

# Ondas gravitacionais para além da Relatividade Geral

Jorge V. Rocha

Departamento de Matemática, ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa  
Centro de Astrofísica e Gravitação CENTRA-IST, Universidade de Lisboa  
IT-IUL, Instituto de Telecomunicações, Lisboa

jorge.miguel.rocha@iscte-iul.pt

*Este artigo aborda a importância das ondas gravitacionais enquanto ferramentas para testar possíveis extensões da teoria da Relatividade Geral [1-11]. No contexto atual da física teórica e experimental, o interesse por teorias modificadas de gravitação é cada vez maior, procurando superar as limitações da Relatividade Geral em diferentes regimes físicos. Essas teorias alternativas têm como objetivo explicar fenómenos ainda não totalmente compreendidos, como a expansão acelerada do universo, o comportamento anómalo da rotação de galáxias e a reconciliação da gravidade com a mecânica quântica numa teoria unificada. Em muitos casos, elas propõem que a gravidade possa comportar-se de maneira diferente daquela prevista por Einstein quando se consideram grandes escalas, energias elevadas ou campos extremamente intensos — exatamente os cenários acessíveis pela astronomia de ondas gravitacionais.*

## 1 – Introdução

Após 110 anos desde a sua formulação por Albert Einstein, a Relatividade Geral (RG) perdura, sendo ainda hoje a teoria de que dispomos que melhor descreve a gravitação. E isto não se deve à falta de escrutínio. Longe disso! Ela foi posta à prova pelo próprio Einstein logo na terceira das quatro apresentações em que anunciou a teoria à Academia de Ciências da Prússia, durante o mês de Novembro de 1915. Nessa aula ele verificou que a RG prevê um avanço do periélio de Mercúrio em total concordância com medições astronómicas já conhecidas naquela altura, mas que até então eram consideradas “anómalas”.

Desde esse longínquo ano, a RG foi amplamente testada por observações no Sistema Solar, em pulsares binários ou em estudos cosmológicos (ver, por exemplo, [4, 6, 9]). E até agora tem passado (quase) todos os testes com distinção. Então porque se buscam alternativas à teoria de Einstein?

## 2 – Uma alternativa à Relatividade Geral impõe-se

Muitos dos testes mencionados anteriormente têm uma característica comum: eles exploram principalmente o

regime de campo fraco, quase estacionário e quase linear. Por outras palavras, investigam situações em que o campo gravitacional é débil em comparação com a massa-energia do sistema, as velocidades dos corpos são baixas em relação à velocidade da luz, e o campo gravitacional é aproximadamente constante no tempo em comparação com a escala temporal característica do sistema. Temos, de facto, evidência para acreditar que a RG é igualmente válida noutros regimes?

Com efeito, existem alguns problemas relacionadas com a gravitação que permanecem por resolver. Discuto abaixo as questões mais prementes, por ordem cronológica.

O primeiro sinal de alarme foi a observação da rotação anómala de galáxias. Numa galáxia típica a velocidade de rotação das suas estrelas aumenta, de forma monótona, com a distância da estrela ao centro da galáxia, aproximando-se duma constante a grandes distâncias. Esta dependência da velocidade das estrelas em função da distância ao centro da galáxia é conhecida como uma ‘curva de rotação’. No entanto, existe uma discrepância entre as curvas de rotação observadas em galáxias e as que são previstas pela RG —na verdade, o seu limite Newtoniano é o regime relevante para estas observações. Mais precisamente, as leis de Kepler implicam que a velocidade de rotação diminua com a distância da estrela ao centro da galáxia. Esta discrepância terá sido notada em casos pontuais por Fritz Zwicky em 1933, e posteriormente foi firmemente estabelecida por Vera Rubin e colaboradores no final da década de 1970. A ideia de que haveria matéria invisível através de observações eletromagnéticas — daí o nome ‘matéria escura’ — que permeia as galáxias e os seus arredores foi introduzida por Zwicky como forma de explicar essa discrepância sem alterar a RG. Presume-se que a matéria escura deva ser atribuída à existência de partículas hipotéticas que não fazem parte do modelo padrão da física de partículas, e que interagem fracamente por intermédio de forças que não a da gravidade. Contudo, até hoje não foi possível detetar essa tal partícula, apesar de intensas buscas desde a década de 1980.

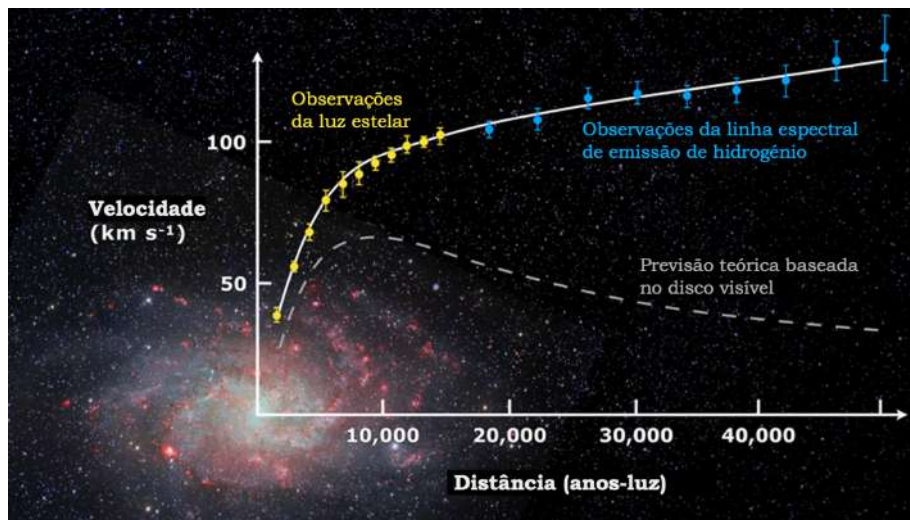


Figura 1: Curva de rotação da galáxia M33, mostrando a velocidade de estrelas em função da sua distância ao centro da galáxia, e ilustrando a discrepância entre observações e teoria. Adaptado de figura criada por Mario de Leo [11], baseado em [3].

O segundo grande desafio apontado à RG trata-se do problema de ajuste fino (*fine-tuning*) da constante cosmológica, introduzida na RG de uma forma genérica pelo próprio Einstein em 1917. O modelo padrão da cosmologia, o denominado modelo  $\Lambda$ CDM (ver artigo de Pedro G. Ferreira nesta edição) inclui um parâmetro, a constante cosmológica  $\Lambda$ , que é responsável pela ‘recente’ expansão acelerada do universo. Isso foi comprovado através da observação de certas supernovas em 1998 por equipas lideradas por Saul Perlmutter, Adam Riess e Brian Schmidt, o que lhes valeu o prémio Nobel da Física em 2011. Mas o valor que este parâmetro toma é dezenas de ordens de grandeza inferior ao que se esperaria se a constante cosmológica fosse gerada por flutuações quânticas do vácuo. Na verdade, a diferença entre esta previsão teórica e as observações astronómicas é tão absurdamente grande que nem foi preciso conhecer o valor preciso da constante cosmológica: esta discrepância tinha já sido notada em 1967 pelo físico soviético Yakov Zel’dovich.

O terceiro grande problema prende-se com a dificuldade em unificar, numa só teoria coerente, a gravitação e as leis da mecânica quântica. O programa habitual de quantização que se implementa com outros campos (por exemplo, o campo eletromagnético) simplesmente falha com a RG. Numa teoria quântica do campo podem-se criar momentaneamente partículas virtuais que contribuem em processos de espalhamento. Apesar de serem virtuais, estas partículas carregam energia e momento que podem tomar valores arbitrários. Para obter respostas para observáveis temos de somar sobre todas as energias e momentos virtuais possíveis, o que frequentemente origina respostas infinitas. Isto seria preocupante para qualquer teoria que se deseja preditiva, mas nos casos de sucesso — como, por exemplo, a versão quantizada do eletromagnetismo que dá origem à famosa Eletrodinâmica Quântica — estas divergências podem ser completamente removidas ao serem absorvidas num número *finito*

de redefinições de quantidades intervenientes na versão clássica da teoria. A este procedimento dá-se o nome de ‘renormalização’. Contudo, Gerard t’ Hooft e Martinus Veltman provaram, em 1974, que a RG não é renormalizável: seria preciso um número infinito de redefinições para eliminar todas as divergências.

Naturalmente, uma só modificação da RG que resolva todos estes problemas dum só assentada e que esteja em acordo com todas as observações experimentais é a meta ideal.

Apesar dos aspetos desafiantes enumerados acima, a RG é uma teoria altamente bem-sucedida no confronto com observações no regime de campo fraco, quase estacionário e quase linear, como anteriormente mencionado. A haver modificações da RG elas devem, portanto, revelar-se significativamente apenas em contextos complementares — o chamado regime de gravidade extrema. De facto, diversas classes inteiras de teorias modificadas da gravidade foram efetivamente descartadas (ou, no mínimo, severamente restringidas) apenas por observações do Sistema Solar [9]. Até recentemente, o regime de gravidade extrema era dificilmente acessível com as observações astronómicas de que dispúnhamos. Mas isso mudou no dia 14 de Setembro de 2015, o dia em que uma experiência humana detetou pela primeira vez uma onda gravitacional (ver artigo de Carlos Herdeiro nesta edição).

Com a capacidade de detetar ondas gravitacionais (OG) abriu-se a possibilidade de explorar o regime de gravidade extrema, no qual o espaço-tempo é altamente dinâmico, a gravidade é intensa e os corpos celestes apresentam velocidades significativas em comparação com a velocidade da luz. Para além disso, OGs têm a vantagem de se propagarem praticamente sem impedimentos desde as suas fontes até à Terra, o que evita problemas de obscurecimento por matéria interveniente. Outro aspeto fundamental é que as OGs existem independentemente

da presença de matéria luminosa, possibilitando a observação de objetos que não emitem radiação eletromagnética própria, como, por exemplo, sistemas binários de buracos negros em processo de fusão.

### 3 – Uma panóplia de modificações da gravidade

Tentativas de modificações da teoria da Relatividade Geral têm uma longa história, desde a sua alvorada até mesmo aos dias de hoje.

Uma das primeiras extensões da teoria de Einstein deveu-se ao matemático Élie Cartan, a partir de 1922, observando que o espaço-tempo pode suportar uma maior estrutura geométrica do que aquela que a RG postula, incluindo aquilo a que se chama ‘torção’ atualmente. Este formalismo revelou-se ser o ponto de partida ideal para a gravitação quântica em laços (*loop quantum gravity*), desenvolvida 60 anos mais tarde. Ainda em meados da década de 1920, Theodor Kaluza, primeiro, e Oskar Klein, depois, exploraram a ideia de que o espaço-tempo pode ter mais do que três dimensões espaciais, e que isso pode ser usado para unificar a gravitação com o eletromagnetismo. Estes trabalhos anteciparam desenvolvimentos posteriores em teoria de cordas.

A diversidade de alternativas à RG propostas ao longo dos anos é vasta, e é conveniente categorizá-las para nos guiar neste labirinto.

Uma classe natural de teorias alternativas à RG contempla a possibilidade de o gravitão, a partícula que medeia a força da gravidade, ter massa não-nula. Estas teorias são conhecidas na sua generalidade como gravidades massivas. A ideia foi primeiramente introduzida por Markus Fierz e Wolfgang Pauli em 1939, numa teoria linearizada em torno dum espaço-tempo plano (ou seja, de Minkowski). Em 1972, David Boulware e Stanley Deser apontaram um sério obstáculo à realização não-linear destas modificações: parecia que em geral elas induziam necessariamente as chamadas instabilidades fantasma (*ghost instabilities*) do vácuo. No entanto, desenvolvimentos mais recentes, em particular a partir de 2010, mostraram que é possível esconder todas as contribuições fantasmagóricas em termos que não afetam as equações de movimento, e assim obter uma teoria saudável em que o gravitão possui massa [5]. Uma das consequências desta hipótese é a modificação do potencial gravitacional estático: em vez da lei Coulombiana, o potencial adquire a forma de Yukawa, com uma supressão exponencial a grandes distâncias comparadas com a do comprimento de onda definido pelo inverso da massa do gravitão. Tal modificação pode potencialmente resolver o problema da matéria escura, e também influencia a questão da expansão acelerada do universo. Outra consequência importante da atribuição de uma massa finita ao gravitão está diretamente relacionada com ondas gravitacionais, e será discutida mais adiante.

Outra grande categoria de teorias modificadas da RG envolve a adição de termos de ordem superior na curvatura,

que contribuem para as equações de movimento. Convém lembrar que as equações de Einstein expressam a igualdade entre o tensor de Ricci — que mede a curvatura do espaço-tempo — e o conteúdo material encapsulado no tensor de energia-momento (ver artigo de José P. S. Lemos nesta edição). O tensor de curvatura de Ricci obtém-se a partir da métrica do espaço-tempo num processo que envolve o cálculo de duas derivadas. Portanto, as equações de movimento da RG são equações diferenciais de segunda ordem. As equações que governam as modificações da gravidade que estamos agora a discutir incluem derivadas de ordem maior que dois. É mesmo possível considerar termos de ordem infinita nas derivadas, o que constitui um exemplo duma teoria não-local de gravitação. A maior motivação para considerar tais teorias prende-se com o seu potencial para resolver o terceiro dos problemas que identifiquei acima, já que, em 1977, Kellogg Stelle mostrou que algumas extensões da RG com termos de curvatura superior tornam a teoria renormalizável.

Outra das ideias mais frequentemente exploradas é a participação de partículas adicionais na mediação da força da gravidade (ver artigo de Richard Brito nesta edição). Historicamente, os primeiros campos suplementares considerados, associados a estas partículas hipotéticas, foram campos escalares. Uma vez que o gravitão está associado com um campo tensorial (a métrica), estas teorias são denominadas teorias *scalar-tensor*. Uma das primeiras teorias deste tipo foi proposta e estudada por Carl Brans e Robert Dicke em 1961. Curiosamente esta teoria pode também ser vista como uma modificação da RG em que a constante universal de Newton é promovida a uma variável, que é precisamente o campo escalar introduzido. Mas porquê ficarmo-nos pela adição de campos escalares? A inclusão de campos vetoriais ou mesmo outros campos tensoriais (como, por exemplo, a métrica auxiliar em *bimetric gravity* proposta por Nathan Rosen em 1975) abre ainda mais possibilidades. Em alguns destes contextos, os novos campos introduzidos quebram a simetria de Lorentz, com as consequências que daí advêm. É o caso da teoria de Einstein-Æther, proposta por Clifford Will e Kenneth Nordtvedt no início da década de 1970, que postula um campo vetorial que define uma direção preferencial em cada ponto do espaço-tempo.

Não é minha intenção fazer uma listagem exaustiva da panóplia de alternativas à RG que têm sido propostas ao longo de mais de um século. Mas isto serve para mostrar que a variedade de teorias de gravidade modificada é angustiantemente vasta. De facto, é infinita. E isso coloca imediatamente uma questão prática: como se pode averiguar uma infinidade de teorias em tempo útil, como seja, por exemplo, a duração finita duma vida humana?

A situação não é tão desesperante como o parágrafo anterior possa ter feito parecer. E numa secção posterior usarei um contra-argumento para pintar um quadro mais esperançoso. Mas, de qualquer maneira, é preci-

so ter uma estratégia. E temos duas opções óbvias: (1) podemos escolher teorias, uma a uma, e testar as suas previsões, o que requer sorte para encontrarmos a agulha certa num palheiro que parece ser infinito — embora tentativas e erros sirvam de guias para escolhas subsequentes. Alternativamente, (2) podemos parametrizar as teorias modificadas de acordo com os efeitos que preveem em relação a um número finito de observáveis. Este segundo método, mais sistemático, dá pelo nome de abordagem pós-einsteiniana parametrizada (*parametrized post-Einsteinian*). Ao acumular observações esperamos impor restrições nos valores que parametrizam as teorias modificadas da gravidade, desse modo excluindo várias delas —por vezes categorias inteiras— e reduzindo o espaço de teorias viáveis.

#### 4 – Fenómenos ondulatórios em Relatividade Geral, e não só

Como o nome indica, ondas gravitacionais são oscilações que se propagam no campo gravítico. Desde a formulação de Albert Einstein da teoria da RG que entendemos a gravidade como uma manifestação do campo gravítico, tal como o eletromagnetismo é um fenómeno atribuído à existência do campo eletromagnético. Aquilo que conhecemos como luz nada mais é que uma onda eletromagnética. Outros exemplos de ondas que temos bem presentes no nosso quotidiano são as ondas de superfície (como as que ocorrem na interface entre a água do mar e o ar), o som (ondas de pressão) e as ondas sísmicas. O que todas as ondas têm em comum é que transportam energia, portanto se uma onda é gerada num local e detetada a uma certa distância, sabemos que houve energia propagada entre esses dois locais.

Matematicamente, uma onda é descrita por uma função: a oscilação de alguma grandeza ou a deslocação de um ponto à medida que o tempo passa. Em mecânica clássica, tanto as grandezas relevantes como variações no espaço e no tempo são variáveis contínuas. Portanto, uma onda é representada por uma função contínua de variáveis contínuas e contém, a priori, uma infinidade de informação. Estabelecendo contacto com a discussão da secção anterior, temos então ao menos uma hipótese plausível de conseguir destrinçar a infinidade de teorias modificadas da gravidade através da observação de ondas gravitacionais. Por outras palavras, embora estejamos à procura duma agulha num palheiro infinito, fazemo-lo com uma infinidade de olhos. (Na prática, a resolução finita dos nossos detetores não nos permite extrair uma quantidade infinita a partir duma única observação duma onda gravitacional, infelizmente.)

De uma forma geral, podemos caracterizar ondas de acordo com um punhado de propriedades que lhes estão associadas: comprimento de onda, frequência, velocidade de propagação, amplitude e polarização. Naturalmente, diferentes tipos de ondas poderão ter propriedades distintas, mas devemos ter em mente que o comprimento de onda, a frequência e a amplitude inicial duma onda

são inteiramente ditadas pelo mecanismo que a gera. Por exemplo, um LED azul tem essa cor porque o material semiconductor de que é feito apresenta um intervalo entre as bandas de energia que os eletrões podem ocupar, e quando passa uma corrente elétrica os eletrões saltam entre bandas, libertando fótons com uma frequência correspondente de cerca de 600 terahertz, e um comprimento de onda de aproximadamente 500 nanómetros. Por sua vez, os comprimentos de onda típicos de OGs geradas por um binário de buracos negros —os sistemas responsáveis pela maior parte dos sinais de OGs detetados atualmente— variam entre os mil e um milhão de quilómetros. (Tal como ondas eletromagnéticas, OGs também sofrem desvios para o vermelho como consequência da velocidade relativa entre a fonte e o observador ou da expansão do universo.) Já a amplitude inicial de um tsunami é principalmente determinada pela perturbação original (um sismo, por exemplo) que o criou.

As outras características das ondas, nomeadamente a velocidade de propagação, a atenuação da amplitude e a sua polarização são em grande medida independentes dos mecanismos de geração: são propriedades da própria teoria ou então do meio em que se propagam. Dado que a gravidade é, em comparação com as restantes forças conhecidas, extremamente fraca, OGs propagam-se essencialmente sem atenuação (pelo menos na RG). Isto traz obviamente diversas vantagens: permite-nos, por exemplo, obter informação sobre eventos que ocorreram a distâncias cosmológicas, sem precisarmos de lidar com incertezas associadas a processos astrofísicos complexos (e por vezes incertos). Por outro lado, se OGs não dependem do meio em que se propagam, então as características listadas no início do parágrafo são propriedades da teoria que as suporta. Concluímos que OGs são ideais para testar teorias da gravidade modificada.

Vale a pena comparar as propriedades das ondas eletromagnéticas com as das OGs. No contexto do eletromagnetismo, as equações de Maxwell que o governa são quatro relações diferenciais, *lineares*, entre as várias componentes do campo eletromagnético. Em conjunto, elas implicam que o campo eletromagnético no vácuo obedece a uma equação de onda muito simples. A velocidade de propagação dessas ondas é, nada mais, nada menos, que a velocidade da luz (por definição, pois a luz é a excitação do campo eletromagnético). No vácuo essas ondas não sofrem atenuação, mas noutros meios existe atenuação devido a espalhamento ou absorção pelo material atravessado, causando uma redução da amplitude da onda à medida que esta se propaga. (Independentemente disso, uma onda que se propaga radialmente —ou seja, igualmente em todas as direções a partir do ponto onde foi originada— verá a sua amplitude diluída inversamente proporcional ao quadrado da distância ao ponto de geração.)

Por seu turno, as equações de Einstein, que governam o campo gravitacional, são equações diferenciais não-lineares

res. Num sentido muito prático e operacional, a teoria é mais complicada que a de Maxwell. Mas quando o campo é fraco, ou seja, quando o espaço-tempo é aproximadamente plano, apenas com pequenas variações de curvatura, as equações tornam-se aproximadamente lineares e de modo semelhante originam uma equação de onda. Curiosamente, a velocidade de propagação destas ondas é igualmente a velocidade da luz (ver artigo de José P. S. Lemos nesta edição ou [7] para mais detalhes). Como mencionado acima, OGs na teoria de Einstein propagam-se essencialmente sem atenuação a través do cosmos. Absorção da onda ocorrerá certamente se esta encontrar um buraco negro no seu trajeto, mas as probabilidades de isto ocorrer na vastidão do cosmos são ínfimas.

Falta discutir a questão da polarização, ou seja, as direções das oscilações causadas pela onda em relação à sua direção de propagação. Como é bem conhecido, ondas sísmicas (na terra sólida) podem ser longitudinais ou transversais. O som é puramente longitudinal, pois ondas transversais requeririam forças de restituição que estão ausentes no ar. O mesmo se passa com qualquer fluido, mas não com uma corda de guitarra, por exemplo. Ondas eletromagnéticas são puramente transversais, sendo isso consequência direta das equações de Maxwell. Ondas gravitacionais em teorias generalizadas da gravidade não têm obrigatoriamente de ser transversais, mas em Relatividade Geral também o são.

## 5 – Breve biografia duma onda gravitacional

De uma forma esquemática, a vida duma onda gravitacional pode ser dividida em três estágios: o seu nascimento dá-se por via da dinâmica violenta de alguma matéria compacta, que assim gera a onda; a duração da sua vida corresponde à propagação da OG através do cosmos; e, para efeitos experimentais, ela finalmente morre quando o seu sinal é registado no detetor. (As OGs têm ainda uma vida além da morte, propagando-se para lá do detetor por toda a eternidade, e atenuando-se cada vez mais, mas do nosso ponto de vista antropocêntrico, isso não é relevante nem observável.)

Como veremos na secção seguinte, os efeitos duma modificação da RG em ondas gravitacionais podem ser atribuídos principalmente a diferenças na propagação ou ao processo de geração da onda, mas não à deteção. Apesar disso, este último estágio é crucial, já que dificilmente obteríamos qualquer informação sobre OGs sem ele.

## 6 – Ondas gravitacionais em teorias de gravitação modificadas

Ondas gravitacionais não são um fenómeno exclusivo da Relatividade Geral. Com efeito, devem fazer parte do pecúlio de qualquer teoria relativista (e respeitável) da gravidade, na medida em que as suas previsões não devem divergir grandemente das da teoria de Einstein em tópicos nos quais a RG já demonstrou enorme sucesso observacional.

Até aqui considerámos apenas ondas gravitacionais em Relatividade Geral. O que muda quando substituímos a teoria de Einstein por uma teoria de gravitação modificada?

Podem ocorrer principalmente três tipos de alterações relacionadas com o estágio de propagação da OG:

### 6.1 - Modificação da velocidade de propagação

Como vimos antes, em RG a velocidade de propagação duma OG é exatamente igual à velocidade da luz. No entanto, em certas teorias de gravidade modificada, como por exemplo Einstein-Æther e algumas teorias *scalar-tensor*, ondas gravitacionais propagam-se a velocidades que podem ser distintas da da luz. No entanto, a velocidade de propagação das OGs é igual à velocidade da luz na teoria de Brans-Dicke, um representante particular das teorias “scalar-tensor” mencionado na secção 3. O único evento multi-mensageiro reportado até à data e envolvendo uma OG — a deteção GW170817 juntamente com a sua correspondente eletromagnética GRB 170817A — determinou que a velocidade de propagação da OG difere da velocidade da luz em menos de uma parte em  $10^{15}$  [8, 10]. Isso permitiu excluir grandes regiões do espaço de parâmetros das famílias de teorias mencionadas acima.

### 6.2 - Modificação da relação de dispersão

A relação de dispersão duma onda relaciona a velocidade de propagação,  $v$ , com a massa do campo ou partícula que lhe está associada. Para uma onda que se propaga à velocidade da luz,  $c$ , a relação de dispersão é muito simples e não depende da massa:  $v = c$ . Contudo, se o gravitão possuir uma massa,  $m_g$ , de uma forma geral a relação de dispersão é modificada de acordo com  $\frac{v^2}{c^2} = 1 - \left(\frac{m_g c^2}{\hbar \omega}\right)^2$ , onde  $\omega$  é a frequência da onda. O constrangimento obtido para a velocidade de propagação de OGs discutido na secção 6.1 pode naturalmente ser usado para impor um limite superior à massa do gravitão, mas não é difícil de entender que o constrangimento será tanto melhor quanto maior for a distância percorrida pela OG desde a sua origem até aos nossos detetores. Acontece que várias outras deteções de OGs correspondem a eventos com geração mais longínqua do que GW170817, portanto elas permitem obter constrangimentos mais fortes à massa do gravitão, mesmo não tendo o sinal eletromagnético correspondente. A ideia é a seguinte [8, 9]. Numa decomposição de Fourier do sinal detetado, componentes de frequência  $\omega$  mais alta propagam-se com velocidades  $v$  ligeiramente mais rápidas. Isto causa um pequeno desvio de fase na forma de onda, que será tanto maior quanto maior for a distância de propagação. Em 2017, o evento GW170104, correspondendo à fonte mais longínqua de OGs detetadas até então, a cerca de 880 megaparsecs, permitiu estabelecer um limite superior para a massa do gravitão da ordem dos  $7,7 \times 10^{-23}$  eV/ $c^2$ . Desde aquele ano, o catálogo de deteções de OGs cresceu enormemente e este valor foi mais recentemente atualizado para  $1,27 \times 10^{-23}$  eV/ $c^2$  [1]. Isto é uma restrição que se aplica a todas as teorias de gravidade massiva.

Em comparação, o limite superior mais recente obtido para a massa dos neutrinos, as partículas massivas mais leves do modelo padrão da física de partículas, é aproximadamente igual a  $0,1 \text{ eV}/c^2$ .

### 6.3 - Inclusão de polarizações adicionais

Muitas das modificações da gravidade induzem polarizações adicionais em ondas gravitacionais. Na verdade, para teorias baseadas numa métrica do espaço-tempo com 4 dimensões, podem existir até a um máximo de 6 polarizações diferentes, três delas transversais e outras três longitudinais [5, 8, 9]. Por exemplo, em gravidade massiva OGs têm, para além das duas polarizações transversais habituais da RG, mais três modos de polarização, perfazendo um total de cinco polarizações diferentes. Teorias que introduzem outros campos, tanto escalares como vetoriais, além do tensor da métrica também produzem tipicamente mais polarizações. É o caso da teoria de Brans-Dicke de que já falámos, que possui apenas um modo de polarização extra, também ele transversal, mas diferente dos outros modos tensoriais da RG, causando oscilações (idênticas em todas as direções transversais à propagação) que alternam entre expansão e contração. Mas para conseguir testar isto é preciso que as deteções sejam realizadas simultaneamente por vários detetores de OGs com orientações diferentes. Até agora tivemos relativamente poucas deteções satisfazendo este requisito e apenas com detetores com duas orientações significativamente diferentes, o que permitiu concluir que polarizações puramente tensoriais (como em RG) são favorecidas pelas observações em comparação com polarizações puramente vetoriais ou escalares.

Mudemos agora o nosso foco para o estágio de geração da OG. Neste contexto, as modificações da RG impactam as formas de onda que detetamos porque alteram também a dinâmica (e, por vezes, a própria estrutura) dos corpos celestes que originam as OGs.

### 6.4 - Radiação dipolar

Como é bem sabido, a RG não contempla radiação monopolar ou dipolar e o tipo de radiação predominante advém de alterações na distribuição quadrupolar da fonte. No entanto, algumas teorias modificadas não apresentam esta restrição, em especial as teorias *scalar-tensor*. Em particular, em sistemas binários quase circulares a radiação dipolar domina sobre o equivalente quadrupolar. No entanto, a magnitude deste canal de emissão, e até mesmo a sua presença, depende não só da teoria da gravidade considerada, mas também dos detalhes dum tal sistema binário, o que dificulta usar este efeito para restringir modificações da gravidade [10]. Por exemplo, na teoria de Brans-Dicke, apenas sistemas binários compostos por um buraco negro e uma estrela de neutrões originam radiação dipolar significativamente diferente da RG. Nesses casos é possível impor restrições através de observações do decaimento do período orbital do binário [6].

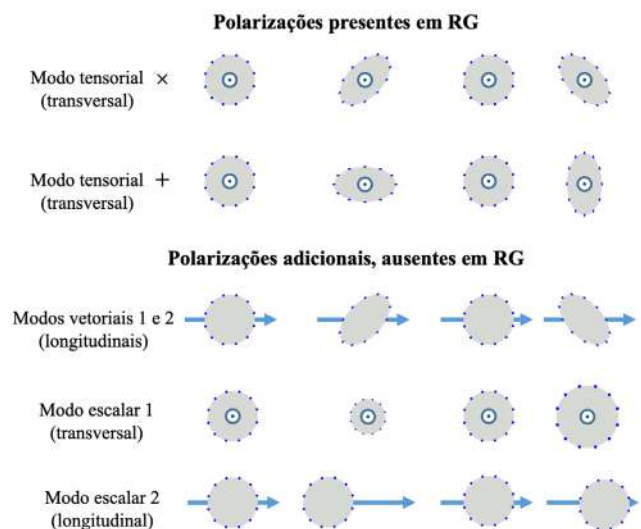


Figura 2: As 6 polarizações possíveis para ondas gravitacionais em teorias baseadas numa métrica, cada uma correspondendo a uma das filas. A terceira fila está associada a duas polarizações distintas, pois o plano perpendicular à direção de propagação da onda é bi-dimensional. A seta azul indica a direção de propagação. As primeira, segunda e quarta filas mostram essa seta apontando para fora da página, correspondendo a polarizações transversais. Cada fila contém uma sucessão de quatro instantâneas, ilustrando a evolução temporal do efeito de uma tal onda gravitacional num conjunto de massas-teste distribuídas circularmente. Figura adaptada de [5].

### 6.5 - Distorções da forma de onda

Todas as deteções diretas de OGs reportadas até hoje foram originadas por binários de buracos negros ou estrelas de neutrões. A forma de onda típica gerada por tais sistemas é habitualmente dividida em três fases: (1) uma primeira fase de 'espiralamento' (*inspiral*) prolongado, em que os dois objetos orbitam um em redor do outro, com a órbita a mudar lentamente (devido à perda de energia por emissão de ondas gravitacionais); (2) uma segunda fase de 'fusão', em que os dois corpos abandonam a órbita quase circular e rapidamente caem um no outro (*merger*); e (3) uma terceira fase de 'relaxamento' (*ringdown*) em que o objeto resultante, inicialmente muito deformado, relaxa até atingir uma configuração estacionária e estável. Modificações da gravidade afetam, em geral, todas as três fases. A análise da fase de fusão requer essencialmente a adoção de métodos numéricos (ver artigo de Ulrich Sperhake nesta edição), os quais têm de ser adaptados às teorias de gravidade modificadas caso a caso, mas as fases de espiralamento e de relaxamento podem ser atacadas com métodos perturbativos. A fase de **espiralamento** apresenta o benefício de constituir a parte mais prolongada do sinal detetado, frequentemente com milhares de ciclos resolvidos. Se houver uma pequena modificação em relação à previsão da RG o acumular do efeito ao fim de tantos ciclos pode originar um desfazamento significativo na forma de onda. Em princípio, isto permite testar teorias de gravidade modificada como, por exemplo, teorias *scalar-tensor*, mas tal como no caso da radiação dipolar a análise depende dos detalhes do sistema binário e as restrições obtidas para os parâmetros da teoria modificada não são ainda competitivas com os limites derivados de observações dentro do sistema solar [10]. Quanto à fase de **relaxamento** —o qual reflete os modos próprios de vibração do objeto final resultante

da fusão do binário—, a sua duração é breve, mas estes modos (discretos) de vibração podem ser calculados rigorosamente para diversas modificações da RG, como por exemplo teorias *scalar-tensor* e teorias que incluem termos de ordem superior na curvatura. Se for possível, de uma forma precisa, extrair das observações de OGs o modo fundamental de vibração, ou até mesmo mais do que um modo (o que constitui uma análise desafiante), pode-se testar se as deteções corroboram as previsões da teoria modificada ou não. Até agora, todos os resultados deste tipo de teste têm sido consistentes com a RG [1, 10].

### 6.6 - Ecos de ondas gravitacionais

Por último, menciono uma proposta mais recente de que ‘ecos’ podem ocorrer no sinal detetado de OGs em certas teorias modificadas [2]. A ocorrer, tal fenómeno representaria um efeito indireto da modificação da gravidade, na medida em que ecos resultam duma modificação da *estrutura* dos objetos compactos, e não da forma como eles orbitam ou da maneira que as OGs se propagam. Certas teorias modificadas da gravidade permitem a existência de objetos extremamente compactos, que em muitos aspetos se comportam como buracos negros (por exemplo, possuem anéis de luz), mas que não têm um horizonte de eventos e, portanto, não são completamente ‘absorventes’ do ponto de vista clássico. Consequentemente, qualquer onda que se propague na direção desse objeto é parcialmente refletida. Por outro lado, a semelhança com buracos negros no exterior destes objetos implica a presença de uma barreira de potencial gravitacional perto do anel de luz, que igualmente reflete parte das ondas e transmite o resto. O resultado final na forma de onda detetada por um observador longínquo seria o surgimento de réplicas atenuadas da onda gravitacional que se esperaria de objetos compactos se eles fossem os buracos negros da teoria da RG. Contudo, análises feitas com os dados de dezenas de deteções de OGs não revelaram, até à data, a presença de ecos gravitacionais [1].

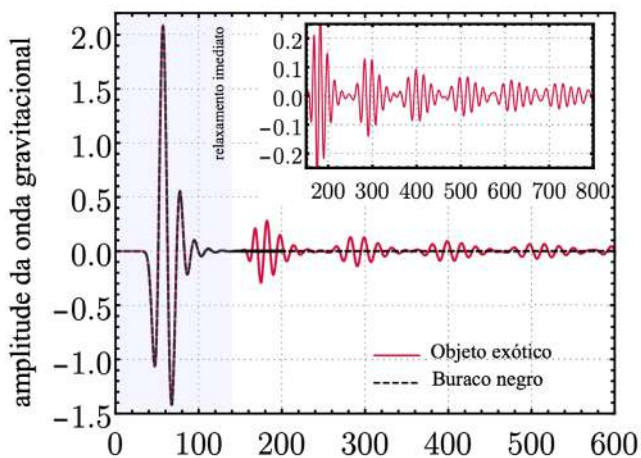


Figura 3: Efeito de ecos num sinal simulado de uma onda gravitacional gerada pela fase de relaxamento de um objeto exótico extremamente compacto sem horizonte de eventos (curva vermelha), em comparação com o sinal gerado por um buraco negro (curva negra, a tracejado). O gráfico mostra a amplitude da onda gravitacional em função do tempo (por unidade de massa), extraída a uma distância de  $50 M$  do objeto, onde  $M$  é a sua massa. São adotadas unidades em que a constante de Newton é  $G = 1$  e a velocidade da luz é  $c = 1$ . Figura adaptada de [2].

## 7 – Conclusão

Uma coisa é certa: a Relatividade Geral continua, mais de um século após a sua formulação, a oferecer a melhor descrição dos fenómenos gravitacionais no universo que nos rodeia. Mas discrepâncias entre observações e aquilo que julgamos conhecer sobre propriedades da matéria (modelo standard da física de partículas), por um lado, e problemas teóricos fundamentais na quantização da gravidade, por outro lado, sugerem fortemente que a teoria centenária de Einstein deve ser suplantada por uma teoria de gravidade modificada. As ondas gravitacionais permitiram já testar (e em alguns casos excluir) uma variedade de tais modificações, acedendo a regimes de gravidade extrema. Para além de nos dar a conhecer um novo mundo, por vezes invisível, as ondas gravitacionais irão continuar a guiar-nos na procura da teoria destinada a suceder à Relatividade Geral. E —quem sabe?— permitam encontrar a tão ambicionada agulha no palheiro.

## Agradecimentos

Desejo expressar o meu agradecimento a Carlos Herdeiro e a José Sande Lemos pela excelente colaboração na edição deste fascículo especial da Gazeta de Física dedicado a ondas gravitacionais. Agradeço também ao diretor da Gazeta de Física, Bernardo Almeida, pelo apoio entusiasta e envolvimento no processo. Estou grato a Antonia Frassino pela revisão do manuscrito e por comentários construtivos. Agradeço ainda o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto 2024.04456. CERN.

### Referências

- [1] Abbott, R. et al., Tests of General Relativity with GWTC-3, LIGO-P2100275 report (2021). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.06861>
- [2] Cardoso, V. & Pani, P., Testing the nature of dark compact objects: a status report, *Living Rev. Relativ.* 22, 4 (2019).
- [3] Corbelli, E. & Salucci, P., The extended rotation curve and the dark matter halo of M33, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 311 (2000).
- [4] Clifton, T., Ferreira, P., Padilla, A. & Skordis, C., *Modified Gravity and Cosmology*, Phys. Rept. 513 (2012).
- [5] de Rham, C., *Massive Gravity*, *Living Rev. Relativ.* 17, 7 (2014).
- [6] Freire, P. & Wex, N., Gravity experiments with radio pulsars, *Living Rev. Relativ.* 27, 5 (2024).
- [7] Maggiore, M., *Gravitational Waves: Volume 1: Theory and Experiments*, Oxford University Press (2007).
- [8] Maggiore, M., *Gravitational Waves: Volume 2: Astrophysics and Cosmology*, Oxford University Press (2008).
- [9] Will, C., The Confrontation between General Relativity and Experiment, *Living Rev. Relativ.* 17, 4 (2014).
- [10] Yunes, N., Siemens, X. & Yagi, K., Gravitational-wave tests of general relativity with ground-based detectors and pulsar-timing arrays, *Living Rev. Relativ.* 28, 3 (2025).
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy\\_rotation\\_curve#/media/File:Rotation\\_curve\\_of\\_spiral\\_galaxy\\_Messier\\_33\\_\(Triangulum\).png](https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_rotation_curve#/media/File:Rotation_curve_of_spiral_galaxy_Messier_33_(Triangulum).png)



Jorge V. Rocha é Professor Auxiliar no Departamento de Matemática do ISCTE-Instituto Universitário de Lisboa e investigador no Centro de Astrofísica e Gravitação (CENTRA-IST). Doutorou-se em Física pela University of California Santa Barbara em 2008, e passou depois alguns anos como investigador no Instituto Superior Técnico e na Universitat de Barcelona, tendo obtido uma bolsa individual Marie Skłodowska-Curie em 2015. É presidente em exercício da Sociedade Portuguesa de Relatividade e Gravitação e autor de dezenas de artigos científicos em revistas internacionais, participando também regularmente em atividades de divulgação científica. Os seus atuais interesses científicos centram-se na área da física-matemática, gravitação e buracos negros.