

Tähtien evoluutio: Niiden syntymä, elämä ja kuolema

John R. Percy

*International Astronomical Union
University of Toronto, Canada*



Tähtien evoluutio

- Kun puhumme tähtien evoluutiosta, tarkoitamme niitä muutoksia, jotka tähdissä tapahtuvat niiden kuluttaessaan “polttoainetta”, alkaen niiden syntymästä koko pitkän elämän läpi kuolemaan asti
- Tähtien evoluution ymmärtäminen auttaa tähtitieteilijöitä ymmärtämään:
 - Aurinkomme luonnetta ja tulevaa kohtaloa
 - aurinkokuntamme alkuperää
 - millainen aurinkokuntamme on suhteessa muihin planeettajärjestelmiin
 - saattaisiko muualla maailmankaikkeudessa olla elämää

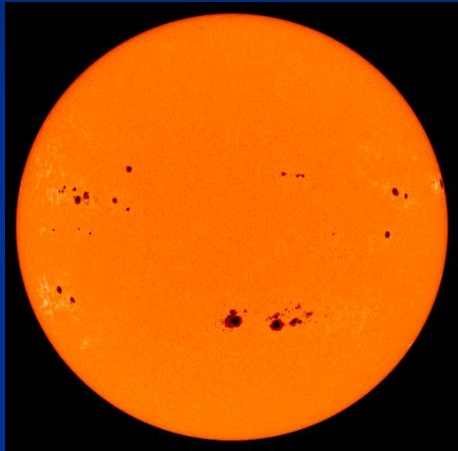


Lyyran rengassumu, kuoleva tähti Lähde: NASA



Auringon ominaisuudet

ja kuinka tähtitieteilijät mittaavat niitä



Aurinko

Lähde: NASAn SOHO-satelliitti

- **Etäisyys:** 1.5×10^{11} m, tutka-aaltojen heijastuminen Merkuriuksesta ja Venuksesta
- **Massa:** 2×10^{30} kg, Aurinkoa kiertävien planeettojen liikkeen mittaaminen
- **Halkaisija:** 1.4×10^9 m, etäisyyden ja näennäisen koon (kulman) mukaan
- **Teho:** 4×10^{26} W, etäisyys ja Maassa mitattu teho
- **Kemiallinen koostumus:** 98% vetyä ja heliumia, tutkimalla sen spektriä.

Tähtien ominaisuudet

miten tähtitieteilijät mittaavat niitä



Orionin tähdistö

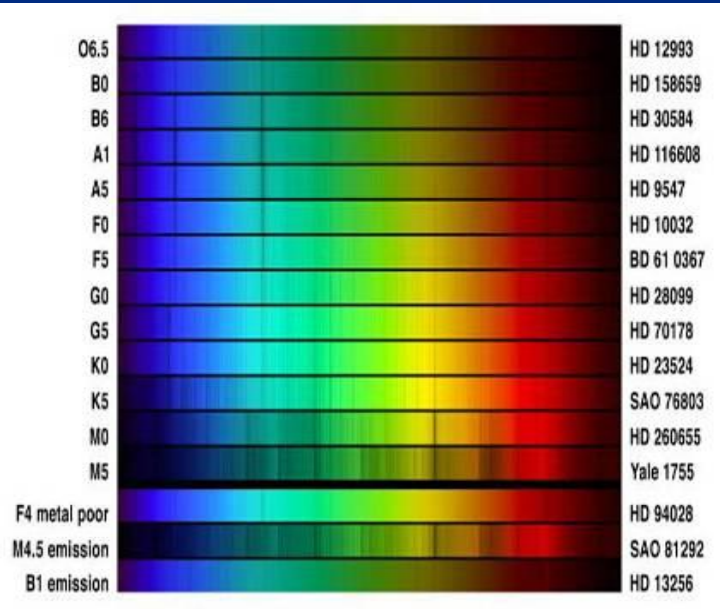
Lähde: Hubble, ESA, Akira Fujii

- **Etäisyys:** parallaksista, tai näennäisestä kirkkaudesta, jos teho on tiedossa
- **Teho:** etäisyydestä ja näennäisestä kirkkaudesta
- **Pinnan lämpötila:** väristä tai spektristä
- **Halkaisija:** tehosta ja pinnan lämpötilasta
- **Massa:** havainnot kaksoistähtijärjestelmistä
- **Kemiallinen koostumus:** spektristä



Tähtien spektri:

tähtien valo, hajotettuna väreihin



- Tähtitieteilijät saavat tietoa avaruuden valonlähteistä tutkimalla niiden säteilemää valoa
- Spektristä saa tietoa koostumuksesta, lämpötilasta ja muista tähtien ominaisuuksista

Vasemmalla: ensimmäiset 13 spektriä tähdistä, joilla on eri pintalämpötila (kuumin ylimpänä); alimmat kolme spektriä on tähdistä, joilla on erikoisia ominaisuuksia

Tähtien spektrejä

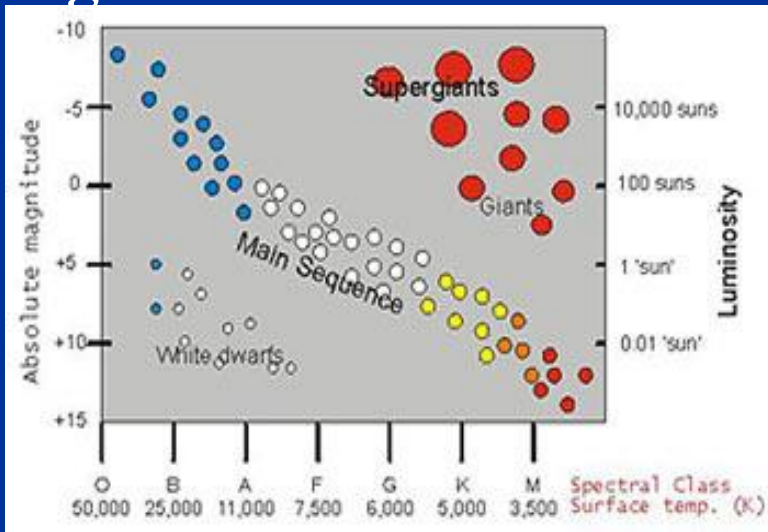
Lähde: US National Optical Astronomy Observatory



Hertzsprung-Russell diagrammi

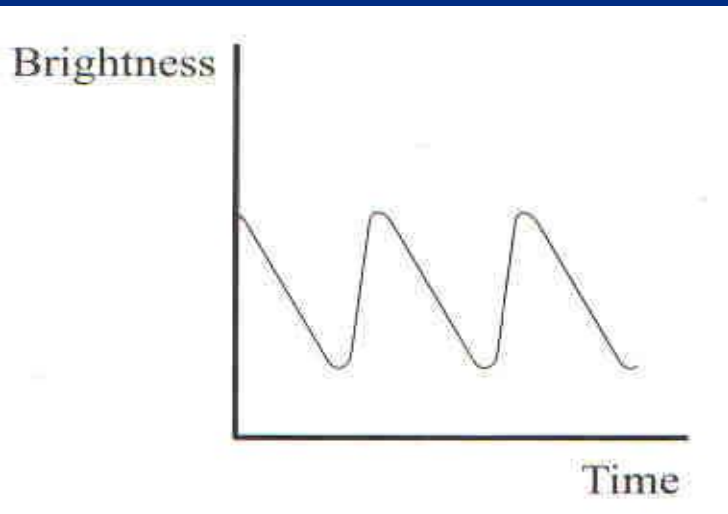
Tähtien ominaisuuksissa on järjestelmällisyyttä!

Hertzsprung-Russell (HR) diagrammi näyttää tehon (kirkkauden) lämpötilan (spektriluokan) funktiona; "absoluuttinen magnitudi" on logaritminen tehon mitta.



- Suurin osa tähdistä sijaitsee pääsarjalla: massiiviset tähdet ovat kuumia ja niillä on suuri teho (ylävasemmalla), kun pienillä tähdillä on pieni massa, lämpötila ja teho (alaoikealla)
- Jättiläistähdet ovat diagrammissa yläoikealla, valkeat kääpiöt taas alavasemmalla

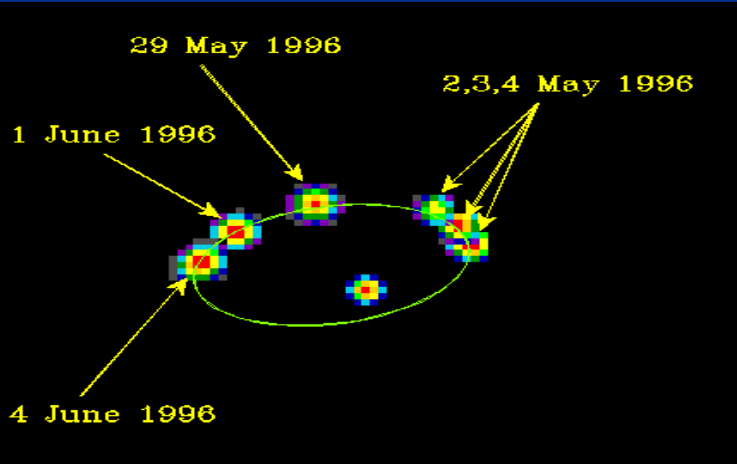
Muuttuvat tähdet



Valokäyrä: kirkkaus x aika -kuvaaja

- Muuttuvat tähdet ovat tähtiä, joiden kirkkaus vaihtelee ajan kuluessa
- Suurin osa tähdistä on muuttuvia; kirkkaus voi muuttua sykkimisen, tehon kasvun, purkausten tai räjähdysten takia tai koska toinen tähti tai planeetta kulkee niiden edestä
- Muuttuvista tähdistä saa tärkeää tietoa tähtien olemuksesta ja evoluutiosta

Kaksoistähdet ja moninkertaiset tähdet



Mizarin kiertoliike, osa ison karhun tähtikuviota

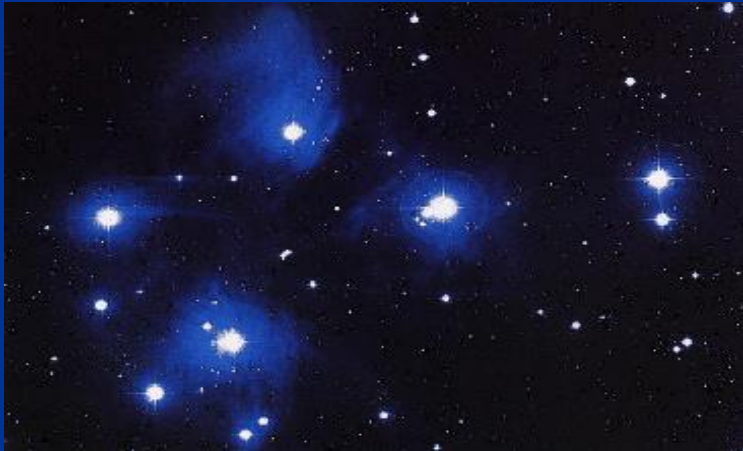
Lähde: NPOI Group, USNO, NRL

- Kaksoistähdet ovat tähtipareja, jotka painovoiman takia kiertävät toisiaan. Ne voidaan nähdä suoraan (kuten kuvassa vasemmalla), havaita spektrin avulla, tai koska ne peittävät aika ajoin toisensa
- Kaikkein tärkein työkalu tähtien massan mittaamisessa
- Moninkertaiset tähdet ovat kolme tai useampikertaisia tähtiä, jotka ovat yhdessä painovoiman takia



Tähtijoukot

"Luonnonlaboratoriot"



Seulasten eli Plejadien avoin tähtijoukko
Lähde: Mount Wilson Observatory

- Tähtijoukot ovat tähtien ryhmiä, jotka ovat lähellä toisiaan painovoiman takia ja liikkuvat yhdessä avaruuden läpi
- Tähdet muodostuivat samassa paikassa samaan aikaan, samasta materiasta, ja ovat samalla etäisyydellä. Niiden ominaisuudet vaihtelevat vain massan suhteen
- Joukot ovat otos saman ikäisiä mutta eri massaisia tähtiä



Mistä Aurinko ja tähdet on tehty?





Maailmankaikkeuden alkuaineiden osuudet: siemenet eli vety (90%), riisi eli helium (8%), pavut eli hiili, typpi, happi ja muutama muu alkuaine (2%)

- Spektroskopian ja muiden tekniikoiden avulla tähtitieteilijät voivat tunnistaa ne alkuaineet, joista tähdet suurimmaksi osaksi koostuvat
- Vety (H) ja helium (He) ovat kaikkein yleisimmät alkuaineet. Ne muodostuivat maailmankaikkeuden muodostuessa
- Painavimmat alkuaineet ovat miljoonia tai miljardeja kertoja harvinaisempia. Ne ovat syntyneet pääasiassa tähdissä ydinreaktioiden seurauksena



1 H																	2 He		
3 Li	4 Be													5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg													13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo	
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

 Elementos creados en los primeros minutos Alkuräjähdyksessä syntyneet alkuaineet

 Elementos creados en el interior de las estrellas Tähtien ytimissä ydinfuusiossa syntyneet alkuaineet

 Elementos creados en supernovas Supernovissa syntyneet alkuaineet



Tähtien rakenteen lait

- Tähtien sisällä syvemmälle mennessä paine kasvaa ylempien kerrosten painon takia
- Kaasulakien mukaan lämpötila ja tiheys kasvavat paineen kasvaessa
- Energiaa virtaa sisusten kuumemmista osista ulompaan, viileämpään osaan säteilyn ja konvektion avulla
- Jos energiaa virtaa ulos tähdestä, tähti jäähtyy - ellei energiaa synny sen sisässä lisää
- *Tähtiä hallitsevat nämä yksinkertaiset ja universaalit fysiikan lait*

Esimerkki: miksi Aurinko ei luhistu tai supistu?



- Puhalla ilmapallo vasemmalla olevan kuvan tapaan
- Ilmakehän ilmanpaine “puristaa” ilmapalloa kasaan. Se ei kutistu, koska sen sisällä olevan kaasun paine työntää sen seinämiä ulospäin
- Auringon sisällä painovoima työntää ainetta sisäänpäin, mutta sen tasapainottaa kaasun ulospäin työntävä paine

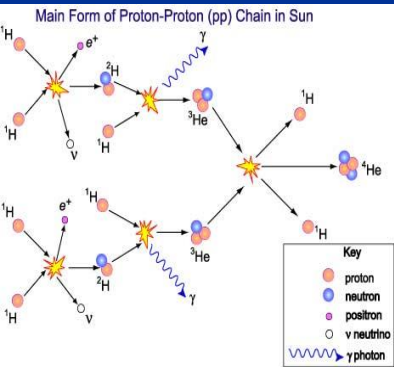
Auringon ja tähtien energianlähde

- **Kaasun, öljyn ja hiilen palaminen?** Tämä prosessi on niin tehoton, että sillä voisi pitää Auringon käynnissä vain muutaman tuhat vuotta
- **Hidas Auringon gravitaatioenergian vapautuminen?** Tällä tavalla Aurinko voisi tuottaa energiaa miljoonia vuosia, mutta se on kuitenkin miljardeja vuosia vanha
- **Radioaktiivisuus (ydinfissio)?** Radioaktiivisia isotooppeja on hädän tuskin ollenkaan Auringossa ja tähdissä
- **Ydinfuusio kevyemmistä alkuaineista painavammiksi? Kyllä!**
Tämä on hyvin tehokas prosessi, ja Aurinko ja tähdet koostuvat lähes 98%:sti kevyistä alkuaineista kuten vedystä ja heliumista



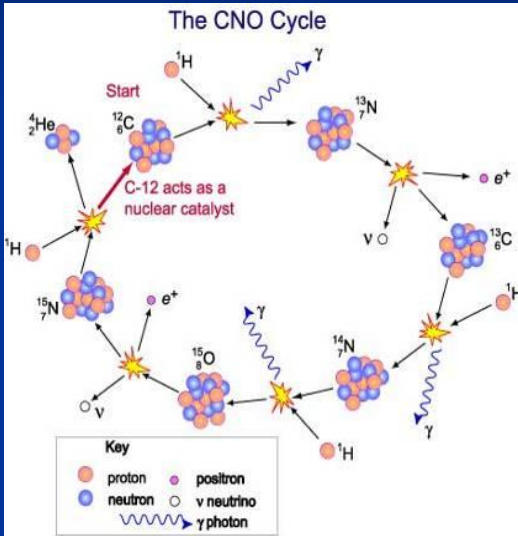
Protoni-Protoni-ketju on Auringon pääfuusioprosessi

- Korkeissa lämpötiloissa ja tiheyksissä Aurinkomme kaltaisissa tähdissä protonit (punaisella) päihittävät välillä olevan elektrostaattisen hylkimisen ja muodostavat ^2H :n (deuteriumin) ja neutrinoa (ν)
- Myöhemmin toinen protoni yhdistyy deuteriumiin muodostaen ^3He :n
- Sitten kaksi ^3He -ydintä yhdistyy ja muodostavat ^4He -ytimen ja kaksi protonia
- Lopputulos: 4 protonia yhdessä muodostavat heliumin ja energiaa (gamma-säteilyä ja kineettistä energiaa)



Protoni-protoni-ketju
Lähde: Australia
National Telescope
Facility

Hiili-typpi-happi-sykli



- Massiivisissa tähdissä, joiden ydin on hyvin kuuma, protonit (punaisella) voivat törmätä ^{12}C (hiili)-yttimeen (ylävasemmalla)
- Tämä käynnistää syklisen tapahtumasarjan, jonka lopuksi neljä protonia yhdistyvät heliumyttimeksi (ylävasemmalla)
- ^{12}C -ydin on jäljellä uudestaan syklin lopuksi, eli se ei synny eikä hajoa. Se toimii katalyyttinä

CNO-sykli

Lähde: Australia National
Telescope Facility



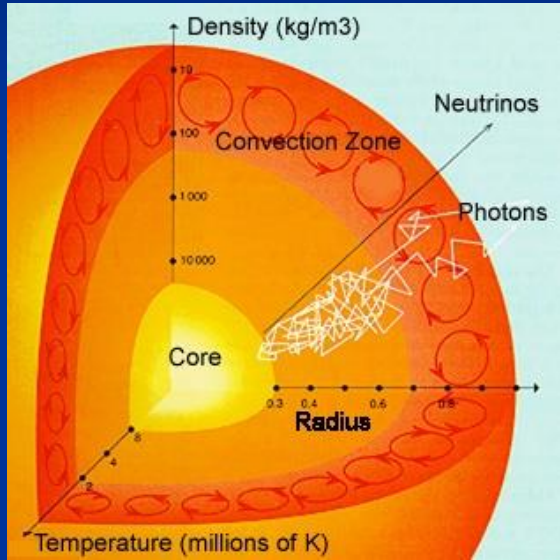
Tähtimallien tekeminen

- Lait, jotka kuvaavat tähtien rakennetta, ilmaistaan kaavoina ja ratkaistaan tietokoneiden avulla
- Tietokone laskee lämpötilan, tiheyden, paineen ja tehon jokaisessa Auringon tai tähden pisteessä. Tätä kutsutaan tähtimalliksi
- Auringon ytimessä tiheys on 150 kertainen veden tiheyteen verrattuna ja lämpötila on $\sim 15\,000\,000\text{ K}$!



Auringon ytimessä

Auringosta tehdyn mallin perusteella

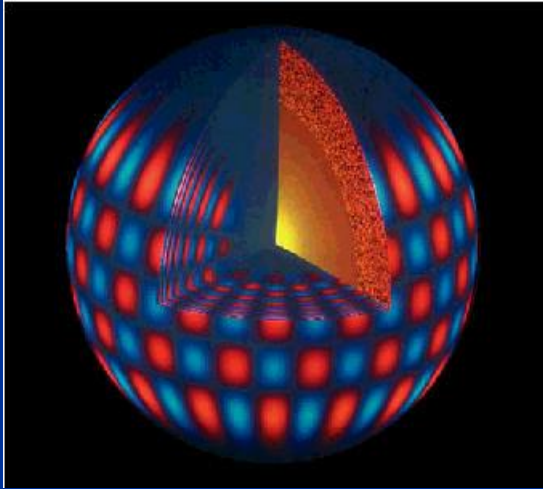


Auringon malli

Lähde: Teoreettisen fysiikan instituutti, Oslon yliopisto

- Kuuman ytimen sisällä ydinreaktiot tuottavat energiaa yhdistämällä vetyä heliumiksi
- Säteilyvyöhykkeellä, ytimen yläpuolella, energia virtaa ulospäin säteilemällä
- Konvektiovyöhykkeellä, säteilyvyöhykkeen ja pinnan välissä, energia siirtyy ulospäin konvektion eli lämpötilaerojen ylläpitämien virtausten seurauksena
- Auringon pinnalla fotosfääri on alue, jossa tähdestä tulee läpinäkyvä

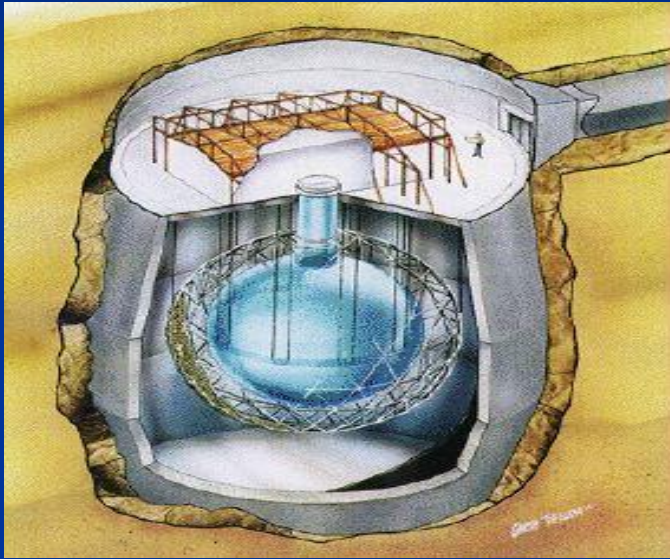
Helioseismologisen mallin testaus



Taiteilijan näkemys Auringon värähtelyistä
Lähde: US National Optical Astronomy Observatory

- Aurinko värähtelee kevyesti tuhansilla tavoilla. Yksi niistä on kuvattu vasemmalla
- Nämä värähtelyt voidaan havaita, tehdä niiden perusteella päätelmiä Auringon sisäisestä rakenteesta, ja näin testata rakenteesta olemassa olevia malleja. Tätä prosessia kutsutaan helioseismologiaksi
- Samankaltaisia värähtelyjä voidaan havaita myös muilla tähdillä: astroseismologia

Auringon neutriinomallin testaaminen



Neutriino-observatorio, Sudbury

Lähde: Sudbury neutrino-observatorio

- Ydinfuusioreaktiot tuottavat neutriinoalkeishiukkasia
- Niillä on hyvin alhainen massa, ja ne vuorovaikuttavat harvoin aineen kanssa
- Niiden massa voidaan havaita ja mitata vain erityisessä observatoriossa, kuten Sudburyn neutrino-observatoriossa (vasemmalla). Sen tulokset ovat yhteneväiset mallien tuottamien ennusteiden kanssa.

Tähtien elinkaaren pituus

- Tähtien elinkaaren pituus riippuu siitä, kuinka paljon ydinpolttoainetta (vetyä) sillä on, ja kuinka nopeasti se sitä kuluttaa (teho)
- Aurinkoamme kevyemmät tähdet ovat kaikkein yleisimpiä, mutta ne ovat vähemmän tehokkaita, joten niiden elinkaari on pidempi
- Aurinkoa massiivisemmat tähdet ovat harvinaisempia. Niillä on enemmän polttoainetta, mutta niiden teho on paljon suurempi, joten niiden elinkaari on lyhyempi



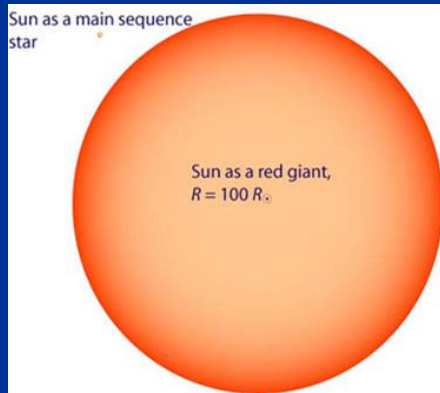
Miten tähtitieteilijät tutkivat tähtien evoluutiota?

- Tähtien tarkkailu niiden elinkaaren eri vaiheissa, ja näiden laittaminen loogiseen muutosjärjestykseen
- Fysiikan lakeihin perustuvien tietokonemallien tekeminen, ottaen huomioon ydinfuusion aiheuttamat muutokset tähden koostumuksessa
- Tähtijoukkojen/ryhmien ja/tai eripainoisten mutta saman ikäisten tähtijoukkojen tutkiminen
- Nopeasti muuttuvien ja merkillisten tähden elinkaaren vaiheiden tutkiminen (esim. novat ja supernovat)
- Muuttuvien sykkivien tähtien tutkiminen, jaksossa tapahtuvan evoluutiosta johtuvan muutoksen mittaaminen



Auringonkaltaisten tähtien evoluutio

- Auringonkaltaiset tähdet eivät juurikaan muutu ensimmäisen $\sim 90\%$:n aikana elämästään, kunhan sillä on tarpeeksi vetyä ylläpitääkseen fuusioreaktiota. Kutsumme näitä pääsarjan tähdiksi



- Kun tähden vety loppuu, se laajenee punaiseksi jättiläiseksi
- Ytimen sisällä lämpötila voi nousta niin suureksi, että tähti alkaa tuottaa energiaa fuusioimalla heliumia hiileksi
- Kun helium loppuu, tähti paisuu edelleen vielä suuremmaksi punaiseksi jättiläiseksi, satoja kertoja Aurinkoa suuremmaksi

Koon vertailu: Aurinko -
punainen jättiläinen
Lähde: Australia National
Telescope Facility



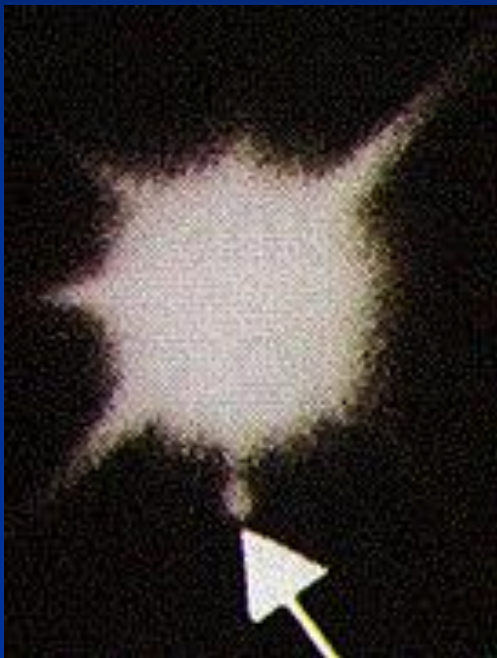
Auringonkaltaisten tähtien kuolema



Helix-sumu
Lähde: NASA

- Kun tähti muuttuu punaiseksi jättiläiseksi, se alkaa sykkiä ja väristä. Kutsumme sitä Mira-tähdeksi.
- Sykkiminen johtaa tähden uloimpien kerrosten irtautumiseen, mikä tuottaa planetaarisen sumun (vasemmalla)
- Tähten ydin jää jäljelle valkoisena kääpiönä, joka on tiivis, pieni ja ilman polttoainetta

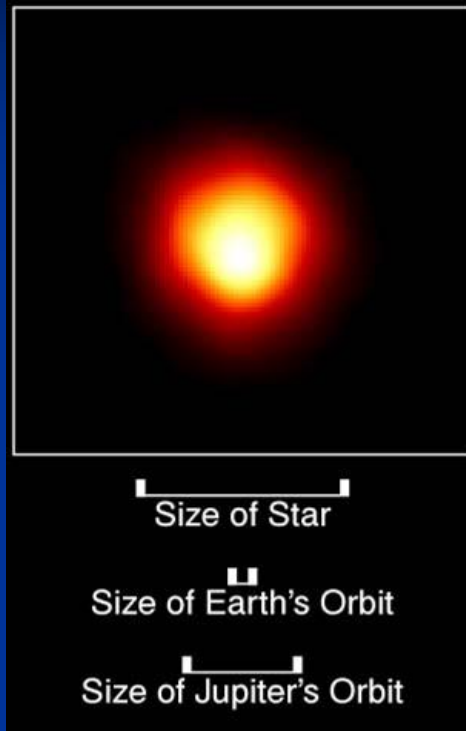
Valkoinen kääpiö



Siriuksen (yllä) valkoinen kääpiö -
seuralainen (alla) Lähde: NASA

- Valkoinen kääpiö on auringonkaltaisen tähden kuollut ydin
- Valkoisen kääpiön massa on samaa suuruusluokkaa kuin Auringon, mutta sen tilavuus on samaa luokkaa Maan kanssa ja tiheys on miljoonia kertoja suurempi kuin vedellä
- Valkoisessa kääpiössä painovoima ja elektronien paine ovat tasapainossa
- Monilla lähitähdillä, kuten Siriuksella (vasemmalla) ja Procyonilla, on valkoinen kääpiö seuralaisena

Massiivisen tähden evoluutio



Betelgeuse.

Lähde: NASA/ESA/HST

- Massiiviset tähdet ovat harvinaisia, tehokkaita ja kuluttavat polttoaineensa nopeasti - muutamassa miljoonassa vuodessa
- Kun ne ovat käyttäneet polttoaineensa, ne paisuvat punaisiksi ylijättiläisiksi
- Niiden ydin on niin kuuma, että niissä muodostuu raudan kaltaisia raskaita alkuaineita
- Betelgeuse (vasemmalla) Orionin tähtikuviossa on kirkas, punainen ylijättiläinen. Se on paljon Maan



Massiivisen tähden kuolema

- Kun massiivisen tähden ydin on muuttunut lähinnä raudaksi, sillä ei ole enempää polttoainetta ydinfuusion ylläpitämiseen eikä se pysy enää kuumana
- Painovoima murskaa neutronitähden ytimen vapauttaen valtavan määrän painovoimaenergiaa aiheuttaen tähden räjähtämisen supernovana (vasemmalla)
- Supernovaräjähdyksessä syntyy rautaa raskaampia alkuaineita ja ne levittävät niitä ja muita alkuaineita avaruuteen. Nämä alkuaineet tulevat osaksi uusia tähtiä, planeettoja ja eläimiä.



Rapusumu, vuonna 1054 räjähtäneen supernovan jäännökset.
Lähde: NASA

Neutronitähdet

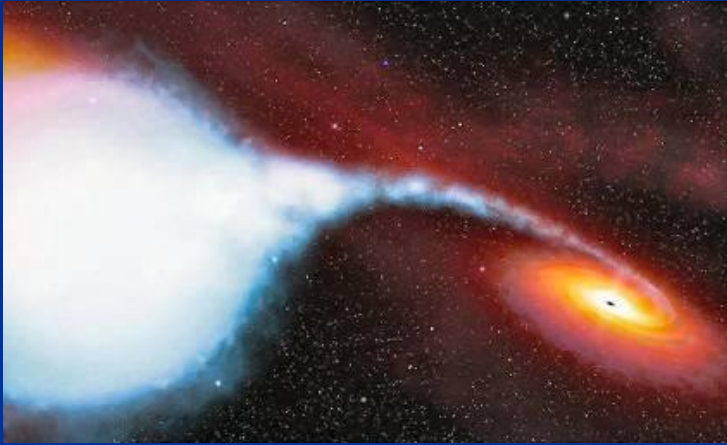
- 1,5-3 kertaa Auringon massaisten tähtien ytimet luhistuvat ja muuttuvat neutronitähdiksi elinkaarensa lopussa
- Ne ovat halkaisijaltaan n. 10 km ja tiheydeltään triljoonia kertoja vettä tiheämpiä
- Ne koostuvat neutroneista ja eksoottisemmista hiukkasista
- Nuori neutronitähti pyörii hyvin nopeasti ja lähettää säännöllisiä radiopulsseja, joten niitä kutsutaan pulsareiksi



Pulsari, Rapusumun keskellä oleva neutronitähti

Lähde: NASA/ESA/HST

Mustat aukot



Taiteilijan tulkinta Cygnus X-1:stä, koostuen näkyvästä tähdestä, joka kiertää kertymäkiekon keskellä olevaa mustaa aukkoa (oikealla). Lähde: NASA.

- Musta aukko on astronominen kappale, jonka painovoima on niin suuri, että mikään ei pääse pakenemaan siltä, ei edes valo
- Harvinaiset, yli 30 kertaa Auringon massaiset tähdet muuttuvat mustiksi aukoiksi niiden polttoaineen loppuessa
- Yksi tapa havaita musta aukko on, tarkkailla miten tähti kiertää sen ympäri (vasemmalla)

Muuttuvien tähtien erikoistapaukset



Normaali tähti (vasemmalla) ja siltä kaasua varastava valkoinen kääpiö kertymäkiekon keskellä (oikealla)

Lähde: NASA

- Monia tähtien jäännöksiä - valkoisia kääpiöitä, mustia aukkoja ja neutronitähtiä - kiertää normaali, näkyvä tähti
- Jos kaasua putoaa normaalista tähdestä tähden jäännökseen, sen ympärille voi syntyä kertymäkiekko (vasemmalla)
- Kun kaasua putoaa tähden jäännökseen, se saattaa purkautua tai räjähtää. Tätä tähteä kutsutaan purkautuvaksi muuttujaksi

Tähtien synty



Orionin tähtisumu
Lähde: NASA

- Tähtiä syntyy kylmästä kaasusta ja pölystä muodostuvien molekyylipilvien eli tähtisumujen sisällä
- Tähtienvälinen pöly ja kaasu kattaa noin 10% galaksimme aineesta
- Nuoret tähdet löytyvät usein läheltä tai niiden tähtisumujen sisältä, joissa ne muodostuvat
- Lähin ja selkein esimerkki tähtiä muodostavasta alueesta on Orionin tähtisumu (vasemmalla) noin 1500 valovuoden päässä

Tähtienvälinen kaasu



Orionin tähtisumu. Kaasu virittyy sumussa olevien tähtien säteilevän ultraviolettivalon takia. Lähde: NASA

- Tähtienvälinen kaasu (atomit ja molekyylit) voi virittyä läheisten tähtien ultraviolettisäteilystä, minkä seurauksena muodostuu emissiosumu (vasemmalla)
- Tähtien välissä oleva kylmä kaasu tuottaa radioaaltoja, jotka voidaan havaita radioteleskoopilla
- 98% tähtienvälisestä kaasusta on vetyä ja heliumia

Tähtienvälinen pöly

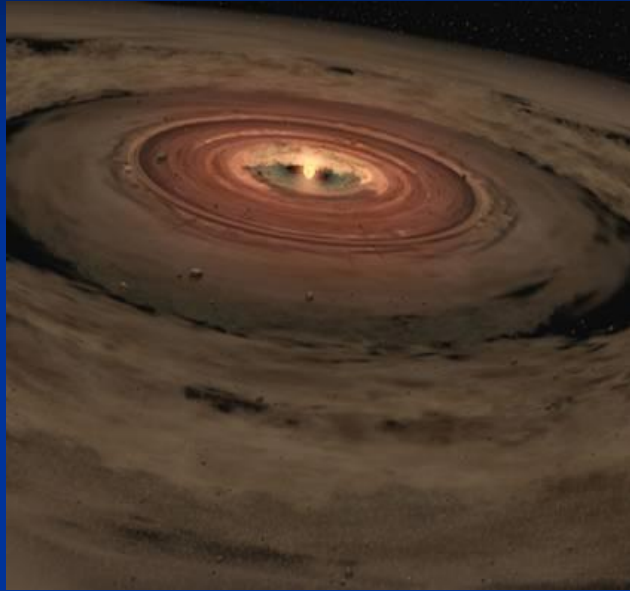
- Näkyvien tähtien läheinen tähtienvälinen pöly voidaan havaita näkyvän valon aallonpituuksilla
- Pöly voi estää valon kulun sen takana olevista tähdistä ja kaasusta (vasemmalla). Tähdet muodostuvat näissä pilvissä
- Vain 1% tähtienvälisestä materiaalista on pölyä. Pölyhiukkaset ovat muutaman sadan nanometrin kokoisia, ja ovat suurimmaksi osaksi silikaatteja ja grafiittia



M16 Lähde: NASA/ESA/HST



Tähtien muodostuminen



Taiteilijan näkemys
syntymässä olevasta
aurinkokunnasta Lähde: NASA

- Tähdet muodostuvat tähtisumun sisällä tiiviissä, ytimiksi kutsutuissa paikoissa.
- Ytimet muodostuvat painovoiman seurauksena
- Pyörimismäärän säilyminen nopeuttaa ytimen pyörimistä, joka luhistuu ja muuttuu lopulta kiekoksi
- Tähdet muodostuvat kiekkojen keskellä. Planeetat muodostuvat kiekon kylmemmissä ulommissa osissa

Protoplanetaariset kiekot

Muodostumassa olevat planeettakunnat



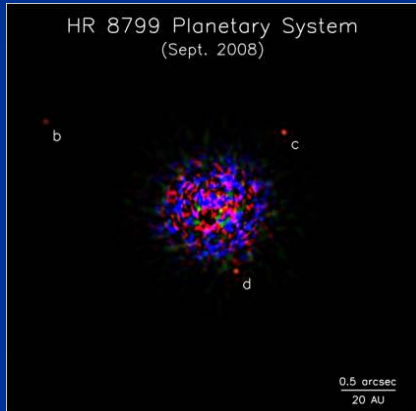
Protoplanetaarisia kiekkoja
Lähde: NASA/ESA/HST

- Protoplanetaarisia kiekkoja on havaittu Orionin tähtisumussa (vasemmalla)
- Tähti on hädin tuskin näkyvissä kiekon keskellä
- Pölykiekko estää takaa tulevan valon näkymisen
- Tämä ja muut havainnot antavat suoria todisteita planeettakuntien synnystä

Eksoplaneetat

Muita tähtiä kiertävät planeetat

- Eksoplaneetat löytyvät yleensä ja niitä tutkitaan niiden painovoiman tähteensä aiheuttaman vaikutuksen kautta, tai tähden hetkellisen himmentymisen avulla planeettojen kulkiessa tähtensä edestä
- Hyvin harvat on havaittu suorilla havainnoilla (vasemmalla)
- Meidän aurinkokuntamme planeetoista poiketen monet eksoplaneetat ovat valtavia ja lähellä tähteään. Tämä auttaa tähtitieteilijöitä korjaamaan planeettakuntien muodostumisen malleja



Eksoplaneettakunta
HR 8799

Lähde: C. Marois et
al., NRC Canada



Ajatuksia lopuksi

- “Painovoima vie eteenpäin tähtien muodostumista, elämää ja kuolemaa” [Professori R.L. Bishop]
- Tähtien syntymä selittää aurinkokuntamme ja muiden planeettakuntien alkuperän
- Tähtien elinkaari selittää energianlähteen, joka tekee elämän Maapallolla mahdolliseksi
- Tähtien elämä ja kuolema tuottavat vetyä raskaampia alkuaineita, joista tähdet, planeetat ja elämä muodostuvat
- Tähtien kuollessa muodostuu painovoiman takia maailmankaikkeuden merkillisimpiä kappaleita: valkoisia kääpiöitä, neutronitähtiä ja mustia aukkoja



Kiitos huomiostanne!

