



ESTELS DE NEUTRONS: ELS VESTIGIS DE GRANS EXPLOSIONS¹

Joan Antoni MIRALLES
Universitat de València

Les primeres hipòtesis sobre l'existència d'estels formats essencialment per neutrons sorgeixen immediatament després del descobriment del *neutró*. Aquesta partícula subatòmica va ser descoberta pel físic anglés James Chadwick el 1932. La massa d'aquesta partícula és molt semblant a la massa del protó, però no té càrrega elèctrica i per això s'anomena neutró. És un constituent dels nuclis atòmics i va permetre d'explicar algunes propietats dels nuclis que no s'entien en aquella època.

La mateixa vesprada en què es rebia la notícia del descobriment, el físic soviètic Lev Landau, en converses amb altres col·legues a Copenhague, especulava sobre les conseqüències del recent descobriment i va proposar l'existència dels *estels de neutrons*. La densitat d'aquests estels deuria ser tan elevada que es podrien considerar com a nuclis atòmics gegants. Per entendre la natura d'aquests tipus d'estels, i com es poden arribar a formar, descriurem de primer els constituents de la matèria: els *àtoms*.

La matèria ordinària està formada per àtoms. A principis del segle XX, el físic neozelandés Ernest Rutherford descobreix que la càrrega positiva dels àtoms radica en el nucli, i que els electrons, amb càrrega negativa, orbiten al voltant del nucli. El 99,95% de la massa està en el nucli, però la grandària d'aquest és entre 10.000 i 100.000 vegades menor que la de l'àtom. Així, la matèria ordinària està pràcticament buida.

¹ Resum de la conferència impartida el dia 8 de maig de 2000 dins del cicle organitzat per l'IECBV amb motiu del Centenari de l'eclipsi de 1900.



El descobriment del neutró canvia lleugerament el model ja que a més de protons, el nucli atòmic també pot contenir neutrons. De fet, com hem comentat adés, alguns dels problemes que presentava el model de Rutherford se solucionen si admetem que el nucli conté també neutrons.

Amb l'establiment de la teoria quàntica, la imatge que ara per ara tenim de l'àtom és la d'un nucli on radica la massa, i d'uns electrons que es distribueixen al voltant del nucli. La mecànica quàntica no permet de parlar de trajectòries definides dels electrons al voltant del nucli. No és possible, per tant, conèixer amb exactitud on es troba un electró de l'àtom en un moment determinat, sinó que podem conèixer només la probabilitat de trobar un electró en una certa regió. A més, els electrons es distribueixen al voltant de l'àtom ocupant certes regions que es caracteritzen per l'energia i el moment angular de l'electró, i que s'anomenen *orbitals atòmics*. El principi d'exclusió de Pauli ens diu que no poden haver-ne més de dos electrons ocupant el mateix orbital. Això fa que l'àtom siga un sistema estable i els electrons no col·lapsen el nucli.

L'àtom més simple és el de l'hidrogen, que té un protó al nucli i un electró ocupant un orbital atòmic. El següent element en la taula periòdica és l'heli que conté dos protons i dos neutrons al nucli i dos electrons ocupant un orbital atòmic. Els neutrons del nucli contribueixen a l'estabilitat d'aquest i impedeixen que el nucli esclate com a conseqüència de la repulsió entre els protons. El nucli de l'àtom d'urani té 92 protons i un nombre de neutrons entre 143 i 147, depenent de l'isòtop de què es tracte.

En les condicions de la Terra, els nuclis atòmics es troben separats a grans distàncies comparades amb la grandària d'aquests, ja que les forces repulsives entre els núvols electrònics fan que es mantinguen allunyats. Però, què passaria si comprimírem la matèria fins que els nuclis s'acostaren? Si disposàrem d'una premsa ideal per a fer-ho, hauríem de vencer la força de la pressió causada pel moviment tèrmic dels àtoms. Quan els àtoms s'ajunten en unes distàncies en què els núvols electrònics se solapen, els electrons comencen a saltar dels orbitals i formen una sopa d'electrons i nuclis, que s'anomena *plasma*, de manera que els electrons tenen llibertat de moure's per tot el plasma i no pertanyen a un sol nucli. Això comença a passar quan la densitat és d'uns 50 grams per centímetre cúbic. A uns 500 grams per centímetre cúbic la pressió és dominada pels electrons que, d'acord amb el principi d'exclusió, no poden ser-ne més de dos per orbital. Ara, els electrons es mouen per tot el recinte, i els orbitals ja no són orbitals atòmics. Però el principi d'exclusió es verifica igualment.

Si continuem augmentant la densitat, arriba un moment, al voltant d'una densitat de 10 tones per centímetre cúbic, en què els electrons comencen a combinar-se amb els protons dels nuclis atòmics i produeixen un neutró i un *neutrí*. Aquest últim, una vegada produït, abandona el sistema, amb la qual cosa es produeix un procés de *neutronització*.

Quan la densitat arriba a unes 100.000 tones per centímetre cúbic, els neutrons dels nuclis comencen a ser expulsats, i a mesura que augmenta la densitat hi ha més neutrons lliures (fora dels nuclis). Quan la densitat arriba a uns 300 milions de tones per centímetre cúbic els nuclis estan tan pròxims que perden la seua identitat i la matèria es converteix en una sopa de neutrons amb uns pocs protons i igual nombre d'electrons. Aquest és l'estat de la matèria a l'interior dels estels de neutrons.

Però quin és el mecanisme pel qual la matèria arriba a aquest estat? La resposta està en l'*atracció gravitatòria*. Igual que la Terra atrau una poma i fa que aquesta caiga a terra, les partícules d'un gas a l'espai tendeixen a agrupar-se a causa de la força de la gravetat que actua entre elles. La pressió, per contra, s'oposa a tal compressió i, depenent del balanç final entre les dues forces, podem tenir *expansió* o *compressió*.

En algunes zones de la nostra Galàxia hi ha *núvols d'hidrogen*, formats principalment per hidrogen molecular, heli i grans de pols. Aquests llocs són els apropiats perquè la força de la gravetat vença la força de la pressió. La temperatura d'aquests núvols és molt baixa (d'uns 10 graus Kelvin) i la densitat és relativament alta, si es compara amb la densitat mitjana de la Galàxia (10.000 molècules per centímetre cúbic front a una molècula per centímetre cúbic).

La massa d'aquests núvols arriba a ser d'un milió de vegades la massa del Sol i, si en una part del núvol s'inicia, per qualsevol raó, una compressió com, per exemple, la produïda per les explosions de supernoves veïnes, o pel pas d'una ona de densitat, aquesta compressió continua i desemboca en un col·lapse d'eixa part del núvol, que dona lloc a la formació de *proto-estels*: objectes en equilibri hidrostàtic en què la força de pressió equilibra la força de la gravetat, i que emeten energia a l'exterior al mateix temps que es comprimeixen i s'escalfen.

El fet que la pèrdua d'energia produïska un augment de la temperatura és causat pel treball que fa la força de la gravetat en comprimir la matèria, i és aquest mecanisme el que permet la formació d'estels. En augmentar la temperatura pot arribar un moment en què s'assolisca la temperatura necessària per a produir reaccions nuclears: unes desenes de milions de graus. Quan açò ocorre, l'objecte deixa de contraure's i l'energia que emet per la superfície s'obté de les reaccions nuclears: ha nascut un estel.





Com que el material del qual es forma l'estel és principalment hidrogen, les reaccions nuclears que tenen lloc a l'interior de l'estel són les de la fusió de l'hidrogen. Aquest element es transforma en heli mitjançant una sèrie de reaccions que produeixen energia, la qual es transporta de l'interior a la superfície per on abandona l'estel. Quan es transforma un gram d'hidrogen en heli s'alliberen uns 100 milions de quilocalories (per produir la mateixa quantitat d'energia s'haurien de cremar unes 20 tones de carbó). La quantitat d'energia nuclear emmagatzemada en un estel fa que aquest pugui brillar per molt temps sense canvis significatius. Així doncs, un estel d'una massa igual a la del nostre Sol pot brillar durant uns deu mil milions d'anys.

Estels més massius, però, esgoten el seu combustible nuclear més ràpidament. Així, un d'una massa 10 vegades a la del Sol només triga uns 10 milions d'anys a esgotar el seu combustible ja que la temperatura al centre és tan alta que el ritme de reaccions nuclears és molt més alt.

En transformar-se l'hidrogen en heli, hi ha un canvi en la composició que repercuteix tant en l'energia emesa com en l'estructura de l'estel: radi, temperatura, etc. A mesura que l'hidrogen escasseja, l'estel s'infla i es fa més roig, comença a convertir-se en un gegant roig. La temperatura al centre, que ara conté heli, augmenta i pot arribar a assolir la temperatura necessària per a començar a produir-se les reaccions de fusió de l'heli, que donen lloc a la transformació d'aquest en carboni i oxigen. De nou, en escassejar l'heli, l'estel es torna a expandir i pot arribar a expulsar l'embolcall d'hidrogen formant una nebulosa planetària i deixant, al centre, un residu d'una massa prop a la massa del Sol amb una composició de carboni i oxigen, que s'anomena *nan blanc*. Aquests estels tenen típicament un radi com el de la Terra però, com ja hem dit, una massa comparable a la del Sol. La densitat, per tant, és molt gran. Al centre d'aquests estels, un centímetre cúbic de material pot contenir una massa d'unes desenes de tones i fins i tot més, depenent de la massa de l'estel. El destí final d'un estel com el Sol i d'aquells amb masses inferiors a vuit vegades la del Sol serà el descrit anteriorment. Estels amb major massa, però, continuen cremant el carboni abans d'expulsar l'embolcall. Aquest carboni dóna lloc a la formació d'elements més pesats com oxigen, neó, magnesi, que també es cremen i produeixen principalment silici.

El silici es crema i produeix ferro, que és el nucli més estable. Quan comença a formar-se ferro al centre, l'estel té una estructura de capes formades pels diferents elements que es van produint en les reaccions nuclears. Així, en la superfície hi ha hidrogen i, si anem cap a l'interior, trobem heli, carboni, neó, oxigen, silici i, al centre, ferro. El nucli de

l'estel, format per ferro, va creixent en massa i quan arriba a tenir entre una i dues vegades la massa del Sol, la força de la gravetat no pot ser equilibrada per la pressió i acaba col·lapsant.

Aquest col·lapse continuarà fins que arribi a determinades densitats, en les quals els nuclis estan tan junts que perden la seua identitat i es dissolen. En aquest cas assoleixen l'estat de la matèria a què férem referència anteriorment. En arribar a aquestes densitats, la pressió augmenta tant que el col·lapse de la part interna s'atura i les capes de l'estel que continuen caient reboten sobre la zona central i es forma una *ona de xoc* que, en propagar-se cap a fora, pot expulsar tot el material que queda per damunt de l'ona, i produir una explosió que fa brillar l'estel durant uns dies, com si es tractara de tota una galàxia.

Aquest fenomen s'anomena *supernova* i ha sigut observat des de l'antiguitat pels astrònoms. Hi ha registres d'un tal fenomen en



Nebulosa del Cranc. Restes d'una supernova (observada pels astrònoms xinesos l'any 1054) on s'ha descobert un pulsar

l'observatori xinès Sung, el 1054 de la nostra era. Si a hores d'ara mirem en aquesta zona del cel amb un telescopi, observem una nebulosa formada pel material expulsat.

Què queda després d'aquesta explosió gegant? La resposta a la pregunta depèn de la massa que és capaç d'expulsar l'ona de xoc. Si l'ona



de xoc expulsa quasi tota la massa per damunt d'on es va formar, es crearà un objecte amb una massa d'entre una i dues vegades la del Sol, que al principi serà molt calent i amb una gran quantitat de neutrins que es difondran des del centre cap a la superfície, i faran que l'objecte es refrede. L'energia emesa en neutrins és molt gran, quasi un 99 % de tota l'energia emesa en l'explosió, però, com que els neutrins interaccionen molt feblement amb la matèria, en resulta molt difícil la detecció. En 1987, però, es van detectar 19 neutrins amb detectors situats sota terra, coincidint amb l'observació, mitjançant telescopis, de l'explosió d'una supernova en una galàxia veïna.

A mesura que es refreda, per l'emissió de neutrins, l'objecte es contrau i al cap d'unes desenes de segons aquest objecte, format essencialment per neutrons, té un radi entre 10 i 20 km i s'anomena *estel de neutrons*, la densitat del qual és d'uns centenars de milions de tones per centímetre cúbic.

Si l'ona de xoc formada en el col·lapse no és capaç d'expulsar matèria suficient, no hi ha possibilitat de formar un objecte en equilibri i el col·lapse prossegueix fins a formar un *forat negre*, és a dir, un objecte d'on ni la llum no pot eixir, i la presència del qual només la podem observar per l'efecte de la gravetat sobre els cossos o el material del voltant.

La teoria esbossada anteriorment sobre la formació d'estels de neutrons en explosions supernoves apareix poc després del descobriment del neutró. El 1934, Baade i Zwicky publiquen un article en què proposen que en una explosió supernova es forma un objecte molt dens en el qual els neutrons i protons estan tan compactats com en un nucli atòmic. De fet, la formació d'aquest objecte tan compacte allibera molta energia gravitatòria que és la causant de l'explosió supernova. Aquesta predicció teòrica va haver d'esperar alguns anys per a tenir indicis de veracitat.

El problema és que l'objecte format en l'explosió supernova resulta ser d'una grandària molt reduïda com per a ser observat. A més, la temperatura de la superfície de l'objecte és tan alta (milions de graus) que l'estel emetria, principalment, raigs X i aquests resulten molt difícils d'observar des de la superfície de la Terra ja que són absorbits per l'atmosfera. A meitat de la dècada dels 60 es començà a explorar el cel usant detectors de raigs X situats en globus o coets xicotets, fet que, mentre durava el vol, permetia de recollir dades de gran importància. Analitzades aquestes dades, es troben algunes fonts de raigs X que se situen fora del nostre sistema solar. S'especula amb

la possibilitat d'haver detectat estels de neutrons, però encara no és del tot clar.

L'acceptació definitiva de l'existència d'estels de neutrons es produeix l'any 1967. En un experiment dirigit a l'estudi del centelleig de les ones de ràdio produït pel gas interestel·lar (efecte similar al que fa que els estels dèbils titil·len quan s'observen des de la Terra), Anthony Hewish, director de l'observatori de la Universitat de Cambridge, a Anglaterra, amb la seua estudiant de doctorat Jocelyn Bell, van descobrir un *senyal polsant* procedent d'una font situada en una ascensió recta $\alpha=19\text{ h }19\text{ min}$ i una declinació $\delta=21^\circ$. El pols es repetia a intervals d'1,34 segons.

Encara que de primer es va aventurar la possibilitat que el senyal podria ser produït per algun instrument electrònic o fins i tot provenir d'alguna civilització extraterrestre, al febrer de 1968 es publica un article a la prestigiosa revista científica *Nature* en què s'anuncia el descobriment i s'inclou una proposta sobre la possible explicació del fenomen basada en *nans blancs* o *estels de neutrons*. T. Gold, poc després del descobriment, proposa que el *fenomen pulsar* és produït per estels de neutrons en rotació amb camps magnètics intensos que, a mode de fars, ens il·luminen amb ones de ràdio quan es fa visible la zona d'emissió. El descobriment del primer pulsar va ser considerat de tal importància per la comunitat científica que se li va concedir el premi Nobel a Anthony Hewish. Amb el descobriment de pulsars amb períodes menors que una dècima de segon en les nebuloses de Vela i Cranc, feia quasi inevitable l'acceptació del model basat en estels de neutrons. A més, com que aquestes nebuloses eren restes d'explosions de supernoves, els descobriments proporcionaven una confirmació sòlida de la predicció feta per Baade i Zwicky el 1934.

Així doncs, a hores d'ara, és generalment acceptat que els estels de neutrons es formen en explosions de supernoves produïdes al final de la vida d'estels massius, aquells amb masses superiors a unes vuit vegades la massa del Sol. En la formació d'un estel de neutrons la intensitat del camp magnètic augmenta fins a valors de l'ordre d'alguns bilions de Gauss (els camps magnètics més elevats aconseguits a la Terra no superen els 100.000 Gauss) i això, juntament amb la rotació de l'estel que pot arribar a centenars de voltes per segon, fa que un estel de neutrons emeta polsos de ràdio com els observats en els pulsars. Un *pulsar* és, per tant, un estel de neutrons magnetitzat i en rotació. S'han descobert fins ara més d'un miler de pulsars en la nostra Galàxia i s'estima que deuen haver-ne uns mil milions en tota la Galàxia. Per a detectar-los s'utilitzen radiotelescopis com el





d'Arecibo, a Puerto Rico, construït en una conca natural amb un diàmetre de 305 metres. L'anàlisi detallat del temps d'arribada dels polsos que provenen d'aquest tipus d'objectes ha proporcionat informació molt valuosa i ha permès de descobrir sistemes formats per dos estels de neutrons orbitant al voltant del centre de masses comú, i formant un sistema binari. S'ha pogut mesurar amb molta precisió les masses dels estels, així com les característiques de les òrbites que fan els estels al voltant del centre de masses. Amb aquestes mesures s'ha verificat que els estels perden energia i cada vegada estan més junts. Aquest fet és una predicció de la teoria de la relativitat general d'Einstein, ja que el sistema emet ones gravitatòries i perd, per tant, energia. La pèrdua d'energia és més acusada quan més prop estiguen els estels els uns dels altres, ja que el camp gravitatori és més intens i les velocitats són pròximes a les de la llum.

Arribarà un moment en què els dos estels col·lisionaran i es produirà una forta emissió d'ones gravitatòries que es propagarà a la velocitat de la llum, i que modificarà l'estructura de l'espai-temps per on passen.

La detecció d'ones gravitatòries és un repte per a la ciència dels propers anys i ja n'hi ha operatius alguns detectors d'aquestes ones que es basen en interferometria làser. Actualment hi ha projectes de situar satèl·lits en òrbita per tal d'augmentar la sensibilitat de l'interferòmetre a l'hora d'interferir els raigs làser que es reflecteixen en espills col·locats als satèl·lits.

S'obri així una nova finestra d'observació que ens permetrà, a partir de l'anàlisi del senyal d'ones gravitatòries, d'obtenir informació molt valuosa sobre els fenòmens físics violents que ocorren a l'Univers.