

Universets udvikling

— et STEM Academy gymnasilærerundervisningsforløb



Peter Laursen & Johan Fynbo, 2026

Indholdsfortegnelse

| | |
|---|----|
| Formål med øvelsen | 3 |
| Nyttige links [samles senere andetsteds] | 3 |
| Modul 1: Lineær regression til galaksers afstand og hastighed | 4 |
| Øvelse 0. Fortolk en figur | 4 |
| Øvelse 1. Reproducer Hubbles figur fra 1929 | 6 |
| Øvelse 2: Hubble v2.0 | 14 |
| Øvelse 3: Hinsides Hubble | 17 |
| Modul 2: Mørkt stof og mørk energi | 22 |
| Øvelse 4: Rotationskurver | 22 |
| Øvelse 5: GN-z9 | 37 |
| Øvelse 6: Kosmologiske parametre fra CMB | 38 |
| Øvelse 7: Tæl galakser i James Webb deep field | 39 |
| Øvelse 8: Se selv Universet med Seestar s50 | 40 |
| Appendix A: Koordinater på himlen | 41 |
| Ækvatorialkoordinater | 41 |
| Appendix B: Galaksen UGC914's stjernemasse | 44 |

Formål med øvelserne

Kosmologi

Det overordnede formål med disse øvelser er at lære eleverne om kosmologi — læren om Universet på dets allerstørste skala. I disse øvelser skal vi især kigge nærmere på Universets udvidelse, udvikling og indhold.

Data og modeller

I øvelserne arbejder vi med data og modeller, hvilket lægger op til en snak om, hvad "en model" egentlig er, og hvordan kan vi blive klogere på modellen og på (i vores tilfælde) Universet? Specifikt omhandler de første øvelser *lineær regression*, og senere skal vi bruge ikke-lineær regression.

At indhente data i astronomi er uundgåeligt mere omstændeligt end kemi og sociologi. For alligevel at prøve at komme ud over blot at få stukket noget data og en formel i hånden, har vi et forslag, som lyder som reklame, men simpelthen blot er en relativt billig og meget simpel måde at komme i personlig kontakt med selve Universet; et lille app-styret teleskop, hvor man på kort tid kan se millioner af lysår ud i Universet.

Ét er at optage selve billederne; før man har et datapunkt, der kan bruges til at lære noget om Universet, må man igennem en masse databehandling. En del af denne databehandling er for kompleks til den generelle undervisning på gymnasialt niveau (men kunne indgå i en SRP/SOP-opgave), men vi har inkluderet en øvelse, hvor eleverne får udleveret data,

Programmering

kan desuden bruges til at lære basal

- Programmering
 - Vi tilgår disse spørgsmål med nogle simple Python-programmer. Alt efter niveau kan disse programmer bruges som en black box, eller vi kan dykke dybere ned i, hvad det er programmer gør.

Modul 1: Hubbles lov

Øvelse 0. Fortolk en figur

Først udleveres Hubbles figur 1 fra [Hubble \(1929\)](#), enten originalen, eller også denne "rensede" version, hvor vi har fjernet den ene linje og cirklerne, som ikke er vigtige for diskussionen:

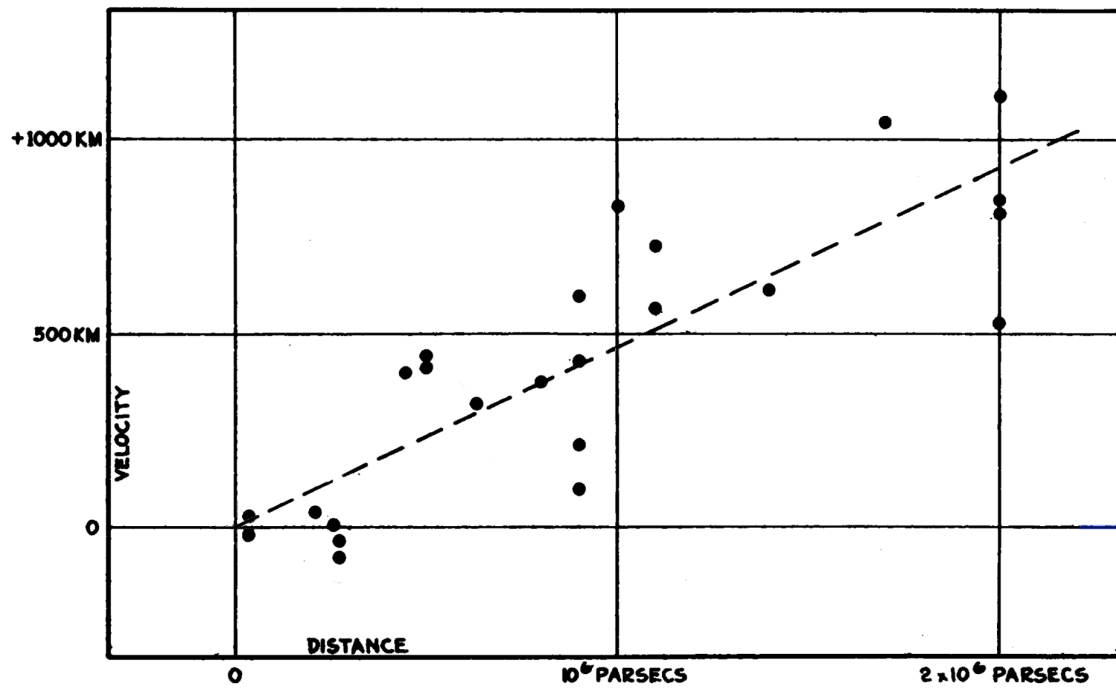


FIGURE 1

På dette tidspunkt vidste man ikke, at tågerne var andre galakser, og man havde kun i få år vidst, at de ikke lå inde i vores egen galakse, Mælkevejen.

Øvelse

Diskutér i grupper hvad figuren fortæller os om Universet.

Giv eleverne et minimum af information på forhånd, alt efter deres niveau.

Mulige fortolkninger:

Måske er det ikke *tågerne*, der bevæger sig, men *os*?

Tågernes hastigheder måles vha. af deres Dopplerforskydning. Men Dopplerforskydning kan både skyldes at kilden bevæger sig og at modtageren bevæger sig (eller begge dele).

Dette var faktisk én af de oprindelige tanker, og hele formålet med Hubbles arbejde var at bestemme Solsystemets hastighed gennem rummet.

Men for det første burde alle tågerne i én retning være rødforskuet, og i den anden retning være blåforskuet. Det viste sig ikke at være tilfældet. For det andet forklarer dette ikke, at hastighederne stiger med afstanden.

Måske er tågerne gasskyer, som engang blev slynget ud af Mælkevejen?

Det ville forklare sammenhængen mellem afstand og hastighed, for hvis de blev slynget ud samtidig, ville de med mest fart på været nået længst væk.

Denne forklaring var faktisk blandt de tidlige fortolkninger. Der manglede dog en mekanisme som kunne forårsage det, og det skulle være én som ikke samtidig slyngede alt andet ud af Mælkevejen.

Måske er tågerne stjernesystemer som vores egen Mælkevej, dannet samtidig i en slags eksplosion?

Dette er nok den opfattelse, de fleste har af Universets udvidelse og Big Bang. Altså, at alt Universets stof blev skabt i et punkt i rummet som eksploderede og slyngede alt stof ud igennem rummet. Nogle stjernesystemer fik lidt fart på, og andre fik meget, og dem med meget fart på, er også dem der er nået længst væk.

Dette er faktisk umiddelbart en valid fortolkning.

Men den er ikke konsistent med generel relativitetsteori, og når vi kommer ud på større afstande, kan vi se, at det ikke kan passe.

Måske ligger tågerne stille i rummet, men *se/ve* rummet udvider sig.

Dette ville få afstanden mellem alle galakserne til at øges proportionalt med deres indbyrdes afstand, konsistent med Hubbles lov (se infoboks). Dette er den accepterede

fortolkning fordi det er en forudsigelse af generel relativitetsteori, som allerede i 1920'erne var accepteret.

Men hvis alle tågerne er på vej væk fra os, betyder det så, at vi sidder i centrum?

Diskutér hvordan det ville se ud, hvis man sad i en af de andre tåger.

Gravitationel rødforskydning

Ifølge generel relativitetsteori vil lys, som bevæger sig fra et kraftigt tyngdefelt til et mindre kraftigt, blive rødforskydet. Måske skyldes rødforskydningen, at lyset bevæger sig væk fra de tunge galakser?

Men nej:

For det første er denne såkaldte "gravitationelle rødforskydning" en meget lille effekt¹. For det andet bliver den til dels ophævet af, at lyset blåforskydes, når det når Mælkevejen. For det tredje har vi masser af eksempler på galakser i samme afstand, som har forskellig masse, men samme rødforskydning. For det fjerde ville det kræve en forklaring på, at galakser tilsyneladende blev tungere, jo længere væk de lå.

Måske mister lyset energi ved andre processer?

Måske interagerer lyset med partikler undervejs på dets rejse til os, og mister energi ved hver interaktion? Jo længere lyset skal rejse, jo mere akkumulerer de små energitab sig, proportionalt med afstanden.

Denne mekanisme blev først foreslået af Fritz Zwicky i 1929, mindre end et halvt år efter at Hubbles artikel udkom. Forskellige versioner, som under ét kan kaldes "træt lys"-hypoteser, optræder stadig i dag, men ikke fra seriøse forskere.

Den umiddelbart klareste årsag til, at ingen af disse hypoteser fungerer er, at ingen af dem forudsiger, at tiden går langsommere for fjerne galakser. Dét gør derimod generel relativitetsteori, og denne effekt er observationelt bekræftet: Fysiske processer i en galakse med rødforskydning z går langsommere med en faktor $(1 + z)$. For eksempel tager det for lokale supernovaer af typen "Ia" ca. 20 dage fra eksplosionen til lysstyrken når sit maksimum. For fjernere supernovaer går det langsommere med præcis denne faktor.

¹ Man kan vise, at den gravitationelle rødforskydning er $z = GM / rc^2$, hvor G er tyngdekonstanten, M er galaksens masse, c er lysets fart, og r er den afstand fra galaksens centrum, hvorfra lysets udsendes. For en galakse som Mælkevejen (som er ret tung; $M \sim 10^{12}$ Solmasser), og for lys udsendt af stjerner i en afstand fra centrum svarende til Solens ($r \sim 25.000$ lysår), fås en rødforskydning af størrelsesordenen 10^{-5} , svarende til mindre end 2 km/s.

Alle former for interaktion af lys med andre partikler involverer også, at lyspartiklen ændrer retning. Overførsel af energi kan ikke ske uden overførsel af impuls. Dette ville få galakserne til at se mere og mere slørede/tågede ud, jo længere væk de er, og det ser vi ikke.

Hvis lyset blot mistede energi undervejs som følge af en eller anden fysisk proces, ville galaksers overfladelysstyrke aftage med en faktor $(1 + z)$. Men generel relativitetsteori forudsiger, at den aftager med $(1 + z)$ i fjerde potens², hvilket er konsistent med observationer.

Øvelse

Grupperne kan indtage og forsvare en given fortolkning (ikke alle fortolkninger er lige lette/svære at forsvare)

Infobox 1

Hvorfor medfører et ekspanderende univers, at hastighed er proportional med afstand?

Hvis rummet udvider sig ens over det hele, øges alle afstande med den samme faktor i et givet tidsrum. Hvis f.eks. rummet vokser med en faktor f , sådan at en afstand r stiger til $f \times r$, er afstanden blevet øget med et stykke

$$\Delta r = fr - r = r(f - 1).$$

$$\Delta r = fr - r = r(f - 1)$$

² Én $(1 + z)$ -faktor pga. rødforskydningen, én pga. tidsforlængelsen, og to pga. at fjerne galakser bliver større og større, ikke mindre og mindre, fordi det lys vi observerer stammer fra dengang de var tættere på os.

Flere spørgsmål:

- Hvad er enheden på hældningen?
- Hvad *fortæller* hældningen?
- Hvad fortæller den inverse hældning?

Baggrundsviden til eleverne

- Hvordan måles hastigheder i Universet?
 - Tal om Dopplerforskydning
- Hvordan måles afstande i Universet?
 - Tal om afstandsstigen
 - For nære objekter kan vi måle en årlig parallakse.
 - For fjerne objekter må vi vide noget absolut om dem, f.eks. lysstyrke eller størrelse.
- Optakten til forståelsen af, hvorfor det giver mening overhovedet at overveje, at selve rummet kan udvide sig, og at fjerne tåger derfor kan tænkes at bevæge sig væk fra os.
 - Einstein, Hubble, Lemaître, Leavitt, Slipher, Humason, de Sitter, Friedmann, Robertson, Wirtz, Lundmark, ...
- Hvad er et lysår? Hvad er en parsec og en Mpc?

Øvelse 1. Reproducer Hubbles figur fra 1929

Første approksimation — rene hastighedsmålinger

I figuren er 24 datapunkter, som viser afstand og hastighed for de 24 galakser i Tab. 1. Vi skal genskabe denne figur.

Lineær regression

Udfør lineær regression på disse datapunkter. Brug dit yndlingsværktøj (Excel, Matlab, et eller andet online-værktøj), eller brug mit Python-script `fit_hubble.py`:

Skriv de 24×2 tal i en fil med én række for hver galakse, og to søjler. Første søjle skal have afstande i Mpc, anden søjle skal have hastigheder i km/s. Kald f.eks. filen `hubble_tab1.dat`. Det vil sige, at filen ser sådan her ud (hvor linjen der starter med `#` er en "header", dvs. forklarende tekst, som ikke bliver læst)

```
# d/Mpc v/kms
0.032 +170
0.034 +290
0.214 -130
(osv.)
```

Kør scriptet `fit_hubble.py` med filen som input. Hvis det køres direkte fra en terminal gøres det på følgende måde (hvor `$` betyder "prompten", som ikke hører med til kommandoen):

```
$ python fit_hubble.py hubble_tab1.dat
```

Hvis i stedet det køres fra en interaktiv Python-session, såsom iPython eller en Jupyter Notebook, gøres det med (hvor prompten her er "`In [1] :`" og kan se anderledes ud alt efter hvilken installation du har, men `%`'et er altså en del af kommandoen):

```
In [1]: %run fit_hubble.py hubble_tab1.dat
```

Programmet `fit_hubble.py` gør følgende:

1. læser dataene fra Hubbles Tab. 1,
2. udfører en lineær regression,
3. plotter dataene og det bedste fit, og
4. udskriver fittets hældning, dvs. Hubble-konstanten.

Spørgsmål

- Ligner din figur Hubbles?
- Hvad er resultatet for H_0 ?

Korriger for vores egen bevægelse

Resultatet skulle gerne ligne Hubbles Fig. 1 nogenlunde. Men ikke helt! De målte hastigheder i Tab. 1 er såkaldte *heliocentriske* hastigheder, dvs. hastigheder ift. Solen. Men Solen bevæger sig også gennem rummet, så der vil være en tendens til at måle *mindre* hastigheder i den retning vi bevæger os *imod* og, omvendt, større hastigheder i den retning vi bevæger os væk fra.

For at fjerne dette bias må Solens hastighed ift. en given galakse fratrækkes denne galakses målte hastighed. Men hvordan ved vi, hvad vores hastighed gennem rummet er? I dag kan vi måle meget præcist vores hastighed ift. "den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling", som bliver beskrevet længere nede. Men det kendte Hubble intet til, så han gjorde det bedste han kunne: Han tog gennemsnittet af alle de observerede galakseres hastigheder. Med mindre de alle sammen er på vej samme sted hen, bør forskellene midle sig ud.³

Med scriptet `solar_motion_hubble.py` kan du beregne denne hastighed ud fra de 24 galakseres hastighed og lave en ny fil med de korrigerede hastigheder. For at køre scriptet, skal du igen bruge filen med galaksernes afstande og hastigheder, som du brugte før (`hubble_tab1.dat`). Desuden skal du have en fil med galaksernes positioner på himlen. Hubble angiver dem ikke, men de kan f.eks. findes på databasen [NASA/IPAC Extragalactic Database \(NED\)](#). Det har vi gjort for dig, og du kan finde resultatet i den fil, der hedder `ra_dec.dat`.

Koordinaterne er angivet i "ækvatorialkoordinater", som du kan læse mere om i App. A. Programmet køres fra kommandolinjen med

```
$ python solar_motion_hubble.py
```

eller, som før, fra en interaktiv session med

```
In [1]: %run solar_motion_hubble.py
```

Fra nu af nøjes vi med at give terminal-måden, ikke interaktiv-måden

³ Faktisk var dette netop Hubbles oprindelige motivation for at foretage sit studie: at bestemme vores hastighed gennem rummet ved at tage gennemsnittet af alle tågerne. Det viste sig så, at tågerne hastighed åbenbart var større, jo længere væk de lå.

Det solkorrigerede resultat

Resultatet er en ny fil med galakseafstande og hastigheder, som hedder `hubble_tab1_solkorr.dat`. I denne fil er afstandene de samme som før, men hastighederne har ændret sig lidt alt efter hvilken retning en galakse ses i.

Desuden skriver programmet resultatet for Solens hastighed ud i x-, y- og z-retningen (som vi kunne kalde V_x , V_y og V_z , men Hubble kalder dem X, Y og Z, så det gør vi også)

samt normen heraf ($V_0 = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$):

Bedste fit for Solens hastighed er

$$X = -69.4 \pm 78.8 \text{ km/s}$$

$$Y = 235.5 \pm 151.8 \text{ km/s}$$

$$Z = -199.9 \pm 81.9 \text{ km/s}$$

$$\text{Total hastighed (V0)} = 316.6 \pm 125.4 \text{ km/s}$$

Korrigerede hastigheder gemt i '`hubble_tab1_solkorr.dat`'

Dette resultat kan sammenlignes med de værdier, som Hubble selv angiver på s. 3 i artiklen:

| 24 OBJECTS | |
|----------------------|---------------------|
| X | - 65 ± 50 |
| Y | +226 ± 95 |
| Z | -195 ± 40 |
| K | +465 ± 50 |
| A | 286° |
| D | + 40° |
| V₀ | 306 km./sec. |

Ret tæt på, og fuldstændig konsistent inden for usikkerhederne. Her kan man eventuelt have en samtale om, hvorvidt to tal som f.eks. " -69.4 ± 78.8 " og " -65 ± 50 " virkelig er to forskellige tal.

Nu kan vi udføre øvelsen fra før, men med den nye fil, `hubble_tab1_solkorr.dat`.

Hvis ovenstående bliver for komplekst, kan det eventuelt skippes, og eleverne får simpelthen udleveret de korrigerede data (efter at de først har prøvet de u-korrigerede data).

Det dette gøres i stil med før med kommandoen

```
$ python fit_hubble.py hubble_tab1_solkorr.dat
```

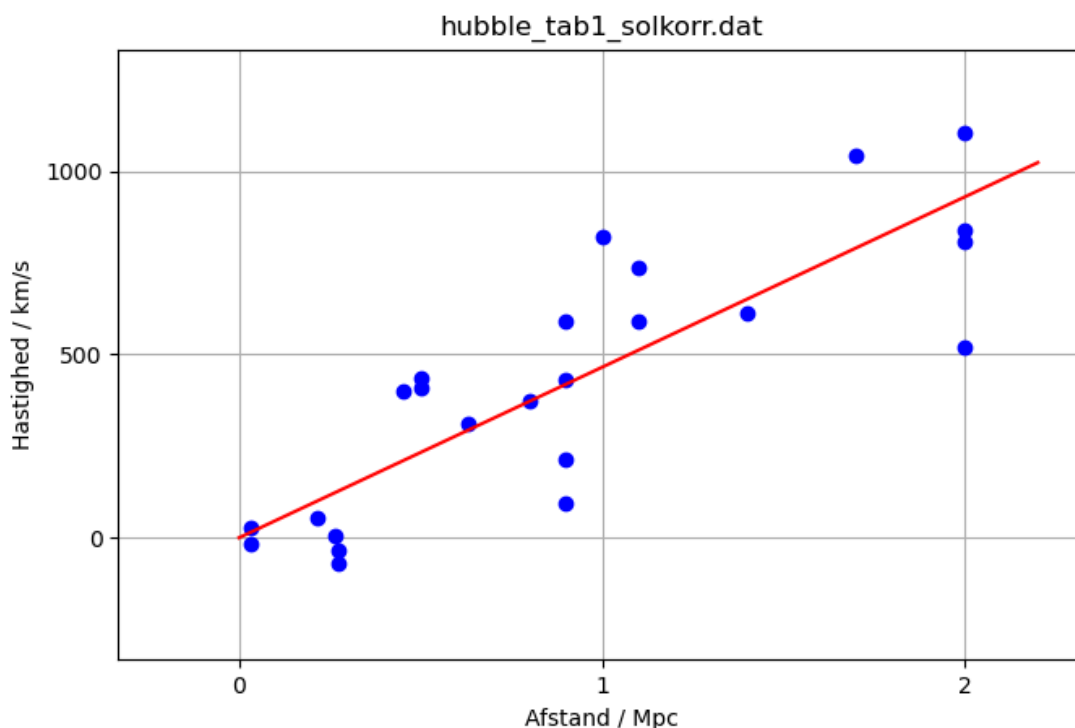
Resultatet skulle gerne ligne Hubbles figur nærmest fuldstændigt. Hvis man vil have aksernes intervaller til at ligne Hubbles, og tegne et grid ligesom ham, kan man ændre linje cirka 66 i `fit_hubble.py`-scriptet fra

```
hubble1929 = False
```

til

```
hubble1929 = True
```

Husk at gemme scriptet inden du kører det igen, og husk at sætte det tilbage til `False` igen når du i de næste øvelser skal kigge meget længere ud i Universet.



Med de solbevægelses-korrigerede data er resultatet for Hubbles konstant $H_0 = 465 \pm 35$ km/s/Mpc.

Hubble får selv 465 ± 50 km/s/Mpc (som han skriver i tabellen på s. 3). Vi ved ikke hvad han har brugt for galaksernes positioner, og hvordan han har afrundet, og hvordan han har udregnet usikkerheden, men vores resultat er ret tæt på.

Hubbles anden tilgang

Hubble prøver også at gruppere galakserne i 9 grupper (baseret på afstand og hvor tæt de ligger på hinanden). Resultatet er cirklerne i figuren og fittet hertil er den solide linje (selvom han i figurteksten skriver den stiplede). Hældningen på denne linje, som han

også angiver i tabellen på s. 3, er 513 km/s/Mpc. Som et størrelsesordens-kompromis mellem disse to værdier skriver han, at proportionalitetskonstanten er ca. 500 km/s/Mpc.

Hubbles lov

Resultatet kan skrives

$$v = H_0 d,$$

hvor v er hastigheden, H_0 er proportionalitetskonstanten/hældningen, og d er afstanden. Denne sammenhæng kaldes *Hubbles lov*, eller, efter en afstemning i den Internationale Astronomiske Union i 2018, Hubble–Lemaître-loven, for at anerkende, at det faktisk var George Lemaître, der kom med denne sammenhæng, og oven i købet bekræftede den observationelt et par år før Hubble, omend knap så overbevisende [som vi vil snakke om].

Normalt måles v i km/s, og d måles i Mpc. Hubble-konstanten måles så i km/s/Mpc for at få enhederne til at passe.

Fortolkning af resultat

Hvad vil det sige, at "Hastigheden stiger med afstanden, og proportionalitetskonstanten er 500 km/s/Mpc"? En galakse i afstanden 1 Mpc fjerner sig fra os med 500 km/s, og en galakse 2 Mpc væk fjerner sig med 1000 km/s. Så én måde at fortolke resultatet er at sige, at hvis én galakse bevæger sig dobbelt så hurtigt som en anden, så er den efter en vis tid kommet dobbelt så langt væk.

Galakserne må altså have været tættere på os i fortiden. Hvis de altid har bevæget sig med samme fart, så må de *alle sammen* have brugt en tid $t = d/v$ på at nå derud, hvor de er i dag. Fra Hubbles lov er den tid altså

$$t = \frac{d}{v} = \frac{1}{H_0}$$

Dette regnestykke er simpelt, men det kræver en del jongleren med enheder. Resultatet er ca. to milliarder år.

Hubble fortolkede ikke selv resultatet; han målte bare og overlod (som han sagde) fortolkningen til teoretikerne. Vigtigst i denne sammenhæng var George Lemaître og Alexander Friedmann. I stedet for at fortolke hastighederne som om, at galakserne bevæger sig *gennem* rummet og væk fra os med forskellige hastigheder, er fortolkningen, at galakserne ligger nogenlunde stille i rummet, men at *selve* rummet kan udvide sig, og at afstandene mellem galakserne stiger.

Den underliggende årsag til denne fortolkning er, at den ekstremt succesfulde generelle relativitetsteori har vist sig, at være en superb beskrivelse af rum og tid og tyngdekraft, og i denne teori er rum i stand til at udvide sig, trække sig sammen og krumme sig. Faktisk er det kun i specielle særtilfælde muligt at have et helt univers som ikke enten udvider sig eller trækker sig sammen, og selv i disse tilfælde vil et sådant univers være ustabil.

Er vi i Universets centrum?

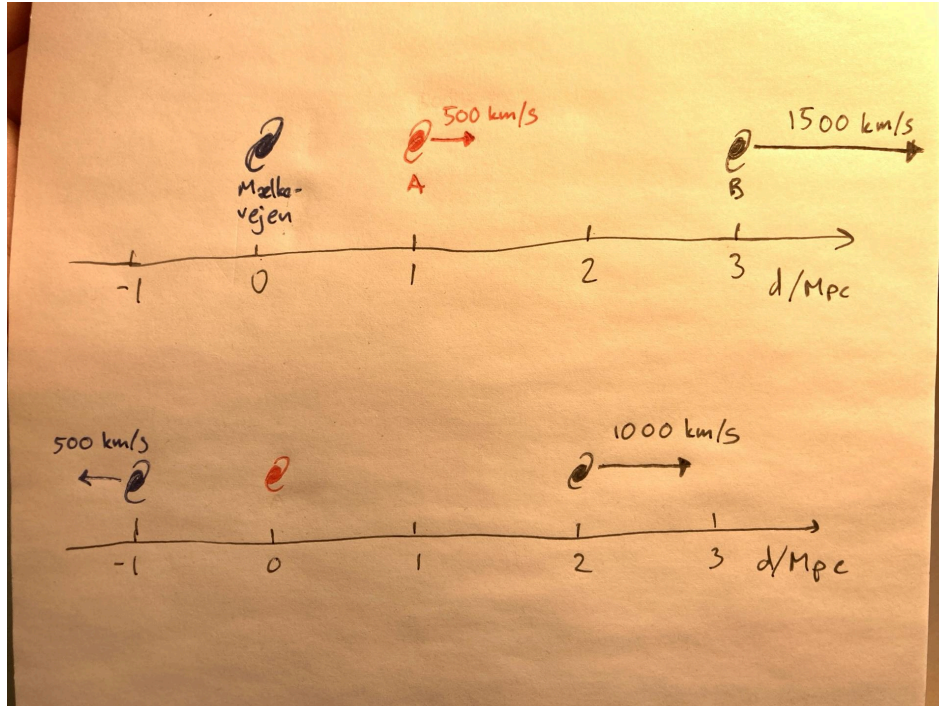
Uanset om vi fortolker resultatet som at galakserne bevæger sig gennem rummet væk fra os, eller som at selve rummet udvider sig og "trækker" galakserne væk fra os, opstår måske spørgsmålet: "Hvis alle galakserne bevæger sig væk fra os, betyder det så at vi sidder i Universets centrum?"

Svaret er nej. Her er to måder at illustrere det på:

Forestil dig to galakser, galakse A og galakse B, som fra vores synspunkt ser ud til at ligge i samme retning, men ikke i samme afstand; A ligger 1 Mpc væk og B ligger 3 Mpc væk. Ifølge Hubbles (og vores foreløbige) resultat, bevæger A sig væk med 500 km/s, og B med 1500 km/s.

Men forestil dig nu hvad en alien i galakse A ville observere. Fra deres synspunkt er det os, der ligger 1 Mpc væk og bevæger os væk fra *dem* med 500 km/s. Og kigger de den anden vej ser de, at B ligger 2 Mpc væk og fjerner sig med 1000 km/s.

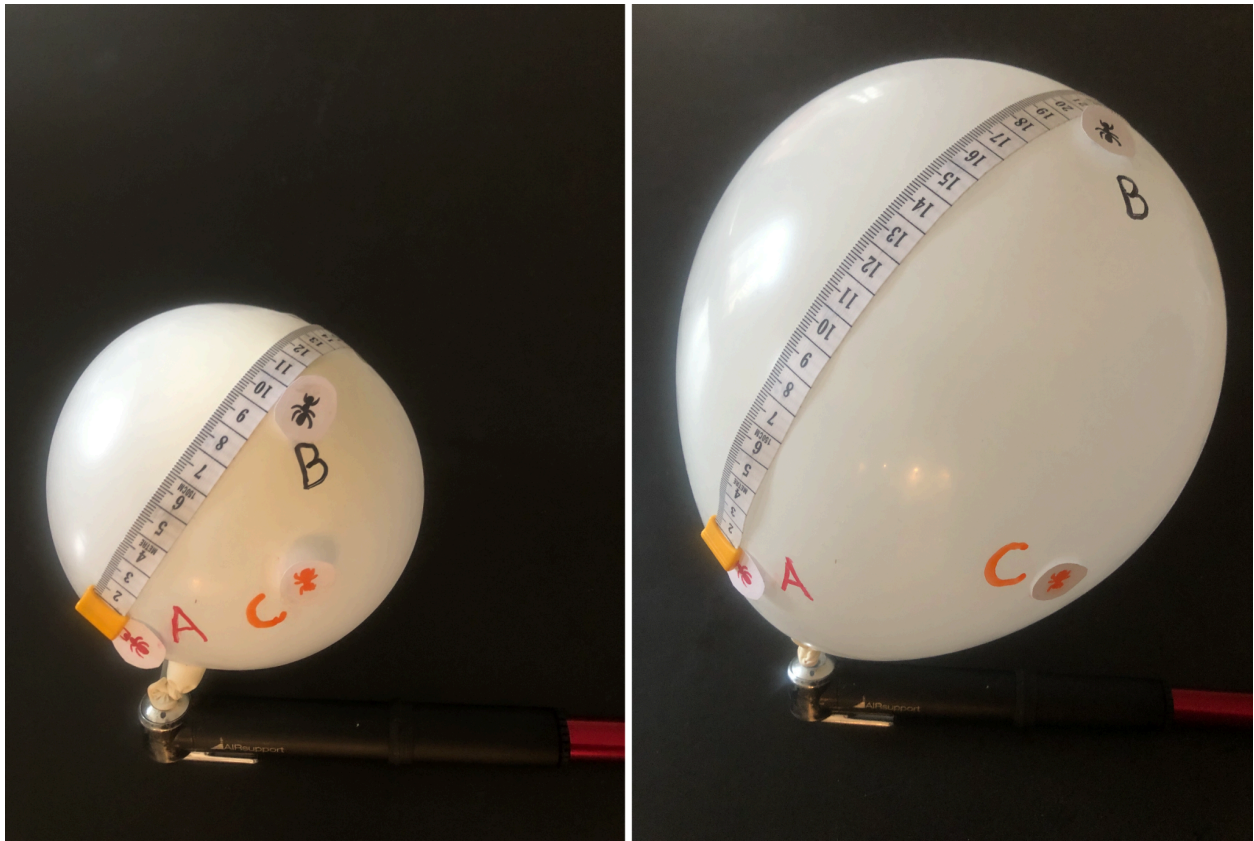
Med lidt vektorregning kan man vise, at det samme gælder for galakser i alle mulige retninger og afstande.



(jeg laver en pænere figur)

En måske mere illustrativ måde at vise det er en klassisk, todimensional analog, hvor der tegnes prikker på overfladen af en ballon, som derefter pustes op. Forestil dig at hver prik er en myre, som måler hvordan afstanden stiger til de andre myrer, efterhånden som ballonen udvider sig.

Lige meget hvilken myre du vælger som observatør, vil du se det samme, nemlig at afstanden til en given myre stiger med en hastighed, som er proportional med afstanden.



Til venstre ses en let slatten ballon med tre myrer på, som hedder Alice (rød), Bob (sort) og Carlos (orange). Alice og Bob er 10 cm fra hinanden, mens Carlos ligger 5 cm og 7 cm fra hhv. Alice og Bob. Til højre har vi pustet ballonen op til dobbelt størrelse. Bob er nu 20 cm fra Alice. Alle afstande fordobles, når ballonens diameter fordobles, så Carlos ligger nu 10 cm og 14 cm fra hhv. Alice og Bob. Myrerne selv tager dog ikke del i denne udvidelse, da elektromagnetiske kræfter holder sammen på deres exoskelet, og på samme måde vokser galakser heller ikke med Universet, da tyngdekraften holder sammen på dem. Alle tre myrer tænker, at de ligger stille, mens de to andre fjerner sig, og derfor tror de, at de sidder i midten af ballonens overflade. Skøre myrer. Foto: Peter Laursen

Øvelse 2: Hubble v2.0

Resultatet, som vi og Hubble kom frem til — altså at udvidelsesraten er ca. 500 km/s/Mpc — er alt for højt. Allerede på Hubbles tid vidste man nok om geologi til at kunne datere visse sten vha. radioaktive henfald og kunne se, at Jorden måtte være mindst tre mia. år gammel. Men ifølge Hubbles resultat lå alle galakserne oven i hinanden for to mia. år siden.

Hvordan kan det passe? Diskutér eventuelt forskellige muligheder inden I fortsætter?

Den primære årsag til miseren er, at Hubble groft undervurderede afstandene til galakser. Hubble målte afstande vha. af Cepheide-stjerner, men på dette tidspunkt vidste man ikke, at der findes to forskellige populationer af Cepheider. Det betød, at de (fleste af de) Cepheider Hubble observerede var 2–3 gange mere lysstærke end han troede. For at passe med den observerede klarhed, måtte han antage, at de var ca. 7 gange tættere på os, end moderne målinger viser os.

Hastigheder er lettere at måle, så her stemte Hubbles — eller rettene Sliphers — målinger bedre overens med moderne værdier.

Filen `hubble_tab1_modern.dat` indeholder som de andre datafiler 24 rækker med data for de 24 galakser i Hubbles Tab. 1, men nu med moderne værdier for afstande og hastigheder. Lad os se hvad resultatet *nu* bliver.

Ikke-korrigerede data

Hastighederne er, som i Hubbles tabel, ikke korrigeret for Solens hastighed. Du kan fitte en ret linje ligesom tidligere med

```
$ python fit_hubble.py hubble_tab1_modern.dat
```

Prøv det eventuelt. Men for at resultatet skal give mening, er vi nødt til igen at korrigere for Solens hastighed.

Den kosmiske referenceramme

Denne deløvelse kan måske blive lidt langhåret, og man kan sagtens springe til næste sektion, "Korrigerede data". Men den kan også give anledning til nogle interessante diskussioner.

Vi kunne gøre det på samme måde som før — altså ved at sige, at gennemsnittet af de 24 galaksers hastigheder definerer den referenceramme, i forhold til hvilke vi måler alle hastigheder — men vi kan også gøre noget bedre:

Ingen referenceramme er mere rigtig end nogen anden, men den referenceramme som galakserne *i gennemsnit* ligger stille i, giver mere mening at bruge, når vi skal måle Universets udvidelse. Med kun 24 galakser har vi langt fra et statistisk robust sample. Men den omtalte referenceramme er den samme som den, i hvilken *den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling* — eller "CMB'en", for "cosmic microwave background" — ser ens ud i alle retninger. Vi skal snakke mere om CMB'en i senere øvelser, men kort fortalt er det stråling fra Universets tidligste leveår, som kommer fra alle sider, og som i princippet ser ens ud i alle retninger. Men fordi vi bevæger os, bliver CMB'en en lille smule blåforskudt i den retning vi bevæger os i, og en lille smule rødforskudt i den modsatte retning. Ved at observere denne *dipol*, som det kaldes, kan vi måle meget præcist, hvor hurtigt vi bevæger os gennem rummet.

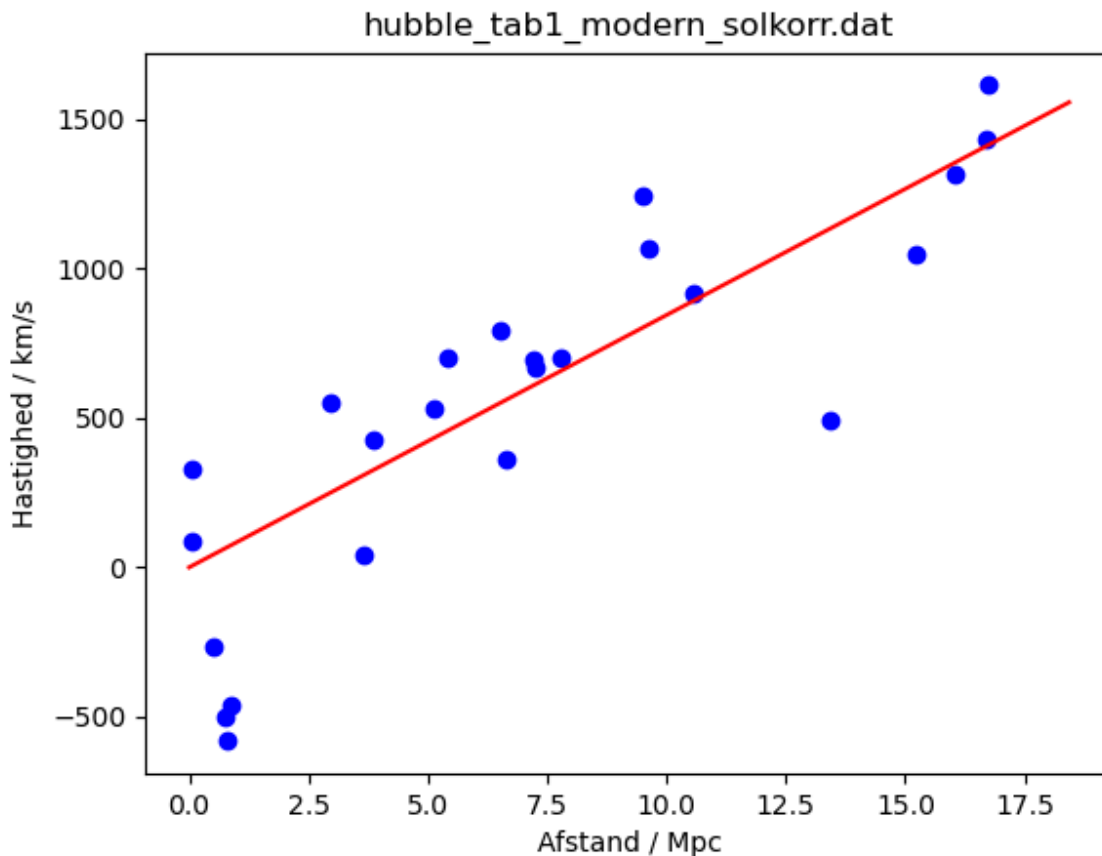
Jorden bevæger sig rundt om Solen med 30 km/s, så hvis man måler en galakses hastighed med et halvt års mellemrum, kan der være op til 60 km/s forskel. Denne bevægelse er der allerede taget højde for i både `hubble_tab1.dat` og `hubble_tab1_modern.dat`. Det er de "heliocentriske" hastigheder. Men Solen bevæger sig rundt i Mælkevejen, Mælkevejen bevæger sig rundt i Den Lokale Gruppe, og Den Lokale Gruppe rundt i Laniakea Superhoben, som falder ned mod et punkt vi kalder The Great Attractor. Den samlede hastighed kan vi se fra CMB'en er 369.82 ± 0.11 km/s i den retningen som i Galaktiske koordinater skrives $l = 264.021^\circ$ og $b = 48.253^\circ$ ([Planck Collaboration et al. 2018](#)). Lidt hurtigere (og en lidt anden retning) end Hubble fandt ud fra sine 24 galakser.

Scriptet `solar_motion_cmb.py` læser 1) filen `hubble_tab1_modern.dat` med moderne afstande og (heliocentriske) hastigheder for de 24 galakser, samt 2) filen `ra_dec.dat` med deres positioner, og spytter en ny fil, `hubble_tab1_modern_solkorr.dat`, ud, som indeholder galaksernes afstande og hastigheder korrigeret for Solens bevægelse. Den køres med

```
$ python solar_motion_cmb.py
```

Korrigerede, moderne data

Hvis du har sprunget det foregående over omkring korrigeringen af Solens hastighed vha. CMB-målinger, kan du bare tage filen `hubble_tab1_modern_solkorr.dat`, som også ligger i den didaktiske værktøjskasse og give den som input til `fit_hubble.py`. Resultatet skulle gerne blive følgende Hubble-diagram:



Fittets hældning er nu $H_0 = 84.3 \pm 7.4$ km/s/Mpc, hvilket ikke er så langt fra Hubble-konstantens moderne værdi, som ligger omkring 70 km/s/Mpc. Ganske imponerende, og en lille smule heldigt, i betragtning af, at vi kun har 24 datapunkter, og deres hastigheder i øvrigt er domineret af deres "egen-hastigheder" som skyldes tyngdekraft-påvirkningen fra deres lokale nabo-galakser, og ikke af Universets udvidelse, fordi de ligger så tæt på **[elaborér her]**.

Øvelse 3: Hinsides Hubble

Det lidt fjernere Univers

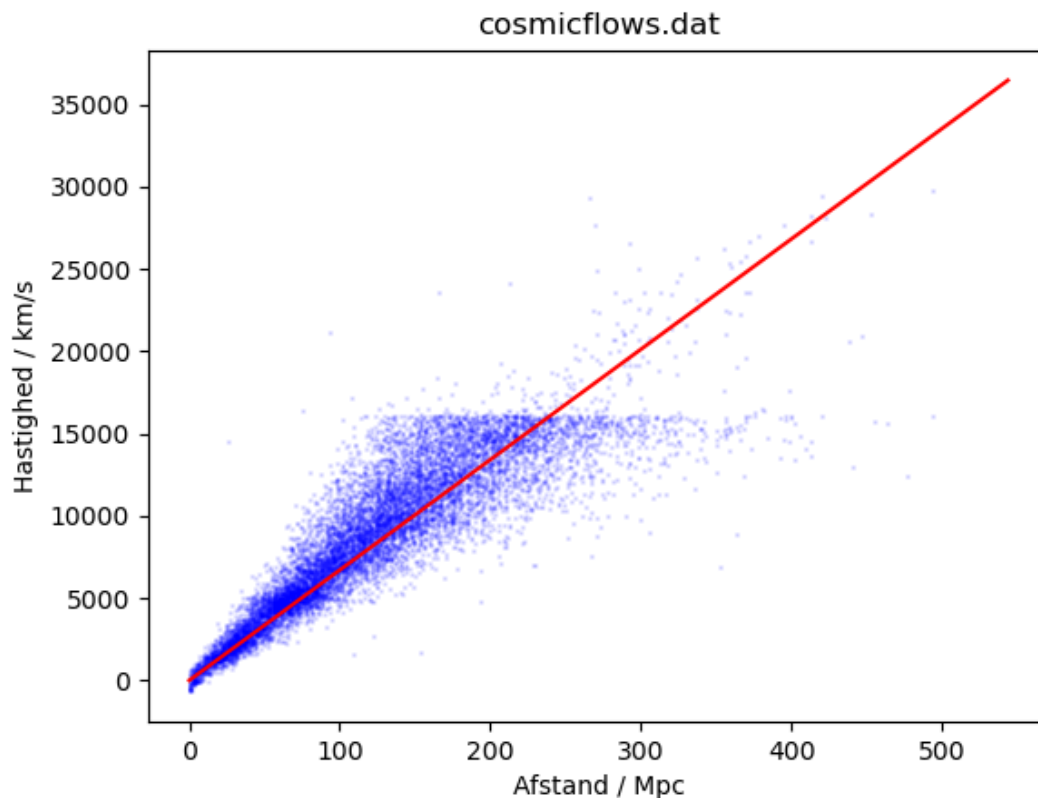
Blot 24 galakser er altså nok til at få en ide om, hvor hurtigt Universet udvider sig. Men lad os se, om vi kan få et endnu mere præcist tal.

I filen `cosmicflows.dat` ligger afstande og hastigheder for 11.507 galakser, observeret med Rumteleskopet Spitzer ([Tully et al. 2016](#)), og korrigeret for Solens bevægelse. Kataloget over disse galakser hedder Cosmicflows-3, og kan [hentes på astro-katalog-servicen VizieR](#).

At lave et Hubble-diagram med disse data er så simpelt som at skrive

```
$ python fit_hubble.py cosmicflows.dat
```

Resultatet skulle gerne blive følgende diagram:



Hældningen (som scriptet skriver ud på skærmen) er $H_0 = 67.1 \pm 0.1$ km/s/Mpc, meget tæt på den "rigtige" værdi.

Afstandene ser ud til at sprede sig mere og mere væk fra en middelværdi, jo længere væk galakserne er, indtil middelværdien er omkring 240 Mpc. Herefter er kun relativt få galakser. Dette har at gøre med, hvordan afstandene er målt, hvilket er en kombination af flere metoder. Spredningen er domineret af de metoder, der hedder [Tully–Fisher-relationen](#) og [fundamentalplans-korrelationen](#). Ved store afstande kan disse metoder ikke benyttes; her bruges [supernova type Ia-metoden](#).

Korrektion for galaksernes egen-hastigheder

Galakserne fjerner sig fra os pga. Universets udvidelse. Men ligesom Solen bevæger sig gennem rummet (med 369 km/s), bevæger galakserne sig også lidt hid og did. Galakser i små grupper bevæger sig typisk rundt med et par 100 km/s, men galakser i store galaksehobe kan flintre rundt med 1000 km/s eller mere. Disse hastigheder kaldes "egen-hastighed", eller *pekuliær*-hastigheder, og kommer "oven i" den hastighed de har pga. Universets udvidelse.

Det betyder, at *nære* galakseres hastigheder er domineret af deres egen-hastigheder. I 10 Mpc afstand fjerner galakser sig med ca. 700 km/s pga. udvidelsen (omkring 70 km/s pr. Mpc), men hvis en galakse samtidig bevæger sig gennem rummet imod os med f.eks. 280 km/s, måler vi kun $(700 - 280) = 420$ km/s, og kan derfor snydes til at tro, at den kun er 6 Mpc væk.

Egen-hastighederne skyldes gravitationelle påvirkninger fra nabo-galakser. Ved at se på, hvad der ellers ligger af andre galakser i nærheden, kan man prøve at estimere, hvad en given galakse mon har af egen-hastighed, og så trække den fra for at få en mere "ren" hastighed.

Filen `cosmicflows_adj.dat` indeholder afstande og hastigheder for de 11.507 galakser fra Cosmicflows-3, men korrigeret for egen-hastigheder vha. en fysisk model, som forfatterne har lavet. Du kan prøve at køre `fit_hubble.py` på dén fil. Så får du måske et mere realistisk bud på Hubble-konstanten (du burde gerne få $H_0 = 69.3 \pm 0.2$ km/s/Mpc). Men det forudsætter så, at du stoler på deres model for egen-hastigheder.

Det meget fjernere Univers

Med Cosmicflows kigger vi ud til flere 100 Mpc afstand. Men vi skal længere ud!

Fillen `pantheon_sh0es.dat` indeholder afstande og hastigheder for 1700 galakser ud til mere end 5000 Mpc, fra et katalog der hedder Pantheon+SH0ES ([Scolnic et al. 2022](#)), som kan [hentes på GitHub](#). Men inden vi laver et Hubble-diagram med disse data, skal vi lige se lidt nærmere på, hvilken afstand og hvilken hastighed, der er angivet i filen:

[beskriv forskellen på luminositetsafstand, som er det der måles, og comoving afstand, som er den der indgår i Hubbles lov]

Vi måler ikke en hastighed af en galakse. Vi har ikke en radarpestol, som vi kan pege mod en galakse og se direkte, hvor hurtigt, den bevæger sig. I stedet måler vi en rødforskydning z , som vi indtil nu har omsat til en hastighed v ud fra formlen

$$v = cz,$$

hvor c er lysets hastighed.

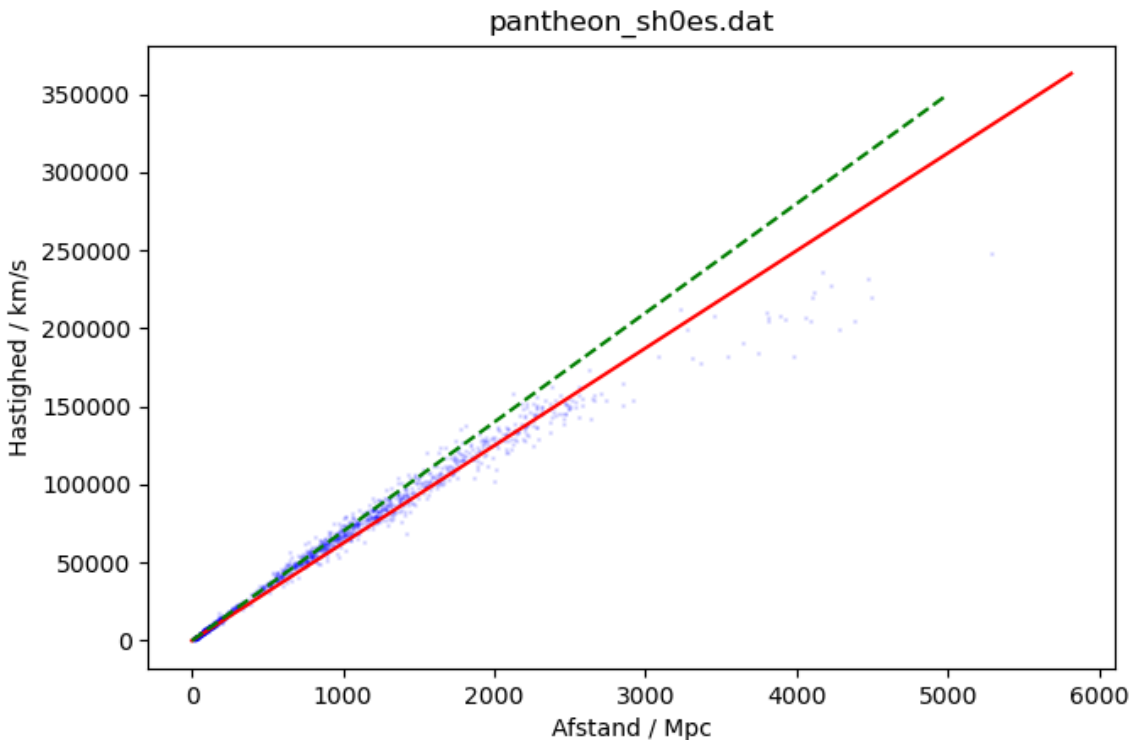
Denne formel er analog til, hvordan *lyd* bliver Dopplerforskuet, og skyldes simpelthen, at lyskilden har flyttet sig i det tidsrum der går mellem to bølgetoppe udsendes, og/eller at observatøren har flyttet sig i det tidsrum der går, mellem to bølgetoppe modtages.

Men denne formel er i virkeligheden en approksimation, der kun gælder for små hastigheder. Ifølge den specielle relativitetsteori går tiden langsommere for et objekt i bevægelse, hvilket yderligere påvirker hastigheden hvormed bølgetoppe udsendes. For hastigheder på 1% af lysets — altså $v = 0.01c$ — er fejlen kun på ca. en halv procent, men ved 10% af lysets hastighed, giver approksimationen en 5% for høj v .

Den korrekte, speciel-relativistiske formel er

$$v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}.$$

Filen `pantheon_sh0es.dat` indeholder comoving afstande og speciel-relativistiske hastigheder. Alligevel ser det skørt ud, når du laver et Hubble-diagram af disse galakser:



Den røde linje er, som tidligere, det bedste fit til dataene. Men det er et dårligt fit! Resultatet er $H_0 = 62.5 \pm 0.2$ km/s/Mpc, hvor det burde ligge omkring de 70 km/s/Mpc, hvilket jeg har tegnet ind med en grøn stiple linje.

Galakserne ser rigtig nok ud til at følge en ret linje for relativt små afstande. Men længere væk end omkring 1000 Mpc begynder de at afvige, og "krumme nedad", og ude ved 5000 Mpc bevæger de sig tydeligt langsommere end de "burde". De ligger *ikke* på en ret linje, og derfor kan man ikke med succes foretage en lineær regression.

Hvad sker der her?

Når vi kigger ud i Universet, kigger vi altid tilbage i tiden, fordi lyset vi ser fra fjerne objekter har brugt tid på at rejse ned til os. Dette faktum er nok på min top 3 over yndlings-fakta, for det betyder, at vi kan rekonstruere Universets historie ved at kigge længere og længere væk.

Lys fra en galakse, som i dag ligger 5000 Mpc væk, har brugt godt 10 milliarder år på at rejse ned til os. Vi ser altså sådan en galakse, som den så ud for 10 mia. år siden. Vi ser 10 mia. år tilbage i tiden! Man skulle måske tro, at hvis lyset har rejst i 10 mia. år, så må galaksen ligge 10 mia. lysår væk. Men 5000 Mpc er det samme som 16.3 mia. år, hvilket er mere end Universets alder.

Det der er sket er simpelthen, at Universet har udvidet sig i mellemtiden. Det galaksen udsendte det lys, vi ser i dag, lå den blot 1800 Mpc (eller 5.8 mia. lysår) væk, men alt imens lyset rejste ned til os, har galaksen og Mælkevejen fjernet sig fra hinanden, og ligger i dag 5000 Mpc fra hinanden.

Når vi ser 10 mia. år tilbage i tiden, ser vi tilbage til en tid, hvor Universet udvidede sig langsommere end i dag

[jeg mangler at afrunde dette afsnit, men ideen er, at det kan fungere som en overgang til næste øvelse, hvor eleverne skal fitte en kosmologisk model til supernova-data]

Hubble var forsigtigt og omtalte de målte hastigheder som *apparent velocities*, "tilsyneladende hastigheder". Man vidste at en bevægelse gennem rummet giver anledning til en Dopplerforskydning. Men man havde også på dette tidspunkt fundet ud af, at selve rummet kan udvide sig, og at en lysstråle, som bevæger sig gennem et ekspanderende rum, rødforskydes.

Modul 2: Mørkt stof og mørk energi

Øvelse 4: Rotationskurver

I denne øvelse ser vi på en spektroskopisk observation af en spiralgalakse, UGC914 (også kaldet NGC 493). Det er en spiralgalakse som ses næsten fra kanten ("edge-on"). Ved at observere galaksen med en spalte oplinieret med galaksens storakse kan vi måle Dopplereffekten ikke bare måle galaksens såkaldte *systemiske* rødforskydning, dvs. den rødforskydning (og tilsvarende hastighed), som beskriver systemet som helhed (og som vi har brugt i de foregående øvelser). Vi kan også måle den såkaldte *rotationskurve*, hvilket er en kurve, der viser rotationshastigheden som funktion af afstanden fra centrum af galaksen. Dette er en af de klassiske observationer, der viser evidens for tilstedeværelsen af mørkt stof i galakser.

Øvelse 4's folder hedder "Øvelse 4 - Rødforskydning og rotationskurver". Heri ligger to foldere for to galakser. Vi gennemgår her blot UGC914.

Datafiler og visning af billeder

Astronomiske observationer gemmes i såkaldte FITS-filer, som har endelsen ".fits". Der findes forskellige værktøjer til at åbne, se, og analysere FITS-filer. Vi anbefaler **SAOImageDS9** (udtales "sao-image-d-s-9", men normalt blot kaldt "DS9"), som kan hentes her: <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>.

FITS-filer indeholder data i binær format (dvs. kan ikke læses af mennesker). Derudover indeholder de også noget metadata i en "header" som er almindelig (ASCII) tekst. Disse metadata indeholder information som f.eks. dato, position på himlen, eksponeringstid, osv.

DS9 kan enten åbnes som enhver anden app, og så kan man åbne en fil gennem File→Open, eller også kan man åbne en fil fra terminalens kommandolinje med

```
$ ds9 wow_en_smuk_galakse.fits
```

Cuts og farveskala

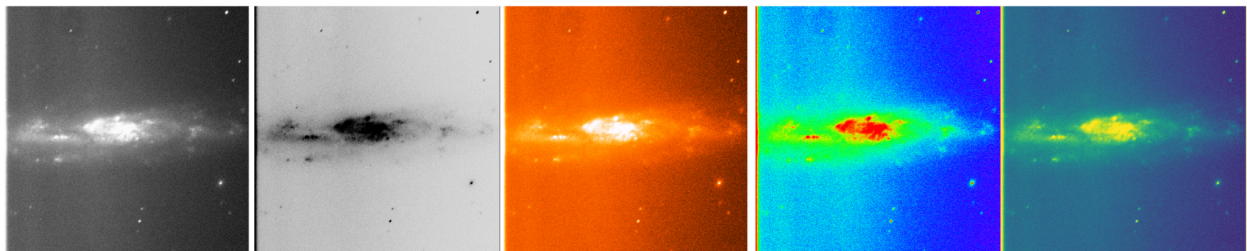
Når billedet åbnes, kan man ofte ikke lige se nogle detaljer. Det er fordi DS9 prøver at vise alle pixel-værdier på samme skala, og nogle få pixel har ekstreme værdier (f.eks. pga. at de ikke virker, eller hvis en kosmisk stråle er hamret ned igennem detektoren). For at sætte farveskalaen til et fornuftigt interval, kan vælges



enten fra menuen eller vha. knapperne.

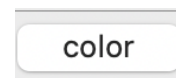
Astronomiske observationer optages altid i sort/hvid; altså, man ser hvor der er lys, og hvor der ikke er lys. Tager man billeder, sættes normalt et filter foran detektoren, så man kun ser på ét bølgelængdeinterval ad gangen.

Når du ser et farvebillede, er det sat sammen af tre (eller flere) billeder i hvert deres bølgelængdeinterval, f.eks. "rød, grøn og blå", eller "nær-infrarød, rød, og H α ". Når man viser et sort/hvid-billede, kan det (naturligt nok) være sort/hvidt, men ofte bruges en anden farveskala, som f.eks. "Hvid/sort" (dvs. omvendte farver, for lissom at spare på blækken), "Heat" (brugt f.eks. i det berømte billede af det [sorte hul M87*](#)), "Rainbow" eller — hvad vi vil bruge — "Viridis", som giver god kontrast mellem lys og ikke-lys, og i øvrigt fungerer godt for farveblinde.



Her ses fem versioner af samme sort/hvid-billede af galaksen UGC914. Den eneste forskel er farveskalaen, som, fra venstre mod højre, er: "almindelig" sort/hvid, invertereret sort/hvid, Heat, Rainbow og Viridis.

Du kan vælge farveskala fra Color i menuen, eller med knappen



Astronomer er generelt ret glade for Viridis, så den bruger vi i denne øvelse.

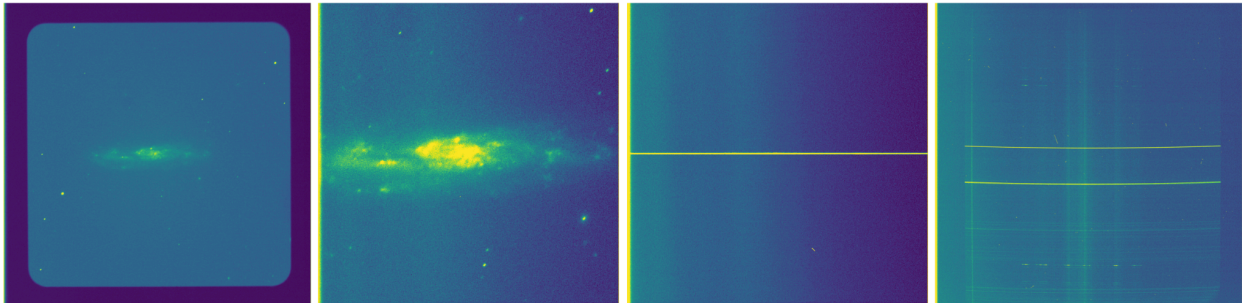
Filer til øvelsen

I folderen UGC914 ligger en folder, der hedder Aquisition. Heri findes en række FITS-filer:

- `ALAh240337.fits`
 - Et billede af galaksen UGC914. Her er faktisk *ikke* brugt noget filter, så billedet viser simpelthen alt lys fra galaksen, uanset bølgelængde.
- `ALAh240338.fits`

- Et zoom-in på galaksen (det er dette, der er vist ovenfor).
- `ALAh240339.fits`
 - Her er lagt en spalte henover galaksen. Vi vil gerne måle Dopplerforskydningen som funktion af afstand fra centrum, så vi kigger på et tyndt udsnit langs galaksens storakse.
- `ALAh240340.fits`
 - Her er udover spalten også benyttet et gitter, som spreder lyset og dermed giver spektret af den del af galakse, som ses gennem spalten. Lyset spredes ud *vinkelret* på spalten, og giver dermed et "2D-spektrum", hvor man har position i galaksen langs den *x*-akse, og bølgelængde langs *y*-aksen.

Prøv at åbne dem med DS9 og kig på dem. De skulle gerne se nogenlunde sådan her ud:



Billede #1 of #2 fra venstre viser galaksen UGC914 i hhv. fuld figur og zoomet ind. Billede #3 viser samme felt som #2, men gennem en tynd spalte, som er placeret langs med galaksens storakse. Når der så tillige placeres et gitter i lysstrålens bane, spredes lyset ud efter dets bølgelængde, og vi får et spektrum vinkelret på spalten, vist på billede #4. Altså, position i galaksen er i den vandrette retning, og lysets bølgelængde er i den lodrette retning, med blå lys op og rødt lys ned. Tydeligst er to spektrallinjer, som stammer fra vand i Jordens atmosfære. Svagere ses forskellige linjer fra galaksens gas, som vil træde tydeligere frem i det færdig-reducerede billede.

Fra rått billede til klart billede

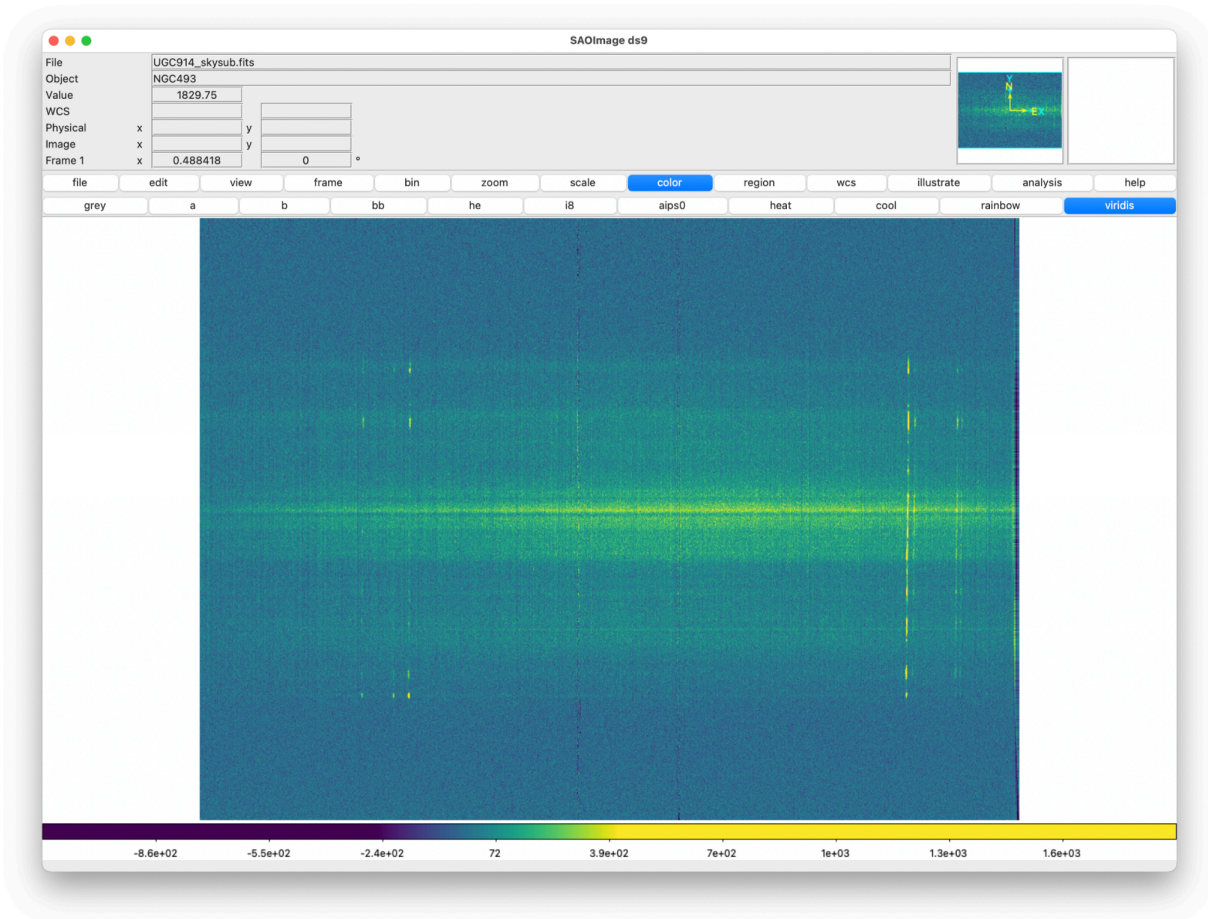
Billedet i `ALAh240340.fits` er et "rått" billede. For at kunne bruge en astronomisk observation til videnskab, skal det "reduceres". Det betyder at man

- trækker himlens baggrundslys fra ("background subtraction"),
- tager højde for at detektorens pixler kan have forskellig følsomhed ("flat-fielding"),
- fratrækker et lille signal der er lagt til for at undgå negative værdier i pixels'ne ("bias") og,

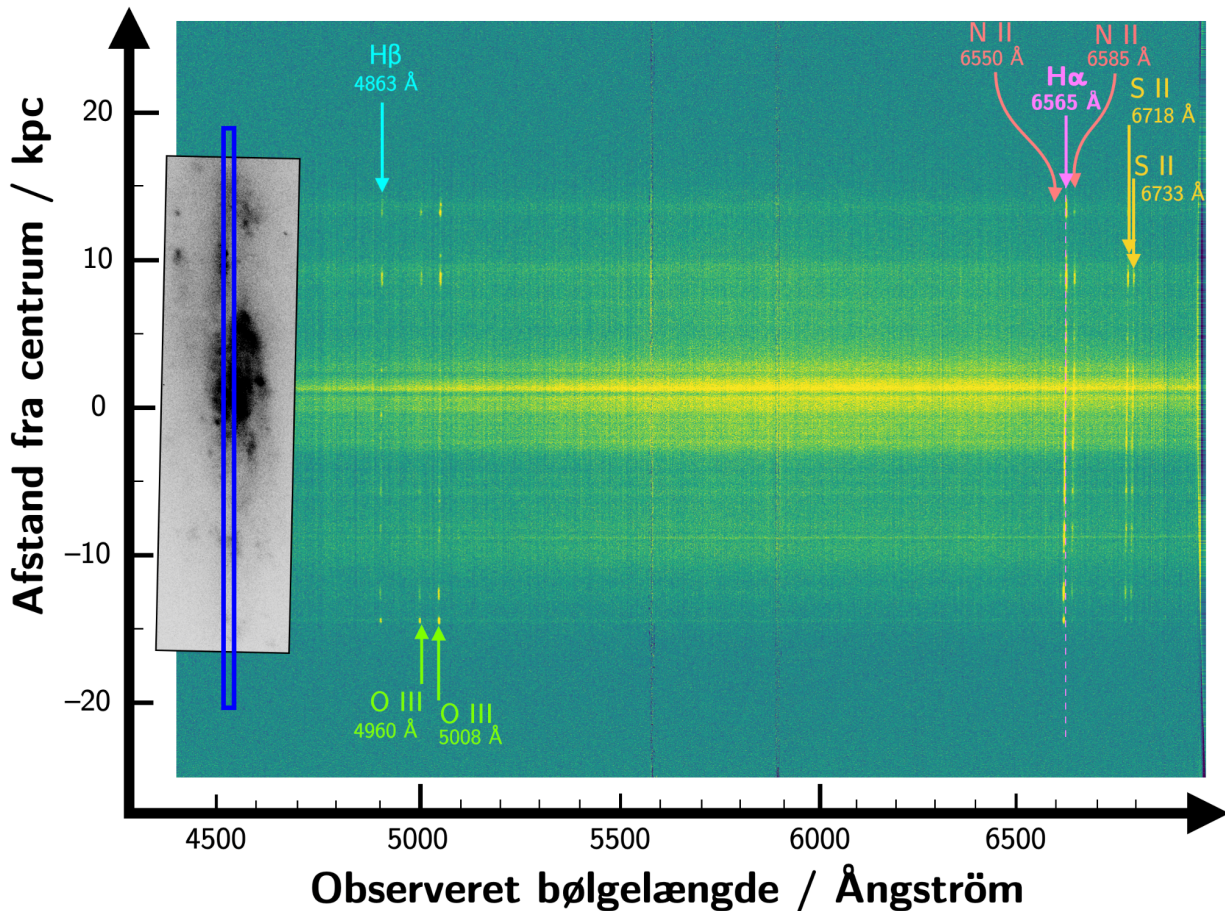
- i forbindelse med spektrer, kalibrerer bølgelængden, så man ved, hvilken pixel der svarer til hvilken bølgelængde.

I folderen UGC914/ ligger et færdigbehandlet (2D) spektrum i filen UGC914_skysub.fits. **Hele billedet er roteret 90°, fordi vi godt kan lide at have bølgelængde på den vandrette akse.**

Tag et kig på spektret med DS9. Med "Scale→ZScale og Color→Viridis skulle det gerne se nogenlunde sådan her ud:



På næste side ses en version med forklarende annotationer:



På ovenstående version er der sat akser på for at vise 2D-spektrrets todimensionale natur: Fysisk afstand (målt i kpc fra galaksens centrum) vises langs y-aksen, og bølgelængde vises langs x-aksen. Det sort/hvide billede af galaksen er indsat så det passer til samme positionsakse. Den mørkeblå rektangel viser, hvor spalten er lagt. Det stærkeste signal fås fra galaksens centrum, mens mindre klumper, som falder forskellige steder i spalten, giver svagere, men stadig tydelige signaler.

Hvilebølglængden for en række spektrallinjer er vist med forskelligt (men vilkårligt) farvede pile og tekst.

- **H β**
 - I den blå ende af spektret ses H β ($\lambda = 4863 \text{ \AA}$), som udsendes når neutral hydrogen henfalder fra 4. til 2. exciterede tilstand.
- **O III**
 - Lidt længere mod den grønne del af spektret ses to linjer ved $\lambda = 4960 \text{ \AA}$ og 5008 \AA , udsendt af dobbelt-ioniseret oxygen. Kemikere, gymnasielærere og andre fornuftige mennesker starter ved 0 og tæller ioniseringer, og ville derfor kalde det O $^{2+}$ (eller O $^{++}$), men astronomer

starter ved 1 og bruger i øvrigt romertal, så vi kalder det O III og udtaler det "O-tre".

- **H α**

- Den kraftigste linje er, som nævnt, H α -linjen, som udsendes ved $\lambda = 6565$ Å, når neutral hydrogen (som astronomer jo så kalder H I) henfalder fra 3. til 2. exciterede tilstand. En tynd, stiplet, magenta linje er tegnet langs hele galaksen ved denne bølgelængde; den forklares i næste sektion.

- **N II**

- På hver side af H α -linjen ligger et par linjer udsendt af enkelt-ioniseret nitrogen.

- **S II**

- Længst mod den røde ende af spektret ser vi lys udsendt af enkelt-ioniseret svovl.

Mål rotationshastighed fra spektret

Galaksen UGC914 ligger omkring 90 millioner lysår væk, og dens "systemiske" rødforskydning — dvs. dens "overordnede" rødforskydning, som måles i centrum af galaksen — er $z = 0.0078$. Det kan man måle vha. flere forskellige spektrallinjer, f.eks. H α , som udsendes ved 6565 Å, men observeres ved omkring 6616 Å, altså 0.78% højere.

I figuren på forrige side er der tegnet en tynd, stiplet linje ved H α 's observerede bølgelængde. Kigger du godt efter, kan du se, at linjen falder en anelse til højre for linjen oppe i toppen, og en anelse til venstre nede i bunden. Lyset fra gas i hele den ene side af galaksen (den side med positive afstands-værdier) er altså en anelse mere rødforskydet end lyset fra den anden side (med negative afstands-værdier).

Med andre ord: I galaksens referenceramme er hele den ene side på vej *væk* fra os, og hele den anden side er på vej *hen imod* os.

Med endnu andre ord: Galaksen roterer!

Ved at måle den præcise rødforskydning fra den ene ende af galaksen, henover midten, og til den anden ende, får man en såkaldt *rotationskurve*, altså hastighed som funktion af afstand fra galaksens centrum.

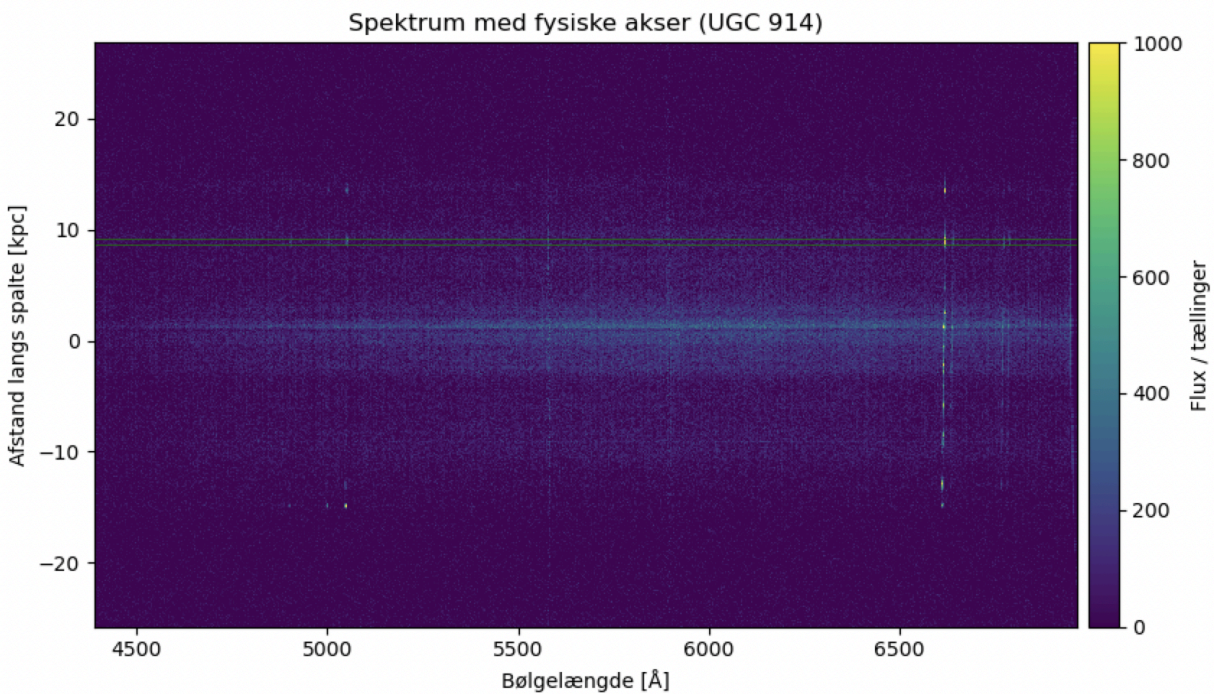
Det kan gøres med det interaktive script `measure_wavelength.py`. Scriptet køres (som andre scripts) med

```
$ python measure_wavelength.py
```

hvorefter spektret åbnes i et vindue. En hvilken som helst spektrallinje kan sådan set bruges, men det er lettest med den klareste, hvilket for UGS914 — og mange andre galakser — er H α -linjen, der stammer fra neutral hydrogens 3 \rightarrow 2-overgang.

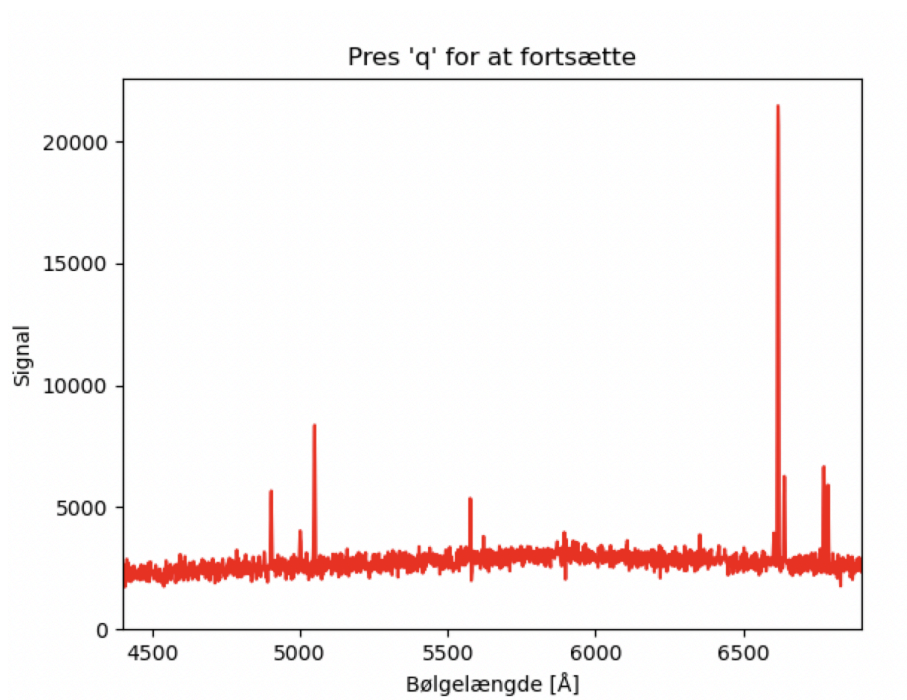
Du finder H α -linjen ude mod højre i x-retningen som den klareste linje. Vælg nu en position i galaksen, dvs. et eller andet sted i y-retningen. Som du kan se, er linjen ikke lige klar over det hele. H α afslører generelt områder i en galakse med kraftig stjernedannelse. Det er nok lettest at vælge et sted hvor linjen ikke er for svag.

- Klik **to gange** på din valgte position langs galaksens storakse (y-aksen) hvor du vil måle hastigheden.
 - Et lille område omkring din ønskede position (y) markeres med to grønne linjer langs hele bølgelængdeintervallet (x).

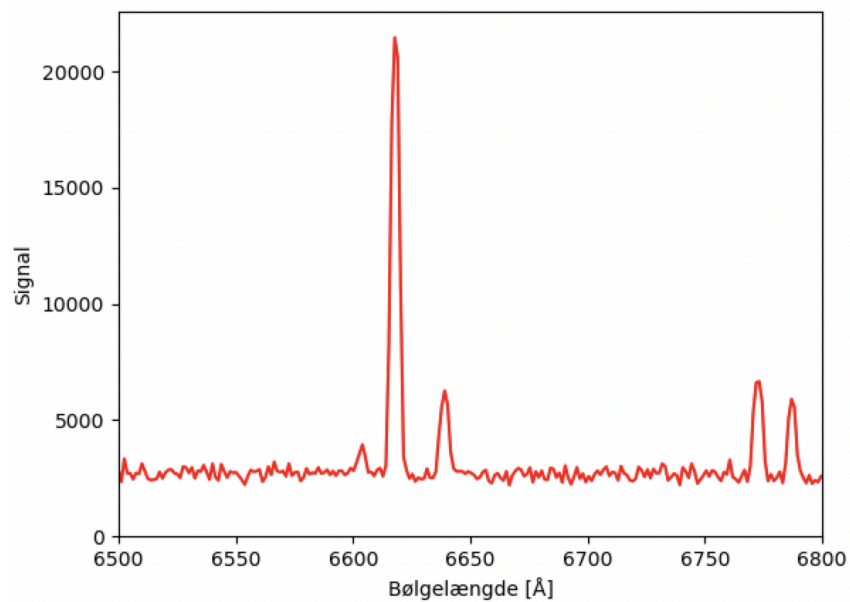


H α -linjen har en hvilebølgelængde på 656.5 nm, men som astronomer måler vi i Ångström, hvor 1 Å = 0.1 nm. Eftersom galaksen er rødforskudt til $z = 0.0078$, finder du H α ved 6616 Å. I dette tilfælde har vi valgt en position ved cirka +8.8 kpc fra galaksens centrum.

- Tryk q for at fortsætte.
 - Herefter vises hele spektret ved din valgte position



- Tryk q igen.
 - Nu zoomes ind på området omkring $H\alpha$ (da det er hard-codet i scriptet)

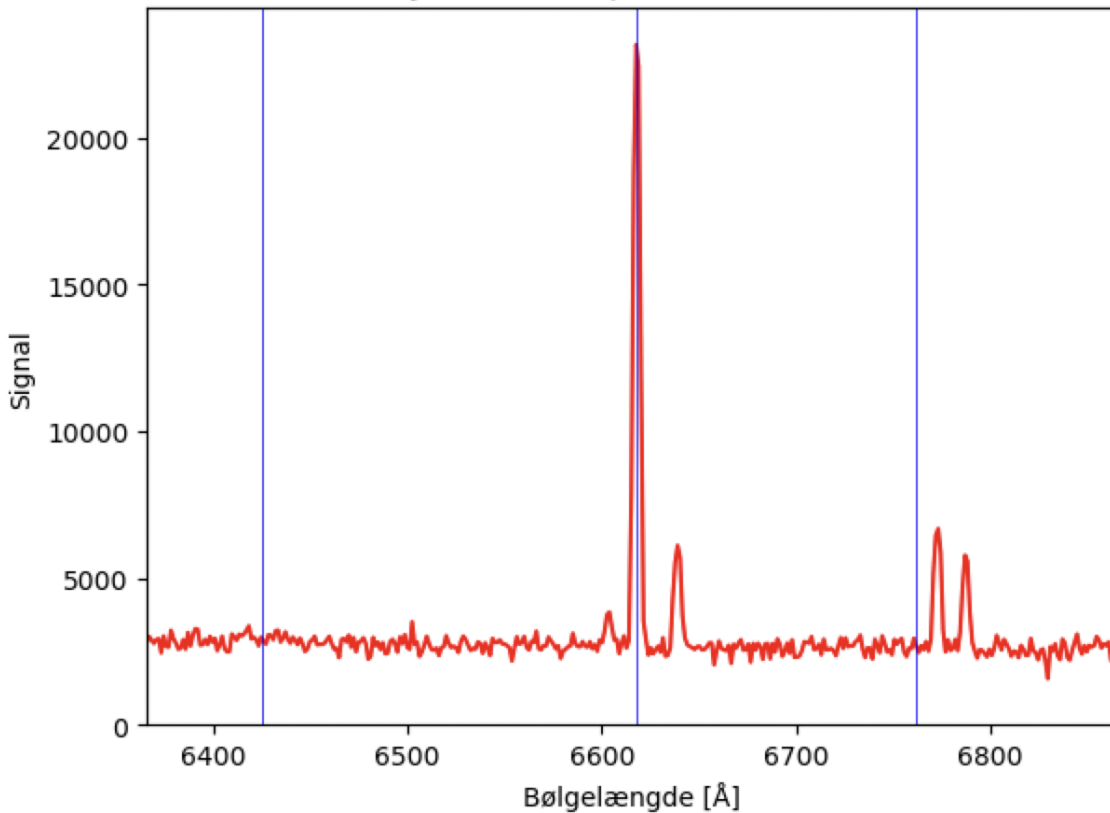


Klik tre gange:

- I kontinuets på venstre side af linjen
- Omkring linjecentrum
- I kontinuets på højre side

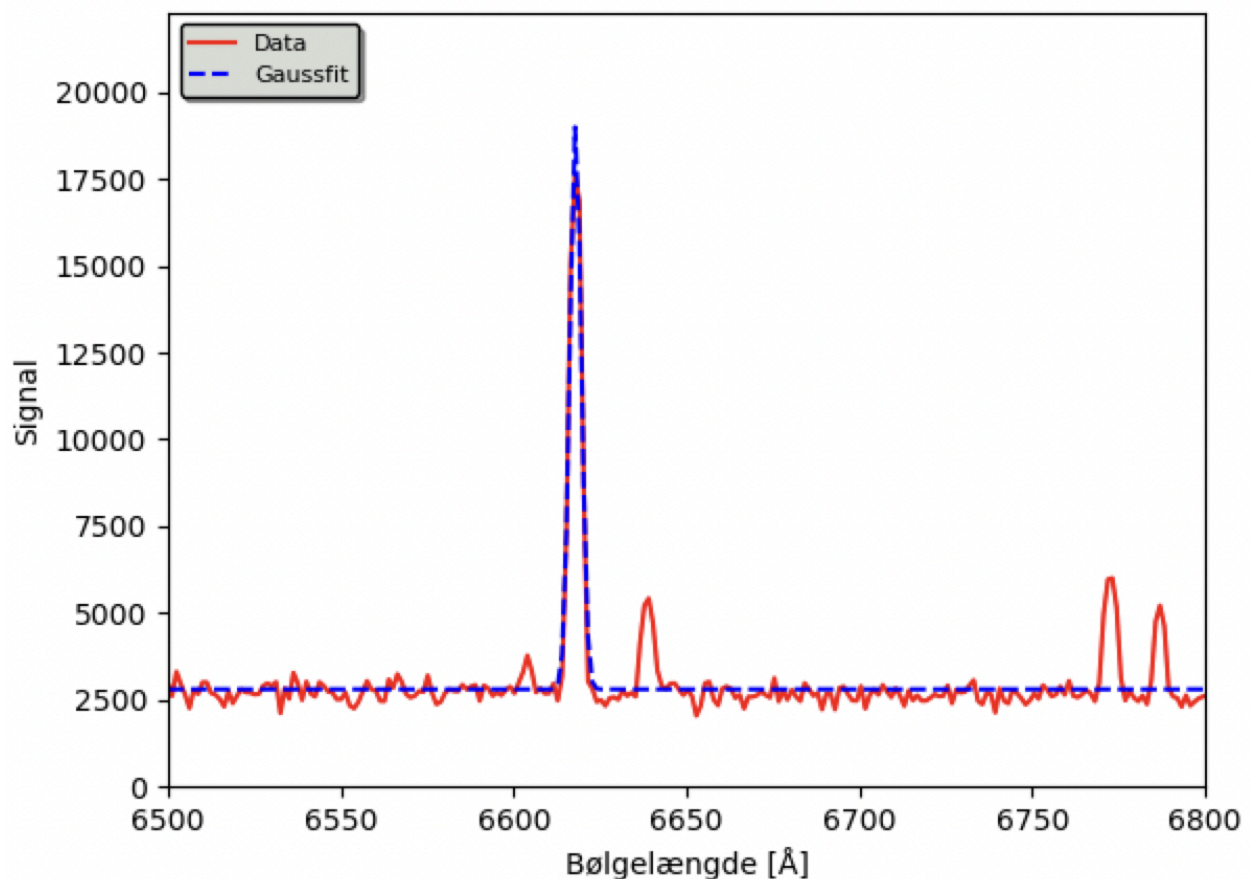
For hvert klik tegnes en lodret blå streg:

Klik tre gange med musen: 1) venstre for linjen (baggrund),
2) på linjen, og 3) højre for linjen (baggrund).
Tryk derefter 'q' for at fortsætte.



Scriptet fitter nu en Gauss-kurve til linjen, og resultatet skrives ud i terminalen

- Afstand fra centeret 8.792 kpc
 - Dette er den fysiske position i galaksen, hvor du klikkede
- Bølgelængde 6617.91 Å
 - Dette er linjecentrum for det bedste fit (den blå stiplede linje i plottet)
- Sigma 1.7 Å
 - Dette er linjebreden (ikke usikkerhed)
- Usikkerhed 0.059 Å
 - Dette er usikkerhed på, hvor linjecentrum ligger



Ifølge dette fit har H α -linjen altså sit linjecentrum ved $\lambda_{\text{obs}} = 6617.91 \pm 0.059$ Ångström i afstanden $d = 8.792$ kpc fra galaksens centrum.

Denne øvelse skal nu gentages ved mange forskellige positioner langs galaksens storakse. Vi har snydt lidt, og givet resultaterne for linjecentrum ved ~50 positioner i filen `ugc914_pos_wav.dat`:

```
# pos/kpc    lam/Å    sig
-15.85966138 6611.79 0.13
-15.33930159 6611.8 0.04
-14.80762963 6611.5 0.22
:
```

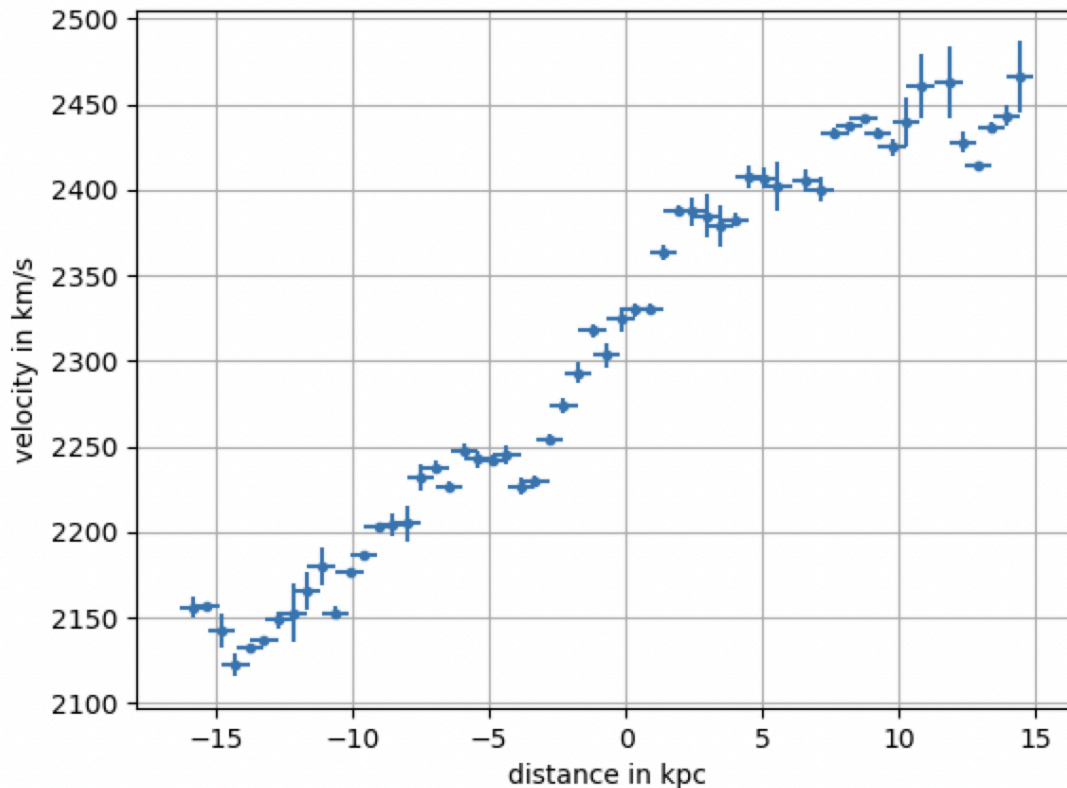
(osv.)

Plot rotationskurven

En rotationskurve er et plot af galaksens hastighed som funktion af afstand fra dens centrum. En sådan kurve kan plottes med scriptet `plot_rot_curve.py`:

```
python plot_rot_curve.py
```

hvilket burde resultere i følgende figur:



Gassen i midten bevæger sig bort fra os med 2340 km/s, svarende til galaksens systemiske rødforskydning på 0.0078 (idet $0.0078 c = 2340$ km/s). Gas ved positive afstande bevæger sig op mod 150 km/s (eller mere) *hurtigere* væk, og gas ved negative afstande, omkring 150 km/s *langsommere*.

I galaksens referenceramme er hastigheden af gas i centrum 0 km/s, og gas ved positive (negative) afstande ligger mellem 0 og +150 (0 og -150) km/s.

Vi er ikke færdige med programmet, så lad plottevinduet stå og læs videre:

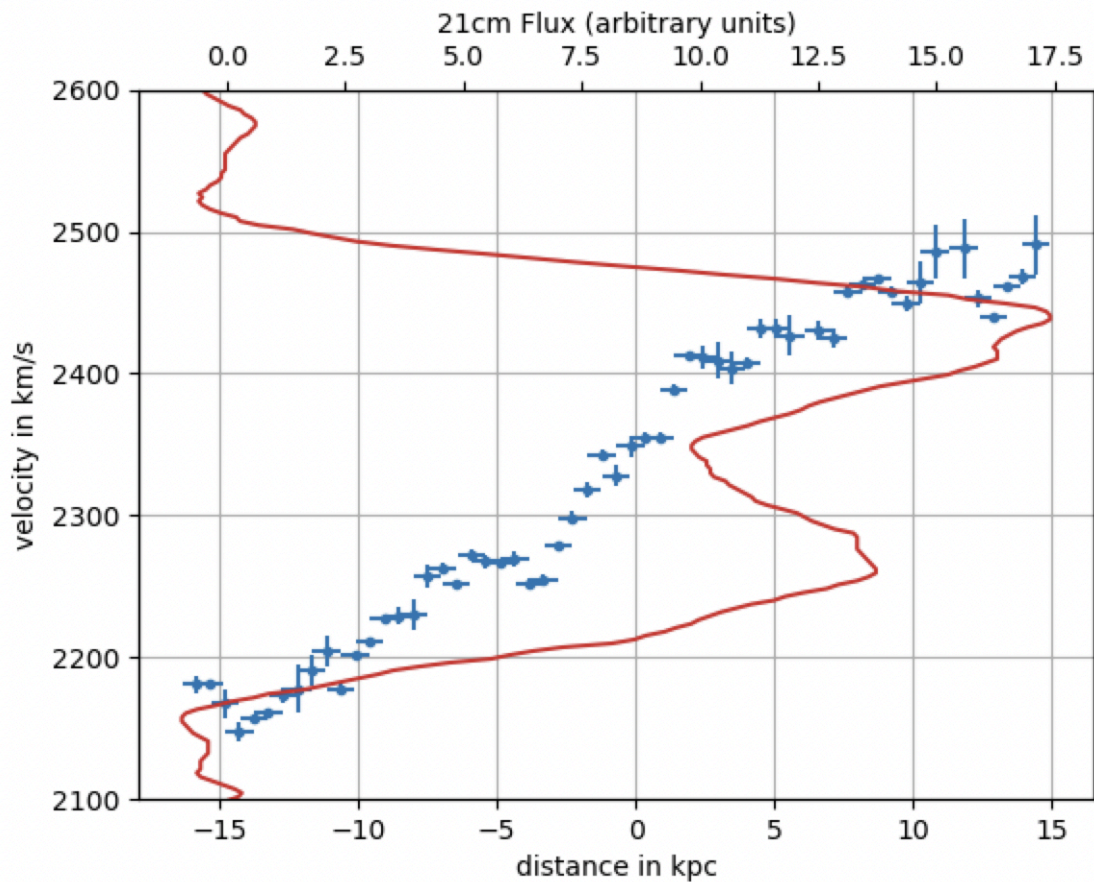
Radioobservationer

Rotationen kan også måles ved en anden type observation, nemlig 21 cm-stråling, som er radiobølger udsendt ved den forbudte 21 cm-linje fra neutral hydrogen (specifikt når elektronen i grundtilstanden spontant flipper sit spin fra et være parallelt med protonens spin, til at være antiparallelt).

Pga. radiobølgers lange bølgelængde er radioobservationer dog meget dårligere opløst, så galaksen er simpelthen bare en "blob" uden nogen som helst features. Vi får altså bare én spektrallinje for hele galaksen. Men spektrallinjens præcise form fortæller os alligevel noget om rotationen, fordi de gasskyernes forskellige hastigheder giver anledning til emission ved forskellige bølgelængder.

Overordnet set består galaksens af gas, som bevæger sig hen imod os, og gas som bevæger sig væk fra os. Derfor får galaksens samlede, ikke-rumligt-opløste spektrum en karakteristisk "dobbelthorn-profil", hvor i UGC914's tilfælde det ene horn peaker omkring +100 km/s, og det andet horn peaker omkring -100 km/s (ift. den systemiske hastighed på de 2340 km/s).

- I plottevinduet kan du trykke q for at fortsætte og sammenligne H α -data med 21 cm-data, som ligger i folderen 21cm/



I denne figur deler dataene y-aksen, men hvor de blå punkter viser position af det H α -emitterende gas i galaksen, viser den røde kurve den omtalte dobbelthorn-profil.

Men vi er stadig ikke færdige med programmet, så lad plottevinduet stå og læs videre:

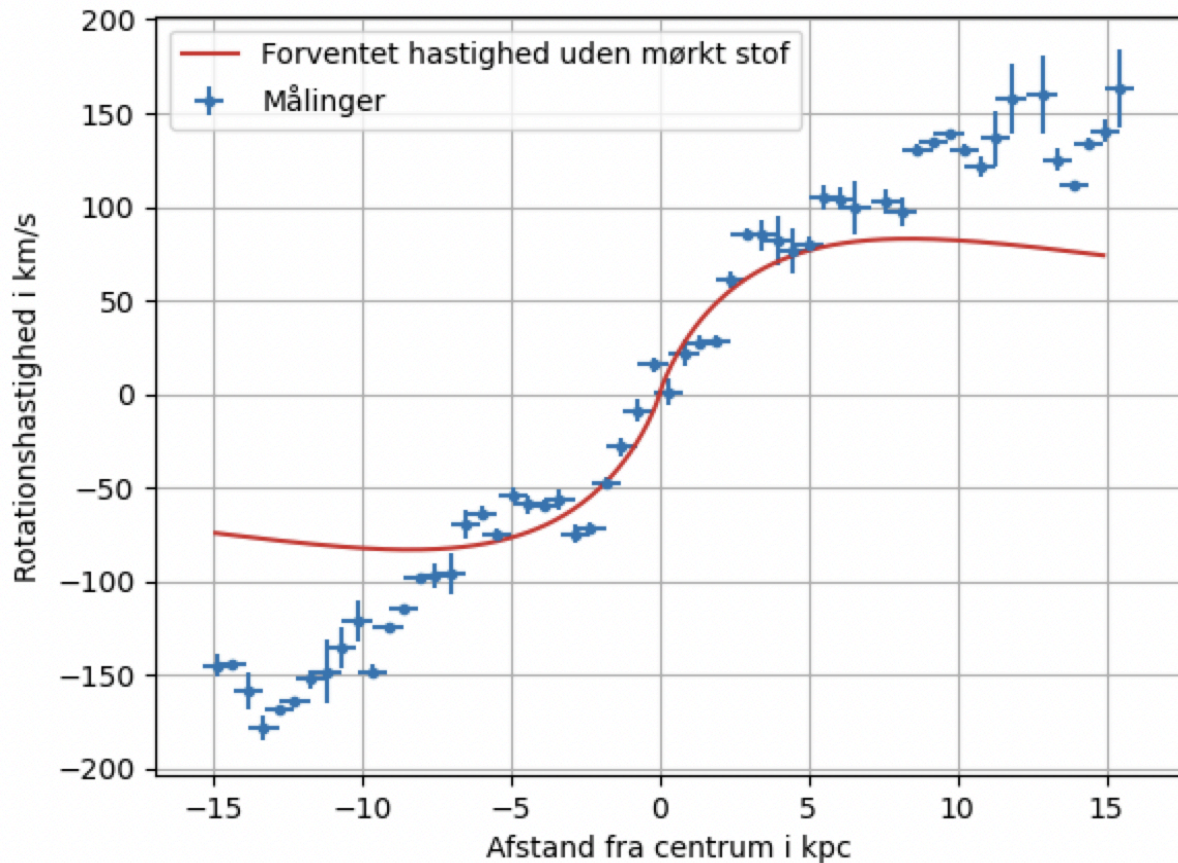
Mørkt stof

Hastigheden af gassen er givet ved galaksens masse. Jo mere den vejer, jo hurtigere må stoffet rotere. I princippet burde vi kunne regne denne rotationskurve ud uden at måle hastigheden, simpelthen ved at observere, hvor *meget* stof der er, og så bruge Newtons formel for tyngdekraften.

Det stof vi kan se kaldes også *baryonisk* stof.

På baggrund af observationer af UGC914's totale masse af gas og stjerner indeholder scriptet `plot_rot_curve.py` en model for, hvordan rotationskurven ville se ud, hvis der kun var gas og stjerner.

- Tryk α igen for at fortsætte og sammenligne med en model af hastigheden givet ved kun baryonisk stof.



I denne version vises hastigheder i galaksens referenceramme, dvs. de 2340 km/s (eller mere præcist 2335.4 km/s) er trukket fra alle hastigheder.

I modellen indgår følgende information, som er hard-codet i scriptet:

- Galaksens stellare masse ($10^{9.967}$ Solmasser)
 - Kan findes på katalog-databasen VizieR (se [App. B](#)).
- Galaksens gasmasse (9×10^9 Solmasser)
 - Kan findes i [Smoker et al. \(2000\)](#), hvor galaksen dog hedder UM 318.
- Galaksens skalalængde (for en antaget eksponentiel skive)
- Galaksens inklinering, dvs. vinklen af rotationsaksen ift. hvis den pegede lige imod os (70°)

Key take-away

Hvis der kun var dét stof vi kan se, ville rotationshastigheden ikke komme op over 100 km/s (rød kurve). Observationel data viser hastigheder op til det dobbelte. Der er to muligheder: Enten har vi misforstået tyngdekraften, eller også må der være noget stof, vi ikke kan se. De fleste (men ikke alle) tror på mulighed #2.

Øvelse 5: GN-z9

Ideen er her, at se et ekstremt eksempel på den kosmologiske rødforskydning, nemlig en af de fjerneste galakser observeret med JWST. Dette vil give anledning til at diskutere spændende emner som universets udvidelse, reionisation, galakseudvikling, hydrogenabsorption, look-back time.

- [Bunker \(2023\)](#)

Øvelse 6: Kosmologiske parametre fra CMB

- <https://chrisnorth.github.io/planckapps/Simulator/>

Øvelse 7: Tæl galakser i James Webb deep field

Inspireret af Troels Pedersens oplæg på mødet 4. September vil vi foreslå en øvelse, hvor vi bruger et af de dybeste nye billeder taget med James Webb Space Teleskopet til at "tælle galakser" og dermed estimere, hvor mange galakser, der findes i det såkaldt observerbare Univers. Brug eventuelt dette, som



Kredit: [ESA/Webb, NASA & CSA, G. Östlin, P. G. Perez-Gonzalez, J. Melinder, the JADES Collaboration, the MIDIS collaboration, M. Zamani \(ESA/Webb\)](#)

Øvelse 8: Se selv Universet med Seestar s50

Seestar S50 er et teleskop til fotografering af nattehimlen, som 1) er så billigt (omkring 5000,- kr.), at det burde være til at anskaffe for de fleste gymnasier, og 2) er så simpelt at bruge, at det kræver et minimum af forberedelse. Med et sådan teleskop vil eleverne lynhurtigt kunne udforske objekter på himlen som kuglehobe, gaståger og andre galakser.

Vi har ingen anpart i teleskopet, men er selv så fascineret af dets simplicitet, at vi synes det vil være en god mulighed for at involvere eleverne.

Appendix A: Koordinater på himlen

Set her fra Jorden ser himmelhvælvingen todimensional ud, og en position på himlen må derfor angives med to koordinater. En position kan beskrives på flere forskellige måder, alt efter hvad man arbejder med. Dette er helt analogt til, at vi kan beskrive en position på Jordens overflade med to koordinater, f.eks. "længdegrad og breddegrad", eller "afstand fra Odense og vinkelafstand fra nord".

Ækvatorialkoordinater

Rektascension og deklination

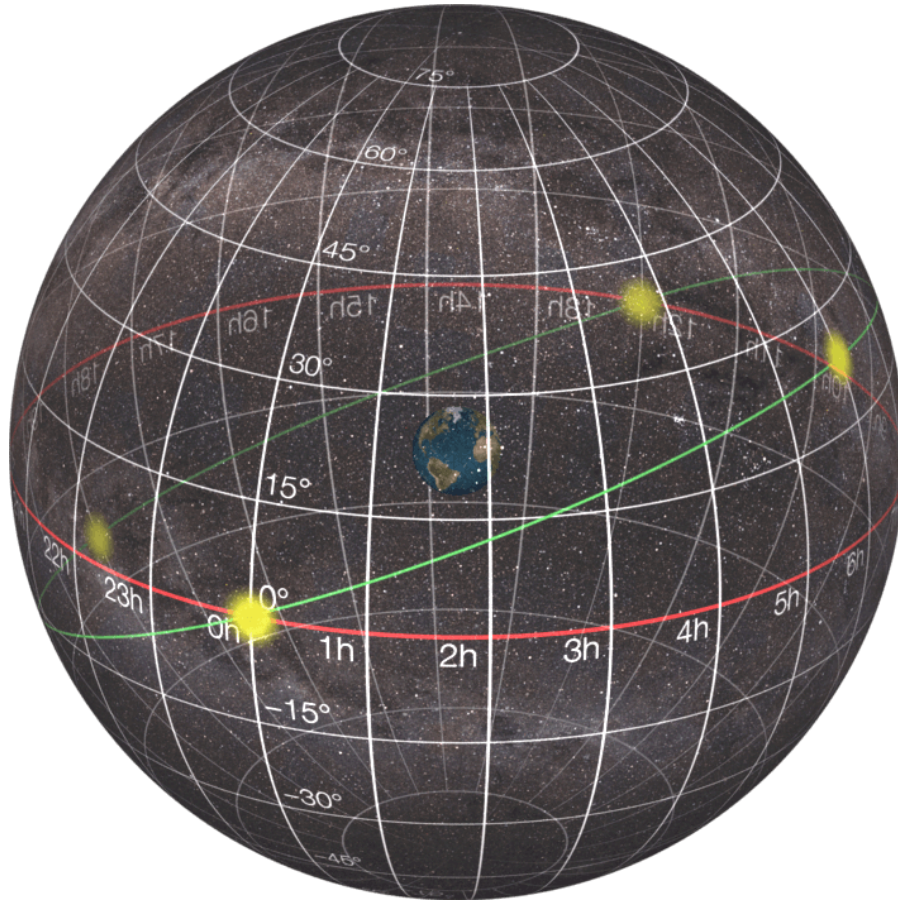
De mest brugte koordinater til at beskrive himmellegemernes positioner er de såkaldte "ækvatorialkoordinater", defineret ved to vinkler som kaldes hhv. rektascension (forkortet "RA", og symboliseret med det græske bogstav α ; alfa) og deklination (forkortet "dec", og symboliseret med det græske bogstav δ ; delta).

Deklinationen måles som en vinkel væk fra ækvator. Dvs. den går fra $\delta = -90^\circ$ til $\delta = +90^\circ$. Nordstjernen ligger altså ved $\delta \approx 90^\circ$, mens en stjerne som ligger lige over ækvator har $\delta \sim 0^\circ$.

Rektascensionen måles langs Jordens ækvator. Man starter med $\alpha = 0^\circ$ ved et bestemt punkt kaldet "Forårspunktet", og måler mod øst. Forårspunktet er defineret som dér hvor den plan som går ud fra Jordens ækvator, og den plan som Jorden bevæger som rundt om Solen i ("ekliptika") skærer hinanden d. 21. marts.

Vinklerne kan måles som grader (eller radianer), men det er faktisk mere almindeligt at måle RA i timer, minutter og sekunder. Dvs., at man deler de 360° op i 24 timer, hver time deles op i 60 minutter, og minutterne deles op i 60 sekunder. I stedet for at skrive f.eks. $\alpha = 31.3^\circ$, så skriver vi $\alpha = 2^h 5^m 12.0^s$.

Deklinationen måles i grader, men i stedet for ét decimaltal, deler man én grad op i 60 "bueminutter", og ét bueminut deles op i 60 buesekunder. I stedet for at skrive $\delta = -29.8625^\circ$ skriver vi $\delta = -29^d 51^m 45.0^s$.



I midten ses Jorden. Vores ækvator ligger i en plan, som ville skære den røde linje. Solen synes at følge en bane der er tiltet ift. ækvatorialplanen med 23.5° . Denne plan, som ville skære den grønne linje, kaldes ekliptika. To gange om året krydser Solen ækvatorialplanen. Det punkt den krydser om foråret definerer koordinatsystemets nulpunkt. Kredit: [Christian Ready / CC BY-SA 4.0](#).

Galaktiske koordinater

En alternativ måde at udtrykke himmelposition er Galaktiske koordinater, som er defineret ved en "længdegrad" l (det er bare et "l", men l er et åndssvagt bogstav at bruge som symbol, fordi det ligner et I, så derfor foretrækker jeg at krølle det det lidt) målt øst for retningen til Mælkevejens midtpunkt, og en "breddegrad" b målt op eller ned fra Mælkevejens plan.

Når Planck Collaboration måler Solens hastighed, angiver de normalt resultatet som en fart V_0 og en retning (l, b) .

Ækvatorialkoordinater i x , y og z

Vi kan også angive Solens hastighed gennem rummet med dens fart V_0 og en retning i ækvatorialkoordinater (α, δ) . Men det Hubble gør, og vi derfor også gør, er *endnu* en alternativ måde, nemlig at definere et kartesisk koordinatsystem, dvs. en x -, y - og z -akse, som står vinkelret på hinanden. Orienteringen ift. (α, δ) -systemet vælges således, at

- x -aksen ligger i ækvatorialplanen ($\delta = 0^\circ$) og peger mod $(\alpha, \delta) = (0h, 0^\circ)$,
- y -aksen ligger i samme plan, men er vinkelret på x og peger mod $(\alpha, \delta) = (6h, 0^\circ)$ (dvs. 90° øst for Forårspunktet), og
- z -aksen peger langs nordpolsaksen, dvs. $\delta = +90^\circ$.

At transformere mellem forskellige koordinatsystemer kan være lidt af et dyr. Her skal vi bare se, hvordan man går fra (V_0, α, δ) til (X, Y, Z) :

$$X = V_0 \cos \alpha \cos \delta$$

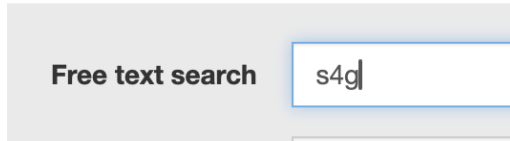
$$Y = V_0 \sin \alpha \cos \delta$$

$$Z = V_0 \sin \delta$$

Appendix B: Galaksen UGC914's stjernemasse

I modellen for det baryoniske stof i Øvelse 4 skal vi bruges den stellar masse for galaksen UGC914. Denne kan findes i databasen VizierR:

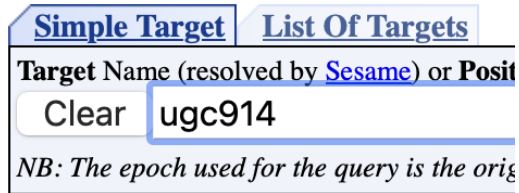
- Gå ind på <https://vizier.cds.unistra.fr/>
- Søg efter kataloget S⁴G



- Vælg kataloget ved at klikke "VizieR"-knappen



- Søg efter galaksen (UGC914)



- Her finder du stjernemassen

