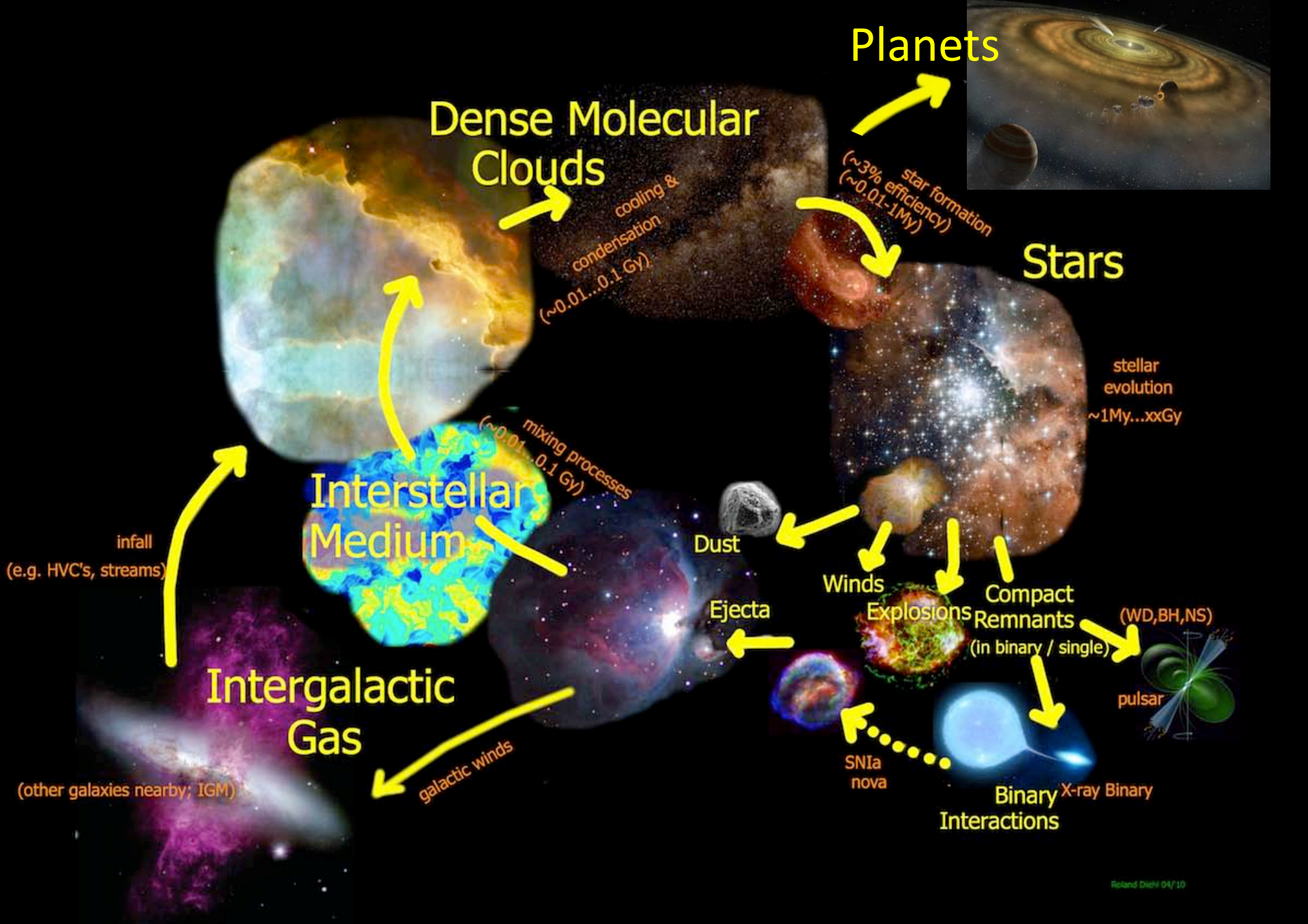


Stjernedannelse



Anja C. Andersen
Niels Bohr Institutet
Københavns Universitet



Tidskaler

Dynamisk tidskala t_{dyn}

Termisk tidskala t_{KH}

Nuclear tidskala t_{nuc}

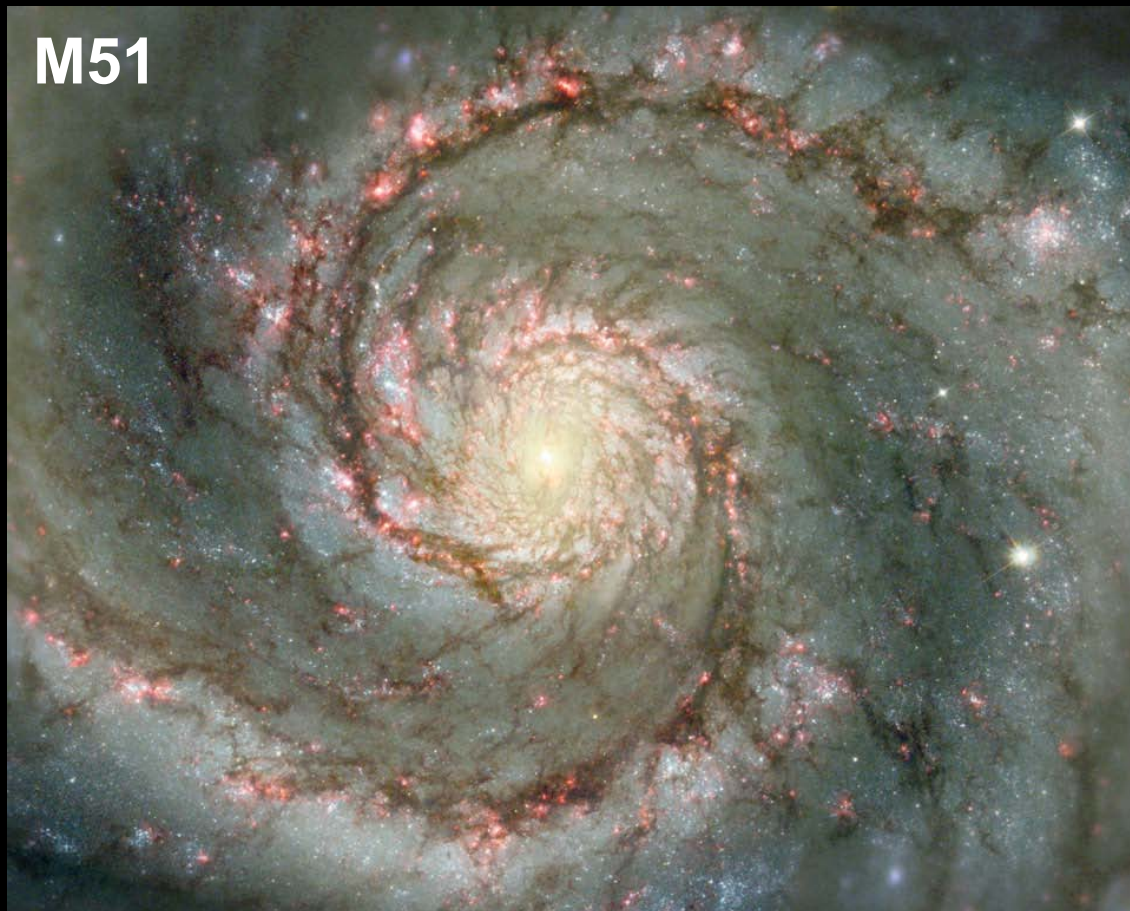
$$t_{\text{dyn}} \ll t_{\text{KH}} \ll t_{\text{nuc}}$$

30 min. \ll 30 mill. år \ll 10 bill. år

Mælkevejen



M51



Det Interstellare Medium

Gas og støv i mellem stjernerne

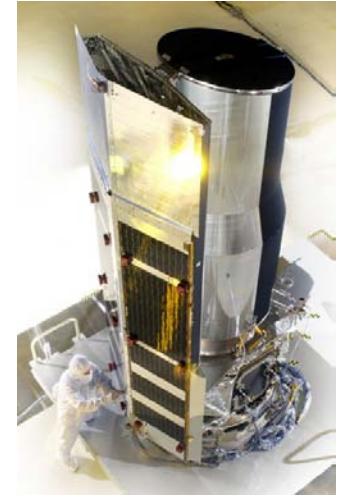
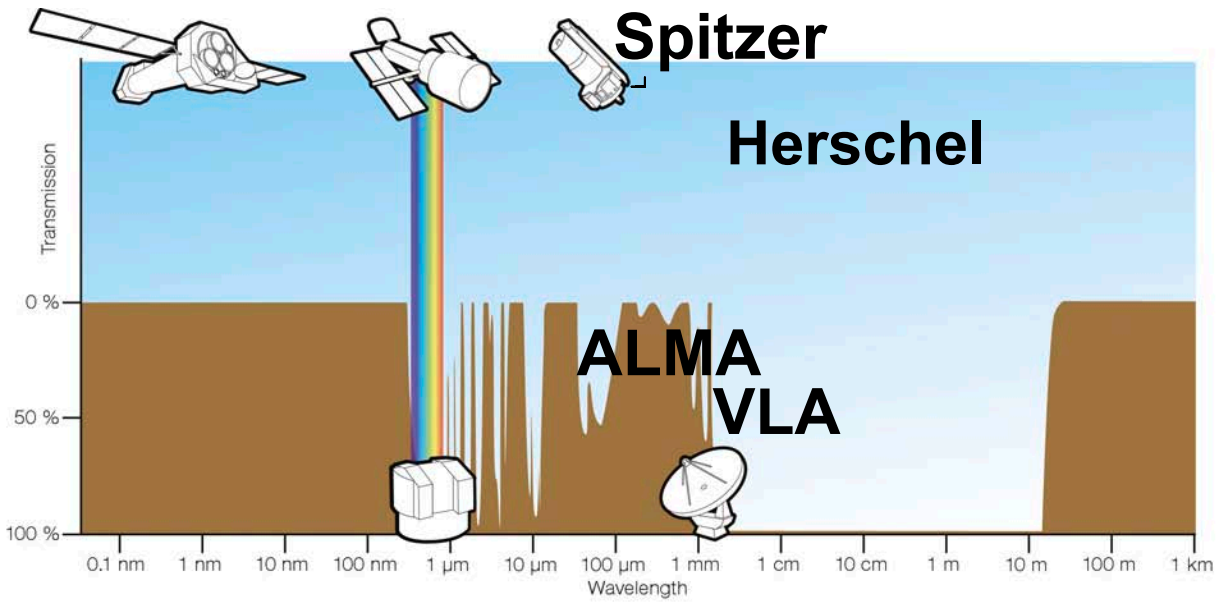
Byggestenene for nye stjerner

Gassen findes som ioniseret, neutral og molekylær:

- Plasma $\sim 1.000.000$ K (Hot Ionized Medium - HIM)
- Varmt ~ 8.000 K (Varmt Ioniserede Medium - WIM)
- Varmt ~ 8.000 K (Varmt Neutralt Medium - WNM)
- Koldt $\sim 100 - 1.000$ K (Koldt Neutralt Medium - CNM)
- Molekylær $\sim 5-100$ K (Molekylær gas - MCs)

Tryk ligevægt : Tryk \sim Tæthed \times Temperatur $\sim 10^4$ K cm⁻³

➔ Stjerner dannes i kold molekylær gas



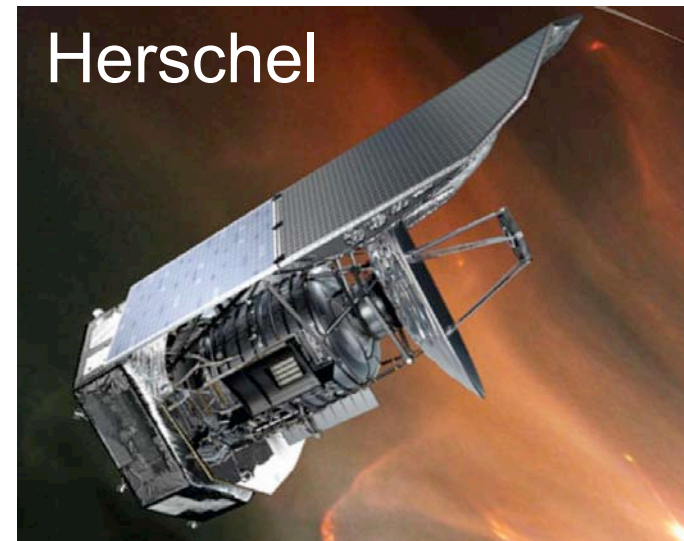
Spitzer



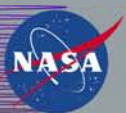
VLA



ALMA



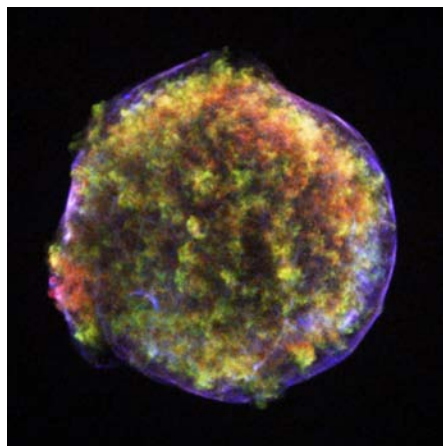
Herschel



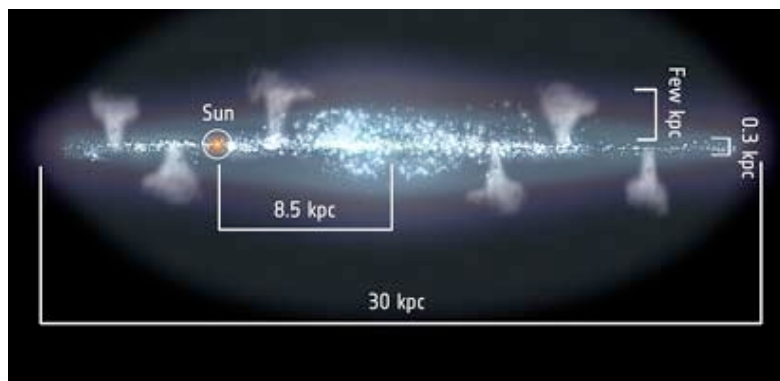
Multiwavelength Milky Way

Hot Ionized Medium $T \sim 10^6$ K

Fuldstændigt ioniseret gas



“Tychos SN”
i røngten



- Supernovaer varmer ISM op til millioner af grader
- Grupper af tunge stjerner kan lave “super bobler”
- Plasma stiger op fra disken, i “galaktiske geysere”
- Oppe over disken ekspanderer gassen og den køler af
- Den kolde gas falder tilbage på disken

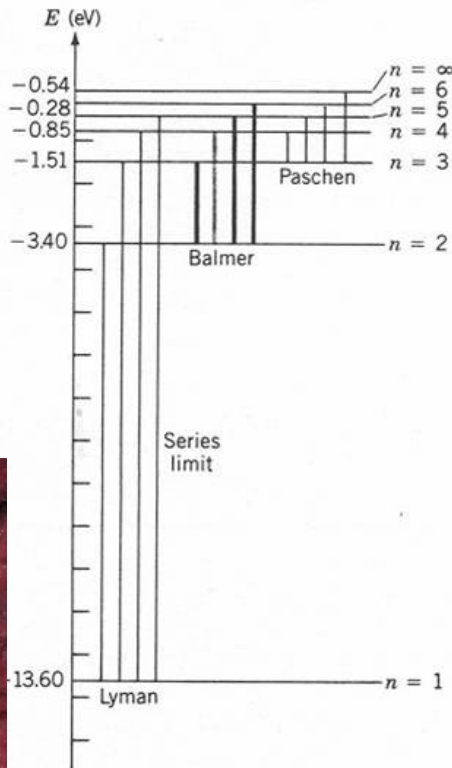
Mælkevejen: Filling factor: 20 – 70% (?) Masse: ?

Tæthed: $10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$

Temperatur: $10^5 - 10^7$ K

Varmt Ioniseret Medium $T \sim 8,000 \text{ K}$

HII – ioniseret gas



- Tunge O og B stjerner udsender masser af UV fotoner

- Det danner *Strömgren* sfærer og større områder med ioniseret brint

- Brint *rekombinerer* til højere elektron niveauer og udsender bla. $H-\alpha$ stråling

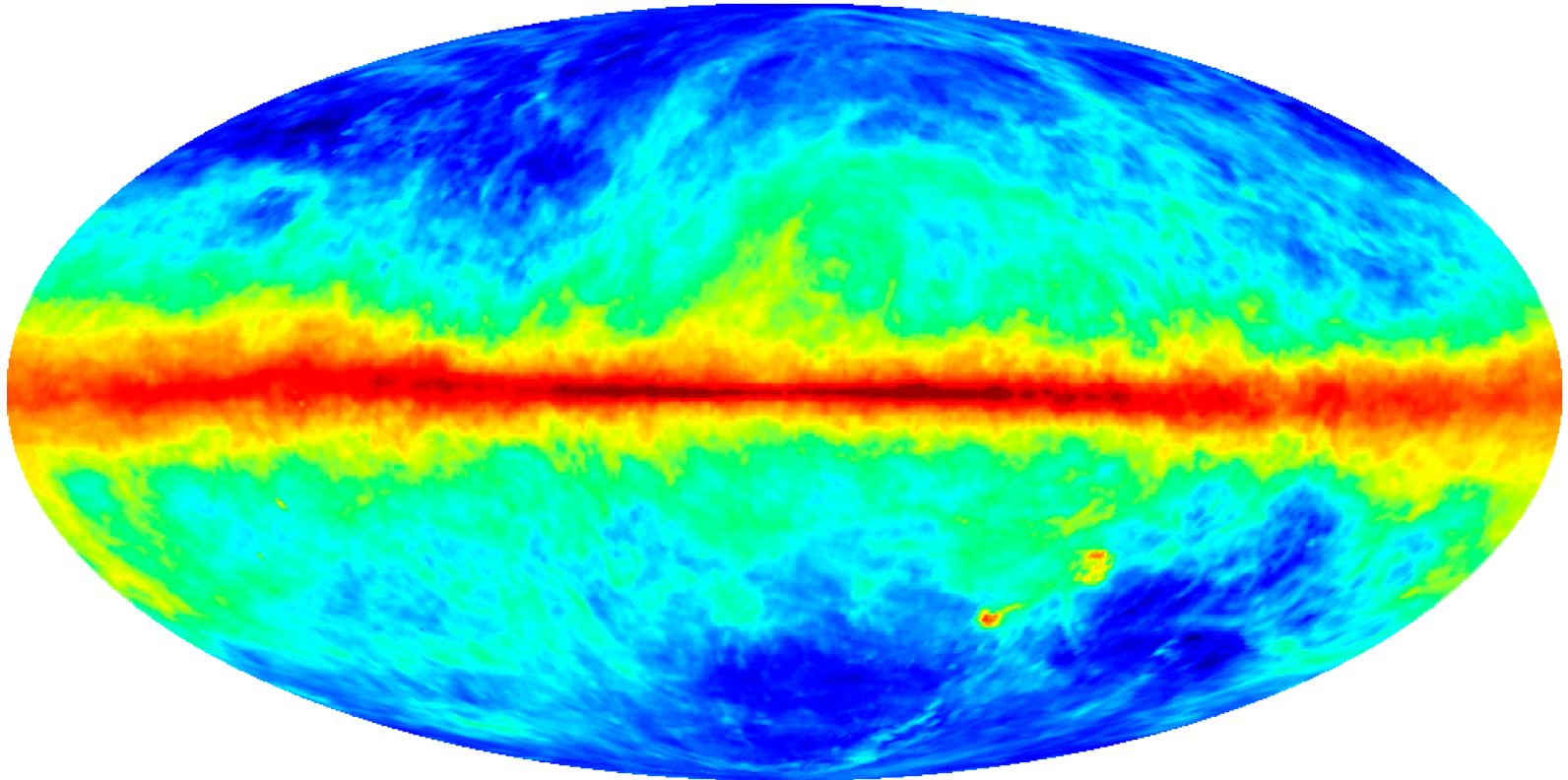
Mælkevejen: Filling factor: 20 – 50% (?) Masse: $> 1.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$

Tæthed: $0.2 - 0.5 \text{ cm}^{-3}$

Temperatur: 8,000 K

Neutrale Medium $T \sim 80 - 8,000 \text{ K}$

HI – neutral gas

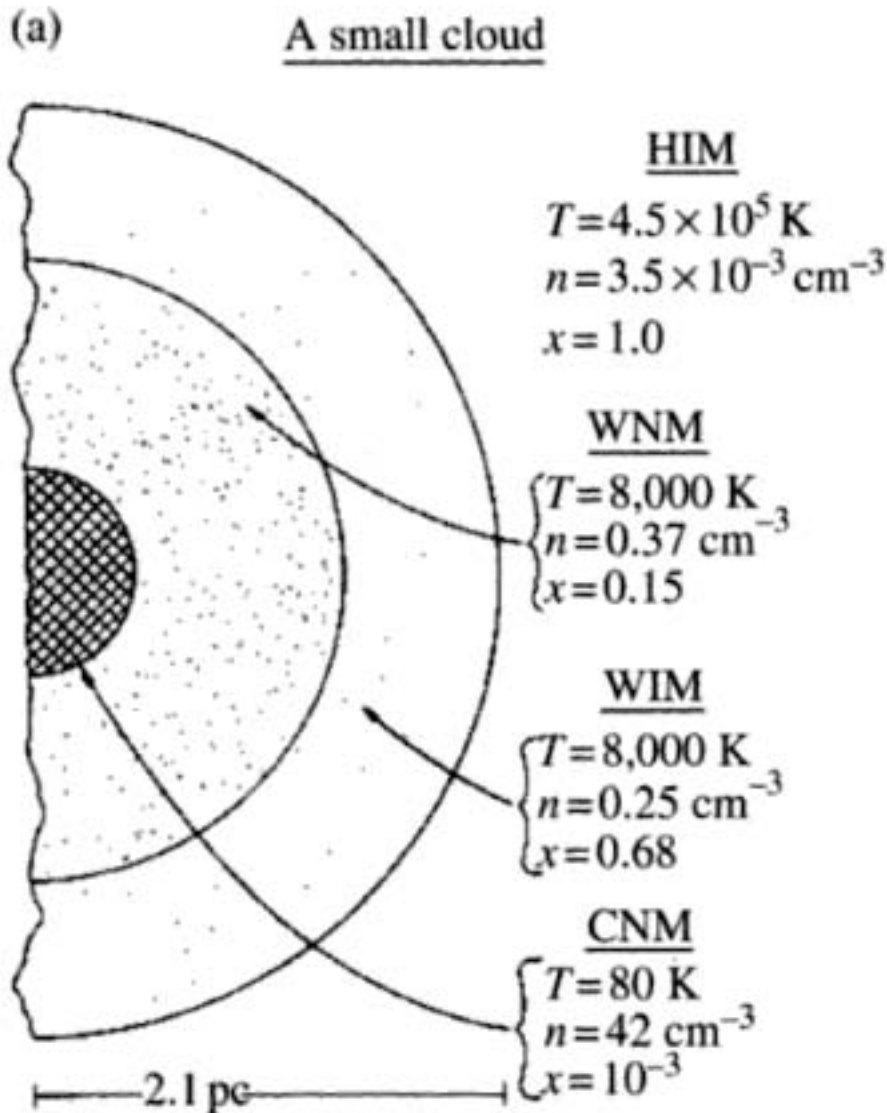


Mælkevejen: Filling factor: 10 – 20% Masse: $> 6 \cdot 10^9 M_{\odot}$

Tæthed: $0.2 - 100 \text{ cm}^{-3}$

Temperatur: 50 – 8,000 K

Strukturen og termodynamikken af ISM

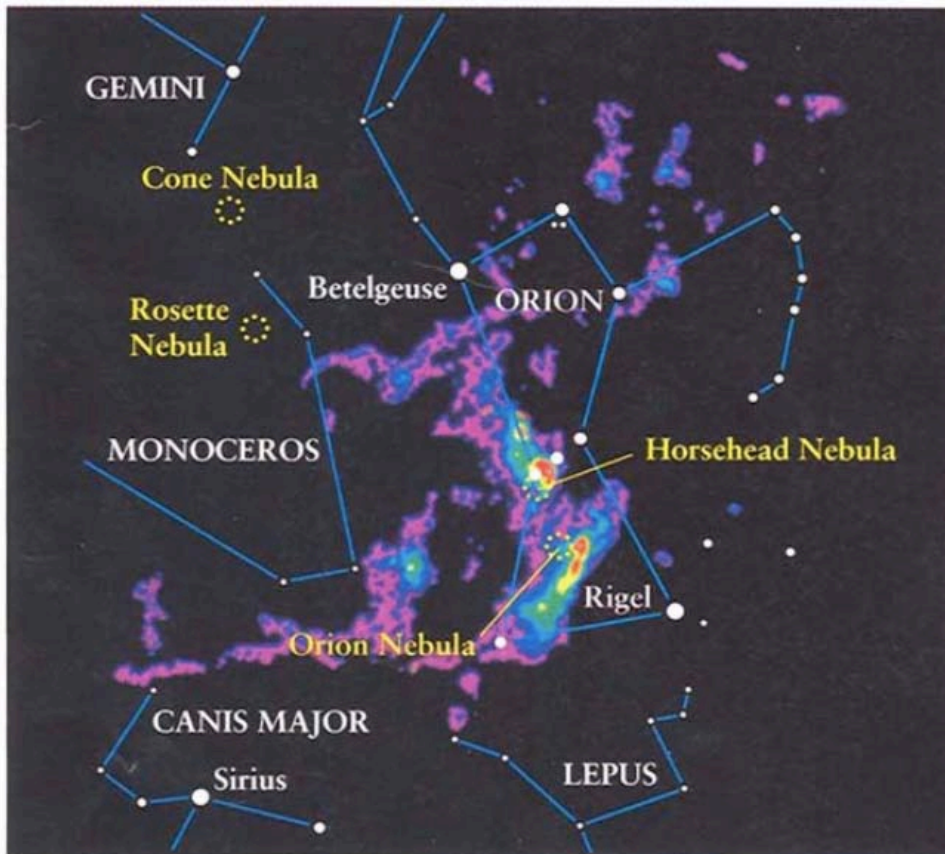


[Tielens 2013]

- Absorption og chokbølger
→ Opvarmning
- Emission pga. kollisioner
→ køling
- Kemisk energi (e.g. rekombination af brint) → Termostat!
- Næsten tryk ligevægt imellem de forskellige faser så længe tyngdekraften og kinetisk energi ikke spiller en rolle

Molekylær gas og støv $T \sim 10-20$ K

H_2 molekyler



- Molekylær brint er den tætteste del af ISM
- Det er her stjerner dannes
- Det er svært at observere H_2 direkte, men man kan finde en masse andre molekyler via deres linier i sub-mm til radio området

Mælkevejen: Filling factor: $<1\%$ Mass: $\sim 2.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$

Tæthed: $10^2 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$

Temperatur: $10 - 20$ K

Molekylær gas og støv $T \sim 10 - 20 \text{ K}$

Støv



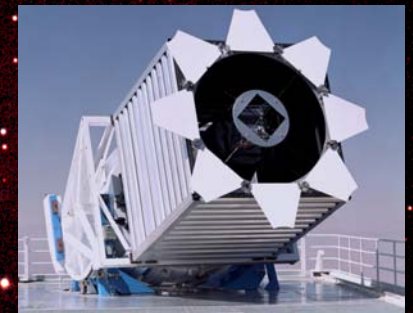
- Laver rødfarvning; afhænger af støv kornenes størrelse
- Støv kan både køle og varme gassen op via kollisioner
- Er en katalysator for kemi'en i molekylskyer

Støv-til-gas masse forholdet er ca 1:100

Cygnus X: En "giant molecular cloud"

Alder: ~ 10 millioner år

Masse: ~ 100.000 sol masser



Synligt lys

**Nær infrarødt gør det muligt
at se igennem støvet**

titusindvis af unge stjerner dukker op

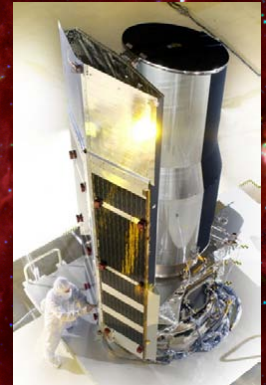


Langbølget Infrarødt: Molekyler + støv

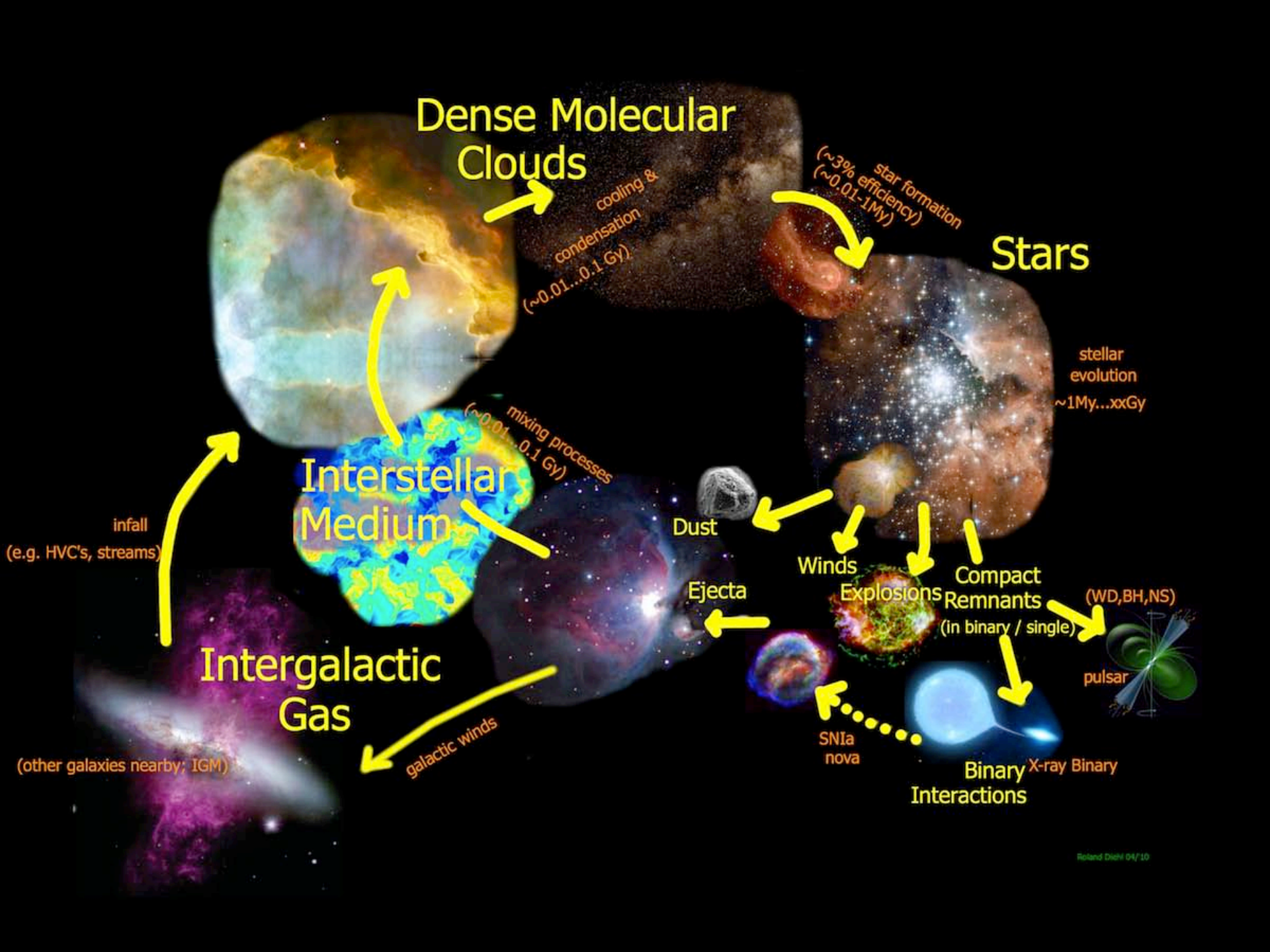
Molekyle jets med
CO, H₂O og H₂

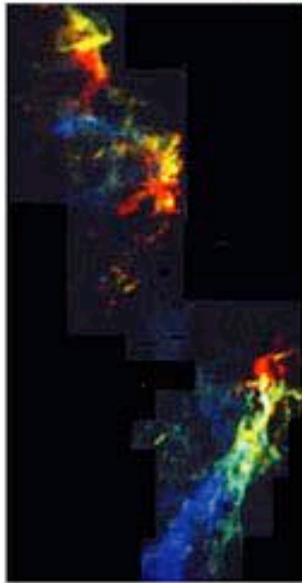
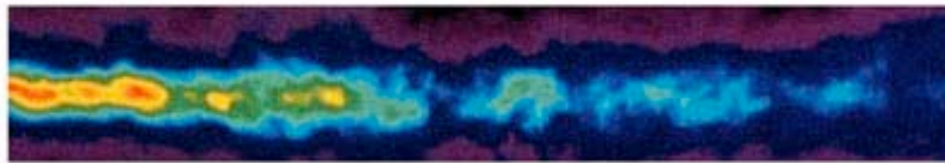
Organiske C_xH_y
molekyler, støv

Supernova
Boble ?



Spitzer

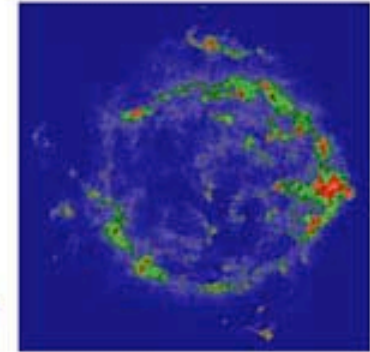




molecular clouds

Bevægelses
mængden bevares

hot
bubbles



Temperaturen falder

Bevægelse bliver super sonisk

Gassen bliver turbulent og
Danner selvtilsvarende strukturer

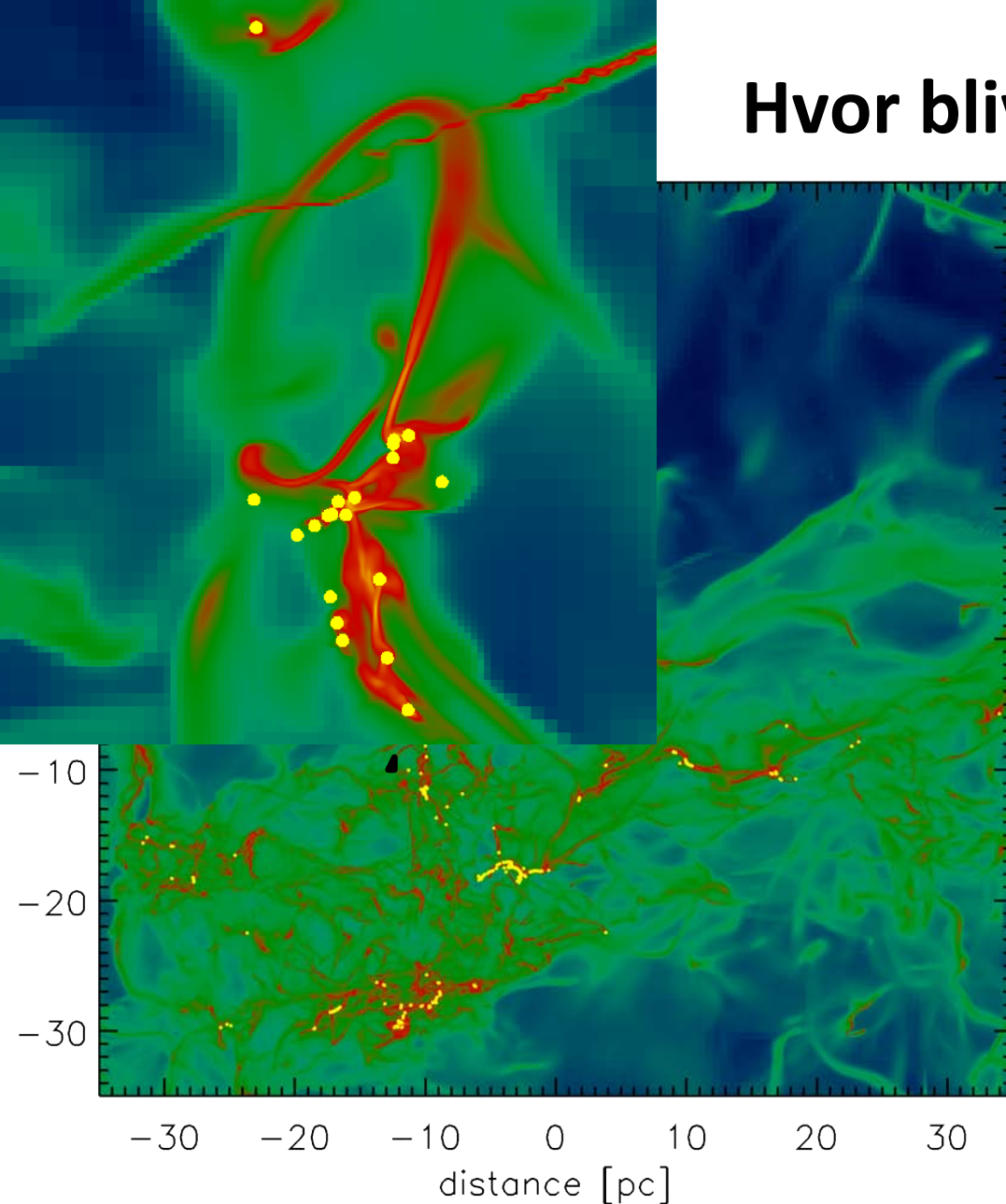
Hvor bliver stjerner dannet ?

Stjerner dannes i fokus punkterne for flere shocks.

Tætheden er der så høj at gassen bliver gravitationelt ustabil.

Det er turbulensen der bestemmer hvor stjerner bliver dannet

Det er tyngdekraften der er den ultimative grund til at de bliver dannet



Koblingen i mellem skalaer:



Giant Molecular Clouds: 50–1000 pc
→ Energi fra supernovaer



Fragmenter inden i molekylskyer: ~1 pc
→ "Puppen" hvor stjerner dannes



Pre-stellare kerner: 0,05 pc = 10.000 AU
→ En enkelt stjernes gas-sky

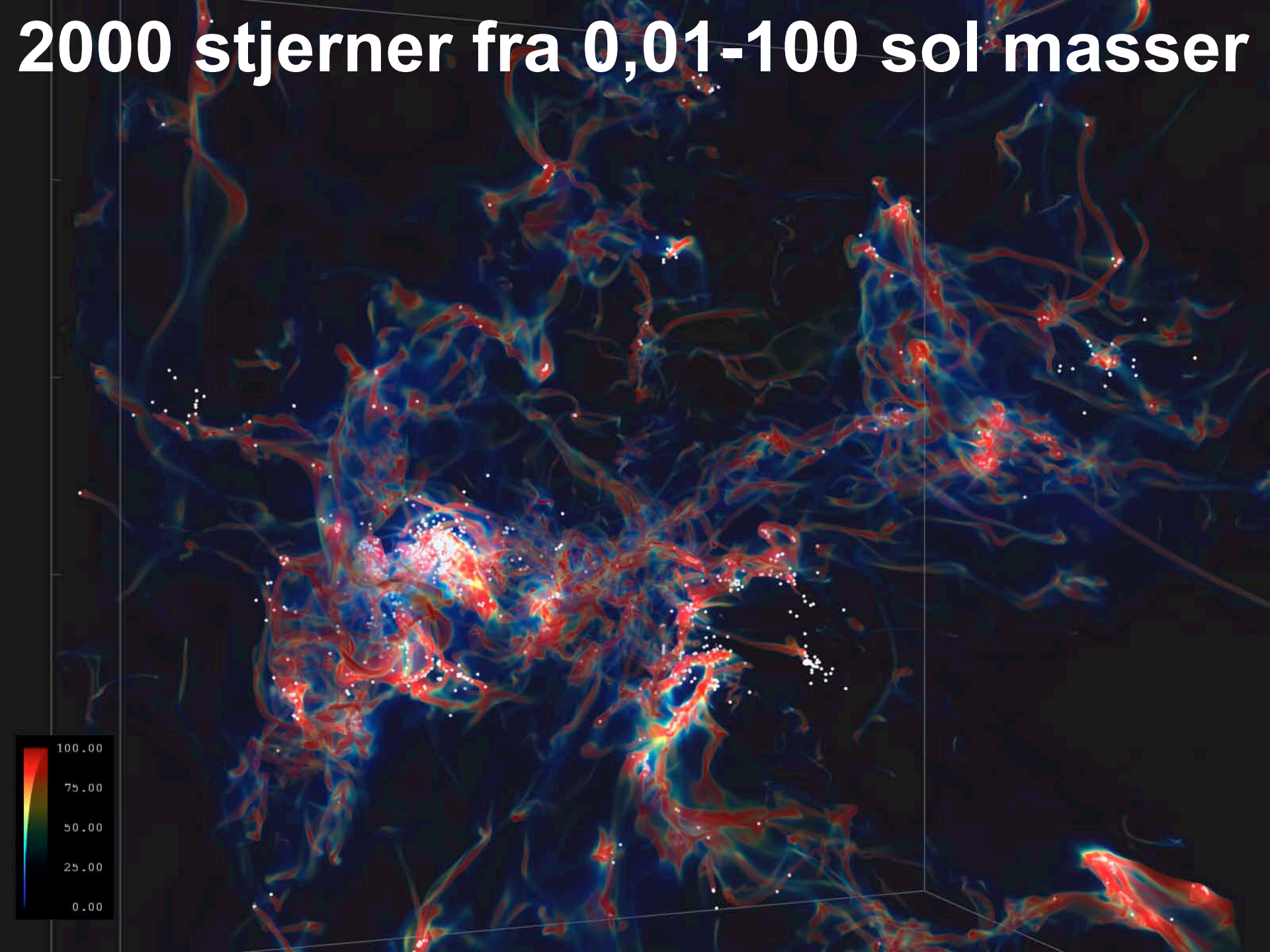


Det indre af et solsystem: 1 AU = 5×10^{-6} pc

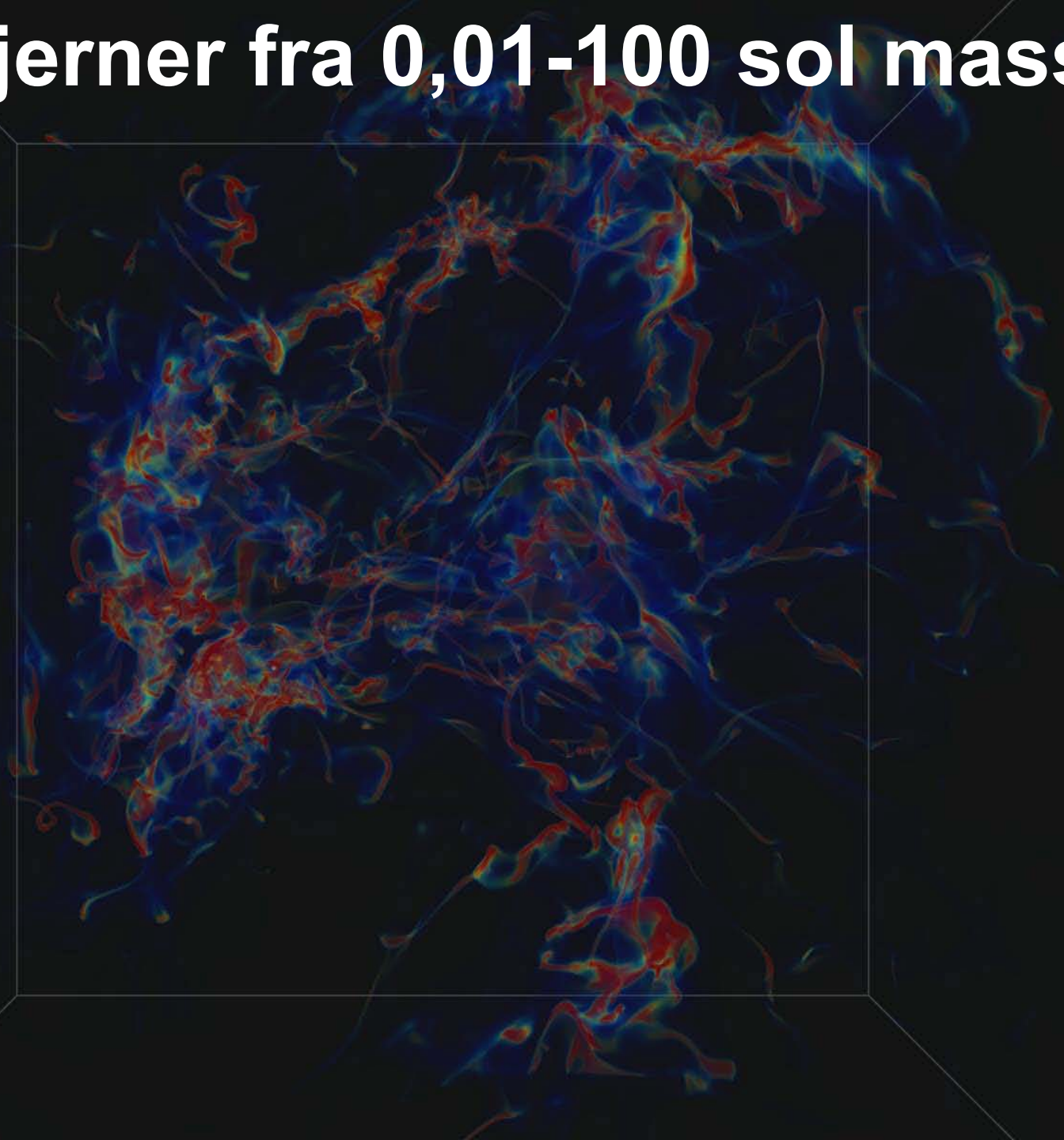
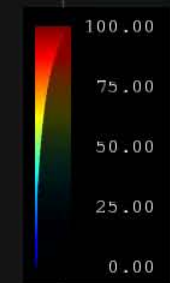
Afstanden ændrer sig med ~100 millioner!



2000 stjerner fra 0,01-100 sol masser



2000 stjerner fra 0,01-100 sol masser



Pause



Herschel's view of the Rosetta nebula

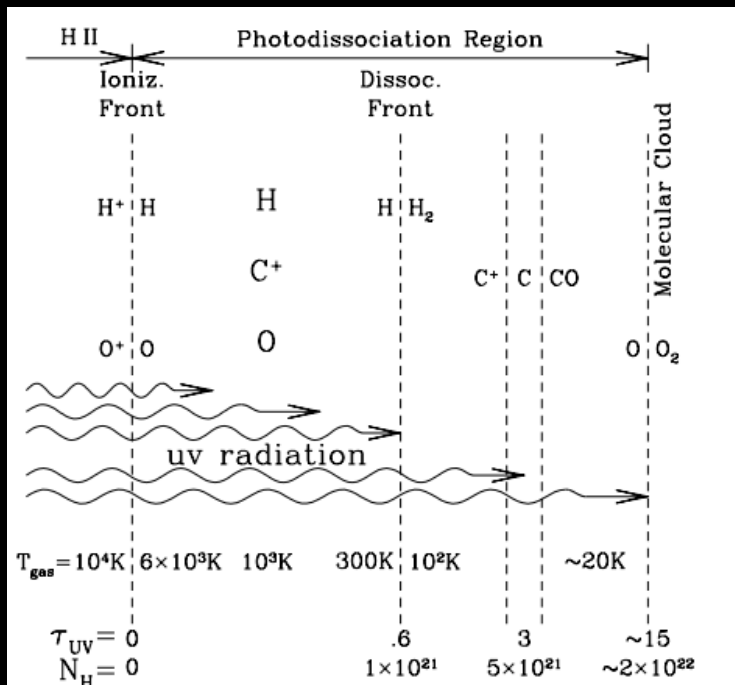


ISM & Molekyleskyer – Termisk Struktur

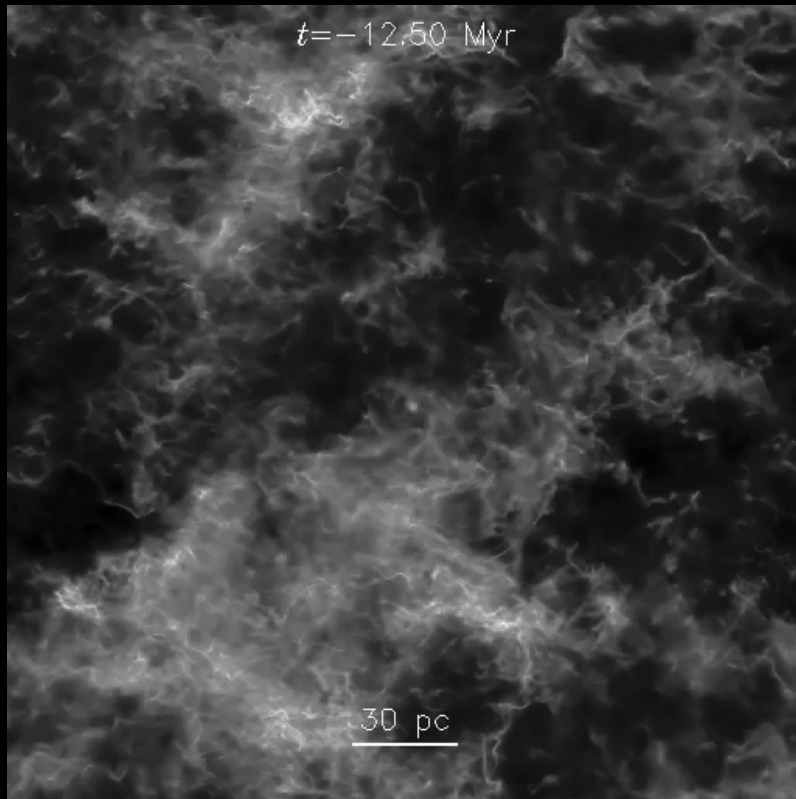
Gassen findes som ioniseret, neutral og molekylær:

- Plasma $\sim 1.000.000$ K (ioniseret)
- Varm ~ 8.000 K (ioniseret & neutral)
- Kold $\sim 100 - 1.000$ K (neutral)
- Molekylær $\sim 5-100$ K

Tryk ligevægt : Tryk \sim Tæthed \times Temperatur $\sim 10^4$ K cm^{-3}
 → Stjerner dannes i kold molekylær gas



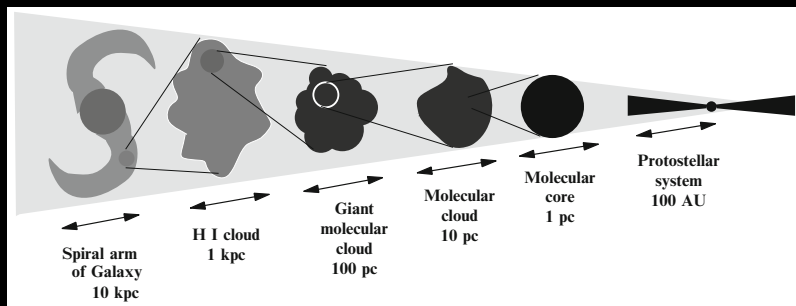
ISM & Molekyleskyer - Dynamik



- ISM er dynamisk og turbulent, tyngdekraften kobler store og små skalaer, og samler gas på parsec skala til en stjerne

$$E_{\text{term}} \approx E_{\text{grav}} \approx E_{\text{kin}} \approx E_{\text{mag}} \approx E_{\text{c-ray}} \approx E_{\text{rad}}$$

- For at observere det interstellare medium bruger man især teleskoper og satellitter der kan se i de infrarøde, sub-mm og radio området
- Interferometre som ALMA og VLA har høj opløsning og kan se små-skala struktur
- Satellitter som Spitzer og Herschel og single-dish teleskoper har lav opløsning, men kan se store dele af himlen



Stjernerdannelses områder

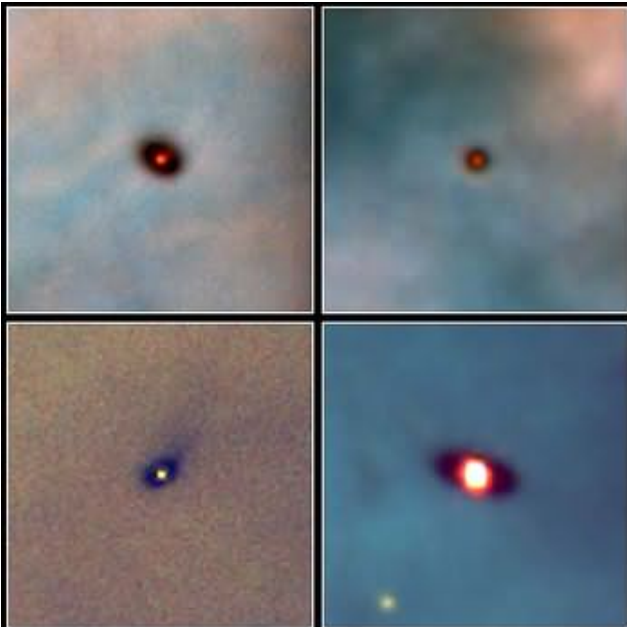
Orion tågen



Trifid tågen



Stjernedannelse

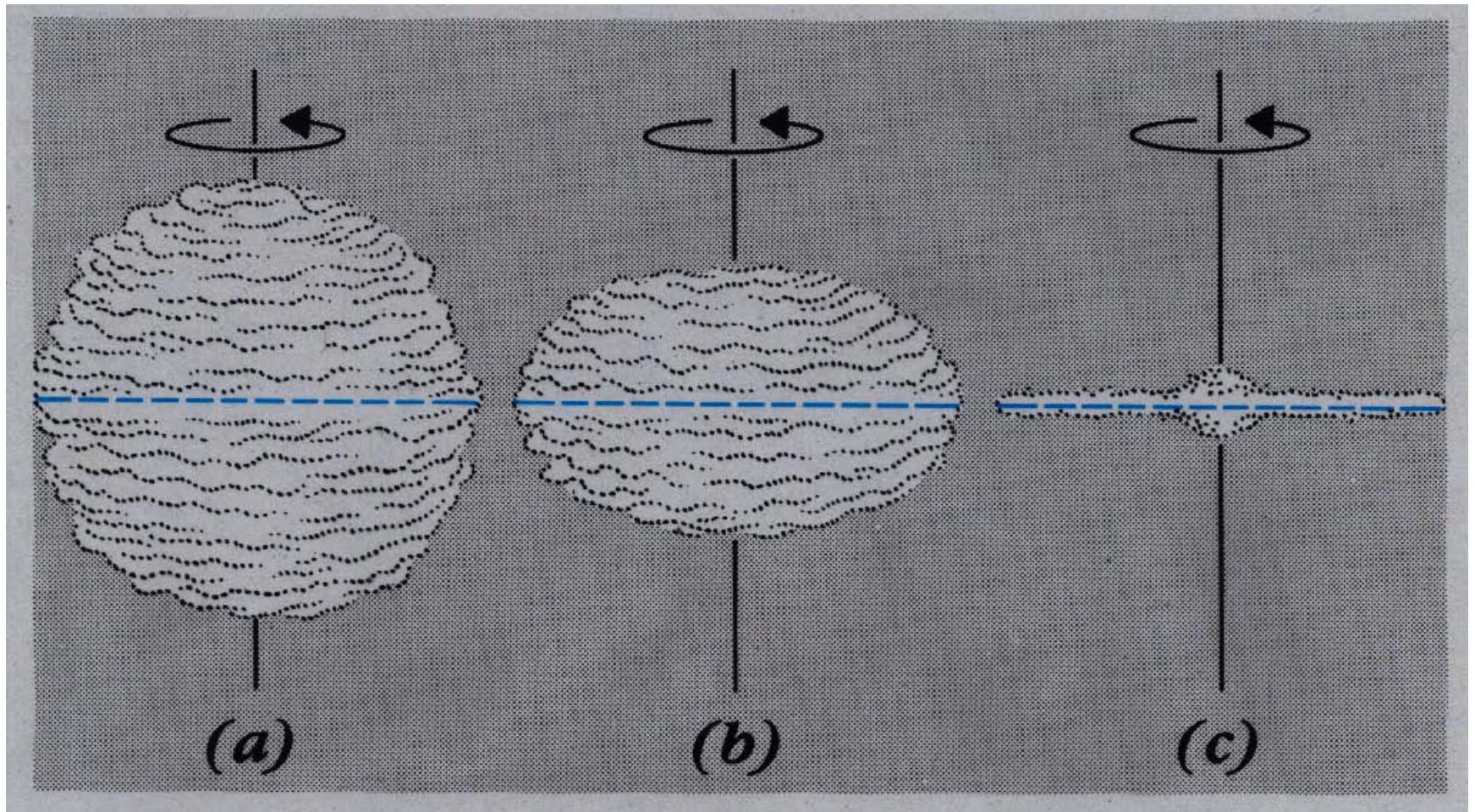


Protoplanetary Disks
Orion Nebula

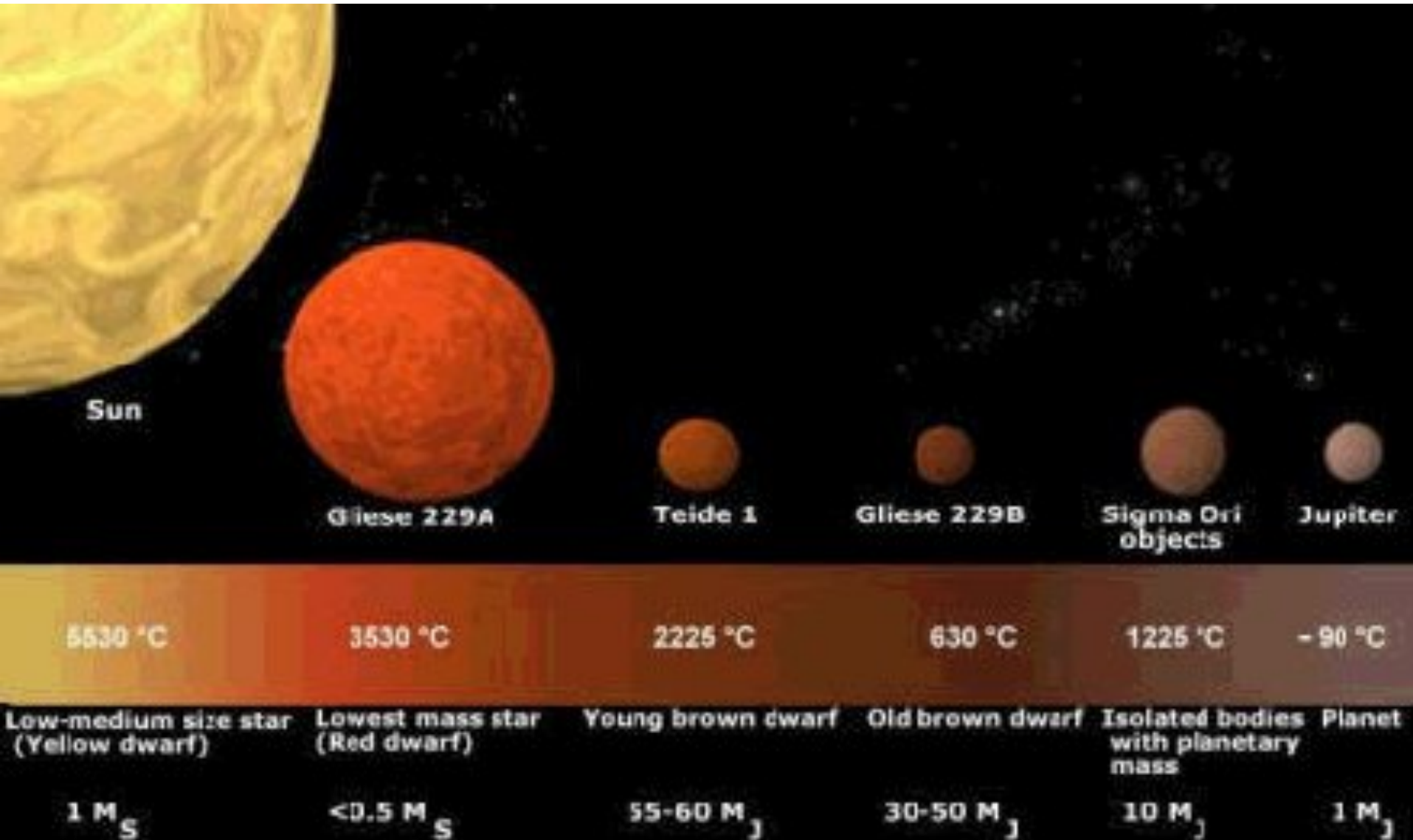
HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

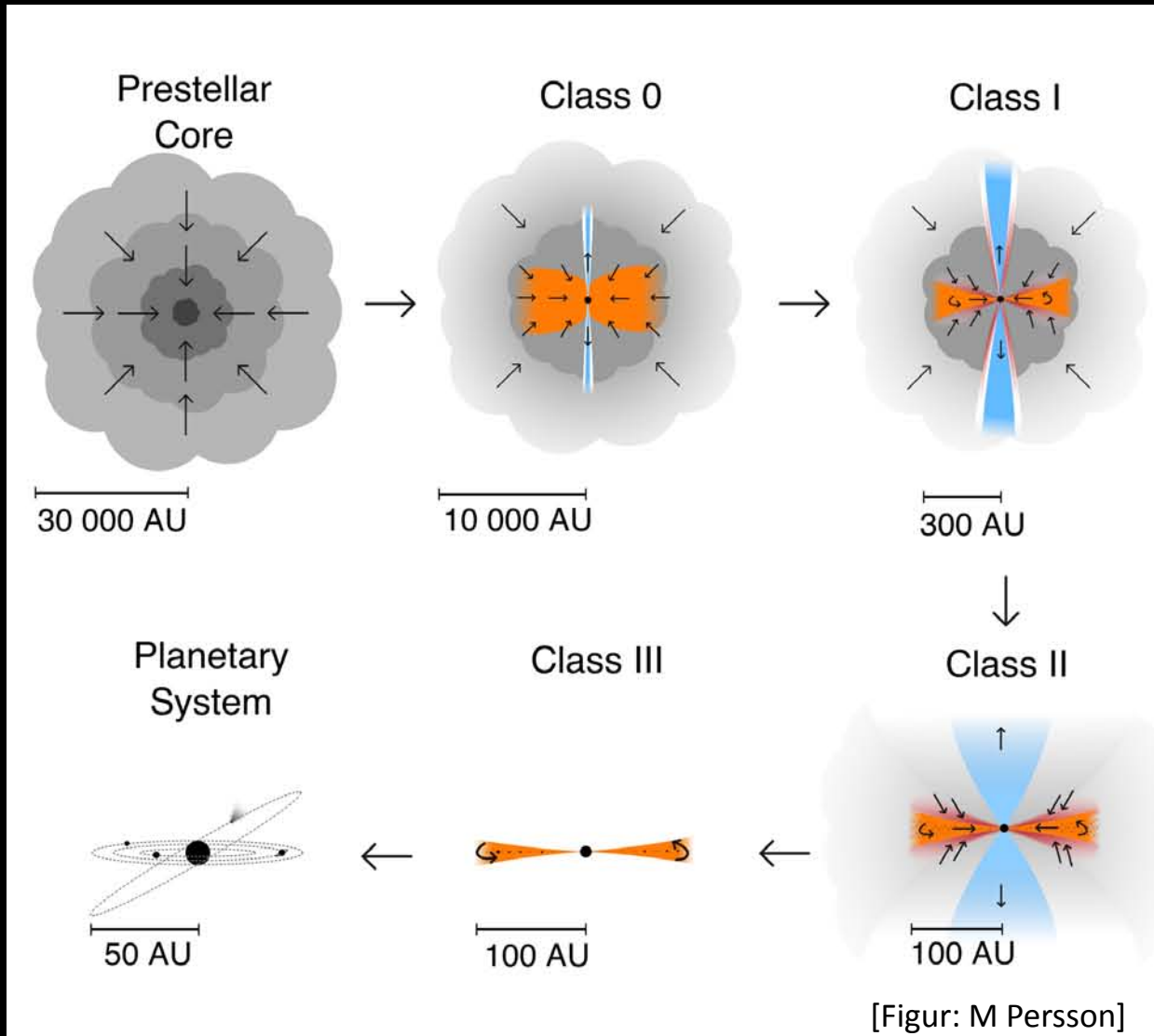
Stjerne og planet dannelse



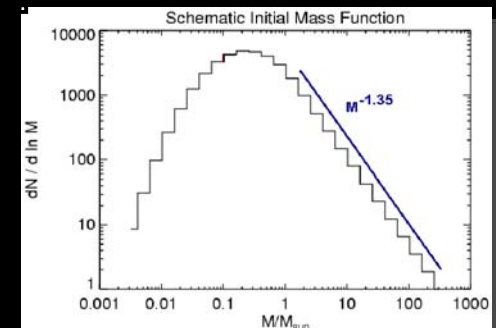
Fra stjerne til planet



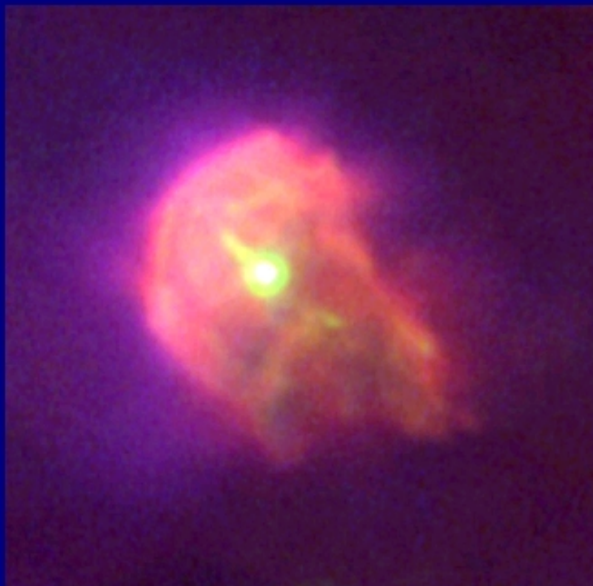
Stjernerdannelse – udvikling



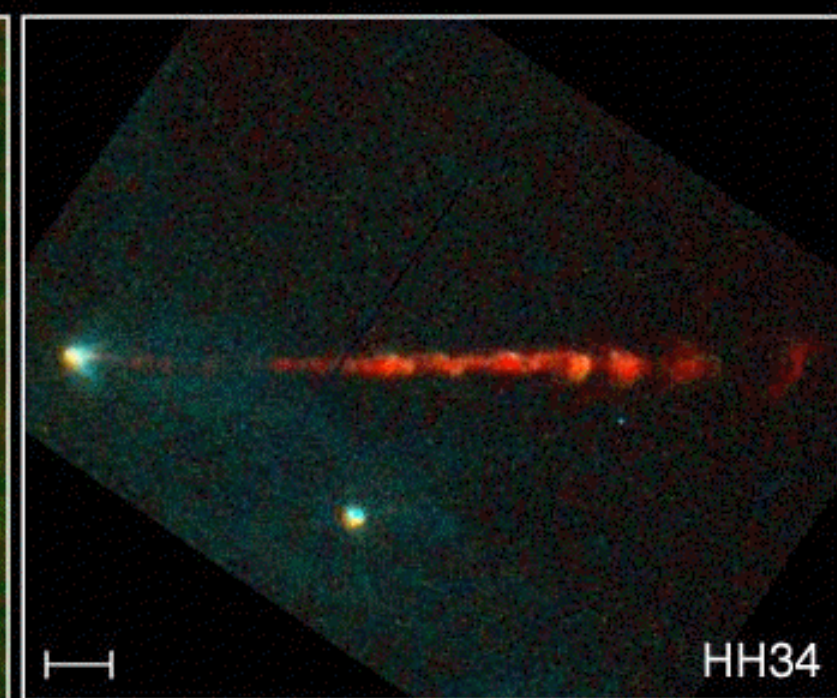
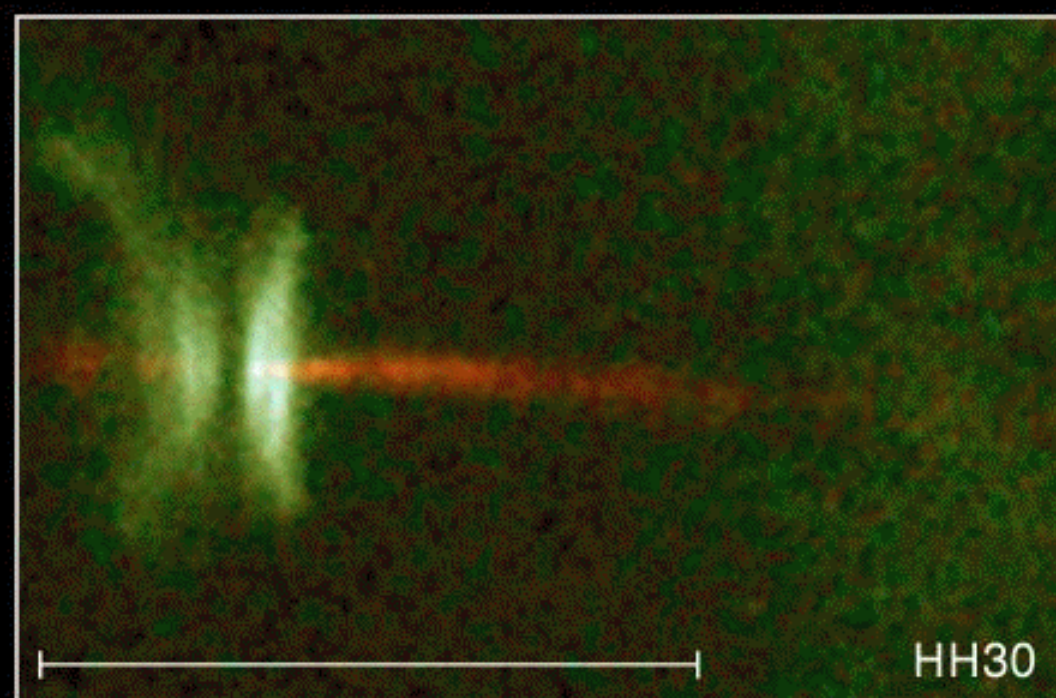
- Stjerner dannes langs filamenter og i fiks punkter for turbulensen
- Det er turbulensen som bestemmer hvilken fordeling af stjerner der dannes
- Når tyngdekraften vinder over trykket dannes stjernerne
- Den mest almindelige stjerne er $0,2 M_{\odot}$



New solar systems forming in Orion



Hubble Space Telescope photographs of proto-planetary disks in the star-forming nebula of Orion. <http://hubblesite.org>



Jets from Young Stars

HST • WFPC2

PRC95-24a • ST ScI OPO • June 6, 1995

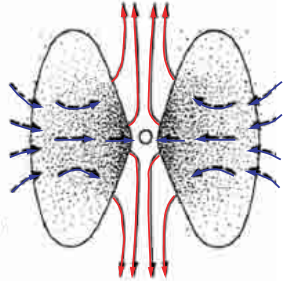
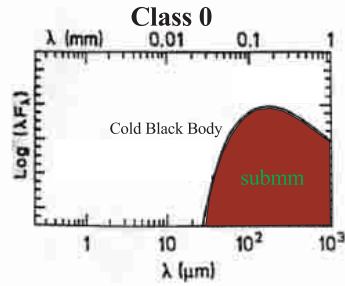
C. Burrows (ST ScI), J. Hester (AZ State U.), J. Morse (ST ScI), NASA

Stjernerdannelse – klasser & observationer

Protostellar Phase

Pre-Main Sequence Phase

Formation of the central protostellar object

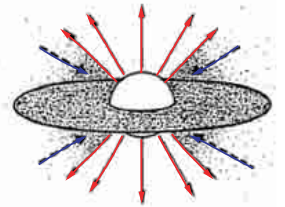
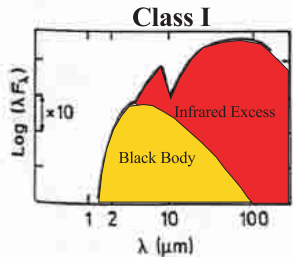


$t \sim 0$ yr

Young Accreting Protostar

$T_{bol} < 70$ K, $M_* \ll M_{env}$

$< 30\,000$ yr

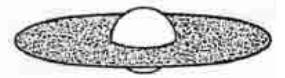
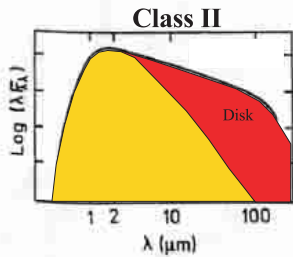


Evolved Accreting Protostar

$T_{bol} \sim 70-650$ K, $M_* > M_{env}$

$\sim 200\,000$ yr

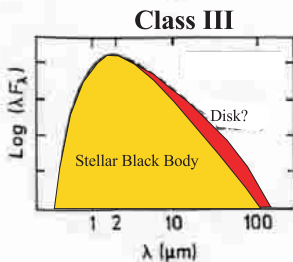
Birthline for
Pre-main sequence stars



Classical T Tauri Star

$T_{bol} \sim 650-2880$ K, $M_{Disk} \sim 0.01 M_{\odot}$

$\sim 1\,000\,000$ yr



Weak T Tauri Star

$T_{bol} > 2880$ K, $M_{Disk} < M_{Jupiter}$

$\sim 10\,000\,000$ yr

Time

Klasse systemet baseres på hældningen af spektral fordelingen af lyset ved infrarøde bølgelængder

- Class 0: Ingen spor af protostjernen i den spektrale energi fordeling (SED).
- Class I: Protostjernen begynder at kunne ses.
- Class II: Pre main sequence stjerne, også kaldet en (strong-line) T-tauri stjerne, der næsten ingen gas har tilbage ved kernen, men hvor der stadig er masser af gas i den proto-planetariske tilvækst skive.
- Class III: Pre main sequence stjerne – weak-line T-Tauri stjerne – hvor der ingen gas er tilbage i skiven, men stadig masser af støv

Birthline er det tidspunkt hvor lys fra stjernens overflade ses direkte

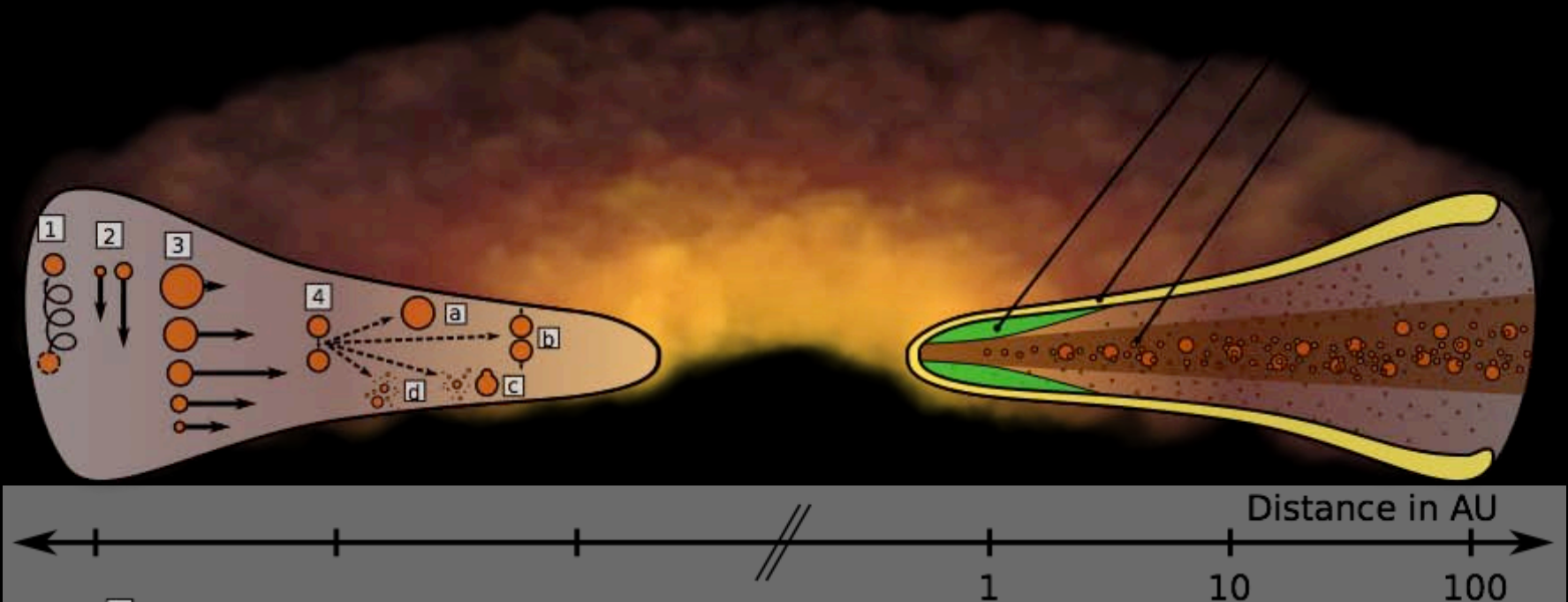
Støv og Protoplanetare skiver

Protoplanetare skiver findes om alle nydannede stjerner og indeholder støv og gas

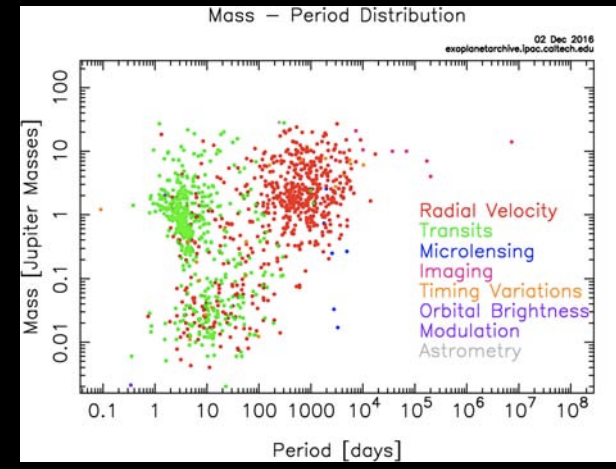
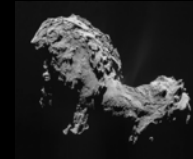
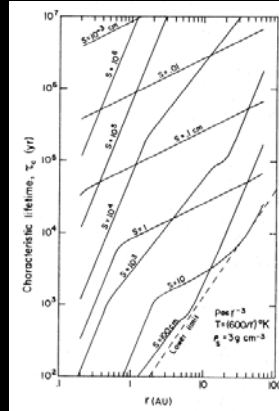
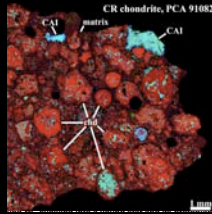
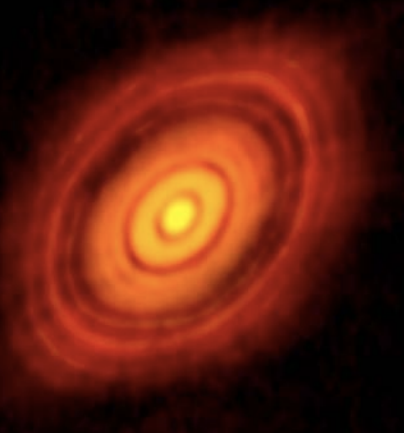
- Skiverne er en konsekvens af bevarelse af angulært moment i det indfaldene materiale
- Tætheden i de indre dele er høj nok til at støv smelter sammen til større partikler og giver mulighed for planet dannelse

Dynamik:

- Støv og gas kan kun falde ind, hvis de mister angulært moment
- Radieelt via viskositet → opvarmning
- Vertikalt med magnetfelter → vinde og jets
- Magnetfelter, stråling, kemi, og støv spiller alle en vigtig rolle for udviklingen i en protoplanetar skive



Planetdannelse og meter barrieren



μm ISM støv

mm - cm størrelse partikler
- chondruler

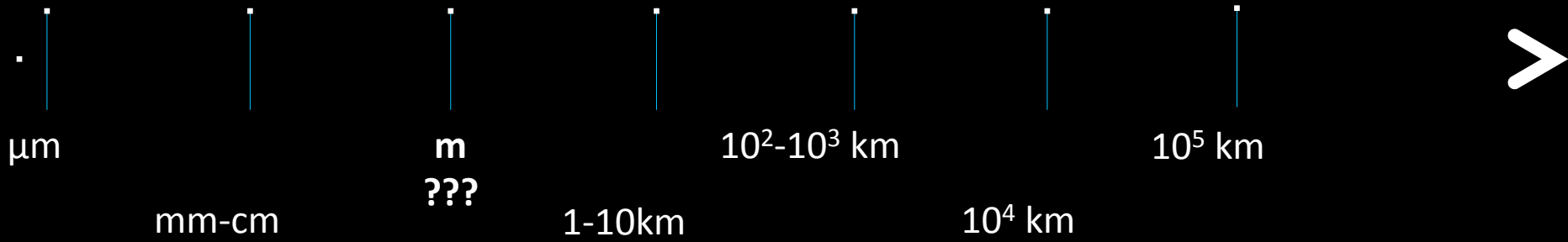
?? meter barrieren ??

asteroider og planetesimaler

embryos / protoplaneter

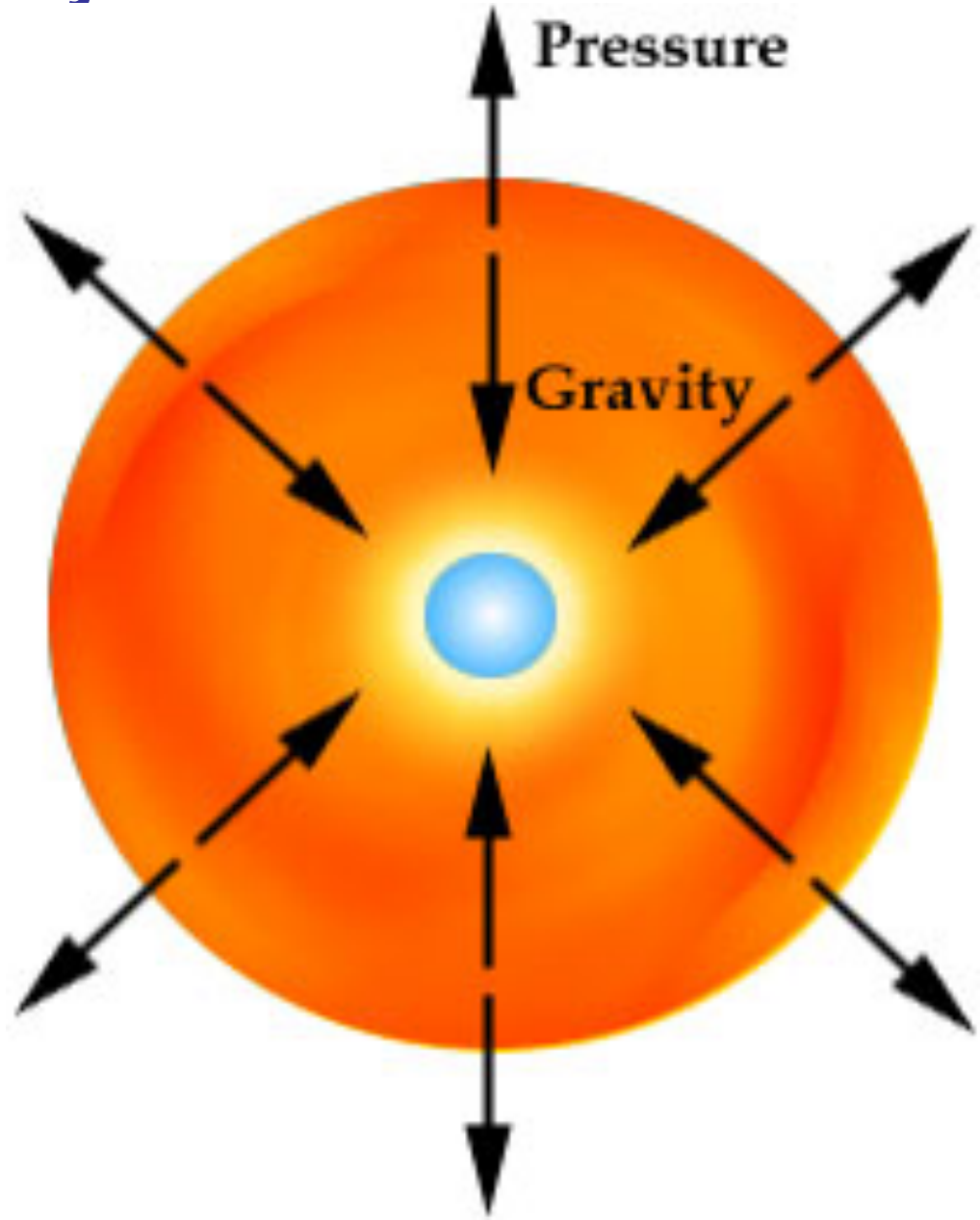
klippe planeter

gas giganter



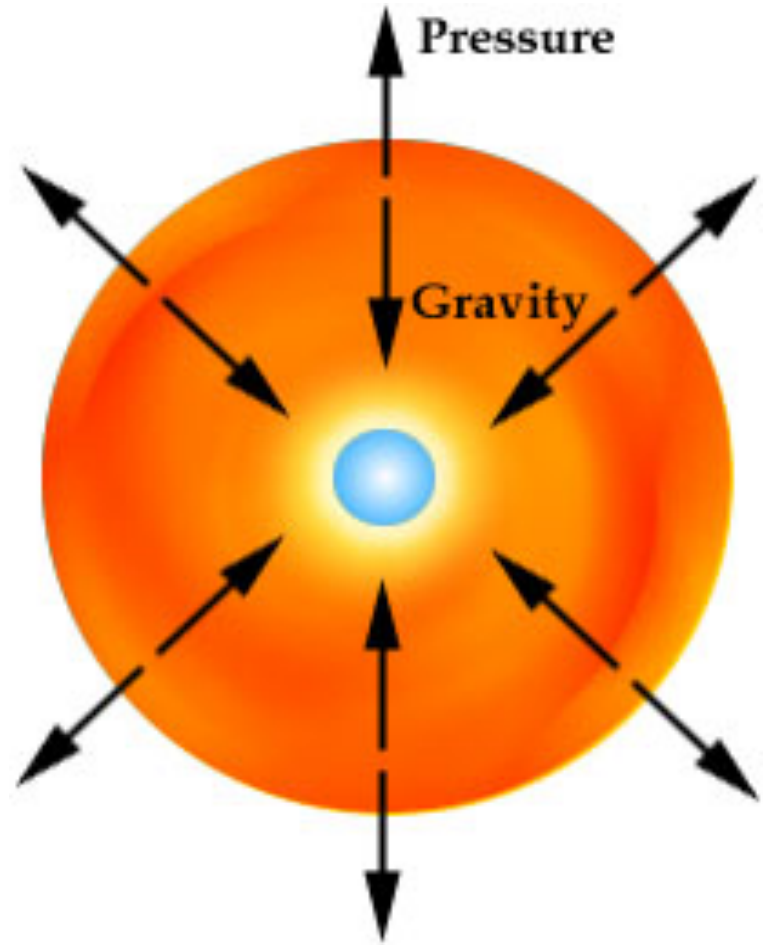
Stjerner

Stor gas kugle -
i ligevægt mellem
tyngdekraften og
gastrykket.

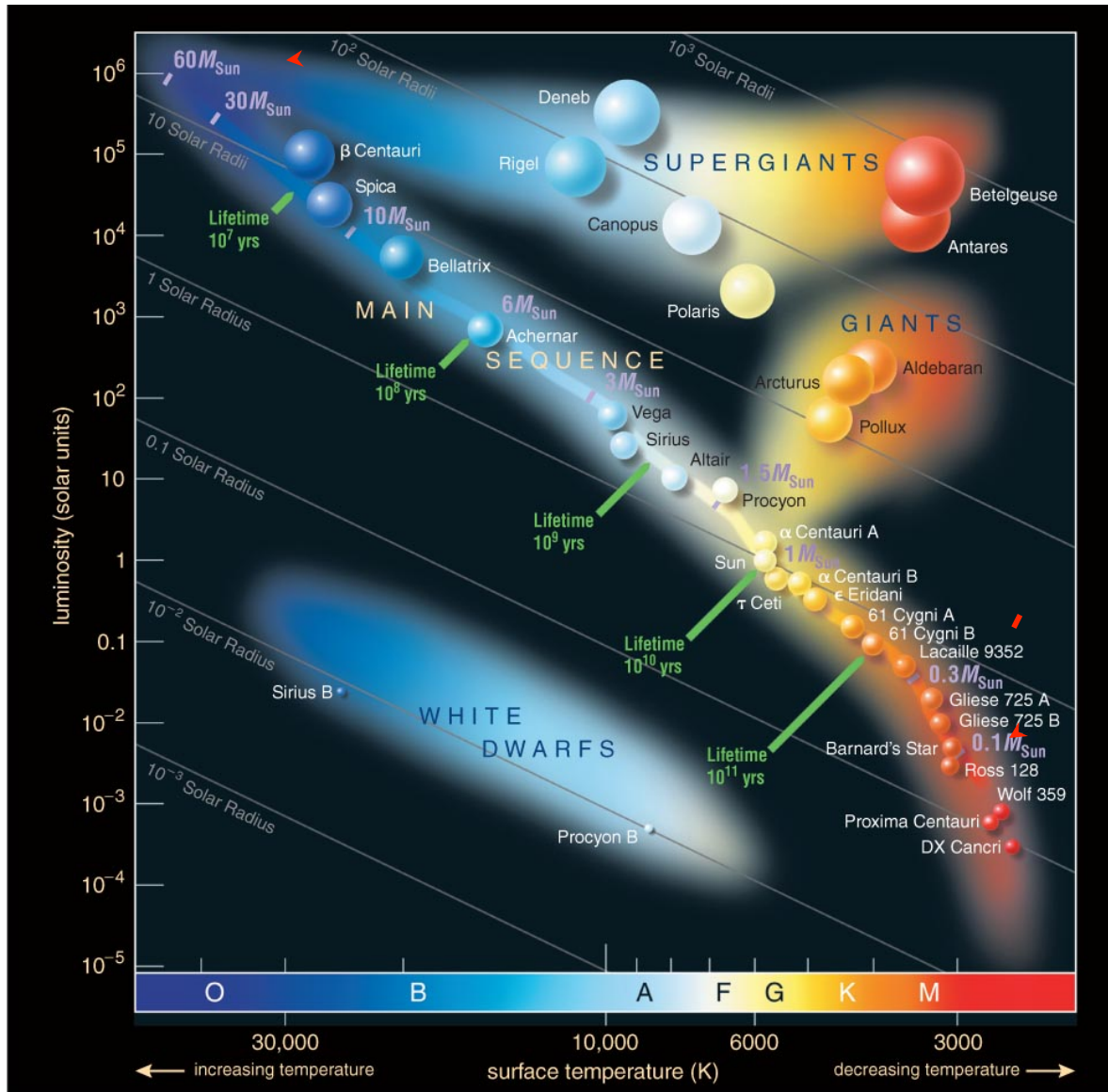


Stjerner

- Stor gas kugle.
- Masse er alt – småt er godt, men ikke for småt!
- $M_* > 0,08 M_{\text{sol}}$
- Stjerner producerer grundstoffer i deres indre.
- Grundstofferne kommer ud når stjernen dør.



Luminosity ·



Temperature

Stjerner tungere end $150M_{\text{sol}}$ vil blæse de yderste lag af.

Stjerner lettere end $0,08M_{\text{sol}}$ kan ikke få gang i fusions processerne.

EVOLUTION OF STARS

$M < 8 M_{\text{sol}}$

Small Star

Red Giant

Planetary Nebula

White Dwarf

Large Star

Red Supergiant

Supernova

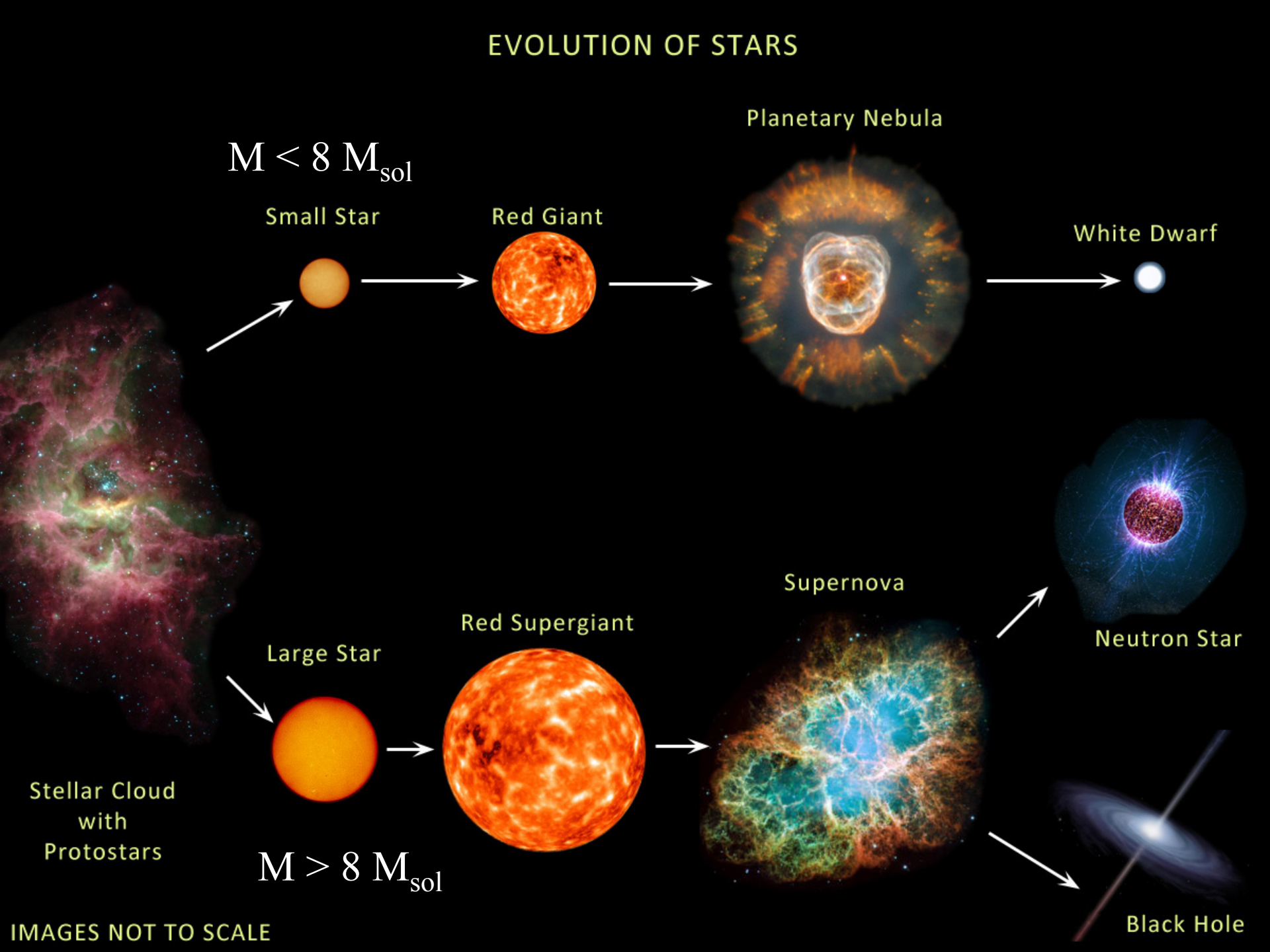
Neutron Star

$M > 8 M_{\text{sol}}$

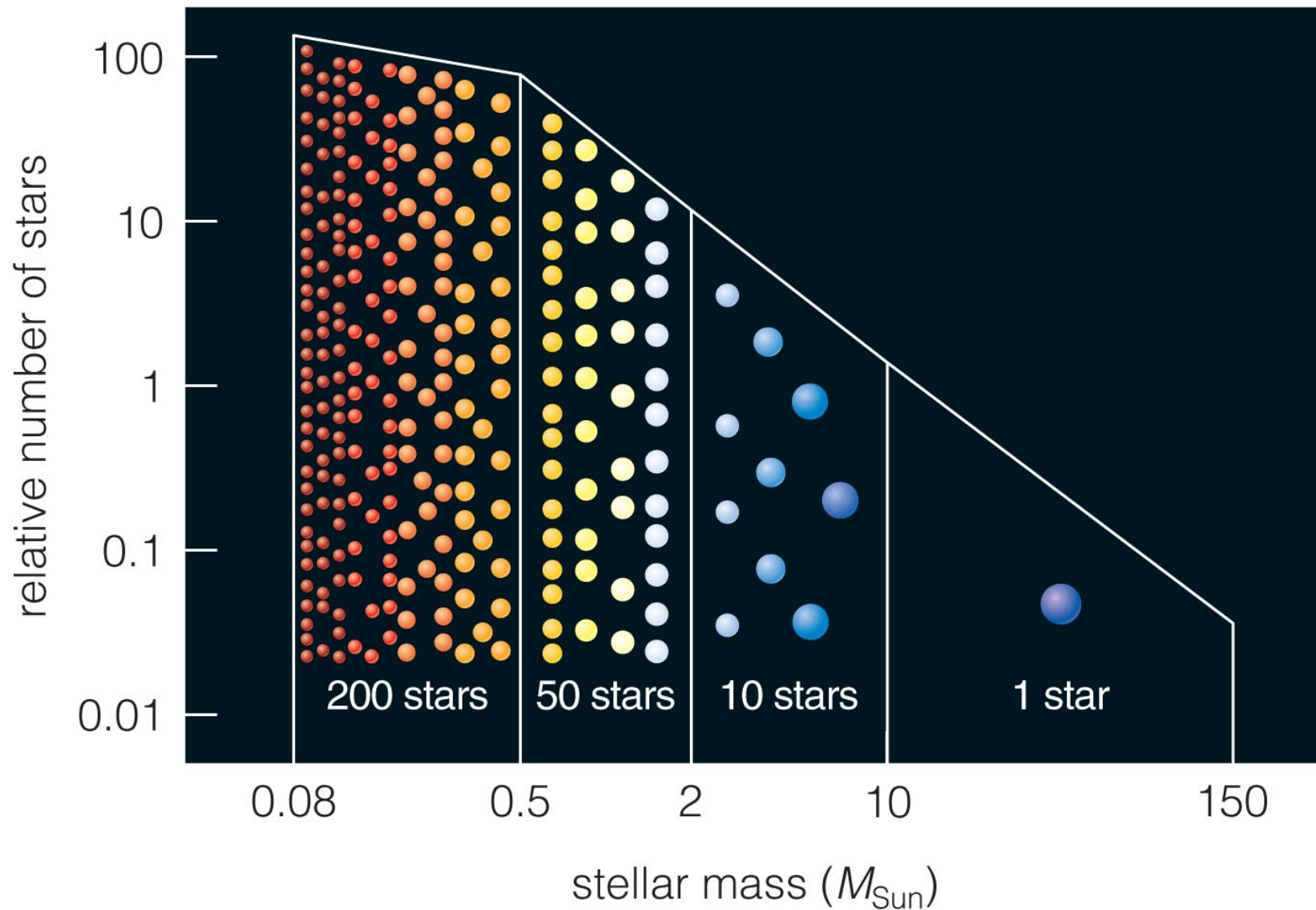
Black Hole

Stellar Cloud with Protostars

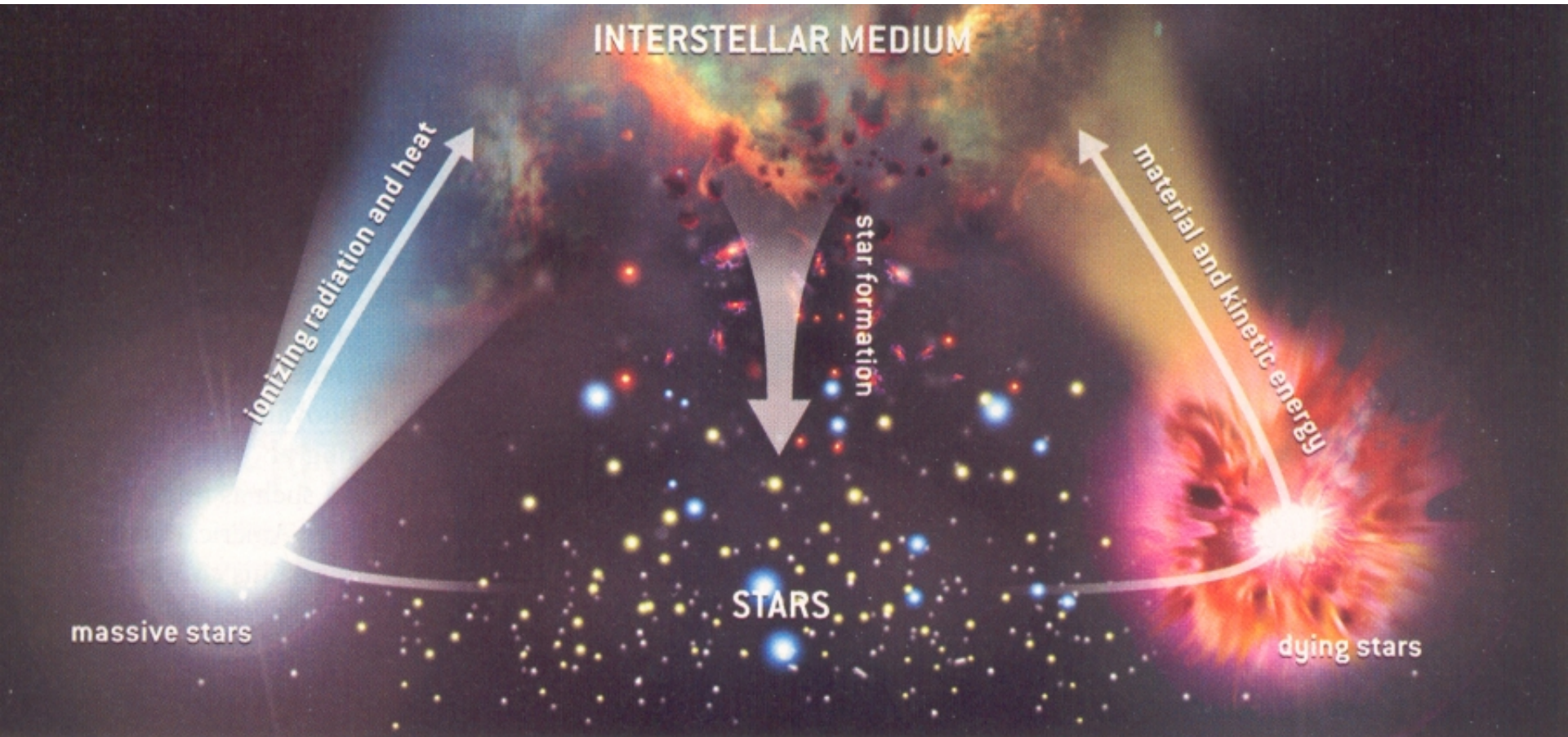
IMAGES NOT TO SCALE



Massen af nydannet stjerner i Mælkevejen



Kosmisk kredsløb

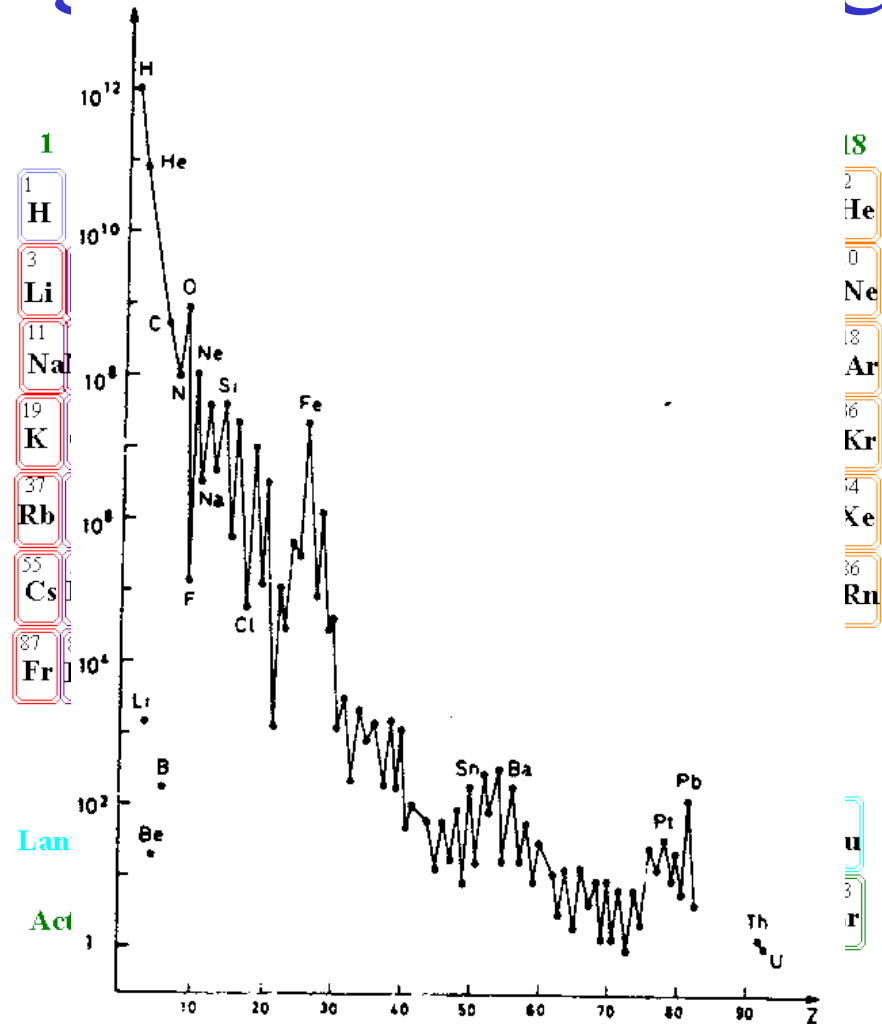


Hyppigheden af grundstoffer i dag

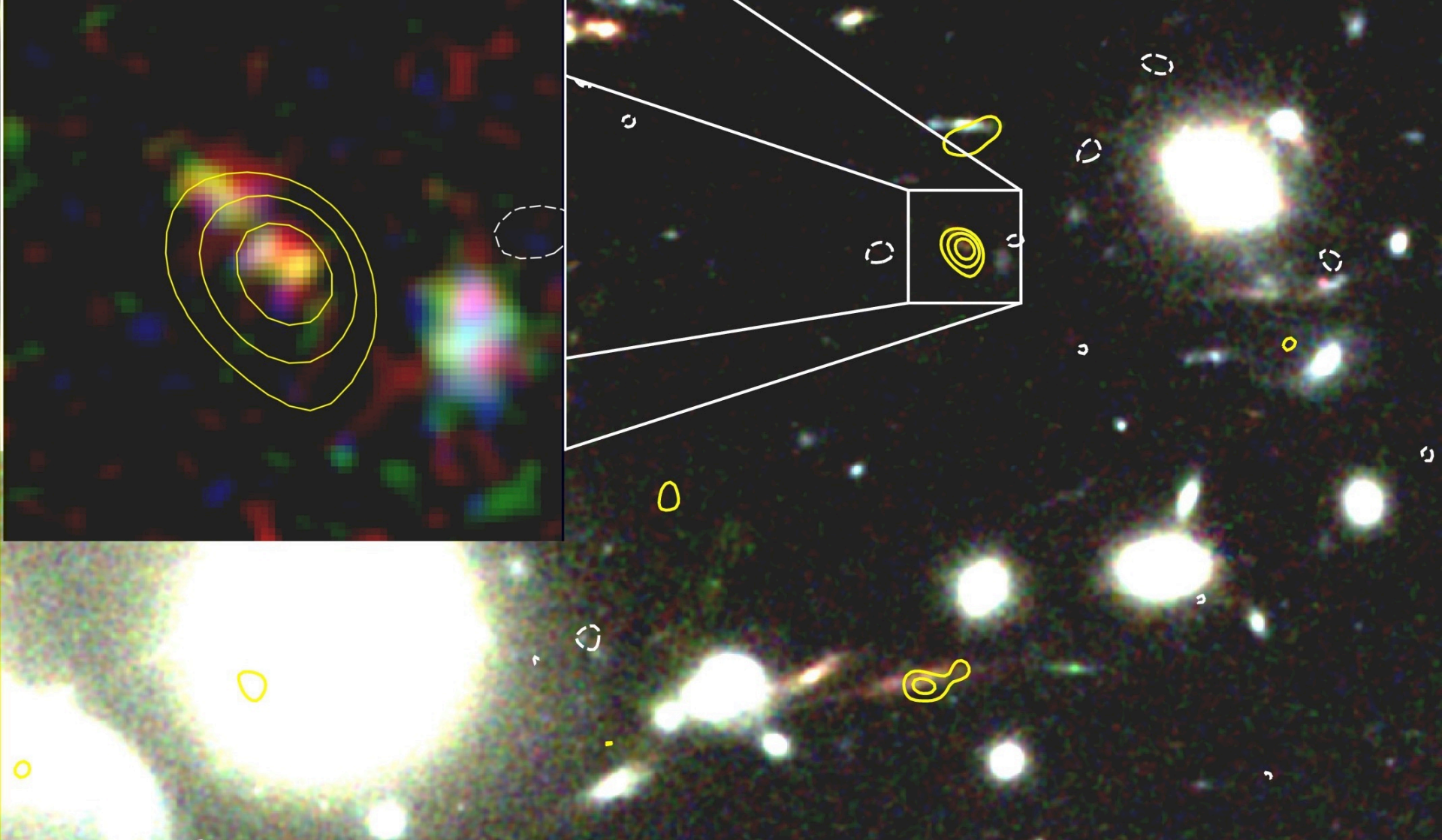
For hvert Au atom

~ 1 million Fe

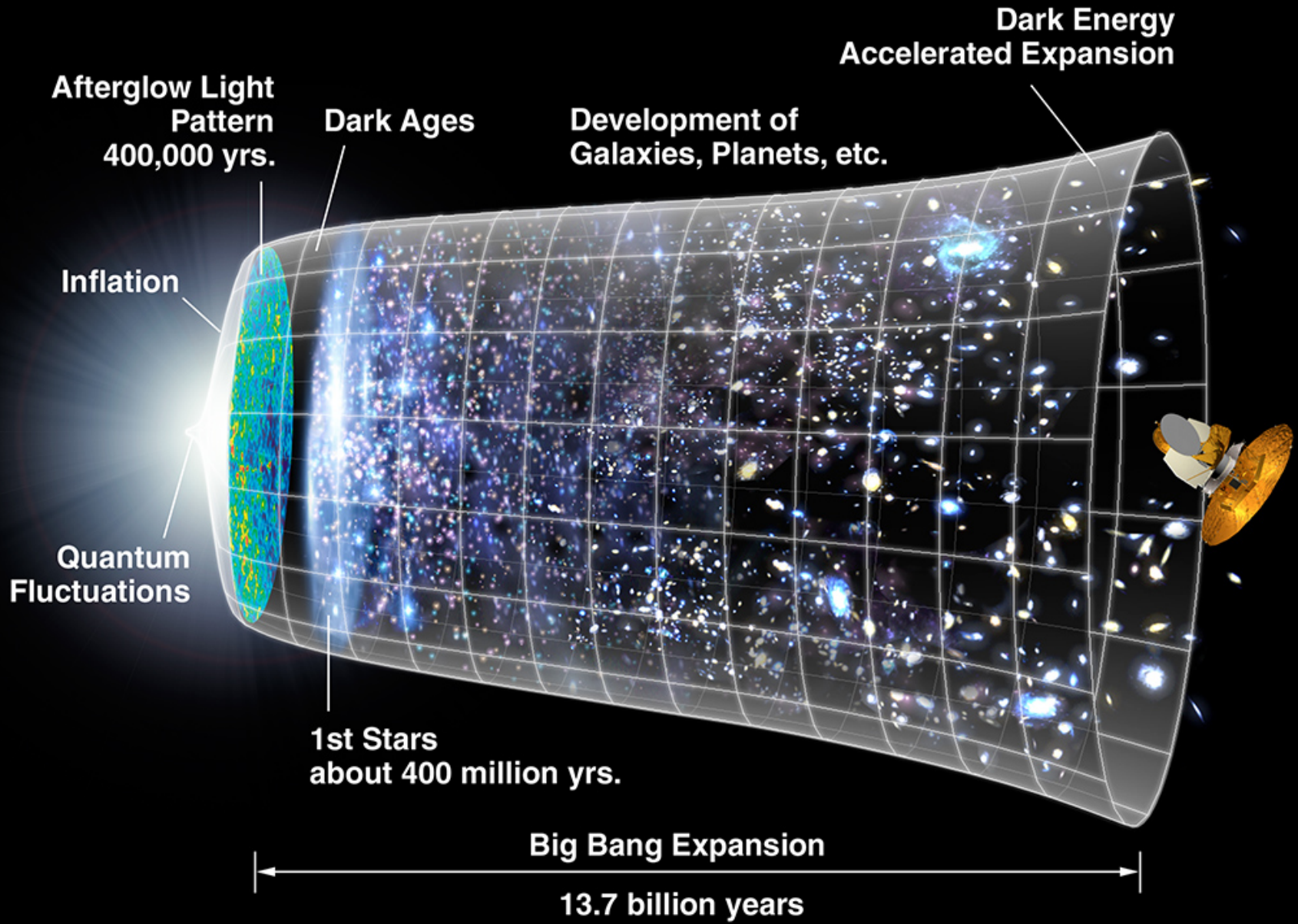
~ 30 million C



De mest hyppige: H, He, O, C, N, Ne, Si, Fe



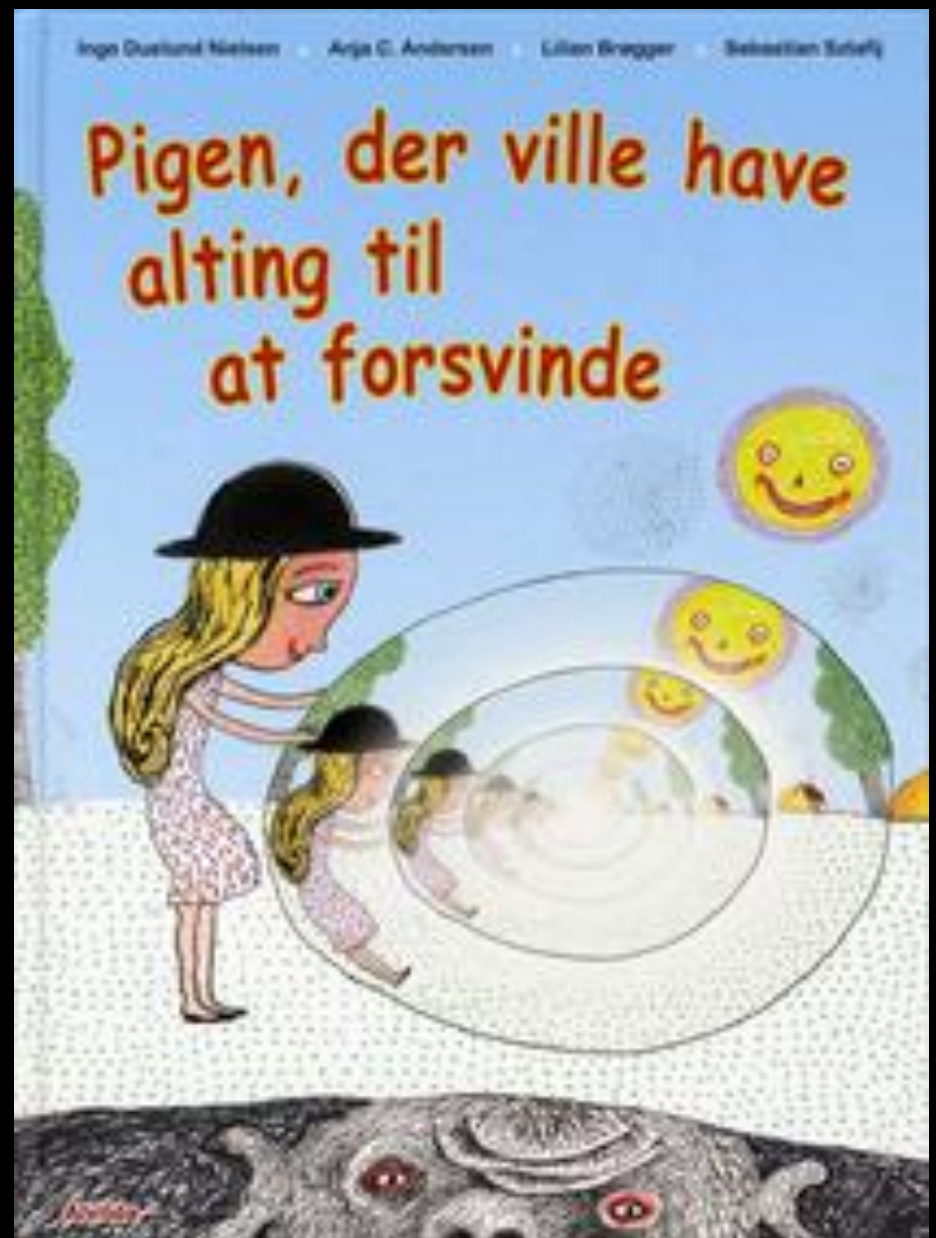
ALMA and Hubble observations of, cluster lensed (9x), dusty galaxy at $z = 7.5$ (~ 700 mio yr after BB) – dust mass $4 \times 10^7 M_{\odot}$



Mobilpay: 51 48 36 88



Pris: 150,- kr



Pris: 100,- kr

ANJA C. ANDERSEN

EN LILLE BOG OM UNIVERSET



LINDHARDT OG RINGHOF

Marie Curies liv og forskning forandrede verden.

At hun fandt og udforskede nye grundstoffer og deres hidtil ukendte egenskaber, var banebrydende for blandt andet den medicinske videnskab.

At hun som første kvinde modtog to Nobelpriser, var epokegørende for alle kvinder i hele verden.

At hun på trods af en fattig opvækst i et besat Polen formåede at uddanne sig i et andet europæisk land, er et håb for alle mennesker.

Frances Andreassen Østerfelt og Anja C. Andersen fortæller i *Marie Curie – et lys i mørket* deres historie om en af nyere tids helt ekstraordinære personligheder.

Frances Andreassen Østerfelt
Anja C. Andersen
Anna Błaszczuk

Marie Curie

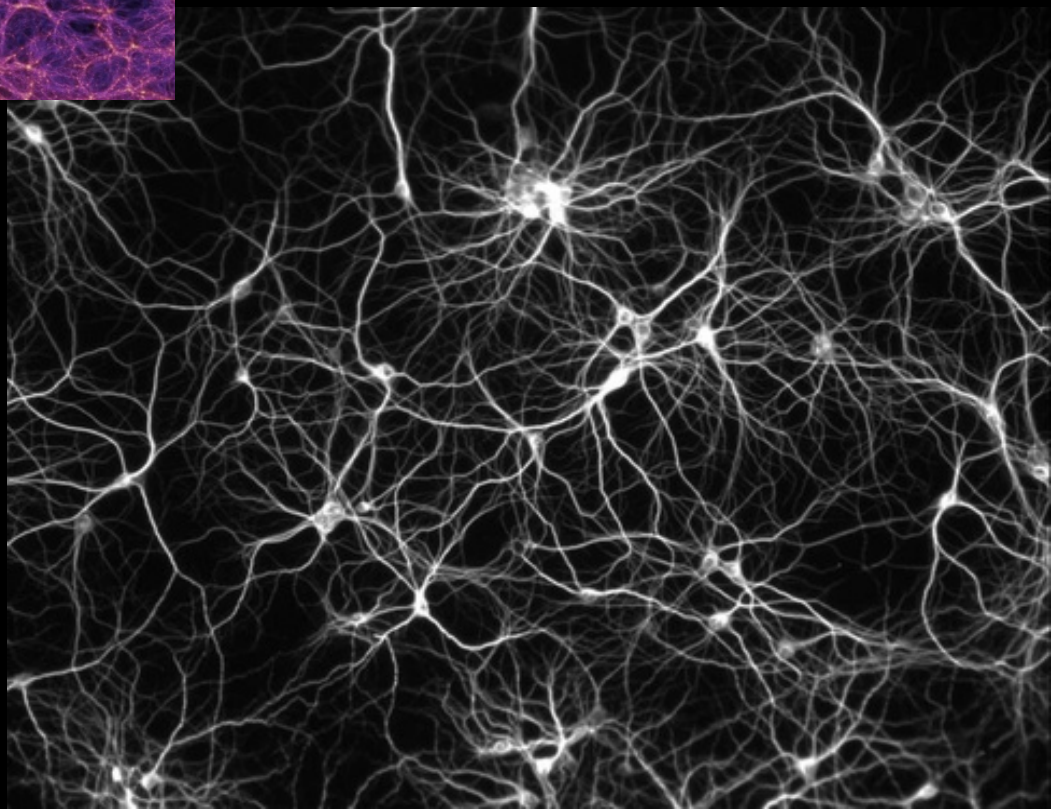
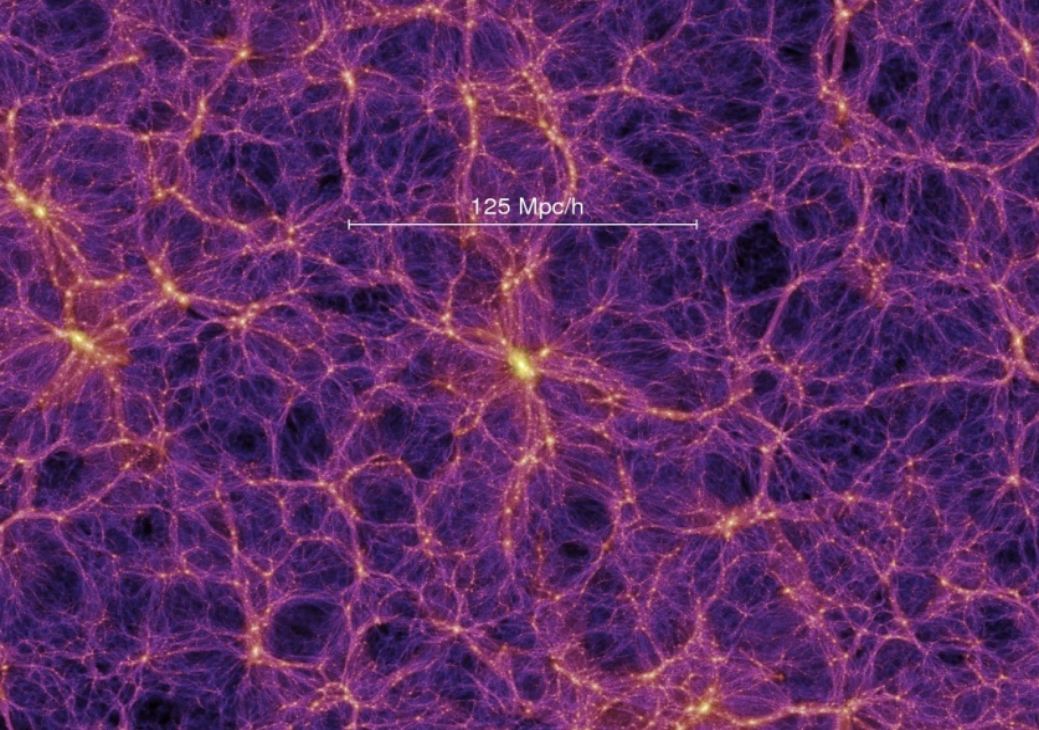
Et lys i mørket

Cobolt



Cobolt

- **Marie Curie** (med Frances Andreas Østerfelt og Anna Błaszczuk) udkommer d. 30/8-2018
- **Månen** (med Michael Linden-Vørnle) udkommer februar 2019



M

K

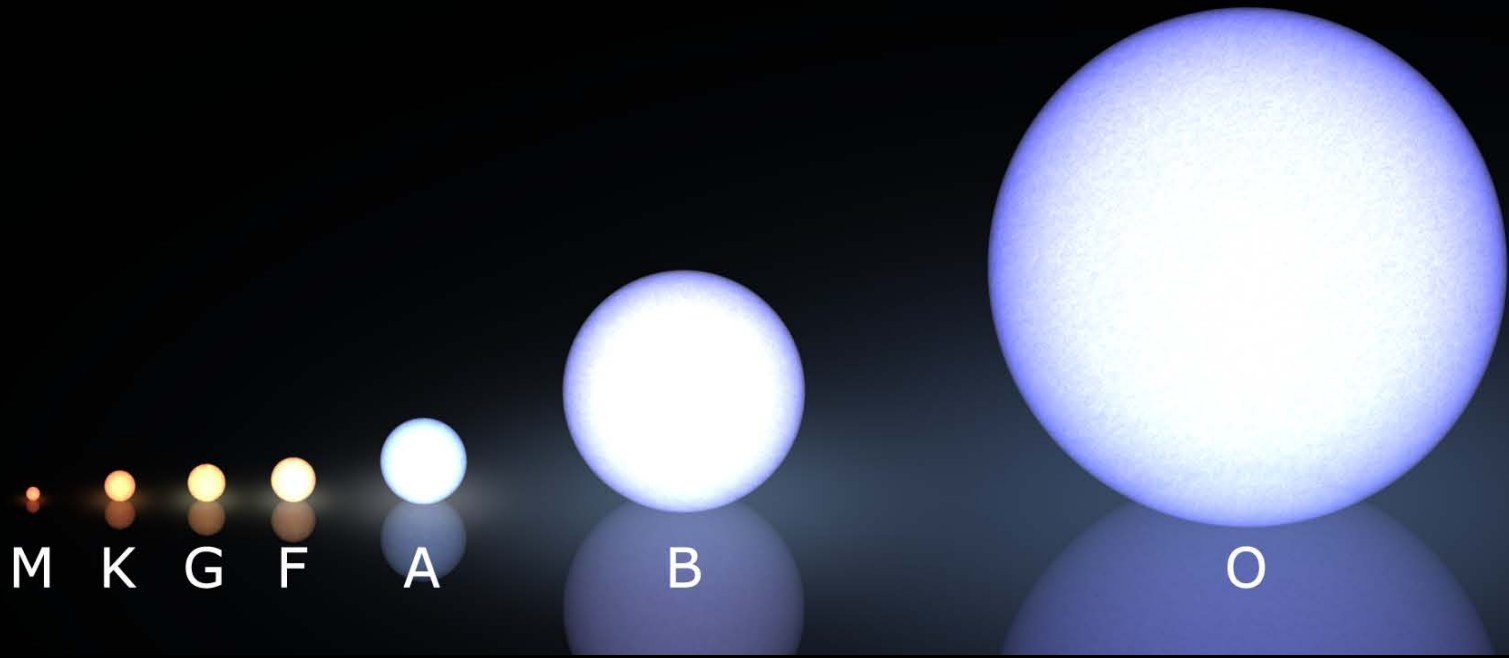
G

F

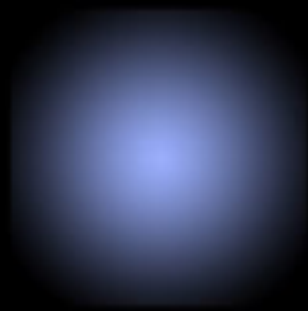
A

B

O

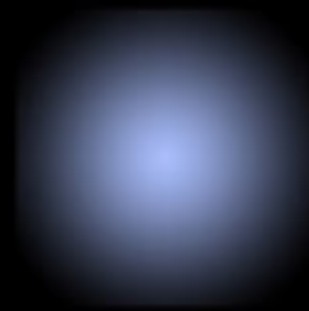


Star Colors



O

50.000 - 30.000



B

10.000 - 30.000



A

7.500 - 10.000



F

6500 - 7500



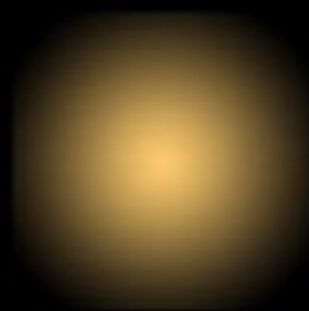
G

5000 - 6500



K

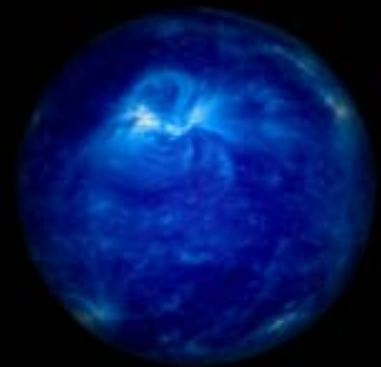
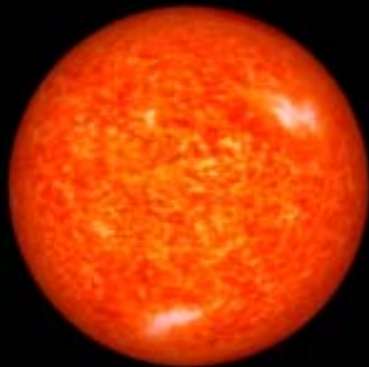
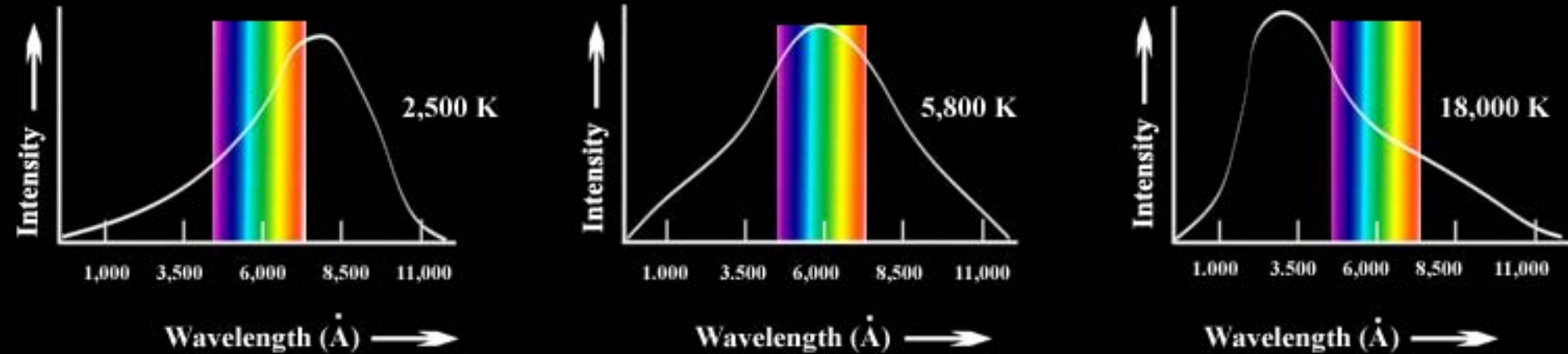
3500 - 5000



M

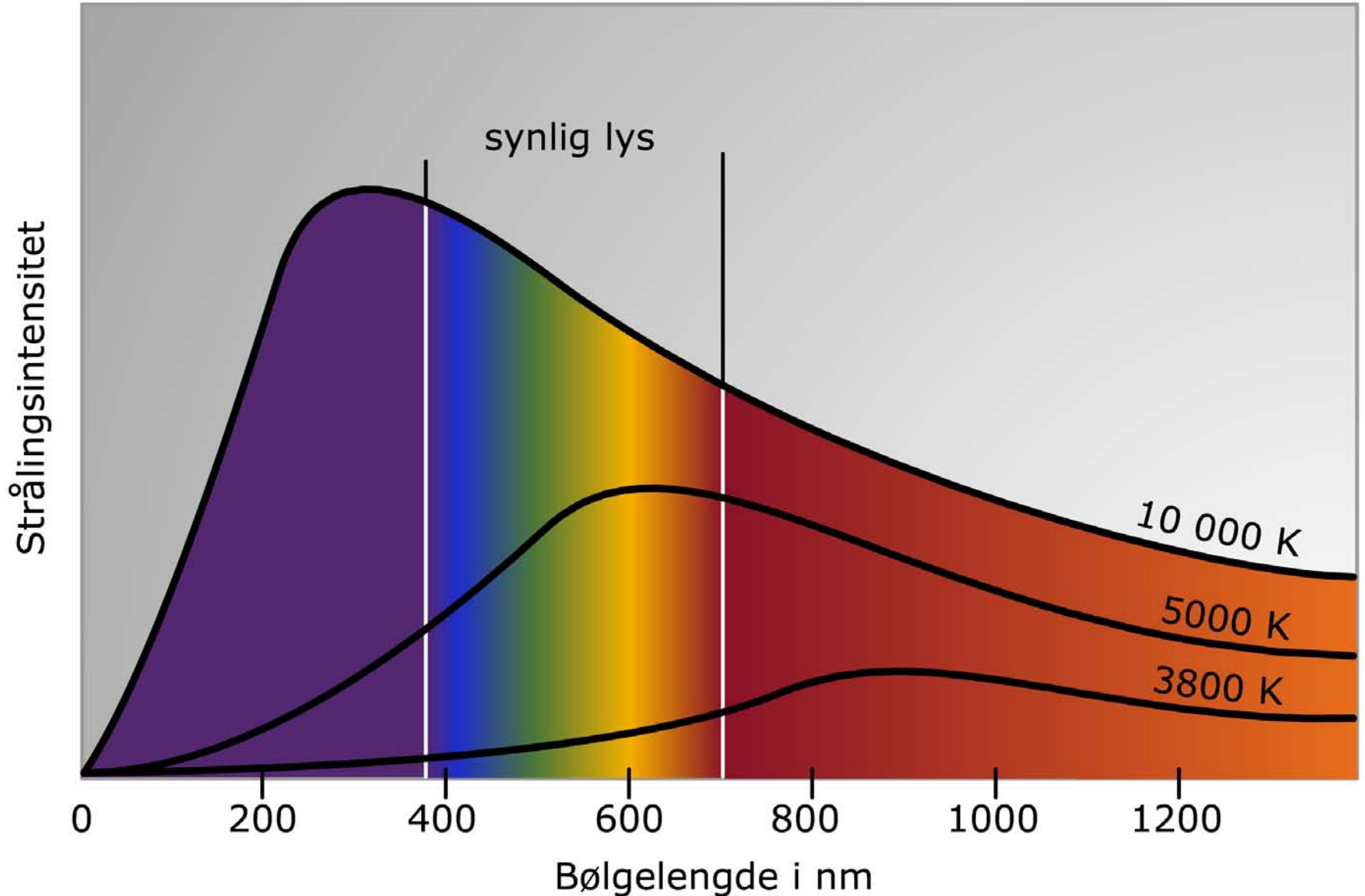
2000 - 3500

Stjerner farve afhænger af temperaturen som er en funktion af massen

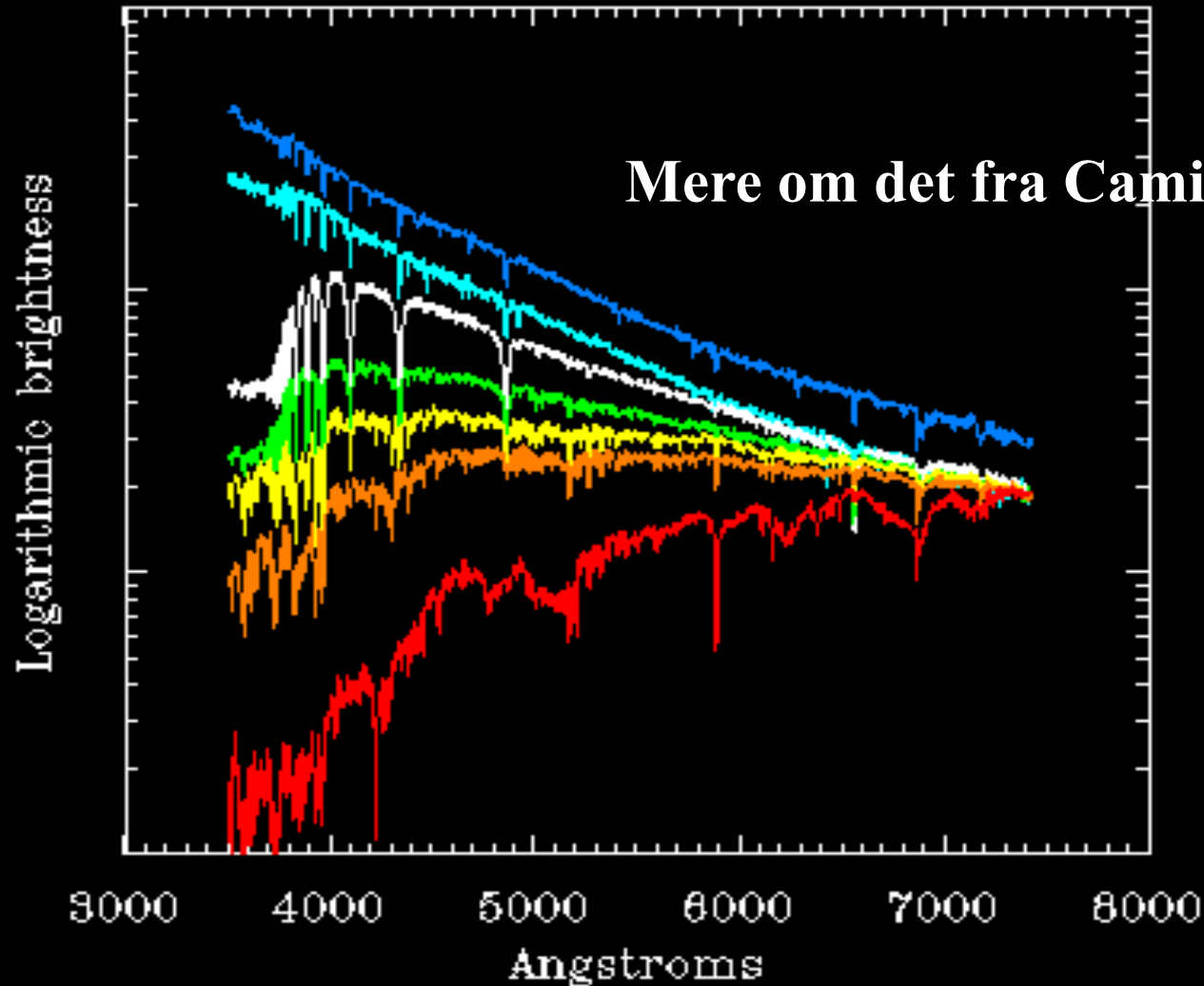


Colors are exaggerated

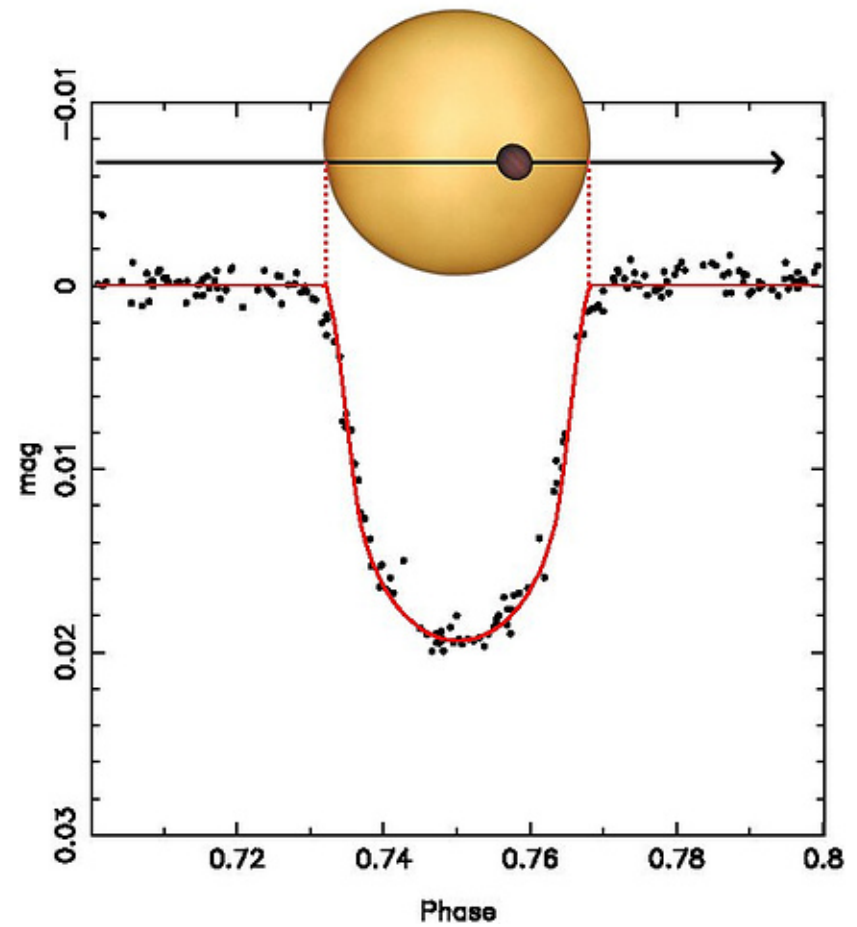
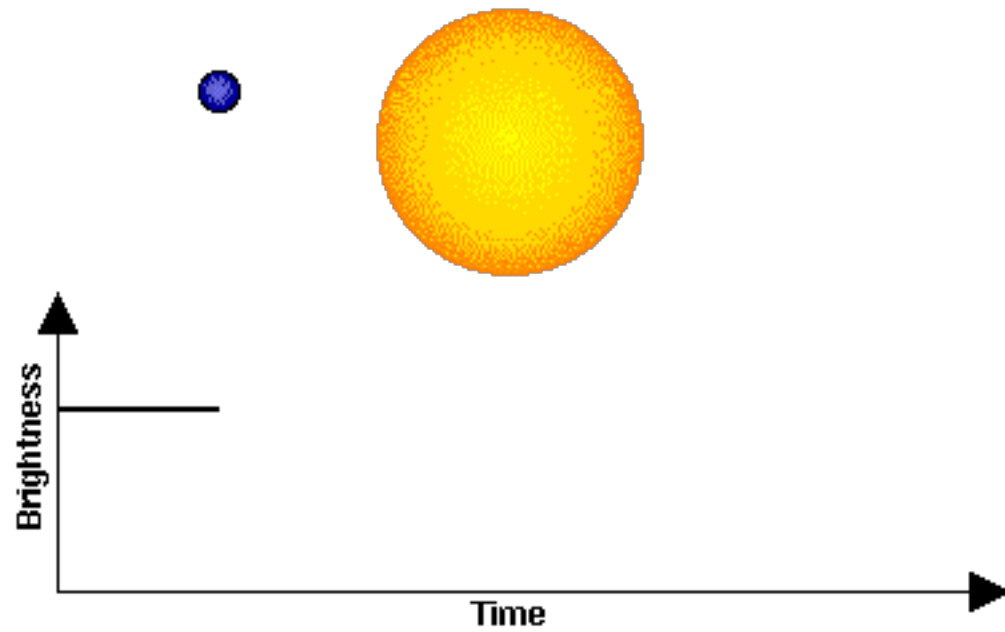
Planck kurve



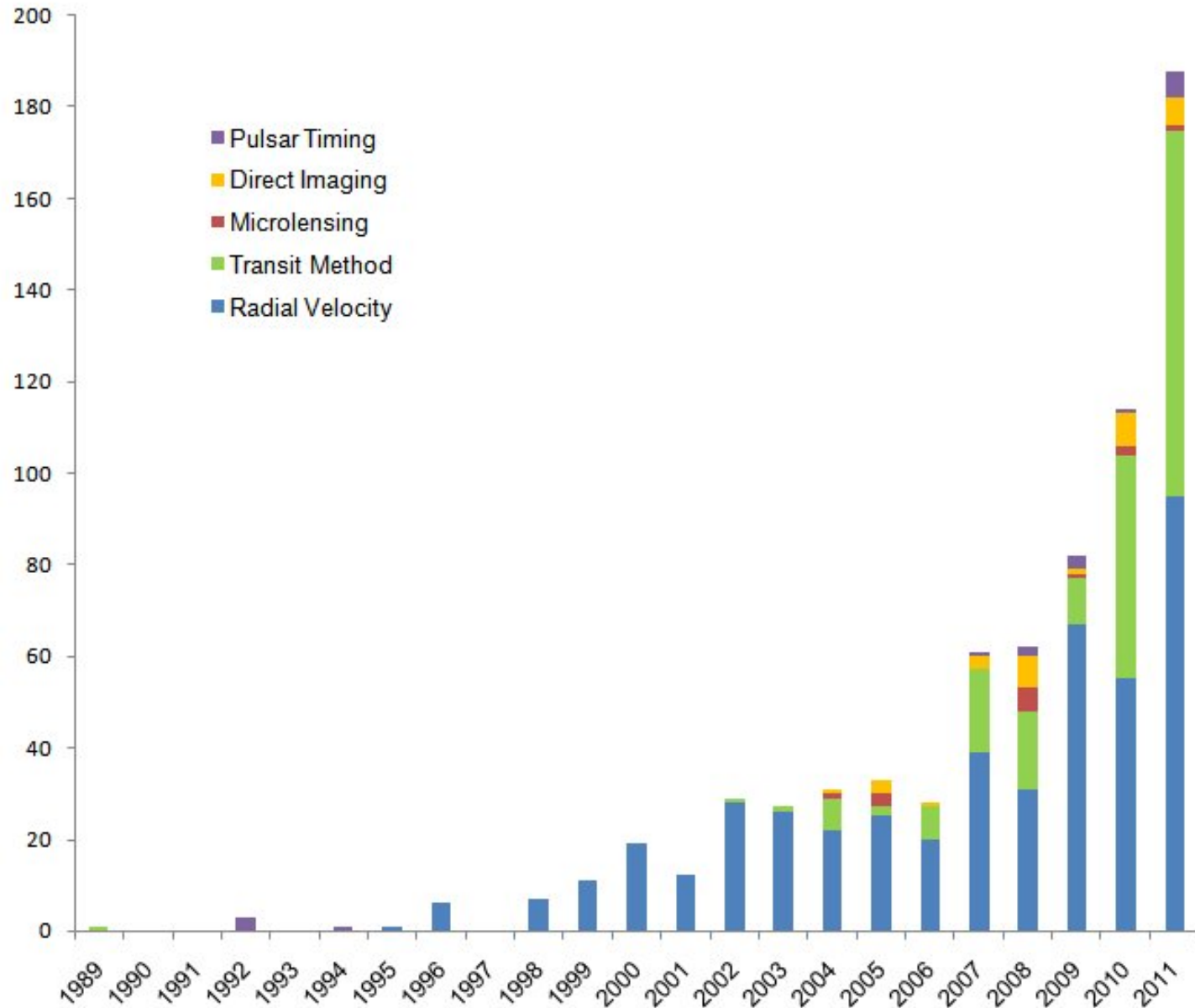
Stjernerne spektrale afhænger af temperaturen



Planet transit



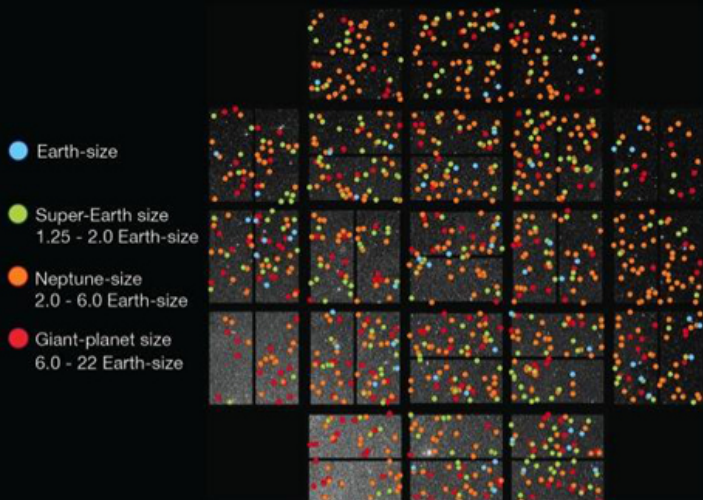
I alt 716 detekteret exo-planeter per 5/1-2012



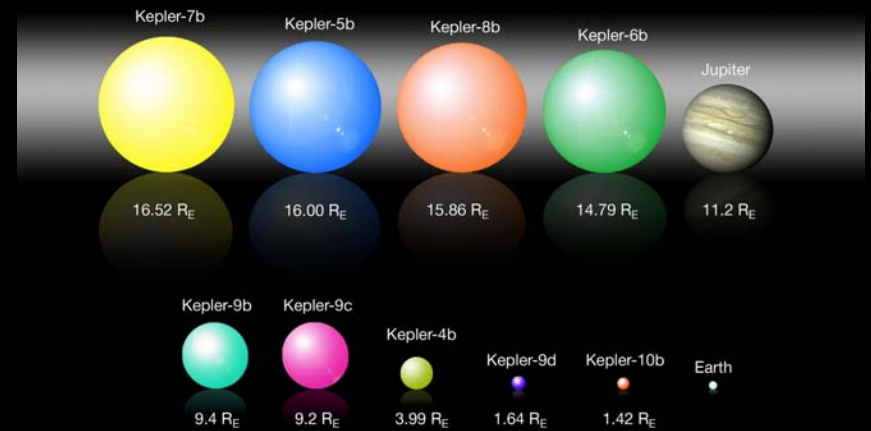
Kepler

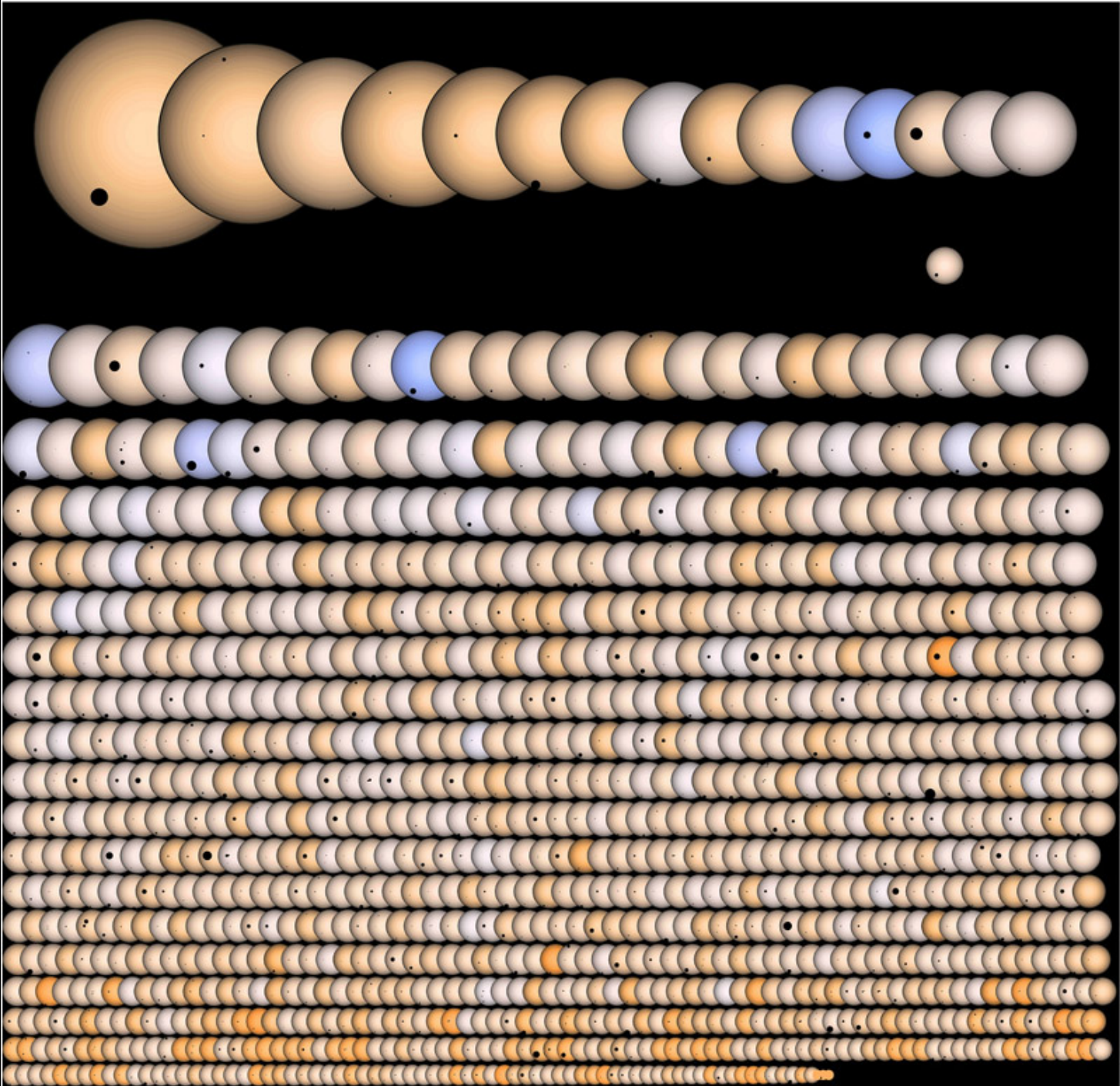


Locations of Kepler Planet Candidates



Planet Size





Det beboelige område

