

Astronomia de ondas gravitacionais

Riccardo Sturani

Instituto Internacional de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo

As detecções de ondas gravitacionais geradas de sistemas binários coalescentes deixaram um marco na física, começando a nova ciência da astronomia de ondas gravitacionais e abrindo novas linhas de pesquisa em física fundamental e cosmologia. Aqui expomos as consequências dessa nova forma de enxergar, ou ouvir, objetos astrofísicos para a compreensão das leis fundamentais da gravitação e da história do Universo.

Abstract

The detections of Gravitational Waves from coalescing binaries represent a landmark in physics, they started the new science of gravitational wave astronomy and opened new lines of research in fundamental physics and cosmology. Here we expose the consequences of this new way to look at, or rather listen to, astrophysical objects for the understanding of the fundamental gravitational laws and the history of the Universe.

Palavras-chave: ondas gravitacionais, binárias coalescentes

Keywords: gravitational waves, coalescing binaries

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n2.36126](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n2.36126)

1 Introdução

A primeira detecção de ondas gravitacionais, ocorrida em 2015, coroou o esforço experimental de décadas para construir interferômetros capazes de medir deslocamentos subnucleares devido o efeito da passagem de ondas gravitacionais. Desde então, dezenas de detecções se acumularam, e foi possível obter em torno de uma detecção por cada semana de observação.

Apesar de sistemas binários de estrelas serem muito comuns no Universo (se estima que uma fração não desprezível de todas as estrelas esteja em um sistema binário), eventos de fusão de objetos astrofísicos acontecem mais raramente que uma vez a cada um milhão de anos por galáxia. Isso é devido ao fato de que o “tempo de vida” dos sistemas binários é muito longo, já que a emissão de ondas gravitacionais, responsável pelo encolhimento da órbita, é muito fraca. Além disso é preciso tomar em conta que os grandes detectores de ondas gravitacionais, LIGO [1], Virgo [2] e KAGRA [3], são sensíveis só em uma janela de frequência que vai desde algumas dezenas de hertz até alguns quilohertz, tornando possível a detecção apenas de sinais emitidos por sistemas

binários com separação entre os objetos de até alguns milhares de quilômetros. Isso limita as fontes emissoras de ondas gravitacionais a objetos astrofísicos compactos (como estrelas de nêutrons e buracos negros) cujo tamanho varia entre cerca de dez quilômetros para estrelas de nêutrons, e varia de forma linear com a massa, para os buracos. A título de exemplo, no caso de um buraco negro com massa igual à do Sol, o raio é de 3 km.

Uma das particularidades das ondas gravitacionais é que a amplitude instantânea, oscilante no tempo, é detectada diretamente, sem precisar medir a intensidade média das oscilações, como é o caso das ondas eletromagnéticas detectadas por exemplo pelo nossos olhos. Isso tem uma dupla vantagem a respeito de outras observações astrofísicas: *i*) a variação da frequência das ondas detectadas traz pelo detector a assinatura do sistema binário junto com detalhes quantitativos sobre a lei gravitacional que governa a dinâmica das fontes; *ii*) a amplitude da onda decai só com o inverso da distância, não com o quadrado dessa, permitindo alcançar fontes mais distantes.

Nas seções seguintes serão apresentadas as principais aplicações que as detecções de ondas

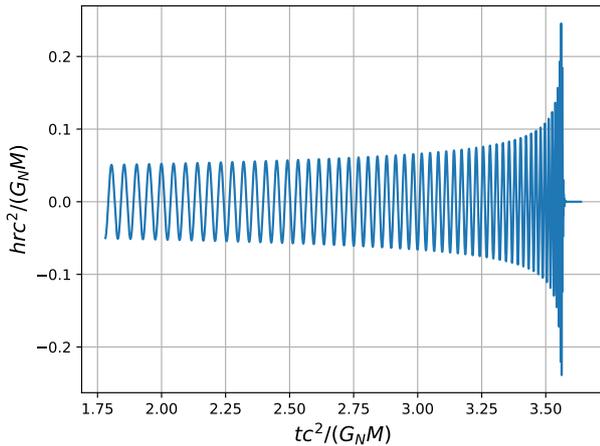


Figura 1: Exemplo de uma forma de onda (multiplicada pela distância e dividida pela massa total do sistema binário) gerada por dois buracos negros de igual massa e sem rotação (spin).

gravitacionais emitidas por sistemas binários de objetos compactos coalescentes podem ter para a física fundamental e para a investigação da história do Universo.

2 Física fundamental

O padrão de oscilação das ondas gravitacionais geradas por sistemas binários coalescentes traz uma rica fonte de informação. Em primeiro lugar, a frequência das ondas não é constante, mas varia à medida que a emissão da radiação gravitacional faz encolher a órbita da fonte (ver, por exemplo, a Fig. 1). Os detalhes quantitativos desta taxa de variação dependem dos parâmetros astrofísicos das fontes, como as massas e os spins dos constituintes do sistema binário, mas também da teoria fundamental da gravitação que rege a dinâmica dos dois corpos.

Podemos imaginar que cada um dos dois objetos astrofísicos que compõe o sistema binário, no ato de se deslocar no espaço-tempo, gera em torno de si um campo gravitacional dependente do tempo que afeta o deslocamento do outro objeto astrofísico, cujo campo gravitacional, por sua vez, afeta o deslocamento do primeiro. Resolver de forma exata este problema de dois corpos usando a teoria da relatividade geral é de uma dificuldade formidável e, para isso, vários métodos aproximados foram desenvolvidos.

É possível por exemplo resolver numericamente as equações da relatividade geral interpretando

o espaço-tempo como uma grade em que cada ponto está a uma distância finita do outro, em vez de formar um contínuo espaço-temporal, como é observado na natureza [4]. Assim é possível resolver as equações de Einstein e determinar tanto a dinâmica das fontes astrofísicas quanto a do próprio espaço-tempo, cuja oscilações propagando-se com a velocidade da luz são as ondas gravitacionais. Apesar de ser o método mais sólido para obter resultados confiáveis, integrar numericamente as equações de Einstein não é o método mais prático: pelo custo computacional e porque é necessário simular cada evento separadamente. É sempre melhor quando é possível ter um controle analítico das soluções de um problema, para entender como se comportam, sem ter que resolver todo o problema de novo, quando se altera um pouco as condições iniciais.

Um método perturbativo analítico consiste em considerar o espaço-tempo em torno do sistema binário como uma perturbação do espaço-tempo em torno do maior dos dois corpos, sendo o parâmetro de expansão a razão entre as massas dos dois corpos [5]. Evidentemente esse método não pode ser estendido para o caso de objetos de massas iguais, que representa o caso mais comum nas detecções de ondas gravitacionais, já que nesse caso os dois corpos estão acelerados, ambos contribuindo para o processo de emissão da radiação gravitacional. No caso de um corpo ser muito mais leve que o outro, será somente ele quem contribuirá para a emissão das ondas gravitacionais, e que será por consequência mais fraca, já que a emissão é proporcional à massa emissora.

Uma aplicação notável da teoria de perturbação em torno de um corpo massivo é a determinação quantitativa da emissão do corpo remanescente de uma coalescência, cujo resultado é um único buraco negro fortemente excitado, que decai a quiescência via a emissão de ondas gravitacionais. Tais ondas são descritas quantitativamente pela superposição de oscilações amortecidas, cuja frequência e amortecimento são univocamente determinados a partir da massa e do spin do buraco negro final [6, 7].

Avaliando quantitativamente o sinal emitido pelo buraco negro remanescente foi efetivamente possível reconhecer, em um caso das dezenas que foram detectados até hoje, a superposição de dois osciladores amortecidos [8], enquanto que nos outros casos foi possível detectar só o modo princi-

pal, já que é previsto que todos os demais modos apareçam com intensidade menor, ficando abaixo do nível de ruído do detector.

O método analítico de maior sucesso para descrever a fase inspiral de um sistema binário de objetos de massas comparáveis é a chamada aproximação pós-Newtoniana da relatividade geral, que consiste em aproximar o campo gravitacional em torno de cada um dos dois corpos como uma série de potência em termos do parâmetro adimensional $G_N M/c^2 r$, onde G_N é a constante da gravitação universal, c é a velocidade da luz no vácuo, M a massa total do sistema binário e r a distância entre os dois corpos. Note que a configuração de dois corpos em deslocamento em torno do centro de massa comum é definida pela distância e pela velocidade v que, durante uma revolução orbital, é ligada ao parâmetro precedente via a relação $v^2 = G_N M/r$.

Em particular, para os sistemas binários que evoluíram a partir de grandes distâncias até encolherem a própria órbita, é possível mostrar que as órbitas não são elípticas, mas circulares, pois a emissão de ondas gravitacionais tende a “circularizar” uma órbita, além de encolhê-la [9]. Dito isso, a expansão pós-Newtoniana pode ser uma série perturbativa descrita tanto em termos de v^2/c^2 , quanto de $G_N M/c^2 r$.

Para calcular o potencial gerado por um componente do sistema binário é necessário resolver o análogo relativístico da equação de Poisson, que liga a derivada segunda do potencial gravitacional à distribuição de matéria que é fonte desse mesmo potencial. Porém a relatividade geral, sendo uma teoria não-linear, introduz uma complicação: não só os corpos massivos são fonte do campo gravitacional, mas também o próprio campo gravitacional gerado por eles! Felizmente esse processo sem fim pode ser truncado em uma dada ordem perturbativa. Por exemplo, até o atual momento, a dinâmica relativística de um sistema binário é conhecida até a quarta ordem pós-Newtoniana (v^8/c^8), com resultados promissores sendo obtidos na quinta ordem.

Para efetuar esses cálculos perturbativos é de grande ajuda adotar uma classificação das contribuições em termo de diagramas de Feynman. Esta técnica foi inicialmente desenvolvida para calcular os efeito quânticos nos espalhamento das partículas fundamentais, necessários para interpretar teoricamente a grande quantidade de da-

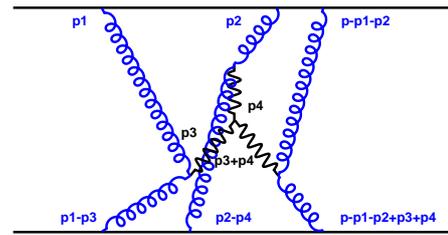


Figura 2: Diagrama de Feynman mais difícil de calcular pela determinação da quarta ordem perturbativa na aproximação pós-Newtoniana do problema de dois corpos na relatividade geral. Esta figura é uma representação pictórica da interação entre dois corpos (linhas contínuas), sendo as interações representadas pelas linhas ondulas. A não linearidade da teoria se reflete em que interações se repartem em novos termos (emergência ou convergência das linhas ondulas gerando outras linhas ondulas).

dos obtidos nos aceleradores de partículas como o CERN. A técnica dos diagramas de Feynman liga uma teoria fundamental a quantidades medidas experimentalmente, como a deflexão da trajetória de uma partícula se chocando com outra, e foi readaptada em [10] para calcular o potencial gravitacional efetivo entre dois corpos massivos, o que é necessário para obter a forma de uma onda gravitacional. Veja na Fig. 2 o mais complicado diagrama de Feynman que é necessário calcular para determinar a dinâmica de dois corpos na quarta ordem pós-Newtoniana [11].

Vale mencionar que estes métodos perturbativos normalmente aproximam os constituintes dos sistemas binários como puntiformes, negligenciando o tamanho dos objetos compactos em relação à distância entre eles. Embora isso seja uma excelente aproximação para quase todos os sinais de ondas gravitacionais detectados até hoje, novos e interessantes efeitos físicos acontecem quando as deformações de estrelas de nêutrons e buracos negros são levados em conta.

No caso das estrelas de nêutrons, a medida direta da deformabilidade é tratada no artigo *Estrelas de nêutrons e seus múltiplos mensageiros*, de Raissa F. P. Mendes, publicado neste mesmo volume. No caso de buracos negros, o efeito, mesmo não sendo ainda detectável com os detectores atuais de segunda geração, é muito intrigante. Acontece que, na relatividade geral, um buraco negro não se deforma sob a influência de um campo gravitacional estático externo, como o campo da estrela companheira em um sistema duplo, diferentemente do que acontece para as es-

trela de nêutrons. Uma parcial explicação qualitativa pode ser dada observando a deformação de um objeto astrofísico, deformações de *maré*, natural para uma distribuição de matéria, como para uma estrela de nêutrons, mas não acontece no espaço vazio que corresponde a um buraco negro. Ao contrário da deformação de maré, a absorção de uma parte da radiação gravitacional produzida pelo sistema binário é desprezível para estrelas de nêutrons mas pode ser importante para buracos negros: o horizonte de eventos de um buraco negro se comporta como uma esponja completamente absorvente. Toda radiação criada suficientemente perto dele não consegue escapar e vem a ser capturada pelo buraco negro.

Além da medida de uma não desprezível deformação das estrelas de nêutrons no evento GW170817 [12], esse efeito de deformação e absorção não foram ainda observados. Em particular uma observação desse fenômeno nos casos de buracos negros poderia dar mais uma confirmação da teoria da relatividade geral ou, em caso de incompatibilidade com a previsão da teoria de Einstein, uma indicação a favor das teorias alternativas da gravitação.

3 Cosmologia

A astronomia gravitacional não só permitiu enxergar os objetos mais enigmáticos da natureza, os buracos negros e as estrelas de nêutrons, como também abriu a possibilidade de enxergar o Universo através de um mensageiro novo, ou escutá-lo, como se diz metaforicamente. É assim possível ter informações complementares àquelas que os mensageiros tradicionais (ondas eletromagnéticas, neutrinos e raios cósmicos) generosamente nos enviaram e já são detectados pelos observatórios existentes desde antes da implementação dos detectores de ondas gravitacionais.

Focando nossa atenção na cosmologia, um jeito padrão de investigar o Universo é relacionar a distância entre objetos astrofísicos e o *redshift* (termo em inglês para desvio para o vermelho) correspondente da luz recebida. O Universo está em expansão, com a velocidade de recessão das galáxias próximas à nossa sendo proporcional à distância relativa até nós. Quando uma fonte em movimento em relação a um observador emite luz, esta chega ao observador com uma frequência diferente daquela com que foi emitida, ana-

logamente ao que acontece com o efeito Doppler no caso do som emitido por uma fonte em movimento. A relação entre a distância e o *redshift* é um dos pilares de qualquer modelo cosmológico, mas infelizmente relaciona duas quantidades difíceis de serem medidas.

É relativamente fácil medir a frequência da luz que chega em um observatório. Para estimar o *redshift* é preciso saber qual era a frequência da luz na época da emissão. Para sinais provenientes de galáxias conhecidas essa medida é possível, identificando frequências associadas a fenômenos específicos cuja frequência é conhecida. Mas para fontes não padrões, como *gamma ray burst*, a estimativa do *redshift* é possível somente se a fonte puder ser associada a uma galáxia conhecida.

Para medir a distância não é suficiente observar a luz de um objeto, é necessário também conhecer sua luminosidade intrínseca, ou seja, a calibração da radiação emitida para comparar com a luminosidade medida e então inferir a chamada distância de luminosidade. É esse o caso, por exemplo, de um certo tipo de supernova, chamadas Ia, que se distingue das outras pela ausência de hidrogênio e pela presença de silício, visíveis no espectro, e que são *velas padrões*, ou seja, elas têm uma emissão padronizada e, com base na intensidade da luz detectada, a distância até elas pode ser medida. Quando é possível determinar o *redshift* também, graças à identificação da galáxia hospedeira, eis que temos os dois ingredientes para determinar a relação distância-*redshift*. Essa relação pode ser expandida em uma série de Taylor, e o coeficiente da primeira ordem é a constante de Hubble-Lemaître H_0 , cujo valor foi determinado de várias formas. Em particular a determinação de H_0 obtida pela análise da radiação cósmica do fundo não confere com o valor obtido através das velas padrões. É de fundamental importância, então, ter uma nova e independente determinação de H_0 , e isso pode ser obtido através das ondas gravitacionais emitidas por binárias coalescentes, ou sirenes padrões. Nesse caso, quando a medida gravitacional da distância de luminosidade é complementada pelo *redshift*, identificando a galáxia hospedeira por exemplo, é possível determinar a constante de Hubble-Lemaître. Por enquanto existe só uma detecção de onda gravitacional proveniente de uma sirene padrão com *redshift* associado e, por consequência, a medida de H_0 é acompanhada de uma incerteza muito

grande. Mas é esperado que com várias dezenas de novas detecções a precisão necessária para resolver o desacordo entre as medidas de H_0 hoje existente seja atingida.

O único evento caracterizado de uma emissão conjunta de ondas electromagnéticas e gravitacionais é hoje conhecido como GW170817, na parte gravitacional, GRB170817A, pela parte de *gamma ray burst*, e AT 2017gfo pela parte de transiente óptico [13]. Ele aconteceu a uma distância de cerca de 120 milhões de anos-luz de nós, e o sinal dos raios gama chegou somente 1,7 segundos depois de passado o pico da onda gravitacional, o que mostra que as duas radiações, gravitacional e electromagnética, viajam com a mesma velocidade com ótimo grau de aproximação.

Outra consequência inesperada do evento GW170817 foi a compreensão dos fenômenos que acompanham a fusão de duas estrelas de nêutrons, que induzem, entre outras coisas, a formação de uma quantidade importante de elementos pesados como ouro e prata, resolvendo um quebra-cabeça existente de longo tempo, já que as fusões nucleares que ocorre no interior de outras estrelas só dão conta de formar o ferro ou elementos mais leves.

4 Conclusões

Estamos no começo de uma verdadeira revolução no campo da astronomia, com repercussões esperadas também no campo da física fundamental e da cosmologia.

O interesse despertado pela detecção de ondas gravitacionais, dado o tipo de fonte particularmente fundamental (tanto que já foi denominado *o átomo do hidrogênio da gravidade*), permite uma descrição fundamental da dinâmica das fontes que está nos ensinando novas lições sobre a gravitação em condições extremas e nunca antes observadas.

Também na cosmologia as ondas gravitacionais nos dão acesso a novas informações, como uma medida independente da relação distância-redshift.

Mas além dos desconhecidos esperados, os eventos registrados mostraram como as novas detecções são fontes de informação sobre os desconhecidos inesperados, que além de responder a antigas perguntas, até então sem respostas, nos

abrem portas rumo a novas direções de investigação sobre o Universo.

Sobre o autor

R. Sturani (riccardo.sturani@ufrn.br) é Doutor em Física pela Scuola Normale Superiore de Pisa (Itália) e pesquisador do Instituto Internacional de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Natal, RN). Especialista em métodos de teoria de campos aplicados ao problema a dois corpos em relatividade geral e membro da colaboração LIGO/Virgo/KAGRA.

Referências

- [1] and J Aasi, B. P. Abbott et al., *Advanced LIGO*, *Classical and Quantum Gravity* **32**(7), 074001 (2015).
- [2] F. Acernese, M. Agathos et al., *Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector*, *Classical and Quantum Gravity* **32**(2), 024001 (2014).
- [3] T. Akutsu, M. Ando et al., *Overview of KAGRA: Detector design and construction history*, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2021**(5) (2020), 05A101.
- [4] L. Lehner, *Numerical relativity: A review*, *Class. Quant. Grav.* **18**, R25 (2001). [ArXiv: gr-qc/0106072](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0106072).
- [5] A. Pound e B. Wardell, *Black hole perturbation theory and gravitational self-force* (2021). [ArXiv:2101.04592](https://arxiv.org/abs/2101.04592).
- [6] T. Regge e J. A. Wheeler, *Stability of a Schwarzschild singularity*, *Phys. Rev.* **108**, 1063 (1957).
- [7] F. J. Zerilli, *Gravitational field of a particle falling in a schwarzschild geometry analyzed in tensor harmonics*, *Phys. Rev. D* **2**, 2141 (1970).
- [8] M. Isi, M. Giesler et al., *Testing the no-hair theorem with GW150914*, *Phys. Rev. Lett.* **123**(11), 111102 (2019). [ArXiv:1905.00869](https://arxiv.org/abs/1905.00869).
- [9] P. C. Peters, *Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses*, *Phys. Rev.* **136**, B1224 (1964).

- [10] W. D. Goldberger e I. Z. Rothstein, *An Effective field theory of gravity for extended objects*, *Phys. Rev. D* **73**, 104029 (2006). [ArXiv:hep-th/0409156](#).
- [11] S. Foffa e R. Sturani, *Conservative dynamics of binary systems to fourth Post-Newtonian order in the EFT approach I: Regularized Lagrangian*, *Phys. Rev. D* **100**(2), 024047 (2019). [ArXiv:1903.05113](#).
- [12] B. P. Abbott et al., *Properties of the binary neutron star merger GW170817*, *Phys. Rev. X* **9**(1), 011001 (2019). [ArXiv:1805.11579](#).
- [13] B. P. Abbott et al., *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, *Astrophys. J. Lett.* **848**(2), L12 (2017). [ArXiv:1710.05833](#).