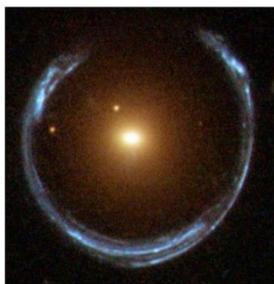
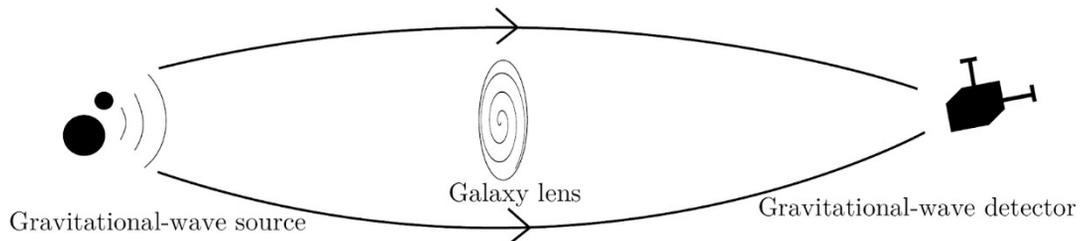


# GRAVIDADE QUE CURVA A GRAVIDADE: ENCONTRAMOS ONDAS GRAVITACIONAIS COMLENTE GRAVITACIONAL?

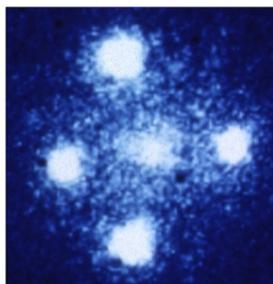
Imagine uma lente de aumento do tamanho de uma galáxia e o que poderíamos fazer com a luz ou com ondas gravitacionais que viajam pelo cosmos. Por meio do fenômeno chamado “lente gravitacional”, objetos astrofísicos massivos atuam como lentes gigantes. Nesse estudo, nós procuramos por assinaturas dessas lentes nos sinais de ondas gravitacionais da primeira metade da Terceira corrida observacional do LIGO-Virgo, a O3.

## LENTE GRAVITACIONAL – PREVISÃO DE EINSTEIN COM MUITAS APLICAÇÕES ASTRONÔMICAS

A teoria da [relatividade geral](#) postula que objetos astronômicos massivos curvam o espaço e o tempo próximos a eles, dobrando os caminhos da luz. Em outras palavras, eles agem como lentes gravitacionais. Essas lentes podem ampliar objetos distantes, dividi-los em várias imagens ou deformá-los em arcos longos ou “[anéis de Einstein](#)” (veja a figura 1). As observações de lentes gravitacionais são comuns na astronomia em todo o [espectro eletromagnético](#). Historicamente, as lentes nos forneceram o primeiro teste da teoria de Einstein [durante o eclipse solar de 1919](#). Mais recentemente, observações de [lentes fracas](#) foram usadas para mapear a distribuição de massa no universo, apresentando um caso convincente para [a matéria escura](#). A lente também permite que os astrônomos estudem [exoplanetas](#) que causam variações periódicas no brilho de suas estrelas à medida que se movem na frente dela. Além disso, as lentes nos permitem descobrir objetos e estruturas massivas no cosmos que, de outra forma, seriam muito fracas para serem detectadas. Com certeza, as lentes gravitacionais se tornaram uma ferramenta padrão em astronomia, astrofísica e cosmologia.



ESA/Hubble & NASA



NASA, ESA, and STScI



NASA, ESA, Hubble SM4 ERO Team, ST-ECF

**Figura 1** : Quando a luz viaja perto de objetos astrofísicos massivos, seu caminho é curvo devido à gravidade, resultando em lentes gravitacionais (gravitational lens). Tal fenômeno pode produzir anéis e cruces de Einstein, distorções estatísticas na luz de fundo das galáxias e muitas outras observações intrigantes. Da mesma forma que a luz, as ondas gravitacionais (gravitational wave) podem ser redirecionadas. No entanto, os métodos para detectar e fazer uso de lentes de ondas gravitacionais são totalmente diferentes. Em vez de distorções de formato de imagem ou brilho transiente de estrelas, focamos em eventos de ondas gravitacionais repetidos e distorções dependentes de frequência nas formas de ondas gravitacionais.

## O QUE UMALENTE GRAVITACIONAL PODE FAZER COM A ONDA GRAVITACIONAL?

Assim como as ondas eletromagnéticas, as [ondas gravitacionais](#) podem ser atingidas por lentes gravitacionais formadas por outros objetos, como estrelas, [buracos negros](#), galáxias e aglomerados de galáxias (Veja a figura 1). No entanto, embora a teoria por trás das lentes das ondas gravitacionais seja semelhante à das lentes de luz, os métodos para detectá-las são totalmente diferentes. Em particular, podemos detectar a ampliação da lente como uma amplificação geral das ondas. Essa ampliação faria com que [os sinais de sistemas binários](#) parecessem vindos de fontes mais próximas e de maior massa. Várias imagens apareceriam como eventos "repetidos": eventos quase idênticos aparecendo com intervalo de minutos, meses ou as vezes anos. Como a lente normalmente produzirá separações de imagem que são muito pequenas para serem resolvidas com os detectores atuais, os eventos parecem vir do mesmo local no céu. Por outro lado, uma microlente produz pequenos atrasos de lente, o que pode fazer com que várias formas de onda que passaram por ela se sobreponham nos detectores e produzam "padrões de batimento".

## O QUE APRENDEMOS COM A DETECÇÃO DE ONDA GRAVITACIONAL COMLENTE?

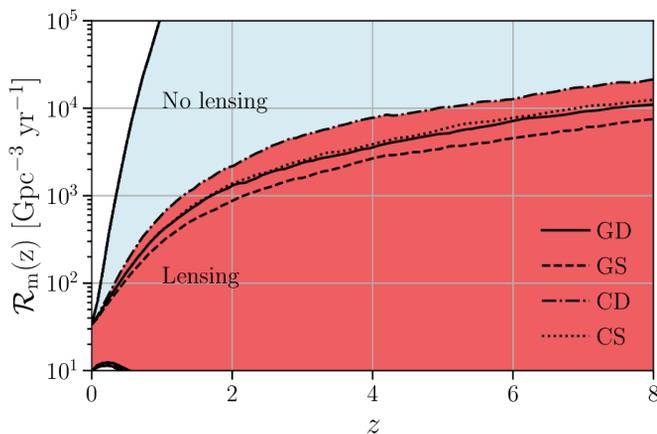
Uma vez identificadas, as ondas gravitacionais com lentes podem dar origem a várias atividades científicas interessantes. Quando o sistema de lentes é suficientemente único, pode-se localizar buracos negros em fusão, invisíveis aos telescópios convencionais, combinando pesquisas de ondas gravitacionais e lentes eletromagnéticas. Quando uma contraparte eletromagnética acompanha as ondas com lente, estudos de cosmologia de precisão podem se tornar viáveis devido às medições de ondas gravitacionais com atraso menores que 1 milissegundo devido à lente. Ao contrastar os atrasos de tempo entre as ondas gravitacionais com lentes e suas contrapartidas eletromagnéticas transitórias, pode-se medir a velocidade da gravidade em relação a da luz. Como as ondas gravitacionais com lentes nos permitem observar o mesmo evento várias vezes em diferentes orientações do detector, elas também podem sondar a [polarização](#) total das ondas, testando a relatividade geral e teorias alternativas. Uma microlente, por outro lado, pode ajudar no estudo de populações de objetos como buracos negros primordiais e de massa intermediária. Uma vez observadas, as ondas gravitacionais com lentes permitirão novos estudos científicos de física fundamental, astrofísica e cosmologia.

## O QUE PROCURAMOS NOS DADOS DA O3 E O QUE ENCONTRAMOS

No estudo atual, procuramos assinaturas de lente gravitacional nos sinais de ondas gravitacionais de [sistemas binários compactos](#) detectados pelo [LIGO](#) e pelo [Virgo](#) durante a corrida observacional O3a. Previmos com que frequência as lentes ocorrem com a atual sensibilidade do detector e determinamos até mesmo como a *ausência* de efeitos de lentes detectáveis já restringe a taxa de fusão de sistemas binários compactas no [universo distante](#) (ver Fig. 2).

## FIGURAS DA PUBLICAÇÃO

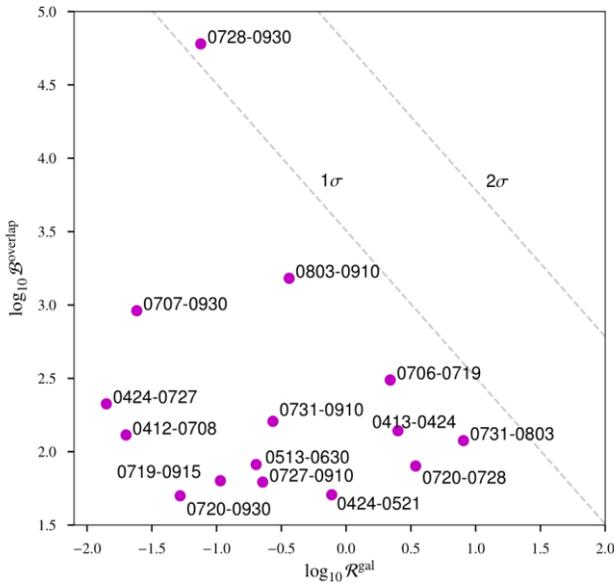
Para maiores informações, você pode encontrar e ler o artigo em [preprint](#) disponível gratuitamente.



**Figura 2** : Este diagrama demonstra como a presença ou ausência de ondas gravitacionais com lentes detectáveis melhora nosso conhecimento da taxa de fusão de sistemas binários compactos (eixo vertical) ao longo da história cósmica, com o eixo horizontal dando o redshift cósmico  $z$ . (O dia atual está em  $z = 0$ .) Já temos uma ideia geral sobre a taxa de fusão, conforme indicado pela região azul no diagrama, de nosso catálogo de observações, sobre o qual você pode ler mais neste resumo. Saber se há ou não efeitos de lente detectáveis nos dados restringe a taxa de fusão em alto redshift (universo inicial), conforme indicado pela região vermelha no diagrama. Isso ocorre porque as lentes podem ampliar os sinais para que possamos detectá-los de mais longe. Neste gráfico, a quantidade mostrada no eixo vertical é tecnicamente a densidade da taxa de fusão, ou seja, o número de eventos de fusão por ano em um volume unitário de um Gigaparsec cúbico (Gpc). As diferentes linhas representam resultados para diferentes situações de lente: lentes em escala galáctica (G) e lentes em escala de aglomerados, bem como detectar apenas uma (S) ou ambas as imagens (D) produzidas por um evento de lente de imagem dupla.

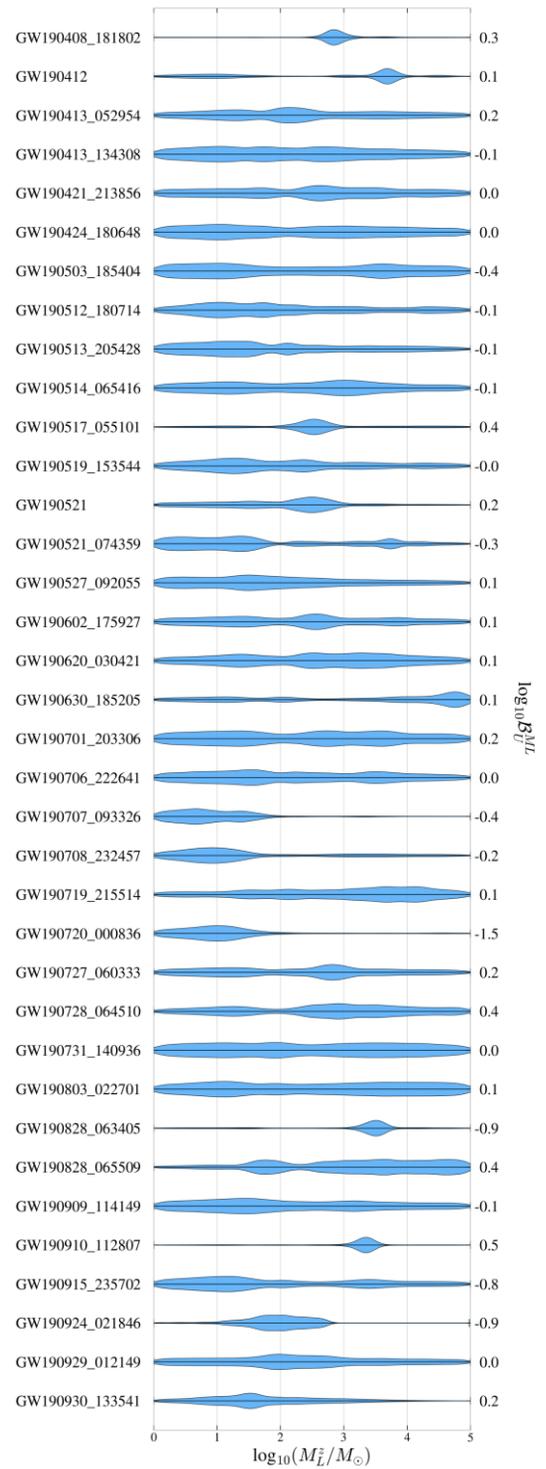


Visite nossos sites:  
<http://www.ligo.org>  
<http://www.virgo-gw.eu>



**Figura 3** : Os pares mais promissores de eventos do GWTC-2 com lente potencial com alta sobreposição entre suas propriedades estimadas, incluindo, por exemplo, as massas e spins dos objetos que se fundem. O grau de sobreposição é classificado no eixo vertical. O eixo horizontal nos diz se o atraso de tempo entre os pares é mais consistente com a lente (assumindo que uma galáxia atue como a lente, levando a curtos atrasos de tempo esperados e fica mais acima) ou com dois eventos não relacionados (que produziriam em média um tempo de atraso mais longo e fica mais em baixo). As linhas tracejadas nos dizem que, combinando as duas medidas, nenhum dos pares mostra evidências significativas de lentes (medidas nos níveis convencionais “sigma”). Ainda assim, para cavar mais fundo, também realizamos análises de acompanhamento mais detalhadas e também incluímos modelos populacionais e efeitos de seleção; no final, todos os pares candidatos parecem consistentes com fusões independentes, sem o envolvimento de lentes.

Também demonstramos como a [ausência de um fundo de onda gravitacional estocástica observável](#) melhora nosso conhecimento da taxa de lente. Além disso, estudamos a ideia de que a ampliação da lente pode ajudar a explicar as massas excepcionalmente altas que vemos em alguns de nossos eventos detectados (como [GW190425](#) ou [GW190521](#)). Também procuramos por lentes múltiplas nos dados do detector, comparando a probabilidade de qualquer par de sinais serem cópias com lentes da mesma fonte ou produzidos por fontes não relacionadas. Encontramos vários pares candidatos que se assemelham muito (veja a Figura 3), assim como as imagens com lente de uma única fonte, mas no final não encontramos suporte para que elas sejam realmente lentes, depois de considerarmos suposições mais realistas sobre a população de sistemas de origem, os [efeitos de seleção](#) de nossas pesquisas e a taxa esperada de lente na sensibilidade atual. Finalmente, procuramos o efeito de “padrão de batimento” característico da microlente nas formas de onda dos eventos detectados, não encontrando nenhuma evidência para eles nos 36 eventos testados (ver Figura 4). Em resumo, nosso estudo abrangente para ampliação de ondas gravitacionais, múltiplas imagens e assinaturas de microlentes em dados O3a **não revelou nenhuma evidência convincente para lentes gravitacionais.**



**Figura 4** : Resultados do teste de 36 eventos de O3a para “padrões de batimento” de microlentes. Os contornos mostram o quão provável são certos valores da massa da lente para os dados medidos, assumindo que o evento passou por microlente. No entanto, não encontramos nenhuma evidência real de que esse seja o caso para qualquer um desses eventos. Os valores listados à direita da figura são [fatores de Bayes](#), uma estatística que nos diz se mais provável para os dados medidos se dá com lente ou sem. Uma vez que são todos negativos ou próximos de zero, isso nos diz que nenhum dos eventos requer microlente para explicar sua evolução de frequência.

## O QUE ESPERAR?

No futuro, será possível aprofundar os efeitos das lentes nas ondas gravitacionais com métodos de análise mais sensíveis e modelagem de lentes mais detalhada. As observações de acompanhamento no espectro eletromagnético de candidatos a lentes, mesmo que não sejam significativas o suficiente com base apenas nos dados de ondas gravitacionais, também podem ser promissoras para identificar as possíveis galáxias hospedeiras e possíveis lentes. Outras atualizações da geração atual de detectores e a extensão da rede global continuarão a melhorar as chances de detecção de assinaturas de lentes claras. Assim que os detectores de terceira geração, que serão espaciais (por exemplo, o [Einstein Telescope](#), o [Cosmic Explorer](#) e o [LISA](#)) estiverem online por volta dos anos de 2030, muitas outras possibilidades empolgantes se tornarão viáveis.

## SAIBA MAIS

Visit our websites:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

Leia o artigo completo [aqui](#).

Traduzido para o Português por Juliédson Artur Malaquias Reis.

Você pode ler o original (em inglês) [aqui](#).

## GLOSSÁRIO

**Buraco Negro:** Um objeto massivo e denso, cuja atração gravitacional é tão forte que a luz não consegue escapar.

**Sistema Binário Compacto:** Um sistema de dois remanescentes de estrelas colapsadas, por exemplo, uma estrela de nêutrons e um buraco negro, orbitando um ao redor do outro.

**Universo distante:** devido à velocidade finita da luz, quanto mais longe olhamos para o universo distante, mais longe também olhamos para trás no tempo. Consequentemente, as fusões binárias detectadas de grandes distâncias realmente aconteceram quando o Universo era muito mais jovem do que hoje e, portanto, restringimos uma época diferente de sua história do que com mais observações locais.

**Relatividade Geral:** a teoria da gravitação atualmente aceita, descrita pela primeira vez por Albert Einstein em 1916. Nessa teoria, a gravidade é o resultado da curvatura no espaço-tempo causada por concentrações de massa ou energia. Ele previu ondas gravitacionais e lentes gravitacionais.

**Gigaparsec:** Uma unidade de distância astronômica apropriada para as maiores distâncias cosmológicas, igual a um bilhão de [parsecs](#). Um Gigaparsec (frequentemente abreviado como Gpc) corresponde a cerca de três bilhões de anos-luz ou  $3 \times 10^{22}$  km.

**Modelo da forma de onda gravitacional:** um modelo previsto de como a perturbação causada por uma onda gravitacional varia com o tempo.

**Polarização da onda gravitacional:** A forma geométrica do alongamento e compressão do espaço-tempo causados por uma onda gravitacional em seu movimento. A relatividade geral prevê apenas um tipo específico, a chamada polarização tensorial.

**Redshift:** o alongamento do comprimento de onda da luz, ou ondas gravitacionais, viajando através do Universo em expansão.

**Efeitos de seleção:** os detectores de ondas gravitacionais são mais propensos a captar eventos com certas propriedades intrínsecas (por exemplo, na faixa certa de massas) e de certas regiões do céu. Isso leva a encontrar mais pares de eventos semelhantes do que se poderia esperar a princípio.

**Spin:** Quantidade que mede a velocidade com que um objeto gira em torno de si mesmo.