Antik og Moderne Kosmologi

Søren Hindsholm

14. april 2001

Indhold

Kapitel 1

Oldtiden

1.1 Mytologiske Verdensbilleder

Ordet ‘Verdensbillede’ findes kun på tysk og de skandinaviske sprog. Med dette ord mener vi *den store helhed vi lever i, og den måde den virker på*, altså Jorden, havet, himlen og dens lysende fænomener. På flere andre sprog, f.eks. engelsk og fransk, bruger man i stedet ordet ‘kosmologi’. De første verdensbilleder vi har, stammer fra *Babylon* (området mellem floderne Eufrat og Tigris, det nuværende Irak), *Israel* og *Grækenland*. Det israelitiske kan man finde i Det gamle Testamente, kap. 1, vers 1–19:

> I begyndelsen skabte Gud himmelen og jorden. Og jorden var øde og tom, og der var mørke over verdensdybet. Men Guds Ånd svævede over vandene. Og Gud sagde: “Der blive lys!” Og der blev lys. Og Gud så, at lyset var godt, og Gud satte skel mellem lyset og mørket, og Gud kaldte lyset dag, og mørket kaldte han nat. Og det blev aften, og det blev morgen, første dag.
>
> Derpå sagde Gud: “Der blive en hvælving midt i vandene til at skille vandene ad!” Og således skete det: Gud gjorde hvælvingen og skilte vandet under hvælvingen fra vandet over hvælvingen; og Gud kaldte hvælvingen himmel. Og det blev aften, og det blev morgen, anden dag.
>
> Derpå sagde Gud: “Vandet under himmelen samle sig på ét sted, så det faste land kommer til syne!” Og således skete det; og Gud kaldte det faste land jord, og stedet, hvor vandet samlede sig, kaldte han hav. Og Gud så, at det var godt. Derpå sagde Gud: “Jorden lade fremspire grønne urter, der bærer frø, og frugttræer, der bærer frugt med kerne, på jorden!” Og således skete det: Jorden frembragte grønne urter, der bar frø, efter deres arter, og træer, der bar frugt med kerne, efter deres arter. Og Gud så, at det var godt. Og det blev aften, og det blev morgen, tredje dag.
>
> Derpå sagde Gud: “Der komme lys på himmelhvælvingen til at skille dag fra nat, og de skal være til tegn og til fastsættelse af højtider, dag og år og tjene som lys på himmelhvælvingen til at lyse på jorden!” Og således skete det: Gud gjorde to store lys, det største til at herske om dagen, det mindste til at herske om natten, og stjernerne; og Gud satte dem på himmelhvælvingen til at lyse på jorden og til at herske over dagen og natten og til at skille lyset

> fra mørket. Og Gud så, at det var godt. Og det blev aften, og det blev morgen, fjerde dag.

I den rige græske mytologi findes der flere spændende beretninger om verdens opståen og indretning; hér tager vi et stykke fra Grækenlands nationaldigter, *Homér*. Det står i *Iliádens* 18. sang, vers 483-89, hvor vi hører om et skjold som smede-guden Hefaístos laver til helten og krigeren Akhílleus:

> Dér afbilded han Jorden, den hvælvede Himmel og Havet,
> Dér den utrættelig ilende Sol, Fuldmaanen og alle
> Tindrende Stjerner, som sidder i Krands paa Himmelen vide.
> Dér var Pleiáder at see, Hyáder, Oríon den stærke,
> Dér var Bjørnen,[1] som Himmelens Vogn man ogsaa benævner,
> Hist den dreier sig om, og fæstner sit Blik mod Oríon.
> Det er den eneste Stjerne, som ei i Okéanos[2] bades.

Disse beskrivelser er ikke geometriske eller matematiske. Men de svarer godt til vores erfaringer, for de nævner det som alle mennesker der bor i kystområder, bemærker: I midten, hvor vi bor, er der land, omkring det ligger vandet, og over os er himlen, som er domineret af Solen og Månen. Den manglende matematisk-geometriske interesse modsvares af en stor interesse for verdens tilblivelse, og den beskrives *med ord og begreber fra vores daglige sprog*, det er altså ikke et videnskabeligt sprog vi finder i myterne.

Denne brug af daglige ord og begreber til at beskrive og forklare naturen er særlig tydelig i den græske mytologis sprog: Tordenvejr forklares med at Zeus ryster sin tordenkile, jordskælv kommer fra Poseídon når han slår til jorden med sin trefork, Solen er en vogn som Hélios kører hen over himlen — i Homers tekst står der netop Hélios —, kornet er Deméter osv. Konsekvensen er en verden som styres efter gudernes luner og forgodtbefindende — et træk der også er tydeligt i Det gamle Testamente. Derfor må de formildes eller ligefrem forpligtes med ofre og bønner eller magi; de to første prøver at bevæge gudernes vilje, den sidste at binde deres vilje. Endelig opstår der en naturlig lyst til at kigge guderne i kortene: *divination*.[3] Her er astrologien specielt interessant fordi den prøver at bruge verdensbilledet til at sige noget om de skjulte kræfter den antager der ligger bag. Astrologien fortsætter helt frem til — ja vore dage, og det viser at en moderne videnskabelig opfattelse af verdensbilledet ikke knuser andre opfattelser selvom den er dem overlegen.

1.2 Fra myte til spirende naturvidenskab

Babylonerne identificerede planeterne med guder. Derfor var det naturligt for dem ved hjælp af planeterne at forsøge at forudsige begivenheder; det skete ved at de havde optegnelser over ny- og fuldmåner, formørkelser, planeters tilsynekomst og forsvinden.

Babylonerne inddelte tiden ved hjælp af en månekalender, og måneden gik fra første observation af nymåne til dagen for næste observation af nymånen. Da denne tid ikke er konstant, men svinger mellem 29 og 30 dage, udviklede

[1] 'Bjørnen' er Store Bjørn.
[2] 'Okeanos' er havet omkring jorden.
[3] Divination er kunsten at spå, f.eks. ud fra planeternes stilling da en person blev født.

de tabeller så de kunne forudberegne deres kalender. Herved fik de også øje på monstret i formørkelser. Dette mønster er periodisk.[4]

Naturens periodiske væsen står i modsætning til opfattelsen af guders lunefulde handlemåde. Derfor fornemmede man efterhånden en konflikt mellem disse to ting: Guderne styrer verden efter forgodtbefindende, men når vi tæller og laver optegnelser, er der et mønster i naturen som ikke virker tilfældigt. Disse overvejelser gjorde man sig første gang for alvor i *de græske byer i Lilleasien* (Det nuværende Tyrkiet) i 6. og 5. årh. f.Kr. I dette område levede *Herodót* (ca. 484–429 f.Kr.), og i hans værk *Históriai* VII, 129 kan man læse et godt eksempel på hvordan disse to opfattelser var i konflikt:

> Folk i Thessálien siger selv at guden Poseídon lavede den kløft som floden Peneíos strømmer igennem, og det er en rimelig påstand. For enhver som mener at Poseidon ryster jorden, og at det der deles af jordrystelse, er denne guds værk, han vil når han ser dette, sige at det er Poseidon der har gjort det. Den spaltning af bjergene er nemlig resultatet af en jordrystelse, forekom det mig.

Grækerne stod i en — vedgået — gæld til babylonerne og ægypterne, f.eks. rejste Herodot til disse lande, og i stykket her bemærker man at folk tror én ting (den gamle forestilling at Poseidon med sin trefork laver jordskælv og kløfter i jorden), men Herodot ikke vil lade den gamle forklaring fremstå som sin egen, han antyder en *natur-lig* i betydningen 'som ligner den natur der skal forklares', ved at lægge særlig vægt på jordrystelsen som årsag til kløften. Naturen forklares altså med årsager fra naturen i stedet for overnaturlige årsager som en guds indgriben.

1.2.1 Den joniske naturfilosofi

Men lad os vende tilbage til tænkerne i Lilleasien. De kaldes nu for de *joniske naturfilosoffer* fordi dette område i oldtiden var beboet af den græske stamme der kaldes den joniske. Disse tænkere prøvede som de første at finde tilbage til verdens oprindelige stof. Dette filosofiske nybrud hang sammen med en anden udvikling der samtidig fandt sted i Grækenland. I de mange bystater fik borgerne større indflydelse på samfundet, der ofte styredes af en folkeforsamling som mødtes og diskuterede på byens torv. Samfundets love blev skrevet ned, og i diskussionerne lærte borgerne at kende begreber som *årsag* og *virkning*.

Forslagene til det oprindelige stof var forskellige: vand; det udelelige; luft, der kan fortættes til vand, der kan stivne til is.[5] Det blev *Empédokles* (midten af det 5. årh. f.Kr.) der lavede hvad vi lidt dristigt kunne kalde verdens første periodiske tabel. Den indeholder fire elementer.

Γ jord (tør og kold)

Υ vand (våd og kold)

A luft (våd og varm)

Π ild (tør og varm)

[4]'Periodisk' kommer af græsk *períodos*: 'kredsløb', og betyder derfor at noget gentages med faste mellemrum.

[5]Denne sidste teori viser at de havde en opfattelse af stoffers tre almindeligste tilstandsformer.

Måske det på os virker lidt naivt at alle stoffer og ting skulle være sammensat af disse fire ting i forskellige forhold, men idéen er ikke dum. Disse fire grundlæggende stoffer er centrale i naturen, og ved at give dem særlige egenskaber (tørhed, kulde osv.) kan man give en *årsag* til at alle mulige andre stoffer er forskellige, ved at sige at andre stoffers karakter skyldes stoffets specielle sammensætning af de fire elementer. Endvidere hænger de fire stoffers egenskaber sammen med deres *virkning*. Man bliver våd og kold af vand, ildens flammer varmer og tørrer. Hermed var grækerne nået et skridt frem mod en mere videnskabelige opfattelse. I stedet for at sige at verden blot er fyldt med forskellige ting, som guder havde skabt, prøvede de her at forenkle det mangfoldige og at give en *generel* forklaring hvor *årsag* og *virkning* spillede en rolle.

1.2.2 Pythagoræerne

I *Syditalien*[6] var der i 6. årh. f.Kr. et specielt kollektiv eller samfund grundlagt af filosoffen *Pythágoras*, som selv var kommet fra Lilleasien. De foretog nogle eksperimenter, og fandt bl.a. ud af at musikkens intervaller oktav, kvint og kvart dannes ved at dele en streng i talforholdene 1:2, 2:3 og 3:4. De arbejdede også med geometri og antog som de første at Jorden må være rund, — sandsynligvis fordi de mente at cirklen og kuglen var specielt perfekte figurer. Endelig var de voldsomt optaget af talteori, og det hele endte i højere talmystik, da de mente at tingene ligefrem bestod af tal: retfærdighed = 4, manden = 2, kvinden = 3, hvorfor ægteskabets nummer bliver 5 (2+3). 10 blev opfattet som et fuldkomment tal, vel nok på grund af den figur der kan dannes med 1, 2, 3 og 4, som giver summen 10. De troede på sjælevandring og blev derfor vegetarianere.[7] Uanset disse mystiske træk tog pythagoræerne det andet vigtige skridt frem mod en videnskabelig opfattelse: Som de første prøvede de at beskrive naturen med en *kvantitativ, matematisk metode*, sådan som deres undersøgelser af sammenhængen mellem en strengs længde og toneintervaller er et eksempel på.

1.2.2.1 Øvelse: Pythagoras' figurer

Nu skal du afbilde tallene 1, 2, 3 og 4 med prikker så 1 bliver et punkt, 2 to prikker på linje, 3 tre på linje osv. Prøv at kombinere disse prikker så du får en køn figur der viser tallene 1, 2, 3 og 4, og som har summen 10.

1.3 Astronomi

1.3.1 Den før-videnskabelige astronomi

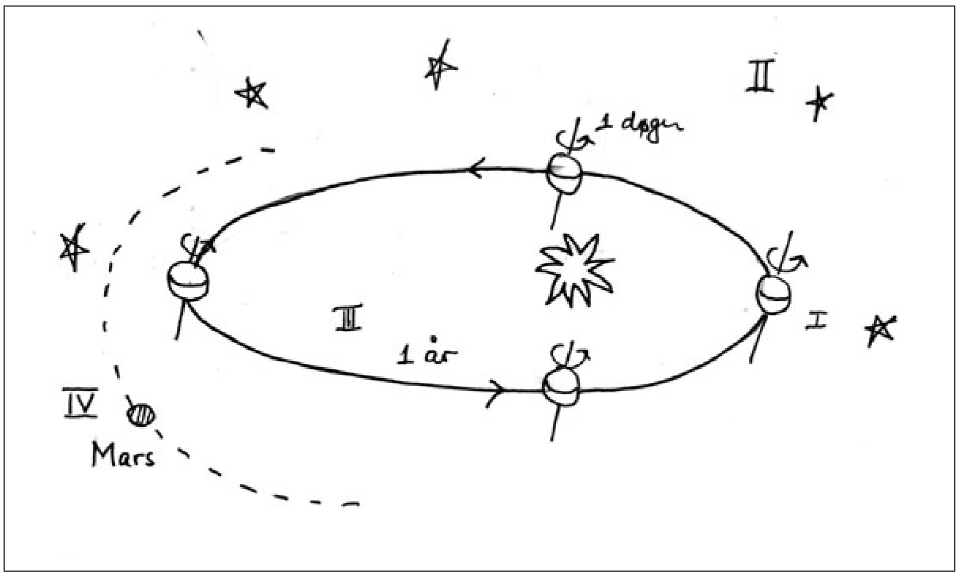
Fra den ældste tid har man i landbrugskulturer som den græske betragtet himlen for at holde styr på årstiderne og således få en kalender til brug for pasningen af markerne med deres vækster:

> Men når Oríon og Sírius kommer op midt på himlen, og den rosenfingrede morgen kan se Arctúrus, så, Perses, skal du plukke alle dine druer og bære dem hjem.

[6] Området var på dette tidspunkt delvist græsk.

[7] — en gris smager jo ikke så godt hvis man tror man samtidig spiser sin fætter, der var sjov, men også så slem at han nok er genfødt som et svin.

— skriver *Hesiód* i digtet *Værker og Dage*. Men man havde også brug for mere præcise observationer af himlen til at lave en rimelig kalender. Græske kalendere var i almindelighed i en sørgelig forfatning, men selvom astronomerne faktisk kunne gøre det vældig godt, tog man kun langsomt og delvist imod deres forbedringsforslag. Det var under disse undersøgelser man opdagede at årstiderne ikke er lige lange, og man fik samlet observationer, som er en forudsætning for astronomiske teorier. Inden vi ser på grækernes astronomiske teorier, behøver vi først et blik på de himmel-fænomener teorierne skulle forklare.



Figur 1.1: På himlen ser vi fem forskellige typer bevægelser. I: Den daglige rotation. II: Stjernebilledernes årlige vekslen. III: Solens årlige vandring fra vest mod ost gennem stjernebilleder. IV: Planeternes stadige vandring gennem de samme stjernebilleder. (Bevægelse V er vist på figurerne 1.2 og 1.3.)

1.3.2 Bevægelser på himlen

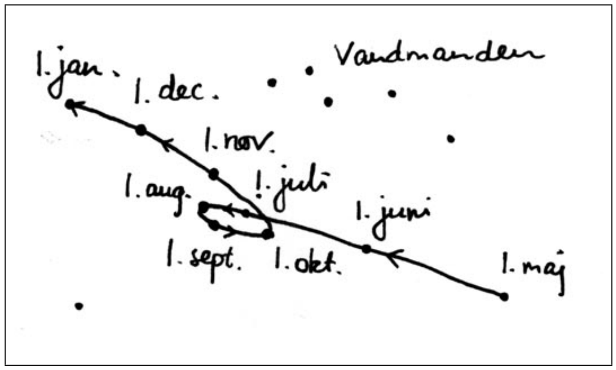
På himlen er der fem forskellige typer bevægelser som en ordentlig astronomisk teori må kunne forklare (i parentes er givet den moderne forklaring på fænomenet), se figur 1.1:

I Himmelkuglen roterer dagligt en omgang (fordi Jorden roterer en gang i døgnet).

II I årets løb kan vi om natten se forskellige stjernebilleder (fordi samme punkt på Jorden under dens årlige tur omkring Solen, om natten vender ud mod forskellige dele af verdensrummet).

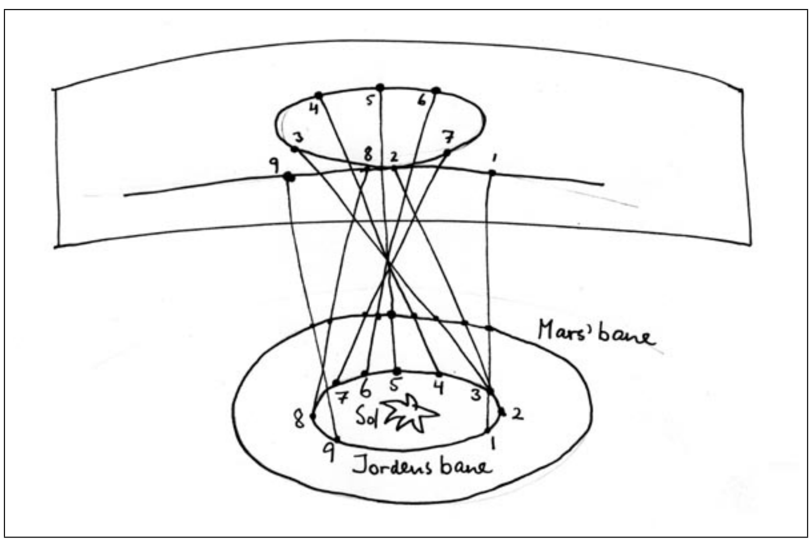
III Solen bevæger sig i årets løb fra vest mod øst gennem en række stjernebilleder (fordi Jorden årligt går mod uret rundt om Solen).

IV Planeterne går i årets løb gennem den samme række stjernebilleder, i samme retning som Solen, men med forskellige hastigheder (skyldes også Jordens årlige vandring om Solen).



Figur 1.2: Den V. bevægelse: Mars' bane fra d. 1. maj 1956 til d. 1. januar 1957. Planeten stod stille d. 11. august og d. 12. oktober; imellem disse datoer gik den baglæns.

V Af og til stopper planeterne op og går et lille stykke tilbage inden de fortsætter mod øst igen, den såkaldte *retrograde* bevægelse (dette fænomen kommer af planetens og Jordens indbyrdes hastighed og deres indbyrdes position), se figurerne 1.2 og 1.3.

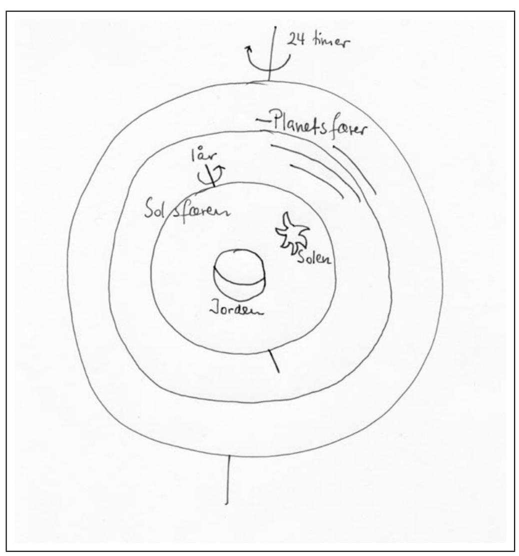


Figur 1.3: Skematisk fremstilling af retrograd bevægelse.

1.3.3 De første astronomiske teorier

Oldtidens to største filosoffer, *Pláton* (428–348 f.Kr.) og *Aristóteles* (384–322 f.Kr.), fik stor indflydelse på det der siden skulle blive 'oldtidens verdensbillede'. Platons betydning var først og fremmest at han bad sin elev *Eudóxos* om at forklare himlen *matematisk*, og det vil i oldtiden sige: *med geometri*. Bevægelserne I–III lod sig let forklare. Jorden ligger stille i midten, alle stjernerne er yderst på indersiden af en kugleskal (himmelkuglen), og den drejer sig en omgang i døgnet (I). Solen følger med denne kugleskals bevægelse, men samtidig har den sin egen bevægelse; den bevæger sig nemlig på kugleskallen så den i løbet af et år er kommet en tur rundt i den, fra vest mod øst (II og III).

Men bevægelserne IV og V er vanskelige at forklare, for planeternes bevægelser er set fra Jorden særdeles uregelmæssige.[8] Eudoxos prøvede at løse problemet ved at anbringe planeterne på kugleskaller,[9] og sætte dem sammen, den ene uden om den anden, sådan at de drejede om forskellige akser, med forskellige hastigheder. På denne måde kan man godt få en planet til at standse og gå lidt tilbage, set fra Jorden, men løsningen var alligevel kun en delvis succes. Banekurverne passede ikke altid lige godt med observationerne; for Mars og Venus var den helt gal. Årstidernes forskellige længde kunne teorien ikke klare, og endelig forklarede den ikke at en planets størrelse varierer. Men i en anden henseende fortjener Eudoxos vores respekt: Det var første gang nogen prøvede med en simpel *geometrisk model* at forklare noget der tager sig ganske kompliceret ud; astronomi var hermed opstået som en videnskab der ved hjælp af matematik/geometri demonstrerer hvorfor tingene ser ud som de gør. Kallíppos (sidste halvdel af 4. årh. f.Kr.) gik videre ad Eudoxos' vej, og Aristoteles endte med at have 56 kugleskaller i sving, i fortsatte forsøg på at få modellen til at passe med de baner man observerede på himlen. Aristoteles' model hang sammen med læren om grundstofferne og deres naturlige steder, og det fører os frem til det *aristoteliske verdensbillede*.



Figur 1.4: Forenklet fremstilling af Aristoteles' univers uden de mange planetsfærer.

1.3.4 Det aristoteliske verdensbillede

Aristoteles brugte Empedokles' lære om de fire grundstoffer og den teori man kalder læren om de *naturlige steder*. Jordens naturlige sted er nederst, for sten og jord søger jo altid nedad. Ildens naturlige sted er øverst oppe, for flammer søger opad, op gennem luften. Vand lægger sig over jord, og luften søger op over vandet. Vi får altså rækkefølgen jord-vand-luft-ild, og Jorden må som den nederste og tungeste ligge ubevægelig i midten af verden.

Dette er ikke blot en lære om stoffers placering, for ud fra stoffernes naturlige placering kan man skabe en bevægelseslære: Når man flytter f.eks. en sten

[8] Ordet 'planet' kommer af græsk *planáomai* = at strejfe omkring.

[9] En kugleskal hedder på græsk en *sfære*, så dette ord bruges ofte når man taler om den græske astronomi.

fra dens naturlige placering nede på jorden, søger den af sig selv ned mod sin oprindelige plads. Det er en almen erfaring at når disse stoffer ikke påvirkes af nogen fremmed kraft, så søger de i *rette linjer* tilbage til deres plads. Hernede hvor vi bor, er den naturlige bevægelse altså retlinet.

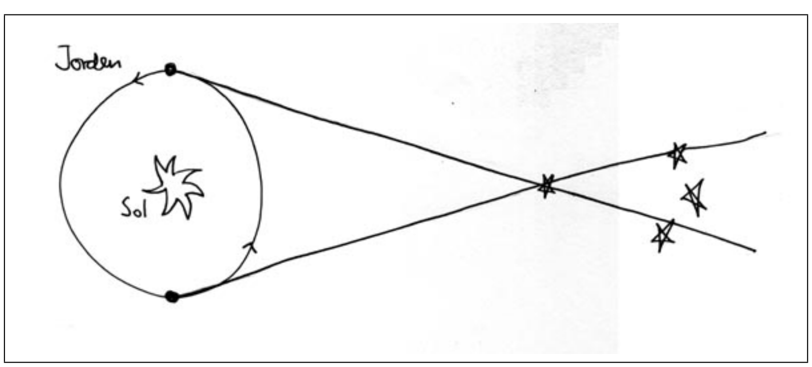
Men oppe på himlen er det anderledes. Dér bevæger tingene sig i cirkelbevægelser, mente Aristoteles, og derfor tilføjede han et femte element, *ætheren*. I ætheren er den naturlige bevægelse ikke retlinet, men cirkelformet. Fordi der gælder forskellige fysiske love nede på jorden og oppe på himlen, siger man at Aristoteles' fysiske love er *lokale*, dvs. at de kun gælder inden for en begrænset del af hele verden.

Mellem Jorden i midten og himmelkuglen yderst sidder Solen og planeterne som sagt på kugleskaller, i denne rækkefølge: Månen, Merkur, Venus, Solen, Mars, Juppiter og Saturn. Uden for Månens kugleskal er alt uforanderligt, og kugleskallerne er uigennemtrængelige. Fra Månen og udefter er elementet det femte (ætheren), og uden for ætheren er der ingenting, ikke engang tomt rum, ifølge Aristoteles, og hans argument herfor er ganske rimeligt: Når hele himmelkuglen roterer, kan den kun have en vis, begrænset størrelse, for ellers ville hastigheden i det uendeligt fjerne blive uendeligt stor; og Aristoteles vidste godt at en uendelig hastighed ikke kan tillades. Derfor må verden være begrænset, og der kan heller ikke være blot tomt rum derude, for — siger Aristoteles — 'rum' er det hvori der kan være et legeme.

1.3.5 Nogle andre teorier

Da Aristoteles havde fremsat sin model, fik den en dominerende stilling, ikke kun fordi Aristoteles var en anerkendt filosof, men lige så meget fordi den gav gode forklaringer på almindelige erfaringer, f.eks. passer læren om de naturlige steder jo med hvad vi alle regner med i vores hverdag.

Der var dog nogle alternative teorier, hvoraf to skal omtales her. Heraklídes fra Póntos (sidste halvdel af 4. årh. f.Kr.) lod Jorden rotere i stedet for himmelkuglen, og Aristárkh fra Sámos (første halvdel af 3. årh. f.Kr.) foreslog at Solen skulle være i midten. I dag kan vi godt lidt bedrevidende undre os over at disse teorier ikke fik større betydning, men i oldtiden havde man gode argumenter for at afvise dem.



Figur 1.5: Parallakse: Fordi Jorden i årets løb flytter sig en banediameter, rammer sigtelinjer fra Jorden mod et stjerne ikke det samme punkt bag stjernen.

- Hvis Jorden roterer en gang i døgnet, vil overfladens hastighed blive betydelig, i Grækenland 370 m/s. Grækerne mente at der så ville blive en vældig blæst, og at ting der falder frit, ville beskrive en skrå bane. Og dette observeres ikke!

- Hvis Solen lå midt i verden, og Jorden bevægede sig omkring den, var det i modstrid med den ellers udmærkede teori om de naturlige steder.
- Hvis Jorden skulle bevæge sig rundt om Solen, måtte der også her være en betydelig blæst ved jordoverfladen. Det observeres der ikke!
- Hvis Jorden bevægede sig rundt om Solen, måtte man kunne måle det vi kalder *parallaksen*. Men denne observeres ikke!

Som man kan se, var afvisningen af teorierne om Jordens rotation og Solen i midten, gode og fornuftige: Ud fra teorierne kunne man slutte sig til resultatet af observationer (blæst og parallakse), og da det ikke blev observeret, måtte teorierne være forkerte. I dag ville en fysiker tænke og argumentere på samme måde, forskellen er blot at *vi* kan gøre meget bedre observationer end grækerne, der måtte nøjes med det ubevæbnede øje.

1.4 Antik astronomi efter Aristoteles

1.4.1 Eratosthenes' måling af Jordens omkreds

Ingen fremsatte efter Aristoteles noget forslag til et verdensbillede der adskilte sig afgørende fra hans. I stedet for arbejdede astronomerne med at lave bedre matematiske beskrivelser af himmellegemernes bevægelser og bestemmelser af kosmologiske størrelser. Et eksempel på det sidste er Eratósthenes' måling af Jordens omkreds (3. årh. f.Kr.). Han vidste at ved sommer-solhverv stod Solen lodret over Syene (det moderne Assuan), og at i Aleksandria var vinklen mellem sol-strålen og en lodret stav $7\frac{1}{5}^\circ$. Når han også kendte afstanden fra Aleksandria til Syene, kunne han beregne Jordens omkreds.

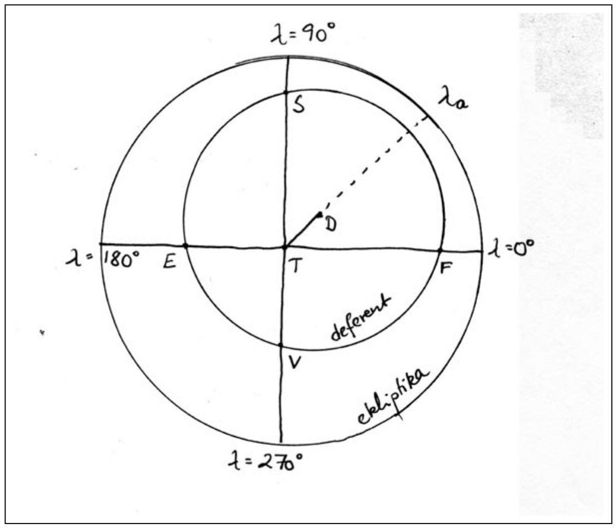
1.4.1.1 Øvelse: Eratosthenes' måling af Jordens omkreds

Når Solen stod lodret over Syene og vinklen mellem sol-strålen og en lodret stav i Aleksandria var $7\frac{1}{5}^\circ$, kunne Eratósthenes beregne hvor stor en del af hele Jordens omkreds stykket mellem Syene og Aleksandria var. Tegn situationen og lav denne beregning.

Stykket fra Aleksandria til Syene var ifølge vores kilde 5000 stadier. Desværre havde grækerne ikke noget SI-system, så en stadie svingede fra 177 m til 192 m. Beregn største og mindste værdi af Eratósthenes' måling, find den moderne værdi i Databogen og sammenlign.

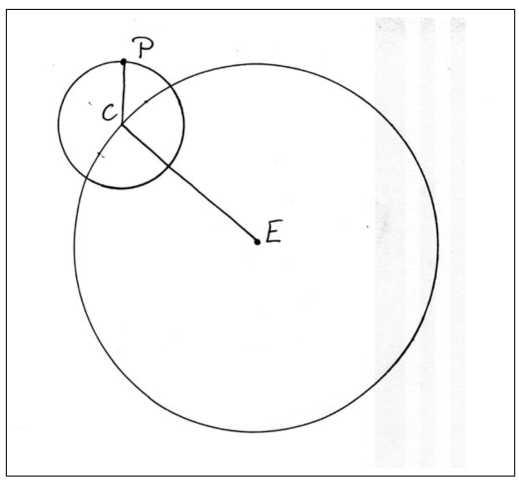
1.4.2 Hipparkh

Oldtidens måske største astronom var Hippárkh fra Rhodos (2. årh. f.Kr.). Han lavede en *excentrisk* model for solbanen, se figur 1.6, som fint forklarer årstidernes forskellige længde: Fra forårsjævndøgn til sommersolhverv er der $94\frac{1}{2}$ døgn, fra sommersolhverv til efterårsjævndøgn $92\frac{1}{2}$ døgn, fra efterårsjævndøgn til vintersolhverv $88\frac{1}{8}$ døgn og fra vintersolhverv til forårsjævndøgn $90\frac{1}{8}$ døgn. Dette lader sig ikke beskrive med en jævn cirkelbevægelse set fra cirklens centrum, men ved en mindre forskydning af cirklens centrum bort fra Jordens



Figur 1.6: Hipparkhs ekscentriske Sol-bane kunne forklare årstidernes forskellige længde.

position lader det sige gøre at få korrekte resultater med en jævn cirkelbevægelse.



Figur 1.7: Bevægelse på epicykel. Planeten P bevæger sig rundt på epicyklen. Dens centrum C bevæger sig rundt på den cirkel der kaldes deferenten, hvis centrum E, er Jorden.

Det som Hipparkh forklarede med sin excentriske cirkel, kan man også forklare på en anden måde, nemlig med den såkaldte *epicykel-model*, se figur 1.7. Den er konstrueret af Apollónios (sidste halvdel af 3. årh. f.Kr.) og består (se figur 1.7) af en stor cirkel *deferenten* hvorpå centrum for en mindre cirkel *epicyklen* bevæger sig rundt. Planeten bevæger sig rundt på epicyklen (S på figuren). Denne model har flere størrelser som astronomen kan justere for at få modellen til at passe med sine observationer: r og R kan justeres i længde og vinkelhastighed, man kan flytte iagttageren væk fra deferentens centrum T, og man kan lade R's vinkelhastighed være konstant i forhold til et andet punkt end T. Der er altså muligheder nok, men det blev ikke Apollonios der kom til at udnytte dem. Det gjorde derimod den af oldtidens astronomer der fik størst betydning for eftertiden.

1.4.3 Ptolemaíos

Ptolemaíos virkede i 2. årh. e.Kr. i Biblioteket i Alexandria, der i oldtiden var et lærdomscenter. Vi ved ikke ret meget om personen Ptolemaios, men vi har så langt hovedparten af hans skrifter, det meste på græsk, men noget af det kun i arabisk og latinsk oversættelse. Ptolemaios selv skrev på græsk, ikke fordi han var græker (han var romer), men fordi græsk var oldtidens naturvidenskabelige sprog ligesom engelsk i dag er det mest benyttede sprog i videnskabelige sammenhænge.

Ptolemaios byggede videre på sine forgængere og foretog også selv en lang række observationer, og på dette grundlag kunne han give en beskrivelse af planeternes bevægelser som stort set stemmer overens med observationerne. Dette er beskrivet i *Al Magesten*, som er en arabisk forvanskning af *'he megiste syntaxis'* — *Den store systematiske afhandling* —, som var den oprindelige titel på hans astronomiske hovedværk. Til forklaring af Solens bevægelse foretrak Ptolemaios Hipparkhs excentriske model fordi den var den enkleste med kun én cirkel. Men til vanskeligere bevægelser som Månens og planeternes måtte han gribe til epicyklerne, som han justerede og tilpassede med alle de muligheder der blev nævnt ovenfor. Det samlede system blev uhyre kompliceret med de mange excentriske cirkler, deferenter, epicykler og alle de størrelser der kan justeres i disse modeller. Men det gav en beskrivelse der i det store og hele passede med observationerne; dvs. at en del steder var der nogen uoverensstemmelse mellem observationer og teori, men kun sjældent var uoverensstemmelsen foruroligende stor — i hvert fald efter de gamles opfattelse.

Ptolemaios' største svaghed var hans forsøg på at bestemme afstande i Solsystemet — de gamle ville dog nok snarere tale om Jordsystemet. Ptolemaios prøvede at beregne størrelsen af dette system ved at lægge kugleskal på kugleskal uden på hinanden. Deres størrelse beregnede han ud fra radius i hver deferent og epicykel, og resultatet blev en radius for kosmos på ca. 100 mio. km, dvs. $5,5$ lysminut. Den moderne værdi for den gennemsnitlige radius i Jordbanen er 150 mio. km!

En anden fejl er at i Ptolemaios' måne-teori varierer månens størrelse med en faktor 2! Den første fejl var det svært for de gamle selv at afsløre, og verdensrummets dimensioner er jo også netop ufatteligt store. Den anden fejl angående Månen må Ptolemaios have indset, men det var ikke muligt for ham at fjerne den, så den måtte stå tilbage som en skønhedsplet på et ellers ret tilfredsstillende system.

1.5 Hvad nåede oldtiden?

Nu har vi naturligvis opgivet de fleste af oldtidens resultater — jorden i midten, bindingen til cirkelbevægelser, de naturlige steder, planeternes skaller osv. Og dog må vi huske på hvad grækerne også fandt frem til: Jorden er rund, Månen får faktisk sit lys fra Solen! Græsk naturvidenskab viser at der kan vindes endelig og evig viden!

Men på en anden måde gælder det grækerne gjorde stadigvæk. Grækerne stillede en række spørgsmål som vi også stiller:

- Hvilken form har verden?
- Hvor stor er den?

- Hvordan er dens enkelte dele i forhold til hinanden?

Og grækerne besvarede disse spørgsmål på en måde der også ligner vores måde at besvare dem på: De gik ud fra årsag og virkning som ved brugen af de 4 elementer, jf. deres "periodiske tabel" s. 7, og de brugte matematiske værktøjer — især geometri — til at finde svarene. *Vi kan også sige at grækerne gav os et egentligt videnskabeligt sprog.*

Begrebet 'Kosmologi', som jeg nævnte først, er ikke et oldgræsk ord. Men tanken bag ordet (verden er et ordnet og smukt hele som kan fattes med forstanden) er i allerhøjeste grad græsk, og denne forestilling tog vi til os fra det antikke Grækenland. Grækerne gav os nemlig den forestilling at Verden er ordnet og sammenhængende så der kan tegnes et billede af den, dvs. Verdensbilledet, ved en kosmologisk undersøgelse.

Kapitel 2

Renæssance og Oplysningstid

2.1 Gennembrud efter oldtiden

I lang tid var de græske resultater anset for den videnskabeligt korrekte viden om verden: Ptolemaios' model var simpelthen *modellen* fra oldtiden og op gennem middelalderen. Først i renæssancen sker der en afgørende udvikling væk fra Ptolemaios. Denne udvikling vil vi nu følge i korte træk.

2.1.1 Kopérnicus (1473-1543)

Kopérnicus nævnes af og til som den der foretog det afgørende brud med den Ptolemaios' verdensbillede, men det er ikke en korrekt vurdering af hans arbejde. Ganske vist lod han Jorden og Solen bytte plads så Solen nu kom til at ligge i midten af verden. Men ser man på hans hovedværk *De revolutionibus— Om rotationerne*, der udkom i hans dødsår, bemærker man at han arbejder i helt den samme tradition som Ptolemaios. Ordningen af stoffet er præcis som Almagestens, han bruger hovedsageligt Ptolemaios' observationer — også hvor han er i tvivl — og han bruger epicykler og excentriske cirkler ligesom grækerne. Derfor blev hans system næsten lige så matematisk kompliceret som Ptolemaios' system!

Heller ikke på Kopérnikus' tid kunne man måle parallaksen til de nærmeste stjerner. Men han havde mod nok til at mene den måtte være der, og forklarede at den ikke kunne måles, med at der fra Saturn, den øverste af planeterne, var et mådeligt gab ud til fiksstjernerne. Det havde konsekvenser for opfattelsen af kosmos' størrelse. Det måtte nu være ca. en halv mio. gange større end hidtil antaget, altså $5 \cdot 10^{16}$ m, ca. 5 lysår.[1]

2.1.2 Tycho Brahe (1546–1601)

Tycho Brahe var en dansk adelsmand der tidligt bestemte sig for at arbejde som astronom. Han mente at Jorden lå i midten, og omkring den kredsede Solen. Planeterne lod han kredse omkring Solen. Dette giver nogle forenklinger i beskrivelsen, men det er nu ikke på grund af denne model, som ikke var Tycho Brahes egen, at han har fået en plads i astronomiens historie.

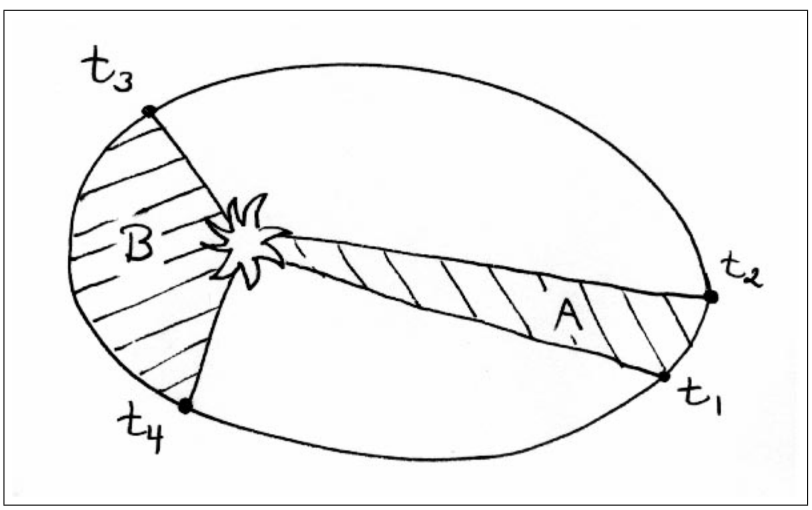
Tycho Brahe var fantastisk dygtig til at gøre observationer. Han arbejdede systematisk og byggede selv gode instrumenter. Han indså at alt for mange af

[1] 1 lysår er den afstand lyset tilbagelægger på 1 år, se øvelsen s. 26.

oldtidens observationer var forkerte, og som den første drog han konsekvensen: Han begyndte forfra på hele det observationsarbejde der er så nødvendigt for astronomer. Hans observationer var ikke blot mere nøjagtige udgaver af dårligere ældre observationer, han gjorde også nogle nye iagttagelser der fik betydelige følger. I 1572 opdagede Tycho Brahe en *supernova*.[2] Denne iagttagelse var i modstrid med Aristoteles' teori om at der hersker uforanderlighed uden for Måne-sfæren. I 1577 observerede man over hele verden en stor komet, og Tycho Brahe kunne vise at måtte være meget længere borte end Månen. Den måtte derfor bevæge sig gennem planeternes sfærer,—atter et resultat i modstrid med det aristoteliske verdensbillede. Sådanne opdagelser rykkede ved det gamle verdensbilledes autoritet.

2.1.3 Johannes Kepler (1571–1630)

Tycho Brahe var ikke nem at omgås og til sidst kom han i strid med den danske konge og drog til Prag. Her fik han som assistent Kepler. Kepler var et regnegeni, og Tycho Brahe lod ham regne på Mars' bane for at lave en teori for Mars' bevægelse.[3] Kepler gjorde nu et stort regnearbejde og som den første astronom nogensinde opgav han cirkelbanerne! Han kunne nemlig ikke få Tycho Brahes gode observationer til at passe med modellen så længe han brugte cirkler, så prøvede han ovaler og æg-formede baner, men de var ikke til at beregne matematisk, og så endte han ved *ellipsen*, som var matematisk velbeskrevet; og så passede det.



Figur 2.1: Planet-banen (her Mars') er en ellipse med Solen i det ene brændpunkt (1. lov). Linjen fra Solen til planeten overstryger i lige store tidsrum lige store arealer (2. lov). Da den er kortere ved B end ved A, må planeten bevæge sig hurtigere ved B; derfor er tidsrummene t_1–t_2 og t_3–t_4 lige lange.

Som et resultat af hele beregningsarbejdet nåede Kepler frem til sine tre love:

1. Enhver planetbane er en ellipse med den sande Sol i det ene brændpunkt.

[2]Se s. 39. Den supernova Tycho Brahe så, lyste i begyndelsen lige så klart som Venus; den kunne ses fra november 1572 til april 1574.

[3]Mars-banen har større excentricitet end de fleste andre planet-baner så hvis Kepler kunne klare den, ville de andre nok gå let, mente Tycho Brahe.

2. Arealhastigheden (det areal en linje fra Sol til planet går hen over per tidsenhed) er en for hver enkelt planet-bane karakteristisk konstant, se figur 2.1.

3. Kvadraterne på planeternes omløbstider forholder sig som 3. potenserne af deres middelafstande fra Solen.

Sidste lov kan også udtrykkes således:

$$\frac{a^3}{T^2} = K$$

for alle planeter i Solsystemet (a er middelafstanden fra Sol til planet, T er omløbstiden).

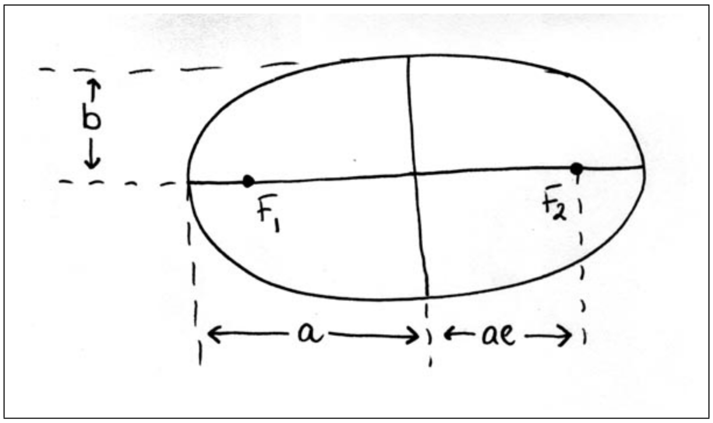
Kepler var ikke blot dygtig til at regne, han var så opslugt af tal at han blev tal-mystiker ligesom Pythagoræerne. Han var sikker på at nøglen til indsigt i naturen og hele verdens indretning lå i tallene, og han opfattede sig selv som en fortsætter af Platons projekt: 'Gud er altid beskæftiget med geometri.' Så selvom han brød med den antikke matematisk form (cirklen) i sin beskrivelse, er hans arbejde alligevel dybest set en fortsættelse af den græske tilgang til naturen.

2.1.3.1 Øvelse: Keplers brug af Tycho Brahes observationer

De store resultater i fysik kommer ofte ved at se med nye, kreative øjne på andres eksperimentelle resultater. Det gælder også Keplers brug af Tycho Brahes observationer. Forklaringen til det følgende er ikke helt enkel, men prøv at tegne figuren først, så bliver resten klarere.

Kepler undersøgte som nævnt Mars' bane, og han havde fået en god idé til hvordan han kunne bestemme den. Han vidste at Mars' periode, dvs. tiden det tager før Mars står på samme sted i sin bane igen, var 687 døgn. Han antog så at Jorden bevægede sig i en cirkelbane omkring Solen (det er næsten korrekt, for Jordens bane er ikke ret elliptisk). Hvis man nu kender Jordens position i forhold til Solen og i forhold til Mars på to tidspunkter med 687 døgn imellem, kan man tænke således: Jorden er to forskellige steder på disse to tidspunkter, for Jorden er det samme sted med et mellemrum på $n \cdot 365,25$ døgn, hvor n er et helt tal. Men Mars er det samme sted fordi 687 døgn er dens periode. Hvis man derfor trækker en linje fra Jorden i retning mod det sted hvor Mars observeres hvert af de to tidspunkter, må skæringen mellem de to linjer give Mars' position relativt i forhold til Jorden. Det ville Kepler gerne prøve, men det tager lang tid at gøre nok par af observationer, hver med 687 døgns mellemrum, til at man har punkter nok til at tegne Mars' bane. Her kom Brahes observationer Kepler til hjælp, og vi vil nu prøve at tegne som Kepler gjorde med Brahes observationer. De var således:

Dato	Jordens længde	Mars' længde
17/2/1585	159,4°	135,2°
5/1/1587	115,4°	182,1°
19/9/1591	5,8°	284,3°
6/8/1593	323,4°	346,9°
7/12/1593	85,9°	3,1°
25/10/1595	41,7°	49,7°
28/3/1587	196,8°	168,2°
12/2/1589	153,7°	218,8°
10/3/1585	179,7°	131,8°
26/1/1587	136,1°	184,7°



Figur 2.2: Ellipse med indtegnet storakse a, lilleakse b, excentricitet e og brændpunkter F_1 og F_2.

Fremgangsmåden er nu denne:

1. Tag et stykke millimeterpapir eller ternet papir, mærk med et punkt på midten Solen, tegn med det punkt som centrum en cirkel med radius ca. 5 cm. Det er Jordbanen. Optegn radius ud til punktet "kl. 3" på cirklen. Det er nulpunktet for vores vinkler i det følgende (astronomerne kalder dette punkt for forårspunktet, som er det sted hvor Jorden står i forhold til Solen ved forårsjævndøgn).

2. Afmærk nu på cirklen for hvert talpar Jordens to positioner på cirklen (tallene i anden søjle). Fra begge positioner tegnes en ret linie ud i den retning som gradtallet i tredje søjle angiver; gradtallet her måles som for i forhold til den linje vi trak fra Solen til forårspunktet. Der hvor linjerne skærer hinanden, er Mars.

3. De to første talpar er de positioner hvor Mars er henholdsvis fjernest og nærmest Jorden. Forbind dem med en linie og mærk dens midte M. Solen skulle gerne ligge lidt fra M på linjen, som kaldes *storaksen* i Marsbanens ellipse (det er linien mellem de to punkter på ellipsen der er længst fra hinanden).

4. Mål storaksen, og find forholdet mellem den halve storakse, som vi kalder a, og Jordbanens radius, se figur 2.2. Den moderne værdi er lidt over 1,5. Dette tal siger altså hvor meget længere Mars er fra Solen end Jorden, og det kunne Kepler altså bestemme meget præcist.

5. I en ellipse er der to brændpunkter. I Marsbanen er det ene Solens position, det andet ligger som Solens spejling i M; lad os kalde det N.

6. En anden vigtig størrelse er ellipsens excentricitet — denne størrelse viser hvor fladtrykt ellipsen er. Den kan findes således:

$$e = \frac{\mid MN \mid}{a} \tag{2.1}$$

   Find den og sammenlign med den moderne værdi $e = 0,0934$.

7. Ellipsen kan nu tegnes på flere måder. F.eks. kan man gøre en snor fast i de to brændpunkter med længden afstemt så en blyantspids spændt ud i snoren passer til en af Marspositionerne. Hvis blyanten føres rundt med snoren spændt, får man en ellipse. Man kan alternativt finde lilleaksen b, som er bestemt ved at $b = a\sqrt{1 - e^2}$. Nu afmærkes de to punkter som ligger i afstanden b, vinkelret ud for M. Tegn efter bedste skøn ellipsen.

2.1.4 Galileo Galilei (1564–1642)

Galilei arbejdede i den lærde kultur i Norditalien omkring byerne Firenze og Pisa. I 1609 hørte han at andre havde lavet en kikkert, og han eftergjorde hurtigt denne opfindelse. Herved blev Galilei den første der systematisk udforskede stjernehimlen med dette teknologiske hjælpemiddel. Mange af Galileis observationer fik betydning. Han så at Månen ikke havde en glat overflade, der var tværtimod bjerge og dale; det rokkede ved troen på antikkens påstand om at himmellegemer var fuldkomne kugler. Han så Jupiters måner; det støttede Kopernikus' argument at Jorden ikke lå midt i kosmos — man havde nemlig indvendt mod Kopernikus at hvis Jorden skulle bevæge sig rundt om Solen med stor fart, ville den tabe Månen. Men nu viste det sig altså at Jupiter også havde måner, og det ville være en absurd påstand at både Jorden og Jupiter begge på én gang skulle være verdens centrum. Altså kunne en planet uden for verdens centrum godt have måner.

Endelig kunne Galilei afgøre en gammel strid om hvad Mælkevejen er. Aristoteles havde på rent spekulativt grundlag sagt at den var en langsom forbrænding af tørre uddunstninger fra Jorden, og Tycho Brahes forslag var at Mælkevejen var en fortætning af den himmelske æther hvorfra nye stjerner og kometer ville komme. Ved at få det hele forstørret i sin kikkert kunne Galilei afgøre at Mælkevejen var en stor samling stjerner.

2.1.5 Isaac Newton (1642–1727)

Keplers love siger noget om hvilke baner planeterne bevæger sig ad, men hvilke fysiske principper der styrer denne bevægelse, siger hans love ikke noget om. Det blev først afklaret ved Newtons arbejder.

Newton, som virkede ved universitetet i Cambridge, begyndte en undersøgelse af hvad der får planeterne til at bevæge sig som de gør. Han var klar over at en masse i jævn cirkelbevægelse kræver en konstant acceleration ind mod cirklens centrum (*centri-petal-acceleration*), og han kunne også udtrykke denne accelerations størrelse:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \tag{2.2}$$

Det er ikke svært at udtrykke v ved hjælp af cirklens omkreds og perioden T:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \tag{2.3}$$

og herefter kan man udtrykke a_c ved r og T:

$$a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2} \tag{2.4}$$

Keplers 3. lov siger at $\frac{r^3}{T^2} = K$, og divideres der med r^2 på begge sider af dette lighedstegn, får man $\frac{r}{T^2} = \frac{K}{r^2}$. Dette indsættes nu:

$$a_c = \frac{4\pi^2 K}{r^2} \tag{2.5}$$

Her er alt over brøkstregen konstanter, så accelerationen aftager altså som kvadratet på radius. Dvs. at når radius vokser til det dobbelte, bliver accelerationen fire gange mindre. Herefter brugte Newton sin 2. lov

$$\vec{F} = m\vec{a} \tag{2.6}$$

Da m er konstant, og da accelerationen aftager med kvadratet på radius, må også kraften aftage som kvadratet på radius. Det spændende og afgørende spørgsmål var nu om den kraft der får legemer til at falde mod jorden, også kunne tænkes at levere kraften til planeternes centripetal-acceleration.

Månens omløbstid T havde man siden oldtiden haft en god værdi for, nemlig

$$T_{\text{Måne}} = 27^d 7^h 43^m = 2,361 \cdot 10^6 \,\text{sek.} \tag{2.7}$$

Newton havde fra en fransk måling af Jorden i 1671 fået en god værdi for Jordens radius:

$$r_{\text{Jord}} = 19,6157 \cdot 10^6 \text{Pariserfod}^4 \tag{2.8}$$

Endvidere regnede Newton med at Månens baneradius i gennemsnit var 60 jordradier. Hermed kunne han finde Månebanens radius:

$$r_{\text{Månebane}} = 1,1769 \cdot 10^9 \text{Pariserfod} \tag{2.9}$$

og Månens centripetal-acceleration:

$$a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = 0,008335 \frac{\text{Pariserfod}}{\text{sek}^2} \tag{2.10}$$

Hvis det er den samme kraft der får legemer til at falde mod jorden og giver Månen dens centripetal-acceleration, skal denne acceleration altså være 60^2 gange mindre end tyngde-accelerationen g ved Jordens overflade. Denne var ifølge den bedste værdi Newton havde, på 30,19139 $\frac{\text{Pariserfod}}{\text{sek}^2}$. Forholdet mellem de to accelerationer er

$$\frac{g}{a_c} = \frac{30,19139}{0,008335} = 3622 \tag{2.11}$$

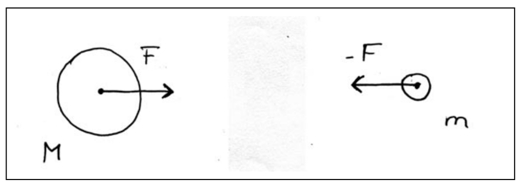
og dette tal var så tæt på 60^2 at Newton turde konkludere at *det er den samme kraft der får legemer til at falde ved jord-overfladen og holder Månen*

[4] 1 Pariserfod = 27,07 cm.

på plads i dens bane. Hermed var Newton kommet frem til en *generel* forståelse af tyngdekraftens virkning.

Dette var et stort fremskridt i forhold til Aristoteles. Vi husker at han havde én slags love for bevægelser nede ved jord-overfladen (de var retlinede) og en anden for bevægelser over jorden (de var cirkelformede), hans love var altså *lokale*. Newton kunne med én og samme lov om tyngdekraften forklare *begge* bevægelser, og det er naturligvis meget mere tiltalende for en fysiker at have én lov der kan forklare meget, end at have flere love der hver for sig kun forklarer noget delvist.

Her efter fremsættelsen af Newtons utroligt betydningsfulde teori kan vi lave en foreløbig sammenfatning. Man havde opgivet græske antagelse som f.eks. de naturlige steder og cirkelbevægelserne. Men andre græske idéer holdt man fast ved, nemlig at *verdensbilledet kan fattes med forstanden*, og at *matematik er det sprog hvormed verdensbilledet beskrives*. Den moderne udforskning af kosmos understreger kun at begge ideer har været særdeles frugtbare.



Figur 2.3: To legemer med masse tiltrækker hinanden.

2.1.5.1 Øvelse: Newtons lov om masse-tiltrækning

Newtons lov om masse-tiltrækning (gravitations-loven) giver den kraft hvormed to legemer med masserne m og M påvirker hinanden når de befinder sig i afstanden r, målt fra legemernes masse-midtpunkt, se figur 2.3. Den har dette udtryk:

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \tag{2.12}$$

hvor G er *gravitations-konstanten*

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11}\frac{Nm^2}{kg^2} \tag{2.13}$$

Beregn følgende størrelser:

1. Kraften på et 1 kg lod på jordoverfladen (Jordens masse og middelradius er $5,974 \cdot 10^{24}$ kg og 6.371.000 m.). Passer det med formlen $F_{tyngde} = mg$?

2. Kraften på Månen (Månens masse og middelafstand til Jorden er $7,348 \cdot 10^{22}$ kg og 384.399.000 m.)

3. Beregn a_c for Månen i moderne enheder og sammenlign.

4. Kraften på et 1 kg lov på måneoverfladen (Månens radius er 1.738.000 m.)

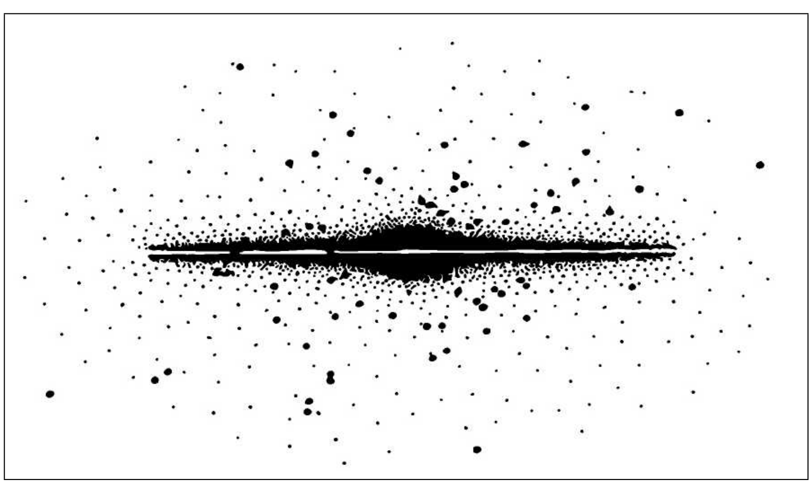
Kapitel 3

Moderne kosmologi

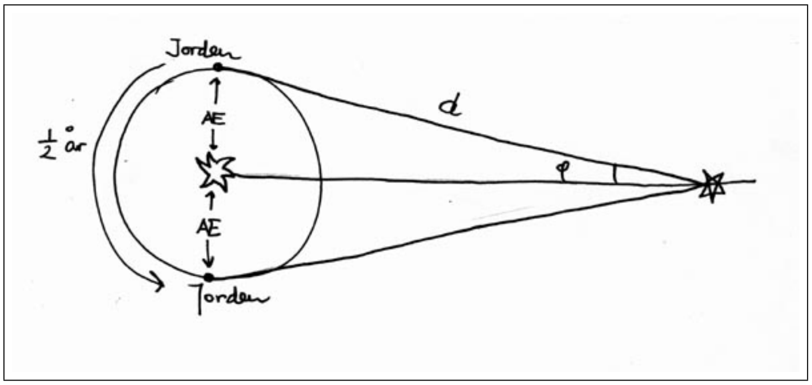
3.1 Hubbles lov

3.1.1 Mælkevejen

Opfindelsen af kikkerten, og siden af fotografiske film, gav et stort løft til den observationelle astronomi. Himlen blev undersøgt og grundigt beskrevet, og i 1920'rne og 1930'rne blev Mælkevejens form og størrelse bestemt nogenlunde præcist. Den er en samling stjerner der har form som en frisbee med en radius på 15.000 pc og en højde på 5.000 pc (de følgende øvelser forklarer hvad enheden pc betyder). De fleste ligger så langt fra Jorden at man med det blotte øje ikke kan se dem som klare enkeltstjerner. De viser sig som et let tåget bånd der går ud fra begge sider af Cassiopeias $\mathcal{W}$. Dette synsindtryk skyldes at vi i den retning kigger fra Jorden ud i frisbee'ens vandrette plan hvor stjernerne ligger tæt. Når vi ser ud i verdensrummet til andre sider, kigger vi op fra eller ned under frisbee'en, og her er der ikke ret mange stjerner. Solsystemet ligger lidt ud til den ene side i forhold til Mælkevejens centrum, så kortlæggelsen af Mælkevejen gjorde verdensbilledet endnu mindre geocentrisk end det var efter Kopernikus' model med Solen i midten.



Figur 3.1: Mælkevejen efter John Plasketts opmåling (1938)



Figur 3.2: I løbet af et halvt år flytter Jorden sig en halv baneomgang, og herved ses stjernen fra forskellige vinkler. Vinklen ϕ er parallaksen.

3.1.1.1 Øvelse: Afstande i rummet

På grund af de store afstande i rummet har astronomer brug for nogle særligt lange længdeenheder.

AE (astronomisk enhed) er Jordens gennemsnitlige afstand til Solen: $149,6 \cdot 10^9$ m.

lysår er den afstand lyset tilbagelægger i løbet af et år. Beregn hvor mange meter det er.

pc (parsec) er afstanden fra Jorden til et stjerne med parallaksen 1” (1 buesekund), se næste opgave.

3.1.1.2 Øvelse: Parallaksen

En metode til at måle afstanden til stjerner er bestemmelse af deres parallakse, se figur 3.2. I trekanten med Solen, Jorden og stjernen kender vi afstanden mellem Solen og Jorden (1 AE) og to vinkler. Så er afstanden d fra Jorden til stjernen bestemt ved at

$$\begin{aligned} \sin\phi &= \frac{1\text{ AE}}{d} \Leftrightarrow \\ d &= \frac{1\text{ AE}}{\sin\phi} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Man vidste siden oldtiden at et heliocentrisk verdensbillede medfører parallakse, men fordi den er så lille, lykkedes det først i 1835–38 Friedrich W. Bessel at måle en stjernes parallakse. Han fandt at 61 Cygnis parallakse var 0,3136” (buesekunder). Ved disse små vinkler deler man 1 grad op i 60 bueminutter, og hvert bueminut opdeles i 60 buesekunder så 1” $= \frac{1}{3600}$ grad.

1. Find afstanden til en stjerne med parallaksen 1”. Det er den astronomiske afstand 1 pc. Udregn 1 pc både i AE og lysår.
2. Find afstanden til 61 Cygni med Bessels parallakse på 0,3136”.
3. Den moderne værdi for 61 Cygnis parallakse er 0,29”. Hvad er afstanden så, og hvor mange procent afviger Bessels bestemmelse af afstanden fra den moderne værdi?

Hvis man skal måle objekter der ligger langt fra Jorden, bliver parallaksen så lille at den ikke kan måles. Derfor kan man kun bruge afstandsbestemmelse ved parallakse når det drejer sig om de 2000 stjerner der er tættest ved Jorden. Rumteleskoper har mulighed for at måle parallakser mere præcist fordi de ikke generes af uro i atmosfæren, og herved kan man med tiden få bestemt afstanden til flere stjerner mere præcist.

3.1.2 Tågerne

En stor diskussion i begyndelsen af det 20. århundrede drejede sig om de såkaldte *tåger*. I modsætning til stjernerne i Mælkevejen så man disse tåger jævnt fordelt over hele himlen. Det var ikke muligt at bestemme deres parallakse, dvs. de var langt væk, og ved at måle på dobblerforskydningen af deres spektre, kunne man efter flere forsøg og enkelte vildfarelser afgøre at de bevægede sig hurtigt bort fra Jorden.

Nogle foreslog at disse tåger var *ø-universer*, dvs. selvstændige universer i lighed med Mælkevejen. Men tanken mødte en del modstand fordi denne teori krævede at verdensrummet var mange, mange gange større end hidtil antaget, og fordi nogle af tågerne roterede, og hvis de var på størrelse med Mælkevejen, ville deres yderste dele rotere med hastigheder man havde svært ved at forestille sig.

3.1.2.1 Øvelse: Dopplereffekten

En stjerne bevæger sig væk fra Jorden med hastigheden v, og man måler så dens spektrum. Man vælger sikre linjer fra et kendt stof, f.eks. brint, og man iagttager at disse linjer nu har en længere bølgelængde end når man måler i laboratoriet. Vi kalder bølgelængden fra stjernens lys λ, og bølgelængden i laboratoriet for λ_0. Denne forskel skyldes at stjernen bevæger sig bort mens den udsender lyset. Herved trækkes bølgerne lidt ud så de får større bølgelængde, og alle linjer i spektret flytter sig hen mod længere bølgelængder. Da de lange bølgelængder i det synlige spektrum er røde, kaldes effekten i astronomien også for *rødforskydning*. Der er denne sammenhæng mellem stjernens hastighed bort og den bølgelængde vi måler:

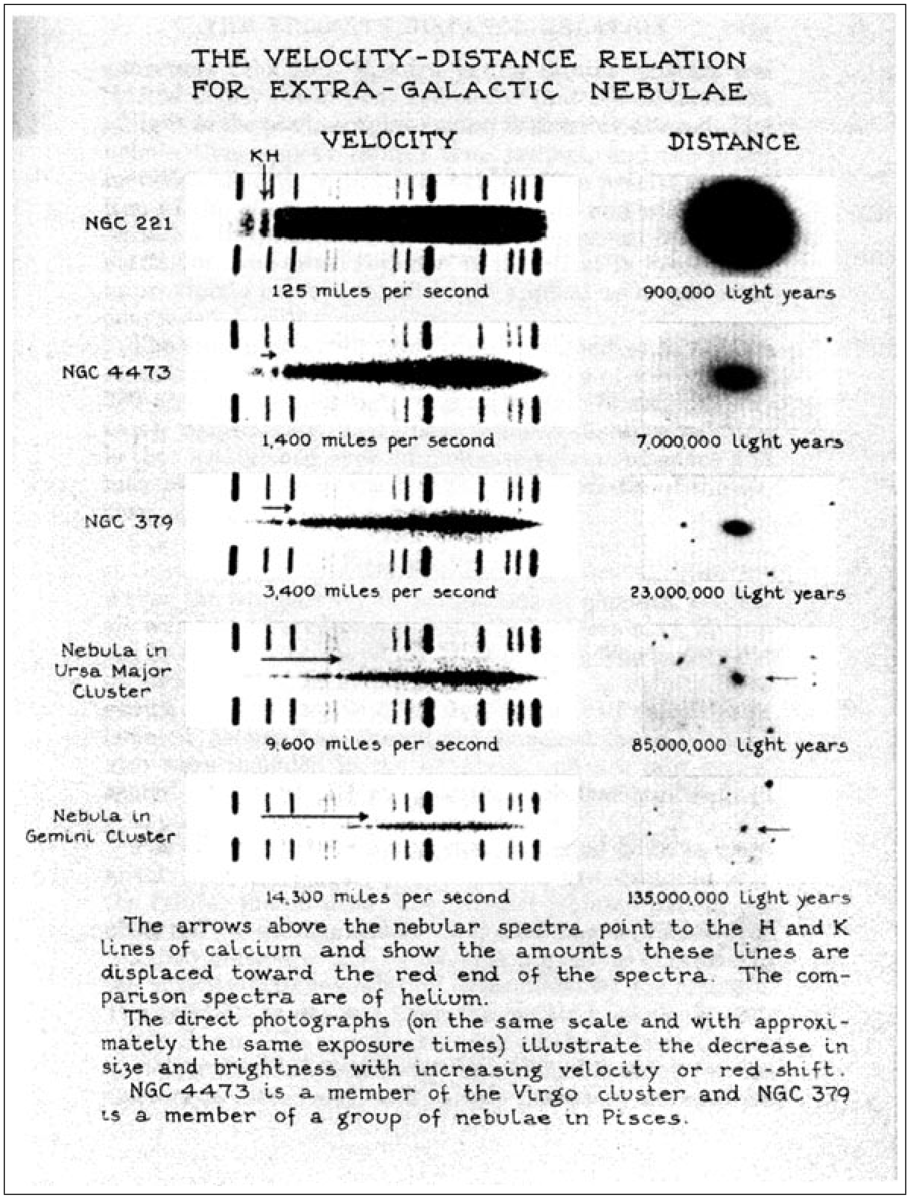
$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \tag{3.2}$$

hvor det er almindeligt at kalde forholdet mellem v og c for z:

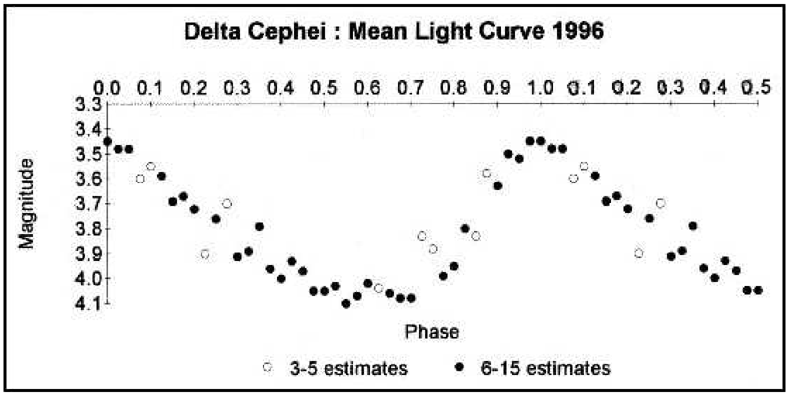
$$z = \frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \tag{3.3}$$

1. K- og H-linjerne i Ca ligger tæt ved 395 nm. I et af spektrene i figur 3.3 har de flyttet sig så de ligger tæt ved He's linje på 402,6 nm. Beregn z og find galaksens hastighed bort. Hubble regnede i miles/sekund. Kan du finde galaksen når det oplyses at 1 mile er 1608 m?

Det skulle dog senere vise sig at denne forklaring på rødforskydningen ikke var korrekt, se s. 32.



Figur 3.3: Ovenstående side er fra Hubbles *The Realm of the Nebulae*, 1936. Pilene peger på hver galakses K- og H-linjer fra calcium, og man kan se hvor meget de er forskudt i forhold til linjerne i sammenligningsspektret, som er He. Billederne til højre viser hvor meget svagere hver galakse ser ud fra Jorden fordi den er længere væk jo hurtigere den bevæger sig.



Figur 3.4: Lysstyrkevariationen for *Delta Cephei*. Perioden er ca. 5,5 døgn. Fra *The Society for Popular Astronomy*.

3.1.3 Hubbles opdagelse i 1929

I 1929 offentliggjorde E.P. Hubble (1889-1953) en artikel om 46 tåger. Deres hastigheder var bestemt ret sikkert med dopplerforskydningen, og 24 af dem havde Hubble også afstandsbedømt. Afstandsbedømmelserne var derimod meget usikre. Hubble måtte bruge forskellige teknikker. I nogle tilfælde skønnede han hvor meget lyset fra den stærkeste stjerne i tågen var svækket, i andre hvor meget hele tågen var svækket, og endelig bruge Hubble i nogle få tilfælde *cepheider*. Cepheider er nogle specielle stjerner hvis lysstyrke varierer periodisk, se figur 3.4. Endvidere er der en sammenhæng mellem periodens længde og stjernens lysstyrke således at cepheider med stor lysstyrke også har længere periode.

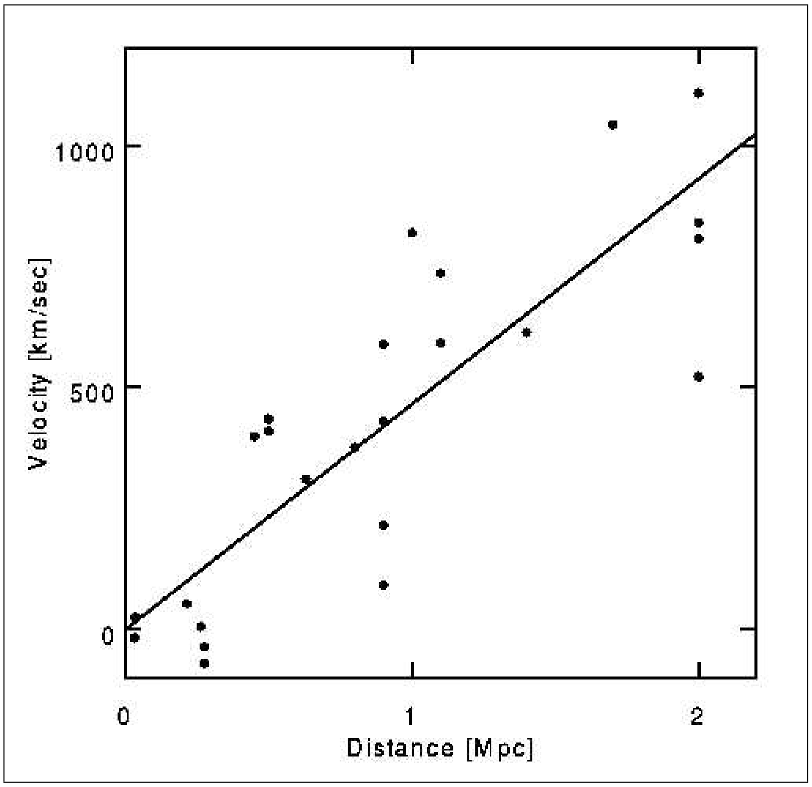
Denne egenskab gør cepheider specielt interessante når man skal bestemme afstande i rummet. Det kan nemlig være svært at afgøre hvor meget lyset fra en fjern stjerne er svækket, for man kender jo ikke den absolutte værdi for stjernens lysstyrke, dvs. den effekt P hvormed stjernen lyser. Men fordi cepheiders lysstyrke hænger sammen med deres periode, kan astronomen først over et stykke tid måle en cepheides variation i lysstyrke. På dette grundlag finder han dens periode, og så kan han finde den absolutte lysstyrke. Dernæst måler man hvor meget lyset er svækket, og så giver afstandskvadratloven mulighed for at bestemme afstanden.[1]

Hubbles data viste at der var en klar lineær sammenhæng således at jo længere borte en tåge var, desto hurtigere bevægede den sig bort, og dette sammenfattede han til *Hubbles lov*.

$$v = Hs \tag{3.4}$$

hvor v er hastigheden bort, H er Hubblekonstanten, og s er afstanden til tågen. Hubble regnede v i km/s og s i megaparsec; herved får H den lidt specielle enhed km/s/Mpc. Hubbles lov var et stærkt argument for at tågerne ikke var en del af Mælkevejen, dvs. man måtte acceptere de var fjerne galakser således at Mælkevejen blot var en af mange galakser. Hermed blev kosmos pludselig mange gange større, igen, og det gav endnu mindre mening at opfatte Jorden som centrum for noget som helst anden end sig selv.

[1] Afstandskvadratloven: $I = \frac{P}{4\pi r^2}$ hvor P er stjernens effekt og r er afstanden til stjernen.



Figur 3.5: Hubbles diagram fra 1929.

3.1.3.1 Øvelse: Hubblekonstanten 1929

Find ud fra figur 3.5 Hubblekonstantens værdi ved at se på Hubbles 1929-data. (Denne værdi af Hubblekonstanten viste sig siden at være alt for stor.)

3.1.3.2 Øvelse: Hubblekonstanten 1936

Hubble ændrede sine værdier efterhånden som han fik bedre data. Prøv at sætte de senere værdier fra 1936-bogen fra figur 3.3 ind i et koordinatsystem. Du kan med fordel regne hastighederne om til km/sekund (201; 2.250; 5.470; 15.400 og 23.000 km/sekund) og afstandene om til Mpc (0,276; 2,15; 7,06; 26,1 og 41,4 Mpc). Hvad bliver H nu? (Også denne værdi af Hubblekonstanten viste sig siden at være alt for stor.)

3.2 Kosmologiske konsekvenser af Hubbles lov

Hubble var selv forsigtig med at fortolke sin lov. Han talte om at galaksernes "tilsyneladende hastigheder", og han vidste at rødforskydning også kunne skyldes andre ting end dopplereffekt. Det blev overladt til andre at tolke Hubbles resultater i en større sammenhæng, og inden Hubble offentliggjorde sin lov, havde teoretiske fysikere mere eller mindre ubemærket forberedt tolkningen af den i en større kosmologisk sammenhæng.

3.2.1 Einsteins relativitetsteori

I 1905 offentliggjorde Einstein (1879–1955) i en artikel sin specielle relativitetsteori, der beskriver hvad der sker med fysiske størrelser som tid, masse og længde ved hastigheder tæt ved lysets, og i 1915 fulgte den almene relativitetsteori. Den almene relativitetsteori skaber en forbindelse mellem stof, energi og rum. Den almene relativitetsteori er på én og samme tid en af de matematisk sværeste og en af de mest spændende og afgørende teorier i moderne fysik. Fordi den er så svær, kan vi ikke komme ind på den her bortset fra nogle få af den resultater som fik særlig betydning for verdensbilledet i dag.

En del af teorien viser at lys bøjes omkring stærke tyngdefelter, og denne afbøjning beskriver teorien ved at sige at rummet krummer omkring et stærkt tyngdefelt. Denne ide om rummet der krummer, arbejdede Einstein videre på i en artikel fra 1917 med titlen 'Kosmologiske overvejelser i forbindelse med den Almene Relativitetsteori'. Her fremlagde Einstein en ide om rummet som er svær at begribe, nemlig at rummet kan krumme så det på én gang er endeligt og ubegrænset. Ideen forstås måske bedste ved at tænke på en bold: En bold har en endelig overflade, men alligevel er den ubegrænset, for man kommer aldrig til en grænse når man går på den. Vi kan altså godt forstå billedet når vi taler om en flade. Einstein viste at det der gælder en flade, også kan gælde rummet.

Einstein var på dette tidspunkt sikker på at universet er statisk, dvs. evigt, stabilt og med en jævn fordeling af stof. Hans ligninger tydede ganske vist mere på at universet udviklede sig, og for at gøre universet statisk indførte Einstein en kosmologisk konstant Λ i sine ligninger. Den bevirkede at universet blev statisk.[2]

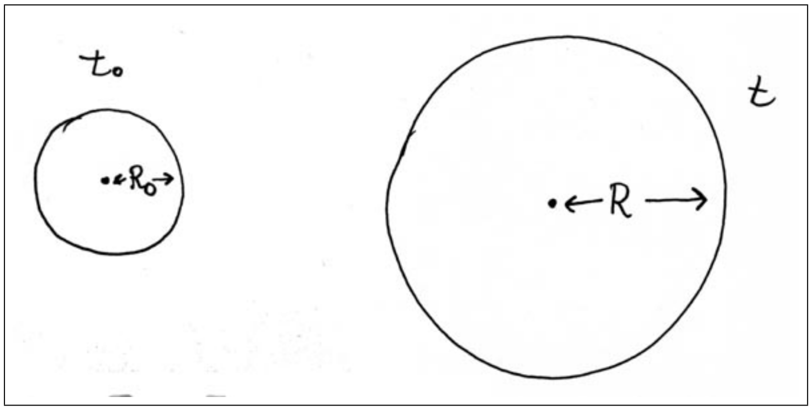
3.2.2 Friedmann og Lemaître

Den russiske matematiker Alexander A. Friedmann (1887–1925) arbejdede videre med Einsteins ligninger. Han viste at de kunne løses på flere måder, f.eks. en hvor universet blev større og større, eller en anden hvor universet voksede til et maksimum og så trak sig sammen igen i et enkelt punkt. Det var alt sammen korrekt set, og Einstein måtte også efter lidt diskussion indrømme at Friedmann formelt matematisk havde ret i sin løsninger. Der kom bare ikke noget ud af det fordi ikke ret mange interesserede sig for Friedmanns arbejde. En af årsagerne hertil var at Friedmann først og fremmest var matematiker, og de astronomiske og kosmologiske konsekvenser af hans udregninger interesserede ham egentlig ikke.

En belgisk fysiker og katolsk præst, Georges Lemaître (1894–1966), kom til lignende resultater i en artikel fra 1927, men til forskel fra Friedmann tillagde han sine resultater en virkelig fysisk betydning. Han argumenterede for at universitet faktisk udvidede sig, og han viste et par år før Hubble at galakserne bevæger sig hurtigere bort jo længere væk de er. Lemaître havde nemlig et godt kendskab til astrofysik, så det var nemt for ham at sætte de abstrakte ligninger i forbindelse med astronomiske observationer. Denne artikel fik dog heller ikke større betydning til at begynde med.

Men da Hubbles artikel kom frem, blev mange astronomer interesserede i andre løsninger end Einsteins statiske, Einstein selv blev også hurtigt overbe-

[2] Mange steder kan man læse at Einstein senere omtalte den som sit livs største bommert, men det er højst tvivlsomt om Einstein nogensinde har sagt det.



Figur 3.6: På et tidligt tidspunkt t_0 var radius i universet R_0. Siden er universet vokset så det til tiden t har en større radius $R(t)$, og alle andre afstande i universet er vokset tilsvarende.

vist om at universet ikke var statisk, og i løbet af nogle få år slog kosmologien en kolbøtte så det i 1933 var almindeligt anerkendt at universet udvidede sig.

3.2.3 Einstein-de Sitter-modellen

Flere fysikere begyndte nu at lave modeller af hvordan universet var opbygget, på grundlag af den nye opfattelse. Einstein og Willem de Sitter (1872–1934) opstillede således en model i 1932.

3.2.3.1 Det kosmologiske princip

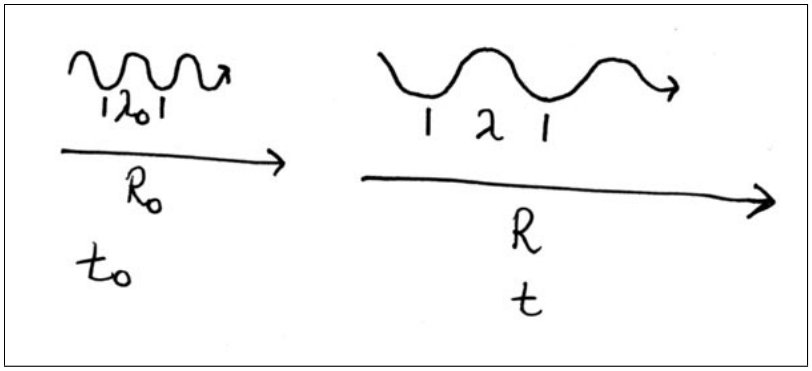
Grundlæggende for deres og andres teorier er det kosmologiske princip der giver to forudsætninger for teorier om universet:

- Universet er isotropt (dvs. ens i alle retninger).
- Universet er homogent (dvs. ensartet overalt).

Det kosmologiske princip fortsætter altså udviklingen bort fra Aristoteles' opdeling af universet i en jorddel og en himmeldel, hen over Newtons udvidelse af tyngdekraften til at gælde overalt til den moderne opfattelse at der gælder de samme fysiske love overalt i universet.

3.2.3.2 Kosmologisk rødforskydning

Centralt i teorierne står skalafaktoren eller krumningsradius R. Denne størrelse er i disse teorier en funktion af tiden t, dvs. $R(t)$ ændrer sig med tiden, og i Einstein-de Sitter-modellen er R konstant voksende. Den angiver at hvis en afstand til tiden t_0 var R_0, vil den til tiden t være $R(t)$. Afstanden er altså blevet $\frac{R(t)}{R_0}$ gange større, se figur 3.6. Det er dog kun *afstandene* i universet der vokser. Planeter som Jorden bevarer deres størrelse fordi tyngdekraften holder sammen på dem. Man har sammenlignet dette med situation for rosiner i en rosinkage der er stillet til hævning. Mens dejen udvider sig, sidder hver rosin fast i den og fjerner sig stille og roligt fra de andre rosiner. Og jo længere væk en anden rosin er, dvs. jo mere hævende dej der er mellem dem, jo længere væk flytter den sig hvert minut. Således kan man også formulere en Hubbles lov for rosiner i en rosinkage der hæver.



Figur 3.7: Hvis en foton havde bølgelængden λ_0 da universets radius var R_0, har samme foton bølgelængden λ når universets radius er vokset til $R(t)$.

Med skalafaktoren kunne man give en bedre og rigtigere forklaring på det Hubble forsigtigt mente var en dopplerforskydning. Nu kunne man nemlig sige at en fotons bølgelængde med tiden blev trukket ud fordi rummet udvidede sig. Hvis skalafaktoren da fotonen blev emitteret af et atom i en fjern galakse, kaldes R_0, kan vi kalde dens bølgelængde λ_0. Det er den bølgelængde vi måler i laboratoriet hvis vi i dag måler på en foton der er emitteret fra det samme grundstof. Men fordi rummet har udvidet sig så skalafaktoren nu er R, måler vi en længere bølgelængde når fotonen omsider når frem til os på Jorden, se figur 3.7. Den kosmologiske rødforskydning skyldes altså ikke at en galakse bevæger sig væk fra os sådan som dopplereffekten kræver det. Den skyldes at rummet har udvidet sig siden lyset blev udsendt fra en galakse.

Man kan vise at størrelsen z der udtrykker forholdet mellem lyset fra stjernen og lyset målt i laboratoriet når man (forkert) opfatter det som en dopplerforskydning, også udtrykker forholdet mellem skalafaktoren i dag og dengang lyset blev udsendt:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{R - R_0}{R_0} \tag{3.5}$$

3.2.3.3 Universets alder

Når man dividerer en strækning med en hastighed, får man den tid det tager at bevæge sig strækningen. Ser man på Hubbles lov, bemærker man at den netop kan skrives om så man får s delt med v:

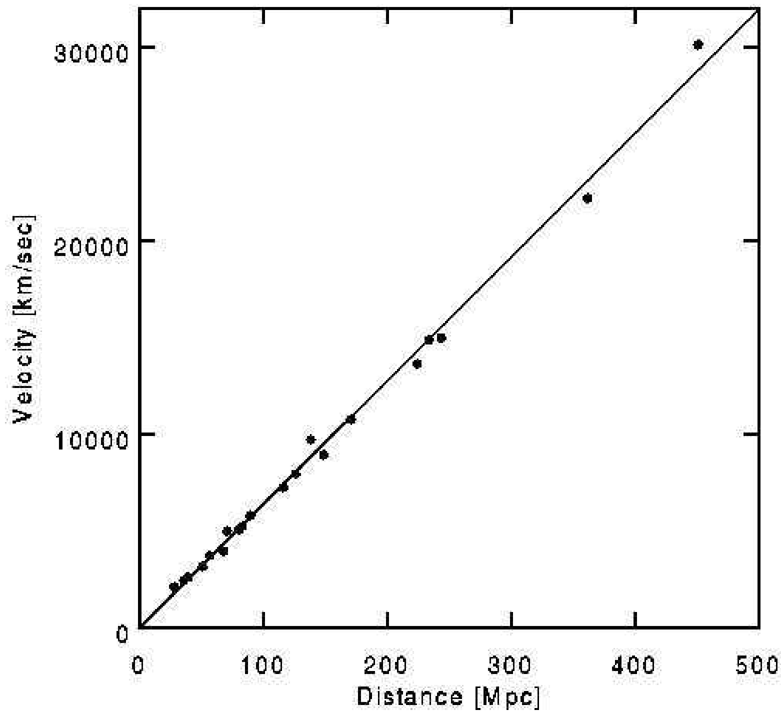
$$v = Hs \Leftrightarrow \frac{s}{v} = \frac{1}{H} \tag{3.6}$$

Det er derfor nærliggende at antage at den reciprokke værdi af Hubblekonstanten, som jo får en tid som enhed, siger noget om universets alder. I Einstein-de Sitter-modellen sættes universets alder t til

$$t = \frac{2}{3}\frac{1}{H} \tag{3.7}$$

3.2.3.4 Øvelse: Beregning af universets alder

Brug den værdi du fandt af H fra 1929 i opgaven s. 30, forkort enhederne og gang præfikserne sammen. Når du har H i enheden s^{-1}, skal du så beregne universets alder efter Einstein-de Sitter-modellen.



Figur 3.8: På denne graf er Hubblekonstanten bestemt med nyere og mere sikre målinger. Bemærk også at denne graf har meget fjernere galakser med end Hubbles fra 1929, jf. figur 3.5.

3.2.3.5 Problemet med universets alder

Det må være et ufravigeligt krav at universets samlede alder er større end alderen på enhver genstand i universet. Midt i 1930'rne antog man at den typiske alder for stjerner og galakser var 3–5 mia. år. På den baggrund var bestemmelsen ud fra Hubblekonstanten klart uacceptabel. Men det er interessant at kosmologerne var så sikre på deres model af det ekspanderende univers at de blot både regnede videre og regnede med at tiden ville løse dette problem, f.eks. ved en bedre bestemmelse af Hubblekonstanten.

3.2.3.6 Øvelse: En moderne værdi for H

Flere og bedre målinger har gjort det muligt at bestemme Hubblekonstanten bedre. Især har det givet fremskridt at man nu kan måle meget fjerne stjerner med rumteleskopet *Hubble*. Ved at måle ude i rummet undgår man atmosfærens forstyrrelser af lyset. Den slags data er brugt til figur 3.8. Beregn universets alder ved hjælp af figur 3.8 og se om det løser aldersproblemet fra den foregående opgave.

3.2.3.7 Øvelse: Universets massetæthed

Einstein-de Sitter-modellen bestemmer universets gennemsnitlige massetæthed d ved udtrykket

$$d = \frac{3H^2}{8\pi G} \tag{3.8}$$

hvor H er Hubblekonstanten og G er gravitationskonstanten, som har værdien $6,67 \cdot 10^{-11} \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}^2/\mathrm{kg}^2$

Find universets gennemsnitlige massetæthed og beregn hvor mange nukleoner (protoner eller neutroner) i hver kubikmeter det svarer til. Regn med at hver nukleon vejer $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

3.3 Big Bang

Tolkningen af Hubbles lov overbeviste de fleste om at universet hverken var evigt eller statisk. Det var tværtimod begyndt på et tidspunkt, og det havde siden udviklet sig. Nu blev to spørgsmål endnu vigtigere for astrofysikerne end før:

1. Hvorfra fik stjernerne deres energi?
2. Hvor kom universets stof fra?

3.3.1 Stjernernes Energi

Før kernefysikken gav indblik i hvordan kerneprocesser kan frigøre energi, troede man at stjerner frigav energi fordi tyngdekraften trak dem sammen. Det skulle ud fra den klassiske mekanik afgive energi når fjerntliggende partikler blev trukket sammen, på samme måde som der frigives energi når en elektron bindes til en atomkerne. Problemet var blot at hvis man regnede ud hvor meget energi Solen kunne frigive på denne måde, kom man til at tal der viste at Solen for længst burde være gået ud.

Men i løbet af 1930'rne fremlagde Hans Bethe (f. 1906), der var flygtet til USA for at undgå nazismen i Tyskland, en teori der forklarede stjerners energiproduktion. Efterhånden som stof samles af tyngdekraften til en stjerne, stiger temperaturen, og når temperaturen bliver høj nok (flere millioner K), begynder disse processer hvor lette kerner smelter sammen ('fusionerer') til tungere kerner:

$$
\begin{aligned}
{}^1_1\mathrm{H} + {}^1_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^2_1\mathrm{H} + {}^0_1\beta^+ + {}^0_0\nu && (3.9)\\
{}^1_1\mathrm{H} + {}^2_1\mathrm{H} &\rightarrow {}^3_2\mathrm{He} + \gamma && (3.10)
\end{aligned}
$$

Når denne proces er gennemløbet to gange, følger denne proces:

$$
{}^3_2\mathrm{He} + {}^3_2\mathrm{He} \rightarrow {}^4_2\mathrm{He} + {}^1_1(H) + {}^1_1\mathrm{H} \qquad (3.11)
$$

Processen kaldes pp-processen, og nettoresultatet er at seks protoner (${}^1_1\mathrm{H}$) omdannes til en α-partikel (${}^4_2\mathrm{He}$), to protoner, to positroner (${}^0_1\beta^+$), to neutrinoer (${}^0_0\nu$) og to γ-partikler.

Energifrigivelsen fra disse processer skaber et tryk udad der opvejer tyngdekraftens pres ind imod stjernens centrum.

Efterhånden som protonerne i stjernens midte brændes op, trækker tyngdekraften den tættere sammen så temperaturen stiger igen, og så begynder andre mere komplicerede processer som til sidst danner lettere kerner, især kul. Men der dannes ingen tungere kerner i stjernen.

Denne teori gav i 1967 Bethe nobelprisen.[3]

[3]Det er både videnskabshistorisk og politisk tankevækkende at nazismens akulturelle og inhumane barbari i Tyskland medførte en enorm hjerneflugt til udlandet, specielt England

3.3.1.1 Øvelse: Fusionsenergi

Man kan beregne disse kerneprocessers Q-værdi. Q-værdien oplyser hvor meget energi der frigøres ved en proces, og den er baseret på den sammenhæng mellem masse og energi Einstein postulerede: $E = mc^2$.

$$Q = -\Delta mc^2 \tag{3.12}$$

Man kan se at når massetilvæksten Δm er negativ, bliver Q-værdien positiv, dvs. at masse er omdannet til energi. Q-værdien beregnes ved at finde massen før og massen efter reaktion, og derpå beregne $\Delta m = m_e - m_f$.

Beregn Q-værdien af den samlede proces ud fra disse masser:

$^1_1$H 1,00866490 u.

$^4_2$He 4,00260324 u.

β-, γ-, ν-partikler er så lette at dem ser vi bort fra, for de påvirker resultatet med under 2%.

Hvor mange joule frigør processen? — 1 u er $1,66054 \cdot 10^{-27}$ kg.

Idet vi antager at denne proces er ansvarlig for Solens samlede energiproduktion nu, og når det oplyses at Solens totaludstråling er på $3,826 \cdot 10^{26}$ W, skal du beregne hvor mange pp-processer der finder sted i Solen hvert sekund.

3.3.2 Det tidligste univers

I årene fra 1946–53 arbejdede den russiske emigrant G.A. Gamow (1904–68) og hans studerende Ralph Alpher (f. 1921) med spørgsmålet om hvordan stoffet er opstået. De beskrev en begyndelse på universet som i dag i store træk er den kosmologien holder sig til, og deres hjælpemidler var kernefysiske modeller samt det helt nye værktøj elektronregnemaskinen.

Teorien siger at universet opstod i en såkaldt singularitet — "Big Bang" — hvormed man mener et punkt med uendelig stor masse, uendelig høj temperatur og uendeligt højt tryk. Under disse omstændigheder gælder almindelige fysiske love ikke, og denne singularitet lader sig derfor ikke beskrive videnskabeligt. Ud fra denne singularitet udvikler rum, tid og stof sig samtidig. Der er altså *ikke* tale om blot en skabelse af stoffet i rummet til et eller andet tidspunkt. Før Big Bang var der nemlig hverken rum eller tid.

I det allertidligste univers var temperaturen ca. 10^{11} K ($t = 0,01$ s), og der var protoner, neutroner, heliumkerner, elektroner, neutrinoer, antineutrinoer og en meget stor mængde energirige fotoner. Fotonernes energi har en direkte forbindelse med temperaturen. Denne sammenhæng er udtrykt med Wiens forskydningslov der siger at den dominerende bølgelængde for fotoner har denne sammenhæng med temperaturen:

$$\lambda_{\text{maks.}} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3}\text{mK} \tag{3.13}$$

Fotonernes energi har særlig betydning for forholdene i det tidligste univers. De havde nemlig så stor energi at de smadrede kerner i de første minutter, og da det hørte op, havde de i 300.000 år så meget energi at de kunne jonisere

og USA. Hjerneflugtens omfang illustreres af at over 30 af de tyske emigranter siden fik nobelprisen.

atomer ved at fjerne elektronerne fra kernerne; der var altså ikke stabile atomer i denne tilstand.

Man siger at det tidlige univers var strålingsdomineret fordi strålingen, altså fotonerne, var de stærkeste. Fordi fotoner hele tiden blev absorberet når de ramte og joniserede atomer, og kort tid efter igen blev udsendt i en ny retning når atomet gendannedes med en anden elektron, kunne stråling ikke strømme frit gennem universet, og det var således en uklar suppe af fotoner, joniserede kerner og andre partikler.

Men efterhånden som universet udvidede sig, faldt temperaturen, og da den 300.000 år efter Big Bang var faldet til ca. 3000 K, indtrådte der en afgørende ændring. Nu havde fotonerne ikke mere energi nok til at ionisere atomerne, herefter strømmede strålingen frit gennem universet, se den næste øvelse. Man siger at strålingen blev afkoblet stoffet, og universet blev gennemsigtigt. Nu fik atomerne ro, og de letteste grundstoffer dannedes (H, He, Li).

Efter 1 mia. år bevirkede tyngdekraften at stof begyndte at trække sig sammen til galakser, og noget senere dannes der stjerner i galakserne, se s. 35.

I dag ved man at Gamow og Alphers teori ramte det rigtige, men i samtiden blev det opfattet som et problem at den ikke kunne redegøre for dannelsen af de tungere grundstoffer, og efter 1953 talte man ikke meget om den.

3.3.2.1 Øvelse: Afkoblingen af strålingen

- Beregn den karakteristiske bølgelænge for fotoner ved temperaturen 3000 K, og find den energi der svarer til denne bølgelængde.

Hydrogenatomets energiniveauer er givet ved denne formel:

$$E_n = \frac{-13,6 \text{ eV}}{n^2} \tag{3.14}$$

- Beregn energien af et hydrogenatom i grundtilstanden og i 1. exciterede tilstand. 1 eV svarer til $1,602 \cdot 10^{-19}$ J.

- Beregn den energi der kræves for at jonisere et hydrogenatom fra grundtilstanden.

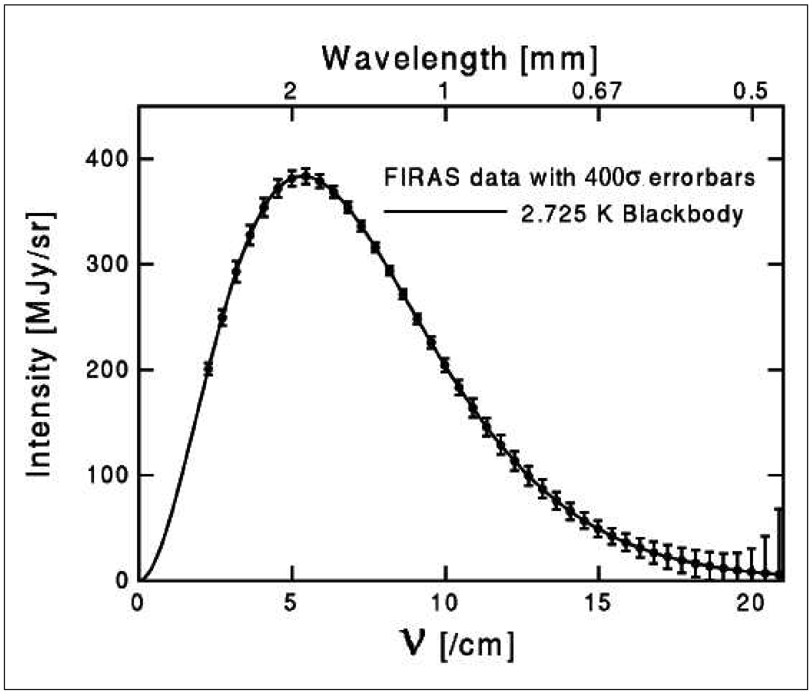
- Beregn den energi der kræves for at excitere et hydrogenatom fra grundtilstanden til 1. exciterede tilstand.

- Vurder om en typisk foton 300.000 år efter Big Bang kunne absorberes af et hydrogenatom.

3.3.3 Den kosmiske baggrundsstråling

Siden 300.000 år efter Big Bang har universet fortsat udvidet sig. Ifølge teorien skulle den afkoblede stråling have været i universet lige siden, men fordi universet har udvidet sig, er dens bølgelængde blevet meget større ved samme mekanisme som er årsag til den kosmologiske rødforskydning, se s. 32. Nogle astrofysikere prøvede også at måle den, men det lykkedes ikke.

I 1964 skulle A.A. Penzias (f. 1933) og R.W. Wilson (f. 1936) måle eventuel radiostøjs forstyrrende virkning på kommunikationen med en ballon (Echo 1) på størrelse med et kontorhus; det var en del af et satellitprogram. De opdagede en konstant og vedvarende mikrobølgestråling med bølgelængden 7,35 cm.



Figur 3.9: På figuren er den optrukne linje den teoretiske fordeling af bølgelængder for baggrundsstrålingen, og mærkerne er de målte bølgelængder med tilføjede usikkerheder. For at man overhovedet kan se usikkerhederne, er de tegnet 400 gange forstørret.

Signalet var underligt, for det fandtes i alle retninger, og en overgang troede de at det skyldtes et par duereder og møget fra duerne i antennen de målte med. En rengøring ændrede dog ikke deres måleresultater. Penzias og Wilson kendte ikke til forudsigelserne om en kosmisk baggrundsstråling, men ved et tilfælde fik de forbindelse med en forskergruppe ved universitetet i Princeton som forberedte en undersøgelse af baggrundsstrålingen. Herved blev det klart for dem hvad de havde fundet. De fik senere nobelprisen for at have opdaget den kosmiske baggrundsstråling og viste hermed at man godt kan få nobelprisen for at opdage noget man ikke ved hvad er. Opdagelsen af den kosmiske baggrundsstråling var en stor og betydningsfuld succes for Big Bang-teorien, og målinger har siden bekræftet sammenhængen mellem forudsigelse og målinger, se figur 3.9.

3.3.3.1 Øvelse: Kosmisk baggrundsstråling

Beregn den karakteristiske bølgelængde for den kosmiske baggrundsstråling ved at bruge den seneste bestemmelse af dens temperatur som er 2,7277 K.

3.3.3.2 Øvelse: Universets udvidelse siden 300.000 år efter Big Bang

Wiens forskydningslov kan omformes til at

$$\lambda_{\text{maks.}} = \text{konstant}/T \tag{3.15}$$

Forholdet mellem bølgelængden da fotonerne blev afkoblet (λ_0), og den kosmiske baggrundsstrålings bølgelængde i dag (λ) er lig med forholdet mellem skalafaktoren dengang og nu:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\text{konstant}/T}{\text{konstant}/T_0} = \frac{R}{R_0} \Leftrightarrow \frac{T_0}{T} = \frac{R}{R_0} \tag{3.16}$$

300.000 år efter Big Bang var temperaturen ca. 3000 K. Beregn hvor mange gange universet har udvidet sig siden da.

3.3.4 De tunge grundstoffer

Gamows og Alphers første Big Bang-teoris beregninger blev efterhånden forfinet så fysikerne i løbet af 1970'erne kunne redegøre for både dannelsen af lette grundstoffer og deres indbyrdes fordeling. Der er i universet ca. 73 % hydrogen, ca. 25 % helium og kun ca. 2 % tungere grundstoffer.

Det havde voldt Gamow og Alpher problemer at forklare dannelsen af de tungere grundstoffer, men det viste sig at stjerners udviklingshistorie rummede en god forklaring. Efterhånden som stjernen opbruger sine ressourcer til at frigøre energi ved fusion, se s. 35, vil den tabe kampen mod tyngdekraftens pres ind imod midten. Nu vil der afhængig af stjernens størrelse ske ét af to.

Stjerner med en masse op til halvanden gang Solens masse vil når hydrogenet er opbrugt, blive til en såkaldt *rød kæmpe*. De yderste lag svulmer op som en stor gaskugle, og de vil i Solens tilfælde til sidst opsluge Jorden. Det inderste af Solen vil fusionere heliumkerner til kul, og så falder den til ro som en *hvid dværg* bestående af kulstofkerner og elektroner i et krystalgitter.

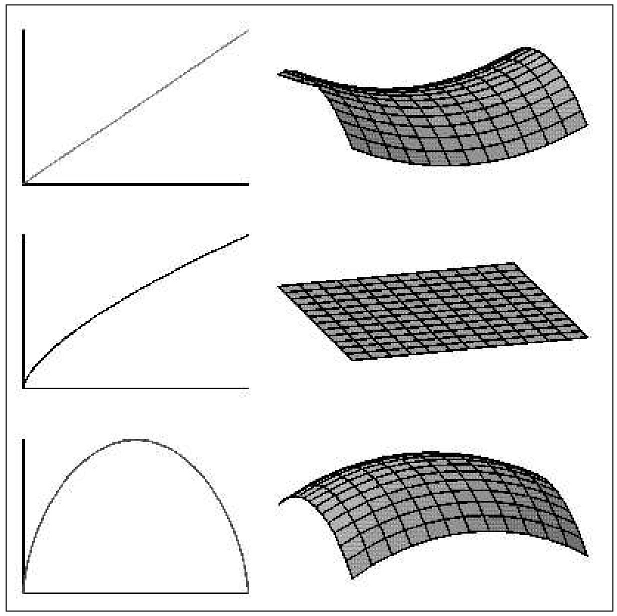
Stjerner der er væsentligt større end Solen, får et voldsommere endeligt. Når det røde kæmpe-stadium er forbi, kollapser kernen, og dette sammenfald ender med en meget voldsom eksplosion hvor mængder af stof slynges bort, mens resten ender som enten en *neutronstjerne* — en samling neutroner med en radius på nogle km — eller et *sort hul*. Et sort hul er en stofmængde der er så kompakt at tyngdekraften fra dens enorme massekoncentration forhindrer endog lyset i at slippe bort. Man får et indtryk af hvor kompakt denne stofmængde er, når man tænker på at Solen pakket sammen på denne måde ville have en radius på 2,9 km, Jorden en radius på 0,87 cm. Disse objekter har en massefylde på omtrent 10.000 mia. kg per kubikcentimeter. Op til eksplosionen dannes der kul, kvælstof og ilt, og disse stoffer smelter sammen til fluor, neon, natrium, aluminium og andre forholdsvis lette grundstoffer.

Ved eksplosionen slynges stoffet ud med hastigheder tæt på lysets, og stjernen er nu en *supernova*, dvs. en stjerne som i nogle måneder lyser med en styrke som en milliard sole. Under eksplosionen er der et kort øjeblik mulighed for at lettere kerner smelter sammen til tungere grundstoffer som kobber, zink, strontium, molybdæn, sølv, tin, bly, guld, kviksølv og uran, og disse stoffer slynges så ud i rummet. Her vil de senere igen blive samlet af tyngdekraften til nye stjerner og planeter som f.eks. Jorden. Fordi der kun er et kort øjeblik til de tunge stoffers dannelse, er de så sjældne, men de få tungere stoffer vi har i vores krop og omkring os er altså rester af stjerneeksplosioner for mange, mange år siden.

3.4 Universets fremtid

Kosmologien har haft tre store succeser i det 20. århundrede:

- Hubbles lov der forklarer bevægelserne i universet.



Figur 3.10: Graferne vil venstre viser hvordan $R(t)$ udvikler sig i et negativt krumt, et fladt og et positivt krumt univers. Fladerne til højre viser rummets struktur.

- Teorien om Big Bang som forklarer dannelsen af stoffet.
- Opdagelsen af den kosmiske baggrundsstråling der er et stærkt argument for Big Bang.

Men der er flere ubesvarede spørgsmål endnu, og denne gennemgang slutter med to af dem:

1. Hvordan ender det mon?
2. Hvor er det mørke stof henne?

3.4.1 Den kritiske masse

Astrofysikere er meget optaget af det der kaldes spørgsmålet om den kritiske masse, eller om universet er åbent eller lukket. Nu udvider hele universet sig, men spørgsmålet er om det bliver ved. Hvis der nemlig er meget stof i universet, vil kræfterne fra tyngdekraften til sidst vinde og trække alle galakserne tilbage igen så det hele samles i et punkt hvor der som ved Big Bang vil være uendelig stor temperatur, tryk og masse. Denne afslutning har man kaldt *Big Crunch* — "den store knasen", og denne udgave kalder man et lukket univers; dette univers er positivt krumt som en kugle. Det kan også tænkes at universet indeholder så lidt stof at det for altid vil udvide sig; det er det åbne univers, og det er negativt krumt som en saddel. Og endelig kan det tænkes at universets masse ligger lige på den kritiske grænse mellem et åbent og et lukket univers. I så fald vil det også udvide sig for altid, men rummet vil være fladt. Spørgsmålet kan ikke besvares endnu, men det giver måske et fingerpeg at man snart måler massen til at være en lille bitte smule over, snart en lille bitte smule under den kritiske masse. Dvs. man kan gætte på at universets masse nok lige præcis er den kritiske.

3.4.2 Det mørke stof

Undersøgelserne af universets masse har gjort os opmærksomme på et andet problem. Det er at vi ikke direkte kan se ret meget af universets masse. Masse som vi kender den, findes først og fremmest i elektroner, protoner og neutroner, og af den slags masse kan vi kun finde så det svarer til nogle få procent af den samlede masse vi ved der må være i verdensrummet. Hvor ved man så fra at der skal være mere masse end det vi kan se? Ved at undersøge roterende galakser kan man afgøre at der må være meget mere masse i universet. Når nemlig noget roterer, skal der være en kraft mod centrum for rotationen der får de roterende dele til hele tiden at ændre retning så de ikke fortsætter ligeud. Den er den kraft en hammerkaster leverer ved at holde godt fast i metaltråden ud til hammerhovedet. Når han slipper metaltråden, ophører denne kraft (centripetalkraften), og hammeren flyver i en ret linje væk fra hammerkasteren indtil den rammer jorden. Det samme gælder når de store stofmængder i en galakse roterer, og centripetalkraften skal komme fra tyngdekraften. Når man kender galaksens rotationshastighed og kan skønne over delenes masse, kan man beregne hvor meget masse der skal til at give den nødvendige tyngdekraft, og her viser det sig at vi ikke kan finde masse nok.

En kandidat til en del af den manglende masse er neutrinoer. Dem er der en meget stor mængde af i universet, og selvom man ikke har kunnet måle deres masse i laboratorier, kan de have en meget, meget lille masse. Fordi der er mellem 1 og 10 mia. neutrinoer for hvert atom i universet, behøver hver neutrino ikke at være ret tung før de bidrager med en masse masse, men de er næppe hele forklaringen selvom de skulle have en vis masse. Derfor må vi i dag erkende at vi lever i et univers hvor vi kun kender en beskeden del af stoffet.

3.5 Hvad er der sket siden grækerne?

Det er måske nemmest at sige hvad der har ændret sig siden den græske astronomi. Universet er i dag utroligt meget større end grækerne drømte om, og Jorden har mistet sin priviligerede position i universets midte. Nu ligger den lidt skævt i en galakse blandt mange andre, og i det uendelige verdensrum kan man slet ikke udpege en midte.

Men på den anden side har fysikerne haft held med at lade jordiske principper gælde for hele universet. Det kosmologiske princip påstår jo at fysikken som vi kender den fra Jorden, gælder overalt. Dette er en forenkling i forhold til Aristoteles der havde forskellige fysiske love i forskellige dele af kosmos.

Derimod er en græsk ide levet videre og fået stor succes. Det er ideen om at man kan beskrive universet med en model, og at man skal bruge matematik når man opstiller sin model. Denne arv fra grækerne er en grundlæggende forudsætninger for hele den vestlige verdens naturvidenskab, og uden denne forudsætning ville vi ikke have vist ret meget om universet.