

Evolució estel·lar: Naixement, vida i mort de les estrelles

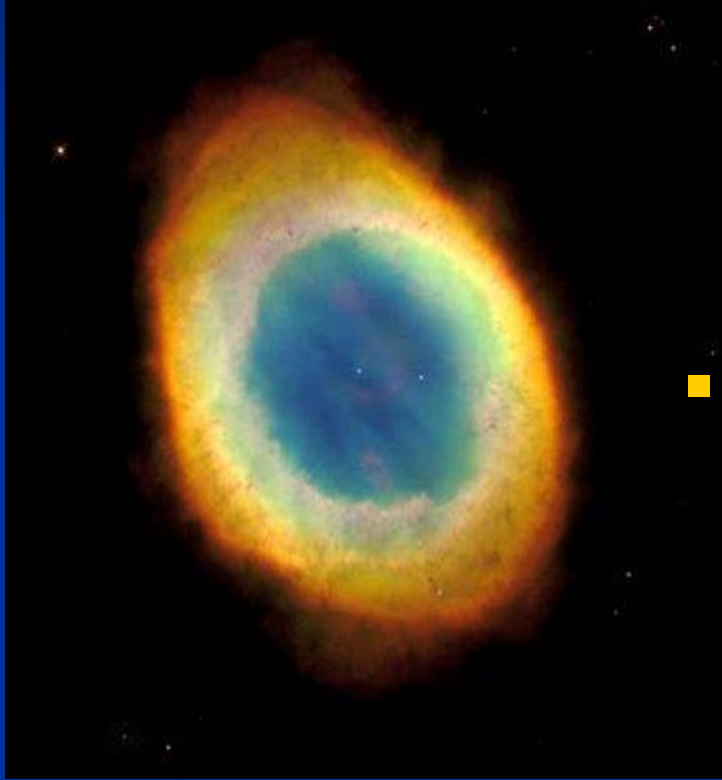
John R. Percy

International Astronomical Union

Universitat de Toronto, Canadà



Evolució de les estrelles



Nebulosa de l'Anell,
una estrella morint

Font: NASA

- Evolució estel·lar es refereix als canvis que tenen lloc en les estrelles quan consumeixen el seu combustible, des del seu naixement i fins a la seva mort.
- Entendre l'evolució de les estrelles ajuda a comprendre:
 - la naturalesa i el destí del Sol
 - l'origen del nostre Sistema Solar
 - la relació entre el Sistema Solar i altres sistemes planetaris
 - la possible existència de vida en un altre lloc de l'Univers

Propietats del Sol: l'estel més proper i com els astrònoms les determinen (important!)



El Sol

Font: NASA SOHO Satellite

- **Distància:** $1,5 \times 10^{11}$ m, reflexió de les ones de radar des de Mercuri i Venus
- **Massa:** 2×10^{30} kg, mesurant el moviment dels planetes que orbiten al voltant del Sol
- **Diàmetre:** $1,4 \times 10^9$ m, a partir del diàmetre aparent (angular) del Sol i la seva distància
- **Potència:** 4×10^{26} W, a partir de la distància i la potència mesurada des de la Terra
- **Composició química:** 98% H i He, estudi del seu espectre.

Propietats dels estels – Sols distants i com els astrònoms les determinen – important!



Constel·lació d'Orió

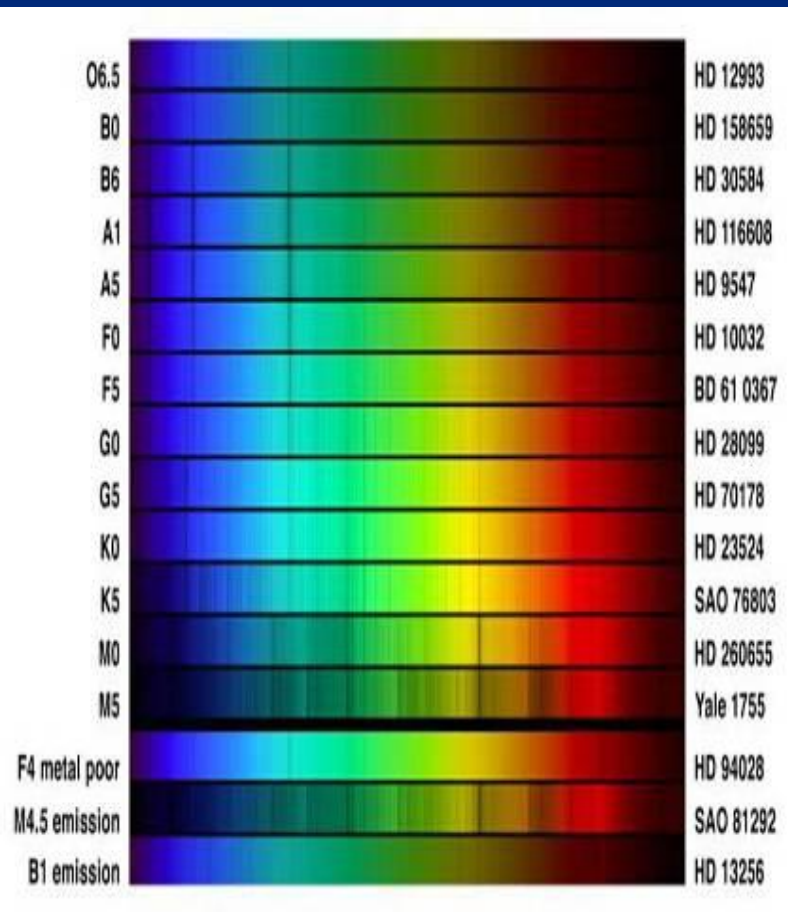
Font: Besser Museum

- **Distància:** de la paral·laxi, o de la brillantor aparent, si la potència és coneguda
- **Potència:** de la distància i la brillantor aparent
- **Temperatura de la superfície:** del color o l'espectre
- **Radio:** la potència i la temperatura de la superfície
- **Massa:** dels estels binaris
- **Composició química:** de l'espectre



Els espectres dels estels

Llum estel·lar, descomposta en els seus constituents



Espectres estel·lars

Font: US National Optical Astronomy Obs.

- Els astrònoms aprenen sobre els objectes celestes gràcies a la llum que emeten
- L'espectre proporciona informació sobre: composició, temperatura, velocitats i altres característiques

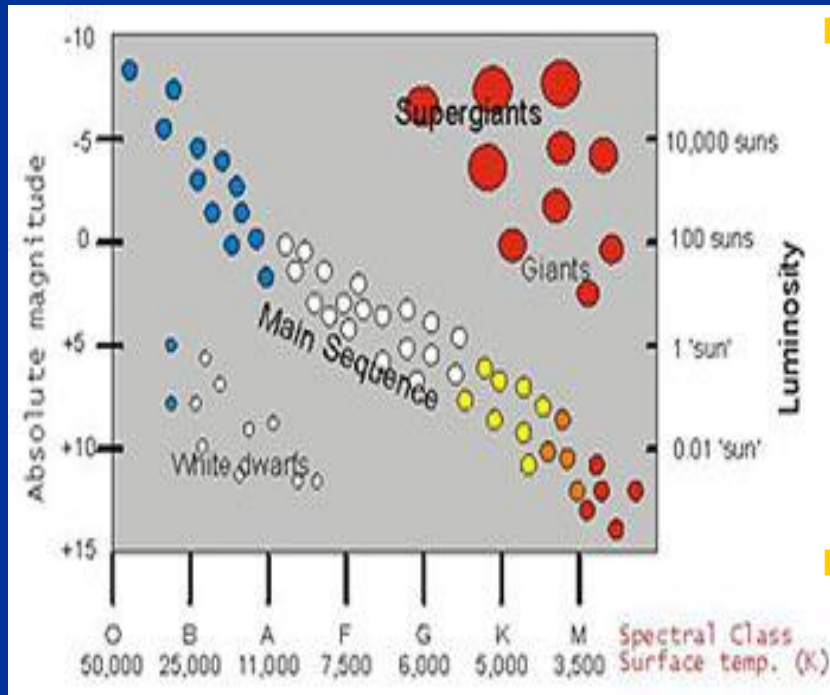
Esquerra: els 13 primers espectres són d'estels de temperatures diferents (les més altes les de dalt de tot); els 3 espectres de la part inferior són d'estels amb propietats anormals.



El diagrama Hertzsprung-Russell

Hi ha ordre en les propietats dels estels!

- El diagrama HR mostra la gràfica potència (luminositat) en funció de la temperatura (tipus espectral) i la “magnitud absoluta” que és una mesura logarítmica de la potència.



- La majoria de les estrelles es troben en la seqüència principal: les estrelles massives són estrelles calents i tenen potències altes (dalt-esquerra); les de massa petita són fredes i tenen potències baixes (a baix a la dreta).

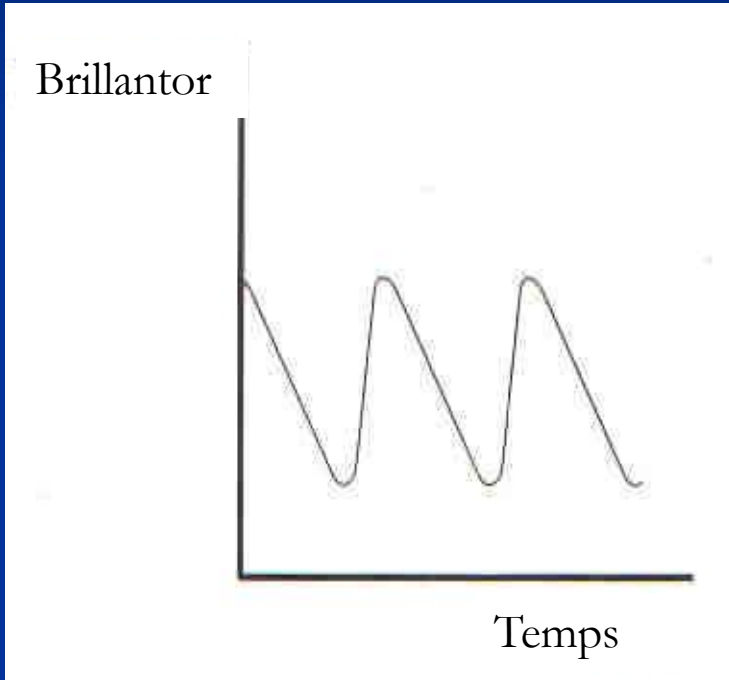
- Les estrelles gegants es troben a dalt a la dreta; i les estrelles nanes blanques a baixa l'esquerra.

Diagrama HR

Font: NASA



Estrelles variables

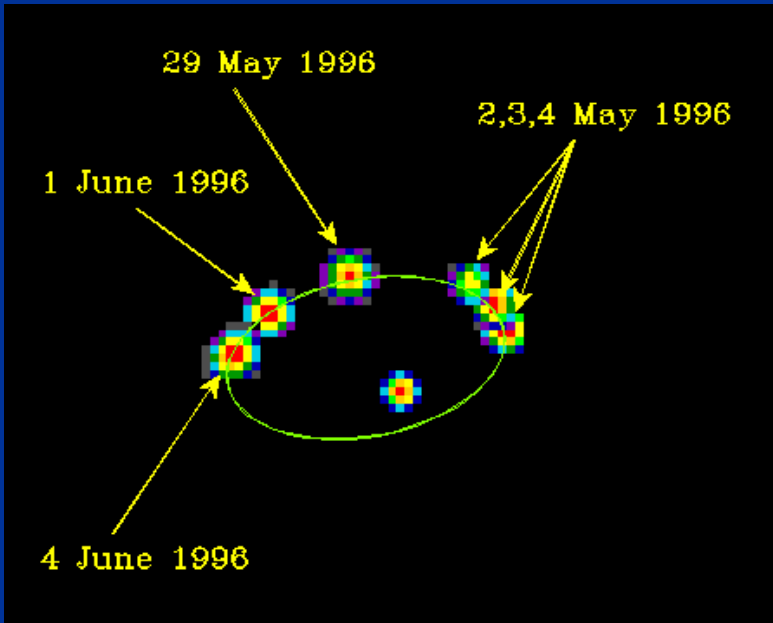


Corba de llum: una gràfica de la brillantor vs el temps.

- Són estrelles que canvien la seva brillantor.
- La majoria de les estrelles són variables; poden variar perquè vibren, fulguren, entren en erupció o exploten, o s'eclipsen per una estrella companya o un planeta.
- Les estrelles variables proporcionen informació sobre la naturalesa i l'evolució estel·lar.

Estrelles binàries (dobles) i múltiples

- Són parelles d'estrelles que estan juntes degut a la gravetat i orbiten al voltant d'elles mateixes.



Moviment orbital de Mizar,
a l'Ossa Major

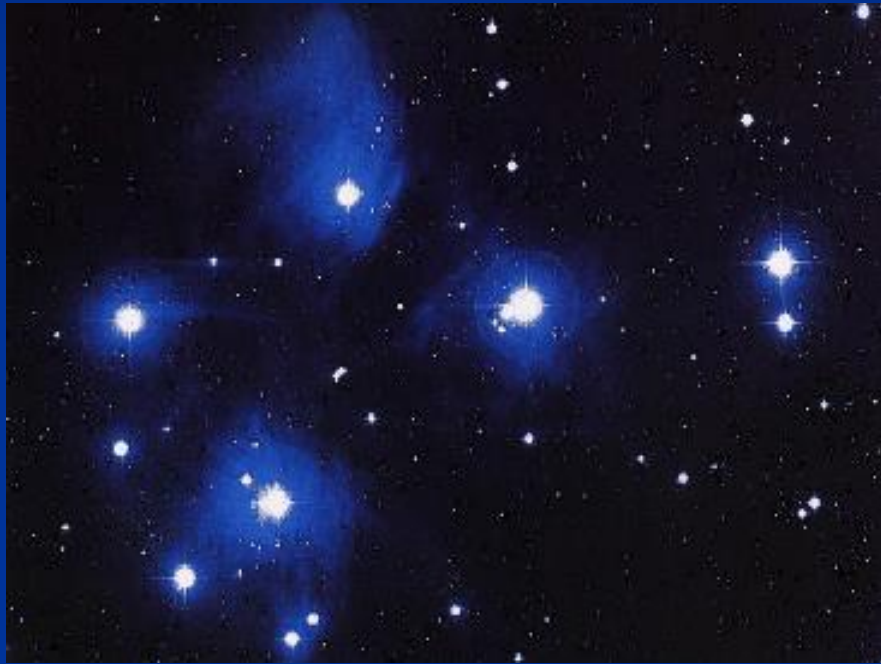
Font: NPOI Group, USNO, NRL

- Poden ser visibles directament (figura esquerra), o detectar-les gràcies als seus espectres, o a un eclipsi d'una estrella amb una altra.
- Són l'eina més important per mesurar masses estel·lars.
- Les estrelles múltiples són tres o més estrelles que estan unides entre sí per la gravetat.



Cúmuls d'estrelles

“Els experiments de la naturalesa”



Cúmulo abierto de Las Pléiades
Font: Mount Wilson Observatory

- Són grups d'estrelles que estan properes entre si a causa de la gravetat, i es mouen totes juntes a través de l'espai.
- Es van formar en el mateix moment (comparteixen l'edat) i lloc, del mateix material, i estan a la mateixa distància; només difereixen en la massa.
- Els cúmuls són exemples d'estrelles amb diferents masses però amb la mateixa edat.



De què està fet el Sol i les estrelles



Proporcions dels elements del Cosmos: escaiola (“alpiste”)
H (90%), arròs He (8%),
fesols C, N, i O traces de tota
la resta (2%).

- Usant espectroscòpia i altres tècniques, es poden identificar les "matèries primeres" amb què estan fetes les estrelles.
- Hidrogen i Heli són els més abundants. Van ser creats en el naixement de l'univers.
- Els elements més pesats són milions o milers de milions de vegades menys abundants. Es van crear per reaccions nuclears a les estrelles.

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

- Elementos creados en los primeros minutos despues del Big Bang
- Elementos producidos por nucleosintesis dentro de las estrellas
- Elementos producidos en las supernovas

Les lleis de l'estructura de les estrelles

- A l'interior de les estrelles la pressió augmenta pel pes de les capes superiors.
- Segons les lleis dels gasos, la temperatura i la densitat augmentarà a mesura que s'incrementi la pressió.
- L'energia fluirà des de la part més calenta de l'interior fins a la part més freda de l'exterior, per radiació i convecció.
- Si l'energia flueix cap a fora de l'estrella, aquesta es refredarà (llevat que es crei energia al seu interior).
- *Les estrelles estan governades per aquestes lleis simples i universals de la física.*



Exemple: Per què no es col·lapsa o contreu el Sol?



- Infla un globus com el de l'esquerra.
- El globus està "empenyent" cap a dins per la pressió atmosfèrica. No s'encongeix doncs la pressió de gas està "empenyent" cap a fora.
- A l'interior del Sol la gravetat, que empeny cap a dins, es compensa amb la pressió del gas.

La Font d'energia per al Sol i les estrelles

- Combustió química de gas, petroli o carbó?

Procés tan ineficient que aportaria energia al Sol només durant pocs milers d'anys.

- Lenta contracció gravitatòria?

Podria aportar energia al Sol durant cent milions d'anys, però el Sol té milers de milions d'anys d'antiguitat.

- Radioactivitat (fissió nuclear)?

Els isòtops radioactius són gairebé inexistent en el Sol i en les estrelles.

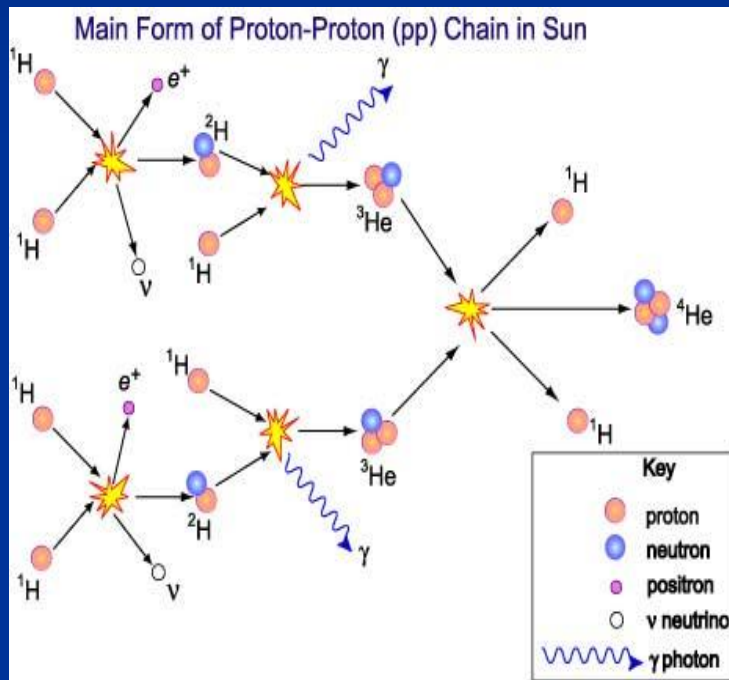
- Fusió nuclear d'elements lleugers en altres més pesats?

Sí! Aquest és un procés molt eficient, i els elements lleugers com l'hidrogen i l'heli representen el 98% del Sol i de les estrelles.



La cadena Protó-Protó

el principal procés de fusió en el Sol



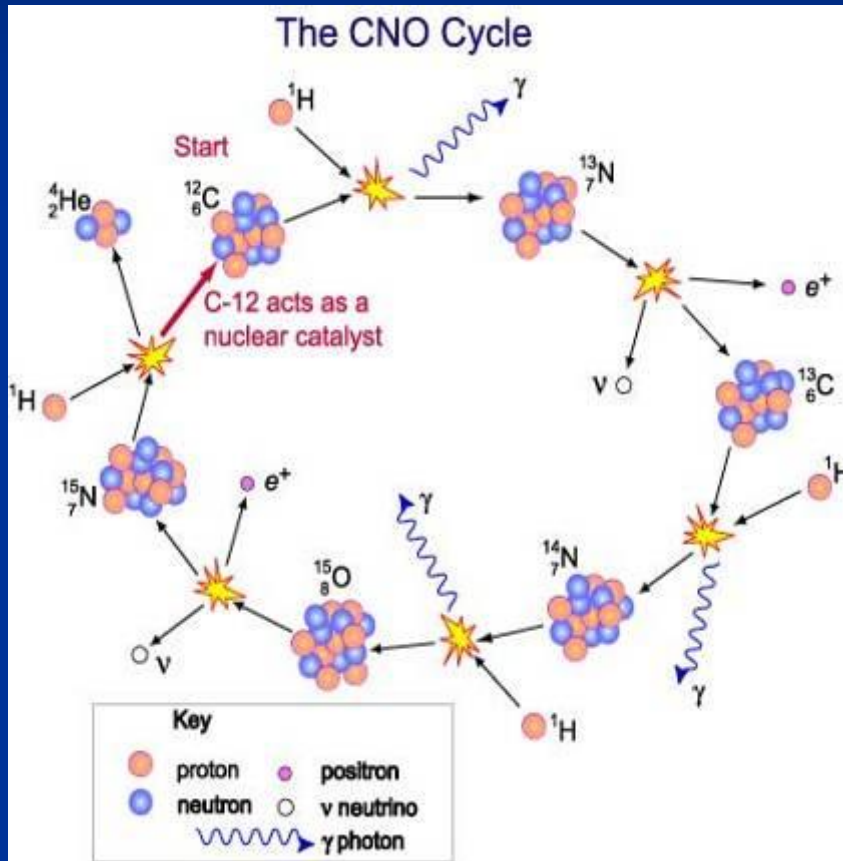
Cicle protó-protó

Font: Australia National Telescope
Facility

- A alta temperatura i densitat, en estrelles com el Sol, els protons (en vermell) superen la repulsió electrostàtica entre ells i es compeneten per formar ^2H (deuteri) i un neutrí (ν).
- Més tard, un altre protó s'ajunta amb el deuteri per formar ^3He .
- Després, els nuclis de ^3He s'acoblen entre sí per formar un nucli de ^4He alliberant dos protons.
- Resultat: 4 protons s'ajunten per formar heli, energia (raigs gamma i energia cinètica).



El cicle Carboni-Nitrogen-Oxigen



Cicle CNO

Font: Australia National Telescope Facility

- En estrelles massives, amb nuclis molt calents, els protons (vermells) s'ajuntaran amb el nucli de ^{12}C (carboni) (dalt a l'esquerra).
- Comença una seqüència circular de reaccions en les quals quatre protons es fonen per formar un nucli d'Heli (a dalt a l'esquerra)
- Un nucli de ^{12}C es recupera, per tant el ^{12}C ni es crea ni es destrueix; actua com un catalitzador nuclear.



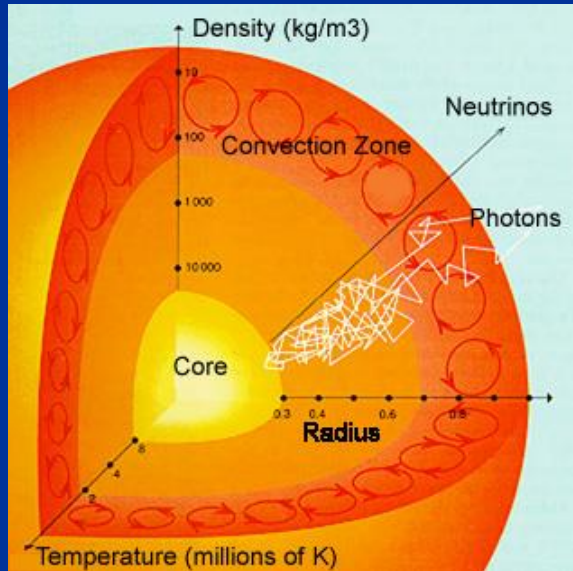
Fent “models” estel·lars

- Les lleis de l'estructura de les estrelles són expressades en equacions i es resolen mitjançant **models informàtics**.
- L'ordinador calcula la temperatura, la densitat, la pressió, i la potència en cada punt del Sol o de l'estrella.
- Així se sap que en el centre del Sol la densitat és 150 vegades la de l'aigua i la temperatura és de 15.000.000 K!



A l'interior del Sol

Basat en un “model” del Sol fet amb ordinador



Model solar

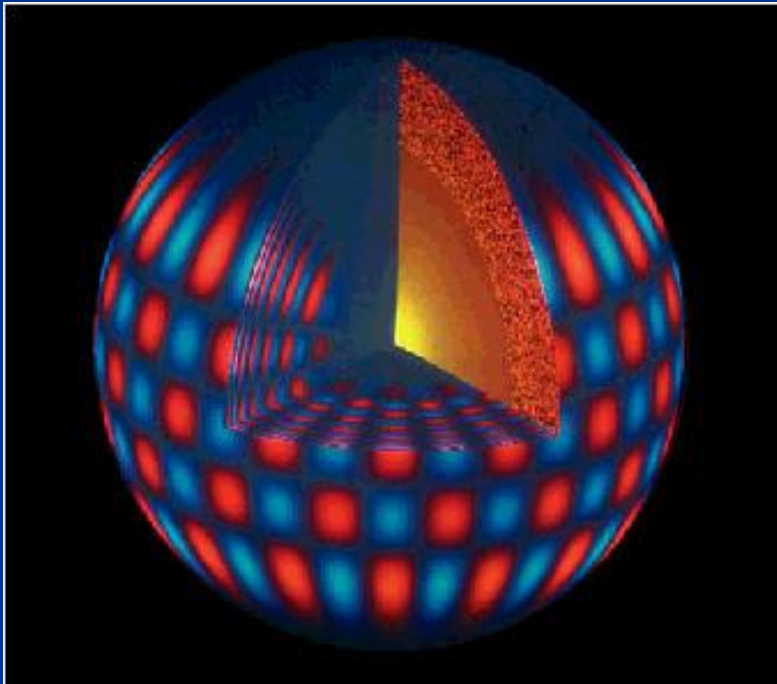
Font: Institute of Theoretical
Physics, University of Oslo

- Al calent nucli, les reaccions nuclears produeixen energia fusionant H i transformant-lo en He.
- A la zona radioactiva, per sobre del nucli, l'energia flueix cap a fora mitjançant el mecanisme de radiació.
- A la zona convectiva, entre la zona radioactiva i la superfície, l'energia flueix cap a fora per convecció.
- La fotosfera, a la superfície, és la capa on l'estrella es fa transparent.



Provant el model: Heliosismologia

- El Sol vibra suaument en milers de modes (patrons). (Un es mostra a la figura de l'esquerra)
- Poden ser observats. Aquesta dada s'utilitza per deduir l'estructura interna del sol i amb això revisar els models. El procés es denomina helisismologia.
- Vibracions similars poden ser observades en altres estrelles: astresismologia.

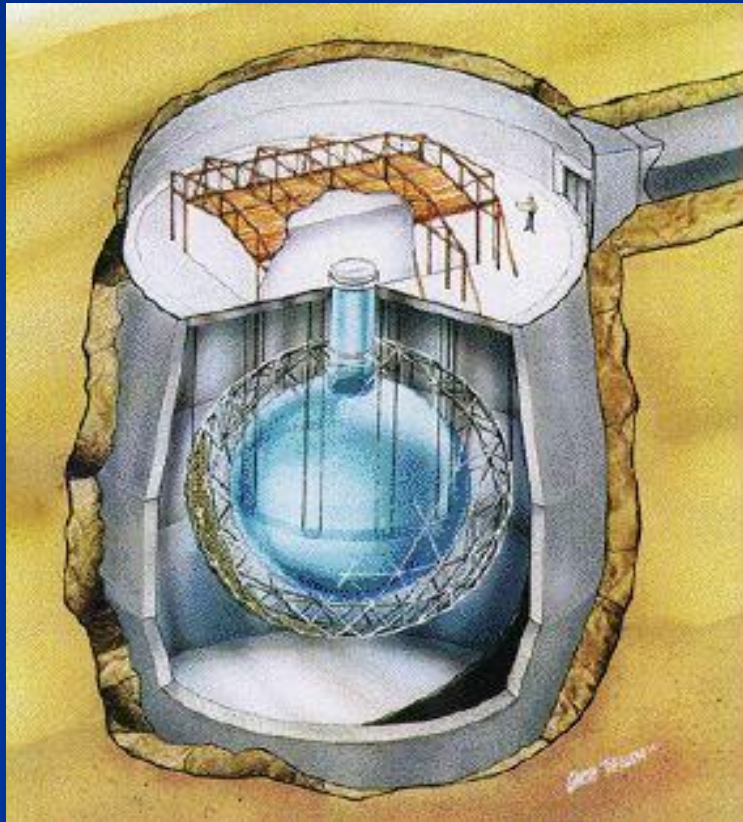


Concepció artística de la vibració solar

Font: US National Optical Astronomy Observatory



Provant el model: Neutrins solars



Observatori de Neutrins, Sudbury
Font: Sudbury Neutrino Observatory

- Les reaccions de fusió nuclear produeixen partícules elementals anomenades neutrins.
- Tot just tenen massa i gairebé mai interactuen amb la matèria.
- Se'ls ha detectat i mesurat gràcies a observatoris especials, com l'Observatori de Neutrins de Sudbury (esquerra). Els resultats concorden amb les prediccions dels models.



La durada de la vida de les estrelles

- La durada de la vida d'una estrella depèn de quant combustible nuclear tingui (massa) i com de ràpid el consumeixi (potència).
- Les estrelles menys massives que el Sol són les més comuns. Tenen menys combustible, però potències molt menors, per tant tenen vides més llargues.
- Les estrelles més massives que el Sol són molt poc comuns. Tenen més combustible, però potències molt més altes, per tant vides més curtes.



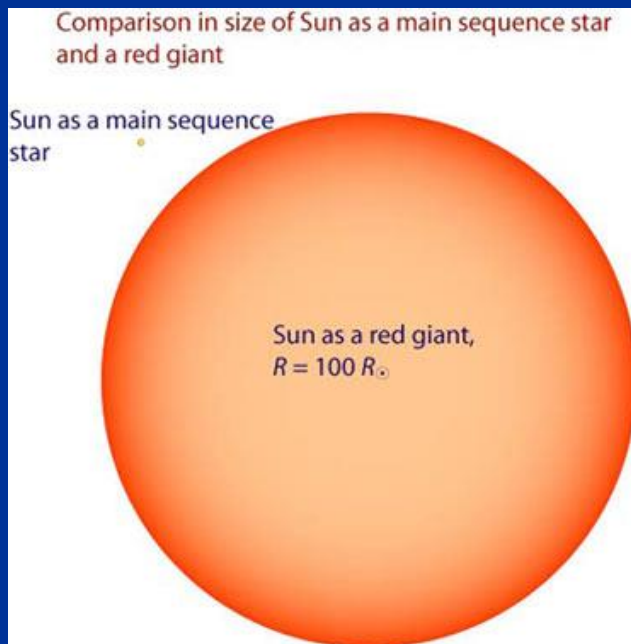
Com aprenen els astrònoms sobre l'evolució de les estrelles

- Observant les estrelles en diverses etapes de les seves vides i posant-les en una seqüència d'evolució lògica.
- Fent models, fent servir les lleis de la física i la comptabilitat dels canvis en la composició de les estrelles que es produeixen a causa de la fusió nuclear.
- Mitjançant l'estudi de cúmuls d'estrelles (grups d'estrelles amb masses diferents, però amb la mateixa edat).
- Observant les fases ràpides i estranyes de l'evolució estel·lar com les supernoves.
- Estudiant estrelles polsants variables, mesurant els canvis lents en el període de pulsació deguts a la seva evolució.



L'evolució d'una estrella com el Sol

- Una estrella com el Sol, no canvia durant el 90% de la seva vida, mentre utilitza el seu combustible: H. És un estel de seqüència principal.



Comparació mides:
Sol-gegant vermella

Font: Australia National Telescope
Facility

- Quan el seu combustible s'esgota, s'expandeix transformant-se en una estrella gegant vermella.
- El nucli s'escalfa prou perquè ràpidament es pugui produir energia mitjançant la fusió d'heli en carboni.
- Quan el seu combustible d'He s'esgoti, de nou s'infla en una estrella vermella gegant major, centenars de vegades més gran el Sol.



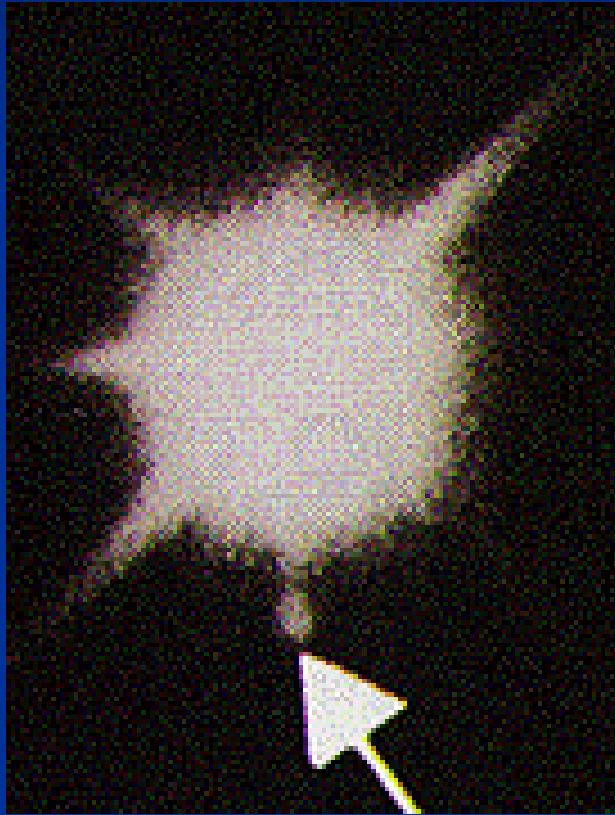
La mort d'una estrella com el Sol



Nebulosa planetària de l'Hèlix
Font: NASA

- Quan l'estrella es converteix en una gegant vermella, comença a fer pulsacions (vibració). Se li diu una estrella Mira.
- La pulsació provoca la separació de les capes externes de l'estrella, produint una bella nebulosa planetària.
- El nucli de l'estrella és una nana densa, blanca i petita, sense combustible.

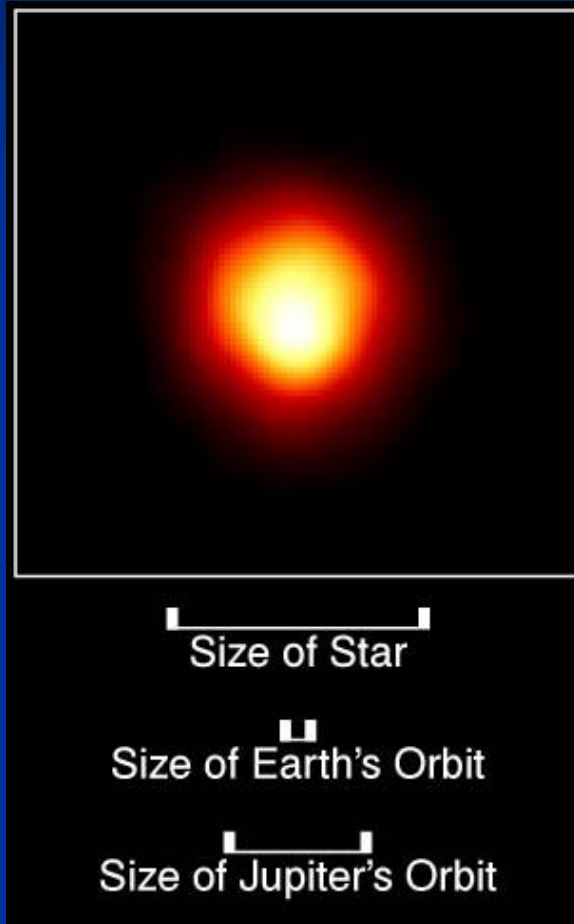
Nanes blanques



La nana blanca companya
de Sírius (a baix)
Font: NASA

- Una nana blanca és el nucli mort d'una estrella com el Sol.
- Té una massa similar a la del Sol, un volum similar al de la Terra i una densitat un milió de vegades més gran que la de l'aigua.
- La força centrípeta de la gravetat és equilibrada per la pressió externa quàntica dels electrons dins d'ella.
- Moltes estrelles properes, p. ex. Sírius (esquerra), tenen com a companyes nanes blanques.

L'evolució d'una estrella massiva



Betelgeuse

Font: NASA/ESA/HST

- Les estrelles massives són poc comuns, consumeixen el seu combustible molt ràpidament, en pocs milions d'anys.
- A mesura que gasten el seu combustible, s'inflen i passen a ser estrelles vermelles supergegants.
- Els seus nuclis són molt calents, prou per fondre elements tan pesats com el ferro.
- Betelgeuse (esquerra), a Orió, és una supergegant vermella brillant. És més gran que l'òrbita de la Terra.



La mort d'una estrella massiva

- Quan el nucli d'una estrella massiva desintegra el ferro, no té més combustible nuclear i ja no pot conservar la temperatura.



Nebulosa del Cranc,
el romanent d'una
explosió de supernova
observada l'any 1054

Font: NASA

- La gravetat aixafa el nucli en un estel de neutrons, alliberant enormes quantitats d'energia gravitacional, i portant a l'estrella a una explosió de supernova (esquerra).
- Les supernoves produeixen els elements químics més pesats que el ferro (com l'or i la plata), expulsen aquests elements a l'espai, on es converteixen en part de noves estrelles, planetes i vida.



Estrelles de neutrons



Púlsar, estrella de neutrons
en el cor de la Nebulosa
del Cranc.

L'energia de rotació
que emet dona energia
a la nebulosa

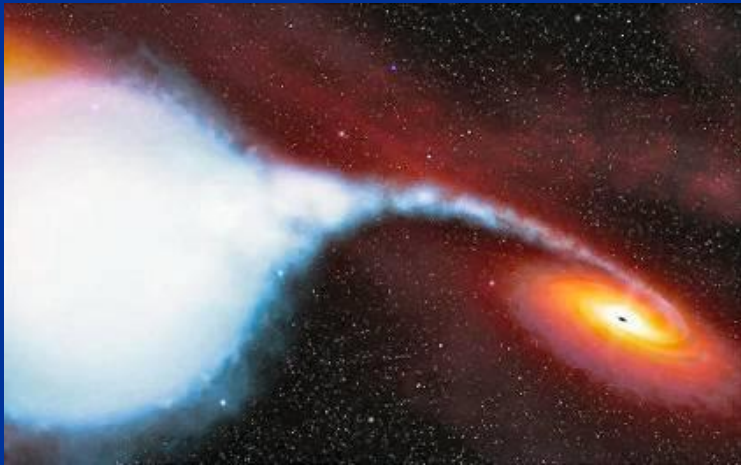
Font: NASA/ESA/HST

- Els nuclis estel·lars amb masses d'entre aproximadament 1,5 i 3 vegades la massa del Sol col·lapsen per convertir-se en estrelles de neutrons al final de la vida.
- Tenen diàmetres d'uns 10 km i densitats trillions de vegades més grans que la de l'aigua.
- Estan fetes de neutrons i partícules exòtiques.
- Les joves estrelles de neutrons giren ràpidament i emeten polsos regulars de radiació ràdio, se les anomena púlsars.



Forats negres

- Un forat negre és un objecte astronòmic la gravetat del qual és tan forta que res pot escapar d'ell, ni tan sols la llum.
- Els nuclis de les poc comuns estrelles massives (més de 30 vegades la massa del Sol) es tornen forats negres quan se'ls esgota el combustible.
- Els forats negres poden ser detectats i “pesats” si una estrella visible està orbitant al voltant d'ells (esquerra).



Concepció artística de Cygnus X-1, una estrella visible (esquerra) amb un forat negre (dreta) en un disc d'acreció

Font: NASA.



Casos especials d'Estrelles variables



Una estrella variable cataclísmica amb una estrella normal (esquerra) i amb una nana blanca (dreta) en un disc d'acreció
Font: NASA

- Molts cadàvers estel·lars (nanes blanques, estrelles de neutrons o forats negres) tenen un estel visible normal orbitant al seu voltant.
- Si el gas de l'estrella normal cau cap al cadàver estel·lar, es forma un disc d'acreció que l'envolta (esquerra).
- Quan el gas cau sobre el cadàver estel·lar, pot esclatar, entrar en erupció, o explotar, aquesta és estrella variable cataclísmica.



El naixement de les estrelles

- Les estrelles es formen en nebuloses, núvols de gas i pols.
- El gas i pols interestel·lar constitueix al voltant del 10% de la matèria en la nostra galàxia.
- Les estrelles més joves es troben generalment en o a prop de la nebulosa de la qual van néixer.
- El més proper i clar exemple d'una "guarderia estel·lar" és la Nebulosa d'Orió (esquerra), a uns 1500 anys llum de distància.



Nebulosa d'Orió (M42)

Font: NASA

Gas interestel·lar



La Nebulosa d'Orió. El gas obté energia de la llum ultraviolada de les estrelles en la nebulosa

Font: NASA

- El gas interestel·lar (àtoms o molècules) pot ser activat per la llum ultraviolada d'una estrella calenta propera, produint una nebulosa d'emissió (esquerra).
- El gas fred, entre les estrelles, produeix ones de ràdio que poden ser detectades pels radiotelescopis.
- El 98% del gas interestel·lar és hidrogen i heli.



Pols interestel·lar

- La pols interestel·lar a prop d'estrelles brillants pot ser detectat a la regió del visible.
- La pols pot bloquejar la llum de les estrelles i el gas darrere d'elles (esquerra). Les estrelles es formen en aquests núvols.
- Només l'1% de la matèria entre les estrelles és pols. Les partícules de pols són d'uns pocs centenars de nanòmetres de mida, i són majoritàriament silicats o grafit.

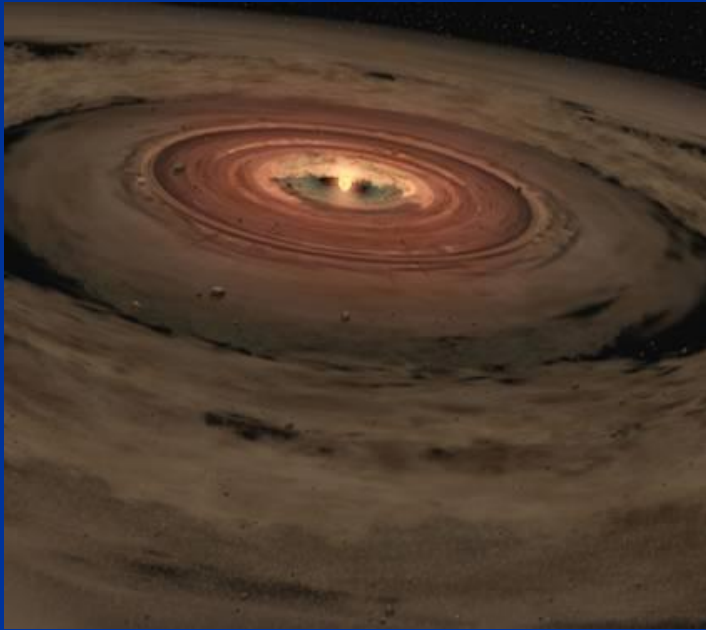


Nebulosa de l'Àguila (M16)
Font: NASA/ESA/HST



Formació d'estrelles

- Les estrelles es formen a partir de parts de nebuloses anomenades nuclis, que són denses o comprimides.
- La gravetat fa contraure als nuclis.
- La conservació del moment angular fa augmentar el gir dels nuclis, que s'aplanen fins transformar-se en discos.
- Les estrelles es formen en els centres dels discos. Els planetes es formen en les parts exteriors, més fredes, del disc.



Concepció artística d'un sistema planetari en procés de formació
Font: NASA

Discos protoplanetaris (Proplyds)

Els sistemes planetaris en el procés de formació



Discos protoplanetaris
en la Nebulosa
d'Orió

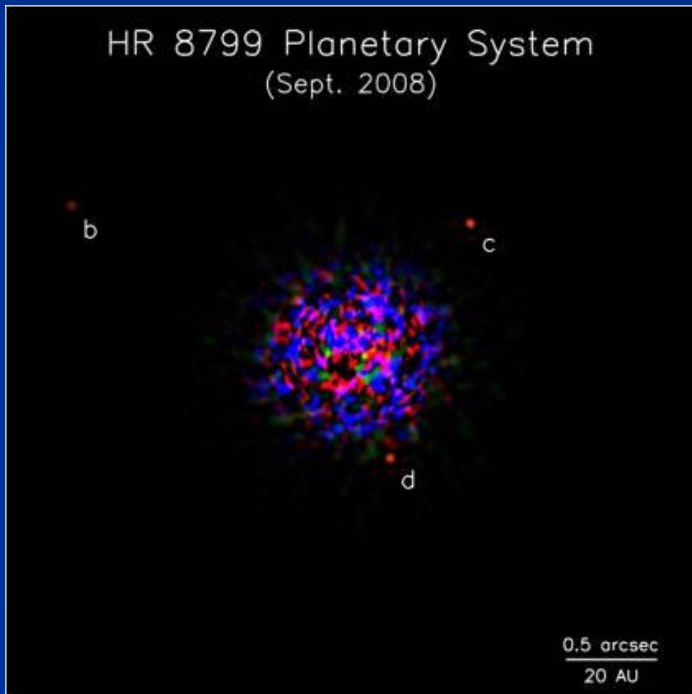
Font: NASA/ESA/HST

- Els discos protoplanetaris han estat observats en la Nebulosa d'Orió (esquerra).
- L'estrella amb prou feines pot ser visible al centre del disc.
- Els de discos de pols bloquegen la llum que hi ha al darrere.
- Aquestes i altres observacions proporcionen una evidència directa de la formació de sistemes planetaris.



Exoplanetes = Planetes extrasolars

Planetes al voltant d'altres estrelles



Sistema exoplanetari HR 8799

Font: C. Marois *et al.*, NRC Canada

- Els exoplanetes normalment són descoberts i estudiats pel seu efecte gravitatori sobre la seva estrella, o pel lleuger enfosquiment d'aquesta si passen per davant d'ella (trànsit).
- Molt pocs han estat captats directament (esquerra).
- A diferència dels planetes del nostre Sistema Solar, molts exoplanetes són enormes i es troben molt a prop de la seva estrella. Això exigeix que els astrònoms modifiquin les seves teories de com es formen els sistemes planetaris.



Consideracions finals

- “La gravetat impulsa la formació, la vida i la mort de les estrelles”[Prof. R. L. Bishop]
- El naixement d'una estrella explica l'origen del nostre Sistema Solar i altres sistemes planetaris.
- La vida de les estrelles explica la Font d'energia que fa possible la vida a la Terra.
- La vida i la mort de les estrelles produeixen elements químics, més pesats que l'hidrogen, dels quals estan fetes les estrelles, els planetes i la vida.
- En la mort d'una estrella, la gravetat produeix alguns dels objectes més estranys de l'Univers: nanes blanques, estrelles de neutrons i forats negres.



Moltes gràcies per
la seva atenció!

