

Buracos negros: a derradeira fronteira

Vitor Cardoso e Francisco Duque

Universidade de Lisboa, Portugal

Resumo

Em Setembro de 2015, os dois conjuntos de espelhos mais perfeitos do mundo moveram-se simultaneamente e da mesma forma, apesar de separados por milhares de quilômetros. Chegara ao fim uma das mais longas buscas da história da ciência. Pela primeira vez a humanidade capturara na Terra uma onda gravitacional. Esta onda foi produzida por um par de buracos negros muito antes do nascimento de Einstein e até de qualquer ser humano. O mundo da física prepara-se agora para uma nova era, em que a astronomia gravitacional nos vai desvendar os segredos sobre as entidades mais misteriosas de todas: os buracos negros.

Abstract

On September 2015, two sets of the most perfect mirrors in the world moved simultaneously and in a similar way, despite being thousands of kilometers apart. The longest quest in the history of science had come to an end. Mankind had captured a gravitational wave on Earth. This wave – also known as Einstein’s messenger – was generated by a pair of black holes, long before Einstein was born, long before mankind appeared. The scientific community is now getting ready for a new era, when gravitational wave astronomy will unlock the key to the most puzzling objects of all, black holes.

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

Keywords: black holes, gravitational waves, general relativity.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v2n2.35943](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v2n2.35943)

1 A máquina do mundo

“(…)
*a máquina do mundo se entreabriu
para quem de a romper já se esquivava
e só de o ter pensado se carpia*

*Abriu-se majestosa e circunspecta
sem emitir um som que fosse impuro
nem um clarão maior que o tolerável
(…)”*

É com estes versos arrebatadores que Carlos Drummond de Andrade inicia *A Máquina do Mundo*, poema onde discorre sobre a jornada insaciável do ser humano para conseguir perceber aquilo que o rodeia. Desde a agonia da incompreensão, à epifania no momento de *eureka*, em que ao desvendar o último pormenor, vemos por fim o mundo de forma nítida, e nos deixamos deslumbrar com a sua elegância. E quem está a ler este texto não pode senão sentir-se deslumbrado. Trilhões de átomos microscópicos, em constante agitação, são mantidos por forças elétricas em estru-

turas estáveis chamadas moléculas, que formam estruturas mais complexas como células, que por sua vez formam órgãos, que formam o corpo de quem escreve isto, e de quem lê. Trilhões de outros átomos juntaram-se há bilhões de anos noutros corpos mais antigos. Uns formaram a nossa Terra, onde o nosso corpo anda, alimenta, diverte, interroga sobre si e morre. Outros átomos formaram o Sol, onde têm tanta energia que chocam frequentemente e criam raios de luz que viajam pelo Universo fora. Alguns desses raios chegam à Terra. Parte dessa luz é reenviada ainda no topo da atmosfera para o espaço, protegendo-nos de raios demasiado energéticos, como os raios-X, que seriam nocivos para os nossos corpos. Outra parte colide com a atmosfera, criando o arco-íris ou dando a cor azul ao céu. Outra parte ainda vem dar diretamente a esta página, onde é refletida até atingir os nossos órgãos de visão e de processamento de sinais, e convertida para sinais elétricos que o nosso cérebro decifra. Este mecanismo gigantesco liga o Sol à Terra, ao leitor e a

nós. Num dia como estes, todos estes sistemas e muitos mais conspiram: um ser humano repousa em cima da crosta terrestre, que orbita em torno do Sol, que orbita em torno do centro da galáxia. A luz que o Sol emite está a ser interpretada pelo leitor para apreender os pensamentos de outro corpo, o de quem escreve, noutra parte do Espaço, noutra instante do Tempo.

Na realidade, a *Máquina do Mundo* é extremamente rica em fenômenos de uma (aparente) diversidade e complexidade. Desde corpos fluidos como a água ou o oxigênio, a corpos sólidos como as pedras ou seres vivos, ou até manifestações envolvendo estes mesmos objetos como o vento, o som, ou as ondas do mar. Cada um de nós tem ligações nervosas que estabelecem a comunicação entre cérebro e músculos, e entre diferentes seres humanos. Compreender e descrever tudo isto é uma tarefa hercúlea. Contudo, reparamos desde há uns séculos que todos estes fenômenos complexos – na realidade todo o universo conhecido – poderiam ser explicados e fabricados com um número muito pequeno de ingredientes. O primeiro destes ingredientes é a matéria – as peças que formam a *Máquina* – constituída por cópias (trilhões de trilhões) idênticas de partículas elementares, como o próton ou o elétron. Estas podem aglomerar-se em átomos, que juntos podem formar moléculas e assim sucessivamente até conjuntos como seres humanos, montanhas, planetas, ou estrelas. O outro ingrediente são as interações fundamentais – aquilo que liga e oleia as peças da *Máquina* – que regem a comunicação entre as partículas elementares. Estas interações são a gravidade, a electricidade e o magnetismo (o “eletromagnetismo”), a força forte e a força fraca.

O eletromagnetismo controla praticamente todos os fenômenos que vemos, desde o acender de uma lâmpada, ao funcionamento de uma célula. Um elétron “fala” com um próton ou com outro elétron através desta interação, sendo a intensidade desta “conversa” determinada por uma propriedade da matéria chamada carga elétrica. A experiência mostra que a carga elétrica possui duas facetas diferentes: umas cargas são “negativas” e outras “positivas”. Por convenção, ao elétron atribui-se carga negativa, ao passo que o próton tem carga positiva. Cargas negativas repelem-se, mas atraem cargas positivas. Assim, o elétron atrai eletricamente um próton, mas repele um outro elétron.

De cada vez que agitamos uma carga elétrica, produzimos “luz”, que não é nada mais do que outra partícula, o fóton. Portanto, as cargas comunicam trocando luz/fótons entre si. E é assim que o ser humano se apercebe do que o rodeia, através do estudo da luz enviada por cargas, quer sejam de lâmpadas na mesa de um laboratório, quer sejam de estrelas a milhões de quilômetros. É extraordinário que toda a nossa percepção da natureza seja baseada praticamente numa única interação, o que também explica porque temos ainda tanto por descobrir.

2 A gravidade

Apesar da ubiquidade do eletromagnetismo, a primeira percepção que temos do que é uma lei física dá-se quando em bebês, percebemos que ao largarmos um brinquedo, ele cai *para o* chão. Enxugadas as lágrimas, repetimos a experiência com brinquedos diferentes e concluímos então que, regra geral, as coisas caem. Nesse momento, ficamos a conhecer a gravidade, a interação fundamental sobre a qual nos iremos debruçar com mais afinco, e que afeta não só os nossos brinquedos de bebê mas também planetas, estrelas e qualquer outro objeto nos lugares longínquos do cosmos. Para perceber a gravidade, temos de responder a duas questões fundamentais: como é que as coisas caem e porque é que as coisas caem?

2.1 A universalidade da queda livre

Uma das primeiras observações sistemáticas, feita na Grécia antiga, pode ser repetida por qualquer um de nós: objetos inanimados com tamanhos e formas diferentes, como uma caneta ou uma pedra, caem da mesma forma quando livres de outras forças. Isto é, deixando cair um navio ou uma boia da mesma altura, simultaneamente, eles chegam ao chão ao mesmo tempo. Como dissemos, isto só se verifica na ausência de outras forças como o atrito, e portanto estamos também de alguma forma a definir o que é o atrito e gravidade com esta descrição.

O filósofo bizantino Ioannes Philoponus de Alexandria parece ter sido uma das primeiras pessoas a testar este fenômeno, deixando cair objetos diferentes da mesma altura. A conclusão que tirou é que “a diferença de tempo com que caem ao chão é muito pequena”. Devido às suas inter-

pretações teológicas radicais do Cristianismo, as suas ideias foram censuradas no Ocidente, mas felizmente amplamente difundidas e debatidas no mundo Árabe. Apenas no século XVI e XVII, os seus textos são ressuscitados na Europa e a experiência acima proposta é repetida de forma mais rigorosa, com os mesmos resultados, por cientistas como Simon Stevin, Galileu Galilei, Isaac Newton, Loránd Eotvos, até ao astronauta David Scott na Lua. Atualmente, sabemos que no vázio absoluto (onde não há qualquer atrito), dois corpos largados de um quilómetro de altura caem ao mesmo tempo, com uma precisão de pelo menos 0,0000000000001 segundos [1]. A gravidade é universal e democrática, afetando todos os corpos da mesma forma, em qualquer lugar.

2.2 O método científico

O segundo passo importante na descrição da gravidade foi dado por Galileu, por volta do ano 1600. Curiosamente, Galileu foi um dos primeiros autores no Ocidente a citar abundantemente Philliponus. Entre vários feitos, Galileu descobriu 4 das 69 atualmente conhecidas luas de Júpiter (por isso designadas de Luas Galileanas de Júpiter), incluindo Io que viria a desempenhar um papel importante na história dos buracos negros. Porém, Galileu é sobretudo conhecido pela formalização do método científico, que define a ciência moderna.

A ciência é um sistema de organização do conhecimento e classificação de fenômenos que se repetem, ou que podem ser deliberadamente repetidos de forma controlada. É uma forma de disciplinar a imaginação, e de subordinar à evidência experimental e observacional, de testar hipóteses e descartar dados pouco ou nada fiáveis. Um cientista deve ser impiedoso e desapegado das suas crenças individuais. O erro é inevitável no percurso de quem faz ciência, mas é esta inevitabilidade que faz da ciência um edifício em permanente construção, onde frequentemente um tijolo é mal colocado, para de seguida ser retirado. É um edifício em constante manutenção e verificação, uma, duas, dez vezes, as necessárias para que a comunidade sinta que os alicerces são seguros o suficiente para se colocar o próximo tijolo. A essência da ciência é o espírito inquisidor e é este que promove as “mudanças de paradigma” que o filósofo Thomas Kuhn identificou como o grande motor da evolução do conhecimento científico.

Um dos primeiros passos no método científico é tentar isolar o fenômeno em estudo. No caso da queda de corpos, isto significa focar a atenção em quedas onde o ar ou os músculos não desempenham papel importante. O segundo passo é exprimir o fenômeno quantitativamente. Galileu assumiu de uma vez por todas que o Universo só pode ser compreendido através da linguagem matemática. Esta atitude está também associada a uma outra mudança: a prioridade passa a ser descrever como o fenômeno acontece, em vez de responder ao porquê.

2.3 O movimento é relativo

Galileu traduziu para a linguagem matemática o que até então se sabia sobre a gravidade. Criou inúmeras experiências, repetindo-as à exaustão, para se convencer de que estava no caminho certo. Estudou, por exemplo, a velocidade dos corpos, isto é, quão rápido a posição de um corpo varia no tempo; se um corpo se move em linha reta e percorre num curto intervalo de tempo dt , uma distância dx , então a velocidade é proporcional a dx e inversamente proporcional a dt :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt}, \quad (1)$$

onde consideramos o movimento mais geral possível e portanto a posição do corpo e a sua velocidade são vetores, ou seja, descrevem as 3 dimensões espaciais.

Uma das amarras de que Galileu se libertou foi a da inércia. Percebeu que, na ausência de outras ações, um corpo parado mantém-se parado, e que um corpo em movimento uniforme, isto é, com velocidade constante, se mantém em movimento uniforme. Este enunciado parece inofensivo mas traz consigo uma nuance física importante, que qualquer pessoa que já viajou de trem reconhece. Se para alguém que vê o trem chegar à estação, os passageiros estão em movimento, do ponto de vista de um passageiro todos os seus companheiros de viagem estão parados. Isto conduz-nos ao princípio da relatividade de Galileu: “Todo o movimento uniforme é relativo. É impossível saber se nós estamos a mover ou parados.”

Depois de ter entendido o movimento de objetos isolados, Galileu dedicou-se ao estudo da queda dos corpos. Imitando Philliponus, entreteve-se a deixar cair objetos concluindo que a velocidade dos mesmos não era constante du-



Figura 1: Uma bala de canhão disparada com diferentes velocidades à superfície da Terra. Para canhões suficientemente poderosos, a bala poderia teoricamente ficar em órbita.

rante a queda. Teve por isso a necessidade de introduzir a taxa de variação da velocidade, a que chamou aceleração

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (2)$$

Galileu foi ainda mais além e verificou que todos os corpos em queda livre eram sujeitos à mesma aceleração, aproximadamente constante de $a = 10 \text{ m s}^{-2}$, dirigida para baixo. Consequentemente, qualquer objeto cai cada vez mais rapidamente à medida que a queda se prolonga. Quantificando, em cada segundo, a velocidade de um corpo aumenta por 10 metros por segundo no sentido do chão. Esta lei explica todos os fenômenos causados pela gravidade na Terra. Permite, por exemplo, prever o que acontece a uma pedra atirada ao ar: se for atirada com uma velocidade de 10 metros por segundo para cima, aproximadamente ao fim de um segundo a velocidade é zero, e depois a pedra começa a cair de volta ao chão.

Podemos também entender a trajetória de uma bala disparada por um canhão, dividindo o seu movimento numa componente horizontal e paralela ao chão (não afetado pela gravidade) e numa vertical, perpendicular à superfície da Terra (onde a gravidade atua). Consideremos a experiência ilustrada na Figura 1, em que um canhão dispara uma bala com velocidade cada vez maior, mas de forma a que a componente verti-

cal da velocidade é sempre a mesma. É fácil de perceber que a altura máxima atingida pela bola é sempre a mesma, mas a distância percorrida na horizontal é tanto maior quanto maior a velocidade.

2.4 A maçã e a lei do inverso do quadrado

Depois de Galileu, passamos a saber calcular todos os fenômenos relacionados com a gravidade à superfície da Terra. Contudo, por volta de 1680, um prodígio entrou em cena. Isaac Newton perguntou-se o que aconteceria à Lua se estivesse sujeita às leis da gravidade. Para perceber o seu raciocínio, voltemos ao exemplo da bola de canhão. Imaginemos que ela é disparada com uma velocidade tão grande que a distância percorrida é o perímetro da Terra. Nesse caso, a bola daria uma volta completa ao planeta e ficaria em órbita! É claro que a bola está em permanente queda em direção à Terra, mas como esta é redonda, é possível que a bola esteja a cair precisamente à mesma razão que a sua distância ao centro da Terra aumenta. O resultado é um movimento circular uniforme. O que Newton percebeu, foi que a Lua também está permanentemente a cair para a Terra, e vice-versa, devido à gravidade. Compreendeu assim que a gravidade que faz com que um brinquedo, pedra, ou maçã caia à superfície da Terra é a mesma que faz com que a Lua orbite em torno de nós, e que Júpiter ou a Terra orbitem em torno do Sol.

Mas esta descrição qualitativa era insuficiente, em particular porque as observações astronômicas de corpos celestes feitas por Tycho Brahe e Johanne Kepler indicavam que os planetas mais distantes do Sol moviam-se mais lentamente, ou seja a aceleração a que estavam sujeitos não poderia ser a mesma. Por conseguinte, era necessário alterar a expressão matemática da aceleração. O resultado a que Newton chegou, conhecido como a lei da gravitação universal, dita que qualquer corpo a uma distância L do centro de uma estrela ou planeta de massa M , é atraído para estes e sofre uma aceleração dada por [2]

$$\vec{a} = -GM \frac{\vec{L}}{L^3}, \quad (3)$$

em que \vec{L} é o vetor, de comprimento L , que une os dois corpos. A constante G é a constante de gravitação universal e vale $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$. As propriedades do

corpo - cor, tamanho, massa, forma geométrica - são irrelevantes para este mecanismo: *todos* os corpos caem da mesma forma. Se esmagássemos a Terra, mantendo a sua massa, até esta ter apenas um metro de raio, a aceleração a que a Lua estaria sujeita seria a mesma, e o seu movimento não sofreria alterações.

Para além de descrever corretamente o movimento dos astros, a lei da Gravitação Universal recupera os resultados de Galileu. Para maçãs e bolas de canhão, $L = 6371$ km é aproximadamente o raio da Terra, e substituindo na expressão para a aceleração obtemos $a = GM/L^2 = 10 \text{ m s}^{-2}$, exatamente o que Galileu mediu.

Esta lei diz-nos que todos os corpos se atraem uns aos outros. Uma maçã atrai outra maçã, mas em circunstâncias normais a intensidade desta atração é muito pequena. Ao contrário de fenômenos elétricos, cuja intensidade é regida pela carga elétrica, a gravidade é tanto mais forte quanto mais massa existir. Assim, a força gravítica que um ser humano exerce sobre si mesmo é pequena. Contudo, em planetas e estrelas, a acumulação de massa é de tal ordem que faz com que a gravidade domine sobre todas as outras interações, o que explica porque os astros são todos arredondados. Enquanto à escala humana, é o eletromagnetismo o ator principal na nossa relação com o mundo exterior, quando viajamos para escalas astronômicas, galácticas e cosmológicas a gravidade assume o trono de rainha da física.

A descoberta de Newton foi a primeira verdadeira lei universal da física e da humanidade, que nos permite com uma sucinta fórmula prever o movimento de planetas e estrelas que estão a milhões de quilômetros de distância de nós!

3 Faça-se luz!

Chegados a este ponto, temos todos os ingredientes necessários para construir um protótipo buraco negro

Por mais paradoxal que pareça, a história dos buracos negros começa com luz. Um objeto é negro quando não emite ou reflete luz visível. A luz é tão familiar para nós que é difícil sequer começar a teorizar sobre ela. Parece rodear-nos em qualquer lado e a qualquer hora. Porém, o que realmente compreendemos acerca da sua natureza? A luz tem forma? Cor? Peso? Tem velocidade? Por ora, é esta última questão que nos interessa.

3.1 A velocidade da luz

Uma das primeiras pessoas a pensar sobre a velocidade da luz foi o filósofo grego pré-socrático Empédocles. Ele acreditava que a luz era uma substância que se movia e que, portanto, teria que demorar um certo intervalo de tempo a chegar do ponto A ao ponto B. Por outras palavras, teria que ter uma certa velocidade. Esta discussão permaneceu no campo da filosofia durante vários séculos, opondo a visão de Empédocles à de Aristóteles que considerava que a luz era a manifestação de uma presença e não de um movimento, logo não teria uma velocidade finita.

Apenas em 1629, o cientista e filósofo holandês Isaac Beeckman propôs uma medição da velocidade da luz, fazendo explodir pólvora. Uma explosão é acompanhada por luz. A experiência de Beeckman consistiu em colocar vários espelhos, separados por quilômetros, a refletirem a luz da explosão. Pediu a vários colegas para registarem alguma diferença no tempo que demoravam a observar a explosão nos diferentes espelhos. Infelizmente, a resposta a que chegaram foi inconclusiva, indicando que se a luz tinha uma velocidade, deveria ser incrivelmente elevada.

Foi preciso esperar por Ole Römer, para sabermos que a luz não viaja de forma instantânea. Na prática, este astrônomo dinamarquês repetiu a experiência de Beeckman, mas com explosões muito mais distantes, nomeadamente os eclipses de Io, a lua de Júpiter descoberta por Galileu. A “explosão” era o instante em que Io saía do eclipse e ficava visível na Terra. A diferença para a experiência anterior é que a Terra se move enquanto a luz viaja desde Io. Römer reparou que o tempo para Io sair de um eclipse era tanto mais longo quanto mais distante a Terra estava de Júpiter, e atribuiu esta diferença à velocidade da luz. Depois de vários anos a estudar esta lua, Römer anunciou, a 22 de Agosto de 1676, que a luz tinha uma velocidade de cerca de 220 000 quilômetros por segundo, um valor 30% mais baixo que o valor atual.

A descoberta de Römer foi celebrada e divulgada na Europa, e estimulou outros a pensarem em formas mais diretas para determinar a velocidade da luz. Uma experiência célebre, desenvolvida por François Arago, Hippolyte Fizeau e Jean Léon Foucault [3] - cientistas cujos nomes se encontram gravados na Torre Eiffel - consistia no aparato apresentado na Figura 2.

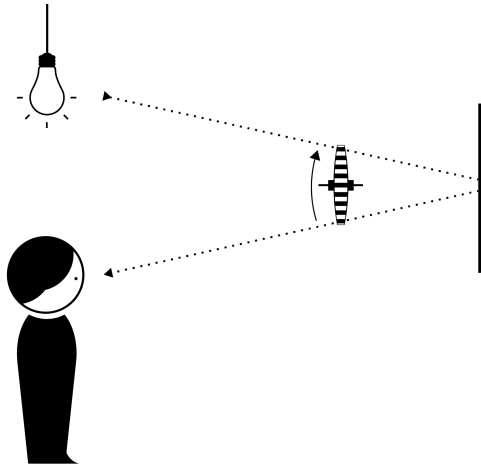


Figura 2: Esquema da experiência de Fizeau, com uma roda dentada em rotação. Um feixe de luz passa pela roda dentada, é refletido num espelho e torna a passar pela roda dentada.

Nesta experiência, um feixe fino de luz é enviado através dos dentes de uma roda dentada que gira com uma certa velocidade de rotação que podemos controlar. A 8 quilômetros de distância, o feixe é refletido num espelho e na viagem de retorno, encontra novamente a roda dentada. Dependendo da velocidade de rotação desta, a luz pode passar ou ser bloqueada por um dos dentes da roda. Sabendo a distância entre a roda e o espelho, o número de dentes da roda, e a sua velocidade de rotação, é possível calcular a velocidade da luz. O valor obtido por Fizeau para a velocidade da luz foi de 315 000 quilômetros por segundo, um desvio de apenas 5% face aos atuais 299 792 quilômetros por segundo. A velocidade da luz é geralmente denotada pela letra c e desde 2019 é tomada como a constante fundamental que define o metro no Sistema Internacional de unidades.

3.2 O caráter ondulatório da luz

Saber a velocidade da luz é um passo importante para a descrever, mas não é tudo. O passo determinante foi dado nos finais do século XIX, por James Maxwell que mostrou que a luz pode ser descrita em termos de campos elétricos e magnéticos, que se propagam como uma onda [4]. Neste aspecto são semelhantes ao som ou às ondas de água que se propagam no oceano. Portanto, a luz – esse fenômeno que nos acompanha toda a vida e que nos permite ver e interpretar o mundo – tem afinal uma descrição ondulatória.

A luz, como qualquer onda, pode ser caracterizada pela sua amplitude e pelo seu período, T , que nos diz quanto tempo o fenômeno leva até se repetir. No caso das ondas no oceano, o período é o intervalo de tempo entre dois máximos (o pico da onda) ou mínimos (os vales). O inverso do período é a frequência f da onda, $f = 1/T$, que nos diz quantas vezes por segundo vemos a repetição. Por exemplo, sons mais agudos têm uma frequência maior que sons mais graves, tal como luz azul tem maior frequência que luz vermelha. É uma simples experiência do dia a dia que o período ou frequência de uma onda depende de quem a mede. Todos nós experimentamos isto ao ver uma ambulância passar. Um paramédico a conduzir a ambulância, ouve a sirene com uma frequência constante, pois está em repouso em relação à sirene. Porém, alguém na rua reconhecerá que quando ela se aproxima, o som que se ouve é agudo e de repente fica grave quando a ambulância se afasta. Este é um efeito clássico importante, de Doppler. É fácil convencermos de que tem que acontecer, pensando na onda emitida pela sirene, com os seus máximos e mínimos a comprimirem-se ou esticarem consoante a fonte se aproxima ou afasta. Matematicamente, o efeito de Doppler para a luz é descrito pela expressão

$$f = \sqrt{\frac{1 \pm v/c}{1 \mp v/c}} f_0, \quad (4)$$

onde f_0 é a frequência medida por alguém que acompanha a fonte emissora de luz, e v é a velocidade da fonte em relação a um outro observador que mede portanto uma frequência f . O sinal $+$ é para fontes a aproximarem-se, o $-$ para fontes que se afastam. No caso da luz, como dissemos a frequência da onda está associada à sua cor. Assim, quando alguém com um laser se aproxima de um observador em repouso, a luz que o observador vê é mais azul que a vista pela pessoa que transporta o laser. No caso em que eles se afastam, a luz vista pelo observador em repouso é mais vermelha.

3.3 O éter não existe

Voltemos à luz e à forma como se propaga. A experiência de Fizeau seria melhorada por Foucault e Albert Michelson, que ao invés de rodas dentadas, optaram por espelhos em rotação. Na realidade, o aparato de Michelson era já uma

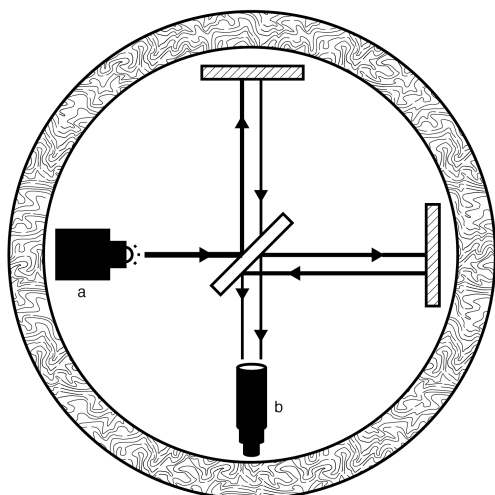


Figura 3: Diagrama do interferômetro original de Michelson. O original está em Potsdam na Alemanha. Um feixe de luz sai do emissor “a”; esse feixe é dividido no centro do aparato onde está um espelho que deixa passar parte da luz. Assim, parte da luz é refletida num dos espelhos em cima, e outra parte é refletida no espelho à direita. Ambas essas ondas são depois obrigadas a interferir no detector “b”.

adaptação de uma experiência anterior desenvolvida em conjunto com Edward Morley, que ficaria para a história como o mais famoso dos “falhanços” na ciência [5].

Da mesma forma que as ondas sonoras necessitam de um meio para se propagarem - não há som na Lua porque não há atmosfera - acreditava-se que a luz, sendo uma onda, também necessitaria um meio específico de transporte. Este meio foi batizado como éter, em homenagem ao deus grego da luz, e tratar-se-ia de uma substância ubíqua que permearia por todo o espaço, interagindo muito pouco com outros corpos.

Se o éter existisse, então o movimento da Terra induziria um fluxo nesta substância, semelhante às correntes que acompanham um barco a atravessar o rio Amazonas. Mas, ao existir uma direção preferencial para esta “corrente” de éter, então a luz deveria mover-se mais rapidamente em certas direções, da mesma forma que um barco, mantendo constante o esforço do seu motor ou dos pobres braços de quem rema, viaja mais rapidamente a favor da corrente do que contra esta.

Para testar esta hipótese, Michelson e Morley desenvolveram o interferômetro de Michelson, esquematizado na Figura 3. Esta experiência consiste em enviar um feixe de luz em direção a um

espelho especial que divide o feixe em dois. Depois, estes feixes gêmeos viajam em direções perpendiculares ao longo de dois braços de igual comprimento. No fim destes, os feixes são refletidos por outros espelhos e fazem o caminho de retorno até se encontrarem novamente no centro do interferômetro, onde se recombina através de um processo conhecido por interferência.

Como uma onda possui picos e vales na sua amplitude, ao juntarmos duas ondas, estas estruturas podem interferir “construtivamente”, somando-se da mesma forma que $1 + 1 = 2$. Porém, no caso dos picos de uma onda coincidirem com os vales da outra, elas interferem “destrutivamente”, anulando-se como $1 - 1 = 0$. À diferença no tempo entre os picos e vales de duas ondas chamaremos de *diferença de fase*.

Se os dois feixes gêmeos viajarem a mesma distância no mesmo intervalo de tempo então reencontrar-se-ão em fase, e cairemos na situação construtiva. Caso contrário, a diferença de fase na sua recombinação gerará uma onda com uma estrutura mais complexa: um padrão de interferência. Cada padrão de interferência diferente está relacionado com uma certa diferença no intervalo de tempo que os feixes gêmeos demoraram a percorrer os braços do interferômetro

Pelo que vimos anteriormente, a viagem do feixe segundo o braço que estivesse paralelo à direção da corrente de éter deveria demorar mais tempo do que no braço que lhe estivesse perpendicular, já que no percurso de regresso após a reflexão nos espelhos, o primeiro feixe estaria a ir contra a corrente. Michelson e Morley não conseguiram observar nenhum padrão de interferência.

Este resultado foi amplamente debatido, com os próprios autores da experiência a mostrarem-se cépticos face às conclusões. Com o volver dos anos, o interferômetro de Michelson foi sendo modificado, tornando-se mais preciso, mas o resultado negativo manteve-se. Após outras experiências independentes também falharem na detecção do éter, a ideia da sua existência foi sendo abandonada, aceitando-se ao invés que a luz se poderia viajar no vazio, sem a necessidade de qualquer meio de propagação, ao contrário das ondas sonoras.

O interferômetro de Michelson tornar-se-ia uma das experiências científicas mais revolucionárias na história. O seu princípio de funcionamento é análogo ao que hoje se utiliza na detecção

de ondas gravitacionais. Para além disso, o resultado desta experiência serviria de base para a teoria da relatividade restrita de Albert Einstein.

3.4 Estrelas negras

A constatação de que a luz possui uma velocidade constante bem definida permite imaginar cenários rebuscados. Por exemplo, a luz que emitimos há 20 anos está agora numa superfície esférica com 100 bilhões de quilômetros de raio centrada no nosso planeta. O resto do Universo é um holograma do que aconteceu na Terra, com diferentes camadas esféricas correspondendo a diferentes épocas. Uma comunidade extraterrestre num planeta distante, com um telescópio ultra potente, pode neste momento estar a ver os nossos bisavós, a maçã a cair na cabeça do Newton ou Empédocles a filosofar.

Em 1784, num destes exercícios de imaginação, o filósofo e membro do clero britânico John Michell chegou a uma conclusão interessante [6]. A lei da gravitação universal que vimos afirma que tudo cai da mesma forma, mas que a aceleração da queda depende da distância ao planeta, diminuindo à medida que nos afastamos dele. Imaginemos então que construímos uma catapulta potente, que nos permite controlar a velocidade com que arremessamos um projétil. Essa velocidade de arremesso é vertical e dirigida para cima. O que acontece se o projétil for disparado com pouca velocidade? Naturalmente, sobe e volta a cair na Terra. Contudo, se atirmos o projétil com uma velocidade de arremesso cada vez maior chegaremos a uma situação em que a altura a que este chega é tão grande, que ele se liberta da atração gravítica da Terra e começa a viajar livremente pelo espaço.

A velocidade de arremesso necessária para que isto aconteça é chamada de *velocidade de escape*, v_{esc} . Esta pode ser calculada a partir da lei da mecânica Newtoniana, sendo o resultado $v_{\text{esc}}^2 = 2GM_{\text{Terra}}/R_{\text{Terra}} = 11 \text{ km/s}$. Portanto, se atirmos uma pedra com uma velocidade maior do que 11 quilômetros por segundo, ela abandona a Terra e não volta mais! Mas, como se pode ver pela sua expressão, a velocidade de escape depende do astro, nomeadamente da sua massa e raio da sua superfície. Quanto maior for a razão entre estas quantidades, ou seja, quanto mais compacto ou denso for um planeta ou estrela, maior será a velocidade de escape que lhe está

associado.

Michell pensou que se tudo cai da mesma forma, a luz também o deveria fazer. Mas, tendo a luz uma velocidade constante, ele inverteu o problema e questionou-se se haveria alguma estrela com uma velocidade de escape maior do que a da luz. Nesse caso, a luz não escaparia da superfície dessa estrela, que seria completamente negra. Por exemplo, o Sol tem cerca 10^{30} kg de massa e um raio de 700 mil quilômetros. Para se tornar numa estrela negra, teríamos que comprimir toda a sua massa para um raio de apenas 3 quilômetros! No caso da Terra, para se tornar um planeta "negro", teria que ser condensada numa esfera de 9 milímetros.

Michell foi ainda mais além, explicando como poderíamos tentar detectar estas estrelas negras em sistemas binários, onde teriam a companhia de uma estrela normal e visível, num método muito semelhante ao que é hoje empregado para detectar buracos negros.

Infelizmente, as suas ideias eram demasiado revolucionárias para época e as estrelas negras nunca foram tomadas a sério pelos seus contemporâneos. Teriam que passar mais de 100 anos para que a justiça fosse reposta.

4 Um mundo relativo

No final do século XIX, a física atravessava um período conturbado. A experiência de Michelson e Morley aniquilou a possibilidade de conciliar o eletromagnetismo de Maxwell com a mecânica de Newton. No cerne desta discrepância estava o princípio da relatividade de Galileu, que atribuía um carácter privilegiado ao tempo. Tanto para Galileu como para Newton, o tempo seria *absoluto*. Isto significava que um observador em repouso e um observador em movimento uniforme a velocidade constante concordariam sempre no intervalo de tempo decorrido entre um evento A - por exemplo, deixar cair uma pedra - e um outro evento B - a pedra chegar ao chão.

Outra causa de desconforto era a "instantaneidade" da lei da gravitação universal. Por exemplo, se o Sol subitamente perdesse uma parte significativa da sua massa, alterar-se-ia o valor de M no lado direito da equação (3). Por conseguinte a aceleração a que a Terra está sujeita mudaria instantaneamente, alterando a sua órbita. Tal é incompatível com a transmissão de informação a

velocidades finitas, com a relação causa e efeito, e portanto com qualquer tentativa de harmonização com a relatividade restrita, como iremos ver.

4.1 A luz é o limite

A resposta a este aparente paradoxo seria dada por Albert Einstein em 1905 [7]. Neste ano, Einstein publicou 4 artigos revolucionários. Em dois deles, introduziu a teoria da relatividade restrita, que tornava a dinâmica dos corpos compatível com o eletromagnetismo de Maxwell. Para tal, assumiu dois postulados:

- *Princípio da relatividade*: as leis da física são as mesmas para qualquer observador não sujeito a uma aceleração (também chamados de observadores ou referenciais inerciais);
- *Invariância da velocidade da luz*: a velocidade da luz é a mesma para qualquer observador, independentemente do movimento da fonte de luz em relação a este.

Ao combiná-los, Einstein concluiu que o tempo não tinha um caráter absoluto. O tique-taque de um relógio depende do seu estado de movimento. Eventos simultâneos para um certo observador não são necessariamente simultâneos para outro. Como exemplo, Einstein imaginou a seguinte experiência conceptual: o Roberto está sentado numa paragem a ver o trem chegar. No momento exato em que o Roberto está a meio do trem, dá-se uma explosão de luz em cada ponta deste. Como a velocidade da luz é constante em todas as direções, e a distância que cada flash tem de percorrer é a mesma até chegar ao Roberto, a luz emitida durante ambas as explosões demora o mesmo intervalo de tempo a chegar ao Roberto. Logo, ele vê as explosões ao mesmo tempo e para si elas são simultâneas.

Já a Alice está dentro do trem e sentada exatamente a meio dele. Como o trem está em movimento, no intervalo de tempo que decorre entre as explosões e a luz que delas emana chegar à Alice, o trem e a Alice já se moveram um pouco relativamente aos dois pontos em que ocorreram as explosões. Neste intervalo de tempo a Alice aproxima-se do ponto onde se deu a explosão na frente do trem e afastou-se do ponto onde se deu a explosão na traseira. Consequentemente, a luz que é emitida nas traseiras tem que viajar uma distância superior à que é emitida na dianteira.

Como postulamos que a velocidade da luz é constante em todas as direções, então a luz emitida na dianteira demora menos tempo a chegar à Alice do que a emitida na traseira. Logo para ela, as duas explosões não são simultâneas.

A teoria da relatividade restrita era capaz de explicar o movimento dos corpos e tinha as mesmas propriedades de transformação entre diferentes observadores inerciais que o eletromagnetismo de Maxwell. Este conjunto de transformações chamam-se transformações de Lorentz. Estas tinham já sido descobertas pelo físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928), poucos anos antes da publicação de Einstein. Para além de Lorentz, também o matemático francês Henri Poincaré assumiu um papel preponderante na formulação dos alicerces da relatividade restrita. Ainda assim, ambos tiveram dificuldades na interpretação física dos seus resultados, que só foi conseguida por Einstein.

A confusão é compreensível já que a relatividade restrita vai contra o “senso comum”. Imaginemos um relógio formado por dois espelhos em paralelo um com o outro, entre os quais reflete um raio de luz. Os espelhos têm uma separação L e um tique-taque deste relógio corresponde à viagem de ida e volta entre espelhos. Para um observador em repouso em relação aos espelhos, o raio de luz percorre uma distância $2L$ num intervalo tempo $\Delta t = 2L/c$. Agora imaginemos um outro observador que se move em relação aos espelhos a uma velocidade constante v . Para este, os raios de luz vão descrever uma trajetória com um certo ângulo, percorrendo uma distância $2D$, como indicado na Figura 4.

Como a velocidade da luz é constante, para este observador o raio demora um intervalo de tempo $\Delta t' = 2D/c$ na viagem de ida e volta entre espelhos. Pelo teorema de Pitágoras, temos que D é maior que L e por isso $\Delta t'$ é maior que Δt , ou seja, o tique-taque do relógio do observador em movimento é maior do que o do observador em repouso. Como o tique-taque de um relógio determina a passagem do tempo, concluímos que para um observador em movimento o tempo *dilatado* em relação a outro em repouso, segundo a relação

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (5)$$

E o que acontece ao espaço? Tomemos uma régua de comprimento L , e ponhamos um relógio a

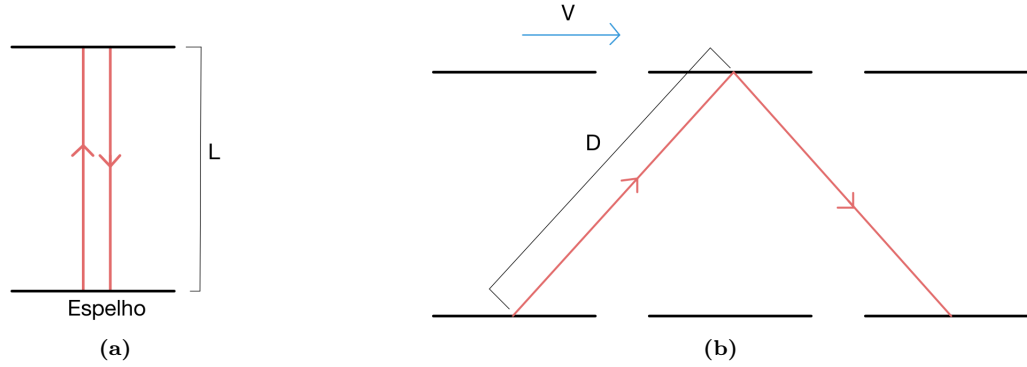


Figura 4: Um relógio composto por 2 espelhos nos quais reflete um raio de luz. Um tique-taque do relógio é dado pelo tempo que a luz demora no percurso de ida e volta de um dos espelhos. A Figura 4a é a perspectiva de um observador parado relativamente aos espelhos, que mede um tique-taque de $\Delta t = 2L/c$. A Figura 4b é a perspectiva de um observador que se move relativamente aos espelhos com uma velocidade v . Como a velocidade da luz é constante, este observador mede um tique-taque de $\Delta t' = 2D/c$. Pelo teorema de Pitágoras, temos que $D = \sqrt{L^2 + (v\Delta t'/2)^2}$, ou seja $D > L$ e por isso $\Delta t' > \Delta t$.

percorrer a régua de uma ponta à outra a uma velocidade v . Para um observador que acompanhe o relógio, este demorará um certo tempo Δt a finalizar o percurso, o que significa que para este observador a régua tem um comprimento $L = \Delta t v$. Já para um observador sentado na régua, o relógio demorará um outro intervalo de tempo $\Delta t'$ a percorrer a régua. Para este, a régua deverá ter um comprimento $L_0 = \Delta t' v$. Mas acabamos de ver na equação (5) como é que Δt e $\Delta t'$ estão relacionados. Desta relação, concluímos que L e L_0 se relacionam segundo

$$L = \sqrt{1 - v^2/c^2} L_0. \quad (6)$$

Para um observador em movimento, a régua é mais curta do que para o observador em repouso em relação a esta, ou seja, o espaço *contraí* relativamente a um outro observador em repouso.

Pensando desta forma, a relatividade parece uma brincadeira de crianças. É, porém, de realçar que estas brincadeiras vão contra a mecânica de Newton. Ainda que Newton tenha assumido (implicitamente) o princípio da relatividade, não tomou em consideração a invariância da velocidade da luz. Sem este último ingrediente, os resultados das nossas experiências seriam distintos. Os efeitos previstos pela relatividade só são relevantes quando as velocidade relativas entre observadores são próximas da velocidade da luz, o que não acontece à escala humana. No limite em que as velocidades entre observadores são muito menores do que a velocidade da luz, a relatividade restrita recupera a mecânica de Newton.

Este é o destino de qualquer teoria física. O

mundo é extremamente complexo e, invariavelmente, qualquer teoria falha na descrição precisa de um certo fenômeno. Nesse momento, é necessário construir uma outra teoria, mais geral, que estenda o paradigma vigente, numa espécie de *matrioska* intelectual. Parece frustrante admitir que nunca iremos conhecer o que nos rodeia na sua totalidade, mas esta é a motivação base que faz um cientista levantar-se da cama todos os dias - explorar o nosso conhecimento até ao seu limite, na certeza e ênsia de que há sempre algo mais por desvendar.

No segundo artigo onde apresentou a teoria da relatividade restrita, Einstein descreveu outra *gedankenexperiment*, onde concluiu que um corpo, ao emitir luz com uma certa energia E , perde uma parte m da sua massa correspondente a E/c^2 . A partir daqui inferiu que uma equivalência entre massa e energia, o que deu à luz a famosa igualdade $E = mc^2$. Ora, da experiência comum, quanto mais leve é um objeto menor é a sua inércia, ou seja quanto menor a massa de um objeto, mais fácil é acelerá-lo. Por outro lado, quanto maior a velocidade de um objeto, maior é a sua energia. Como, segundo Einstein, energia é sinónimo de massa, que por sua vez é sinónimo de inércia, então quanto maior é a velocidade de um objeto, mais energia lhe temos que fornecer para aumentar esta velocidade. Isto explica a dificuldade que há em atingir velocidades próximas da luz. Atualmente, o máximo que conseguimos atingir é no acelerador de partículas LHC no CERN, na Suíça, onde prótons são acelerados até uma velocidade de 99,999999% da velo-

cidade da luz. Caso conseguíssemos acelerar um astronauta até estas velocidades, um ano para ele corresponderia a 2236 anos terrestres! Para que um objeto com massa atinja a velocidade da luz, é necessária uma quantidade infinita de energia. Invertendo o raciocínio, concluímos que a luz, por viajar à velocidade da luz, não pode ter massa. A velocidade da luz c define um limite máximo para quão rápido algo no universo se consegue propagar, ou seja, um limite para a velocidade de transmissão de informação.

Apesar de romperem drasticamente com o paradigma vigente, estes novos conceitos sobre relatividade e equivalência massa-energia foram rapidamente aceites pela comunidade científica de então. Ainda assim, o debate em torno das situações contraintuitivas que a teoria parecia permitir durou alguns anos. A contribuição definitiva para a sua compreensão foi dada por Hermann Minkowski. Em 1908, este matemático alemão construiu uma interpretação geométrica da relatividade restrita. Em vez de olhar para o universo como um conjunto de 3 dimensões espaciais - comprimento, largura e altura - que evoluem no tempo, Minkowski considerou que o tempo podia e devia ser posto em pé de igualdade com as restantes coordenadas espaciais. O universo passava a ser constituído por 4 dimensões interligadas entre si, 1 temporal e 3 espaciais. Estava criado o *espaço-tempo* de Minkowski, um espécie de lençol completamente liso.

4.2 A mais bela das teorias

Apesar da sua elegância e eficácia, a relatividade restrita não dizia nada em relação à gravidade. Por isso Einstein começou a pensar em como incluir a gravidade nesta descrição. A ideia chave surgiu-lhe logo em 1907. Como vimos, Galileu verificou que a aceleração gravítica a que um corpo está sujeito é independente da sua massa, forma ou composição. Então imaginemos o seguinte: o Roberto deixa cair algumas pedras do topo do morro do Corcovado, no Rio de Janeiro, e imediatamente a seguir atira-se com elas. As pessoas no topo do morro vêem tanto o Roberto como as pedras a irem em direção ao chão. Já para o Roberto as pedras estão a flutuar em relação a si. Este raciocínio conduziu Einstein ao [8]

- *Princípio da equivalência*: um campo gravitacional uniforme é equivalente a uma aceleração constante. Um observador em queda

livre vê o mundo ao seu redor como se não houvesse gravidade.

Aplicamos o princípio a uma situação mais interessante. O Roberto atira-se de novo do morro do Corcovado e enquanto cai acende uma lanterna que emite luz com frequência f_0 . A sua amiga Alice ficou no topo do morro a ver o Roberto cair. À medida que o Roberto cai, a sua distância e velocidade aumentam em relação à Alice. Quando a distância entre eles é Δz , o tempo que a luz emitida pela lanterna demora a ir do Roberto à Alice é $t = \Delta z/c$. Já durante este intervalo, o Roberto adquire uma velocidade $v = gt = \Delta z/c$. Como há uma velocidade relativa entre o Roberto e a Alice, a frequência f da luz que ela mede está relacionada com f_0 pela expressão para o efeito de Doppler. Para velocidades muito menores que a velocidade da luz, a expressão (4) simplifica para

$$f = \left(1 - \frac{g \Delta z}{c^2}\right) f_0, \quad (7)$$

ou seja a Alice vê luz com uma frequência menor, e por isso mais vermelha que a emitida pelo Roberto.

Ao olhar para esta expressão, Einstein apercebeu-se de que o termo que provoca o desvio para o vermelho, $g \Delta z/c^2$, podia ser escrito como $\Delta\Phi/c^2$, em que $\Delta\Phi$ é a diferença do potencial gravítico sentido pela Alice e o Roberto. O potencial gravítico descreve quão intensa é a gravidade num determinado ponto do universo, independentemente do corpo que esteja sujeito a essa gravidade. A expressão (7) pode então ser generalizada para

$$\Delta t = \left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right) \Delta t_0, \quad (8)$$

em que Φ é um potencial gravítico arbitrário e em vez de escrevermos em termos da frequência da luz escrevemos em termos do seu período.

Mas estes períodos podem ser simplesmente o tique-taque de um relógio, portanto a passagem do tempo também é sensível à gravidade! Quanto mais intensa é a gravidade (quanto maior Φ), maior é o tique-taque de um relógio em comparação com o de outro onde a gravidade é mais fraca. Isto é o desvio gravitacional para o vermelho.

Por exemplo, como o potencial gravítico da Terra diminui com a distância ao seu centro, então os nossos pés experienciam o tempo a passar

mais devagar que a nossa cabeça. Como o campo gravitacional é relativamente fraco à superfície da Terra, esta diferença não é significativa. Mas o desvio gravitacional para o vermelho é fundamental para o bom funcionamento do sistema GPS, do qual dependem os nossos *smartphones*, televisões e outros aparelhos. Este sistema de localização é constituído por 31 satélites em órbita a uma altura de 20 180 quilómetros face à superfície terrestre. Para que funcione bem, é necessário calcular com grande exatidão o intervalo de tempo que decorre entre o sinal emitido por estes satélites e antenas receptoras à superfície da Terra. Para tal, os satélites possuem relógios atômicos muito precisos, cujo tique-taque é diferente dos relógios à superfície da terra devido ao desvio gravitacional para o vermelho. Caso não se considerasse este efeito, ao fim de um dia de funcionamento, o GPS teria um erro acumulado de cerca 30 quilómetros nas posições que indica. É fascinante como uma ideia tão abstrata como o princípio da equivalência acabaria por se tornar tão necessário para o funcionamento do mundo como o conhecemos hoje.

Einstein também percebeu que era impossível representar o desvio gravitacional para o vermelho usando o espaço-tempo de Minkowski. Por esta razão, ele imaginou que a gravidade deveria deformar a geometria do espaço-tempo da mesma forma que ao nos deitarmos num lençol esticado e liso, ele afunda-se em torno de nós. Para falar de gravidade, é necessário um espaço-tempo curvo que distorça distâncias e intervalos de tempo.

Para descrever a gravidade como um efeito geométrico, teve de recorrer à geometria diferencial, que tinha sido desenvolvida no séc. XIX por Carl Gauss e seu aluno Bernhard Riemann. Esta disciplina da matemática é tecnicamente complexa, e Einstein passou vários anos a tentar formalizar as suas ideias. Teve de recorrer até à ajuda de matemáticos como Marcel Grossmann e David Hilbert e diz-se que durante este período passava os dias fechado no quarto, abrindo a porta apenas para receber as refeições. Somente em 1915, já após algumas tentativas falhadas, Einstein apresentou as equações baptizadas com o seu nome [9]:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}. \quad (9)$$

O símbolo $G_{\mu\nu}$ é o tensor de Einstein, e descreve a geometria do espaço-tempo em cada ponto. Já $T_{\mu\nu}$ é o tensor de energia-momento, que está relacionado com as propriedades da matéria que

habita o espaço-tempo. Citando o físico John Wheeler, “o espaço-tempo diz à matéria como se mover, e a matéria diz ao espaço-tempo como se deformar”.

De uma forma simplificada, um tensor é uma generalização a várias dimensões do conceito de vetor. Da mesma forma que a lei da gravitação universal é uma equação vetorial para as 3 componentes do vetor aceleração (as 3 dimensões espaciais), as letras gregas μ e ν representam índices que percorrem as 4 coordenadas do espaço-tempo. Apesar de poderem ser condensadas em apenas uma linha, as equações de Einstein são 10 equações não independentes entre si (10 ao invés de $4 \times 4 = 16$ já que por razões de simetria $G_{\mu\nu} = G_{\nu\mu}$, logo algumas equações são repetidas). Por esta razão, é extremamente complicado arranjar uma solução geral para as equações de Einstein e muita da investigação feita hoje recorre ao auxílio de supercomputadores. Ainda assim, quando compreendida, é impossível não nos deslumbrarmos, e são recorrentes considerações estéticas sobre a relatividade geral. Para quem as estuda, elas são tão belas como uma sinfonia de Beethoven ou um quadro de Picasso.

4.3 A relatividade geral posta à prova

A relatividade geral foi uma disrupção total do paradigma científico e a comunidade científica reagiu com cepticismo. Era necessário comparar as ideias de Einstein com experiências antes de serem adotadas como a descrição certa da gravidade.

Como a gravidade deforma a geometria do espaço-tempo, na presença de massa, a linha mais curta que une dois pontos deixa de ser uma reta. Por exemplo, como a Terra é uma esfera, a linha mais curta que une o Rio de Janeiro a Lisboa é uma curva ao longo da superfície terrestre. A estas linhas de comprimento mínimo que unem dois pontos do espaço-tempo chamamos de geodésicas e são a generalização para geometrias não-planas do conceito de reta. As trajetórias que os aviões descrevem são geralmente geodésicas, de forma a minimizar o gasto de combustível. A luz também obedece a uma propriedade de “minimização de combustível”, já que como é a substância que se propaga mais rapidamente no Universo, encontra sempre o caminho mais curto entre dois pontos. Mas devido à deformação do espaço-tempo por objetos com massa, este caminho pode tam-

bém ser curvo, como as geodésicas à superfície da Terra ou feitas pelos aviões. Este fenômeno é conhecido como deflexão da luz.

Quanto maior a massa de um corpo maior a deflexão da luz que pode provocar. Um ser humano é demasiado leve para que esta deflexão seja relevante. Mas um planeta ou uma estrela possuem massa suficiente para provocar um efeito observável. O objeto mais massivo próximo da Terra é o Sol. Segundo Einstein, um raio de luz a rasar a superfície do Sol, emitida por uma estrela que esteja atrás deste, deveria defletir segundo 1,75 segundos de arco (1 segundo de arco é uma medida de ângulo correspondente a $1/60$ de 1 grau), o suficiente para ser observado com a tecnologia disponível na altura.

Em 1916, os astrônomos Frank Dyson e Arthur Eddington aperceberam-se da oportunidade para medirem a deflexão da luz durante um eclipse solar previsto para 29 de maio de 1919. Este eclipse era particularmente propício para esta observação, já que o Sol estaria à frente do agrupamento de estrelas Hyades, um dos agrupamentos estelares mais próximos da Terra e por isso mais luminosos e melhor estudados. O eclipse seria observável ao longo de um percurso de 12 mil quilômetros desde a costa este da América do Sul até à costa oeste de África. Foram organizadas duas expedições para observar o eclipse, uma em Sobral no Brasil, encabeçada pelos astrônomos Andrew Crommelin e Charles Davidson, e outra em Sondi na ilha de Príncipe do arquipélago de São Tomé e Príncipe, liderada pelo próprio Eddington. Durante o eclipse, que durou 5 minutos e 2 segundos, as duas expedições fotografaram a posição das estrelas de Hyades no céu. Depois, levaram estas fotografias de volta para Inglaterra e compararam-nas com fotografias recolhidas à noite, quando o Sol não influenciaria os raios de luz emitidos por Hyades. Após 5 meses de análise, os resultados foram anunciados a 6 de novembro de 1919 numa reunião da Royal Society em Londres [10, 11]: a previsão da relatividade geral confirmava-se. Os jornais da época anunciavam uma “revolução na ciência,” e assim foi.

A teoria de Einstein foi testada exaustivamente durante décadas, e sucessivamente confirmada com experiências cada vez mais sofisticadas...mas sempre em situações onde o campo gravitacional Φ/c^2 era pequeno (em particular $\Phi/c^2 \lesssim 10^{-6}$ no sistema solar). Mas a teoria da relatividade geral

é extremamente complexa, e esconde tesouros em situações mais gerais.

5 Eles existem

O próprio Einstein disse ser impossível chegar a uma solução geral destas equações, sem a necessidade de recorrer a uma qualquer aproximação. Demorou apenas meses a ser desmentido. Em 1915, Karl Schwarzschild obteve uma solução exata das equações de Einstein, na ausência de matéria. A solução de Schwarzschild descrevia o campo gravitacional no exterior de um corpo esféricamente simétrico. Porém, nas coordenadas esféricas de Schwarzschild, existiam patologias em duas localizações distintas: uma na origem, e outra em $R_{\text{Schw}} = 2GM/c^2$ - estranhamente o valor do raio das estrelas negras de Michell. Patologias normalmente significam algo de errado, com o modelo ou com a teoria. Durante os 50 anos seguintes os físicos debruçaram-se sobre o significado desta solução. Como iremos ver, ela descreve um buraco negro sem rotação, e o raio de Schwarzschild é o horizonte de eventos, uma espécie de “superfície” que delimita uma região do espaço-tempo onde a gravidade é tão forte que nem a luz consegue escapar. Nada de errado se passa no horizonte de eventos, é apenas uma superfície que separa duas regiões completamente diferentes, e que impossibilita comunicação do interior com o exterior. Já a patologia na origem, essa continua lá...e é necessário um censor cósmico para a curar, como falaremos.

5.1 Formação de buracos negros

Inicialmente, pensou-se que a patologia em R_{Schw} não teria sentido físico, porque nenhum astro poderia ser tão compacto. Para um objeto estar dentro do seu raio de Schwarzschild, teria que ter uma densidade muito maior do que as densidades então. Na Tabela 1, apresentamos o raio de Schwarzschild e respectivas densidade para diferentes massas. Estas densidades são tão monstruosas que a primeira reação é simplesmente ignorar tais soluções. Até cerca de 1920, pensava-se ser impossível comprimir matéria até densidades muito maiores do que a da água. Portanto, uma estrela com um raio de Schwarzschild seria uma solução curiosa do ponto de vista intelectual, mas que não deveria existir no Universo. Em 1914-

Tabela 1: Raios de Schwarzschild e densidades correspondentes para estrelas com diferentes massas. A massa do Sol é aproximadamente $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{30}$ kg.

Massa	R_{Schw}	Densidade
Uma massa solar, M_{\odot}	3 quilômetros	10 vezes mais denso do que o núcleo de um átomo
$10^6 M_{\odot}$	3×10^6 km	18 mil vezes mais denso do que a água
$10^9 M_{\odot}$	3×10^9 km	50 vezes menos denso do que a água

1915, chegou a primeira contradição destes pressupostos. Ao estudar a luz emitida por várias estrelas, o astrônomo Walter Adams concluiu que duas delas – Sirius B e 40 Eridani B, respectivamente – eram extremamente densas. Estas estrelas tinham massas semelhantes à massa do Sol mas estavam comprimidas num raio semelhante ao raio da Terra. Isto corresponde a densidades da ordem de dez a cem mil vezes a densidade da água. Uma colher de chá com material destas estrelas pesaria 10 toneladas! Estas estrelas são hoje conhecidas como anãs brancas e são o estado final de estrelas semelhantes ao nosso Sol.

Mas o que suportaria estas estrelas tão densas? A estrutura e forma dos astros, como a Terra e o Sol, é ditada pela gravidade. Para que o equilíbrio seja atingido é necessário que haja forças de pressão que contrariem a gravidade do próprio astro, da mesma forma que o ar nos nossos pulmões previne que o nosso peito colapse. No caso da Terra, a pressão no seu centro é garantida pelas forças eletromagnéticas e agitação térmica dos constituintes do núcleo de ferro. Esta é 4 milhões de vezes maior que a pressão atmosférica. A pressão e temperaturas são tão altas que liquefazem o centro da Terra. Mas para uma estrela como o Sol, as pressões são tão altas que o material da estrela é reduzido aos seus constituintes fundamentais: átomos, elétrons e prótons, em agitação térmica num gás a altas temperaturas chamado de plasma. A pressão é fornecida sobretudo pelo movimento do plasma e por radiação eletromagnética, ou seja, luz. Esta é alimentada por reações nucleares, nomeadamente a combinação de átomos de hidrogênio para formar átomos de hélio. São estas reações que geram a luz que vemos na Terra.

O que acontece quando os ingredientes necessários para as reações nucleares nas estrelas, como o hidrogênio, se esgotam? Nesse caso, a pressão que advém da radiação eletromagnética deixa de existir, a estrela começa a arrefecer e deveria colapsar sobre si mesma. O processo é ligeiramente mais

complicado, mas grosso modo isto parece acontecer a estrelas como o Sol. Ao diminuir de tamanho, a densidade destas estrelas vai se tornando cada vez maior, e os átomos que as constituem estão cada vez mais próximos. Neste momento, um novo mecanismo de pressão entra em jogo.

Para além de uma revolução na gravidade, a primeira metade do século XX ficou marcado pelo advento da mecânica quântica, a teoria que explicava a natureza a escalas muito reduzidas, como as do átomo. Com a mecânica quântica descobrimos que os átomos são constituídos por um núcleo à volta do qual existe uma “nuvem” de partículas com carga elétrica negativa: os elétrons. Percebeu-se que estas partículas são férmions, isto é, são partículas que obedecem ao princípio da exclusão de Pauli. Este dita que dois férmions não podem estar no mesmo estado quântico. Como consequência, ao esmagarmos dois elétrons, tentando obrigá-los a ocupar o mesmo estado, eles exercem uma pressão contrária. Esta é a pressão de degenerescência e é o mecanismo que confere a estabilidade às anãs brancas.

Ainda assim, seria a pressão de degenerescência imbatível? Após trabalhos preliminares de Edmund Stoner e Wilhelm Anderson, o físico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar provou a existência de um limite máximo para a massa de uma anã branca [12]. Eles encontraram o mesmo aspecto curioso, resumido na Figura 5: existe um limite máximo para a massa das estrelas. Este é o limite de Chandrasekhar e vale cerca de 1,4 vezes a massa do Sol. Ao ultrapassar esta massa, uma anã branca não é capaz de ser suportada pela pressão de degenerescência e colapsa sobre si mesma.

Apesar de vir a ser agraciado com prêmio Nobel de Física em 1983, os resultados de Chandrasekhar não foram tidos em grande consideração pelos seus colegas. O próprio Eddington argumentou que “deveria existir uma lei da Natureza que previne a estrela de se comportar de forma absurda”. De fato, havia ainda mais física a ser

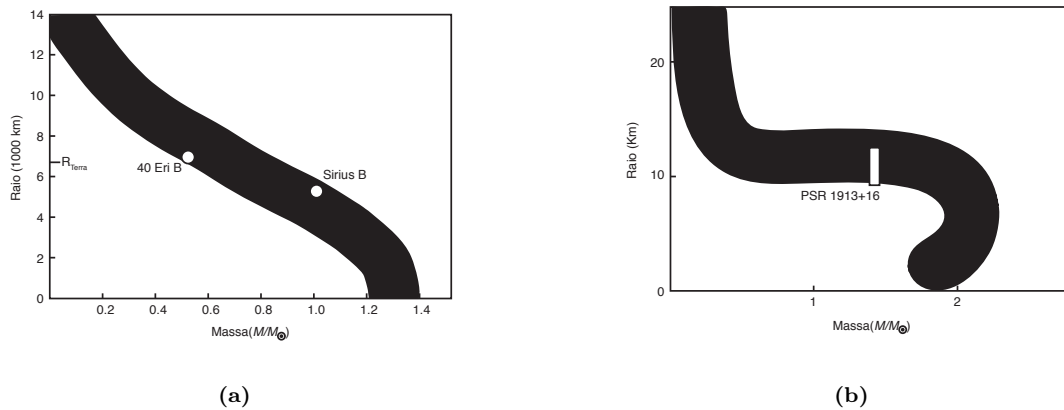


Figura 5: O diagrama massa-raio para anãs brancas (suportadas por pressão de elétrons, à esquerda) e estrelas de nêutrons (suportadas por pressão dos nêutrons, à direita). A massa do Sol está representada como M_{\odot} . A espessura da linha traduz a incerteza na composição exata da estrela. O diagrama mostra algumas estrelas conhecidas. O raio das anãs brancas é comparável com o da Terra, mas a sua massa é milhares de vezes superior, da ordem da massa do Sol. Para as estrelas de nêutrons, o raio é da ordem de apenas alguns quilômetros. Em ambos os casos, e usando a física conhecida hoje, a estrela não pode ter mais do que a massa de três sóis.

considerada. Em 1932, James Chadwick provou experimentalmente a existência do nêutron, uma partícula de carga elétrica neutra presente no núcleo dos átomos, muito mais pesada que um elétron [13]. O nêutron também é um férmion e por isso também obedece ao princípio da exclusão de Pauli, pelo que apresenta o mesmo tipo de pressão de degenerescência que o elétron. Assim, uma anã branca que ultrapasse o limite de Chandrasekhar pode continuar a colapsar até atingir densidades da ordem da densidade nuclear, momento em que os elétrons se combinam com os prótons livres para formar nêutrons e a pressão de degenerescência destes é capaz de suportar uma estrela de nêutrons. Estas estrelas têm densidades 10^{14} vezes maior que a densidade da água, com massas semelhantes à massa do Sol comprimidas em apenas uma dezena de quilômetros.

O que acontece a uma destas estrelas, quando no limite de massa, lhe adicionamos uma pitada de sal? Em 1939, Robert Oppenheimer e George Volkoff mostraram que também há um limite máximo de massa que uma estrela de nêutrons consegue suportar [14]. Ultrapassado este limite - o limite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff - ela também colapsa sobre a sua própria gravidade. O próprio Oppenheimer em colaboração com o seu aluno Hartland Snyder obteve uma solução exata das equações de Einstein que descrevia uma estrela sem pressão a colapsar [15]. Compreenderam que quando a estrela era comprimida para um raio menor que o seu raio de Schwarzschild,

o desvio gravitacional para o vermelho era infinito, ou seja um observador no infinito veria a superfície da estrela a congelar nesse raio. Isto era uma propriedade análoga à das estrelas negras de Michell. Por esta razão, chamaram a estes objetos de estrelas congeladas. Hoje em dia, chamamos-lhes buracos negros.

Em suma, existe um mecanismo padrão para formar buracos negros no Universo. As estrelas nascem e vivem milhões de anos a queimar combustível nuclear. Quando este se esgota, se forem suficientemente massivas, dão origem a uma estrela de nêutrons que facilmente pode resultar num buraco negro se estiver a captar material de outra estrela. Um buraco negro é uma solução das equações de Einstein, tal como um planeta como a Terra o é, e é a solução que descreve o fim de todas as estrelas suficientemente velhas e massivas. Logo, os buracos negros devem ser objetos muito comuns no nosso Universo.

Apesar destes resultados serem robustos, tanto estrelas de nêutrons como buracos negros continuaram a ser tomados como uma curiosidade intelectual, pouco plausível de realmente existir no mundo. Com o deflagrar da 2ª Guerra Mundial, a investigação na gravitação desacelerou de sobremaneira e muitos dos intervenientes referidos envolveram-se no Projeto Manhattan para o desenvolvimento da bomba atômica.

O interesse da comunidade científica nestas matérias foi reavivado em 1967, quando Jocely Bell Burnell, uma estudante de doutoramento em

Cambridge, detectou uma fonte de radiação eletromagnética a emitir pulsos com um período muito bem definido de 1,33 segundos [16]. Não existia nenhuma física consensual que explicasse esta observação, e Jocelyn Bell e o seu orientador Antony Hewish chegaram a ponderar tratar-se de um sinal de origem extraterrestre. Após outras detecções de sinais semelhantes, confirmou-se que eles tinham origem em estrelas de nêutrons com uma velocidade de rotação muito elevada. As densidades nucleares que se atingem nestas estrelas originam campos eletromagnéticos extremamente fortes (milhares de milhões superiores ao da Terra), o que promove a emissão de radiação segundo os polos magnéticos da estrela, criando feixes de luz muito colimados, como um laser. Com a rotação da estrela, estes feixes acabam por funcionar como um farol, e as estrelas são conhecidas como pulsares. O período dos pulsos é o período de rotação da estrela. A estrela de nêutrons com a rotação mais rápida hoje conhecida dá 43 000 voltas por minuto, a uma velocidade de 25% a velocidade da luz!

De repente, estrelas de nêutrons e buracos negros deixaram de ser um devaneio de fantasiosos e passaram a ser levados a sério. A década de 70 foi marcada por avanços significativos nesta área. Uma verdadeira era de ouro da gravidade.

5.2 Anatomia de um buraco negro

A ideia de ter um objeto à superfície dos quais a gravidade é tão forte que nem a luz consegue escapar foi, como vimos, introduzida por Michell. Mas o conceito atual de um buraco negro, que surge no esplendor da relatividade geral, é diferente. Se pegarmos um buraco negro sem rotação e sem carga elétrica, e “cortarmos” todo o espaço ao longo do plano de simetria, obtemos um plano como o ilustrado na Figura 6. Nada do que acontece no interior do horizonte de eventos, a superfície que delimita o círculo negro do centro, é visível do exterior. O horizonte está localizado no raio de Schwarzschild, e ao contrário da superfície das estrelas negras, não corresponde a nenhuma barreira física sólida. Um astronauta pode penetrar no horizonte de eventos e entrar no buraco negro. Lá dentro, é forçosamente arrastado para uma singularidade, onde as forças de maré são tão fortes que o despedaçam. Para conseguir escapar do horizonte de eventos, o astronauta teria que viajar a velocidades superiores

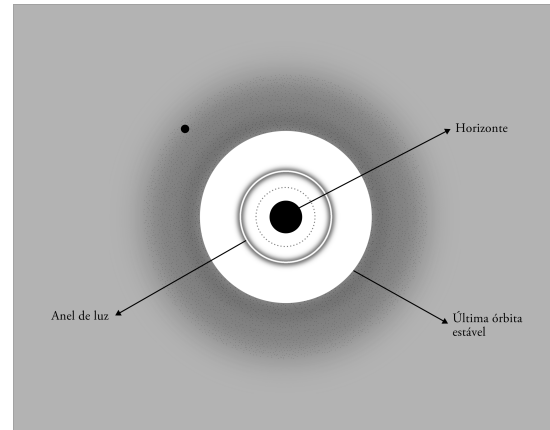


Figura 6: Esquema de um corte equatorial de um buraco negro, sem rotação e sem carga elétrica. Longe do buraco negro (na região a cinzento), a matéria comporta-se tal como na teoria de Newton: possíveis estrelas ou planetas (como o ponto escuro) podem ter órbitas circulares e estáveis. Contudo, órbitas com raio abaixo de um certo valor são todas instáveis. Essa zona é representada em tom claro. O círculo claro nessa zona é o chamado anel de luz: um feixe de luz consegue ter uma trajetória circular apenas nesse raio. O círculo negro central é o buraco negro: nada do que acontece lá dentro se vê cá fora.

à da luz, o que já vimos não ser possível. No interior do buraco negro encontram-se os restos da estrela-mãe que colapsou e lhe deu origem. Este ponto é conhecido como a singularidade, onde a teoria de Einstein deixa de ser válida. Para descrever a singularidade, precisamos de uma outra teoria mais completa, que explique a gravidade a distâncias muito pequenas.

Ao contrário do que se passa com a eletromagnetismo, os efeitos quânticos que descrevem a física a pequenas distâncias – que serão necessários para descrever a singularidade de um buraco negro – são irrelevantes para observadores como nós. Esses efeitos nunca conseguem escapar do horizonte de eventos. Vamos então olhar agora para o exterior. Assumamos que um astronauta está parado a 1 milímetro do horizonte de eventos de um buraco negro com uma massa igual à do nosso Sol. O astronauta tem uma lanterna que emite um flash de luz por segundo, segundo o astronauta. O Princípio da Equivalência dita que estes flashes chegam a nós, muito longe do buraco negro, espaçados não por um segundo, mas por cerca de meio minuto! Se o flash for ultravioleta para o astronauta, será infravermelho para nós. Da mesma forma, um segundo do astronauta são 30 segundos nossos: o tempo corre muito mais devagar ao pé do buraco negro! Esta experiên-

cia mostra porque é impossível provar realmente que buracos negros existem: qualquer aparelho que enviemos para fazer o teste demora, segundo os nossos relógios, um tempo infinito a atravessar o horizonte de eventos... nós e toda a nossa civilização estaríamos mortos antes de saber o resultado de tal experiência. O horizonte de eventos representa, de uma certa maneira, um fim do tempo como o conhecemos.

Agora é fácil de entender o que acontece a uma estrela a colapsar. O seu brilho diminui progressivamente, até que se extingue. Não é que a luz volte necessariamente para trás, como na perspectiva de Michell. Simplesmente, é desviada para frequências cada vez mais baixas e cada vez com menos energia, ou seja, menos brilhantes.

Como vimos, a gravidade consegue defletir a luz. Este efeito pode ser dramático ao pé de buracos negros: um feixe de luz emitido tangencialmente ao círculo claro da Figura 6, o chamado anel de luz que está localizado a um raio $R_{\text{Luz}} = 3GM/c^2$, permanece em órbita circular! A teoria de Newton também permite anéis de luz, só que prevê que este se encontra precisamente a meio caminho entre o centro e o ponto de não retorno da luz, ou seja nunca seria visível. Na teoria de Einstein o anel de luz é responsável pela aparência dos buracos negros.

Apesar da luz poder percorrer órbitas circulares à volta do buraco negro, estas órbitas são instáveis. Qualquer pequena perturbação leva-as a cair no buraco negro ou a escapar para zonas distantes. Esta é a grande diferença para a teoria de Newton, onde todas as órbitas circulares do problema de dois corpos são estáveis. Isto significa que não esperamos observar nenhuma matéria junto ao buraco negro. Órbitas circulares estáveis para objetos com massa são apenas possíveis na zona cinzenta da Figura 6. A fronteira dessa zona corresponde a um raio $R = 6GM/c^2$, o raio da última órbita estável. Se um buraco negro fosse iluminado, toda a luz que penetra no anel de luz seria absorvida. Portanto, a sombra de um buraco negro é ditada pelo anel de luz, e não pelo horizonte de eventos.

A famosa imagem do buraco negro M87* apresentada em 2019 - um buraco com uma massa de 6 bilhões massas solares - é na verdade uma imagem de luz que orbita em torno deste objeto e vai escapando para longe dele. Por definição, é impossível fotografar um buraco negro! Ainda

que não se possa provar a existência do horizonte de eventos, podemos fazer testes à teoria comparando a previsão da relatividade geral para a trajetória da luz com as imagens obtidas pelos telescópios.

5.3 Cisne X-1: a aposta

As propriedades que descrevemos são o nosso guia na busca de buracos negros no universo usando telescópios normais. O primeiro objeto a ser identificado como um excelente candidato a buraco negro foi uma fonte de raios-X a apenas 6 anos-luz de distância, batizada de Cisne X-1. Os raios-X foram detectados pela primeira vez durante os anos 60 usando contadores de Geiger em mísseis lançado para o espaço, já que os raios-X não penetram na atmosfera terrestre [17].

Já em 1971, diferentes grupos anunciaram a descoberta de uma estrela brilhante a emitir ondas de rádio mais ou menos na mesma posição da fonte de raios-X. Outras estrelas semelhantes a essa não emitem raios-X, portanto supôs-se que a estrela teria um companheiro que causa essa emissão. Pela análise da luz emitida pela estrela brilhante ao longo do tempo, é possível estudar a sua órbita. Conclui-se que ela tem um período orbital de 5.6 dias e uma massa de cerca de 20 sóis, enquanto o companheiro invisível teria uma massa de cerca de 20 sóis. Isto levou o físico Kip Thorne a apostar com Stephen Hawking, em 1974, que o companheiro seria um buraco negro. Porquê? Em primeiro lugar, este companheiro é muito pequeno e escuro. Tendo uma massa superior a 3 sóis, não pode ser uma anã branca ou uma estrela de nêutrons. Em segundo lugar, a emissão dos raios-X é periódica, variando em escalas de tempo de 0.001 segundos. Neste intervalo de tempo a luz só percorre 300 quilômetros. A explicação mais razoável para tudo isto é que o companheiro é um buraco negro, com material em órbita, perto da última órbita estável, e este material emite raios-X ao ser acelerado. Stephen Hawking deu-se por vencido ao saber as características de Cisne X-1. Contudo, a surpresa maior estava para vir...

5.4 Sagitário A*: o centro da galáxia

Durante mais de vinte anos, astrônomos na Alemanha e Estados Unidos estiveram à espreita do centro da nossa galáxia, a fotografar pacien-

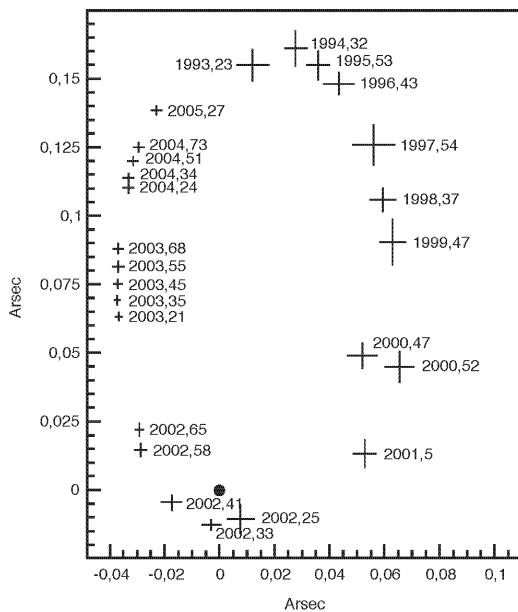


Figura 7: A posição angular da estrela S2 no céu, ao longo de cerca de 12 anos. A estrela S2 encontra-se em órbita em torno de um ponto marcado a escuro, no centro da nossa galáxia. Esta trajetória permite estimar a massa do ponto em cerca de 4 milhões de sóis (cortesia de Stefan Gillessen).

temente as órbitas de um conjunto de estrelas muito luminosas. Surpreendentemente, descobriram que todas as estrelas suficientemente perto do centro orbitam em torno de um ponto invisível, conhecido como Sagitário A*. A trajetória de uma das estrelas mais próximas deste ponto, chamada de S2, está representada na Figura 7. Esta figura mostra o ângulo, visto da Terra, entre um telescópio que aponta para o centro e outro telescópio que aponta para essa estrela. É fácil de ver que esta estrela se move no céu, com um período de aproximadamente 15 anos [18]. Estudando esta trajetória (mesmo com as leis de Newton), conclui-se que o centro tem uma massa de cerca de 4 milhões de sóis. Mas ainda mais intrigante, é que esta grande quantidade de massa não emite luz, e está concentrada numa região muito pequena. A explicação dada pela equipe que fez as observações é que se trata de um buraco negro gigante, mesmo no centro da nossa galáxia. O prêmio Nobel da Física de 2020 foi atribuído a este estudo.

É inerente à natureza humana, e também à própria ciência, a procura de soluções alternativas. A primeira reação de um cientista quando ouve falar

de uma nova descoberta é desconfiar da sua veracidade, e procurar mostrar que essa descoberta é falsa, ou que tem problemas. Aquelas descobertas que resistem a estas tentativas são então consideradas avanços pela comunidade e incorporadas no edifício científico. Claro está que quando a equipe anunciou os seus resultados, houve várias explicações alternativas. Contudo, nenhuma das alternativas conseguiu sobreviver ao escrutínio. Hoje, julgamos que este objeto é realmente um buraco negro, e que a grande maioria das galáxias tem um buraco negro supermassivo no centro, apesar de ainda não se compreender completamente o mecanismo por detrás da formação destes objetos supermassivos.

5.5 A calvície de buracos negros

A maior parte do século XX foi passado a estudar, de forma cada vez mais precisa, a partícula elementar da eletricidade: o elétron. A razão é fácil de entender. Se desvendássemos os mistérios do mais ínfimo constituinte da matéria, da partícula que resulta da divisão sucessiva de todos os corpos, então poderemos compreender tudo o que esteja relacionado com aglomerados dessa partícula (átomos, moléculas, células, frutos, seres humanos, etc). Dado que o elétron interage através da eletricidade e magnetismo, compreenderíamos também esta interação na perfeição. Este tem sido o objetivo dos aceleradores de partículas, como os que estão no CERN, durante as últimas décadas.

Os buracos negros podem ser vistos como a partícula elementar da gravidade. É o próprio vácuo, curvado sobre si mesmo, que os constitui. São feitos apenas de espaço-tempo. Apesar do seu nascimento ser causado pelo colapso de uma estrela, o estado final – o buraco negro em si – é vácuo puro. O material da estrela original está para lá do horizonte de eventos.

Por isso, acabam por ser os objetos mais simples do Universo. Um dos resultados mais importantes obtidos na era de ouro da gravidade é o teorema do não-cabelo: em situações de equilíbrio, a massa, carga elétrica e a rotação do buraco negro, dizem-nos tudo sobre ele [19–22]. Este resultado é impressionante quando comparado com a complexidade do planeta Terra ou de um único ser humano. Se quisermos descrever uma pessoa qualquer, precisamos de conhecer a sua massa, a sua altura, a cor dos olhos, o comprimento de

cada dedo, braço ou perna, quantos cabelos tem, que penteado usa, o traço dos lábios... uma lista infundável de variáveis. Já se dois buracos negros tiverem a mesma massa, a mesma carga e rodarem ao mesmo ritmo, então são gêmeos exatamente idênticos. Nenhuma experiência feita no exterior do buraco negro os conseguiria distinguir.

Para os maquiavélicos, podíamos tentar enganar a Natureza deixando cair uma bola de futebol no buraco negro. Todos nós distinguimos um relvado com uma bola de outro sem. Isto também é verdade para buracos negros: enquanto a bola cai, é claramente possível dizer que aquele buraco negro é diferente de um outro sem bola a cair. Mas à medida que esta se aproxima do horizonte de eventos, então toda a informação que resta é apenas e unicamente a da massa, carga e rotação do buraco negro que engoliu a bola. A cor da bola, o material que a constitui, se é ligeiramente achatada ou não, perde-se irremediavelmente no interior do buraco negro. Isto é, o horizonte de eventos de todos os buracos negros em equilíbrio é uma “superfície” (na realidade não existe superfície, estamos a lidar com o vácuo) perfeitamente polida. Não existem montanhas em buracos negros. É costume por isso dizer-se que os buracos negros não têm cabelo, onde “cabelo” representa a informação que normalmente associamos a objetos terrestres.

5.6 Censura cósmica

A singularidade no interior dos buracos negros é um problema: a descrição da gravidade não pode ser a correta se prevê campos gravitacionais infinitos, ou se as próprias equações deixam de fazer sentido porque não conseguem fazer previsões. De fato, até aos anos 60 pensava-se que a singularidade que aparecia no centro de um buraco negro se devia às simetrias que eram assumidas para o sistema. Por exemplo, o colapso de Oppenheimer e Snyder descrevia uma estrela com simetria esférica, ou seja igual vista de todos os ângulos. Mas talvez se a estrela tivesse a rodar ligeiramente, a força centrífuga inerente a essa rotação poderia prevenir o aparecimento de patologias.

Porém, em 1965, o matemático britânico Roger Penrose deitou por terra esta ideia ao provar o seu teorema da singularidade [23, 24]. Numa linguagem matemática, este teorema afirma que se no Universo os raios de luz forem sempre concentrados e nunca afastados entre si pela gravi-

dade - a chamada condição de energia nula - então sempre que se forma um horizonte de eventos, as geodésicas para a luz são incompletas para o futuro, isto é têm um ponto onde terminam e a partir do qual não podem ser estendidas para o futuro. Este ponto final é justamente a singularidade. Esta é inexplicável pelas leis da Natureza que hoje conhecemos. Isto é, eles abrigam a falha da descrição clássica da gravidade, a mesma que prevê a existência dos próprios buracos negros. A importância deste resultado foi reconhecida pelo Comitê Nobel em 2020, ao atribuir a outra metade do prêmio Nobel de Física a Penrose. Foi a primeira vez na história que este prêmio foi atribuído devido a um trabalho puramente matemático.

As singularidades impedem-nos de ter uma teoria plenamente funcional, que necessita, provavelmente, de ser corrigida com efeitos quânticos. Mas para que serve então a teoria, se o nosso universo está populado com buracos negros? Aqui entra o horizonte de eventos: dado que nada pode sair de um buraco negro, as singularidades dentro destes não afetam a causalidade fora do horizonte de eventos, onde vivemos. Portanto os buracos negros *protegem-nos* das falhas da relatividade geral, por assim dizer. O que acontece se houver uma singularidade que não esteja protegida por um horizonte de eventos, isto é que seja *nua*? Pode estar nesta folha, por exemplo? Então toda a região do espaço-tempo que esteja causalmente relacionada com este ponto, ou seja que possa ser atingida por um raio de luz que saia desta singularidade, deixa de ser determinística. Não poderíamos inferir, com base nas condições atuais, o que aconteceria no futuro. O princípio indutivo no qual assenta o método científico cairia completamente. Esta situação levou Penrose a tentar salvar a teoria, conjecturando que em geral não há singularidades nuas no Universo, ou seja elas estão todas escondidas por detrás de um horizonte de eventos. Esta é a conjectura da censura cósmica e no dia em que escrevemos permanece sem resposta definitiva [25–27].

6 Ouvir buracos negros

E agora voltamos à *Máquina do Mundo*. Pensemos no sistema Terra-Sol. A informação, transportada pela luz, demora cerca de 8 minutos a chegar do Sol ao nosso planeta. A relatividade

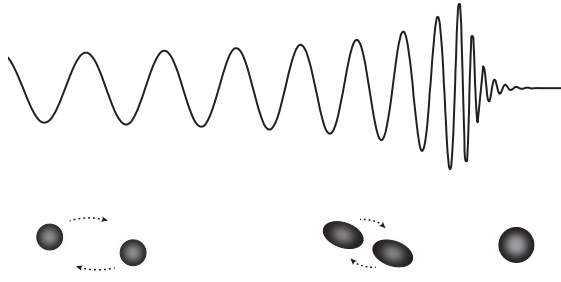


Figura 8: A evolução de uma binária emitindo ondas gravitacionais. Quando uma binária de estrelas emite ondas gravitacionais, perde energia e fica mais compacta: a sua velocidade aumenta e a sua separação diminui. Esta evolução reflete-se no aumento da amplitude e frequência da onda gravitacional emitida, mostrada aqui. Finalmente, os corpos chocam e formam um único corpo em repouso. A emissão de ondas cessa a partir desse instante.

geral é uma teoria da gravidade que respeita as mesmas propriedades de causalidade do eletromagnetismo de Maxwell. Então, a informação relativa a uma alteração do campo gravitacional do Sol, devido por exemplo a perda de massa, deve também ser transmitida por ondas. Devem existir ondas do campo gravitacional.

6.1 Ondas gravitacionais

Esta analogia foi proposta por Poincaré. Cargas elétricas em aceleração emitem luz: perturbações no campo eletromagnético que se propagam à velocidade da luz. As antenas emitem radiação devido à aceleração de partículas nos seus braços por via de uma corrente elétrica. Poincaré sugeriu que numa teoria relativista da gravidade, partículas com massa - a “carga elétrica” da gravidade - aceleradas, deveriam emitir perturbações do campo gravitacional.

Foi o próprio Einstein, numa série de artigos publicados entre 1916 e 1918, a obter uma solução do tipo de onda para as suas equações. Ondas gravitacionais são forças de maré, e surpreendentemente viajam à velocidade de luz. Na linguagem da relatividade geral, são distorções do espaço-tempo que se propagam no vácuo. É comum tentar visualizar estas ondas, imaginando um lençol esticado - o espaço-tempo - no qual esfregamos rapidamente um dedo de um lado para o outro. À medida que o fazemos, o lençol vai baloiçando, e estas deformações - as ondas gravitacionais - vão-se afastando do dedo pelo lençol.

As ondas gravitacionais são ondas transversas,

à semelhança das suas congêneres eletromagnéticas. Isto significa que a direção da perturbação que a onda induz é perpendicular à sua direção de propagação. Se uma onda gravitacional estivesse a incidir perpendicularmente nesta folha, o comprimento e largura da folha iriam aumentar e diminuir periodicamente no tempo, a uma frequência igual à frequência da onda, mas a espessura da folha manter-se-ia a mesma. As palavras que compõe esta frase iriam estender e comprimir, ou seja, a passagem de uma onda gravitacional modifica a distância entre dois pontos.

6.2 A fórmula do quadrupolo

Ora, o ser humano nunca se apercebeu da passagem de uma onda gravitacional. Temos que saber porquê. Tomemos um corpo, como uma mão a acenar, de massa M a realizar um movimento periódico de frequência Ω e amplitude R . A teoria de Einstein diz que este corpo emite ondas gravitacionais com frequência $\Omega, 2\Omega$ etc, que transportam energia. A potência (energia por unidade de tempo) em ondas gravitacionais é

$$\mathcal{P} \approx \frac{G^4}{c^5} \Omega^6 M^2 R^4. \quad (10)$$

Para uma mão a acenar, esta potência vale cerca de 10^{-84} Watts. O efeito destas ondas pode ser traduzido no deslocamento relativo δL , que duas partículas livres separadas por uma distância L experienciam quando a onda passa:

$$\frac{\delta L}{L} \approx \frac{G}{c^4} \frac{\Omega^2 M R^2}{r}, \quad (11)$$

onde $r \gtrsim c/\Omega$ é a distância entre a fonte (as mãos neste caso) e as partículas. Vemos então que uma mão a acenar produz ondas gravitacionais com frequência de cerca de um Hertz. Ao passar por duas massas-teste separadas por um metro, estas sofrem uma variação na sua separação de 10^{-53} m. E agora percebemos porque é tão difícil gerar e ver ondas gravitacionais. De todas as interações fundamentais da Natureza, a gravidade é de longe a mais fraca. Por isso, por muito que abanemos os nossos braços, as ondas que geramos são demasiado fracas para nos preocuparmos com elas.

Precisamos de corpos com muita massa, que viajem a velocidades muito elevadas. Alguns objetos celestes são bons candidatos. De fato, a maior parte das estrelas e buracos negros estão

presentes em binárias, onde os dois constituintes orbitam em torno um do outro. Consideremos o caso mais simples de dois corpos com massa M a descreverem trajetórias circulares em torno de um centro comum, a uma distância R entre si. Estando sujeitos à gravidade um do outro, estes corpos aceleram, e por isso alteram a direção do seu movimento. Conseqüentemente, a binária emite ondas gravitacionais, que para além de deformarem o espaço-tempo, também transportam energia. A potência \mathcal{P} associada a esta emissão, ou seja, a energia que é transportada por unidade de tempo pelas ondas emitidas, obedece à chamada fórmula do quadrupolo

$$\mathcal{P} = \frac{64 G^4 M^5}{5 c^5 R^5}. \quad (12)$$

Existem dois aspectos importantes acerca deste resultado. Para que a emissão em ondas gravitacionais seja relevante, a distância R entre os corpos deve ser o mais pequena possível, e a sua massa o maior possível. Temos que ter muita massa em pouco espaço...precisamos de buracos negros, ou estrelas de nêutrons. Em segundo lugar, este resultado só se refere a órbitas circulares. Contudo, a emissão de ondas gravitacionais tende a “circularizar” a órbita de binárias, pelo que o resultado acaba por ser bem mais geral.

Tomemos dois buracos negros, cada um com massa semelhante ao nosso Sol, que estejam prestes a colidir um com o outro. Neste, caso podemos tomar como massa $M = 5M_{\odot}$ e a distância entre eles é duas vezes o seu raio de Schwarzschild. Substituindo na fórmula do quadrupolo, obtemos uma potência de 5×10^{50} Watts, um valor muito maior que a luminosidade do Sol. Sabendo que há cerca de 10^{11} estrelas na nossa galáxia, e cerca de 10^{10} galáxias no Universo visível, então podemos estimar que a potência emitida por todas as estrelas no Universo visível deverá ser da ordem de $10^{10} \times 10^{11} \times L_{\odot} = 3 \times 10^{47}$ Watts. Um simples par de buracos negros a orbitar perto um do outro emite mil vezes mais energia em ondas gravitacionais que todas as estrelas conhecidas!

Esta libertação monstruosa de energia torna o estudo de ondas gravitacionais um dos tópicos mais excitantes da física moderna. O Universo pode ser separado em diferentes escalas de energia. No caso da gravidade, a teoria de Newton descreve bem o Universo a baixas velocidades e campos gravitacionais fracos, o que corresponde a baixas energias. Este regime é válido na maior

parte dos sistemas astrofísicos. À medida que vamos considerando objetos com mais massa e a mover-se a velocidades mais elevadas, a energia aumenta e a teoria de Newton dá lugar à relatividade geral. Como vimos, esta prevê as suas próprias limitações ao admitir singularidades no espaço-tempo. A crença geral é que deverá existir uma teoria ainda mais geral, que englobe a relatividade geral e descreva a gravidade a distâncias muito pequenas de forma a explicar as singularidades, ou seja a escalas de energia ainda maiores. Para a conseguirmos obter, precisamos de dados experimentais que nos permitam testar a relatividade geral em situações extremas. Por esta razão, há a expectativa de observar novos fenômenos com ondas gravitacionais.

Estas ondas praticamente não interagem com o meio onde se propagam, ao passo que a radiação eletromagnética é muito mais susceptível a perturbações ao longo da sua viagem, como por exemplo o bloqueio por poeira interestelar. Assim, as ondas gravitacionais que chegam à Terra trazem consigo informação pura sobre o sistema onde foram criadas.

6.3 Hulse-Taylor

A interação tão fraca entre ondas gravitacionais e a matéria é um problema quando queremos detectar estas ondas. Como sabemos que elas existem? Como é que as apanhamos?

Um dos princípios fundamentais da física é o da conservação da energia. Se as ondas gravitacionais transportam energia, então ela tem de ser extraída de algum lado. Como a única fonte de energia no sistema é a própria binária, a energia total é a soma da energia cinética devido ao movimento dos dois corpos e da energia potencial associada à interação gravítica entre eles,

$$E_{\text{Bin}} = -\frac{1}{2} \frac{GM}{R}. \quad (13)$$

Se nenhum dos corpos estiver a perder massa e sendo G uma constante, então a única quantidade variável é a distância R entre os dois corpos. Portanto, a separação entre os corpos vai evoluir devido à emissão de ondas gravitacionais. Em particular, R tem de decrescer, os corpos aproximam-se. Assim, a atração gravitacional entre eles torna-se mais forte, e os corpos orbitam a velocidades cada vez mais elevadas, radiando ainda mais ondas gravitacionais. O destino desta

dança, caso nenhum dos corpos seja destruído por forças de maré, é uma colisão. Esta evolução está mostrada na Figura 8.

Em 1974, os astrônomos americanos Russell Hulse e Joseph Taylor Jr. detectaram um pulsar a 21 mil anos-luz da Terra, com um período de rotação muito bem definido de 59 milissegundos. Porém, este pulsar apresentava um comportamento distinto das observadas até então. Às vezes, os pulsos chegavam mais cedo e outras vezes mais tarde. Estas variações pareciam ser periódicas no tempo, repetindo-se a cada 7,75 horas. Hulse e Taylor acabaram por concluir que este comportamento era consistente com a presença do pulsar numa binária. Esta é constituída pelo próprio pulsar e por outra estrela de nêutrons (não magnetizada, logo não emite os pulsos de luz periódicos característico do pulsar), ambas com uma massa de 1,4 massas solares. Como os pulsares funcionam como relógios muito precisos, Hulse e Taylor conseguiram medir a diminuição no período da binária devido à emissão de ondas gravitacionais. Ao fim de 4 anos, publicaram os primeiros resultados, e a diminuição do período da órbita - 76,5 microssegundos por ano - concordava com a prevista pela fórmula do quadrupolo.

Esta foi a primeira detecção (ainda que indireta) de ondas gravitacionais, e deu direito ao prêmio Nobel de Física em 1993. Segundo os dados mais recentes, a diminuição do período corrobora a relatividade geral com uma possível discrepância de apenas 0,16 %.

6.4 A detecção direta de ondas gravitacionais

As forças de maré induzidas pela passagem de uma onda gravitacional, alteram as distâncias entre corpos (como forças que são). Como vimos, mesmo para corpos livres esta alteração é minúscula. Apesar de existirem eventos cataclísmicos no Universo que geram uma enorme quantidade de ondas gravitacionais, a amplitude destas é inversamente proporcional à distância que percorrem. Assim, as ondas gravitacionais chegam à Terra com amplitudes fracas. Precisamos de um instrumento que detecte variações de distância de forma muito precisa: o interferômetro de Michelson-Morley. Como vimos, esta experiência permite comparar o tempo que a luz demora a percorrer dois percursos. Se os percursos forem diferentes, o tempo que a luz demora

a percorrê-los é diferente. Este é o princípio de funcionamento subjacente aos interferômetros de ondas gravitacionais. Enquanto o interferômetro de Michelson-Morley tinha apenas alguns metros, os detectores de ondas gravitacionais estendem-se por quilômetros, já que a variação da distância é proporcional ao tamanho do detector [ver Eq. (11)]. Mesmo assim, as ondas gravitacionais que atingem a Terra provocam uma variação no comprimento dos seus braços de uma fracção do tamanho de um elétron. Estes instrumentos têm por isso de ser extremamente precisos, o que obrigou ao desenvolvimento de lasers potentes, e espelhos perfeitos capazes de refletir a luz sem perdas. Esta tecnologia está já a ser aplicada na indústria, o que é mais um exemplo dos dividendos que a sociedade pode retirar do investimento em ciência fundamental.

Em 1994, já após a construção de vários protótipos e feitos os devidos testes, o consórcio LIGO (do inglês *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) assegurou um financiamento de 395 milhões de dólares para a construção de 2 interferômetros. Um foi construído em Livingston, Louisiana, no sudeste dos EUA enquanto o outro foi colocado em Hanford, Washington, 30000 quilômetros a noroeste. Cada um é constituído por dois braços de 1 metro de diâmetro e 4 quilômetros de extensão, que fazem um ângulo de 90° entre si, e que são percorridos por lasers em vácuo. Quando uma onda gravitacional atinge a Terra, os dois braços variam ligeiramente o comprimento de forma distinta, o que pode ser detectado a partir do tempo de chegada dos lasers. A diferença entre a distância percorrida pelos lasers é recolhida ao longo do tempo e comparada com as previsões da relatividade geral, num processo semelhante ao que é feito para a verificação de assinaturas. Apesar de se tratar de instrumentos muito precisos, estão sujeitos a ruído que perturba o sinal. A baixas frequências (menores que 10 Hz) o sinal é dominado pela vibração da Terra. Já a altas frequências (maiores que 1000 Hz), o ruído é causado pelo chamado *shot noise*, que ocorre devido a flutuações aleatórias na intensidade dos lasers. Assim, há uma banda de frequências de 10-1000 Hz onde estes aparelhos podem operar. Havendo mais do que um, torna-se muito improvável que um evento semelhante detectado por ambos não se deva a uma onda gravitacional, ou seja, previnem-se falsas detecções.

Sabendo a separação entre os interferômetros e que as ondas gravitacionais viajam à velocidade da luz, é também possível prever a diferença no tempo entre os sinais detectados nos dois instrumentos. Quando este é suficientemente parecido com um sinal previsto pela teoria, e é detectado em ambos os interferômetros, diz-se que houve a detecção de um evento.

Apenas em setembro de 2015 o LIGO detectou o primeiro evento. Após análise dos dados, conclui-se que este tinha sido criado por uma colisão entre 2 buracos negros de 29 e 36 massas solares a 1,3 bilhões de anos luz de distância, que formaram um buraco negro com 60 massas solares. O sinal deste evento durou 0,2 segundos e está representado na Figura 8.

A produção e detecção de ondas eletromagnéticas foi feita por Hertz no laboratório, uma década depois de Maxwell as ter previsto. A detecção direta de ondas gravitacionais demorou um século, e foi celebrada em todo o mundo como um acontecimento científico sem precedentes. Era a primeira oportunidade na história para testar a teoria da relatividade geral em regimes de campos gravitacionais muito fortes. A experiência LIGO foi recompensada com o prêmio Nobel de Física de 2017, atribuído a três físicos profundamente envolvidos na experiência: Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne. Desde 2015, foram construídos mais interferômetros e à data foram detectados 50 eventos de ondas gravitacionais. Até agora, nenhum deles evidenciou algo que a relatividade geral não pudesse explicar. Mesmo após 100 anos e sujeita a testes cada vez mais precisos, a teoria de Einstein permanece de pedra e cal como o paradigma científico para descrever a gravidade.

7 Uma nova era de ouro

A história da gravidade não começou a ser forjada no século passado, nem no anterior. Nem sequer neste milênio. Esta história é anterior à própria humanidade. Começou a ser escrita com o nascimento do Universo, e continuou com as primeiras estrelas, que gastaram o seu combustível, colapsaram sobre si mesmas e formaram buracos negros. Há 1,3 bilhões de anos, dois destes objetos bailavam em torno um do outro, perdendo energia devido à emissão de ondas gravitacionais, o que os fez aproximarem-se, até se unirem num

só. As ondas gravitacionais geradas nesta dança começaram então uma viagem pelo espaço e pelo tempo.

No entanto, num planeta longínquo, a física, a química e a biologia conspiravam para formar sistemas vivos cada vez mais complexos. Há 85 milhões de anos apareciam os primeiros primatas, que eventualmente deram origem ao *Homo Sapiens*. Nutridos de uma curiosidade inata, os humanos tentavam compreender o mundo que os rodeia. Arranjaram uma linguagem - a Matemática - para descrever os fenômenos físicos. Perceberam que as coisas invariavelmente caíam no chão e quiseram perceber o *como* e o *porquê*. Há 300 anos atrás, quando as ondas formadas na tal colisão estavam a 3×10^{15} quilômetros de distância da Terra, Newton formalizava a primeira teoria da gravidade. Volvidos 100 anos, Michell descrevia um protótipo dos buracos negros que tinham colidido. Mais um século passado, Einstein corrigia as falhas de Newton e previa a existência destas ondas gravitacionais, que estavam agora a apenas 100 anos de chegar à Terra. Há 50 anos, iniciavam-se esforços para construir um instrumento que permitisse detectá-las. Apenas uns dias antes destas chegarem à Terra, este instrumento era finalmente ligado para cumprir o seu objetivo. O sucesso que foi a detecção direta de ondas gravitacionais não pode ser atribuído apenas a Newton, Einstein ou outras individualidades. É o culminar dos esforços de toda uma espécie, cuja racionalidade veio acompanhada de uma fome incessável de fazer perguntas. É um percurso feito a partir da morte e vida de estrelas, teorias e acima de tudo pessoas.

Nas próximas décadas, os interferômetros em operação vão ser melhorados e novos instrumentos, com melhor tecnologia vão ser construídos. Em 2034-2040, a Agência Espacial Europeia planeja lançar a experiência LISA (do inglês *Laser Interferometer Space Antenna*). A LISA será um interferômetro no espaço, constituído por 3 satélites a orbitar a Terra, à mesma distância desta que do Sol. As vantagens de ter um instrumento destes são óbvias. No espaço não há sismos a introduzirem ruído na experiência, logo esta torna-se muito mais precisa. Para além disso, o próprio espaço é vácuo pelo que os braços do interferômetro não têm que ser construídos fisicamente, o que permite que sejam muito mais compridos. Em vez de 4 quilômetros, estes satélites vão estar

separados por milhões de quilômetros, formando um triângulo equilátero. Os satélites funcionam como os espelhos do interferômetro de Michelson-Morley, e entre eles estarão a ser emitidos lasers, para monitorizar as variações na distância entre os satélites.

Estes “braços” tão longos tornam o interferômetro sensível a frequências mais baixas, entre os $10^{-5} - 1$ Hz, o que permite detectar uma binária muito mais cedo no seu processo de evolução e por isso acompanhá-las durante muito mais tempo. A primeira fase da experiência LISA terá um tempo de vida de 4 anos, mas algumas binárias podem ficar na banda de frequências detectáveis pela experiência durante milhões de anos! Tendo um sinal mais limpo (porque há menos ruído) e muito mais longo irá permitir fazer testes muito mais precisos à relatividade geral. Esta gama de frequências permite olhar para sistemas mais variados para além da simples binária composta por 2 objetos com massas de poucos sóis que até agora tem sido estudada. Com a LISA, iremos observar ondas gravitacionais vindas da colisão de dois buracos negros supermassivos, ondas emitidas durante a morte de uma estrela numa supernova, ondas emitidas durante o início do nosso Universo... existem perguntas para as quais vamos ter resposta, ainda que parcial,

- Qual a origem dos buracos negros supermassivos que se encontram no centro das galáxias? Como é que nasceram e cresceram?
- Os buracos negros só têm realmente os 3 “cabelos”: massa, carga e rotação?
- Nós vimos mesmo buracos negros?
- As ondas gravitacionais viajam realmente à velocidade da luz?
- Como é que o Universo se formou e quão rápido se está a expandir? E o que é o que faz expandir?
- Quais são as propriedades da matéria a altas densidades que constitui as estrelas de nêutrons?
- Qual a natureza da matéria escura?
- Como funciona a gravidade a pequenas distâncias?

- A descrição de Einstein captura todas as observações?

Esta lista não é de todo exaustiva, mas ilustra a riqueza que a física dos buracos negros e ondas gravitacionais trará nas próximas décadas. Mas não conseguimos prever o imprevisível. É possível que vejamos fenômenos inesperados, coisas novas em que pensar. Serão tempos de descoberta e interrogação, onde provavelmente muito do que hoje consideramos serem verdades inabaláveis passarão a ser um pouco menos verdade, apenas mais um piso na nossa torre de Babel da Ciência. Uma nova era de ouro, onde a única certeza é que com as respostas que alcançaremos, virão ainda mais perguntas por responder.

Agradecimentos

Agradecemos à Ana Carvalho por ter feito uma revisão cuidadosa do texto e por produzir todas as figuras para nós. Devemos também um agradecimento ao Conselho Europeu de Investigação, por apoio à investigação através do programa H2020 ERC Consolidator Grant “Matter and strong-field gravity: New frontiers in Einstein’s theory” acordo no. MaGRaTh-646597. Este projeto foi também apoiado pelo programa europeu Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 690904, e GWverse COST Action CA16104, “Black holes, gravitational waves and fundamental physics.” Finalmente, agradecemos à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelos projetos No. SFRH/BD/143657/2019, UIDB/00099/2020, PTDC/MAT-APL/30043/2017 e PTDC/FIS-AST/7002/2020.

Sobre os autores

Vitor Cardoso (vitor.cardoso@tecnico.ulisboa.pt) é professor de física no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal, onde integra o grupo de pesquisa em gravitação CEN-TRA. Coordenador do GWverse COAST Action, envolvendo cerca de 30 países e 300 cientistas, com objetivo de explorar a física de ondas gravitacionais. Já publicou mais de 200 artigos científicos e possui dezenas de prêmios e reconhecimentos por seus projetos de pesquisas.

Francisco Duque (francisco.duque@tecnico.ulisboa.pt) é doutorando em física no Instituto

Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal, onde desenvolve pesquisas sobre buracos negros e ondas gravitacionais.

Referências

- [1] P. Touboul, G. Métris et al., *The MICROSCOPE space mission to test the equivalence principle*, *Comptes Rendus Physique* **21**(2), 139 (2020).
- [2] A. Gabbey, *Isaac Newton: The principia: Mathematical principles of natural philosophy*, trans. by i. bernard cohen and anne whitman, assisted by julia budenz,, *Isis* **94**(4), 719 (2003).
- [3] M. H. Fizeau, *The hypotheses relating to the luminous aether, and an experiment which appears to demonstrate that the motion of bodies alters the velocity with which light propagates itself in their interior*, *Philosophical Magazine and Journal of Science* **2**(14), 568 (1851).
- [4] J. C. Maxwell, *A dynamical theory of the electromagnetic field*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **155**, 459 (1865). Disponível em <http://www.jstor.org/stable/108892>, acesso em jul. 2021.
- [5] A. A. Michelson e E. W. Morley, *Influence of motion of the medium on the velocity of light*, *American Journal of Science* **s3-31**(185), 377 (1886).
- [6] J. Michell, *VII. on the means of discovering the distance, magnitude, & c. of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose. by the Rev. John Michell, B.D. F.R.S. in a letter to Henry Cavendish, Esq. F.R.S. and A.S.*, *Phil. Trans. R. Soc.* **74**, 35 (1784).
- [7] A. Einstein, *On the electrodynamics of moving bodies*, *Annalen Phys.* **17**, 891 (1905).
- [8] A. Einstein, *On the relativity principle and the conclusions drawn from it*, *Jahrb Radioaktivitat Elektronik* **4**, 411 (1907).
- [9] A. Einstein, *The field equations of gravitation*, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)* **1915**, 844 (1915).
- [10] F. W. Dyson, A. S. Eddington e C. Davidson, *A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of may 29, 1919*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* **220**, 291 (1920).
- [11] J. P. S. Lemos, C. A. R. Herdeiro e V. Cardoso, *Einstein and Eddington and the eclipse in Principe: Celebration and science 100 years after*, *Gazeta de Física* **42**(4/5), 26 (2019). Disponível em <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/477/article/1753/pdf>, acesso em jul. 2021.
- [12] S. Chandrasekhar, *The maximum mass of ideal white dwarfs*, *Astrophys. J.* **74**, 81 (1931).
- [13] J. Chadwick, *Possible existence of a neutron*, *Nature* **129**, 312 (1932).
- [14] J. R. Oppenheimer e G. M. Volkoff, *On Massive neutron cores*, *Phys. Rev.* **55**, 374 (1939).
- [15] J. R. Oppenheimer e H. Snyder, *On Continued gravitational contraction*, *Phys. Rev.* **56**, 455 (1939).
- [16] A. Hewish, S. J. Bell et al., *Observation of a rapidly pulsating radio source*, *Nature* **217**(5130), 709 (1968).
- [17] S. Bowyer, E. T. Byram et al., *Cosmic X-ray sources*, *Science* **147**(3656), 394 (1965).
- [18] R. Schodel et al., *A star in a 15.2 year orbit around the supermassive black hole at the center of the Milky Way*, *Nature* **419**, 694 (2002). [ArXiv:astro-ph/0210426](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210426).
- [19] D. Robinson, *Uniqueness of the Kerr black hole*, *Phys. Rev. Lett.* **34**, 905 (1975).

- [20] J. D. Bekenstein, *Black hole hair: 25 - years after*, in *Proceedings of the Second International A.D. Sakharov Conference on Physics: Moscow, Russia 20-24 May 1996*, editado por I. M. Dremin e A. M. Semikhatov (World Scientific, 1997). [ArXiv:gr-qc/9605059](#).
- [21] P. T. Chrusciel, J. L. Costa e M. Heusler, *Stationary black holes: Uniqueness and beyond*, [Living Rev. Relativ.](#) **15**, 7 (2012). [ArXiv:1205.6112](#).
- [22] V. Cardoso e L. Gualtieri, *Testing the black hole ‘no-hair’ hypothesis*, [Class. Quant. Grav.](#) **33**(17), 174001 (2016). [ArXiv:1607.03133](#).
- [23] R. Penrose, *Gravitational collapse and space-time singularities*, [Phys. Rev. Lett.](#) **14**, 57 (1965).
- [24] R. Penrose, *Gravitational collapse: The role of general relativity*, [Riv. Nuovo Cim.](#) **1**, 252 (1969).
- [25] V. Cardoso, J. a. L. Costa et al., *Quasi-normal modes and strong cosmic censorship*, [Phys. Rev. Lett.](#) **120**(3), 031103 (2018). [ArXiv:1711.10502](#).
- [26] R. Emparan, *Predictivity lost, predictivity regained: a Miltonian cosmic censorship conjecture*, [Int. J. Mod. Phys. D](#) **29**(14), 2043021 (2020). [ArXiv:2005.07389](#).
- [27] S. Hollands, R. M. Wald e J. Zahn, *Quantum instability of the Cauchy horizon in Reissner–Nordström–deSitter spacetime*, [Class. Quant. Grav.](#) **37**(11), 115009 (2020). [ArXiv:1912.06047](#).