

Albert Einstein (1879–1955) był nie tylko uczonym, ale też popularyzatorem fizyki, a w pewnym sensie także publicystą naukowym. Zamieszczony obok jego artykuł popularny „Elementary Derivation of the Equivalence of Mass and Energy” nie znany jest szerokim kręgom, zapewne dlatego, że Einstein opublikował go w mało znanym fizykom piśmie izraelskim [Technical Journal (Haifa), 1946, V, 16–17]. Niniejszy tekst jest tłumaczeniem z rosyjskiego przekładu artykułu [Albert Einstein, *Sobranije naucznych trudow*, tom 2, 650–652, Izd. „Nauka”, Moskwa 1966].

Elementarne wyprowadzenie równoważności masy i energii

Albert EINSTEIN

Przedstawione tu wyprowadzenie prawa równoważności, dotychczas nigdzie nie publikowane, ma dwie zalety. Chociaż wykorzystuje się w nim szczególną zasadę względności, nie wymaga to jednak stosowania formalnego aparatu teorii; dowód opiera się jedynie na trzech znanych wcześniej prawach:

- (1) zasadzie zachowania pędu,
- (2) wyrażeniu na pęd promieniowania, czyli — na pęd pakietu falowego poruszającego się w danym kierunku,
- (3) znanym wyrażeniu dla aberracji światła (wpływu ruchu Ziemi na widziane z Ziemi położenie nieruchomych gwiazd, czyli — na prawie Bradleya).

Rozpatrzmy teraz następujący układ. Niech ciało B spoczywa swobodnie w przestrzeni względem układu odniesienia K_0 . Dwa pakiety falowe S i S', o energii $E/2$ każdy, poruszają się odpowiednio w dodatnim i ujemnym kierunku osi x_0 , padają na ciało i są przez nie pochłonięte. W wyniku tego procesu energia ciała zwiększa się o E . Ciało B pozostaje przy tym w spoczynku względem układu K_0 , a wynika to z symetrii zagadnienia.

Rozważmy teraz ten sam proces z układu odniesienia K poruszającego się względem układu K_0 ze stałą prędkością v w ujemnym kierunku osi z_0 . W układzie K rozważany proces opisuje się następująco: ciało B porusza się w dodatnim kierunku osi z z prędkością v . Kierunki dwóch pakietów falowych w układzie K tworzą z osią x kąt α . Zgodnie z prawem

aberracji, w pierwszym przybliżeniu zachodzi związek: $\alpha = \frac{v}{c}$, gdzie c — prędkość światła.

Z rozważań dotyczących przebiegu procesu w układzie K_0 wiemy, że prędkość ciała B po pochłonięciu pakietów falowych S i S' nie ulegnie zmianie.

Zastosujemy teraz do naszego układu prawo zachowania pędu dla składowych w kierunku z w układzie K.

I. Niech M oznacza masę ciała B do chwili pochłonięcia pakietów falowych; w takim razie Mv jest pędem ciała B (zgodnie z mechaniką klasyczną). Każdy pakiet falowy ma energię $E/2$, a więc — zgodnie ze znanym wnioskiem z teorii Maxwella — jego pęd ma wartość $E/2c$. Ściśle rzecz biorąc, tyle jest równy pęd pakietu falowego S względem układu odniesienia K_0 . Kiedy jednak prędkość v jest mała w porównaniu z c , wówczas pęd w układzie K ma taką samą wartość — z dokładnością do wielkości małej drugiego rzędu ($\frac{v^2}{c^2}$ w porównaniu z 1).

Wartość składowej tego pędu wzdłuż osi z jest równa $\frac{E}{2c} \sin \alpha$, albo — z wystarczającą dokładnością

(jeśli pominąć wielkości małe wyższych rzędów) — $\frac{E}{2c} \alpha$, lub $\frac{E}{2} \frac{v}{c^2}$. Zatem składowe pędów

pakietów falowych S i S' wzdłuż osi z są w sumie równe $E \frac{v}{c^2}$. Tak więc pęd całkowity układu

przed aktem pochłonięcia jest równy

$$Mv + \frac{E}{c^2} v.$$

II. Niech M' oznacza masę ciała B po akcie pochłonięcia. Z góry bierzemy tu pod uwagę możliwość zwiększenia masy po pochłonięciu energii E (jest to konieczne na to, aby ostateczny wynik naszych obliczeń był niesprzeczny). Wobec tego pęd układu po akcie pochłonięcia będzie równy

$$M'v.$$

Skorzystamy wreszcie z zasady zachowania pędu dla składowych wzdłuż osi z . Daje to związek

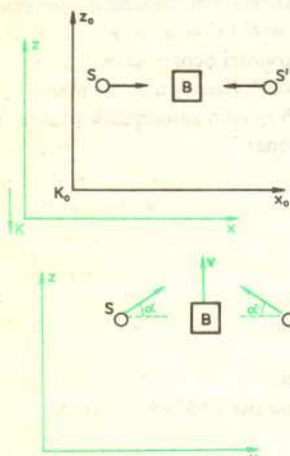
$$Mv + \frac{E}{c^2} v = M'v$$

lub

$$M' - M = \frac{E}{c^2}.$$

Związek ten wyraża prawo równoważności energii i masy. Zwiększenie energii o E wiąże się ze wzrostem masy o $\frac{E}{c^2}$. A wobec tego, że energię określa się zazwyczaj z dokładnością do stałej addytywnej, więc tę ostatnią możemy wybrać tak, aby zachodził związek:

$$E = Mc^2.$$



Aberracja światła, odkryta w 1726 r. przez astronoma angielskiego J. Bradleya, to zmiana położenia gwiazdy widzianej z Ziemi na skutek ruchu samej Ziemi. Aberracja roczna, uwarunkowana ruchem orbitalnym Ziemi wokół Słońca, widoczna jest jako ruch gwiazdy po małej łuku (jak to widać z Ziemi) orbicie eliptycznej. Aberrację można poglądowo wyjaśnić jako wynik (wektorowego) sumowania się prędkości światła gwiazdy i prędkości obserwatora (wraz z Ziemią).



Wobec tego, że $v \ll c$, gdzie c — wartość prędkości światła, więc $\sin \alpha \approx \alpha = \frac{v}{c}$ i kąt aberracji $\alpha = \frac{v}{c}$ (prawo Bradleya). Ten przybliżony wzór bardzo dobrze zgadza się z wynikami pomiarów, co oznacza, że w tym przypadku ($v \ll c$) wystarczającą dokładność obliczeń zapewnia klasyczna reguła składania prędkości Galileusza.

Ponieważ dla $\frac{v}{c} \rightarrow 0$ transformacja Lorentza przechodzi w klasyczną transformację Galileusza, więc i wyrażenie na pęd ciała ma dla małych prędkości postać klasyczną. Związek $E = pc$, spełniony dla świetlnej paczki falowej, może być udowodniony przy pomocy transformacji Lorentza i zasady względności bez uciekania się do równań Maxwella. Dowód jest elementarny, choć dosyć długi.