör sig med samma hastighet vilken har den kortaste våglängden?

RESONERA FYSIK

1 Nedan visas tre övergångar mellan energinivåerna i en tänkt atom.



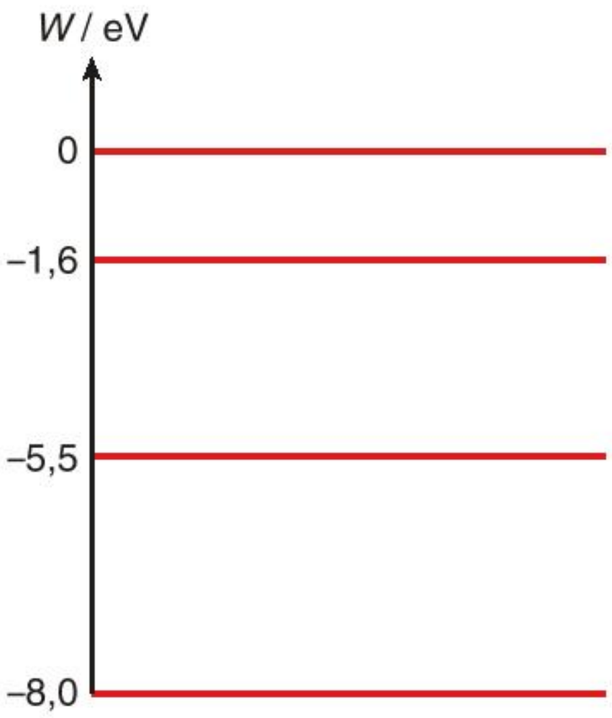
Vilket/vilka av följande påstående är korrekta för de tre övergångarna?

A $W_1 + W_2 = W_3$
B $f_1 + f_2 = f_3$
C $\lambda_1 + \lambda_2 = \lambda_3$
D Övergång 3 har störst våglängd
E Övergång 2 har störst frekvens
F Övergång 1 är energirikast

2 Det ljus som motsvarar övergången 2 i figuren i uppgift 1 ovan är gult. Vilken/vilka färger är det över huvud taget möjligt att ljus som motsvarar övergång 3 kan ha?

A violett
B blått
C grönt
D orange
E rött

3 Figuren visar ett förenklat energinivådiagram för en tänkt atom. Atomen befinner sig i grundtillståndet $W = -8{,}0$ eV. Vad kan hända om atomen beskjuts med



a elektroner med energin 2,5 eV?
b elektroner med energin 5,0 eV?
c elektroner med energin 10,0 eV?
d fotoner med energin 2,5 eV?
e fotoner med energin 5,0 eV?
f fotoner med energin 10,0 eV?

4 En exciterad atom återgår till sitt grundtillstånd och sänder ut grönt ljus. Om atomen istället hamnar i ett mellanliggande tillstånd vilken/vilka av följande "färger" kan då den utsända fotonen ha?
A röd
B violett
C blå
D gul

5 Anta att en atom har tre exciterade tillstånd där alla övergångar mellan nivåerna är möjliga. Hur många spektrallinjer kan denna atom ge?
A 3
B 4
C 5
D 6
E mer än 6.

6 Vi sänder ljus mot en yta av en viss metall. Vilken fysikalisk storhet för ljuset bestämmer
a om elektroner kommer att slås loss från metallen?
b hur stor kinetisk energi de "lossrivna" elektronerna får?
c hur många elektroner som slås loss från metallytan varje sekund?

7 En metall sänder ut elektroner när den belyses med grönt ljus, men inte när den belyses med gult ljus. Kommer metallen att sända ut elektroner när den belyses med
a rött ljus?
b blått ljus?

8 Vi gör ett försök med fotoelektrisk effekt genom att sända ljus mot en metallplatta. Påståendena nedan handlar om de elektroner som frigörs från metallplattan. Avgör om påståendena är riktiga eller felaktiga.
A Genom att öka ljusintensiteten frigörs fler elektroner per tidsenhet.
B Elektronernas fart ökar när ljusintensiteten ökar.
C Om ljuset är långvågigt kommer inte elektroner att frigöras även om ljusintensiteten ökar.
D Om ljusets våglängd minskar får elektronerna mindre fart.

9 En stråle av ultraviolett ljus träffar ett elektroskops "metallkula". Vilket av nedanstående alternativ är korrekt? Om elektroskopet från början är
A positivt laddat laddas det ur och blir neutralt
B positivt laddat blir det negativt laddat
C negativt laddat laddas det ur och blir neutralt
D negativt laddat blir det positivt laddat
E neutralt blir det negativt laddat
F neutralt blir det positivt laddat.

10 Vilken har den största rörelsemängden, en 1 MeV foton eller en proton eller en elektron med 1 MeV kinetisk energi?
A fotonen
B protonen
C elektronen
D protonen och elektronen
E De har alla samma.

UPPSKATTA FYSIK

1 När Max och Erik ser på fotboll under VM konstaterar de att flera matcher avgörs med straffar efter förlängning. Max har läst att alla föremål kan förknippas med en våglängd när de rör sig. Han frågar Erik som efter ett tag ger honom ett ungefärligt värde på fotbollens våglängd vid den sista straffen. Vad får man för ungefärligt värde på våglängden?

2 Hur många Joule strålar du ut under din livstid?

3 Hur stor cirkel skulle man kunna bilda om alla människor på jorden höll varandra i händerna?



TESTA DIG I FYSIK

1 En övergång i en atom går från starttillståndet n till sluttillståndet n^*. Avgör om det är fråga om absorption eller emission om

a $n = 1, n^* = 2$
b $n = 4, n^* = 2$
c $n = 2, n^* = 8$

2 Bestäm våglängden för det ljus som utsänds när en väteatom går från ett exciterat tillstånd med $n = 6$ till ett med $n = 2$.

3 En mikrovågsugn med effekten 750 W producerar elektromagnetisk strålning med våglängden 10,8 cm. Hur många mikrovågsfotoner produceras varje sekund?

4 Bestäm ljuset med den längsta våglängden som en väteatom i sitt grundtillstånd kan absorbera.

5 Utträdesarbetet för natrium är 2,28 eV. Bestäm den maximala hastighet som en elektron som slås ut från en natriumyta kan få om ytan belyses av ljus med våglängden

a 430 nm
b 630 nm.

6 En elektron befinner sig i ett exciterat tillstånd i en atom i ca 10^{-8} s. Hur stor är den minsta osäkerheten i energin uttryckt i eV för det exciterade tillståndet?

7 En proton accelereras från vila av spänningen 6,50 MV.

a Beräkna protonens rörelseenergi efter accelerationen.
b Beräkna protonens hastighet efter accelerationen.
c Beräkna protonens våglängd efter accelerationen.

8 Hur mycket energi behövs för att jonisera en väteatom som befinner sig i tillståndet med $n = 2$?

9 ★ En foton joniserar en väteatom som befinner sig i sitt grundtillstånd så att elektronen får en kinetisk energi på 5,0 eV. Vilken våglängd har fotonen?

HEMLABORATIONER

Tejpen

Gå in i ett mörkt rum med en rulle tejp. Riv snabbt av en bit av tejpen. Vad iakttar du då? Kan du förklara vad som händer? Du kan också prova med ett "klister"-kuvert.

Koksaltet

Ta lite koksalt ytterst på en nål och stick in nålen i lågan från ett ljus. Vad ser du?

4 Kraft och rörelse

Undervisningen i kursen ska behandla:

- **Vridmoment för att beskriva jämviktstillstånd**
- **Tvådimensionell rörelse i gravitationsfält**
- **Centralrörelse**
- **Simulering av tvådimensionell rörelse med hjälp av enkla numeriska metoder**
- **Avgränsning och studier av problem med hjälp av fysikaliska resonemang och matematisk modellering innefattande linjära och icke-linjära funktioner, ekvationer och grafer samt derivator och vektorer**

Kraftmoment 139
Kast 142
Cirkelrörelse 148
Tvådimensionell rörelse och numerisk modellering 160
Uppgifter 168

4.1 Kraftmoment

Jämvikt

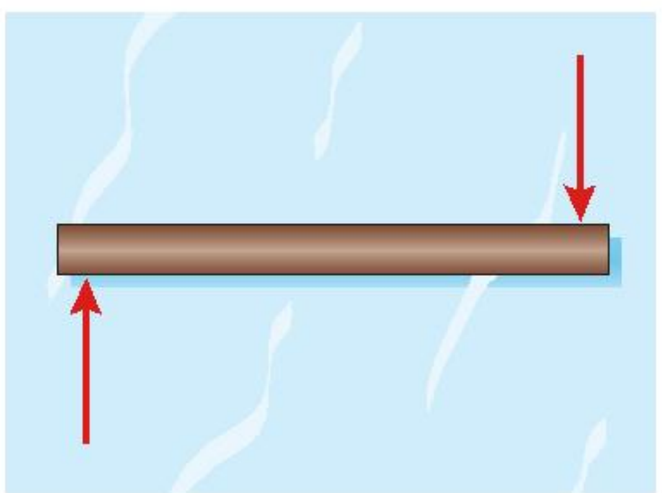
En stege faller om du inte stödjer den mot något. Om du däremot stödjer stegen mot en vägg så går det fint. Stegen blir stående. Du har tydligen åstadkommit *jämvikt*. Ett föremål som är i jämvikt sätts inte i rörelse trots att det är utsatt för krafter. Vad krävs av de verkande krafterna för att det ska råda jämvikt?

För det första måste den resulterande kraften vara lika med noll. Om föremålet var i vila förblir det i vila så länge som den resulterande kraften är noll enligt Newtons andra lag.

FÖRSTA JÄMVIKTSVILLKORET

Den resulterande kraften på ett föremål i jämvikt är lika med noll

Att den resulterande kraften är noll är ett nödvändigt men inte tillräckligt villkor för jämvikt. Att det inte är tillräckligt framgår av figur 4.1. Två lika stora och motriktade krafter verkar på en pinne som ligger på isen. Den resulterande kraften är lika med noll, men som du säkert vet resulterar just de här krafterna i att det blir snurr på pinnen.



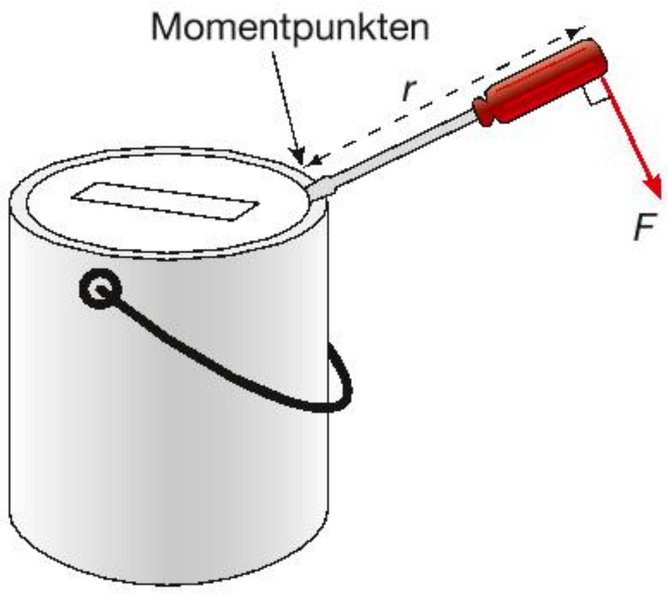
4.1 Pinnen börjar snurra om den påverkas av motriktade krafter i ytterändarna.



Är detta möjligt?

För att förstå vad som mer behövs för att uppnå jämvikt, kan du gräva fram ytterligare en situation ur minnet. En gång var du säkert ett barn på en gungbräda. Om det satt en lika tung person vid den andra änden så rådde det jämvikt om ni satt lika långt ut på brädan. Men om den som satt på den andra änden flyttade sig bakåt, vippade gungbrädan över åt det hållet. Om du flyttade dig inåt mitten vippade den också över åt det andra hållet.

För att klä erfarenheten i ord behöver vi ett nytt begrepp, *moment*. Du har kanske hört talas om moment som *kraft gånger arm*. I fysiken måste vi vara mer precisa. *Armen* är avståndet mellan kraftens angreppspunkt och den punkt som föremålet vrider sig kring. Den så kallade *momentpunkten*. Kraften som momentet utgår ifrån måste vara vinkelrät mot armen.



4.2 Moment är lika med "kraft gånger arm".

Om man ska lossa en tjurig mutter eller få upp locket på en burk målarfärg kan man skaffa sig bättre moment med samma kraft genom att förlänga armen, se figur 4.2.

MOMENT

Moment = kraft · arm. $M = F \cdot r$

Svårt? Låt oss ta ett par exempel:

EXEMPEL 1 **Gungbrädan**

Två personer på en gungbräda väger lika mycket. Låt oss säga att de har tyngden 600 N och sitter 2,5 m från vippunkten som här är momentpunkten. Var och en av personerna påverkar då gungan med momentet

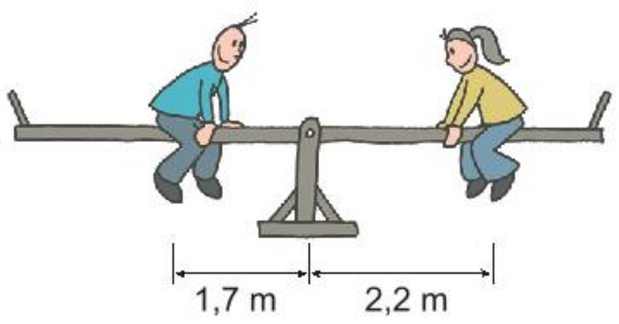
$$M = F \cdot r = 600 \cdot 2{,}5 \text{ Nm} = 1\,500 \text{ Nm}$$

När det råder jämvikt så är de två momenten lika stora och verkar i motsatt rotationsriktning.

Nu är vi mogna för att formulera det andra jämviktsvillkoret:

ANDRA JÄMVIKTSVILLKORET

Summan av momenten i den ena rotationsriktningen måste vara lika stor som summan av momenten i den andra rotationsriktningen.



EXEMPEL 2 **Hur mycket väger Elin?**

Elin och Johan talar vikt. Johan väger 95 kg, men Elin vet inte hur mycket hon väger. Enkelt säger Johan. Sätt dig på gungbrädan så placerar jag mig så att brädan är i jämvikt.

Sagt och gjort. Elin sitter 2,2 m från momentpunkten och Johan sitter 1,7 m från momentpunkten när brädan är i jämvikt.

Hur mycket väger Elin?

Lösning:

$$F_E \cdot r_E = F_J \cdot r_J \qquad \text{(Vi löser ut } F_E\text{)}$$

$$F_E = \frac{F_J \cdot r_J}{r_E}$$

$$m_E \cdot 9{,}82 = \frac{95 \cdot 9{,}82 \cdot 1{,}7}{2{,}2} \qquad \text{(Dividera båda leden med 9,82.)}$$

$$m_E = 73 \text{ kg}$$

Vi kan bortse från brädans eget moment, eftersom det är lika stort på båda sidor om momentpunkten.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad menas med jämvikt?
- Hur formuleras det första jämviktsvillkoret?
- Vad menas med kraftmoment?
- Hur formuleras det andra jämviktsvillkoret?
- En kraft på 50 N som är vinkelrät mot armen verkar 0,8 m från momentpunkten. Bestäm dess moment.
- En homogen linjal är upphängd i sin mittpunkt. En kraft på 6,0 N verkar på linjalen, 15 cm från mittpunkten. Hur stor kraft verkar på andra sidan om linjalen är i jämvikt då avståndet till mittpunkten är 10 cm? 15 cm? 20 cm?

4.2 Kast

Vi gissar att du har stor erfarenhet av kast. Så stor att du till och med kan beräkna kastbanor i huvudet. Tänk till exempel på en utspark i fotboll. Redan när du ser bollen i början av dess bana, vet du ungefär var du bör vara placerad för att möta den. Den kunskapen är *kvalitativ*. Motsvarande kunskaper har människan använt ända sedan hon började använda kastvapen i jakt och krig.

I det här avsnittet ska vi studera kaströrelser *kvantitativt*. Vi ska bland annat beräkna kastbanor när vi vet vilken hastighet och riktning föremålet har i utgångsläget. Innan vi börjar med kaströrelser, ska vi påminna dig om rörelseformlerna vid konstant acceleration.

Rörelseformlerna

När ett föremål rör sig med *konstant hastighet* längs en rät linje, säg längs x-axeln, kan vi beräkna läget vid varje tidpunkt. Vi har $x = vt$ där v är hastigheten. Formeln förutsätter att föremålet passerade origo vid tidpunkten $t = 0$.

KONSTANT ACCELERATION

När ett föremål rör sig med *konstant acceleration* längs en rät linje, fås hastigheten av

$$v = v_0 + at$$

Läget fås av

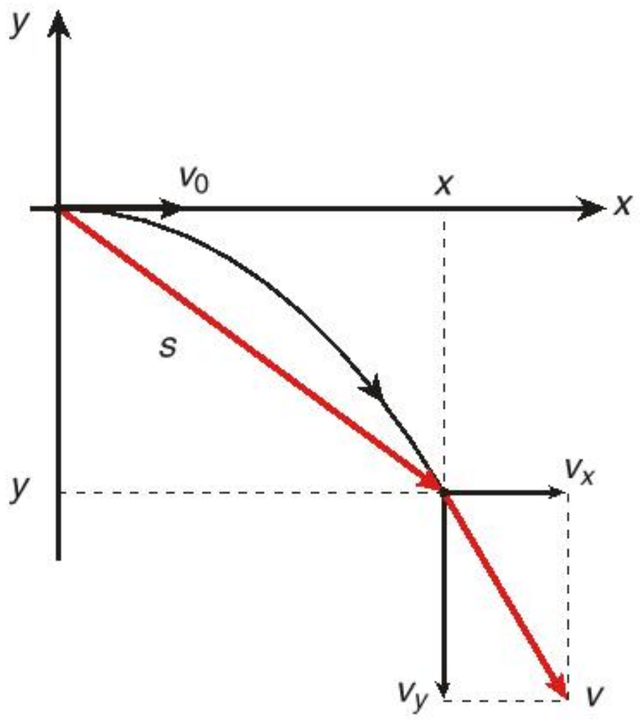
$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

där föremålet passerar origo med hastigheten v_0 vid tidpunkten $t = 0$.

Accelerationen a kan vara positiv eller negativ.

Ett föremål som faller fritt har tyngdaccelerationen g. Tyngdaccelerationen är en vektor som pekar rakt nedåt. Dess värde minskar när höjden över havet ökar, men den minskar så lite att vi inte behöver ta hänsyn till det i vanliga kaströrelser. Dessutom varierar den lite med breddgraden på jorden.

Här kommer vi att använda $g = 9{,}82\ \text{m/s}^2$ för tyngdaccelerationen nära havsytan. Den enda kraft som verkar vid fritt fall, är tyngden $F_g = mg$ lodrätt nedåt.



4.3 Vågrätt kast. Banan är en del av en parabel med högsta punkten i origo.

Vågräta Kast

I ett vågrätt kast är utgångshastigheten v_0 vågrät. Vi låter startpunkten vara i origo i ett koordinatsystem där x-axeln är vågrät och y-axeln pekar lodrätt uppåt. Se figur 4.3.

Då får vi hastighetsformlerna

$$v_x = v_0 \text{ och } v_y = -gt$$

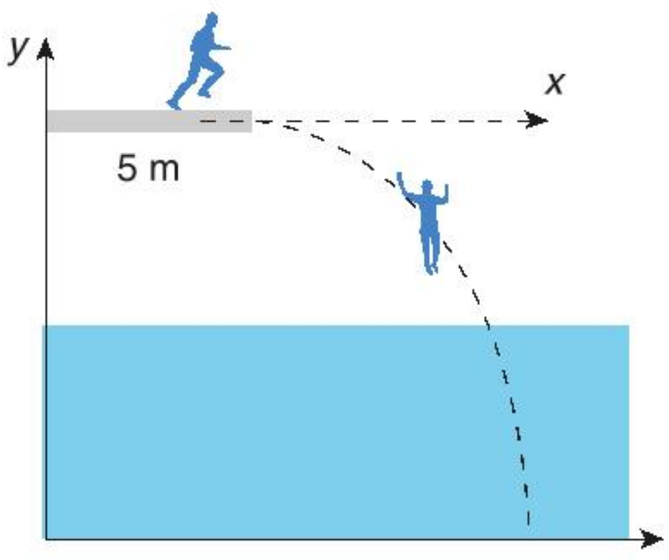
och lägesformlerna

$$x = v_0 t \text{ och } y = -\frac{1}{2} gt^2$$

Formlerna för x-riktningen motsvarar en rörelse med *konstant hastighet*. Formlerna för y-riktningen motsvarar fritt fall *utan utgångshastighet*.

EXEMPEL 3 **Vågrätt hopp från 5-meterssvikt**

Lina har följt med sin 12-årige lillebror och några av hans kompisar till simhallen. Hon sitter på åskådarplats och tittar på när de hoppar. De tävlar om vem som kan komma längst ut när de slår i vattenytan. Som markeringar lägger de handdukarna på bassängkanten. De blir mer och mer uppspelta och lyckas hoppa längre och längre. Lina sitter och funderar över hur långt det egentligen är möjligt att hoppa. Kan du hjälpa henne?



Hopp från 5 meters höjd.

Lösning: Hon kan börja med att försöka uppskatta pojkarnas hastighet. Pojkar i den åldern brukar springa ett 60-meterslopp på ungefär 10 s. Det betyder en medelhastighet på 6 m/s. Här har de inte så lång sträcka att accelerera på så vi kan anta en högsta hastighet på 5 m/s. Om vi bortser från luftmotståndet så kan vi använda lägesformeln $y = -\frac{1}{2} gt^2$ för att beräkna falltiden. Vi sätter $y = -5$ m:

$$y = -\frac{1}{2} gt^2 \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{-2y}{g}} = \sqrt{\frac{10}{9{,}82}} = 1 \text{ s}$$

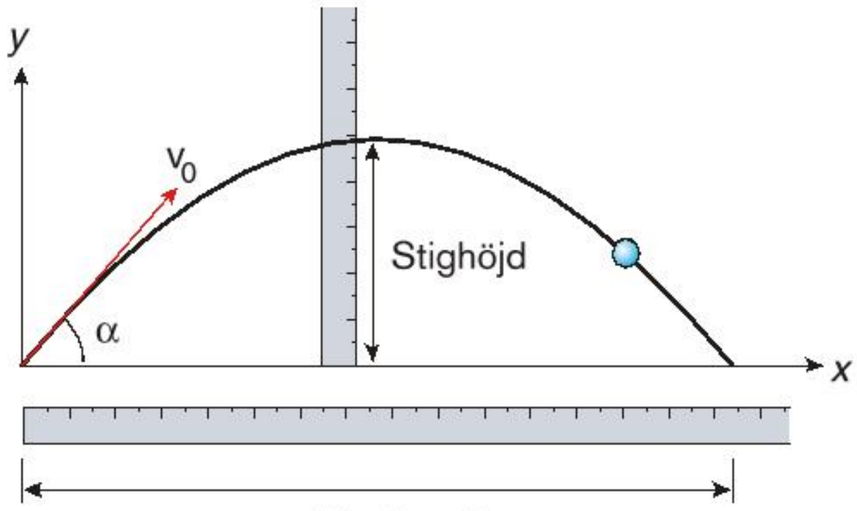
Lägesformeln $x = v_0 t$ ger den sträcka som barnen kan nå innan de slår i vattenytan,

$$x = v_0 t = 5 \cdot 1 \text{ m} = 5 \text{ m}$$

Här har vi gjort en enkel överslagsberäkning. Hur tror du att det stämmer med verkligheten? Modellen bygger på fritt fall. Är det en rimlig modell i detta fall?

Sneda Kast

I ett snett kast pekar utgångshastigheten v_0 snett uppåt eller nedåt. Vi låter startpunkten vara i origo i ett koordinatsystem där x-axeln är vågrät och y-axeln pekar lodrätt uppåt. Se figur 4.4.



4.4 Kast snett uppåt. Kastbanan är en del av en parabel. Det betyder att den är symmetrisk. När du befinner dig i kurvans högsta punkt har halva tiden gått och halva sträckan i x-led har passerats.

Om v_0 bildar vinkeln α med x-axeln, har utgångshastigheten komposanterna

$$v_{0x} = v_0 \cos\alpha \text{ och } v_{0y} = v_0 \sin\alpha$$

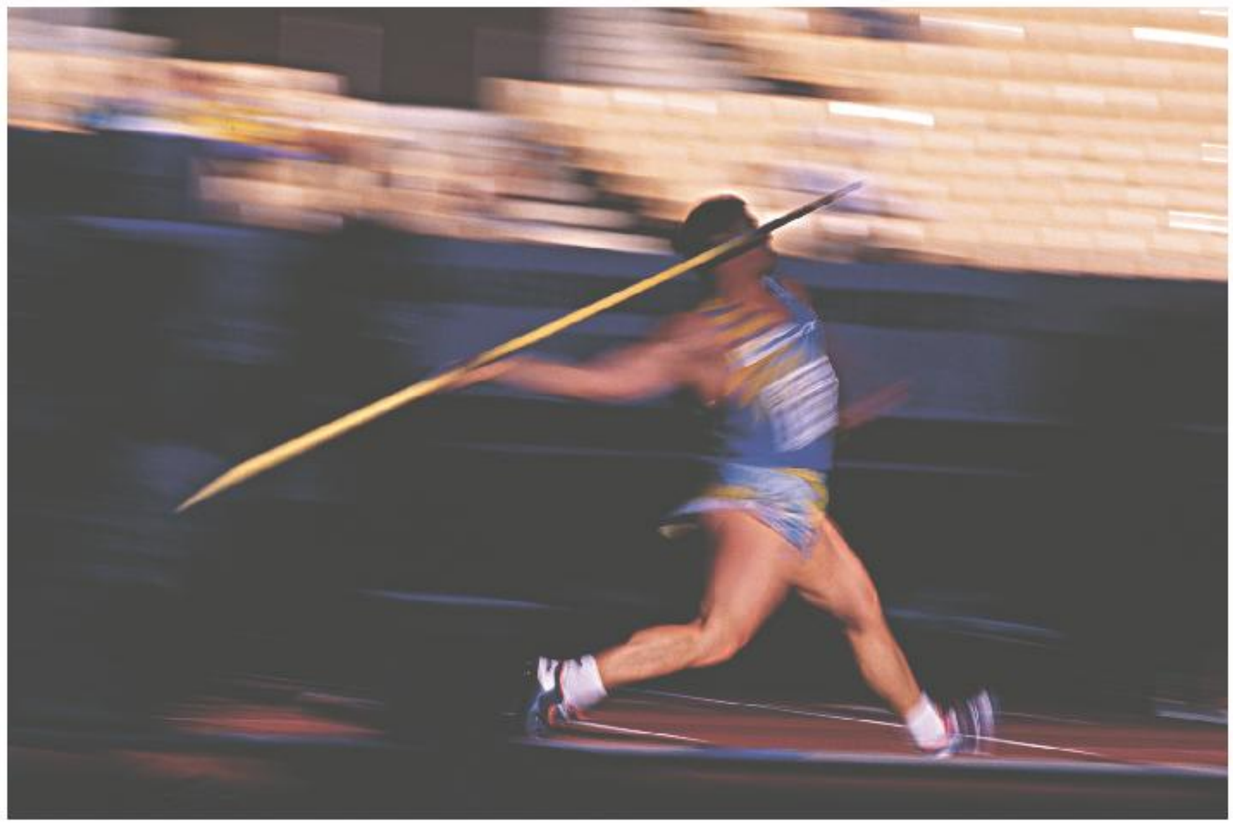
Då får vi hastighetsformlerna

$$v_x = v_{0x} \text{ och } v_y = v_{0y} - gt$$

och lägesformlerna

$$x = v_{0x}t \text{ och } y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

Formlerna för x-riktningen motsvarar en rörelse med *konstant hastighet*, v_{0x}. Formlerna för y-riktningen motsvarar ett lodrätt kast med utgångshastigheten v_{0y}.



EXEMPEL 4 **Haliflax**

Under en våldsam explosion i Halifax den 6 december 1917 kastades William Becker genom luften och landade i ett träd 1 500 meter längre bort, skadad men levande. Vi utgår från att Becker kastades en vågrät sträcka på 1 500 m och att startvinkeln var 45°. Vi antar vidare att utgångshastigheten var 120 m/s och att vi kan bortse från luftmotståndet.

a) Hur länge varade flygturen?

b) Hur högt kom han?

Lösning:

a) Flygturen skedde med konstant hastighetskomposant i vågrät riktning:

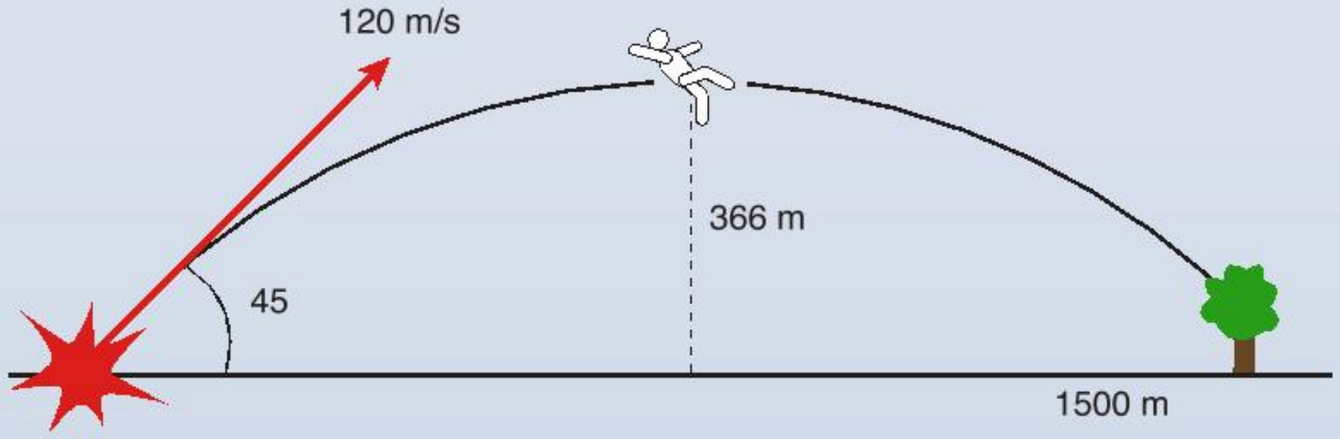
$$v_{0x} = v_0 \cos 45° = 120 \cos 45° \text{ m/s} = 84{,}9 \text{ m/s}$$

Det ger tiden

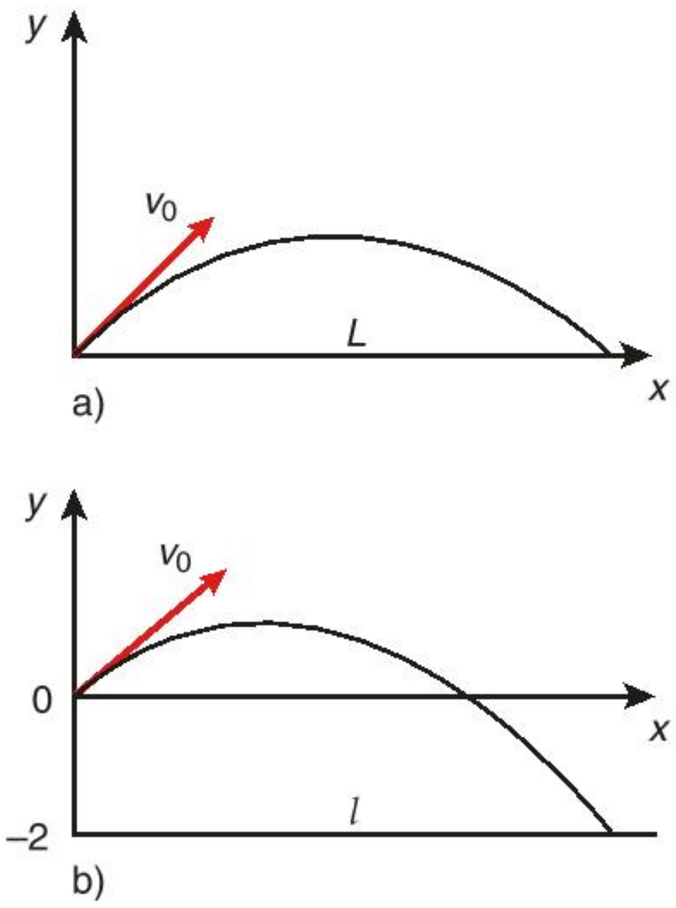
$$t = \frac{x}{v_{0x}} = \frac{1500}{84{,}9} \text{ s} = 17{,}7 \text{ s}$$

b) Den maximala höjden nåddes efter halva tiden, det vill säga efter 8,84 s. Se figuren. Då hade William en höjd som vi får fram med lägesformeln för y-riktningen:

$$y = v_0 \sin 45° \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 = 366 \text{ m}$$



Om historien är sann och våra antaganden är rimliga fick William lite av en flygtur – med flax!



4.5 Kulstöt från **a** marknivå och **b** från 2 m över marken.

EXEMPEL 5 **En kulstöt**

Kulikov stöter en kula snett uppåt från origo med utgångshastigheten $v_0 = 12{,}5$ m/s som bildar vinkeln $\alpha = 47°$ med x-axeln. Se figur 4.5a. Hur lång blir stöten?

Lösning: Först måste vi bestämma hur länge kulan är i luften. Om kulan träffar marken på höjden $y = 0$, får vi andragradsekvationen

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$$

$$0 = 12{,}5 \cdot \sin 47° \cdot t - \frac{1}{2} \cdot 9{,}82 \cdot t^2$$

Löser du ekvationen får du att $t = 1{,}86$ s.

Vi sätter in denna tid i formeln för x och får kastlängden

$$l = v_{0x} t = 12{,}5 \cdot \cos 47° \cdot 1{,}86 \text{ m} = 15{,}9 \text{ m}$$

Modellen har en allvarig brist: Vi räknar som om Kulikov presterade konststycket att *ligga* på marken och stöta kulan snett uppåt! I verkligheten stöter han kulan från en punkt cirka 2 m över marken. Om vi fortfarande utgår från att kulan lämnar Kulikovs hand i origo blir $y = -2$ i landningspunkten. Se figur 4.5b. Gör om beräkningarna på egen hand. Sätt $y = -2$. Beräkna t och l på nytt. Du bör få $t = 2{,}06$ s och $l = 17{,}6$ m.



KONTROLLFRÅGOR

- Vilken acceleration har ett föremål efter att vi kastat det?
- Är det sant att ett föremål faller fritt bara vid lodrätt kast?
- Skriv rörelseformlerna för vågrätt kast. Förklara symbolerna i formeln.
- Skriv rörelseformlerna för snett kast. Förklara symbolerna i formeln.
- Är det sant att ett föremål som kastas, alltid har konstant hastighet i x-riktningen?
- En sten kastas från en klippkant rakt ut med hastigheten 15 m/s. Stenen träffar marken efter 2,5 s.
  a) Hur långt ut från klippkanten landar den?
  b) Hur hög är klippan?
- En kula kastas med hastigheten 14 m/s snett uppåt i 30° riktning (mot horisontalplanet).
  a) Hur stor hastighet har kulan alldeles i början på kastet i horisontell och vertikal led?
  b) Hur stora är hastigheterna efter 1 s?
  c) När är kulan längst upp?
  e) Hur långt upp kommer kulan?
  e) Hur länge är kulan i luften om den landar på samma höjd som den kastades?
  f) Var landar kulan?

4.3 Cirkelrörelse

Ungefär cirkelformiga rörelser är vanliga i astrofysiken. Planeterna kretsar runt solen i banor som är ganska cirkelformiga, och månar kretsar runt de flesta planeterna. Inom fysiken kallas den här typen av rörelse för *centralrörelse* eftersom rörelsen sker kring ett centrum.

Kraften som håller kvar ett föremål i en cirkelbana kallar vi för *centripetalkraft*. Den kan förmedlas av ett gravitationsfält, ett elektriskt eller magnetiskt fält.

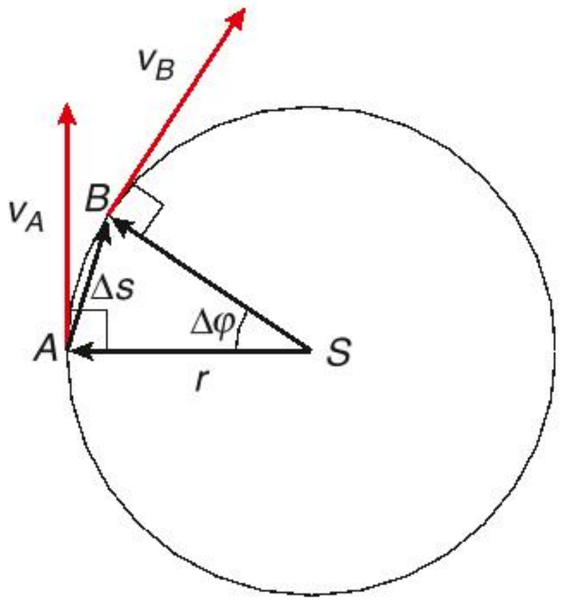
Här ska vi begränsa oss till att studera punktformiga föremål som rör sig i cirkelformade banor. Vi kommer inte att ta hänsyn till föremålens utsträckning. Det innebär att vår modell fungerar bra för planetrörelser eller för partiklar som går i cirkelbanor i centralfält, men dåligt för de roterande delarna på en bil eller för en breakdansare som spinner på huvudet! För att kunna behandla sådana cirkelrörelser behöver vi en mer avancerad modell som även tar hänsyn till massfördelningen hos föremålet.

Centripetalacceleration

Vi börjar med att studera ett föremål som rör sig i en cirkelformig bana med *konstant banhastighet*. Det betyder att hastigheten v har konstant absolutvärde v. Men även om absolutvärdet är konstant, så är inte hastighetsvektorn konstant. Hastigheten ändrar ju riktning hela tiden. Det betyder att föremålet har en acceleration a. Vi ska bestämma riktningen och absolutvärdet till accelerationen med hjälp av definitionen

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Då måste vi ta till en del tricks. Försök att följa med i härledningen så att du *förstår* varje enskilt steg. Du behöver inte komma ihåg alltsammans. Däremot måste du komma ihåg resultatet, alltså accelerationens *riktning* och *storlek*.



4.6a Cirkelrörelse med konstant banhastighet.

Accelerationens riktning

Tänk dig att föremålet följer en cirkelbana med centrum S och radien r. Se figur 4.6a.

Föremålet passerar punkten A vid tidpunkten t och punkten B vid tidpunkten $t + \Delta t$. Vinkeln mellan SA och SB är lika med $\Delta\varphi$. Eftersom $SA = SB = r$ blir $\Delta\varphi$ toppvinkel i den likbenta triangeln SAB.

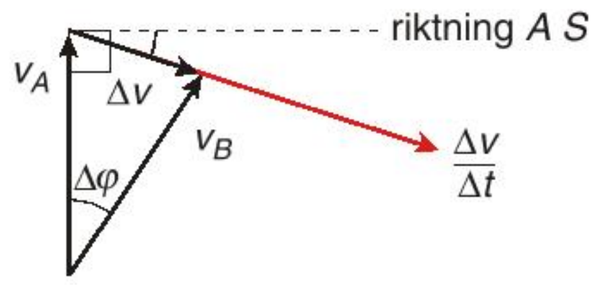
Enligt figuren är $SA + AB = SB$. Därför kan vi skriva förflyttningen $\Delta s = AB = SB - SA$. Hastigheten är v_A i punkten A och v_B i punkten B. Båda hastigheterna har absolutvärdet v. Hastighetsändringen från A till B är

$$\Delta v = v_B - v_A$$

under tidsintervallet Δt. Hastighetsvektorerna är tangenter till cirkelbanan. Då måste v_A vara vinkelrät mot SA och v_B vara vinkelrät mot SB. Det betyder att vinkeln mellan v_A och v_B är lika med $\Delta\varphi$.

Vi ritar en ny triangel med v_A och v_B och Δv som sidor. Se figur 4.6b. I figuren ser du att $v_A + \Delta v = v_B$. Även här ser du att vi kan skriva hastighetsändringen som $\Delta v = v_B - v_A$.

Eftersom banhastigheten är konstant, är detta en likbent triangel med toppvinkeln $\Delta\varphi$. Medelaccelerationen $\Delta v/\Delta t$ under tidsintervallet Δt har samma riktning som Δv. Om vi låter $\Delta t \to 0$ så kommer också $\Delta\varphi \to 0$. Då kommer medelaccelerationen att närma sig ett vinkelrätt läge mot v_A och alltså peka in mot centrum av cirkeln. Det betyder att momentanaccelerationen a i punkten A måste peka in mot cirkelns centrum.



4.6b Hastighetsvektorerna bildar en likbent triangel med toppvinkeln $\Delta\varphi$.

Absolutvärdet av accelerationen

De två trianglarna i 4.6a och 4.6b är likformiga, eftersom båda är likbenta och har samma toppvinkel $\Delta\varphi$. Det ger oss

$$\frac{\Delta v}{\Delta s} = \frac{v}{r}$$

Vi multiplicerar med Δs och dividerar med Δt på båda sidorna. Då får vi

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{r} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

När $\Delta t \to 0$ går vänsterledet mot a och högerledet mot

$$\frac{v}{r} \cdot v = \frac{v^2}{r}$$

Därmed har vi funnit att

$$a = \frac{v^2}{r}$$

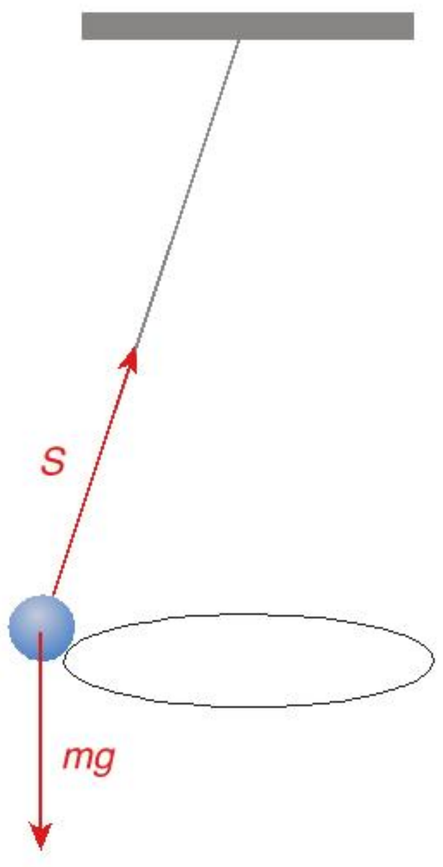
Efter en lång och mödosam resa har vi lyckats bestämma accelerationen i en cirkelrörelse med konstant banhastighet. Denna acceleration är så viktig att den fått ett eget namn, *centripetalacceleration*. Låt oss sammanfatta:

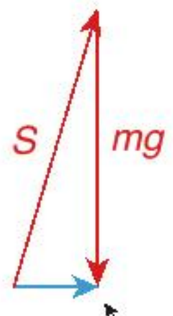
CENTRIPETALACCELERATION

När ett föremål rör sig med konstant banhastighet i en cirkelbana, pekar accelerationen alltid in mot cirkelns centrum. Absolutvärdet av centripetalaccelerationen är

$$a = \frac{v^2}{r}$$

där v är banhastigheten och r är banradien.





Summan av vektorerna pekar in mot mitten av cirkeln.

Ett enkelt kvalitativt försök.

En kula hänger i ett snöre. Se figur. För att få kulan att gå i en cirkelrörelse måste vi dra ut den till sidan och ge den en tangentiell fart. Prova själv! Det är inte så lätt. Det här är ett enkelt kvalitativt försök som visar att hastigheten är tangent till banan och att summan av krafterna (markerade i figuren) och därmed accelerationen pekar in mot mitten av cirkeln.

EXEMPEL 6 **Hastighetsåkning på skridskor**

Världsrekordet på 500 m skridskor sattes år 2007 av den kanadensiske åkaren Jeremy Wotherspoon. Hans tid var 34,03 s. Om han använde 9,50 s på de första 100 m betyder det att de sista 400 m gick på 24,53 s. Om han höll konstant banhastighet under resten av loppet var den:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{400}{24{,}53}\ \text{m/s} = 16{,}3\ \text{m/s}$$

Innerkurvan kan ha radien $r = 25{,}5$ m. I innerkurvan har sprintern därför centripetalaccelerationen

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{16{,}3^2}{25{,}5}\ \text{m/s}^2 = 10{,}4\ \text{m/s}^2$$

Alltså större än tyngdaccelerationen!

EXEMPEL 7 **In mot solen**

Jorden går runt solen i en ungefär cirkelformad bana med en radie på $r = 1{,}5 \cdot 10^{11}$ m. Varvtiden är ett år. Vad blir jordens centripetalacceleration?

Lösning: Vi vet att centripetalaccelerationen är $a = \frac{v^2}{r}$.
Vi vet r och måste finna v. Men

$$v = \frac{s}{T} = \frac{2\pi r}{T}$$

där s är omkretsen i jordbanan och T är ett år mätt i sekunder. Detta ger

$$T = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\ \text{s} = 3{,}15 \cdot 10^7\ \text{s}$$

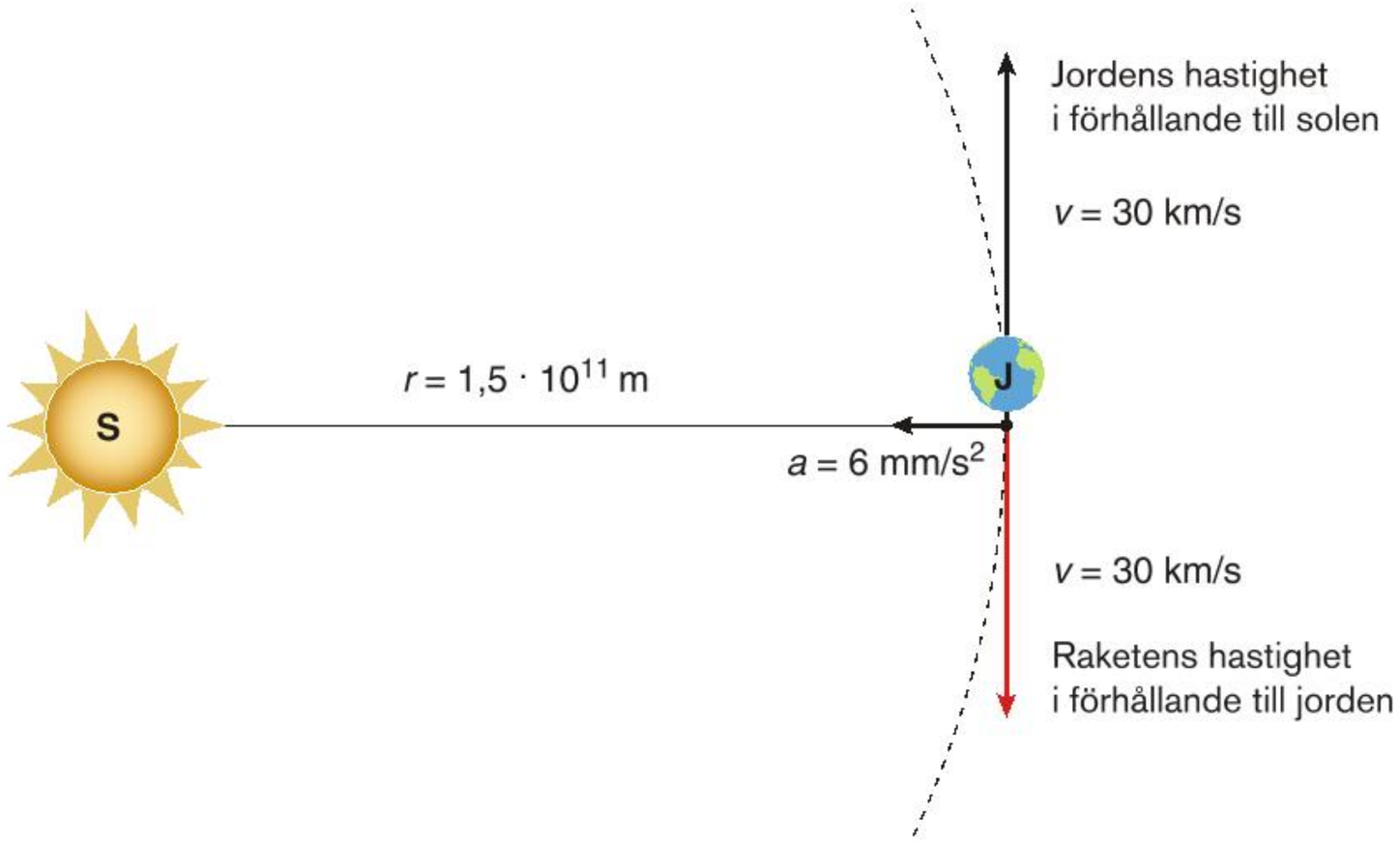
Banhastigheten blir

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi \cdot 1{,}5 \cdot 10^{11}}{3{,}15 \cdot 10^7}\ \text{m/s} = 3{,}0 \cdot 10^4\ \text{m/s} = 30\,\text{km/s}$$

Centripetalaccelerationen är

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(3{,}0 \cdot 10^4\right)^2}{1{,}5 \cdot 10^{11}}\ \text{m/s}^2 = 6{,}0 \cdot 10^{-3}\ \text{m/s}^2 = 6\,\text{mm/s}^2$$

Man skulle kunna tro att det är enkelt att skicka en raket eller rymdsond rakt in mot solen. Så är inte fallet. För att klara det måste man nämligen skjuta raketen rakt bakåt i förhållande till jordens hastighetsriktning, och det med en hastighet på 30 km/s. Då skulle raketen till att börja med vara i vila i förhållande till solen och sedan falla rakt in mot solen. Se figur 4.7.



4.7 En raket till solen.

Men så stor hastighet som 30 km/s klarar vi inte av att ge rymdsonder idag. Vet du hur vi i alla fall kan skicka en rymdsond mot solen? Man skjuter rymdsonden mot en planet. När rymdsonden stöter samman med planeten blir effekten ungefär som ett släggkast där gravitationen är kättingen och den stora planeten kastaren. Resultatet blir att rymdsonden kan få en högre fart relativt jorden när den slungas iväg från planeten än när den närmar sig den.

Observera att när ett föremål har omloppstiden T i en cirkelbana, är banhastigheten

$$v = 2\pi r/T$$

Sätter vi in detta i formeln $a = v^2/r$, får vi en ny formel för centripetalaccelerationen

$$a = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Resultantkraftens riktning

För att åstadkomma krökta rörelser, till exempel cirkelrörelse, behövs det krafter. Newtons andra lag, $F_{res} = ma$, säger oss att resultantkraften har samma riktning som accelerationen. Därför verkar också resultantkraften F_{res} in mot cirkelbanans centrum.

RESULTANTKRAFT VID CIRKELRÖRELSE

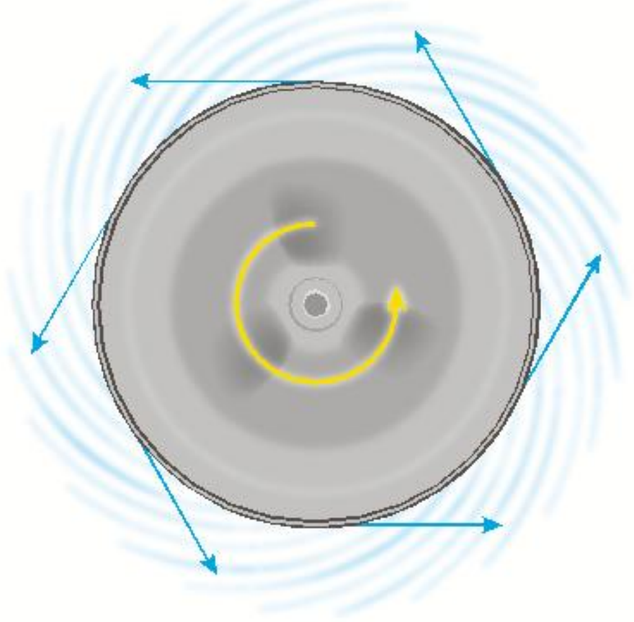
När ett föremål rör sig med konstant banhastighet i en cirkelbana, verkar resultantkraften in mot cirkelns centrum. Resultantkraftens absolutvärde är

$$F_{res} = m\frac{v^2}{r}$$

Denna resultantkraft är *vektorsumman* av alla de krafter som verkar på föremålet när det rör sig i en cirkelbana med *konstant* banhastighet.

EXEMPEL 8 Centrifugering

På programmet i en tvättmaskin kan vi välja centrifugering. När tvättmaskinen centrifugerar, rinner vattnet ut från kläderna mycket snabbare än om de bara hängdes upp på en tvättlina. Centrifugtrumman roterar snabbt, och kläderna får en stor centripetalacceleration. Men trumman är full av hål, och vattendropparna försvinner ut genom hålen längs rätlinjiga banor som tangerar trumväggen. Se figur 4.8.



4.8 Vattendropparna rinner ut genom hålen i centrifugen. De kommer att slungas iväg i tangentens riktning.

På senare år har man börjat tillverka *ultracentrifuger* för att separera atomer i olika isotoper och för att separera molekyler med olika densitet. I dagens biokemiska revolution är ultracentrifugen en central apparat. I specifikationen till en ultracentrifug står det att den har en radie på 2 mm och roterar 100 000 varv per sekund. Hur stor blir centripetalaccelerationen i ultracentrifugen?

Lösning: Om centrifugen roterar 100 000 varv per sekund blir tiden för ett varv

$$T = \frac{1}{f}\,s = \frac{1}{100000}\,s = 10^{-5}\,\text{s}$$

Nu kan vi beräkna banhastigheten v i cirkelbanan. Hastigheten blir

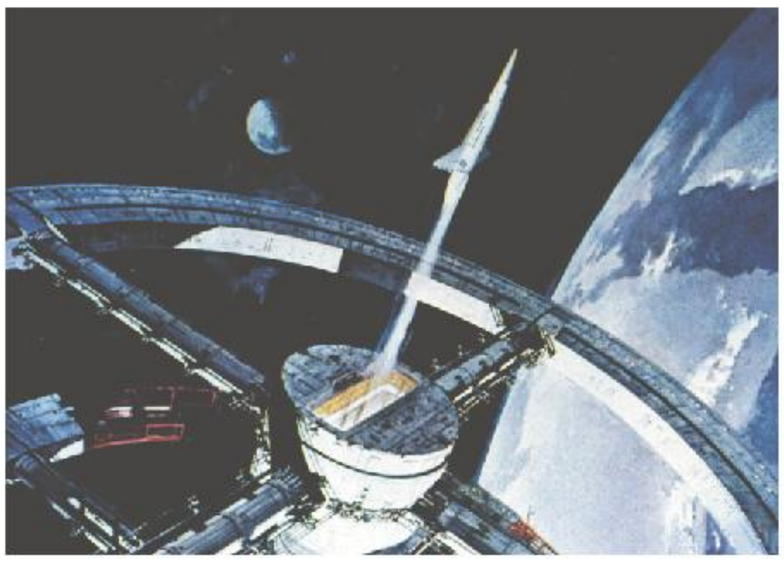
$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{10^{-5}}\,\text{m/s} = 1{,}26 \cdot 10^{3}\,\text{m/s}$$

Centripetalaccelerationen blir därför

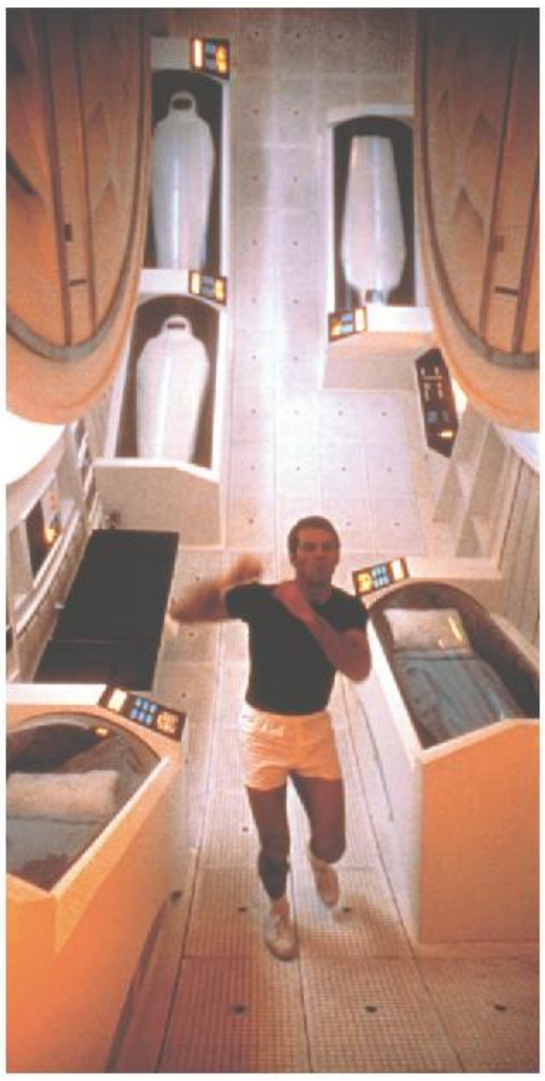
$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{\left(1{,}26 \cdot 10^{3}\right)^2}{2 \cdot 10^{-3}}\,\text{m/s}^2 = 7{,}9 \cdot 10^{8}\,\text{m/s}^2$$

Det vill säga ca 80 miljoner gånger tyngdaccelerationen!

Ordet centrifug betyder flykt från centrum.



En rymdstation spinner runt sin egen axel samtidigt som den är i fritt fall runt en planet. En person i mitten av rymdstationen är "tyngdlös". Längst ut från centrum kan en annan person samtidigt stå pressad mot ett golv – som på jorden … ungefär.



EXEMPEL 9 **Rymdstationen i filmen 2001**

I kultfilmen "År 2001, en rymdodyssé" förekommer en rymdstation som faller i en cirkelbana runt en måne. Om rymdstationen bara gick i bana runt månen utan att rotera kring sin axel skulle det råda "tyngdlöshet" ombord. Då skulle den ju befinna sig i fritt fall. Stationen har därför en artificiell tyngdkraft som simuleras genom att den roterar kring sin egen axel. Den cirkelformade ytterväggen är golv i det roterande hjulet. Se figurer till vänster.

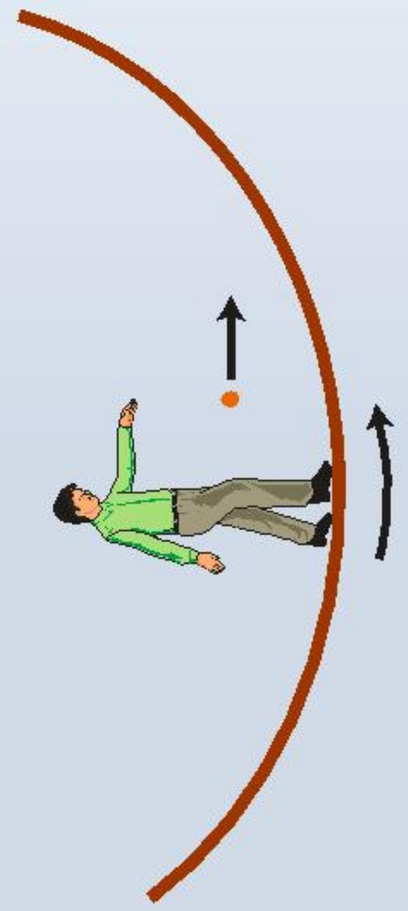
Låt oss anta att rymdstationen har radien 50 m. Då skulle det råda jordliknande förhållanden längst ut från centrum när $\frac{v^2}{r} = 9{,}8\,\text{m/s}^2$. Det ger oss en rotationshastighet på 22 m/s eller 80 km/h. Ett helt varv avverkas på ungefär 14 s. Det råder inga tvivel om att människorna där inne känner att de pressas mot golvet med något som liknar jordens tyngdkraft. Om de skulle ställa sig på en vanlig våg så skulle vågen visa deras massa.

EXEMPEL 10 **Tyngdlöst bollsläpp**

Tänk dig att du befinner dig på rymdstationen i exempel 9 och släpper en boll du har i handen. Vad händer? Bollen "vet inte" att den befinner sig inne i den roterande rymdstationen. Så snart du släpper den befinner den sig i "tyngdlöst tillstånd", det vill säga i fritt fall tillsammans med rymdstationen. Efter en stund kolliderar den med golvet.

Men … hur ser det ut för dig? Ser bollen ut att falla rätt ned och studsa rätt upp igen? Se figur 4.9.

När du släpper bollen fortsätter den med konstant fart i rätlinjig bana som är parallell med tangenten till det roterande hjulet. Efter en stund kolliderar den med golvet. Men för dig som släpper bollen ser det ut som om den föll "ned" mot golvet.

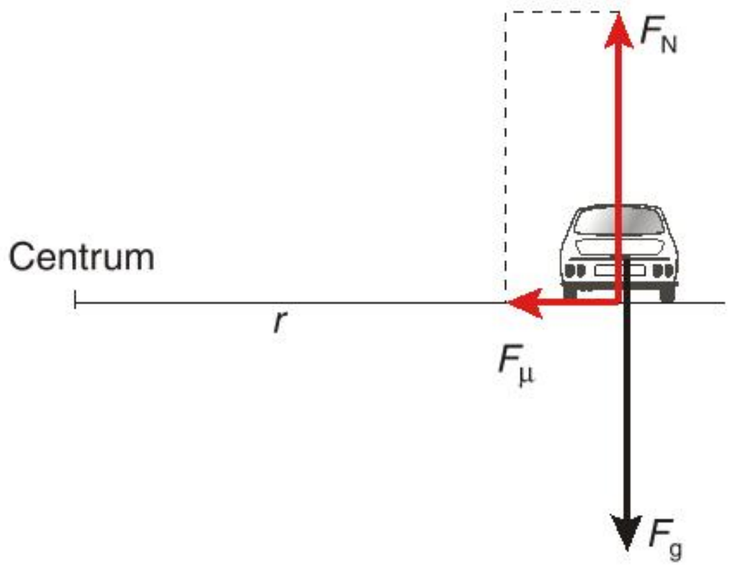


4.9 Tyngdlöst bollsläpp.

Vågräta cirkelbanor

Här i kurs 2 studerar vi kroklinjig rörelse i två dimensioner, det vill säga i ett *plan*. När vi nu studerar cirkelrörelse, ska vi nöja oss med att titta på två fall: vågrätt plan och lodrätt plan.

En skridskolöpare som åker genom en kurva är ett exempel på en vågrät cirkelrörelse, för en skridskobana ska ju helst vara vågrät.



4.10 Krafter på en bil i en kurva utan dosering. Det är friktionen som håller kvar bilen på vägen.

EXEMPEL 11 **Sväng utan dosering**

En bil med massan m kör med konstant hastighet v i en vågrät kurva med radien r. Vägverket har dessvärre glömt att *dosera* kurvan. Det är inte bra, för då är det bara friktionen på hjulen som håller bilen på plats i kurvan. Se figur 4.10.

Bilen påverkas av tre krafter: tyngden F_g, normalkraften F_N och friktionskraften F_μ. Om bilen ska hålla sig kvar i kurvan, måste

$$F_\mu = ma$$

där a är centripetalaccelerationen $a = v^2/r$.

Vi får sambanden

$$F_N = F_g \qquad \text{och} \qquad F_\mu = m\frac{v^2}{r}$$

Den sista formeln visar att det bara är friktionen som håller kvar bilen på vägen. Bilen mister väggreppet och börjar glida när hastigheten blir så stor att $F_\mu = \mu N = \mu mg$ där μ är friktionskoefficienten för glidfriktion. Vi sätter in i formeln $F_\mu = mv^2/r$ och får

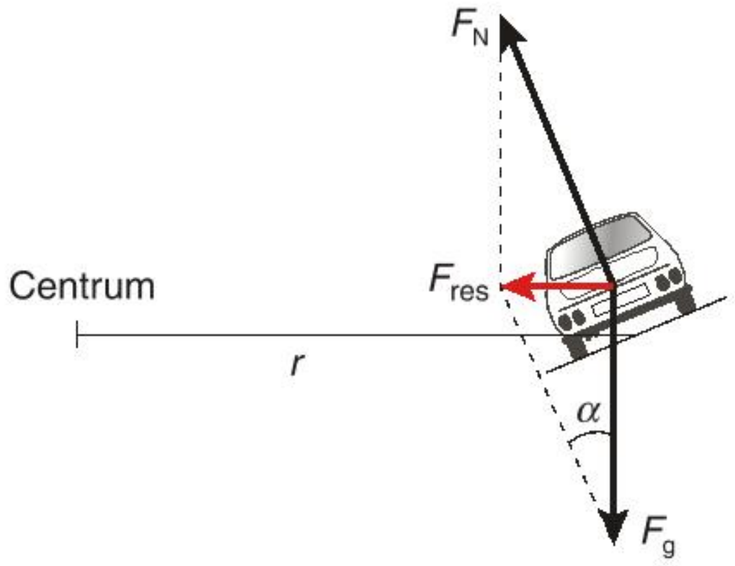
$$\mu mg = m\frac{v^2}{r} \qquad \text{som ger} \qquad v = \sqrt{\mu rg}$$

Vid denna hastighet kommer bilen alltså att förlora väggreppet. För en bil med bra sommardäck på torr asfalt kan friktionskoefficienten vara $\mu_1 = 0{,}82$. För slitna sommardäck på våt asfalt kan friktionskoefficienten vara $\mu_2 = 0{,}15$. Kurvradien är $r = 150$ m. Maxhastigheten med bra däck på torr asfalt blir då

$$v_1 = \sqrt{\mu_1 rg} = \sqrt{0{,}82 \cdot 150 \cdot 9{,}82}\ \text{m/s} = 34{,}8\ \text{m/s} = 125\ \text{km/h}$$

Maxhastigheten med slitna däck på våt asfalt blir

$$v_2 = \sqrt{\mu_2 rg} = \sqrt{0{,}15 \cdot 150 \cdot 9{,}82}\ \text{m/s} = 14{,}9\ \text{m/s} \approx 54\ \text{km/h}$$



4.11 Krafter på en bil i en kurva med dosering. Det är resultanten av tyngden och normalkraften som håller kvar bilen på vägen.

EXEMPEL 12 **Kurva med dosering**

Så kör bilen in i en kurva som Vägverket kommit ihåg att dosera. Det betyder att vägbanan har en lutningsvinkel α så att kurvans ytterkant ligger högre än innerkanten. Se figur 4.11. Bilföraren kan nu anpassa hastigheten v så att enbart doseringen håller bilen kvar på vägen. Detta betyder att $F_\mu = 0$. Newtons andra lag ger då

$$F_{res} = F_g + F_N = ma$$

Av figur 4.11 ser du att

$$\tan\alpha = \frac{F_{res}}{F_g} = \frac{m\dfrac{v^2}{r}}{mg} = \frac{v^2}{rg}$$

som ger

$$v = \sqrt{rg\tan\alpha}$$

Alla storheterna på högra sidan är konstanta: g är given av naturen, medan r och α är givna av Vägverket. Om föraren anpassar hastigheten så att $v = \sqrt{rg\tan\alpha}$, så är det enbart doseringen som håller kvar bilen på vägen. För passagerarna känns det nästan exakt som att sitta i en bil som kör med konstant fart på en rät väg. Den enda skillnaden är att de känner sig lite tyngre.

Vi tänker oss att kurvradien är $r = 150$ m. Om kurvan är doserad för en medelhastighet på $v = 60$ km/h = 16,7 m/s, så bör doseringen vara sådan att

$$\tan\alpha = \frac{v^2}{rg} = \frac{16{,}7^2}{150 \cdot 9{,}82}$$

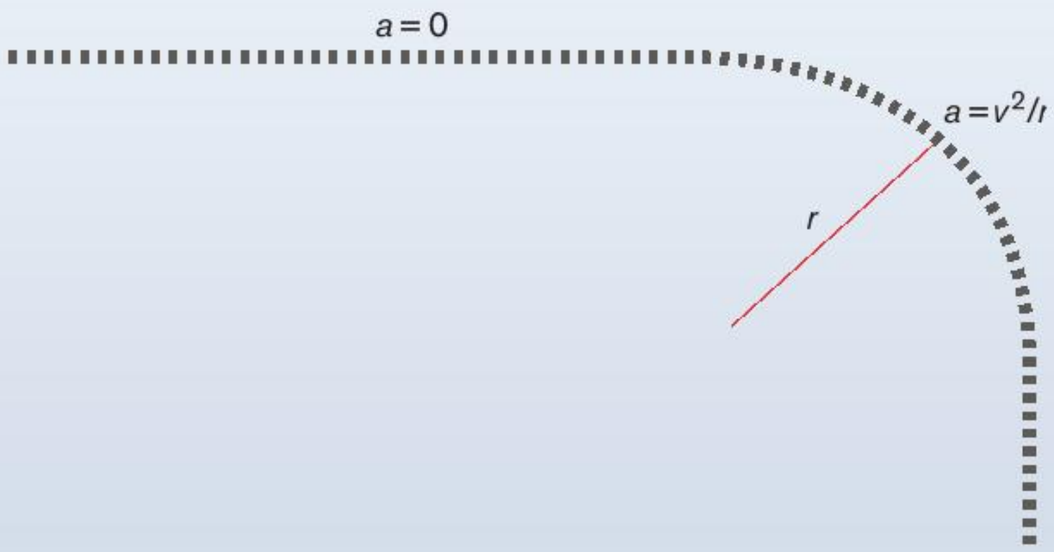
Det ger $\alpha = 10{,}7°$.



Kurvorna i velodromcykling är starkt doserade.

EXEMPEL 13 **Oändligt ryck?**

Tänk dig ett tåg som kör med konstant fart på en raksträcka som övergår i en cirkelformad sväng där tåget fortsätter att köra med samma fart. Se figur 4.12.



4.12 Raksträcka som övergår i cirkelformad sväng.

I det ögonblick svängen börjar så förändras accelerationen från $a = 0$ till $a = \frac{v^2}{r}$. Vi har inte talat om förändring av acceleration tidigare, något som matematiskt uttrycks som $j(t) = a'(t)$.
På engelska kallas den här storheten för "jerk", som vi kan översätta till ryck.

Om vår järnväg är konstruerad på det sätt som vi antyder i figur 4.12 så kommer accelerationens derivata att bli oändligt stor när vi går in i kurvan (och oändligt negativ när vi går ut ur kurvan). Är det ett problem? Låt oss tänka efter.

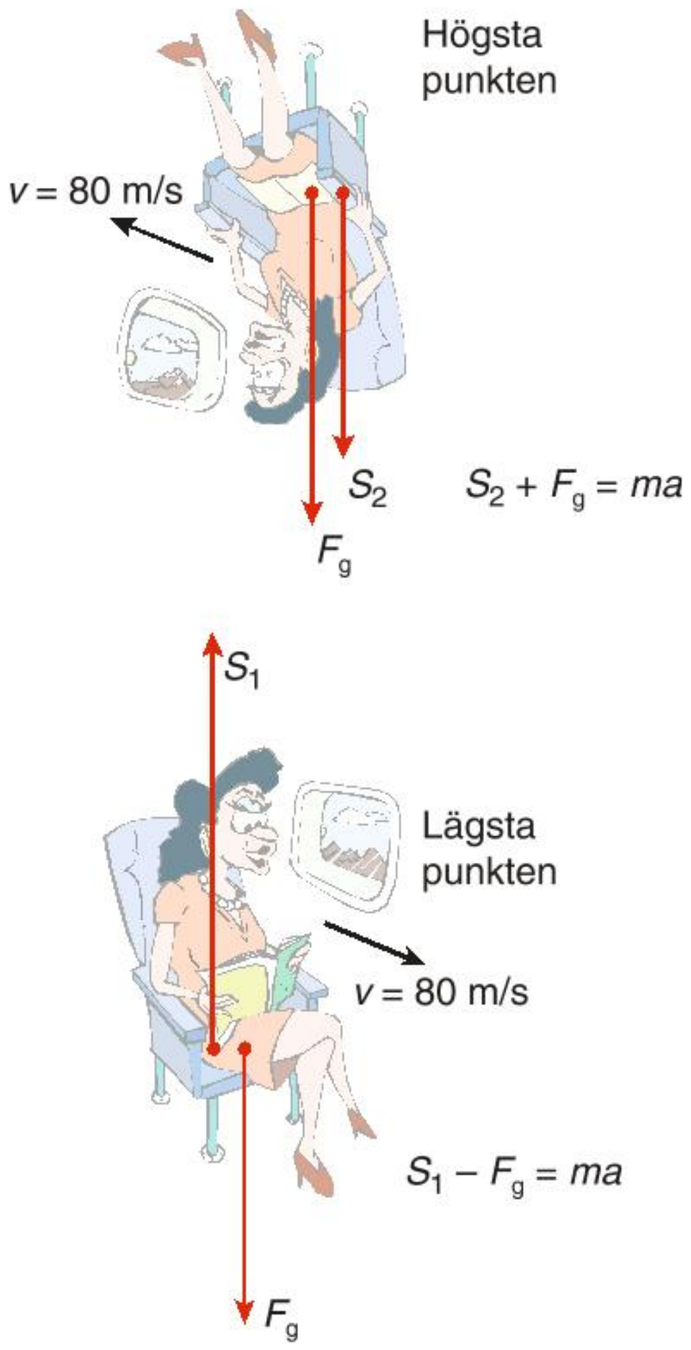
Om du står utan att hålla i dig i en buss som har konstant fart så kan du stå i lodlinjen utan att luta dig i en eller annan riktning. Om bussen har konstant acceleration, dvs om $a'(t) = 0$, så går det också bra, bara du lutar dig mot accelerationen med en bestämd vinkel.

Men så snart bussens acceleration förändras upplever du ett ryck och måste ta ett steg för att inte falla. I vårt järnvägsexempel ovan är det rycket oändligt stort, så tåget spårar ur!

I verkligheten kan sådana kurvor inte accepteras, vare sig på vägar, järnvägar eller berg- och dalbanor. Verklighetens kurvor inleds därför med en så kallad klotoid. Det är en sväng där radien ökar från oändlig (raksträcka) till den kurvradie som passar terrängen och trafiken just där. Storheten "ryck" är för övrigt viktig både fysiologiskt (vad kroppen tål) och ingenjörsmässigt (vad konstruktioner tål). Varken maskiner eller människor tål hur stora ryck som helst.

Lodräta Cirkelbanor

Vi ska avsluta detta avsnitt med att titta lite på cirkelrörelser i ett lodrätt plan.



4.13 Krafter på passageraren i högsta och lägsta punkten i loopen.

EXEMPEL 14 **Flygplan i loop**

Ett sportflygplan går in i en loop och följer en cirkelbana i ett lodrätt plan. Se figur 4.13. Banradien är $r = 400$ m och banhastigheten är konstant $v = 80$ m/s. Passageraren i planet har massan $m = 56$ kg. Beräkna stolens kraft på passageraren när planet passerar cirkelns lägsta och högsta punkt.

Lösning:

Eftersom planet har konstant banhastighet, så får centripetalaccelerationen a samma absolutvärde genom hela banan, även i de högsta och lägsta punkterna. Vi får

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{80^2}{400}\ \text{m/s}^2 = 16{,}0\ \text{m/s}^2$$

I den *lägsta* punkten påverkas passageraren av tyngden F_g och stolkraften S_1. Stolkraften verkar uppåt, och tyngden verkar nedåt. Resultantkraften F_{res} måste verka uppåt mot cirkelns centrum eftersom accelerationen pekar uppåt. Vi väljer positiv riktning uppåt och får $S_1 - F_g = ma$. Det ger

$$S_1 = ma + F_g = m(a + g) = 56 \cdot (16{,}0 + 9{,}82)\ \text{N} = 1\,450\ \text{N}$$

Om passageraren satt på en våg, så skulle den visa (1 450/9,82) kg = 147 kg. Längst ned i banan skulle passageraren känna sig mycket tyngre än vanligt.

I den *översta* punkten påverkas passageraren av tyngden F_g och stolkraften S_2. Stolkraften verkar nu nedåt. Resultantkraften F_{res} verkar nedåt mot cirkelns centrum. Nu väljer vi positiv riktning nedåt och får

$S_2 + F_g = ma$. Det ger

$$S_2 = ma - F_g = m(a - g) = 56 \cdot (16{,}0 - 9{,}82)\ \text{N} = 350\ \text{N}$$

Om passageraren satt på en våg i banans högsta punkt, så skulle den visa (350/9,82) kg = 35 kg. Passageraren skulle alltså känna sig lättare än vanligt.

Situationen längst ner i cirkeln påminner om det "tryck" som utförsåkare, störtloppsåkare, hoppare och andra skidlöpare upplever när hastigheten är stor och backen kröker uppåt.

Situationen längst upp i cirkeln påminner om den "viktlättnad" som bilförare och motorcyklister upplever när hastigheten över ett backkrön är stor.

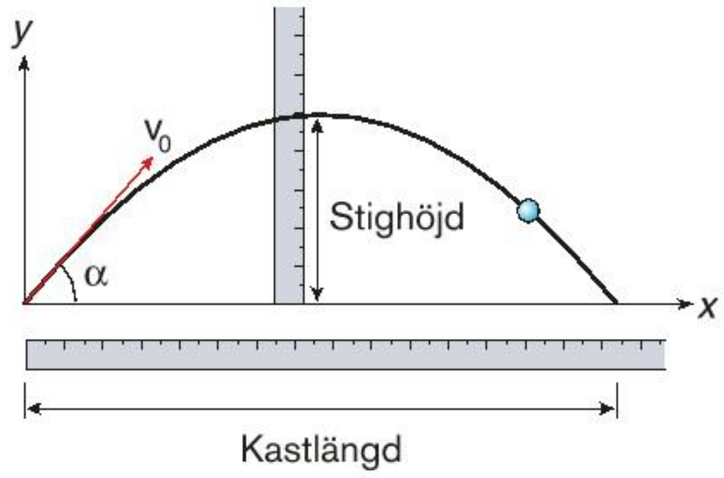
KONTROLLFRÅGOR

- Vilken riktning har accelerationen när ett föremål rör sig i en cirkelbana med konstant banhastighet?
- Är det sant att resultantkraften alltid verkar in mot centrum när ett föremål rör sig med konstant banhastighet i en cirkel?
- Orvar cyklar med konstant fart runt i en cirkulär bana med diametern 28 m på 14 s. Hur stor är Orvars acceleration?
- Du fäster en 0,50 kg tung sten i ett rep som är 0,82 m långt. Du svingar sedan runt stenen i en cirkelbana med hastigheten 15 m/s. Hur stor centripetalkraft verkar på stenen?
- En 1 200 kg tung bil kör in i en odoserad kurva med radien 150 m. Friktionskraften kan högst bli 1,8 kN. Vilken är den högsta hastighet som bilen kan ha i kurvan utan att köra ur?

4.4 Tvådimensionell rörelse och numerisk modellering

Vi ska avsluta det här kapitlet med att *simulera* kast. Först ska vi göra det genom att leka lite med snett kast utan luftmotstånd på räknaren och sedan genom att visa hur du själv kan konstruera en *numerisk modell* med hjälp av Excel.

Det finns två grundläggande sätt att studera snett kast på räknaren: antingen genom *funktionsframställning* där y är en funktion av x, eller genom *parameterframställning* där koordinaterna x och y var för sig är funktioner av tiden t. Tiden är då en parameter.



Kast snett uppåt.

Nu ska vi titta närmare på de två metoderna och tar oss an ett snett kast där utgångshastigheten har värdet v_0 och kastvinkeln är α. Då fås positionen vid tiden t som

$$x = v_0 \cos\alpha \cdot t$$

$$y = v_0 \sin\alpha \cdot t - \frac{1}{2} g t^2$$

De här två ekvationerna kommer hela tiden att vara vår utgångspunkt. Lägg märke till att ekvationen för x beskriver en rörelse med konstant fart längs en rät linje. Den för y däremot visar ett lodrätt kast. Kombinerar vi dem får vi ett snett kast. Sätter vi in ett värde för t i ekvationerna så får vi alltså x och y-koordinat för den punkt där föremålet befinner sig efter t sekunder.

Vi kan få räknaren att rita grafer genom att sätta in olika funktionsuttryck. Det räknaren då gör är att beräkna funktionsvärdet för ett antal variabelvärden. Vi kan få räknaren att markera punkterna var för sig eller att binda samman punkterna med linjesegment till en sammanhängande graf. Inne i räknaren görs en massa beräkningar som du just nu inte vet så mycket om. Hur räknaren egentligen räknar ut cos 35° ska vi inte heller bry oss om just nu. Vi bryr oss bara om hur räknaren kan hjälpa oss med att studera snett kast.

EXEMPEL 15 **Snett kast på räknaren**

Metod 1: Funktionsframställning.

Vi får tiden t ur uttrycket för x här ovanför:

$$t = \frac{x}{v_0 \cos\alpha}$$

Om vi nu sätter in det uttrycket för t i uttrycket för y, får vi:

$$y = v_0 \sin\alpha \cdot \frac{x}{v_0 \cos\alpha} - \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0 \cos\alpha} \right)^2$$

Men det uttrycker ju y som en funktion av x.

Eftersom $\tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}$ får vi att

$$y = \tan\alpha \cdot x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2\alpha} \cdot x^2$$

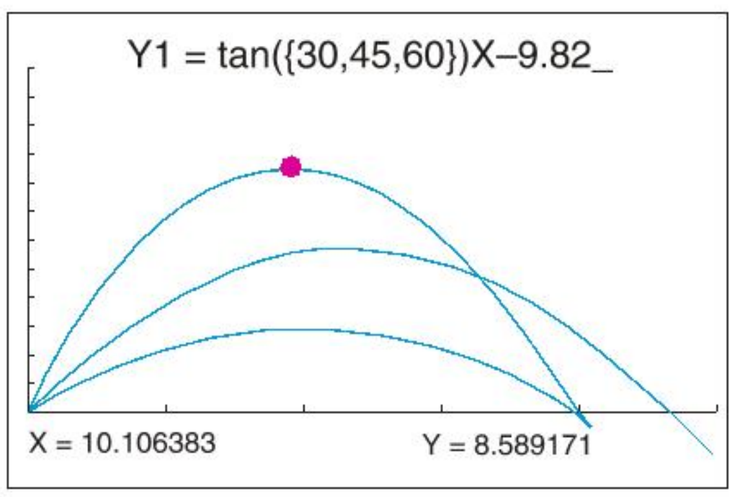
Det där ser krångligt ut, men är inte värre än något annat för räknaren. Nu är det bara att skriva in funktionen med passande värden på konstanterna α, v_0 och g.

Vi väljer tre olika kast som alla har $v_0 = 15$ m/s, medan kastvinkeln α har värdena 30°, 45°och 60°. Då kan vi faktiskt skriva de tre kastfunktionerna som en funktion genom att använda oss av räknarens listfunktion. Inom parenteserna skriver vi {30,45,60}. Då slipper vi skriva in funktionsuttrycket tre gånger. Se till att du ställer in att vinklar ska mätas i grader. Se figur 4.14a.

Plot 1 Plot 2 Plot 3
\Y1 = tan({30, 45, 60})X– 9.82/(2 ×15² × (cos({30, 45, 60})²))X²
\Y2 =
\Y3 =
\Y4 =

4.14a

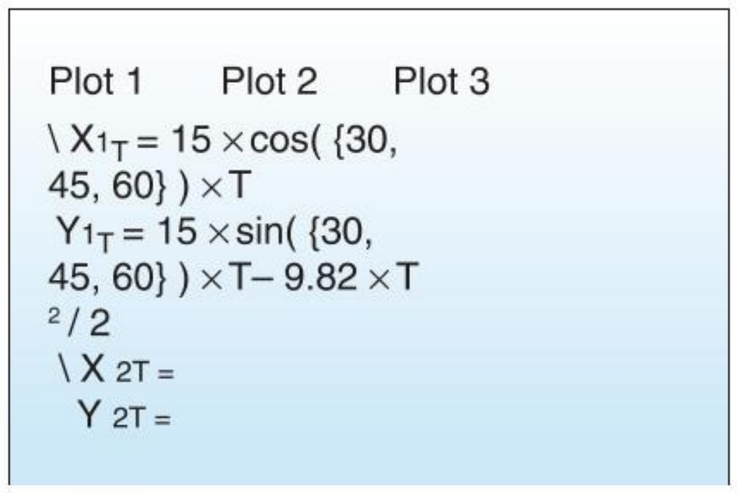
Vi väljer $X_{min} = 0$, $X_{max} = 25$, $Y_{min} = -2$, $Y_{max} = 14$. Genom den inställningen blir en meter lika lång i x-och y-led. Detta gör att kastbanan på skärmen får samma form som i "verkligheten". Då ska du få fram de tre kastbanorna i figur 4.14b. Med hjälp av TRACE kan du nu bestämma kastlängden l och stighöjden h för de tre kasten. Kontrollera att du får följande svar:



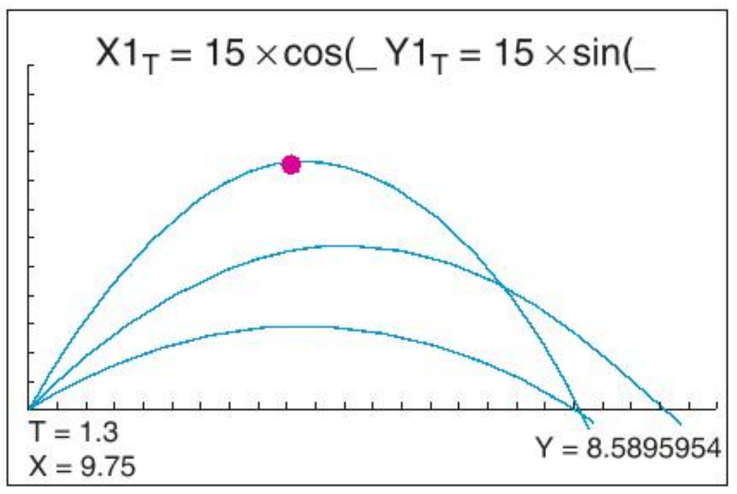
4.14b

$l_1 = 19{,}8$ m och $h_1 = 2{,}9$ m
$l_2 = 22{,}9$ m och $h_2 = 5{,}7$ m
$l_3 = 19{,}8$ m och $h_3 = 8{,}6$ m

Om du får det, så har du gjort ett bra jobb!



4.14c



4.14d

Metod 2: Parameterframställning – ett sätt att visa själva rörelsen

Välj parameterframställning på räknaren och knappa in de tre funktionerna

Återigen kan vi skriva in de tre kastfunktionerna genom att använda oss av räknarens listfunktion. Se figur 4.14c.

Välj $T_{min} = 0$, $T_{max} = 3$, $T_{step} = 0{,}05$ och välj områdena för X och Y som i metod 1. Då får du förhoppningsvis fram samma kastbanor som ovan.

Fördelen med parameterframställningen är att du nu kan läsa av var föremålet är vid en given tidpunkt. Du kan enkelt bestämma den tid det tar innan partikeln når sin högsta punkt. Vi får $t_1 = 0{,}75$ s, $t_2 = 1{,}05$ s och $t_3 = 1{,}35$ s. Om du får fram ungefär samma svar, så har du gjort ett bra jobb igen.

Tror du att det är rimligt att bortse från luftmotståndet i det här exemplet? Vi tycker det, för om man jämför med en realistisk modell som tar hänsyn till luftmotstånd så visar det sig att kastlängden bara blir några få centimeter kortare. Om det inte är VM så är väl det bra nog?

Nu kan du leka vidare med räknaren. Välj olika utgångshastigheter och kastvinklar. Vilken skala bör du välja på koordinataxlarna? Hur långt (X_{max}), hur högt (Y_{max}) och hur länge (T_{max}) flyger föremålet? Försök att tänka på ett verkligt kast och använd det du vet. Vilken utgångsvinkel ger högsta höjden? Vilken utgångsvinkel ger största längden?

I ett snett kast utan luftmotstånd är banan alltid en bit av en parabel. Från kurs 1 minns du kanske att ett *tyngdlöst tillstånd* är detsamma som fritt fall. När amerikanska astronauter tränas för arbete i tyngdlöst tillstånd tas de med på flygturer i ett speciellt flygplan som har det inbjudande namnet *Vomit Comet*. Se figur 4.15. Planet kan röra sig i en kastparabel i 25 sekunder. Under dessa 25 s följer planet, astronauterna och allt annat – även det som inte sitter fast – inne i planet samma kastbana. Förhållandena ombord är precis som de som råder i en rymdfarkost med avslagna motorer ute i rymden.



4.15 "Rymdläraren" Christa Mcauliffe ombord på NASA:s flygplan Vomit Comet.

Numeriska modeller

En av de första som gjorde en numerisk modell för ett fysikaliskt fenomen var engelsmannen L.F. Richardson som försökte räkna ut vädret i Frankrike den 20 maj 1910 med utgångspunkt i vädret dagen innan. Det tog honom två år och prognosen bommade fullständigt. Men idén var riktig. Sedan dess har datorerna bidragit till att realisera Richardsons drömmar.

Idag används numeriska modeller inom all naturvetenskap och teknologi. I stället för att formulera fysiken i ett litet antal ekvationer och räkna ut vad som händer *analytiskt* med hjälp av papper och penna, något man bara kan göra i ett litet antal idealiserade modeller, skriver man upp ekvationer som tar med verklighetens komplikationer, t.ex. luftmotstånd. Sedan låter man datorn beräkna vad som händer i korta tidsintervall. Först under t.ex. en millisekund, och sedan under nästa och nästa, … så länge man önskar och så länge modellen fortfarande är tillförlitlig.

I ett kast med luftmotstånd varierar accelerationen olinjärt, men under varje millisekundintervall kan man anta att accelerationen är konstant. Det är ett rimligt antagande under ett tillräckligt kort tidsintervall. Inför nästa tidsintervall uppdateras position, hastighet och acceleration. Så kan förfarandet repeteras tusen gånger per modellsekund. Datorn utför alla de tusentals beräkningarna på bråkdelen av en sekund.

Vi ska visa hur numerisk modellering går till i Office-programmet Excel.

NUMERISK MODELL FÖR LODRÄTT KAST MED EXCEL

1. Lodrätt kast utan luftmotstånd.

För att komma in i själva programmet Excel börjar vi med det enklaste fallet, det vill säga ett lodrätt kast *utan luftmotstånd*. Lyckas vi med den modellen så kan vi bygga vidare på den genom att lägga in luftmotstånd.

Excel är kanske inte det allra bästa programmet för numeriska modeller, men det är bra och det finns med i Office-paketet på alla PC. Det finns gott om gratis introduktionskurser på nätet (på Youtube t.ex), så här tar vi bara med det nödvändigaste.

Skärmbilden i Excel ser ut ungefär som den i Word. Men Excel har en kommandolinje överst och ett rutmönster av celler i arbetsområdet. Varje cell har ett namn som bestäms av positionen, t.ex. C13, vilket betyder kolumn C, rad 13. Klickar du på den cellen och skriver **–9,8** på kommandolinjen, så kommer cell C13 att innehålla konstanten –9,8.

A1 f_x 0,1

	A	B
1	0,1	
2	0,2	
3	0,3	
4	0,4	
5	0,5	
6		

Om du i stället väljer att skriva 0,1 i cell A1 och 0,2 i cell A2, markerar bägge och drar med musen i nedre högerhörnet så gissar Excel att A3 ska innehålla 0,3, A4 0,4, och så vidare.

Vi ska se på ett lodrätt kast utan luftmotstånd med starthöjd 0 m och starthastighet 30 m/s. Positiv riktning är uppåt.

Om vi låter kolumn A vara tidpunkterna för ett lodrätt kast, så kan vi låta B-kolumnen vara höjden och C-kolumnen hastigheten.

Rad 4: Vi börjar med att sätta in startvärdena genom att klicka på A4 och B4 och skriva **0** på kommandolinjen, i C4 skriver vi **30**.

Rad 5: Det är på den här raden som vi talar om för Excel vilka regler vi tänker följa för att generera de följande raderna, det vill säga det som händer längre fram i tiden.

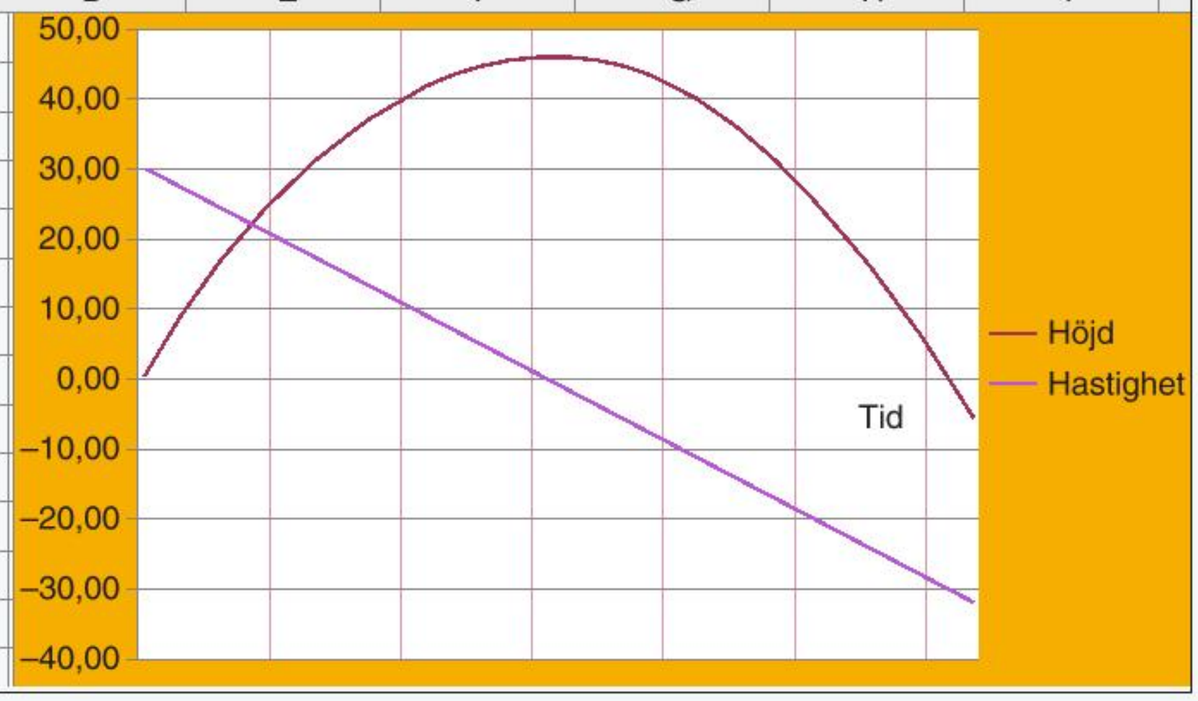
I A5 skriver vi **0,1**. Då kommer Excel att gissa att A6 är 0,2 och att A7 ska vara 0,3 och så vidare. Det är bra.

I B5 skriver vi:

=B4+C4*0,1–0,5*9,8*0,1^2

På rad 4 i kolumn A, B och C matar vi startvärden för tid, höjd och hastighet.

	A	B	C
4	0	0	30
5	0,1	2,951	29,02
6	0,2	5,804	28,04
7	0,3	8,559	27,06
8	0,4	11,216	26,08
9	0,5	13,775	25,1
10	0,6	16,236	24,12
11	0,7	18,599	23,14
12	0,8	20,864	22,16
13	0,9	23,031	21,18
14	1	25,1	20,2
15	1,1	27,071	19,22
16	1,2	28,944	18,24
17	1,3	30,719	17,26



Det är vägformeln vid konstant acceleration baserad på värdena på raden innan. Formeln i B5 kanske du känner som:

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

Vi har valt positiv riktning uppåt, det gör att accelerationen i vår vägformel blir negativ, $a = -9{,}8$ m/s^2.

I C5 skriver vi:

=C4−9,8*0,1

som ger oss farten efter 0,1 s med konstant acceleration.

Jämför

$$v = v_0 + at$$

där $a = g$.

Märker vi nu rad 5 och tar tag i nedre högra hörnet och drar nedåt med musen så genererar Excel nya värden var 0,1 sekund.

2. Lodrätt kast med luftmotstånd

Men om vi skulle lägga in luftmotstånd? Ja, då måste vi ha en kolumn till för accelerationen. Om vi antar att luftmotståndet F_L är lika med kv^2 så ger Newtons andra lag:

$$F = ma = mg + kv^2 \Rightarrow a = g + \frac{k}{m} v^2$$

Men det är bara rätt i den ena riktningen. Luftmotståndet verkar ju *hela* tiden mot hastigheten. Det betyder att det ska vara negativt på väg upp och positivt på väg ned. Det klarar vi genom att skriva:

$$a = g - \frac{k}{m} v \cdot \sqrt{v^2}$$

Vi låter konstanten $k/m = 0{,}02$ (som är ganska riktigt för en luddig tennisboll):

Rad 4: A4-C4 som förut, men D4 blir **=−9,8−0,02*C4*ROT(C4^2)**

Rad 5: A5 som förut, men B5 blir **=B4+C4*0,1+0,5*D4*0,1^2**, C5 blir **=C4+D4*0,1** och D5 till sist blir **=−9,8-0,02*C5*ROT(C5^2)**.

Markerar vi rad 5 och tar tag i nedre högra hörnet med musen och drar rätt ned så genereras resten av kastet. Du kan se resultatet i figuren.

Den sista modellen tror vi kommer närmare verkligheten än vi har varit på länge. Om vi ändå skulle vilja förbättra den skulle vi kunna göra tidsintervallen kortare. Sedan är det bara att sätta igång med simuleringar. För att bedöma modellen jämför vi med experiment. Sammanfaller modellen väl med verkligheten är det en bra modell. Annars har vi missat något. Då får vi sätta oss ned och tänka, göra några experiment, ställa upp en ny hypotes, göra en numerisk modell och testa den. Ungefär så kan det gå till i forskning.

	A	B	C	D
3				
4	0	0	30	–27,8
5	0,1	2,861	27,22	–24,618568
6	0,2	5,534	24,7581432	–22,059313
7	0,3	7,96081432	22,5522119	–19,972045
8	0,4	10,1670355	20,5550074	–18,250167
9	0,5	12,1735362	18,7299907	–16,816251
10	0,6	13,9975353	17,0483656	–15,612935
11	0,7	15,6533719	15,4870721	–14,596988
12	0,8	17,1530791	14,0273733	–13,735344
13	0,9	18,5068164	12,6538389	–13,002393
14	1	19,7232003	11,3535996	–12,378084
15	1,1	20,8095603	10,1157911	–11,846585
16	1,2	21,7721394	8,93113268	–11,395303
17	1,3	22,6162526	7,79160242	–11,014181
18	1,4	23,3464129	6,69018428	–10,695171
19	1,5	23,9664313	5,62066715	–10,431838
20	1,6	24,479498	4,57748335	–10,219067
21	1,7	24,8882464	3,55557664	–10,052843
22	1,8	25,194804	2,55029239	–9,9300798
23	1,9	25,4008333	1,55728441	–9,8485027
24	2	25,5075617	0,57243414	–9,8065536
25	2,1	25,5158051	–0,4082212	–9,7966671
26	2,2	25,425983	–1,3878879	–9,7614753



För beräkning av lodrätt kast med luftmotstånd har vi infört en kolumn D för accelerationen.

SAMMANFATTNING

Kraft och rörelse

Kraftmoment

Moment = kraft · arm

$$M = F \cdot r$$

Summan av momenten i den ena rotationsriktningen måste vara lika stor som summan av momenten i den andra rotationsriktningen.

Kast

Snett kast med utgångshastighet v_0 och y-axeln uppåt:

$$v_x = v_{0x} \quad \text{och} \quad v_y = v_{0y} - gt$$

$$x = v_{0x}t \quad \text{och} \quad y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

Cirkelrörelse

När ett föremål rör sig med konstant banhastighet i en cirkelbana, pekar accelerationen alltid in mot cirkelns centrum.

Absolutvärdet av *centripetalaccelerationen* är

$$a = v^2/r = 4\pi^2 r/T^2$$

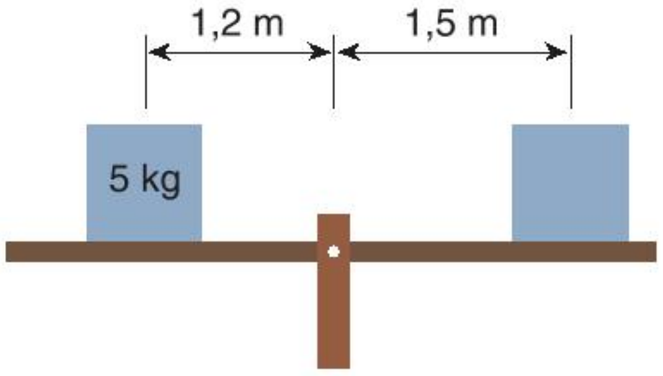
Resultantkraften på föremålet verkar in mot cirkelns centrum och har absolutvärdet

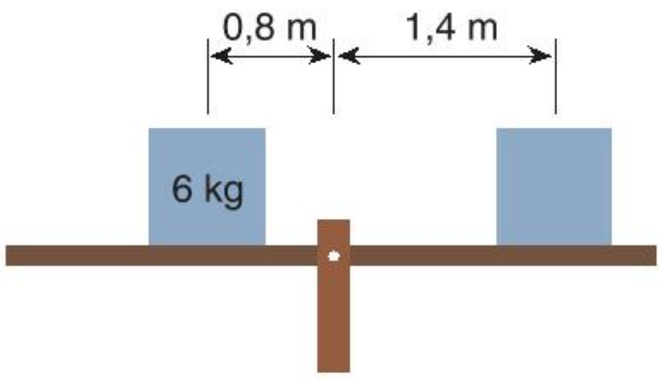
$$F_{res} = mv^2/r$$

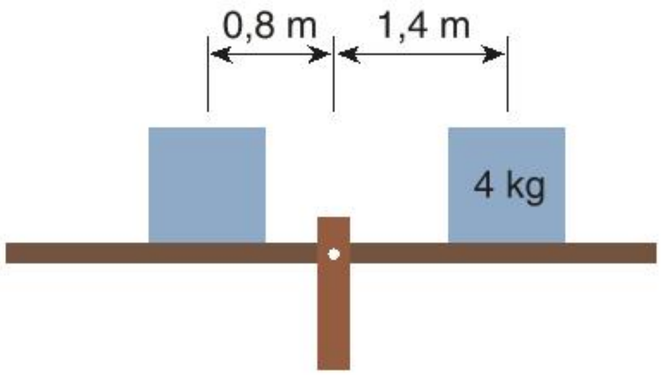
RÄKNA FYSIK

Kraftmoment

4.01 Nedan finns tre figurer som visar en homogen planka, som är monterad i plankans mittpunkt med en skruv. Plankan kan svänga fritt. Två föremål ligger på plankan och vikten på en av dem finns angiven i figuren. Deras avstånd till vridningspunkten är också angivna. Bestäm det andra föremålets vikt.







4.02 Pelle, som väger 68 kg, cyklar uppför en brant backe. Han ställer sig upp så att hela hans tyngd verkar på pedalerna. Pedalerna rör sig i en cirkel med radien 18 cm. Vilket är det största moment han kan påverka pedalerna med?

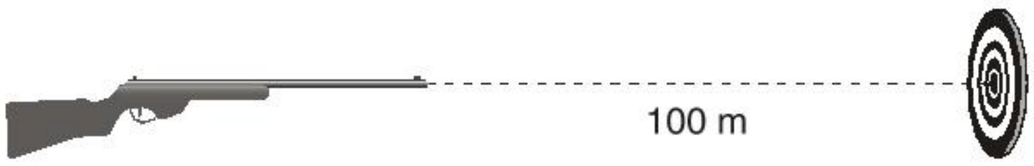
4.03 En meterstav, som väger 0,12 kg, är rörlig kring sin ena ändpunkt. I den andra änden hänger en vikt på 0,50 kg. Staven hålls i vågrätt läge av en dynamometer, som är fäst i stavens mitt. Vad visar dynamometern?

4.04 ★ En jämntjock 2,23 m lång planka är vridbar kring sin ena ände. Plankan hålls i horisontellt läge med en vertikal uppåtriktad kraft på 268 N. Kraften verkar 1,52 m från vridningspunkten. Bestäm plankans massa.

Kast

Bortse från luftmotstånd om inte texten i uppgiften säger något annat.

4.05 Judith siktar med ett gevär rakt mot en måltavla 100 m bort. Kulan kommer ut ur loppet med en vågrät hastighet på 0,50 km/s. Hur långt under centrum i måltavlan träffar kulan?



4.06 Karl kastar en sten horisontellt rakt ut från en klippa med en hastighet av 18,4 m/s.

a Hur långt ut från klippkanten (horisontellt räknat) har stenen kommit efter 2,3 s?

b Hur långt har den fallit efter 2,3 s?

4.07 En kula rullar över kanten på ett 0,95 m högt bord. Kulan träffar golvet 1,10 m från bordskanten, mätt längs golvet.

a Beräkna kulans hastighet vid bordskanten.

b Beräkna kulans hastighet när den landar på golvet.

4.08 Jesper, som är stuntman, kör sin motorcykel horisontellt ut från en 48 m hög klippa. För att landa säkert måste han landa minst 67 m ut från klippan. Vilken är den minsta hastighet han då behöver ha? Bortse från luftmotståndet.

4.09 En boll kastas snett uppåt. Utgångshastigheten är $v_0 = 10$ m/s och bildar vinkeln $\alpha = 60°$ med horisontalplanet.

a Beräkna den vågräta och den lodräta komposanten av utgångshastigheten.

b Beräkna bollens hastighet efter tiden $t = 1{,}50$ s.

c Beräkna bollens läge efter tiden $t = 1{,}50$ s.

4.10 Vid utspark från mål får en fotboll utgångshastigheten 25 m/s i riktning 32° upp från marken. Vi räknar som om startpunkten är på marken. Bortse från luftmotstånd.

a Hur lång tid tar det innan bollen når sin högsta punkt? Hur högt är bollen då?

b Hur stor är hastigheten i den högsta punkten? Har bollen någon acceleration där?

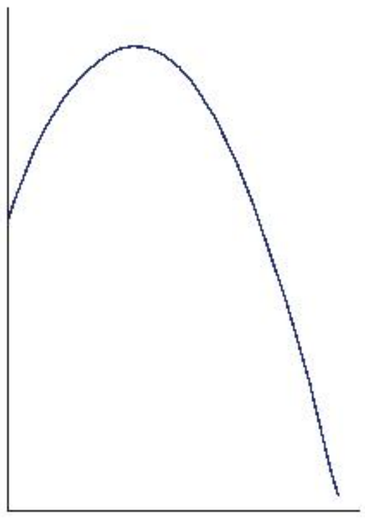
c Hur lång tid tar det innan bollen är nere på marken igen? Hur långt från startpunkten är bollen då?

d Hur stor är hastigheten (absolutvärde och riktning) strax innan nedslaget?

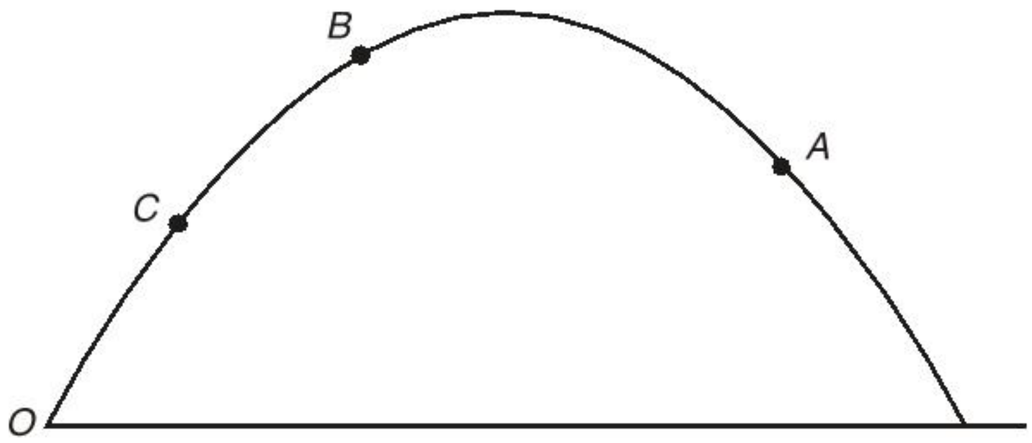
4.11 ★ Karl kastar en sten från en klippa. Stenen kastas med en hastighet av 16 m/s och i en vinkel på 52° snett uppåt.

a Stenen träffar marken efter 3,6 s. Hur hög är klippan?

b Hur högt över klippkanten kommer stenen som högst?



4.12 En sten följer en kastbana. Se figuren. Kastet startar i punkten O. Bortse från luftmotstånd. Rita in följande i figuren:



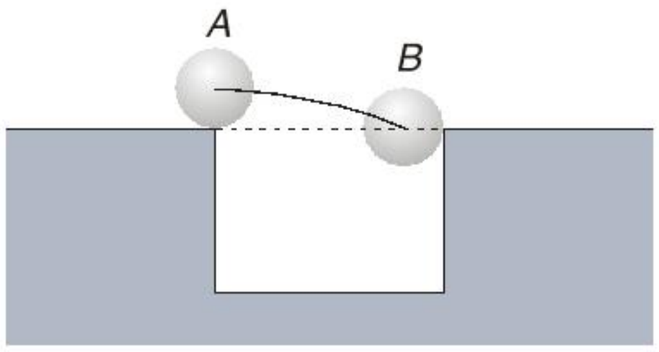
a hastighetens riktning i punkten *A*

b kraftens riktning på stenen i punkten *B*

c accelerationens riktning i punkten C.

4.13 ★ I golf är poängen att slå en boll ned i ett hål. Det sista slaget – *putten* – får inte vara för hårt för då kan bollen passera över hålet utan att falla ner i det. En enkel modell bygger på att bollen hamnar i hålet om den faller minst en bollradie innan den träffar hålets motsatta sida. Se figuren. Bollradien är 2,1 cm och håldiametern är 10,8 cm.

a Beräkna den största hastighet bollen får ha i A om den ska hamna i hålet.



b Kan du nämna några brister i den modell vi har använt?



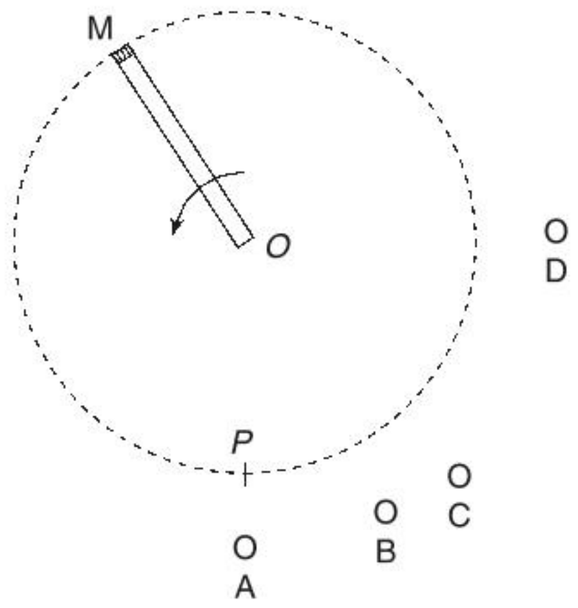
4.14 ★★ En olycklig fotbollsspelare dundrar iväg en straffspark så att bollen träffar rätt i överliggaren efter 0,65 s. Straffpunkten ligger 11,0 m från mållinjen, och överliggaren är 2,45 m över mållinjen.

a Beräkna den vågräta och lodräta komposanten av utgångshastigheten, v_{ox} och v_{oy}.

b Beräkna utgångshastigheten (absolutvärde och riktning).

Cirkelrörelse

4.15 På en isyta roterar en horisontell stång kring den ena ändpunkten O. Längst ut på stången ligger en mutter M. När rotationshastigheten ökar, lossnar muttern från stången vid punkten *P*. En av personerna A, B, C och D träffas av muttern. Vem?

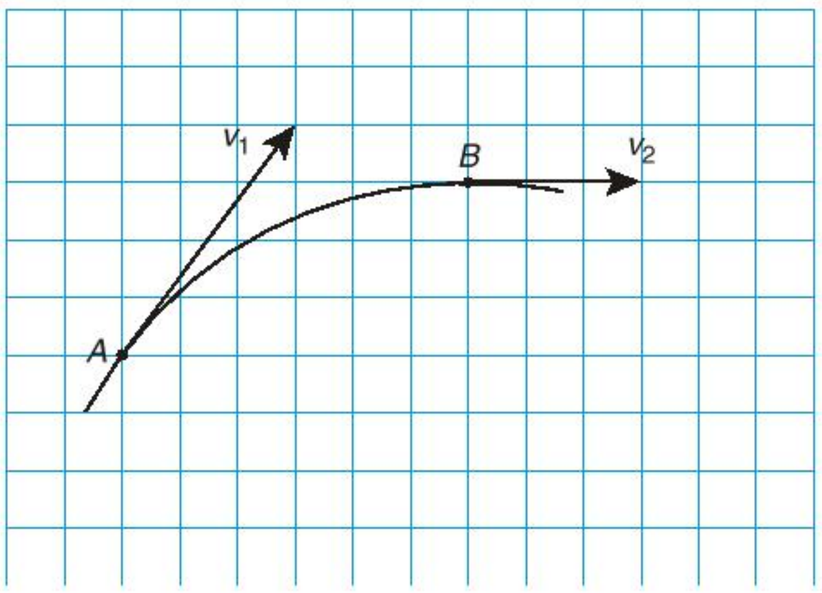


4.16 Tidigt på morgonen 6 juni får Svensson lust att köra några extra rundor i en rondell med sin bil.

a Vilken riktning har hastighetsvektorn i 1) den nordligaste, 2) den västligaste, 3) den sydligaste, och 4) den östligaste punkten i rondellen?

b Beräkna cirkelbanans radie när hastigheten är 30 km/h och en runda tar 4,5 s.

4.17 En partikel flyttar sig från A till B längs en krökt bana. Se figuren. Hastighetsvektorn är v_1 i A och v_2 i B. Banhastigheten är $v_1 = 25$ m/s i A och $v_2 = 15$ m/s i B.



a Rita in hastighetsändringen $\Delta v = v_2 - v_1$ i figuren.

b Bestäm absolutvärdet på Δv genom att mäta i figuren.

4.18 En bancyklist jagar genom en halvcirkelformad kurva. Beräkna hastighetsändringen Δv när cyklisten kör in i kurvan med hastigheten 12 m/s och kommer ut ur kurvan med hastigheten

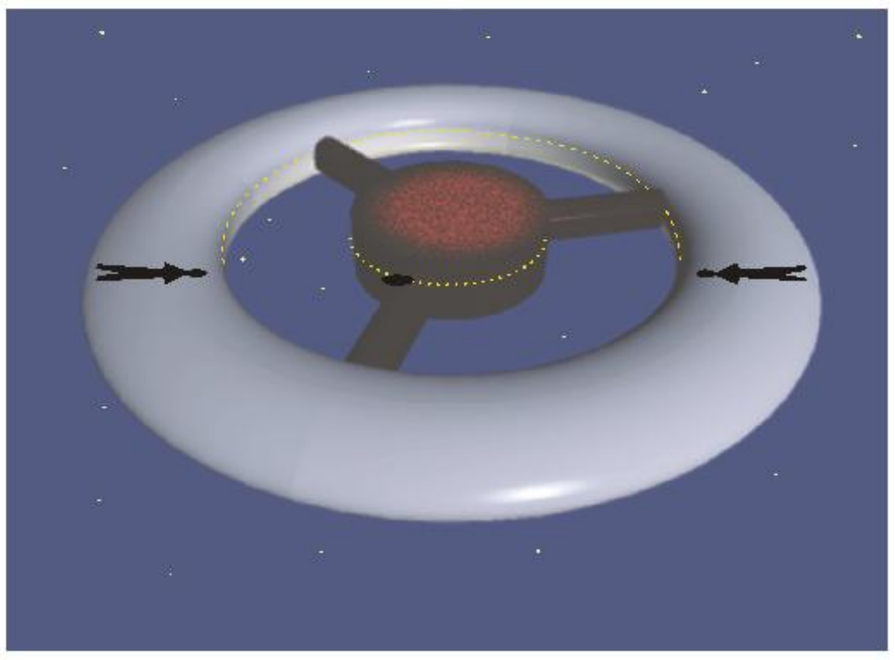
a 12 m/s

b 14 m/s

4.19 Östen bor i Bergen och befinner sig på avståndet 3 186 km från jordaxeln. Beräkna banhastigheten och centripetalaccelerationen i den cirkelrörelse som beror på att jorden roterar en gång runt sin axel på 24 timmar.

4.20 En skridskolöpare håller konstant banhastighet och använder 7,0 s genom ytterkurvan på skridskobanan. Kurvan är halvcirkelformad och har radien 29,5 m. Beräkna centripetalaccelerationen i kurvan.

4.21 En framtida rymdstation ser ut som ett gigantiskt cykelhjul. Invånarna lever inne i "cykelhjulet" på avståndet 900 m från axeln. Om rymdstationen roterar så att centripetalaccelerationen där är 9,82 m/s^2, så kommer invånarna att känna samma tyngd som på jorden. Hur lång rotationstid måste rymdstationen ha då? Figuren visar att invånarna har sina fötter mot yttersidan av stationen. Varför måste det vara så?



4.22 En person som väger 70 kg står i en buss som kör med hastigheten 63 km/h genom en vågrät kurva med radien 150 m.

a Beräkna resultanten av de krafter som verkar på personen. Vilken riktning har denna resultant?

b Skulle resultantkraften bli större eller mindre

1 om hastigheten var större?

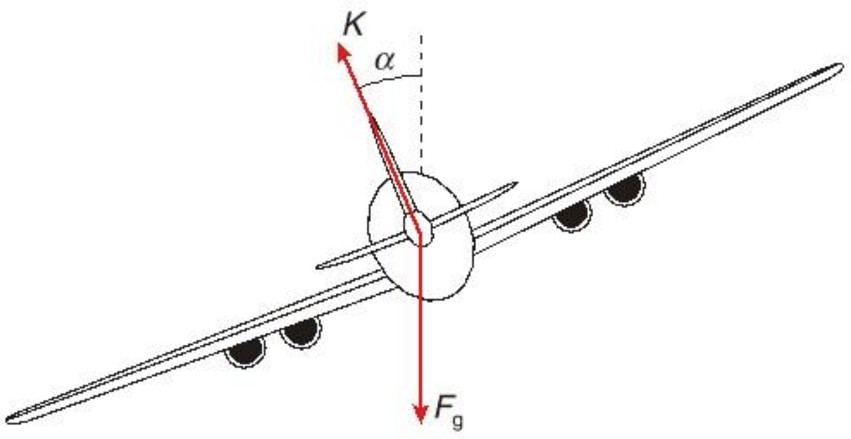
2 om kurvradien var större?

3 om personen var tyngre?

4.23 ★ Ett flygplan som väger 70 ton går in i en vågrät sväng med hastigheten 360 km/h. Planet lutar då en vinkel $\alpha = 27°$ (se figuren).

a Vilken riktning ska resultanten av tyngden F_g och lyftkraften K ha? Hur stor är resultanten?

b Beräkna svängradien.



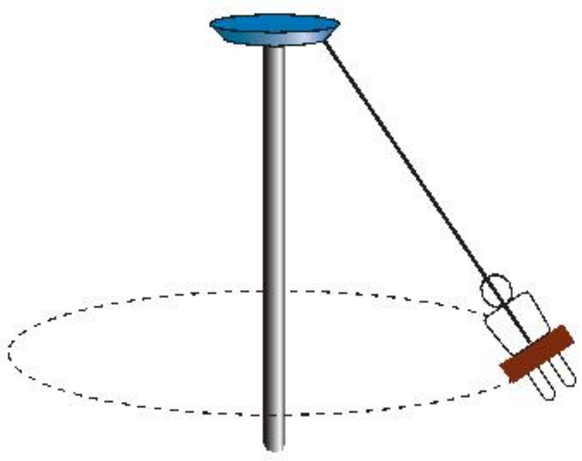
c Hur stor är lyftkraften på planet?

4.24 ★ Marianne väger 40 kg och åker karusell. Cirkelbanans radie är 6,0 m. Varvtiden är 4,5 s. Bortse från luftmotstånd.

a Beräkna banhastigheten och centripetalaccelerationen.

b Rita en figur som visar de krafter som verkar på Marianne.

c ★ Beräkna stolkraften (storlek och riktning) som verkar på Marianne.



4.25 ★ Hastighetsmätaren visar konstant hastighet medan en bil kör över ett backkrön. På ett säte inne i bilen ligger ett paket.

a Rita de lodräta krafter som verkar på paketet när bilen passerar krönet.

b Beräkna krafterna när massan är 2,55 kg, hastigheten är 12 m/s och backkrönet är en del av en cirkel med radien 80 m.

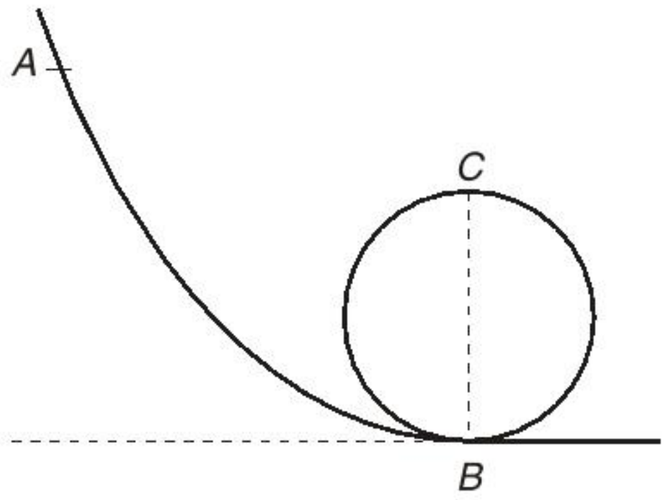
4.26 ★ Hur stor hastighet måste bilen i uppgift 4.25 ha för att paketet ska lätta från sätet precis på toppen av backen?

4.27 ★★ En liten kula hänger i ett tunt snöre med längden l. Vi drar kulan åt sidan så att snöret blir sträckt och vågrätt. Från denna position släpper vi kulan så att den följer en cirkelformad bana.

a Visa att kulan får hastigheten $v = \sqrt{2gl}$ i den lägsta punkten.

b Visa att när kulan passerar den lägsta punkten, är snörkraften på kulan tre gånger så stor som tyngden.

4.28 ★★ En leksaksbil som väger 50 g glider i en loopingbana som visas i figuren. Radien i den cirkelformade delen av banan är 0,20 m. Vi bortser från friktion och andra motstånd.



a Vi låter bilen starta från punkten A som ligger 0,60 m högre än B. Beräkna hastigheten och normalkraften när bilen passerar B. Beräkna också normalkraften i punkten C.

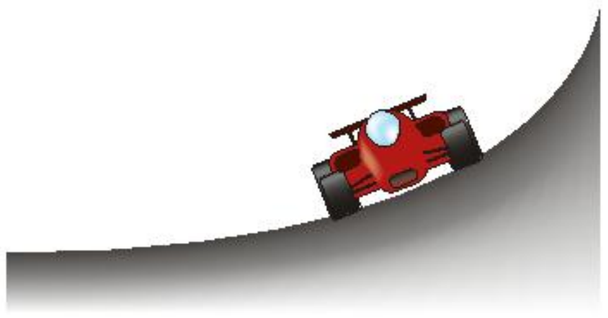
b Vilken är den minsta hastighet bilen kan ha i punkten C för att bilen ska ha kontakt med banan hela vägen runt?

DISKUTERA FYSIK

1 Varför orsakar jordens rotation att ett föremål får en liten mindre tyngd på ekvatorn jämfört med på polerna?

2 En bil kör med hastigheten 90 km/h genom en svagt krökt kurva. Strax därefter kör den genom en starkt krökt kurva med samma hastighet. Är det någon skillnad på bilens acceleration i de två kurvorna?

3 På en racerbana ökar lutningen i en kurva ju längre ut i kurvan man kommer. Se figur. Detta ökar säkerheten. Varför?



4 En person i ett Pariserhjul rör sig med konstant fart v i en vertikal cirkel med radien r. Hur stor är normalkraften från sätet jämfört med tyngdkraften när korgen är
a längst upp
b längst ner?

5 Hur många "acceleratorer " har du i en bil? Det finns åtminstone tre olika kontroller i bilen som kan användas för att accelerera bilen. Vilka är de och på vilket sätt sker accelerationen?

6 Om du ska lyfta ett tungt föremål så är det bättre att ha ryggen så rak som möjligt och använda benen istället för att bocka dig och använda dina armar. Varför?

7 Kan kraften på ett föremål vara noll medan kraftmomentet är skilt ifrån noll? Ge exempel eller motexempel.

8 Ett föremål kastas snett uppåt. Finns det någon punkt längs banan där hastigheten och accelerationen är
a vinkelräta mot varandra
b parallella med varandra?

9 Två föremål kastas ut med samma fart, en i vinkel α med horisontalplanet och den andra i vinkeln $90° - \alpha$. Båda föremålen träffar marken i samma punkt. Kommer föremålen att vara lika länge i luften?

10 En boll kastas rakt upp av en passagerare på ett tåg som rör sig med konstant hastighet. Beskriv bollens rörelse så som den uppfattas av passageraren och som den uppfattas av en person utanför tåget.
Hur ändras deras observationer om tåget accelererar?

11 Tre identiska bollar kastas ut från en hög byggnad, alla med samma utgångsfart. Boll 1 kastas snett uppåt, boll 2 horisontellt ut och boll 3 snett nedåt. Beskriv deras rörelser och jämför deras hastigheter när de når marken. Bortse från luftmotståndet.

12 Förklara varför jorden inte är sfärisk utan tjockare vid ekvatorn?

13 Det är lättare att hålla en stor tyngd i handen när du har handen längs med sidan jämfört med när du håller handen rakt ut. Varför?

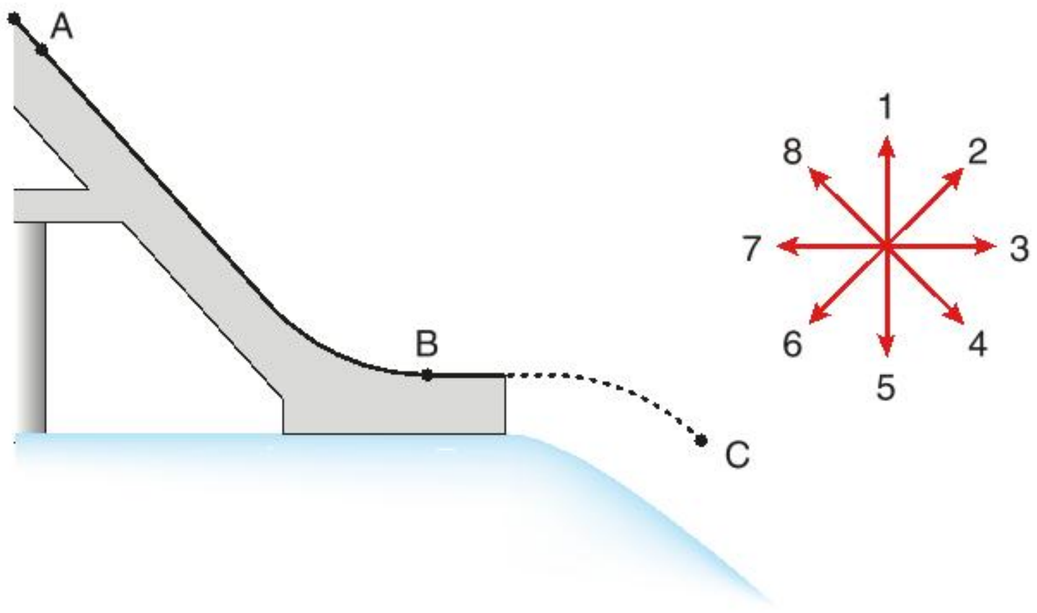
14 Från taket i en järnvägsvagn hänger en kula i ett tunt snöre. När tåget kör genom en kurva, hänger snöret med kulan snett. Vad kan det bero på?

15 ★ Varför vill framändan på en bil tryckas ner och bakändan upp när man bromsar?

RESONERA FYSIK

1 Figuren nedan visar en backhoppare i en hoppbacke. Vilken av riktningarna 1 till 8 har den resulterande kraften på hopparen i punkt

a A
b B
c C



2 I ett skyltfönster står en skyltdocka löst på en roterande skiva. Se figur.

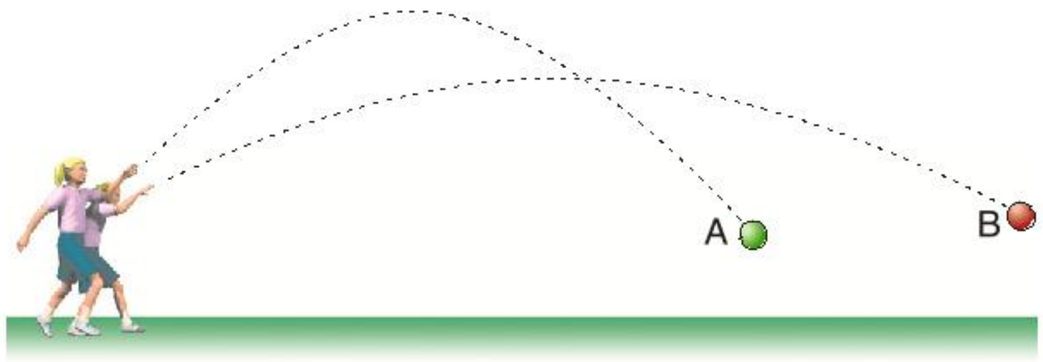
I vilken riktning är dockans
a hastighet
b acceleration
c resultantkraft riktad?

Välj bland alternativen nedan
I In mot centrum
II Ut från centrum
III Rakt nedåt
IV Rakt uppåt
V I tangentens riktning



3 Varvtalet för den roterande skivan i föregående uppgift ökas till det dubbla. Om dockan fortfarande står kvar på skivan hur har den resulterande kraften ändrats?
I Fyra gånger så stor
II Två gånger så stor
III Lika stor
IV Hälften så stor
V En fjärdedel så stor.

4 Två flickor står och kastar äpplen på två mål olika långt bort. Om de kastar samtidigt vilket mål träffas först?

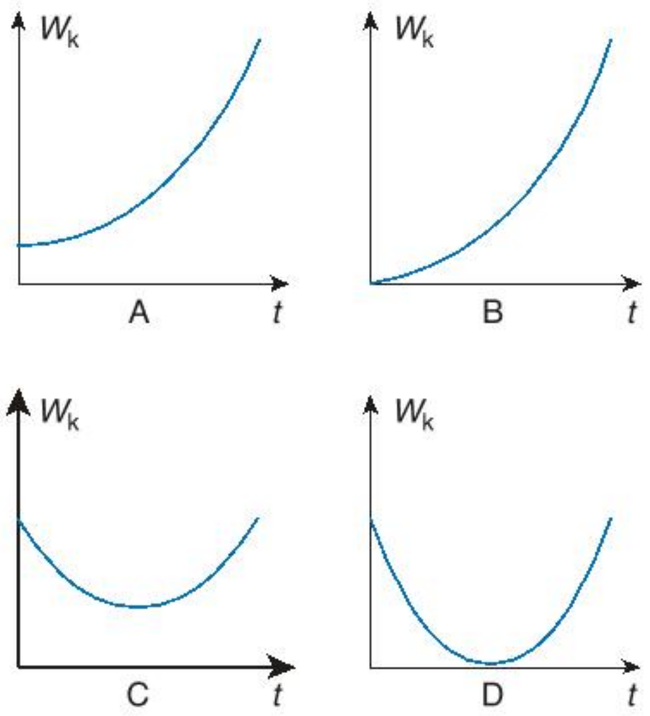


I A
II B
III Båda träffas samtidigt
IV Mer information behövs.

5 En kula skjuts ut från marken i 45° mot horisontalplanet med utgångsfarten v. Den största höjd kulan når är h. Kulan skjuts ut igen i samma vinkel men med utgångsfarten $2v$. Den största höjd kulan nu når är
a h
b $2h$
c h^2
d $4h$

6 En kula skjuts ut med utgångsfarten v. Utgångsvinkeln är 45° mot horisontalplanet och utskjutningsanordningen befinner sig på ett horisontellt plan. Kulan landar vid tiden t_0 . Kulan skjuts ut på nytt med samma vinkel och med utgångshastigheten $2v$. Bortse från luftmotståndet. Kulan landar vid tiden
a t_0
b $2t_0$
c t_0^2
d $4t_0$

7 Figurerna nedan visar den kinetiska energin hos ett föremål som funktion av tiden vid ett kast i gravitationsfältet.

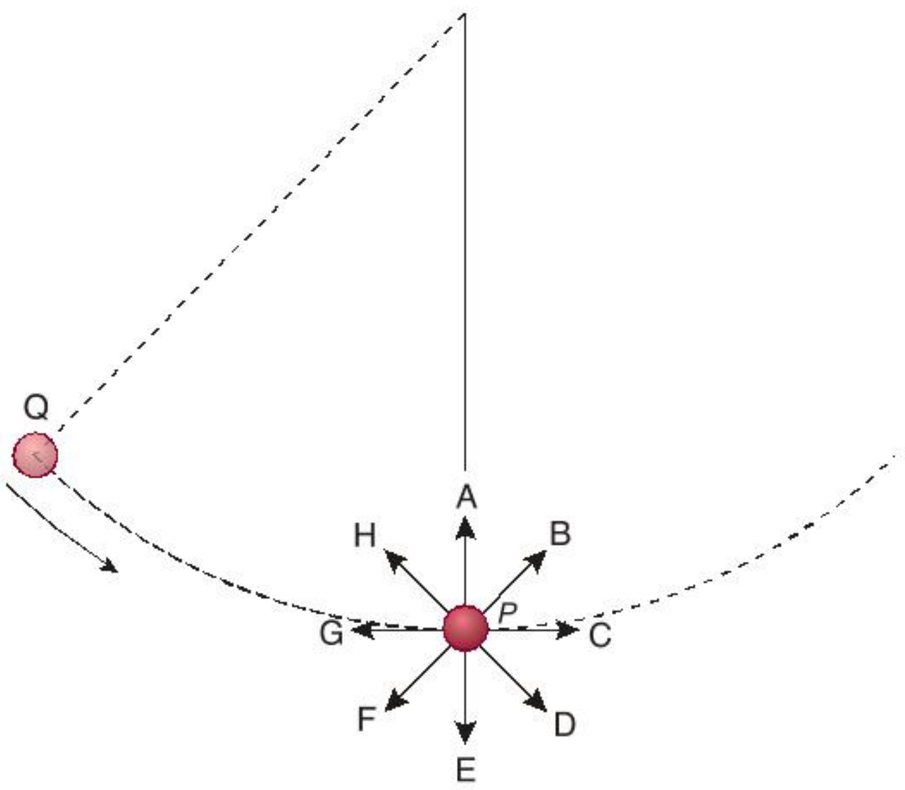


De fyra kaströrelserna visar

1 föremålet släpps
2 föremålet kastas rakt uppåt
3 föremålet kastas horisontellt
4 föremålet kastas snett uppåt

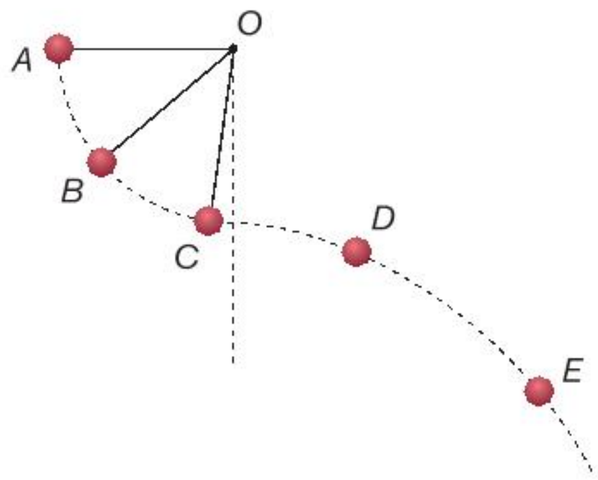
Para ihop de fyra alternativen med rätt figur.

8 En kula som hänger i ett snöre släpps från punkten Q i figuren.

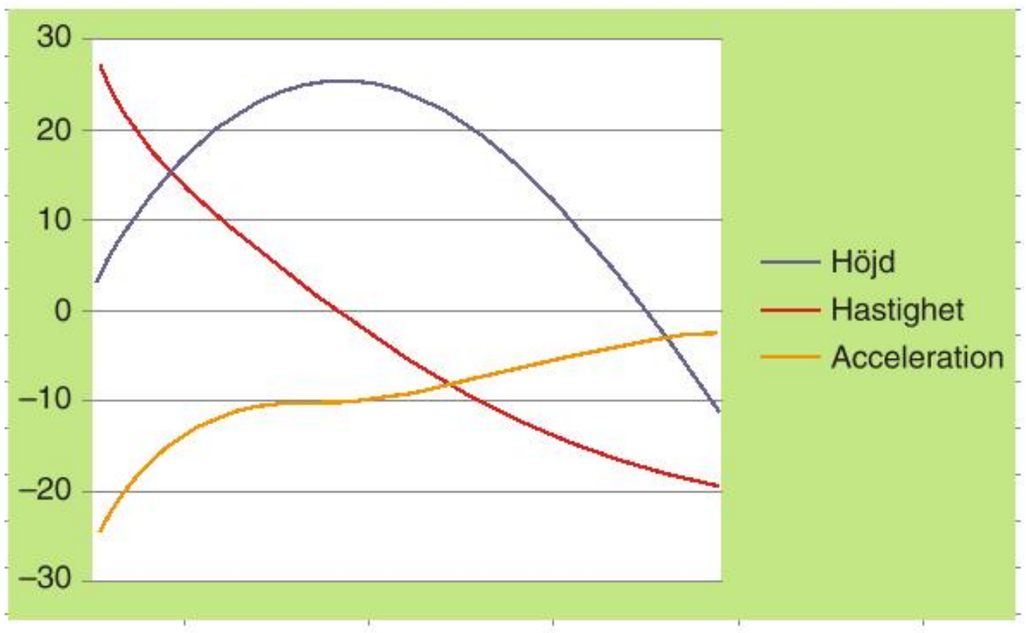


a Vilken av pilarna visar hastighetsriktningen i punkten *P*?
b Vilken av pilarna visar accelerationsriktningen i punkten *P*?

9 En kula är fäst i den ena ändan av ett tunt snöre. Den andra ändan av snöret är fäst i O. Nu håller vi kulan i *A* så att snöret är vågrätt. Så släpper vi kulan utan begynnelsefart. Snöret går av när kulan hänger lodrätt. Bortse från luftmotståndet. Figuren nedan visar kulan i fem olika lägen efter det att vi släppt den. Rita krafterna som verkar på kulan i de fem lägena. Kraftpilarna ska ha rimliga längder i förhållande till varandra.



10



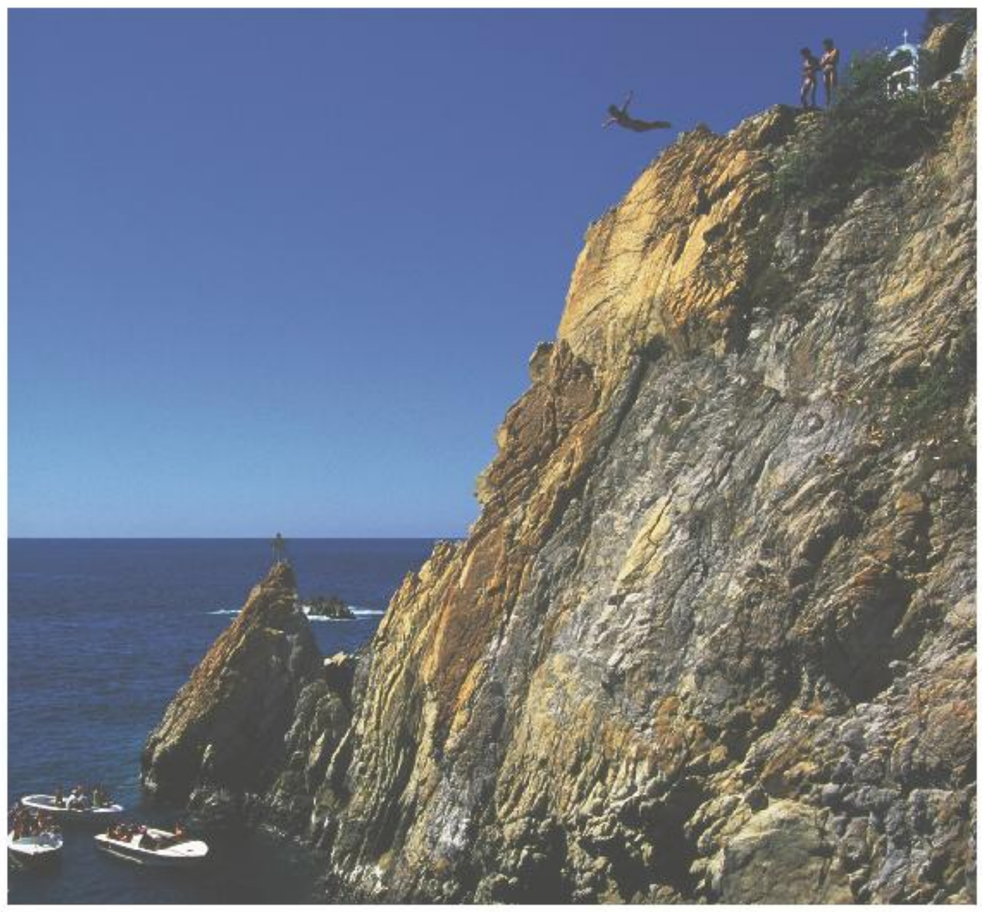
a Lägg in tidsskala i figuren från avsnitt 4.4 (Lodrätt kast med luftmotstånd).
b Studera accelerationsgrafen. Den ser ut att vara horisontell en liten stund. Är det realistiskt? Förklara hur vi kan tolka det.
c I matematiken lär vi oss att om derivatan i en punkt är lika med noll och andraderivatan är negativ så är det en maxpunkt. Hur stämmer det med graferna? Förklara.
d Skissera grafernas fortsättning om vi förlänger tidsaxeln så att den blir tre gånger längre. Hur kommer skeendet att se ut i fortsättningen? Kommentera. Hur stämmer det med påståendet att detta skulle vara en luddig tennisboll?

11 Corioliseffekten. Vad händer om en person som står på ”golvet” i den roterande rymdstationen i exempel 9-10 släpper en boll?

- **a** Sett från utsidan av någon som “svävar/faller” med stationen?
- **b** Sett av en person som roterar med stationen runt sin axel?
- **c** Anta nu att personen kastar bollen rakt upp – lodrätt kast. Hur kommer nu det att se ut för de två olika observatörerna (kastaren och en observatör som svävar utanför stationen)?

UPPSKATTA FYSIK

1 I Acapulco finns det en känd klippa som man kan dyka från. Se bilden nedan. Med vilken fart träffar man vattnet när man dyker från klippkanten? Med vilken fart kan man behöva kasta sig ut?



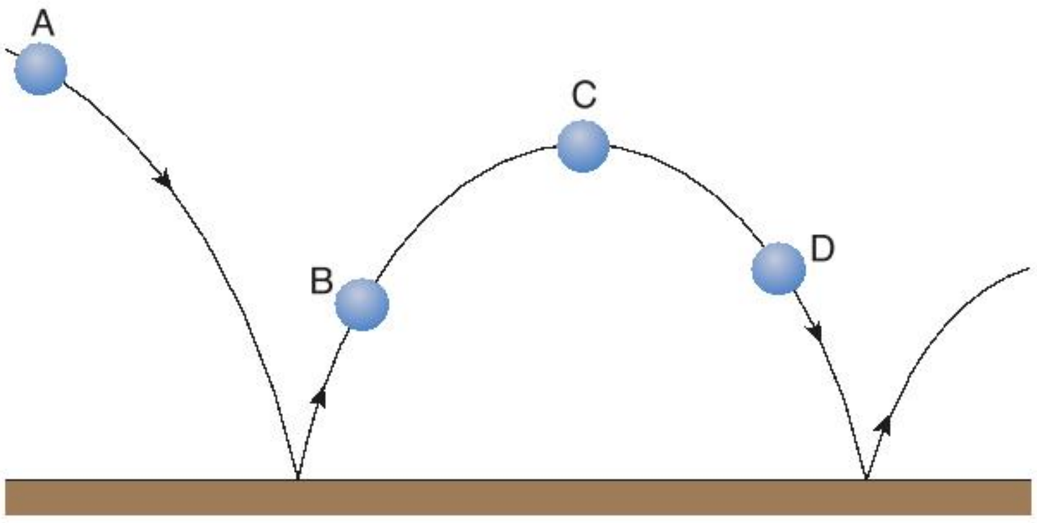
2 Efter en heldag på tivoli kommer Åsa och Jamina hem. De upplever dagen igen när de ser på sina digitalbilder. Att åka i karusellen på bilden tyckte de var häftigt. Uppskatta med hjälp av bilden den hastighet karusellen hade vid detta tillfälle.



3 Oskar får ofta hjälpa till med tvätten i sin familj. Vid ett tillfälle när han hade mycket lite tvätt i maskinen observerade han att vid centrifugeringen ”trillade” tvätten inte ner när den befann sig i det ”översta” läget. Efter det att tvättningen var över satte han sig ner och började räkna på hur många varv/min trumman då minst måste göra. Gör själv en uppskattning.

TESTA DIG I FYSIK

1 En boll kastas på ett bord så att den följer den bana som visas i figuren. Rita de krafter som verkar på på bollen i lägena A, B, C och D. Bortse från luftmotstånd.



2 Hur stor acceleration har en cyklist som cyklar med farten 36 km/h genom en kurva med radien 25 m?

3 En vattenstråle sprutar upp från marken i 70° vinkel mot horisontalplanet vid tiden $t = 0$. Strålen har farten 10 m/s när den lämnar marken. Bortse från luftmotståndet. Vilket uttryck beskriver det horisontella (x) och det vertikala (y) läget för en vattendroppe vid tiden t?

A $x(t) = 10t$ och $y(t) = 10t$
B $x(t) = 10t$ och $y(t) = gt^2$
C $x(t) = 10\cos(70°)t$ och $y(t) = 10\sin(70°)t - 0{,}5gt^2$
D $x(t) = 10\sin(70°)t$ och $y(t) = 10\cos(70°)t$

4 En 1,00 m lång homogen linjal är upphängd i sin mittpunkt. Sten hänger en 250 g vikt 4,0 dm från mittpunkten. Var på andra sidan ska Ulrika placera sin 400 g vikt för att linjalen ska vara i horisontellt jämviktsläge?

5 En kula rullar på ett l m högt horisontellt bord. Efter 0,5 s rullar den ut över bordskanten. Rita *s*-*t*-, *v*-*t*- och *a*-*t*-diagram för kulans rörelse i x-led och y-led.

6 En bil kör med hastigheten 90 km/h utför kanten på en klippa. Från klippan är det 56 m ner till vattenytan. Hur långt ut från klippan kommer bilen att slå i vattnet?

7 En cyklist håller farten 8,5 m/s. Med samma fart svänger han runt ett hörn så att hans bana blir en cirkel med radien 24 m.
a Hur stor är hans acceleration i svängen?
b Cyklisten och cykeln väger tillsammans 85 kg. Hur stor är kraften som håller cyklisten i cirkelbanan?

8 ★ Under en filminspelning svingar sig en stuntman från den ena sidan av en liten ravin till den andra. Repet som han håller i är 4,7 m långt. Han svingar sig i en vertikal cirkulär bana. Hur stor är spänningen i repet om han passerar banans lägsta punkt med hastigheten 5,2 m/s och hans vikt är 82 kg?

9 ★ En fotbollspelare sparkar en boll mot ett mål, som är 31,6 m bort. Bollen får en utgångsfart på 16,7 m/s i en riktning 35° mot horisontalplanet. Var hamnar bollen i förhållande till målvakten, som står i målet?

10 ★★ Målvakten i föregående uppgift betraktar bollen tills den når sin högsta höjd, då han börjar springa för att fånga den vid markytan. Hur fort måste han springa?

11 ★★ En 3,2 m lång jämntjock planka vilar på två bockar, placerade på avståndet 0,60 m från vardera ändpunkten. Ute på plankans ena ände placerar man vikter så att plankan precis lättar från den bock som befinner sig längst bort från vikterna. Vilken massa har plankan om vikternas tyngd är 224 N? Rita figur!

HEMLABORATIONER

Linjalen

Leta upp en böjlig linjal och en liten kula. Lägg kulan på ett bord och böj linjalen så att du kan skjuta iväg kulan med den. Skjut iväg kulan så att den rullar ut över bordskanten och träffar golvet.

Upprepa försöket några gånger och försök varje gång att böja linjalen lika mycket så att kulan hamnar på samma ställe hela tiden.

För att vara säker på att du böjer linjalen lika långt varje gång kan du t.ex. tejpa fast ett papper på bordet och markera linjalens lägen böjd och oböjd. Gör mätningar och uppskatta med hjälp av dessa hur mycket energi som går åt till att böja linjalen till det läge du har använt.

Dricksglaset

Lägg en liten kula på bordet och sätt ett vanligt dricksglas upp och ner över kulan. Rör glaset i cirkulära rörelser så att kulan snurrar runt inne i glaset. Lyft snabbt på glaset och observera hur kulan kommer att röra sig. Åt vilket håll rör den sig?

Konjaksglaset

Lägg en kula på bordet och sätt ett konjaksglas (inte alltför fint glas) upp och ner över kulan. Försök nu att lyfta kulan från en plats på bordet till en annan plats med hjälp av konjaksglaset. Kulan får alltså inte beröra bordet under själva förflyttningen – och du får inte röra kulan eller vända på glaset. Hur gör du?

5 Fält

Undervisningen i kursen ska behandla:

- **Samband mellan elektriska och magnetiska fält: magnetiskt fält kring strömförande ledare**
- **Planering och genomförande av experimentella undersökningar och observationer samt formulering och prövning av hypoteser i samband med dessa.**

Gravitationsfält 179
Elektriska fält 183
Potentiell energi 187
Magnetiska fält 189
Strömledare i magnetfält 192
Magnetfält runt strömledare 199
Uppgifter 203

För oss som föddes på jorden, passerar solen och månen förbi. Stjärnorna återvänder från sina rundor, och försvinner igen ut ur sikte.

Nikolaus Kopernikus

Som du vet påverkar två massor varandra genom gravitationskrafter. Två elektriska laddningar påverkar också varandra med elektriska krafter. För att beskriva dessa krafters påverkan inför vi begreppet *fält*. Med fält menar vi en fysikalisk egenskap som sträcker sig över ett område i rummet. Vi antar att varje partikel alstrar ett fält omkring sig. Det fältet påverkar i sin tur en annan partikel så att en växelverkan uppstår.

Växelverkan betyder en ömsesidig kraftverkan mellan två föremål.

Införandet av fält gör det lättare att förstå varför krafter kan verka på avstånd. Genom att lära sig mer om hur fält beter sig får vi svar på frågor om hur krafterna ändras om föremålens avstånd, massor eller laddningar ändras. Fält har också en utbredningshastighet, så om ett föremål ändras på något sätt kommer ändringen i fältet att breda ut sig och först ändra krafterna på de närmsta föremålen och senare på dem längre bort.

5.1 Gravitationsfält

Enligt Newtons teori om gravitation attraherar alla kroppar varandra med en kraft som är beroende av massornas storlek och avståndet mellan dem.

NEWTONS GRAVITATIONSLAG

Krafterna mellan två kroppar är proportionella mot massorna och omvänt proportionella mot kvadraten på avståndet mellan dem,

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},\ G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{Nm^2/kg^2}$$

Avståndet *r* är avståndet mellan de båda kropparnas tyngdpunkter.

Källan till fältet
Egentligen finns det ett gravitationsfält omkring alla föremål, även din kropp. Fältets källa är föremålets massa.

Alla föremål i området runt jorden påverkas av en gravitationskraft från jorden. Därför säger vi att jorden omger sig med ett *gravitationsfält*. Om du håller en boll i handen och släpper den, börjar bollen att accelerera på grund av gravitationskraften från jorden. Bollen är i jordens gravitationsfält.

Gravitationsfältet runt jorden är starkast vid jordytan och blir svagare och svagare utåt i världsrymden där det blandar sig med gravitationsfälten runt andra himlakroppar.

GRAVITATIONSFÄLT

Ett *gravitationsfält* är ett område där det verkar gravitationskrafter på föremål som är i området.

Vi kan inte se ett gravitationsfält, men vi kan påvisa det genom att placera ett föremål med massa där. Gravitationsfältet är där vare sig det finns föremål i fältet eller inte.

När vi dividerar gravitationskraften F_g med massan m av det föremål kraften verkar på, får vi en storhet som beskriver gravitationsfältet. Storheten heter *gravitationsfältstyrka* och har symbolen g.

GRAVITATIONSFÄLTSTYRKA

***Gravitationsfältstyrka* är gravitationskraft per massenhet,**

$$g = \frac{F_g}{m}$$

Enheten för fältstyrka är newton per kilogram, N/kg.

Fältstyrkan g är en vektor som pekar lodrätt nedåt på jorden.

När ett föremål med massan m placeras på ett ställe där gravitationsfältstyrkan är g, påverkas alltså föremålet av gravitationskraften.

$$F_g = mg$$

Du ser att *tyngdaccelerationen på ett ställe är lika med gravitationsfältstyrkan på stället*.

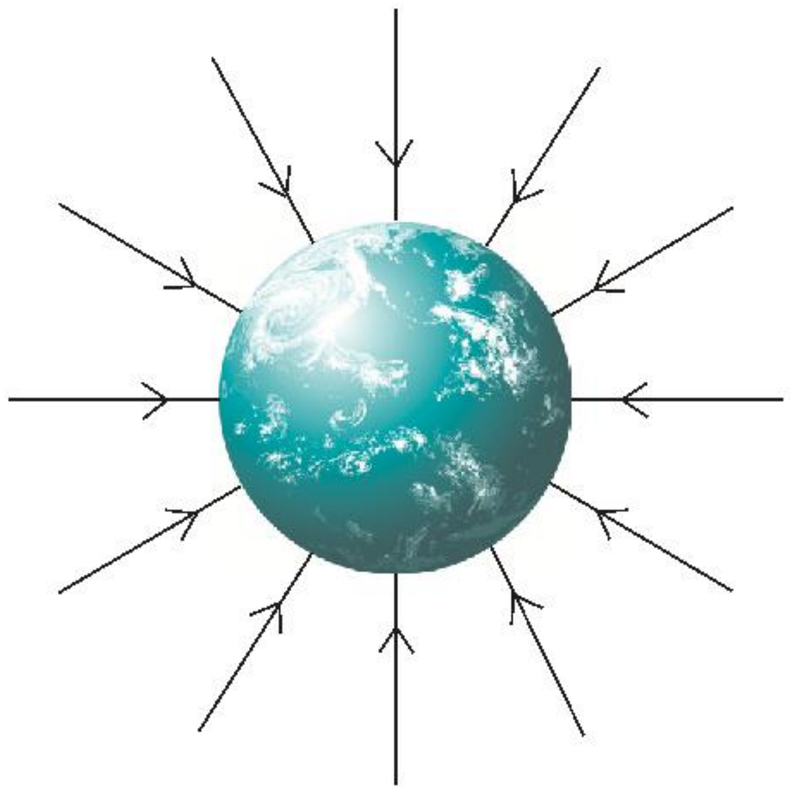
Enheten för tyngdaccelerationen är m/s^2. Vi kan därför välja mellan N/kg och m/s^2 som enhet för fältstyrka. Vid havsytan har fältstyrkan i genomsnitt absolutvärdet

$$g = 9{,}82 \text{ N/kg} = 9{,}82 \text{ m/s}^2$$

Ser du likheten mellan de båda uttrycken $F_g = mg$ och $F = ma$?

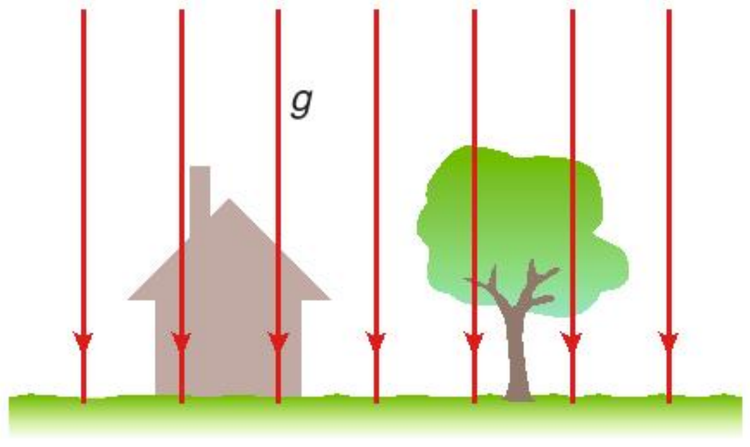
Ibland skriver vi till små index, till exempel F_g eller F_μ för att göra det tydligare vilken kraft vi menar. På samma sätt betecknar vi tyngdaccelerationen med g och annan acceleration med a.

Fysik är ett abstrakt område. Därför använder vi enkla modeller eller bilder för att illustrera abstrakta begrepp. Vi kan skapa oss en sådan bild av gravitationsfältet runt jorden. Vi kan rita *fältlinjer* med samma riktning som fältstyrkevektorerna. Alla sådana linjer strålar in *lodrätt* mot jorden. De är tätare nära marken än högre upp. Det ska visa att fältstyrkan är större nära marken än högre upp. Se figur 5.1a.

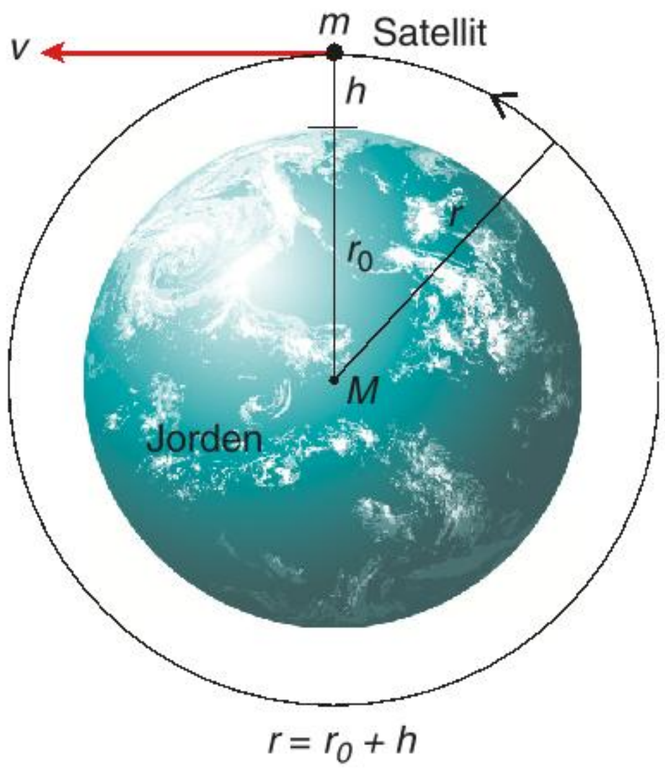


5.1 a Fältlinjebild av gravitationsfältet runt jorden.

Inom ett tillräckligt litet område på jordytan är fältstyrkan g ungefär konstant. En god modell i det fallet är att anta att g har samma riktning och samma absolutvärde i hela området. Vi kan lugnt anta att gravitationsfältet är *homogent* i området och att alla fältlinjerna är parallella och pekar lodrätt nedåt. Se figur 5.1b. Det är nästan sant!



5.1 b Fältlinjebild av gravitationsfältet på jordytan.



5.2 Satellit i cirkelbana.

EXEMPEL 1 **Fältstyrkan i höjden**

En satellit kretsar 1 600 km över havsytan. Hur stor är fältstyrkan på denna höjd? Se figur 5.2.

Lösning: Vi kallar jordradien för r_0. På höjden $h = 1\,600$ km är avståndet r från jordens centrum

$$r = r_0 + h = \left(6{,}37 \cdot 10^6 + 1{,}60 \cdot 10^6\right)\text{m} = 7{,}97 \cdot 10^6\ \text{m}$$

Vi sätter satellitens massa till m och jordens massa till M.

Vi utnyttjar de båda sambanden för gravitationsfältstyrka och gravitationskraft:

$$g = \frac{F_g}{m} \qquad \text{och} \qquad F = G\frac{Mm}{r^2}$$

Fältstyrkan på detta avstånd är

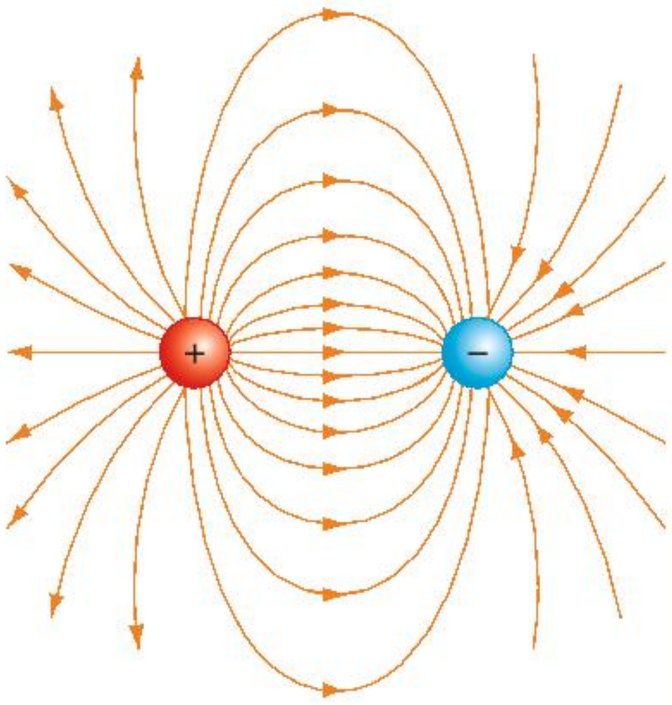
$$g = G\frac{M}{r^2} = \frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}97 \cdot 10^{24}}{\left(7{,}97 \cdot 10^6\right)^2}\ \text{N/kg} = 6{,}27\ \text{N/kg}$$

Fältstyrkan är alltså lika med 6,27 N/kg på höjden 1 600 km över havet. Vid havsytan är fältstyrkan lika med 9,82 N/kg.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad menas med gravitationsfält?
- Hur definieras gravitationsfältstyrka?
- Hur kan man *mäta* gravitationsfältstyrkan på ett ställe?
- Vilken formel har vi för gravitationsfältstyrkan runt jorden?
- Hur används fältlinjer till att illustrera styrkan och riktningen i ett gravitationsfält?
- Vad innebär det att ett gravitationsfält är homogent?
- Är gravitationsfältet runt jorden homogent?
- Bestäm gravitationsfältstyrkan om gravitationskraften är 5,2 N på massan 0,57 kg.
- Hur stor är gravitationskraften på ett föremål med massan 1,45 kg om fältstyrkan är 9,75 N/kg?

5.2 Elektriska fält



5.3a Två laddningar påverkar varandra med ett elektriskt fält.

Varje elektrisk laddning omger sig med ett elektriskt kraftfält. Se figur 5.3a.

Som du kan se i figuren befinner sig den negativa laddningen i den positiva laddningens fält på samma sätt som den positiva laddningen befinner sig i den negativa laddningens fält.

Fälten och fältens styrka kan beskrivas på följande sätt:

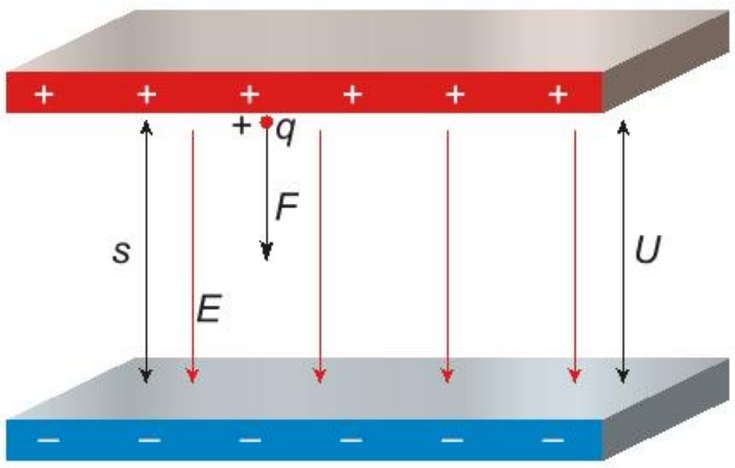
COULOMBS LAG

Krafterna mellan två elektriska laddningar är proportionella mot laddningarna och omvänt proportionella mot kvadraten på avståndet mellan dem,

$$F = k\frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2},\ k = 8{,}99 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2 \quad \text{(i vakuum)}$$

ELEKTRISKT FÄLT

Ett elektriskt fält är ett område inom vilka elektriska krafter verkar på elektriska laddningar. Fältet har den riktning som en positiv laddning skulle röra sig.



5.3b Elektrisk fältstyrka mellan två parallella metallplattor. Fältstyrkan E är parallell med kraften F. Fältstyrkan är riktad åt det håll som en positiv laddning skulle röra sig.

Ett enkelt exempel på ett elektriskt fält är fältet mellan två parallella metallplattor som är kopplade till en likspänningskälla. Se figur 5.3b. Fältlinjerna har samma riktning som fältstyrkan E, det vill säga samma riktning som den elektriska kraften F på en positiv laddning i fältet. Fältet är *homogent*. Det innebär att fältstyrkan E har samma riktning och samma absolutvärde överallt i fältet.

ELEKTRISK FÄLTSTYRKA

Elektrisk fältstyrka är elektrisk kraft per laddning,

$$\text{Elektrisk fältstyrka} = \frac{\text{elektrisk kraft}}{\text{laddning}} \text{ eller } E = \frac{F}{q}$$

Enheten för elektrisk fältstyrka är newton per coulomb, N/C.

FÄLTSTYRKA I ETT HOMOGENT ELEKTRISKT FÄLT

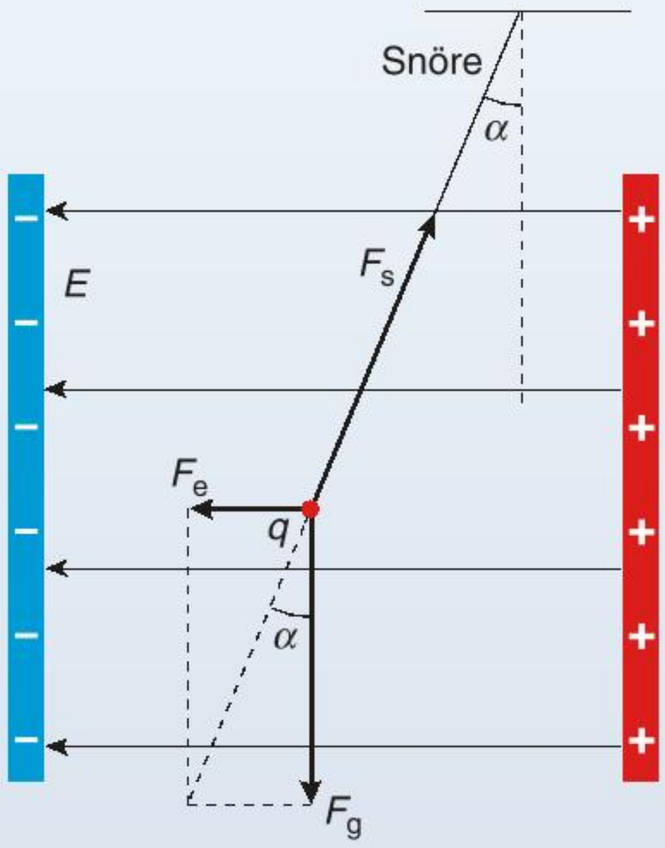
I det homogena elektriska fältet mellan två metallplattor är fältstyrkan,

$$\text{Elektrisk fältstyrka} = \frac{\text{spänning}}{\text{avstånd mellan plattorna}} \text{ eller } E = \frac{U}{s}$$

där U är spänningen och s är avståndet mellan plattorna.

EXEMPEL 2 **Elektrisk pendel**

Mellan två lodräta metallplattor hänger en pendelkula med laddningen $q = 2{,}5 \cdot 10^{-8}$C och tyngden $F_g = 7{,}5 \cdot 10^{-3}$ N. Se figur 5.4. Spänningen mellan plattorna är $U = 4{,}0$ kV och avståndet mellan dem är $s = 8{,}0$ cm. Vi ska beräkna den elektriska fältstyrkan E mellan plattorna, den elektriska kraften F_e på kulan och vinkeln som snöret bildar med lodlinjen.



5.4 En elektrisk pendel.

Lösning: Fältstyrkan mellan plattorna är

$$E = \frac{U}{s} = \frac{4{,}0 \cdot 10^{3}}{8{,}0 \cdot 10^{-2}}\ \text{V/m} = 5{,}0 \cdot 10^{4}\ \text{V/m}$$

Fältstyrkan har riktning från den positiva till den negativa plattan. Eftersom pendelkulan är positivt laddad, har den elektriska kraften F_e samma riktning som fältstyrkan E, alltså vågrätt åt vänster i figuren. Kraften har absolutvärdet:

$$F_e = qE = 2{,}5 \cdot 10^{-8} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{4}\ \text{N} = 1{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{N}$$

Kulan påverkas av tre krafter: tyngden F_g, den elektriska kraften F_e och kraften F_s i snöret. Kulan hänger stilla, så resultanten av de tre krafterna blir noll, $F_g + F_e + F_s = 0$. I figuren ser du att

$$\tan\alpha = \frac{F_e}{F_g} = \frac{1{,}25 \cdot 10^{-3}}{7{,}5 \cdot 10^{-3}}$$

som ger $\alpha = 9{,}5°$. Snöret bildar alltså en vinkel på 9,5° med lodlinjen.

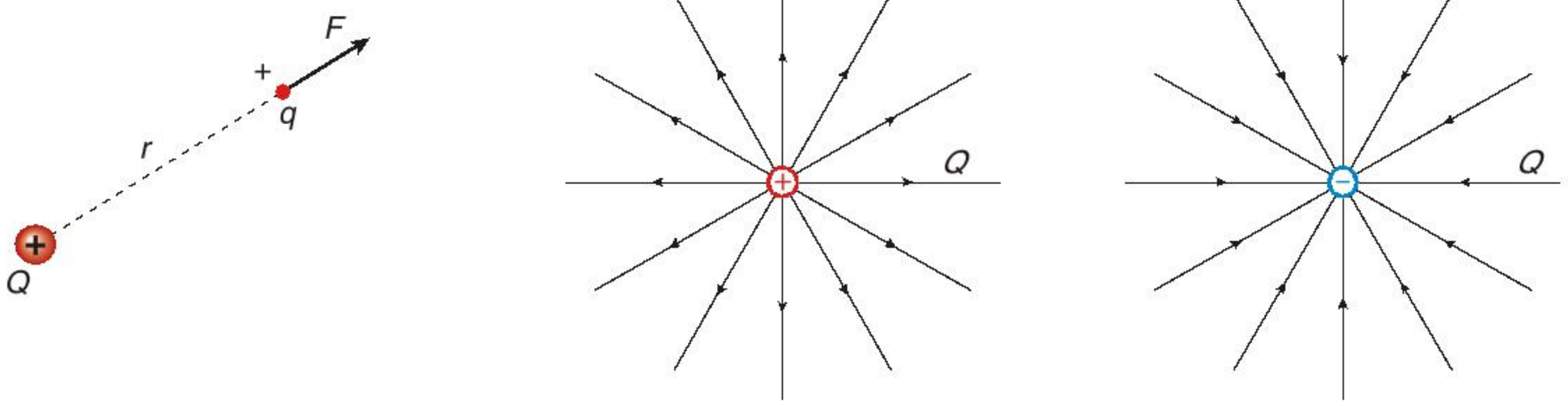
Radiellt fält

Nu ska vi studera det elektriska fältet runt en kula med laddningen Q. Då placerar vi en *positiv* provladdning q på avståndet r från kulans centrum.

Provladdningen påverkas av en elektrisk kraft F med absolutvärdet

$$F = k\frac{qQ}{r^2}$$

Om Q är positiv, så pekar F radiellt utåt från kulan. Om Q är negativ, pekar F radiellt inåt mot kulan. Se figur 5.5. Den elektriska fältstyrkan E i den punkt där provladdningen är, får vi ur definitionen $E = F/q$. Linjerna i figuren kallas *elektriska fältlinjer* och visar således riktningen på den elektriska fältstyrkan. Ju starkare fältet är, desto tätare ligger fältlinjerna.



5.5 Radiella elektriska fält. Elektriska fältlinjer visar riktningen för den elektriska fältstyrkan.

EXEMPEL 3 **Kärnfält**

Kärnan i en uranatom har laddningen

$$Q = 92e = 92 \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \text{C} = 1{,}47 \cdot 10^{-17}\ \text{C}$$

Urankärnan har radien $7{,}4 \cdot 10^{-15}$ m. Vi går in till avståndet $r = 1{,}0 \cdot 10^{-14}$ m från kärnans centrum. Då är vi precis utanför kärnan. Den elektriska fältstyrkan där är

$$E = \frac{F}{q} = \frac{kQ}{r^2} = \frac{8{,}99 \cdot 10^9 \cdot 1{,}47 \cdot 10^{-17}}{\left(1{,}0 \cdot 10^{-14}\right)^2}\ \text{N/C} = 1{,}3 \cdot 10^{21}\ \text{N/C}$$

Det är ett ofattbart starkt elektriskt fält!

KONTROLLFRÅGOR

- Vad menas med elektriskt fält?
- Hur definieras elektrisk fältstyrka?
- Är det sant att den elektriska kraften på en laddad partikel alltid har samma riktning som fältstyrkan?
- Vilken formel används för den elektriska fältstyrkan mellan två laddade metallplattor?
- Vad kan du säga om riktningen på det elektriska fältet mellan två metallplattor?
- Beskriv riktningen på det elektriska fältet runt en laddad kula?
- Bestäm den elektriska fältstyrkan då den elektriska kraften på en elektron är $3{,}2 \cdot 10^{-16}$ N.
- Hur stor är den elektriska kraften på en proton om $E = 50$ kN/C?
- Avståndet mellan två elektriskt laddade plattor är 15 cm. Spänningen mellan plattorna är 450 V. Hur stor är den elektriska fältstyrkan mellan plattorna?
- En elektron befinner sig mellan två parallella plattor där det elektriska fältet är 20 kV/m. Hur stor är den elektriska kraften på elektronen?

5.3 Potentiell energi

Tidigare har vi nämnt att det finns flera typer av potentiell energi. Varje typ är knuten till en bestämd kraft. När vi utför arbete på ett föremål mot den kraften, får föremålet större potentiell energi.

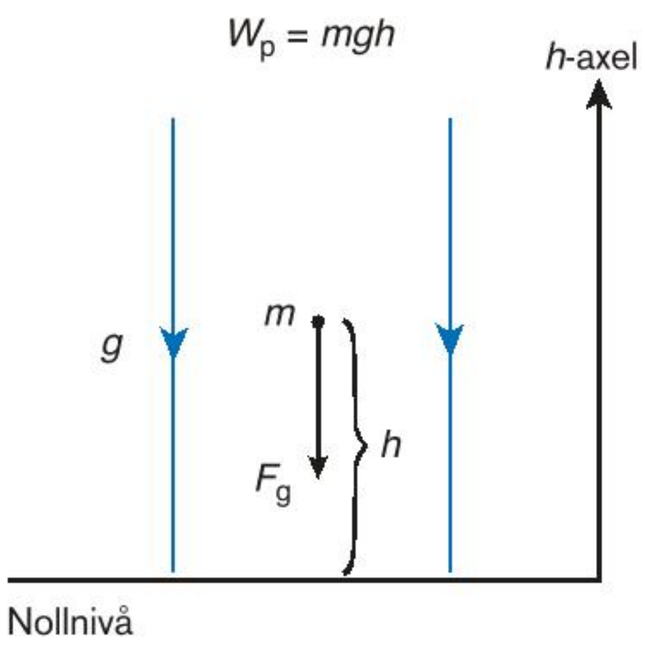
Vi har hittills tittat på potentiell energi i *tyngdkraftfältet* och nu ska vi på motsvarande sätt studera potentiell energi i ett *elektriskt* fält.

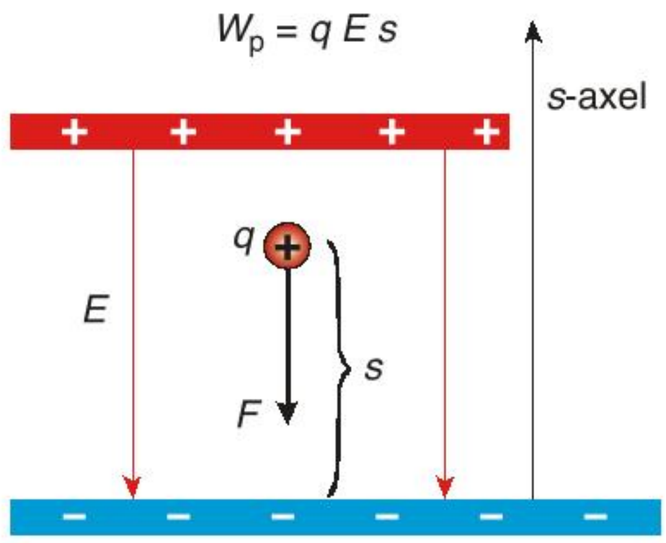
Homogent fält

Om vi lyfter ett föremål med massan *m mot* tyngdkraften i ett homogent gravitationsfält, får föremålet större potentiell energi i tyngdkraftfältet. På höjden *h* över en vald nollnivå, är den potentiella energin

$$W_p = mgh$$

Se figur 5.6.



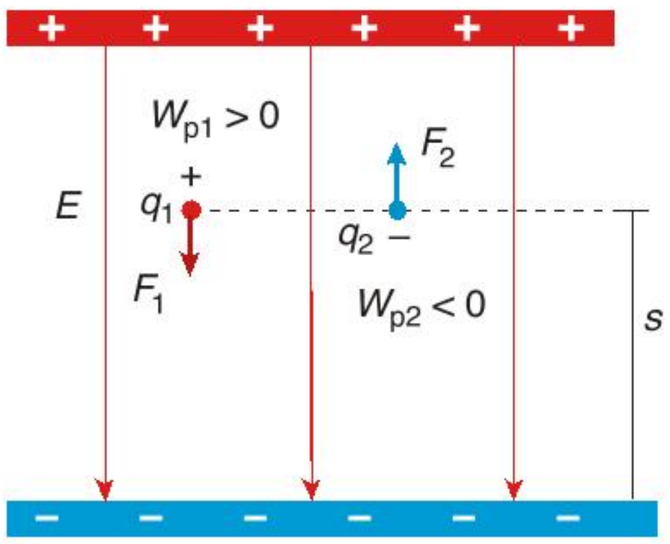


5.6 (T.v.) I ett homogent tyngdkraftfält pekar fältstyrkan *g* lodrätt neråt, medan *h*-axeln pekar lodrätt uppåt, *mot* fältriktningen.

5.7 (T.h.) Homogent elektriskt fält med fältstyrkan *E* lodrätt neråt och *s*-axeln lodrätt uppåt, *mot* fältriktningen.

Nu ska vi ta oss an potentiell energi i ett elektriskt fält. För att du ska se sambandet med tyngdfältet, låter vi det elektriska fältet vara mellan två horisontella metallplattor med den positiva plattan överst och den negativa plattan underst. Då pekar *E*-fältet lodrätt neråt. Se figur 5.7.

När vi lyfter en *positiv* provladdning *q* ett stycke *s mot* den elektriska kraften *F,* måste vi utföra ett arbete $W = Fs = qEs$. Det här arbetet övergår till elektrisk potentiell energi hos provladdningen. Vi låter *s*-axeln peka uppåt, *mot* fältriktningen, precis som *h*-axeln i tyngdkraftfältet. Oftast väljer vi nollnivån på den negativa plattan vare sig laddningen är positiv eller negativ. Men kom ihåg att det är valfritt. Det är ju bara differensen i potentiell energi som spelar roll. En negativ laddning skulle "falla" uppåt i det elektriska fältet i figur 5.7, och då minskar den potentiella energin – var vi än har placerat vår nollnivå.



5.8 Potentiell energi i ett homogent fält.

EXEMPEL 4 **Potentiell energi**

Mellan två vågräta metallplattor finns ett lodrätt elektriskt fält med fältstyrkan $E = 4{,}0$ kN/C. Se figur 5.8. Vi väljer nollnivån vid den negativa plattan. På avståndet $s = 5{,}0$ cm över nollnivån finns en positiv laddning $q_1 = 2{,}0 \cdot 10^{-8}$ C och en negativ laddning $q_2 = -q_1$. Vi ska beräkna den potentiella energin för vardera laddningen.

Lösning: Den positiva laddningen har en positiv potentiell energi,

$$W_{p1} = q_1 Es = 2{,}0 \cdot 10^{-8} \cdot 4{,}0 \cdot 10^{3} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{J} = 4{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{J}$$

Den negativa laddningen har negativ potentiell energi,

$$W_{p2} = q_2 Es = \left(-2{,}0 \cdot 10^{-8}\right) \cdot 4{,}0 \cdot 10^{3} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{J} = -4{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{J}$$

Om vi tänker oss att laddningarna har flyttat sig från mellannivån till där de är, så har den positiva laddningen flyttat sig *mot* den elektriska kraften. De negativa laddningarna har flyttat sig *med* den elektriska kraften. Se figur 5.8.

KONTROLLFRÅGOR

- Vilket samband används för att ta reda på den elektriska potentiella energin hos en laddning som befinner sig i ett elektriskt fält?
- Ökar eller minskar den potentiella energin när en laddning flyttar sig *mot* den elektriska kraften? Har laddningens tecken någon betydelse?
- Har elektronen i väteatomen positiv eller negativ potentiell energi när den snurrar i bana runt protonen?
- En positiv laddning på 35 µC förs 15 cm mot fältlinjerna i elektriskt fält där $E = 40$ kV/m. Hur mycket ändras laddningens potentiella energi?
- En negativ laddning på 74 nC flyttas 35 cm längs fältlinjerna i ett elektriskt fält så att dess potentiella energi ökar med 1,85 mJ. Bestäm fältstyrkan. Förs laddningen med eller mot fältlinjerna?

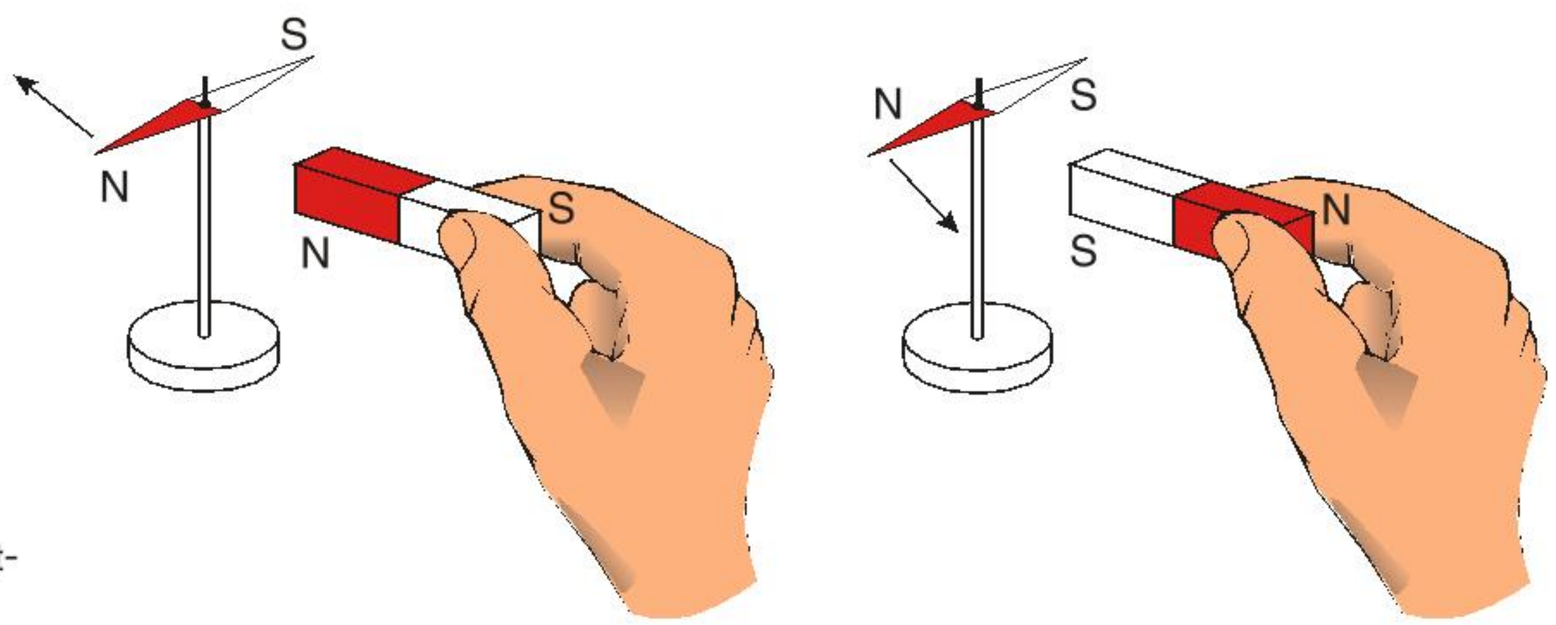
5.4 Magnetiska fält

Om du stryker en synål av stål mot en stark magnet, blir nålen själv magnetisk. Lägger du synålen försiktigt på en vattenyta, så att den flyter, kommer nålen efter en stund att ställa in sig i riktningen nord-syd. Detsamma gör nålen i en kompass. En kompassnål är rätt och slätt en liten magnet.

NORDPOL OCH SYDPOL

Den ände av kompassnålen som pekar mot norr, kallar vi nålens nordpol. Den ände som pekar mot syd, kallar vi sydpolen.

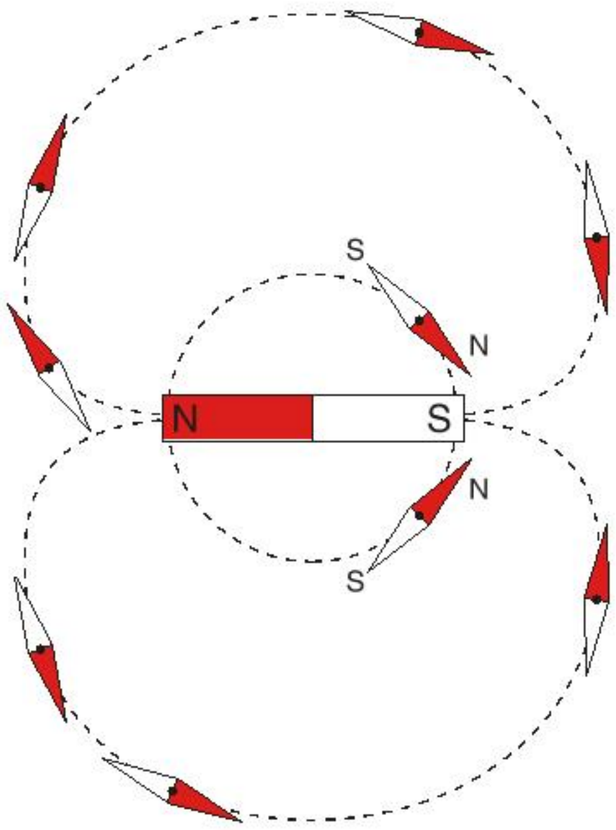
Låt oss göra några enkla, kvalitativa försök: Vi för nordpolen på en stavmagnet mot nordpolen på kompassnålen. Då ser vi att kompassnålens nordpol vrider sig bort från stavmagnetens nordpol. När vi för sydpolen på stavmagneten mot nordpolen på kompassnålen, ser vi att kompassnålens sydpol vrider sig mot stavmagnetens nordpol. Se figur 5.9.



5.9 Lika poler repellerar (stöter bort) varandra, motsatta poler attraherar (drar till sig) varandra.

Försöket visar att *lika poler stöter bort varandra, och olika poler attraherar varandra*. Det visste du nog redan. Försöket visar också att magnetiska krafter är *avståndskrafter*. Vi säger att kompassnålen var i *magnetfältet* runt stavmagneten. Ett magnetfält är alltså ett område där det verkar magnetiska krafter på kompassnålar och andra magneter som är i området.

Kompassnålen ställer in sig i en bestämd riktning i fältet. Det använder vi till att definiera fältriktningen:



5.10 Magnetiska fältlinjer runt en stavmagnet.

FÄLTRIKTNINGEN I ETT MAGNETFÄLT

Fältriktningen på ett ställe i ett magnetfält är den riktning som nordpolen på en kompassnål pekar i.

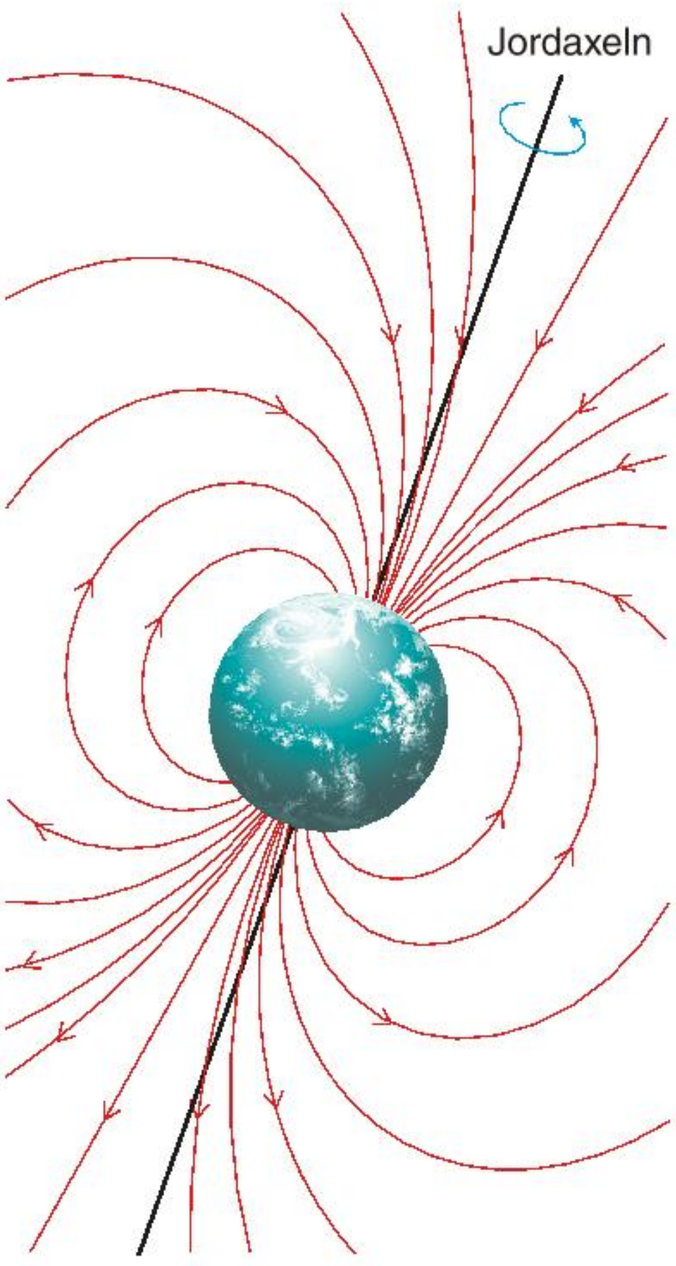
Nu kan vi illustrera magnetfältet med fältlinjer, som vi tidigare har gjort med gravitationsfält och elektriska fält.

Vi lägger en stavmagnet på locket till en genomskinlig plastlåda som innehåller små kompassnålar. Se figur 5.10. Vi ritar de magnetiska fältlinjerna så att varje kompassnål tangerar fältlinjen på stället. På det sättet får vi en bild av fältlinjerna.

FÄLTRIKTNINGEN RUNT EN STAVMAGNET

Fältlinjerna bildar slutna kurvor som går ut från nordpolen och in mot magnetens sydpol. Fältlinjerna ligger tätast där magnetfältet är starkast.

Jorden är en stor magnet med en nordpol och en sydpol. Se figur 5.11.

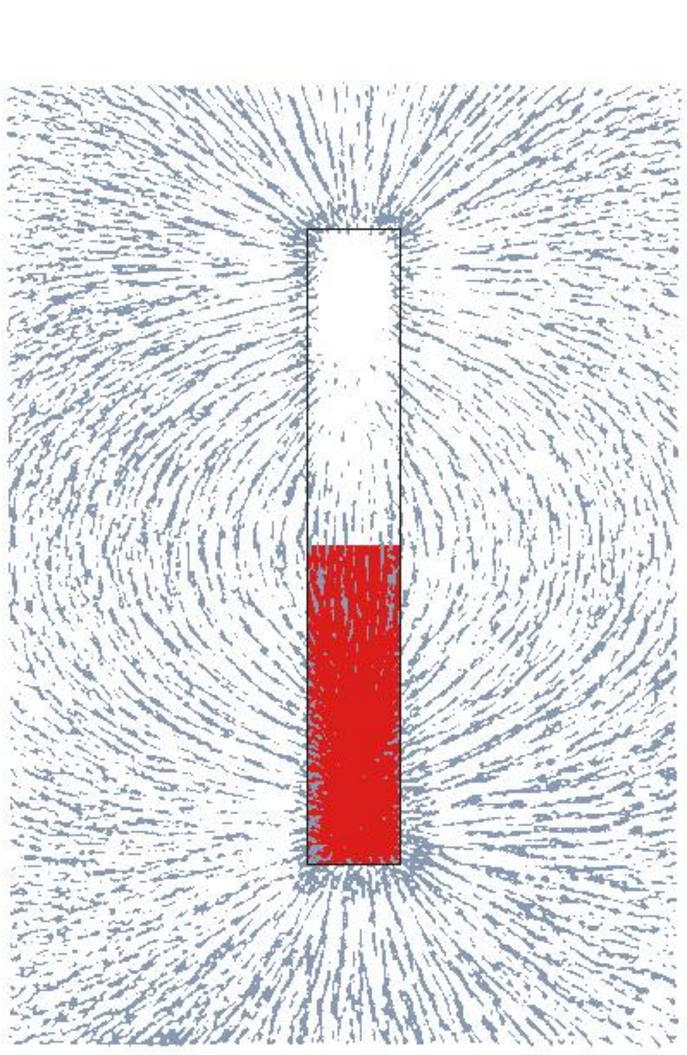


5.11 Jorden är en stor magnet.

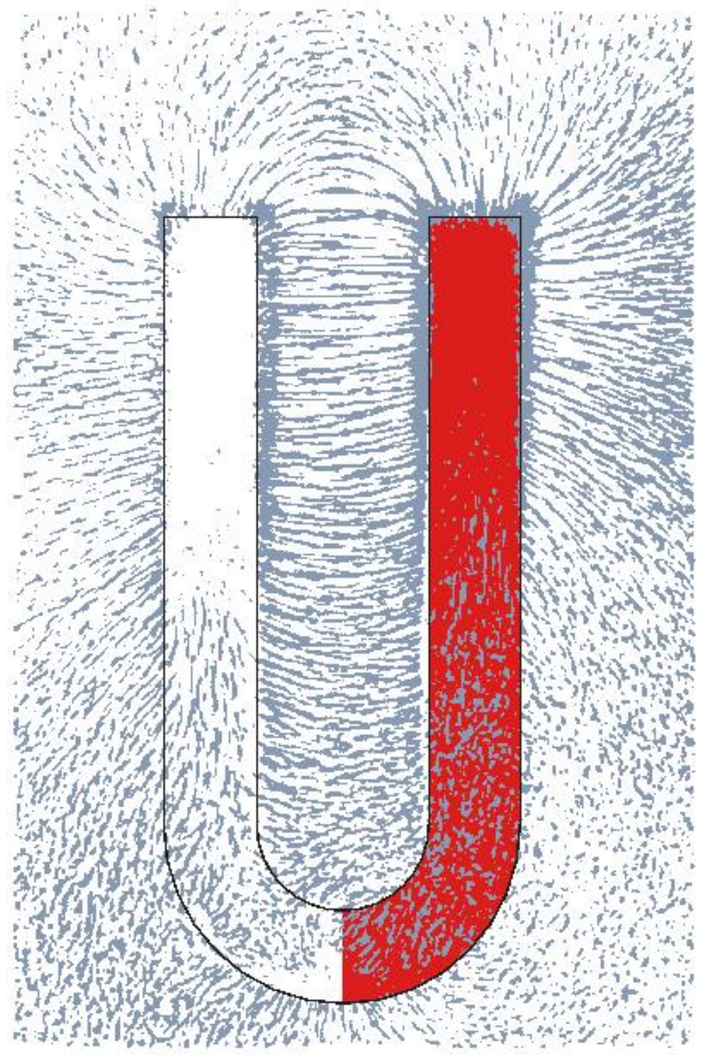
Eftersom nordpolen på en kompassnål pekar mot norr, måste jorden ha en magnetisk sydpol i närheten av den geografiska nordpolen, och omvänt. De jordmagnetiska polerna ligger cirka 12 breddgrader från de geografiska polerna, men de magnetiska polerna flyttar sig långsamt. För närvarande är den magnetiska nordpolen på väg norrut med en hastighet på drygt 20 kilometer om året. Det är till och med så att polerna ibland byter plats helt och hållet. Detta har skett ungefär med 200 000 års mellanrum under de senaste 20 miljoner åren. Att polerna verkligen har bytt plats kan man veta genom att studera de magnetiska mineral som finns i berggrunden. När berggrunden är flytande så ställer de magnetiska mineralen in sig i magnetfältets riktning och när berget sedan stelnar kan inte längre ämnena röra sig. Vi får då en bild av hur magnetfältet var riktat när bergarten bildades.

Vi kan också få en bild av magnetiska fältlinjer om vi lägger en plastskiva över en stavmagnet och strör järnfilspån på skivan. Se figur 5.12. Magnetfältet får spånen till att bli små magneter. Om vi knackar på skivan, ordnar spånen in sig i ett mönster som följer fältlinjerna.

Ett homogent magnetfält är ett magnetfält som har samma styrka och samma riktning överallt. Mellan polerna på en hästskomagnet är magnetfältet i det närmaste homogent. Se figur 5.13.



5.12 Magnetfältet runt en stavmagnet.



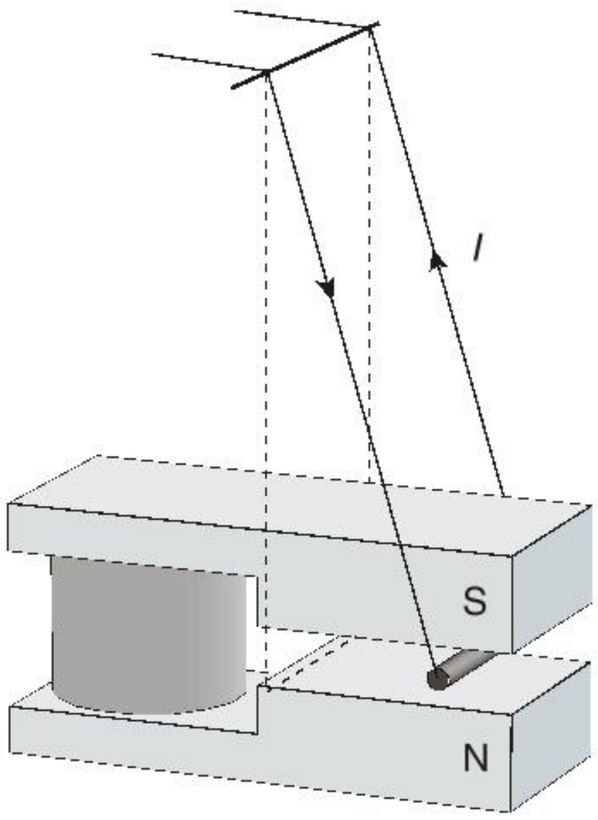
5.13 Magnetfältet runt en hästskomagnet.

KONTROLLFRÅGOR

- Vilken regel gäller för kraftverkan mellan två magnetpoler?
- Vad menas med magnetfält?
- Hur definieras riktningen på ett magnetfält?
- Hur ser magnetfältet ut runt en stavmagnet?
- Vad innebär det att ett magnetfält är homogent?
- Varför pekar nordpolen på en kompassnål *norrut*?

5.5 Strömledare i magnetfält

Fysikerna upptäckte snabbt hur en magnet påverkar en annan magnet, och att en magnet attraherar järn, men inte trä, sten eller koppar. Men vad hände om de skickade en elektrisk ström genom en kopparledning som var i ett magnetfält? Skulle den påverkas av en magnetisk kraft?



5.14 Strömledare i magnetfält.

EXEMPEL 5 **Strömledare i magnetfält**

Vi ställer en hästskomagnet så att magnetfältet blir lodrätt. Mellan polerna hänger vi en vågrät ledare av koppar, vinkelrätt mot magnetfältet. Ledaren hänger som en pendel i två lätta och böjliga ledningar. Se figur 5.14. Vi kopplar de två ledningarna till en likspänningskälla. Så länge strömmen är avslagen, hänger pendeln rakt ner. Men när vi skickar likström genom ledaren, svänger pendeln ut åt den ena sidan.

Förklaringen måste vara att den *strömförande* ledaren påverkas av en *magnetisk kraft*. Vi går vidare med försöket och upptäcker följande fenomen:

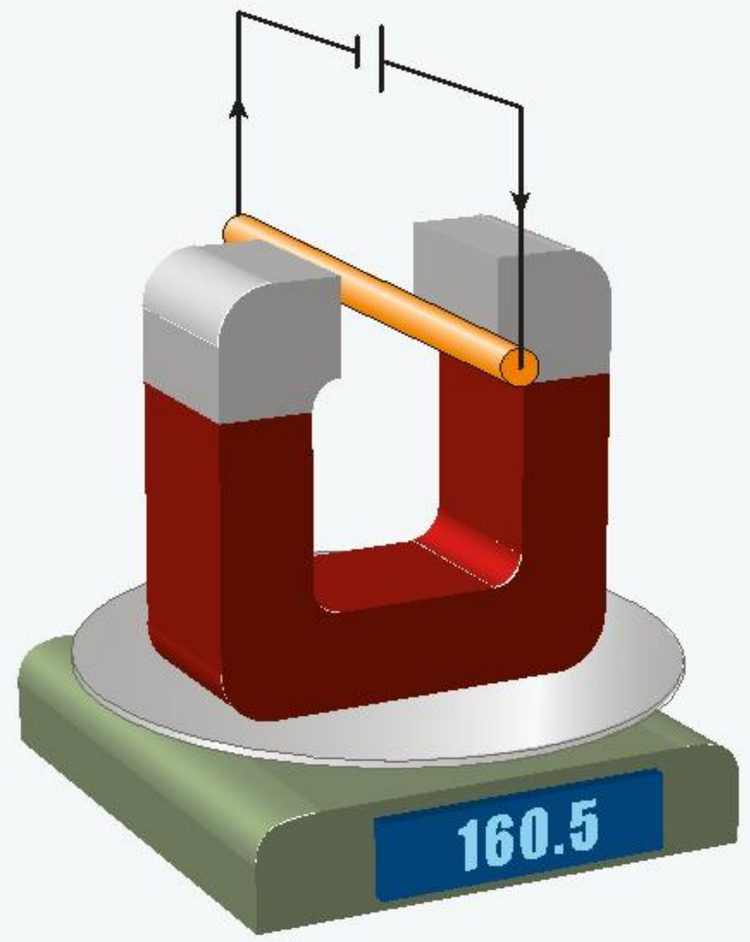
- när strömmen ökar, ökar också pendelutslaget
- när vi byter strömriktningen, svänger pendeln ut åt andra hållet
- om vi byter ut kopparledaren mot en ledare av en annan metall, visar det sig att både storleken och riktningen hos den magnetiska kraften är oberoende av metallen.

Försöket tyder på att en strömförande ledare i ett magnetfält påverkas av en magnetisk kraft som beror på strömmen och strömriktningen, men inte av vilket material ledaren är tillverkad av.

Anders och Elin har fått i uppdrag att kvantitativt undersöka den märkliga växelverkan som finns mellan en strömförande ledare och en magnet. Här följer ett utdrag från deras rapport:

VÄXELVERKAN MELLAN LEDARE OCH MAGNET

Strömvåg för mätning av kraft på strömledare i magnetfält. Ledaren är vågrät och vinkelrät mot magnetfältet från hästskomagneten.



Utförande: Vi placerade en hästskomagnet på en våg som i figuren och förlitade oss på Newtons tredje lag: Om magneten påverkar ledaren med en kraft uppåt så påverkar ledaren magneten med en lika stor kraft nedåt. Denna kraft kunde vi mäta med hjälp av vågen.

När man undersöker sambandet mellan tre fysikaliska variabler brukar man hålla en av dem konstant, variera den andra och se hur det påverkar den tredje. Så upprepar man försöket genom att hålla en av de andra två variablerna konstant.

Vi kunde variera två parametrar:

1. Längden av ledaren som befann sig mellan magnetens poler. Det gjorde vi genom att dra samma ledare flera varv genom plaströret.
2. Strömmen genom ledaren som befann sig i röret mellan polerna. Strömmen varierade vi med hjälp av likspänningskällan.

FÖRSÖKSSERIE 1: Ledarens längd varierades.

Vi höll strömstyrkan konstant (2,0 A) i den här delen av försöket. Vågen visade 160,5 g (m_0) när det inte gick ström genom ledaren.

Resultat:

Längd/m	0	0,02	0,04	0,06	0,08
Massa/ kg	0,1605	0,1607	0,1610	0,1613	0,1615
Kraft/mN	0	1,96	4,91	7,86	9,82

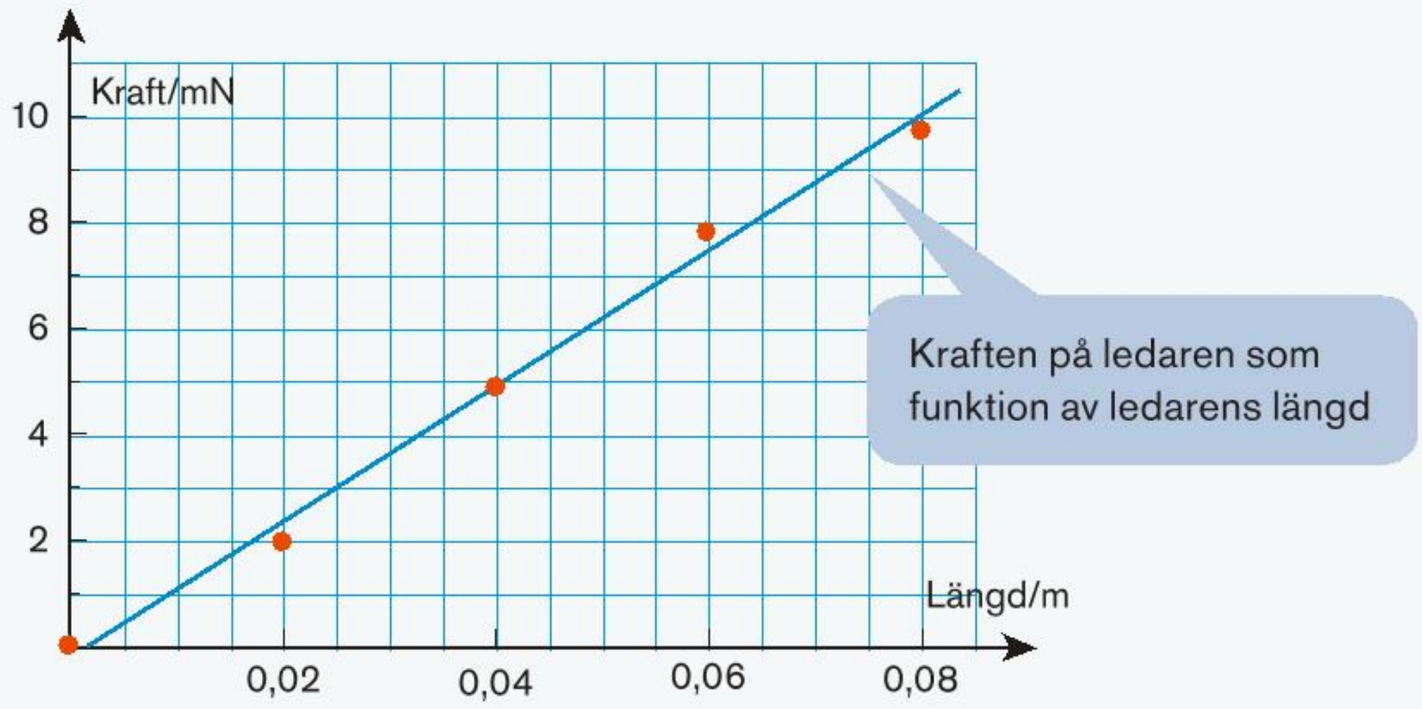
Vi omvandlade massan mätt på vågen till kraft genom att subtrahera massa utan ström och multiplicera resultatet med 9,82 m/s^2:

$$F = (m - m_0) \cdot g$$

Med siffror insatta:

$$F_{(0{,}02\ \mathrm{m})} = (0{,}1607 - 0{,}1605) \cdot 9{,}82\ \mathrm{N}$$
$$= 0{,}0002 \cdot 9{,}82\ \mathrm{N} = 0{,}001964\ \mathrm{N}, \text{ osv.}$$

Den räta linjen utgår nästan från origo och mätpunkterna fördelar sig



relativt slumpmässigt på båda sidor om grafen. Vi drog slutsatsen att kraften F på ledaren är proportionell mot ledarens längd l:

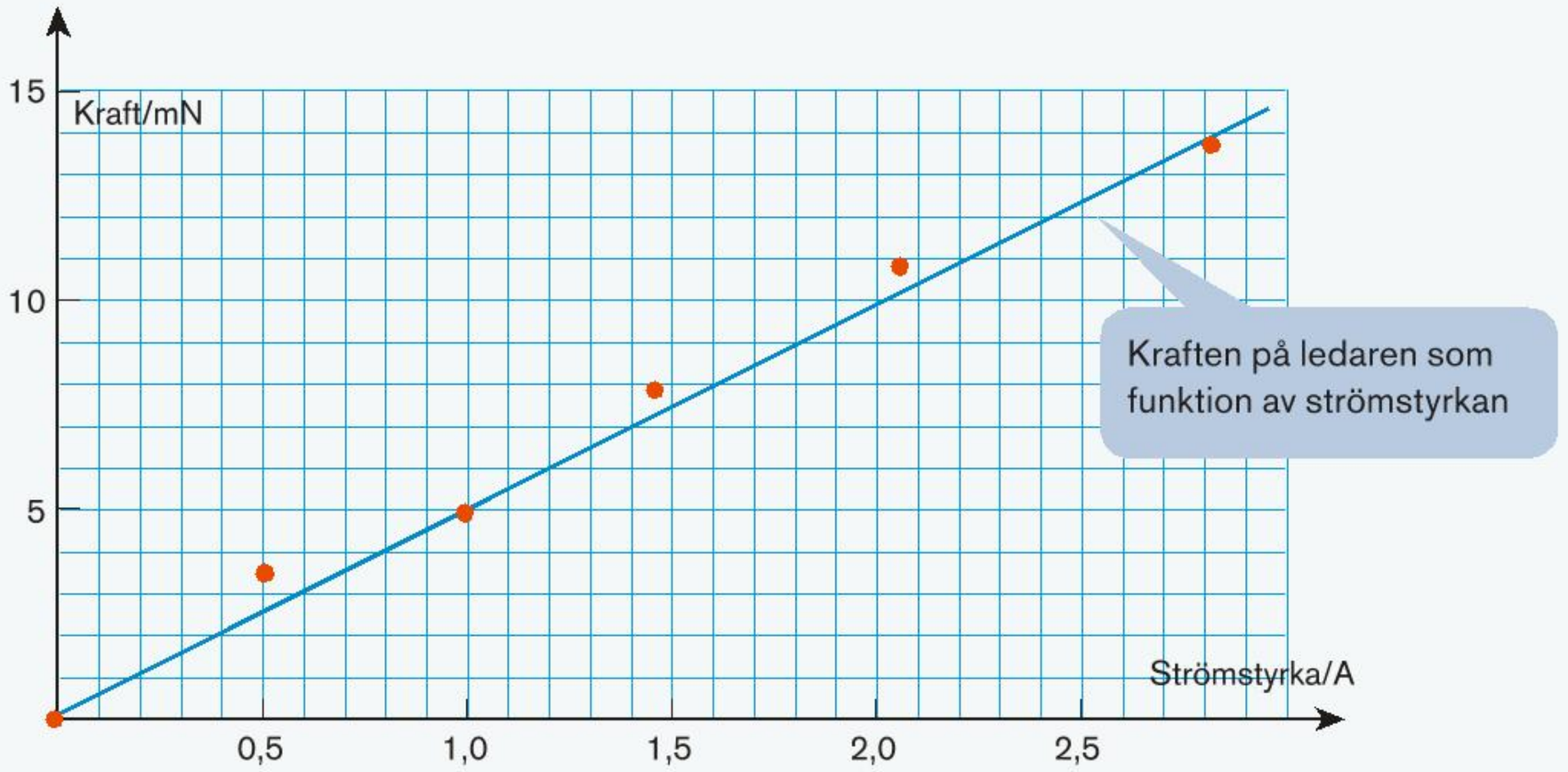
$$F = k_l \cdot l$$

FÖRSÖKSSERIE 2: Strömstyrkan varierades

Vi varierade strömmen och mätte motsvarande massa på vågen. Massan översatte vi till kraft på samma sätt som i försöksserie 1. Ledarens längd i fältet var 0,08 m.

Resultat:

Strömstyrka/A	0	0,508	0,995	1,468	2,062	2,828
Kraft/mN	0	3,43	4,91	7,85	10,8	13,7



Funktionsgrafen blev även den här gången en rät linje som nästan utgår från origo. Vi kunde alltså konstatera att kraften är proportionell mot strömstyrkan:

$$F = k_I \cdot I$$

Slutsats: Kraften på en ledare i ett magnetiskt fält är proportionell mot ledarens längd i fältet och strömstyrkan genom ledaren:

$$F = k \cdot I \cdot l$$

Enligt vår formelsamling är proportionalitetskonstanten k lika med den magnetiska flödestätheten B. Enheten för magnetisk flödestäthet är Tesla eller N/Am.

Vårt resultat kan alltså skrivas:

$$F = IlB$$

Eftersom $B = \frac{F}{I \cdot l}$ kunde vi som bonus ta reda på den magnetiska flödestätheten mellan magnetens poler.
Med utgångspunkt i mätningarna ovan var B ungefär 0,06 T.

Den magnetiska flödestätheten B talar om hur starkt ett magnetfält är. En starkare magnet ger ett större värde på B.

Resultaten av Anders och Elins experiment kan formuleras på följande sätt:

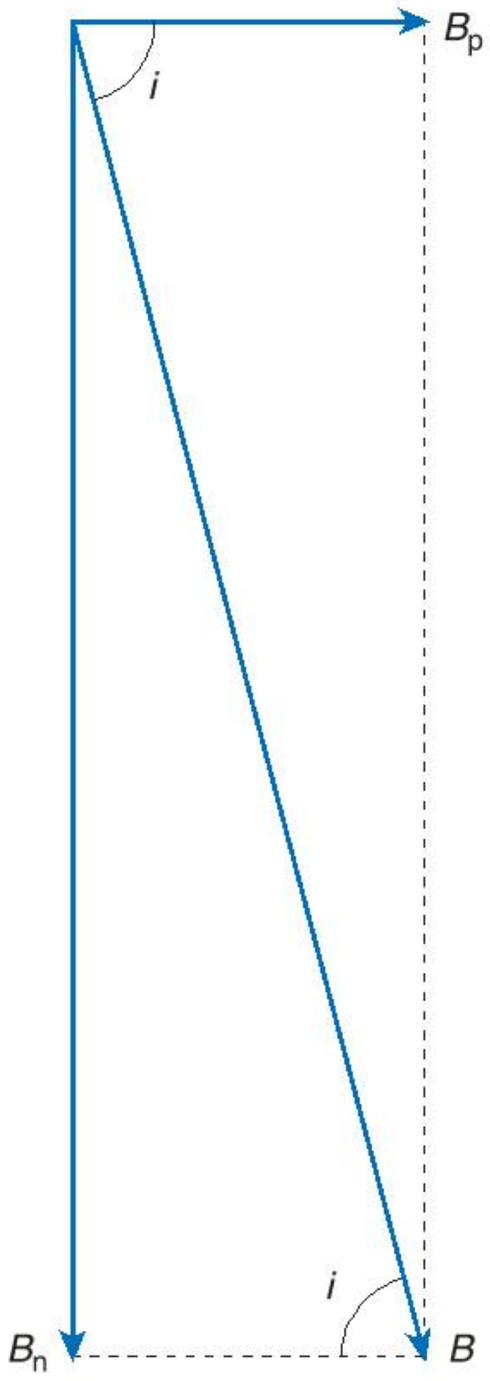
MAGNETISK KRAFT PÅ STRÖMLEDARE

En strömförande ledare som bildar rät vinkel mot ett homogent magnetfält, påverkas av en magnetisk kraft som är proportionell mot strömmen i ledaren och mot ledarens längd,

$$F = IlB$$

Storheten B är en ”magnetisk fältstyrka” som av historiska skäl har fått namnet *magnetisk flödestäthet*. Flödestätheten är en vektor B som har samma riktning som de magnetiska fältlinjerna. I gapet på hästskomagneten har B riktning från nordpolen till sydpolen.

Ett magnetfält på 1 T är ett starkt magnetfält. Jordens magnetfält har en flödestäthet på ungefär 67 µT vid polerna och 30 µT vid ekvatorn. En stark hästskomagnet kan ha en flödestäthet på upp till 0,10 T. De starkaste människotillverkade magnetfälten är på ungefär 10 T.



5.15 Komposantuppdelning av det jordmagnetiska fältet. Den markerade vinkeln i figuren kallas inklinationsvinkel, det vill säga lutningen på jordens magnetfält. Vid den magnetiska ekvatorn är fältet parallellt med jordytan, och vid de magnetiska polerna pekar det rakt ner i marken.

Index p i B_p betyder att komposanten är parallell med markplanet. Index n i B_n står för normal och betyder att B_n är vinkelrät mot marken och mot B_p. Gängse beteckningar är B_h för horisontalkomposant och B_v för vertikalkomposant.

EXEMPEL 6 **En jordnära flödestäthet**

I mellersta Sverige har det jordmagnetiska fältet en flödestäthet på 51 µT. Vektorn B pekar snett nedåt och bildar en vinkel på 75° med ett vågrätt plan. Se figur 5.15.

En kompassnål som kan svänga fritt i ett vågrätt plan, påverkas av den vågräta komposanten B_p och visar riktningen som B_p har. Den vågräta komposanten har absolutvärdet

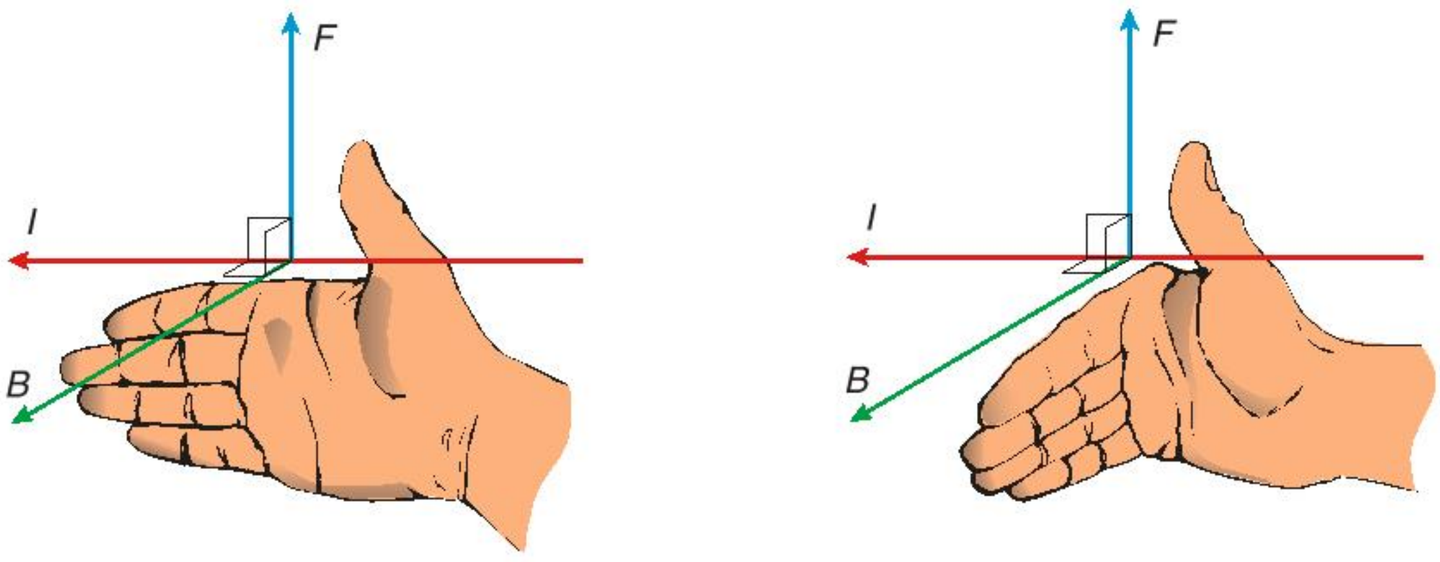
$$B_p = B\cos i = 51 \cdot \cos 75° \,\mu\text{T} = 13\ \mu\text{T}$$

Den lodräta komposanten B_n påverkar inte kompassnålens riktning. Men den drar nordänden nedåt. Det uppvägs av att tillverkaren har gett sydänden en större massa. En sådan kompass kan inte användas vid ekvatorn. Där måste vi använda kompassnålar som är lika tunga i bägge ändarna. På det södra halvklotet måste vi använda kompassnålar med tung nordände. Varför?

Nu ska vi titta lite närmare på *riktningen* hos den magnetiska kraften som verkar på strömledaren. I de fall vi har tittat på, var strömledaren vinkelrät mot magnetfältet. Då var den magnetiska kraften *vinkelrät* både mot ledaren och mot de magnetiska fältlinjerna. Den magnetiska flödestätheten är en vektor *B* som har samma riktning som de magnetiska fältlinjerna på platsen. Vi låter ledaren motsvara en vektor *I* som har samma riktning som *strömmen* genom ledaren. Den magnetiska kraften *F* är *vinkelrät* både mot *I* och *B*. Försök visar att de tre vektorerna (*I*, *B*, *F*) bildar ett *högersystem*. Det formulerar vi som en högerhandsregel:

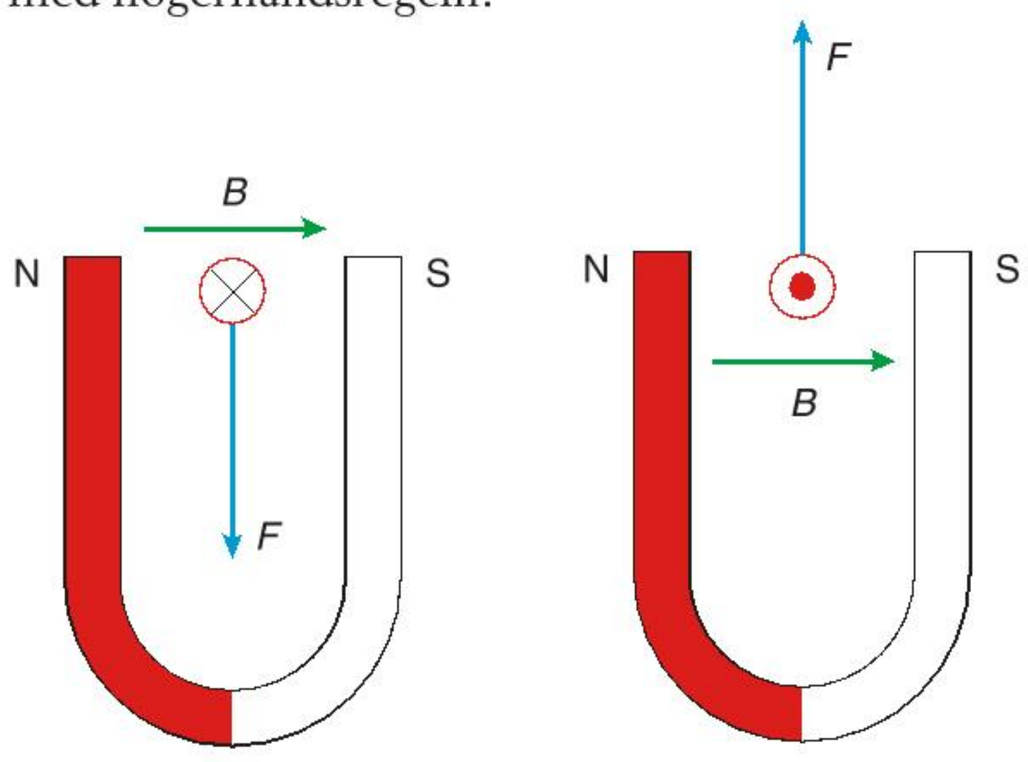
HÖGERHANDSREGELN FÖR MAGNETISK KRAFT

Håll höger hand så att raka fingrar pekar längs *I* och böjda fingrar pekar längs *B*. Då pekar tummen längs *F*.



5.16 Vektorerna (*I*, *B*, *F*) bildar ett högersystem.

Se figur 5.16. Se också figur 5.17. Där har magneten placerats så att flödestätheten *B* pekar vågrätt åt höger, parallellt med pappret. Ledaren är vinkelrät mot pappret. I figur 5.17a går strömmen *in* i pappret och är märkt med ⊗. Det ska föreställa *bakänden* på en pil. I figur 5.17b går strömmen *ut* från pappret och är märkt med ⊙. Det ska föreställa *spetsen* på en pil. Kontrollera att kraftriktningen stämmer med högerhandsregeln!



5.17 Flödestätheten pekar vågrätt åt höger.
a Strömmen går in i pappersplanet.
b Strömmen kommer ut från pappersplanet.

EXEMPEL 7 **Vi mäter flödestäthet**

Vi ska mäta flödestätheten i gapet på en hästskomagnet.
Se figur 5.17a.

Vi hänger en ledare med längden $l = 0{,}030$ m vinkelrätt mot fältet och skickar en ström $I = 1{,}2$ A genom ledaren. Då uppmäts den magnetiska kraften till $F = 2{,}3$ mN. Beräkna den magnetiska flödestätheten mellan magnetpolerna. Kontrollera också riktningen hos den magnetiska kraften på ledaren.

Lösning:

Flödestätheten B har riktning från nordpolen till sydpolen på magneten. Absolutvärdet blir

$$B = \frac{F}{Il} = \frac{2{,}3 \cdot 10^{-3}}{1{,}2 \cdot 0{,}030}\,\mathrm{T} = 0{,}064\ \mathrm{T}$$

KONTROLLFRÅGOR

- Vilken formel har vi för den magnetiska kraften på en rak strömledare?
- Hur definieras magnetisk flödestäthet för ett homogent magnetfält?
- Hur definieras riktningen på den magnetiska flödestätheten?
- Hur formuleras högerhandsregeln för magnetisk kraft på en strömledare?
- En ledare med längden 0,28 m befinner sig i ett magnetfält, vinkelrätt mot fältet. Magnetfältets styrka är 6,2 mT.
  a) Genom ledaren skickar man en ström på 1,4 A. Hur stor blir kraften på ledaren?
  b) Hur stor ström ska man skicka genom ledaren för att kraften på ledaren ska bli 8,0 mN?

5.6 Magnetfält runt strömledare

Raka ledare

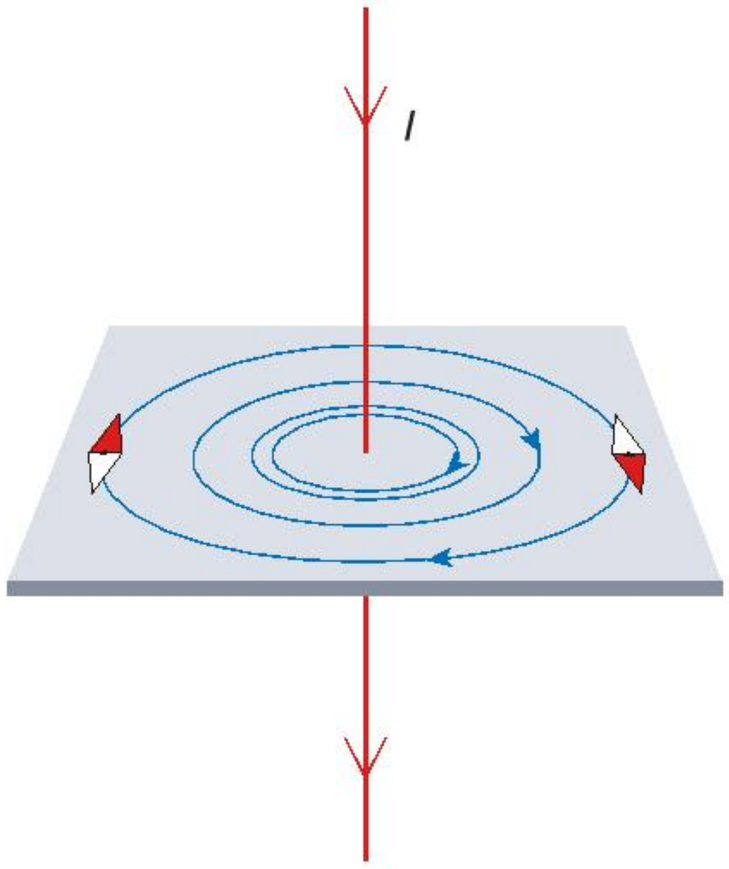
Elektricitet och magnetism var gåtfulla fenomen i mer än två tusen år. När Benjamin Franklin (1706–90) påvisade att blixten är en elektrisk urladdning, blev det klart att elektriska strömmar alstrar magnetiska fält. I början av 1800-talet var det många fysiker som försökte tänka ut laboratorieförsök som kunde påvisa sambandet mellan elektricitet och magnetism.

Den avgörande upptäckten gjordes sommaren 1820 av dansken Hans Christian Ørsted (1777–1851). Ørsted kopplade en metalltråd till polerna på ett elektriskt batteri och förde en liten kompassnål in mot tråden. Nålen vreds då bort från sitt vanliga nord-sydliga läge. När strömmen bröts, återvände kompassnålen till nord-syd-läget. Ørsted hade därmed påvisat att *en elektrisk ström omger sig med ett magnetiskt fält*. Efter många försök kom han fram till lagen för magnetfältet runt en rätlinjig strömledare. Vi formulerar lagen i två punkter:

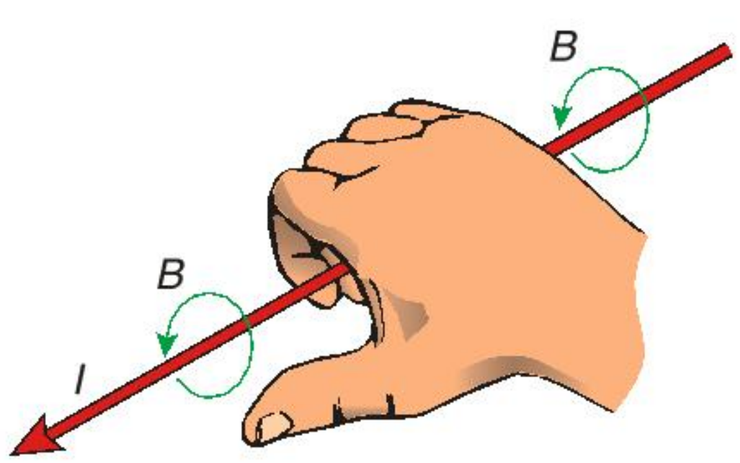
ØRSTEDS LAG

1. **De magnetiska fältlinjerna runt en rätlinjig strömledare är cirklar med centrum i ledaren. Cirkelplanet är vinkelrätt mot ledaren.**
2. **Håll höger hand runt strömledaren så att tummen pekar i strömriktningen. Då pekar de andra fingrarna i fältriktningen.**

Se figur 5.18 och 5.19.



5.18 Magnetfältet runt en rak strömledare.



5.19 Högerhandsregeln för strömledare.

Det är rimligt att anta att den magnetiska flödestätheten blir starkare om man ökar strömmen och att magnetfältet blir svagare när avståndet till ledaren ökar. Det är också precis vad mätningar visar. Noggranna experiment visar att flödestätheten B på ett visst avstånd från ledaren är proportionell mot strömstyrkan I och omvänt proportionell mot avståndet r från ledaren. Vi kan formulera det på följande sätt.

MAGNETFÄLTET RUNT EN RAK LEDARE

$B = k \cdot \frac{I}{r}$ där $k = 2 \cdot 10^{-7}$ Tm/A

EXEMPEL 8 Magnetisk flödestäthet nära en ledare

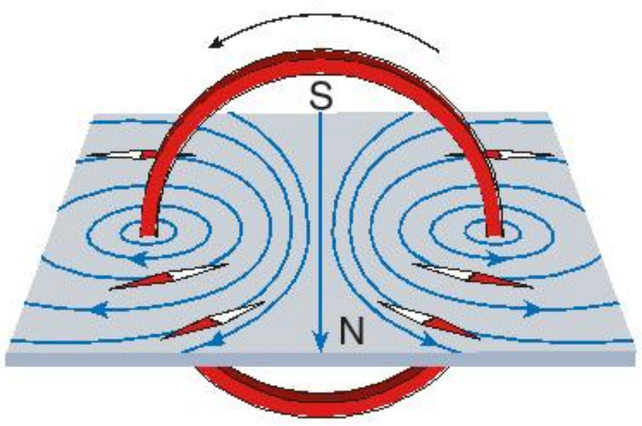
Hur stor är den magnetiska flödestätheten på ett avstånd av 10 cm från en elektrisk ledare när strömmen genom ledaren är 25 A?

Lösning: Vi kan beräkna flödestätheten genom att använda sambandet ovan. $I = 25\text{A}$ och $r = 0{,}10$ m.

$$B = k \cdot \frac{I}{r} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{25}{0{,}10}\,\text{T} = 5 \cdot 10^{-5}\,\text{T}$$

Detta magnetfält är av samma storleksordning som jordens magnetfält.

Strömspolar



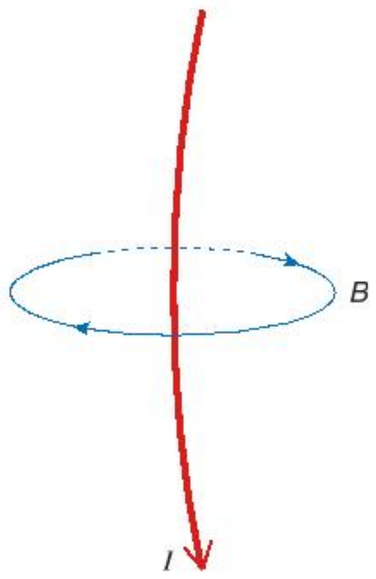
5.20 Magnetfältet runt en strömslinga.

Vi kan utnyttja Ørsteds lag till att tillverka starka elektromagneter. Låt oss först titta på en *strömslinga*, det vill säga en cirkelformad ledare som det går likström genom. Om vi placerar små kompassnålar i centrum av strömslingan, upptäcker vi att *strömslingan fungerar som en magnet*. Strömslingan har en nordpol och en sydpol, precis som en stavmagnet. Se figur 5.20.

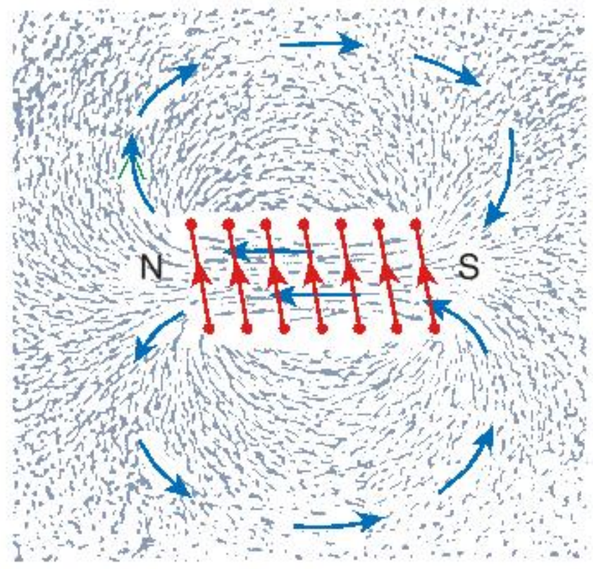
Om vi skiftar strömriktningen, skiftar också fältriktningen. Resultatet är en konsekvens av Ørsteds lag. En *liten* del av strömslingan är en ungefärligen *rak* ledare. Fältlinjerna går som cirklar runt detta ledarstycke. Magnetfältet runt *hela* strömslingan är det totala bidraget från alla de små ledarstyckena. Se figur 5.21.

Därefter tillverkar vi en rak *spole* genom att linda en isolerad ledning runt en cylinder, till exempel en toarulle. Spolen fungerar som en seriekoppling av många strömslingor. Om vi sänder likström genom

5.21 En liten del av en strömslinga.



5.22 Magnetfältet runt en rak strömspole.

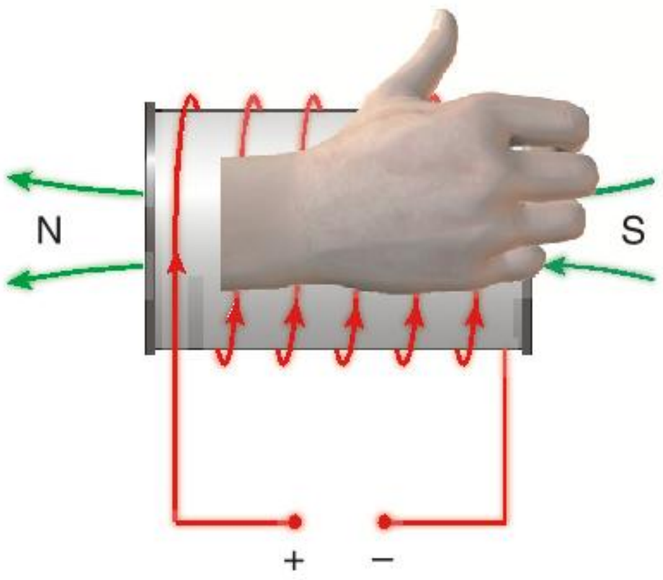


spolen, fungerar varje strömslinga som en magnet. Magnetfälten från alla strömslingorna adderar sig till ett resultantfält.

När vi undersöker magnetfältet med små kompassnålar, ser vi att spolen verkar som en magnet med en pol i vardera änden. Se figur 5.22. Om vi skiftar strömriktningen, så skiftar magnetfältet riktning. *Utanför* spolen har magnetfältet samma form som fältet runt en stavmagnet, och fältet går från nordpolen till sydpolen.

Fältlinjerna fortsätter inne i spolen. *Inne i* spolen går fältet från sydpolen till nordpolen. Inne i spolen är fältlinjerna parallella, och fältet är homogent.

Vi kan bestämma fältriktningen *inne i* en strömspole med hjälp av högerhandsregeln. Se figur 5.23.



5.23 Håll handen så att tummen pekar i strömriktningen. Då pekar fingrarna i magnetfältets riktning

KONTROLLFRÅGOR

- Vilken viktig upptäckt är Ørsted känd för?
- Hur vill du beskriva magnetfältet runt en rak strömledare?
- Hur lyder högerhandsregeln för magnetfältet runt raka strömledare?
- Hur vill du beskriva magnetfältet runt en cirkelformad strömslinga?
- Hur vill du beskriva magnetfältet *inne* i en rak strömspole?
- Hur vill du beskriva magnetfältet *utanför* en rak strömspole?
- Hur lyder högerhandsregeln för magnetfältet inne i en strömspole?
- Beräkna styrkan på det magnetiska fältet på 15 cm avstånd från en ledare i vilken det går 5,0 A.
- I en ledare går det en ström på 0,62 A. På vilket avstånd från ledaren är den magnetiska flödestätheten 0,50 μT?

SAMMANFATTNING

Fält

Newtons gravitationslag

Gravitationslagen: två föremål attraherar varandra med gravitationskrafter som är proportionella mot massorna och omvänt proportionella mot kvadraten på avståndet mellan dem,

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gravitationsfält

Ett *gravitationsfält* är ett område där gravitationskrafter verkar på föremål som är i området.

Gravitationsfältstyrka är gravitationskraft per massenhet,

$$g = \frac{F_g}{m}$$

Fältstyrkan runt jorden ges av

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

där M är jordmassan och r är avståndet från jordens centrum.

Elektrisk fältstyrka

Ett *elektriskt fält* är ett område där det verkar elektriska krafter på elektriska laddningar.

Elektrisk fältstyrka är kraft per laddningsenhet: $E = F/q$

- Mellan två metallplattor är fältstyrkan $E = U/s$ där U är spänningen och s är avståndet mellan plattorna.

Elektriska fältlinjer visar riktningen på det elektriska fältet. Ju starkare fältet är, desto tätare ligger fältlinjerna.

Potentiell energi

En provladdning q på avståndet s från nollnivån i ett homogent elektriskt fält med fältstyrkan E, har potentiella energin $W_p = qEs$.

Magnetiska fält

Alla magneter har två poler: nordpol och sydpol.

Fältlinjerna bildar slutna kurvor som går från nordpolen och in mot sydpolen.

Ett *magnetfält* är ett område där det verkar magnetiska krafter på magneter, strömledare och elektriska laddningar som är i området.

Strömledare i magnetfält

Magnetisk kraft på en strömförande ledare som är vinkelrät mot ett homogent magnetfält, ges av $F = I\,l\,B$ där I är strömmen genom ledaren, l är ledarens längd och B är den magnetiska flödestätheten.

Högerhandsregeln: Håll höger hand så att raka fingrar pekar längs I och böjda fingrar längs B. Då pekar tummen längs F.

Magnetfält runt strömledare

Ørsteds lag: De magnetiska fältlinjerna runt en rätlinjig strömledare är cirklar med centrum i ledaren. Cirkelplanet är vinkelrätt mot ledaren.

Högerhandsregeln: Håll höger hand så att tummen pekar i strömmens riktning. Då pekar de andra fingrarna i fältriktningen.

En *strömspole* verkar som en magnet. Spolen har en nordpol och en sydpol, precis som en stavmagnet.

RÄKNA FYSIK

Gravitationsfält

Om inte uppgiftstexten säger annat sätter vi jordradien lika med 6 371 km. Vidare bortser vi från att jorden, månen och andra himlakroppar roterar kring sin egen axel.

5.01 Använd data från fysiktabellen för att beräkna gravitationskraften på jorden från solen.
Hur stor är gravitationskraften på solen från jorden?

5.02 Tarzan och Jane sitter om kvällen tätt tillsammans och kopplar av under den vackra fullmånen, efter att ha svingat sig i djungeln hela dagen. Avståndet mellan dem (tyngdpunkterna) är 0,45 m. Tarzan väger 75 kg, och Jane väger 60 kg.
Beräkna gravitationskraften på Jane från Tarzan. Beräkna också gravitationskraften på Jane från månen. Är det Tarzan eller Månen som fysikaliskt sett verkar mest attraherande på Jane?

5.03 En kommunikationssatellit på $4{,}5 \cdot 10^3$ kg går i bana över ekvatorn och påverkas av en gravitationskraft på 1,0 kN från jorden. Hur stor är banradien? Hur högt över ekvatorn går satelliten?

5.04 Använd data från fysiktabellen för att beräkna tyngdaccelerationen på ytan av
- **a** månen
- **b** Mars

5.05 Hur stor är gravitationsfältstyrkan om en 15,0 kg tung cykel påverkas av en gravitationskraft på 147 N?

5.06 ★ Den ryske rymdstationen Mir kretsar runt jorden på höjden 400 km över jordytan.
- **a** Hur stor är gravitationsfältstyrkan ombord på Mir?
- **b** En rymdfarare har tyngden 750 N på jordytan. Hur stor blir gravitationskraften på rymdfararen ombord på Mir?

5.07 ★★ I gravitationsfältet runt jorden kallar vi fältstyrkan vid jordytan för g_0. Jordradien kallar vi r_0.
- **a** Visa att gravitationsfältstyrkan (tyngdaccelerationen) g på avståndet r från jordens centrum då kan skrivas

$$g = g_0 \cdot \frac{r_0^{\,2}}{r^2} \qquad \left(r \geq r_0\right)$$

- **b** Hur stor blir gravitationsfältstyrkan (uttryckt i g_0) på höjden $h = r_0$ över jordytan?
- **c** Hur högt (uttryckt i r_0) måste vi innan gravitationsfältstyrkan blir $g_0/10$?

Elektriska fält

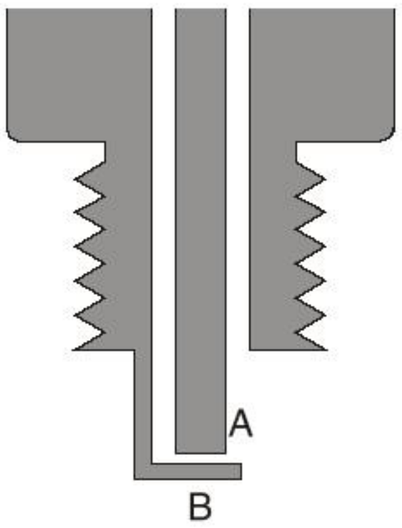
5.08 Hur stor är den elektriska kraften på en elektron om $E = 12\,000$ N/C?

5.09 Spänningen mellan två elektriskt laddade plattor är 450 V. Avståndet mellan plattorna är 8,0 cm. Hur stor är den elektriska fältstyrkan mellan plattorna?

5.10 I en punkt P i ett elektriskt fält påverkas en elektron av en elektrisk kraft på $8{,}8 \cdot 10^{-16}$ N rakt norrut.
- **a** Bestäm den elektriska fältstyrkan i P (storlek och riktning).
- **b** Hur stor skulle den elektriska kraften (storlek och riktning) bli på en proton i P?

5.11 Spänningen mellan två horisontella metallplattor är 180 V. Avståndet mellan plattorna är 12,0 cm. Den översta plattan är positiv.
- **a** Vilken riktning har det elektriska fältet mellan plattorna?
- **b** Hur stor är fältstyrkan mellan plattorna?
- **c** En partikel med den positiva laddningen $3{,}2 \cdot 10^{-18}$ C rör sig fritt genom fältet. Hur stor är den elektriska kraften på partikeln? Vilken riktning har kraften?

5.12 För att få till en gnista i det 0,70 mm breda gapet mellan elektroderna A och B på ett tändstift i en bilmotor måste fältstyrkan vara minst $3{,}0 \cdot 10^6$ V/m. Hur stor måste spänningen vara?



5.13 ★ På en voltmeter kan man avläsa att spänningen mellan två laddade plattor är 260 V. Avståndet mellan plattorna är 12 cm.

a Bestäm styrkan på det elektriska fältet mellan plattorna.

Avståndet mellan plattorna fördubblas.

b Hur förändras spänningen mellan plattorna?

c Hur förändras det elektriska fältet mellan plattorna?

5.14 ★ Beräkna den elektriska fältstyrkan på avståndet $5{,}29 \cdot 10^{-11}$ m från kärnan i en väteatom. (Det är på detta avstånd som elektronen normalt snurrar i sin bana, enligt Bohrs atommodell.) Vilken riktning har fältstyrkan?

5.15 ★ Om laddningen hos en metallkula blir så stor att den elektriska fältstyrkan vid kulans yta överstiger $3{,}0 \cdot 10^6$ V/m, blir luften runt kulan joniserad. Då börjar kulan att urladda sig till luften. Vilken är den största laddning en metallkula med radien 2,5 cm kan ha?

5.16 ★ Spänningen mellan två horisontella metallplattor är 16 kV. Avståndet mellan plattorna är 1,2 cm. En oljedroppe med massan $2{,}2 \cdot 10^{-13}$ kg svävar i vila i det elektriska fältet mellan plattorna.

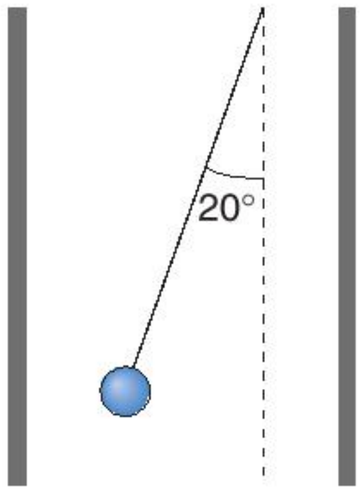
a Rita en figur som visar de krafter som verkar på oljedroppen.

b Beräkna laddningen på oljedroppen.

5.17 ★★ En liten kula har massan 10 g och laddningen $-2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C och hänger i en tunn och lätt tråd. När kulan placeras i det homogena elektriska fältet mellan två lodräta metallplattor, hänger den stilla som figuren visar.

a Beräkna den elektriska fältstyrkan (storlek och riktning) i det homogena fältet.

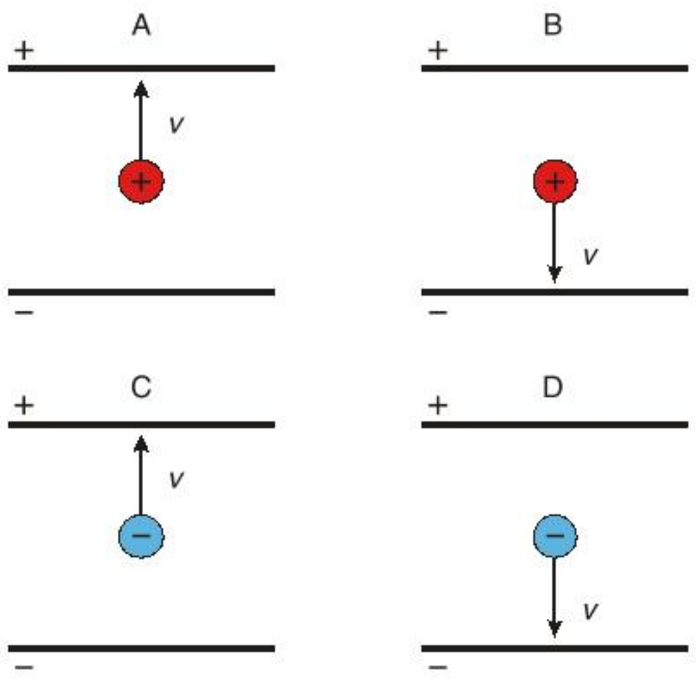
b Beräkna spänningen mellan plattorna när avståndet mellan dem är 8,5 cm.



Potentiell energi

5.18 I ett elektriskt fält med fältstyrkan 12 000 V/m rör sig en elektron längs med fältlinjerna. Hur mycket ändras elektronens potentiella energi när den rört sig 8,5 cm?

5.19 Figurerna visar en laddad partikel som rör sig i ett elektriskt fält.



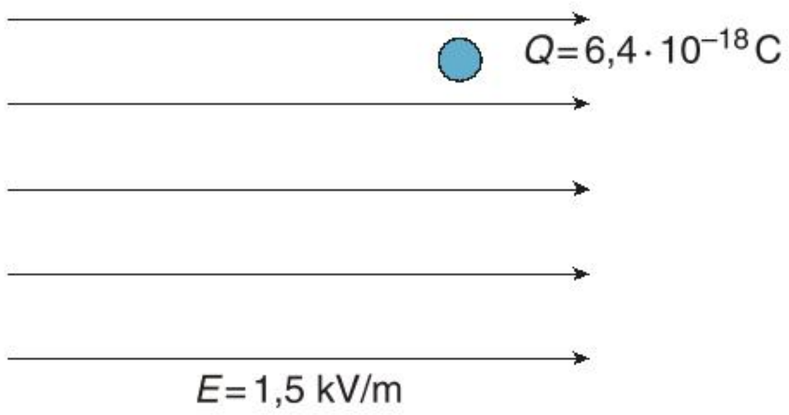
a Rita in riktningen för fältstyrkan E i var och en av figurerna. Rita sedan in den elektriska kraften F på var och en av partiklarna.

b Bestäm i vart och ett av fallen om partikelns potentiella energi W_p ökar, minskar eller är oförändrad.

5.20 En positiv laddning på $6{,}4 \cdot 10^{-18}$ C placeras i elektriskt fält med styrkan 1,5 kV/m.

a Hur stor är den elektriska kraften på laddningen?

★ **b** Laddningen flyttas 2,8 dm snett nedåt vänster i figuren (45° mot fältlinjerna). Hur stort arbete behöver man utföra för att flytta laddningen denna sträcka?

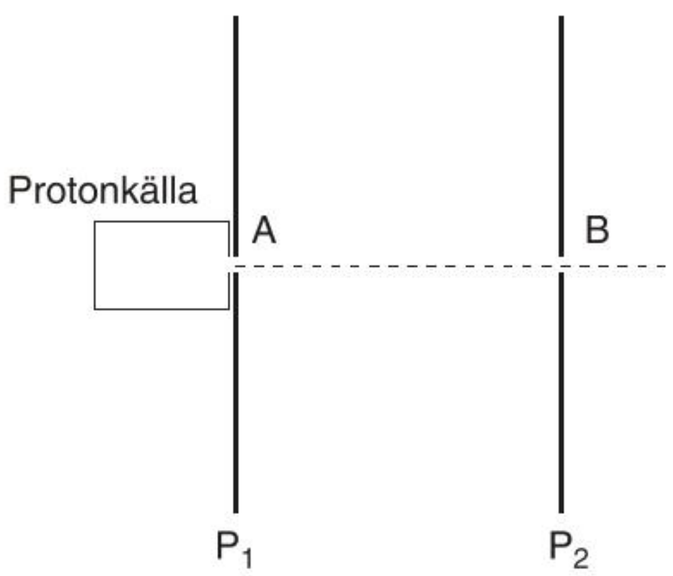


5.21 ★★ Protoner accelereras i det homogena elektriska fältet mellan två metallplattor P_1 och P_2 som befinner sig i vakuum. Fältstyrkan är 50 kV/m, och avståndet mellan plattorna är 4,0 cm. Vi lägger nollnivån för den potentiella energin vid P_2.

a Hur stor potentiell energi har en proton vid A?

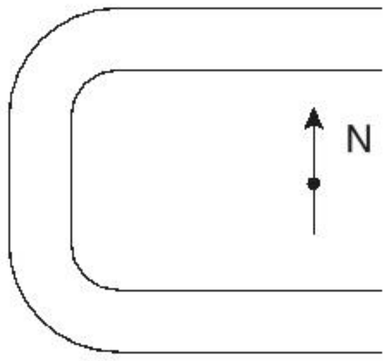
b Hur stor potentiell energi har protonen i punkten M mitt mellan A och B? Vilken hastighet har protonen i M?

c Vilken hastighet har protonen när den passerar B? Hur lång tid använder protonen från A till B?

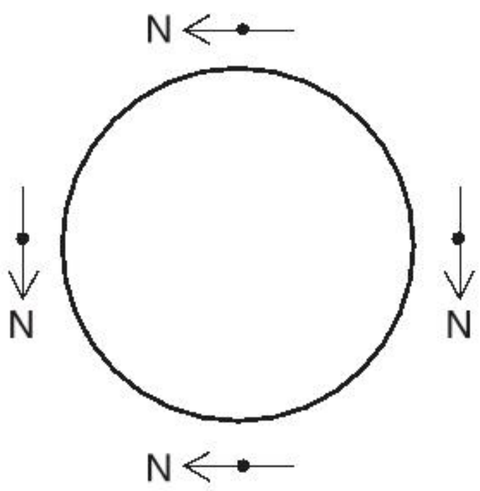


Magnetiska fält

5.22 Figuren visar hur en liten kompassnål ställer in sig i gapet på en hästskomagnet. Fundera ut var hästskomagneten har sin nordpol och sydpol.



5.23 En stängd kartong innehåller en stavmagnet. Figuren visar hur en liten kompassnål ställer in sig på fyra ställen i magnetfältet utanför kartongen. Fundera ut vilket läge stavmagneten kan ha inne i kartongen.



Strömledare i magnetfält

5.24 I ett försök med en strömvåg bestämde man magnetfältets styrka i sex olika mätningar. Resultatet blev:

Mätning nr	1	2	3	4	5	6
B/T	0,064	0,068	0,067	0,064	0,065	0,068

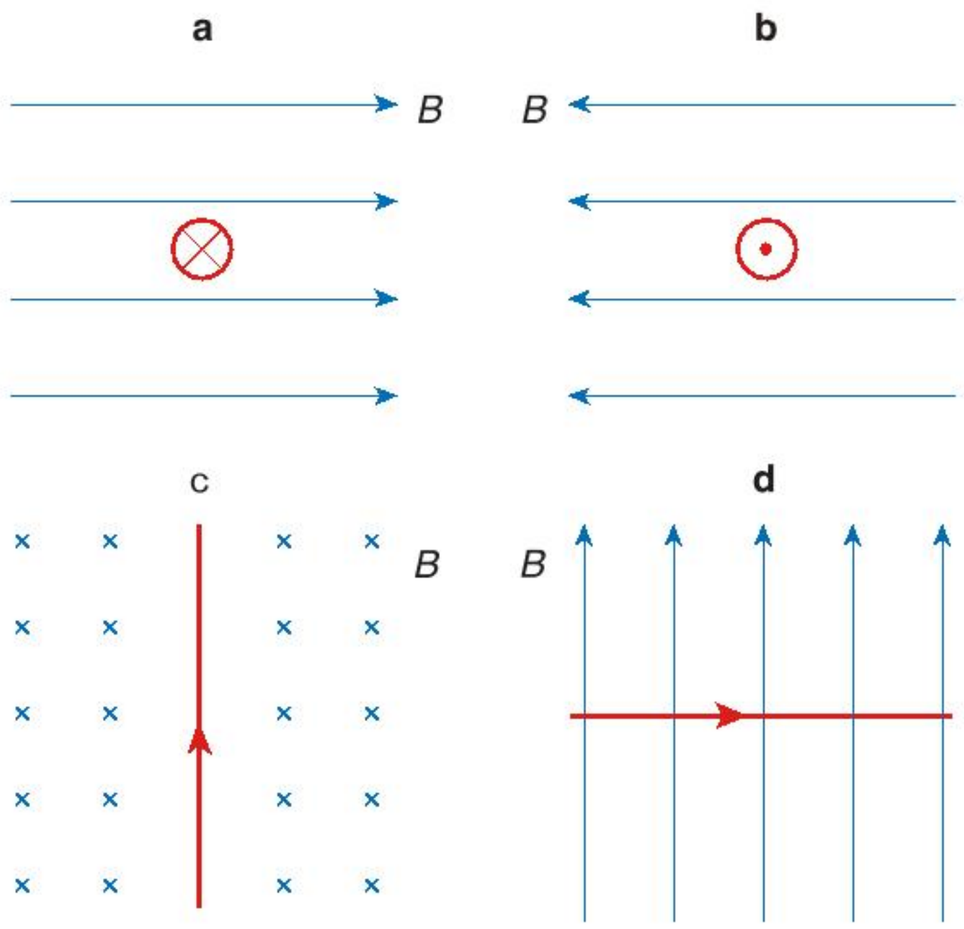
Bestäm ett värde på *B*. Ange också osäkerheten i värdet.

5.25 Beräkna vilka värden den magnetiska kraften på en 15 cm lång ledare kan anta. Ledaren befinner sig i ett magnetfält med $B = 0{,}065$ T och strömmen genom ledaren är 6,0 A.

5.26 **a** I en ledare med längden 0,100 m går det en ström på 3,0 A. Ledaren står vinkelrätt mot ett magnetfält med flödestätheten 0,067 T. Beräkna den magnetiska kraften på ledaren. Rita en figur som visar riktningen på strömmen, magnetfältet och kraften.

b En ledare med längden 2,5 cm hänger vinkelrätt mot magnetfältet i gapet på en hästskomagnet. När strömmen är 6,5 A påverkas ledaren av en magnetisk kraft på 18 mN. Beräkna flödestätheten i magnetfältet.

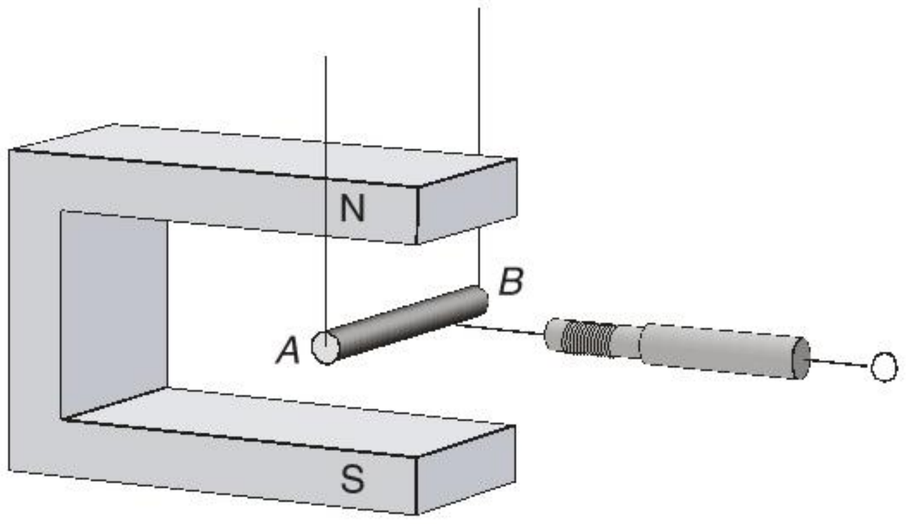
5.27 En strömledare är vinkelrät mot ett magnetfält. Bestäm riktningen på den magnetiska kraften i var och en av figurerna nedan. (I figur a markerar ⊗ strömriktning in i pappret. I figur b markerar ⊙ strömriktning ut från pappret.)



5.28 En kopparstav AB är 3,0 cm lång och hänger i gapet på en hästskomagnet. När det går ström genom kopparstaven, kan vi hålla staven på plats med en kraftmätare som figuren visar. När strömmen är 5,0 A, visar kraftmätaren 0,12 N.

a Beräkna flödestätheten i gapet på hästskomagneten.

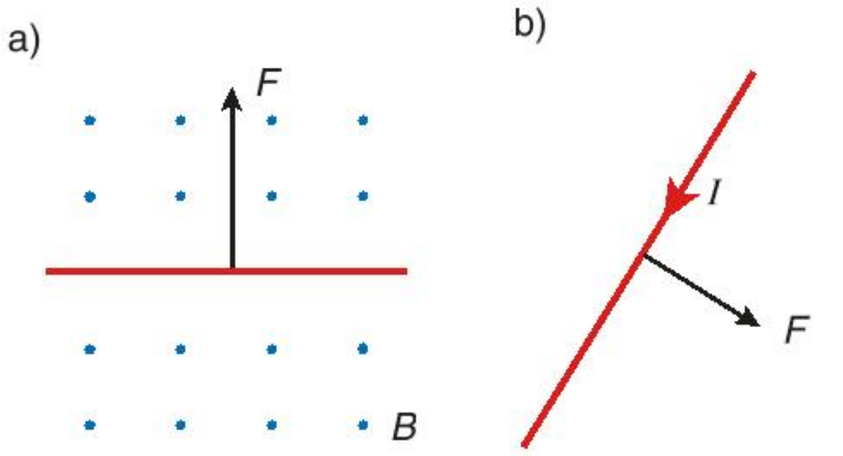
b Bestäm magnetfältets riktning, den magnetiska kraften och strömmen i staven.



5.29 En strömledare är vinkelrät mot ett magnetfält. Den magnetiska kraften på strömledaren är F.

a Bestäm strömriktningen i ledaren i figur a).

b Bestäm riktningen på magnetfältet som ledaren i figur b) är i.

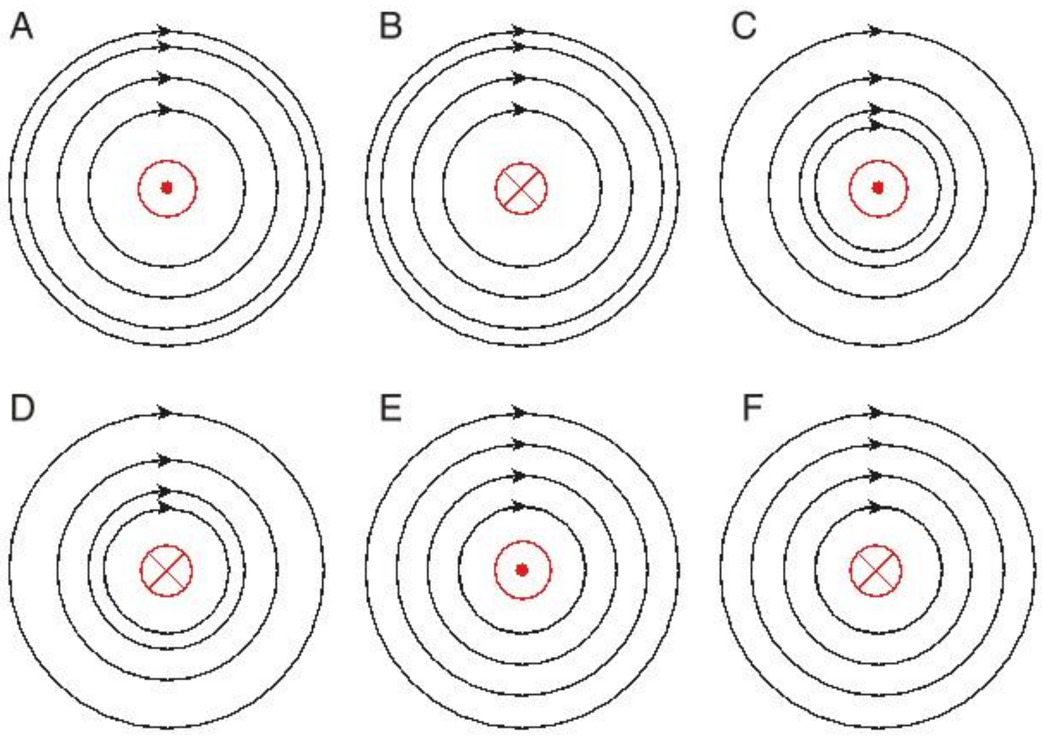


5.30 På en viss plats har det jordmagnetiska fältet en vågrät komposant som är 15 µT. Fältet bildar en vinkel på 68° med jorden. Beräkna det jordmagnetiska fältets styrka på platsen.

5.31 ★★ En 2,8 m lång tråd är monterad horisontellt på en plats där det jordmagnetiska fältet bildar en vinkel på 64° med tråden. Jordmagnetiska fältets styrka på platsen är 66 µT. Hur stor blir kraften på tråden om strömmen genom tråden är 7,2 A?

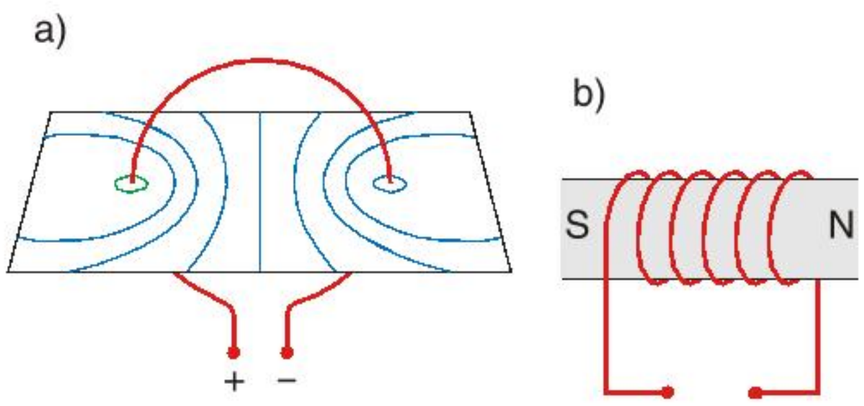
Magnetfält runt strömledare

5.32 Vilken av figurerna illustrerar bäst magnetfältet runt en rak, strömförande ledare som står vinkelrätt mot pappersplanet?



5.33 **a** Figur a visar de magnetiska fältlinjerna runt en cirkelformad strömslinga. Rita in fältriktningen.

b Bestäm strömriktningen i spolen i figur b. Rita in några av fältlinjerna inne i spolen.



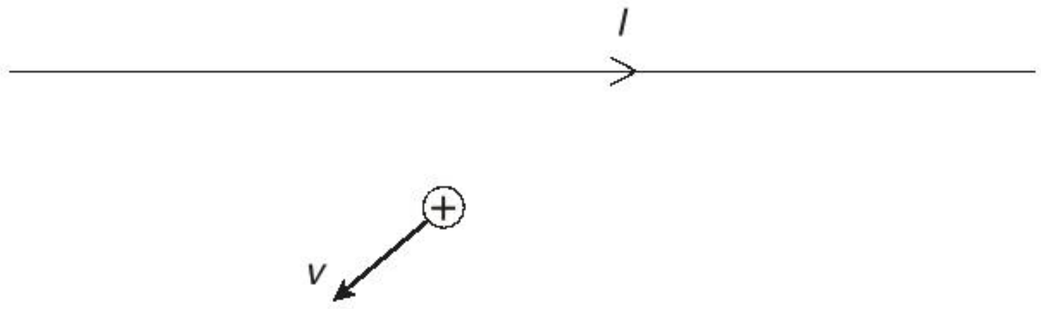
5.34 Hur starkt är det magnetiska fältet på 28 cm avstånd från en elektrisk ledare i vilken det går 12,8 A?

5.35 12 cm ifrån en elektrisk ledare mäter man upp den magnetiska flödestätheten till 6,4 μT.

a Hur stor ström går det i ledaren?

b Hur stor är flödestätheten 22 cm från ledaren?

5.36 ★ En positivt laddad partikel rör sig i magnetfältet runt en rak strömledare. Se figuren. Rita in den magnetiska kraften på partikeln.



5.37 ★★ Hur stor är den magnetiska kraften mellan två 85 cm långa parallella ledare på 46 cm avstånd ifrån varandra om strömmen i vardera ledaren är 23 A?

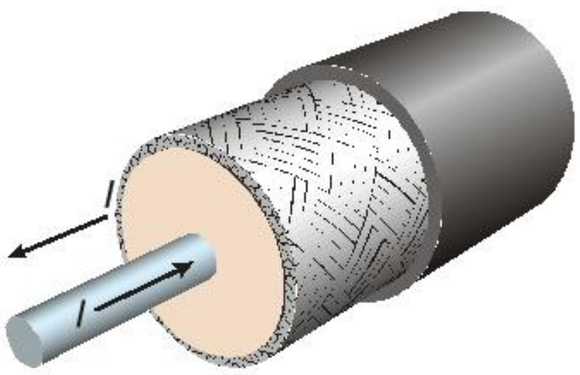
DISKUTERA FYSIK

1 Månen rör sig runt jorden i en cirkulär bana. Den hålls kvar i sin bana av jordens gravitationskraft. Uträttar jordens gravitationskraft ett positivt, negativt eller inget arbete alls på månen?

2 Varför använder vi formeln $F = mg$ för gravitationen på ett föremål nära jordytan men formeln $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ när föremålet är långt ifrån jorden?

3 Kim och Kristina har var sin magnet och vill undersöka vilken magnet som är starkast. Efter noggranna experiment finner de att Kristinas nordpol är starkare än Kims nordpol. Kim är inte nöjd utan påstår att det därmed inte är bevisat vilken magnet som är starkast. Kims sydpol kan ju vara starkare än Kristinas? Kan du avgöra vem som har den starkaste magneten?

4 En koaxialkabel består av en ledare inuti en cylindrisk ledare. De två ledarna är åtskilda av ett isolerande material. Mittledaren transporterar strömmen åt ena hållet och den cylindriska ledaren åt det andra hållet. Vad är fördelen med att använda en koaxialledare? Hur är det magnetiska fältet utanför ledaren?



5 En strömförande ledare passerar genom ett speciellt område där det inte verkar någon kraft på den. Kan vi då sluta oss till att det inte finns något magnetiskt fält i detta område?

6 Kommer en spik att attraheras av båda ändar på en magnet. Förklara vad som händer inuti spiken när den placeras nära magneten.

7 Varför ska man inte slå med en hammare på en magnet?

8 Parallella trådar påverkar varandra med magnetiska krafter. Hur är det om trådarna är vinkelräta mot varandra? Föreställ dig två trådar orienterade vinkelrät mot varandra så att de nästan rör vid varandra. Det går en ström i båda ledarna. Är där en kraft mellan ledarna?

9 Två järnstänger attraherar varandra. Trots att en av stängerna vänds 180° attraherar stängerna varandra fortfarande? Hur är detta möjligt?

10 Varför ska man inte ha magneter i närheten av inspelade band?

11 Kan elektriska fältlinjer någonsin korsa varandra?

12 Vi önskar bestämma det elektriska fältet i en punkt nära en positivt laddad metallsfär. Vi för en liten testladdning till punkten och mäter kraften F på den. Kommer F/q vara större, mindre än eller lika med elektriska fältet E som det var i punkten innan vi förde dit testladdningen?

13 Vi har sett att ett elektriskt fält måste finnas i en ledare som leder ström. Hur är detta möjligt med tanke på att i det elektrostatiska fallet, dvs. när laddningarna är i vila, säger vi att det inte finns något fält inuti ledaren?

14 Anta att man valt att mäta små energier i protonvolt istället för i elektronvolt. Vilken skillnad skulle det ha gjort?

RESONERA FYSIK

1 Gravitationskraften på ett föremål är F när föremålet har avståndet r från jordens centrum.
- **a** Hur stor blir gravitationskraften (uttryckt i F) om föremålet flyttas till avståndet $2r$ från jordens centrum?
- **b** Till vilket avstånd (uttryckt i r) måste vi flytta föremålet för att gravitationskraften ska bli $F/2$?

2 Två föremål A och B dras mot varandra på grund av gravitationskraften. Föremål A är dubbelt så tungt som föremål B. Allteftersom de kommer närmare varandra kommer
- **a** kraften
- **b** accelerationen

I att öka lika mycket på båda.
II att minska lika mycket på båda.
III att vara oförändrad.
IV på A att öka mest.
V på B att öka mest.
VI går inte att avgöra eftersom vi inte vet något om massorna.

3 Astronauterna i en rymdfärja som går i en bana runt jorden påverkas

I alltid av jordens dragningskraft.
II aldrig av jordens dragningskraft.
III av jordens dragningskraft när de är så långt borta som möjligt från solen.
IV av jordens dragningskraft när de är så nära solen som möjligt.

4 Hur långt ut måste du färdas för att komma bort från jordens gravitationsfält?

I Utanför jordens atmosfär.
II Bortom månen.
III Bortom solen.
IV Utanför Vintergatan.
V Du kommer aldrig bort från fältet.

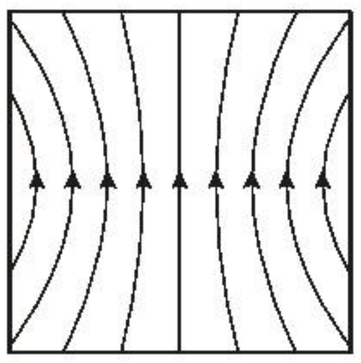
5 En guldhandlare tänker tjäna pengar på att köpa guld på ett ställe på jorden och sälja det på ett annat ställe för samma pris per kg. Han ska köpa guldet

I på en plats vid ekvatorn och sälja det vid polerna.
II på en plats vid polerna och sälja det vid ekvatorn.
III på toppen av Himalaya och sälja det någonstans vid ekvatorn.
IV någonstans vid ekvatorn och sälja det på toppen av Himalaya.
V Han kommer aldrig att kunna tjäna några pengar på sin tanke oberoende av hur mycket guld han köper.

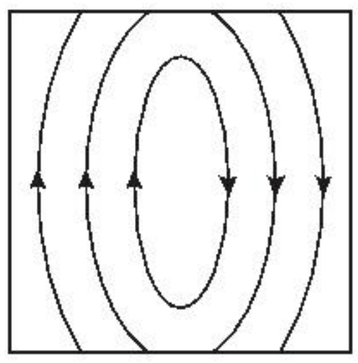
6 En elektron accelereras från vila av en spänning på 100 V. Hur mycket större kommer dess slutthastighet att vara om den accelereras av en fyra gånger så stor spänning?

A 1
B $\sqrt{2}$
C 2
D 4
E 8

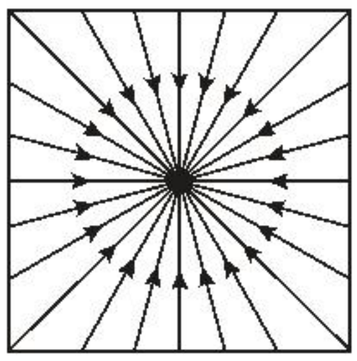
7 I figurerna nedan visas fyra olika elektriska fältmönster. Ingen laddning finns i det visade området. Vilket eller vilka av mönstren är möjliga?



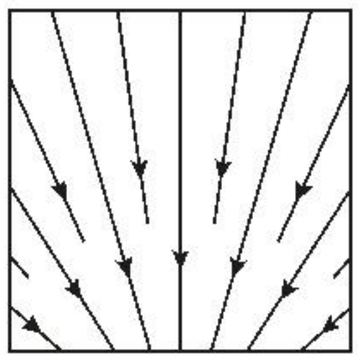
A



B



C

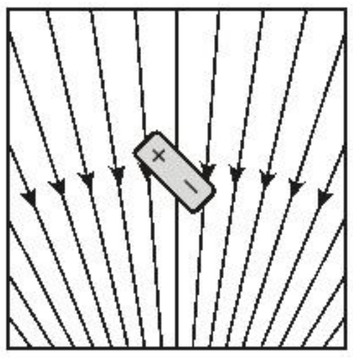


D

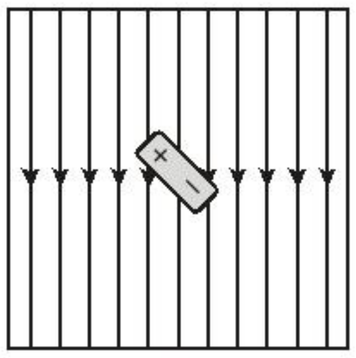
8 Två lika stora laddningar men med motsatta tecken, kallas en elektrisk dipol. I figurerna nedan visas hur en elektrisk dipol placeras i ett yttre fält. I vilket eller vilka av fallen är

a den resulterande kraften på dipolen 0?

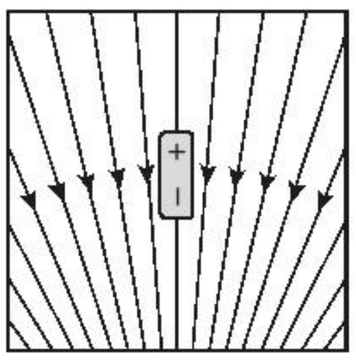
b det resulterande kraftmomentet på dipolen 0?



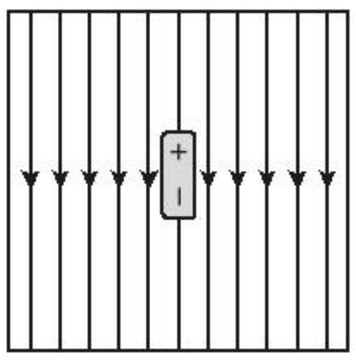
A



B



C



D

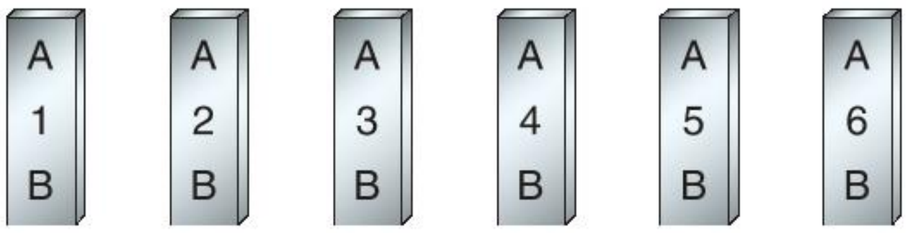
9 Stina har sex till formen likadana föremål, som antingen är magneter eller järnföremål. Hon numrerar föremålen 1 till 6 och markerar A och B på föremålens ändar.

Hon tar och undersöker om föremålen påverkar varandra och kommer fram till att:

- Änden 1A attraherar änden 2B
- Änden 1B repellerar änden 3A
- Änden 2B attraherar änden 3B

a Vilket/vilka av föremålen är med säkerhet en magnet?

b Hur skulle änden 2A påverka 3A?



Hon kommer också fram till att:

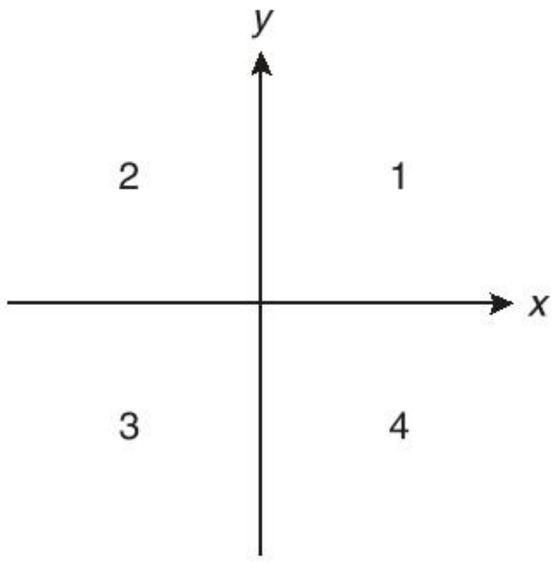
- Änden 4A attraherar änden 5A
- Änden 5A attraherar änden 6B
- Föremål 4 och 6 påverkar inte varandra

c Vilken/vilket av föremålen är med säkerhet en magnet?

10 En strömförande ledning går i x-axelns riktning och en annan i y-axelns riktning. I båda ledarna går strömmen i axelriktningen. I vilken kvadrant är det magnetiska fältet alltid riktat

a uppåt?

b nedåt?



c Finns det någon punkt där det resulterande fältet är noll?

11 Källan till all magnetism är

A små bitar av järn
B små domäner med likriktade "atomer"
C ferromagnetiska ämnen
D elektriska laddningar i rörelse
E alla alternativen A-D ovan
F inget av alternativen A-D ovan.

12 Magnetiska domäner förekommer oftast i

A järn
B koppar
C guld
D silver

13 Jordens magnetiska nordpol ligger närmast

A jordens nordpol
B ekvatorn
C jordens sydpol

14 Magnet A har dubbelt så starkt magnetiskt fält som magnet B. På ett visst avstånd attraherar magnet A magnet B med kraften 40 N. Med hur mycket påverkar magnet B magnet A?

A inte alls
B med 20 N
C med 40 N
D med 80 N
E med mer än 80 N

15 Om en magnet flyttas från norra halvklotet till södra halvklotet kommer dess kompassnål att ändra riktning

A 180°
B 90°
C inte alls
D beror på var man är

16 Flera metallgem hänger ner från nordpolen på en magnet. Det nedersta gemetets undre ände är

A en nordände
B en sydände
C en nordände eller sydände. Det beror på gemet ovanför.

UPPSKATTA FYSIK

1 Anta att jorden och solen inte är elektriskt neutrala utan att solen har N st överskottselektroner och jorden N st överskottsprotoner. Uppskatta det största värde N kan anta om vi antar att Coulombkraften måste vara mindre än 1 promille av gravitationskraften (annars skulle inte gravitationskraften beskriva planetrörelserna så bra).

2 I planeringen av ett stort interstellärt party erbjuder sig jorden frivilligt att ta med isbitar till de olika drinkarna. Isen hämtas från sydpolen, där den mesta isen finns. Islagret är där i medeltal 2 km tjockt. Hur många drinkar skulle kunna serveras med is som finns naturligt på jorden?

3 Oskar och hans familj är ute med sin stora segelbåt. När Oskar en dag står nere i kajutan och lagar mat kommer han att tänka på att kompassen däruppe befinner sig rakt ovanför ledningen från bilbatteriet till en av lamporna nere i kajutan. Han börjar fundera på hur mycket magnetfältet från ledningen kan påverka kompassen. Han kan så mycket fysik att han vet att det beror på vilken riktning båten går i. Hjälp honom att uppskatta hur stor avvikelsen kan bli som mest.

TESTA DIG I FYSIK

1 I en elektrisk ledare, som är placerad vinkelrätt mot ett magnetfält på 25 mT, går det en ström på 12,4 A. Hur lång är ledaren om den påverkas av en kraft på 0,25 N?

2 Bestäm den attraktiva kraften mellan en personbil som väger 1,2 ton och en lastbil som väger 6,8 ton när personbilens tyngdpunkt är 12 m bakom lastbilens tyngdpunkt.

3 En typisk vit dvärg, en stjärna som en gång i tiden var en vanlig stjärna som vår sol, är stor som månen men tung som solen. Hur stor är *g* på dess yta.

4 På vilket avstånd från en lång rak ledare, i vilken det går 4,0 A, är det magnetiska fältet lika starkt som det jordmagnetiska fältet på 54 μT?

5 En 1800 kg tung geostationär satellit befinner sig ungefär 5,6 jordradier ut från jordytan. Hur stor är gravitationskraften på satelliten?

6 För att föra en positiv laddning från en horisontell platta upp till en annan går det åt 78 nJ. Spänningen mellan plattorna är 540 V. En av plattorna är negativt laddad och den andra positivt.

a Vilken av plattorna är positivt laddad?

b Hur stor är den positiva laddningen?

7 Stig har fyra till formen likadana föremål, som antingen är magneter eller järnföremål. Han numrerar föremålen 1 till 4 och markerar A och B i föremålens ändar. Om något av föremålen är en magnet så är A och B de magnetiska ändarna. Han tar och undersöker om föremålen påverkar varandra och finner att:

- Änden 2A attraherar änden 3A
- Änden 2A påverkar inte mittpunkten på 4
- Änden 2A repellerar änden 1B

a Vilket/vilka av föremålen är med säkerhet magnet?

b Hur skulle mittpunkten på 1 påverkas av änden 2A? Finns det mer än en möjlighet med avseende på de fakta du har?

8 En 4,0 m lång homogen tråd av koppar ansluts till en spänning på 44 V.

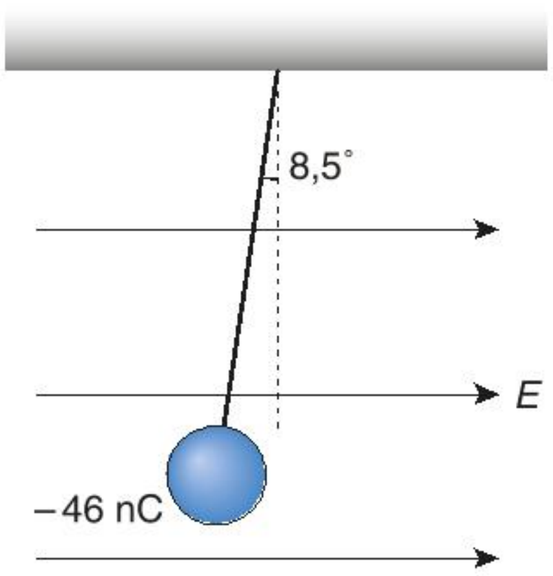
a Beräkna fältstyrkan i tråden?

b En identisk tråd ansluts parallellt med den första. Hur stor blir nu fältstyrkan i den ursprungliga tråden?

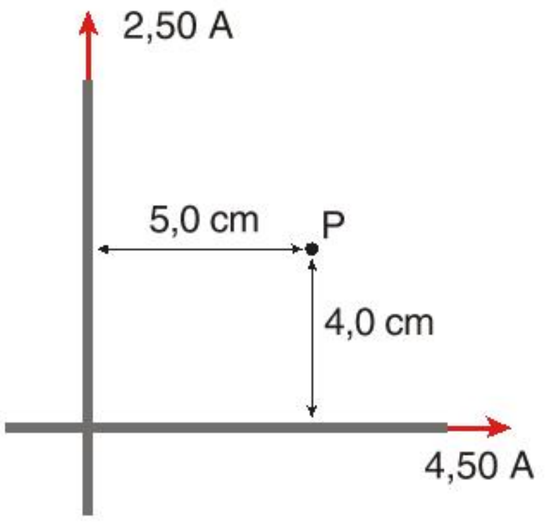
c En identisk tråd ansluts i serie med den första så att den totala spänningen över båda trådarna blir 44 V. Hur stor blir nu fältstyrkan i den ursprungliga tråden?

d ★ En koppartråd med dubbelt så stor radie ansluts i serie med den ursprungliga tråden så att den totala spänningen över båda trådarna blir 44 V. Hur stor blir nu fältstyrkan i den ursprungliga tråden?

9 ★★ En 1,4 g tung kula med laddningen –46 nC hänger i en 16,0 cm lång tråd. Se figur. Ett horisontellt elektriskt fält kopplas på så att vinkeln mellan tråden och ett vertikalt plan är 8,5°. Bestäm fältets styrka.



10 ★ I en elektrisk krets korsar två långa raka ledare varandra. Se figur. Hur stor blir den resulterande magnetiska flödestätheten i punkten P?

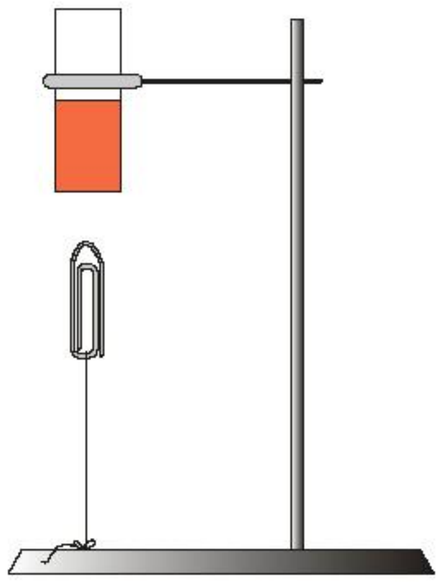


11 ★★ I två långa raka parallella ledare på 15 cm avstånd går strömmarna i rakt motsatta riktningar. Strömmen i den ena ledaren är 3,6 A och i den andra 1,0 A. Var ligger de punkter där den resulterande flödestätheten från de två ledarna är noll?

HEMLABORATIONER

Svävande gemet

Montera en magnet vertikalt i ett stativ. Tag sedan ett gem och fäst en tunn tråd i det. Fäst tråden, t.ex. i stativet, så att gemet "svävar". Ta till sist fram en sax av metall och klipp mellan magneten och gemet. Vad händer? Varför? Upprepa försöket med en sax av plast.

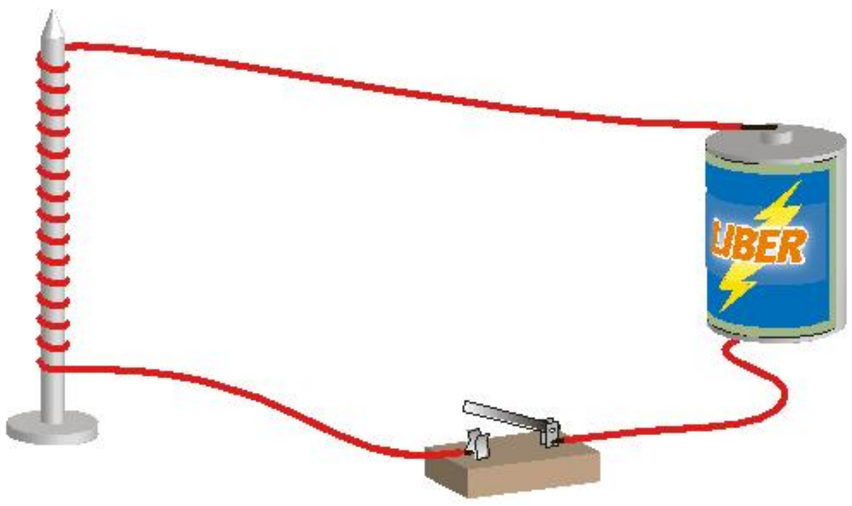


Gemet

Ta fram två metallgem, som inte attraherar varandra. Placera det ena gemet på ena sidan av en magnet. Låt det sitta där över natten. Ta sedan loss det och närma det till det andra gemet. Vad händer? Varför?

Elektromagneten

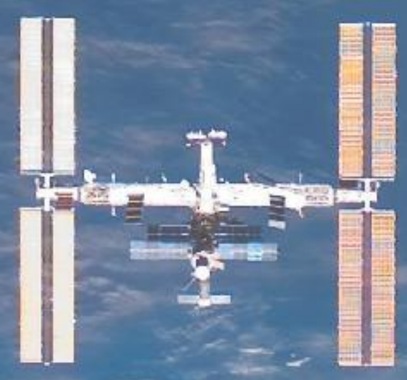
Vira ca 1 m av en tunn isolerad ledare runt en stor järnspik. Förbind tråden till ett batteri och en brytare. Se figur. Slut brytaren en kort stund och se hur många gem du kan "plocka" upp.



6 Rörelse i fält

Undervisningen i kursen ska behandla:

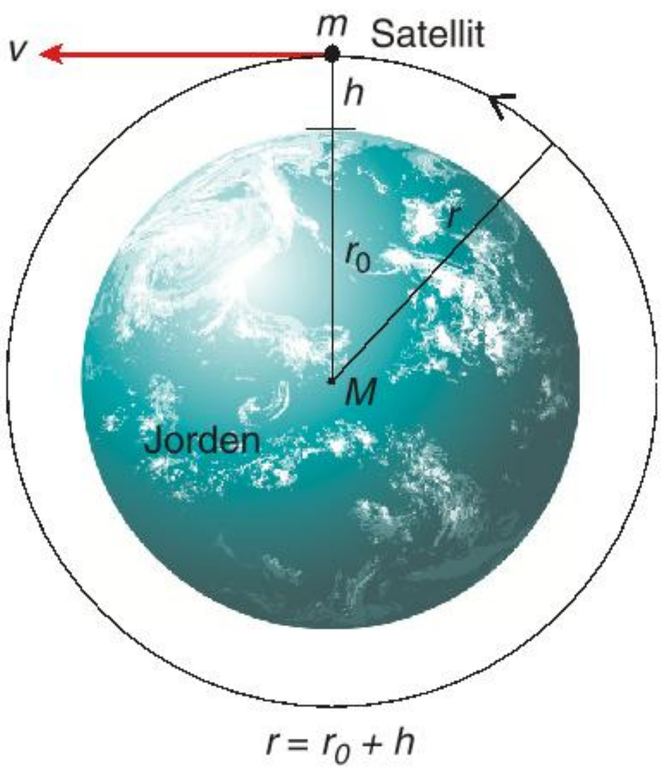
- **Tvådimensionell rörelse i elektriska fält**
- **Centralrörelse**
- **Samband mellan elektriska och magnetiska fält: rörelse av elektrisk laddning i magnetiskt fält**
- **Fysikaliska principer bakom tekniska tillämpningar för kommunikation och detektering**



Rörelse i gravitationsfält 215
Laddade partiklar i elektriska fält 218
Laddade partiklar i magnetfält 222
Elektronmassan 230
Orsakerna till magnetism 232
Uppgifter 235

6.1 Rörelse i gravitationsfält

År 1957 sände Sovjetunionen upp den första konstgjorda *satelliten*. Sedan dess har tusentals satelliter placerats i bana runt jorden. Rymdskepp med människor har sänts till månen, rymdsonder utan människor har landat på Mars och Venus, och andra rymdsonder har seglat förbi de yttersta planeterna i solsystemet. Newtons gravitationslag är grunden för att vi kan beräkna banorna för de satelliter och rymdsonder vi skickar upp.



6.1 Satellit i cirkelbana.

Omloppshastighet

Enligt Newtons gravitationslag $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$ kommer en satellit som kretsar runt jorden att följa en ellipsformad bana. Speciellt kan banan vara en *cirkel*, som är den enklaste av alla ellipser. Cirkelbanan är ofta en tillräckligt bra modell för verkliga satellitbanor.

En satellit med massan m cirklar runt jorden i en *cirkelformad* bana med radien r. Se figur 6.1. Vi ska bestämma en formel för *omloppshastigheten* v. Gravitationskraften ger satelliten en centripetalacceleration. Vi sätter in uttrycken för kraft och acceleration i Newtons andra lag $F = ma$ och får

$$G\frac{Mm}{r^2} = m\frac{v^2}{r}$$

där M är jordens massa och r är banradien. Vi dividerar med m och får omloppshastigheten v.

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Formeln visar oss två saker: Omloppshastigheten är *oberoende av satellitmassan,* och omloppshastigheten *minskar* när banradien ökar. Det första innebär att stora och små satelliter har samma hastighet när de cirklar på samma avstånd från jorden.

EXEMPEL 1 **Satellit som cirklar**

En satellit cirklar 1 600 km över havsytan. Hur stor är omloppshastigheten?

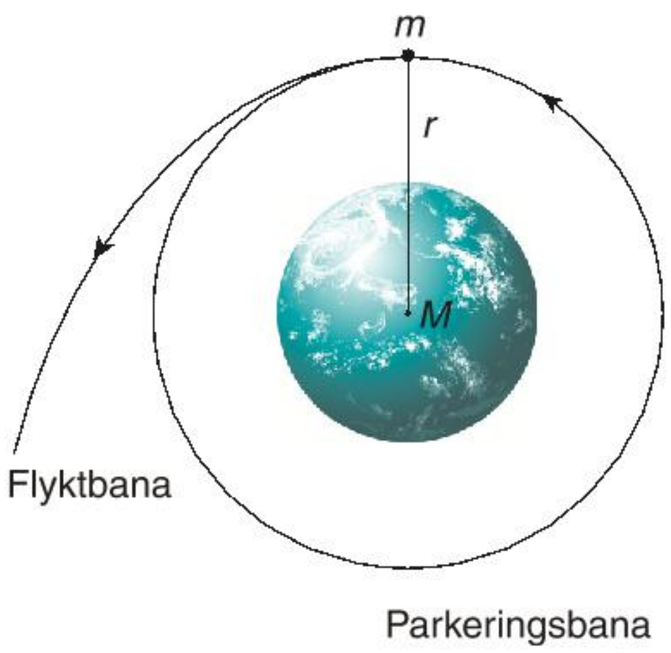
Lösning: Banradien på denna höjd är

$$r = r_0 + h = \left(6{,}37 \cdot 10^6 + 1{,}60 \cdot 10^6\right)\text{m} = 7{,}97 \cdot 10^6\,\text{m}$$

Omloppshastigheten blir därför

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}97 \cdot 10^{24}}{7{,}97 \cdot 10^6}}\ \text{m/s} = 7{,}1 \cdot 10^3\ \text{m/s}$$

Omloppshastigheten är alltså lika med 7,1 km/s på höjden 1 600 km över havet.



Satellit i parkeringsbana.

Lös ekvationen algebraiskt (med bokstäver) för den variabel du är intresserad av *innan* du sätter in tal. Då är det lättare att förstå hur själva fysiken hänger ihop och lättare för dig att gå tillbaka och kontrollera svaret.

EXEMPEL 2 **Geostationära satelliter**

Kommunikationssatelliter går i *geostationära* banor över ekvatorn. En sådan satellit håller sig hela tiden över *samma* punkt på ekvatorn. Den har alltså en varvtid som är lika med jordens rotationstid,

$T = 23\text{ h } 56\text{ min } 4\text{ s} = 8{,}62 \cdot 10^4\text{ s}$ (Se formelsamlingen)

Hur högt över havsytan går en geostationär satellit?

Lösning: Gravitationskraften från jorden gör att satelliten får en centripetalacceleration i sin cirkelrörelse kring jorden. Jordens dragningskraft på satelliten är

$F = G\dfrac{M \cdot m}{r^2}$ där M är jordens massa och m är satellitens massa.

Banhastigheten v i cirkelbanan kan skrivas:

$v = \dfrac{s}{t} = \dfrac{2\pi r}{T}$ där T är satellitens omloppstid.

Satellitens centripetalacceleration blir:

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{(2\pi r / T)^2}{r} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Enligt Newtons andra lag $F = ma$ gäller då att

$$G\frac{M \cdot m}{r^2} = m \cdot \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Om du dividerar med m på båda sidor och löser ut r så får du

$$r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}97 \cdot 10^{24} \cdot \left(8{,}62 \cdot 10^4\right)^2}{4\pi^2}}\ \text{m} = 4{,}22 \cdot 10^7\ \text{m}$$

Vi drar bort jordradien och får höjden över havet,

$$h = r - r_0 = 4{,}22 \cdot 10^7\ \text{m} - 6{,}37 \cdot 10^6\ \text{m} = 3{,}58 \cdot 10^7\ \text{m}$$

Det betyder att geostationära satelliter går cirka 36 000 km över jordytan vid ekvatorn.



Reparation av kommunikationssatellit

KONTROLLFRÅGOR

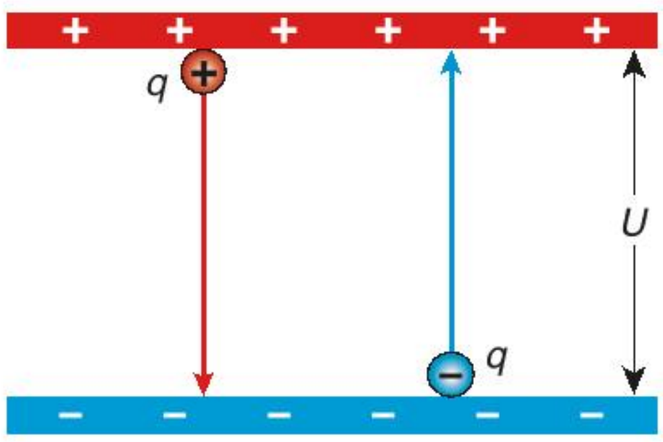
- Vilken roll spelar massan för en satellits omloppshastighet?
- Vad kan man säga om en satellits omloppshastighet när banradien minskar?
- Vad menas med en geostationär satellit?
- Hur högt över jordytan måste en satellit befinna sig vid ekvatorn för att vara geostationär?

6.2 Laddade partiklar i elektriska fält

Efter att ha studerat rörelser i gravitationsfältet ska vi nu titta på laddade partiklar som rör sig i ett *elektriskt* fält, till exempel elektroner i ett TV-rör.

Längs fältet

En partikel med laddningen q rör sig parallellt med fältlinjerna i ett elektriskt fält. Se figur 6.2. Partikeln påverkas av en elektrisk kraft F som utför ett arbete W på partikeln.



6.2 En laddad partikel startar från vila och rör sig längs en elektrisk fältlinje.

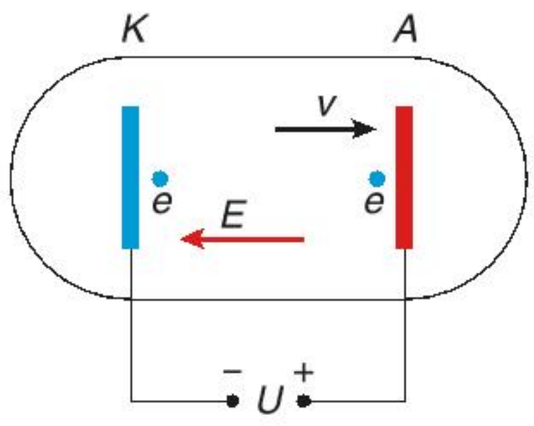
ELEKTRISKT ARBETE

När en laddad partikel flyttar sig i ett elektriskt fält, fås arbetet för den elektriska kraften av

$$W = qU$$

där U är spänningen mellan startpunkten och slutpunkten.

Om partikeln *bara* påverkas av den kraften och dessutom startar från vila, kan vi beräkna den kinetiska energin W_k som partikeln får i fältet.



6.3 Ett enkelt elektronrör.

EXEMPEL 3 **Elektronrör**

Spänningen mellan katoden och anoden i ett elektronrör är 250 V. Se figur 6.3.

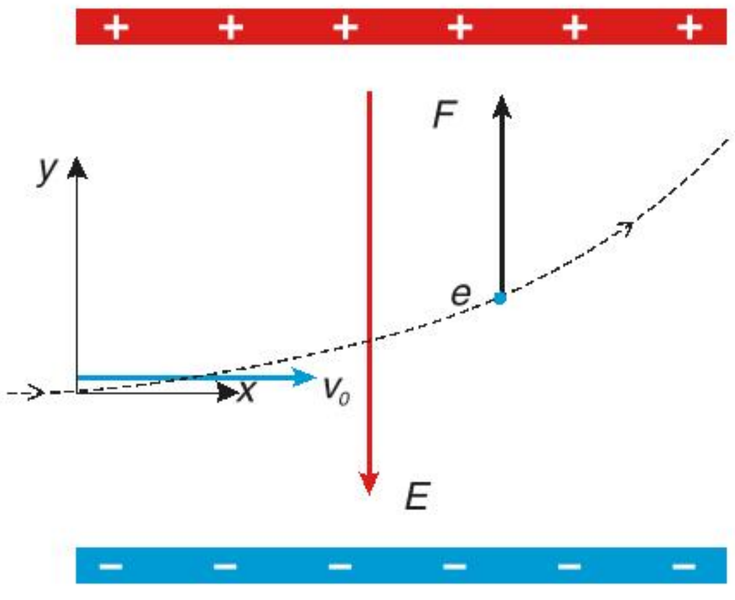
Vi tänker oss att det finns elektroner i vila strax utanför katoden. Hur hög hastighet får en elektron vid anoden?

Lösning: Ur energiformeln $\frac{1}{2}mv^2 = eU$ får vi hastigheten

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 250}{9{,}11 \cdot 10^{-31}}}\ \text{m/s} = 9{,}4 \cdot 10^6\ \text{m/s}$$

Den hastigheten är 3,1 procent av ljushastigheten!

Hittills har vi studerat elektroner som rör sig *längs* en elektrisk fältlinje. Nu ska vi skicka in elektroner i ett elektriskt fält, *vinkelrätt* mot fältlinjerna.



6.4 Elektroner i homogent fält.

På tvärs mot fältet

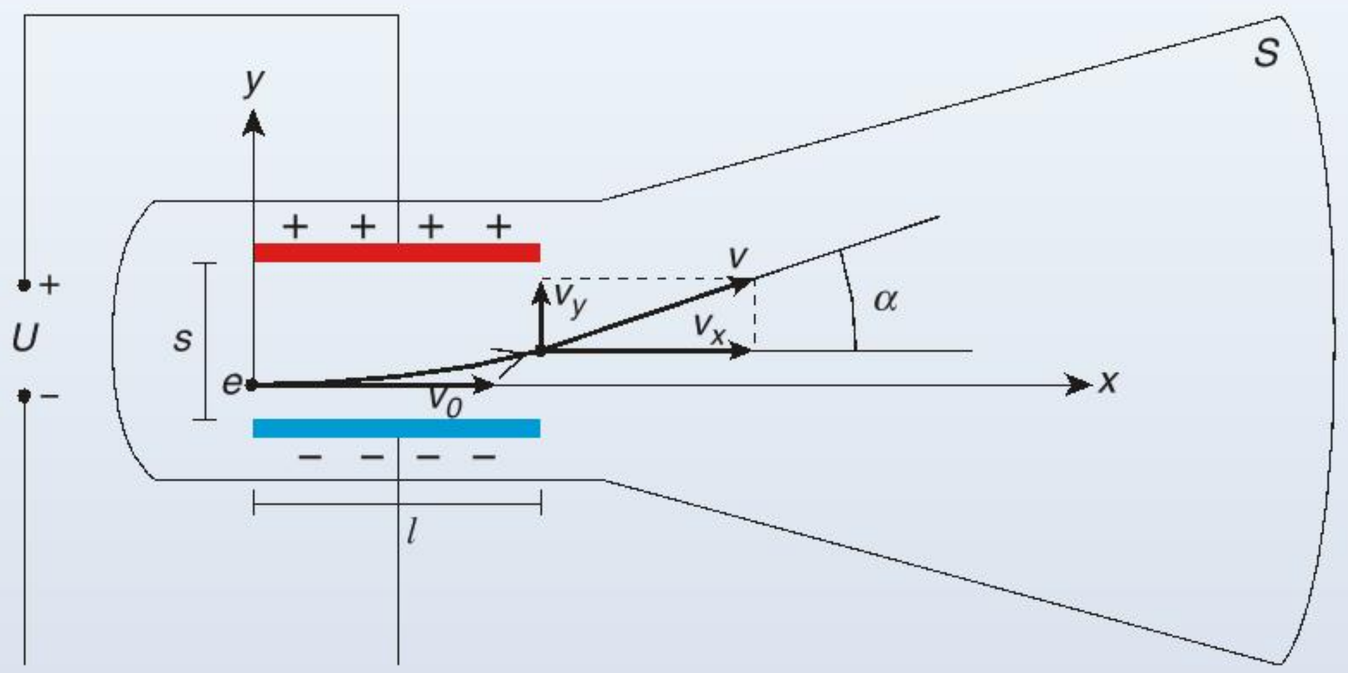
En elektronstråle kommer med den horisontella hastigheten v_0 in i ett homogent elektriskt fält mellan två horisontella metallplattor. Den översta plattan är positiv. Elektronerna rör sig i vakuum. Vi vill studera elektronernas rörelse i det elektriska fältet och väljer ett koordinatsystem med origo i den punkt där elektronerna kommer in i fältet. Se figur 6.4.

Den elektriska fältstyrkan mellan plattorna pekar lodrätt neråt och är konstant. Den elektriska kraften på varje elektron är därför konstant och verkar lodrätt uppåt. Det innebär att alla elektronerna får en konstant acceleration a som pekar lodrätt *uppåt*.

6.5 Ett snabbt elektronkast.

EXEMPEL 4 **Vi kastar elektroner**

En elektronstråle kommer horisontellt in i ett homogent elektriskt fält mellan två horisontella metallplattor. Se figur 6.5.



Hastigheten är $v_0 = 8{,}0 \cdot 10^6$ m/s. Plattorna har längden $l = 5{,}0$ cm, avståndet mellan dem är $s = 3{,}0$ cm och spänningen mellan dem är $U = 60$ V. Den elektriska fältstyrkan E mellan plattorna pekar lodrätt neråt och har absolutvärdet

$$E = \frac{U}{s} = \frac{60}{0{,}030}\ \text{V/m} = 2{,}0 \cdot 10^3\ \text{V/m}$$

Den elektriska kraften F på varje elektron verkar lodrätt uppåt, och elektronen får en konstant acceleration a som pekar lodrätt uppåt och har absolutvärdet

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{3}}{9{,}11 \cdot 10^{-31}} \text{ m/s}^2 = 3{,}51 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2$$

Du ser att tyngdaccelerationen är helt oväsentlig i det här fallet.

Den horisontella hastigheten v_x är konstant. Genom det elektriska fältet använder elektronen tiden

$$t = \frac{l}{v_x} = \frac{5{,}0 \cdot 10^{-2}}{8{,}0 \cdot 10^{6}} \text{ s} = 6{,}25 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

På den tiden får elektronerna en lodrät hastighetskomposant uppåt med absolutvärdet

$$v_y = at = 3{,}51 \cdot 10^{14} \cdot 6{,}25 \cdot 10^{-9} \text{ m/s} = 2{,}19 \cdot 10^{6} \text{ m/s}$$

När elektronerna kommer ut ur det elektriska fältet, har de en hastighet v med absolutvärdet

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{8{,}0^2 + 2{,}19^2} \cdot 10^{6} \text{ m/s} = 8{,}3 \cdot 10^{6} \text{ m/s}$$

Riktningen α får vi ur

$$\tan\alpha = \frac{v_y}{v_x} = \frac{2{,}19}{8{,}0} \text{ som ger } \alpha = 15°$$

Hastigheten har absolutvärdet $8{,}3 \cdot 10^6$ m/s och pekar 15° snett uppåt höger.

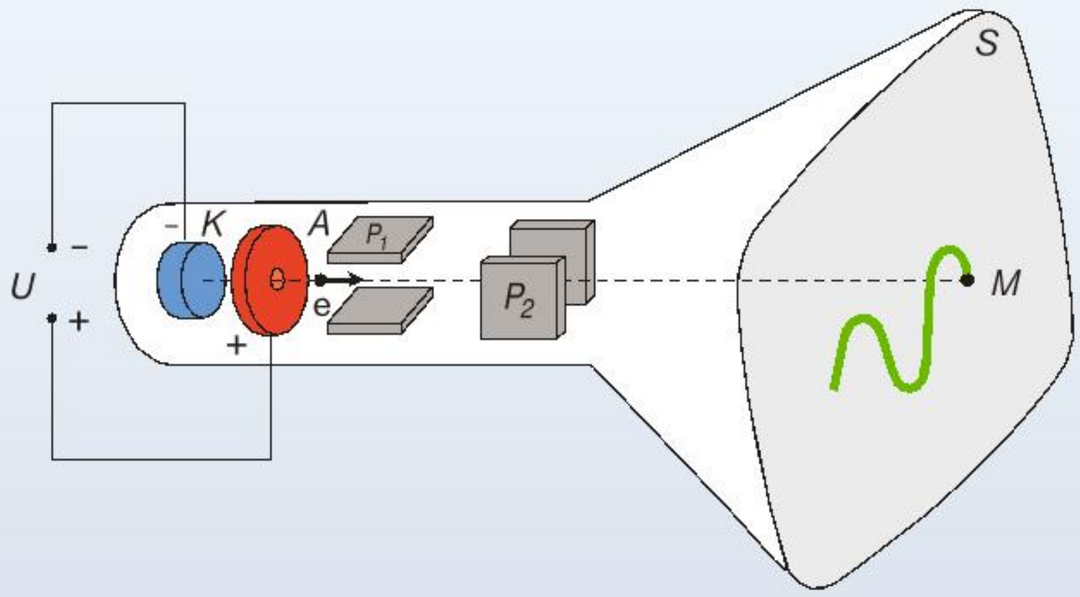
Inne i fältet får elektronerna en förskjutning lodrätt uppåt,

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \cdot 3{,}51 \cdot 10^{14} \cdot \left(6{,}25 \cdot 10^{-9}\right)^2 \text{ m} = 6{,}9 \text{ mm}$$

Allt detta kan du naturligtvis lösa grafiskt på räknaren. Kast i elektriskt fält är ju kvalitativt helt likt kast i tyngdkraftfältet. Kvantitativt skiljer det däremot rejält. Här var ju hastigheterna och accelerationerna enorma – och det är typiskt för partiklar i elektriska fält. Försök nu att lösa uppgiften grafiskt på räknaren på samma sätt som vi gjorde i samband med kast i tyngdkraftfältet!

EXEMPEL 5 **Oscilloskop**

Ett oscilloskop är en apparat som visar hur en spänning varierar med tiden. Se figur 6.6.



6.6 Oscilloskop. Katoden *K* värms upp och sänder ut elektroner. Elektronerna accelereras i ett starkt elektriskt fält mellan katoden *K* och anoden *A*. Elektronerna passerar ett litet hål i *A* och passerar ett lodrätt elektriskt fält vid plattparet P_1, och ett vågrätt elektriskt fält vid plattparet P_2. Slutligen träffar de skärmen *S*. Där ser vi en lysande fläck i mittpunkten *M* när det inte finns någon spänning över något av plattparen.

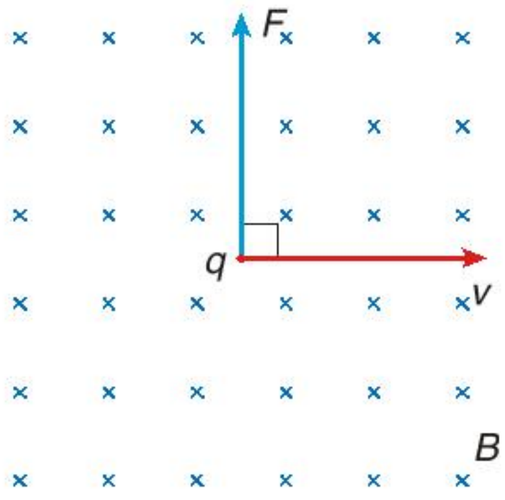
När vi lägger spänningen U_1 över plattparet P_1 uppstår ett elektriskt fält vinkelrätt mot elektronbanan. Elektronerna avböjs lodrätt uppåt eller neråt så länge de är i fältet. Därefter fortsätter de rätlinjigt tills de träffar skärmen i en punkt som ligger lite ovanför eller nedanför mittpunkten *M*.

Med en spänning U_2 över plattparet P_2 kan vi på samma sätt böja av strålen horisontellt.

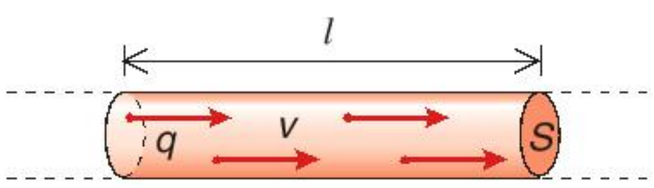
Om vi använder plattparet P_2 till att förskjuta ljusfläcken horisontellt, så ritar ljusfläcken en kurva på skärmen och visar hur spänningen U_1 över plattparet P_1 varierar med tiden.

KONTROLLFRÅGOR

- Hur förklarar du innehållet i formeln $W = qU$?
- Är det sant att två partiklar med olika massa, men med samma laddning, får lika stor kinetisk energi när de accelereras av samma spänning?
- Vilka slags banor följer elektroner när de kommer in vinkelrätt mot fältlinjerna i ett homogent elektriskt fält?
- En laddning på 0,68 nC accelereras av en spänning på 25 kV. Hur stort elektriskt arbete uträttas?
- Med hjälp av en spänning på 1 800 V tillförs en laddning ett elektriskt arbete på 7,2 mJ. Hur stor är laddningen?
- En elektron accelereras från vila av en spänning på 640 V. Hur hög hastighet har elektronen efter accelerationen?



6.7 Den magnetiska kraften på en positiv laddning q i ett magnetfält.



6.8 Laddningsbärare strömmar genom en ledare.

6.3 Laddade partiklar i magnetfält

En strömförande ledare i ett magnetfält påverkas av en magnetisk kraft. Kraften är inte beroende av vilket ämne ledaren är tillverkad av. Det tyder på att den magnetiska kraften verkar på de *elektriska laddningarna* som strömmar i ledaren. Försök visar att detta stämmer. En laddad partikel som rör sig i ett magnetfält, påverkas av en magnetisk kraft.

Vi ska studera det enklaste fallet, nämligen när laddningens hastighet bildar rät vinkel mot de magnetiska fältlinjerna. Från tidigare vet du att den magnetiska kraften på en strömförande ledare är vinkelrät mot magnetfältet och mot strömriktningen. Det betyder att den magnetiska kraften F på en laddning q som rör sig, är vinkelrät mot flödestätheten B och mot laddningens hastighet v. Se figur 6.7.

Föreställ dig nu en bit l av en rätlinjig ledare. Genom ledaren strömmar det N laddningsbärare, var och en med laddningen q och hastigheten v. Se figur 6.8. Laddningsbärarna är jämnt fördelade i ledaren. Vi ska härleda en formel för den magnetiska kraften på var och en av laddningarna.

Under tiden $t = l/v$ passerar alla N laddningsbärare ett fritt valt tvärsnitt S av ledaren. Under tiden t passerar alltså en total laddning $Q = Nq$ genom tvärsnittet S, och strömmen i ledaren blir

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{Nq}{\frac{l}{v}} = \frac{Nqv}{l}$$

Vi sätter in uttrycket för I i formeln $F = IlB$ och får den totala magnetiska kraften ΣF på alla laddningarna i ledaren:

$$\Sigma F = \frac{Nqv}{l} lB = NqvB$$

Den magnetiska kraften på en enskild laddning q med hastigheten v blir

$$F = \frac{\Sigma F}{N} = qvB$$

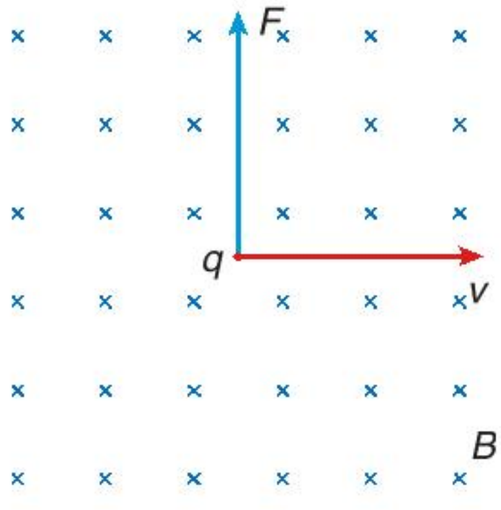
MAGNETISK KRAFT PÅ LADDAD PARTIKEL I RÖRELSE

En elektrisk laddning som rör sig vinkelrätt mot ett magnetfält, påverkas av en magnetisk kraft som är proportionell mot laddningens storlek, hastighet och mot den magnetiska flödestätheten.

$$F = qvB$$

Kraften är vinkelrät mot hastigheten och mot fältlinjerna.

Om laddningarna är positiva så kan du använda högerhandsregeln. Tänk däremot på att strömmens riktning och rörelseriktningen för negativa laddningar blir motsatta.



6.9 Proton i magnetfält.

EXEMPEL 6 **Kraft på proton i magnetfält**

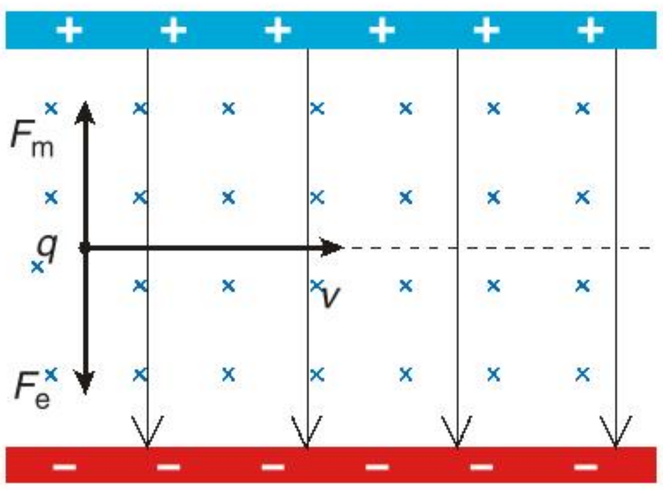
En proton rör sig med hastigheten $v = 9{,}4 \cdot 10^5$ m/s vinkelrätt mot ett magnetfält med flödestätheten $B = 8{,}0$ mT. Den magnetiska kraften på protonen har värdet

$$F = qvB = 1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 9{,}4 \cdot 10^5 \cdot 8{,}0 \cdot 10^{-3}\,\text{N} = 1{,}2 \cdot 10^{-15}\,\text{N}$$

Protonen har positiv laddning, och kraftriktningen får vi med hjälp av högerhandsregeln. Se figur 6.9.

Formeln $F = qvB$ gäller bara om hastigheten v är vinkelrät mot flödestätheten B. Den magnetiska kraften är *noll* när hastigheten är *parallell* med den magnetiska fältriktningen.

Korsande fält

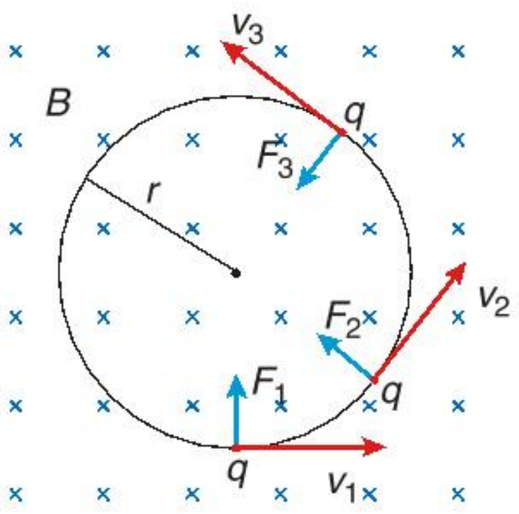


6.10 Positiv laddad partikel i korsande fält.

Ett homogent magnetfält med flödestätheten B och ett elektriskt fält med fältstyrkan E är vinkelräta mot varandra. Se figur 6.10. En partikel med positiv laddning q kommer in med hastigheten v vinkelrätt mot båda fälten. Partikeln påverkas av en magnetisk kraft F_m och en elektrisk kraft F_e som verkar i var sin riktning.

Partikeln kommer att röra sig *rätlinjigt* genom fälten om de två krafterna F_m och F_e är lika stora men motsatt riktade. Här sätter vi in $F_m = qvB$ och $F_e = qE$ som ger $qvB = qE$. Vi får då att hastigheten är $v = E/B$ när partikeln går rakt fram.

Om partikeln hade haft större hastighet än $v = E/B$, skulle den magnetiska kraften fått övertaget och partikeln skulle ha böjts av uppåt i figur 6.10. Hade hastigheten varit mindre än $v = E/B$, skulle partikeln ha böjts av nedåt. På detta sätt sorterar det korsande fältet ut de partiklar som har precis hastigheten $v = E/B$.



6.11 Laddningar går i en cirkelformad bana.

Cirkelrörelse

Den magnetiska kraften F på en laddning i rörelse är alltid vinkelrät mot hastigheten v. Krafter som är vinkelräta mot hastigheten, utför inte något arbete. Det betyder att den magnetiska kraften inte utför något arbete på laddningen. Om inte några andra krafter verkar, har laddningen konstant kinetisk energi och därför konstant banhastighet. Men hastigheten byter riktning, och därmed skiftar också riktningen på den magnetiska kraften.

Ett specialfall är när hastigheten v är vinkelrät mot flödestätheten B. Då blir banan en *cirkel*. Se figur 6.11. Vi ska härleda en formel för banradien. Den magnetiska kraften $F = qvB$ är då centripetalkraft. Vi får

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

Ur denna ekvation får vi banradien:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Fysiken har två sidor: den nyttiga och den nyfikna. Den nyfikna sidan, som vi ger mest utrymme i denna bok, går ut på att vi söker efter kunskap om oss själva och världen. Den nyttiga sidan går ut på att fysiken skapar skelettet i vår teknologiska kultur och därmed grunden för vårt materiella välstånd.

Låt oss stanna lite vid nyttan och ge ett exempel.

EXEMPEL 7 **Masspektrografen**

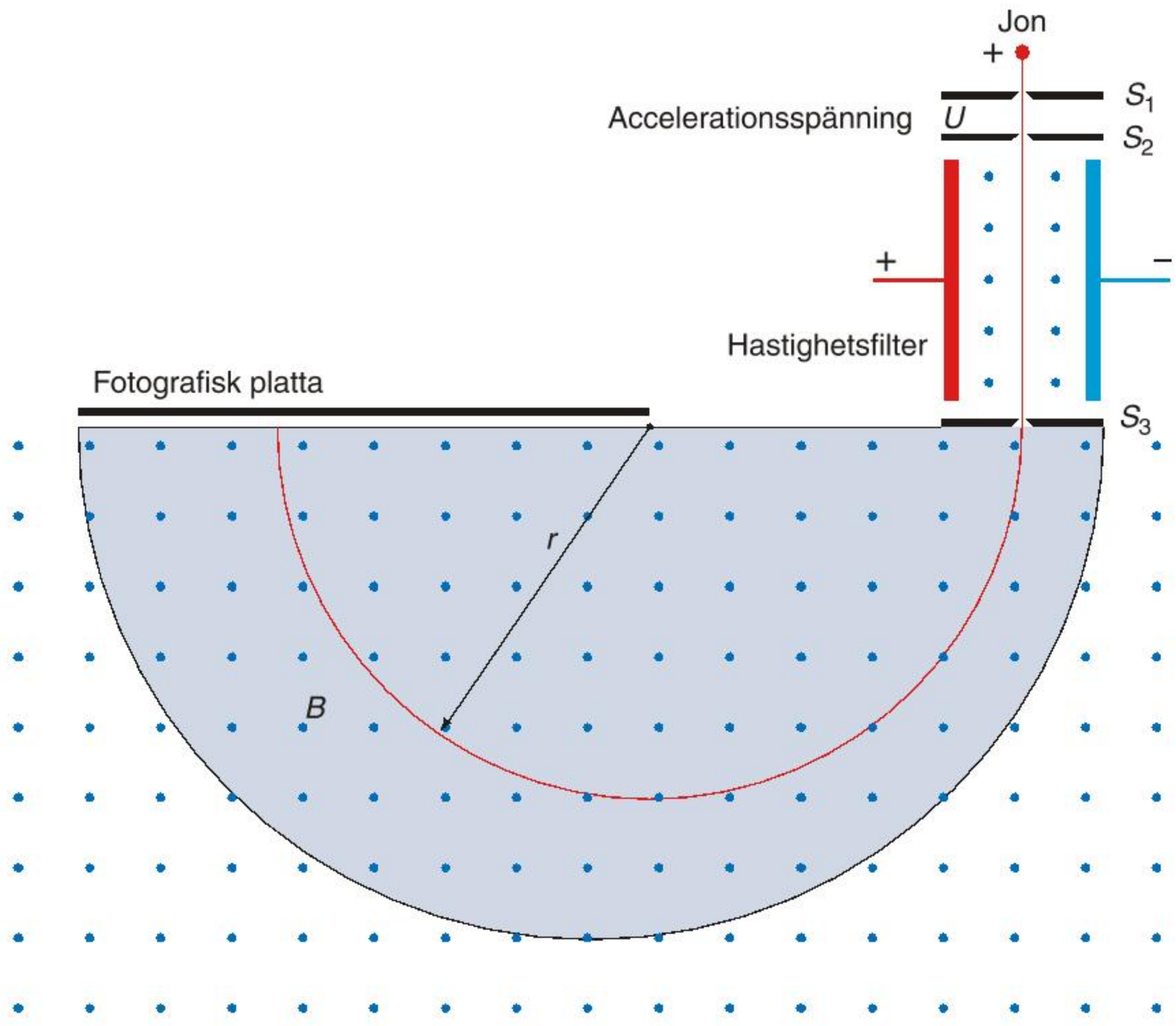
Det visar sig att uttrycket för banradien $r = mv/qB$ har stor praktisk betydelse. Ett exempel är *masspektrografi* som används när man analyserar den kemiska uppbyggnaden av ett ämne. Med en masspektrograf kan molekylärbiologerna snabbt hitta raden av aminosyror i en proteinmolekyl. Det ger oss en djupare förståelse av människokroppen, hur den fungerar och hur den kan repareras.

Hur fungerar detta mirakelinstrument? Först omvandlas ämnesproven till gas, därefter joniseras gasen i en elektronkanon. De positiva gasjonerna accelereras av en spänning, passerar ett hastighetsfilter och leds därefter in i ett magnetfält. Se figur 6.12. Jonerna avböjs av magnetfältet och träffar en detektor, till exempel en fotografisk plåt. Joner med samma laddning men olika massor

träffar plåten på olika ställen. Det var med detta instrument som det runt 1920 slogs fast att grundämnena består av olika isotoper. Senare har masspektrografen blivit ett oumbärligt instrument vid kemisk analys.

Nu finns det bärbara masspektrografer som kan påvisa kemiska föroreningar i atmosfären ned till en molekyl per miljard andra molekyler i luften (1 ppb). Ett internationellt samarbetsprojekt utvecklade en masspektrograf för rymdsonden *Mars Orbiter* som bland annat analyserade marsatmosfären. Genom att lära oss om marsatmosfären lär vi oss också om vår egen atmosfär och betingelserna för liv.

I oljebranschen och biokemin är masspektrografen flitigt använd. När du hör att en person är knuten till en brottsplats, är det ofta efter kemisk analys med hjälp av masspektrografi. Praktisk nytta och teoretisk nyfikenhet går hand i hand.



6.12 Masspektrograf. Jonerna accelereras i ett elektriskt fält, går genom ett hastighetsfilter, kommer in i magnetfältet och avböjs med olika radier beroende på massa och jonladdning.

EXEMPEL 8 **Vilken jon? Masspektrografen ger svaret.**

En positiv jon med laddningen $q = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C accelereras från vila av en spänning på $U = 90$ V. Så kommer jonen in i ett homogent magnetfält med flödestätheten $B = 0{,}028$ T. Fältet är vinkelrätt mot jonens hastighet. Rörelsen sker i vakuum. Jonbanan i magnetfältet blir en cirkel med radien $r = 4{,}90$ cm. Vi vill beräkna jonens massa.

Lösning: Jonen får en kinetisk energi som är lika med det arbete den elektriska kraften utför på jonen:

$$\frac{mv^2}{2} = qU$$

När jonen kommer in i magnetfältet, blir banan en cirkel. Ur sambandet

$qvB = \dfrac{mv^2}{r}$ kan vi lösa ut v. Då får vi $v = \dfrac{qrB}{m}$.

Låt oss nu sätta in detta uttryck för hastigheten i uttrycket för den kinetiska energin. Vi får

$\dfrac{mq^2r^2B^2}{2m^2} = qU$. Här löser vi ut m och får

$$m = \frac{qr^2B^2}{2U} = \frac{1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot (4{,}90 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0{,}028^2}{2 \cdot 90}\ \text{kg} = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$

Jonen har laddningen $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C och massan $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg. Jonen är alltså en positiv vätejon, det vill säga en proton.



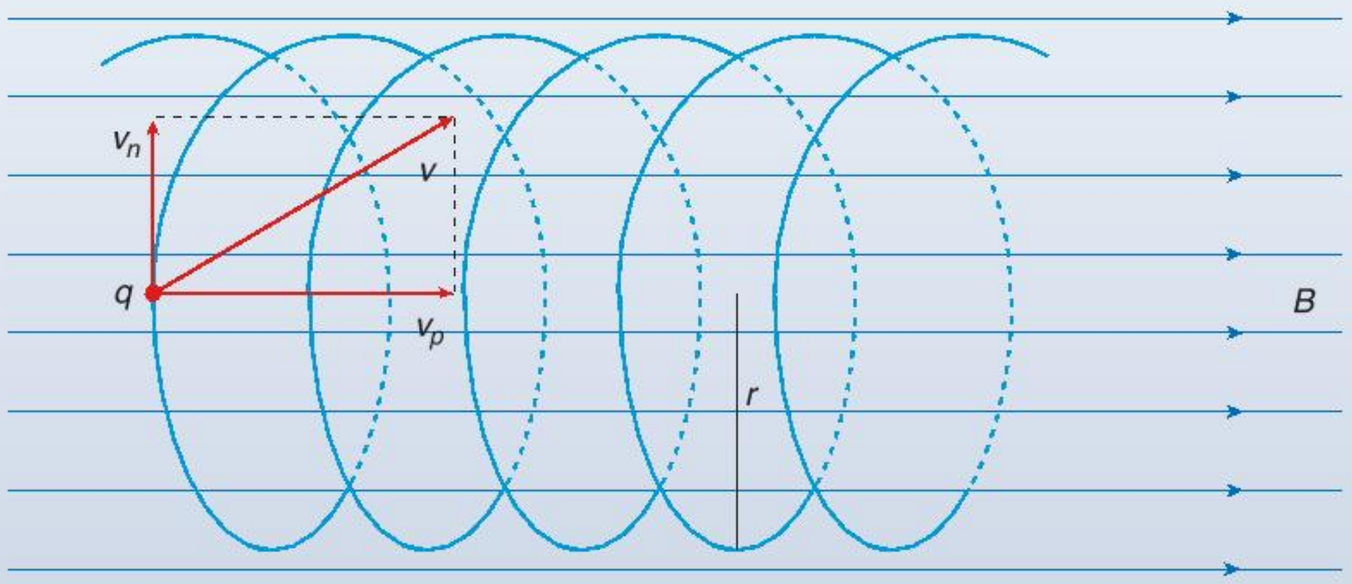
Masspektrograf i laboratorium. Större flygplatser använder masspektrografi för att upptäcka och analysera narkotika. Vid träff kan tullpersonalen direkt se på skärmen vilken typ av narkotiskt preparat det rör sig om.

Spiralformad rörelse

En laddning som rör sig vinkelrätt mot ett magnetfält påverkas av en magnetisk kraft $F = qvB$. Om laddningen däremot rör sig längs med fältlinjerna påverkas den inte av fältet. Men vad händer om laddningen rör sig snett in i ett magnetfält? Då kommer den att följa en spiralformad bana.

EXEMPEL 9 **Spiralformad bana**

En partikel med positiv laddning q skjuts snett in i ett homogent magnetfält med flödestätheten B. Se figur 6.13. Partikeln har hastigheten v. Vi komposantuppdelar v i en komposant v_p som är parallell med B och en komposant v_n som är vinkelrät mot B.



6.13 Laddningen q far snett in i ett magnetfält.

Om bara normalhastigheten v_n fanns, så skulle laddningen röra sig i en cirkelformad bana vinkelrät mot B. Radien skulle då bli

$$r = \frac{mv_n}{qB}$$

Om bara parallellhastigheten v_p fanns, så skulle laddningen röra sig med konstant hastighet parallellt med B.

När båda hastighetskomposanterna är skilda från noll, kommer laddningen att följa en *spiralkurva* genom magnetfältet. Spiralaxeln är parallell med B.



Esrange rymdcentral
ESRANGE är en anläggning för rymd- och miljöforskning några mil utanför Kiruna. Där kan man bland annat studera olika norrskens-fenomen

Norrsken

Hur många årtusenden har människor stått under det flammande norrskenet i bävande undran? Bågar och band med skiftande form och färg fladdrar som väldiga gardiner på himlen. Se figur 6.14.

Norrskenet bleknar inte i vetenskapens ljus. Norrskenet är rester efter enorma magnetiska stormar som rasade på solen ungefär ett dygn tidigare. Magnetiska stormar på solen förstärker *solvinden*, som är laddade partiklar, för det mesta protoner och elektroner, som solen sänder ut i alla riktningar.

När sådana partiklar kommer in i jordens magnetfält, påverkas de av magnetiska krafter. Många partiklar går in mot jordens magnetiska poler, i *spiralbanor* runt fältlinjerna. När partiklarna tränger in i jordatmosfären, kolliderar de med luftmolekyler. Molekylerna exciteras och återutsänder en del av energin som *ljus*. Detta är orsaken till norrskenet på det norra halvklotet och sydskenet på det södra halvklotet. Norrsken och sydsken uppträder i områden runt jordens magnetiska poler. När det är norrsken hos oss, är det ett motsvarande sydsken som fladdrar över havet vid Antarktis.

De vanligaste färgerna i norrskenet är rött ljus från syremolekyler, blått och violett ljus från kvävejoner och gulgrönt ljus från syreatomer. Av och till kan vi se någon av spektralfärgerna i balmerserien från väte. De uppstår när energirika protoner från solen fångar in fria elektroner i atmosfären och bildar exciterade väteatomer, som sedan hoppar ner till lägre energinivåer.



6.14 Norrsken.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad är innehållet i formeln $F = qvB$? När gäller formeln?
- Verkar det en magnetisk kraft på en laddad partikel som är i vila?
- Hur lyder högerhandsregeln för magnetkraften på en positivt laddad partikel i rörelse?
- Hur bestämmer man riktningen på den magnetiska kraften på negativt laddade partiklar i rörelse?
- Är det sant att den magnetiska kraften inte utför något arbete på en laddad partikel som rör sig genom ett magnetfält?
- Vad menas med att ett elektriskt fält och ett magnetfält är korsade?
- Vilka är villkoren för att en laddad partikel ska gå rätlinjigt genom korsade fält?
- Hur kan vi få en laddad partikel att gå i cirkelbana i ett magnetfält?
- Hur uppstår norrskenet?
- Hur stor är den magnetiska kraften på en elektron i vila? Proton?
- En elektron rör sig med hastigheten $2{,}6 \cdot 10^6$ m/s i ett magnetfält där $B = 1{,}5$ mT. Hur stor är kraften på elektronen?
- En proton påverkas av en magnetisk kraft på $2{,}4 \cdot 10^{-15}$ N i ett magnetfält med flödestätheten 48 mT. Hur stor är protonens hastighet?
- En elektron rör sig i en cirkelbana med radien 4,0 cm i ett magnetfält med flödestätheten 1,2 mT. Hur stor är dess hastighet?

6.4 Elektronmassan

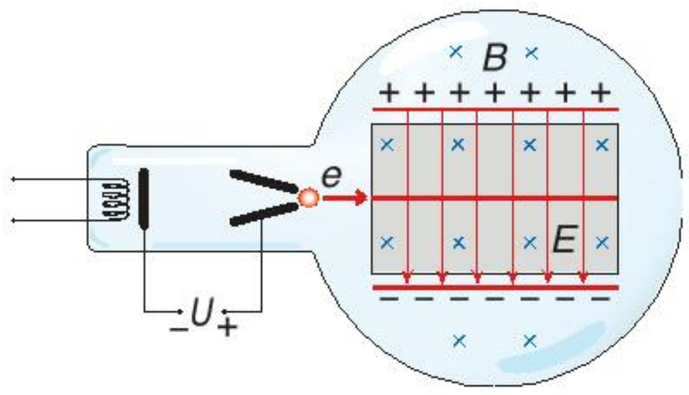
Vi fortsätter med ett försök som kan göras på de flesta skollaboratorier. Försöket går ut på att *mäta elektronmassan*. Millikans försök visade att elektronen har en negativ elementarladdning, $-e = -1{,}60 \cdot 10^{-19}\,\text{C}$. När elektronen accelereras av en spänning U från vila i ett elektriskt fält, får elektronen den kinetiska energin

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

där m är elektronmassan och v är hastigheten. Spänningen är lätt att mäta. Om vi kan bestämma hastigheten v, så kan vi bestämma massan m.

Vi ska se hur vi kan bestämma elektronmassan med ett *teltronrör*.

Teltronröret är ett klotformat glasrör med en pip. Se figur 6.15.



6.15 Försök med teltronrör.

Röret är lufttomt. Inne i pipen finns en elektronkanon med spänningen U. Vi kan reglera elektronhastigheten genom att variera U. Inne i röret står en lodrät platta som har en beläggning av zinksulfid. När elektronerna träffar plattan, ser vi ett lysande streck längs plattan.

Vi korsar ett elektriskt fält E och ett magnetiskt fält B inne i röret. Det elektriska fältet ligger mellan två vågräta metallplattor och pekar lodrätt nedåt. Om spänningen mellan plattorna är U_p och avståndet mellan plattorna är s, blir den elektriska fältstyrkan

$$E = \frac{U_\text{p}}{s}$$

Det magnetiska fältet alstras av två seriekopplade spolar, en på var sida om teltronröret. Magnetfältet är vågrätt och är märkt med kryss i figur 6.15. Flödestätheten B kan vi beräkna när vi mäter strömmen I genom spolarna.

Vi reglerar E och B så att elektronerna rör sig rätlinjigt genom fälten. Då är $F_E = F_B$ och detta kan skrivas som $qE = qvB$. Elektronhastigheten blir

$$v = \frac{E}{B}$$

När vi sätter in $v = E/B$ i formeln $\frac{1}{2}mv^2 = eU$, får vi att elektronmassan i *sådana* försök ges av

$$m = \frac{2eUB^2}{E^2}$$

EXEMPEL 10 **Ett lyckat teltronförsök**

Vi genomför försöket och gör följande mätningar:

- accelerationsspänningen $U = 2{,}0$ kV
- plattspänningen $U_p = 1{,}5$ kV
- plattavståndet $s = 0{,}055$ m
- spolströmmen $I = 0{,}25$ A

I bruksanvisningen för teltronröret anges att flödestätheten vid elektronbanan är $B = \left(4{,}23 \cdot 10^{-3}\ \text{T/A}\right) \cdot I$. Flödestätheten blir

$$B = 4{,}23 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}25\ \text{T} = 1{,}06 \cdot 10^{-3}\ \text{T}$$

Den elektriska fältstyrkan är

$$E = \frac{U_p}{s} = \frac{1\,500}{0{,}055}\ \text{V/m} = 2{,}73 \cdot 10^4\ \text{V/m}$$

Nu kan vi beräkna elektronmassan:

$$m = \frac{2eUB^2}{E^2} = \frac{2 \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}0 \cdot 10^3 \cdot \left(1{,}06 \cdot 10^{-3}\right)^2}{\left(2{,}73 \cdot 10^4\right)^2}\ \text{kg} = 9{,}6 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}$$

Resultatet avviker bara 5 % från tabellvärdet $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg.

KONTROLLFRÅGOR

- Hur ska vi göra när vi vill mäta elektronmassan med hjälp av ett teltronrör?

6.5 Orsakerna till magnetism

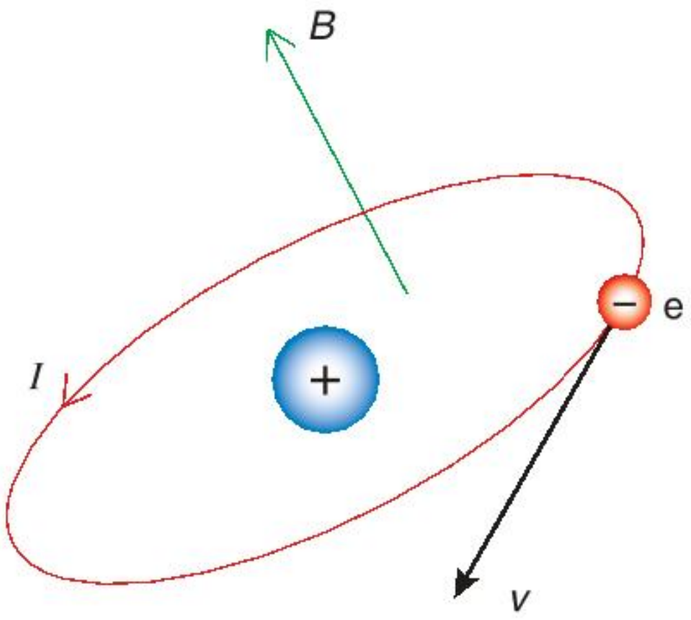
Erfarenheten visar att magnetism inte är ett självständigt naturfenomen. Det finns ett nära samband mellan magnetism och elektricitet.

Vi kopplar en spole till en likspänningskälla och sätter en kompassnål i närheten. När vi slår på och av strömmen, svänger kompassnålen fram och tillbaka. Men när vi lägger in ett järnstycke i spolen och gör om försöket, svänger kompassnålen mycket kraftigare. Magnetfältet utanför spolen är alltså *starkare* när det finns järn i spolen. Järnet blir magnetiskt och förstärker magnetfältet runt spolen.

Fysikern André Ampère var den förste som tänkte att det finns ett samband mellan magnetfältet runt en strömspole och magnetfältet runt ett järnstycke. År 1826 framförde han följande hypotes:

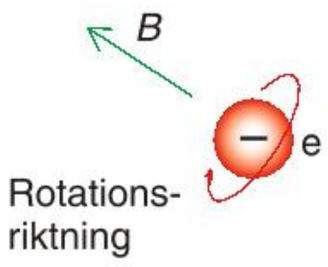
AMPÈRES HYPOTES

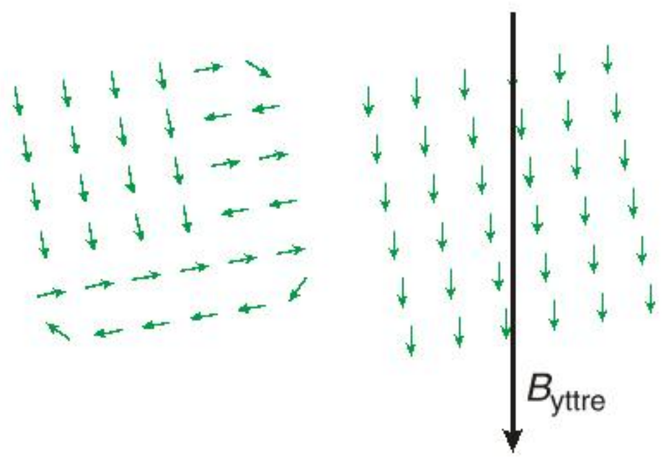
Alla magnetfält beror på elektriska strömmar. Det är strömmarna inne i molekylerna som frambringar magnetism i järn och andra magnetiska ämnen.



6.16 En elektron rusar runt en atomkärna och fungerar som en liten strömslinga. Denna strömslinga alstrar ett magnetfält.

Idag vet vi att alla atomer är uppbyggda av kärnor omgivna av elektroner. En elektron som går i bana runt en atomkärna, verkar som en liten strömslinga med magnetfält runt sig. Se figur 6.16. Dessutom spinner elektroner (och nukleoner) runt sina axlar. Därför verkar de som små magneter. Se figur 6.17. Båda fenomenen får atomen att fungera som en liten magnet.



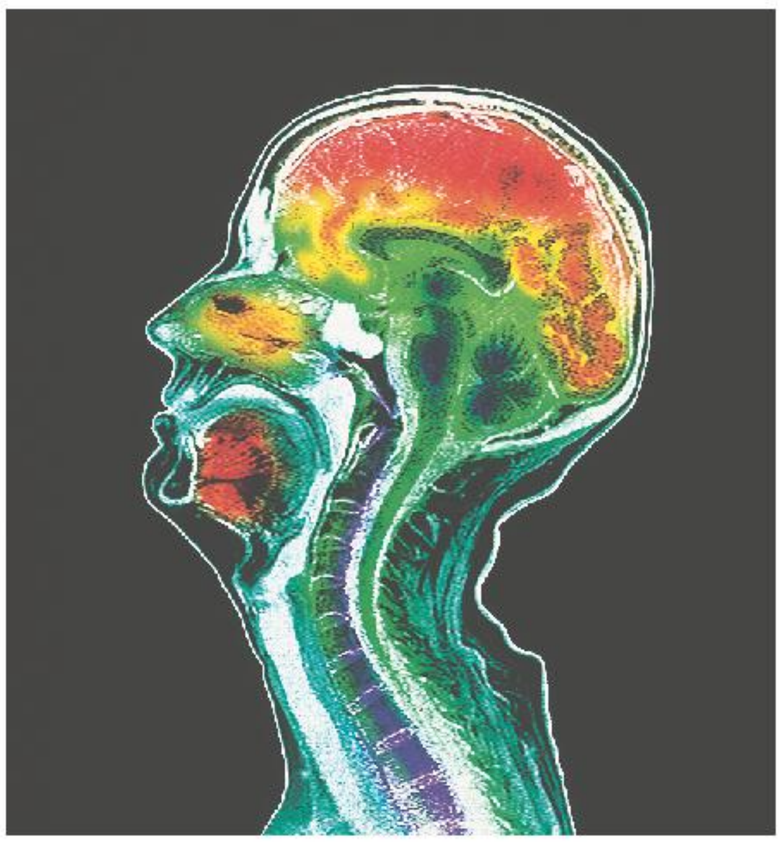


6.17 T.v. Elektronen spinner och omger sig med ett magnetfält.

6.18 T.h. Ferromagnetism
Ett vanligt järnstycke består av domäner, det vill säga magnetiska områden med olika polriktningar. När man magnetiserar järn, utsätts järnet för ett starkt yttre magnetfält som orienterar domänerna i samma riktning. Då har järnet blivit magnetiskt.

Vissa ämnen är lätta att magnetisera, till exempel järn, nickel och kobolt. Permanenta magneter tillverkas av dessa ämnen. Då används ett yttre magnetfält för att ordna atommagneterna i samma riktning. Se figur 6.18.

Tillsammans ger atommagneterna ett starkt magnetfält som varar länge. Räcken av järn är ofta magnetiserade av det jordmagnetiska fältet, något du kan testa med en kompass. Om du bankar på en magnetiserad järnstång, kan magnetiseringen försvinna igen. Underligt! Du kan också avmagnetisera en stavmagnet genom att värma upp den. Vad tror du är förklaringen till det?



6.19 Hjärnatrofi
MRI-bild på hjärnan hos en 51-årig man. Överst syns den veckade storhjärnan. Det mörkt röda partiet visar på atrofi, det vill säga förtvining. Atrofi uppträder vid olika sjukdomstillstånd som slaganfall, Alzheimers sjukdom och AIDS-relaterad demens.

EXEMPEL 11 **Flöde på hjärnan**

Många vanliga grundämnen har isotoper med kärnor som är små magneter. Det används i MRI (Magnetic Resonance Imaging) som är en teknik för att skapa bilder av en människas inre. Se figur 6.19. En person placeras i ett starkt magnetfält. De magnetiska atomkärnorna i kroppen orienterar sig efter fältlinjerna. Genom en speciell teknik kan man vända de magnetiska kärnorna. När kärnan vänder, sänder varje isotop ut karakteristiska radiosignaler. Med hjälp av signalbehandling omvandlas sedan dessa signaler till skarpa bilder.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad går Ampères hypotes ut på?

SAMMANFATTNING

Rörelse i fält

Satelliter

En satellit som går i en *cirkelbana* runt jorden, har konstant banhastighet som ges av

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Laddade partiklar i ett elektriskt fält

Det *elektriska arbetet* på en laddad partikel som rör sig i ett elektriskt fält är $W = qU$, där U är spänningen.

En laddad partikel som kommer in vinkelrätt mot ett elektriskt fält, följer en kastbana genom fältet.

Laddade partiklar i magnetfält

Magnetisk kraft på en elektrisk laddning som rör sig vinkelrätt mot ett homogent magnetfält, ges av $F = qvB$ där q är laddningen, v hastigheten och B flödestätheten.

RÄKNA FYSIK

Rörelse i gravitationsfält

6.01 Hubble-teleskopet går i en cirkelbana 600 km över jordytan. Beräkna omloppsfarten och varvtiden.

6.02 Sputnik I sköts år 1957, som den första konstgjorda satelliten, upp i en bana runt jorden. Den hade en varvtid på 96 minuter. Beräkna banradien.

6.03 En av planeterna i vårt solsystem har en måne som cirklar runt planeten i en bana med radien $1{,}88 \cdot 10^9$ m. Varvtiden är 16,7 dygn.

a Beräkna banhastigheten (omloppshastigheten) för denna måne.

b Beräkna planetens massa. Vad heter planeten?

6.04 Det var länge ett problem att bestämma massan av planeten Pluto. År 1978 upptäcktes det att Pluto har en måne. Denna måne, som fick namnet Karon, går i bana runt Pluto med omloppstiden 6,4 dygn och med banradien lika med 19 700 km. Beräkna utifrån detta ett värde på Plutos massa.

Laddade partiklar i elektriska fält

6.05 Ett arbete på 0,82 pJ uträttas när en laddning accelereras över en spänning på 1,28 MV. Hur stor är laddningen?

6.06 En heliumkärna (en heliumatom som har mist sina två elektroner) accelereras från vila av en spänning på 1,2 MV. Beräkna vilken hastighet heliumkärnan kommer upp i.

6.07 En proton med massan m och laddningen e accelereras från vila med hjälp av spänningen U. När protonen kommer ut ur det elektriska fältet är farten

A $\sqrt{\frac{2Ue}{m}}$ **B** $\frac{2Ue}{m}$ **C** $\sqrt{\frac{Ue}{m}}$ **D** $\frac{Ue}{m}$

6.08 En partikel med laddningen + 8,3 nC befinner sig i ett homogent elektriskt fält. Den släpps från vila och rör sig en sträcka på 14 cm längs fältlinjerna. Dess kinetiska energi blir då 62 µJ.

a Hur stort arbete har det elektriska fältet uträttat?

b Hur stor spänning har laddningen genomlöpt?

c Hur starkt är det elektriska fältet?

6.09 En elektron i vakuum accelereras av en spänning på 250 V. Beräkna den kinetiska energin och den hastighet elektronen får

a om den startar med hastigheten noll.

★ **b** om den startar med hastigheten $5{,}0 \cdot 10^6$ m/s.

6.10 ★ En elektron accelereras från vila till hastigheten $3{,}0 \cdot 10^7$ m/s längs en sträcka på 1,0 cm i ett homogent elektriskt fält.

a Hur stor är accelerationsspänningen?

b Hur stor är den elektriska fältstyrkan?

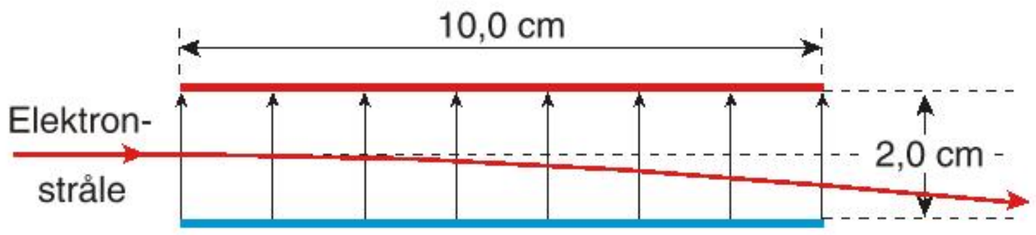
c Hur lång tid tar hastighetsökningen?

6.11 ★★ I en elektronstråle i vakuum har elektronerna hastigheten $1{,}8 \cdot 10^7$ m/s. Elektronstrålen passerar mellan två parallella plattor som figuren visar. Plattorna är 10,0 cm långa och avståndet mellan dem är 2,0 cm. Spänningen mellan plattorna är 35 V. Beräkna

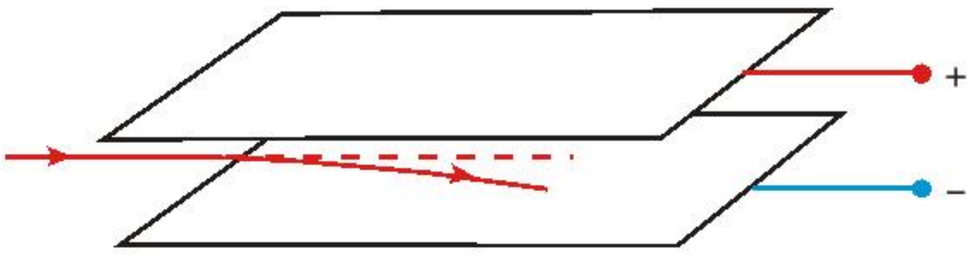
a tiden som en elektron är mellan plattorna

b den lodräta acceleration som en elektron får i det elektriska fältet

c den vinkel som elektronstrålen böjts av när den har passerat det elektriska fältet mellan plattorna.



6.12 ★★ I ett luftfilter finns två stora, parallella metallplattor på avståndet 4,0 cm från varandra. Spänningen mellan plattorna är 35 kV. När det går luft genom filtret, påverkas laddade stoftpartiklar i luften av en elektrisk kraft vinkelrätt mot plattorna. Vi betraktar stoftpartiklar som har massan $2{,}0 \cdot 10^{-11}$ kg och laddningen $6e$.



a Beräkna den elektriska kraft som en stoftpartikel utsätts för mellan plattorna.
b Beräkna accelerationen för en stoftpartikel om vi utgår från att resultanten av alla krafterna på partikeln är lika med den elektriska kraften.
c Luften sugs genom filtret med hastigheten 1,2 m/s. Hur långa måste plattorna vara för att alla stoftpartiklarna ska landa på den ena plattan och därmed avlägsnas från luften?

Laddade partiklar i magnetfält

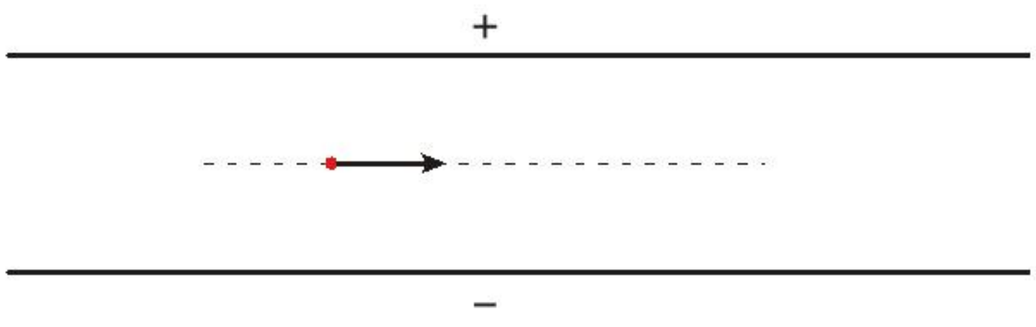
6.13 En proton och en elektron rör sig båda med hastigheten $1{,}5 \cdot 10^7$ m/s vinkelrätt mot ett magnetfält med flödestätheten 3,2 mT.
a Beräkna den magnetiska kraften på protonen. Beräkna också protonens acceleration.
b Samma fråga för elektronen.

6.14 En positivt laddad partikel rör sig i ett homogent magnetfält. Vid en viss tidpunkt har partikeln hastighet rakt norrut. Bestäm riktningen för den magnetiska kraften på partikeln om magnetfältet har riktningen
a rakt västerut
b rakt österut
c lodrätt uppåt
d lodrätt nedåt.
Rita figurer som illustrerar fallen a och c.

6.15 En elektron med en viss fart kommer in i ett homogent magnetfält. Hastigheten är vinkelrät mot fältet. En magnetisk kraft verkar på elektronerna så att de går i en cirkelbana med radien R. Hur ändras radien R och kraften F om elektronerna kommer in i fältet med högre fart?
A Radien ökar och kraften ökar
B Radien ökar och kraften minskar
C Radien minskar och kraften ökar
D Radien minskar och kraften minskar

6.16 En stråle av enkelt joniserade litiumatomer böjs inte av när de passerar genom ett magnetiskt fält med styrkan 15 mT som är vinkelrätt mot ett elektriskt fält på 600 V/m. Vilken hastighet har litiumjonerna när de passerar de två fälten?

6.17 Figuren visar en elektron med hastigheten $2{,}0 \cdot 10^7$ m/s som rör sig rätlinjigt genom ett homogent elektriskt fält med fältstyrkan 50 kV/m. Det är möjligt eftersom det finns ett homogent magnetfält utöver det elektriska fältet. Rita en figur som visar krafterna som verkar på elektronen. Beräkna storlek och riktning på den magnetiska flödestätheten.



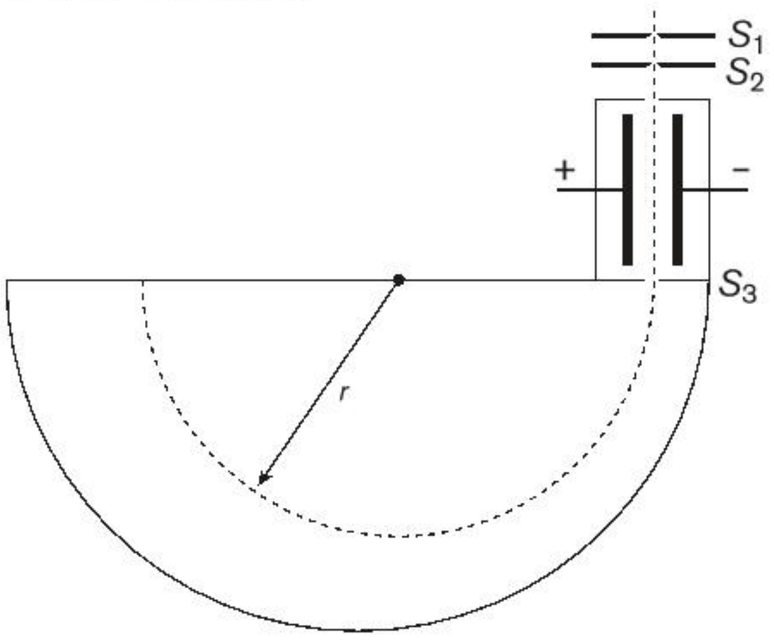
6.18 Protonen och elektronen i uppgift 6.13 följer var sin cirkelbana. Beräkna banradien för
a protonen
b elektronen.

6.19 En proton rör sig i cirkelbana vinkelrätt mot ett homogent magnetfält. Banradien är 0,80 m, och banhastigheten är $3{,}9 \cdot 10^6$ m/s. Hur stor är den magnetiska flödestätheten? Rita en figur som visar riktningen på den magnetiska kraften på protonen, protonens hastighet och den magnetiska flödestätheten.

6.20 ★ En enkelladdad positiv jon (laddning $+e$) accelereras från vila av en spänning på 120 V. Därefter kommer jonen vinkelrätt in i ett homogent magnetfält med flödestätheten 0,061 T. Här följer jonen en cirkelbåge med radien 0,124 m.

a Beräkna jonens kinetiska energi.
b Hur stor rörelsemängd har jonen?
c Beräkna jonens massa. Vilket grundämne kan det vara?

6.21 ★★ Figuren visar en masspektrometer som ska användas för att bestämma massan hos en neonisotop. Neonjoner med en positiv elementarladdning men med olika hastigheter, kommer in mot spaltöppningen S_1. Se figuren. Efter att ha blivit accelererade mellan plattorna S_1 och S_2 kommer de in i ett utrymme där de samtidigt påverkas av ett elektriskt och ett magnetiskt fält. Fälten är vinkelräta mot varandra och mot hastighetsriktningen så att bara joner med en bestämd hastighet går igenom spaltöppningen S_3. Hela apparaten står under vakuum.



a Vilken riktning har magnetfältet B när de två plattorna som orsakar det elektriska fältet E har laddningar enligt figuren?
b Hur stor hastighet har de joner som passerar S_3 när $E = 1{,}2 \cdot 10^5$ V/m och $B = 0{,}60$ T?
c När jonerna passerat S_3 verkar bara magnetfältet. Radien r i cirkeln som jonerna rör sig i är 7,2 cm. Bestäm massan för neonisotopen.
d Spänningen mellan S_1 och S_2 var 3 000 V. Hur stor fart hade neonjonen innan den nådde spaltöppningen S_1?

DISKUTERA FYSIK

1 Om jordens massa fördubblades hur skulle det påverka månens bana runt jorden?

2 Månen rör sig runt jorden i en cirkulär bana. Den hålls kvar i sin bana av jordens gravitationskraft. Uträttar jordens gravitationskraft ett positivt, negativt eller inget arbete alls på månen?

3 Varför har Saturnus och Jupiter perioder som är mycket större än ett år?

4 Hur kan du avgöra om det du ser på himlen är en geostationär satellit eller en stjärna?

5 Jorden rör sig snabbare runt solen på vintern än på sommaren? Är jorden närmare solen på vintern eller på sommaren? Påverkar detta årstiderna?

6 Laddade joner som närmar sig jorden från solen (solvind) och som dras mot polerna orsakar ibland ett fenomen som kallas aurora borealis eller norrsken på nordliga bredder. Varför händer det vid polerna?

7 Kan du få en elektron i vila att börja röra sig med ett magnetiskt fält? Elektriskt fält?

8 En laddad partikel rör sig i en cirkel under inverkan av ett homogent magnetiskt fält. Om det magnetiska fältet plötsligt upphör hur kommer partikeln då att röra sig?

9 En laddad partikel rör sig i en cirkel under inverkan av ett homogent magnetiskt fält. Om ett elektriskt fält som pekar i samma riktning som det magnetiska fältet slås på beskriv hur partikeln då kommer att röra sig.

10 En laddad partikel rör sig i en rak linje i ett speciellt område. Kan det finnas ett magnetiskt fält i detta område?

11 Om jordens magnetiska fält beror på cirkulerande strömmar under jordens yta, går strömmen från väster till öster eller tvärtom?

12 I en blixt är det en snabb rörelse av negativa laddningar från molnet till marken. I vilken riktning avviker blixten på grund av jordens magnetiska fält?

13 En hängande Slinky ansluts till ett kraftfullt batteri och en brytare. När brytaren sluts så att det plötsligt flyter en ström genom Slinky kommer den att dra ihop sig eller expandera?

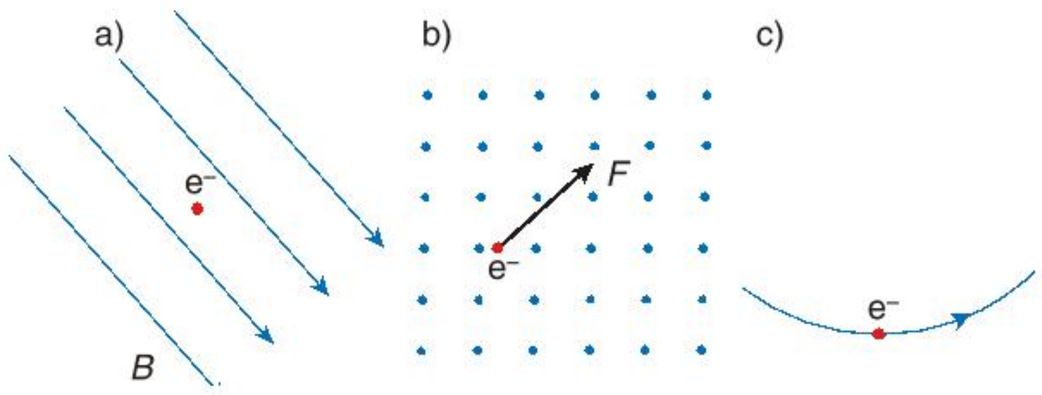
14 Du befinner dig svävande i en helikopter högt över planeten Naboo. I ryggsäcken har du en massa elektrisk laddning och i huvudet en massa elektromagnetisk kunskap. Där du befinner dig är det ett starkt homogent, horisontellt magnetfält utöver det vertikala tyngdkraftfältet. Innan du kastar du dig ut resonerar du lite med dig själv om vad som kommer att hända. Kommer du att falla fritt? Hur går det när du väl kastar dig ut?

RESONERA FYSIK

1 Den planet som rör sig snabbast runt solen är
- **I** den minsta planeten.
- **II** den största planeten.
- **III** den närmsta planeten.
- **IV** planeten längst bort.
- **V** Alla rör sig lika snabbt.

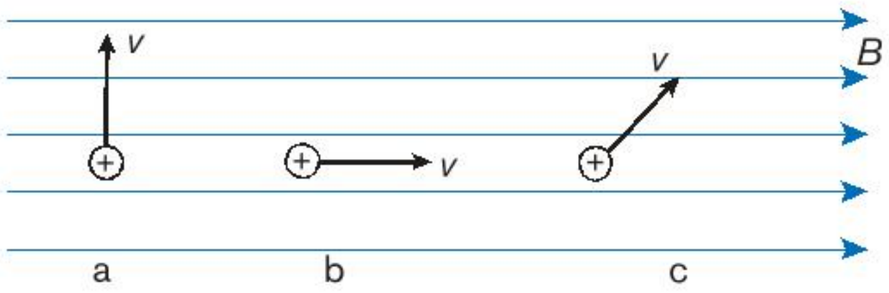
2 Från jorden ser det ut som en satellit A hinner ifatt och passerar en annan satellit B. Det beror på att
- **I** A är närmare jorden
- **II** B är närmare jorden
- **III** A väger mer än B
- **IV** B väger mer än A
- **V** Inget av alternativen I till IV

3 Denna uppgift handlar om elektroner som rör sig i ett magnetfält.



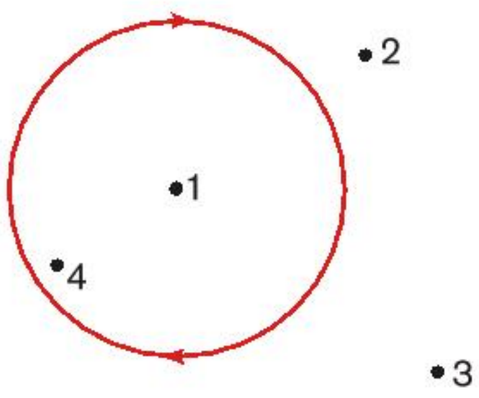
- **a** Figuren visar de magnetiska flödeslinjerna. Elektronen har hastighet vinkelrätt in i pappersplanet. Rita in en pil som visar riktningen på den magnetiska kraften.
- **b** Magnetfältet har riktning vinkelrätt ut från pappersplanet. Figuren visar den magnetiska kraften på elektronen. Rita in en pil som visar hastighetsriktningen.
- **c** Figuren visar en liten del av elektronbanan. Banan ligger i pappersplanet. Vilken riktning har magnetfältet?

4 När en laddad partikel rör sig i ett homogent magnetfält, kommer partikeln att följa olika banor beroende på hastighetens riktning. Se figuren.

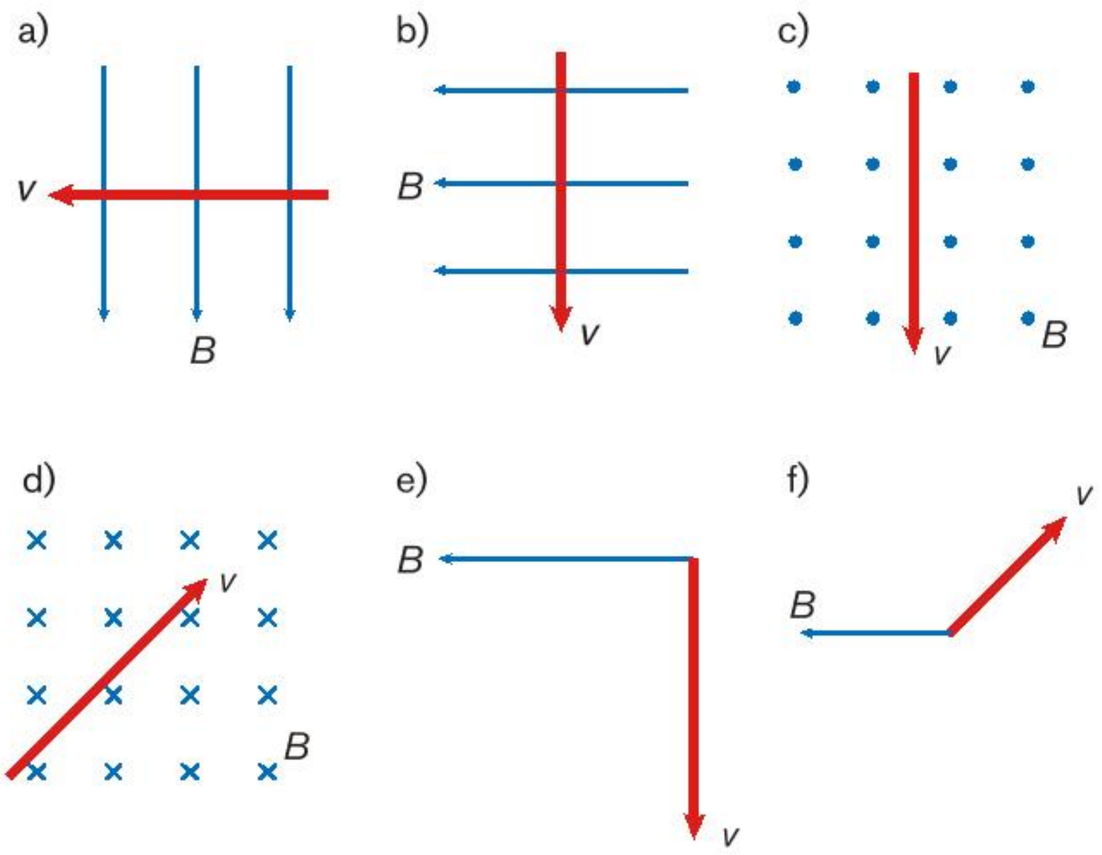


a Vilken slags bana följer partikel a?
b Vilken slags bana följer partikel b?
c Vilken slags bana följer partikel c?
d Förklara varför den magnetiska kraften inte utför något arbete på någon av partiklarna a–c.

5 En ström går medurs i en slinga såsom figuren visar. Beskriv åt vilket håll det magnetiska fältet, som bildas på grund av strömmen i slingan, är riktat i de fyra punkterna 1, 2, 3 och 4.



6 Åt vilket håll är kraften på en proton riktad om den rör sig i de magnetiska fälten som figurerna visar?

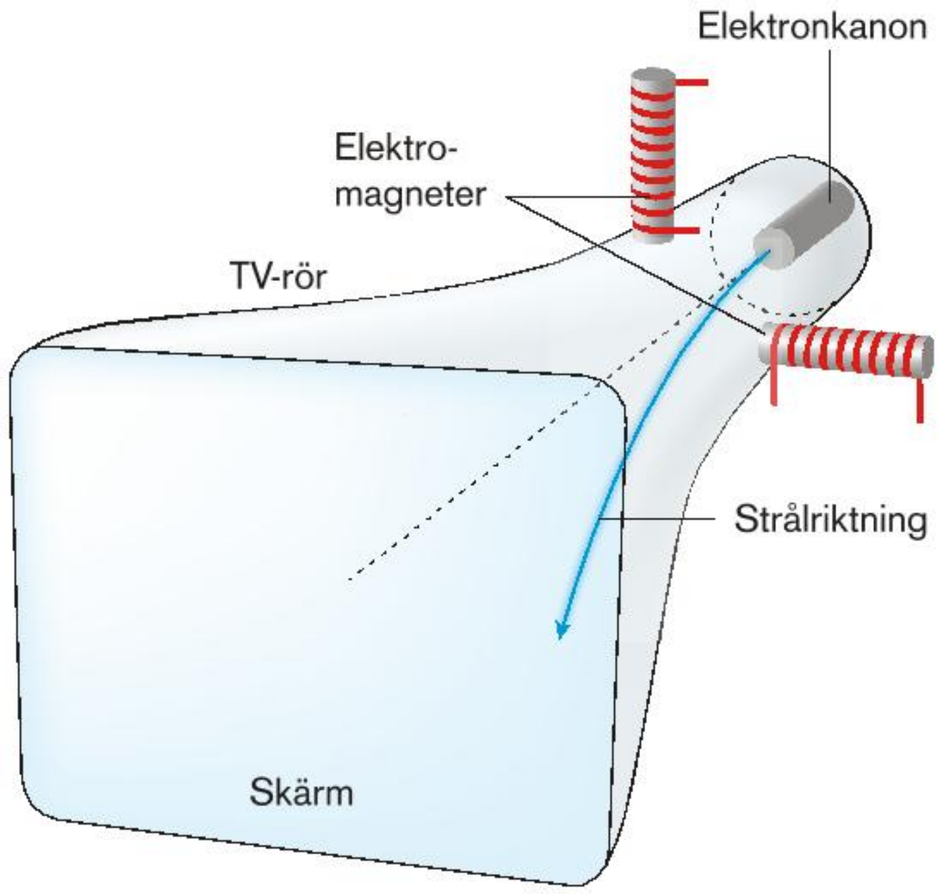


7 Vilket kraftfält kan öka en elektrons hastighet?
A elektriska fältet
B magnetiska fältet
C både det elektriska och magnetiska fältet
D inget av fälten

8 En elektron accelereras från vila av en spänning på 100 V. Hur mycket större kommer dess slut-hastighet att vara om den accelereras av en fyra gånger så stor spänning?
A 1
B $\sqrt{2}$
C 2
D 4
E 8

UPPSKATTA FYSIK

1 I ett TV-rör accelereras elektroner över en elektrisk spänning och böjs sedan med hjälp av magnetiska fält. Se figur. Uppskatta den maximala styrkan på de magnetiska fälten som behövs för att kontrollera böjningen av elektronstrålen, om spänningen som används för att accelerera elektronerna genom anoden är 10 kV.



2 På en ort i Götaland slår blixten en dag ner i en flaggstång av metall. Uppskatta hur stor den magnetiska kraften på flaggstången blir.

3 Håkan var med sin klass på studiebesök på ett fysiklaboratorium. Där berättade en forskare om ett experiment som gick ut på att accelerera protoner och låta dem träffa en tunn platta av ^{63}Cu. Det man sedan studerade var den γ-strålning man fick från reaktionen $^{63}\text{Cu} + p \rightarrow {}^{64}\text{Zn} + \gamma$. Man kunde i experimentet observera γ med energier upp till drygt 12 MeV. När klassen kom tillbaka till skolan visade läraren sedan ett schema för ^{64}Zn och bad dem med hjälp av schemat och den information de fått på studiebesöket uppskatta den hastighet med vilken protonerna träffade ^{63}Cu-plattan.

I schemat nedan anger S_p och S_n bindningsenergin för en proton respektive en neutron, dvs. så mycket energi som måste tillföras ^{64}Zn för att avlägsna partikeln.

Vilken hastighet hade protonerna ungefär?

S_n – – – – – – – – – – – – 11,863 MeV

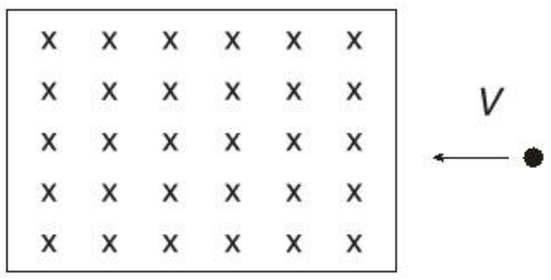
S_p – – – – – – – – – – – – 7,712 MeV

_____ 0 Mev
$^{64}_{30}$Zn

TESTA DIG I FYSIK

1 Asteroiden Icarus går runt solen som planeterna med en period på 410 dygn. Hur stor är dess medelavstånd från solen?

2 En partikel med positiv laddning q och farten v kommer in i ett magnetfält med riktningen in i pappersplanet, som figuren visar. Hastigheten är vinkelrät mot magnetfältet. Anta att det bara verkar magnetiska krafter på partikeln. I magnetfältet får partikeln



A En acceleration i samma riktning som magnetfältet
B Ingen acceleration
C En acceleration som hela tiden är vinkelrät mot partikelns rörelseriktning
D En acceleration i partikelns rörelseriktning.

3 En proton rör sig i en cirkulär bana med radien 0,48 m i ett magnetiskt fält på 0,42 T, riktat vinkelrät mot protonens hastighet.
a Hur lång tid tar det för protonen att gå ett varv i fältet?
b Vilken radie får en elektron som rör sig med samma fart och i samma plan som protonen?

4 Accelerationen för en proton som accelereras rakt västerut i ett elektriskt fält är $3{,}4 \cdot 10^{10}$ m/s^2. Bestäm det elektriska fältets styrka och riktning.

5 En elektron i vila accelereras av en spänning på 1,55 kV. Elektronen kommer sedan in i ett område där det finns ett homogent magnetiskt fält på 1,25 T. Vilken är den
a största magnetiska kraft som kan verka på elektronen?
b minsta magnetiska kraft som kan verka på elektronen?

6 ★ En laddning på 24,5 nC placeras i ett homogent elektriskt fält på 1 950 V/m. Fältlinjerna är riktade rakt åt höger. Hur stort arbete uträttar den elektriska kraften om laddningen rör sig 70 cm
a rakt uppåt?
b rakt åt höger?
c nedåt åt höger i en riktning på 45° med horisontalplanet?

7 ★★ En elektron i vakuum accelereras av en spänning på 250 V. Elektronens kinetiska energi efter accelerationen är $5{,}1 \cdot 10^{-17}$ J. Vilken hastighet har den före accelerationen?

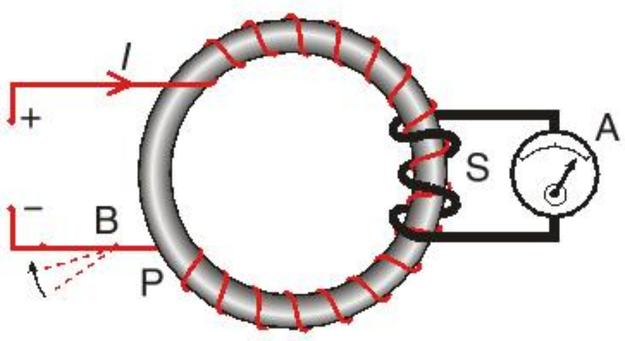
8 ★★ En partikel med laddningen +6,4 nC befinner sig i ett homogent elektriskt fält. Den släpps från vila och rör sig längs fältlinjerna. När den rört sig 11,8 cm är dess rörelseenergi 48 µJ.
a Hur stort arbete har det elektriska fältet uträttat?
b Hur stor spänning har laddningen genomlöpt?
c Hur starkt är det elektriska fältet?

7 Induktion

Undervisningen i kursen ska behandla:

- **Samband mellan elektriska och magnetiska fält: induktion och några tillämpningar, till exempel växelspänningsgeneratorn och transformatorn**
- **Orientering om elektromagnetiska vågors utbredning.**

Induktionsfenomenet 243
Inducerad spänning 248
Faradays induktionslag 251
Växelspänning 257
Elektromagnetiska vågor 266
Uppgifter 274

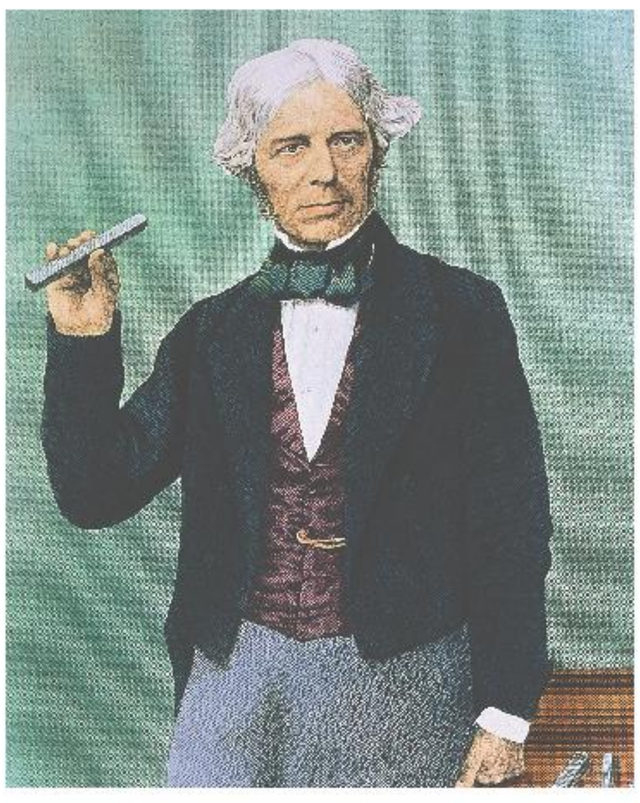


7.1 Faradays ring. När vi sluter brytaren B, blir det ett kortvarigt utslag på amperemetern.

År 1820 hade Ørsted upptäckt att en elektrisk ström alstrar ett magnetfält. Är det omvända också möjligt? Kan ett magnetfält alstra en elektrisk ström? Flera fysiker ställde sig den frågan under 1820-talet. Bland annat försökte de utröna om det gick en ström i en ledare som befann sig i ett starkt magnetfält. Försöken var resultatlösa. Om det fanns någon ström, så var den i varje fall för liten för att fysikerna på den tiden skulle kunna mäta den.

7.1 Induktionsfenomenet

Genombrottet kom först efter att det experimentella geniet Michael Faraday (1797–1867) hade arbetat med problemet under en tid. År 1831 använde han en apparat som sedan dess kallas *Faradays ring*. Se figur 7.1. Runt en järnring lindade han två isolerade ledningar. Tillsammans utgjorde ledningarna två spolar: *primärspolen P* och *sekundärspolen S*. Primärspolen kopplades till en spänningskälla, medan sekundärspolen bara kopplades till en amperemeter. Med konstant ström genom primärspolen hände inte något med amperemetern. Men precis i det ögonblick då Faraday slog på strömmen i primärspolen, gjorde amperemetern ett *kortvarigt* utslag. När han slog av primärströmmen, gjorde amperemetern ett kortvarigt utslag i *motsatt* riktning.



Michael Faraday.

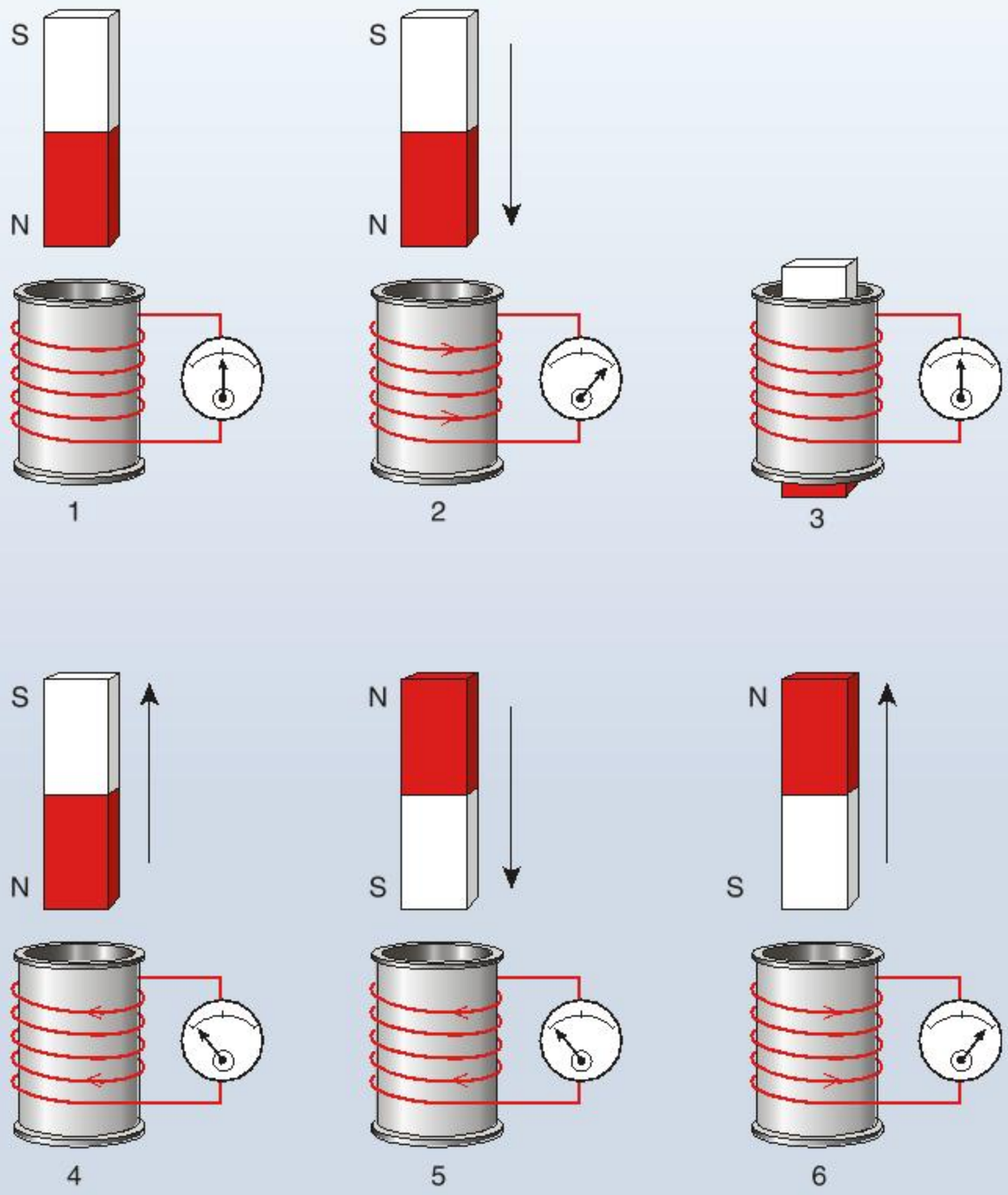
Faraday beskrev försöket på följande sätt: När strömmen slås på i primärspolen, alstras ett magnetfält inne i primärspolen. De magnetiska fältlinjerna följer järnringen. Därför går magnetfältet också genom sekundärspolen. När magnetfältet genom sekundärspolen *varierar,* alstras en elektrisk ström i sekundärspolen. Med detta hade Faraday upptäckt det fenomen som vi kallar *elektromagnetisk induktion:*

FENOMENET INDUKTION

Ett magnetfält som varierar, kan inducera (alstra) en elektrisk ström.

EXEMPEL 1 **Induktion med spole och magnet**

Vi har en stavmagnet och en rak spole. Se figur 7.2. Spolen är kopplad till en amperemeter som har nolläget mitt på skalan och kan ge utslag åt båda sidorna. Försöket utförs i sex steg:



7.2 En magnet rör sig ut och in i spolen.

1. Magneten är i vila utanför spolen. Amperemetern gör inte något utslag.
2. Magneten rör sig in mot spolen med nordpolen först. Då gör amperemetern utslag åt höger.
3. Magneten är i vila inne i spolen. Amperemetern gör inte något utslag.
4. Magneten rör sig bort från spolen. Då gör amperemetern utslag åt vänster.

Viktigare än Napoleon?
Faradays upptäckter utgör en väsentlig del av det fundament som hela vårt teknologiska samhälle vilar på. De var startskottet för en teknologisk revolution som fortfarande pågår. Man skulle kunna ställa frågan om Faraday med sina upptäckter är en viktigare historisk person än Napoleon med sina krig. Att jämföra historiska personer och händelser är svårt, men inte orimligt. Historien skulle säkert ha fått ett helt annat förlopp om induktionen inte hade upptäckts av Faraday. En annan fråga är om induktionen skulle ha upptäckts av andra om inte Faraday hade upptäckt den. Svaret på den frågan är helt säkert ja. Förr eller senare skulle någon annan ha gjort samma upptäckt. Det gäller det allra mesta i fysiken.

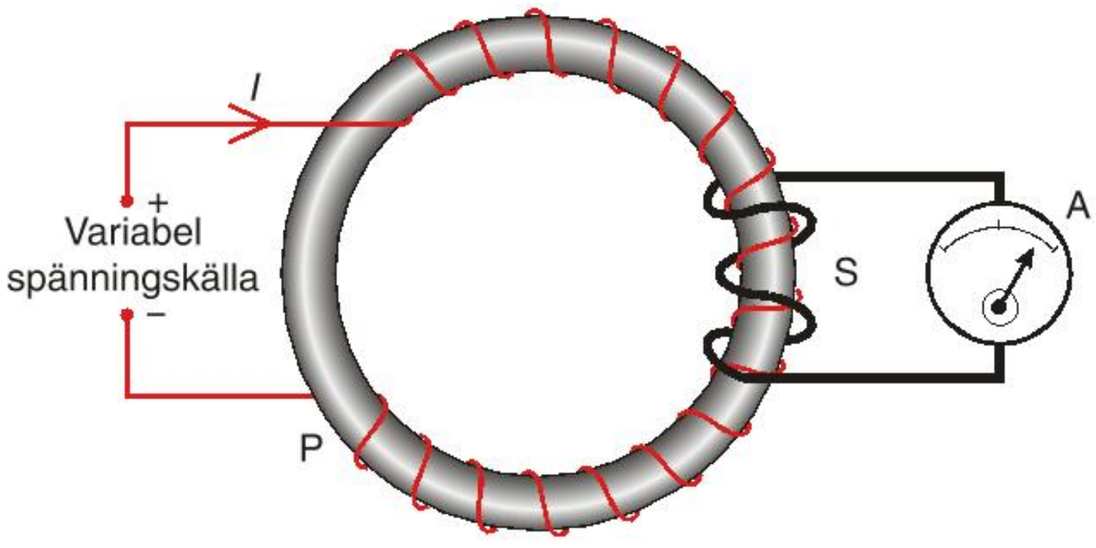
5. Vi vänder magneten och låter den röra sig in mot spolen med sydpolen först. Då gör amperemetern utslag åt vänster.
6. Magneten rör sig bort från spolen. Då gör amperemetern utslag åt höger.

Försöket visar att *en magnet som rör sig i förhållande till en spole, inducerar en ström i spolen*. Detta är ett av många sätt att åstadkomma induktion på. När magneten rör sig i förhållande till spolen, *varierar* magnetfältet i spolen.

Faradays upptäckt av elektromagnetisk induktion är något av det viktigaste som har hänt i historien. Sedan dess har elektromagnetisk induktion blivit absolut nödvändig i det elektrifierade samhälle vi nu lever i. Induktion förekommer många gånger i den energikedja som går från energiverken och till våra hem. Elektromagnetisk induktion används i bilmotorer och persondatorer. Du har kanske hört talas om generatorer och transformatorer? Det är ett par av de vanligaste tillämpningarna av elektromagnetisk induktion. Vi ska titta närmare på dem längre fram i kapitlet.

Lenz' lag

Nu ska vi bestämma i vilken riktning den inducerade strömmen går. För det ändamålet kan vi använda Faradays ring. Se figur 7.3. Nu kopplar vi primärspolen till en *variabel* likspänningskälla.



7.3 Faradays ring. P är primärspolen och S är sekundärspolen.

När vi varierar strömmen i primärspolen, varierar också magnetfältet inne i spolen. Magnetfältet går också genom sekundärspolen och inducerar en ström i den. Utslaget på amperemetern visar oss i vilken riktning induktionsströmmen går. Nu tittar vi på magnetfälten som

alstras av strömmarna i spolarna. Riktningen på magnetfältet inne i en spole får vi fram med hjälp av högerhandsregeln för strömspolar. Se kapitel 5.

När strömmen i primärspolen *ökar,* blir magnetfältet B i primärspolen *starkare.* Då visar det sig att magnetfältet B_{ind} från induktionsströmmen i sekundärspolen har *motsatt* riktning mot magnetfältet B från primärspolen.

När primärströmmen *minskar,* blir magnetfältet B i primärspolen *svagare.* Då visar det sig att magnetfältet B_{ind} från induktionsströmmen i sekundärspolen har *samma* riktning som magnetfältet B från primärspolen.

I båda fallen ser du att magnetfältet B_{ind} som induktionsströmmen alstrar, *motverkar* förändringen av magnetfältet B från primärspolen.

Resultatet av alla sådana försök kan sammanfattas i en regel som formulerades år 1834 av den ryske fysikern Heinrich Lenz (1804–65):

LENZ' LAG

En inducerad elektrisk ström motverkar sin orsak.

I försöket med faradayringen var orsaken till induktionen att magnetfältet B i primärspolen *förändrades.* Magnetfältet B_{ind} som uppstod i sekundärspolen, *motverkade* förändringen i primärspolfältet.

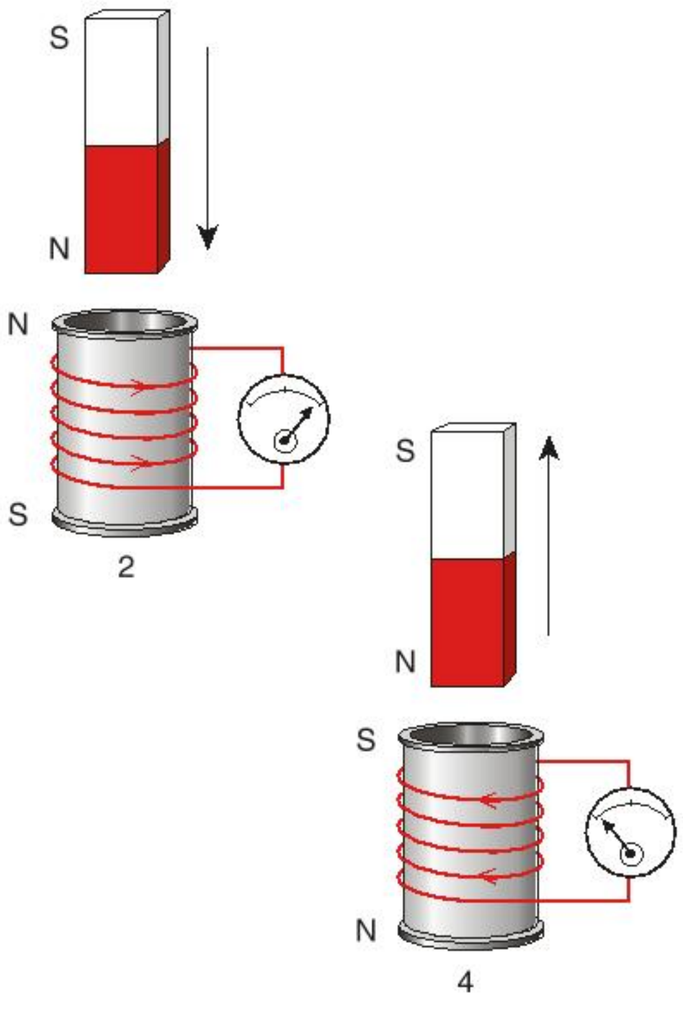
EXEMPEL 2 **Motarbete**

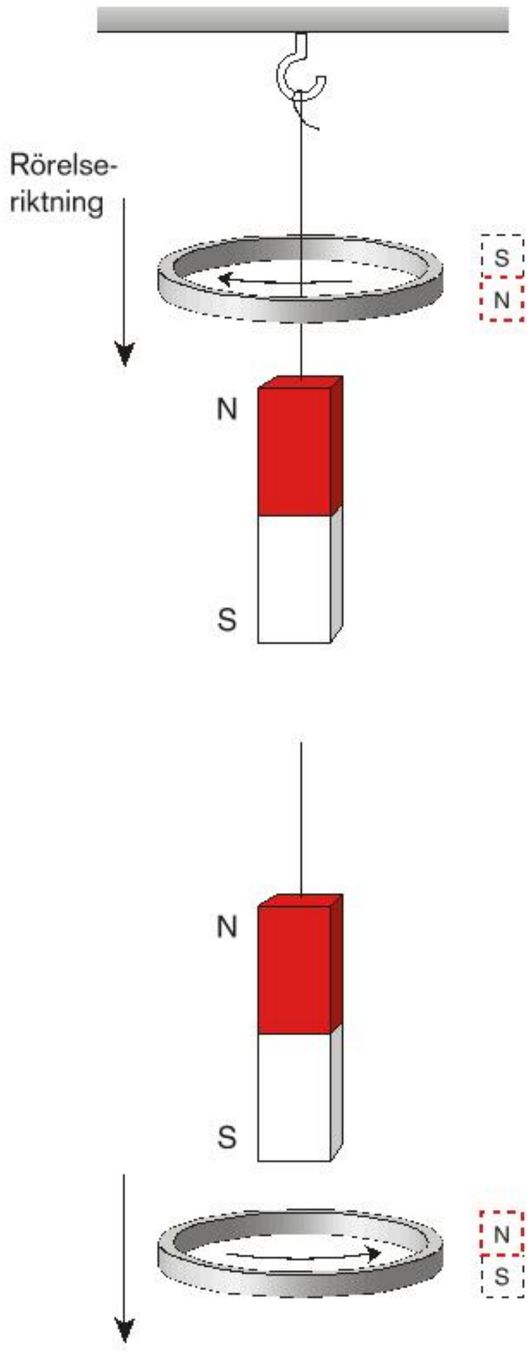
Vi återvänder till försöket i exempel 1.

I steg 2 har induktionsströmmen en sådan riktning att spolen får *nordpol* närmast magneten. Du vet att lika poler stöter bort varandra. Spolen kommer därför att *motarbeta* att magneten rör sig nedåt.

I steg 4 har strömmen en sådan riktning att spolen får *sydpol* överst. Motsatta poler dras mot varandra. Spolen kommer därför att *motarbeta* att magneten rör sig uppåt.

I båda fallen ser du att induktionsströmmen har en sådan riktning att den motarbetar magnetens rörelse. Det betyder att induktionsströmmen *motverkar* sin orsak.





7.4 Ta en ring och låt den falla!

EXEMPEL 3 Ringen faller

En stavmagnet hänger i ett snöre. Nordpolen är överst. Vi håller en aluminiumring över magneten. Se figur 7.4. Så släpper vi ringen. Den faller genom magnetfältet, och en ström induceras i ringen.

Vi ska bestämma strömriktningen i ringen strax innan den passerar magnetens nordpol. När ringen närmar sig nordpolen, kommer ringen och magneten att stöta bort varandra. Det betyder att induktionsströmmen i ringen har en sådan riktning att ringen får nordpol nederst. Alltså måste induktionsströmmen gå *medurs,* sett uppifrån.

Vi ska också bestämma strömriktningen i ringen strax efter det att den har passerat magnetens sydpol. När ringen avlägsnar sig från sydpolen, kommer ringen och magneten att dra till sig varandra. Det betyder att induktionsströmmen i ringen har en sådan riktning att ringen får nordpol överst. Alltså måste induktionsströmmen gå *moturs,* sett uppifrån.

KONTROLLFRÅGOR

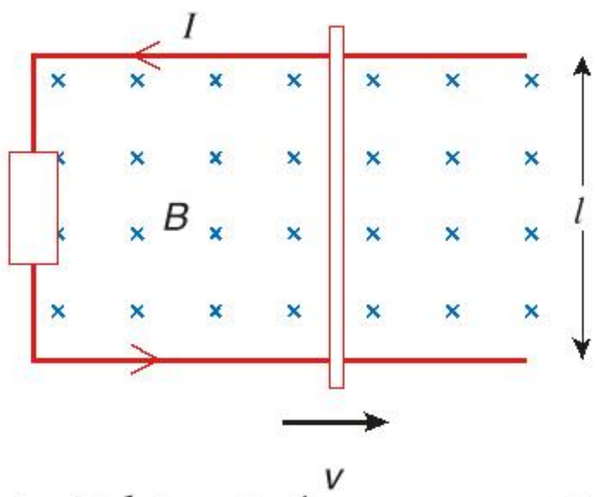
- Vad går elektromagnetisk induktion ut på?
- Varför är *förändring* ett nyckelord i samband med induktion?
- Hur kan man demonstrera induktion med en magnet och en spole?
- Vad säger Lenz' lag? Vad kan vi använda Lenz' lag till?

7.2 Inducerad spänning

Elektromotorisk spänning är den spänning (potentialskillnad) som till exempel finns mellan elektroderna i ett batteri. Potentialskillnaden kan få en elektrisk ström att flyta genom en sluten strömkrets.

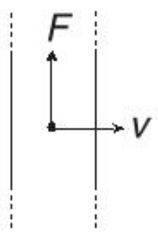
Hittills har vi tittat på några kvalitativa försök, och vi har skaffat oss en regel som sammanfattar dem. Nu ska vi härleda en formel för den *elektromotoriska spänning e* som induceras i en ledare som rör sig genom ett magnetfält. Det är den elektromotoriska spänningen som driver den inducerade strömmen när ledaren är en del i en sluten strömkrets.

Vi betraktar en sluten krets med formen av en rektangel. Se figur 7.5a. Den ena sidan är en ledare med längden l. I figuren glider ledaren med konstant hastighet v åt höger. Rektangeln är vinkelrät mot ett homogent magnetfält med konstant flödestäthet B som pekar rakt in i pappret.



7.5a Induktion i ledarslinga. Kryssen illustrerar magnetiska fältlinjer som går vinkelrätt in i pappret.

När ledaren rör sig åt *höger,* induceras en ström som går *moturs* genom rektangeln. När ledaren rör sig åt vänster, går induktionsströmmen *medurs.* Om ledaren ligger still, så induceras ingen ström. Detta säger oss att det är ledaren i *rörelse* som är spänningskällan för induktionsströmmen.



7.5b Magnetisk kraft på en positiv laddning i ledaren då den rör sig åt höger.

Men hur kan ledaren bli en spänningskälla när den rör sig genom magnetfältet? För att svara på det går vi in i ledaren och tittar på tänkta *positiva* laddningar där. Se figur 7.5b. När ledaren rör sig åt höger, kommer laddningarna att påverkas av en magnetisk kraft

$$F = qvB$$

Kraftriktningen blir uppåt i ledaren i enlighet med högerhandsregeln för magnetisk kraft på en positiv laddning. På en positiv laddning som förflyttas från ledarens ena ände till den andra, utförs ett arbete

$$W = F \cdot l = qvB \cdot l$$

Spänningen mellan ändpunkterna är lika med arbetet per laddningsenhet:

$$e = \frac{W}{q} = \frac{qvBl}{q} = vBl$$

Tänk positivt
Från kurs 1 vet du att laddningsbärarna i vanliga ledare är negativa elektroner och att de rör sig mot strömriktningen. Det är enklare att tänka på positiva laddningar och elektriska krafter som verkar på dem.

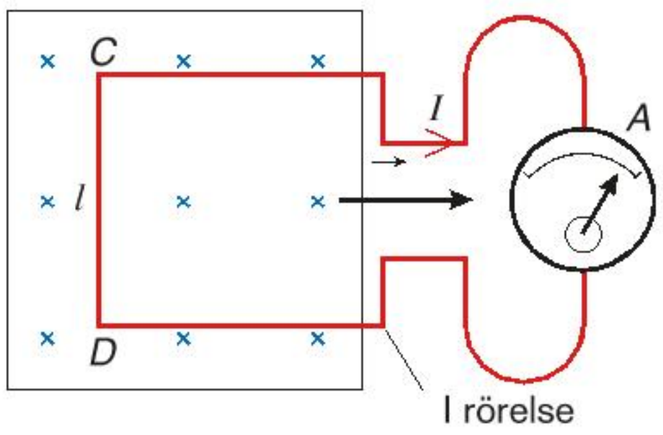
Det är alltså den spänningen som driver induktionsströmmen genom kretsen. Med detta har vi visat:

GENERATORFORMELN

När ett rätlinjigt ledarstycke rör sig vinkelrätt mot ett magnetfält och vinkelrätt mot sin egen längdriktning, induceras en elektromotorisk spänning i ledarstycket. Spänningen bestäms av ledarstyckets hastighet *v*, magnetfältets flödestäthet *B* och ledarstyckets längd *l*,

$$e = vBl$$

Formeln $e = vBl$ kallas generatorformeln eftersom den visar hur elektromotorisk spänning kan induceras i en elektrisk generator. Observera att formeln bara gäller om vektorerna v, B och l är vinkelräta mot varandra. Högerhandsregeln för magnetisk kraft på raka strömledare visar att den magnetiska kraften på det rörliga ledarstycket verkar bakåt. Det stämmer med att induktionsströmmen ska motverka sin orsak.



7.6 Rektangeln dras ut ur magnetfältet.

EXEMPEL 4 **Ledarkrets**

En rektangelformad ledarkrets ligger delvis inne i ett magnetfält med flödestätheten $B = 6{,}8$ mT. Se figur 7.6. Magnetfältet är vinkelrätt mot rektangeln. Ledarstycket CD har längden $l = 22$ cm. Vi drar ut kretsen ur magnetfältet med konstant hastighet $v = 4{,}0$ m/s som är vinkelrät mot både CD och magnetfältet. Resistansen i kretsen är $R = 2{,}0\ \Omega$. Vi ska bestämma strömmen I som induceras i kretsen.

Lösning: Så länge CD är i magnetfältet, induceras en elektromotorisk spänning

$$e = vBl = 4{,}0 \cdot 6{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}22\,\text{V} = 6{,}0 \cdot 10^{-3}\,\text{V} = 6{,}0\,\text{mV}$$

Induktionsströmmen blir

$$I = \frac{e}{R} = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-3}}{2{,}0}\,\text{A} = 3{,}0\ \text{mA}$$

Den magnetiska kraften på CD måste verka åt vänster, alltså *mot* rörelsen. Därför går induktionsströmmen från D till C och vidare *medurs* genom kretsen.

EXEMPEL 5 Energiomvandling

Vi ska titta lite närmare på ledarkretsen i exempel 4. Se figur 7.6. Vi använder tiden $t = 0{,}10$ s för att dra ut ledarkretsen helt ur magnetfältet. Hur mycket elektrisk energi uppstår i kretsen under denna tid?

Lösning: Vi använder Joules lag för elektrisk energi och får

$$W = eIt = 6{,}0\ 10^{-3} \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}10\ \text{J} = 1{,}8\ \mu\text{J}$$

Det här är inte mycket elektrisk energi! Men varifrån kommer den? Den kan ju inte ha uppstått av sig själv.

På ledarstycket CD verkar en magnetisk kraft F_m *bakåt*. Om ledarslingan ska röra sig med konstant hastighet, så måste vi dra i den med en lika stor kraft F *framåt*. På tiden t flyttar sig slingan en sträcka $s = vt$. Dragkraften utför då ett arbete

$$W = Fs = IlB \cdot vt = 3{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}22 \cdot 6{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 4{,}0 \cdot 0{,}10\ \text{J} = 1{,}8\ \mu\text{J}$$

Det arbete som dragkraften F utför på ledarslingan, omvandlas till elektrisk energi i kretsen. En anordning som omvandlar mekanisk energi till elektrisk kallas för en *generator*.

KONTROLLFRÅGOR

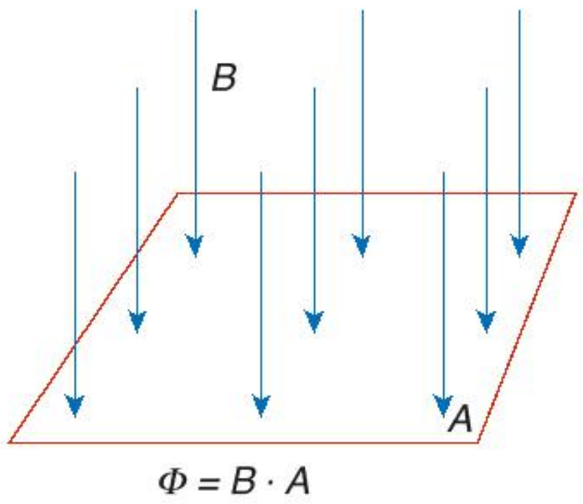
- Hur kan det uppstå en spänning mellan ändpunkterna på ett ledarstycke som rör sig genom ett magnetfält?
- Vad säger oss generatorformeln?
- Hur ska ett ledarstycke röra sig genom ett magnetfält för att generatorformeln ska gälla?
- En 12 cm lång ledare rör sig med hastigheten 0,25 m/s vinkelrätt mot fältlinjerna i ett fält där $B = 3{,}5$ mT. Hur stor spänning induceras?
- När en 0,42 m lång stav förs genom ett magnetiskt fält (vinkelrätt mot fältlinjerna) med flödestätheten 11,4 mT induceras en spänning på 8,0 mV. Hur snabbt förs ledaren genom fältet?

7.3 Faradays induktionslag

Hittills har vi tittat på induktion i två speciella situationer. I avsnitt 7.1 såg vi exempel på att ett magnetfält som varierar, kan inducera elektrisk ström. I avsnitt 7.2 såg vi att ett ledarstycke som rör sig i ett magnetfält, kan inducera en elektrisk ström i en sluten krets. Nu ska vi arbeta oss fram till en *generell* induktionslag, som också omfattar de två specialfallen ovan. För att komma vidare behöver vi en ny storhet, *magnetiskt flöde*.

Magnetiskt flöde

Tänk dig ett magnetfält med flödestätheten B. En yta med arean A är vinkelrät mot magnetfältet. Se figur 7.7.



7.7 Magnetiskt flöde Φ genom en yta med arean A.

MAGNETISKT FLÖDE

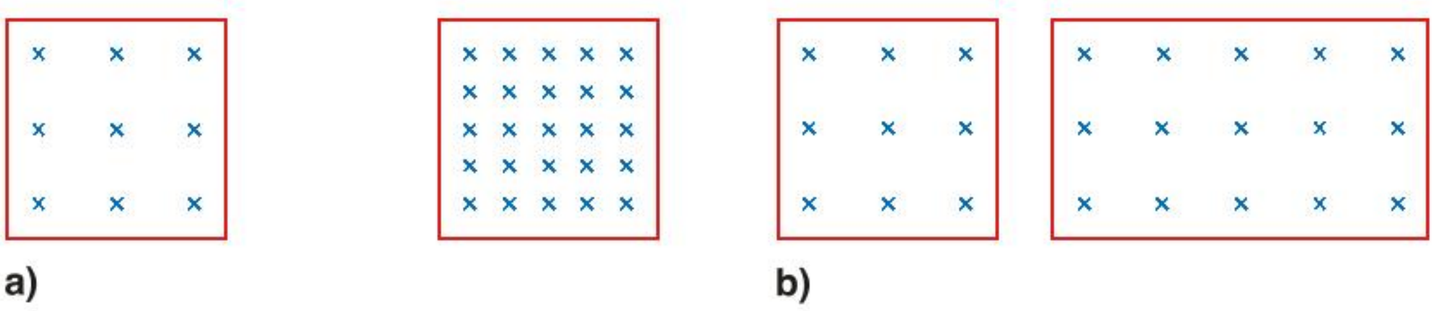
Det magnetiska flödet genom en yta är lika med produkten av magnetfältets flödestäthet och ytans area,

$$\Phi = BA$$

Enheten för magnetiskt flöde har fått namnet *weber* och beteckningen Wb. Definitionen av flöde visar att weber är lika med tesla gånger kvadratmeter,

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{Tm}^2$$

Den här definitionen av magnetiskt flöde gäller bara om ytan är vinkelrät mot flödestätheten. Vi återkommer med en lite mer generell definition i avsnitt 7.4. Faraday åskådliggjorde magnetiskt flöde med hjälp av de magnetiska fältlinjerna. Ju fler fältlinjer som går genom en yta, desto större är det magnetiska flödet genom ytan. Se figur 7.8. De två ytorna i figur a har lika stor area A. Men det magnetiska flödet är störst genom den högra ytan eftersom flödestätheten B är störst där. Du ser att fältlinjerna ligger tätast där. De två ytorna i figur b har lika starka magnetfält genom sig. Men det magnetiska flödet är störst genom den högra ytan eftersom den har största arean.



7.8 Flödet är produkten av flödestätheten och arean.
a Olika flöden eftersom flödestätheterna är olika.
b Olika flöden eftersom areorna är olika.

Magnetisk flödestäthet kan vi nu skriva som flöde per ytenhet,

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Enheten tesla kan därför skrivas som weber per kvadratmeter, $1\,\mathrm{T} = 1\,\mathrm{Wb/m^2}$. Det är formeln $B = \Phi/A$ som förklarar namnet flödestäthet, på liknande sätt som formeln $\rho = m/V$ förklarar namnet masstäthet (densitet). Ju större flödestätheten är, desto fler *fältlinjer per ytenhet* ritar vi.

Induktionslagen

Faraday beskrev elektromagnetisk induktion med hjälp av flödesbegreppet: När det magnetiska flödet genom en sluten ledarkrets *varierar,* så induceras det en elektromotorisk spänning i ledarkretsen. Den inducerade spänningen *motverkar* flödesändringen i kretsen.

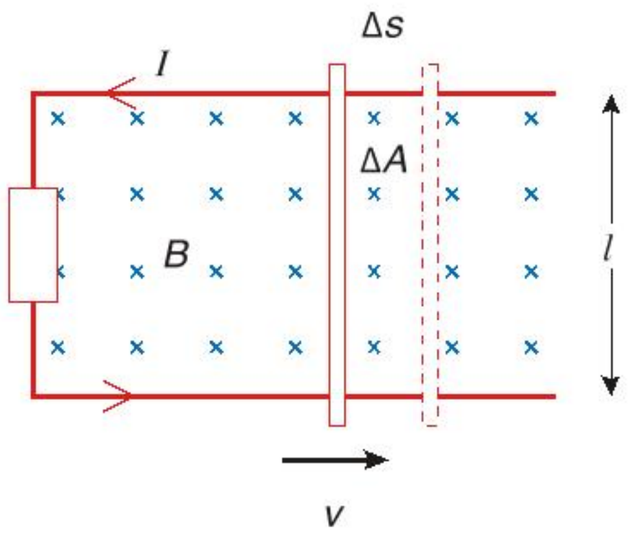
Detta kallar vi Faradays induktionslag.

FARADAYS INDUKTIONSLAG

När det magnetiska flödet genom en ledarslinga varierar, induceras det en elektromotorisk spänning i ledarslingan. Den inducerade spänningen är lika med tidsderivatan av flödet,

$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

Den här formeln gäller i många olika situationer. Generatorformeln är faktiskt ett specialfall av Faradays induktionslag. Se figur 7.9.



7.9 Induktion i en rektangulär ledarslinga.

En rektangulär ledarslinga med rörligt ändstycke är placerad i ett magnetfält med flödestätheten B. Ledarslingan ligger i pappersplanet, och de magnetiska fältlinjerna går vinkelrätt in i pappret.

- När vi drar ledarstycket åt höger, *ökar* flödet genom ledarslingan, och det induceras en ström som flyter moturs. Inne i slingan får då induktionsströmmens magnetfält B_{ind} *motsatt riktning* mot det yttre magnetfältet B.
- När vi drar ledarstycket åt vänster, *minskar* flödet genom ledarslingan, och det induceras en ström som flyter medurs. Inne i slingan får då induktionsströmmens magnetfält B_{ind} *samma* riktning som fältet B.

I båda fallen motverkar induktionsströmmen *förändringen* i flödet.

Titta igen på figur 7.9. När ledarstycket rör sig ändras rektangelns area med $\Delta A = l\Delta s$. Då *ändras* det magnetiska flödet Φ genom ledarslingan med

$$\Delta\Phi = B\Delta A = Bl\Delta s = Blv\Delta t = e\Delta t, \text{ där } e = Blv$$

Men detta är ju generatorformeln! Den kan i just det fallet även uttryckas som

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

När vi låter Δt gå mot noll, går $\Delta\Phi/\Delta t$ mot tidsderivatan av flödet genom ledarslingan:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{d\Phi}{dt}$$

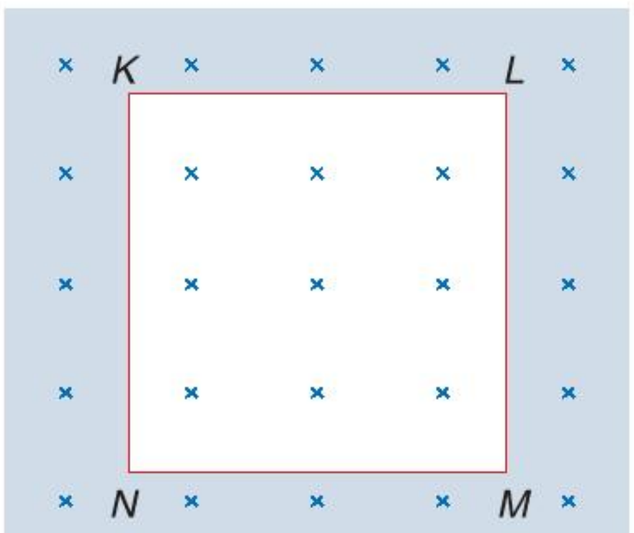
Sammantaget har vi kommit fram till att generatorformeln är ekvivalent med *Faradays induktionslag* i det här specialfallet:

$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

Formelsamlingar anger ofta induktionslagen med ett minustecken, men det har bara betydelse när man vill studera spänningens polaritet.

EXEMPEL 6 **Inducerad spänning i en ledarslinga**

En ledarslinga KLMN är placerad i ett homogent magnetfält. Se figur 7.10a. Magnetfältet pekar vinkelrätt in i pappret. Slingan har arean $A = 0{,}040\ \text{m}^2$. Under tiden $\Delta t = 1{,}4$ s minskar flödestätheten jämnt från $B_1 = 0{,}50$ T till $B_2 = 0{,}15$ T. Hur stor blir den inducerade spänningen?



7.10a Ledarslingan KLMN är placerad i ett homogent magnetfält.

Lösning: Storleken av flödesändringen blir

$$\Delta\Phi = (B_1 - B_2)A = (0{,}50 - 0{,}15)\cdot 0{,}040\ \text{Wb} = 0{,}014\ \text{Wb}$$

Den inducerade spänningen blir

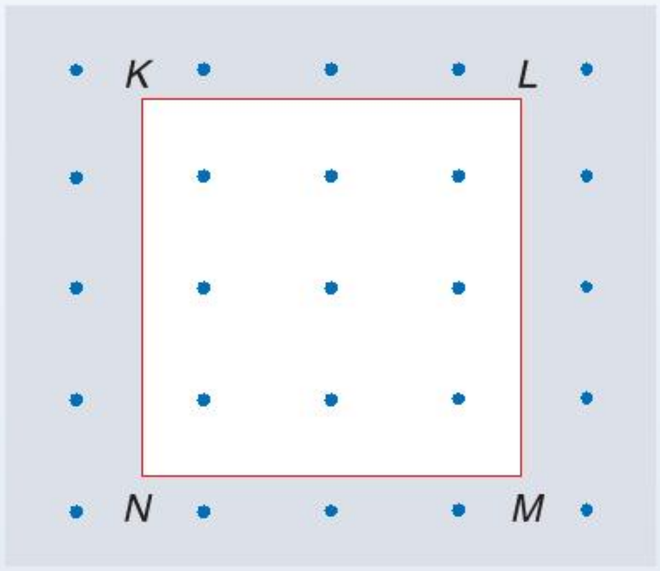
$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{0{,}014}{1{,}4}\,\text{V} = 0{,}010\,\text{V}$$

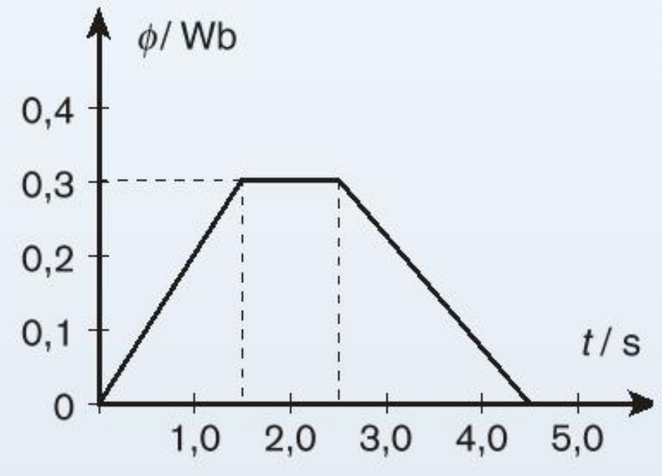
Induktionsströmmen alstrar ett magnetfält inne i slingan som motverkar minskningen av flödestäheten. Därför måste induktionsströmmen enligt högerhandsregeln flyta *medurs* i riktningen KLMNK.

7.10b Ledarslingan KLMN i ett magnetfält. Flödet genom ledarslingan varierar.

EXEMPEL 7 **Ändring av flödet i en ledarslinga**

Ledarslingan i exempel 6 placeras i ett nytt magnetfält. Se figur 7.10b.





Magnetfältet går vinkelrätt *ut* från pappret. Det magnetiska flödet genom ledarslingan varierar så som kurvan visar. Beräkna inducerad spänning e i slingan vid tidpunkterna 1 s, 2 s och 3 s.

Lösning: Vid tidpunkten $t = 1$ s är

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{0,3-0}{1,5-0}\ \text{Wb/s} = 0,20\ \text{Wb/s}$$

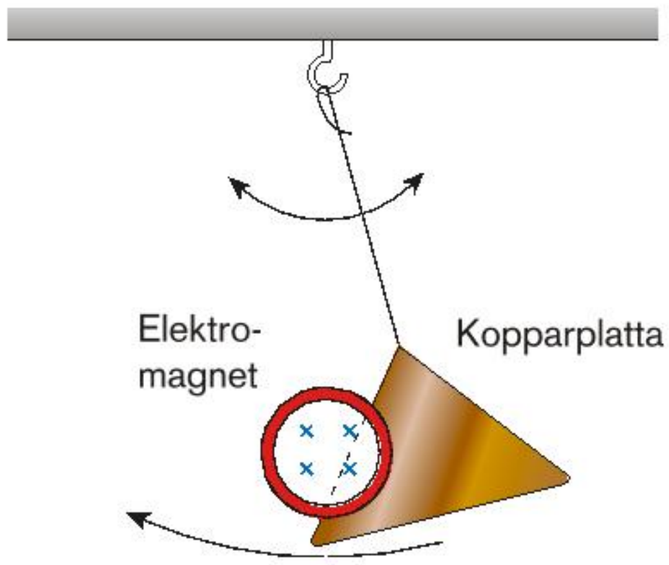
Då är $e = 0,20$ V. Det betyder att den inducerade spänningen är lika med 0,20 V. Induktionsströmmen flyter *medurs* för att motverka flödesökningen på insidan av slingan.

Vid tiden $t = 2$ s är $\frac{d\Phi}{dt} = 0$. Då är $e = 0$. När flödet är konstant, blir det ingen induktion.

Vid tidpunkten $t = 3$ s är

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{0-0,3}{4,5-2,5}\ \text{Wb/s} = -0,15\ \text{Wb/s}$$

Detta innebär en minskning av flödet med 0,15 Wb/s och storleken på den inducerade spänningen blir därför $e = 0,15$ V. För att motverka flödesminskningen kommer induktionsströmmen att flyta *moturs* för att alstra ett magnetfält som pekar *ut* från pappret på insidan av slingan.



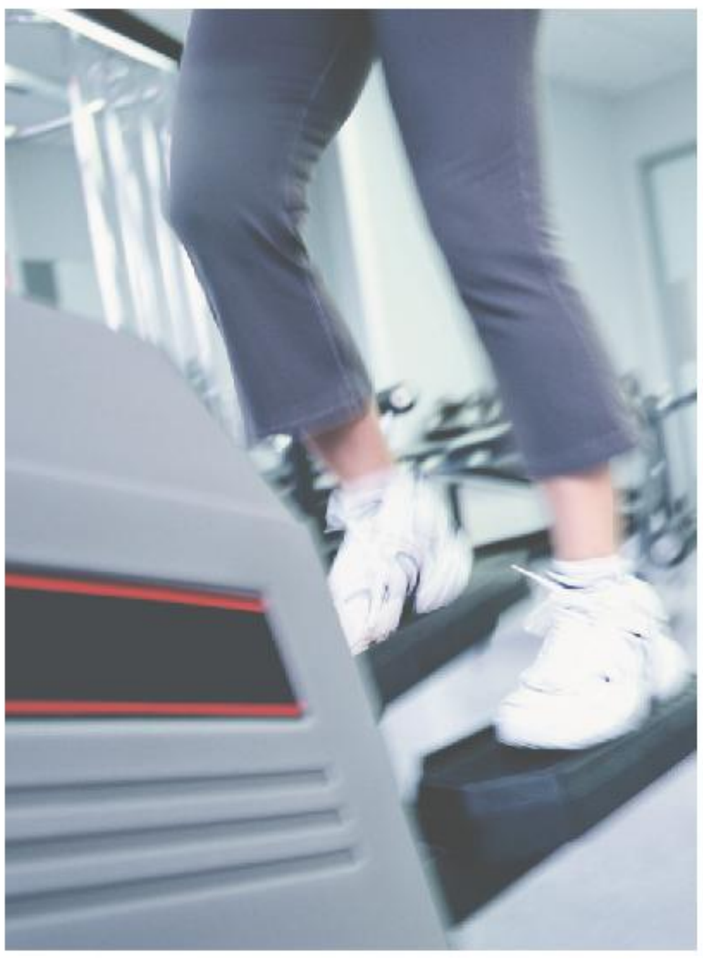
7.11 Magnetisk bromsning av kopparplatta i magnetfält.

EXEMPEL 8 **Magnetisk bromsning**

En triangelformad metallplatta hänger i en stång. Plattan kan svänga som en pendel mellan polerna på en elektromagnet. Se figur 7.11. Först låter vi pendeln svänga *fritt*, utan ström till magneten, och lägger märke till med hur stor amplitud, ungefär, pendeln svänger.

Därefter kopplar vi ström till elektromagneten. Då upptäcker vi att pendelsvängningarna dämpas snabbt, och efter en kort tid upphör svängningarna helt.

Vi förklarar försöket på följande sätt: När metallplattan svänger in i eller ut ur magnetfältet, blir det en flödesändring genom metallplattan. Denna flödesändring inducerar *virvelströmmar* i metallplattan. Då uppstår en kraftverkan mellan metallplattan och det yttre magnetfältet. Enligt Lenz' lag kommer dessa krafter att motverka att metallplattan svänger in i eller ut ur magnetfältet. De magnetiska krafterna verkar därför alltid i motsatt riktning mot metallplattans rörelse, och svängningarna dämpas.



Trappmaskiner håller längre och blir mer tystgående om magnetbromsar används.

Magnetisk bromsning används mycket i större bilar, bussar och släpvagnar. De har *magnetiska bromsar.* Bromssystemet består av cirkelformade järnskivor som är monterade på hjulaxlarna och roterar med axlarna. Vinkelrätt mot järnskivorna finns det elektromagneter. När bilen ska bromsa, kopplas en ström till elektromagneterna.

Fördelen med magnetiska bromsar är att bromsningen inte sliter ned bromsarna, som vanlig mekanisk bromsning gör. Magnetiska bromsar håller därför längre än mekaniska bromsar.

Vi har härlett Faradays induktionslag för en speciell situation: ett rakt ledarstycke rör sig vinkelrätt mot ett homogent magnetfält. Men lagen gäller *generellt*, till exempel för en spole.

INDUCERAD SPÄNNING I EN SPOLE

När en spole har N lindningsvarv och flödet genom varje lindningsvarv är $\Phi(t)$ blir den inducerade spänningen i spolen

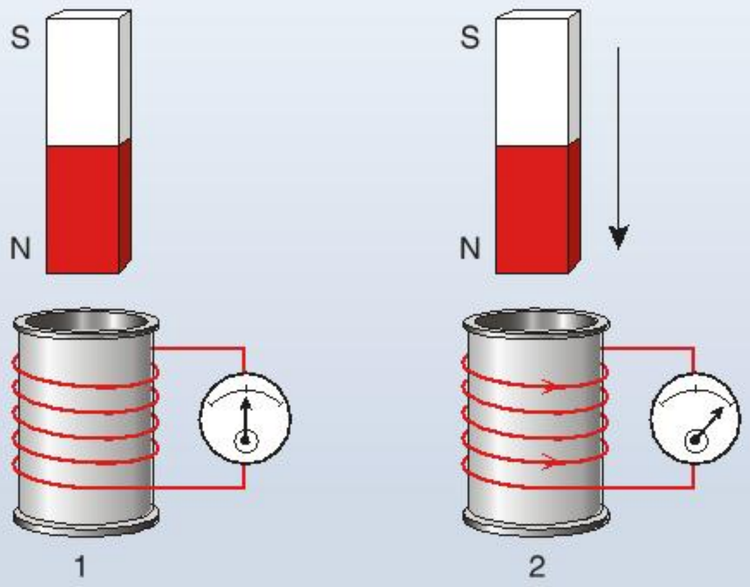
$$e = N\frac{d\Phi}{dt}$$

Figur 1. Konstant magnetfält – ingen ström.

Figur 2. Magnetfältet ändras – ström flyter i spolen.

EXEMPEL 9 **Induktion i en spole**

Det magnetiska flödet i en 600-varvs spole ökar jämnt under tiden 0,2 s från noll till 0,15 mWb. Hur stor spänning induceras i spolen under denna tid?



Lösning: Spänningen induceras enligt sambandet

$$e = N\frac{d\Phi}{dt} = 600\,\frac{0{,}15\cdot 10^{-3}}{0{,}2}\ \text{V} = 0{,}45\ \text{V}$$

Ett viktigt fall har vi när en spole roterar i ett magnetfält. Det ska vi studera närmare i nästa avsnitt.

KONTROLLFRÅGOR

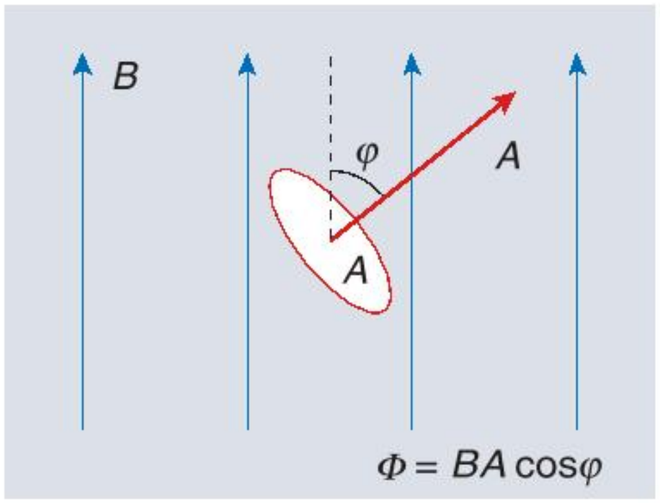
- Hur definieras storheten magnetiskt flöde?
- Hur formuleras Faradays induktionslag?
- Hur undersöker man åt vilket håll den inducerade strömmen går?
- Är det sant att det magnetiska flödet genom en ledarslinga måste vara noll för att den inducerade spänningen ska bli noll?
- En kvadratisk slinga med sidokanten 24 cm befinner sig i ett magnetfält med B = 7,3 mT. Hur stort är det magnetiska flödet genom slingan om slingan är vinkelrät mot fältet? Parallell med fältet?
- Hur stor spänning induceras i en ledarslinga om flödesändringen är 75 mWb på 3 s?
- Vid tiden t = 0 s är flödet genom en ledarslinga 0,012 Wb. Vid tiden t = 0,8 s är flödet 0,076 Wb. Hur stor spänning induceras i slingan under denna tid om flödesändringen är jämn?
- Flödet i en spole med 300 varv ändras jämnt från 45 mWb till 87 mWb under 0,6 s. Hur stor spänning induceras i spolen?

7.4 Växelspänning

Innan vi går vidare, måste vi titta lite närmare på två hjälpbegrepp: magnetiskt flöde och vinkelhastighet.

Mer om flöde

Vi har tidigare definierat magnetiskt flöde som $\Phi = BA$. Det förutsätter att ytan med arean A är vinkelrät mot magnetfältet med flödestätheten B. Naturligtvis är arean inte alltid vinkelrät mot magnetfältet och därför ger vi nu en mer generell definition av magnetiskt flöde:



7.12 Generell definition av magnetiskt flöde.

MAGNETISKT FLÖDE

Det magnetiska flödet genom en yta är

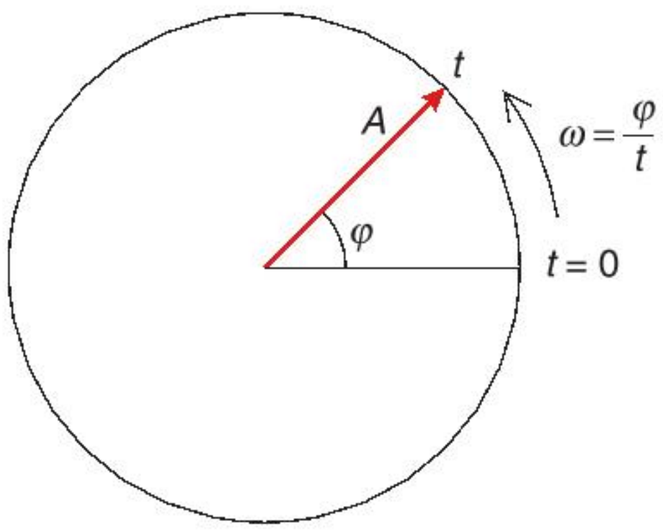
$$\Phi = B \cdot A = BA\cos\varphi$$

där φ *är* den vinkel som ytan är vriden i förhållande till när den är vinkelrät mot magnetfältet.

Se figur 7.12. Formeln $\Phi = BA\cos\varphi$ visar att flödet Φ varierar när minst en av storheterna B, A eller φ varierar.

Vinkelhastighet

Vi tänker oss att en vektor A vrider sig en vinkel φ på tiden t. Se figur 7.13. Om vektorn vrider sig lika stora vinklar under lika långa tidsintervall, säger man att den har konstant *vinkelhastighet*. Vinkelhastigheten ω är då



7.13

$$\omega = \frac{\varphi}{t}$$

Vi mäter vinkeln i radianer. Vinkelhastigheten får därför enheten *radianer per sekund*. Ur formeln får vi φ som

$$\varphi = \omega t$$

Den här formeln säger oss att vinkeln är proportionell mot tiden när vinkelhastigheten är konstant. Lägg märke till att relationen motsvaras av $s = v \cdot t$ i rätlinjig rörelse med konstant fart. När en vektor A har roterat ett helt varv, är vinkeln lika med 2π och tiden lika med varvtiden T, alltså $\varphi = 2\pi$ och $t = T$.

VINKELHASTIGHET

Vinkelhastigheten för en vektor med varvtiden (perioden) T är $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$, där f är rotationsfrekvensen.

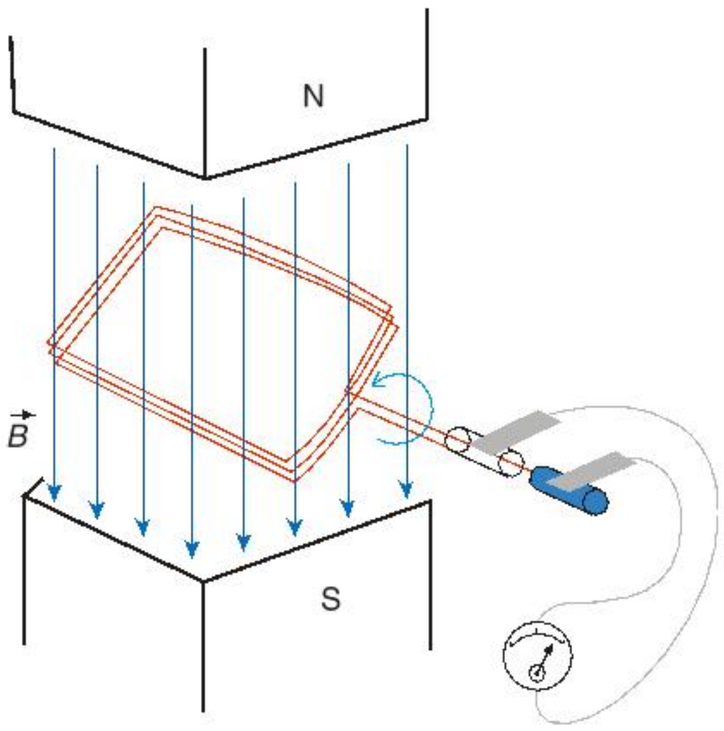
EXEMPEL 10 **Vinkelhastighet och rotationsfrekvens**

Hur stor blir vinkelhastigheten för en rektangulär slinga som roterar 50 varv per sekund?

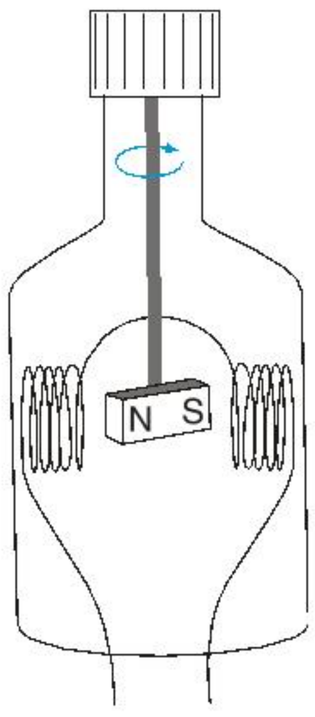
Lösning: Om slingan roterar 50 varv per sekund är rotationsfrekvensen 50 Hz. Eftersom $\omega = 2\pi f$ blir

$\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/s} = 314 \text{ rad/s}.$

Inducerad växelspänning



Roterande spole i magnetfält. När en spole roterar i ett magnetfält induceras en spänning eftersom flödet varierar med tiden. Spolen på bilden har tre slingor. Spänningen som induceras blir därför tre gånger större än för en enkel strömslinga. Det är så en generator fungerar. I den här typen av generator är det spolar som roterar medan magneterna hålls stilla.



En generator kan också ha magneter som roterar medan spolarna hålls stilla. En liten generator, sådan som finns på äldre cyklar, kallas ibland dynamo. I en sådan roterar en magnet mellan två spolar som sitter fast.



En gammal cykelgenerator. Den inducerade spänningen driver en ström som får lamporna på cykeln att lysa. En nyare variant av cykelgenerator är navgeneratorn som sitter inuti hjulets nav. Den är därför skyddad både från slask och smuts.

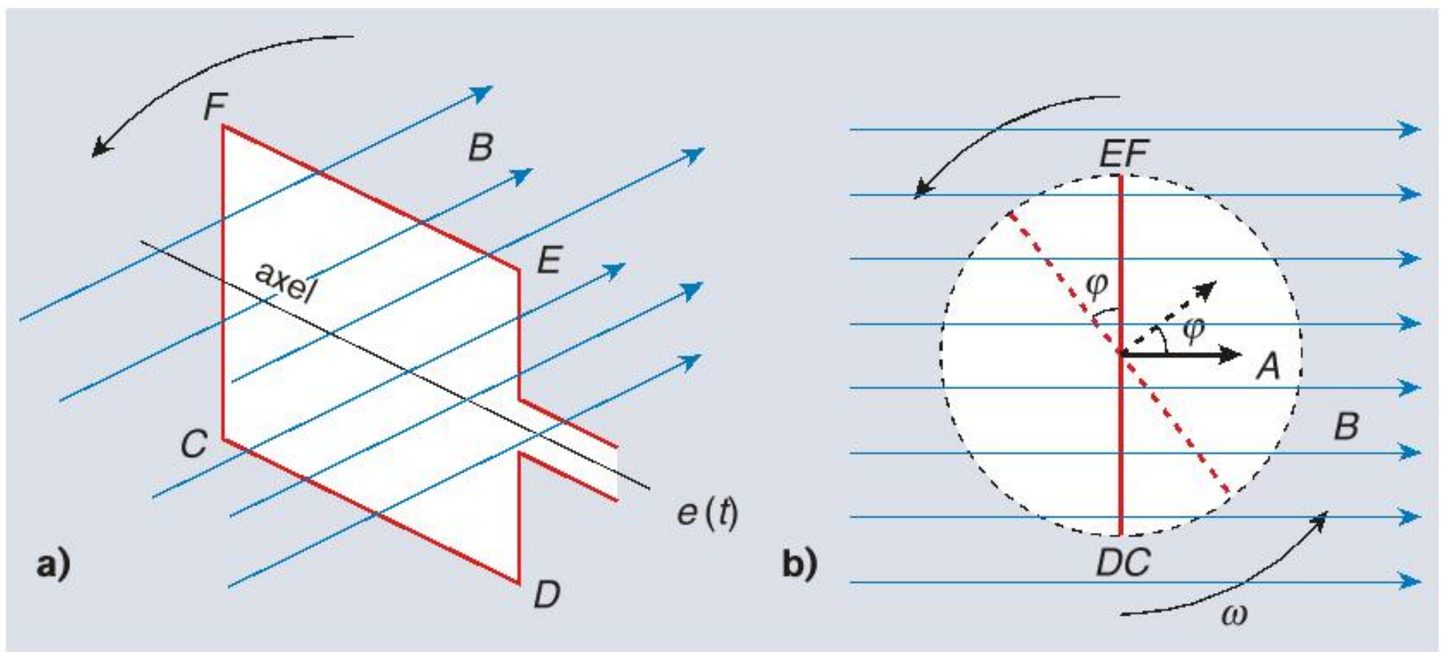
En *elektrisk generator* omvandlar mekanisk energi till elektrisk energi. Generatorn har en spole som roterar i ett konstant magnetfält så att flödet genom spolen varierar med tiden. Då induceras en elektromotorisk spänning i spolen.

Vi ska studera den här processen schematiskt. En spole med N lindningsvarv och arean A roterar med konstant vinkelhastighet ω runt en axel som är vinkelrät mot ett magnetfält med konstant flödestäthet B. Se figur 7.14. Vinkeln φ mellan vektorerna B och A ökar proportionellt mot tiden,

$$\varphi = \omega t$$

När φ är lika med noll eller ett heltal gånger 2π, är flödet Φ genom spolen maximalt. Flödet vid tiden t blir

$$\Phi(t) = BA\cos\omega t$$



7.14 Spolen CDEF roterar med konstant vinkelhastighet i ett magnetfält med konstant flödestäthet.

I N lindningsvarv induceras en spänning

$$e(t) = N\frac{d\Phi}{dt} = NBA(\cos\omega t)' = NBA(-\sin\omega t)\omega = -NBA\omega\sin\omega t$$

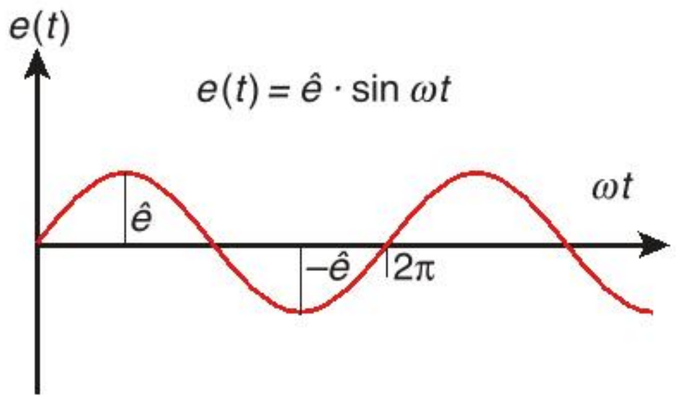
Som vi har nämnt tidigare betecknar minustecknet spänningens polaritet och därför kan vi bortse från detta här. När $\sin\omega t = 1$, får spänningen e maxvärdet $\hat{e} = NBA\omega$. Vi kan därför skriva formeln för $e(t)$ som

$$e(t) = \hat{e}\sin\omega t \quad (\hat{e} \text{ läser du som e – topp})$$

INDUCERAD VÄXELSPÄNNING

När en spole roterar med konstant vinkelhastighet i ett homogent magnetfält, induceras en växelspänning i spolen:

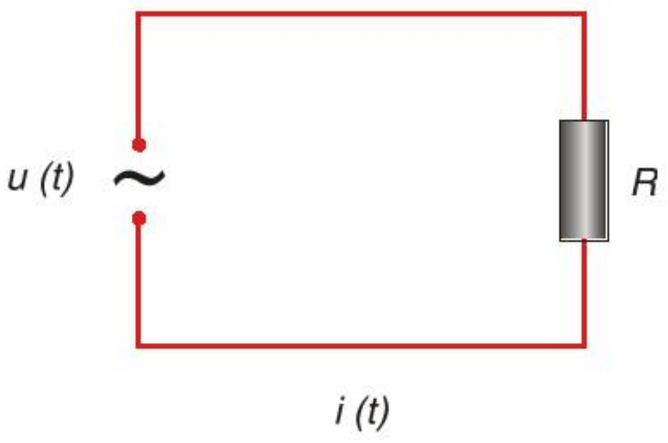
$$e(t) = \hat{e}\sin\omega t$$



7.15 Den inducerade spänningen i spolen är en växelspänning, och kurvan är en sinuskurva.

Se figur 7.15. När vi kopplar spolen till en yttre strömkrets, går det en *växelström* i kretsen.

Den första anläggning som producerade elektrisk energi för försäljning, byggdes av Thomas Edison (1847–1931). Anläggningen öppnades i New York år 1882 och levererade *likström* till 1 000 glödlampor. Efter hand har *växelström* blivit det vanligaste. Växelström lämpar sig väl för energiöverföring över stora avstånd, eftersom förlusterna blir mycket mindre än om man använder likström. Spänningen transformeras då *upp* vid generatorstationen och *ned* vid mottagarstationen. Längre fram i detta avsnitt ska vi titta närmare på *hur* detta går till.



7.16 Växelströmskrets med motstånd.

Växelströmskrets med motstånd

Vi kopplar en växelspänningskälla till ett motstånd med resistansen R. Se figur 7.16. *Polspänningen* fås som

$$u(t) = \hat{u} \sin \omega t$$

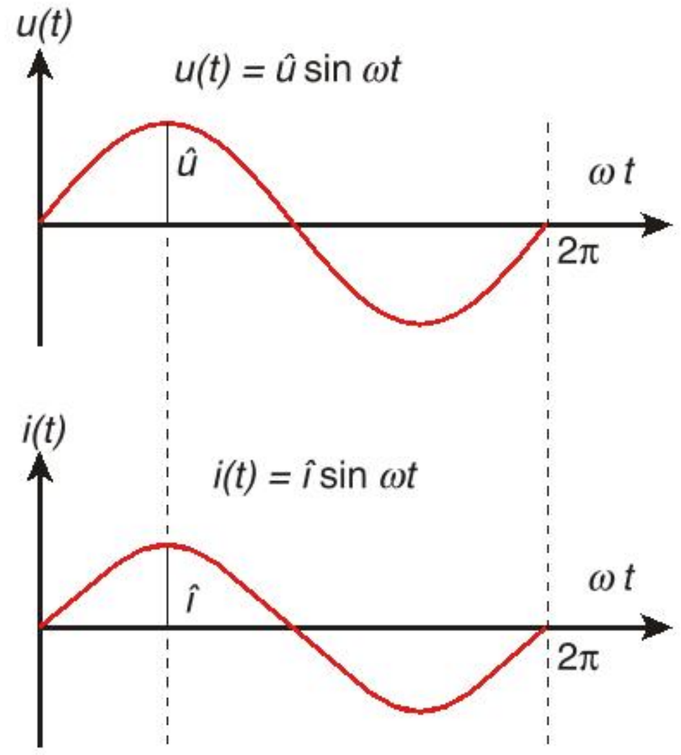
där $\hat{u}$ (u-topp) är spänningens största värde och $\omega = 2\pi f$

De flesta energiverk världen över använder $f = 50$ Hz. Då blir $\omega = 314$ radianer per sekund. Vinkelhastigheten ω kallas ofta *vinkelfrekvensen* när det har med växelspänning att göra.

Vi antar att Ohms lag gäller för spänningens momentanvärden över motståndet och strömmen genom motståndet, $u(t) = Ri(t)$. Det ger

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{\hat{u}}{R} \sin \omega t = \hat{\imath} \sin \omega t$$

där $\hat{\imath} = \hat{u}/R$ är strömmens största värde. Av formlerna för $u(t)$ och $i(t)$ ser du att spänning och ström ges av *samma* sinusfunktion sin ωt av tiden. Strömmen och spänningen varierar i takt. Se figur 7.17.



7.17 Strömmen och spänningen varierar i takt.

När det går en växelström genom ett motstånd, antar vi att Joules lag för elektrisk effekt gäller hela tiden:

$$P(t) = Ri^2(t)$$

Effekten varierar med tiden. Vi kan visa att en sinusformad växelström med toppvärdet $\hat{\imath}$ ger en medeleffekt

$$P = \frac{1}{2} R\hat{\imath}^2$$

under loppet av en period.

Med *effektivvärdet* av en växelström menar vi värdet på en likström som ger samma effekt som växelströmmen ger i genomsnitt. Vi kallar effektivvärdet av växelströmmen för I_e och får

$$P = RI_e^2$$

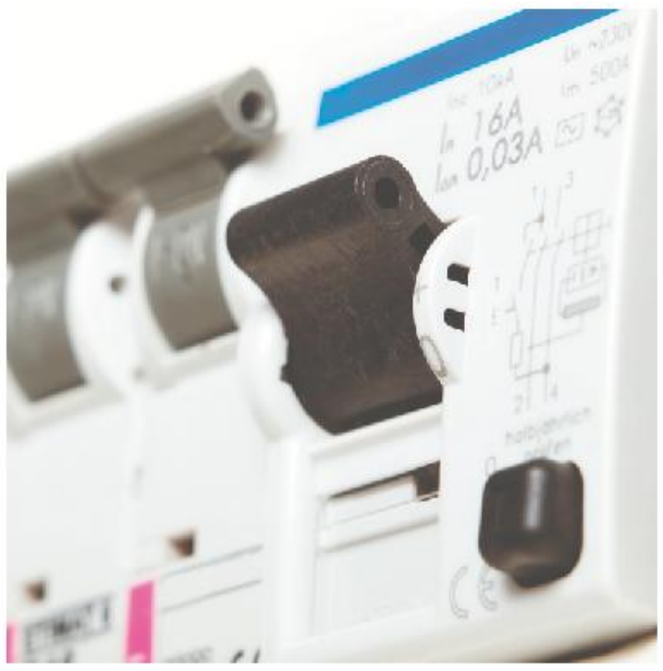
EFFEKTIVVÄRDE

Av de två formlerna för P får vi $I_e^2 = \frac{1}{2}\hat{\imath}^2$ som ger effektivvärdet

$$I_e = \frac{\hat{\imath}}{\sqrt{2}}$$

På motsvarande sätt kan vi bestämma effektivvärdet av en växelspänning som har toppvärdet $\hat{u}$:

$$U_e = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$



När vi anger ström och spänning i en växelströmskrets, är det vanligtvis effektivvärdena vi uppger. Säkringar är märkta med strömmens effektivvärden.

Av $P = RI_e^2$ och $U_e = RI_e$, får vi $P = U_e I_e$.

EFFEKTEN I EN VÄXELSTRÖMSKRETS

I en växelströmskrets med motstånd fås medeleffekten som

$$P = U_e I_e$$

där U_e och I_e är effektivvärdena av spänning och ström.

EXEMPEL 11 **Effektiv ström**

En 750 W ugn är kopplad till nätet. Nätspänningen är 230 V. Beräkna effektivvärdet och toppvärdet av strömmen genom ugnen.

Lösning: Strömmens effektivvärde är

$$I_e = \frac{P}{U_e} = \frac{750}{230}\ \text{A} = 3{,}26\ \text{A}$$

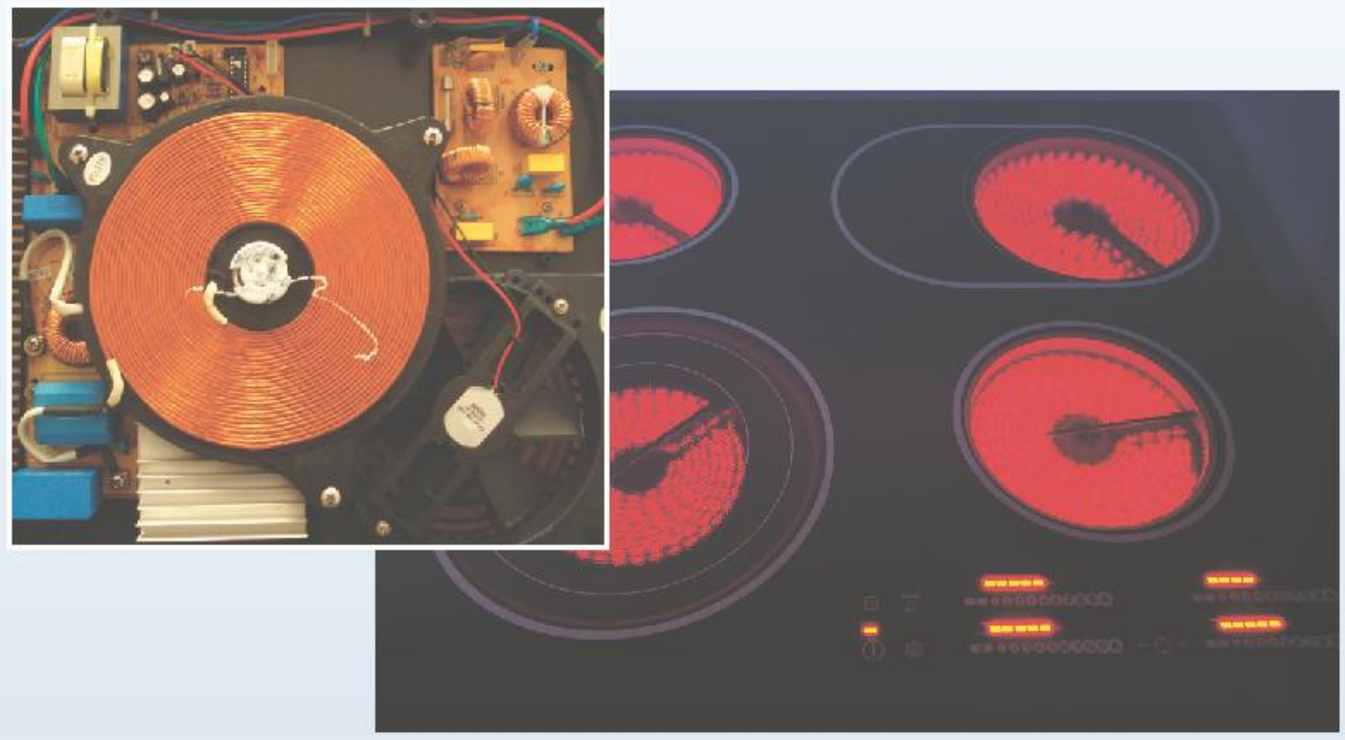
Strömmens toppvärde kan vi beräkna genom sambandet

$$I_e = \frac{\hat{\imath}}{\sqrt{2}}.$$

Toppvärdet är

$$\hat{\imath} = \sqrt{2} \cdot I_e = \sqrt{2} \cdot 3{,}26\ \text{A} = 4{,}6\ \text{A}$$

EXEMPEL 12 Induktionsspis

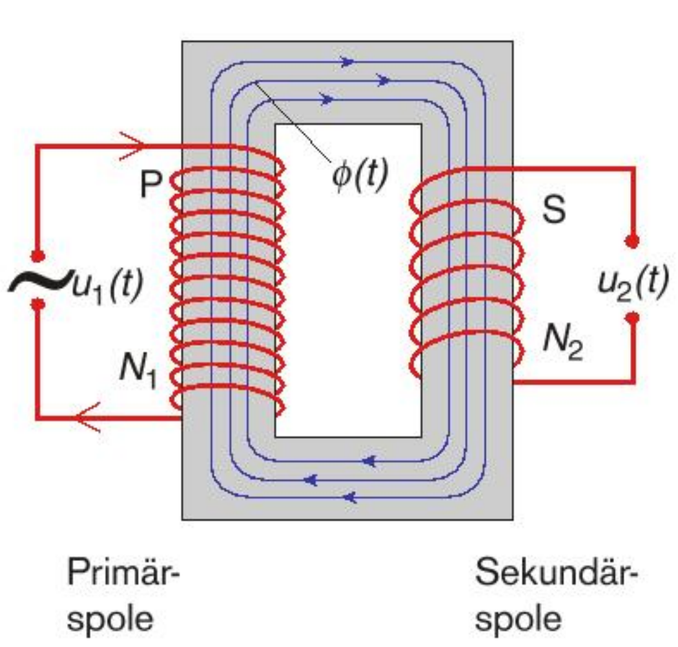


Växelströmmar utnyttjas också i hushållen. Moderna köksspisar har kokplattor av ett ickeledande material, till exempel keramik. Genom kokplattan sänds ett växlande magnetfält upp genom botten på den kastrull som ska värmas upp. Kastrullen värms då upp med magnetisk induktion. Smarta saker! Även om det är ström i plattan, så värms inget upp förrän kitteln sätts på plattan. Botten i sådana kastruller måste vara tillverkade av speciella magnetiska material. Om du träffar på sådana kastruller, kan du ta en liten magnet och kontrollera om botten är magnetisk.

Transformator

När vi överför elektrisk energi, ska energin ledas genom långa ledningar över stora avstånd. Effektförlusten i överföringsledningarna är $\Delta P = RI_e^2$ där R är resistansen och I_e strömmen. Av formeln ser du att effektförlusten blir den minsta möjliga när strömmen är den minsta möjliga. Då följer det av formeln $P = U_e I_e$ för den överförda effekten att spänningen U_e måste vara så stor som möjligt. Därför transformeras spänningen upp på produktionsplatsen och ned vid förbrukningsplatsen.

En transformator har en järnkärna med två spolar: primärspolen P med N_1 lindningsvarv och sekundärspolen S med N_2 lindningsvarv. Järnkärnan är oftast formad som en ring eller en sluten fyrkant med öppning i mitten. Se figur 7.18. Vi kopplar primärspolen till en sinusformad växelspänning $u_1(t)$. I primärspolen går det då en växelström som alstrar ett *varierande* magnetfält i järnkärnan. Därmed uppstår det flödesvariationer i sekundärspolen så att det induceras en växelspänning $u_2(t)$ där. Vi utgår från att de magnetiska fältlinjerna håller



7.18 Transformator med järnkärna och två spolar, en modern version av Faradays ring.

sig inom järnkärnan. Då gäller det här resultatet med god noggrannhet för spänningarnas *effektivvärden:*

SPÄNNING OCH LINDNINGSTAL

I en transformator är förhållandet mellan spänningarna lika med förhållandet mellan lindningstalen,

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Strömmen genom primärspolen är I_1, och strömmen genom sekundärspolen är I_2. Både I_1 och I_2 är effektivvärden. Med god noggrannhet kan vi säga att den effekt $P_2 = U_2I_2$ som sekundärspolen avger, är lika med den effekt $P_1 = U_1I_1$ som matas in i primärspolen. Vi har alltså $U_2I_2 = U_1I_1$. Om vi använder förhållandet att $U_2/U_1 = N_2/N_1$, får vi följande regel:

STRÖM OCH LINDNINGSTAL

I en transformator utan effektförlust är förhållandet mellan strömmarna i spolarna lika med det *omvända* förhållandet mellan lindningstalen,

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

EXEMPEL 13 **En enkel transformator**

I en transformator har primärspolen 800 lindningsvarv och sekundärspolen 50 lindningsvarv. Primärspolen är kopplad till en växelspänning med effektivvärdet 230 V. Ett motstånd med resistansen $R = 1{,}50\ \Omega$ är kopplad till sekundärspolen. Beräkna sekundärströmmen och primärströmmen.

Lösning: Spänningen över sekundärspolen är

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 230 \cdot \frac{50}{800}\ \text{V} = 14{,}4\ \text{V}$$

Strömmen genom sekundärspolen får vi med Ohms lag

$$I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{14{,}4}{1{,}50}\ \text{A} = 9{,}6\ \text{A}$$

Strömmen I_1 i primärspolen blir

$$I_1 = \frac{U_2I_2}{U_1} = \frac{14{,}4 \cdot 9{,}6}{230}\ \text{A} = 0{,}60\ \text{A}$$

EXEMPEL 14 **Magnetisk koppling**

Vi ska koppla två elektriska kretsar till varandra utan att använda ledningar mellan kretsarna. Det kan vi åstadkomma genom att använda den *magnetiska kopplingen* som vi har sett i figur 7.18. Den visar en transformator med primärkretsen *P* och sekundärkretsen *S*. De två kretsarna är sammankopplade med hjälp av transformatorns järnkärna. När det går en växelström i primärkretsen, så kommer det varierande magnetfältet i järnkärnan att inducera en växelström i sekundärkretsen. Strömmen i primärkretsen kan därför styra strömmen i sekundärkretsen.

Fördelen med en sådan koppling är att strömmen i primärkretsen inte kommer direkt in i sekundärkretsen, utan bara «fjärrstyr» strömmen i sekundärkretsen. Det är magnetfältet i järnkärnan som blir «mellanledet» mellan de två kretsarna. Om det av en eller annan anledning blir kortslutning i sekundärkretsen, behöver inte detta nödvändigtvis leda till kortslutning i primärkretsen. De två kretsarna opererar elektriskt sett oberoende av varandra.

Varje transformator fungerar som en magnetisk koppling. Det gäller både stora transformatorer som används vid energiöverföring med högspänningsledningar, och små transformatorer som används i lågspänningskretsar, till exempel radio- och TV-apparater, mikrovågsugnar och eltandborstar.

I badrummet
Batteridrivna tandborstar och rakapparater av nyare typ har ingen direkt elektrisk koppling mellan ledningsnätet för 230 V och batterienheten. Kopplingen sker via en liten transformator. Primärspolen är kopplad till ledningsnätet och sekundärspolen till batteriet. Var och en av spolarna är inbyggd i ett plasthölje,och det finns inte någon ledningssladd som förbinder dem. Detta speciella sätt att koppla på har stora fördelar i våtrum, där vi måste förhindra att elektriska ledningar kommer i kontakt med vatten.



KONTROLLFRÅGOR

- Vilken är den generella definitionen av magnetiskt flöde?
- Hur definieras vinkelhastighet när vinkelhastigheten är konstant?
- Vilken energiomvandling sker i en elektrisk generator?
- Vad menas med effektivvärdet av en växelström och av en växelspänning?
- Hur är en transformator uppbyggd?
- Vad använder vi transformatorer till?
- Vilket samband gäller mellan spänningarna och lindningstalen i en transformator?
- Hur stor är vinkelhastigheten för en visare som roterar 10 varv per sekund?
- Vinkelhastigheten för en roterande slinga är 1570 rad/s. Hur stor är dess rotationsfrekvens?
- En växelspännings toppvärde är 28 V. Hur stort är effektivvärdet?
- En växelströms effektivvärde är 5,0 A. Hur stort är toppvärdet?
- Antalet varv i spolarna i en transformator är 300 varv respektive 15 000 varv. Man kopplar en spänning på 150 V till transformatorn. Vilka två möjliga spänningar kan man få ut från transformatorn?

7.5 Elektromagnetiska vågor

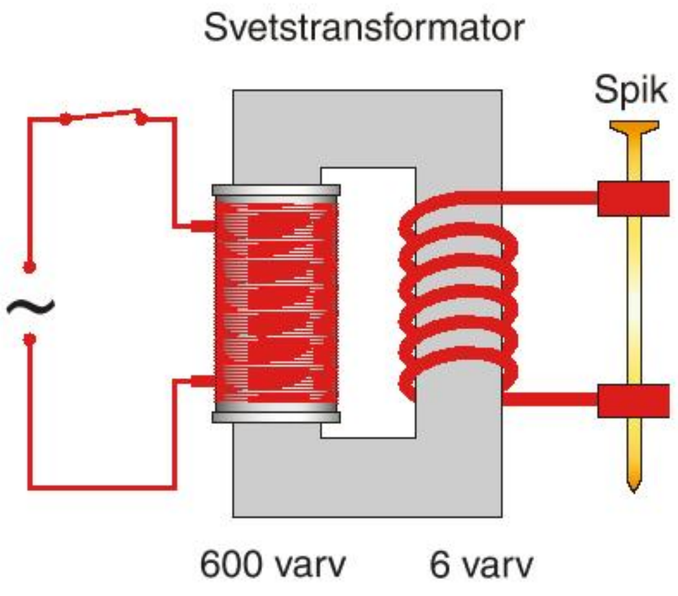
I elektromagnetiska vågor är det elektriska och magnetiska fält som svänger. I vakuum utbreder sig vågorna med ljushastigheten $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s.

Termisk strålning

Alla föremål sänder ut elektromagnetisk strålning. Hur mycket strålning föremålen sänder ut och vilka våglängder som är dominerande, beror på temperaturen. Därför kallar vi strålningen för *termisk strålning*. Ju högre temperatur föremålen har, desto starkare blir strålningen och desto kortare blir de dominerande våglängderna. Den termiska strålningen från solen värmer upp stugväggen till påsken, och den termiska strålningen från den öppna spisen får dina kinder att hetta.



Vi kan *se* strålningen från föremål med temperaturer över 1 500 K, men föremål sänder ut strålning vid *alla* temperaturer. Din egen strålning är starkast i infrarött. Till och med i ett rum som är helt mörkt för våra ögon, kommer du att stråla infrarött mätt mot en bakgrund som har en annan temperatur. Du har kanske sett skräckfilmer där någon skum typ jagar hjälten eller hjältinnan i halvmörker med hjälp av IR-kikare?



7.19 En glödande spik.

EXEMPEL 15 **Temperaturstrålning**

Våglängden hos den strålning som är mest dominerande, varierar med temperaturen. Det kan vi visa med ett försök. Se figur 7.19.

Vi värmer upp en spik med hjälp av en liten svetstransformator. När spiken är kall, sänder den inte ut synlig strålning. När spiken blir varmare, börjar den glöda. Först är den rödglödgande, därefter gul och slutligen gulvit. Spiken sänder ut ljus med högre och högre frekvens och kortare och kortare våglängd i takt med att temperaturen stiger.

Noggranna mätningar visar att termisk strålning innehåller *alla* våglängder. Det vill säga att spektret är *kontinuerligt*.

Erfarenheten visar att ett föremål som *absorberar* mycket strålning, också *emitterar* mycket strålning. Ett föremål som absorberar lite strålning, emitterar lite strålning. Om du är i *skuggan* på en varm plats och vill bli så sval som möjligt, så bör du ha mörka kläder. Men om du vill behålla värmen, så bör du ha ljusa kläder. I verkligheten spelar även luftens rörelse en roll. Se på klädseln i varmt torrt klimat till exempel.

En *svart kropp* definieras i fysiken som ett föremål som absorberar *all* strålning som träffar det. När temperaturen är given, är svarta föremål de som också *emitterar mest* strålning! Att betrakta ett föremål som en svart kropp är för det mesta en idealiserad modell, ungefär



Om du har gått barfota på mörk asfalt en solig sommardag förstår du varför ljus klädsel i solen kan vara bra. Men varför klädsel över huvud taget? Verkligheten innebär mer än strålningsbalans. Den innebär bland annat avkylande perspiration och luftströmmar inne i en löst sittande klädsel. Uråldrig vardagsteknologi.

som när vi betraktade rörelse utan luftmotstånd eller friktion. De flesta föremål omkring oss reflekterar ljus och får på det viset sina färger. Stjärnor däremot strålar ungefär som svarta kroppar. Det kommer vi tillbaka till i kapitel 8. Strålningslagarna är ganska enkla för svarta kroppar. Låt oss se lite närmare på termisk strålning från sådana kroppar.

Ett föremål som sänder ut strålning, sänder ut energi. Den mängd energi det sänder ut per ytenhet och tid, kallar vi *utstrålningstätheten*.

UTSTRÅLNINGSTÄTHETEN

Utstrålningstätheten *U* från ett föremål är lika med utstrålad effekt per ytenhet av föremålet,

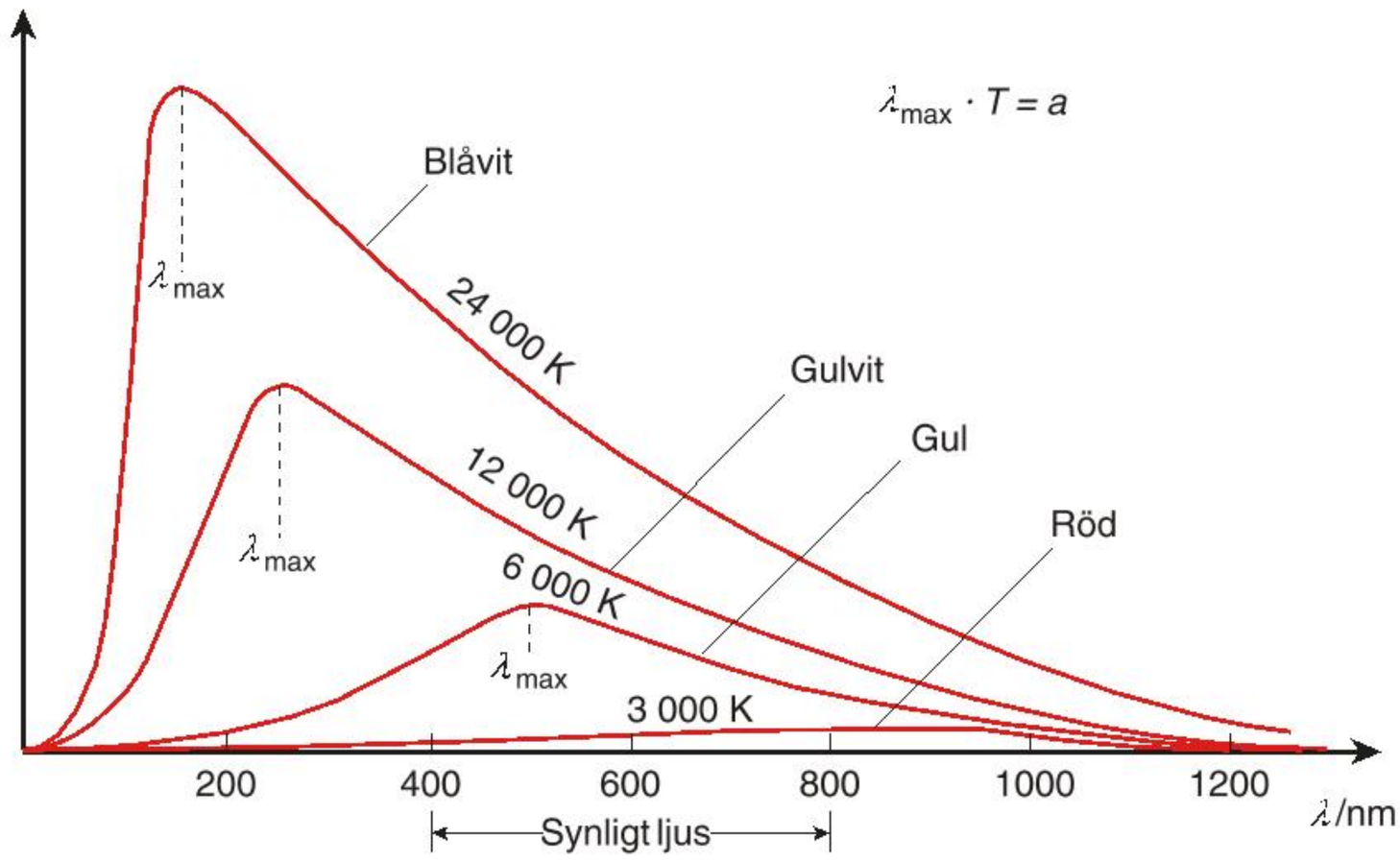
$$U = \frac{P}{A}$$

Enheten för utstrålningstäthet är W/m^2.

År 1900 kom Max Planck fram till en lag som visar hur utstrålningstätheten från en svart kropp varierar med våglängden λ och temperaturen T. När vi framställer Plancks strålningslag grafiskt med våglängden λ på x-axeln, får vi så kallade *planckkurvor*. Figur 7.20 visar planckkurvor för fyra olika temperaturer. Planckkurvorna visar oss två viktiga saker:

- Utstrålningstätheten varierar med våglängden
- Utstrålningstätheten ökar när temperaturen stiger.

Vi ska undersöka dessa lagbundenheter lite närmare.



7.20 Planckkurvor för fyra olika temperaturer.

Wiens förskjutningslag

Toppunkten på planckkurvan svarar mot en våglängd som vi kallar λ_{max}. Planckkurvorna i figur 7.20 visar att ju högre temperaturen T är, desto mindre är våglängden λ_{max}.

WIENS FÖRSKJUTNINGSLAG

Våglängden för energimaximum i termisk strålning är omvänt proportionell mot temperaturen hos föremålet som strålar. Vi kan skriva

$$\lambda_{max} = \frac{a}{T} \qquad \text{eller} \qquad \lambda_{max}\, T = a$$

där konstanten $a = 2{,}90 \cdot 10^{-3}$ Km.

Den tyske fysikern Wilhelm Wien (1864–1928) kom fram till denna lag *innan* Planck upptäckte sin strålningslag.

EXEMPEL 16 **Lampglöd**

Glödtråden i en glödlampa har ungefär temperaturen 1 700 °C. Detta motsvarar ungefär $T = 2\,000$ K.

Våglängden för energimaximum hos strålningen från lampan är därför

$$\lambda_{max} = \frac{a}{T} = \frac{2{,}90 \cdot 10^{-3}}{2000}\ \text{m} = 1{,}45 \cdot 10^{-6}\ \text{m}$$

Denna våglängd ligger långt ute i den *infraröda* delen av spektret. Det betyder att det mesta av utstrålningen är infraröd, och att glödlampan *inte* är så effektiv som ljuskälla.

EXEMPEL 17 **Färgtemperatur**

Solstrålningen har energimaximum vid våglängden $\lambda_{max} = 490$ nm, som ligger i den *gulgröna* delen av spektret. Utifrån detta kan vi beräkna temperaturen på solytan:

$$T = \frac{\text{a}}{\lambda_{max}} = \frac{2{,}90 \cdot 10^{-3}}{490 \cdot 10^{-9}}\ \text{K} = 5{,}9 \cdot 10^{3}\ \text{K}$$

Vi säger att solens *färgtemperatur* är lika med 5 900 kelvin.

Stefan-Boltzmanns lag

En svart kropp sänder ut termisk strålning med *alla* våglängder, även om vissa våglängder är mer dominerande än andra. Den totala utstrålningstätheten U vid temperaturen T ges av följande lag:

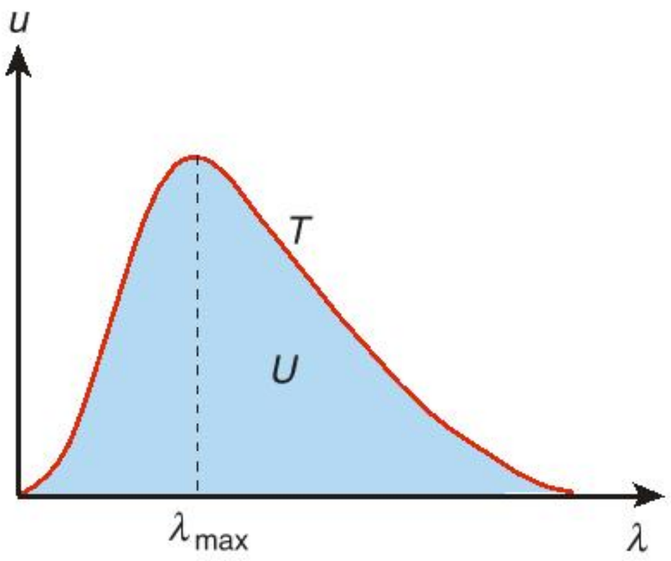
σ är den grekiska bokstaven sigma.

STEFAN-BOLTZMANNS LAG

Utstrålningstätheten från en svart kropp är proportionell mot fjärde potensen av föremålets temperatur,

$$U = \sigma T^4$$

där konstanten σ har värdet $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m^{2}K^4.



7.21 Den färglagda arean motsvarar utstrålningstätheten U.

De österrikiska fysikerna Josef Stefan (1835–93) och Ludwig Boltzmann (1844–1906) kom fram till denna lag *innan* Planck upptäckte sin strålningslag. Se figur 7.21.

EXEMPEL 18 **Strålande människor och glödlampor**

Människokroppen har yttemperaturen 27 °C, som ungefär motsvarar $T = 300$ K. Om vi tänker oss att kroppen strålar som en svart kropp, har den en utstrålningstäthet på

$$U = \sigma T^4 = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^4 \text{ W/m}^2 = 460 \text{ W/m}^2$$

Hur strålande är du? Om du kan räkna ut hur stor kroppsyta du har, så kan du beräkna hur stor effekt du utstrålar totalt.

Glödtråden i en glödlampa har en temperatur runt 2 000 K.

Om vi även här antar att glödtråden strålar som en svart kropp, blir utstrålningstätheten

$$U = \sigma T^4 = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 2000^4 \text{ W/m}^2 = 900 \text{ kW/m}$$

EXEMPEL 19 **Effektiv temperatur**

De flesta stjärnor strålar ungefär som svarta kroppar. För en stjärna med radien R och yttemperaturen T blir den utstrålade effekten

$$P = UA = U \cdot 4\pi R^2 = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2$$

Solen strålar med effekten $P = 3{,}9 \cdot 10^{26}$ W och solradien är $R = 7{,}0 \cdot 10^8$ m. Utifrån detta kan vi beräkna temperaturen på solytan. Ekvationen $P = \sigma T^4 \cdot 4\pi R^2$ ger

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma 4\pi R^2}} = \sqrt[4]{\frac{3{,}9 \cdot 10^{26}}{5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 4\pi \cdot \left(7{,}0 \cdot 10^8\right)^2}}\ \text{K} = 5{,}8 \cdot 10^3\ \text{K}$$

Vi säger att solens *effektiva temperatur* är lika med 5 800 K. Det stämmer bra med färgtemperaturen 5 900 K som vi räknade fram med hjälp av Wiens förskjutningslag.

EXEMPEL 20 **Utstrålningen från jorden**

Utstrålningstätheten från jorden har beräknats till $U = 240\ \text{W/m}^2$. Vi utgår från att jorden med atmosfär strålar som en svart kropp. (Till detta kommer reflekterat solljus, som gör att rymdfararna kan *se* jorden från världsrymden.) Stefan-Boltzmanns lag $U = \sigma T^4$ ger då temperaturen

$$T = \sqrt[4]{\frac{U}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{240}{5{,}67 \cdot 10^{-8}}}\ \text{K} = 255\ \text{K}$$

Det här är medeltemperaturen på planeten jorden som den skulle ha varit utan atmosfär. På *jordytan* är medeltemperaturen 288 K. Skillnaden på 33 K beror på *växthuseffekten*. Vi har alltså en naturlig växthuseffekt. Utan den skulle vi inte finnas.

KONTROLLFRÅGOR

- Hur stor hastighet har elektromagnetiska vågor i vakuum?
- Varför kan elektromagnetiska vågor gå genom vakuum, något som ljudvågor inte kan?
- Vad är termisk strålning?
- Vad menas med en svart kropp?
- Hur definieras utstrålningstätheten från ett föremål?
- Vad är en planckkurva?
- Vilken information får vi av Wiens förskjutningslag?
- Vad berättar Stefan-Boltzmanns lag för oss?
- En yta på 25 dm^2 strålar med en effekt på 80 W. Hur stor är utstrålningstätheten? Hur hög är temperaturen?
- Vilken temperatur har ett föremål som har energimaximum vid våglängden $\lambda_{max} = 580$ nm?
- En järnbit har temperaturen 450 °C. Vilken är våglängden λ_{max} för energimaximum?
- Hur stor är utstrålningstätheten för en svart kropp med temperaturen 0 °C?

SAMMANFATTNING

Induktion

Induktionsfenomenet

Ett magnetfält som *varierar,* kan alstra en elektrisk ström.

Lenz' lag: En inducerad elektrisk ström motverkar sin orsak.

Inducerad spänning

Generatorformeln: När ett rätlinjigt ledarstycke rör sig vinkelrätt mot ett magnetfält och vinkelrätt mot sin egen längdriktning, så induceras en elektromotorisk spänning i ledarstycket. Spänningen bestäms av ledarstyckets hastighet v, flödestätheten B i magnetfältet och ledarens längd l

$$e = vBl$$

Faradays induktionslag

Magnetiskt flöde genom en yta är lika med

$$\Phi = BA\cos\varphi$$

Faradays induktionslag: När det magnetiska flödet genom en ledarslinga varierar, så induceras det en elektromotorisk spänning i ledarslingan:

$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

Induktionsströmmens riktning tar du reda på med hjälp av Lenz' lag och högerhandsregeln.

Växelspänning

Generator: När en spole roterar med konstant vinkelhastighet i ett konstant magnetfält, så induceras det en sinusformad växelspänning i spolen

$$e(t) = \hat{e}\sin\omega t$$

Transformatorn används till att förändra växelspänningar. När lindningstalet är N_1 på primärspolen och N_2 på sekundärspolen, gäller

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{och} \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

där U och I är effektiv spänning och ström.

Termisk strålning

Wiens förskjutningslag: Våglängden λ_{max} för energimaximum vid temperaturen T ges av

$$\lambda_{max} \cdot T = a = 2{,}90 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K \cdot m}$$

Stefan-Boltzmans lag: Utstrålningstätheten U vid temperaturen T ges av $U = \sigma T^4$

Elektromagnetiska vågor

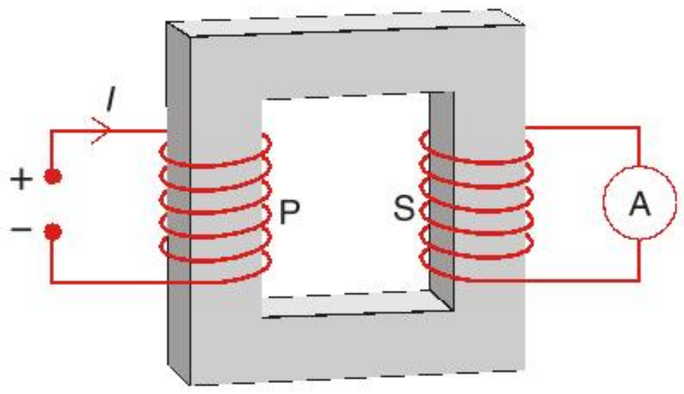
I elektromagnetiska vågor är det elektriska och magnetiska fält som svänger. I vakuum utbreder sig vågorna med ljushastigheten

$$c = 3{,}00 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}.$$

RÄKNA FYSIK

Induktionsfenomenet

7.01 Figuren visar en järnkärna med två spolar, P och S. P-spolen är kopplad till en variabel likspänningskälla. S-spolen är kopplad till en känslig amperemeter. När det går ström i P-spolen, uppstår det ett magnetfält inne i hela järnkärnan, alltså också inne i S-spolen.



Järnkärna

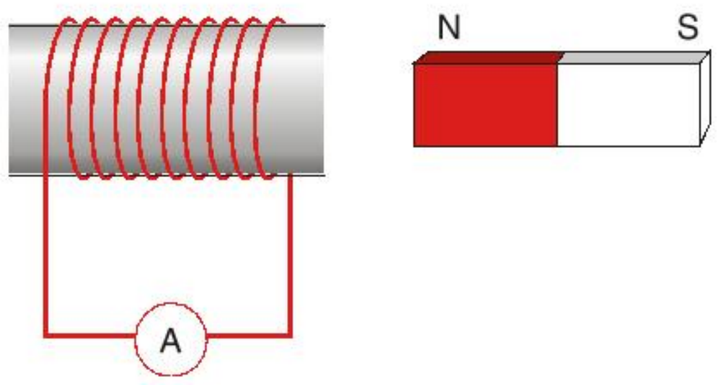
a Vad är villkoret för att det ska induceras en spänning i S-spolen?

b Avgör i vilka av fallen nedan som det induceras en spänning i S-spolen. Motivera svaren.

1) Vi slår på strömmen i P-spolen.
2) Vi låter det gå konstant ström i P-spolen.
3) Vi ökar strömmen i P-spolen.
4) Vi minskar strömmen i P-spolen.
5) Vi slår av strömmen i P-spolen.
6) Vi låter P-spolen vara utan ström.

c Amperemetern kan slå ut åt höger eller åt vänster, beroende på strömriktningen genom instrumentet. Det visar sig att amperemetern slår ut åt höger i fall 1) i b-uppgiften. Vad kan du säga om riktningen på amperemeterutslaget i de andra fallen i b-uppgiften?

7.02 Vi gör induktionsförsök med en spole och en stavmagnet. Se figuren.



a Vi låter stavmagneten närma sig spolen med nordpolen längst fram. Varför induceras det en spänning i spolen? Induktionsströmmen gör spolen till en magnet. Får spolen nordpol eller sydpol närmast stavmagneten? Bestäm strömriktningen i spolen.

b Vi låter spolen närma sig stavmagneten. Induceras det nu en spänning i spolen? Bestäm i så fall strömriktningen.

c Vi flyttar både spolen och magneten åt höger med samma hastighet. Induceras det då en spänning i spolen?

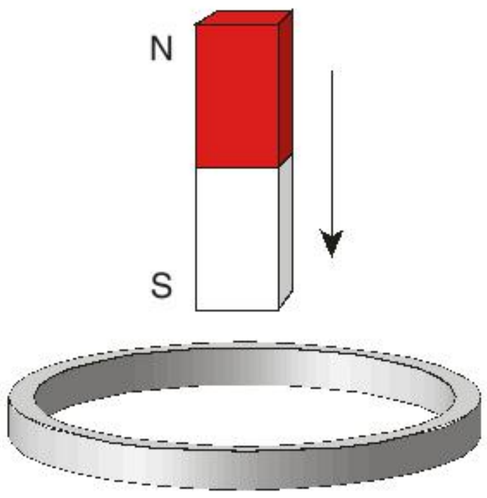
7.03 En stavmagnet faller genom en cirkelformad metallring. Under fallet induceras en spänning i ringen.

a Vad är det som gör att det induceras en spänning i ringen?

b Bestäm strömriktningen när sydpolen närmar sig ringen.

c Bestäm strömriktningen när nordpolen avlägsnar sig från ringen.

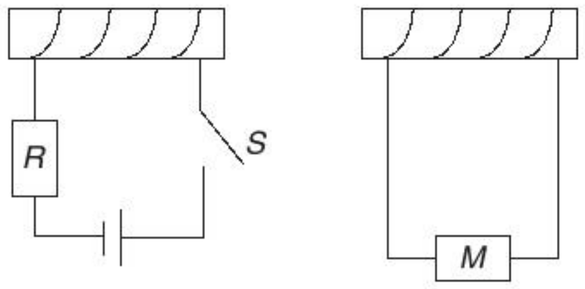
d Varför behöver stavmagneten lite längre tid för fallet än om metallringen inte hade varit där?



7.04 ★ Se figur. Vilken riktning får strömmen i resistorn *M* om

a brytaren *S* öppnas?

b resistansen hos *R* ökar?



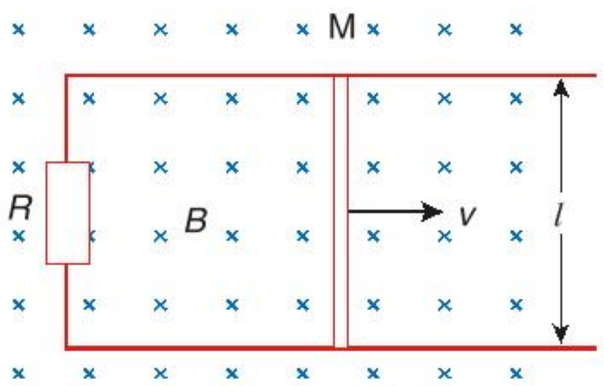
Inducerad spänning

7.05 Med en hastighet på 0,15 m/s rör sig en 2,4 dm lång ledare vinkelrät mot fältlinjerna i ett fält där flödestätheten är 28 mT. Hur stor spänning induceras i ledaren?

7.06 Ett flygplan rör sig vågrätt på ett ställe där den jordmagnetiska flödestätheten har en lodrät komposant på 50 μT nedåt. Mellan vingspetsarna induceras det en spänning på 0,46 V. Avståndet mellan vingspetsarna är 42 m. Hur stor hastighet har flygplanet? Vilken av vingspetsarna är positiv?

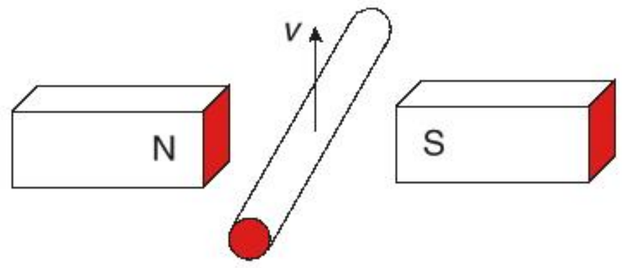
7.07 En bil kör med en hastighet av 90 km/h på en horisontell väg där det jordmagnetiska fältet är 52 μT och inklinationsvinkeln är 68°. Hur stor spänning induceras mellan ändarna på en 1,6 m lång axel?

7.08 En ledarkrets ligger vinkelrätt mot ett homogent magnetfält med flödestätheten $B = 0{,}75$ T, som figuren visar. Ledarstycket M har längden $l = 0{,}40$ m och rör sig med konstant hastighet $v = 0{,}24$ m/s. Resistansen i kretsen är $R = 0{,}18\ \Omega$. Det finns ingen friktion.

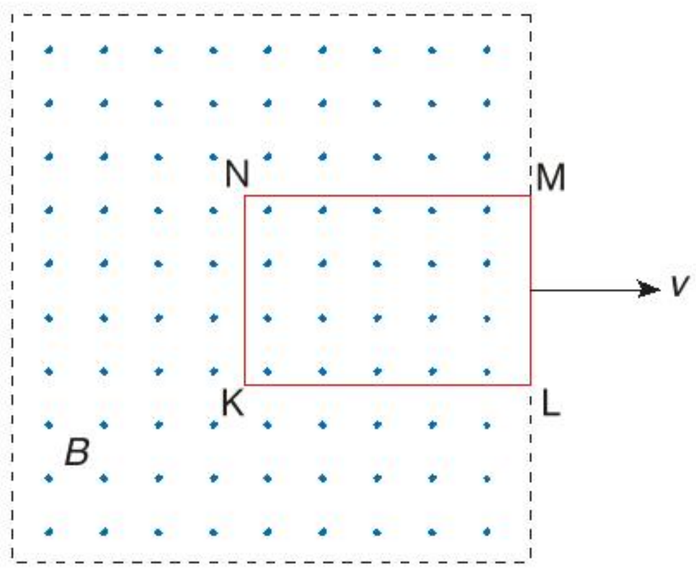


a Beräkna den inducerade spänningen och strömmen i ledarkretsen. Bestäm strömriktningen.
b Om ledarstycket M ska hålla konstant hastighet, måste vi skjuta det med en kraft i hastighetsriktningen. Förklara varför. Beräkna skjutkraften.
c Beräkna den elektriska effekten som utvecklas i kretsen.

7.09 En ledare rör sig horisontellt mellan polerna på en magnet. Se figur. Magnetfältet mellan polerna kan betraktas som homogent med styrkan 0,84 T. När ledaren rör sig med hastigheten 85 cm per sekund induceras en spänning på 57 mV.
a Vilken av ändarna kommer att vara positivt laddad. Motivera.
b Hur stor är den del av ledaren som befinner sig inne i magnetfältet?



7.10 En rektangelformad krets KLMN är vinkelrät mot ett homogent magnetfält med flödestätheten $B = 0{,}80$ T. Vi drar ut kretsen ur magnetfältet med konstant hastighet $v = 0{,}10$ m/s. Se figuren. Så snart kortsidan LM kommer ut ur magnetfältet, börjar det gå en induktionsström i kretsen.

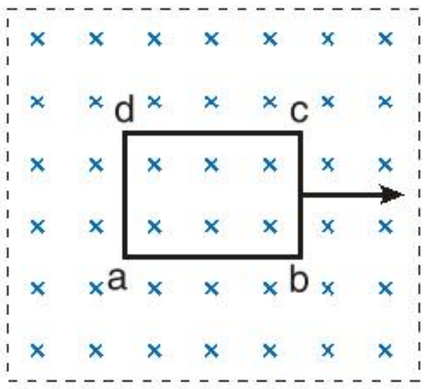


Magnetfält ut från pappret

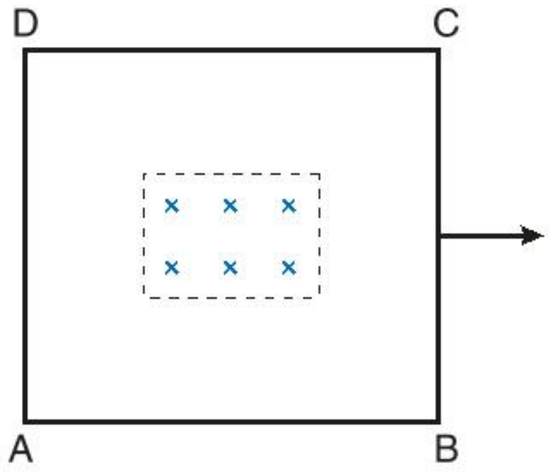
a Bestäm strömriktningen.
b I kretsen är KL = NM = 0,20 m och KN = LM = 0,15 m. Resistansen är 16 mΩ. Beräkna den inducerade spänningen och strömmen i kretsen.
c Hur länge går det induktionsström i kretsen? Hur stor elektrisk energi utvecklas i kretsen?

Faradays induktionslag

7.11 **a** Vi flyttar en ledarkrets abcd som figur a) visar. Magnetfältet är homogent. Varför induceras det ingen spänning så länge hela ledarkretsen är innanför magnetfältet?



a)



b)

b Vi flyttar en ledarkrets ABCD som figur b) visar. Magnetfältet är homogent. Varför blir det ingen inducerad ström så länge ledarkretsen omsluter hela magnetfältet?

7.12 Det magnetiska flödet genom en krets ökar jämnt från 5,0 Wb till 6,8 Wb på 2,4 s. Beräkna den inducerade spänningen i kretsen.

7.13 ★ En cirkulär metallslinga med radien 0,20 m befinner sig i ett homogent magnetiskt fält. Fältet är orienterat vinkelrätt mot slingan. Plötsligt minskar magnetiska flödestätheten genom slingan från 145 mT till 75 mT på 0,25 s. Det kommer då att gå en ström i slingan. Bestäm medelvärdet av denna ström om slingans resistans är 1,5 Ω/m.

7.14 En spole har 800 varv. Det magnetiska flödet genom spolen ändras likformigt från 140 mWb till 320 mWb på tiden 0,12 s. Hur stor spänning induceras över spolen?

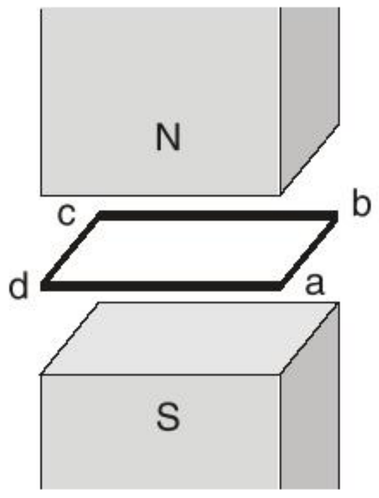
7.15 Vi går tillbaka till kretsen i uppgift 7.10.

a Hur stort är det magnetiska flödet genom kretsen när den är helt inne i magnetfältet?

b Bestäm flödesändringen i kretsen när vi drar ut den helt ur magnetfältet.

c Använd *Faradays induktionslag* för att bestämma hur stor den inducerade spänningen blir och induktionsströmmens riktning i kretsen.

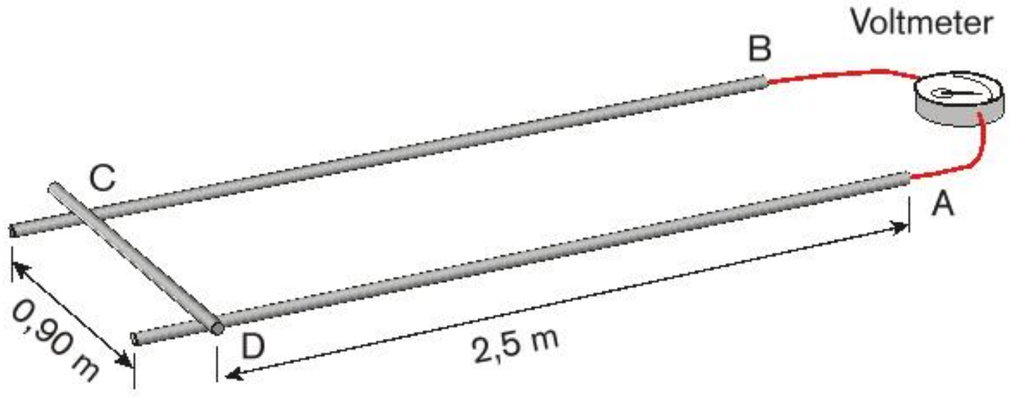
7.16 ★ En kvadratisk spole *abcd* är placerad vinkelrätt mot fältlinjerna i det homogena magnetfältet mellan två magnetpoler. Se figuren. Spolen har 280 lindningsvarv, kantlängden är 2,0 cm och resistansen 5,0 Ω.



a Vi minskar flödestätheten i magnetfältet jämnt från 0,55 T till 0,25 T på 0,80 s. Beräkna inducerad spänning i spolen. Beräkna också den inducerade strömmen, och bestäm strömriktningen.

b Medan flödestätheten är 0,25 T, drar vi spolen med konstant hastighet sidlänges ut ur magnetfältet på 1,2 s. Bestäm induktionsströmmen och strömriktningen i spolen.

7.17 ★ Vi ska bestämma den magnetiska flödestätheten i ett rum. Vi kopplar en voltmeter till ändpunkterna *A* och *B* på två parallella metallskenor. Se figuren.

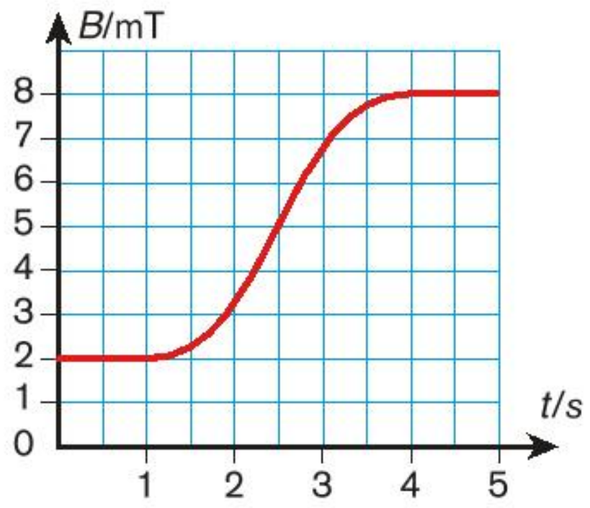


Vi lägger en metallstav på tvärs över metallskenorna med kontakt i punkterna C och *D*. Rektangeln *ABCD* är vinkelrät mot det homogena magnetfältet. Så skjuter vi metallstaven så att avståndet mellan *AB* och *CD* minskar från 2,5 m till 1,1 m på 1,2 s. Under denna tid visar voltmetern en konstant spänning på 60 μV. Hur stor är den magnetiska flödestätheten i rummet?

7.18 ★★ En spole med 50 lindningsvarv och tvärsnittsarean $2{,}0 \cdot 10^{-3}$ m^2 är placerad med spolaxeln parallell med fältlinjerna i ett homogent magnetfält. Den magnetiska flödestätheten varierar med tiden som figuren visar.

a Beräkna maxvärdet av den inducerade spänningen i spolen.

b Rita en kurva som visar hur storleken på den inducerade spänningen varierar med tiden.



Växelspänning

7.19 En visare roterar N varv/s med vinkelhastigheten ω rad/s.

a Bestäm N om $\omega = 50$ rad/s.

b Bestäm ω om N = 800 varv/s.

7.20 Bestäm effektivvärdet för en växelspänning om toppvärdet är 140 V.

7.21 Peter mäter effektivvärdet av strömmen genom sin brödrost. Han får det till 2,5 A. Hur stor är strömmens toppvärde?

7.22 En 60 W lampa är kopplad till nätspänningen 230 V. Beräkna effektivvärdet och toppvärdet av strömmen genom lampan.

7.23 ★ En spole med N lindningsvarv roterar med konstant vinkelhastighet ω i ett homogent magnetfält. Rotationsaxeln är vinkelrät mot fältlinjerna. Det magnetiska flödet genom vart och ett av spolens lindningsvarv ges av $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, där Φ_m är det maximala flödet.

a Bestäm en formel för den inducerade spänningen i spolen.

b Beräkna toppvärdet av spänningen när $N = 140$, $\Phi_m = 2{,}50 \cdot 10^{-3}$ Wb och $\omega = 100\pi\,\text{s}^{-1}$. Hur många varv per sekund roterar spolen?

c Den inducerade spänningen får större toppvärde om spolen i b) roterar snabbare. Hur stor måste vinkelhastigheten vara om toppvärdet ska bli 132 V? Hur många varv per sekund gör spolen då?

7.24 En transformator med 1 000 lindningsvarv på primärspolen är kopplad till nätspänningen 230 V.

a Hur många lindningsvarv måste sekundärspolen ha för att sekundärspänningen ska bli 12 V?

b Till sekundärspolen kopplar vi en lampa som är märkt 30 W, 12 V. Beräkna sekundärströmmen och primärströmmen när lampan lyser normalt.

7.25 ★ Med ett elverk transformeras spänningen upp från 11 kV till 132 kV. Sekundärspolen i transformatorn har 42 000 lindningsvarv.

a Beräkna antalet varv i primärspolen.

b Generatorn levererar en effekt på 36 MW till primärsidan. Beräkna primärströmmen och sekundärströmmen om vi räknar med en effektförlust på 5,0% i transformatorn.

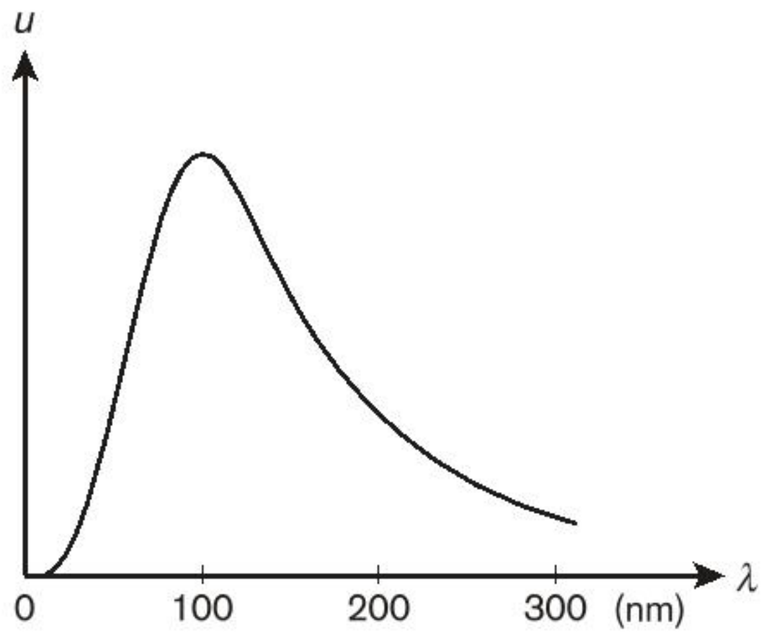
Elektromagnetiska vågor

7.26 En bit glödande järn har temperaturen 980 °C. Beräkna våglängden för energimaximum i strålningen från järnbiten.

7.27 Utstrålningstätheten för ett blyklot är 520 W/m^2. Vilken temperatur har klotet förutsatt att det strålar som en svart kropp?

7.28 Hur långt går elektromagnetiska vågor på 1 µs i vakuum?

7.29 Figuren visar planckkurvan för en viss stjärna.
a Bestäm stjärnans yttemperatur.
b Bestäm utstrålningstätheten från stjärnan.



7.30 **a** Glödtråden i en glödlampa bör sända ut mesta möjliga strålning i den synliga delen av spektret. Vilken temperatur måste glödtråden ha för att λ_{max} ska vara 600 nm?
b En elektrisk ugn har temperaturen 60 °C. Beräkna våglängden för energimaximum i strålningen från ugnen. I vilken del av spektret ligger λ_{max}?

7.31 ★ En klotformad 100 W glödlampa har en radie på 4,0 cm. Vi räknar med att den strålar som ett svart kropp, och lika i alla riktningar.
a Hur stor utstrålningstäthet har glödlampan?
b Hur hög är temperaturen? Kommentera svaret.

7.32 ★ Stjärnan Vega sänder ut strålning med energimaximum vid våglängden 299 nm. Utstrålad effekt är $2{,}3 \cdot 10^{28}$ W. Beräkna yttemperaturen och radien för Vega.

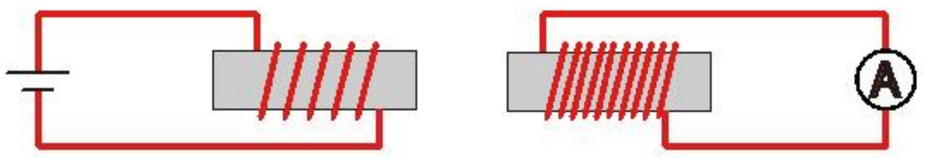
7.33 ★ För en elektromagnetisk våg gäller sambandet $c = E_m/B_m$ där E_m och B_m är maxvärdena av den elektriska fältstyrkan E och den magnetiska flödestätheten B i vågen.
a Visa att formeln ger enheten m/s för våghastigheten c.
b Från en mobiltelefon går det ut radiovågor med $B_m = 2{,}0$ µT. Beräkna E_m.

DISKUTERA FYSIK

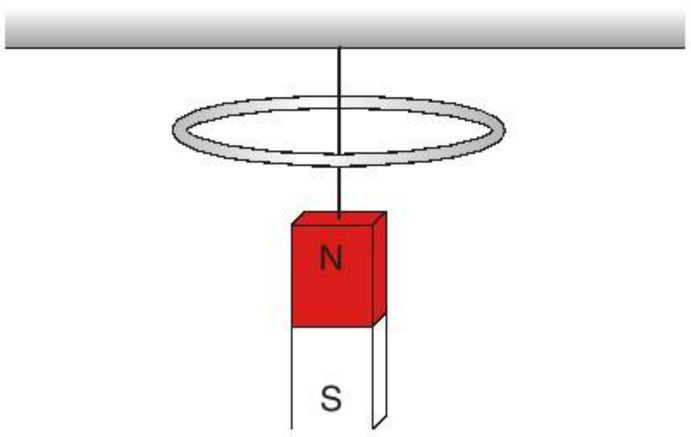
1 En 600-varvsspole placeras på en U-formad järnkärna med ok. 600-varvsspolen ansluts tillsammans med en glödlampa till ett batteri.
a Vad händer när oket snabbt tas av?
b Vad händer när oket snabbt läggs tillbaka?



2 En 600-varvsspole med järnkärna ansluts till en spänningskälla. En 10 000-varvsspole ansluten till en amperemeter placeras alldeles intill 600-varvsspolen enligt figur. När man hastigt drar ner spänningen kommer det i kretsen med 10 000-varvsspolen gå en medurs riktad ström. Hur kommer strömriktningen i 10 000-varvskretsen att bli om man istället för att hastigt dra ner spänningen snabbt
a drar ut järnkärnan i 600-varvsspolen?
b skjuter isär spolarna?



3 En stavmagnet hänger i ett snöre från ett tak. Man för en metallring upp över stavmagneten. Ringen släpps sedan så att dess plan är horisontellt hela tiden.
a Åt vilket håll kommer den inducerade strömmen att gå?
b Tar det längre tid för magneten att falla med eller utan magnet?
c Hur varierar spännkraften i snöret?



4 Om en aluminiumbit hålls mellan polerna på en stark magnet behövs det en kraft för att dra ut den ur det magnetiska fältet även om biten inte är magnetisk. Förklara.

5 En magnet som faller inuti ett metallrör kommer att uppnå en gränshastighet även om röret är evakuerat så att det inte finns något luftmotstånd. Förklara.

6 Är ljud en elektromagnetisk våg? Om inte, vad är den i så fall?

7 Kan elektromagnetiska vågor fortplanta sig genom vakuum? Hur är det med ljudvågor?

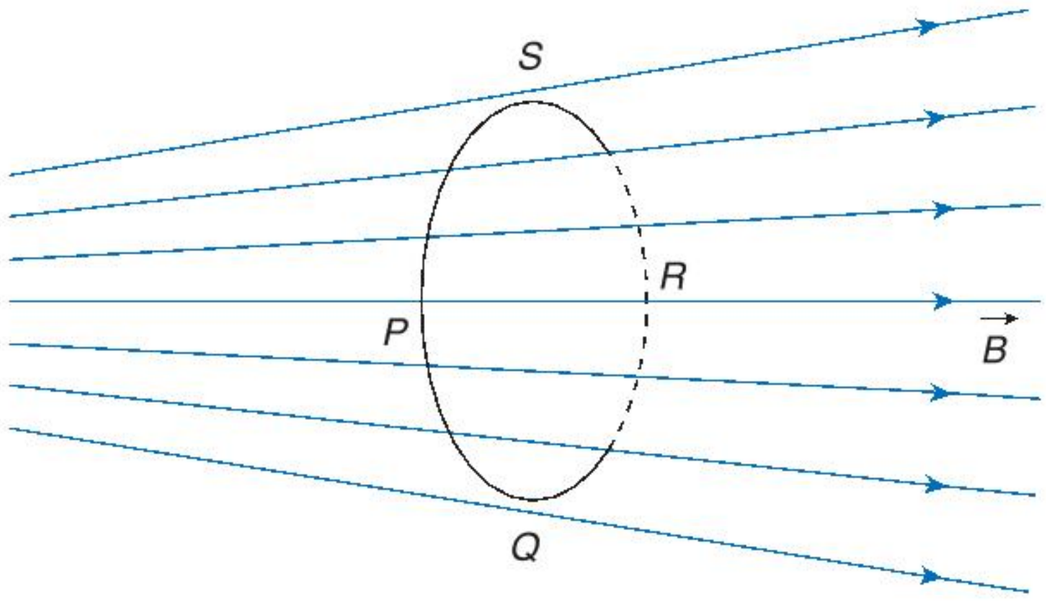
8 Ett flygplan flyger från Sydafrika till Europa. Det skär då de jordmagnetiska fältlinjerna och det induceras en spänning mellan planets vingspetsar. Vilken spets blir positivt laddad och vilken blir negativt laddad? Skulle denna inducerade spänning kunna driva planets ljussystem?

9 Är det möjligt att producera en konstant inducerad spänning under en kort tid?

10 På flygplatser får du ofta gå igenom en metalldetektor, som består av en spole med många varv. Spolen är en del av en resonanskrets. Hur fungerar detektorn?

11 På ett bord placeras en stor platt spole, som ansluts till en känslig galvanometer (amperemeter). En 5 kg vikt placeras i spolen. Om vikten snabbt lyfts upp ur spolen gör amperemetern utslag. Likadant om vikten snabbt ställs tillbaka. Varför gör amperemetern utslag? Fenomenet har en praktisk betydelse i trafiken. Vilken?

12 En ringformad ledare *PQRS* är placerad i ett icke-homogent magnetfält som figuren visar. *P* är den punkt på ringen som är närmast dig.



Vi flyttar ringen åt höger i figuren. Ringen är hela tiden vinkelrät mot fältlinjen genom centrum.

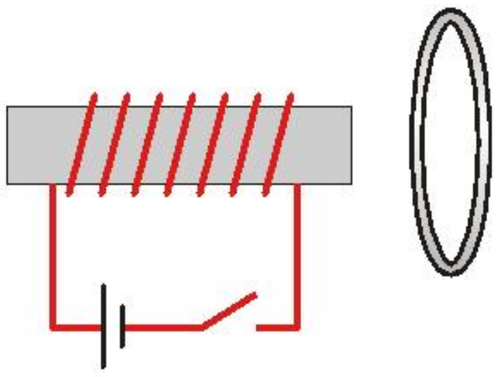
a Kommer flödet genom ringen att öka, minska eller vara konstant?

b Induceras det en ström i ringen? Vilken blir i så fall strömriktningen?

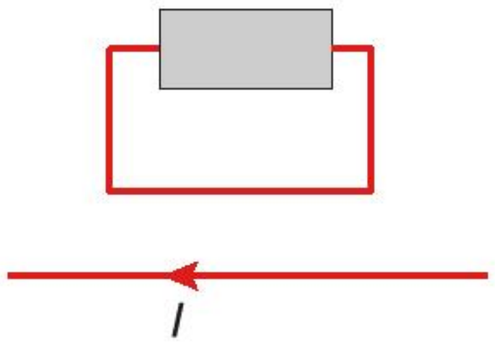
13 En 1 000 W glödlampa är tillverkad med mycket större area än en 100 W glödlampa. Vad är orsaken till det?

RESONERA FYSIK

1 En slinga placeras nära en elektromagnet, se figur. Åt vilket kommer den inducerade strömmen i slingan att gå när brytaren
- **a** sluts?
- **b** har varit sluten en lång stund?
- **c** bryts?

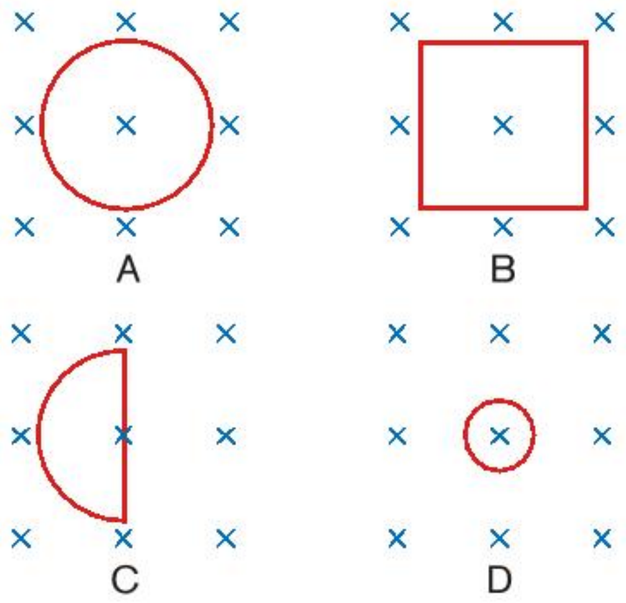


2 En metallslinga placeras i närheten av en ledare. Avgör om det induceras någon ström i slingan i nedanstående fall. Om det går ström ange om den går medurs eller moturs.

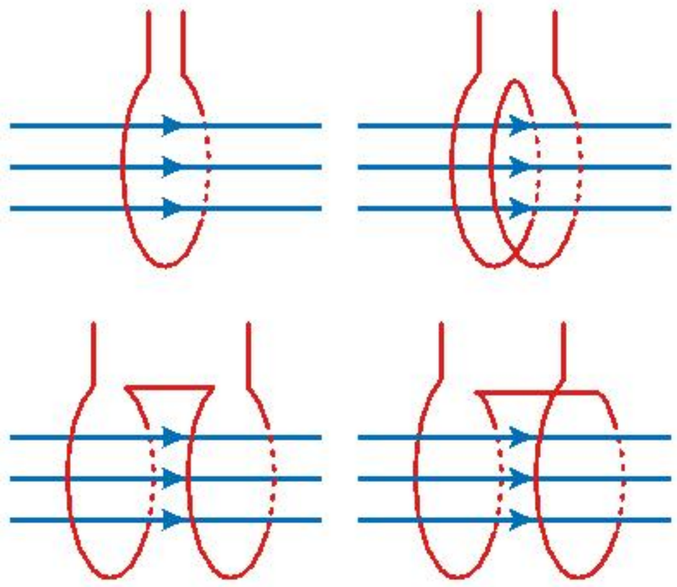


- **a)** Strömmen minskar snabbt till noll.
- **b)** Strömriktningen kastas snabbt om.
- **c)** Slingan rör sig snabbt åt höger i figuren (parallellt med ledaren).
- **d)** Slingan rör sig snabbt uppåt i figuren (från ledaren).
- **e)** Slingan rör sig långsamt åt vänster i figuren (parallellt med ledaren).
- **f)** Slingan rör sig långsamt nedåt i figuren (mot ledaren).

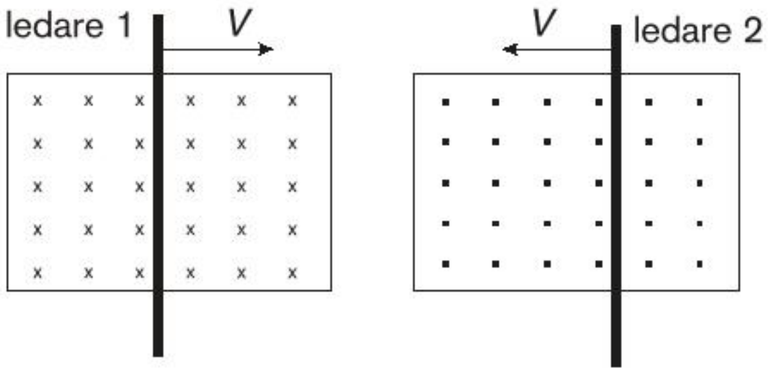
3 Flödestätheten ökar likformigt. I vilken slinga induceras det då
- **a** störst spänning?
- **b** minst spänning?



4 Flödestätheten minskar likformigt. Var induceras det då
- **a** störst spänning?
- **b** minst spänning?



5 Två ledare, 1 och 2, rör sig båda med farten v genom var sitt magnetfält, som figuren visar. Ledare 1 är till vänster i figuren och ledare 2 till höger. Magnetfältet i den vänstra figuren är riktat in i pappret och i den högra figuren ut ur pappret. I vilken av ledarna induceras en ström uppåt i ledaren?

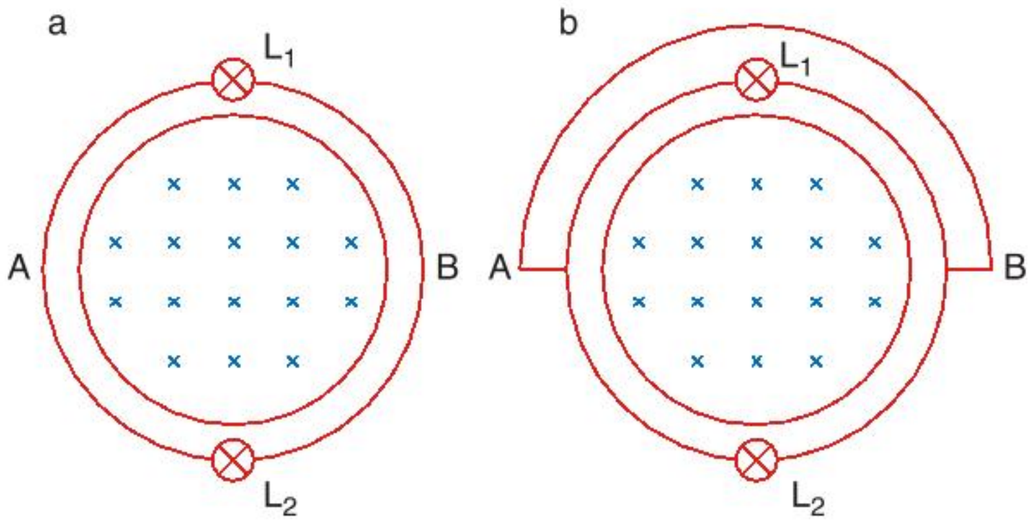


A Bara i ledare 1
B Bara i ledare 2
C I både ledare 1 och 2
D Inte i någon av ledarna

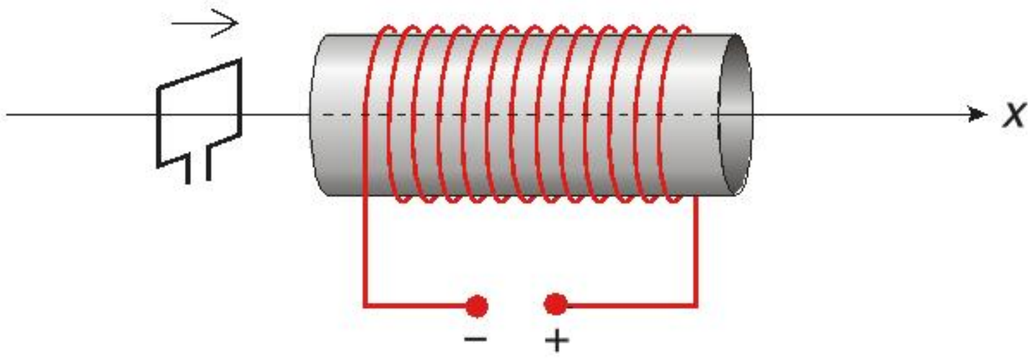
6 En spole genererar ett magnetiskt fält riktat in i pappret, se fig a. Runt spolen placeras en sluten krets med två stycken glödlampor L_1 och L_2. När strömmen genom spolen ändras kommer magnetfältet också att ändras och en ström kommer att flyta i kretsen. Det gör att lamporna L_1 och L_2 lyser.

Därefter ansluter man en resistansfri tråd mellan punkterna A och B, se fig b, och ändrar strömmen genom spolen på samma sätt som tidigare. Vilket av nedanstående påståenden är sant?

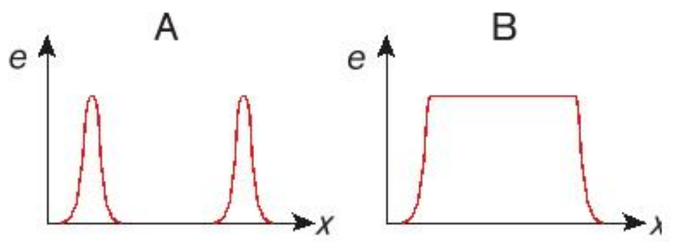
I Lamporna lyser inte alls.
II Lamporna lyser lika starkt som tidigare.
III Lampan L_1 lyser lika starkt och lampa L_2 inte alls.
IV Lampan L_1 lyser starkare och lampa L_2 inte alls.
V Lampan L_2 lyser lika starkt och lampa L_1 inte alls.
VI Lampan L_2 lyser starkare och lampa L_1 inte alls.

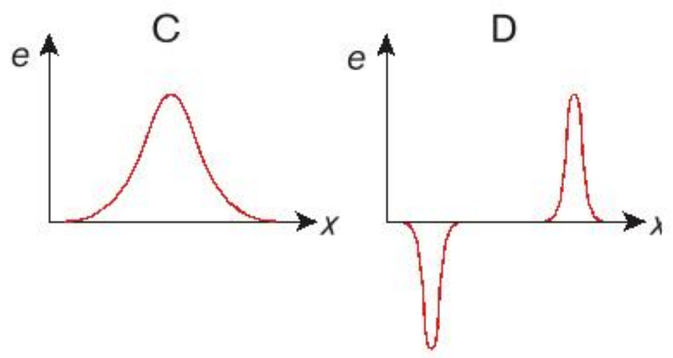


7 Figuren visar en lång rak spole som det går en konstant ström igenom. En liten slinga av koppartråd förs med konstant hastighet genom spolen längs dess axel. Slingans plan är hela tiden vinkelrätt mot spolens axel.

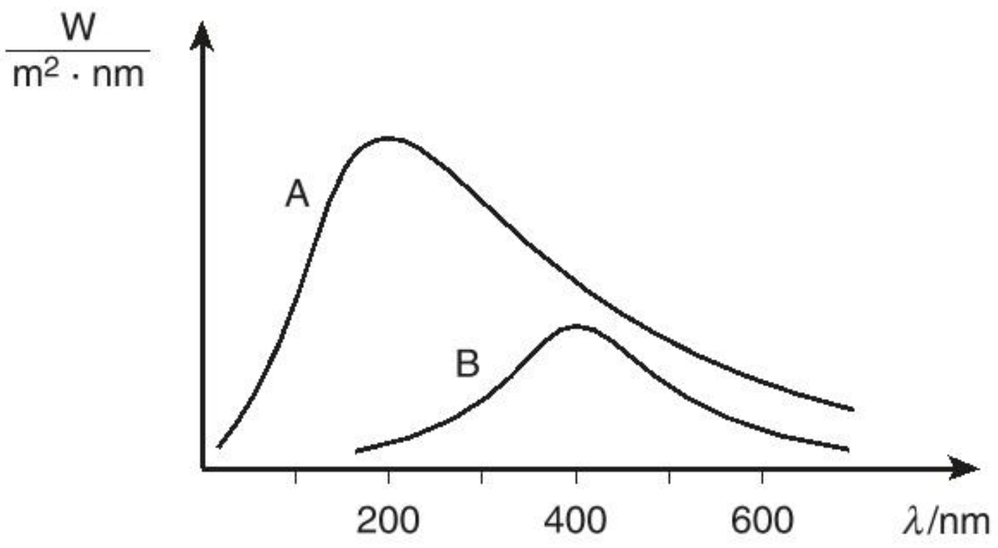


Vilken av graferna nedan visar bäst hur den inducerade elektromotoriska spänningen i slingan varierar med dess position x. Motivera ditt svar.





8 Figuren visar en planckkurva för två lika stora föremål A och B.



Avgör om följande påståenden är sanna eller falska:

I A har dubbelt så stor absolut temperatur som B.

II En foton med våglängden 200 nm har mycket större energi när den kommer från föremål A än när den kommer från föremål B.

III A sänder ut flera fotoner per sekund med våglängder mellan 400 nm och 410 nm än B.

IV B sänder ut mer synligt ljus per sekund än A.

UPPSKATTA FYSIK

1 Under en av sina många cykelturer funderar Amir på om det kommer att induceras en spänning i hans cykelekrar när han cyklar och i så fall hur stor den blir. Han utnyttjar sina kunskaper i fysik och inser att den största spänningen induceras när han cyklar i rakt östlig eller västlig riktning. Hur stor spänning kan det uppkomma mellan hjulnavet och fälgen?

2 En levande person och solen strålar båda ut energi. Hur många människor skulle det behövas för att matcha solens effekt?

3 Hur stor area av solceller skulle det behövas för att generera lika mycket effekt som Sverige behöver?

TESTA DIG I FYSIK

1 En stav med längden 18 cm rör sig i vinkelrätt mot ett magnetiskt fält. När staven förs med hastigheten 1,8 m/s blir den inducerade spänningen mellan stavens ändpunkter 28 mV. Hur starkt är fältet?

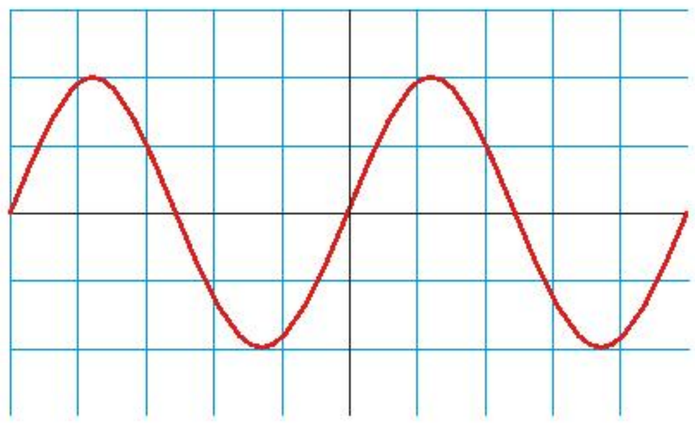
2 Flödet genom en spole med 600 varv minskar likformigt från 0,69 mWb till 0,26mWb på 3,6 s. Hur stor spänning induceras i spolen?

3 Genom ett motstånd på 18 Ω går det en sinusformad växelström med toppvärdet 2,8A.

a Bestäm effektivvärdet av spänningen över motståndet.

b Beräkna genomsnittseffekten i motståndet.

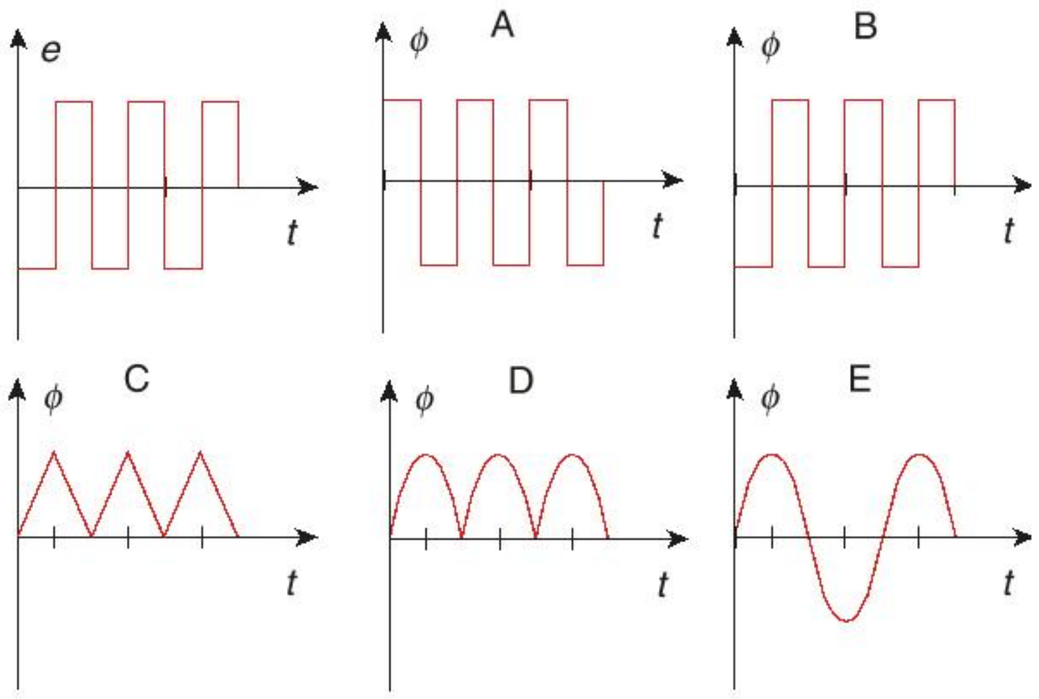
4 Figuren visar en oscilloskopbild av en sinusformad växelspänning. Vågrätt motsvarar en ruta tiden 4,0 ms. Lodrätt svarar en ruta mot spänningen 30 V. Bestäm toppvärde och frekvens för växelspänningen. Skriv en formel som visar hur växelspänningen varierar med tiden.



5 **a** En vuxen person har en kroppsarea på ca 1,2 m^2 och en hudtemperatur på 35 °C. Beräkna den utstrålade effekten om vi räknar med att kroppen strålar som en svart kropp.

b Om en svart kropp med arean A och absoluta temperaturen T strålar till omgivningen som har en lägre temperatur T_0, är den avgivna nettoeffekten $P_{\text{netto}} = \sigma\left(T^4 - T_0^4\right)A$. Beräkna P_{netto} för personen i a-uppgiften när han eller hon är i ett rum där temperaturen är 20°C.

6 En ledarslinga är placerad i ett magnetfält som varierar med tiden. Den första figuren visar hur den inducerade spänningen e varierar med tiden. Vilket av diagrammen A–E visar bäst hur det magnetiska flödet Φ genom ledarslingan varierar med tiden. Motivera svaret.

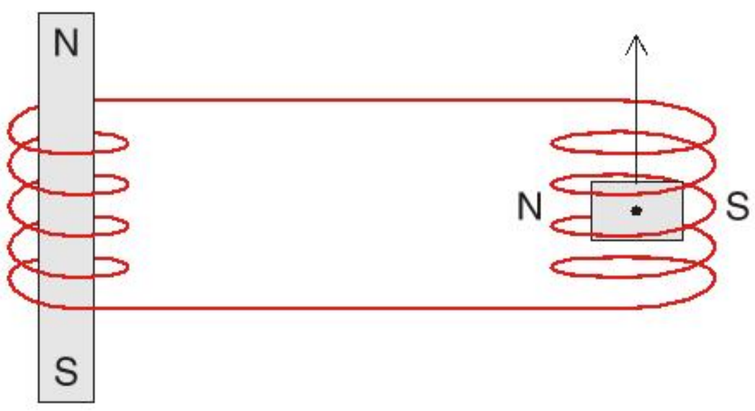


7 Det magnetiska flödet genom en slinga varierar med tiden enligt sambandet

$\Phi(t) = 0{,}04t^2 + 0{,}25t.$

Hur stor är den inducerade spänningen vid tidpunkterna 4,0 s resp. 10,0 s?

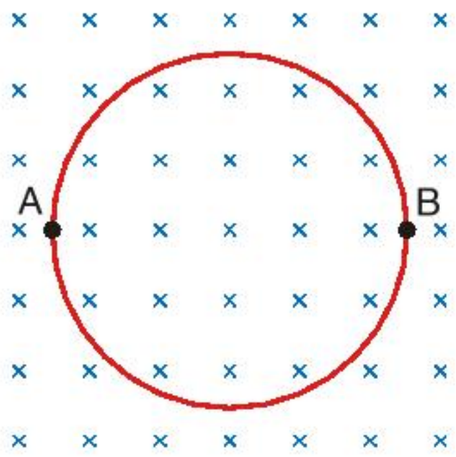
8 ★ Stavmagneten i den vänstra spolen dras uppåt.



a Bestäm riktningen för den inducerade strömmen.

b Kommer visaren på magneten i den högra spolen att ge utslag åt höger eller åt vänster?

9 ★ En böjlig cirkulär slinga med radien 10,0 cm är placerad vinkelrätt mot de magnetiska fältlinjerna i ett magnetiskt fält på 0,24 T. En person tar sedan tag i slingan i punkterna A och B. Med ett snabbt ryck under 0,075 s sträcker han slingan genom att föra punkterna A och B så långt ifrån varandra som möjligt. Hur stor är den genomsnittliga inducerade spänningen i slingan?



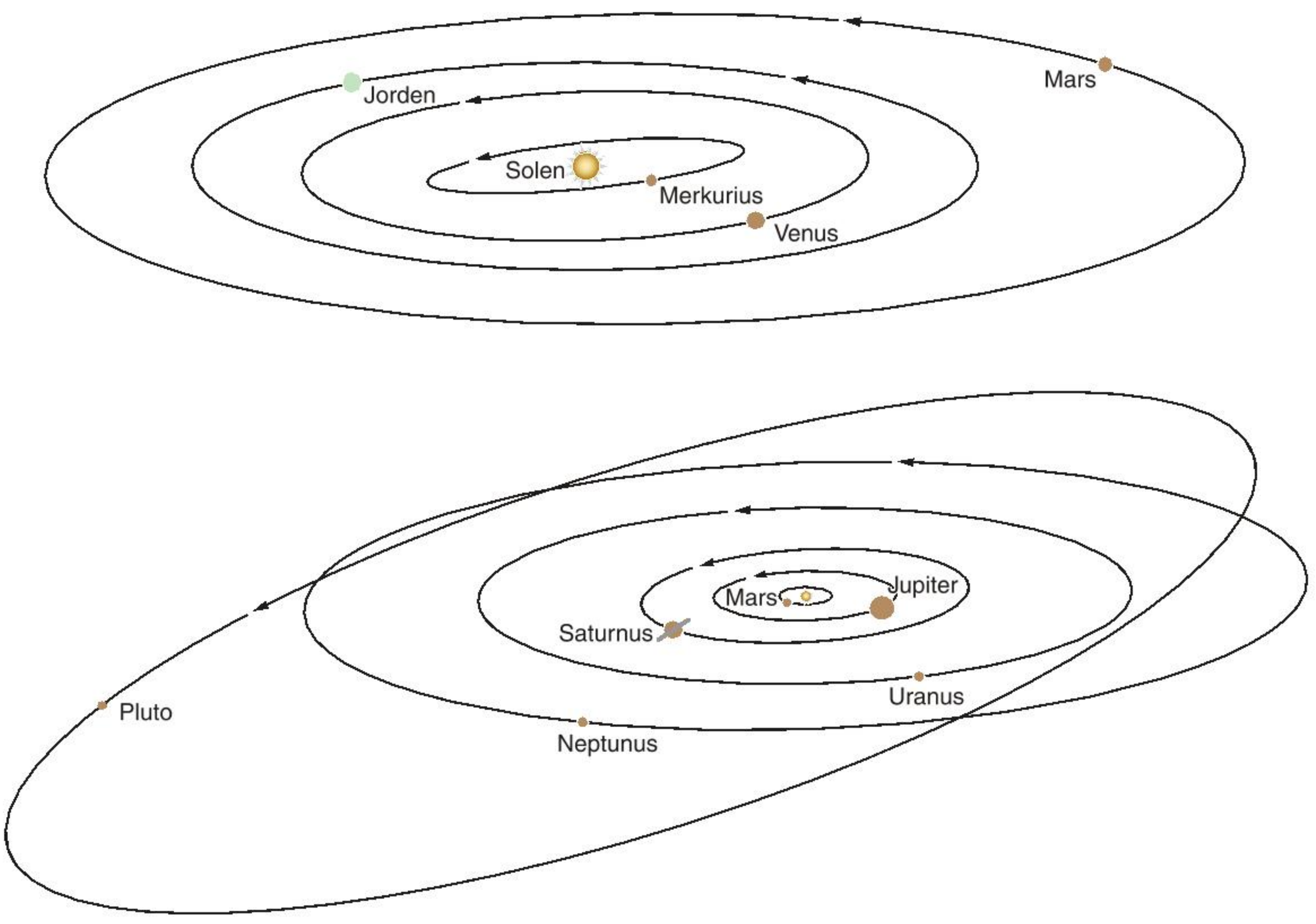
8 Astrofysik

Undervisningen i kursen ska behandla:

- **Orientering om aktuella modeller och teorier för beskrivningen av universums storskaliga utveckling och av galax-, stjärn- och planetbildning**
- **Metoder för undersökning av universum**
- **Orientering om dopplereffekt**
- **Elektromagnetisk strålning från stjärnor och interstellära rymden**
- **Metoder för att upptäcka och undersöka exoplaneter**
- **Villkor för liv på andra planeter**
- **Fysikens relation till och gränser mot etiska, filosofiska och religiösa frågor.**

Avstånd till stjärnorna 287
Stjärnspektra 291
Stjärnutveckling 297
Exoplaneter 310
Galaxer 316
Kosmologi 323
Uppgifter 337

Omkring år 1650 satt biskop James Ussher och räknade generationer i Bibeln, från Adam och Eva och framåt. Han fann att världen skapades år 4004 f.Kr. På 1600-talet kände man till jordens storlek och avståndet till solen och visste att stjärnorna är mycket längre bort än solen. Men man diskuterade fortfarande om jorden var världens centrum.



8.1 Solsystemet, schematiskt. Jorden är en av åtta *planeter* som kretsar runt solen. Planeterna är Merkurius, Venus, Jorden, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus och Neptunus. Pluto blev nyligen degraderad till dvärgplanet.

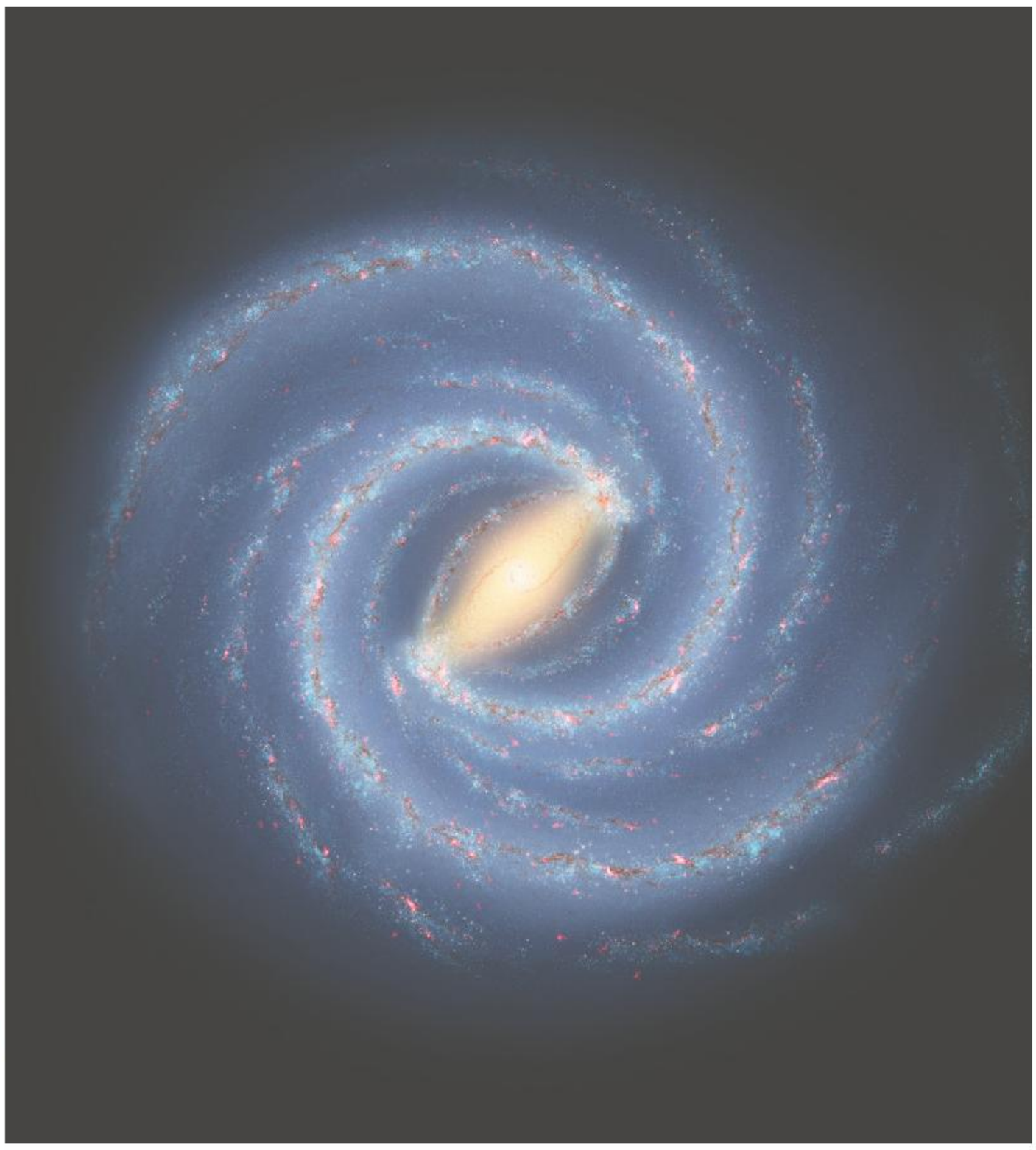
Sedan den gången har universum blivit större och större, och människan har blivit mindre och mindre. Vid slutet av 1800-talet insåg man att människan är släkt med djuren, och att människor och djur har gemensamma förfäder. Vi och våra släktingar är rymdvarelser på en pytteliten planet som kretsar runt en av Vintergatans hundra miljarder stjärnor. Till den *närmaste* grannstjärnan i Vintergatan skulle det ta 100 000 år med den moderna teknikens *snabbaste* rymdsond. Vintergatan är en av hundra miljarder galaxer (stora stjärnsystem), och även de närmaste är ofattbart långt borta. Som enorma lysande öar vrider de sig i världsrymden, åtskilda från varandra av ett hav av tid och rum. Finns det andra rymdvarelser där ute på "öarna"? De flesta astronomer tror att det finns liv på andra ställen i universum. Men med de enorma avstånden får vi kanske aldrig veta det.

I detta kapitel ska vi ta oss an universum: vårt gigantiska, kalla och förunderliga hem. Men innan du går vidare, bör du ta dig en titt på figurerna 8.1 och 8.2.

8.2 Vintergatan, vår hemgalax med sina 200 miljarder stjärnor sedd inifrån och sedd utifrån. Alla stjärnor som vi kan se med blotta ögat om natten tillhör Vintergatan. Stjärnorna är samlade i en diskusliknande skiva med en diameter på 80 000 ljusår och en tjocklek på 5 000 ljusår. Ut från centrum går spiralarmar som består av stjärnor, gas och stoft. Solen finns i en av spiralarmarna, ungefär 30 000 ljusår från centrum.

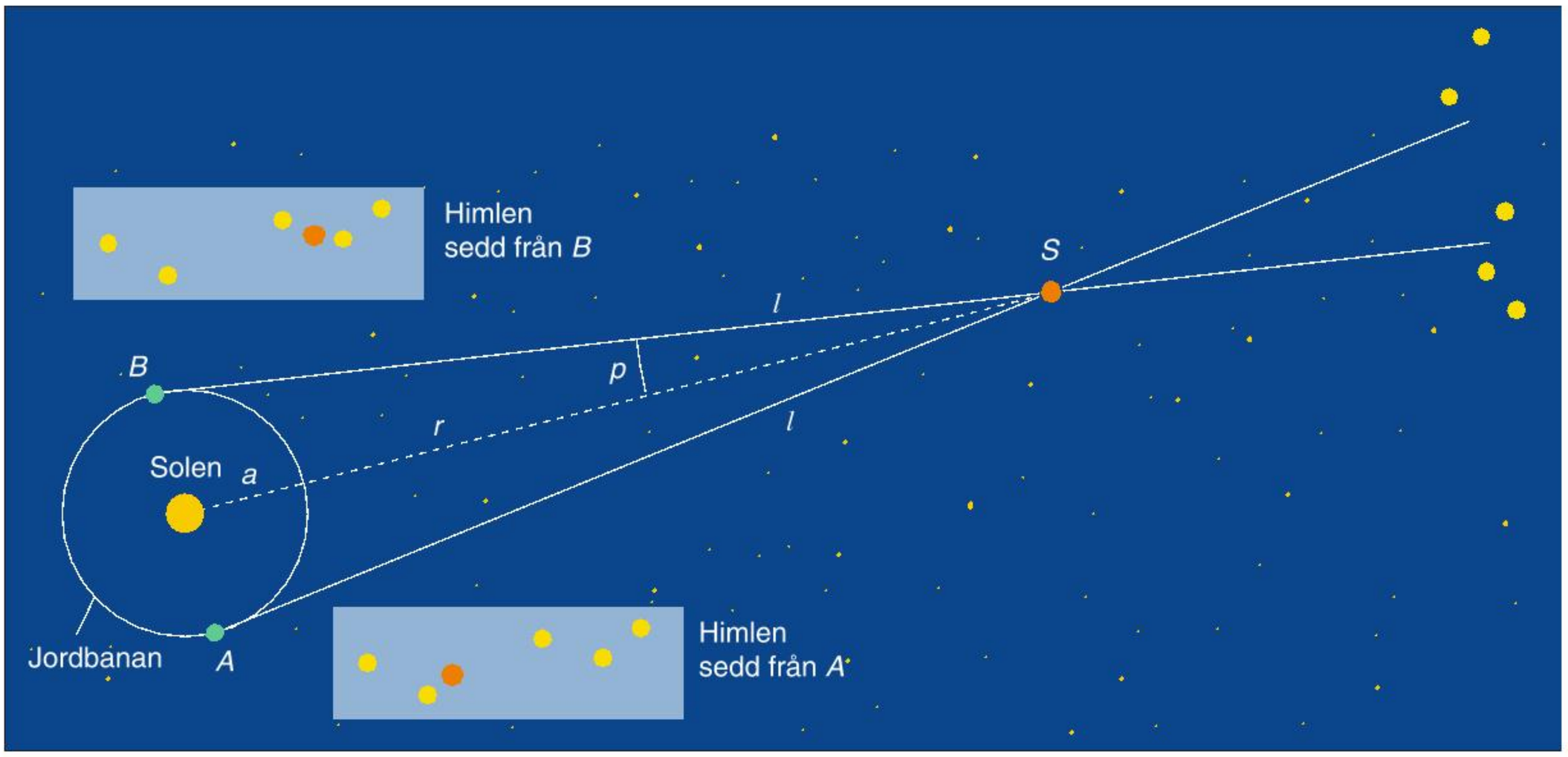
Ett ljusår är den sträcka ljuset färdas på ett år. 1 ljusår = 1 l.y. = $9{,}46 \cdot 10^{15}$ m.





8.1 Avstånd till stjärnorna

Natthimlen ser ut som insidan av ett stjärnbestrött skal med jorden i centrum. Men när vi pratar om avstånden i universum behöver vi en djupdimension. Hur mäter vi avstånd i universum? Svaret är att vi har en rad olika mätmetoder. De närmaste avstånden, till exempel avståndet till månen, kan vi mäta direkt med hjälp av radar. Men ju längre bort vi kommer desto mera indirekta blir metoderna. Därför måste man kräva att metoderna överlappar så att man kan stämma av dem mot varandra.



8.3 Parallaxmetoden.

Parallaxmetoden

För stjärnor som ligger nära kan vi utnyttja *parallaxmetoden*. Håll den ena armen framför dig med pekfingret upp. Betrakta bakgrunden omväxlande med höger och vänster öga. Ser du att fingret ser ut att flytta sig mot bakgrunden? Det är detta som kallas parallax.

Vi vet att jorden går i en ellipsformad bana runt solen. I förhållande till avlägsna bakgrundsstjärnor tycks en jordnära stjärna följa en liten ellips på himlen under året. Se figur 8.3.

Synlinjen l från jorden till stjärnan S rör sig mellan två ytterlägen A och B under loppet av ett halvt år. Avståndet från solen till stjärnan kallar vi r. Den maximala vinkeln p mellan l och r är *parallaxen* för stjärnan. Astronomerna fotograferar stjärnan många gånger under

loppet av ett år, och mäter p på fotografierna. Om jordbanans radie är a, får vi ur figuren att

$$\tan p = \frac{a}{r}$$

2π radianer = 360 grader.

Eftersom p är en mycket liten vinkel, kan vi sätta $\tan p \approx p$ när p är mätt i radianer. Därmed kan vi beräkna avståndet från solen till stjärnan.

PARALLAXMETODEN

Avståndet r, mellan solen och en stjärna med parallaxen p, mätt i radianer är

$$r = \frac{a}{p}$$

där $a = 1{,}50 \cdot 10^{11}$ m är jordbanans radie.

EXEMPEL 1 **Närmaste grannen**

Alfa Kentauri har den största parallaxen vi känner till. Alltså är Alfa Kentauri den närmaste grannen till solen. Parallaxen är $p = 3{,}7 \cdot 10^{-6}$ rad. Avståndet blir därför

$$r \approx \frac{a}{p} = \frac{1{,}50 \cdot 10^{11}}{3{,}7 \cdot 10^{-6}}\ \text{m} = 4{,}1 \cdot 10^{16}\ \text{m}$$

Ett ljusår är den sträcka ljuset färdas på ett år:

$$s = ct = 3{,}00 \cdot 10^{8} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\ \text{m} = 9{,}46 \cdot 10^{15}\ \text{m}$$

Det betyder att 1 ljusår = 1 l.y. = $9{,}46 \cdot 10^{15}$ m

Avståndet till Alfa Kentauri blir därför

$$r = \frac{4{,}1 \cdot 10^{16}}{9{,}46 \cdot 10^{15}}\ \text{l.y.} = 4{,}3\ \text{l.y.}$$

Om vi förminskar solsystemet och dess närmaste omgivning med en faktor 10^{10}, se figur 8.1, skulle Alfa Kentauri vara liten som en grapefrukt på avståndet 4 100 kilometer från solen. Tänk dig solen som en apelsin i Lund och Alfa Kentauri som en grapefrukt i New York! Det illustrerar hur långt det är mellan stjärnorna, och hur tom världsrymden är.

Parallaxmetoden begränsas av osäkerheten när vi mäter p. Med rymdbaserade teleskop kan parallaxmetoden utnyttjas på avstånd upp till 1 000 ljusår. Det är korta avstånd i ett kosmiskt perspektiv.

Ljusstyrkemetoden kallas också för *Inversa kvadratmetoden.*

Ljusstyrkemetoden. Jakten på ”standardlampor”

Ju större avstånd det är mellan en ljuskälla och vår observationspunkt desto svagare ser vi ljuset. Det betyder att vi kan använda ljusstyrkan, det vill säga den observerade effekten per areaenhet, P^*, för att bestämma avståndet om vi känner den totala utstrålade effekten P.

Vi tänker oss att en ljuskälla strålar lika mycket i alla riktningar. Vi antar också att det inte finns något som skymmer sikten till den. Då avger ljuskällan samma effekt genom sfäriska skal på olika avstånd från stjärnan. Eftersom arean av det sfäriska skalet är $A = 4\pi r^2$ så blir den instrålade effekten per areaenhet:

$$P^* = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Vi kan lösa ut r ur formeln och bestämma avståndet – om vi vet P och P^*. Den instrålade effekten per areaenhet P^* är relativt enkel att mäta med hjälp av den fotoelektriska effekten. Det betyder att avståndsbestämningen hänger på att vi känner den totala utstrålade effekten.

LJUSSTYRKEMETODEN

Om vi känner den utstrålade effekten P hos en stjärna och mäter instrålad effekt per areaenhet P^*, ges avståndet r till stjärnan av

$$r = \sqrt{\frac{P}{4\pi P^*}}$$

Våra närmaste stjärngrannar
När vi undersöker stjärnorna i närheten av solen, upptäcker vi att solen utstrålar större effekt än genomsnittet av grannstjärnorna. Solen tillhör ”övre medelklass” i stjärnsamhället.

Som tur är finns det speciella typer av stjärnor med ett karakteristiskt spektrum så nära oss att vi kan bestämma avståndet med parallaxmetoden – då kan vi samtidigt beräkna deras totala utstrålade effekt. Då kan de användas som ”standardlampor” på större avstånd så länge de är ljusstarka nog för att observeras. Problemet med den här metoden är att de vanligaste typerna av stjärnor är ljussvaga. På stora avstånd behöver vi ljusstarkare standardlampor.

Vissa stjärnor vars effekt varierar periodiskt är samtidigt mycket ljusstarka. De viktigaste av dem är *cepheiderna,* som är uppkallade efter en variabel stjärna i stjärnbilden Cepheus. Hos cepheiderna finns det ett entydigt samband mellan perioden hos variationerna och den utstrålade effekten. Ju längre period, desto större utstrålad effekt. Genom att mäta perioden kan alltså astronomerna beräkna cepheidens utstrålade effekt P. När de samtidigt mäter P^*, kan de beräkna avståndet enligt formeln ovan.

cepheider uttalas *sefeíder.*

Cepheiderna spelar en mycket viktig roll inom astronomin. Det var med hjälp av Cepheiderna man i 1900-talets början lyckades avgöra den vetenskapliga tvisten om huruvida vissa lysande dimmoln, så kallade *nebulosor,* låg i vår egen Vintergata eller om de var enormt avlägsna "vintergator", långt bortom vår egen galax. Cepheiderna visade att universum var mycket mycket större än man dittills hade trott. Några av galaxerna låg 40 miljoner ljusår ifrån oss. Men det var bara början.

För nästa steg på avståndsskalan har man funnit en metod som bygger på att de ljusstarkaste stjärnorna i olika galaxer är av samma typ och alltså utstrålar ungefär samma effekt. Det är ett rimligt antagande eftersom galaxerna i övrigt liknar varandra. Stjärnan Rigel i stjärnbilden Orion är en av Vintergatans starkast lysande stjärnor. Rigel befinner sig på "bara" 900 ljusårs avstånd, det vill säga ett avstånd som kan bestämmas med parallaxmetoden. För Rigel kan vi alltså beräkna den utstrålade effekten. Antar vi att de ljusstarkaste stjärnorna i andra galaxer strålar med samma effekt så kan vi bestämma avståndet till dem. På detta sätt har astronomerna mätt avstånd på upp till 100 miljoner ljusår.

För större avstånd än 100 miljoner ljusår måste vi förlita oss på helt andra metoder. Det ska vi återvända till senare.

KONTROLLFRÅGOR

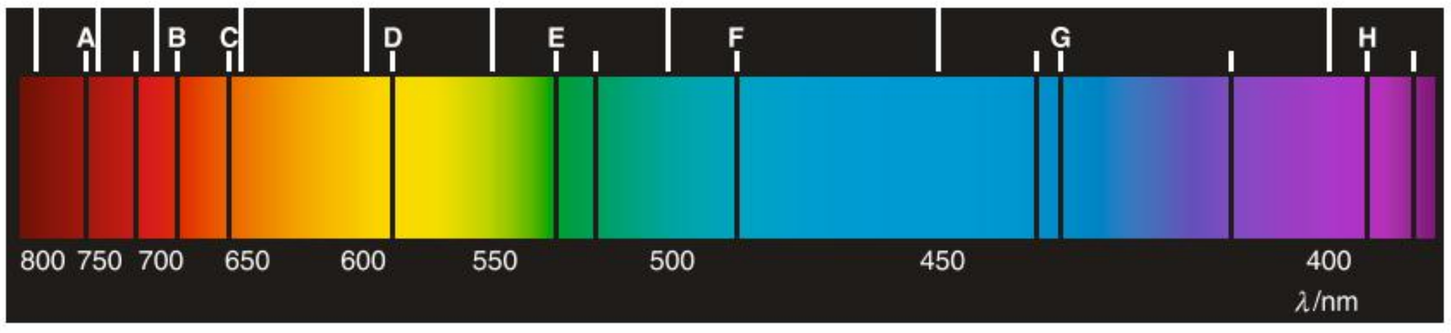
- Vad menas med parallax?
- Hur mäter man parallaxen till en stjärna?
- Vad menas med ett ljusår?
- Vad menas med den observerade effekten från en stjärna?
- Hur kan vi använda den observerade effekten för att bestämma avståndet till en stjärna? Gäller sådana mätningar för näraliggande eller avlägsna stjärnor?
- Vad är en cepheid? Hur kan man använda cepheiderna till att bestämma avstånd i universum?
- Parallaxen för en stjärna är $3{,}5 \cdot 10^{-8}$ rad. Hur långt bort är stjärnan?
- Det tar 258 år för ljuset från en stjärna att nå jorden. Bestäm stjärnans parallax.

8.2 Stjärnspektra

Länge menade man att stjärnornas natur var ett exempel på något vi människor aldrig skulle få kunskap om. Det enda man såg från jorden var det svaga ljuset från punktformiga ljuskällor. Inte ens idag med moderna jordbaserade teleskop kan man se stjärnorna som något annat än punktformiga ljuskällor utan utsträckning, så tanken var inte alls dum. Men det här var i början av 1800-talet, strax innan Joseph von Fraunhofer upptäckte spektrallinjer i ljuset från solen.

Även ljuset från andra stjärnor visade sig ha spektrallinjer. Genom att jämföra spektrallinjerna från stjärnorna med spektrallinjer från lysande gaser i laboratoriet kunde man plötsligt identifiera en lång rad ämnen som fanns på stjärnorna. Helium upptäcktes till och med på solen *innan* man fann det på jorden. Samtidigt kunde man slå fast att stjärnorna tycktes lyda under samma fysikaliska lagar som de man funnit här på jorden – detta var inte självklart.

Nu för tiden är spektrallinjerna i ljuset från stjärnor den viktigaste informationskällan om stjärnor och det som finns i rymden mellan oss och stjärnorna. Se figur 8.4.



8.4 Solspektrum med fraunhoferlinjer. Fraunhofer fann mer än 500 mörka linjer och satte bokstäver från *A* till *H* på de 8 tydligaste linjerna.

Hur uppstår då dessa spektrallinjer? Under stjärnatmosfären, som är de yttersta lagren hos stjärnan, finns plasma, en lysande joniserad gas med en temperatur på 5 700 K, som ger ifrån sig termisk strålning. På sin väg ut genom stjärnatmosfären absorberas vissa våglängder av den här strålningen. Detta ser man som mörka spektrallinjer. Spektrallinjerna i ljuset från stjärnorna är alltså absorptionslinjer.

STJÄRNKEMI

Solen och stjärnorna innehåller samma grundämnen som de som finns på jorden. Grundämnena beter sig på samma sätt som under motsvarande förhållanden på jorden.

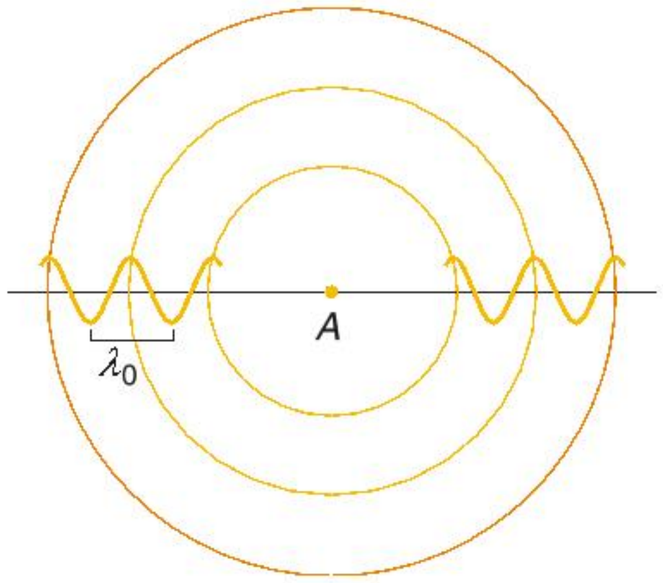
Andra upplysningar vi kan få om en stjärna genom att studera dess spektrum är

- yttemperaturen
- magnetfältet
- rotationshastigheten
- hastigheten mot eller bort från oss.

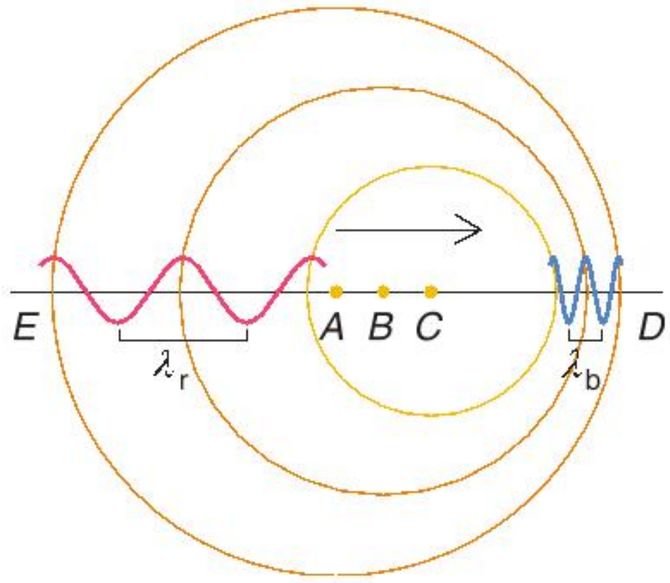
Dopplereffekt

När en brandbil kommer mot oss med tjutande sirener, hör vi högre toner än när bilen passerar och avlägsnar sig från oss. Detta fenomen utforskades av den österrikiske fysikern Johann Christian Doppler (1803–53), och vi kallar det *dopplereffekt*. Vi ska titta lite på dopplereffekten för ljus.

Vi tänker oss att en ljuskälla sänder ut ljus med konstant våglängd λ_0 i förhållande till ljuskällans egna referenssystem. Vågfronterna är klotytor med centrum i ljuskällan. Se figur 8.5. En observatör som är i vila i förhållande till ljuskällan, observerar våglängden λ_0.



8.5 Ljuskällan i *A* är i vila i förhållande till observatören.



8.6 Ljuskällan rör sig i förhållande till observatörerna i *D* och *E*.

Men om ljuskällan rör sig i förhållande till observatören, blir situationen en annan. Se figur 8.6.

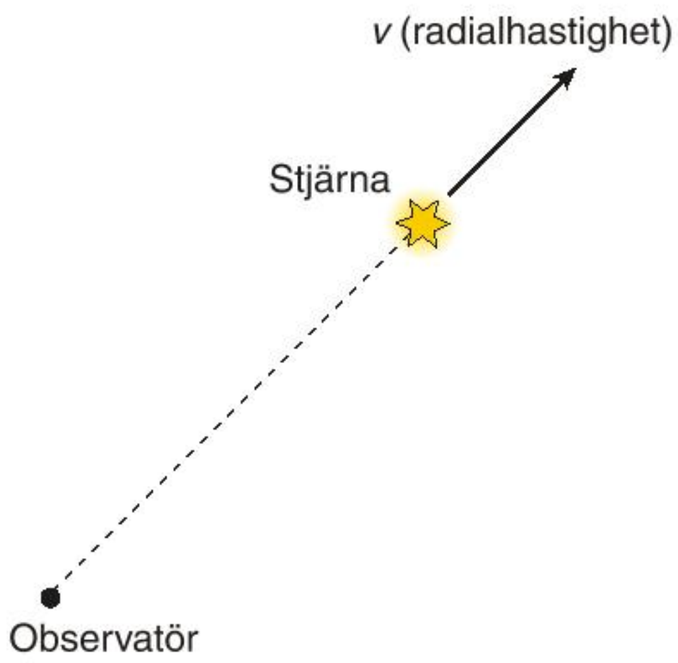
Den första vågfronten sändes ut när ljuskällan var i *A*, den andra när ljuskällan var i *B*, och den tredje när ljuskällan var i C.

En observatör i punkten *D* observerar att vågfronterna kommer tätare och att våglängden λ är mindre än λ_0. En sådan förskjutning av ljuset mot kortare våglängder kallar vi *blåförskjutning*.

Blåförskjutning inträffar när ljuskällan är på väg emot oss. Rödförskjutning inträffar när ljuskällan är på väg ifrån oss.

En observatör i *E* observerar att vågfronterna kommer glesare, och att våglängden λ är större än λ_0. En förskjutning mot längre våglängder kallar vi *rödförskjutning*.

En spektrallinje i ett stjärnspektrum förskjuts alltså mot kortare våglängder om stjärnan närmar sig, och mot längre våglängder om stjärnan avlägsnar sig. Sambandet mellan förskjutningen $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ och hastigheten v ges av *dopplerformeln*.



8.7 Radialhastighet.

DOPPLERFORMELN

Radialhastigheten *v* hos en stjärna ges av

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda}{\lambda_0}$$

där *c* är ljushastigheten och $\Delta\lambda$ är våglängdsförskjutningen hos en spektrallinje som i laboratoriet har våglängden λ_0.

Om $\frac{\lambda}{\lambda_0} < 0$ är stjärnan på väg mot oss och vi har en blåförskjutning.

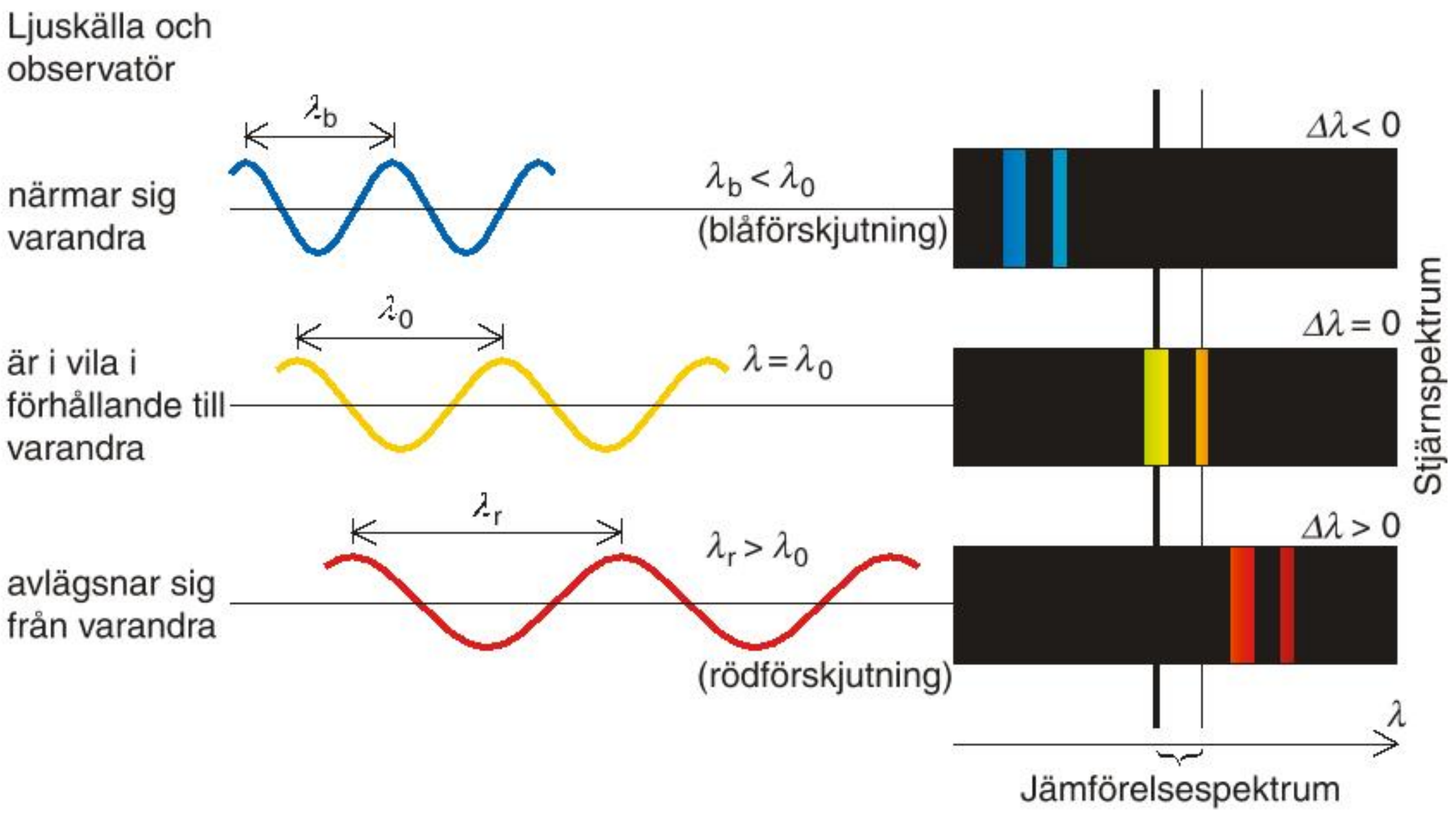
Om $\frac{\lambda}{\lambda_0} > 0$ är stjärnan på väg från oss och vi har en rödförskjutning.

Radialhastigheten är hastigheten i synlinjens riktning. Se figur 8.7.

Figur 8.8 visar hur astronomerna observerar dopplereffekten i praktiken. Till höger ser du tre stjärnspektra varav ett *jämförelsespektrum* som framställts i laboratoriet. Astronomerna mäter förskjutningen $\Delta\lambda$ i förhållande till jämförelsespektret och beräknar stjärnans radialhastighet med hjälp av dopplerformeln.

Observera att blåförskjutning betyder att *alla* spektrallinjer förskjuts mot kortare våglängder. Rödförskjutning betyder att *alla* spektrallinjer förskjuts mot längre våglängder.

8.8



EXEMPEL 2 **En typisk radialhastighet**

Vanligtvis har stjärnorna en radialhastighet av storleksordningen 10^4 m/s. En stjärna med radialhastigheten $v = 3{,}0 \cdot 10^4$ m/s bort från oss får alltså en relativ våglängdsförskjutning

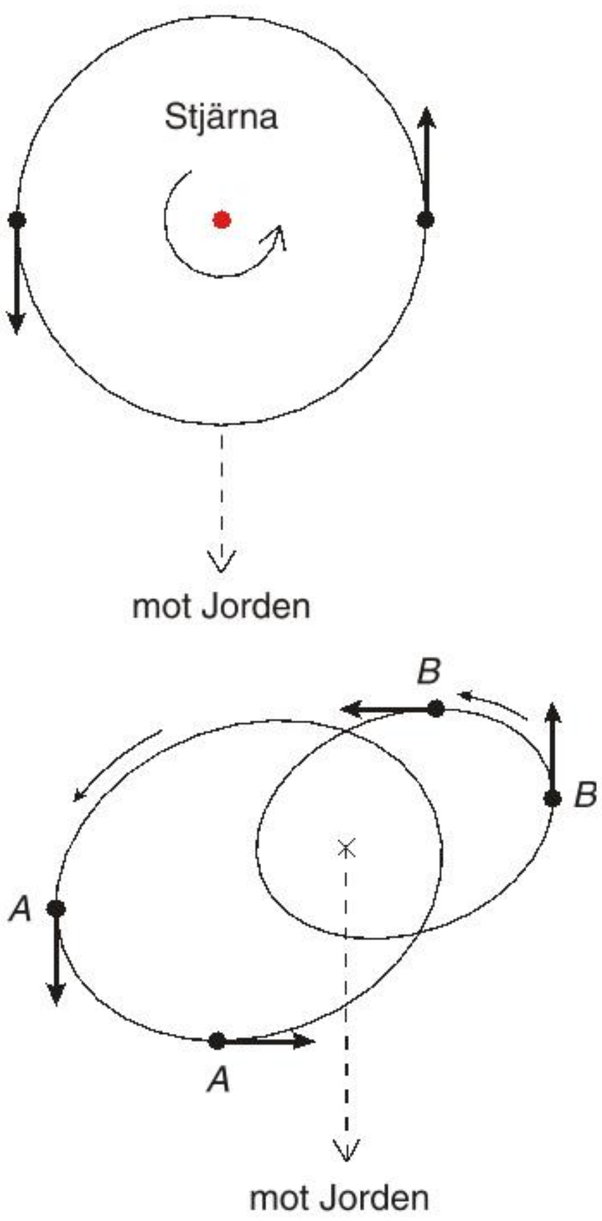
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} = \frac{3{,}0 \cdot 10^4}{3{,}0 \cdot 10^8} = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$$

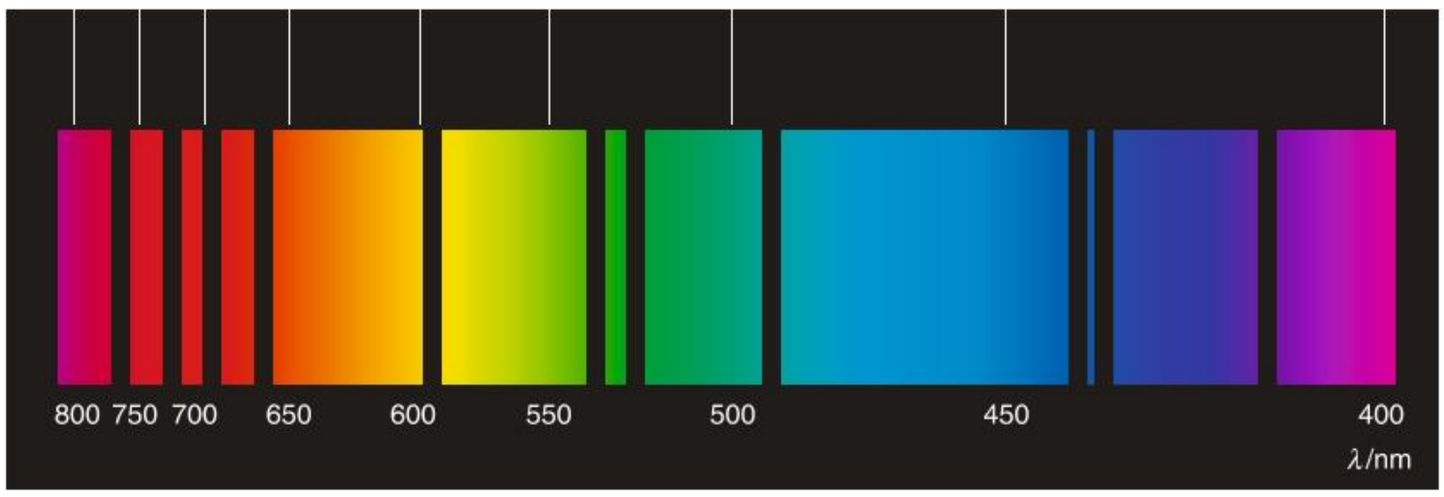
Det vill säga att $\Delta\lambda = 1{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda_0$ Den röda vätelinjen med $\lambda_0 = 656$ nm förskjuts med $\Delta\lambda = 0{,}0656$ nm. Den violetta vätelinjen med $\lambda_0 = 410$ nm får förskjutningen $\Delta\lambda = 0{,}0410$ nm. Lägg märke till att spektrallinjerna inte förskjuts lika mycket.

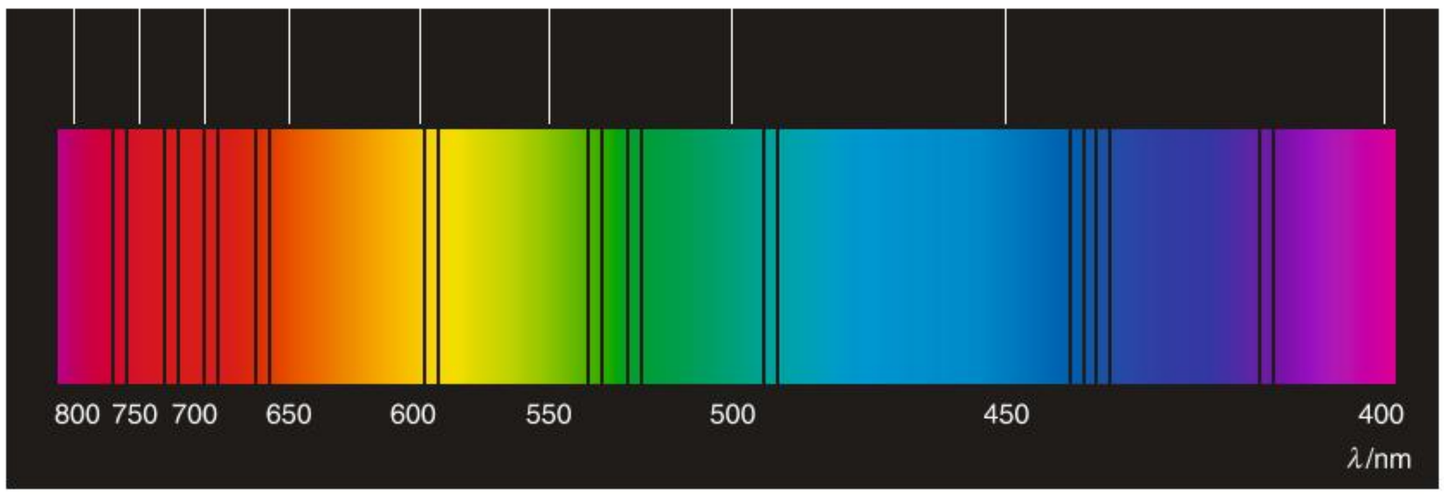
Dopplereffekten kan ge oss mer information om stjärnor än man först föreställer sig. Tänk dig till exempel en stjärna som roterar runt sin egen axel, men som annars är i vila i förhållande till oss. Då kommer den ena randen att vara på väg mot oss och den andra randen på väg från oss. Detta medför att spektrallinjerna blir bredare.

Om två stjärnor går i banor runt en gemensam tyngdpunkt, kommer deras stjärnspektra dessutom att överlagra varandra. Spektrallinjerna kommer periodvis att dela sig i dubbellinjer. Detta sker när den ena stjärnan rör sig mot oss och den andra från oss. Se figur 8.9.

8.9 Några olika orsaker till dopplereffekt.
a Stjärnan roterar, och spektrallinjerna blir bredare.
b Två stjärnor kretsar runt en gemensam tyngdpunkt.







Hertzsprung-Russell-diagrammet

Spektraltyp, *spektralklass*, den typ exempelvis en stjärna tilldelas vid spektralklassifikation. De vanligaste spektraltyperna i den så kallade Harvard-klassifikationen är (efter fallande yttemperatur) O, B, A, F, G, K och M, och de flesta kända stjärnor kan föras till någon av dessa.

I början av 1900-talet indelades stjärnorna i sju *spektralklasser:*

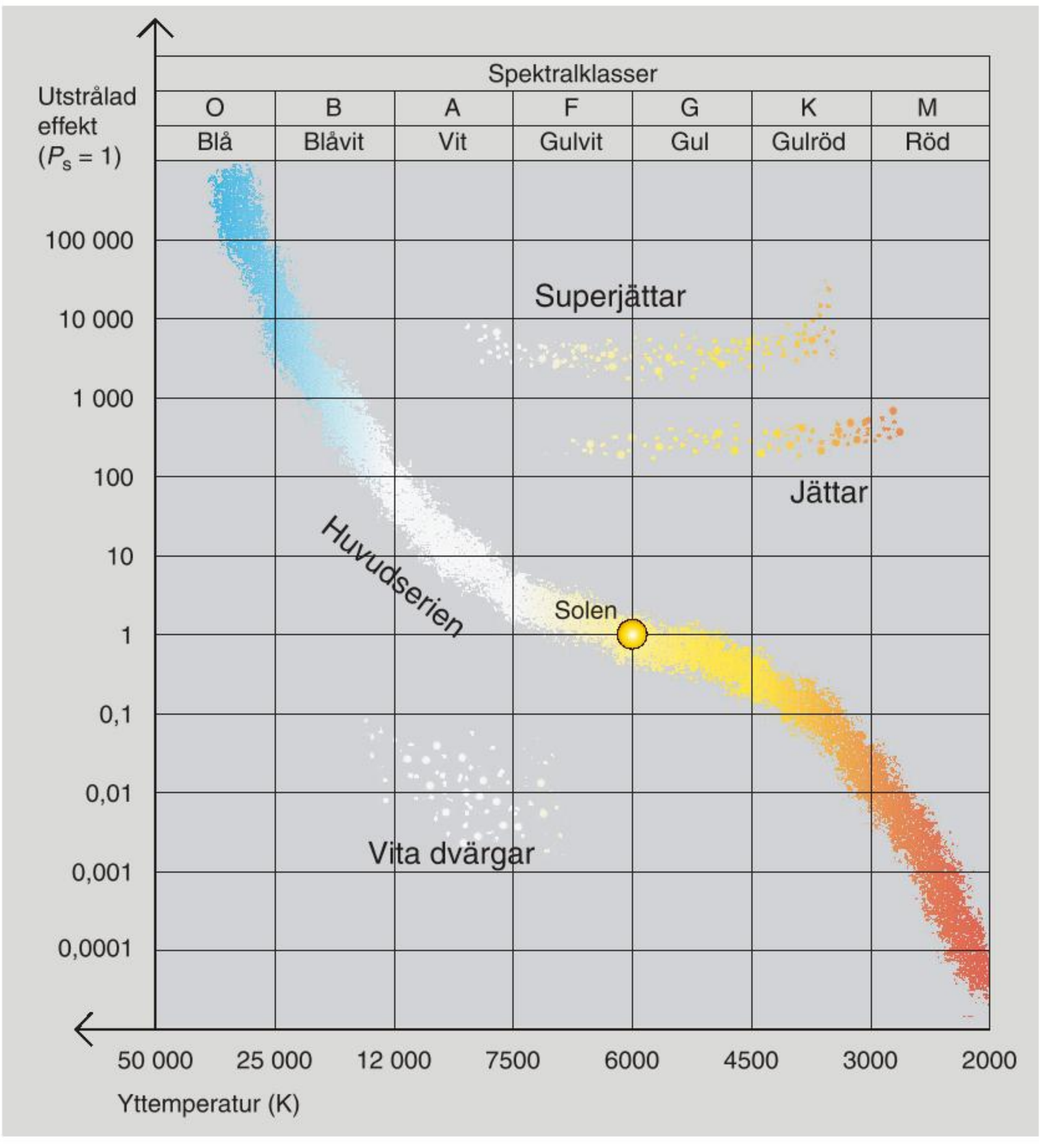
O, B, A, F, G, K, M

Det har tillkommit spektralklasser sedan den här indelningen gjordes, men eftersom de allra flesta stjärnorna tillhör en av de här spektralklasserna koncentrerar vi oss på dem.

Spektralklassificeringen grundar sig på vilka spektrallinjer som förekommer och hur starka de är. Indelningen ger samtidigt en uppfattning om stjärnans yttemperatur som syns i stjärnans färg.

Den fallande temperaturskalan går från de hetaste O-klassade, blåvioletta stjärnorna till de betydligt svalare M-klassade röda stjärnorna.

När vi ritar ett diagram med stjärnornas spektralklass längs x-axeln och deras utstrålade effekt längs y-axeln, får vi ett *Hertzsprung-Russell-diagram* eller kortare *HR-diagram*. Se figur 8.10.



8.10 HR-diagram. Lägg märke till att temperaturen ökar åt *vänster* längs x-axeln. Det finns ett direkt samband mellan en stjärnas temperatur och dess utstrålade effekt.

Diagrammet är uppkallat efter dansken Ejnar Hertzsprung (1873–1967) och amerikanen Henry Russell (1877–1957). Stjärnorna är inte jämnt fördelade i diagrammet. De flesta ligger längs ett diagonalt band som vi kallar *huvudserien*. Överst till vänster i huvudserien hittar vi varma, blå O-stjärnor som utstrålar mer än 100 000 gånger så stor effekt som solen. Nederst till höger i huvudserien hittar vi svala, röda M-stjärnor som utstrålar mindre än 1/10 000 av effekten från solen. Också massan och radien minskar från de blå jättarna till de röda dvärgstjärnorna i huvudserien. Solen är en gul stjärna som ligger ungefär mitt i huvudserien, i spektralklass G.

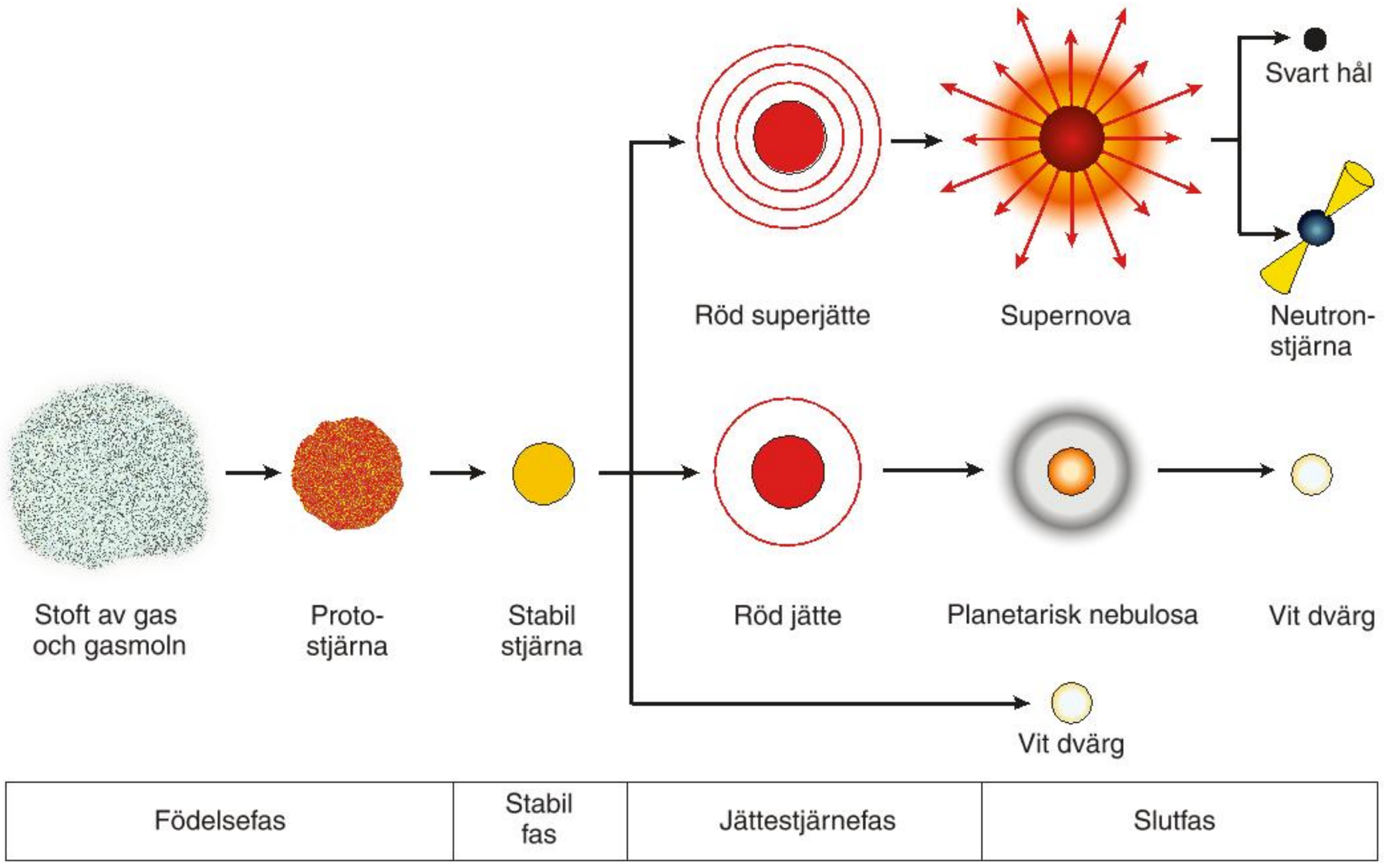
Det finns röda stjärnor som utstrålar stor effekt. De ligger uppe till höger i HR-diagrammet. Trots att de har relativt låg temperatur utstrålar de en stor effekt, därför måste de ha stor radie. Vi kallar dem *röda jättestjärnor*. De största kan ha en radie på flera hundra solradier och kallas röda *superjättar*.

Det finns vita stjärnor som trots hög temperatur utstrålar liten effekt. De måste därför ha en liten radie. De ligger nere till vänster i HR-diagrammet. Vi kallar dem *vita dvärgstjärnor*. De har en radie ungefär så stor som jordens.

KONTROLLFRÅGOR

- Hur kan vi veta att solen och de andra stjärnorna i universum innehåller samma grundämnen som vi känner till på jorden?
- Vad går dopplereffekten ut på?
- Hur kan man bestämma radialhastigheten hos en stjärna med hjälp av dopplereffekten? Hur avgör man om en stjärna är på väg mot oss eller bort från oss?
- Vilken fysikalisk egenskap hos en stjärna avgör vilken spektralklass stjärnan hör till? Till vilken spektralklass hör solen?
- Vad är ett Hertzsprung-Russell-diagram? Vad menas med huvudserien i ett HR-diagram?
- Vad kallas stjärnorna uppe till höger i HR-diagrammet, och vad kallas stjärnorna nere till vänster?

8.3 Stjärnutveckling



8.11 De flesta stjärnor går igenom fyra faser: Födelsefas, stabil fas, jättestjärnefas och slutfas. Figuren visar en översikt över denna utveckling.

Hittills har vi *beskrivit* stjärnorna som vi observerar dem här och nu. Även om vi kunde betrakta himlen natt efter natt i flera år, är det inte särskilt troligt att vi skulle ha turen att *se* en stjärna förändras. Varje enskild stjärna vi ser verkar statisk och oföränderlig. För vår flyktiga blick märks det inte att även stjärnorna föds, åldras och dör.

I teoretisk astrofysik skapar man komplexa modeller för hur stjärnorna blir till, och hur de utvecklas. Modellerna bygger på fysikens lagar och beräknas med hjälp av datorer. Runt oss finns stjärnor av alla åldrar som modellerna kan testas mot.

Födsel och ungdom

I rymden mellan stjärnorna finns det områden av gas och stoft, så kallade nebulosor. Några av stoftmolnen har massor motsvarande miljoner solmassor. I teleskop med lång exponeringstid ser de ut som enorma kosmiska åskmoln, med konturer nästan som om de vore fasta. Se figur 8.12. De jordiska åskmolnens "guldkanter" kommer från solljus, de här molnens guldkanter kommer från nyfödda stjärnor.

Molnen ser kompakta ut, men i verkligheten är de tunnare än det bästa vakuum vi kan åstadkomma på jorden. Stoftet består i stort sett av



8.12 Jättelika pelare av gas i vars närhet nya stjärnor föds i stjärnhopen M16.

frusen gas runt små partiklar av järn eller sten. Gasen består av ungefär 75 % väte och 25 % helium, mätt i procent av massan. Det var dessa grundämnen som fanns med från starten i vårt nyfödda universum. Alla andra grundämnen tillsammans utgör mindre än 1 % av gasmassan.

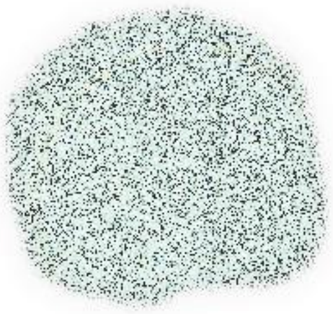
Den genomsnittliga gastätheten *mellan* stjärnorna är mindre än 10^{-21} kg/m^3. Det motsvarar mindre än en atom per cm^3.

EXEMPEL 3 **Gastätheten i rymden**

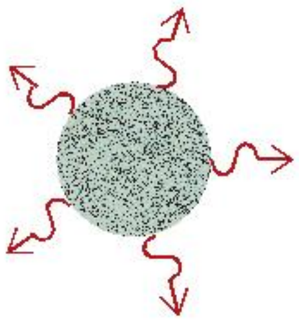
Vi kan försöka åskådliggöra tätheten ute i rymden genom att jämföra med den luft vi andas. Tätheten är 1,3 kg/m^3. Vi gör det rimliga antagandet att luften består av kväve med molekylvikten 28 u. Då innehåller den $\frac{1{,}3}{28 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}} = 2{,}8 \cdot 10^{25}$ molekyler per kubikmeter. Det blir $2{,}8 \cdot 10^{19}$ molekyler per kubikcentimeter.

Tänk dig att vi har en 1 m lång cylinder med sådan luft. Drar vi ut cylinderns längd till 10 m så ökar volymen 10 gånger och tätheten minskar till 1/10. Vi måste dra ut vår cylinder till $2{,}8 \cdot 10^{19}$ m för att få ned tätheten till en molekyl per kubikcentimeter. Det är 3 000 ljusår!

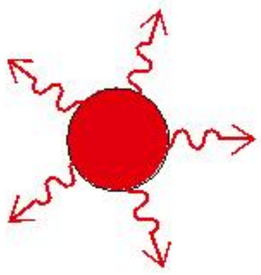
8.13 Tidiga utvecklingssteg för en stjärna.



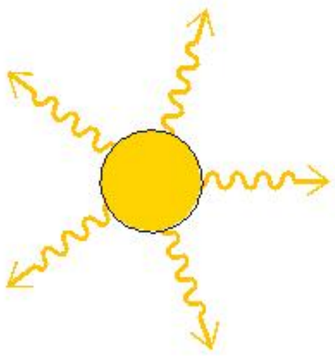
a Nebulosa
Nebulosa med densitet större än 10^{-16} kg/m^3



b Klot
Klotformad nebulosa som sänder ut infraröd strålning



c Protostjärna
Synligt ljus



d Huvudseriestjärna
Innertemperatur över $5 \cdot 10^6$ K.
Stabil stjärna

Trots den låga tätheten i gasmolnen är det där, i de så kallade nebulosorna, som stjärnor kan födas. Om tätheten i en nebulosa blir tillräckligt stor, kan den nämligen börja dra sig samman. Varje partikel påverkas ju av gravitationskrafter från alla de andra partiklarna i nebulosan, så att resultantkraften pekar in mot centrum. Se figur 8.13a.

Efter hand som nebulosan drar sig samman, antar centrum *klotform*. Klotet är omgivet av en så kallad *ackretionsskiva*, eller *ansamlingsskiva*, en roterande skiva av stoft och partiklar. Ackretionsskivor tycks vara ett vanligt resultat när gravitationen drar samman ett gasmoln. Orsaken till det är att molnet i sin helhet alltid har mer eller mindre rotation. Precis som för en isdansare som drar in armarna blir rotationsfarten större när genomsnittsavståndet till rotationscentrum minskar.

Inne i ackretionsskivan kan gravitationen leda till lokala massanhopningar. Vid ungefär månstorlek kallas dessa protoplaneter. Lägg märke till att planeterna i vårt solsystem alla roterar i samma riktning i samma plan. Planet som kallas ekliptikan är en rest av solsystemets ackretionsskiva. Det har visat sig att planeter är en naturlig konsekvens av gravitationskrafter och kollisioner inne i ackretionsskivan när stjärnor föds. Det betyder att planeter är vanliga runt andra stjärnor än solen. Dessa s.k. exoplaneter återkommer vi till.

Så småningom stiger temperaturen i det centrala klotet eftersom den potentiella energin omvandlas till termisk energi när gasen faller inåt. Det betyder att klotet börjar stråla i infrarött Se figur 8.13b.

När klotet har fallit samman ytterligare börjar det sända ut synligt ljus. Vi kallar det nu för en *protostjärna*. Se figur 8.13c. Lägg märke till att det ofta bildas flera stjärnor i närheten av varandra i samma gasmoln. Det ser ut som om bara hälften av alla stjärnor är "singlar".

EXEMPEL 4 **Protostjärna**

I en nebulosa i stjärnbilden Orion har astronomerna observerat ett stjärnliknande föremål. Det har en yttemperatur runt 600 K och utstrålar en effekt som är 1 000 gånger soleffekten. Det är mycket som tyder på att det är en protostjärna. Den drar sig samman och temperaturen stiger, men i centralområdet har temperaturen ännu inte blivit så hög att kärnreaktioner kommit i gång.

När en protostjärna har dragit sig samman så mycket att temperaturen i centralområdet överstiger *fem miljoner grader* startar fusionsreaktioner i centralområdet. En och annan kollision mellan vätekärnor, dvs. protoner, blir så våldsam att den starka kärnkraften, som har kort räckvidd, lyckas övervinna den elektrostatiska coulombkraften. När det sker omvandlas väte i flera steg till helium. Energin från fusionsreaktionerna tar någon miljon år på sig ut från centrum av stjärnan till det yttersta lagret, där den slutligen strålar ut i rymden. Trots att energi hela tiden läcker ut från centrum upprätthålls den höga temperaturen genom fusionsreaktionerna.

För att kärnreaktionerna ska komma igång i centralområdet, måste stjärnmassan vara minst 0,08 solmassor. Om massan är mindre än så, blir centraltemperaturen för låg för kärnreaktioner.



8.14 Plejaderna är ett ungdomsgäng i stjärnsamhället. Det är mycket som tyder på att Plejaderna består av ganska unga stjärnor, bara 4 miljoner år gamla. De är inneslutna i ett svagt lysande moln. Det är troligtvis resterna av den nebulosa som stjärnorna har bildats av.

Man kan undra hur vi egentligen kan veta vad som pågår i en stjärnas *inre*. Svaret är att vi har fått en lång rad viktiga pusselbitar från studier av vår närmaste stjärna, solen. Hypoteser baserade på studier av solen kan dessutom testas på jordiska laboratorier. Av fusionsprodukterna från solens inre är det bara neutrinerna som tar sig ut direkt. Även om all materia är nästan genomskinlig ur neutrinosynpunkt, även jorden, så produceras sådana enorma mängder att vi ändå lyckas detektera en och annan som bekräftar våra teorier om förhållandena i solens inre. På det viset vet vi mer om solens inre än om jordens inre.

En stjärna som solen är dessutom en enorm gasklump. Den skälver och vibrerar i takt med explosionerna i sitt inre. Det kan vi se i form av mönster av stående seismiska vågor vid dess yta. Vi kan alltså få information om solens inre struktur med hjälp av "ekon" från dessa vågor, på motsvarande sätt som vi får det om jorden via jordseismologi. Helioseismologi kallas denna relativt nya gren av astrofysiken.

Stabilt vuxenliv som huvudseriestjärna

Så länge det finns tillräckligt med väte för fusionsreaktionerna i centralområdet, är stjärnan en stabil huvudseriestjärna. Inne i stjärnan råder det då jämvikt mellan gravitationskrafter som verkar inåt, och tryckkrafter som verkar utåt. Om centralområdet skulle dra sig samman, så skulle temperaturen stiga och fusionstakten öka. Det skulle öka trycket, och centralområdet skulle utvidgas och kylas av.

STABILA STJÄRNOR

Stabila stjärnor har ungefär konstant radie, temperatur och utstrålad effekt. Massan ligger mellan 0,08 och 60 solmassor. Energin kommer från vätefusion i centralområdet.

Det är *bara massan* som bestämmer var en ung stjärna kommer att hamna i huvudserien. Små stjärnor med massa ned mot 0,08 solmassor blir röda, ljussvaga M-stjärnor. Stjärnor med en massa lika med solmassan blir gula G-stjärnor. Och stjärnor med en massa upp mot 60 solmassor blir blå, ljusstarka O-stjärnor.

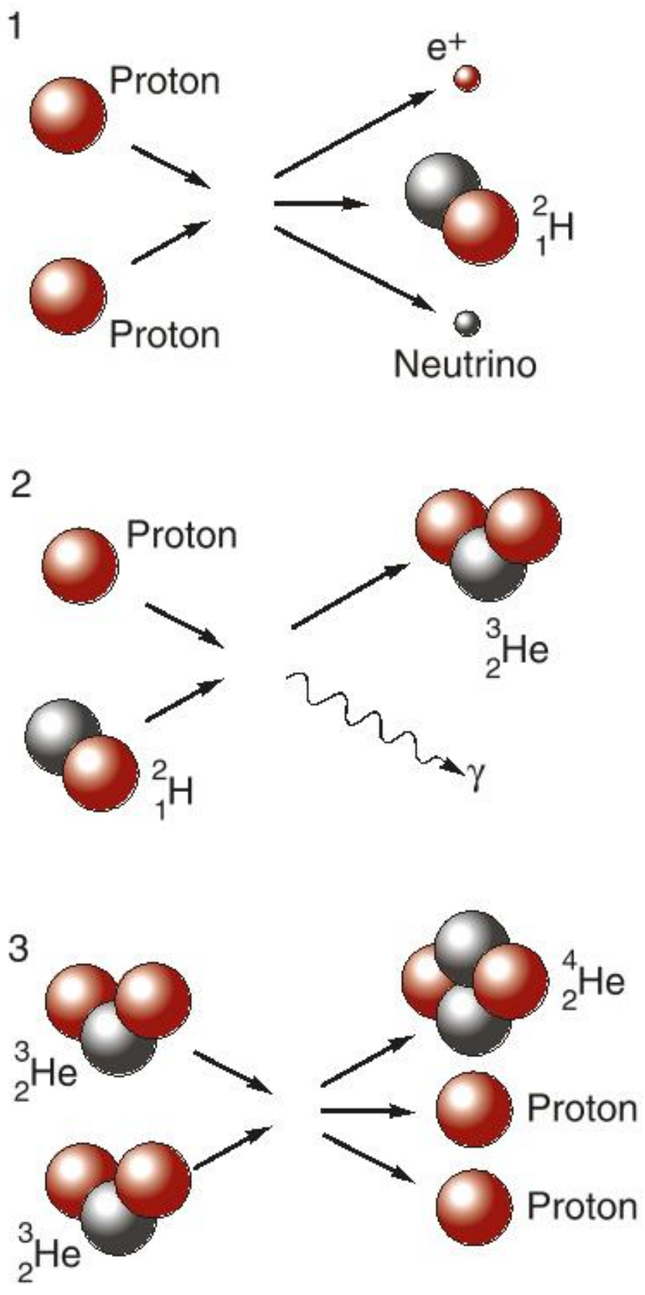
I centralområdet i stabila stjärnor är alltså temperaturen så hög att väte fusionerar till helium. Det är två processer som är aktuella: *proton-proton-fusionen* och *kolcykeln*.

Nettoresultatet av båda reaktionerna är

$$4\,{}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\mathrm{e}^{+} + 2\nu + \text{gammastrålning}$$

Det betyder att fyra vätekärnor omvandlas till helium, två positroner och två neutriner. Eftersom fyra vätekärnor väger mer än heliumkärnan och positronerna kommer skillnaden i massa ut i form av energi.

Proton-proton-fusionen går av sig själv när centraltemperaturen i stjärnan är större än $5 \cdot 10^6$ K. Kolcykeln är mest effektiv när centraltemperaturen är större än $20 \cdot 10^6$ K.



Schematisk framställning av proton-proton-fusionen.

Den stabila perioden är den längsta i stjärnans liv. Hur länge den varar, beror på massan. I en stjärna med stor massa blir centraltemperaturen hög och fusionstakten hög. Det leder till att stjärnor med stor massa förbrukar sitt väte mycket snabbare än stjärnor med liten massa. *Stjärnor med stor massa har därför störst utstrålad effekt och kortast livslängd,* ned mot 1 miljon år. Dessa stjärnor ligger överst till vänster i HR-diagrammet. *Stjärnor med liten massa har minst utstrålad effekt och längsta livslängden,* upp mot 100 miljarder år. Dessa stjärnor ligger nederst till höger i HR-diagrammet.

EXEMPEL 5 **Länge leve solen!**

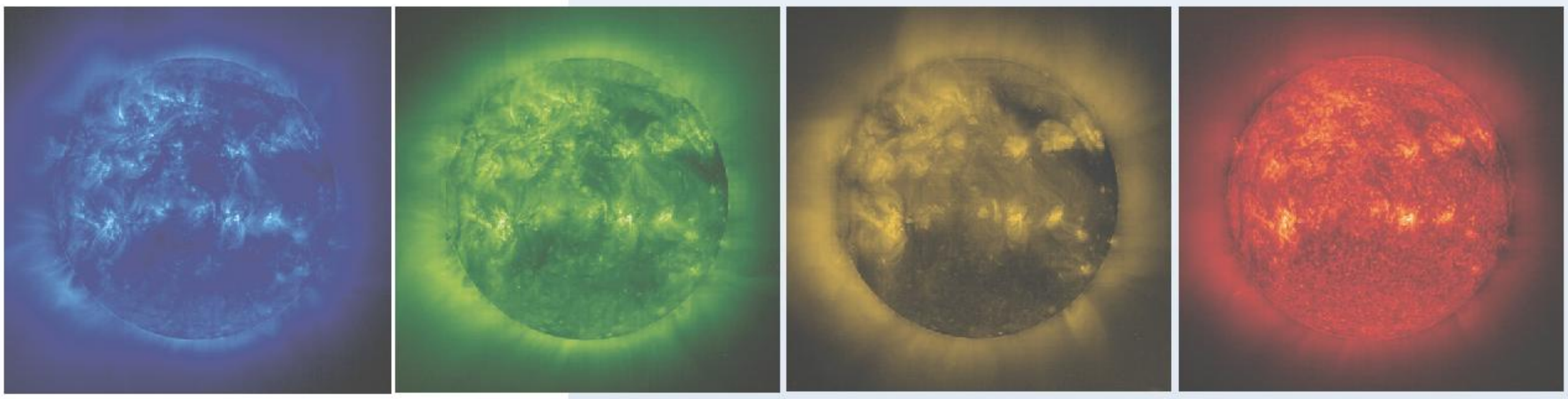
Solen utstrålar effekten $P = 3{,}9 \cdot 10^{26}\,\text{W}$. På tiden $t = 1$ s utstrålar solen alltså energin $W = 3{,}9 \cdot 10^{26}\,\text{J}$. För varje heliumkärna som skapas vid fusion av 4 vätekärnor, frigörs det $W_1 = 4{,}3 \cdot 10^{-12}\,\text{J}$. Antalet heliumkärnor som bildas i solen på en sekund, är därför

$$N = \frac{W}{W_1} = \frac{3{,}9 \cdot 10^{26}}{4{,}3 \cdot 10^{-12}} = 9{,}1 \cdot 10^{37}$$

Väteförbrukningen i solen på en sekund blir

$$\Delta m = N \cdot 4m_{\text{H}} = 9{,}1 \cdot 10^{37} \cdot 4 \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} = 6{,}1 \cdot 10^{11}\ \text{kg}$$

Det motsvarar massan av nästan en kubikkilometer vatten



8.15 a–d Solar and Heliospheric Observatory är ett observatorium vars viktigaste uppgift är att studera aktiviteten på solen för att komma fram till hur solaktiviteten påverkar klimatet på jorden. SOHO har bekräftat att solen bubblar av aktivitet. Fotoserien visar solen fotograferad med fyra olika våglängder.

I huvudseriestjärnor räknar man med att väte med en total massa lika med 10 % av stjärnmassan kan fusionera. Solens bränsleförråd blir då

$$m = 0{,}10 \cdot m_{\text{S}} = 0{,}10 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{30}\ \text{kg} = 2{,}0 \cdot 10^{29}\ \text{kg}$$

Och solens livslängd blir

$$t_{\text{s}} = \frac{m}{\Delta m} \cdot t = \frac{2{,}0 \cdot 10^{29}}{6{,}1 \cdot 10^{11}} \cdot 1\ \text{s} = 3{,}3 \cdot 10^{17}\ \text{s} = 1{,}0 \cdot 10^{10}\ \text{år}$$

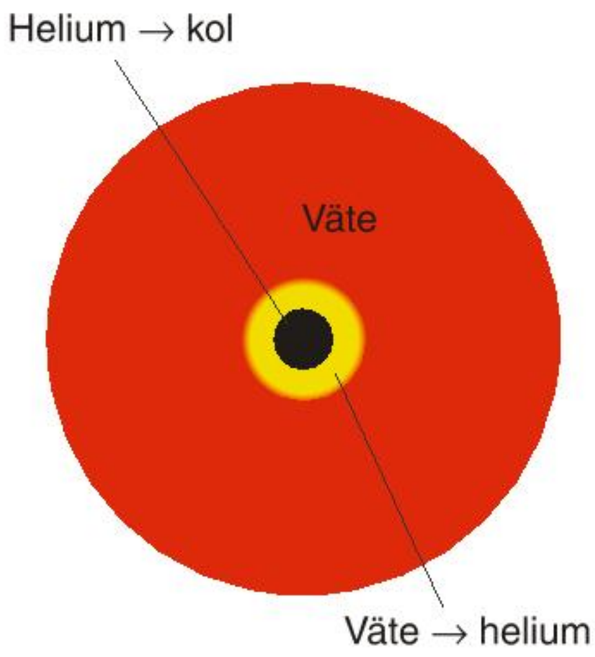
Solen får alltså en livslängd på 10 miljarder år. Mycket tyder på att solen är 5 miljarder år gammal just nu. Solen är alltså *halvvägs* i sin karriär som stabil stjärna. Stabiliteten hos solen över en så lång tid har varit en nödvändig förutsättning för utvecklingen av intelligent liv på jorden.

Ålderdom och död

Förr eller senare når stjärnan det stadium där mängden helium har blivit så stor i förhållande till mängden väte att det inte är nog för att upprätthålla vätefusion. Då lämnar stjärnan huvudserien.

Antalet efterföljande stadier innan stjärnan går in i sitt slutstadium beror på stjärnans massa.

Låt oss börja med att se på en stjärna av solens typ. När fusionshastigheten minskar i kärnan så minskar också trycket. Då kommer gravitationen att få övertag och krama upp kärnan i allt högre temperatur samtidigt som kärnan faller samman. Eftersom heliumkärnorna har en större positiv laddning än vätekärnorna krävs det en högre temperatur för att de ska fusionera. Men till sist, vid en temperatur över 100 miljoner kelvin, kan de mest energirika heliumkärnorna kollidera med en sådan fart att de övervinner coloumbkrafterna och "limmas" samman av den starka kärnkraften till kolkärnor. Samtidigt har temperaturen i ett skal *runt* kärnan blivit tillräckligt hög för vätefusion. Se figur 8.16. De båda fusionsprocessernas energiproduktion leder till att stjärnans yttre lager sväller. Radien och den utstrålade effekten ökar, medan yttemperaturen sjunker. Stjärnan blir en *röd jätte*. Genomsnittsradien i röda jättar har beräknats till 100 solradier. *De allra flesta stjärnor blir röda jättar, förr eller senare.*

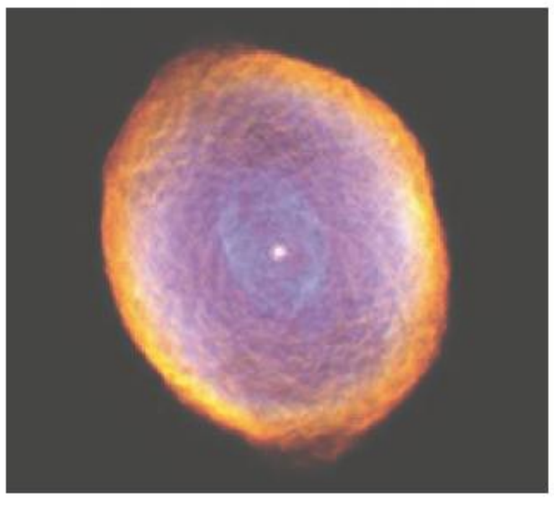


8.16 Fusionsskal i röd jättestjärna.

Vi räknar med att solen kommer att bli en röd jätte på det sätt vi har beskrivit. Då är livet på jorden slut för länge sedan.

I stjärnor med större massa än solens kan ständigt nya fusioner ta vid i centralområdet. Men varje nytt steg ger mindre energi per fusionsreaktion och varar kortare tid. Samtidigt fortsätter de tidigare fusionerna i koncentriska skal allt längre utåt. På det här sättet byggs det gradvis upp tyngre atomkärnor i centralområdet.

Vita dvärgar



8.17 Planetarisk nebulosa.

Teoretiska beräkningar tyder på att stjärnor med en massa mindre än 5–6 solmassor i sina slutstadier kastar av sig massa genom att tryckkrafterna från djupare lager blåser iväg de yttersta lagren ut i världsrymden. De slutar som vita dvärgar med en massa mindre än 1,4 solmassor.

Den utslungade massan bildar en lysande *planetarisk nebulosa* kring den vita dvärgen. Se figur 8.17.

Det som blir kvar av stjärnan, är en liten, kompakt stjärna ungefär så stor som jorden. Vita dvärgstjärnor har därför mycket stor densitet.

Två massor
Vi måste alltså skilja mellan två massor hos en stjärna. *Huvudseriemassan* är den massa stjärnan har när den är en stabil huvudseriestjärna. *Restmassan* är den massa stjärnan har kvar efter att den har slungat ut stoft i världsrymden.

Inne i stjärnan råder det balans mellan gravitationskrafterna och tryckkrafter av ett märkligt slag (*degenerationstryck*), som uppkommer då elektroner pressas samman i en liten volym. Kvantteorin tillsammans med relativitetsteorin kan förklara varför inte ens detta tryck är nog för att motstå gravitationen när restmassan hos den döende stjärnan är större än 1,4 solmassor.

EXEMPEL 6 **En vit dvärg**

En vit dvärgstjärna har en restmassa på 0,66 solmassor och en radie på 1,4 jordradier. Det betyder att $m = 1{,}3 \cdot 10^{30}$ kg och $r = 9{,}0 \cdot 10^{6}$ m Stjärnans volym blir

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi\left(9{,}0 \cdot 10^{6}\right)^3}{3}\,\mathrm{m}^3 = 3{,}0 \cdot 10^{21}\,\mathrm{m}^3$$

Densiteten blir enorm:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1{,}3 \cdot 10^{30}}{3{,}0 \cdot 10^{21}}\,\mathrm{kg/m}^3 = 4{,}3 \cdot 10^{8}\,\mathrm{kg/m}^3$$

Det betyder att en tärning stor som en sockerbit av detta ämne har en massa på 430 kg.

En vit dvärg frigör inte längre kärnenergi. Den utstrålar bara termisk energi. Trots detta kan de hetaste vita dvärgstjärnorna utstråla en effekt per ytenhet som är många gånger starkare än solens, men de flesta lyser betydligt svagare. Energiutstrålningen är termisk och kommer från ett långsamt läckage av lagrad värme från tidigare stadier av stjärnans liv. Den vita dvärgen blir sakta svalare, avkylningen kan ta flera miljarder år och den kommer att sluta sina dagar som en *svart dvärg*.

Hur kommer det att gå för jorden? Astronomerna räknar med att solen blir en röd jätte och därefter en vit dvärg om cirka fem miljarder år. Om den röda jättesolen får hundra gånger så stor radie som nu, kommer solytan att ligga mellan Merkuriusbanan och Venusbanan. Då kommer temperaturen på jorden att stiga katastrofalt. Allt vatten kommer att förångas och försvinna ut i världsrymden, och allt liv kommer att dö ut. Om solen därefter blåser ut gas som en planetarisk nebulosa, kommer allt spår av liv på jorden att utplånas. I ett ännu längre perspektiv kommer troligen solen att möta en annan stjärna, och resultatet blir sannolikt att planeterna slungas ut i den interstellära rymden.

Supernovor och neutronstjärnor

Stjärnor med en huvudseriemassa större än 5–6 solmassor får en mer dramatisk död. När det mesta av heliumet i centralområdet har fusionerat till kol drar sig centralområdet samman. Då stiger temperaturen. Samtidigt ökar radien genom att de yttre delarna expanderar. Då sjunker också yttemperaturen och stjärnan blir en röd superjätte. Den har ännu större radie och utstrålad effekt än en röd jätte. När centraltemperaturen kommer upp i 700 miljoner kelvin, börjar kol att fusionera till ännu tyngre grundämnen som kisel. Om temperaturen närmar sig 5 miljarder kelvin, kan fusionsprocesserna skapa järn.

När det börjar skapas järn och tyngre grundämnen i fusionsprocesserna rusar stjärnan mot sin död i den så kallade järnkatastrofen. Orsaken är att vidare fusionsprocesser inte ger energi utan tvärtom tar energi från omgivningen. Kärnan kyls, trycket minskar, gravitationen får övertaget och stjärnan imploderar.

Under kollapsen frigörs enorma mängder gravitationsenergi, och det sker kärnreaktioner som skapar grundämnen som är tyngre än järn, till exempel guld och uran. I den enorma tätheten som uppstår förenar sig protoner med elektroner och bildar neutroner och neutriner. Allt detta sker oerhört snabbt eftersom stjärnan faller samman med en fart på 70 000 km/s. Till sist, när centralområdet har en större täthet än en atomkärna övergår kollapsen till att bli en explosion. Sammanbrottet i det inre av stjärnan sänder ut våldsamma chockvågor i stjärnan, och huvudparten av stjärnan blåses ut i världsrymden. Se figur 8.18.



8.18 Krabbnebulosan i stjärnbilden Oxen är resterna efter en supernova som observerades av kinesiska astronomer år 1054. Då supernovan var som ljusstarkast var den synlig på dagen. Gasen har strömmat utåt med en hastighet på mer än 1 000 km/s och bildar nu ett gasmoln med en diameter på 6 ljusår.



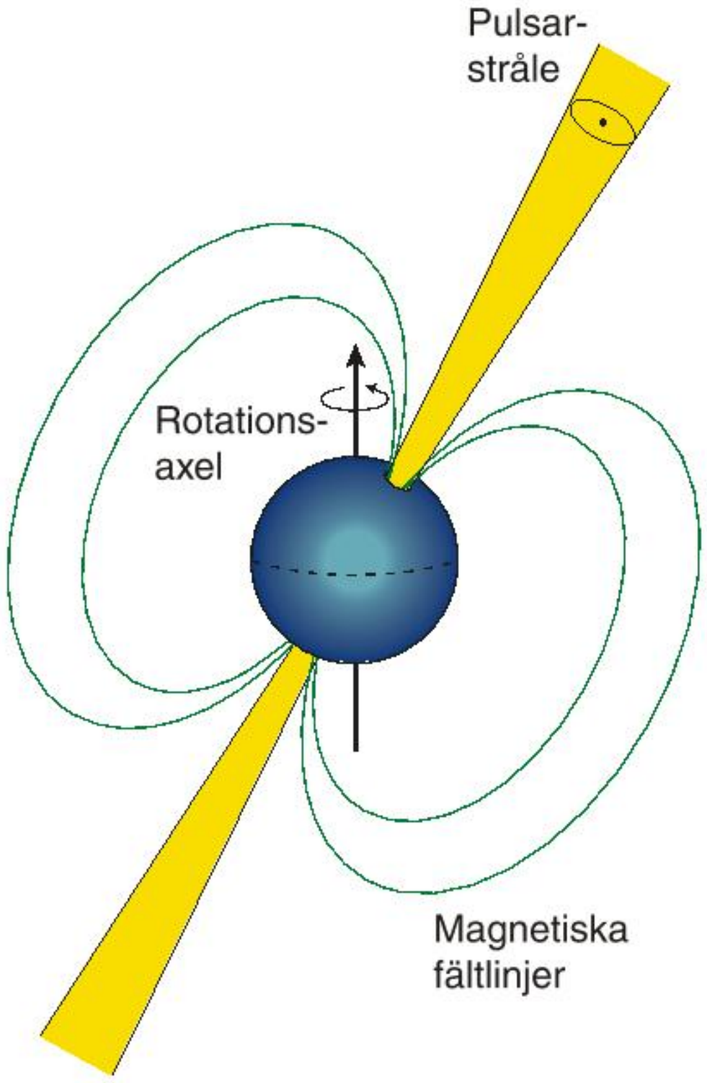
8.19 Supernova SN 1987 A, fotograferad 23 februari 1987.

Stjärnan är nu en supernova och strålar ut större effekt än en hel galax. Se figur 8.19.

EXEMPEL 7 **Supernovan SN 1987 A**

År 1987 kunde astronomerna för första gången studera en supernova med moderna instrument. Då upptäckte de en supernova i Stora Magellanska molnet, en liten galax som ligger 170 000 ljusår från Solsystemet. Se figur 8.19. Tidigare fotografier av samma område visade att det var en blå superjätte som hade exploderat. Explosionen slungade ut 4–7 solmassor med en hastighet på många tusen kilometer per sekund. Det motsvarar en kinetisk energi runt 10^{45} J. Men största delen av energin sändes troligen ut i form av neutriner med en total energi på $3 \cdot 10^{46}$ J. 16 av de neutrinerna detekterades 18 timmar innan ljuset från supernovan nådde jorden. Tar man hänsyn till att ljuset till skillnad från neutrinerna hindrades något på sin väg ut ur supernovan innan det började sin 170 000 åriga resa hit, betyder det att neutrinerna hade ungefär samma fart som ljuset med en noggrannhet på 0,00004 %.

Supernovorna är viktiga för utvecklingen av liv som vårt. För det första *bildar* supernovorna tunga grundämnen. Grundämnena mellan helium och järn bildas i jättestjärnor, men alla grundämnen tyngre än järn bildas i supernovor. För det andra sänder supernovorna ut tunga grundämnen som i världsrymden blandar sig med gas och stoft. Se figur 8.18. Av detta kan det senare uppstå nya stjärnor, som innehåller tyngre grundämnen än helium redan från början. Vi räknar med att solen är en sådan stjärna. Vi själva är alltså uppbyggda av supernovastoft. Det betyder också att allt guld på jorden har bildats i en eller flera supernovor som exploderade innan solsystemet blev till för 5 miljarder år sedan.



8.20 En pulsarmodell.

Om restmassan efter en supernovaexplosion är större än 1,4 solmassor, kan stjärnan sluta som en *neutronstjärna*. Neutronstjärnan är det kompakta centralområdet som blir kvar efter explosionen. Radien är bara 10–20 km. Densiteten är därför ungefär som densiteten hos en atomkärna. En bit av neutronstjärnan, stor som ett knappnålshuvud, 1 mm^3, kan ha en massa på 300 000 ton. Om jordens befolkning komprimerades till en sådan täthet skulle vi alla få plats i ett rum stort som en sockerbit.

Under sammanbrottet i det inre av supernovan är de fysikaliska förhållandena så extrema att elektroner pressas in i atomkärnorna, där de slår sig samman med protoner och bildar neutroner. Det är därför stjärnan kallas en neutronstjärna. Neutronstjärnan är som en enorm atomkärna bestående av neutroner.

Det är också så att många neutronstjärnor roterar mycket snabbt. Rotationstiden kan vara några få millisekunder. De omger sig med starka magnetfält, upp till 10^8 T, och kan sända ut en laserliknande strålning som sveper genom världsrymden. Se figur 8.20. Varje gång ett sådant strålknippe träffar jorden, kan vi observera en strålningspuls. Sådana roterande neutronstjärnor kallas för pulsarer.

EXEMPEL 8 **Pulsaren i Krabbnebulosan**

År 1968 upptäckte astronomerna en pulsar i Krabbnebulosan. Pulsaren måste vara resterna efter en supernova som kineserna observerade år 1054. Pulsaren har en period på 33 ms. Det betyder att neutronstjärnan roterar 30 varv per sekund. Det är snabbt, men rekordet och gränsen för det möjliga innan neutronstjärnan slits sönder är några hundra varv per sekund!

Svarta hål

Man kan visa att flykthastigheten från en himlakropp med massan m och radien r är

$$v = \sqrt{2G\frac{m}{r}}$$

där G är gravitationskonstanten. Sätter vi in ljushastigheten c i formeln och löser ut radien r så får vi den så kallade kritiska radien

$$r_0 = 2G\frac{m}{c^2}.$$

Hur ska den kritiska radien tolkas? Jo, i en neutronstjärna råder det jämvikt mellan gravitationskrafterna och tryckkrafterna från neutronerna. Men om restmassan efter supernovaexplosionen är större än ca 3 solmassor kan inte tryckkrafterna stå emot gravitationskrafterna. Sammandragningen fortsätter och passerar den kritiska radien. När det sker så kan ingenting längre slippa ut ifrån stjärnan. Inte ens ljus. Då har den blivit ett svart hål.

EXEMPEL 9 **Ett svart hål**

Den kritiska radien för en stjärna med restmassan lika med 2,5 solmassor = $5{,}0 \cdot 10^{30}$ kg är

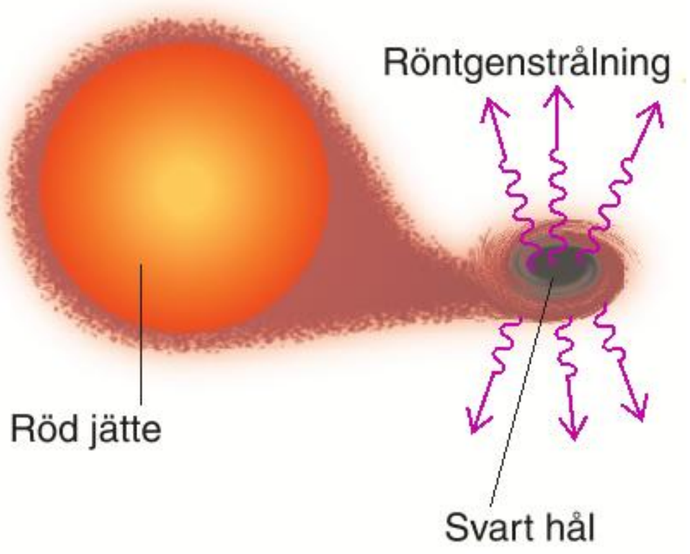
$$r_0 = 2G\frac{m}{c^2} = \frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{30}}{\left(3{,}00 \cdot 10^{8}\right)^2}\ \text{m} = 7{,}5 \cdot 10^{3}\ \text{m}$$

Det betyder att stjärnan blir ett svart hål om den pressas samman till en radie mindre än 7,5 km.

När en stjärna blir ett svart hål, känner vi inte till *några* krafter som är starka nog för att hejda sammanbrottet. Vi vet faktiskt inte vad som sker efter det att radien har passerat den kritiska radien eftersom vi inte har någon fysik som beskriver situationer under så extrema förhållanden. För att skapa modeller för det måste vi förena kvantteori och generell relativitetsteori i en ännu mer generell teori, men det har ingen lyckats med hittills.

Ett svart hål kan bara observeras indirekt, genom verkningarna av det enorma gravitationsfältet. Om ett föremål faller in mot ett svart hål, kommer hastigheten att öka mot ljushastigheten när föremålet passerar den kritiska gränsen.

Einsteins speciella relativitetsteori handlar om koordinatsystem med konstant fart. I det här kapitlet använder vi resultat från Einsteins ännu mer revolutionerande teori, den generella. Den behandlar gravitation samt accelererade system.



8.21 Synlig stjärna och svart hål, schematiskt.

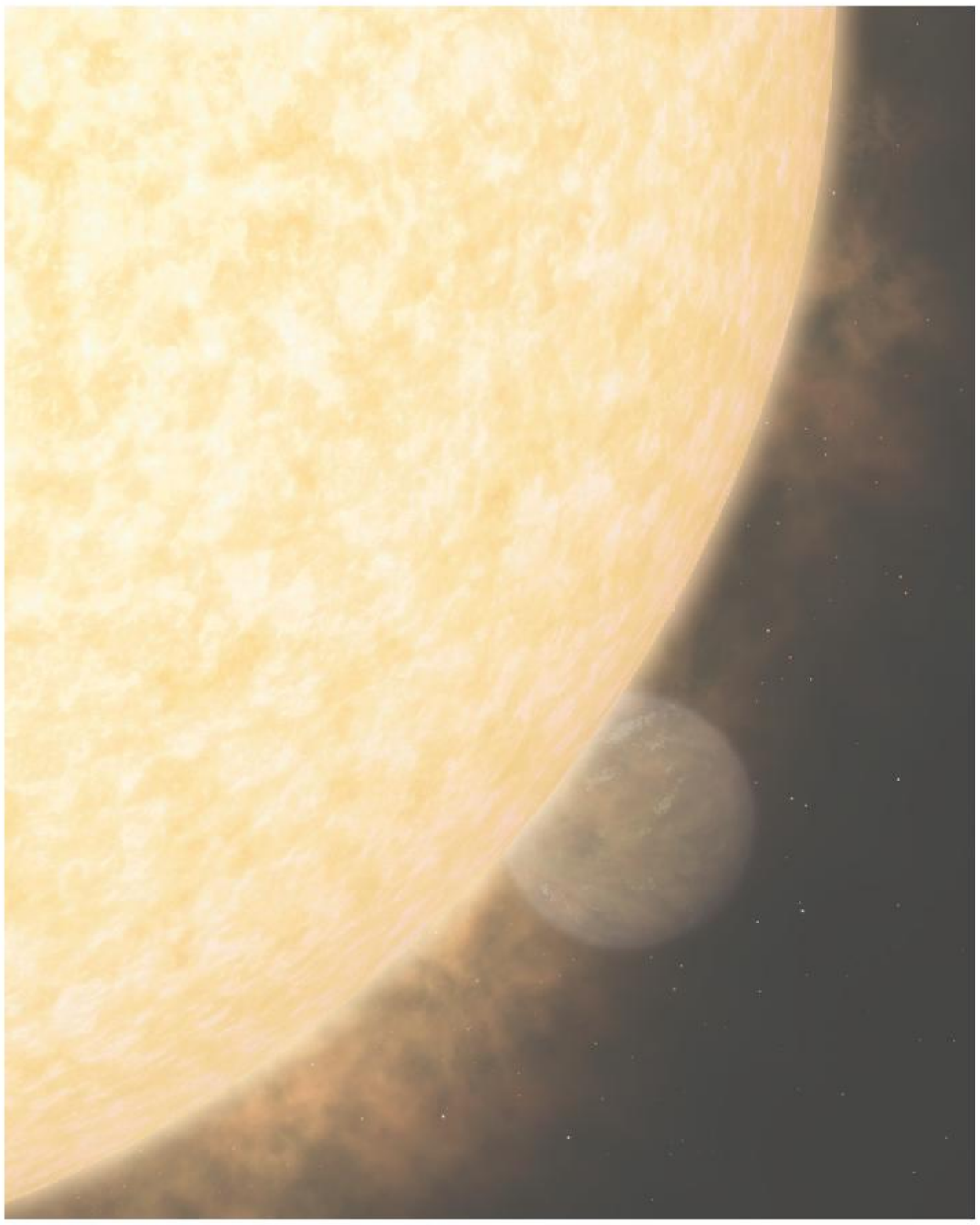
Astronomerna har observerat intensiv röntgenstrålning från enstaka stjärnor. En sådan stjärna är kanske den ena partnern i ett dubbelstjärnesystem där en synlig stjärna och ett svart hål kretsar runt en gemensam tyngdpunkt. Det svarta hålet drar till sig stoff från den synliga stjärnan, och därvid sänds röntgenstrålning ut från laddningar som accelereras in i det svarta hålet. Se figur 8.21.

I dag har man observerat många fenomen i samband med resterna efter supernovaexplosioner eller i galaxcentra som bara tycks kunna förklaras genom närvaron av svarta hål. Det har övertygat de flesta astronomer om att de finns. Men, eftersom vi inte kan se dem direkt kan vi inte vara fullständigt säkra. Hur det är där inne har vi ingen aning om. Materialet som dras in i hålet behåller sin energi och bidrar till det svarta hålets gravitation, mycket mer än det vet vi inte.

KONTROLLFRÅGOR

- Vilka är de två vanligaste gaserna i världsrymden?
- Hur kan det bildas stjärnor i en nebulosa?
- Vilka egenskaper har en stabil stjärna?
- Vad är det som bestämmer var i huvudserien en stjärna hamnar?
- Vad blir nettoresultatet av kärnreaktionerna i en stabil stjärna?
- Hur beror livslängden hos en huvudseriestjärna på massan?
- Vilka tre slutstadier är möjliga i stjärnornas liv? Vad är det som avgör vilket av slutstadierna en stjärna hamnar i?
- Vilka egenskaper är typiska hos en vit dvärg?
- Vad är en supernova? Vad är det som utlöser en supernovaexplosion?
- Vilka egenskaper är typiska hos neutronstjärnor?
- Vad är ett svart hål? Hur uppstår svarta hål?
- Varför kallas stjärnorna för grundämnesfabriker?

8.4 Exoplaneter



Om vi tittar mot en stjärna blir vi så bländade att vi inte ser en liten planet som bara lyser svagt med ”lånat ljus”.

En *exoplanet* är en planet som är bunden till en annan stjärna än solen. Avstånden i universum är så enorma att det länge verkade omöjligt att upptäcka en enda exoplanet, även om det skulle vimla av dem runt andra stjärnor i vår hemgalax. Orsaken är att de är små och väldigt ljussvaga bredvid sin stjärna. Det betyder att vi bara kan observera exoplaneter indirekt genom den påverkan de har på ljuset från sina hemstjärnor eller från bakomliggande stjärnor.

I huvudsak finns det fem indirekta observationsmetoder:

- Pulsarmetoden
- Förmörkelse eller transitmetoden
- Förmörkelsevariationer
- Dopplerspektroskopi
- Gravitationell linsbrytning.

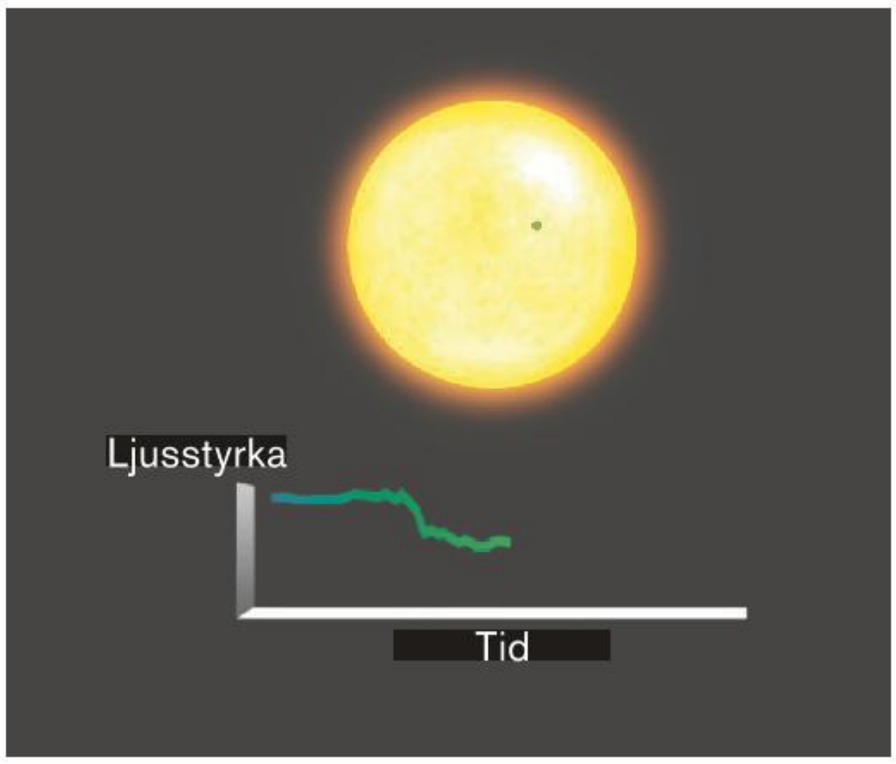
Pulsarmetoden

Den första exoplaneten upptäcktes 1992. Det var en jätteplanet i tät bana runt en pulsar. Antagligen är planeten resterna av pulsarens partner i ett dubbelstjärnesystem. Jätteplaneten kunde upptäckas genom att den och pulsaren kretsar runt sin gemensamma tyngdpunkt. Det åstadkommer små periodiska dopplervariationer i pulsarfrekvensen som går att detektera från jorden.

Ett par år senare upptäcktes den första jätteplaneten som gick i bana runt en huvudseriestjärna. Sakta fylldes sedan listan av jätteplaneter på. Inte nödvändigtvis för att jätteplaneter är vanligare än småplaneter utan för att de är lättare att upptäcka.

Sedan dess har jakten på exoplaneter gått in i en ny era med förbättrade teleskop för jordbundna observationer, nya rymdteleskop och nya detektionsmetoder. När den här boken skrivs närmar sig antalet exoplaneter tusen och när du läser den har säkert antalet passerat tusen och fortsatt att stiga.

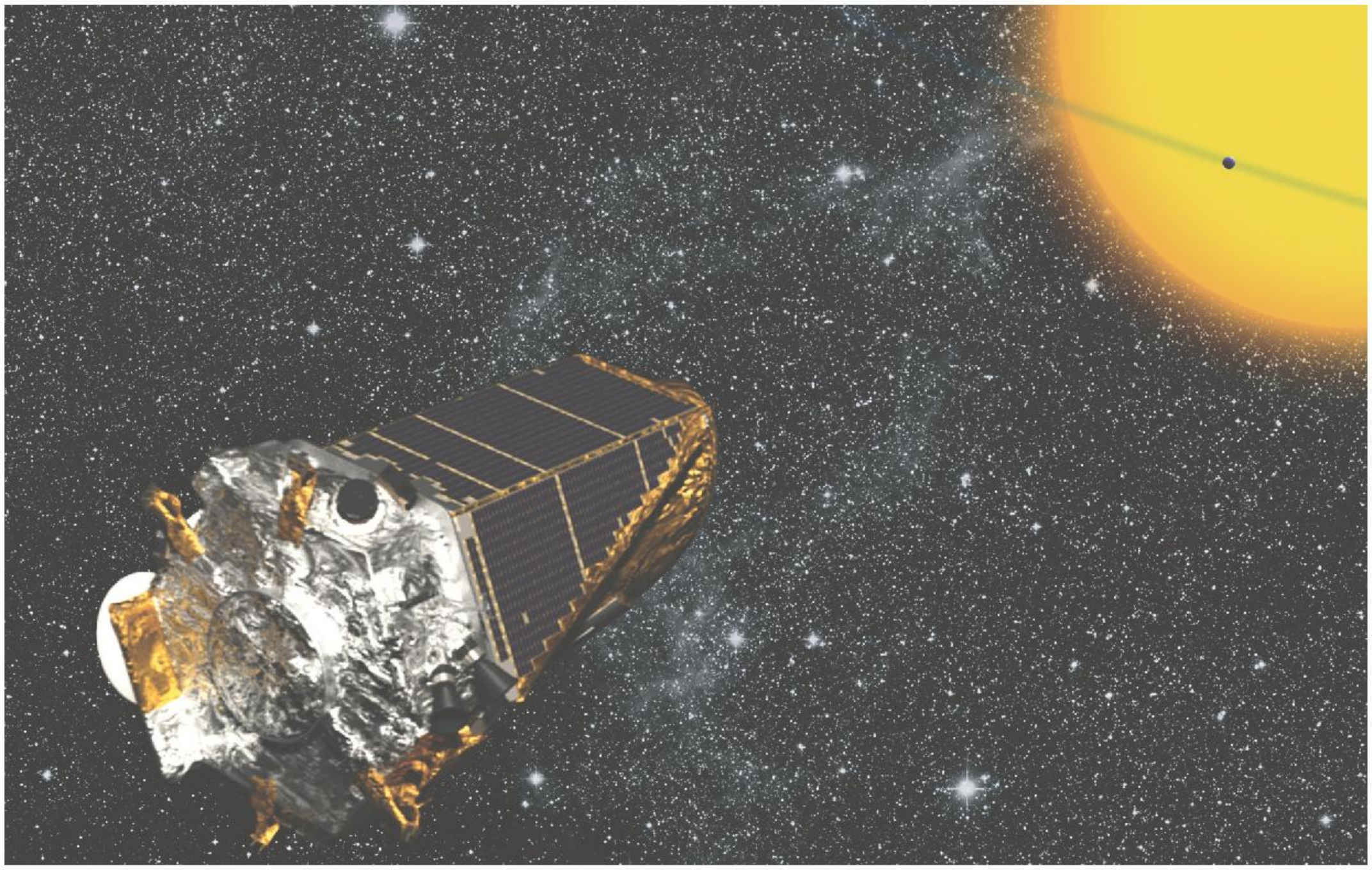
Förmörkelsemetoden eller transitmetoden



8.22 Förmörkelsemetoden fungerar genom att planeten en gång per "exo-år" passerar framför sin stjärna och skymmer en del av ljuset från den. Metoden kräver att vår siktlinje till stjärnan ligger nära planetbanans plan. Det gäller ungefär 5 % av alla planetsystem.

I mars 2009 skickade USA upp rymdteleskopet Kepler. Det har som huvuduppgift att försöka detektera exoplaneter med hjälp av den så kallade *förmörkelsemetoden*. Metoden går ut på att detektera den lilla förändring som uppstår i ljuset då exoplaneter passerar framför sin stjärna. Se figur 8.22.

Kepler är egentligen en stor digital kamera med 95 megapixel. Varje halvtimme tar den en bild av 100 000 stjärnor på upp till 3 000 ljusår från solen. Datorer på jorden håller koll på stjärnornas ljusstyrka.



Bilden illustrerar hur lite en stjärna av solens storlek skuggas av en jordlik planet. Hela tiden uppträder variationer i stjärnans utstrålning som beror på fenomen i dess atmosfär, solfläckar, osv. Det är därför viktigt att notera om nedgången i ljusstyrkan är periodisk. Helst ska detektionen bekräftas med hjälp av en av de andra metoderna.

På hösten 2011 hade Kepler upptäckt 700 planeter, varav några flerplanetsystem och några få jordliknande planeter. Alla de här planeterna har bekräftats genom oberoende metoder för att utesluta att det inte bara rör sig om solfläckar som rört sig över stjärnytan.

Förmörkelsemetoden favoriserar upptäckt av jätteplaneter som är tätt bundna till sin stjärna. Men statistisk analys av observationsmaterialet från Kepler visar att 40 % av alla stjärnor har minst en planet som är mindre än Saturnus och att de flesta planeterna är betydligt mindre än Jupiter. Det skulle betyda att det finns massor av planeter i Vintergatan som har ungefär samma massa som jorden.

Förmörkelsevariationer

Om förmörkelsetiden varierar så kan det bero på att den förmörkande exoplanetens bana påverkas av andra planeter. *Förmörkelsevariationer*, som innebär att man detekterar dessa variationer, är en hyperkänslig metod som kan leda till upptäckter av planeter som har samma massa som jorden eller till och med mindre. Men den förutsätter alltså att man först har upptäckt en förmörkande planet.

Dopplerspektroskopi

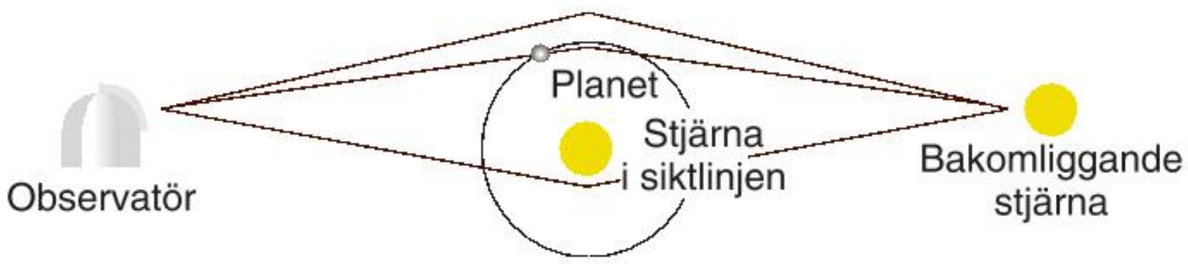
Den metod som lämpar sig bäst för jordbundna observationer är spektroskopi.

En stjärna går tillsammans med sina planeter i en bana runt stjärnsystemets tyngdpunkt. Det innebär att stjärnan ibland är på väg emot oss och ibland ifrån oss. När stjärnan rör sig mot oss gör dopplerförskjutningen att ljuset förskjuts mot blått. När den avlägsnar sig blir ljuset rödförskjutet. Med dopplerspektroskopi kan man detektera den förskjutning i spektrallinjerna som en exoplanet ger upphov till.

Även dopplerspektroskopi favoriserar stora planeter i tät bana runt sin stjärna. Ju mindre det skiljer mellan stjärnans och planetens massa, och ju mindre avståndet mellan planeten och stjärnan är, desto mer påverkas stjärnan av planeten. Just nu kan man mäta variationer i en stjärnas fart ned till 1 m/s med den här metoden.

Stjärnan och planeten har samma period men stjärnans bana runt tyngdpunkten är mycket mindre. Det innebär att stjärnans hastighet i banan är mycket mindre och dess rörelse mindre tydlig. Exempelvis har solen hastigheten 13 m/s (cykelfart) runt systemet solen-Jupiters tyngdpunkt. Ytterligare en försvårande omständighet är ju att vi bara kan observera den radiella hastighetskomponenten.

Gravitationell mikrolinsbrytning



8.23 Ljus bryts in mot gravitationsfält. Det gör att en osynlig planet kan upptäckas genom sin påverkan på ljuset från en bakomliggande stjärna.

Runt 1915 utvidgade Einstein den speciella relativitetsteorin till en mer generell teori. Om teorin var riktig skulle ljuset från en bakomliggande stjärna brytas in mot tyngdkraftfältet när det passerar en stjärna som ligger nära siktlinjen. Se figur 8.23. Einsteins förutsägelse innebar att man kunde testa teorin under nästa solförmörkelse. Om den stämde borde stjärnorna bakom solen se ut att flytta sig relativt de positioner de hade när inte solen fanns i förgrunden. När man observerade effekten under en solförmörkelse på södra halvklotet fick Einsteins generella relativitetsteori en bekräftelse som i ett slag gjorde Einstein världsberömd. Även ljus från en bakomliggande stjärna som passerar ett planetliknande objekt böjs in mot det. Det kallas för *gravitationell mikrolinsbrytning* och har utvecklats till en metod för att upptäcka små ljussvaga objekt.

Liv i universum

En viktig orsak, förutom de rent vetenskapliga, till att man bryr sig om att leta efter exoplaneter är den filosofiska frågan: Är vi ensamma i universum?

I och med att vi blir allt bättre på att upptäcka och observera exoplaneter kan vi göra allt bättre estimat (skattningar) över hur många planeter i vår galax som har goda förutsättningar för liv. Idag vet vi bara att det finns liv på en enda planet i universum. Där började livet sjuda så fort planeten svalnat. Att livet började så tidigt på jorden tyder på att liv inte är ovanligt när grundförutsättningarna väl är uppfyllda. Men vilka är då de fysikaliska förutsättningarna?

Forskare tänker sig först och främst att en planet där det finns liv bör befinna sig vid en stabil huvudseriestjärna. Den bör också befinna sig i det som forskarna kallar den beboeliga zonen, det vill säga på ett sådant avstånd från sin stjärna att det varken är för kallt eller för varmt. Då kommer det att finnas vatten i fast och flytande form samt i gasform på planeten, något som forskare anser vara viktigt.

Är det nödvändigt att stjärnan är en andra generationens stjärna så att det finns rikligt med kemiska ämnen som är tyngre än väte, helium och litium? Kanske. Men även med denna begränsning finns det säkert mängder av planeter som uppfyller de fysikaliska förutsättningarna för att liv ska kunna uppstå – det finns 200 miljarder stjärnor i Vintergatan och hundratals miljarder galaxer.

Vad krävs för att det ska uppstå *intelligent* liv som kan fundera över frågor som denna? Här går gissningarna isär. Forskare tror att *evolutionen* är en naturlig mekanism i universum som driver fram liv när väl grundförutsättningarna är uppfyllda. Samtidigt tog det 4 miljarder år innan Homo Sapiens utvecklades vid vår ovanligt stabilt strålande andra generationens stjärna.

Vi vet inte vilka av jordens övriga egenskaper som är nödvändiga. Vi har årstider, jorden har ett magnetfält som skyddar det landlevande livet från kosmisk strålning och vårt solsystem har en jätteplanet, Jupiter, som har dammsugit upp runt oss så att risken för asteroidnedslag har blivit liten. Men, å andra sidan, utan asteroidnedslaget som utrotade dinosaurierna för 60 miljoner år sedan skulle nog inte någon sådan som du ha kunnat sitta här och reflektera över livet.

Försiktiga forskare gissar att det just nu kan finnas några tiotal planeter med intelligent liv i vår Vintergata. Liv som kan skapa en civilisation och teknologi. Men även om det bara fanns några tiotal civilisationer i Vintergatan så finns det flera hundra miljarder galaxer. Så då skulle det kunna vimla av intelligent liv i universum.

Är vi isolerade i universum?

Men så kommer nästa fråga: Kan vi få kontakt med någon av civilisationerna? Vi som är fysiker måste lägga önsketänkandet på hyllan och underkasta frågan de fysikaliska lagarna. Anta att det skulle finnas en civilisation på en planet innanför en radie på 3 000 ljusår, alltså i vår närmaste omgivning. Då dröjer det upp till 3 000 år innan de i bästa fall kan motta ett meddelande som vi sänder i dag. När svaret kommer om 6 000 år är vi, och kanske även vår civilisation, glömda och borta för tusentals år sedan.

Även om dessa interstellära långdistanssamtal tar lång tid fram och tillbaka så skulle det vara en av de största upptäckterna någonsin om vi lyckades fånga upp en signal från någon kontaktsökande civilisation där ute. Vi söker.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad är en exoplanet?
- Vad är förmörkelsemetoden?
- Hur fungerar mikrolinsmetoden?
- Vad kan man finna med hjälp av förmörkelsevariationsmetoden?
- Varför har man mest hittat jätteplaneter i tät bana runt sin moderstjärna?
- Finns det många jordliknande planeter i galaxen?
- Varför är det viktigt med en stabil moderstjärna när man söker efter intelligent liv?
- Vad är den beboeliga zonen?
- Varför kan det vara viktigt att moderstjärnan är en andra generationens stjärna?

8.5 Galaxer

Vintergatan

Solen och hundra miljarder andra stjärnor, och stora mängder gas och stoft, utgör tillsammans det stjärnsystem som vi kallar Vintergatan. Se figur 8.24.

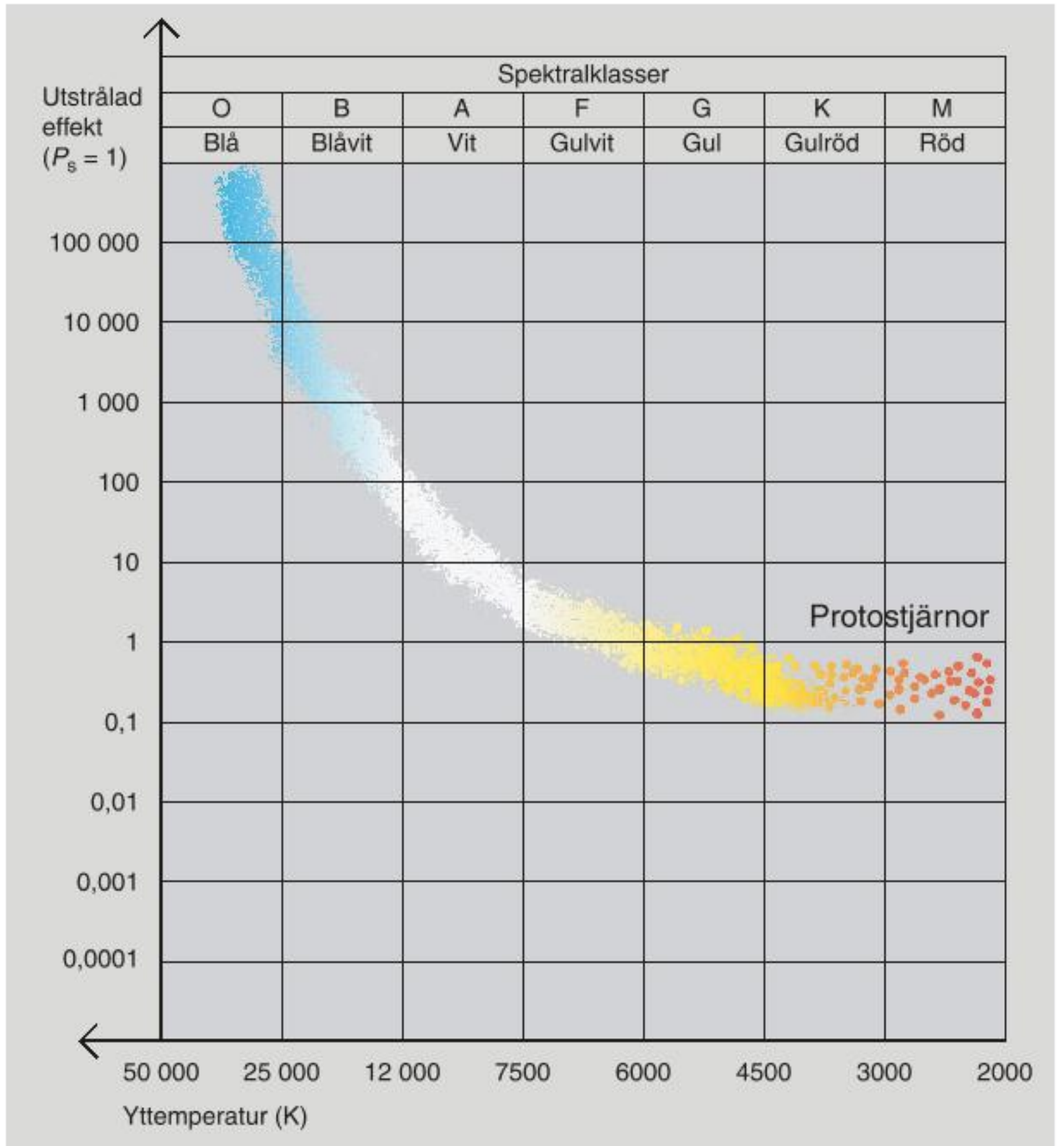
Astronomerna räknar med att Vintergatan blev till för 13 miljarder år sedan. Den bildades av ett enormt gasmoln som bestod av 75 % väte och 25 % helium. Under loppet av några hundra miljoner år förtätades mycket av den gasen till stjärnor, och Vintergatan fick ungefär den form den har i dag.

Förutom de enskilda stjärnorna så finns det stora grupper av stjärnor, *stjärnhopar*. Stjärnhoparna kan lära oss mycket om stjärnornas utveckling, för vi räknar med att alla medlemmarna i en hop bildades ungefär samtidigt i samma gasmoln. Det betyder att en stjärnhop ger oss en ögonblicksbild av stjärnor som är lika gamla och har samma kemiska sammansättning, men olika massor. På det sättet kan astrofysikerna testa sina teorier om stjärnutveckling. Se figurerna 8.25 och 8.26.



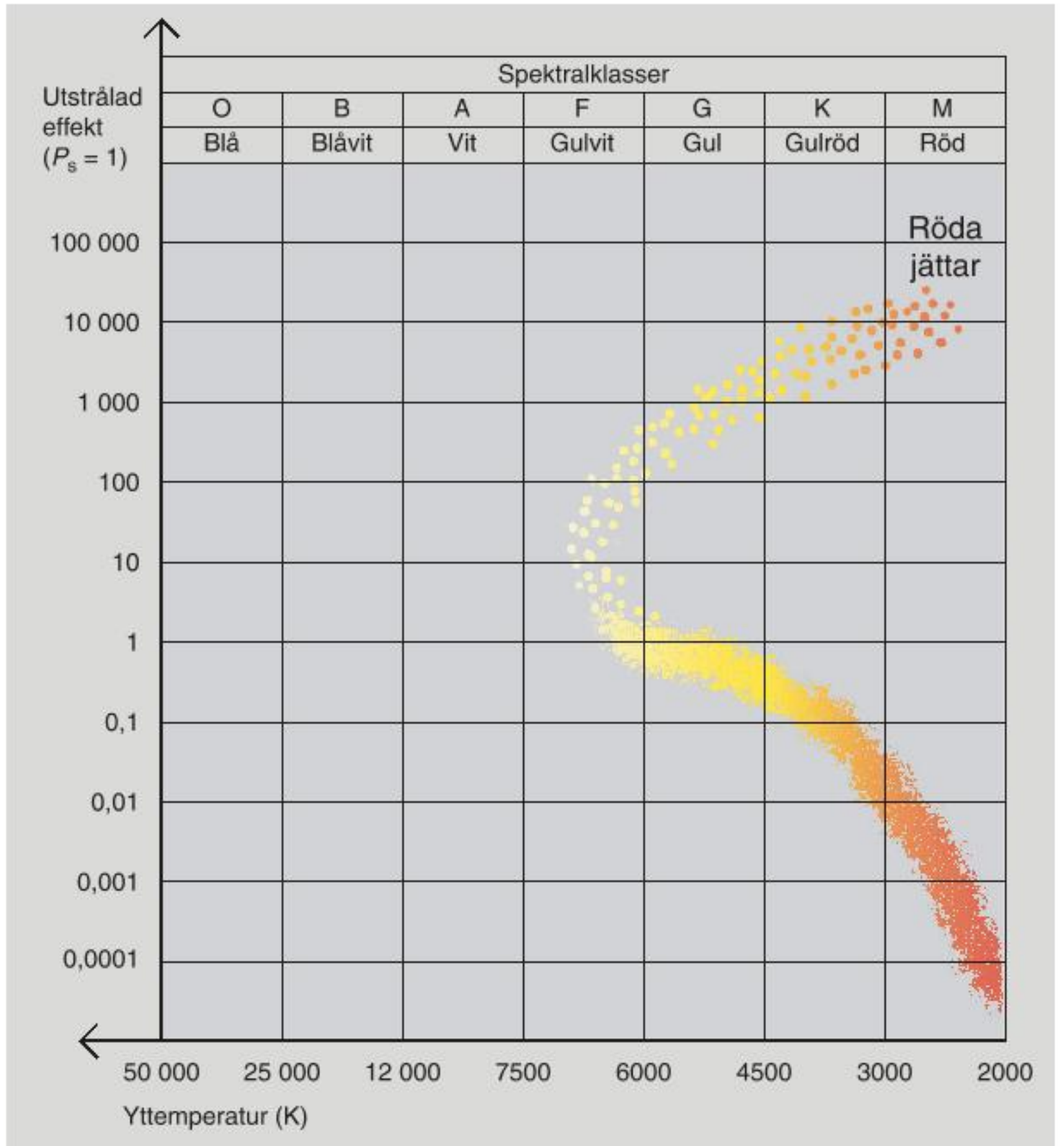
8.24 Spiralgalaxen (NGC 4414) påminner om Vintergatan.





8.25 (Överst) Runt Vintergatans centrum finns stora hopar med tiotusentals stjärnor. Dessa hopar kallas för klotformade stjärnhopar. En av de mest kända är Herkuleshopen, M13 i stjärnbilden Herkules.

8.26a (Ovan) H-R-diagram för en ung stjärnhop. Diagrammet visar att stjärnor med liten massa ännu inte har nått Huvudserien. Varför? Eftersom stjärnorna behöver *längre tid* för att nå Huvudserien ju *mindre* massa de har.



8.26b H-R-diagram för en gammal stjärnhop. Diagrammet visar att stjärnor med stor massa har brutit sig ut från Huvudserien och börjat utveckla sig till röda jättar. Ju äldre en stjärnhop är, desto längre ned på Huvudserien sker utbrytningen. Varför? Eftersom stjärnorna finns *längre* tid i Huvudserien ju *mindre* massa de har. Diagrammet är ett utmärkt test på modellen för stjärnutveckling.

Andra galaxer

I stjärnbilden Andromeda kan man under klara och mörka kvällar med blotta ögat, eller med en kikare, se en liten dimmigt lysande fläck. Innan man visste vad det var kallades den för Andromedanebulosan. Den omnämndes av persiska astronomer för mer än 1 000 år sedan. Efter hand upptäcktes flera sådana nebulosor. Det var först under 1900-talet som astronomerna lyckades visa att Andromedanebulosan består av stjärnor. År 1924 lyckades den amerikanske astronomen *Edwin Hubble* (1889–1953) mäta avståndet till Andromedanebulosan med hjälp av cepheider i nebulosan. Avståndet var allt för stort för att Andromedanebulosan skulle kunna höra till Vintergatan.

Andromedanebulosan är ett stort stjärnsystem, en *galax*, som ligger 2,3 miljoner ljusår från oss. Det gör den till en av Vintergatans närmaste galaxgrannar. Andromedagalaxen har en diameter på 180 000 ljusår och innehåller 300 miljarder stjärnor. Den är alltså större än Vintergatan. Se figur 8.27.



8.27 Andromedagalaxen är en av våra närmaste granngalaxer. Du kan se den med en vanlig kikare som en dimfläck i stjärnbilden Andromeda, som står högt i söder på kvällshimlen om vintern.

Avståndet till de mest avlägsna galaxerna som vi kan fotografera med världens största teleskop, är cirka 12 miljarder ljusår. Antalet galaxer som vi kan observera, är beräknat till 10^{11}. Det finns alltså lika många galaxer i det observerbara universum som det finns stjärnor i Vintergatan.

När vi ser utåt i rymden, ser vi bakåt i tiden. När astronomerna observerar en galax som är 12 miljarder ljusår bort, så ser de galaxen som den såg ut för 12 miljarder år sedan. Då var den en ung galax.

Förminskad modell av det observerbara universum
Om vi förminskar det universum vi kan se med en faktor på 10^{21}, blir Vintergatan som ett grytlock med en diameter på 80 cm. Med denna måttstock blir de mest avlägsna galaxerna som grytlock på avståndet 120 kilometer. Tänk dig universum som en svärm av hundra miljarder grytlock spridda i ett klotformat område med en diameter på ungefär 20 mil.

Galaxhopar

Galaxerna är i stort sett samlade i större eller mindre grupper, *galaxhopar.* Galaxerna i en hop hålls samman av gravitationskrafter. Vintergatan och Andromedagalaxen tillhör *Den lokala gruppen*. Den innehåller cirka 30 galaxer. Nästa galaxhop ligger ca 10 miljoner ljusår bort.

Det finns galaxhopar som innehåller flera tusen galaxer. Galaxhoparna är ofta klotformiga, och galaxerna i en hop är gärna koncentrerade mot centrum av hopen. Det verkar också som om det finns hopar av galaxhopar, så kallade *superhopar.*

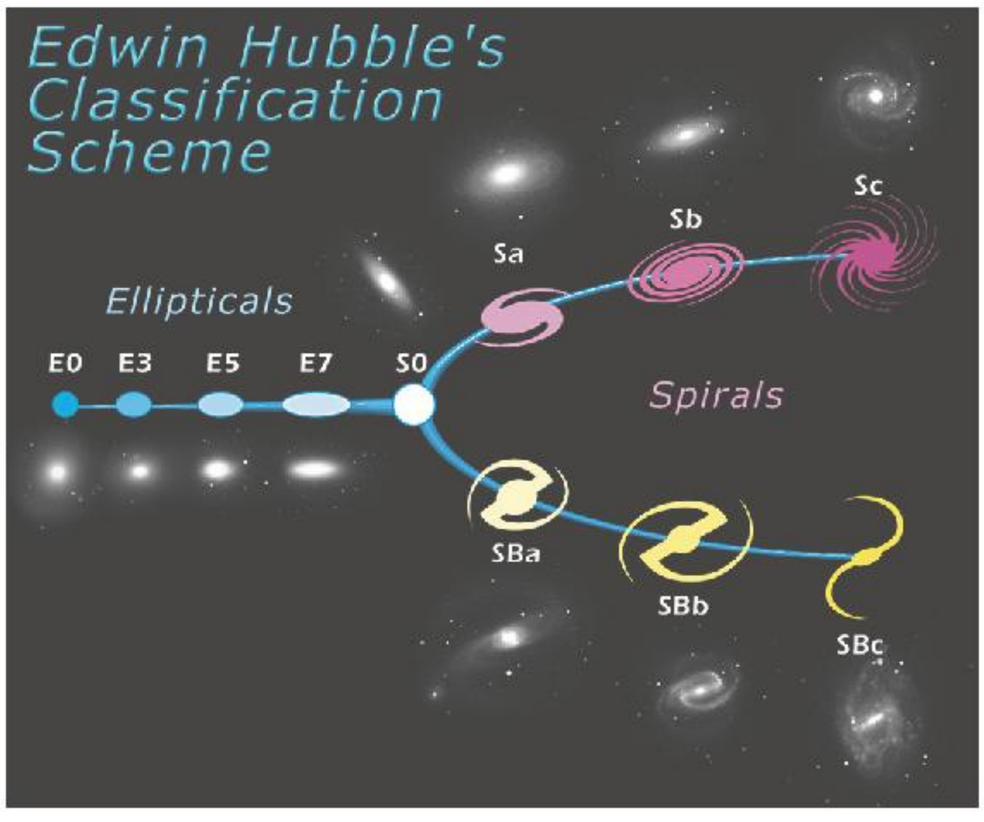
Om vi antar att de *ljusstarkaste* galaxerna har lika stor utstrålad effekt i alla galaxhopar, kan de användas som standardlampor. Vi kan stämma av antagandet med hjälp av närbelägna galaxhopar vars avstånd vi kan bedöma med andra metoder. När vi så mäter ljusintensiteten från de ljusstarkaste galaxerna i en *avlägsen* galaxhop, kan vi beräkna avståndet till den. Det gör det möjligt att mäta avstånd upp till nästan 10 miljarder ljusår.

Under senare år har man upptäckt att både vår lokala galaxhop och grannhoparna rör sig mot något som måste vara en avlägsen masskoncentration. Eftersom galaxhoparna inte slits i stycken, måste det som drar dem till sig, ligga mycket långt bort och ha en *enorm* massa. Vi vet inte säkert vad denna *Great attractor* är, men vi faller mot den med en hastighet på 700 km/s. Senaste nytt tyder på att den galaxhop som man tidigare trodde var källan till det enorma gravitationsfältet har för lite samlad massa. Kanske ligger The Great Attractor utanför det observerbara universum. Alltså så långt borta att dess ljus inte har nått oss ännu efter 13,7 miljarder år.

Glimtar från galaxutveckling

De första galaxerna bildades för omkring 13 miljarder år sedan. De bildades när enorma gasmoln drog sig samman. De flesta behöll en viss nettorotation, även när områden av molnet drog sig samman till enskilda stjärnor. Över tid ledde rotationen till den form dessa galaxer har idag: mycket stjärntäta centra omgivna av stjärnor fördelade i spiralarmar. Dessa så kallade *spiralgalaxer* innehåller relativt mycket gas och stoft, som fortsätter att bidra till att nya stjärnor bildas – om än inte i samma takt som för några miljarder år sedan.

Andra, så kallade *elliptiska galaxer,* tycks ha bildats först efter att delar av gasmolnet kollapsat till unga stjärnor. Först kom alltså stjärnorna, därefter samlade de sig till galaxer. Elliptiska galaxer innehåller väldigt lite gas och stoft som kan bidra till att nya stjärnor föds.



8.28 Hubbles klassifikation av galaxer efter deras form. E står för 'elliptic' och S för 'spiral'. Utöver dessa finns en rad andra former.

I teleskop lyser de med ett svagt rödaktigt sken. Detta är alltså det samlade ljuset från en stjärnpopulation som är ålderstigen. Stjärnorna i de här galaxerna är fördelade innanför en mer ellipsliknande form. Deras banor går i alla möjliga riktningar utan något speciellt mönster.

Ju längre bort galaxerna befinner sig, desto mer strålar det ifrån centralområdet. Våra närmaste grannar är rätt lugna, men eftersom avstånd i rummet också innebär avstånd i tid, anar vi att åldringarna antagligen har haft en vild ungdomstid.

De mest avlägsna, och därför yngsta, galaxerna sänder ut enorma energimängder, i form av strålning från den inre kärnan av centralområdet. En sådan här hyperaktiv kärna i en galax kallar vi en *kvasar*. Kvasarstadiet är det vildaste stadiet i galaxens utveckling. De energirikaste kvasarerna utstrålar lika stor effekt som tusen galaxer. Efter hand minskar aktiviteten i de galaktiska centra. Mycket tyder på att strålningen från galaxernas centra kommer från området runt ett supermassivt svart hål i det inre av kärnan. Det svarta hålet avslöjar sig genom den fart med vilken de omgivande stjärnorna rör sig runt ett område med bara något ljusårs radie. På dopplerförskjutna spektra ser vi att stjärnornas fart kan vara relativistisk. Massan innanför deras bana måste därför vara enorma, 10^6 solmassor eller mer!

Vad har det då blivit av de supermassiva svarta hålen i de äldre galaxerna som Vintergatan? De finns nog kvar där, men de har slukat det mesta i sin omgivning, så de märks inte så mycket.

EXEMPEL 10 **Svart hål i Vintergatan?**

Vintergatans centrum sänder ut intensiv röntgenstrålning. Det tolkas som att det lurar ett svart hål där inne. När materialet från gas och stjärnor faller in mot det svarta hålet bildas det en ackretionsskiva som på grund av frigjord potentiell energi hettas upp till miljontals grader och ger ifrån sig den röntgenstrålning vi kan observera.

Observationerna tyder på att det svarta hålet har en massa på *sex miljoner* solmassor. Den kritiska radien för ett sådant svart hål är

$$r_0 = 2G\frac{m}{c^2} = \frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{6} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{30}}{\left(3{,}00 \cdot 10^{8}\right)^2}\,\text{m} = 1{,}8 \cdot 10^{10}\,\text{m}$$

Vilket är ungefär lika med 1/10 av avståndet från solen till jorden.

Vi har tidigare nämnt att det i Vintergatans ungdom måste ha funnits en stor befolkning av massiva blå jättestjärnor som syntetiserade de tyngre grundämnena, blev gamla och till sist exploderade i enorma supernovor och spred grundämnena ut i rymden. På det viset blev vårt eget 5 miljarder år gamla solsystem med alla sina tyngre ämnen möjligt. Vår sol är en andra generationens stjärna och förutsättningarna och råmaterialet till oss människor skapades för miljarder år sedan i de här kosmiska jätteexplosionerna.

Mörk materia

Spiralgalaxernas stjärnor går i bana runt masscentrum. Med hjälp av dopplereffekten kan man mäta vilken fart de har. Vi kan jämföra de farter vi mäter med de farter de borde ha när man tar hänsyn till den synliga massan innanför banradien. Runt 1970 upptäckte den amerikanska astrofysikern Vera Rubin (1928–) att banfarten som funktion av avståndet till centrum inte avtog som den borde. I själva verket tyder mätningarna på att banfarterna var alldeles för stora i förhållande till den massa som borde finnas innanför banorna. I så fall finns det enormt mycket mer *mörk materia* som vi inte kan se, än det finns lysande eller ljusabsorberande materia som vi kan se. Den mörka materien tycks fördela sig som en sfärisk sky som omger galaxerna.

Vi kan alltså inte se den mörka materien och den skymmer inte heller sikten för oss. Vad kan den då bestå av? Ja, nu mörknar mysteriet. Om det hade varit så att den mörka materien bestod av bruna

dvärgar, planeter, svarta hål eller andra ljussvaga "vanliga" objekt så skulle vi ändå ha kunnat observera dem indirekt. Vi skulle observera hur de fungerade som gravitationslinser när vi studerade fjärran galaxer. Dessutom skulle de ha lämnat synliga spår från sin förhistoria. Men vi ser inga sådana tecken. Forskare undersöker olika möjligheter att förklara den mörka materien. Många tror att den består av "WIMPS" (Weakly Interacting Massive Particles), okända elementarpartiklar som inte är uppbyggda av våra partikelpusselbitar. De har massa eftersom de utövar gravitation, de är kalla eftersom de inte ger ifrån sig ljus, och de interagerar inte eller bara svagt via de övriga växelverkningarna.

Hur säkra är vi då på den mörka materiens existens? Den signalerar inte bara sin närvaro genom den nämnda rotationsfarten utan även genom andra oberoende kanaler.

Galaxhoparnas rörelser visar att de individuella galaxerna måste ha mycket mer mörk materia än synlig. Vi kan även använda mer närbelägna galaxer som "gravitationslinser" för avlägsna bakomliggande galaxer. Det visar sig då att gravitationen böjer ljuset från den avlägsna galaxen på ett sätt som tyder på en mycket större massa än den vi kan se. Dessutom visar modeller för galaxutveckling att de enorma gasmoln som gav upphov till galaxerna aldrig skulle ha lyckats dra sig samman utan gravitationshjälp från den mörka materien.

KONTROLLFRÅGOR

- Vad är en galax?
- Hur skulle du beskriva Vintergatan?
- Vad är en galaxhop? Vad heter hopen som Vintergatan hör till?
- Varför tror man det finns så få närbelägna aktiva galaktiska kärnor?
- Varför räknar man med att det finns ett svart hål i Vintergatans kärna?

8.6 Kosmologi

Kosmologi är den del av astronomin som handlar om universum som helhet. En del av frågorna kosmologerna ställer sig känner du kanske igen från egna nattliga funderingar:

- Hur gammalt är universum?
- Hur blev universum till?
- Vad kommer att hända med universum?
- Är universum allt som finns?
- Om universum är allt som finns, och detta uppstod vid Big Bang? I vad uppstod då Big Bang? I "Ingenting"? Men *vad* är i så fall "Ingenting"?

Fysikerna kan inte ge några säkra svar på sådana frågor. Några av frågorna är kanske fel ställda eller meningslösa. Vad fysikerna gör är att försöka skapa *modeller* för universum. Vi ska titta lite närmare på de här modellerna och vilka observationer de bygger på. Helhetsbilden vi presenterar tycks just nu vara den som stämmer bäst med de observationer vi hittills har gjort och tolkningen av dem. Men just nu förbereds en rad observationer med nya metoder och instrument, både jordbaserade och rymdbaserade. Dessa kommer sannolikt att leda till att de modellerna blir modifierade eller kanske rent av måste förkastas. Det blir spännande att följa med på den här forskningsfronten under åren som kommer.

Hubbles lag

Runt 1920 upptäckte astronomerna att spektrallinjerna i ljuset från galaxerna är förskjutna mot rött eller blått. Detta tolkades som en dopplereffekt, som beror på att galaxerna rör sig från eller mot oss. Efter hand upptäckte astronomerna att de allra flesta spektra från fjärran galaxer är förskjutna mot *rött*. Det skulle betyda att *de allra flesta galaxerna rör sig bort från Vintergatan*. Det är bara några få granngalaxer, t.ex. Andromedagalaxen, som rör sig mot oss.

År 1929 gjorde Edwin Hubble en mycket viktig upptäckt. Han beräknade *avståndet* till 18 galaxer med hjälp av cepheider i galaxerna. Därefter beräknade han *radialhastigheten* för samma galaxer med hjälp av dopplereffekten. Då upptäckte han att galaxernas radialhastighet är större ju större avståndet är. *Hastigheten är proportionell mot avståndet*. Se figur 8.29.

8.29 Hubbles upptäckt: galaxernas radialhastigheter är proportionella mot avståndet.

HUBBLES LAG

Galaxerna avlägsnar sig med en hastighet som är proportionell mot avståndet från oss:

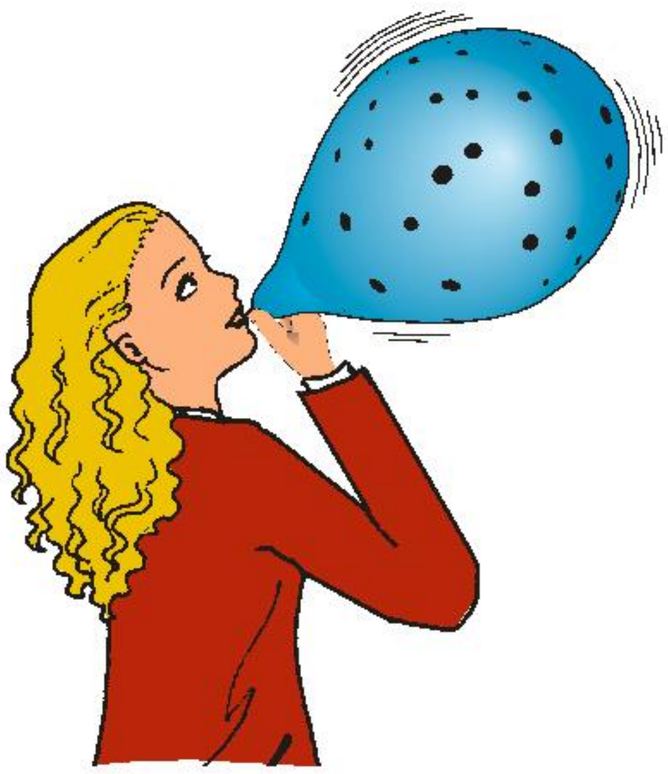
$$v = Hr$$

Här är v radialhastigheten hos en galax, r är avståndet från jorden till galaxen, och H är *Hubbles konstant*. Enligt senare mätningar har den värdet

$$H = 22 \pm 1 \text{ km/s per miljon ljusår}$$

Det betyder att galaxernas hastighet är 22 km/s större för varje miljon ljusår vi förflyttar oss bort från jorden.

Galaxerna avlägsnar sig alltså från Vintergatan. Men det betyder *inte* att Vintergatan är universums centrum. Låt oss illustrera det med en enkel modell: Vi har en ballong med små bläckfläckar på ytan. Se figur 8.30.



8.30 Ballongmodell för ett universum utan centrum.

När vi blåser upp ballongen, kommer alla fläckarna att fjärma sig från varandra. Ingen fläck är i centrum. Därför kan vi formulera Hubbles lag på följande sätt: *Galaxerna fjärmar sig från varandra. Hastigheten är proportionell mot avståndet mellan galaxerna.*

EXEMPEL 11 **Comahopen**

Galaxerna i Comahopen, i stjärnbilden Berenikes hår, avlägsnar sig från solsystemet med hastigheten 6 900 km/s. Beräkna avståndet till hopen.

Lösning: Av Hubbles lag får vi

$$r = \frac{v}{H} = \frac{6900}{\frac{22}{10^6}} \text{ l.y.} = 3{,}1 \cdot 10^8 \text{ l.y.}$$

Avståndet är alltså 310 miljoner ljusår.

Avståndet till avlägsna galaxhopar kan vi alltså beräkna med hjälp av Hubbles lag.

EXEMPEL 12 **Stora rödförskjutningar**

Dopplers formel, som vi behandlade i avsnitt 8.2 Stjärnspektra, säger att sambandet mellan radialhastighet och rödförskjutning är

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Den här formeln gäller bara om $\Delta\lambda/\lambda_0 \ll 1$. Om $\Delta\lambda/\lambda_0 > 1$ har universum utvidgat sig mycket sedan ljuset sändes ut. I så fall har de elektromagnetiska vågorna töjts ut av rymdens expansion sedan de påbörjade sin resa.

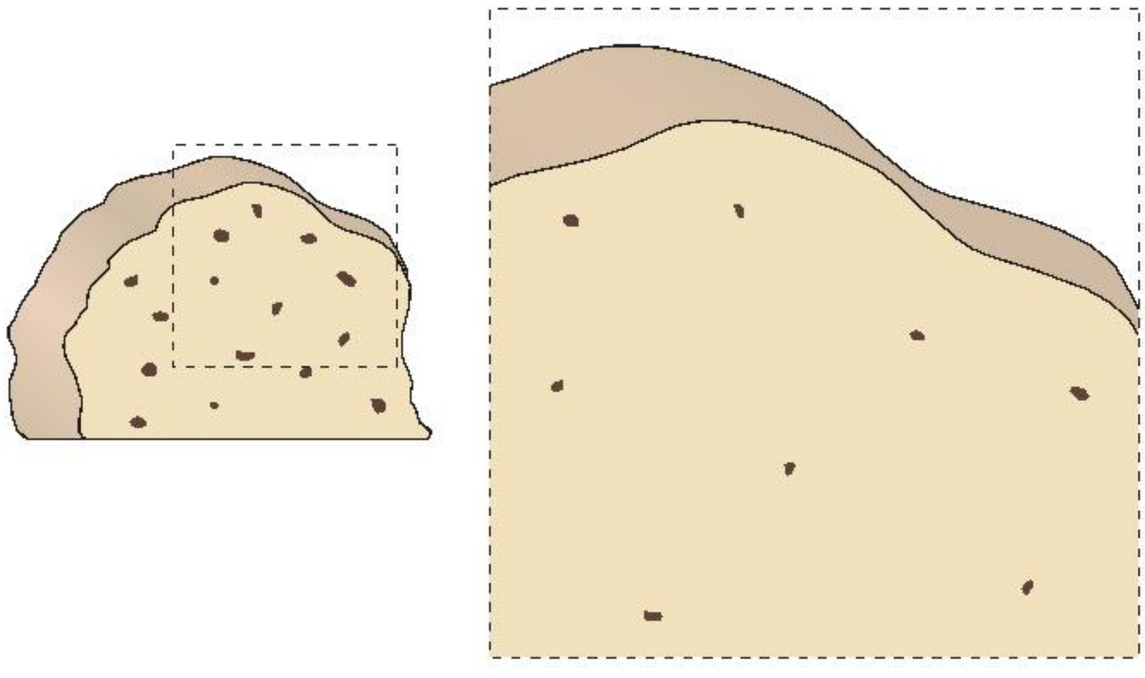
Hubble-teleskopet
Hubble-teleskopet, namngivet efter Edwin Hubble, utplacerades år 1990 och går i en bana 600 km över jordytan. En kort tid efter uppskjutningen visade det sig att teleskopet inte fungerade som det skulle. År 1997 reparerades därför teleskopet i rymden. Hubble-teleskopet tar nu bättre bilder än någon hade kunnat drömma om på förhand. Med Hubble-teleskopet kan vi se föremål som är 25 gånger svagare än dem vi kan se med teleskop på jordytan.

Universum utvidgar sig

Hubble upptäckte att rödförskjutningen av ljuset från en galax är proportionell mot avståndet till galaxen. Han tolkade rödförskjutningen som en dopplereffekt och kom fram till slutsatsen att alla galaxer avlägsnar sig från varandra med en hastighet som är proportionell mot avståndet mellan dem.

I modern kosmologi tolkar vi rödförskjutningen på ett annat sätt. I stället för att tänka oss att galaxhoparna rör sig genom världsrymden, tänker vi oss att *rummet* mellan galaxhoparna *utvidgar sig*. Det blir större och större avstånd mellan galaxhoparna, men varje galaxhop är stort sett *i vila* i förhållande till sin lokala del av rymden. Det betyder att *hela universum utvidgar sig*. Hastigheten v i Hubbles lag måste vi då tolka som avståndsökning per tidsenhet.

Vi kan jämföra universum med en kolossal bulldeg med russin i. Se figur 8.31. Russinen motsvarar galaxhoparna, och degen motsvarar rymden mellan galaxhoparna. När degen jäser, ökar *avståndet* mellan russinen. Men varje russin är *i vila* i förhållande till den närmaste degen.



8.31 Bullmodell för ett universum som utvidgar sig. Ju större avståndet är mellan två russin, desto större blir avståndsökningen. Russinen följer alltså Hubbles lag.

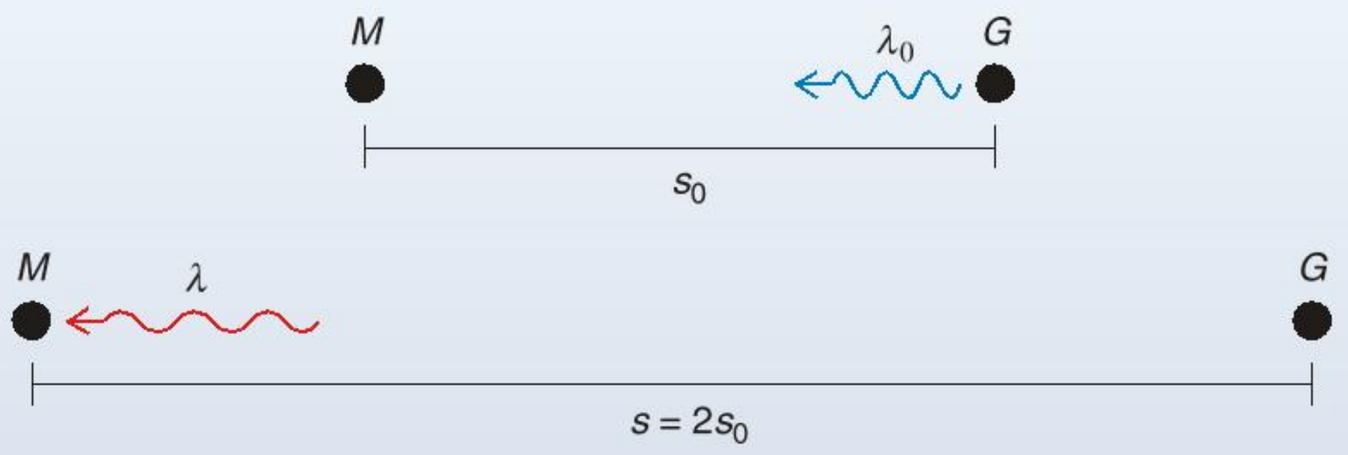
Rödförskjutningen i ljuset från en galax beror på hur mycket universum har utvidgat sig medan ljuset har varit på väg till oss. Om avståndet till en galax i dag är s, och om ljuset utsändes när avståndet var s_0, kan vi teoretiskt visa att rödförskjutningen blir

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{s - s_0}{s_0} = \frac{\Delta s}{s_0}$$

där Δs är avståndsökningen medan ljuset har varit på väg. Det betyder att Δs säger oss hur mycket universum har utvidgat sig under denna tid. $\frac{\Delta s}{s_0}$ är den så kallade skalfaktorn. Formeln säger oss att *våglängden för elektromagnetisk strålning ökar proportionellt mot universums utvidgning*. Vi kan tänka oss att vågorna blir ”utdragna”, så att vågtopparna kommer längre och längre från varandra i takt med att universum utvidgar sig.

EXEMPEL 13 **Två galaxer emellan**

Galaxen G sänder ut *violett* ljus med våglängden $\lambda_0 = 400$ nm. Avståndet till Vintergatan M är då s_0. Se figur 8.32.



8.32 Ljusvågorna tänjs ut i takt med att universum utvidgar sig.

Vintergatan tar emot strålningen när avståndet har ökat till $s = 2s_0$. Ljusets våglängd har då ökat till

$$\lambda = 2\lambda_0 = 800 \text{ nm}$$

Vi observerar *rött* ljus.

Den stora smällen

Universum utvidgar sig. Men hur blev universum till, och hur startade utvidgningen? Den teori som har i särklass mest stöd bland kosmologer går ut på att universum blev till och började utvidga sig vid *den stora smällen,* the Big Bang, för cirka 13,7 miljarder år sedan. Den stora smällen var inte en vanlig explosion där materien slängdes ut i ett rum som redan existerade. De flesta kosmologer tänker sig att *både rum, tid och materia blev till* vid den stora smällen.

Det var den belgiske astronomen och teologen Georges Lemaître som hade lagt märke till att Einsteins generella relativitetsteori inte tillåter ett statiskt universum. År 1927 framlade Lemaître idén om att universum kunde ha blivit till i en "stor smäll".

Vi tänker oss att universum har utvidgat sig under en tid t från den stora smällen och fram till nu. För enkelhets skull tänker vi oss att universum har utvidgat sig med *konstant hastighet* hela tiden. Två galaxer som avlägsnar sig från varandra med hastigheten v, har nu nått avståndet $r = vt$ från varandra. Vi kombinerar detta med Hubbles lag $v = Hr$. Då får vi

$$t = \frac{1}{H}$$

De två galaxerna var fritt valda. Därför blir tiden t en uppskattning av hur länge universum har utvidgat sig.

EXEMPEL 14 **Universums ålder?**

Vi sätter Hubbles konstant lika med

$$H = \frac{22\,\text{km/s}}{10^6\,\text{l.y.}} = \frac{22 \cdot 10^3\,\text{m/s}}{10^6 \cdot 9{,}46 \cdot 10^{15}\,\text{m}} = 2{,}3 \cdot 10^{-18}\,\text{s}^{-1}$$

Då får vi

$$t = \frac{1}{H} = \frac{1}{2{,}3 \cdot 10^{-18}}\,\text{s} = 4{,}3 \cdot 10^{17}\,\text{s} = 1{,}4 \cdot 10^{10}\,\text{år}$$

Det betyder att universum är ungefär 14 miljarder år gammalt.

EXEMPEL 15 **Religion och fysik/vetenskap**

Påven Pius XII (1876–1958) blev glad när han hörde talas om Lemaîtres tankar om ett expanderande universum som implicerade en stor smäll. Det bekräftade ju skapelseberättelsen! Lemaître, som själv var katolsk präst, höll inte med om det. Han ansåg att det var orimligt att det skulle finnas en koppling mellan vetenskapliga teorier och skapelseberättelsen. Om det senare visade sig att teorin om Big Bang var fel skulle det ju visa sig att kyrkan hade fel.

Omvänt, anser många, kan inte en religiös text eller en präst uttala sig om huruvida en vetenskaplig teori är korrekt eller inte. De bör inte heller försöka. Kyrkan har ju försökt att krossa vetenskapliga idéer förr, till exempel den att jorden inte är världens centrum, men på lång sikt resulterade det bara i att kyrkan själv blev utsatt för kritik. Just nu pågår en liknande konflikt om evolutionsläran inom en del religioner.

Vetenskaplig kritik mot vetenskapliga teorier är nödvändig för vetenskapens utveckling. Utomvetenskaplig kritik mot teorierna ser mest ut att slå tillbaka mot kritikerna.

Universums expansion ser ut att accelerera

Så sent som i slutet på 1990-talet ansåg man det som närmast en formsak att bekräfta att gravitationskrafterna har bromsat universums expansionshastighet. Gravitationen verkar ju attraherande och är också den klart dominerande kraften på stora avstånd.

År 1998 publicerades resultatet av en undersökning som hade som mål att undersöka hur mycket expansionen bromsades. Resultatet av undersökningen var en fullständigt oväntad sensation för astronomerna. Universums expansion bromsas inte som väntat, *den accelererar*! Upptäckten bekräftades senare av oberoende observationsmetoder och belönades med 2011 års nobelpris i fysik.

Men om gravitation alltid är attraktiv – vad är det då som får universums expansion att accelerera? Det förekommer flera hypoteser, men som vanligt måste det vara förutsägelser baserade på hypoteserna och deras överensstämmelse med observationer som fäller avgörandet.

När detta skrivs har andra oberoende metoder pekat i samma riktning. I och med dessa sensationella resultat har fysikervärlden fått en vitamininjektion och surrar av aktivitet.

Det största mysteriet med den kosmiska accelerationen är att den tyder på att 70 % av det som universum består av är gravitationellt frånstötande! I generell relativitetsteori bidrar tryck till energi. Ett positivt tryck bidrar därför till gravitationen. Om universum är fyllt av ett medium som tillåter negativt tryck, skulle detta bidra till ett slags antigravitation som kunde förklara den accelererande expansionen.

Hypoteser om vad den mörka energin består av talar om "vakuumenergi" och andra fenomen som ligger långt bortom vår "gymnasiefysikhorisont".

Universum tycks bestå av:
- 70 % mörk energi (detta är inte materia)
- 26 % mörk materia (som vi inte vet vad det är)
- 3,5 % osynlig vanlig materia
- 0,5 % synlig vanlig materia

Det är alltså dessa ynka 0,5 % som astronomerna kan studera.

Som alltid måste vi komma ihåg att "observationerna" av universums accelererande expansion bygger på tolkningar och antaganden. Det kan hända att några av de observationer vi har berättat om är feltolkade. För att kunna lita på supernovor som standardljus måste vi till exempel anta att dagens supernovor utstrålar samma effekt som motsvarande supernovor för miljarder år sedan.

Vad allt det här betyder för universums framtid råder det delade meningar om. En sak är emellertid klar. Det finns mycket att göra för framtidens astrofysiker!

Big Bang Modellen

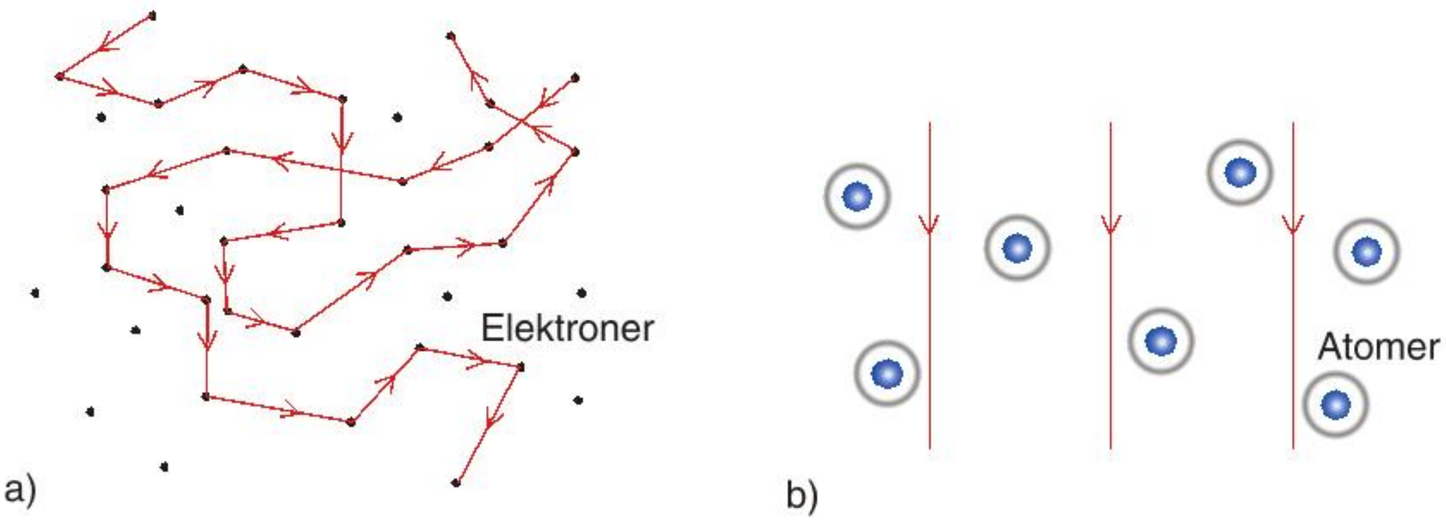
Teorin om Big Bang kombinerar vetenskapen om det största med vetenskapen om det minsta: kosmologi och partikelfysik. Teorin är omfattande och djärv, men den har bekräftats så grundligt att vi kallar den *standardmodellen* för universum.

Enligt standardmodellen var både tätheten och temperaturen ofantligt hög strax efter den stora smällen. Universum var en "soppa" av strålning och elementarpartiklar.

En sekund efter den stora smällen hade temperaturen sjunkit till 10^{10} K. Universum innehöll i stort sett fotoner och neutriner, men också protoner, neutroner och elektroner. Nu var temperaturen tillräckligt låg för att protoner och neutroner skulle kunna slå sig samman till deuterium*kärnor* $\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right)$.

Tre minuter efter den stora smällen hade temperaturen sjunkit till 10^9 K. Då kunde deuteriumkärnorna fusionera till heliumkärnor.

En halv timme efter den stora smällen hade temperaturen sjunkit till 10^8 K. Då var nästan alla neutronerna i universum bundna i heliumkärnor, och det fanns stora mängder protoner över. Fusionerna avstannade nu, eftersom temperaturen var för låg för att heliumkärnor skulle kunna fusionera till tyngre kärnor. Från och med *då bestod fördelningen av "icke-mörk" materia i universum av ungefär 75 % väte och 25 % helium*. Universum bestod av fria elektroner, protoner och heliumkärnor, och enorma mängder fotoner och neutriner. De fria elektronerna hindrade fotonerna att röra sig fritt och rätlinjigt genom rymden. Universum var *ogenomskinligt*, ungefär som dimma. Se figur 8.33a.



8.33 Dimman lättar i universum.
a Fria elektroner fungerar som dimma för fotonerna. Fotonerna kolliderar ständigt med fria elektroner och återutsänds i nya riktningar (comptoneffekten).
b Elektronerna är bundna i atomerna. Elektrondimman lättar, och fotonerna kan breda ut sig obehindrat.

Tre hundra tusen år efter den stora smällen hände något viktigt. Då hade temperaturen sjunkit till cirka 3000 K. Temperaturen var tillräckligt låg för att elektronerna skulle kunna binda sig till vätekärnor och heliumkärnor och bilda *neutrala* väte*atomer* och helium*atomer*. Fria elektroner hindrade inte längre fotonernas rörelse, och strålningen kunde obehindrat breda ut sig genom rymden. Universum blev *genomskinligt*, ungefär som när dimman lättar. Se figur 8.33b.

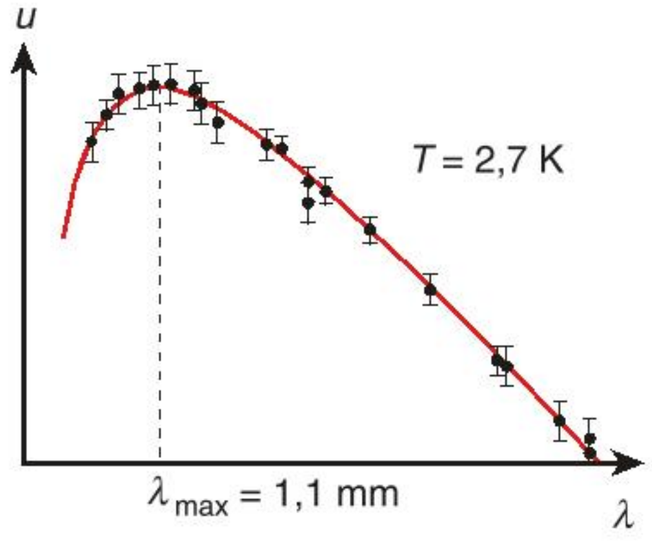
En miljard år efter den stora smällen började de enorma mängderna av väte och helium att klumpa ihop sig i stora gasmoln, som utvecklade sig till galaxhopar, galaxer och stjärnor.

Många miljarder år efter den stora smällen sitter några nyfikna människor här på jorden och undrar över hur universum blev till.

Kosmisk bakgrundsstrålning

År 1948 hävdade George Gamow (1904–69) att *om* universum blev till i en big bang, så måste hela universum vara fyllt av en svartkroppstrålning. Detta är resterna av den strålning som måste ha fyllt universum just då det blev genomskinligt. Sedan dess har strålningens våglängd ökat i takt med universums utvidgning. Det innebär att bakgrundsstrålningen förändras till en svartkroppstrålning motsvarande en mycket lägre temperatur.

Gamows förutsägelse glömdes bort till år 1965 då två amerikanska forskare upptäckte en svag mikrovågsstrålning som kom från världsrymden. Den kom in jämnt fördelad från alla riktningar och kunde inte spåras tillbaka till bestämda källor. Det visade sig att strålningen har energimaximum vid våglängden λ_{max} = 1,1 mm. Det motsvarar en strålningstemperatur på 2,73 K. Figur 8.34 visar planckkurvan för termisk strålning vid 2,73 K. De senaste 15 åren har det gjorts mätningar som visar att bakgrundsstrålningens spektrum passar perfekt med planckkurvan för 2,73 K.



8.34 Planckkurva för termisk strålning vid 2,7 K. De utmärkta punkterna svarar mot verkliga observationer.

I dag är de flesta astronomer och fysiker övertygade om att den kosmiska bakgrundsstrålningen är identisk med den strålning som fyllde världsrymden tre hundra tusen år efter den stora smällen. Ingen annan teori än standardmodellen har hittills lyckats förutsäga bakgrundsstrålningen. Därför är den kosmiska bakgrundsstrålningen ett av de viktigaste argumenten för standardmodellen.

EXEMPEL 16 **Den gången och nu**

Tre hundra tusen år efter den stora smällen var $\lambda_{max} = 970$ nm för den kosmiska bakgrundsstrålningen. I dag är $\lambda_{max} = 1{,}1$ mm. Våglängden har ökat i takt med universums utvidgning från år 300 000 efter den stora smällen till i dag. Det betyder att universum har förstorats med en faktor

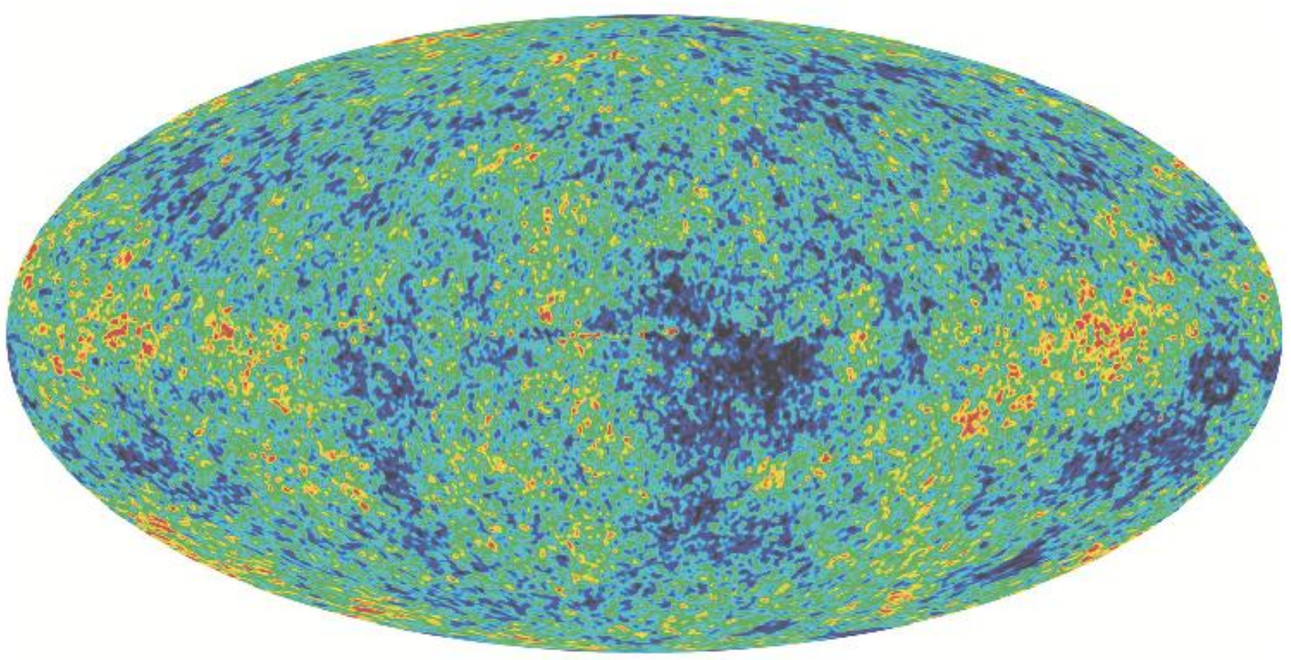
$$\frac{\Delta s}{s_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-3}}{970 \cdot 10^{-9}} = 1{,}1 \cdot 10^3$$

Vi har tidigare nämnt att avståndet från Vintergatan till Comahopen är $s = 3{,}5 \cdot 10^8$ l.y. Då bakgrundsstrålningen sändes ut, var avståndet

$$s_0 = \frac{s}{1{,}1 \cdot 10^3} = \frac{3{,}5 \cdot 10^8}{1{,}1 \cdot 10^3} \text{ l.y.} = 3{,}2 \cdot 10^5 \text{ l.y.}$$

Det vill säga bara 320 000 ljusår.

Vid den tiden existerade varken Vintergatan eller Comahopen. Men avståndet mellan det område där Vintergatan utvecklades och det område där galaxerna i Comahopen utvecklades, var cirka 320 000 ljusår.



8.35 En "baby-bild"av universum. Den kosmiska bakgrundsstrålningen avslöjar hur universum såg ut 300 000 år efter tidens början. De olika färgerna representerar små variationer i strålningens temperatur. Rött är "varmare" områden, och blått indikerar kallare. Dessa variationer blev upphovet till alla galaxer.

COBE-satelliten (Cosmic Background Explorer) sköts upp år 1989. Sedan dess har man sänt upp ännu en satellit, WMAP, med uppgift att undersöka den kosmiska bakgrundsstrålningen. Se figur 8.35. Det är en bild av universum 300 000 år efter Big Bang. Bilden har korrigerats för Vintergatans fart i förhållande till bakgrundsstrålningen. Detta är för kosmologerna detsamma som benrester för paleontologer. Temperaturvariationerna är inte större än en tusendels kelvin. Det är dessa små skillnader som med hjälp av mörk materia "kondenserade" till galaxer efter några hundra miljoner år.

Inflation

Man kan undra var den stora smällen kom ifrån, var materien kom ifrån och hur områden i universum som inte har någon orsaksmässig möjlighet till kommunikation (ljuset har ännu inte haft tid att ta sig mellan områdena) ändå har blivit så lika.

WMAP ger ett enastående stöd för något som kallas inflationsscenariot som upptäcktes av Alan Guth år 1979. Inflationsmodellen förklarar bland annat hur bakgrundsstrålningen kan vara så likartad i alla riktningar. Här kan vi bara kort sammanfatta denna modell.

En gräns för hur långt tillbaka vi kan "se" med våra teorier är 10^{-43} s efter Big Bang, detta kallas Plancktiden. Då hade universum en temperatur på 10^{32} K.

Någon gång strax efter Plancktiden inleddes en "inflationsfas" (*eng. inflate* = blåsa upp) som pågick i 10^{-35} s. Under den fasen fördubblades universums storlek ungefär 2^{100} gånger. En sådan oerhörd förstoring applicerad på en vattenmolekyl skulle blåsa upp den till galaxstorlek! Lägg emellertid märke till att det var rummet som expanderade och inte partiklarna i rummet. Detta innebär att "platser" som var nära varandra på ett ögonblick flyttades långt bort ifrån varandra. Detta strider inte mot relativitetsteorin eftersom det inte är partiklar som rör sig genom rummet från varandra, utan det är snarare rummet som de är inbäddade i som expanderar. Det som drev den enorma förstoringen var ett "negativt tryck" av samma slag, men oerhört mycket större, än det som just nu ser ut att driva universums accelererande expansion.

Inflationsmodellen förutsäger också att universum ska vara "plant". Exakt vad detta innebär lämnar vi till högre årskurser. Men om universum är plant innebär det att det var oändligt stort redan från början och att Big Bang skedde i alla punkter samtidigt! När du hör fysiker säga att universum en gång, alldeles efter Big Bang, var stort som en grapefrukt ska det tolkas som att *den del* av universum vi kan se idag, det observerbara universum, då var stort som en grapefrukt.

Vårt plana universum måste enligt inflationsmodellen ha en viss täthet av energi. Fynden av mörk materia och mörk energi tyder på att universum har precis den energitäthet som inflationsmodellen förutsäger. WMAP-mätningarna i sin tur tyder på att vårt universum verkligen är plant.

En sak är att en modell kan förklara vissa observationer som *har* gjorts, men när den dessutom korrekt förutsäger resultatet av *senare* undersökningar, som inflationsmodellen gör, ja då får den en solid bekräftelse.

Starka sidor

Standardmodellen för universum (Big Bang) och inflationsteorin stödjer sig alltså på fem grundläggande observationer, som modellen kan förklara:

- Universums utvidgning.
- Fördelningen av väte och helium i universum.
- Tätheten av materia i universum.
- Den kosmiska bakgrundsstrålningen. Dess existens och dess variation.
- Termofysikens andra lag, som kräver att universum hela tiden går mot ökad oordning kräver att början var mycket välordnad.

Just nu finns det ingen konkurrerande teori med så mycket stöd i observationer. Att standardmodellen i kombination med inflationsteorin stämmer med observationerna är inte tillräckligt för att säkerställa att modellen är sann. Vi måste komma ihåg att våra observationer bygger på *tolkningar*. Vi tolkar t.ex. den kosmiska rödförskjutningen som en expansionseffekt, men det finns andra tolkningar.

Hur går det då med vårt hem, universum? Vi lever i en spännande tid då kosmologi och astrofysik är områden i snabb utveckling. Just nu tyder allting på att det blir allt tommare i framtiden. Galaxerna avlägsnar sig från varandra. Födelsefrekvensen av stjärnor sjunker, samtidigt som de gamla dör. Det verkar som om universum närmar sig ett evigt mörker där ingenting längre kan ske. Det är väl ytterligare en orsak för oss att betrakta nattens stjärnbeströdda himmel med undran och tacksamhet?

KONTROLLFRÅGOR

- Vad säger Hubbles lag?
- Vilken är den kosmologiska tolkningen av rödförskjutningen i ljuset från galaxhoparna?
- Vad är den stora smällen? När skedde den?
- Vad menas med standardmodellen för universum?
- Vilken förklaring har standardmodellen på den kosmiska bakgrundsstrålningen?
- Vilka tre observationer är de viktigaste stöden för standardmodellen?

SAMMANFATTNING

Astrofysik

Avståndet till stjärnorna

Parallaxmetoden för nära stjärnor:

$$r = a/p$$

Ljusstyrkemetoden för avlägsna stjärnor:

$$r = \sqrt{P/4\pi P^*}$$

Stjärnspektra

Dopplereffekt: Ljuset från en stjärna som rör sig i synlinjens riktning, förskjuts mot rött eller blått. Radialhastigheten v ges av formeln

$$v/c = \Delta\lambda/\lambda_0$$

Spektralklassen för en stjärna bestäms av yttemperaturen.

Hertzsprung-Russel-diagrammet visar hur den utstrålade effekten från stjärnorna varierar med spektralklassen. De flesta stjärnorna ligger i *huvudserien*.

Stjärnutveckling

- En stjärna *blir till* i gasmoln som drar sig samman på grund av gravitation.
- *Stabila stjärnor* är huvudseriestjärnor. Stjärnor med stor massa har kortaste livslängden. Stjärnorna får energi från vätefusion i centralområdet.
- När vätet i stjärnans centralområde har förbrukats, blir stjärnan en *röd jätte*.
- Stjärnor med liten eller medelstor massa blir *vita dvärgstjärnor*. Stjärnor med stor massa exploderar som supernovor och slutar som *neutronstjärnor* eller svarta *hål*.
- *Grundämnena* från helium till järn byggs upp vid fusionsprocesser i stjärnorna. Tyngre grundämnen bildas i supernovor.

Exoplaneter

En *exoplanet* är en planet som är bunden till en annan stjärna än solen. Den kan observeras genom den påverkan den har på ljuset från sin hemstjärna eller från bakomliggande stjärnor.

I huvudsak finns det fem indirekta observationsmetoder:

- Pulsarmetoden
- Förmörkelse- eller transitmetoden
- Förmörkelsevariationer
- Dopplerspektroskopi
- Gravitationell linsbrytning.

En förutsättning för *liv* på en planet, tror man, är att planeten befinner sig i den beboeliga zonen där vatten kan existera i fast och flytande form samt i gasform.

För *intelligent liv* tror man att evolution över minst en miljard år är nödvändig. Då är det ett nödvändigt men knappast tillräckligt villkor att moderstjärnan dessutom är en stabil huvudseriestjärna till höger om mitten i HR-diagrammet.

Galaxer

Galaxer är stora stjärnsystem som kan innehålla mer än hundra miljarder stjärnor. Galaxerna hålls samman av gravitationskrafter.

Galaxhop är en samling av många galaxer.

Kvasarer är troligen hyperaktiva kärnor i unga galaxer.

Kosmologi

Hubbles lag: Galaxerna avlägsnar sig från varandra med hastigheter som är proportionella mot avstånden mellan dem:

$$v = Hr$$

där H är Hubbles konstant.

Universums utvidgning: Det blir större och större avstånd mellan galaxhoparna, men varje galaxhop är stort sett i vila i förhållande till sin lokala del av rymden.

Standardmodellen: Universum blev till i den stora smällen för cirka 14 miljarder år sedan. Därefter har universum utvidgat sig och avkylts. Universum innehåller 75 % väte och 25 % helium. Universum är fyllt av kosmisk bakgrundsstrålning.

RÄKNA FYSIK

Avstånd till stjärnorna

8.01 År 1838 mättes avståndet till en stjärna för första gången. Då mätte den tyske astronomen F. W. Bessel parallaxen till stjärnan 61 Cygni, stjärna nr 61 i stjärnbilden Cygnus (Svanen). Med moderna mätinstrument finner vi att parallaxen är $1,42 \cdot 10^{-6}$ rad. Beräkna avståndet till 61 Cygni i ljusår.

8.02 Stjärnan Betelgeuse har en parallax på $2,44 \cdot 10^{-8}$ rad. Beräkna avståndet till Betelgeuse i ljusår.

8.03 För en cepheid har den genomsnittliga utstrålade effekten bestämts till $5,6 \cdot 10^{29}$ W utifrån perioden hos variationerna. Ljusintensiteten mätt från jorden är i genomsnitt $2,0 \cdot 10^{-12}$ W/m^2. Beräkna avståndet till stjärnan. Ge svaret i ljusår.

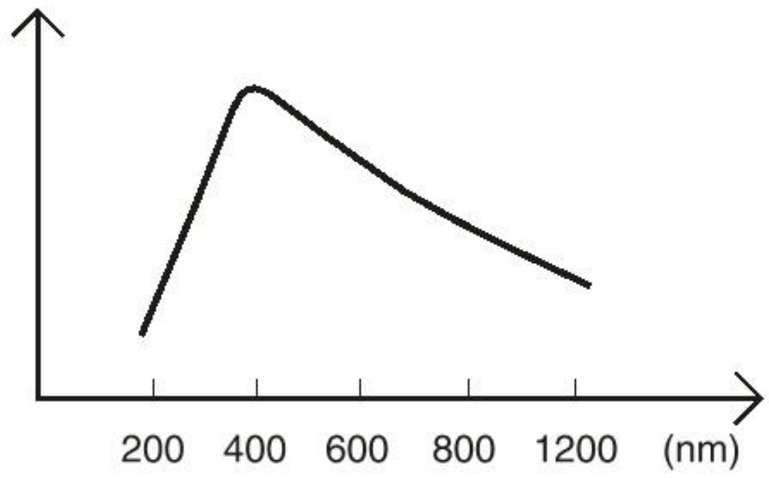
8.04 För den ljusstarkaste stjärnan i Andromedagalaxen mäter vi ljusintensiteten till $2,0 \cdot 10^{-14}$ W/m^2. Utstrålad effekt är $3 \cdot 10^5$ gånger så stor som från solen. Beräkna avståndet till Andromedagalaxen i ljusår.

Stjärnspektra

8.05 För en spektrallinje med våglängden 656,3 nm är våglängdsförskjutningen –0,011 nm i spektret för Arcturus och +0,046 nm i spektret för Betelgeuse. Beräkna radialhastigheten för var och en av stjärnorna och avgör om den rör sig mot oss eller från oss.

8.06 Solens rotationstid kan bestämmas med hjälp av dopplereffekten. Genom att titta på spektra hos ljuset från de två ytterkanterna av solekvatorn finner vi att spektrallinjen som i laboratoriet mäts till 656,0 nm, är något förskjuten. Linjen från den ena ytterkanten är förskjuten 0,0090 nm i förhållande till linjen från den andra ytterkanten. Använd detta till beräkna banhastigheten för en punkt på solekvatorn. Beräkna solens rotationstid vid ekvatorn.

8.07 Kurvan visar hur utstrålad effekt fördelar sig på olika våglängder λ i spektret från en viss stjärna. Använd kurvan till att bestämma stjärnans yttemperatur.



Vilken spektralklass tillhör stjärnan? Om stjärnan är en huvudseriestjärna, vad kan du då säga om den totala utstrålade effekten från stjärnan i förhållande till solen?

Stjärnutveckling

8.08 En stjärna lever av proton-proton-fusioner. För varje ^4_2He -kärna som bildas, frigörs en energi på $4,3 \cdot 10^{-12}$ J. Hur stor blir den utstrålade effekten från stjärnan när väteförbrukningen är 10 miljoner ton per sekund? Vilken spektralklass tillhör stjärnan?

8.09 Ge en översikt över solens utveckling från "födelse till död". Nämn någon typisk egenskap hos de faser solen då genomgår.

8.10 **a** Beräkna den kritiska radien för solen och för en stjärna på 10 solmassor. Kan solen bli ett svart hål?

b Astronomerna menar att det i Vintergatans centrum finns ett supertungt svart hål på 6 miljoner solmassor. Hur stor är den kritiska radien? Jämför svaret med solradien.

Galaxer

8.11 Solen rör sig runt Vintergatans centrum i en cirkel med radien 30 000 l.y. Omloppstiden är 250 miljoner år.

a Visa att solen har hastigheten $2{,}3 \cdot 10^5$ m/s och centripetalaccelerationen $1{,}8 \cdot 10^{-10}$ m/s^2.

b För att bestämma massan M av den del av Vintergatan som ligger innanför solbanan, kan vi räkna som om hela denna massa är samlad i centrum. Använd detta till att beräkna ett värde för M. Hur många solmassor motsvarar M?

Kosmologi

I uppgifterna sätter vi Hubbles konstant lika med $H = (22 \pm 1)$ km/s per miljon ljusår såvida inte uppgiftstexten säger något annat.

8.12 En galax avlägsnar sig från oss med en hastighet på 8,0 % av ljushastigheten. Beräkna avståndet till galaxen om den följer Hubbles lag. Är ljuset från galaxen rödförskjutet eller blåförskjutet?

8.13 Galaxen M 87 i stjärnbilden Virgo (Jungfrun) ligger på avståndet $50 \cdot 10^6$ ljusår från oss. Beräkna galaxens radialhastighet om den följer Hubbles lag. Hur stor är våglängdsförskjutningen $\Delta\lambda$ i galaxspektret för vätelinjen H_α med $\lambda_0 = 656{,}3$ nm?

8.14 I spektret till en kvasar observerar vi rödförskjutningen $\Delta\lambda/\lambda_0 = 4{,}43$. Vid vilken våglängd i kvasarspektret hittar vi vätelinjen H_γ med $\lambda_0 = 434{,}0$ nm? Hur många gånger större har universum blivit under den tid som ljuset från kvasaren har varit på väg till oss?

DISKUTERA FYSIK

1 Förklara varför vi kan säga: "Vi ser bakåt i tiden när vi ser utåt i rummet".

2 En bilförare blir stoppad av polisen för att ha kört mot rött ljus. Han skyller ifrån sig på följande sätt: "På grund av farten så lyste det grönt för mig!" Vad säger du om hans påstående.

3 Vintergatan ansågs förr som "mjölkig" men anses inte längre vara det. Varför?

4 Varför har några galaxer armar.

5 Alla galaxer tycks vara på väg ifrån oss. Är vi därför i mitten på universum?

UPPSKATTA FYSIK

1 Enligt en hypotes så dödade en asteroid dinosaurierna. 20 % av asteroidens massa la sig som ett lager på jorden med en "densitet" på 0,02 g/cm^2. Hur stor var asteroidens massa?

2 Det finns omkring 1200 stjärnor inom 50 ljusår från oss. Hur många stjärnor finns det inom 1000 ljusår från oss?

3 Det har rapporterats att det förmodligen finns omkring 10 miljarder ton vatten på månen. Hur många gånger mer vatten finns det på jorden?

4 Hur mycket energi skulle frigöras om en meteorit på 100 m i diameter skulle träffa jordens yta? En meteorit skulle ha en hastighet ungefär samma som flykthastigheten från solen på jordens avstånd.

TESTA DIG I FYSIK

1 Stjärnan Betelgeuse strålar med en effekt på $4{,}8 \cdot 10^{30}$ W. Alldeles utanför jordatmosfären är ljusintesiteten 10 nW/m^2. Beräkna avståndet till Betelgeuse i ljusår.

2 En av spektrallinjerna från järn har våglängden 630,250 nm. Vilken våglängd observerar vi för denna spektrallinje i spektret från Capella, som har en radialfart på 30 km/s bort från oss.

3 Man räknar med att Solen har en ålder på ungefär 5 miljarder år. Om du utgår från att solen hela tiden har strålat med samma effekt, $3{,}9 \cdot 10^{26}$ W, hur stor massa har då solen förlorat på grund av utstrålningen? Hur många procent av solmassan är det?

4 Beräkna avståndet till en galax som avlägsnar sig från oss med farten 1 500 km/s.

HEMLABORATIONER

Månens diameter

Välj en kväll när det är molnfritt och du kan se månen. Ta fram en penna. Håll pennan i din utsträckta hand så att den är vinkelrät mot synlinjen. Flytta pennan så att den del som sticker ut på ena sidan handen precis motsvarar månens diameter. Hur många cm behövs för detta?
Mät avståndet mellan pennan och dina ögon.
Utnyttja att du vet avståndet till månen och beräkna månens diameter.

Solens effekt

Vänd din ena kind mot solen och låt en kompis hålla en 100 W-lampa någon meter ifrån kinden utan att skymma solen. Låt sedan kompisen sakta föra lampan mot din kind tills du säger stopp. Det gör du när strålningen från lampan börjar märkas. Då är solens och lampans intensitet på din kind ungefär lika.
Mät avståndet mellan lampan och kinden och utnyttja detta för att beräkna solens effekt. Upprepa försöket ett par gånger. Byt gärna "försöksperson".

Svar kontrollfrågor

Kapitel 1

s. 21

15 0,05 s
16 4 Hz
17 3 m/s
18 2 m

s. 33

11 6 cm
12 3 cm eller 27 cm
13 7,0 cm
14 5,8 cm

s. 45

11 500 Hz, 1 000 Hz
12 660 Hz, 990 Hz
13 10 dB
14 32 W/m^2

Kapitel 2

s. 68

20 1,25
21 1,7
22 $\alpha = 38°$, $\beta = 61°$
23 1,56

s. 81

17 3,3 µm
18 640 nm
19 26,6°
20 $n = 3$

Kapitel 3

s. 101

8 1,634 aJ
9 122 nm
10 W_4

s. 108

10 0,4908 aJ

s. 117

9 $1{,}10 \cdot 10^{15}$ Hz
10 1,2 eV

s. 119

5 $1{,}78 \cdot 10^{-26}$ kgm/s
6 364 nm

s. 128

7 $1{,}3 \cdot 10^{-13}$ m
8 $4{,}0 \cdot 10^{6}$ m/s
9 10^{-10} m

Kap 4

s. 141

5 40 Nm
6 9,0 N, 6,0 N, 4,5 N

s. 147

6 a) 38 m
b) 31 m
7 a) 12 m/s resp. 7,0 m/s
b) 12 m/s resp. –2,8 m/s
c) Efter 0,71 s
d) 2,5 m
e) 1,4 s
f) 17 m bort

s. 159

3 2,8 m/s^2
4 140 N
5 54 km/h (15 m/s)

Kap 5

s. 182

8 9,1 N/kg
9 14,1 N

s. 186

7 2 000 N/C
8 $8{,}0 \cdot 10^{-15}$ N
9 3,0 kV/m
10 $3{,}2 \cdot 10^{-15}$ N

s. 188

4 0,21 J
5 71 kV/m mot fältlinjerna

s. 198

5 a) 2,4 mN
b) 4,6 A

s. 201

8 6,7 µT
9 25 cm

Kap 6

s. 221

4 17 µJ
5 4,0 µC
6 $1{,}5 \cdot 10^{7}$ m/s

s. 229

11 $6{,}2 \cdot 10^{-16}$ N
12 $3{,}1 \cdot 10^{5}$ m/s
13 $8{,}4 \cdot 10^{6}$m/s

Kap 7

s. 250

4 0,11 mV
5 1,7 m/s

s. 256

5 0,42 mWb
6 25 mV
7 80 mV
8 21 V

s. 265

8 63 rad/s
9 250 varv/s
10 20 V
11 7,1 A
12 3 V resp. 7 500 V

s. 272

9 320 W/m^2
10 5 000 K
11 4,0 µm
12 315 W/m^2

Kap 8

s. 290

7 $4{,}3 \cdot 10^{18}$ m
8 $6{,}15 \cdot 10^{-8}$ rad

Kapitel 1

1.01 **a** $T = 2{,}0$ s, $f = 0{,}50$ Hz.
b 0,020 s.

1.02 2,0 cm, 4,0 s, 0,25 Hz.

1.03 **a** 340 N/m
b 11 J

1.04 **a** 250 N/m
b 0,25 J

1.05 **a** 130 kN/m
b 31 kN

1.06 2,5 Hz.

1.07 $A = 1{,}0$ m, $\lambda = 6{,}6$ m, $f = v/\lambda = 0{,}47$ Hz, $T = 1/f = 2{,}1$ s.

1.08 **a** 1,9 m
b $T = 4{,}5$ s och $l = 12$ m ger $v = \lambda/T = 2{,}7$ m/s.

1.09 **a** A: ned, B: upp, C: ned, D: ned.
c 0,63 s för alla punkterna.

1.10 **a** 50 s
b 0,15 m.

1.11 2,0 cm, 0,20 m/s, 10 Hz.

1.12 **a** 4 cm, 0,8 s, 1,25 Hz
b 0 m/s, $-2{,}5$ m/s^2, övre vändläget
c 0,2 s , 1,8 s
d Övre eller nedre vändläge
e Jämviktsläget
f 0 m/s, nedre vändläget
g Nedanför resp. ovanför jämviktsläget
h 1,1 N
i 28 N/m

1.13 **a** Båda 55°.
b Oförändrad frekvens f (bestämd av vågkällan) och oförändrad fart v (bestämd av mediet) ger oförändrad våglängd $\lambda = v/f$.

1.14 32 m

1.15 **a** λ och v störst i I, f lika stor i I och II.
b I

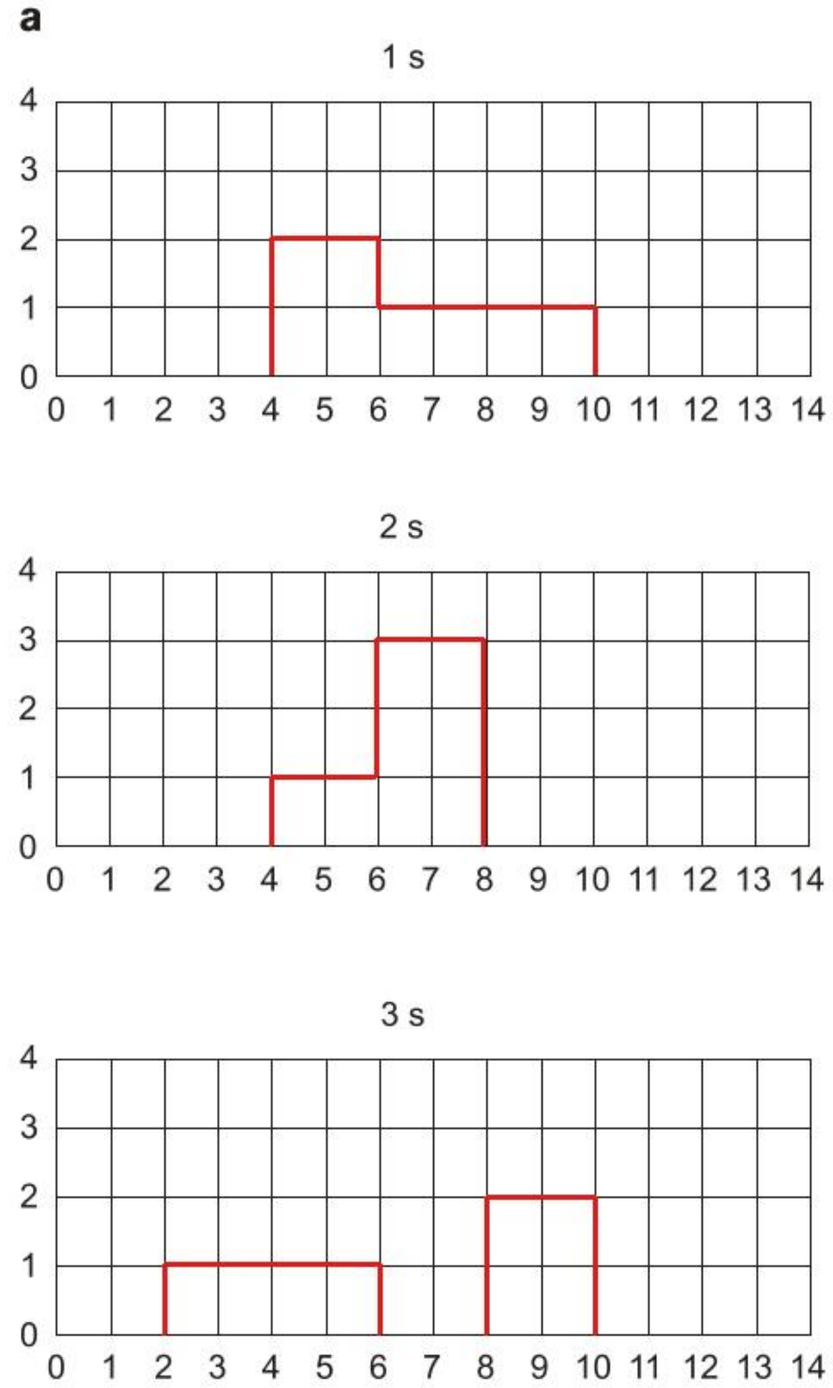
1.16 **a** $f = v_1/\lambda_1 = 2{,}0/0{,}04$ Hz = 50 Hz
b $v_2 = f\lambda_2 = 50 \cdot 0{,}03$ m/s = 1,5 m/s

1.17 **a** 1) Mer markerad. 2) Mindre markerad.
b 1) Mindre markerad. 2) Mer markerad.

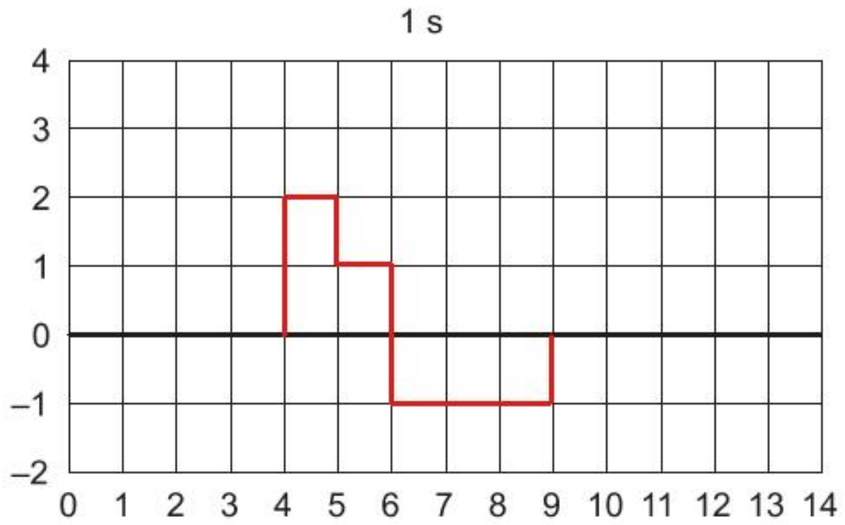
1.18 A: nedåt, B: uppåt

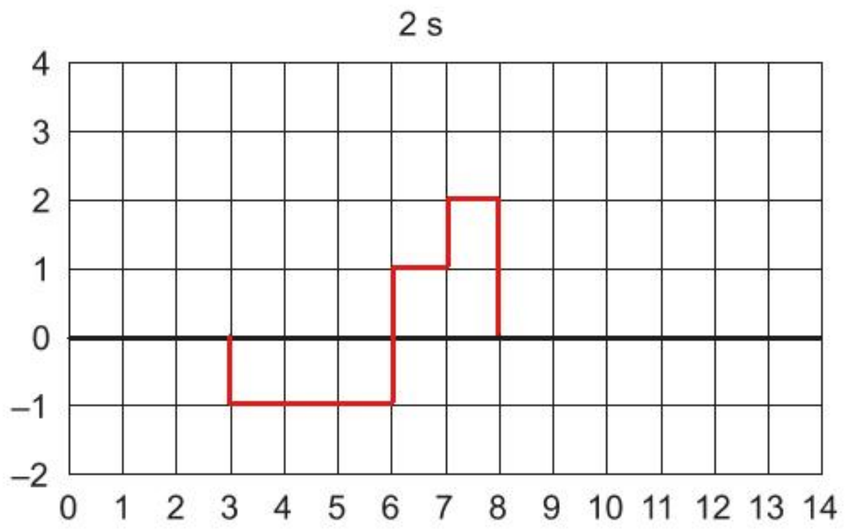
1.19 8 rutor

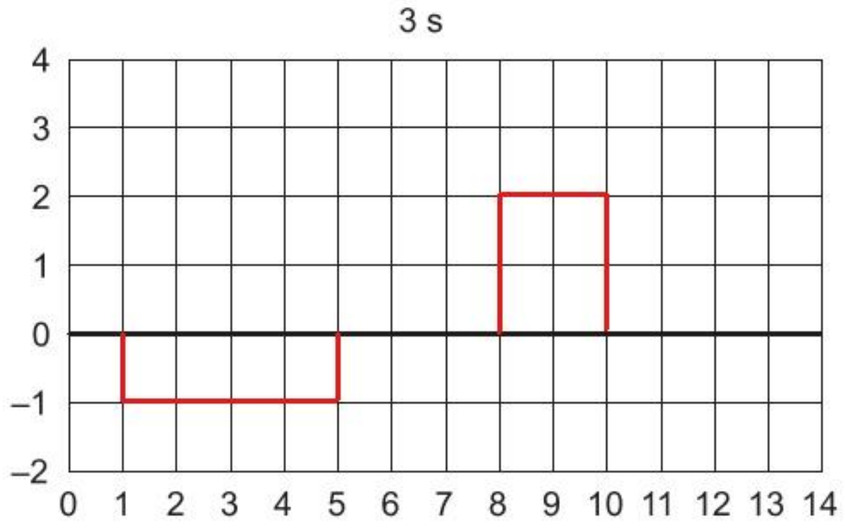
1.20 **a**



b







1.21 **a** $y_3 = 2y_1$, konstruktiv interferens.
b $y_3 = 0$, destruktiv interferens.

1.22 Amplituden varierar periodiskt. (Utslaget varierar periodiskt i styrka mellan noll och ett maxvärde). Fenomenet heter svävning.

1.23 **a** 44 cm eller 70 cm
b 33 cm eller 111 cm

1.24 **a** $\lambda/2$
b 6,0 cm
c 3,0 cm
d 9,0 cm

1.25 22,5 cm

1.26 **a** 9 cm
b 9 cm
c 4,5 m/s

1.27 **a** 0,664 m
b Mellan 0,017 m och 17 m.

1.28 0,3 s för kort.

1.29 $7{,}5 \cdot 10^{-4}$ m = 0,75 mm.
$0{,}50 \cdot 0{,}75$ mm ≈ 0,4 mm.

1.30 3,6 km/s

1.31 190 Hz

1.32 $70{,}8 \cdot n$ Hz, där $n \geq 1$

1.33 75 Hz

1.34 **a** 760 Hz
b 1 140 Hz
c 258 m/s

1.35 325 Hz

1.36 70 dB

1.37 10^{-10} W/m^2

1.38 **a** 3 dB
b 10 dB
c 30 dB

1.39 **a** 15 mW/m^2
b 100 dB

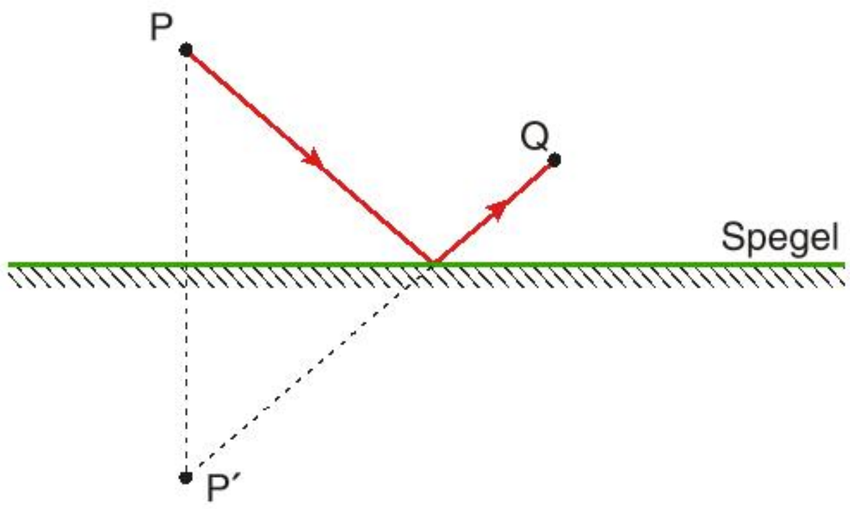
Kapitel 2

2.01 Båda 66°

2.02 Tio i två

2.03 16°

2.04 *Ledning:* Rita först spegelbilden av P



2.05 15°

2.06 **a** 1,60
b 15,3°

2.07 1,55

2.08 **a** 45°, 17°
b 2,42

2.09 **a** Glaset
b $\alpha = 32°$, $\beta = 53°$

2.10 1,6

2.11 **a** S
b R och T
c 1,5

2.12 1,62

2.13 1,45

2.14 79,6°

2.15 55,5°

2.16 **a** 75,2°
b 22,6°
c Mindre α_1 ger mindre brytningsvinkel vid A och därmed större infallsvinkel än gränsvinkeln vid B.

2.17 **a** 0,26°
b 1,31°
c 2,63°

2.18 $\tan\theta = 0{,}5 \cdot 1{,}66/9{,}00$ ger $\theta = 5{,}27°$

$d \cdot \sin\theta = 1 \cdot \lambda$ ger $d = 6{,}89$ µm

2.19 **a** 39,3°
b Nej. Formeln $d \cdot \sin\theta = 4\lambda$ ger $\sin\theta > 1$.

2.20 $1{,}65 \cdot 10^{-6}$ m.

2.21 488 nm. Blått.

2.22 503 nm.

2.23 $n_{max} = 3$ ger totalt 3 + 1 + 3 = 7 ljusfläckar.

2.24 **a** När $n = 0$, blir $\theta = 0°$ för alla λ.
b $\theta_v = 4{,}59°$, $\theta_R = 8{,}05°$
c 9,17 cm.

2.25 **a** 0,122 m.

2.26 **a** Radiovågor (mikrovågor)
b 1,42 GHz.

Kapitel 3

3.01 **a** 10,2 eV
b $5{,}67 \cdot 10^{-19}$ J

3.02 **a** 150 eV
b 185 eV
c 208 eV

3.03 **a** Från tillstånd 2 och tillstånd 3.
b $W_a = W_3 - W_2 = 0{,}303$ aJ
$W_b = W_2 - W_1 = 1{,}634$ aJ
$W_c = W_3 - W_1 = 1{,}937$ aJ
c $f_a = W_a/h = 457$ THz, $f_b = 2\,470$ THz, $f_c = 2\,920$ THz.

3.04 **a** $\Delta W = 0{,}396$ aJ
b $f = 598$ THz och $\lambda = 502$ nm.

3.05 – 0,458 aJ

3.06 **a** $f_{max} = 822$ THz, $f_{min} = 457$ THz
b 2 467 THz.

3.07 **a** $W_j = W_\infty - W_1 = 2{,}179$ aJ.
b $W_k = \frac{1}{2}mv^2$ och $W_j = W_K$ ger $v = 2{,}19 \cdot 10^6$ m/s

3.08 **b** $2{,}12 \cdot 10^{-18}$ J, $2{,}16 \cdot 10^6$ m/s
c Nej

3.09 **a** Gasatomerna har energinivåer som ligger tillräckligt ifrån varandra för att energisprången ska ge strålning med åtskilda frekvenser.
b Energisprången som ger A och C sker oftare (hos fler atomer) än andra energisprång.
c Energin går åt till att få upp atomerna i högre energitillstånd så att de därefter kan sända ut strålning.

3.10 **a** (3) → (4)
b 330 nm. Nej (ultraviolett).

3.11 **b** 534 nm. Grön
c $0{,}979 \cdot 10^{-18}$ J
d $W_\infty \rightarrow W_1$, 203 nm.

3.12 **b** Kalium, K.

3.14 1200 nm.
Ledning: $W_3 - W_1 = (W_3 - W_2) + (W_2 - W_1)$.

3.15 **a** $5{,}53 \cdot 10^{-19}$ J
b $1{,}85 \cdot 10^{-19}$ J, $6{,}35 \cdot 10^5$ m/s
c $5{,}55 \cdot 10^{14}$ Hz.

3.16 **a** $W = hf - W_k = 7{,}16 \cdot 10^{-19}$ J
b Nej, fotonenergien $4{,}97 \cdot 10^{-19}$ J är mindre än utträdesarbetet.

3.17 **a** $6{,}0 \cdot 10^{-34}$ Js
b $3{,}8 \cdot 10^{14}$ Hz, $2{,}3 \cdot 10^{-19}$ J

3.18 $6{,}63 \cdot 10^{-19}$ J, $p = 2{,}2 \cdot 10^{-27}$ kgm/s

3.19 $p = 3{,}94 \cdot 10^{-5}$ kgm/s

3.20 $1{,}64 \cdot 10^{-18}$ J, $2{,}47 \cdot 10^{15}$ Hz, 122 nm.

3.21 $p_\gamma = h/\lambda$ och $p_e = h/\lambda$ ger samma λ.

3.22 **a** $1{,}05 \cdot 10^{-10}$ m
b $1{,}5 \cdot 10^{5}$ m/s
c $eU = \frac{1}{2}mv^2$ ger $v = 4{,}38 \cdot 10^{6}$ m/s och $\lambda = h/mv = 9{,}05 \cdot 10^{-14}$ m.

3.23 **a** $2{,}41 \cdot 10^{-17}$ J
b 150 V
c Mindre U.

3.24 $6{,}63 \cdot 10^{-22}$ kgm/s, $2{,}77 \cdot 10^{8}$ m/s

3.25 **a** $\Delta x \geq 2{,}1 \cdot 10^{-30}$ m
b $\Delta x \geq 5{,}8 \cdot 10^{-10}$ m.

3.26 **b** $\Delta p \geq 5{,}3 \cdot 10^{-24}$ kgm/s
c $\Delta p \geq 2{,}7\ p$. Kravet på väldefinierad bana är inte uppfylld. Fysikerna har därför övergett banmodellen.

Kapitel 4

4.01 **a** 4 kg
b 3,4 kg
c 7 kg

4.02 120 Nm

4.03 11 N

4.04 37,2 kg

4.05 0,20 m

4.06 **a** 42 m
b 26 m

4.07 **a** 2,5 m/s
b 5,0 m/s, 60° mot golvet.

4.08 22 (21,4) m/s

4.09 **a** $v_{0x} = 5{,}0$ m/s, $v_{0y} = 8{,}7$ m/s
b $v_x = 5{,}0$ m/s och $v_y = -6{,}07$ m/s ger $v =$ 7,9 m/s och $\varphi = 50{,}5°$ mot horisontalplanet
c $x = 7{,}5$ m och $y = 1{,}9$ m.

4.10 **a** $v_y = 0$ ger $t = v_{0y}/g = 1{,}3$ s. $y_{max} = 8{,}9$ m
b $v_x = v_{0x} = 21$ m/s. $a_y = -g = -9{,}82$ m/s^2.
c $y = 0$ ger $t = 2v_{0y}/g = 2{,}7$ s. $x_{max} = v_{0x}t = 57$ m.
d 25 m/s, 32° mot marken.

4.11 **a** 18 m
b 8,1 m

4.12 **a** Längs tangentens riktning.
b, c Lodrätt nedåt.

4.13 **a** 1,3 m/s

4.14 **a** $x = v_{0x}t$ ger $v_{0x} = 16{,}9$ m/s; $y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$ ger $v_{0y} = 7{,}0$ m/s
b $v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2} = 18$ m/s , tan $\varphi = v_{0y}/v_{0x}$ ger $\varphi = 22°$.

4.15 **C**

4.16 **a** 1) Västerut 2) Söderut 3) Österut 4) Norrut.
b 6,0 m

4.17 **b** 20 m/s

4.18 **a** 24 m/s i samma riktning som farten ut från kurvan.
b 26 m/s i samma riktning som farten ut från kurvan.

4.19 $v = 2\pi r/T = 232$ m/s, $a = v^2/r = 0{,}0168$ m/s^2.

4.20 5,9 m/s^2.

4.21 60,2 s. Det är kraften på fötterna från underlaget som ger en person den nödvändiga centripetalaccelerationen.

4.22 **a** 0,14 kN. Inåt mot centrum i svängen.
b 1) större; 2) mindre; 3) större.

4.23 **a** Vågrätt in mot centrum. $F_{res} = mg \tan a = 0{,}35$ MN.
b $F_{res} = mv2/r$ ger $r = 2{,}0$ km.
c $K = 0{,}77$ MN.

4.24 **a** 8,4 m/s, 12 m/s^2 (11,7 m/s^2)
c 0,61 kN, 50° med lodlinjen.

4.25 **a** Tyngden F_g nedåt och normalkraft F_N uppåt, $F_g > F_N$.
b $F_g = 25$ N. $F_g - F_N = mv^2/r$ ger $F_N = 20$ N.

4.26 $F_N = 0$ ger $v = \sqrt{gr} = 28$ m/s ≈ 100 km/h

4.27 **b** Ledning: $S - F_g = mv^2/r$.

4.28 **a** 3,4 m/s, 3,4 N. 0,49 N
b 1,4 m/s. (*Ledning:* Det minsta värde normalkraften i C kan ha är noll.)

Kapitel 5

5.01 Bägge $3{,}54 \cdot 10^{22}$ N

5.02 $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ N, $2{,}0 \cdot 10^{-3}$ N, Månen

5.03 $42 \cdot 10^6$ m, $36 \cdot 10^6$ m

5.04 **a** 1,62 m/s^2
b 3,75 m/s^2

5.05 9,8 N/kg

5.06 **a** 8,7 m/s^2
b 660 N.

5.07 **a** *Ledning:* $g_0 = gM/r_0^2$ ger $gM = g_0 r_0^2$.
b $g = g_0/4$ för att $r = r_0 + h = 2r_0$
c $g = g_0/10$ ger $r = \sqrt{10} r_0$ och $h = r - r_0 = 2{,}2r_0$.

5.08 $1{,}9 \cdot 10^{-15}$ N

5.09 5,6 kV/m

5.10 **a** 5,5 kN/C rakt söderut.
b $8{,}8 \cdot 10^{-16}$ N rakt söderut.

5.11 **a** Lodrätt nedåt.
b 1,5 kV/m.
c $4{,}8 \cdot 10^{-15}$ N. Lodrätt nedåt.

5.12 Minst 2,1 kV.

5.13 **a** 2,2 kV/m
b Oförändrat 260 V
c 1,1 kV/m

5.14 $5{,}15 \cdot 10^{11}$ V/m. Radiellt utåt.

5.15 $2{,}1 \cdot 10^{-7}$ C. (Vi räknar som om kulladdningen är samlad i centrum av kulan.)

5.16 **a** Tyngdkraft nedåt, elektrisk kraft uppåt
b $1{,}6 \cdot 10^{-18}$ C

5.17 **a** 0,18 MV/m mot höger.
b 15 kV.

5.18 $1{,}6 \cdot 10^{-16}$ J

5.19 **a** A och B: F nedåt. C och D: F uppåt
b A och D: W_p ökar. B och C: W_p minskar.

5.20 **a** $9{,}6 \cdot 10^{-15}$ N
b $1{,}9 \cdot 10^{-15}$ J

5.21 **a** $3{,}2 \cdot 10^{-16}$ J
b $1{,}6 \cdot 10^{-16}$ J. $4{,}4 \cdot 10^5$ m/s
c $6{,}2 \cdot 10^5$ m/s. $1{,}3 \cdot 10^{-7}$ s

5.22 Sydpol uppe och nordpol nere.

5.23 På sned med nordpol uppe till höger och sydpol nere till vänster.

5.24 (0,066 ± 0,002) T

5.25 0 – 59 mN

5.26 **a** 20 mN. Se fig. 5.16
b 0,11 T.

5.27 **a** Rakt nedåt (i papprets plan)
b Rakt nedåt
c Mot vänster
d Rakt ut från pappret.

5.28 **a** 0,80 T
b B lodrätt nedåt, F mot vänster och I från A till B.

5.29 **a** Mot vänster
b In i pappret.

5.30 40 μT

5.31 1,2 mN

5.32 D

5.33 **a** Från oss (på insidan av slingan).
b Mot vänster genom spolen.

5.34 9,1 μT

5.35 **a** 3,8 A
b 3,5 μT

5.36 Snett ned åt höger, vinkelrätt mot v.

5.37 0,20 mN

Kapitel 6

6.01 7,6 km/s, $T = 2\pi r/v = 5{,}8 \cdot 10^3$ s = 1,6 h

6.02 $GMm/r^2 = m \cdot 4\pi^2 r/T^2$ ger $r = 6{,}9 \cdot 10^6$ m

6.03 **a** 8,19 km/s
b $1{,}89 \cdot 10^{27}$ kg, Jupiter

6.04 $1{,}5 \cdot 10^{22}$ kg. (*Ledning:* Karon har accelerationen $a = 4\pi^2 r/T^2$.)

6.05 $6{,}4 \cdot 10^{-19}$ C

6.06 $W_k = qU$ och $W_k = \frac{1}{2}mv^2$ ger $v = 1{,}1 \cdot 10^7$ m/s.

6.07 A

6.08 **a** 62 µJ
b 7,5 kV
c 53 kV/m

6.09 **a** $4{,}0 \cdot 10^{-17}$ J, $9{,}4 \cdot 10^6$ m/s
b $eU = W_k - \frac{1}{2}mv_0^2$ ger $W_k = 5{,}1 \cdot 10^{-17}$ J och $v = 11 \cdot 10^6$ m/s.

6.10 **a** 2,6 kV
b $2{,}6 \cdot 10^5$ V/m
c 0,67 ns.

6.11 **a** 5,6 ns
b $3{,}1 \cdot 10^{14}$ m/s^2
c 5,4°.

6.12 **a** $8{,}4 \cdot 10^{-13}$ N
b 0,042 m/s^2
c 1,7 m. (*Ledning:* De partiklar som går längst in i filtret "faller" 4,0 cm vinkelrätt mot plattan)

6.13 **a** $7{,}7 \cdot 10^{-15}$ N, $4{,}6 \cdot 10^{12}$ m/s^2
b $7{,}7 \cdot 10^{-15}$ N, $8{,}4 \cdot 10^{15}$ m/s^2.

6.14 **a** Lodrätt uppåt.
b Lodrätt nedåt
c Rakt österut.
d Rakt västerut.

6.15 A

6.16 40 km/s

6.17 Elektrisk kraft uppåt, magnetisk kraft nedåt, 2,5 mT rakt in i pappret.

6.18 **a** 49 m.
b 2,7 cm.

6.19 51 mT.

6.20 **a** $1{,}9 \cdot 10^{-17}$ J
b $1{,}2 \cdot 10^{-21}$ kgm/s
c $3{,}8 \cdot 10^{-26}$ kg = 23 u. Natrium.

6.21 **a** Rakt ut från pappret
b $2{,}0 \cdot 10^5$ m/s
c $3{,}5 \cdot 10^{-26}$ kg = 21 u
d $qU = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ ger $v_0 = 1{,}1 \cdot 10^5$ m/s

Kapitel 7

7.01 **a** Magnetfältet inne i S-spolen måste ändras.
b 1) och 5) Ja, kortvarigt 2) och 6) Nej 3) och 4) Ja. När strömmen i P -spolen ändras, varierar magnetfältet i järnkärnan. Detta magnetfält går också genom S-spolen.
c 2) och 6) Inget. 3) Åt höger. 4) och 5) Åt vänster.

7.02 **a** Magnetfältet inne i spolen ändrar sig. Nordpol, för att få repulsion. Ström nedåt genom de synliga spolslingorna, alltså moturs i kretsen. (*Ledning:* Använd högerhandsregeln för strömspolar.)
b Strömriktning som i a)
c Nej

7.03 **b** Medurs, sett uppifrån.
c Moturs, sett uppifrån.
d Magnetisk kraft på magneten från ringen verkar mot rörelsen.

7.04 **a** Åt höger
b Åt höger

7.05 1,0 mV

7.06 $2{,}2 \cdot 10^2$ m/s.
Vänstra (när vi ser i fartriktningen).

7.07 1,9 mV

7.08 **a** 72 mV, 0,40 A. Moturs.
b 0,12 N
c $P = eI = 29$ mW.

7.09 **a** Den längst bort
b 8,0 cm

7.10 **a** *NKLMN*
b 12 mV, 0,75 A
c $t = s/v = 2{,}0$ s där $s = KL = 0{,}20$ m.
$W = eIt = 18$ mJ.

7.11 **a** och **b**: Flödet genom ledarkretsen ändrar sig inte.

7.12 $e = |\Delta\Phi/\Delta t| = (1{,}8/2{,}4)$ V = 0,75 V

7.13 19 mA

7.14 1,2 kV

7.15 **a** 0,024 Wb
b –0,024 Wb
c $e = -\Delta\Phi/\Delta t = 12$ mV . $e > 0$ medför ström i riktningen *KLMNK*.

7.16 **a** 0,042 V, 8,4 mA, *adcba*
b 4,7 mA, *adcba*.

7.17 57 µT.

7.18 **a** Ca 0,4 mV (vid $t = 2{,}5$ s).
b Den inducerade spänningen ökar från 1 s fram till 2,5 s för att sedan avta fram till 4 s, då den återigen är noll.

7.19 **a** 8 varv/s
b 5 000 rad/s

7.20 99 V

7.21 3,5 A

7.22 $Ie = P/Ue = 0{,}26$ A, $\hat{\imath} = I_e \cdot \sqrt{2} = 0{,}37$ A

7.23 **a** $e = e_m \sin \omega t$ där $e_m = N\omega\Phi_m$
b 110 V, 50
c 377 s^{-1}, 60.

7.24 **a** 52
b 2,5 A, 0,13 A (effektivvärden)

7.25 **a** 3500
b $3{,}3 \cdot 10^3$ A, $2{,}6 \cdot 10^2$ A

7.26 2,3 µm

7.27 36 °C

7.28 300 m.

7.29 **a** $T = a/\lambda_{max} = 29 \cdot 10^3$ K
b $4{,}0 \cdot 10^{10}$ W/m^2

7.30 **a** 4 830 K. Glödtråden kommer att smälta.
b 8,7 µm. Infraröd strålning.

7.31 **a** 5,0 kW/m^2
b 544 K eller 271 °C.

7.32 9 700 K, $1{,}9 \cdot 10^9$ m.

7.33 **a** Med N/C som enhet för E_m och N/Am som enhet för B_m, får c enheten

$$\frac{\text{N/C}}{\text{N/Am}} = \frac{\text{Am}}{\text{C}} = \frac{\text{Am}}{\text{As}} = \text{m/s}.$$

Jämför formeln $v = E/B$ för korsande elektriska och magnetiska fält.
b 0,60 kV/m.

Kapitel 8

8.01 11,2 l.y.

8.02 650 l.y.

8.03 $1{,}5 \cdot 10^{20}$ m = $1{,}6 \cdot 10^4$ l.y.

8.04 $2{,}3 \cdot 10^6$ l.y.

8.05 Arcturus:
$c \cdot \Delta\lambda/\lambda_0 = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s · (–0,011)/656,3
= –5,0 km/s, alltså mot oss.
Betelgeuse: 21 km/s från oss.

8.06 2,1 km/s, 25 dygn.

8.07 $7{,}2 \cdot 10^3$ K, Klass F, Uppemot 6 gånger större.

8.08 $6{,}4 \cdot 10^{24}$W, M-klass

8.10 **a** 2,9 km, 29 km. Nej, massan är för liten.
b $1{,}8 \cdot 10^{10}$ m = 25 R_s.

8.11 **a** Använd $v = 2\pi r/T$ och $a = v^2/r$.
b GMm_s/r^2 ger $M = 2{,}2 \cdot 10^{41}$ kg = $1{,}1 \cdot 10^{11}$ m_s. (Massan av hela Vintergatan är ca $4 \cdot 10^{41}$ kg.)

8.12 $v = 2{,}4 \cdot 10^4$ km/s ger $r = v/H = 1{,}2 \cdot 10^9$ l.y.
Rödförskjutning.

8.13 $v = Hr = 20$ km/s · 50 = $1{,}0 \cdot 10^6$ m/s.
$\Delta\lambda = (v/c) \cdot \lambda_0 = 2{,}2$ nm.

8.14 $\Delta\lambda/\lambda_0 = 4{,}43$ ger $\lambda = 5{,}43 \cdot \lambda_0 = 2{,}36$ µm.
$\Delta s/s_0 = 4{,}43$ ger $s/s_0 = 5{,}43$.

TESTA DIG I FYSIK

Kapitel 1

1 4,4 s

2 40 st

3 19 cm

4 1,68 m

5 84 dB

6 44 cm/s

7 7,9 cm

8 70,5 cm lång

Kapitel 2

1 **b**

2 **c**

3 1,6 µm

4 1,19

5 Det med lägst n (2,06), $v = 1{,}5 \cdot 10^8$ m/s

6 93 µm

7 6,0°

8 26°

9 400 nm - 470 nm

10 21 cm

Kapitel 3

1 **a** absorption
b emission
c absorption

2 410 nm

3 $4{,}08 \cdot 10^{26}$ st

4 122 nm

5 **a** $4{,}6 \cdot 10^5$ m/s
b Elektronen slås ej ut.

6 $3 \cdot 10^{-8}$ eV

7 **a** $1{,}04 \cdot 10^{-12}$ J
b $3{,}5 \cdot 10^7$ m/s
c $1{,}12 \cdot 10^{-14}$ m

8 0,545 aJ

9 67 nm

Kapitel 4

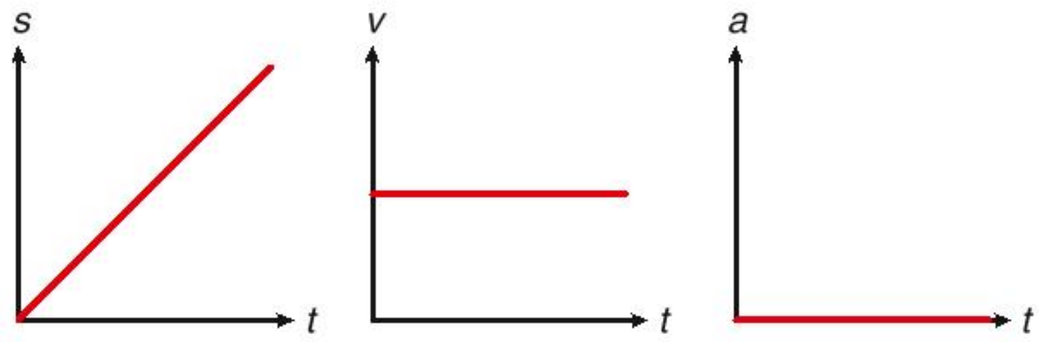
1 I samtliga fall rakt ned.

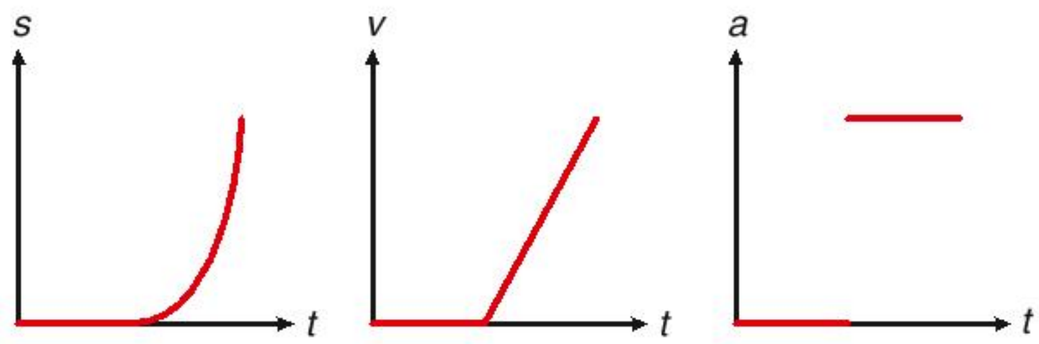
2 4 m/s^2

3 C

4 2,5 dm

5 Lägg origo i startpunkten, x-axeln åt höger och y-axeln nedåt.





6 84 m

7 **a** 3,0 m/s^2
b 260 N

8 1,3 kN

9 4,9 m framför målvakten

10 5,0 m/s

11 14 kg

Kapitel 5

1 0,81 m

2 3,8 µN

3 $4{,}4 \cdot 10^7$ m/s^2

4 1,5 cm

5 410 N

6 **a** övre plattan
b 0,14 nC

7 **a** 1, 2 och 4
b påverkar ej 1

8 **a** 11 V/m
b 11 V/m
c 5,5 V/m
d 8,8 V/m

9 45 kN/C

10 13 µT

11 5,8 cm utanför ledaren med 1,0 A

Kapitel 6

1 $1{,}6 \cdot 10^8$ km

2 C

3 **a** 0,16 µs
b 0,26 mm

4 350 N/C

5 **a** $4{,}68 \cdot 10^{-12}$ N
b 0 N

6 **a** inget
b $3{,}3 \cdot 10^{-5}$ J
c $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ J

7 $4{,}9 \cdot 10^6$ m/s

8 **a** 48 J
b 7,5 kV
c 64 kV/m

Kapitel 7

1 86 mT

2 72 mV

3 **a** 36V
b 71 W

4 60 V, 50 Hz, $u = 60 \cdot \sin 100\pi t$

5 **a** 0,61 kW
b 0,11 kW

6 C

7 0,57 V, 1,05 V

8 **a** Moturs
b Höger

9 0,10 V

Kapitel 8

1 $6{,}18 \cdot 10^{18}$ m = 650 l.y.

2 $\Delta\lambda = \lambda_0 v/c$ ger = $\lambda_0 + \Delta\lambda$ = 630,313 nm

3 $6{,}8 \cdot 10^{26}$ kg, 0,034 %

4 $7{,}5 \cdot 10^7$ l.y.

Register med ordförklaringar

A

absolutvärde: storleken på hastigheten eller accelerationen, har positivt värde och ingen riktning 148, 149
absorbera: uppta i sig; lat. *sorbere* = suga 76, 97, 104, 267
absorptionsspektrum: spektrum av ljus som har passerat genom ett ämne 76, 105
acceleration: hastighetsförändring per tidsenhet; lat. *celer* = snabb 142
ackretionsskiva: en roterande skiva där stoftet samlas när ett gas/stoftmoln faller samman av sin egen tyngdkraft 299
amplitud: maximalt utslag; lat. *amplus = vid 10*
anod: positiv elektrod i ett elektronrör; gr. *anhodos* = väg uppåt 112
atom: den minsta delen av ett grundämne; gr. *atomos* = odelbar 7, 96
atomkärna: den inre, positiva delen av ett atom 96
avståndskraft: kraft som verkar genom ett tomt rum (vakuum) 179, 189

B

bakgrundsstrålning: konstant, joniserande strålning från världsrymden, luften, berggrunden el. liknande 332
balmerserien: den synliga delen av vätespektrumet 99
bandspektrum: molekylspektrum där linjerna på vissa ställen ligger så tätt att delar av spektret ser kontinuerligt ut 103
banhastighet: absolutbeloppet av momentanhastigheten 148
bekräfta: visa genom försök att en hypotes kan vara sann 21
Big Bang: Den stora smällen, universums början (ifall det har en början) 327
blandningsfärg: färg som är sammansatt av rena spektralfärger 67, 76
brytning: riktningsändringen hos en våg när den passerar gränsskiktet mellan två medier 23, 59
brytningsindex: förhållandet mellan ljushastigheten i vakuum och ljushastigheten i det aktuella mediet 60
brytningsvinkel: vinkeln mellan infallsnormalen och hastighetsriktningen för brutna vågor 60
buk: de punkter i en stående våg där svängningen är som störst 32
böjning: utbredningen åt båda sidorna bakom spalten (öppningen), av en våg som passerar en smal spalt 26, 69, 70

C

CCD-enhet: en digital ljusdetektor 116
centrifug: apparat där ämnen skiljs från varandra med hjälp av rotation 153
centripetalacceleration: acceleration in mot centrum av en krökt bana; lat. *petere* = söka 148
centripetalkraft: kraft som håller kvar ett föremål i en cirkelbana 148
cepheid: stjärntyp vars utstrålade effekt varierar periodiskt 289
comptoneffekt: spridning av energirik elektromagnetisk strålning mot fria elektroner 120
coulomb: amperesekund, enhet för elektrisk laddning 183

D

degenerationstryck: kvantmekaniskt tryck som hindrar vissa "döda"stjärnor från att falla samman 304
destruktiv interferens: interferens där vågor försvagar varandra; lat. *de* = av, *struere* = bygga 29
diffus reflektion: reflektion från en ojämn yta 58
dispersion: uppdelning av ljuset i olika färger 276
dopplereffekt: det att våglängden och frekvensen av ljud– och ljusvågor beror på den relativa hastigheten mellan observatör och vågkälla 292
dopplerspektroskopi: metod för att detektera förskjutning i spektrallinjerna i ljuset från en stjärna, används för att upptäcka exoplaneter 313
dosering: den vinkel som en vägbana lutar inåt 155
dvärgstjärna: stjärna med liten radie och liten utstrålad effekt 296
dämpade svängningar: svängningar vars amplitud avtar med tiden 10

E

effektiv temperatur: temperaturen hos ett föremål mätt med h jälp av utstrålningstätheten från föremålet 271
effektivvärde: värde på likström (eller likspänning) som ger samma effekt som en given växelström (eller växelspänning) ger i genomsnitt 261
egenfrekvens: frekvensen hos ett svängande system som svänger fritt 10
eko: reflekterat ljud; gr. *ekho* 41
elektrisk energi: energi som levereras av en elektrisk spänningskälla 259
elektrisk fältstyrka: elektrisk kraft per laddning, enhet N/C eller V/m 183
elektrisk laddning: en grundstorhet som har med elektriska krafter mellan elementarpartiklar att göra; gr. *elektron* = bärnsten 183
elektriskt fält: område inom vilket elektriska krafter verkar på elektriska laddningar 183
elektromagnetisk våg: elektriska och magnetiska svängningar som utbreder sig i rummet 14, 82
elektromotorisk spänning: energi per laddningsenhet i en spänningskälla, ger upphov till ström i en krets; lat. *movere* = röra sig 248
elektron: negativ elementarpartikel i den yttre delen av en atom; gr. *elektron* = bärnsten 96
elektronmikroskop: mikroskop som utnyttjar snabba elektroner i stället för ljus för avbildning 121
elektronvolt: produkten av elementarladdningen och en (1) volt, mikrokosmisk energienhet 97
ellips: kurva där punkterna ligger så att summan av avstånden från två fixa punkter är konstant; gr. *ellipse* = brist 215
emissionsspektrum: spektrum av ljus som sänds ut från ett ämne 102
emittera: sända ut strålning; lat. *mittere* = sända 102, 267
energikvanta: mikroskopisk och odelbar energimängd i elektromagnetisk strålning; lat. *quantum* = hur stor 96
enhetsanalys: analys av enheterna på båda sidor i ett uttryck 21
excitera: lyfta till en högre energinivå; lat. *excitare* = jaga 97
exoplanet: en planet som tillhör en annan stjärna än solen 310
experiment: vetenskapligt försök där man testar en hypotes; lat. *experiri* = prova 16

F

fas: svängningstillstånd (utslag och svängningsriktning) för en punkt på en våg 13, 32
fiberoptik: teknik som utnyttjar totalrefiektion för att sända ljus genom tunna fibrer av glas 64
fjäderkonstant: proportionalitetskonstanten i Hookes lag. 16
flöde: produkten av flödestätheten och arean, storhet som beskriver magnetfältet genom en yta; lat. *flux* = flyt 251
flödestäthet: flöde per ytenhet, ett mått på magnetisk fältstyrka 196
forskning: vetenskapligt arbete, undersökning 16
fotocell: anordning som omvandlar ljusenergi direkt till elektrisk energi 109
fotoelektrisk effekt: det att ljus som träffar en metall, kan slå loss elektroner från metallen 109
foton: ljuspartikel, kvanta av elektromagnetisk strålning; gr. *phos* = ljus 102
fraunhoferlinje: mörk absorptionslinje i spektret från solen eller från en stjärna 95
frekvens: antalet svängningar per tidsenhet; lat. *frequens* = upprepad 9
friktion: kraft som verkar längs kontaktytan mellan två föremål; lat. *fricare* = gnida 155
friktionskoefficient: förhållandet mellan friktionskraft och normalkraft 155
fritt fall: fall där ett föremål bara påverkas av tyngdkraften 142, 154
fältlinje: linje som ritas i ett kraftfält och som i varje punkt har fältvektorn som tangent 256, 181
färg: vår upplevelse av det ljus som träffar ögat 65, 66
färgtemperatur: temperaturen hos ett föremål mätt med hjälp av färgen (våglängden) på den strålning som är mest framträdande 269
förmörkelsemetoden: metod för att detektera den lilla förändring som uppstår i ljuset då en exoplanet passerar framför sin stjärna 311
förmörkelsevariationer: metod för att detektera variationer i förmörkelsetiden, används för att upptäcka andra planeter i närheten av en exoplanet 312

G

galax: stort system av stjärnor som är sammanbundna av gravitationskrafter; gr. *gala* = mjölk 318
galaxhop: system av galaxer som är bundna till varandra med gravitationskrafter 319
gammafaktor: faktor som används vid omräkningar i den speciella relativitetsteorin 123
generator: elektromagnetisk spänningskälla, maskin som omvandlar mekaniskt arbete till elektrisk energi; lat. *generere* = frambringa 258, 259
genomskinlig: som släpper igenom synligt ljus av alla frekvenser 76
geostationär satellit: satellit som cirklar över ekvatorn och håller sig över samma punkt på jordytan 216
gitterkonstant: avståndet mellan mittpunkterna i två grannspalter i ett optiskt gitter 73
glöda: sända ut termisk strålning vid så hög temperatur att en del av strålningen är synligt ljus 267
GPS: Satellitnavigationssystem där man kan bestämma positioner på jorden mycket noggrant 129
gravitation: dragningskraft (attraktion) mellan massor; lat. *gravis* = tung 179
gravitationell mikrolinsbrytning: Ljusbrytning in mot gravitationsfält, har utvecklats till en metod att upptäcka exoplaneter 313
gravitationsfält: område där gravitationskrafter verkar på massor 180
gravitationsfältstyrka: gravitationskraft per massenhet 180
gravitationslins: ljus som passerar mycket nära en massa böjer av in mot massan. Resultatet blir ungefär som en lins. 313
grundtillstånd: det lägsta energitillståndet i en atom 97
grundton: den enklaste formen av en stående våg. Grundtonen har den lägsta frekvensen 35
grundämne: ämne som inte kan brytas ner till enklare ämnen 103, 307
gränsfrekvens: lägsta ljusfrekvens som kan ge fotoelektrisk effekt från en given metall 109
gränsvinkel: den största infallsvinkel ljuset kan ha i ett medium för att ljuset inte ska totalreflekteras 63

H

harmonisk svängning: regelbunden periodisk rörelse utan dämpning 9
Helioseismologi: studium av stjärna med hjälp av seismiska vågor 300
hertz: antalet svängningar per sekund, enhet för frekvens 9
Hertzsprung–Russeldiagram: ett spridningsdiagram med stjärnornas spektralklass (temperatur) längs x–axeln och deras utstrålade effekt längs y–axeln. 295
homogent fält: område där fältstyrkan har konstant riktning och konstant absolutvärde 181, 183
Hookes lag: ett samband som är tilllämpligt när längdförändringen hos ett elastiskt föremål är proportionell mot den verkande kraften. 16
Hubbles lag: galaxerna avlägsnar sig med en hastighet som är proportionell mot avståndet mellan dem. 323, 324
huvudserien: mängden av stabila stjärnor, ordnade efter yttemperatur och utstrålad effekt 296
huvudseriestjärna: normal, stabil stjärna som producerar energi genom fusion av väte till helium 301
hypotes: antagande (påstående) som kan testas i verkligheten; gr. *hypo* = under, *thesis* = tes 16
högersystem: tredimensionellt koordinatsystem där ordningsföljden mellan koordinataxlarna följer en högerhandsregel 197

I

indigo: blåviolett färg; efter den indiska indigoväxten 66
inducera: alstra elektrisk ström (spänning) genom magnetisk påverkan 244
infallsnormal: normalen till en reflekterande eller brytande yta 22, 58
infallsplan: plan genom infallsnormal och hastighetsriktning för en infallande våg 58
infallsvinkel: vinkeln mellan infallsnormal och hastighetsriktning för infallande vågor 23, 58
Inflation: en modell som beskriver en våldsam expansion under universums första sekund. 233
infraröd strålning: elektromagnetisk strålning som har lite lägre frekvens än synligt ljus; lat. *infra* = under 82, 83

integrerad krets: ett flertal olika komponenter är sammanförda i ett sammanhängande block, som t.ex. transistorer, resistorer, kondensatorer. Man använder även ordet chip för en integrerad krets. 127
intensitet: instrålad effekt per ytenhet; lat. *intendere* = anstränga 109
interferens: när flera vågor samverkar och bildar en våg; lat. *ferre* = bära 26, 27, 69

J

jonisationsenergi: den minsta energi som behövs för att jonisera en atom 99
jonisera: slå loss elektroner från en atom; gr. *ion* = vandrar 99
jonosfär: joniserat luftlager som reflekterar radiovågor 83
jättestjärna: stjärna med stor radie och stor utstrålad effekt 297, 305

K

katod: negativ elektrod i ett elektronrör; gr. *kathodos* = väg nedåt 112
kedjereaktion: kärnreaktion som leder till att flera andra kärnor omvandlas 132
kinetisk energi: rörelseenergi, det arbete som krävs för att sätta ett föremål i rörelse; gr. *kinesis* = rörelse 110
koherenta vågkällor: vågkällor som svänger i takt med samma frekvens; lat. *cohaerere* = hänga samman 69
komposantuppdelning: dela upp en vektor i två komposanter som ofta står vinkelrätt mot varandra; lat. *de* = av, *componere* = sätta samman 144
konstruktiv interferens: interferens där vågor förstärker varandra; lat. *con* = med, *struere* = bygga 29
kontinuerligt spektrum: sammanhängande spektrum, med omärkliga övergångar mellan alla regnbågens färger 104
korsade fält: elektriskt och magnetiskt fält som står vinkelrätt mot varandra 223
kosmisk bakgrundsstrålning: elektromagnetisk mikrovågsstrålning från världsrymden, kommer jämnt fördelad från alla riktningar och kan inte spåras tillbaka till bestämda källor 331
kosmologi: den del av astronomin som handlar om universum som helhet; gr. *kosmos* = ordning, logos = ord 323
kraftmoment: kraft gånger vinkelräta avståndet mellan kraftens angreppspunkt och momentpunkten 139, 140
kritisk radie: den radie en himlakropp måste tryckas samman till för att bli ett svart hål 308
kvanta: minsta delen av en fysisk storhet; lat. *quantum* = hur stor 95, 96
kvanthypotesen: att en atom bara kan sända ut eller ta emot energi i bestämda proportioner 96
kvantparadoxen: det att fotoner, elektroner osv. emitteras och absorberas som partiklar, men utbreder sig som vågor 124
kvasar: hyperaktiv kärna i en ung galax 320

L

laser: ljuskälla som sänder ut koherent ljus genom att en mängd atomer emitterar samtidigt; av eng. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* 70
likström: elektrisk ström som har samma riktning hela tiden 260
linjespektrum: spektrum som består av klart åtskilda färglinjer 102, 103
ljud: periodiska tryckvariationer som utbreder sig genom ett ämne och kan uppfattas av örat 34
ljushastighet: elektromagnetiska vågor utbreder sig i vakuum med hastigheten $3{,}00 \cdot 10^8$ m/s 57
ljusstråle: ljusknippe som är så smalt att vi kan betrakta det som en rät linje 58
ljusstyrka: ett mått för ljusintensiteten från en stjärna 311
ljusår: den sträcka som ljuset färdas på ett år i vakuum 286
longitudinell våg: våg där punkterna i vågmediet svänger längs vågens hastighetsriktning 15, 13
luftmotstånd: friktionskraft som verkar på ett föremål som rör sig i luft 163, 165
luminiscens: ljusstrålning vid låg temperatur; lat. *lumen* = ljus 106
lymanserien: den ultravioletta delen av vätespektret 101

M

magnetfält: område där det verkar magnetiska krafter på kompassnålar, magneter, strömförande ledare och laddade partiklar i rörelse 189, 190
magnetisk fältriktning: den riktning som nordpolen på en magnet pekar i, när magneten kan svänga fritt i ett givet magnetfält 190
magnetiska krafter: krafter mellan elektriska laddningar som rör sig i förhållande till varandra 189
masspektrograf: instrument som används för att analysera kemiska uppbyggnaden av ämnen 224
medelacceleration: hastighetsförändring per tidsenhet 149
mekanisk våg: våg som bara kan utbreda sig genom ett ämne 14
mikrovåg: elektromagnetisk våg med något lägre frekvens än infraröd strålning 82, 84
modell: förenkling av verkligheten; lat. *modus* = sätt 7
molekyl: en eller flera atomer som utgör den minsta delen av ett ämne; lat. *moles* = massa 7
moment: kraft gånger vinkelräta avståndet mellan kraftens angreppspunkt och momentpunkten 140
momentanacceleration: gränsvärdet för medelaccelerationen när tidsintervallet går mot noll; lat. *momentum* = ögonblick 149
momentpunkt: den punkt som ett föremål vrider sig kring 140
mörk energi: energi av okänd typ som tycks verka med en negativ, frånstötande gravitation 329
mörk materia: materia som bidrar till universums massa, men som inte kan observeras med optiska metoder 329

N

nebulosa: anhopning av gas och stoft i världsrymden 297, 299
neutrino: elektriskt neutral lepton, med liten eller ingen massa 300
neutronstjärna: liten stjärna med extremt stor masstäthet (en möjlig rest efter en supernova) 307
nod: de punkter i en stående våg där svängningen är som minst 32
nollnivå: nivå (yta) där en potentiell energi har satts till noll 187
nordpol: den pol som pekar mot norr när en kompassnål eller magnet kan svänga fritt 189
norrsken: ljusfenomen på natthimlen som uppstår när laddade partiklar från solen rör sig in mot jordens magnetiska poler och kolliderar med molekyler i atmosfären 228

O

omloppshastighet: banhastighet hos en satellit som går i en cirkelformad bana 215
optik: den del av fysiken som handlar om ljus och andra elektromagnetiska vågor; gr. ops = syn 64
optiskt gitter: tunn platta med många smala spalter på samma inbördes avstånd 72
ordningstal: nummer på ljusmaximum, räknat från det centrala maximet, i ett gitterförsök eller dubbelspaltförsök 73
oscilloskop: elektronrör som visar hur en spänning varierar med tiden; lat. *oscillere* = svänga 221
oskärpa: principiell gräns för hur exakt vi kan mäta en mikroskopisk storhet 125

P

paradox: påstående som skenbart är en självmotsägelse, men som egentligen rymmer en dold sanning; gr. *para* = vid sidan av, *doxa* = mening 125
parallax: vinkeln mellan två siktlinjer till en stjärna, när stjärnan observeras från två olika punkter på jordbanan; gr. *parallaxis* = omväxling 287
parameter: fri variabel; gr. *para* = vid sidan av, *metrein* = mäta 160, 162
paschenserien: den infraröda delen av vätespektret 101
pendel: vikt som hänger i ett snöre och svänger periodiskt kring ett jämviktsläge; lat. *pendulus* = nedhängande 7
period: svängningstid hos ett svängande system 9
plan pendel: pendel som svänger fram och tillbaka i ett lodrätt plan 7
planckkurva: grafisk framställning av Plancks strålningslag med våglängden på x–axeln 268
planet: kall och mörk himlakropp som kretsar runt en stjärna; lat. *planeta* = den vandrande 285
planetarisk nebulosa: klotformat skal av varm gas som kastas ut från en varm stjärna mot slutet av stjärnans liv 303

plant universum: universummodell där genomsnittstätheten är lika med den kritiska tätheten, så att universums utvidgningstakt kommer att gå mot noll när tiden går mot oändligheten 333
postulat: påstående som godtas utan bevis; lat. *postulare* = kräva 96
potentiell energi: lägesenergi, arbete som krävs för att flytta ett föremål mot en gravitationskraft eller elektrisk kraft;lat.potens = kraft 187
protostjärna: klotformad koncentration av gas som utvecklas till en stjärna 297, 299
puls: ett kortvarigt förlopp hos en fysikalisk storhet, t.ex en ensam våg som orsakas av en kortvarig stöt hos en elastisk kropp 12
pulsar: himlakropp (sannolikt en roterande neutronstjärna) som sänder ut radiopulser med kort och konstant period; lat. *puls* = slag 307
pulsarmetoden: metod för att detektera små dopplervariationer i pulsarfrekvensen, används för att upptäcka exoplaneter 311

R

radialhastighet: hastighetskomposant i synlinjens riktning 293
reflektera: återkasta 58
reflektionsvinkel: vinkeln mellan infallsnormalen och hastighetsriktningen för reflekterade vågor 58
regelbunden reflektion: reflektion från en plan yta 58
regressionslinje: en linje som anpassats till mätpunkter i ett diagram med hjälp av en räknare eller dator 18
regressionsprogram: 18
relativ rörelse: rörelse i förhållande till ett referenssystem; lat. *relativus* = återfört 129
resonans: svängningstillstånd där ett svängande system påverkas av en periodisk kraft med samma frekvens som egenfrekvensen för systemet; lat. *resonare* = klinga med 10, 11
restmassa: den massa en stjärna har kvar efter att den har kastat ut stoft i världsrymden 304
resultantkraft: tänkt kraft som har samma verkan som de verkliga krafterna har tillsammans 139
rotation: när punkter i en kropp rör sig i cirklar kring en rotationsaxel 148
rödförskjutning: förskjutning mot längre våglängder i spektret från stjärnor och galaxer 292
rörelsemängd: produkten av massan och hastigheten (och eventuellt också gammafaktorn) för en partikel 123
rörelsemängden för en foton: förhållandet mellan fotonenergin och ljushastigheten 118

S

satellit: konstgjord eller naturlig himlakropp som kretsar runt en planet 182
spektralfärg: färg som inte kan delas upp i flera färger 65
spektralklass: en indelning av stjärnor efter linjemönstret i spektret 295
spektroskop: apparat som används för att observera ett spektrum; gr. *skopein* = se 313
spektrum: färgbild som blir synlig när ljus passerar ett prisma eller ett optiskt gitter; lat. *specto* = bli synligt 65
spänning: arbete per laddningsenhet som den elektriska kraften utför på en laddning som flyttas i ett elektriskt fält 183
standardmodellen: en modell för universum som helhet, den kombination av kosmologi och partikelfysik som i dag är mest utbredd bland fysiker och astronomer 129
starka kärnkraften: kraft som bara verkar på kvarkar och partiklar uppbyggda av kvarkar 303
stjärnhop: grupp av stjärnor som hålls samman av gravitationskrafter 316
strömslinga: cirkelformad ledare som det går ström genom 200, 201
stående våg: interferensfenomen när en våg interfererar med sin reflekterade våg 32
superjätte: stor stjärna med mycket stor utstrålad effekt 297, 305
supernova: stjärna som plötsligt exploderar och utstrålar en enorm effekt under kort tid; lat. *super* = över, *nova* = ny 297, 305
svart dvärg: slocknad stjärna, sista stadiet i utvecklingen av en stjärna 304
svart hål: gravitationsfält som är så starkt att inte ens ljus kan undslippa det (en möjlig rest efter en supernova) 308, 309

svart kropp: föremål som absorberar all strålning som träffar det 297
svart yta: yta som absorberar ljus med alla frekvenser 297
sveptunnelmikroskop: Principen för ett sveptunnelmikroskop är att en mycket spetsig och elektriskt ledande tipp anbringas nära ett ledande prov och att en potentialskillnad mellan spets och prov får elektroner att tunnla över gapet mellan dem. 122
svängande system: system som kan utföra svängningar 7, 8
svängning: periodisk rörelse mellan två gränslägen 8
svängningstid: den tid som ett svängande system behöver för att gå från ett gränsläge tillbaka till samma gränsläge 9
sydpol: den magnetpol som pekar mot söder när magneten kan svänga fritt 189

T

tangent: rät linje som berör en krökt linje i en punkt; lat. *tangere* = beröra 149, 154
termisk strålning: temperaturstrålning, energiutstrålning från ett föremål på grund av temperaturen; gr. *thermos* = värme 266
tesla: newton per ampere per meter, enhet för magnetisk flödestäthet 196
ton: entonigt ljud, ljud med konstant frekvens 34
tonhöjd: vår upplevelse av frekvensen hos ljud som träffar örat 40
transformator: spänningsomvandlare, apparat som omvandlar växelspänning från ett värde till ett annat 262
transitmetoden: Se förmörkelsemetoden.
transversell våg: våg där punkterna i vågmediet svänger vinkelrätt mot vågens hastighetsriktning 12
tröghetssystem: referenssystem där Newtons första lag gäller 129
tröskelspänning: den minsta spänning som kan stoppa elektronströmmen genom en fotocell när katoden är positiv 112
tunneleffekt: att en partikel kan gå genom en barriär som den egentligen inte har tillräcklig energi för att forcera 126
tyngdaccelerationen: accelerationen hos ett föremål som faller fritt 142
tyngdlöst tillstånd: tillstånd i ett referenssystem som faller fritt 195

U

ultraljud: ljud som har högre frekvens än vad ett normalt öra kan uppfatta 40, 42
ultraviolett ljus: elektromagnetisk strålning som har något kortare våglängd än synligt ljus 66, 82
utslag: avstånd från jämviktsläget för ett svängande system 8
utstrålningstäthet: utstrålad effekt per ytenhet 268
utträdesarbete: det arbete som behövs för att slå loss en elektron från en given metall 110

V

weber: voltsekund, enhet för magnetiskt flöde 251
vinkelhastighet: vinkel per tidsenhet 257, 258
Vintergatan: den galax som solen hör till 286
vit dvärg: gammal stjärna som har hög temperatur och liten radie 297, 303
vit yta: yta som reflekterar ljus med alla våglängder 66
vitt ljus: ljus som innehåller alla synliga frekvenser 65
WMAP: en satellit som har kartlagt den kosmiska bakgrundsstrålningen och därmed universums barndom. 332
våg: svängningstillstånd som utbreder sig i rummet 7
vågfront: sammanhängande linje eller yta där alla punkterna svänger i samma fas; lat. *frons* = panna 15
våghastighet: den hastighet varmed svängningstillståndet hos en våg utbreder sig 14
våglängd: avståndet mellan en punkt och nästa som svänger i samma fas hos en våg 13
växelspänning: elektrisk spänning som varierar periodiskt 259, 260
växelström: elektrisk ström som byter riktning periodiskt 260
växelverkan: ömsesidig kraftverkan mellan två föremål 179

Ö

överton: ton som har högre frekvens än den motsvarande grundtonen. Klangen vi uppfattar hos ett instrument beror på den inbördes styrkan mellan övertonerna 36

ERGO

FYSIK

Ergo Fysik 2 omfattar gymnasieskolans kurs Fysik 2. Den riktar sig till naturvetenskapligt och tekniskt program. Boken passar också för vuxenutbildning och basår.

Liber

www.liber.se

Best.nr 47-10672-1
Tryck.nr 47-10672-1-01

9 789147 106721