

Ondas gravitacionais como detetores de novas partículas

Richard Brito

CENTRA, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico - IST, Universidade de Lisboa - UL

richard.brito@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Na última década, a deteção de ondas gravitacionais emergiu como uma das mais revolucionárias ferramentas de observação do Universo. Este artigo discute como essas ondas, além de nos fornecerem informação sobre buracos negros e estrelas de neutrões, poderão também ser utilizadas para obter informação sobre a natureza da matéria escura. Em particular, abordamos o papel que a observação de buracos negros e ondas gravitacionais poderá ter na procura por bosões ultra-leves.

Introdução

A maior parte da informação que recebemos no nosso dia-a-dia chega até nós sob a forma de ondas. Ouvimos porque o nosso ouvido é capaz de decodificar informação contida em ondas sonoras com frequências entre aproximadamente 20 Hz e 20 000 Hz. Vemos porque os nossos olhos são sensíveis a ondas eletromagnéticas com frequências entre os 400 Hz e os 800 THz. Durante grande parte da história da humanidade, o nosso conhecimento sobre o Universo esteve limitado à informação acessível através da observação dessas duas faixas relativamente estreitas: o som e a luz visível.

Em 1865, o físico escocês James Clerk Maxwell publicou um conjunto de equações, hoje conhecidas como as equações de Maxwell, que descrevem os fenómenos eletromagnéticos de forma unificada [1]. A partir destas equações, previu a existência de ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo à velocidade da luz. Essa constatação levou-o à extraordinária conclusão de que “a luz é uma perturbação eletromagnética propagada através do campo de acordo com as leis do eletromagnetismo” [1]. Cerca de 20 anos mais tarde, Heinrich Hertz confirmou experimentalmente a existência de ondas eletromagnéticas, produzindo ondas com frequências mais baixas do que aquelas a que o olho humano é sensível, as hoje indispensáveis ondas de rádio. Essa descoberta revolucionou a ciência e a tecnologia. Para além de abrir caminho às telecomunicações modernas, permitiu o desenvolvimento da astronomia em múltiplas bandas do espectro eletromagnético, das ondas rádio aos raios gama, permitindo-nos observar fenómenos cósmicos que seriam impossíveis de detetar se apenas

tivéssemos acesso ao espectro visível.

Neste artigo, vamos explorar uma nova e promissora janela para o Universo, aberta em 2015: a deteção de ondas gravitacionais [2]. Nesse ano, os detetores LIGO (acrónimo para *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) registaram pela primeira vez ondas gravitacionais emitidas durante a colisão de dois buracos negros. Foi também a primeira vez que “vimos” um evento cósmico desta natureza, o que não é de surpreender visto que esta colisão não emitiu nenhuma radiação eletromagnética (que saibamos), apenas radiação gravitacional. Tal como a exploração do espectro eletromagnético para lá da luz visível revolucionou a astronomia, a observação do Universo através de ondas gravitacionais abriu uma nova era que irá certamente revolucionar o nosso conhecimento sobre o Universo.

O destino quis que essa deteção histórica ocorresse quase precisamente 100 anos após Albert Einstein ter dado uma série de palestras na Academia de Ciências da Prússia, onde apresentou pela primeira vez a sua Teoria da Relatividade Geral, reformulando por completo a nossa compreensão da gravidade [3]. Pouco tempo depois, em 1916, Einstein previu a existência de ondas gravitacionais [4]: pequenas perturbações no campo gravitacional que se propagam à velocidade da luz, de forma análoga às ondas eletromagnéticas¹. Tal como previsto por Einstein, a amplitude destas ondas é extremamente reduzida, mesmo quando emitidas por uma colisão de dois buracos negros, o que torna a sua deteção tecnicamente desafiante.

Apesar dessa dificuldade, a deteção de ondas gravitacionais tornou-se desde então quase rotineira. Em 2025, os detetores LIGO, Virgo e KAGRA registam eventos com uma regularidade quase diária. Esse número imenso de observações, assim como a precisão das observações, só irá aumentar no futuro. Estão neste momento a ser planeados futuros detetores de ondas gravitacionais que serão muito mais sensíveis do que os detetores atuais, nomeadamente o Cosmic Explorer nos Estados Unidos [6] e o *Einstein Telescope* na Europa [7]. Os obser-

¹Einstein viria a duvidar do significado físico dos seus resultados, sendo que apenas nos anos 50 a existência de ondas gravitacionais foi rigorosamente demonstrada como sendo uma previsão real das equações de Einstein [5].

Modelo Padrão

	fermiões			bosões		
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">QUARKS</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">LEPTÕES</div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> u up $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> c charm $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> t top $\approx 172.56 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> g gluão 0 0 1 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> H Higgs $\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 </div> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; color: orange;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">BOSÕES ESCALARES (spin=0)</div> </div>	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> d down $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> s strange $\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> b bottom $\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> γ fotão 0 0 1 </div>		<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); color: red;">BOSÕES VETORIAIS (spin=1)</div> </div>
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> e elétron $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> μ muão $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> τ tau $\approx 1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Z bosão Z $\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 </div>		
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> ν_e neutrino do electrão $< 0.8 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> ν_μ neutrino do muão $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> ν_τ neutrino do tau $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> W bosão W $\approx 80.369 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 </div>

Figura 1 - O Modelo Padrão das partículas elementares: fermiões (quarks e leptões) e bosões mediadores das interações fundamentais. O gravitão, a partícula que teoricamente medeia a interação gravitacional, não está incluído. Cada caixa mostra o símbolo, nome, massa aproximada, carga elétrica e spin da partícula [10]. A massa é expressa em unidades de electrão-volt (eV) por c^2 , onde c é a velocidade da luz. Em unidades do sistema internacional, $1 \text{ eV}/c^2 \approx 1,78 \times 10^{-36} \text{ kg}$. A carga elétrica é dada relativamente à do próton.

vatórios de ondas gravitacionais terrestres estão, contudo, limitados à observação de ondas gravitacionais com frequências no intervalo $\approx [10, 1000] \text{ Hz}$. As fontes de ondas gravitacionais mais comuns nesta gama de frequências são sistemas binários compostos por buracos negros com dezenas de massas solares ou por estrelas de neutrões. A deteção de ondas gravitacionais com frequências muito mais baixas, nomeadamente ondas com frequências no intervalo $\approx [10^{-4}, 10^{-1}] \text{ Hz}$, das quais se destacam os sinais emitidos por sistemas envolvendo buracos negros com milhões de massas solares, requer a construção dum observatório de ondas gravitacionais no espaço, que é precisamente o âmbito da missão LISA [8] (acrónimo para *Laser Interferometer Space Antenna*), uma missão liderada pela Agência Espacial Europeia com o apoio da NASA.

O LISA está programado para ser lançado na próxima década. Até agora, as ondas gravitacionais deram-nos as provas mais convincentes da existência de buracos negros. Mas há razões para acreditar que o seu potencial vai muito para além disso. Neste artigo, iremos discutir uma possibilidade surpreendente, por enquanto apenas teórica, mas cheia de promessas: a ideia de que as ondas gravitacionais podem ajudar-nos a desvendar o mistério da matéria escura [9]. Esta forma de matéria, que compõe a maior parte da matéria do Universo, continua a escapar à nossa compreensão. Focaremos parte da discussão num tipo de candidato algo exótico, mas fascinante: partículas de massa extremamente pequena conhecidas como bosões ultra-leves. Mas as possibilidades são vastas, e as ondas gravitacionais podem muito bem ser a chave para revelá-las.

Matéria escura

O Modelo Padrão da física de partículas ensina-nos que toda a matéria de que somos feitos é composta, ao nível mais fundamental, por partículas elementares. Estas dividem-se em dois grandes grupos: os fermiões, como os electrões, e os bosões, como os fotões, a partícula elementar associada à luz. Esta distinção baseia-se numa propriedade fundamental das partículas, chamada spin, uma característica quântica que pode ser interpretada como uma forma de momento angular intrínseco.

Apesar desta interpretação, é importante notar que o *spin* é uma propriedade fixa: cada tipo de partícula tem um valor de spin que nunca muda e que as caracteriza. A magnitude do spin S de uma partícula é dada por $S = \hbar \sqrt{s(s+1)}$, onde \hbar é a constante de Planck reduzida e s pode ser um número inteiro ou semi-inteiro. Para fermiões s é um número semi-inteiro (como os electrões, com $s = 1/2$), enquanto para bosões s é um número inteiro (como os fotões, com $s = 1$). Na Fig. 1 é dada alguma informação sobre todas as partículas elementares que compõem o Modelo Padrão atual. Os sucessos do Modelo Padrão são notáveis tendo, nalguns casos, previsto a existência de várias partículas muito antes da sua deteção experimental. O caso mais emblemático é o bosão de Higgs, descoberto em 2012 no LHC (acrónimo para *Large Hadron Collider*), o maior acelerador de partículas do mundo, operado pelo CERN [11, 12].

Contudo, apesar do seu sucesso impressionante, o Modelo Padrão não é uma teoria completa. Diversas observações,

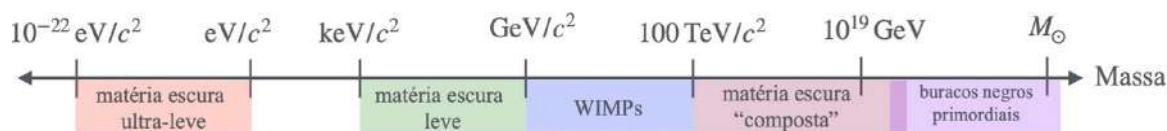


Figura 2 - Esboço (não à escala) da enorme gama de possíveis modelos de matéria escura classificados em termos da sua massa. Os possíveis candidatos abrangem muitas ordens de magnitude em massa, desde novas partículas elementares a buracos negros. Imagem inspirada nas Refs. [14,15].

desde a dinâmica das galáxias à radiação cósmica de fundo, indicam que o Universo contém muito mais matéria do que aquela que conseguimos ver. A essa componente invisível chamamos matéria escura, justamente porque desconhecemos a sua verdadeira natureza. Sabemos apenas que deve ser eletricamente neutra, interage muito fracamente com a matéria comum (pelo que sabemos, é possível que só interaja através da gravidade), e não pode ser composta por nenhuma das partículas atualmente incluídas no Modelo Padrão. Ainda mais desconcertante, desde 1998 sabemos que o Universo está a expandir-se de forma acelerada, o que aponta para a existência de um tipo de energia misteriosa a que chamamos energia escura.

Os fortes indícios que apontam para a existência da matéria e da energia escura não são um mero detalhe: segundo as mais recentes medições do satélite Planck, apenas cerca de 5 % da energia do Universo corresponde à matéria “comum” descrita pelo Modelo Padrão. Os restantes 95 % dividem-se em aproximadamente 27 % de matéria escura e 68 % de energia escura [13]. Em suma: a nossa melhor teoria atual sobre a composição elementar da matéria só explica uma pequena fração da composição do Universo. Este é certamente um dos maiores problemas ainda por resolver da física moderna!

O mistério da matéria escura é particularmente difícil de resolver porque, do ponto de vista teórico, existe uma grande variedade de possíveis candidatos [14] que são capazes de explicar as observações a grandes escalas (desde escalas comparáveis com as galáxias mais pequenas até escalas cosmológicas). Contudo, sabemos muito menos sobre o comportamento da matéria escura a pequenas escalas (como à escala do sistema solar). Essa ignorância torna difícil restringir as propriedades fundamentais dos candidatos a matéria escura. Tal como resumido na Fig. 2, a massa das partículas elementares que compõem a matéria escura pode ir de $10^{-22} \text{ eV}/c^2$ (10^{-28} vezes menor do que a massa do eletrão!) até massas comparáveis com as partículas mais pesadas do Modelo Padrão (ou maiores). E existe inclusive a possibilidade de que a matéria escura seja composta por buracos negros formados nos primórdios do Universo.

Uma estratégia chave para entender melhor a matéria escura passa, portanto, por estudar como ela se distribui em pequenas escalas. Por exemplo, se a matéria escura for composta por partículas com massa muito inferior a $1 \text{ eV}/c^2$, a descrição da matéria escura como um conjunto de partículas pontuais deixa de ser uma boa aproximação, sendo necessário considerar os efeitos ondulatórios da matéria. Este fenómeno está relacionado com a dualidade onda-partícula da matéria descoberta nos inícios do século XX. Todas as partículas têm associado a si um comprimento de onda de De Broglie, dado

por $\lambda_{\text{dB}} = h/p$ onde p é o momento linear da partícula em causa e h é a constante de Planck. Se a distância média entre duas partículas num meio for comparável ou menor do que esse comprimento de onda, o comportamento ondulatório das matéria torna-se importante.

Com base em estimativas da velocidade típica da matéria escura na nossa galáxia, pode-se concluir que, se a sua massa for inferior a aproximadamente $30 \text{ eV}/c^2$, é necessário considerar os efeitos ondulatórios² da matéria [16]. Para além disso, existe um limite inferior para a massa da matéria escura dado por $\approx 10^{-22} \text{ eV}/c^2$. Partículas com essa massa têm um comprimento de onda de De Broglie apenas 10 vezes menor do que a distância entre o sistema solar e o centro da Via Láctea. Se a matéria escura fosse composta por partículas com massas muito menores, o seu comprimento de onda seria muito maior que as escalas típicas de uma galáxia, levando à supressão da formação de galáxias no Universo, o que exclui essa possibilidade.

Como discutimos em cima, além da massa, outra propriedade fundamental de qualquer partícula é o seu spin. Como vimos, o spin permite distinguir entre férmions e bósons. Os férmions obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, que impede que duas partículas idênticas ocupem o mesmo estado quântico, um aspeto essencial na estrutura dos átomos. Já os bósons não estão sujeitos a esta restrição. Este facto tem implicações importantes: não é possível explicar a matéria escura com férmions muito leves (massa inferior a $\approx 10 \text{ eV}/c^2$), pois seriam necessárias mais partículas nas galáxias do que o princípio de exclusão permite. Portanto, qualquer partícula de matéria escura ultra-leve terá de ser um bóson.

A ideia de bósons ultra-leves não é tão estranha quanto parece. Já nos anos 70 foi proposto um candidato com estas características, o axião, para resolver certos problemas teóricos do Modelo Padrão [17, 18, 19]. Mais tarde, percebeu-se que os axiões também podiam ser bons candidatos a matéria escura [20, 21, 22]. Para além disso, a teoria de cordas, teoria que procura unificar todas as forças fundamentais incluindo a gravidade, prevê de forma natural a existência de famílias de partículas axiônicas, com massas que podem naturalmente ser muito menores que $1 \text{ eV}/c^2$ [23, 24].

Mas de que forma nos podem ajudar as ondas gravitacionais a desvendar estes mistérios? É isso que discutiremos a seguir: as oportunidades únicas que a deteção de ondas gravitacionais oferece para estudar a matéria escura, particularmente os candidatos ultra-leves, em contextos extremos, como nas vizinhanças de buracos negros. Como veremos, propriedades

²Por esse motivo, este tipo de matéria escura é por vezes denominado por wave dark matter.

como a massa e o spin destas partículas podem ser cruciais para explorar essas possibilidades.

Ondas gravitacionais e matéria escura

Existem vários exemplos de como as ondas gravitacionais poderão providenciar pistas sobre a natureza da matéria escura. Não discutiremos aqui todos esses exemplos; o leitor interessado poderá encontrar uma análise mais detalhada na Ref. [9]. Vejamos, contudo, algumas possibilidades.

Se a matéria escura for composta por buracos negros formados nos primórdios do Universo, é natural imaginar que esses buracos negros possam formar sistemas binários que emitem ondas gravitacionais potencialmente detetáveis. Apesar desta hipótese não estar completamente descartada, existem várias observações que restringem fortemente a possibilidade de que buracos negros primordiais expliquem a totalidade da matéria escura [25].

Por outro lado, se a matéria escura for composta por novas partículas que, de alguma forma, se aglomeram por colapso gravitacional, formando objetos muito compactos com dezenas de massas solares (ou mais) que eventualmente colidem, então a detecção das ondas gravitacionais emitidas nesses eventos poderá revelar a presença de objetos exóticos, possivelmente compostos por matéria escura. Embora esta possibilidade pareça algo especulativa, há modelos de matéria escura ultra-leve em que se prevê a formação de objetos compactos denominados estrelas de bosões [26]. As ondas gravitacionais emitidas durante a colisão de duas estrelas de bosões podem, em princípio, distinguir-se das geradas por sistemas de buracos negros ou estrelas de neutrões [27]. No entanto, essa diferenciação nem sempre é trivial: já foram detetados eventos pelo LIGO que são compatíveis tanto com colisões de dois buracos negros como com fusões de estrelas de bosões formadas por partículas ultra-leves vetoriais [28].

Uma possibilidade menos exótica é a de a matéria escura afetar a dinâmica de sistemas binários de buracos negros. De facto, um sistema binário em movimento num meio denso sofre perturbações por parte desse meio, o que afeta as ondas gravitacionais emitidas [29]. Embora a densidade típica da matéria escura seja extremamente baixa (na vizinhança do sistema solar estima-se que seja cerca de 10^{-26} vezes menor do que a densidade da água!), em certos cenários é possível que essa densidade seja significativamente maior, nomeadamente nas proximidades de buracos negros supermassivos, como os que se encontram no centro da maioria das galáxias [30, 31].

Como discutido anteriormente, a missão LISA irá detetar ondas gravitacionais provenientes de sistemas envolvendo buracos negros supermassivos, em particular os chamados *extreme mass-ratio inspirals* (EMRIs), onde um buraco negro de algumas dezenas de massas solares orbita um buraco negro supermassivo. Estes sistemas são especialmente interessantes, pois o LISA será capaz de os observar durante dezenas de milhares de ciclos orbitais [32]. Isso permitirá testar, com precisão sem precedentes, se os objetos supermassivos no centro das galáxias são de facto buracos negros, como previs-

to pela Relatividade Geral. Para além disso, em alguns casos, será possível estudar a matéria que rodeia estes sistemas, seja ela um disco de acreção ou matéria escura [29, 33, 34]. A densidade exata da matéria escura na vizinhança de um buraco negro supermassivo depende de vários fatores. Por exemplo, em certos modelos, partículas de matéria escura podem aniquilar-se a altas densidades, o que impede a formação de regiões com densidades muito elevadas. Por outro lado, colisões entre buracos negros supermassivos podem dispersar a matéria escura em redor. Ainda assim, desde que a densidade seja suficientemente alta, poderá ser possível detetar os seus efeitos em EMRIs através de observações com o LISA [29, 33, 34].

Existem pelo menos dois mecanismos para gerar grandes densidades de matéria escura na vizinhança de um buraco negro. Um deles ocorre quando o buraco negro cresce lentamente ao longo do tempo devido à acreção de matéria, levando a uma acumulação progressiva de matéria escura nas suas proximidades [30]. Outro mecanismo, talvez menos intuitivo, baseia-se na possibilidade de extrair energia e momento angular de um buraco negro [31]. Como discutiremos de seguida, essa possibilidade permite formar nuvens macroscópicas de bosões ultra-leves em torno de buracos negros, se tais partículas realmente existirem na natureza.

Buracos negros e bosões ultra-leves

De modo algo surpreendente, os buracos negros podem funcionar como baterias de energia. Apesar de nada poder escapar de dentro de um buraco negro, onde “dentro” é definido como a região delimitada pelo chamado horizonte de eventos, parte da energia contida num buraco negro pode ser extraída [35]. O leitor mais familiarizado com a física de buracos negros poderá pensar de imediato na famosa radiação de Hawking, que ocorre devido a efeitos quânticos e leva à evaporação do buraco negro. No entanto, a extração de energia é possível mesmo negligenciando esse fenómeno, que é irrelevante para buracos negros com as massas que sabemos existir na natureza.

Desde 1969, graças a um famoso trabalho de Roger Penrose (galardoado com o Prémio Nobel da Física em 2020), sabemos que é possível extrair toda a energia rotacional de um buraco negro em rotação [35]. Existem vários mecanismos para essa extração; um deles é o da *superradiância* [36], descoberto nos anos 70: se uma onda monocromática de baixa frequência incidir sobre um buraco negro em rotação, esta poderá ser refletida com uma intensidade superior à da onda original. Esta amplificação ocorre desde que a frequência angular de rotação da onda seja menor do que frequência angular do buraco negro, e dá-se à custa da energia rotacional do buraco negro, que diminui no processo.

O fenómeno da superradiância pode ocorrer com ondas eletromagnéticas, gravitacionais, mas também com qualquer outro tipo de ondas cujo constituinte fundamental sejam bosões. Devido à dualidade onda-partícula, uma partícula que tenha um comprimento de onda de Compton associado (dado por $\lambda_C = h/(m_p c)$, com m_p a massa da partícula) que seja da ordem de

grandeza do tamanho do buraco negro ou maior, comporta-se essencialmente como uma onda em torno desse buraco negro. Assim, partículas muito leves podem extrair energia e momento angular de um buraco negro através do processo de superradiância. Além disso, flutuações de baixa frequência destas partículas podem ficar “presas” em torno do buraco negro, permitindo uma extração contínua de energia e momento angular, que leva à formação de uma nuvem de bosões que no fim do processo gira de forma sincronizada com o buraco negro [31, 37], tal como ilustrado na Fig. 3.

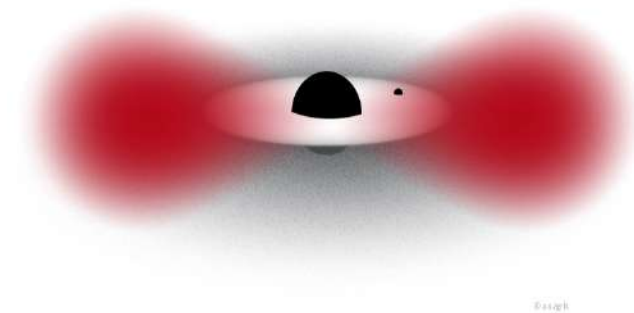


Figura 3 - Representação de uma nuvem de bosões (regiões avermelhadas) em torno de um buraco negro. A figura mostra também um disco de acreção (em branco) e um pequeno buraco negro a orbitar o buraco central. Adaptado de [31].

A estrutura desta nuvem é em tudo semelhante a um átomo de hidrogénio macroscópico, com a particularidade que, devido ao fato do princípio de exclusão de Pauli não ser aplicável à bosões, é possível formar nuvens de bosões macroscópicas que podem conter até $N \approx 10^{76} \times (M/M_{\odot})^2$ partículas num dado nível de energia [38] (M refere-se à massa do buraco negro e M_{\odot} indica uma massa solar).

Existem fortes evidências de que o Universo está repleto de buracos negros, cujas massas variam entre $\approx 3 M_{\odot}$ e $10^{10} M_{\odot}$. O raio típico desses buracos negros pode ser estimado usando o chamado raio de Schwarzschild $R_{\text{Sch}} = 2GM/c^2$, com G a constante gravitacional de Newton, o que nos permite concluir que o raio dos buracos negros que conhecemos pode ir de ≈ 9 km a 3×10^{10} km. Um cálculo simples, comparando λ_c com R_{Sch} , permite concluir que o processo descrito em cima é apenas relevante para partículas com massa $m_b \approx 5,6 \times 10^{-11} \times (M_{\odot}/M)$ eV/c², ou seja, apenas se existirem partículas ultra-leves na natureza.

Se tais partículas ultra-leves existirem, a formação duma nuvem de bosões pode ser extremamente rápida. Por exemplo, para um buraco negro com um milhão de massas solares e partículas escalares com massa 10^{-16} eV/c², o processo pode ocorrer em menos de um ano, sendo por isso potencialmente relevante no processo de evolução de um buraco negro. Em geral, após a formação de uma nuvem, esta decai num período que pode durar milhares ou mesmo dezenas de milhões de anos³, devido à emissão de ondas gravitacionais periódicas com uma frequência típica $f_{\text{GW}} \approx 50 \times (m_b / (10^{-13} \text{eV}/c^2))$ Hz [38,39]. Isto é de contrastar com as ondas gravitacionais emitidas pela colisão de dois buracos negros, tais como as detetadas até agora pelo LIGO, que duram apenas frações de

³Existem contudo modelos onde é possível evitar essa emissão, ver por exemplo [37].

segundo. Assim, estas nuvens funcionam como autênticos “faróis” gravitacionais, cujos sinais podem estar constantemente presentes nos detetores.

Para além disso, se nuvens de bosões existirem, estas poderão afetar a evolução de binárias de buracos negros [40], como já aludido em cima, o que poderá ser detetável por futuros detetores como o LISA [33, 34]. A Fig. 4 mostra simulações recentes [41], em que se modela a perturbação duma nuvem de bosões provocada por um objeto compacto a orbitar um

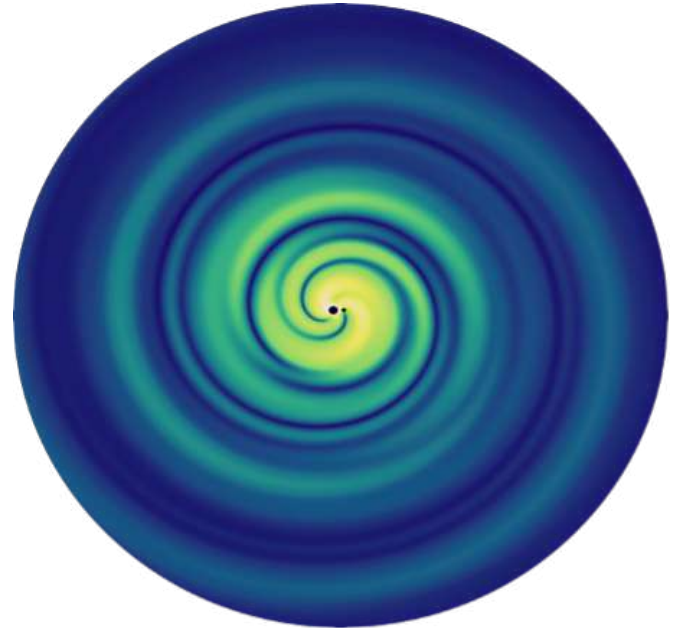


Figura 4 - Simulação de um objecto compacto com dezenas de massas solares, em órbita circular em torno de um buraco negro supermassivo envolto numa nuvem de bosões. A figura mostra as perturbações induzidas na nuvem devido ao movimento do objecto compacto. Adaptado de [41].

buraco negro supermassivo envolto pela nuvem. Essas perturbações por sua vez afetam a evolução da órbita do objeto, o que modifica a onda gravitacional emitida pelo sistema binário. Observações de buracos negros e ondas gravitacionais poderão, assim, impor limites sem precedentes à existência de partículas ultra-leves. Por exemplo, a simples medição da massa e rotação de buracos negros permite excluir intervalos de massa dessas partículas, pois a superradiância só ocorre se o buraco negro tiver uma rotação suficientemente elevada [36]. Além disso, o LIGO é sensível às ondas gravitacionais emitidas por nuvens de bosões formadas por partículas com massas entre $\sim 10^{-14}$ eV/c² e 10^{-11} eV/c², enquanto o LISA será sensível ao intervalo $\sim 10^{-19}$ eV/c² a 10^{-15} eV/c². O facto de o LIGO não ter detetado tais sinais já permite excluir com alguma confiança partículas com massas entre 10^{-13} eV/c² e 10^{-12} eV/c², desde que essas interajam principalmente através da gravidade [42]. Com o LISA e observações eletromagnéticas complementares, poderemos excluir partículas ultra-leves em todo o intervalo $\sim 10^{-21}$ eV/c² a 10^{-11} eV/c², ou, mais entusiasmante ainda, detetar indícios da sua existência.

Conclusão

Os exemplos discutidos mostram que, de forma algo surpreendente, a observação de ondas gravitacionais pode ser uma

poderosa ferramenta para investigar a existência de novas partículas, incluindo potenciais constituintes da matéria escura. Embora ainda hipotética, a ideia de utilizar buracos negros e ondas gravitacionais para descobrir novas partículas que escapam aos métodos laboratoriais tradicionais é certamente excitante.

Estas novas fronteiras tornaram-se acessíveis com a primeira detecção de ondas gravitacionais, a 14 de setembro de 2015. Com o desenvolvimento de detetores cada vez mais sensíveis, é quase certo que muitas descobertas nos aguardam e que surpresas estão ao virar da esquina. Talvez algumas dessas descobertas ajudem a resolver alguns dos maiores enigmas da física moderna, como a natureza da matéria escura; ou, quem sabe, tragam consigo novas e ainda mais desafiantes questões. Seja qual for o caminho, o futuro da física das ondas gravitacionais é, sem dúvida, promissor e entusiasmante.

Agradecimentos

Agradeço aos Profs. José Sande Lemos, Carlos Herdeiro e Jorge Rocha pelo convite para escrever este artigo. Agradeço ainda o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto "GravNewFields", graças ao qual foi possível realizar parte do trabalho discutido neste artigo.

Referências

- [1] J. C. Maxwell, "A dynamical theory of the electromagnetic field," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 155, pp. 459–513, 1865.
- [2] B. P. Abbott et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, no. 6, p. 061102, 2016.
- [3] A. Einstein, "Zur allgemeinen Relativitätstheorie," *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp. 778–786, Jan. 1915.
- [4] A. Einstein, "Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation," *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp. 688–696, Jan. 1916.
- [5] D. Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*. Princeton University Press, 2007.
- [6] M. Evans et al., "A Horizon Study for Cosmic Explorer: Science, Observatories, and Community," arXiv:2109.09882 [astro-ph.IM], 2021.
- [7] A. Abac et al., "The Science of the Einstein Telescope," arXiv:2503.12263 [gr-qc], 2025.
- [8] M. Colpi et al., "LISA Definition Study Report," arXiv:2402.07571 [astro-ph.CO], 2024.
- [9] G. Bertone et al., "Gravitational wave probes of dark matter: challenges and opportunities," *SciPost Phys. Core*, vol. 3, p. 007, 2020.
- [10] S. Navas et al., "Review of particle physics," *Phys. Rev. D*, vol. 110, no. 3, p. 030001, 2024.
- [11] S. Chatrchyan et al., "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC," *Phys. Lett. B*, vol. 716, pp. 30–61, 2012.
- [12] G. Aad et al., "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC," *Phys. Lett. B*, vol. 716, pp. 1–29, 2012.
- [13] N. Aghanim et al., "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters," *Astron. Astrophys.*, vol. 641, p. A6, 2020. [Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021)].
- [14] T. Lin, "Dark matter models and direct detection," *PoS*, vol. 333, p. 009, 2019.
- [15] E. G. M. Ferreira, "Ultra-light dark matter," *Astron. Astrophys. Rev.*, vol. 29, no. 1, p. 7, 2021.
- [16] L. Hui, "Wave Dark Matter," *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 59, pp. 247–289, 2021.
- [17] R. D. Peccei and H. R. Quinn, "CP Conservation in the Presence of Instantons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 38, pp. 1440–1443, 1977.
- [18] S. Weinberg, "A New Light Boson?" *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 223–226, 1978.
- [19] F. Wilczek, "Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 279–282, 1978.
- [20] J. Preskill, M. B. Wise, and F. Wilczek, "Cosmology of the Invisible Axion," *Phys. Lett. B*, vol. 120, pp. 127–132, 1983.
- [21] L. F. Abbott and P. Sikivie, "A Cosmological Bound on the Invisible Axion," *Phys. Lett. B*, vol. 120, pp. 133–136, 1983.
- [22] M. Dine and W. Fischler, "The Not So Harmless Axion," *Phys. Lett. B*, vol. 120, pp. 137–141, 1983.
- [23] P. Svrcek and E. Witten, "Axions In String Theory," *JHEP*, vol. 06, p. 051, 2006.
- [24] A. Arvanitaki et al., "String Axiverse," *Phys. Rev. D*, vol. 81, p. 123530, 2010.
- [25] B. Carr and F. Kuhnel, "Primordial Black Holes as Dark Matter: Recent Developments," *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, vol. 70, pp. 355–394, 2020.
- [26] S. L. Liebling and C. Palenzuela, "Dynamical boson stars," *Living Rev. Rel.*, vol. 26, no. 1, p. 1, 2023.
- [27] C. Palenzuela et al., "Gravitational Wave Signatures of Highly Compact Boson Star Binaries," *Phys. Rev. D*, vol. 96, no. 10, p. 104058, 2017.
- [28] J. Calderón et al., "GW190521 as a Merger of Proca Stars: A Potential New Vector Boson of 8.7×10^{-13} eV," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, no. 8, p. 081101, 2021.
- [29] E. Barausse, V. Cardoso, and P. Pani, "Can environmental effects spoil precision gravitational-wave astrophysics?" *Phys. Rev. D*, vol. 89, no. 10, p. 104059, 2014.
- [30] P. Gondolo and J. Silk, "Dark matter annihilation at the galactic center," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 83, pp. 1719–1722, 1999.
- [31] R. Brito, V. Cardoso, and P. Pani, "Black holes as particle detectors: evolution of superradiant instabilities," *Class. Quant. Grav.*, vol. 32, no. 13, p. 134001, 2015.
- [32] S. Babak et al., "Science with the space-based interferometer LISA. V: Extreme mass-ratio inspirals," *Phys. Rev. D*, vol. 95, no. 10, p. 103012, 2017.
- [33] P. S. Cole et al., "Distinguishing environmental effects on binary black hole gravitational waveforms," *Nature Astron.*, vol. 7, no. 8, pp. 943–950, 2023.
- [34] H. Khalvati et al., "Impact of relativistic waveforms in LISA's science objectives with extreme-mass-ratio inspirals," *Phys. Rev. D*, vol. 111, no. 8, p. 082010, 2015.
- [35] R. Penrose, "Gravitational collapse: The role of general relativity," *Riv. Nuovo Cim.*, vol. 1, pp. 252–276, 1969.
- [36] R. Brito, V. Cardoso, and P. Pani, "Superradiance: New Frontiers in Black Hole Physics," *Lect. Notes Phys.*, vol. 906, pp. 1–237, 2015.
- [37] C. A. R. Herdeiro and E. Radu, "Kerr black holes with scalar hair," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, p. 221101, 2014.
- [38] A. Arvanitaki, M. Baryakhtar, and X. Huang, "Discovering the QCD Axion with Black Holes and Gravitational Waves," *Phys. Rev. D*, vol. 91, no. 8, p. 084011, 2015.
- [39] R. Brito et al., "Gravitational wave searches for ultralight bosons with LIGO and LISA," *Phys. Rev. D*, vol. 96, no. 6, p. 064050, 2017.
- [40] D. Baumann, H. S. Chia, and R. A. Porto, "Probing Ultralight Bosons with Binary Black Holes," *Phys. Rev. D*, vol. 99, no. 4, p. 044001, 2019.
- [41] C. Dyson et al., "Environmental Effects in Extreme-Mass-Ratio Inspirals: Perturbations to the Environment in Kerr Spacetimes," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 134, no. 21, p. 211403, 2025.
- [42] R. Abbott et al., "All-sky search for gravitational wave emission from scalar boson clouds around spinning black holes in LIGO O3 data," *Phys. Rev. D*, vol. 105, no. 10, p. 102001, 2022.



Richard Brito, é Professor Auxiliar do Departamento de Física do Instituto Superior Técnico. A sua investigação foca-se principalmente em estudar como usar a observação de buracos negros e ondas gravitacionais para detetar candidatos à matéria escura e testar a gravidade nos seus regimes mais extremos. É membro do consórcio LISA, onde co-lidera um grupo de trabalho que visa estudar física fundamental com o LISA.