

Spektre, rødforskydning og universets udvidelse

- Emission og absorption - Bohrs atommodel
- Hydrogenspektret
- Kontinuert stråling og Planck-kurver
- Absorptionsspektre
- Klassisk dopplereffekt
- Rødforskydning og rødforskydningstal
- Ballonmodellen - universets udvidelse
- Galakseres hastighed - et eksempel
- Hubbles lov

Emission og absorption - Bohrs atommodel

Postulat 1

Et atom kan kun befinde sig i en række ganske bestemte *stationære tilstande*, hver med deres energi.

Postulat 2

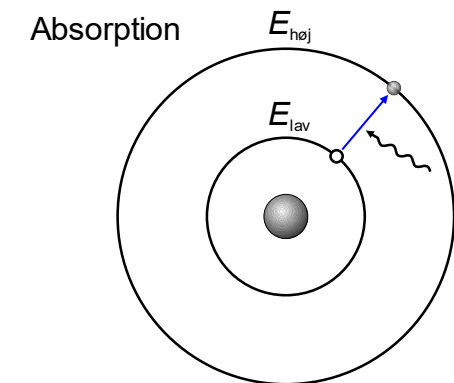
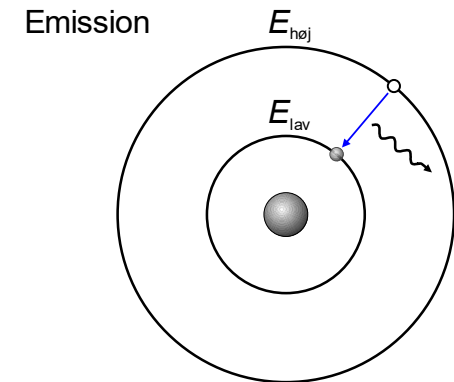
Et atom kan overgå fra en stationær tilstand med en høj energi til en stationær tilstand med en lav energi ved at udsende en foton (*emission*) med en energi givet ved

$$(1) \quad E_{\text{foton}} = E_{\text{høj}} - E_{\text{lav}} = h \cdot f$$

hvor $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ er *Plancks konstant* og f er fotonens frekvens. Omvendt kan et atom også overgå fra en stationær tilstand med en lav energi til en stationær tilstand med høj energi ved at optage en foton (*absorption*) med energi og frekvens, som ligeledes er givet ved (1).

Bølgeligningen

Farten for elektromagnetisk stråling er c , så: $c = f \cdot \lambda \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f}$



Hydrogenspektret

Energiniveauer i hydrogenatomet

$$E_n = -h \cdot c \cdot R \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{2,182 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{n^2}$$

hvor $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ er *Plancks konstant*,
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ er lysets hastighed, $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ er *Rydbergkonstanten* og n er banenummeret.

Eksempel: Vi ønsker bølgelængden af den linje, der svarer til at elektronen hopper fra 3. til 2. bane i hydrogenatomet:

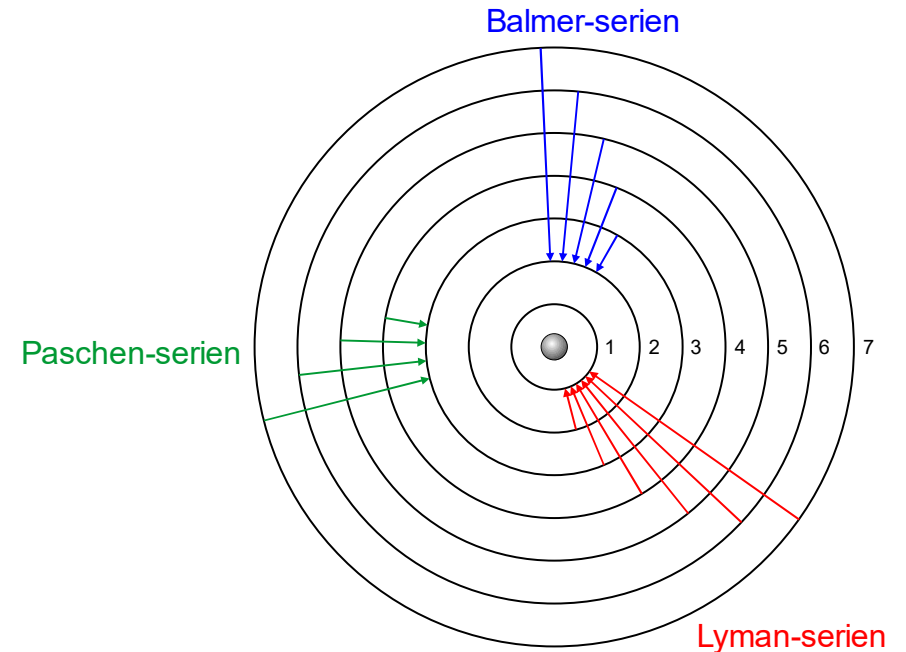
$$E_3 = -h \cdot c \cdot R \cdot \frac{1}{3^2} = -\frac{2,182 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{3^2} = -2,424 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_2 = -h \cdot c \cdot R \cdot \frac{1}{2^2} = -\frac{2,182 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{2^2} = -5,455 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

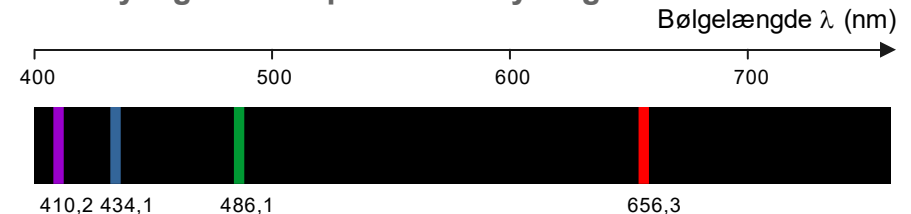
$$E_{\text{foton}} = E_3 - E_2 = 3,031 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$f = \frac{E_{\text{foton}}}{h} = \frac{3,031 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 4,571 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

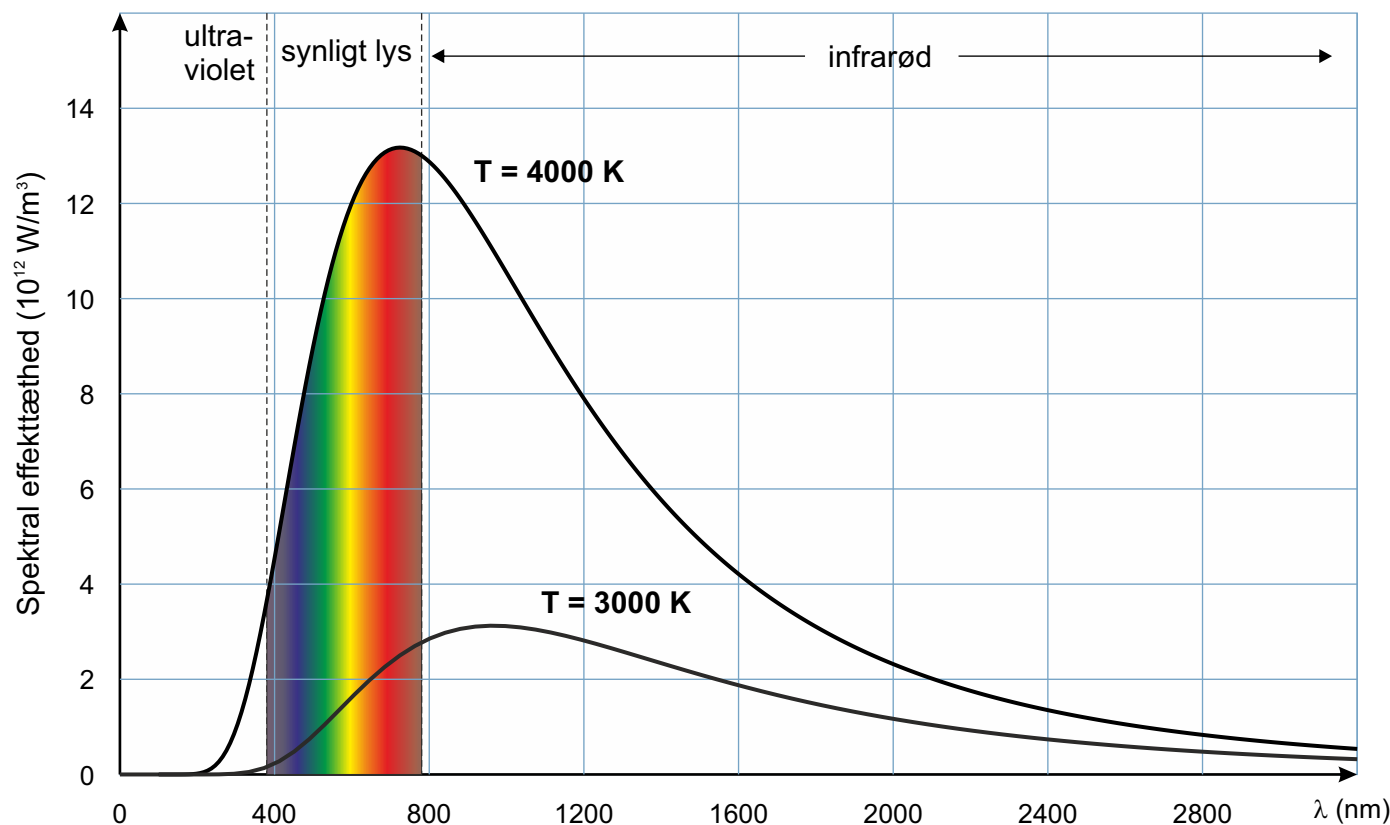
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4,571 \cdot 10^{14} \text{ Hz}} = 6,563 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 656,3 \text{ nm}$$



Den synlige del af spektret for hydrogen



Kontinuert stråling og Planck-kurver



Vi ser, at legemet med temperatur 4000 K udsender mest i det synlige område, mens legemet med temperatur 3000 K udsender det meste af sin stråling i det infrarøde område.

Ethvert legeme med en temperatur over det absolutte nulpunkt (0 K) udsender *elektromagnetisk stråling*. Denne stråling består af et sammenhængende spektrum af bølgelængder og kaldes *kontinuerlig* (eller kontinuert) *stråling*.

Dette adskiller sig fra den stråling, som udsendes af enkelte atomer eller molekyler, hvor der kun udsendes (eller absorberes) bestemte bølgelængder. Her opstår i stedet et linjespektrum, som for eksempel ses i atomspektre fra brint og natrium.

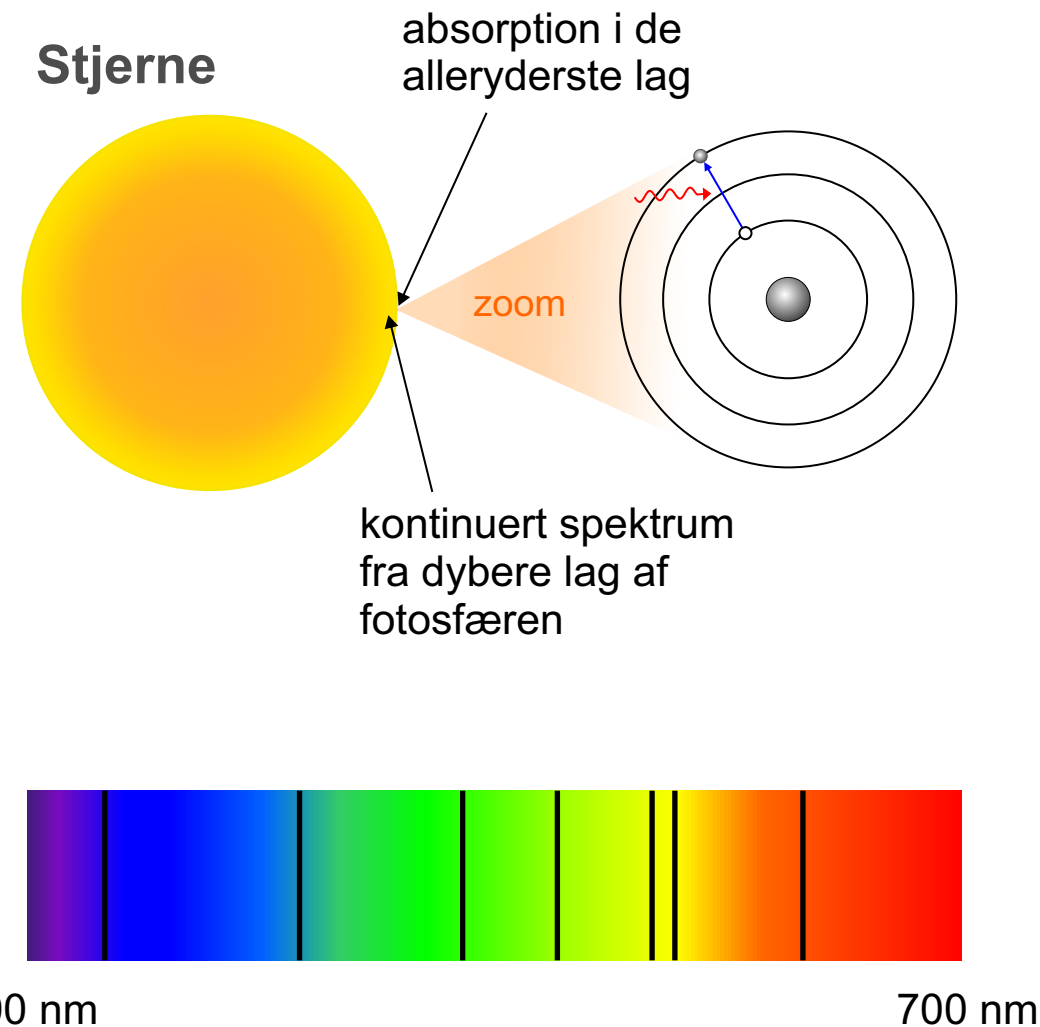
For et legeme med temperaturen T kan strålingens intensitet som funktion af bølgelængden ideelt set beskrives med en såkaldt Planck-kurve.

Absorptionsspektre

På forrige side med Planck-kurver så vi, at et legeme med en temperatur over 0 K udsender et kontinuert spektrum. Solen er et eksempel. Dette spektrum opstår i de dybere og varmere lag af Solens synlige overflade, den såkaldte *fotosfære* – nærmere bestemt omkring 500 km nede.

Når lyset bevæger sig op gennem de øverste, koldere og tyndere lag af fotosfæren, passerer det gennem gasser, som indeholder grundstoffer som hydrogen, helium, natrium, calcium og jern. Her kan atomerne absorbere lys med helt bestemte bølgelængder, der svarer til deres elektronovergange.

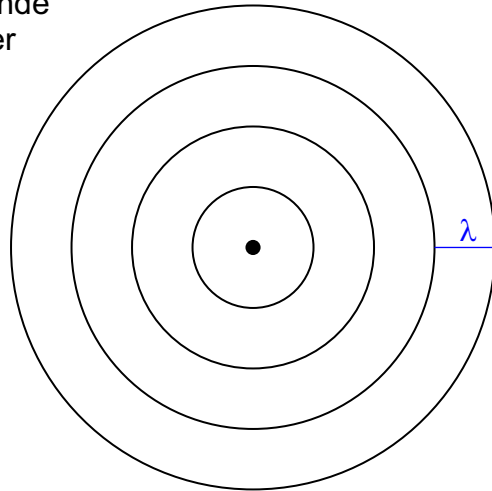
På den måde bliver visse bølgelængder "fjernet" fra det regnbuefarvede, kontinuerte spektrum. Resultatet er et absorptionspektrum – som det ses på figuren til højre – med mørke linjer dér, hvor absorptionen er sket. Det samme sker i andre stjerner, hvor lyset også passerer gennem tynd gas og danner et absorptionsspektrum.



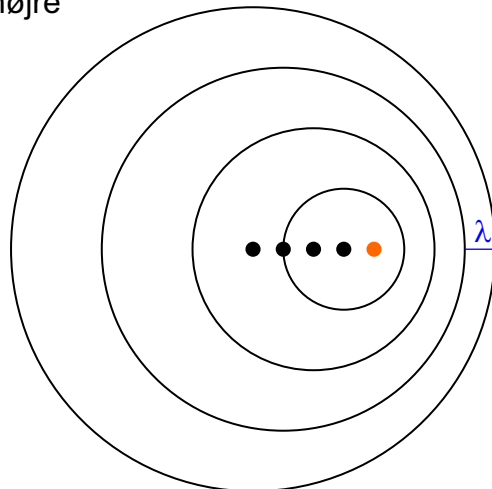
Klassisk dopplereffekt



Stillestående
bølge giver



Bølge giver bevæger
sig mod højre

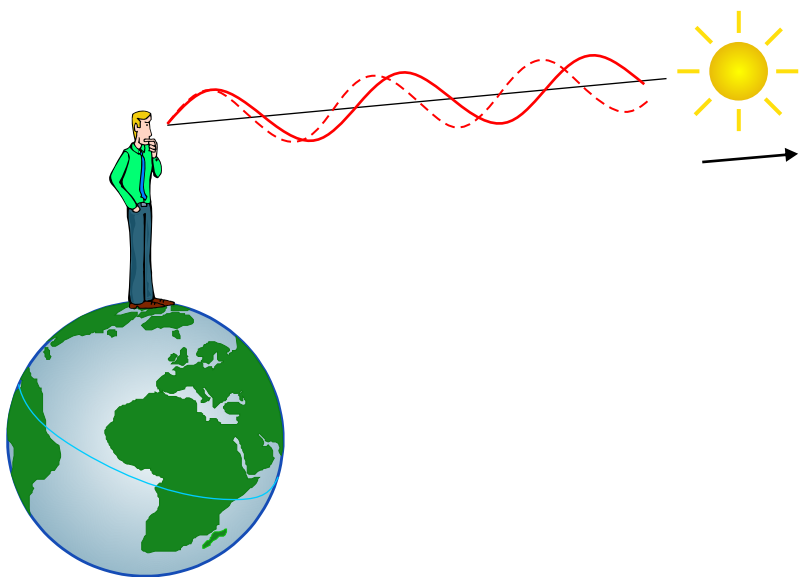


Når en bølge giver står stille, udbreder bølgerne sig symmetrisk i alle retninger, og afstanden mellem bølgetoppene — bølgelængden λ — er den samme overalt. Men hvis bølge giveren bevæger sig hen imod en observatør, vil denne opfatte, at bølgerne bliver "presset sammen", så bølgelængden bliver kortere. Det betyder samtidig, at frekvensen f , altså antallet af bølgetoppe per sekund, opfattes som højere. Det skyldes bølgeligningen $v = f \cdot \lambda$: Hvis λ bliver mindre, må f blive større, når v er konstant.

Omvendt, hvis bølge giveren bevæger sig væk fra observatøren, bliver bølgerne "strukket ud", og observatøren opfatter en længere bølgelængde og dermed en lavere frekvens.

Denne effekt kaldes dopplereffekten og kendes for eksempel fra lyden af en ambulance. Ambulancen udsender hele tiden lydbølger. Når den nærmer sig, opfattes tonen som højere, og når den passerer og kører væk, bliver tonen dybere.

Rødforskydning og rødforskydningstal



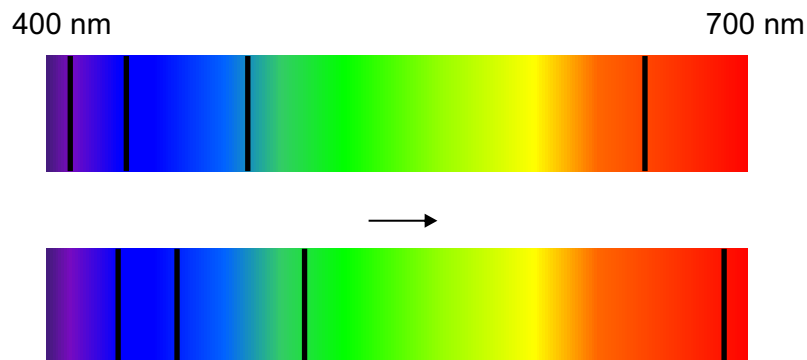
En stjerne bevæger sig bort fra en observatør på Jorden. Ligesom i det klassiske tilfælde med dopplereffekten (fra forrige side) vil bølgelængden af det lys, som stjernen udsender, forekomme længere for observatøren, end den ville have været, hvis stjernen havde stået stille (se den stiplede kurve). Dette fænomen kaldes **rødforskydning**. Betegnelsen skyldes, at en længere bølgelængde i det synlige spektrum får spektrallinjer til at forskydes mod den røde ende af spektret.

Det skal bemærkes, at rødforskydning kan skyldes to forskellige effekter: stjernens egenbevægelse (klassisk dopplereffekt) og rummets udvidelse (kosmologisk rødforskydning). Vi vender tilbage til universets udvidelse på næste side.

Til venstre ses to absorptionsspektre med synlige hydrogenlinjer. Det øverste er laboratoriespektret (ingen bevægelse), mens det nederste viser et rødforskudt spektrum, hvor linjerne er forskudt mod den røde ende. Forskydningen skyldes, at objektet bevæger sig væk. Rødforskydningstallet z defineres som:

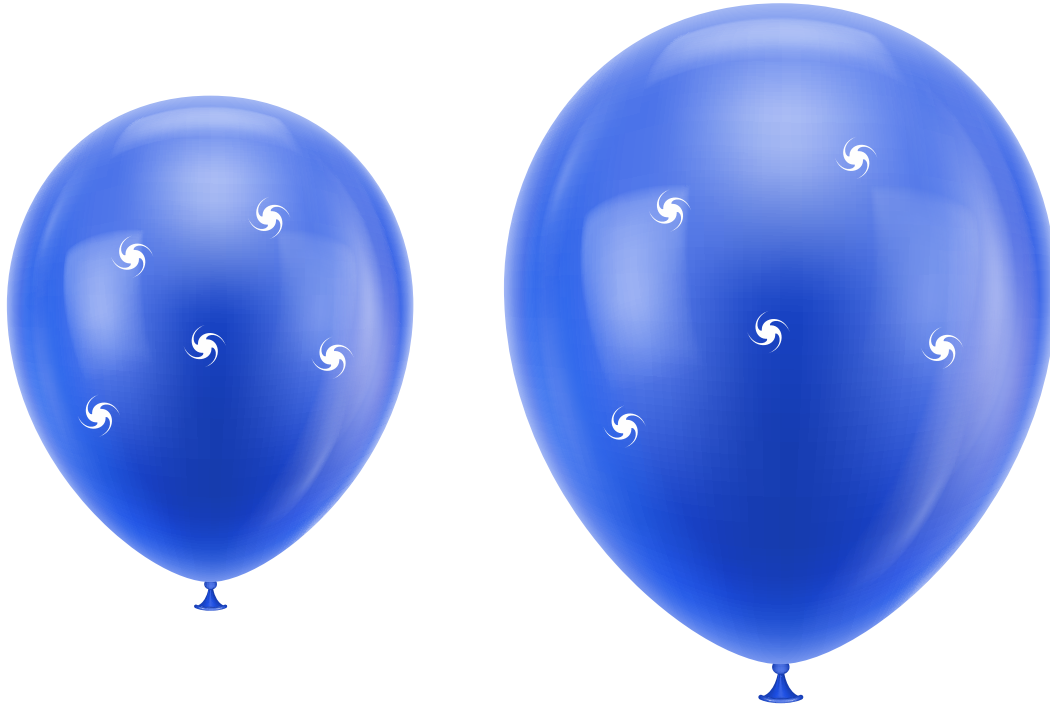
$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

hvor λ er den observerede bølgelængde, og λ_0 er laborativærdien.



Ballonmodellen

- Universets udvidelse



Udvidelsen af det tredimensionale rum er svær at forestille sig. For at forstå nogle vigtige pointer kan man bruge en såkaldt ballonmodel af universet. I ballonmodellen repræsenterer universet den todimensionale overflade af en ballon. På overfladen befinder der sig galakser. Der er intet inde i eller uden for ballonen – kun selve overfladen er "universet". Udvidelsen af universet illustreres ved, at man puster ballonen op – svarende til, at tiden går.

Pointe 1: Universet har intet centrum. I modellen findes der ikke et bestemt sted, som er midtpunkt for udvidelsen – alle punkter på ballonens overflade fjerner sig fra hinanden.

Pointe 2: Når ballonen pustes op, bliver de indbyrdes afstande mellem galakserne større og større. Det ser altså ud, som om galakserne bevæger sig væk fra hinanden. Derudover kan galakser også have en egenbevægelse, dvs. bevæge sig gennem rummet i forhold til det udvidende koordinatsystem.

NB: Galaksernes størrelse ændrer sig ikke under udvidelsen. Det er kun rummet mellem dem, der strækkes.

Hvis rødforskydningstallet ikke er for stort (fx $z < 0,1$), kan man beregne en tilnærmet værdi for den tilsyneladende hastighed, hvormed en galakse fjerner sig fra os, ved hjælp af formlen:

$$v = z \cdot c$$

Denne formel gælder dog kun som en tilnærmelse ved små hastigheder sammenlignet med lysets hastighed.

Galakters hastighed - et eksempel

Rødforskydning og fart

Hvis $z < 0,1$ er følgende formel en rimelig tilnærmelse til den tilsyneladende fart v , en galakse fjerner sig fra os:

$$v = z \cdot c = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \right) \cdot c$$

Eksempel

Galaksen NGC 7331 er en spiralgalakse, som befinder sig omkring 40 mio. lysår borte i stjerne tegnet Pegasus. H_α -linjen måles til at have bølglængden 658,1 nm. Bestem rødforskydningstallet og den hastighed, som galaksen har væk fra os.

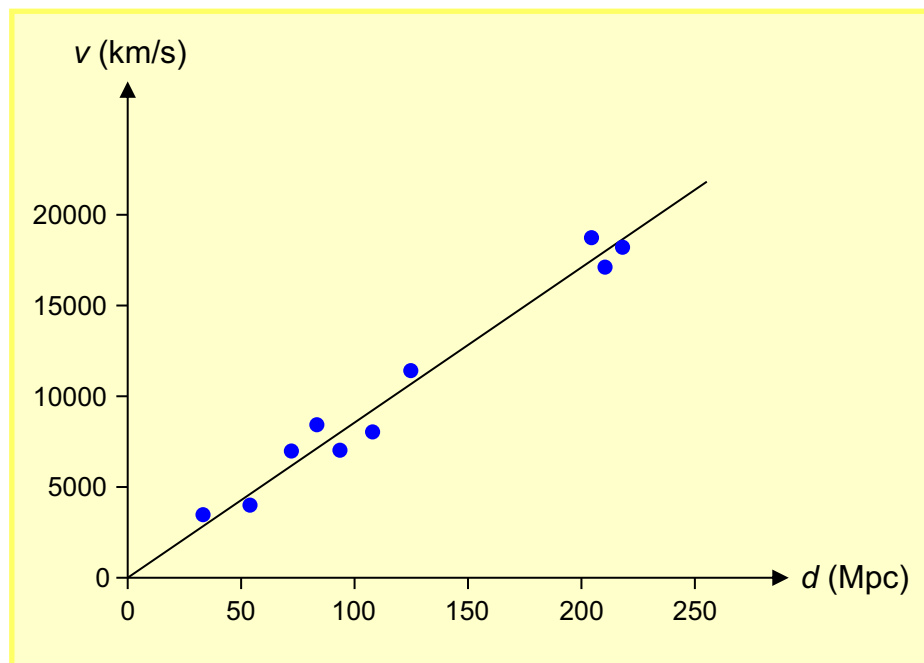
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{(658,1 - 656,3) \text{ nm}}{656,3 \text{ nm}} = \frac{1,8 \text{ nm}}{656,3 \text{ nm}} = 0,00274$$

$$v = z \cdot c = 0,00274 \cdot 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 822 \text{ km/s}$$



NGC 7331 Acquired with the Schulman Telescope at the Mount Lemmon SkyCenter.jpg
Credit: Adam Block/Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>

Hubbles' lov



Til venstre ses en skitse, der antyder den omtrentlige, proportionale sammenhæng mellem galakseres hastighed og afstand. På forrige side så vi, hvordan man kan bestemme en galakses tilsyneladende hastighed i forhold til os. Hvis man derudover — for en række galakser — kan finde deres afstand, kan man afbilde hastighed som funktion af afstand d . Det gjorde Edwin Hubble (1889–1953). I 1929 viste han, at der var en nogenlunde lineær sammenhæng, som i dag kaldes Hubbles lov:

$$v = H_0 \cdot d$$

hvor v er hastigheden i km/s, og d er afstanden i Mpc (megaparsec). 1 Mpc svarer til en million parsec, og 1 parsec er ca. 3,26 lysår. Hældningen H_0 kaldes Hubble-konstanten. Den er dog ikke helt konstant, da den ændrer sig over tid. Den aktuelle værdi er cirka 70 km/s/Mpc.

Hubbles lov er et vidnesbyrd om, at universet udvider sig og understøtter dermed også Big Bang-teorien.

NB! Ethvert blå punkt i skitsen repræsenterer én galakse. Punktets koordinater viser dens afstand til os og dens hastighed væk fra os.