PROCURA DE BURACOS NEGROS MAIS LEVES DO QUE O SOL ATRAVÉS DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Cada período de observação da rede de detetores de ondas gravitacionais LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) oferece uma oportunidade de detetar mais fontes (o número de fusões de sistemas binários de objetos compactos já ultrapassa as 200) e para realizar procuras mais aprofundadas de fontes que ainda não foram observadas. Entre estas, um alvo particularmente interessante são as fusões de objetos compactos com massas inferiores à massa do Sol (representada por $M_{\odot}$). Embora não exista qualquer processo astrofísico conhecido capaz de formar objetos tão leves a partir de estrelas normais (ver **Figura 1**), especula-se que alguns processos poderiam ter originado, por exemplo, buracos negros primordiais no Universo primitivo.

Embora as fusões de objetos leves emitam, em geral, ondas gravitacionais menos intensas do que os sistemas mais massivos, os nossos detetores são sensíveis a estas fontes desde que não se encontrem demasiado distantes (tipicamente até um décimo de gigaparsec). A sua procura tem o potencial de revelar nova física. Na primeira parte do quarto período de observação LVK (O4a), os detetores LIGO recolheram dados com uma sensibilidade sem precedentes, aumentando o seu alcance 15% a 45% em comparação com o terceiro período de observação e, por isso, sondando um volume maior do Universo.

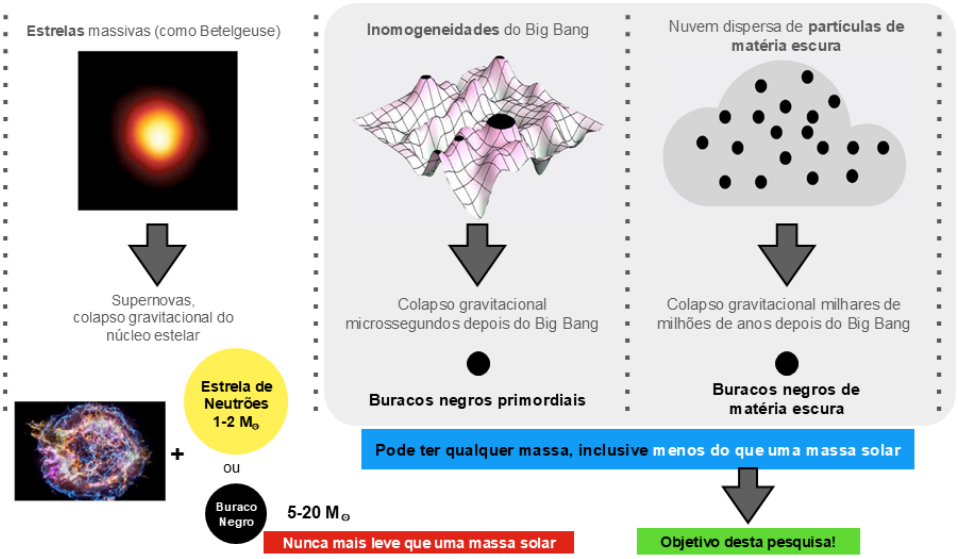


Figura 1: Ilustração esquemática dos diferentes cenários de formação de objetos compactos que podem ser observados pelos detetores LIGO-Virgo-KAGRA. Para além de estrelas de neutrões e dos buracos negros formados por evolução estelar, poderão existir no Universo buracos negros primordiais ou de matéria escura, de natureza hipotética, com massas inferiores à do Sol.

Utilizando três pipelines de procura independentes (GstLAL, MBTA, PyCBC – todas baseadas no conhecimento da forma de onda esperada mas diferindo nos métodos usados para separar sinais de ruído de fundo e para estimar a sua significância estatística), analisámos os dados de O4a para procurar fusões de massa subsolar, onde o objeto mais leve do sistema binário tem uma massa entre 0,2 $M_{\odot}$ e 1 $M_{\odot}$ e o objeto mais massivo tem uma massa entre 0,2 $M_{\odot}$ e 10 $M_{\odot}$. Para contextualizar este intervalo, os objetos compactos mais leves observados através de ondas gravitacionais até à data têm massas restringidas a valores acima de 1 $M_{\odot}$, enquanto observações eletromagnéticas forneceram evidência para uma estrela de neutrões leve com uma massa estimada de cerca de 0,8 $M_{\odot}$.

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web:

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

A procura não revelou qualquer novo evento candidato (embora tenha identificado o evento GW230529: ver o resumo científico sobre esta entusiasmante descoberta). No entanto, a partir da ausência de deteções, foi possível estabelecer limites superiores para a taxa de ocorrência deste tipo de eventos (ver **Figura 2**). Para tal, quantificámos a sensibilidade da nossa procura aplicando-a a sinais simulados de fusões de sistemas binários de buracos negros de massa subsolar, injetados nos dados de O4a.

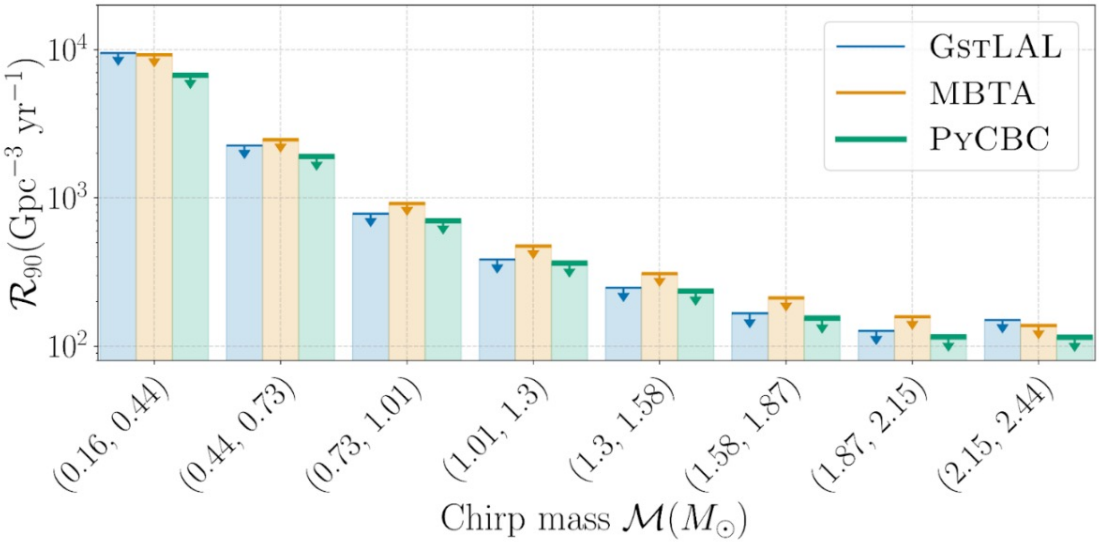


Figura 2: (Figura 5 do artigo): Limites superiores para a taxa de fusão de sistemas binários de buracos negros de massa subsolar, em função da massa de chirp, isto é, uma combinação das massas dos dois buracos negros que representa a massa efetiva do sistema binário. Estes limites superiores são inferidos a partir da ausência de deteções nos dados O4a e da sensibilidade estimada da procura realizada por cada pipeline.

Pela primeira vez, analisamos também a sensibilidade da nossa procura no caso em que os objetos de massa subsolar no sistema binários são estrelas de neutrões. Embora não se espere que as estrelas de neutrões tenham massas inferiores à do Sol, se tais objetos existirem, os efeitos de maré na dinâmica do sistema binário – em que a atração gravitacional de uma estrela induz uma deformação na outra – deverão desempenhar um papel importante. Isto deve-se ao facto de essa deformação, subtil em estrelas de neutrões típicas, se tornar significativa em estrelas mais leves. Uma vez que a nossa procura assume que os objetos são buracos negros, isto é, objetos sem efeitos de maré, poderá não captar perfeitamente um sinal proveniente de fusões de estrelas de neutrões de massa subsolar. Quantificamos a sensibilidade da procura neste caso específico aplicando-a a sinais simulados de fusões de sistemas binários de estrelas de neutrões e determinando com que frequência um sinal é detetado.

Os limites superiores para a taxa de fusões podem ser reinterpretados como restrições a modelos de matéria escura que preveem fusões de sistemas binários de buracos negros de massa subsolar. Um desses modelos propõe que os buracos negros primordiais se tenham formado no Universo primitivo e que se tenham associado em sistemas binários que acabam por fundir-se. Derivamos valores máximos para a fração de matéria escura que esses buracos negros primordiais poderão constituir, dependendo de vários hipóteses sobre a sua massa e sobre o cenário de formação dos sistemas binários. Outra classe de modelos considera a possibilidade de a matéria escura ser composta por partículas (desconhecidas) que podem interagir com o seu meio envolvente, acumulando-se em regiões densas e colapsando eventualmente para formar buracos negros. Estes buracos negros são designados por "buracos negros escuros" (ou "buracos negros de matéria escura" – ver **Fig. 1**), uma vez que teriam origem na matéria escura. Estes buracos negros escuros poderão depois formar sistemas binários e fundir-se, sendo que a sua fase espiral produziria uma onda gravitacional. Embora, mais uma vez, este procura não tenha produzido deteções, este resultado nulo permite restringir até que ponto a matéria escura poderá ser composta por buracos negros escuros, no intervalo de massas subsolares considerado neste estudo.

O período de observação O4 continuou até novembro de 2025 e acumulou muito mais dados, o que proporciona uma oportunidade para aprofundar a procura e abre portas para uma deteção ou para o estabelecimento de restrições mais apertadas. Fica atento!

PARA SABER MAIS

Visita as nossas páginas web:

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

Lê uma pré-impressão do artigo científico aqui ou no arxiv.

Traduzido para o português por Tiago Fernandes e revisto por Inês Rainho a partir da versão original em inglês disponível aqui.