

GWTC-4.0: À PROCURA DO EFEITO DE LENTE GRAVITACIONAL EM ONDAS GRAVITACIONAIS

As ondas gravitacionais—ondulações no espaço-tempo produzidas pela fusão de binários de objetos compactos, como as detetadas pela colaboração LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)—foram uma previsão da teoria da relatividade geral de Einstein. A teoria de Einstein também nos diz que a matéria curva o espaço e o tempo em seu redor, fazendo com que qualquer sinal que viaje através dessa região seja desviado por essa curvatura. Este processo, conhecido por efeito de lente gravitacional, é matematicamente semelhante ao efeito de lente que a luz sofre, por exemplo, ao passar através do vidro (um fenômeno do qual podes até depender para ler estas palavras!). A lente gravitacional da luz por objetos massivos no espaço é observada há mais de cem anos e tornou-se uma ferramenta habitual dos astrónomos, mas até agora a lente gravitacional de ondas gravitacionais nunca foi observada.

Neste estudo, procurámos indícios do efeito de lente gravitacional nos novos eventos de binários de buracos negros detalhados no mais recente catálogo LIGO-Virgo-KAGRA (GWTC-4.0), que inclui deteções realizadas durante a primeira parte do quarto período de observação LVK (O4a).

QUE INDÍCIOS DEIXA O EFEITO DE LENTE GRAVITACIONAL NAS ONDAS GRAVITACIONAIS?

Como toda a matéria provoca a curvatura do espaço e do tempo, existe uma ampla variedade de objetos (com uma vasta gama de massas diferentes) que poderiam atuar como lentes para um sinal de onda gravitacional durante a sua viagem até à Terra. Estes vão desde estrelas individuais, passando por campos de estrelas, até galáxias e enxames de galáxias—e não é surpreendente que, com possíveis lentes distribuídas por uma gama tão diversa de escalas de massa, os potenciais indícios de efeitos de lente gravitacional em ondas gravitacionais sejam também variados.

Considere-se em primeiro o extremo mais pesado da escala, o das galáxias e enxames de galáxias (com massas da ordem de centenas de milhões de massas solares ou mais). Se um sinal de onda gravitacional passar suficientemente próximo de um objeto tão massivo, este sofre o que chamamos de efeito de lente forte, em que são produzidas múltiplas cópias desse sinal. Este fenômeno é mostrado na **Figura 1**, que ilustra o efeito de lente forte tanto para um sinal de luz (proveniente da galáxia hospedeira da fonte de ondas gravitacionais) como para o próprio sinal de ondas gravitacionais. Estas cópias do sinal viajam cada uma ao longo da sua própria trajetória e experienciam diferentes partes do campo gravitacional produzido pelo objeto-lente, pelo que as observamos em momentos distintos e com diferentes ampliações—o que altera a amplitude da onda gravitacional, fazendo com que a fonte pareça mais próxima ou mais afastada de nós. No entanto, isso deixa a forma dos sinais inalterada, exceto por um deslocamento global de fase—de forma semelhante ao que acontece quando se olha através do vidro e os reflexos aparecem invertidos.

Isto significa que podemos procurar estes múltiplos sinais sujeitos a lente gravitacional analisando eventos de ondas gravitacionais que aparentem exibir semelhanças nos parâmetros medidos. Por exemplo, poderíamos observar múltiplos eventos que parecem provir de sistemas binários com massas semelhantes, ou de uma direção no céu semelhante, mas que à primeira vista parecem situar-se a distâncias diferentes. Claro que existe a possibilidade de isto acontecer por coincidência, pelo que devemos ser rigorosos nas nossas análises e tentar eliminar (ou pelo menos reduzir) esses casos de “falsos positivos”. Isto é feito através de um processo em múltiplas etapas.

Em primeiro lugar, usamos algoritmos rápidos que examinam os diferentes eventos de ondas gravitacionais, procurando estas semelhanças nos parâmetros inferidos e avaliando quão compatíveis diferentes combinações de sinais podem ser sob a suposição de que sofreram o efeito de lente gravitacional (denominada “hipótese de lente”).

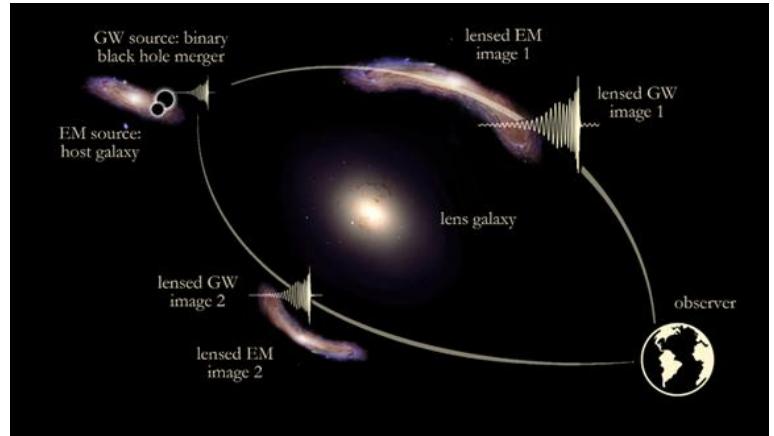


Figura 1: Esquema que ilustra o processo de lente gravitacional forte, em que o sinal originalmente emitido passa próximo de um objeto que atua como lente e várias “cópias” desse sinal são produzidas, cada uma com o seu próprio trajeto e diferente amplificação. Estas múltiplas cópias chegam depois ao observador na Terra em momentos distintos, como sinais separados. O esquema ilustra o efeito da lente gravitacional forte sobre uma fonte de ondas gravitacionais (OG), sobreposto a representações do efeito da lente gravitacional forte sobre a luz, ou seja, uma fonte eletromagnética (EM); também são mostradas imagens distorcidas da galáxia hospedeira da fonte de OG, tal como seriam observadas por telescópios. [Crédito da imagem: Laura Uronen, CUHK.]

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web:
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Este primeiro passo reduz a lista de candidatos a lente gravitacional, que são depois encaminhados para análises mais sofisticadas, mas também mais intensivas em termos computacionais, que procuram determinar quão significativos são os potenciais candidatos.

Devemos também ter em conta que, dado que diferentes sinais terão diferentes amplificações, pode haver determinados sinais detetados que fiquem “abaixo do limiar”: tão “fracos” que as pesquisas padrão da LVK por sinais de ondas gravitacionais não os conseguem identificar. Ainda assim, esses sinais estão presentes nos dados que recebemos e, por isso, realizamos pesquisas direcionadas para esses candidatos.

Embora na maioria das vezes procuremos indícios de lente gravitacional forte em grandes escalas através da procura de diferentes cópias do mesmo sinal, em determinadas condições específicas pode acontecer que apenas um único sinal de onda gravitacional seja identificável. Este cenário ocorre no chamado caso Tipo II¹, e nessas circunstâncias o efeito de lente resulta em algumas pequenas diferenças nos diferentes modos de frequência do sinal que podem ser detetadas.

Passando agora para lentes mais pequenas e menos massivas, também neste caso são produzidas múltiplas imagens quando o sinal passa suficientemente perto do objeto, mas como a lente é muito menor, também as deflexões e os atrasos temporais que produz são mais reduzidos. Isto significa que, em vez de múltiplos sinais distintos, observamos apenas um único sinal com padrões distintos, chamados de [padrões de batimento](#)—que são observados quando dois sinais de frequência ligeiramente diferente interferem um com o outro. Estes padrões são teoricamente detetáveis nos dados da LVK e, por isso, procuramo-los neste estudo.

O QUE DESCOBRIMOS?

Após a análise de mais de três mil e quinhentos pares de sinais resultantes de combinações das fontes de ondas gravitacionais detetados em O4a pelas nossas análises rápidas, apenas algumas dezenas destes pares foram encaminhadas para uma análise mais intensiva. No entanto, nenhum deles apresentou indícios significativos de lente gravitacional e, por isso, foram descartados. Nas pesquisas abaixo do limiar, também não houve candidatos relevantes. Além disso, a nossa análise de lente gravitacional forte do Tipo II não encontrou nenhum suporte significativo para a hipótese de lente gravitacional entre os novos eventos. Ainda assim, esses resultados foram úteis: utilizámos a não-deteção de lente gravitacional forte para inferir restrições sobre a frequência com que binários de buracos negros se fundem em desvios para o vermelho altos, tal como mostra a [Figura 2](#).

Na nossa pesquisa de distorções em sinais individuais, causadas por lentes menos massivas, a grande maioria dos sinais não apresentou qualquer suporte para a hipótese de lente—mostrando apenas distorções compatíveis com o que seria de esperar, por mero acaso, numa população de sinais não sujeitos a efeito de lente. Houve, no entanto, uma única exceção: [o evento GW231123](#), cuja deteção foi [anunciada separadamente como um "evento excepcional"](#) antes da publicação do [catálogo O4a](#) completo. A nossa análise indica que GW231123 parece apresentar um suporte para a hipótese de lente muito mais forte do que seria normalmente de esperar num sinal não sujeito a efeito de lente. Por exemplo, como mostra a [Figura 3](#), depois de gerar um pequeno “fundo” simulado de pouco mais de 250 eventos de ondas gravitacionais *não sujeitos a efeito de lente*, verificámos que nenhum destes eventos mostrou um nível de suporte à hipótese de lente gravitacional igual ou superior ao observado no GW231123.

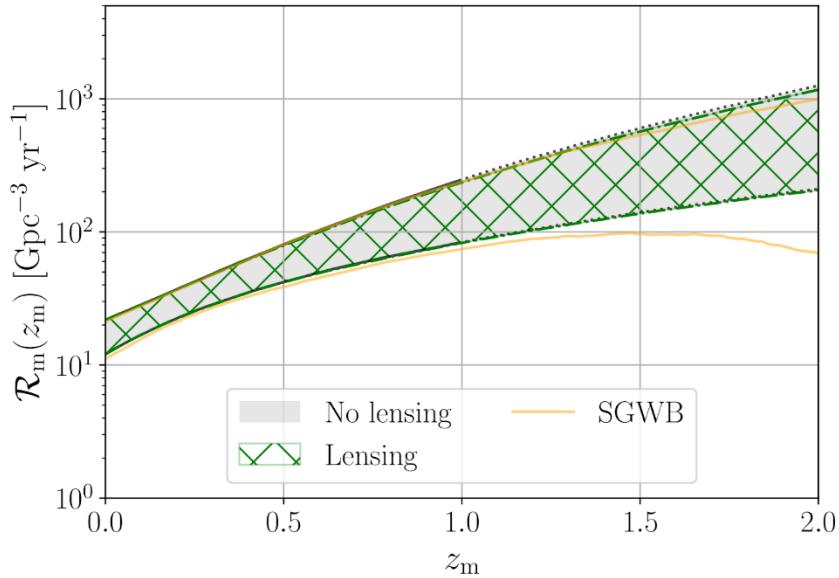


Figura 2: (Figura 11 do nosso [artigo](#)) A taxa inferida de fusão de binários de buracos negros em função do desvio para o vermelho. As nossas restrições à taxa de fusão (mostradas na região tracejada a verde), obtidas ao considerar a não deteção de lente gravitacional forte neste estudo, são comparáveis com as restrições inferidas diretamente a partir das propriedades dos [binários de buracos negros que foram detetados no nosso novo catálogo](#) (mostrados a cinzento) e com os limites da taxa de fusão inferidos a partir da não deteção de um [fundo estocástico de ondas gravitacionais](#) (mostrado pelas curvas a laranja).

O CURIOSO CASO DO GW231123

O GW231123 é um sinal muito curto; observámo-lo apenas durante alguns ciclos de onda gravitacional, ao longo de cerca de um décimo de segundo. A partir das nossas análises padrão (isto é, assumindo ausência de efeito de lente gravitacional), o GW231123 parecia corresponder a um sistema binário de buracos negros pesado e [com spin elevado](#) (na verdade, [o sistema mais massivo deste tipo alguma vez observado através de ondas gravitacionais](#)). Curiosamente, porém, os parâmetros inferidos para o GW231123 nestas análises sem lente gravitacional variam significativamente consoante o modelo específico para a emissão de ondas gravitacionais

1. No efeito de lente gravitacional forte existem três classes de “imagem”. Estas são denominadas Tipo I, II e III. Uma imagem é atribuída a cada uma dessas classes dependendo do deslocamento de fase que experimentou. Este deslocamento pode assumir um dos três valores: (I) 0, (II) $\pi/2$ ou (III) π . O valor do deslocamento de fase que ocorre é determinado pela posição do sinal no campo gravitacional à medida que viaja ao longo do seu trajeto até nós.

(referido como “[forma de onda](#)”) que foi utilizado. Por outro lado, quando o GW231123 foi analisado em busca de indícios de efeito de lente gravitacional, estas diferenças entre os modelos de forma de onda pareceram ser atenuadas—e, embora um dos componentes do sinal continuasse a ser inferido como mais massivo e com spin elevado (ainda que menor do que o caso sem efeito de lente), o outro componente passou a parecer mais leve e com um spin mais moderado. Ao analisar um sinal de onda gravitacional com efeito de lente, já sabemos que, se o efeito de lente não for tido em conta, isso pode levar a que o sinal seja interpretado como tendo uma rotação mais elevada do que realmente tem. Este padrão de comportamento seria consistente com o que foi encontrado para o GW231123 se, de facto, esse evento *tivesse sofrido* efeito de lente gravitacional. No entanto, devemos ser cautelosos antes de saltar para tal conclusão e considerar cuidadosamente outras possíveis explicações.

Uma possibilidade é que, dada a pequena duração do sinal, a qualidade dos dados em algumas frequências, associadas a certas características no [espetro de ruído](#) dos nossos detetores, possa ser motivo de preocupação. No entanto, quando examinamos as diferenças entre os sinais propostos com e sem efeito de lente para este evento, isso parece sugerir que nenhuma linha espectral isolada é responsável por sustentar a hipótese de lente. Num [caso anterior](#), em que houve algum suporte à hipótese de lente desta forma, verificámos que esse suporte era originado por dados de apenas um dos detetores—o que sugere que o mais provável era tratar-se de ruído transitório naquele detetor, e não de efeito de lente. No caso do GW231123, por outro lado, ao analisarmos individualmente os dados de cada detetor, verificámos que estes *continuam* a suportar a hipótese de lente—o que significa que a causa é comum a ambos os detetores.

Assim, se o GW231123 *for* um evento com efeito de lente, é importante perguntar quão provável é que um sistema com lente deste tipo seja observado. No nosso estudo, modelámos o objeto responsável pelo efeito de lente do GW231123 como uma massa pontual isolada. Houve relatos recentes de que o satélite [Swift](#) poderá ter observado efeito de lente gravitacional em [explosões de raios gama](#) por uma lente deste tipo. Embora estes indícios de lente gravitacional não estejam confirmados, se os tomarmos como reais, podem ajudar-nos a estimar quão provável seria observar um evento de efeito de lente gravitacional em ondas gravitacionais como o GW231123. Assim (e tendo também em conta outras possíveis fontes como [núcleos galáticos ativos](#)), concluímos que seria de esperar observar um evento de ondas gravitacionais com efeito de lente por uma massa pontual isolada, como a proposta para o GW231123, entre um em cada cem e um a cada dez mil sinais de ondas gravitacionais detetados. Por outras palavras, se o GW231123 *tiver* efeito de lente, então, com as observações atuais, representa um achado bastante raro.

Por outro lado, também sabemos que o modelo de massa pontual isolada usado nas pesquisas realizadas no nosso estudo não abrange outros cenários, talvez mais prováveis, para a lente—por exemplo, quando a lente está inserida num objeto maior, como uma galáxia. Se tal cenário fosse verdadeiro, isso alteraria a nossa estimativa da frequência com que um evento com efeito de lente semelhante ao GW231123 seria observado, e seriam necessários estudos mais aprofundados para refinar essa estimativa.

Em resumo, os resultados das nossas análises, quando considerados em conjunto, não nos permitem chegar a uma conclusão segura sobre se o GW231123 é de facto um sinal sujeito ao efeito de lente gravitacional. No entanto, no futuro, à medida que formos observando cada vez mais sinais, poderemos chegar a uma conclusão mais definitiva; por isso, fiquem atentos!

PERSPECTIVAS FUTURAS

A procura pelo efeito de lente gravitacional em ondas gravitacionais continua! No catálogo mais recente, ainda não parece ter sido encontrado qualquer indício fiável de efeito de lente. Contudo, encontrámos o candidato mais interessante e promissor até à data: o GW231123, para o qual a hipótese de lente não pode ser descartada. Nos próximos anos, com a deteção de um número crescente de fontes de ondas gravitacionais, abre-se perspectivas promissoras para identificar indícios de efeito de lente gravitacional entre elas. Vários dos testes realizados neste estudo serão fundamentais para tornar essa identificação possível.

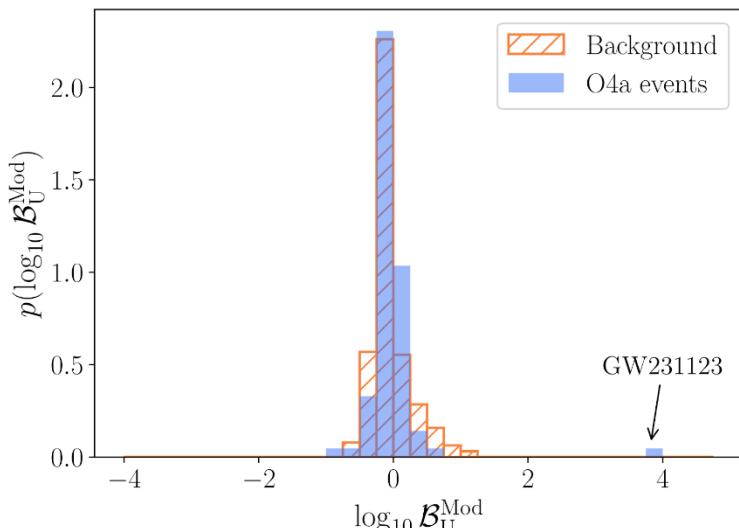


Figura 3: (Figura 6 do nosso [artigo](#)). Distribuição dos fatores de Bayes—que indicam quanto um modelo é preferível em relação ao outro—ao comparar modelos com e sem efeito de lente para os eventos do O4a considerados no nosso estudo. A azul mostra-se um histograma do logaritmo (em base 10) do fator de Bayes, comparando um modelo com lente (em que a lente é uma massa pontual isolada) com um modelo sem lente, para cada um dos nossos eventos. Em laranja apresenta-se um histograma dos valores do logaritmo do fator de Bayes para uma distribuição simulada de pouco mais de 250 eventos sem lente. A maioria dos eventos do O4a situa-se dentro desta distribuição simulada. No entanto, o GW231123 encontra-se significativamente fora desta distribuição.

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web:

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

Lê uma pré-impressão de acesso livre do artigo científico [aqui](#) ou no [arxiv](#).

Os dados relativos ao GWTC-4.0 foram publicados pelo Gravitational-Wave Open Science Centre [aqui](#).

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