13. L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto energetico?*

di A. Einstein

I risultati di uno studio sull'elettrodinamica da me recentemente pubblicato in questi annali[1]) portano a una conseguenza molto interessante, che verrà derivata qui.

Io presupposi là le equazioni di Maxwell-Herz nello spazio vuoto insieme all'espressione maxwelliana per l'energia elettromagnetica dello spazio e, oltre a ciò, il principio:

le leggi, secondo le quali gli stati dei sistemi fisici mutano, sono indipendenti rispetto a quale di due sistemi di coordinate, che si trovano in movimento di trasporto parallelo uniforme uno rispetto all'altro, questi cambi di stato vengono riferiti (principio di relatività).

Basato su queste fondamenta[2] derivai, tra l'altro, il seguente risultato (l. c. § 8):

un sistema di onde di luce piane possiede, riferito al sistema di coordinate (x, y, z), energia l; la direzione di radiazione (normale d'onda) forma l'angolo φ con l'asse x del sistema. Introducendo un nuovo sistema di coordinate (ξ, η, ζ), in movimento di traslazione parallela verso il sistema (x, y, z), la cui origine si muove lungo l'asse x con velocità v, la suddetta quantità di luce possiede energia — misurata nel sistema (ξ, η, ζ):[3]

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

dove V rappresenta la velocità della luce. Facciamo uso di questo risultato nel seguito.

Si trovi ora nel sistema (x, y, z) un corpo in riposo, la cui energia — riferita al sistema (x, y, z) — sia E_0. Relativa al sistema (ξ, η, ζ), come sopra in movimento con velocità v, sia l'energia del corpo H_0.

Questo corpo invia in una direzione che forma un angolo φ con l'asse x onde di luce piane di energia $L/2$ (misurata relativamente al sistema (x, y, z)) e allo stesso

---

*Titolo originale: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*. Pubblicato in: *Annalen der Physik* 18 (1905): 639–641. Tradotto da Oliver F. Piattella.

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

[2] Il principio della costanza della velocità della luce usato là è ovviamente contenuto nelle equazioni di Maxwell.

[3] **Nota del traduttore:** nell'articolo originale di Einstein le equazioni non sono numerate.

tempo una quantità di luce equivalente nella direzione opposta. Nel mentre, il corpo rimane a riposo in riferimento al sistema (x, y, z). Per questo processo deve valere il principio di conservazione dell'energia e certamente (secondo il principio di relatività) in relazione a entrambi i sistemi di coordinate. Chiamiamo E_1, rispettivamente H_1, l'energia del corpo dopo l'emissione di luce, misurata relativamente al sistema (x, y, z), rispettivamente (ξ, η, ζ), così otteniamo, attraverso l'uso della relazione data sopra:

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

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

Per sottrazione si ottiene da queste equazioni:

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

Entrambe le differenze di forma $H - E$ che appaiono in questa espressione hanno semplici significati fisici. H e E sono valori dell'energia dello stesso corpo, riferiti a due sistemi di coordinate in movimento relativo uno rispetto all'altro, mentre il corpo rimane a riposo in uno dei due sistemi (il sistema (x, y, z)). È quindi chiaro che la differenza $H - E$ può differire dall'energia cinetica del corpo riferita all'altro sistema (il sistema (ξ, η, ζ)) solo per una costante additiva C, che dipende dalla scelta della costante additiva arbitraria delle energie E e H. Possiamo dunque stabilire:

$$H_0 - E_0 = K_0 + C \ , \tag{5}$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C \ , \tag{6}$$

dato che C non cambia durante l'emissione di luce. Quindi otteniamo:

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

L'energia cinetica del corpo in relazione a (ξ, η, ζ) decresce a causa dell'emissione di luce, e di un ammontare che non dipende affatto dalle caratteristiche del corpo. Inoltre, la differenza $K_0 - K_1$ dipende dalla velocità nello stesso modo in cui ne dipende l'energia cinetica dell'elettrone (l. c. § 10).

Trascurando grandezze del quarto ordine e superiori, possiamo stabilire:

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

Da questa equazione segue immediatamente:

se un corpo cede sotto forma di radiazione una energia L, la sua massa diminuisce di L/V^2. Riguardo a ciò, è chiaramente inessenziale che l'energia sottratta al corpo si trasformi in energia di radiazione, cosicché siamo portati alla seguente conclusione generale:

la massa di un corpo è una misura del suo contenuto energetico; cambiando l'energia di L, cambia la massa nello stesso senso di $L/9 \cdot 10^{20}$, se l'energia viene misurata in erg e la massa in grammi.

Non è escluso che per corpi il cui contenuto di energia è altamente variabile (per esempio per i sali di radio), si riesca ad ottenere una prova della teoria.

Se la teoria corrisponde ai fatti, allora la radiazione trasferisce inerzia dal corpo emittente all'altro assorbente.

Berna, settembre 1905

(Ricevuto il 27 settembre 1905)