

Les ones gravitatòries detectades per LIGO: La primera mirada en les profunditats dels forats negres.

Jordi Miralda, Professor ICREA a l'Institut de Ciències del Cosmos, UB

Les ones gravitatòries van ser una de les primeres prediccions sorgides de la teoria de la Relativitat General d'Albert Einstein. La Relativitat descriu la gravetat d'una forma molt diferent a la teoria d'Isaac Newton: la gravetat no és una força que actua a distància, sinó una influència de la massa-energia sobre la pròpia estructura de l'espai-temps (en concret, sobre la curvatura de l'espai-temps) que, com qualsevol altra influència, es pot propagar com a màxim de ràpid a la velocitat de la llum. L'existència d'ones gravitacionals és una conseqüència immediata del fet que la gravetat s'ha de propagar, igual que qualsevol altra interacció o forma de transmetre informació d'un punt a l'altre de l'espai.

Aquestes ones gravitacionals són molt diferents de les ones a què estem habituats. Moltes ones que observem cada dia es propaguen a través d'un medi material: és el cas del so, que és una petita variació de la pressió de l'aire, o de les ones que visualitzem a la superfície d'un líquid (com les onades del mar), que es propaguen sota l'efecte de la gravetat estàtica terrestre. És també el cas de les ones de gravetat de l'alta atmosfera, que són bàsicament ones de so de gran longitud que es propaguen pels efectes combinats de la gravetat terrestre i la pressió, i que s'anomenen sovint pel mateix nom d'"ones gravitatòries" en meteorologia, cosa que alguna vegada ha creat confusi. Però com diem en català, el nom no fa la cosa: les ones gravitatòries de la Relativitat no tenen res a veure amb cap ona en un medi material. És la pròpia gravetat que oscil·la i es propaga en el buit.

La llum és també una altra ona que pot propagar-se en el buit, sense necessitat de cap medi interventor que la transmeti. En el cas de la llum, són els camps elèctrics i magnètics, presents arreu de l'espai, els que oscil·len i transporten l'energia de les ones lumíniques d'un lloc a l'altre, i ens permeten veure'ns-hi en general. Però les ones gravitatòries no són la propagació de cap camp o influència que impregni l'espai ubíquament: és el propi espai-temps, el propi buit, que s'estira i s'arronsa i propaga energia i informació a través de l'Univers.

L'existència de les ones gravitatòries ja va rebre, de forma indirecta, una primera confirmació observacional amb el descobriment que dos objectes massius orbitant al voltant del seu centre de gravetat comú no conserven la seva energia orbital, sinó que la van perdre. El moviment accelerat de les masses en òrbita indueix la deformació de l'espai-temps que genera l'emissió d'ones gravitatòries, i l'energia que s'emporten les

ones és justament la que perden les masses en moviment. La conseqüència és que l'òrbita s'ha d'encongir, i les dues masses es van acostant. Aquesta pèrdua d'energia orbital és extremament petita quan les velocitats orbitals són molt menors que la velocitat de la llum, i només s'ha pogut mesurar en el cas dels púlsars binaris, o estrelles de neutrons en què l'observació de pulsacions d'ones de ràdio que emeten permet la mesura de la velocitat orbital amb una altíssima precisió. La pèrdua d'energia orbital d'una estrella de neutrons movent-se al voltant d'una altra va ser mesurada per primer cop pels físics Russell Hulse i Joseph Taylor, i coincideix exactament amb la predicció que fa la Relativitat General. Hulse i Taylor van ser guardonats amb el Premi Nobel al 1993 per aquest descobriment.

Però la detecció directa de les ones gravitatòries no s'ha aconseguit fins el 14 de setembre de 2015, quan el complex instrument operat per la col·laboració LIGO va detectar un senyal que els físics havíem esperat durant moltes dècades. L'instrument de LIGO consisteix en dos grans tubs en forma de L dins dels quals s'hi ha fet el buit, per tal de permetre que dos raigs de llum làser viatgin al llarg de cada braç de la L sense sofrir la més mínima pertorbació. Els dos raigs surten del centre de la L i són reflectits per miralls per recórrer varies vegades la longitud del braç, fins que es combinen mitjançant la tècnica de la interferometria. La combinació dels dos raigs làser permet mesurar el número de longituds d'ona del làser que cada raig ha viatjat, i comparar la diferència de recorregut entre els dos raigs amb precisions increïbles. Cada braç de la L té una longitud de 4 km, i l'instrument LIGO és capaç de detectar variacions de la longitud dels dos braços de fins a una mil·lèsima del radi d'un protó. Recordem que un àtom és un milió de vegades més petit que el granet de pols més menut visible a simple vista, i a la vegada el protó (partícula que forma el nucli dels àtoms) és encara cent mil vegades més petit. Aquesta enorme precisió que assoleix l'instrument de LIGO en mesurar oscil·lacions de la longitud del camí recorregut pel raig làser és el que ens cal per poder detectar la subtil variació de les distàncies quan el pas d'una ona gravitatòria sacseja l'estructura de l'espai-temps.

Dos d'aquests instruments en forma de L han estat funcionant, un a l'estat de Louisiana i l'altre a l'estat de Washington dels Estats Units d'Amèrica, per detectar les ones gravitatòries. La detecció del mateix senyal als dos detectors de LIGO el passat 14 de setembre és el que ens permet confirmar que estem observant una ona gravitatòria que viatja per l'Univers i travessa la Terra a la velocitat de la llum, i no pas el resultat d'alguna vibració aleatòria provocada per un cop de vent, un petit moviment sísmic, o un llampec d'alguna tempesta en algun punt del planeta. El senyal detectat és el que es mostra en la figura adjunta: al municipi de Hanford, Washington, detectem una oscil·lació de la longitud dels braços de la L representada per la línia vermella de la gràfica esquerra, i al municipi de Livingston, Louisiana, detectem la línia blava. Els

gràfics inferiors mostren l'ajust del senyal observat a la predicció del model que creiem que explica el que es va observar.

I què és el que va produir aquesta ona gravitatòria que, en tan sols una dècima de segon, va travessar la Terra i va deixar aquest senyal meravellós, esperat amb gran delit per milers de científics, als detectors dels dos instruments de LIGO? Doncs es tracta de la fusió final de dos forats negres per formar-ne un de sol. Dos forats negres que contenen d'entrada 36 i 29 masses solars, que orbitaven un al voltant de l'altre en una òrbita que s'anava encongint progressivament a mesura que s'emetia energia en ones gravitatòries, i que finalment van acabar caient un damunt de l'altre i formant un sol forat negre més gros, de 62 masses solars. Una part de la massa total inicial dels dos forats negres, que sumaven 65 masses solars, es va escapar en les ones gravitatòries emeses: 3 masses solars transformades en energia en les poques dècimes de segon que va durar la fusió, segons la fórmula d'Einstein $E = mc^2$ que ens diu que la massa conté una quantitat d'energia enorme si aconseguim extreure-la d'alguna manera. Doncs bé, resulta que la forma més eficaç que existeix de convertir la matèria en energia pura és de tirar massa cap dins d'un forat negre fent que xoqui i emeti radiació abans de desaparèixer cap dins l'horitzó, o bé ajuntar dos forats negres fent que radiïn ones gravitatòries mentre es fusionen. En aquest cas, un 5% de la massa dels forats negres es va convertir en energia d'ones gravitatòries durant la fusió. (L'aniquilació de matèria i antimatèria, que converteix tota la massa en energia, és l'únic procés més eficient per produir energia que tirar matèria a un forat negre, però només és possible si disposem d'una quantitat d'antimatèria igual a la matèria que volem convertir en energia.)

El senyal detectat per LIGO indica les últimes òrbites que van seguir els dos forats negres abans d'arribar a l'abraçada mortal que els havia de fusionar en un de sol per sempre més. Cada dues oscil·lacions de l'ona rebuda que veiem a la gràfica corresponen a una òrbita dels forats negres. Just abans de la fusió, el període orbital era d'unes 3 centèsimes de segon, i s'anava escurçant a mesura que els forats negres queien un sobre l'altre. La reverberació final, des que es produeix la màxima amplitud de vibració fins que es va apagant, correspon a la sotragada que fa l'espai-temps en el moment de la fusió i el naixement del nou forat negre de 62 masses solars, el que s'anomena en anglès "ringdown", una mena de palpitations del nou horitzó fusionat que sorgeixen de les perturbacions restants dels dos forats negres que s'enfonsen inexorablement cap a l'interior de l'horitzó, un interior del qual mai no podem saber res els observadors que ens ho mirem des de fora, a recer dels perills de la gravitació desbocada.

No és cap exageració, així doncs, afirmar que la forma de l'ona mesurada per LIGO que es mostra a la figura és la primera observació que hem aconseguit de les profunditats dels forats negres. L'existència de forats negres és sens dubte la predicció més fantàstica i sorprenent que fa la Relativitat: un objecte massiu del qual només en pots observar la

seva gravitació, i en què tot el que hi cau desapareix rere un horitzó del qual no pot sortir cap informació. Però quan ens el mirem de lluny estant, la gravetat d'un forat negre és com la d'una massa normal: per exemple, si el Sol fos substituït per un forat negre de la mateixa massa, la Terra continuaria orbitant al voltant sense cap canvi en la seva òrbita. Només quan ens hi acostem molt, i el moviment de les òrbites arriba a velocitats que s'acosten a la de la llum, els efectes de la relativitat i la gravitació desbocada d'un forat negre, que implica la presència d'un horitzó de successos, esdevenen evidents i podem observar-los plenament. Fins ara, totes les observacions astronòmiques de què disposàvem sobre forats negres eren d'objectes en òrbites massa allunyades per poder observar directament la gravitació prop de l'horitzó. O bé eren objectes lluminosos que creiem que contenen forats negres, com els quàsars i les binàries de raigs X que brillen intensament quan un disc d'acreció va amollant matèria a poc a poc per deixar-la caure cap al forat negre, que són massa complicats per poder-ne deduir res de fiable sobre el camp gravitatori d'un forat negre.

En canvi, les ones de LIGO de la fusió de dos forats negres sonden directament la curvatura de l'espai-temps ben a prop de l'horitzó dels forats negres, allà on la teoria d'Einstein es manifesta com a radicalment diferent de la de Newton. La teoria d'Einstein ens diu que tot forat negre està caracteritzat per només unes poques propietats: la massa, el moment angular, i la càrrega elèctrica. Així doncs, un forat negre, un cop s'ha estabilitzat a la seva configuració estàtica final, i malgrat haver-se format engollint tota la matèria d'estels més massius que el Sol, s'assembla més a una partícula elemental que no pas a un objecte macroscòpic: talment com un electró, un cop n'especifiquem la massa, el moment angular o "espín", i la càrrega, ja està tot dit. Tot el que es podria saber de la matèria que ha caigut al forat negre ha desaparegut rere l'horitzó per sempre més. Per això, la teoria de la relativitat fa una predicció única sobre la forma de l'ona que es produeix quan dos forats negres es fusionen. En funció només de les masses i moments angulars (la càrrega elèctrica sabem que ha de ser zero per forats negres grans), podem predir exactament la forma de l'ona que hem d'observar. Aquesta predicció s'ajusta plenament al que hem observat amb LIGO.

El succés detectat per LIGO és en realitat l'objecte més lluminós que hem observat mai en tot l'Univers. La màxima lluminositat possible que pot existir a l'Univers es produeix quan un objecte d'una massa M pot emetre una bona part de l'energia que conté la massa, Mc^2 , en el temps més curt possible, que és el temps que triga la llum a travessar la zona més petita possible que pot ocupar la massa M abans de col·lapsar a un forat negre sota la seva pròpia gravetat. Aquesta lluminositat màxima és la que s'emet en una fusió de dos forats negres de masses comparables. Si haguéssim pogut rebre l'energia de les ones gravitatòries detectades per LIGO en forma de llum visible, la fusió de forats negres hagués sigut tan brillant com la Lluna plena, des de la distància

de 1300 milions d'anys-llum en què es va produir el succés. A aquesta distància, els quàsars més lluminosos de l'Univers (que eren els objectes més lluminosos coneguts fins ara, abans de la detecció de LIGO de la fusió de forats negres) serien tot just visibles a l'ull humà només amb l'ajuda d'uns bons binoculars. La dificultat de detectar les ones gravitatòries es fa evident quan ens adonem que, amb tota la tecnologia que hem desenvolupat fins l'actualitat, tot just ara hem arribat a detectar per primer cop un objecte tan brillant com la Lluna plena!

Les mesures de més fusions de forats negres que creiem que s'aniran obtenint a partir d'ara amb LIGO i altres instruments ens aportaran una informació cabdal sobre la quantitat de forats negres que s'han format al llarg de la història de l'Univers. Hi ha molts processos astrofísics que condueixen a la formació de forats negres: un estel massiu pot contraure el seu nucli fins a densitats prou altes per col·lapsar directament a un forat negre. En algunes circumstàncies una binària de dos estels, o bé un sol estel rodant ràpidament, pot formar dos forats negres que acabin fusionant-se poc després: en el cas del succés detectat per LIGO, hi va haver una curiosa coincidència amb un espetec de raigs gamma del qual s'ha especulat que podria ser el resultat de l'explosió de l'embolcall de l'estel, posterior a la fusió de forats negres al seu interior. El gas a prop d'un nucli galàctic pot acretar-se cap a un forat negre central per fer-lo créixer, i els forats negres poden també fusionar-se successivament per formar-ne de més i més massius. Això hauria d'explicar la formació dels forats negres nuclears (situats al nucli d'una galàxia), responsables del fenomen dels quàsars, que poden arribar fins a milers de milions de masses solars. Els instruments de LIGO i altres experiments a la Terra que continuen atents per detectar nous successos, i les futures missions a l'espai que podran ampliar les cerques cap a ones de molt més baixa freqüència, podran revelar quants forats negres s'han format de cada massa al llarg del temps. També es podrà investigar amb precisió si existeix qualsevol desviació de l'estructura de l'espai-temps dels forats negres que pogués indicar una modificació de la gravitació respecte al que prediu la Relativitat General. Les fusions de forats negres poden servir també com a eina de mesurar distàncies a l'Univers, gràcies a la perfecta predictibilitat de l'amplitud de les ones que emeten.

En resum, la detecció de LIGO d'aquesta ona tan especial, que va durar tan sols una dècima de segon, és un descobriment d'enorme importància per l'astronomia, la cosmologia i la física: la primera detecció directa de les ones gravitatòries obre un nou ventall de possibilitats per l'observació de l'Univers, i al mateix temps és la primera observació directa de forats negres, precisament durant l'acte de fusionar-se. L'existència dels forats negres a l'Univers, que és possiblement la predicció més formidable, sorprenent i allunyada de la nostra experiència comuna feta per les teories de la física, s'ha vist espectacularment confirmada.