



# Teoria da relatividade geral: 100 anos encurvando como vemos o universo

.....  
**Daniel Augusto Turolla Vanzella**

Instituto de Física de São Carlos,  
Universidade de São Paulo, São Carlos,  
SP, Brasil

E-mail: [vanzella@ifsc.usp.br](mailto:vanzella@ifsc.usp.br)  
.....

## Introdução

**E**m novembro de 1915, Albert Einstein apresentava à comunidade científica o resultado de quase dez anos de esforços em sua busca por uma nova teoria da gravidade. A *teoria da relatividade geral*, como foi chamada, que substituiu, como entendimento fundamental, a velha teoria da gravitação universal de Isaac Newton, revolucionava mais uma vez nosso entendimento acerca de *tempo e espaço*, que, agora, além de serem percepções dependentes de observador (ou seja, *relativas*) de um ente mais fundamental – o *espaço-tempo* –, eram também suscetíveis de serem *distorcidos*

**A constatação de que objetos soltos no ar caem no chão é tão corriqueira que o leitor pode se surpreender ao saber que as tentativas de se explicar esse fenômeno levaram a duas das maiores revoluções na história do pensamento humano**

pela presença de matéria e energia. Nesse cenário, a mais cotidiana das interações fundamentais conhecidas, a gravidade, ganhou uma interpretação profunda e até mesmo fantástica. Da “criação” do Universo e sua evolução, aos abismos de tempo e espaço escondidos no interior dos buracos negros, a relatividade geral transformou para sempre nossa visão da natureza. E mesmo depois de um século, continua a nos surpreender e a ser a única janela por onde podemos vislumbrar aspectos da natureza que ainda escapam aos maiores e mais avançados laboratórios terrestres.

Das quatro *forças fundamentais* conhecidas na natureza – aquelas que não podem ser explicadas em termos de forças ainda mais elementares –, a *gravidade* é certamente a que primeiro nos demos conta de sua existência. Antes mesmo de descermos das árvores, aprendemos a respeitá-la – sob pena de, não o fazendo, não sobrevivermos ao tombo. A constatação de que objetos soltos no ar caem no chão

é tão corriqueira que o leitor pode se surpreender ao saber que as tentativas de se explicar esse fenômeno levaram a duas das maiores revoluções na história do pensamento humano, unindo céu e terra e tocando no mais antigo de todos os mistérios: a origem do Universo.

## Alcançando o céu

Ao que sabemos, a primeira tentativa de se explicar o fenômeno de queda de objetos remonta aos gregos antigos. De acordo com o filósofo grego Aristóteles (384–322 a.C.), um objeto material lançado ao ar retornava ao solo porque o elemento *terra* presente em sua constituição tinha a *tendência natural* de ocupar o centro do

Universo. Como a própria Terra já ocupava esse lugar privilegiado, raciocinava Aristóteles, o melhor que os outros corpos materiais poderiam fazer seria aproximarem-se o máximo possível desse centro; ou seja, voltarem ao chão.

Apesar de insatisfatória para os padrões atuais, essa explicação permaneceu sem contestação no mundo ocidental por quase dois mil anos. Em particular, ela se encaixava naturalmente em duas idéias amplamente aceitas até o final da Idade Média. Uma delas era o *geocentrismo* – a visão de que a Terra ocupava o centro do Universo –, essencial na explicação aristotélica da gravidade. Outra era a rígida dicotomia entre os fenômenos terrestres e os celestes: a causa de um fenômeno tão mundano quanto a queda de um objeto não podia ter nenhuma conexão com fenômenos que se desenrolavam na esfera celeste, como o movimento da Lua e dos planetas, fenômenos estes sob a jurisdição exclusiva de anjos e deuses. Foi o físico inglês Isaac Newton

---

A teoria da relatividade geral revolucionou nosso entendimento acerca de tempo e espaço. Com ela, a mais cotidiana das interações fundamentais conhecidas, a gravidade, ganhou uma interpretação profunda e até mesmo fantástica. Da “criação” do Universo aos abismos de tempo e espaço escondidos no interior dos buracos negros, a relatividade geral transformou para sempre nossa visão da Natureza. E mesmo depois de um século, continua a nos surpreender e a ser a única janela por onde podemos vislumbrar aspectos da Natureza que ainda escapam aos maiores e mais avançados laboratórios terrestres.

(1642-1727) quem primeiro demonstrou que tal separação era ilusória e que a mesma lei que rege a queda de uma simples maçã aqui na Terra podia também regular o movimento da Lua ao redor da Terra e dos planetas ao redor do Sol. A sua *lei da gravitação universal* - *universal* por se aplicar igualmente a *todos* os objetos, terrestres e celestes - marca a primeira grande unificação ocorrida no âmbito científico, rasgando o véu que mantinha os mistérios do céu protegidos do poder de nossa razão.

Por mais de duzentos anos, a gravitação universal de Newton foi amplamente aplicada, explicando com sucesso o movimento de planetas e cometas, o fenômeno das marés provocado pela atração gravitacional da Lua, a precessão dos equinócios - mudança gradual na direção do eixo de rotação da Terra devido a seu formato ligeiramente achatado e à força gravitacional do Sol -, entre outros. Sua exatidão era (e é) tão grande que, baseado nessa lei e em pequenas irregularidades na órbita do planeta Urano, o matemático francês Urbain Le Verrier (1811-1877) foi capaz de *prever*, em 1846, a existência e a posição de um planeta até então desconhecido que seria responsável por essas irregularidades; Netuno, como foi batizado, foi descoberto dias depois pelo astrônomo alemão Johann Galle (1812-1910) onde Le Verrier havia dito que ele estaria. Plutão seria descoberto mais ou menos da mesma maneira, em 1930, devido a irregularidades na órbita de Netuno. Mas se a teoria da gravitação universal de Newton era tão bem sucedida, por que a necessidade de substituí-la?

### Tempo e espaço relativos

Em 1905, os alicerces mais profundos sobre os quais todas as teorias físicas são construídas, nossas noções elementares de *tempo* e *espaço*, foram abalados. O jovem físico alemão Albert Einstein (1879-1955), então um desconhecido funcionário do escritório de patentes de Berna, Suíça, apresentava a solução para um enigma que vinha desafiando físicos teóricos e experimentais havia cerca de duas décadas: a *invariância* da velocidade da luz. Diferentemente da velocidade de objetos comuns, cujo valor também depende do estado de movimento

do observador que faz a aferição - um carro a 40 km/h em relação a um pedestre parado na calçada é visto com uma velocidade de 70 km/h pelo motorista de

um outro carro trafegando em sentido contrário a 30 km/h -, a velocidade da luz parecia ser sempre a mesma, cerca de 300.000 km/s, independente do movimento relativo entre a fonte emissora e o observador - ou seja, no exemplo anterior, ambos, pedestre e motorista do carro trafegando em sentido oposto, mediriam *exatamente* a mesma velocidade para a luz emitida pelo farol do primeiro carro. Einstein percebeu que a única maneira consistente de compreender esse estranho comportamento -

uma velocidade *absoluta* - era aceitar que tanto a percepção de espaço quanto a de tempo deveriam depender do movimento do observador: tempo e espaço seriam conceitos *relativos*. Um exemplo pitoresco comumente utilizado para ilustrar esse fato é o de dois irmãos gêmeos que se separam, um deles saindo em uma viagem a altíssima velocidade e o outro permanecendo em sua vida pacata. Quando o gêmeo viajante retorna de sua veloz empreitada, encontra seu irmão tendo envelhecido *mais* do que ele próprio; ou seja, o tempo passou mais devagar para o viajante do que para quem permaneceu em repouso - efeito tanto mais acentuado quanto mais próximo da velocidade da luz tiver sido o movimento do viajante. Além disso, a distância percorrida na viagem também é fonte de discordância: para o gêmeo que ficou parado, a distância percorrida pelo seu irmão viajante é maior do que a que este último atribui a sua própria viagem. Einstein mostrou que nossas percepções de tempo e espaço devem ser afetadas pelo nosso estado de movimento de modo a compactuar para que um valor especial de velocidade seja absoluto: a velocidade da luz.

Ao revolucionar nosso entendimento sobre tempo e espaço, a *teoria da relatividade*, como ficou conhecida a teoria de Einstein, marcou uma mudança de paradigma na física. Agora, qualquer teoria com pretensões de descrever a natureza em seus aspectos mais fundamentais deveria ser construída sobre essas novas fundações e não sobre as velhas bases newtonianas. Em particular, a teoria da gravitação universal de Newton, assentada sobre os alicerces de tempo absoluto

e espaço euclidiano, por mais bem sucedida que tivesse sido até aquele momento, tinha que ser substituída por uma nova teoria da gravidade que se conformasse com esse novo paradigma.

### Encurvando o tempo e o espaço

O próprio Einstein tomou para si essa tarefa de encontrar uma nova teoria para a gravidade. Se fôssemos citar os principais marcos em sua busca, eles seriam três: a formulação do *princípio de equivalência de Einstein*, o surgimento da idéia de *espaço-tempo* e a percepção de que esse espaço-tempo deveria ter uma *geometria curva*.

O princípio de equivalência de Einstein é na verdade uma

reinterpretação de um fato que já era bem conhecido na gravitação newtoniana: o de que todos os objetos caem com a mesma aceleração sob a ação da gravidade, independentemente do quão pesados sejam. Einstein percebeu que esse inocente fato, sozinho, possibilitava interpretar a força da gravidade como sendo uma *força de inércia*, termo usado para designar uma força que deixa de existir quando se adota um ponto de vista especial - o de um referencial inercial. Um exemplo comum de uma força de inércia é a *força centrífuga* que tenta nos jogar para fora de um referencial em movimento circular, como um carrossel girando ou um carro fazendo uma curva. Essa força, que tem efeitos bastante reais para quem está nesse referencial, sendo jogado para fora, simplesmente deixa de existir quando se adota o ponto de vista de alguém parado em terra firme, para quem a simples *inércia* dos objetos - a tendência de manterem seu estado de movimento retilíneo com velocidade constante - é a responsável por "jogá-los" para fora. No caso da gravidade, imagine-se confinado(a) em uma cabine que parece ser um elevador, sem saber como foi parar ali. De repente, um súbito solavanco é seguido de um intenso frio na barriga e uma sensação de total ausência de peso. Seus pés mal tocam o chão e seu celular, tendo escapado de sua mão com o susto, flutua a seu lado. Sua conclusão é tão desesperadora quanto aparentemente inescapável: o elevador encontra-se em queda livre, sendo a sensação de flutuação apenas uma consequência de que tudo - elevador, você, seu celular - cai com a mesma aceleração sob a ação da gravidade. Você apenas lamenta que essa sensação logo terminará com

**Para explicar a invariância da velocidade da luz - problema que desafiou os físicos durante duas décadas - Einstein propôs que tanto o espaço quanto o tempo dependiam diretamente do observador. Portanto, esses conceitos eram relativos**

**O sucesso da gravitação universal de Newton foi construído sobre triunfos como prever irregularidades na órbita de Urano devido a presença de outro corpo próximo. Esse corpo seria descoberto e batizado de Netuno**

o elevador se estatelando no fundo do fosso. No entanto, um pensamento otimista lhe vem à mente: estaria *mesmo* o elevador em queda livre? Como ter certeza, apenas baseado no que acontece dentro da cabine? Como discernir a situação de queda livre da possibilidade de que essa cabine na verdade esteja flutuando no espaço sideral longe de qualquer planeta ou corpo capaz de provocar gravidade? Esse é exatamente o teor do princípio de equivalência de Einstein: é impossível discernir, através de experimentos *locais* – dentro da cabine e em um curto intervalo de tempo –, a situação de queda livre em um campo gravitacional da de se estar livre de qualquer força – ou seja, inercial – no espaço sem gravidade. Essa idéia, que o próprio Einstein qualificaria como a mais feliz de sua vida, fornecia uma valiosa conexão entre situações sem gravidade – onde sua teoria da relatividade era aplicável – e situações com gravidade. Ele havia dado o primeiro passo em sua busca.

O segundo passo não foi dado por Einstein mas sim por um ex-professor seu, o matemático alemão Hermann Minkowski (1864-1909). Minkowski percebeu, em 1907, que os efeitos da relatividade poderiam ser melhor compreendidos se tempo e espaço fossem considerados como meras facetas de um ente mais fundamental, um “espaço” físico com quatro dimensões (ou direções independentes) no qual *cada* observador perceberia de maneira *diferente*, dependendo de seu movimento, como essas quatro dimensões se separam nas três espaciais e uma temporal que experimentamos com nossos sentidos. Nascia o conceito de *espaço-tempo*.

Curiosamente, Einstein não percebeu de imediato a profundidade da contribuição de Minkowski. Para ele, a reformulação de sua teoria em termos de espaço-tempo não passava de uma curiosidade matemática, uma “erudição supérflua”. Alguns anos se passariam antes que Einstein desse a devida importância à idéia de Minkowski. Mas quando finalmente o fez, pelos idos de 1912, mostrou mais uma vez sua genialidade ao vislumbrar a possibilidade de descrever a gravidade através de um espaço-tempo que tivesse sua geometria distorcida, curvada pela presença de matéria e energia. O cerne da nova teoria da gravidade estava estabelecido.

Três anos ainda se passariam até que a nova teoria tomasse sua forma final. Em 25 de novembro de 1915, Einstein chega às equações da gravidade que hoje levam seu nome. Na tentativa de encontrar uma teoria da gravidade que fosse consistente com a relatividade de 1905,

Einstein acaba por generalizar esta última. Unindo todas as peças do quebra-cabeças, a *teoria da relatividade geral*, como foi chamada – a teoria de 1905 passou a ser chamada de relatividade restrita ou especial –, aboliu o conceito de *força* gravitacional: agora, uma maçã solta no ar cai em direção ao chão não porque há uma força puxando-a para baixo mas porque a trajetória de queda é a “mais retilínea possível” – *geodésica* – na geometria do espaço-tempo distorcida pela massa da Terra. Do mesmo modo, o Sol não mais exerce uma *força* sobre a Terra e os outros planetas; apenas deforma a geometria à sua volta de modo que os planetas, livres da ação de qualquer força, ao percorrerem as trajetórias “mais retas possíveis” nessa geometria distorcida, acabam descrevendo as órbitas que observamos (veja Fig. 1). Em consonância com o princípio de equivalência de Einstein, que é incorporado da melhor maneira possível pela relatividade geral, os referenciais em queda livre são os verdadeiros referenciais inerciais. Você, leitor(a), sentado(a) em sua cadeira ou em pé lendo estas linhas, está, mesmo parado(a), sendo *acelerado(a)* para cima – ou seja, sendo tirado(a) a todo instante da trajetória que seria inercial – pela única força que atua sobre você no momento: a de contato com a cadeira ou o chão.

### O periélio de Mercúrio, o desvio da luz e o GPS

Essa nova maneira de entender a gravidade levou a algumas consequências imediatas. A primeira delas foi a explicação de uma anomalia na órbita do planeta mais próximo ao Sol, Mercúrio. Sabia-se, desde os tempos de Le Verrier, que o ponto de máxima aproximação ao Sol (*periélio*) de Mercúrio mudava ligeiramente, a cada volta, de uma maneira que não podia ser completamente explicada pela gravitação de Newton e os planetas conhecidos. O próprio Le Verrier usara esse fato para

prever a existência de um planeta desconhecido, ainda mais próximo ao Sol, que foi batizado de Vulcano. Porém, diferentemente do que aconteceu no caso de Urano e Netuno, esse hipotético planeta nunca foi encontrado. Quando Einstein chegou na forma final de sua teoria, ele verificou que, embora para campos gravitacionais fracos ela desse resultados muito parecidos com os da gravitação universal (como não poderia deixar de ser, considerando o sucesso da gravitação de Newton), a diferença entre as duas se acentuava à medida que o campo gravitacional fosse mais intenso. E essa diferença era *exatamente* a necessária para explicar satisfatoriamente a anomalia da órbita de Mercúrio, por este se encontrar mais próximo ao Sol e, portanto, em uma região de campo gravitacional mais intenso. A relatividade geral já nascia com um fato empírico a seu favor.

Mas além de explicar um fato já conhecido, Einstein também extraiu outra consequência imediata de sua teoria: o desvio de raios de luz por campos gravitacionais. Desde que se comprovou que a luz era um tipo de *onda*, em 1801, a idéia de que ela seria afetada pela gravidade de um planeta ou estrela parecia demasiado especulativa para ser levada a sério. Isso porque na gravitação de Newton, vigente na época, *matéria* atrai *matéria*, mas uma onda não carrega matéria consigo ao se propagar. Agora, porém, sendo a gravidade apenas um efeito colateral da curvatura do espaço-tempo, sobre o qual *tudo* se propaga – inclusive a luz –, era inevitável que a trajetória da luz também fosse afetada. Einstein calculou qual seria o desvio de um raio de luz, vindo de uma estrela distante, ao passar rasante ao Sol, o que levaria a uma mudança na posição aparente da estrela quando vista da Terra (Fig. 2). Em 29 de maio de 1919, duas expedições científicas britânicas, uma enviada a Sobral, no Ceará, e outra à Ilha do Príncipe, na costa africana ocidental,

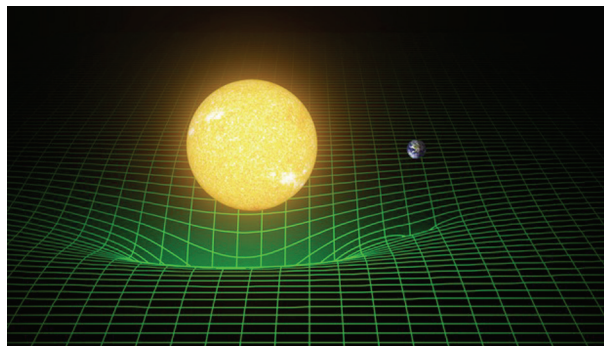


Figura 1. Representação artística da curvatura do espaço(-tempo) devido à presença do Sol e da Terra. (Crédito: T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab).



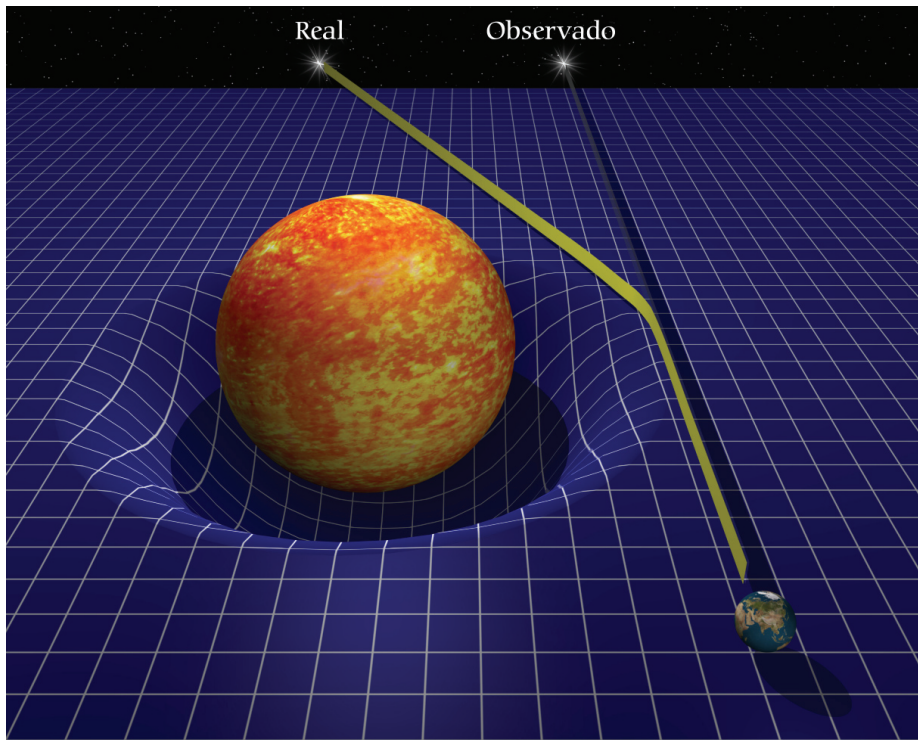


Figura 2. Representação artística da deflexão de um raio de luz passando nas imediações do Sol devido à curvatura por ele produzida. (Crédito: Dave Jarvis, <http://davidjarvis.ca/dave/gallery>).

fotografaram o céu na direção do Sol durante um eclipse total, de modo que as estrelas de fundo pudessem ser vistas. Comparando com registros dessas mesmas estrelas de outra época do ano, quando o Sol não estava entre elas e nós, a mudança na posição aparente dessas estrelas devido à presença do Sol pôde ser medida e a previsão feita por Einstein quase quatro anos antes foi confirmada.

Praticamente da noite para o dia, Einstein se tornou uma celebridade mundial, adquirindo, perante o grande público, uma aura mítica por ter desvendado segredos profundos do espaço e do tempo. Agora, além desses conceitos serem “relativos”, dependentes do estado de movimento do observador, também eram “distorcidos” pela presença de matéria e energia. Por exemplo, de acordo com a relatividade geral, quanto mais intenso o campo gravitacional, mais devagar é o “passar do tempo”. Para campos gravitacionais como o da Terra esse efeito é muito pequeno para ser perceptível em nosso dia-a-dia – o quanto se envelhece *mais rápido* a cada metro que nos afasta-

mos do chão, um centésimo de segundo a cada três milhões de anos, dificilmente convencerá um corretor de imóveis a lhe vender a cobertura de um prédio por um preço mais em conta. Porém, com a tecnologia avançada e sensível que temos hoje, não só somos capazes de medir essa diferença como ela chega a ser um problema em algumas situações. O *Sistema de Posicionamento Global* (GPS), amplamente utilizado hoje em dia por celulares, automóveis, aeronaves, embarcações, entre outros, faz uso do tempo que sinais de rádio emitidos por satélites orbitando a Terra a 20 mil quilômetros de altura, a 14 mil km/h, levam para chegarem no receptor a ser localiza-

**No GPS há um tempo de trânsito para a informação ir do equipamento aos satélites distantes 20 mil quilômetros da superfície terrestre. Contudo, devido à distância da Terra e à velocidade dos satélites, o tempo para eles passa 0,000038 segundos mais devagar a cada dia. Sem a correção relativística, a perda de precisão do sistema chegaria a 10 quilômetros ao final de um único dia**

do. Com esses *tempos de trânsito* dos sinais obtém-se a distância do receptor até cada um dos satélites utilizados (no mínimo quatro) e, com essas distâncias, determina-se a posição do receptor. Todo o procedimento depende de medidas de tempo com precisão – por isso, cada satélite carrega consigo um relógio atômico. No entanto, devido à altura (e velocidade) em que orbitam, onde o campo gravitacional

da Terra é cerca de dez vezes mais fraco que aqui na superfície, o tempo para eles passa mais rápido a uma taxa de 0,000038 segundos por dia. Quando convertido em distância, esse descompasso causaria, ao final de um único dia de funcionamento, uma perda de precisão de mais de 10 quilômetros, tornando o sistema totalmente inútil. Para evitar isso, essa diferença no fluir do tempo é corrigida de acordo com o previsto pela teoria. Portanto, o bom funcionamento do sistema é uma verificação cotidiana da acurácia da relatividade geral.

### A tempo para o centenário

Outra consequência que Einstein extraiu de sua teoria já em 1916 foi a de que as deformações no tecido do espaço-tempo poderiam se propagar, como ondulações na superfície de um lago. Nascia o conceito de *ondas gravitacionais*. Como qualquer outra onda, essas também seriam capazes de carregar energia, deformando, mesmo que minimamente, corpos materiais que estivessem em seu caminho – sucessivamente os esticando e espremendo, em direções perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação da onda.

*Sistemas binários*, ou seja, pares de corpos celestes (estrelas, por exemplo) orbitando-se mutuamente, são fontes naturais de ondas gravitacionais (Fig. 3). Como consequência da decorrente perda de energia, as órbitas desses corpos deveriam ficar cada vez menores e suas velocidades cada vez maiores. Embora esse efeito seja muito pequeno para ser percebido na maioria dos casos, em 1974 o físico Russell Hulse (n. 1950) e o astrofísico Joseph Taylor Jr. (n. 1941), ambos norte-americanos, descobriram um sistema binário de estrelas de nêutrons (estrelas muito compactas e densas) que lhes permitiu observar, ao longo dos anos seguintes, os efeitos dessa perda de energia. Embora não fosse possível observar diretamente o portador dessa energia se esvaindo, os efeitos sobre o sistema binário estavam em perfeito acordo com o que

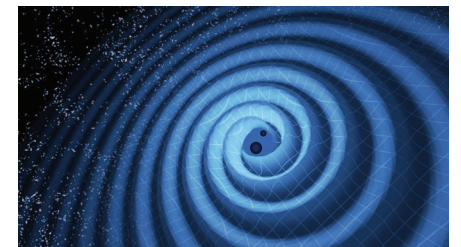


Figura 3. Representação artística das ondas gravitacionais produzidas por um sistema binário. (Crédito: LIGO/T. Pyle).

seria esperado se esse portador fosse ondas gravitacionais emitidas pelo sistema, como previsto pela relatividade geral. Por essa descoberta, Hulse e Taylor receberam o Prêmio Nobel de Física de 1993 e mais uma predição da relatividade geral se confirmava. Ou não?

Embora as observações de Hulse e Taylor fossem um forte indício a favor da existência de ondas gravitacionais, eram, ainda assim, um indício indireto. Era necessário detectar algumas dessas ondas para se ter o veredito final. Essa tarefa, no entanto, não é fácil. Tipicamente, ondas gravitacionais que chegam na Terra produzem distensões e compressões que, mesmo para a própria Terra, não passam muito do tamanho de um núcleo atômico (que já é cerca de 100 mil vezes menor que o átomo). E esse efeito é proporcional ao tamanho do corpo; ou seja, ainda menor para qualquer aparelho de medida construído na Terra.

Em 1999 é inaugurado, nos Estados Unidos, o *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO), constituído de dois interferômetros (dispositivo que detecta mínimas mudanças de comprimento usando técnicas de interferência de luz), construídos nos estados de Washington e Louisiana (Fig. 4). Cada um desses interferômetros possui dois “braços” perpendiculares de 4 quilômetros cada, com espelhos em suas extremidades. A ideia básica é que a passagem de uma onda gravitacional pela Terra poderia alterar de maneira diferente o comprimento de cada um dos braços, de modo que um raio de luz (laser, no caso) percorrendo cada um desses braços o faria em tempos diferentes. Essa diferença de tempo acarretaria uma mudança no padrão de interferência entre raios percorrendo os diferentes braços, o que poderia ser detectado. Porém, de 1999



Figura 4. Foto aérea do laboratório LIGO localizado em Livingston, no estado da Louisiana, EUA.

a 2010, quando o experimento foi interrompido para se fazer melhorias técnicas, nada foi detectado.

Depois de completadas as melhorias do agora *advanced LIGO* (aLIGO), projetado para ser mais de dez vezes mais sensível que sua versão anterior, o primeiro período oficial de observações se iniciaria em meados de setembro de 2015. Alguns dias antes, porém, no dia 14 de setembro, durante testes em que os interferômetros estavam funcionando plenamente, uma surpresa: a primeira detecção de ondas gravitacionais da história da humanidade! E por um desses caprichos, bem a tempo de celebrar o centenário da teoria que previu sua existência (embora a divulgação da detecção só tenha ocorrido meses depois, em 11 de fevereiro de 2016).

De setembro de 2015 a janeiro de 2016 mais dados foram colhidos pelos interferômetros e não faltam rumores de que mais detecções foram feitas e logo serão tornadas públicas. Vivemos um momento histórico no qual uma nova janela de observação para o Universo foi aberta.

### **Uma lente para o lado escuro do universo**

A relatividade geral mudou dramaticamente a maneira como vemos o universo. Logo em 1917, Einstein percebeu que sua teoria não favorecia a ideia de que o universo fosse *estático*: ele deveria estar se expandindo ou se contraindo, de modo que no passado ele deveria ter sido bem diferente do que é hoje, possivelmente tendo até tido um *início*. Era a primeira vez que essa questão, que sempre instigou a mente humana,

**Ondas gravitacionais incidentes na Terra provocam no planeta distensões e compressões da ordem de um núcleo atômico. Sua detecção, em 2015, chegou bem a tempo de coroar a acuidade da teoria geral da relatividade em seu centésimo aniversário.**

podia ser abordada de uma maneira científica. Mas mesmo Einstein, com sua genialidade, não era imune aos preconceitos de sua época e ele resolveu modificar sua teoria – introduzindo o que ficou conhecido como *constante cosmológica* – de modo que ela se conformasse com um universo estático e

eterno. Quando em 1929 o astrônomo americano Edwin Hubble (1889-1953) publicou o resultado de suas observações mostrando que as galáxias estavam se afastando umas das outras – ou seja, o universo estava de fato

em expansão –, Einstein abandonou a constante cosmológica, chamando-a de o maior erro de sua vida. Hoje sabemos, graças a dados coletados por telescópios terrestres e espaciais, que não apenas nosso universo está se expandindo desde há cerca de 13,8 bilhões de anos mas que, surpreendentemente, nos últimos 6 bilhões de anos o está fazendo de maneira cada vez mais rápida. Interpretado à luz da relatividade geral, esse fato significa que cerca de 70% do conteúdo de energia do universo está em uma forma exótica, furtiva, diferente de qualquer coisa que já detectamos em nossos mais avançados laboratórios de física de partículas. Não conseguimos “vê-la” mas sua existência é denunciada pelo seu efeito gravitacional sobre a expansão do universo – por isso, mesmo sem se conhecer sua identidade, foi batizada de *energia escura*. O mesmo acontece com outros 25% do conteúdo de energia do universo: através de seus efeitos gravitacionais, curvando raios de luz de galáxias distantes e influenciando a expansão do universo, sabemos que existe cinco vezes mais matéria – de um tipo ainda desconhecido, denominada *matéria escura* – do que podemos “ver” diretamente. Enquanto nossos mais avançados aceleradores e detectores de partículas, como o *Large Hadron Collider* (LHC), sob a fronteira franco-suíça, buscam incansavelmente, mas ainda sem sucesso confirmado, por indícios de partículas além das que são previstas pelo *modelo padrão das partículas elementares* – que dão conta de apenas 5% do que existe no universo –, a relatividade geral abre uma janela para os restantes 95% dos constituintes da natureza.

### **Buracos negros e o início do universo**

Apesar de tudo que a relatividade geral possibilitou que aprendêssemos sobre o universo em grandes escalas, é no con-



texto estelar que surge sua consequência mais fantástica. O ciclo de vida de uma estrela pode ser bastante complicado e tempestuoso, dependendo de sua massa, mas é certo que, em algum momento, as reações de fusão nuclear que ocorrem em seu interior, que geram calor e pressão suficientes para sustentar sua própria gravidade, cessam ou se tornam ineficientes. Quando chega esse momento para estrelas que têm cerca de 10 vezes ou mais massa que o Sol, o núcleo da estrela colapsa sob sua própria gravidade, gerando ondas de choque que ejetam suas camadas mais externas em uma grande explosão – uma *supernova*. Se a massa do objeto remanescente desse processo de “morte estelar” for maior do que cerca de 3 massas solares, então *nada* é capaz de impedir que toda essa matéria colapse indefinidamente até se concentrar em uma região de volume efetivamente nulo! A curvatura provocada por essa *singularidade* no espaço-tempo é tão grande que qualquer coisa que se aproxime muito, inclusive a luz, é inevitavelmente tragada em sua direção. Essa região em torno da singularidade de onde nem mesmo a luz consegue escapar é chamada de *buraco negro* e a fronteira imaterial que a delimita é chamada de *horizonte de eventos*.

Não podemos literalmente ver um buraco negro – já que *nada* escapa de seu interior – mas sua presença pode ser denunciada pelo efeito que provoca na matéria e na luz que se encontra ou passe

por suas imediações. É desse modo que sabemos, por exemplo, que um forte candidato a buraco negro, com cerca de 4,1 milhões de massas solares, encontra-se no centro de nossa própria galáxia. E longe de ser um caso isolado, hoje acredita-se que a maioria das galáxias têm um buraco negro gigante em seu centro, alguns com até bilhões de massas solares. Em uma escala bem mais modesta, buracos negros de algumas massas solares podem ser identificados pela emissão de raios-X da matéria sendo engolida, antes de cruzar o horizonte de eventos, “canibalizada”, por exemplo, de alguma estrela vizinha muito próxima – como no sistema chamado Cygnus X-1 (Fig. 5). Embora o próprio Einstein aparentemente nunca tenha aceitado a existência desses objetos exóticos, frutos de sua própria teoria, hoje em dia é inconcebível acomodar todas as observações astronômicas sem fazer uso da existência de buracos negros.

Mas para os interessados em questões fundamentais da natureza, os buracos negros têm uma importância maior do que a de apenas explicar dados observacionais. Entender as singularidades escondidas em seu interior é uma questão que tem frustrado gerações. No escopo da relatividade geral, as singularidades são como “bordas” do espaço-tempo, o “fim da linha” para quem ou o que a elas se dirigirem. No entanto, acredita-se que uma teoria da gravidade “melhor” que a relatividade geral, em que os princípios da

mecânica quântica sejam levados em conta de maneira totalmente consistente – uma teoria de “gravidade quântica” –, seja capaz de revelar a verdadeira estrutura das singularidades. Embora estejamos protegidos de qualquer consequência dessas singularidades nos mantendo do lado de fora do horizonte de eventos, acredita-se que há cerca de 13,8 bilhões de anos uma singularidade tenha sido o ponto de partida para a subsequente expansão do universo. Portanto, guardada no interior dos buracos negros pode estar a chave para o mais antigo dos mistérios: a origem do universo.

### À espera de um novo paradigma

Cem anos depois de sua formulação, a relatividade geral resiste como sendo a última teoria *clássica* ainda utilizada, com sucesso inigualado, para descrever uma interação fundamental. Assim como aconteceu com a gravitação universal de Newton com o advento da relatividade restrita, acreditamos que a relatividade geral deva ser substituída por uma versão que se adeque ao paradigma introduzido pela física quântica. Mas a busca por essa teoria de “gravidade quântica” – o que quer que isso seja –, que é quase tão antiga quanto a própria relatividade geral, tem frustrado os mais brilhantes físicos teóricos de cada geração – inclusive o próprio Einstein. Novamente a exemplo da gravitação newtoniana e da relatividade restrita, em que ambos tiveram que ceder para se chegar a uma teoria mais profunda, talvez não baste tentar construir uma teoria da gravidade sobre os princípios quânticos como os conhecemos; talvez seja necessária uma reformulação de ambos os lados. Na carência de dados experimentais para indicar o caminho, não será uma grande surpresa se a relatividade geral completar seu segundo centenário tão em forma quanto completa o seu primeiro. Certamente, ela continuará sendo uma valiosa ferramenta na exploração do universo.

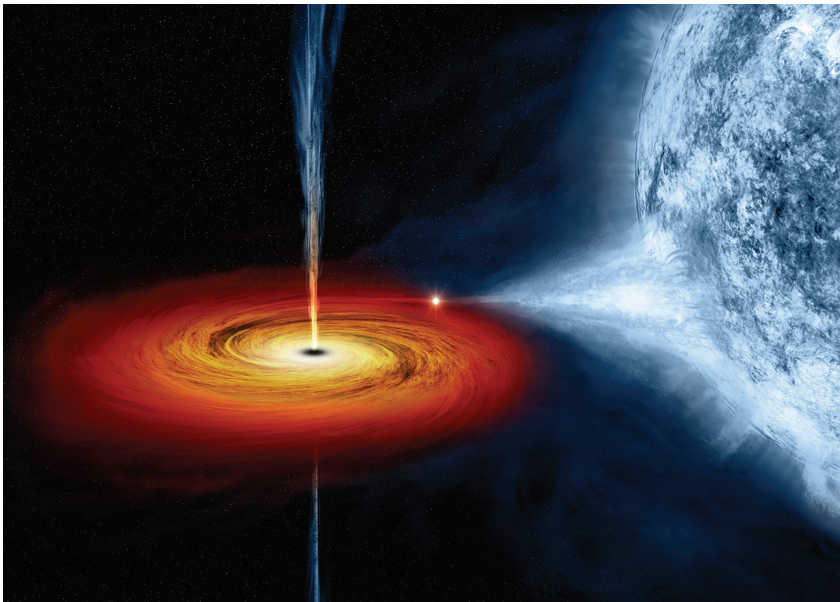


Figura 5. Representação artística de Cygnus X-1, um buraco negro com cerca de 14,8 massas solares que gira em torno de seu próprio eixo cerca de 800 vezes por segundo, a cerca de 6 mil anos-luz da Terra. O buraco negro atrai matéria de sua companheira estelar, formando um disco que emite raios-X – detectados por satélites e observatórios construídos para este fim –, antes de finalmente ser engolida ou ejetada ao longo do eixo de rotação do buraco. (Crédito: NASA/CXC).

### Sugestão de leitura

- Abraham Pais, *Sutil é o Senhor* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995).
- Bertrand Russell, *ABC da Relatividade* (Zahar, Rio de Janeiro, 2005).
- Simon Singh, *Big Bang* (Record, Rio de Janeiro, 2006).
- Kip Thorne, *Black Holes and Time Warps* (W.W. Norton & Company, New York, 1994).
- George Matsas e Daniel Vanzella, *Buracos Negros: Rompendo os Limites da Ficção* (Vieira & Lent, Rio de Janeiro, 2008).