

Ondas Gravitacionais: a nova astronomia

Professora Dr.^a Cecilia Chirenti

Centro de Matemática, Computação e Cognição
Universidade Federal do ABC

Resumo

Em 1915 Einstein propôs a Teoria da Relatividade Geral, que unifica o tempo e o espaço e explica a gravitação dos corpos celestes através da curvatura do espaço-tempo. A existência das ondas gravitacionais, oscilações do espaço-tempo que se propagam no vácuo com a velocidade da luz foi proposta um ano depois. Mas foi somente cem anos mais tarde, após um monumental esforço de pesquisa e engenharia, que elas foram detectadas diretamente pela primeira vez, em setembro de 2015, pela colaboração LIGO nos Estados Unidos. Os dois detectores de ondas gravitacionais do LIGO são interferômetros laser de 4 km de comprimento capazes de medir variações Δh no comprimento h dos braços do interferômetro da ordem de $\Delta h/h \sim 10^{-21}$. O primeiro sinal detectado veio da colisão de dois buracos negros a 1,4 bilhão de anos-luz de distância e a energia irradiada por este evento em 0,5 s foi maior do que a energia luminosa de todas as estrelas do universo! Já foram detectados diversos sinais vindos de colisões de buracos negros, a primeira colisão de duas estrelas de nêutrons foi observada este ano e o Prêmio Nobel de Física de 2017 foi dado aos cientistas pioneiros responsáveis pelo sucesso do LIGO. A nova astronomia de ondas gravitacionais está nos trazendo muito rapidamente informações surpreendentes sobre buracos negros, a formação dos elementos químicos mais pesados, a estrutura da matéria nuclear, a cosmologia e a própria estrutura do espaço-tempo.

1 Histórico e Teoria

Albert Einstein precisou de 10 anos de trabalho árduo para generalizar a teoria da relatividade restrita. De 1905 a 1915, ele trabalhou para criar uma teoria que explicasse a gravitação e fosse compatível com os postulados da relatividade. O resultado foi uma visão totalmente diferente do tempo e espaço newtonianos, combinados em um espaço-tempo dinâmico, onde a ação à distância da força gravitacional foi substituída pela noção de geodésicas determinadas pelo conteúdo de matéria e energia do espaço.

É claro que uma aula não é suficiente para aprender toda a teoria da relatividade geral. Então o nosso objetivo nesta seção é apresentar e discutir algumas das equações mais importantes, além de fornecer referências onde o aluno interessado pode se aprofundar mais no assunto.

No espaço de Minkowski da relatividade restrita, o *intervalo relativístico* entre dois eventos com coordenadas (ct, x, y, z) (aqui c é a velocidade da luz no vácuo) e $(ct + \Delta t, x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$, dado por

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2, \quad (1)$$

é invariante pelas transformações de Lorentz (ver figura 1).

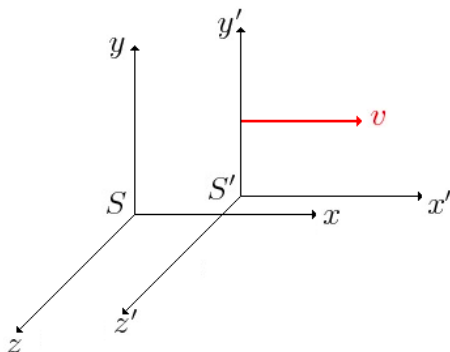


Figura 1: As transformações de Lorentz relacionam dois referenciais inerciais, que possuem velocidade relativa constante v , levando em conta os postulados da relatividade restrita.

Na relatividade geral, a *curvatura* do espaço-tempo modifica o intervalo invariante, ou *elemento de linha*, que pode ser escrito de maneira mais genérica como

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (2)$$

onde os x^μ são as coordenadas do espaço-tempo e $g_{\mu\nu}$ é chamado o *tensor métrico* ou *métrica* do espaço-tempo. (Para o espaço de Mikowski da eq. (1), a métrica é denominada $\eta_{\mu\nu}$ e é dada pela matriz $\text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ em coordenadas cartesianas.) Esta métrica, que descreve como podemos medir distâncias no espaço-tempo curvo, é determinada pelas equações de campo de Einstein,

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (3)$$

onde $R_{\mu\nu}$ e R são respectivamente o tensor de Ricci e o escalar de curvatura, e são calculados a partir de derivadas da métrica, Λ é a constante cosmológica, G é a constante da gravitação universal e $T_{\mu\nu}$ é o tensor de energia-momento. Esta equação (que na verdade é um conjunto de equações diferenciais acopladas nos coeficientes da métrica), descreve como a geometria do espaço-tempo depende do seu conteúdo de matéria e energia (ver figura 2).

Uma das consequências da relatividade geral é a existência de soluções ondulatórias para a métrica. Essas *ondas gravitacionais* vão ser oscilações do próprio espaço-tempo, que se propagam com a velocidade da luz no vácuo e deformam o espaço-tempo por onde passam.

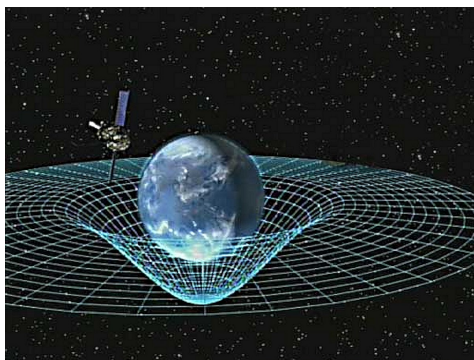


Figura 2: Representação da curvatura do espaço-tempo ao redor da Terra. Fonte: NASA

São ondas transversais, como as ondas eletromagnéticas, e foram previstas por Einstein inicialmente em 1916. Para se obter uma solução de onda, pode-se trabalhar com a *linearização* das equações de campo de Einstein (3), escrevendo a métrica como

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (4)$$

onde $\eta_{\mu\nu}$ é a métrica do espaço de Minkowski e $h_{\mu\nu}$ é uma pequena perturbação. Ao resolver as equações de Einstein para esta métrica, encontramos as soluções de onda, que possuem duas polarizações chamadas de h_+ e h_\times (ver figura 3).

Houve inicialmente muita controvérsia a respeito da existência das ondas gravitacionais, e o próprio Einstein mudou de opinião diversas vezes. Um dos motivos dessa incerteza inicial é o fato de que as equações de campo de Einstein (3) são tensoriais e podem ser escritas usando diferentes sistemas de coordenadas (isso é chamado *liberdade de calibre*). Em alguns deles as ondas podem ser vistas claramente, mas em outros não. Então, como saber se elas são reais? Essa questão levou bastante tempo para ser respondida de maneira satisfatória.

Outra questão importante é: se essas ondas existem, elas podem ser detectadas? Inicialmente também se imaginava que não, porque a amplitude dessas ondas é extremamente pequena. Pode-se estimar que as ondas gravitacionais detectadas na Terra causarão uma variação Δh em um corpo de comprimento h tipicamente da ordem de $\Delta h/h \sim 10^{-21}$. Isso quer dizer que se $h = 10^6$ m, ou 1000 km, Δh será do tamanho do núcleo de um átomo!

Mas a primeira detecção indireta de ondas gravitacionais recebeu o prêmio Nobel de Física já em 1993. Russell Hulse e Joseph Taylor estudaram o pulsar PSR B1913+16 ao longo de quase 20 anos e mostraram que o seu período estava variando de acordo com as previsões da relatividade geral: o sistema binário perde energia pela emissão de ondas gravitacionais, a distância entre as estrelas diminui e o período do pulsar fica mais curto (ver figuras 4 e 5).

Além disso, Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne receberam o prêmio Nobel de Física em 2017 pela primeira detecção direta de ondas gravitacionais, realizada pela colaboração LIGO. Agora já não há mais dúvidas de que as ondas gravitacionais são reais e podem ser

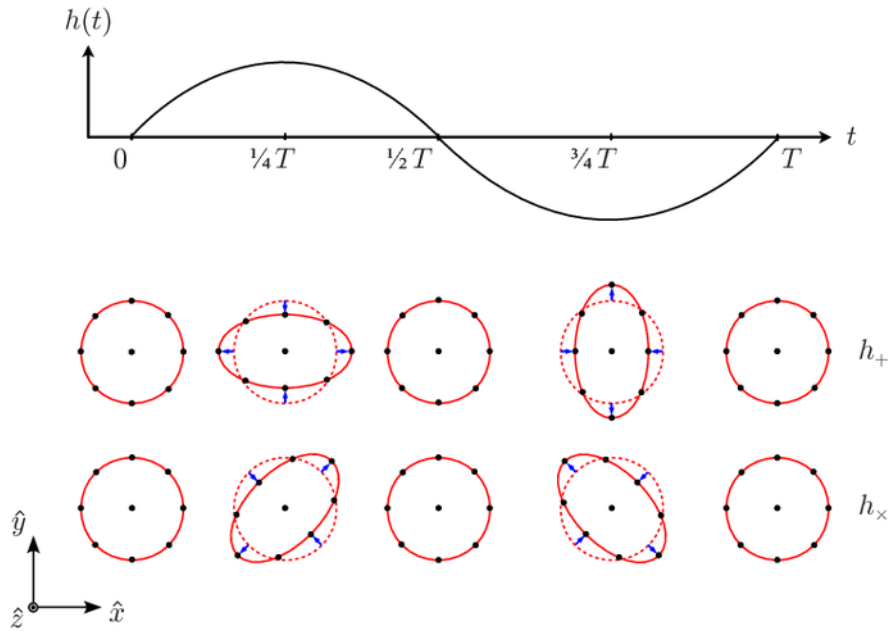


Figura 3: Efeito das polarizações h_+ e h_\times das ondas gravitacionais sobre um círculo de partículas teste para uma onda se propagando ao longo da direção \hat{z} . Fonte: arXiv:1607.04202 [gr-qc]

detectadas, mas essa confirmação levou 100 anos desde a publicação do artigo original de Einstein!

Nas próximas seções vamos ver como funcionam os detectores (Seção 2), quais são as fontes de ondas gravitacionais (Seção 3) e quais são os desafios para o futuro desta área de pesquisa (Seção 4).

2 Detectores e Análise de Dados

Como vimos na seção 1, as ondas gravitacionais deformam o espaço onde se propagam. Assim, as distâncias transversais à direção de propagação da onda gravitacional vão ser deformadas e esse efeito pode ser detectado. Porém, este tipo de detecção é extremamente difícil, por causa da amplitude muito pequena dessas ondas. Por isso, estas medições são um problema de engenharia tecnologicamente muito desafiador! Todas as fontes de ruído devem ser controladas, como ruído sísmico (com amortecedores), ruído térmico (com vácuo e/ou criogenia) e até mesmo o ruído de contagem de fótons ou *shot noise* (causado pelo laser nos interferômetros, como veremos adiante). Além disso, os detectores são projetados levando em conta qual o tipo de sinal a ser estudado, para otimizar a sensibilidade do detector.

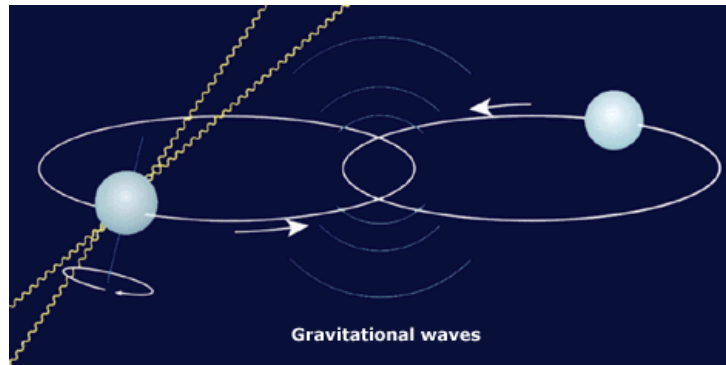


Figura 4: Esquema do pulsar PSR B1913+16, formado por duas estrelas de nêutrons, sendo uma delas um pulsar. Este sistema emite ondas gravitacionais. Fonte: Nobelprize.org

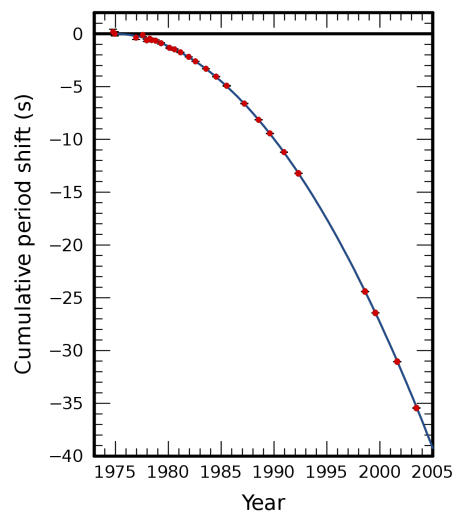


Figura 5: Variação cumulativa do período do pulsar PSR B1913+16. Os pontos indicam as medições (com barras de erro!) e a curva representa a previsão da relatividade geral. Este sistema binário vai coalescer e as duas estrelas vão se fundir em 300 milhões de anos! Fonte: Nobelprize.org

Devido à baixa *razão sinal-ruído* esperada para este tipo de detecção, são utilizados modelos das formas de onda que são comparados com os dados até que seja encontrada a melhor correlação, em um processo estatístico chamado *matched filtering*. Estes modelos são gerados a partir de simulações de relatividade numérica, que são realizadas em supercomputadores por grupos de pesquisa no mundo todo. Uma detecção só é confirmada se for vista em mais de um detector, com uma razão sinal-ruído alta o suficiente para garantir que não se trata de uma

flutuação estatística.

Existem atualmente quatro tipos de detectores de ondas gravitacionais que estão sendo utilizados ou desenvolvidos. Dois desses são os detectores tipo *massa ressonante* e os detectores tipo *interferômetro laser*.

Os detectores tipo massa ressonante foram os pioneiros. O princípio de funcionamento destes detectores está exemplificado na figura 6. O primeiro detector foi desenvolvido por Joe Weber na Universidade de Maryland na década de 60, e inspirou outros detectores tipo barra como o ALLEGRO (Estados Unidos) e o AURIGA (Itália). Também existem detectores tipo

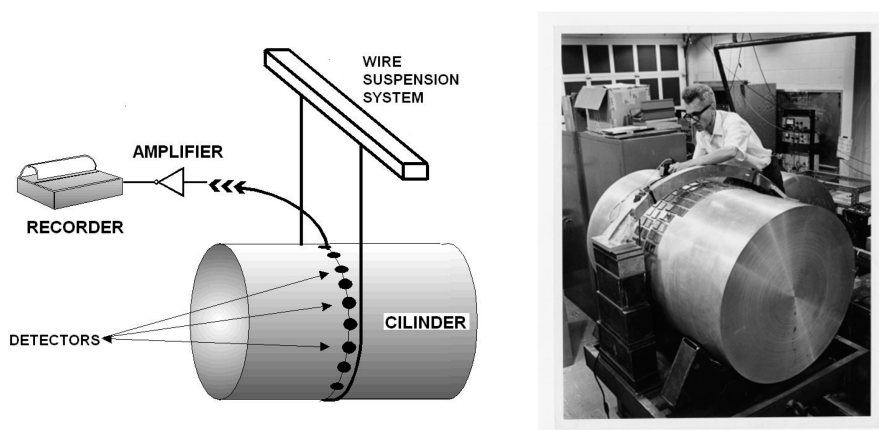


Figura 6: *Esquerda:* Esquema de funcionamento de um detector de ondas gravitacionais tipo massa ressonante. *Direita:* Joe Weber e o primeiro detector de ondas gravitacionais na década de 60. Fonte: Universidade de Maryland

esfera, como o MiniGRAIL (Holanda) e o detector Mario Schenberg (Brasil), desenvolvido pelo INPE em São José dos Campos (ver figura 7).

Os detectores tipo interferômetro laser são os responsáveis pelas recentes observações de ondas gravitacionais. O seu princípio de funcionamento está esquematizado na figura 8. Os dois detectores LIGO nos Estados Unidos e Virgo na Itália já realizaram detecções. Outros detectores são o GEO600 (Alemanha), KAGRA (Japão - em comissionamento) e LIGO-India (em planejamento). Com três detectores em funcionamento simultaneamente, é possível determinar a posição no céu da fonte de um evento de ondas gravitacionais.

Para o futuro está planejado o detector LISA, um interferômetro laser que ficará em órbita da Terra e cujo lançamento está previsto para 2030. Esse projeto foi precedido pela missão LISA Pathfinder 2015, que testou a tecnologia necessária para a missão LISA. Quando estiver em funcionamento, serão detectadas colisões de buracos negros super massivos no centro de galáxias distantes!

Uma outra maneira completamente diferente para se detectar ondas gravitacionais é através das observações de pulsares (*Pulsar Timing Array* ou PTA). Os pulsares são relógios tão

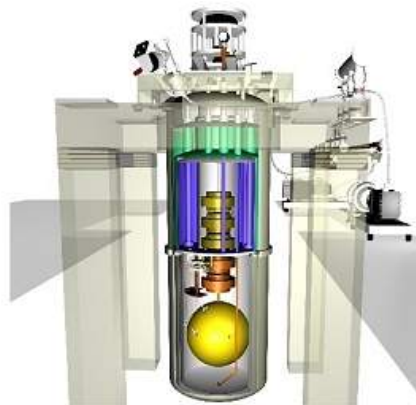


Figura 7: Esquema do detector de ondas gravitacionais brasileiro Mario Schenberg. Fonte: Xavier P. M. Gratens

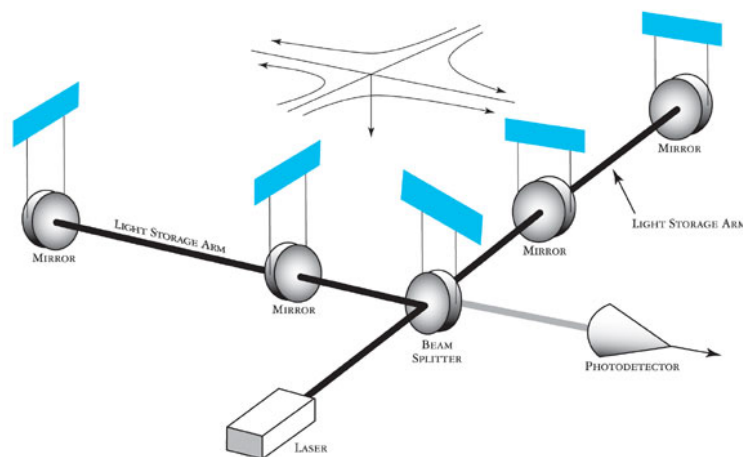


Figura 8: Esquema de funcionamento de um detector de ondas gravitacionais do tipo interferômetro laser. Os espelhos são suspensos em um sistema de pêndulos acoplados para diminuir o ruído sísmico, e o trajeto do laser é feito dentro de tubos mantidos a vácuo. Nos detectores LIGO, os braços do interferômetro possuem 4 km de extensão! Fonte: LIGO Scientific Collaboration

precisos que os astrônomos conseguem determinar o período de um pulsar com até 15 algarismos significativos! Por isso, minúsculas variações do período causadas pela passagem de uma onda gravitacional entre a Terra e um conjunto de pulsares poderão ser detectadas no futuro.

As curvas de sensibilidade de diversos detectores, que indicam qual deve ser a amplitude mínima $\Delta h/h$ de um sinal para ser detectado em função da sua frequência, estão apresentadas

na figura 9.

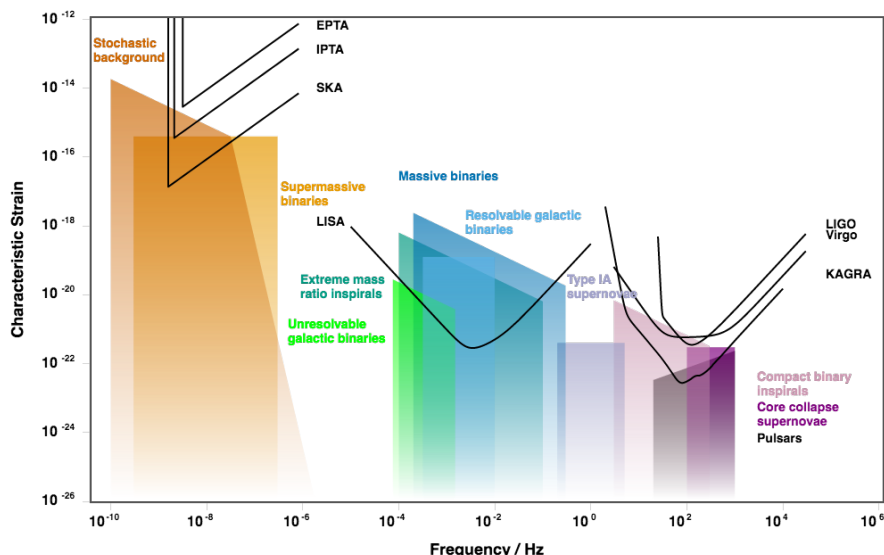


Figura 9: Curvas de sensibilidade para diversos detectores de ondas gravitacionais atuais e futuros, indicando as amplitudes esperadas de diferentes fontes astrofísicas de ondas gravitacionais. Fonte: Christopher Berry

3 Fontes de Ondas Gravitacionais e Observações Astrofísicas Recentes

Em 11 de fevereiro de 2016 foi anunciada a primeira detecção direta de ondas gravitacionais pela colaboração LIGO (que ganhou o prêmio Nobel de Física de 2017 por este feito). O evento foi detectado na Terra em 14 de setembro de 2015 e recebeu o nome GW150914. A análise de dados indicou que as ondas gravitacionais foram geradas pela fusão de um sistema binário de buracos negros de massas iguais a 36 e 29 massas solares (1 massa solar = $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg), que se fundiram e criaram um buraco negro de massa igual a $62 M_{\odot}$ (ver figura 10). Assim, $3 M_{\odot}$ foram transformadas em energia que foi emitida na forma de ondas gravitacionais.

O evento teve duração de 0,5 s e, neste intervalo de tempo, emitiu mais energia do que a energia luminosa de todas as estrelas do universo! (Porém, não devemos esquecer que as ondas gravitacionais não são visíveis. Tampouco são audíveis, porém a sua frequência seria audível caso fosse uma onda sonora. Por isso costuma-se dizer que se trata de uma nova maneira de *ouvir* o universo!)

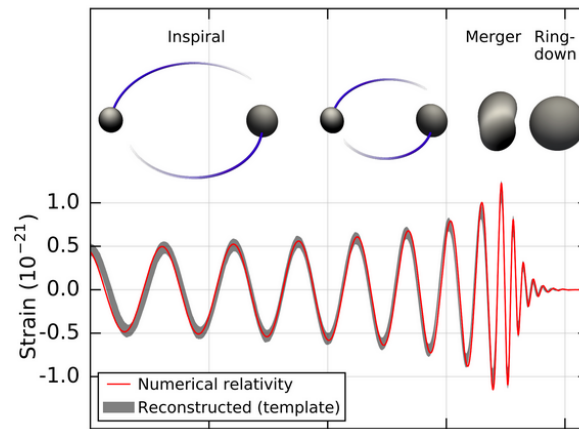


Figura 10: Esquema do evento GW150914, a primeira detecção direta de ondas gravitacionais. O sinal foi gerado por um sistema binário de buracos negros, e possui três partes: espiral (quando os buracos negros se aproximam), fusão e decaimento. Fonte: LIGO Scientific Collaboration

A distância até esse evento foi estimada em 410 Mpc (1 parsec = 3.26 anos-luz = 3.1×10^{16} m; para comparação, a nossa galáxia possui um diâmetro de aproximadamente 30 kpc). A posição no céu do evento não pôde ser determinada com precisão, porque o evento foi detectado apenas pelos dois detectores do LIGO (ver figura 11).

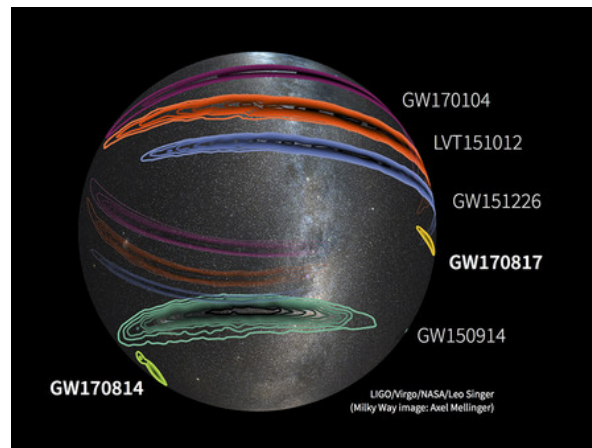


Figura 11: Localização no céu dos eventos de ondas gravitacionais detectados. Os eventos detectados por 3 detectores são localizados mais precisamente. Fonte: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer

Os valores encontrados para as massas dos buracos negros do sistema binário que gerou o evento GW150914 foi uma surpresa, pois são mais elevados que se pensava que poderiam ser as massas de buracos negros formados pelo colapso de uma estrela. Estes buracos negros devem ter sido formados pelo colapso de estrelas com baixa metalicidade (quantidade de elementos mais pesados do que o hidrogênio e o hélio), que perdem pouca massa através de vento estelar durante sua evolução e podem portanto gerar buracos negros mais massivos!

A primeira detecção realizada por três detectores (LIGO e VIRGO) foi anunciada em 2017. Este evento foi chamado GW 170814 e foi semelhante à da primeira detecção, mas a determinação da posição da fonte no céu melhorou consideravelmente graças ao terceiro detector, como pode ser visto novamente na figura 11.

Em 17 de agosto de 2017 foi detectada pela primeira vez a fusão de um sistema binário de estrelas de nêutrons, observada novamente pelos três detectores (ver figura 12). A distância até esse evento foi estimada em 40 Mpc, tornando este evento o mais próximo da Terra já detectado em ondas gravitacionais. Este evento foi denominado GW170817 e mobilizou a comunidade astronômica mundial pois, ao contrário da fusão de dois buracos negros, era esperada a emissão de uma *contrapartida eletromagnética* das ondas gravitacionais. De fato, foi detectado um *short gamma ray burst* (GRB 170817A) 2 s após o evento e um transiente óptico (AT 2017gfo) 11 h após o evento, observado por numerosos telescópios em todas as frequências de rádio a raios X.

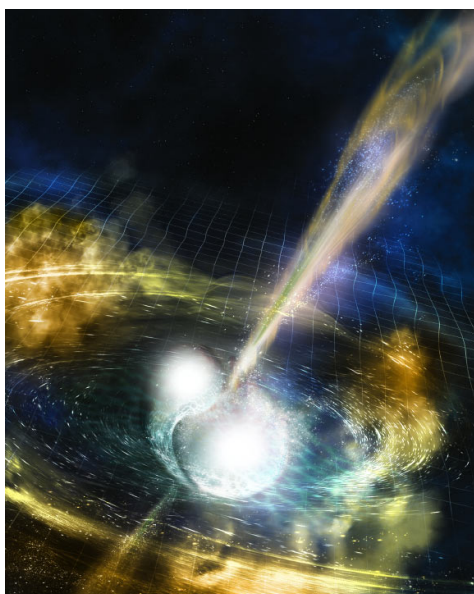


Figura 12: Visão artística da colisão de duas estrelas de nêutrons que gerou o evento de ondas gravitacionais GW170817. Fonte: NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet

As massas das duas estrelas de nêutrons foram estimadas no intervalo $1.17 - 1.60M_{\odot}$.

A determinação das massas de estrelas de nêutrons é muito importante para a determinação da sua equação de estado. Nas condições extremas de densidade e pressão no interior dessas estrelas (que possuem tipicamente $1.4 M_{\odot}$ e 10 – 15 km de raio: uma colher de chá da matéria de uma estrela de nêutrons pesaria 10 milhões de toneladas!), a *equação de estado da matéria nuclear* ainda é desconhecida, e muitos modelos para a composição no centro da estrela já foram propostos.

Esta observação permitiu testar modelos de *kilonovas* para a *formação de elementos pesados*. A fusão das duas estrelas de nêutrons produziu grandes quantidades destes elementos, através do processo *r* (de captura *rápida* de nêutrons) de formação de núcleos de elementos mais pesados que o ferro. As observações indicam que aproximadamente $10 M_{\odot}$ de ouro e platina foram formados! Estima-se que as fusões de estrelas de nêutrons são responsáveis por criar metade dos elementos mais pesados do que o ferro em todo o universo.

Outra consequência do evento GW170817 é para o estudo da *cosmologia*. Este tipo de evento pode ser usado como uma *sirene-padrão* (em analogia às velas-padrão da astronomia) para a determinação da constante de Hubble. O resultado obtido de $H_0 = 70_{-8.0}^{+12.0}$ (km/s)/Mpc foi compatível com os valores obtidos através de outras medições cosmológicas.

4 Desafios para o Futuro

As detecções de ondas gravitacionais trazem uma maneira de observar o universo totalmente diferente do que os astrônomos era capazes de fazer antes. Os telescópios de rádio a raios X observam radiação eletromagnética. Os detectores LIGO e VIRGO procuram por radiação gravitacional.

As observações que já foram realizadas são só as primeiras, e muitas outras virão a cada tomada de dados dos detectores. Elas nos permitiram verificar diretamente a última previsão da teoria da relatividade geral de Einstein que ainda faltava ser testada. Além disso, já aprendemos mais sobre como os buracos negros são formados, sobre as massas de estrelas de nêutrons (e a equação de estado da matéria nuclear), e sobre a formação dos elementos mais pesados que o ferro no universo.

À medida que mais eventos forem detectados, poderemos fazer análises estatísticas desses resultados, e diminuir os erros associados às medições. Isso poderá ser especialmente útil para a determinação da constante de Hubble.

Outras fontes de ondas gravitacionais são esperadas mas ainda não foram detectadas, como sistemas binários mistos (com uma estrela de nêutrons e um buraco negro), supernovas, pulsares e o fundo estocástico de ondas gravitacionais gerado por muitas fontes longínquas espalhadas pelo universo. Além destas fontes esperadas, pode ser que outras existam! O futuro pode guardar mais surpresas.

Para que mais eventos sejam detectados, é necessário melhorar ainda mais a sensibilidade dos detectores. Os limites da tecnologia atual certamente vão ser ampliados novamente, pois até mesmo os limites quânticos de precisão de medições já começam a ser importantes

(estados *squeezed* serão utilizados futuramente nos detectores de ondas gravitacionais).

Finalmente, além da informação astrofísica inédita que as ondas gravitacionais podem fornecer, também poderemos realizar testes fundamentais da teoria da relatividade geral. Teorias alternativas poderão ser testadas e descartadas ou não, confirmando ou mudando para sempre o nosso entendimento sobre o espaço-tempo e o universo em que vivemos.

5 Referências

- [1] H. Moysés Nussenzweig, Um Curso de Física Básica - Ótica, Relatividade e Física Quântica, Vol. 4, Editora Edgard Blücher, São Paulo (1998).
- [2] J. B. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity, Pearson, London (2014).
- [3] W. J. Maciel, Introdução à Estrutura e Evolução Estelar, EDUSP, São Paulo (2000).
- [4] M. Maggiore, Gravitational Waves - Volume 1: Theory and Experiments, Oxford University Press, Oxford (2008).
- [5] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).
- [6] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), "GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescencer", Phys. Rev. Lett. 119, 141101 (2017).
- [7] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), "GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral", Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017).