

Natureza Relativística do Tempo

Questão: Qual a concepção do tempo, segundo a Teoria da Relatividade?

1. O Tempo segundo a Teoria da Relatividade Restrita

A maior descoberta com relação ao tempo físico foi feita pela Teoria da Relatividade Restrita, consolidada a partir do trabalho de Albert Einstein em 1905, e com a geometrização do espaço-tempo anunciada em 1908 por Hermann Minkowski:⁹⁵

Doravante, o espaço por si só e o tempo por si só estão fadados a desvanecer em meras sombras, e apenas uma espécie de união entre os dois preservará uma realidade independente.

O que a teoria previu é que quaisquer dois relógios, sejam eles mecânicos ou biológicos, marcarão tempos diferentes conforme as acelerações sofridas por eles. Assim, considere duas pessoas que tenham relógios com bom funcionamento e que marquem um encontro para sincronizar seus relógios; após se separarem, se movimentarem, e voltarem a se reencontrar, geralmente seus relógios estarão marcando tempos diferentes (salvo no caso em que as acelerações de cada um acabe coincidindo). Tal constatação foi dramatizada pelo físico francês Paul Langevin, em 1911, por meio de um viajante em um foguete que viaja no espaço sideral a uma velocidade próxima à da luz:

Bastaria para isso que nosso viajante consentisse de se fechar dentro de um projétil que a Terra lançaria com uma velocidade suficientemente próxima daquela da luz, porém inferior, o que é fisicamente possível, arranjando-se para que se produzisse um encontro, com uma estrela por exemplo, após um ano da vida do viajante, e lhe mandasse para a Terra com a mesma velocidade. De volta à Terra, tendo envelhecido dois anos, ele sairá de sua arca e encontrará nosso globo envelhecido em duzentos anos, se sua velocidade permaneceu dentro de um intervalo de somente vinte milésimos inferior à velocidade da luz. Os fatos experimentais mais seguramente estabelecidos da física nos permitem afirmar que assim seriam as coisas.⁹⁶

Tal situação contraintuitiva pode ser chamada de “experimento mental dos gêmeos viajantes”. É interessante notar que a situação de separação entre os gêmeos é *simétrica*, então não se poderia afirmar que os tempos transcorrem em ritmos diferentes; porém, como um dos gêmeos pára e retorna, ele se coloca em dois referenciais diferentes, ao contrário daquele que permaneceu na Terra (em um só referencial), então a simetria se quebra, e entende-se porque o tempo pode transcorrer mais devagar para o viajante.⁹⁷

⁹⁵ Traduções de cinco artigos de Einstein de 1905 estão em STACHEL (org.), op. cit. (nota 6). Ver também os originais de: LORENTZ, H.A.; EINSTEIN, A. & MINKOWSKI, H. (1958), *Princípio de relatividade*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. A citação de Minkowski é da p. 93 do artigo “Espaço e tempo”, que se encontra neste volume, pp. 93-114.

⁹⁶ LANGEVIN, P. (1911), “L'évolution de l'espace et du temps”, *Scientia* 10, pp. 31-54. Citação da p. 50. Neste exemplo, $\gamma = \Delta t / \Delta t' = 100$, correspondendo a uma velocidade de $v = 0,99995c$. Os “vinte milésimos” mencionados por Langevin poderiam ser “cinquenta milionésimos”.

⁹⁷ É interessante que muitos consideravam este experimento mental um “paradoxo”. Entender por que ele era assim considerado envolve um esforço de mapeamento cognitivo.

A diferença nos relógios foi constatada experimentalmente em aviões circunavegando a Terra em diferentes sentidos: como a Terra gira em torno do seu eixo, as velocidades de cada avião (que em relação à atmosfera são as mesmas) acabam sendo bastante diferentes (em relação ao referencial externo à Terra). Mediu-se uma diferença de em torno de 300 bilionésimos de segundo.⁹⁸ Este efeito foi devido não somente às acelerações distintas dos aviões Concorde utilizados, mas também às alterações nos relógios devidas aos diferentes valores dos campos gravitacionais (um efeito explicado pela Teoria da Relatividade Geral). Hoje em dia, esses dois efeitos precisam ser corrigidos para o bom funcionamento do sistema GPS (*global positioning system*).

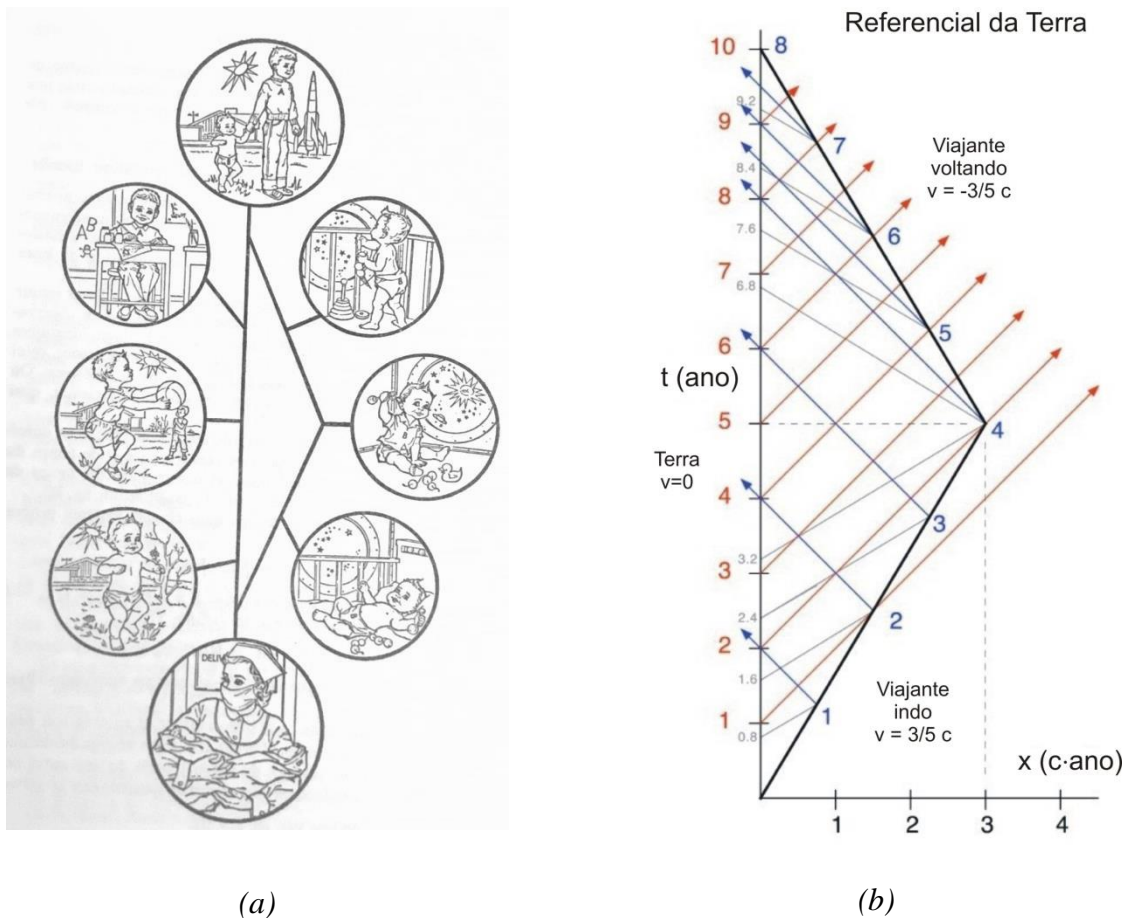


Figura IX.1. Experimento mental dos gêmeos viajantes. (a) Ilustração de Tonnelat. (b) Diagrama espaço-temporal para o viajante a $3/5 c$, com sinais luminosos enviados anualmente por cada gêmeo (vermelho e azul), e linhas de simultaneidade (cinza). Notar que a situação é simétrica até a mudança de referencial do viajante (no ano 4, em seu referencial): cada gêmeo vê o tempo do outro dilatar. As duas imagens na fileira central de (a) correspondem ao plano de simultaneidade do referencial da Terra: onde um fotógrafo teria que estar (em b) para capturar as imagens desta fileira central?⁹⁹

⁹⁸ HAFELE, J.C. & KEATING, R.E. (1972), "Around-the world atomic clocks: observed relativistic time gains", *Science* 177, pp. 168-70. Para um relato didático deste experimento, e também da confirmação da dilatação temporal em experimentos com múons, ver o site do curso.

⁹⁹ A Fig. IX.1a foi retirada de TONNELAT, Marie-Antoinette (1971), *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris, p. 207. A Fig. IX.1b é de MALLINCKRODT, A.J. (2001), "The so-called 'twin paradox'", <https://www.cpp.edu/~ajm/materials/twinparadox.html>

2. Dilatação do Tempo

O artigo de 1905 de Einstein foi o ponto culminante de um processo de investigação das propriedades ópticas de corpos em movimento que se iniciou com Arago (1810) e Fresnel (1818), e que foi quase completado por Lorentz, Larmor e Poincaré, antes de 1904, dentro da concepção da existência do éter luminífero. FitzGerald e Lorentz introduziram a hipótese de que corpos em movimento com relação ao éter se contraem, explicando assim o experimento de Michelson-Morley (sem precisar supor que o éter seria arrastado pelo movimento da Terra). Poincaré explorou o critério operacional de se determinar a simultaneidade de eventos distantes, por meio de feixes de luz, concluindo que diferentes referenciais estipulam diferentes convenções de simultaneidade para dois eventos. Isso fortaleceu sua defesa do “princípio de relatividade”, que para ele exprimia a impossibilidade de determinarmos nosso estado de movimento absoluto em relação ao éter.¹⁰⁰

Einstein seguiu um caminho próprio para chegar a essas mesmas ideias, abandonando a tese da existência do éter. Tomou como o *princípio de relatividade* como postulado, afirmando que *todas* as leis da física (inclusive as do eletromagnetismo, o que inclui a óptica) são invariantes em qualquer referencial inercial (na seção XII.1 discutiremos os referenciais inerciais). Juntamente com o postulado de que a velocidade da luz c é independente da velocidade da fonte, donde se segue que c tem o mesmo valor em todos os referenciais, concluiu que uma medição de intervalo de tempo Δt_{AB} entre dois eventos A e B depende do referencial de movimento, assim como as medições da distância Δx_{AB} entre estes dois eventos.

A derivação de Einstein da propriedade de “dilatação do tempo” é famosa por sua simplicidade. Considere um foguete que passa rapidamente, com velocidade v na direção horizontal, perto de um asteroide, que consideramos em repouso (Fig. IX.2). A nave carrega um “relógio de luz”, que envolve a emissão de um pulso de luz, sua reflexão em um espelho a uma distância vertical d , e sua detecção no mesmo ponto (no referencial do foguete) em que o feixe foi emitido. O intervalo de tempo entre o evento de emissão (A) e detecção (B) é dado por $\Delta t'_{AB} = 2d/c$, onde o apóstrofe indica que este é o intervalo medido pelo relógio no referencial em movimento.

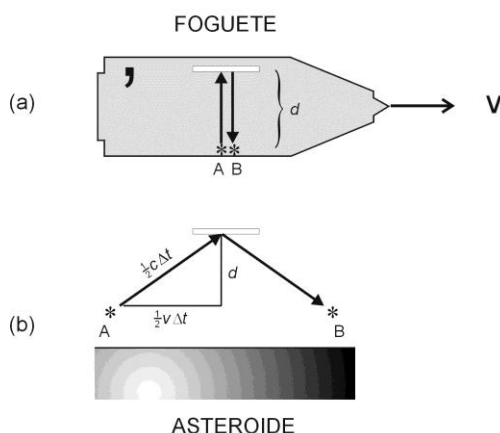


Figura IX.2: (a) No referencial do foguete, em movimento com velocidade v em relação ao asteroide, dois eventos A e B , ligados por um raio de luz que reflete verticalmente num espelho, ocorrem na mesma posição, separados pelo tempo $\Delta t' = 2d/c$. (b) No referencial do asteroide, estipulando que a velocidade medida da luz também é c , a distância percorrida é maior, e portanto o valor numérico do intervalo temporal também é maior, por um fator γ (fator de Lorentz): $\Delta t = \gamma \Delta t'$.

¹⁰⁰ Uma boa introdução à história da Teoria da Relatividade Restrita é: HIROSIGE, T. (1976), “The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity”, *Historical Studies in the Physical Sciences* 7, pp. 3-82. Mais detalhes podem ser encontrados em: MILLER, A.I. (1981), *Albert Einstein's special theory of relativity: emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading (MA). Além das referências apresentadas na nota 6, uma boa apresentação matemática é: GAZZINELLI, R. (2005), *Teoria da relatividade especial*, Blücher, São Paulo. Uma exploração didática e filosófica é apresentada por: SALMON (1980), *Space, time, and motion: a philosophical introduction*, op. cit. (nota 46).

Já no referencial do asteroide, o movimento vertical do feixe de luz deve ser composto com o movimento horizontal do foguete. Classicamente, esperaríamos que a velocidade relativa ao asteroide seria maior, mas a Teoria da Relatividade impõe que a velocidade da luz seja constante. Assim, como a distância percorrida é maior (à mesma velocidade), o intervalo de tempo medido será também maior. Na Fig. IX.2b, aparece um triângulo retângulo de catetos d e $\frac{1}{2}v\Delta t$, e de hipotenusa $\frac{1}{2}c\Delta t$. Escrevendo a equação de Pitágoras, $d^2 + (\frac{1}{2}v\Delta t)^2 = (\frac{1}{2}c\Delta t)^2$, encontra-se que:

$$\Delta t = \frac{2d/c}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t' \quad , \quad \text{onde o fator de Lorentz } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \text{ é maior ou igual a 1.} \quad (\text{IX.1})$$

Para exemplificar, suponhamos que o foguete está com uma velocidade relativa ao asteroide de $0,87c$, de forma que $\gamma = 2$. Cada vez que o relógio na nave marcar $\Delta t' = 1$ s, o relógio no asteroide marcará $\Delta t = 2$ s. Isso pode ser interpretado dizendo-se que o relógio em movimento “anda mais devagar”, pois ele dá uma volta quando o nosso relógio do asteroide dá duas voltas. Outra maneira de exprimir isso é dizer que o tempo do relógio em movimento “se dilatou”, no sentido que 1 s marcado por ele se esticou e vale por 2 s medidos no referencial em repouso. De qualquer forma, se em um certo referencial dois eventos A e B ocorrem na mesma posição (como ocorreu no foguete), então o intervalo de tempo medido neste referencial, chamado *tempo próprio*, será numericamente menor do que em qualquer outro referencial que meça A e B .

3. Contração dos Comprimentos

O resultado análogo à dilatação do tempo para o espaço é conhecido como *contração de comprimentos*: $\Delta x = (1/\gamma) \Delta x'$. O tamanho de um objeto pode ser definido a partir de dois eventos A e B que ocorrem simultaneamente nas extremidades do objeto. Estes eventos terão separação espacial máxima justamente no referencial em que são simultâneos. Em todos os outros referenciais que se movem ao longo da direção x , a separação espacial medida será menor (contração de comprimentos), e os eventos A e B *não serão simultâneos!*

Para ilustrar esses conceitos, ilustramos na Fig. IX.3 um foguete carregando dois relógios, que passa ao lado de um asteroide, onde se encontram mais dois relógios. Há quatro eventos de comparação local entre relógios, cuja descrição é invariante em qualquer referencial. Vemos que relógios sincronizados em um referencial não o são em outro. Vemos também que a dilatação do tempo ocorre de maneira recíproca, da perspectiva de cada um dos referenciais, assim como a contração de comprimentos.

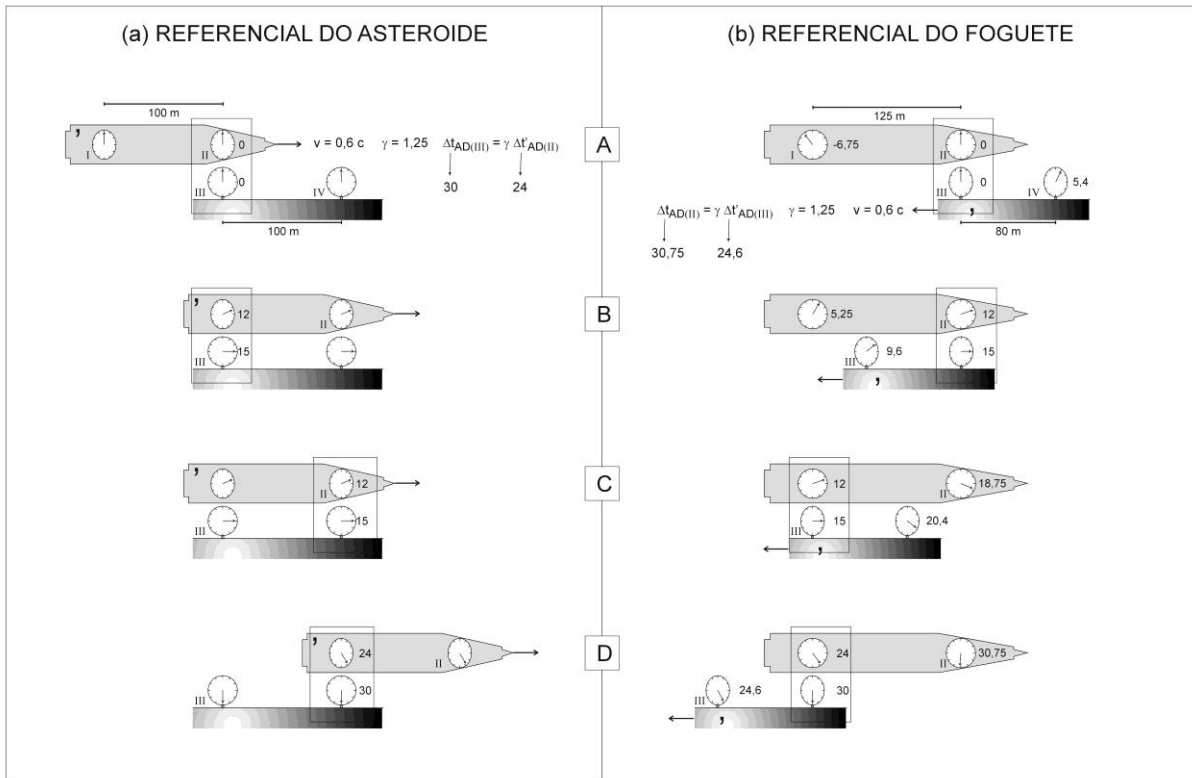


Figura IX.3: Foguete com dois relógios passando por asteroide com dois relógios. (a) Do lado esquerdo, a passagem do foguete, visto do referencial do asteroide (considerado em repouso), à velocidade $0,6c$. Levando em consideração a “contração do comprimento” do foguete, a distância entre os relógios de cada sistema é a mesma, 100 m . Devido à “dilatação do tempo”, um relógio no foguete (por exemplo, II) corre mais lento do que um relógio no asteroide (III). Isso é evidenciado pela relação $\Delta t_{AD(III)} = \gamma \Delta t'_{AD(II)}$, entre os relógios II e III, para o intervalo de tempo entre os eventos A e D, onde o apóstrofe indica o referencial em movimento. Os eventos B e C, de encontro de relógios, são vistos de maneira simultânea. (b) Do lado direito, a mesma situação vista do referencial do foguete. Os quatro eventos de encontros entre relógios devem manter as mesmas marcações temporais: tais eventos locais são “objetivos” ou “invariantes”, não se alterando com o referencial considerado. Os outros tempos marcados podem ser calculados levando-se em conta as proporções das distâncias percorridas à velocidade constante. Vemos que os dois relógios de cada sistema não se encontram sincronizados (ao contrário do caso anterior), ou seja, os eventos de passagem do ponteiro pelo 0 (dentro do foguete, por exemplo) não são mais simultâneos. Vemos também a simetria entre as duas perspectivas, com a relação $\Delta t_{AD(II)} = \gamma \Delta t'_{AD(III)}$ mantendo-se válida (onde o relógio II está agora em repouso, e o III em movimento), ou seja, como no caso anterior, o tempo no referencial em movimento é dilatado (ou seja, marca um valor menor de tempo).

4. Interpretações da Teoria da Relatividade Restrita

Numa análise preliminar, podemos dizer que há duas classes de interpretações da Teoria da Relatividade Restrita, uma einsteiniana e outra lorentziana.¹⁰¹ A primeira, que é dominante desde a 1ª Guerra Mundial, nega que o conceito de simultaneidade tenha significado absoluto, mas ela se divide em três interpretações distintas com respeito à dilatação do tempo e à contração dos comprimentos.

¹⁰¹ Uma classificação historicamente mais rica é apresentada em HENTSCHEL, K. (1991), “Philosophical interpretations of relativity theory: 1910-1930”, *PSA 1990*, vol. 2, Philosophy of Science Association, East Lansing (MI), pp. 169-79.

(1) *Relativismo relativístico*. A dilatação e contração são reais, mas seus valores dependem do referencial em questão. Um foguete possui de fato um tamanho de 125 m no próprio referencial, e possui de fato um tamanho de 100 m no referencial do asteroide. Assim, a realidade é relativa ao observador.

(2) *Perspectivismo relativístico*. Há invariantes que perpassam as descrições em diferentes referenciais, como o “intervalo espaço-temporal” (seção XXI.7). O tempo próprio e o tamanho próprio são casos particulares desse intervalo (para dois eventos no mesmo ponto do espaço ou simultâneos, respectivamente), sendo independentes do referencial e considerados reais. As observações feitas de diferentes referenciais sofrem de “efeitos de perspectiva”, deformando as medições de tempo e espaço (de maneira análoga a um navio visto de uma praia, que pode estar virado e parecer menor). Apenas do próprio referencial é que observamos diretamente os tempos e comprimentos reais.

(3) *Convencionalismo relativístico*. Uma classe importante de interpretações, iniciada por Poincaré e Reichenbach, considera que a tese de que a luz se propaga à mesma velocidade nos dois sentidos (pressuposto ao se definir o critério de simultaneidade entre eventos distantes) é uma convenção arbitrária, que poderia ser modificada sem alterar as previsões empíricas da teoria. Assim, o plano de simultaneidade adotado é uma mera convenção.

As interpretações lorentzianas são aquelas que privilegiam um dos referenciais inerciais, que pode ou não estar associado ao éter luminífero.

(4) *Relatividade relativa ao éter*. Haveria um referencial inercial absoluto: porém, o estado de movimento de um corpo em relação a este éter ocasiona a contração física deste corpo (devido a alterações nas forças intermoleculares) e também a mudança no ritmo dos ciclos associados (que afeta a medição do tempo). Porém, é impossível determinar experimentalmente qual é a velocidade de um referencial em relação ao éter. O tamanho medido do foguete em relação ao asteroide é resultado das contrações ocorridas em ambos os referenciais.

(5) *Interpretação dinâmica das contrações e dilatações*. Há uma tradição interpretativa que busca encontrar uma descrição “construtiva” de porque ocorre contração espacial de corpos (ao estilo mais de FitzGerald do que de Lorentz) e alterações de período (ao estilo de Larmor), a partir do estudo dinâmico de processos moleculares (incluindo possivelmente a Física Quântica), sem no entanto exigir a existência de um referencial absoluto. A abordagem “construtiva” buscaria fundamentar os princípios da Teoria da Relatividade de Einstein, de maneira análoga a como a Mecânica Estatística busca fundar a 2ª Lei da Termodinâmica. Nesta linha, Bell salientou¹⁰² que:

Não precisamos aceitar a filosofia de Lorentz [da realidade do éter] para aceitar uma pedagogia lorentziana. Seu mérito especial é levar adiante a lição de que as leis da física, em qualquer referencial *único*, dão conta de todos os fenômenos físicos, incluindo as observações de observadores em movimento.

5. Equivalência entre massa e energia

Um dos resultados mais importantes da Teoria da Relatividade Restrita foi a equivalência entre massa e energia, expressa pela fórmula $E=mc^2$: a energia total E de um

¹⁰² Sobre esta interpretação, ver BROWN, H.R. (2005), *Physical relativity*, Clarendon, Oxford. No cap. 7, ele examina este ponto de vista em diferentes autores, como William Swann (1930), Lajos Jánossy (1971) e John Stuart Bell (1976), mencionando também trechos que se aproximam desta concepção em Einstein, Weyl e Pauli. A citação de Bell é retirada do livro de Brown, p. 6, que inclui o trecho entre colchetes. O original é BELL, J.S. ([1976] 1987), “How to teach special relativity”, em seu *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge U. Press, pp. 67-80.

sistema físico S é numericamente igual ao produto de sua massa relativística m (medida por um observador O que se move com velocidade v em relação a S) e da velocidade da luz c ao quadrado. Se esta velocidade v for nula, tem-se a massa de repouso m_0 de S, onde $m = \gamma m_0$. No caso em que O e S estão em repouso relativo, o valor da energia E_0 é chamada energia de repouso, de maneira que $E_0 = m_0 c^2$.

O conceito de massa em questão é a massa inercial, que é uma medida da “inércia” de um corpo, ou seja, sua tendência a resistir mudanças em seu estado de movimento provocadas por quaisquer forças. Já o conceito de energia é uma medida do movimento de um corpo, atual ou potencial. Uma distinção ontológica relevante (BAIERLEIN, 2007, p. 24) é entre os entes (*entities*, coisas, objetos) envolvidos, que seriam matéria (partículas) e campos, e as propriedades (atributos) destes entes, como massa e energia.

A equação $E=mc^2$ foi derivada pela primeira vez por Albert Einstein, ainda em 1905, calculando um exemplo em que utilizou a teoria eletromagnética de Maxwell, e concluindo que “a massa de um corpo é uma medida do seu conteúdo de energia”. A partir da década de 1930, vários físicos forneceram derivações “dinâmicas”, que não pressupõem o eletromagnetismo de Maxwell, mas utilizam o momento relativístico e a energia cinética relativística (Einstein, 1935), mostrando que “a equivalência massa-energia é uma consequência das alterações na estrutura do espaço-tempo trazidas pela Relatividade Restrita”, nas palavras de Francisco FERNFLORES.¹⁰³

Este autor apresenta alguns exemplos do uso desta lei.

(a) Uma barra de ouro de 1 kg absorve energia térmica e sua temperatura aumenta em 10°C. O aumento de massa Δm_0 é $\Delta E_0/c^2$, que resulta em um aumento de $1,4 \cdot 10^{-14}$ kg. Vê-se que a massa inercial da barra de ouro altera-se com a absorção ou perda de energia (ao contrário do que ocorre na Mecânica Clássica).

(b) A massa de um gás ideal é a soma das massas de repouso de suas moléculas mais a soma das energias cinéticas das moléculas (dividida por c^2).

(c) Numa reação nuclear, como a produzida por Cockcroft & Walton (1932), um próton colide com um núcleo de lítio (de 3 prótons e 4 nêutrons), gerando duas partículas alfa (cada qual com 2p e 2n): $p + {}^7\text{Li} \rightarrow \alpha + \alpha$. Neste caso, em que há conservação do número de partículas, a massa de repouso inicial é maior do que a final, sugerindo que massa foi convertida em energia cinética final (as velocidades das partículas alfa são vinte vezes maiores do que a do próton incidente) (Fig. IX.4).

(d) Um exemplo simples envolvendo partículas elementares que transmutam é o aniquilamento de um elétron e um pósitron, fornecendo dois fótons de raio gama: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$. A massa de repouso de um fóton individual é nula, mas a massa de um par de fótons se movendo em direções não paralelas é diferente de zero (TAYLOR & WHEELER, 1992, p. 232).

Fernfiores apresenta então três interpretações para a equação $E=mc^2$:

(1) *Interpretações de mesma-propriedade* (Eddington, 1929; Torretti, 1996): massa e energia são a mesma propriedade dos sistemas físicos, portanto não faz sentido falar em “conversão”. Esta visão reflete a noção de Minkowski (seção IX.1) de que espaço e tempo estão fundamentalmente unidos. Ela também pode levar à consequência ontológica de que matéria e campos não podem ser distinguidos (Einstein & Infeld, 1938).

¹⁰³ Seguimos aqui FERNFLORES, F. (2019), “The equivalence of mass and energy”, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, online. Há uma tradução feita da versão de 2012: “A equivalência entre massa e energia”, trad. R.S. Lapa, *Pólemos* (Brasília) 1(2): 210-6 (2012). TAYLOR, E.F. & WHEELER, J.A. (1992), *Spacetime physics: introduction to special relativity*, 2ª ed., W.H. Freeman, New York. A análise do experimento de Cockcroft & Walton (1932), usando dados de Aston (1927), está numa carta de BAINBRIDGE, K.T. (1933), “The equivalence of mass and energy”, *Physical Review* 44: 123. A interpretação (2) está em BONDI, H. & SPURGIN, C.B. (1987), “Energy has mass: a common misunderstanding is re-examined”, *Physics Bulletin* 38: 62-63; BAIERLEIN, R. (2007), “Does nature convert mass into energy?”, *American Journal of Physics* 75: 320-25.

(2) *Interpretações de diferentes-propriedades e não-conversão* (Bondi & Spurgin, 1987; Baierlein, 2007): massa e energia são propriedade diferentes, e o que aparenta ser um processo de conversão é na verdade um processo de transformação de energia, conservando as massas. O exemplo (c) do bombardeamento do lítio por prótons (Fig. IX.4) era tradicionalmente interpretado como um exemplo de *conversão* de massa em energia, mas a partir da análise de Bondi & Spurgin (1987) isso passou a ser visto como uma *transformação* de parte da energia potencial entre os núcleons (que contribui para a massa de repouso do lítio) em energia cinética dos produtos. “Massa da energia potencial diminuiu e massa da energia cinética aumentou. A energia foi conservada e a massa foi conservada, cada qual separadamente” (BONDI & SPURGIN, p. 63). Por outro lado, como aponta Fernflores, o aniquilamento de férmions do exemplo (d) não consegue ser explicado diretamente por esta interpretação, apesar da tentativa de BAIERLEIN (2007, p. 323).

(3) *Interpretações de diferentes-propriedades e conversão* (Rindler, 1977): massa e energia são propriedade diferentes, mas pode haver conversão entre elas, não no exemplo do lítio (c), mas sim no de aniquilamento (d).

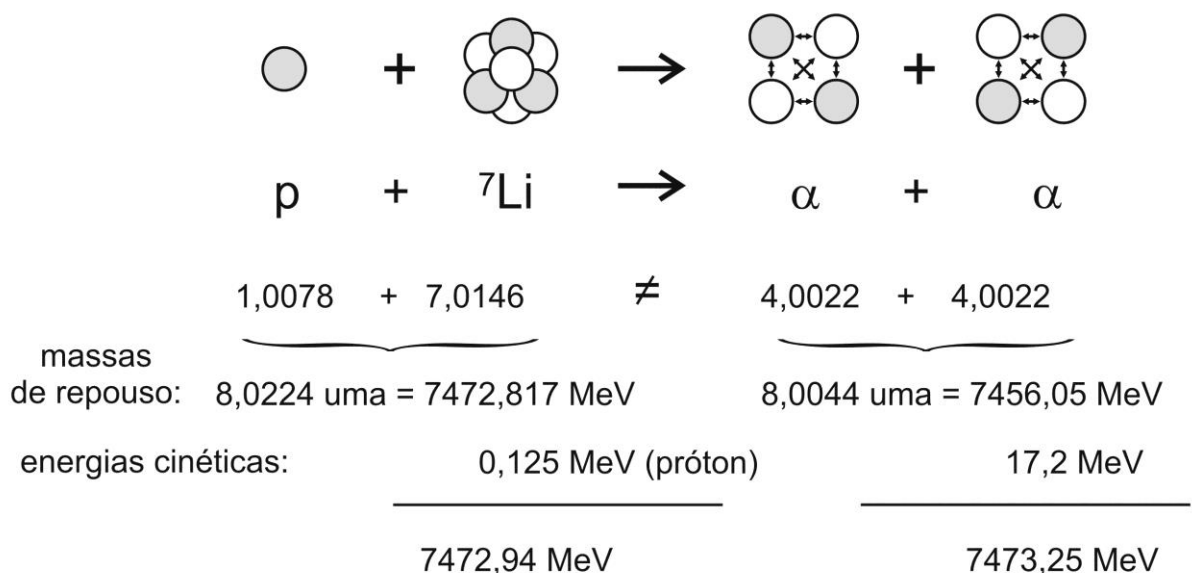


Figura IX.4. Balanço de massa e energia de uma reação nuclear realizada por Cockcroft & Walton (1932), segundo análise de Bainbridge (1933). A diferença de massa entre os reagentes e os produtos é 0,018 uma (unidades de massa atômica), equivalendo a 16,8 MeV, o que é próximo da diferença de energias cinéticas, de 17,1 (o núcleo de lítio estava em repouso). Isso é indicado de outra maneira na figura, onde aparecem as energias totais, cuja diferença é 0,3 MeVs. Em relação à energia cinética final, essa diferença é de 2%, justificando a conclusão de Bainbridge de que “dentro do erro provável das medições, a equivalência de massa e energia é satisfeita”. O núcleo de ⁴He (partícula α) é representado indicando as forças (relacionadas às energias potenciais) entre os núcleons, indicando, na interpretação de Bondi & Spurgin, que as energias cinéticas finais provêm de parte da energia potencial inicial do núcleo de lítio (as forças análogas no ⁷Li não estão mostradas na figura). Com valores atualmente aceitos para as massas de ⁴He e ⁷Li (respectivamente 4,0026 e 7,0160), a diferença cai para 1%.