



LIGO
Scientific
Collaboration



Observação de ondas gravitacionais da fusão de um sistema binário de buracos negros

A teoria da relatividade geral de Einstein, publicada pela primeira vez há um século atrás, foi descrita pelo físico Max Born como "o maior feito do pensamento humano sobre a natureza". Nós relatamos neste artigo duas descobertas de importância científica extrema diretamente relacionadas com uma das previsões mais importantes da teoria de Einstein: A primeira detecção direta de **ondas gravitacionais** e a primeira observação da colisão e fusão de um par de **buracos negros**.

Este evento cataclísmico, conhecido como **GW150914**, ocorreu em uma galáxia distante mais de um bilhão de anos-luz da Terra. Ele foi observado em 14 de Setembro 2015 pelos dois detectores do **Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferometria Laser** (sigla **LIGO** em Inglês), indiscutivelmente, os dois instrumentos científicos mais sensível e complexos já construídos. O LIGO estimou que a energia de pico liberada neste evento sob a forma de ondas gravitacionais durante os momentos finais de fusão dos buracos negros foi dez vezes maior do que a *luminosidade* combinada (ou seja, a taxa na qual a energia é liberada como luz) de todas as galáxias no universo observável. O avanço marca o começo de uma nova e excitante era em astronomia e, ao mesmo tempo, abre uma nova janela de observação do universo sob a forma de ondas gravitacionais.

INTRODUÇÃO E CONTEXTO

As **ondas gravitacionais** são oscilações do espaço-tempo causadas por alguns dos fenômenos mais violentos do cosmos, como colisões e fusões de estrelas massivas compactas. A sua existência foi prevista por Einstein em 1916, quando ele mostrou que objetos massivos acelerados distorciam o espaço-tempo causando a irradiação de ondas na forma de radiação gravitacional. Essas oscilações viajam à velocidade da luz através do universo, levando informações sobre suas origens, bem como pistas valiosas sobre a natureza da própria gravidade.

Nas últimas décadas, os astrônomos têm acumulado fortes evidências de que as ondas gravitacionais existem, principalmente por estudar seu efeito em órbitas próximas de pares de estrelas em nossa galáxia. Os resultados destes estudos concordam muito bem com a teoria de Einstein - com exatamente o mesmo decaimento orbital previsto pela teoria e que é devido à perda de energia transportada por ondas gravitacionais. No entanto, a detecção direta de ondas gravitacionais tem sido amplamente desejada pela comunidade científica já que esta descoberta iria fornecer maneiras novas e mais robustas para testar a relatividade geral sob condições extremas, abrindo uma nova maneira para explorar o universo.

No mesmo ano em que Einstein previu a existência das ondas gravitacionais, o físico Karl Schwarzschild mostrou que o trabalho de Einstein permitiu a existência de **buracos negros**: objetos estranhos tão densos e compactos que nem mesmo a luz poderia escapar de sua atração gravitacional. Embora, por definição, não podemos "ver" a luz de um buraco negro, astrônomos reuniram uma importante coleção de evidências de sua existência, estudando os efeitos desses candidatos a buracos negros na área circundante a eles. Por exemplo, acredita-se que a maioria das galáxias, incluindo a Via Láctea contém um **buraco negro supermassivo** no seu centro - com massas de milhões ou até bilhões de vezes maior que a do Sol. Também existem evidências de buracos negros com massas muito menores (de poucas vezes para uma dúzia de vezes a massa do Sol), que se acredita serem restos de estrelas mortas que sofreram uma explosão cataclísmica chamado de um **colapso do núcleo supernova**.

Além destes progressos substanciais na observação indireta de buracos negros, a nossa compreensão teórica desses estranhos objetos foi drasticamente melhorada - incluindo, na última década, alguns avanços notáveis na nossa capacidade de simular em computador as várias órbitas muito próximas até a fusão de um sistema binário (composto por um par) de buracos negros. Estes modelos nos permitiram criar **formas de ondas gravitacionais** muito precisas - ou seja, os padrões de ondas gravitacionais emitidas por buracos negros e como eles evoluem à medida que os buracos negros ficam mais próximos até finalmente se fundirem em um único buraco negro, mais massivo - de acordo com as previsões da relatividade geral. Assim, a observação direta de uma fusão de buraco negro iria oferecer um poderoso laboratório cósmico para testar a teoria de Einstein.

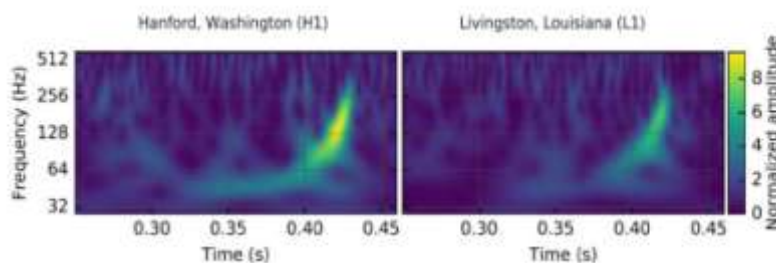


Figura 1. (Adaptado a partir da Figura 1 da nossa publicação). O evento GW150914 observado pelos detectores LIGO em Hanford (H1, painel esquerdo) e LIGO Livingston (L1, painel da direita). As duas figuras mostram como a evolução da amplitude (ver abaixo) das ondas gravitacionais produzidas pelo evento em cada detector LIGO variou em função do tempo (em segundos) e frequência (em Hertz, ou ciclos de número de ondas por segundo). Em ambas figuras é mostrada como a frequência de GW150914 aumenta bruscamente, de 35 Hz a cerca de 150 Hz em dois décimos de segundo. GW150914 foi detectado primeiro em L1 e aproximadamente sete milésimos de segundo mais tarde, em H1 - consistente com o tempo que a luz leva (ou ondas gravitacionais) para viajar entre os dois detectores.

OS DETECTORES LIGO

LIGO é o maior observatório de ondas gravitacionais e um dos mais sofisticados experimentos de física do mundo. Composto por dois grandes **interferômetros a laser** localizado a milhares de quilômetros de distância, um em Livingston, Louisiana e outro em Hanford, Estado de Washington, LIGO usa as propriedades físicas da luz e espaço próprio para detectar ondas gravitacionais - um conceito que foi proposto pela primeira vez nas décadas de 60 e 70. Um primeiro conjunto de detectores foi concluído no início de 2000, incluindo TAMA300 no Japão, GEO600 na Alemanha, LIGO nos Estados Unidos e Virgo na Itália. Em seguida, e usando combinações destes detectores, foram feitas observações conjuntas entre 2002 e 2011, sem se obter qualquer detecção de ondas gravitacionais. Depois de progressos significativos realizados, os detectores LIGO começaram a operar em 2015 como **LIGO Avançado**: os primeiros de uma rede global de detectores significativamente mais sensíveis.

Um interferômetro como o LIGO consiste de dois braços perpendiculares (no caso de estes braços são de 4 km) em que um feixe de laser é enviado e refletido pelos espelhos (**massas teste** suspensas) no final dos braços. Quando uma onda gravitacional passa, a ampliação e encolhimento de espaço faz com que os braços do interferômetro se alonguem e encolham alternadamente, um fica menor enquanto o outro fica maior e vice-versa. Como os braços alteram de comprimento, os feixes de laser viajam distâncias diferentes através dos braços - o que significa que os dois feixes não estão mais em **fase** e é produzido o que chamamos de **padrão de interferência**. É por causa disto que nos referimos aos detectores LIGO como "interferômetros").

A diferença entre o comprimento dos dois braços é proporcional à intensidade da onda gravitacional que está passando, chamada de **amplitude de deformação da onda gravitacional**, sendo esta amplitude de deformação extremamente pequena. Em uma onda gravitacional típica, supõe-se que esta amplitude de deformação deva ser, aproximadamente, **dez mil vezes menor que o diâmetro de um próton!** Ainda assim os interferômetros LIGO são tão sensíveis que eles podem medir valores tão extremamente pequenos.

A Figura 2 mostra um diagrama simplificado de um detector LIGO Avançado.

Para detectar com sucesso uma onda gravitacional como GW150914, os detectores LIGO precisam combinar uma grande sensibilidade com a capacidade de isolar os sinais *reais* das fontes de **ruído instrumental**: pequenas perturbações devido, por exemplo, a efeitos ambientais ou ao próprio instrumento, poderiam imitar - ou simplesmente superar - os padrões de ondas gravitacionais que estamos buscando. Esta é uma das principais razões pelas quais há dois detectores LIGO Avançados, o que nos permite distinguir as ondas gravitacionais dos efeitos ambientais e instrumentais acima mencionados: só um sinal de onda gravitacional real apareceria em ambos os detectores - que, sem dúvida, estariam separados por alguns milésimos de segundo, considerando o tempo que a luz (ou uma onda gravitacional) leva para se deslocar entre os dois detectores.

No quadro (b) da Figura 2 se mostra como o ruído instrumental nos detectores LIGO mudou em função da frequência ao longo da duração de GW150914. A principal fonte de ruído em altas frequências é devido a flutuações na potência do laser. A frequências médias, a principal fonte de ruído é devida aos movimentos aleatórios dos átomos das massas de teste e outros componentes ópticos. A baixas frequências, o ruído é dominado por vibrações sísmicas, que cobrem completamente qualquer sinal de onda gravitacional com uma frequência menor que 10 Hz.

Embora os detectores LIGO Avançados estejam geograficamente localizados na mesma posição que os detectores iniciais, para alcançar maior sensibilidade foi exigida a atualização de quase cada aspecto do projeto inicial do LIGO. Essas atualizações incluíram:

- Aumentar significativamente a potência do laser, para reduzir a principal fonte de ruído em altas frequências
- Re projetar cavidades recicladoras para conter melhor a distribuição espacial do laser
- Usar massas de teste de silício fundido maiores e mais pesadas, para reduzir os movimentos aleatórios dos espelhos
- Suspender as massas de teste usando fibras de sílica fundida, para reduzir o ruído térmico
- Suspender as massas de teste com um pêndulo de quatro fases, melhorando o isolamento sísmico
- Usar controle ativo de "medir e cancelar" para reduzir o impacto do movimento do solo

Operar uma rede de dois ou mais detectores também nos permite, por triangulação, posicionar a direção no céu da onda gravitacional observada uma vez conhecida a diferença de tempo de chegada em cada detector. Quanto mais detectores se tiver na rede, mais precisa será a localização no céu da fonte emissora desta onda gravitacional. Em 2016, o detector Virgo Avançado, na Itália, vai juntar-se à rede global - além de estar prevista a construção de outros interferômetros avançados. Para mais detalhes, consulte

<http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>

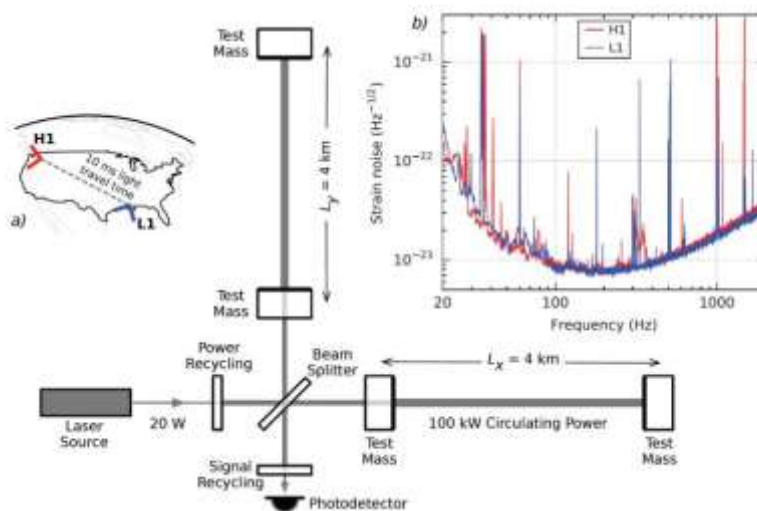


Figura 2. Diagrama simplificado de um detector Ligo Avançado (sem escala), nos quais se incluem várias das principais melhorias no projeto básico: uma **cavidade óptica** que reflete a luz laser de volta e para a frente várias vezes em cada braço, multiplicando-se o efeito da onda gravitacional na fase da luz do feixe de laser; um espelho de **reciclagem de potência** que aumenta a potência do laser no interferômetro como um todo; um espelho de **reciclagem de sinal**, que permite otimizar ainda mais o sinal extraído no **fotodetector**. Estes melhoramentos aumentam a potência do laser no interior da cavidade óptica por um fator de 5000 e aumentam o tempo total em que o sinal está circulando no interferômetro.

No quadro (a) são mostradas as posições e orientações dos dois observatórios LIGO e também é indicado o tempo que demora para a luz viajar entre eles. No quadro (b) se mostra como a amplitude de ruído do instrumento variou em função da frequência em cada detector em torno do tempo do evento. Quanto menor é o ruído do instrumento, mais sensível é o detector. Os picos altos indicam faixas pequenas de frequência onde o ruído do instrumento é particularmente grande.

NOSSAS OBSERVAÇÕES DO LIGO E O QUE SIGNIFICAM

No dia 14 de Setembro de 2015, às 09:50:45 (GMT), os observatórios LIGO em Hanford e Livingston detectaram um sinal do mencionado evento GW150914. O sinal foi identificado pela primeira vez pelo que chamamos de método de busca de baixa latência, projetada para analisar os dados do detector de imediato, no qual se buscam padrões de ondas gravitacionais sem sequer modelar os detalhes precisos do modelo de onda. Estas buscas imediatas descobriram o evento candidato logo **três minutos** depois do sinal chegar aos detectores. Os dados de amplitude da onda gravitacional adquiridos pelos interferômetros do LIGO foram comparados com um banco extensivo de modelos de onda preditos de forma teórica - um processo conhecido como **filtragem por coincidência** - com o objetivo de encontrar o modelo de onda mais semelhante aos dados observados.

A Figura 3 apresenta os principais resultados dessas análises detalhadas - todos apontando firmemente para GW150914, como a coalescência de dois buracos negros. A parte do meio da figura mostra a reconstrução do padrão da amplitude da onda gravitacional vista pelo detector de Hanford. É particularmente clara a concordância entre a amplitude estimada (mostrada em cinzento) e o modelo teórico da onda mais semelhante no caso de dois buracos negros coalescentes (mostrado em vermelho), tal como previsto pela relatividade geral.

Imagens dos horizontes dos buracos negros em vários estágios do cálculo computacional são mostrados no topo da figura: a **espiralação para dentro**, durante a qual os buracos negros se aproximam, a **fusão**, durante a qual os dois buracos negros se unem, e a **fase de estabilização**, quando o buraco negro remanescente oscila brevemente antes de estabilizar-se.

A comparação dos dados de amplitude com as previsões teóricas nos permite testar se a relatividade geral é realmente a teoria correta para descrever o evento. Esta resposta é um surpreendente "sim": nossas observações sugerem que a relatividade geral passa no teste com louvor.

Também podemos usar os dados para estimar características físicas específicas de GW150914: as massas dos dois buracos negros antes da fusão, a massa do buraco negro remanescente e a distância ao evento.

Nossos resultados descrevem GW150914 como a fusão de dois buracos negros com massas de aproximadamente **36 vezes e 29 vezes** a massa do Sol, respectivamente, e que o buraco negro remanescente teria uma massa ao redor de **62 vezes** a do Sol. Além disso, se conclui que o buraco negro remanescente está rodando - estes buracos negros em rotação foram formulados de maneira teórica no ano de 1963 pelo matemático Roy Kerr. Finalmente, nossos resultados indicam que GW150914 ocorreu a uma distância de mais de **um bilhão de anos luz**. Desta forma, os detectores do LIGO observaram um evento certamente notável, que ocorreu há muito tempo atrás em uma galáxia muito distante.

Se compararmos as massas dos buracos negros antes e depois da fusão, vemos que a coalescência converteu aproximadamente **três vezes a massa do Sol** (ou quase **seis milhões de trilhões de trilhões de quilogramas**) em energia na forma de ondas gravitacionais, a maioria emitida em uma fração de segundo. Em contraste, o sol emite o equivalente a quatro bilhões de quilogramas por segundo de radiação eletromagnética. De fato, a energia libertada pelo pico GW150914 foi mais do que seis vezes maior do que a luz combinada (isto é, a taxa à qual a energia é libertada como luz) de **todas as estrelas e galáxias no universo observável**.

COMO SABEMOS QUE GW150914 FOI UMA FUSÃO DE BURACOS NEGROS?

Os valores estimados das massas antes da fusão dos dois componentes de GW150914 são em si um argumento muito forte para assegurar que os dois são buracos negros - ainda mais se for considerada a enorme **velocidade** e a pequena **separação** dos dois componentes tal e qual se mostra na parte inferior da figura 3. Nesta figura vê-se que as velocidades estimadas dos dois componentes são uma fração significativa da velocidade da luz. Da mesma forma, a sua separação aproximada é somente cerca de algumas vezes o tamanho característico de um buraco negro para uma dada massa, conhecido como o seu **raio de Schwarzschild**.

Estes gráficos implicam que os dois componentes estiveram separados por algumas poucas centenas de quilômetros imediatamente antes de se fundirem, ou seja, quando a frequência da onda gravitacional era de aproximadamente 150 Hz. Os buracos negros são os únicos objetos conhecidos que são suficientemente compactos para estarem tão perto sem se fundirem. Assim, e com base na estimativa da massa total dos dois componentes, um par de estrelas de nêutrons não seria suficientemente massivo, e um par composto por uma **estrela de nêutrons** e um buraco negro se teria fundido com uma frequência menor que 150 Hz.

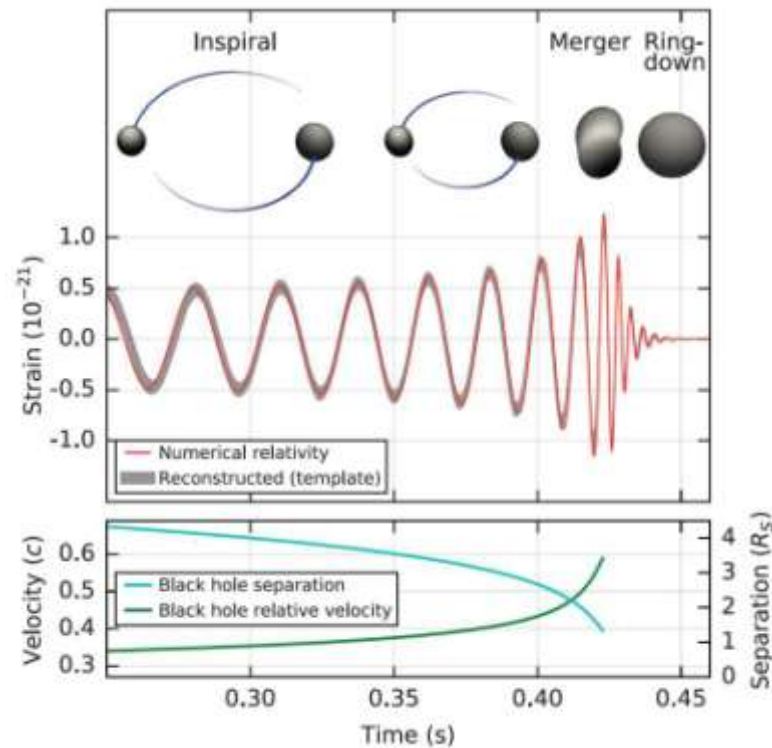


Figura 3. Alguns resultados principais da nossa análise de GW150914, na qual se compara a amplitude da onda gravitacional estimada (vista por H1 em Hanford) com as previsões dos modelos teóricos de onda mais semelhantes obtidos da relatividade geral durante as três fases do evento: fase de evolução suave ("inspiração"), fusão ("incorporação") e estabilização ("ringdown"). Se mostra também a separação e a velocidade dos buracos negros, e como elas mudaram a medida que a fusão ocorria.

TEMOS CERTEZA QUE GW150914 FOI UM EVENTO ASTROFÍSICO REAL?

A resposta curta é "sim", mas é claro que esta é uma questão crucial e a colaboração científica LIGO e a colaboração Virgo têm feito juntas um grande esforço para responder, levando a cabo um conjunto de testes diversificados e independentes - que contribuem para reforçar o caso da detecção de GW150914.

Em primeiro lugar, como já foi mencionado, a diferença de tempo entre as observações em cada detector de LIGO foi consistente com o tempo de percurso da luz entre os dois detectores. Além disso, como mostrado na Figura 1, os sinais de Hanford e Livingston mostram um padrão similar, como seria de se esperar considerando o alinhamento dos interferômetros, além de ser em ambos potente o suficiente para se destacar em comparação com o ruído de fundo durante o tempo do evento - o equivalente a sermos capaz de entender uma conversa acima do ruído de fundo em uma grande sala, lotada.

Entender esse ruído de fundo é uma parte essencial da nossa análise e envolve monitorar uma grande coleção de **dados ambientais** gravados nos dois locais: movimento do solo, variações da temperatura e flutuações da potência do laser, nomeando apenas alguns. Paralelamente,

vários canais de dados monitoram em tempo real o **estado dos interferômetros** - verificando, por exemplo, se os feixes de laser estão centrados corretamente. Se qualquer um desses canais ambientais ou instrumentais indicar um problema, os dados recolhidos pelo detector são descartados. Ainda assim, apesar de estudos exaustivos, nenhum destes problemas foram encontrados na análise deste evento.

Apesar disto, pode GW150914 ter sido uma flutuação de ruído incomum, que ocorreu ao acaso e com características semelhantes em ambos os sítios dos detectores? Para excluir esta possibilidade seria necessário saber o quão incomum teria sido esta flutuação: quanto menor for a probabilidade desta coincidência hipotética, com mais confiança podemos excluir esta possibilidade em favor de uma outra alternativa - ou seja, que GW150914 foi realmente um evento real de ondas gravitacionais.

Para realizar esta análise estatística foram utilizados 16 dias de dados estáveis e de alta qualidade pertencentes ao mês seguinte ao evento. GW150914 foi, de longe, o sinal mais forte observado em ambos os detectores durante esse período. Para isso, uma série de deslocamentos de tempo entre os dados artificiais H1 e L1 são aplicados para criar um conjunto de dados de maior duração para procurar sinais tão (ou mais) fortes que GW150914. Usando apenas deslocamentos de tempo maiores do que 10 milissegundos (o tempo de percurso entre os dois detectores) nos asseguramos que estes conjuntos de dados artificiais não contêm nenhum sinal real, e, assim, podem ser utilizados para determinar quão improvável seria uma flutuação estatística de ruído ser capaz de imitar GW150914. Esta probabilidade é chamada de **taxa de falso alarme** - isto é, quão comum, estatisticamente falando, esperamos erroneamente confundir este evento real (um "falso alarme") com uma flutuação de ruído semelhante.

A Figura 4 (adaptada da Figura 4 da nossa publicação) mostra o resultado desta análise estatística, por uma das pesquisas levadas a cabo com os dados do nosso detector. As curvas preta e azul representam propriedades estatísticas do nosso ruído de fundo, as quais descrevem (sob hipóteses ligeiramente diferentes) o número esperado de "eventos" de ruído capazes de imitar um sinal verdadeiro de determinada potência (representado por valores característicos de detecção estatísticas). A principal informação extraída a partir desta figura é o quão longe está GW150914 das duas curvas em preto e azul; isto significa que um evento de ruído imitando GW150914 seria extremamente incomum - na verdade, a pesquisa estima que a taxa de falso alarme seria menor do que a de um evento a cada 200.000 anos. Esta taxa de falso alarme pode ser traduzida pela conhecida variável "Sigma" (indicada por σ), que é comumente utilizada em análise estatística para medir a significância estatística de uma detecção. Podemos ver na figura que esta busca identifica GW150914 como um evento real, com significância de mais de cinco sigma.

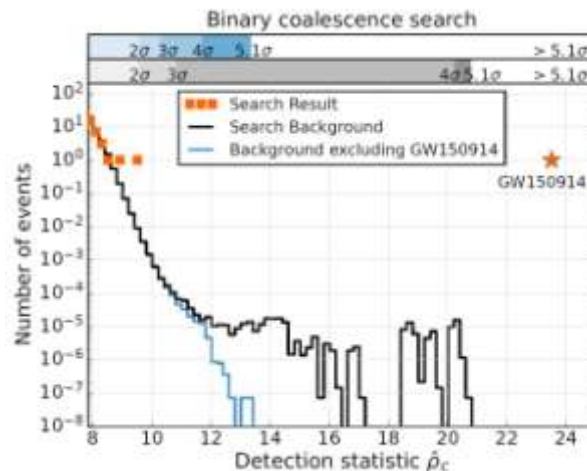


Figura 4. (Adaptada da Figura 4 da nossa publicação). Resultados da nossa pesquisa para a coalescência binária quantificando quão incomum é GW150914 em comparação com outros "eventos" falsos decorrentes de flutuações de ruído. Esta pesquisa concluiu que um evento de ruído imitando GW150914 seria extremamente raro - menos do que uma ocorrência em cerca de 200.000 anos - um valor que corresponde a um nível de significância de detecção de mais de cinco "Sigma".

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

A primeira detecção de ondas gravitacionais e a primeira observação da fusão de um buraco negro binário são conquistas significativamente notáveis, mas representam apenas a primeira página em um excitante novo capítulo na astronomia.

Os projetos futuros incluem melhorias nos detectores LIGO Avançados, e a extensão da rede global de detectores para incluir o Virgo Avançado, KAGRA, e um possível terceiro detector LIGO na Índia, o que irá melhorar significativamente a nossa capacidade de localizar posições de fontes de ondas gravitacionais no céu e estimar suas propriedades físicas. O novo campo da astronomia de ondas gravitacionais parece ter um futuro brilhante pela frente!

Mais informações:

A página da Colaboração Científica LIGO (inclui link para o principal trabalho, publicado no *Physical Review Letters*):
<http://www.ligo.org>

Página do Virgo Avançado: <http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

Alguns dos artigos que acompanham a publicação principal:

Unmodeled searches used for first LIGO gravitational wave detection:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500229/public/main/>

A Search for Gravitational Waves from Compact Binary Coalescences in 16 Days of Advanced LIGO:

Data associated with GW150914: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500269/public/main>

Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave candidate G184098:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500227/public/main/>

GW150914: a black-hole binary coalescence as predicted by general relativity:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500213/public/main/>

Constraints on the rate of binary black-hole coalescences from 16 days of Advanced LIGO

observations: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500217/public/main/>

GW150914: A merging binary black hole at redshift ~ 0.1 :

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500218/public/main/>

LIGO Open Science Center (with access to GW150914 data): <https://losc.ligo.org/about/>

Mais sobre LIGO Avançado em:

<http://tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf>