

# Os primeiros 10 anos de detecções pelos observatórios de ondas gravitacionais!

Riccardo Sturani

Instituto de Física Teórica - UNESP, São Paulo, Brazil

riccardo.sturani@unesp.br

A primeira detecção de ondas gravitacionais, que aconteceu no dia 14 de Setembro 2015, coroou o esforço experimental de décadas para construir interferômetros capazes de captar deslocamentos sub-nucleares devidos ao efeito da passagem de ondas gravitacionais.

Desde então, centenas de detecções se acumularam nas quatro tomadas de dados que se desenrolaram até hoje, a última das quais está ainda em andamento e deverá estar concluída em Novembro deste ano. Todas as ondas gravitacionais observadas são oriundas da fusão de sistemas binários compostos de buracos negros e/ou estrela de neutrões a uma taxa observada de mais de um por semana.

Apesar de sistemas binários de estrelas serem muito comuns no Universo - estima-se que a maioria de todas as estrelas estejam num sistema binário ou a maior multiplicidade - eventos de fusão de objetos astrofísicos acontecem mais raramente que uma vez por milhão de anos por galáxia.

Isso é devido ao facto que a vida dos sistemas binários é muito longa, já que a emissão de ondas gravitacionais responsáveis pelo encolhimento da órbita é decididamente fraca. Além disso vale ressaltar que os grandes interferômetros LIGO [1], Virgo [2] e KAGRA [3], que estão funcionando conjuntamente na atual tomada de dados, são sensíveis só à janela de frequência entre algumas dezenas de Hertz e alguns quilohertz. Isso torna possível a detecção de sinais só para objetos compactos, onde a fonte tem tamanho máximo de algumas centenas de quilómetros, para poder gerar sinais na janela de frequência mencionada.

As fontes detetáveis com os detectores funcionando neste momento são então limitadas a objetos astrofísicos compactos, como estrelas de neutrões e buracos negros, cujo tamanho varia entre ao torno de dez quilómetros para estrela de neutrões e uma quantidade variável linearmente com a massa para os buracos negros, sendo o tamanho de um buraco negro com massa igual à do nosso Sol de três quilómetros.

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 electromagnéticas detectadas por

exemplo pelos nossos olhos.

Isso tem uma dupla vantagem com respeito a outras observações astrofísicas: i) a variação temporal da frequência instantânea das ondas detectadas traz pelo detector a assinatura do sistema binário junto com os detalhes quantitativos da lei gravitacional regendo a dinâmica das fontes, ii) na propagação através do cosmos, a amplitude das ondas gravitacionais decai só com o inverso da distância, não com o quadrado dessa, permitindo alcançar fontes distantes.

O grande fascínio que as observações das ondas gravitacionais trazem, é a possibilidade de poder observar o Universo através de um novo mensageiro, permitindo ao mesmo tempo aprofundar o conhecimento sobre a história do Universo e sobre o mesmo mensageiro que traz esta informação, a gravidade.

## Física fundamental

O padrão de oscilação das ondas gravitacionais geradas para binárias coalescentes traz uma mina de informação. Em primeiro lugar, a frequência das ondas não é constante, mas varia à medida que a emissão gravitacional faz encolher a órbita da fonte. 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 componentes, no ato de se deslocar, gera um campo gravitacional dependente do tempo em torno dele que afeta o deslocamento do outro componente, cujo campo gravitacional por sua vez afeta o deslocamento do primeiro.

Resolver exatamente este problema a dois corpos da Relatividade Geral é de uma dificuldade formidável, por isso vários métodos aproximados foram desenvolvidos.

É possível, por exemplo, resolver numericamente as equações da Relatividade Geral aproximando o espaço tempo com uma grelha cujos pontos estão a distância finita, em vez de formar um contínuo como seria natural [4]. É assim 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 gravita-

cionais.

Apesar de ser o método mais sólido para obter resultados confiáveis, integrar numericamente as equações de Einstein não é o mais prático: pelo alto custo computacional e porque é necessário simular cada evento separadamente.

Por outro lado, métodos analíticos não podem resolver exatamente o problema a dois corpos, mas precisam de aproximações para chegar a resultados úteis para interpretação dos dados observacionais.

Um esquema de aproximação usa como pequeno parâmetro para controlar a expansão perturbativa a razão das massas dos dois corpos [5] e recentemente atingiu a segunda ordem perturbativa [6]. Na descrição analítica da dinâmica gravitacional dos dois corpos, é conveniente separar uma fase de espiralamento na qual a distância entre os dois componentes do sistema binário diminui gradualmente, uma de fusão e a subsequente fase de oscilações amortecidas do objeto resultante, ou “ring-down”, como é comumente chamada esta terceira e última fase.

Avaliando quantitativamente o sinal emitido do buraco negro oriundo de um sistema binário inicial, é possível testar a relatividade geral, cuja previsão é que o ring-down seja descritível, quantitativamente, como a superposição de oscilações amortecidas exponencialmente no tempo, cujas frequências e tempo de amortecimento são calculáveis em termos de 2 parâmetros só: a massa e o spin do buraco negro final. Dada a intensidade relativamente baixa dos sinais detectados até hoje, não foi possível testar significativamente esta previsão da relatividade geral, que passou por todos os testes até então.

O método analítico mais popular para descrever a fase de espiralamento de um sistema binário de massa comparável é a aproximação pós-Newtoniana à Relatividade Geral [7], que consiste em aproximar o campo ao torno de cada um dos dois corpos em série de potências na perturbação da métrica, ou  $GM/r$  (onde  $G$  é constante de gravitação,  $M$  a massa total do sistema binário,  $r$  a distância relativa dos seu constituintes) que pela lei de Kepler numa órbita circular deve igualar  $v^2$ , onde  $v$  é a velocidade relativa entre os dois corpos.

A detecção das ondas gravitacionais impulsionou grandemente este tipo de estudo, que tem atingido a quarta ordem perturbativa [8] (quinta ordem perturbativa se nos limitamos na parte conservativa da dinâmica gravitacional [9,10,11]). Além de formar a base pela forma de ondas usadas na análise das observações, o método pós-Newtoniano permite uma classificação de novos efeitos, qualitativamente diferentes, que aparecem na dinâmica ao aumentar a ordem de aproximação. Por exemplo, focando no caso dos objectos compactos sem spin, na quarta ordem perturbativa aparecem efeitos de absorção do horizonte dos buracos negros, e na quinta ordem efeitos de deformação de marés, importantes para estrelas de neutrões mas nulos para buracos negros na relatividade geral. Aprofundar o cálculo perturbativo permite desvendar aspectos qualitativamente novos da relatividade geral e verificá-los quantitativamente nas formas de ondas medidas nas observações. Métodos de teoria de

campo concebidos para estudar o resultados do espalhamentos de partículas fundamentais, mostraram-se muito eficazes no estudo das interações gravitacionais [12], mostrando como vários conceitos até há pouco tempo atrás associados à teoria quântica de campo, como gráficos de Feynman, divergências, contra-termos, renormalização, expansão em loop, tem tudo a ver com a teoria de campo, e não com a sua parte quântica.

Uma outra expansão perturbativa da relatividade geral aplicada à dinâmica a dois corpos é a aproximação post-minkowskiana, que é não-perturbativa na velocidade e cujo parâmetro de expansão é a perturbação da métrica,  $GM/r$ . Ainda mais neste esquema da aproximação pós-Newtoniana, o uso de métodos emprestados da física de partículas permitiram um rápido avanço no estudo do problema gravitacional a dois corpos. Cálculos a “loop”, que na física de partículas são associados a correções quânticas, mostraram conter uma parte clássica relevante para o problema gravitacional, parte clássica que na verdade é a única a sobreviver no limite não relativístico, apropriado nas aplicações astrofísicas, no qual o momento trocado entre as “partículas” é muito menos que as massas delas. A quarta ordem perturbativa foi completada em [13,14] e resultados parciais na quinta ordem perturbativa foram obtidos em [15].

A coleção de eventos até hoje permitiu vários testes da relatividade geral, no regime “forte” na escala do tamanho das fontes (de quilómetros até centenas de quilómetros), não apontado pelo momento para alguma necessidade de modificá-la. Porém na próxima década estão previstos observatórios de ondas gravitacionais de terceira geração, o Einstein Telescope [16] e o Cosmic Explorer [17], e o interferómetro espacial LISA [18], que poderão observar sinais até 100 vezes mais intensos, cuja análise demandará um domínio mais preciso da dinâmica a dois corpos do que temos agora [19].

### Cosmologia

De um lado a astronomia gravitacional permitiu-nos ver uma quantidade de objetos compactos, buracos negros e estrelas de neutrões, fora da nossa galaxia, trazendo informação sobre a taxa de fusão de sistemas binários (da ordem de 1 por galaxia por milhão de ano), a distribuição de massa dos buracos negros “estrelares” (com massa entre algumas e cem massas solares), por outro lado, mais em geral, providenciou um outro jeito de ver a estrutura de grande escala do Universo, que até há dez anos atrás podia ser investigada só com mensageiros electromagnéticos. Graças às informações complementares trazidas pelas ondas gravitacionais relativamente aos mensageiros tradicionais (ondas electromagnéticas, neutrinos e raios cósmicos), novas investigações foram possíveis.

Focando a nossa atenção na cosmologia, sabemos que o Universo está em expansão, a velocidade de recessão das galáxias próximas com respeito à nossa sendo proporcional à distância relativa. Quando uma fonte em movimento relativo ao observador emite luz, essa chega ao observador com uma frequência distorcida com respeito aquela com que foi emitida, analogamente ao que acontece com o efeito Doppler no caso do som emitido de uma fonte em deslocamento.

A relação entre a distância e o redshift é um dos pilares de qual-

quer modelo cosmológico, mas infelizmente liga duas quantidades, a distância, ou melhor ainda, a distância de luminosidade, e o redshift, difíceis de medir conjuntamente pelo mesmo sistema.

Se é relativamente fácil medir a frequência da luz que chega ao observatório, para estimar o redshift é preciso saber qual era a frequência da luz na época da emissão. Para luz proveniente das galáxias, essa medida é possível identificando frequências associadas a fenômenos químicos específicos cuja frequência é conhecida. Porém, para fontes não padrões, como por exemplo “gamma ray bursts”, a estimativa do redshift é possível só se a fonte for associada a uma galáxia conhecida.

De outro lado, para medir a distância não é suficiente observar a luz de um objeto astronômico, é necessário também conhecer a luminosidade intrínseca, ou seja a calibração da radiação emitida, para comparar com a luminosidade medida e então inferir a distância de luminosidade.

É esse o caso por exemplo de um certo tipo de supernovae, as chamadas de tipo Ia, que se distinguem das outras pela ausência de hidrogênio e pela presença de silício, visíveis no espectro, que são velas padrões, ou seja elas têm uma emissão padronizada e em base disso, com a intensidade da luz detectada a distância entre 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 série de Taylor, e o coeficiente da primeira ordem é a constante de Hubble-Lemaître  $H_0$ , que foi determinada com vários métodos, por exemplo [20].

Em particular, a determinação de  $H_0$  obtida pela análise da radiação cósmica de fundo [21] não coincide com o valor obtido com as velas padrões. É de fundamental importância então ter uma nova determinação independente, e isso é o caso das ondas gravitacionais emitidas de binárias coalescentes, ou sirenes padrões.

O sinal gravitacional tem uma frequência característica variável devido ao encolhimento da órbita durante a fusão, que permite uma calibração absoluta da amplitude da onda emitida, e por consequência uma medida da distância. Porém o redshift de um evento gravitacional foi medido só por 1 evento, GW170817 [22], a fusão de duas estrelas de nêutrons, que foi acompanhado de um sinal eletromagnético que permitiu a identificação da galáxia hospedeira. Na falta de demais sinais com contraparte eletromagnética, as centenas de fusões de duplas de buracos negros representam um novo levantamento, complementar aos levantamentos astronômicos tradicionais, para explorar a estrutura a grande escala do universo. Nas próximas décadas, com o advento de novos detectores, o número de detecções de ondas gravitacionais é esperado contar-se não em centenas, mas em centenas de milhares; como consequência providenciará um novo mapa da distribuição da matéria no Universo, da qual será possível aprender sobre a sua história [23].

#### Referências

- [1] J. Aasi et al., Advanced LIGO, *Class. Quant. Grav.* 32, 074001 (2015).
- [2] F. Acernese et al., Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector, *Class. Quant. Grav.* 32 (2), 024001 (2015).
- [3] T. Akutsu et al., Overview of KAGRA: Detector design and construction history, *PTEP* 2021, 5, 05A101 (2021)
- [4] L. Lehner, Numerical relativity: A Review, *Class. Quant. Grav.* 18, R25 (2001).
- [5] A. Pound, B. Wardell, Black hole perturbation theory and gravitational self-force (2021).
- [6] B. Wardell, A. Pound, N. Warburton, J. Miller, L. Durkan, *PRL* 130 24, 241402 (2023)
- [7] L. Blanchet, Post-Newtonian Theory for Gravitational Waves, *Living Rev. Rel.*, 17, 2 (2014)
- [8] L. Blanchet, G. Faye, O. Henry, F. Larroutourou and D. Trestini, Gravitational-wave flux and quadrupole modes from quasicircular nonspinning compact binaries to the fourth post-Newtonian order, *Phys. Rev. D*, 108, 6 064041 (2023)
- [9] J. Blumlein, A. Maier, P. Marquard and G. Schafer, The fifth-order post-Newtonian Hamiltonian dynamics of two-body systems from an effective field theory approach, *Nucl. Phys. B* 983, 115900 (2022), [Erratum: *Nucl. Phys. B* 985, 115991 (2022)]
- [10] R. Porto, M. Riva and Z. Yang, Nonlinear gravitational radiation reaction: failed tail, memories and squares, *JHEP* 04, 050 (2025)
- [11] G. Almeida, A. Muller, S. Foffa and R. Sturani, Gravitational memory contributions to waveform and effective action, arXiv:2410.10565
- [12] W. D. Goldberger, I. Z. Rothstein, An Effective field theory of gravity for extended objects, *Phys. Rev. D* 73, 104029 (2006).
- [13] Z. Bern, J. Parra-Martinez, R. Roiban, M. Ruf, C. Shen, M. Solon and M. Zeng, Scattering Amplitudes, the Tail Effect, and Conservative Binary Dynamics at O(G<sup>4</sup>), *Phys. Rev. Lett.* 128, 16 61103 (2022)
- [14] C. Dlapa, G. Kalin, Gregor, Z. Liu and R. Porto, Conservative Dynamics of Binary Systems at Fourth Post-Minkowskian Order in the Large-Eccentricity Expansion, *Phys. Rev. Lett* 128, 16 161104 (2022)
- [15] M. Driesse, G. U. Jakobsen, A. Klemm, G. Mogull, C. Nega, J. Plefka, B. Saue and J. Usovitsch, Emergence of Calabi-Yau manifolds in high-precision black-hole scattering, *Nature* 641, 8063, 603–607 (2025)
- [16] A. Abac et al., The Science of the Einstein Telescope, arXiv:2503.12263.
- [17] D. Reitze et al., Cosmic Explorer: The U.S. Contribution to Gravitational-Wave Astronomy beyond LIGO, *Bull. Am. Astron. Soc.* 51, 7, 035 (2019).
- [18] M. Colpi et al., LISA Definition Study Report, arXiv:2402.07571.
- [19] M. Purrer and C. Haster, Gravitational waveform accuracy requirements for future ground-based detectors, *Phys. Rev. Res.* 2 023151 (2020).
- [20] D. M. Scolnic et al. Pan-STARRS1 collaboration, The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample, *Astrophys. J* 959, 2, 101 (2018).
- [21] N. Aghanim et al., Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, *Astron. Astrophys.* 64 A6 (2020), [Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021)].
- [22] B. P. Abbott et al., Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *Astrophys. J. Lett.* 848 2, L12 (2017).
- [23] J. Ferri, I. Tashiro, L. R. Abramo, I. Matos, M. Quartin and R. Sturani, A robust cosmic standard ruler from the cross-correlations of galaxies and dark sirens, *JCAP* 04 008 (2025).



Riccardo Sturani completou o seu Mestrado em Física na Universidade de Pisa e o Doutorado em Física na Scuola Normale Superiore di Pisa, sendo atualmente investigador na UNESP - Universidade Estadual Paulista. A sua investigação tem sido efetuada em torno das ondas gravitacionais. É membro da colaboração científica LIGO, da colaboração ET (Einstein Telescope) e membro do grupo *Dark Energy Science Collaboration (DESC)* da colaboração *Legacy Survey of Space and Time (LSST)*.