

**SOCIETAT CATALANA
DE FÍSICA**

EL SOL,

A CÀRREC DE

JORDI ISERN,

DE L'INSTITUT D'ESTUDIS

ESPACIALS DE CATALUNYA

I DE L'INSTITUT

DE CIÈNCIES DE L'ESPAI

DEL CONSELL SUPERVISOR

D'INVESTIGACIONS CIENTÍFIQUES

La Terra és un planeta singular: és un sistema doble, té tectònica de plaques, té molta aigua i arbora vida i, a més a més, està lligada a una estrella no gaire corrent, el Sol.

El Sol es va formar ara fa 4.500 milions d'anys. Contràriament al que es pensa, no és un dels estels que més abunden i la seva composició química, incloent-hi el sistema planetari, fa sospitar que ha canviat de posició respecte a la que tenia en el moment de néixer. Es tracta d'un reactor termonuclear autoregulat molt estable, amb una temperatura superficial prou baixa per no emetre radiacions excessivament dures, amb una evolució secular induïda pels cicles de combustió molt lenta i uns canvis a curt termini relativament petits.

En aquesta conferència es descriu l'estructura actual del Sol, l'evolució secular i les variacions a curt termini que són previsible.

1. INTRODUCCIÓ

El Sol és una immensa esfera de gas incandescent que brilla gràcies a les reaccions termonuclears que es produeixen al seu interior i que es manté unida per la pròpia autogravitació. És una estrella de la seqüència principal de tipus G2; en la taula 1 es mostren les grans xifres que la caracteritzen. Es tracta d'un estel de massa mitjana, amb propietats força típiques, però contràriament al que es diu no n'és un dels més corrents (les nanes vermelles, per exemple, són molt més abundants). Està compost per una gran quantitat d'hidrogen (un 94 % en nombre d'àtoms), una mica d'heli (un 6 % en nombre d'àtoms) i restes de metalls (un 0,1 % en nombre d'àtoms), on la paraula *metalls*, en un clar abús de llenguatge, es fa servir per designar tots els elements més pesants que l'hidrogen i l'heli, independentment de quines siguin les propietats químiques que tinguin.

La densitat mitjana del Sol és de $1,4 \text{ g/cm}^3$, però en el centre és molt més alta, uns 160 g/cm^3 , ja que hi ha d'haver un gradient de pressió per mantenir l'equilibri. En conjunt, i a gran escala, el Sol es troba en equilibri hidrostàtic, per la qual cosa ha de compensar les pèrdues d'energia que experimenta a través de la superfície amb l'energia que obté de les reaccions termonuclears de l'interior. Com que la temperatura central és de només 15,8 milions de graus, el procés energètic dominant és la fusió de l'hidrogen en heli, $4 \text{ } ^1\text{H} \rightarrow \text{}^4\text{He}$, on quatre protons i dos electrons amb una massa total de $6,694 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ es transformen en un nucli d'heli de $6,644 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ de massa, de manera que la diferència es converteix en energia.

Pels astrònoms, es tracta de l'única estrella propera, situada a una distància de només 150 milions de quilòmetres, que es pot estudiar amb detall i serveix de guia per entendre i explicar el comportament de la resta d'estrelles de l'Univers. És a dir, qualsevol teoria de l'evolució estel·lar ha d'ésser capaç d'explicar les propietats del Sol. En aquest sentit, tot i que molts teòrics afirmen, fent broma, que el Sol és massa a prop, la veritat és que l'acord entre la teoria i les observacions és tan bona que, quan han aparegut discrepàncies entre les dues, com és el cas del flux de neutrins solars, s'han hagut de modificar les teories físiques i no pas els models astrofísics.

247

TAULA 1. *Paràmetres característics del Sol*

Massa	$1,989 \cdot 10^{33} \text{ g/cm}^3$
Radi	$6,967 \cdot 10^{10} \text{ cm}$
Temperatura efectiva	5.780 K
Lluminositat	$3,845 \cdot 10^{33} \text{ erg}$

El flux que arriba a la Terra, anomenat *constant solar*, és de $1.365\text{-}1.368 \text{ W/m}^2$, la qual cosa fa que domini completament l'energètica i tots els cicles vitals del planeta.

És el responsable dels vents i dels corrents marins. Aquest fet permet la fotosíntesi de les plantes i escalfa els animals que es belluguen pel planeta, i qualsevol pertorbació d'aquest flux energètic pot afectar de manera catastròfica els equilibris ecològics de la Terra.

2. L'INTERIOR DEL SOL

Convencionalment, es distingeix entre l'interior i l'atmosfera. La separació entre les dues regions és borrosa, però de manera genèrica es pot dir que l'atmosfera és la regió d'on surten la major part dels fotons (tècnicament es diu que és la regió que té una profunditat més petita que la unitat, on la profunditat òptica és una certa mesura de la probabilitat que té un fotó per escapar-se) i, per tant, la regió on es forma l'espectre, mentre que l'interior és el lloc on es produeixen les reaccions termonuclears que fan brillar l'estrella.

La font d'energia del Sol va ésser durant molt de temps un misteri difícil d'explicar. Era clar que no podia ésser d'origen químic, ja que les reaccions d'aquesta naturalesa no són prou energètiques. Per exemple, si el Sol estigués format per una barreja de carboni i oxigen només podria brillar durant unes desenes de milers d'anys. Per aquest motiu, Von Helmholtz i Lord Kelvin van proposar, de manera independent, que l'origen de l'energia solar havia d'ésser gravitatori.

Segons aquesta idea, el Sol es troba en equilibri hidrostàtic i compleix, per tant, el teorema del virial, el qual afirma que l'energia potencial gravitatòria és el doble de l'energia interna (tèrmica en el cas del Sol) si les partícules són no relativistes. Això vol dir que les pèrdues d'energia a través de la superfície es compensen mitjançant la contracció gravitatòria, de manera que una meitat de l'energia potencial que es desprèn compensa l'energia perduda, mentre que l'altra

meitat es converteix en energia interna. És a dir, com més energia perd el Sol, més s'escalfa.

D'acord amb la taula 1, l'energia potencial gravitatòria del Sol és de prop de $4 \cdot 10^{48}$ erg, la qual cosa vol dir que podria brillar amb la potència actual durant uns 30 milions d'anys, un període de temps que en el moment en què es va llançar la idea semblava raonable, ja que els registres geològics permeten determinar amb molta precisió les edats relatives dels estrats, però fallen a l'hora d'establir l'edat absoluta; per aquesta raó, aquesta estava considerada com a molt incerta. El descobriment de la radioactivitat va permetre a Rutherford i Boltwood determinar amb precisió aquesta edat dins l'interval de 4.100 a 4.300 milions d'anys, dos ordres de magnitud més gran que l'edat proposada per Kelvin-Helmholtz. Hi havia, per tant, una contradicció entre l'edat de la Terra i la del Sol i només quedaven dues solucions: o bé la Terra havia estat capturada pel Sol o bé aquest tenia una font addicional d'energia.

Entre els anys 1905 i 1906, Einstein va publicar els treballs on establia les bases de la teoria de la relativitat restringida. Un dels punts fonamentals era l'equivalència entre massa i energia, $E = mc^2$. Tal com va fer notar Eddington l'any 1929, l'energia emmagatzemada en forma de massa a l'interior del Sol és $E = M_{Sol}c^2 = 1,8 \cdot 10^{54}$ erg, per la qual cosa podria continuar radiant al ritme actual durant 14 bilions d'anys més. Dit d'una altra manera, n'hi hauria prou que el Sol aniquilés una part molt petita de la massa que té per obtenir l'energia que necessita. La resposta definitiva la van proposar Bethe i Von Weizäcker l'any 1938 quan van descobrir el mecanisme de fusió termonuclear de l'hidrogen per produir heli, el qual té un rendiment en massa del 0,07% i només afecta el 10% de la massa interna.

TAULA 2. *Font bàsica d'energia del Sol*

<i>PPI (90% del total de les reaccions)</i>
${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$
${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$
<i>PPII (8% de les reaccions)</i>
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$
${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$
${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow 2{}^4\text{He}$
<i>PPIII (1% de les reaccions)</i>
${}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu$
${}^8\text{B} \rightarrow 2{}^4\text{He}$

El principal problema de la fusió de l'hidrogen per donar heli és que durant el procés s'han de convertir dos protons en dos neutrons, cosa que fa intervenir la interacció feble. Per aconseguir aquesta fusió, hi ha dues possibilitats: les cadenes PP, que comencen amb la reacció directa —dos protons donen un nucli de deuteri, un positró i un neutrí—, la qual és molt lenta (temps característic de 14.000 milions d'anys), i el cicle CNO, que fa servir els isòtops d'aquests elements com a catalitzadors. Les desintegracions beta que actuen en el cicle CNO són més ràpides que la reacció bàsica de les cadenes PP, però com que a les reaccions pròpiament termonuclears intervenen nuclis amb càrrega elèctrica més alta, aquest cicle només s'activa a temperatures elevades, per la qual cosa les estrelles de massa més petita que una vegada i mitja la massa del Sol cremen preferentment el seu combustible per mitjà de les cadenes PP. La taula 2 mostra els detalls d'aquest procés. Els raigs gamma produïts per les reaccions nuclears i per l'anihilació dels positrons es termalitzen ràpi-

dament i escalfen el medi ambient, mentre que els neutrins s'escapen directament, ja que la seva secció eficaç d'interacció amb la matèria és molt feble.

El ritme de les reaccions termonuclears depèn molt de la temperatura ($r_{pp} \propto T^4$, en el cas del centre del Sol) i a causa d'això la regió de combustió termonuclear està molt localitzada en el centre de les estrelles. En el cas del Sol, aquesta regió només ocupa el 10% del radi solar. Els fotons d'aquest lloc de l'estrella es difonen lentament cap a zones de temperatura més baixa situades cap a l'exterior. El procés de difusió és molt lent, ja que els fotons segueixen un camí aleatori, i triguen més de deu milions d'anys a arribar a la superfície. La similitud entre aquesta xifra i l'edat del Sol obtinguda per Kelvin i Helmholtz no és casual. Finalment, quan la radiació arriba a 0,8 vegades el radi solar, el material es fa prou opac perquè l'energia es transporti per convecció, la qual origina la gran riquesa fenomenològica que s'observa a la superfície del Sol.

251

3. ELS NEUTRINS SOLARS

Tal com s'ha dit abans, l'interior del Sol és opac a la radiació electromagnètica i, per tant, és impossible observar directament les regions centrals. Els neutrins, en canvi, interactuen molt feblement amb la matèria i en poden travessar grans quantitats sense ésser absorbits. Per tant, un detector situat a la Terra que sigui capaç de detectar-los podria analitzar directament l'interior del Sol i comprovar si la teoria és correcta o no.

El primer detector de neutrins que es va construir estava format per un gran dipòsit de percloroetilè, un líquid que normalment es fa servir a les tintoreries, situat a més de 1.500 metres de profunditat en una antiga mina d'or de Dakota del

Sud anomenada «Homestake Gold Mine» per evitar qualsevol interferència de la radiació còsmica. Un dels isòtops del clor interactua amb un neutrí per donar un isòtop d'argó radioactiu d'acord amb la reacció ${}^{37}_{17}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$. Una vegada al mes, els responsables de l'experiment purgaven el dipòsit i extreien l'argó produït (un nucli cada dos dies aproximadament) per inferir el flux de neutrins solars. Segons el model estàndard de Sol, s'haurien de produir 7,9 SNU (una SNU és una unitat arbitrària però convenient, que val 10^{-36} reaccions per àtom de ${}^{37}\text{Cl}$ i per segon) i només se'n detecten 2,2 SNU, és a dir, menys d'un terç del que s'esperaria. Aquesta discrepància es coneix pel *problema dels neutrins solars*.

Altres experiments independents han confirmat la realitat d'aquest problema. El detector Kamiokande II, que fa servir 3.000 tones d'aigua ultrapura envoltada per fotocèl·lules que detecten la llum Cerenkov produïda per la dispersió dels neutrins pels electrons, troba que el nombre de neutrins per unitat de temps que detecta és la meitat del que s'esperaria. Els experiments amb gal·li, SAGE i GALLEX, que aprofiten la reacció ${}^{71}_{31}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}_{32}\text{Ge} + e^-$, també detecten un nombre inferior de neutrins del que s'esperaria.

El dilema que planteja aquest resultat és: o bé els models solars estan malament, o bé cal reconsiderar la física dels neutrins. Després de molts anys de comprovacions i, sobretot, de sondejos amb tècniques d'heliologia, s'ha arribat a la conclusió que els models solars són essencialment correctes i que l'única explicació vàlida és que els neutrins experimenten una transformació durant el seu periple cap a la Terra.

Efectivament, els neutrins es divideixen en tres famílies: electrònics (ν_e), muònics (ν_μ) i tauònics (ν_τ). La teoria desenvolupada per Pontecorvo i Gribov, per una banda, i per Mikheyev, Smirnov i Wolfenstein, per l'altra, estableix que els neutrins canvien de naturalesa durant el seu viatge, ja que les

espècies es barregen entre elles. És a dir, els neutrins solars neixen dins la família electrònica i durant el seu viatge una fracció es converteix en neutrins muònics i tauònics. Com que els experiments esmentats més amunt només són sensibles als neutrins electrònics, solament detecten una fracció del flux total de neutrins que arriben a la Terra procedents del Sol. Aquesta hipòtesi ha estat confirmada brillantment pels experiments Solar Neutrino Observatory, a Ontario (Canadà), i KamLAND, a Kamioka (Japó), els quals han mostrat que efectivament els neutrins barrejaven el seu caràcter al llarg del desplaçament.

4. L'ATMOSFERA

La primera cosa que sorprèn del Sol és que a simple vista té una frontera molt ben definida, com si tingués una superfície. Evidentment, això no és així, sinó que la major part dels fotons s'escapen d'una regió, la fotosfera, molt prima en comparació al radi solar (500 km, és a dir, el 0,07 % del radi total). En aquesta regió, la temperatura passa dels 6.500 K a la base als 4.400 K en el cim, i és en aquesta regió on es forma l'espectre d'absorció, ja que els gasos més freds absorbeixen selectivament la llum d'espectre continu que emergeix des de la base.

Quan s'observa la base de la fotosfera, es veu una retícula fosca que separa un conjunt de regions més brillants, d'uns 700 km de diàmetre, que apareixen i desapareixen contínuament en un temps característic de 5 a 10 minuts. Aquesta estructura rep el nom de *granulació solar* i és conseqüència de la penetració de les cèl·lules convectives dins la regió fotosfèrica. L'anàlisi espectral mostra que les zones brillants estan formades per «bombolles» de gas calent que es mouen cap a l'exterior, mentre que les zones fosques estan

formades per gas fred que s'enfonsa cap a l'interior després d'emetre l'energia que transporten a la fotosfera, on els gasos són transparents.

En aquests moments, no es disposa d'una teoria satisfactòria per explicar amb detall les propietats dels moviments convectius. Tanmateix, el tractament relativament groller que es fa servir en els models numèrics actuals proporciona resultats acceptables. Per exemple, és interessant fer notar dues propietats del Sol relacionades amb la convecció: una és que el Sol emet gairebé com un cos negre i l'altra és que les capes convectives apareixen quan el material és massa opac i, en el cas del Sol, la zona convectiva arriba just a la fotosfera. Tots dos fenòmens són causats en gran part per l'existència a la fotosfera d'un ió, H^- (un àtom d'hidrogen amb un electró addicional), que està en equilibri amb el medi ambient, $H + e^- \rightleftharpoons H^- + \gamma$. Aquest electró està molt poc lligat, 0,75 eV, i pot absorbir totes les radiacions que tinguin una energia superior a aquesta quantitat o, equivalentment, longituds d'ona més curtes que 17.000 Å, i viceversa, que poden generar un continu de fotons d'ona més curta que aquest valor.

La cromosfera, que contribueix a la lluminositat total del Sol amb només una deu mil·lèsima part, és la zona que es troba immediatament per sobre la fotosfera i té un gruix de 2.000 quilòmetres. En aquesta regió, la densitat cau quatre ordres de magnitud, però la temperatura puja des dels 4.400 K fins als 25.000 K, per la qual cosa contribueix amb ratlles d'emissió i d'absorció a l'espectre. En particular, si es fan servir filtres que restringeixen la visió a determinades longituds d'ona com, per exemple, la corresponent a la ratlla H_α , es poden veure noves estructures sobre la superfície del Sol.

Una d'aquestes és la supergranulació, que és similar a la granulació, però a escales més grans. En aquest cas, els supergrànuls, que tenen unes mides de 30.000 quilòmetres, ascendeixen per la part central i baixen per la perifèria amb

unes velocitats típiques de 0,4 km/s. Una altra estructura que apareix és la de les espícules, uns filaments de gas d'uns 10.000 quilòmetres de longitud i una vida mitjana d'uns 15 minuts, que cobreixen una fracció de la superfície del Sol.

Per sobre la cromosfera, la temperatura creix molt ràpidament fins a superar el milió de graus al cap de pocs centenars de quilòmetres i a continuació s'estabilitza. Aquesta regió abrupta rep el nom de *zona de transició* i es pot estudiar selectivament gràcies a les ratlles d'emissió de diversos ions com és el cas de la ratlla de 977 Å del CIII (carboni ionitzat dues vegades), que emet a temperatures d'aproximadament 90.000 K, o la línia de 1.032 Å de l'OVI (oxigen ionitzat cinc vegades), que emet a 300.000 K. És interessant notar que les estructures que caracteritzen la cromosfera continuen deixant l'empremta fins a zones de temperatura molt elevada dins la zona de transició.

La regió on la temperatura s'estabilitza rep el nom de *corona*. Aquesta regió, que només es fa visible durant un eclipsi total de Sol o mitjançant tècniques especials, s'estén des de la zona de transició fins a uns quants radis solars. La contribució energètica a la lluminositat total és aproximadament la milionèsima de la contribució fotosfèrica. La densitat és molt baixa i la temperatura és d'aproximadament un parell de milions de graus.

La corona també està estructurada i normalment es parla de les corones K, F i E. La corona K emet llum blanca, d'espectre continu, causada per la dispersió de la llum de la fotosfera pels electrons lliures, i s'estén des de la superfície del Sol fins a una distància de 2,3 radis solars. La corona F està causada per la dispersió de la llum que fan els grans de pols situats més enllà de 2,3 radis solars i s'acaba confonent amb la llum zodiacal (llum del Sol reflectida per la pols que hi ha en el pla de l'eclíptica). La corona E és la responsable de les ratlles d'emissió produïdes pels gasos altament ionit-

zats que formen la corona. Aquesta corona recobreix totes les altres.

Quan s'observa el Sol amb raigs X, es veu que l'emissió no és uniforme sinó que apareixen zones fosques, anomenades *forats coronals*, que no són gaire brillants en aquesta banda de l'espectre, i zones molt brillants, algunes situades fins i tot a l'interior de les zones fosques, que apareixen i desapareixen en qüestió d'hores. Els forats coronals es caracteritzen per tenir les densitats i les temperatures més baixes de la corona i per estar relacionats amb el camp magnètic del Sol i els mecanismes de generació del vent solar.

El vent solar és un corrent d'ions i electrons que s'escapen contínuament del Sol i envaeixen tot l'espai interplanetari a raó de 10^{-14} masses solars per any. Les partícules, que tenen una densitat de 5 a 10 per cm^3 , tarden entre 5 i 10 dies a arribar fins a l'òrbita de la Terra i ho fan amb una velocitat d'entre 400 i 450 km/s, que continua augmentant. La seva existència es posa de manifest a través dels cometes, ja que els gasos que s'escapen del nucli i formen la cabellera són arrossegats pel vent i formen la cua. És per aquesta raó que les cues cometàries sempre es troben en la direcció oposada al Sol. El vent solar també es manifesta a través de la interacció amb el camp magnètic terrestre, ja que les partícules atrapades per les línies magnètiques es dirigeixen cap als pols i, en xocar amb l'atmosfera, originen les aurores polars.

5. ACTIVITAT SOLAR

Quan s'observa la superfície del Sol, es veu que hi ha regions fosques anomenades *taques solars*. Aquestes taques presenten una zona més interna, anomenada *ombra*, envoltada per una zona més clara anomenada *penombra*. S'estima que la temperatura de la part més interna és de només 3.800 K, per

la qual cosa són menys brillants i, per tant, es veuen fosques en comparació a la matèria que les envolta.

El nombre de taques solars no és constant, però l'aparició segueix una pauta cíclica d'onze anys. El nombre de taques durant cada màxim d'activitat no és el mateix, però els màxims sempre estan separats pel mateix interval de temps. Aquesta regularitat encara es veu més bé quan es representa la latitud de la taca en funció del moment de la seva aparició. Al començament del cicle, les taques apareixen a latituds elevades, però a mesura que passa el temps apareixen cada cop més a prop de l'equador, de manera que el conjunt té l'aspecte d'una papallona, per la qual cosa aquests diagrames es coneixen per *diagrames papallona*.

L'autor d'aquests diagrames, E. Walter Maunder, també va descobrir que, durant el període que va des del 1645 fins al 1715, no es va observar cap taca. Aquest període s'anomena *mínim de Maunder* i coincideix amb una època inusualment freda a Europa que es coneix per l'*era glacial petita*. Evidentment, aquesta època també es va caracteritzar per l'absència d'aurores polars i l'existència de corones molt febles durant els eclipsis solars. Com que les temperatures baixes es manifesten en forma d'anomalies en el gruix dels anells dels arbres, s'ha pogut saber que en el passat el Sol deu haver experimentat altres mínims d'activitat.

Els estudis del magnetisme solar indiquen que el camp magnètic és més intens a l'interior de les taques que a l'exterior i que aquestes apareixen per parelles de polaritat magnètica oposada, de manera que tots els membres de la parella que estan més avançats en el sentit de la rotació solar tenen la mateixa polaritat dins el mateix hemisferi i oposada a l'hemisferi contrari. Quan el Sol canvia de cicle, la polaritat del camp magnètic també ho fa, és a dir, el pol nord magnètic passa a ser el pol sud i viceversa, i passa el mateix amb la polaritat de les taques líder. Això vol dir, doncs, que la perio-

dicitat del cicle solar és de 22 anys! Cal fer notar aquí que el camp magnètic terrestre experimenta el mateix comportament, però a escales de temps molt més llargues.

L'origen de les taques està relacionat amb la rotació diferencial del Sol. Efectivament, el Sol no gira com un sòlid rígid, sinó que ho fa més ràpid a l'equador (25 dies per volta) que no pas a latituds altes (28 dies per volta a 40° de latitud). Com que el gas ionitzat està lligat al camp magnètic mitjançant la càrrega elèctrica, aquell l'arrossega en el seu moviment de rotació, de manera que les línies de camp es deformen i s'entortolliguen sobre si mateixes. El resultat és que el camp magnètic s'intensifica en aquests manyocs i la pressió i la temperatura baixen, amb la qual cosa el gas brilla menys.

Les taques no són l'única manifestació del camp magnètic solar. Les fulguracions són causades per violentes inestabilitats del camp magnètic que duren entre uns quants minuts i unes quantes hores. Durant una fulguració, la zona afectada adquireix una temperatura superior als 5 milions de graus i accelera una gran quantitat de partícules fins a energies notables. Les platges són zones molt brillants en llum H_α situades al voltant de les taques solars i que queden després que aquestes han desaparegut. Els filaments són bandes fosques d'uns 100.000 quilòmetres de longitud que connecten taques solars i que, quan es veuen projectades sobre el firmament, més enllà del limbe solar, reben el nom de *prominències*.

6. EVOLUCIÓ DEL SOL

L'espai interestel·lar no és buit, sinó que és ple de gasos i pols que es manifesten de maneres diverses segons quin sigui l'estat físic. En particular, a la galàxia hi ha estructures que s'anomenen *núvols moleculars gegants*, les quals tenen una

massa aproximada d'un milió de vegades la massa del Sol, una temperatura de només uns 20 K i unes densitats de 100 a 300 partícules per cm^3 . A l'interior d'aquests núvols hi ha unes condensacions, entre 10^7 i 10^9 partícules per cm^3 , molt calentes, entre 100 i 200 K, i relativament petites (entre 0,05 i 1 ps) que contenen entre 10 i 100 vegades la massa del Sol. Associades a aquestes subestructures, s'hi troben estrelles de tipus O i B, les quals es caracteritzen per tenir una vida tan curta que no tenen temps d'allunyar-se de la regió on es van formar, la qual cosa indica que les estrelles neixen a l'interior dels grans núvols moleculars i que les condensacions no són altra cosa que els embolcalls de les protoestrelles.

Els núvols moleculars es troben en equilibri, és a dir, la tendència a dispersar-se causada per l'agitació tèrmica queda compensada per l'atracció gravitatòria que tendeix a fer-los col·lapsar. Si en un moment donat les forces gravitatòries guanyen l'agitació tèrmica, el núvol, o la part afectada del núvol, comença a col·lapsar-se. Durant aquesta etapa, el núvol és pràcticament transparent, per la qual cosa l'energia de la contracció és radiada eficientment. Això fa que el núvol entri en caiguda lliure i que les inhomogeneïtats tendixin a accentuar-se amb el temps i en provoquin la fragmentació. Aquest procés de fragmentació s'atura quan la densitat és prou gran, uns 10^{-13} g/cm^3 , perquè el núvol es faci opac a la radiació, i el col·lapse isoterm es converteix en un d'adiabàtic. La font més important d'opacitat és la pols. Quan això passa, es diu que s'ha format una protoestrella, la qual continua contraient-se fins que la temperatura central arriba al punt de la ignició termonuclear. Durant tot aquest temps, l'estrella allibera energia al ritme que li marca el reajustament tèrmic de l'interior.

En el cas d'una estrella com el Sol, la primera font d'energia és la combustió del deuteri primordial, ja que aquesta és la reacció més ràpida de totes. En qualsevol cas, com que l'a-

bundància de deuteri és molt petita, aproximadament $2 \cdot 10^{-5}$ vegades la de l'hidrogen, aquesta font només aconseguirà alen-
tir lleugerament el procés de contracció i cal esperar que la tem-
peratura augmenti més perquè les cadenes de fusió de l'hidro-
gen s'activin i funcionin de manera regular. Quan això passa,
l'estrella atura la contracció i s'instal·la en una etapa evolutiva
molt estable, la seqüència principal, en la qual compensa les
pèrdues d'energia gràcies a la combustió de l'hidrogen. El Sol
es troba en aquesta fase des de fa gairebé 4.500 milions d'anys.

Tot i aquesta estabilitat, el Sol ha anat canviant
durant tot aquest temps, ja que la lluminositat, el radi i la
temperatura superficial han augmentat des de llavors. Aquesta evolució és conseqüència del fet que, en convertir-se
gradualment l'hidrogen en heli, el pes molecular mitjà del
gas augmenta i, d'acord amb la llei dels gasos perfectes, per
mantenir la pressió ha d'augmentar la densitat i/o la tempe-
ratura. En qualsevol cas, el nucli del Sol es comprimeix i s'es-
calfa. Com que el ritme de generació d'energia ve donat per
 $\dot{\epsilon} \propto \rho X^2 T^4$,¹ l'efecte de l'increment de densitat i temperatura
sobrepasa la disminució de l'abundància d'hidrogen i es
produïxen els efectes esmentats abans.

Arribarà un moment, quan l'abundància de l'hidrogen
sigui zero al centre, que la temperatura serà tan elevada que
permetrà cremar-lo en una gran capa situada al voltant d'un
gran nucli isoterm i inert fet d'heli. En aquell moment, l'e-
nergia que es generarà serà més gran que quan l'hidrogen es
cremava a la zona central; tanmateix, el resultat no serà un
increment de la lluminositat, sinó que l'energia s'invertirà en
l'expansió de les capes externes, per la qual cosa la llumino-
sitat i la temperatura externes disminuiran i el radi augmen-
tarà. El Sol entrarà a la fase subgegant.

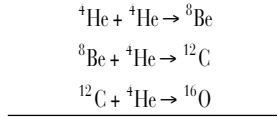
1. $\dot{\epsilon}$ és el ritme de generació d'energia, ρ la densitat, X és la frac-
ció de massa d'hidrogen o la superfície i T la temperatura a la superfície.

Aquesta fase evolutiva acabarà quan la massa del nucli isoterm superi un valor crític anomenat *límit de Schöenberg-Chandrasekhar*, a partir del qual el nucli d'heli es col·lapsarà gravitatòriament i s'escalfarà fins a arribar a temperatures superiors al centenar de milions de graus, moment que l'heli s'encendrà. Durant aquesta etapa, l'hidrogen s'anirà cremant en una capa molt prima però també molt calenta, de manera que provocarà un augment molt notable de la lluminositat i del radi amb la consegüent disminució de la temperatura superficial. El Sol s'haurà convertit en una gegant vermella, és a dir, en una estrella amb una lluminositat 1.000 vegades més gran que l'actual, una temperatura superficial de 3.000 K, gairebé la meitat d'ara, i un radi 100 vegades més gran que l'actual i que seria equivalent al de l'òrbita de Mercuri.

Com que els electrons són fermions, obeeixen el principi d'exclusió de Pauli i no poden ocupar el mateix estat quàntic, per la qual cosa s'han de situar en estats d'energia cada vegada més elevada. En aquest cas es diu que es degeneren. Quan la degeneració és completa, els efectes quàntics són dominants i la pressió és independent de la temperatura. Aquest efecte és tan important que per si mateix pot aguantar una estructura de fins a 1,4 vegades la massa del Sol, coneguda per *massa límit de Chandrasekhar*.

Totes les estrelles de massa més petita que dues vegades la massa del Sol arriben al punt d'ignició de l'heli amb un nucli parcialment degenerat, de manera que la ignició és gairebé explosiva; en aquest cas es parla de la *fogonada de l'heli*, però la durada i l'energia són molt curtes, de manera que l'energia és absorbida per les capes exteriors. En les estrelles de massa inferior a la meitat de la massa solar, l'heli no s'encén mai. El Sol, evidentment, passarà per aquest procés i, tan bon punt s'hagi estabilitzat, cremarà heli en el centre i hidrogen en una capa al voltant d'aquest; per tant, l'estructura serà força similar a la que té ara.

TAULA 3. *Combustió de l'heli*



La combustió de l'heli converteix gradualment aquest element en una barreja de carboni i oxigen (la taula 3 mostra el conjunt de reaccions dominants). Quan el combustible s'esgota, les reaccions continuen en una doble capa, una de més interna que crema heli i una de més externa que crema hidrogen. Aquesta situació és físicament equivalent a la fase gegant roja, per la qual cosa el Sol s'expandirà una vegada més i tornarà a reduir la seva temperatura superficial. Hi ha, de totes maneres, tres diferències fonamentals. La primera és que la lluminositat encara serà molt més elevada que durant la fase gegant roja i, en conseqüència, la superfície del Sol encara arribarà molt més lluny, gairebé fins a l'òrbita terrestre; la segona és que la combustió en doble capa és molt inestable i acaba expulsant tot l'embolcall situat més enllà de la zona de combustió de l'hidrogen, la qual cosa originarà una nebulosa planetària, i la tercera és que el nucli de carboni/oxigen està completament degenerat i no pot escalfar-se i arribar a la temperatura d'ignició del carboni. Aquesta etapa es coneix per *fase AGB* (*asymptotic giant branch*).

L'expulsió de l'embolcall deixarà al descobert el nucli intern i calent del Sol, és a dir, la zona on s'han produït totes les reaccions termonuclears que l'han alimentat en vida. Al cap de 100.000 anys, s'hauran dissipat tots els gasos expulsats durant la fase AGB i el nucli central es refredarà suficientment per adquirir l'aspecte típic d'una nana blanca, la qual s'anirà refredant gradualment per a la resta dels temps.