

## Experimentos Relativísticos 1: Dilatação temporal em múons

Em 1940, o físico italiano Bruno Rossi e seu colega David B. Hall, da Universidade de Chicago, decidiram estudar partículas de raios cósmicos, conhecidos então como “mésotrons”, para determinar sua taxa de decaimento, ou seja, o tempo médio que uma dessas partículas subsiste antes de se transformar em outras partículas.<sup>1</sup> Para isso, compararam o número de partículas detectadas no topo de uma montanha no Colorado com o número medido 1600 m abaixo. Ao fazerem esse estudo, tiveram que levar em conta o efeito relativístico da “dilatação do tempo” no referencial das partículas em movimento, de forma que seu estudo foi um dos primeiros testes desta previsão da Teoria da Relatividade Restrita.<sup>2</sup>

Para estudar esse experimento, vale a pena nos concentrarmos na versão mais didática realizada por David Frische & James Smith (1963).<sup>3</sup> Hoje em dia, a partícula estudada por Rossi & Hall se chama *múon*, fazendo parte da família dos léptons, do qual faz parte também o elétron, que tem massa 200 vezes menor, e os neutrinos.

Os múons dos raios cósmicos são criados no alto da atmosfera, após os prótons vindos de outras galáxias chocarem-se com as moléculas da atmosfera, produzindo píons, que rapidamente decaem gerando múons e neutrinos. Em torno de 100 múons atravessam nosso corpo por segundo, enquanto dormimos numa praia. Os múons decaem exponencialmente com uma vida média de  $\bar{T} = 2,21 \cdot 10^{-6}$  s, conforme se vê na Fig. 4, transformando-se em um elétron (ou pósitron) e neutrinos. O decaimento exponencial tem a propriedade curiosíssima de “não ter memória”, ou seja, a probabilidade de um múon decair independe de quanto tempo ele já existiu.



Fig. 1: Bruno Rossi (1905-93) e sua bela gravata tricotada.

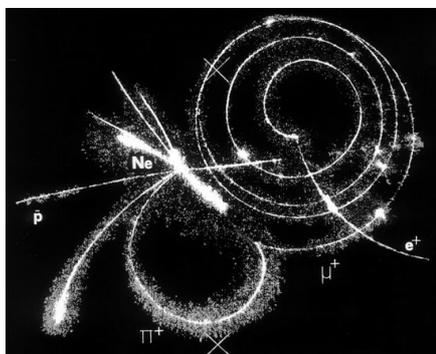


Fig. 2: Um antipróton colide com um núcleo do gás neônio, em um campo magnético, gerando um píon  $\pi^+$ , que decai em um múon  $\mu^+$  (e neutrino), que decai em um pósitron  $e^+$  (e dois neutrinos) (Fonte: G. Piragino, Experimento PS179, CERN, Genebra, 1996).



Fig. 3: Concepção artística do múon (por Sérgio Kon).<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ROSSI, B. & HALL, D.B. (1941), “Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum”, *Physical Review* 59: 223-8.

<sup>2</sup> O primeiro teste foi feito por Ives & Stilwell, em 1938, envolvendo o deslocamento de frequência de linhas de espectro atômico por efeito Doppler “transverso”, para moléculas de hidrogênio (raios de canal) rumando em dois sentidos de movimento. Os autores citaram o experimento como um teste da “teoria de Lorentz e Larmor”.

<sup>3</sup> FRISCH, D.H. & SMITH, J.H. (1963), “Measurement of the relativistic time dilation using  $\mu$ -mesons”, *American Journal of Physics* 31: 342-55. O filme didático deste experimento está em <http://www.scivee.tv/node/2415>.

<sup>4</sup> ABDALLA, MARIA CRISTINA B. (2004), *O discreto charme das partículas elementares*, ilustrações de Sérgio Kon, Unesp, São Paulo, p. 69.

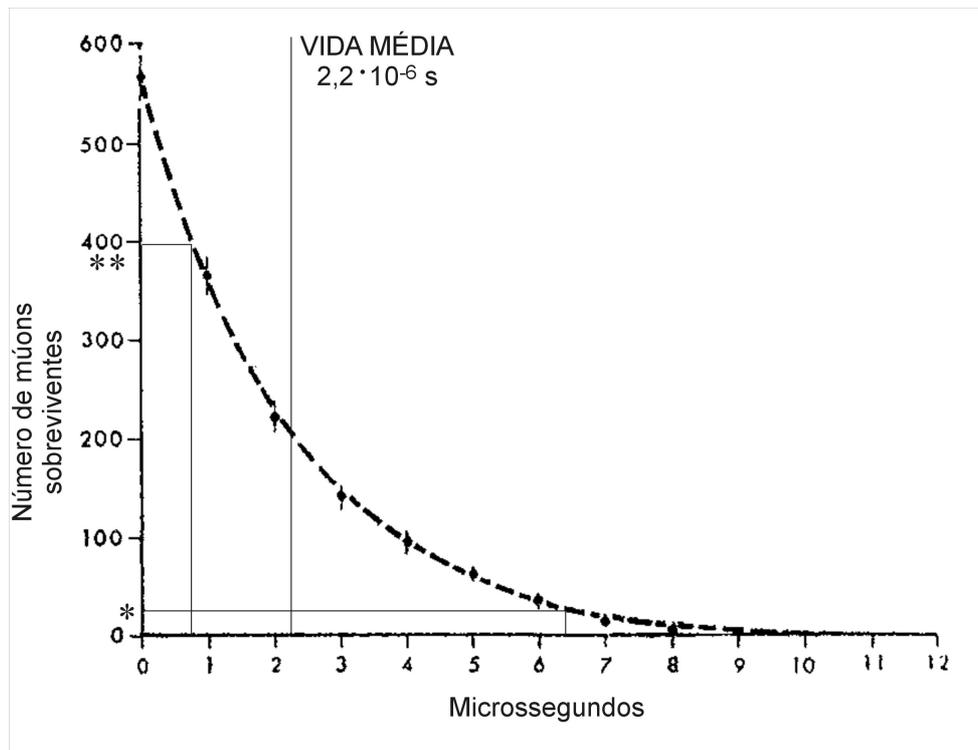


Fig. 2: Curva de decaimento exponencial do múon, medido em quase repouso no cintilador (adaptado de FRISCH & SMITH, 1963, p. 347). A marcação \* indica o número de múons (30) que deveriam sobreviver ao chegar ao nível do mar, segundo a Física Clássica, após 6,41 milissegundos. A marcação \*\* indica o número *medido* de múons no nível do mar (397), que segundo o gráfico estaria associado a um intervalo de tempo de 0,72 milissegundos. A dilatação temporal  $\gamma$  é dada pela razão desses dois valores temporais.

Frisch & Smith mediram o número de múons incidindo por segundo em um detector no alto do Monte Washington, de altura 1907 m, e a taxa medida no MIT, ao nível do mar em Cambridge, Massachussets, e à mesma latitude. O detector usado foi um *cintilador*, que consiste de um material que gera um pulso de luz por “luminiscência”, na passagem de uma partícula eletricamente carregada. No experimento, o cintilador consiste de uma base de plástico, dopado com alguma substância fluorescente que acentua a emissão de luz. Esta luz é então detectada em uma fotomultiplicadora.

Os múons medidos foram selecionados em uma faixa estreita de velocidades. Isso foi feito colocando-se o detector abaixo de uma camada de 76 cm de ferro, no Monte Washington, de forma que a grande maioria dos múons viajando a uma velocidade menor do que  $0,9950 c$  (onde  $c$  é a velocidade da luz) acaba sendo parada pela interação elétrica com os elétrons do ferro (a absorção pelos núcleos é desprezível). A passagem dos múons pelo detector gera um pulso único, mas às vezes um outro pulso pode ser detectado, correspondendo à emissão de um elétron no cintilador. Isso significa que este múon foi parado e decaiu, e o seu tempo de decaimento medido e plotado na Fig. 2. São apenas estes múons que são contados no experimento. Por outro lado, múons mais velozes do que  $0,9954 c$  tendem a passar pelo cintilador sem serem absorvidos, apesar de deixarem um pulso no detector: esses não são contados no experimento. Em uma hora de medição, contaram  $563 \pm 10$  múons, ou seja, um média de 563 com um erro estimado de mais ou menos 10. Este fator teve que ser corrigido para descontar as coincidências fortuitas entre múons (que não pararam no cintilador) e elétrons (que são originados de outros múons, não registrados). Assim, o valor utilizado foi 550.

Em Cambridge, a ideia seria estimar quantos daqueles 550 múons, selecionados com velocidade em torno de  $0,9952 c$ , chegariam ao nível do mar. Imaginemos um conjunto de 550 múons com mesma energia passando pela altitude do primeiro experimento e caindo sobre o detector em Cambridge. Eles seriam parcialmente desacelerados pelos elétrons da camada de 1907 m de ar, de forma que, para pará-los no cintilador, seria necessária uma camada mais fina de ferro do que aquela usada em cima da montanha.



Fig. 5. James Smith manuseia a fotomultiplicadora, a ser colocada abaixo do cintilador, de formato cilíndrico. Ao fundo veem-se os tijolos de ferro, embaixo do qual seria colocado o detector.

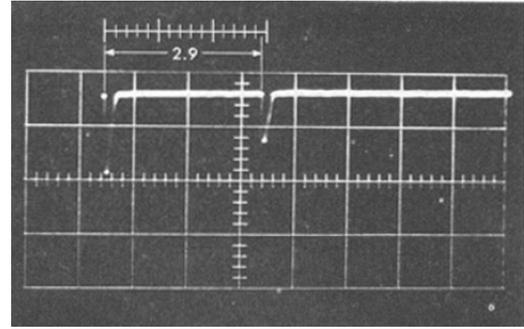


Fig. 6. Exemplo da leitura feita no osciloscópio. O pulso da esquerda é o do múon, ao passo que o da direita é o do elétron, indicando o decaimento deste múon específico após 2,9 milissegundos (FRISCH & SMITH, 1963, pp. 344-5).

Qual seria o número esperado de múons detectados a nível do mar? Para fazer esta estimativa, é preciso levar em conta o quanto os múons desaceleram na atmosfera, e o resultado calculado por Frisch & Smith corresponde a uma velocidade média de  $\bar{v} = 0,992 c$ . Assim, o tempo de queda, medido no referencial do laboratório, pode ser calculado, considerando que a velocidade da luz é  $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s:  $\Delta t = d/\bar{v} = 1907 / (0,992 \cdot 2,998 \cdot 10^8) = 6,41 \cdot 10^{-6}$  s .

Olhando para o gráfico da Fig. 4, vemos que, após este intervalo de tempo, o número de múons a ser detectado no cintilador no MIT é em torno de 30 múons. Isso pode ser calculado usando a expressão  $N = N_0 \cdot e^{-t/\bar{T}}$ , para o número  $N$  de múons sobreviventes após um tempo  $t$ . No entanto, a contagem experimental de eventos forneceu  $408 \pm 9$  múons, o que deve ser corrigido para o valor 397. Como explicar esta diferença entre 30 e 397?

A chave é considerar que o tempo médio de decaimento do múon tem o valor de  $\bar{T} = 2,21 \cdot 10^{-6}$  s apenas no referencial de repouso do múon. De fato, os tempos de decaimento medidos (Fig. 4) correspondem a múons a velocidades muito baixas, quase em repouso em relação ao laboratório.

Olhando para a Fig. 4, podemos estimar qual o tempo transcorrido que corresponderia a um número final de 397 múons, ou calcular usando a expressão do decaimento exponencial, obtendo  $\Delta t' = 0,72 \cdot 10^{-6}$  s . Usando agora a expressão para a dilatação do tempo,  $\Delta t = \gamma \Delta t'$ , obtemos para o valor experimental do fator de Lorentz:  $\gamma_{\text{exp}} = 8,9 \pm 0,8$ .

Vejamos agora como este resultado se compara com o cálculo relativístico para a dilatação do tempo no referencial do múon (em relação ao laboratório). Ao invés de trabalhar com a velocidade média do múon, é mais correto trabalhar com a energia média; como esta é proporcional ao fator de Lorentz  $\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , devemos estimar o valor médio de  $\gamma$ . Para as velocidades inicial e final,  $0,9952 c$  e  $0,989 c$ , os fatores  $\gamma$  são respectivamente 10,2 e 6,8 , de forma que a média é 8,4. Assim, o valor teórico a ser comparado com o experimental é  $\gamma_{\text{teo}} = 8,4 \pm 2$ .

Vemos assim que há uma boa concordância entre o experimento e a Teoria da Relatividade Restrita, que prevê o fenômeno da dilatação do tempo.