

Knud Erik Sørensen

Spektralanalyse

Horsens **A**stronomiske **F**orening

2. september 2012

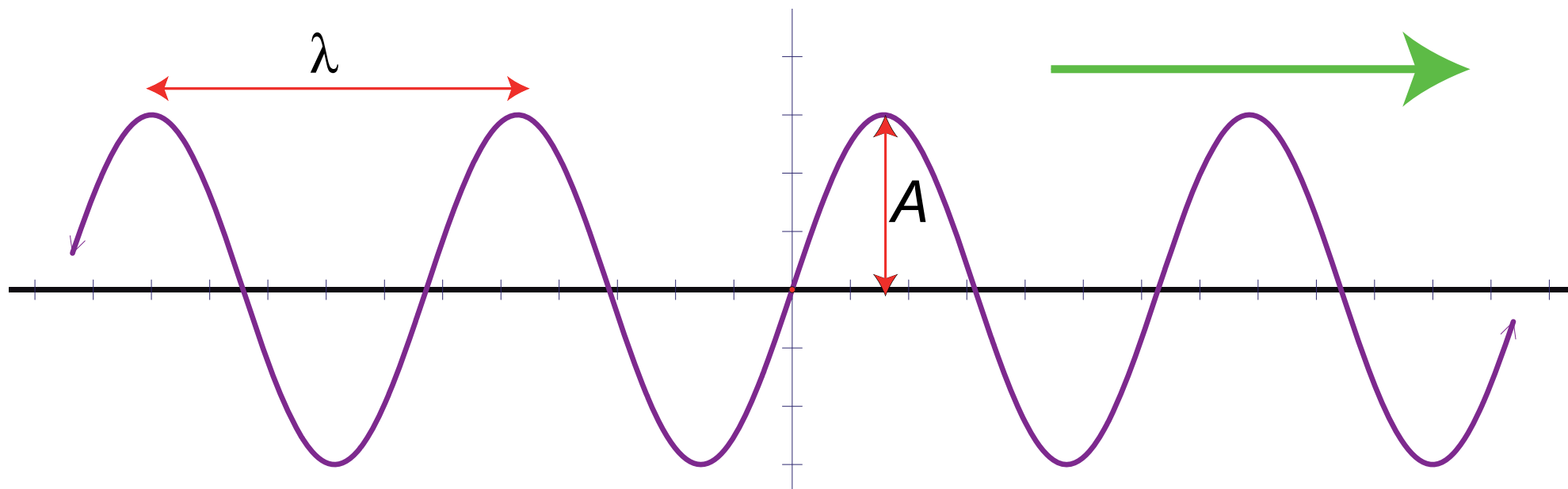


Lys: Bølger - eller partikel?

Bølgelængde λ
= længden af en cyklus

Amplitude A
= bølgens højde over
"hvilepositionen"

Hastighed v
= bølgens fart



Frekvens f =
antal bølgetoppe, der pas-
serer i hvert sekund

Længere bølgelængde betyder

- lavere frekvens
- mindre energi i fotonen

$$v = \lambda \cdot f$$

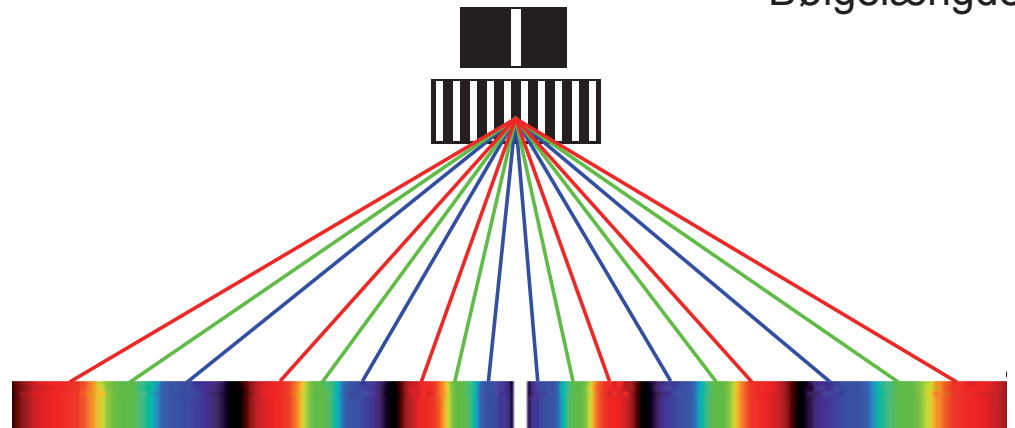
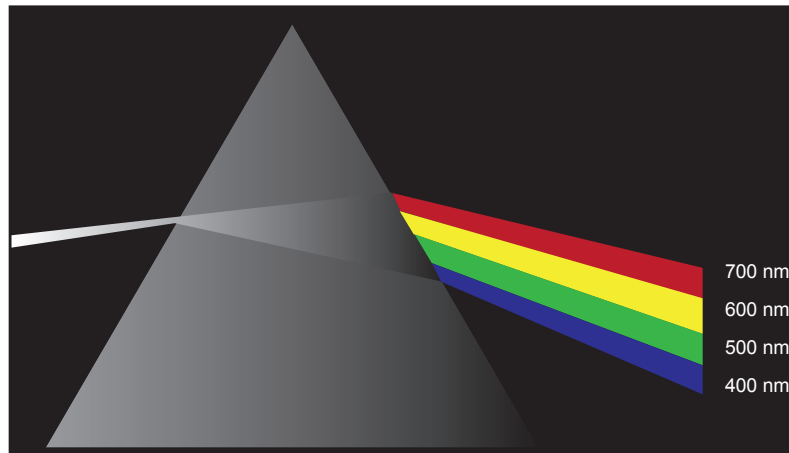
$$E = h \cdot f$$

Synligt lys og andre bølgelængder

- Lys er blot en af mange slags EMR: *elektromagnetisk stråling*

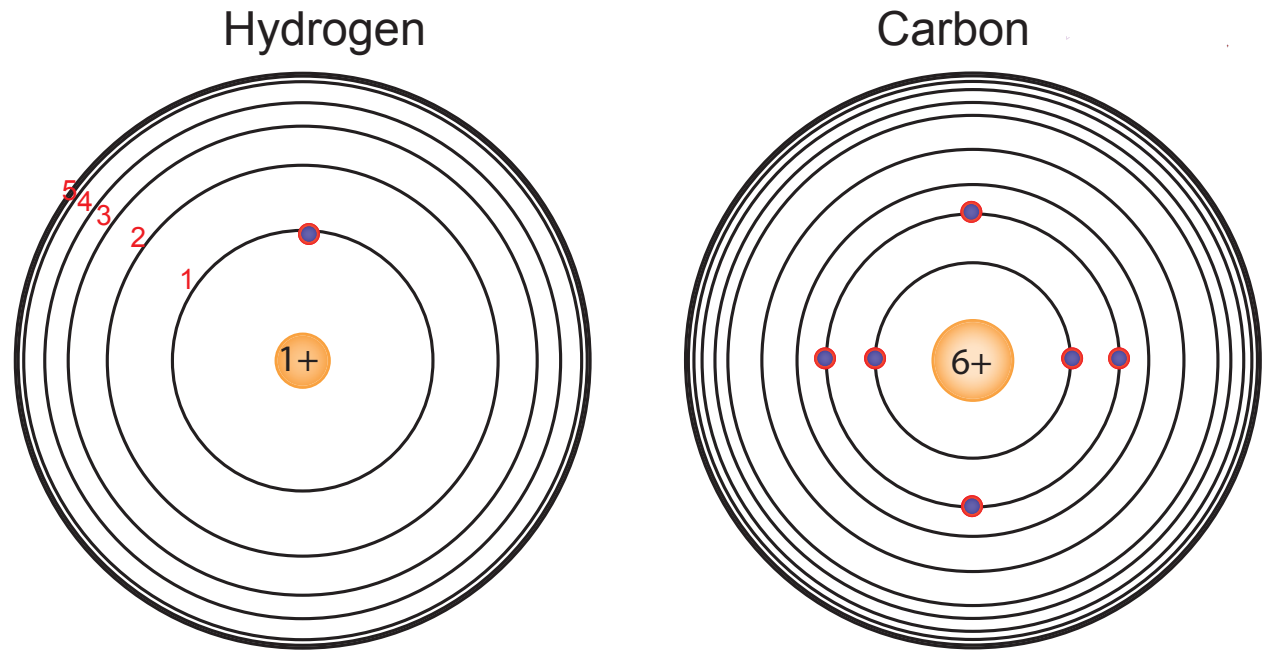


Frekvens, Fotonenergi



Atomers opbygning

- Atomnummer = antal protoner i kernen = antal elektroner i skaller omkring kernen.
- Skallerne repræsenterer energiniveauer – og disse niveauer er forskellige fra atom til atom.



Elektromagnetisk stråling

- EMR fremkommer, når ladninger accelererer – og derved mister energi
- EMR fremkommer også, når elektroner hopper fra et højere til et lavere energiniveau i atomer.
- Herved fremkommer et **diskret** spektrum.

Emission og absorption

Absorption

Hvis en elektron tilføres den rette energi, kan den bevæge sig fra et niveau til et højere niveau.

Atomet **absorberer** energi.

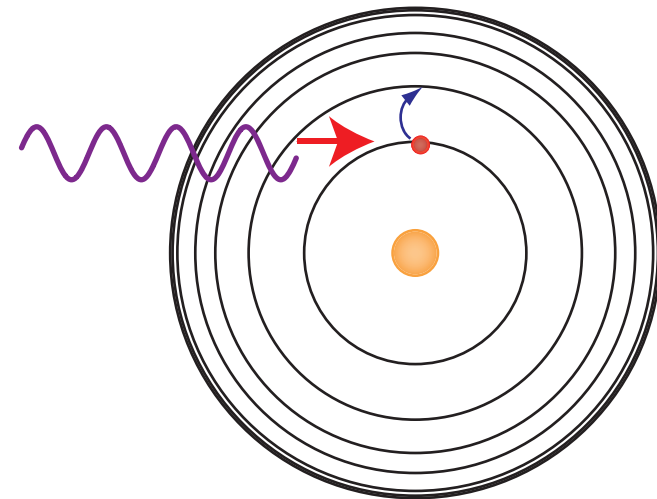
Emission

Hvis der er et hul i et lavere energiniveau, kan elektronen udsende energi i form af stråling og hoppe til det lavere niveau.

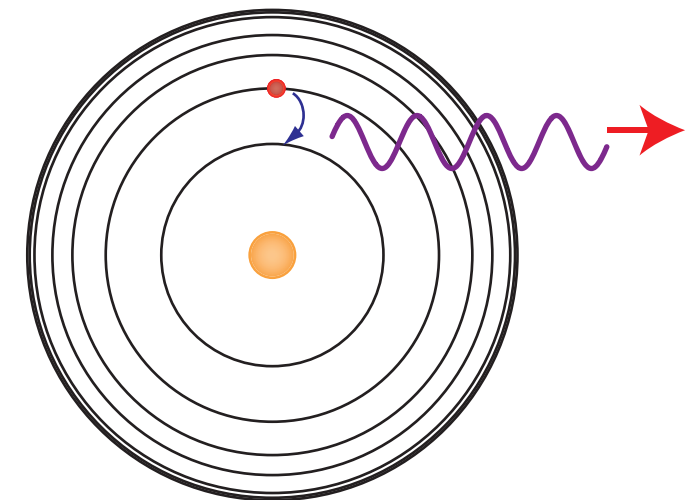
Atomet **emitterer** energi.

Hydrogen

Absorption



Emission

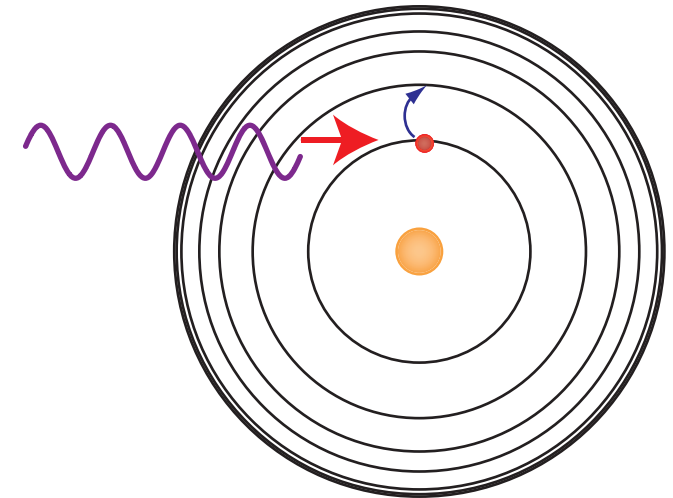


Elektronovergange - ioniseringer

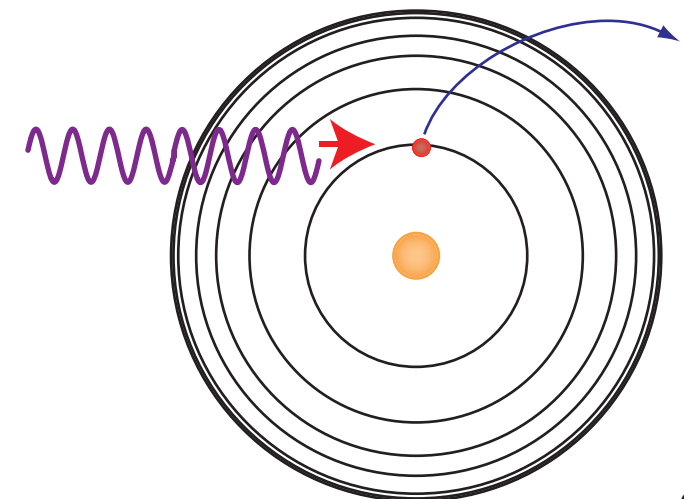
- Kun hvis fotonens energi netop er den nødvendige til et hop, sker absorptionen.
- Ved ionisering kan alle fotonenergier absorberes.
- Den nødvendige fotonenergi er bestemt af, hvilket skalnummer elektronen befinder sig i. Jo tættere en elektron befinder sig på kernen – altså jo lavere skalnummeret er – jo større energi skal der tilføres.

Hydrogen

Absorption

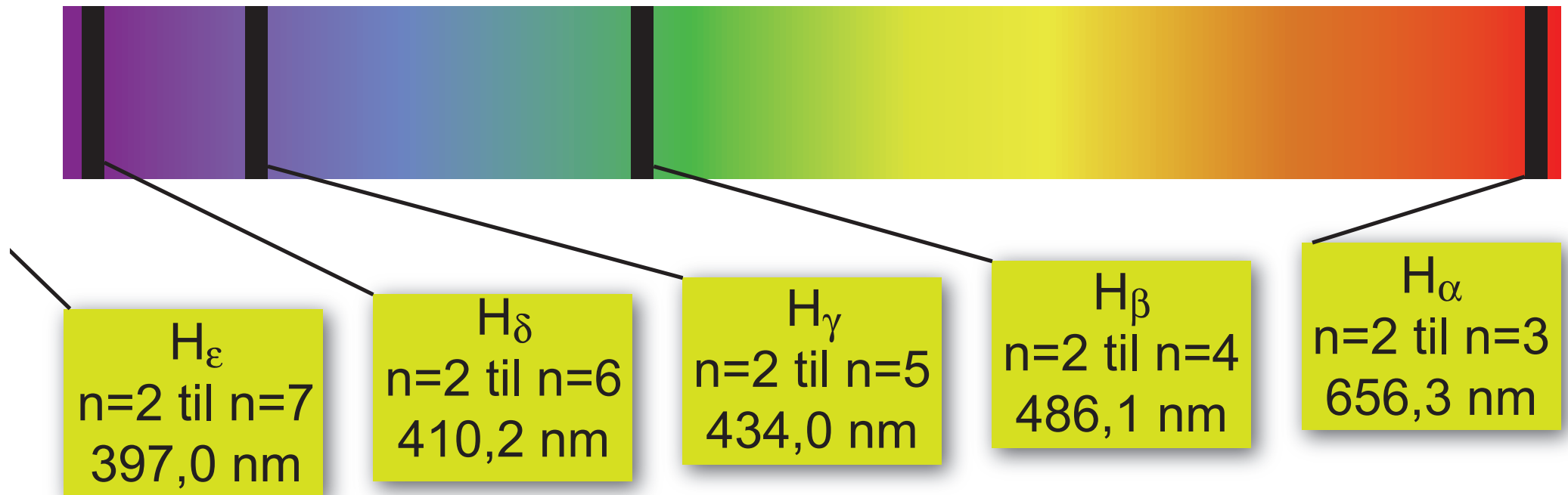


Ionisering



Balmer-serien – overgangene

Bølgelængderne og farverne for absorptionslinjerne i den synlige del af Balmer-serien, dvs. elektronerne absorberer lys og bevæger sig fra niveau 2 til et højere niveau.



... og et uendeligt antal af andre, som vi ikke kan se.

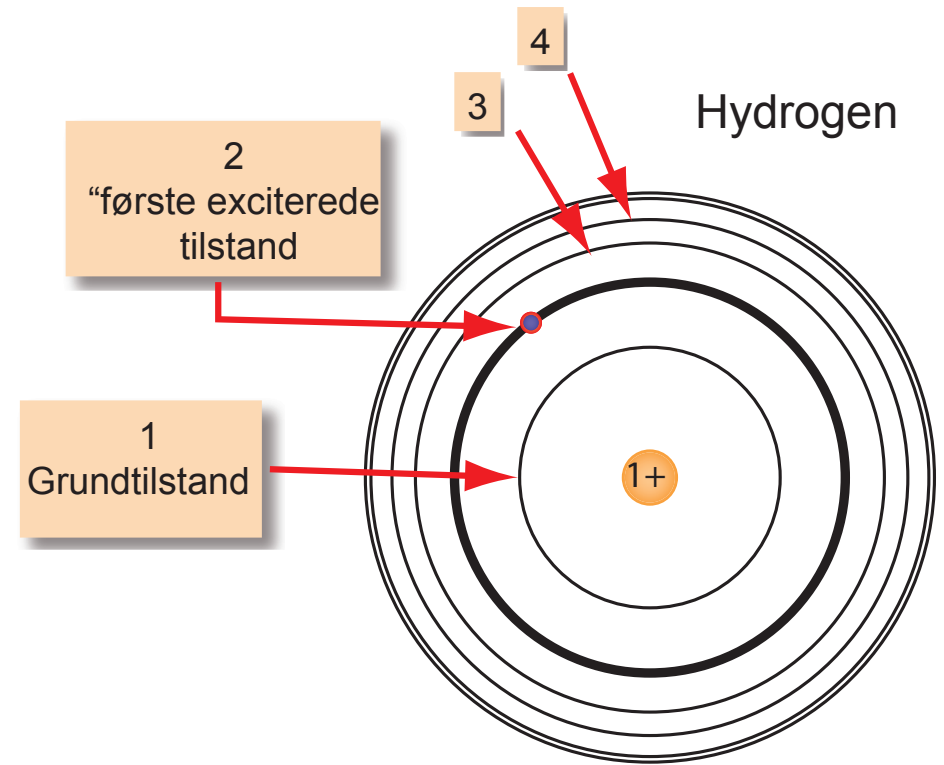
Temperaturen bestemmer

Sandsynligheden for et Balmer-henfald afhænger af temperaturen.

I en **kold** stjerne – under 7000 K – er de fleste elektroner i niveau 1 og ikke ret mange i niveau 2. Derfor er Balmer-linjerne svage i kolde stjerner.

Lyman-linjerne, der er hop til og fra niveau 1, vil være stærkere.

I en **varm** stjerne – f.eks. 20.000 K – vil Balmer-linjerne være markante.



Violette stjerner er generelt meget varme med svage Balmer-linjer

Blålige stjerner er generelt varme med de kraftigste Balmer-linjer

Gule stjerner er middelvarme med svage Balmer-linjer

Røde stjerner er kolde stjerner med meget svage Balmer-linjer

Andre overgange

Emission og absorption i Balmer-serien er blot én slags overgange mellem energiniveauer.

Emission og absorption forekommer i mange andre serier og i andre grundstoffer i stjerners fotosfærer.

I kolde stjerner kan der også være molekylforbindelser, der giver anledning til emission og absorption.

I dag kan man ud fra den relative styrke af overgangslinjer finde frem til en stjernes temperatur.

Balmer-
linjer

Neutrale
heliumlinjer

Ioniserede
calciumlinjer

ioniserede
jernlinjer

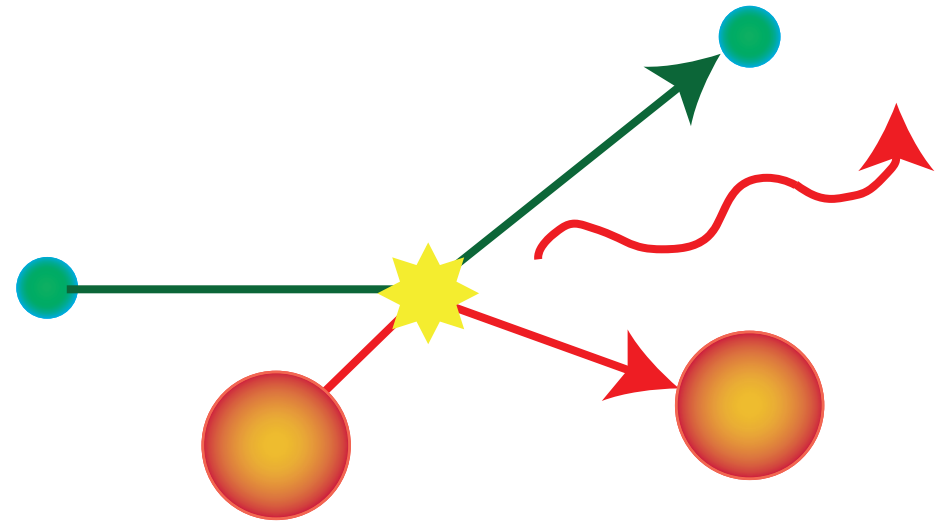
ioniserede
heliumlinjer

Titanium-
oxidlinjer

Kontinuerte spektre

- Ladninger kolliderer
- Ladninger accelereres

Elektron og atom kolliderer



Alle bølgelængder kan fremkomme

- Absolut sorte legemer - *forudsætning*
- Plancks strålingslov
- Stefan-Boltzmanns lov
- Wiens forskydningslov

Stefan-Boltzmanns lov

Loven siger, at et absolut sort legeme

- pr. kvadratmeter af dets overflade
- pr. sekund

udstråler en energi givet ved:

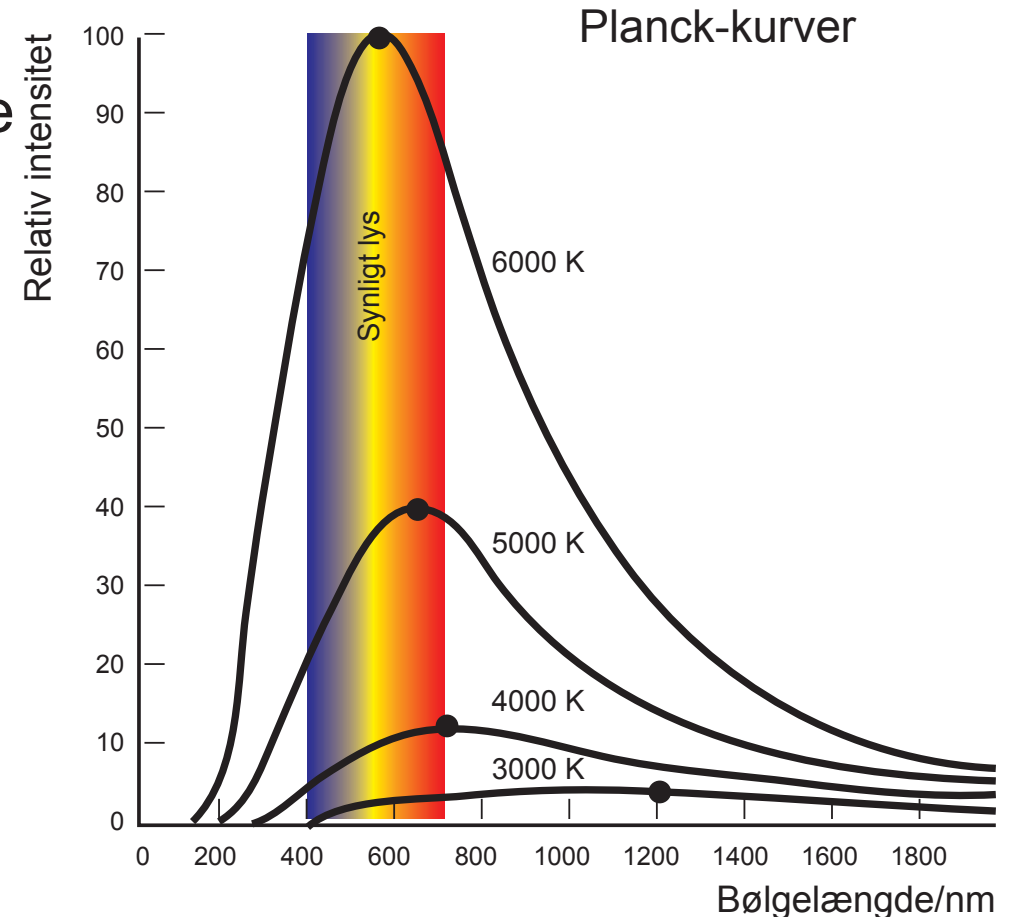
$$E = \text{konstant} \cdot T^4$$

Hvis to stjerner har samme størrelse, vil den varmeste være langt den mest lysende men en stor, kold stjerne kan udstråle mere energi end en lille varm stjerne.

Wiens Forskydningslov

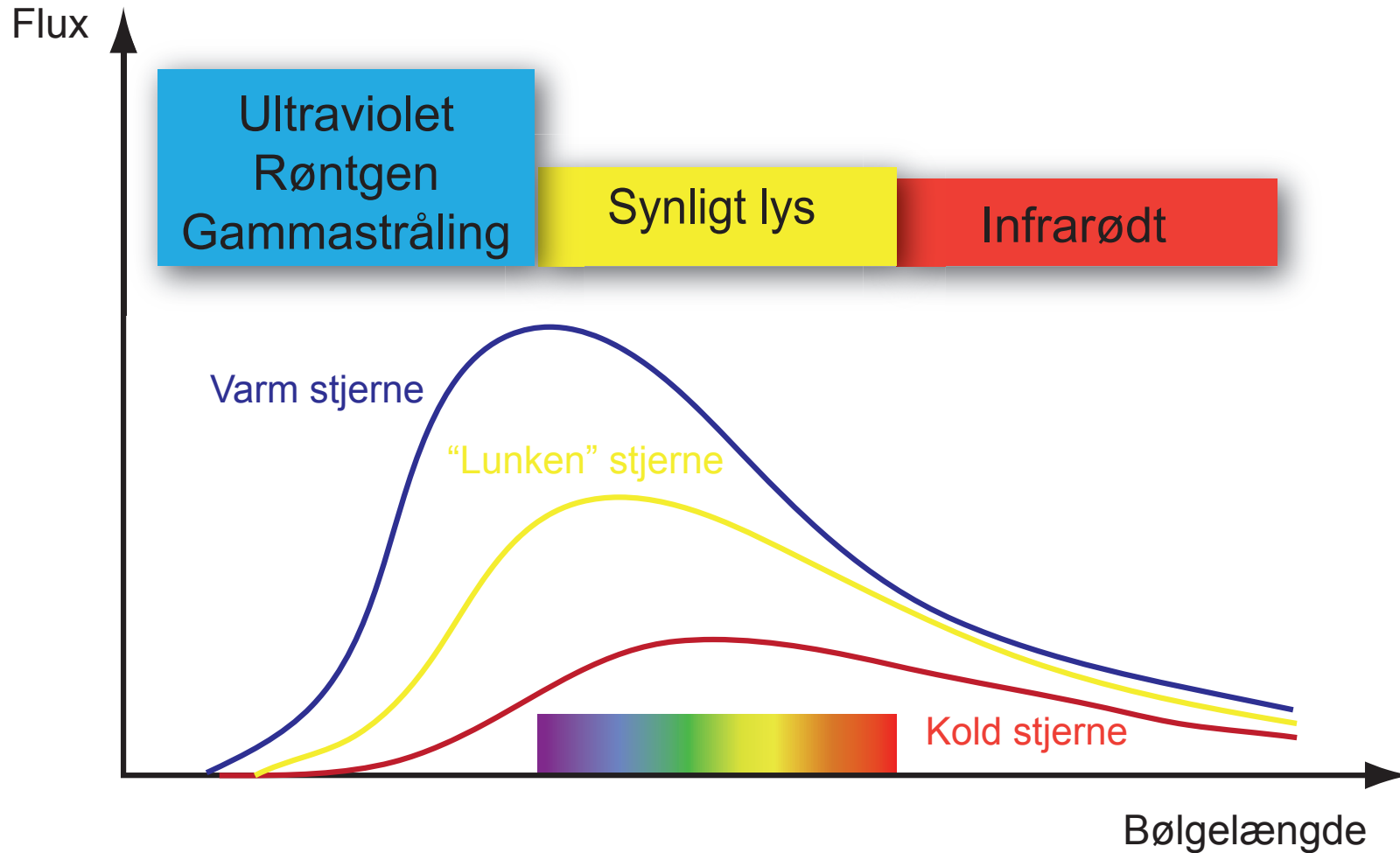
$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{konstant}$$

Varme stjerner udsender mest energi ved korte bølgelængder.



- Den totale energi, der udstråles, er proportional med arealet under grafen.
- Grafens top forskydes med venstre, når temperaturen stiger.

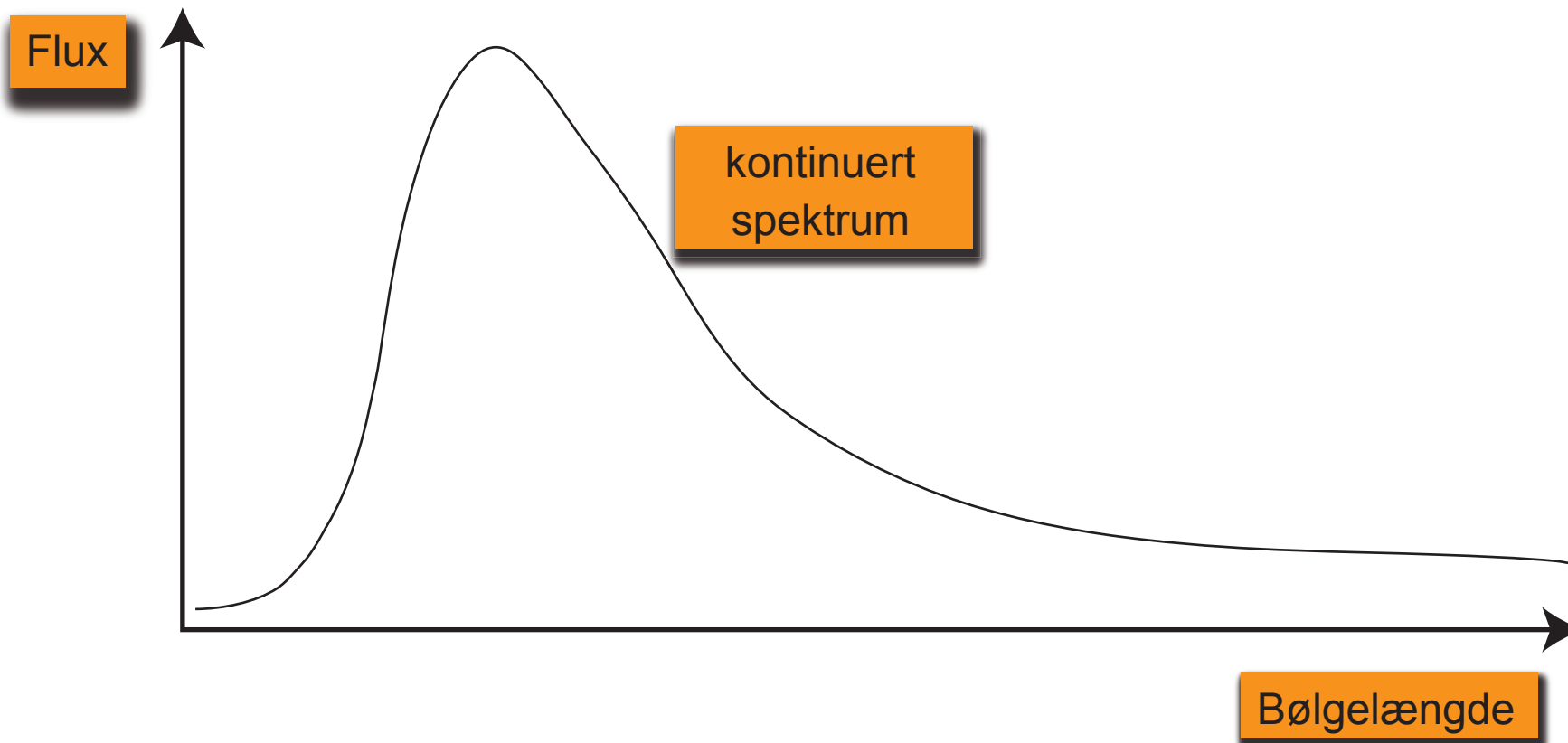
Stjerner farver



- Varme stjerner: Rigel, Sirius, Canopus
- “Lunkne” stjerner: Solen, Capella
- Kolde stjerner: Arcturus, Aldebaran, Antares, Betelgeuse

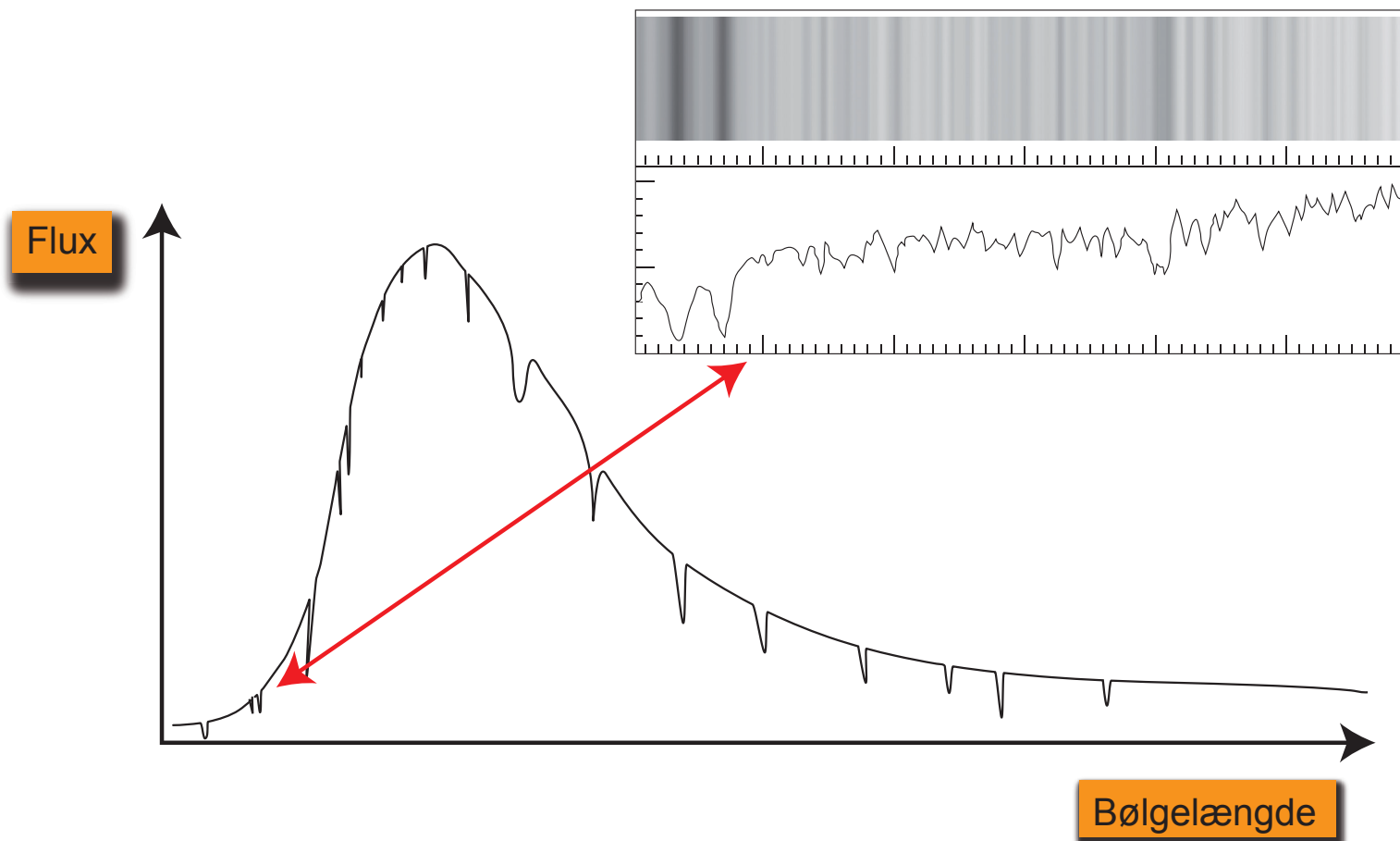
Tre slags spektre. 1: Kontinuert spektrum

Dette spektrum er et teoretisk spektrum, bestemt af Plancks strålingslov. Det er bakke-formet:



Tre slags spektre. 2: Absorptionsspektrum

Absorptionsspektret er et kontinuert spektrum, men med reduceret flux ved visse bølgelængder på grund af, at noget har absorberet disse bølgelængder mellem kilden og Jorden.



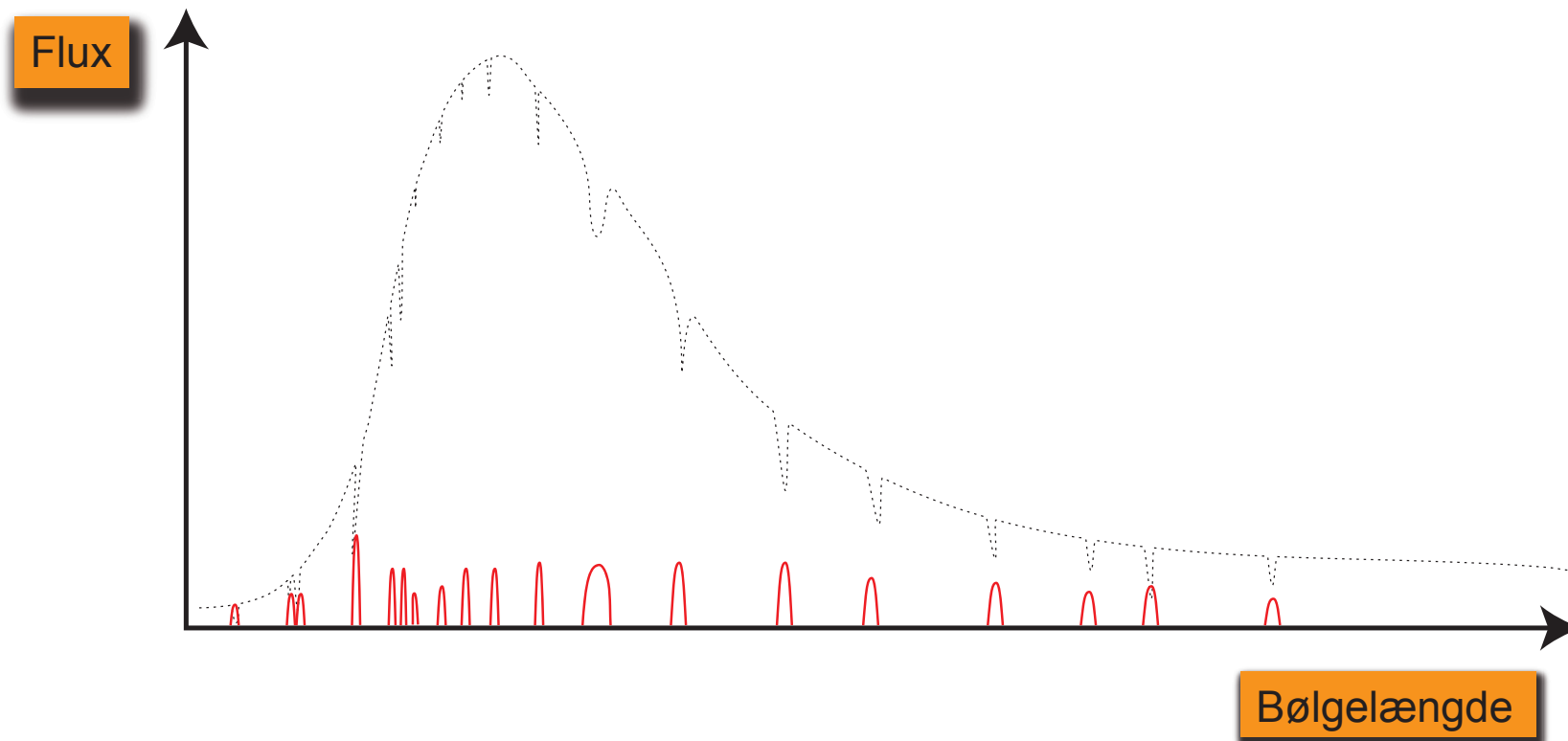
Absorptionen kan være sket i fotosfæren i den stjerne, som har emitteret lyset ... eller i en gassky mellem stjernen og Jorden.

Tre slags spektre. 3: Emissionsspektrum

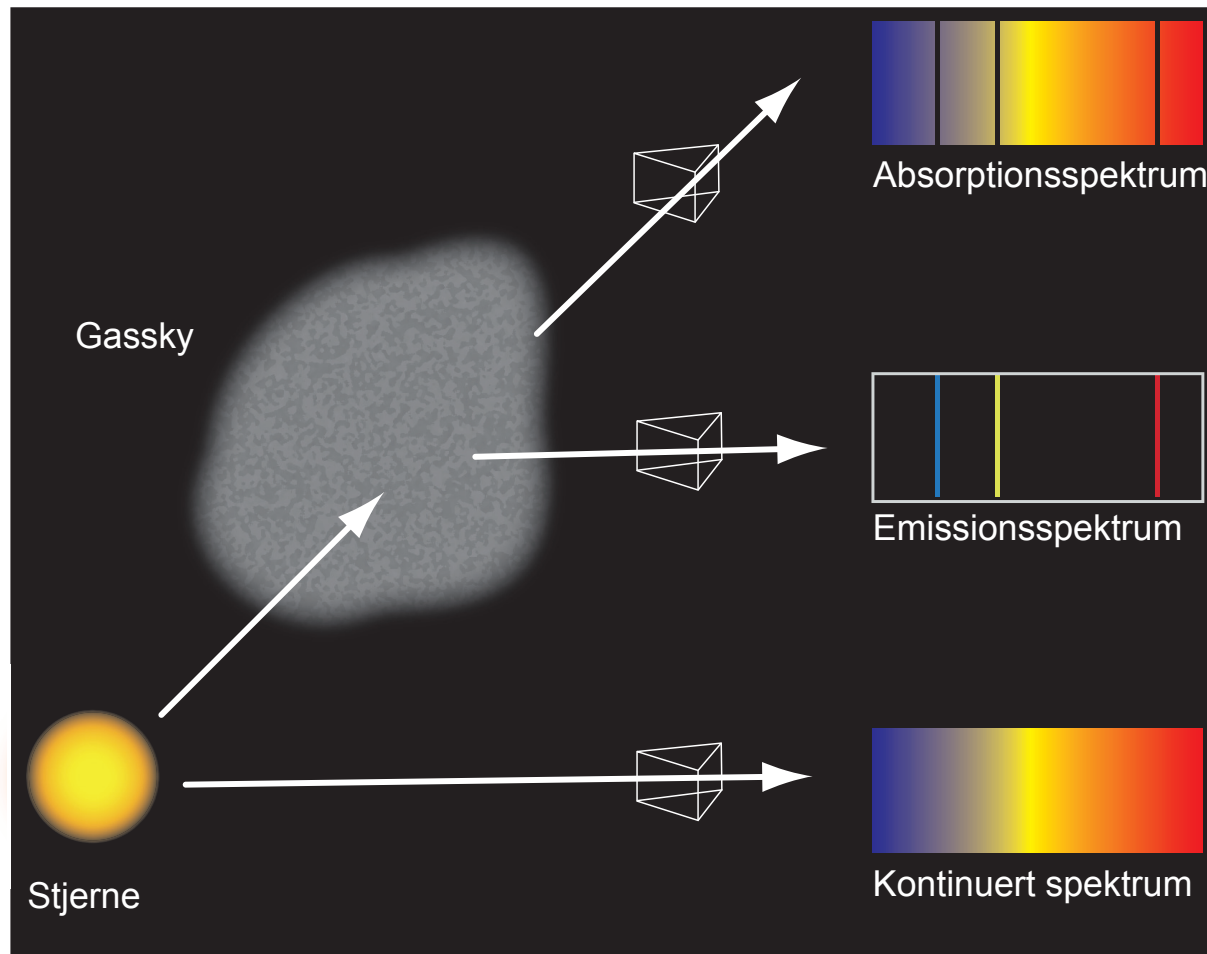
Emissionsspektret ser meget anderledes ud.

På film ses farvede linjer i et sort bånd i stedet for sorte linjer i et farvet bånd.

Eller man ser spektret som vist i rødt nedenfor.

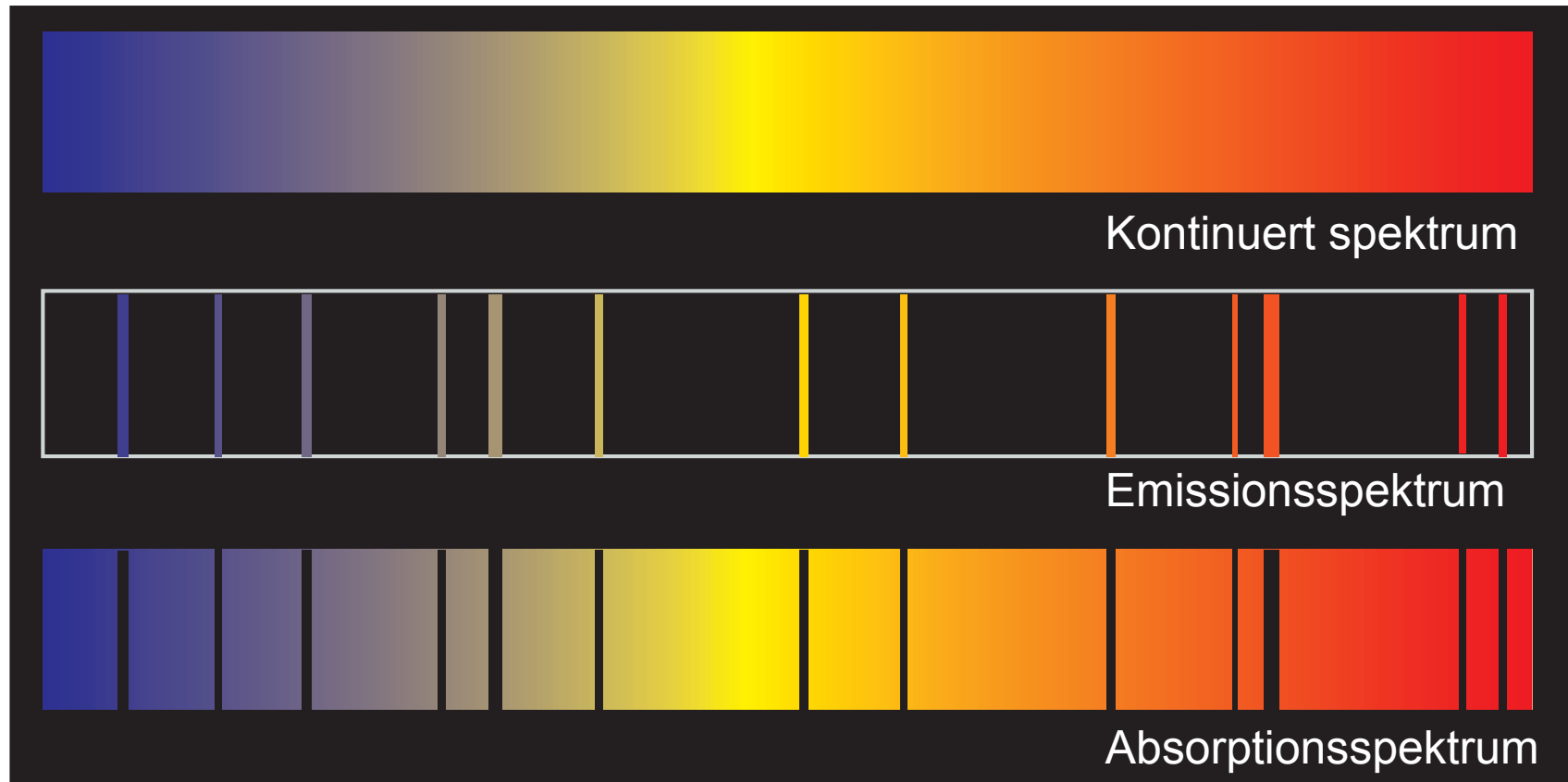


Hvilken slags spektrum ser man?



Den viste gassky vil i praksis oftest være stjernens egen atmosfære!

De tre slags spektre



- I den virkelige verden har vi altid en blanding af de tre
- Komplikationer:
 - Intensiteterne er forskellige - *hvorfor?*
 - linjerne er forskudte - *hvorfor?*

Forskudt spektrum

Hvis et emissions- eller absorptionsspektrum fra en stjerne eller en galakse sammenlignes med et tilsvarende spektrum her på Jorden, ses ofte en generel forskydning mod den blå eller den røde ende. Her ser vi en blåforskydning.

Spektrum fra objekt, der ikke bevæger sig i forhold til Jorden



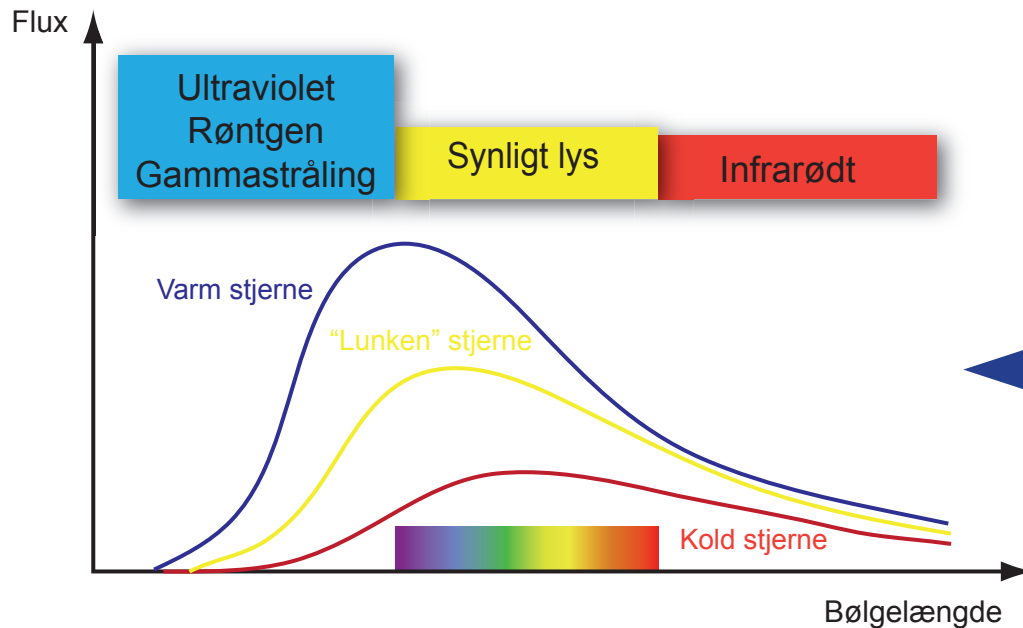
Spektrum fra objekt, der bevæger sig i forhold til Jorden



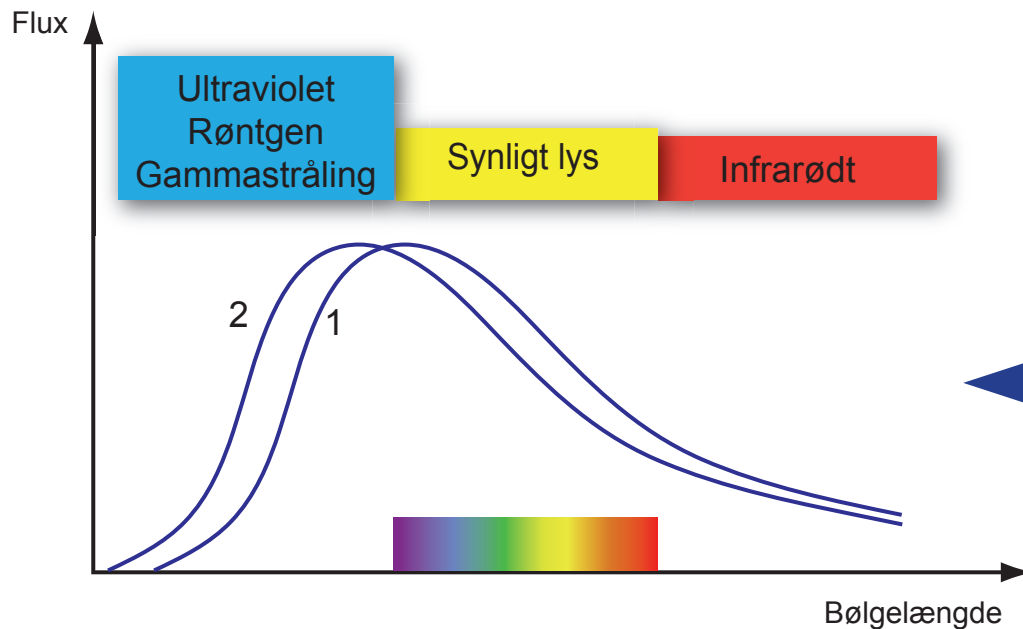
Rød/blå-forskydning – Dopplereffekt

$$\frac{\text{Bølgelængdeændring}}{\text{Laboratiebølgelængde}} = \frac{\text{Hastighed mod Jorden}}{\text{Lysets hastighed}}$$

Topforskydning og Parallelforskydning



Forskellige temperaturer!

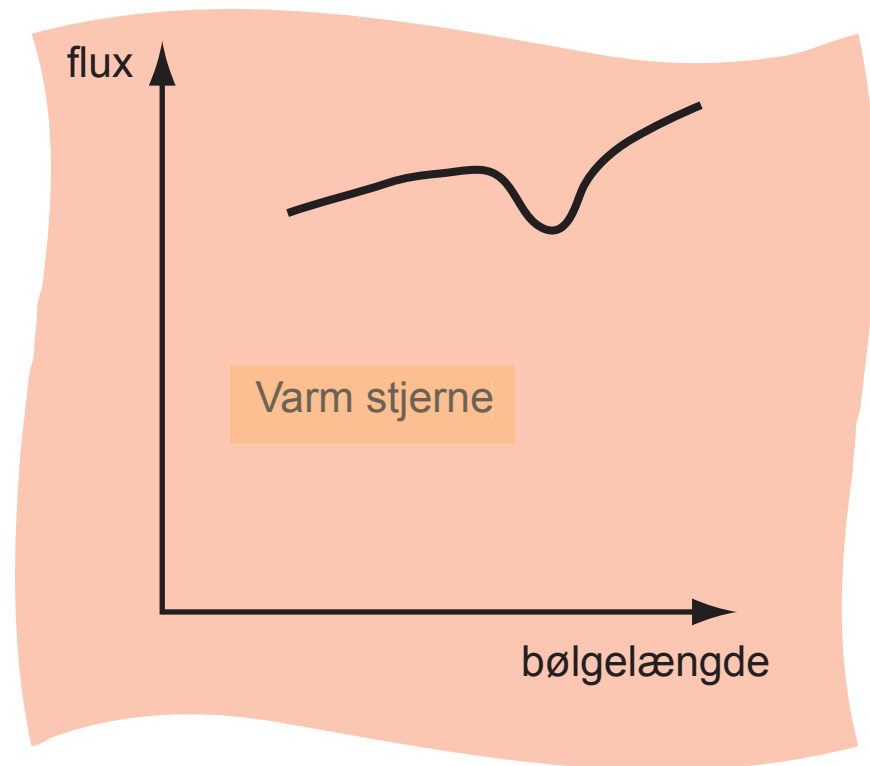
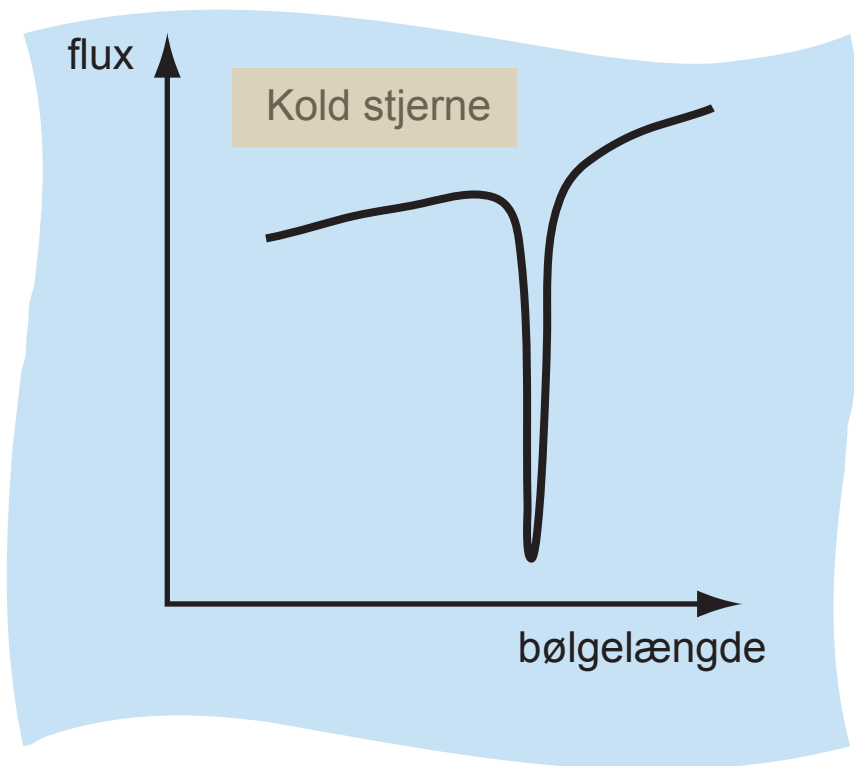


Forskellige hastigheder!

Linjerne er bredt ud mod både rødt og blå!

Undertiden er linjerne udbredt mod både rødt og blå på én gang!

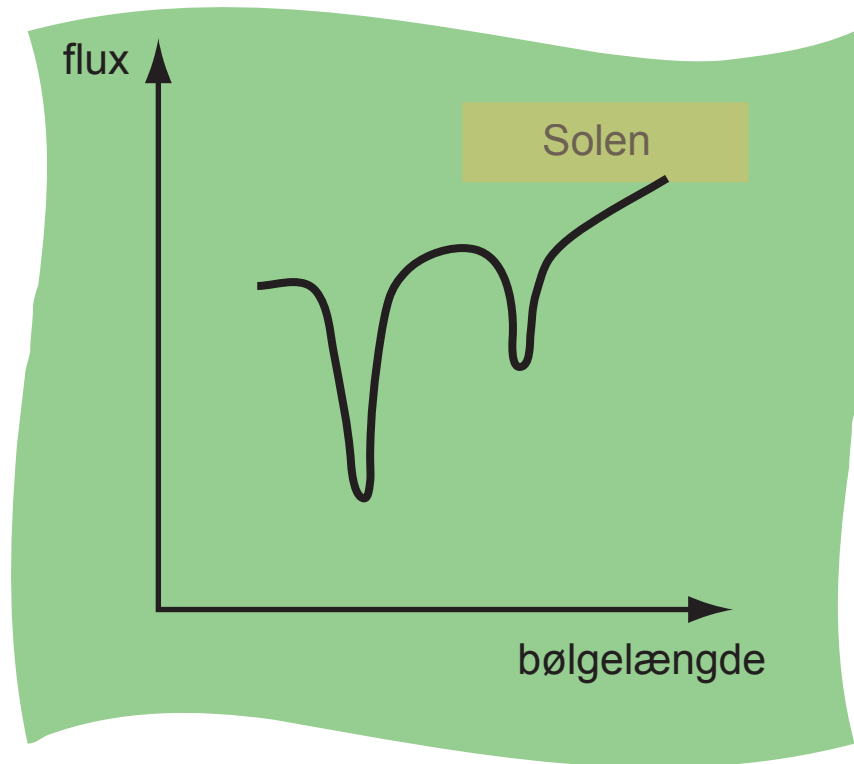
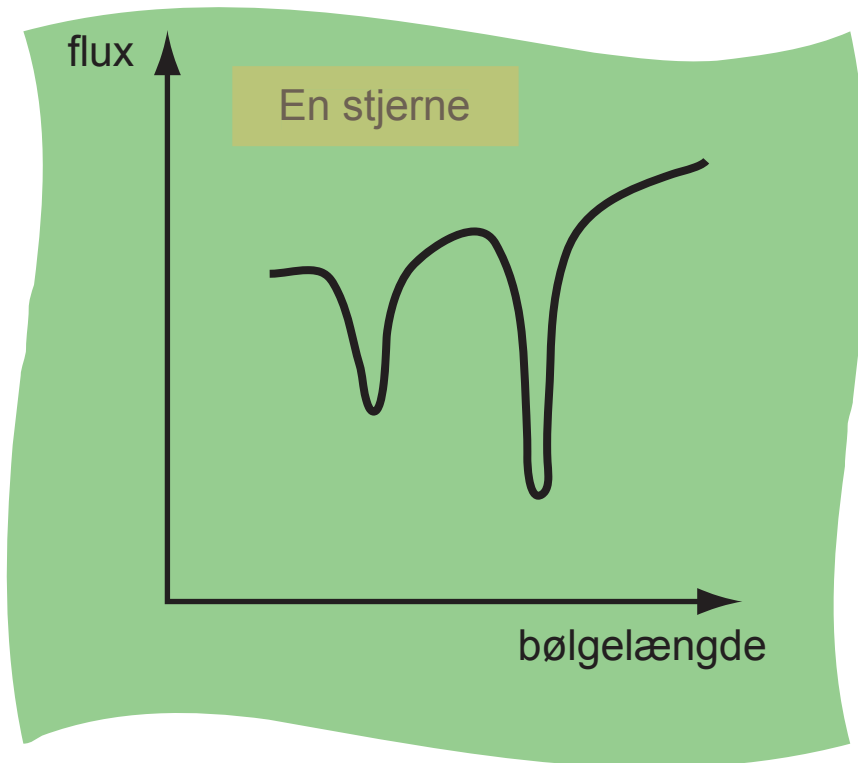
- Altså ikke skarpe linjer! Hvorfor?



Doppler-forbredring afhænger indirekte af temperaturen og trykket!

Linjerne har forskellige styrker

Linjerne har forskellige styrker – *hvorfor?*



Processerne og dermed linjeintensiteterne afhænger direkte af temperaturen!

Spektralklasser

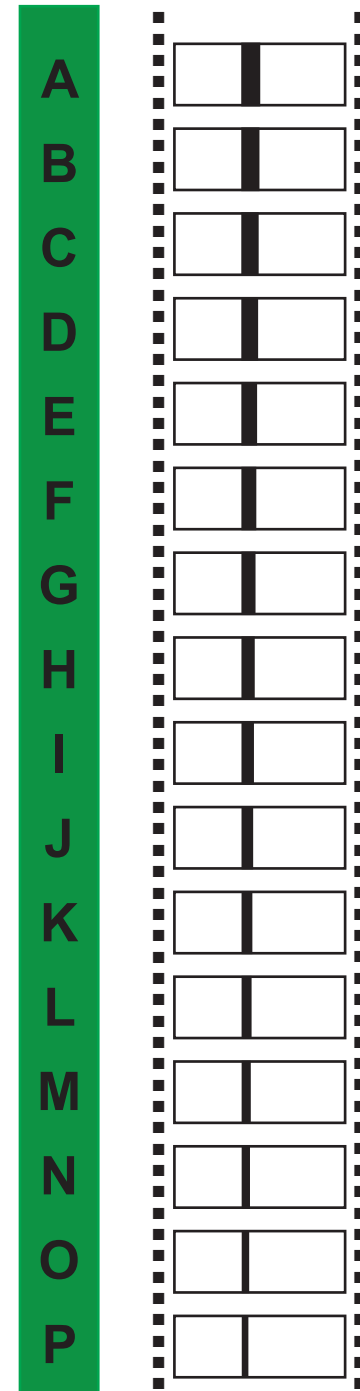
1. forsøg

I 1860'erne og 1870'erne opdagede den italienske astronomi Angelo Secchi, at mange stjerners spektraler har absorptionslinjer. Han delte fra 1867 stjernerne ind i 3 klasser, som han senere udvidede til 5 klasser: I, II, III, IV og V.

2. forsøg

På Harvard College Observatory udviklede Edward Pickering – reelt Williamina Fleming – et udvidet system baseret på Secchis system. Det gik fra A til P med faldende styrke af *Balmer-linjerne*.

Resultat: *The Draper Catalogue of Stellar Spectra*, publiceret 1890. Det indeholdt 10.000 stjerner.



Spektralklasser – fortsat (1)



Pickerings Harem eller Harvard Computers:

Williamina Fleming, Antonia Maury, Annie Jump Cannon, Henrietta Swan Leavitt m.fl.

3. forsøg

I 1897 omarrangerede Antonia Maury en del stjerner, så B kom før A.

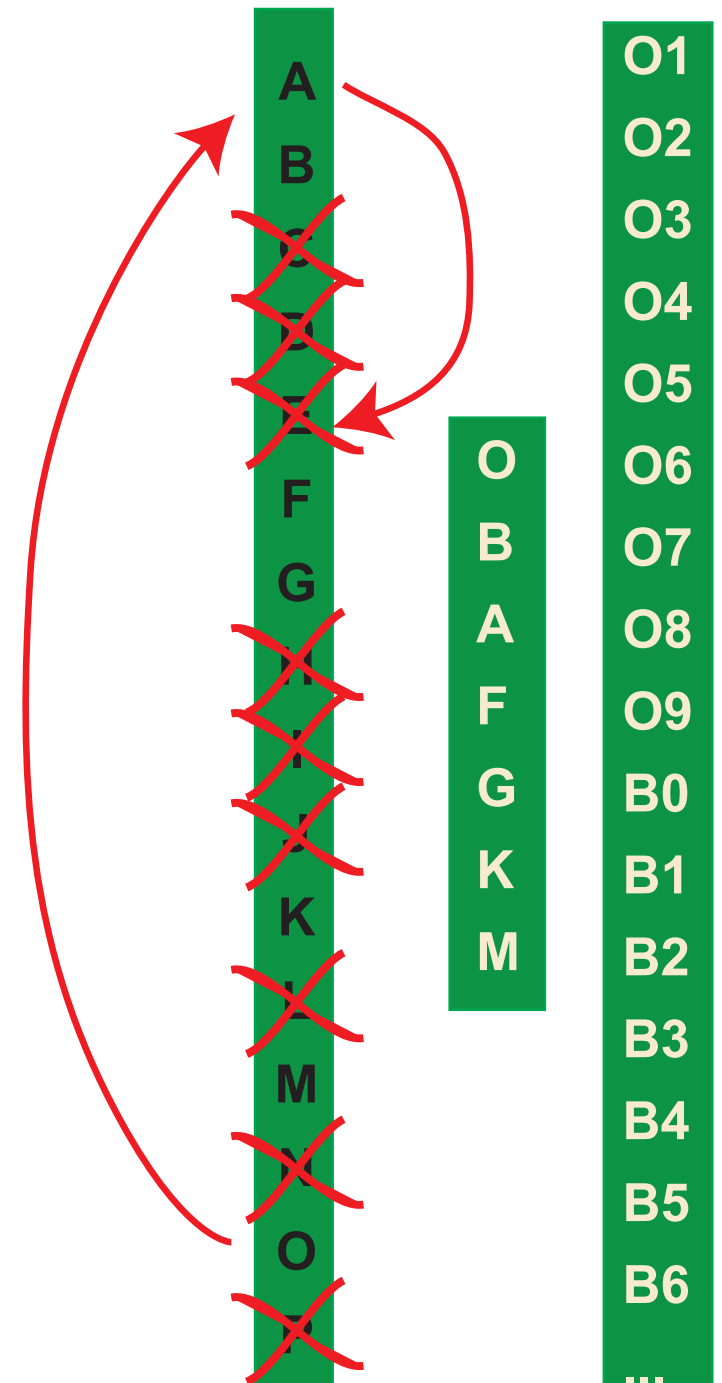
Spektralklasser – fortsat (2)

4. forsøg

I 1901 redesignede Annie Jump Canon bogstaverne og slettede nogle, så man nu tog hensyn til den relative styrke af alle linjer – ikke blot Balmer-linjer. Herved blev der en glidende overgang fra en klasse til en anden. *The Harvard Classification Scheme* var dermed en realitet.

Rækkefølgen blev **OBAFGKM**.

Men indførte gradvis nogle underklasser, og fra 1912 indførte Canon generelt subklasser fra 0 til 9 til hver klasse som en finstruktur.



Spektralklasser – fortsat (3)

Der er 7 spektralklasser, hvis rækkefølge huskes via remsen:

Oh Be A Fine Girl Kiss Me.

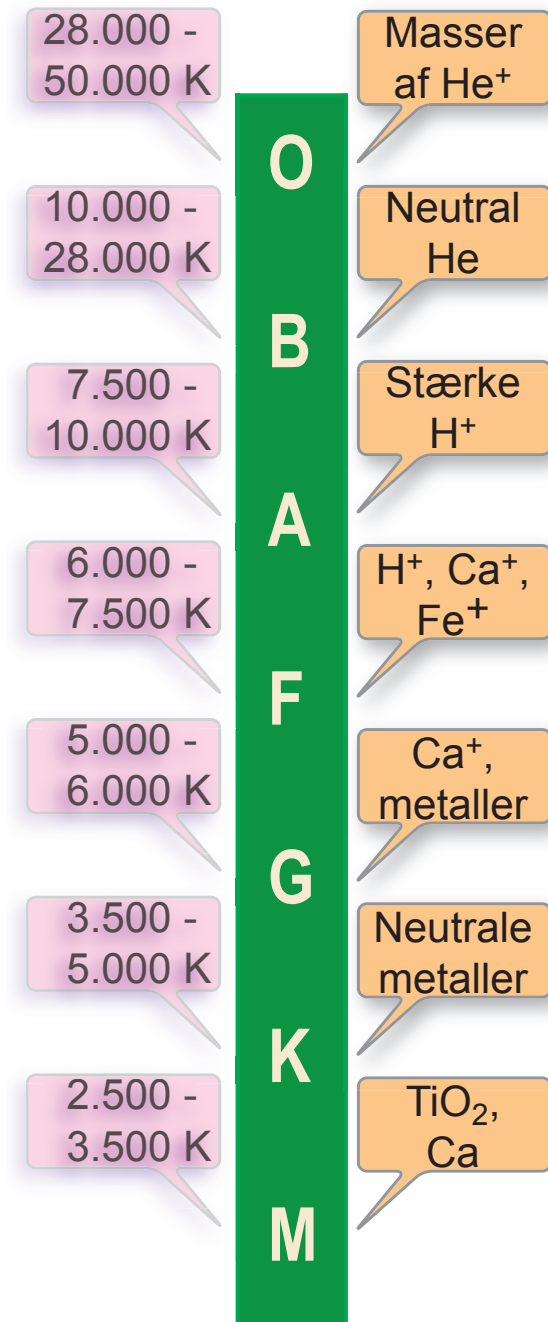
O	B	A	F	G	K	M
Violet	Blå	Blå	Blå-hvid	Hvid-gul	Orange-rød	Rød
>28.000 K	10.000 - 28.00 K	7.500 - 10.000 K	6.000 - 7.500 K	5.000 - 6.000 K	3.500 - 5.000 K	< 3.500 K
Få synlige absorptionslinjer, svage Balmer-linjer, heliumlinjer	Neutrale hydrogenlinjer, flere markante Balmer-linjer	Stærke Balmer-linjer og andre linjer	Svage Balmer-linjer, mange linjer fra neutrale metaller	Endnu svagere Balmer-linjer, domineret af joniseret calcium	Neutrale metallinjer dominerer	Stærke neutrale metallinjer og molekylbånd

Spektralklasser – fortsat (4)

Hvorfor optræder spektrallinjer med forskellige vægte i forskellige spektralklasser? Svaret dukkede først op sidst i 1920'erne ved studiet af energiovergange i forskellige atomer.

Det afgørende viste sig at være **temperaturen**. Man opdagede, at enhver overgang i et atom sker hyppigst i et bestemt temperaturinterval.

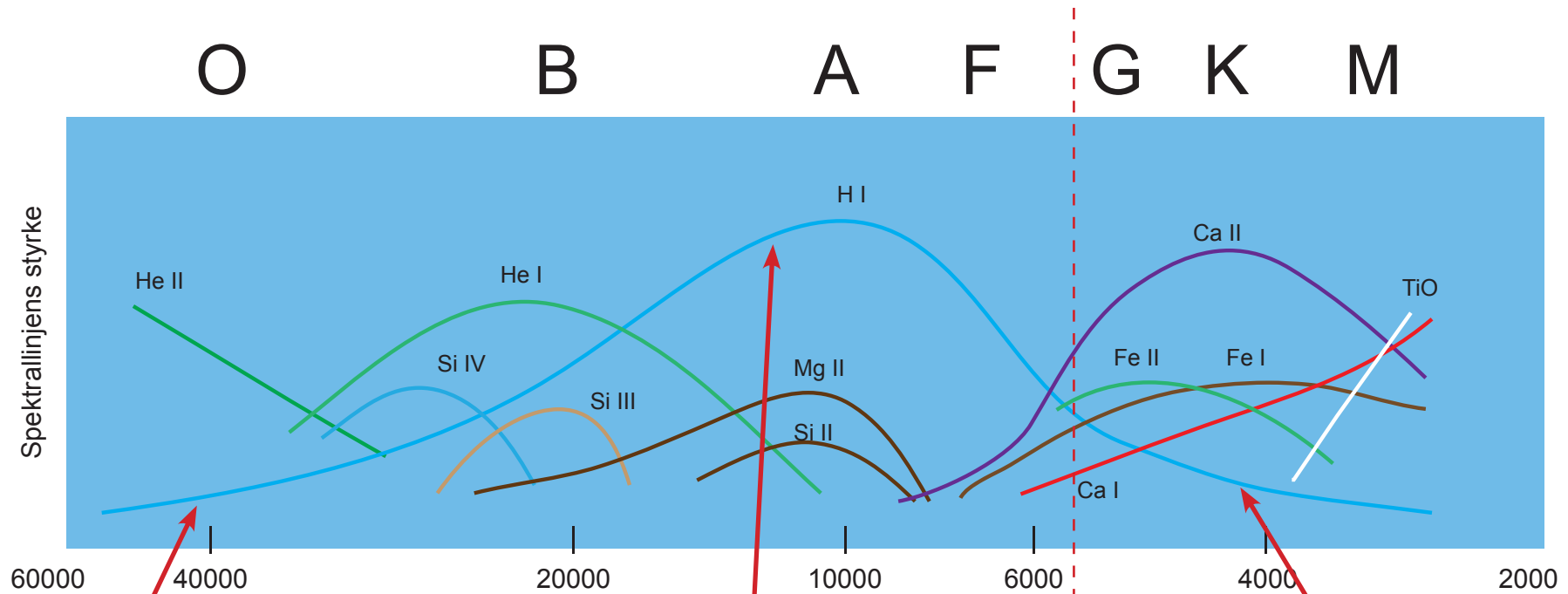
Harvard-astronomen Cecilia Payne-Gaposchkin kunne i 1925 sammenkoble spektralklasse og temperatur.



Temperaturens fingeraftryk

Payne-Gaposchkin byggede på inderen Meghnad Sahas beregninger af temperaturafhængigheden af elektronovergange i atomer. Disse sker kun ved "passende" temperaturer, som er forskellige fra atom til atom.

Solen - bemærk: ingen He-linjer



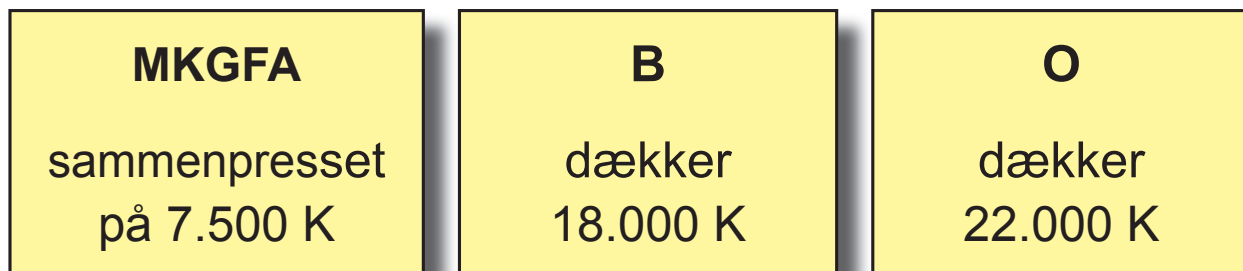
For varmt – kun meget få elektroner i hydrogenatomer

Passende!
Masser af elektroner i hydrogenatomer absorberer synligt lys

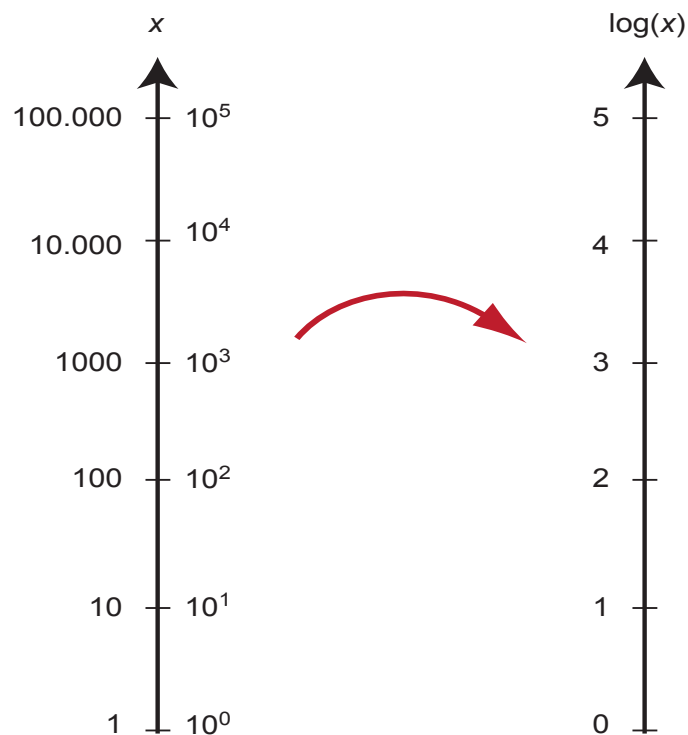
For koldt – kun få elektroner hopper til højere energiniveauer

Intervaller og logaritmisk skala

Stjernernes temperaturer



Derfor foretrækker astronomerne en logaritmisk skala:



28.000 - 50.000 K

10.000 - 28.000 K

7.500 - 10.000 K

6.000 - 7.500 K

5.000 - 6.000 K

3.500 - 5.000 K

2.500 - 3.500 K

O

B

A

F

G

K

M

HR-diagrammet

I 1905 bemærkede den danske astronom Ejnar *Hertzsprung*, at grafen for den absolutte magnitudo versus farven viste nogle regulære grupperinger.

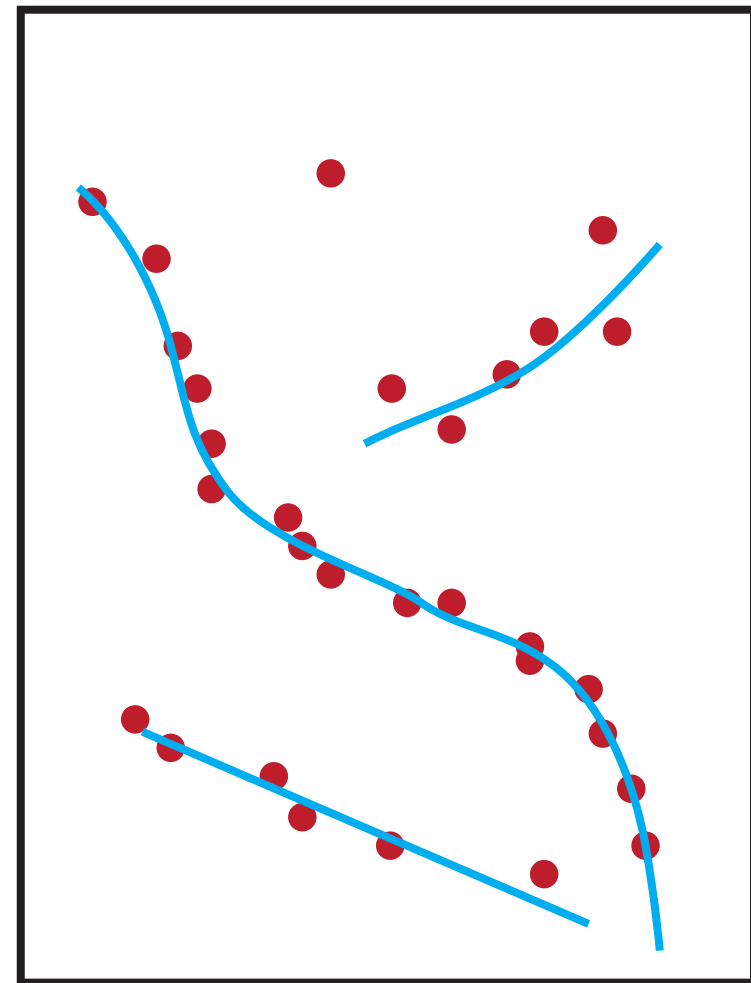
Omkring 1910 bemærkede amerikaneren Henry *Russel* de samme ting, men han brugte spektraltypen i stedet for farven.

Fra 1933 – på forslag fra Bengt Strömberg – taler vi om Hertzsprung-Russel diagrammet eller bare HR-diagrammet.

-10
lysstærk

A
b
s
o
l
u
t
m
a
g
n
i
t
u
d
e

+15
lyssvag



O5

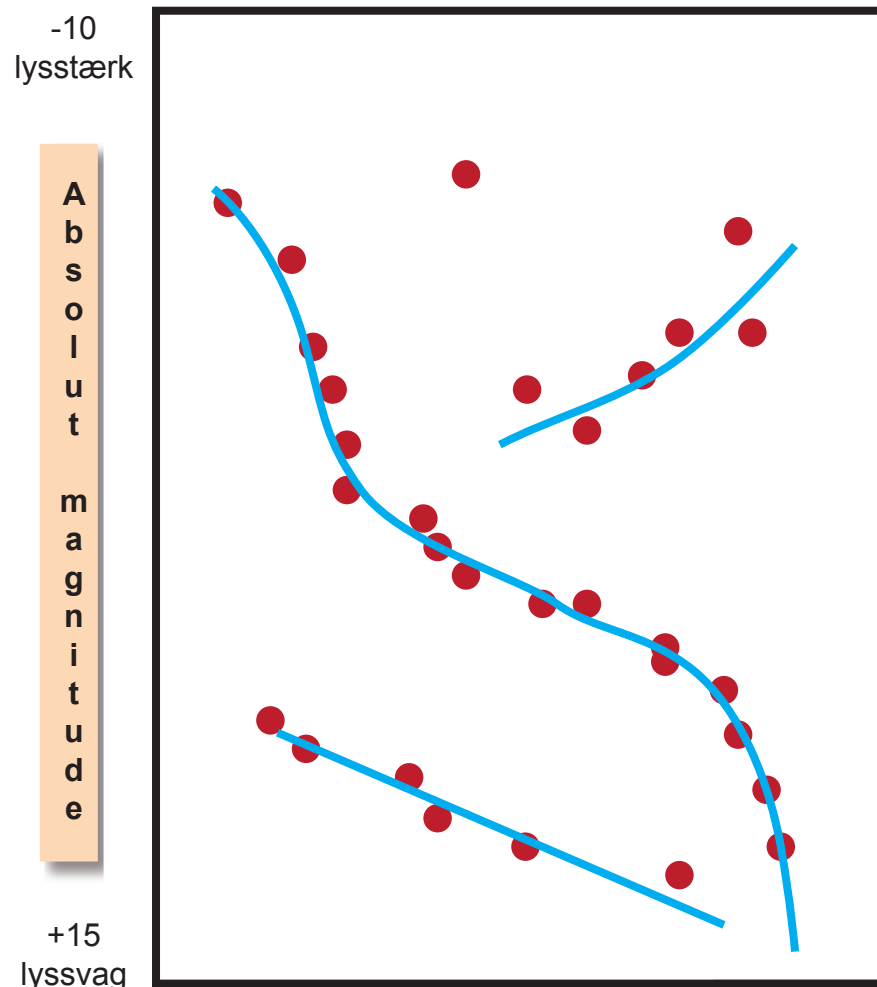
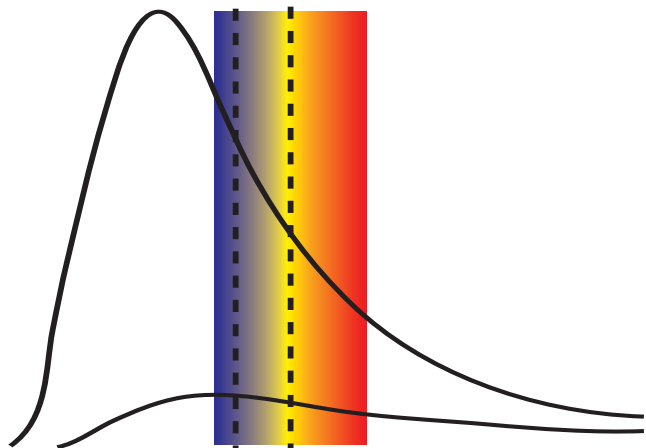
Spektraltype

M8

Temperatur eller farve

Senere, da sammenhængen mellem temperatur og spektraltype var erkendt, begyndte HR-diagrammet at optræde med temperatur langs den horisontale akse. Derfor falder temperaturen ud ad 1. akse!

Ofte optræder også farverne fra blå til rød på 1. akse – eller undertiden farveindexet B-V.

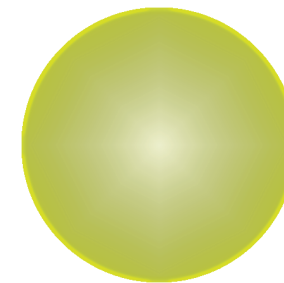


O5	Spektraltipe	M8
Blå	Farve	Rød
40.000	Temperatur	2.500

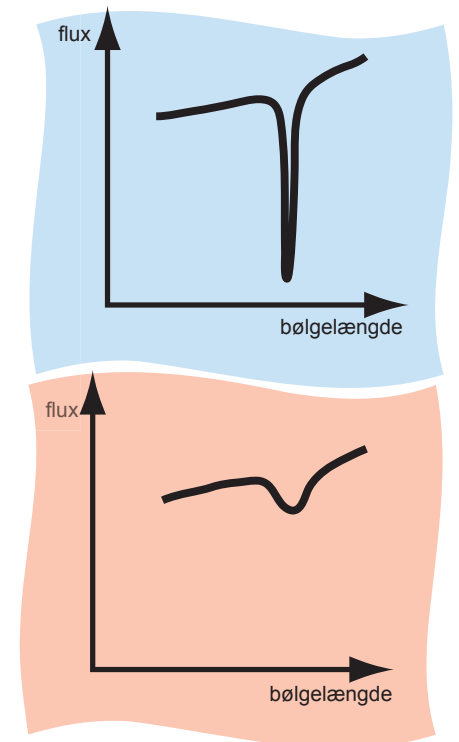
Spektralklasser – fortsat (5)

5. forsøg: MKK-spektralklassifikation = Yerkes spektralklassifikation

- 1943: **M**organ, **K**eenan og **K**ellman, Yerkes Observatory, Chicago
- Todimensional klassifikation med temperatur og luminositet, hvor tyngdekraften ved overfladen indgår – i modsætning til Harvard Klassifikationen, hvor kun temperaturen ved overfladen danner basis.
- En kæmpestjerne og en dværgstjerne kan have samme masse, men tyngdekraften og dermed trykket og gastætheden ved overfladen af kæmpestjernen er meget mindre end ved dværgstjernen. Mindre tryk gør absorptionslinjer dybere og smallere.



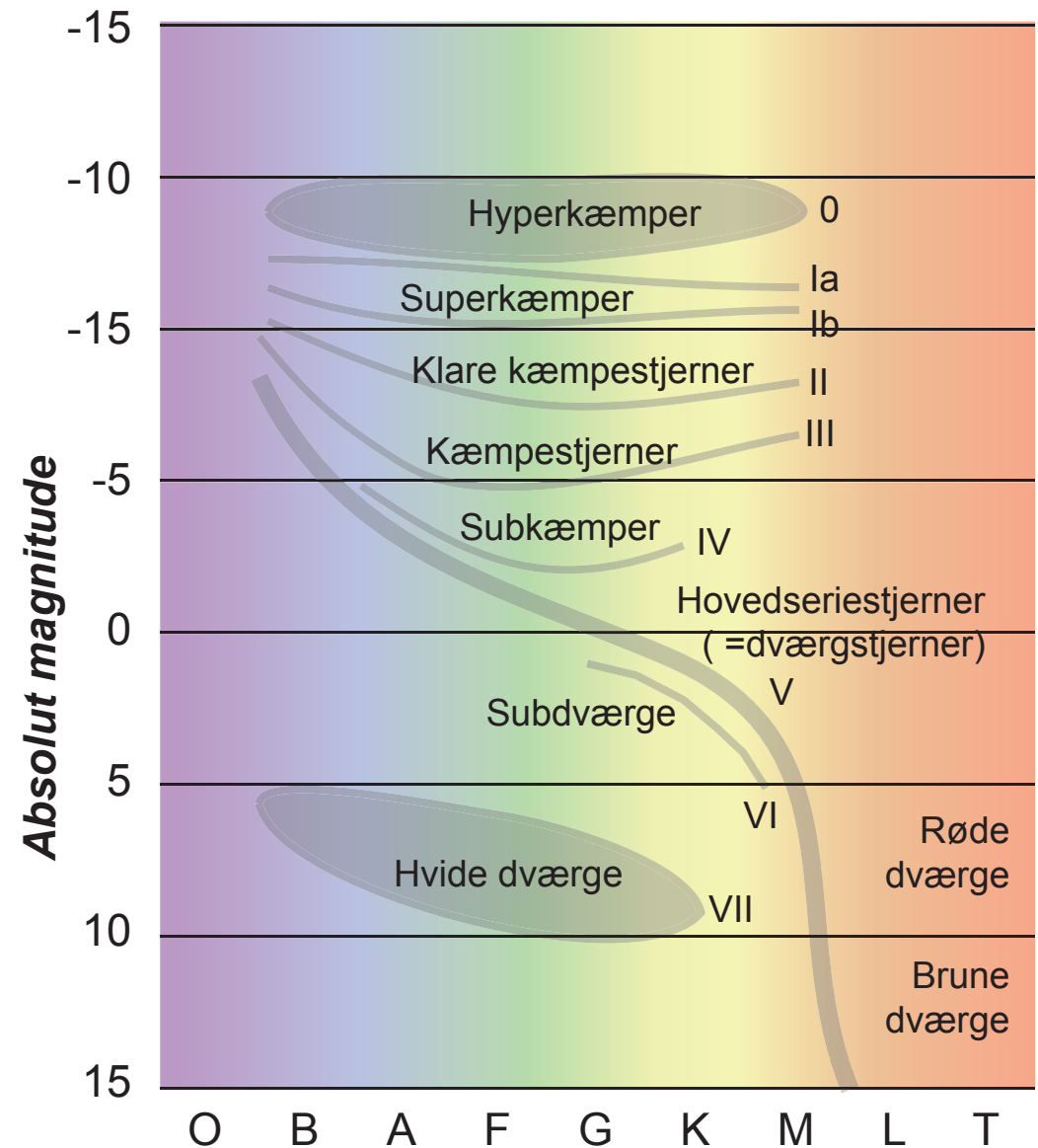
Samme masse



Spektralklasser – fortsat (6)

6. forsøg: MK-spektralklassifikation

- 1953: **Morgan og Keenan** reviderede klassifikationen til det nu anvendte system.
- Luminositetsklassen er den tredje parameter.
- Eksempler:
 - Deneb; **A2 Ia**
 - Betelgeuse; **M2 Iab**
 - Pollux: **K2 IIIb**
 - 85 Pegasi: **G5 Vb**
- Overgange: a → ab → b



Og hvad kan spektrene så bruges til?

Når man har bestemt stjernens spektraltype – og stjernens apparente magnitudo – kan man også bestemme mange andre af stjernens egenskaber:

