物体の慣性はそれに含まれるエネルギーに依存するのか？

アルバート・アインシュタイン

私が最近この学術誌に公表した電気力学についての研究[1)]の結果から、非常に興味深い結論が導かれるので、ここにそれを示す。

ここで基礎となるのは、真空中の Maxwell-Hertz 方程式、空間の電磁エネルギーに対する Maxwell の表式、および相対性原理、すなわち

> 物理系の状態変化を支配する法則は、互いに等速並進運動しているどの座標系においても同じである

という原理である。これらの原理[2)]から、とりわけ以下の結果が導かれた (文献 1 の §8)：

> 光の平面波が座標系 (x, y, z) においてエネルギー l を持っていたとする。光の伝播方向（波面に垂直方向）は、x 軸に対して角度 φ を向いているとする。新しい座標系 (ξ, η, ζ) を導入する。この座標系は (x, y, z) 系に対して等速並進運動をしており、その原点は x 軸方向に速度 v で運動しているとする。すると、この光のエネルギーを (ξ, η, ζ) 系で観測すると
>
> $$l^* = l \, \frac{1 - \dfrac{v}{V} \cos\varphi}{\sqrt{1 - v^2/V^2}}$$
>
> となる。ここで、V は光の速度である。

この結果を以下で用いる。

さて、(x, y, z) 系で静止しているある物体があり、(x, y, z) 系でのそのエネルギーを E_0 とする。一方、それに対して速度 v で動いている座標系 (ξ, η, ζ) におけるこの物体のエネルギーを H_0 とする。

---

*) A. Einstein, Annalen der Physik **18**, 639 (1905). "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?" 日本語訳：中西　秀

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. **17**. p.891, 1905.

2) そこで用いられた光速普遍の原理はもちろん Maxwell 方程式から導かれる。

ここで、この物体がx軸に対して角度φの方向に平面波の光を放出し、その放出された光のエネルギーを(x,y,z)系において$\dfrac{1}{2}L$としよう。それと同時に、この物体が同じ量の光を反対方向に放出したとする。それでも、この物体は(x,y,z)系に対して静止している。エネルギー保存則は、（相対性原理に従って）どちらの座標系においても、この過程に対して成り立たなければならない。光を放出した後の物体のエネルギーが、(x,y,z)系および(ξ,η,ζ)系において、それぞれE_1およびH_1とすると、上で与えた表式を用いて、

$$
\begin{aligned}
E_0 &= E_1 + \frac{1}{2}L + \frac{1}{2}L, \\
H_0 &= H_1 + \frac{1}{2}L\,\frac{1-\dfrac{v}{V}\cos\varphi}{\sqrt{1-v^2/V^2}} + \frac{1}{2}L\,\frac{1+\dfrac{v}{V}\cos\varphi}{\sqrt{1-v^2/V^2}} \\
&= H_1 + \frac{L}{\sqrt{1-v^2/V^2}}
\end{aligned}
$$

を得る。これらの式の差をとると、

$$
\bigl(H_0 - E_0\bigr) - \bigl(H_1 - E_1\bigr) = L\left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/V^2}} - 1\right)
$$

を得る。

この表式に現れる$H-E$の形の2つの量は簡単な物理的意味を持っている。HとEは同じ物体の異なる座標系におけるエネルギーで、2つの座標系は相対的に運動しており、物体は(x,y,z)系に対して静止している。それ故、これらの差$H-E$は座標系(ξ,η,ζ)における運動エネルギーKであるか、それと異なるとしても、エネルギーHあるいはEに対して取りうる任意の付加定数Cでしかないことは明らかである。この付加定数Cは光の放出前後で変化しないので、

$$
\begin{aligned}
H_0 - E_0 &= K_0 + C \\
H_1 - E_1 &= K_1 + C
\end{aligned}
$$

と書けるだろう。これらより、

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

を得る。つまり、(ξ,η,ζ)系における物体の運動エネルギーは光を放出した結果減少し、その減少量は物体の性質にはよらない。更に、この

差 $K_0 - K_1$ の速度依存性は、電子の運動エネルギーの速度依存性（文献 1 の §10）と同じである。

4 次以上の項を無視すると、

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

を得る。この表式より、以下のことが直ちに導かれる：

> 物体がエネルギー L を放射で失うと、その質量は L/V^2 だけ減少する。

物体から引き出されたエネルギーが放射エネルギーとして放出されたということが重要でないのは明らかである。そこで、我々はより一般的な結論、

> 物体の質量はそれが含んでいるエネルギーの尺度である

に導かれる。もし、エネルギーをエルグで測り、質量をグラムで測ったとすると、物体のエネルギーが L[erg] だけ変化すれば、その質量は $L/9 \times 10^{20}$[g] だけ変化する。

例えばラジウム塩のように、含まれるエネルギーが大きく変化する物質を用いれば、この理論を検証することは不可能ではないだろう。

この理論が正しければ、光を放射する物体から吸収する物体へ質量が伝送される。

ベルン、1905 年 9 月

（1905 年 9 月 27 日、受理）