

Apontamento Sobre a Teoria da Relatividade Restrita

por FILIPE DUARTE SANTOS

Laboratório de Física e Engenharia Nucleares — Junta de Energia Nuclear — Sacavém

«Um dos volumes mais notáveis de toda a literatura científica parece-me ser o volume 17, série 4, de *Annalen der Physik* do ano 1905» escreveu o físico Max Born. É neste volume que se encontra o primeiro artigo de Albert Einstein sobre a teoria da relatividade. Nesse mesmo ano Einstein escreveu cinco artigos em *Annalen der Physik* numa expressão notável da sua plenitude criadora. Porém foi o artigo sobre a teoria da relatividade com o título «Acerca da electrodinâmica dos corpos em movimento» o que teve maior influência na evolução da ciência e vida contemporâneas provocando uma profunda revolução no pensamento racional do homem. O aparecimento das ideias que formam a teoria é um acontecimento extraordinário pela intensidade e variedade das suas consequências. Podemos distinguir a sua contribuição para o conhecimento das leis dos fenómenos físicos, na vida da sociedade humana e na filosofia da ciência contemporânea. Relativamente ao segundo campo de acção são bem conhecidas as possibilidades de produção de energia que a teoria da relatividade veio abrir. A conversão de massa em energia, por exemplo nas centrais nucleares industriais que proliferam nos mais diversos países e beneficiam o nível de vida dos seus cidadãos, resulta, em última análise, de um fenómeno físico previsto pela primeira vez no âmbito da teoria. A mesma lei veio aumentar de modo terrível a responsabilidade do homem para consigo através das imensas quantidades de energia que põe à sua disposição e que temos o dever e o direito de decidir como utilizar. Reco-

nhecida a importância excepcional das ideias fundamentais da teoria da relatividade afigura-se do maior interesse estudar a sua génese.

Propagação de ondas

A electrodinâmica, tema central do artigo citado, possuía já no princípio deste século um desenvolvimento considerável em particular no domínio das suas aplicações práticas na engenharia. Contudo a teoria sofria de problemas preocupantes; procuremos encontrá-los. As equações fundamentais que regem os fenómenos electromagnéticos foram escritas por Maxwell cerca de 1864. Deduz-se destas equações a existência de ondas electromagnéticas que se propagam com a velocidade da luz. Esta previsão teórica foi verificada experimentalmente pelo físico Hertz, o que conduziu à confirmação definitiva de que a luz é uma onda electromagnética com comprimento de onda compreendido entre certos limites característicos da visibilidade humana. Se reflectirmos um pouco no conceito de onda verificamos estar a propagação de uma onda, pelo menos nos exemplos mais imediatos ao nosso alcance, associada a um certo meio que sofre alterações enquanto o fenómeno ondulatório se processa. Assim, por exemplo, as ondas que se formam num lago calmo quando atiramos uma pedra são perturbações, com carácter periódico, da superfície da água: o meio neste caso é a água. As ondas sonoras cuja recepção pelo ouvido dá ori-

gem aos sons correspondem, numa certa porção do espaço, a compressões e descompressões do ar: o meio é, neste exemplo, o ar. Se fizermos o necessário para que uma campainha toque num recipiente onde se fez o vácuo, o som não se propaga devido à ausência de ar e portanto não atinge o exterior. Em contrapartida verifica-se, por meio de experiências, que a luz, ou melhor, as ondas electromagnéticas, se propagam no vácuo. Aparentemente não existe um meio material suporte da propagação das ondas electromagnéticas. Os físicos do fim do século passado e princípio do actual, porém, tiveram grande relutância em admitir a não existência deste meio que, por não ser observável, seria forçosamente hipotético. Repare-se que rejeitar a existência do meio hipotético, ao qual se chamou éter, não era uma obra simples devido, entre outros motivos, às modificações profundas que isso implica nos conceitos de espaço e tempo. Foi necessário o génio de Einstein para aceitar plenamente tais consequências e com elas estabelecer as bases de uma teoria coerente.

Princípio da relatividade restrita

O que resulta afinal de negar a existência de um meio material suporte da propagação das ondas electromagnéticas? Começemos por tentar concretizar esta negação. Abandonada a ideia do éter as ondas electromagnéticas passam a constituir uma realidade independente de quaisquer corpos materiais. Uma característica universal destas ondas é a sua velocidade de propagação que, como vimos, é igual à velocidade de propagação da luz. Consideremos então dois observadores com movimento relativo uniforme que se preparam para medir a velocidade da luz no vácuo emitida por uma fonte de luz

não especificada (supõe-se os referenciais dos observadores galileanos, isto é, referenciais onde se verificam as leis da mecânica de Newton, pelo menos em primeira aproximação). As observações que os dois experimentadores podem efectuar sobre o feixe de luz são estritamente equivalentes: ambos observam uma onda electromagnética propagando-se no vácuo. Após breve reflexão concluímos, com base na hipótese inicial de rejeição do éter, que ambos os observadores atribuem necessariamente igual velocidade de propagação à onda electromagnética. Concretamente ambos observam uma onda electromagnética no vácuo e isso é suficiente para conhecer certas características desta onda, em particular a sua velocidade de propagação. A nova estrutura do espaço e do tempo, compatível com a conclusão obtida não é aquela a que os nossos órgãos dos sentidos nos habituaram e de acordo com a qual a velocidade de um corpo é diferente para dois observadores animados de movimento relativo com velocidade constante. A afirmação de que a velocidade da luz no vácuo é igual para todos os observadores com movimento relativo uniforme (sendo o seu valor independente da velocidade da fonte produtora de luz) é uma expressão particular de um princípio muito geral e de grande importância em física. Este princípio, chamado da relatividade restrita (por ser a particularização do princípio da relatividade geral que engloba os movimentos acelerados), garante a validade das leis da física para todos os observadores em movimento relativo uniforme. Como corolário conclui-se que o estudo dos fenómenos físicos não pode revelar uma translação uniforme através do espaço. A equivalência que o princípio da relatividade estabelece entre os observadores é a expressão de uma ideia de simplicidade que tem sido extremamente produtiva e dinâmica em física.

Fórmulas de Lorentz

Voltemos porém à nossa linha de pensamento e para tal é conveniente introduzir o conceito de acontecimento. Um acontecimento, no sentido geral que vamos usar, é algo que sucede num certo lugar e num certo instante como, por exemplo, a emissão ou recepção de um sinal de luz. A localização de um acontecimento por um observador requer a enumeração de quatro quantidades, três que caracterizam a sua posição no espaço, definidas por exemplo, como as coordenadas (x, y, z) num sistema de eixos cartesianos ortogonais e a quarta, o tempo t . Se considerarmos de novo dois observadores S e S' com movimento relativo uniforme de velocidade de módulo v eles descrevem a localização de acontecimentos por meio de conjuntos de quatro números (x, y, z, t) e (x', y', z', t') respectivamente. Admitamos que os sistemas de eixos cartesianos ortogonais dos dois observadores são paralelos, que a origem do sistema de eixos de S' se desloca segundo o eixo dos x de S , no sentido de x crescente, e que coincide com a origem do sistema de eixos de S' no instante $t=0$. Estas especificações não são de modo nenhum essenciais às ideias que pretendemos expôr mas têm a vantagem de simplificar consideravelmente a argumentação e os cálculos. O problema que se põe agora é o de encontrar a relação que existe entre (x, y, z, t) e (x', y', z', t') quando estes conjuntos de números se referem ao mesmo acontecimento observado pelos experimentadores S e S' respectivamente. Por outras palavras, pretendemos as relações que nos permitem obter as coordenadas de um acontecimento no referencial de S' conhecidas as coordenadas do mesmo acontecimento no referencial de S . A estas relações, que são fórmulas de transformação das coordenadas de acontecimentos, chama-se fór-

mulas de Lorentz. Para as deduzir é suficiente aplicar o princípio da relatividade restrita às duas seguintes leis da física: a velocidade de propagação da luz é constante, afirmação que já comentámos, e o movimento de uma partícula não actuada por forças é rectilíneo e de velocidade constante. A validade destas leis para os observadores S e S' conduz, após breves cálculos, às fórmulas de transformação de Lorentz

$$x' = (x - vt)/B; \quad y' = y, \quad z' = z,$$

$$t' = (t - vx/c^2)/B; \quad B = \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

deduzidas pela primeira vez, com plena generalidade, por Einstein em 1905 (c representa a velocidade de propagação da luz no vácuo). Estas relações vieram substituir as fórmulas de transformação das coordenadas de acontecimentos da mecânica clássica, chamadas frequentemente fórmulas de transformação de Galileu;

$$x' = x - vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t.$$

Falámos já das equações de Maxwell salientando que elas sintetizam as leis fundamentais dos fenómenos electromagnéticos. A teoria da relatividade mantém invariáveis estas equações para os observadores S e S' pela aplicação das fórmulas de transformação de Lorentz. Esta invariabilidade traduz afinal a extensão do princípio da relatividade restrita às leis dos fenómenos electromagnéticos e é uma das realizações mais notáveis da teoria. Significa, por outras palavras, que dois físicos em movimento relativo uniforme, chegam, por meio da realização independente de experiências, às mesmas leis para os fenómenos electromagnéticos. O mesmo não sucederia se o espaço-tempo físico tivesse a estrutura imposta pelas fórmulas de transformação de Galileu.

Dilatação do tempo e contracção de Fitzgerald

As discrepâncias entre o espaço-tempo sugerido através dos órgãos dos sentidos por meio de uma observação imediata e superficial dos fenómenos naturais e o espaço-tempo físico só se revelam para velocidades relativamente próximas da velocidade da luz no vácuo, que é de trezentos mil quilómetros por segundo. Alguns aspectos destas diferenças são inesperadas e a nossa intuição directa do espaço e do tempo é inútil para os compreender melhor. Embora efeitos especificamente relativistas não intervenham ainda na vida quotidiana eles são parte integrante da ciência contemporânea e encontram-se a cada passo nos laboratórios de física.

Consideremos um intervalo de tempo definido por dois acontecimentos distintos e admitamos que a sua medição é feita por observadores S e S' em movimento relativo uniforme com relógios perfeitamente idênticos. Para simplificar suponha-se que os dois acontecimentos se dão na mesma posição relativamente a S' . A aplicação das fórmulas de Lorentz mostra que a duração do intervalo de tempo não é a mesma nos dois referenciais: a duração medida por S' é menor do que a duração medida por S . Este fenómeno relativista, com o nome de dilatação do tempo, inesperado do ponto de vista dos conceitos clássicos de espaço e tempo, verifica-se experimentalmente ao medir as vidas médias de partículas elementares animadas de velocidades próximas da velocidade da luz no vácuo. A medição de comprimentos apresenta um efeito, de certa analogia com o anterior, chamado contracção de Fitzgerald. Com efeito a medição do comprimento de uma régua quando ela se encontra em repouso relativamente ao observador e em movimento uniforme na direcção da

dimensão a medir, não conduz ao mesmo valor: de acordo com as fórmulas de Lorentz o valor obtido na medição da régua em movimento é menor.

Identificação entre massa e energia

A dinâmica relativista, tal como a cinemática, identifica-se com a mecânica clássica no limite das pequenas velocidades. Para velocidades próximas da velocidade de propagação da luz surgem também diferenças como por exemplo o facto de o valor obtido na medição da massa de um corpo variar com a sua velocidade relativamente ao observador. Quando a velocidade relativa aumenta o valor obtido na medição da massa aumenta e tende para infinito quando a velocidade se aproxima da velocidade da luz no vácuo. Esta previsão da teoria, confirmada diariamente, intervem na rotina de operação dos grandes aceleradores de partículas usados no estudo da física das altas energias.

Segundo a opinião de Einstein o resultado mais notável da teoria da relatividade restrita é a identificação entre massa e energia de acordo com a equação

$$E = mc^2$$

onde c representa ainda a velocidade de propagação da luz no vácuo. Esta identificação é completa: se a mecânica tivesse sido sempre tratada de um modo relativista não teriam sido necessários dois nomes — massa e energia — para nomear uma mesma coisa. Quando um sistema material isolado sofre diminuição da sua massa, de uma certa quantidade, isso significa a libertação simultânea de uma quantidade de energia correspondente de acordo com a equação citada. É o que sucede aos núcleos dos átomos ao desin-

tegrarem-se nos reactores das centrais nucleares, produzindo assim grandes quantidades de energia.

A velocidade da luz como velocidade limite

A teoria da relatividade impõe a velocidade da luz no vácuo como uma velocidade limite, impossível de ser ultrapassada. Esta limitação poderia ser a origem de uma certa nostalgia por nos impedir, à priori, a exploração do universo, pois que as distâncias entre os corpos celestes são da ordem de muitos anos de luz (distância percorrida pela luz no vácuo durante um ano). A estrela mais próxima de nós — alfa do Centauro — encontra-se a cerca de 4 anos de luz. Porém devido ao efeito relativista da dilatação do tempo a limitação é apenas aparente. Se uma nave espacial partisse da terra e viajasse através do espaço sideral com uma velocidade constante de, por exemplo, 298 500 quilómetros por segundo, durante dez anos de acordo com o calendário terrestre, quando os astronautas chegassem de novo à Terra afirmariam que na nave espacial apenas tinha decorrido cerca de um ano. Se a velocidade dos viajantes fosse suficientemente próxima da velocidade da luz no vácuo já não encontrariam a sua ge-

ração ao regressar à Terra. Vemos assim que, apesar da existência de uma velocidade limite, a duração da vida humana não impõe uma barreira formal intransponível à exploração do universo. Deve notar-se que em rigor este exemplo sai fora do âmbito da relatividade restrita pois nele intervêm os movimentos acelerados da nave, pelo menos, na partida e chegada à Terra. A teoria da relatividade geral, de que não vamos aqui falar, faz o estudo destes movimentos e propõe uma nova teoria da gravitação.

Percorremos brevemente algumas das conclusões mais importantes da relatividade restrita e é indubitável o alcance profundo que têm na ciência e vida contemporâneas. Se meditarmos sobre a origem desta teoria encontramos o princípio da relatividade que garante a perfeita igualdade dos observadores na sua procura das leis da natureza.

BIBLIOGRAFIA SUMÁRIA

- [1] RUI LUÍS GOMES, *Teoria da relatividade restrita*, Livraria Sá da Costa.
- [2] L. D. LANDAU, Y. RUMER, *O que é a Relatividade*, Livros de bolso, Portugália Editora, N.º 80.
- [3] A. EINSTEIN e L. INFELD, *A evolução da Física*, Livros do Brasil.