

Evoluția stelelor: nașterea, viața și moartea stelelor

John R. Percy

*Uniunea Astronomică Internațională
Universitatea Toronto*



Evoluția stelelor

- Când vorbim despre evoluția stelelor ne referim la modificările ce apar în stele când își consumă ”combustibilul”, de când se nasc, de-a lungul vieții lor și până când mor.
- Cunoașterea evoluției stelelor îi ajută pe astronomi să înțeleagă:
 - natura Soarelui și viitoarea lui soartă
 - originea sistemului nostru solar
 - cum să compare sistemul nostru solar cu alte sisteme planetare
 - dacă poate exista viață altundeva în univers.



Nebuloasa Inel, o stea pe moarte. Sursa: NASA



Proprietățile Soarelui: cea mai apropiată stea și cum le măsoară astronomii – important!

- **Distanța:** $1,5 \times 10^{11}$ m; reflectând undele radar pe Mercur și Venus
- **Masa:** 2×10^{30} kg; analizând mișcarea planetelor care se rotesc în jurul Soarelui
- **Diametrul:** $1,4 \times 10^9$ m; din diametrul aparent (unghiular) al Soarelui și distanța până la el
- **Puterea:** 4×10^{26} W; din distanța până la el și puterea măsurată pe Pământ.
- **Compoziția chimică:** 98% hidrogen și heliu; studiindu-i spectrul.



Soarele.

Sursa: NASA Ssatelitul OHO



Proprietățile stelelor – sori îndepărtați și cum le măsoară astronomii – important!



Constelația Orion

Sursa: Hubble, ESA, Akira Fujii

- **Distanța:** din paralaxă sau din strălucirea aparentă dacă se cunoaște puterea.
- **Puterea:** din distanță și strălucirea aparentă
- **Temperatura la suprafață:** din culorile spectrului
- **Raza:** din puterea și temperatura la suprafață
- **Masa:** din observarea stelelor binare
- **Compoziția chimică:** din spectrele stelare

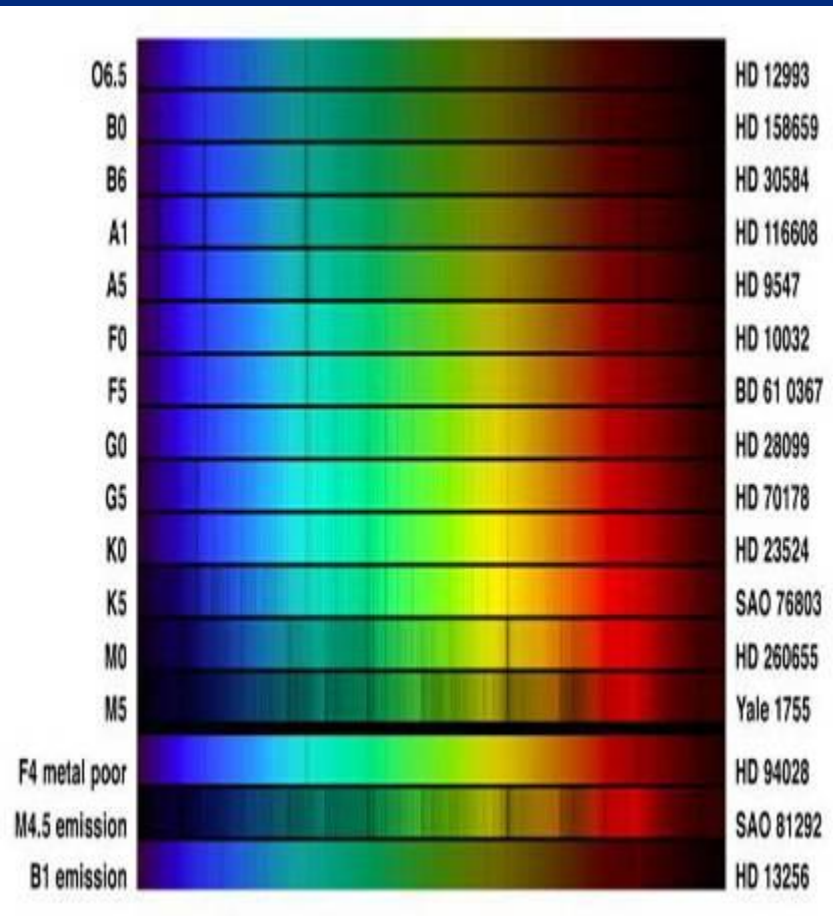


Spectrele stelelor

lumina stelelor, descompusă în culori

- Astronomii învață despre sursele astronomice prin studierea luminii pe care acestea o emit.
- Spectrul oferă informații despre compoziție, temperatură și alte proprietăți ale stelelor.

Stânga: primele 13 spectre ale stelelor cu temperaturi diferite la suprafață (cea mai ridicată în partea de sus); ultimele trei spectre provin de la stele cu proprietăți deosebite.



Spectre selare

Sursa: US National Optical Astronomy Observatory



Diagrama Hertzsprung-Russell

Există o ordine în proprietățile stelelor!

- În diagrama Hertzsprung-Russell (HR) reprezentăm puterea (strălucirea) în funcție de temperatură (clasa spectrală); pe ordonată "magnitudinea absolută" este o măsură logaritmică a puterii.

- Majoritatea stelelor se află în "secvența principală": stelele masive sunt fierbinți și au o putere mare (stânga sus), în timp ce stelele mici au mase mai mici, sunt reci și au o putere redusă (dreapta jos).
- Stelele gigante se află în partea din dreapta sus a diagramei, în timp ce piticele albe se află în partea din stânga jos.

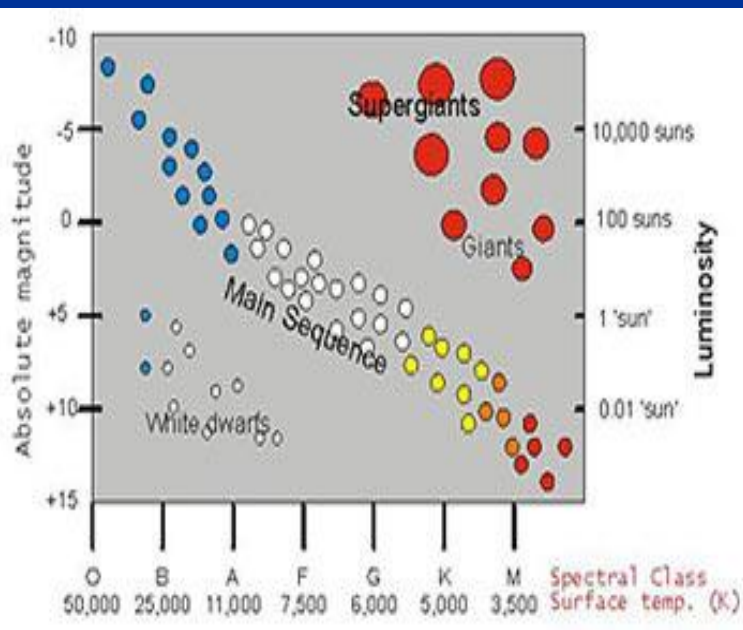
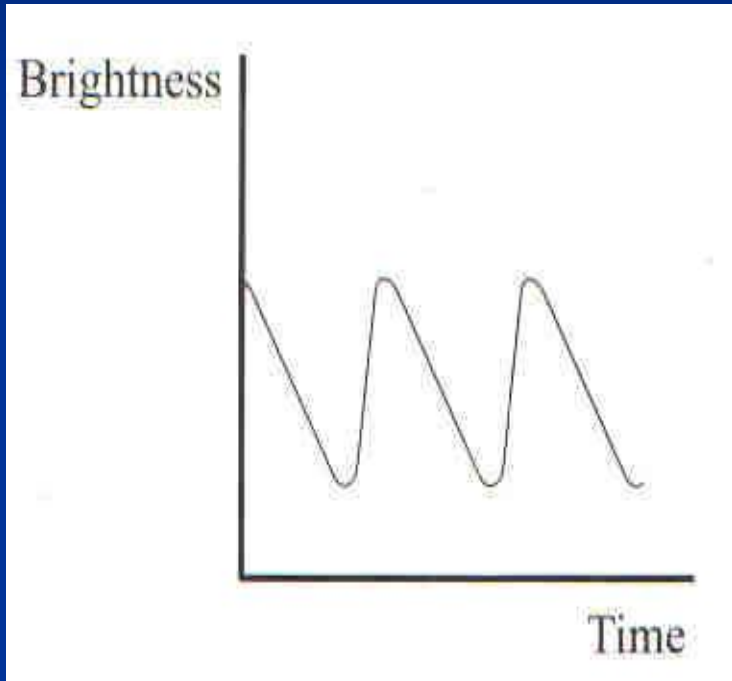


Diagrama HR Sursa: NASA



Stele variabile

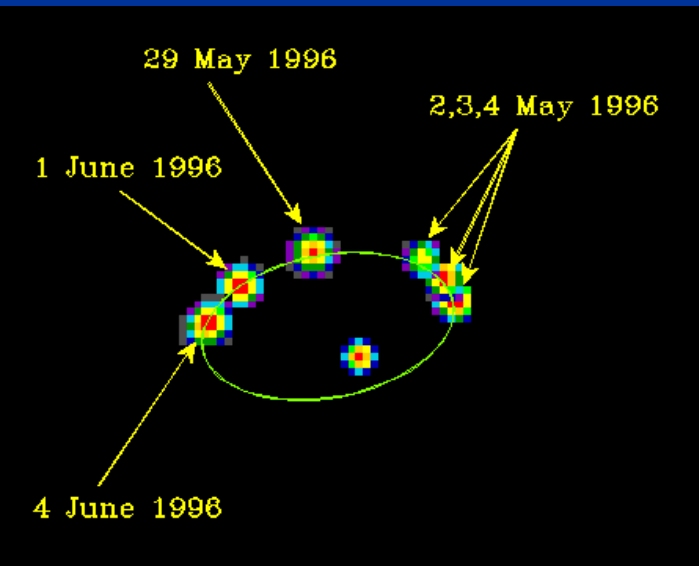


Curba de lumină: graficul strălucirii vs. timp

- Stelele variabile sunt stelele care își schimbă strălucirea în timp.
- Majoritatea stelelor sunt variabile; ele pot varia pentru că suprafața lor vibrează, strălucesc diferit, erup ori explodează sau sunt eclipsate de o stea sau planetă companion.
- Stelele variabile furnizează informații importante despre natura stelelor și evoluția lor.

Stele binare (duble) și multiple

- Stelele binare sunt perechi de stele care sunt împreună din cauza gravitației și orbitează unele în jurul altora. Ele pot fi observate direct (ca în imaginea din stânga), pot fi detectate spectral sau datorită unei eclipse între stele.
- Ele reprezintă cel mai important instrument pentru determinarea maselor stelelor.
- Stelele multiple sunt trei sau mai multe stele care sunt împreună din cauza gravitației.



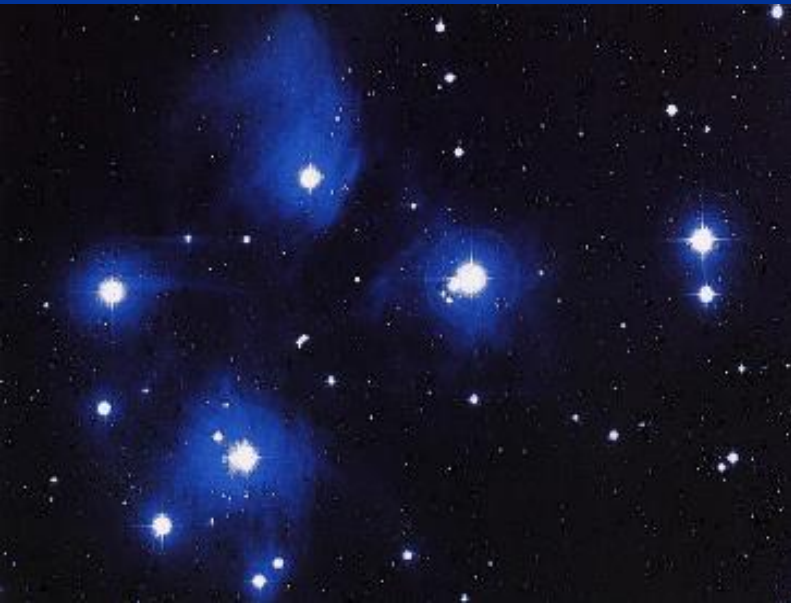
Mișcarea orbitală a stelei Mizar,
în Ursa Mare

Sursa: NPOI Group, USNO, NRL



Roiuri de stele

”experimentele naturii”



Roi Deschis – Pleiadele

Sursa: Observatorul Mount Wilson

- Roiurile de stele sunt grupuri de stele, apropiate între ele, care interacționează gravitațional și care se mișcă împreună prin spațiu.
- Stelele s-au format în același timp și loc, din același material și se află la aceeași distanță, diferă doar masa lor.
- Roiurile de stele sunt exemple de stele cu mase diferite, dar cu aceeași vârstă.



Din ce sunt alcătuite Soarele și stelele



Abundența elementelor chimice în univers:

grăunțe H (90%), orez He (8%), boabe de fasole C, N și O și alte câteva elemente (2%).

- Folosind spectroscopia și alte metode, astronomii pot afla din ce “materie primă” sunt formate stelele.
- Hidrogenul (H) și heliul (He) sunt cele mai abundente elemente și s-au format odată cu formarea universului.
- Elementele mai grele sunt de milioane sau de miliarde de ori mai puțin abundente. Ele s-au format în interiorul stelelor, ca urmare a reacțiilor termonucleare.

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



Legile referitoare la structura stelelor

- În interiorul unei stele, pe măsură ce mergem mai adânc, presiunea crește datorită greutateii straturilor superioare.
- Conform legilor gazelor, temperatura și densitatea cresc pe măsură ce crește presiunea.
- Energia va trece din partea interioară, mai fierbinte, spre partea exterioară, mai rece, prin radiație, convecție sau conducție.
- Dacă energia se transferă în exteriorul stelei, steaua se va răci - dacă nu se crează mai multă energie în interior.
- *Stelele sunt guvernate de aceste legi simple și universale ale fizicii.*



Exemplu: De ce nu are loc colapsul sau contractia Soarelui?



- Umflați un balon ca în imaginea din stânga
- Presiunea atmosferică "împinge" balonul spre interior. Balonul nu se contractă deoarece presiunea gazului "împinge" balonul spre exterior.
- În interiorul Soarelui, gravitația care adună materialul spre interior, este echilibrată de presiunea gazului.

Sursa de energie a Soarelui și stelelor

- Combustia chimică a gazului, petrolului sau carbonului?

Acest proces este ineficient deoarece furnizează energie Soarelui numai pentru câteva mii de ani

- Contractia gravitațională lentă?

Aceasta ar putea aduce energie Soarelui pentru milioane de ani, dar Soarele are vârsta de câteva miliarde de ani

- Radioactivitatea (fisiunea nucleară)?

Izotopii radioactivi sunt aproape inexistenți în interiorul Soarelui sau a stelelor

- Fuziunea nucleară a elementelor ușoare în elemente mai grele?

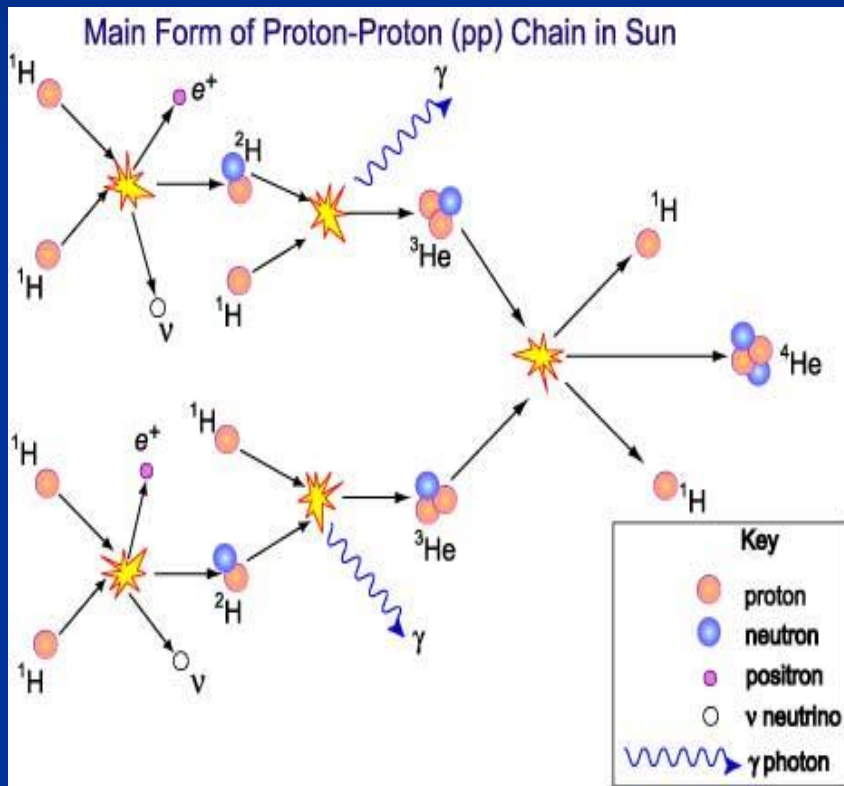
Da! Acesta este un proces foarte eficient, și elemente ușoare, cum ar fi hidrogenul și heliul reprezintă 98% din masa Soarelui și a stelelor.



Ciclul proton-proton

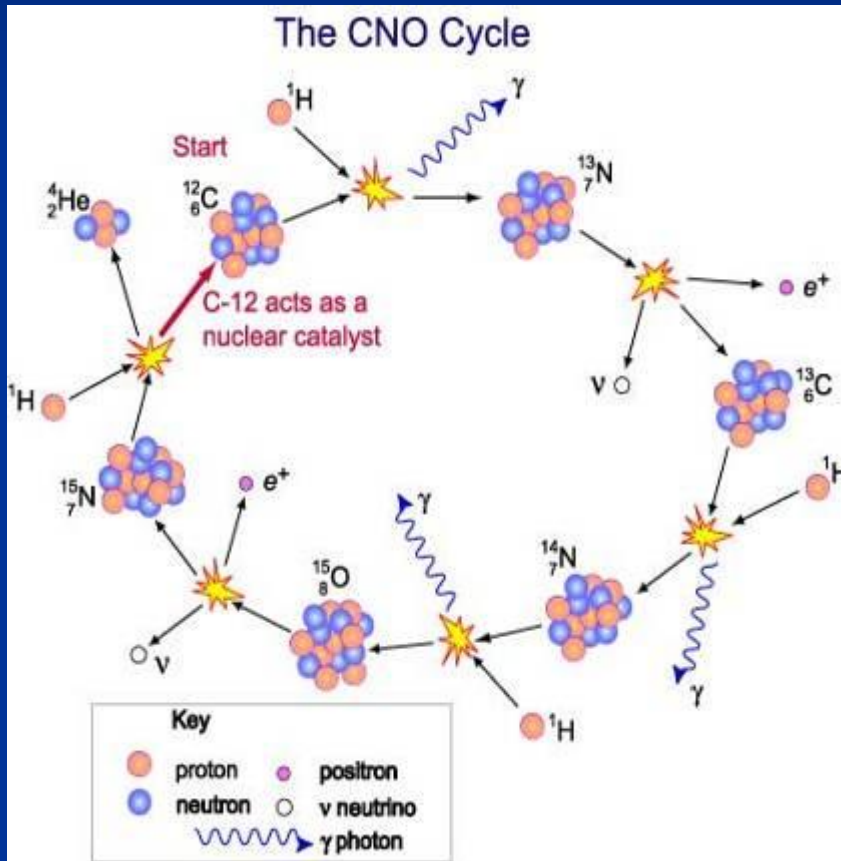
este principalul proces de fuziune în Soare

- La temperaturi și densități mari, în stele ca Soarele nostru, protonii (cu roșu) înving respingerea electrostatică dintre ei și formează ^2H (deuteriu) și neutrino (ν)
- Ulterior, un alt proton se cuplează cu deuteriul pentru a forma ^3He
- Apoi, două nuclee de ^3He se cuplează, formând un nucleu de ^4He și eliberând doi protoni.
- Rezultat: 4 protoni formează împreună heliu și energie (raze gama și energie cinetică)



Ciclul proton-proton
Sursa: Australia National Telescope Facility

Ciclul carbon-azot-oxigen



Ciclul CNO

Sursa: Australia National Telescope Facility

- În stelele masive, cu nucleu foarte fierbinte, protonii (roșu) se pot ciocni cu un nucleu ^{12}C (carbon) (sus stânga).
- Așa începe o secvență circulară de reacții în care patru protoni fuzionează pentru a forma în final un nucleu de heliu (stânga sus).
- Un nucleu ^{12}C este recuperat din nou la sfârșitul ciclului, deci nu este nici creat nici distrus; el acționează ca un catalizator nuclear.



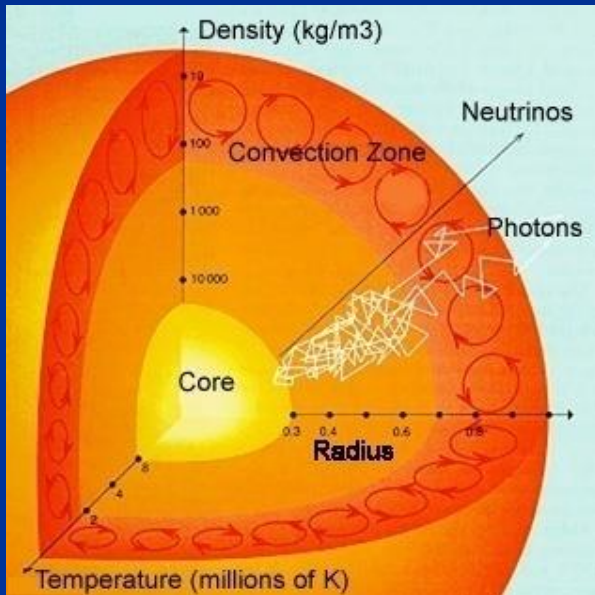
Să creăm "modele" stelare

- Legile care descriu structura stelară se exprimă prin ecuații și se rezolvă cu ajutorul unui computer.
- Computerul calculează temperatura, densitatea, presiunea și puterea în fiecare punct al Soarelui sau stelei. Acesta se numește un model.
- În centrul Soarelui, densitatea este de 150 de ori mai mare decât cea a apei, iar temperatura este $\sim 15.000.000$ K!



În interiorul Soarelui

Pe baza unui "model" computerizat al Soarelui



- În interiorul miezului fierbinte, reacțiile nucleare produc energie prin fuziunea hidrogenului în heliu
- În zona radiativă, deasupra nucleului, energia este transferată spre exterior prin mecanismul radiației
- În zona convectivă, între zona radiativă și zona de la suprafață, energia se transmite spre exterior prin convecție
- Fotosfera, aflată la suprafață, este stratul în care steaua devine transparentă

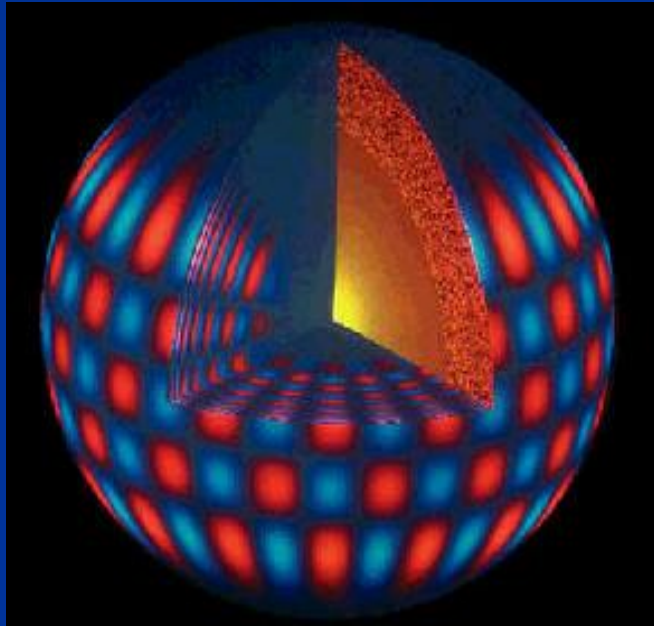
Model solar

Sursa: Institutul de Fizică Teoretică,
Universitatea din Oslo



Testarea modelului helioseismologic

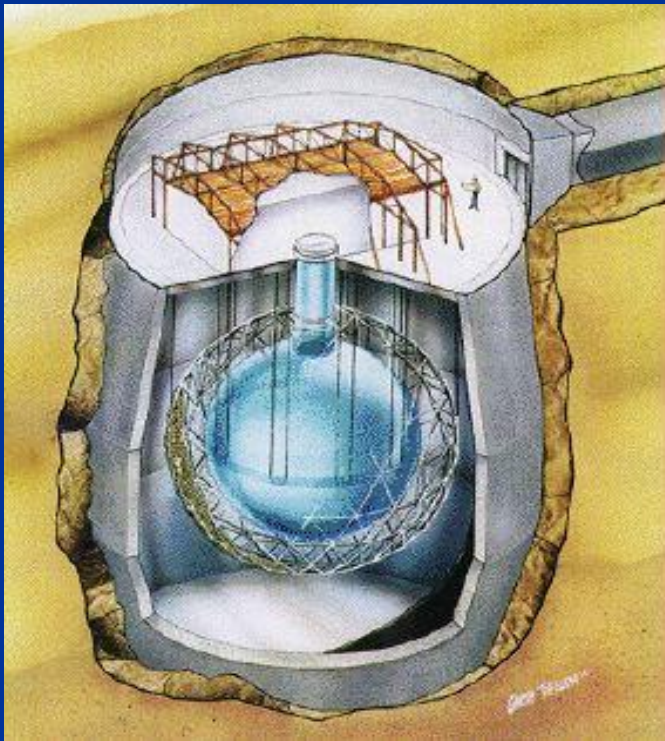
- Soarele vibrează ușor în mii de moduri (modele). Unul dintre ele este prezentat în imaginea din stânga.
- Aceste oscilații pot fi observate, iar apoi pot fi folosite pentru a deduce structura internă a Soarelui și pentru a testa modelele existente ale structurii Soarelui. Procesul este cunoscut drept helioseismologie.
- Oscilații similare s-au observat și la alte stele: astroseismologie.



Concepția artistică a vibrațiilor solare.
Sursa: Observatorul Național
Astronomic SUA

Testarea modelului solar neutrino

- Reacțiile de fuziune nucleară produc particule elementare, numite neutrino.
- Aceste particule au o masă extrem de mică și interacționează rar cu materia.
- Masa acestor particule a fost detectată și măsurată datorită observatoarelor speciale, cum ar fi Observatorul de Neutrino din Sudbury (stânga). Rezultatele sunt în concordanță cu predicțiile obținute cu ajutorul modelelor.



Observatorul de neutrino, Sudbury
Sursa: Sudbury Neutrino Observatory

Durata vieții stelelor

- Durata vieții unei stele depinde de cantitatea de combustibil nuclear (hidrogen) pe care aceasta o are și de cât de repede consumă acest combustibil (puterea).
 - Stelele mai puțin masive decât Soarele nostru sunt cele mai comune. Acestea au mai puțin combustibil, dar au și o putere mult mai redusă și astfel ele au o viață mai lungă.
 - Stelele mai masive decât Soarele sunt mai puțin comune. Acestea au mai mult combustibil, dar puteri mult mai mari și de aceea au o viață mai scurtă.



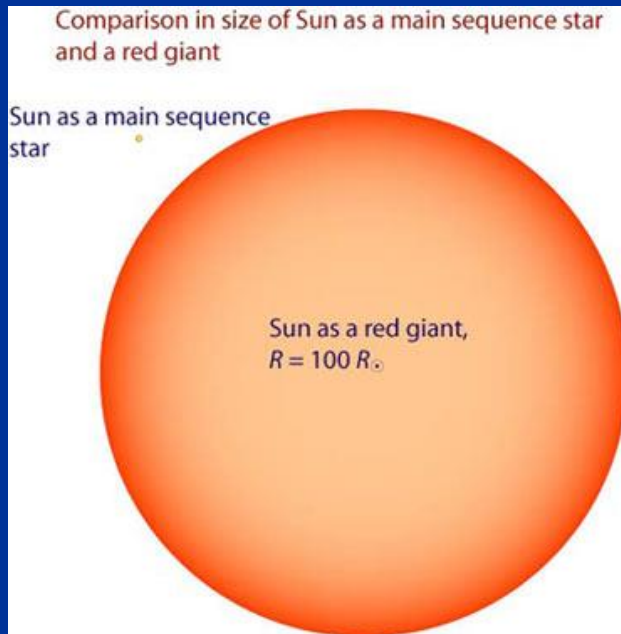
Cum află astronomii informații despre evoluția stelelor?

- Observând stelele în diferite stadii ale vieții lor și așezându-le într-o secvență logică a evoluției.
- Realizând modele cu ajutorul computerelor, folosind legile fizicii și înregistrând modificările în compoziția stelelor care au loc datorită fuziunii nucleare.
- Studiind roiurile de stele și/sau grupurile de stele cu mase diferite dar de aceeași vârstă.
- Studiind cele mai rapide și mai ciudate faze din viața stelelor (ex. supernove și nove).
- Prin studiul stelelor variabile sau pulsarilor, măsurând modificările lente din perioada de pulsație, determinate de evoluția lor.



Evoluția stelelor asemănătoare Soarelui

- Stelele asemănătoare Soarelui nu se modifică mult pe durata a cca ~90% din viața lor, atâta timp cât au destul combustibil (hidrogen) pentru a continua reacțiile termonucleare. O astfel de stea este numită stea de pe secvența principală.



- Când combustibilul stelei, hidrogenul, este epuizat, atunci steaua se mărește și devine o gigantă roșie.
- În interiorul miezului, temperaturile pot crește suficient pentru a începe să se producă energie prin fuziunea heliului în carbon.
- Când heliul este epuizat, steaua se umflă din nou într-o gigantă roșie încă și mai mare, de sute de ori mai mare decât Soarele

Dimensiune comparativă:

Soare – gigantă roșie

Sursa: Telescopul Național Australia



Moartea stelelor asemănătoare Soarelui



Nebuloasa planetară Helix
Sursa: NASA

- Când steaua devine o gigantă roșie, aceasta începe să pulseze (vibreze). O numim steaua Mira.
- Mișcarea pulsatorie determină separarea straturilor exterioare ale stelei, producând o minunată nebuloasă planetară (stânga)
- Miezul stelei este o pitică, densă, albă, mică și fără combustibil.

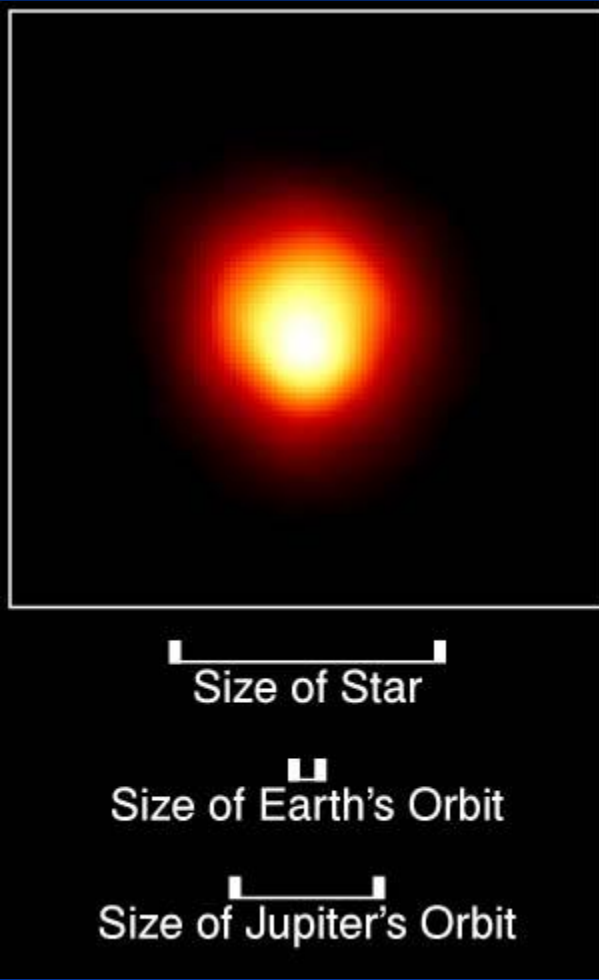
Pitica albă



Pitica albă (jos) companion al lui Sirius (sus). Sursa: NASA

- O pitică albă reprezintă miezul mort al unei stele similare cu Soarele.
- O pitică albă are o masă similară cu a Soarelui, un volum similar cu cel al Pământului și o densitate de un milion de ori mai mare decât densitatea apei.
- Într-o pitică albă, forța centripetă gravitațională este echilibrată de presiunea cuantică externă exercitată de electronii din interiorul său.
- Multe stele aflate în apropiere, inclusiv Sirius (stânga) și Procyon, au companioni pitice albe.

Evoluția unei stele masive



- Stelele masive sunt rare, puternice și își consumă combustibilul foarte rapid - în câteva milioane de ani.
- Când își consumă combustibilul, ele se umflă și devin supergigante roșii.
- Miezul lor este foarte fierbinte, suficient încât să producă elemente grele cum ar fi fierul.
- Betelgeuse (stânga), în constelația Orion, este o astfel de supergigantă roșie. Ea este mult mai mare decât orbita Pământului.

Betelgeuse.

Sursa: NASA / ESA / HST



Moartea unei stele masive

- Când miezul unei stele masive devine constituit în principal din fier, nu mai are combustibil nuclear pentru a continua fuziunea și nu mai poate rămâne fierbinte.
- Gravitația strivește nucleul într-o stea neutronică, eliberând o cantitate enormă de energie și determinând steaua să explodeze sub forma unei supernove (stânga).
- Supernovele produc elemente mai grele decât fierul și le expulzează pe acestea și alte elemente în spațiu, elemente ce vor deveni parte a noilor stele, planete și ființe vii.



Nebuloasa Crab: rămășițele
exploziei unei supernove,
observate în anul 1054
Sursa: NASA

Stelele neutronice

- Miezurile stelelor, cu mase între de 1,5 - 3 ori masa Soarelui, colapsează și devin stele neutronice, ca sfârșit al vieții lor stelare.
- Acestea au diametre de cca 10 km și densități de 10^{12} de ori mai mari decât a apei.
- Sunt constituite din neutroni și particule mult mai exotice.
- Stelele neutronice tinere se rotesc rapid și emit pulsuri regulate de radiații în domeniul radio, fiind cunoscute sub numele de pulsari.

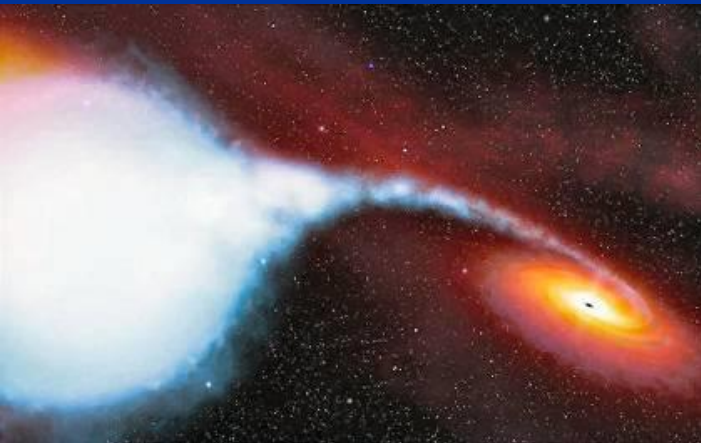


Pulsar, stea neutronică în centrul nebuloasei Crab. Energia de rotație pe care o emite energizează nebuloasa.

Sursa: NASA/ESA/HST



Găurile negre



Reprezentare artistică a lui Cygnus X-1, o stea vizibilă (stânga) împreună cu o gaură neagră (dreapta) în centrul unui disc de acreție.

Sursa: NASA.

- O gaură neagră este un obiect astronomic a cărui gravitație este atât de puternică încât nimic nu poate scăpa din ea, nici măcar lumina.
- Nucleele stelelor neobișnuit de masive (mai mult de 30 de ori masa Soarelui) devin găuri negre când li se termină combustibilul.
- O modalitate de a detecta o gaură neagră: când o stea vizibilă orbitează în jurul ei (stânga).



Cazuri speciale ale stelelor variabile



- Multe resturi stelare – pitice albe, găuri negre sau stele neutronice - au o stea vizibilă, normală, orbitând în jurul lor.
- Dacă gazul provenit de la o stea normală ajunge pe restul stelar, discul de acrecție se poate forma în jurul acestuia (stânga).
- Când gazul ajunge pe restul stelar, acesta poate arde, erupe sau exploda, ceea ce se numește o stea variabilă cataclismică.

O pereche formată dintr-o stea normală (stânga) și o pitică albă cu un disc de acrecție, ce fură gaz de la companion. (dreapta). Sursa: NASA

Nașterea stelelor

- Stelele se formează în interiorul norilor moleculari (nebuloase), constituiți din gaz rece și praf.
- Praful interstelar și gazul interstelar reprezintă cca. 10% din materia din galaxia noastră.
- Stelele tinere pot fi găsite în general în interiorul sau aproape de nebuloasa din care acestea provin.
- Cel mai apropiat și mai clar exemplu de regiune de formare a stelelor este nebuloasa Orion (stânga), aflată la cca 1500 ani lumină de noi.



Nebuloasa Orion
Sursa: NASA



Gaz interstelar

Gazul dintre stele



- Gazul interstelar (atomi sau molecule) poate fi activat de lumina ultravioletă provenită de la o stea din apropiere, producând o emisie a nebuloasei (stânga).
- Gazul rece dintre stele produce unde radio, care pot fi detectate cu ajutorul radiotelescoapelor.
- Hidrogenul și heliul reprezintă 98% din gazul interstelar.

Nebuloasa Orion. Gazul este energizat de lumina ultravioletă, provenită de la stelele din nebuloasă. Sursa: NASA

Praful interstelar

Praful dintre stele

- Praful interstelar din apropierea stelelor strălucitoare poate fi detectat în domeniul vizibil al spectrului.
- Praful poate bloca lumina provenită de la stele și gazul din spatele lui (stânga). Stelele se formează în acești nori.
- Doar 1% din materialul dintre stele este praf. Particulele de praf au o dimensiune de câteva sute de nm și sunt mai ales silicați sau grafit



Gaseous Pillars • M16 HST • WFPC2
PRC95-44a • ST ScI OPO • November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

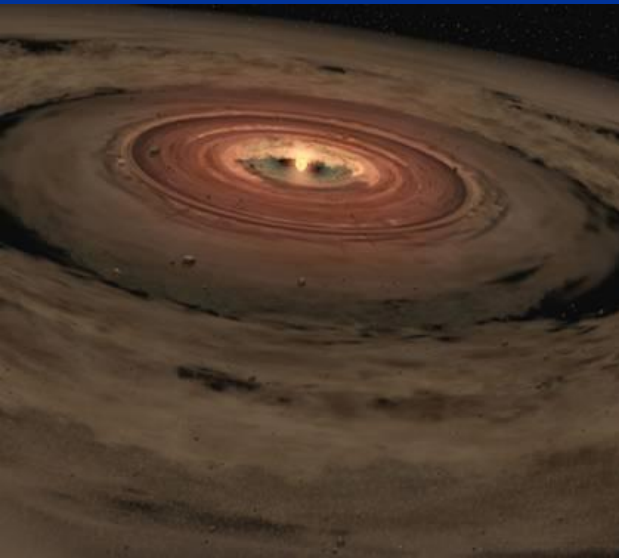
M16

Sursa: NASA / ESA / HST



Formarea stelelor

- Stelele s-au format în interiorul acelor părți ale unei nebuloase numite nuclee, care sunt dense sau comprimate.
- Gravitația este responsabilă pentru atracția între nuclee.
- Conservarea momentului cinetic mărește viteza de rotație a nucleelor, care se aplatizează și în final devin discuri.
- Stelele se formează în centrul discului. Planetele se formează în părțile mai reci, mai exterioare ale discului.



Reprezentare artistică a unui sistem planetar în cursul procesului de formare. Sursa: NASA



Discuri protoplanetare

Sisteme planetare în procesul de formare



- Discurile protoplanetare au fost observate în nebuloasa Orion (stânga).
- Steaua poate fi greu vizibilă în centrul discului.
- Discul de praf a blocat lumina care este în spate.
- Acestea și alte observații oferă o dovadă directă a formării sistemelor planetare.

Proplyds

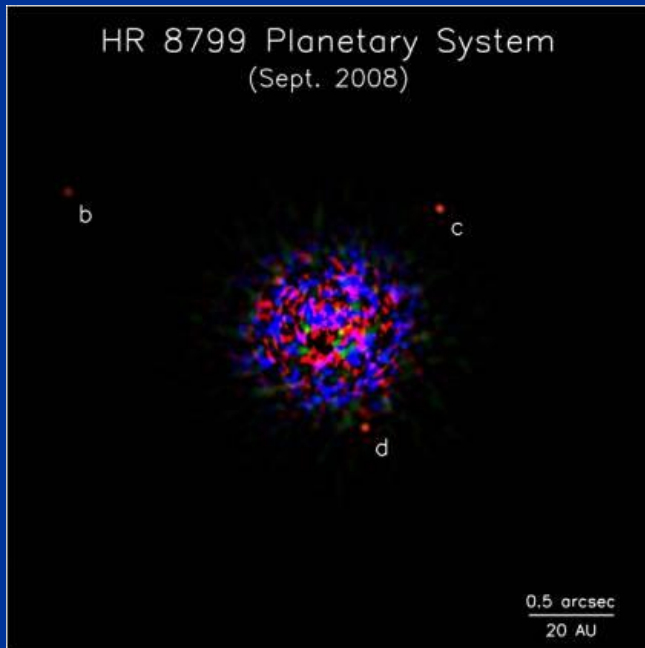
Sursa: NASA / ESA / HST



Exoplanete = planete extrasolare

Planete din jurul altor stele

- Exoplanetele sunt descoperite și studiate de obicei prin efectul gravitațional pe care îl au asupra stelei sau prin reducerea luminii stelei atunci când are loc un tranzit.
- Foarte puține exoplanete au fost observate direct (stânga).
- Spre deosebire de planetele din sistemul solar multe exoplanete sunt imense și foarte apropiate de steaua lor. Acesta permite astronomilor să modifice/corecteze teoriile referitoare la modul în care se formează sistemele planetare.



Sistemul exoplanetei HR 8799
Sursa: C. Marois et al., NRC Canada



Considerații finale

- “Gravitația conduce formarea, viața și moartea stelelor” [Professor R.L. Bishop]
- Nașterea unei stele explică originea Sistemului Solar, precum și a altor sisteme planetare.
- Viața unei stele explică sursa energiei care face viața posibilă pe Pământ.
- Ciclurile repetate, viață și moarte ale stelelor, produc elementele chimice mai grele decât hidrogenul, din care sunt constituite stelele, planetele și ființele vii.
- În timpul morții unei stele, gravitația produce cele mai ciudate obiecte din univers: pitice albe, stele neutronice și găuri negre.



Vă mulțumesc foarte
mult pentru atenție!

