

Buracos negros, modos quasinormais e ondas gravitacionais

Cecilia Chirenti

University of Maryland, College Park, EUA

NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, EUA

Center for Research and Exploration in Space Science and Technology, College Park, EUA

Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil

Resumo

Buracos negros podem ser estudados de diferentes maneiras. A partir das equações da relatividade geral, passando por observações em raios X e ondas gravitacionais, podemos tentar entender diferentes aspectos destes objetos astrofísicos. Também é possível que existam objetos ainda mais exóticos disfarçados de buracos negros no universo.

Abstract

Black holes can be studied in different ways. From the mathematical equations of general relativity, to X-rays and gravitational waves, we can try to understand their different aspects. There are also potentially more exotic astrophysical objects masquerading as black holes in the universe.

Palavras-chave: buracos negros, relatividade geral, ondas gravitacionais

Keywords: black holes, general relativity, gravitational waves

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n2.35941](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n2.35941)

1 Introdução

Se o leitor é um estudante de física, pode ser que ainda não tenha tido contato formal com a noção de buraco negro nas disciplinas de graduação. Mas é provável que já tenha se interessado pelo assunto, que certamente ocupará lugar de destaque em um curso de relatividade geral, por exemplo. Por outro lado, estudantes de astronomia podem encontrar buracos negros muitas vezes ao longo da sua graduação: nas disciplinas de introdução à astronomia, estrutura e evolução estelar e astrofísica de altas energias, por exemplo.

Infelizmente, na maioria das vezes, os pontos de vista do físico e do astrônomo sobre buracos negros são muito distintos e, até, mutuamente ignorados. O interesse do *físico teórico* especialista em relatividade geral, absorto em seus tensores e derivadas covariantes, pode passar longe das preocupações do *astrônomo observacional* que estuda quasares e precisa levar em consideração efeitos de extinção e *feedback*.

Inesperadamente, a recente contribuição de uma terceira modalidade de cientista foi responsável em parte por possibilitar a renovada união entre teóricos e observacionais interessados em buracos negros. Graças ao trabalho realizado em *simulações numéricas*, pudemos obter a forma de onda gravitacional esperada para a colisão de dois buracos negros. Com considerável trabalho experimental, foram desenvolvidos os detectores de ondas gravitacionais que possibilitaram o surgimento de uma nova forma de fazer astronomia.

Provavelmente o leitor não esteve perdido em alto mar durante os últimos cinco anos (ou em alguma outra situação análoga) sem acesso a internet, jornais, e atualizações do *arXiv*. Neste caso, não ignora a revolução desencadeada pelo anúncio realizado em fevereiro de 2016 da primeira detecção de ondas gravitacionais, batizada de GW150914 [1]: 50 detecções confirmadas, milhares de artigos, observações multimensageiras e o prêmio Nobel de Física de 2017, entre outros.

Assim, parte dos astrônomos passa agora a se preocupar com temas tão “teóricos” e matemáticos quanto a propagação de perturbações no espaço-tempo. Ao mesmo tempo, parte dos relativistas começa a se interessar por tratamento estatístico de dados e viés observacional. Quando comunidades diferentes precisam aprender a falar a mesma língua, acontecem desentendimentos e surgem ideias novas. Viva o progresso da ciência!

2 Buracos negros

Como sabemos que buracos negros existem? Nesta seção vamos ver alguns exemplos de observações e de resultados teóricos que auxiliam no estudo dos buracos negros.

2.1 Observados por astrônomos

A característica mais importante de um buraco negro é a sua massa, que determina também o raio do seu horizonte de eventos (veja mais detalhes na seção 2.2 abaixo). Curiosamente, os buracos negros observados até hoje existem em tamanhos “P” e “G”, mas a existência de buracos negros de tamanho “M” (o termo técnico é massa intermediária) ainda não foi comprovada.

Os buracos negros de tamanho “P” são chamados de buracos negros de massa estelar. Eles são formados no fim da vida de uma estrela de massa maior do que aproximadamente 20 – 30 massas solares (o valor exato ainda é bem incerto). Uma estrela de 30 massas solares passa aproximadamente 6 milhões de anos na sequência principal, estágio durante o qual a estrela realiza o processo de fusão nuclear que transforma hidrogênio em hélio (para comparação, o nosso Sol fica aproximadamente 9 bilhões de anos na sequência principal!). Após a sequência principal, essa estrela passa por uma fase de gigante vermelha, gigante azul, explosão de supernova, e finalmente o colapso gravitacional do remanescente da supernova forma um buraco negro de aproximadamente 5 – 10 massas solares (tudo isso é relativamente “rápido” e leva menos de um milhão de anos).

Sabemos que esses buracos negros existem, pois eles são observados quando se encontram em sistemas binários. Cada um desses sistemas binários é formado por um buraco negro e uma estrela. Dependendo da distância entre eles e do

estágio de evolução da estrela, pode haver transferência de massa da estrela para o buraco negro, formando um disco de acreção. A matéria no disco de acreção dissipa energia enquanto cai em direção ao buraco negro no centro, e emite radiação em raios X. Essa radiação é observada por satélites como Fermi, Swift, NuStar, Nicer, XMM, e-Rosita (entre outros) e nos permite inferir as massas desses buracos negros, estimadas no intervalo aproximado de 5 – 20 massas solares.

Os buracos negros de tamanho “G” são chamados de buracos negros supermassivos e possuem milhões ou bilhões de massas solares. Eles são encontrados no centro de galáxias e não são formados diretamente pelo colapso de uma estrela. As observações de estrelas em órbita do buraco negro central da Via Láctea (chamado de Sagittarius A*), permitem determinar a sua massa em aproximadamente 4 milhões de massas solares. Os pesquisadores responsáveis por essas medições dividiram recentemente o prêmio Nobel de Física em 2020. A foto do buraco negro apresentada pela colaboração *Event Horizon Telescope* em 2019 representa o buraco negro central da galáxia M87, de aproximadamente 6 bilhões de massas solares. Os buracos negros supermassivos também são observados como *quasares*, ou núcleos ativos de galáxias. Nem todas as galáxias são ativas, mas a minoria que apresenta esse tipo de atividade emite radiação em todas as frequências, de ondas de rádio a raios gama, gerada pela matéria (estrelas, gás, etc) que cai no buraco negro central.

Ainda não sabemos como esses buracos negros supermassivos são formados. Nunca houve estrelas tão grandes no universo que pudessem colapsar para formar esses gigantes. Simulações indicam que é difícil fazer uma única nuvem de gás grande o suficiente colapsar sem se quebrar em pedaços menores. Por outro lado, colidir muitos buracos negros menores até formar um buraco negro supermassivo levaria mais tempo do que a idade do universo! Neste ponto o leitor pode se perguntar: como sabemos que são buracos negros, e não uma coleção de muitas estrelas no centro das galáxias? A resposta tem a ver com a massa determinada pela observações, e com o tamanho da região ocupada por essa massa. No centro da Via Láctea, seriam necessárias 4 milhões de estrelas como o sol dentro de um raio igual ao do sistema solar (até a órbita de Plu-

tão) e esse sistema gravitacional de muitos corpos seria dinamicamente instável: as estrelas se dispersariam em alguns milhares de anos.

É claro que essa não é toda a história a respeito das observações astronômicas de buracos negros. O leitor interessado pode aprender mais a respeito de observações de buracos negros de massa estelar em [2] e sobre observações de buracos negros supermassivos em [3].

2.2 Descritos pela relatividade geral

Agora vamos deixar de lado as observações por um instante. Na seção anterior discutimos exemplos de observações que são interpretadas como buracos negros. Mas, afinal, o que são buracos negros? Aqui precisamos de algumas noções da teoria da relatividade geral de Einstein, mas é importante avisar que o estudo dessa teoria é razoavelmente complexo para alunos de graduação. Existem diversos livros-texto apropriados para nível de graduação e pós-graduação em física; para alunos do ensino médio, uma boa leitura é a referência [4].

Primeiramente, no âmbito da teoria da relatividade restrita, espaço e tempo se tornam um espaço-tempo 4-dimensional. Medidas de tempo e distância e a noção de simultaneidade passam a depender do observador, pois nada se propaga mais rápido do que a velocidade da luz no vácuo. É aqui que aparece a famosa equação $E = mc^2$.

Passando da relatividade restrita para a relatividade geral, incluímos a gravitação – que se torna equivalente à aceleração. A noção de força da gravidade é substituída por geodésicas no espaço-tempo curvo. A luz de estrelas distantes não se propaga mais em uma linha reta. Buracos negros se tornam possíveis, e trazem consigo muitos desafios conceituais.

O *horizonte de eventos* de um buraco negro é uma superfície matemática, uma esfera com raio dado por

$$R = \frac{2GM}{c^2}, \quad (1)$$

onde G é a constante da gravitação universal, c é a velocidade da luz e M é a massa do buraco negro, que resultou por exemplo do colapso gravitacional subsequente a uma explosão de supernova, como descrito na seção anterior.¹ Nós, do lado de fora,

¹Na discussão simplificada deste artigo, omitimos os efeitos do spin do buraco negro. Para aprender como são medidos os spins dos buracos negros, ver [5].

não temos acesso ao que se passa no interior do horizonte de eventos. Podemos cruzar o horizonte de eventos (uma vez só), mas se o fizermos não podemos mais voltar. Lá dentro, de acordo com a teoria, existe uma singularidade: um ponto de densidade infinita.

Definimos a *compactidade* (adimensional) como

$$C \equiv \frac{GM}{c^2 R}. \quad (2)$$

Portanto, temos $C = 1/2$ para um buraco negro. Nenhum corpo pode ser mais compacto do que um buraco negro; se tentar, ele se torna um buraco negro nesse processo. A luz é desviada fortemente pelo seu campo gravitacional (ou pela forte curvatura do espaço-tempo). O movimento de um sistema binário de buracos negros gera a propagação de oscilações na curvatura do espaço-tempo. Essas perturbações se propagam com a velocidade da luz e são detectáveis na Terra como ondas gravitacionais (ver mais na seção 2.4).

É difícil acreditar que todas essas características são necessariamente verdadeiras para os buracos negros *astrofísicos* (observados) descritos na seção anterior. As observações indicam objetos bastante compactos, com uma certa massa observada. Mas serão realmente os buracos negros descritos pela teoria? Uma certa dose de ceticismo é saudável em geral, e também para físicos e astrônomos em particular. Como podemos ter certeza da existência do espaço-tempo curvo, do horizonte de eventos, da singularidade e das ondas gravitacionais?

Uma possível resposta pode ser obtida matematicamente, com os chamados *modos quasinormais* do buraco negro [6]. Para defini-los, vamos inicialmente lembrar um pouco de física básica. O leitor, se for estudante de física (ou mesmo aluno do ensino médio), já estudou sistemas massa-mola. Uma massa m ligada a uma mola de constante k oscila com uma frequência $\sqrt{k/m}$ em torno da sua posição de equilíbrio, na situação idealizada em que não existe atrito ou outras formas de dissipação de energia. A função horária $x(t)$ que descreve a posição da massa em função do tempo é uma senoide com a frequência $\sqrt{k/m}$ (quanto maior a massa, menor a frequência e maior o período da oscilação). Se houver dissipação de energia, a função horária será uma senoide exponencialmente amortecida (no caso de amortecimento subcrítico).

O que isso tem a ver com buracos negros? É possível *perturbar* matematicamente o espaço-tempo que descreve um buraco negro. Uma pequena perturbação de um buraco negro causa uma onda gravitacional que se propaga pelo espaço-tempo e oscila ao redor do equilíbrio (como no sistema massa-mola). A onda perde energia que cai no horizonte de eventos do buraco negro ou é dissipada no infinito. Qualquer que seja a perturbação inicial, a oscilação pode ser descrita como uma soma de senóides exponencialmente amortecidas (chamadas modos quasinormais), sendo que cada uma é caracterizada por uma frequência ω e um tempo de decaimento τ :

$$\omega = \omega(M, a) \quad \tau = \tau(M, a), \quad (3)$$

cujos valores dependem somente da massa M do buraco negro e do seu spin J ($a \equiv cJ/cM^2$ é o parâmetro adimensional de spin e $|a| < 1$). Quanto maior a massa, menor a frequência e maior o tempo de decaimento. Cada buraco negro possui um conjunto discreto de pares de (ω, τ) , como as diferentes notas que podem ser tocadas em uma corda de violão. Os modos quasinormais são as frequências naturais do buraco negro (ou seja, a sua assinatura), como veremos nas próximas seções.

2.3 Simulados numericamente

A detecção das ondas gravitacionais mencionadas na seção anterior é uma das medidas mais desafiadoras que já foram realizadas. Isso porque a amplitude dessas ondas é muito, muito pequena. O tamanho característico esperado é $(\Delta h)/h \sim 10^{-21}$, que é ridiculamente pequeno. Por esse motivo, parte do trabalho de detecção é entender (muito bem) as fontes de ruído no detector. Não vamos discutir esse aspecto aqui, mas o leitor interessado pode aprender mais no artigo de O. Aguiar, que também integra esta Seção Temática.

Outra parte tão ou mais importante é a modelagem do sinal esperado. Como o sinal é muito pequeno, as chances de detecção aumentam se soubermos *com precisão* a forma da onda esperada. Mas como fazer isso?

As equações de Einstein que descrevem a relatividade geral são equações diferenciais acopladas de segunda ordem na métrica do espaço-tempo. Resolvendo essas equações para uma

fonte do campo gravitacional, obtemos a curvatura do espaço-tempo em todo ponto. É possível escrever essas equações no chamado formalismo 3+1, que separa o tempo das dimensões espaciais. Assim, podemos resolver um problema de valor inicial: dadas as condições no tempo inicial, a solução pode ser evoluída no tempo.

Nenhuma dessas etapas é muito fácil. Encontrar o formalismo apropriado foi difícil, e transformar pela primeira vez as equações em um programa de computador que rodava e convergia para a solução correta foi um avanço excepcional. Mas finalmente foi possível [7]: as chamadas simulações de relatividade numérica nos possibilitaram obter o sinal esperado.

O sinal é composto de três partes: *inspiral*, *merger* e *ringdown*,² como pode ser visto na Figura 1. Durante o *inspiral*, os dois buracos negros orbitam o centro de massa do sistema binário, chegando cada vez mais perto. O *merger* é a colisão dos dois buracos negros. O *ringdown* é a fase final, quando sobrou somente um buraco negro, resultante da colisão dos dois buracos negros iniciais do binário. Uma das características mais interessantes é o fato do *ringdown* apresentar os modos quasinormais descritos na seção anterior. Após o processo extremamente complexo do *merger* dos dois buracos negros, recuperamos os resultados do regime de pequenas perturbações. Portanto, o *ringdown* fornece um sinal que é característico do buraco negro gerado após a colisão dos dois buracos negros do sistema binário.

Ainda existem desafios. Um sistema binário de buracos negros com massas $m_1 = m_2$ é mais fácil de simular do que sistemas com $m_1 > 10 m_2$. Além disso, os buracos negros podem ter spin, cujas amplitudes e orientações adicionam 6 dimensões no espaço de parâmetros. Efeitos sutis na forma de onda podem ser mascarados por erros numéricos. E quem quiser estudar as consequências de teorias alternativas à relatividade geral precisa praticamente começar do zero, modificando o formalismo e os programas que já existem.

Finalmente, um parêntesis. Essas simulações também podem ser feitas para sistemas binários de estrelas de nêutrons, cujas ondas gravitacionais também são detectáveis na Terra, como pode ser lido no artigo de R. Sturani, também publi-

²Não existem boas traduções em português para *inspiral* e *ringdown*. *Merger* é fusão, ou neste contexto, colisão.

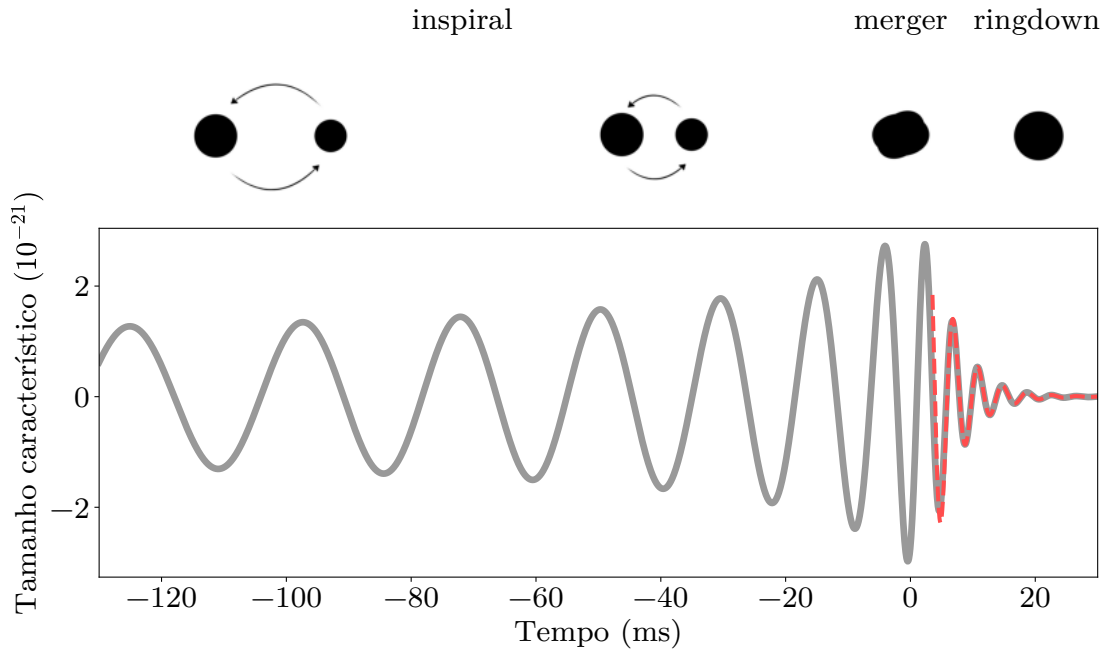


Figura 1: Representação dos três estágios da onda gravitacional emitida por um sistema binário de buracos negros: *inspiral*, *merger* e *ringdown*. A curva cinza indica a onda calculada em uma simulação de relatividade numérica compatível com a primeira detecção de ondas gravitacionais, GW150914 [1]. A linha vermelha tracejada mostra a senoide exponencialmente amortecida que descreve o modo quasinormal do buraco negro formado após o *merger*. Figura preparada por Iara Ota (UFABC).

cado nesta Seção Temática. Mas agora temos mais uma grande fonte de incerteza, na forma da equação de estado (pressão em função da densidade) que descreve a matéria nessas estrelas. No fim das contas, buracos negros estão longe de ser os objetos mais complexos do universo. Podemos até dizer que são os mais simples!

2.4 Observados em ondas gravitacionais

Já temos quase 50 detecções de eventos de coalescência de sistemas binários de buracos negros (e alguns eventos que envolveram estrelas de nêutrons) observados em ondas gravitacionais. É um sucesso fenomenal, não só pelo desafio técnico e científico que essas detecções representam, como também pela quantidade de novas informações que estamos conseguindo.

Primeiramente, um pouco do histórico. A primeira detecção de ondas gravitacionais de um sistema binário de buracos negros aconteceu em 14 de setembro de 2015, e foi realizada pela colaboração LIGO, nos Estados Unidos [1]. Em agosto de 2017, o detector Virgo entrou em funcionamento na Itália, e participou da primeira detecção tripla de um evento, GW170814 (a colaboração LIGO possui dois detectores). Esse já era

o quinto evento anunciado. Em 2019, o detector KAGRA entrou em funcionamento no Japão. (Outros detectores estão atualmente em construção/planejamento, ver seção 5.) Até o presente momento, temos 50 eventos detectados [8, 9]!

As tomadas de dados não acontecem o tempo todo, mas sim em campanhas de observação (chamadas O1, O2, O3, etc) intercaladas por intervalos para manutenção e desenvolvimento adicional dos detectores. Os resultados divulgados até agora pertencem às campanhas O1, O2 e O3a (primeira metade da O3). Ainda estamos esperando os resultados da O3b serem divulgados, e a O4 deve começar em junho do ano que vem. A pandemia de Covid19 impactou até mesmo as observações de ondas gravitacionais: a campanha O3b teve que terminar antes do esperado, e a O4 teve seu início adiado.

Os resultados das observações atestam o sucesso da teoria e das simulações. As ondas gravitacionais observadas correspondem perfeitamente ao esperado. Com um número cada vez maior de observações, acumulamos resultados e aprendemos mais sobre os buracos negros: quais as suas massas e spins? Onde eles se encontram, quão distantes estão de nós e como se distribuem no

universo?

As primeiras surpresas surgiram em relação às massas dos buracos negros observados em ondas gravitacionais. Antes do *merger* (colisão), eles possuem massas um pouco maiores (aproximadamente 5 – 85 massas solares) do que os buracos negros de massa estelar observados pelos astrônomos em raios X. (Ver na Figura 2 as massas observadas dos buracos negros *finais* gerados após o *merger* , que são obviamente maiores.) O que isso quer dizer? Seriam talvez buracos negros primordiais, formados no início do universo, antes das primeiras estrelas? Essa é uma possibilidade, mas não uma necessidade decorrente das observações. (O leitor pode ler mais a respeito no artigo de J. A. F. Pacheco, que também compõe esta Seção Temática.)

O colapso de estrelas massivas (de 20 – 30 a 100 – 300 massas solares) e com baixa metalicidade (fração de elementos mais pesados do que hidrogênio e hélio) pode dar origem a esses buracos negros mais pesados. Por que a baixa metalicidade é importante? Porque essas estrelas perdem menos massa por *vento estelar* (que pode fazer uma estrela perder até 90% da sua massa inicial!), tornando possível a formação de buracos negros mais pesados. Porém, por que buracos negros com essas massas não são vistos em observações de raios X? Ainda não sabemos com certeza, mas é possível que seja consequência de um efeito de seleção observacional: observamos apenas algumas dezenas de buracos negros em raios X, todos na nossa galáxia, que não tem metalicidade baixa (e possui aproximadamente 100 milhões de buracos negros). Como pode ser visto da Figura 2, os buracos negros observados em ondas gravitacionais até agora estão muito mais distantes, em outras galáxias.

Em alguns dos eventos com sinais mais fortes (com massas maiores ou mais próximos da Terra), foi possível até observar o *ringdown* e os modos quasinormais. Essa é a parte mais fraca do sinal, então é fácil de entender que precisamos de um sinal bem forte. Mas além disso, a massa é importante, porque a frequência dos modos quasinormais é inversamente proporcional à massa do buraco negro. O detector LIGO é mais sensível a frequências na faixa de aproximadamente 50 – 500 Hz (ver Figura 3), que equivale aproximadamente à frequência do modo quasinormal de um buraco negro com massa entre 20 e 200 massas

solares. Se o buraco negro tiver uma massa menor ou maior do que esses valores, não será possível detectar o seu *ringdown* , mesmo que o evento tenha acontecido “perto” (em escala astronômica) e o sinal seja muito forte.

3 Astrofísica e ondas gravitacionais

À medida que aprendemos cada vez mais sobre buracos negros a partir de suas ondas gravitacionais, aparecem novas perguntas. Por exemplo, existem massas “proibidas” para buracos negros? Essa é uma área de pesquisa muito ativa, e se divide em duas partes. A primeira é: qual é a massa mínima que um buraco negro pode ter? Provavelmente é a massa de um buraco negro formado pela colisão de duas estrelas de nêutrons, e seria aproximadamente 3 massas solares. Mas buracos negros um pouco mais leves ainda talvez possam ser formados por colapso estelar se a massa do remanescente do colapso for maior que a massa máxima de uma estrela de nêutrons (2 – 3 massas solares).

A segunda parte tem a ver com um modelo chamado *pair instability* supernova (“instabilidade de criação de pares”, ver por exemplo [11]). De acordo com a teoria, estrelas com massas no intervalo aproximado de 150 – 230 massas solares e baixa metalicidade, quando chegam no estágio de fusão de oxigênio, produzem fótons que são energéticos o suficiente para se combinar e produzir pares elétron-pósitron, criados com baixa energia. Esse processo contribui para diminuir a pressão de radiação que sustenta a estrela contra o colapso gravitacional, causando o colapso do núcleo da estrela e uma reação em cadeia que explode a estrela completamente. Não há formação de buraco negro. Estima-se, ainda com bastante incerteza, que buracos negros com massas entre 50 – 70 e 130 – 160 massas solares não podem ser formados por colapso estelar por causa desse mecanismo. Esse “intervalo proibido” de massas é chamado de *mass gap* .

Outra pergunta muito interessante é: como se formam os sistemas binários de buracos negros que nós observamos em ondas gravitacionais? Existem duas possibilidades mais ou menos gerais. De acordo com a primeira, os dois buracos negros nasceram já bem próximos: a partir de um sistema binário com duas estrelas massivas, onde ambas evoluíram e se tornaram buracos negros

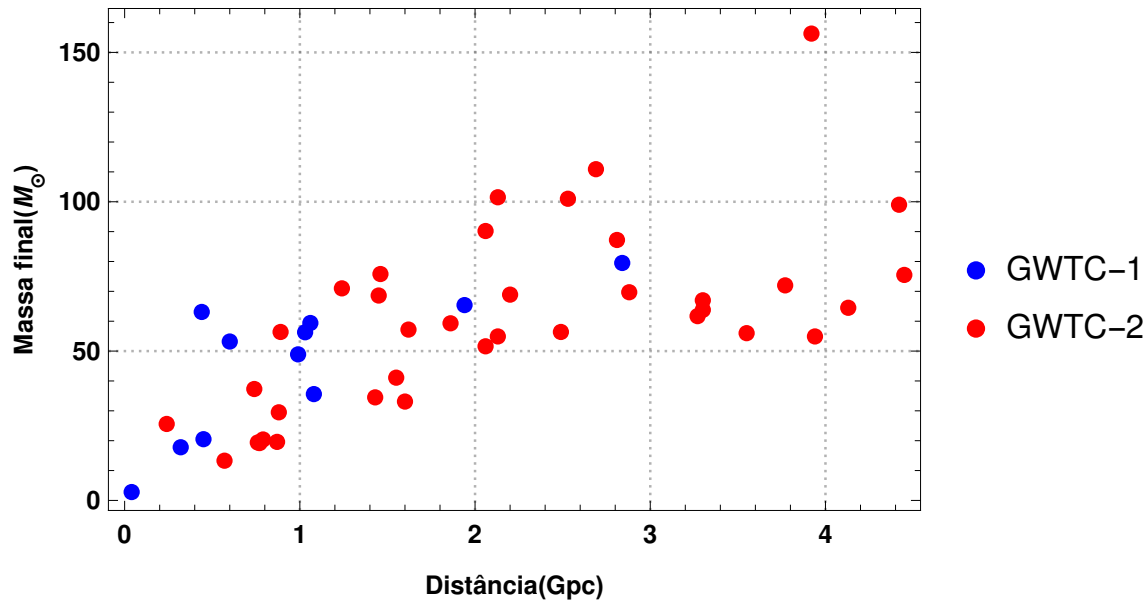


Figura 2: Buracos negros detectados em ondas gravitacionais pela colaboração LIGO/Virgo. Em vermelho, os dados das campanhas observacionais O1 e O2, disponíveis no catálogo GWTC-1 [8]; em azul, os dados da campanha observacional O3a, disponíveis no catálogo GWTC-2 [9]. As massas indicam a massa do buraco negro final gerado após o *merger* (colisão) do sistema binário de buracos negros. As distâncias são dadas em Gpc; para comparação, o raio da Via Láctea é aproximadamente 16 kpc e $1 \text{ pc} \approx 3.26$ anos luz. Figura preparada por Luís F. L. Micchi (UFABC).

(cenário de evolução do sistema binário). A segunda possibilidade é que os dois buracos negros nasceram “longe”: duas estrelas massivas isoladas evoluem separadamente e se tornam buracos negros isolados (porém com velocidade); por sorte, os dois buracos negros acabam se encontrando um dia e formam o sistema binário (cenário de formação dinâmica).

Tudo muito simples, não é mesmo? Que o leitor não se engane, sempre há complicações possíveis. (Uma discussão mais aprofundada pode ser lida em [12].) Por exemplo, no primeiro cenário (evolução do sistema binário), temos uma grande dificuldade: o sistema binário precisa sobreviver à explosão de duas supernovas para formar os dois buracos negros. Essas explosões podem romper o sistema binário, pois o buraco negro formado após a supernova é acelerado por causa da explosão e pode escapar da estrela companheira. No segundo cenário (formação dinâmica), é preciso que os buracos negros existam em ambientes com quantidade e densidade suficientes de buracos negros para que eles tenham chance de se encontrarem, como por exemplo em aglomerados globulares ou no centro de galáxias.

Uma vez que não conseguimos observar todo o processo acontecendo, como saber qual foi o canal de formação de um determinado evento? E como

descobrir qual a fração de eventos que ocorrem através de cada processo? Talvez as orientações dos spins dos buracos negros no sistema binário possam trazer informações. No cenário de evolução do sistema binário, espera-se que os buracos negros possuam spins alinhados, enquanto no cenário dinâmico as orientações dos spins podem ser arbitrárias.

Além disso, as perguntas acabam se confundindo. Se for observado, por exemplo, um buraco negro no *mass gap*, isso quer dizer que não entendemos a física da *pair instability* supernova, ou quer dizer que esse buraco negro foi formado anteriormente pela colisão de dois buracos negros menores?

4 Indo além da teoria

Além de aprender sobre as características, histórias e ambientes dos buracos negros, existe também interesse em testar se a natureza dos buracos negros observados corresponde àquela prevista pela teoria da relatividade geral de Einstein. Como ainda não existe uma teoria quântica da gravitação, sabemos que a teoria ainda não está completa, por mais bem sucedida que tenha sido até agora. Então talvez o objetivo não seja procurar saber se Einstein estava errado (da mesma

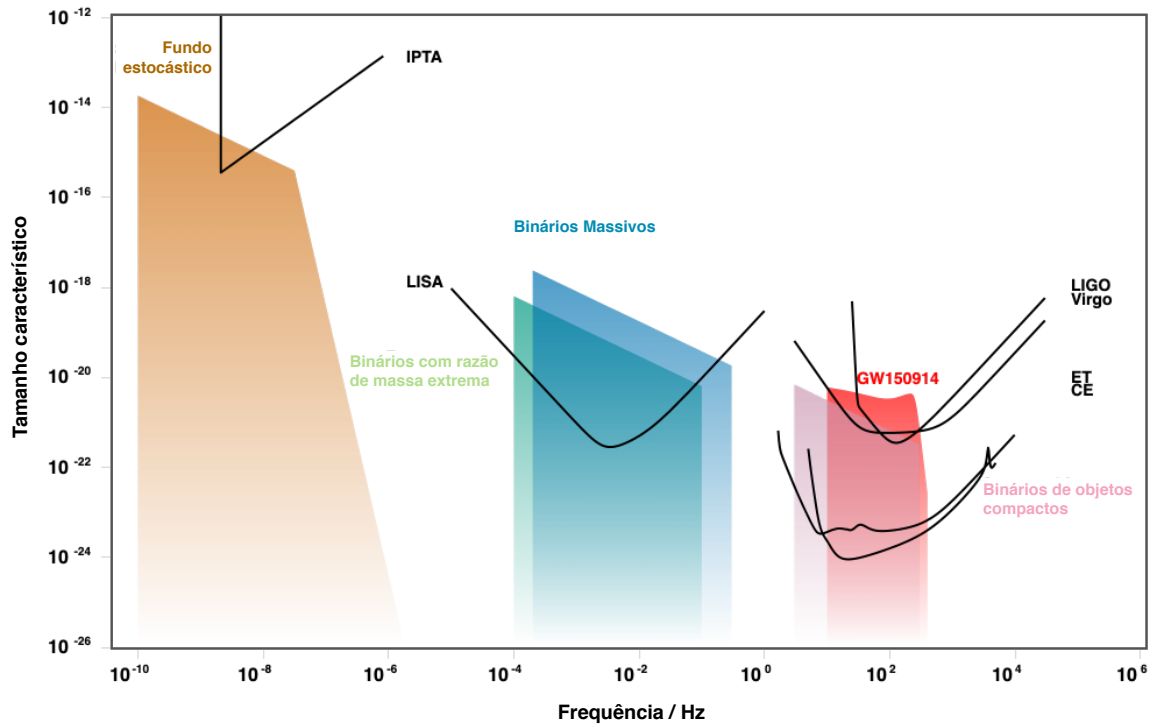


Figura 3: Curvas de sensibilidade de diferentes detectores de ondas gravitacionais atuais e futuros, incluindo estimativas para a amplitude dos sinais de diferentes fontes. Os sinais são detectáveis quando estão acima da curva do detector. Figura preparada usando o Gravitational Wave Sensitivity Curve Plotter criado por Christopher Moore, Robert Cole e Christopher Berry, disponível em <http://gwplotter.com> (ver também [10]).

maneira que Newton não estava errado), mas procurar o que há além da sua teoria.

Existem muito modelos teóricos que generalizam a relatividade geral, seja através da inclusão de novos campos ou novas forças, que atuam como pequenas correções da teoria original. As mudanças não podem ser muito grandes: as teorias alternativas têm que passar em todos os testes observacionais que já foram realizados nos mais de 100 anos da relatividade geral. Mas, se as alterações precisam ser muito pequenas, o leitor pode se perguntar: qual é o objetivo dessa busca? Por que não podemos nos contentar com a teoria que já existe?

A resposta para essa pergunta pode ser filosófica (busca do conhecimento), ou pragmática (os pesquisadores precisam de trabalho), ou intermediária entre esses dois extremos. O fato é que ainda há muito o que aprender sobre o universo. Pense em energia escura e matéria escura, que constituem quase 95% da matéria e energia do universo, e nós não sabemos do que são feitas! Ainda não sabemos em qual escala de energia as correções quânticas da gravitação serão relevantes, e quais possíveis aplicações poderão ser encontradas. Por outro lado, questões fundamen-

tais sobre o número de dimensões do universo e existência de universos paralelos são arrebatadoras.

Se pudermos mostrar que buracos negros reais são diferentes (mesmo que muito pouco!) daqueles previstos pela teoria, teremos as pistas iniciais para começar a desvendar os segredos mais profundos da natureza. Por enquanto, a forma mais promissora de fazer esse teste é usando ondas gravitacionais. Os modos quasinormais são uma assinatura dos buracos negros e da teoria da relatividade geral. Se a teoria for alterada, ou se substituirmos os buracos negros por outro objetos mais exóticos, as frequências e tempos de decaimento dos modos quasinormais mudam. Parece fácil! Mas essas medidas são difíceis de realizar com precisão, e outros efeitos podem aparecer quando temos objetos exóticos disfarçados de buracos negros, como pode ser lido no artigo de V. Cardoso, que também compõe esta Seção Temática.

5 Futuro

No futuro próximo, esperamos cada vez mais detecções de ondas gravitacionais. Se as observações de N eventos são analisadas juntas, como se fossem N medidas de uma mesma grandeza, esperamos que o erro estatístico na medida deve diminuir como $1/\sqrt{N}$. Portanto, poderemos testar cada vez melhor a natureza dos buracos negros e a teoria da relatividade geral, além dos modelos astrofísicos de supernovas e de formação de sistemas binários.

Nos próximos anos, os detectores também se tornarão mais precisos, e novos detectores serão construídos e postos em funcionamento (ver Figura 3). Na próxima década, teremos detectores na Terra que serão 10 vezes mais precisos que os detectores atuais; são os chamados detectores de terceira geração, como o *Einstein Telescope* (ET) e os *Cosmic Explorer* (CE), ver, por exemplo, [13]. Além disso, teremos um detector espacial (LISA - *Laser Interferometer Space Antenna*, [14]) que vai trabalhar em frequências mais baixas e detectar ondas gravitacionais da colisão entre buracos negros supermassivos no centro de galáxias distantes.

O fundo estocástico de ondas gravitacionais geradas por essas colisões de buracos negros supermassivos está sendo estudado através de observações de pulsares, por colaborações como NANOGrav e EPTA. Procurando por pequenas variações no tempo de chegada dos pulsos será possível verificar a passagem de uma onda gravitacional de baixíssima frequência, cujos indícios já começam a aparecer nos dados [15].

O leitor pode estar certo de que continuaremos a ter muitas novidades sobre ondas gravitacionais no futuro!

Agradecimentos

A autora agradece a Riccardo Sturani pelo convite para escrever este artigo; Júnior Toniato e Júlio Fabris por informações adicionais; Iara Ota e Luís F. L. Micchi pela elaboração das figuras 1 e 2, respectivamente; finalmente, Cole Miller e Cintia Chirenti por comentários e sugestões no texto.

Sobre a autora

C. Chirenti (cecilia.chirenti@ufabc.edu.br) é

especialista em buracos negros, estrelas de nêutrons e ondas gravitacionais. Além disso, também trabalha às vezes com modelos mais exóticos, como gravastares. É professora associada do Centro de Matemática, Computação e Cognição da Universidade Federal do ABC (UFABC), onde trabalha desde 2009. Desde 2020 é pesquisadora visitante do Departamento de Astronomia da Universidade de Maryland nos EUA e trabalha no Laboratório de Astropartículas do Goddard Space Flight Center da NASA. Atualmente orienta dois alunos de doutorado e um aluno de iniciação científica na UFABC, e co-orienta uma aluna de doutorado na Universidade de La Plata, Argentina.

Referências

- [1] B. P. Abbott et al., *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, *Phys. Rev. Lett.* **116**(6), 061102 (2016). [ArXiv:1602.03837](https://arxiv.org/abs/1602.03837).
- [2] R. A. Remillard e J. E. McClintock, *X-Ray Properties of Black-Hole Binaries*, *ARA&A* **44**(1), 49 (2006). [ArXiv:astro-ph/0606352](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0606352).
- [3] M. J. Rees, *Black Hole Models for Active Galactic Nuclei*, *ARA&A* **22**, 471 (1984).
- [4] B. Schutz, *Gravity from the ground up* (Cambridge University Press, Nova York, 2003).
- [5] C. S. Reynolds, *Observing black holes spin*, *Nature Astronomy* **3**, 41 (2019). [ArXiv:1903.11704](https://arxiv.org/abs/1903.11704).
- [6] C. Chirenti, *Black Hole Quasinormal Modes in the Era of LIGO* (2018). [ArXiv:1708.04476](https://arxiv.org/abs/1708.04476).
- [7] F. Pretorius, *Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes*, *Phys. Rev. Lett.* **95**(12), 121101 (2005). [ArXiv:gr-qc/0507014](https://arxiv.org/abs/gr-qc/0507014).
- [8] B. P. Abbott et al., *GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs*, *Physical Review X* **9**(3), 031040 (2019). [ArXiv:1811.12907](https://arxiv.org/abs/1811.12907).

- [9] R. Abbott, T. Abbott et al., *Gwtc-2: Compact binary coalescences observed by ligo and virgo during the first half of the third observing run*, *Physical Review X* **11**(2) (2021).
- [10] C. J. Moore, R. H. Cole e C. P. L. Berry, *Gravitational-wave sensitivity curves*, *Classical and Quantum Gravity* **32**(1), 015014 (2015). [ArXiv:1408.0740](#).
- [11] A. Heger e S. E. Woosley, *The Nucleosynthetic Signature of Population III*, *ApJ* **567**(1), 532 (2002). [ArXiv:astro-ph/0107037](#).
- [12] M. C. Miller, *Implications of the gravitational wave event GW150914*, *General Relativity and Gravitation* **48**(7), 95 (2016). [ArXiv:1606.06526](#).
- [13] M. Punturo et al., *The Einstein Telescope: a third-generation gravitational wave observatory*, *Classical and Quantum Gravity* **27**(19), 194002 (2010).
- [14] P. Amaro-Seoane et al., *Laser Interferometer Space Antenna*, arXiv:1702.00786 (2017). [ArXiv:1702.00786](#).
- [15] Z. Arzoumanian et al., *The NANOGrav 12.5 yr Data Set: Search for an Isotropic Stochastic Gravitational-wave Background*, *ApJ* **905**(2), L34 (2020). [ArXiv:2009.04496](#).