

# Estels de bosons

## Ecós al cel

**Miguel Ángel Sanchis-Lozano**

Departament de Física Teòrica, IFIC, Centre mixt CSIC · Universitat de València

**Nicolás Sanchis-Gual**

Instituto Superior Técnico · CENTRA · Universidade de Lisboa

**Quan pensem** en l'Univers probablement imaginem la Lluna, el Sol, els planetes i els seus satèl·lits, els asteroides, fins i tot, la Via Làctia i altres galàxies. Aquests cossos celestes són prou coneguts i, en la majoria dels casos, visibles de nit. Però, si l'Univers és tan gran, què més hi ha?

Si busquem amb atenció i amb els instruments adequats, hi podem trobar objectes que existeixen en condicions extremes degudes a l'efecte de la gravetat. Per exemple, el nostre Sol té una massa d'aproximadament  $10^{30}$  kg (això és un 1 seguit de 30 zeros) i un radi de 695 000 km. Per la seua banda, la massa de la Terra és aproximadament  $10^{24}$  kg i un radi d'uns 6300 km. Què passaria si aconseguíem concentrar tota la massa del Sol en una esfera de la grandària de la Terra? Podria existir un objecte tan compacte i dens?

La resposta és coneguda: són les anomenades nanes blanques, l'etapa final de l'evolució estel·lar, que tindrà lloc al 97% dels estels de l'Univers. De fet, d'ací uns 5000 milions d'anys, després de passar per la fase de gegant roja, el Sol acabarà els seus dies com una nana blanca. Afortunadament per als físics, les nanes blanques emeten llum i poden ser observades i estudiades amb telescopis. Però, i si continuem comprimint el Sol fins a una esfera de radi de, per exemple, la distància entre Xàbia i Dènia, és a dir, uns 10 quilòmetres? En aquest cas, apleguem als estels de neutrons, formats principalment, com el seu nom indica, per neutrons, constituents amb els protons i els electrons de l'àtom. Aquests objectes es poden formar quan estels similars al nostre Sol però amb masses unes quantes vegades la seua massa, exploten produint una supernova, un dels esdeveniments més energètics i lluminosos de l'Univers. Vos imagineu la densitat, la pressió i les condicions extremes a l'interior d'aquest estel? I si continuem comprimint?

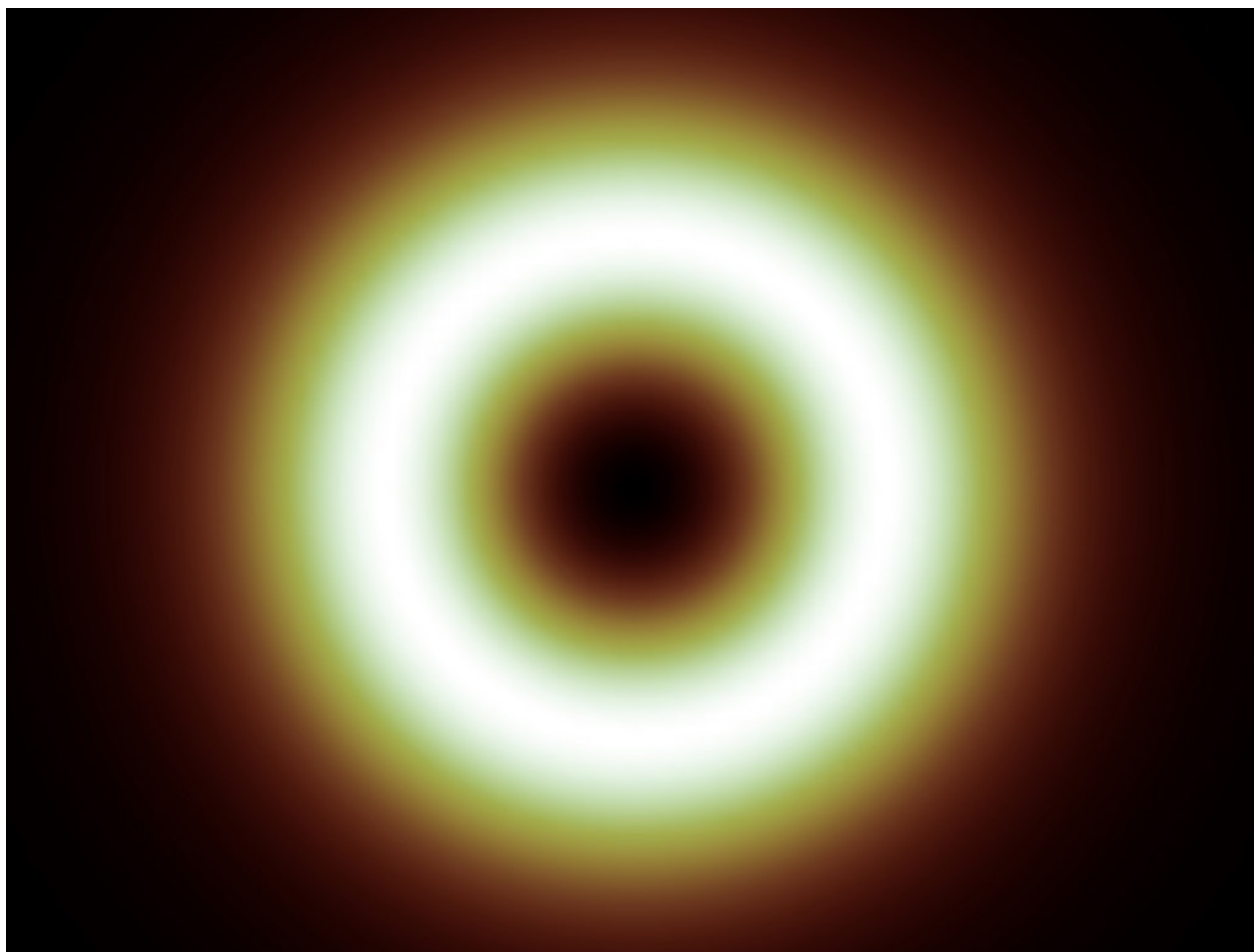
No hi ha cap objecte conegut que siga més dens que els estels de neutrons i que estiga format per matèria ordinària. Si superem aquesta densitat

**És lícit preguntar-se si allò que estem observant és un forat negre o un imitador.**

**No hi ha cap objecte conegut format per matèria ordinària més dens que els estels de neutrons.**

crítica, acabarem amb un col·lapse gravitatori, procés que no hi haurà manera d'aturar perquè no hi ha força a l'Univers que pugui contrarestar-ho. De manera que es formarà un dels objectes físics més interessants: un forat negre. Un forat negre es diu *negre* perquè no pot emetre llum (de fet ni la llum se'n pot escapar) i, aleshores, no es pot observar directament. Però, quan estudiem les òrbites dels estels més pròxims al centre de la nostra galàxia, ens indiquen que hi ha un objecte molt massiu (6 milions de vegades la massa del Sol), fosc i relativament menut, és a dir, compacte: un forat negre supermassiu. Fins i tot, es poden prendre fotos de l'anomenada *ombra d'un forat negre*, com l'espectacular imatge presa pel Event Horizon Telescope de Messier 87 (M87), un forat negre supermassiu situat al centre de la galàxia d'Andròmeda. Igualment, s'hi poden detectar les ones gravitatòries emeses durant una col·lisió de dos d'aquests objectes, observades gràcies a les grans col·laboracions internacionals LIGO i Virgo. Fins ara, totes les deteccions es corresponen a forats negres o estels de neutrons. No obstant això, com de segurs estem que el que observem són realment forats negres?





Simulacions d'un estel de bosons on es mostra la distribució de densitat d'energia que resulta bastant diferent de la d'un estel de neutrons o d'un forat negre.

El treball d'un investigador és examinar críticament les dades, proposar hipòtesis raonables i aplicar el mètode científic. Un forat negre presenta dues qüestions conceptuals que han intrigat els físics des dels temps d'**Einstein**: l'horitzó de successos, frontera que separa completament l'interior del forat negre de la resta de l'Univers, i la singularitat, punt en què fins i tot la teoria de la Relativitat General d'Einstein perd la seua capacitat predictiva. Per tant, és lícit preguntar-nos si efectivament allò que estem observant és un forat negre, o pot ser un "imitador de forat negre". Un imitador seria un cos molt compacte, però no tant com els forats negres (amb una densitat semblant a la dels estels de neutrons) que interacciona molt poc o no gens amb la llum, per la qual cosa observacionalment serien similars i difícils de distingir. Ara bé, els models d'estel fosc podrien resoldre aquests "problemes" que plantegen els forats negres, és a dir, l'existència dels horitzons i les singularitats, malgrat que presenten nous problemes a la física. Aquests objectes són coneguts com a Objectes Compactes Exòtics o ECOs, per les seues sigles en anglès (*Exotic Compact Objects*).

S'han proposat molts models d'ECO (estels de quarks, estels de Planck...), però en aquest article

anem a parlar d'una de les alternatives més senzilles i estudiades pels físics, els estels de bosons. I què són els bosons? Són un tipus de partícula subatòmica estudiada pel físic indi **Satyendra Nath Bose** i per Einstein. Aquestes partícules segueixen unes regles quàntiques diferents a les dels electrons, els protons, els neutrons i els quarks, partícules que anomenem fermions. Per exemple, l'any 2012, el *Large Hadron Collider* (LHC) va descobrir el famós bosó de **Higgs**. Val a dir que ja se'n coneixien més, de bosons, com ara els fotons, que són bosons d'interacció: existeixen només per propagar la interacció electromagnètica. De la mateixa manera, el gravitó seria l'hipotètic bosó (no descobert) que transportaria la interacció gravitatòria, l'anàleg del fotó per a la força de la gravetat. A diferència dels fermions, si tenim un gas de bosons i el refredem fins aplegar a una temperatura molt pròxima a -273 graus Celsius (el zero absolut), el gas passarà al cinquè estat de la matèria: un condensat de Bose-Einstein. En aquest estat, els bosons es comporten conjuntament com una ona.

La idea dels estels de bosons prové del concepte de geons, o entitat electrogravitacional, introduït per l'astrofísic **John Archibald Wheeler**, el mateix



que va suggerir la denominació de forat negre (*black hole*, en anglès). Un geó seria un objecte format per una ona electromagnètica o gravitatòria confinada en una regió de l'espai, sense poder propagar-se. L'energia de l'ona modificaria l'espai-temps, seguint la Relativitat General, atrapant l'ona. Serien estels de pura llum o pura gravetat. Açò seria totalment diferent d'un estel com el Sol, format per matèria convencional on es produeixen reaccions nuclears que generen energia que ens arriba en forma de llum. Tanmateix, els geons plantegen un problema fonamental que impedeix que es pugui confinar, d'aquesta manera, una ona electromagnètica o gravitatòria: el fotó i el gravitó no tenen massa, són pura energia. Que la partícula bosònica tinga massa és necessari per tal que es forme un pou de potencial que atrape l'ona, actuant com un espill. Per tant, els geons de Wheeler no poden existir. Però encara podem trobar una solució.

Suposem que existeix un bosó similar al de Higgs, però amb una massa molt, molt menor. Seria menys massiu que un protó i també que un electró. Estem parlant de milions de vegades menys massiu, impossible de detectar amb els acceleradors de partícules actuals. A l'espai exterior, un gas d'aquests bosons podria condensar (com ho fan les gotetes de vapor d'aigua als núvols) passant a ser un condensat de Bose-Einstein amb una massa total similar a la del Sol i amb una densitat pròxima a la dels estels de neutrons. D'aquesta manera, si l'ona de bosons quedara confinada per la deformació de l'espai-temps predita per Einstein, es formaria un estel de bosons.

Les propietats gravitatòries d'aquests estels serien paregudes a les dels estels de neutrons, però no presentarien una superfície dura. Així, una nau espacial no xocaria contra l'estel, sinó que el travessaria (si pogués sobreviure a les forces de marea gravitacionals, naturalment). Un feix de llum no seria absorbit per aquest objecte com en el cas del forat negre, per la qual cosa l'ombra podria ser diferent. Els especialistes estan investigant aquest grau de diferència. A més a més, el senyal gravitatori de la col·lisió de dos estels de bosons podria ser prou semblant a la de dos forats negres com per a no poder-les distingir amb la resolució actual dels detectors d'ones gravitatòries. De fet, és possible que alguna de les deteccions de LIGO i Virgo no es corresponga amb forats negres, sinó dos estels de bosons o una altra classe d'ECOs. Per a poder diferenciar ambdues alternatives, és necessari obtenir teòricament els senyals gravitoris emesos per la fusió d'aquests objectes en simulacions realitzades per potents superordinadors.

El descobriment dels estels de bosons, junt amb

el descobriment paral·lel d'una partícula bosònica amb una massa tan menuda tindria profundes implicacions en molts camps de la física: en astrofísica i cosmologia (per la formació d'aquests objectes i la seua participació en l'evolució de les galàxies), en física teòrica (pel seu hipotètic rol com a matèria fosca) i en física de partícules (per l'origen de la partícula bosònica, que podria provenir fins i tot de la teoria de cordes). La possibilitat és, per descomptat, molt emocionant!

Per si tot açò no fóra prou, els bosons posseeixen una propietat molt interessant a prop dels forats negres. En condicions adequades, un condensat de bosons pot extraure energia dels forats negres, disminuint la massa d'aquests últims. Aquest procés es coneix com superradiància i és semblant al procés quàntic d'evaporació de **Hawking**. En comptes de ser absorbits pel forat negre, els bosons es multipliquen i augmenten exponencialment l'energia del condensat. Aquest sistema és conegut com a una "bomba" de forat negre. Recentment, hom ha descobert que al final del procés no hi ha un esdeveniment explosiu, sinó que es pot formar un forat negre amb "pèl" bosònic: els bosons i el forat negre estarien en un equilibri perfecte. Un altra possibilitat és que aquest equilibri no es pugui donar i els bosons es dispersen o caiguen al forat negre mentre emeten ones gravitatòries. Aquestes ones es podrien detectar i ens permetrien determinar experimentalment la massa del bosó. Els forats negres es convertirien aleshores en detectors de partícules. Per últim i des d'una perspectiva de ciència ficció, si la nostra civilització fóra capaç de construir una esfera de **Dyson** (una esfera feta d'espills) al voltant d'un forat negre, podria extraure energia del forat utilitzant fotons mitjançant la superradiància, ja que l'espill substituiria el pou de potencial per confinar l'onada. Es podrien formar mines de forats negres i obtenir energia de manera pràcticament il·limitada.

Ras i curt, els estels de bosons són hipotètics objectes còsmics amb una gran importància en cosmologia i física teòrica i de partícules. Amb els desenvolupaments recents en el camp de la gravitació, l'ombra obtinguda pel Event Horizon Telescope i les ones gravitatòries per LIGO i Virgo, estem en el moment adequat per a fer increïbles descobriments. Si existeixen els estels de bosons, podrien tindre un gran impacte i canviar la física tal i com la coneixem.

Vdeos recomanats

<https://www.youtube.com/watch?v=ulCdoCfw-bY>

<https://www.youtube.com/watch?v=QyiuRIOpggc>

