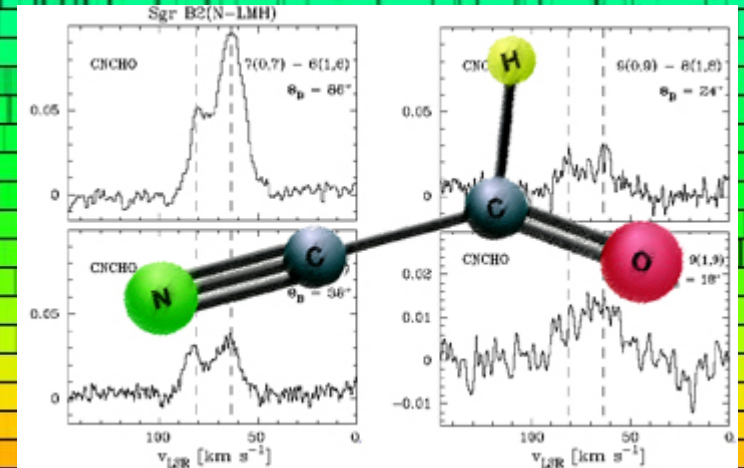


# Spektroskopi – et fantastisk værktøj



Hans Buhl, Steno Museet, Aarhus Universitet



# Spektroskopi

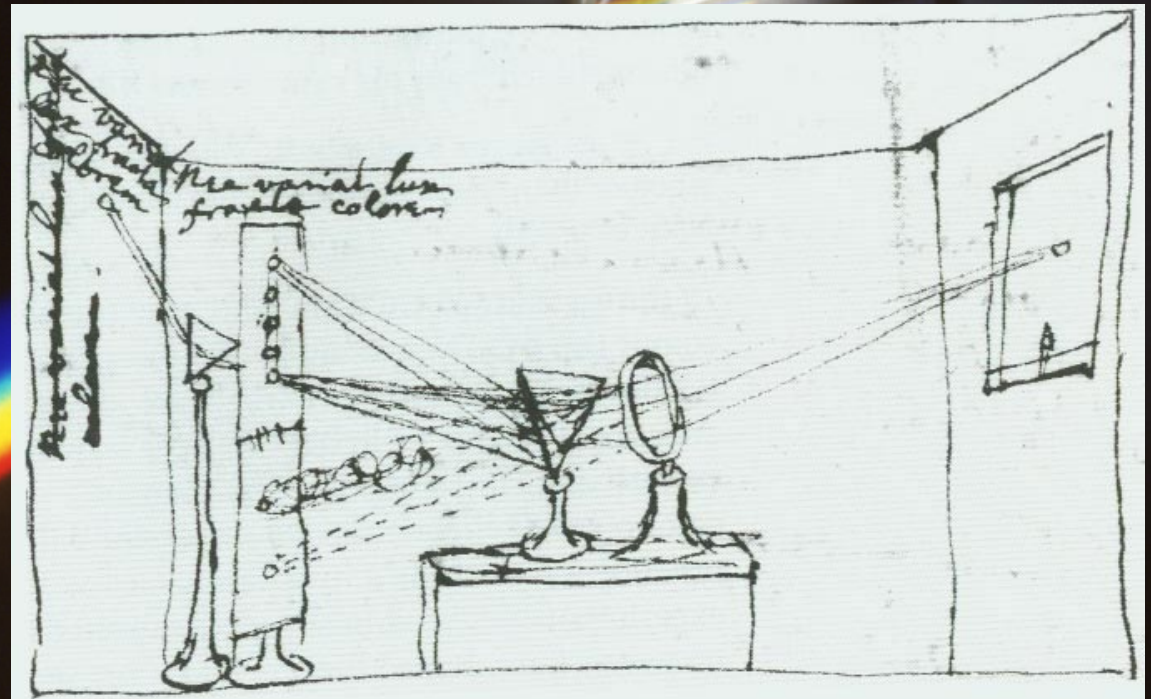
## – et fantastisk værktøj

- Naturvidenskaben har givet os et fantastisk indblik i udviklingen fra **big bang til det moderne menneske**
- Verden: stof og stråling
- Strålingen "fortæller" om stoffet
- Derfor er analyse af lys og anden stråling en af de kraftfulde metoder til indsigt
- Kan bruges inden for mange fag fra fysik over biologi til medicin



# Lys og farver

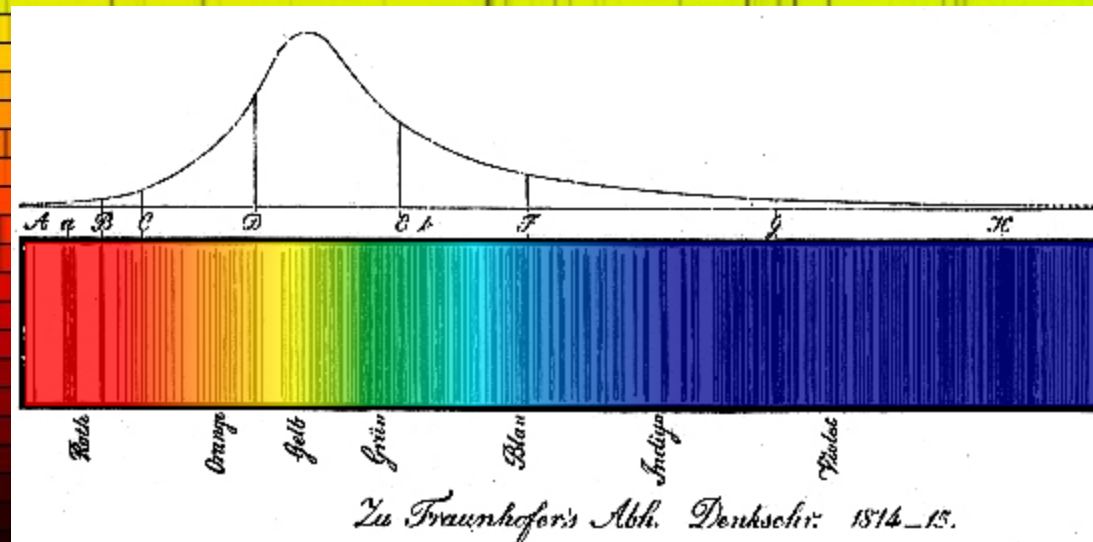
- I 1672 opdagede Newton, at hvidt lys kan opspaltes til en række primære farver af et prisme





# Huller i sollyset

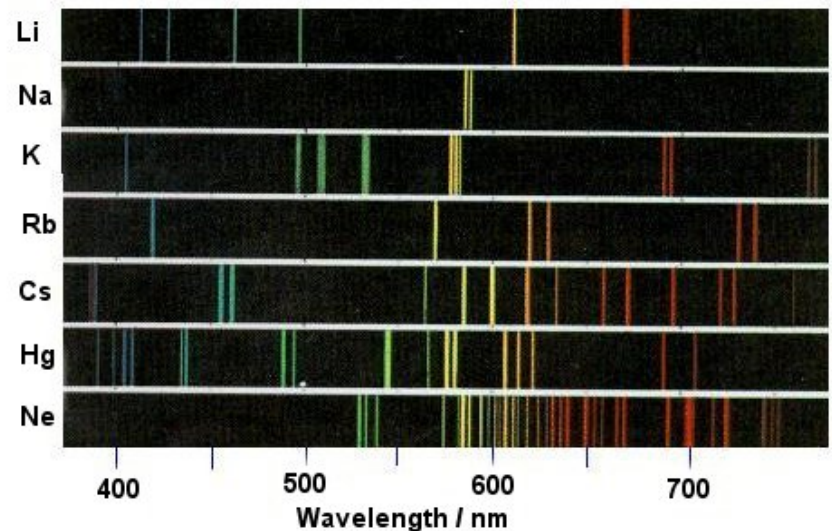
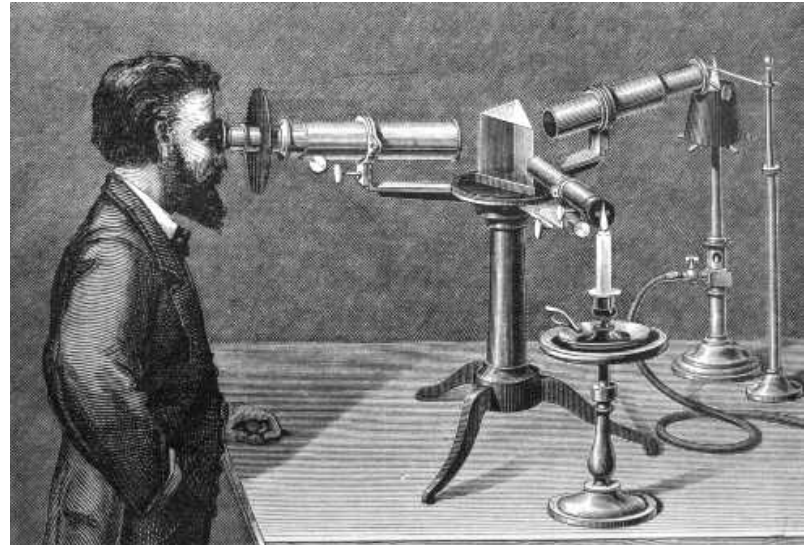
- I 1817 opdagede instrumentmageren Joseph von Fraunhofer "huller" i solspektret
- Han kunne tælle over 500 sorte linjer
- Månens og Venus' linjer  $\approx$  solens linjer
- Stjernernes linjer  $\neq$  solens linjer





# Spektroskopiens fødsel

- Forskellige stoffer lyser med forskellige farver
- Der ses et karakteristisk spektrum gennem et prisme
- **Robert Bunsen** og **Gustav Kirchhoff** grundlagde i 1859 spektralanalysen.



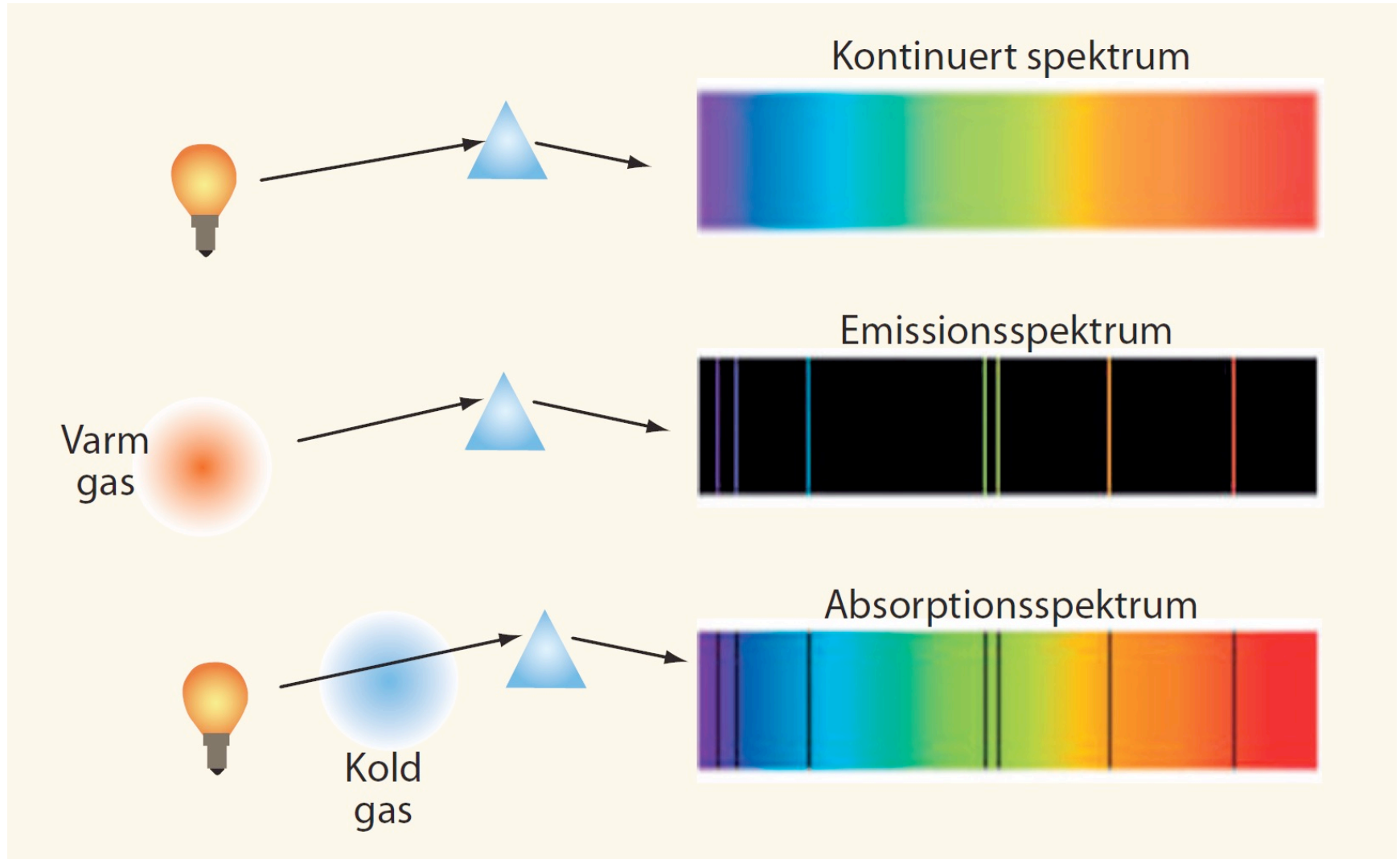




Robert Bunsen, 1859:

”I øjeblikket er Kirchhoff og jeg optaget af en undersøgelse, som ikke tillader os at sove. Kirchhoff har lavet en fuldstændig uventet opdagelse, idet han har fundet årsagen til de mørke linjer i solspektret og kan producere disse linjer kunstigt. [...] Derved er der åbnet en vej til at bestemme Solens og stjernernes kemiske sammensætning.”

# To slags spektre

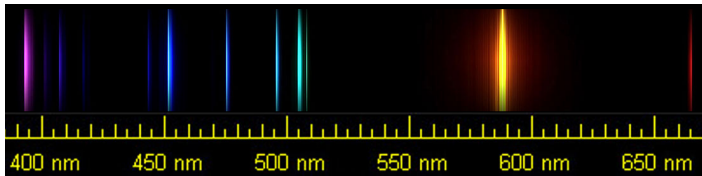




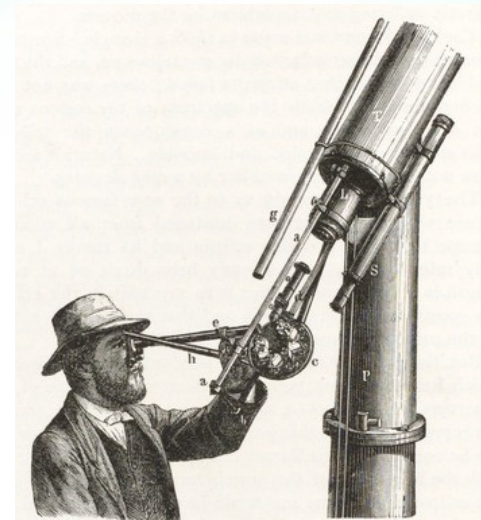
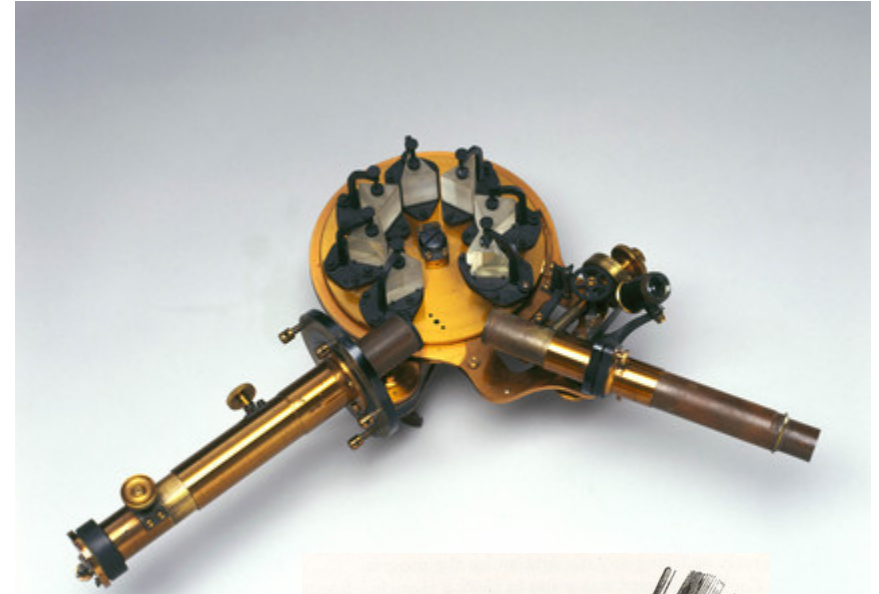


# Astrospektroskopi

- Joseph N. Lockyer opdagede i 1868 en uforklarlig gul linje i solspektret



- Måtte stammede fra et hidtil ukendt grundstof
- Helium  
(af gr. helios 'Solen')



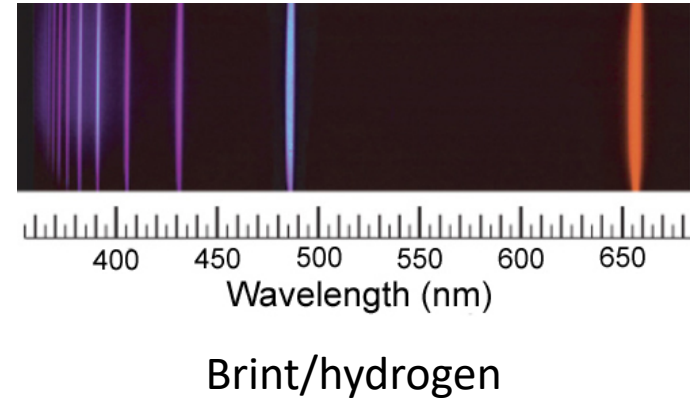


# Astrofysik

- Spektroskopien blev mere end noget andet indgangen til [astrofysikken](#)
- Fra at være punkter på himlen blev stjernerne til fysiske objekter, som kunne studeres.
- AL vor viden om himmellegemerne stammer fra analyse af det lys og anden stråling vi modtager fra dem...
- ...kombineret med forestillingen om at universet er universelt, dvs. at den samme fysik gælder over alt.

# Spektralgåden

- Men hvorfor lyser atomerne med bestemte farver?
- I slutningen af 1880'erne fandt man en simpel matematisk relation mellem bølgelængderne i brints spektrum
- Men man forstod ikke årsagen

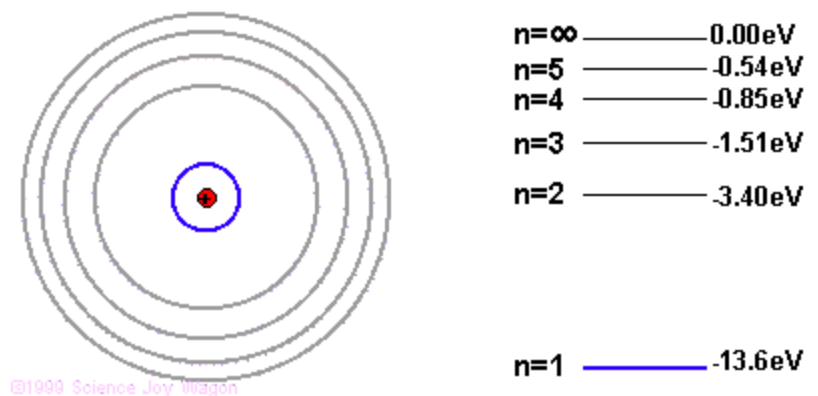
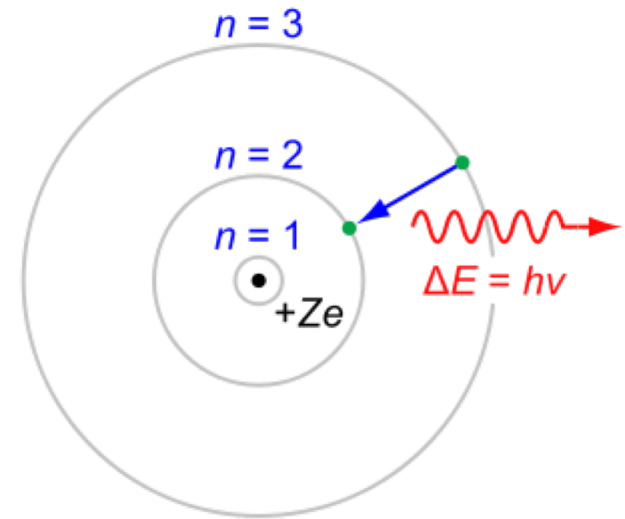


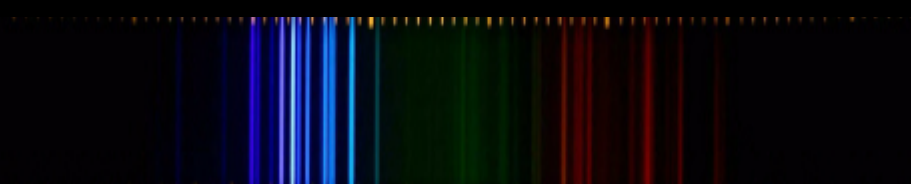
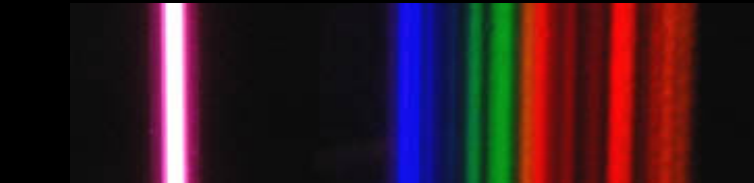
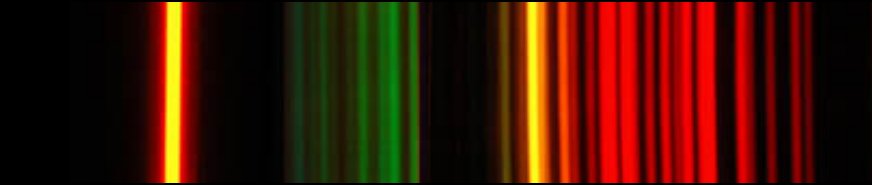
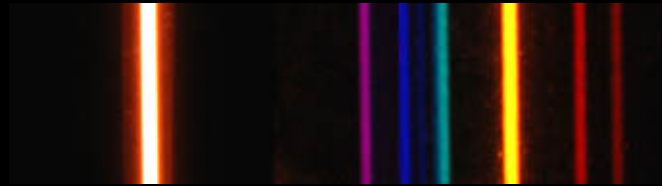
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$



# Bohrs løsning

- I 1913 lykkedes det dog Niels Bohr at give en fysisk forklaring
- Atomer har deres helt egen (kvante)fysik:
  - Elektronerne bevæger sig i stabile baner
  - De kan "springe" mellem banerne ved at optage eller udsende lys





- Spektrallinjernes placering fortæller om atomernes struktur



# Stjernernes fingeraftryk

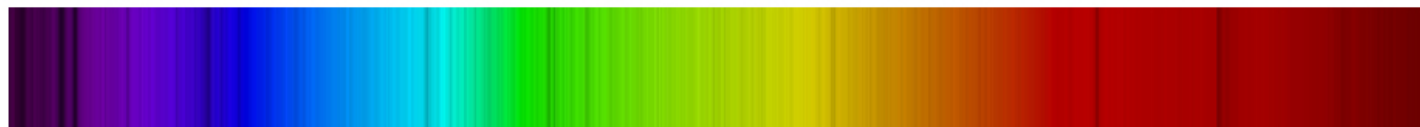
Zeta Orionis (Alnitak)  
Ca. 30.000 °C



Sirius  
Ca. 10.000 °C



Solen  
Ca. 5.500 °C

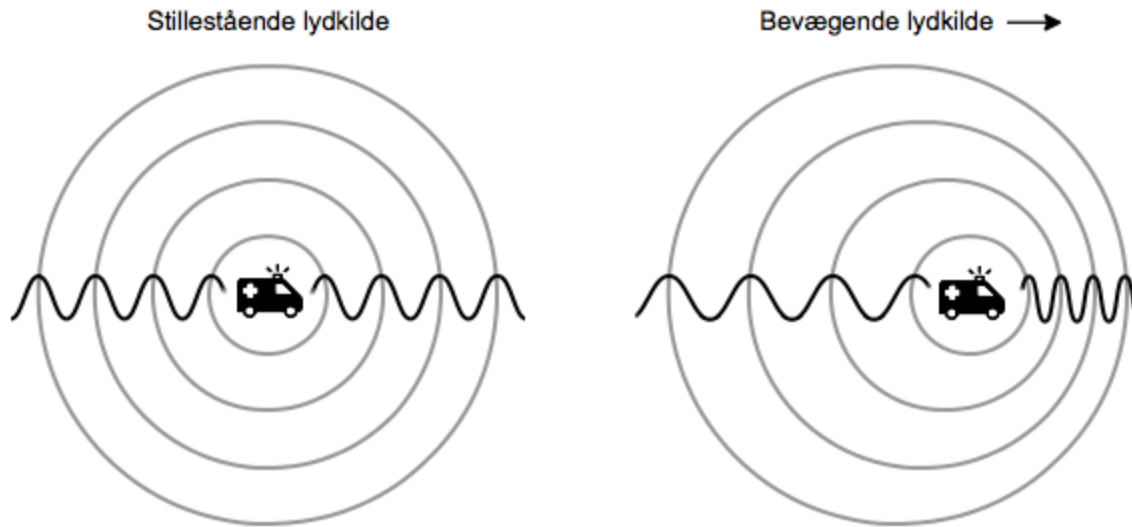


Betelgeuse  
Ca. 3.200 °C

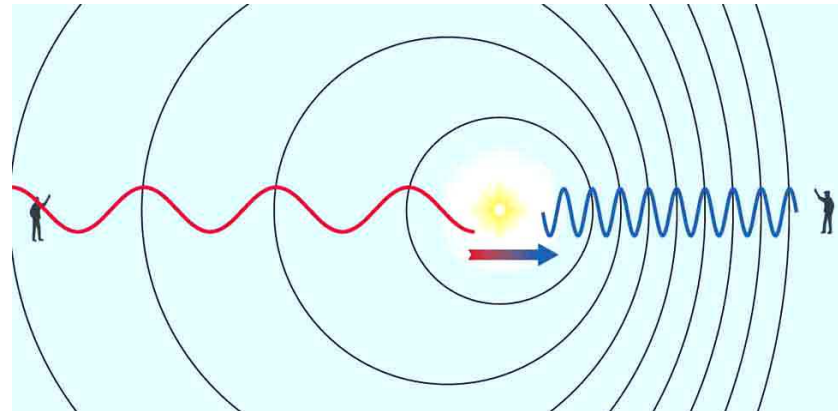


- Stjernernes spektre fortæller om
  - Grundstofsammensætning (linjer)
  - Temperatur (farvefordeling)
  - Bevægelse (forskydning af linjer)

# Doppler-effekten



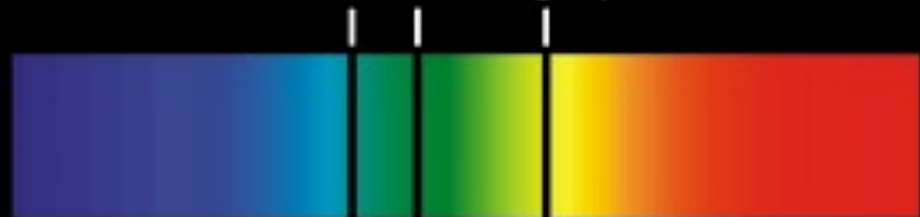
- Gælder også for lys
  - Rødforskydning og blåforskydning



# Rød- og blåforskydning



The star's chemical fingerprints



1. Receding star



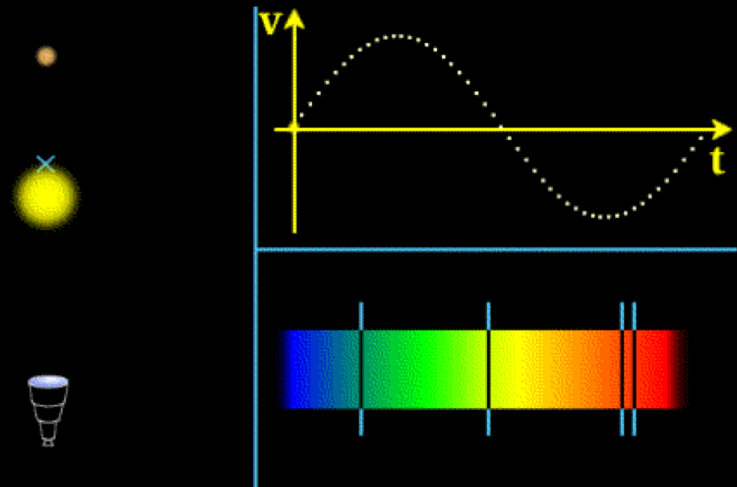
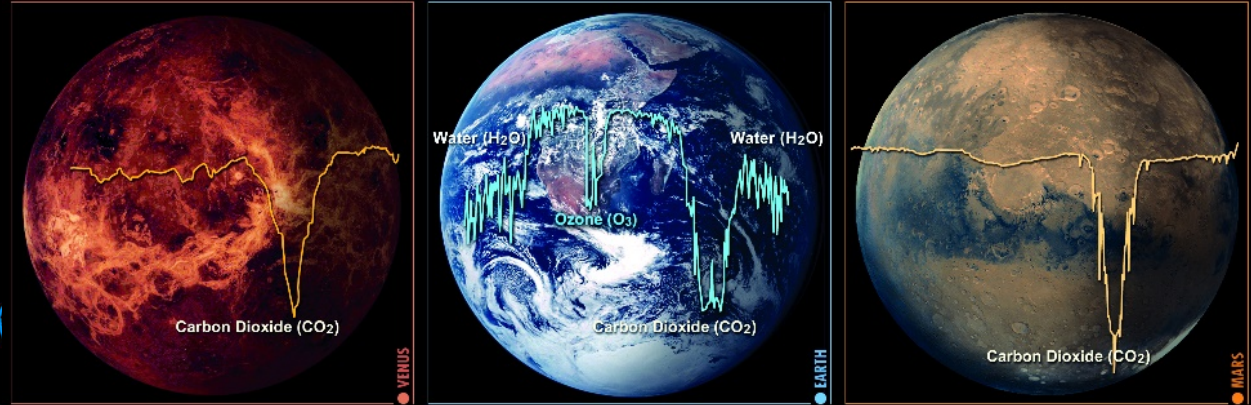
2. Approaching star



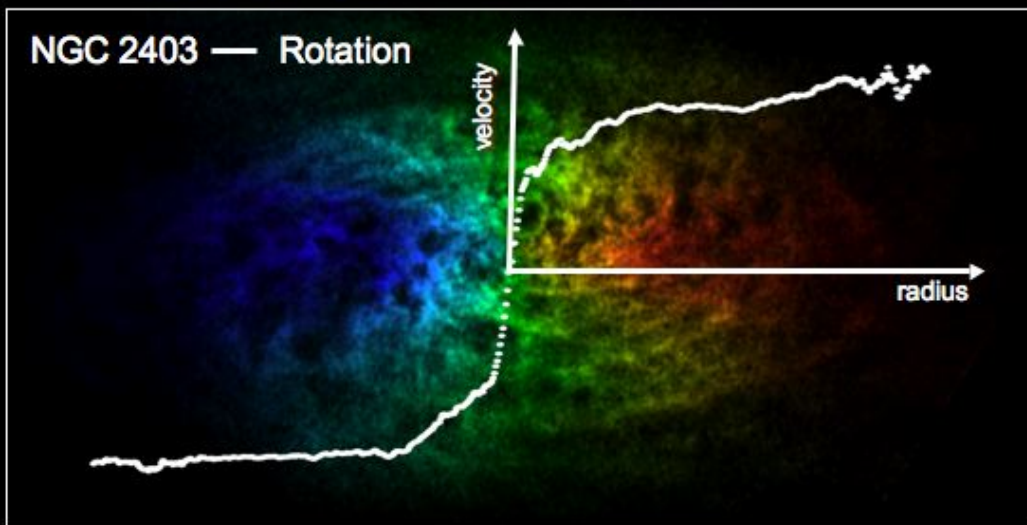


# Jagt på exoplaneter

- Radialhastighedsmetoden



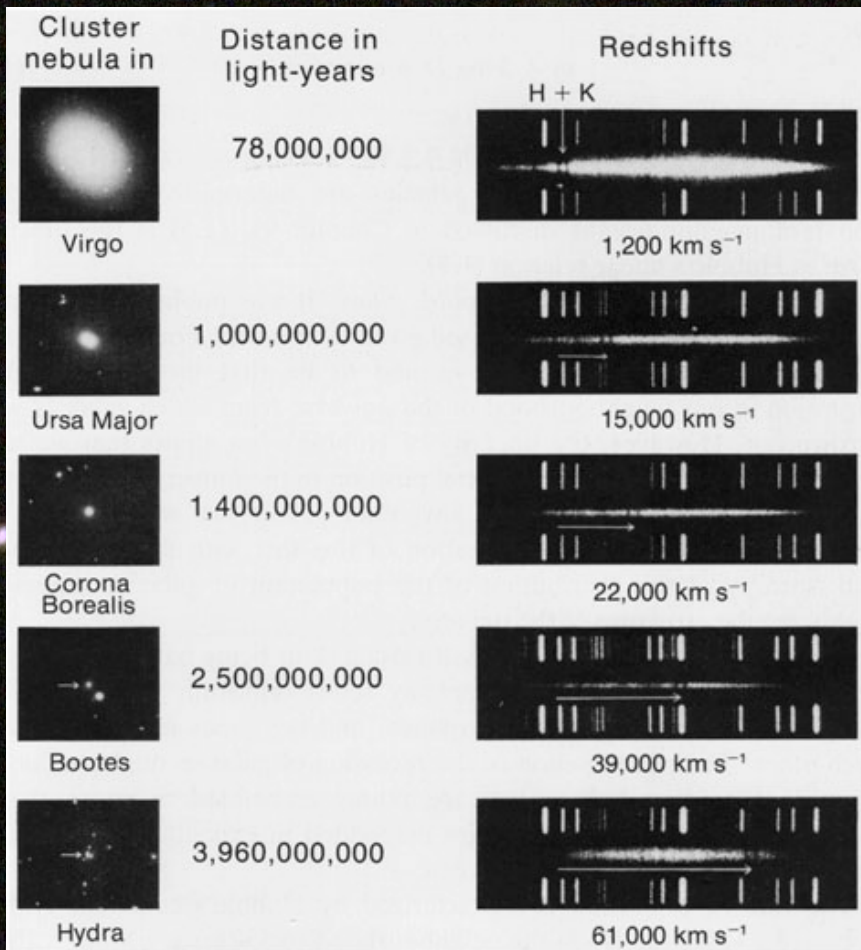
# Måling af galakser rotation



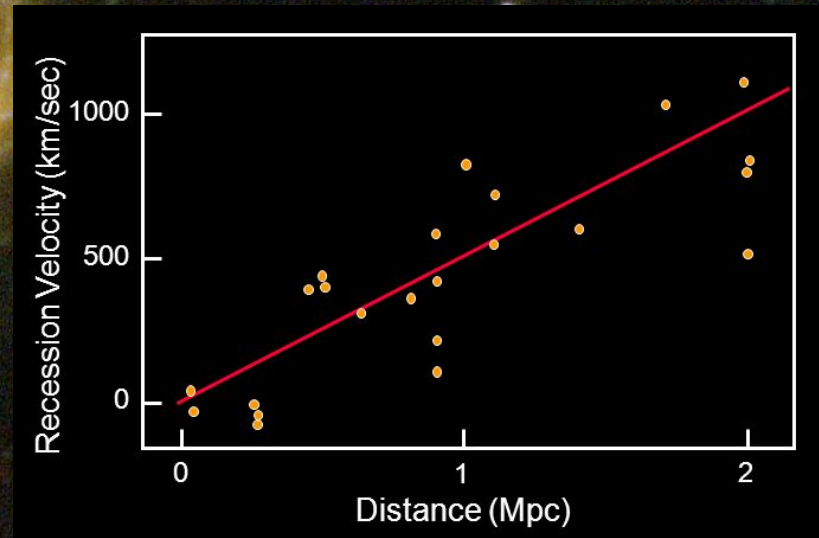
- De ydre dele bevæger sig "for hurtigt" (ift. mængden af støv, gas og stjerner)
- Der må være noget usynlig masse
  - Teorien om "mørkt stof"



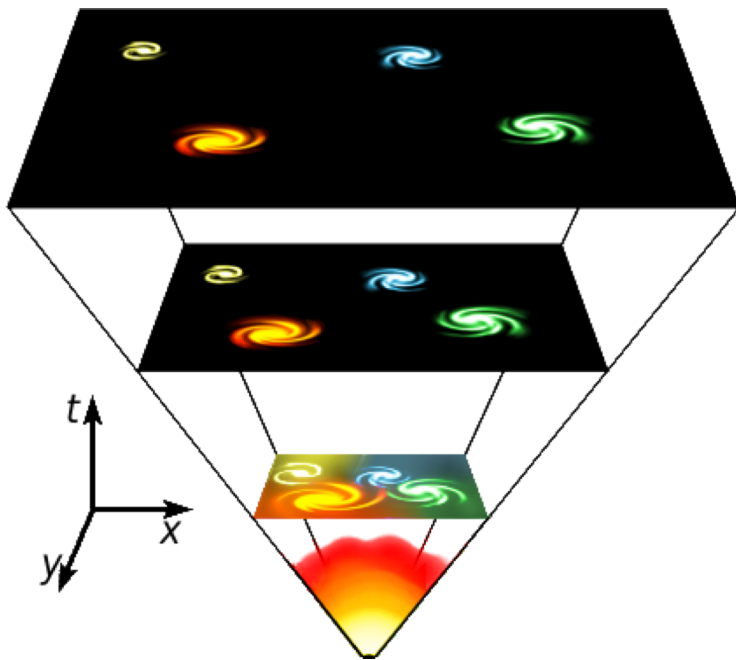
# Måling universets udvidelse



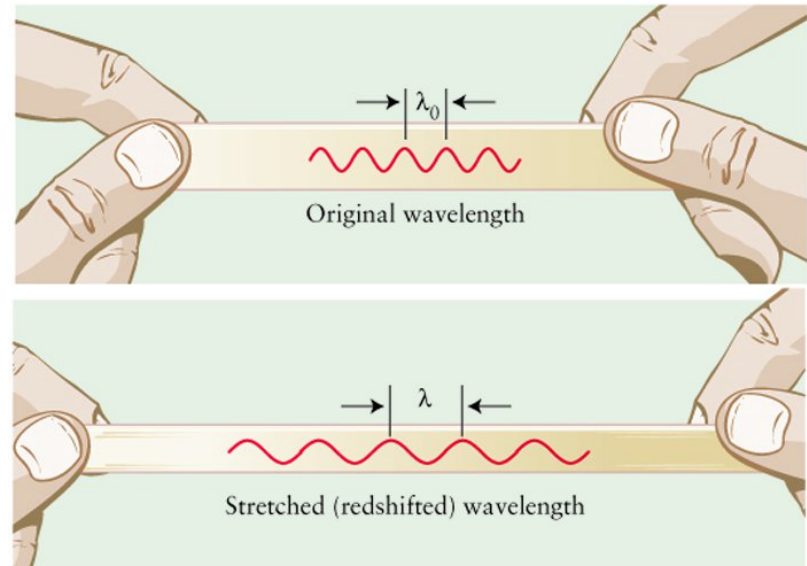
- Hubble 1929:  
Galakserne bevæger sig væk fra os.
- Jo længere væk de er,  
desto hurtigere



# Rødforskydning og big bang

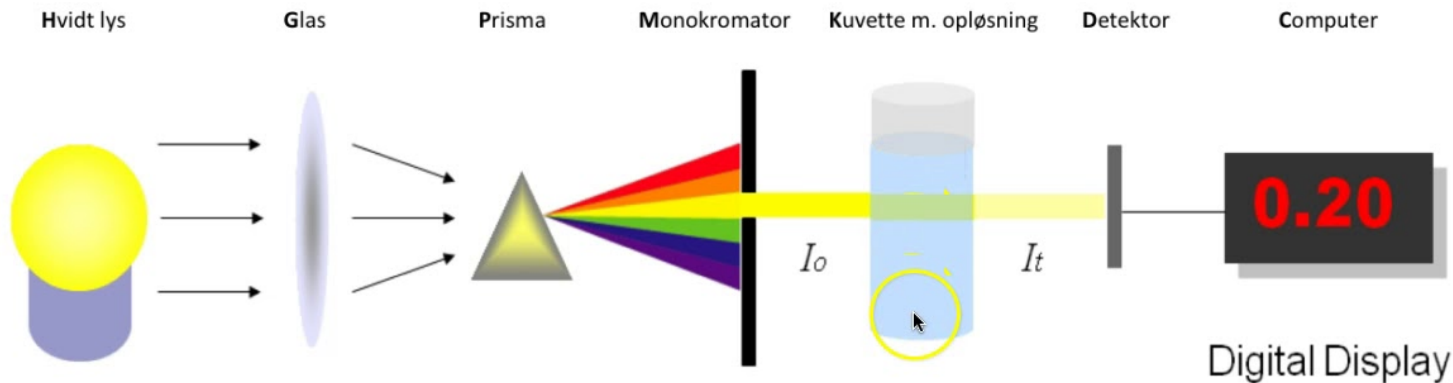


- **NB:** Den kosmologiske rødforskydning skyldes **ikke** Doppler-effekten, men rummets udvidelse

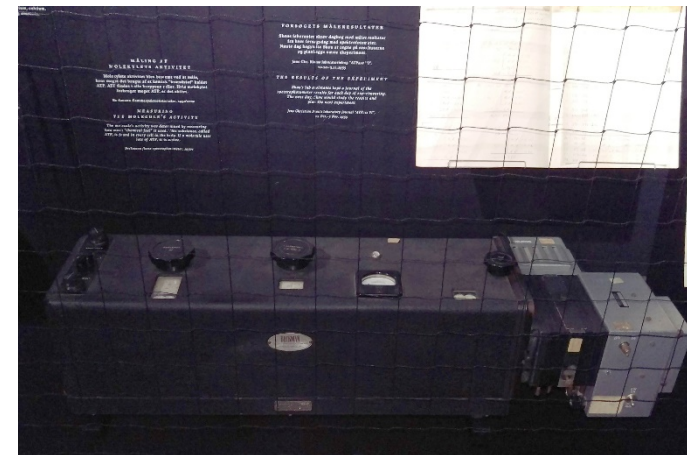




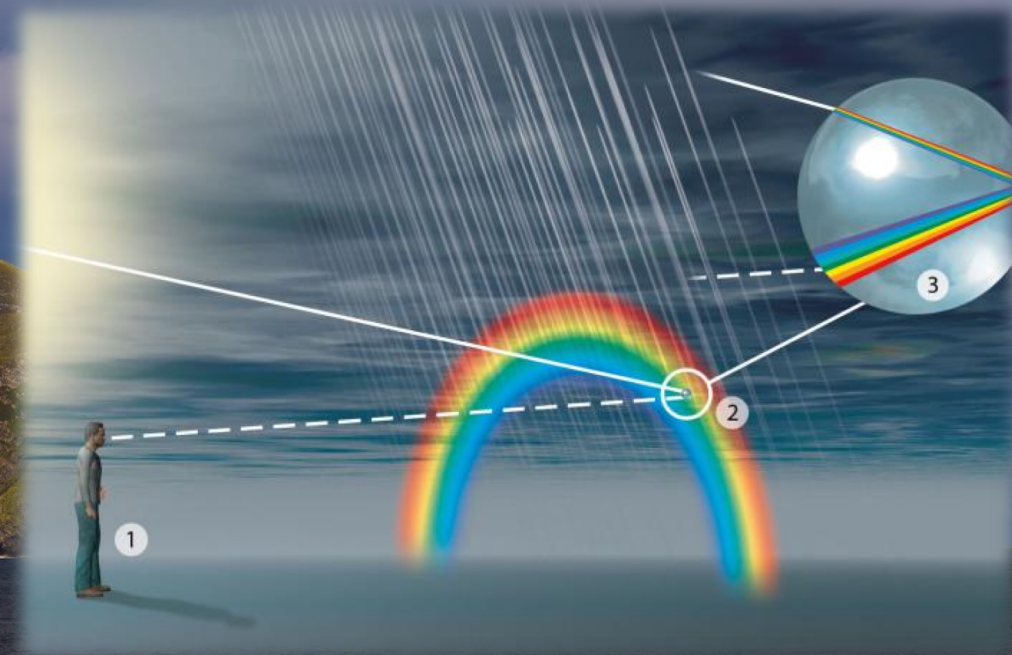
# Spektrofotometri



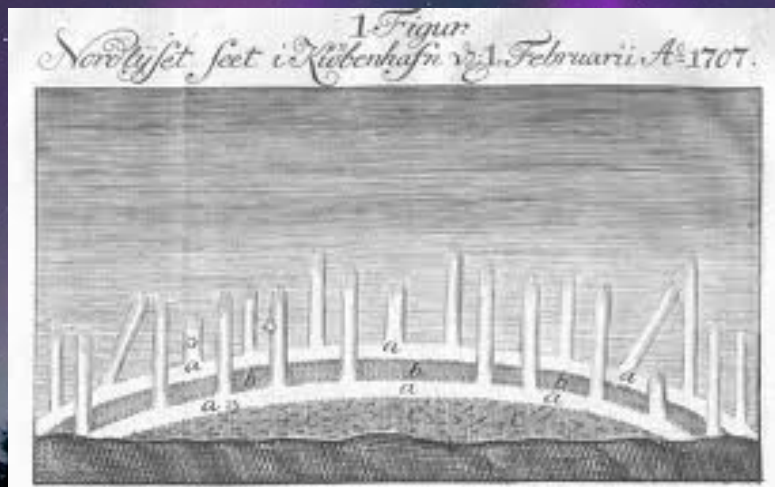
- Måling af stoffers koncentration i opløsninger
  - Meget brugt til biokemi
  - f.eks. DNA, proteiner og enzymer
  - Jens Chr. Skou: krabbenerver
    - opdagelsen af Na-K-pumpen



# Regnbuen er et spektrum



# Nordlys

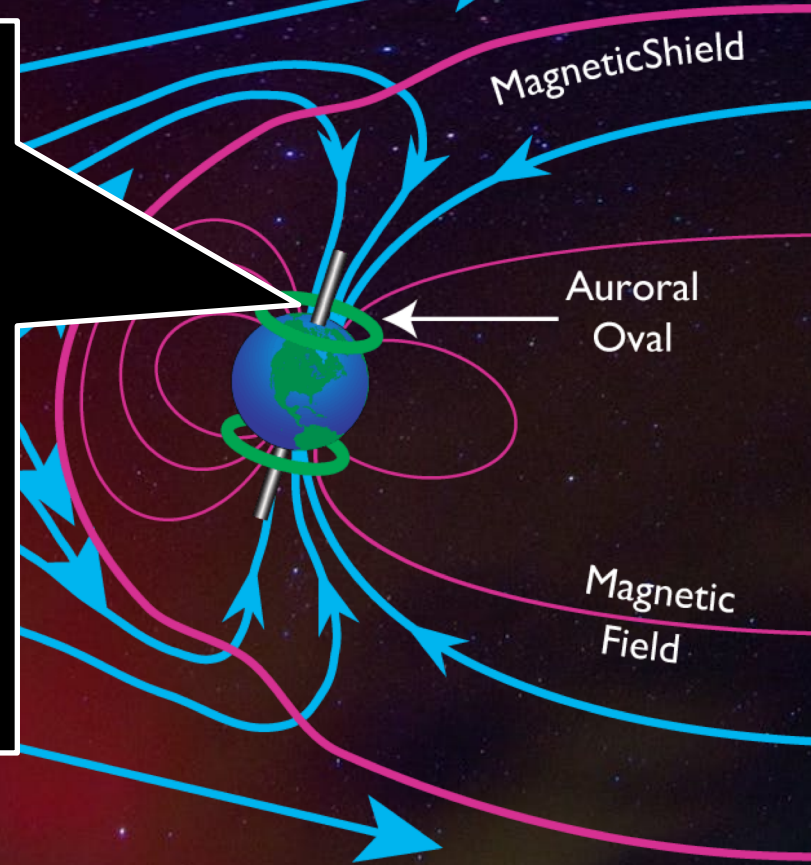
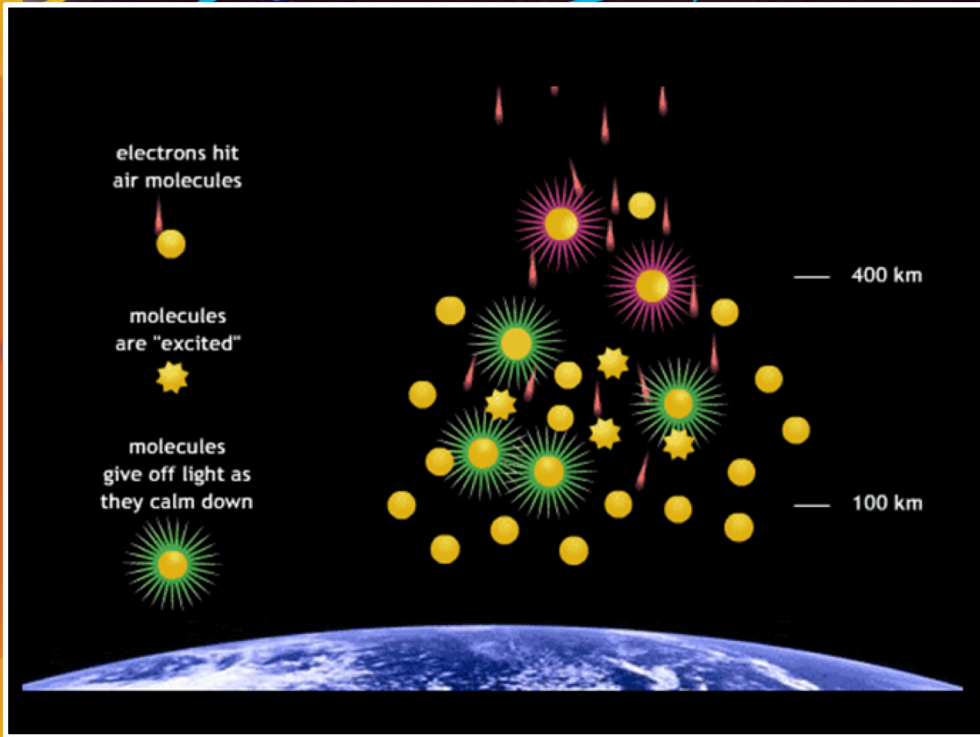


- Ole Rømer beskrev det i 1700-tallet.

- Nu ved vi, at det fortæller om atmosfærens sammensætning og Jordens indre



# SUN



- Nordlys opstår når ladede partikler i solvinden indfanges af Jordens magnetfelt og exciterer atomer i atmosfæren

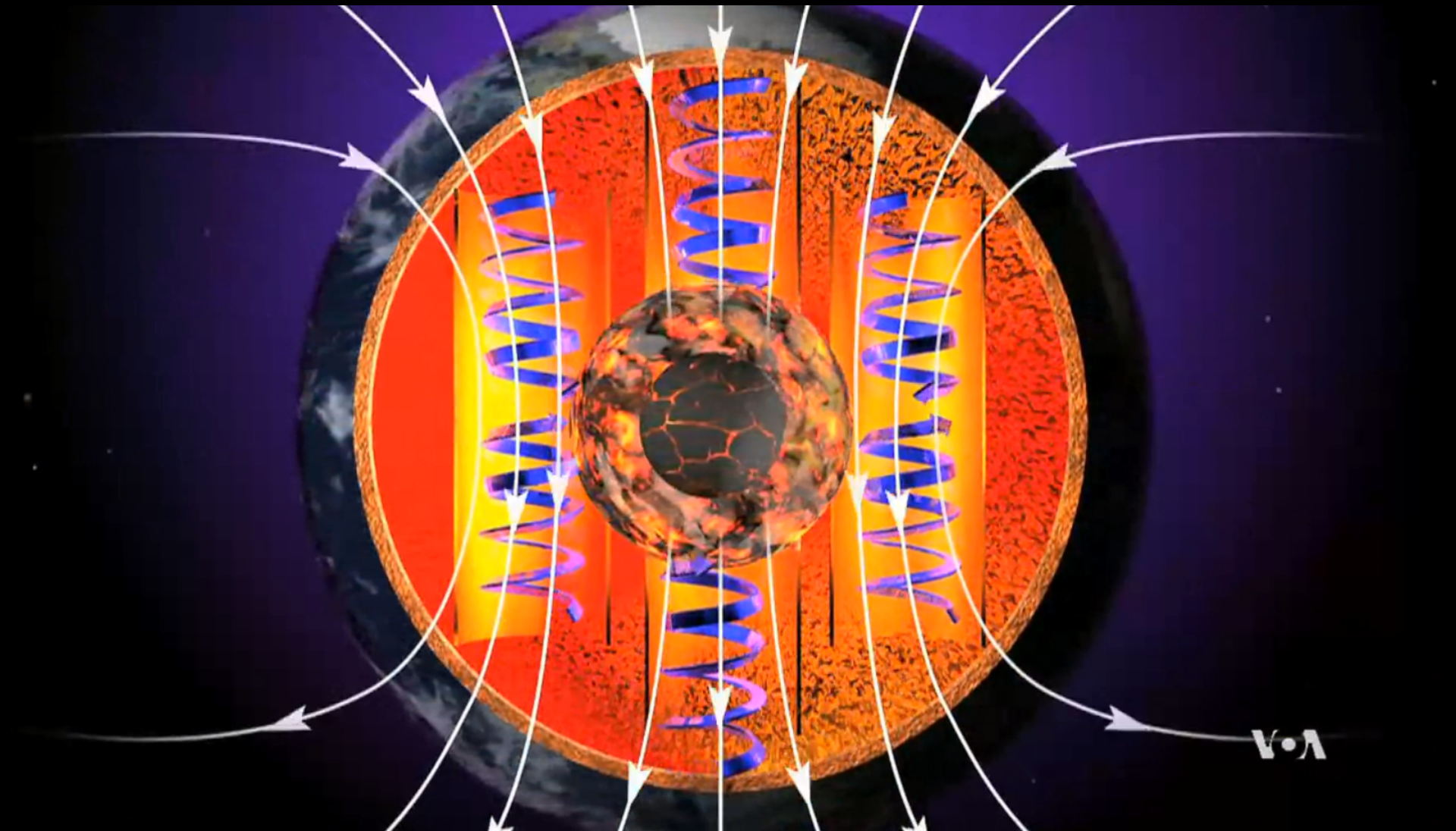


- 
- Grønne eller brun-røde farver stammer fra oxygen

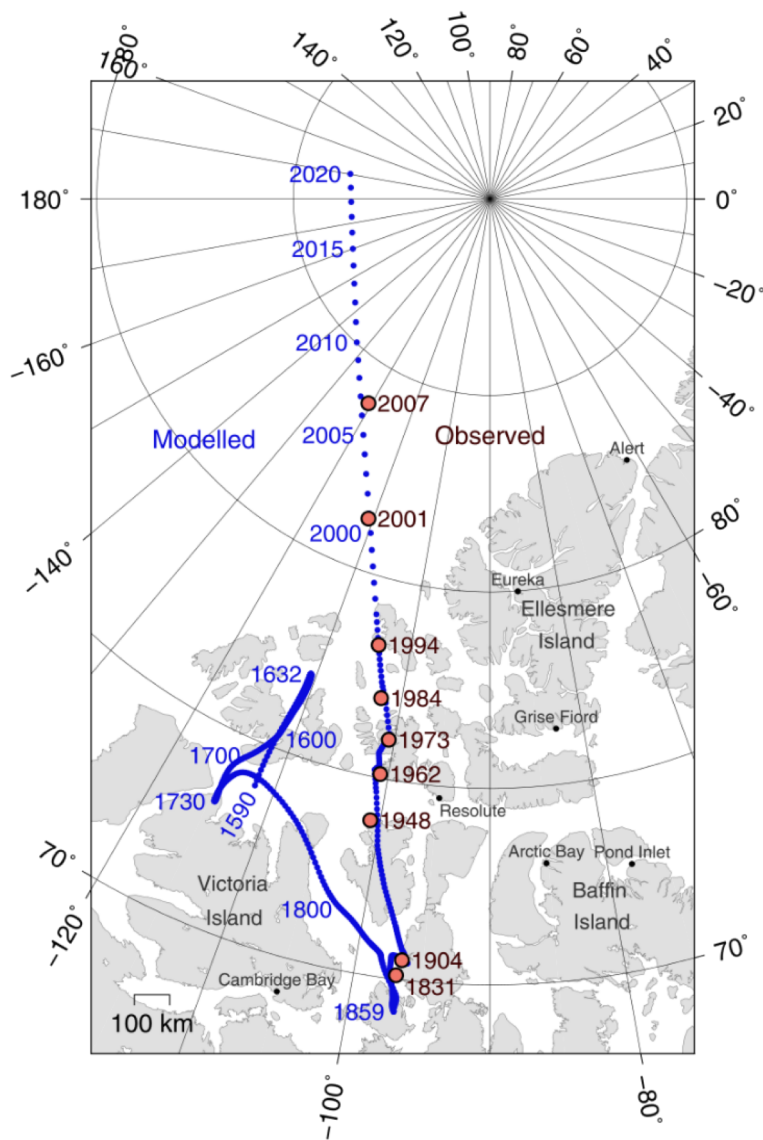


- Blålige farver stammer fra nitrogen

# Jordens magnetfelt stammer fra jernkernen



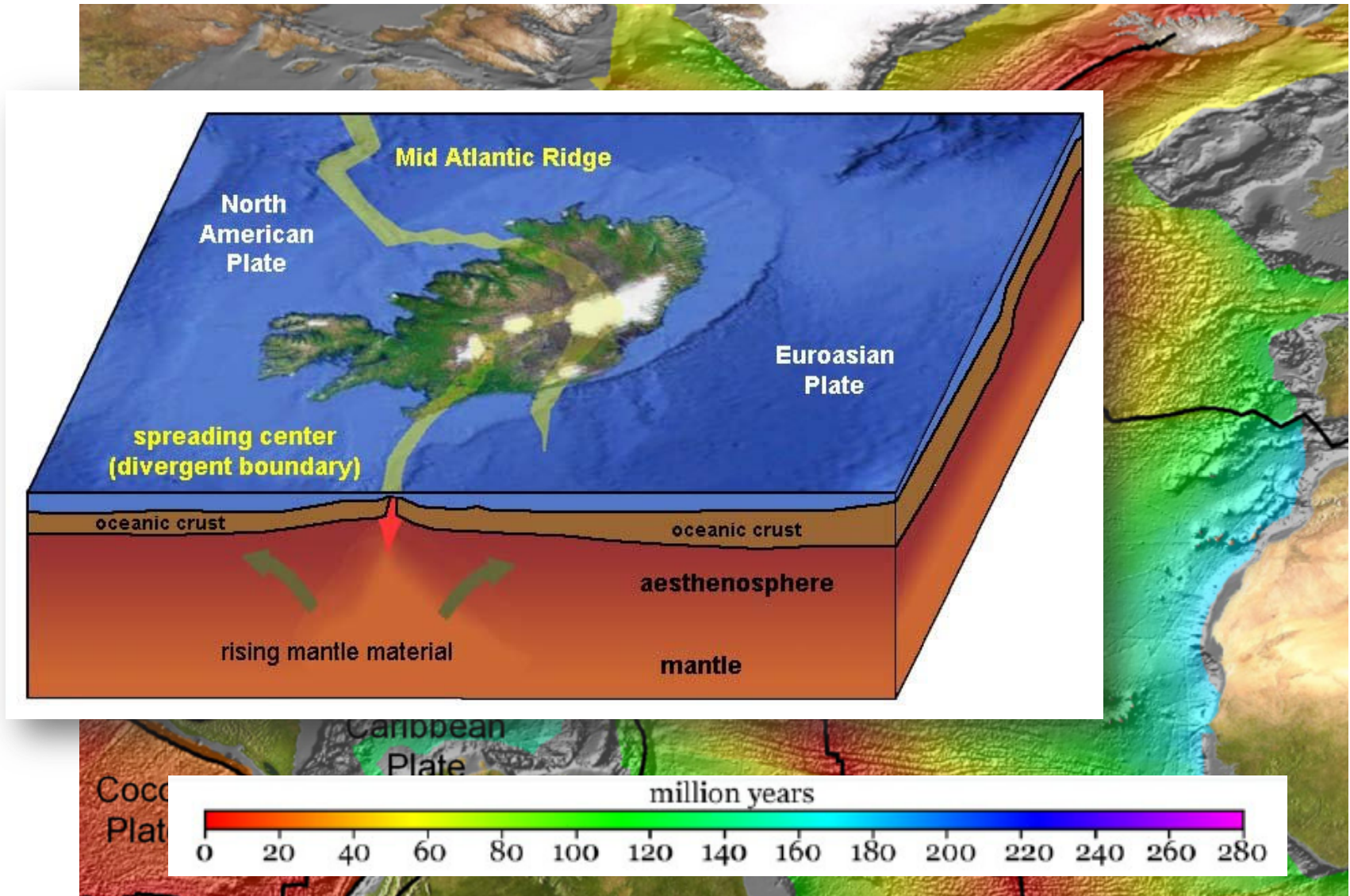
# Den magnetiske pol flytter sig



- Bevæger sig ca. 50 km mod Sibirien om året
- Polerne har byttet plads mange gange i Jordens historie.
  - Uregelmæssige mellemrum

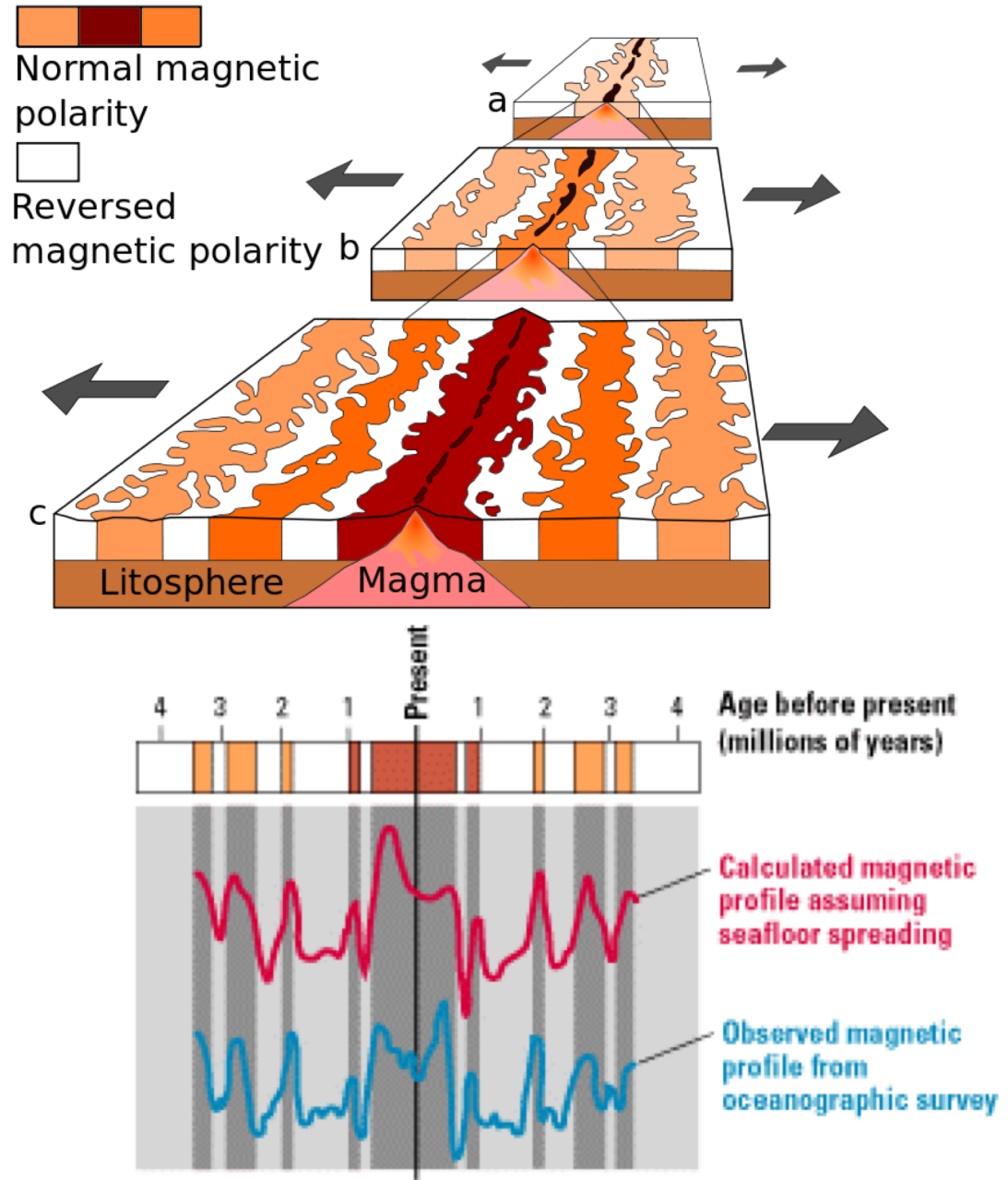


# Pladetektonik og magnetisme

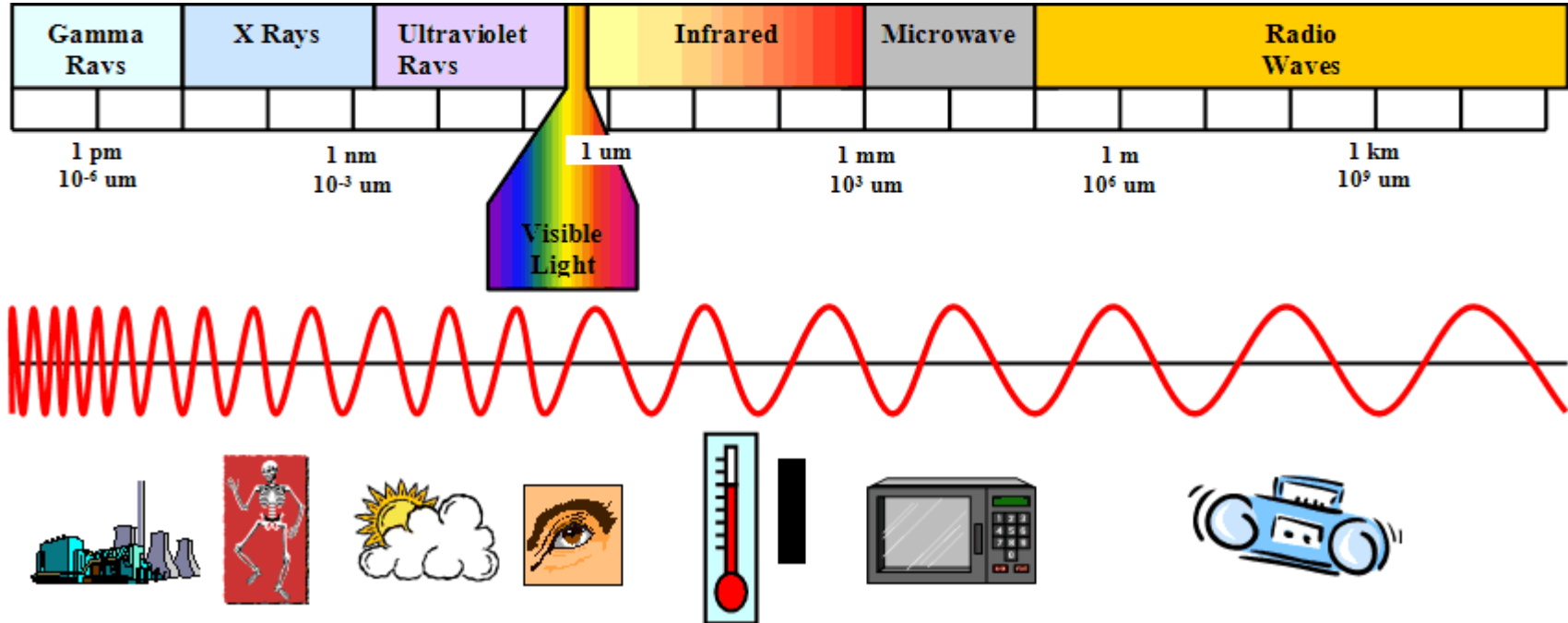


# Den magnetiske havbund

- Polvendingerne er registreret i havbundens magnetiske "båndoptager"



# Mange slags "lys"



- Det synlige lys udgør kun en meget lille del af det elektromagnetiske spektrum



# Infrarød stråling

- I 1801 målte William Herschel, at der er en varmekvælbending uden for det synlige, røde område af spektret





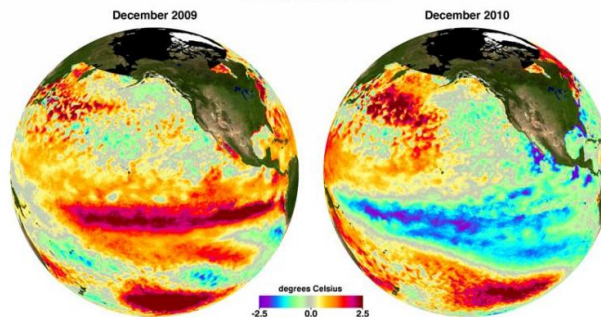
# Anvendelser af infrarød stråling

- Termografi



- Satellit-måling af havtemperaturer

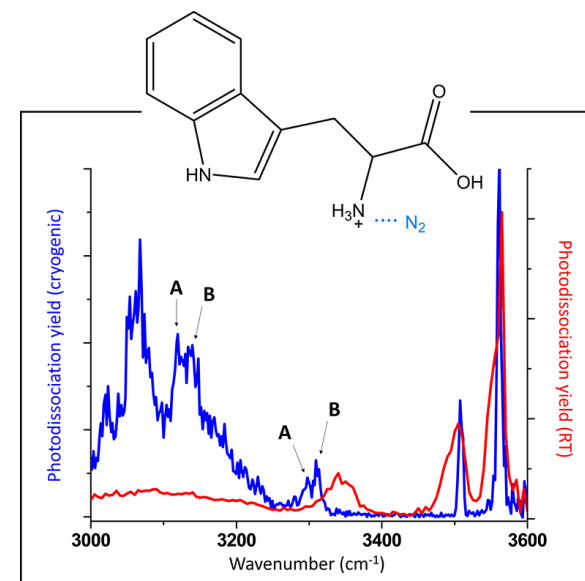
Monthly Averaged Sea Surface Temperature Relative to Normal  
Blended AMSR-E and MODIS SSTa



El Nino

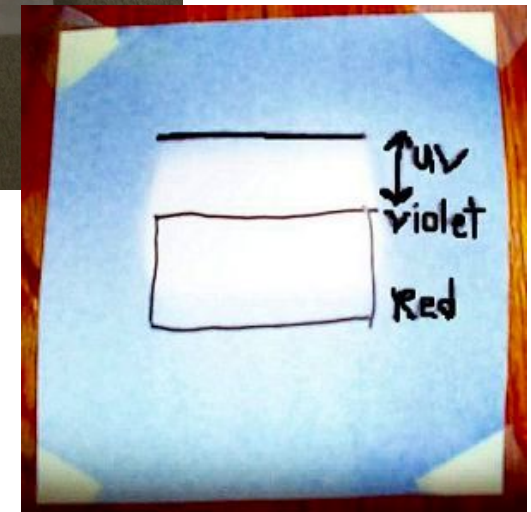
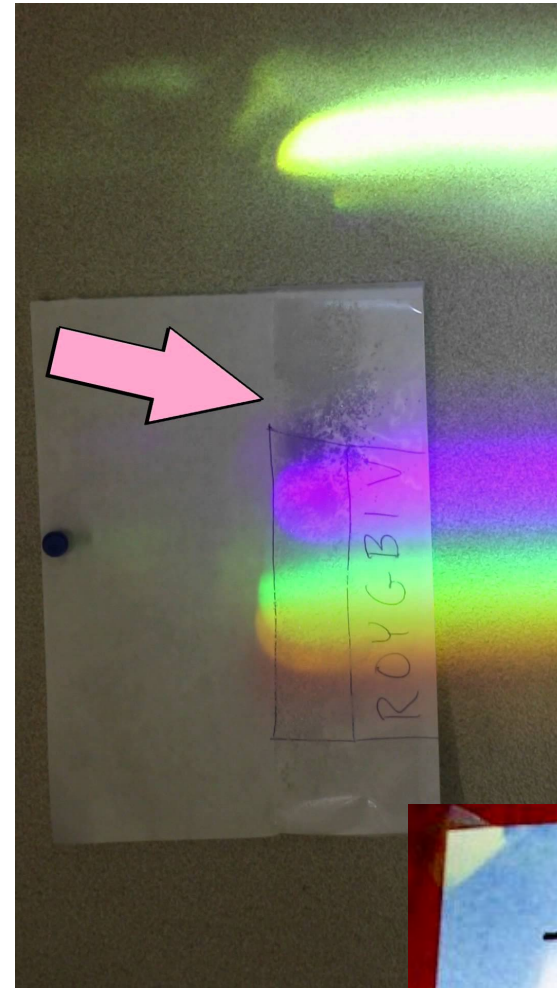
El Nina

- Spektroskopi af molekyler

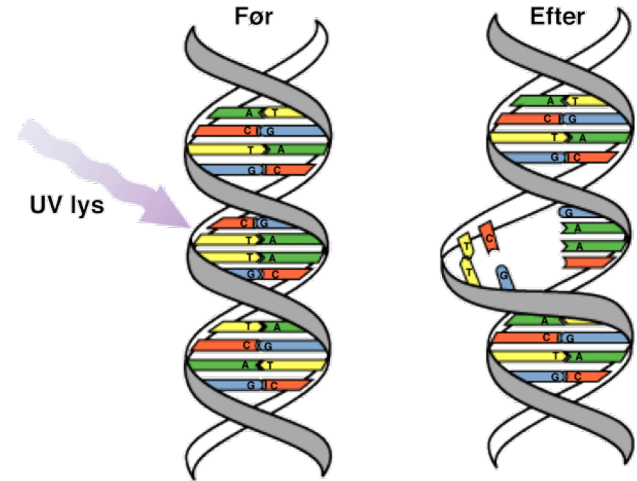
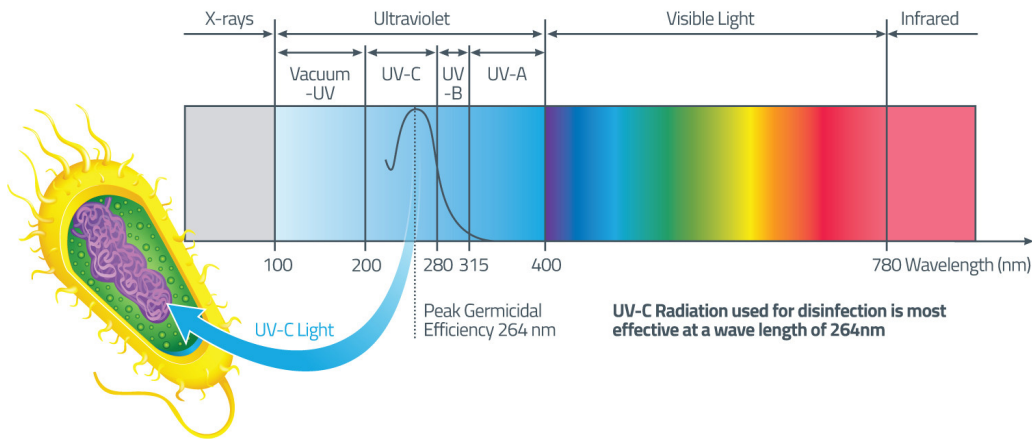


# Ultraviolet stråling

- I 1801 opdagede Johann Wilhelm Ritter, at der uden for det violette område af spektret var nogle stråler, som kunne sværte papir med sølvklorid
  - Kan laves med blåtryk-papir



# Ultraviolet stråling

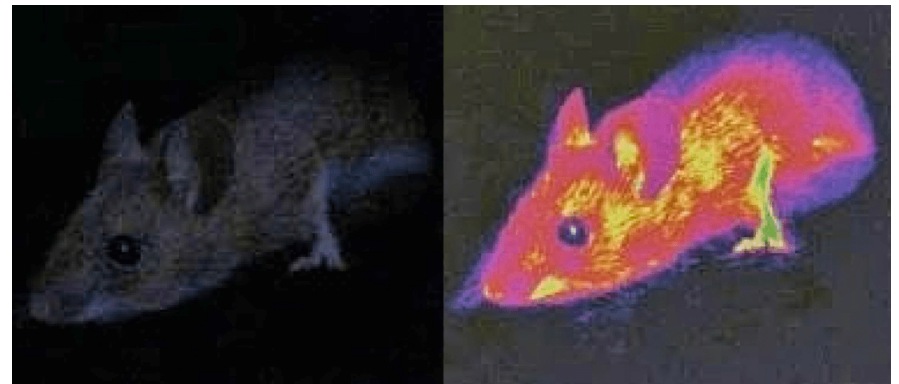
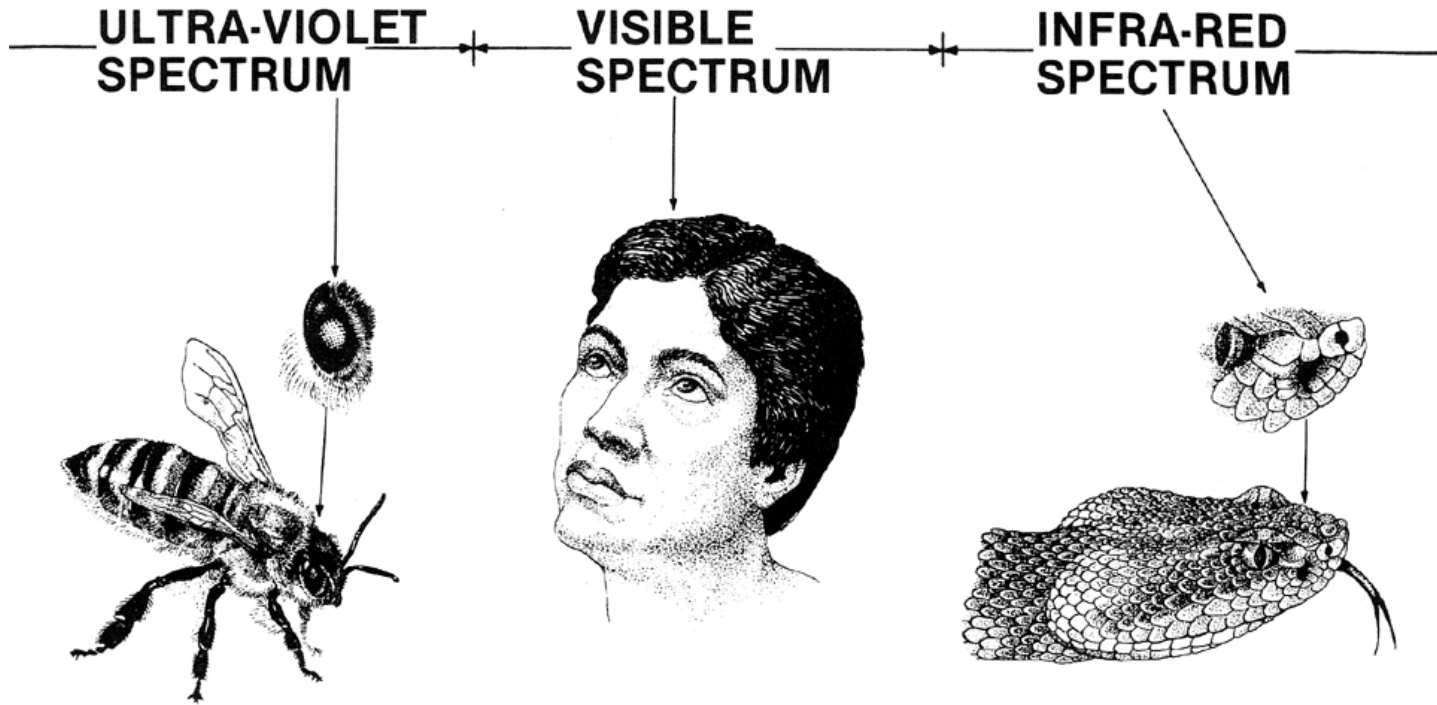


- UV-stråling er så energirig, at den kan bryde kemiske bindinger



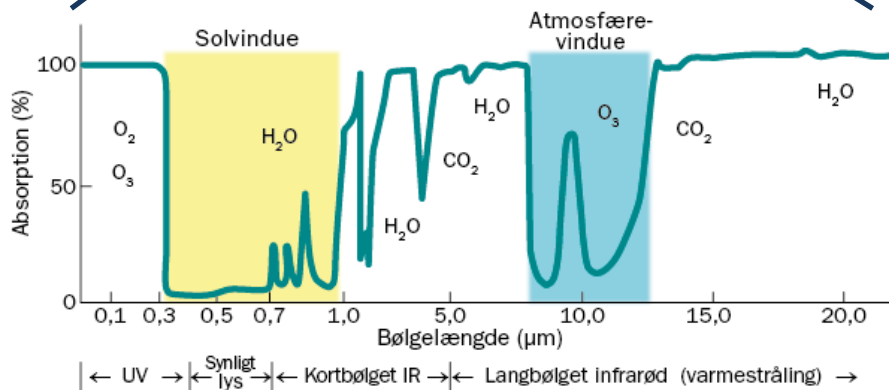
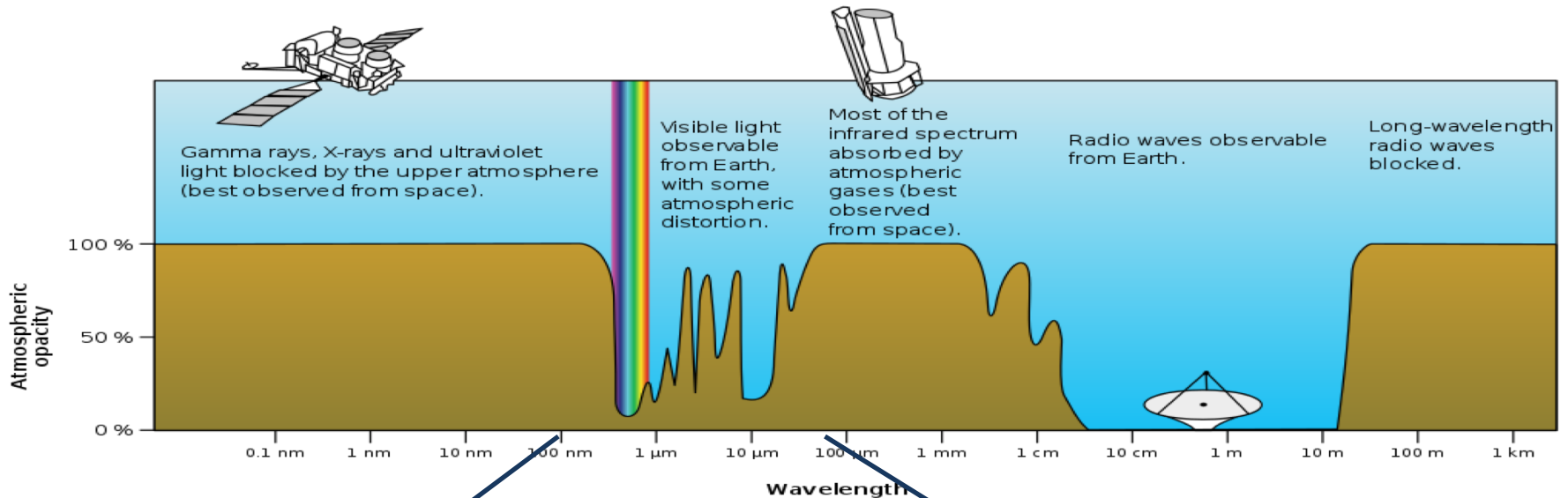


# Om at se i forskellige bølgelængder



# Atmosfærens absorptionsspektrum

- Ved hvilke bølgelængder er der hul i atmosfæren?



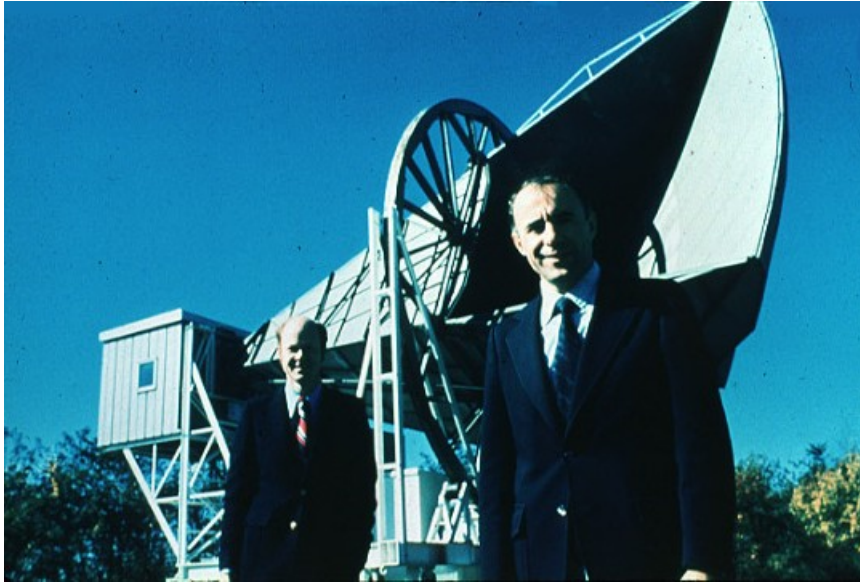
- Hvordan har det påvirket evolutionen?

# Andromeda-galaksen i et nyt lys





# Den kosmiske baggrundsstråling

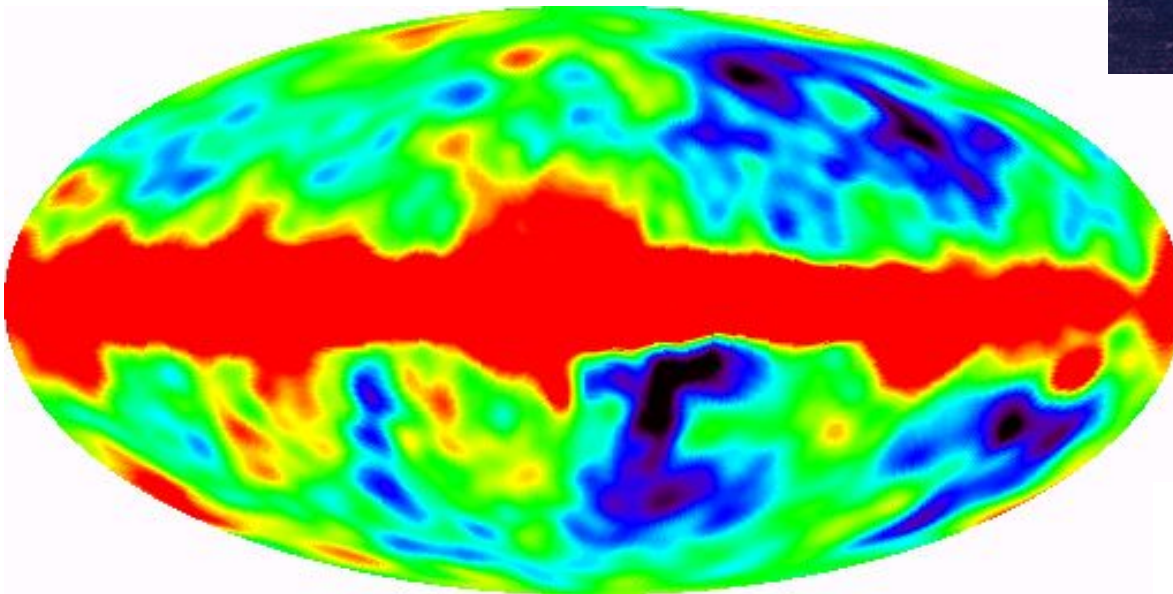


- Opdaget af radioingeniørerne Penzias og Wilson i 1965
- Mikrobølger, ca. 3K
- Næsten ens i alle retninger
- "Eftergløden" fra Big Bang
- Nobelpris 1978



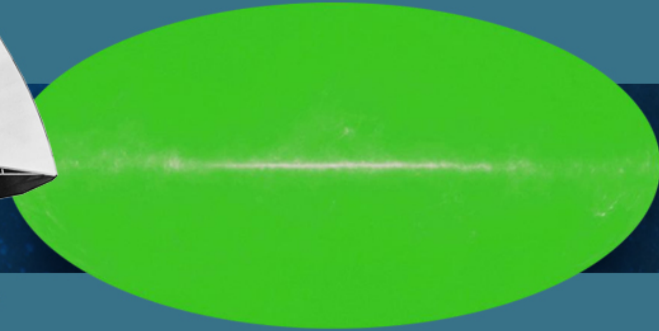
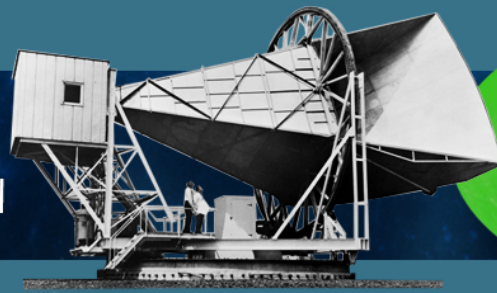
# Den kosmiske baggrundsstråling

- 1992: Første måling af anisotropi i strålingen af den amerikanske COBE satellit
- Nobelpris 2006

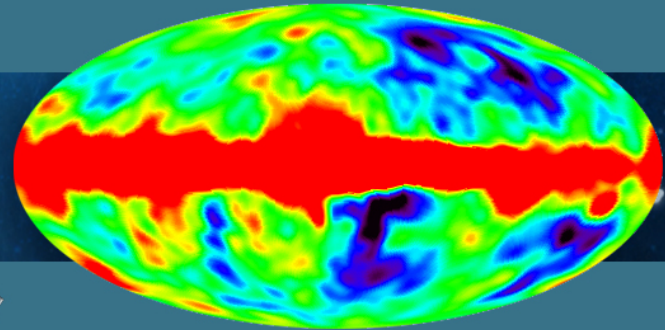


$$(\delta T \approx 30 \mu K)$$

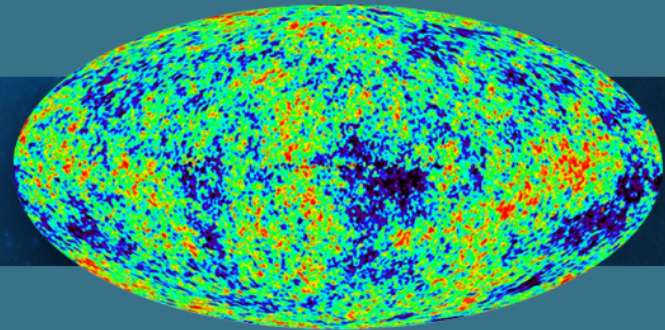
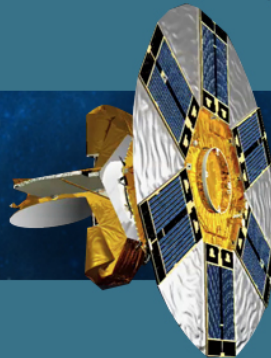
1962  
PENZIAS & WILSON



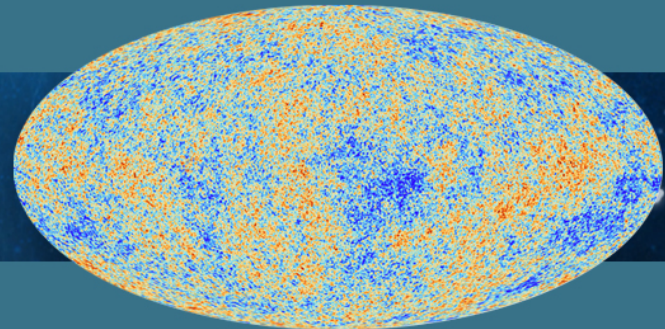
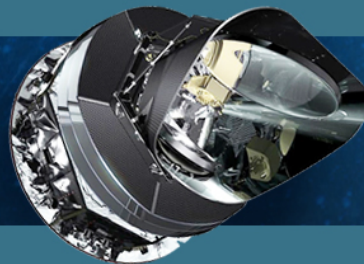
1989-1993  
COBE



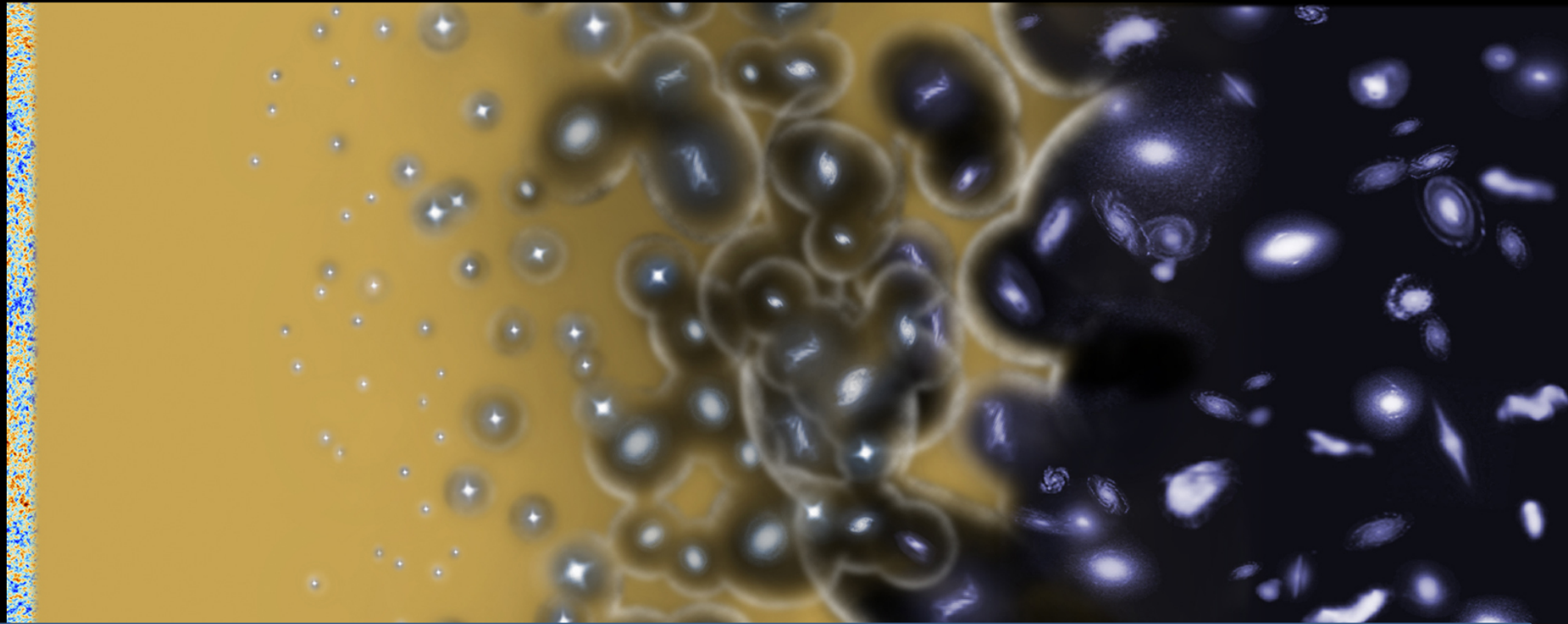
2001-2010  
WMAP



2009-2013  
PLANK





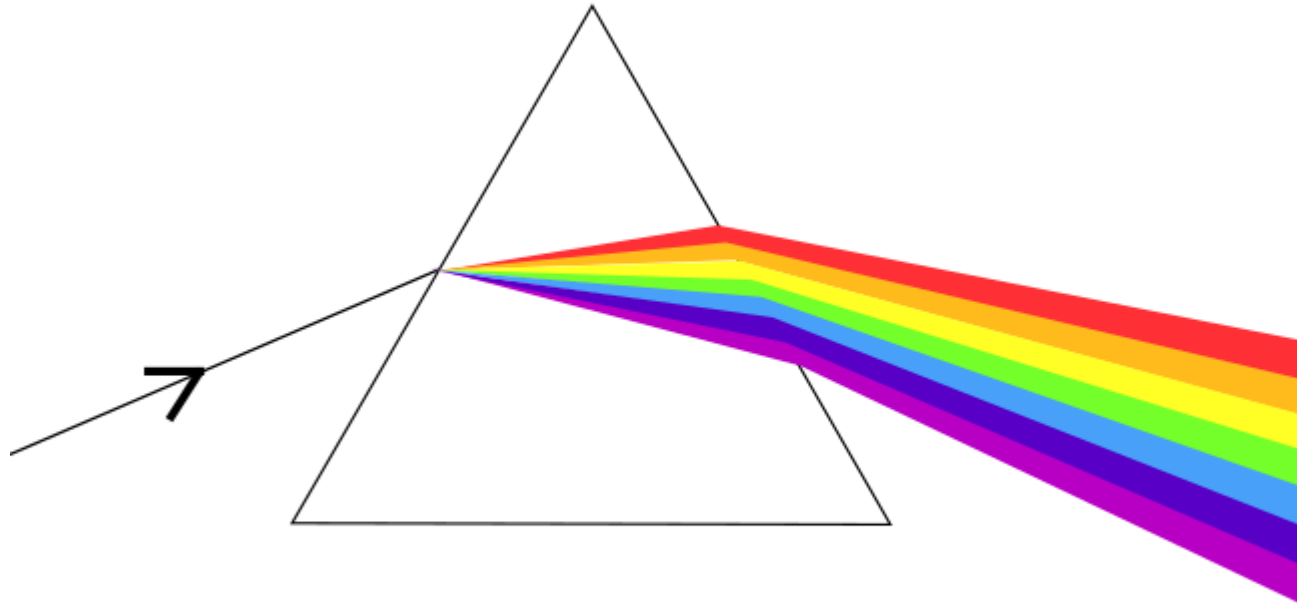


BB

MM

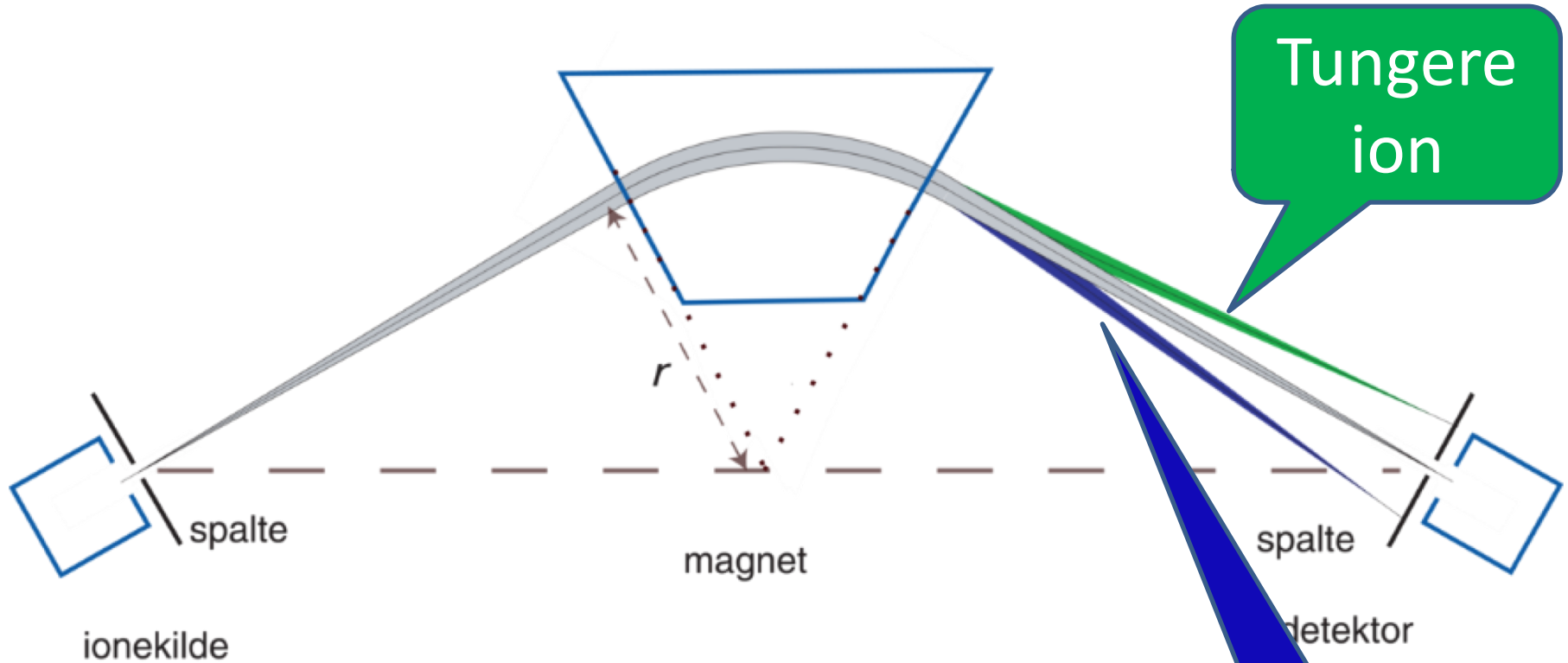
- Målingerne fra Planck-satellitten fortæller os om massefordelingen i det tidligere univers – og dermed om vores forhistorie

# Massespektroskopi



- Lys kan sorteres med et prisme

# Massespektroskopi



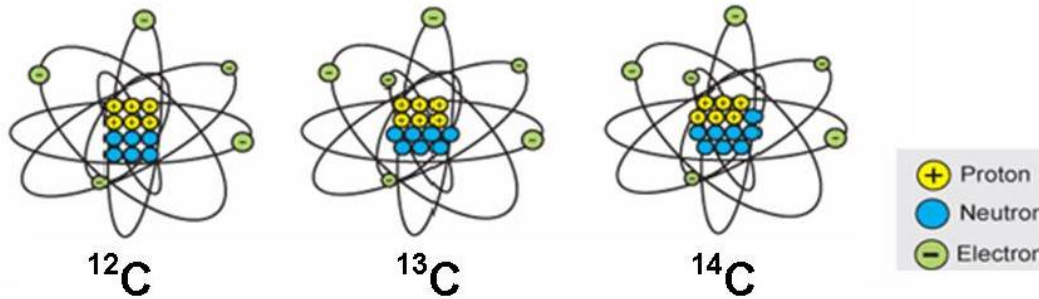
- Lys kan sorteres med et prisme
- Ioner kan sorteres med et magnetfelt

Tungere  
ion

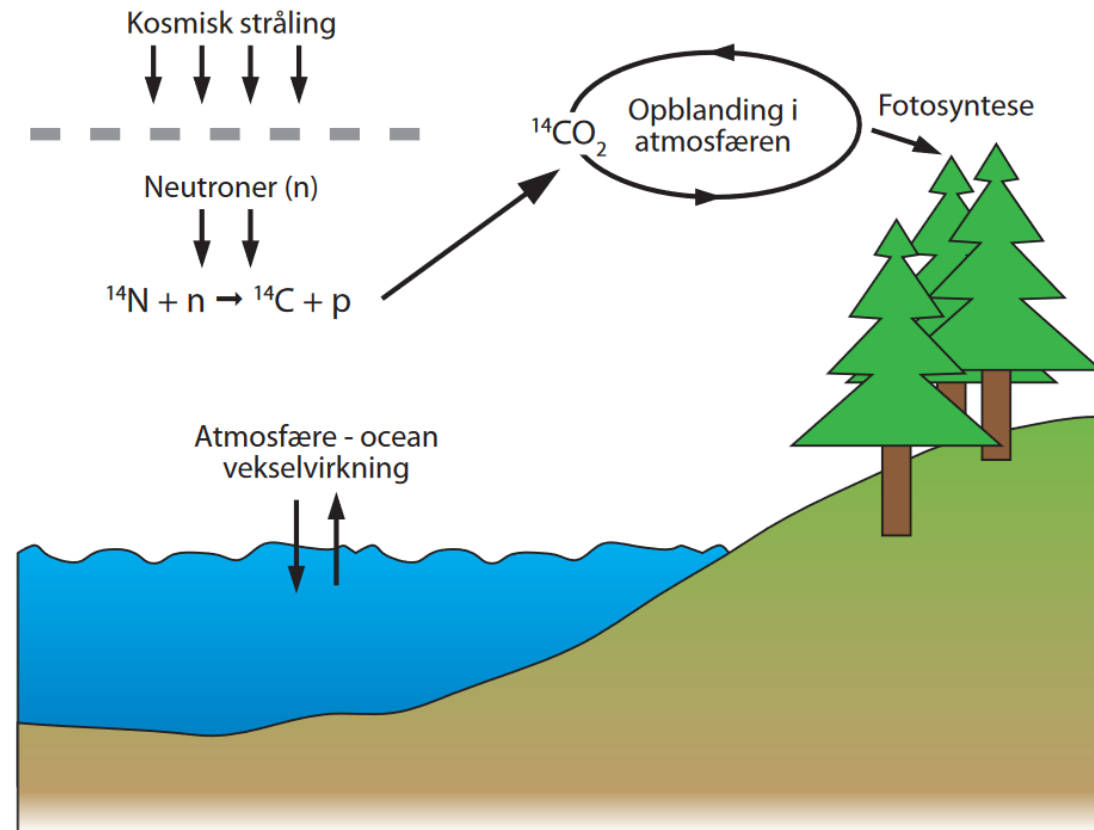
Lettere  
ion



# Kulstof 14-datering

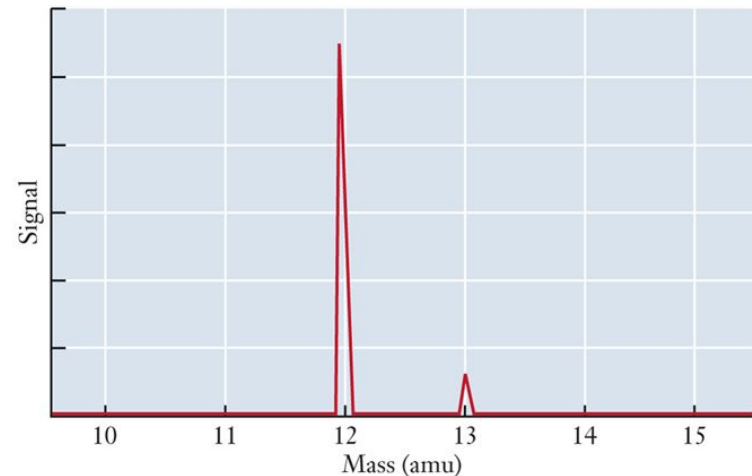
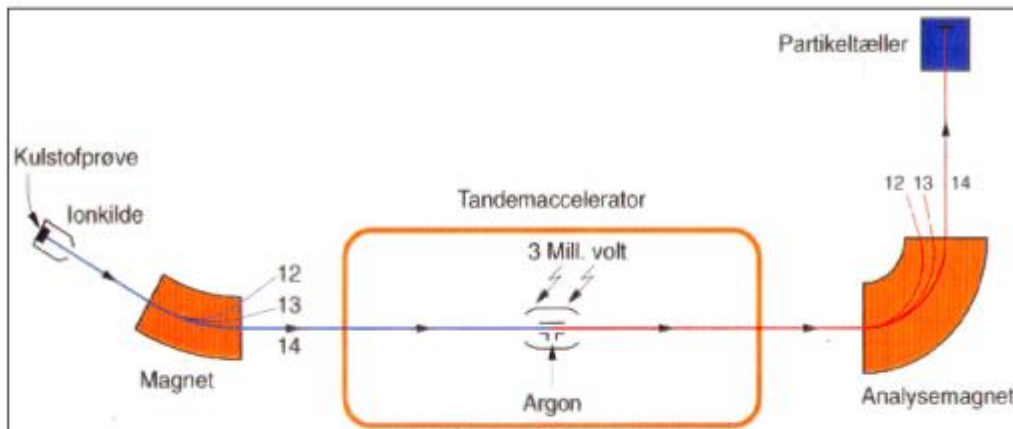
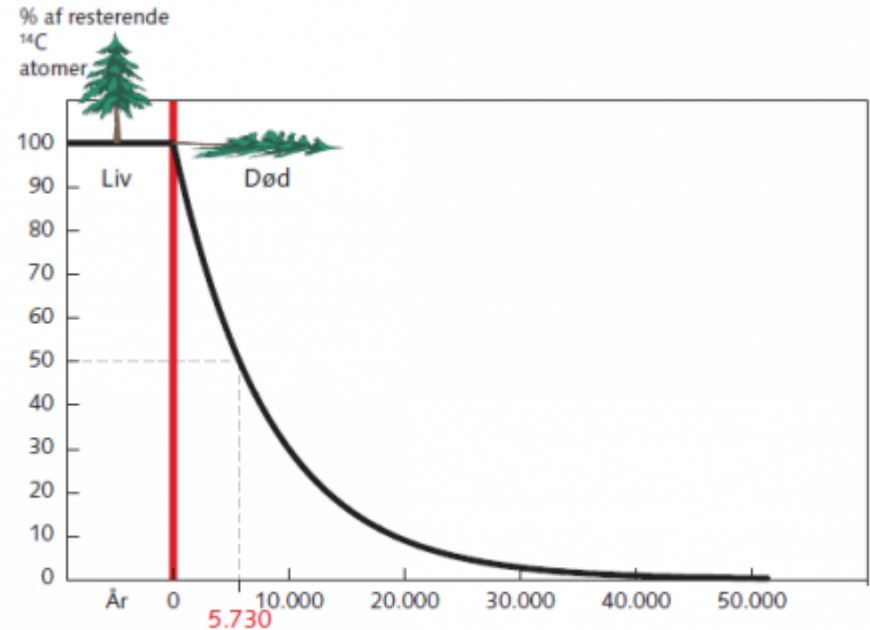


- Kulstof findes i forskellige udgaver (isotoper)
- Kulstof 14 er radioaktiv
  - $T_{1/2} = 5.730$  år
  - Dannes i atmosfæren

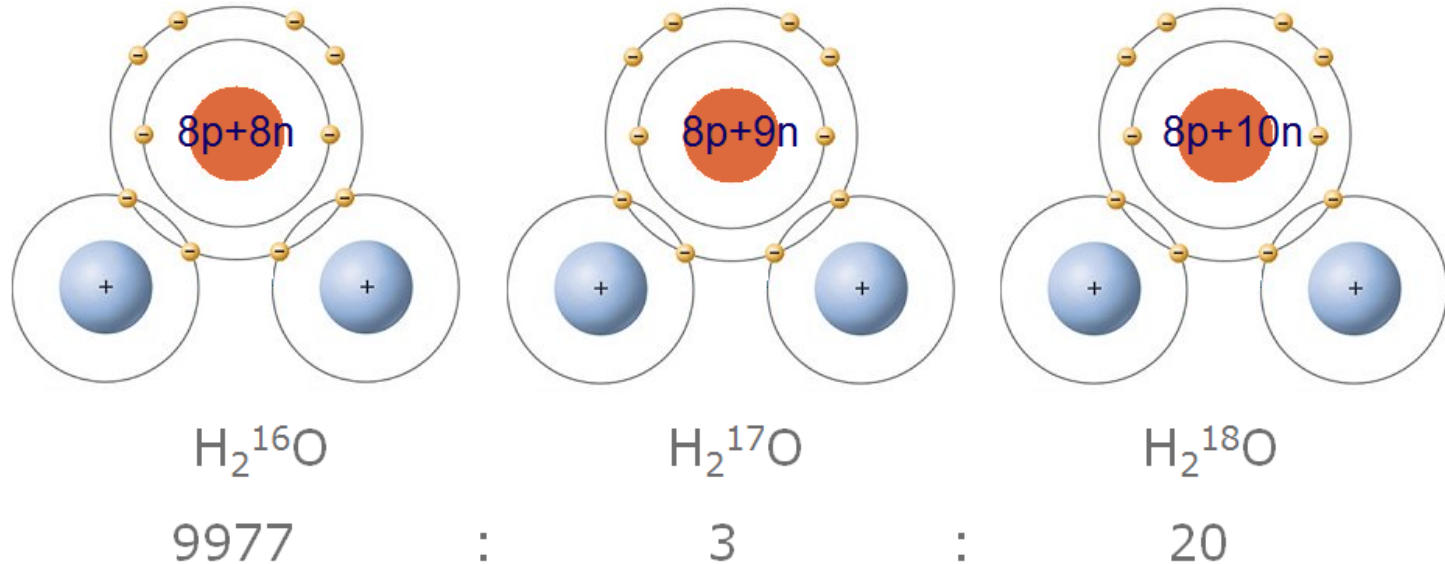


# Kulstof 14-datering

- Når organismen dør, falder mængden af kulstof 14
- Dette kan måles og bruges til datering

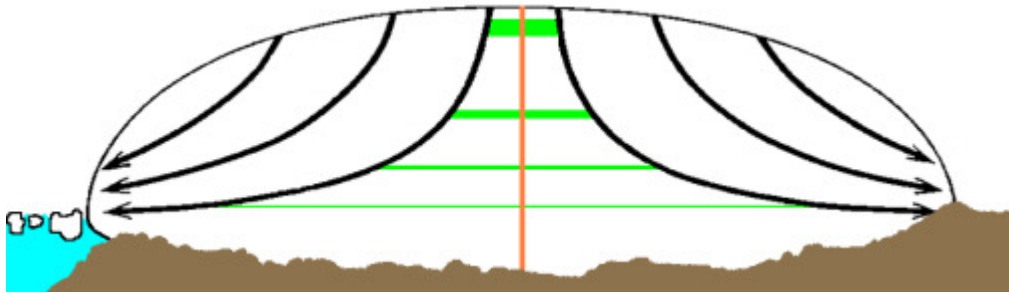
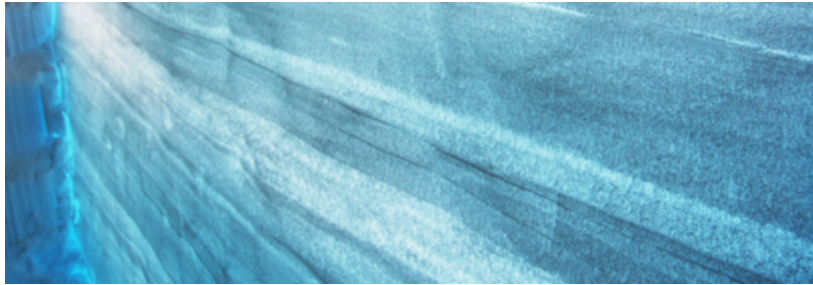


# Måling af temperatur (i fortiden)

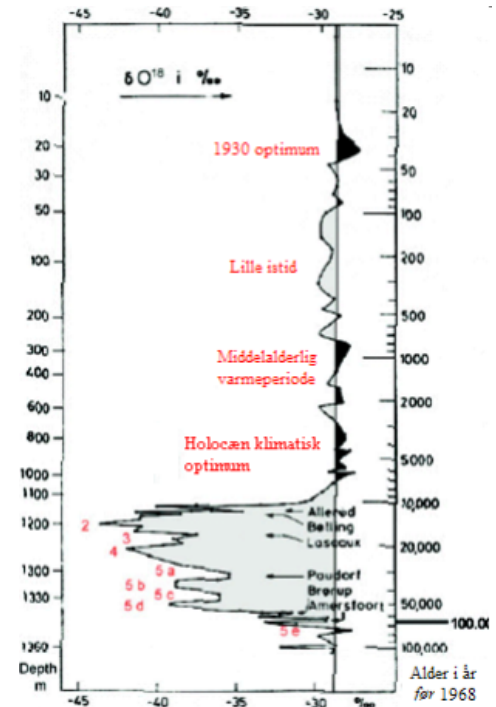


- Ilten i vand findes også i forskellige vægtudgaver
- Vandets fordampning eller fortætning afhænger af massen
- Jo mindre  $^{18}O$  der er i regn og sne i forhold til  $^{16}O$ , desto koldere har klimaet været.

# Måling af temperatur m. iskerner



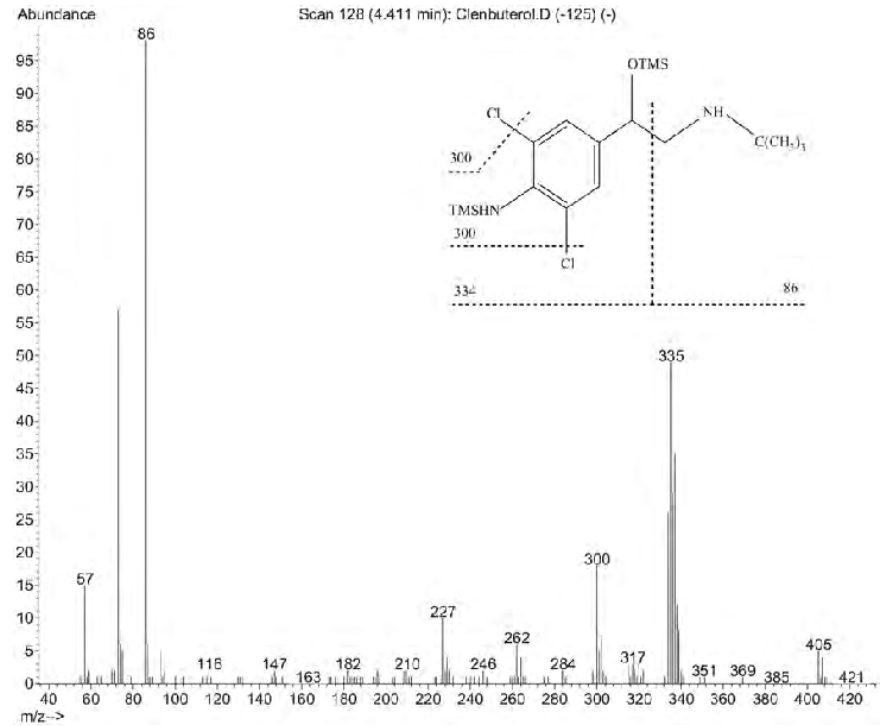
- Ved at måle mængden af  $^{18}\text{O}$  i de forskellige lag, får man et mål for temperaturen da sneen faldt





# Dopingkontrol

Hvordan finder man  
0,00000000005 gram doping?



# Fra big bang til moderne menneske

## Eksempler på viden fra spektroskopiske teknikker

Big Bang og universets udvidelse	Rødforskydning Måling af mikrobølgespektrum
Stjerner opbygning og grundstofindhold	Studier af spektrallinjer
Galaksers og exoplaneters bevægelse	Dopplerforskydning af spektre
Nordlys. Jordens magnetfelt og indre opbygning.	Optisk spektroskopi Massespektroskopi
Klimaforandringer	Datering og isotopmålinger med massespektroskopi
Evolution af forskellige arters syn	Om at se med forskellige bølgelængder
Det moderne menneske kan analysere og syntetisere	Spektrofotometri Massespektroskopi