

AFINANDO NOSSOS DETECTORES USANDO COLISÕES CÔSMICAS

Calibração astrofísica usando duas fusões excepcionais de buracos negros

A colaboração [LIGO, Virgo e KAGRA \(LVK\)](#) detectou mais de [300 sinais de ondas gravitacionais](#) de fusão de pares de [buracos negros](#), [estrelas de nêutrons](#) e binárias de buraco negro - estrela de nêutron. Cada [sinal](#) codifica informação sobre suas fontes e a física extrema que governa essas colisões. Extrair essas informações requer que os observatórios de ondas gravitacionais detectem a emissão de ondas gravitacionais com precisão (escutando os sinais claramente, de certa maneira) e levem em conta qualquer incerteza em sua medição. A Colaboração LVK relata duas novas ondas gravitacionais [fortes](#), GW240925 e GW250207, com as quais nós somos capazes de realizar os primeiros testes informativos de [calibração astrofísica](#).

Foi um tipo surpreendentemente bom de azar: observamos dois fortes sinais de ondas gravitacionais (veja **Figura 1**) em momentos em que o detector LIGO Hanford estava, metaforicamente, fora do tom – o que significa que nós não sabíamos precisamente como interpretar esses dados. Mas, graças à intensidade dos sinais, conseguimos analisá-los e ajustar o LIGO Hanford medindo diretamente o estado do detector ao mesmo tempo. Isso é particularmente importante no caso de GW250207, para o qual a incerteza do detector é amplamente desconhecida e variável com o tempo.

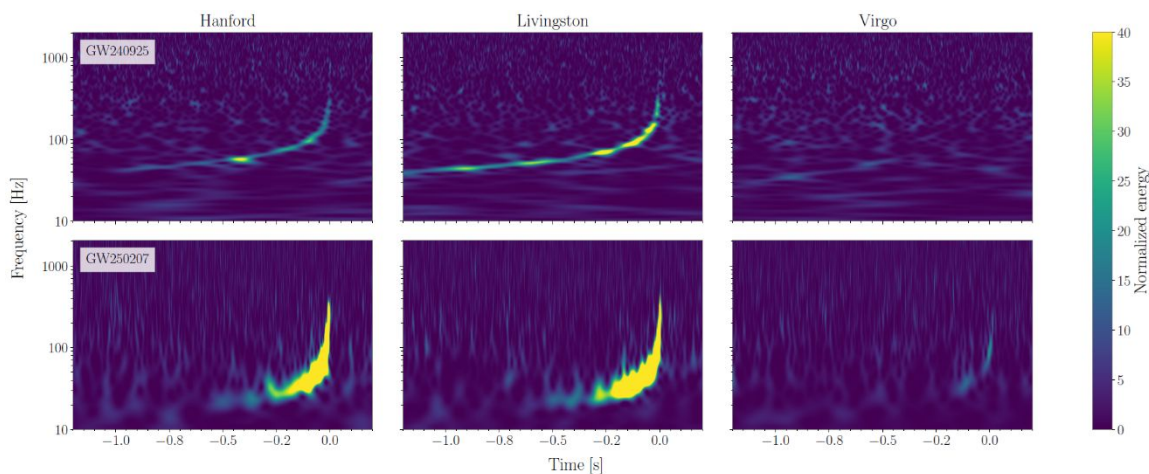


Figura 1: Os eventos de ondas gravitacionais GW240924 (linha superior) e GW250207 (linha inferior) como observados pelos observatórios LIGO Hanford (coluna da esquerda), LIGO Livingston (coluna do meio), e Virgo (coluna da direita). Os gráficos, chamados [espectrogramas](#), mostram a potência do espectro (energia por diferentes frequências) como uma função do tempo. Os sinais podem ser vistos como o aumento na energia ao longo do tempo (em segundos) e em frequências específicas (em hertz), representados por bandas em verde e amarelo. Sua forma segue o padrão característico de [chirreio](#) produzido por sinais de ondas gravitacionais. A espessura e o brilho da GW250207 mostram o quanto era alto!

CALIBRAÇÃO ASTROFÍSICA

[Ondas gravitacionais](#) esticam e comprimem espaços por onde passam. Os detectores LVK medem isso enviando uma luz de laser por dois braços perpendiculares e observam as [pequenas diferenças no tempo de viagem da luz](#) — evidência de que os comprimentos dos braços mudaram. Uma onda gravitacional mudará o comprimento do braço tipicamente em algo próximo de 10^{-19} m, que é muito menor que a [largura de um próton](#)! Para manter a sensibilidade a mudanças tão sutis, nós cuidadosamente regulamos os detectores em tempo real, usando [circuitos de controle de feedback](#). Porém, não só precisamos converter o tempo de viagem de luz em sinal, como também temos que levar em conta como os circuitos de controle mudaram no tempo de viagem da luz. Isso é feito através de um cuidadoso procedimento de calibração que modela como um detector muda à medida que as ondas passam por ele (sim, incluindo os circuitos de controle!). Geralmente, nós não conseguimos criar um modelo perfeito e temos que corrigir nossas medições para calcular a discrepância entre elas e esse modelo. Fazemos isso observando os erros e as incertezas em nossos cálculos. Nós quantificamos a discrepância usando lasers e sensores auxiliares e nosso conhecimento detalhado do instrumento. Mas o que acontece quando essa informação extra não está disponível e uma calibração adequada não pode ser realizada?

Se a calibração é imprecisa, a informação da fonte que nós inferimos pode estar enviesada, o que pode nos levar a tirar conclusões erradas sobre a física envolvida. Felizmente, se um sinal de onda gravitacional é forte o suficiente, pode ser desvinculado do erro de calibração. Se nós assumirmos que a teoria da relatividade geral de Einstein prevê corretamente como o sinal deve ser, podemos mitigar potenciais vieses nos resultados. Isso é chamado de calibração astrofísica. Para ambas as detecções, GW240925 e GW250207, podemos empregar nossos métodos usuais para estimar os erros de calibração para os detectores do LIGO Livingston e Virgo, mas não para o detector do LIGO Hanford. Felizmente, ambos os sinais são fortes o suficiente para realizar o primeiro teste informativo de calibração astrofísica! As formas prováveis dos erros de calibração que encontramos são mostradas na **Figura 2**. Um resumo de ambos os eventos é apresentado na **Tabela 1**.

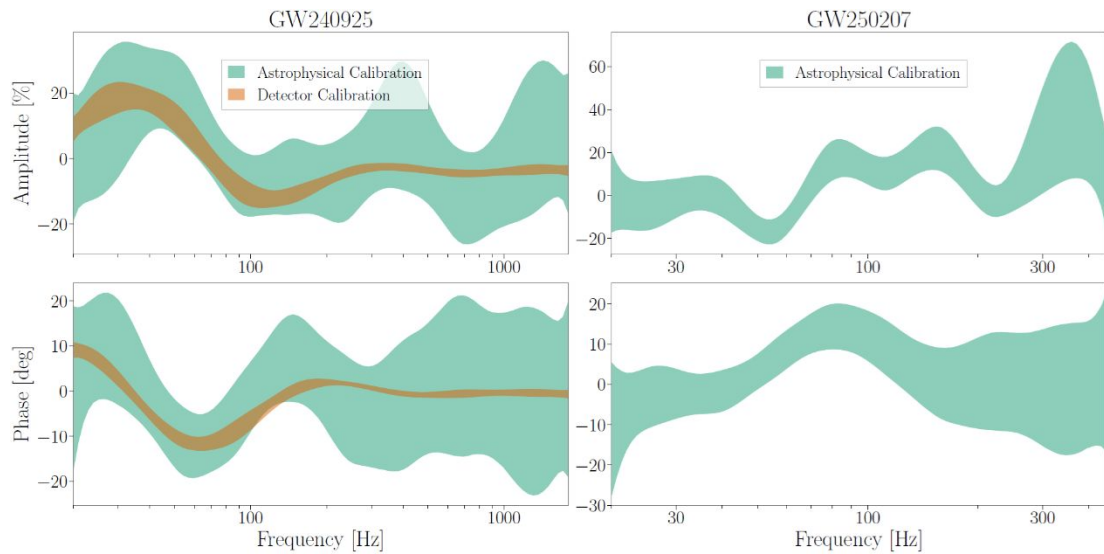


Figura 2: A forma provável do erro inferido na calibração de Hanford em termos de sua amplitude e fase como uma função da frequência. Quanto maior a região sombreada para uma certa frequência, maior a nossa incerteza sobre qual exatamente é o erro de calibração. Os gráficos para GW240925 à esquerda mostram em verde os resultados para a calibração astrofísica nos dados iniciais e em laranja o erro quantificado usado nas informações extras medidas no detector (referido como 'Calibração do Detector'). Podemos ver que a região verde sombreada encapsula a laranja, o que significa que estamos aferindo com sucesso a forma do erro de calibração! À direita, temos os resultados da GW250207 com apenas a região sombreada em verde, pois não havia informações adicionais do detector para verificar esses resultados.

POR QUE A CALIBRAÇÃO ASTROFÍSICA É IMPORTANTE?

Com os dados precisos de ondas gravitacionais, podemos estimar as propriedades (ou *parâmetros*) dos buracos negros que geraram o sinal de ondas gravitacionais, propriedades como as massas dos buracos negros, se eles estão girando ou não, e onde estão localizados no céu (coordenadas equatoriais). Descobrimos que GW240925 foi gerado por buracos negros de 9 e 7 vezes a massa do Sol a uma distância de ~350 megaparsecs da Terra, e GW250207 por dois buracos negros de 35 e 30 vezes a massa do Sol a uma distância de ~200 megaparsecs da Terra; nenhum dos eventos fornece muita evidência de que os buracos negros estão girando rapidamente. Sem contabilizar adequadamente as incertezas da calibração, essas estimativas poderiam estar enviesadas a um valor que não é verdadeiro, então nós precisamos que as incertezas de calibração sejam precisas para garantir que podemos confiar nos dados.

Nós também podemos usar os dados da onda gravitacional e os parâmetros estimados da fonte para realizar análises empolgantes, como testes da relatividade geral e determinar a constante de Hubble. A Relatividade Geral é a teoria de Einstein para a gravidade; testá-la em situações extremas, como durante a fusão de dois buracos negros, significa que podemos ver se existe alguma discrepância entre o que a teoria prevê e o que observamos. Embora não tenhamos ainda encontrado uma discrepância entre a relatividade geral e as observações, ela não é uma teoria completa e entender quais observações diferem das previsões pode nos permitir desenvolver uma teoria nova e mais completa que inclua a gravidade quântica. Embora erros de calibração não possam imitar sinais de ondas gravitacionais, eles podem imitar desvios para relatividade geral.

SAIBA MAIS:

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



Portanto nossa confiança em uma possível discrepância entre a relatividade geral e nossas observações pode ser minada por erros de calibração, significa que não podemos confiar na nossa interpretação dos dados! Nesses casos como a GW250207, onde métodos típicos de calibração onde estavam indisponíveis, podemos usar a calibração astrofísica em vez de, então ainda podemos confiar nos dados. Quando usamos dados da calibração astrofísica, nenhuma discrepância entre a teoria de Einstein e as observações detectadas para esse evento.

Usando calibração astrofísica, para que podemos confiar nos dados do detector LIGO Hanford, também significa que podemos restringir a área que acreditamos de onde as ondas gravitacionais originaram. Essa localização no céu trabalha de forma similar à triangulação, onde mais detectores envolvidos na detecção, quanto mais podemos restringir a área de provável origem do sinal. Na **Figura 3**, a possível área se desloca e diminui significativamente quando a calibração dos dados do LIGO Hanford é corretamente usada.

Tabela 1: Breve resumo do contexto observacional para GW240925 e GW250207

GW240925	GW250207
Um problema técnico do detector de Hanford criou temporariamente um descalibração dos dados ao vivo, que foi quantificada e corrigida em uma fase posterior, permitindo que dados calibrados corretamente fossem produzidos offline. Isso significa que podemos realizar calibração astrofísica com dados iniciais, e comparar os resultados de análises com esses dados e os dados finais corretamente calibrados.	Durante esse sinal, o LIGO Hanford acabou de ser ligado e estava em um estado instável. Diversos sensores auxiliares não estavam coletando dados, tornando impossível calcular o erro de calibração. Esse é o segundo evento mais intenso que já observamos, e isso providencia uma única janela para física emocionante. Acessar essa informação só é possível graças as mensurações de calibração astrofísica dos erros de calibração.

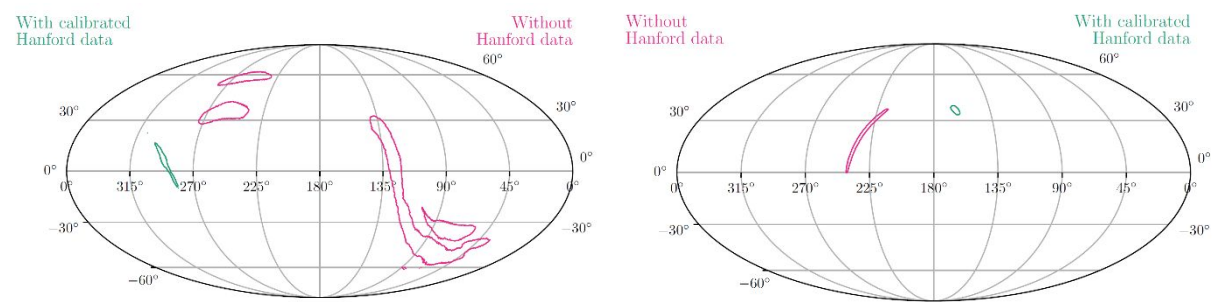


Figura 3: Localização no céu de GW240925 (esquerda) e GW250207 (direita). As áreas em rosa são obtidas usando dados dos detectores do LIGO Livingston e Virgo. Usando os dados de calibração astrofísica do LIGO Hanford, a possível localização da fonte se desloca e reduz na área verde.

A localização no céu é um ingrediente chave na mensuração da constante de Hubble, um valor que pode nos dizer a taxa de expansão do Universo. Para determinar a constante de Hubble, precisamos mensurar as distâncias cósmicas. Os dois métodos para realizar essa medida são medir a [vela padrão](#) como as [supernova](#), e medir as flutuações na radiação [cosmic microwave background](#) que restou do Big Bang. No entanto, esse método não concorda com o valor da constante, considerando a [tensão de Hubble](#). Usando ondas gravitacionais para medir a constante de Hubble pode ajudar a resolver essa tensão. Devido a sua posição no céu e intensidade, GW250207 é considerado um dos melhores sinais de buraco negro binário para mensurar a constante de Hubble mas é inviável para resolver a tensão sozinho, pois seria necessário mais [sirenes sombrias](#) para produzir uma medição mais precisa da constante de Hubble. Analisando todas as sirenes sombrias detectadas durante a primeira parte da quarta corrida observacional é coberta nesse [resumo científico](#) anterior.

Usando GW240925 e GW250207 permitiu executar o primeiro teste informativo de calibração astrofísica, uma nova possibilidade para o método de calibração de altos sinais que poderia nos ajudar na confiança dos dados mesmo que os detectores de ondas gravitacionais estão em um estado instável, permitindo aplicar para melhorar a nossa habilidade de mensuração as propriedades da fonte, testar a gravidade da teoria de Einstein e determinar a taxa de expansão do Universo usando ondas gravitacionais!

SAIBA MAIS:

Visite nossos websites:

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

Leia um pré-print gratuito do artigo científico [here](#) ou no [arxiv](#). Links GWOSC a serem adicionados aqui também.