Premi Nobel de Física 2002: dues noves finestres a l'Univers

Josep Maria Paredes* **i Pere Pascual**†

Introducció

El Premi Nobel de Física de l'any 2002 ha estat concedit a tres físics que han contribuït al descobriment i a la detecció de partícules i radiació còsmiques, amb la qual cosa han obert dos nous camps de recerca: l'astronomia de neutrins i l'astronomia de raigs X. La meitat del Premi Nobel ha estat per a Ray Davis, de la Universitat de Pennsilvània, i per a Masatoshi Koshiba, de la Universitat de Tòquio, per les seves contribucions pioneres a l'astrofísica, en particular per la detecció de neutrins còsmics. L'altra meitat ha estat per a Riccardo Giacconi, d'Associated Universities Inc. (AUI) de Washington, per les seves contribucions pioneres a l'astrofísica, que han portat al descobriment de fonts de raigs X còsmiques (figura 1).

Figura 1: *Ray Davis, Masatoshi Koshiba i Riccardo Giacconi (d'esquerra a dreta)*

Riccardo Giacconi i l'astronomia de raigs X

Wilhelm Röntgen va descobrir els raigs X l'any 1895. El seu descobriment va comportar importants avenços posteriors en els camps de la medicina i de la física, però no va ser fins que es va entrar en l'era espacial que es va poder estudiar el cel amb raigs X. La causa d'aquest retard és deguda al fet que els observatoris de raigs X han d'estar situats per sobre de l'atmosfera, que els absorbeix. Això pot semblar sorprenent, ja que els raigs X travessen la nostra carn, que està molt més atapeïda que l'atmosfera. Ara bé, encara que els àtoms a l'atmosfera estan prou espaiats, el gruix total de l'atmosfera és tan gran que fa menyspreable la probabilitat que un raig X arribi al terra. L'opacitat de l'atmosfera als raigs X és deguda a l'absorció fotoelèctrica dels àtoms que constitueixen les molècules dels gasos atmosfèrics. En canvi, la llum visible interactua de manera molt feble amb els àtoms de l'atmosfera i la travessa amb poca absorció.

Acabada la Segona Guerra Mundial, es van enviar als Estats Units els coets alemanys V2. El setembre de 1949 es va llançar un d'aquests coets equipat amb petits comptadors Geiger. L'equip responsable d'aquest experiment, dirigit per Herbert Friedman, del Naval Research Laboratory, va detectar per primera vegada emissió de raigs X procedent de la corona solar, les capes calentes més externes de l'atmosfera solar (Friedman et al., 1951). L'emissió de raigs X detectada era molt feble, només una milionèsima part de l'energia total radiada pel Sol en totes les longituds d'ona. Aquest resultat va fer pensar a molts científics que no calia esforçar-se a construir millors detectors i telescopis per observar fonts de fora del sistema solar ja que seria molt difícil tenir èxit. Afortunadament, aquesta visió no era compartida per Riccardo Giacconi.

Giacconi, que havia estudiat Física a la Universitat de Milà, on també es va doctorar investigant la física de raigs còsmics, va ser nomenat l'any 1959 responsable de ciències de l'espai de la companyia American Science and Engineering (AS&E), amb l'encàrrec de desenvolupar un programa d'astronomia de raigs X. Aquesta companyia s'havia constituït amb la idea que científics joves (Giacconi tenia 28 anys aleshores) poguessin tenir contractes del Departament de Defensa i de la NASA. El cap de l'equip directiu de l'AS&E era el reconegut físic Bruno Rossi, professor al Massachusetts Institute of Technology (MIT). Rossi, que també era membre de l'Space Science Board de la NASA, estava familiaritzat amb l'estudi sobre el gran potencial de les observacions d'emissions còsmiques de raigs X i és qui va fer el suggeriment d'estudiar-les. Giacconi, juntament amb Rossi, es va posar a treballar en els principis bàsics de com s'hauria de construir un telescopi de raigs X. De forma brillant, van idear una manera de focalitzar els raigs X en un detector fent que es reflectissin amb un angle molt petit al llarg d'una superficie de paraboloides seg-

*Josep Maria Paredes Poy (Ulldecona, 1954) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1987) i actualment és professor titular d'Astronomia i Astrofísica a la Universitat de Barcelona (josep@am.ub.es; htpp://www.am.ub.es/~josep).

†Pere Pascual de Sans (Sevilla, 1934) és doctor en Física per la Universidad de Zaragoza (1960). Actualment és professor emèrit a la Universitat de Barcelona.

mentats (Giacconi & Rossi, 1960). Giacconi i els seus col·laboradors van desenvolupar i van portar a la pràctica posteriorment aquestes idees.

Juntament amb el seu grup, també va seguir treballant en experiments amb coets amb la finalitat de provar la presència de radiació de raigs X de l'univers, però amb l'objectiu principal de detectar raigs X procedents de la Lluna. Després de calcular-ne l'emissió basada en la fluorescència de la seva superfície pels raigs X solars, van estimar que es podria arribar a detectar, encara que amb prou feines, durant els pocs minuts de vol del coet. Els dos primers llançaments van fallar, però el tercer, que va tenir lloc el 18 de juny de 1962 va tenir èxit. El coet *Aerobee 150*, que portava tres comptadors Geiger (figura 2), va arribar a una gran altura durant sis minuts. Les dades revelaven un pic de radiació intens al sud (figura 3) que no procedia de la Lluna, ja que l'emissió observada era massa intensa i no estava en la seva direcció. Després d'algunes setmanes d'anàlisis van concloure que l'origen més probable de la radiació observada era de fora del sistema solar i que el pic intens provenia d'una direcció al voltant del centre galàctic (Giacconi et al., 1962). El pic d'emissió és Sco X-1, identificat uns anys després com un objecte estel·lar feble a la constel·lació d'Escorpió (Gursky et al., 1966). A més, en aquest vol històric, també van detectar una radiació de raigs X de fons en tot el cel. La naturalesa d'aquesta radiació de fons còsmica de raigs X, feble i uniforme, ha estat desvelada recentment gràcies a les observacions fetes pel satèl·lit *Chandra*, com es comenta més endavant.

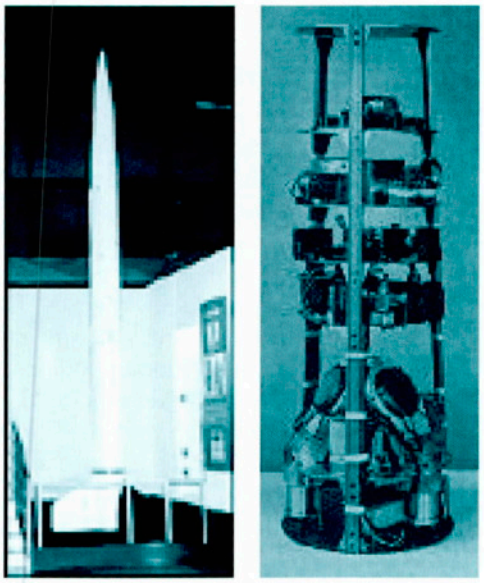

Figura 2: *Coet* Aerobee *amb els tres comptadors Geiger*

Aquests resultats van ser certament una sorpresa, però no un accident. El grup de Giacconi, l'any 1962, ja havia desenvolupat un programa de recerca per l'estudi dels raigs X procedents de l'espai. Cal indicar que en el seu article pioner (Giacconi & Rossi, 1960) sobre l'ús de reflectors d'incidència rasant per estudiar els raigs X còsmics, s'esmentava la nebulosa del Cranc com una font potencial. En aquella època ningú no tenia cap raó poderosa per esperar fonts intenses de raigs X, però si es tenen en compte els avenços que s'havien fet en radioastronomia, tothom esperava que aquesta nova finestra portaria a descobriments importants. Cal fer esment que l'emissió en raigs X provinents de la Lluna no es van detectar fins l'any 1990, gràcies al satèl·lit de raigs X *Roentgen Satellite X-ray Observatory* (ROSAT). El descobriment de la primera font de raigs X extrasolar per Giacconi i els seus col·legues va atreure l'interès de tota la comunitat astronòmica i va començar una exploració que ha aportat grans descobriments. Els anys següents, el grup de Giacconi va descobrir i identificar noves fonts de raigs X, com ara Cygnus X-2, que també va resultar ser un objecte estel·lar feble com Sco X-1. Aquests resultats els van portar a pensar que l'emissió de raigs X s'originava com a resultat de l'acreció de matèria provinent d'una estrella normal sobre una companya compacta no visible, com pot ser una nana blanca o una estrella de neutrons. També van trobar, entre altres troballes, que el púlsar en la nebulosa del Cranc era un emissor intens de raigs X, i van descobrir la primera font extragalàctica, M67, al cúmul de Verge.

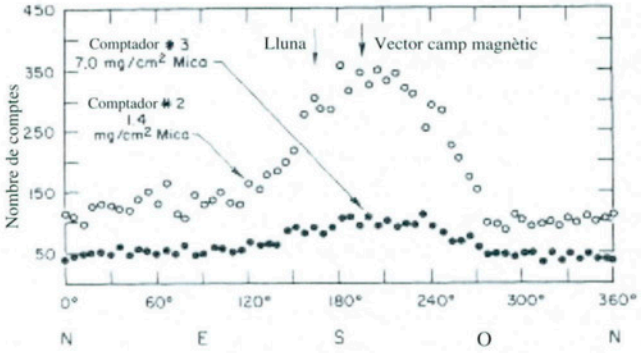

Figura 3: *Resultats de la primera detecció de raigs X de fora del sistema solar. Es mostra la distribució azimutal de raigs X mesurada pels comptadors Geiger a través de dues finestres de mica de diferent gruix. S'observa la presència d'una font de raigs X, diferent de la Lluna. També hi ha indicis d'una emissió còsmica de fons*

Els satèl·lits de raigs X

Amb la finalitat de superar la dràstica limitació temporal que comportava fer les observacions amb coets o globus sonda, Giacconi va proposar l'any 1963 de construir un satèl·lit de raigs X per fer un escombratge del cel. Ell i el seu grup van desenvolupar el satèl·lit, que es va llençar des de Kenya el 12 de desembre de 1970, anomenat *Uhuru*, que significa llibertat en swahili, ja que aquest era el setè aniversari de la independència de Kenya. Els detectors de raigs X que portava tenien deu

vegades més sensibilitat que els emprats en qualsevol experiment anterior. *Uhuru* va fer possible el seguiment durant amplis períodes de temps de l'emissió en raigs X de fonts còsmiques. Es va descobrir que l'emissó d'aquestes fonts presentava variacions ràpides, intenses i algunes vegades periòdiques. En combinació amb observacions òptiques, es va poder demostrar que aquestes fonts de raigs X formaven sistemes binaris, on matèria de l'estrella normal era transferida a l'estrella companya col·lapsada, gràcies al seu intens camp gravitatori. En molts d'aquests sistemes binaris, l'estrella col·lapsada és una estrella de neutrons, però en un d'ells, Cygnus X-1, el grup de Giacconi va descobrir fluctuacions ràpides, de menys d'un segon. Prenent com a base aquest descobriment, juntament amb observacions òptiques posteriors, Cygnus X-1 es va convertir en el més ferm candidat a forat negre. Avui dia hi ha una dotzena d'objectes a la nostra Galàxia que es creu que són forats negres. Altres descobertes del grup de Giacconi van ser Centaurus X-3, un púlsar de raigs X, o l'emissió en cúmuls de galàxies, entre d'altres.

Tot i el gran avenç que va representar *Uhuru*, no era possible obtenir imatges. Giacconi va construir un telescopi capaç de fer-ho. Es va dir *Einstein X-ray Observatory* i va entrar en funcionament l'any 1978. Aquest telescopi, que era 1.000 vegades més sensible que el d'*Uhuru*, era accessible a la comunitat astronòmica amb temps d'observació obert. La seva resolució angular, de pocs segons d'arc, va fer possible fer mapes d'objectes estesos, com ara restes de supernova, amb tots els detalls. Duia també un espectròmetre d'estat sòlid, que va permetre estudiar els elements pesants produïts en l'explosió de supernoves. En particular, el grup de Giacconi va publicar gran quantitat de resultats importants. N'esmentem, a tall d'exemple, alguns: l'emissió X d'estrelles tardanes està correlada amb la rotació estel·lar i la convecció; el descobriment de fonts X puntuals en la galàxia d'Andròmeda; el descobriment de jets en raigs X en nuclis de radiogalàxies; i finalment es demostra que els quàsars emeten raigs X i que les fonts llunyanes contribueixen significativament a l'emissió de fons de raigs X.

Mentre s'estava construint l'*Einstein X-ray Observatory*, Giacconi, juntament amb Harvey Tananbaum, va presentar a la NASA la proposta de construcció d'un nou telescopi de raigs X l'abril de 1976. Aquest telescopi representava una gran millora respecte a l'*Einstein*, perquè amb una resolució de 0,5 segons d'arc, permetria obtenir imatges similars a les obtingudes amb telescopis òptics. Aquest nou telescopi va patir diversos retards a causa de problemes de finançament. Finalment va ser llançat el juliol de 1999 amb el nom de *Chandra X-ray Observatory* en honor del premi Nobel de Física S. Chandrasekhar. Amb aquest telescopi s'ha aconseguit produir imatges i espectroscòpia comparables a les que s'obtenen en altres longituds d'ona. A part del mèrit de ser un dels creadors d'aquest observatori espacial, Giacconi ha dirigit diversos projectes de recerca, i en particular ha estat l'investigador principal del *Chandra Deep Field South*. Amb una llarga exposició en raigs X de 261 hores (figura 4), completada l'any 2001, l'equip de Giacconi ha catalogat 300 fonts de raigs X extremament febles, en una regió petita del cel (Giacconi et al., 2002). Per primer cop, després de més de quaranta anys del descobriment d'una radiació còsmica de fons de raigs X pel mateix Giacconi, s'ha demostrat que la combinació de la intensitat en raigs X de centenars de fonts individuals pot explicar la que havia estat una emissió de fons enigmàtica durant molts anys.

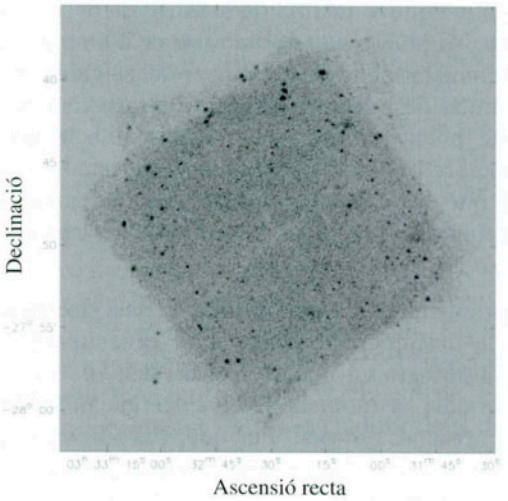

Figura 4: *Imatge de 942 ks obtinguda per Chandra, en el rang de 0,5 a 2 keV. Representa la imatge en raigs X més profunda feta fins ara*

Neutrinos

Poc després de l'anàlisi de Sir Ernest Rutherford (1871-1937) de 1911, es va acceptar que un àtom de pes atòmic A i nombre atòmic Z estava format, d'una banda, per un nucli constituït per A protons i $A-Z$ electrons, amb un radi de pocs femtòmetres, i, de l'altra, per una escorça atòmica que, en el cas d'un àtom no ionitzat, estava formada per Z electrons, ja que la seva càrrega total era nul·la. Pel que fa a la mida total de l'àtom, s'acceptava que era d'unes dècimes de nanòmetre. Cal tenir en compte que aleshores les úniques partícules elementals conegudes eren els electrons, els protons i els fotons i que les úniques forces ben establertes eren la gravitació i l'electromagnetisme. L'any 1930 es comprenia molt bé tota l'escorça atòmica, regida per les forces electromagnètiques, gràcies a l'aparició de la mecànica quàntica i se sabia que, a petites distàncies d'entorn d'un femtòmetre, es produïen unes interaccions fortes. No obstant això, la composició del nucli donava cada vegada més maldecaps. Les dificultats principals eren les següents:
a) Si un electró havia de confinar-se dins del nucli, el

principi d'indeterminació li assignava una energia d'algunes desenes de MeV com a mínim i, per aquesta raó, no s'entenia com podia estar-hi reclòs.
b) Ja es coneixia el moment magnètic dels electrons i se sabia que, el dels protons, si bé no s'havia mesurat, era molt menor. En conseqüència, el moment magnètic del nucli devia ser de la mateixa magnitud que el de l'electró i això hauria donat una estructura hiperfina molt més gran que l'experimental. Quin estrany mecanisme feia que el moment magnètic nuclear fos com el dels protons?
c) D'acord amb el model que considerem, el nucli de nitrogen amb $A = 14$ i $Z = 7$ tenia a l'interior 21 partícules de spin 1/2, cosa que estava en clara contradicció amb l'spin 1 que es deduïa de mesures de la molècula de nitrogen. Alguna cosa semblant succeïa amb el ^{6}Li.
d) Independentment dels resultats del seu spin, se sabia que el nucli de nitrogen satisfeia l'estadística de Bose-Einstein, però això era incompatible amb la presència d'un nombre imparell de fermions dins seu.
e) Per què les desintegracions beta tenien un espectre continu si corresponien al procés nuclear observat $(A, Z) \to (A, Z + 1) + e$?

El problema de l'espectre continu dels electrons emesos en la desintegració β era molt preocupant. Si un cos es desintegra en només dos, les lleis de conservació de l'energia i el moment fixen l'energia de cadascuna de les partícules emeses. Per què, llavors, en el procés $(A, Z) \to (A, Z + 1) + e$ els electrons presentaven un espectre continu d'energies, que precisament acabava en l'energia que donaven les equacions de conservació alludides? Niels Henrik David Bohr (1885-1962), en la lliçó «Faraday» del 8 de maig de 1930, va proposar públicament que l'energia no es conservava en aquests processos, idea que portava entre mans des de feia més d'un any i que va continuar defenent durant gairebé quatre anys més. Així, per exemple, l'octubre de 1929, Bohr escrivia a Nevill Francis Mott (1905-1996): «Estic preparant un treball sobre estadística i lleis de conservació en mecànica quàntica, en què també espero donar arguments convincents sobre el punt de vista que el problema de l'expulsió dels raigs β queda fora de l'abast de les lleis de conservació de l'energia i el moment».

El 4 de desembre de 1930, Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) va adreçar una famosa carta als assistents a un congrés d'experts en radioactivitat que tenia lloc a Tübingen, que començava dient: «He arribat a una solució desesperada per al problema de l'estadística equivocada dels nuclis de N i de ^{6}Li, i també per al problema de l'espectre continu de les desintegracions β [...]. Suposar que en el nucli hi ha partícules amb càrrega elèctrica nul·la, que anomenaré *neutrons*, que tenen spin 1/2 i que satisfan el principi d'exclusió [...]. La massa dels neutrons ha de ser com la massa de l'electró i en cap cas superior a 0,01 vegades la massa del protó [...]. El neutró té un moment magnètic que no ha de sobrepassar $e \times 10^{-13}$ cm». Actualment, aquesta partícula s'anomena *antineutrino electrònic*. El problema de l'espectre continu d'energia quedava resolt si se suposava que, juntament amb l'electró, s'emetia un antineutrino electrònic i que entre els dos es repartien l'energia i el moment disponibles. En un primer moment, Pauli va acceptar que la nova partícula era un component del nucli, a fi de resoldre el problema de l'estadística. Val a dir que en aquell moment ningú no creia que les partícules, excepte en el cas dels fotons, es poguessin crear ni destruir. Tanmateix, al cap d'uns mesos, Pauli va admetre la possibilitat que els antineutrinos es creessin en el moment de produir-se la desintegració beta.

El 17 de febrer de 1932, James Chadwick (1891-1974) va fer publicar un treball titulat *Possible existència d'un neutró*. Poc després la situació era clara: el neutró era una nova partícula elemental de spin 1/2 i en el nucli atòmic hi havia Z protons i $(A - Z)$ neutrons. Això resolia els quatre primers problemes dels cinc enunciats més amunt, mentre que els neutrinos en resolien l'últim. L'any 1933, Enrico Fermi (1901-1954) va publicar el cèlebre estudi «Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta». Va enviar una primera versió d'aquest treball a la revista *Nature* com a carta a l'editor, però va ser rebutjada perquè incloïa «especulacions abstractes massa allunyades de la realitat física perquè poguessin ser d'interès per als lectors». Malgrat tot, la seva teoria es va exposar més detalladament el 1934. Aquesta hipòtesi suposava una interacció puntual de quatre camps de tipus Dirac: el que descrivia el neutró, que es desintegrava, i el dels tres productes de la desintegració, el protó, l'electró i el neutrino. Gràcies a aquest plantejament, es van poder explicar satisfactòriament les desintegracions beta de tots els nuclis.

Al principi de la dècada dels cinquanta tothom acceptava l'existència dels neutrinos, tot i que ningú els havia detectat. Ningú havia vist, per exemple, la reacció $\bar{\nu}_e + p \to n + e^+$. No obstant això, gràcies a la teoria de Fermi, se sabia que si l'antineutrino tenia l'energia d'1 MeV, en dirigir-lo sobre un apantallament de plom amb un gruix d'un any de llum, interaccionaria de mitjana només una vegada. Per tant, per veure la reacció anterior, es necessitaven fluxos d'antineutrinos extraordinàriament grans. El 1951 Frederick Regnes (1918-1998) es va adonar que els fluxos necessaris es podien trobar prop dels reactors nuclears i, juntament amb Clyde Lorrain Cowan (1919-1974), va començar a treballar en el reactor de Savannah River. L'any 1953 van aconseguir els primers senyals de la reacció anterior, però, l'evidència inqüestionable la van trobar tres anys més tard i, el 15 de juny de 1956, van enviar un telegrama a Pauli per notificar-li que havien descobert la seva partícula. Es va concedir a Regnes la meitat del Premi Nobel de Física de 1995 per la detecció del neutrino; malauradament,

Cowan havia mort uns anys abans. Fermi i Pauli també van rebre el Premi Nobel, però per motius que no tenien res a veure amb els neutrinos.

L'electró i el neutrino electrònic són leptons; és a dir, partícules elementals que només experimenten les interaccions febles i les electromagnètiques si estan carregats. De la mateixa manera que hi ha una càrrega elèctrica i una de bariònica que es conserven additivament en totes les interaccions, aviat es va suposar l'existència d'unes càrregues leptòniques associades amb els leptons i que també es conservarien de manera general. La càrrega leptònica electrònica val $L_e = +1$ per a l'electró i el neutrino electrònic; $L_e = -1$ per a les seves antipartícules i zero per a qualsevol altra partícula. El novembre de 1936, Seth Henry Neddermeyer (1907) i Carl David Anderson (1905-1991) van descobrir, en la radiació còsmica, un nou leptó, el muó, del qual avui sabem que porta un neutrino associat, el neutrino muònic. El 1962, es va demostrar experimentalment que el neutrino electrònic i el muònic són diferents, tal com ja s'havia conjecturat teòricament. Per tant, hi havia un nombre leptònic muònic que valia $L_\mu = +1$ per al muó i el seu neutrino; $L_\mu = -1$ per a les seves antipartícules i que tenia un valor nul per a la resta de partícules. El Premi Nobel de Física de 1988 es va atorgar conjuntament a Leon Max Lederman (1922), Melvin Schwartz (1932) i Jack Steinberger (1921) «pel mètode del feix de neutrinos i la demostració de l'estructura doble dels leptons, mitjançant el descobriment del neutrino muònic», cosa que significava el primer Premi Nobel relacionat amb l'estudi dels neutrinos. L'any 1975, Martin Lewis Perl (1927) i els seus col·laboradors van descobrir un nou leptó anomenat *tau*, amb un nou neutrino associat. Perl va compartir amb Regnes el Premi Nobel de Física de 1995.

Ja es coneixien, per tant, tres famílies de leptons, cadascuna amb el corresponent nombre leptònic additivament conservat. Avui dia sabem:

Partícula	Mc^2	Vida mitjana
e	0,510998902 (21) MeV	$> 4,6 \times 10^{26}$ anys
ν_e	< 3 eV	
μ	105,658357 (5) MeV	2,19703 (4) 10^{-6} s
ν_μ	$< 0,19$ MeV	
τ	1.776,99 (28) MeV	2,906 (11) 10^{-13} s
ν_τ	$< 18,2$ MeV	

Les interaccions electromagnètiques i febles s'han unificat en la teoria electrofeble, creada per Sheldon Llig Glashow (1932), Abdus Salam (1926-1996) i Steven Weinberg (1933), que van compartir el Premi Nobel de Física de 1979 «per les seves contribucions a la teoria unificada de la interacció feble i electromagnètica entre les partícules elementals, incloent-hi, entre d'altres, la predicció del corrent feble neutre». En aquesta teoria, el fotó és l'intermediari de les interaccions electromagnètiques i els bosons Z i $W^\pm$ els intermediaris de les interaccions febles. La mesura de la vida mitjana del bosó Z ens permet afirmar que no apareixerà una nova família de leptons semblant a les anteriors.

En la teoria cosmològica del Big Bang es pot provar que, de la mateixa manera que hi ha una radiació còsmica de fons, corresponent a un cos negre a la temperatura $T = 2,725\,(1)$ K, hi ha un gas de neutrinos a una temperatura $T_\nu = (4/11)^{1/3}\,T = 1,945\,(1)$ K. Això significa que a l'Univers hi ha 411 fotons per cm^3. D'altra banda, suposant que el gas de neutrinos sigui altament relativista, llavors hi deu haver un total de 112 neutrinos o antineutrinos de cada família per cm^3; i com que hi ha tres famílies, la densitat de la suma de neutrinos i antineutrinos serà de 336 per cm^3. Veiem, doncs, que els neutrinos són, després dels fotons, les partícules més abundants de l'Univers, perquè, aproximadament, hi ha un protó per cada mil milions de fotons. Malauradament, fins ara no es coneix cap manera clara de detectar aquest fons de neutrinos.

Un altre problema actual són les oscil·lacions de neutrinos, que poden tenir lloc si els nombres leptònics no es conserven, com s'ha suposat fins aquí. En la cadena de reaccions nuclears que produeixen l'energia solar es generen neutrinos que escapen fàcilment del Sol i s'escampen uniformement en totes les direccions de l'espai; els que agafen la direcció apropiada arriben, finalment, a la Terra. Al Sol els neutrinos són produïts en la cadena principal PPI i en les dues de secundàries PPII i PPIII a través de les reaccions:

PPI:	$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$	$0 \leq E_\nu \leq 0,42$ MeV
PPII:	$^7\mathrm{Be} + e \rightarrow {}^7\mathrm{Li} + \nu_e$	$\mathrm{E}_\nu = 0,86$ MeV
PPIII:	$^8\mathrm{B} \rightarrow {}^8\mathrm{Be} + e^+ + \nu_e$	$0 \leq E_\nu \leq 11$ MeV

On les energies mitjanes dels neutrinos emesos són respectivament: 0,263 MeV, 0,86 MeV i 7,2 MeV i els fluxos de neutrinos són respectivament 6,0 10^{10} cm^{-2} s^{-1}, 4,9 10^9 cm^{-2} s^{-1} i 5,0 10^6 cm^{-2}s^{-1}.

El 1967, Raymond Davis (1914) i el seu equip van muntar un aparell per detectar aquests neutrinos. El detector estava basat en la reacció $\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + e$ i constava de 615 tones de percloroetilè ($C_2\,Cl_4$), situades a una profunditat de 1.500 m de Homestake Gold Mine, a Lead (South Dakota). La captura de neutrinos a l'estat fonamental del ^{37}Ar té un llindar de 0,814 MeV, però la captura més probable és, de bon tros, al primer estat excitat del ^{37}Ar, el llindar de la qual és de 2,12 MeV. Això vol dir que els neutrinos detectats per Davis són principalment (un 74 %) els de la desintegració del ^{8}B. Els càlculs basats en el model solar estàndard donen a aquesta experiència un resultat de ($7{,}6^{+1,3}{}_{-1,1}$) SNU, en què 1 SNU (*solar neutrino unit*) és, per definició, igual a 10^{-36} captures per àtom i per segon. D'acord amb això, és previsible que es produeixin entre un i dos àtoms de ^{37}Ar cada dia. El fet que aquests pocs àtoms es puguin

detectar amb una eficiència pròxima al 100 % és tot un triomf de les tècniques de la química nuclear. Aquest detector, que ha funcionat fins al 1985, ha observat un flux de neutrinos de (2,56 ± 0,23) SNU, aproximadament tres cops menys de l'esperat. Els succeeix res, als neutrinos, en el viatge de 150 milions de quilòmetres des del Sol fins a la Terra? Pot ser que el model teòric del Sol sigui equivocat i que, en conseqüència, es produeixin molts menys neutrinos dels que s'han calculat? Actualment no hi ha gaires dubtes que, si bé el model solar encara pot tenir algunes incerteses, hi ha un problema real amb la falta de neutrinos. El treball de Davis, al principi molt qüestionat, és àmpliament acceptat i ha merescut el Premi Nobel de Física de 2002, atorgat *ex aequo*, d'una banda, a la parella Raymond Davis Jr i Masatoshi Koshiba «per les contribucions pioneres en astrofísica, concretament per la detecció dels neutrinos còsmics» i, de l'altra, a Riccardo Giacconi, també «per les contribucions pioneres en astrofísica, que han conduït al descobriment de les fonts còsmiques de raigs X». Avui no es pot dubtar de l'existència d'oscil·lacions de neutrinos.

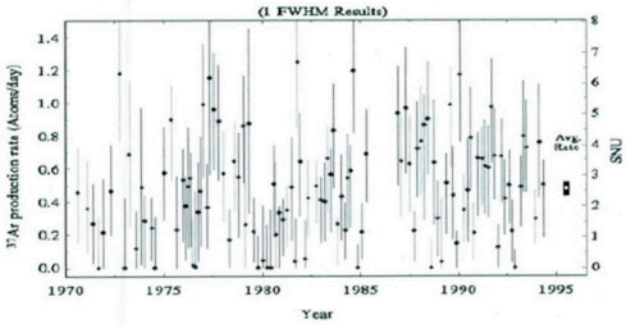

Figura 5: *Resultats finals de l'experiment de Davis (Cleveland et al, 1998). El flux mitja de neutrinos d'uns 2,5 SNU és molt menor que el calculat d'uns 8,6 SNU*

Suposem que els neutrinos tinguin massa i tornem a la teoria electrofeble. Els neutrinos amb masses ben definides M_i $(i = 1, 2, 3)$, els indicarem amb ν_i; mentre que els neutrinos que apareixen associats als leptons carregats, els indicarem com uns nous neutrinos ν'_i, els camps dels quals són la combinació lineal dels camps dels neutrinos de masses ben definides. Els neutrinos ν'_i són els que s'han considerat des del principi, és a dir l'electrònic, el muònic i el tauònic. Tant els neutrinos que es produeixen com els que es poden detectar en les reaccions nuclears són neutrinos ν'_i i no pas neutrinos de masses ben definides ν_i. Per tant, es pot escriure $|\nu'_i\rangle = \sum_k V_{ik}|\nu_k\rangle$ en què V és la matriu unitària. Llavors, es pot provar que en la seva evolució temporal hi ha oscil·lacions de neutrinos; és a dir, si en l'instant $t = 0$ es produeix un neutrino de tipus ν'_i, la probabilitat que en un instant $t > 0$ s'obtingui un neutrino diferent de tipus ν'_k ve donada per:

$$P(\nu'_i \to \nu'_k; t) = \left| \sum_l V_{il} V^*_{kl} \exp(-iE_l t) \right|^2 =$$

$$= \sum_l \sum_m V^*_{im} V_{km} V_{il} V^*_{kl} \exp(-i(E_l - E_m)t),$$

en què E_l és l'energia del neutrino ν_l. El nombre total de neutrinos es manté.

Si seguim la hipòtesi que el moment $\vec{p}$ està fixat i que és molt superior a la seva massa, aleshores

$$E_l - E_m = \frac{(E_l - E_m)(E_l + E_m)}{(E_l + E_m)} \approx \frac{m_l^2 - m_m^2}{2p} = \frac{\Delta m^2_{lm}}{2p}.$$

La longitud d'oscil·lació es defineix de la manera següent:

$$L_{lm} = \frac{4\pi p}{\Delta m^2_{lm}},$$

d'on

$$P(\nu'_i \to \nu'_k; t) = \sum_l \sum_m V^*_{im} V_{km} V_{il} V^*_{kl} \exp(-i2\pi t/L_{lm}).$$

Una explicació simple de les experiències de Davis és que el Sol produeix neutrinos ν'_e, una part dels quals es transforma en neutrinos ν'_μ i ν'_τ, que no són detectats per la reacció del ^{37}Cl.

Actualment, les evidències de les oscil·lacions de neutrinos són múltiples. En l'experiment GALLEX s'usen com a detector 30 tones d'una solució de clorur de gal·li que ha permès detectar els neutrinos que vénen de la cadena PPI. S'observa la reacció $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \to {}^{71}\text{Ge} + e$ el llindar d'energia de la qual és només de 0,234 MeV. S'hi trobaven 80 unitats quan se n'esperaven 120, i la discrepància era de dues desviacions estàndard. Aquesta mateixa reacció s'usa en el SAGE i el GNO. Actualment s'espera un flux de neutrinos de $(128^{+9}{}_{-7})$ SNU i en les experiències es troba: SAGE = $(75\ ^{+8}{}_{-7})$ SNU i GALLEX + GNO $(74\ ^{+8}{}_{-7})$ SNU.

El japonès Masatoshi Koshiba (1926) va ser el creador dels detectors Kamiokande. Els experiments del Kamiokande i Super-Kamiokande usen aigua i detectors Čerenkov. En aquest cas, la reacció usada per detectar els neutrinos solars és: $\nu_x + e \to \nu_x + e$.

Per eliminar el fons es detecten els neutrinos d'energies superiors a 7 MeV. Com a conseqüència, els electrons de retrocés estan picats en la direcció del neutrino que arriba. La distribució angular dels electrons detectats presenta un pic en la direcció oposada al Sol, que demostra clarament l'origen solar d'aquests neutrinos. La predicció teòrica és $(1{,}0\ ^{+0{,}20}{}_{-0{,}16})$ SNU i els valors experimentals són: Kamiokande $(0,55 \pm 0,08)$ SNU i Super-Kamiokande $(0,48 \pm 0,02)$ SNU.

Un pas important en la resolució del problema dels neutrinos solars són els resultats recents del Sudbury Neutrino Observatory (SNO). Com en el Super-Kamiokande, només s'observen neutrinos de la cadena PPIII. És un detector de 1.000 tones d'aigua pesant. Això permet observar la reacció produïda per mediació de corrents carregats $\nu_e + d \rightarrow p + p + e$, i també el procés $\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e$ produït per mediació tant de corrents carregats com de corrents neutres. De la primera d'aquestes reaccions s'obté directament el flux de neutrinos electrònics, que és $\Phi^{CC}(\nu_e) = 1,75 \pm 0,07$ (est.) $^{+0,12}{}_{-0,11}$ (sist.) $\pm 0,05$ (teò.)$\times 10^6$ cm^{-2} s^{-1}.

Tenint en compte la hipòtesi que tot el flux consisteix en neutrinos electrònics, del procés elàstic anterior s'obté: $\Phi^{EL}(\nu_e) = 2,39 \pm 0,34$ (est.)$^{+0,16}{}_{-0,14}$ (sist.)$\times 10^6$ cm^{-2} s^{-1}.

De la comparació d'aquestes dues quantitats es conclou que, amb 1,6 desviacions estàndard, els neutrinos que arriben del Sol contenen neutrinos no electrònics. Resultats més recents del Super-Kamiokande permeten afirmar el mateix, però amb 3,3 desviacions estàndard.

La radiació còsmica produeix en l'atmosfera terrestre pions i kaons que es desintegren en leptons carregats i neutrinos:

$$\pi^{\pm}, k^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu), \quad \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu).$$

Aquests neutrinos s'han pogut detectar per mitjà de les típiques reaccions neutrino-nucleó produïdes per mediació de corrents carregats. Un recompte naïf suggereix que el flux de neutrinos atmosfèrics ha de contenir el doble de neutrinos muònics que d'electrònics. En el Super-Kamiokande trobem:

$$R = \frac{(N_\mu/N_e)_{\rm exp}}{(N_\mu/N_e)_{\rm th}} = 0,638 \pm 0,017(\text{ est.}) \pm 0,050 \text{ (sist.)}$$

quan la mostra es restringeix a energies menors d'1 GeV per als leptons carregats. Quan aquesta energia és superior a 1 GeV, trobem un nombre semblant. Sembla lògic interpretar el dèficit de neutrinos muònics com a possibles oscil·lacions d'aquests neutrinos. L'anàlisi de la dependència angular dels neutrinos observats referma aquesta hipòtesi.

No es veu cap dèficit per als neutrinos electrònics. Al contrari, el dèficit dels neutrinos muònics augmenta com més gran és l'angle zenital, és a dir, la distància entre el punt de producció i el detector.

La col·laboració japonesa KamLAND –acrònim de *Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector*– té per objecte mesurar les oscil·lacions dels antineutrinos electrònics, d'energia superior a 1,8 MeV, produïdes per un reactor nuclear situat a uns 180 km del detector. Aquest detector és un líquid d'escintil·lació que descobreix la reacció usada per Cowan i Regnes en detectar els neutrinos per primer cop. Trobem que el flux d'antineutrinos detectats és 0,611 ± 0,085 (estadístic) ± 0,041 (sistemàtic) del flux que s'esperava si no hi haguessin oscil·lacions per a energies d'antineutrinos superiors a 3,4 MeV. S'espera poder augmentar-ne considerablement la precisió. D'aquesta mesura s'obté $\Delta m^2_{12} = 5,5\ 10^{-5}$ eV^2. Ningú creu que la massa dels neutrinos sigui molt gran ni que variï gaire; possiblement la massa del neutrino sigui de l'ordre d'una centèsima d'electronvolt.

Un problema important és saber si els neutrinos són partícules de Dirac o de Majorana, tenint en compte que, en aquestes últimes, partícula i antipartícula coincideixen. Des d'un punt de vista teòric i a fi d'explicar la massa dels neutrinos, molts teòrics preferirien que fossin partícules de Majorana, ja que un mecanisme natural dóna masses de l'ordre de la magnitud esmentada. La clau per aclarir la qüestió és saber que, si els neutrinos són de Majorana, llavors és possible l'observació de la doble desintegració beta sense neutrinos, $A(Z,N) \rightarrow A(Z+2, N-2) + e^- + e^-$ cosa que no és possible per a neutrinos de tipus Dirac. La col·laboració Heidelberg-Moscou palesa el fet d'haver observat aquesta desintegració, però els especialistes ho posen en dubte.

Referències

Chandra X-Ray Observatory Center [en línia], <http://chandra.harvard.edu> [Disponible: 04/03/2003]
HEASARC (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center) [en línia], <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/corp/observatories.html> [Disponible: 04/03/2003]
FRIEDMAN, H., LICHTMAN, S. W., BYRAM, E. T., *Phys. Rev.*, **83**, 1025 (1951).
GIACCONI, R., ROSSI, B. B., *J. Geophys. Res. Letters*, **65**, 773 (1960).
GIACCONI, R., GURSKY, H., PAOLINI, F. R., ROSSI, B. B., *Phys. Rev. Letters*, **9**, 439 (1962).
GIACCONI, R., ZIRM, A., WANG, J., et al., *ApJSS*, **139**, 369 (2002).
GURSKY, H., GIACCONI, R., GORENSTEIN, P. et al., *ApJ*, **144**, 1249 (1996).
http://neutrino.kek.jp
htpp://www.sas.upenn.edu/home/news/davis.html
DAVIS, R., *Phys. Rev.*, **97**, 766 (1955).
DAVIS, R. ET AL., *Phys. Rev. Lett.*, **20**, 1205 (1968). DAVIS, R. ET AL., *Bull. Am. Phys. Soc. II*, **16**, 631 (1971).
HIRATA, K. ET AL., *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 1490 (1987).
HIRATA, K. ET AL., *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 16 (1989).