

GW250114: SINFONIA CÓSMICA DE CAOS

No 10.º aniversário da detecção de ondas gravitacionais, [as colaborações LIGO, Virgo e KAGRA \(LVK\)](#) reportam um novo sinal proveniente da fusão de buracos negros: GW250114. Os buracos negros eram surpreendentemente semelhantes (em termos de massa e distância) aos observados na primeira detecção do LIGO, em 2015: GW150914. Mas, após 10 anos de melhorias tanto na rede global de detetores de ondas gravitacionais quanto nos métodos usados para analisar os seus dados, os investigadores da LVK conseguiram “ouvir” o GW250114 três vezes mais nítido do que a pioneira primeira detecção. Com esta observação sem precedentes, os investigadores da LVK confirmaram que os buracos negros crescem sempre em tamanho e que, quando perturbados, soam como um sino com o “som” previsto por Einstein.

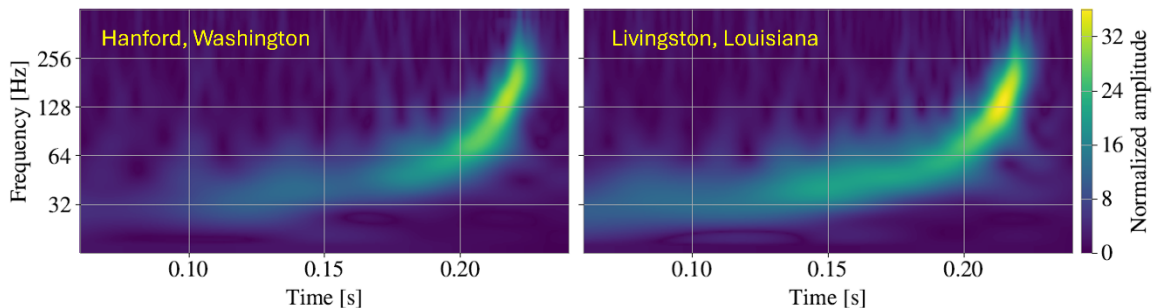


Figura 1: (Adaptado da Figura 1 da nossa [publicação](#).) O evento de ondas gravitacionais GW250114 observado pelos detetores LIGO Hanford (painel esquerdo) e LIGO Livingston (painel direito). Os dois gráficos mostram como a deformação das ondas gravitacionais produzida pelo evento em cada detetor LIGO variou em função do tempo (em segundos) e da frequência (em hertz, ou número de ciclos de onda por segundo). Ambos os gráficos mostram a frequência do GW250114 subindo acentuadamente, num padrão semelhante a um chiro, de aproximadamente 30 Hz a 250 Hz ao longo de dois décimos de segundo.

Há mais de 50 anos, Stephen Hawking e Jacob Bekenstein conjecturaram que a [área do horizonte de eventos de um buraco negro](#) codifica a sua [entropia](#). A entropia é uma medida da desordem, ou caos¹, de um sistema que só pode aumentar com o tempo, como se sabe desde a época das máquinas a vapor. Se a conjectura deles estiver correta, isso significa que as áreas dos buracos negros só podem aumentar. Isso fascinou os físicos porque, de acordo com a teoria da gravidade de Einstein, a [Relatividade Geral](#), os buracos negros deveriam ser objetos extremamente simples, descritos apenas por dois números²: a sua massa e o seu [spin](#). No entanto, as descobertas de Hawking e Bekenstein sugerem que os buracos negros são simultaneamente simples e codificam enormes quantidades de caos. Essa dualidade está na base de uma profunda conexão entre o espaço-tempo e a [mecânica quântica](#).

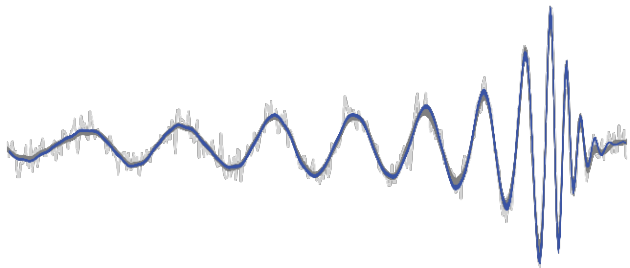


Figura 2: Esquema que ilustra a excelente concordância entre os dados (mostrados em cinzento claro) observados pelo detetor LIGO Livingston no momento da detecção GW250114 e o nosso melhor modelo para as ondas gravitacionais produzidas pela fusão de dois buracos negros (a azul). Também está incluída a faixa cinza escura, que mostra uma reconstrução da forma de onda sem assumir que o sinal foi produzido por dois buracos negros. O facto de a faixa cinzenta escura ser consistente com a faixa azul escura indica que o nosso modelo está a descrever o sinal com precisão.

PARA SABER MAIS:

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



1. Rigorosamente falando, em matemática, caos refere-se a outro conceito distinto da noção de desordem, mas os termos são frequentemente usados como sinónimos em descrições informais – vê, por exemplo, [aqui](#).

2. Tecnicamente, os buracos negros também podem ter uma carga elétrica total, mas espera-se que os buracos negros formados a partir de estrelas tenham uma carga elétrica total insignificante.

O evento GW250114 testa essas duas facetas únicas dos buracos negros: o facto de serem objetos simples e da sua entropia aumentar sempre. Além disso, a nitidez e a amplitude do sinal do GW250114 permitem a caracterização mais precisa do «som» proveniente do relaxamento dos buracos negros até agora.

Quando um buraco negro em rotação é perturbado (como ocorre quando nasce da fusão de dois buracos negros progenitores), ele vibra como um sino ou um tambor, emitindo um «som» gravitacional único que é rapidamente amortecido. Supõe-se que este relaxamento se comporte como o de um [buraco negro que gira](#), idealizado matematicamente pela primeira vez por Roy Kerr e conhecido coloquialmente como buraco negro de Kerr. Para testar essa hipótese, os investigadores da LVK usaram o sinal GW250114 para isolar cuidadosamente o «som» do buraco negro resultante da fusão (ou seja, a sua emissão de ondas gravitacionais) e conseguiram determinar que este correspondia aos «sons» de um buraco negro de Kerr.

Para compreender o som de um buraco negro, imagina instrumentos musicais. Cada instrumento tem um som único, determinado pela sua forma e propriedades materiais — um sino soa diferente de um tambor ou de uma guitarra. Mas o som também depende da forma como o instrumento é perturbado: bater num tambor com uma baqueta produz um som diferente de bater nele com uma escova. Os buracos negros de Kerr só podem emitir sons de determinadas frequências e durações, determinadas exclusivamente pela sua massa e rapidez de rotação. Uma perturbação faz com que alguns desses sons sejam emitidos, mas geralmente não todos. Se mais do que um deles for detetado, eles podem ser comparados entre si: correspondem ao mesmo buraco negro de Kerr? Os investigadores da LVK conseguiram determinar com elevada confiança, pela primeira vez, que pelo menos dois dos sons previstos por buracos negros foram emitidos pelo buraco negro final e que as suas frequências e tempos de decaimento estavam de acordo com as expectativas para um buraco negro de Kerr. O remanescente do GW250114 é, de facto, um buraco negro simples, descrito apenas pela sua massa e spin.

Ao mesmo tempo, os investigadores da LVK confirmaram que a área desse buraco negro final é maior do que a soma das áreas dos dois buracos negros iniciais (ver **Figura 3**). O som do buraco negro final contém toda a informação necessária para medir a sua área. Os buracos negros iniciais, embora não emitam esse tipo de som, também emitem o seu próprio sinal gravitacional. À medida que orbitam um ao redor do outro, perdem energia para as ondas gravitacionais e «caem» um em direcção ao outro. Os investigadores da LVK utilizaram a parte do sinal GW250114 antes da colisão dos buracos negros para medir as áreas dos buracos negros iniciais. Estas medições completamente independentes confirmaram que a fusão GW250114 tinha realmente aumentado a entropia do Universo!

A deteção do GW250114 foi possível graças ao trabalho de décadas de milhares de cientistas para melhorar os detetores de ondas gravitacionais, compreender como os buracos negros devem ressoar e conceber formas engenhosas de «ouvir» esse ressoar a partir dos dados. No seu décimo aniversário, a ciência das ondas gravitacionais está em pleno crescimento e continua a oferecer uma forma completamente nova de explorar o nosso universo – com provavelmente muitas mais surpresas por vir.

PARA SABER MAIS:

Visita as nossas páginas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

Lê o artigo científico na revista Physical Review Letters [aqui](#).

Lê uma pré-impressão do artigo científico [aqui](#).

Divulgação dos dados do GW250114 pelo Gravitational-Wave Open Science Center disponíveis [aqui](#).

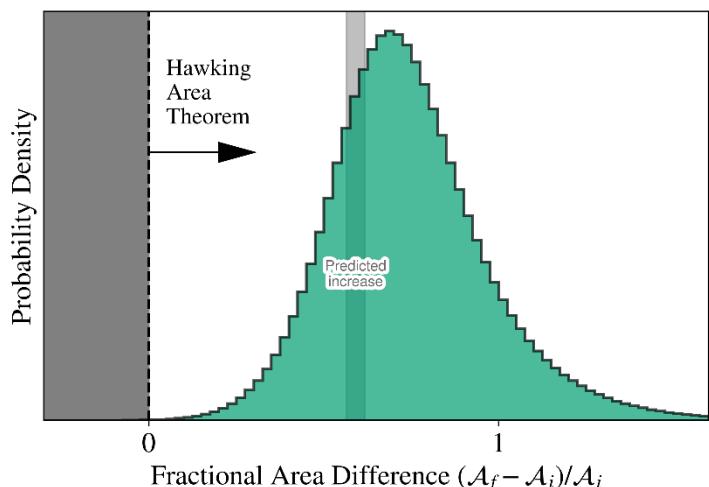


Figura 3: (Adaptado da Figura 5 da nossa [publicação](#).) Distribuição de probabilidade para a diferença fracionária da área do GW250114, igual à área A_f do buraco negro final menos a soma das áreas A_i dos buracos negros iniciais, dividida por A_i como normalização. Portanto, de acordo com o Teorema da Área de Hawking, a diferença fracionária da área deve estar à direita da região sombreada a cinzento escuro, ou seja, à direita da linha vertical tracejada que corresponde a uma diferença fracionária da área igual a zero, quando $A_f = A_i$. Podemos ver que a distribuição de probabilidade desfavorece fortemente valores da diferença fracionária da área menores que zero; o que é consistente com o Teorema da Área de Hawking. O pico da distribuição de probabilidade também está em boa concordância com a faixa vertical a cinzento claro, rotulada como «Aumento previsto», que indica a diferença fracionária de área prevista pela Relatividade Geral, correspondendo a um aumento na área de cerca de 65%.