

Duże efekty relatywistyczne przy małych prędkościach

Ludwik Lehman¹
II LO im. M. Kopernika w Głogowie

Zasada względności została po raz pierwszy jasno wyrażona w słynnym dziele Galileusza *Dialog o dwóch najważniejszych układach świata* w 1632 roku. Dzisiaj często formułuje się ją tak: prawa fizyki są takie same we wszystkich inercjalnych układach odniesienia. Wystarczy znaleźć jeden taki układ – pozostałe poruszają się względem niego ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Zasada względności niejednokrotnie okazywała swą zadziwiająco dużą moc poznawczą. Zaledwie 20 lat po jej sformułowaniu Christiaan Huygens znakomicie zastosował ją do opisu zderzeń całkowicie sprężystych. Zrozumiał on, że wystarczy założyć jeden „oczywisty” (i łatwo sprawdzalny) wynikający z symetrii przypadek: dwie identyczne kule zderzające się z prędkościami o tej samej wartości mają po zderzeniu prędkości przeciwne. Potem zastosował zasadę względności. Wyobraźmy sobie, że opisane zderzenie przeprowadzamy na łodzi poruszającej się względem lądu (rys.1).



Rys. 1.

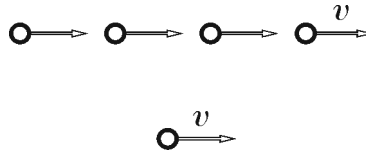
Aby otrzymać prędkości kul względem lądu, trzeba do ich prędkości względem łódki dodać prędkość samej łódki. W ten sposób stosując zasadę względności łatwo uzyskamy wzory na prędkości kul po zderzeniu dla ich dowolnych prędkości przed zderzeniem.

Przy zastosowaniu podobnych metod rozpatrzono dokładnie zderzenia sprężyste i niesprężyste jeszcze przed sformułowaniem przez Newtona zasad dynamiki.

¹ obserwatorium@wp.pl

Bardzo wdzięcznym obiektem rozważań z użyciem zasady względności Galileusza jest siła Lorentza czyli siła, jaką pole magnetyczne działa na poruszający się ładunek elektryczny. Zawsze bowiem można przejść do układu, w którym ładunek spoczywa, zatem siła Lorentza po prostu znika.

Rozważmy szczególnie prosty przypadek przedstawiony na rys. 2.



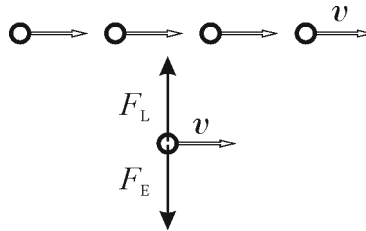
Rys. 2.

Wyobraźmy sobie bardzo długi ciąg jednakowo od siebie odległych ładunków dodatnich poruszających się z tą samą prędkością v . W pewnej odległości od tego prądu taki sam pojedynczy ładunek porusza się z tą samą prędkością. Na ładunek ten działa oczywiście siła Lorentza skierowana w stronę prądu (rys. 3) o wartości:

$$F_L = qvB. \quad (1)$$

Działa też na niego przeciwnie skierowana siła elektryczna o wartości:

$$F_E = qE. \quad (2)$$



Rys. 3. Siły działające na ładunek

Założmy, że te siły się równoważą. Siła Lorentza zależy od prędkości, a elektryczna tylko od gęstości ładunków, więc musi istnieć prędkość taka, że:

$$F_L = F_E. \quad (3)$$

Obliczmy tę prędkość. Po wstawieniu do (3) wzorów (1) i (2) otrzymujemy:

$$vB = E \quad (4)$$

Natężenie pola elektrycznego dla jednorodnie naładowanego przewodu łatwo uzyskać choćby z prawa Gaussa. Wynosi ono:

$$E = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (5)$$

gdzie ϵ_0 to przenikalność elektryczna próżni, r to odległość pojedynczego ładunku od prądu elektrycznego, a σ – liniowa gęstość ładunków (ładunek przypadający na jednostkę długości).

Wartość indukcji magnetycznej wyraża się wzorem:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\mu_0 \sigma v}{2\pi r}, \quad (6)$$

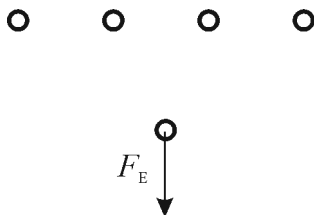
gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni, a natężenie prądu w tym przypadku wynosi:

$$I = \sigma v.$$

Wstawiając (5) i (6) do (4) uzyskujemy łatwo wzór na szukaną prędkość:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}. \quad (7)$$

Przypomnijmy: dla prędkości ładunków danej wzorem (7) siła Lorentza równoważy siłę elektryczną. To jednak jest niemożliwe, bo sprzeczne z zasadą względności. Przejdźmy bowiem do układu poruszającego się w prawo z prędkością v (rys.4).



Rys. 4.

W tym układzie wszystkie ładunki spoczywają, więc nie ma siły Lorentza (ba, nawet pola magnetycznego!), a siła elektryczna oczywiście istnieje. Zatem w tym układzie nasz ładunek ma przyspieszenie zwrócone w dół, a w poprzednim nie ma żadnego. To jest sprzeczne z zasadą względności, zatem niemożliwe. Tak oto dochodzimy do wniosku, że ładunki elektryczne nie mogą osiągać prędkości danej wzorem (7). Jeśli ktoś nie pamięta – to jest wartość prędkości światła w próżni.

Do tego wniosku dochodzimy stosując wyłącznie zwykłą „szkolną” fizykę nie wiedząc o istnieniu teorii względności. Doprawdy dziwne. Jak to możliwe?

Nawet, jeśli prędkości ładunków są bardzo małe w porównaniu z prędkością światła, coś w przedstawionym przykładzie „nie gra”. Wypadkowa siła działająca na ładunek w układzie z rys. 3 jest mniejsza od siły elektrycznej z rys. 4, jeśli F_E jest taka sama w obu układach. Zgodnie z zasadą względności przyspieszenie ładunku, a zatem siła wypadkowa musi być w obu układach taka sama. Stąd nieuchronny wniosek, że siła F_E z rys. 4 musi być mniejsza od tej z rys. 3. Ze wzoru (5) widać, że jest to możliwe, jeśli σ będzie inna (mniejsza) w układzie z rys. 4. Jeśli zakładamy niezmienniczość ładunku, zostaje nam jeszcze jedno wyjście: odległość między ładunkami zależy od ich prędkości. Gdy się poruszają (rys. 3) – odległość ta jest mniejsza, zatem gęstość liniowa ładunku jest większa. Tak faktycznie jest, efekt ten nazywamy skróceniem Lorentza. Nazwa jest nieprzypad-

kowa. Hendrik Lorentz odkrył to zjawisko przed powstaniem teorii względności szukając transformacji (też nazwanej jego nazwiskiem) zachowującej postać równań Maxwella przy przejściu do układów poruszających się względem eteru. Jednak dopiero Albert Einstein odkrył uniwersalność i pełny sens transformacji (i skrócenia) Lorentza.

Podsumujmy. Elektrodynamika Maxwella jest *de facto* teorią relatywistyczną i dlatego można z niej wysnuć relatywistyczne wnioski. Okazuje się, że skrócenie Lorentza można łatwo zaobserwować nie tylko przy prędkościach zbliżonych do c . Wystarczy zmierzyć siłę oddziaływania dwóch przewodów z prądem. Mimo że elektrony w przewodach mają prędkości rzędu milimetrów na sekundę, efekty relatywistyczne mają tu decydujące znaczenie.

W powyższych przykładach posługiwaliśmy się wyłącznie „nierelatywistyczną” zasadą względności i dynamiką Izaaka Newtona. Ścisły opis relatywistyczny można znaleźć na przykład w pięknej książce Edwarda M. Purcella „Elektryczność i magnetyzm”.

Powyższe rozważania nie są sposobem popularyzacji STW. Nie przedstawiają one ani istoty ani piękna tej teorii. Pokazują tylko, że posługując się wyłącznie szkolną „nierelatywistyczną” fizyką można dojść do wniosku, że przy prędkościach zbliżonych do c konieczna jest „nowa” fizyka. Ich celem jest też wskazanie na to, że – wbrew powszechnemu przekonaniu – zjawiska relatywistyczne mogą być łatwo zaobserwowane nawet dla bardzo małych prędkości.