

O SIGNIFICADO DA RELATIVIDADE NO FINAL DO SÉCULO

Quando se comemoram os setenta e cinco anos da primeira comprovação experimental da teoria da relatividade geral, publicada em 1915 por Albert Einstein, é altura de fazer um balanço para avaliar os sucessos e os fracassos desta teoria, qualificada por muitos como a mais bela teoria física.

PAULO CRAWFORD

O ponto de partida será a teoria da relatividade restrita, publicada por Einstein no *annus mirabilis* de 1905 num artigo intitulado "Sobre a Electrodinâmica dos Corpos em Movimento". Esta teoria baseia-se em dois postulados fundamentais. (1) As leis da física tomam a mesma forma para todos os observadores que se movem uns em relação aos outros com velocidade constante e segundo uma linha recta (movimento uniforme). (2) Todos os observadores medem o mesmo valor para a velocidade da luz quer esta tenha sido emitida por um corpo em repouso ou por um corpo em movimento uniforme. Notemos os seguintes pontos. Estes postulados não dizem nada sobre *quais* são as leis da Natureza. Referem-se exclusivamente a movimentos (uniformes) mas aplicam-se a *todas* as leis físicas. Têm portanto uma natureza cinemática e não dinâmica. Os observadores definidos no primeiro postulado designam-se **observadores inerciais**. Concluímos que as leis físicas são as mesmas para todos os observadores inerciais. Dito de outro modo, os observadores inerciais são totalmente equivalentes do ponto de vista das leis físicas. Este primeiro postulado é conhecido por Princípio da Relatividade de Einstein.

Quando no segundo postulado falamos em velocidade da luz referimo-nos obviamente à velocidade da luz no vácuo que é aproximadamente 300.000 km/s. Para compreendermos o comportamento dos sinais luminosos, imaginemos dois observadores, A e B, separados por uma grande distância. A e B decidem medir a velocidade da luz a partir do intervalo de tempo que medeia a passagem de sinais luminosos trocados

entre si. Suponhamos que a distância entre eles é 300.000 km, e que os seus relógios foram sincronizados antes da experiência. A envia um sinal luminoso para B num instante previamente combinado, e um segundo depois B observa o clarão correspondente à chegada do sinal. Esta foi a técnica utilizada em 1675 por O. Roemer, para medir a velocidade da luz a partir da duração da sua viagem através do sistema solar, desde Júpiter à Terra, a qual dura cerca de uma hora. Não dispondo de um companheiro para lhe enviar um sinal



Paulo Crawford é doutorado em Física pela Universidade de Lisboa e professor auxiliar da Faculdade de Ciências da mesma Universidade, onde rege entre outras a disciplina de Relatividade e Cosmologia. É actualmente membro do Centro de Física Nuclear do Complexo Interdisciplinar II, onde dirige um grupo de investigação em Gravitação e Cosmologia. Fez investigação no King's College da Universidade de Londres e no Grupo Teórico de Relatividade da Universidade de Maryland, nos Estados Unidos. Nos últimos quatro anos tem desenvolvido pesquisa sobre a cosmologia do Universo primitivo, em colaboração com físicos de partículas, no âmbito de projectos de investigação financiados pelo Fundo CERN (Centro Europeu de Física de Altas Energias).

luminoso, Roemer recorreu ao movimento de um dos satélites de Júpiter, cujas posições podia calcular antecipadamente. As "luas" de Júpiter, quando observadas da Terra, chegam ora atrasadas ora adiantadas às posições calculadas, pois o tempo que a luz demora a percorrer a distância entre Júpiter e a Terra varia consoante esta se afasta ou se aproxima do planeta. A medida do atraso permitiu a Roemer calcular muito aproximadamente a velocidade da luz, a partir do conhecimento das posições relativas entre Júpiter e a Terra. Esta foi uma das descobertas científicas famosas do século XVII, não tanto pelo rigor do valor obtido mas por ter estabelecido um valor finito para a velocidade da luz.

Imaginemos agora uma experiência um pouco mais complicada. Os observadores A e B desejam verificar se a velocidade da luz varia de lugar para lugar. Para isso, cada um deles mede não só o tempo que a luz leva a percorrer a distância entre eles, mas também o tempo que a luz leva a atravessar um tubo de um metro, junto de cada um dos observadores. É claro que esta última medida exige uma

electrónica sofisticada, pois que o tempo que a luz leva a atravessar um tal tubo é menor que a centésima milionésima parte de um segundo ($\Delta t < 10^{-8}$ s). Ao fim de algum tempo e depois de repetirem esta experiência várias vezes, A e B concluem que a velocidade da luz é a mesma ao longo dos seus respectivos tubos e que este valor coincide com a velocidade média tomada entre as suas posições.

Vamos alterar ligeiramente a experiência. Em vez de A e de B permanecerem em repouso, B move-se agora com velocidade constante na direcção de A. À medida que B se aproxima de A, B espera que os sinais luminosos, enviados por A, atravessem o seu tubo a uma velocidade superior à da experiência anterior, quando a velocidade entre eles era nula. Não é isso que acontece no nosso quotidiano? Se um observador parado na plataforma duma estação de caminho de ferro vê passar um comboio a 100 km/h , e no comboio há um passageiro a deslocar-se a uma velocidade de 5 km/h em relação ao comboio, então a velocidade relativa entre o passageiro e o observador da plataforma é 105 km/h ou 95 km/h consoante o passageiro se afasta ou se aproxima da estação? Não devia acontecer o mesmo com a luz? Porém, para grande surpresa dos observadores A e B, a velocidade da luz permanece inalterada ao atravessar os respectivos tubos. E além disso, a velocidade medida a partir dos intervalos de tempo que a luz leva a percorrer a distância entre A e B continua

a ser a mesma. Consternado com este resultado, B supõe que a sua velocidade em relação a A é ainda muito pequena e recorre a um foguetão para aumentá-la. B aproxima-se de A cada vez mais depressa, na esperança de receber mais rapidamente os sinais luminosos enviados por A, mas é em vão, a velocidade medida localmente continua a ser a mesma. Ao fim de algum tempo, B atinge uma velocidade em relação a A igual a 99% da velocidade da luz e nota que os sinais luminosos chegam agora muito azulados. Trata-se de um fenómeno familiar, B sabe que a luz azul significa luz de alta



Foto 1 - Albert Einstein (Berlim, 1916).

frequência e recorda-se que as ondas sonoras também se deslocam para as altas frequências quando a fonte e o observador se aproximam um do outro. O efeito designa-se por **deslocamento de Döppler** e observa-se, por exemplo, quando dois carros se cruzam: a buzina torna-se mais aguda se os carros se aproximam e mais grave se eles se afastam. Voltando à nossa experiência, apesar do deslocamento de Döppler, B não observa nenhuma variação na velocidade da luz, isto é, B continua a medir a mesma velocidade para os sinais enviados por A.

B decide-se então a utilizar um outro foguetão para inverter o sentido do movimento e, assim, afastar-se de A a toda a velocidade. Verifica agora que os sinais luminosos enviados por A chegam bastante avermelhados, como se as ondas luminosas tivessem sido alongadas, provocando o aumento do seu comprimento de onda, tal como as ondas sonoras da buzina de um carro que se afasta. Ao fim de algum tempo B afasta-se de A a uma velocidade igual a 99% da velocidade da luz. B esperava que a luz enviada por A viajasse ao seu encontro a 3000 km/s (1% da velocidade habitual), mas nada disso acontece. A luz continua a chegar à mesma velocidade de $300\,000 \text{ km/s}$, independentemente da velocidade a que B se desloca em relação a A.

Numa última tentativa, e já desesperado por esta contradição entre o comportamento da luz e a experiência quotidiana, B resolve utilizar ainda um outro foguetão com o fim de ultrapassar a velocidade dos sinais luminosos na esperança que, ao viajar a uma velocidade superior à da luz relativamente a A, os sinais luminosos enviados por A não o atinjam. Enquanto decorre esta fase da experiência, A verifica que B está a fazer um esforço desesperado para atingir a velocidade da luz, mas quanto mais perto se encontra dessa velocidade, maior é a energia que necessita para acelerar. A necessidade de combustível cresce sem limite. Mesmo com toda a energia disponível no mundo, B não é

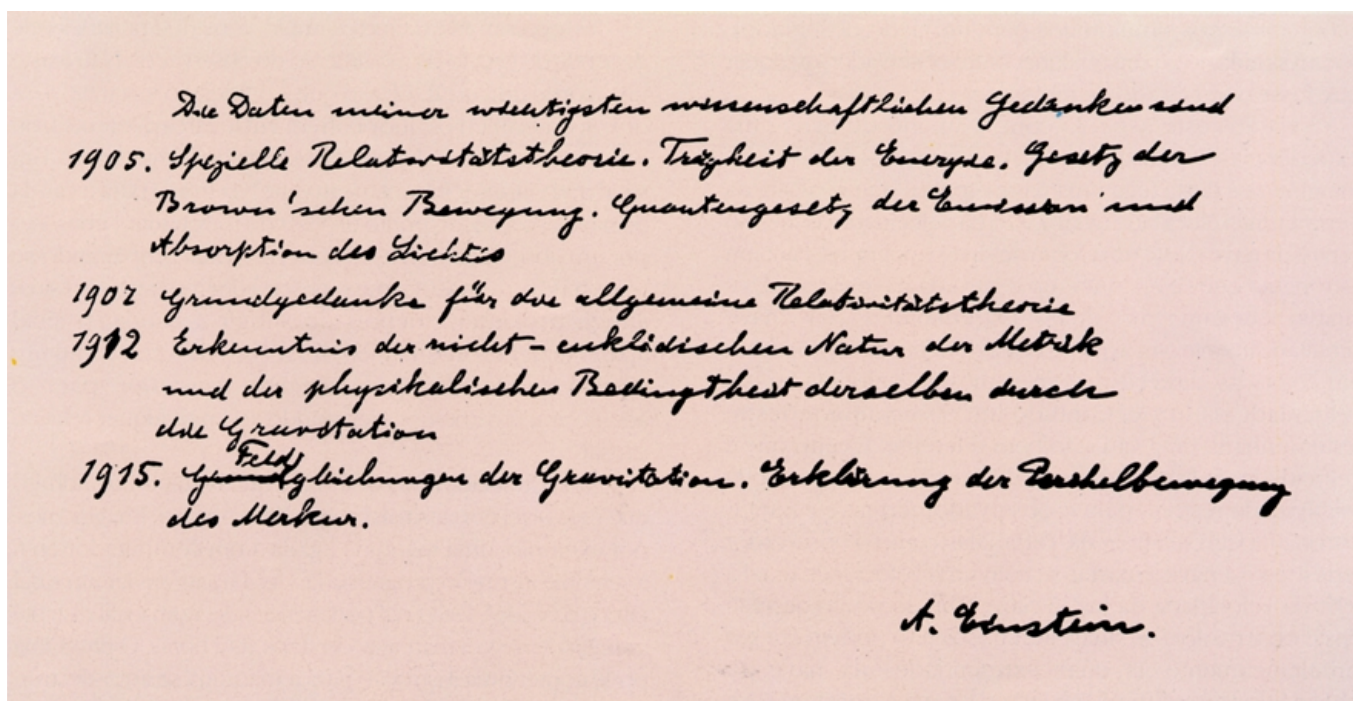


Foto 2 - Notas autobiográficas, do punho de Einstein (tradução: "As datas das minhas contribuições científicas mais importantes são: 1905 - Teoria da Relatividade Restrita. Inércia da Energia. Lei do movimento Browniano. Leis quânticas da Emissão e Absorção da Luz. 1907 - Ideias base da Teoria da Relatividade Geral. 1912 - Reconhecimento do carácter não-euclidiano da métrica e sua relação física com a gravitação. 1915 - Equações de campo da Gravitação. Explicação do movimento do periélio de Mercúrio")

capaz de vencer a barreira que o impede de atingir a velocidade a luz. Parece que à medida que B se aproxima da velocidade da luz, maior é a sua inércia: toda a nova energia consumida parece ser dispendida para criar mais massa e não para aumentar a velocidade. Entretanto, os sinais luminosos emitidos por A continuam a atravessar o tubo de um metro, transportado por B, a uma velocidade de 300 000 km/s.

O quadro descrito na experiência anterior está em contradição com a nossa rotina diária, fundamentada na mecânica de Newton. A relatividade restrita ensina-nos a ser mais cautelosos. Sempre que os objectos se movam com velocidades próximas da velocidade da luz devemos ignorar a nossa experiência quotidiana, e levar a sério os postulados desta teoria.

Como consequência da invariância da velocidade da luz, Einstein foi levado a concluir que o **espaço** e o **tempo** variam com o estado de movimento do observador. Por exemplo, quando B se aproxima vertiginosamente de A, a distância entre A e B, medida por B, contrai-se. Além desta peculiar contração do espaço, o movimento de B tem também um efeito muito estranho sobre o tempo. Quando B compara o seu relógio com dois relógios iguais, localizados em sítios diferentes, previamente sincronizados e em repouso em relação a A, constata que o seu relógio se atrasa em relação a estes relógios "solidários" com A. E vice-versa, o relógio de A atrasa-se em relação a dois relógios espacialmente separados e solidários com B (previamente sincronizados). A conclusão óbvia a retirar destes factos é: a **sincronização** dos relógios é um conceito relativo ao

observador. Não existe uma sincronização universal, simultaneamente válida para todos os observadores (inerciais). Relógios parados e sincronizados do ponto de vista de um observador A, não estão sincronizados para um observador B que se move com velocidade próxima da velocidade da luz em relação a A. Por outras palavras, se B se aproxima de A a grande velocidade e, pelo caminho, acerta o seu relógio por um relógio que está parado em relação a A, mas a uma certa distância de A, quando B se cruza com A verifica que o relógio de A está adiantado em relação ao seu relógio. Do ponto de vista de B, os dois relógios que estão em repouso relativamente a A, não foram previamente sincronizados, ainda que o tenham sido do ponto de vista de A. Esta situação traduz a impossibilidade de definir o conceito de **simultaneidade** de modo absoluto. Além disso, constatamos que o intervalo de tempo entre dois acontecimentos é mais curto para o observador que vê os dois acontecimentos ocorrerem no mesmo ponto de espaço. Designa-se o tempo medido por esse observador **tempo próprio**.

Dois acontecimentos físicos, que ocorrem em diferentes pontos de espaço (isto é, espacialmente separados) e simultâneos para um observador A, não serão simultâneos para outro observador B que se desloca a grande velocidade em relação a A. Este carácter **relativo** do conceito de simultaneidade é uma consequência do valor finito (constante) da velocidade da luz. Este é o conceito fundamental da teoria da relatividade restrita. Se as acções físicas pudessem propagar-se a uma velocidade infinita a simultaneidade teria um carácter absoluto: dois

acontecimentos simultâneos para um dado observador, seriam simultâneos para qualquer outro observador, qualquer que fosse o seu estado de movimento.

Vejamus este aspecto com o auxílio de mais uma experiência de pensamento, à boa maneira de Einstein. Imaginemos desta feita uma nave espacial que se afasta da Terra a uma velocidade igual a 90% da velocidade da luz. No centro da nave existe uma fonte de sinais luminosos. Para um astronauta que se encontre no centro da nave espacial, os sinais chegam às duas extremidades da nave simultaneamente, visto que as ondas luminosas se propagam em todas as direcções com a mesma velocidade – a velocidade da luz, c . Contudo um observador terrestre testemunharia uma situação bem diferente. É certo que a velocidade da luz é a mesma, de acordo com a teoria da relatividade restrita, para o observador terrestre e para o astronauta que se afasta da Terra. Mas como o observador terrestre vê a nave a afastar-se com uma velocidade igual a 90% da velocidade da luz, é claro que, do ponto de vista deste observador, os sinais luminosos não podem chegar simultaneamente às duas extremidades da nave. O observador terrestre vê a cauda da nave a aproximar-se rapidamente da origem do sinal luminoso, enquanto a dianteira da nave se afasta dessa origem. Durante o intervalo de tempo que a luz leva a atravessar a nave, esta afasta-se da Terra e, por isso, o sinal enviado para trás atinge a cauda da nave antes do outro sinal atingir a extremidade dianteira. Assim, dois acontecimentos que são simultâneos para o astronauta ocorrerão em instantes diferentes para o observador terrestre.

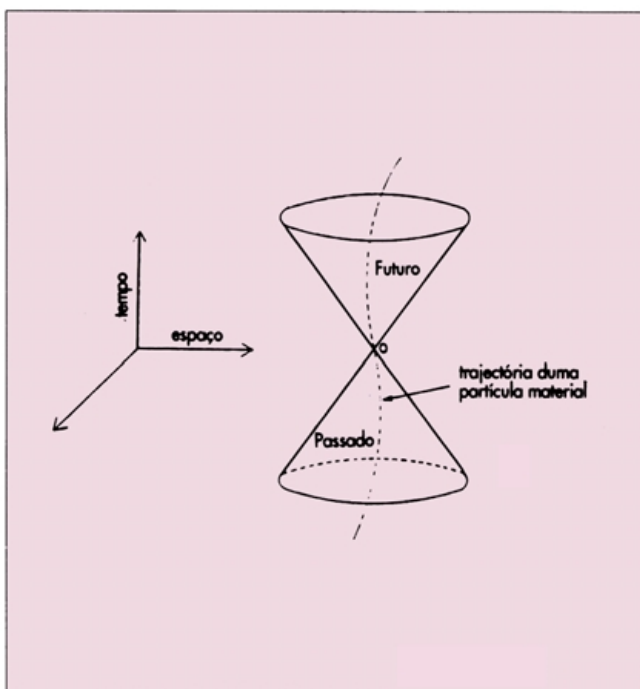


Fig. 1 - Diagrama do espaço-tempo: cada ponto deste diagrama representa um acontecimento físico, aqui identificado por três coordenadas, duas de espaço e uma de tempo. O cone é uma fronteira que separa os acontecimentos que têm uma relação causal com o acontecimento O , daqueles que não podem influenciar O nem ser influenciados por O .

Vimos, com este último exemplo, como a simultaneidade depende do estado de movimento do observador. Não existe um acordo universal sobre o que é o "mesmo instante" para dois acontecimentos que ocorrem em lugares diferentes, ou seja, não existe uma definição absoluta de "instantâneo". Um sinal que viajasse "instantaneamente" da frente para a cauda da nave espacial, do ponto de vista do astronauta, seria visto por um observador terrestre como um sinal propagando-se "para trás" no tempo. Como o observador terrestre vê o sinal atingir a dianteira depois de atingir a cauda, o sinal aparentemente "instantâneo" seria visto da Terra como um sinal enviado do acontecimento posterior para o acontecimento anterior, destruindo assim qualquer relação causal.

São conhecidos os paradoxos que resultam de admitir que é possível enviar sinais "para trás" no tempo. Imaginemos, por exemplo, uma máquina ligada a um computador com a seguinte instrução programada: "Às 4 horas enviar um sinal para o passado". Este sinal pode reflectir-se num local distante a atingir de novo a máquina, digamos, às 2 horas. O programa pode conter uma instrução para a máquina se auto-destruir uma hora após a chegada do sinal. É claro, uma tal sequência de acontecimentos é totalmente inconsistente: auto-destruição às 3 horas anteciparia a transmissão do sinal às 4 horas, impedindo a recepção do sinal às 2 horas e, portanto, anulando a accionamento do mecanismo de auto-destruição, em contradição com a hipótese original. A inconsistência traduz-se numa quebra da relação causa-efeito. Assim, para preservar a estrutura causal dos fenómenos físicos adoptamos a regra: **não é possível enviar sinais a velocidades superiores à da luz.**

No que se refere ao conteúdo, a relatividade restrita baseia-se inteiramente nos dois postulados acima enunciados. Quanto à forma, é de enorme conveniência reconhecer que, neste novo quadro da relatividade restrita, os conceitos de espaço e de tempo passam a estar indissolúvelmente interligados, tal como o notou Hermann Minkowski em 1908:

"Daqui em diante o espaço só por si e o tempo só por si estão condenados a tornarem-se meras sombras, e só uma união dos dois preservará uma realidade independente".

O mundo físico da nossa experiência, é agora representado por um espaço a quatro dimensões, o espaço-tempo. Cada ponto do espaço-tempo é um acontecimento físico, representado por quatro coordenadas (t, x, y, z) : t representa o instante e (x, y, z) dá-nos a localização do acontecimento. Diferentes observadores (inerciais) usam coordenadas diferentes para o mesmo acontecimento. O conjunto de todos os acontecimentos da vida de um observador (ou de uma partícula) formam uma trajectória do espaço-tempo a que se dá o nome de **linha do Universo**. Para os observadores inerciais as linhas do Universo são geodésicas (i.e., linhas rectas) deste espaço. Se dois observadores se cruzam e tomam esse acontecimento como a origem das respectivas coordenadas de espaço e de tempo,

a invariância da velocidade da luz no vácuo exige que

$$x^2+y^2+z^2 - c^2 t^2 = x'^2+y'^2+z'^2 - c^2 t'^2$$

onde (t, x, y, z) e (t', x', y', z') são as coordenadas dum mesmo acontecimento para cada um dos observadores.

À semelhança do que acontece com a geometria euclideana, onde a generalização do teorema de Pitágoras nos diz que

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

é um comprimento invariante numa rotação, também a geometria do espaço-tempo da relatividade restrita pode ser caracterizada pelo invariante fundamental,

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2,$$

que traduz a invariância da velocidade da luz no vácuo, e também é habitualmente interpretado como uma “distância” entre dois pontos (acontecimentos) deste espaço-tempo a quatro dimensões e, por isso, designado **intervalo do Universo**. Porém, devido à existência de três sinais positivos e um negativo (na linguagem matemática diz-se que se trata de uma forma quadrática indefinida) esta distância nem sempre é positiva como na geometria euclideana. Dados dois acontecimentos cuja separação espacial é $r = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$ e cuja separação temporal é t , três situações diferentes podem ocorrer:

$$(1) \quad r^2 - c^2 t^2 = 0,$$

os dois acontecimentos formam um par do tipo-luz;

$$(2) \quad r^2 - c^2 t^2 < 0,$$

os dois acontecimentos formam um par do tipo-tempo;

$$(3) \quad r^2 - c^2 t^2 > 0,$$

os dois acontecimentos formam um par do tipo-espaço.

Todos os pares de acontecimentos que estão numa relação de causa-efeito pertencem às categorias 1 ou 2. Nenhuma informação pode ser transmitida com velocidade maior do que a da luz. Logo, dois acontecimentos que pertençam à categoria 3 não podem estar causalmente relacionados. Como as partículas materiais viajam sempre com uma velocidade inferior à da luz, dois quaisquer acontecimentos da vida de uma partícula material formam um par do tipo-tempo, isto é, a sua separação temporal é maior do que a sua separação espacial, para todos os observadores inerciais. O conjunto dos acontecimentos que formam com a origem do espaço e do tempo um par tipo-luz geram uma hipersuperfície a três dimensões conhecida por **cone de luz**. As linhas do Universo das partículas materiais que passam

pela origem estão necessariamente contidas no interior do respectivo cone de luz (Fig. 1). No espaço-tempo da relatividade restrita, a estrutura de cones de luz é rígida, ou seja, é a mesma em todos os pontos.

É fácil verificar que a transformação de coordenadas que satisfaz a invariância do intervalo do Universo é a conhecida transformação de Lorentz (ver o artigo de E. Lage na Colóquio/Ciências), donde se deduz a fórmula da adição de velocidades que está de acordo com as experiências de pensamento descritas atrás,

$$u = \frac{u' + v}{1 + u' v/c^2}$$

Se, por exemplo, $u' = 100 \text{ km/h}$ é a velocidade do passageiro em relação ao comboio, e $v = 5 \text{ km/h}$ é a velocidade do comboio em relação à estação o valor de u é uma décima milésima da bilionésima parte de 1% menor que 105 km/h . E se $u' = c$ vem $u = c$, qualquer que seja o valor de $v < c$, em acordo com o postulado de Einstein: a velocidade da luz (no vácuo) é a mesma para todos os observadores. A luz de uma estrela que se aproxima da Terra viaja com velocidade c , tal como a luz de uma estrela que se afasta. Usando estrelas duplas os astrónomos verificaram este facto com grande precisão.

O ESPAÇO-TEMPO CURVO DA RELATIVIDADE GERAL

Tanto o espaço euclideano como o espaço-tempo da relatividade restrita são espaços planos. Ao procurar compatibilizar a interacção gravitacional com as ideias da relatividade restrita, onde sobressai a noção da velocidade da luz como velocidade limite para a transmissão das acções físicas, Einstein é levado, ao fim de uma luta intelectual intensa, a renunciar ao espaço-tempo plano. Na presença de um campo gravítico é necessário incluir todos os tipos de movimentos relativos e não só os movimentos uniformes. Será possível generalizar o Postulado (1) de modo a aplicá-lo a todos os observadores de um campo gravítico? Vejamos, numa linguagem simples, quais as considerações que orientaram o pensamento de Einstein. Começo pelo carácter universal da gravitação. A interacção gravitacional tem uma natureza única entre todas as forças: todos os corpos caem ao longo da mesma trajectória espacial independentemente da sua massa e da sua constituição. Este facto sugere que a gravidade não é realmente uma força mas uma propriedade geométrica do espaço ou, no contexto da relatividade, do espaço-tempo. Neste ponto surge a ideia revolucionária de Einstein: os observadores em queda livre num campo gravítico identificam-se com os observadores inerciais da relatividade restrita no que diz respeito às suas observações locais (Princípio da Equivalência). Mas, ao contrário da relatividade restrita, dois observadores em queda livre não mantêm uma velocidade uniforme entre si devido aos efeitos não locais do campo gravítico. Realmente, dois corpos em queda livre à superfície da Terra não descrevem trajectórias

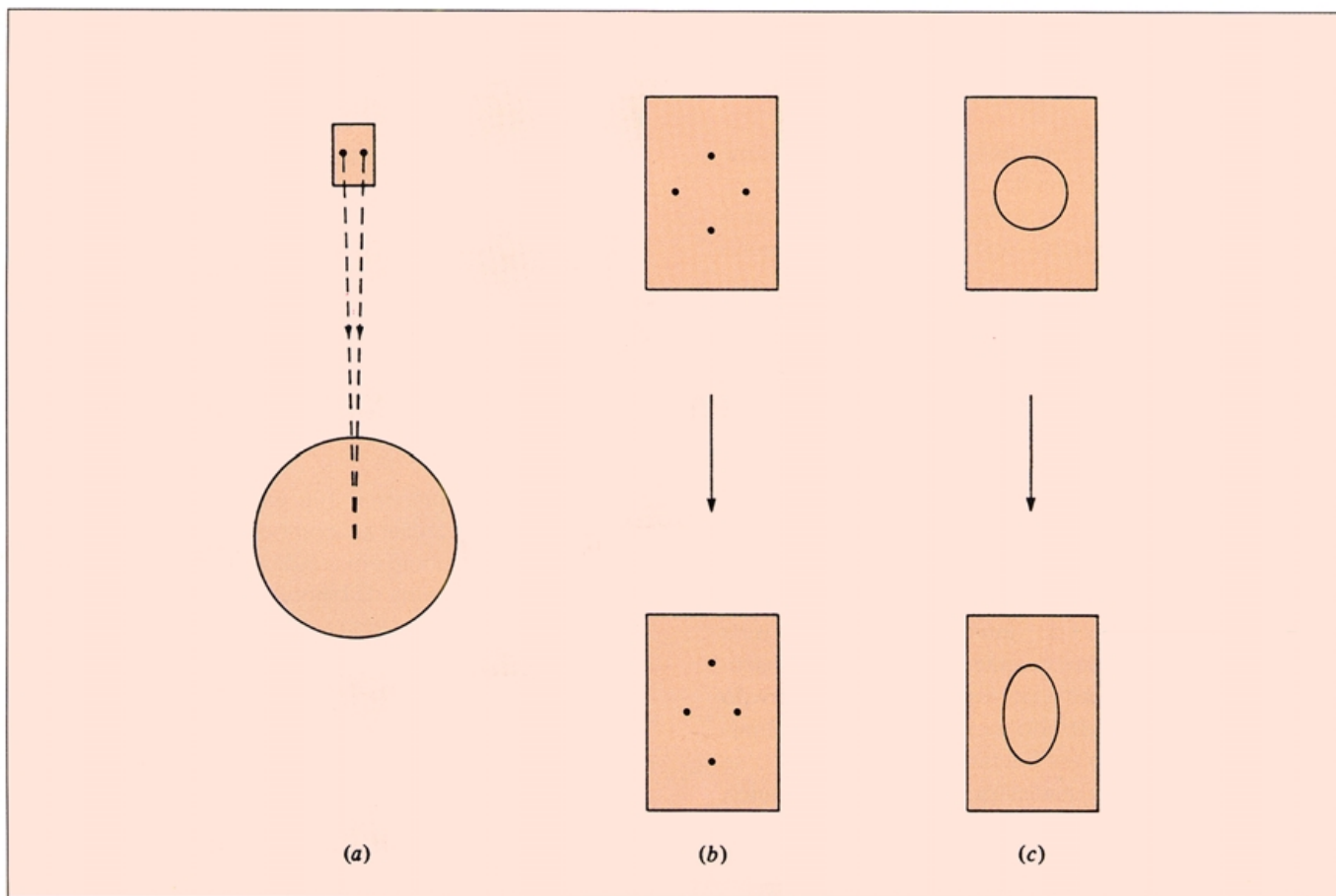


Fig. 2 a) - Duas partículas em queda livre vão lentamente aproximando-se uma da outra à medida que se deslocam segundo trajetórias espaciais que convergem para o centro de massa da Terra. **b)** Coloquemos 4 partículas nos vértices de um quadrado e suficientemente afastadas para que o campo gravítico apresente uma variação significativa com a distancia. Se este sistema entrar em movimento de queda livre o quadrado inicial sofre uma distorção e transforma-se num losango por ação das chamadas **forças de maré** que traduzem a presença intrínseca de um campo gravítico. Estas forças de maré permitem distinguir a situação de imponderabilidade, característica duma queda livre, da situação de ausência de forças. Não é possível eliminar totalmente a presença de um campo gravítico, colocando um corpo em queda livre, embora as acelerações de maré possam ser desprezáveis localmente. **c)** Neste caso substituíram-se as 4 partículas por um anel circular. A deformação do anel é equivalente à distorção do quadrado, podendo ser interpretada como devida ao aparecimento de duas acelerações: uma que afasta as partículas na vertical e outra que as aproxima segundo a horizontal.

exatamente paralelas pois, sendo o campo central, as trajetórias convergem para o centro de massa, embora, a uma escala local, as trajetórias sejam quase paralelas (Fig. 2). Para justificar estas diferenças face à relatividade restrita, Einstein identifica a gravidade com uma modificação em relação à geometria euclideana: a gravitação produz uma **curvatura** do espaço-tempo. As linhas do Universo dos observadores em queda livre serão as geodésicas deste espaço-tempo curvo. Claro que agora as geodésicas já não são linhas rectas, como no espaço plano, mas sim as linhas "mais direitas" que o espaço-tempo curvo admite.

Mas o que é a curvatura do espaço? E como se determina essa curvatura? Todos os que imaginam o espaço como um vazio de coisas materiais, o que resta quando abstraímos os objectos e os seres presentes, ficam perplexos com a noção de um espaço curvo. Para a maioria das pessoas, o espaço destina-se a ser ocupado pelos corpos nos seus movimentos relativos, o espaço é o palco onde se desenrolam os diferentes acontecimentos. Para o matemático, um espaço é uma colecção de "pontos", cuja natureza pode variar consoante as aplicações matemáticas e/ou físicas. Assim, o espaço vazio

pode ser entendido como um espaço sem matéria, mas não como um espaço sem propriedades definidas entre os seus elementos (pontos). Por exemplo, os pontos do espaço-tempo da teoria da relatividade são acontecimentos físicos, isto é, algo que ocorreu num certo local e num certo instante. Vimos já que o conjunto de todos os acontecimentos físicos forma um espaço contínuo a quatro dimensões. Na ausência de campos gravíticos, ou seja, quando estamos suficientemente afastados das distribuições de matéria e energia, este contínuo é o espaço-tempo da relatividade restrita. Neste espaço-tempo os sistemas de coordenadas inerciais são análogos aos sistemas cartesianos de coordenadas rectilíneas da geometria euclideana. Tomando só duas dimensões, é possível representar estes sistemas de coordenadas num plano (numa folha de papel, por exemplo). Mas já não é tão fácil usar um sistema de coordenadas rectilíneas numa superfície esférica. Sobre a folha de papel posso traçar um reticulado de segmentos de recta perpendiculares entre si e, com estas coordenadas, posso determinar a posição de qualquer ponto do papel (bastando um único sistema de coordenadas para determinar todos os

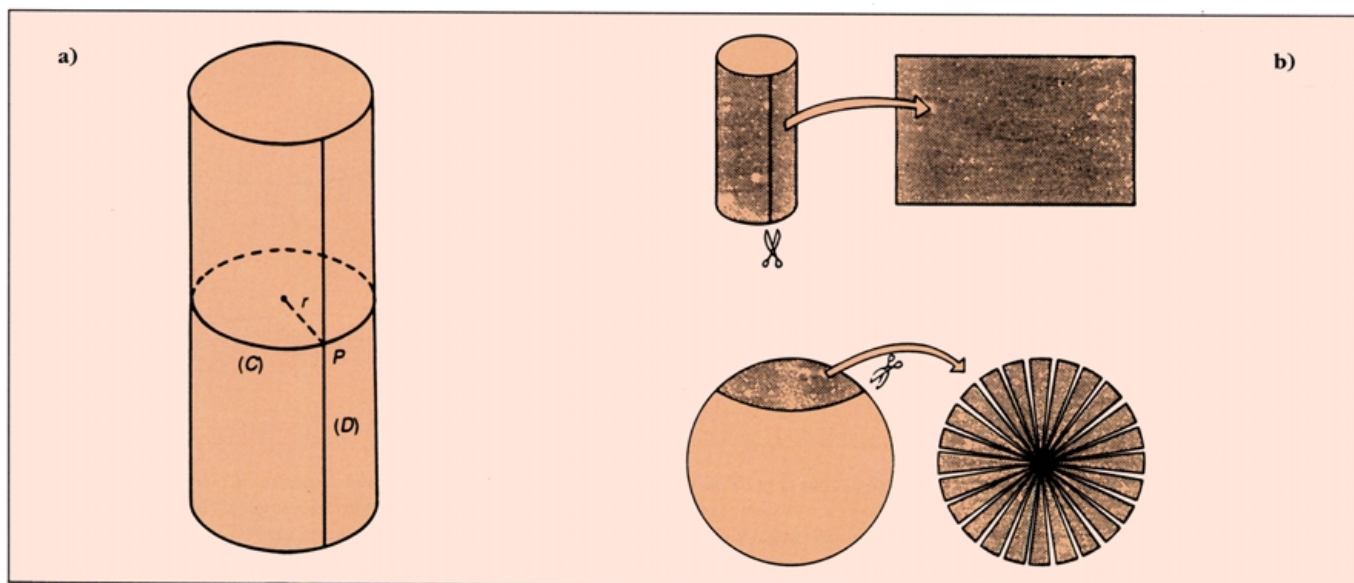


Fig. 3 a) - Curvatura do cilindro: são necessários dois números para especificar a curvatura do cilindro no ponto P. Na direção paralela ao eixo do cilindro (D), a curvatura é nula; na direção perpendicular, é igual à da circunferência (C). **b)** Comparação entre o cilindro e a esfera: a curvatura intrínseca do cilindro é igual ao produto das curvaturas referidas em a) e, portanto, é nula; podemos cortar o cilindro segundo o eixo e colocá-lo sobre uma folha de papel. A curvatura de uma esfera é estritamente positiva; se cortamos a região indicada e tentarmos planificá-la, a superfície rasga-se pois que a sua área é menor que a de um círculo plano com o mesmo raio.

pontos do papel). Envolvendo a esfera com a folha de papel, verifico que não é possível ajustar o papel à esfera sem dobrá-lo. Deste modo, sou obrigado a sobrepor diferentes porções do reticulado com as mesmas porções da esfera. Nestas condições, não é possível estabelecer uma correspondência unívoca entre os pontos da esfera e os pontos do papel. É necessário que o papel tenha uma área maior do que a área da esfera para que seja possível envolvê-la completamente com a folha de papel. Em contrapartida, no caso de um cilindro não existe qualquer dificuldade em envolvê-lo com uma única folha de papel, e sem necessidade de a dobrar. Existe, portanto, uma correspondência (aplicação) bem definida entre os pontos do papel e os pontos da superfície do cilindro. A folha de papel e o cilindro são espaços (bi-dimensionais) intrinsecamente planos e a esfera é um espaço (bi-dimensional) intrinsecamente curvo (Fig. 3). Como estender esta noção de curvatura a espaços com mais dimensões sem os "mergulhar" em espaços planos de dimensão superior? Para isso teremos de olhar para as suas características intrínsecas.

Entre os axiomas da geometria euclideana existe um que foi sempre uma fonte de grande controvérsia até meados do século XIX. Refiro-me ao *axioma das paralelas* que estabelece o seguinte: por um ponto do espaço só passa uma paralela a uma recta dada. Duas linhas rectas coplanares dizem-se paralelas se não se intersectam. Há algo de incómodo nesta definição que, segundo consta, dava que pensar ao próprio Euclides. Na vida real só encontramos segmentos de recta, nunca linhas rectas (cujo comprimento é infinito). Põe-se, pois, a seguinte questão: como podemos ter a certeza que dois segmentos de recta se mantêm à mesma distância quando prolongados indefinidamente?

Ao longo dos tempos, várias pessoas tentaram encontrar

um axioma mais básico do qual se pudesse deduzir o axioma das paralelas. Foi o caso de John Wallis no século XVII e também o de Geralamo Saccheri no século seguinte. Este último, na sua obra *A Prova de Euclides*, publicada em 1733, pensou erradamente que tinha finalmente estabelecido o axioma das paralelas como uma verdade transparente. Nesta obra, Saccheri derivou e discutiu muitos teoremas não-euclidianos mas sem se aperceber que a geometria não-euclideana podia ter uma validade teórica igual à geometria de Euclides. Para Emanuel Kant, que partilhava neste campo da crença dominante, a geometria de Euclides era uma verdade cristalina, sem alternativa. Na sua *Crítica da Razão Pura* Kant tentou colocar a geometria euclideana numa base sólida argumentando para isso que os seus axiomas eram *a priori*, isto é, anteriores à experiência e, portanto, uma "necessidade inevitável do pensamento".

Hoje sabemos que o axioma das paralelas não pode ser reduzido a outro axioma mais básico, e é fundamental para distinguir o espaço euclideano de todos os outros espaços possíveis. No espaço euclideano o perímetro de uma circunferência é igual a π vezes o seu diâmetro: $C = \pi \times D$, e a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a dois ângulos rectos: $\alpha + \beta + \gamma = \pi$. Noutros espaços estas relações são diferentes, como veremos. De todo os espaços não-euclidianos só há dois que são também **uniformes** no mesmo sentido do espaço euclideano, ou seja, são homogêneos e isotrópicos, pois todos os seus pontos e todas as suas direcções são equivalentes. O primeiro destes espaços tem uma geometria **hiperbólica** e foi descoberto independentemente por Johann Gauss, Nikolai Lobachevsky e Janos Bolyai; o segundo tem uma geometria **esférica** e foi descoberto por Georg Riemann. Estes espaços têm uma escala intrínseca de comprimento que vamos representar

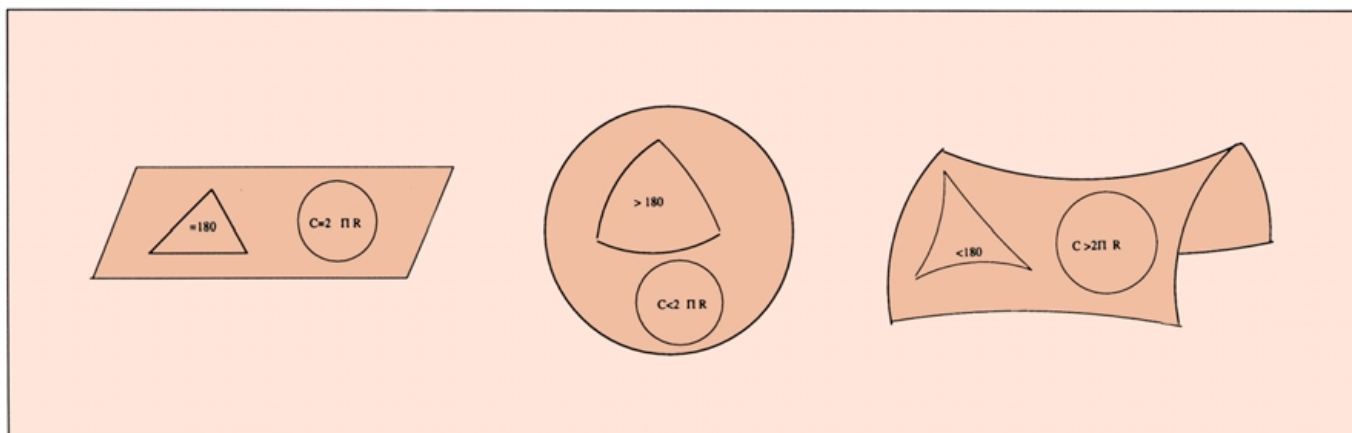


Fig. 4 - Geometria dos espaços uniformes: as propriedades das superfícies uniformes estão aqui exemplificadas pelo plano, pela esfera e pela superfície em forma de sela. Esta última é um exemplo imperfeito porque tem centro e, por isso, não pode representar um espaço homogêneo de curvatura negativa. A melhor representação deste espaço é uma superfície infinita chamada pseudoesfera que não pode ser construída num espaço tri-dimensional.

por R . Se considerarmos regiões de um espaço uniforme cujas dimensões sejam muito pequenas em relação a R , então as suas geometrias assemelham-se localmente à geometria euclidiana. Portanto, quando R é muito grande não é fácil distinguir entre os três espaços uniformes. Observadores que vivam em espaços com geometria esférica ou hiperbólica, mas que só tenham acesso ao que se passa na sua vizinhança imediata, pelo estudo de fenómenos locais, terão tendência a pensar em termos da geometria de Euclides.

Os três espaços uniformes distinguem-se pelos seguintes postulados: (1) No espaço hiperbólico, por um dado ponto passam muitas geodésicas paralelas a uma geodésica dada; (2) no espaço euclidiano só passa uma geodésica paralela nas mesmas condições, como sabemos; (3) no espaço com geometria esférica, não existe nenhuma geodésica paralela a uma geodésica dada. Por outro lado, no espaço hiperbólico o perímetro de uma circunferência é maior que π vezes o seu diâmetro: $C > \pi \times D$, e a soma dos ângulos internos de um triângulo é menor que dois ângulos rectos: $\alpha + \beta + \gamma < \pi$; e, no espaço esférico, o perímetro de uma circunferência é menor que π vezes o seu diâmetro: $C < \pi \times D$, e a soma dos ângulos internos de um triângulo é maior que dois ângulos rectos: $\alpha + \beta + \gamma > \pi$.

Para ilustrar um espaço esférico dispomos obviamente da superfície de uma bola. Mas é mais difícil dar um exemplo de um espaço hiperbólico bi-dimensional (Fig.4). David Hilbert, um dos mais célebres matemáticos do princípio do século, mostrou que não é possível construir uma superfície bi-dimensional imersa¹ num espaço euclidiano, que represente a geometria de um espaço hiperbólico, uniforme por toda a parte. A superfície de uma pseudo-esfera tem uma geometria hiperbólica mas não é uniforme, pois os seus pontos não são todos equivalentes. A superfície em forma de “sela” é homogênea e isotrópica apenas numa pequena região central; no entanto, tem virtude de ilustrar que o

espaço hiperbólico é **aberto** e de extensão infinita (tal como o espaço euclidiano). Por sua vez uma superfície esférica põe em evidência como a geometria esférica é **fechada** e de extensão finita. Estes espaços curvos têm a designação comum de espaços riemannianos.

Do ponto de vista da curvatura, os três espaços uniformes distinguem-se porque:

- 1. o espaço esférico tem curvatura positiva ($K > 0$);
- 2. o espaço euclidiano tem curvatura nula ($K = 0$);
- 3. e o espaço hiperbólico tem curvatura negativa ($K < 0$).

No caso dos espaços bi-dimensionais uniformes a curvatura é dada por $K = \pm 1/R^2$, onde R é o raio de curvatura, a escala intrínseca de comprimento já mencionada. No caso geral, uma superfície bi-dimensional tem dois raios de curvatura, R_1 e R_2 , medidos, em cada ponto, em direcções perpendiculares entre si; mas se a superfície é uniforme $R_1 = R_2$, existe um único raio de curvatura, com o mesmo valor em todos os pontos da superfície. Quando os raios de curvatura são medidos para o mesmo lado da superfície, a curvatura diz-se positiva: $K > 0$; quando os raios de curvatura são medidos em lados opostos da superfície, a curvatura diz-se negativa: $K < 0$. Uma superfície plana tem um raio de curvatura infinito e a curvatura é, portanto, nula: $K = 0$. Num espaço homogêneo e isotrópico, a soma dos três ângulos internos de um triângulo menos dois ângulos rectos é igual à curvatura vezes a área do triângulo:

$$K \times \text{área do triângulo} = \text{soma dos ângulos internos} - \pi.$$

Com esta fórmula podemos determinar a curvatura de um modo intrínseco, sem necessidade de recorrer a espaços de dimensão superior.

Até aqui temos considerado apenas superfícies bi-dimensionais imersas num espaço euclidiano tri-dimensional para mais facilmente ilustrar o conceito de curvatura. Mas é possível estender este conceito a espaços de dimensão

¹ A “imersão” e o “mergulho” de um espaço noutra de dimensão superior são noções matemáticas precisas e distintas. Aqui, porém, contentamo-nos com a noção intuitiva subjacente e usamos indiferentemente os dois termos.

qualquer. Porém, num espaço tri-dimensional a curvatura é um objecto bem mais complicado, contendo seis componentes que, em geral, têm diferentes valores. Se o espaço é uniforme, três das componentes são nulas e as outras três são constantes por toda a parte e iguais entre si; quando o espaço é plano todas as componentes se anulam. Num espaço (-tempo) com quatro dimensões, como na relatividade, a curvatura tem vinte componentes, que são todas nulas na relatividade restrita.

Se quisermos pensar na curvatura como uma "deformação" de um espaço que está imerso num espaço plano de dimensão superior, já sabemos que para um espaço curvo bi-dimensional necessitamos de um espaço plano tri-dimensional; mas para um espaço curvo tri-dimensional necessitamos, em geral, de um espaço plano com seis dimensões: e para um espaço curvo quadri-dimensional teremos de recorrer, em geral, a um espaço plano com dez dimensões. A teoria da relatividade geral de Einstein descreve o nosso Universo como um espaço-tempo curvo com quatro dimensões. Mas quando falamos aqui de curvatura não procuramos visualizar o espaço-tempo como estando imerso num espaço-tempo plano com dez dimensões. A curvatura deve ser aqui entendida como uma propriedade geométrica intrínseca. Aliás, um espaço plano não é em nada mais fundamental do que um espaço curvo, e é bem mais difícil imaginar um espaço com dez dimensões, embora plano, do que um espaço quadri-dimensional curvo.

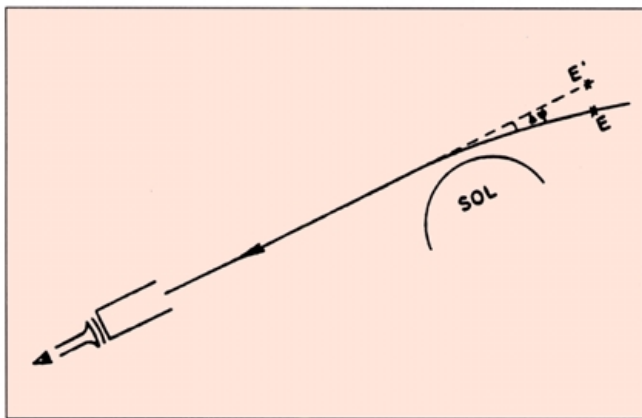


Fig. 5 - Encurvamento dos raios luminosos no campo gravítico do Sol: para um raio luminoso rasando a superfície solar a teoria da relatividade geral prevê um ângulo de desvio $\Delta \varphi = 1,75''$. Devido às dificuldades experimentais (quando se faz o registo em chapa fotográfica há que atender à distorção do filme durante a revelação) os valores medidos estão compreendidos entre $1,43''$ e $2,7''$.

Desde Kepler que os físicos empregavam a geometria euclídeana no espaço vazio do sistema solar para determinar as trajectórias dos planetas em torno do Sol. A geometria euclídeana parecia funcionar bem nestas paragens remotas com uma excepção: o avanço do periélio do Mercúrio (o ponto da órbita elíptica do planeta mais próximo do Sol) de 43 segundos de arco por século representava uma "deformação" da órbita que não era possível explicar como sendo devida apenas às perturbações provocadas pelos



Foto 3 - Roça "Suni", na Ilha do Príncipe, onde foi feita a primeira comprovação experimental da teoria da Relatividade Geral de Einstein, durante o eclipse total que se verificou em 29 de Maio de 1929

outros planetas. Embora essa deformação seja pequena, a sua origem permaneceu misteriosa até ao princípio do século, quando Einstein completou a sua teoria da relatividade geral. A proposta revolucionária de Einstein, tal como se explicou acima, foi identificar a gravidade com o desvio em relação à geometria euclídeana, ou seja, com a curvatura do espaço. Deste ponto de vista os planetas não se movem numa trajectória elíptica em torno do Sol, como supunha Newton, com o Sol a exercer uma *força* gravítica sobre eles para os afastar das suas trajectórias rectilíneas naturais. Em vez disso, a gravidade do Sol é interpretada como uma deformação do espaço (e do tempo) na sua vizinhança, e os planetas limitam-se a seguir as trajectórias mais "fáceis" – os caminhos que minimizam as suas acções mecânicas através do espaço curvo. Estes caminhos mais fáceis (as geodésicas) são afinal muito próximos dos caminhos "forçados" tomados pelos planetas segundo a teoria da força gravítica de Newton. Mas não são exactamente iguais. A órbita de Mercúrio, por exemplo, avança 43 segundos de arco por século. Um efeito semelhante ocorre com todos os outros planetas mas, dada a proximidade do Sol, o efeito é mais significativo no caso do Mercúrio. Este foi o grande triunfo de Einstein.

Se o espaço à roda do Sol não é exactamente euclídeano, também é natural que as imagens das estrelas que se encontram na direcção do Sol cheguem até nós algo deformadas, como foi observado por Sir Arthur Eddington em 1919 na Ilha do Príncipe, durante um eclipse solar. Este efeito ocorre sempre que a luz passa na proximidade de qualquer objecto celeste e é tanto mais importante quanto maior for a curvatura do espaço (-tempo), isto é, quanto mais intenso for o campo gravítico do objecto junto do qual passam os raios luminosos (Fig. 5).

A outra maneira do campo gravítico influenciar o comportamento da luz tem a ver com a mudança de

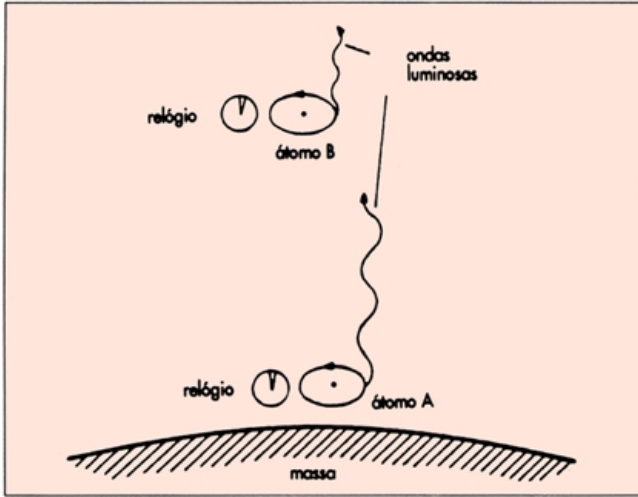


Fig. 6 - Comportamento dos relógios num campo gravítico: num campo estático com simetria esférica a teoria prevê que os relógios colocados mais perto da superfície do corpo, onde a curvatura é mais intensa, andam mais lentamente. Este efeito foi verificado na Terra por Pound e Rebka em 1960.

frequência. Num linguagem newtoniana, é fácil entender que a luz emitida por uma estrela dispense uma certa energia para vencer a barreira de potencial que a separa do observador. Este dispêndio de energia traduz-se num deslocamento das riscas do espectro da radiação emitida para a zona do vermelho. Einstein previu teoricamente este deslocamento gravitacional das frequências pela primeira vez em 1911, antes de completar a teoria da relatividade geral, por meio de um raciocínio heurístico. Vejamos como descrever quantitativamente este efeito.

Consideremos dois átomos idênticos, A e B, que se encontram em repouso a distâncias diferentes num certo campo gravítico. O átomo A emite luz cuja frequência apresenta um deslocamento para o vermelho, dado por

$$(v_e - v_o) / v_o = \Delta v / v_o = \Delta U / c^2$$

para um observador colocado junto do átomo B, e sendo ΔU a diferença de potencial gravítico entre B e A. Podemos identificar os átomos com relógios atômicos e a frequência da luz emitida com a frequência de referência desses relógios. Sempre que o relógio A avança um segundo, A envia um sinal luminoso para B. De acordo com a equação anterior os sinais luminosos emitidos por A chegarão a B com uma frequência $v_o = v_e - \Delta v$ que é menor que a frequência de B. Como não se perde nenhuma informação de A para B devemos concluir que o relógio A avança mais lentamente que o relógio B. Enquanto o relógio B mede um segundo, emite durante o mesmo tempo v_e ondas mas recebe somente $v_o = v_e - \Delta v$ ondas de A. Por outras palavras, durante o intervalo de tempo ΔT_B , o relógio A mede

$$\Delta T_A = (1 - \Delta v / v_o) \Delta T_B = (1 - \Delta U / c^2) \Delta T_B$$

Na mecânica newtoniana, o potencial gravítico à superfície

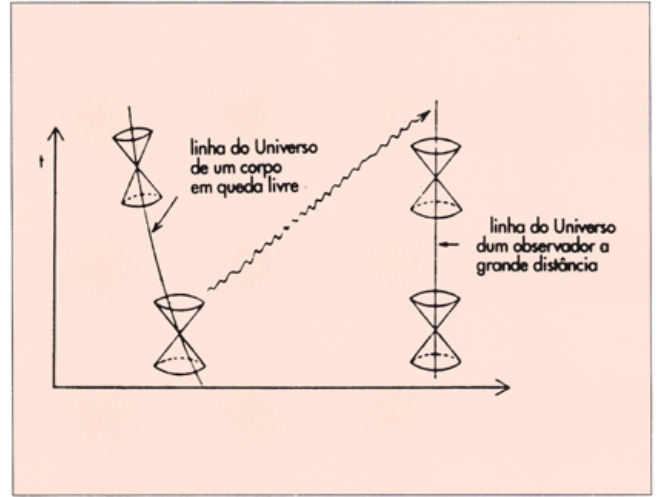


Fig. 7 - Comportamento dos cones de luz na presença de um campo gravítico: os cones de luz são arrastados e inclinados pelo campo gravítico da estrela. Esta inclinação traduz a distorção provocada pela curvatura do espaço-tempo.

duma estrela de raio R e massa M é dado por

$$U(R) = - GM/R,$$

onde G é a constante de gravitação de Newton. Se o relógio B se encontra muito afastado da massa responsável pelo campo gravítico, podemos fazer $U \sim 0$ e se A está à superfície da estrela, vem

$$\Delta T_A = (1 - GM / Rc^2) \Delta T_B$$

Em resumo: os relógios movem-se mais lentamente na vizinhança dos campos gravitacionais intensos (Fig. 6). No caso do Sol $GM_S / R_S c^2 \sim 10^{-6}$; logo, um relógio situado à superfície do Sol atrasar-se-ia por um factor de $\sim 10^{-6}$ em relação a um relógio idêntico colocado na Terra, onde se faz $U \sim 0$, pois $GM_T / R_T c^2 \sim 10^{-9}$ à superfície da Terra. Mas à superfície de uma estrela de neutrões ($GM / Rc^2 \sim 10^{-3}$) o efeito é mais significativo! A equação anterior foi obtida sem a intervenção das equações de Einstein da relatividade geral. A expressão exacta, para um campo gravítico com simetria esférica, toma a forma

$$\Delta T_A = (1 - 2 GM/Rc^2)^{1/2} \Delta T_B$$

com base numa solução das equações de Einstein obtida por Karl Schwarzschild em 1916. ΔT_A mede o intervalo de tempo próprio de um relógio colocado a uma distância² da

² Numa geometria curva as distâncias, tal como os tempos, não se medem como num espaço plano, e o valor da coordenada radial não fornece imediatamente a distância ao centro de massa.

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 49.

1. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie; von A. Einstein.

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als „Relativitätstheorie“ bezeichneten Theorie; die letztere nenne ich im folgenden zur Unterscheidung von der ersteren „spezielle Relativitätstheorie“ und setze sie als bekannt voraus. Die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erleichtert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst die formale Gleichwertigkeit der räumlichen Koordinaten und der Zeitkoordinate klar erkannte und für den Aufbau der Theorie nutzbar machte. Die für die allgemeine Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsmittel lagen fertig bereit in dem „absoluten Differentialkalkül“, welcher auf den Forschungen von Gauss, Riemann und Christoffel über nichteuklidische Mannigfaltigkeiten ruht und von Ricci und Levi-Civita in ein System gebracht und bereits auf Probleme der theoretischen Physik angewendet wurde. Ich habe im Abschnitt B der vorliegenden Abhandlung alle für uns nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt vorauszusetzenden mathematischen Hilfsmittel in möglichst einfacher und durchsichtiger Weise entwickelt, so daß ein Studium mathematischer Literatur für das Verständnis der vorliegenden Abhandlung nicht erforderlich ist. Endlich sei an dieser Stelle dankbar meines Freundes, des Mathematikers Grossmann, gedacht, der mir durch seine Hilfe nicht nur das Studium der einschlägigen mathematischen Literatur ersparte, sondern mich auch beim Suchen nach den Feldgleichungen der Gravitation unterstützte.

Annalen der Physik. IV. Folge. 49.

50

Foto 4 Primeira página do artigo de Einstein no vol. 49 (1916) de *Annalen der Physik*, a tradução portuguesa faz parte da colectânea “O Princípio da Relatividade”, editada pela Fundação Gulbenkian.

estrela cuja coordenada radial é R e ΔT_B é o intervalo de tempo próprio medido por um relógio que se encontra afastado da estrela, fora da influência do campo gravítico.

Em termos das frequências, e supondo que o relógio A tem a coordenada radial R_A e o relógio B a coordenada radial R_B , obtemos a seguinte expressão para o deslocamento espectral

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_e} = \frac{\nu_o \cdot \nu_e}{\nu_e} \sim \frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_e} \right)$$

no caso em que $R_A c^2 \gg 2GM$ e $R_B c^2 \gg 2GM$. Se A (emissor) está mais perto do objecto que cria o campo gravítico do que B (receptor), então $1/R_B < 1/R_A$, e o deslocamento é para o vermelho, mas para um sinal enviado de B para A o deslocamento é para o azul. Esta fórmula foi verificada em 1960 por Robert V. Pound e Glenn A. Rebka, usando a torre de 22,6 m de altura do Laboratório de Física de Jefferson, na Universidade de Harvard.

Para finalizar esta introdução à teoria de Einstein, vamos destacar as aspectos essenciais que distinguem a relatividade restrita da relatividade geral. Na relatividade restrita o espaço-tempo é plano e pode ser visto como um palco onde se desenrolam os acontecimentos físicos. A estrutura de cones de luz que nos dá a relação causal entre os acontecimentos é rígida, isto é, é a mesma em todos os pontos do espaço-tempo e para todos os observadores, sejam estes inerciais ou acelerados. Note-se que os observadores acelerados podem não ter acesso a todos os acontecimentos físicos. Na

relatividade geral o espaço-tempo é geralmente curvo, adquirindo um carácter dinâmico que lhe permite descrever o comportamento das partículas materiais e da luz na presença de uma dada distribuição de matéria. Como consequência, a estrutura de cones de luz varia de ponto para ponto (Fig.7). A curvatura do espaço-tempo desempenha nesta teoria um papel equivalente ao da força gravítica na teoria de Newton, adquirindo o carácter dinâmico de interacção com a matéria. Nas palavras do físico americano John Wheeler, a matéria diz ao espaço como deve curvar e a geometria (curvatura) diz à matéria como se deve deslocar. O espaço-tempo da relatividade geral reduz-se, obviamente, ao espaço-tempo plano da relatividade restrita nas regiões suficientemente afastadas das distribuições de matéria e energia.

UMA TEORIA MÁGICA

“É tal a magia desta teoria que quase ninguém que a compreenda adequadamente lhe consegue escapar”.

Albert Einstein

Enquanto preparava um longo artigo de revisão em 1907, sobre a sua teoria da relatividade restrita, Einstein começou a interrogar-se sobre a forma de modificar a teoria newtoniana da gravitação de modo que as suas leis pudessem conciliar-se com a nova teoria. Nos anos que se seguiram Einstein continuou esta pesquisa sózinho até que em 1913 beneficiou da colaboração de Marcel Grossmann que o ajudou a desvendar os mistérios da geometria riemanniana. Juntos produziram dois artigos, o último dos quais foi publicado em 1915. Na sua forma final a teoria foi construída unicamente por Einstein e publicada na revista *Berliner Berichte* num conjunto de quatro artigos com datas de 4, 11, 18 e 25 de Novembro de 1915.

Os dez anos seguintes foram anos de recepção, afirmação e sucesso da teoria. Em 1918 surgiram os primeiros dois livros devotados à relatividade geral, um em Londres por Eddington, e outro em Berlim por Herman Weyl. A 29 de Maio de 1919 o encurvamento dos raios luminosos rasando o Sol foi medido na Ilha do Príncipe e no Sobral (Brasil) durante um eclipse solar, graças ao zelo de Eddington e do Astrónomo Real britânico Frank Dyson. As previsões da teoria de Einstein foram publicamente confirmadas no famoso encontro da *Royal Society* em Londres a 6 de Novembro de 1919. No dia seguinte, no cabeçalho do jornal londrino *Times* podia ler-se: “Revolução na Ciência/Nova Teoria do Universo/Ideias Newtonianas Abandonadas”.

A Primeira Guerra Mundial tinha terminado. O mundo estava cansado e desiludido, e à procura de novos ideais. A teoria de Einstein com as suas ideias bizarras sobre a curvatura do espaço (- tempo) captou a imaginação da opinião pública, embora muito poucas pessoas a compreendessem. Apareceram então inúmeros artigos de divulgação em jornais e em revistas filosóficas que entusiasmaram o público culto e tornaram a relatividade num tema de conversação



Foto 5- Nova York, 1921: "Pior do que se poderia imaginar. Enxames de reporteres... além de um exército de fotógrafos, que se precipitavam sobre mim como lobos esfaimados".

obrigatório. O próprio Einstein escreveu um longo artigo no *Times* em finais de 1919, procurando explicar a teoria aos leigos. Na capa da revista noticiosa *Berliner Illustrirte* de 14 de Dezembro de 1919 a sua fotografia é publicada com a legenda: "Uma nova grande figura da história mundial". Einstein torna-se então um pensador célebre em todo o mundo e a sua opinião é solicitada para os mais variados assuntos. Os Estados Unidos recebem-no com pompa e circunstância e o seu nome passa a ser pronunciado com reverência, acabando por adquirir o significado do génio. Nem todos, porém, aplaudiram o triunfo de Einstein. Alguns membros da comunidade científica e outras pessoas movidas por razões mais políticas do que científicas moveram-lhe uma guerra sem quartel, afirmando que a sua teoria era totalmente incompreensível e inútil.

Ironicamente, enquanto a lenda de Einstein e da sua teoria crescia, a investigação em relatividade geral tornava-se estéril e estagnava. Na opinião da maioria dos físicos, no período entre 1925 e 1955 - *grosso modo* - a teoria marcou passo.

"Lembro-me que durante a minha lua de mel em 1913, levava na minha bagagem alguns exemplares dos artigos de Einstein que me absorveram durante horas, para grande consternação da minha mulher. Esses artigos pareceram-me fascinantes, mas difíceis e quase assustadores. Quando reencontrei Einstein em Berlim em 1915 a teoria tinha sido aperfeiçoada e coroada com a explicação da anomalia do perélio do Mercúrio, descoberta por Leverrier. Compreendi-a então, não só graças às publicações mas também através das numerosas discussões com Einstein - o que teve como efeito que eu decidisse nunca mais empreender qualquer trabalho nesse campo. Os fundamentos da relatividade geral pareceram-me então, e ainda hoje, o maior feito do pensamento humano sobre a Natureza, a mais

espantosa associação de penetração filosófica, de intuição física e de habilidade Matemática. Mas os seus laços com a experiência eram ténues. Isso seduziu-me tal como uma grande obra de arte que se deve apreciar e admirar à distância".

Esta foi a forma como o físico alemão Max Born, durante o primeiro congresso de relatividade geral realizado em Berna em 1955, evocou as suas relações com a teoria de Einstein. Este texto, melhor que qualquer longo preâmbulo, descreve em grossas pinceladas o verdadeiro lugar da relatividade geral enquanto teoria física na instituição científica entre o princípio dos anos vinte, altura em que a teoria é reconhecida, e o início do seu renascimento que se pode situar, simbolicamente, em 1955 - ano da morte de Einstein. Das palavras de Born ressaltam três aspectos que gostaria de analisar mais permenorizadamente: a beleza, a dificuldade e a fraca ligação com a experiência.

"A teoria da relatividade exerce uma atracção singular por causa da sua consistência interna e da simplicidade dos seus axiomas" escreve Einstein no prefácio do livro do seu colaborador P. G. Bergmann - *Introduction to the Theory of Relativity*. Simplicidade lógica, tal é uma das palavras chave da questão relacionada com a escassez de parâmetros, o que segundo Karl Popper implica a alta improbabilidade a priori duma teoria científica ou ainda a sua grande refutabilidade. Na verdade, a relatividade geral, como não possui parâmetros livres - com excepção da constante cosmológica Λ , que não é um parâmetro essencial da teoria - tem pouca elasticidade para fazer face a numerosos testes experimentais ou observacionais. É uma teoria extraordinariamente rígida e altamente refutável, ao contrário das chamadas "teorias alternativas" do campo gravítico, que dispõem de parâmetros "ajustáveis" aos resultados de observação. Neste sentido, a relatividade geral é uma boa teoria segundo Popper.

Parte da magia desta teoria reside precisamente na beleza da sua consistência interna, o que leva muitos relativistas a considerá-la como o modelo por excelência de teoria física. Assim será ela considerada por Bergmann "o mais perfeito exemplo de teoria do campo até agora conhecido", para Hermann Weyl é "um dos mais belos exemplos do poder do pensamento especulativo" e, segundo Paul Langevin, "não temos actualmente nada que se lhe possa comparar do ponto de vista [físico], e menos ainda do ponto de vista da beleza interior, da necessidade lógica e da fidelidade ao que a física deve ser, uma construção lógica sobre uma base exclusivamente experimental".

Mas alguns relativistas não esquecem o essencial. Por exemplo, Lanczos recorda-nos que: "Nem a harmonia interna, nem a satisfação que uma tal teoria oferece podem servir de critérios da sua validade. Trata-se só de saber quais são as consequências que se podem tirar para a observação e como estas consequências podem ser verificadas pela experiência. A teoria da relatividade geral não desempenha aqui um papel diferente de qualquer outra teoria". É, portanto, conveniente distinguir entre a validade da teoria e a satisfação

lógica que a sua harmonia interna produz nos seus praticantes. Porém, isso nem sempre aconteceu. Por exemplo, Bergmann ao introduzir no seu livro o capítulo sobre os "testes experimentais" escreve, "os argumentos mais convincentes a favor da teoria da relatividade geral permanecem, contudo, até ao presente teóricos". E o próprio Einstein escreve em 1930, "Não considero que o principal significado da teoria da relatividade geral seja a previsão de alguns pequeníssimos efeitos observáveis, mas antes a simplicidade dos seus fundamentos e a sua consistência" Como se podem compreender estas posições? Tratar-se-á de um entusiasmo mal controlado dos defensores da teoria? É possível encontrar uma explicação plausível. Assim, é mais razoável pensar que as afirmações anteriores foram produzidas numa atitude defensiva que procura implicitamente compensar a falta de argumentos da teoria da relatividade geral no plano empírico, e que embora não dê à estrutura interna um papel prioritário, tende a fazer ressaltar os aspectos teóricos. Einstein estava aparentemente convencido da validade da relatividade geral e acreditava que as experiências confirmariam o que ele já conhecia.

Por vezes o tema da estrutura lógica da teoria de Einstein desliza para uma discussão sobre a estética da relatividade geral. Elegância, harmonia, beleza interior, todas juntas ou cada uma de per si, é a expressão da sedução que a teoria exerce sobre os seus praticantes que não escondem o prazer que encontram numa teoria bem estruturada. Efectivamente, se os relativistas retornam tão frequentemente a este tema da estética, é sem dúvida porque a relatividade geral é verdadeiramente bela e eles são tão sensíveis à sua beleza. Porém, Einstein nunca gostou que se falasse da elegância da teoria nem recorreu a conceitos estéticos para a classificar. Os aspectos que lhe eram caros eram a simplicidade e a consistência interna. Embora se possa interpretar esta atitude dos relativistas de valorizar os aspectos teóricos como uma compensação para a escassez de resultados experimentais, deve reconhecer-se que o prazer estético é a justo título uma razão suplementar para trabalhar em relatividade, tanto mais que esta é uma área onde a magreza dos resultados concretos dificilmente justifica por si só o empenhamento dos seus praticantes.

Deve reconhecer-se que o argumento estético é uma arma de dois gumes e algumas vezes foi usado sob uma forma pejorativa. Como dizia o astrofísico relativista Subrahmanyan Chandrasekhar num artigo sobre a história da disciplina, "a descrição do trabalho de Einstein como uma obra de arte é muitas vezes a máscara sob a qual os físicos se escondem enquanto negam a pertinência da relatividade geral para o avanço da física". É uma constatação que se apoia por exemplo na frase de Rutherford: "Para além da sua validade, a teoria da relatividade geral só pode ser considerada como uma magnífica obra de arte". Assim, é ao nível da sua fecundidade, e "para além da sua validade", que a relatividade geral é condenada. Pois se a relatividade geral não passa de "uma obra de arte", é porque os seus praticantes são artistas que produzem ideias, talvez magníficas, mas muito pouco úteis. Uma acusação mais moderada feita por

alguns físicos aos seus colegas relativistas é a de os considerarem matemáticos pois nenhuns outros cientistas são sensíveis à estética.

A teoria de Einstein foi considerada por vários cientistas como sendo de muito difícil acesso. É conhecida a bazófia de Eddington, contada por Chandrasekhar, a propósito do mito que se criou em torno da dificuldade da teoria. À saída de um encontro onde foi apresentar os resultados da expedição que tinha ido observar o eclipse de 1919, um colega comentou "Professor Eddington, você deve ser uma das três pessoas no mundo que compreende a relatividade geral", Eddington fez um ar pensativo mas manteve-se calado. O colega insistiu, dizendo, "Não seja modesto, Eddington." Eddington replicou, "Pelo contrário, estou a tentar descobrir quem é a terceira pessoa". Em geral, foram físicos muito respeitáveis que se referiram explicitamente a esta questão. Podemos citar os nomes de Born, Paul Ehrenfest, Max von Laue e J. J. Thompson entre os que fizeram declarações que contribuíram para a reputação de incompreensibilidade desta teoria. Note-se a este propósito que, como dizia Born, se trata "de uma teoria nova, revolucionária. É necessário um esforço para assimilá-la". Acrescente-se que é uma teoria que utiliza uma maquinaria matemática que até aquela data nunca tinha sido usada em física e que, portanto, exigia um investimento particular que nem todos estavam preparados para fazer.

Este facto explica em parte o isolamento da relatividade geral que nos anos até ao seu renascimento desenvolverá laços infinitamente ténues com as restantes teorias físicas. Falta acrescentar que na vanguarda dos seus desenvolvimentos a relatividade geral porá - como qualquer outra teoria - aos seus especialistas problemas bastante difíceis e são muitos os relativistas que se lamentam deste facto. Este aspecto deve relacionar-se com a questão da fecundidade da teoria. Deve também ter-se em conta nesta apreciação as dificuldades conhecidas no campo observacional bem como as desvantagens desta teoria face às outras. Efectivamente, ao contrário da teoria newtoniana que teve pela frente um campo de acção quase virgem, ou da relatividade restrita e da mecânica quântica que encontraram situações bem mais simples, o quadro em que se desenvolveu a relatividade geral foi mais limitado e complexo. Mas é claro que as dificuldades que a teoria afrontou não têm muito a ver com a sua pretensa incompreensibilidade.

Pode concluir-se que a suposta incompreensibilidade da teoria de Einstein não é mais que o reverso da sua fraca fertilidade, o golpe baixo dos que não tendo o desejo de investir nela, não tendo nela nenhum interesse próprio, e complexados por não a compreender realmente acusam-na de ser uma teoria incompreensível. É uma acusação envenenada que visa a clausura da teoria e dos seus especialistas fechados numa linguagem hermética. O tema da dificuldade é, portanto, utilizado de uma maneira análoga ao da estética. Assim, a fraca ligação que a relatividade geral mantém com os "verdadeiros" problemas da física colocam-na por algum tempo, do lado da arte pela arte. Mas convém salientar que, ao longo da sua história, a relatividade geral



Foto 6 - Primeira página do artigo de R. V. Pound e G. A. Rebka, em *Physical Review Letters* (1960).

nunca foi seriamente posta em causa e acabou sempre por se revelar mais respeitável e melhor no campo das observações que todas as outras concorrentes. Mesmo assim os relativistas são unânimes em deplorar as dificuldades associadas à observação - e não experimentação - dos efeitos previstos pela teoria, que limitam seriamente a repetição e o controle dos testes que a permitem verificar. Este é um tema recorrente na literatura relativista e uma preocupação lancinante do próprio Einstein. Entre o eclipse de 1919 e a experiência de Pound e Rebka em 1960, que marca o início do renascimento da teoria, apesar das numerosas tentativas que foram feitas para aplicar a relatividade geral a outros problemas, como a aceleração da Lua, o deslocamento da órbita de Marte, os efeitos de lente gravitacional, o movimento do periélio da Terra, sem falar do campo cosmológico, o estatuto empírico da teoria manteve-se limitado aos três testes clássicos: o avanço do periélio do Mercúrio, o encurvamento dos raios luminosos e o deslocamento das riscas espectrais. Para isso contribuíram as limitações tecnológicas da época, por um lado, e por outro a enorme proximidade da teoria de Newton, que após dois séculos de hegemonia, só deixa às suas concorrentes uma margem ínfima para se afirmarem empiricamente. Neste sentido, pode dizer-se que a relatividade geral reformulou a física clássica e, em particular, revolucionou a gravitação sem dispor de um verdadeiro campo próprio acessível. Isto colocou-a numa posição desconfortável, pois isolou-a do resto da física ao mesmo tempo que a tornou uma referência obrigatória dos filósofos da ciência e a afastou do centro de interesse dos físicos.

No congresso de Berna de 1955, das trinta e quatro conferências só uma será reservada aos resultados

observacionais. Na homenagem que J. R. Oppenheimer escreve na revista *Reviews of Modern Physics* por altura da morte de Einstein lê-se:

"Nos quarenta anos que decorreram [estes três testes] permanecem a principal e, com uma excepção, a única ligação entre a relatividade geral e a experiência. A excepção reside no campo cosmológico".

É já no final dos anos cinquenta que este quadro começa a sofrer uma inversão e entre aqueles que para isso contribuíram avulta o nome do físico americano Robert Dicke. Dicke chega à relatividade com a firme intenção de remeter a teoria de Einstein ao campo experimental e denuncia com vigor "a indigência da prova experimental" e como "uma coisa aflitiva [...] a falta de contacto com a observação e com os factos experimentais". É neste quadro que se pode compreender o entusiasmo e a esperança provocados pela experiência de Pound e Rebka que, graças ao efeito de Mossbauer recentemente descoberto, vem verificar - a 1%! - o terceiro teste. No ambiente de euforia que rodeou esta boa nova A. Schild dirá no *American Journal of Physics*:

"Eis que se aproximam dias excitantes: a teoria da gravitação de Einstein, a sua teoria da relatividade geral de 1915, passou do reino da matemática ao da física. Após 40 anos de reduzidos resultados astronómicos, novas experiências terrestres se revelam possíveis e estão a ser projectadas".

O RENASCIMENTO DA RELATIVIDADE GERAL

Depois de ter sido considerada durante muito tempo uma teoria difícil e esotérica, sem aplicação aos restantes domínios da física, limitada a descrever pequenas correcções à teoria da gravitação de Newton, a relatividade geral tornou-se finalmente uma teoria popular, tendo ganho hoje um lugar seguro entre os *curricula* dos cursos de física e de matemática da maioria das universidades.

Este êxito retumbante foi naturalmente suscitado pelos importantes desenvolvimentos teóricos iniciados nos anos 60, bem como pelas retumbantes observações astronómicas que se verificaram no mesmo período. Foi a combinação destes dois tipos de contribuições que provocou um verdadeiro renascimento da relatividade geral, ao mesmo tempo que se reforçou a sua aplicação à Astrofísica e à Cosmologia.

Vejam os quais os desenvolvimentos experimentais e teóricos que mais contribuíram para o renascimento da relatividade geral.

A 9 de Março de 1960, o corpo editorial do periódico científico *Physical Review Letters* recebe o artigo de Pound e Rebka, intitulado "O Peso Aparente dos Fótons". O artigo descreve a primeira medida laboratorial bem sucedida da

mudança de frequência ou do comprimentos de onda da luz por influência do campo gravítico da Terra.

Alguns meses mais tarde, no número de Junho de 1960 da revista científica *Annals of Physics* surge um artigo assinado pelo físico-matemático inglês Roger Penrose intitulado "Tratamento Spinorial da Relatividade Geral". Embora se tratasse de um artigo com um formalismo matemático pesado, delineava uma técnica de cálculo extremamente elegante para resolver alguns problemas de relatividade geral. Este foi um dos primeiros passos dados no sentido de tornar mais simples muitos dos morosos e complexos cálculos relativistas.

Ainda no ano de 1960 têm início as observações levadas a cabo pelos astrónomos americanos Thomas Mathews e Allan Sandage, com o telescópio de 200 polegadas de Monte Palomar na Califórnia, da fonte de rádio 3C48 (objecto número quarenta e oito do terceiro catálogo de Cambridge de fontes de rádio). Estavam interessados em estudar a radiação visível emitida por esta fonte e, para isso, tiraram uma chapa fotográfica da zona do céu à roda da 3C48. Esperavam encontrar um enxame de galáxias com a localização da fonte de rádio, mas não foi isso que observam. A análise da chapa fotográfica parecia indicar que o objecto afinal tinha as dimensões de uma estrela, mas não era uma estrela vulgar, pelo menos nada comparável a qualquer estrela conhecida. O seu espectro tinha cores bastante invulgares, e apresentava grandes e rápidas variações de brilho. Era pois uma fonte de rádio, que parecia do tipo "estelar" (apesar das estrelas ordinárias não serem fontes intensas de rádio) mas que pelo tipo e variabilidade do seu espectro não parecia ser exactamente uma estrela. Daí que fosse designada fonte de rádio quase estelar ou **quasar**.

A descoberta dos quasares catapultou a relatividade geral imediatamente para a fronteira da astronomia. Foram entretanto descobertos objectos semelhantes, como o 3C273. E em 1963 Martin Schmidt do Observatório de Monte Wilson descobriu que as riscas do espectro de emissão do 3C273 apresentavam um deslocamento de 16 por cento no sentido dos comprimentos de onda mais altos. Para o 3C48 foi medido posteriormente um deslocamento para vermelho ainda maior, da ordem dos 30%. Em 1929, Edwin Hubble tinha anunciado que as galáxias distantes se afastam com velocidades proporcionais às suas distâncias. Este sistemático deslocamento para o vermelho no espectro das galáxias distantes é ainda hoje interpretado como uma expansão do Universo. Os grandes deslocamentos para o vermelho dos espectros dos quasares mostram que eles se afastam de nós com grandes velocidades, cerca de 30 por cento da velocidade da luz no caso do 3C48, a que corresponde uma distância da ordem de 6 biliões de anos-luz. Estando os quasares tão distantes seria de esperar que fossem objectos com fraco brilho. Mas, pelo contrário, os quasares são objectos extremamente brilhantes, tanto na parte visível como na das ondas de rádio do espectro. Portanto, a sua luminosidade intrínseca deve ser enorme. O 3C48 é cerca de 100 vezes mais luminoso que a nossa galáxia.

Qual a origem de uma fonte tão poderosa? Como se

explicam as suas rápidas variações de brilho? À escala cósmica, a gravidade é a interacção dominante, por isso é provável que a resposta a estas perguntas esteja na existência de campos gravitacionais extraordinariamente intensos, o que pode implicar concentrações imensas de massa, talvez com milhões de vezes a massa solar, confinadas a uma região do espaço que não deve ultrapassar uma hora-luz (aproximadamente igual ao diâmetro da órbita de Júpiter).

A descoberta dos quasares deu origem à criação de uma nova área da física. Em Dezembro de 1963, em Dallas, Texas, teve lugar o primeiro simpósio sobre esta nova disciplina designada Astrofísica Relativista. Para esta conferência foram convidados astrónomos, físicos e matemáticos, de modo a proporcionar um debate alargado, capaz de reunir as experiências e os conhecimentos diversificados destas três áreas do saber. Segundo o testemunho de alguns dos seus participantes, a atmosfera reinante era de grande nervosismo e excitação. Em parte pelo recente assassinato do presidente John Kennedy, mas em boa medida porque se tratava de uma experiência nova de comunicação entre cientistas de áreas diferentes e porque se vivia então um período de grande euforia científica.

Alguns tempo mais tarde, no final do ano de 1967, os astrónomos da Universidade de Cambridge Jocelyn Bell e Anthony Hewish descobriram um novo tipo de estrela, chamada **pulsar** devido à emissão regular de impulsos de rádio. Pensa-se que os pulsares são estrelas imensamente compactas, tão densas que os seus diâmetros não ultrapassam poucas dezenas de quilómetros, e que podem rodar muitas vezes num segundo. A compactificação nestas estrelas é tão grande que destrói os seus núcleos e os reduz a um mar de neutrões. Daquilo que se conhece da matéria nuclear, estas estrelas de neutrões parecem encontrar-se à beira de um espectacular acidente catastrófico. A gravidade à superfície da estrela é tão intensa, que se uma estrela de neutrões tiver uma massa maior que três massas solares será incapaz de encontrar uma estrutura de equilíbrio, colapsando numa fracção de segundo e desaparecendo totalmente do Universo.

A explicação deste intrigante fenómeno reside na violenta curvatura do espaço que traduz a crescente intensidade da gravidade numa estrela em colapso. À medida que o raio da estrela se reduz, a curvatura do espaço à superfície da estrela rapidamente se torna suficientemente forte para encurvar os raios luminosos e retê-los em torno da estrela. Quando nem a própria luz consegue escapar ao campo gravítico da estrela esta transforma-se num verdadeiro **buraco negro** no espaço. No interior do buraco negro, a matéria continua a ser inexoravelmente atraída para o centro do buraco: nenhuma força do Universo parece ser capaz de parar este processo de colapso.

Os buracos negros são sem dúvida objectos de estudo fascinantes. Mas foram muito mal compreendidos durante muito tempo. Quando Chandrasekhar desenvolveu em 1931 a sua teoria das "anãs brancas", mostrando que estas estrelas não poderiam ter uma massa superior a 1,4 massas solares, encontrou muita oposição por parte de Eddington. Embora a teoria das anãs brancas não se baseie na relatividade geral,

COBE DMR

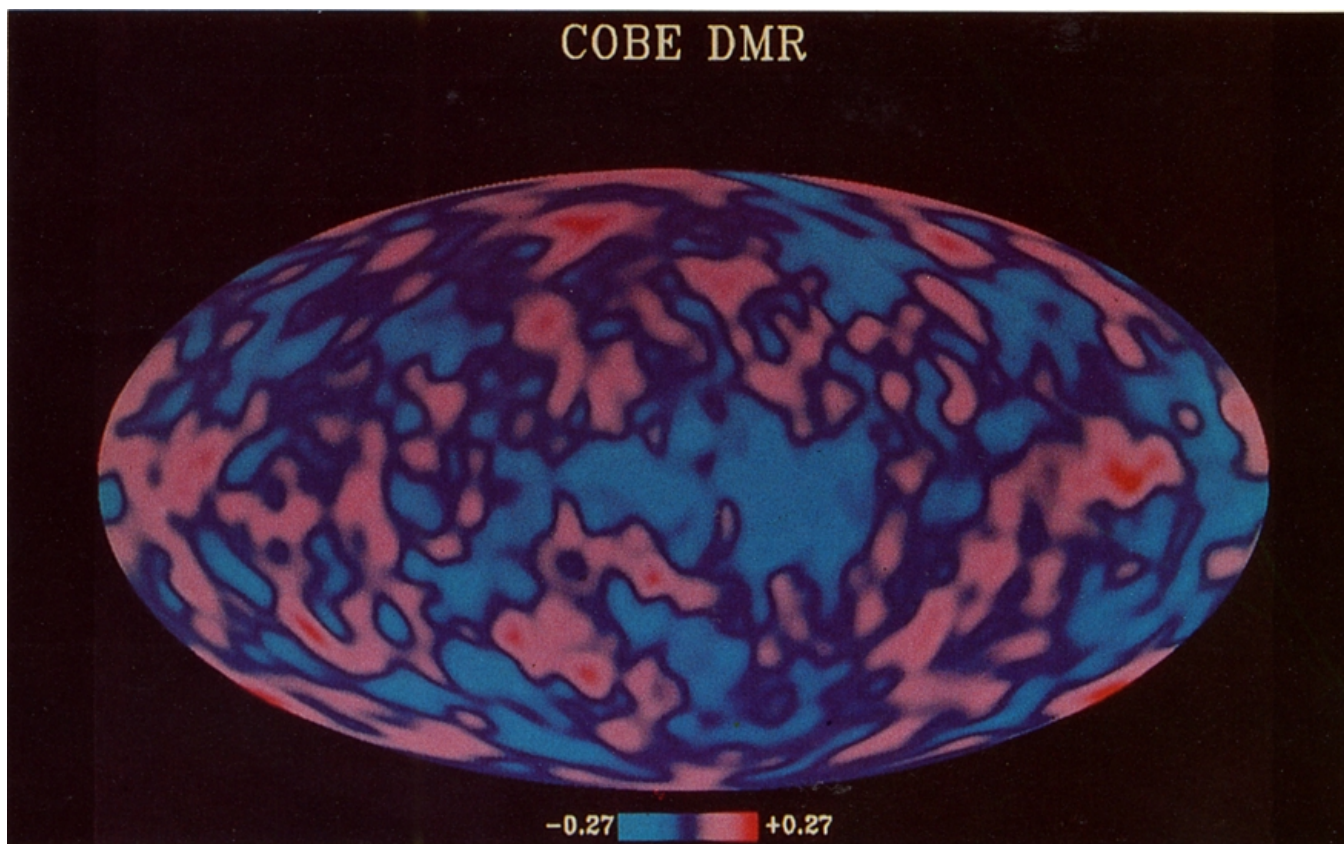


Foto 7- Flutuações de temperatura na radiação cósmica de fundo - Dados obtidos nos três comprimentos de onda (3,3, 5,7, e 9,6 milímetros) pelo COBE durante o primeiro ano de observação foram combinados na produção deste mapa de temperatura do céu. O mapa está em coordenadas galácticas, nas quais o plano da Via Láctea seria na horizontal central (embora todos os dados da Via Láctea tenham sido retirados). O centro da nossa galáxia estaria no centro da fotografia. As regiões em rosa e em vermelho estão a temperaturas ligeiramente mais altas, e as regiões a azul claro estão a temperaturas ligeiramente mais baixas do que as regiões a azul escuro que estão à temperatura média da radiação cósmica de fundo. As variações de temperatura são da ordem dos microkelvin (30 milionésimos do grau) e a radiação de fundo tem uma temperatura média característica de 2,73 kelvin. As regiões mais quentes correspondem a áreas onde a densidade do gás é ligeiramente menor, e as regiões mais frias têm densidade ligeiramente maior.

depende com certeza da interação gravitacional. Eddington percebeu claramente que uma consequência dessa teoria para as estrelas com massa suficiente era a inevitabilidade do colapso, com formação de uma **singularidade** do espaço-tempo, isto é, um ponto onde a curvatura se torna infinita e todas as leis são violadas. Eddington considerava isto um absurdo e portanto atrasou muito a aceitação da teoria das anãs brancas entre astrónomos e astrofísicos.

Em 1933 J. R. Oppenheimer e H. Snyder calcularam o colapso de um fluido esfericamente simétrico e sem pressão usando as equações de Einstein da relatividade geral. Mostraram que não há nada nas equações de Einstein que possa evitar o colapso e a formação do buraco negro associado. Mas, mesmo depois deste resultado, o conceito de buraco negro permaneceu adormecido durante os trinta anos seguintes até à descoberta dos quasares. Há realmente dois factos que contribuíram para a retoma destas ideias. O primeiro, relaciona-se com os quasares e com a necessidade de compreender as enormes quantidades de energia emitida por estes objectos. Para explicar os intensos campos gravitacionais responsáveis pela produção de energia, Edwin Salpeter da Universidade de Cornell recorreu aos objectos estudados por Oppenheimer e Snyder. O segundo facto foi a descoberta em 1963 de uma solução das equações de Einstein por Roy P. Kerr. Kerr recorreu a um conjunto de sofisticadas técnicas matemáticas que exploram os princípios de simetria na pesquisa de novas soluções das equações de

Einstein. Quando Kerr apresentou a sua comunicação no primeiro simpósio do Texas em Astrofísica Relativista, poucos puderam acompanhá-lo devido à complexidade dos cálculos envolvidos. Mas hoje sabe-se que a solução de Kerr é a única solução para um buraco negro em rotação e a solução obtida por Schwarzschild em 1916, dois meses após a publicação da teoria de Einstein, é simplesmente um caso particular da solução de Kerr quando não há rotação.

Envolvidos com o problema dos quasares, os astrofísicos relativistas consumiram os dez anos seguintes provando esta e muitas outras características das soluções de Schwarzschild e de Kerr. Por exemplo, sabia-se que a geometria de Schwarzschild apresentava um comportamento patológico junto do chamado raio gravitacional, $R = 2GM/c^2$, correspondente às dimensões do buraco negro. E uma situação semelhante ocorria com a geometria de Kerr. Ficou então provado que estes problemas eram causados por uma má escolha de coordenadas. Contudo, isso não alterou o facto da superfície correspondente ao raio gravitacional, também conhecido por raio de Schwarzschild, possuir uma propriedade especial. Foi-lhe dado o nome de "horizonte de acontecimentos" porque essa superfície funciona como uma membrana que deixa passar a informação num só sentido: para um observador exterior, todos os acontecimentos com $R < 2GM/c^2$ são completamente inacessíveis. Foi esta característica do horizonte de acontecimentos que levou John Wheeler a introduzir o termo

buraco negro, durante uma conferência realizada em Nova Iorque em 1967.

Para um observador que se encontre bastante afastado do horizonte, a única característica detectável do buraco negro é o seu campo gravítico. Este não se distingue do campo produzido por qualquer outro objecto com a mesma massa e momento angular. Porém, para um observador próximo do horizonte surgem fenómenos muito estranhos. O encurvamento dos raios luminosos pode ser tão grande que a luz pode ficar retida em torno do buraco seguindo uma órbita circular, com um raio $R = 3GM/c^2$ no caso do buraco negro de Schwarzschild. Nos buracos negros de Kerr, a rotação dá origem a um arrastamento dos observadores em queda livre em torno do buraco tal que, se estes se encontram próximo do horizonte e seguindo uma órbita equatorial, o arrastamento em torno do buraco torna-se tão forte que nada poderá evitá-lo. Estas e muitas outras características dos buracos negros foram estabelecidas durante um período de intensa pesquisa, entre 1963 e 1974, por um conjunto de relativistas famosos que assim muito contribuíram para o renascimento da teoria. Para terminar esta exposição não podemos deixar de referir duas áreas de investigação muito actuais em relatividade: a cosmologia relativista e a detecção de ondas gravitacionais.

A FRONTEIRA ACTUAL DA TEORIA

Há 45 anos atrás, como se percebe pelo que ficou dito, os físicos na sua quase totalidade manifestavam muito pouco interesse pela relatividade geral ou pela interacção gravitacional. Esta situação começou a sofrer uma suave inflexão com os acontecimentos dos anos 60.

Nos anos 70 e 80 assistimos por sua vez ao ressurgimento do paradigma da unificação da física, tão querido a Einstein nos últimos anos da sua vida, e que dominou muitos dos desenvolvimentos teóricos verificados nestes vinte anos. Embora esse esforço renovado não se tenha ainda saldado por um verdadeiro sucesso, deu alguns frutos visíveis entre os quais se destaca a aliança da relatividade geral com a física das partículas elementares na construção de modelos cosmológicos para o universo primordial.

Os nossos conhecimentos de astronomia não sugeriam, antes dos anos 60, situações no Universo onde a gravidade fosse suficientemente intensa para produzir espaços-tempo fortemente curvos. Mas apesar da actual densidade de matéria no Universo ser muito pequena (cerca de uma massa solar por bilião cúbico de ano-luz³) o Universo é muito grande (os actuais telescópios permitem observar distâncias da ordem do bilião de ano-luz) e toda a matéria nele existente contribui cumulativamente para a curvatura do espaço-tempo.

Desde 1915 que Einstein se deu conta que, a uma escala cosmológica, o efeito cumulativo da curvatura do espaço podia tornar-se tão grande que alteraria a sua *topologia*. Voltamos por um instante aos exemplos bi-dimensionais dados

atrás. Se a curvatura de uma superfície é sempre para o mesmo lado e aproximadamente igual por toda a parte, o espaço acaba por se fechar sobre si próprio, como no caso da superfície esférica. Embora numa região suficientemente pequena as propriedades geométricas da superfície esférica não sejam muito diferentes das do plano, a estrutura *global* é claramente diferente – a esfera é, como sabemos, uma superfície com uma área finita, embora não possua qualquer fronteira. Como consequência, é possível tomar o caminho mais curto entre dois pontos (geodésica) e seguir sempre em frente até regressar ao ponto de partida pelo sentido oposto. O modelo de Einstein para o Universo era o análogo tri-dimensional da superfície esférica. Contudo, vimos já que existem outros espaços uniformes tri-dimensionais como o espaço hiperbólico, de curvatura negativa, e o espaço euclideano sem curvatura. A determinação da natureza global do espaço é uma das tarefas mais importantes da cosmologia moderna. Porém, a porção do Universo acessível aos maiores telescópios fixos na Terra, ou aos telescópios espaciais, como é o caso do Hubble, é demasiado pequena para revelar a estrutura global directamente. Para esclarecer este enigma é necessário usar uma combinação de teoria e de observação.

Ao medir pequenas variações da temperatura da radiação cósmica de fundo, da ordem dos 30 milionésimos do grau centígrado, o satélite americano COBE registou recentemente os sinais deixados nessa radiação por pequenas flutuações de densidade do plasma cósmico, formadas cerca de 300 000 anos após o **big bang**, que se situam nos confins do espaço, a cerca de 15 mil milhões de anos-luz. É presumível que essas flutuações de densidade correspondam a concentrações de matéria aglutinadas pela gravidade para formar as galáxias e os aglomerados de galáxias que hoje observamos. Trata-se da maior e da mais antiga das estruturas alguma vez observadas. Essas manchas de "anisotropia" no brilho da radiação de fundo estendem-se ao longo de uma tira de dimensões colossais, ao pé da qual a "Grande Muralha" de galáxias, descoberta por Margaret Geller e John Huchra em 1989, com cerca de 500 milhões de anos-luz, é uma estrutura quase insignificante. A maior das manchas agora descoberta cobre um terço do Universo conhecido, ou seja mais de 3 biliões de anos-luz.

Para dar uma ideia da enormidade destas distâncias vale a pena comparar com a distância da Terra à Lua (cerca de 1,25 segundo-luz, ou seja, cerca de 375 mil quilómetros) ou com a distância média da Terra ao Sol (cerca de 8 minutos e 20 segundos-luz, aproximadamente 150 milhões de quilómetros). A distância à estrela mais próxima (Próxima Centauro) é cerca de 4,2 anos-luz e a distância do Sol ao centro da Via Láctea é aproximadamente 30 000 anos-luz.

Recordemos brevemente algumas das observações astronómicas que foram determinantes para o estabelecimento do modelo do big bang. A primeira e mais relevante observação é com certeza a chamada lei de Hubble que descreve o afastamento das galáxias distantes com velocidades proporcionais às suas distâncias: $v = H(t)d$. Nesta fórmula v é a velocidade de recessão da galáxia, d é a distância, e H é a "constante" de Hubble no instante em

³ O ano-luz é, como sabemos, a distância percorrida pela luz durante um ano. Num espaço-tempo plano essa distância é igual a $9,46 \times 10^{15}$ m.

que fazemos a observação. É esta lei que permite atribuir uma dinâmica ao Universo e nos leva a afirmar que o Universo actual está em expansão. É uma lei empírica, mas que se pode deduzir teoricamente no âmbito da cosmologia relativista saída da teoria de Einstein da relatividade geral. A partir do valor actual da constante de Hubble podemos estimar a idade aproximada do Universo, admitindo



Foto 8 - Joseph Taylor e Russel Hulse, físicos distinguidos com o Prémio Nobel de Física de 1993, pelos seus trabalhos sobre pulsares binários.

uma taxa de expansão constante, $t_H = 1/H$, a que chamamos "tempo de Hubble". Infelizmente não conhecemos o valor de H com exactidão. As medidas actuais de H fornecem resultados compreendidos entre 50 e 100 *km* por segundo e por megaparsec - o megaparsec (Mpc) equivale a 3,26 mil milhões de anos-luz. Por outras palavras, isto significa que uma galáxia que se encontre à distância de 1 Mpc se afasta de nós com uma velocidade que pode estar compreendida entre 50 e 100 *km* por segundo, consoante o valor de H que tomarmos.⁴ Mais precisamente, devemos entender que é o próprio espaço que se expande com essa velocidade no momento de observação. E quanto maior for a distância entre as galáxias maior será a velocidade, sendo esta independente da direcção de observação. A estes valores da constante de Hubble corresponde uma idade para o Universo que se situa entre 10 e 20 mil milhões de anos. Assim, é normal adoptar o valor intermédio de 15 mil milhões de anos para dar uma ordem de grandeza da idade do Universo. Com base neste cálculo aproximado, podemos afirmar que as manchas de anisotropia agora descobertas se situam a uma distância de 15 mil milhões de anos-luz. Deve-se notar que o valor de H varia no tempo, e a idade do Universo não só depende de H mas também do modelo teórico utilizado. Os 15 mil milhões de anos representam, como não podia deixar de ser, um valor grosseiro que dá uma ordem de grandeza da idade do Universo. Acrescenta-se que há determinações independentes para a idade das estrelas mais antigas que fornecem valores compreendidos entre os 13 e os 18 mil milhões de anos.

⁴ Muito recentemente foi determinada a distância à galáxia M100, no aglomerado da Virgem, a partir do Telescópio Espacial Hubble, obtendo-se um valor de cerca de 80 *Km/s* por Mpc para o valor correspondente da constante de Hubble. Um valor tão alto dessa constante implica uma idade de 12 biliões de anos para um Universo com uma baixa densidade, e 8 biliões de anos para um Universo com uma densidade elevada, no quadro dos modelos de big bang.



A descoberta de E. Hubble em 1929 — um Universo dinâmico em expansão — foi sem dúvida uma das maiores descobertas do século. Na altura, já a teoria da relatividade geral de Einstein tinha produzido os modelos teóricos capazes de descrever um Universo em expansão. Mas só nos finais dos anos 40 foram essas ideias levadas até às suas últimas consequências por George

Gamow e seus colegas Ralph Alpher e Robert Herman, os quais previram a existência de uma radiação cósmica em equilíbrio térmico, banhando uniformemente o Universo com uma temperatura de aproximadamente 5 kelvin (cerca de -268 graus centígrados), relíquia de uma época em que o Universo era muito quente e denso. Nasceu assim o modelo hoje conhecido por big bang quente. A radiação electromagnética de origem cósmica, no domínio das microondas, previstas pelo big bang seria descoberta em 1964 quase acidentalmente por Arno Penzias e Robert Wilson e identificada um ano mais tarde por Robert Dicke e James Peebles. Desde então têm sido realizadas inúmeras observações para determinar rigorosamente o espectro da radiação cósmica de fundo (RCF), para saber se se trata de uma radiação isotrópica (ideal) tipo corpo negro, e obter com precisão a sua temperatura característica. Essas observações confirmaram os resultados iniciais de Penzias e Wilson: fixaram o valor da temperatura efectiva em 2,7 kelvin e mostraram que a radiação era extraordinariamente isotrópica (quando se observa a radiação em diferentes direcções concluímos que as variações de temperatura são inferiores a 0,0001 do grau centígrado). Este resultado constituiu a prova mais sólida a favor do modelo do big bang. A outra previsão notável deste modelo é a relação entre o hélio e o hidrogénio existentes no Universo.

A missão do COBE foi cuidadosamente planeada em função da nossa compreensão actual do Universo. Em Janeiro de 1990, dois meses após o início da sua missão, o COBE tinha já coberto 75% do céu e obtido um valor bastante preciso para a temperatura efectiva da RCF ($T = 2,735$ kelvin), mas não tinha ainda detectado quaisquer sinais de anisotropia. Sabia-se que a sensibilidade do COBE aumentaria de um factor 10 perto do fim da missão e finalmente chegaram os resultados surpreendentes recentemente noticiados, que confirmam *grosso modo* as ideias chave do modelo do big bang. Em particular, a existência dessas manchas de anisotropia, devidas a flutuações de temperatura, era um

requisito indispensável para explicar a formação de estruturas num Universo espacialmente homogêneo e isotrópico, como é o modelo do big bang. Um dos maiores obstáculos à aceitação deste modelo era precisamente a sua incapacidade para produzir as condições necessárias para a formação de galáxias. Concretamente, parecia difícil conciliar a hipótese teórica de uma grande uniformidade a uma larga escala e a necessidade de concentrações de matéria suficientes para resistir à expansão do Universo e dar lugar à formação de estruturas. Ultrapassado este obstáculo, foi possível assegurar a predominância deste modelo no quadro das teorias que procuram explicar a origem e evolução do cosmo. O COBE foi construído para observar as estruturas maiores, mas falta agora pesquisar as estruturas mais pequenas, correspondentes aos aglomerados e superaglomerados de galáxias. Para isso os astrofísicos e cosmólogos contam com detectores colocados no Polo Sul e instrumentos lançados em balões-sonda na estratosfera. Espera-se receber em breve o resultado dessas observações, que serão cruciais para testar o chamado estado inflacionário ocorrido no Universo mais primitivo (cerca de $t = 10^{-35}$ s após o big bang). Uma das previsões da inflação cosmológica relaciona-se com as flutuações de densidade para pequenas e grandes estruturas. As manchas observadas pelo COBE estão de acordo com essas previsões. Espera-se que as mais pequenas estruturas também estejam.

A ideia essencial de um Universo em expansão, tendo passado por uma fase extremamente quente durante a qual se produziram por fusão nuclear alguns elementos químicos leves (como o hélio, deutério e lítio), é uma ideia adquirida em cosmologia. Esta ideia conduz-nos quase inevitavelmente à conclusão que esta expansão começou com um big bang alguns 10 ou 20 biliões de anos atrás. O estado do Universo era então muito semelhante ao interior de um buraco negro, embora invertido no tempo. Neste quadro, o Universo emergiu aparentemente duma singularidade antes da qual nem o espaço nem o tempo existiam. Por outro lado, a ideia de uma fase inflacionária durante a qual o Universo se expandiu aceleradamente também parece ser uma ideia que viverá connosco ainda por muito tempo. Há muitos "pormenores" ainda por clarificar e há certamente várias teorias mais ou menos complicadas que podem incorporar esta ideia base de um Universo em expansão.

Dos problemas por esclarecer devemos mencionar que ainda não dispomos de uma teoria convincente para a formação das galáxias, e é bem possível que a maior parte da matéria existente no Universo (matéria negra, não visível) não tenha ainda sido detectada. Há bons indícios da existência dessa matéria negra, que se julga actualmente necessária para compreender os mecanismos de formação das galáxias e, no caso dos indícios se confirmarem, essa matéria negra será determinante para a evolução futura do Universo. Permanecem ainda por desvendar inúmeros mistérios e, entre eles, os momentos iniciais do Universo, anteriores às primeiras estruturas agora observadas, são sem dúvida um tema apaixonante que continua a ser investigado.

A atribuição do Prémio Nobel da Física de 1993 a Joseph Taylor e Russel Hulse da Universidade de Princeton pela

sua descoberta do pulsar binário PSR 1913 + 16 põe finalmente um sinal de aprovação na teoria da relatividade geral. É caso para citar o aforismo popular: mais vale tarde do que nunca!

A teoria da relatividade de Einstein revolucionou os nossos conceitos de espaço, de tempo e de universo. No entanto, o prémio Nobel da Física nunca tinha sido antes atribuído a um trabalho tão directamente relacionado com a relatividade geral. Em 1921 Einstein recebeu o prémio Nobel da Física pelo seu trabalho sobre o efeito fotoeléctrico e não pela relatividade. Parte do problema ficou a dever-se ao facto da teoria ser difícil de testar, e historicamente os Júris do Nobel parecem preferir premiar trabalhos que tenham tido confirmação experimental.

Até 1974, o sistema solar era o laboratório por excelência da relatividade geral. Porém, a descoberta do pulsar binário no Verão de 1974 mostrou como certos tipos de sistemas astronómicos distantes podem fornecer laboratórios de precisão para testar a relatividade geral. O sistema estudado é constituído por um pulsar com um período de 59×10^{-3} s e com um período orbital de cerca de 8 horas em torno de um companheiro que não foi ainda directamente observado, mas que se crê tratar-se de uma estrela de neutrões "morta". A inesperada estabilidade do "relógio" do pulsar e a limpidez da órbita permitiram a Hulse e Taylor e seus colaboradores determinar os parâmetros do sistema com grande precisão. O sistema é altamente relativista, como se deduz das relações $v_{\text{orbital}}/c \sim 10^{-3}$ e $GM/Rc^2 \sim 10^{-3}$ que permitem antever efeitos cinemáticos (como a dilatação do tempo) e efeitos gravitacionais (como o deslocamento espectral para o vermelho) significativos. A observação do avanço do periastro (termo correspondente ao periélio) de $4^{\circ}.22663 \pm 0^{\circ}.00002$ por ano, e os efeitos associados aos tempos de chegada dos impulsos (deslocamento gravitacional para o vermelho, dilatação temporal) podem ser usados, assumindo que a relatividade geral é correcta, para determinar as massas do pulsar e do seu companheiro, sendo o resultado $m_p = 1.4411 \pm 0.0007 M_{\odot}$ e $m_c = 1.3873 \pm 0.0007 M_{\odot}$, onde M_{\odot} é a massa do Sol.

Uma das previsões mais importantes da teoria de Einstein, ainda não discutida aqui, é a existência de ondas gravitacionais. Embora Joseph Weber da Universidade de Maryland, nos Estados Unidos, tenha comunicado a detecção de ondas gravitacionais em 1968, nenhum outro investigador pode confirmar os seus resultados. A opinião generalizada entre os relativistas era que as ondas gravitacionais não tinham ainda sido detectadas. Ora, o pulsar binário descoberto em 1974 é o laboratório adequado para testar a existência dessas ondas. Poderá uma massa acelerada radiar ondas gravitacionais, da mesma forma que uma carga eléctrica acelerada radia ondas electromagnéticas? Tal foi a questão que Einstein tentou responder. Em 1918 Einstein descobriu soluções das equações da relatividade geral, que representam ondas da curvatura do espaço-tempo a propagar-se com a velocidade da luz. A analogia entre as ondas gravitacionais e as ondas electromagnéticas tem alguma utilidade mas é insuficiente para dar uma ideia precisa deste

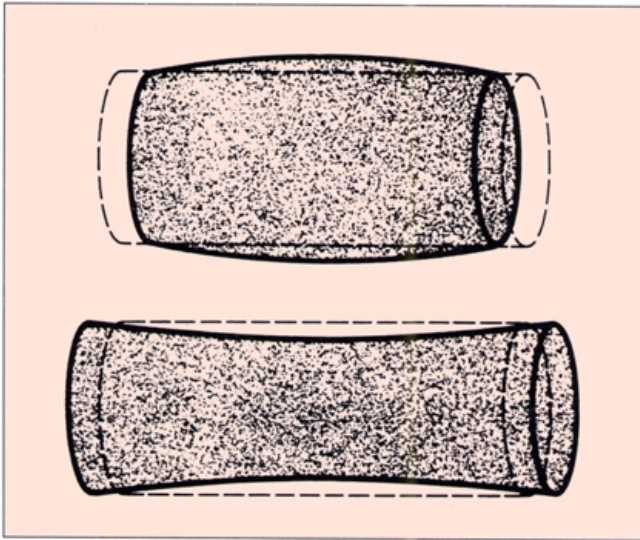


Fig. 8 - Cilindro de alumínio atravessado por uma onda gravitacional. A onda desloca-se numa direcção perpendicular ao papel. Em primeiro lugar, as forças de maré da onda comprimem as extremidades do cilindro ao mesmo tempo que expandem a região central. A seguir provocam a compressão da região central e a expansão das extremidades.

tipo de ondas (Figs. 8 e 9). Uma primeira diferença a salientar: a gravitação é sempre atractiva; a massa, ou "carga gravitacional", tem sempre o mesmo sinal. Como resultado disto, um "oscilador" gravitacional elementar, constituído por duas massas vibrantes na extremidade de uma mola, não radia o mesmo tipo de ondas que duas cargas eléctricas de sinais opostos, pois a radiação electromagnética é "dipolar", e a radiação gravitacional é "quadripolar". Uma complicação adicional é que o *gravitão*, a partícula associada a uma onda gravitacional, transporta uma "carga gravitacional" associada à sua energia, enquanto o fóton, a partícula que transporta-se a interacção electromagnética, não tem uma carga eléctrica. Como resultado uma onda gravitacional produzida por uma massa acelerada é ela própria fonte de gravitação: o gravitão é um grave ou a gravidade gravita! Em termos técnicos dizemos que a gravidade é "não linear". Esta não-linearidade introduz dificuldades consideráveis mesmo nas situações aparentemente mais simples, como no cálculo do campo gravítico gerado por duas massas em movimento. Ao contrário do que acontece em electromagnetismo, o campo produzido pelas duas massas **não** é a soma dos campos produzidos por cada uma das massas isoladamente; temos de ter em conta a gravitação produzida pela interacção das duas massas, que varia à medida que elas se movem. É por esta razão que o chamado "problema dos dois corpos", como no caso de um binário de estrelas, para o qual existe uma solução newtoniana fácil de obter, não pode ser resolvido rigorosamente em relatividade geral. Porém, no caso dos campos gravitacionais razoavelmente fracos a não-linearidade pode ser ignorada, como acontece quando queremos detectar ondas gravitacionais produzidas por fontes distantes. Mas as equações simplificadas que assim se obtêm não podem ser usadas na exploração de uma supernova ou na colisão de dois buracos negros. Uma terceira diferença a notar tem a ver com as intensidades relativas.

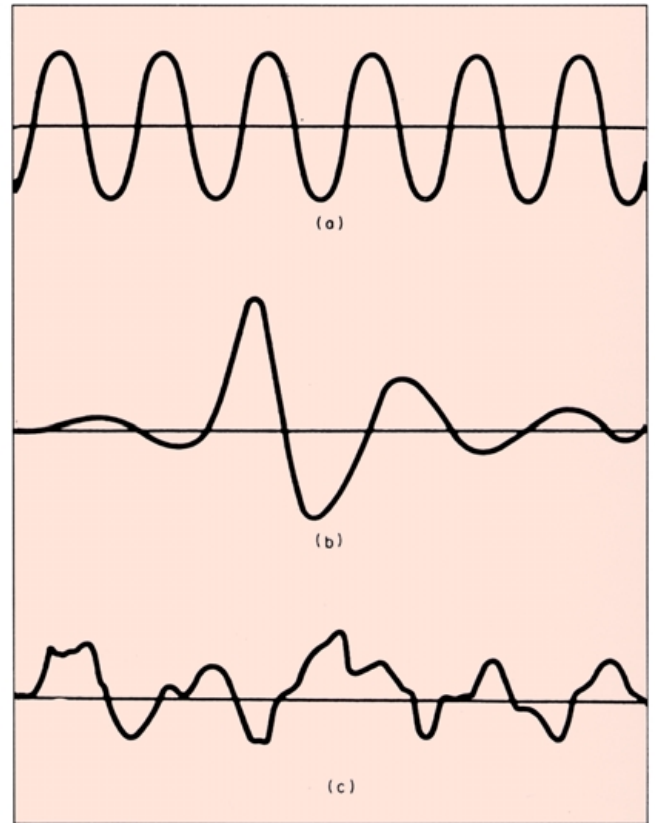


Fig. 9 - Ondas gravitacionais produzidas por diferentes fontes. a) Binário de estrelas: ondas regulares com um período bem definido. b) Colapso de uma Supernova dando origem a um buraco negro: verificam-se uns picos de intensidade seguidos por perturbações amortecidas devidas ao buraco negro em formação. c) Fundo de ondas gravitacionais: ruído de fundo produzido por variadas fontes ou pelo big bang.

Dois prótons colocados a um centímetro de distância ficam sujeitos aos dois tipos de interacções: gravitacional e electromagnética. Mas a gravidade que os atrai é 10^{37} mais fraca que a força electrostática que os repele. Este é o principal obstáculo à detecção de ondas gravitacionais. Um binário de estrelas de neutrões radia energia gravitacional suficiente para que os seus efeitos possam ser detectados indirectamente através da perda de energia indicada pela diminuição do período de revolução orbital.

A medida da taxa de decrescimento do período orbital do pulsar binário PSR 1913 ±16 deu em 1979 a primeira comprovação dos efeitos de amortecimento devidos à radiação gravitacional. Usando os elementos orbitais medidos e dispondo dos valores das massas do sistema, obtidas por aplicação da relatividade geral, a fórmula de Einstein do "momento quadripolar" prevê uma taxa de atenuação do período orbital dada por: $dP/dt = -2.40243 \pm 0.00005 \times 10^{-12}$. As observações têm agora um rigor melhor que 0,5%, estando $dP/dt (obs) = - (2.408 \pm 0.011) \times 10^{-12}$, completamente de acordo com a previsão teórica. Isto é uma prova (indirecta) da existência de ondas gravitacionais, do seu carácter quadripolar e da validade da fórmula da relatividade geral obtida por Einstein.

Hoje conhecem-se cerca de 40 pulsares binários emissores rádio. Dois deles, o PSR 1534 +12 que se encontra

na nossa galáxia, e o PSR 2127+11C no enxame globular M15, são laboratórios de relatividade altamente promissores. Atendendo à sua enorme precisão e à sua proximidade da Terra, o PSR 1534+12 pode fornecer uma determinação ainda mais rigorosa da taxa dP/dt do que o valor proporcionado pelo PSR 1913+16.

Além de verificarem a existência de ondas gravitacionais os pulsares binários permitem a realização de testes da relatividade geral para campos fortes, em contraste com os testes para campos fracos realizados no sistema solar. Na verdade, como estes sistemas contêm pelo menos uma, mas talvez duas estrelas de neutrões, dispomos assim de campos gravitacionais fortemente relativistas.

Recordando as palavras de A. Schild diremos que, sem

sombra de dúvidas, a teoria da relatividade geral de Einstein passou, nos últimos 34 anos, do reino da matemática ao da física. Não é mais possível continuar a fazer astrofísica e cosmologia sem recorrer a esse instrumento teórico precioso que é a teoria da gravitação de Einstein. Ninguém hoje duvida que a Gravidade é a "força" organizadora do Universo: a interação dominante na formação de estruturas (galáxias, estrelas, pulsares e buracos negros) e na dinâmica do Universo no seu conjunto. Mas a investigação nos próximos vinte anos deverá também revelar maior informação do interior dessas estruturas, através da detecção de ondas gravitacionais, e poderá provar que a Gravidade é a força unificadora de todas as interações físicas.

SUGESTÕES DE LEITURA

- HARRISON, EDWARD R., *Cosmology: The Science of the Universe*, Cambridge University Press, 1981.
- LAGE, E., *Espaço, Tempo e Relatividade*, Colóquio/Ciências, no 3 (1988).
- HENRIQUES, A. BARBOSA, *Espaço, Tempo e Matéria*, Colóquio/Ciências, no 4 (1989).
- PAIS, A. *Subtle is the Lord...: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1980; Tradução portuguesa: *Subtil é o Senhor*, Gradiva, 1993.
- WEINBERG, S. *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, Basic Books, 1977; Tradução portuguesa: *Os Três Primeiros Minutos do Universo*, Gradiva, 1987.
- WILL, CLIFFORD M. *Was Einstein Right?*, Basic Books, 1986; Tradução portuguesa: *Einstein tinha Razão?*, Gradiva, 1989.

AGRADECIMENTOS

Por ocasião dos setenta e cinco anos da observação do encurvamento dos raios luminosos por Sir Arthur Eddington na Ilha do Príncipe, durante um eclipse total do Sol, a Fundação Gulbenkian fez deslocar a S. Tomé e Príncipe uma comitiva que participou nas cerimónias de comemoração. Este artigo é um desenvolvimento da conferência realizada no Centro Cultural Português de S. Tomé, em 27 de Maio de 1994, a convite da Fundação. Agradeço aos Professores J. Carança e J. Moreira Araújo esta dupla oportunidade. Agradeço também ao Professor J. Moreira Araújo a leitura atenta da primeira versão deste texto e as várias sugestões que muito contribuíram para o melhorar. Finalmente quero agradecer à minha mulher, Ana Isabel Simões, os muitos comentários, críticas, e sugestões que ajudaram a dar forma ao produto final, cuja responsabilidade é apesar de tudo minha.