

NOVES RESTRICCIONS SOBRE L'EXPANSIÓ CÒSMICA I LA RELATIVITAT GENERAL AMB ONES GRAVITACIONALS

En una publicació recent de [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK), presentem noves mesures de la [constant de Hubble](#) (H_0) i restriccions sobre possibles desviacions respecte a la [teoria de la relativitat general](#) d'Einstein a escales cosmològiques. Utilitzem dades de 76 esdeveniments d'ones gravitacionals detectats recentment i observats durant la primera part del quart període d'observació LVK, afegint-los als catàlegs prèviament disponibles, que en conjunt formen el nou [catàleg d'ones gravitacionals transitòries GWTC-4.0](#). Analitzant els senyals d'ones gravitacionals de 142 fonts de [coalescència de sistemes binaris d'objectes compactes](#), mesurem directament la [distància de lluminositat](#) a cada binària i les masses desplaçades cap al vermell dels seus dos objectes compactes. Mitjançant trets de la distribució de masses de forats negres i estrelles de neutrons, i la distribució de possibles galàxies amfitriones del catàleg de galàxies [GLADE+](#) dins del volum de localització de cada ona gravitacional, obtenim informació estadística sobre el [desplaçament cap al vermell](#) de la font. Combinar aquestes estimacions de distància i desplaçament cap al vermell proporciona restriccions independents sobre la constant de Hubble, sense dependre de la tradicional [escala de distàncies còsmiques](#). A més, establim nous límits sobre possibles modificacions en la propagació de les ones gravitacionals que podrien indicar física més enllà de la relativitat general. Aquests resultats demostren el poder creixent de la cosmologia d'ones gravitacionals per mesurar de manera independent el ritme d'expansió de l'Univers i per posar a prova les lleis fonamentals que el regeixen.

SIRENES ESTÀNDARD, EXPANSIÓ CÒSMICA I ENERGIA FOSCA

Als anys 1920, Georges Lemaître i Edwin Hubble van fer el descobriment revolucionari que l'Univers s'està expandint (vegeu la [Figura 1](#)). Des de llavors l'estudi de l'Univers, conegut com a cosmologia, s'ha convertit en una disciplina rica i independent, que pretén explicar com es va formar i va evolucionar l'Univers, utilitzant un model definit per només un grapat de paràmetres fonamentals. Avui dia, aquest model es coneix com a '[Lambda CDM](#)' i es considera el 'Model Estàndard' de la cosmologia. Es basa en la [teoria de la Relativitat General](#) d'Albert Einstein.

Tanmateix, fins i tot avui dia, la cosmologia moderna encara fa front a grans preguntes sense resposta. Un dels majors enigmes està relacionat amb un dels paràmetres clau del Model Estàndard de la cosmologia: la constant de Hubble, o H_0 . Aquest nombre (expressat en unitats de quilòmetres per segon per megaparsec (Mpc), $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$) descriu com de ràpidament s'està expandint l'Univers local — en termes senzills, mesura com de ràpidament s'allunyen els objectes distants entre si. No obstant, mesures obtingudes amb mètodes diferents i independents donen valors diferents. Si mirem al romanent del Big Bang — el fons còsmic de microones ([CMB](#), per les seves sigles en anglès) — trobem un valor al voltant de $68 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Però quan mesurem distàncies locals utilitzant explosions d'estrelles properes, també anomenades [supernoves de tipus Ia](#) i estrelles [variables Cefeides](#), obtenim al voltant de $74 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Avui dia, la diferència entre aquests dos valors no pot ser explicada només per errors de mesura. Aquesta discrepància, anomenada '[tensió de Hubble](#)', s'ha convertit en un dels enigmes més urgents en cosmologia moderna.

Mentrestant, un altre misteri es perfila: [l'expansió de l'Univers s'està accelerant](#), tal com es va constatar per primer cop el 1998 a partir de mesures de supernoves tipus Ia. Aquest increment de velocitat del ritme d'expansió còsmica ens requereix afegir un nou component a l'Univers, anomenat [energia fosca](#) i entendre la veritable naturalesa de l'energia fosca és un dels grans reptes de la cosmologia moderna. Actualment, cartografiats de galàxies realitzats amb grans telescopis terrestres o espacials, com ara [DESI](#) i [Euclid](#), estan mapant la distribució de galàxies en el cosmos amb una precisió excel·lent. Això ens permetrà comprovar si la distribució de galàxies pot explicar-se totalment amb la teoria d'Einstein — o si hi ha quelcom de nou actuant a les escales més grans de l'Univers.

En aquest context, recentment les ones gravitacionals (GWs, per les seves sigles en anglès) han aparegut com una potent eina cosmològica. Predites primerament per Einstein fa un segle, les GWs són ondulacions que es propaguen en l'espai-temps, produïdes per esdeveniments cataclísmics a l'Univers com parells de [forats negres](#) o [estrelles de neutrons](#) que s'apropen seguint una trajectòria espiral i es fusionen. Segons la Relativitat General, les GWs viatgen lliurement a través de l'Univers a la velocitat de la llum, provocant petits desplaçaments en les distàncies relatives entre masses en caiguda lliure a la Terra — un efecte [detectat per primer cop el 2015](#) per la col·laboració LIGO-Virgo. A diferència d'altres marcadors de distàncies còsmiques, les GWs proporcionen una [forma directa de mesurar a quina distància ha ocorregut un esdeveniment](#), sense basar-se en la complexa "escala de distàncies còsmiques" utilitzada per supernoves i Cefeides. Les nostres mesures de distàncies utilitzant GWs es basen en computacions acurades de la forma esperada del senyal observat pels detectors de GWs a la Terra segons la Relativitat General. Comparant l'amplitud i fase del senyal observat amb les prediccions, podem determinar directament la distància de cada font. Les fonts de GWs són per tant anomenades "[sirenes estàndard](#)" — una referència a les "candeles estàndard" (objectes amb brillantor intrínseca coneguda, com les supernoves tipus Ia) que els astrònoms han fet servir durant dècades. Combinant la distància mesurada a partir d'una sirena estàndard amb informació de la velocitat en què s'està allunyant de nosaltres la galàxia amfitriona, podem fer una mesura independent de la constant de Hubble.

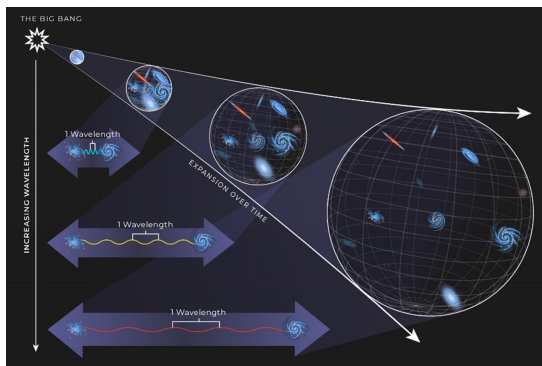


Figura 1. Esquema que il·lustra l'expansió còsmica i el desplaçament cap al vermell cosmològic. A mesura que l'Univers s'expandeix, les galàxies s'allunyen entre si, anàlogament a punts sobre la superfície d'un globus sent inflat, i la llum de galàxies llunyanes apareix estirada cap a longituds d'ona més llargues i vermelles. Aquest desplaçament cap al vermell també afecta les ones gravitacionals emeses per fonts llunyanes. [Crèdit: NASA Scientific Visualization Studio]

Però això no és tot: les GWs també poden ajudar a comprovar si la teoria de la gravetat d'Einstein es manté certa a les escales cosmològiques més grans. Si nova física — com un camp desconegut d'energia fosca — està darrere de l'expansió accelerada de l'Univers, podria modificar com les GWs viatgen al llarg de grans distàncies còsmiques, i en particular, com la seva amplitud (la seva mida) canvia durant la propagació. Aquest efecte implica que la distància deduïda a partir de GWs seria diferent que la distància inferida a partir de llum emesa per la mateixa font, si la gravetat fos diferent de la predita per la relativitat general d'Einstein. Els paràmetres que descriuen aquest fenomen poden ser limitats fent servir els mateixos mètodes que s'utilitzen per determinar la constant de Hubble. Això significa que les GWs es poden fer servir per abordar simultàniament dues grans qüestions sense resposta en cosmologia — amb un enfocament que també és independent d'altres mètodes emprats històricament per mesurar l'expansió còsmica.

En aquest estudi, la [col·laboració LVK](#) ha utilitzat observacions de GWs no només per refinar les mesures de la constant de Hubble, sinó també per posar restriccions sobre com les GWs podrien comportar-se de manera diferent respecte a les prediccions d'Einstein.

MÈTODES

A diferència de la mesura directa de distància, els senyals de GW no proporcionen mesures directes del [desplaçament cap al vermell](#) de la seva font. Tal com la llum d'una galàxia que s'allunya s'estira cap a longituds d'ona més llargues (més vermelles), les masses dels forats negres que es fusionen semblen més grans del que realment són degut a l'expansió de l'Univers. Això vol dir que no podem distingir si estem observant un objecte realment més massiu o un objecte que s'allunya de nosaltres més ràpidament — almenys no només a partir del senyal de GW.

Tanmateix, s'espera que algunes fonts també emetin un feix lluminós — en particular, les fusions que contenen almenys una estrella de neutrons. Quan això és detectat en coincidència amb una senyal d'ona gravitacional, els astrònoms poden identificar la galàxia amfitriona i mesurar directament el seu desplaçament cap al vermell. Per tant, aquestes fonts es denominen “sirenes brillants”. Aquest va ser el cas de la primera fusió d'un sistema binari d'estrelles de neutrons detectada pels observatoris d'ones gravitacionals, [GW170817](#), que també va produir un senyal electromagnètic brillant. Aquell senyal va portar a la ràpida identificació de la seva galàxia amfitriona ([NGC 4993](#)), i combinant el seu desplaçament cap al vermell amb la distància obtinguda a partir de les dades d'ones gravitacionals, va proporcionar la [primera mesura de sirena estàndard de la constant de Hubble](#).

Malauradament, no s'han trobat nous sistemes binaris d'estrelles de neutrons en coincidència amb senyals electromagnètics en la primera part del quart període d'observació de LVK. Per totes les altres fonts — principalment sistemes binaris de forats negres — ens basem en mètodes estadístics per estimar el desplaçament cap al vermell. Aquests mètodes utilitzen algun coneixement extern, o “a priori”, sobre la població global de fonts. És crucial entendre que la distribució observada de les propietats de les fonts difereix de la població real subjacent. Això passa, en part, degut a la naturalesa dels nostres detectors, que són més propensos a detectar certes fonts (com les més massives o properes) que d'altres (més lleugeres o llunyanes). A més, si la història d'expansió de l'Univers o les lleis de la gravetat fossin diferents — per exemple, si l'energia fosca tingués propietats inesperades — això canviaria la relació entre la població real i l'observada. Comparar les propietats esperades de la població de fonts amb les observades, i tenir en compte detingudament la diferent probabilitat de detecció, o “biaix de selecció”, permet doncs establir restriccions sobre les propietats de l'Univers, com ara la seva història d'expansió.

Utilitzem un enfocament estadístic que aprofita simultàniament dues fonts d'informació complementàries sobre les propietats de la població subjacent — referit globalment com el mètode de “sirena fosca”.

La primera font d'informació està relacionada amb la distribució de masses dels sistemes binaris de forats negres, coneguda també com el mètode de la “sirena espectral”. Suposem que els forats negres a l'Univers es formen preferentment al voltant d'una massa específica, degut a processos intrínsecament astrofísics. Per exemple, la teoria prediu que els forats negres de massa estel·lar haurien de tenir una massa màxima, ja que les estrelles extremadament massives exploten de manera tan violenta (mitjançant el que es coneix com a [supernova per inestabilitat de parells](#)) que no deixen enrere cap forat negre. Comparant l'escala de massa màxima esperada amb el que observem — i sabent com l'expansió còsmica desplaça aquestes masses — podem inferir el ritme d'expansió. En particular, per primera vegada en una publicació de cosmologia de LVK, utilitzem un model que cobreix tot el rang de masses de les fonts, el qual inclou diferents tipus de fusions, concretament, sistemes binaris de forats negres, d'estrelles de neutrons, i sistemes formats per un forat negre i una estrella de neutrons.

La segona font d'informació prové de la distribució de galàxies — també anomenada el mètode del “catàleg de galàxies”. Assumint que els forats negres es formen en galàxies, comparem la distribució de galàxies en la regió on probablement va ocórrer cada fusió amb grans catàlegs de galàxies per tal d'identificar possibles galàxies amfitriones. Degut a que els mapes del cel de GWs són imprecisos, aquesta associació amb la galàxia amfitriona és probabilística: hi poden haver centenars o milers de potencials galàxies amfitriones, cadascuna amb una probabilitat diferent de ser la veritable. La probabilitat depèn de la constant de Hubble i de les propietats de l'energia fosca, que relacionen distància i desplaçament cap al vermell, però també pot dependre de propietats intrínseques de la galàxia, com ara la seva massa o [lluminositat](#). Suposem que la probabilitat que una galàxia aculli una fusió d'ones gravitacionals és proporcional a la seva lluminositat en [llum infraroja](#). Verifiquem que aquesta suposició no afecta de manera significativa els nostres resultats finals. És important destacar que també hem de corregir el fet que els cartografiats de galàxies són incomplets: algunes galàxies febles o llunyanes poden faltar-hi.

Finalment, degut a que els nostres detectors són més sensibles a certes masses i distàncies de forats negres, hem de corregir amb cura aquests efectes de selecció per evitar biaixos. Això significa que ens cal estimar les propietats de la població de forats negres i la història d'expansió còsmica *al mateix temps*, tenint també en compte la informació sobre el desplaçament cap al vermell dels catàlegs de galàxies. En aquest treball, fem un gran pas endavant respecte a les anàlisis de LVK anteriors, on aquestes peces d'informació es combinaven en etapes separades com a compromís entre precisió i cost computacional. Gràcies a les millores en els nostres fluxos d'anàlisi de dades (“pipelines”), ara realitzem una mesura completa i simultània — la manera estadísticament correcta d'obtenir els resultats més precisos.

PER SABER-NE MÉS:

Visita les nostres pàgines web: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



RESULTATS

La **Figura 2** mostra la nostra mesura de la constant de Hubble (H_0). La millor estimació prové de la combinació de l'anàlisi de sirenes fosques amb el resultat de la sirena brillant GW170817. De la posició i amplada del pic de la corba, obtenim $H_0 = 76.6^{+13.0}_{-9.5} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Aquí, els nombres en subíndex i superíndex indiquen el nostre error en aquesta mesura amb un [interval creïble](#) del 68%. Les anàlisis de LVK anteriors que feien servir catàlegs de galàxies assumien un model fix de la població d'objectes compactes, el qual feia que les restriccions sobre H_0 fossin estrictes d'una manera no realista. El mètode utilitzat en aquest treball arriba a una precisió similar però és més robust estadísticament perquè els paràmetres que descriuen la població d'objectes compactes, com ara la posició d'escalas preferents en la distribució de masses, ara es mesuren conjuntament amb els cosmològics.

Els nostres resultats indiquen que l'ús d'un model complet per a la distribució de masses de les fusions de sistemes binaris compactes comporta una millora d'un 50% respecte a les restriccions amb sirenes fosques i models que només utilitzen fusions de sistemes binaris de forats negres, malgrat la inclusió de només cinc esdeveniments addicionals que contenen almenys una estrella de neutrons. L'estimació obtinguda només amb sirenes fosques és encara lleugerament més ampla que el resultat obtingut amb l'única sirena brillant GW170817, cosa que emfatitza la importància de detectar més [fonts multi-missatgeres](#); tanmateix, la mesura de la constant de Hubble obtinguda utilitzant sirenes espectrals constitueix una millora del 60% respecte a resultats previs de LVK.

La **Figura 3** presenta les nostres restriccions sobre possibles desviacions respecte a la relativitat general d'Einstein en la manera com les GWs es propaguen a través d'un Univers en expansió. Específicament, examinem el ràtio entre la distància mesurada a partir de l'amplitud de l'ona gravitacional (anomenada D^{GW}_L) i la distància que seria mesurada a partir d'una contrapartida electromagnètica (anomenada D^{EM}_L). Si la relativitat general és correcta, aquestes dues distàncies haurien de coincidir exactament, de manera que el ràtio hauria de ser igual a 1 a tots els desplaçaments cap al vermell (línia discontinua negra). Ho comprovem emprant dues parametritzacions diferents de l'efecte i establim límits sobre els paràmetres corresponents. Els panells superior i inferior de la figura mostren els resultats per a cada model, que concorden bé entre si. Les franges acolorides indiquen els intervals creïbles del 90% de GWTC-4.0. No trobem cap evidència de desviacions respecte a la relativitat general. La nostra millor mesura estableix un límit al nivell del 60% (interval creïble del 68.3%) a aquestes possibles desviacions, millorant en aproximadament un 40% les restriccions anteriors no provinents de LVK. La sirena brillant GW170817 no hi contribueix significativament, perquè aquest efecte s'acumula durant la propagació i només les fonts a desplaçaments cap al vermell no negligibles són informatives — GW170817, a un desplaçament cap al vermell $z = 0.01$, és simplement massa propera.

Finalment, les dades de GWTC-4.0 no imposen cap límit en el contingut de matèria fosca de l'Univers ni en [l'equació d'estat de l'energia fosca](#). L'efecte més impactant de l'energia fosca es manifesta, en canvi, a través d'una propagació modificada de les ones gravitacionals.

RESUM I PERSPECTIVES DE FUTUR

Els darrers resultats de la col·laboració LIGO-Virgo-KAGRA proporcionen una nova mesura independent de la constant de Hubble, així com restriccions actualitzades sobre possibles desviacions respecte a la relativitat general d'Einstein a escales cosmològiques. La millor estimació de la constant de Hubble, que combina dades estadístiques de "sirenes fosques" amb l'única sirena brillant coneguda, GW170817, és $76.6^{+13.0}_{-9.5} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ — consistent amb mesures anteriors basades en ones gravitacionals però obtinguda amb un tractament estadístic millorat. L'anàlisi mostra que la inclusió d'un rang més complet de tipus de fonts comporta límits significativament més ajustats que els obtinguts emprant només sistemes binaris de forats negres, malgrat que no es van trobar noves sirenes brillants durant aquest període d'observació.

La presència de trets distintius en la distribució de masses dels forats negres — escalas de massa preferents on tendeixen a formar-se — és actualment la principal font d'informació cosmològica per esdeveniments sense contrapartida electromagnètica. La informació addicional de catàlegs de galàxies amfitriones millora la mesura només en un 8.6% aproximadament, principalment degut a la incompletesa del catàleg GLADE+ utilitzat aquí, i de la localització en el cel força imprecisa dels esdeveniments detectats fins ara en el quart període d'observació. S'espera que ambdós factors millorin aviat: l'augment de sensibilitat del detector Virgo en la part restant del quart període d'observació hauria de comportar esdeveniments més ben localitzats, i un catàleg més complet, UpGLADE, està en preparació.

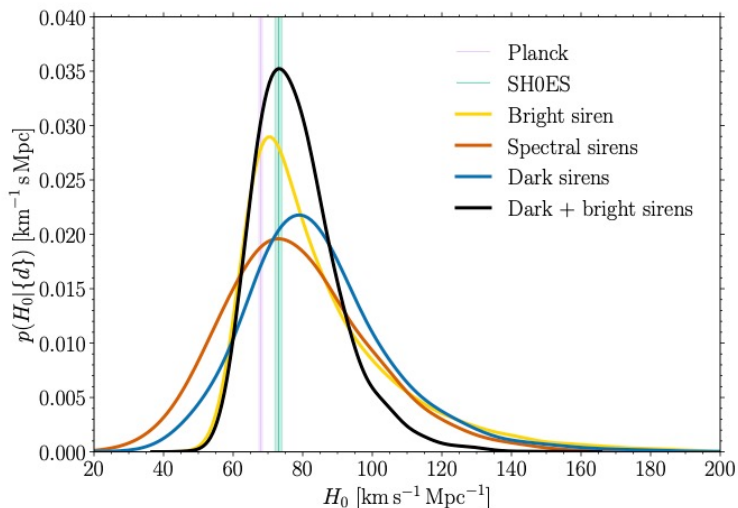


Figura 2. (Figura 5 de la nostra publicació). Distribució de probabilitat a posteriori per als valors de la constant de Hubble (H_0) a partir de diferents combinacions del conjunt complet de dades GWTC-4.0. El millor resultat correspon a la corba negra, que és una combinació de les "sirenes fosques" de GWTC-4.0 i la "sirena brillant" GW170817. Per comparar, també es mostren els resultats obtinguts només amb sirenes fosques (blau), sirenes espectrals (taronja), i l'única sirena brillant (groc).

El nostre estudi també posa a prova si les ones gravitacionals podrien propagar-se al llarg de distàncies cosmològiques de manera diferent respecte a la predicció de la relativitat general, una eina clau per explorar idees relacionades amb l'energia fosca. No s'ha trobat cap desviació respecte a la relativitat general, ara amb límits aproximadament un 40% més estrictes que límits previs de GW no provinents de LVK.

Aquests resultats mostren que, amb més dades en camí i amb mètodes estadístics robustos ja implementats, la cosmologia amb ones gravitacionals està ben posicionada per tal de fer front a algunes de les grans qüestions sense resposta de la física moderna.

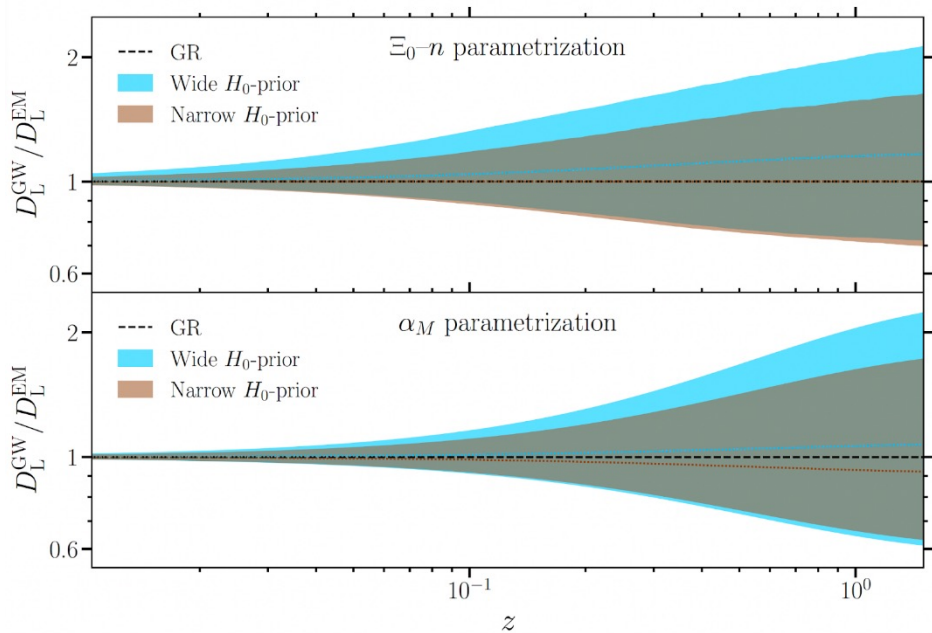


Figura 3. (Figura 10 de la nostra publicació). Ràtio entre la distància mesurada a partir de fonts d'ones gravitacionals i la distància que seria mesurada a partir d'una emissió electromagnètica de la mateixa font, en funció del desplaçament cap al vermell de la font. Si la teoria de la relativitat general és vàlida, s'espera que les dues coincideixin, de manera que el ràtio seria idènticament igual a 1 per tots els desplaçaments cap al vermell. Les franges acolorides mostren el límit obtingut a partir de GWTC-4.0 amb un interval creïble del 90%. No trobem cap evidència de desviacions respecte a la relativitat general. Els panells superior i inferior corresponen a dues formes paramètriques diferents adoptades per descriure aquest efecte, que donen resultats consistents entre si.

GLOSSARI

GLADE+: nova compilació ampliada de catàlegs de galàxies, que conté dades d'uns 22 milions de galàxies, emprades per proporcionar informació de desplaçament cap al vermell de potencials galàxies amfitrions dels nostres esdeveniments de GW. Un article científic d'accés lliure que descriu el catàleg GLADE original està disponible [aquí](#).

Megaparsec: unitat de distància comunament utilitzada en cosmologia. Un megaparsec és igual a un milió de parsecs, on un [parsec](#) és aproximadament igual a tres anys llum i un quart, o 3.086×10^{16} metres.

Constant de Hubble: paràmetre utilitzat per mesurar el ritme d'expansió de l'Univers. El seu valor actual es denota amb el símbol H_0 i és d'uns $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Teoria del Big Bang: explicació de l'origen i evolució de l'Univers observable que descriu com l'Univers va començar fa uns 14.000 milions d'anys, i com s'ha expandit des d'un estat inicial molt calent i dens. La teoria del Big Bang és àmpliament acceptada com a explicació de moltes de les propietats observades de l'Univers, incloent [l'abundància dels elements químics més lleugers](#) i l'existència de la [radiació de fons còsmic de microones](#).

Fons còsmic de microones (CMB): radiació electromagnètica procedent d'una etapa primerenca de l'evolució de l'Univers, quan aquest tenia uns 380.000 anys. El CMB també es coneix com a "radiació reliquia" (en anglès, "relic radiation") residual del Big Bang. Per més informació, vegeu [aquí](#).

Supernova de tipus Ia: mecanisme d'explosió particular d'una nana blanca que acumula material d'una estrella companya, la massa de la qual arriba a sobrepassar el [límit de Chandrasekhar](#) de 1.4 vegades la [massa solar](#). Les distàncies de supernoves tipus Ia poden ser estimades de manera fiable ja que totes elles exploren amb un pic de brillantor intrínseca, o [luminositat](#), bastant similar – convertint-les en [candel·les estàndard](#) útils.

Cefeïda: tipus d'estrella variable polsant que experimenta canvis periòdics en el radi i la temperatura, que donen lloc a variacions regulars i periòdiques en la seva [luminositat](#). Mesurant el seu període de pulsació, els astrònoms poden estimar de manera fiable la distància d'estrelles variables Cefeïdes.

Escala de distàncies còsmiques: la combinació de mètodes a partir dels quals els astrònoms determinen la distància d'objectes a l'Univers. Les distàncies a objectes remots, que normalment es basen en relacions empíriques entre les seves propietats, es fonamenten en mesures més directes i geomètriques de distàncies a objectes propers – generalment dins de la galàxia Via Làctia. Per a més informació, vegeu [aquí](#).

Forat negre: una regió de l'espai-temps causada per una massa extremadament compacta on la gravetat és tan intensa que impedeix que res, ni tan sols la llum, en pugui escapar.

Estrella de neutrons: romanent del procés de supernova experimentat per una estrella amb una massa entre 10 i 25 vegades la massa del nostre Sol. Les estrelles de neutrons típiques tenen una massa al voltant de 1-2 masses solars i un radi de 10-15 quilòmetres, sent alguns dels objectes més compactes mai descoberts.

Supernova per inestabilitat de parells (PISN): tipus d'explosió supernova que es preveu que tingui lloc en una estrella amb una massa superior a unes 130 masses solars. La producció de [parells electró-positró](#) al nucli provoca una caiguda dràstica de la pressió que sosté l'estrella, cosa que condueix a una explosió termonuclear descontrolada que no deixa cap romanent estel·lar.

Desplaçament cap al vermell: augment en la longitud d'ona (del so, la llum, o les ones gravitacionals) degut al moviment de la font respecte a l'observador. A causa de l'[expansió cosmològica de l'Univers](#), els objectes com ara les galàxies s'allunyen de nosaltres, i la llum i altra radiació electromagnètica que emeten presenta una longitud d'ona més llarga.

Matèria fosca: forma misteriosa de matèria que constitueix aproximadament el 85% de la massa de l'Univers. Es diu fosca perquè no emet llum ni interacciona electromagnèticament. Moltes teories sobre matèria fosca preduen que és algun tipus de partícula fonamental, però també és interessant considerar la possibilitat que els objectes més foscos que coneixem (els forats negres) podrien ser un component de la matèria fosca.

Energia fosca: component misteriós i desconegut del contingut de matèria i energia del cosmos que domina el comportament de l'Univers a les seves escales més grans i que es creu que és responsable de l'[acceleració de l'expansió de l'Univers](#). El model més simple d'energia fosca és el de la denominada constant cosmològica, que exerceix una pressió negativa i provoca una expansió accelerada.

Distribució de probabilitat a posteriori: gràfic o representació que mostra la probabilitat dels diferents valors possibles d'una propietat física donada, després d'analitzar les nostres dades, estimada a partir d'un procés anomenat [inferència Bayesiana](#).

PER SABER-NE MÉS:

Visita les nostres pàgines web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Llegiu una preimpressió gratuïta de l'article científic complet [aquí](#) o a [arxiv](#).

Publicació de dades del Gravitational-Wave Open Science Centre per GWTC-4.0 disponible [aquí](#).

Traducció al català per Anna Moreso Serra i Nino Villanueva (a partir de la versió original en anglès a https://ligo.org/science-summaries/O4a_Cosmology)