

Csillagfejlődés: A csillagok születése, élete és halála

John R. Percy

Fordította: Simon-Zsók Anett

International Astronomical Union

University of Toronto, Canada



A csillagfejlődés

- Csillagfejlődés alatt azon változások sorozatát értjük, amelyek egy csillagban, élete során (több százezer, több millió vagy pár milliárd év alatt) lejátszódnak.
- A csillagfejlődés tanulmányozása segít a csillagászoknak megérteni:



- A Napunk természetét és későbbi viselkedését
- A Naprendszerünk eredetét
- Miben hasonlít a Naprendszer más csillagrendszerekhez
- Lehet-e máshol is élet az Univerzumban

A Gyűrűs-köd, egy haldokló csillag
Forrás: NASA

A Nap – a legközelebbi csillag- tulajdonságai és hogyan számították ki ezeket a csillagászok



A Nap

Forrás: NASA SOHO Satellite

- **Távolság:** 1.5×10^{11} m, A Merkúrról és a Vénuszról visszaverődő elektromágneses hullámokat mérték
- **Tömeg:** 2×10^{30} kg, a bolygók mozgásának tanulmányozásából
- **Átmérő:** 1.4×10^9 m, a látszó átmérő és a Nap távolságából
- **Luminozitás:** 4×10^{26} W, a távolságból és abból, hogy megmérték a Földre érkező energiát
- **Kémiai összetétel:** 98% hidrogén és hélium, színekép tanulmányozásából



Más csillagok tulajdonságai és hogyan számították ki ezeket a csillagászok

- **Távolság:** parallaxisból, vagy a látszó fényességükből, ha tudták a luminozitását
- **Luminozitás:** távolság és látszó fényességből
- **Felszíni hőmérséklet:** a színekükből
- **Átmérő:** energiájukból és felszíni hőmérsékletükből
- **Tömeg:** kettőscsillagok megfigyelésével
- **Kémiai összetétel:** színekükből



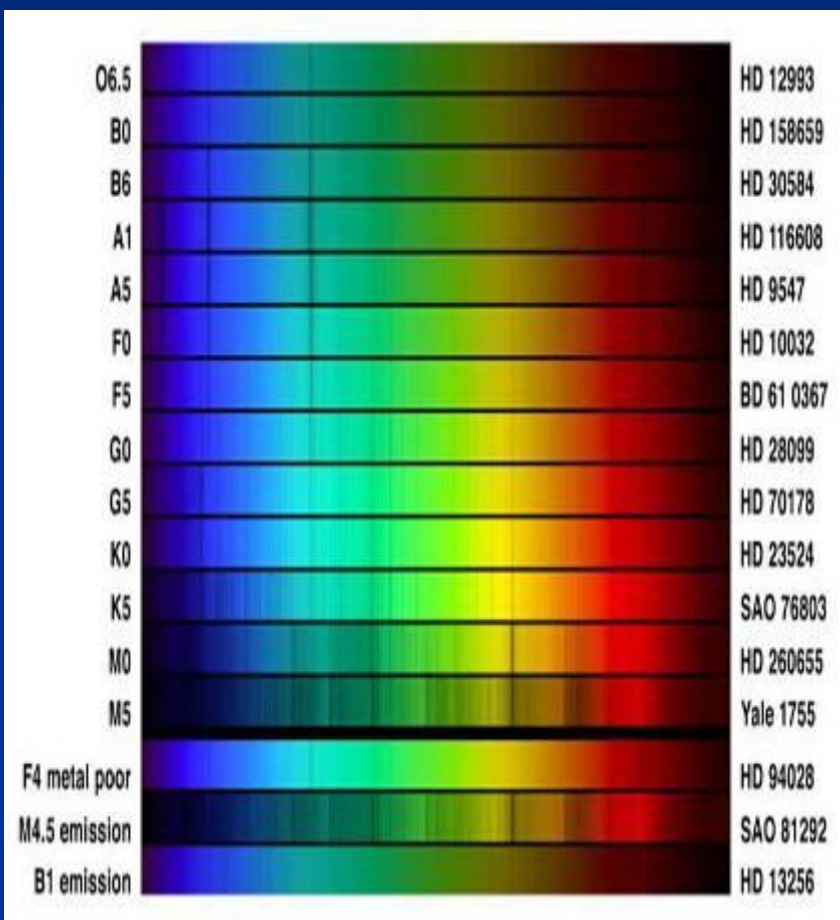
Orion csillagkép

Forrás: Hubble, ESA, Akira Fujii



A csillagok színeképe a fény, ami színekre bontható

- A csillagászok a csillagokat az általuk kibocsájtott fény útján tanulmányozzák
- A színekép a csillagok összetételéről, a hőmérsékletéről és rengeteg másról is információt ad nekünk



Balra: Az első 13 „vonal” különböző felszíni hőmérséklettel rendelkező csillagok színeképe (a legfelső a egforróbb), az utolsó 3 különleges csillagok tulajdonságairól árulkodik

Csillagok színeképei

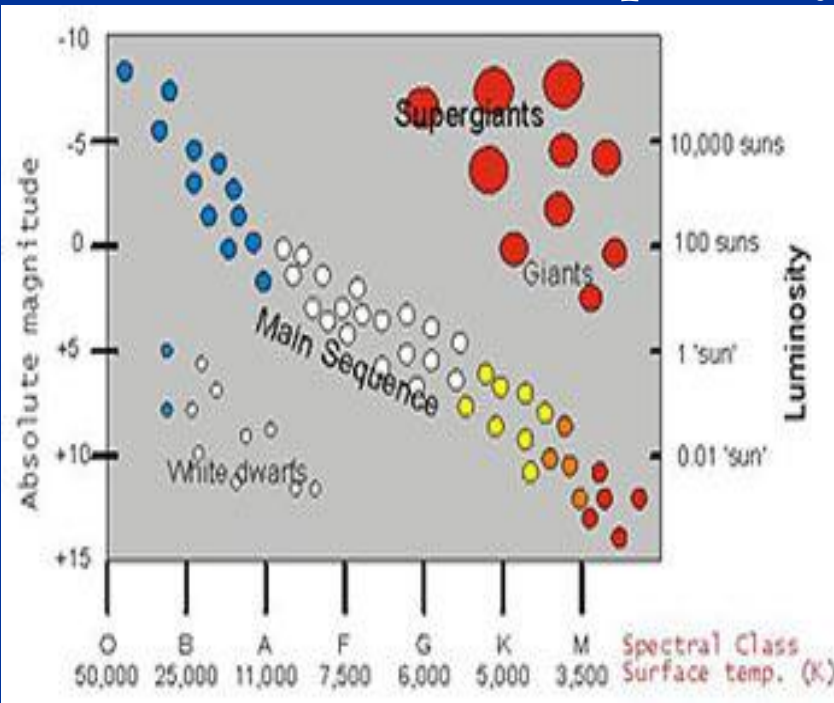
Forrás: US National Optical Astronomy Observatory



A Hertzsprung-Russell diagram

-van egy rendszer a csillagok tulajdonságaiban-

- The Hertzsprung-Russell (HR) diagram, egy csillagfejlődési diagram, amely egy grafikonon a csillagok legszembetűnőbb tulajdonságait (szín, luminozitás, abszolút magnitúdó, felszíni hőmérséklet, színképosztály) mutatja.

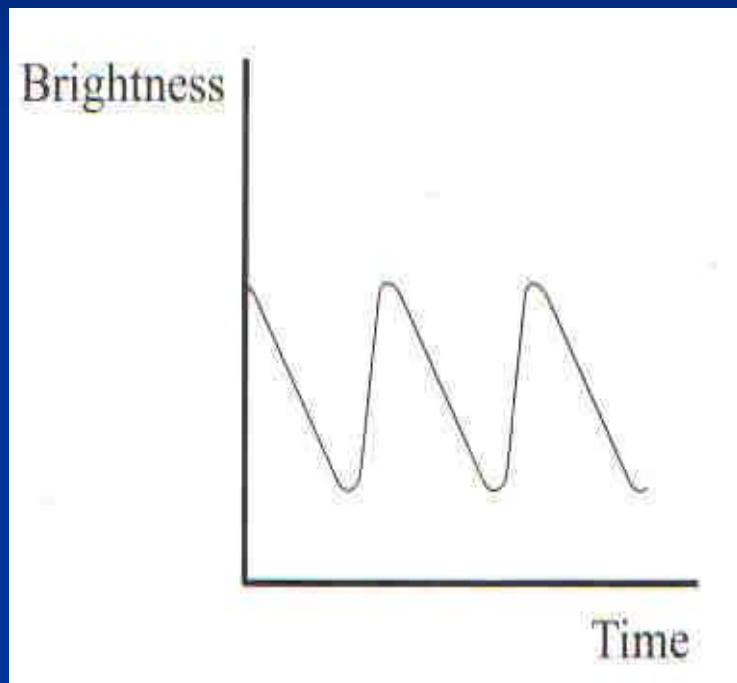


- A legtöbb csillag a fősorozaton helyezkedik el: a forróbbak és nagytömegűek a bal felső sarokban, a hűvösebbek és kisebbek a jobb alsó sarokban
- Az óriáscsillagok a jobb felső sarokban, míg a fehér törpék a bal alsó sarokban helyezkednek el

HR diagram Forrás: NASA



Változócsillagok

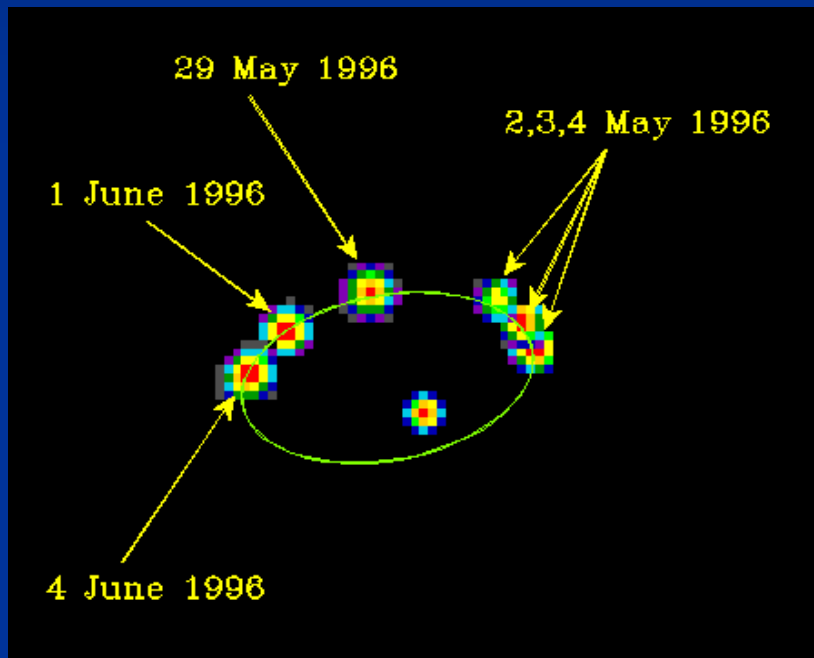


Fénygörbe: egy grafikon a fényességről az idő függvényében

- A változócsillagok olyan csillagok, amelyek idővel változtatják a fényességüket
- Lehetséges, hogy egy csillag luminozitása állandó, csupán a spektrális jellemzői változnak és ez árulkodik bizonyos fizikai állapotok megváltozásáról.
- A változócsillagok rengeteg információt adnak a csillagfejlődésről és a csillagok természetéről

Kettőscsillagok (vagy még több csillagból álló rendszerek)

- A kettőscsillag két olyan csillag együttese, ahol az egymáshoz képesti mozgás során a két komponens tömegvonzása meghatározható. (egymás körül keringő csillagok)
- Nagyon fontos szerepet játszanak a csillagok tömegének kiszámításában
- Léteznek olyan rendszerek is, amelyek három vagy még több csillagból állnak



A Mizar csillag mozgása

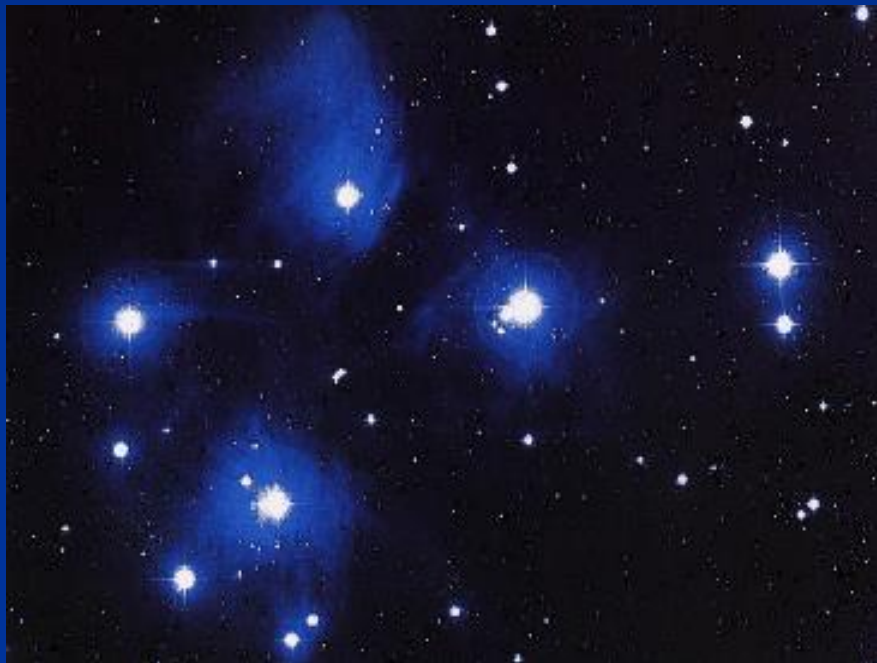
Forrás: NPOI Group, USNO, NRL



Csillaghalmazok

„a természet kísérletei”

- A csillaghalmaz olyan csillagok csoportja, amely egy közös csillagközi felhőben alakult ki, és tagjai még mindig laza gravitációs kapcsolatban állnak egymással.
- A csillaghalmazokban a csillagok életkora ugyanaz, azonban a tömegük különböző



Plejádok (Fiastyúk) csillaghalmaz
Forrás: Mount Wilson Observatory

Miből vannak a Nap és a csillagok?



Az Univerzumban az elemek eloszlása (a kép segítségével szemléltetve): madáreleség → hidrogén (90%), rizs → hélium (8%), bab → szén, nitrogén, oxigén és más elemek (2%).

- Színképelemzéssel és más módszerekkel a csillagászoknak sikerült kideríteni miből is állnak főként a csillagok:
- A hidrogén (H) és a hélium (He) a fő alkotóelemük, amelyek az Univerzum keletkezése során alakultak
- A nehezebb elemek előfordulása nem túl gyakori. A csillagok belsejében keletkeztek termonukleáris reakciók által.

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					



Elements created at the Big Bang



Elements produced by nucleosynthesis, in the core of the stars



Elements produced by supernovas



A csillagok összetételének törvényei

- A csillagok belsejében, ahogyan bennebb és bennebb megyünk a nyomás nő a külső rétegek súlya miatt
- A termodinamika gáztörvénye alapján a hőmérséklet és a sűrűség nő, ha a nyomás nő.
- Az energia a belső forró rétegből a külső hidegebb rétegbe áramlik konvekció által.
- Ha az energia kifelé áramlik, a csillag lehűl, ha nem termelődik még több energia a csillag belsejében.

A csillagokat ezek az egyszerű fizikai törvények irányítják.



Példa: Miért nem zsugorodik vagy omlik össze a Nap?



- Fújjunk fel egy lufit
- A légköri nyomás a lufit összenyomná, azonban a gáznyomás belülről kifelé nyomja a lufi falát.
- A Nap belsejében a gravitáció befelé nyomja az anyagot, de ezt a gáznyomás egyensúlyozza.

Mi biztosítja a csillagok és a Nap energiaforrását?

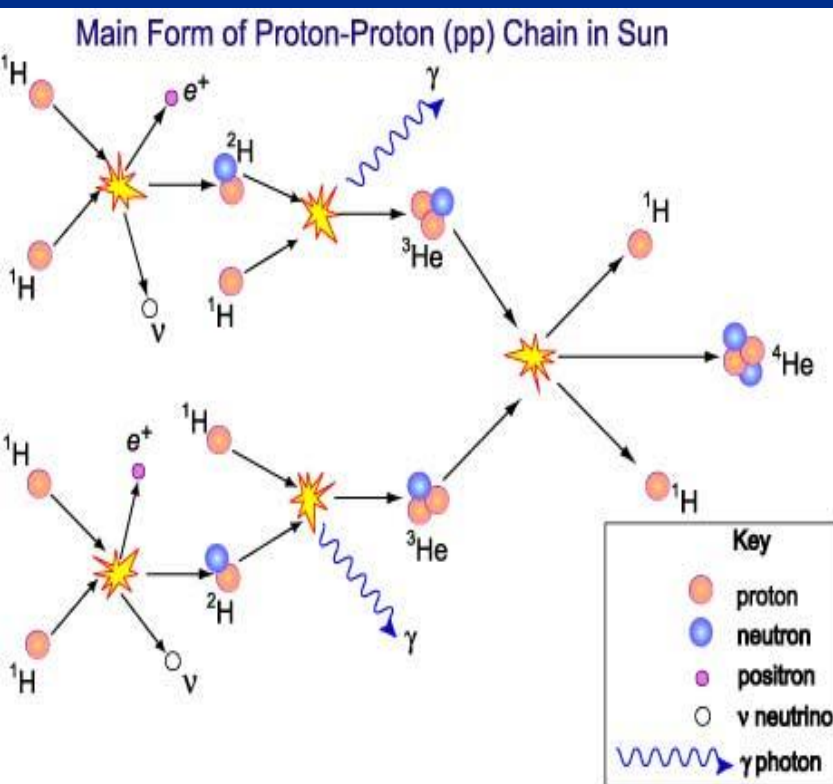
- A gázak és a szén elégetése?
Ez a folyamat kevésbé hatékony, csak egy pár évezredre biztosítana energiát a Napunknak.
- Lassú gravitációs összehúzódás?
Ez a folyamat évmillióig tudna energiát biztosítani a Napnak, de tudjuk, hogy ő több milliárd éves.
- Radioaktivitás?
A Nap és a csillagok belsejében majdnem egyáltalán nincsenek radioaktív izotópok.
- Magfúzió? (olyan magreakció, amelynek során két kisebb atommag egyesül egy nagyobbat eredményezve) **Igen! Ez egy nagyon hatékony folyamat. A hidrogén és a hélium 98% százalékát teszi ki a Napnak.**



Proton-proton ciklus

-a Nap fő energiatermelése-

- Nagyon magas hőmérsékleten két proton alakul deutériummá (^2H), kibocsátva egy pozitront és egy neutrínót
- Ezután, a deutérium egyesül egy másik hidrogénmaggal, aminek eredményeként ^3He mag keletkezik
- Később, két ^3He atommag egyesül ^4He maggá, miközben két proton szabadul fel
- Tehát: 4 proton szükséges, hogy héliumot és energiát (gamma-sugárzás és helyzeti energia formájában) állítsunk elő



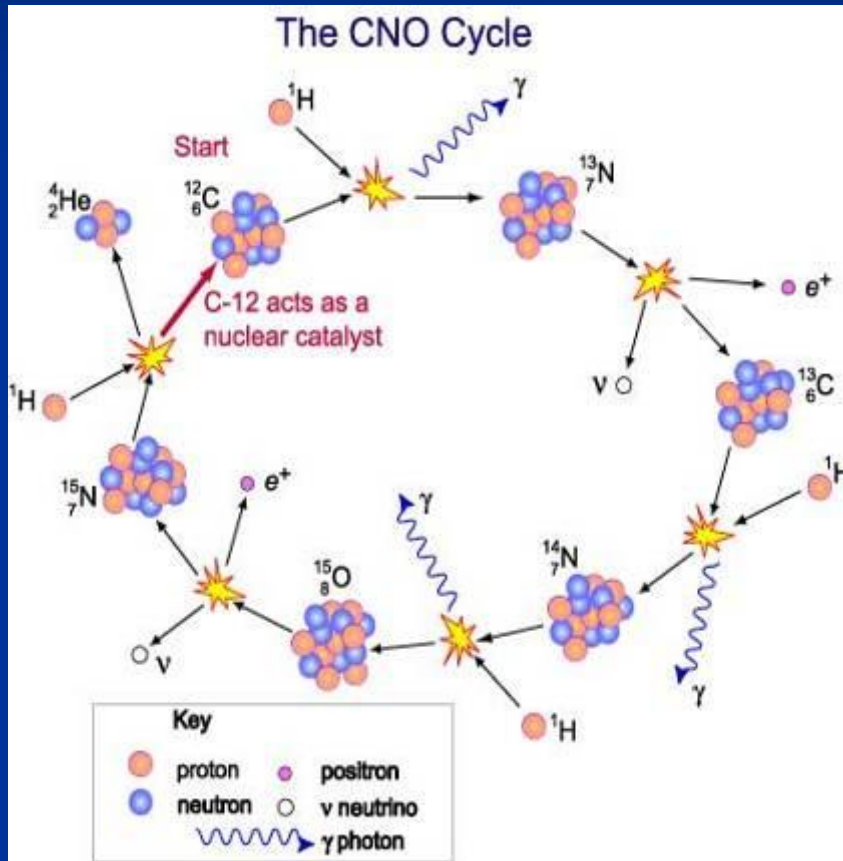
Proton-proton ciklus

Forrás: Australia National Telescope Facility



A szén-nitrogén-oxigén ciklus

- Nagytömegű csillagokban, ahol nagyon forró a csillagmag, a protonok ^{12}C -es atomokkal ütközhetnek. Ez egy körfolyamatot indít be, amelynek végén 4 proton egy héliumatommá alakul
- A szén (esetenként oxigén és nitrogén) atommagok csupán a folyamat katalizátoraként szolgálnak, a folyamat végén számuk változatlan marad.



CNO cycle

Forrás: Australia National Telescope Facility



Csillagmodellek



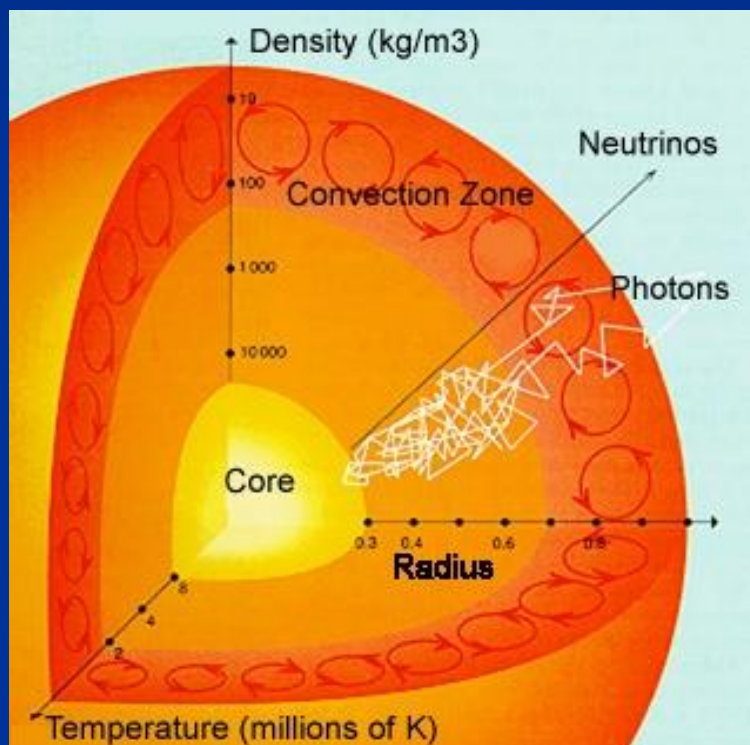
- A törvények, amelyek a csillagok felépítését írják le egyenletekben vannak kifejezve és számítógépek oldják meg azokat.
- A számítógép kiszámítja a hőmérsékletet, sűrűséget, nyomást és az energát a csillag bármely pontjában, ezt hívják modellnek.
- A Nap középpontjában az anyag sűrűsége 150-szer nagyobb mint a víz sűrűsége és a hőmérséklet $\sim 15,000,000$ K!



A Nap belsejében...

egy számítógépes modell segítségével

- A forró magban zajlik a termonukleáris reakció, melynek során hélium keletkezik.
- A sugárzási övben (a mag fölötti réteg) sugárzás útján az energia feölfelé (a felszín irányába) áramlik.
- A konvekciós burokbán (a sugárzási öv és a felszín közti réteg) az energia konvekció útján áramlik kifelé.
- A fotoszféra (a felszínen) az a réteg ami számunkra vizuálisan láthatatlan.

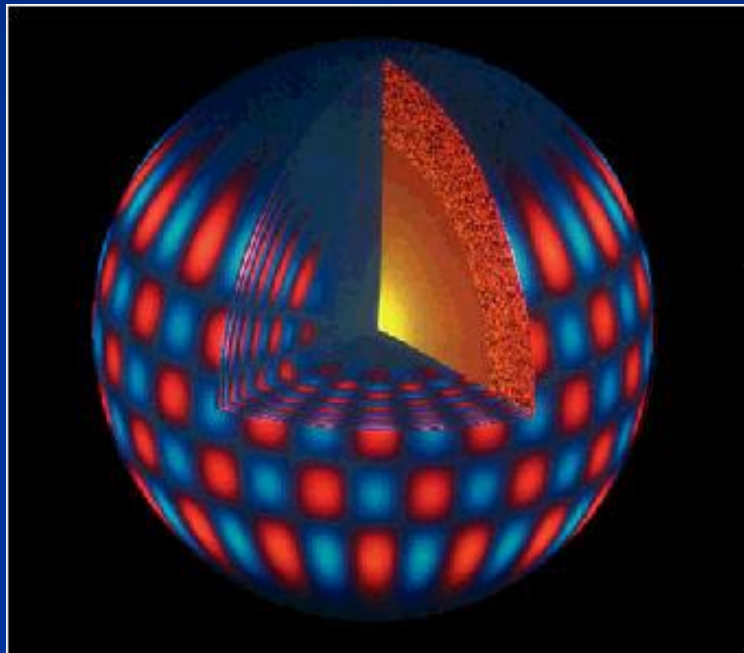


Napmodell

Forrás: Institute of Theoretical Physics,
University of Oslo



Napszeizmológiai modell

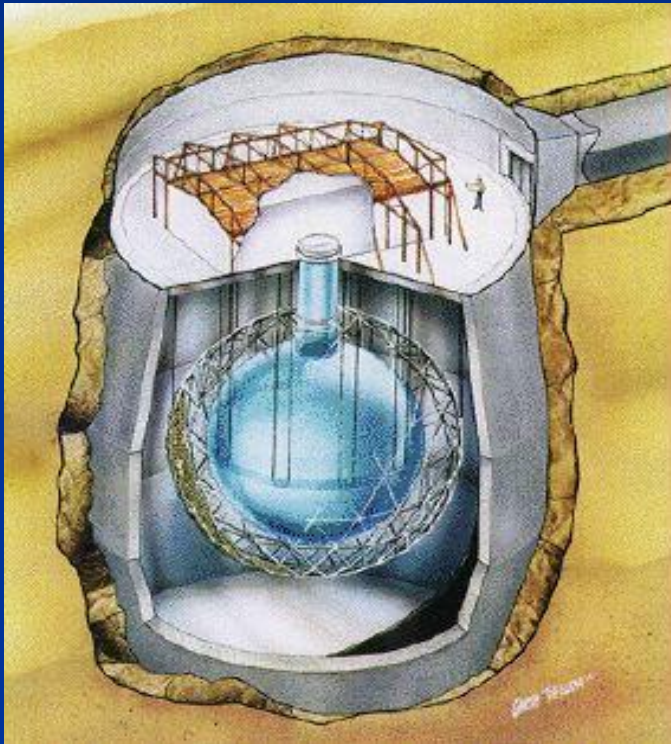


Szoláris oszcilláció művészi ábrázolása.
Forrás: US National Optical Astronomy
Observatory

- Az oszcillációk vizsgálata révén nyert frekvenciaadatok lehetővé teszik a Nap hőtani, illetve mágneses jellemzőinek feltárását.
- Ezek hozzájárulnak a Nap fejlődésének pontosabb megértéséhez, a hosszú időintervallumokon át ívelő energiaszállító folyamatok feltérképezéséhez.
- Hasonló oszcillációk megfigyelhetőek más csillagok esetében is, ezekkel az asztroszeizmológia foglalkozik.

Napneutrínó-modell

- A magfúzió során rengeteg elemi részecske termelődik, például a neutrínó
- A tömegük nagyon kicsi és nem lépnek kölcsönhatásba más atomokkal vagy részecskékkel.
- A tömegüket egy különleges módszerrel sikerült megmérni. A Sudbury Neutrínó Observatóriumban. Az eredmények igazolják a feltételezéseket.



Neutrínó Observatórium

Forrás: Sudbury Neutrino Observatory



Csillagok élettartama

- A csillagok élettartama attól függ mennyi „üzemanyaga” (hidrogén) van, és ezt milyen gyorsan használja el.
- A csillagok, amelyek kisebbek a Napunknál a leggyakoribbak. Kevés üzemanyaguk van, de lassabban használják el azt, ebből kifolyólag hosszabb az életük.
- A Napunknál nagyobb csillagok előfordulása kevésbé gyakori. Több üzemanyaguk van, de gyorsabban használják el azt, emiatt van rövid életük.



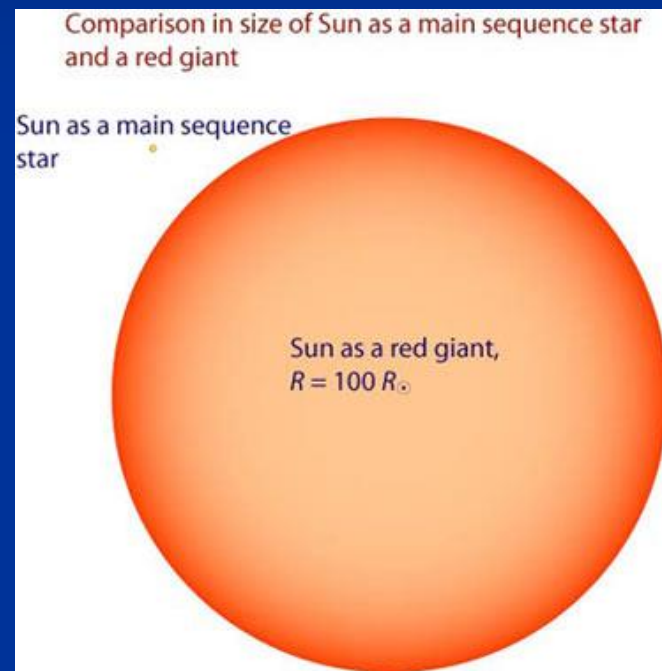
Hogyan tanulmányozzák a csillagászok a csillagfejlődést?

- Rengeteg csillagot figyelnek meg, amelyek különböző életszakaszokban vannak és fejlődési szakasz szerint sorba állítják őket.
- Modelleket készítenek a fizika törvényeinek megfelelően és figyelembe veszik a termionukleáris folyamatok által előidézett összetételi változásokat is a csillagok belsejében.
- Csillaghalmazokat tanulmányoznak
- Megfigyelik a furcsa csillagok viselkedését is
- A változócsillagok segítségével a csillagok életében a kisebb változások is megfigyelhetőek



A naptípusú csillagok fejlődése

- A naptípusú csillagok nem nagyon változnak életük során, addig amíg termionukleáris reakciók zajlanak le bennük.



- Amikor elhasználták az összes hidrogént, vörös óriáscsillaggá fújódnak fel.
- A mag belsejében olyan magas hőmérséklet keletkezik, hogy a hélium szénné alakul át különböző folyamatok mentén.
- Ha a héliumfúzió leáll, a csillag még nagyobb lesz

Összehasonlítás: A Nap valójában és a Nap egy vörös óriáscsillagként

Forrás: Australia National Telescope Facility



A naptípusú csillagok halála

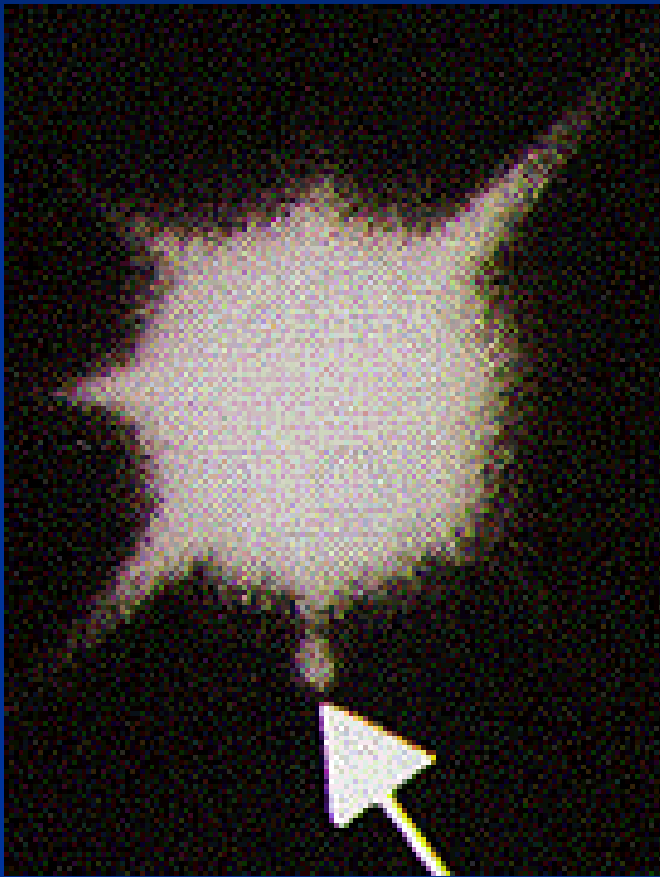


Hélix planetáris-köd

Forrás: NASA

- Amikor egy csillag vörös óriás lesz lüktetni (pulzálni) kezd. Ezeket Míra-típusú csillagoknak hívjuk.
- A lüktetés a külső héj leválásainak eredménye. Ha ezek lassan leválnak planetáris köd keletkezik.
- A csillag magja egy fehér törpecsillag lesz, amely már nem lesz képes energiatermelésre

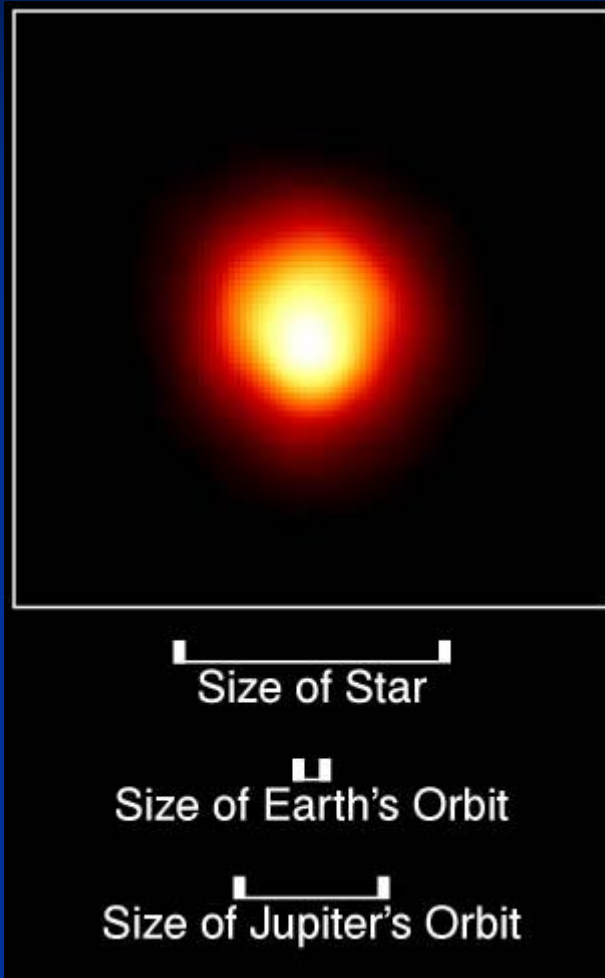
Fehér törpecsillag



A Szíriusz fehér törpecsillaga
Forrás NASA

- A fehér törpék a naptípusú csillagok „halott” csillagmagjai
- A fehér törpék tömege a Napéhoz hasonló, a sűrűsége viszont milliószor nagyobb, mint a vízé
- A fehér törpecsillagokban a centripetális gravitációs erő a külső kvantumnyomás által kerül egyensúlyba, a benne levő elektronok által
- Sok közeli csillagnak van fehér törpe kísérője (pl. Szíriusz, Procyon)

A nagyömegű csillagok fejlődése



- A nagyömegű csillagok ritkák, hatalmasak és nagyon gyorsan – pár millió év alatt- elhasználják az anyagukat.
- Amikor az összes anyagukat elhasználták vörös szuperóriássá válnak
- A mag annyira forró, hogy nehéz elemek is keletkeznek benne, mint például a vas
- A Betelgeuse csillag az Orion csillagképből olyan hatalmas, hogy az átmérője sokkal nagyobb, mint a Föld pályájának átmérője

Betelgeuse.

Forrás: NASA/ESA/HST



A nagytömegű csillagok halála

- Amikor a csillagmag majdnem csak vasból áll, nincs több nukleáris energia, hogy a csillag a fúziót folytatni tudja.
- A gravitáció hatására a csillagmag összeomlik és neutroncsillag keletkezik. A folyamat során olyan nagy mennyiségű energia szabadul fel, hogy szupernóva-robbanás jön létre.
- A szupernóva-robbanásokban a vasnál nehezebb elemek is keletkeznek, és ezek szétszóródnak az Univerzumban.



A rák-köd
Forrás: NASA

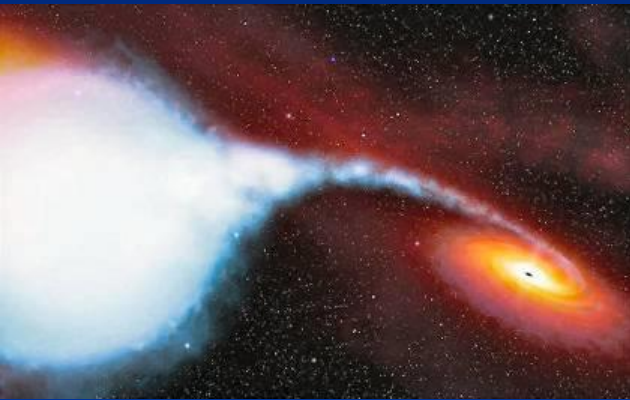
Neutroncsillagok



- A csillagmagok, amelyek 1,5 és 3 naptömeg között vannak életük végén neutroncsillagok lesznek.
- Átmérőjük kb. 10 km és a sűrűségük milliárdszor nagyobb a víz sűrűségénél
- Főként neutronokból állnak.
- Az olyan fiatal neutroncsillago, amik gyorsan forognak és sugárzást bocsájtanak ki pulzároknak nevezzük

Pulzár a Rák-köd belsejében.
Forrás: NASA/ESA/HST

Fekete-lyukak



Fantáziarajz a Cygnus X-1 csillagról,
mellette egy fekete-lyukkal
Forrás: NASA.

- A fekete-lyuk egy olyan objektum, amelyről az erős gravitáció miatt a fény sem tud távozni.
- A több mint 30 naptömegű csillagokból fekete-lyukak lesznek életük végén
- Az egyik módszer a fekete-lyukak megfigyelésére az, ha van körülötte egy ismert csillag.

Különleges változócsillagok

- Sok csillagmaradvány - fehér törpék, fekete lyukak, neutroncsillagok – körül normál látható csillag kering.
- Ha a normál csillagból származó gáz a csillagmaradványra bomlik, akkor a akkréciós korong kialakulhat körülötte (balra).
- Amikor a gáz a csillagmaradványra esik szét, elégget, kitörhet vagy felrobbanhat, amit kataklizmikus változócsillagnak nevezünk



A pair of normal star (left) and a white dwarf star with an accretion disc stealing gas from the companion (right).
Forrás: NASA



A csillagok keletkezése

- A csillagok hideg gázból és porból álló felhőkben keletkeznek
- A csillagközi por és gáz 10%-át teszi ki a galaxisunk anyagának
- A fiatal csillagok általában még abban a ködben találhatóak, amiben születtek.
- Az egyik legközelebbi csillagkeletkezési felhő, az Orion köd, kb. 1500 fényévre van a Földtől



Orion-köd
Forrás: NASA

Csillagközi gáz



- A csillagközi gáz (atomok és molekulák) ultraibolya tartományban láthatóvá válik.
- A hideg gáz rádióhullámokat generál és rádiótávcsövekkel is észlelhető
- 98%-t a csillagközi gáznak a hidrogén és a hélium teszi ki

Orion-köd (UV tartományban készült felvétel)

Forrás: NASA



Csillagközi por



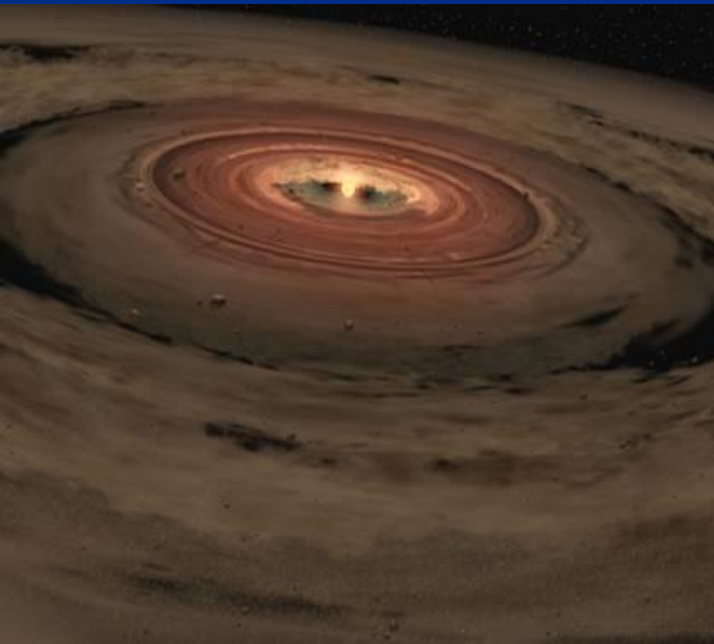
- A csillagközi por a fényes csillagok közelében látható tartományban is észlelhető
- A por eltakarja a mögötte levő csillagok fényét
- A csillagközi anyagnak csupán 1%-a por. A szemcsék pár száz nm nagyságúak, többségük szilikát vagy grafit.

M16

Soruce: NASA/ESA/HST



Csillagkeletkezés



- A csillagködök belsejében a csillagok sűrű gázfelhőben keletkeznek
- Az összesűrűsödő gázfelhő egyes részei saját tömegvonzásuknál fogva egyre több gázt vonzanak magukba, így egyre sűrűbbé válnak, ezek a globulák.
- A beérkező anyag a protocsillag körül akkréciós korongot képez
- Az akkréciós korong külső részeiben pedig bolygók is kialakulnak.

Művészi ábrázolás egy csillagrendszer keletkezéséről
Forrás: NASA

Protoplanetáris korongok

csillagrendszer keletkezés folyamatában



- Az Orion-ködben megfigyelhetők protoplanetáris korongok
- A korong közepén nehezen észlelhető a csillag, mivel egy porkorong takarja el a fényét
- Ezek a megfigyelések támasztják alá a protoplanetáris korongok létezését és fejlődését

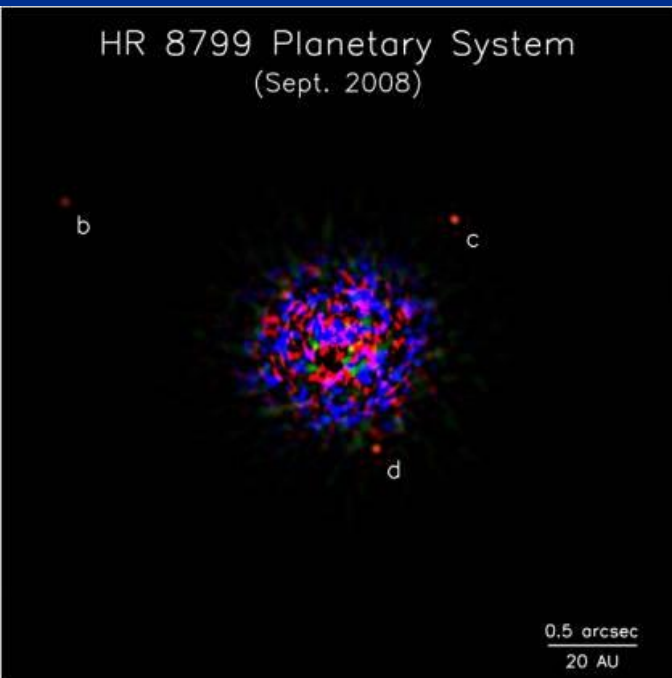
Protoplanetáris korongok
Forrás: NASA/ESA/HST



Exobolygók

-bolygók más csillagok körül-

- Az exobolygókat úgy fedezik fel, hogy a csillagra gyakorolt gravitációs hatást vizsgálják, amely körül keringenek. Egy másik módszer az, hogy megfigyelik, ahogyan a bolygó elhalad a csillaga előtt. (ilyenkor a csillag elhalványul)
- Nagyon keveset sikerült megörökíteni eddig fényképen.
- A mi naprendszerünkkel ellentétben más rendszerekben a bolygók sokkal hatalmasabbak is lehetnek.



System exoplanet HR 8799

Forrás: C. Marois et al., NRC Canada



Végső következtetések

- A gravitáció a felelős a csillagok kialakulásáért, életéért és haláláért. [Professor R.L. Bishop]
- Egy csillag születésének tanulmányozása sokat elárul nekünk a naprendszer és más csillagrendszerek kialakulásáról.
- Egy csillag életének tanulmányozása segít magyarázatokat keresni a földi élet létrejöttére.
- A csillagok életük során és annak végén a hidrogénnél is nehezebb elemeket termelnek, amiből később más csillagok és bolygók keletkezhetnek.
- A csillagok halálakor keletkeznek a legbonyolultabb objektumok az univerzumban: a fehér törpék, a neutroncsillagok és a fekete-lyukak.



Köszönöm a figyelmet!

