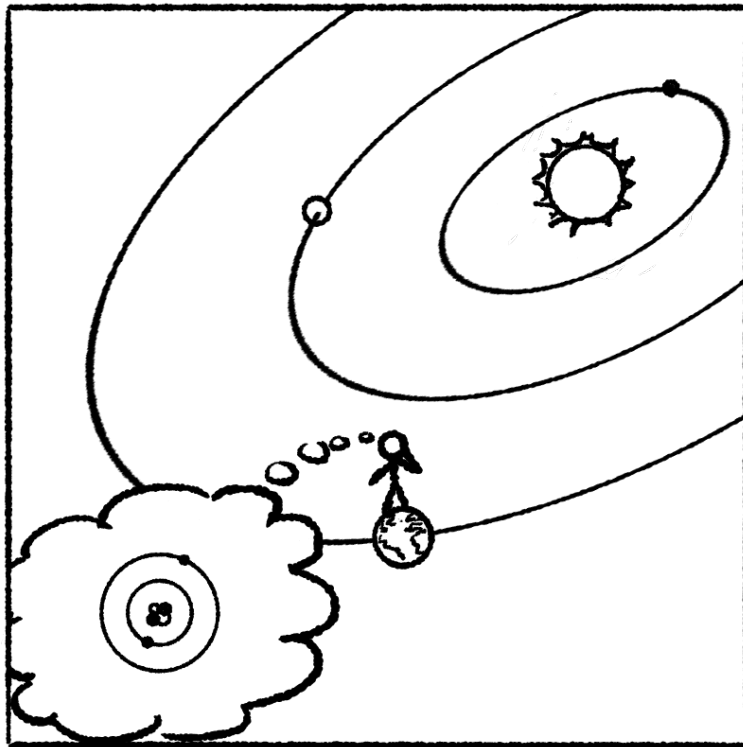


Mike Vandal Auerbach

STORT OG SMÅT I FYSIK

Version 1.0

3. november 2025



Stort og småt i fysik

Version 1.0, 2025

Værdien af forskellige konstanter er, med mindre andet er angivet, taget fra Databog Fysik Kemi, 11. udgave.[1]

Disse noter er skrevet til fysikundervisning på stx og må frit anvendes til ikke-kommercielle formål.

Noterne er skrevet vha. tekstformateringsprogrammet \LaTeX , se www.tug.org og www.miktex.org. Figurer og diagrammer er fremstillet i *pgf/TikZ*, se www.ctan.org/pkg/pgf.

Disse og andre noter kan downloades fra www.mathematicus.dk.



Materialet er udgivet under en »Kreditering-Ikkekommerciel-Deling på samme vilkår 4.0 International«-licens (CC BY-NC-SA 4.0).

Mike Vandal Auerbach, 2025.

Indhold

1	Hvad er fysik?	5
2	Densitet og opdrift	7
2-1	Enheder og størrelser	7
2-2	Densitet	8
2-3	Tabeller og grafer	10
2-4	Tyngdekraft	10
2-5	Opdrift	12
3	Atomer	15
3-1	Historien om atomet	15
3-2	Eksponentiel notation	19
3-3	Præfikser	19
3-4	Atomets opbygning	20
4	Solsystemet	23
4-1	Solsystemets opbygning	23
4-2	Solsystemets dannelse	24
4-3	Keplers love	25
5	Jorden	27
5-1	Længde- og breddegrader	27
5-2	Døgn	27
5-3	Årstider	28
5-4	Månen	29
6	Universet	33
6-1	Kosmologiske teorier	33
6-2	Den kosmiske rødforskydning	34
6-3	Big Bang	36
6-4	Universets udviklingshistorie	39
A	Standardsymboler	41
A-1	Almindeligt anvendte størrelsessymboler	41
A-2	Enhedspræfikser	42
A-3	Det græske alfabet	42
	Bibliografi	43
	Billedkilder	44

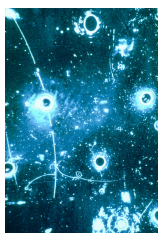
Hvad er fysik?

Fysik handler meget kort fortalt om stof og energi. Det handler om hvad stof er lavet af, og hvordan det bevæger sig, og om rum og tid. Det handler om den energi der er indeholdt i bevægelse, i stråling, i elektricitet etc. Og det handler også om hvordan stof og energi kan omdannes til hinanden.

I fysik er man interesseret i at finde sammenhænge på alle skalaer – lige fra atomer (og endnu mindre) til galakser og hele universets struktur. Disse sammenhænge beskrives oftest vha. matematik, altså som formler der udtrykker sammenhænge.

En af måderne man kan undersøge sammenhænge på er gennem eksperimenter. Eksperimenter kan bruges til at eftervise teoretiske sammenhænge, men de kan også bruges til at finde nye. Fysik som forskningsdisciplin har derfor to sider, teoretisk og eksperimentel. I den eksperimentelle fysik forsøger man, som nævnt, at eftervise teoretisk beskrevne sammenhænge eller opdage nye fænomener, mens man i den teoretiske fysik prøver at beskrive sammenhænge matematisk – enten på baggrund af eksperimentelle resultater eller ud fra rene matematiske overvejelser. De to grene af fysikken kan ikke eksistere uden hinanden for man har brug for teorierne (dvs. de matematiske formler) til at beskrive resultaterne af eksperimenterne, og man har brug for eksperimenter til at eftervise at de teoretiske sammenhænge rent faktisk passer på virkeligheden.

Det er ikke nyt for mennesket at beskrive sammenhænge; mennesket har siden oldtiden tænkt over hvordan verden hang sammen. Aristoteles



(a) Boblekammer.[32]



(b) Kogende vand.[25]



(c) Grumman Bearcat F8F.[28]



(d) Galaksen NGC 3949.[36]

Figur 1.1: Fysik beskæftiger sig med fænomener på alle skalaer – fra subatomare partikler hvis spor kan iagttages i et boblekammer, varmfænomener som smeltning og fordampning, hvordan fly flyver, og til galakser og universets udvikling.

(384–322 fvt.) kom ved at filosofere over menneskelige erfaringer frem til en beskrivelse af hvorfor ting bevæger sig. Bl.a. mente han at tunge ting falder hurtigere end lette ting fordi man kan mærke at jorden trækker mere i tunge objekter end i lette.[18] Ud fra sine tanker om hvordan verden hang sammen kom Aristoteles frem til en samling »naturlove« for bevægelse. Det viste sig desværre at Aristoteles' love var ganske forkerte.

Øvelse 1.1

Et fladt stykke papir og et stykke papir der er krøllet sammen til en kugle, falder ikke lige hurtigt selv om de vejer det samme.

- a) Giv et bud på hvorfor papiret falder med forskellig fart i de to situationer.

Det var først i det 17. århundrede at de første rigtige matematiske naturlove blev beskrevet af bl.a. Galilei.[19] Grunden til Galileis succes var netop at han lavede eksperimenter for at finde frem til naturlovene. Så fysik som naturvidenskabeligt fag har altså eksisteret i ca. 400 år.

Som sagt handler fysik om at beskrive sammenhænge på alle skalaer. I de følgende kapitler bliver dette illustreret ved at præsentere fysik på vores dagligdags skala (densitet og opdrift), på meget lille skala (atomer) og på meget stor skala (vores solsystem og det univers Solsystemet befinder sig i).

Densitet og opdrift

Densitet og opdrift er eksempler på såkaldte *fysiske størrelser*, dvs. noget der kan måles og gives en talværdi. Andre eksempler på størrelser er temperatur, afstand eller tid.

2-1 Enheder og størrelser

Størrelser i fysik repræsenteres altid med et symbol på ét bogstav. Man kunne f.eks. kalde temperaturen T , afstanden x og tiden t .¹ Hvis man vil angive værdien af en bestemt størrelse skal dette altid angives som et tal og en enhed. Vil man skrive at temperaturen T er 20 grader celsius, skriver man

$$T = 20^{\circ}\text{C} .$$

På samme måde kan man skrive f.eks.

$$x = 173 \text{ mm} , \quad t = 69 \text{ s} .$$

Størrelsen x er altså en længde på 173 mm, og størrelsen t er en tid på 69 s. Man skal altid have enhed på en størrelse da man ellers ikke kan vide hvor stor den er: Får man at vide at en bestemt længde er »37«, kan man ikke vide om det drejer sig om 37 cm, 37 km, 37 fod eller noget helt fjerde.

En størrelse er ikke afhængig af sin enhed, f.eks. er 1,75 m og 175 cm den samme størrelse. Man vil ofte komme ud for at det er hensigtsmæssigt at omskrive en størrelse til en anden enhed i forbindelse med udregninger, sådan at de størrelser der indgår i udregningen har enheder der »passer sammen« (dette uddybes nedenfor).

Fordi en størrelse er uafhængig af sin enhed, nævner man dem altid ved deres navn – aldrig deres enhed. Man måler f.eks. *tiden* og ikke »minutterne«, og man måler *temperaturen* og ikke »graderne«.

Øvelse 2.1

Hvilke af følgende sætninger er korrekte måder at udtrykke sig på?

- a) Jeg har målt graderne til 20.
- b) Jeg har målt temperaturen til 20°C .
- c) Jeg har målt temperaturen til 20 grader.
- d) Jeg har målt centimeterne til 39.
- e) Jeg har målt længden til 39 cm.

Både størrelser og enheder skrives med symboler. »Grader celsius« skrives f.eks. som $^{\circ}\text{C}$. For at man kan kende forskel på størrelser og enheder, er man blevet enige om det følgende:

¹Bemærk her at det er vigtigt at kunne kende forskel på store og små bogstaver: t og T er to forskellige ting.

Størrelsessymboler skrives altid med kursiv, mens enheder skrives med almindelig skrift.

På den måde kan man i en beregning skelne mellem » m «, som typisk er symbol for størrelsen masse, og enheden » m «, altså meter.

Når man skriver størrelsessymboler, vælger man tit samme bogstav som startbogstavet for den størrelse symbolet står for, f.eks. t for *tid* eller T for temperatur.² Af og til anvender man også græske bogstaver som størrelsessymboler. En oversigt over det græske alfabet og standardsymboler for størrelser kan ses i appendiks A.

²Ofte er standarden at vælge samme bogstav som første bogstav i størrelsens navn på engelsk, f.eks. F for kraft (force) og p for tryk (pressure).

SI-enheder

Størrelser skal som nævnt altid angives med enhed, men den samme størrelse kan angives med forskellige enheder. En tid på 2 minutter kan også angives som 120 sekunder. Idet det er svært at sammenligne størrelser der angives i forskellige enheder, har man lavet et system af enheder der alle passer sammen – det såkaldte *SI-system*.³ Dette system er bygget op omkring syv grundenheder som ses i nedenstående tabel.

³SI er en forkortelse for det franske *Système Internationale d'unités*, »det internationale system af enheder«.[4]

Størrelse	SI-enhed
Afstand/længde	m (meter)
Masse	kg (kilogram)
Tid	s (sekund)
Stofmængde	mol
Elektrisk strømstyrke	A (ampere)
Temperatur	K (kelvin)
Lysstyrke	cd (candela)

Der findes mange flere typer af fysiske størrelser end dem der er nævnt i tabellen, f.eks. areal og volumen (rumfang). Enhederne for disse størrelser kan alle dannes ved at sammensætte grundenheder. SI-enheden for areal er f.eks. kvadratmeter (m^2), og enheden for volumen er kubikmeter (m^3).

Nogle af de såkaldte *afløede* enheder har deres helt eget enhedssymbol. SI-enheden for energi er f.eks. joule (J). Denne enhed kan dog også skrives om vha. grundenhederne, der gælder nemlig

$$1 \text{ J} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} .$$

2-2 Densitet

Når man står med en genstand, kan man altså måle forskellige størrelser. Specielt er tre størrelser interessante hvis man vil sige noget om genstanden:

Masse Alle genstande eller ting omkring os har masse. Den har typisk størrelsessymbolet m , og SI-enheden er kilogram (kg). Massen af en genstand kan måles på en vægt.

Volumen En genstands volumen⁴ er et udtryk for hvor meget den fylder. SI-enheden for volumen er kubikmeter (m^3), men man bruger ofte

⁴Et andet ord for volumen er *rumfang*.

andre enheder, f.eks. liter (L) hvis der er tale om væsker. Ved faste stoffer angives volumen også nogle gange i cm^3 frem for m^3 da 1 m^3 er et ret stort volumen.

Densitet Forholdet mellem en genstands masse og volumen.

Når man beregner forholdet mellem masse og volumen, får man altså den såkaldte *densitet*, dvs. densiteten fortæller hvor meget stor massen er i forhold til volumen. Densiteten kan beregnes med følgende formel:

Densiteten af et stof

$$\rho = \frac{m}{V}$$

hvor m er stoffets masse, og V er dets volumen.

Størrelsessymbolet for densitet er ρ (det græske bogstav »rho«), og SI-enheden for densitet er kg/m^3 , men den angives ofte i g/mL for væsker eller i g/cm^3 for faste stoffer.⁵

Densiteten for en væske eller et fast stof viser altså hvor meget et bestemt volumen af stoffet vejer, dvs. hvis et stof har en høj densitet vil en lille mængde af stoffet veje meget, mens det er omvendt for et stof med lav densitet. Densiteten kan derfor bruges til at bestemme hvilket stof en genstand består af.

⁵1 mL og 1 cm^3 er det samme volumen, den ene bruges normalt når man taler om væsker og den anden når man taler om faste stoffer.

Eksempel 2.2

En metalklods har en masse på 96 g og et volumen på $12,2 \text{ cm}^3$. Densiteten af klodsen er så

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{96 \text{ g}}{12,2 \text{ cm}^3} = 7,9 \text{ g}/\text{cm}^3 .$$

Klodsen består derfor sandsynligvis af jern idet densiteten af jern er

$$\rho_{\text{jern}} = 7,874 \text{ g}/\text{cm}^3 .$$

Øvelse 2.3

1 mL og 1 cm^3 er det samme volumen.

- Omregn 1 mL til liter.
- Omregn 1 cm^3 til kubikmeter.
- Hvor mange liter er der på 1 m^3 ?

Øvelse 2.4

Hvis man slår densiteten af jern op i en tabel, finder man $\rho_{\text{jern}} = 7874 \text{ kg}/\text{m}^3$. Men i eksemplet ovenfor stod der $\rho_{\text{jern}} = 7,874 \text{ g}/\text{cm}^3$. Heldigvis er der tale om den samme størrelse.

- Argumentér for at $1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Øvelse 2.5

En terning af et gråt metal er 2,5 cm på hver led. Terningen vejer 42,2 g.

- Bestem terningens volumen.
- Bestem terningens densitet, og brug tabellen nedenfor til at give et bud på hvilket metal den består af.
- Bestem massen af 20 cm³ sølv.

Metal	Densitet / g/cm ³
Aluminium	2,6989
Jern	7,874
Sølv	10,50

2-3 Tabeller og grafer

Når man udfører eksperimenter, vil man ofte have en serie af måledata. Skal man præsentere disse, gøres det bedst i en tabel. Et eksempel på en måleserie kan ses i tabel 2.1. Disse data er fremkommet ved at man har puttet noget sprit i et 100 mL måleglas hvorefter man har vejet glasset. Herefter har man tilsat mere sprit og vejet igen, osv.

Det er ikke så vigtigt om tabellen skrives lodret eller vandret. Til gengæld er det vigtigt at enhederne angives i overskriften og ikke står nede i selve tabellen – det øger nemlig læseligheden af tabellen betydeligt, og det sikrer at alle målinger af samme størrelse angives med samme enhed. Overskrifter skriver man ved at angive størrelsen der måles efterfulgt af enheden der måles i. Man skriver enten enheden i parentes eller skriver en skråstreg mellem størrelsessymbol og enhed.⁶

Grafer

Når man har målinger som dem i tabel 2.1, kan man analysere dem på forskellige måder. Når man har målt sammenhørende værdier af to størrelser, er det nærliggende at indsætte dem som punkter i et koordinatsystem for at se hvordan de evt. afhænger af hinanden. Her kan man f.eks. tegne en (V, m) -graf, dvs. en graf med volumen på førsteaksen og massen på andenaksen.

På fig 2.2(a) kan man se (V, m) -graf. Det er vigtigt på sådan en graf at huske titler på akserne, sådan at man kan se hvad der er på grafen. Aksetitlerne skal være de samme som overskrifterne i tabellen.

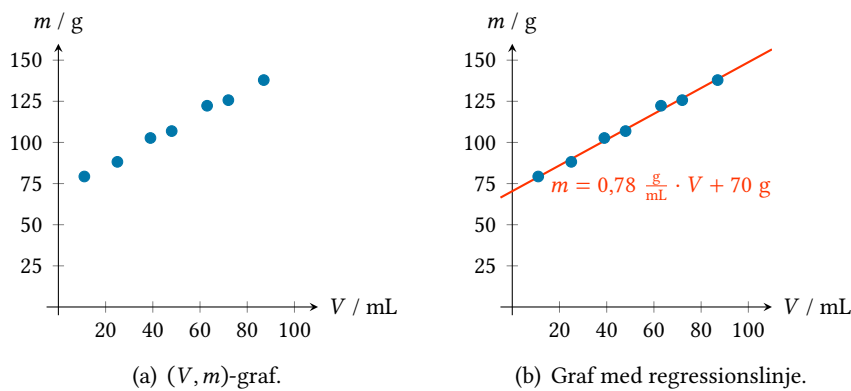
2-4 Tyngdekraft

I 1687 publicerede Isaac Newton (1642–1727) sit berømte værk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (naturfilosofiens matematiske principper) hvori han opstillede tre naturlove for kræfter, de såkaldte »Newtons love«. [20] De tre love beskriver hvordan kræfter påvirker en genstands bevægelse. I den samme bog opstillede han også sin tyngdelov der redegjorde for hvordan tyngdekraft virkede.

Tabel 2.1: Målinger af massen af forskellige volumener af sprit.

V / mL	m / g
11	79,3
25	88,2
39	102,7
48	106,9
63	122,3
72	125,7
87	137,9

⁶Skråstregen er egentlig en brøkstreg. Man dividerer så at sige enheden væk, sådan at det kun er de rene tal der står nede i selve tabellen.



Figur 2.2: Målingerne fra tabel 2.1 indsat i et koordinatsystem. På grafen til højre er der indtegnet en regressionslinje.

Newtons *Principia*... var et banebrydende arbejde og en hjørnesten i tilblivelsen af moderne fysik.[20] Pga. hans arbejde med de 3 love og hans formulering af en generel teori for tyngdekraft, giver det god mening at man har valgt at opkalde SI-enheden for kraft efter ham. En krafts størrelse måles altså i *newton* (N).

Sammenhængen mellem denne enhed og grundenhederne er den følgende:

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} .$$

En kraft på 1 N er ikke en voldsomt stor kraft, den svarer nogenlunde til den kraft ens hånd påvirkes af pga. tyngdekraften når man holder en citron i hånden.

Man kan måle en krafts størrelse med et såkaldt *dynamometer*⁷ (også somme tider kaldet et »newtonmeter«). Den simpleste form for dynamometer er et instrument der består af en fjeder og en skala. Fjederen er forsynet med en krog så man kan hægte den på en genstand, og alt efter hvor meget fjederen bliver trukket ud, kan man aflæse på skalaen hvor stor en kraft man trækker i fjederen med, se figur 2.4.

Newton beskrev som sagt tyngdekraften. Dette gjorde han med sin tyngdelov der viste at tyngdekraften er et resultat af at alle ting med masse trækker i hinanden. Tyngdekraften mellem to genstande bliver større jo tættere de to genstande er på hinanden, og jo større masse de har.

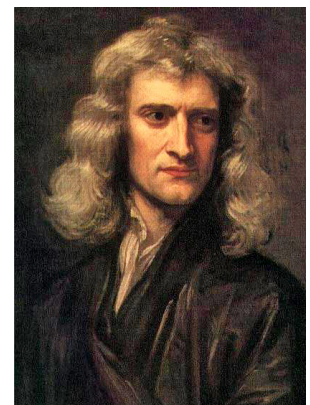
Når man på står på jordoverfladen, er den tyngdekraft man mærker, resultatet af tiltrækningen fra Jorden. Dvs. den kraft der holder os fast på Jordens overflade, er et træk fra hele planeten. Og fordi Jorden er stort set rund, og fordi afstanden til Jordens centrum er meget stor, er denne kraft nogenlunde lige stor, uanset hvor på jordoverfladen, man befinder sig. Tyngdekraften på en genstand kan derfor beregnes med en simpel formel:

Tyngdekraft ved jordoverfladen

En genstand med massen m der befinder sig ved jordoverfladen, er påvirket af en tyngdekraft F_t med størrelsen

$$F_t = m \cdot g ,$$

hvor $g = 9,82 \text{ N/kg}$ er tyngdeaccelerationen.



Figur 2.3: Sir Isaac Newton.[35]

⁷Ordet kommer af græsk *dynamis* »kraft« og *metron* »mål«.



Figur 2.4: Et dynamometer der kan måle kræfter op til 5 N.

Eksempel 2.6

En tung bog på 1,65 kg ligger på et bord. Bogen bliver påvirket af en tyngdekraft på

$$F_t = m \cdot g = 1,65 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ kg/N} = 16,2 \text{ N} .$$

Øvelse 2.7

- a) Bestem tyngdekraften på et æble med en masse på 130 g.

Øvelse 2.8

Tyngdekraften på en ramme sodavand med 24 dåser er 81,8 N. I beregningerne kan du se bort fra massen af pap og plastic.

- a) Hvad er den samlede masse af de 24 sodavand?
b) Hvad er massen af 1 dåse sodavand?

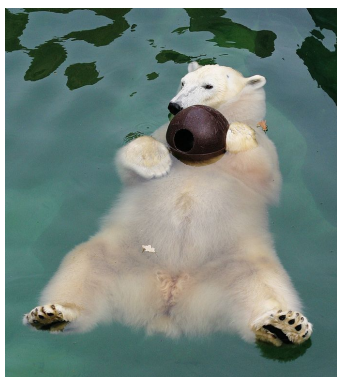
Øvelse 2.9

Tyngdekraften på en flaske med 250 mL solsikkeolie er 3,4 N.

- a) Hvad er massen af flasken med solsikkeolie?

Flasken uden olie har en masse på 110 g.

- b) Bestem oliens densitet.



Figur 2.5: En flydende isbjørn.[27]

2-5 Opdrift

Figur 2.5 viser et billede af en isbjørn der flyder i vandoverfladen. Idet isbjørnen er i hvile, må den være påvirket af andre kræfter end bare tyngdekraften. Det viser sig at enhver genstand der befinder sig i en væske eller en gas, er påvirket af en opdrift fra væsken/gassen. Grunden til at isbjørnen flyder er altså at den er påvirket af en opdrift fra vandet der er lige så stor som tyngdekraften.

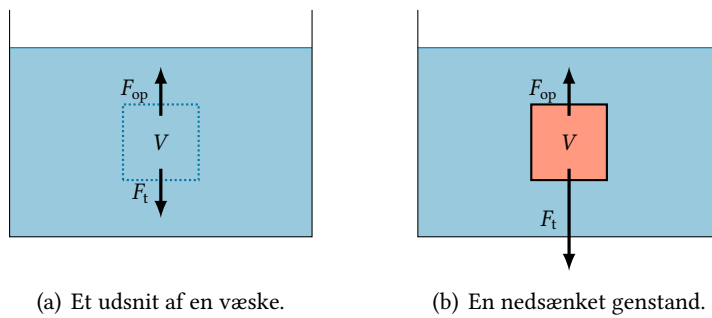
Figur 2.6(a) viser et kar med en væske. Et lille udsnit af væsken (vist med stiplede linjer på figuren) med volumen V vil være påvirket af tyngdekraften som trækker nedad. Men væsken er i hvile, dvs. det lille udsnit af væsken må derfor ud over tyngdekraften være påvirket af en anden kraft der er lige så stor som og modsat rettet tyngdekraften. Denne kraft kaldes *opdriften*.

Opdriften stammer fra trykket af den omgivende væske. Erstatte man nu det lille udsnit af væsken med en genstand med samme volumen, må denne genstand derfor påvirkes af samme opdrift. Man kan vise at opdriften på en genstand kan beregnes vha. Arkimedes' lov:

Opdrift (Arkimedes' lov)

$$F_{\text{op}} = \rho \cdot V \cdot g ,$$

hvor ρ er væskens densitet, V er genstandens volumen, og g er tyngdeaccelerationen.



Figur 2.6: Opdriften på et volumen af en væske og på en genstand med samme volumen der er nedsænket i væsken, må være den samme. Tyngdekraften er dog ikke nødvendigvis den samme.

Den samme formel gælder for opdriften fra en gas, her skal den anvendte densitet være gassens densitet.

Eksempel 2.10

Atmosfærisk luft har en densitet på $\rho = 1,2928 \text{ kg/m}^3$, og et gennemsnitligt menneske har et volumen på $V = 65,22 \text{ L}$. [14] Opdriften på et gennemsnitligt menneske fra luften er derfor

$$\begin{aligned} F_{\text{op}} &= \rho \cdot V \cdot g \\ &= 1,2928 \text{ kg/m}^3 \cdot 65,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 9,82 \text{ N/kg} = 0,828 \text{ N} . \end{aligned}$$

Hvis et menneske derimod er helt nedsænket i vand, er opdriften væsentligt større idet densiteten af vand er $\rho = 1,00 \text{ kg/L}$. Et menneske i vand vil altså være påvirket af en opdrift på

$$\begin{aligned} F_{\text{op}} &= \rho \cdot V \cdot g \\ &= 1,00 \text{ kg/L} \cdot 65,22 \text{ L} \cdot 9,82 \text{ N/kg} = 640 \text{ N} . \end{aligned}$$

Som man kan se er opdriften fra luft altså så lille at det ikke kan mærkes, mens den forholdsvist store opdrift i vand er det der muliggør at mennesker kan holde sig flydende i vand.

Øvelse 2.11

Ferskvand har en densitet på $1,00 \text{ kg/L}$, mens saltvand har en densitet på $1,03 \text{ kg/L}$.

- a) Er det nemmest for en svømmer at holde sig flydende i ferskvand eller i saltvand?

Øvelse 2.12

En varmluftsballon har et samlet volumen på 2800 m^3 , og den samlede vægt af ballonen er $3,4 \text{ ton}$. Luften udenom ballonen har en densitet på $\rho_{\text{luft}} = 1,2928 \text{ kg/m}^3$.

- Hvor stor er opdriften på ballonen?
- Hvor stor er tyngdekraften på ballonen?
- Hvilken vej bevæger ballonen sig?
- Bliver ballonen ved med at bevæge sig i denne retning?

Atomer

Ordet *atom* stammer fra det græske *átomos* som betyder »udelelig«. De allerførste teorier om atomer anså atomerne for at være den mindste udelelige enhed af alt stof. I dag ved man at atomer faktisk ikke er udelelige, men selv består af mindre bestanddele, nemlig protoner, neutroner og elektroner – og at protonerne og neutronerne består af endnu mindre partikler kaldet kvarker.

3-1 Historien om atomet

Den græske filosof Leukippos grundlagde i ca. 450 f.v.t. atomteorien. Der er dog intet af Leukippos' arbejde der har overlevet til vor tid,[16] og det er således først og fremmest hans elev Demokrit som udviklede atomteorien i mere detalje, der i dag er kendt som ophavsmanden til atomteorien.[5]

Ifølge Demokrits atomteori består alt stof af udelelige partikler der er så små at de er usynlige. Disse atomer adskiller sig i form og position; nogle af dem har kroge og pigge på overfladen der gør at de kan hænge sammen. Han forestillede sig at alt stofs egenskaber kan forklares ud fra kollisioner og kombinationer af disse atomer.[3] Det var en rent filosofisk teori uden empirisk evidens – der var altså på ingen måde tale om en videnskabelig teori.[16]

Den første videnskabelige teori om atomer kom fra den engelske fysiker og kemiker John Dalton i begyndelsen af det 19. århundrede. Ud fra sit arbejde med partialtryk af gasser fandt Dalton ud af at bestemte gasser altid optrådte i bestemte vægtforhold. Herved kom han frem til at alle stoffer måtte bestå af nogle bestemte grundelementer, dvs. atomer.[11]

I 1897 opdagede den engelske fysiker J.J. Thomson at atomer indeholdt elektroner,[23] og han opstillede derfor i 1903 en model af atomet som en positivt ladet kugle hvori elektronerne bevægede sig rundt i koncentriske skaller.[5] Det viste sig dog ret hurtigt at denne model ikke var sand.

I 1909 arbejdede den newzealandske fysiker Ernest Rutherford i Manchester. Han foreslog den fysikstuderende Ernest Marsden at han skulle lave forsøg med α -partikler der blev sendt igennem et tyndt metalfolie. Forventningen var at α -partiklerne der er positivt ladede, ville afbøjes af den positive ladning i atomerne i metalfoliet, og man kunne ud fra denne afbøjning få bedre styr på atomets struktur.

Det overraskende resultat af forsøget var at nogle af α -partiklerne blev afbøjet så meget at de blev skudt direkte tilbage.[16] Rutherford konkluderede at de positive α -partikler måtte være blevet afbøjet af en tæt positiv ladning i metalfoliet. Det betød at der i atomet måtte befinde sig en meget lille og meget tæt positiv kerne, 100 000 gange så lille som atomet selv. I 1911

opstillede Rutherford derfor en atommodel hvor elektronerne bevægede sig rundt om den positive atomkerne som planeter i et solsystem.[5]

Men der var et problem med Rutherfords model. Hvis elektronerne var i en bane omkring atomkernen ville de hele tiden skifte retning, dvs. de ville have en acceleration. Elektroner er negativt ladede partikler, og man vidste fra Maxwells teori om elektromagnetisme at ladede partikler der accelereres, vil udsende elektromagnetisk stråling. Elektronerne ville således miste deres energi og deres baner omkring atomkernen ville så blive mindre og mindre, indtil atomerne til sidst kollapsede.

Idet atomer er stabile, måtte der en anden forklaring til. Den danske fysiker Niels Bohr løste problemet med en ad hoc løsning da han i 1913 opstillede sin atommodel[16] der byggede på følgende postulater:

Postulat 1 Atomer kan kun eksistere i ganske bestemte stationære tilstande med hver deres bestemte energi.

Postulat 2 Et atom kan springe fra tilstand m til tilstand n ved at udsende en foton (en lyspartikel) med energien $E_n - E_m$.

Disse to postulater løste problemet med at elektronbanen skulle kunne blive gradvist mindre idet elektronerne så kun kunne være i bestemte baner og ikke derimellem.

De to postulater virker grebet ud af den blå luft, men faktisk byggede Bohr sine ideer på tidligere resultater om det lys der udsendes fra atomer. Man vidste at atomer udsendte lys med ganske bestemte bølgelængder, de såkaldte *spektrallinjer*. Den østrigske fysiker Johann Balmer havde i 1885 vist at bølgelængderne af nogle af hydrogens spektrallinjer kunne beskrives ved formlen[2]

$$\lambda = 3645 \cdot 10^{-7} \text{ mm} \cdot \left(\frac{m^2}{m^2 - n^2} \right),$$

hvor $n = 2$, og m er et helt tal større end 2.

Flere fysikere, bl.a. svenskeren Johannes Rydberg, arbejdede på dette tidspunkt med at forklare hydrogens og andre atomers spektrallinjer, og man fandt ud af at Balmers formel kan generaliseres.[5] Formlen ser i sin moderne form således ud:

Bølgelængden af hydrogens spektrallinjer

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

hvor $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ og $m > n$.

Konstanten R kaldes *Rydbergs konstant*.

Ved at udnytte dette resultat kunne Bohr vise at hydrogens spektrallinjer kunne forklares hvis man antog at hydrogens elektron kun kunne befinde sig i faste baner, og at energien i bane nr. n var givet ved

$$E_n = -\frac{h \cdot c \cdot R}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

hvor $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J · s er Plancks konstant, $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s er lysets fart, og $R = 1,097 \cdot 10^7$ m⁻¹ er Rydbergs konstant.

Bohrs model var dog ikke perfekt. Faktisk kunne den kun forklare hydrogenatomet helt præcist. Men modellen blev alligevel grundlaget for meget af det videre arbejde med atomets struktur.

Bohr havde udledt sin formel for energien i de enkelte elektronbaner ved at antage at elektronen dannede en form for stående bølge om atomkernen. Den franske fysiker Louis de Broglie fik derfor den idé at ligesom lys kunne være både bølger og partikler, så kunne partikler som elektroner også forstås som bølger. Ud fra de Broglies ideer kunne den østrigske fysiker Erwin Schrödinger i 1926[16] opstille en ligning for partiklers bevægelse. Schrödingers ligning omhandler ikke partiklerne bevægelse direkte, men behandler i stedet den såkaldte *bølgefunktion*. Fortolkningen af bølgefunktionen kom senere da den tyske fysiker Max Born fandt ud af bølgefunktionen angiver *sandsynligheden* for at finde en partikel et bestemt sted.

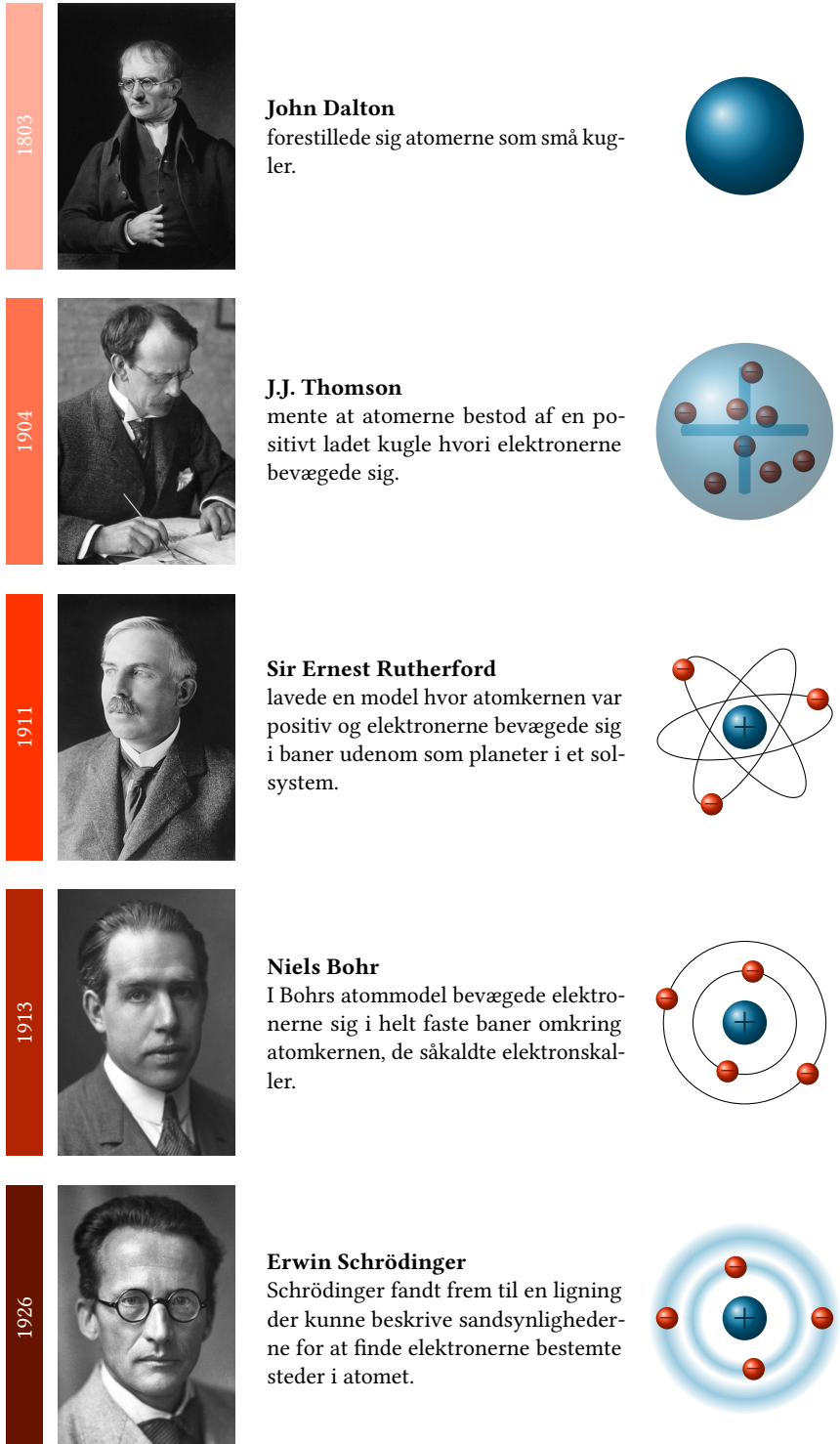
Figur 3.1 viser en oversigt over hvordan fysikkens forståelse af atomet har udviklet sig. Bemærk at strukturen af atomkernen ikke er taget med i beskrivelsen. Det var først i 1919 at Ernest Rutherford identificerede protonen som en del af atomkernen.[6] Han formodede at der også måtte være en neutral partikel i kernen, en formodning der viste sig at være sand da den engelske fysiker James Chadwick opdagede neutronen i 1932.[16]

Man vidste nu at atomet bestod af en kerne af protoner og neutroner samt elektroner der var bundet til atomkernen. Protonerne har positiv elektrisk ladning, og elektronerne har en (lige så stor) negativ ladning, dvs. det er elektriske kræfter der holder elektronerne bundet til atomkernen. De positive protoner i atomkernen frastøder hinanden, men grunden til at atomkernen er stabil er at protoner (og neutroner) tiltrækker hinanden med den såkaldte *stærke kernekraft*.

Under arbejdet med at forstå denne kraft fandt man frem til at protonerne og neutronerne i virkeligheden ikke var fundamentale partikler, men selv bestod af andre partikler. I 1964 beskrev de amerikanske fysikere Murray Gell-Mann og George Zweig uafhængigt af hinanden disse partikler der endte med at blive kaldt *kvarker*. [16] Det viste sig at den elektriske ladning af kvarkerne var brøkdele af elektronens ladning, således at en proton består af to kvarker med en positiv ladning på $\frac{2}{3}$ af elektronens ladning og én kvark med en negativ ladning på $\frac{1}{3}$ af elektronens ladning.

I den atommodel man har i dag, består atomerne således af en positivt ladet kerne med elektroner udenom, og kernen består af protoner der er positivt ladede, og neutroner der ikke har en ladning. Protonerne og neutronerne består så hver især af tre såkaldte kvarker.

Figur 3.1: En hurtig oversigt over hvordan billedet af atomet har udviklet sig over tid.
Billedkilder: [41], [33], [40], [38], [30]



3-2 Eksponentiel notation

Atomer er utroligt små, dvs. de størrelser man bruger når man regner på atomer er angivet med nogle utroligt små talværdier. Kigger man på formlerne i afsnittet ovenfor, vil man se at de typisk er angivet som en talværdi ganget med en 10^7 -potens, f.eks. Rydbergs konstant som er

$$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}.$$

I fysik har man forholdsvis ofte brug for at skrive meget store eller meget små tal, og denne måde at skrive på gør det muligt uden at skulle skrive for mange nuller. Et stort tal som f.eks. 4 567 000 000 000 000 000 er meget besværligt at have med at gøre idet man let kommer til at skrive et 0 for meget eller for lidt når man skal skrive tallet (desuden optager så lange tal en frygtelig masse plads) – det samme gælder for små tal som 0,000 000 000 000 032 4.

Disse tal skrives derfor nemmest ved hjælp af såkaldt *eksponentiel notation*. De to tal ovenfor skrives som

$$4,567 \cdot 10^{18} \quad \underbrace{(4\ 567\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000)}_{18 \text{ pladser}}$$

$$3,24 \cdot 10^{-14} \quad \underbrace{(0,000\ 000\ 000\ 000\ 032\ 4)}_{14 \text{ pladser}}$$

Ved denne måde at skrive tallene på viser eksponenten hvor kommaet i virkeligheden skal stå. F.eks. fortæller tallet 18 at hvis man skal skrive tallet $4,567 \cdot 10^{18}$ uden brug af eksponentiel notation, skal kommaet placeres 18 pladser længere mod højre. På samme måde fortæller tallet -14 at $3,24 \cdot 10^{-14}$ skal skrives med kommaet 14 pladser længere mod venstre hvis tallet skal skrives uden eksponentiel notation. Altså:

Eksponentiel notation

- Tallet $b \cdot 10^a$ er b med kommaet a pladser længere mod højre.
- Tallet $b \cdot 10^{-a}$ er b med kommaet a pladser længere mod venstre.

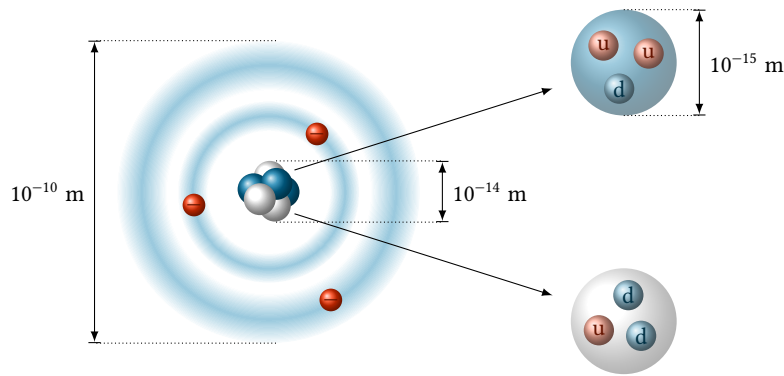
Øvelse 3.1

Skriv tallene vha. eksponentiel notation.

- | | |
|------------------------|--------------------|
| a) 457 000 000 000 000 | b) 6 300 000 |
| c) 0,000 043 5 | d) 0,000 000 069 7 |

3-3 Præfikser

I fysik og andre naturvidenskabelige fag bruger man ofte eksponentiel notation til at skrive meget små eller store tal. Men nogle gange vil man i stedet vælge at bruge et *præfiks* på enheden, dvs. et bogstav der sættes foran enheden og som angiver en skalering af den – et eksempel kunne være 2 mm som i virkeligheden bare er en kortere måde at skrive $2 \cdot 10^{-3}$ m på.



Figur 3.3: Atomets opbygning. Atomet består af en kerne af positivt ladede protoner og neutrale neutroner. Uden om kernen befinder elektronerne sig. Protonerne og neutronerne består hver af tre kvarker; protonerne består af 2 up-kvarker og 1 down-kvark, mens neutronerne består af 1 up-kvark og 2 down-kvarker. Størrelsesangivelserne på figuren er tilnærmede værdier.

positiv og negativ elektrisk ladning der binder elektronerne til atomkernen. Protonens og elektronens ladning har altid den samme størrelse, denne størrelse kalder man *elementarladningen*, dens størrelse er

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} .$$

Protonens ladning er e , mens elektronens ladning er $-e$.

Elementarladningen har fået sit navn fordi det er den mindste elektriske ladning der kan eksistere frit. Dog har kvarkerne mindre ladning end elementarladningen: up-kvarker har ladningen $\frac{2}{3}e$, og down-kvarker har ladningen $-\frac{1}{3}e$. Men som nævnt ovenfor kan kvarker ikke eksistere frit, dvs. man kan ikke isolere en elektrisk ladning mindre end e .

Da elektronerne og protonerne har elektriske ladninger af samme størrelse, men med modsat fortegn, er et atom neutralt hvis det indeholder lige mange elektroner og protoner.

På figur 3.3 er der angivet nogle størrelser for diameteren af et atom, atomkernen og nukleonerne. Disse tal er tilnærmede værdier idet både atomets og kernens diameter afhænger af hvor mange nukleoner der er i kernen og hvor mange elektroner der er udenom.

Øvelse 3.5

Figur 3.3 viser nogle af størrelsesforholdene i et atom. Forestil dig at man vil bygge en model af et atom som er 100 m i diameter. Dvs. den afstand der på figuren er 10^{-10} m, skal skaleres op til 100 m.

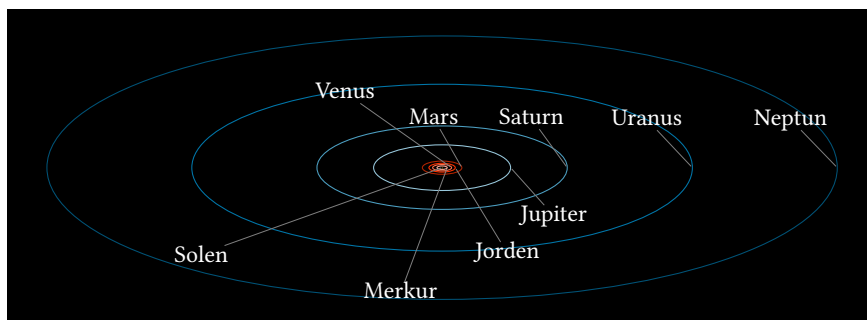
- Hvor stor bliver atomkernens diameter i denne model?
- Hvor stor bliver diameteren af en proton i denne model?

Solsystemet

Vi bor på planeten Jorden som er en af de 8 planeter i Solsystemet. Centrum af dette solsystem er stjernen Solen, og det er den alle planeterne kredser om. Vores solsystem er blot ét blandt mange i Universet. Det ligger i en galakse ved navn Mælkevejen som også blot er én blandt utallige galakser.

4-1 Solsystemets opbygning

I Solsystemet finder man som nævnt Solen og 8 planeter der kredser om den, se figur 4.1. De inderste 4 planeter i Solsystemet (Merkur, Venus, Jorden og Mars) er klippeplaneter, dvs. de har en fast overflade. De 4 yderste (Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun) er derimod alle gasplaneter; de består således mest af hydrogen og helium og har ikke en fast overflade. Det er ikke en tilfældighed at klippeplaneterne er tættest på Solen, det skyldes måden Solsystemet er dannet på, se afsnit 4-2 nedenfor.



Figur 4.1: Planeterne i Solsystemet og deres baner omkring Solen.

Tabel 4.2 viser nogle data om Solsystemets planeter, deres middelfastande fra Solen, deres omløbstider, deres ækvatorradier samt deres masser i forhold til Jordens. Afstandene fra planeterne til Solen er meget store, og de bliver derfor målt i AU, såkaldte *astronomiske enheder*. En astronomisk enhed er defineret til at være lig Jordens middelfastand til Solen:

$$1 \text{ AU} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} .$$

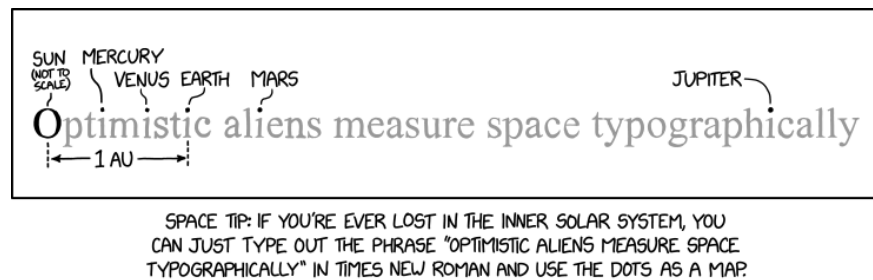
Jordens afstand til Solen er således 1 AU, som altså er det samme som 149,6 millioner km.

Som man kan se af figuren og tabellen ovenfor, er afstandene meget store og ikke specielt regelmæssige. Den relative afstand fra Solen til de første fem planeter kan dog bestemmes ud fra sætningen på figur 4.3. Hvis man så husker at afstanden til Jorden er 1 AU, kan man hurtigt finde afstanden til de andre fire planeter.

Tabel 4.2: Planeterne i Solsystemet, deres størrelser, omløbstider, afstande til Solen og masser i forhold til Jordens.

	Afstand / AU	Omløbstid / år	radius / km	M/M_{Jord}
Solen	–	–	669 000	$3,33 \cdot 10^5$
Merkur	0,387	0,241	2439	0,055
Venus	0,723	0,615	6052	0,815
Jorden	1,000	1,000	6378	1,000
Mars	1,542	1,881	3394	0,107
Jupiter	5,203	11,862	71 398	317,8
Saturn	9,539	29,458	59 650	95,2
Uranus	19,18	84,014	25 600	14,5
Neptun	30,06	164,793	24 340	17,2

Figur 4.3: En huskeregel for de relative afstande i det indre solsystem. Fra xkcd.com.[15]



Øvelse 4.1

Forestil dig at du skal lave en skalamodel af Solsystemet hvor afstanden mellem Solen og Neptun er 100 m.

- Hvad bliver afstandene fra Solen til de andre planeter i denne model?
- Hvad bliver diameteren af Solen og planeterne i denne model, hvis de skal være i samme skala?

Ud over de objekter der er listet i tabellen ovenfor, er der også et asteroidebælte mellem Mars og Jupiter, samt et endnu større bælte af asteroider, kaldet Kuiper-bæltet, længere ude end Neptun (i en afstand af mellem 30 AU og 50 AU fra Solen). Asteroider er store klippestykker af varierende størrelse, fra få kilometer op til dværgplaneter som Ceres der er næsten 1000 km i diameter.¹

Det er i Kuiper-bæltet man finder Pluto der tidligere havde status som Solsystemets 9. planet, men nu er blevet klassificeret som dværgplanet – idet der findes mange objekter i Kuiper-bæltet af sammenlignelig størrelse med Pluto.

4-2 Solsystemets dannelse

Solsystemet blev dannet for 4,57 milliarder år siden af en stor gassky der bestod af hydrogen, helium og små mængder af andre elementer.[12] Pga. små uregelmæssigheder i densiteten af gassen begyndte skyen at trække sig sammen under sin egen tyngdekraft. Denne sammentrækning fik skyen til at rotere, og tætheden i midten af skyen blev meget høj.

I løbet af denne proces blev der på et tidspunkt så varmt midten af gasskyen, og trykket blev så højt at hydrogenatomer kunne fusionere til

¹Ceres er en dværgplanet der befinder sig i asteroidebæltet mellem Mars og Jupiter. Den blev opdaget den 1. januar 1801 af den italienske astronom og katolske præst Giuseppe Piazzi.[9]

helium – der blev altså dannet en stjerne i midten af gasskyen. Dette var begyndelsen på vores solsystem.

Denne stjerne var omgivet af gas støv fra resterne af gasskyen, og det var dette gas og støv der over nogle millioner år samlede sig til planeter, asteroider og kometer (se figur 4.4). Pga. rotationen af gasskyen vil de tunge elementer fortrinsvis befinde sig tæt på Solen, mens de lette elementer bevæger sig mod Solsystemets yderkant. Dette er forklaringen på at de indre planeter er klippeplaneter, mens de ydre er gasplaneter.

4-3 Keplers love

Den tyske astronom og matematiker Johannes Kepler opstillede mellem 1609 og 1619 tre love for planeters bevægelse. Lovene var han kommet frem til ved at analysere den danske astronom Tycho Brahes meget nøjagtige astronomiske observationer. Der var tale om rent empiriske love uden nogen bagvedliggende fysisk teori. Det viste sig senere at de tre love kunne udledes direkte af Newtons tyngdelov, men denne var ikke kendt på Keplers tid.

Keplers love for planetbevægelse

1. Planeterne bevæger sig i ellipser (se figur 4.5) med Solen i det ene brændpunkt.
2. En linje fra planeten til Solen overstryger lige store arealer i lige store tidsrum.
3. For planetens omløbstid T og den halve storakse a i den elliptiske bane gælder at forholdet T^2/a^3 er konstant.

Keplers 2. lov kan umiddelbart virke lidt kringlet formuleret, men figur 4.6 giver en illustration heraf. Figuren illustrerer at en planets fart i dens bane ikke er konstant, men derimod sådan at de to markerede arealer på figuren er lige store når planeten har været lige lang tid om at overstryge dem. Dette betyder så at planeten vil bevæge sig hurtigere når den er tæt på Solen, end når den er langt fra Solen.

Keplers 3. lov omhandler forholdet mellem ellipsens halve storakse og omløbstiden. Det viser sig at den halve storakse i en ellipse er det samme som middelfstanden til brændpunkterne, dvs. man kan lige så vel formulere loven ud fra omløbstiden og middelfstanden.

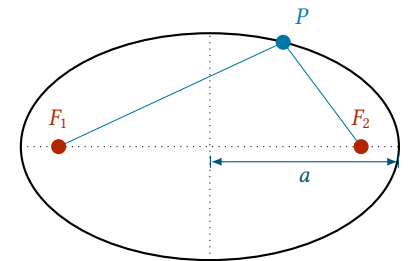
Konstanten i Keplers 3. lov afhænger i virkeligheden af Solens masse, dvs. der er kun tale om en konstant så længe man befinder sig i vores solsystem. Planeter i andre solsystemer opfylder stadig Keplers love, men dog med en anden konstant i den 3. lov.

Eksempel 4.2

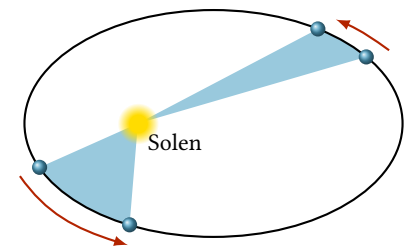
Konstanten i Keplers 3. lov kan beregnes ud fra oplysningerne i tabel 4.2. For Jorden er middelfstanden til Solen 1 AU, og omløbs-



Figur 4.4: En kunstnerisk gengivelse af et tidligt solsystem hvor der endnu ikke er dannet planeter. Den unge stjerne er her omgivet af en roterende sky af gas og støv.[37]



Figur 4.5: En ellipse er den figur der fremkommer ved at tegne alle de punkter P hvor den samlede afstand til de to brændpunkter F_1 og F_2 er konstant. Afstanden a kaldes den halve storakse.



Figur 4.6: Keplers 2. lov. De to blå arealer er lige store når planeten er lige lang tid om at have bevæget sig de to stykker af dens bane.

tiden er 1 år, dvs. konstanten er

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{(1 \text{ år})^2}{(1 \text{ AU})^3} = 1 \frac{\text{år}^2}{\text{AU}^3}.$$

Måler man i stedet afstanden i kilometer, får man konstanten til at være

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{(1 \text{ år})^2}{(149,6 \cdot 10^6 \text{ km})^3} = 2,997 \cdot 10^{-25} \frac{\text{år}^2}{\text{km}^3}.$$

Øvelse 4.3

Undersøg om det passer at forholdet T^2/a^3 er konstant for planeterne i tabel 4.2.

Øvelse 4.4

Halleys komet har en meget langstrakt elliptisk bane omkring Solen. Kometen kan ses på himlen hvert 76. år (dvs. dens omløbstid er 76 år).

- Bestem vha. Keplers 3. lov middelfstanden mellem Solen og Halleys komet.

Jorden

Jorden er den bedst beskrevne planet i Solsystemet, hvilket naturligvis skyldes at det er den planet vi bor på.

5-1 Længde- og breddegrader

For at man kan bestemme positioner på jordoverfladen, har man brug for et koordinatsystem. Det koordinatsystem man bruger, er de såkaldte længde- og breddegrader (se figur 5.1).

Breddegraderne angiver hvor man befinder sig i nordlig eller sydlig retning. De måles ud fra Ækvator som befinder sig midtvejs mellem Nord- og Sydpolen. Man måler breddegraden ved at kigge på vinklen fra Ækvator i nordlig eller sydlig retning; 55°N betyder således at man befinder sig på en position 55° nord for Ækvator.

Længdegraderne måler position i vestlig eller østlig retning. Ækvator er det naturlige valg som nulpunkt for breddegraderne, idet Ækvator så at sige er Jordens midte i forhold til dens rotation om sin egen akse, men der er ikke på samme måde et naturligt valg for 0° når man kigger på længdegraderne. Af historiske årsager har man valgt at lægge den såkaldte *nulmeridian* sådan at den går igennem Greenwich Observatoriet i London. Længdegraderne angiver altså vinklen til denne linje; således angiver 10°Ø at man befinder sig 10° øst for nulmeridianen.

Øvelse 5.1

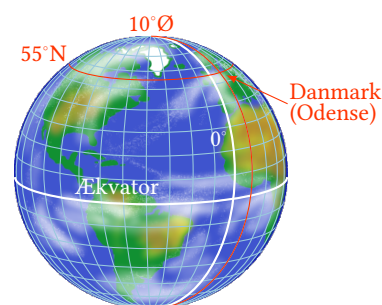
Som man kan se på figur 5.1 dækker breddegraderne 180° fra Nordpolen til Sydpolen. Jordens radius er 6378 km.

- a) Hvor stor er afstanden mellem to breddegrader?

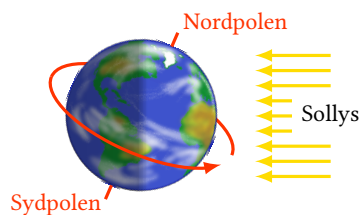
Som man kan se af opgaven ovenfor, er der altid samme afstand mellem to breddegrader. Det samme er ikke tilfældet med længdegrader, idet den cirkel længdegraderne måles ud fra, bliver mindre når man nærmer sig polerne. Dvs. afstanden mellem f.eks. 10°Ø og 20°Ø afhænger af breddegraden – den er længst ved Ækvator og bliver mindre og mindre når man bevæger sig nordpå eller sydpå.

5-2 Døgn

Jorden roterer som bekendt om sig selv. Rotation foregår om en akse gennem Nord- og Sydpolen, og én omdrejning varer 24 timer; denne tid kalder vi et døgn (se figur 5.2). Idet Jorden roterer, vil forskellige steder på Jorden



Figur 5.1: Længde- og breddegrader. Odense, hvor disse noter er skrevet, har koordinaterne $55^\circ\text{N } 10^\circ\text{Ø}$.



Figur 5.2: Jordens rotation om sin akse er årsagen til nat og dag.

Figur 5.3: Timelapse-billede af nattehimmelen.[34] På <https://youtu.be/tp6UkqlwVfk?t=7s> kan man se en video af fænomenet. Videoen er lavet ved at tage 650 billeder med omkring 23 sekunders mellemrum som herefter er sat sammen til en video.

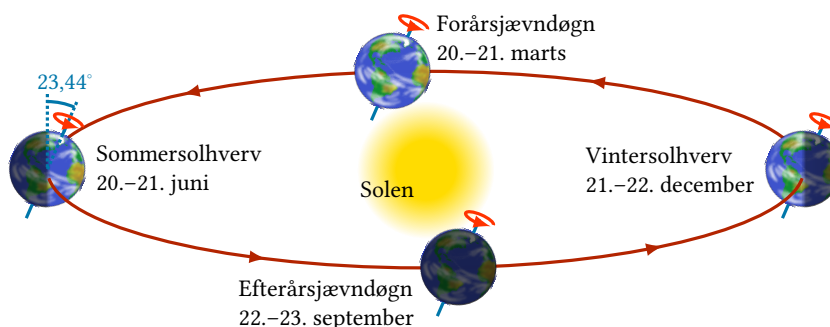


5-3 Årstider

Samtidig med at Jorden roterer om sin egen akse, bevæger den sig i en bane omkring Solen. Det tager 1 år ($365,2422$ døgn¹) for Jorden at bevæge sig én gang rundt om Solen. Banen som Jorden bevæger sig rundt om Solen i, ligger i et plan der kaldes baneplanet eller *ekliptika*. Hvis man forestiller sig at man laver en model af Jordens bevægelse omkring Solen hvor man lader en bold trille i en bane på gulvet omkring en lampe, så svarer gulvet til baneplanet.

¹Et år er ikke præcis 365 døgn, men $365,2422$ - det er derfor vi har skudår hvert fjerde år (og springer skudåret over når årstallet kan deles med 100).

Figur 5.4: Jordens bevægelse rundt om Solen. På <https://fabulastudios.dk/dtu/aarstiderne/> findes en interaktiv animation af denne bevægelse.

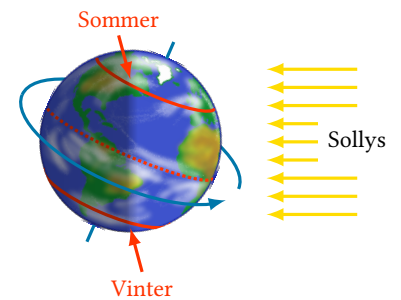


Jordens rotationsakse omkring sig selv står ikke vinkelret på baneplanet, men hælder med $23,44^\circ$. Dette gør at nogle tider på året vender Jordens

nordlige halvkugle mod Solen, og andre gange vender den væk fra Solen, som det kan ses på figur 5.4. Når den nordlige halvkugle vender mod Solen, bliver dagene her i Danmark længere, omvendt bliver de kortere når den nordlige halvkugle peger væk fra Solen.

Om sommeren har vi altså længere dage, og Solen kommer også højere op på himlen. Derfor er der varmere om sommeren end om vinteren. Dette ses på figur 5.5 hvor banerne for et punkt på den nordlige og et punkt på den sydlige halvkugle er angivet som cirkler på jordkloden.

Som man kan se, vil punktet på den nordlige halvkugle have sollys i mere end halvdelen af døgnets timer, mens det er omvendt for punktet på den sydlige halvkugle. Dette forklarer hvorfor det er vinter på den sydlige halvkugle når det er sommer i Danmark. Heraf kan man også se at når man befinder sig på ækvator, er dag og nat altid lige lange.



Figur 5.5: Når den nordlige halvkugle peger ind mod Solen, er det sommer på den nordlige halvkugle og vinter på den sydlige.

Øvelse 5.2

Gå ind på siden <https://www.earthspacelab.com/app/seasons/>. Brug animationen til at finde svar på de følgende spørgsmål:

- Hvorfor er dagene kortere om vinteren end om sommeren?
- Hvorfor kommer Solen højere op på himlen om sommeren end om vinteren?
- Hvorfor kommer Solen på intet tidspunkt til at stå direkte over hovedet på os på vores breddegrader?
- Hvor tæt skal man være på ækvator, for at Solen på et tidspunkt på året kan stå direkte over hovedet på en?
- Hvor langt skal man være fra ækvator, for at der er tidspunkter på året hvor Solen ikke går ned?

Øvelse 5.3

Hvordan ville Jordens årstider se ud hvis Jordens akse stod vinkelret på ekliptika?

Hvordan ville det se ud hvis akse var parallel med ekliptika?

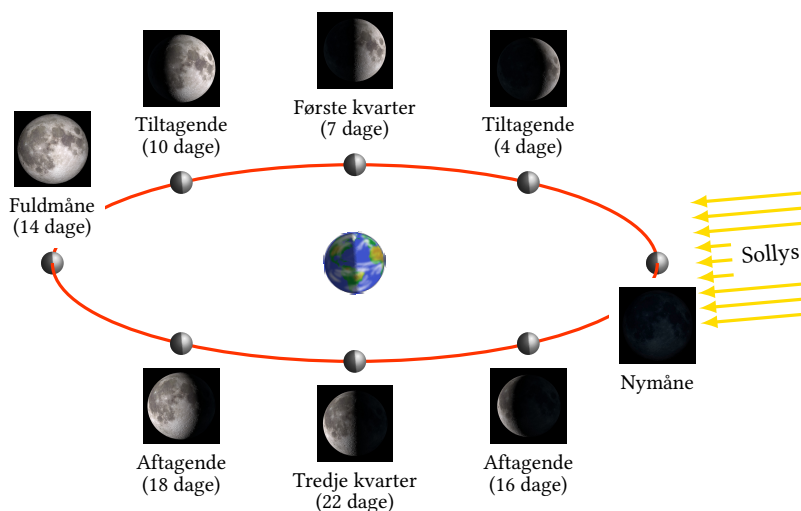
5-4 Månen

Det himmellegeme der ligger tættest på os, er Månen. Månen bevæger sig rundt om Jorden, samtidig med at Jorden bevæger sig omkring Solen. Grunden til at vi kan se Månen, er at lyset fra Solen reflekteres af Månen – hvor meget af Månen vi kan se her på Jorden afhænger så af hvordan Solen, Månen og Jorden ligger i forhold til hinanden, se figur 5.6.

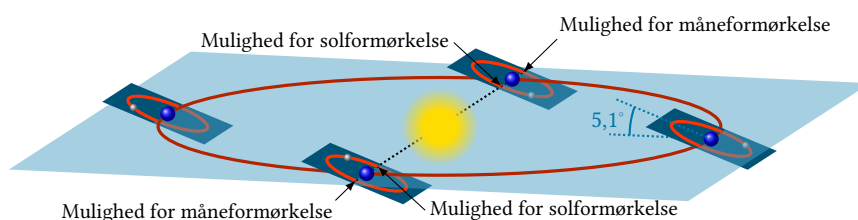
Månen roterer også om sig selv. Den hastighed Månen roterer med, passer sådan sammen med rotationen omkring Jorden at Månen altid vender den samme side mod Jorden. Dvs. når man står på Jorden, vil man altid se den samme side af Månen.

Månen gennemløber faserne fra nymåne til fuldmåne og tilbage igen, mens den bevæger sig rundt om Jorden. Månen er 27,3 døgn om at bevæge sig rundt om Jorden, men fordi Jorden når at bevæge sig et stykke rundt om Solen på den tid, vil der gå 29,5 døgn mellem hver fuldmåne. På figur 5.6 er tidspunktet for de forskellige faser angivet i antal døgn efter nymåne.

Figur 5.6: Månens bevægelse rundt om Jorden er årsagen til månefaserne. En fuld cyklus fra nymåne til nymåne (eller fuldmåne til fuldmåne) tager 29,5 døgn. Billederne af Månen er stammer fra [29].



Figur 5.7: Månens bane omkring Jorden ligger ikke i samme plan som Jordens bane omkring Solen. Figuren er ikke i korrekt skala.



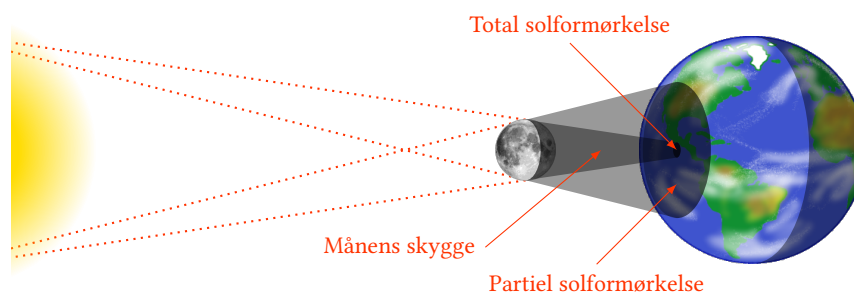
Som man kan se på figuren, er der fuldmåne når Månen befinder sig »bag ved« Jorden i forhold til Solen. At Jorden ikke altid skygger for månen ved fuldmåne, skyldes at det plan Månen befinder sig i, ligger $5,1^\circ$ forskudt i forhold til Jordens baneplan rundt om Solen (ekliptika). En vinkel på $5,1^\circ$ er ikke stor, men afstanden fra Jorden til Månen er gennemsnitligt 385 000 km, så den lille vinkel er stor nok til at Månen går fri af Jordens skygge.

Idet Månens baneplan altså er vinklet i forhold til ekliptika, vil Månen ikke nødvendigvis være direkte mellem Solen og Jorden når der er nymåne, eller ligge i skygge af Jorden hver gang der er fuldmåne. Men det kan ske, og når det sker at Jorden, Månen og Solen ligger på linje, har man enten en solformørkelse eller en måneformørkelse (se figur 5.7).

Solformørkelse

En solformørkelse sker, når Månen bevæger sig ind mellem Solen og Jorden. Der hvor Månens skygge falder på Jorden, bliver der rent faktisk mørkt midt på dagen. Billedet på figur 5.8 viser fænomenet.

Figur 5.8: Under en solformørkelse bevæger Månen sig mellem Jorden og Solen. Fordi Månen er mindre end Jorden vil Månens skygge kun ramme en lille del af jordoverfladen – en solformørkelse kan derfor kun observeres hvis man befinder sig det rigtige sted på jordoverfladen.

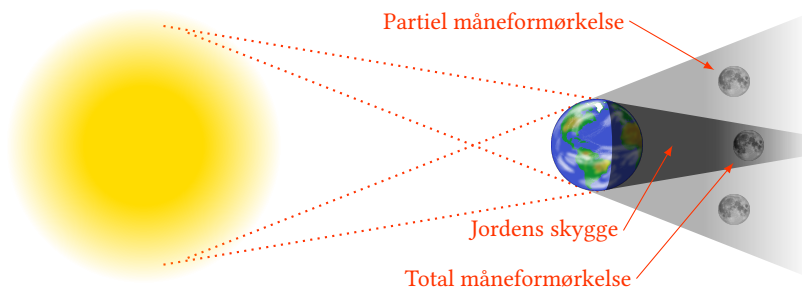


Som man kan se på figur 5.7, er der to gange om året mulighed for sol- eller måneformørkelser. Hvis der skal være en formørkelse, kræver det nemlig at Solen, Jorden og Månen ligger på linje, og det sker når Månens bane krydser ekliptika på linjen mellem Jorden og Solen (den stiplede linje på figuren).

I en periode på gennemsnitligt 34,5 døgn omkring hvert af disse to punkter er der mulighed for sol- eller måneformørkelser. Formørkelserne kommer når der enten er nymåne (solformørkelse) eller fuldmåne (måneformørkelse) i løbet af disse to perioder.[8] Det sker altså ca. 2 gange om året at der er mulighed for sol- eller måneformørkelser, og fordi perioden på 34,5 døgn er længere end perioden mellem to fuldmåner, kan der forekomme formørkelser flere gange i løbet af disse perioder.

Måneformørkelse

Måneformørkelser sker, når Månen bevæger sig ind i Jordens skygge (se figur 5.9).



Når Månen passerer ind i Jordens skygge, vil noget af lyset fra Solen dog alligevel kunne ramme Månen. Det røde lys i Solens spektrum vil nemlig afbøjes i Jordens atmosfære og ramme Månen; under en måneformørkelse er Månen derfor ikke sort, den ser ud som på billedet på figur 5.10.

Figur 5.9: Under en måneformørkelse bevæger Månen sig ind i Jordens skygge.



Figur 5.10: Månen under en total måneformørkelse.[39]

Universet

Siden oldtiden har vi mennesker forsøgt at forstå og forklare den verden vi bebor. Vi har kigget omkring os og ud i verdensrummet, og forsøgt at finde en forklaring på og en mening med de ting vi ser. Mange af de tidlige *kosmologier* forklarer verdens opståen og opbygning ud fra et mytologisk billede hvor guder og/eller naturkræfter er en stor del af verdensbilledet. I den nordiske mytologi blev verdens opståen således forklaret på denne måde:

I begyndelsen fandtes der intet andet end et stort tomt gab eller svælg, Ginnungagap. Men mod syd dannedes en ildverden, Muspelheim, og mod nord en isverden, Niflheim. Af mødet mellem is og ild dannedes tågedråber, og af dem opstod liv. Det første menneskelignende væsen, urjætten Ymer, og den første ko, Audhumbla, omtales her. Ymer avlede med sig selv nye væsener, og fra hans afkom stammer rinturser (jætter). Koen mælk gav Ymer næring, og koen stod samtidig og slikkede salt af stenen omkring sig. Af stenen opstod herved en mand, Bure. Han fik en søn, Borr, der blev gift med kvinden Bestla, og de fik tre sønner, Odin, Vile og Ve.

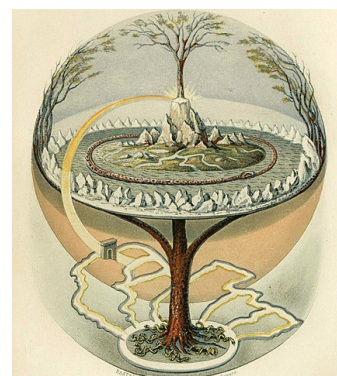
Disse tre dræbte Ymer og dannede kosmos af hans kropsdeler. Af kødet dannedes jorden, af knoglerne klipper, af blodet hav, af hans hjerneskal himmelhvælvingen. Af hans øjenbryn blev menneskenes hjem, Midgård, bygget.[22]

Der findes mange skabelsesmyter som denne, fælles for dem er at de netop er myter og altså ikke bygger på konkrete observationer af verden omkring os. Dette adskiller dem fra naturvidenskabelige forklaringer der jo bygger på observationer og eksperimenter. På trods af denne forskel tjener myterne dog et lignende formål, nemlig at forklare den verden vi lever i.

6-1 Kosmologiske teorier

I slutningen af det 19. århundrede vidste man hvordan Solsystemet var opbygget, og man kunne ud fra Newtons tyngdelov regne sig frem til hvordan planeterne bevægede sig rundt om Solen, og også hvor de ville befinde sig årtier fra nu.

Der var dog områder af fysikken hvor der stadig var lidt problemer. Bl.a. stemte målinger af planeten Merkurs bane ikke helt overens med forudsigelserne fra Newtons tyngdelov. Man prøvede at forklare afvigelserne med en endnu uopdaget planet, som man kaldte Vulcan, hvis tyngdekraft



Figur 6.1: Verdens opbygning ifølge den nordiske mytologi. I midten ses verdenstræet Yggdrasil.[26]

ville påvirke Merkurs bane sådan at målingerne passede med teorien.[17] Tyngdeloven havde siden 1687 været en af fysikkens store triumfer så det kunne jo næppe være den det var galt med.

Men det var det så alligevel. I 1915 publicerede Einstein sin almene relativitetsteori der kobledede tyngdekraften til rummets krumning. Ifølge relativitetsteorien er Newtons tyngdelov en udmærket tilnærmelse til den måde tyngdekraften virker på – så længe de involverede masser ikke er voldsomt store, og objekternes hastigheder er forholdsvist små (sammenlignet med lysets fart). De afvigelser man så i Merkurs bane, var i virkeligheden forårsaget af at Merkur er så tæt på Solen, der jo har en enormt stor masse, at afvigelserne fra Newtons tyngdelov blev målelige.

Da Einstein publicerede sin almene relativitetsteori i 1915 var den almindelige videnskabelige opfattelse af Universet at det var statisk, og at Universet altid havde eksisteret. Man mente altså at Universet så ud som det altid havde gjort.[21] Men et statisk univers er ustabil, hvilket man allerede var klar over langt tidligere. Newtons tyngdelov siger nemlig at alle masser påvirker hinanden med en tiltrækkende kraft. Hvis Universet på et tidspunkt var statisk, ville alle masserne tiltrække hinanden, og Universet ville kollapse.

Relativitetsteorien forudsiger ligeledes at et statisk univers er ustabil. Einstein indførte derfor en »kosmologisk konstant« i sin teori. En konstant der giver en frastødende kraft som balancerer tyngdekræfterne, sådan at Universet kan forblive statisk og stabilt.[21]

Men i slutningen af 1920'erne viste den amerikanske astronom Edwin Hubble at alting i Universet bevæger sig væk fra os, hvilket betyder at Universet udvider sig. Dette fik Einstein til at kalde den kosmologiske konstant for sit livs største bommert.¹

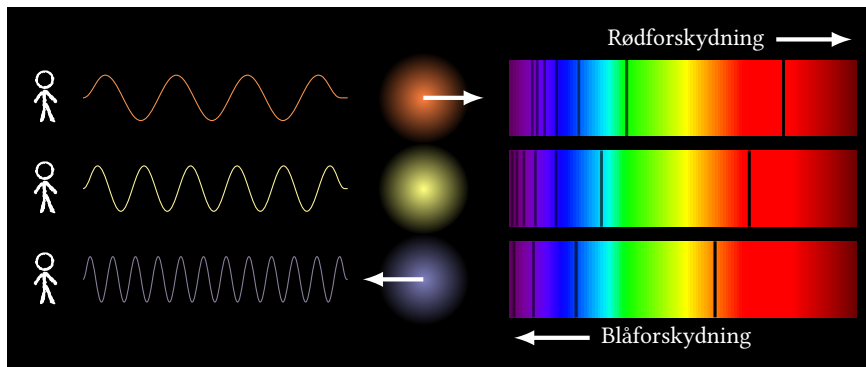
¹Det har senere vist sig, at der faktisk er brug for den kosmologiske konstant idet universets udvidelse er accelererende, hvilket kan forklares ud fra en frastødende kraft.[7, 24]

6-2 Den kosmiske rødforskydning

Den første astronom der opdagede at fjerne galakser i Universet bevæger sig væk fra os, var amerikaneren Vesto Slipher.[10] Slipher arbejdede med at analysere spektre af lys fra andre galakser, og han var den første der opdagede at linjerne i disse spektre var *rødforskudte*, dvs. at bølgelængderne var forskudt mod den røde ende af spektret ift. de spektre vi observerer fra lys produceret i laboratorier her på Jorden.

Denne rødforskydning kan forklares ud fra en Doppler-effekt – galaksernes lys er forskudt mod den røde ende af spektret fordi de er på vej væk fra os. Idet galakserne bevæger sig væk fra os mens de udsender lys, vil lysets bølgelængder blive »strakt ud«, og vi vil her på Jorden modtage lyset med en større bølgelængde (dvs. rødforskudt). Hvis en galakse bevæger sig mod os, vil der tilsvarende ske en »blåforskydning« af lyset (se figur 6.2).

Man definerer rødforskydningen til at være størrelsen z givet ved



Figur 6.2: Når en lyskilde bevæger sig væk fra en observatør, bliver de observerede bølgelængder længere end de udsendte, dvs. lyset bliver rødforskuet. Omvendt bliver lyset blåforskuet når lyskilden bevæger sig hen mod observatøren.

Rødforskydning

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0}{\lambda_0},$$

hvor λ_{obs} er den observerede bølgelængde, mens λ_0 er den såkaldte laboratoriebølgelængde, dvs. fra en lyskilde der ikke er i bevægelse.

Man kan vise at farten af en lyskilde med god tilnærmelse er givet ved formlen

$$v = c \cdot z,$$

hvor c er lysets fart. Tilnærmelsen gælder godt så længe rødforskydningen ikke er større end 0,1.²

På den tid da Slipher udførte sine målinger, vidste man faktisk ikke hvad galakserne bestod af. Man kaldte dem »stjernetåger«, og formodede at de bestod af gasskyer eller lignende i vores egen galakse Mælkevejen. Slipher kunne ud fra den målte rødforskydning beregne »stjernetågerens« hastighed, og han konkluderede på denne baggrund at disse objekter befandt sig langt uden for vores galakse – Universet var lige pludselig blevet mange gange større.

Lidt om måleenheder

I kapitel 4 blev enheden AU (astronomisk enhed) omtalt. Denne enhed er fin til målinger af afstande inden for vores solsystem, men når man skal se på større afstande, er det mere praktisk at måle i *lysår* (ly) eller *parsec* (pc). 1 ly er den afstand som lyset tilbagelægger på 1 år. Idet lys bevæger sig ret hurtigt, er 1 ly altså en ret stor afstand.

Lysets fart er $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s, og der er 365,2422 døgn på et år, dvs.

$$1 \text{ ly} = c \cdot 1 \text{ år} = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 365,2422 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 9,47 \cdot 10^{15} \text{ m}.$$

Måleenheden parsec er defineret ud fra den vinkel en stjerne flytter sig på stjernehimlen (set fra Jorden) hen over året. Den præcise definition er ikke så vigtig her, men størrelsen af 1 pc er

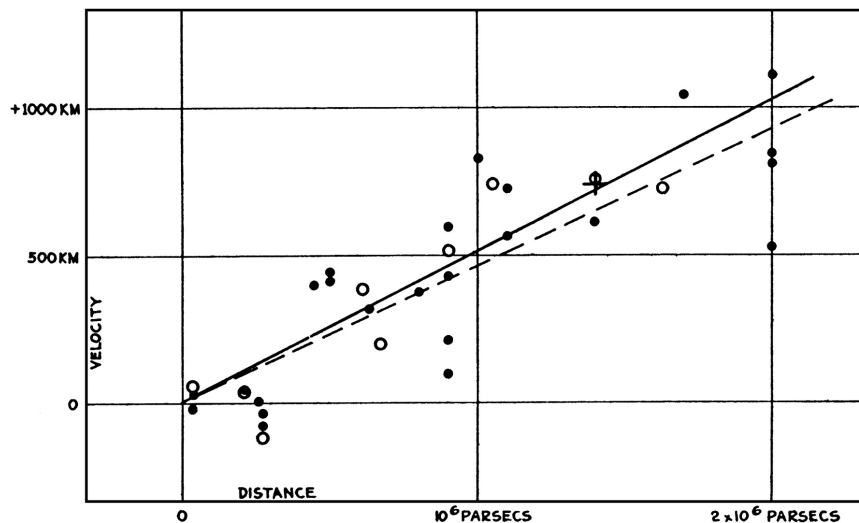
$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ m}.$$

Hvad viste Hubbles målinger?

I slutningen af 1920'erne målte Edwin Hubble også på rødforskydningen, men han kombinerede sine målinger med nyopfundne teknikker til at måle

²Hvis den bliver større end det, skal man til at indregne relativistiske effekter, og formlen bliver så noget mere kompliceret.

Figur 6.3: Hubbles oprindelige diagram over sammenhængen mellem hastighed og afstand for stjernetåger. De radiale hastigheder (markeret med forkerte enheder) er afbildet som funktion af afstanden. Fra [10].



afstanden til fjerne galakser (se figur 6.3). Disse målinger viste at jo længere en galakse er fra os, jo hurtigere bevæger den sig også væk. Faktisk var der en proportionalitet mellem en galakses hastighed v væk fra os og dens afstand r ,

Hubble-Lemaîtres lov

$$v = H_0 \cdot r .$$

Sammenhængen er opkaldt efter Edwin Hubble der opdagede den, og den belgiske fysiker Georges Lemaître der på denne baggrund opstillede en model for Universets udvikling.

På figur 6.3 ses Hubbles oprindelige diagram over sammenhængen mellem galakseres hastigheder og deres afstande. Af diagrammet ses det at galaksernes hastigheder vokser med afstanden. Hubble fejlvurderede i stor stil afstanden til galakserne (hans afstande var ca. 7 gange for små), hvorved han fik målt Hubblekonstanten til ca. 500 km/s/Mpc. Moderne målinger giver en konstant på $H_0 = 67,4$ km/s/Mpc.[10] Hubble-loven holder dog stadig.

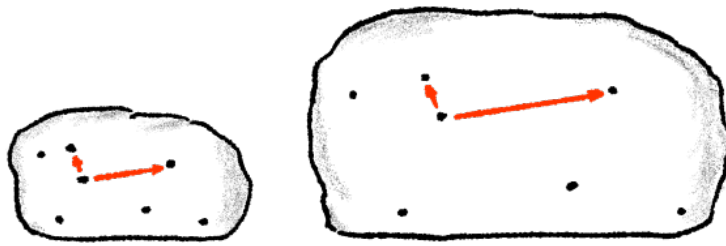
Hubble-konstanten er som sagt en proportionalitetskonstant. Det betyder altså at når $H_0 = 67,4$ km/s/Mpc, vil hastigheden væk fra os øges med 67,4 km/s pr. megaparsec afstanden vokser med.

6-3 Big Bang

Hubble-Lemaîtres lov fortæller os at universet udvider sig. At objekter i Universet bevæger sig hurtigere væk fra os jo længere de er væk, betyder at det er rummet selv der udvider sig. En analogi til denne udvidelse er et rosinbrød der hæver.

Fra én rosins perspektiv bevæger alle de andre rosiner sig væk når brødet hæver, og de rosiner der er længst væk bevæger sig også hurtigst væk. Fordi alle rosiner oplever det samme, er der ikke noget centrum for udvidelsen – det er brødet mellem rosinerne der ekspanderer.

Idet Universet udvider sig, må det have været mindre i fortiden. Jo længere man går tilbage i tiden, jo mindre og tættere må Universet derfor have



Figur 6.4: Når et rosinbrød hæver, bevæger alle rosinerne sig væk fra hinanden. Fra én rosins perspektiv, vil alle de andre rosiner bevæge sig væk – og jo længere væk de er til at starte med, jo hurtigere vil de se ud til at bevæge sig væk.

været. Universet må altså have haft en begyndelse hvor det var uendeligt tæt og varmt. Det er udvidelsen fra denne begyndelse man kalder Big Bang.

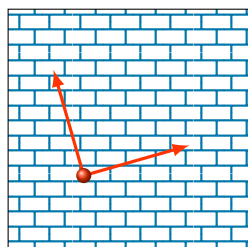
Det kosmologiske princip

Idet der ikke er noget centrum for Universets udvidelse, er alle steder i Universet i princippet ens. Dette stemmer overens med det såkaldte *kosmologiske princip* der siger at Universet er ens overalt. Hermed menes at

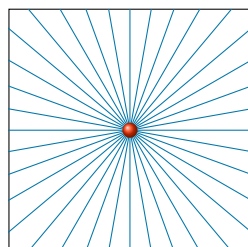
Det kosmologiske princip

1. *Universet er homogent*, dvs. det har den samme energi- og masse-tæthed overalt, og at
2. *Universet er isotropt*, dvs. uanset hvilken retning man kigger i, vil Universet se ens ud.

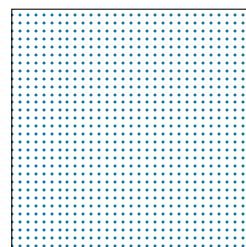
Figur 6.5 viser forskellen på disse to begreber. Mønsteret på figur 6.5(a) er homogent, men det er ikke isotropt. Kigger man i forskellige retninger (vist med de to pile), vil der nemlig ikke være lige langt mellem stregerne man ser. Figur 6.5(b) er et isotropt i det viste punkt, men mønsteret er bestemt ikke homogent. Derimod viser figur 6.5(c) et mønster der er både homogent og isotropt.



(a) Homogent.



(b) Isotropt.



(c) Homogent og isotropt.

Figur 6.5: Et mønster der er homogent, men ikke isotropt, og ét der er isotropt i det viste punkt, men ikke homogent. Det sidste mønster har begge egenskaber.

Det kosmologiske princip er naturligvis forkert når man f.eks. kigger på vores solsystem, hvor masse-tætheden i midten af Solen er en helt anden end i det tomme rum mellem planeterne. Men det har vist sig at det kosmologiske princip gælder med god tilnærmelse på store skalaer (dvs. over 100-200 Mpc).

Universets alder

Ifølge Hubble-Lemaîtres lov er

$$v = H_0 \cdot r .$$

Hvis et objekt i Universet befinder sig i afstanden r , har det altså bevæget sig denne afstand siden Big Bang. Kaldes man Universets alder T_0 er objektets hastighed derfor

$$v = \frac{r}{T_0} .$$

Samlet set giver dette at

$$\frac{r}{T_0} = H_0 \cdot r \quad \Leftrightarrow \quad T_0 = \frac{1}{H_0} .$$

Man kan altså beregne Universets alder ud fra Hubblekonstanten. På nuværende tidspunkt ved vi at Universet er ca. 13,7 milliarder år gammelt.

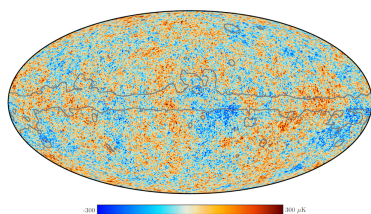
Den kosmiske baggrundsstråling

Big Bang-teorien er efterhånden blevet bekræftet af mange observationer. En af de vigtigste af disse er den såkaldte *kosmiske baggrundsstråling* der blev opdaget af de to amerikanske astronomer Penzias og Wilson i 1965.[16]

I 1948 havde den amerikanske fysiker George Gamow beregnet at hvis Big Bang-teorien stemte, skulle Universet være fyldt med stråling. Det tidlige Univers var nemlig så tæt og varmt at atomer ikke kunne eksistere. Men på et tidspunkt bliver det koldt nok til at elektroner kan binde sig til atomkerner så der dannes atomer. Dette skete da Universet var ca. 380 000 år gammelt.

Før dette tidspunkt kunne stråling ikke bevæge sig ret langt i Universet før det blev absorberet af frie elektroner, men i samme øjeblik som elektronerne blev bundet til atomkerner, blev Universet så at sige gennemsigtigt. Den stråling der var i Universet på det tidspunkt var varmestråling, svarende til den temperatur det varme plasma havde da elektronerne blev bundet til atomerne – ca. 4000 K.

Siden da er denne strålings bølgelængde blevet større og større pga. Universets udvidelse, så den i dag svarer til en temperatur på 2,73 K. Det var denne stråling de to astronomer Penzias og Wilson opdagede i 1965. Man har efterfølgende målt gentagne gange på denne baggrundsstråling. De bedste målinger indtil videre er foretaget af Planck-satellitten der var opsendt fra 2009–2013. Figur 6.6 viser en illustration af satellittens målinger. Formålet med målingerne er at måle de små variationer der er i baggrundsstrålingen – det er disse små variationer i energitæthed der kan forklare hvordan stof har samlet sig til stjerner og galakser.



Figur 6.6: Den kosmiske baggrundsstråling målt af Planck-satellitten.[31]

Big Bangs fire søjler

Big Bang-teorien har vist sig at være en teori der kan forklare rigtig meget om Universet, og den er underbygget af rigtig mange observationer. De fire ting som Big Bang-teorien har kunnet forklare (og som ingen konkurrerende teorier har været i stand til at forklare fyldestgørende) er

1. Universets udvidelse,
2. den kosmiske baggrundsstråling,
3. dannelsen af de lette grundstoffer, og
4. dannelsen af galakser og større strukturer i Universet.

De lette grundstoffer blev dannet inden for de første 20 min af Universets historie (se gennemgangen i næste afsnit). Big Bang-modellen forudsiger at der blev dannet ca. 75% hydrogen-1, 25% helium-4, og 0,01% deuterium (hydrogen-2) og helium-3 (og meget små mængder af tungere grundstoffer). Denne fordeling af grundstoffer passer fuldstændigt med den grundstoffordeling man kan observere i fjerne stjerner.³

³De tungere grundstoffer blev dannet senere i supernova-eksplosioner.

6-4 Universets udviklingshistorie

På nuværende tidspunkt har man en ret god model for hvordan Universets udvikling er forløbet. Tidslinjen er nogenlunde denne:[13]

10^{-43} s efter Big Bang er så tæt man kan komme på begyndelsen, og man ved ikke ret meget om dette tidspunkt i Universets historie. Ifølge den generelle relativitetsteori var Universet en gravitationel singularitet før dette tidspunkt (men denne beskrivelse kan være forkert pga. kvanteeffekter). Sandsynligvis er alle 4 fundamentale naturkræfter (elektromagnetisme, svag kernekraft, stærk kernekraft og gravitation) forenet i én samlet fundamental kraft.

På dette tidspunkt er Universets størrelse ca. 10^{-35} m, og temperaturen er over 10^{32} K.

10^{-43} s til 10^{-36} s skiller gravitation sig ud fra de andre kræfter (der forbliver forenede), og de tidligste elementarpartikler (og antipartikler) dannes.

Fra 10^{-36} s til 10^{-32} s skiller den stærke kernekraft sig ud fra de andre forenede kræfter, hvilket får Universet til at gennemgå en ekstremt hurtig ekspansion, den såkaldte *kosmiske inflation*. Universets størrelse stiger i løbet af denne ekstremt lille brøkdelen af et sekund med en faktor på mindst 10^{26} , så det ender med en størrelse på omkring 10 cm.

Fra 10^{-36} s til 10^{-12} s. Da den stærke kernekraft skiller sig ud, dannes der en lang række eksotiske partikler, bl.a. W- og Z-bosoner samt Higgs-bosoner (som er årsag til at partikler kan have masse).

Fra 10^{-12} s til 10^{-6} s dannes kvarker, elektroner og neutrinoer, mens Universet køler af til under 10^{16} K, og de fire fundamentale naturkræfter antager deres nuværende form. Kvarker og antikvarker annihilere hinanden, men der er et lille overskud af kvarker (ca. 1 for hver milliard par) som ender med at blive til stof.

Fra 10^{-6} s til 1 s køler Universets temperatur ned til ca. 10^{12} K, hvilket gør at kvarker kan kombinere og danne hadroner (tunge partikler som protoner og neutroner).

Fra 1 s til 3 min. Efter at størstedelen (men ikke alle) hadroner og antihadroner annihilere, dominerer leptoner (såsom elektroner) og antileptoner (positroner) massen i Universet.

Fra 3 min til 20 min Falder temperaturen i Universet til et punkt (ca. 10^9 K) hvor atomkerner begynder at dannes. Protoner og neutroner fusionerer og danner de simple grundstoffer hydrogen, helium og lithium. Efter ca. 20 min er temperaturen og tætheden af Universet faldet så meget at fusionsreaktionerne går i stå.

Fra 3 min til 240 000 år. I denne periode afkøles Universet gradvist; det er fyldt med plasma, en varm, uigennemsigtig suppe af atomkerner og elektroner. Efter at de fleste af leptonerne og antileptonerne annihilere i slutningen af lepton-æraen, er det meste af Universets energi domineret af fotoner som interagerer med protonerne, elektronerne og atomkernerne.

Fra 240 000 til 300 000 år falder Universets temperatur til omkring 3000 K, og tætheden fortsætter også med at falde. Atomkernerne begynder derfor at indfange de frie elektroner. Da elektronerne nu er bundet til atomerne, bliver Universet endelig gennemsigtigt for lys. Det er de frie fotoner fra dette tidspunkt i Universets udvikling der i dag er årsag til den kosmiske baggrundsstråling.

Fra 300 000 til 150 mio. år er de første atomer dannet, men der er endnu ikke dannet stjerner der kan afgive lys. Perioden kaldes derfor den mørke urtid.

Fra 150 mio. år og fremad forstærker tyngdekraften små variationer i tætheden af den gas Universet består af, og lokalt trækker noget af denne gas sig sammen under tyngdekraften, hvorved der dannes stjerner.

De første stjerner er enorme kæmpestjerner (100 gange større end Solen) som eksisterer i meget kort tid, før de eksploderer i gigantiske supernovaer.

Fra 8,5 til 9 mia. år bliver Solsystemet dannet. Solen er en sent dannet stjerne, der indeholder stof fra mange tidligere generationer af stjerner. Solen og Solsystemet er altså dannet for ca. 4,5 til 5 mia. år siden.

Standardsymboler

A-1 Almindeligt anvendte størrelsessymboler

Størrelse	Symbol(er)	SI-enhed		Sammenhæng med andre enheder
Acceleration	a	m/s^2		
Afstand/længde	l, s, x	m	meter	
Aktivitet	A	Bq	becquerel	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
Arbejde	A	J	joule	$1 \text{ J} = 1 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2}$
Areal	a, A	m^2	kvadratmeter	
Brændværdi	B	J/kg		
Bølgelængde	λ	m	meter	
Densitet	ρ	kg/m^3		
Effekt	P	W	watt	$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$
Elektrisk ladning	Q, q	C	coulomb	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
El. spænding	U	V	volt	$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$
El. strømstyrke	I	A	ampere	
Energi	E	J	joule	$1 \text{ J} = 1 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2}$
Frekvens	f	Hz	hertz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
Hastighed	v	m/s		
Kraft	F	N	newton	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}$
Masse	m	kg	kilogram	
Nyttevirkning	η		(enhedsløs)	
Resistans	R	Ω	ohm	$1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$
Temperatur	T	K	kelvin	
Tid	t	s	sekund	
Tryk	p	Pa	pascal	$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
Varme	Q	J	joule	$1 \text{ J} = 1 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^2}$
Varmefylde	c	$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$		
Varmekapacitet	C	J/kg		
Volumen	V	m^3	kubikmeter	

A-2 Enhedspræfikser

Præfiks	Navn	Værdi
a	atto	10^{-18}
f	femto	10^{-15}
p	pico	10^{-12}
n	nano	10^{-9}
μ	mikro	10^{-6}
m	milli	10^{-3}
c	centi	10^{-2}
h	hekto	10^2
k	kilo	10^3
M	mega	10^6
G	giga	10^9
T	tera	10^{12}
P	peta	10^{15}

Præfikserne c (centi) og h (hekto) bruges normalt kun i helt specielle forbindelser som cm (centimeter) og hPa (hektopascal).

Når man skal regne med enheder der har præfikser, er det en god ide at erstatte dem med deres værdi, f.eks.

$$\frac{12 \text{ mm}}{6,7 \mu\text{s}} = \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{6,7 \cdot 10^{-6} \text{ s}} = 1800 \text{ m/s} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ m/s} = 1,8 \text{ km/s} .$$

A-3 Det græske alfabet

A	α	alfa	H	η	eta	N	ν	ny	T	τ	tau
B	β	beta	Θ	θ	theta	Ξ	ξ	xi	Y	υ	ypsilon
Γ	γ	gamma	I	ι	iota	O	o	omikron	Φ	ϕ	phi
Δ	δ	delta	K	κ	kappa	Π	π	pi	X	χ	chi
E	ϵ	epsilon	Λ	λ	lambda	P	ρ	rho	Ψ	ψ	psi
Z	ζ	zeta	M	μ	my	Σ	σ	sigma	Ω	ω	omega

Bibliografi

- [1] Erik Strandgaard Andersen, Paul Jespersgaard og Ove Grønbæk Østergaard, red. *Databog fysik kemi*. 11. udg. F & K forlaget, 2012.
- [2] Johann J. Balmer. »Notiz über die Spektrallinien des Wasserstoffs«. I: *Annalen der Physik und Chemie* 25.3 (1885).
- [3] Sylvia Berryman. »Democritus«. I: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Red. af Edward N. Zalta. Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/democritus/> (hentet 28.05.2022).
- [4] Bureau International des Poids et Mesures. *The International System of Units (SI)*. 9. udg. 2016. URL: <https://www.bipm.org/> (hentet 25.10.2021).
- [5] Florian Cajori. *A History of Physics in its Elementary Branches (through 1925): Including the Evolution of Physical Laboratories*. New York, N.Y.: Dover Publications, Inc., 1962.
- [6] John Campbell. *Rutherford, transmutation and the proton*. CERN Courier. 8. maj 2019. URL: <https://cerncourier.com/a/rutherford-transmutation-and-the-proton/> (hentet 28.05.2022).
- [7] Steven Carlip. *The Cosmological Constant*. 30. dec. 2020. URL: <https://phys.libretexts.org/@go/page/1284> (hentet 26.04.2024).
- [8] Fred Espenak. *Periodicity of Solar Eclipses*. NASA. 12. jan. 2012. URL: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEsaros/SEperiodicity.html> (hentet 04.05.2024).
- [9] Bob King. *Let's get serious about Ceres*. 15. aug. 2015. URL: <https://skyandtelescope.org/observing/celestial-objects-to-watch/lets-get-serious-about-ceres/> (hentet 07.05.2024).
- [10] Robert P. Kirshner. *Hubble's diagram and cosmic expansion*. PNAS. 21. okt. 2003. URL: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2536799100> (hentet 10.12.2015).
- [11] Helge Kragh. »John Dalton«. I: *Den Store Danske på lex.dk*. 7. maj 2020. URL: https://denstoredanske.lex.dk/John_Dalton (hentet 27.05.2022).
- [12] Mikhail Marov. *The Formation and Evolution of the Solar System*. Maj 2018. DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.2. URL: <https://oxfordre.com/planetaryscience/view/10.1093/acrefore/9780190647926.001.0001/acrefore-9780190647926-e-2>.
- [13] L. Mastin. *Big Bang Timeline*. Okt. 2009. URL: https://www.physicsoftheuniverse.com/topics_bigbang_timeline.html (hentet 17.05.2023).
- [14] Ron Milo m.fl. *Human Body Mean Volume*. BioNumbers. URL: <https://bionumbers.hms.harvard.edu/bionumber.aspx?id=109718> (hentet 01.08.2023).
- [15] Randall Munroe. *Space Typography*. URL: <https://xkcd.com/2863> (hentet 01.05.2024).
- [16] Roger G. Newton. *From Clockwork to Crapshoot: a history of physics*. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, 2007.
- [17] Souren P. Pogossian. »Vulcan and the anomalous displacement of Mercury's perihelion – a historical and numerical perspective«. I: *Astrophysics and Space Science* 368.7 (jul. 2023). ISSN: 1572-946X. DOI: 10.1007/s10509-023-04210-5. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10509-023-04210-5>.

- [18] Jens Ramskov. *Den moderne fysik opstod i et frit fald*. Ingeniøren. 24. okt. 2021. URL: <https://ing.dk/artikel/moderne-fysik-opstod-frit-fald-251120> (hentet 27.10.2021).
- [19] Wolfgang Rößler. *Eine kleine Nachtphysik – Große Ideen und ihre Entdecker*. 7. udg. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2013.
- [20] George Smith. »Isaac Newton«. I: *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Red. af Edward N. Zalta. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2008. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/newton/> (hentet 12.10.2021).
- [21] Domingos Soares. *Einstein's static universe*. 2012. arXiv: [1203.4513 \[physics.gen-ph\]](https://arxiv.org/abs/1203.4513).
- [22] Finn Stefánsson. »Kosmologi«. I: *Nordisk mytologi*. lex.dk, 5. aug. 2011. URL: <https://mytologi.lex.dk/kosmologi> (hentet 02.05.2023).
- [23] Harry Varvoglis. *History and Evolution of Concepts in Physics*. Springer International Publishing, 2014.
- [24] Edward L. Wright. *Frequently Asked Questions in Cosmology*. 24. maj 2013. URL: https://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html (hentet 26.04.2024).

Billedkilder

- [25] Scott Akerman. *Boiling Water*. URL: <https://www.flickr.com/photos/sterlic/2835194472>.
- [26] Oluf Olufsen Bagge. *Yggdrasil*. Prose Edda, 1847.
- [27] Colin M.L. Burnett. *A Polar Bear floating at the Henry Doorly Zoo in Omaha, Nebraska*. 30. sep. 2006. URL: <https://commons.wikimedia.org>.
- [28] John Dibbs. *Grumman Bearcat F8F (G-RUMM)*. URL: <https://www.flyinglegends.com/>.
- [29] Bill Dunford. *Phases of the Moon*. NASA. URL: <https://www.universetoday.com/author/pars3c/page/3/> (hentet 04.05.2024).
- [30] *Erwin Schrödinger*. Nobelstiftelsen. 1933. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/summary/>.
- [31] ESA and the Planck Collaboration. *2018 Planck Results*. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery> (hentet 30.04.2024).
- [32] »Gargamelle: first neutral current.« 1973. URL: <https://cds.cern.ch/record/39468>.
- [33] *Joseph John Thomson*. Nobelstiftelsen. 1906. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1906/summary/>.
- [34] Bob King. *Time exposure centered on Polaris, the North Star*. 5. nov. 2015. URL: <https://www.universetoday.com/tag/polaris/> (hentet 30.04.2024).
- [35] Godfrey Kneller. *Portræt af Sir Isaac Newton*. Olie på lærred, 1689. Isaac Newton Institute, Cambridge.
- [36] NASA/ESA/Hubble Heritage Team. *Milky Way Neighbor*. URL: <https://www.nasa.gov/>.

- [37] NASA/JPL-Caltech. *PIA03243: Portrait of Our Dusty Past (Artist Concept)*. 20. dec. 2005. URL: <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03243> (hentet 08.05.2024).
- [38] *Niels Bohr*. Nobelstiftelsen. 1922. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/summary/>.
- [39] Jathin Premjith. *Lunar Eclipse and Occultation*. 2011. URL: <https://www.universetoday.com/tag/astronomy-photographer-of-the-year/> (hentet 30.04.2024).
- [40] *Sir Ernest Rutherford*. Library of Congress. URL: <https://www.loc.gov/pictures/item/2014716719/>.
- [41] Charles Turner. *John Dalton: British physicist*. Maleri. 1834.