



REIAL ACADÈMIA DE DOCTORS

Un univers turbulent



Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari electe

Excm. Sr. Jordi Isern i Vilaboy

Doctor en Física

A l'acte de la seva recepció, 9 d'abril de 2002, i

discurs de contestació de l'acadèmica de número

Excma. Sra. Ma. Teresa Anguera i Argilaga

Doctora en Psicologia

Barcelona

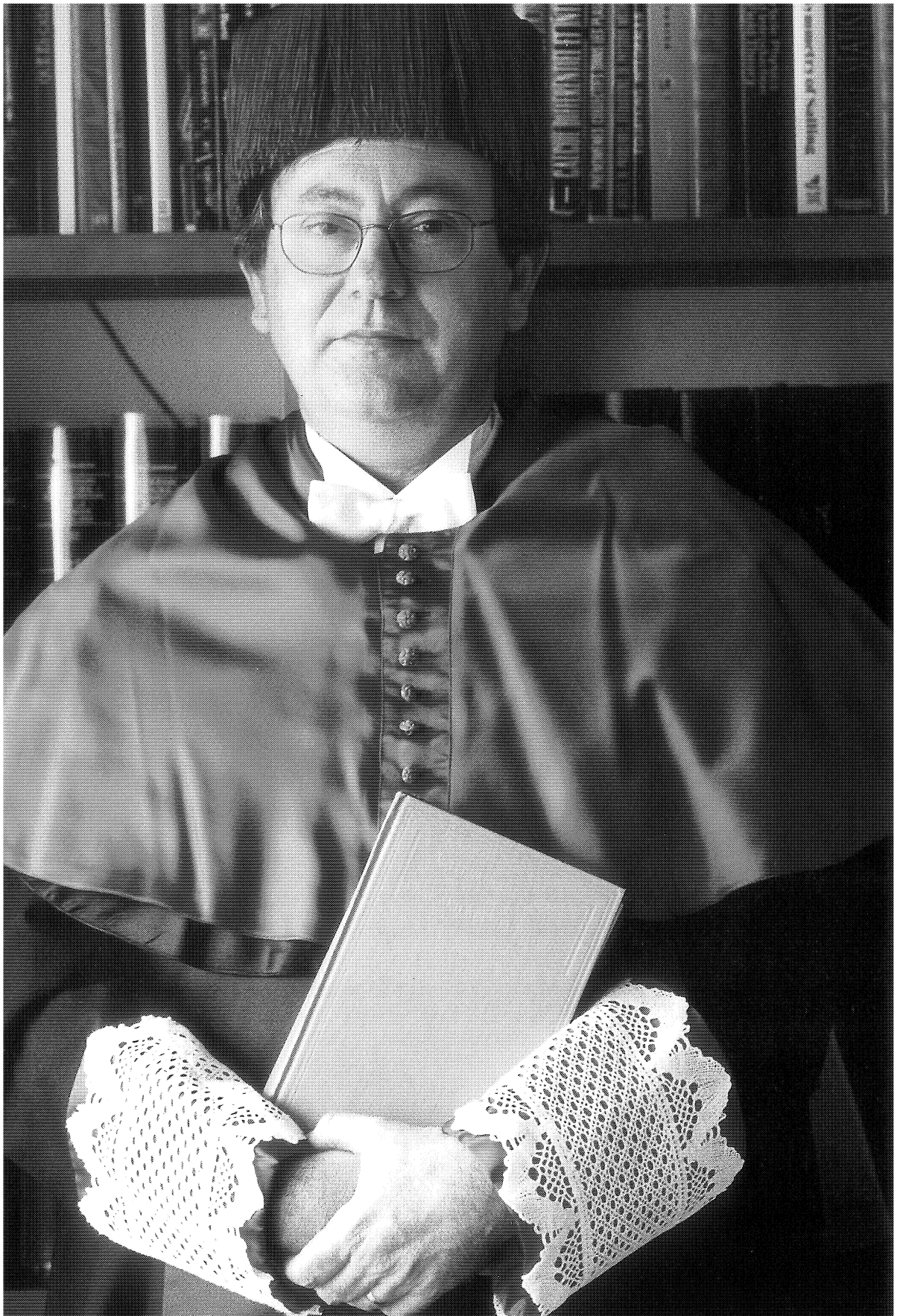
2002

Dr. Jordi Isern i Vilaboy

Un univers turbulent

REAL ACADEMIA DE DOCTORS

-Publicacions-



Excm. Sr. Degà President,
Excms. Srs. Acadèmics,
Senyores i Senyors:

És per a mi un gran honor haver estat acollit per la Reial Acadèmia de Doctors de Catalunya per la qual cosa voldria expressar el meu agraïment a aquesta docta corporació i en especial al seu President, l'Excm. Sr. Dr. Josep Casajuana, per la confiança i la benevolència que han demostrat cap a la meva persona i a la meva tasca científica i docent.

Siguin quins siguin els mèrits que pugui haver reunit al llarg de la meva vida professional, aquests no són el fruit d'un treball aïllat sinó que són el producte d'una cultura, que dec a la meva família i al meu país, i a uns mestres i professors que em van obrir els ulls al món de la ciència i que van despertar la inquietud intel·lectual. També vull incloure en aquests agraïments als meus antics alumnes, ara ja doctors, els quals m'han

permès mantenir la ment desperta i al dia gràcies a la seva curiositat, a la seva capacitat inquisitiva i la seva col·laboració en tots els àmbits de la meva feina.

I sense més preàmbuls i, amb la vènia de la Presidència, començaré la meva dissertació.

UN UNIVERS TURBULENT

La cerca

Des de sempre, l'home s'ha preguntat què era l'Univers, quin era el seu origen o quina edat tenia. Sobretot, s'ha preguntat quin paper hi jugava ell dins del conjunt. Totes les cultures conegudes han intentat construir una imatge, una història, que contestés aquestes preguntes i donés sentit a la vida de l'home i als nostres actes. Avui dia, a l'inici del tercer mil·leni, no hi ha encara cap resposta i és possible que mai se'n trobi cap de prou satisfactòria o completa, però al llarg del segle passat es van posar les bases per trobar-ne una de plausible, basada en l'Astronomia, la Física i les Matemàtiques. Tot fa pensar, aquesta és la meva esperança, que durant el segle XXI es produiran grans avenços en aquest terreny.

A la civilització occidental va predominar, durant molts anys, la idea aristotèlica que l'Univers estava format per dues parts, el món sublunar, habitat pels humans, efímer, corruptible, impur, variable, amb una atmosfera plena de meteors, de cometes i d'aurores, i el món astral, etern, pur i harmoniós, ocupat pels planetes, pel Sol, l'astre perfecte i immaculat, i les estrelles fixes.

La concepció aristotèlica va trontollar fortament l'11 de novembre de 1572, quan Tycho Brahe va descobrir la presència d'una estrella nova a la

constel·lació de Cassiopea. Aquesta estrella *-nova stella-* va aparèixer sobtadament en el firmament, es va anar debilitant gradualment al llarg dels mesos i, finalment, va desaparèixer. Durant tot aquest procés no va canviar de posició respecte a les estrelles fixes i es va moure seguint els mateixos cercles perfectes que seguien les altres, la qual cosa va mostrar que era un membre de ple dret de la vuitena esfera. La conclusió era clara, les estrelles estaven subjectes a les mateixes imperfeccions que els habitants del món sublunar i que, per tant, no hi ha havia dos móns qualitativament diferents sinó que tots dos eren el mateix. Copèrnic ja havia sembrat la llavor de la teoria heliocèntrica i la cadena d'esdeveniments que es van produir és ben coneguda. Kepler, després d'analitzar les observacions dels planetes fetes per Tycho, va descobrir les lleis del moviment planetari. Galileu va inventar el primer telescopi i va demostrar per primera vegada que la Lluna tenia mars i muntanyes, que Júpiter es comportava com un sistema planetari en miniatura i que el Sol, l'astre perfecte, tenia taques. Finalment, Newton va descobrir, gràcies a la llei de la gravitació, el motor que controlava el moviment dels astres. Tanmateix, la imatge d'un Univers tranquil, il·limitat i ple d'estrelles, regit per les lleis harmonioses de la mecànica celest, es va mantenir fins ben entrat el segle XX.

Impulsada per les necessitats de la navegació i per les millores tecnològiques en el camp de l'òptica i de la mecànica, l'Astronomia va experimentar al llarg dels segles XVIII i XIX un creixement notable i es va consolidar com una disciplina científica moderna.

Gràcies al desenvolupament dels telescopis, a principis del segle XX, ja se sabia que les estrelles i el Sol eren immenses esferes de gasos incandescents, i que les “noves” no eren estrelles acabades de néixer, sinó que eren estrelles ja existents que experimentaven un increment brusc de la lluminositat, fins a 60.000 vegades la seva brillantor inicial, i després tornaven al seu estat normal. Però, al cap de poc temps, es va veure que hi havia una varietat que estava associada a les nebuloses espirals. La més significativa era S Andromedae, descoberta per Gully a França i Hartwig a Alemanya l'agost de 1885 a la nebulosa espiral d'Andròmeda o M31 (en aquella època encara no se sabia que M31 era una galàxia), la qual va assolir una magnitud visual aparent de sis durant el màxim, el límit que es pot detectar a simple vista.

Als voltants de 1920 es va revisar l'escala de còsmica distàncies i es va veure que les nebuloses espirals estaven molt allunyades de nosaltres i que cadascuna era, en realitat, una immensa aglomeració d'estrelles. De cop i volta, es va descobrir que les estrelles formaven grans illes ben diferenciades -les galàxies- separades per centenars de milers i, fins i tot milions, d'anys llum. Per tant, les “noves extragalàctiques” eren extraordinàriament brillants i no tenien res a veure amb les noves habituals, ja que la seva lluminositat era entre mil i deu mil vegades més gran. Per aquesta raó Baade i Zwicky van proposar a l'any 1933 anomenar-les “supernoves”, però aviat van veure que estaven relacionades amb la mort de les estrelles i, a l'any 1938, van ésser considerades com a fenòmens astronòmics amb entitat pròpia i no com una

varietat de noves. Avui dia se sap que durant una explosió de supernova s'expulsa una gran quantitat de material contaminat pels residus de les reaccions nuclears que fan brillar els estels, el qual s'incorpora al medi interestel·lar i l'enriqueix amb els nous elements químics sintetitzats per les estrelles i que la major part dels elements més pesants que l'hidrògen i l'heli han estat expulsats per les supernoves. Les explosions de supernova són tan violentes que la velocitat dels gasos expulsats poden adquirir velocitats superiors als 10.000 km/s i que poden arribar a desgasificar les galàxies i a impedir l'aparició de noves generacions d'estels.

Però l'Univers no és només un lloc turbulent en el qual es produeixen tota mena de cataclismes, sinó que ell mateix és el producte d'una explosió. A l'any 1929, Hubble va descobrir que les ratlles espectrals de les galàxies estaven corregudes cap el vermell amb una quantitat que era proporcional a la distància. És a dir, si es defineix el desplaçament cap el vermell com $z = \Delta\lambda/\lambda_0$, la llei de Hubble, tal com es coneix avui dia, diu que $z = (H_0/c)d$ on c és la velocitat de la llum i H_0 la constant del mateix nom. Si se suposa que la velocitat és petita respecte a la llum, aquest resultat es pot interpretar com un efecte Doppler, $v = H_0d$, i per tant que les galàxies s'allunyen de la Via Làctia amb una velocitat que és tant més gran com més gran és la distància. Això vol dir que en el passat les galàxies estaven més a prop i que a una època de l'ordre de $T = H_0^{-1}$ havia d'ésser molt més dens i calent que no pas ara, la qual cosa suggereix que fins i tot l'Univers hauria començat amb una gran explosió (el "Big Bang").

El model cosmològic estàndard

El model cosmològic estàndard es basa en una solució homogènia i isòtropa de la Teoria de la Relativitat General (Friedman, Robertson, Walker, Lemaître) segons la qual el factor d'escala, a , amb què s'expansiona l'Univers està dominat per la densitat de matèria, ρ , la pressió, P , i el paràmetre de curvatura, k , el qual pot ésser positiu o negatiu segons es tracti d'un Univers tancat o obert, o pot ésser zero si és pla:

$$\left[\frac{\dot{a}}{a} \right]^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho - \frac{k}{a^2}$$
$$\frac{\ddot{a}}{a} = - \frac{4\pi G}{3} (\rho + 3P)$$

on s'han fet servir les unitats per les quals $\hbar \equiv c \equiv k_B \equiv 1$. Segons aquestes equacions, la constant de Hubble és el valor actual de la quantitat $H \equiv \dot{a} / a$. La densitat per la qual l'Univers és pla es coneix com a densitat crítica i val $\rho = 3H_0^2 / 8\pi G$. Si la densitat és menor que aquest valor, l'Univers està corbat negativament i si és més gran ho està positivament. Sovint es fa servir aquesta quantitat com a patró i la densitat, en aquestes unitats, es representa per Ω . Integrant aquestes equacions es pot veure que l'evolució de la temperatura respecte al temps és $T \propto t^{1/2} \propto (1+z)$ la qual cosa indica que en el

passat, la temperatura havia d'ésser molt més elevada que no pas ara.

Durant molts anys, la idea d'un Univers en expansió va ésser objecte d'una polèmica violenta a causa de la falta de proves empíriques. De fet, el nom de "Big Bang" o Gran Bum prové d'un sarcasme de Fred Hoyle, un dels detractors més aferrissats de la teoria, per la qual cosa en els cercles científics es fa servir sovint el nom de model cosmològic estàndard. A pesar de tot, aquest model es va acabar imposant gràcies que feia dues prediccions molt concretes que han resultat certes. La primera era que si l'Univers havia estat inicialment molt calent, s'hauria refredat en expansionar-se i hauria deixat un fons de microones amb una temperatura d'uns pocs Kelvin. Aquesta radiació va ésser descoberta per Penzias i Wilson l'any 1964. La segona era que en una explosió d'aquestes característiques s'haurien de crear elements químics com l'heli i el deuteri, i la teoria de l'evolució estel·lar ha deixat ben clar que les estrelles són capaces de sintetitzar tots els elements químics excepte l'hidrogen, el deuteri i l'heli. Precisament, un dels grans èxits del model estàndard ha estat l'acord entre les abundàncies d'aquests elements predites pel model i les abundàncies mesurades en els objectes més vells de l'Univers.

Segons aquest model, l'evolució de l'Univers es pot dividir en tres etapes o eres: la dominada per la radiació, la dominada per la matèria i la dominada per la curvatura. La fase dominada per la radiació abasta des d'uns 10^{-12} segons d'edat, quan la temperatura era d'uns 300 GeV (1 GeV són mil milions d'electrons-volt),

o sigui uns 3×10^{16} K, fins els 10^{11} segons, uns 10.000 anys, quan les densitats d'energia i matèria s'igualen i la temperatura és de només un 3 eV, és a dir, uns 30.000 K. Al principi, l'energia estava dominada per la radiació i una sopa de parelles partícula-antipartícula: sis tipus de quarks i antiquarks (up, down, charm, strange, top i bottom), sis tipus de leptons i antileptons (electrons, muons, tauons i els corresponents neutrins) i dotze bosons (fotons, W^\pm , Z^0 i els vuit gluons). Cada vegada que la temperatura es feia més petita que la massa d'una parella partícula-antipartícula, aquesta s'anihilava i desapareixia. Per exemple, quan la temperatura va baixar per sota dels 90 GeV, es van aniquilar els bosons W^\pm i Z^0 , a 200 MeV els quarks i els gluons es van combinar per formar protons, neutrons, pions i altres partícules. Als 100 MeV es van aniquilar els muons i quan la temperatura va baixar per sota de 1 MeV van començar les reaccions nuclears que van sintetitzar els isòtops primordials: D, ^3He , ^4He i ^7Li . Finalment es van aniquilar els electrons i els positrons. L'etapa dominada per la matèria abasta des de l'etapa dominada per la radiació fins ara, uns 13 mil milions d'anys després de la gran explosió. Al principi d'aquesta època, les inhomogeneïtats locals de la densitat de matèria, una part en cent mil, com ha demostrat la missió espacial COBE i altres experiments, es van amplificar per l'acció de la gravetat i van originar les primeres galàxies i l'estructuració progressiva que s'observa avui dia. Quan la temperatura va baixar per sota els 0,3 eV, els electrons es van combinar amb els nuclis atòmics i l'Univers es va fer transparent. El fons de microones que s'observa avui dia és precisament la imatge que s'ha conservat

d'aquell moment. Quan això va passar, l'Univers tenia 300.000 anys. L'última fase està dominada per la curvatura o per la constant cosmològica, si aquesta és diferent de zero. En tots dos casos, el creixement de les inhomogeneïtats s'aturarà i les estructures que puguin existir en aquell moment quedaran congelades.

El model cosmològic estàndard descansa sobre arguments molt sòlids. El més important, tal com s'ha indicat abans, és la presència de la radiació de fons. L'experiment COBE va demostrat que el fons còsmic és quasi perfectament isoterm (300 parts per milió) en totes les direccions i que té una temperatura de $2,7277 \pm 0,002$ K. L'única explicació raonable és considerar-la com la radiació fòssil de la que hi havia en el moment en què els electrons es van combinar amb els nuclis atòmics. Les mesures de la temperatura de la radiació de fons en el passat confirmen brillantment aquesta hipòtesis. Quan més enrera en el temps es mira més gran és el valor de z i el model estàndard prediu que la temperatura varia com $1+z$. Les mesures de la temperatura fent servir els nivells hiperfins de l'àtom neutre de carboni en el medi intergalàctic indiquen que la temperatura era de $7,4 \pm 0,8$ K i $7,9 \pm 1$ K quan z valia 1,776 i 1,973 respectivament.

En busca de la matèria fosca

Quan s'analitza la velocitat de rotació de les estrelles al voltant del centre galàctic, tant en el cas de la Via Làctia com en altres galàxies, en funció de la distància radial, s'observa que no obeeix la llei de

Kepler, $v \propto r^{-1/2}$, sinó que es manté constant o fins i tot augmenta cap a l'exterior. L'única explicació plausible, sense invocar modificacions de la llei de Newton, és suposar que les galàxies estan embolcallades per un halo de matèria que no emet llum (matèria fosca), ja que en cas contrari s'hauria detectat. Aquesta hipòtesis es veu corroborada per l'anàlisi d'estabilitat dels discs galàctics i de les galàxies nanes. Si no hi hagués un halo fosc, aquestes estructures no podrien existir.

COBE també va descobrir la presència d'anisotropies de l'ordre de $30 \mu\text{K}$ sobre distàncies angulars de 10^0 en el firmament i va proporcionar la primera evidència que les estructures actuals es van formar a partir de petites inhomogeneïtats de la densitat (una part en cent mil), les quals s'han anat intensificant gràcies a la gravetat al llarg de la vida de l'Univers. De fet, es creu que les fluctuacions primordials de la matèria fosca van crear els pous de potencial gravitatori necessaris per construir les galàxies i bastir les grans estructures de l'Univers, i és justament la caiguda de matèria bariònica a l'interior d'aquests pous la que modula una part de les anisotropies de la radiació de fons.

Hi ha diversos mètodes independents per amidar la contribució de la matèria fosca al contingut energètic de l'Univers. Els més precisos, quan les dades són bones, es basen en les supernoves i les anisotropies del fons còsmic, però també, es poden fer servir les mesures directes de la massa de l'halo galàctic i l'anàlisi de les propietats dels cúmuls de galàxies. Tots ells apunten

cap a $\Omega_M \approx 0,3$, la qual cosa porta immediatament a la pregunta: quina és la naturalesa de la matèria fosca?

Pel que fa a la primera pregunta, durant molts anys s'ha pensat que la resposta es trobava a les restes estel·lars, nanes blanques i estrelles de neutrons, o bé als objectes subestel·lars, nanes marrons, planetes gegants o nuclis cometaris, però fins ara no s'ha pogut confirmar que cap d'aquests objectes sigui responsable per si sol de la matèria fosca, ni tan sols d'una fracció significativa. De fet, les restriccions que imposa la nucleosíntesi primordial permet descartar aquesta hipòtesi i cal emfatitzar que si algun dia es trobés cap evidència empírica que això no és veritat, caldria revisar a fons el model cosmològic estàndard.

Efectivament, la nucleosíntesi primordial no només constitueix un dels pilars bàsics de la teoria de la Gran Explosió, sinó que també proporciona una mesura molt precisa de la contribució de la matèria ordinària (bariònica) a la densitat total de l'Univers, ja que determina la quantitat de deuteri que se sintetitza durant el Big Bang. Les mesures de l'abundància de deuteri als núvols intergalàctics d'hidrogen més antics, i que per tant no han tingut temps de destruir-lo, indiquen que com a màxim els barions només poden contribuir en un 5% a la densitat crítica.

La pregunta és immediata, si la densitat de matèria normal no és suficient per explicar la dinàmica de l'Univers, quina és la naturalesa de la matèria que falta? Una contribució òbvia és la dels fotons del fons còsmic i la dels neutrins fòssils del Big Bang. El nombre de

fotons és fàcil de calcular si es coneix la temperatura: 412 per centímetre cúbic. El nombre de neutrins també ho és si se suposa que a l'era radiativa estaven en equilibri amb els fotons: 1/11 de fotó per a cada una de les espècies de neutrí. Si, a més a més, se suposa que els neutrins són partícules lleugeres, la contribució de fotons i neutrins a la densitat crítica és només d'una cent mil·lèsima, $\Omega_{\gamma\nu} \approx 10^{-5}$.

Una altra possibilitat és que la matèria fosca estigui constituïda per partícules fòssils que interactuïn tan feblement que hagin pogut escapar a la aniquilació del Big Bang. Hi ha diverses possibilitats: neutrins, axions, neutralins etc., però els únics que s'han detectat fins ara són els primers i ja s'ha vist que no són suficients. Segons la velocitat que tinguin, aquestes partícules es classifiquen en calentes (neutrins) o fredes (axions, neutralins). Les partícules ràpides tenen la propietat d'esborrar qualsevol fluctuació de mida petita, per la qual cosa, si la matèria fosca fos "calenta", primer es formarien les grans estructures i després les galàxies. Els grans telescopis terrestres i el telescopi espacial Hubble indiquen que primer es van formar les galàxies i després les grans estructures que es detecten avui dia, per la qual cosa la hipòtesi que la matèria fosca és "freda" ha anat guanyant credibilitat a pesar de no conèixer-ne encara la naturalesa.

El model inflacionari

El model cosmològic estàndard ha tingut un gran èxit a l'hora de descriure l'expansió de l'Univers,

l'origen dels elements químics més lleugers o la formació de les estructures de matèria. Aquest model explica les conseqüències de l'explosió, però no què hi havia abans, ni perquè va explotar, ni d'on va sortir el plasma inicial, ni explica una sèrie de problemes fonamentals:

- i) El problema de l'horitzó. L'experiment COBE ha demostrat que la radiació còsmica de fons és molt homogènia, una part en cent mil. La qüestió és perquè és tan homogènia si en el moment en què es van desacoblar radiació i matèria les regions del firmament separades per més de 2 graus no estaven connectades causalment.
- ii) El problema de l'estructura a gran escala. El model cosmològic estàndard prediu que l'Univers és homogeni, però les observacions mostren que les galàxies s'agrupen i formen grans estructures separades per grans buits, de 100 Mpc de diàmetre, o que la radiació de fons presenta diferències de temperatura d'una part en cent mil sobre escales angulars de 10 graus.
- iii) El problema de la planor de l'Univers. Tal com s'ha vist abans, la densitat de l'Univers és molt a prop del valor crític. L'equació de Friedmann indica que aquest valor és inestable excepte en un univers pla, ja que $|\Omega(t) - 1| = |k|/a^2 H(t)^2$ on k és el factor de curvatura ($k=0,1,-1$ segons que les geometries siguin planes, esfèriques o hiperbòliques respectivament). Aquesta equació és equivalent a dir que $\Omega - 1 \propto t$ a l'època radiativa i $\Omega - 1 \propto t^{2/3}$ a l'època dominada per la matèria. Per tant, demanar

que Ω estigui entre 0,1 i 2 a l'actualitat equival a demanar que $|\Omega(1) - 1| \cong 10^{-16}$ i $|\Omega(10^{-43}) - 1| \cong 10^{-60}$ quan l'Univers tenia un segon i l'edat de Planck, 10^{-43} s, respectivament. El model cosmològic estàndard no té preferències per cap valor de la densitat, però si aquesta està a la vora de la crítica, sempre hi ha hagut d'estar amb una precisió extraordinària per poder explicar els valors actuals, la qual cosa no sembla natural. Una altra possibilitat és que l'Univers sempre hagi estat pla, $k=0$, però, perquè això sigui així, cal una raó física important que en aquest moment no es coneix.

- iv) El problema dels monopols. La teoria de partícules preveu l'aparició de diversos defectes topològics, tanques, monopols etc, durant els primers moments del refredament de l'Univers. Els monopols són els més importants i, d'acord amb la teoria, haurien de dominar la matèria, cosa que no passa.

La física de partícules prediu l'existència d'un estat anomenat "fals buit", el qual té la propietat de mantenir la densitat d'energia constant en expansionar-se, la qual cosa fa que exerceixi una pressió negativa, $P = -\rho$, on ρ és la densitat d'energia i s'han agafat unes unitats per les quals la velocitat de la llum val la unitat. D'acord amb les equacions que descriuen l'expansió de l'Univers, l'acceleració gravitatòria depèn no només de la densitat d'energia, sinó, també, de la pressió, és a dir $\ddot{a} \propto -(\rho + 3P)$ on a és el factor d'escala, tal com s'ha dit abans, el qual està relacionat amb el factor d'expansió q de la següent manera $q = -(\ddot{a}/a)/H^2$.

La teoria de la inflació suposa que en algun moment abans dels 10^{-12} s hi havia una regió de l'Univers que contenia un fals buit. Aquesta regió podria haver estat molt petita, fins i tot molt més petita que el diàmetre d'un protó. A causa de la repulsió gravitatòria provocada per la pressió negativa del fals buit, aquesta regió hauria començat a créixer exponencialment fins a arribar a tenir la grandària per poder explicar les propietats de l'Univers actual. Ara bé, el fals buit és inestable i es desintegra alliberant energia, propietat que va permetre la formació del plasma primordial. Aquesta fase d'expansió accelerada va durar uns 10^{-35} s, la xifra és només aproximada. Per tant, la inflació va crear les condicions inicials que la teoria del Big Bang necessita per explicar les observacions actuals.

Durant la inflació, $\ddot{a}(t) > 0$ i el producte aH creix exponencialment, de manera que $\Omega^{-1} \propto e^{-2Ht}$, on H és el paràmetre de Hubble durant la inflació. Per tant, n'hi prou que la inflació tingui una durada prou llarga per comparació amb H^{-1} perquè Ω passi de qualsevol valor arbitrari a 1 i es torni pla. Al llarg d'aquest procés, el factor d'escala creix a velocitat superlumínica mentre que l'horitzó ho fa a la velocitat de la llum i les regions lligades causalment són estirades fins més enllà de l'horitzó. Quan la inflació s'atura, el factor d'escala torna a créixer a velocitat sublumínica i l'horitzó atrapa gradualment les regions que abans havien estat connectades, amb la qual cosa se soluciona el problema de l'horitzó. El problema dels monopols també queda solucionat d'una manera semblant, ja que la densitat de

defectes topològics disminueix com a conseqüència de l'increment de volum induït per la inflació.

Un problema addicional que encara no està resolt és quan es va produir la inflació. Normalment se suposa que es va produir a l'escala de la gran unificació (10^{16} GeV) o sigui al voltant de 10^{-39} s, molt després del temps de Planck, però es podria haver produït molt després. L'única restricció és que la inflació ha d'ésser anterior a la gènesi dels barions ja que en cas contrari aquests s'haurien diluït fins a tenir una densitat negligible. Sembla que l'única manera de determinar l'escala d'energia en què es va produir la inflació serà mesurant la intensitat del fons d'ones gravitatòries, ja que aquesta és funció de l'energia en què es va produir el fenomen.

La constant de Hubble

La determinació de la constant de Hubble ha estat el gran problema de l'astronomia del segle XX. Durant molts anys hi ha hagut una discussió aferrissada i sovint vitriòlica entre els partidaris d' $H_0=50$ km/s/Mpc i els partidaris d' $H_0 = 100$ km/s/Mpc. En principi, la mesura d'aquesta quantitat és senzilla. N'hi ha prou de mesurar simultàniament la distància i la velocitat de recessió d'aquelles galàxies que no estiguin afectades per l'atracció gravitatòria de cap altra de propera. El problema és que hi ha pocs mètodes calcular distàncies que siguin satisfactoris. En general, un indicador de distàncies s'hauria de basar en unes propietats físiques clares i ben compreses, s'hauria de poder aplicar a un

nombre estadísticament significatiu de galàxies llunyanes, hauria de generar barres d'error petites i, sobretot, hauria d'estar lliure d'errors sistemàtics. Actualment no n'hi ha cap que compleixi aquests criteris i es tardarà encara uns quants anys per aconseguir una precisió de l'1%. Gràcies al telescopi Hubble, s'ha arribat a una precisió del 10% aproximadament, però el gran problema continua estant en els errors sistemàtics, els quals encara no estan ni ben controlats ni tan sols ben identificats.

El mètode més directe és el de la triangulació fent servir com a línia de base el diàmetre de l'òrbita terrestre. Aquest mètode té un abast limitat a uns 500 pc (1 parsec o pc equival a 3,26 anys llum) quan es fan servir telescopis terrestres. La missió espacial HIPPARCOS, de l'Agència Espacial Europea, va aconseguir estendre considerablement aquest tipus de mesures, i s'espera que GAIA, també de l'agència europea, ho faci fins a distàncies de l'ordre del radi galàctic.

Per mesurar la distància a objectes més allunyats cal utilitzar altres mètodes. El més habitual es basa en la propietat del flux lluminós de disminuir amb el quadrat de la distància, $\Phi \propto d^{-2}$. Si un determinat tipus d'astre té una lluminositat intrínseca L , i es mesura el flux Φ , es pot trobar la distància mitjançant $d=(L/4\pi\Phi)^{1/2}$. Evidentment cal tenir en compte els efectes de l'extinció per part del medi interestel·lar i intergalàctic. Els indicadors més interessants són aquells que tenen una lluminositat constant (se'ls coneix com a "candela patró") o bé una lluminositat relacionada amb una

propietat que és independent de la distància (per exemple el període d'oscil·lació d'una estrella).

La mesura de distàncies és tan important que és difícil resumir exhaustivament tots els mètodes existents en un únic article. El més important és el de les Cefeides. Es tracta d'estrelles molt brillants que polsen amb un període que és directament proporcional a la magnitud, de manera que una vegada calibrades n'hi ha prou en mesurar el període per trobar la lluminositat i, per tant, la distància. Amb aquest mètode es pot arribar fins a 20 Mpc. Notis que per calibrar aquestes estrelles cal determinar abans les distàncies d'una mostra mitjançant el mètode trigonomètric, per la qual cosa reben el nom d'indicadors secundaris. La precisió que pot proporcionar una única cefeida és del 10% i una mostra gran, com l'aconseguida pel Telescopi Espacial Hubble, del 2%.

Les supernoves del tipus Ia en són els indicadors més interessants, ja que són fenòmens d'origen estel·lar i més brillants que una galàxia de tipus mitjà, per la qual cosa són visibles fins a distàncies de centenars de Mpc. Es creu que són la manifestació externa de l'explosió termonuclear d'una estrella nana blanca de carboni i oxigen que forma part d'un sistema estel·lar doble. La llum que emeten és produïda per la desintegració dels elements radioactius sintetitzats durant l'explosió. La lluminositat en el màxim varia molt poc d'un individu a l'altre i, a més a més, hi ha una relació empírica que permet reduir encara més aquesta dispersió (les supernoves més brillants es debiliten més lentament), amb la qual cosa la precisió

final que pot proporcionar una única supernova és del 6%. Cal notar que en aquests moments les supernoves de tipus Ia es calibren sobre observacions fetes a galàxies de les quals es coneix la distància gràcies a les cefeides, per la qual cosa són considerades com a indicadors terciaris. El problema d'aquest mètode és que encara no se sap quins són els sistemes estel·lars dobles que exploten ni quines són les propietats físiques de l'explosió.

Deixant de banda les incerteses pròpies de cada mètode, el principal problema és el dels errors sistemàtics. Un dels més importants és el de l'absorció de la llum, anomenada extinció, causada per la matèria interposada entre l'observador i l'objecte i el de l'envermelliment ocasionat per l'absorció preferent de les radiacions de longitud d'ona curta. Un altre problema és la metal·licitat que no només modifica la lluminositat estel·lar, sinó que redistribueix la radiació a l'espectre. El valor actualment més acceptat és $H_0=68\pm 6$ km/s/Mpc.

Per a valors de z petits, la llei de Hubble està emmascarada per les velocitats peculiars de les galàxies, és a dir, per les pertorbacions induïdes per l'atracció gravitatòria de les galàxies veïnes, mentre que per a valors iguals o més grans que 1, s'ha vist que la llei es compleix aproximadament, però fins fa molt poc no s'ha pogut abordar el problema de comprovar-la amb precisió i veure com l'Univers es desacelera per determinar si la densitat és més gran, igual o més petita que la crítica. Per poder esbrinar aquesta qüestió, calia disposar d'un patró de mesura de distàncies prou

precís que arribés fins a valors de z iguals o més grans que 1. Aquesta possibilitat va aparèixer quan es va arribar a la conclusió que les supernoves de tipus Ia eren molt homogènies i es va poder reunir una mostra significativa. El resultat ha estat sorprenent: l'Univers no s'està frenant, sinó que s'accelera. Les supernoves més allunyades són sistemàticament més febles del que haurien d'ésser segons el model estàndard i, per tant, que es troben a una distància més gran de la que estarien si l'Univers s'hagués expansionat amb velocitat constant o es frenés a causa de l'atracció gravitatòria de la matèria. Una vegada més, les supernoves estan tornant a canviar la visió que l'home té del cosmos!

En busca de l'energia fosca

La teoria de l'Univers inflacionari és molt consistent des del punt de vista teòric, ja que connecta d'una manera senzilla i elegant el microcosmos amb el macrocosmos. Tanmateix va ésser acollida amb escepticisme per molts cosmòlegs, ja que predeia un Univers planer, $\Omega = 1$, mentre que totes les mesures indicaven que la densitat de matèria, fosca més bariònica, difícilment superava el valor de 0,3. Aquesta percepció ha canviat recentment gràcies al descobriment que l'Univers s'estava accelerant, la qual cosa no té res a veure amb la inflació, i a les noves mesures del fons de microones.

Les diferències de temperatura més importants en el fons de microones apareix entre regions que estan separades per la distància angular que es correspon

amb l'anomenat "horitzó sònic", és a dir, la distància que ha viatjat el so des de l'origen de l'Univers fins que la radiació es va desacoblar de la matèria. Si l'Univers fos pla, aquesta distància formaria un angle d'1 grau en el firmament. Si l'Univers estigués corbat negativament aquest angle seria menor i si ho estigués positivament seria més gran. Les mesures actuals (experiments BOOMERANG, DASI, Maxima, i CBI) indiquen que $\Omega=1,0 \pm 0,04$, és a dir, que l'Univers és planer. Per poder fixar definitivament aquesta qüestió, caldrà esperar les dades d'alta precisió que proporcionaran les missions MAP, de NASA, i Planck d'ESA.

De manera similar al que passava en el moment de la inflació, l'acceleració de l'Univers es pot explicar si el 70% de l'energia que falta és capaç de generar una pressió negativa que superi l'atracció gravitatòria. Quina és la naturalesa d'aquesta energia, que s'ha convingut en qualificar de fosca? El candidat més obvi és el buit, el qual és matemàticament equivalent a la constant cosmològica, Λ , introduïda per Einstein per aconseguir un Univers estàtic. Per tant, si això és correcte resulta que l'Univers va experimentar un impuls gravitatori en els primers moments a causa del fals buit i n'estaria experimentant un altre ara a causa del buit.

El buit quàntic és un estat molt complicat del qual encara es desconeixen les propietats físiques. Hi ha contribucions dels camps de bosons, de fermions i de Higgs, les quals poden ésser positives o negatives, de tal manera que la densitat total d'energia pot ésser positiva, negativa o nul·la segons els valors que

s'adoptin. El problema és que la suma de totes les contribucions fins arribar a l'escala de Planck (l'escala d'energies a la qual la gravetat quàntica és important) és 120 ordres de magnitud més gran que el valor observat pels astrònoms. Evidentment, com que les contribucions de cadascun dels camps tenen signe diferent, aquestes es podrien compensar adequadament per obtenir el valor observat, però que es cancel·lin les 120 primeres xifres decimals i es respecti la que fa 121 no pot ésser fruit de la casualitat sinó que hi ha d'haver un mecanisme físic que en sigui responsable. No és d'estranyar, per tant, l'interès i els esforços que s'estan fent per trobar models alternatius, tots ells relacionats amb la unificació de la gravetat amb les altres forces, capaços de generar pressions negatives i impulsar d'aquesta manera l'Univers. Afortunadament, tots els candidats a energia fosca produeixen pressions i acceleracions diferents, per la qual cosa s'espera que un patró de mesura prou precís, com les supernoves de tipus Ia, permetrà identificar la naturalesa de l'energia fosca o, com a mínim, descartar candidats

Un exemple de com les supernoves de tipus Ia poden il·luminar la recerca dels orígens de l'Univers l'ha proporcionat recentment una supernova, SN1997ff, molt llunyana, situada a $z = 1,755$, que indica clarament que, en aquest instant de temps, l'Univers s'estava desacelerant. Aquesta mesura està d'acord amb el fet que si la densitat del buit sempre és constant i la densitat de matèria creix quan el volum disminueix, en algun moment del passat la matèria hauria d'haver estat dominant i l'Univers s'hauria d'haver frenat en aquella època.

Les supernoves

Arribats a aquest punt cal assenyalar que fets extraordinaris demanen proves extraordinàries i sens dubte l'acceleració de l'Univers cal posar-la dins aquesta categoria. Per poder afirmar que aquesta acceleració existeix, cal demostrar que les supernoves distants i per tant antigues tenen les mateixes propietats que les actuals i això només es podrà assegurar quan es tingui un domini gairebé total de la física de l'explosió i de les propietats dels objectes que exploten.

Així doncs, què són aquestes supernoves que han guiat i continuen guiant la humanitat en la seva recerca dels secrets del cosmos? El caràcter transitori i imprevisible del fenomen fa que l'estudi de les supernoves sigui molt difícil. Afortunadament, les tècniques modernes per descobrir-les i estudiar-les han incrementat la base empírica de coneixements fins al punt que ja és possible correlacionar els aspectes fenomenològics (corbes de llum, espectres...) amb els mecanismes físics causants de l'erupció.

Des del punt de vista observacional, les supernoves es classifiquen en tipus I i II, segons com sigui l'espectre en el moment que la corba de llum passa per un màxim. Si les ratlles d'hidrogen hi són absents, s'anomenen de tipus I (SNI) i si hi són presents de tipus II (SNII).

També segons l'espectre, les SN se subdivideixen en tres categories: SNIa si presenten una intensa ratlla del

silici ionitzat una vegada, SNIb si la ratlla del silici hi és absent però n'hi ha una d'heli neutre, i SNIc si no n'hi ha cap de les dues.

Les supernoves de tipus Ia es caracteritzen per una forta pujada inicial de la lluminositat, unes 10 magnituds en dues setmanes, seguida per un debilitament molt més suau dividit en dues etapes ben clares. La primera dura un mes i la lluminositat cau unes tres magnituds. La segona mostra un debilitament suau que dura més d'un any i que té un temps característic de 70 dies. A banda de la falta d'hidrogen, l'espectre es caracteritza per la presència de ratlles d'elements de massa mitjana com Si, S, Ca i Mg en el moment del màxim i per la presència de ferro i cobalt a les èpoques tardanes. Aquestes supernoves apareixen a tota mena de galàxies, espirals, el·líptiques i irregulars, sense que hi hagi cap correlació amb les poblacions d'estrelles joves i massives. Des del punt de vista de la utilització com a indicadors de distàncies, la propietat més important que tenen és la gran homogeneïtat fotomètrica i espectral de cadascun dels individus de la mateixa classe. Les supernoves de tipus Ib es caracteritzen per la presència d'importantes quantitats d'heli i per l'aparició de grans quantitats d'oxigen quan els gasos de la supernova es fan més transparents i es poden veure capes més profundes. La forma de la corba de llum és similar a les Ia però més suau i menys lluminosa, la qual cosa suggereix que en aquestes erupcions hi intervenen masses molt més grans que no pas a les Ia. Les supernoves de tipus Ic es caracteritzen per la presència d'intenses ratlles d'oxigen en el moment del màxim i també per tenir una corba de llum

més abrupte que les Ib, la qual cosa indica que la massa implicada en el procés és menor que en el cas anterior. Les propietats estadístiques apunten que totes estan associades a les poblacions d'estrelles joves i massives.

Les supernoves de tipus II admeten una subclassificació segons la forma de la corba de llum en el blau. Algunes mostren un replà (SNII-P), d'altres tenen un comportament lineal (SNII-L) i altres són peculiars com la SN1987A observada en el Núvol Gran de Magallhaes. Les propietats més rellevants són la forta dispersió quant a forma i intensitat de la corba de llum, per la qual cosa no són gaire útils com a indicadors de distància, l'associació clara amb zones de formació estel·lar i la incidència nul·la en galàxies el·líptiques, la qual cosa significa que estan associades a estrelles joves i massives.

Física de les estrelles

Les estrelles obtenen l'energia de la combustió nuclear del material que hi ha al seu interior i de la contracció gravitatòria. Quan el combustible s'esgota en el nucli, les regions centrals es contrauen per obtenir l'energia necessària per mantenir la pressió. Si la temperatura és prou elevada, reutilitzen les cendres nuclears produïdes a l'etapa prèvia com a combustible i aturen de manera temporal el procés de contracció de l'estrella. Com que el primer combustible que l'estrella pot cremar és l'hidrogen, aquest element es converteix mitjançant contraccions i combustions successives en

heli, carboni, oxigen, neon, etc. fins a arribar al ferro, el nucli atòmic més lligat de la natura.

Quan la densitat és prou gran, el caràcter fermiònic dels electrons es posa de manifest i el principi d'exclusió de Pauli fa que aparegui una sobrepressió que pot arribar a ésser dominant o fins i tot aturar el procés de contracció estel·lar. La pressió dels electrons es pot descomposar en dues parts, una que només depèn de la densitat i l'altra que s'anul·la quan la temperatura tendeix a zero, és a dir, $P_e \approx P_0(\rho) + P_1(\rho, T)$, de manera que $P_1 \rightarrow 0$ quan $T \rightarrow 0$. Consideracions dimensionals permeten il·lustrar la situació.

La condició per a que un objecte autogravitant estigui en equilibri hidrostàtic és:

$$\frac{dP}{dr} = -\rho \frac{GM_r}{r^2}$$

on M_r és la massa situada a l'interior d'una esfera de radi r . Des del punt de vista dimensional, aquesta equació es pot escriure com $P \sim M^2 R^{-4}$. Si els electrons no són relativistes, el terme dominant és $P_0 \propto \rho^{5/3}$, el qual es comporta dimensionalment com $P \sim M^{5/3} R^{-5}$. Per tant, per cada massa estel·lar és possible trobar una estructura d'equilibri queaturi el procés de fusió nuclear a algun lloc entre l'hidrogen i el ferro. Segons el teorema del virial, l'energia gravitatòria val:

$$\Omega = -3 \int P dV$$

Si els electrons són no relativistes $P=2/3e$, on e és la densitat d'energia interna, amb la qual cosa, l'energia interna total de l'estrella és $E_{th} = -\Omega/2$. Això vol dir que l'energia interna és de l'ordre de l'energia gravitatòria i que, durant la transició d'una estructura d'equilibri a una altra, la meitat de l'energia gravitatòria es converteix en interna i l'altra meitat és emesa. En altres paraules, una estrella és un objecte que quan perd energia s'escalfa.

Si $E_{th} \sim MT$ i $\Omega \sim M^2/R$, resulta que $T \sim M/R$ i $\rho \sim T^3M^{-2}$. Atès que les reaccions termonuclears són molt sensibles a la temperatura (per exemple, el ritme de la combustió de l'hidrogen a través del cicle CNO és proporcional a T^{17}), cada una d'elles té una temperatura característica de combustió i, per tant, una estrella poc massiva ha d'encendre el combustible a una densitat més elevada que no pas una de molt massiva. Això vol dir que si la degeneració electrònica atura el procés de contracció abans d'arribar a la temperatura d'ignició, l'estrella perd la capacitat d'extraure energia nuclear i es mor lentament. De fet, les estrelles que tenen una massa inferior a $0,5 M_{\odot}$ mai arriben a cremar l'heli i les de menys de $10 M_{\odot}$ mai arriben a cremar el carboni, aquesta última xifra no és gaire segura, ja que depèn de les pèrdues de massa de l'estrella i encara no es comprèn ben bé el mecanisme que les provoca.

Els nuclis estel·lars degenerats tenen la propietat de contraure's quan la massa creix, la qual cosa vol dir que l'energia de Fermi, ϵ_F , dels electrons també augmenta. Quan $\epsilon_F \gg m_e c^2$, l'equació d'estat canvia de forma i es converteix en $P_0 \propto \rho^{4/3}$ i la pressió s'escala com

$P \sim M^{4/3} R^{-4}$. Com que la dependència en R és la mateixa que l'exigida per l'equilibri hidrostàtic no hi ha cap escala de longituds definida i qualsevol pertorbació trenca l'equilibri. A més a més, les partícules relativistes compleixen que $P = 1/3 \rho c^2$ i l'energia de lligadura, definida com la suma de les energies interna i gravitatòria, és zero. Per tant, un petit excés de pressió provoca una expansió violenta mentre que una lleugera despressurització provoca el col·lapse de l'estructura. La massa màxima per a la qual pot existir equilibri és $M_{\text{Ch}} = 1,44 \langle Y_e \rangle^2 M_{\odot}$, anomenada massa límit de Chandrasekhar, on $\langle Y_e \rangle$ és el nombre electrònic molar mig. És obvi que els nuclis degenerats amb una massa a prop del límit de Chandrasekhar són els candidats ideals per a tota mena de fenòmens catastròfics.

Per poder interpretar un fenomen en termes físics, cal conèixer els paràmetres fonamentals que el defineixen: mides i energia. Durant una explosió de supernova es desprenen uns 10^{51} erg en forma d'energia cinètica i uns 10^{49} erg en forma d'energia electromagnètica, i les mides de l'objecte que explota es corresponen amb les d'un objecte estel·lar, la qual cosa vol dir que l'energia que es necessita, suposant que la massa sigui de l'ordre de la massa del Sol, és de 5×10^{17} erg/g aproximadament. Només hi ha dos objectes físics que tinguin aquest empaquetat, els nuclis de ferro i les estrelles de neutrons. L'energia de lligam del nucli de ferro és d'uns 8 MeV/nucleó, o sigui que la fusió de l'hidrògen (o heli o carboni) per donar ferro es pot proporcionar uns 10^{18} erg/g. Per altra banda, un estel de neutrons típic té una massa de 1,4 vegades la massa del Sol i un radi d'uns 8 a 10 km, el que vol dir que el

seu potencial gravitatori és d'uns 10^{53} erg, amb un empaquetat d'uns 10^{20} erg/g. Aquestes xifres diuen que una estructura degenerada, amb una massa a prop de la massa de Chandrasekhar, que exploti termonuclearment o que col·lapsi gravitatòriament i formi una estrella de neutrons, pot explicar el fenomen de supernova.

Col·lapses gravitatoris

Les estrelles que tenen una massa superior a les 10-12 vegades la massa del Sol són capaces de passar per totes les etapes de la combustió termonuclear i formar un cor de ferro. A l'interior d'aquest cor, la pressió dels electrons degenerats supera amb molt la dels ions i de la radiació, alguns valors típics podrien ser 10^{28} , 10^{26} i 10^{25} dines/cm² respectivament. A mesura que la combustió nuclear avança, la massa del cor de ferro creix i s'acosta a la massa de Chandrasekhar. Durant aquest procés, l'estructura degenerada es contrau lentament i la densitat augmenta fins que els nuclis de ferro comencen a capturar electrons. Aquestes captures tenen dues conseqüències: redueixen la pressió dels electrons i disminueixen la massa de Chandrasekhar ($M_{Ch} \propto \langle \gamma_e^2 \rangle$). A més a més, si l'estrella és prou gran, una part dels nuclis de ferro es fotodesintegren en partícules alfa i neutrons i absorbeixen energia. El resultat és que el cor estel·lar perd pressió i col·lapsa cap a una estrella de neutrons.

A mesura que el col·lapse avança es formen dues regions. Una de més interna, on la velocitat de caiguda

és proporcional a la distància i sempre és subsònica, i una altra de més externa que es mou supersònicament amb un perfil de velocitats $v \propto r^{-1/2}$. Quan la matèria situada a la zona interna arriba a tenir la densitat de la matèria nuclear, es fa molt dura, rebota i provoca la formació d'una ona de xoc a la interfície sònica que separa les dues regions. Aquesta ona de xoc, que tindria prou energia, uns 10^{51} erg, per provocar l'explosió l'estrella, s'estanca, ja que el punt sònic es troba a l'interior del cor inert de ferro i inverteix l'energia que té en la fotodesintegració dels nuclis atòmics d'aquest element.

Mentre passa tot això, a l'interior de la protoestrella de neutrons es crea una gran quantitat de neutrins a expenses de l'energia gravitatòria que s'ha alliberat, uns 10^{53} erg. A les regions on la densitat supera els $\sim 2 \times 10^{11} \text{g/cm}^3$, els neutrins estan atrapats i no poden escapar lliurement, i queden en equilibri amb la matèria. Gràcies a l'estancament del xoc l'energia interna té temps de propagar-se cap enfora via difusió de neutrins i convecció i de formar una bombolla molt calenta que fa explotar les capes exteriors. Tot aquest procés dura de l'ordre d'un segon. Les capes més externes, les que van des del cor de ferro fins a l'atmosfera, no tenen temps de reaccionar i només es posen en moviment quan els arriba l'ona de xoc procedent de l'interior.

L'explosió de les capes internes té dos efectes sobre les capes exteriors. Per una banda, expulsa els fotons que estaven atrapats a l'embolcall de l'estrella i per l'altra injecten elements radioactius, ^{56}Ni essencialment,

que en desintegrar-se fan brillar els residus en expansió. Tant la intensitat i la forma de la corba de llum com l'espectre depenen de les propietats de l'estrella: massa, composició química i presència o no d'una companya. Per exemple, si la metal·licitat és elevada, l'explosió es produeix a la fase gegant vermella, amb un embolcall molt extens, i la supernova mostra ratlles d'hidrogen a l'espectre així com també un característic replà a la corba de llum. El resultat és una SNII-P. Si la metal·licitat és baixa, l'explosió es produeix a la fase gegant blava i la corba de llum és similar a la que va mostrar la SN1987A. Si l'estrella que explota és molt massiva o forma part d'un sistema doble, el vent estel·lar o la companya poden haver eliminat l'embolcall d'hidrogen o fins i tot d'heli i el resultat és una supernova de tipus Ib o Ic respectivament.

Explosions termonuclears estel·lars

L'altre tipus de catàstrofe que pot provocar la degeneració electrònica és una explosió termonuclear. La condició necessària perquè es produeixi una explosió és que l'energia s'injecti abans que la matèria tingui temps reaccionar dinàmicament. En el cas estel·lar, aquesta propietat només la tenen les estrelles que estan degenerades ja que, si la pressió està dominada per un gas ideal clàssic, qualsevol despreniment d'energia provoca una expansió adiabàtica de l'estrella i la conseqüent disminució de la temperatura. Com que el ritme de les reaccions nuclears és molt sensible, aquesta disminució provoca una reducció dràstica de la generació d'energia i l'estrella es

veu obligada a contraure's per recuperar l'estat anterior. És a dir, un gas ideal es comporta com un termostat extremadament eficient. Pel contrari, si la matèria està dominada pels electrons degenerats, la pressió no augmenta o ho fa molt poc, això la qual cosa no hi ha cap expansió apreciable i la temperatura augmenta, amb la això també ho fa el ritme de generació d'energia i el procés es reforça. Quan la temperatura és prou elevada, l'energia es desprèn en un temps molt més curt que el temps hidrodinàmic, els electrons deixen d'estar degenerats i es produeix una violenta explosió.

Per quantificar aquestes idees es pot definir el temps característic d'escalfament nuclear com:

$$\tau_n = \frac{c_v T}{\dot{\epsilon}}$$

on c_v és el calor específica i ϵ és el ritme de generació d'energia. El temps que necessita el sistema per reaccionar davant una sobrepressió és de l'ordre del temps que necessita una ona sonora per arribar a qualsevol punt del sistema:

$$\tau_{hd} = \frac{h}{c_s}$$

on h és la dimensió característica del sistema i c_s la velocitat del so. La condició d'inestabilitat es pot definir com: $\tau_n \leq \tau_{hd}$. La temperatura de deflagració és la temperatura per a la qual $\tau_n = \tau_{hd}$, la qual no s'ha de

confondre amb la temperatura d'ignició, que es defineix com la temperatura per a la qual les pèrdues per neutrins igualen a l'energia generada per les reaccions nuclears.

Les estrelles normals cremen pacíficament el seu combustible gràcies que estableitzen la temperatura per sota de la temperatura de deflagració mitjançant expansions adiabàtiques. La eficiència d'aquesta expansió es pot estimar calculant el canvi de densitat necessari per retrobar l'equilibri després del despreniment d'una certa quantitat d'energia. Si el gas és ideal, el canvi de densitat compleix:

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \propto \frac{Q}{kT}$$

on Q és l'energia despresa per cada reacció i és de l'ordre del MeV, mentre que la temperatura de la combustió nuclear no supera els 100 de keV, per això les estructures dominades per un gas ideal són molt estables. Per contra, si la component electrònica és degenerada,

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \approx \frac{P_i}{P_e} \ll 1$$

doncs $P_i \ll P_e$ i sota aquestes condicions el refredament adiabàtic és poc eficient. Per obtenir una explosió termonuclear, els electrons han d'ésser degenerats i la temperatura de deflagració del combustible ha d'ésser igual o més petita que la temperatura per a la qual es compleix $P_i \cong P_e$. L'hidrogen, per exemple, mai no pot provocar una explosió de supernova, però si una de nova. La raó és que, durant la combustió d'aquest

element, la meitat dels protons s'ha de convertir en neutrons i la interacció feble limita el ritme de les reaccions. En canvi, l'heli i el carboni no estan subjectes a aquestes limitacions i quan la temperatura és suficientment gran es poden cremar explosivament. Per tant, els únics objectes que poden arribar a explotar són les nanes blanques d'heli o de carboni – oxigen.

Una vegada el combustible s'ha encès, el front de combustió es propaga per tota l'estrella. Se sap que aquesta propagació no és supersònica, que no és una detonació, ja que si ho fos es cremaria tota l'estrella i a l'espectre només es veurien ratlles dels elements del pic del ferro (Fe, Co, Ni...). Aquest fet complica extraordinàriament el problema, ja que la flama, en moure's amb una velocitat més petita que la del so, és afectada per totes les pertorbacions i inestabilitats que es produeixen a la zona cremada.

El combustible es pot encendre a diferents punts i afectar regions força extenses de la zona central. Si el gradient inicial de temperatura és prou suau, grans extensions de matèria poden arribar simultàniament al punt d'ignició sense que hi intervingui cap mecanisme de transport. L'escala de temps per a l'acceleració de la combustió nuclear és:

$$\tau_{nuc} = \frac{\dot{\epsilon}_{nuc}}{d\epsilon_{nuc}/dt}$$

i la posició del front de combustió canvia amb una velocitat de fase que ve donada per $v_{ph} = (d\tau_{nuc}/dr)^{-1}$.

Aquesta velocitat és tant més gran quant més petits són els valors absoluts dels gradients de densitat i de temperatura. Per tant, aquelles regions que tinguin una velocitat de fase superior a la velocitat del so s'encendran espontàniament i el front de combustió es propagarà supersònicament.

Una vegada que la velocitat de fase cau per sota la velocitat del so, el front es propaga gràcies a la conducció electrònica. Inicialment la flama segueix el règim laminar i es pot calcular fàcilment la velocitat de propagació. L'amplada del front és $\delta \approx \sqrt{\chi\tau}$, on χ és la conductivitat termomètrica i τ és el temps que dura la combustió i per tant la velocitat és $D \approx \delta/\tau = \sqrt{\chi/\tau}$. Aquesta velocitat sempre és de l'ordre o més petit que l'1% de la velocitat del so. Més concretament, la velocitat de propagació és de l'ordre dels 80 km/s i el gruix de la flama de l'ordre de la dècima de del mil·límetre. Tan bon punt la flama s'allunya del centre, diverses inestabilitats (Rayleigh-Taylor, Kelvin-Helmholtz, Landau-Darrieux) distorsionen el front de combustió i augmenten l'àrea efectiva de la flama, amb la qual cosa la velocitat efectiva de la combustió s'incrementa notablement fins a arribar a ésser de l'ordre d'unes dècimes de la velocitat del só.

Com que la flama es mou subsònicament, les sobrepressions que genera i que es mouen a la velocitat del só, tenen temps d'arribar a les capes situades més en fora i les posen en moviment, de manera que quan la flama hi arriba ja no és capaç de cremar-les completament, és a dir, a reduir-les a Fe, Co i Ni, i la flama s'acaba apagant. El resultat de tot el procés és la

ruptura violenta de l'estrella i l'expulsió del material a gran velocitat. A l'interior d'aquests residus hi ha una gran quantitat de material radioactiu, 6 dècimes de massa solar de ^{56}Ni , el qual al desintegrar-se en cobalt primer i ferro després el fa brillar molt intensament durant molt de temps. És interessant fer notar aquí que l'objecte que explota sempre és una nana blanca a la vora de la massa de Chandrasekhar, per la qual cosa s'espera que les característiques de l'explosió (lluminositat i espectre) no variïn gaire d'un individu a l'altre i, per això, es puguin utilitzar com a patrons de distància. També cal fer notar que la massa crítica, excepte pel que fa al nombre d'electrons, només depèn de propietats físiques bàsiques, per això, si les lleis de la Física no han canviat amb el temps, el seu valor s'ha mantingut constant al llarg de la vida de l'Univers.

Això porta a un punt crític: han variat les propietats de les supernoves de tipus Ia al llarg del temps? En aquests moments no s'és capaç de seguir el comportament d'una flama nuclear sota condicions estel·lars. Per exemple, se sap que la distribució dels elements químics a l'interior dels nuclis degenerats, la densitat d'ignició –la qual determina quan a prop s'està de la massa crítica- o simplement la ignició quasi simultània d'una o diverses regions provoca canvis, petits, però significatius, de la corba de llum. Si aquestes desviacions del patró no presenten cap biaix evolutiu es podrà assegurar que les SNIa són el mètode ideal per mesurar distàncies.

Per estar segurs que no hi ha canvis evolutius sistemàtics, cal determinar quin és l'objecte que explota

i quin és el procés que provoca l'explosió. Certament, l'energètica, la manca d'hidrogen i l'aparició de supernoves de tipus Ia a tota mena de galàxies, juntament amb la l'homogeneïtat espectrofotomètrica avalen la idea d'una nana blanca que explota. Però la teoria de l'evolució estel·lar prediu que les estrelles que generen aquest tipus de nana blanca expulsen l'embolcall a la fase AGB molt abans d'arribar a la massa crítica, $1,1 M_{\odot}$. Per tant, cal que aquestes estrelles formin part de sistemes estel·lars dobles i que la companya li proporcioni la massa que li fa falta i és precisament en aquest procés on es poden produir efectes evolutius sistemàtics.

De sistemes estel·lars dobles que puguin fer intercanvis de matèria n'hi ha molts, però que continguin una nana blanca i una companya prou massives com per arribar a la massa límit n'hi ha pocs. Entre ells cal mencionar les estrelles simbiòtiques, que estan formades per una nana blanca i una gegant vermella que l'embolcalla, les noves massives com U Scorpii, en les quals la nana blanca ja és a prop de la massa de Chandrasekhar, les fonts supertoves de raigs X, on la nana acreix matèria a ritmes molt elevats, o la col·lisió de dues nanes blanques com a conseqüència de la pèrdua de moment angular ocasionada per l'emissió d'ones gravitacionals. En cap cas, però s'ha aconseguit donar una resposta satisfactòria que expliqui totes les propietats observades. És clar que durant els propers anys caldrà fer molts esforços, tant des del punt de vista observacional, com teòric, com de simulació numèrica per entendre millor el comportament de les supernoves , tan termonuclears com gravitacionals. El llançament, a

finals del 2002, del satèl·lit INTEGRAL pot ésser especialment significatiu, ja que permetrà observar amb detall per primera vegada la composició i distribució de les cendres radioactives, cosa que pot proporcionar la clau definitiva per entendre la física de les supernoves.

Fonts de vida

Segons el model cosmològic estàndard, minuts després del Big Bang l'Univers només estava format per hidrogen, heli-4 i traces de deuteri, heli-3 i liti-7. Al cap de poc temps es van formar les primeres estrelles, les quals van sintetitzar els primers elements químics. Si aquestes estrelles haguessin estat estables, aquests elements haurien quedat permanentment bloquejats en el seu interior i el gas interestel·lar i intergalàctic no hauria evolucionat. Afortunadament van explotar com a supernoves i van escampar els residus nuclears per tota la galàxia on es van barrejar amb la matèria primordial i es van incorporar a les generacions següents d'estels les quals, finalment, també van explotar i van afegir la seva contribució al contingut químic de la galàxia. De fet, si no hagués estat per les supernoves, avui dia no hi hauria cap planeta amb un substrat rocallós, ni aigua, ni oxigen ni carboni ni cap ésser viu. Sense les supernoves no existiria cap sistema planetari ni probablement cap ésser viu.

No només això, es creu que el nostre Sol i la seva cohort de planetes i satèl·lits es va formar gràcies a l'explosió d'una supernova en la proximitat del Sistema Solar i que va desestabilitzar la nebulosa primigènia. La

raó per la qual aquesta hipòtesis sembla força plausible és una mica subtil i es basa en el descobriment d'un excés, petit però significatiu, de ^{26}Mg , en uns grans trobats en el meteorit d'Allende (anomenat així en honor del poble on va caure: "Pueblito de Allende", Mèxic). L'abundància d'aquest isòtop en el meteorit era de l'11,05% en front de l'11,01% de les mostres terrestres.

Tal com s'ha dit abans, durant una explosió de supernova s'expulsen molts isòtops radioactius a gran velocitat que acaben barrejant-se, ells o els seus productes de desintegració, amb el material interestel·lar. En particular, durant un col·lapse gravitatori es produeixen quantitats molt significatives de ^{26}Al , un isòtop radioactiu que té una vida mitjana de 720.000 anys, el qual emet un positró i es converteix en ^{26}Mg . Com que les propietats químiques i mineralògiques de l'alumini i el magnesi són diferents, l'alumini radioactiu format molt abans del col·lapse de la nebulosa primigènia hauria tingut temps de desintegrar-se i barrejar-se seguint les pautes del magnesi. En canvi, l'alumini fresc, produït menys d'un milió d'anys abans de la formació del Sistema Solar s'hauria barrejat seguin les seves pautes i apareixeria com un excés local de ^{26}Mg .

Així doncs, el més probable és que la nebulosa protosolar mantingués un delicat equilibri entre les forces gravitatòries que tendeixen a fer-la col·lapsar i els gradients de pressió que tendeixen a dispersar-la. En un moment donat, ara fa 4600 milions d'anys, una supernova va explotar a no gaire distància de manera

que l'expansió dels seus gasos va comprimir el material nebulari i va decantar l'equilibri a favor de la gravetat. Al mateix temps, part dels residus de la supernova va penetrar a l'interior de la supernova i la va sembrar amb grans carregats amb alumini radioactiu que després es convertiria en ^{26}Mg .

L'efecte beneficiós de les supernoves no ha estat només aquest. Si es comparen els diferents planetes terrestres es veu que Terra és l'únic que té un camp magnètic important i tectònica de plaques. El primer actua com un escut capaç d'aturar les partícules d'alta energia que emet el Sol i evita l'erosió de l'atmosfera, especialment de l'aigua, i l'esterilització de la superfície terrestre mentre que la segona actua com a estabilitzador climàtic. Com és ben sabut, la vida ha estat present a la Terra durant milers de milions d'anys i els éssers vius només prosperen dins un marge molt estret de temperatures, menys de 100 graus, situat entre els punts de congelació i d'ebullició de l'aigua, la qual cosa vol dir que existeix un mecanisme molt eficaç que controla els gasos hivernacle, especialment el diòxid de carboni. Efectivament, aquest compost es dissol a l'aigua i, a través del procés de meteorització o per l'acció dels éssers vius, s'acaba convertint en carbonat càlcic, el qual precipita i s'acumula a les grans conques sedimentàries per la qual cosa la seva abundància atmosfèrica tendeix a disminuir contínuament. Si desapareixés del tot, la Terra experimentaria un refredament dràstic i irreversible. Afortunadament, la subducció associada a la tectònica de plaques fa que aquests sediments siguin ràpidament reprocessats i el

gas carbònic pugui tornar a l'atmosfera a través de les emissions volcàniques.

Tan el camp magnètic com els moviments tectònics són conseqüència dels moviments convectius del mantell terrestre, els quals arrossegueuen les plaques i alimenten la dinamo terrestre. Però per això fa falta que l'energia flueixi des del centre cap a la perifèria i, per tant, que hi hagi un subministrament energètic eficaç. Aquesta font és el propi camp gravitatori terrestre i la desintegració dels isòtops radioactius de vida llarga que les generacions anteriors de supernoves van injectar a la Galàxia.

Fonts de mort

L'atmosfera terrestre és la part més delicada del planeta Terra i la més crítica, ja que absorbeix les radiacions, solars i còsmiques, que provenen de l'exterior i que aniquilarien la vida. Pot una supernova tenir efectes letals sobre la Terra?. Aquesta pregunta és difícil de contestar amb seguretat, però es poden fer estimes del que podria passar si n'explotés una a la vora. Una manera és comparar la seva contribució al flux habitual de radiacions que la Terra rep i que els éssers vius absorbeixen sense problemes.

Les supernoves de tipus Ia, que són les més brillants, tenen en el visible una magnitud absoluta $M_V \sim -20$. Si es té en compte que el Sol té una magnitud absoluta de +4,8, la supernova s'hauria de trobar a menys de 3 pc, una dotzena d'anys llum, per ésser tan

brillant com el Sol. Aquest, durant les fulguracions emet una gran quantitat de raigs X que provoquen un flux de $\sim 10^{-11}$ erg/cm²/s a l'interval entre 1 i 10 keV a l'alçada de l'òrbita terrestre. Una supernova emet, en el mateix rang energètic uns 10^{42} erg/s com a màxim i, per tant, s'hauria de trobar a menys de 200 pc per superar la irradiació solar. La radiació gamma és més perillosa, ja que de la supernova s'escapen molts fotons amb energies de l'ordre d'1 MeV procedents de la desintegració del níquel i el cobalt. Una supernova que explotés a la distància d'1 kpc provocaria sobre la Terra un flux addicional de raigs gamma de 50.000 fotons/cm²/s, la qual cosa representa un flux d'energia de $\sim 8 \times 10^{-2}$ erg/cm²/s, durant uns dos mesos. Tenint en compte que aquests fotons són absorbits molt eficaçment per l'atmosfera no sembla que l'explosió d'una supernova normal situada a mes d'1kpc pugui causar danys extraordinaris a la Terra i, afortunadament, el Sistema Solar es troba en una regió relativament despoblada de la Galàxia on la freqüència de les explosions és relativament baixa. Tot i això, durant els darrers dos mil anys n'han explotat unes quantes prou a prop com perquè s'hagin detectat a simple vista. Segons els registres històrics – especialment els xinesos- es van observar supernoves els anys 185, 386, 393, 1005, 10054, 1181, 1572 (observada per Tycho) i el 1604 (observada per Kepler). L'aparició de l'any 1006 va ésser la més espectacular, ja que, tal com indiquen les cròniques àrabs, el diàmetre duplicava el de Venus i la brillantor era equivalent a un quart de la Lluna plena.

Moltes de les explosions de supernova deixen com a residu un estel de neutrons, el qual té típicament un radi de 10 km i una massa de 1,4 vegades la massa del Sol, està animat d'un ràpid moviment de rotació i posseeix un camp magnètic molt intens. Aquests estels, si estan aïllats, emeten uns feixos de radiació molt intensos que van des de la regió ràdio fins a la X i gamma. Si formen part d'un sistema estel·lar doble, poden capturar matèria de la companya i emetre una gran quantitat de radiació X gràcies a l'energia despresada en el procés de caiguda de la matèria sobre l'estrella de neutrons. Es tracta, per tant, d'objectes extremadament energètics que podrien aniquilar completament la Terra si passessin a prop del Sistema Solar. De totes maneres, en aquests moments no es coneix cap objecte que pugui afectar la Terra en els propers milions d'anys.

A l'any 1967, els Estats Units van posar en òrbita els satèl·lits Vela amb l'objectiu de comprovar el compliment per part de l'antiga Unió Soviètica dels acords de prohibició de proves nuclears a l'atmosfera. Aquests satèl·lits van descobrir l'existència d'unes misterioses erupcions de raigs gamma d'origen clarament extraterrestre que duraven entre uns quants milisegons i un miler de segons. L'origen d'aquestes erupcions encara és un enigma, però ja es comença a albirar una possible solució gràcies al descobriment fet pel satèl·lit "Compton Gamma Ray Observatory" que aquestes fonts estaven distribuïdes isotròpicament pel firmament i que per tant haurien d'estar a distàncies cosmològiques. La variabilitat temporal indica que el despreniment d'energia es produeix en un volum molt petit, de mesures estel·lars. Per consideracions energètiques es creu que es forma un feix de partícules

relativistes molt estret que col·lisiona amb el medi interestel·lar i que el procés està relacionat amb la formació d'un forat negre o una estrella de neutrons durant un col·lapse gravitatori d'una estrella supermassiva, com Eta Carinae, o alternativament, durant la col·lisió de dues estrelles de neutrons o d'una estrella de neutrons i un forat negre. L'energia en joc és de l'ordre de 10^{52} erg/estereoradian, per tant molt superior a la d'una supernova normal.

Si un fenomen d'aquests es produís a una distància d'1 kpc i el feix enfilés la Terra, l'energia dipositada en un dels hemisferis seria de 2×10^{10} erg/cm² en pocs segons, l'equivalent a 4 bombes nuclears d'un kilotó per km². Les conseqüències serien terribles, ja que destruiria completament la capa d'ozó, generaria tormentes a escala global i provocaria enormes incendis. Però la situació podria ésser pitjor si, tal com indiquen els detectors d'alta energia, aquestes fonts emeten una quantitat de fotons amb energies de l'ordre del TeV dos ordres de magnitud més gran que el nombre de fotons de baixa energia, ja que en aquest cas l'energia dipositada a l'atmosfera seria molt superior i, a més a més, produirien dosis letals de muons amb un elevat poder de penetració que destruiria la vida encara que estigués a gran profunditat sota terra o sota el mar. S'estima que la probabilitat que uns d'aquests raigs enfilis la Terra és de 3×10^{-3} i tenint en compte que a la Galaxia es produeix una d'aquestes supernoves anòmales cada milió d'anys, resulta que la probabilitat que afecti la Terra és d'una vegada cada 100 milions d'anys. Curiosament, es tracta d'un temps comparable

al temps que ha passat entre extincions massives com la del Cretaci/Terciari.

Conclusions

L'Univers no és, doncs, aquell lloc plàcid i harmoniós que havien imaginat els filòsofs i els físics anteriors al segle XX, sinó que és l'escenari de tota mena de cataclismes que posen en joc quantitats enormes d'energia. Fins i tot l'Univers és el resultat d'una explosió. És sorprenent adonar-se que la vida ha pogut sorgir gràcies als cataclismes que van crear els elements necessaris per donar suport a la vida, però que si la vida ha pogut florir a la Terra amb tota la seva riquesa i varietat és gràcies que el Sol es troba a una regió relativament despoblada de la galàxia, on la violència de les explosions no s'ha fet sentir amb tota la seva plenitud. Aquesta sensació de sorpresa augmenta encara més quan un s'adona que l'estabilitat climàtica de la Terra, per comparació a Mars, per exemple, la proporciona la Lluna, que manté fixa l'orientació de l'eix de rotació de la Terra davant les pertorbacions gravitatòries dels planetes gegants, i que aquest satèl·lit es va formar probablement gràcies a una col·lisió entre la proto-Terra i un cos celeste de la mida de Mart. És que potser la vida no és res més que una espècie d'"estat" de la matèria que apareix fàcilment en qualsevol lloc on hi hagin les condicions oportunes? No se sap en aquests moments.

No hi ha cap dubte que en els propers anys assistirem a canvis tan profunds de la visió que l'home

té del Cosmos que l'actual semblarà tan ingènua com ens sembla ara la del passat. Fem vots perquè la societat continuï confiant en la ciència com a eina imprescindible per construir el futur i ens doti dels recursos necessaris per continuar arrabassant secrets a la natura i també per què la medicina ens permeti mantenir la ment desperta durant molts anys per poder-los assimilar i assaborir amb tota la seva profunditat.

BIBLIOGRAFIA

Unsolved problems in Astrophysics
Eds J.N. Bahcall & J.P. Ostriker
Princeton University Press 1997

Our cosmic origins
A.Delsemme
Cambridge University Press 1998

Stellar interiors
C.J. Hansen & S.D. Kawaler
Springer 1994

Astrobiology
Eds G.Horneck & C.Banmstark-Khan
Springer 2001

Construcción del Universo
D. Layzer
Prensa Científica 1989

Cosmological Physics
J.A. Peacock
Cambridge University Press 1999

Principle of Physical Cosmology
P.J.E. Peebles
Princeton University Press 1993

Advanced stellar Astrophysics
W.K. Rose

Cambridge University Press 1998

El Sistema Solar

R Smoluchowski

Prensa Científica 1986

*Destiny or chance: our solar system and its place in
the Cosmos*

S.R. Taylor

Cambridge University Press 1998

Rare Earth

P. Ward & D. Brownlee

Springer 2000

La vida de las estrellas

Temas Investigación y Ciencia 1997

DISCURS DE CONTESTACIÓ
PER L'ACADÈMICA NUMERÀRIA

EXCMA. SRA. DRA.

Ma. TERESA ANGUERA i ARGILAGA

Excm. Sr. Degà President,
Excms. Srs. Acadèmics,
Senyores i Senyors:

És per a mi un motiu de gran satisfacció personal haver estat escollida per a contestar el discurs de recepció en la Reial Acadèmia de Doctors del Excm. Dr. Jordi Isern, fins ara membre electe.

Tots els presents hem experimentat l'enriquiment que suposa la memòria presentada pel nou acadèmic, Dr. Jordi Isern, sobre *Un Univers turbulent*, i l'emoció que ens transmet el coneixement d'aquest gran enigma –encara que cada vegada ho és menys- sobre el qual la ciència ha dedicat temps, passió pel saber, i indubtables esforços.

El Dr. Jordi Isern nasqué a Llançà el 10 de juny de 1950, es llicencià en Ciències Físiques per la Universitat de Barcelona l'any 1972, i es doctorà per aquesta

mateixa Universitat l'any 1978. Ha estat Professor, en diversos períodes, de la Universitat de Barcelona i de la Universitat Politècnica de Catalunya, i Professor d'Investigació del Consell Superior d'Investigacions Científiques, en el sí del qual ha estat fent recerca en el Instituto de Astrofísica de Andalucía, en el Centre d'Estudis Avançats de Blanes, i en l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, on és en la actualitat, des de desembre de 1999.

La seva capacitat com a forjador d'investigadors es fa palesa pel fet que al llarg d'aquests anys ha dirigit sis Tesis Doctorals, i avui en dia, els seus ex-doctorands, ja inserits en una tasca també docent i investigadora, segueixen col·laborant amb el mestre.

El Dr. Isern és prolífic autor en el seu àmbit, amb més de 200 publicacions especialitzades, entre les quals figuren treballs en les més importants revistes científiques del món, com *Nature*, i de forma molt especial ha publicat articles en revistes d'Astronomia i d'Astrofísica, com *Astrophysical Journal*, *Astrophysical Journal Letters*, *Astronomy and Astrophysics*, o *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, entre altres.

Els seus camps de recerca són la estructura i evolució de les estrelles (estrelles AGB i nanes blanques), les explosions estel·lars (supernoves, noves i fonts de raigs X), l'origen dels elements químics, i l'estructura i l'evolució de la Galàxia (evolució química, formació estel·lar i edat). Per tot l'allau de persones que en som alienes, aquestes línies ens fan pensar en la

permanent pregunta envers què és l'Univers, quin és el seu origen, o fins quan es preveu que existeixi.

Uns punts de llum de brillantors diferents en el cel, una bengala que explota en el firmament, o el camí d'estels de la Via Làctia, que tots, de nens i d'adults, hem contemplat extasiats, ens porten a plantejar-nos qüestions transcendents sobre la vida i el més enllà, i sobre la immensitat de l'Univers, on tan sols les macrounitats que amiden les distàncies i les microunitats que mesuren les partícules ens fan encongir i sentir la petitesa de l'ésser humà. Petitesa que contrasta en front de la grandesa de la vida, de la qual gaudim al planeta Terra, de la perfecció del sistema, i de la inconmensurabilitat de l'espai.

En front de la imatge tranquil·la d'un Univers serè i sense especials sotrats, ens trobem amb un lloc turbulent on els fenòmens astronòmics es presenten moltes vegades en forma de cataclismes, i on calen proves empíriques –com en el seu dia l'experiment COBE– que puguin cloure les fortes polèmiques generades. El nou Acadèmic ens ha anat desgranant diverses qüestions sobre les quals encara manquen nous coneixements, com ara són la matèria fosca, o quan es va produir la inflació, o les propietats físiques del buit quàntic, o si una supernova pot tenir efectes letals sobre la Terra.

El ciutadà llec en Astronomia difícilment es pregunta si una estrella mor lentament, o què és una supernova, o si les nanes blanques poden arribar a explotar; però sí és probable que tingui el desig que les

importants recerques que es porten a terme, així com els projectes de llançament de satèl·lits, aportin, a més d'uns resultats eficaços en recerca bàsica, respostes rellevants en recerca aplicada, traduïbles en qüestions summament diversificades i positives sobre la vida, la salut, o la producció. La traducció de les descobertes en Astrofísica i Astronomia en avantatges per la vida civil, i per resoldre mancances que són colpidores en el moment actual de la Humanitat, és també un deure al que no hi podem ser insensibles.

El Cosmos encara tanca zelosament un bon grapat de secrets, posant molt alt el llistó de les recerques que calen continuar, i tenim el deure d'agrair les seves contribucions als que hi dediquen els seus esforços i saber. Indubtablement, l'Univers és una font inexorable d'objectius de recerca i de preguntes, de satisfaccions pels avenços aconseguits i d'angoixes pels dubtes que encara resten pendents, en una espiral de sabers contraposats que són la prova més ferma de la colpadora fertilitat que constitueix en sí mateix. Fertilitat que també ha estat llaminera des de l'àmbit humanístic, on diverses vessants –com l'art, la poesia, o les creences populars- han dedicat bon nombre de produccions.

L'insigne filòsof i pensador Ortega i Gasset deia que "*estructura es igual a elementos más orden*". La ciència ens aporta contínuament més informació sobre els elements en els quals rau l'Univers, aquest *Univers turbulent*, com ha titulat la seva magnífica exposició el Dr. Isern. Cal que ens preguntem també per l'ordre, com l'altre component del binomi, i en quina mesura la

seva regulació està o no fora de l'abast de la ciència, ja que aquesta és un excels producte humà, però la petitesa dels humans està fora de tot dubte quan contemplem el firmament.

S'espera que en els propers anys, o dècades, l'avenç vertiginós dels recursos tecnològics, juntament amb sòlids coneixements de l'Astronomia i les Matemàtiques, ens puguin aportar noves descobertes sobre l'Univers, i fem vots perquè aquestes ens obrin solcs útils per a la pau, per al progrés, i per a una major justícia social entre els pobles. En un període històric on, més que mai, cal la cruïlla i complementarietat entre diverses àrees de coneixement, cal lluitar per tenir encesa aquesta llum d'esperança.

En el joiós acte que avui ens aplega, i després d'escoltar la vostra magnífica conferència, es fa palès l'encert de la Reial Acadèmica de Doctors al obrir les portes, com a membre, al Dr. Jordi Isern, de qui podrem seguir gaudint els seus coneixements i la il·lusió per la conquesta de nous sabers al compartir, com a col·legues, les tasques d'aquesta Corporació.

ÍNDIX

UN UNIVERS TURBULENT	9
La cerca.....	9
El model cosmològic estàndard.....	13
En busca de la matèria fosca	16
El model inflacionari	19
La constant de Hubble	23
En busca de l'energia fosca	27
Les supernoves.....	30
Física de les estrelles.....	32
Col·lapses gravitatoris	36
Explosions termonuclears estel·lars.....	38
Fonts de vida	45
Fonts de mort	48
Conclusions	52
BIBLIOGRAFIA	54
DISCURS DE CONTESTACIÓ	57

NOVES PUBLICACIONS DE LA REIAL ACADEMIA DE DOCTORS

Directori 1991.

Los tejidos tradicionales en las poblaciones pirenaicas (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm.Sr. Eduardo de Aysa Satué, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Antoni Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història), 1992.

La tradición jurídica catalana (Conferència magistral del acadèmic de número Excm.Sr. Josep Joan Pintó i Ruiz, Doctor en Dret, en la Solemne Sessió d'apertura de curs 1992-93, que fou presidida per SS.MM. el Rei Joan Carles I i la Reina Sofia), 1992.

La identidad étnica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Angel Aguirre Baztan, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm.Sr. Josep M. Pou d'Avilés, Doctor en Dret), 1993.

Els laboratoris d'assaig i el mercat interior; Importància i nova concepció (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm.Sr. Josep M^a Simón i Tor, Doctor en Medicina i Cirurgia), 1993.

Contribución al estudio de las Bacteriemias (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il.lm.Sr. Miquel Marí i Tur, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm.Sr. Manuel Subirana i Cantarell, Doctor en Medicina i Cirurgia), 1993.

Realitat i futur del tractament de la hipertròfia benigna de pròstata (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm.Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Albert Casellas i Condom, Doctor en Medicina i Cirurgia i President del Col.legi de Metges de Girona), 1994.

La seguridad jurídica en nuestro tiempo. ¿Mito o realidad? (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres), 1994.

La transició demogràfica a Catalunya i a Balears (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Tomàs Vidal i Bendito, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Ferrer i Bernard, Doctor en Psicologia), 1994.

L'art d'ensenyar i d'aprendre (Discurs de promoció a acadèmic numerari de l'Excm.Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Agustín Luna Serrano, Doctor en Dret), 1995.

Sessió necrològica en record de l'Excm.Sr. Lluís Dolcet i Buxeres, Doctor en Medicina i Cirurgia i Degà emèrit de la Reial Acadèmia de Doctors, que morí el 21 de gener de 1994. Enaltíren la seva personalitat els acadèmics de número Excms.Srs.Drs. Ricard García Vallès, Josep M^a Simón i Tor i Albert Casellas i Condom. 1995.

La Unió Europea com a creació del geni polític d'Europa (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Jordi Garcia-Petit i Pàmics, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Llort i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques), 1995.

La explosión innovadora de los mercados financieros (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il.lm.Sr. Emilio Soldevilla García, Doctor en Ciències Econòmiques i Empresariales, i contestació per l'Excm.Sr. José Méndez Pérez, Doctor en Dret), 1995.

La cultura com a part integrant de l'Olimpisme (Discurs d'ingrés com acadèmic d'honor de l'Excm.Sr. Joan Antoni Samaranch i Torelló, Marquès de Samaranch, i contestació per l'Excm.Sr. Jaume Gil i Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques), 1995.

Medicina i Tecnologia en el context històric (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1995.

Els sòlids platònics (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numerària Excma.Sra. Pilar Bayer i Isant, Doctora en Matemàtiques, i contestació per l'Excm.Sr. Ricard Garcia i Vallès, Doctor en Dret) 1996.

La normalització en Bioquímica Clínica (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Xavier Fuentes i Arderiu, Doctor en Farmàcia, i contestació per l'Excm.Sr. Tomàs Vidaj i Bendito, Doctor en Geografia) 1996.

L'entropia en dos finals de segle (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques, i contestació per l'Excm.Sr. Pere Miró i Plans, Doctor en Ciències Químiques) 1996.

Vida i música (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Carles Ballús i Pascual, Doctor en Medicina i Cirurgia, i contestació per l'Excm.Sr. Josep M^a Espadaler i Medina, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1996.

La diferencia entre los pueblos (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent Il.lm.Sr. Sebastià Trias Mercant, Doctor en Filosofia i Lletres, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'aventura del pensament teològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Josep Gil i Ribas, Doctor en Teologia, i contestació per l'Excm.Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1996.

El derecho del siglo XXI (Discurs d'ingrés com acadèmic d'honor de l'Excm.Sr.Dr. Rafael Caldera, President de Venezuela, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Filosofia i Lletres) 1996.

L'ordre dels sistemes desordenats (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Josep M^a Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques, i contestació per l'Excm.Sr. Joan Bassegoda i Nonell, Doctor Arquitecte) 1997.

Un clam per a l'ocupació (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Isidre Fainé i Casas, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Joan Bassegoda i Nonell, Doctor Arquitecte) 1997.

Rosalía de Castro y Jacinto Verdaguer, visión comparada (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Jaime Manuel de Castro Fernández, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Pau Umbert i Millet, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

La nueva estrategia internacional para el desarrollo (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Santiago Ripol i Carulla, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Joaquim Gironella i Coll, Doctor en Medicina i Cirurgia) 1998.

El aura de los números (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor Enginyer de Camins, Canals i Ports, i contestació per l'Excm.Sr. David Jou i Mirabent, Doctor en Ciències Físiques) 1998.

Nova recerca en Ciències de la Salut a Catalunya (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numeraria Excma.Sra. Anna M^a Carmona i Cornet, Doctora en Farmàcia, i contestació per l'Excm.Sr. Ricard Garcia i Vallès, Doctor en Dret) 1998.

Dilemes dinàmics en l'àmbit social (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Albert Biayna i Mulet, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Ma. Costa i Torres, Doctor en Ciències Químiques) 1999.

Mercats i competència: Efectes de liberalització i la desregulació sobre l'eficàcia econòmica i el benestar (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Amadeu Petitbó i Juan, Doctor en Ciències Econòmiques, i contestació per l'Excm.Sr. Jaime M. de Castro Fernández, Doctor en Dret) 1999.

Epidemias de asma en Barcelona por inhalación de polvo de soja (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numeraria Excma.Sra. M^a José Rodrigo Anoro, Doctora en Medicina, i contestació per l'Excm.Sr. Josep Llor i Brull, Doctor en Ciències Econòmiques) 1999.

Hacia una evaluación de la actividad cotidiana y su contexto: ¿Presente o futuro para la metodología? (Discurs d'ingrés de l'acadèmica numeraria Excma.Sra. Maria Tercsa Anguera Argilaga, Doctora en Filosofia i Lletres (Psicologia) i contestació per l'Excm.Sr. Josep A. Plana i Castellví, Doctor en Geografia i Història) 1999.

Directori 2000.

Antonio de Capmany: el primer historiador moderno del Derecho Mercantil (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Xabier Añoveros Trias de Bes, Doctor en Dret, i contestació per l'Excm.Sr. Santiago Dexeus i Trias de Bes, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2000.

La medicina de la calidad de vida (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Luís Rojas Marcos, Doctor en Psicologia, i contestació per l'Excm.Sr. Angel Aguirre Baztán, Doctor en Psicologia) 2000.

Pour une science touristique: la tourismologie (Discurs d'ingrés de l'acadèmic corresponent, Il.lm.Sr. Jean-Michel Hoerner, Doctor en Lletres i President de la Universitat de Perpinyà, i contestació per l'Excm.Sr. Jaume Gil-Aluja, Doctor en Ciències Econòmiques) 2000.

Virus, virus entèrics, virus de l'hepatitis A (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Albert Bosch i Navarro, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm.Sr. Pere Costa i Batllori, Doctor en Veterinària) 2000.

Mobilitat urbana, medi ambient i automòbil. Un desafiament tecnològic permanent. (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Pere de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial, i contestació per l'Excm.Sr. Carlos Dante Heredia García, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

El rei, el burgès i el cronista: una història barcelonina del segle XIII (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. José Enrique Ruiz-Domènec, Doctor en Història, i contestació per l'Excm.Sr. Felip Albert Cid i Rafael, Doctor en Medicina i Cirurgia) 2001.

La informació, un concepte clau per a la ciència contemporània (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Salvador Alsius i Clavera Doctor en Ciències de la Informació, i contestació per l'Excm.Sr. Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra, Doctor en Enginyeria de Camins, Canals i Ports) 2001.

La drogaaddicció com a procés psicobiològic (Discurs d'ingrés de l'acadèmic numerari Excm.Sr. Miquel Sánchez-Turet, Doctor en Ciències Biològiques, i contestació per l'Excm.Sr. Pedro de Esteban Altirriba, Doctor en Enginyeria Industrial) 2001.

La Reial Acadèmia, bo i respectant com a criteri d'autor les opinions exposades en les seves publicacions, no se'n fa responsable ni solidària.

© Reial Acadèmia de Doctors
Impressió: Imprenta Baltasar 1861
Tels. 93 346 91 52 - 93 346 92 06
Tiratge 350 exemplars

Dipòsit Legal: B-16866-2002

REIAL ACADEMIA DE DOCTORS
-Publicacions-