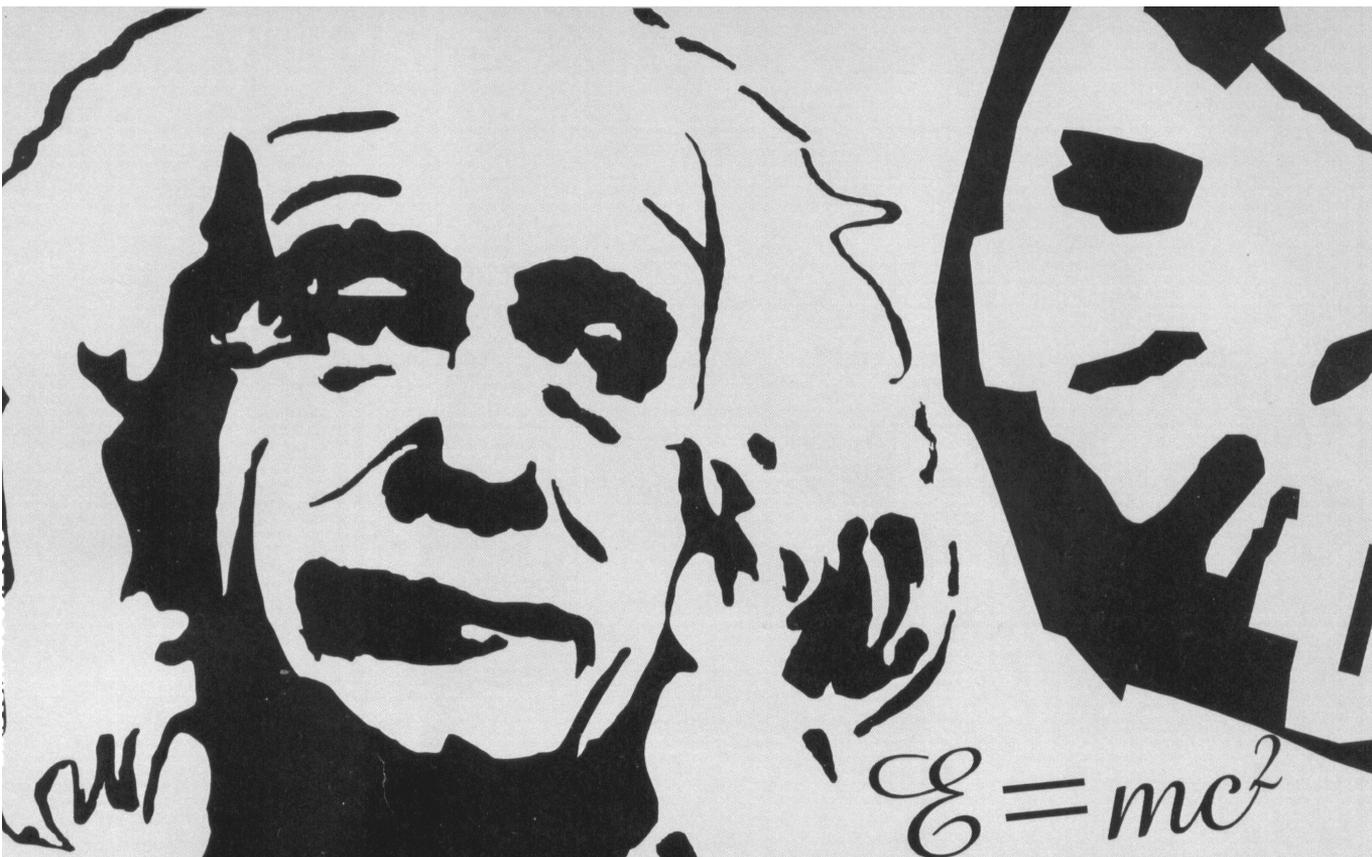


A(S) RELATIVIDADE(S) DE EINSTEIN



Antonio Luciano Leite Videira

O mundo que nos chega através dos nossos sentidos será dotado de uma realidade própria, imanente, ou, pelo contrário, serão muitas das suas características percebidas por nós estritamente dependentes do particular observador envolvido?

A visão de um Mundo objetivo, a que nos acostumáramos desde Aristóteles a Newton, foi-nos decididamente retirada pela Relatividade de Einstein: se não todas, certamente muitas das medidas através das quais nos apropriamos dos fenômenos percebidos vão depender do estado de movimento relativo entre o sistema observador e o sistema observado.

1905: *annus mirabilis*

Ilustração de abertura
Mathias Townsend

Na Primavera de 1905 – assinados por um perfeito desconhecido e em rápida sucessão – apareceram, nas prestigiadas páginas dos *Annalen der Physik* de Berlim, quatro trabalhos em física teórica abordando temas totalmente distintos. Tratava o primeiro da questão – fundamental na altura, em que ainda se discutia vivamente a própria realidade dos átomos – da determinação das dimensões moleculares. (Nada mau, nada mau mesmo.) Levando em conta o movimento browniano, o segundo analisava precisamente a realidade atômica. (Este, por si só, já dava bem o calibre do autor.) O terceiro, recuperando desassombradamente as idéias corpusculares de Newton sobre a natureza da luz, atribuía-lhe heurísticamente (estendendo de maneira audaz a perturbadora proposta de Max Planck) características duais de onda e partícula, absolutamente revolucionárias. (Viria a ser este trabalho a principal justificação oficial para seu autor ser agraciado em 1922 com o Prêmio Nobel de Física relativo ao ano de 1921.) Por último, um trabalho em que se rejeitava liminarmente o conceito de simultaneidade absoluta da mecânica newtoniana e com isso – ao obrigar à sua reformulação – desvendava toda uma nova e deslumbrante visão de mundo, a Relatividade.

O responsável solitário por esse assombroso quarteto, um tal A. Einstein, apesar de nascido em Ulm no sul da Alemanha, detinha desde a adolescência a cidadania suíça e acabara de completar 26 anos; casado e já com um filho (e encontrando-se completamente à parte da comunidade científica), ganhava a sua vida modestamente como um oficial subalterno do Serviço de Patentes em Berna.

Mundo imanente ou mundo contingente?

O Mundo de que tomamos consciência através das nossas janelas sensoriais pareceu-nos, desde sempre, dotado de uma realidade própria (imanente, inerente, intrínseca), especificada pelas características (qualidades, propriedades) próprias aos objetos que o constituem. Uma estrela, observada aqui da Terra ou de outro ponto qualquer deste nosso Universo (por nós ou por putativos alienígenas) apresentar-se-á (a nós e a eles) com as mesmas e idênticas qualidades que lhe são inerentes, que a definem e singularizam: o seu espectro de radiação, o seu diâmetro, a sua massa e por aí fora. Essa é uma evidência que, para além de óbvia, nos parece irrefutável. Aí baseou Aristóteles a sua *physis*, aí baseou Newton a sua *physiks*, aí baseamos todos nós a certeza de que *as coisas são o que são*, e, portanto, que *o Mundo é o que é*.

¹ Distinguido, digamos, por um cavalinho rampante.

Um carro de corrida vermelho¹, com tais e tais dimensões, apresentará exatamente a mesma cor e terá as mesmas dimensões tanto para o piloto que o conduz como para qualquer espectador nas arquibancadas; assim também os relógios nos pulsos respectivos do piloto e do espectador concordarão com qual venha a ser o tempo transcorrido numa determinada volta. E, no entanto, enquanto que, para o piloto, o som produzido pelo seu carro permanecerá inalterado (desde que a velocidade não se altere), para o espectador, o som percebido varia acentuadamente, consoante o carro esteja a aproximar-se ou a afastar-se dele (devido ao efeito Doppler). Analogamente, enquanto que, aqui da Terra, a luz emitida pelo nosso Sol é vista como “amarela” (digamos, para simplificar), observada da grande galáxia espiral Andrômeda, uma vizinha nossa (a dois milhões e duzentos e cinqüenta mil anos-luz de distância) que se está aproximando de nós (e com a qual a nossa galáxia virá a colidir) parecerá algo mais “azulada”. Tanto as ondas sonoras como as ondas luminosas afiguram-se distintamente para diferentes observadores: as ondas não são o que são, mas são coisas distintas para diferentes observadores. Mas, se se observam diferenças no comportamento das ondas dependendo do (estado de) movimento relativo entre a fonte das ondas e o observador, o que verdadeiramente se passará com as demais entidades naturais?

Acabamos de estabelecer que as características observadas do nosso carro de corrida são as mesmas, seja o observador alguém que se encontre em repouso com ele (o piloto), seja o observador alguém que se encontra em movimento com respeito a ele (o espectador). Será essa concordância, porém, rigorosamente válida, qualquer que seja o valor da velocidade relativa entre o sistema observado e o sistema observador? Sendo a Física a ciência por excelência dos fenômenos naturais, a sua validação tem que se fundar estritamente na observação e na medida. Não se pode almejar uma adequação efetiva entre as considerações congeminadas pela mente humana e o mundo natural sem que às nossas especulações correspondam efetivamente as nossas medidas e observações. Daí que, qualquer que seja o objeto natural em causa (elétron ou fóton, pulsar ou quasar, cachalote ou ocelote, estetoscópio ou periscópio), qualquer pessoa, isto é, qualquer observador terá que submetê-lo a uma série de medidas, que se traduzirão num determinado conjunto de números (referidos a um dado sistema de unidades, por exemplo, o Sistema Internacional, baseado no segundo, no metro e no quilograma), números esses que refletirão

a precisão conseguida com os dispositivos de medida disponíveis. Repetamos, então, a pergunta: “Serão as propriedades de qualquer objeto, de qualquer sistema natural, inteiramente independentes de qualquer relação entre o objeto e o observador que mediu essas propriedades – o que implicará que se possa atribuir uma *qualidade essencial* a cada objeto – ou, pelo contrário, só se poderão estabelecer os atributos de um objeto *relativamente a um dado observador previamente determinado?*” A primeira alternativa assegura-nos a existência de um Mundo tal como ele é, enquanto que a última permite-nos apenas considerar um Mundo contingente.

Esta é, com efeito, a questão central da Teoria da Relatividade e a sua resposta nos levará à análise das idéias-chave envolvidas. Um reparo, porém, antes de mais nada. Disse Teoria da Relatividade quando, de fato, têm-se duas teorias: a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), dada à luz na tal primavera de todos os milagres, e a Teoria da Relatividade Geral (TRG), a que Einstein só chegou no outono de 1915. A TRR – apesar de, à primeira vista, poder afigurar-se-nos como abstrusa, bastante distinta da nossa “intuição” e daquilo que nos acostumamos a considerar como “senso comum” – é, quanto a mim, realmente muito simples, tanto no seu conteúdo conceitual quanto na sua estrutura formal (que, pelo menos na sua versão original de 1905 exige pouco mais do que álgebra elementar). Já a TRG é toda uma outra história. Envolvendo uma significativa complexidade, mais no que respeita às exigências formais do que propriamente quanto às suas idéias de base, a sua manipulação (que envolve o tratamento de nada menos do que 10 equações diferenciais não lineares acopladas) é incomparavelmente mais árdua do que no caso da TRR. Por outro lado, enquanto que a TRR se aplica a todos os fenômenos envolvendo velocidades próximas da da luz (abrangendo em particular a física nuclear, a física das partículas elementares e a teoria quântica de campos), a TRG restringe-se essencialmente aos casos envolvendo campos gravitacionais muito intensos, o que faz com que as suas manifestações no nosso sistema solar se evidenciem sob a forma ou de pequenas correções à gravitação newtoniana ou de efeitos pouco evidentes. O que resulta em que, enquanto a TRR é amplamente difundida, a TRG permanece, ainda hoje, nove décadas após a sua formulação, praticamente desconhecida pela grande maioria dos próprios físicos. O que é uma pena, uma enorme pena, pois, para todos aqueles que chegam a conhecê-la, ela constitui indubitavelmente uma das mais profundas, mais deslumbrantes, mais belas produções do espírito humano.

² Percebem-se as sombras do Estagirita, de Kepler, de Galileu, de Darwin, ...

Mas voltemos à nossa pergunta e imaginemos que os dois maiores físicos de sempre, Newton e Einstein, se encontrem sentados lado a lado no canto do Hades reservado aos verdadeiramente grandes da Ciência², comentando uma notícia que lhes chegara e que anunciava que a nave espacial *D. Pedro*, levando a bordo o casal de astronautas João e Maria e lançada oito anos antes da base espacial de Alcântara no Maranhão rumo ao cinturão de Kuiper, acabava de ultrapassar a órbita de Netuno. Para Newton, as informações referentes à *D. Pedro* – um gigante azul com 50 metros de comprimento e 200 toneladas de massa – traduzem dados absolutos, inerentes à nave, independentes da escolha de observador, e, portanto, válidos, para *todos* os observadores, quaisquer que esses dados sejam. Era essa, desde sempre, a maneira de entender e descrever o Mundo, perfeitamente de acordo com a intuição de todos nós, assente nas sensações que recebemos dos fenômenos com que nos deparamos no nosso dia-a-dia. Repetidamente, vemos o mesmo Sol e a mesma Lua percorrerem os seus périplos celestes; e vemos os campos de futebol e os jogadores e a bola sempre com o mesmo aspecto; e vemos os nossos relógios marcarem o tempo de jogo sempre da mesma maneira. E, por isso mesmo, estamos todos convencidos (desde que tomamos consciência daquilo que nos rodeia) de que as coisas têm propriedades intrínsecas, dispõem de qualidades imanentes que as caracterizam e individualizam: as coisas são o que são, independentemente de qual seja o observador. E a física de Newton – vindo ao encontro das expectativas da nossa intuição e da nossa observação corriqueira – é a descrição que justifica com sucesso a estabilidade do nosso sistema planetário, bem como da própria Via-Láctea, assim como também é ela que permite aos computadores delinearem as trajetórias seguidas nas nossas viagens de ida-e-volta à Lua, ou das naves não tripuladas (como o par Cassini-Huygens enviado para investigar Saturno e a sua lua Titã), ou da futura *D. Pedro*.

A razão que Einstein nos traz – embora necessariamente de acordo com a de Newton no domínio em que esta última tem demonstrado a sua inequívoca validade – é fundamentalmente outra. Einstein reage às informações pertinentes à *D. Pedro* (como, a rigor, de qualquer outro sistema natural) estabelecendo na TRR que aquelas propriedades anunciadas de cor, comprimento e massa (como ainda outras) não são características intrínsecas, absolutas, inalteráveis do objeto nave, mas que os seus valores dependem estritamente do par sistema observado – sistema observador,

sendo os valores anunciados (azul, 50 metros, 200 toneladas) válidos unicamente para um único observador, e que é aquele que se encontra em repouso relativamente ao objeto observado; para qualquer outro observador, que esteja em movimento com respeito à nave, as qualidades que a caracterizam divergirão tanto mais daquelas medidas no seu referencial de repouso quanto maior for a velocidade relativa entre o observador e a nave. Necessariamente, a nossa experiência diária demonstra que as diferenças implicadas pela TRR com os valores de repouso – também dito *valores próprios* – só comecem a ser significativas para velocidades relativas não muito inferiores à da propagação da luz no vácuo, e que é de aproximadamente trezentos mil quilômetros por segundo. Ou seja, para Einstein, nem todas as propriedades mensuráveis de um sistema físico lhe são intrínsecas, mas dependem estritamente do estado de movimento relativo entre o sistema observado e o seu observador, e, até que se especifique essa relação, não faz sentido afirmar que essas propriedades lhe são realmente intrínsecas e, portanto, absolutas, as mesmas para qualquer observador, mesmo que esta se desloque rapidamente relativamente ao objeto em causa. O que não significa que toda e qualquer medida que se possa efetuar sobre um dado sistema dependa do estado de movimento relativo entre o sistema de medida e o sistema medido, havendo quantidades que são efetivamente essenciais a um dado sistema físico, como o número de átomos (e, portanto, o seu número de prótons, nêutrons e elétrons), bem como a natureza desses átomos. Uma bola de ferro poderá ser uma esfera azul para um determinado observador ou um elipsóide vermelho para um outro, mas permanecerá para ambos como detendo igual número de átomos de ferro: a Relatividade não faz alquimia.

Imaginemos que dois observadores idênticos (isto é, dotados de dispositivos de medida – réguas, relógios, balanças, espectrógrafos... – idênticos), cada um deles imóvel sobre uma régua, estabelecem que ambas são amarelas e medem um metro de comprimento. Se eles se encontram em repouso relativamente um ao outro, ao medirem o comprimento e a cor da régua do outro verificarão que cada uma delas também mede um metro e apresenta o mesmo tom de amarelo que a sua. Se, por outro lado, eles estiverem em movimento relativo, embora a régua de cada um deles (em repouso relativo) permaneça, para si, inalterável, a outra régua (em movimento relativo) será medida por cada um deles como sendo mais curta do que a sua (comprimento inferior a um metro), como se o movimento a

fizesse contrair, além de sua cor deixar de ser amarela para aproximar-se do vermelho, no caso da distância entre os dois observadores estar a aumentar, ou aproximando-se do azul, quando a distância entre eles diminuir. E mais. Dotados de relógios idênticos, ao compará-los quando em repouso relativo, verificam que um determinado intervalo de tempo para um dos relógios, digamos um segundo, corresponde exatamente ao mesmo intervalo de um segundo para o outro relógio. Porém, mais uma vez, se os seus respectivos relógios se encontrarem em movimento relativo, um segundo medido por cada um dos dois relógios corresponde a um intervalo de tempo maior no relógio em movimento relativamente a si: relativamente ao seu relógio próprio (em repouso), cada um dos observadores medirá o tempo do relógio em movimento em relação ao seu como transcorrendo mais devagar, mais lentamente. Assim: a TRR estabelece que a *maior* distância entre dois pontos sobre uma régua é aquela medida no referencial próprio da régua e que o *menor* intervalo de tempo é o medido no referencial próprio do relógio.

Quando um bastão passa do repouso para o movimento uniforme, nada acontece com ele. Diz-se que ele se contrai, porém o comprimento não é uma propriedade do bastão, mas sim uma relação entre o bastão e o observador. Até que se especifique o observador, o comprimento do bastão é inteiramente indeterminado.

Com estas palavras, o famoso astrofísico britânico Arthur Stanley Eddington (1882-1944) – aliás, o primeiro responsável direto por Einstein se ter tornado, a partir de 1920, uma figura mundialmente reconhecida – quis estabelecer que a contração do comprimento observada em um objeto³ em movimento não se prende a qualquer fenômeno ocorrendo ao nível atômico ou molecular, mas sim – e muito mais simplesmente – que o comprimento (tal como vários outros atributos) de um objeto só pode ser estabelecido uma vez estabelecido o estado de movimento relativo entre o sistema observado e o sistema observador. E pronto, aqui está a essência última da TRR; permita-se-me, pois, que insista neste ponto.

De acordo com a TRR, as medidas de tempo e espaço tomadas separadamente variam de observador para observador; variações essas, porém, que se cancelam mutuamente ao se considerar a geometria quadridimensional do espaço-tempo construído pela união do tri-espaço com o tempo, intervindo a velocidade da luz como “cola” entre o espaço

³ Eddington fala de “bastão” como eu falei de “régua”, objetos ambos nos quais predomina uma dimensão sobre as outras duas, para enfatizar que apenas se contrai a dimensão que se desloca paralelamente ao observador.

⁴ Lembrando que (velocidade) x (tempo) = (espaço) e que, ao multiplicar o tempo pela velocidade da luz, obtém-se uma quarta dimensão espacial, que corresponde ao tempo.

e o tempo⁴, de modo a ter-se uma única entidade espaço-temporal. Note-se que, neste quadro, para a luz, não existem independentemente as entidades espaço e tempo, mas apenas espaço-tempo; daí que, para a luz, não existam intervalos espaciais ou temporais: a luz, ela própria, não percebe nem o espaço nem o tempo.

Uns quarenta anos antes do aparecimento da TRR, James Clerk Maxwell (1831-1879) havia-nos trazido a sua fusão de três classes de fenômenos, vistos, até então, como totalmente independentes, a eletricidade, o magnetismo e a ótica. Ao casar os campos elétrico e magnético no campo eletromagnético, Maxwell impõe que a luz nada mais seja do que radiação eletromagnética. Foi preciso vir Einstein apontar-nos que a fusão eletromagnética de Maxwell traz consigo, automaticamente, a fusão do espaço com o tempo; o que significa que o Eletromagnetismo de Maxwell é automaticamente compatível com a TRR. Mas, então, em que consiste afinal essa TRR?

A Relatividade de 1905

Uma teoria física é uma estrutura abstrata lógico-formal erguida a partir de uma base axiomática convencional, sendo ela tão mais elegante formalmente quanto menor for o número de axiomas (postulados ou princípios) de que o seu arquiteto faça uso. No final do século dezenove, a Física consistia essencialmente da Mecânica de Newton – satisfeita pelas massas – e do Eletromagnetismo de Maxwell – satisfeito pelas cargas. Ora, Galileu estabelecera, na primeira metade do século dezessete, que as leis do movimento de uma massa são as mesmas para todos os observadores que se deslocam uniformemente uns relativamente aos outros, o que (apesar de, até Einstein, ninguém ter-se dado conta disso) obriga a que a Mecânica Newtoniana seja efetivamente uma teoria relativística, satisfazendo o chamado *Princípio da Relatividade Galileana*.

Uma vez admitido um Princípio da Relatividade (PR), necessita-se um outro postulado que estabeleça, que fixe a relação entre as observações realizadas por diferentes observadores inerciais⁵, ou seja, precisa-se de um postulado que sirva de “ponte” entre as medidas realizadas por cada observador inercial (OI) no seu referencial próprio. O fato de a Mecânica Newtoniana satisfazer o PR Galileana implica que a ela esteja associada uma ponte no espaço-tempo de Newton, expressa pelas chamadas *transformações de Galileu*, relacionando as medidas de diferentes OI em

⁵ Isto é, observadores não acelerados.

movimento relativo nesse palco. Pode-se, então, afirmar que a física de Newton é a estrutura formal, logicamente consistente, desenvolvida a partir do PR Galileana e das transformações de Galileu, tomados ambos como a sua base axiomática.

Por seu lado, contudo, a teoria eletromagnética de Maxwell não satisfaz manifestamente o PR de Galileu, o que levava a que a situação em finais do século dezanove fosse a seguinte. A dinâmica das massas (newtoniana) satisfazia a relatividade galileana⁶, enquanto que a dinâmica das cargas (maxwelliana) não o fazia. Admitamos agora que se quisesse impor um certo tipo de simetria entre os conceitos de massa e carga, propondo que ambas as respectivas dinâmicas (e, portanto, *toda* a física da época) seguissem um princípio relativístico, tal que todas as observações de fenômenos implicando seja a massa, seja a carga não diferenciassem entre diferentes OI. Só que a imposição dessa simetria entre massa e carga levaria inapelavelmente à alteração da, à época, ainda recente, pouco testada e pouca compreendida construção maxwelliana, a fim de que se pudesse preservar em todo o seu augusto esplendor, velho de dois séculos, o estudadíssimo e testadíssimo edifício newtoniano, ou, contrariamente, à manutenção da novel estrutura de Maxwell e à conseqüente (quase que iconoclasta) alteração da estrutura de Newton. (Uma terceira possibilidade seria ainda a de mandar Newton e Maxwell simultaneamente às urtigas, o que, apesar de logicamente válido, seria o mais difícil de implementar.)

Tal como uma moeda tem, necessariamente, que ser composta pelos dois elementos indissociáveis de “cara” e “coroa”, não admitindo qualquer delas uma existência autônoma, qualquer representação formal do mundo fenomenológico que se idealize, qualquer “peça”, assim qualquer teoria física que se confabule tem, imprescindivelmente, que consistir da fusão da entidade espaço-tempo – a geometria ou “palco” espaço-temporal – onde ocorrem os acontecimentos transcritos na “peça” com a entidade composta pelos intervenientes nesses acontecimentos, os agentes ou “atores” que compõem essa peça (os tais elétron ou próton, pulsar ou quasar...), que compõem essa representação do mundo natural.

Assim, a representação formal que chamamos física newtoniana exige um certo tipo de espaço-tempo (aquele que os nossos sentidos percebem à nossa volta), compatível com uma certa dinâmica (a de Newton). Essa geometria, esse palco – que consiste do produto de quatro retas

⁶ Embora não seja demais repetir que ninguém percebesse a física de Newton como relativística.

infinitas, mutuamente ortogonais, uma para o tempo, três para o espaço – admite a possibilidade de sistemas físicos poderem se deslocar a velocidades arbitrariamente elevadas (e, portanto, infinitas), sendo, pois, compatível com o conceito de simultaneidade absoluta.⁷ Observe-se que nada há de logicamente inconsistente com esta representação newtoniana – que, aliás, dominou indisputadamente até Einstein⁸: o espaço-tempo newtoniano, bem como a dinâmica que lhe está associada, são perfeitamente consistentes do ponto de vista lógico-formal, o que, apesar de não obrigar a Natureza a concordar com esse quadro, ela o faz suficientemente de perto, de modo a não desmerecer as nossas exigências sobre ele. Exceções raríssimas (e que não foram tomadas como verdadeiras ameaças) eram quase que unicamente o pequeno desvio da órbita de Mercúrio, conhecido desde 1859, e o resultado nulo do interferômetro de Michelson e Morley de 1881.

Na TRR, Einstein resolve propor que *toda* a física – tanto a dinâmica associada à massa, como a dinâmica associada à carga – deve ser a mesma para todos os OI, que as leis naturais (e, claro está, os fenômenos a elas relacionados) são as mesmas para todos os OI. É este o seu Princípio da Relatividade: “As leis da Natureza são independentes do movimento translacional uniforme de um sistema físico como um todo”; ou mais concisamente: “As leis da Natureza são as mesmas para todos os OI.”

Como vimos, a admissão de um PR exige que pelo menos uma das duas dinâmicas em vigor – ou a mecânica de Newton ou o eletromagnetismo de Maxwell – tenha que sofrer alterações. O mais “razoável” seria admitir sem reservas a mecânica de Newton, compatível com o PR de Galileu e com as transformações de Galileu entre diferentes OI, e modificar o eletromagnetismo de Maxwell, de modo a torná-lo – também ele – compatível com esse mesmo PR e com essas mesmas transformações. Privilegiar Newton sobre Maxwell; privilegiar uma dinâmica com tantas provas dadas contra uma outra, muitíssimo mais recente (expressa, ademais, numa linguagem matemática à época bastante pouco familiar de equações diferenciais parciais), e com uma base empírica incomparavelmente mais estreita. Tivesse sido essa a opção da nova teoria relativística e o seu segundo postulado, relacionando as diferentes medidas próprias conduzidas por OI em movimento relativo, teria que ser logicamente equivalente a postular que as transformações entre diferentes OI mantivessem inalteradas tanto as equações de Newton como as equações do novo eletromagnetismo

⁷ As propriedades intrínsecas do espaço-tempo newtoniano são os intervalos temporais entre dois acontecimentos (ou eventos) quaisquer – o tempo é absoluto – e os intervalos espaciais (no caso de eventos simultâneos) – o espaço é absoluto.

⁸ É verdade que, numa conferência em 1904, Henri Poincaré prenunciara a necessidade de mudanças no sentido daquelas que vieram a ser implementadas meses depois por Einstein na sua TRR.

(não-maxwelliano). E como as transformações que deixam invariantes as equações de Newton são as transformações de Galileu, também as equações da nova teoria eletromagnética diferente da de Maxwell teriam que ser invariantes com respeito a essas mesmas transformações. Não foi esse o caminho seguido por Albert Einstein, que escolheu precisamente a opção contrária: privilegiar Maxwell sobre Newton.

A estrutura geométrica do espaço-tempo newtoniano (aquele que se ajusta às observações nas nossas vizinhanças) decorre fundamentalmente da aceitação pela física pré-einsteiniana da existência na Natureza de velocidades arbitrariamente elevadas, admissão essa que levou ao Princípio da Simultaneidade Absoluta. Mas, e se não se aceitar que a Natureza admita que sistemas físicos se propaguem a uma velocidade infinita? (Saberá a Natureza, efetivamente, o que seja o infinito?) Está-se, aqui, perante uma questão de gosto: ou se aceitam valores arbitrariamente elevados para a velocidade de propagação de um sistema natural, ou se admite que a Natureza imponha um valor máximo finito para a velocidade de propagação de um sinal físico qualquer, isto é, um limite finito para a velocidade de propagação da informação. Foi algo logicamente equivalente a isso que Einstein propôs como a segunda coluna mestre da TRR, atribuindo à luz⁹ a propriedade de se propagar no vácuo mais rapidamente do que qualquer outro sistema natural. E, uma vez que se postula a existência de uma velocidade máxima para a propagação de um sinal físico (qualquer que ele seja), esse valor limite terá que ser universal, terá que ter exatamente o mesmo valor constante para todos os OI, o que concorda automaticamente com o PR, que estabelece que não podem existir observadores preferenciais. Como, por um lado, sistemas com massa podem ser acelerados (podem alterar a sua velocidade), e como, por outro, as ondas eletromagnéticas, que não possuem massa, se propagam (no vácuo) com velocidade constante, é natural supor, postular que sejam os objetos de massa nula (e, portanto, também de carga nula), a saber: a radiação eletromagnética¹⁰ – o agente físico a deslocar-se à velocidade máxima, e, conseqüentemente, constante (velocidade “um”, digamos), permitida na Natureza: “A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os OI”, que é justamente o chamado Postulado da Constância da Velocidade da Luz (PCVL). Como o arquiteto da nova estrutura relativística era realmente *muito* bom, bastaram-lhe dois únicos pilares – o PR e o PCVL – para sustentar todo o magnífico edifício da TRR.

⁹ A rigor, a qualquer sistema de massa nula.

¹⁰ E, eventualmente, a radiação gravitacional, prevista pela Teoria da Relatividade Geral, mas não detectada até hoje.

A admissão do PCVL obriga ao abandono da moldura espaço-temporal newtoniana e à utilização de uma nova geometria – o chamado espaço-tempo de Minkowski¹¹ – o palco para a peça da TRR.

A TRR é, pois, a estrutura logicamente consistente, erguida no espaço-tempo de Minkowski sobre a base axiomática do PR e do PCVL, assegurando o primeiro que a Natureza se apresenta invariavelmente com o mesmo “aspecto” a todos os OI e estabelecendo o segundo como efetuar a passagem, como lançar a ponte no palco de Minkowski – as chamadas transformações de Lorentz, que vêm substituir as transformações de Galileu – entre diferentes OI. De modo equivalente, pode-se dizer que a TRR é a estrutura desenvolvida a partir do PR e das transformações de Lorentz.¹²

Dado que incontáveis observações asseguram que a física de Newton descreve exemplarmente incontáveis fenômenos naturais, sempre que eles não envolvem velocidades significativamente próximas da da luz, a física da Relatividade Restrita terá, no regime de baixas velocidades, a que reproduzir a representação newtoniana.

A necessidade de uma teoria relativística para a gravitação

Enquanto que o Eletromagnetismo de Maxwell é automaticamente condizente com a TRR, a gravitação newtoniana não o é, bastando lembrar que, nesta última, duas massas separadas por uma distância arbitrariamente grande interagem instantaneamente (a força gravitacional newtoniana não envolve o tempo), o que, sendo compatível com a existência de uma velocidade de propagação dos efeitos físicos infinita (e, portanto, com a noção de simultaneidade absoluta), não é consentâneo com a exigência da TRR de um limite superior finito para a velocidade (e da correspondente relatividade da simultaneidade). Tem-se, pois, que procurar desenvolver uma nova teoria da gravitação que seja conforme com os ditames da relatividade; da relatividade, sim, mas qual?

Einstein logo se convenceu de que não seria possível idealizar uma descrição da gravitação no quadro conceitual da TRR. A equivalência entre massa inercial e energia¹³, ditada pela TRR, juntamente com a igualdade empírica entre massa inercial e massa gravitacional, implica que tudo na Natureza tenha peso, e, portanto, que todas as formas de energia estejam sujeitas à atração gravitacional, de onde

¹¹ Desenvolvido em 1908 por Hermann Minkowski, antigo professor de Einstein em Zurique e que havia se manifestado no sentido de que este jamais chegaria a ser alguém na vida.

¹² Que relacionam medidas de tempo, espaço, velocidade, momento, energia, campo elétrico, campo magnético e por aí fora, efetuadas por um determinado OI com as medidas correspondentes efetuadas por um outro OI, estando esses observadores em movimento relativo uniforme.

¹³ Expressa pela equação mais famosa entre todas, $E=mc^2$, onde m é a massa inercial.

resulta que, na presença de matéria e radiação, a noção de movimento inercial da TRR só faça sentido localmente no espaço e no tempo; o que equivale a dizer que, ao se basear num PR restrito a OI, a TRR não admite a possibilidade de movimento acelerado.

O princípio de equivalência

Ainda na fase de testes e ensaios da missão que a levaria até aos confins do nosso sistema solar, a *D. Pedro* encontra-se imóvel na sua base de Alcântara, com a astronauta Maria a bordo, enquanto que, numa pequena nave de apoio, João havia sido enviado para uma breve viagem de duas semanas¹⁴. Em ambas as naves, existe uma esfera de aço ligada a um eletroímã e situada 9,8 metros acima dos respectivos pisos, de modo que, aqui na Terra, ao se desligar a corrente, as duas esferas atinjam, cada uma, a base da sua nave após um segundo, o que nos diz que a aceleração da força gravitacional terrestre é de 9,8 metros por segundo por segundo (1g). Ao repetir essa experiência longe da Terra, e encontrando-se a sua nave em movimento uniformemente acelerado com 1g, João verifica que a sua esfera de aço leva exatamente o mesmo tempo de um segundo para percorrer 9,8 metros até embater no piso, o que o leva a concluir que a esfera se deslocou em direção ao piso com aceleração de 1g. De fato, a centenas de milhar de quilômetros da Terra (e de qualquer outro corpo astronômico), o que caracteriza o “piso” e o “teto” da nave é a direção do seu movimento acelerado: ao observar a esfera deslocar-se de uma posição inicial – o “teto” – para uma posição final – o “piso” –, o astronauta sabe que a nave está se deslocando no sentido oposto com o mesmo valor numérico da aceleração com que ele viu a esfera “cair” no interior da nave. A aceleração da nave de João foi escolhida justamente para que fosse igual numericamente à aceleração gravitacional da Terra, de modo que ele, na nave, tal como se se encontrasse parado em Alcântara, possa ficar “em pé”, com os pés apoiados no piso e que qualquer objeto que não esteja fixo na nave “caia” (“para baixo”) em direção a esse piso. Assim, ao ficar livre da força eletromagnética que a mantinha fixa, a esfera de aço na nave de João no espaço interplanetário passa a não estar sujeita a qualquer força, o que a leva a permanecer exatamente no mesmo sítio – relativamente ao Sol, digamos – onde se encontrava quando presa ao eletroímã; a nave, porém, continuando a acelerar-se com 1g, devido aos seus motores, deixará a esfera ficar

¹⁴ A fim de aterrar no asteroide Éris, quando este se encontrasse no seu ponto de aproximação máxima da Terra, a 840 mil quilômetros de distância.

para trás, fazendo com que um observador solidário com a nave (isto é, deslocando-se também com aceleração $1g$) perceba a esfera deslocar-se no sentido do piso com $1g$. Ou seja, tanto em repouso em Alcântara (em presença do campo gravitacional terrestre), como em movimento acelerado no espaço interplanetário (longe de qualquer efeito gravitacional mensurável sobre a esfera), e desde que a aceleração gravitacional da Terra e a aceleração da nave coincidam, os movimentos das esferas na Terra e na nave são indistinguíveis.

Apesar de João e Maria observarem as suas respectivas esferas deslocarem-se exatamente da mesma maneira, as suas leituras do movimento de cada uma delas são marcadamente distintas. Enquanto Maria é compelida a uma descrição newtoniana *dinâmica*, em termos da força gravitacional exercida pela Terra sobre a sua esfera, João, por seu lado – estando ele, a sua nave e a sua esfera – longe de qualquer possível efeito gravitacional, é induzido a uma descrição *cinemática*, livre da intervenção de qualquer força. Haverá, então, algum meio, algum processo físico capaz de permitir que as situações das duas esferas possam ser distinguidas, estabelecendo-se que uma delas se encontra efetivamente sob a ação de uma força gravitacional, enquanto que a outra está completamente livre?

A resposta é decididamente negativa. Mais uma vez, como no caso do movimento com velocidade uniforme, não há qualquer possibilidade de distinguir empiricamente as medidas de João das de Maria: como observadores são inteiramente equivalentes. Conclusão esta que conduz ao chamado *Princípio de Equivalência* (PE): “Há uma plena equivalência entre uma força gravitacional (uniforme) e um movimento (uniformemente) acelerado.”

Este PE, que veio permitir a formulação da gravitação não em termos de uma força, como o fizera Newton, mas em termos meramente cinemáticos, foi idealizado por Einstein em 1907, enquanto ainda funcionário da seção de patentes em Berna. Confidenciou ele, muito mais tarde, que a idéia – por ele considerada como “a mais feliz” que tivera em toda a sua vida – lhe ocorreu no local de trabalho, enquanto ele, quase como que num transe, especulava sobre o que sentiria alguém dentro de um elevador em queda livre.¹⁵

Gravitação como curvatura

No espaço-tempo de Newton atua uma misteriosa força da gravidade; para Newton, há o palco do espaço-tempo

¹⁵ Não havendo ainda naves espaciais em 1907, mas já dispondo de elevadores, foi a imagem de um deles caindo livremente com alguém no seu interior que acudiu a Einstein.

e há o ator gravitação. Já a explicação da gravitação desenvolvida por Einstein na TRG prescinde de qualquer força externa ao espaço-tempo; para Einstein há apenas a arena espaço-temporal. Necessariamente, o palco não poderá ser tão simples quanto o utilizado por Newton na sua física (e, portanto, por nós, no nosso dia-a-dia), tendo que ser estruturalmente mais complexo do que aquele, e sendo precisamente essa estrutura da geometria espaço-temporal que irá representar a gravitação no quadro da TRG.

Como é sabido, ainda há gente que acredita que o nosso planeta seja plano. Pois bem, imaginemos dois desses sábios situados sobre o equador terrestre, distanciados de dez quilômetros e que, munidos cada um deles com a sua bússola, decidam deslocar-se paralelamente um ao outro em direção ao norte. Após terem percorrido duzentos quilômetros, param e medem conscienciosamente a distância entre ambos, obtendo o valor de 9.995 metros, o que os surpreende. Retomando caminho, medem repetidamente as distâncias entre eles e verificam que, apesar de terem decidido seguir ao longo de trajetórias escrupulosamente paralelas, eles vão, paulatinamente, se aproximando um do outro. “Ah!” – dizem eles – “Temos aqui a manifestação inequívoca de uma força atrativa, que nos está aproximando mutuamente. Cumpre que investiguemos as características desta força atrativa atuando sobre nós.” Após uma série de medidas e de considerações, os dois sábios (sem o suspeitar) refazem toda a descrição newtoniana da gravitação, acabando por concluir que o fato de eles irem se acelerando um relativamente ao outro, terminando por chocar-se um com o outro, deve-se a uma força gravitacional atrativa entre ambos, proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa em cada instante.

Mas, e quanto a nós? Nós que sabemos que a Terra não é plana, mas esférica, o que é que nós dizemos de toda aquela azáfama e de todas aquelas conclusões? Nós, é claro, simplesmente confirmamos que, devido à esfericidade da Terra, todos os grandes círculos de longitude, depois de se cruzarem nos pólos, vão-se afastando uns dos outros até atingir a sua máxima separação relativa no equador. Para nós, a aproximação mútua dos dois sábios não se deve a qualquer força gravitacional atuando à distância e instantaneamente sobre eles, mas prende-se tão simplesmente à curvatura do nosso planeta e ao fato de eles se deslocarem ao longo de dois grandes círculos, sempre totalmente livres da ação de qualquer tipo de força.¹⁶

¹⁶ Não confundamos a força atrativa entre eles com a força que os atrai a ambos para o centro da Terra.

A primeira representação da gravitação, desenvolvida na segunda metade do século XVII, usa uma geometria espaço-temporal tão simples quanto possível (quatro retas cruzando-se perpendicularmente), na qual atua uma força; é essa a idealização de Newton. A segunda é a de Einstein na TRG e lança mão de um espaço-tempo mais complicado (dotado de curvatura), prescindindo, porém, da intervenção de qualquer força para reproduzir o fenômeno gravitacional; a curvatura do espaço-tempo é tudo o que é preciso para dar conta da aproximação cada vez mais rápida dos dois viajantes. Enquanto que, para Newton, os seus movimentos – que, para eles, ocorrem numa geometria plana – são ditados por uma força gravitacional atuando misteriosamente à *distância*, para Einstein, cada um deles é guiado ao longo do seu percurso pela geometria *local* onde ele se encontra em cada instante (com o tempo e o espaço intimamente interligados numa entidade única). E isso vale tanto para um viajante sobre a Terra como para a Lua ao seu redor; vale para a nossa nave, esteja ela em órbita planetária ou longe de qualquer corpo celeste; vale para quaisquer planetas girando à volta dos seus sóis; vale para esses mesmo sóis nos seus périplos galácticos; vale para as galáxias; vale para a própria luz. Todos terão que seguir ponto a ponto, inexoravelmente, os trilhos do espaço-tempo.

Esta é uma das faces do deslumbrante painel da TRG, no qual a gravitação é representada como o efeito da geometria espaço-temporal sobre o movimento dos sistemas físicos – a matéria e a radiação – nesse palco quadridimensional:

O espaço-tempo atua sobre a matéria e a radiação, ditando-lhe como elas se devem deslocar.

Para vermos a outra face da TRG, pensemos num caracol a arrastar-se sobre uma abóbora e na haste da abóbora que provoca uma deformação na forma da superfície da cucurbitácea: a TRG determina que a presença da matéria – a haste – encurva o espaço-tempo nas suas proximidades:

A matéria e a radiação atuam sobre o espaço-tempo, ditando-lhes como ele deve se encurvar.

Concluindo: a matéria aqui (haste) encurva o espaço-tempo aqui (cova na superfície da abóbora), e uma curvatura aqui implica em curvatura além (o efeito estende-se no espaço-tempo); assim, a matéria aqui (haste) influencia a matéria além (caracol). Esta é a explicação de Einstein para a gravitação, que, embora formalmente muitíssimo mais exigente do que a elaboração newtoniana, é muitíssimo mais apelativa conceitualmente.

¹⁷ Por nós possuímos 3 dimensões espaciais, não conseguimos visualizar superfícies tridimensionais, daí o recurso de se reduzir a 2 a dimensionalidade espacial do Mundo.

Uma maneira conveniente (e, por isso mesmo, comumente utilizada) é visualizar uma membrana elástica plana¹⁷, que se deformará pela presença de um objeto de massa M . O encurvamento da superfície é máximo na região imediatamente vizinha a M , diminuindo gradualmente com a distância, até que, para pontos suficientemente afastados, a deformação causada por M passa a ser desprezível e a superfície torna-se plana. Uma pequena massa m – pequena querendo dizer aqui que a sua presença sobre a membrana não altera a sua forma (qualquer que ela seja), dentro da sensibilidade de registro observacional de que se disponha – a uma certa distância de M irá se acelerando na direção desta última. Para Einstein, o fenômeno gravitacional é a manifestação do local do espaço-tempo onde e quando m se encontrar: m vai “sentindo”, em cada instante, a geometria tridimensional. (Tal como o caracol vai sentindo em cada instante a forma da superfície da abóbora.)

A equação de Einstein

A TRG consiste, portanto, de duas faces ou metades justapostas, nenhuma delas podendo existir sem a outra.

Tal como a mecânica de Newton consiste da união do espaço-tempo newtoniano com as transformações lineares de Galileu, e a física da Relatividade Restrita compõem-se da junção do espaço-tempo de Minkowski com as transformações lineares de Lorentz, assim a física gravitacional einsteiniana apresenta-se como a ligação de um espaço-tempo riemanniano com as transformações lineares gerais. A TRG distingue-se, contudo, das demais por ser exemplo único de uma teoria física em que a sua arquitetura apresenta a face geométrica (o placo do espaço-tempo) e a face entidades dinâmicas (os atores matéria e radiação) explicitamente entrelaçados na sua equação fundamental do campo gravitacional – a chamada Equação de Einstein, por ele finalmente apresentada à *Preussische Akademie der Wissenschaften* em Berlim, em 25 de novembro de 1915 –, e cujo conteúdo traduz *grosso modo* que:

$$\{Curvatura\ do\ espaço-tempo\ 3+1\ dimensional\} = \{Densidade\ de\ Matéria\ e\ Radiação\}^{18}$$

¹⁸ A rigor não é exatamente isto que ela representa, já que o lado esquerdo não corresponde a toda a curvatura do espaço-tempo em causa (que é manifestada pelo tensor de Riemann), mas a uma quantidade (o tensor de Ricci) que descreve como é que se efetua o chamado movimento paralelo ao longo desse espaço-tempo.

As conseqüências empíricas da TRG

Embora a TRG constitua indubitavelmente uma das mais belas criações do espírito humano, isso não obriga a que o quadro nela representado encontre correspondência na Natureza. Só a comparação entre as previsões da teoria

e as nossas medidas dos fenômenos correlatos poderá decidir se ela é ou não conforme com o mundo natural. Ora, as observações astronômicas e as experiências desenvolvidas ao longo de quase um século têm invariavelmente validado a descrição de um espaço-tempo encurvado pela presença de matéria e radiação com um grau de precisão confirmadamente crescente, a par do aumento da sofisticação tecnológica disponibilizada.

No nosso sistema planetário, a massa do Sol é largamente dominante¹⁹, portanto sendo ele fundamentalmente o responsável pela gravitação nas suas redondezas. Como a nossa estrela é relativamente pouco massiva, os desacordos entre as previsões newtonianas e as da TRG são correspondentemente pequenas; onde se tem que lançar mão do instrumental completo da TRG é em sistemas extremos, tal como estrelas de nêutrons ou buracos negros (a existência destes últimos, por si mesma, uma necessidade imposta pela teoria).

As órbitas planetárias – desde que calculadas no contexto newtoniano, em termos da interação de apenas dois corpos, o planeta em questão e o Sol – correspondem a elipses, ou seja, a trajetórias fechadas, cada planeta repetindo vezes sem conta, ao longo de bilhões de anos, o seu périplo em torno da estrela mãe. Ora, desde 1859 que os astrônomos sabiam que a órbita de Mercúrio gira – diz-se que ela “precessiona” – lentamente, não descrevendo, assim, uma elipse fechada, mas uma rosácea aberta, com as medidas de precessão do perihélio²⁰ de Mercúrio acusando 5.600 segundos de arco por século.

Tratava-se, então, de salvar a teoria newtoniana, mesmo porque, além de ser a única formalização da gravitação existente até ao aparecimento da TRG, a menos deste comportamento da órbita de Mercúrio, tão impecavelmente havia reproduzido todos os fenômenos para os quais fora sendo invocada desde o seu primeiro aparecimento nos *Principia* em 1687. Tendo-se incluído nos cálculos da órbita de Mercúrio, além do Sol, todas as correções devidas aos efeitos dos demais planetas, isso permitiu dar conta da quase totalidade do deslocamento do perihélio, 5.557 segundos de arco por século; e, todavia, por pequena que fosse, essa discrepância, essa famosa discrepância de 43 segundos de arco por século, não podia ser ignorada. Daí que – ciente dessa situação – Einstein, mesmo antes de conseguir a sua equação de campo definitiva (que, de fato, não é necessária, na sua completa generalidade, para a determinação da precessão), houvesse, já em 1914, calculado o movimento de Mercúrio e conseguido obter justamente o resíduo de 43 segundos.²¹

¹⁹ A massa de Júpiter não chega a ser um milésimo da massa solar.

²⁰ Perihélio sendo o ponto da elipse mais próximo do foco onde se encontra o Sol. Sendo máxima para Mercúrio, a precessão ainda é detectável para Vênus, a Terra e Marte.

²¹ Confessou Einstein que, no seguimento desse acordo entre essa previsão do quadro teórico que ele tão longa e empenhadamente se esforçava por desenvolver e a observação astronômica, ele passou dois ou três dias num autêntico estado de euforia. E não era para menos!

No caso do avanço do perihélio de Mercúrio, o sucesso alcançado pela descrição einsteiniana refere-se a um fenômeno previamente identificado pela ciência, o que não lhe permitia ainda auferir de um estatuto de supremacia face ao augusto legado newtoniano. Aquilo que veio verdadeiramente impressionar, pode-se mesmo dizer que veio realmente deslumbrar, não apenas a comunidade científica, mas a generalidade do mundo letrado logo a seguir à Primeira Grande Guerra, foi a previsão da teoria de algo que, além de ser inteiramente insuspeitado, vinha ainda implicar características radicalmente inovadoras para o tempo e para o espaço, muito distanciadas daquelas universalmente admitidas até então, o encurvamento do espaço-tempo.

Além de aparentemente surpreendente, a deflexão da trajetória luminosa causada por uma massa como a do Sol, é inevitável no contexto da TRG, uma vez que esta teoria estabelece que, na ausência de forças externas, tanto a matéria como a radiação se deslocam o mais eficientemente possível, o que quer dizer ao longo dos percursos mais curtos – as geodésicas – do seu espaço-tempo. Como a geometria espaço-temporal é determinada pelos seus ocupantes matéria e radiação, as geodésicas dependerão do conteúdo de cada domínio espaço-temporal e a luz terá que seguir os trilhos geodésicos que vier a encontrar, e que não poderão ser as retas de uma geometria plana, sem curvatura²².

Bastante mais espetacular que o encurvamento provocado pelo Sol é o devido a galáxias. A luz que nos chega das profundezas do nosso Universo, proveniente de galáxias e quasares velhos de bilhões de anos, encontra no seu caminho, por vezes, uma galáxia, mais próxima de nós, cuja massa fará com que essa luz se encurve sob a forma de um arco (os chamados anéis de Einstein). Tal é a nossa confiança na TRG que utiliza a medida desse encurvamento a fim de estimar a massa da galáxia interveniente.

O que falta fazer

Várias outras previsões da teoria da gravitação de Einstein têm sido, com o passar do tempo, submetidas a testes cada vez mais exigentes, sendo os resultados invariavelmente consistentes com a teoria. Quase um século após a sua formulação, a TRG continua inteiramente válida nas escalas macroscópicas do tempo e do espaço, onde não se espera que seja necessária a intervenção da física quântica. O que não significa que a representação por ela proposta para a gravitação continue válida ao nível quântico. Todavia,

²² A TRG prevê uma deflexão de 1,75 segundos de arco para a luz tangencial à superfície solar e a melhor observação fornece $1,760 \pm 0,016$ segundos de arco, ou seja, concordância plena.

ao contrário do caso dos fenômenos eletromagnéticos e nucleares, que já dispõem de uma descrição relativística quântica, o fenômeno gravitacional, o primeiro a ser incorporado à física, é também o último a resistir tenazmente, até hoje, a todos os esforços (e têm sido muitos) desenvolvidos no sentido de se elaborar uma teoria relativística da gravitação.

Na realidade, tem-se uma incompatibilidade entre a TRG e a teoria quântica responsável pelas outras três interações fundamentais (eletromagnética, nuclear fraca e nuclear forte). Enquanto a TRG alterou o conceito de espaço-tempo, mantendo inalterada a relação entre observador e observado, a teoria quântica, por seu turno, alterou as hipóteses sobre a relação entre observado e observador, mantendo a concepção newtoniana sobre o espaço-tempo. O que quer dizer que, tanto a TRG como a teoria quântica contêm hipóteses que cada uma delas contraria, o que obriga a que se tenha que ultrapassar este estágio da Física, procurando desenvolver uma única teoria – a Teoria Quântica da Gravitação – que inclua, que unifique os aspectos relacionais da geometria trazidos pela TRG e os aspectos relacionais entre o observador e observado exigidos pela teoria quântica. Este é um assunto fascinante (embora extremamente difícil), que, apesar de ter conseguido significativos progressos, sobretudo nas últimas duas décadas, permanece em aberto, não se sabendo ainda quando se poderá dispor de uma teoria que, finalmente, venha juntar a gravitação às outras três interações. E não podemos esquecer que toda a cosmologia depende disso. Há ainda muito caminho a percorrer, mas enquanto a nossa espécie perdurar, ela continuará, na sua ânsia essencial de saber, a perseguir o exemplo daqueles entre nós que dedicam o melhor das suas vidas a procurar desvendar sempre um pouco mais este maravilhoso Mundo que nos coube.

Os anos de busca no escuro por uma verdade que se presente mas que não se pode expressar, o intenso desejo e a alternância de confiança e de dúvida até se romper caminho para a claridade e a compreensão, são coisas conhecidas apenas por aqueles que as experimentam.

Assim disse tão bem aquele que nos inspirou e conduziu ao longo destas páginas. Albert Einstein.

Antonio Luciano Leite Videira é graduado e doutor em Física e professor do Departamento de Física da Universidade de Évora, Portugal.
lvideira@uevora.pt