13. A inércia de um corpo depende do seu conteúdo energético?*

por A. Einstein

Os resultados de um estudo sobre eletrodinâmica que publiquei recentemente nestes anais[1]) conduzem a uma consequência muito interessante, que será derivada aqui.

Assumi lá as equações de Maxwell-Herz no espaço vazio junto com a expressão Maxwelliana para a energia eletromagnética do espaço e, além disso, o princípio:

as leis, segundo as quais os estados dos sistemas físicos mudam, são independentes em relação a qual de dois sistemas de coordenadas, que estão em movimento de transporte paralelo uniforme um em relação ao outro, essas mudanças de estado são relatadas (princípio da relatividade) .

Com base nestes fundamentos[2]) eu deduzi, entre outras coisas, o seguinte resultado (l. c. § 8):

um sistema de ondas de luz planas possui, referido ao sistema de coordenadas (x, y, z), energia l; a direção da radiação (normal de onda) forma o ângulo φ com o eixo x do sistema. Ao introduzir um novo sistema de coordenadas (ξ, η, ζ), em movimento de translação paralela em direção ao sistema (x, y, z), cuja origem se move ao longo do eixo x com velocidade v, a quantidade de luz acima mencionada tem energia — medida no sistema (ξ, η, ζ):[3]

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \, , \tag{1}$$

onde V representa a velocidade da luz. Aproveitamos desse resultado a seguir.

Esteja agora no sistema (x, y, z) um corpo em repouso, cuja energia — referida ao sistema (x, y, z) — é E_0. Em relação ao sistema (ξ, η, ζ), movendo-se como dito acima com a velocidade v, seja a energia do corpo H_0.

Este corpo envia em uma direção que forma um ângulo φ com o eixo x ondas de luz planas de energia $L/2$ (medida em relação ao sistema (x, y, z)) e, ao mesmo tempo, uma quantidade equivalente de luz na direção oposta. Enquanto isso, o

*Título original: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*. Publicado em: *Annalen der Physik* 18 (1905): 639–641. Traduzido por Oliver F. Piattella.

[1]A. Einstein, Ann. d. Physik **17.** p. 891. 1905.

[2]O princípio de constância da velocidade da luz usado lá está obviamente contido nas equações de Maxwell.

[3]**Nota do tradutor:** no artigo original de Einstein as equações não são numerados.

corpo permanece em repouso em relação ao sistema (x, y, z). Para este processo o princípio de conservação de energia deve ser válido e certamente (de acordo com o princípio da relatividade) em relação a ambos os sistemas de coordenadas. Chamamos E_1, respectivamente H_1, a energia do corpo após a emissão da luz, medida em relação ao sistema (x, y, z), respectivamente (ξ, η, ζ), assim obtemos, através do uso da relação dada acima:

$$E_0 = E_1 + \left[\frac{L}{2} + \frac{L}{2}\right] , \tag{2}$$

$$H_0 = H_1 + \left[\frac{L}{2}\frac{1 - \frac{v}{V}\cos\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} + \frac{L}{2}\frac{1 + \frac{v}{V}\cos\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}\right] = H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} . \tag{3}$$

Por subtração, obtemos a partir dessas equações:

$$(H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L\left\{\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1\right\} . \tag{4}$$

Ambas as diferenças de $H - E$ que aparecem nesta expressão têm significados físicos simples. H e E são valores de energia do mesmo corpo, referindo-se a dois sistemas de coordenadas em movimento relativo um em relação ao outro, enquanto o corpo permanece em repouso em um dos dois sistemas (o (x, y, z)). É portanto claro que a diferença $H - E$ pode diferir da energia cinética do corpo referida ao outro sistema (o sistema (ξ, η, ζ)) apenas por uma constante aditiva C, que depende da escolha da constante aditiva arbitrária das energias E e H. Podemos, portanto, estabelecer:

$$H_0 - E_0 = K_0 + C , \tag{5}$$
$$H_1 - E_1 = K_1 + C , \tag{6}$$

já que C não muda durante a emissão de luz. Então, temos:

$$K_0 - K_1 = L\left\{\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1\right\} . \tag{7}$$

A energia cinética do corpo em relação a (ξ, η, ζ) diminui devido à emissão de luz, e de uma quantidade que não depende em nada das características do corpo. Além disso, a diferença $K_0 - K_1$ depende da velocidade da mesma forma que a energia cinética do elétron depende dela (l. c. § 10).

Negligenciando as quantidades da quarta ordem e acima, podemos estabelecer:

$$K_0 - K_1 = \frac{L}{V^2}\frac{v^2}{2} . \tag{8}$$

Desta equação segue-se imediatamente:

se um corpo libera uma energia L na forma de radiação, sua massa diminui de L/V^2. A respeito disso, é claramente desnecessário que a energia retirada do corpo se transforme em energia de radiação, de modo que somos levados à seguinte conclusão geral:

a massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo de energia; mudar a energia de L muda a massa no mesmo sentido de $L/9 \cdot 10^{20}$, se a energia for medida em erg e a massa em gramas.

Não está excluído que para corpos cujo conteúdo de energia é altamente variável (por exemplo para sais de rádio), é possível obter uma prova da teoria.

Se a teoria corresponder aos fatos, então radiação transfere inércia do corpo emissor para o outro absorvente.

Berna, setembro 1905

(Submetido no 27 setembro de 1905)