

Sto lat elektrodynamiki ciał w ruchu Einsteina

Mikołaj KORZYŃSKI

Spośród trzech słynnych prac, które 26-letni Albert Einstein opublikował w czso piśmie „Annalen der Physik” w 1905 roku największą karierę poza fizyką, w świadomości ogółu wykształconych ludzi, zrobiła zapewne ta z numeru 17, o krótkim tytule „O elektrodynamice ciał w ruchu”. Praca zawiera wykład teorii przestrzeni, czasu i zjawisk elektromagnetycznych, którą potem, za Maxem Planckiem, nazwano szczególną teorią względności.

Historia problemu, z którym postanowił zmierzyć się w swojej pracy Einstein, jest długa i powikłana i sięga co najmniej prac Galileusza. W swoim „Dialogu o dwóch systemach świata” florentczyk wysuwa hipotezę, że prędkość światła jest skończona. Oczywiście za jego czasów technika eksperymentalna nie pozwalała zweryfikować tego przypuszczenia.

W 1676 duński astronom Olaf Rømer zauważył, że pewne nieregularności w ruchach księżyców Jowisza można łatwo wyjaśnić zakładając skończoną prędkość światła. Ponieważ jednak rozmiary Układu Słonecznego nie były wówczas dobrze znane, nie podał on żadnej wartości prędkości światła.

Na początku XVIII wieku angielski astronom James Bradley odkrył aberrację gwiazd, czyli zjawisko pozornej zmiany położenia gwiazdy na niebie podczas roku. Okazało się, że wszystkie stałe gwiazdy wydają się zataczać małe elipsy bądź okręgi na niebie w takt orbitalnego ruchu Ziemi. Fakt ten łatwo było wytłumaczyć posługując się korpuskularną teorią Newtona, w której światło rozchodziło się ze skończoną prędkością. Efekt staje się analogiczny do skośnych śladów kropel, jakie zostawia padający pionowo deszcz na bocznych szybach pędzącego samochodu.

Więcej kłopotów dostarczała teoria falowa, która przeważała w optyce XIX wieku. Fale z konieczności wyobrażano sobie jako fale mechaniczne rozchodzące się w jakimś ośrodku, który nazwano eterem. Ten obraz mocno zaważył nad myśleniem fizyków tego stulecia. Eter na ogół wyobrażano sobie jako najzupełniej materialny, lecz bardzo lekki płyn przenikający materię.

Samą aberrację trudniej wytłumaczyć na gruncie teorii falowej, gdyż czoła płaskiej fali, w przeciwieństwie do strumienia cząstek, wyglądają tak samo bez względu na ruch obserwatora. Proste i zgodne z ówczesnymi pomiarami wyjaśnienie podał Fresnel, przyjmując, że eter jest częściowo unoszony, czy też „wleczony” przez ciała takie jak szkło soczewek teleskopów z prędkością $v = (1 - \frac{1}{n^2})$, gdzie n to współczynnik załamania materiału. Z kolei w poruszającym eterze prędkość światła była inna niż w spoczywającym, tak, jak prędkość fal na powierzchni płynącej wody jest inna niż tam, gdzie woda poczywa. Model wlezonego eteru działał dobrze, ale wiadomo już wówczas było, że dla praktycznie wszystkich materiałów współczynnik n jest nieco inny dla różnych długości fal świetlnych. Oznaczało to konieczność wprowadzenia nieco inaczej wleczonych „eterów” dla różnych długości fal, co wielu uczonych uznawało za niezadawalające.

Inną teorię aberracji światła przenoszonego przez eter podał Stokes, zakładając, że eter, jako nieściśliwy płyn, opływa Ziemię podczas jej ruchu. Problemem jego teorii było to, że prędkość eteru (a więc i kąt aberracji) na powierzchni Ziemi zależał od położenia obserwatora.

W międzyczasie powstała teoria elektromagnetyzmu Maxwella, rozwinięta potem przez Hertza, Heaviside’a i innych. Jedną z jej konsekwencji była możliwość rozchodzenia się fal z prędkością bardzo bliską ówczesnej prędkości światła. Szybko przyjęto więc, że światło jest po prostu falą elektromagnetyczną opisywaną równaniami Maxwella. Należy zaznaczyć, że sam Maxwell posługiwał się w swoich pracach na ten temat obrazem wirów i fal w mechanicznym ośrodku.

**Rozwiązanie zadania F 645.**

W czasie Δt przez przekrój wirnika przechodzi strumień $\rho v \pi r^2 \Delta t$ powietrza. Wirnik przekazuje więc mu pęd $\rho v^2 \pi r^2 \Delta t$ w jednostce czasu, więc siła nośna wynosi

$$F = \rho v^2 \pi r^2.$$

Śmigłowiec zwisa w polu grawitacyjnym Ziemi, więc $F = Mg$. Z kolei energia kinetyczna powietrza popychanego w jednostce czasu wynosi

$$\rho \frac{v^3 \pi r^2}{2} \Delta t.$$

Silnik musi więc dostarczać co najmniej tyle energii w jednostce czasu, a więc

$$P > \rho \frac{v^2 \pi r^2}{2},$$

a po podstawieniu poprzednio wyprowadzonych zależności

$$P > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{M^3 g^3}{\rho \pi r^2}} \approx 73 \text{ kW}$$

**Rozwiązanie zadania M 1099.**

Korzystając z nierówności pomiędzy średnimi potęgowymi uzyskujemy

$$\begin{aligned} \sqrt[n]{\frac{(\frac{1}{3}a)^n + (\frac{1}{2}b)^n}{2}} &\geq \frac{\frac{1}{3}a + \frac{1}{2}b}{2} = \\ &= \frac{2a + 3b}{12} = 1, \end{aligned}$$

skąd teza.

¹ Wydaje się ponadto, że Lorentz również nie był pierwszym, który odkrył transformacje nazwane jego imieniem, w 1900 roku napisał je Larmor.

W 1887 roku dwaj amerykańscy doświadczalnicy, Albert Abraham Michelson (pochodzący ze Strzelna) i Edward Morley spróbowali bezpośrednio wykryć wspomniany wcześniej ruch Ziemi względem eteru, tzw. wiatr eteryczny, związany z ruchem Ziemi wokół Słońca. Eksperyment oparty był na pomysł Michelsona z roku 1881. Ich urządzenie, interferometr, miał wykrywać niewielkie różnice w czasie przelotu światła w dwóch prostopadłych kierunkach. Z teoretycznych rozważań wiadomo było, że jeśli układ pomiarowy porusza się względem eteru (a więc prędkość światła jest nieco inna w różnych kierunkach), sygnał świetlny wysłany wzdłuż kierunku ruchu powinien systematycznie spóźniać się w stosunku do sygnału wysłanego prostopadle. Aparatura Michelsona i Morleya miała teoretyczną możliwość wykrywania zmian prędkości światła rzędu $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, więc powinna przynajmniej pokazać okresową zmienność prędkości światła w czasie roku związaną z ruchem orbitalnym Ziemi wokół Słońca o prędkości ok. $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Jednak rezultat eksperymentu Michelsona-Morleya, jak i zresztą kolejnych, coraz dokładniejszych pomiarów w latach 1902–1904 (Morley), 1921 (Miller), 1924 (Miller), był negatywny.

Ten zaskakujący wynik próbowano tłumaczyć na wiele sposobów. George FitzGerald, aby wyjaśnić problem, wysunął w hipotezę *ad hoc*, że ciała poruszające się w eterze doznają skrócenia w kierunku ruchu. Pomysł rozwinął Hendrik Lorentz, proponując w 1903 roku dokładne wzory na transformacje długości i czasu przy przechodzeniu z jednego układu do drugiego poruszającego się względem niego, nazwane potem transformacjami Lorentza.

$$\begin{aligned} t' &= \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z \end{aligned}$$

Jak zauważył Lorentz, transformacje te mają interesującą własność: zachowują postać równań Maxwella. Co za tym idzie, wszystkie zjawiska elektromagnetyczne, w tym rozchodzenie się światła, stały się „niewrażliwe” na ruch względem eteru. Tak, jak Maxwell, obaj fizycy w chwili publikacji swoich wyników nadal byli zwolennikami istnienia eteru przenoszącego oddziaływania elektromagnetyczne. Lorentz wciąż skłonny był uznawać parametr t występujący w transformacjach Lorentza jako abstrakcyjny, niefizyczny „czas lokalny”¹.

Nieco inne podejście do zagadnienia przedstawił wybitny francuski matematyk Poincaré. Zapostulował on, wobec danych doświadczalnych powinno się przyjąć, że zjawiska elektromagnetyczne nie zależą od prędkości biorących w nich udział względem żadnego ośrodka. Innymi słowy – fizycy powinni starać się, by tworzone przez nich prawa, zarówno mechaniki, jak i elektrodynamiki, były takie same we wszystkich układach poruszających się ze stałą prędkością względem siebie. Eter, wyróżniający jeden układ, stawał się w tej sytuacji zbędny.

Zarówno prace Lorentza, jak i Poincarégo opublikowano kilka lat przed Einsteinem. Zawierały one już dużą część współcześnie pojmowanej szczególnej teorii względności. Co więc zrobił w swojej pracy w „Annalen der Physik” Einstein i dlaczego to jego historycy nauki, a za nimi publiczność, uznali za twórcę tej teorii?

W skrócie możnaby napisać, że Einstein uporządkował całą teorię i nadał jej przejrzystą strukturę logiczną – od postulatów do wniosków. Praca rozpoczyna się od prostego eksperymentu myślowego. Rozważmy poruszający się magnes spoczywający kawałek przewodnika. W teorii Maxwella poruszający magnes wytwarza pole elektryczne, a to powoduje przepływ prądu w obwodzie (rysunek 2).



Rozwiązanie zadania F 646.

Niech M oznacza chwilową masę rakiety, a ΔM masę wyrzucaną w krótkim czasie Δt . Pęd rakiety zmienia się w tym czasie o

$$\Delta(Mv) \approx -\Delta M v + M \Delta v.$$

Jednocześnie za rufą pojawia się ΔM gazów o prędkości $v - u$. Z zasady zachowania pędu musi więc zająć

$$-\Delta M v + M \Delta v + \Delta M (v - u) = 0,$$

a stąd

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{u}{M} \cdot \frac{\Delta M}{\Delta t}.$$

Wielkość ta rośnie wraz z ubytkiem masy rakiety.

Zasadę zachowania energii rozpatrujemy w podobny sposób: zmiana energii kinetycznej rakiety w Δt to

$$\Delta \left(\frac{Mv^2}{2} \right) \approx -\Delta M \frac{v^2}{2} + M v \Delta v.$$

Energia kinetyczna wyrzuconych w tym czasie gazów to

$$\frac{\Delta M (v - u)^2}{2}.$$

Wobec tego

$$-\Delta M \frac{v^2}{2} + M v \Delta v + \frac{\Delta M (v - u)^2}{2} = P \Delta t.$$

Łącząc oba wyrażenia dostajemy, że

$$P = \frac{\Delta M}{\Delta t} \cdot \frac{u^2}{2},$$

co jest wielkością stałą podczas ruchu rakiety.

Z kolei w drugiej sytuacji magnes spoczywa, a przewodnik porusza się. Żadne pole elektryczne nie występuje, ale siła Lorentza działająca na ładunki w przewodniku powoduje przepływ prądu tak samo, jak w pierwszym przypadku. Efekt (przepływ prądu) jest taki sam bez względu na to, czy za poruszający uznamy magnes, czy przewodnik. To rozumowanie prowadzi Einsteina do sformułowania pierwszego postulatu swojej pracy: prawa elektrodynamiki powinny pozostawać takie same we wszystkich inercjalnych układach odniesienia, tak, jak prawa mechaniki. Ponadto wprowadza drugi, słynny postulat o stałości prędkości światła w różnych układach odniesienia, od razu zaznaczając, że jest on „tylko pozornie sprzeczny z pierwszym”. Cała praca to rozwinięcie tych idei.

Wpierw Einstein zajmuje się samym pomiarem długości i czasu zgodnie ze swoimi postulatami. Definiuje co rozumie przez dobry (zsynchronizowany) układ zegarów i przez pomiar długości poruszającego się ciała. Wyprowadza wówczas transformacje Lorentza jako jedyny zestaw transformacji liniowych współrzędnych zgodny ze swoimi postulatami. Zauważa przy okazji, że nowe definicje wymagają przyjęcia nowego prawa składania prędkości.

W drugiej, „elektrodynamicznej” części swojej pracy zajmuje się teorią Maxwella i wyprowadza wzory na transformacje pól elektrycznego i magnetycznego przy zmianie układu, zarówno w przypadku próżniowym (czyste pole elektromagnetyczne), jak i przy obecności ładunków.

Wyposażony w te narzędzia Einstein rozwiązuje kilka podstawowych problemów elektrodynamiki. Zaczyna od wyprowadzenia relatywistycznych wzorów na wspomnianą na początku aberrację światła i efekt Dopplera. Oblicza też związki między wartościami ciśnienia i strumienia energii fali elektromagnetycznej obserwowanymi w różnych układach inercjalnych. Na koniec bada przyspieszenie elektronu w polu elektrycznym i magnetycznym obserwowane z różnych układów inercjalnych. Jako ciekawostkę można podać fakt, że w żadnym miejscu tej pracy nie pojawia się „najpopularniejszy” i najczęściej kojarzony teorią względności wzór $E = mc^2$.

Praca ta oczywiście nie zakończyła dyskusji o problemie eteru i o elektrodynamice. Trzy lata po omówionej pracy Ritz zaproponował teorię, w której prędkość światła była stała w stosunku do źródła promieniowania. Jednocześnie trwały prace doświadczalników nad badaniem rozchodzenia się światła w różnych warunkach: w 1932 roku Kennedy i Thorndike zmodyfikowali oryginalny eksperyment Michelsona–Morleya, dzięki czemu udało im się wykluczyć pierwotną hipotezę skrócenia FitzGerala. Sagnac w 1913 zbadał z kolei rozchodzenie się światła w obracającym się, nieinercjalnym układzie odniesienia, uzyskując pełną zgodność z teorią Einsteina.

Współczesną, elegancką formę nadał szczególnej teorii względności matematyk Hermann Minkowski. Zobaczył on w koncepcjach Einsteina obraz pewnej geometrii, różniącej się od zwyczajnej definicją „odległości”.

Sam Einstein zajął się od 1907 roku próbami pogodzenia teorii grawitacji z teorią względności. Problem okazał się bardzo trudny i dopiero w 1915 roku opublikował równania ogólnej teorii względności – to jednak temat na co najmniej kolejny artykuł.

Literatura

- [1] Praca „Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik* **17**, 891-921 (1905), w polskim tłumaczeniu dostępna w skrypcie „Literatura źródłowa do kursu Podstawy Fizyki na Politechnice Warszawskiej, tom 1: szczególna teoria względności” pod redakcją Witolda Kruczka, Biblioteka Dydaktyczna Zespołu Metodologii Dydaktyki Fizyki Instytut Fizyki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1981
- [2] A. Trautman, W. Kopczyński, „Czasoprzestrzeń i grawitacja”, wyd. II, Państwowe Wydawnictwo Naukowe 1984
- [3] <http://en.wikipedia.org>