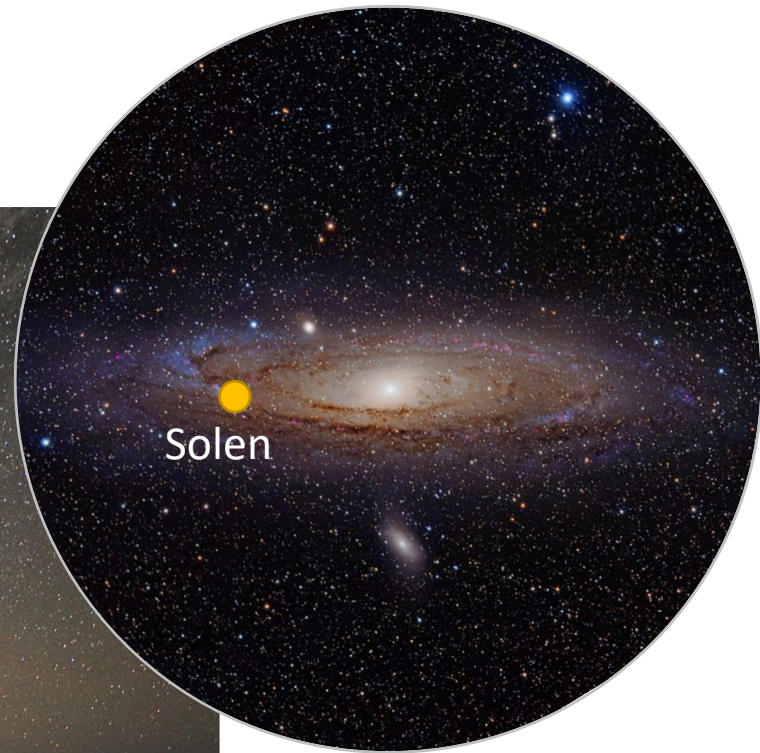


GALAKSER, STJERNER & PLANETER

Efter det første gas samler sig, starter dannelsen af galakser hvor de første stjerner formes. De danner grundstoffer og skaber skyer af tungere materiale som efterfølgende stjerner og efterfølgende planeter bliver skabt fra.

Hver størrelsesorden vil blive præsenteret, med henvisninger til andre steder i materialesamlingen, hvor nødvendige koncepter er præsenteret (fx fusion i stjerner, rødforskydning og gammaglimt). Der er også emner som vi ikke dækker, og der vil derfor nogle steder blot være henvisning til at læse om emner andre steder.

Vi bor i Mælkevejen



Modifieret fra [Wikimedia Commons](#)

[G. Hudepohl / ESO](#)

Når vi kigger ud i rummet, hvad ser vi så? Står man i byen kan man måske se nogle få spredte stjerneglimt, men står man på en mark uden nogen andre lyskilder i nærheden, vil man se et bælte henover nattehimmelen, hvori der er ekstra mange stjerner. Vi befinder os altså i en skiveformet klump af stjerner = galakse. Og når vi kigger ind i bæltet, kigger vi ind igennem skiven af vores galakse, Mælkevejen.

Var Jorden ikke i vejen så man kunne se hele bæltet, vil man opdage, at stjernerne i bæltet ikke er uniformt fordelt. Det er fordi vi bor i yderkanten af Mælkevejen, og der derfor er flere stjerner når vi kigger mod midten. (Se evt. historien om ændringerne af vores verdensbillede i materialet om 'Big Bang').

Billede til højre viser hvor langt ude solen er i forhold til centrum af vores galakse. Her er dog brugt et fotografi af vores nabogalakse, Andromeda, og ikke af Mælkevejen, da vi endnu ikke har mulighed for at tage et billede af Mælkevejen, så skal man meget længere væk endnu vi endnu er nået. Voyager 1 satellitten har rejst i 40 år og er 'kun' nået små 140 astronomiske enheder væk fra jorden (omkring 1/50.000.000 af Mælkevejens diameter).

Hubble Deep Field

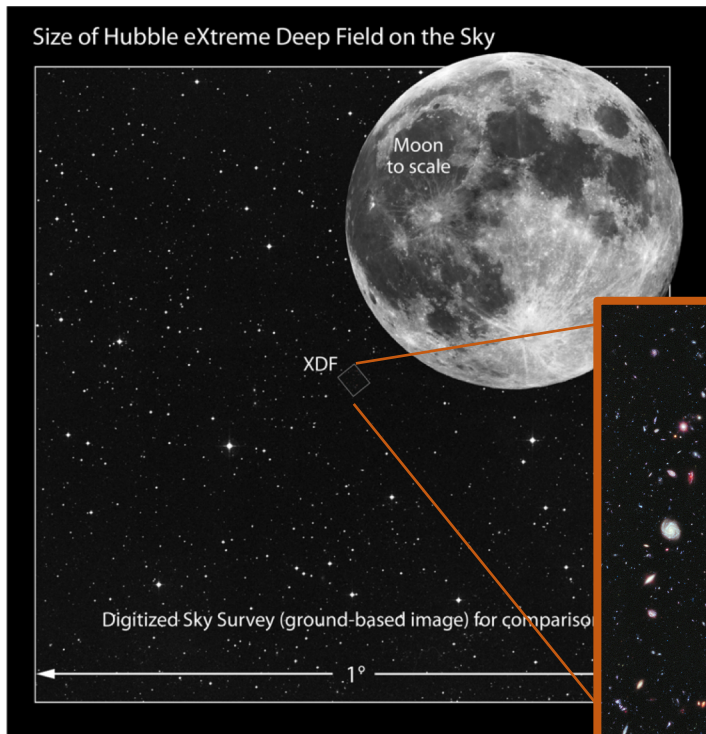


NASA

Hvad hvis vi kigger væk fra skiven i vores galakse? Kigger væk fra lyset og ud i det uendeligt mørke rum? Så ser vi det ovenstående billede, 'Hubble Deep Field' (HDF), som blev taget i 1995 ved at pege Hubble teleskopet mod den mørkeste afkrog af nattehimlen. Vi blev dog ikke mødt af koldt, mørkt ingenting, men et væld af massive galakser og flotte nebula'er (stjernetåger) med deres milliarder af stjerner og (sandsynligvis) planeter.

Husk da, når vi kigger langt ud i rummet, kigger vi også langt tilbage i tiden. Tager det et lyssignal 3 lysår om at nå jorden, vil vi se lyssignalet 3 år efter det er blevet udsendt. Et billede som dette kan derfor fortælle om det tidlige univers og dannelsen af de første galakser. Se fx [video-artikel om det oprindelige Hubble Deep Field billede](#) (engelsk):

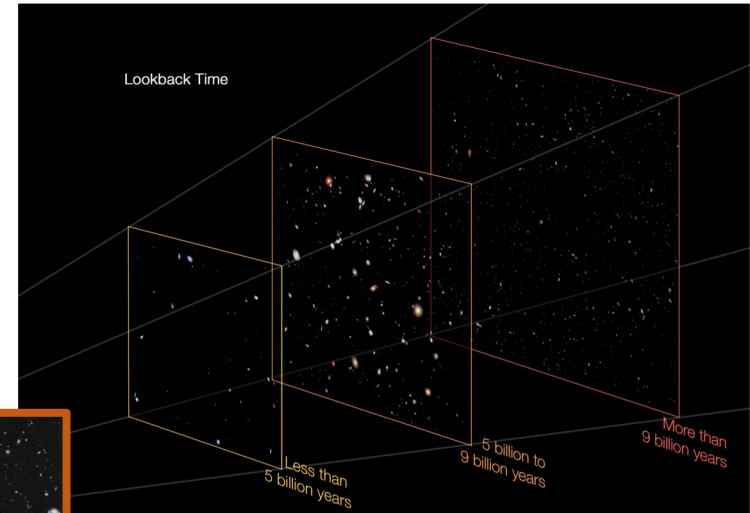
Et ekstremt lille billede, langt tilbage i tiden



[NASA, ESA, STScI, T.Rector](#)



[NASA/ESA](#)



[ESA/Hubble](#)

Et efterfølgende billede med endnu større dybde blev taget af Hubble teleskopet i 2012, døbt "eXtreme Deep Field" (XDF).

Fra dette lille mørke udsnit af himlen kan man lære enormt meget om dannelsen af de tidligste galakser. Samtlige prikker på billedet er galakser; de små er bare så utrolig langt væk, at de er op til næsten 13.2 milliarder år gamle (ca. 500 mio. efter Big Bang).

Man kan sætte sig til at tælle antallet af galakser på billedet og der er rigtig mange (omkring 5500). Men billedet er kun et lille udsnit af himlen (omkring 1/30.000.000). Så antallet af galakser ud over vores egen er altså enormt stort.

Rigtig mange andre galakser



Jacob Bers (Bersonic)

I vores galakse er der omkring 300 milliarder stjerner, hvilket er det typiske antal stjerner i en gennemsnitlig galakse. I det synlige univers er der yderligere omkring 300 milliarder galakser (det præcise antal afhænger af hvordan vi definerer en galakse). Ovenfor ses vores kosmiske nabo, Andromeda-galaksen.

Med så mange potentielle kandidater, er det næsten umuligt at forestille sig at der ikke er liv et andet sted i universet (mere om exoplaneter og studier af atmosfæren på fjerne planeter til sidst i materialet).

Hvad er en galakse så?

- Samling af 1-10.000 milliarder stjerner
- Radius på typisk 5.000-50.000 lysår
- ca. 50% af alle stjerner er i spiralgalakser, ca. 50% i elliptiske galakser
- De fleste galakser har et supermassivt sort hul i centrum
- Derudover er ~85% af en galakses masse udgjort af 'mørk stof'

Mørkt stof: Ukendt stof som har masse, men som ikke interagerer med fotoner (lys). Se mere i materialet om 'Big Bang'. Sorte huller vil blive uddybet på senere slides under stjerners udvikling.

En anden længde enhed man støder på, når man undersøger størrelsen af galakser er parsec (pc), som er omkring $31 \cdot 10^{15}$ meter, omkring 206,27 astronomiske enheder eller omkring 3,26 lysår.

Galakser fødes

- Spørgsmål:
 - Hvordan opstår galakser?
 - Hvornår er de opstået?
 - Hvad fortæller det os?



NASA

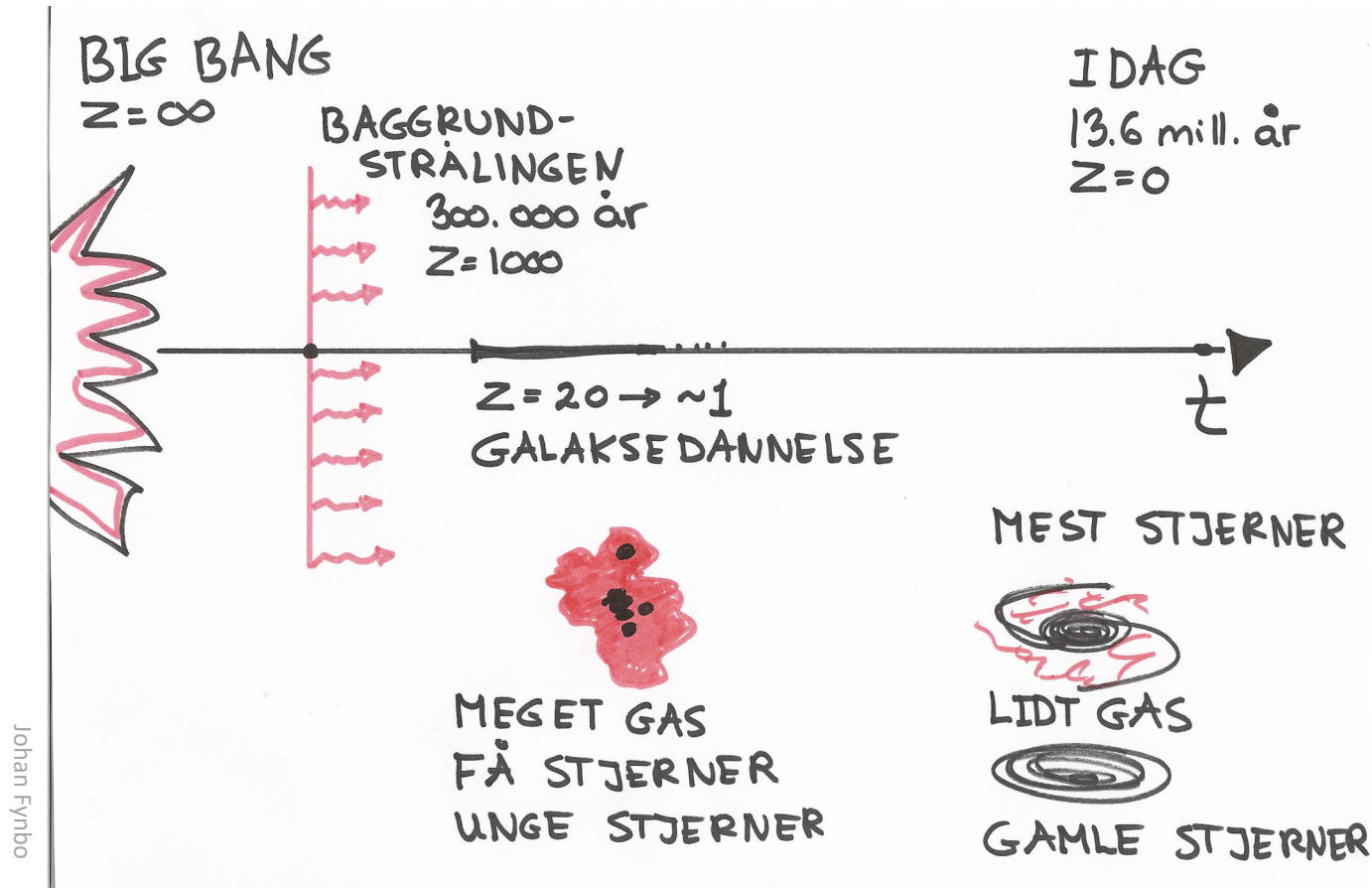


Wolfgang Moroder

Galakser er meget svære at studere, da de ikke til at tage ind i et laboratorium og undersøge. Vi kan kun lære om galakser indirekte ved at studere det lys de udsender. Ligesom vi kun kan lære om en baby ved at lave en ultralydsundersøgelse.

En baby kan vi se ved at udsende en ultralyds puls, og afhængig af ekkoet vi modtager, kan vi bestemme hvordan baby ser ud. Med galakser er vi dog afhængige af at vi kan se dem direkte, og dermed analysere det lys de udsender.

Galakser i det større billede



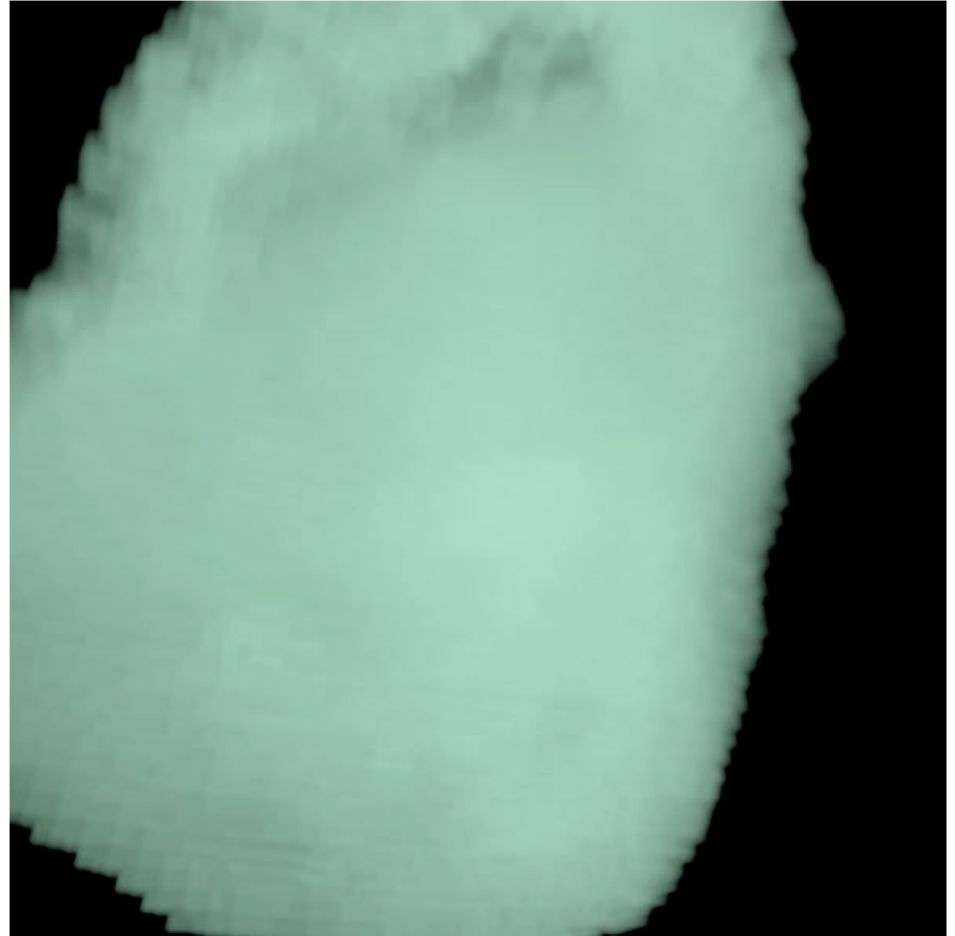
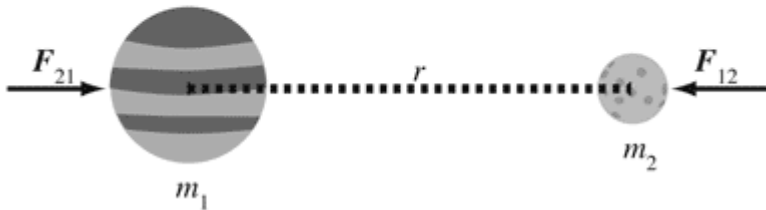
Resume af verdens historien for galakser: Efter mikrobølge-baggrundsstrålingen (CMB) udsendes, består universet af en næsten isotrop (uniform, ensartet) fordeling af gas, men de små fluktuationer i tætheden virker som frø for dannelsen af galakser (se nærmere om CMB i materialet om 'Big Bang').

Tyngdekraften trækker gassen sammen i større og større klumper. De første galakser er skabt omkring 200 mio. år efter Big Bang (rødforskydning, $z = 20$), men fortsætter med at klumpe mere og mere sammen indtil omkring 5 mia. år efter Big Bang ($z = 1$), hvor de fleste større galakser er formet.

Undervejs i denne proces bliver der løbende skabt stjerner. I de nyere galakser er der derfor meget gas og få, unge stjerner. I de ældre galakser har gassen haft tid til at kollapse til stjerner, så her er der flere stjerner og en lavere andel af frit gas.

Galaksedannelse

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

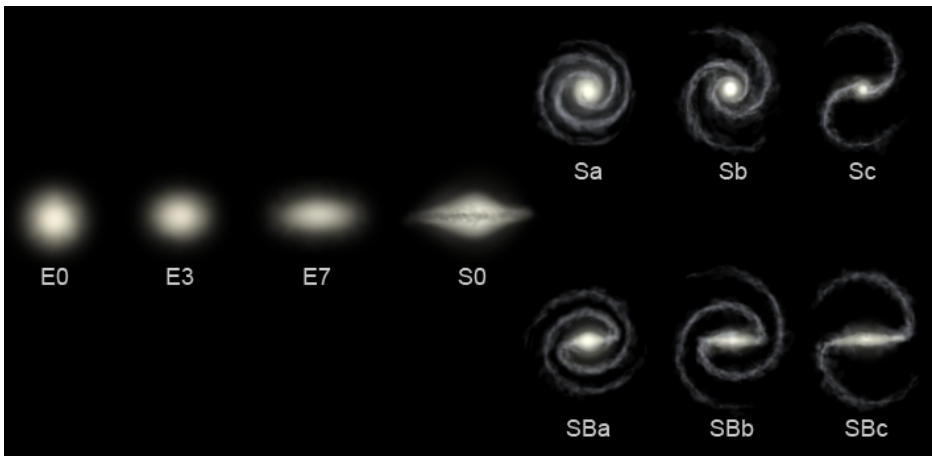


Galaksedannelse er styret af tyngdekraften. Ligesom Jorden tiltrækkes af Solen, bliver gasskyer i universet ganske langsomt trukket sammen i tættere og tættere klumper. Det er små fluktuationer i den oprindelige massefordeling i gassen, der bestemmer hvorhenne gassen kolliderer. Dermed er det meget små forskelligheder i massetætheden, der definerer hvilke astronomiske objekter der dannes hvor.

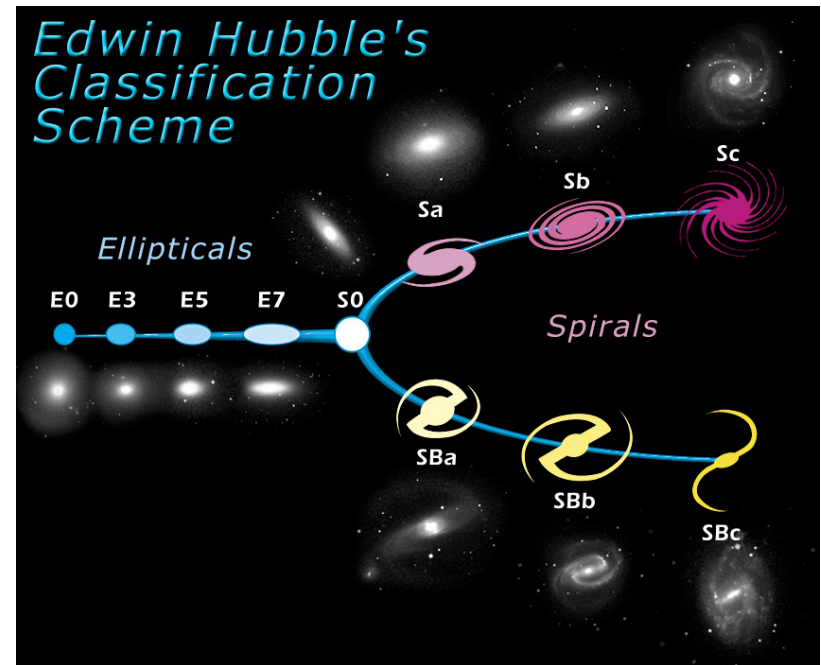
Filmen ovenfor (GalaxyformationS1Science2012.mpg) viser en computersimulering af hvordan sådan en samling af gas opfører sig når det kun påvirkes af tyngdekraften. Simuleringen indeholder altså kun beskrivelse af tyngdekraften og starter så med en næsten fuldstændig ligeligt fordelt sky af gas. Simuleringen illustrerer på kort tid hvad der sker i løbet af flere milliarder år.

Typer af galakser

- Hubble's klassifikation af galakser:
 - E = Elliptisk
 - S0 = Linseformet galakse
 - S = Spiral
 - SB = Spiral med bar



Wikimedia Commons



Wikimedia Commons

De elliptiske galakser har en simpel struktur, med en tiltagende koncentrationen af stjerner, jo tættere på centrum man er. De er nummereret med højere nummer, jo mere elliptiske de er.

De linseformede galakser, har foruden den elliptiske struktur, også en skive af materiale omkring centrum.

I spiralgalakserne er skiven opdelt i spiralarme, som hovedsageligt består af gas og yngre stjerner. Centrum af spiralgalakserne er hovedsageligt fyldt med ældre stjerner. Derudover har spiralgalakserne også en halo af kuglehober, som er klumper af meget gamle stjerner der befinder sig i en sfærisk halo omkring galaksen.

Galakse kollisioner og deres udvikling



ESA/Hubble

Efterhånden som galakserne i det tidlige univers kolliderer, skabes der større og større galakser. Hvis der er stor størrelsesforskel mellem de to galakser, vil den større galakse absorbere den mindre galakse, uden at dens struktur ændres særligt (eksempelvis vil en større spiralgalakse, fortsat have en spiral form).

Hvis de to galakser er af nogenlunde samme størrelse, vil den endelige galakseform være drastisk anderledes. Eksempelvis vil de to spiralgalakser ovenfor fusionere til en elliptisk galakse. Billedet af 'De dansende mus' (NGC 4676) er taget af Hubble-teleskopet (2002). Grundet dette fænomen, menes der at komme flere og flere elliptiske galakser

Galakser på kollisionskurs

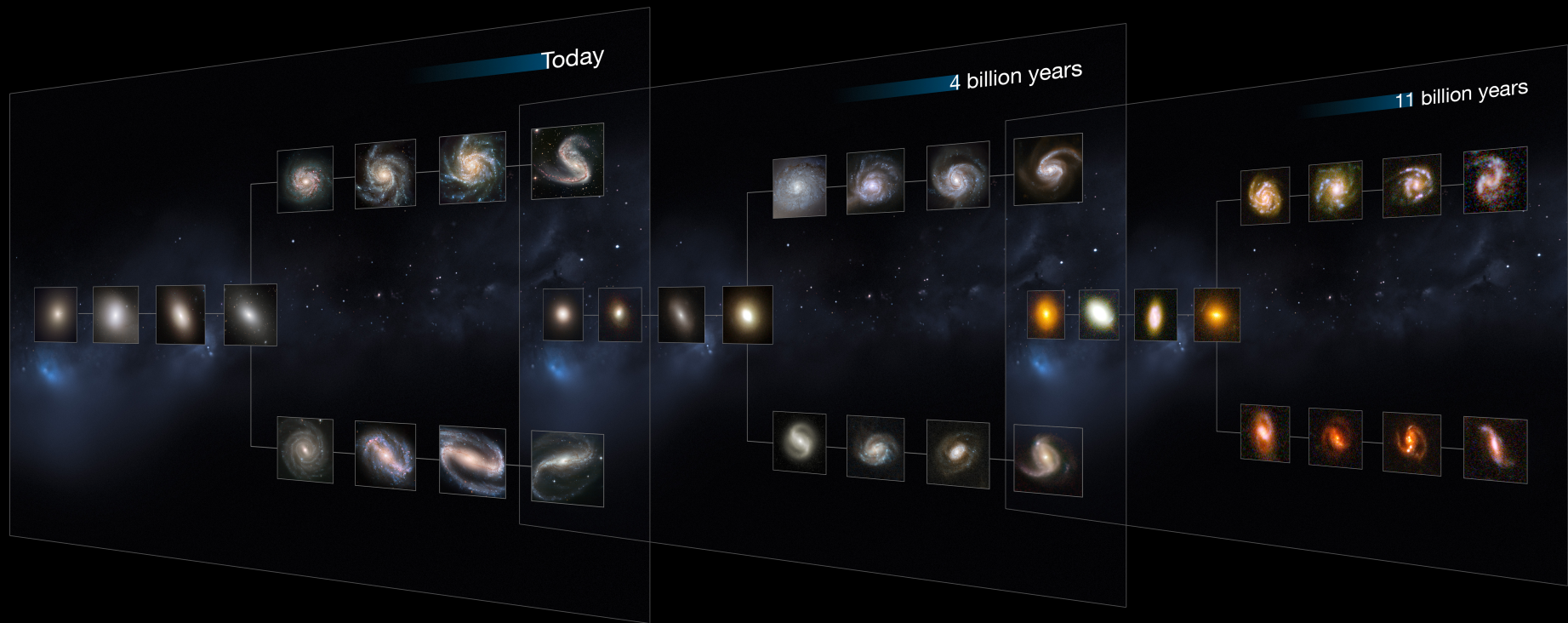


NASA: ESA; Z. Levay and R. van der Marel, STScI; T. Hallas; and A. Mellinger

Mælkevejen er også på kollisionskurs. Det forventes at vi vil kolliderer med vores nærmeste nabo, Andromeda, om 4 mia. år. (Solen lyser forsat 5 mia. år, så i princippet skulle det være muligt at observere kollisionen fra Jorden). I stedet for "kollision" er det måske mere korrekt at sige at de bevæger sig igennem hinanden, da sandsynligheden for at objekter som planeter og stjerner faktisk rammer hinanden er uhyre lille.

Mælkevejen er allerede kollideret med flere mindre galakser, og kolliderer i øjeblikket med flere dværggalakser (galakser med 1/200 så mange stjerner). Fx er dværggalakserne kendt som 'de Magellanske Skyer', allerede i kredsløb om Mælkevejen. Så kollisioner med andre galakser er almindeligt for de fleste galakser.

Forandring i galakseformer



Alle galakseformerne findes i universet i dag, men vi kan også studere de tidligere stadier af de forskellige typer af galakser, og lære mere om hvordan de har fået deres form (billederne er taget af Hubble teleskopet, men er kun illustrative, da alderen af galakserne ikke passer helt præcist med den angivne alder).

Sandsynligheden for at stjerner faktisk støder sammen i en galakse-kollision er uhyre lille, til gengæld vil gassen mellem stjernerne i galakserne "støde sammen" og på grund af friktionen vil gassen gennem kollisionen danne nye stjerner.

Jo flere kollisioner en galakse går igennem, jo mindre gas vil der være og jo flere stjerner vil der være. Dette er præcist hvad vi ser i store elliptiske galakser, hvilket styrker vores teori om at de er resultatet af gamle galakser der har oplevet mange kollisioner.

Galaksernes fortid

- For at lære mere skal vi finde unge galakser og studere lyset fra dem
- Noget af det klareste lys vi kan se på himlen kommer fra gammaglimt
- Gammaglimt hjælper os dermed med at forstå det tidligste univers
- Et gammaglimt er et meget kortvarigt (millisekunder til minutter) udbrud af kraftig gammastråling fra døende eller kolliderende stjerner

nature

Vol 461 | 29 October 2009 | doi:10.1038/nature08459

LETTERS

A γ -ray burst at a redshift of $z \approx 8.2$

N. R. Tanvir¹, D. B. Fox², A. J. Levan³, E. Berger⁴, K. Wiersema¹, J. P. U. Fynbo⁵, A. Cucchiara², T. Krühler^{6,7}, N. Gehrels⁸, J. S. Bloom⁹, J. Greiner⁶, P. A. Evans¹, E. Rol¹⁰, F. Olivares⁶, J. Hjorth⁵, P. Jakobsson¹¹, J. Farihi¹, R. Willingale¹, R. L. C. Starling¹, S. B. Cenko⁹, D. Perley⁹, J. R. Maund², J. Duke¹, R. A. M. J. Wijers¹⁰, A. J. Adamson¹², A. Allan¹³, M. N. Bremer¹⁴, D. N. Burrows², A. J. Castro-Tirado¹⁵, B. Cavanagh¹², A. de Ugarte Postigo¹⁶, M. A. Dopita¹⁷, T. A. Fatkhullin¹⁸, A. S. Fruchter¹⁹, R. J. Foley⁴, J. Gorosabel¹⁵, J. Kennea², T. Kerr¹², S. Klöse²⁰, H. A. Krimm^{21,22}, V. N. Komarova¹⁸, S. R. Kulkarni²³, A. S. Moskvitin¹⁸, C. G. Mundell²⁴, T. Naylor¹³, K. Page¹, B. E. Penprase²⁵, M. Perri²⁶, P. Podsiadlowski²⁷, K. Roth²⁸, R. E. Rutledge²⁹, T. Sakamoto²¹, P. Schady³⁰, B. P. Schmidt¹⁷, A. M. Soderberg⁴, J. Sollerman^{5,31}, A. W. Stephens²⁸, G. Stratta²⁶, T. N. Ukwatta^{8,32}, D. Watson⁵, E. Westra⁴, T. Wold¹² & C. Wolf²⁷

Rødforskydning på $z = 8,2$
svarer til omkring 640 mio.
år efter Big Bang

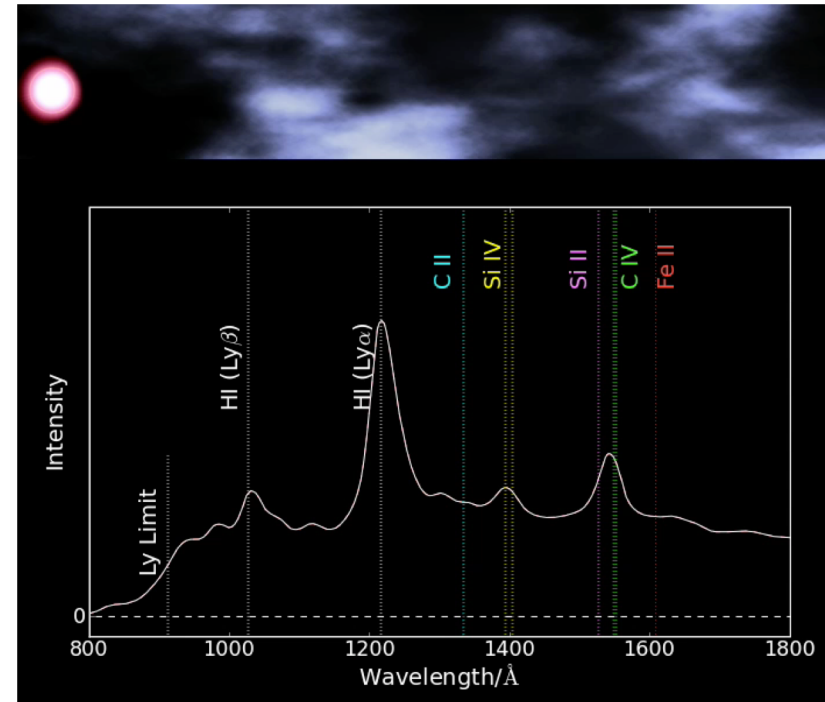
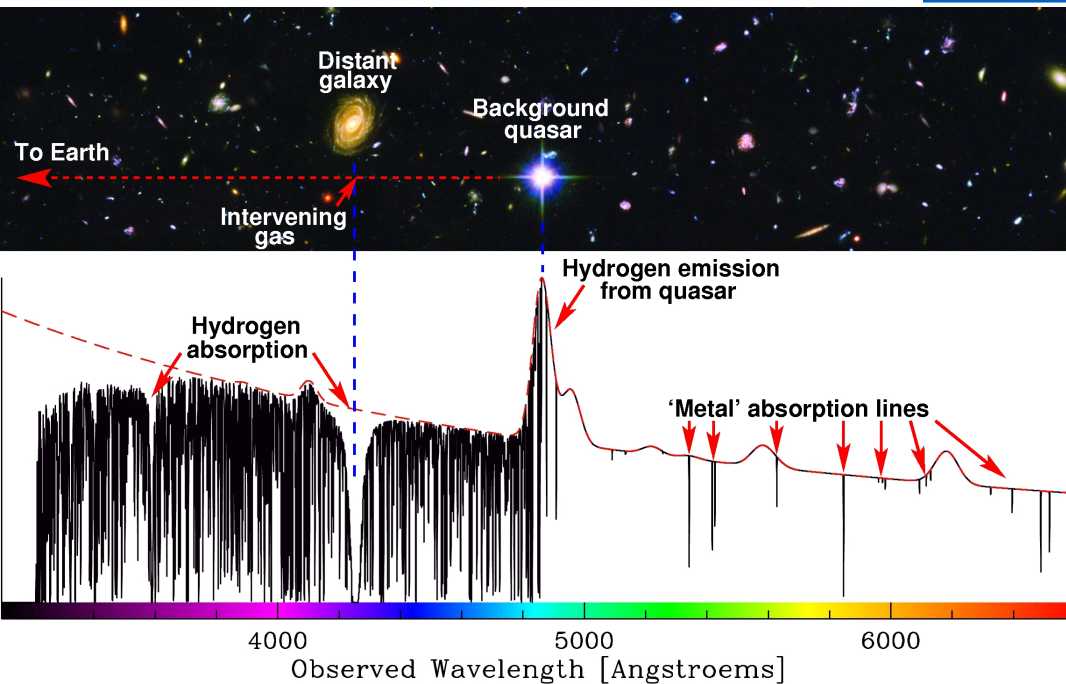
Jo væk et objekt er, jo længere tilbage i tiden ser vi det også. Men for at se et objekt langt væk, skal det producere enormt meget lys. Særligt gammaglimt producerer meget stærke lysglimt, så det er muligt at se dem langt væk (og dermed tilbage i tiden). Derfor er det rigtig interessant når gammaglimt langt borte (med stor rødforskydning) opdages.

Gammaglimt er derfor én måde vi kan lede efter, studere og lære mere om de tidligste galakser.

Udfordringer ved at se langt væk

Andrew Pontzen

[Michael Murphy](#)



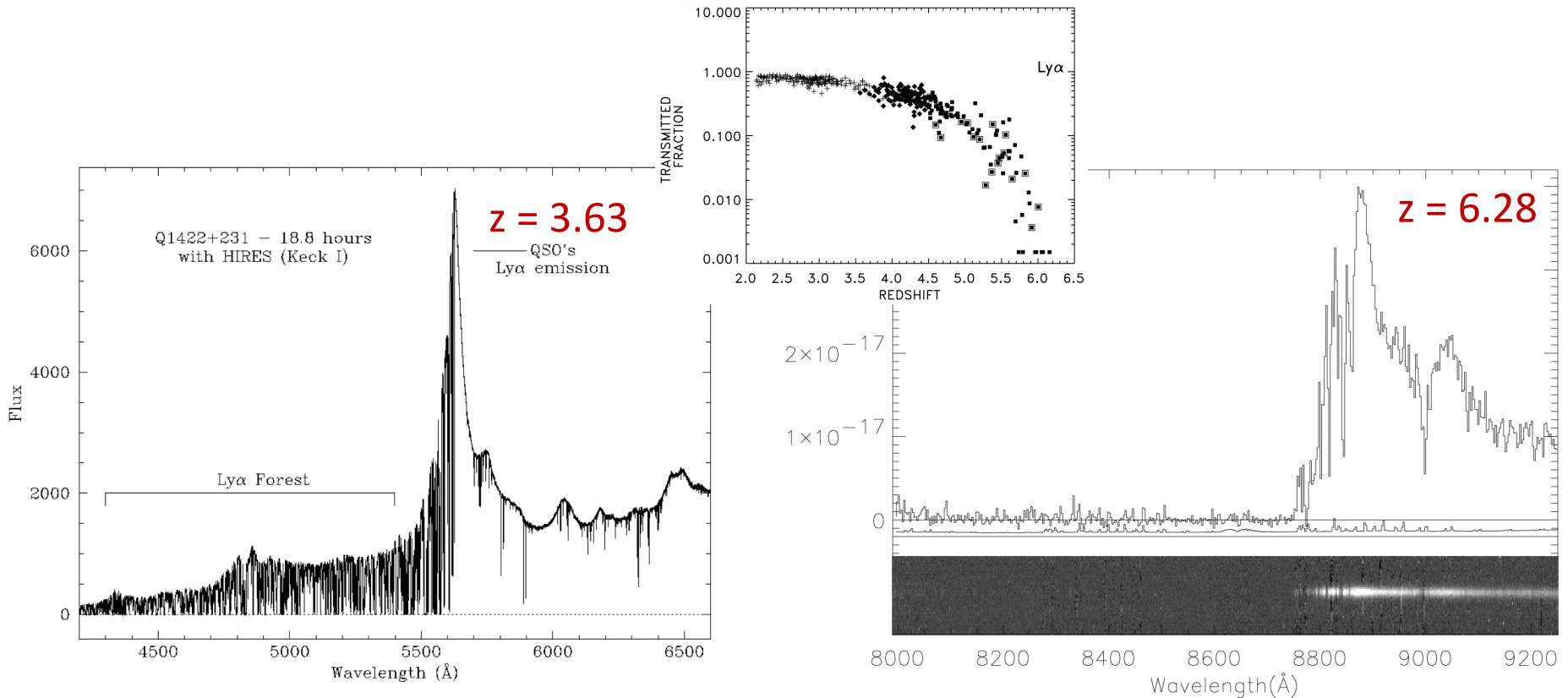
Lyman- α absorption: En foton med bølglængde 121,6 nm exciterer en elektron fra grundtilstanden til første exciterede niveau i brint.

Dette er en tydelig absorptionslinje, da der er meget brint i universet, og det er en stærk overgang.

Alle hydrogenskyer på lysets vej imod jorden resulterer i en absorptionslinje. Ved rødforskydning z , absorberer gasskyen Lyman- α overgangen ved $(z+1) \cdot 121,6$ nm, så på vejen ned til jorden vil der blive absorberet flere gange.

Billede til venstre og filmen til højre illustrerer denne pointe, hvor særligt en galakse absorberer en stor del af lyset.

Dæmpede Lyman- α absorbere



En yderligere effekt på skoven af Lyman- α linjer, er at absorptionen bliver meget kraftigere længere tilbage i tiden. Dette skyldes at gassen nu til dag er ioniseret og dermed ikke har samme elektron struktur til at absorberer lys.

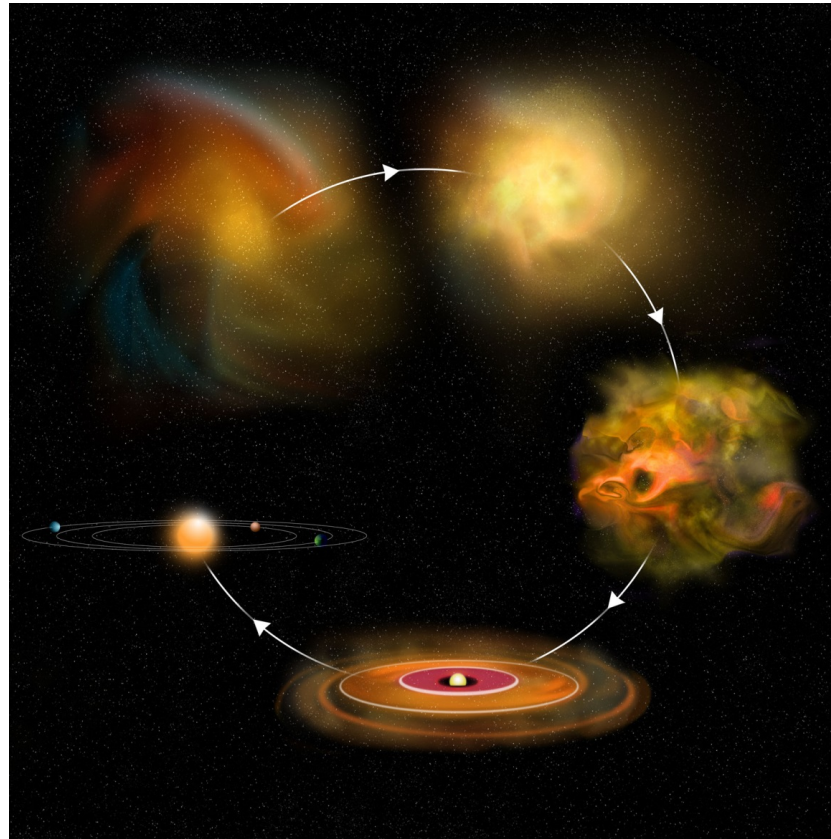
Tidligere var universet dog neutralt, og absorberede dermed langt mere af lyset. Resultatet er de såkaldt 'dæmpede Lyman- α absorbere'. Dette er naturligvis en udfordring, da noget af lyset fra det tidlige univers bliver absorberet, men det giver også et mål for hvornår/fra hvor langt væk lyset blev udsendt.

STJERNER

Galakserne starter deres formation, når gassen i det tidlige univers samler sig under påvirkning fra tyngdekraften.

Livet for de stjerner der dannes skal vi nu se nærmere på.

Fra interstellar gassky til stjernesystem

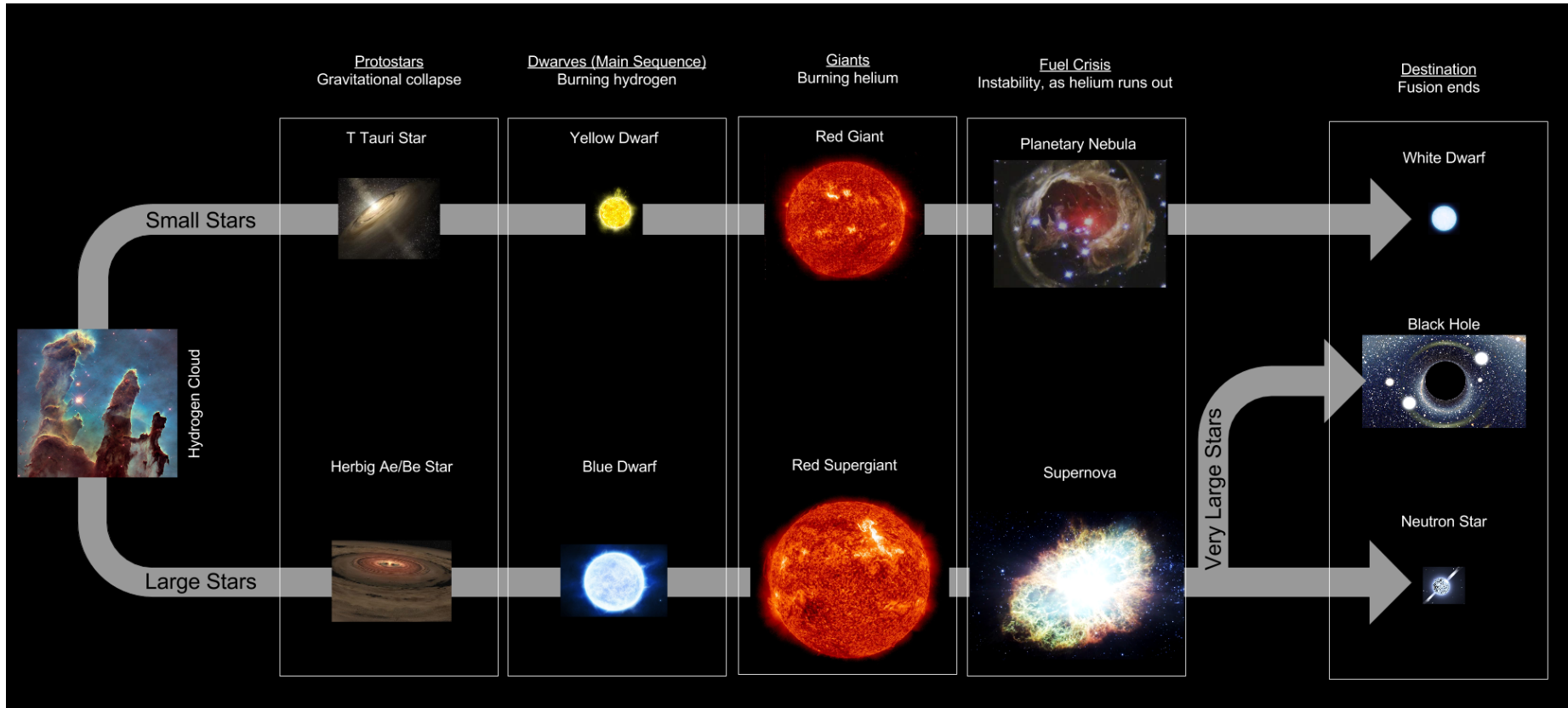


NRAO

Samtidig med dannelsen af de første galakser (et par hundrede millioner år efter Big Bang), dannes de første stjerner. Dette sker når gasskyerne i enkelte områder af galaksen bliver massive nok til at tyngdekraften der trækker gassen sammen, bliver større end gastrykket, der prøver at skubbe gassen fra hinanden (grundet den interne temperatur, også selvom den er lille). Gasskyen falder sammen og danner starten på en stjerne, en såkaldt 'protostjerne', og fusionsprocesserne går i gang med at forbrænde hydrogen.

Når fusionsprocesserne i stjerner starter, og der produceres energi, lys og varme, blæser trykket fra dette lyset det resterende gas væk fra stjernen, og er det kan senere blive til planeter (se mere om planeternes dannelse senere).

Stjernernes stadier

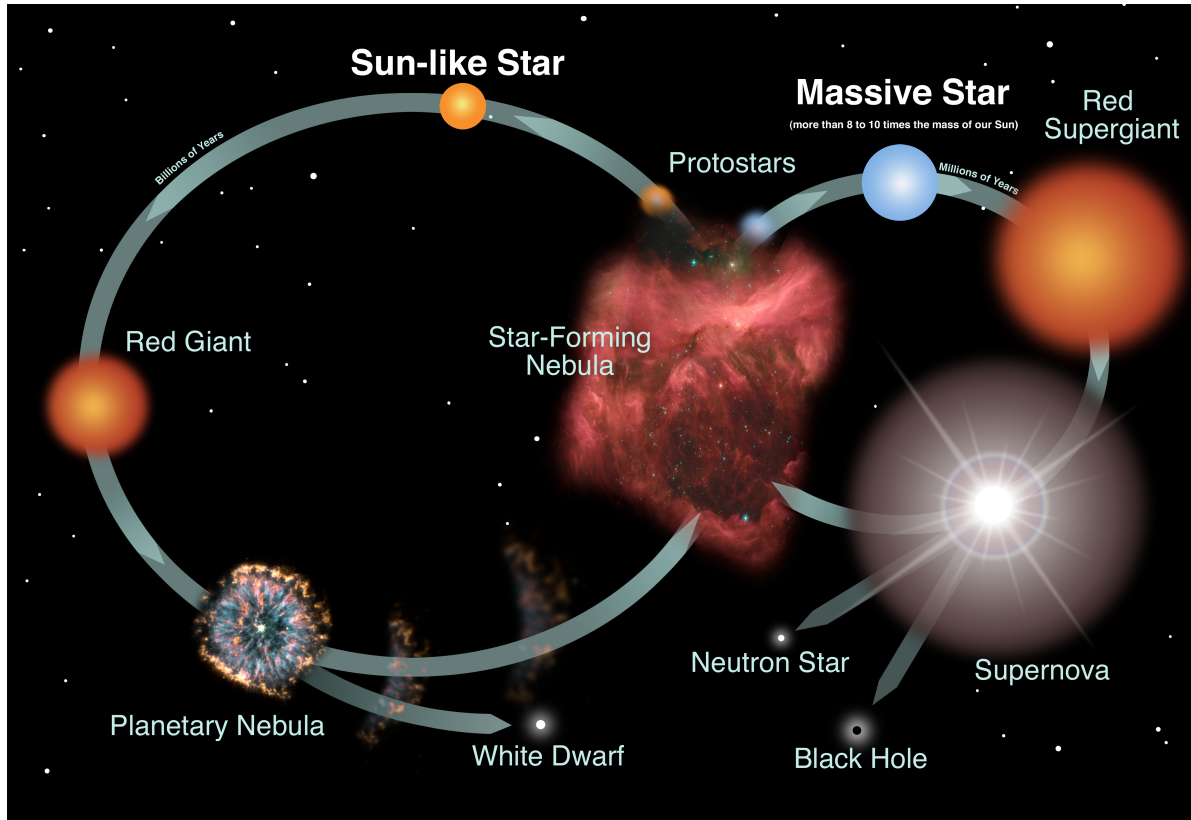


Kevin Binz

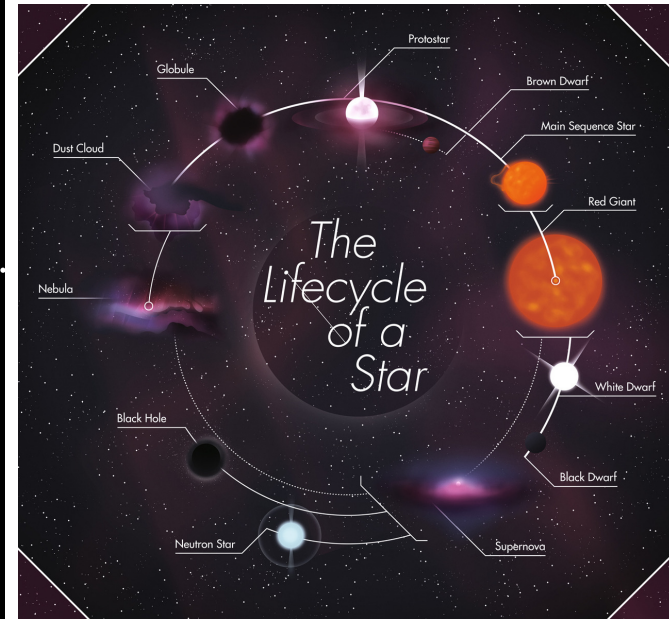
Når fusionsprocesserne starter, starter stjernens status som hovedstjerne ('Main Sequence'), som er den tilstand vi ofte tænker på stjerner i. Når hydrogen som brændstof er brugt op falder stjernen sammen under tyngdekraften og bliver varm nok til at helium forbrændingen starter, men når det er slut, forløber de sidste skridt i forbrændingen hurtigt og alt andet end stjernens kerne blæses ud i universet ved en mere eller mindre spektakulær eksplosion, (afhængig af størrelsen af stjernen), og kernen er tilbage som den 'døde' rest af stjernen (død betyder her, producerer ikke længere større mængder lys).

Stjernens livsproces afhænger af størrelsen, dvs. massen af gas i protostjernen. På de følgende slides bliver de mulige skæbner præsenteres.

Cyklisk proces for stjerner



[NASA/Night Sky Network](#)

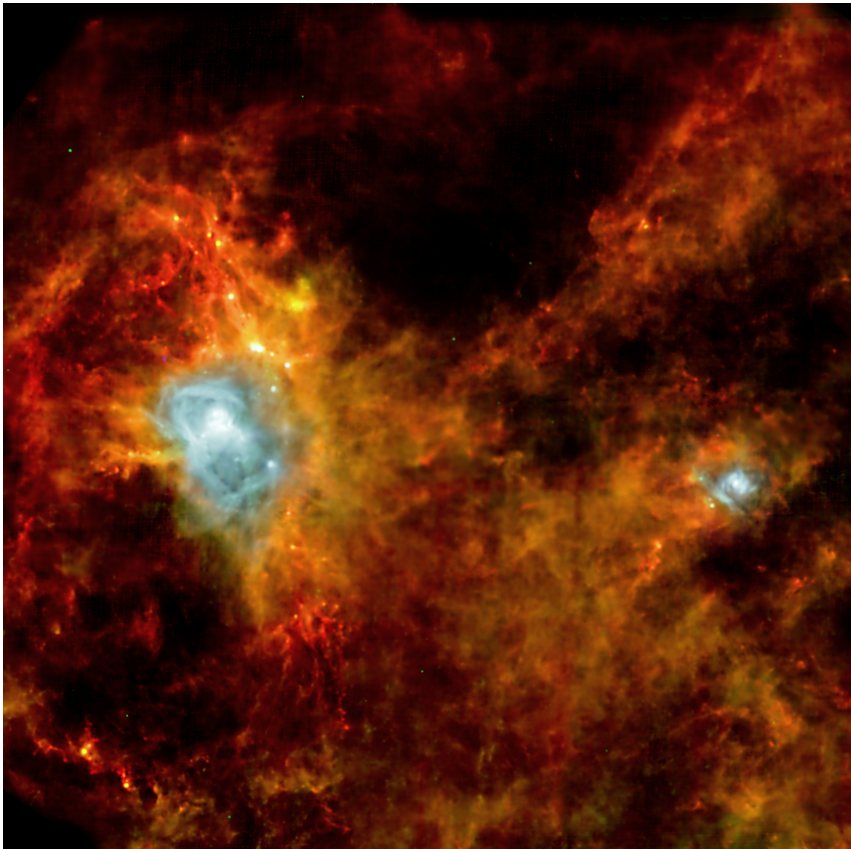


Ophavsret ukendt

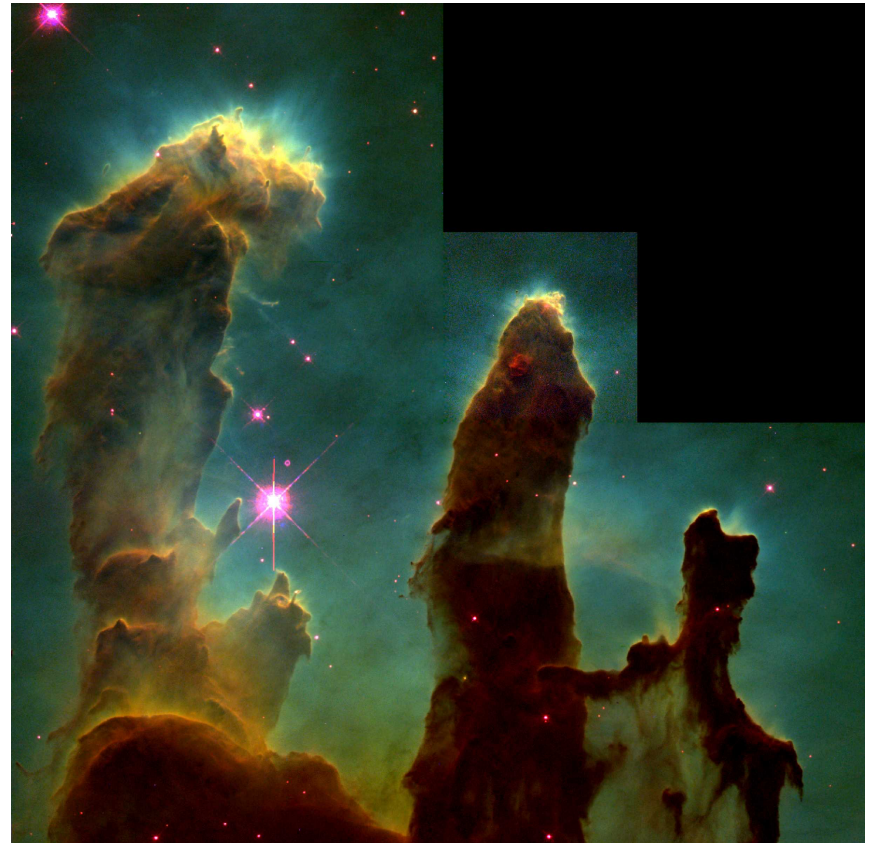
Et godt billede at have i hovedet angående stjerner livscyklus, er et cyklisk liv som angivet på de ovenstående figurer: Stjerner bliver skabt i stjernedannende tåger (nebula), lever deres liv, og når de dør, bliver det overskydende materiale sendt ud i gasform, som langsomt samler sig til nye stjernetåger, hvor nye stjerner kan dannes.

Det giver også en forståelse af hvordan stjerner, som dannes i dag, kan indeholde materiale, som ikke var i universet lige efter Big Bang. Grundstoffer som dannes i stjernerne, bliver sendt ud igen efter deres død, og bliver en del af de nye stjerner (mere om grundstoffernes dannelse i stjerner i præsentationen 'Grundstoffer')

Stjernernes fødestuer



ESA/Herschel



NASA

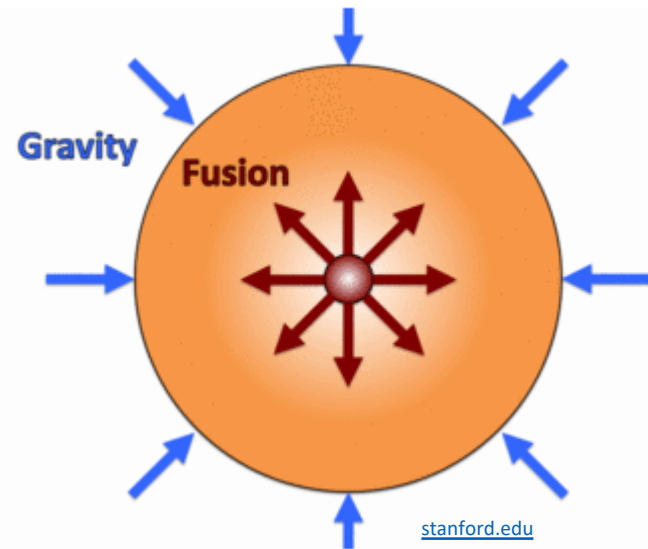
Stjerner bliver dannet i områder i galakser hvor densiteten af gas er blevet tilstrækkelig høj.

På billedet til venstre er det såkaldte "Goulds bælte" (taget af Herschel teleskopet). De små lysende prikker man kan fornemme, er helt unge stjerner, der lige er blevet skabt. Der er dog faktisk op imod 600 klumper af gas der endnu ikke helt er stjerner endnu, men som en dag bliver så tætte at fusionen går i gang.

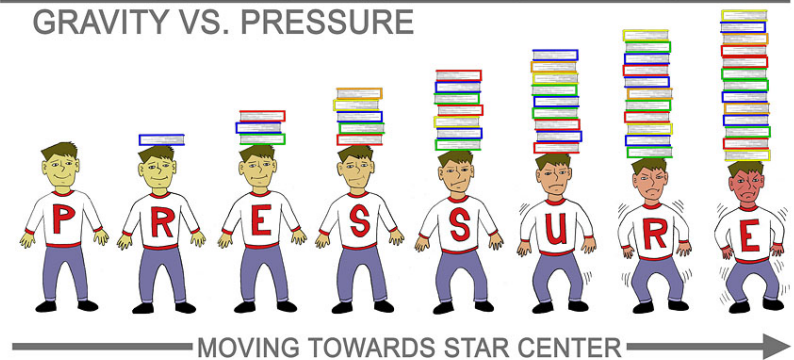
Billede til højre (taget af Hubble teleskopet), af et område af Ørnetågen hvor der også dannes ekstra mange stjerner.

Første fusion

- Protostjernen tiltrækker gas fra den stjernetaåge den er dannet i.
- Efterhånden som massen stiger, bliver tyngdekraften på gassen stærkere, hvilket presser kernen mere sammen, med en temperaturstigning til følge.
- Når temperaturen stiger til over 10 mio. K starter proton-proton processen, og den medfølgende energiproduktion (se materiale om 'Grundstoffer')
- Med den forøgede energi produktion og temperaturstigning opstår der en hydrostatisk ligevægt mellem tyngdekraften og varmetrykket, som fortsætter resten af stjernens tid som hovedserie-stjerne.



HYDROSTATIC EQUILIBRIUM IN A STAR GRAVITY VS. PRESSURE

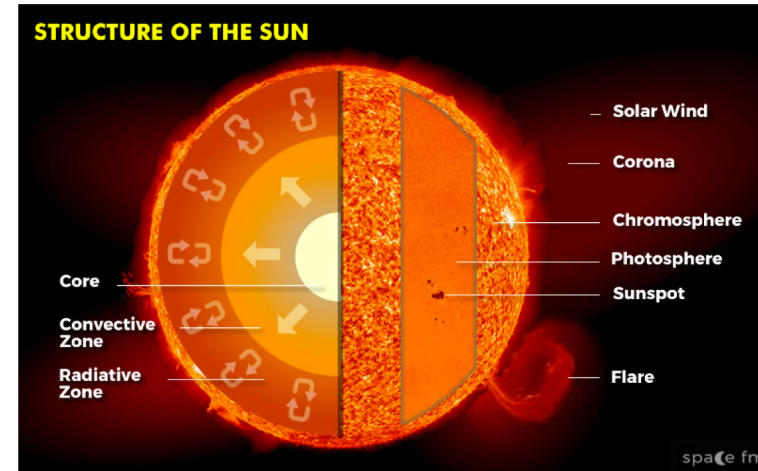


Andet skridt af proton-proton kæden er fusion af deuterium (og protoner). Der er også en lille bitte smule deuterium fra det tidlige univers eller tidligere stjerner, og fusionen af denne deuterium-rest starter allerede ved 1 mio. K (hvorimod hydrogenfusion først starter ved 10 mio. K). Forbrændingen af deuterium spiller en interessant rolle i stjernedannelsen, da deuteriumfusionen er meget temperaturafhængig, hvilket har den effekt at temperaturen holdes relativt stabil indtil al deuterium er forbrændt. Herefter falder stjernen sammen igen indtil temperaturen er høj nok til at hydrogenfusionen kan starte. Denne periode med deuterium forbrænding giver stjernen tid til at trække mere gas til sig, inden varmen fra hydrogenfusionen blæser den gas væk som endnu ikke er blevet en del af stjernen, og giver ophav til at stjerner kan blive tungere end 2-3 solmasser (og vi ved at der er stjerner med en masse på over 20 solmasser).

Protostjerner med masse mindre end 8% af solens masse, når kun til deuteriumfusion, og ikke hydrogenfusion. Dermed lyser disse stjerner kun svagt, og lever som 'brune dværge' i mange millioner år indtil de er kølet helt af.

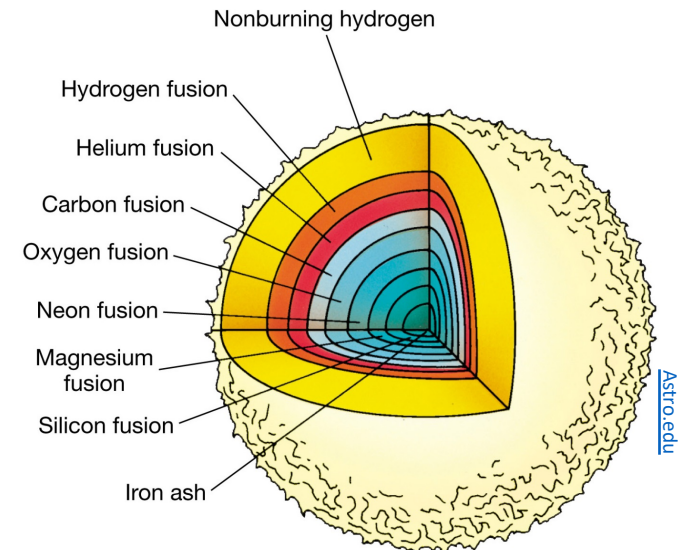
Fusionen fortsætter

- Efterhånden som hydrogen bliver omdannet til helium, bliver mere og mere af stjernens kerne til helium. Når hydrogenmængden bliver for lav stopper hydrogenfusionen
- Det resulterer i en lavere temperatur i stjernens kerne, som falder sammen (skrumper) under tyngdekraften indtil trykket (og temperaturen) bliver højt nok til at fusionere helium
- Den ydre skal begynder nu at forbrænde hydrogen, givet den højere temperatur i stjernens kerne. De ydre lag af stjernen svulmer op, da der produceres mere varme end der er nødvendigt for at balancere trykket fra tyngdekraften
- I stjerner der er tungere en 8-11 gange solens masse, kan denne skift til fusion af tungere og tungere grundstoffer fortsætte helt op til jern, da den store masse under tyngdekraften kan presses tættere sammen og skabe høje nok temperature til at disse processer kan forløbe



space fm

space.fm



Astro.edu

Derfor vokser stjerner i størrelse særligt til sidst i deres 'liv'. Dette gælder alle størrelser af stjerner, lige indtil der (næsten) ikke er mere brændsel tilbage.

Fusionen stopper ved jern, da det er det sidste element hvor man får energi af at kombinere to 'mindre' grundstoffer (med lavere atomnummer). Vil man fortsætte fusionen efter jern vil det koste energi, og kan derfor ikke bruges som energikilde. (se mere i materialet om 'Grundstoffer').

En stjernes liv er dermed en kontinuerlig kamp mellem trykket fra tyngdekraften, der prøver at presse stjernen sammen, og fusionen af grundstoffer, der skaber en udadgående kraft.

Hvordan ved vi det?

ABSORPTION SPECTRUM OF HYDROGEN



ABSORPTION SPECTRUM OF HELIUM



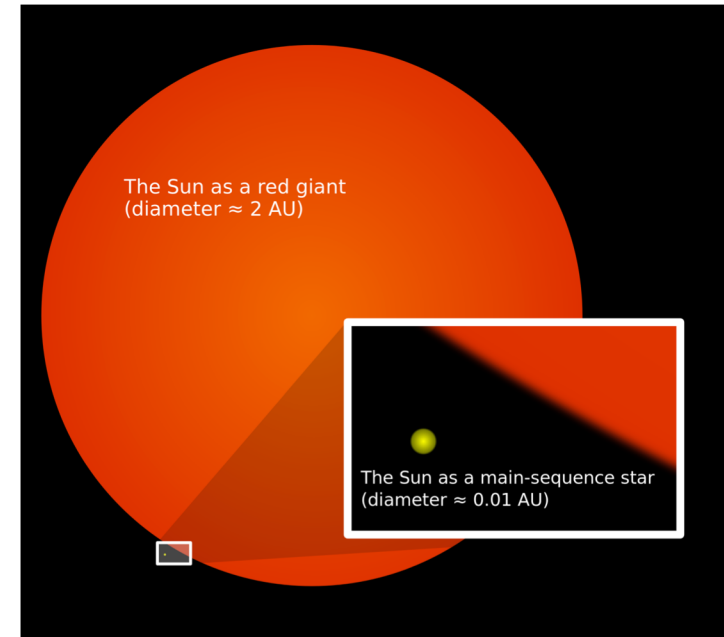
Ophavsret ukendt

Vi kender til den kemiske sammensætning af stjerner ved hjælp af spektroskopi. Ved at se på spektret af elektromagnetisk stråling produceret af en stjerne, og særligt absorptionslinjer i spektret, kan man bestemme hvilke grundstoffer der er til stede i stjernen (se flere detaljer om spektroskopi i materialet om 'Grundstoffer').

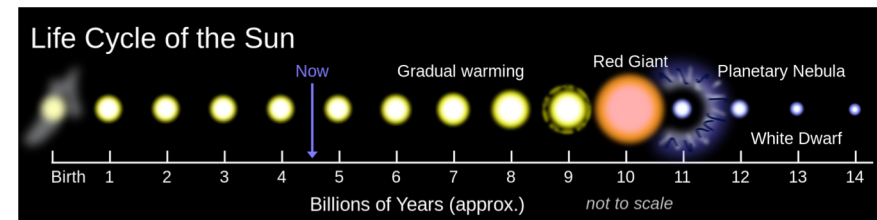
Ved at se på forskellige stjerner med forskellig alder, udseende og lysstyrke, har man lært alle detaljerne om stjerners forbrænding og fusionsprocesser.

Eksempel: Solens liv

- Vores nærmeste stjerne, Solen, lever et liv som hovedserie-stjerne i omkring 10 mia. år
- Solen er i dag ca. 4,5 mia. år gammel
- Når hydrogenforbrændingen i solen slutter og den svulmer op, betegnes den som en 'rød kæmpe'. Den vil da være så stor at Merkur, Venus og Jorden bliver opslugt
- Når forbrændingen af helium går i stå, svulmer solen igen op, denne gang mere voldsomt
- Det blæser de yderste lag af solen og det inderste af solen (omkring 50%) lever videre som en hvid dværg (white dwarf)



[Oona Räisänen](#)



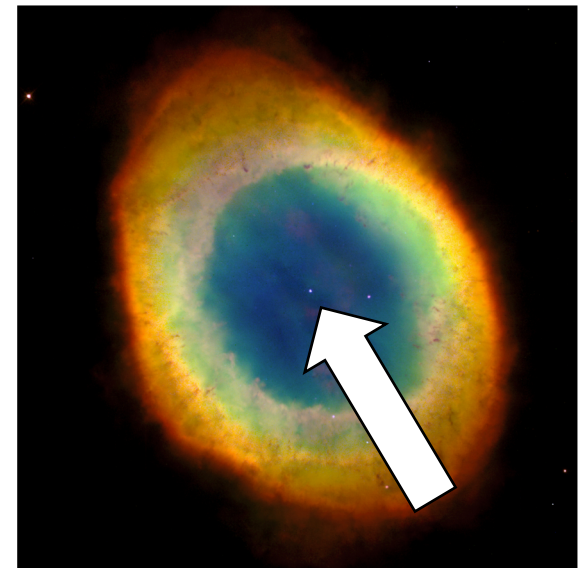
[Wikimedia Commons](#)

Når en stjerne med solens masse svulmer op og falder sammen i og omkring tiden, hvor forbrænding af et grundstof slutter og et andet starter, sker det i flere bølger.

Det afgørende er at hver bølge er kraftigere end den forrige. I tungere stjerner betyder det, at kernen når at blive varm nok til at forbrænding af carbon kan startes, men givet solens relativt lave masse, vil tyngdekraften ikke være stærk nok til at holde på de yderste lag, som derved undslipper stjernen og danner en gassky omkring stjernen ("planetary nebula", en navn der er misvisende da det ikke har noget med planeter at gøre).

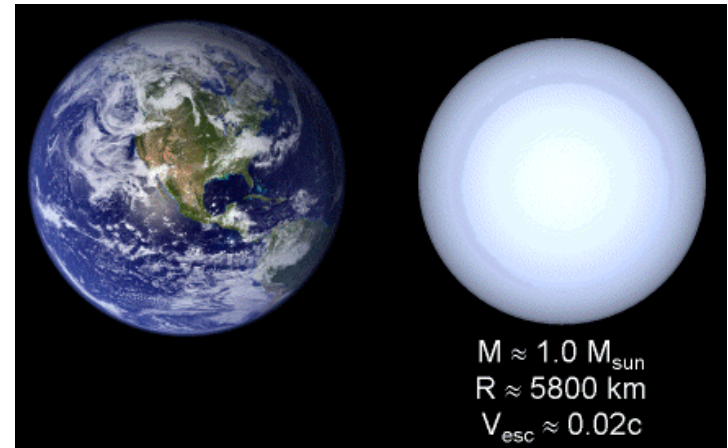
Hvide dværge

- Hvide dværge er de små rester af døde stjerner
- De brænder ikke længere, så i starten kan de lyse klart på resterne af den termiske energi fra sit tidligere liv. Men lyset fra dem svinder indtil de er kølet helt ned
- Hvide dværge er ikke meget større end Jorden, men vejer typisk omkring 0,5-0,7 gange solens masse (altså en høj densitet på omkring 1000 kg/L)
- Hvide dværge består hovedsageligt af hydrogen og helium med en carbon/oxygen kerne (da den stjerne som udgangspunkt ikke var stor nok til at fortsætte forbrændingen af tungere grundstoffer)



The Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)

Tåge ('The Ring Nebula', M57) med den tiloversblevne hvide dværg i centrum)



Ohio State

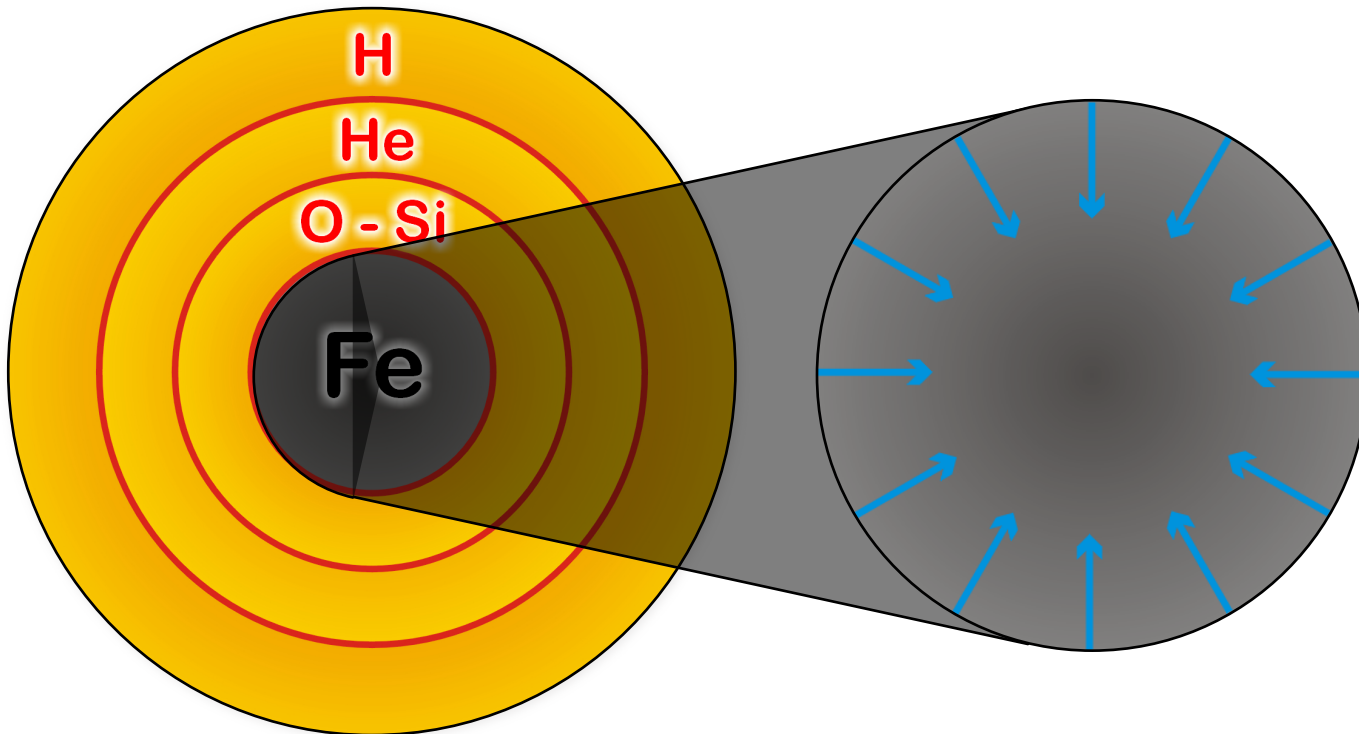
En hvid dværg har stadig meget varme gemt i sig, og det tager flere tusind milliarder år (de bedste bud siger i hvert fald klart længere end universets nuværende alder) før al varme forlader dem. Dette er både grundet den enorme høje termiske varme i selve dværgstjernen, men også fordi rummet er en enorm dårlig varmeleder.

Når solen ender som hvid dværg vil dens overflade temperatur være omkring 100.000 K. Da lysintensitet stiger med temperatur, vil der set fra jorden komme mere lys fra 'Solen' efter den er blevet til en hvid dværg, end der gjorde før. (Det er dog nok nærmere en hypotetisk observation, da Jorden til det tidspunkt allerede er brændt op da Solen svulmede op til en rød kæmpe).

En tung stjernes kollaps

Løgstruktur

Kollaps (implosion)



Stjerner tungere end 10 solmasser kan fortsætte forbrænding af tungere grundstoffer, og ender generelt med at blive endnu større i deres kæmpefase og betegnes 'superkæmper'.

Men til sidst er der ikke mere tilbage at forbrænde og kernen af jern falder sammen uden mulighed for at starte en ny fusionsproces. Dette resulterer i et voldsomt kollaps af jernkernen.

En tung stjernes eksplosion

- Efter stjernens pludselige kollaps, bliver trykket i stjernens indre så stort (og varmt), at stjernen eksplodere i den mest voldsomme begivenhed i rummet: en 'supernova'
- Vi har endnu ikke en optagelse fra rummet om hvordan det ser ud idet, en stjerne eksplodere, men der findes mange illustrationer af hvordan der kunne se ud før og efter (eksempel til højre).



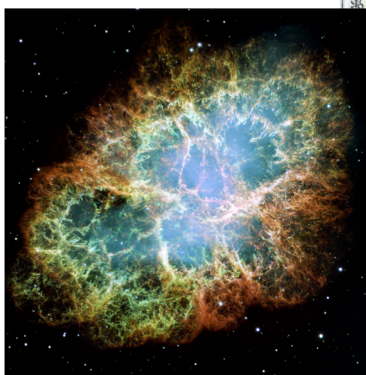
Det der bliver tilovers er en enorm gassky omkring den tilbageblevne neutronstjerne eller sorte hul (se næste slides)

En supernova er visuelt en kraftigere udgave af en 'nova' (fra 'ny'), som også er et skarpt lysglimt som opstår når en hvid dværg i et binært stjernepar, opsluger eks. hydrogen fra sin partner, som starter fusion, og kort derefter kastes ud i rummet på grund af varmen fra det indre af den hvide dværg.

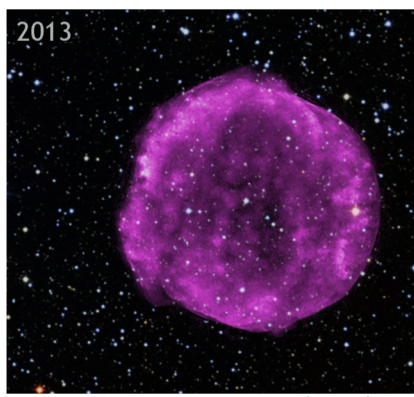
Supernova observationer

- Supernovaen der førte til Krabbetågen blev set og nedskrevet i Kina i 1054
- Tycho-tågen er opkaldt efter Tycho Brahe, som nedskrev sin observation af SN1572 (se link for animation af den fortsatte eksplosion)
- Siden er mange flere supernovaer observeret. Særligt er SN1987a interessant for neutrino fysik, da det var den første der blev registreret neutrinoer fra (men det er en helt anden historie)

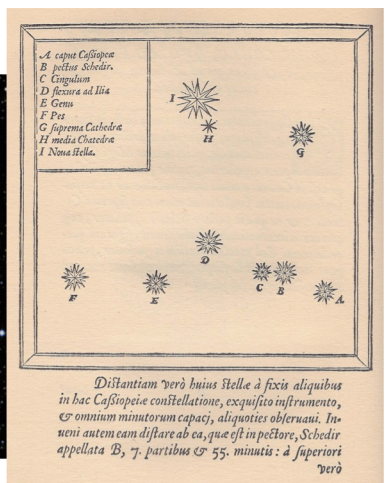
歷代名臣奏議卷之三百一
 宋仁宗至和二年侍御史趙鼎上言曰臣伏見自去年五月己未夜
 星遂見僅及周輪至今光耀未退此谷永所謂馳騁曠處也災長頸
 所甚奸犯其為論變豈可畏也又去冬連今春京東西路及陝右川
 蜀諸郡旱暵不雨麥苗焦死民既艱食寇攘必興此京房所謂欲極
 不用茲謂張厥災荒其為災於後可懼也邇來岷峽山谷驚裂有聲
 他郡數處地亦震動此伯陽所謂陽伏而不能出陰迫而不能升蓋
 土失其性其為災豈益可駭也夫變調陰陽者三公之職天戒若曰
 陛下左右輔弼當得忠賢剛正之人為之乃可以召至和之氣消去
 崩之駭不然何以妖星滿變也旱暵災沴也地震祥異也三者皆應
 察明如是之著耶臣愚



ESA/Hubble



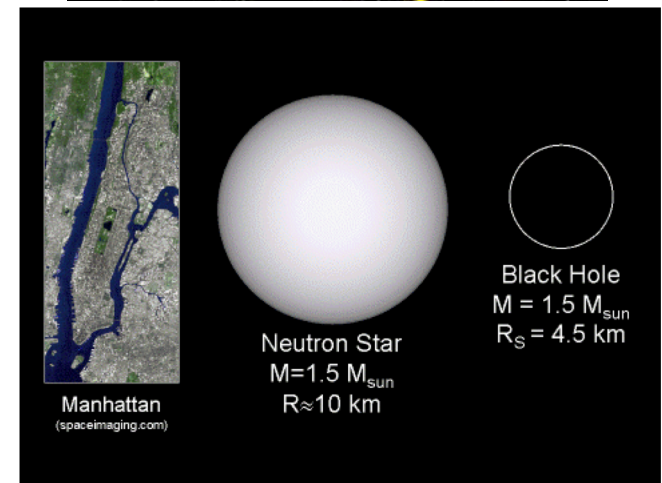
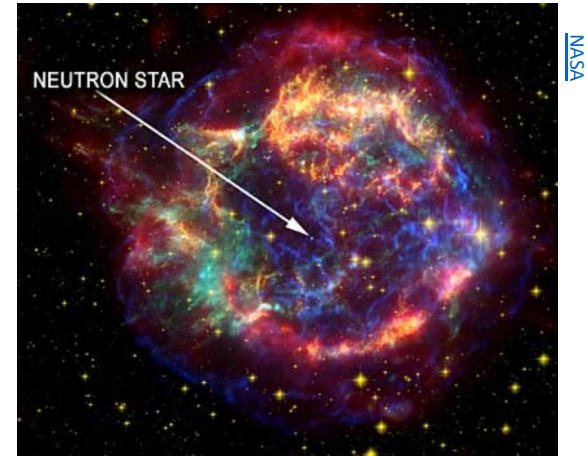
NSF/NRAO/VLA



Navngivningen af supernovaer angives som SN[år][a,b,c], hvor suffixet a,b,c...etc bruges hvis flere supernovaer observeres det samme år.

Resterne efter en supernova

- Kernen som bliver tilbage efter en supernova falder yderligere sammen og bliver til en af to fascinerende objekter på himlen (afhængig af stjernen oprindelige masse:
 - 10-30 solmasser: Neutronstjerne
 - >30 solmasser: Sort hul
- Neutronstjerne består næsten udelukkende af neutroner (deraf navnet)
- Da neutroner ikke har nogen elektrisk ladning, kan de pakkes enormt tæt, hvilket giver neutronstjerner en enorm densitet (omkring 10^{14} kg/L)
- Neutronstjerner har typisk en radius på 10 km og masse mellem 1,4-2,16 solmasser (resten af den oprindelige stjerne er blæst væk i supernovaen)

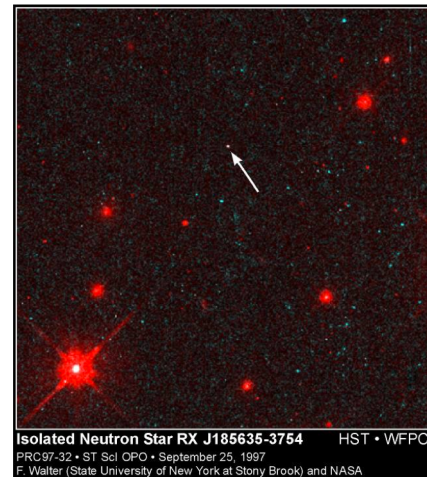
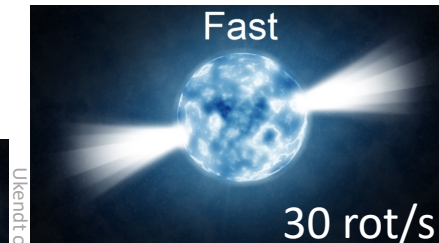
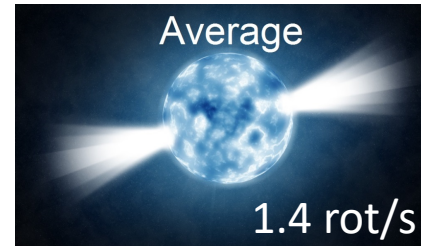


Neutronstjerner er navngivet efter den tilstand som al materialet har i denne stjerne-rest. Stoffet i neutronstjerner kan ikke længere kaldes atomer, da tyngdekraften er så stærk at elektronerne er trukket ind i atomkernerne. Neutronstjerner kan simpelthen ses som en samling af neutroner holdt sammen af et enormt træk fra tyngdekraften.

Neutronernes enorme densitet svarer til at en teske neutronstjerne på Jorden ville veje det samme som 100 Giza-pyramider eller 5000 hangarskibe (Nimitz-klassen).

Neutronstjerner kan sjældent ses, men høres som pulsarer

- Neutronstjerner starter med en overfladetemperatur på 600.000 K og udsender dermed lys som kan observeres (fx billedet nederst til venstre)
- Neutronstjernerens magnetfelt er mere end 100 millioner gange stærkere end jordens, hvilket producerer stærke røntgenstråler og radiobølger
- Røntgenstrålerne afslører neutronstjernen der er blev tilovers efter supernovaen, der har skabt krabbetågen (nederst til højre)
- Neutronstjerner roterer op til flere hundrede gange i sekundet, og hvis et af dets magnetiske poler peger imod jorden, kan vi observere/høre pulser af radiobølgerne for hver rotation (fx klip øverst)



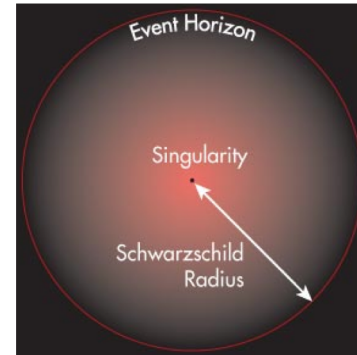
[NASA](#)

Neutronstjerne roterer enormt hurtigt, fordi de har ændret størrelse så radikalt. Fordi den angulære bevægelsesmængde altid er bevaret, må stjernens rotationshastigheden forøges når radius af stjernen formindskes. (Det samme udnytter skøjtedansere der trækker armene ind. Prøv det selv ved at dreje rundt på en kontorstol).

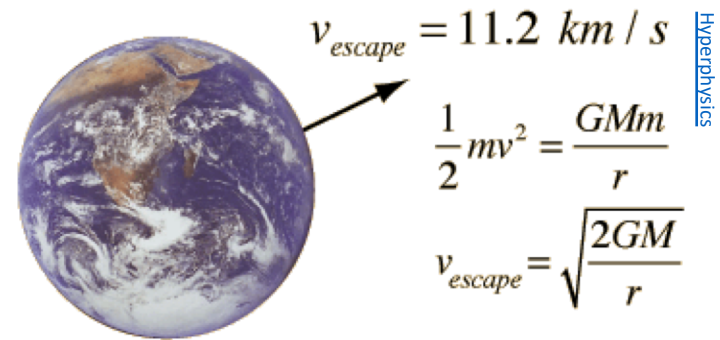
Det er neutronstjernernes puls der har givet dem tilnavnet 'pulsar' (fra "Pulsating Star"). Flere eksempler og lydclip kan findes på [The Sounds of Pulsars](#) (engelsk).

Sorte huller

- Hvis den tiloversblevne masse efter supernovaen er tungere en 3 solmasser, falder kernen sammen til et sort hul
- Et sort hul er et objekt med så høj densitet at intet kan undslippe dets tyngdekraft
- Vi kan udregne jordens undvigelseshastighed, dvs. den hastighed der er behov for, for at slippe fri fra jordens tyngdekraft
- Hvis jorden blev presset sammen så den var på størrelse med en bordtennisbold, så ville undvigelseshastigheden ved overfladen være større end lysets hastighed
- Dermed ville lys ikke kunne slippe væk, og jorden ville være blevet omdannet til et sort hul



Ophavsret ukendt



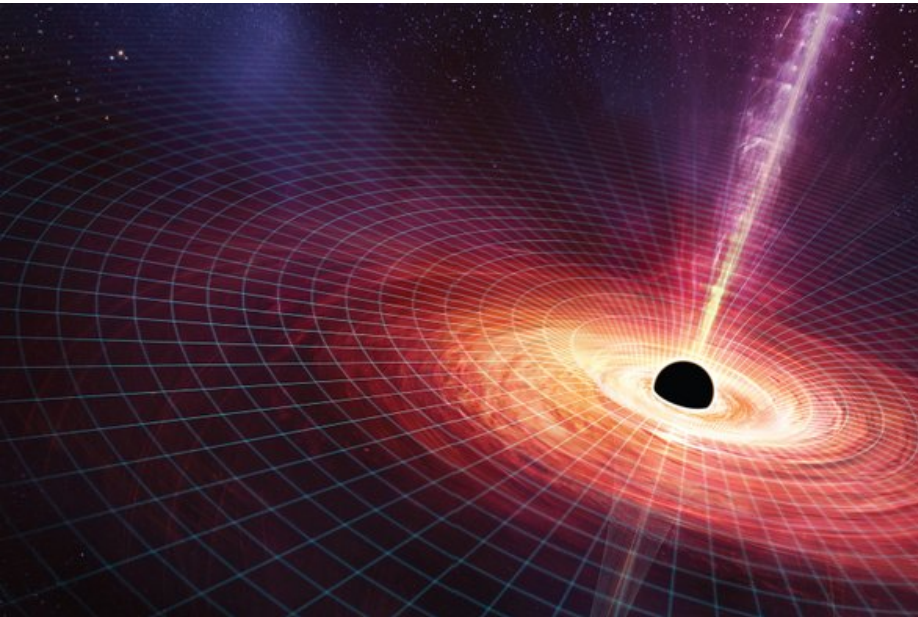
Med Jordens masse presset sammen i en bordtennisbold:

$$v_{\text{escape}} > c$$

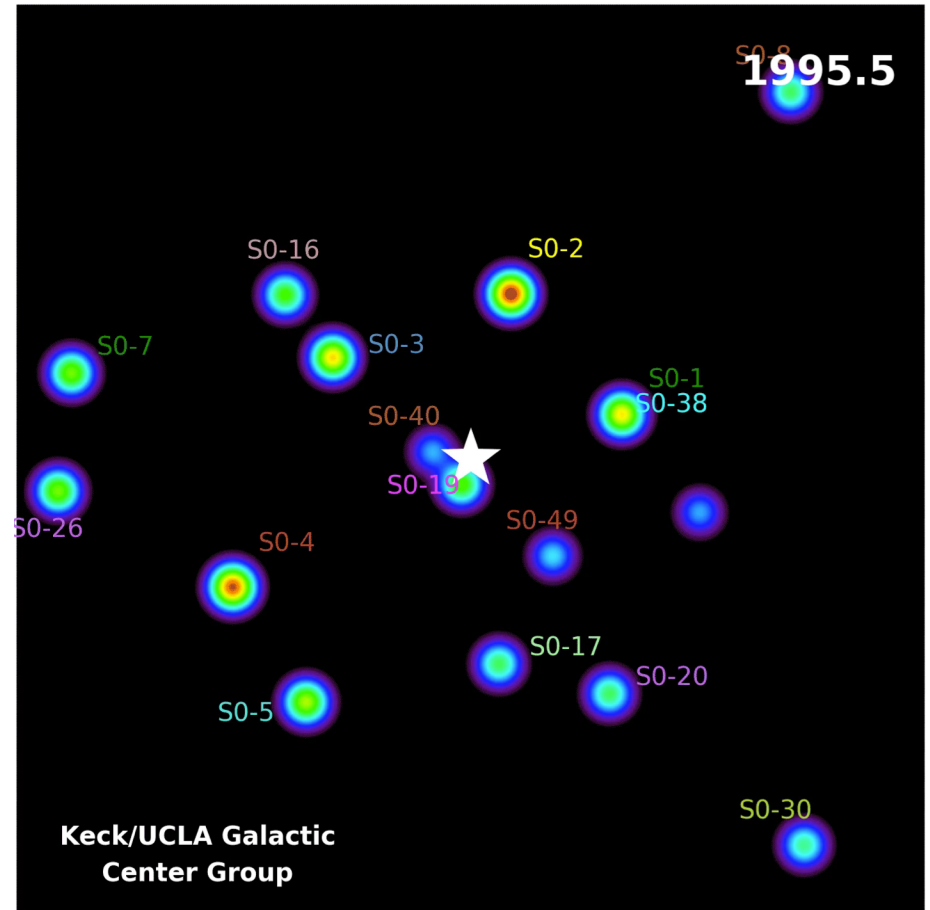
Mere er der egentlig ikke at sige om sorte huller. Hvis man vil arbejde videre med beskrivelsen skal man introducere både kvantemekanik og general relativitetsteori. Det ændrer dog ikke særlig meget på observationen af at sorte huller er uendeligt små, og alt inden for deres begivenhedshorisont ("Event Horizon"), vil blive indfanget.

Det kan dog nævnes at den typiske beskrivelse af et sort hul er et såkaldt 'Schwarzschild' sort hul, hvor man ser bort fra eventuel rotation og elektrisk ladning.

Observation af sorte huller



[Mark Ross](#)

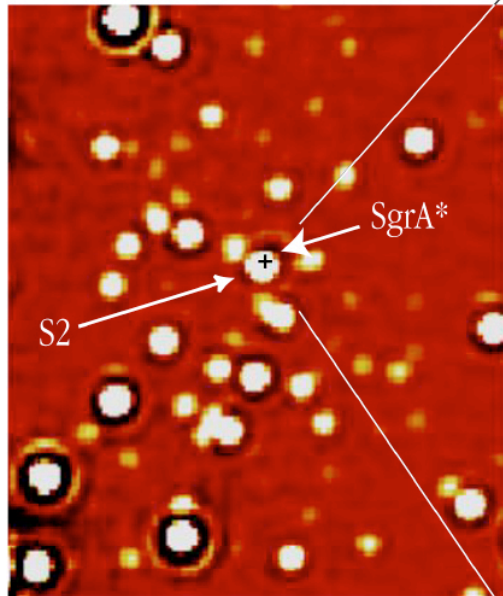


Sorte huller kan observeres gennem studier af andre objekters baner omkring dem.

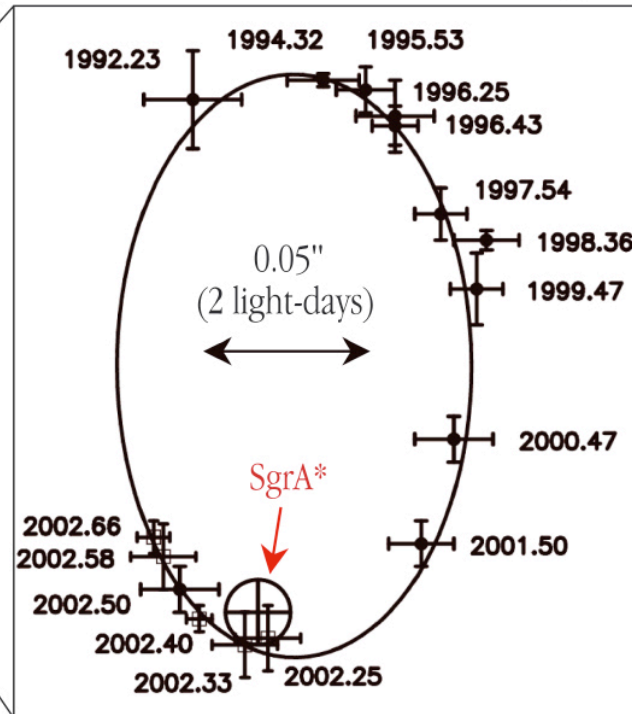
Illustrationen til venstre er blot en flot tegning af et sort hul, men videoen til højre er en ægte observation af stjerner omkring et sort hul i centrum af Mælkevejen. Det er det tætteste på et billede af et sort hul vi er kommet, og er beviset for, at der er et supertungt sort hul i centeret af Mælkevejen.

S2 observeret over 10 år

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*



ne.nu

The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

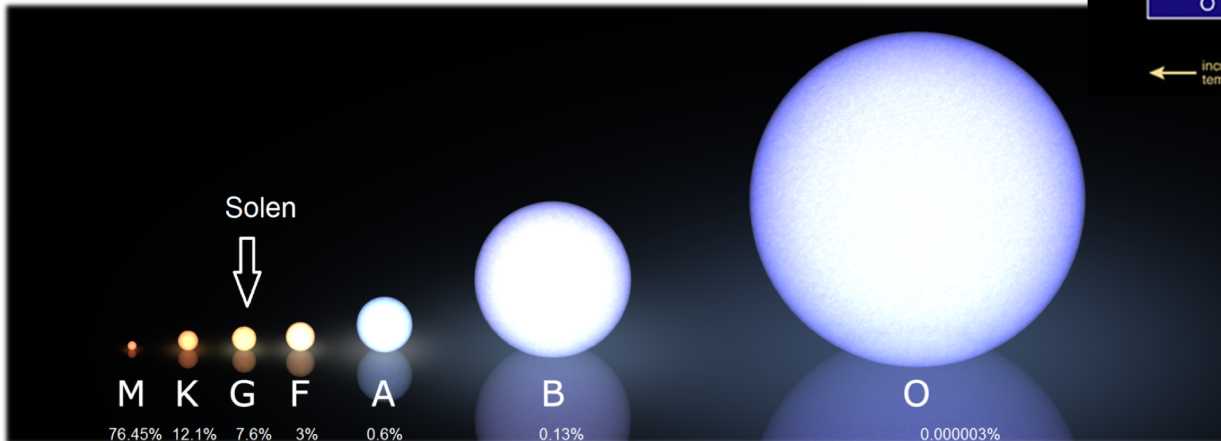
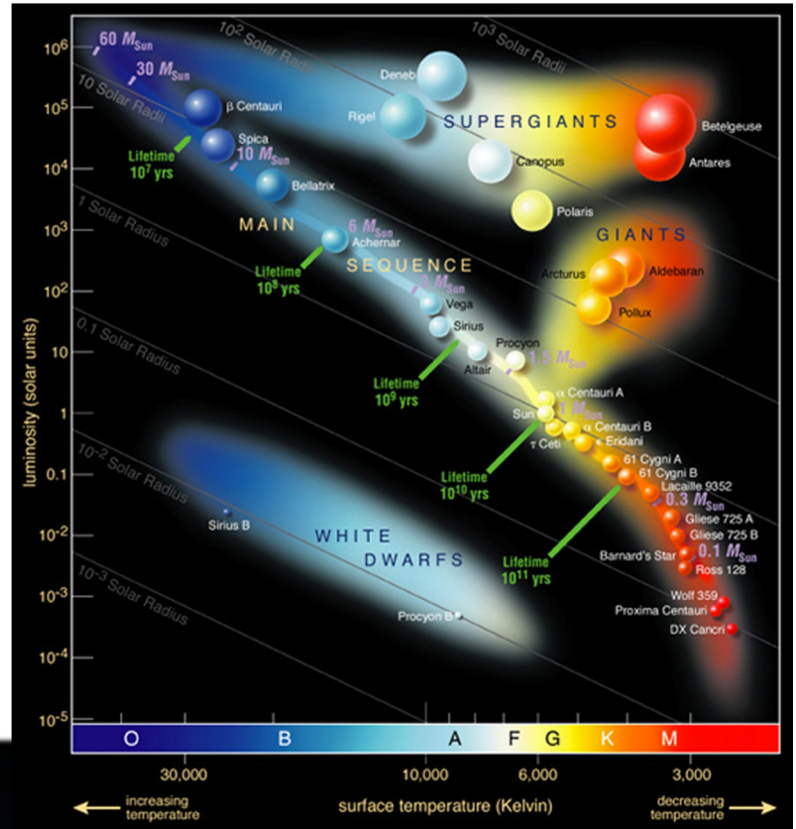


Det sorte hul i centrum af Mælkevejen, er blevet observeret over 10 år, og særligt en af stjernerne (S2) der bevæger sig i en bane om det sorte hul (her refereret til som SgrA*) har nu bevæget sig en fuld omgang omkring det sorte hul.

Hermed har det været muligt at bestemme massen af det sorte hul i midten af Mælkevejen til at være omkring 5 millioner solmasser.

Stjerner

- Stjerner findes i mange størrelser, men bliver typisk inddelt i 7 grupper, afhængig af deres størrelse og kemiske sammensætning
- Store stjerner lever meget kortere end små, så de er for længst eksploderet
- For ca. 10 mia. år siden ($z=2$) var der flest stjerner i universet, og siden da bliver der dannet færre end der dør, så rummet bliver langsomt mere og mere tomt for stjerner

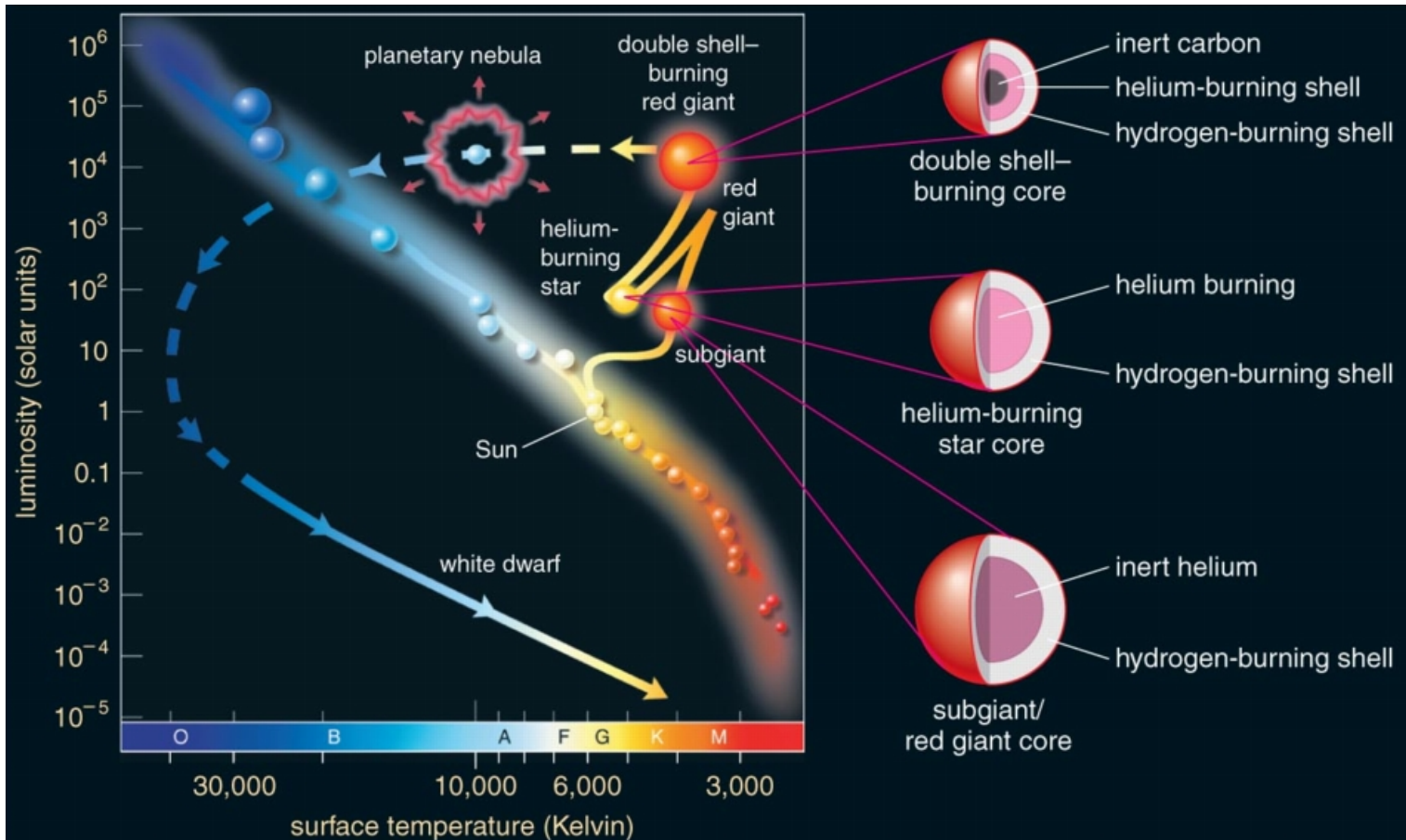


Ophavsret ukendt

På figuren til venstre er angivet en omtrentlig fordeling af stjerner af de forskellige typer i universet. Særligt de supertunge stjerner korte liv, er skyld i at der findes så få af dem (se mere i materialet om 'Grundstoffer').

Til højre er et eksempel på et Hertzsprung-Russel (HR) diagram. HR-diagrammet giver en ide om hvordan de forskellige klasser af stjerner i universet fordeles sig i forhold til lysudsendelse og overfladetemperatur.

Livet for en stjerne som solen



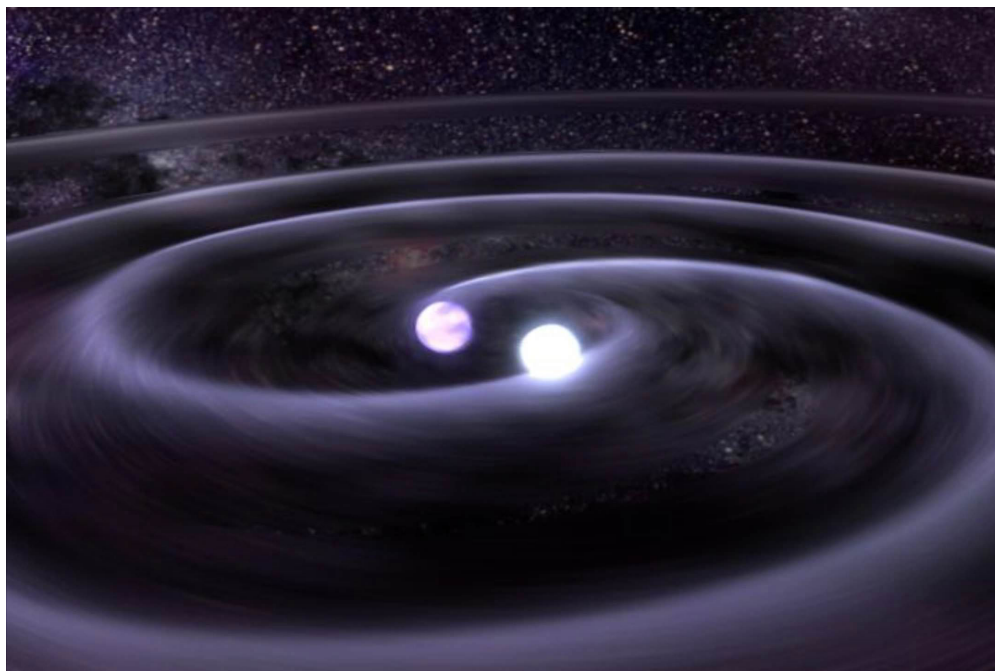
Ophavsret ukendt

Med en forståelse af HR-diagrammet, er det også muligt at følge en stjerne som solen gennem dens stadier.

På HR-diagrammet kan man se hvordan solen er forskellige steder i forskellige stadier, og hvordan det påvirker dens overfladetemperatur og luminositet.

Når kæmper smelter sammen

- Der sker noget spektakulært når de tungeste objekter på himlen smelter sammen
- Når to sorte huller eller neutronstjerner mødes, begynder de langsomt at kredse om hinanden
- Fordi de er så tunge, så trækker de med en enorm tyngdekraft på alt omkring sig
- Resultatet af dette er udsendelsen af gravitationsbølger



NASA/Goddard Space Flight Center

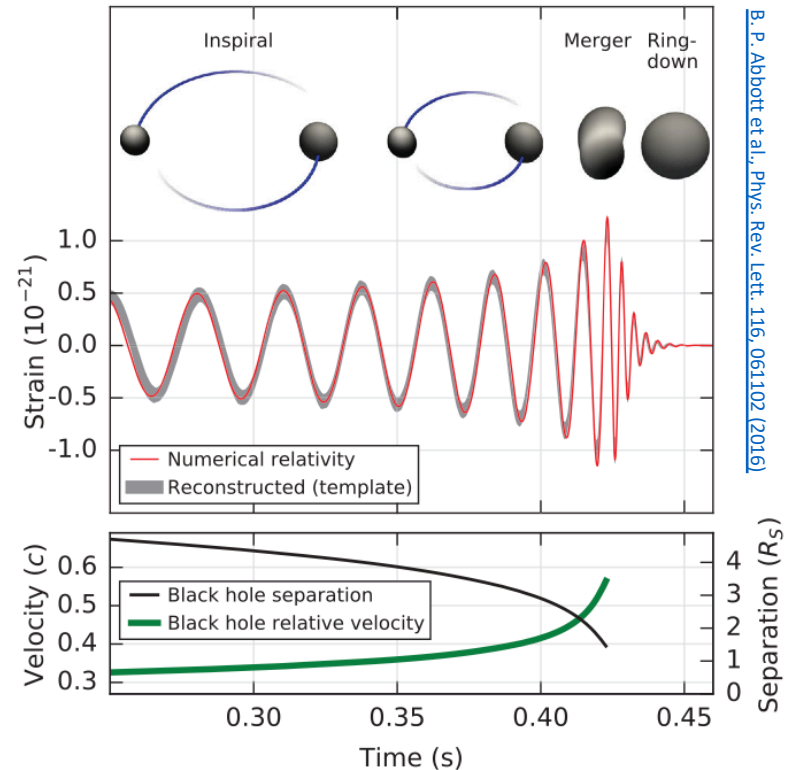
Illustration af to neutron stjerner der smelter sammen

Studiet af gravitationsbølger har været længe undervejs, men er et af årtiets vigtigste opdagelser med de første observationer i 2016, og den afgørende bekræftelse i 2017.

Se fx [en animation af neutronstjernernes sammen stød \(ESO\)](#).

Gravitationsbølger

- Gravitationsbølger kan forstås ligesom almindelige longitudinale bølger
- I stedet for at være igennem fx en fjeder, så bevæger gravitationsbølger sig igennem rumtiden
- Dvs. at bølgen får rummet til at trække sig sammen og fra hinanden igen
- Effekten er dog meget meget lille. De gravitationsbølger, som blev observeret i 2016 ændrede din højde med omkring $1/1.000.000$ af en atomkernes bredde (10^{-21} m).



LIGO observatoriet fremlagde i 2016 de første observationer, der svarer til signalet forventet fra sammensmeltning af to sorte huller.

Grunden til, at opdagelsen var så fantastisk er, at den slags bølger har været forudsagt af Einsteins relativitetsteori siden det forrige århundrede. Opdagelsen giver os endnu mere tillid til, at relativitetsteorien er rigtig. Desuden er det en kæmpe teknisk udfordring at detektere og måle på gravitationsbølger, men det er altså nu lykkedes!

Måling af gravitationsbølger

- Da gravitationsbølger strækker i rumtiden, kan man observere effekten af bølgerne ved hjælp af et interferometer
- I et interferometer sendes laserlys ud i to retninger vinkelret på hinanden og ved at se på interferensen i lyset når det når tilbage igen, kan man se måle meget små ændringer i afstandene mellem spejlene
- For at måle gravitationsbølger har man spejlene hængene ude i 4 km lang 'arme', for at være i stand til at måle så små ændringer som bølgerne medfører



Caltech/MIT/LIGO

LIGO målestation og en af de 4 km lange arme



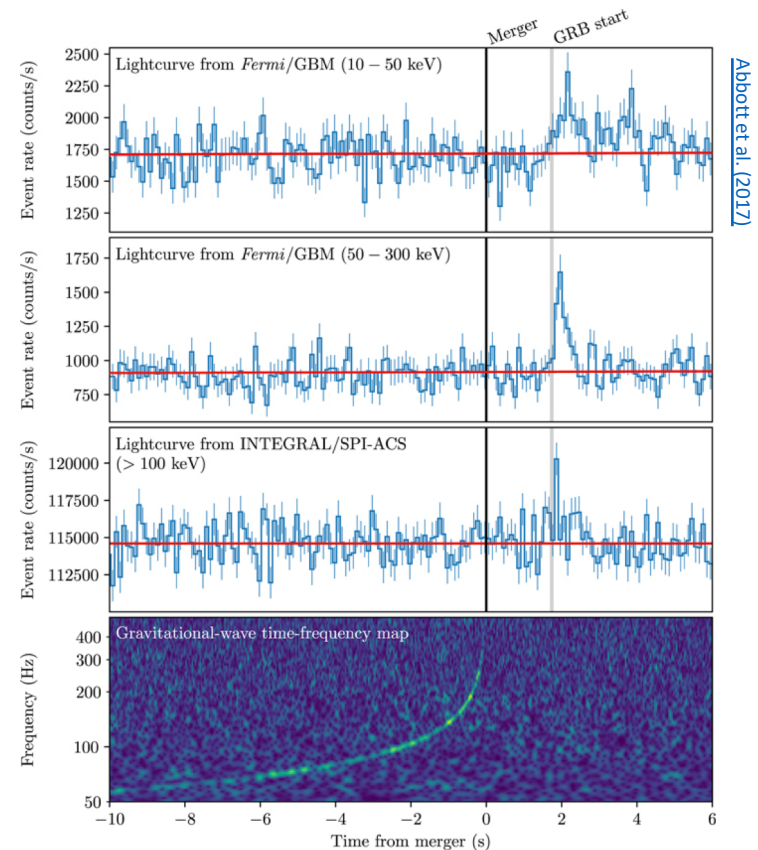
LIGO-Virgo

Der er bygget to sådanne eksperimenter (LIGO og Virgo), så de kan sikre sig at deres signal rent faktisk er en gravitationsbølge fra rummet, og ikke bare lokal støj.

LIGO består af to målstationer og Virgo af en, og tilsammen giver det en mulighed for også at bestemme fra hvilken retning gravitationsbølgen kom fra.

To neutronstjerner mødes

- Den 17. august 2017 detekterer både LIGO og Virgo et stærkt signali retning af galaksen NGC 4993
- Spektakulært: Kort tid efter observeres et kort gammaglimt fra samme retning
- Efterfølgende observationer ved andre bølgelængder cementerede opdagelsen
- Det var en observation af sammensmeltningen af to neutronstjerner!



Denne opdagelse var ikke alene den første observation af fusionen af to neutronstjerner gennem andet end elektromagnetisk stråling og en bekræftelse af at sådan et møde forårsager korte gammaglimt.

Man opdagede også den efterfølgende kilonova som skyldes en produktion af de allertungeste grundstoffer. Og for første gang har man en forklaring på hvor universet allertungeste grundstoffer stammer fra (se mere om dette i materialet om 'Grundstoffer').

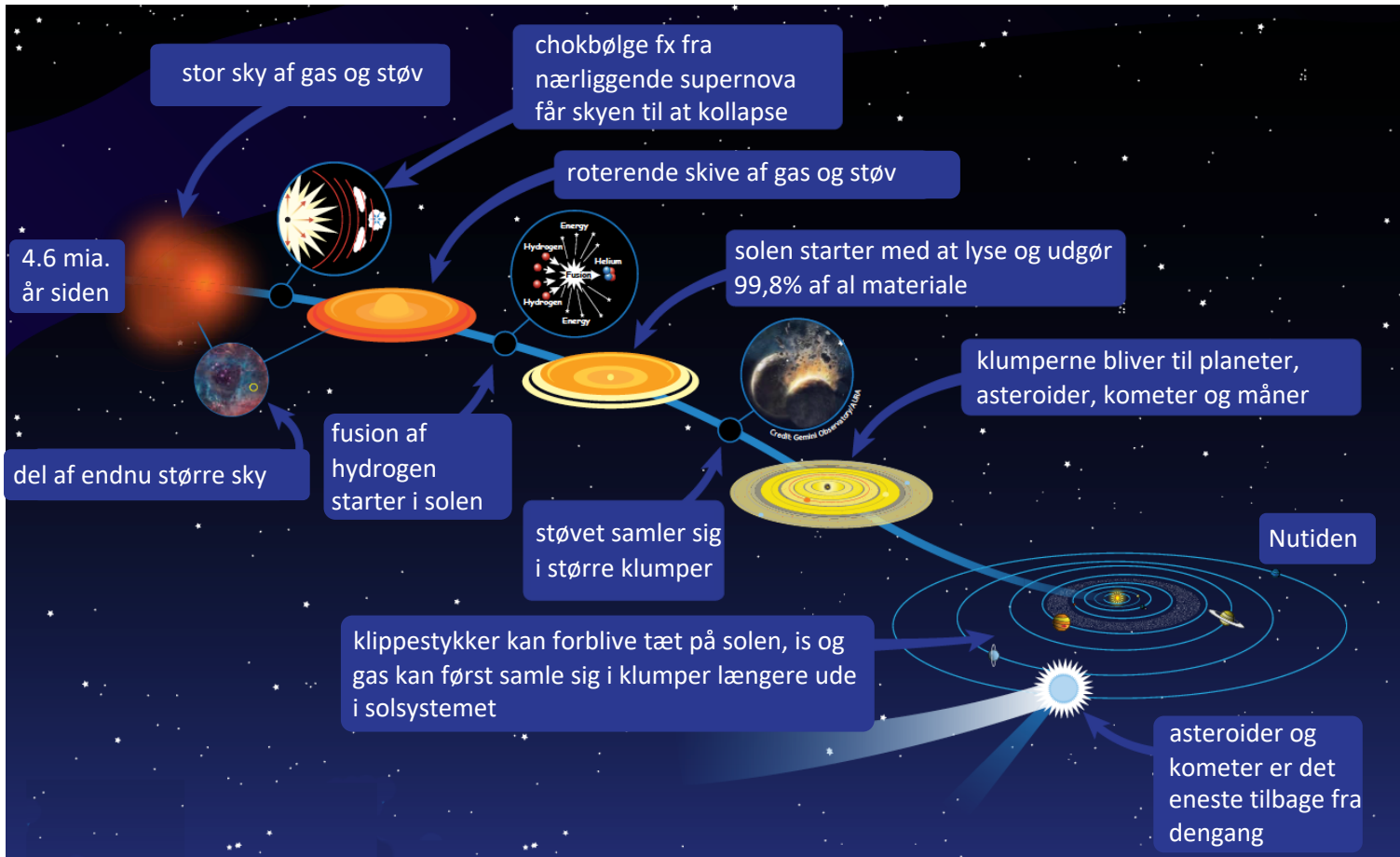
Se fx [video der illustrerer neutronstjernes møde](#).

PLANETER

Nu hvor vi ved hvordan stjerner lever og dør, skal vi undersøge dannelsen af planeter, eksempelvis i vores eget planetsystem, solsystemet.

Hermed rykker vi også nærmere os selv i denne fortælling, nemlig henimod at forstå Jordens skabelse.

Solsystemets dannelse (oversigt)



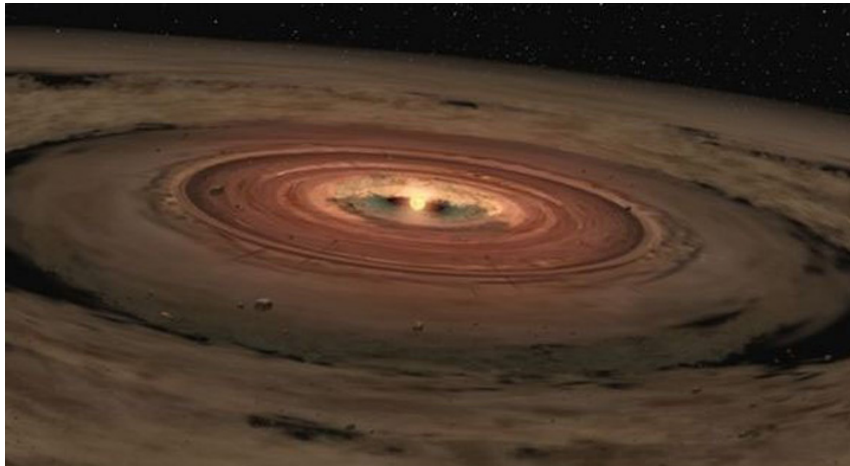
Oversat fra [NASA](#)

Ud af en roterende sky af gas, som trækker sig sammen til en disk, skabes solen i midten. Trykket fra solens lys (der opstår idet fusionen sætter i gang) presser de lettere materialer (gas/is) ud i de ydre dele af systemet, mens de tungere materialer (sten/metal) forbliver tættere på solen.

De rester af gas, som ikke bliver til en stjerne, vil ligge og cirkulerer i en disk og langsomt samle sig til planeter. Antallet af planeter og deres størrelse afhænger af mængden og fordelingen af gas.

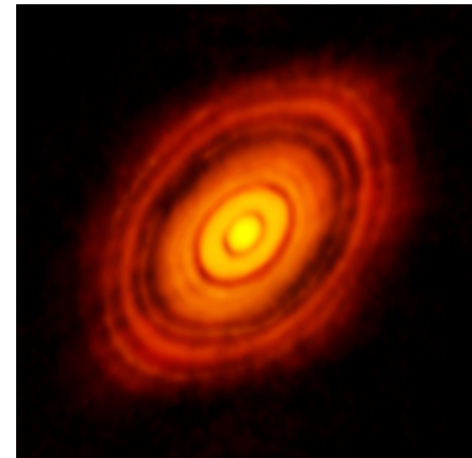
Unge planetsystemer

- Stjernen dannes i midten af det tidlige planetsystem og optager langt det meste af gassen
- Solen udgør 99,8% af alt materialet i solsystemet



NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC)

Illustrativ tegning af ungt planetsystem



ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

Foto af materiale omkring en protostjerne

Generelt ses planetsystemerne som flade skiver af gas og grunden til dette skyldes to effekter. 1) Den angulære bevægelsesmængde er altid bevaret, så den lille smule rotation som tågen havde inden stjernens dannelse, forsvinder ikke og systemet bærer for evigt denne rotation. 2) Gasmolekylerne taber hastighed (energi) når de kolliderer med hinanden.

Da den angulære bevægelsesmængde er bevaret for dette system kan de kun tabe hastighed vinkelret på rotationsretningen. Efter gentagne kollisioner bliver alle gasskyer skiveformede. Dette er også grunden til at alle observerede galakser er flade skiver.

Planeter dannes

- Støv og gas samler sig i større og større klumper omkring den nydannede stjerne
- Dette sker først gennem friktionen mellem gasmolekylerne (når de tilfældigt mødes)
- Når de klumperne er store nok tiltrækker de hinanden ved hjælp af tyngdekraften
- Dette fortsætter indtil de er på størrelse med månen
- Herefter lever de deres liv, eller kolliderer yderligere med hinanden og skaber endnu større planeter



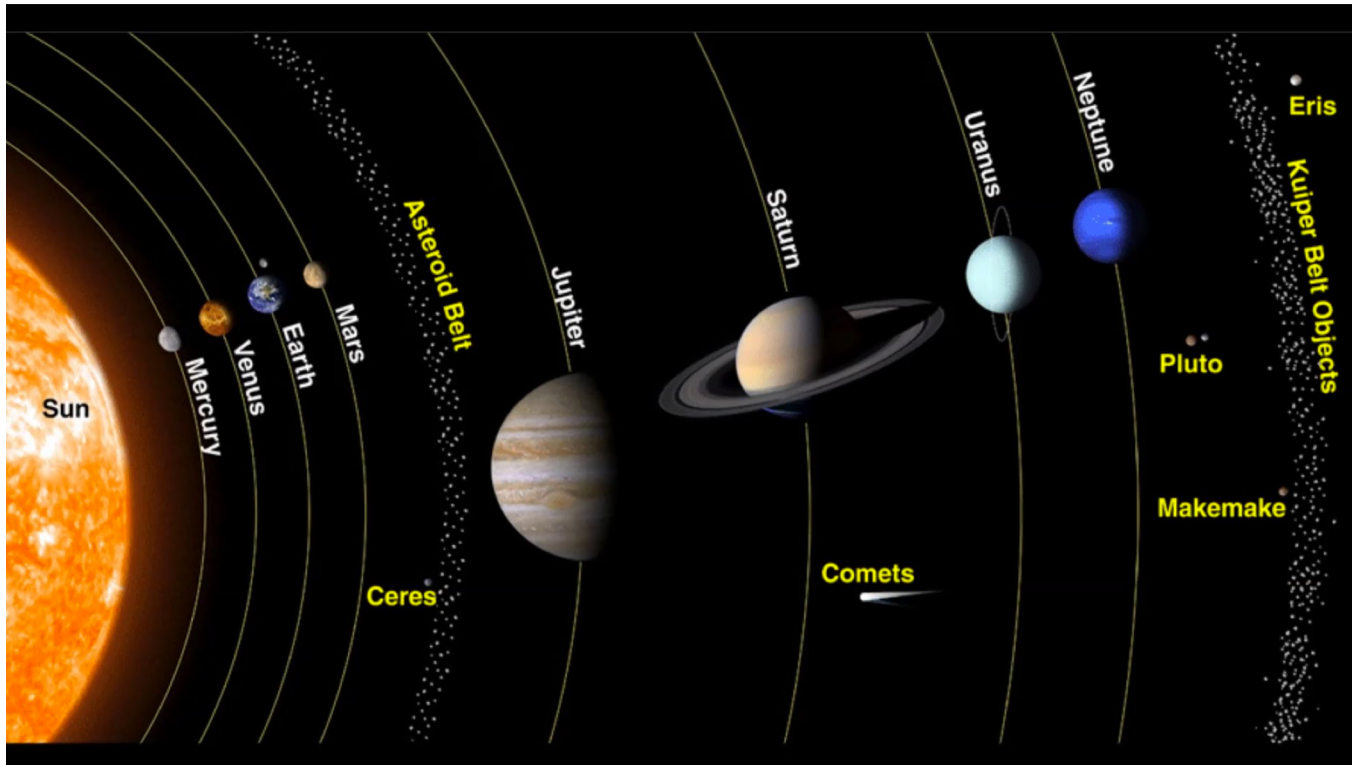
W. K. Hartmann, Planetary Science Institute, Tucson, Arizona

Da planeter ikke udsender særlig meget lys, er det svært at følge udviklingen af planetsystemer lige så nøje som vi kan følge stjernes udvikling, og langt den største kilde om planetdannelse kommer fra vores viden om solsystemet.

Fysikken er rimelig kompleks, men vi ved at der gik ca. 3 mio. år fra de første støvkorn klistrer sammen i solsystemet, til al støvet er samlet i kilometer-store klumper. Over de næste én million år samles klumperne til planeter på størrelse med Månen og Mars, men der er mange af disse klumper med overlappende banekurs, og der sker mange voldsomme kollisioner over de næste 10-100 mio år.

Dette er et forskningsfelt, som stadig er i fuld gang. Ovenstående er den mest populære hypotese, men måske bliver det ændret inden for de næste par år.

Solsystemet 1: De indre planeter



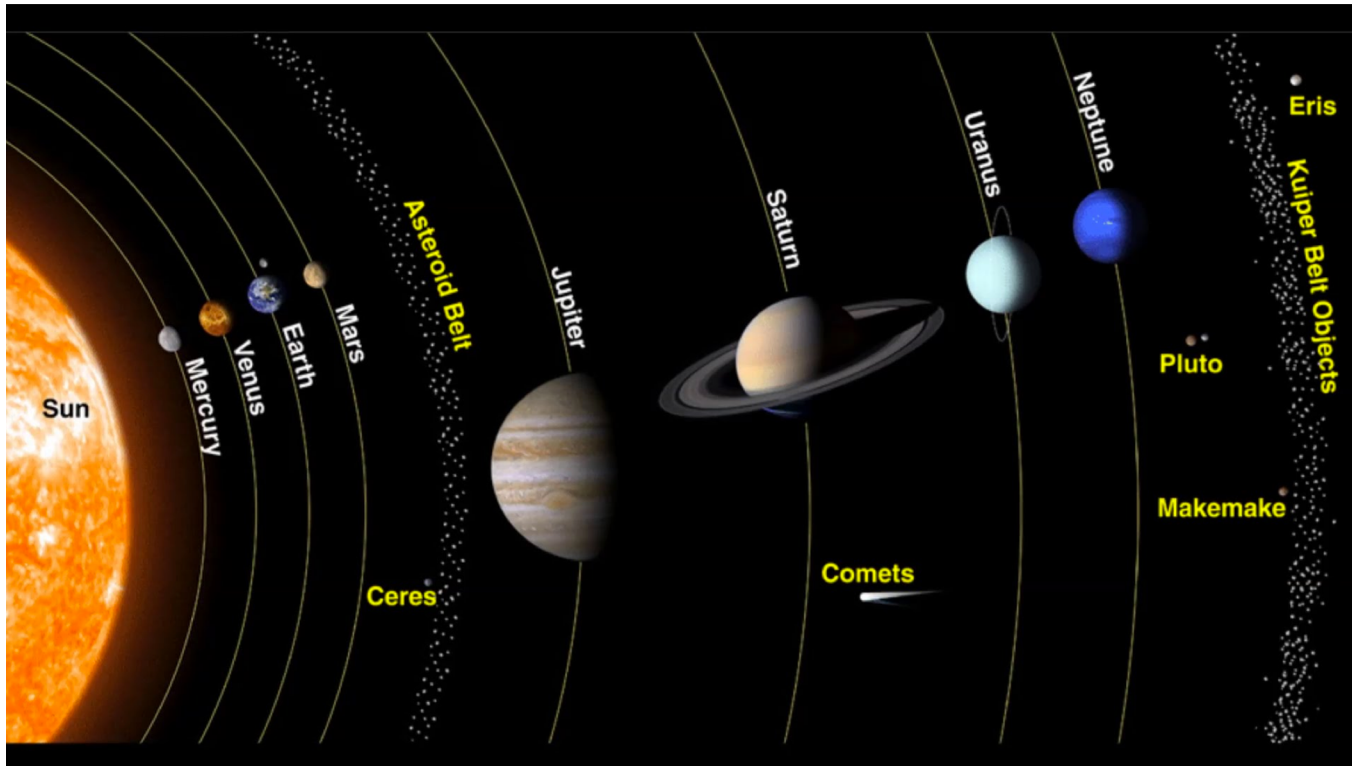
NASA

Om enhver anden stjerne vil planeter dannes efter de samme generelle mekanismer som her er beskrevet for solsystemet.

De indre planeter (inden for 4 astronomiske enheder, Merkur, Venus, Jorden og Mars) er skabt af tungere metaller (klipper og sten), da temperaturen i det tidlige solsystem var så høj, at grundstoffer med for lavt smeltepunkt ikke kunne samle sig til faste klumper. Da de tungere grundstoffer er meget sjældne i universet (se materiale om 'Grundstoffer') var der heller ikke meget i solsystemet, og dette har begrænset størrelsen af de indre planeter.

Asteroidbæltet består af klippemateriale og antages at have haft materiale til mindst én planet, men tyngdekraften fra Jupiter og Saturn slyngede det meste af materialet længere ind eller ud af solsystemet, så der i dag kun er omkring 1/2000 af Jordens masse tilbage.

Solsystemet 2: De ydre planeter

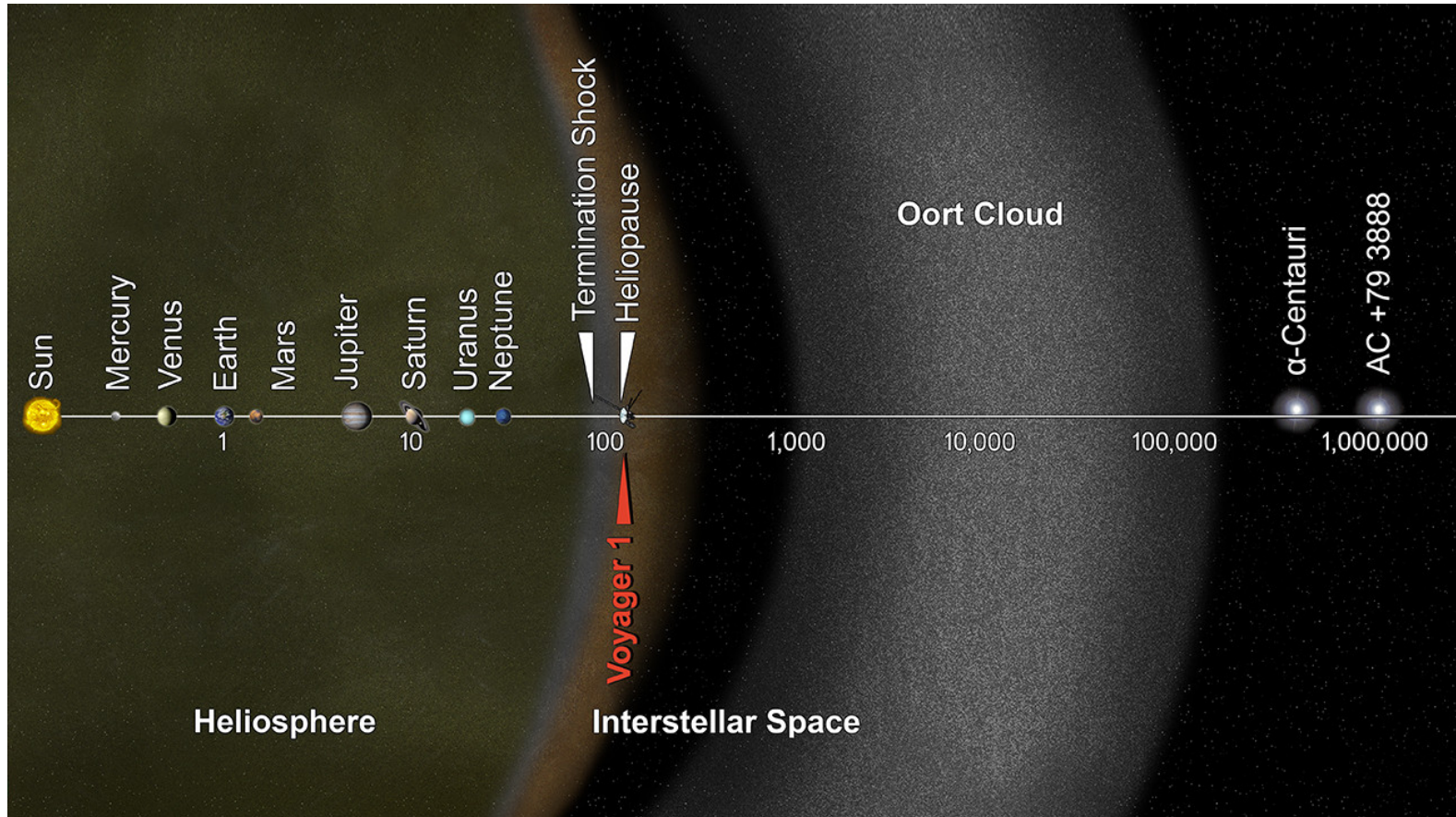


NASA

De ydre planeter (Jupiter, Saturn, Uranus og Neptun) dannes først af frosne gasser, eksempelvis vand, metan og CO₂, som der var langt mere af i det tidlige solsystem. Dette gjorde planeterne tunge nok til at tiltrække og fastholde hydrogen og helium efterladt fra dannelsen af Solen (og som var til stede i en rigelige mængde; derfor er 99% af den masse, som ikke er bundet i solen, fundet i de ydre planeter).

Kuiperbæltet minder meget om asteroidebæltet, men består af klumper af frosne gasser, og befinder sig i en bane mellem 30-50 astronomiske enheder fra solen. Der er flere 'større' klumper, som klassificeres som dværgplaneter, eks. Pluto, Eris og Makemake. Pluto blev oprindeligt benævnt en planet, men da det viste sig at der var flere andre klumper af samme størrelse som Pluto, og Pluto ikke (som de andre planeter i solsystemet) har ryddet sin bane for andet materiale valgte man at stoppe med at benævne den som planet.

Solsystemet størrelse

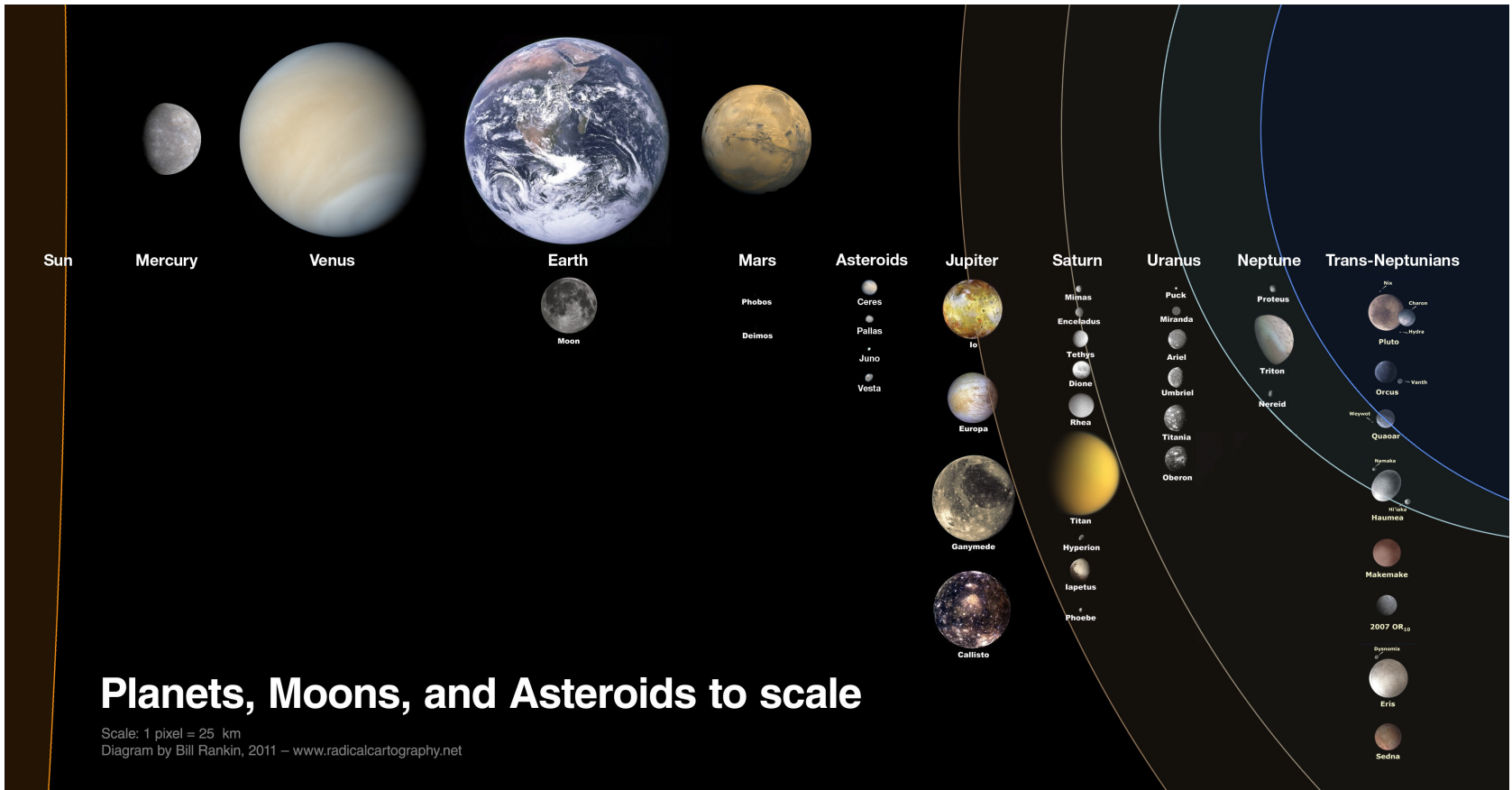


Som udgangspunkt ville man sætte grænsen for solsystemet i den afstand hvor man ikke længere kan mærke magnetfeltet fra Solen (kaldet 'Heliopausen'), hvor det interstellare medie bremser solvinden.

På illustrationen oven for er afstandene logaritmisk og stiger altså med en faktor 10 for hver markering, med afstande målt i astronomiske enheder (AU) - afstanden fra Solen til Jorden.

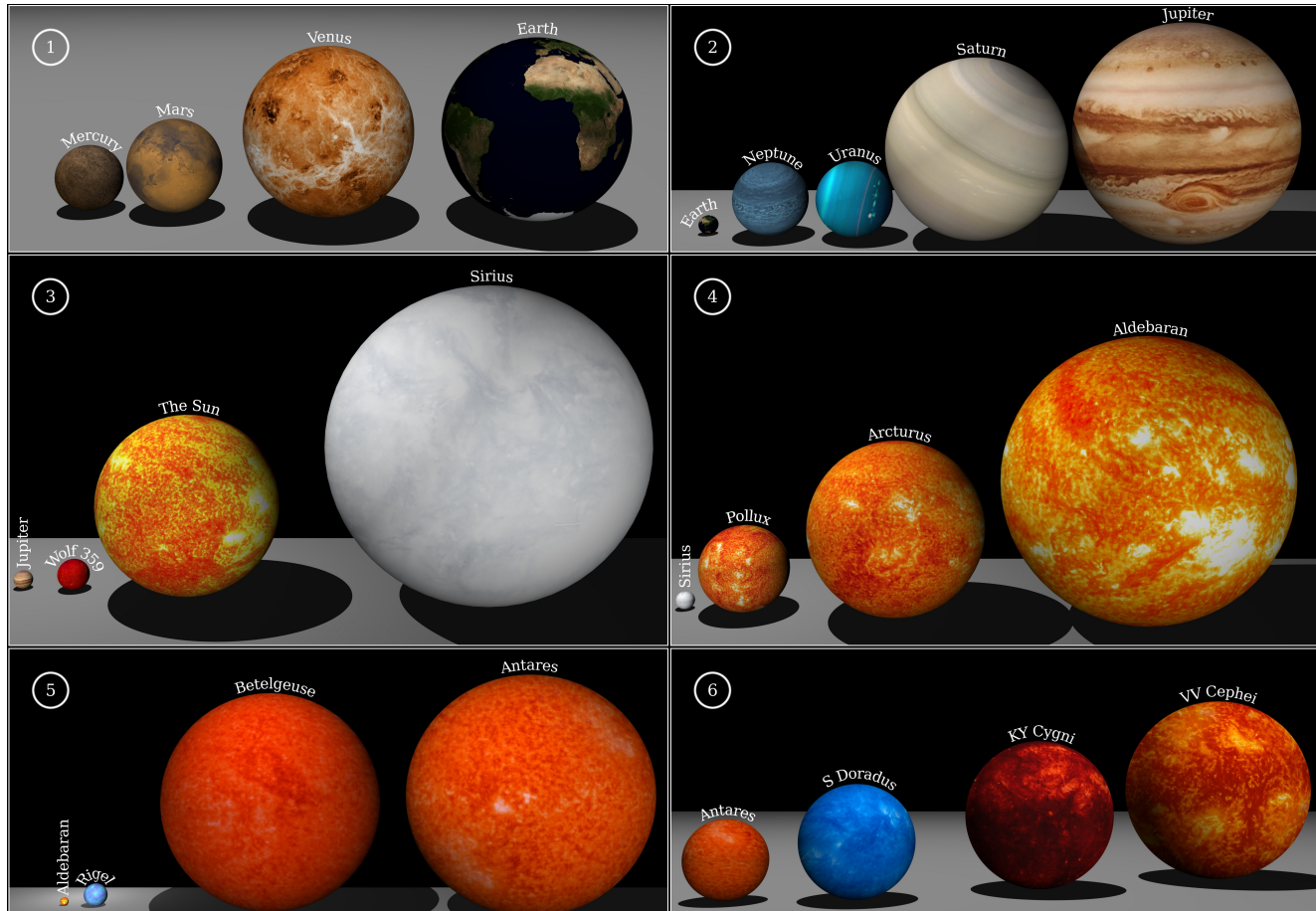
På figuren er også angivet hvor langt Voyager 1 er nået, omkring 145 AU, det længste en menneskeskabt ting er nået i rummet, og det er efter at have fløjet med omkring 17 km/s siden 1977 – og vi har stadig kontakt til satellitten!

Planeternes størrelse



Her ses planeterne i deres rigtige størrelsesforhold. Jorden er den største af de fire inderste planeter (klippeplaneter), som har en fast overflade. Jorden har, som den eneste, en stor måne. Planeterne længere ude (gas-giganterne) er meget større og består hovedsageligt af gas. Planeterne er angivet med farvede ringe da der ikke er plads til hele planeten (ligesom solen).

Planeter vs. stjerner



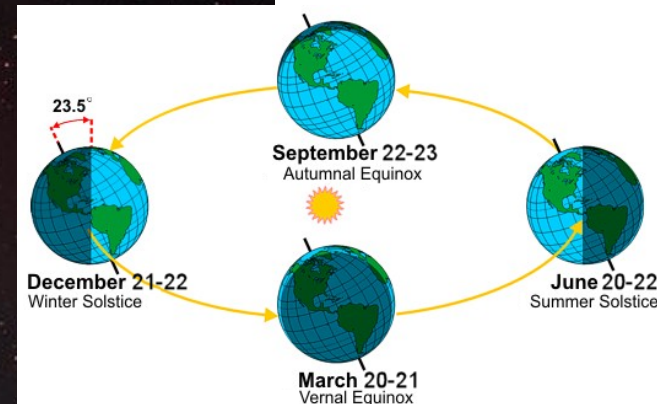
[Wikimedia Commons](#)

For at give en fornemmelse af de størrelser objekter i rummet kan have, sammenligner figuren ovenfor planeterne i solsystemet med solen, og andre stjerner. For hver ny ramme, starter rækken med det største objekt fra den forrige ramme.

Det største objekt der er taget med i sammenligningen her er VV Cephei som er en af de største stjerner hidtil observeret i Mælkevejen, med en estimeret radius på 1050 gange solens radius.

Det er dog ikke den største vi har observeret; den pris går til VY Canis Majoris, med en radius på 1420 gange solens radius.

Månens dannelse

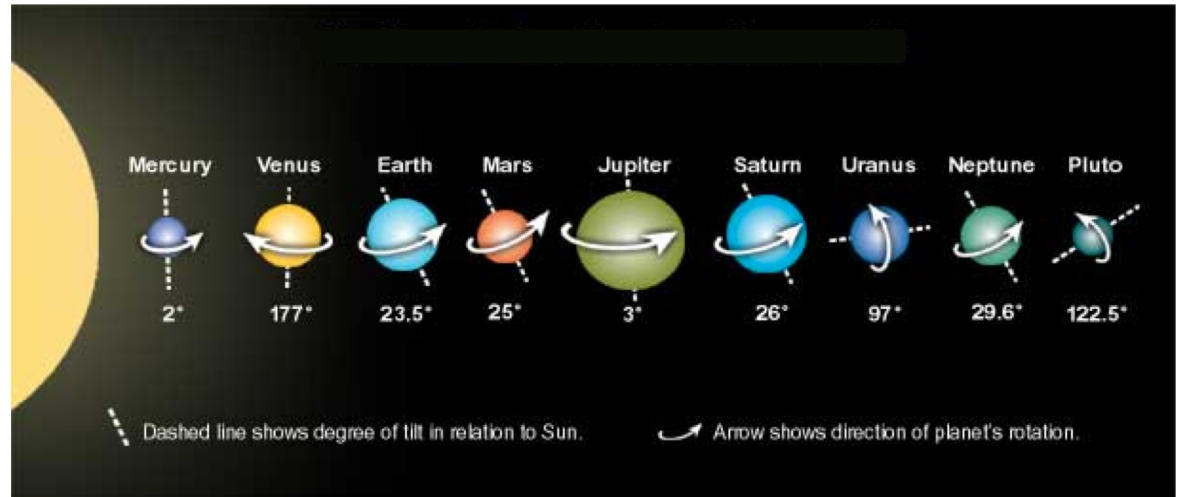


Månen blev til, da Jorden stødte sammen med en anden planet (på størrelse med Mars) i Jordens bane, omkring 30 millioner år efter solsystemet blev skabt. Jorden tog det meste af materialet, mens månen tog resterne. Det er derfor månen er lavet af det samme materiale som jordens yderste lag.

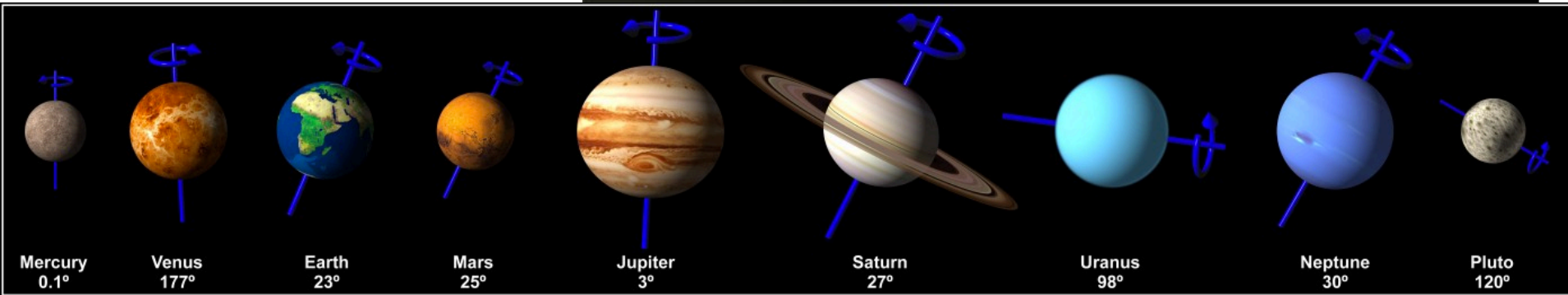
Den kollision er ikke bare en interessant begivenhed i jordens historie, men har haft vidtrækkende konsekvenser. Kollisionen har sandsynligvis givet Jordens daglige rotation, og samtidig ændret Jordens rotationsakse i forhold til Jordens omløb om Solen, hvilket er givet os årstiderne. Derudover bevæger Månen sig samme vej rundt om Jorden, som Jorden bevæger sig om Solen, og er med til at stabiliserer Jordens rotation, og dermed årstiderne.

Derudover giver så stor en måne også stærke tidevandseffekter, som ifølge nogle teorier har spillet en afgørende rolle for livets ryk fra vand til land.

Planeternes rotation



Ophavsret ukendt



Obliquity of the Nine Planets

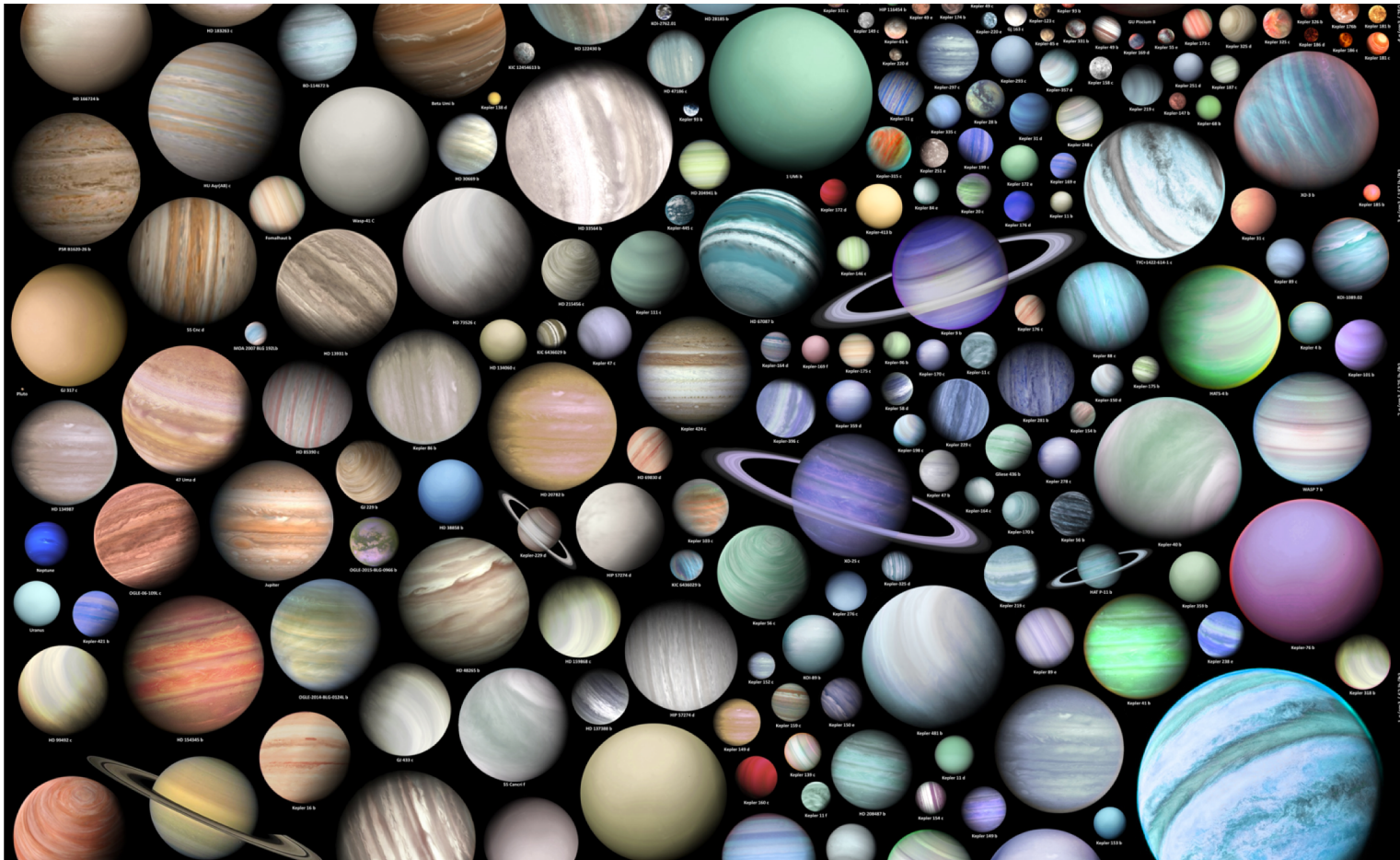
© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton

[Calvin Hamilton](#)

Tilsvarende kollisioner er teoretiseret for andre planeter i solsystemet. Særligt kraftige sammenstød har givet Venus og Uranus (og Pluto), en rotation modsat alle andre planeter i solsystemet. Venus har yderligere en rotation, der er så langsom, at en Venus-dag er længere end et Venus-år, og giver altså ikke ophav til ligeså regulære årstider, som dem vi har på Jorden.

Derudover er der mange andre egenskaber ved planeterne som er interessante, men er historier som må vente til en anden god gang (om eksempelvis den manglende atmosfære på de andre klippeplaneter, det voldsomme storme på Jupiter, og de fantastiske ringe omkring Saturn og Uranus).

Exoplaneter



Exoplaneter er planeter, som ikke går rundt om solen, og dermed ikke er en del, af vores solsystem. Man har altid spekuleret på, om der mon også var planeter rundt om de andre stjerner omkring os, men det er meget svært at se, idet planeterne selv sender meget lidt lys ud.

Men i 1995 lykkedes det at detektere den første exoplanet, og siden da er det gået meget stærkt. I dag har man opdaget mere end 3000 exoplaneter, hvoraf flere ligner Jorden.

Andre potentielt beboelige planeter?

- De mest fundamentale spørgsmål:
 - Er der jord-lignende planeter?
 - Er de beboelige?
 - Er der liv derude?
- Eftersøgningen er i fuld gang, men den næste milesten er at undersøge atmosfæren på fjerne planeter
- Hvis atmosfæren indeholder stoffer der ikke er i kemisk ligevægt, kan det skyldes biologisk liv
- Dette gælder fx ilt (O_2) og ozon (O_3)

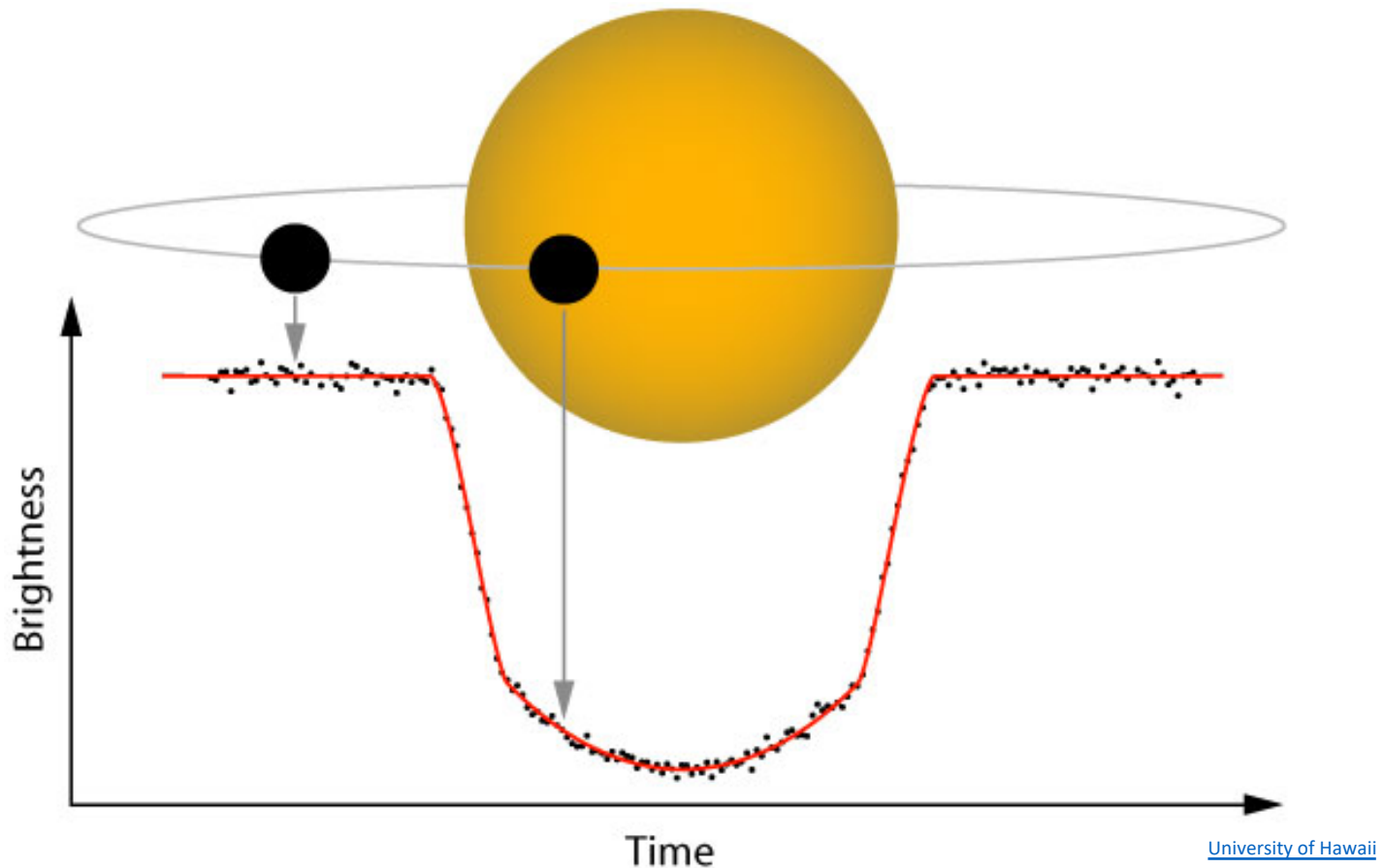


Ophavsret ukendt

Atmosfærens sammensætning på en exoplanet kan undersøges ved at se på spektret fra lys der passerer igennem, da de resulterende absorptionslinjer vil fortælle hvilke forbindelser der eksisterer i hvilke koncentrationer.

Man kan også sammenligne det udsendte lys fra planeten, ved at sammenligne det spektrum man ser fra stjernen alene (når planeten er bagved stjernen) med hvad man ser fra stjernen og planeten (når planeten er synlig).

Detektion af Exo-planeter

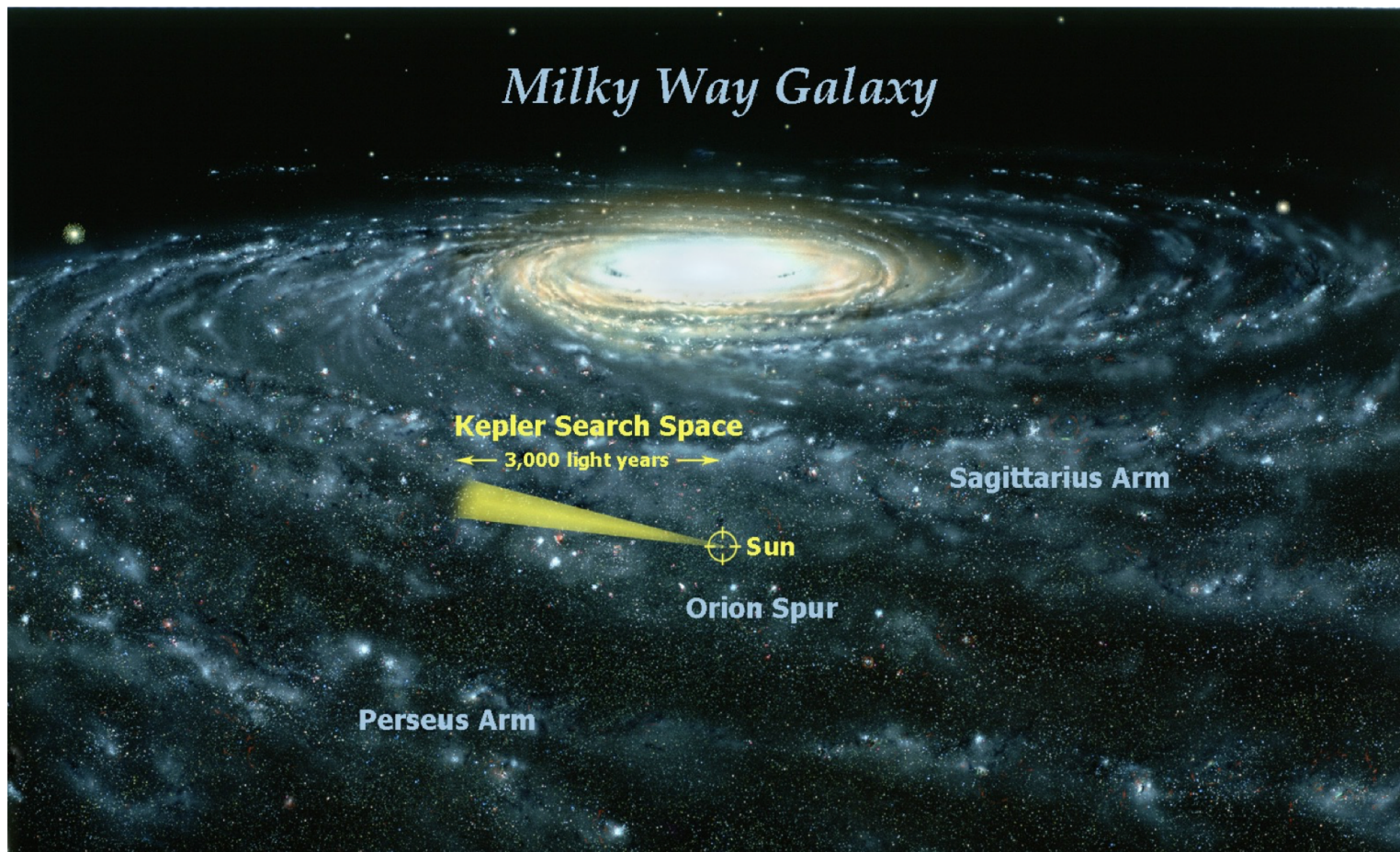


Der findes efterhånden mange måder, hvormed man kan detektere exo-planeter, men de to mest brugte er:

Transit-metoden (illustreret ovenfor): Man ser om planeten passerer ind foran stjernen, som dermed en kort overgang sender en lille smule (0.1-1%) mindre lys. Læs mere om transitmetoden i ide-kataloget.

Radial-metoden: Ved at måle intensiteten af en stjernes lys, kan man se om stjernen står og "rokker" frem og tilbage, hvilket kan skyldes en planet i kredsløb om stjernen, som hiver i den. Dette var metoden man brugte til at opdage den første exoplanet.

Kepler: På jagt efter exo-planeter



[Wikimedia Commons](#)

Kepler-missionen kigger omkring 3000 lysår ud ad Orion-armen, som blot er en lille bitte del af vores galakse. Selvom Kepler kun studerer en lille del af Mælkevejen, har den allerede opdaget mere end 2500 hidtil ukendte verdener.

For at kunne udnytte transitmetoden på fjerne stjerner, er Kepler i stand til at måle ændringer i lysstyrke meget præcist: 20 ppm (parts per million). Det svarer til at se på en gadelampe 1.5 km væk og så dreje hovedet 7 grader (hvilket forøger/sænker lysstyrken tilsvarende).

Om materialet

Big Bang til naturfag

- Materialet er udarbejdet af projektet 'Big Bang til Naturfag' (et samarbejde mellem Københavns Universitet og Aarhus Universitet)
- Denne del af materialet er udarbejdet med særligt bidrag fra:
 - Johan Fynbo, Professor MSO (Københavns Universitet)
 - Jonatan Selsing, PostDoc (Københavns Universitet)
- Big Bang til Naturfag er støttet af A.P. Møller Fonden

KØBENHAVNS
UNIVERSITET



AARHUS UNIVERSITET

A.P. MØLLER FONDEN