

Relatividade Restrita

Michael Fowler

Universidade de Virgínia, Departamento de Física

Relatividade de Galileu

Albert Einstein escreveu o seu primeiro artigo sobre relatividade em 1905. Para contextualizar o seu trabalho, vamos em primeiro lugar rever o significado de “relatividade” no que toca à física. O primeiro exemplo é o que se designa de “relatividade de Galileu” e não é mais do que a percepção de Galileu de que ao observar objetos em movimento, vivos ou não, num quarto fechado, não há forma de concluir sobre se o quarto está em repouso ou se é um dos muitos quartos de um barco em movimento com velocidade e direção constante¹ - contudo pode-se distinguir se o barco está a acelerar ou a mudar de direção. Todos os objetos permanecem na mesma posição, quer o quarto esteja em repouso ou em movimento retilíneo uniforme. Depois de Newton ter formulado as Leis do Movimento, que descrevem como os corpos se movem em resposta à forças, os físicos reformularam a observação de Galileu, tornando-a mais técnica mas equivalente: *as leis da física são as mesmas, tanto num quarto com movimento uniforme como num quarto em repouso*. Por outras palavras, a mesma força produz a mesma aceleração, e portanto um objeto cuja resultante das forças que nele atuam é nula move-se em linha reta e com velocidade constante². É óbvio que esta conclusão implica que tenhamos cronómetros e instrumentos de medição, de modo a determinar o tempo de movimento de um corpo ao longo de uma distância medida, e portanto os físicos *visualizam* o quarto em questão como tendo as paredes calibradas de modo a poder ser determinada a posição de qualquer objeto, e com um bom cronómetro para determinar o tempo de movimento. Um quarto com estas características é considerado um “referencial” – as paredes calibradas são utilizadas para determinar a posição exata de um objeto num dado instante de tempo (o equivalente a um sistema de coordenadas). Nenhuma determinação do movimento dos objetos no interior deste *referencial* permitirá concluir sobre se o referencial está em repouso ou em movimento uniforme.

O que significa exatamente que o referencial está em repouso? Parece óbvio do nosso ponto de vista, o de criaturas que vivem à superfície da Terra – significa repouso em relação aos objetos fixos à superfície da Terra. Na realidade, o movimento de rotação da Terra indica-nos que esta não é um referencial em repouso, movendo-se a 18 milhas por segundo ao longo da sua órbita em torno do Sol. Do ponto de vista de um astronauta, um referencial em repouso em relação ao Sol parece ser mais razoável. Mas porquê parar por aqui? Acreditamos que as leis da física são válidas para todo o universo. Consideremos um local no espaço longínquo, muito afastado do Sol e até da nossa galáxia. Observaríamos, a partir desse ponto, galáxias em todas as direções, e com diferentes movimentos. Suponha agora que se considera um dado referencial em repouso, e que se pretende verificar se as Leis de Newton ainda são válidas. Em particular, verifica-se se a Primeira Lei é válida – qualquer corpo sujeito a uma resultante das forças nula tem movimento retilíneo uniforme. *A Primeira Lei é frequentemente designada por Lei da Inércia, e o referencial no qual esta lei se sustenta designa-se de referencial inercial*. Em seguida considera-se um segundo referencial, que se move a velocidade constante em relação ao primeiro, e conclui-se que as Leis de Newton também são válidas para este referencial. O que é digno de nota neste caso é o facto de não ser de todo óbvio qual dos dois referenciais está em repouso. Podemos contudo afirmar que ambos os referenciais são inerciais, uma vez que em ambos, qualquer corpo sujeito a uma força resultante nula tem movimento retilíneo uniforme (convém não esquecer que a velocidade pode tomar o valor zero). Neste caso, Michelson diria que o referencial em repouso é aquele que se encontra em repouso em relação ao *éter*. Contudo, as experiências do próprio Michelson demonstraram que o movimento em relação ao *éter* é indetetável, por isso como podemos saber se estamos ou não no referencial correto?

A meio do século XIX ocorreram avanços substanciais no que toca à compreensão dos campos elétricos e magnéticos (de facto, este avanço é em grande parte responsável pela melhoria das condições de vida desde então). Estes novos conhecimentos foram *resumidos* num conjunto de equações, as equações de Maxwell, que descrevem a interação entre campos elétricos e magnéticos, e como são capazes de se gerar mutuamente, tal como dois séculos antes os conhecimentos de dinâmica foram *resumidos* por outro

¹ N. do T.: com movimento retilíneo uniforme (M.R.U.).

² N. do T.: uma vez que a resultante das forças é nula, a aceleração também é nula (segunda Lei de Newton).

conjunto de equações, as Leis de Newton. A importância das equações de Maxwell na discussão deste tema prende-se com o facto de estas preverem a existência de ondas resultantes de campos eléctricos e magnéticos que se propagam a uma velocidade de 3×10^8 metros por segundo, tendo-se percebido de imediato na altura que não se tratava de uma coincidência - as ondas luminosas resultavam da oscilação de campos eléctricos e magnéticos (este é já um dado adquirido).

Vale a pena realçar que o trabalho de Maxwell foi capaz de prever a velocidade da luz através dos resultados de experiências que, à época da sua realização, se julgava não estarem relacionadas com a luz – por exemplo, experiências sobre a intensidade de um campo eléctrico produzido por um íman em oscilação. Maxwell foi capaz de deduzir a velocidade de propagação de ondas a partir de métodos análogos aos utilizados anteriormente por outros cientistas para determinar a velocidade do som com base na densidade e elasticidade do ar.

Generalização da relatividade de Galileu para incluir a luz: Relatividade Restrita

Vejamos agora a grande revelação de Einstein: a Teoria da Relatividade Restrita. É ilusoriamente simples. Einstein começou por *sacudir o pó* da conclusão de Galileu acerca das experiências realizadas no quarto de um navio em movimento uniforme, e reescreveu-a da seguinte forma:

As Leis da Física são as mesmas para todos os referenciais inerciais.

De seguida, Einstein procurou incluir as descobertas posteriores a Galileu, ao referir que as Leis da Física devem agora incluir as equações de Maxwell sobre campos eléctricos e magnéticos e também as Leis de Newton, sobre o movimento de massas sujeitas à gravidade e a outras forças³.

Exigir que as equações de Maxwell sejam satisfeitas para todos os referenciais inerciais tem uma grande consequência. Tal como já foi referido, as equações de Maxwell permitem obter a velocidade da luz, que corresponde a 3×10^8 metros por segundo. Assim sendo, *exigir que as Leis da Física sejam as mesmas em todos os referenciais inerciais implica que a velocidade de qualquer onda luminosa, determinada em qualquer referencial inercial, corresponda a 3×10^8 metros por segundo.*

Esta é a totalidade do conteúdo da Teoria da Relatividade Restrita: as leis da Física são as mesmas em qualquer referencial inercial e, em particular, qualquer determinação da velocidade da luz relativamente a qualquer referencial inercial permitirá obter sempre o mesmo valor, 3×10^8 metros por segundo.

Não consegue mesmo perceber se está em movimento!

Tal como Galileu afirmou, a partir da observação de mosquitos, peixes e garrafas a gotejar, atirar objetos ou saltar não nos ajudam a determinar se de facto estamos num quarto em repouso ou se o quarto se move a velocidade constante, e Einstein acrescentou que nenhum tipo de observação, *mesmo que seja a determinação da velocidade da luz que atravessa o quarto*, com qualquer grau de precisão, nos ajuda a determinar se o quarto está “mesmo em repouso”. É óbvio que isto implica que o conceito de “repouso” não tem sentido. Se Einstein estiver correto, não existirá nenhum referencial natural em repouso no Universo. Naturalmente, não pode existir nenhum *éter*, nenhuma *geleia* fina e transparente que preenche todos os espaços e vibra à passagem da luz, pois caso existisse, providenciaria o tal referencial natural em repouso e afetaria a velocidade da luz quando determinada noutros referenciais inerciais em movimento, tal como discutido anteriormente.

³ N. do autor: as equações de Maxwell permanecem completamente inalteradas na relatividade especial, mas as Leis de Newton necessitam de um pequeno reajustamento para incluir a relatividade especial. A Primeira lei continua a ser válida, mas a Segunda Lei deve ser reajustada, uma vez que a massa dos corpos varia. Devemos igualar a força à taxa de variação do momento. A Terceira Lei, que afirma que a acção é igual à reacção, não é válida, pois se um corpo se move o seu campo eléctrico, por exemplo, não se ajusta instantaneamente – a onda propaga-se à velocidade da luz. Enquanto a onda não atingir outro corpo carregado, as forças eléctricas entre as cargas não estarão equilibradas. Contudo, a consequência crucial da Terceira Lei – a conservação do momento quando dois corpos interagem, continua válida, o próprio campo tem momento, o que resulta em equilíbrio.

Portanto, a experiência de Michelson-Moreley estava condenada desde o início. Nunca existiu nenhum fluxo de *éter*. A velocidade da luz não diminui quando esta se propaga “contra a corrente”⁴ – a luz propaga-se sempre à mesma velocidade, velocidade essa que por uma questão de simplicidade, designaremos por c ,

$$c = 3 \times 10^8 \text{ metros por segundo.}$$

Isto responde à questão: *a velocidade da luz, c , é determinada em relação a quê?* Já se sabe que a luz não é como o som, cuja velocidade se determina em relação a um determinado meio material subjacente. Também não é como as balas, cuja velocidade pode ser determinada em relação ao emissor (a desacreditada teoria do emissor, no que diz respeito à luz). *A luz propaga-se à velocidade c , em relação ao observador*, uma vez que se o observador considerar um referencial inercial para medir a velocidade da luz, concluirá que esta corresponde a c .

Verdade e consequências

A verdade a que o texto se refere é a aparentemente inócua e plausível afirmação de que um referencial inercial é tão bom como qualquer outro – as Leis da Física são as mesmas em qualquer um deles – e portanto a velocidade da luz é a mesma em todos eles. Esta Teoria da Relatividade Restrita tem algumas consequências surpreendentes, que se tornam mais acentuadas quando os objetos se movem a velocidades relativas próximas da velocidade da luz. Einstein gostava de explicar a sua teoria recorrendo ao que designava por “experiências mentais” envolvendo comboios e outros meios de transporte com velocidades relativas comparáveis à velocidade da luz (e que tecnicamente não são, por enquanto, possíveis de executar), portanto seguiremos esta linha de aproximação ao tema.

Para começar, consideremos uma simples determinação da velocidade da luz levada a cabo ao mesmo tempo em dois referenciais inerciais que se movem a metade da velocidade da luz, um em relação ao outro. A montagem da experiência é a descrita em seguida: em solo plano, coloca-se uma lanterna, a qual emite um pulso de luz. Colocam-se duas fotocélulas (dispositivos que enviam uma mensagem ao longo de um fio elétrico, sempre que detetam luz) a uma distância de 10 metros ao longo da trajetória do pulso de luz, e ligam-se as fotocélulas a um cronómetro, de modo a que se consiga determinar o intervalo de tempo que decorre entre o momento em que a luz é captada pela primeira fotocélula e o momento em que é captada pela segunda fotocélula. A partir desse intervalo de tempo e da distância entre as fotocélulas, pode-se determinar facilmente a velocidade do pulso de luz.

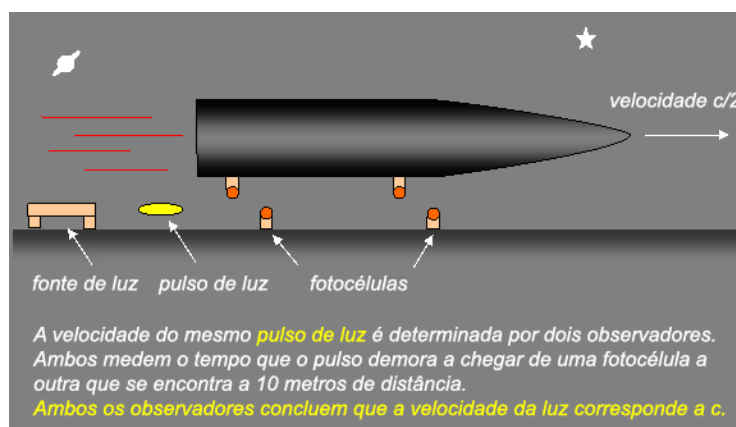


Imagem 1: Determinação da velocidade da luz em dois referenciais inerciais diferentes⁵.

⁴ N. do T.: Contra a corrente do hipotético fluxo de *éter*.

⁵ N. do autor: Na realidade esta imagem não representa com precisão a situação. Os corpos que se movem com velocidades relativas comparáveis à velocidade da luz contraem-se, e este facto, quando combinado com os diferentes intervalos de tempo que a luz necessita para chegar das diferentes partes da nave ao nosso olho alteraria o aspeto da nave. Contudo isto não afeta a validade das afirmações presentes neste texto.

Entretanto, há um outro observador que viaja a bordo de uma nave espacial a uma velocidade correspondente a metade da velocidade da luz. Este observador está também equipado com um par de fotocélulas, que coloca a dez metros de distância uma da outra na parte de baixo da nave espacial, tal como indicado na imagem anterior, e está preparado para efetuar a determinação da velocidade do mesmo pulso de luz em relação a outro referencial (a nave espacial). *O observador a bordo da nave conclui que a velocidade do pulso de luz em relação ao referencial “nave” corresponde a c , enquanto o observador que se encontra no solo conclui que a velocidade do pulso de luz em relação ao referencial “solo” corresponde também a c .* Esta é, inequivocamente, uma consequência da Teoria da Relatividade.

© Michael Fowler, Universidade de Virgínia

Casa das Ciências 2013

Tradução/Adaptação de Nuno Machado e Manuel Silva Pinto

