

Afstande i Universet – afstandsstigen

- fra borgeleo.dk

Afstandsstigen

I astronomien har det altid været et stort problem at bestemme afstande. Først bestemtes afstandene til de nære objekter som Solen, Månen og planeterne, siden afstandene til stjerner og galakser. Man taler ofte om *afstands-stigen*, der er den serie af målemetoder, som trin for trin bringer os længere ud i Universet. Mange trin på afstandsstigen er ret sikre. Således kender vi næsten alle afstande i solsystemet med en nøjagtighed på nogle få kilometer. Også afstanden til de nærmeste stjerner har vi godt styr på, ikke mindst på grund af den europæiske satellit [Hipparcos](#). Og om få år endnu mere præcise afstande til mange flere stjerner i Mælkevejen fra satellitten [Gaia](#). Men går vi længere ud i Universet, så begynder problemerne at melde sig. Det er stadig en meget vanskelig opgave at bestemme afstande til galakser. De virkeligt store afstande på milliarder af lysår, det man kalder kosmologiske afstande, kender vi kun med en nøjagtighed på måske 25 %.

Vi medtager i denne beskrivelse kun visse metoder til afstandsbestemmelse – i litteraturen er der mange andre mere eller specielle metoder, som fx laserpulsbestemmelse af afstanden til Månen.

De metoder, vi medtager her, er – med gradvist stigende afstande:

- Solsystemet – Keplers 3. lov, astronomiske enheder og radarmålinger
- Trigonometriske stjerneparallakser
- Variable stjerner – standardlyskilder, herunder
 - Cepheider*
 - Type Ia supernovaer*
- Hubbles lov - hastigheden er proportional med afstanden

Se en glimrende introduktion (på engelsk) til afstandsbestemmelse [her](#).

Solsystemet – Keplers 3. lov, astronomiske enheder og radarmålinger

Det første trin på stigen handler om at bestemme afstande i solsystemet. Historisk har udgangspunktet været Keplers 3. lov, der giver afstande målt i astronomiske enheder (1 AE = Jordens middelf afstand til Solen) til planeterne i solsystemet, hvis planeternes omløbstider om Solen er bestemt.

Når man så på et givet tidspunkt har beregnet en afstand til en planet i AE, bruges radarmålinger til at bestemme afstanden i km.

Herved kan 1 AE omregnes til km, og alle afstande i Solsystemet er så kendte i km.

Resultatet er, at

$$1 \text{ AE} = 149.597.871 \text{ km}$$

Med en usikkerhed på 1 km. Langt de fleste afstande i Solsystemet er i dag kendte med få km's usikkerhed.

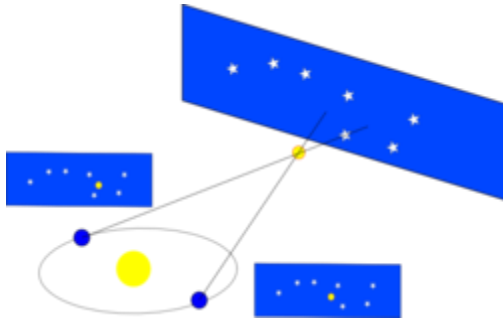
Den første mere vellykkede bestemmelse af den astronomiske enhed blev foretaget af den italienske astronom *Cassini* i 1672. Han brugte en parallakse måling af afstanden til planeten Mars, foretaget fra to forskellige steder på Jorden på et tidspunkt, hvor Mars var tættest på Jorden. Han fandt at den astronomiske enhed var på 138.730.000 km.

Opgave 1: afstanden til Mars

En radarpuls sendes fra Jorden af sted mod Planeten Mars, og efter 32,3 minutter registreres signalet, der er tilbagekastet fra marsoverfladen. Radarpulsen bevæger sig med lysets fart i det tomme rum.

- a) Beregn afstanden til Mars på det pågældende tidspunkt, dels i enheden km, dels i enheden AE

Trigonometriske stjerneparallakser



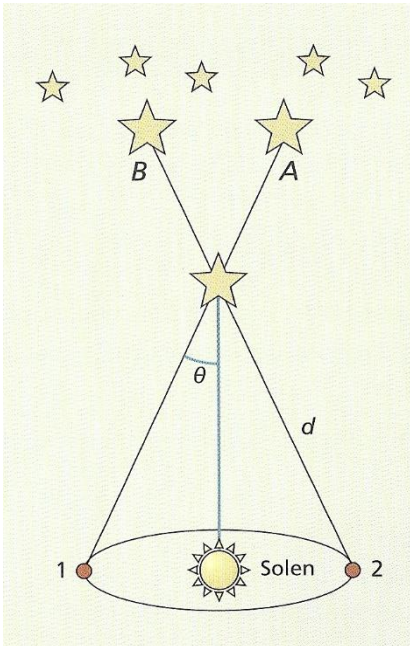
Figur 1: en stjernes position i forhold til baggrundsstjerneerne ændres, når Jorden bevæger sig rundt om Solen. Det er dog ganske lidt, fordi stjernerne er så langt væk.

Tycho Brahe havde en god grund til ikke kunne acceptere den nye teori fra Kopernikus om at Jorden bevæger sig om Solen. Tycho Brahe ræsonnerede nemlig rigtigt, at stjernerne burde vise en parallakse, hvis Jorden kredsede om Solen. Trods hans egne efter tiden meget nøjagtige målinger (vinkler på ca. $0,02^\circ$) lykkedes det aldrig for Tycho Brahe at måle nogen stjerneparallakse. Derfor konkluderede han, at Jorden måtte være i centrum for Universet. Tycho Brahe troede ikke på, at stjernerne kunne være så langt borte, at selv han ikke kunne måle deres parallakser. Først 1838 lykkedes det den tyske astronom Friedrich Wilhelm Bessel (1784 - 1846) med kikkert for første gang direkte at måle en stjerneparallakse. Parallaksevinklen er

for den nærmeste stjerne alfa Centauri så lille som $0,000214^\circ$, altså ca. 100 gange mindre end de parallakser, Tycho Brahe kunne måle.

Parallaksemåling er en direkte trigonometrisk metode til at finde stjerneafstande. Metoden anvendes stadig, i dag er de jordbaserede målinger dog erstattet af parallaksebestemmelser fra rummet. Senest har satellitten Hipparcos forsynet os med et meget omfattende stjerne katalog, hvor parallakserne er bestemt med en nøjagtighed på $0,000.000.3^\circ$, hvilket giver os ret præcise afstande ud til ca. 300 lysår. Med Hubble Space teleskopet er lykkedes at måle parallaksevinkler så små, at afstande op til 7500 lysår har kunnet bestemmes, bl.a. til en række såkaldte cepheide-stjerner, se nedenfor.

Opgave 2: afstanden til alfa Centauri



Figur 2: parallaksevinkel for en stjerne

Brug oplysningen ovenfor - nemlig at parallaksevinklen for alfa Centauri er $0,000214^\circ$ - sammen med figur 3 og din viden om retvinklede trekante til at beregne afstanden fra stjernen alfa Centauri til Jorden (den røde prik der kører rundt om Solen). Afstanden fra Solen til Jorden er 1 AE.

Begrund og brug ligningen

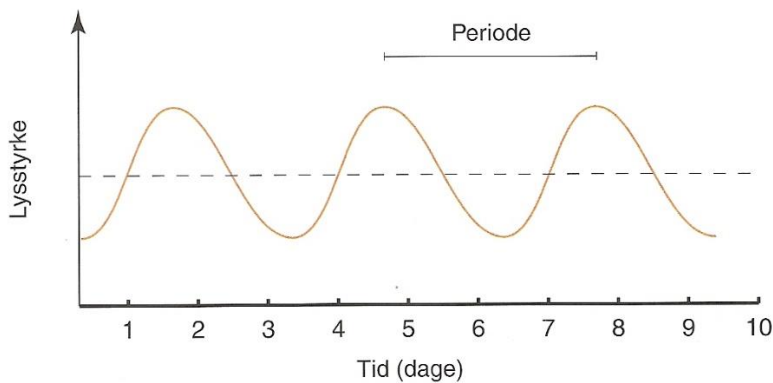
$$\sin(\theta) = \frac{1 \text{ AE}}{d}$$

Variable stjerner - standardlyskilder

Det næste trin er at bestemme afstande, der rækker ud over Mælkevejen. Man har med de variable cepheidestjerner en metode, der rækker fra omkring 3000 lysår til 150 Mlysår ud i rummet.

Nedenfor ses lyskurven for en typisk såkaldt cepheide - en stjerne, hvis lysstyrke svinger på en regelmæssig måde. Disse stjerner har samtidig en voldsom stor middellysstyrke, så de kan ses over store afstande. Cepheiderne er opdaget af Henrietta Swan Leavitt (1868-1921).

Cepheider er stjerner, der skiftevis udvider sig og trækker sig sammen og undervejs varierer i lysstyrke. Nogle cepheider varierer på få døgn, mens andre er uger eller måneder om at gennemløbe en periode.



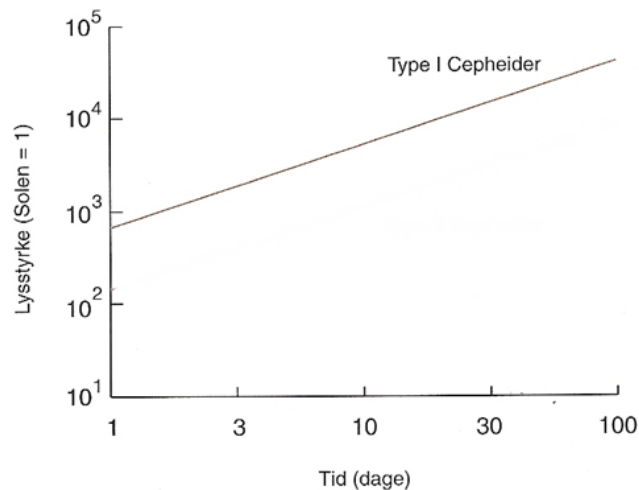
Figur 3: Middellysstyrken for en cepheide vokser med dens lysstyrkeperiode

Når perioden er målt (det er ikke svært at observere den skiftende lysstyrke, stjernens lys skal 'bare' følges over nogle dage - eller måneder!), kan stjernens middellysstyrke bestemmes.

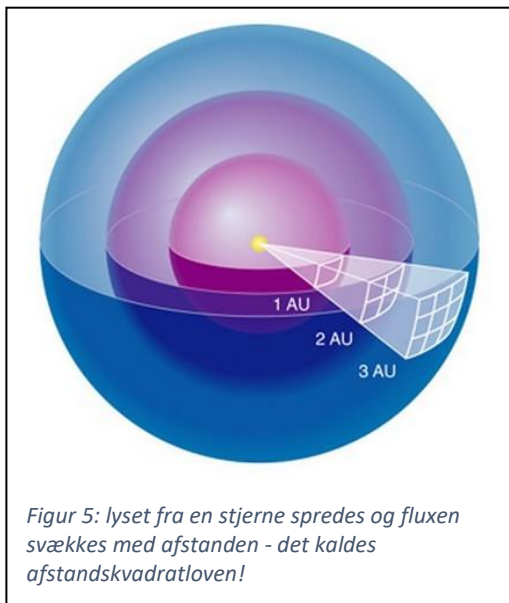
Afstanden til de nærmeste cepheider kan måles med *parallakse-metoden* omtalt ovenfor. Når lysintensiteten er målt, og afstanden er kendt, kan stjernens lysstyrke beregnes, se afstandskvadratloven nedenfor. Herved har man målt den sammenhæng mellem periode og lysstyrke, der vises på figur 5 nedenfor.

Og omvendt: med en kendt periode giver figur 5 lysstyrken, og afstanden til stjernen bestemmes, når man fra Jorden måler hvor stærkt eller svagt stjernen lyser.

Lysintensiteten aftager nemlig med kvadratet på afstanden. Så hvis cepheiden måles til at være meget lyssvag (i middel), så er den også meget langt borte.



Figur 4: Der er en sammenhæng mellem perioden og middellysstyrken for cepheiden



Det lykkedes for Edwin Hubble i 1924 at observere cepheider i Andromeda-galaksen og ud fra periode-lysstyrkerelationen som på figur 5 kunne Hubble nu endelig vise, at Andromedagalaksen er et selvstændigt stjernesystem uden for vor Mælkevej. Afstanden til Andromedagalaksen var nemlig langt større end Mælkevejens udstrækning.

I dag er cepheidemetoden den centrale metode, når man skal bestemme galakseafstande ud til 150 Mlysår. De følgende trin i afstandsstigen bygger videre på denne metode.

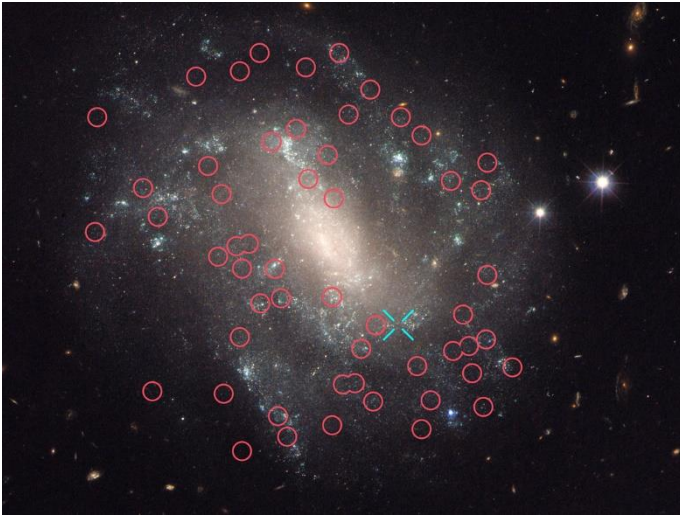
Afstandskvadratloven

Lysintensitetens afhængighed af afstanden fra stjernen er udtrykt i følgende sammenhæng:

$$I = \frac{L}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

Her er I intensiteten, der måles i enheden W/m^2 , L er stjernens lysstyrke (i enheden W), og r er afstanden mellem stjernen og iagttageren, målt i meter.

Det forudsættes i denne formel, at stjernen udsender lige meget lys i alle retninger, sådan at lysstyrken L fordeles jævnt over hele kugleoverfladens areal $4\pi r^2$.



Figur 6: Cepheider (røde cirkler) og type Ia-supernova (blåt kryds) i galaksen UGC 9391, der befinder sig 130 millioner lysår borte. (Illu.: Nasa, ESA og A. Riess (STScI/JHU))

Eksempel - afstanden til en type I cepheide

En type I cepheide har en periode på 30 dage. Lysstyrken finder vi fra figur 4 til at være 10^4 gange Solens lysstyrke, der er $3,8 \cdot 10^{26}$ W. Cepheidens middelinintensitet måles til $5,9 \cdot 10^{-16}$ W/m².

Vi isolerer afstanden r af ligningen ovenfor:

$$r = \sqrt{\frac{L}{4 \cdot \pi \cdot I}} = \sqrt{\frac{10^4 \cdot 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot 5,9 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2}} = 23 \cdot 10^{21} \text{ m}$$

der kan omregnes til 2,4 Mlysår.



Figur 7: de fjerneste gadelamper er mere lyssvage end de nære. Det samme gælder for supernovaer.

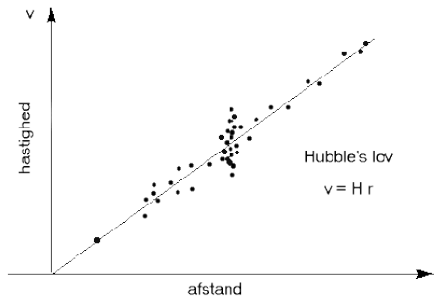
Supernova type 1a - standardlyskilde

En af de bedste metoder til at bestemme meget store afstande er observationer af supernovaer af typen 1a, der fungerer som en slags standardlyskilde med kendt maksimal lysstyrke, omkring $5 \cdot 10^9$ gange mere lysstærk end Solen i den visuelle del af spektret, og dermed ofte lige så lysstærk som hele den galakse, den er en del af! Disse supernovaer kan - i den ret korte periode på nogle uger hvor de er mest lysstærke - ses på afstande der er flere milliarder lysår, og det betyder at metoden kan anvendes over store dele af det synlige univers.

Beregningen af afstandene til de fjerneste supernovaer er afhængige af Universets udvikling siden Big Bang, og denne afhænger af de kræfter, der har styret udviklingen. Netop derfor er de blevet brugt som argument for eksistensen af den såkaldte sorte energi, uden hvilken de mest lyssvage supernovaers store afstande er svære at forklare. Den sorte energi er ansvarlig for, at Universets udvidelse pt. ser ud til at gå hurtigere og hurtigere.

Afstanden til de nærmeste supernovaer kan bestemmes med cepheide-metoden, se fx figur 7, hvor der i samme galakse er cepheider og en enkelt supernova-eksplosion også er observeret. Herved kan supernovaernes lysstyrke beregnes.

Hubbles lov - hastigheden er proportional med afstanden



De allerstørste afstande - dem der kaldes "kosmologiske" - bygger på Hubbles lov:

$$v = H_0 \cdot r \quad \text{Hubbles lov}$$

Her er v galaksens nuværende hastighed bort fra os, r er galaksens nuværende afstand til os, og endelig er H_0 Hubbles 'konstant', omkring 20,8 km/s/Mlysår.

Galaksens 'flughastighed' er altså proportional med dens afstand fra os.

Hubbles lov bruges typisk på afstande over 300 Mlysår. Under denne afstand er Universets udvidelse ikke homogen, fordi gravitationskræfter mellem galakserne i galaksehobe forhindrer dem i at deltage i Universets generelle udvidelse. Hastigheden v bestemmes for små værdier af z (under 0,1) af formlen

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = z \quad \text{Doppler-forskydningsformlen}$$

Altså Dopplerforskydningsformlen, hvor λ er den observerede bølglængde i galaksespektret, λ_0 er laboratorieværdien for bølglængden af det grundstof, der er 'ansvarlig' for spektrallinjen.

Hastigheden v kan beregnes af Dopplerforskydningsformlen ovenfor op til rødforskydninger på omkring 0,1, svarende til en galaksehastighed på 10% af lysets fart, altså 30.000 km/s.

Bruger vi Hubbles lov med denne hastighed, får vi:

$$r = \frac{v}{H_0} = \frac{30.000 \text{ km/s}}{20,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}/\text{Mlysår}} = 1400 \text{ Mlysår} = 1,4 \text{ Glysår}$$

Beregninger af kosmologiske afstande for store værdier af rødforskydningen - ikke helt nemt!

For rødforskydninger over 0,1 gælder Hubbles lov stadig, men både afstand og hastighed bliver afhængige af Universets udviklingshistorie op til nu. Vi kan desværre ikke mere bruge formlen for Dopplerforskydningen til beregning af galaksens hastighed. Derfor er det ikke muligt at bruge Hubbles lov direkte, når rødforskydningen er bestemt fra galaksespektret.

Men hvordan finder vi så afstandene til galakser med store værdier af rødforskydningen z , fx den pt. fjerneste galakse med en rødforskydning omkring 11?

I kosmologien fortolkes rødforskydningen ikke som en enkelt Dopplerforskydning, men derimod en hel serie af Dopplerforskydninger, idet lyset på sin vej mod os hele tiden nærmer sig en ny galakse i sin bevægelsesretning. Denne galakse fjerner sig fra den forrige, lyset passerede, med en (yderligere) rødforskydning til følge - og lyset vil derfor gradvis blive mere og mere rødforskydet på sin vej imod os, og denne rødforskydning er et direkte udtryk for, hvor meget Universet har udvidet sig siden lyset fra galaksen blev udsendt.

Alle (store) afstande er vokset med en faktor $1+z$ under lysets bevægelse fra galaksen til os. Derfor var Universet $1+z$ gange mindre ved lysudsendelsen end i dag. Hvis fx $z = 11$, så var Universets størrelse 12 gange mindre end nu, da lyset fra den fjerne galakse blev udsendt.

Men Universets størrelse er afhængig af udviklingen i afstandene fra Big Bang til nu! For at beregne denne udvikling, skal man som input bruge Universets nuværende udvideshastighed (Hubblekon-

stanten) men også mængden af 'normalt' atomart stof og af mængden af mørkt stof, der begge bremser galaksernes hastighed - og endelig mængden af sort energi, der accelererer galakserne op i hastighed - til at beregne Universets udvikling tilbage i tiden - eller frem i tiden! Disse input kaldes kosmologiske parametre.

Har man valgt sine kosmologiske parametre, kan tidspunktet for lysudsendelsen beregnes, og afstanden til galaksen beregnes. Hubbles lov bruges således ikke direkte til afstandsbestemmelse for de største rødforskydninger, men afstanden kan beregnes når Hubblekonstanten og Universets stof/energi-indhold er kendt, se tabel herunder.

<i>Kosmologiske parametre - fra Planckdata</i>	
Hubblekonstant (km/s/Mlysår)	20,8
Andel normalt stof	0,049
Andel mørkt stof	0,268
Andel sort energi	0,683

Figur 8: kosmologiske parametre - andele skal forstås som andele af den såkaldte kritiske densitet

Prøv evt. at beregne lysets rejsetid, nuværende afstand til en galakse (comoving radial distance) osv. med en kosmologisk model-beregner på adressen <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>. Modellen kræver at man indtaster værdien af Hubblekonstanten, andelen af stof (normalt+mørkt), andelen af sort energi (vac) og rødforskydningen. Summen af de to sidste bør være 1, som Planck-data har vist (giver et fladt Univers - tryk på *flat*).

Du kan også bare bruge modellen ved at indtaste rødforskydningen og trykke på *flat*-knappen. De øvrige tal behøver du ikke at ændre - de er gode nok efter vores nuværende viden om Universet.

Opgave 3: afstanden til galaksen NGC 4889

En bestemt spektrallinje har i laboratoriet bølglængden 393,3 nm. I spektret fra galaksen NGC 4889 måler man, at bølglængden er 401,8 nm.

- Beregn rødforskydningen z og vis derved, at den er mindre end 0,1
- Beregn galaksens fart bort fra os
- Beregn afstanden til galaksen ved hjælp af Hubbles lov