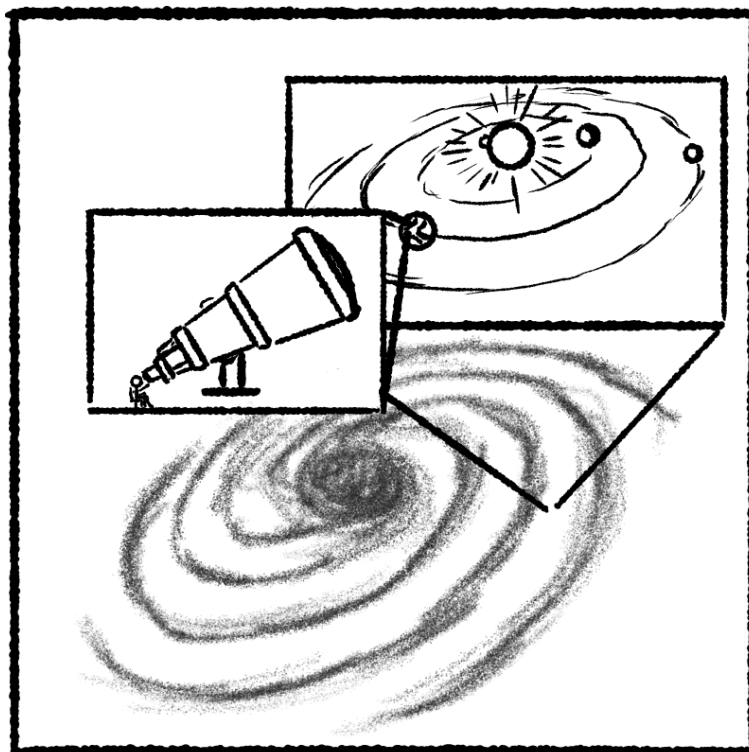


Mike Vandal Auerbach

RUMMET

Version 1.2

14. november 2024



Rummet

Version 1.2, 2024

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 $\text{\LaTeX}$, 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, 2024.

Indhold

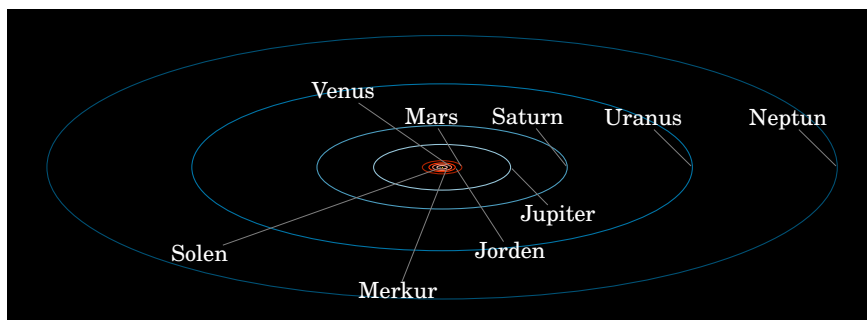
1	Solsystemet	5
1-1	Solsystemets opbygning	5
1-2	Solsystemets dannelse	6
1-3	Keplers love	7
2	Jorden	9
2-1	Længde- og breddegrader	9
2-2	Døgn	9
2-3	Årstider	10
2-4	Månen	11
3	Stjerner	15
3-1	Solens struktur	15
3-2	Fusion af hydrogen	15
3-3	Stjerners udvikling	16
4	Afstandsmålinger i universet	19
4-1	Parallaksemetoden	19
4-2	Størrelsesklasser	21
4-3	H-R-diagrammer	22
4-4	Andre lyskilder	22
5	Universet	25
5-1	Kosmologiske teorier	25
5-2	Den kosmiske rødforskydning	26
5-3	Big Bang	28
5-4	Universets udviklingshistorie	31
	Bibliografi	33
	Billedkilder	34

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.

1-1 Solsystemets opbygning

I Solsystemet finder man som nævnt Solen og 8 planeter der kredser om den, se figur 1.1. 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 1-2 nedenfor.



Figur 1.1: Planeterne i Solsystemet og deres baner omkring Solen.

Tabel 1.2 viser nogle data om Solsystemets planeter, deres middelf afstande 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 middelf afstand 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.

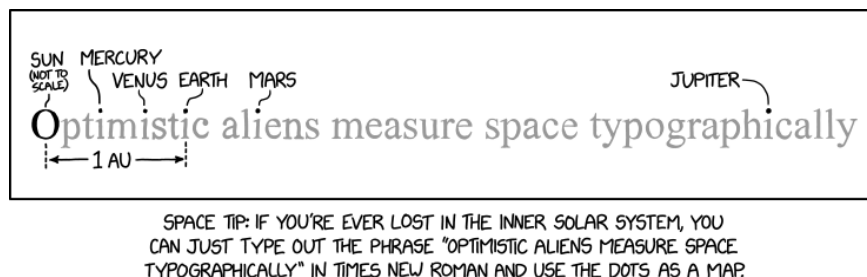
Som man kan se af figuren og tabellen ovenfor, er afstandene meget store og ikke specielt regelmæssige. Den relative afstand fra Solen til de første fem planeter kan dog bestemmes ud fra sætningen på

Tabel 1.2: 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 1.3. Hvis man så husker at afstanden til Jorden er 1 AU, kan man hurtigt finde afstanden til de andre fire planeter.

Figur 1.3: En huskeregel for de relative afstande i det indre solsystem. Fra [xkcd.com](#).^[11]



Øvelse 1.1

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.

1-2 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.^[9] Pga. små uregelmæssigheder i densiteten af gassen begyndte skyen at

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.^[7]

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 i midten af gasskyen, og trykket blev så højt at hydrogenatomer kunne fusionere til helium – der blev altså dannet en stjerne i midten af gasskyen. Dette var begyndelsen på vores solsystem.

Denne stjerne var omgivet af gas og 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 1.4). Pga. rotationen af gasskyen vil de tungere elementer fortrinsvis befinde sig tæt på Solen, mens de lettere elementer bevæger sig mod Solsystemets yderkant. Dette er forklaringen på at de indre planeter er klippeplaneter, mens de ydre er gasplaneter.



Figur 1.4: 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.[22]

1-3 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.

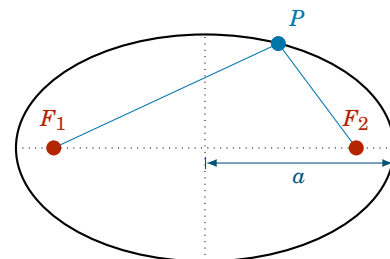
Keplers love for planetbevægelse

1. Planeterne bevæger sig i ellipser (se figur 1.5) 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.

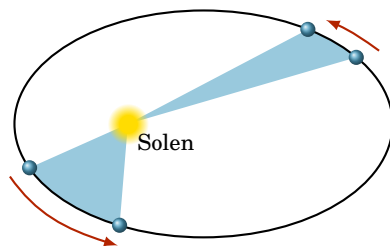
Keplers 2. lov kan umiddelbart virke lidt kringlet formuleret, men figur 1.6 giver en illustration heraf. Figuren illustrerer at en planets fart i dens bane ikke er konstant, men derimod sådan at de to markerede arealer på figuren er lige store når planeten har været lige lang tid om at overstryge dem. 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 middelfaststanden til brændpunkterne, dvs. man kan lige så vel formulere loven ud fra omløbstiden og middelfaststanden.

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.



Figur 1.5: 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 1.6: 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.

Eksempel 1.2

Konstanten i Keplers 3. lov kan beregnes ud fra oplysningerne i tabel 1.2. For Jorden er middelfstanden til Solen 1 AU, og omløbstiden 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 1.3

Undersøg om det passer at forholdet T^2/a^3 er konstant for planeterne i tabel 1.2.

Øvelse 1.4

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

- a) 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.

2-1 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 2.1).

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 naturlig 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 2.1

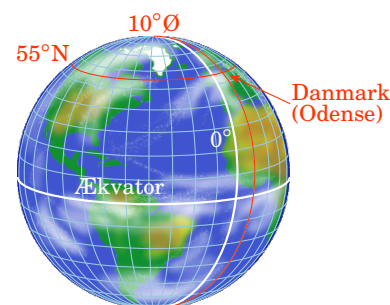
Som man kan se på figur 2.1 dækker breddegraderne 180° fra Nordpolen til Sydpolen. Jordens radius er 6378 km.

- a) Hvor stor er afstanden mellem to breddegrader?

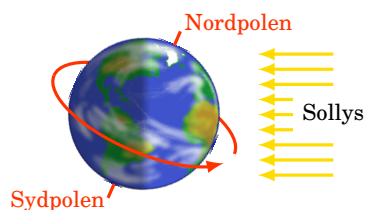
Som man kan se af opgaven ovenfor, er der altid samme afstand mellem to breddegrader. Det samme er ikke tilfældet med længdegrader, idet den cirkel længdegraderne måles ud fra, bliver mindre når man nærmer sig polerne. Dvs. afstanden mellem f.eks. 10°Ø og 20°Ø afhænger af breddegraden – den er længst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

2-2 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 2.2). Idet Jorden roterer, vil forskellige



Figur 2.1: Længde- og breddegrader. Odense, hvor disse noter er skrevet, har koordinaterne 55°N 10°Ø .



Figur 2.2: Jordens rotation om sin akse er årsagen til nat og dag.

Figur 2.3: Timelapse-billede af nattehimmelen.[21] 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.

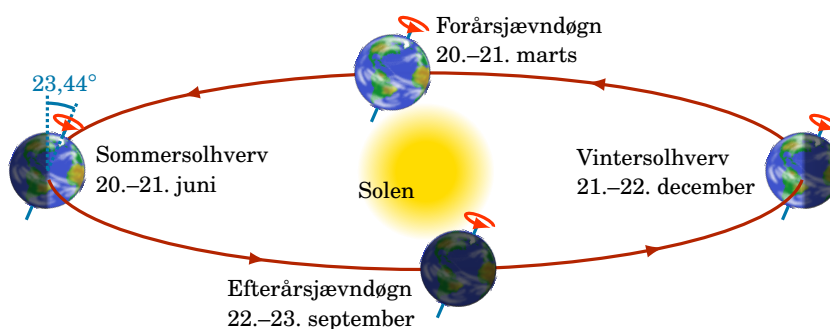


2-3 Årstider

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).

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.

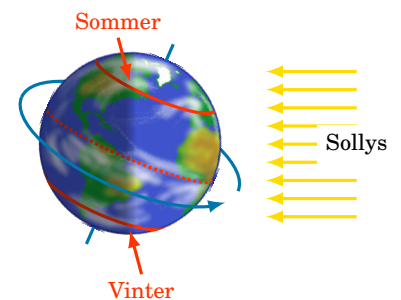
Figur 2.4: Jordens bevægelse rundt om Solen. På <https://fabulastudios.dk/dtu/aarstiderne/> findes en interaktiv animation af denne bevægelse.



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 2.4. 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 2.5 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 2.5: Når den nordlige halvkugle peger ind mod Solen, er det sommer på den nordlige halvkugle og vinter på den sydlige.

Øvelse 2.2

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 2.3

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

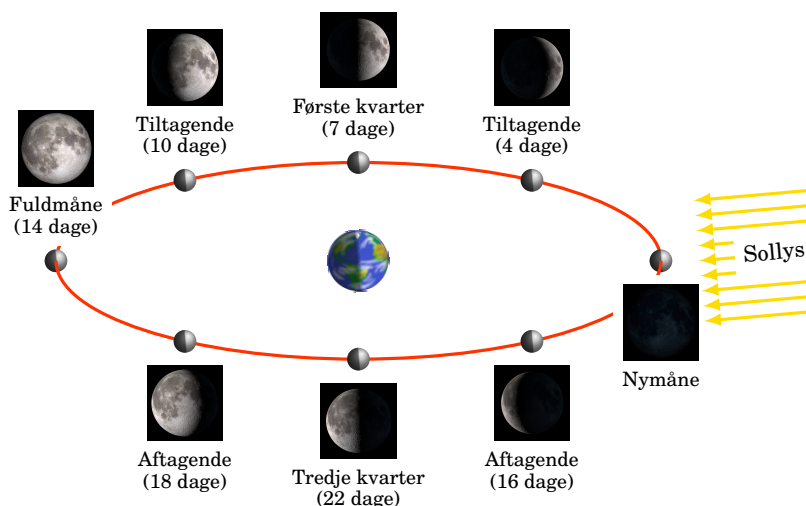
Hvordan ville det se ud hvis akse var parallel med ekliptika?

2-4 Månen

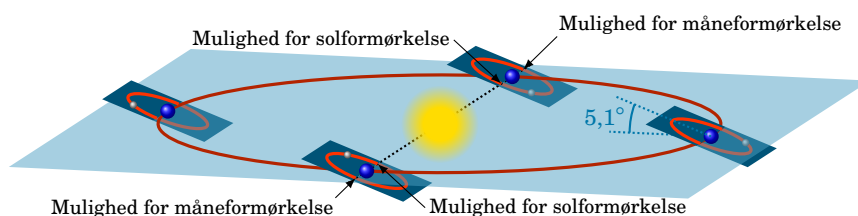
Det himmellegeme der ligger tættest på os, er Månen. Månen bevæger sig rundt om Jorden, samtidig med at Jorden bevæger sig omkring Solen. Grunden til at vi kan se Månen, er at lyset fra Solen reflekteres af Månen – hvor meget af Månen vi kan se her på Jorden afhænger så af hvordan Solen, Månen og Jorden ligger i forhold til hinanden, se figur 2.6.

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.

Figur 2.6: 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 [19].



Figur 2.7: Månens bane omkring Jorden ligger ikke i samme plan som Jordens bane omkring Solen. Figuren er ikke i korrekt skala.



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 2.6 er tidspunktet for de forskellige faser angivet i antal døgn efter nymåne.

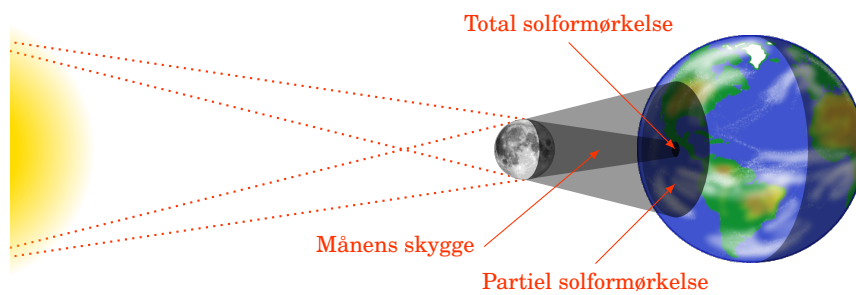
Som man kan se på figuren, er der fuldmåne når Månen befinder sig »bag ved« Jorden i forhold til Solen. At Jorden ikke altid skygger for månen ved fuldmåne, skyldes at det plan Månen befinder sig i, ligger $5,1^\circ$ forskudt i forhold til Jordens baneplan rundt om Solen (ekliptika). En vinkel på $5,1^\circ$ 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 2.7).

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 2.8 viser fænomenet.

Som man kan se på figur 2.7, er der to gange om året mulighed for sol- eller måneformørkelser. Hvis der skal være en formørkelse, kræver



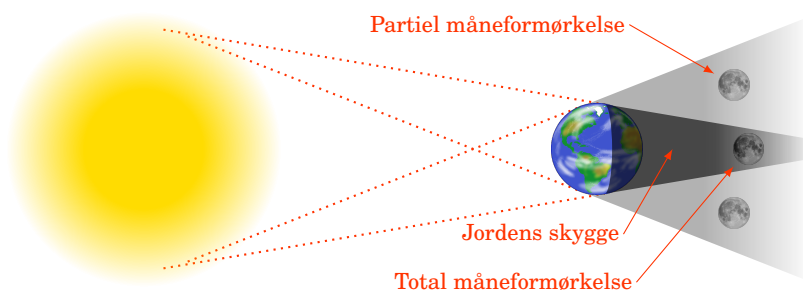
Figur 2.8: Under en solformørkelse bevæger Månen sig mellem Jorden og Solen. Fordi Månen er mindre end Jorden vil Månens skygge kun ramme en lille del af jordoverfladen – en solformørkelse kan derfor kun observeres hvis man befinder sig det rigtige sted på jordoverfladen.

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.[4] 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 forekommer formørkelser flere gange i løbet af disse perioder.

Måneformørkelse

Måneformørkelser sker, når Månen bevæger sig ind i Jordens skygge (se figur 2.9).



Figur 2.9: Under en måneformørkelse bevæger Månen sig ind i Jordens skygge.

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 2.10.



Figur 2.10: Månen under en total måneformørkelse.[23]

Stjerner

Stjerner er i virkeligheden gigantiske kugler af gas, og hovedparten af denne gas er hydrogen og helium. De er dannet ved at en gassky har trukket sig sammen under sin egen tyngdekraft, og i midten er der opstået så høj en temperatur og så højt et tryk at hydrogenatomer kan fusionere til helium. Herved udsendes der en utrolig mængde energi som elektromagnetisk stråling. Det er strålingstrykket fra disse kernereaktioner der holder stjernen i balance og sørger for at den ikke trækker sig yderligere sammen.[3]

3-1 Solens struktur

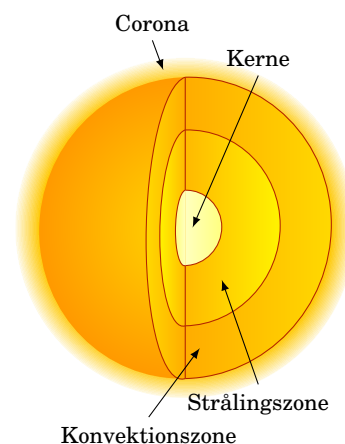
Det indre af vores stjerne, Solen, ser ud som på figur 3.1. Inderst finder man kernen hvor fusionsreaktionerne finder sted. I det indre af kernen er temperaturen omkring 15 mio. K og densiteten er omkring 150 g/cm^3 . Temperaturen og densiteten falder gradvist mod Solens overflade.

Når man er nået ca. 25% af afstanden mod overfladen, finder der ikke længere fusionsreaktioner sted.[6] Her er temperaturen faldet til omkring 7,5 mio. K, og densiteten er »kun« 20 g/cm^3 .

Strålingszonen, som ligger uden om kernen, strækker sig fra ca. 25% til 70% af afstanden til overfladen. Her bevæger energien fra kernen sig som stråling på vej mod overfladen. Strålingen tager ikke en lige vej, men bliver absorberet og emitteret af partikler undervejs.

Det yderste lag af Solen kaldes konvektionszonen. Her er temperaturen igen lavere, og det betyder at nogle af de tungere atomer ikke eksisterer fuldstændigt som plasma, men har beholdt nogle af deres elektroner. Det betyder igen at lyset har sværere ved at trænge igennem denne zone, idet nogle af atomerne absorberer lyset. Herved bliver konvektionszonen varmet op af strålingen fra kernen hvorved den faktisk begynder at »koge« hvilket skaber konvektionsstrømme.

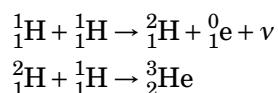
Konvektionszonen slutter ved Solens synlige overflade. Ved Solens overflade er temperaturen 5700 K, og densiteten er faldet til $2 \cdot 10^{-7} \text{ g/cm}^3$. Her begynder coronaen som er Solens atmosfære.[6]

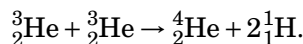


Figur 3.1: Solens opbygning.

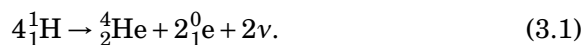
3-2 Fusion af hydrogen

I det indre af Solen fusionerer hydrogen til helium. I virkeligheden er der tale om en kæde af kernereaktioner:





Analysere man disse reaktioner, når man frem til at nettoreaktionen er



dvs. fire ${}^1_1\text{H}$ -kerner fusionerer og giver én ${}^4_2\text{He}$ -kerne, to positroner og to neutrinoer. Det er disse kernereaktioner der er årsag til energiuudstrålingen fra Solen. Solens udstrålede effekt er $3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$, dvs. reaktionen (3.1) må forløbe mange gange i sekundet.

Øvelse 3.1

Solens effekt er på $3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

- Bestem Q -værdien for processen (3.1).
- Hvor mange af disse reaktioner vil der være pr. sekund i Solens kerne?
- Hvor meget masse forsvinder der pr. sekund?

Solens samlede masse er $1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

- Hvor stor en del af Solens masse forsvinder der pr. sekund pga. fusionsreaktioner?

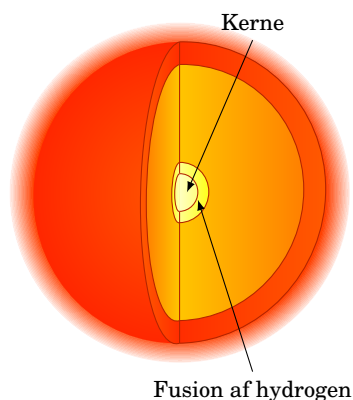
3-3 Stjerners udvikling

Det er klart at en stjerne som Solen ikke kan brænde evigt, for på et tidspunkt vil det meste af hydrogenen i kernen være fusioneret til helium. Når det sker, vil strålingstrykket fra kernen være mindre end tyngdekraften, dvs. stjernen begynder at trække sig sammen. Herved bliver der endnu varmere i kernen, og på et tidspunkt bliver der varmt nok til at helium kan fusionere til beryllium og carbon, mens fusionen af hydrogen til helium faktisk fortsætter i en tynd skal omkring kernen (se figur 3.2).

Det strålingstryk der skabes herved, er tilstrækkeligt til at de ydre dele af stjernen udvider sig. Stjernen bliver mange gange større end den var, og dens overflade bliver faktisk koldere – så stjernens farve bliver mere rødlig. Når en stjerne når dette stadie, kalder man den en rød kæmpestjerne. Når det sker for Solen vil dens radius ende med at være lige så stor som afstanden fra Solen til Jorden.[3]

På et tidspunkt vil der ikke være tilstrækkeligt med helium tilbage i kernen, og stjernens kerne vil igen begynde at trække sig sammen. På dette tidspunkt består kernen mest af carbon og oxygen. Hvis stjernen er på størrelse med Solen, vil kernen trække sig sammen og varme så meget op at der kan forekomme fusion af hydrogen og af helium i skaller uden om kernen, men der er ikke tilstrækkelig med masse til at varme op sådan at der sker yderligere fusion i kernen.

På et tidspunkt går fusionen derfor i stå, og de yderste dele af stjernen vil drive væk, således at den meget varme kerne af carbon og oxygen står tilbage. Denne kerne er på størrelse med Jorden, men er stadig utrolig varm. Sådan et objekt kaldes en hvid dværgstjerne.[3]

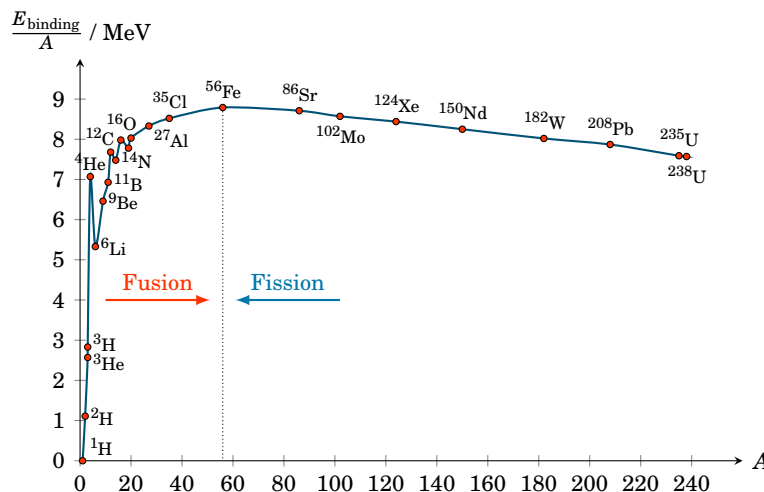


Figur 3.2: En rød kæmpestjerne. I kernen fusionerer helium til carbon, mens fusion af hydrogen stadig finder sted i en skal omkring kernen.

Hvis stjernen til gengæld er væsentligt større end Solen,¹ kan temperaturerne i kernen nå højt nok op til at carbon og oxygen også kan fusionere. Stjernen går så igennem en serie af forskellige fusionsreaktioner, indtil kernen til sidst består af jern.

Figur 3.3 viser bindingsenergien pr. nukleon for diverse grundstoffer. Af grafen fremgår det at jern er det grundstof der har den højeste bindingsenergi pr. nukleon. Det betyder at man hverken kan få energi ud af at fusionere jern eller ved at spalte det.

¹Hvis dens masse er ca. 10 gange Solens eller mere.



Figur 3.3: Bindingsenergi pr. nukleon for diverse nuklider.

Det betyder at når kernen på en tung stjerne er blevet til jern, går fusionsprocesserne i stå. Der er herved intet tryk fra stjernens indre, og i stjernens kerne er det således tyngdekraften der vinder. Kernen trækker sig sammen under tyngdekraften, og hvis kernen er tung nok bliver denne sammentrækning ved indtil kernen bliver så varm og tæt at jernatomerne spaltes til frie protoner og neutroner. Dette giver en voldsom forøgelse i densitet, og elektroner og protoner fusionerer herved til neutroner.

Kernen i stjernen består altså nu af neutroner, og densiteten ender med at blive så høj at neutronerne nærmest rører ved hinanden. Denne sammentrækning sker forholdsvist hurtigt og resulterer i en chokbølge der breder sig ud gennem stjernen. Stjernen eksploderer herved i en såkaldt *supernova*.

I en supernova-eksplosion frigiver stjernen så meget energi at nogle af grundstofferne i stjernen fusionerer til endnu tungere grundstoffer, det er herved at grundstoffer tungere end jern er dannet. Faktisk frigiver eksplosionen så meget energi at stjernen i nogle dage lyser lige så kraftigt som alle stjernerne i en normal galakse tilsammen.[3]

Tilbage efter eksplosionen ligger stjernens kerne af neutroner. Hvis denne kerne har en masse på mindre end ca. 2 solmasser vil den være stabil, og den er således blevet til en såkaldt *neutronstjerne* – et utroligt tæt objekt med en masse på ca. 2 gange Solens masse, men en radius på kun ca. 10 km.

Hvis kernen af neutroner derimod har en masse på mere end 2 solmasser, vil tyngdekraften være så stærk at neutronerne presses ind i hinanden, og kernen kolliderer til et sort hul.

Øvelse 3.2

En neutron har en masse på $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg og en radius på ca. 0,8 fm.

- a) Bestem densiteten af en neutron.

En neutronstjerne består af neutroner der er pakket helt tæt. Dens radius er ca. 10 km.

- b) Bestem massen af neutronstjernen.
c) Hvor mange solmasser svarer det til?

De eneste grundstoffer der blev skabt da Universet blev dannet i Big Bang, var hydrogen, helium og en ganske lille smule lithium. Men hvor kommer alt det andet så fra? Svaret på dette spørgsmål finder man netop ved at se på stjernerne. Mens de brænder, fusionerer stjernerne hydrogen til helium, helium til carbon, osv. Og når de brænder ud, vil de største stjerne eksplodere i en supernova-eksplosion som skaber endnu tungere grundstoffer ved fusion.

Disse nye grundstoffer kan så indgå i formationen af nye solsystemer. Det er tankevækkende at langt de fleste grundstoffer vi ser omkring os på Jorden, er blevet skabt længe inden vores jordklode blev dannet, da en massiv stjerne på et tidspunkt eksploderede i en supernova.

Afstandsmålinger i universet

Når man kigger ud i Universet, er alting meget langt væk. Men hvor langt væk er alting? Og hvordan måler man rent faktisk afstandene til stjerner og galakser? Stjernerne er jo så langt væk at de selv i et teleskop kun kan ses som en prik.

I kapitel 1 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). 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.

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

Til sammenligning er en astronomisk enhed kun

$$1 \text{ AU} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}.$$

4-1 Parallaxemetoden

Hvis man holder en blyant op foran ansigtet og lukker skiftevis det ene og så det andet øje, ser blyanten ud som om den flytter sig i forhold til baggrunden. Ved at måle hvor stor en vinkel blyanten flytter sig, kan man bestemme hvor langt væk fra ansigtet den er.

Det er selvfølgelig ikke så interessant i forhold til blyanter, her kunne man jo bare have taget et målebånd i stedet for at have besværet med at måle vinkler. Men når man måler afstande til stjerner, har målebånd ikke den store nytte.

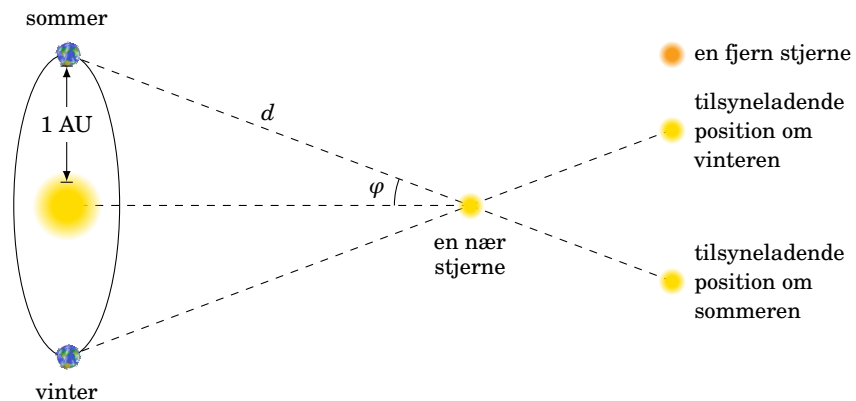
På figur 4.1 ses princippet i parallaxemålinger. Sigtelinjen til en stjerne flytter sig i løbet af det halve år der er mellem sommer og vinter, fordi Jorden bevæger sig rundt om Solen. Vinklen φ , som er angivet på tegningen, kaldes stjernens parallax. Vinklen som sigtelinjen ud til stjernen flytter sig, bliver målt i forhold til en baggrund af meget fjerne stjerner.

Ved almindelige trigonometriske overvejelser kan man udlede at

$$\sin(\varphi) = \frac{1 \text{ AU}}{d},$$

hvilket giver at afstanden til en stjerne er

Figur 4.1: En stjernes parallakse (φ) er defineret som halvdelen af vinklen mellem sigtelinjerne sommer og vinter. Da man kender afstanden fra Jorden til Solen (afstanden er $1 \text{ AU} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$), kan man vha. trigonometri finde afstanden d fra Jorden til stjernen.



$$d = \frac{1 \text{ AU}}{\sin(\varphi)}.$$

Størrelsesforholdene er dog nogle helt andre i virkeligheden, end de er på figuren. Den stjerne der ligger nærmest jorden (ud over Solen), er Proxima Centauri, som ligger ca. 4,24 lysår væk.

Når man måler stjernernes parallaker, har man brug for at omtale meget små vinkler. Dette gør man ved at dele 1° ind i 60 bueminutter ($60'$), som igen deles ind i 60 buesekunder ($60''$). Der gælder altså $1^\circ = 60' = 3600''$. Enheden *parsec* (pc) er defineret til at være den afstand en stjerne skal være i, for at dens parallakse er lige præcis $1''$.

Størrelsen af en parsec bliver derfor

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AU}}{\sin(1'')} = \frac{149,6 \cdot 10^9 \text{ m}}{\sin\left(\frac{1}{3600}^\circ\right)} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}.$$

Øvelse 4.1

- a) Hvor mange astronomiske enheder går der på 1 lysår?

Proxima Centauri ligger 4,24 lysår fra vores solsystem (det svarer til afstanden d på figur 4.1).

- b) Hvor stor er Proxima Centauris parallakse? Angiv resultatet i buesekunder.

Øvelse 4.2

Den danske astronom Tycho Brahe (1546–1601) er kendt for sine meget nøjagtige målinger af stjerners position på himlen. Hans mest nøjagtige instrumenter målte med en nøjagtighed på ca. $30''$, det var derfor ikke muligt på det tidspunkt at måle stjerners parallakse[14], hvilket faktisk var medvirkende til at Tycho Brahe forkastede det heliocentriske verdensbillede.

Med en nøjagtighed på ca. $30''$ på målingerne, vil en stjerne skulle have en parallakse mere end $30''$, for at man overhovedet kan måle at der er en parallakse.

- a) Hvor tæt på vores solsystem ville en stjerne være hvis dens parallakse var på $30''$? Bestem resultatet i meter, lysår og parsec.

4-2 Størrelsesklasser

Parallaxemetoden duer kun hvis afstanden ud til den stjerne der måles på, er under ca. 100 ly. Da Mælkevejen er ca. 200 000 ly i diameter, kan denne metode altså kun bruges til de allernærmeste stjerner i vores galakse. Hvis man vil måle større afstande, bliver man nødt til at se på lysstyrker i stedet.

I oldtiden inddelte den græske astronom Hipparchos (ca. 190–120 fvt.) stjernerne i størrelsesklasser fra 1–6, alt efter hvor kraftigt de lyste på himlen.[5] Denne inddeling baserede sig selvfølgelig på et individuelt skøn. I dag har man defineret en stjernes *tilsyneladende størrelsesklasse* ud fra målinger af stjernens lysintensitet

Tilsyneladende størrelsesklasse

$$m = k - \log\left(\frac{I}{1 \text{ W/m}^2}\right),$$

hvor I er stjernens lysintensitet (målt i watt pr. kvadratmeter).

Konstanten k i formlen ovenfor er valgt så stjerner der lige nøjagtigt kan anes med det blotte øje, har størrelsesklasse 6. På denne måde kommer en stjernes tilsyneladende størrelsesklasse nogenlunde til at passe med den gamle inddeling fra oldtiden.

For en stjerne definerer man også størrelsen *absolut størrelsesklasse* M som den størrelsesklasse en stjerne ville have hvis den befandt sig i afstanden 10 pc.

Der er en sammenhæng mellem m , M og afstanden til stjernen d som er givet ved:

$$m - M = 5 \cdot \log\left(\frac{d}{10 \text{ pc}}\right).$$

Øvelse 4.3

Solen har den tilsyneladende størrelsesklasse $m = -26,74$, og lysintensiteten er $I = 1360 \text{ W/m}^2$.

- Bestem konstanten k .
- Bestem solens absolutte størrelsesklasse, M .

Øvelse 4.4

Afstanden til stjerner der ligger under ca. 30 pc væk fra vores solsystem, kan måles vha. parallaxemetoden.

- I tabellen nedenfor ses målinger for 4 nære stjerner. Bestem deres absolutte størrelsesklasse M .

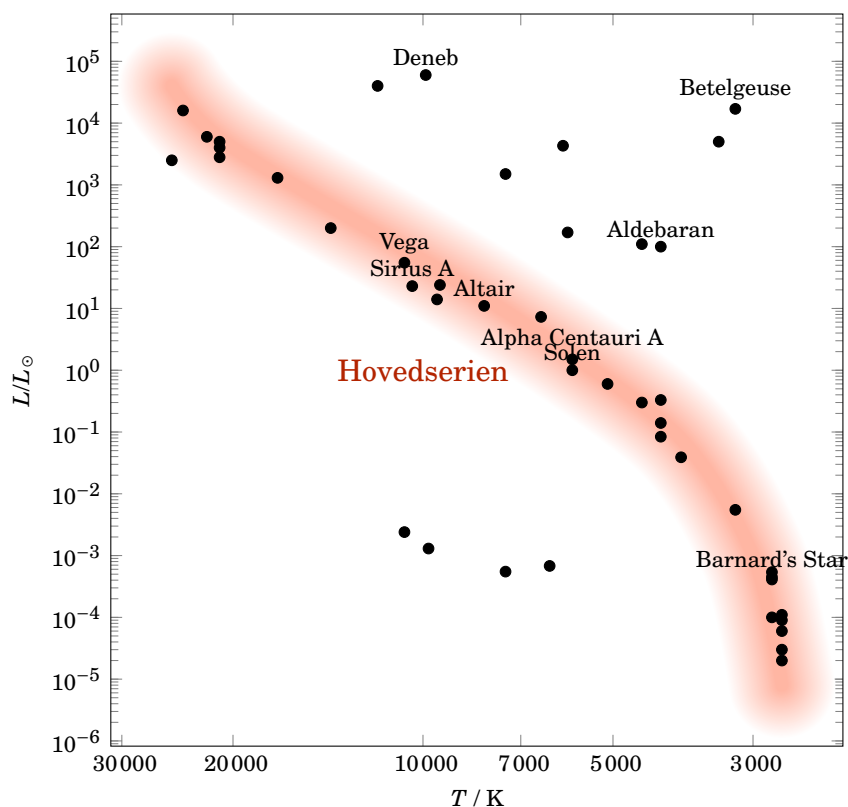
Stjerne	m	d / pc
Aldebaran	+0,85	21
Sirius	−1,46	2,7
Vega	+0,04	8,1
α -Centauri	−0,01	1,34

4-3 H-R-diagrammer

Afstandsbestemmelse vha. lysstyrke kræver at man kender den absolutte lysstyrke for det objekt man vil bestemme afstanden til.

For nære stjerner kan afstanden som nævnt bestemmes vha. paralaksemetoden. Hvis man kender afstanden ud til en stjerne kan man vha. målinger af stjernens lys her på Jorden bestemme hvor lysstærk stjernen er. Det viser sig at når man afbilder stjerners lysstyrke som funktion af deres overfladetemperatur, fordeles stjernerne sig nogenlunde som i diagrammet på figur 4.2. Dette kaldes et Hertzsprung-Russell-diagram (eller blot H-R-diagram) efter de to astronomer Ejnar Hertzsprung og Henry Norris Russell.

Figur 4.2: H-R-diagram. Begge akser er logaritmiske, og førsteaksen er aftagende.



Hvis man antager at andre stjerner fordeles sig på samme måde, kan man vurdere en stjernes absolutte lysstyrke ved at sammenligne med en anden stjerne med samme spektrum. Kender man den absolutte lysstyrke, og måler man den tilsyneladende lysstyrke her på Jorden, kan man derved bestemme afstanden til stjernen.

4-4 Andre lyskilder

Man kan som sagt måle afstanden til objekter i Universet ved at se på deres lysstyrke – men det kræver at man kender deres absolutte lysstyrke for at man kan bestemme afstanden til dem. Nogle af de objekter man kender lysstyrken på, er de såkaldte *cepheider* eller variable stjerner. Det er en speciel type stjerner som varierer i lysstyrke. Astronomen Henrietta Leavitt opdagede i starten af 1900-tallet [12]

at der er en sammenhæng mellem cepheidernes lysstyrke og deres periode. Vha. cepheider kan man måle afstande ud til ca. 100 mio. lysår.

En endnu stærkere lyskilde er type 1A supernovaer. Det er en speciel type supernova der kan forekomme når én af stjernerne i et dobbeltstjerne-system¹ er blevet til en hvid dværgstjerne. Den hvide dværgstjerne vil akkumulere masse fra den anden stjerne pga. tyngdekraften, og når den har masse nok vil den eksplodere i en supernova. Fordi det altid sker på samme måde, har disse supernovaer altid samme lysstyrke.[3]

¹Dvs. et system hvor to stjerner roterer omkring hinanden

Vha. type 1A supernovaer kan man bestemme afstande ud til ca. 30 mia. lysår, simpelthen fordi supernovaer er så lysstærke. Til gengæld kræver det at man får øje på dem, idet en supernova kun lyser i et begrænset tidsrum. Man skal altså få øje på dem når de forekommer eller kort tid efter.

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). Koens mælk gav Ymer næring, og koen stod samtidig og slikkede salt af sten 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.

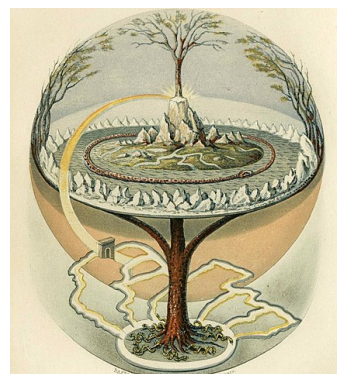
Disse tre dræbte Ymer og dannede kosmos af hans kropsdele. Af kødet dannedes jorden, af knoglerne klipper, af blodet hav, af hans hjerneskal himmelhvælvingen. Af hans øjenbryn blev menneskenes hjem, Midgård, bygget.[16]

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.

5-1 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



Figur 5.1: Verdens opbygning ifølge den nordiske mytologi. I midten ses verdensstræet Yggdrasil.[18]

med forudsigelserne fra Newtons tyngdelov. Man prøvede at forklare afvigelserne med en endnu uopdaget planet, som man kaldte Vulcan, hvis tyngdekraft ville påvirke Merkurs bane sådan at målingerne passede med teorien.[13] 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 kobledes 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 forholdsvis 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.[15] Men et statisk univers er ustabilt, 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 ustabilt. 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.[15]

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

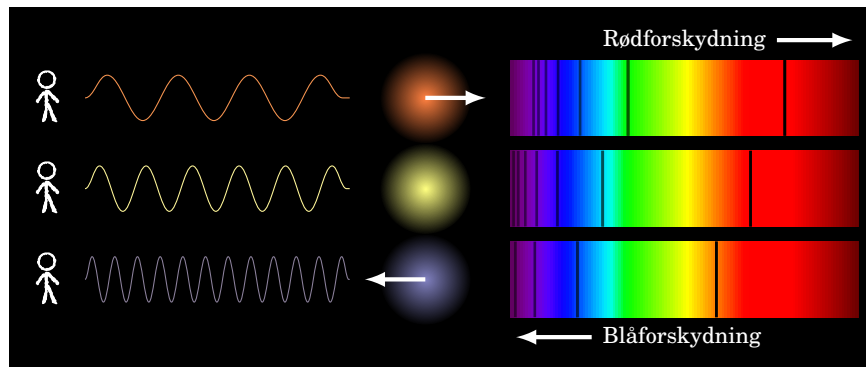
¹Det har senere vist sig, at der faktisk er brug for den kosmologiske konstant idet universets udvidelse er accelererende, hvilket kan forklares ud fra en frastødende kraft.[2, 17]

5-2 Den kosmiske rødforskydning

Den første astronom der opdagede at fjerne galakser i Universet bevæger sig væk fra os, var amerikaneren Vesto Slipher.[8] 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 netop bliver »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 5.2).

Man definerer rødforskydningen til at være størrelsen z givet ved



Figur 5.2: Når en lyskilde bevæger sig væk fra en observatør, bliver de observerede bølgelængder længere end de udsendte, dvs. lyset bliver rødforskudt. Omvendt bliver lyset blåforskudt 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 »stjernetågerne« 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.

I slutningen af 1920'erne målte Edwin Hubble også på rødforskydningen, men han kombinerede sine målinger med nyopfundne teknikker til at måle *afstanden* til fjerne galakser (se figur 5.3). 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

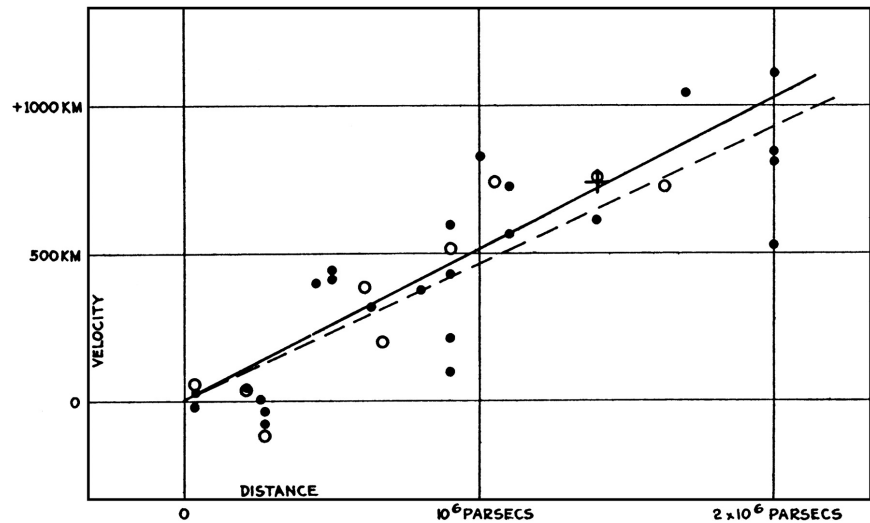
$$v = H_0 \cdot r.$$

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 5.3 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.[8] Hubble-loven holder dog stadig.

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

Figur 5.3: 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 [8].

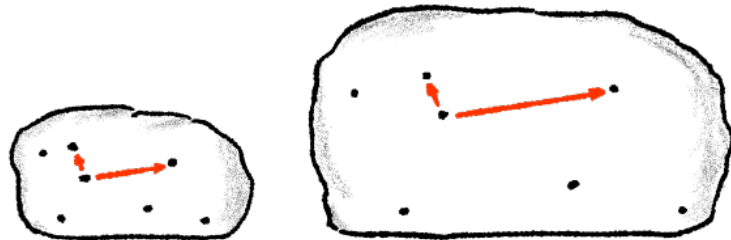


Hubble-konstanten er som sagt en proportionalitetskonstant. Det betyder altså at når $H_0 = 67,4 \text{ km/s/Mpc}$, vil hastigheden væk fra os øges med $67,4 \text{ km/s}$ pr. megaparsec afstanden vokser med.

5-3 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.

Figur 5.4: 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.



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 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

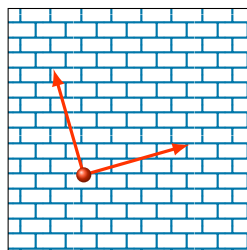
Idet der ikke er noget centrum for Universets udvidelse, er alle steder i Universet i princippet ens. Dette stemmer overens med det såkaldte

kosmologiske princip der siger at Universet er ens overalt. Hermed menes at

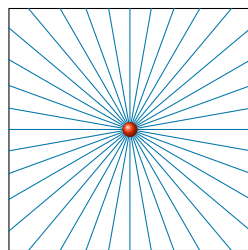
Det kosmologiske princip

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

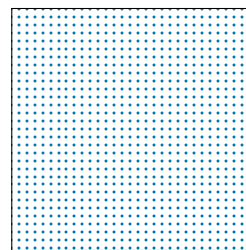
Figur 5.5 viser forskellen på disse to begreber. Mønsteret på figur 5.5(a) er homogent, men det er ikke isotropt. Kigger man i forskellige retninger (vist med de to pile), vil der nemlig ikke være lige langt mellem stregerne man ser. Figur 5.5(b) er et isotropt i det viste punkt, men mønsteret er bestemt ikke homogent. Derimod viser figur 5.5(c) et mønster der er både homogent og isotropt.



(a) Homogent.



(b) Isotropt.



(c) Homogent og isotropt.

Figur 5.5: 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 massetætheden 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-Lemaître's 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. Kalder 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.

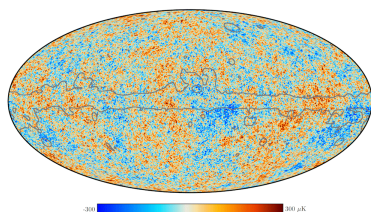
Den kosmiske baggrundsstråling

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.[12]

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 ind til videre er foretaget af Planck-satellitten der var opsendt fra 2009–2013. Figur 5.6 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 5.6: Den kosmiske baggrundsstråling målt af Planck-satellitten.[20]

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.

5-4 Universets udviklingshistorie

På nuværende tidspunkt har man en ret god model for hvordan Universets udvikling er forløbet. Tidslinjen er nogenlunde denne:[10]

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 brøkdel 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 annihilerede 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.

Bibliografi

- [1] Erik Strandgaard Andersen, Paul Jespersgaard og Ove Grønbæk Østergaard, red. *Databog fysik kemi*. 11. udg. F & K forlaget, 2012.
- [2] Steven Carlip. *The Cosmological Constant*. 30. dec. 2020. URL: <https://phys.libretexts.org/@go/page/1284> (hentet 26.04.2024).
- [3] Jørgen Christensen-Dalsgaard. *Lecture Notes on Stellar Structure and Evolution*. 8. udg. Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, aug. 2023.
- [4] Fred Espenak. *Periodicity of Solar Eclipses*. NASA. 12. jan. 2012. URL: <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEsaros/SEperiodicity.html> (hentet 04.05.2024).
- [5] Michael S. Evans. »Achieving continuity: a story of stellar magnitude«. I: *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 41.1 (2010), s. 86–94. ISSN: 0039-3681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2009.12.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0039368109000934>.
- [6] David H. Hathaway. *The Solar Interior*. NASA. 22. sep. 2022. URL: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml> (hentet 09.05.2024).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Mikhail Marov. *The Formation and Evolution of the Solar System*. Maj 2018. DOI: [10.1093/acrefore/9780190647926.013.2](https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.2). URL: <https://oxfordre.com/planetaryscience/view/10.1093/acrefore/9780190647926.001.0001/acrefore-9780190647926-e-2>.
- [10] L. Mastin. *Big Bang Timeline*. Okt. 2009. URL: https://www.physicsoftheuniverse.com/topics_bigbang_timeline.html (hentet 17.05.2023).
- [11] Randall Munroe. *Space Typography*. URL: <https://xkcd.com/2863> (hentet 01.05.2024).
- [12] Roger G. Newton. *From Clockwork to Crapshoot: a history of physics*. Cambridge, Massachusetts: The Belknap Press of Harvard University Press, 2007.
- [13] 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](https://doi.org/10.1007/s10509-023-04210-5). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10509-023-04210-5>.
- [14] Erling Poulsen. *Tycho Brahes instrumenter*. Rundetaarn. URL: <http://www.rundetaarn.dk/> (hentet 12.01.2019).
- [15] Domingos Soares. *Einstein's static universe*. 2012. arXiv: [1203.4513](https://arxiv.org/abs/1203.4513) [physics.gen-ph].
- [16] Finn Stefánsson. »Kosmologi«. I: *Nordisk mytologi*. lex.dk, 5. aug. 2011. URL: <https://mytologi.lex.dk/kosmologi> (hentet 02.05.2023).

- [17] 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

- [18] Oluf Olufsen Bagge. *Yggdrasil*. Prose Edda, 1847.
- [19] Bill Dunford. *Phases of the Moon*. NASA. URL: <https://www.universetoday.com/author/pars3c/page/3/> (hentet 04.05.2024).
- [20] ESA and the Planck Collaboration. *2018 Planck Results*. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery> (hentet 30.04.2024).
- [21] Bob King. *Time exposure centered on Polaris, the North Star*. 5. nov. 2015. URL: <https://www.universetoday.com/tag/polaris/> (hentet 30.04.2024).
- [22] 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).
- [23] Jathin Premjith. *Lunar Eclipse and Occultation*. 2011. URL: <https://www.universetoday.com/tag/astronomy-photographer-of-the-year/> (hentet 30.04.2024).