Przez eter do teorii względności

*Michał TARNOWSKI**

*student, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Znany matematyk i filozof angielski, Lord Bertrand Russell, jest autorem książeczki *ABC teorii względności*. Napisał w niej jak to bardzo wielu ludzi wie, że Einstein zrobił coś wielkiego – a jednocześnie mało kto wie, co to konkretnie jest. To samo można powiedzieć o teoriach eteru i o doświadczeniu Michelsona–Morleya – historycznie poprzedzających szczególną teorię względności. Bardzo wielu ludzi zainteresowanych fizyką o nich słyszało, ale zwykle nie poświęca się im tyle uwagi, ile potrzeba, aby zrozumieć historyczne korzenie szczególnej teorii względności (STW) i co zadecydowało o jej sukcesie.

Historia poprzedzająca sformułowanie STW jest długa i dotyka optyki, astronomii, mechaniki i elektrodynamiki. Ma kilka niuansów, które mogą prowadzić – i, niestety, często prowadzą – do kilku poważnych nieporozumień. Być może ten artykuł pomoże je wyjaśnić. Forma kalendarium może wydawać się sucha, ale jest przejrzysta. Skończymy je tam, gdzie zaczyna się wiele historycznych wstępów do STW – na doświadczeniu Michelsona–Morleya z końca XIX wieku. Wyjaśnienie, co się stało między nim a opublikowaniem STW w 1905 r., wymagałoby osobnego artykułu.

1676 – duński astronom Ole Rømer publikuje astronomiczne dowody, że prędkość światła w próżni (od XX w. oznaczana przez c) jest ograniczona. Wbrew powszechnemu przekonaniu Rømer nie podał liczbowej wartości c, a jedynie czas przelotu światła przez orbitę ziemską. Pierwsze znane szacunki c należą do Christiaana Huygensa. Wbrew innemu przekonaniu – Rømer znał promień orbity ziemskiej (tzw. jednostkę astronomiczną), ale nie uważał liczbowej wartości c za szczególnie istotną.

Rømer pracował nad wyznaczaniem długości geograficznej. To miało wielkie znaczenie dla floty, a Francja ścigała się wtedy z Wielką Brytanią o kolonie i o dominację na morzu. Wyznaczenie długości geograficznej wymagało użycia zegara, a dostępne wtedy czasomierze słoneczne, klepsydry i zegar wahadłowy Huygensa były za mało dokładne dla żeglugi. Galileusz zaproponował wykorzystanie swojego odkrycia: księżyców Jowisza, a konkretniej ich zaćmień przez tego gazowego olbrzyma. Okres obiegu Io wokół Jowisza to niecałe dwa dni, dlatego z obserwacjami nie trzeba czekać na wyjątkowy czas w roku. Metoda okazała się nie do zrealizowania na morzu – statki były za mało stabilne do obserwacji astronomicznych. Mimo to była użyteczna na lądzie.

Rømer uczestniczył w wyznaczeniu różnicy długości geograficznej między Paryżem a Uraniborgiem pod Kopenhagą, gdzie mieściło się dawne obserwatorium Tychona Brahego. Przy dokładnych obserwacjach zauważył efekt podobny do efektu Dopplera przewidzianego i odkrytego w XIX wieku. Kiedy Jowisz zbliżał się do Ziemi, okres kolejnych odsłonięć lub zniknięć Io był krótszy niż przy oddalaniu się tych dwóch planet. Światło odbijane przez Io miało między kolejnymi zaćmieniami skracaną lub wydłużaną drogę do Ziemi dzięki wzajemnemu ruchowi. Znając prędkość orbitalną Ziemi i elementarną algebrę, można stąd wyznaczyć c lub czas przelotu światła przez daną odległość.

Wyniki Rømera i Huygensa były ciepło przyjęte przez Newtona. Od II wydania *Principiów* pisze w nich, że Słońce jest oddalone od Ziemi o około 8 minut świetlnych. Mimo to znaleźli się krytycy: Robert Hooke oraz współpracownicy Rømera z paryskiego obserwatorium królewskiego, jak Cassini i Picard. Wskazywali np. na brak podobnych efektów dla innych księżyców. Alternatywne wyjaśnienia obserwacji Rømera zostały wykluczone dopiero w XVIII wieku przez Laplace'a.

1728 – James Bradley obserwuje aberrację gwiazdową i wyjaśnia ją przez ograniczoną prędkość światła. Skończona wartość c zostaje powszechnie przyjęta. Jego obserwacje dowodzą też ruchu Ziemi względem gwiazd stałych – to pierwszy bezpośredni dowód heliocentryzmu Kopernika. Geocentryzm jest do uratowania tylko przez groteskowe założenie, że wszystkie gwiazdy krążą wokół Słońca.

Rozwiązanie zadania M 1569.
Udowodnimy, że jeżeli n jest liczbą podzielną przez 8, to n nie można zapisać w postaci sumy dwóch elementów zbioru S albo – w myśl tezy poprzedniego zadania – w postaci iloczynu dwóch elementów zbioru S. Przypuśćmy, że

$$n = \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)\left(\frac{c}{d} + \frac{d}{c}\right) = \frac{(a^2+b^2)(c^2+d^2)}{abcd},$$

gdzie $\mathrm{NWD}(a,b) = \mathrm{NWD}(c,d) = 1$. Skoro $8|n$, to co najmniej jeden z czynników w liczniku powyższego ułamka jest podzielny przez 4; bez straty ogólności załóżmy, że $4|a^2+b^2$. Stąd wynika, że liczby a i b są tej samej parzystości, skąd wobec $\mathrm{NWD}(a,b) = 1$ – obie są nieparzyste. Jednak wówczas a^2+b^2 daje resztę 2 przy dzieleniu przez 4 – sprzeczność.

Aby wskazać nieskończenie wiele liczb naturalnych będących iloczynami dwóch elementów zbioru S, rozważymy ciąg Fibonacciego

$$F_1 = F_2 = 1,\ F_{n+2} = F_{n+1} + F_n,\ \text{dla } n \geqslant 1$$

i wykorzystamy tożsamość

$$F_{2n+1}^2 + 1 = F_{2n-1}F_{2n+3}.$$

Dla $(x,y) = (F_{2n+1}, F_{2n+3})$ mamy więc

$$\left(x + \frac{1}{x}\right)\left(y + \frac{1}{y}\right) = \frac{x^2+1}{y} \cdot \frac{y^2+1}{x} = \frac{F_{2n+3}^2+1}{F_{2n+1}} \cdot \frac{F_{2n+1}^2+1}{F_{2n+3}} = F_{2n+5}F_{2n-1},$$

co jest liczbą całkowitą dla każdego $n \geqslant 1$. To kończy dowód, gdyż dla różnych n otrzymujemy różne liczby.

Aberracja gwiazdowa to przesuwanie się w ciągu roku gwiazd na niebie o kąt około 20″ (sekund). (Równoważnie: to 1/3 minuty kątowej albo 1/180 stopnia.) Pierwszy raz była zaobserwowana przez Cassiniego i Picarda, a Hooke błędnie interpretował ją jako paralaksę. Bradley wyjaśnił ją poprawnie przez złożenie prostopadłych prędkości światła oraz Ziemi względem gwiazd. To zjawisko bywa porównywane do spadającego pionowo deszczu: kiedy obserwator się porusza poziomo względem powierzchni Ziemi i chmur, tj. prostopadle do deszczu, krople spadają na niego z ukosa. Jeśli porusza się w przeciwnym kierunku, kąt opadów zmienia kierunek. Najwyraźniej widać to na szybach pojazdów. Znając kąt przesunięcia, można obliczyć stosunek dwóch prędkości.

Największe różnice w położeniu gwiazd są między równonocami wiosennymi a jesiennymi, a to dlatego, że wtedy prędkość orbitalna Ziemi jest największa. To odwrotnie niż przy paralaksie rocznej. Wywołuje ona skrajnie różne położenia ciał na niebie między przesileniami (lato i zima), bo odległość między tymi punktami orbity jest największa, zgodnie z I prawem Keplera. Po stuleciach nieudanych prób paralaksę roczną wreszcie zaobserwował Bessell w XIX w. Była jeszcze jednym koronnym dowodem heliocentryzmu.

1810 – François Arago, tak jak większość ówczesnych fizyków, wierzy w newtonowskie cząstki światła. Szuka różnicy w prędkościach promieni pochodzących z różnych gwiazd. Spodziewane różnice w aberracji gwiazdowej byłyby za małe. Dlatego próbuje znaleźć różnice w prędkości przez dyspersję – różne kąty załamania dla promieni o różnej prędkości. Obserwuje gwiazdy przez teleskop i pryzmat, ale nie znajduje żadnych różnic w prędkości światła, mimo ruchu obiegowego Ziemi. Konkluduje, że widocznie każda gwiazda wysyła promienie o różnych prędkościach, ale tylko jedna prędkość jest widoczna dla ludzkiego oka. Pozostałe miałyby być np. niedawno odkrytymi promieniami cieplnymi Herschela (podczerwienią) i promieniami chemicznymi Rittera (nadfioletem).

1818 – Augustin Fresnel wyjaśnia doświadczenie Arago przez falową teorię światła oraz hipotezę częściowego wleczenia eteru. Arago wykazuje się wielką uczciwością intelektualną i zostaje przekonany. Hipoteza ma wiele słabych punktów. Stopień wleczenia eteru ma zależeć od współczynnika załamania. Biorąc pod uwagę dyspersję – eter powinien być wleczony w różnym stopniu przez różne długości fal albo każda długość powinna mieć swój własny eter. Podobny problem dotyczył dwójłomności.

Podłużne fale świetlne nie potrafiły wyjaśnić doświadczenia Malusa z polaryzacją przez odbicie. Za to fale poprzeczne mogą się rozchodzić tylko w ciele stałym. Dlatego eter był traktowany przez Fresnela jako ciało stałe, a nie jako płyn. Płyny z definicji nie wytrzymują tzw. momentów ścinających, czyli przesuwania się równoległych płaszczyzn w przeciwnych kierunkach. Jeśli sąsiednie obszary fali, np. po różnych stronach grzbietu, przesuwałyby się poprzecznie w różne strony, to nie wróciłyby do wyjściowego stanu i ich ruch nie byłby okresowy. Dzięki badaniu podłużnych i poprzecznych fal sejsmicznych wiadomo, jaka część wnętrza Ziemi jest stała, a jaka – płynna.

1845 – George Stokes proponuje bardziej spójną teorię całkowitego wleczenia eteru. Jak się potem okaże – również ona jest szyta bardzo grubymi nićmi.

1851 – Hippolyte Fizeau mierzy prędkość światła w płynącej wodzie. Jego wyniki wydają się potwierdzać fresnelowską hipotezę częściowego wleczenia. Podobne doświadczenie wykonuje w Holandii Martinus Van Hoek w 1868.

1871 – George Airy sprawdza hipotezy Fresnela i Stokesa, obserwując aberrację gwiazdową przez teleskop wypełniony wodą. Wbrew przewidywaniom Stokesa – nie ma żadnych odstępstw od aberracji obserwowanej przez zwykły teleskop.

1881 – Albert Michelson w Poczdamie pod Berlinem, przy współpracy z laboratorium Helmholtza, używa swojego interferometru do szukania wiatru eteru. Otrzymuje negatywny wynik. Uważa to za potwierdzenie teorii Stokesa i obalenie teorii Fresnela. Inni naukowcy wytykają mu błędy.

Doświadczenie polegało na szukaniu różnicy faz dla prostopadłych wiązek światła, pokonujących taką samą odległość. Ta poruszająca się wzdłuż eteru razem z Ziemią miałaby krótszy czas przelotu niż ta poprzeczna. Po obrocie interferometru i zamianie ramion można by się spodziewać innej różnicy faz i przez to przesunięcia prążków interferencyjnych na ekranie. To było

Rozwiązanie zadania M 1567.
Podstawiając $a = -\sqrt[n]{2}$ oraz $k = 2n$ do tożsamości

$$\frac{1-a^k}{1-a} = \sum_{i=0}^{k-1} a^i,$$

uzyskujemy

$$-\frac{3}{1+\sqrt[n]{2}} = \sum_{i=0}^{2n-1} (-\sqrt[n]{2})^i,$$

czyli

$$\frac{1}{1+\sqrt[n]{2}} = \frac{1}{3}\sum_{i=0}^{2n-1} (-1)^{i+1}(\sqrt[n]{2})^i.$$

Wobec tego wystarczy przyjąć

$$W_n(x) = \sum_{i=0}^{2n-1} \frac{(-1)^{i+1}}{3} x^i.$$

Rozwiązanie zadania M 1568.
Zauważmy, że jeżeli $n = (x+\frac{1}{x})(y+\frac{1}{y})$ dla pewnych $x, y \in \mathbb{Q}^+$, to

$$n = xy + \frac{1}{xy} + \frac{x}{y} + \frac{y}{x},$$

przy czym $xy, \frac{x}{y} \in \mathbb{Q}^+$. To dowodzi, że jeżeli n jest iloczynem dwóch elementów zbioru S, to jest również sumą dwóch elementów zbioru S.

Przypuśćmy, że $n = x + \frac{1}{x} + y + \frac{1}{y}$ dla pewnych $x, y \in \mathbb{Q}^+$ oraz niech $x = \frac{a}{b}$, $y = \frac{c}{d}$ będą zapisami liczb x, y w postaci ułamków nieskracalnych, czyli $\mathrm{NWD}(a,b) = \mathrm{NWD}(c,d) = 1$. Wówczas

$$n = \frac{(a^2+b^2)cd + (c^2+d^2)ab}{abcd}.$$

Ponieważ n jest liczbą całkowitą, więc ab musi być dzielnikiem licznika powyższego ułamka. Stąd wniosek, że ab dzieli $(a^2+b^2)cd$, skąd wobec $\mathrm{NWD}(a,b) = 1$ mamy, że ab dzieli cd. Analogicznie uzasadniamy, że cd dzieli ab. Zatem $ab = cd$, czyli $d = \frac{ab}{c}$ i w konsekwencji

$$\begin{aligned} n &= \frac{a}{b} + \frac{b}{a} + \frac{c}{d} + \frac{d}{c} = \\ &= \frac{a}{c}\cdot\frac{c}{b} + \frac{b}{c}\cdot\frac{c}{a} + \frac{c}{a}\cdot\frac{c}{b} + \frac{a}{c}\cdot\frac{b}{c} = \\ &= \left(\frac{a}{c} + \frac{c}{a}\right)\left(\frac{b}{c} + \frac{c}{b}\right). \end{aligned}$$

Skoro $\frac{a}{c}, \frac{b}{c} \in \mathbb{Q}^+$, to n jest iloczynem dwóch elementów zbioru S.

Polecana literatura

Andrzej Kajetan Wróblewski, *Historia fizyki*, PWN, Warszawa 2006

Tenże, *De Mora Luminis: A spectacle in two acts with a prologue and an epilogue*, American Journal of Physics, 1985

Michel Janssen, John Stachel, *Optics and electrodynamics of moving bodies in the 19th century*, Max Planck Institute for the History of Science, 2004

What a drag: Arago's Experiment (1810), 2008 `skullsinthestars.com/2008/07/05/what-a-drag-aragos-experiment-1810`

Wojciech Kopczyński, Andrzej Trautman, *Czasoprzestrzeń i grawitacja*, PWN, Warszawa 1981

pierwsze doświadczenie drugiego rzędu, tzn. w którym oczekiwany efekt był proporcjonalny do kwadratu v/c (tzw. stałej aberracji), a nie tylko wprost do tego stosunku.

1886 – Michelson i Edward Morley powtarzają doświadczenie Fizeau z większą dokładnością. Wynik wydaje się potwierdzać teorię Fresnela, a wcześniejsze doświadczenie Michelsona okazuje się niedokładne.

1887, wiosna – Woldemar Voigt w Getyndze publikuje pracę matematyczną o efekcie Dopplera i o własnościach równania falowego. Znajduje transformacje współrzędnych, względem których to równanie jest niezmiennicze. Voigt nie odnosi się wcale do doświadczeń związanych z eterem. Jego praca jest osobnym wątkiem, związanym z STW w inny sposób.

1887, lato – Michelson i Morley w Cleveland w stanie Ohio wykonują swoje słynne doświadczenie, znane po prostu jako doświadczenie Michelsona–Morleya. Było powtórzeniem doświadczenia Michelsona z 1881 z większą dokładnością. Długości ramion powiększono przez wielokrotne odbicia wiązek. Ewentualne drgania, np. przy obrocie, miały być niwelowane przez rtęć, na której pływało urządzenie. Mimo to nie znajdują żadnego wiatru eteru. Wyniki zdają się znowu potwierdzać całkowite wleczenie i negować wyniki sprzed roku.

Jak wspomniano na wstępie, łatwo o kilka nieporozumień na temat tych jedenastu wydarzeń. Niektóre z nich są dużo poważniejsze niż te dotyczące obserwacji Rømera.

1. Wprowadzenie eteru rzekomo przez teorię elektromagnetyczną Maxwella. Eter miał długą historię, sięgającą korzeniami starożytności. Został powszechnie uznany razem z falową teorią światła na początku XIX w. Całe dekady później powstała teoria Maxwella, która pomogła eter wyeliminować. Pole elektromagnetyczne nie potrzebuje ośrodka, tak jak nie potrzebuje go pole grawitacyjne.

Dla jasności trzeba przyznać, że owszem, równania Maxwella sugerują pewien wyróżniony układ odniesienia. W swojej pełnej postaci, z tzw. prądem przesunięcia w prawie Ampere'a, te równania nie mają symetrii Galileusza. Wyróżniony układ utożsamiano z eterem, ale to nie jest logiczna konieczność. Przykładowo Emil Cohn uważał, że równania elektrodynamiki są spełnione w idealnie inercjalnym układzie gwiazd stałych. Jak się jednak okazało, teoria Maxwella zamiast symetrii Galileusza ma symetrię Lorentza. Ta ostatnia jest w pełni fizyczna i nie ma wyróżnionego układu odniesienia.

Tak więc teoria Maxwella początkowo utrwaliła starą wiarę w eter, ale potem przyczyniła się do jej odrzucenia. Czasami rozróżnia się eter w silniejszym sensie, fizyczny – ośrodek fal światła – oraz eter w słabszym sensie, geometryczny – wyróżniony układ odniesienia. Równania Maxwella zabiły ten pierwszy i początkowo sugerowały drugi, który również upadł.

2. Obalenie eteru rzekomo przez doświadczenie Michelsona–Morleya. Michelson i Morley uważali swój wynik za dowód jednego wariantu tej teorii – mianowicie hipotezy Stokesa (o całkowitym wleczeniu eteru). Jej niesłuszność była wskazana przez inne doświadczenia, np. Fizeau. Morley i jego współpracownicy, np. Dayton C. Miller, szukali wleczenia eteru jeszcze w latach 20.

W odpowiedzi na doświadczenie M–M zaproponowano bardzo wyrafinowane teorie eteru. Ich epigoni, czyli ostatni obrońcy, byli aktywni jeszcze w latach 30., a nawet zdarzają się do dziś. Nic dziwnego, że na początku XX w. Bertrand Russell w swojej książce *Problemy filozofii* pisze o eterze bez zawahania. Do teorii eteru Lorentza odwoływał się jeszcze Ernest Rutherford w latach 20.

3. Rzekome udowodnienie przez doświadczenie M–M, że prędkość światła c w próżni jest nieprzekraczalna. Jak wspomniano – to doświadczenie można wyjaśnić przez teorię całkowitego wleczenia. Nie daje ono żadnych ograniczeń na prędkość ciał względem eteru. Innym wyjaśnieniem jest teoria emisyjna Walthera Ritza z 1908 roku, w której prędkość światła względem źródła jest stała i wynosi c, eter nie istnieje (albo każde źródło ma własny eter), a prędkości transformują się galileuszowsko. W szczególności: prędkość światła i źródła w tej teorii mogły się dodawać. Obydwa wyjaśnienia – całkowite wleczenie i teorie emisyjne – okazały się fałszywe, ale rozstrzygnęły o tym inne doświadczenia niż to M–M.

To kalendarium kończy się w momencie, kiedy optyka i fizyka eteru cierpiały na rozdwojenie jaźni. Doświadczenia typu Fizeau wydawały się potwierdzać hipotezę Fresnela częściowego wleczenia eteru. Za to doświadczenie Michelsona–Morleya zdawało się potwierdzać hipotezę Stokesa wleczenia całkowitego. Potrzebny był geniusz, który potrafił wyjaśnić oba rodzaje doświadczeń. Znalazł się już po kilku latach – był nim Hendrik Antoon Lorentz, a jego prace nawet przerosły potrzeby optyki. Mimo to i one miały słabe punkty. Musiały ustąpić miejsca dziełu Einsteina – ale to temat na oddzielną opowieść.