

ASTRONOMIA

NOVETATS SOBRE L'EVOLUCIÓ ESTEL·LAR

Antoni Petit i Deulofeu

RESUMEN

Sabemos que el espacio interestelar no está vacío, sino lleno de masas de gas y polvo. La densidad del gas es solamente de un átomo de hidrógeno por cm^3 y la temperatura se sitúa en menos de 170 grados centígrados. Con este gas y polvo se forman gigantescas nubes que pueden colapsar sobre si mismas.

A medida que la nube gaseosa en condensación se contrae, se calienta y finalmente las altas temperaturas que se manifiestan en su centro (hablamos de unos 10 millones de grados centígrados), alcanzan el punto donde las reacciones de fusión entran en ignición y nace la estrella.

SUMMARY

It's been known that the interstellar space is not empty, but full of gas and dust. The gas density is just a single hydrogen atom per cm^3 and the temperature reaches minus 170 Celsius degrees. With this gas and dust, massive clouds are formed and may collapse to itself.

While the condensing gas cloud shrinks, it heats up and finally the high temperatures in its centre (we are talking about 10 million Celsius degrees), are high enough to reach the point in which fusion reactions ignite and a new star is born.

KEY WORDS: *Convective zone, Radiative zone, Core, Prominence, Flare, Granule, Chromosphere, Photosphere.*

INTRODUCCIÓ

Per un astrofísic, un estel és una bola de plasma molt calenta que es manté íntegre gràcies a la força de la gravetat. La calor i les pressions generades per les reaccions nuclears internes, generalment per la fusió de l'hidrogen per produir heli, eviten que la bola de foc es desplomi per la seva pròpia gravetat. Però els estels també es fan grans i moren quan el seu combustible nuclear s'esgota i l'objecte estel·lar desapareix, ja sigui en forma de nana blanca, d'estel de neutrons o en últim cas com forat negre.

El Sol és un estel de la seqüència principal, de classe espectral G2 i una mica més gran i calent que un estel mitjà. És una immensa esfera de plasma formada

majoritàriament per hidrogen i heli que radia una gran quantitat d'energia a l'espai mitjançant processos nuclears de fusió.

Va formar-se farà uns 4500 milions d'anys, al mateix temps que el sistema solar, i arribarà al final de la seva vida d'aquí a uns 5000 milions d'anys més. Aleshores es convertirà en una gegant vermella i després en una nana blanca.

Tota la matèria del Sol està en forma de plasma per raó de la seva temperatura extrema. Així, el Sol, pot girar més ràpidament a l'equador que en llurs latituds altes, ja que no és un sòlid. La rotació diferencial (segons la latitud) de l'astre causa que les línies del camp magnètic s'entortolliguin amb el temps, provocant la formació de les espectaculars taques i protuberàncies solars.



Figura 1. Estructura del Sol

1. GRANS ESTRUCTURES DEL MEDI INTERESTEL·LAR (MIE)

L'hidrogen, que és l'element més abundant de l'Univers, constitueix el 90% de la massa del gas interestel·lar. Més de la meitat de l'hidrogen es troba en forma molecular (H_2) o està ionitzat sense el seu electró (H_i). El MIE està compost per una mescla extremadament diluïda: amb ions, àtoms, molècules, pols còsmica, rajos còsmics i camps magnètics. Tot això emplena l'espai i s'enquadra dins el medi intergalàctic.

Però solament en una petita fracció de l'espai interestel·lar es troba l'hidrogen en les formes H_2 i H_i ; allà on el medi és relativament dens. Per tant, l'hidrogen escampat per la resta del volum espacial, es troba en la forma d'àtoms individuals.

En els primers estudis sobre aquest tema, es va creure que el MIE es distribuïa en

forma de núvols. Però més endavant, amb els anàlisis gràfics de les ràdiosenyals emeses pel sistema detector, es va posar de manifest que en la seva part més gran, el MIE s'ordenava en vastos embolcalls d'hidrogen neutre.

Diversos mecanismes físics han estat proposats per explicar el seu origen, entre ells es poden citar els efectes combinats dels vents estel·lars en estrelles de gran massa i les explosions de supernoves. Altres mecanismes alternatius considerats són la col·lisió de núvols d'alta velocitat dins el gas de la Via Làctia, les explosions de raigs gamma o la formació d'estels de quarks a partir d'estels neutrònics.

En la figura 2, podem veure que l'estructura GS263-02+45, amb les observacions en la línia de 21 cm de l'àtom H_i , es poden identificar unes varietats de MIE, amb longituds que poden variar des d'unes poques desenes de parsecs¹, fins a centenars de parsecs. En el gràfic podem veure que la dilatació de l'embolcall es realitza a una velocitat d'uns 6 km/s.

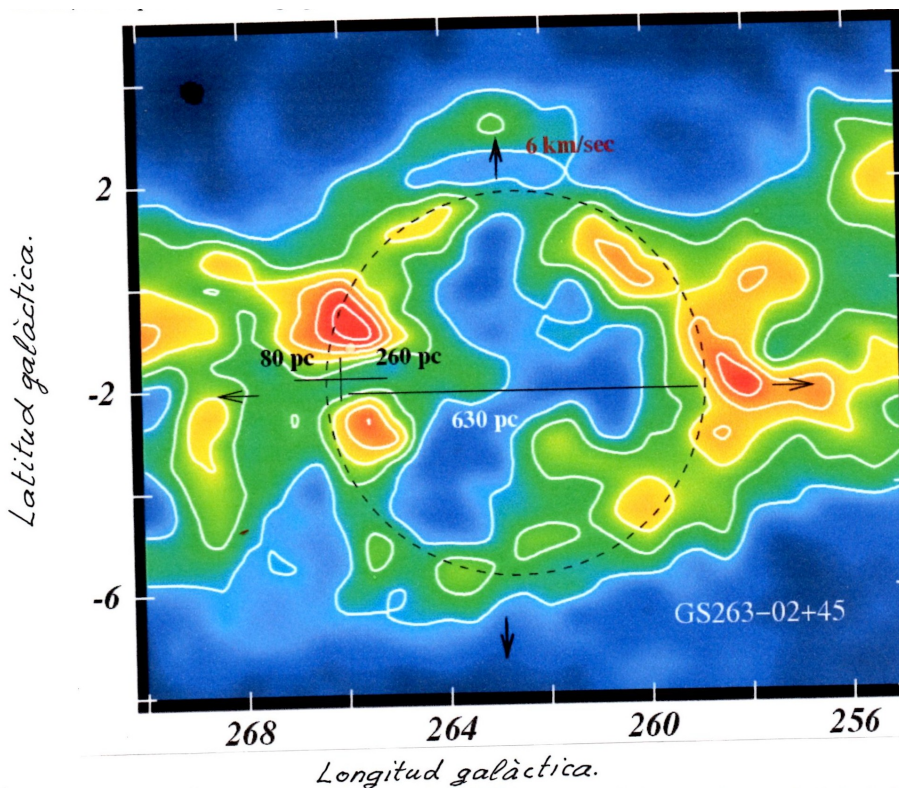


Figura 2. Estructura GS263-02+45

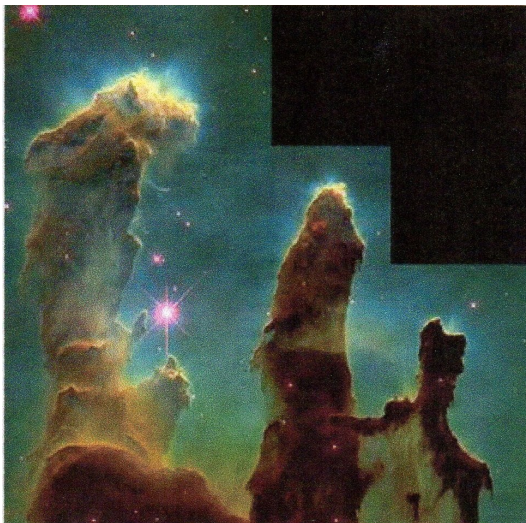
1 1 parsec = $30,8 \cdot 10^{12}$ km

A causa del fregament entre partícules augmentarà la temperatura del gas comprimit per l'acció de la gravetat. Després d'alguns milions d'anys, el gas assolirà una temperatura crítica d'uns 10 milions de graus K, punt en el qual els nuclis d'hidrogen comencen a fondre's en l'interior de la naixent estrella.

Aquesta alliberació de grans quantitats d'energia termonuclear procedent de la combustió de l'hidrogen, detindrà el col·lapse gravitatori de l'estrella, que ulteriorment ja irradiava energia des de llur superfície cap a l'espai, en forma de ones electromagnètiques, incloent també les de la llum visible.

La formació de les estrelles està generalment esquematitzada per tres mòduls principals:

1) Una formació esporàdica en sistemes de petita talla, d'una o poques estrelles.



2) Una formació de grups d'estrelles d'una dotzena a un centenar de membres.

3) Una formació en cúmuls, dins els núvols moleculars gegants, on un gran nombre d'estels neixen dins un sistema dens i gravitacionalment lligat.

Figura 3. Pilars de gas molecular en la nebulosa de l'Àguila. Algunes estrelles estan encara formant-se en el seu interior.

1.1. Formació d'un protoestel

Les estrelles es formen a partir de la fragmentació i condensació d'immensos núvols moleculars de gran densitat i grandària. La metal·licitat del núvol de gas, serà la que posseeixin els estels que el van formar originalment.

Dins de cada un dels fragments del núvol, la gravitació tendeix a acostar cada element de matèria a la zona més densa:

l'energia potencial ($E_p = G \cdot M \cdot m / r$) contracta la matèria al mateix temps que l'escalfa; però l'energia tèrmica ($E_t = 3/2 \cdot k \cdot T$) s'oposa a l'anterior.

Per aquesta raó la condensació gràvida és alentida i el protoestel queda format quan les energies són iguals: $E_p = E_t$

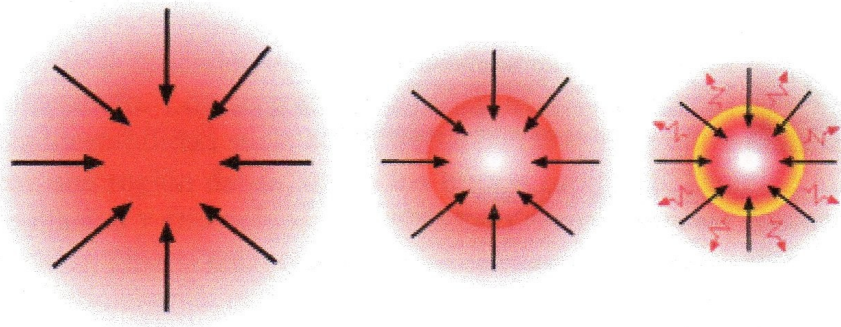


Figura 4. Formació d'un protoestel

Aquest protoestel tindrà una densitat d'uns 100.000 àtoms per cm^3 i en el qual la radiació pot escapar lliurement, evacuant així l'energia resultant de la contracció. La temperatura restarà, doncs, constant i baixa; l'estel en formació resultarà ser una font tèrmica infraroja, que l'observació visual no podrà detectar, però que pot ser observada per detectors apropiats. El radi, en aquest estadi, estarà al voltant de 15×10^9 km.

1.2. Tipus de nebuloses – (Regions H1 i H2)

Els grans núvols d'hidrogen són de tipus diferents, segons la temperatura i la densitat que hi regna, les densitats són febles si les comparem amb les de l'aire terrestre ($2,5 \cdot 10^{19}$ molècules per cm^3). Aquestes regions foren descobertes gràcies a les radiacions intenses que emetien: ratlles de radio de 21 cm (H1), (H2) i ($\text{H}\alpha$) (Veure taula 1).

Components del mitjà interestel·lar	Número de partícules per m^3	Temperatura °K
Nebuloses difuses ionitzades (H II)	$< 10^8$	10.000
Núvols difusos atòmics (H I)	10^6	100
Núvols moleculars	10^9 a 10^{10}	20
Medi inter-nuvolar	3×10^5	6000
Gasos coronals	$< 10^4$	5×10^5

Taula 1. Tipus de nebuloses

Les nebuloses difuses més fredes (de 100 a 200 °K) i menys denses (alguns àtoms per cm^3) són formades per hidrogen neutre i s'anomenen regions (H1). Aquests

núvols emeten en el domini de les ones de radio, una intensa ratlla de 21 cm.

Per les regions (H2), el gas escalfat per els estels calents serà doncs una regió rica en hidrogen ionitzat. La temperatura irà de 5.000 a 10.000 °K i la densitat serà de 50 a 1.000 àtoms per cm³.

En particular l'hidrogen, constituent essencial de les nebuloses, es troba en l'espai, excitat a un nivell (2), que vol dir que estàticament, els electrons no estan pas al nivell (1) fonamental, sinó en el nivell (2) que és on les transicions augmenten.

Dins el visible apareix la sèrie de Balmer, en la qual la ratlla més intensa està dins el color roig (656 nm).



Amb un filtre roig es poden fotografiar totes les parts de la nebulosa que emeten en aquesta ratlla de l'hidrogen. Com que l'hidrogen és el constituent principal del gas, el núvol enter apareixerà de color rosa (figura 5).

El cúmulo i la nebulosa es troben a una distància d'uns 5200 anys llum de la Terra. El cúmulo mesura uns 130 anys llum de diàmetre. La radiació de les estrelles joves exciten els àtoms de la nebulosa fent que emetin radiació, que és el que fa brillar la nebulosa. La massa s'estima en unes 10.000 masses solars.

Figura 5. Nebulosa brillant de la Rosseta (NGC 2237-9).

1.3. Fases de l'evolució estel·lar

Trajectòries evolutives d'estrelles de distintes masses que estan representades en un diagrama de *Hertzsprung-Rusell*.

VLB = Variable Llumina Blava

WR = Estrella Wolf-Rayet

SGB = Supergigant Blava

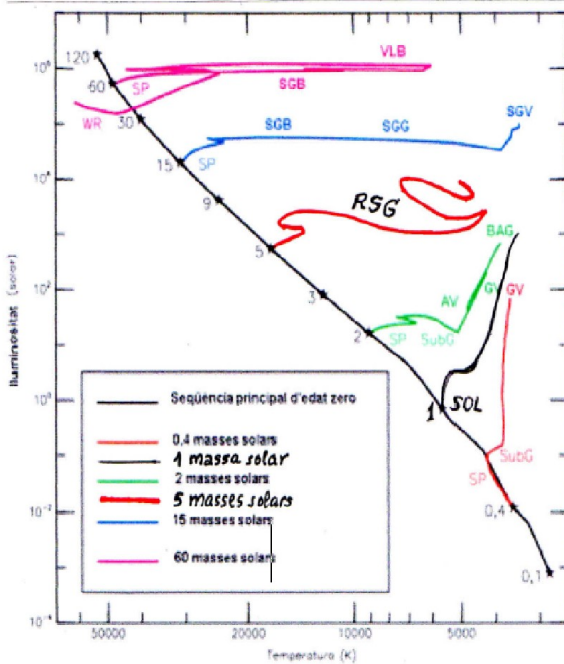
Sub-G = Subgigant Vermella.

SGV = Supergigant Vermella

SGG = Supergigant Groga

RSG = Gigant Vermella

Formades a partir de condensacions interestel·lars, els estels passen la major part de la seva evolució en una llarga etapa d'equilibri en la *seqüència principal*, on llur hidrogen central es transmuta en heli. Així la vida d'un estel es divideix en unes fases desiguals:



a) Una contracció durant 150 milions d'anys forma el *protoestel*.

b) Una fase d'equilibri sobre llur seqüència principal, que durarà uns 10.000 milions d'anys.

c) A continuació vindrà l'estadi de la *gegant roja* que durarà 1.000 milions d'anys i finalment l'astre degenerarà fins l'extinció al cap d'uns 20 milions d'anys.

Figura 6. Diagrama de Hertzsprung-Russell

1.4. Contracció i fragmentació dels núvols interestel·lars

L'evolució d'un núvol depèn dels equilibris entre la gravitació i la pressió d'origen tèrmic que confereix una certa energia cinètica a les partícules:

$$E_c = (3/2) k \cdot T \cdot M/m \quad (1)$$

k = Constant de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T = temperatura del núvol en °K

M = Massa del núvol

m = massa d'un àtom d'hidrogen: $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg

Si el núvol és una esfera de radi R , la seva energia potencial val:

$$E_p = (3/5) \cdot G \cdot M^2/R \quad (2)$$

G = Constant de gravitació.

Aquest núvol contractarà si resulta que $E_p > E_c$, i llavors:

$$0,4 \cdot G \cdot M \cdot m / k \cdot T > R \quad (3)$$

i essent d la densitat del núvol:

$$d = M / 4/3 \cdot \pi \cdot R^3 \quad (4)$$

Llavors resultarà que $R^3 = 3M / 4\pi \cdot d$. I si (n_0) és el nombre de partícules per m^3 , llavors el càlcul serà:

$$M > 3 \cdot 10^4 (T^3 / n_0)^{1/2} = M_J \text{ (en masses solars: } M_\odot) = 50 \times 10^6 M_\odot$$

M_J s'anomena massa de Jeans²

1.5 Estrelles de la pre-seqüència principal

Quan la matèria està completament ionitzada, la temperatura central s'eleva de nou fins arribar a més d'un milió de graus, les reaccions termonuclears seran desencadenades i això es tradueix en un violent alliberament d'energia.

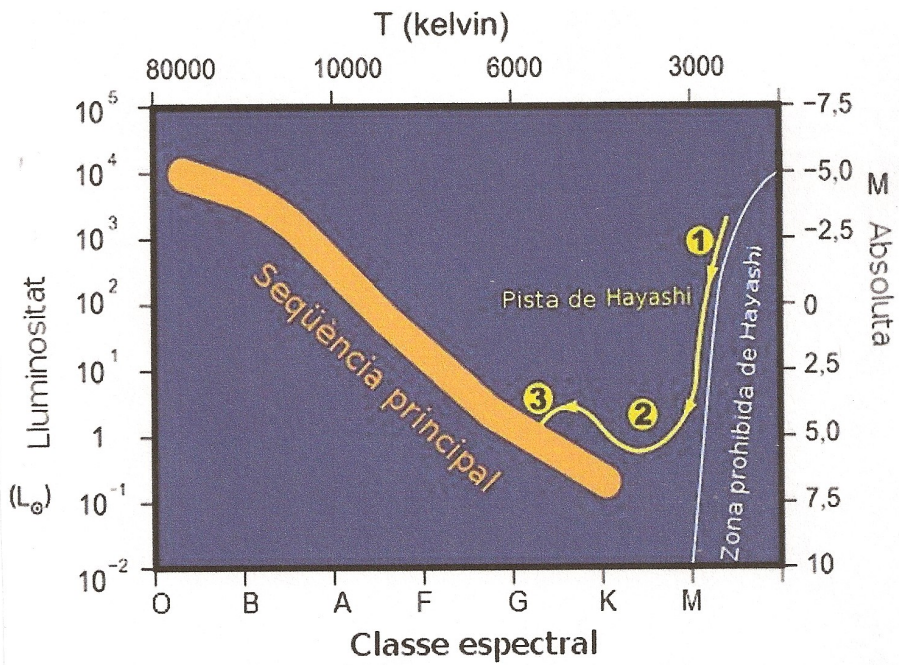


Figura 7. Diagrama estel·lar de Hertzsprung-Russell.

El límit calculat per Chushiro Hayashi (Astrofísic japonès), mostra que el protoestel té una temperatura mínima de l'ordre de 4.000 °K, sigui quina sigui la lluminositat estel·lar. En aquest cas no tractem amb un núvol fosc, sinó amb una

² En honor a Sir James Jeans, astrofísic anglès, que va calcular la massa crítica de la formació d'estrelles l'any 1926.

estrella visible en la qual la temperatura superficial està al voltant dels 4.000 °K; i com que la superfície és gran també ho serà la lluminositat. Aquest tipus d'estrelles s'indiquen amb l'acrònim angles PMS (*pre-main-sequence*), i es divideix en estels variables FU Orionis (amb masses 0,08 Mo i 2 Mo.), i estrelles Herbig Ae/Be (2 a 8 Mo). No existeixen estrelles PMS més massives de 8 masses solars.

L'estrella PMS segueix un trajecte característic al diagrama H-R, conegut com pista de Hayashi, durant el qual continua contraient-se fins assolir el *límit d'Hayashi*.

Després, les estrelles amb menys de 0,5 Mo assoliran la seqüència principal, i les estrelles més massives al final de la pista de Hayashi, patiran un lent col·lapse en una condició propera a l'equilibri hidrostàtic; seguint en aquest punt un camí en el Diagrama H-R anomenat pista d'en Henyey.

Les estrelles T Tauri són similars al Sol en massa i temperatura, però són algunes vegades més grans en termes de diàmetre, i a causa del radi seran més lluminoses. Es caracteritzen per l'alta velocitat de rotació, típica de les estrelles joves i posseeixen els camps magnètics extremadament intensos, que atrauen el gas veí xuclant-lo al llarg de les línies de camp provocant erupcions massives que estenen les taques solars a la fotosfera. Els estels T Tauri tenen també emissions de raigs X i de ràdio molt intenses i variables, prop de 1.000 vegades superiors a les del Sol.

Aproximant l'estrella a un cos negre ideal, la seva lluminositat (L) és directament proporcional al radi (R) i a la temperatura superficial T_{rf} . Aquests paràmetres relacionats entre si, donen l'equació:

$$L = 4\pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_{rf}^4$$

on ($4\pi \cdot R^2$) indica la superfície radiant de l'estrella i (σ) la constant de Stefan-Boltzmann.

1.6. Seqüència Principal

L'estel en equilibri pertany a la seqüència del diagrama H-R i allibera, per radiació a la superfície, l'energia produïda en el seu centre. Aquest estadi és el més llarg de la vida d'un estel, d'algunes centenes de milions d'anys per a les estrelles blaves massives i lluminoses, i fins algunes desenes de mils de milions d'anys per a les estrelles roges. Es mostra que les estrelles comencen llur evolució després de la seqüència principal vers l'estadi de les gegants roges, en el moment que elles han consumit la massa crítica d'hidrogen que ocupa la zona convectiva al voltant del nucli: aquesta massa comprèn al voltant d'un 0,07 de la massa total de l'estel.

Tipus espectral	Radi R/R _o	Massa M/M _o	Lluminositat L/L _o	Temperatura °K
O2	19,00	120,00	2000000,000	49.000
O5	10,00	35,00	225000,000	39.000
B0	8,00	17,00	40000,000	29.000
B5	5,00	5,40	1200,000	15.200
A0	3,60	2,80	100,000	9.600
A5	3,20	2,40	55,000	8.700
F0	2,70	1,85	18,000	7.200
F5	2,00	1,45	6,000	6.400
G0	1,24	1,12	1,240	6.000
G2	1,00	1,00	1,000	5.800
G5	0,88	0,90	0,640	5.500
K0	0,78	0,80	0,370	5.150
K5	0,60	0,60	0,150	4.450
M0	0,34	0,40	0,025	3.850
M5	0,18	0,12	0,004	3.200

Taula 2. Dades de la seqüència principal

1.6.1. Durada de la vida nuclear de les estrelles

La durada d'aquesta etapa es correspon amb la durada necessària perquè l'hidrogen del centre de l'estel es transmuti completament en heli. Aquesta massa d'hidrogen molt calent i comprimit a l'ésser transmutat en heli, és proporcional a la massa M' de l'estel i el seu valor aproximadament de (M'/10). Així per 1 kg d'hidrogen consumit, una massa de 0,007 kg és transformada en una energia igual a $0,007 \cdot c^2$.

L'energia global que disposa l'estrella serà igual a:

$$E_T = M'/10 \cdot (0,007 \cdot c^2) = M*/10 \cdot 6,4 \cdot 10^{14} \text{ Jouls}$$

c = veloc. de la llum

Si L és l'energia mitjana irradiada per segon, la durada de vida de l'estrella (D) serà igual a:

$$D = E_T / L \text{ (expressada en segons)}$$

L, està expressada a partir de la magnitud absoluta: $M = -2,5 \cdot \log L + \text{constant}^3$

$$\log L/L_o = 3,45 \cdot \log (M' / M_o)$$

essent $L_o = 3,83 \cdot 10^{26}$ Watts, tenim que $M_o = 2 \cdot 10^{30}$ kg

3 Veure la relació Massa-Lluminositat mitjana, en el diagrama HR.

$$\text{La durada (en anys)} = 10,6 \cdot 10^9 \cdot (M' / M_{\odot}) / (L / L_{\odot})$$

Podem utilitzar:

$$\text{Log}(D) = 10 - 2,45 \cdot \text{log}(M'/M_{\odot}), \text{ o alternativament,}$$

$$\text{Log}(D) = 10 - 0,71 \cdot \text{log}(L/L_{\odot})$$

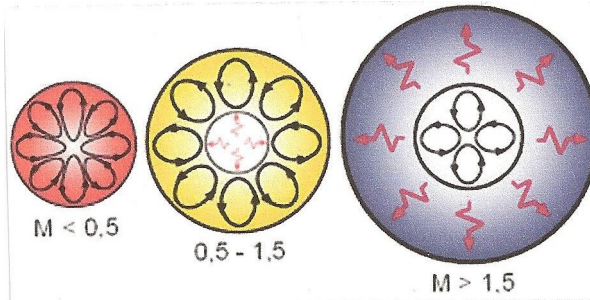


Figura 8. Esquema de tipus d'estrelles en llur seqüència principal.

1.6.2. Reaccions de síntesis de l'heli

L'energia d'un neutrí en la primera reacció del cicle protó-protó és igual al voltant de 0,42 Mev. En la reacció del cicle de Bethe el carboni i el nitrogen juguen el rol de catalitzadors.

Tipus de reacció		Energia alliberada en MeV	Durada de la reacció
Cicle (P-P) Protó-protó	${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$	1,44	$14.000 \cdot 10^6$ anys
	${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5,49	5 segons
	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H}$	12,85	1 milió d'anys
Cicle del Carboni (CNO)	${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	1,95	$13 \cdot 10^6$ anys
	${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^+ + \gamma$	1,37	7 minuts
Cicle de Bethe	${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	7,54	$2,7 \cdot 10^6$ anys
	${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	7,35	$320 \cdot 10^6$ anys
	${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu$	1,86	82 segons
	${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$	4,96	110.000 anys

Taula 3. Reaccions de síntesi de l'heli

Segons els càlculs teòrics la relació entre l'energia despresa per 1 kg de matèria per segon d'una part i la temperatura i la densitat per una altre, es pot escriure:

$$E_{pp} = 10^{-6} \cdot \rho \cdot X^2 \cdot (T/10^6)^4 \cdot W/\text{kg} \quad (5)$$

on X és la concentració relativa d'hidrogen segons la massa.

Posant $T = 14 \cdot 10^6$ K: $\rho = 10^5$ kg/m³ i $X = 0,8$ obtenim finalment:

$$E_{pp} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ W/kg}$$

Es pot comprovar que només amb la dècima part de l'energia que dona el Sol en la zona de les reaccions termonuclears, ja es garanteix llur lluminositat durant mils de milions d'anys.

En el cas del cicle del carboni la fórmula anàloga a la (5) serà:

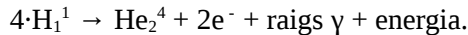
$$E_{CNO} = 6,6 \cdot 10^{-24} \cdot \rho \cdot X_{pp} \cdot X_{CNO} (T/10^6)^{20} \text{ W/kg (6)}$$

Però ($X_{CNO} = 0,003$), i operant amb la fórmula resultarà:

$$E_{CNO} = 10^{-10} \text{ W/kg}$$

Queda, doncs, clar que en el nostre Sol el rol principal en el despreniment d'energia esdevé en les reaccions del cicle protó-protó. Les reaccions produeixen la suficient energia per explicar la radiació estel·lar observada i utilitzant els elements atòmics suficientment abundants per alimentar aquesta reacció en el curs del temps, la qual és la transmutació exotèrmica de l'hidrogen al convertir-se en heli, fusió que opera seguint la reacció global:

$$H_1^1 = 1,00813$$



$$4 \text{ unitats massa protó} = 4 \cdot 1,00813 = 4,03252$$

Massa del heli: 4,00389

Pèrdua de massa en la reacció: $4,0325 - 4,00389 = 0,02863$

$$\Delta m / m = 0,02863 / 4,0325 = 0,0071 \text{ kg.}$$

Així doncs 1 kg de H transmutat en He s'acompanya amb una pèrdua de massa de 0,0071 kg i aquest valor transformat en energia resultarà:

$$E = c^2 \cdot \Delta m = 9 \cdot 10^{16} \cdot 0,0071 = 6,39 \cdot 10^{14} \text{ Jous (7)}$$

Ara aplicant la fórmula resultarà:

$$E = \text{massa} \cdot 9 \cdot 10^6 \text{ (m/seg.)} = \text{Wats/s}$$

En conseqüència resulta que la transmutació d'una unitat de H solar en He, amb un 0,02863 de massa excedent, representa l'alliberació d'una energia de 173.600 kwats/h. Tal despreniment d'energia s'efectua a expenses de la massa solar, la qual perd per segon unes 4.200.000 Tones de massa.

2. ESTRUCTURA DEL SOL

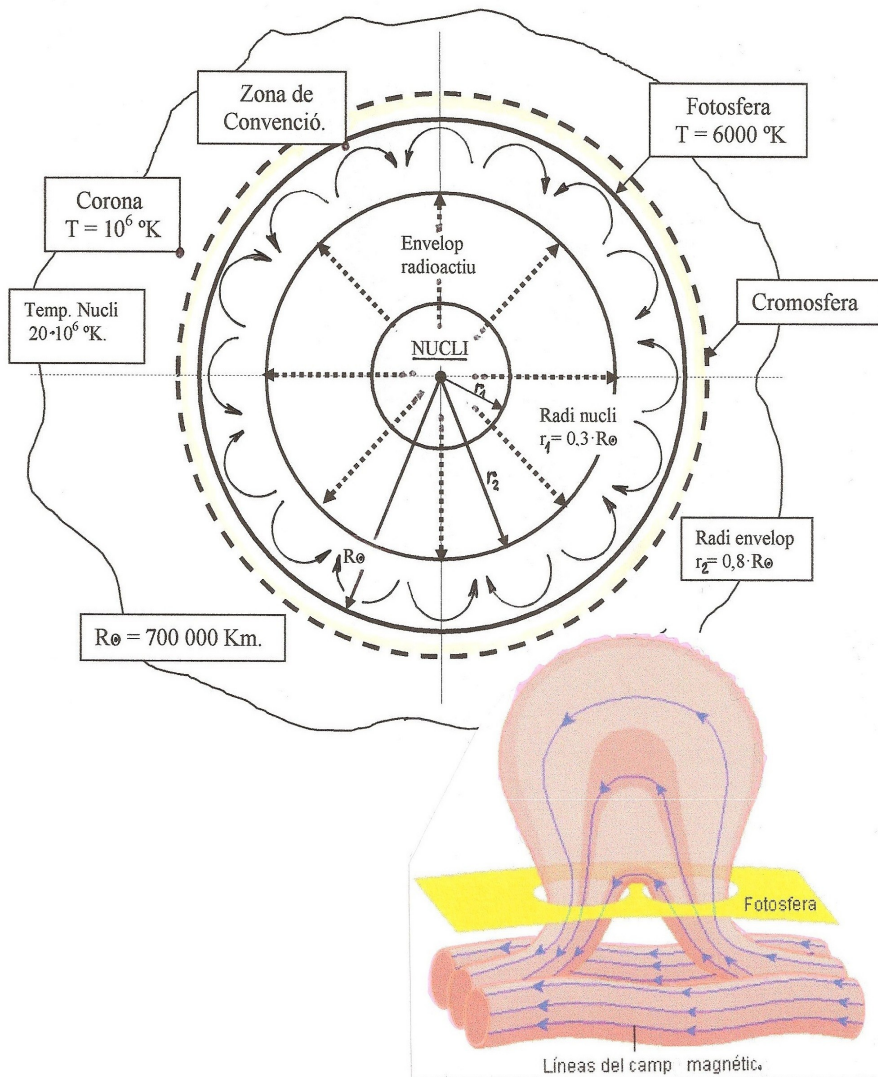


Figura 9. Esquema de l'estructura d'un estel de tipus solar.

Com a conseqüència de les densitats elevades que regnen en el sí del Sol, aquests processos d'absorció i readmissió són freqüents des de fa milions d'anys, perquè aquesta energia, sota la forma de radiació, emergeix cap a la superfície de l'astre.

A més, aquesta energia s'acompanya amb una fragmentació progressiva, però amb una energia més feble. Un simple càlcul ens pot mostrar que un sol impuls gamma produeix alguns milions d'impulsos que surten de la superfície solar. Les capes de

matèria solar absorbint la llum s'escalfen i en la readmissió es tornen a refredar. En un estat d'equilibri, la quantitat de energia emesa per la capa és semblant a aquella que ha absorbit, i perquè el flux d'energia que surt de les capes internes sigui constant, serà necessària que la temperatura de cada capa subjacent sigui més elevada. La quantitat d'energia transmesa des d'una capa a l'altra es determina a partir del coeficient d'absorció.

Com més gran és aquest coeficient, menys energia rep la capa subjacent i, per tant, la diferència de temperatures entre les capes és més gran.

2.1. La corona solar

La corona solar és la part externa de l'atmosfera del Sol, que s'estén més enllà de un milió de km i s'endinsa en l'espai interplanetari; aquests fenòmens poden observar-se en els eclipses totals o utilitzant un aparell denominat coronògraf.

Avui en dia sabem que llur densitat és extremadament tènue, ja que és un bilió de vegades inferior a l'atmosfera terrestre. Però, en canvi, és extremadament calenta: la seva temperatura pot arribar a aconseguir els 2 milions de graus. Contràriament la fotosfera solar no arriba als 6.000 °C.

En la figura 10 podem veure que els rínxols coronals constitueixen l'estructura bàsica de la corona solar inferior i de la regió de transició del Sol. La difusió d'aquests rínxols està directament lligada als cicles solars.

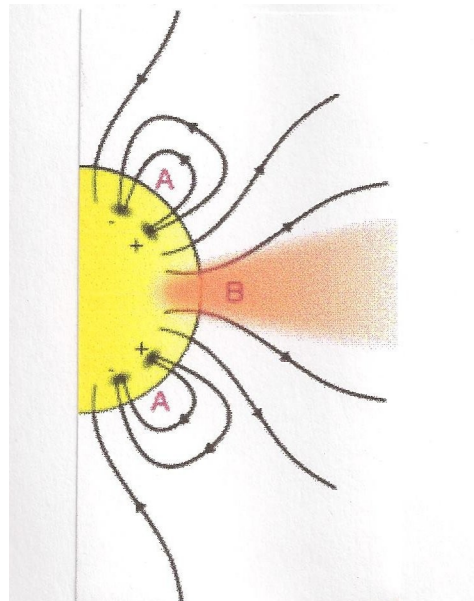


Figura 10. Arcs coronals connecten regions de polaritat magnètica oposada (A) amb el camp magnètic unipolar en l'orifici coronal (B).

El mecanisme ha de ser prou estable per continuar alimentant la corona amb el plasma cromosfèric i prou potent per accelerar i, per tant, escalfar el plasma des dels 6.000 °K fins per sobre d'1 milió de °K, en la curta distància des de la cromosfera i la zona de transició fins la corona. Per tant, el plasma serà d'origen cromosfèric i es tracta, doncs, d'una energització cromosfèrica més un fenomen

d'escalfament coronal.

En el gràfic (figura 11) es pot veure la relació existent entre temperatura i densitat en funció de l'altura per sobre de la cromosfera en km.

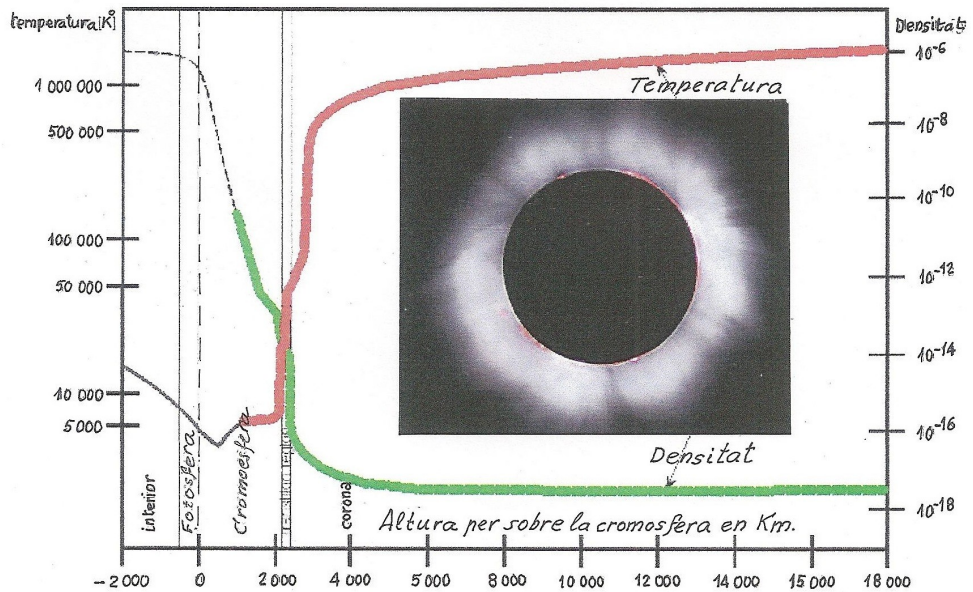
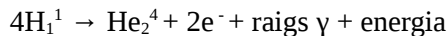


Figura 11. Fotografia d'un eclipsi solar a França (11 d'agost de 1999)

2.2. Reaccions en el nucli del Sol

Les reaccions produeixen la suficient energia per explicar la radiació estel·lar observada i, utilitzant els elements atòmics suficientment abundants, alimentar aquestes reaccions en el curs del temps. Aquesta transmutació exotèrmica de l'hidrogen al convertir-se en heli opera seguint la reacció global següent:



i tal com hem calculat a l'apartat 1.5.2, es produeixen:

$$E = c^2 \cdot \Delta m = 9 \cdot 10^{16} \cdot 0,0071 = 6,39 \cdot 10^{14} \text{ J/kg}$$

com que el Sol irradia a raó de $3,8 \cdot 10^{26}$ Joules per segon, significa que cada segon es cremem 593,75 milions de tones en el nucli del Sol:

$$3,8 \cdot 10^{26} / 6,4 \cdot 10^{14} = 5,9375 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}$$

Una fracció d'aquesta massa és transformada en energia, que és la que ens envia el Sol en forma de llum i calor:

$$\Delta m_1 = 0,0071 \cdot 594 \cdot 10^6 \text{ tones} = 4,2 \text{ milions de Tones}$$

I calculat d'una altra forma:

$$\Delta m_1 = E_0 / c^2 = 3,8 \cdot 10^{33} / 9 \cdot 10^{16} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Tones}$$

Els paràmetres principals de l'estat d'una estrella són la seva lluminositat (L), la seva massa (M) i el radi (R). Els seus valors es solen expressar en unitats solars:

$$L_0 = 3,86 \cdot 10^{26} \text{ Wats}, M_0 = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}, \text{ i } R_0 = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$$

El quadre general de l'evolució de les estrelles es pot simplificar de la següent manera:

1. Condensació de pols i gas ric en hidrogen.
2. Etapa d'evolució, amb el període de les reaccions termonuclears (H → He).

Quan en el centre s'ha acabat l'hidrogen, el nucli es contrau i es recalenta. L'estel es transforma en una gegant roja i després comença la combustió dels elements més pesants i el procés sol acabar amb l'explosió de l'envoltura d'hidrogen, la qual formarà una nebulosa planetària. El romanent que queda al final es refreda i passa a l'estat de nana blanca.

En el gràfic de la figura 12 es presenta el resum de la trajectòria de l'estel en relació al temps⁴.

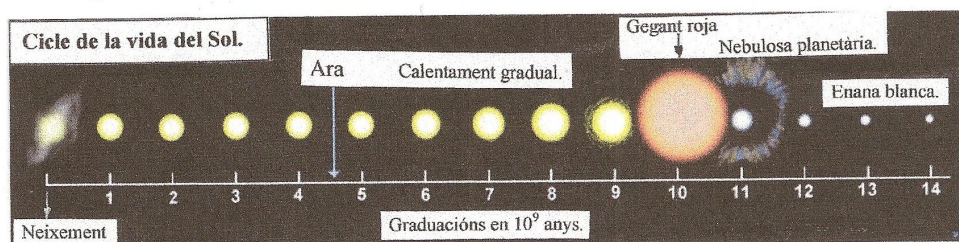


Figura 12. *Cicle de vida d'un estel solar respecte del temps*

La durada de l'etapa de la seqüència principal es correspon amb la durada necessària perquè l'hidrogen en el centre de l'estrella és transmuti completament en heli. El càlcul d'aquesta durada de vida nuclear es desenvolupa de la mateixa forma que es fa en el Sol.

4 Per ampliar més aquest procés, podeu consultar l'article *Un estel anomenat Sol* (PETIT, 1992)

2.3. Compendi del procés i fases dels esdeveniments en relació al temps

Fase	Durada després de la formació del Sol	Esdeveniments
Sistema pre-Solar	10 ⁹ anys abans de la formació del sistema solar	Les generacions precedents d'estels viuen i moren injectant els elements pesants dins el mitjà interestel·lar, a partir del qual el sistema solar es formarà.
	50 milions d'anys abans de la formació del sistema solar	El sistema solar es forma en un planter d'estels, tals com la nebulosa d'Orió. Els estels més massius formaran llur vida i moriran finalment en les explosions de supernova.
Formació del Sol	En els següents 100.000 anys	La nebulosa pre-solar es forma i comença a esfondrar-se sobre ella mateixa. El Sol comença a formar-se.
	De 100.000 a 50 · 10 ⁶ anys més	El Sol és un proto-estel tal com T Tauri.
	Uns 10 · 10 ⁶ anys més	Es formen els planetes exteriors. Després de 10 milions d'anys, els gasos continguts en el disc proto-planetary ha estat llançat lluny i la formació de planetes exteriors està quasi acabada.
	Uns 100 · 10 ⁶ anys més	Es formen els planetes tel·lúrics i les llunes. Gegantescos impactes tenen lloc entre els cossos. L'aigua està dipositada sobre la Terra.
Seqüència principal	Uns 50 · 10 ⁶ anys més	El Sol esdevé una estrella de la seqüència principal.
	200 · 10 ⁶ anys més	Es formen les roques més velles de la Terra.
	Fins a uns 600 · 10 ⁶ anys més	La ressonància de les òrbites de Júpiter i Saturn desplacen Neptú cap al cinturó de Kuiper. Un gran bombardeig tardiu té lloc en el sistema solar intern.
	Uns 800 · 10 ⁶ anys més	La forma de vida més antiga coneguda apareix sobre la Terra.
	4.600 · 10 ⁶ anys més	Avui en dia el Sol resta com estel de la seqüència principal. Esdeveniments cada cop més calents i lluminosos a un ritme d'un 10 % cada 1.000 milions d'anys.
	6.000 · 10 ⁶ anys més	La zona habitable del Sol surt de l'òrbita terrestre, lliscant potser fins a Mart, el qual haurà ampliat l'òrbita.
	7.000 · 10 ⁶ anys més	La via Làctia i la galàxia Andròmeda entren en col·lisió. És possible que el sistema solar sigui capturat per Andròmeda abans que les galàxies es fusionin completament.
Post-seqüència principal	Fins a uns 12.000 · 10 ⁶ anys	El Sol comença a cremar l'hidrogen dins l'envolvent del seu nucli, concluint llur vida d'estrella de seqüència principal. El Sol comença a seguir la branca de les gegants roges (veure diagrama H-R). Esdevé molt més lluminós i gran baixant la seva temperatura fins 2.600 °K. El Sol és ara una gegant roja, englotirà Mercuri i Venus i, eventualment, la Terra quedarà recremada.

	12.000 10 ⁶ anys més	El Sol esdevé una estrella ardent d'heli, travessant les fases de la branca asimptòtica de les gegants. Perdrà al voltant d'un 30 % de llur massa dins totes les fases de la seqüència principal. La branca asimptòtica de les gegants acaba amb l'ejecció d'una nebulosa planetària, deixant el nucli del Sol darrere d'ella sota la forma d'una nana blanca.
Les restes del Sol	El procés total en 10 ¹⁵ anys	La nana blanca solar no produeix ja cap energia, continuament se anirà refredant fins esdevenir una nana negra. La gravetat de les estrelles pròximes deslligarà als planetes de les seves òrbites. El sistema solar deixarà d'existir.

2.4. Problemes amb el neutrí solar

L'enorme espessor òptic de la matèria solar el fa opac per totes les formes de la radiació electromagnètica. Les reaccions termonuclears del nucli, fa milions d'anys que flueixen cap a l'exterior portant en el seu sí els quàntums durs energètics.

A diferència de la radiació normal, els neutrins són uns indicadors perfectes per detectar les condicions internes en el sí del Sol. Però la seva interacció amb la matèria és molt feble i per tant representen el millor útil per rendir compte dels processos de generació d'energia dins l'astre solar. Pràcticament les observacions dels neutrins són l'únic mitjà per penetrar a l'interior del nucli del nostre astre.

Els neutrins són produïts per les reaccions termonuclears. La síntesi d'un nucli d'heli forma 2 neutrins i consumeix una energia tal com:

$$\Delta E = 4 \cdot 10^{12} \text{ Jous}$$

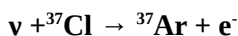
El nombre total dels neutrins produïts per segon serà, doncs:

$$N = 2 L_o / \Delta E = 10^{39}$$

I la densitat del seu flux sobre la Terra serà de:

$$F = 4N / \pi \cdot a^2 = 10^{15} \text{ l/m}^2 \cdot \text{s}$$

Però encara que el flux de neutrins és important, és molt difícil mesurar-los, ja que llur interacció amb la matèria és molt feble. Una experiència ha estat proposada per desacelerar els neutrins solars arran de la seva absorció per un isòtop estable com ara el clor (³⁷Cl), amb el qual la reacció serà de la forma:



Les observacions han pogut descobrir d'isòtop inestable de l'argó (³⁷Ar) que apareix en aquestes condicions. Aquesta reacció ha estat utilitzada per crear un detector de neutrins, constituït per un gran dipòsit ple de perclorur d'etilè (C₂Cl₄), emplaçat dins un profund pou, per reduir sensiblement la influència dels raigs còsmics sobre la marxa de la reacció.

KAMLAND. Aquest serà el nou i gran detector de neutrins que s'està construint, a través d'una col·laboració internacional entre Hongria, el Japó i els Estats Units. Aquest detector, situat a l'illa japonesa de Honshu, estudiarà una àmplia gamma de la física de partícules, la Geofísica i l'Astrofísica.

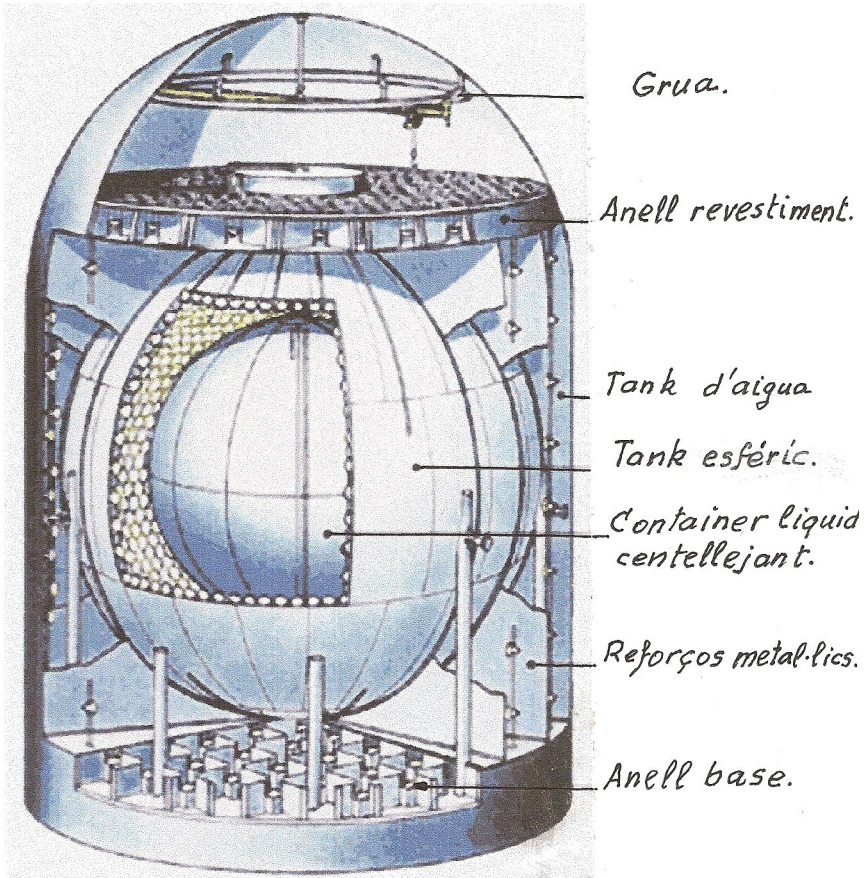


Figura 13. Detector de neutrins Kamland

L'ampli espectre d'energies d'antineutrins emesos pels fragments de fissió, rics en neutrons d'un reactor té un màxim d'uns 3,5 MeV.

2.5. Magnetisme planetari

El camp magnètic de la Terra que forma la magnetosfera terrestre s'estén a uns 70 – 80·10⁶ km en la direcció del Sol i a molts milions de quilòmetres en el sentit

contrari. En l'espai circumterrestre el camp magnètic forma una trampa magnètica per les partícules carregades d'altres energies denominat cinturó de radiació.

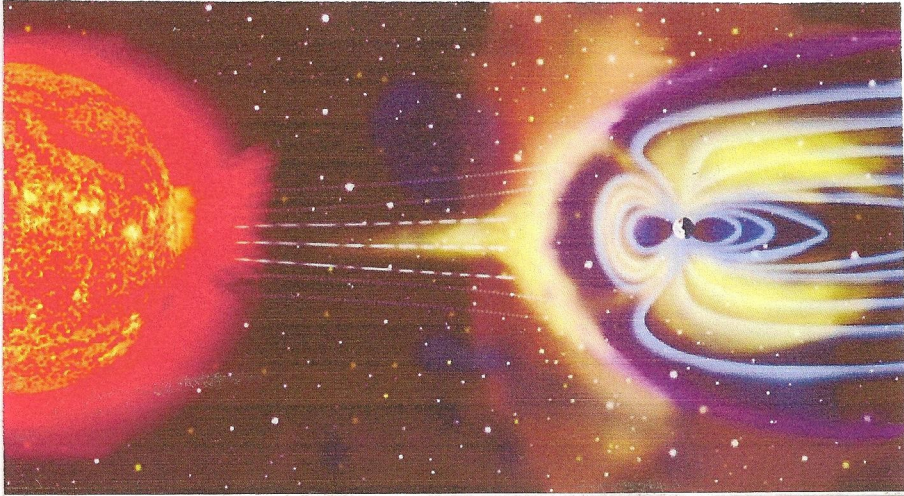


Figura 14. Visió de la magnetosfera terrestre.

La magnetosfera, que es comprimeix durant el dia a causa de les forces de les partícules que incideixen en ell, protegeix la superfície de la Terra de les partícules carregades del vent solar. El camp magnètic interplanetari és fonamentalment el camp del vent solar (plasma en expansió contínua de la corona solar).

El vent solar és un flux de partícules que sorgeixen de l'atmosfera de l'estrella, en bona part protons d'alta energia, d'uns 500 keV. En les immediacions de l'òrbita terrestre el camp interplanetari és de: 10^{-4} a 10^{-5} Oe⁵

Les línies de força del camp magnètic interplanetari tenen la forma d'espitals d'Arquímedes i aquest camp segueix la mateixa forma d'espital en les parts del nord i sud de l'heliosfera, però en direccions oposades. Aquests dos dominis magnètics, estan separats per dues làmines de corrent (un corrent elèctric confinat en un pla corbat).

Aquesta làmina de corrent helioesfèrica agafa la forma similar a la de la faldilla d'una ballarina, i canvia llur forma en dependència del cicle solar. El camp magnètic solar s'inverteix cada 11 anys.

5 $1 \text{ Oe} = 103/4\pi = 75,577 \text{ A/m}$

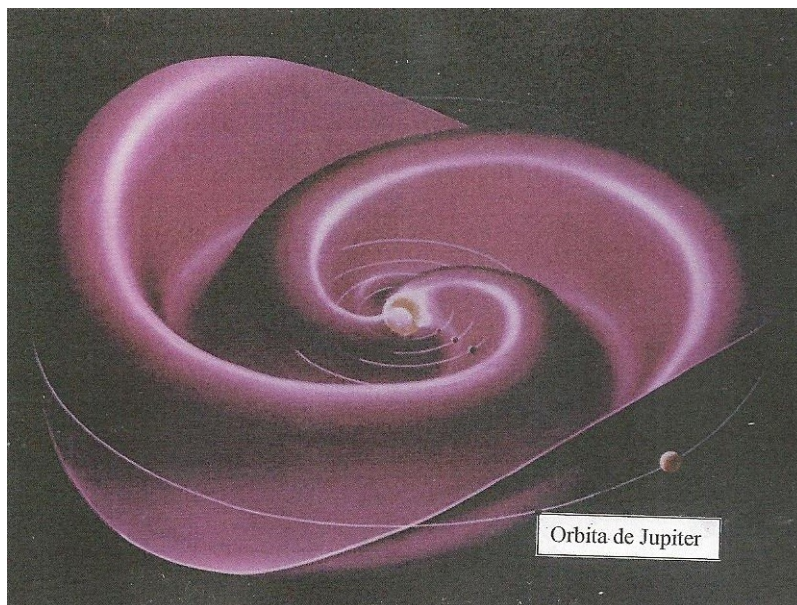


Figura 15. Suposada visió de les línies de força del camp magnètic solar.

3. COM VA NÉIXER EL NOSTRE SOL?

Un equip de cosmo-químics francesos del *Museum National d'Histoire Naturelle de Paris*, van estar 15 anys estudiant per aconseguir reproduir els primers moments de la naixença del nostre Sol. Efectivament ara farà 4.600 milions d'anys el nostre estel va emergir del seu capoll de gasos, en la perifèria d'un altre estel massiu generador, en algun cantó de la Via Làctia. Vegem les pautes seguides:

- a) Farà $4.600 \cdot 10^6$ anys, un gegantesc núvol de gas s'esfondra sota l'efecte de la gravitació. En el cor d'aquell vòrtex, la polseguera aglutinada en enormes boles de matèria, donaven pas a la formació d'unes 5.000 estrelles de gran massa.
- b) 8 milions d'anys més tard l'explosió dels estels de gran massa en forma de supernoves van enriquir el conjunt del gas interestel·lar i aquestes explosions van dispersar els elements radioactius. Entre ells destaca l'isòtop de ferro 60 (^{60}Fe) que en principi no tenia explicació fins aquell moment.
- c) Al cap de 2 milions d'anys més una segona generació d'estels neix i en aquest punt es posa a bufar un vent de matèria. El ^{60}Fe proveeix a una gran guarderia estel·lar, en la qual noves estrelles s'enriqueixen. Però elles també es barrejaran amb l'alumini 26 (^{26}Al) i d'aquest element els astrofísics tampoc poden trobar explicacions de la seva presència.



Figura 16. Pauta de l'estructura còsmica del naixement d'un estel massiu.

d) Passen 100.000 anys més i el nostre primerenc Sol s'adjunta a la perifèria d'una d'aquestes estrelles massives. Un vent furiós carregat de partícules de ^{60}Fe i ^{26}Al , comprimeix la matèria que l'envolta.

e) A continuació es forma una mena de closca de gas i polseguera que acaba per esfondrar-se sobre si mateix. Aquesta estructura còsmica donarà naixença a una tercera generació d'estels, i entre aquests, el nostre Sol naixerà, així com un centenar de germanes bessones.

Passaran alguns milions d'anys més i l'estrella que és l'origen del nostre astre, s'extingirà en una explosió gegantesca i posteriorment les seves germanes es dispersaran pels confins de la Via Làctia.

El Sol restarà sol, però els asteroides que l'envolten guardaran la traça de llur genealogia primordial sota la forma de derivats de l'alumini 26 i del ferro 60.

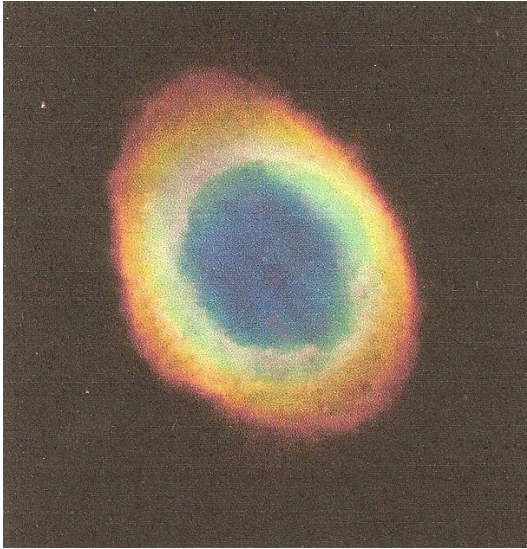
L'equip de cosmo-químics no en dubtaran pas, ells han trobat la història de la naixença del Sol. Aquest fenomen és una prova més que el nostre sistema solar no pot ser únic. Aquest estudi ha estat, per tant, una bona nova per als que busquen vida extraterrestre ⁶.

3.1. Nebuloses planetàries

Aquestes nebuloses estan associades a un estadi final de l'evolució estel·lar. De fet aquests objectes estan constituïts per un embolcall ejectat per una estrella degenerada que es diluirà per l'espai en el curs d'uns 40.000 anys.

L'astre central, de massa equivalent a la del Sol, se suposa que ha ejectat una cinquena part de llur massa. L'estrella està en rotació i sens dubte és la seu d'un camp magnètic.

⁶ Per a qui l'interessi aprofundir en aquesta teoria, estan disponibles uns vídeos que simulen l'esfondrament de núvols de gas que va seguida per la formació d'estels: www.astro.ex.ac.uk/peopl/mbate/Animation



Les nebuloses planetàries són d'unes dimensions de 0,01 pc. a 1 pc⁷, i de formes diverses: disc més o menys estès amb anell simple o doble, en forma d'hèlix, ... Al voltant de 1.300 nebuloses planetàries han estat identificades fins ara a la nostra galàxia.

Figura 17. La nebulosa de l'anell. Una nebulosa planetària com la que el Sol pot arribar a ser en un futur llunyà.

En el següent gràfic (figura 18) es mostra l'abundància de tots els elements comuns en la fotografia del Sol, on es pot veure que l'oxigen és més abundant que els elements pesants (o metàl·lics), i en canvi és 1.000 vegades més rar que l'hidrogen.

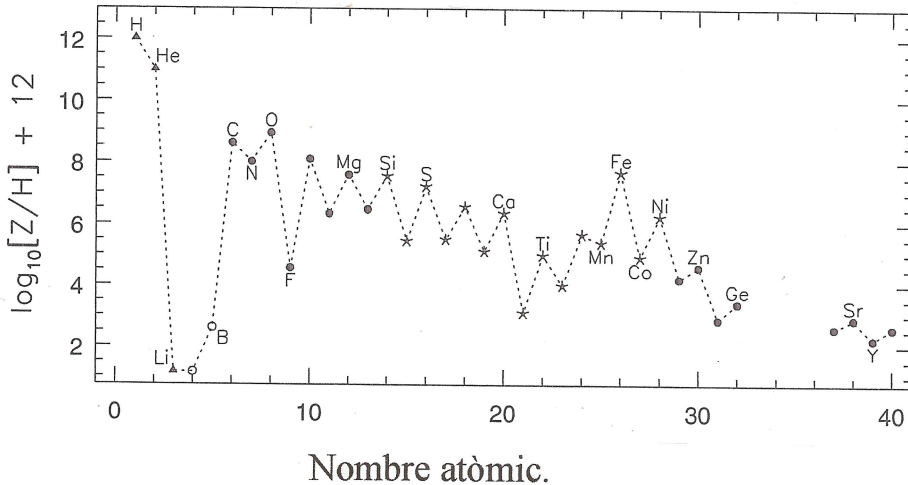


Figura 18. Abundància d'elements comuns al Sol.

La fracció de massa dels elements metàl·lics es denota per Z, l'abundància dels quals en el Sol és de (Z₀ = 0,02). El gràfic dona el logaritme del nombre d'àtoms de cada element trobat en el Sol, però considerant que està en funció de la següent relació: H = 10¹²

⁷ 1 pc. = 30 bilions de km.

3.2. Els neutrins: partícules increïblement discretes⁸

Els neutrins formen una nombrosa família en el model estàndard molt difícils de detectar. Hi ha 6 tipus principals: neutrònics, electrònics, muònics i llurs 3 antipartícules associades, tots de massa molt petita ja que el més pesant és 10 milions de vegades més lleuger que l'electró (recordem que l'electró es fa servir com unitat en la física electrònica).

Cal esmentar que els neutrins poden travessar titaniques quantitats de matèria sense deixar rastre i, en canvi, ells són emesos en nombre de milions de bilions per segon en qualsevol reactor nuclear. Per tant, en teoria deuriem ser molt nombrosos, però resulta que els detectors de totes les centrals atòmiques del món només n'han pogut detectar un 7,3 %, o sigui que els neutrins semblen esfumar-se misteriosament.

Per explicar aquesta anomalia els especialistes de la matèria, després d'una vintena de resultats anòmals i altres experiències realitzades a través de tot el món, estan disposats a fer una requisitòria per completar aquesta família de petits elements neutres.

S'ha descobert recentment que els neutrins tenen massa i que es poden transformar en varietats més difícils de detectar en el camí del Sol a la Terra. Des d'aquest punt de vista les mesures coincidirien amb la teoria.

El repte és acorrallar aquestes enigmàtiques partícules, ho sigui trobar un neutrí d'una nova espècie, en el qual llur principal característica seria ser insensible a l'acció de cap de les tres forces fonamentals del model estàndard. Aquesta seria la partícula fantasma perfecta, ja que no interactuaria si no és per mitjà de la gravitació o sigui, un neutrí dit estèril perquè actua amb una absoluta discreció⁹.

Certament aquest tipus de partícules podria donar resposta a un dels més grans enigmes científics: la massa mancant de l'Univers.

Els neutrins estèrils podrien constituir aquella misteriosa matèria obscura que compon el 80 % del contingut físic del nostre univers i pels físics seria la pista més segura per explicar l'absència d'antimatèria en el nostre univers.

Així amb una massa al voltant d'1 eV, el neutrí estèril explicaria la desaparició dels neutrins normals emesos pels reactors nuclears. Un concepte que podria resoldre els problemes actuals i ser la porta d'entrada d'una nova física, una noció a la vegada salvadora i revolucionària. Un concepte, doncs, que ho seria tot llevat d'estèril, en el sentit vulgar de la paraula.

⁸ Una partícula és discreta quan no té límits.

⁹ En física, tota partícula és estèril, quan no es pot subdividir en micro-partícules.

BIBLIOGRAFIA

ACKER, AGNÉS (1992). *Astronomie*. Ed. Masson. París.

DAGAEF, M. et al. (1986). *Astronomie*. Ed. Mir. Moscou.

GROUSSON M. et al. (2012). Neutrino. *Rev. Science et Vie*, núm. 1137. París

KIPPENHAHN, R. (1993). *Cien mil millones de soles*. Ed. Salvat. Barcelona.

OSTLIE, D. A. (1996). *An introduction to modern stellar*. Ed. Addison-Wesley. USA.

PECKER I SCHATZMAN (1959). *Astrophysique general*. Ed. Masson. París.

PETIT, A. (1992). Un estel anomenat Sol. *Butll. Centre d'Est. Nat. Barc. Nord*. II (2):97-113. Santa Coloma de Gramenet.

SOBOLEV, V. (1985). *Cours d'astrophysique theorique*. Ed. Mir. Moscou.

