

¿RECOLZA LA TEORIA DE LA GRAVITAT D'EINSTEIN LES DARRERES OBSERVACIONS DE LIGO/VIRGO/KAGRA?

INTRODUCCIÓ

Les ones gravitacionals són produïdes per masses accelerades de manera no uniforme que transporten informació sobre les seves fonts i, sovint, són considerades com ondulacions en la curvatura de l'espai-temps. [La teoria de la Relativitat General d'Einstein](#) (RG) prediu propietats mesurables de les ones gravitacionals. Segons la RG, aquestes ones viatgen a la [velocitat de la llum](#), i la velocitat de propagació és independent de la freqüència de l'ona. Prediu que les ones tindran dos [modes de polarització](#) independents anomenats "més" i "creu". A més, la RG fa prediccions sobre la dinàmica de l'espai-temps que condueixen a la generació d'ones gravitacionals, per exemple, en el cas de col·lisions de forats negres i estels de neutrons. Les deteccions d'ones gravitacionals procedents de la fusió de sistemes binaris de forats negres i estels de neutrons per la xarxa de detectors "advanced LIGO/Virgo" brinden una oportunitat única per verificar les prediccions de la RG i per tant cercar qualsevol física més enllà d'aquesta teoria.

Amb el catàleg d'ones gravitacionals transitòries més recent, GWTC-3, els detectors LIGO/Virgo han detectat al voltant de 90 fusions de sistemes binaris compactes, incloent sistemes binaris de forats negres, sistemes binaris d'estels de neutrons i parells d'estels de neutrons i forats negres. D'entre els 90 esdeveniments, [es van anunciar per primera vegada](#) 35 fusions de sistemes binaris compactes des de la segona meitat del tercer període d'observació (O3b). En [aquest article](#), combinem les noves dades d'observació amb les dades més antigues per cercar possibles desviacions de la RG.

Tots els experiments fan mesuraments amb la presència de soroll i els detectors d'ones gravitacionals no en són una excepció. Quan cerquem alteracions respecte a la RG, certs tipus de soroll que són presents al detector poden imitar-los, creant un risc que afirmem incorrectament una alteració quan no n'hi ha. Per tant, restringim la nostra anàlisi només a esdeveniments "forts", els senyals dels quals podrien assemblar-se al soroll del detector només una vegada cada 1000 anys o més. Això ens dona 15 esdeveniments de O3b per ser analitzats i sobre els quals duem a terme nou proves diferents que cerquen alteracions respecte de la RG. A continuació, es descriu un resum dels resultats.

PROVES DE CONSISTÈNCIA

Consistència general del senyal amb les dades: la prova residual

Fem servir formes d'ona de la RG per detectar i interpretar esdeveniments d'ones gravitacionals. La prova de la RG més directa que podem fer és restar a les dades observades la [forma d'ona de la RG](#) que millor s'ajusti a les dades. El residu que deixa aquest procediment ha de ser consistent amb el soroll, si la RG és correcta. Per a tots els esdeveniments estudiats, trobem que el residu és consistent amb el soroll del detector i evidencia la consistència de les dades amb les prediccions de la RG.

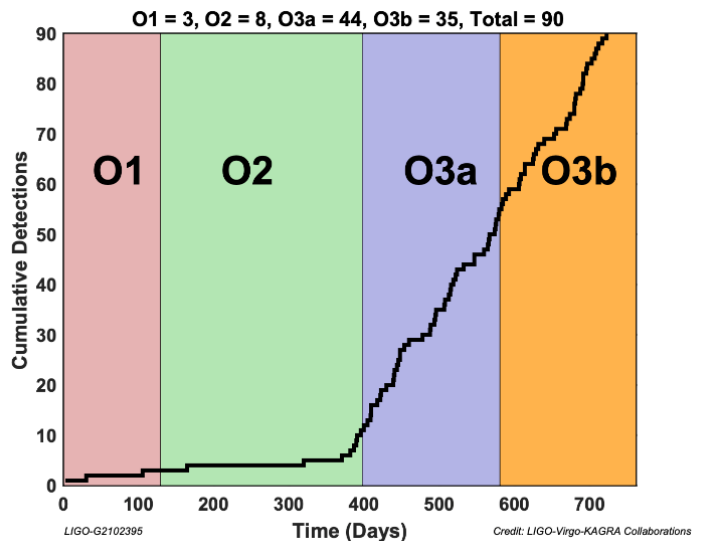


Figura 1: Durada dels tres primers períodes d'observació dels detectors "advanced LIGO" i "advanced Virgo" i el nombre acumulat de deteccions realitzades. No obstant això, com s'esmenta al text principal, en aquest estudi no tots aquests sistemes binaris es van analitzar per posar a prova la RG.

Auto-consistència de la forma d'ona: la prova de consistència d'espiral-fusió-relaxació

Les ones gravitacionals de les fusions d'estels de neutrons i forats negres tenen tres fases evolutives: la lenta espiral dels dos cossos l'un cap a l'altre, la fusió dels dos cossos en un i la relaxació de l'objecte compacte resultant. Es pot realitzar una verificació de consistència important preguntant si la forma d'ona de l'espiral és consistent amb la forma d'ona de la post-espiral. La massa i l'espí finals del forat negre resultant es poden inferir d'ambdues parts de l'evolució utilitzant

ajustaments empírics inspirats en simulacions de relativitat numèrica d'aquests sistemes binaris a la RG. La nostra anàlisi va trobar que les formes d'ona de les fases espiral i post-espiral coincidien per a tots els esdeveniments que van ser analitzats (veure [figura 2](#)).

PROVES PARAMETRITZADES DE GR

La física altament no lineal i complexa durant la dinàmica tardana del sistema binari condueix a diversos efectes físics que queden codificats en la forma de l'ona gravitacional. Una teoria de la gravitació modificada podria tenir una predicció diferent per a un o més efectes. Els models parametritzats permeten cercar possibles desviacions de la RG en aquests efectes físics. Cerquem evidència de física que no estigui descrita per la RG a les fases espiral i de fusió/relaxació de l'evolució.

Proves emprant la fase espiral

La fase espiral del sistema binari es descriu mitjançant una aproximació de camp feble i a càmera lenta anomenada [aproximació post-Newtoniana](#) de la RG. Diferents coeficients post-newtonians capturen un o diversos dels efectes físics que ocorren durant la dinàmica del sistema binari. Provar la seva consistència amb les prediccions de la RG constitueix un test molt útil d'aquesta teoria. La nostra anàlisi, combinada amb els resultats de catàlegs anteriors, proporciona els límits més recents per als coeficients de desviació; no obstant això, no trobem inconsistències estadísticament significatives amb la RG.

La fase espiral del sistema binari també ens permet comprovar si el senyal és consistent amb la coalescència de dos [forats negres de Kerr](#) en la RG. Si un dels objectes compactes està rotant, aquest gir pot provocar una deformació, igual que la rotació de la Terra comporta un aplanament als pols i una inflamació a l'equador. Això condueix a una contribució perceptible a la fase evolutiva del sistema binari, la qual és diferent per a un forat negre de Kerr en comparació amb altres objectes compactes. Vam provar aquest efecte i no vam trobar evidència de cap [objecte compacte exòtic](#).

Proves emprant la fase de fusió i relaxació

De manera similar, provem si les ones gravitacionals emeses durant la fase de fusió i la relaxació segueixen les prediccions de la RG. La durada de la fusió i la relaxació és molt més curta que l'espiral, excepte en el cas dels sistemes binaris de masses altes, cosa que dona com a resultat una menor acumulació de [relació senyal-soroll](#) durant aquesta part de l'evolució. Restringir els esdeveniments a aquells amb una relació senyal-soroll acumulada raonable durant la fusió i la relaxació permet establir límits significatius. Aquesta prova es realitza amb tres mètodes que són complementaris entre si pel que fa als detalls de la forma d'ona i metodologia i parametrització. Trobem que la prova és consistent amb GR dins de les incerteses estadístiques.

Proves de propagació d'ones gravitacionals

Mentre que les ones gravitacionals es propaguen de forma no dispersiva segons la RG, les modificacions d'aquesta teoria poden donar lloc a [dispersió](#). Això dona com a resultat que els components de freqüència de l'ona viatgin a diferents velocitats, provocant diferències en els seus temps d'arribada al detector. Per exemple, si les ones de més freqüència emeses durant la fusió viatgen més ràpid que les ones de menor freqüència, produïdes en l'espiral, llavors les "ones de fusió" podrien arribar a la Terra abans del previst. Vam cercar la dispersió d'ones gravitacionals i no vam trobar cap evidència. Un model específic i interessant que pot encaixar aquí són les teories del gravitó massiu. Aquesta és una de les teories en què es proposa que la suposada partícula de gravitó té una massa petita (però desconeguda). Això condueix a un tipus específic de dispersió que pot restringir i proporcionar un límit inferior a la massa del gravitó. Sobre la base dels esdeveniments analitzats dels tres períodes d'observació, el límit que obtenim és que la massa del gravitó hauria d'estar per sota de 1.3 vegades $10^{-23} \text{ eV}/c^2$.

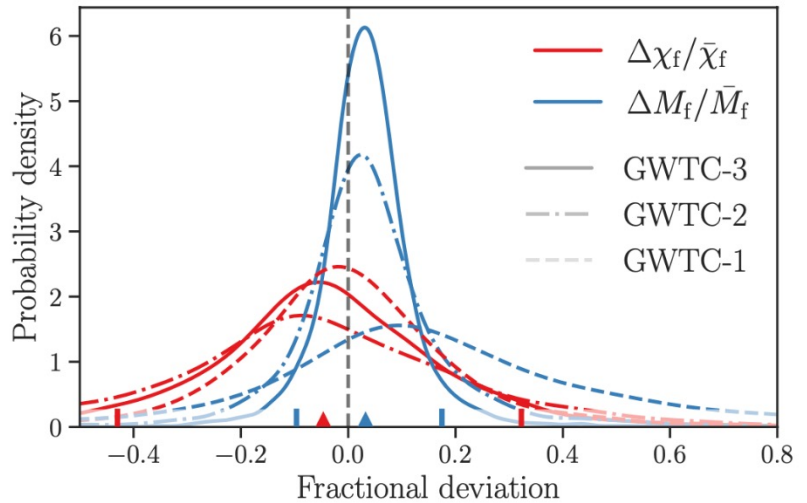


Figura 2: La diferència fraccionària entre la massa (blau) i l'espi (vermell) de les parts espiral i post-espiral de la forma d'ona gravitacional deduïda de GWTC-3 es comparen amb els resultats de les anàlisis anteriors (GWTC-1 i GWTC-2). La línia vertical gris mostra el valor de zero segons la RG i els resultats mostren una excel·lent consistència amb aquesta teoria. (Fig. 4 del [nostre article](#)).

Proves de polarització de les ones gravitacionals

Les ones gravitacionals a la RG només poden tenir dos estats de polarització: “més” i “creu”. Però, una teoria de la gravetat més general pot tenir fins a sis modes de polarització diferents (veure figura 3). Fent servir tres detectors (els dos LIGOs i Virgo), podem establir un límit parcial en el contingut de polarització no descrit per la RG en els senyals que observem. El mètode es basa en la construcció d'un flux de dades del detector sense cap senyal pròpia de la RG. Qualsevol residu en aquest flux de detectors indicaria la presència de modes de polarització addicionals. La nostra anàlisi no va mostrar aquesta presència i les dades s'ajusten a les prediccions de la RG.

Ecocs posteriors a la fusió

Hi ha alternatives teòriques als forats negres que es denominen imitadors de forats negres, perquè poden imitar les propietats dels mateixos però no són forats negres segons la RG. Una de les propietats més distintives d'un forat negre és la presència d'un [horitzó d'esdeveniments](#), el qual és una superfície de la qual res torna, és a dir, amb una capacitat d'absorció perfecta. Tot i això, en els imitadors de forats negres, l'equivalent d'un horitzó d'esdeveniments pot ser una superfície que, per exemple, podria ser parcial o totalment reflectora. S'ha argumentat que la forma d'ona posterior a la fusió d'aquests objectes pot contenir ecocs repetits del senyal procedent de la fase de relaxació. Vam cercar aquests ecocs a les dades i no en vam trobar cap, la qual cosa implica la consistència dels romanents de fusió amb forats negres rotatoris en la RG.

RESUM

Es van buscar proves d'una possible violació de la RG de nou formes diferents. Vam trobar que, dins de les incerteses estadístiques degudes al soroll i la possible sistemàtica desconeguda a causa de models de forma d'ona inexactes, les prediccions de la RG són completament consistents amb els esdeveniments detectats. Donada la importància de la detecció de possibles violacions de la RG, seguirem impulsant aquestes proves en els propers anys. Les noves proves podrien sondejar facetes completament noves de la gravetat que no s'han explorat fins ara, utilitzant detectors més sensibles que estaran operatius en els pròxims anys.

GLOSSARI

Dispersió d'una ona és el fenomen on diferents components de freqüència d'una ona viatgen amb diferents velocitats.

Polarització d'una ona es refereix a les formes independents en què una ona pot oscil·lar. Per a les ones gravitacionals a la RG, hi ha dos modes independents de polarització, anomenats “més” i “creu”. Això significa que una ona gravitacional que passés per un anell de partícules l'estiraria i l'espremeria en la forma d'un “+” i una “x”.

Període d'observació O3: el tercer període de presa de dades en l'era “Advanced LIGO” i Virgo va començar l'abril de 2019. O3a, la primera part d'O3, es va desenvolupar de l'1 d'abril de 2019 a l'1 d'octubre de 2019, mentre que O3b, la segona part d'O3, es va estendre de l'1 de novembre de 2019 al 27 de març de 2020.

Forat negre: Regió de l'espai-temps que té una gravetat tan forta que ni tan sols la llum en pot escapar. El límit de no escapament, que és exclusiu dels forats negres, es denomina horitzó d'esdeveniments.

Estel de neutrons: Romanent del procés de supernova sofert per un estel amb una massa entre 10 i 25 vegades la massa del nostre Sol. Els estels de neutrons típics tenen una massa del voltant d'1-2 masses solars i un radi de 10-15 quilòmetres, essent un dels objectes més compactes mai descoberts.

Objectes compactes exòtics: aquests són objectes que imiten les propietats dels forats negres, però no ho són. Distingir-los dels mateixos és tot un repte.

Formes d'ona de la RG: Formes d'ona gravitacionals calculades utilitzant GR que s'empren tant per a la detecció com per a la interpretació del senyal d'ona gravitacional en les dades.

Forats negres de Kerr: Forats negres en la RG que estan completament descrits per la seva massa i el seu espín (rotació).

eV/c²: L'electró volt (eV) és una unitat d'energia i amb la coneguda equivalència entre massa i energia $E=mc^2$, d'Einstein, eV/c^2 és una unitat de massa. 1 eV/c^2 és aproximadament igual a 1.8×10^{-36} quilograms. Per tant, la massa del gravitó és inferior a 2.3×10^{-59} quilograms.

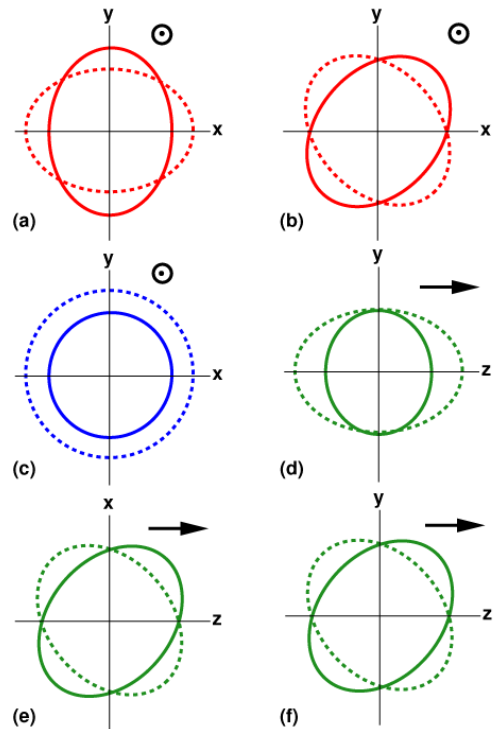


Figura 3: Representació dels sis modes de polarització permesos en una teoria general de la gravetat. Els tres primers corresponen a la situació en què la direcció de propagació de l'ona és cap al pla de la pantalla (transversal) i en els tres últims la fletxa indica la direcció de propagació de l'ona. Els dos primers, a la fila superior, són els únics modes permesos per la RG anomenats “+” i “x”. (Crèdit de la figura: Clifford Will, Living Reviews in Relativity)

PER SABER MÉS

Llegiu una preimpresió gratuïta de l'article científic complet [aquí](#) o a arXiv.org

VISITAU LES NOSTRES PÀGINES WEB:

www.ligo.org; www.virgo-gw.eu;
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Traducció al català per Jorge Valencia Gómez (a partir de la versió original en anglès a <https://www.ligo.org/science/Publication-O3bTGR/>)