L'inertie d'un corps dépend-elle de son niveau d'énergie ?

Albert Einstein

Annalen der Physik (1905) *

Les résultats d'une étude électrodynamique que j'ai récemment publiée dans ces Annales [a] conduisent à une conclusion très intéressante, qui doit être déduite ici. Je me suis basé sur les équations de Maxwell-Hertz pour l'espace vide, ainsi que sur l'expression de Maxwell pour l'énergie électromagnétique de l'espace, et j'ai également établi le principe suivant :

Les lois qui régissent les changements d'état des systèmes physiques sont indépendantes du système de coordonnées auquel ces changements d'état se rapportent parmi deux systèmes de coordonnées en mouvement de translation parallèle uniforme l'un par rapport à l'autre (principe de relativité).

En me basant sur ces principes [b], j'en ai déduit, entre autres, le résultat suivant (1-c. § 8) :

Un système d'ondes lumineuses planes possède, par rapport au système de coordonnées (x, y, z), l'énergie l ; la direction du rayon (normale à l'onde) forme l'angle ϕ avec l'axe x du système. Si l'on introduit un nouveau système de coordonnées (ξ, η, ζ) en translation parallèle uniforme par rapport au système (x, y, z), dont l'origine se déplace à la vitesse v le long de l'axe x, la quantité de lumière mentionnée – mesurée dans le système (ξ, η, ζ) – possède l'énergie :

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

où V est la vitesse longitudinale. C'est ce résultat que nous utiliserons dans la suite.

Il y a maintenant dans le système (x, y, z) un corps au repos dont l'énergie – par rapport au système (x, y, z) – est E_0. Par rapport au système (ξ, η, ζ) se déplaçant à la vitesse v comme ci-dessus, l'énergie du corps est H_0.

Ce corps émet dans une direction formant un angle ϕ avec l'axe x des ondes lumineuses planes d'une énergie L/2 (mesurée par rapport à (x, y, z)) et simultanément une quantité égale de lumière dans la direction opposée. Le corps reste alors au repos par rapport au système (x, y, z). Le principe de l'énergie doit s'appliquer à ce processus et ce (selon le principe de la relativité) par rapport aux deux systèmes de coordonnées. Si nous appelons E_1 ou H_1 l'énergie du corps après l'émission de lumière mesurée par rapport au système (x, y, z) ou (ξ, η, ζ), nous obtenons en utilisant la relation indiquée ci-dessus :

$$\begin{aligned}
\mathrm{E}_0 &= \mathrm{E}_1 + \left[\frac{\mathrm{L}}{2} + \frac{\mathrm{L}}{2}\right],\\
\mathrm{H}_0 &= \mathrm{H}_1 + \left[\frac{\mathrm{L}}{2}\frac{1-\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V}}\cos}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V}}\right)^2}} + \frac{\mathrm{L}}{2}\frac{1-\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V}}\cos}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V}}\right)^2}}\right],\\
&= \mathrm{H}_1 + \frac{\mathrm{L}}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V}}\right)^2}}.
\end{aligned}$$

Par soustraction, on obtient ces coefficients :

$$(\mathrm{H}_0-\mathrm{E}_0)-(\mathrm{H}_1-\mathrm{E}_1) = \mathrm{L}\left[\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V}}\right)^2}}-1\right].$$

Les deux différences de la forme H – E qui apparaissent dans cette expression ont des significations physiques simples. H et E sont des valeurs d'énergie du même corps, par rapport à deux systèmes de coordonnées en mouvement l'un par rapport à l'autre, le corps étant au repos dans l'un des systèmes (système (x, y, z)). Il est donc clair que la différence H – E ne peut se distinguer de l'énergie cinétique K du corps par rapport à l'autre système (système (ξ, η, ζ)) que par une constante additive C, qui dépend du choix des constantes additives arbitraires des énergies H et E. Nous pouvons donc poser :

$$\begin{aligned}
\mathrm{H}_0-\mathrm{E}_0 &= \mathrm{K}_0 + \mathrm{C},\\
\mathrm{H}_1-\mathrm{E}_1 &= \mathrm{K}_1 + \mathrm{C},
\end{aligned}$$

puisque C ne change pas pendant l'émission de lumière. Nous obtenons donc :

$$\mathrm{K}_0-\mathrm{K}_1 = \mathrm{L}\left[\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V}}\right)^2}}-1\right].$$

*Traduit de : Einstein, A. *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energienhalt abhängig ?*, Annalen der Physik, Vol. 323, Issue 13, p.639-641 (1905). , et mis en page par Matthieu Schneider. La traduction a été réalisée avec l'aide de Deepl. Les données et notations ont été modernisées afin de faciliter la compréhension du lecteur.

a. A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891. 1905.

b. Le principe de constance de la vitesse de la lumière qui y est utilisé est bien entendu inclus dans les équations de Maxwell.

L'énergie cinétique du corps par rapport à (ξ, η, ζ) diminue par suite de l'émission de lumière, et cela d'une quantité indépendante des qualités du corps. La différence $K_0 - K_1$ dépend en outre de la vitesse, tout comme l'énergie cinétique de l'électron (l. c. § 10).

En négligeant les grandeurs d'ordre quatre et supérieur, nous pouvons poser :

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

Il découle directement de cette équation : Si un corps cède l'énergie L sous forme de rayonnement, sa masse diminue de L/V2. Il n'est apparemment pas important que l'énergie extraite du corps se transforme en énergie de rayonnement, ce qui nous amène à la conclusion plus générale : La masse d'un corps est une mesure de son contenu énergétique ; si l'énergie varie de L, la masse varie dans le même sens de $L/9 \times 10^{16}$ [c].

Il n'est pas exclu que l'on parvienne à vérifier la théorie dans le cas de corps dont le contenu énergétique est très variable (par exemple les sels de radium).

Si la théorie correspond aux faits, le rayonnement transmet de l'inertie entre les corps émetteurs et les corps absorbants.

Bern, Septembre 1905. [d]

c. NdT : Einstein n'écrit pas encore sa célèbre équation $E = mc^2$. Il la formule littéralement sur le principe dans le système d'unité CGS.

d. Reçu le 27 septembre 1905