



Czy można używać pojęcia masy relatywistycznej?

*Paweł F. Góra
Instytut Fizyki UJ*

Odpowiedź krótka: Można, ale moim zdaniem nie należy. Jeśli zaś się tego pojęcia używa, należy być bardzo ostrożnym.

Odpowiedź długa: Pojęcie masy jako miary bezwładności (masę bezwładną) wprowadził sir Izaak Newton. Ten sam Newton, formułując swoje prawo grawitacji, posługiwał się też pojęciem masy ciężkiej – ta zaś mierzy ilość materii. W fizyce klasycznej przyjmuje się, że masa bezwładna i masa ciężka są sobie równoważne – doświadczalnie (w warunkach ziemskiego pola grawitacyjnego) pokazał to Węgier, baron Roland Eötvös. Eksperyment Eötvösa był później, wraz z postępem technik eksperymentalnych, wielokrotnie powtarzany (innymi metodami rzecz jasna, ale z uwagi na wagę problemu eksperyment pokazujący klasyczną równoważność masy bezwładnej i ciężkiej tradycyjnie nazywa się „eksperymentem Eötvösa”).

W fizyce relatywistycznej trzeba się zdecydować co przez masę rozumiemy. Zwróćmy uwagę, iż druga zasada dynamiki w sformułowaniu Newtona

$$F = ma \quad (2.14)$$

w teorii względności nie obowiązuje. Obowiązuje natomiast

$$F = \frac{dp}{dt} \quad (2.15)$$

(siła jest pochodną pędu) - na gruncie klasycznym 2.14 i 2.15 są oczywiście równoważne, jako że klasycznie

$$p = mv \quad (2.16)$$

a „masa jest stała”. We wzorach 2.14, 2.15, 2.16 i następnych F , a , v , p należy rozumieć jako wektory w R^3 . Z 2.15 widać, że prawdziwą miarą bezwładności jest pęd (trzeba zadziałać siłą, aby zmienić pęd). Masa relatywistyczna

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.17)$$

gdzie m_0 to „masa spoczynkowa”, wprowadzana jest po to, aby na gruncie relatywistycznym obowiązywał wzór 2.16. Alternatywnie można zmienić definicję pędu

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.18)$$

Oczywiście 2.16 wraz z 2.17 są dokładnie równoważne 2.18, widać jednak, że w teorii względności *albo* zachowujemy definicję pędu 2.16 i zmieniamy masę, *albo* nie zmieniamy masy, ale zmieniamy definicję pędu. Co przemawia za tym drugim?

Po pierwsze, konstatacja, że to pęd jest prawdziwą miarą bezwładności: siłą trzeba działać i wtedy, gdy wartość prędkości rośnie – rośnie wówczas także „masa relatywistyczna” – i wtedy, gdy wartość prędkości nie rośnie („masa relatywistyczna” się nie zmienia), ale zmienia się jej kierunek. Co więcej, 2.18 określa przestrzenne składowe czterowektora czteropędu cząstki, czyli podstawowego obiektu, za pomocą którego opisuje się ruch w ramach teorii względności.

Po drugie, przyjęcie 2.18 jako definicji pędu jest zgodne z uznanym w klasycznej mechanice teoretycznej podejściem, zgodnie z którym pęd jest pochodną lagranżianu względem odpowiedniej współrzędnej.

Po trzecie jest wreszcie kwestia związku pomiędzy masą bezwładną a masą ciężką – i to właśnie jest źródłem licznych nieporozumień. Grawitację opisujemy poprzez ogólną teorię względności. W tej teorii źródłem pola grawitacyjnego jest tensor energii-pędu. W tensorze tym występuje masa spoczynkowa i składowe związane z pędem cząstki, nigdzie natomiast nie występuje „masa relatywistyczna”, tymczasem bardzo wiele osób przypuszcza, że skoro „masa relatywistyczna rośnie”, to odpowiednio będzie rosło pole grawitacyjne poruszającej się cząstki, opisywane nadal wzorem Newtona, tylko z „masą relatywistyczną” zamiast „masy” – to zaś jest po prostu nieprawda. Owszem, cząstki poruszające się wytwarzają inne pole grawitacyjne, ale nie można go opisywać wzorem Newtona; co więcej, tak naprawdę w ogólnej teorii względności wzór Newtona nie obowiązuje nawet w przypadku cząstek spoczywających (vide czarne dziury Schwarzschilda) – wzór Newtona jest tylko przybliżeniem w przypadku małych mas i małych prędkości. No ale skoro mamy małe prędkości, to „masa relatywistyczna” jest równa masie spoczynkowej. A zatem jeśli chcemy przyjąć koncepcję „masy relatywistycznej”, to dodatkowo jesteśmy zmuszeni zerwać związek pomiędzy masą bezwładną a masą ciężką.

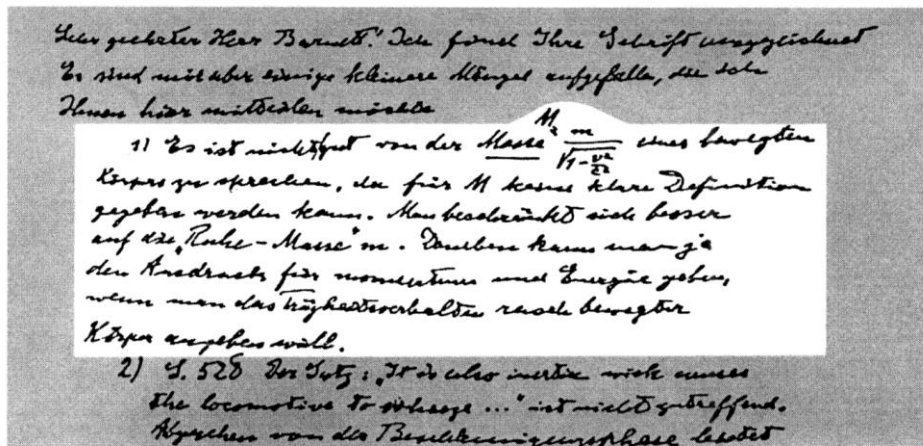
Rekapitulując: Mamy dwie możliwości

1. Przyjmujemy koncepcję masy relatywistycznej i wówczas
 - nie zmieniamy definicji pędu
 - zmieniamy definicję masy
 - tracimy związek pomiędzy masą bezwładną a masą ciężką
2. Zapominamy o masie relatywistycznej i wówczas
 - zmieniamy definicję pędu

- o zgadzamy się, że masa mierzy „ilość materii”. Wówczas „masa” to *to samo*, co „masa spoczynkowa”
- o musimy pamiętać, że dla dużych mas i/lub prędkości prawo grawitacji Newtona i tak nie obowiązuje.

Obie te konwencje są równie dobre, byle je konsekwentnie stosować. Widać jednak, że koncepcja „masy relatywistycznej” tak naprawdę niczego nowego nie wnosi, rodzi za to dużo zamieszania – dlatego też ja jestem przeciwnikiem używania tego terminu.

Przyjęcie konwencji drugiej pozwala także na związanie masy z kwadratem czteropędu P opisującego cząstkę: $m^2 c^4 = P^2$. Jest to niezmiennik transformacji Lorentza.



Letter from Albert Einstein to Lincoln Barnett, 19 June 1948. Einstein wrote in German; the letter was typed and sent in English. The highlighted passage in this excerpt says: "It is not good to introduce the concept of the mass $M = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ of a moving body for which no clear definition can be given. It is better to introduce no other mass concept than the 'rest mass' m . Instead of introducing M it is better to mention the expression for the momentum and energy of a body in motion." (Reprinted by permission of the Hebrew University of Jerusalem, Israel.)

List od Alberta Einsteina do Lincolna Barnetta (*Physics Today*, June 1989)