

**ELS PREMIS NOBEL
DE L'ANY 2002
SOBRE EL
PREMI NOBEL DE FÍSICA
CONCEDIT A
RAYMOND DAVIS JR.,
MASATOSHI KOSHIBA
I RICCARDO GIACCONI,
A CÀRREC DE
JOSEP ANTONI GRÍFOLS,
DE LA UNIVERSITAT AUTÒNOMA
DE BARCELONA**

El títol d'aquesta conferència pretén ser un petit tribut o homenatge a l'iniciador de l'astronomia ajudada d'instruments, que és Galileu.

Em sembla que és en un museu de Florència on hi ha el telescopi de Galileu, amb el qual va iniciar una nova època, una nova era en l'astronomia. Com que tot això va de telescopis, en un sentit general i generalitzat, crec que val la pena fer aquesta menció.

El títol fa referència a l'obra *Sidereus nuncius* de Galileu, que és la primera obra escrita, diguem d'astronomia, després de l'ús d'un telescopi, on hi ha un dibuix original de Galileu de la Lluna (figura 1), més concretament, del que ell

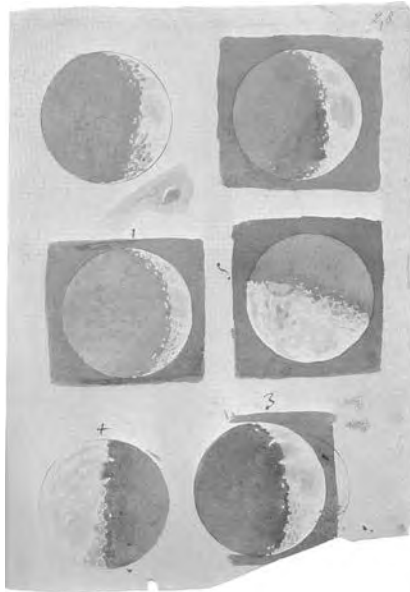


FIGURA 1. *Dibuixos de la Lluna fets per Galileu, possiblement entre el 30 de novembre i el 18 de desembre de 1609.*

veia a la Lluna a través del telescopi; de manera que és el primer *paper* en astronomia, diguem ajudada de telescopis (figura 2).



FIGURA 2. *Dos dels telescopis de Galileu, actualment en un museu de Florència.*

També de Galileu, però no de la mateixa obra, són els primers dibuixos de les taques del Sol; de manera que Galileu és el primer que també mira el Sol i hi veu aquestes imperfeccions, és a dir, que n'estudia la morfologia, a part del moviment, que és el que havien fet els astrònoms anteriors.

I això potser és el màxim que un podia arribar a pensar que es pot fer sobre el coneixement de l'estructura del Sol, o de les estrelles, perquè fins i tot el 1844 un filòsof ficava els peus a la galleda quan afirmava que si hi ha alguna cosa que mai no sabrem és la composició de les estrelles llunyanes i dels planetes. Amb tot, poc temps després es va iniciar l'era de l'anàlisi espectroscòpica de la llum que arriba de les estrelles i del Sol, en particular, amb l'espectroscòpia de Fraunhofer, i aleshores es demostrà que aquella sentència era absolutament improcedent.

De les estrelles, i en particular del Sol, ja sabem moltes coses i d'això en parlarem ara, en particular de com fun-

ciona el Sol. Malgrat que August Comte deia el 1844 que no en sabriem res, el cert és que sabem molt com funciona el Sol i és rellevant aquest punt, perquè és, en part, l'estudi del funcionament del Sol el que ha rebut aquest any el Nobel de Física.

Permeteu-me un petit prolegomen: Kelvin i Helmholtz pensaven que l'energia radiada pel Sol era simplement conversió d'energia gravitatòria per contracció en escalfor i després en energia electromagnètica radiada. El teorema del virial diu que l'energia interna d'un sistema estable és una meitat de la seva energia gravitatòria, per un sistema gravitatori; per tant, si hi ha contracció del Sol, els canvis en aquesta energia gravitatòria es reparteixen un 50% en canvis en l'energia interna d'aquesta estrella i l'altre 50% és el que s'ha de radiar per conservació de l'energia. De manera que el que van fer Kelvin i Helmholtz fou considerar l'energia gravitatòria, és a dir, l'energia d'una esfera de massa (m) i de radi (r), de manera que una variació d'aquesta energia gravitacional —i prenent-ne la meitat, perquè només la meitat serà radiada— resulta tres desenes parts de la fórmula

$$G (m^2/r^2) \Delta r$$

Amb aquesta fórmula, si volem calcular el temps de vida del Sol, només cal que posem en aquell Δr un canvi substancial del radi, per exemple, de prop del mateix radi, i ho dividim per la lluminositat del Sol (4×10^{26} watts). D'aquesta manera tenim una estimació, grollera si voleu, del temps que triga a esgotar-se aquesta energia, el temps que triga a haver-hi un canvi substancial del Sol. El temps resulta que és de 10 milions d'anys. D'això se'n diu *temps de Kelvin-Helmholtz*. És a dir, aquests canvis, que impliquen només la conversió d'energia gravitatòria, són molt més curts que els canvis geofísics de la Terra; això és una poca-soltada, i en

concret vol dir que el Sol té entorn de 10 milions d'anys, ha viscut 10 milions d'anys, o que també viurà 10 milions d'anys més. De manera que això realment cau pel seu propi pes, perquè sabem per dades geològiques que la història del sistema solar és molt més antiga. Aleshores el primer que fa un pas endavant sobre això és Eddington, cap al 1920, que ja coneix la teoria d'Einstein, ja sap que a dintre de la massa hi ha molta quantitat d'energia emmagatzemada, el famós $E = mc^2$, i ell proposa que quatre nucleons, quatre protons, en concret, es transformin en heli i amb això hi ha un defecte de massa. Quatre protons pesen més que un àtom d'heli, pesen més, tenen més massa, i, per tant, aquest defecte, el que falta, proposa Eddington, multiplicat per c^2 , és doncs el que s'inverteix radiant. Naturalment aquesta idea és la correcta, però encara cal que passin uns vint anys més, fins que cap al 1938-1940, Bethe i altres fan una teoria sobre el funcionament precís del Sol; el Sol no funciona com es pensaven Kelvin i Helmholtz, simplement contraient-se i deixant anar en forma de radiació aquesta energia alliberada, sinó que és a còpia de combustions termonuclears; els protons, quan s'acosten els uns als altres, han de vèncer barreres coulombianes, i, un cop vençudes aquestes barreres coulombianes, el balanç total del procés és que quatre protons acaben sent una partícula alfa, amb l'emissió de dos positrons i dos neutrins, més quasi 27 megaelectrons volt d'energia. Aquesta és l'energia que s'allibera cada vegada que quatre protons sintetitzen una partícula alfa. Naturalment això és el balanç final, això passa per una sèrie de reaccions que ja explicaré més endavant per sobre, però l'important aquí és la paraula *neutrins* o el fet que apareixen en aquesta mena de reaccions, que són partícules molt lleugeres d'espín 1/2, ara sabem que tenen massa, segurament per sota d'1 electró volt, però massives, i, a més, són partícules neutres, que interactuen només feblement amb la matèria ordinària; és a dir, un cop són pro-

duïts aquests neutrins a l'interior del Sol, en són expulsats immediatament, ens arriben a nosaltres i s'escampen per tot arreu. Típicament, això depèn de la *secció eficaç*, que és com s'anomena tècnicament la quantitat d'interacció que hi amb la matèria: el recorregut lliure mitjà d'un neutrí per plom, per exemple, és de 100 a 1.000 anys llum; o dit d'una altra manera, un neutrí d'una energia al voltant del megaelectró volt, travessa, sense ni adonar-se'n, d'entre 100 a 1.000 anys llum de plom posats l'un darrere l'altre, de manera que els neutrins són unes partícules absolutament penetrants, fantasmagòriques, que ho travessen tot. Per als neutrins que escapen del centre del Sol, ja he dit que surten immediatament, la matèria solar no és cap obstacle; en canvi, la radiació que és creada, els fotons, que és produïda en el centre del Sol, triga uns 10 milions d'anys a sortir, és a dir, que podria passar, si ho dramatitzem al màxim, que fa 10 milions d'anys que el Sol és apagat i no ho sabem. En canvi, amb els neutrins podem saber que almenys encara fa vuit minuts que cremava, perquè més o menys un neutrí triga com la llum a arribar des del Sol fins aquí, vuit minuts, a la velocitat de la llum. De manera que el Sol és un forn, una central termonuclear, el centre del qual té 10 milions de graus; la capa externa té 6.000 kelvins; la lluminositat, com hem dit abans, 4×10^{26} watts; una massa de 2×10^{30} kg i, pel que fa a la seva vida, fins ara ha viscut uns 5.000 milions d'anys, molt més que no pas aquells anys predits per Helmholtz i Kelvin.

De manera que l'energia es genera per fusió de nuclis d'hidrogen, que sintetitza heli. Per cert, és el que aquí volem tenir com a font inexhaurible d'energia produïda per fusió nuclear, i aquí no ho aconseguim mai perquè no hem aconseguit encara les temperatures llindar, aquelles temperatures que cal superar per creuar les barreres coulombianes dels protons. El Sol crema 600 milions de tones per segon d'aquest hidrogen, d'aquests protons, 600 milions de tones cada

segon per sintetitzar l'heli i generar l'energia que ens dona. El flux de neutrins del Sol és de 60.000 milions de neutrins per centímetre quadrat i segon que arriben ara a la superfície de la Terra; per tant, per cada centímetre quadrat del nostre cos i per cada segon que passa, ens travessen 60.000 milions de neutrins. La lluminositat dels neutrins, però, és només un 2,3 % de la lluminositat del Sol. L'energia que duen aquests neutrins és molt petita comparada amb l'energia que porta la radiació electromagnètica.

He promès parlar dels processos de síntesi, els processos detallats que passen dintre del gran forn solar per sintetitzar l'energia i produir els neutrins. Entre aquests processos, cal destacar la cadena de protó-protó (p-p). Com que és molt improbable que xoquin en el mateix punt quatre protons alhora, s'ha de procedir en processos dos a dos: dos protons xoquen, produeixen deuteri i emeten un positró i un neutrí, o també, menys freqüentment, el deuteri es troba un altre hidrogen, un altre protó, i genera heli 3 i sintetitza heli 3, i al mateix temps allibera energia, perquè hi ha l'energia de lligam d'aquest heli 3. Aleshores, dos helis 3, de dos processos paral·lels, sintetitzen una partícula alfa i deixen anar dos protons. Hi ha també altres alternatives, com un heli 3 i un heli 4 que formen beril·li, etc. En fi, hi ha altres cadenes col·laterals que constitueixen la cadena de p-p, les quals se sap perfectament amb quins percentatges passen. Una dada important són els neutrins produïts en el p-p, anomenats *neutrins de p-p*, que tenen una energia que no arriba als 0,420 megaelectrons volt. En canvi, hi ha altres neutrins que arriben més amunt, a 0,86.

De manera que se sap perfectament com funciona el Sol, almenys des del punt de vista teòric, i això ha estat confirmat precisament amb el treball d'aquests premis Nobel, dels quals parlarem d'aquí a un moment.

I un cop establerta la teoria del Sol i de quants neutrins han d'arribar a la Terra, això es presta ara a voler-ho

comprovar empíricament i aquí és on entra l'*astronomia de neutrins*. Els telescopis de neutrins són simplement disposicions experimentals que ja no tenen la forma d'un tub, com el de Galileu, sinó que són gegantins arranjaments experimentals: a 1,5 km sota terra, dintre d'una mina d'or, hi ha un gran tanc que actua com a detector d'aquests neutrins que arriben del Sol. El premi Nobel, Ray Davis, és qui va muntar aquest experiment que ara vull explicar. L'experiment s'anomena *Homestake*, que és el nom de la mina dels Estats Units. Hem dit que els neutrins penetren la matèria «tan tranquil·lament», de manera que estem sota terra i penetren la terra i entren fins al detector. Aquest detector conté, essencialment, àtoms de clor 37. El procés és el següent: arriba un gran flux de neutrins, cadascun amb molt poques probabilitats d'interactuar amb matèria, però com que n'arriben molts, algun potser hi interactuarà. A més, si hi ha molta matèria, molts àtoms de clor, encara hi haurà més probabilitats d'interactuar-hi. Així, doncs, aquesta reacció —on un àtom de clor es transforma en argó— és possible, encara que passa molt poc sovint, i és possible només per a neutrins que superin els 0,81 megaelectrons volt. Els neutrins més nombrosos arriben com a màxim a 0,4, de manera que, malauradament, no són sensibles a aquesta reacció. Davis, doncs, s'havia d'oblidar de voler detectar el grup de neutrins que és més nombrós. Però el procés és apte per a totes les altres fonts de neutrins, essencialment les principals, llevat, com dic, de la cadena del p-p. En aquest experiment de Davis hi havia, per tant, 2×10^{30} àtoms d'aquest clor dintre d'un tanc d'uns 400.000 litres de percloroetilè. Què és aquest element? És un líquid molt barat que es fa servir com a detergent líquid per rentar industrialment la roba. De manera que aquell tanc que us he comentat, és ple de 400.000 litres de percloroetilè, i espera neutrins que li arribin. De mitjana, els càlculs diuen que només 17 àtoms d'aquest argó són

produïts entre els 2×10^{30} àtoms de clor que hi ha a l'objectiu, és a dir, que només n'interactuen 17 d'entre els 2×10^{30} àtoms; aquests números potser no ens els imaginem, però són números fantàsticament grans. De manera que es tracta de, literalment, trobar una agulla en un paller: trobar 17 àtoms d'argó dintre d'un tanc de 400.000 litres de percloroetilè. Això es mesurava cada dos mesos: Davis extreia entorn de 17 àtoms d'aquests 400.000 litres, perquè aquest període de dos mesos era ideal, optimitza el fet de detectar l'argó. L'argó és radioactiu i té una vida mitjana de 35 dies, aproximadament. És radioactiu per captura electrònica, bàsicament pel procés invers, per una emissió d'electrons Auger en els àtoms. La qüestió és que s'han d'extreure i no podem esperar gaire temps, perquè si esperem més dels 35 dies de la vida mitjana, malgrat que els hagi produït, se t'han desintegrat i ja no en tornes a tenir. Com s'extreuen? El premi Nobel és radioquímic, va fer el doctorat en química, de manera que és un gran expert en química, per tant es va dedicar a treure aquests àtoms purgant tot el tanc amb heli: el va condensar a 32 graus sota zero, el va passar per un sedàs molecular a temperatura ambient i va recollir finalment aquests àtoms sobre carbó a la temperatura del nitrogen líquid. És un procés químic complicat, però d'una eficiència d'extracció bastant notable, del 95 %.

Així, l'experiment d'aquest tanc que és allà, esperant els neutrins i del qual cada dos mesos s'extreuen 17 àtoms, ha estat funcionant des dels anys setanta fins a l'any 1996, de manera que ha estat uns trenta anys col·leccionant àtoms d'argó. En aquest període se n'han produït uns 2.200, que indiquen la presència dels neutrins del Sol que han interactuat. L'eficiència d'aquest procés d'extracció, ja ho acabo de dir, és del 95 % i, en conseqüència, els àtoms, després del procés, van ser 1.997; el 95 % de 2.200 són 1.997. L'eficiència es coneix molt bé, perquè en l'experiment hi ficaven una

quantitat coneguda d'argó i, per tant, si aquesta quantitat coneguda es recollia després, se sabia que el que s'hi ficava pràcticament es treia, s'extreia.

Hem comprovat que, efectivament, el model del Sol funciona perfectament, i, a més, tenim altres experiments que ho han comprovat, no és el moment aquí d'explicar-los, perquè estem homenatjant els premis Nobel d'enguany. Només voldria afegir que els neutrins que es produeixen al Sol són un tipus de neutrins anomenats *neutrins electrònics*, perquè estan associats a processos en què apareixen electrons. De fet, aquests neutrins oscil·len; ara sabem que canvien de naturalesa i passen a ser una altra mena de neutrins que no es poden detectar amb aquests processos en aquest tanc, de manera que, per què no arriben tots els que s'esperen? La resposta és senzilla: perquè s'han transformat.

El Premi Nobel a Ray Davis és el premi a l'experiment més antic sobre aquesta qüestió. Hi ha, també, el Premi Nobel a un japonès, Koshiba, pel mateix motiu, per neutrins. Aquest japonès és l'impulsor d'un altre detector gegantí, però al Japó; aquest detector també és a sota terra —per aïllar la radiació còsmica, per protegir, perquè no hi hagi processos no associats a neutrins del Sol que emmascarin els resultats. Quan es construïa aquest tanc, tota la cavitat va ser emplenada d'aigua i es van posar tot de detectors a les parets, uns fotocàtodes, que són uns aparells que detecten la llum. S'han d'emmagatzemar moltes tones d'aigua a dintre per tenir l'esperança que hi hagi reaccions de neutrins del Sol amb l'aigua. Després del primer detector, que es diu *kamiokande*, el mateix Koshiba en va impulsar un de superior, el *superkamiokande*, perquè aquell primer detector, de fet, estava pensat per descobrir la desintegració del protó. Durant molts anys, es va pensar que el protó s'havia de desintegrar, que no era estable, que la matèria de la qual som fets no és estable, i s'havien emmagatzemat grans quantitats d'aigua per veure

si algun protó d'aquesta aigua, de tota aquesta immensa quantitat, es desintegrava; això no s'ha vist mai, de manera que el protó, pel que sabem, és absolutament estable, però el mateix detector ha servit, en canvi, per veure senyals que arriben del Sol. Els neutrins del Sol incideixen en aquest tanc, en 2.140 tones d'aigua, i xoquen elàsticament amb electrons de la molècula d'aigua (naturalment, si interactuen); per això n'hem de tenir molts, perquè algun d'aquests electrons interactuï. L'electró, en rebre el xoc del neutrí, recula, és un electró relativístic, i recula a una velocitat superior a la que té la llum en aquest medi, i, quan passa això, es produeix l'*efecte Txerenkov*. Quan una partícula es mou a una velocitat superior a la que té la llum en aquell medi, aquesta partícula emet radiació, de manera que aquests electrons emeten radiació Txerenkov, que és la que es detecta a les parets d'aquell dipòsit immens que aplega 1.100 fotomultiplicadors. Els fotocàtodes que reben els fotons de la radiació Txerenkov, la detecten i la registren. La detecció aquí és bàsicament de neutrins procedents del bor 8. Comparat amb l'experiment de Davis, que és aquell d'anar recollint àtoms transformats i després veure, a part, quants neutrins hi han incidit, aquest és un experiment en línia, és a temps real, és a dir, quan arriba el neutrí, pràcticament immediatament després es detecta el fotó en un fotomultiplicador d'aquests, de manera que és un experiment a temps real i, a més a més, és direccional, perquè en aquell tanc, quan n'extreus els àtoms d'argó, no saps d'on ha vingut el neutrí, però aquí sí, perquè saps cap on recula l'electró que rep l'impacte del neutrí i, per tant, apunta en la direcció contrària a la direcció del Sol.

De manera que no només Davis ha registrat neutrins del Sol, sinó que Koshiba també n'ha registrat, amb la particularitat que sap d'on vénen i sap quan arriben. És coneguda la dita que en el regnat de Felip II el sol no es ponia mai en els seus dominis. Val a dir, però, que això és una vanaglò-

ria vana, perquè els imperis passen, però, en canvi, en els dominis de la física sí que mai no es pon el sol, perquè, si un se situa sota de la Terra pot saber on és el Sol simplement amb aquest instrument; amb aquest telescopi, fins i tot de nit, hom pot saber on és el Sol, de manera que és un triomf de la física davant de la política.

Ara deixem els experiments pels quals aquests científics han ajudat a confirmar els mecanismes interns del Sol, i ens centrem en la vida del Sol. Ja he dit que la vida del Sol és de prop de 10^{10} anys. Si un fa servir l'energia nuclear, en lloc d'aquella energia gravitacional, pot estimar que el Sol ha de durar 5.000 milions d'anys més (perquè ja en duu 5.000 i són uns 10.000 milions d'anys). Bé, això és entorn de 1.000 vegades el temps de Kelvin i Helmholtz, i això ho fa bàsicament cremant hidrogen per sintetitzar heli (el que se'n diu *seqüència principal*). El Sol, naturalment, no continuarà sempre podent cremar heli, i quan hagin passat els anys previstos, passa per una fase de gegant roja durant la qual s'expansiona molt. Les seves, diguem-ne, dimensions seran més grans que la de l'òrbita al voltant del Sol actualment, de manera que el seu espai vital ens envairà a nosaltres. Passada aquesta fase més breu (la fase més llarga és la de la seqüència principal de la síntesi continuada i estable d'heli), quan s'apaguen aquests processos nuclears, perquè s'acaba el combustible, o el combustible ja no pot cremar més perquè no té prou temperatura interna per seguir sintetitzant a partir de l'heli nuclis superiors, aleshores aquest sol acabarà sent el que se'n diu una *nana blanca*. Estic seguint la història del nostre Sol, o de qualsevol estrella que tingui la seva massa. Quan s'arriba a la nana blanca, l'estabilitat d'aquesta estrella, que ja no combustiona materials nuclears, queda garantida simplement per la pressió dels electrons, que eviten el col·lapse gravitacional, pel principi d'exclusió de Pauli; és a dir, arriba un moment, quan s'apaguen les combustions termonuclears, que la grave-

tat té tendència a comprimir el material i a fer-lo més i més dens, fins al punt que els electrons són massa comprimits, estan envaint el *Lebensraum* els uns als altres, és a dir, l'espai vital dels seus veïns. Més enllà d'aquí no es poden comprimir i aturen llavors tota la massa que tenen a sobre i contraresten tota la força gravitacional amb pressió de Fermi, pressió que és quàntica (del principi de Pauli). Una nana blanca típica té la massa de tot el Sol, però concentrada en la mida, el volum del planeta Terra, de manera que és una cosa molt densa, aquesta nana blanca. Així, quan arribem aquí, som amb una estrella compacta, freda, nana blanca, que és el destí d'aquest nostre sol, per exemple, o qualsevol estrella de la seva mida. Què els passa, però, a les estrelles més grans que el Sol? Si hi ha més massa al damunt, també hi ha més energia gravitacional, i la compressió gravitatòria, quan s'acaba la combustió de l'heli, pot fer augmentar la temperatura de l'interior d'aquella estrella per sobre dels llindars de combustió de l'heli. Estem a temperatures més elevades, suficients perquè l'heli comenci a cremar i, aleshores, se sintetitza carboni lentament en el nucli de l'estrella; és a dir, l'heli es va convertint en carboni a l'interior, però a les parts externes tenim heli i hidrogen. El procés d'evolució estel·lar és que primer teníem hidrogen, en el centre hem sintetitzat heli, després aquest heli —si tenim prou massa gravitacional, si tenim prou energia, si s'escalfa suficientment— se substitueix per carboni; en l'embolcall d'aquest carboni central hi ha heli, després hi ha hidrogen, etc. En fi, això pot continuar perquè, quan s'ha cremat tot l'heli en el centre de l'estrella, que és el més calent, i ha passat a ser carboni, aleshores s'apaga; s'apaga i es torna a contraure l'estrella fins que arribem als llindars de temperatures suficients per cremar carboni; llavors el carboni crema i sintetitza neó. Al voltant, on hi havia heli, es va transformant en carboni i, a l'altra capa més externa, on hi havia hidrogen, se sintetitza heli, i a l'exterior queda una capa d'hidrogen. Bé,

i això continua i, si té prou massa aquesta estrella..., naturalment això es pot truncar depenent de la massa de l'estrella en qualsevol d'aquests estadis, però si l'estrella té prou massa s'arriba a l'últim dels nuclis que poden ser sintetitzats, el ferro.

Quan el cor de l'estrella és privat del combustible nuclear s'apaga i es contrau, però de moment els electrons s'oposen a aquest col·lapse i exerceixen pressió de Fermi, fins que, de tanta pressió com hi ha, aquests electrons esdevenen molt energètics i assoleixen velocitats relativístiques; quan passa això, a l'estrella energèticament li surt a compte que els protons que hi ha capturin els electrons i es converteixin en neutrons, perquè per passar de protons a neutrons necessitem certa energia, perquè hi ha més massa en els neutrons que en els protons, de manera que quan els electrons tenen prou energia per aportar el dèficit de massa, l'estrella converteix tots els protons en neutrons tot empassant-se els electrons i deixa anar neutrins un altre cop. Això és la *neutronització* i aquest és l'origen d'una estrella de neutrons. Tot el que hi ha allà en el nucli d'aquesta estrella es converteix en neutrons.

Naturalment, quan ja no hi ha electrons, tota l'estructura col·lapsa fins que el nucli arriba a una densitat prou gran (la densitat nuclear, més o menys) perquè la pressió de Fermi dels neutrons equilibri la gravetat. Els neutrons (i els protons) tenen una pressió de Fermi 2.000 vegades menor que la pressió dels electrons, per això els protons no tenien cap paper abans; ara, però, com que no hi ha electrons, són els neutrons els que assumeixen un paper, però, naturalment, no fins que aquesta pressió de Fermi no sigui considerable. Això passa quan hi ha prou densitat, perquè la pressió de Fermi és proporcional a la densitat. És a dir, tenim una estructura que col·lapsa, i que està col·lapsant sobre el seu mateix material, però només fins al moment en què el nucli intern pot resistir el col·lapse, per pressió de Fermi. Tot

aquest material exterior que s'estavella en caiguda lliure, bàsicament sobre el seu nucli, arriba un moment en què rebota sobre aquest nucli a causa de la pressió de Fermi que exerceixen els neutrons. Dit d'una altra manera: els neutrons que hi ha en el nucli de l'estrella reben la caiguda de tots els materials que tenen al damunt (tots aquests materials que s'han anat sintetitzant), però com que els neutrons han esdevingut un nucli dur, els materials reboten i llavors són expel·lits a l'exterior. I això és justament una explosió de supernova. De fet, nosaltres som pols d'estrelles, perquè els nostres materials són fets d'aquestes explosions: el nostre ferro, níquel, oxigen, tot el que tenim ha estat produït abans en una estrella que ha explotat com una supernova.

En aquest punt, l'energia gravitacional alliberada és molt fàcil de calcular. El nucli que queda de l'estrella de neutrons té un radi de 10 km: tota una estrella més gran que el Sol queda reduïda, doncs, a 10 km de radi, on l'emissió d'energia és fantàstica, 10^{53} erg, i on pràcticament tot aquí són neutrins. Mentre que en el Sol només una ridícula fracció de la lluminositat electromagnètica eren neutrins, aquí pràcticament tota l'energia és alliberada en forma de neutrins; només un 1% en energia cinètica del material que surt expel·lit, i un 0,1% en radiació electromagnètica.

El febrer del 1987 vam tenir la sort que en el Gran Núvol de Magalhães va explotar una supernova i la vam veure, i, per primera vegada, vam detectar-ne els neutrins. Aquesta supernova va ser el primer cas històric, perquè va permetre experimentar situacions molt poc habituals. En efecte, hi havia una supernova de la qual, per dir-ho d'alguna manera, teníem la foto d'abans d'explotar i el 1987 va fer explosió: és a dir, en tenim l'abans i el després. En general, les supernoves, la de Kepler, la de Brahe, totes aquestes només es veien *a posteriori*, quan ja s'havia produït l'explosió; però no sabies que abans hi havia una estrella, allà.

Això és un inici també d'astronomia de neutrins extragalàctica, perquè el Gran Núvol de Magalhães és en una galàxia satèl·lit, petita, però exterior a la nostra. I el febrer del 1987 el detector kamiokande, que hem vist abans al Japó, fou impactat per neutrins d'aquesta explosió de supernova, que va ser produïda a 170.000 anys llum de la Terra. Dels 10^{58} neutrins que van ser emesos (calculat amb les teories de col·lapse nuclear), 10^{16} van travessar el detector i només 12 van ser registrats. Al detector, hi arriben neutrins des de diverses procedències: per exemple, del procés de neutronització que s'ha explicat més amunt; també hi arriben neutrins i antineutrins de processos d'anihilació en el nucli de l'estrella. La interacció d'aquests neutrins o antineutrins es fa a través de l'aigua en el detector kamiokande. L'energia d'aquests darrers neutrins és molt més gran que no pas l'energia dels neutrins del Sol, i és d'entre 10 i 20 MeV. El fet de tenir els dotze successos de neutrins registrats per ordre d'arribada, és la primera vegada que permet comprovar la teoria del col·lapse gravitacional.

Encara queden els raigs X i, per parlar-ne, seguim amb les estrelles. L'eficiència d'extracció d'energia del Sol per fusió nuclear és molt poca. De fet, aquesta fracció de massa per c^2 que es converteix en radiació és del 0,7%; en canvi, si ara tenim un cos com una estrella de neutrons, es pot arribar a una eficiència de generació d'energia molt més gran. És a dir, pot haver-hi processos molt energètics en el cosmos que estan produïts per matèria, material que cau sobre una estrella de neutrons (M), per exemple. Quan cau material sobre un cos de massa (m) i de radi (r) pot alliberar una fracció gM/rc^2 de la seva energia en repòs; gMm/r dividit per mc^2 (la massa petita del cos). Per a una estrella de neutrons, això pot ser del 15%, és a dir, si l'estrella és prou concentrada, puc obtenir molta energia només de matèria que cau sobre aquesta estrella de neutrons: en caure, impac-

ta sobre l'estrella, es converteix en escalfor i després aquesta escalfor es radia. Per exemple, 10 grams de gas que s'estavelessin sobre la superfície d'una estrella de neutrons deixarien anar una energia equivalent a la bomba d'Hiroshima. Només 10 grams de gas caient en caiguda lliure sobre una estrella de neutrons! I aquesta energia seria radiada després en raigs X, de manera que tota l'energia gravitacional ha estat convertida en energia tèrmica i després radiada en forma de raigs X.

Aquest sistema, en què va caient matèria sobre una estrella de neutrons, ha d'estar estabilitzat gravitacionalment. El procés només pot ser estable si la lluminositat està acotada, és a dir, només pot arribar a radiar 10^{31} watts si l'estrella té una massa com la del Sol. Perquè si hi ha més lluminositat, la pressió de la radiació generada a partir de l'energia gravitacional priva que hi continuï caient matèria, l'empeny cap a fora, de manera que no hi pot haver un sistema estable en què vagi caient matèria a sobre d'una estrella de neutrons, perquè la pressió de radiació l'expulsa. Ara, si un fa ús de la llei de Stefan, per tenir un ordre de magnitud per a la radiació superficial de potència, obté que la temperatura a què correspon això és de 10 milions de kelvins; aquesta temperatura vol dir que el gruix de la radiació és a la banda dels raigs X, perquè hi ha la llei de Wien que relaciona la temperatura amb la longitud d'ona de la radiació emesa, de manera que, bàsicament, quan la matèria cau sobre estructures com estrelles de neutrons, el que s'emet és radiació X, raigs X. Aquests raigs X són absorbits per l'atmosfera: fins a més o menys 30 km per sobre del nivell del mar, hi ha unes capes de l'atmosfera que són impermeables a les longituds d'ona dels raigs X, de manera que hem d'anar com a mínim a 30 km per sobre del nivell del mar per captar un raig X, i amb raigs X més tous, encara hem de pujar més.

Com és que no s'ha fet abans astronomia amb raigs X? Simplement perquè des de terra no es poden detectar els

raigs X que arriben d'aquests processos còsmics. I això és el que inaugura l'astronomia de raigs X, que es fa primer amb globus, després amb coets, als anys quaranta i cinquanta, amb els coets V-2 dels alemanys (en els quals es van començar a posar comptadors de Geiger), i aleshores, durant petits períodes de temps, en els minuts només en què el coet pujava i tornava, es podien detectar aquests raigs X.

Després d'això, l'exploració va millorar amb la posada en òrbita dels satèl·lits. L'últim premi Nobel de qui he de parlar, Riccardo Giacconi, és responsable d'haver muntat tota aquesta nova astronomia sobre la base de satèl·lits. El primer satèl·lit va ser l'Uhuru, que en suahili vol dir 'llibertat'; després, l'Einstein Observatory és la continuació d'aquest Uhuru, i el que hi ha actualment, el més sofisticat de tots, és el Chandra. L'Univers en la banda dels raigs X revela fonts que són estrelles, galàxies i cúmuls de galàxies que emeten de 100 a 100 milions més d'energia que en el registre visible; és a dir, malgrat que sembli el contrari, en raigs X s'emet molta més energia que no pas en llum visible.

I ara hem d'explicar com són aquestes màquines que permeten que s'emetin raigs X, com s'aconsegueix que plogui matèria sobre estrelles de neutrons. Això són, per exemple, els púlsars de raigs X. S'ha vist que, de les fonts de raigs X que s'han observat, que són milers, més de la meitat són a la nostra Via Làctia, i la gran majoria d'aquestes fonts de raigs X són en estrelles binàries, és a dir, sistemes de dues estrelles que donen voltes l'una al voltant de l'altra, i aquestes estrelles binàries en algun cas emeten pulsacions de raigs X, i per això se'n diuen *púlsars*.

Una estrella binària, un sistema binari, és, normalment, una estrella compacta i una estrella normal molt massiva. Des de la perspectiva de la mecànica lagrangiana, o de la mecànica newtoniana, si aquesta estrella gran ocupa tot el que se'n diu *el lòbul de Roche*, aleshores en tota la superfície

equipotencial, i en particular en el punt de Lagrange, no hi ha força, de manera que si hi ha matèria, li és molt fàcil passar d'un cantó a l'altre, perquè és molt inestable. O sigui, matèria d'una estrella normal molt gran passa a l'altra i això va alimentant l'estrella compacta amb el material que li cau a sobre. Naturalment, com que estan en rotació l'una al costat de l'altra, aquest material addicional forma un disc al voltant de l'estrella de neutrons. Aquest disc de moment no s'estavella, però acaba desestabilitzant-se i 10^{12} tones de gas s'estavellen sobre els pols magnètics de l'estrella de neutrons cada segon.

Els casquets polars tenen un diàmetre d'un quilòmetre, i s'escalfen fins a 10, 100 milions de kelvins, de manera que s'emet aquesta radiació X, perquè cau matèria sobre els pols —ara direm com— i s'escalfen fins a aquestes temperatures i emeten una energia que és 10.000 vegades la de l'emissió del Sol en totes les longituds d'ona.

D'aquella parella d'estrella normal gegant al costat de la compacta, ocupem-nos només de la compacta; la compacta, aquella estrella de neutrons, en general, està girant, però té uns camps magnètics molt intensos, i quan la part més interna del disc de matèria entra a la zona del camp magnètic, aleshores l'energia magnètica és superior a l'energia de rotació del disc, i el material en aquestes parts més internes és xuclat per sobre dels pols magnètics, s'estavella contra el casquet polar i emet radiació. Com que el pol magnètic no coincideix en general amb la rotació, mentre l'estrella va donant voltes, els feixos de raigs X emesos ara t'arriben i ara no t'arriben en forma de polsos, perquè t'estan escombrant de manera intermitent. És com un far de costa que va escombrant amb la llum i, de tant en tant, et toca; de la mateixa manera, aquest feix de raigs X arriba a la Terra i això és d'una manera polsada. Per exemple, el Centauri X-3, que és un cas d'aquests sistemes binaris, emet polsos regulars cada 4,84 segons; això gira molt

de pressa, i, a més a més, cada 2,87 dies deixa de radiar durant dotze hores, perquè com que està donant voltes al voltant d'una estrella companya enorme, durant dotze hores està darrere l'estrella i no ens n'arriben els raigs X; després, passades les dotze hores, torna a sortir.

Hi ha altres fonts de raigs X, naturalment, no només sistemes binaris en què s'estavella matèria d'una estrella i és traspasada a una altra. Hi ha, per exemple, remanents de supernoves; aquests materials ejectats escalfen el gas interestel·lar del voltant fins a temperatures molt altes, i aquests gasos a temperatures molt altes radien raigs X. També hi ha forats negres. Per exemple, Cassiopea és el detritus d'una explosió d'una supernova que va passar el segle XVII, i ara en veiem els materials, diguem-ne, que es difuminen a l'espai interestel·lar. De manera que l'astronomia té molt camp per recórrer.

També parlaré dels forats negres. Ens hem aturat en l'evolució estel·lar amb una cosa prou notable, una estrella compacta que és tota una massa d'un sol en 10 km, la mida de Barcelona en diàmetres. Què pot passar si l'estrella progenitora, la que ha evolucionat fins a l'estrella de neutrons, era una estrella tan massiva que ni tan sols la pressió de Fermi dels neutrons pot aturar el col·lapse gravitacional? Penseu que els forats negres són una realitat que és simplement portar a l'extrem un *gedankenexperiment* d'Einstein, un experiment que us exemplifico: si cau una persona per la finestra, adoneu-vos que persona i sabatilla cauen alhora, al mateix ritme, i si seguim aquest pensament fins al final, ens porta, ineludiblement, i no és moment d'explicar-ho, a la realitat dels forats negres. Aquest pensament inicial d'Einstein el va posar en el camí del principi d'equivalència, i després en el de la relativitat general, i en la relativitat general no hi ha cap altra sortida que arribar a situacions en què hi hagi els forats negres. La relativitat general (o dur fins a l'extrem

aquell *gedankenexperiment*) és arribar a la conclusió que l'espaitemps és una cosa corbada, que la gravetat no és més que l'espaitemps corbat. Per simplificar, la gravetat del Sol es deu al fet que el Sol corba l'espaitemps al seu voltant; la gravetat de la Terra no es produeix perquè la Terra atrau màgicament les coses, sinó perquè l'espaitemps al voltant de la Terra està corbat; la gravetat d'una estrella de neutrons es deu al fet que l'espaitemps al voltant de l'estrella de neutrons és molt corbat i com més massiu i més compacte sigui un objecte, molt més deformat és l'espaitemps que té al seu voltant. De manera que, en el límit, això és el forat negre; quan s'entra en un forat negre, no se'n pot sortir, perquè quan es passa una certa zona s'està sotmès a unes forces de marea impressionants: un es queda completament esqueixat, perquè hi ha unes grans diferències de força gravitatòria entre els peus, per exemple, i el cap. Un forat negre és, simplement, que l'espai s'ha convertit en temps i el temps en espai, i això és el que passa literalment quan es travessa el que es coneix com *radi de Schwarzschild*.

De manera que, inexorablement, un està abocat a caure en el forat negre de la mateixa manera que un està abocat a tenir seixanta anys després que n'ha tingut cinquanta-cinc, i a tenir-ne seixanta-cinc, si aguantés, després d'haver-ne tingut seixanta. Amb la mateixa inexorabilitat que el temps passa de temps menor a més gran, anem des del radi de Schwarzschild d'un forat negre fins al punt de la singularitat que és $r = 0$, perquè el futur absolut, el futur absolut d'una persona que comença estant a una certa distància (r), diguem-ho així, distància, és anar a parar a la distància 0. Però com detectarem un forat negre? Perquè un forat negre no deixa escapar res, ni llum, ni radiació. De manera que estem davant d'un problema que, malgrat que és una cosa molt impactant, és molt difícil de, *a priori* almenys, saber que hi és, perquè res no s'escapa d'allà, ni la llum.

Si tenim un forat negre en un sistema binari, que incorpora matèria de l'estrella companya, es formarà un disc, també, però aquest material, si penetra massa serà completament xuclat. La manera, doncs, com es detecten els forats negres és també per raigs X. Tenim un disc de matèria que està orbitant establement al voltant del centre del forat negre, a una certa distància, on l'última òrbita estable és tres vegades el radi de Schwarzschild; però el fregament entre diferents capes de materials escalfen, a temperatures de milions de graus, aquest material i, de tant en tant, s'emeten flamarades de raigs X no de manera polsada com en les estrelles de neutrons, sinó de manera esporàdica i aleatòria. I aquesta és la característica d'un forat negre: veure flamarades de raigs X, però sense una periodicitat establerta, sinó d'una manera molt esporàdica i aleatòria.

He hagut de córrer massa en les últimes coses i, per tant, demano disculpes, però això dels forats negres és una cosa completament establerta. Un exemple de forat negre és el Cignus X-1, que és el primer que es va veure. Una altra característica dels forats negres és que les estrelles de neutrons no poden ser més massives que el que se'n diu *massa de Chandrasekhar* i que és d'una a dues masses solars. De manera que si en un sistema binari, per observació astronòmica, t'adones que la massa desconeguda que hi ha supera de molt la d'una estrella de neutrons, l'únic que pot ser és un forat negre. De fet, ara ja sabem que molt probablement en els centres actius de galàxies hi ha forats negres que no són d'aquest origen estel·lar, sinó que són forats negres que arriben a tenir milions de masses solars, que no vénen de l'evolució d'una única estrella, sinó que probablement són resultat del col·lapse de cúmuls d'estrelles.