

QUÈ SIGNIFIQUEN LES NOSTRES DARRERES CERQUES D'UN FONS D'ONES GRAVITACIONALS PER A LA COSMOLOGIA I LA FÍSICA D'ALTES ENERGIES?

INTRODUCCIÓ

Malgrat l'èxit extraordinari dels models estàndard de la [física de partícules](#) i de la [cosmologia](#), la nostra comprensió dels aspectes bàsics de la física fonamental encara és incompleta. La naturalesa de la [matèria fosca](#) i l'[energia fosca](#), l'origen de l'[asimetria matèria/antimatèria](#), l'explicació de les [masses dels neutrins](#) i la realitat de la [inflació còsmica](#) continuen sent qüestions obertes importants. Per tal de resoldre aquestes qüestions, s'estan investigant escenaris que [impliquen física més enllà del Model Estàndard](#) i estan sota escrutini en [experiments de física d'astropartícules](#), des de [col·lisionadors](#) fins a telescopis. Molts d'aquests escenaris "més enllà del model estàndard" també implicarien l'existència de fenòmens nous en les primeres etapes de l'Univers, que podrien deixar petjades que podem buscar en forma d'un [fons d'ones gravitacionals](#).

Les dades de LIGO/Virgo/KAGRA (LVK) ens permeten buscar signes del fons d'ones gravitacionals que podrien haver estat generats per aquests mecanismes de l'Univers primerenc, com [ara transicions de fase de primer ordre](#), [cordes còsmiques](#), [parets de domini](#), una equació d'estat [rígida](#), inflació [d'axions](#), perturbacions escalars [de segon ordre](#), [forats negres primordials](#), i [violació de paritat](#). A continuació parlem breument de cadascun d'aquests fenòmens.

TRANSICIONS DE FASE, CORDES CÒSMIQUES I PARETS DE DOMINI

Des que es va originar, l'Univers s'ha anat expandint i refredant progressivament i, en temps antics, l'Univers va experimentar canvis en el seu estat fonamental — anàleg al que passa amb l'aigua quan l'aigua líquida es converteix en gel. A mesura que la temperatura de l'univers baixava, aquest va experimentar una sèrie de [transicions de fase](#) en què va entrar en estats amb menys [simetries](#), és a dir, en què la uniformitat original de les forces de la natura es va fragmentar en característiques distintes i específiques. En aquest procés poden aparèixer [defectes topològics](#) com [cordes còsmiques](#) i murs de domini. Una corda còsmica és un objecte unidimensional l'energia del qual es concentra al llarg d'una línia. És anàleg a les esquerdes que poden aparèixer en el gel quan l'aigua es congela.

La **Figura 1** mostra un *cusp* i un *kink* en una corda còsmica. Quan es formen *cusps* i *kinks* i s'acceleren en una corda còsmica, s'emeten ones gravitacionals. La col·lisió de *kinks* també crea ones gravitacionals. Una paret de domini és un objecte bidimensional, una frontera que separa dos dominis. És un lloc on les propietats fonamentals de l'univers hagueren de passar d'un estat estable a un altre.

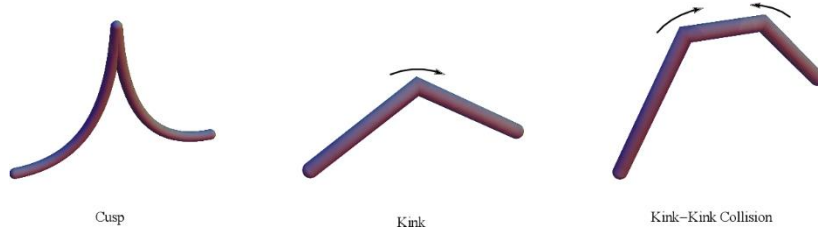


Figura 1: Il·lustracions de dibuixos animats de *cusps*, *kinks* i col·lisions *kink-kink*, que dominen la producció d'ones gravitacionals a partir de cordes còsmiques a altes freqüències. [Crèdit de la imatge: [Long, Hyde i Vachaspati](#)]

UNA ECUACIÓ D'ESTAT "STIFF"

En el model cosmològic estàndard, l'Univers estava primer dominat per partícules relativistes (és a dir, partícules que es movien a velocitats properes a la [de la llum](#)) abans d'entrar en una [era dominada per la matèria](#) en què la [densitat](#) d'energia de l'Univers va passar a ser dominada per partícules que es movien a velocitats més lentes. Alguns models de física d'alta energia impliquen que aquestes diferents èpoques podrien haver estat precedides per una seqüència poc convencional d'èpoques durant les quals la relació entre la [pressió](#) i la densitat d'energia de l'Univers (coneguda com la seva "[equació d'estat](#)") era molt inusual, amb la pressió del fluid còsmic tan alta com la seva densitat d'energia: aquest escenari s'anomena una equació d'estat "stiff".

INFLACIÓ D'AXIONS

Per abordar alguns enigmes i preguntes sense resposta associats al [model cosmològic del Big Bang](#), s'ha proposat que l'Univers va experimentar un període primerenc d'expansió molt ràpida, conegut com a [Inflació Còsmica](#), durant el qual l'Univers va créixer ràpidament [de manera exponencial](#). Entre els diversos models inflacionaris que s'han considerat, en un anomenat "inflació d'axions" l'expansió exponencial està impulsada per una partícula hipotètica anomenada axió, que està motivada per idees de la física de partícules d'alta energia. Els axions també són candidats per a la [matèria fosca freda](#), ja que són extremadament lleugers, elèctricament neutres i interactuen molt feblement amb la matèria normal.

TROBA MÉS INFORMACIÓ:

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



PERTORBACIONS DE SEGON ORDRE

L'Univers a grans escales és [homogeni](#) i [isòtrop](#), d'acord amb el que es coneix com el [Principi Cosmològic](#). Tanmateix, a escales més petites l'Univers no és tan regular: hi ha [pertorbacions](#) —variacions tant en la geometria com en el contingut de matèria de l'Univers— que es creu que han conduït a l'existència d'estructures (és a dir, galàxies i cúmuls de galàxies) i buits. Hi ha diferents tipus de pertorbacions cosmològiques. Les fluctuacions en la densitat i la pressió del fluid còsmic s'anomenen pertorbacions escalars, mentre que les ondulacions en l'espai-temps mateix són *pertorbacions tensorials, també conegudes com a ones gravitacionals*. En [la teoria de la Relativitat General d'Albert Einstein](#), la gravetat és [no lineal](#). La matèria crea la gravetat, però la gravetat —perquè conté energia— genera encara més gravetat. Com a resultat d'això, dues pertorbacions cosmològiques expressades en la seva forma matemàtica més simple poden interactuar entre elles per produir una pertorbació més complexa, coneguda com a *segon ordre*.

FORATS NEGRES PRIMORDIALS

Els [forats negres primordials](#) són forats negres hipotètics que podrien haver-se format de diverses maneres a l'Univers primitiu. La seva massa abasta una àmplia gamma i també podrien formar sistemes binaris, és a dir, parells de forats negres primordials que estan gravitacionalment units entre ells. Aquests objectes han despertat molt d'interès perquè són un dels candidats més plausibles per la matèria fosca.

RESULTATS: CERCA DE SIGNATURES DE MODELS COSMOLÒGICS NO ESTÀNDAR

Totes aquestes fonts cosmològiques podrien produir un fons d'ones gravitacionals. Les cerques d'aquest tipus de fons en dades LVK poden restringir els paràmetres dels models cosmològics a escales d'energia superiors a les que podem assolir amb [acceleradors de partícules](#).

A més, la [violació de la paritat](#) és la idea que les lleis de la física podrien no ser les mateixes quan mires una imatge especular d'un procés determinat. Un exemple n'és [la violació CP](#), en què es viola el principi de simetria de CP, o *conjugació de càrrega-paritat* (que estableix que les lleis de la física han de ser les mateixes si una partícula s'intercanvia amb la seva [antipartícula](#) mentre les seves coordenades espacials estan invertides o "mirallades"). Alguns models cosmològics motivats per la física d'altres energies poden provocar la producció d'ones gravitacionals que violen la paritat. Per tant, les dades LVK també es poden utilitzar per buscar processos de violació de la paritat a l'Univers primerenc.

En la nostra nova publicació utilitzem dades de les quatre [primeres campanyes d'observació](#) LVK per cercar un fons d'ones gravitacionals de totes les fonts cosmològiques que hem descrit anteriorment. Al mateix temps, també hem considerat una contribució de fons d'ones gravitacionals procedents de fonts astrofísiques febles i llunyanes, com ara [les coalescències binàries compactes](#) —les fusions, per exemple, de forats negres binaris i sistemes d'estrelles de neutrons binàries— arreu de l'Univers.

En aquesta cerca no s'ha trobat cap senyal, però les nostres anàlisis han pogut establir restriccions importants als models que s'han provat. Un exemple d'aquestes restriccions, en el cas dels models de forats negres primordials, es mostra a la **Figura 2** (Fig. 14 de la nostra publicació).

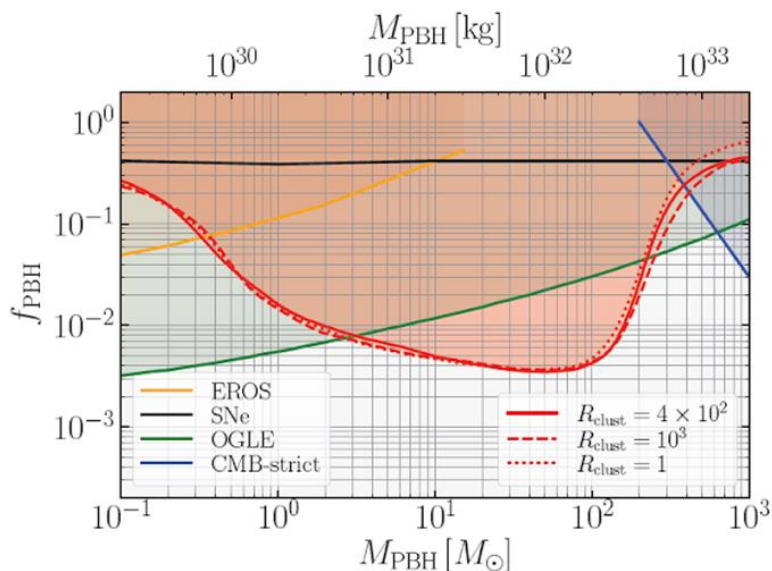


Figura 2 (Fig. 14 de la nostra [publicació](#)): Gràfic que mostra les restriccions de la nostra anàlisi sobre f_{PBH} , la fracció de matèria fosca composta avui per forats negres primordials, com a funció de la massa primordial del forat negre M_{PBH} en unitats de la [massa del Sol](#). La regió ombrejada de vermell queda exclouida per la nostra anàlisi amb una probabilitat del 95%, és a dir, estem un 95% segurs que la fracció de matèria fosca composta per forats negres primordials no pot ser més gran que els valors traçats per les corbes sòlides, dissenyades i puntejades, que corresponen a diferents supòsits del model sobre la velocitat a la qual es produeixen les fusions binàries dels forats negres primordials. Podem veure a la figura que les restriccions sobre f_{PBH} de la nostra anàlisi d'ones gravitacionals són, en certs rangs de massa, significativament més fortes que en altres sondes astrofísiques, com ara les [cerques de microlent](#) (EROS, OGLE), les [restriccions de lent de supernoves](#) (SNe) i les mesures del [fons còsmic de microones](#) (CMB-strict).

TROBA MÉS INFORMACIÓ:

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

Llegiu un preimprès gratuït de l'article científic complet [aquí](#) o a [arxiv](#).

Traduït al català per Irene Prohens Peteracova (a partir de la versió en original en anglès) i revisat per Maria Antònia Ferrer Martínez.