

WOJCIECH SADY*

NIEDOOKREŚLENIE TEORII PRZEZ DANE EMPIRYCZNE A REWOLUCJA RELATYWISTYCZNA W FIZYCE

Abstract

UNDERDETERMINATION OF SCIENTIFIC THEORY BY EVIDENCE AND THE RELATIVISTIC REVOLUTION IN PHYSICS

Quine (1951) argued that, in the face of empirical anomalies, a given theoretical system can be modified in many different ways: "Any statement can be held true come what may, if we make drastic enough adjustments elsewhere in the system. [...] Conversely, by the same token, no statement is immune to revision". I will show that the history of relativistic revolution contradicts Quine's claim. Indeed, when physicists tried to explain anomalous results of experiments from Arago (1810) to Michelson (1881-1887) – in which the influence of the motion of the Earth on the course of optical phenomena was examined – by invoking the principles of classical mechanics, there was some freedom of choice. And some rival hypotheses about mechanical properties of luminiferous aether were formulated. But when in 1887 – on the basis of Hertz's experiments – Maxwell's electrodynamics was accepted, the problem of the optics of moving bodies was transformed into the problem of electrodynamics of moving bodies. Then the freedom of choice disappeared. From the conjunction of Maxwell's equations and Galileo's transformations, it followed – contrary to the results of experiments – that the Earth's motion changes the optical phenomena. The same results of experiments showed that all the phenomena under study are in perfect agreement with Maxwell's equations in their "normal" form. In this situation, there was no choice but to preserve Maxwell's equations and to modify Galileo's transformations. Step by step, Lorentz, Larmor, and Poincaré inferred transformations preserving the form of Maxwell's equations in all inertial frames of reference. Just when they finished, Einstein published exactly the same set of formulae, together with the remark that "the introduction of a »luminiferous ether« will prove to be superfluous". It meant that Maxwell's equations were not reducible to the laws of mechanics.

Keywords: underdetermination of scientific theory, growth of science, discovery, scientific revolution, theory of relativity

* Instytut Filozofii i Socjologii, Uniwersytet Pedagogiczny im. KEN w Krakowie, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków, wojciech.sady@gmail.com.

Wiele napisano o niedookreśleniu teorii przez dane empiryczne, najczęściej przywołując prace Pierre'a Duhema i Willarda Van Ormana Quine'a, a następnie Thomasa Kuhna i Paula Feyerabenda. Zwolennicy tej tezy twierdzą, że jakkolwiek bogaty byłby zbiór zgromadzonych danych obserwacyjnych, można do niego dopasować niezliczenie wiele wyjaśniających je teorii (a liczne z nich, dodadzą niektórzy, będą wzajemnie niewspółmierne). W szczególności, gdy natrafimy na wyniki obserwacji sprzeczne z przewidywaniami wynikającymi z systemu teoretycznego, możemy — by przywrócić jego zgodność z danymi — modyfikować system na wiele różnych sposobów:

Całokształt naszej tzw. wiedzy czy też przekonań, od najbardziej przygodnych prawd geografii i historii aż po najgłębsze prawa fizyki atomistycznej, a nawet czystej matematyki i logiki formalnej, jest tworem człowieka i styka się z doświadczeniem tylko wzdłuż swych krawędzi. Mówiąc inaczej, nauka jako całość podobna jest do pola siły, którego warunkami brzegowymi jest doświadczenie. [...] Pole jako całość jest jednak na tyle niezdeterminowane [niedookreślone — WS] przez swe warunki brzegowe, tj. przez doświadczenie, że istnieje znaczna swoboda wyboru zdań, których wobec danego konfliktu z doświadczeniem mają być przecenione [których ocena ma ulec zmianie wobec danego konfliktu z doświadczeniem — WS]. Żadne poszczególne świadectwo doświadczenia nie jest związane z jakimś określonym zdaniem z wnętrza pola; związek ten ma co najwyżej charakter pośredni, za sprawą równowagi pola jako całości. [...] Każde zdanie może obowiązywać niezależnie od doświadczenia, o ile dokonamy dostatecznie daleko idącego przystosowania reszty systemu. [...] I odwrotnie, [...] żadne zdanie nie jest zabezpieczone przed rewizją. Nawet logiczne prawo wyłączonego środka proponowano zrewidować w imię uproszczenia mechaniki kwantowej; czyż istnieje zasadnicza różnica pomiędzy takim wybiegiem a wybiegami, w wyniku których Kepler zastąpił Galileusza, Einstein Newtona, a Darwin Arystotelesa? (Quine 1951, tłumaczenie za Quine 2000: 71-72)

Nie będę tu omawiał czy oceniał debat toczonych w ciągu ostatnich kilkunastu lat wokół tezy o niedookreśloności i jej epistemologicznych konsekwencji. Przegląd podstawowych stanowisk i na bieżąco aktualizowaną literaturę przedmiotu znaleźć można np. w haśle encyklopedycznym autorstwa Kyle'a Stanforda (2016). Nie będę też analizował tezy Quine'a na gruncie logiki czy ogólnej teorii poznania. Postaram się natomiast pokazać, że prowadzi ona do błędnego obrazu historii nauki. Zdaje się bowiem sugerować, że gdy system teoretyczny staje w obliczu anomalii doświadczalnej, naukowcy formułują wiele hipotez „ratunkowych”, kwestionując przy tym zasadność różnych części systemu, łącznie z tymi najbardziej podstawowymi. Naszkicuję zarys procesu, w wyniku którego — by odwołać się do ostatniego zdania cytowanego fragmentu — Einstein zastąpił Newtona, czyli miejsce mechaniki klasycznej zajęła szczególna teoria względności. Okaże się, że to, co z punktu widzenia samej logiki jest możliwe, nie jest możliwe dla uczonych — i to z więcej niż jednego powodu.

1. PREHISTORIA REWOLUCJI RELATYWISTYCZNEJ, CZYLI OPTYKA CIAŁ W RUCHU PRZED MICHELSONEM

Na początku XIX w. myślenie fizyków o świecie kształtowały zasady mechaniki klasycznej. Równania mechaniki są niezmiennicze względem transformacji Galileusza: po przekształceniu zgodnie z nimi współrzędnych czasowych i przestrzennych przyjmują identyczną postać we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

Od publikacji Newtonowskich *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687) trwały wysiłki, aby — przy użyciu hipotezy korpuskularnej — rozszerzyć zakres zastosowań mechaniki na zjawiska świetlne. Badania nad zjawiskami dyfrakcji i interferencji sprawiły, że Thomas Young w 1800 r. wskrzesił dawną, a niemal wówczas zapomnianą, falową teorię światła, która przez następne kilkanaście lat nie zyskała prawie zwolenników. Tymczasem dokonano odkryć eksperymentalnych, których — jak to dziś wiemy — nigdy nie udało się wyjaśnić w ramach programu badawczego mechaniki klasycznej.

W 1808 r. Étienne Louis Malus (który uważał, że światło jest związkem tlenu i ciepła) odkrył polaryzację światła. Wkrótce potem badania nad nią podjęli, i dokonali licznych odkryć eksperymentalnych, David Brewster, François Dominique Arago i Jean-Baptiste Biot. Zwolennicy teorii korpuskularnej próbowali wyjaśnić polaryzację, wyposażając drobinki świetlne w bieguny (stosowana do dziś nazwa zjawiska pochodzi od łacińskiego *polus*, czyli biegun).

Z teorii korpuskularnej wynikało, że współczynnik załamania światła zależy od prędkości, z jaką dociera ono do granicy ośrodków. Korzystając z tego wniosku, Arago w 1810 r. badał, czy gwiazdy emitują światło z tą samą prędkością. Okazało się, że światło wszystkich gwiazd załamuje się w pryzmacie w identyczny sposób, również w przypadku gwiazd, do których Ziemia zbliża się w swym ruchu orbitalnym i od których się oddala. Współczesny fizyk od razu uzna to za świadectwo łamania klasycznej zasady sumowania prędkości, jednak przez blisko sto lat nikt tak tego nie interpretował. Sam Arago, zapewne zainspirowany dokonanymi właśnie odkryciami niewidzialnych promieni podczerwonych i nadfioletowych, twierdził, że każda z gwiazd wysyła światła o różnych prędkościach, ale nasze oczy są wrażliwe tylko na to, które dociera do nich z prędkością c .

W 1818 r., demonstrując szereg zjawisk dyfrakcji i interferencji, Augustin Fresnel przekonał niemal wszystkich fizyków, że światło ma naturę falową (por. Fresnel 1818). Zgodnie z obrazem świata mechaniki klasycznej istnienie fal świadczy o istnieniu falującego ośrodka, który nazwano „eterem”. Trzeba teraz było wyposażać eter w takie własności mechaniczne, aby z praw mecha-

niki i odpowiednich hipotez pomocniczych wynikały zdania opisujące wyniki eksperymentów optycznych, łącznie ze wspomnianymi przed chwilą.

Aby wyjaśnić odkrytą jeszcze w 1728 r. przez Jamesa Bradleya aberrację gwiazdną (by gwiazda znajdowała się stale w centrum teleskopu, należy go co noc pochyłać pod kątem α , takim że $\operatorname{tg}\alpha = v_z/c$, gdzie v_z – prędkość ruchu orbitalnego Ziemi, c – prędkość światła), Fresnel przyjął, że eter wypełniający przestrzeń kosmiczną jest nieruchomy. W 1821 r. z wyników eksperymentów nad zjawiskiem polaryzacji wywnioskował, że jeśli światło ma charakter falowy, to są to fale poprzeczne, a nigdy podłużne. Fale poprzeczne mogą powstawać jedynie w ciałach stałych, mających sprężystość kształtu. Jednak we wszystkich znanych nam ciałach stałych mogą powstawać również fale podłużne, rozchodzące się zwykle z inną prędkością – a tych w wypadku eteru nie udawało się znaleźć¹. Aby fale podłużne wyeliminować, Fresnel przyjął, że eter jest całkowicie nieściśliwy. Musiał jednak porzucić to założenie, aby uzyskać zgodne z wynikami eksperymentów wyjaśnienie załamania światła na granicy dwóch ośrodków.

Przejdźmy do odkrycia Arago. Z punktu widzenia mechaniki klasycznej załamanie światła może być wywołane bądź tym, że eter wypełniający wnętrza ciał przezroczystych jest mniej sprężysty, bądź tym, że ma większą masę właściwą niż eter w „próżni”. Wynik eksperymentu Arago przesądził o tym, że Fresnel (1818) wybrał drugą możliwość. Proste obliczenia prowadziły do wniosku, że jeśli ciało przezroczyste o współczynniku załamania n porusza się z prędkością v względem eteru „nieruchomego”, to środek masy eteru w jego wnętrzu porusza się z prędkością $u = (1 - 1/n^2)v$. Wynikało stąd, że ruch Ziemi nie wywiera, z dokładnością rzędu v_z/c , wpływu na załamanie światła, a to było mniej niż szacowany błąd pomiarów Arago.

W 1839 r. sformułowano dwie kolejne hipotezy mające eliminować fale podłużne. Według Jamesa MacCullagha eter jest ciałem, które z niewyjaśnionych jak dotąd powodów reaguje sprężystość jedynie na skręcenia. Augustin Cauchy natomiast domniemywał, że eter ma „normalny”, dodatni współczynnik sprężystości kształtu, ale „anormalny”, ujemny współczynnik sprężystości objętości (czyli na ucisk reaguje skurczem).

Fresnelowska hipoteza eteru całkowicie nieściśliwego i nieruchomego, przez którą ciała „ważkie” – o czym świadczą niezliczone doświadczenia – przenikają bez najmniejszego oporu, wydawała się wielu absurdalna. George Stokes (1845) sformułował w związku z tym hipotezę konkurencyjną, zgodnie z którą eter jest nieściśliwą cieczą o dużej lepkości, tak że zachowuje się ni-

¹ Jeszcze w 1895 r. Wilhelm Röntgen, ogłaszając odkrycie promieni X, wyrażał przypuszczenie, że są to właśnie podłużne fale w eterze (1895: § 17).

czym ciecz w stosunku do ciał poruszających się względem niego ze stosunkowo małymi prędkościami, a niczym ciało stałe, gdy zachodzą w nim niesłychanie szybkie drgania. Taki eter „przylepiałyby się” do Ziemi i pewna jego warstwa wędrowałaby wraz z nią po orbicie — tak że w pobliżu powierzchni Ziemi nie byłoby „wiatru eteru”. Szybkość rozchodzenia się fal jest stała względem ośrodka, a więc z teorii Stokesa wynikało, że dociera ono do naszych urządzeń optycznych z tą samą prędkością ze wszystkich kierunków (a nie, jak w teorii Fresnela, z różnymi prędkościami, tyle że tę różnicę kompensuje częściowy ruch eteru wraz z pryzmatem czy soczewką).

Z hipotez Fresnela, Cauchy’ego i MacCullagha, mających eliminować powstawanie w eterze fal podłużnych, nie wynikały, po dodaniu reszty ówczesnej wiedzy, zdania niedotyczące samej polaryzacji, które podlegałyby eksperymentalnemu sprawdzeniu. Hipotezy te nie pobudziły zatem naukowców do nowych badań eksperymentalnych. Znaleziono natomiast implikacje testowe hipotez Fresnela i Stokesa, mających wyjaśnić negatywny rezultat pomiarów Arago. W 1851 r. Hippolyte Fizeau badał interferencję promieni świetlnych biegnących pod prąd i z prądem szybkiego strumienia wody. Zaobserwował wywołane ruchem wody przesunięcie prążków interferencyjnych zgodne z hipotezą częściowego unoszenia eteru Fresnela. Martin Hoek w 1868 r. przeprowadził ten eksperyment w zmodyfikowanej postaci i uzyskał podobny wynik. W 1871 r. George Airy stwierdził, że kąt aberracji gwiazdnej nie zmienia się po napełnieniu teleskopu wodą. W latach siedemdziesiątych Éleuthère Mascart, używając zarówno laboratoryjnych źródeł światła, jak i światła ciał niebieskich, badał odbicie, załamanie, dyfrakcję, polaryzację przez substancje dwójłomne i skręcenie płaszczyzny polaryzacji przez kryształ górski. Eduard Ketteler w 1872 r. badał interferencję dwóch promieni biegnących w nachylnych do siebie rurach wypełnionych wodą, by znów stwierdzić, że ruch Ziemi nie wywołuje zmiany obrazu interferencyjnego. Wszystkie uzyskiwane wyniki potwierdzały teorię eteru Fresnela.

Nie zawsze uzyskiwano tak prosty obraz. Fizeau w 1860 r. stwierdził, że ruch Ziemi powoduje skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła przechodzącego przez szkło. Dopiero ćwierć wieku później Lorentz pokazał, że uzyskane przez Fizeau wyniki były sprzeczne, a w 1905 r. DeWitt Bristol Brace powtórzył ten sam eksperyment ze zwiększoną dokładnością i wykazał, że wspomniane skręcenie nie występuje. W 1870 r. Wilhelm Klinkerfues ogłosił, że ruch Ziemi zmienia linię absorpcyjną sodu — i trzeba było czekać do 1901 r., by Herman Haga eksperymentalnie wykazał, że był to błąd. We wszystkich wspomnianych dotąd eksperymentach uzyskiwano dokładność rzędu v_z/c . Wreszcie Albert Michelson znalazł sposób osiągnięcia dokładności rzędu v_z^2/c^2 . Jego eksperyment interferometryczny jest zbyt dobrze znany, by go tu

omawiać. Wyniki uzyskane w 1881 r. potwierdziły hipotezę braku wiatru eteru Stokesa, a podważyły hipotezę Fresnela. Wkrótce wyszło na jaw, że błędy pomiarów mogły być większe od oczekiwanych, a Michelson popełnił błąd rachunkowy, który powiększył oczekiwany efekt. Dlatego uczony nawiązał współpracę z Edwardem Morleyem, by badania kontynuować. W 1886 r. Michelson i Morley powtórzyli, w znacznie ulepszonej postaci, eksperyment Fizeau i uzyskali zgodność z przewidywaniami wynikającymi z hipotezy Fresnela rzędu 1% (por. Michelson, Morley 1886). Rok później powtórzyli eksperyment z 1881 r., dokonując szeregu modyfikacji w badanym układzie i już rzetelnie z dokładnością rzędu v_z^2/c^2 wykazali, że – zgodnie z hipotezą Stokesa – światło zachowuje się tak, jakby poruszało się względem Ziemi z taką samą prędkością we wszystkich kierunkach.

2. BRAKI WYOBRAŹNI TWÓRCZEJ CZY WYRAZ ISTOTY LUDZKIEGO POZNAWANIA?

Jak widać, wszystkie hipotezy, jakie sformułowano w latach 1815-1850 w odpowiedzi na wspomniane anomalie, dotyczyły mechanicznych własności eteru, nikt natomiast nie kwestionował samych zasad mechaniki, a tym bardziej leżących u ich podstaw przekonań o naturze czasu i przestrzeni. Dziś powiedzielibyśmy, że w obrazie świata mechaniki klasycznej dla problemów związanych ze zjawiskiem polaryzacji i pomiarami Arago nie było rozwiązania².

W tym miejscu ktoś mógłby stwierdzić – przywołując zasadę niedookreślenia w wersji Quine'a – że naukowcy tej epoki powinni co najmniej spróbować wymierzyć *modus tollens* w samą mechanikę klasyczną, zamiast bronić jej za pomocą kolejnych hipotez *ad hoc*. Rzecz w tym, że nie byli w stanie tego uczynić. Po pierwsze, to mechanika kształtowała sposoby, na jakie postrzegali świat i myśleli o świecie. Odrzucając ją, straciliby zdolność do naukowego myślenia o świecie. Nie ma naukowego myślenia bez teoretycznych założeń poprzedzających doświadczenia i późniejszą analizę ich wyników. Można zastąpić jeden system apriorycznych założeń innym, ale w połowie XIX w. żaden alternatywny system na rynku idei nie był dostępny. Nie jest możliwe stworzenie takiego systemu na zawołanie: musi on powstać w wyniku krążenia idei między jednostkami pobudzonymi do myślenia przez nowe odkrycia eksperymentalne analizowane za pomocą zastanego systemu. Odkrycia są ze swej istoty nieprzewidywalne, a zatem nie da się zaplanować powstania no-

² Tych, którzy nadal wierzą w istnienie newtonowskiego rozwiązania, a nawet takowe proponują, od dziesięcioleci uważa się za pseudonaukowców.

wych idei teoretycznych. W końcu jednak taki niezaplanowany – i niezgodny z intencjami jego twórcy – system powstał.

3. NARODZINY ELEKTRODYNAMIKI MAXWELLA

Na początku XIX w. znano trzy rodzaje sił działających, jak zakładano, na odległość: siły grawitacyjne, elektryczne i magnetyczne. Miały to być siły centralne, odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości między ich centrami. Oprócz tego znano wiele rodzajów sił działających przez kontakt: siły sprężystości, ciśnienia cieczy i gazów itd. W 1820 r. Hans Oersted odkrył siły działające między prądami elektrycznymi a magnesami. W ciągu kilku następnych miesięcy Ampère odkrył i zbadał siły działające między prądami elektrycznymi. Wyniki tych eksperymentów wskazywały, że magnetyzm jest skutkiem ruchu elektryczności. W 1829 r. Francesco Zantedeschi, a w 1831 r. niezależnie Michael Faraday i Joseph Henry odkryli zjawisko indukcji elektromagnetycznej. W połowie lat czterdziestych XIX w., w wyniku badań nad przekształcaniem pracy w ciepło i ciepła w pracę, Julius Meyer, Hermann Helmholtz i James Joule sformułowali niezależnie zasadę zachowania energii. Reakcja teoretyków – choć wszyscy chcieli być wierni mechanice klasycznej – była częściowo niedookreślona przez zastaną wiedzę i wspomniane odkrycia eksperymentalne.

W 1845 r. Wilhelm Weber zbudował teorię wyjaśniającą te odkrycia w kategoriach sił działających na odległość, zależnych od odległości ładunków, ale też od ich wzajemnych prędkości (co wyjaśniało siły między prądami) oraz przyspieszeń (co wyjaśniało indukowanie prądów).

James Clerk Maxwell, który uznał, że teoria Webera nie da się pogodzić z zasadą zachowania energii, poddał teoretycznej analizie zjawiska elektromagnetyczne, zakładając przy tym, że są one rezultatami oddziaływań przez kontakt. Całą przestrzeń wypełnia niewidzialny „ruchomy ośrodek” podległy prawom mechaniki klasycznej. Obecność i ruchy ciał naelektryzowanych i namagnesowanych wytwarzają w tym ośrodku jakieś procesy, które następnie oddziałują na inne ciała naelektryzowane bądź namagnesowane. W części I artykułu *O Faradayowskich liniach sił* (1855) jakościowo analizował ruch nieważkiej cieczy płynącej przez ośrodek, stawiający opór proporcjonalny do prędkości, pod wpływem różnicy ciśnień wytwarzanej przez układ źródeł i zlewów. Ale w części II (1856), matematycznej, porzucił takie wyobrażenia i wyprowadził równania określające pole magnetyczne wytwarzane przez prądy elektryczne oraz indukowanie prądów przez zmiany pola magnetycznego

z praw mechaniki, zasady zachowania energii, przyjętych wcześniej definicji natężeń pól i wyników eksperymentów. W części I *O fizycznych liniach sił* (1861) rozważał model wirów molekularnych (których obroty jawią się jako siły magnetyczne), a w części II uczynił wiry ciałami stałymi i umieścił między nimi warstwy kulek (będących zarazem ładunkami elektrycznymi). Nie uzyskał ani jednego równania elektrodynamiki, którego by już nie zaproponował w *O Faradayowskich liniach sił*. Na początku części III (1862) nadał wirom elastyczność. Łącząc takie wyobrażenia z matematyczną analizą równań wywiedzionych wcześniej, a także z prawem zachowania ładunku, wprowadził pojęcie prądu przesunięcia (dodając odpowiedni człon do prawa Ampère'a). Od tej chwili w jego tekstach znalazł się komplet równań zwanych dziś równaniami Maxwella, choć były one rozproszone, a związki między nimi niejasne. W ośrodku elastycznym mogą biec fale, a ich obliczona na podstawie pomiarów elektro- i magnetostatycznych prędkość okazała się równa zmierzzonej w eksperymentach optycznych prędkości światła. A zatem: „trudno nam uniknąć wniosku, że światło polega na poprzecznych drganiach tego samego ośrodka, który jest przyczyną zjawisk elektrycznych i magnetycznych” (Maxwell 1862: III). Ruchomy ośrodek okazał się eterem, a światło falą elektromagnetyczną.

W kolejnym artykule, *Dynamiczna teoria pola elektromagnetycznego* (1864), Maxwell nie próbował już podać modelu eteru, choć stanowczo twierdził, że istnieje i podlega prawom mechaniki. Zamiast tego w części VI podał czysto matematyczne falowe rozwiązania swych równań. Okazało się, że zawsze opisują rozchodzenie się fal poprzecznych, a nigdy podłużnych.

Równania pola elektromagnetycznego, wydedukowane z danych czysto eksperymentalnych, pokazują, że rozchodzić się mogą jedynie drgania poprzeczne. A zatem nauka elektromagnetyzmu wiedzie do dokładnie tych samych wniosków co nauka optyki [...]; obie stwierdzają rozchodzenie się drgań poprzecznych i obie określają tę samą prędkość ich rozchodzenia się (Maxwell 1864: § 100).

Maxwell, podkreślmy to, nie zamierzał przeprowadzać rewolucji w fizyce. Przeciwnie, chciał wprowadzić zjawiska elektromagnetyczne do zakresu udanych zastosowań mechaniki klasycznej. Do końca życia zachował nadzieję na to, że uda się zbudować model podległego prawom mechaniki ośrodka przekazującego oddziaływania elektryczne i magnetyczne między ciałami „ważkimi”. Nie udało się tego dokonać ani jemu, ani żadnemu z jego następców, choć próby takie z uporem podejmowano jeszcze na początku XX w. (a pseudonaukowcy podejmują je do dziś). W ten sposób, *niezależnie od czyichkolwiek subiektywnych przekonań czy zamierzeń, równania Maxwella stały się autonomiczne w stosunku do równań mechaniki klasycznej.*

Mało tego. Choć Maxwell nie skonstruował teorii eteru, to z praw mechaniki, przyjętych definicji natężeń pól elektrycznego i magnetycznego oraz z wyników eksperymentów wydedukował szereg równań matematycznych. A po dodaniu, w celu ocalenia zasady zachowania ładunku, członu na tzw. prąd przesunięcia, uzyskał układ równań, które niezależnie od jego intencji połączyły się w system. Gdy Maxwell wprowadzał funkcję prądu przesunięcia \mathbf{D} , wiązał ją z wyobrażeniami elastycznych odkształceń eteru (w związku z czym w artykułach z lat 1862 i 1864 błędnie zapisał, w obecnych oznaczeniach, $\mathbf{D} = -\epsilon\mathbf{E}$). Samych tych odkształceń jednak nie zdołał mechanicznie opisać, wskutek czego ogłoszone przez niego równanie dla prądu przesunięcia faktycznie — niezależnie od subiektywnych wyobrażeń — głosiło tyle co: „zmienne pole elektryczne wytwarza wirowe pole magnetyczne” (a Maxwell, najwyraźniej pod presją wymogu niesprzeczności, po jedenastu latach poprawił wspomniany wzór na $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$).

Zasadnicze dla dalszego rozwoju wydarzeń było uzyskanie wspomnianych rozwiązań falowych równań elektrodynamiki w 1864 r.: okazało się, że *same równania Maxwella, już bez udziału praw mechaniki, dostarczają modeli zjawisk, a modele te są zgodne z wynikami eksperymentów*. Tyle że Maxwell przedstawił swoje równania w sposób bardzo zawiły i niejasny, a jego prace — zwłaszcza ze względu na osobliwy splot wyobrażeń o eterze i rozważań matematycznych — sprawiały wrażenie raczej luźnego zlepku idei niż wykładu jednolitego systemu. W rezultacie przez ćwierć wieku jego elektrodynamika prawie nie zyskała zwolenników.

W latach siedemdziesiątych XIX w. Helmholtz przedstawił teorię łączącą idee Webera i Maxwella: siły elektryczne działają na odległość, ale cała przestrzeń jest wypełniona ośrodkiem, który w otoczeniu ciał naelektryzowanych ulega polaryzacji, co zmienia postać działających sił wypadkowych. Fale elektromagnetyczne w teorii Helmholtza mogą być zarówno poprzeczne, jak i podłużne.

4. ELEKTRODYNAMIKA CIAŁ W RUCHU PO MICHELSONIE

Michelson i Morley (1887) do analizy negatywnego wyniku swojego eksperymentu użyli klasycznej optyki falowej, a o Maxwellu czy domniemanej elektromagnetycznej naturze światła nawet nie wspomnieli. Przywołali jedynie hipotezy Fresnela, Stokesa i ich swoistą syntezę zaproponowaną w 1886 r. przez Lorentza. Z eksperymentów wymienili tylko eksperyment Fizeau z 1851 r., powtórzony przez nich w 1886 r.

Jednak akurat w tym czasie stosunek fizyków do teorii Maxwella uległ radykalnej zmianie. W latach 1885-1887 Oliver Heaviside przedstawił równania Maxwella w postaci prawie identycznej z tą, jaką dziś znamy z podręczników. Ogromnie ułatwiło to zarówno opanowanie teorii, jak i konstruowanie jej nowych zastosowań. Rzucone w 1879 r. przez Helmholtza wyzwanie, by eksperymentalnie rozstrzygnąć, która teoria zjawisk elektromagnetycznych jest prawdziwa, po ośmiu latach zdołał podjąć — dzięki ogłoszonym właśnie wynikom badań nad rozładowaniem butelki lejdejskiej — jego uczeń Heinrich Hertz. Gdy w 1887 r. wytworzył i odebrał fale radiowe, wyniki eksperymentów nad nimi przemówiły na korzyść teorii Maxwella — która ćwierć wieku po ogłoszeniu doczekała się wreszcie powszechnej akceptacji. Dla zwolenników elektrodynamiki Maxwella wyniki eksperymentów od Arago do Michelsona–Morleya i innych nabrały nowego sensu: pytanie o optykę ciał w ruchu stało się szczególnym przypadkiem pytania o elektrodynamikę ciał w ruchu.

Fizycy jeszcze przez dwadzieścia lat pozostali mechanistami. Jednak gdy mieli do czynienia ze światłem (łącznie z podczerwienią i nadfioletem) bądź z falami radiowymi, stosowali równania Maxwella — ponieważ tylko one, czy ktoś tego chciał, czy nie, dostarczały modeli fal elektromagnetycznych zgodnych z wynikami eksperymentów. Łączyli z tym, jak zaraz zobaczymy, rozmaite wyobrażenia o podległym prawom mechaniki eterze, ale niewiele to zmieniło, ponieważ mechanicznego modelu eteru nikt nie zdołał sformułować. *Niezależnie od intencji*, zostawali z *matematycznymi rozwiązaniami równań Maxwella* opisującymi (poprzeczne) fale elektromagnetyczne i z niczym więcej. Tymczasem równania te okazały się mieć zaskakujące własności matematyczne.

Z czysto matematycznego punktu widzenia równania Maxwella nie są niezmiennicze względem transformacji Galileusza. Załóżmy, że równania te są spełnione w kartezjańskim układzie odniesienia (x, y, z) , względem którego inny układ (x', y', z') porusza się ruchem jednostajnym z prędkością v , tak że osie x i x' pokrywają się, a osie y i y' oraz z i z' pozostają równoległe. Czas w obu układach, zgodnie z klasycznymi wyobrażeniami, płynie jednostajnie i wszędzie jednakowo. Jeśli w równaniach Maxwella podstawimy $x' = x - vt$, $y' = y$, $z' = z$, pozostawiając zmienną czasową t bez zmiany, to uzyskamy równania o innej postaci, a różnica między równaniami w obu układach będzie rosła wraz ze wzrostem prędkości.

W tym miejscu trzeba zaznaczyć, że niezmiennicze ze względu na transformacje Galileusza nie jest też klasyczne równanie falowe. Pracując nad teorią efektu Dopplera w 1887 roku — tym samym, w którym Michelson i Morley przeprowadzili słynny eksperyment, a Hertz odkrył fale radiowe — Woldemar

Voigt wyprowadził transformacje zachowujące niezmienniczość tego równania. Miały one, w używanych dziś oznaczeniach, postać:

$$x = x - vt, \quad y' = \beta y, \quad z' = \beta z, \quad t' = t - (vx/c^2),$$

gdzie $\beta = (1 - v^2/c^2)^{1/2}$. Dzieląc wszystkie te wzory przez β , otrzymuje się transformacje zwane dziś transformacjami Lorentza. Wyjaśnić tu trzeba, że zarówno równania Maxwella, jak i równanie falowe są niezmiennicze względem transformacji Voigta (lub Lorentza) przemnożonych przez dowolną funkcję prędkości. Do pomnożenia wzorów przez β^{-1} skłoniłyby Voigta proste rozważania fizyczne, nie próbował jednak nadać transformacjom fizycznego sensu, w szczególności nie powiązał ich z wynikami eksperymentów Michelsona – traktował je jedynie jako narzędzie obliczeniowe. Był to zapewne jeden z powodów, dla którego jego praca przeszła bez echa.

Również bez echa przeszedł zrazu króciutki tekst George'a FitzGerala z 1889 r., w którym wynik eksperymentu Michelsona–Morleya został poddany jakościowej analizie przy użyciu, z jednej strony, atomizmu, a z drugiej, elektrodynamiki. Oto jego najważniejszy fragment:

Chciałbym zasugerować, że niemal jedyna hipoteza, która może tę sprzeczność rozwiązać, jest taka, że długość ciał materialnych zmienia się w trakcie ruchu przez eter czy wskroś niego, w stopniu zależnym od kwadratu stosunku ich prędkości do prędkości światła. Wiemy, że na siły elektryczne wpływa ruch ciał naelektryzowanych względem eteru i nie wydaje się, by nieprawdopodobne było przypuszczenie, iż ruch wywiera wpływ na siły molekularne, a w rezultacie rozmiar ciała ulega zmianie (FitzGerald 1889).

Pierwsza próba sformułowania elektrodynamiki ciał w ruchu została podjęta przez Hertza w 1890 r. Już wcześniej Rowland i Röntgen badali pola magnetyczne wytwarzane przez naelektryzowane dyski szybko wirujące między okładkami również naelektryzowanego kondensatora. Wykorzystując wyniki ich pomiarów i zakładając, że eter wypełniający wnętrza ciał „ważkich” porusza się wraz z nimi, a zatem że we wnętrzach ciał obowiązują zwykłe równania Maxwella, Hertz podał wzory na transformacje natężeń pól elektrycznego i magnetycznego przy przechodzeniu od jednego inercjalnego układu odniesienia do drugiego. Jednak wyniki kolejnych eksperymentów podważyły główne założenie Hertza. Oliver Lodge w 1891 r. badał interferencję promieni przechodzących w obie strony między równoległymi dyskami zamocowanymi na wspólnej osi; interferencyjny obraz nie zmienił się po wprawieniu dysków w szybki ruch obrotowy, z czego wynikało, że nie udzielają one eterowi nawet 1/200 prędkości swego ruchu.

Hendrik Lorentz jeszcze w swym doktoracie z 1875 r. zauważył, że gdyby eter był sprężystym ciałem stałym, nie udałoby się uniknąć powstawania w nim fal podłużnych. W związku z tym, akceptując równania Maxwella, po-

rzucił wszelkie próby skonstruowania modelu eteru jako ośrodka podległego prawom mechaniki. Uznał eter za ciało zupełnie innego rodzaju niż ciała „ważkie”. Po czym połączył elektrodynamikę Maxwella z ideami Webera i zaczęła budować teorię nazwaną po latach „elektronową”. W dojrzałej postaci ogłosił ją w artykule *Teoria elektromagnetyczna Maxwella i jej zastosowanie do ciał w ruchu* (1892a). Próbę wyjaśnienia negatywnego wyniku eksperymentu Michelsona–Morleya z 1887 r. podjął Lorentz w krótkim tekście *Względny ruch Ziemi i eteru* (1892b). Na początku przywołał hipotezy Fresnela i Stokesa, by przyznać, że ta pierwsza wyjaśnia wyniki wszystkich przeprowadzonych na jej podstawie eksperymentów z wyjątkiem eksperymentu Michelsona–Morleya. Po dokonaniu klasycznych obliczeń czasów, w jakich światło przebiega ramiona interferometru, stwierdzał:

Od dawna na próżno usiłowałem ten eksperyment wyjaśnić, aż znalazłem jedyny sposób pogodzenia uzyskanego rezultatu z teorią Fresnela. Polega on na założeniu, że linia łącząca dwa punkty ciała stałego nie zachowuje swej długości, gdy raz porusza się równoległe do kierunku ruchu Ziemi, a następnie zostaje ustawiona do niego prostopadle. [...] Faktycznie, co determinuje rozmiar i kształt ciała stałego? Najwyraźniej natężenie sił molekularnych [...]. A teraz możemy założyć, że siły elektryczne i magnetyczne działają za pośrednictwem eteru. [...] w takim razie zmieniać się one będą w zależności od tego, czy linia łącząca dwie cząstki poruszające się razem przez eter jest równoległa do kierunku ruchu, czy prostopadła (Lorentz 1892b).

Zauważmy, że Lorentz, nie znając pracy FitzGerala, formułuje tezy bliźniaczo podobne. Obaj traktują też hipotezę kontrakcji jako „niemal jedyną” lub wręcz „jedyną”, jaka w zaistniałej sytuacji wchodzi w grę. Proste i czysto klasyczne obliczenia doprowadziły Lorentza do wniosku, że obraz interferencyjny się nie zmieni (z dokładnością rzędu v^2/c^2), jeśli „długość ramion [interferometru] w pierwszym eksperymencie Michelsona, a rozmiar kamiennej płyty w drugim” zmniejszają się w kierunku ruchu zgodnie ze wzorem $l' = l(1 - v^2/2c^2)$.

W pracy *Zjawiska elektryczne i optyczne w poruszających się ciałach* (Lorentz 1895), wprowadził „twierdzenie o stanach korespondujących”. Zgodnie z nim z dokładnością do wyrazów rzędu v/c obserwator poruszający się względem eteru z prędkością v obserwuje zjawiska „fikcyjne” identyczne z tymi, jakie obserwuje obserwator nieruchomy mający do czynienia ze zjawiskami „rzeczywistymi”. Prowadziło to do ciekawych konsekwencji, jeśli chodzi o czas (dla prostoty posłużę się nieco późniejszą interpretacją Poincarégo). Wiemy z doświadczenia, że światło zachowuje się w układzie związanym z Ziemią tak, jakby poruszało się z tą samą prędkością we wszystkich kierunkach. Nie wiedząc, czy i z jaką prędkością względem eteru porusza się nasz układ, synchronizujemy rozmieszczone w różnych miejscach zegary, wysyła-

jąc sygnał świetlny, a następnie nastawiając każdy zegar na czas t' równy l'/c , gdzie l' to mierzona w naszym układzie odległość między źródłem światła a zegarem. Jeśli „w rzeczywistości” nasz układ porusza się względem eteru z prędkością v wzdłuż osi x , to w tym kierunku faktycznie (o czym nie wiemy) światło porusza się w jedną stronę z prędkością $c - v$, a w drugą $c + v$. A zatem, synchronizując zegary, popełniamy błąd. Czas „lokalny” t' , wskazywany przez każdy z naszych zegarów, różni się od czasu „rzeczywistego” t , wspólnego dla całego kosmosu, a związek między nimi dany jest — zgodnie z fizyką klasyczną — wzorem $t' = t - vx/c^2$. Jeśli potem, używając tak „rozregulowanych” zegarów, mierzymy w naszym układzie prędkość światła, to stwierdzamy, że jest ona we wszystkich kierunkach taka sama (wnioskując tak, popadamy w błędne koło, jako że założenie o stałości c legło u podstaw procedury synchronizacji zegarów).

Po paru latach Lorentz ogłosił *Uproszczoną teorię zjawisk elektrycznych i optycznych w układach poruszających się* (1899). Podał wzory na transformacje czasu i współrzędnych przestrzennych zachowujące — gdyby uzupełnić je o transformacje pozostałych wchodzących w grę wielkości — pełną niezmienniczość równań Maxwella. Wciąż uzależniony od wyobrażeń o nieruchomym eterze posługiwał się trzema układami współrzędnych. Z układu S , spoczywającego w stosunku do eteru, przechodził do układu S_k , poruszającego się prostoliniowo i z jednostajną prędkością v , za pomocą transformacji Galileusza, a stąd przechodził do „wyobrażonego układu” S' . Łącząc oba te kroki, otrzymujemy:

$$x' = \varepsilon\gamma(x - vt), \quad y' = \varepsilon y, \quad z' = \varepsilon z, \quad t' = \varepsilon\gamma(t - vx/c^2),$$

gdzie $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. Jeśli podstawić $\varepsilon = 1$, to mamy wzory znane dziś jako transformacje Lorentza; podstawienie $\varepsilon = (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ daje transformacje Voigta. Lorentz o ε stwierdzał:

aby uzyskać rzeczywiste transformacje wytworzone przez ruch postępowy, ten czynnik winien mieć określoną wartość. Nie widzę jednak sposobu, aby ją wyznaczyć (Lorentz 1899: § 9).

Joseph Larmor jeszcze w latach 1894-1895 przedstawił teorię elektronową podobną do Lorentzowskiej. W artykule *O dynamicznej teorii ośrodka elektrycznego i świetlnego* (1897) i w książce *Eter i materia* (1900) podał, przyjmując $\varepsilon = 1$, wzory transformacyjne nie tylko dla współrzędnych czasoprzestrzennych, lecz także dla natężeń pól elektrycznych i magnetycznych, identyczne z tymi, jakie znamy z dzisiejszych podręczników. W rezultacie, co uzmysłowił mu Lorentz, uzyskał niezmienniczość równań Maxwella z dokładnością do wielkości rzędu v^2/c^2 . Nie zdawał sobie sprawy z tego, że gdyby do-

dać jeszcze wzory na transformacje gęstości ładunków i prądów, a także na sumowanie prędkości, równania Maxwella stałyby się w pełni niezmiennicze. Podobnie jak Lorentz, traktował dylatację rozmiarów ciał i czasu jako efekty dynamiczne (a za realnością czasu absolutnego argumentował jeszcze w latach dwudziestych).

Aby nie komplikować rozważań, pomińmy historię badań, które doprowadziły do odkrycia elektronu, a następnie promieniotwórczości, a także dociekań teoretycznych na temat wzrostu masy „elektromagnetycznej” naelektryzowanych ciał w ruchu, potwierdzonych eksperymentalnie przez Kaufmanna w 1901 r.

Badacze, którzy do rozważań nie włączali elektrodynamiki, nadal próbowali modyfikować stare teorie. Max Planck w liście do Lorentza z 1899 r. wyraził przypuszczenie, że eter jest ściśliwy, a ten otaczający Ziemię pod wpływem sił grawitacji zwiększa gęstość i wędruje wraz z nią. Theodor des Coudres i Wilhelm Wien w 1900 r. przedstawili podobną wersję teorii Stokesa, przyjmując, że współczynnik unoszenia eteru jest proporcjonalny do natężenia sił grawitacyjnych (a zatem jest duży w przypadku całej Ziemi, natomiast prawie nie unoszą go niewielkie przyrządy eksperymentalne).

W wydanej w 1902 r. *Nauce i hipotezie* Poincaré sformułował zasadę względności. Najpierw, jak pisał, wykazano brak wpływu ruchu Ziemi na przebieg zjawisk optycznych z dokładnością do wyrazów rzędu v/c , co zmusiło do wprowadzenia hipotez kontrakcji i dylatacji czasu. Gdy Michelson i Morley osiągnęli dokładność rzędu v^2/c^2 , Lorentz i inni wprowadzili do wzorów transformacyjnych odpowiednie poprawki, zadowolili się jednak niezmienniczością równań z taką właśnie dokładnością, tym samym sugerując podjęcie dalszych prac eksperymentalnych mających na celu wykrycie efektów ruchu Ziemi względem eteru, jakkolwiek niewielkie by one były. Poincaré natomiast uogólnił indukcyjnie dotychczasowe niepowodzenia:

wbrew Lorentzowi nie wierzę, by najdokładniejsze nawet obserwacje mogły kiedykolwiek doprowadzić do wykrycia czegoś więcej niż tylko ruchy względne ciał materialnych (Poincaré 1902: rozdz. 12).

Do śmierci w 1912 r. zachował jednak rozróżnienie wielkości „rzeczywistych” (jak absolutny czas, płynący wszędzie jednakowo) i „pozornych” (jak czas mierzony zegarami umieszczonymi w różnych miejscach układów poruszających się względem eteru).

Rayleigh w 1901 r. próbował zaobserwować, wywołane domniemaną kontrakcją w kierunku ruchu, podwójne załamanie światła w izotropowych kryształach — daremnie. Dokładność tego eksperymentu powiększył wkrótce Brace — i też niczego nie zaobserwował. W latach 1901-1903 Trouton i Noble

próbowali wykryć moment siły działającej na poruszający się wraz z Ziemią przez eter płaski kondensator – na próżno. Wreszcie Emil Cohn (1904) wyeliminował z obrazu świata eter, a za uniwersalny układ odniesienia uznał gwiazdy stałe. Jego elektrodynamika ciał w ruchu nie wytrzymała jednak próby czasu.

Odkrycia te zainspirowały Lorentza do dalszej modyfikacji wzorów transformacyjnych i dodania kolejnych. W artykule *Zjawiska elektromagnetyczne w układach poruszających się z dowolną prędkością mniejszą od prędkości światła* (1904) popełnił jednak błędy we wzorach na transformacje gęstości ładunków i sumowania prędkości, a w rezultacie trzy równania Maxwella, w ich „elektronowej” wersji, pozostawały niezmiennicze, lecz równanie będące połowym odpowiednikiem prawa Coulomba w układzie poruszającym się przyjmowało postać $\text{div}'e' = 4\pi\rho'(1 - uv/c^2)$. Te błędy poprawił Poincaré w artykule *O dynamice elektronu*. Jego krótka wersja ukazała się drukiem 5 czerwca 1905 r., a w lipcu oddał do druku wersję pełną, opublikowaną w styczniu 1906 roku. 30 czerwca 1905 r. Einstein przesłał swój artykuł *Elektrodynamika ciał w ruchu*, który opublikowano we wrześniu tegoż roku. W artykule Einsteina znajdują się wzory transformacyjne dla czasu, przestrzeni, natężeń pól elektrycznych i magnetycznych, gęstości ładunków i prądów, uzupełnione przez wzory na sumowanie prędkości. Są one identyczne z tymi, jakie znaleźć można w artykułach Lorentza i Poincarégo. Różnica polega na tym, że zdaniem Einsteina „wprowadzenie »eteru świetlnego« okazuje się zbędne”. To jedno twierdzenie sprawiało, że to, co dla Lorentza, Larmora czy Poincarégo było efektem dynamicznym, wywołanym domniemaną zmianą sił wiążących atomy, a także błędów popełnionych nieświadomie przy synchronizacji zegarów, stawało się efektem czysto kinematycznym niewymagającym dalszych wyjaśnień.

5. CZY FIZYCY W 1905 ROKU MIELI WYBÓR?

Mając to wszystko na uwadze, zastanówmy się, czy w latach 1887-1905 istniała, jak twierdził Quine, „znaczną swobodą wyboru zdań, których ocena [miała] ulec zmianie wobec danego konfliktu z doświadczeniem”, a dowolne zdanie mogło nadal obowiązywać, niezależnie od wyników eksperymentów, gdyby dokonano „dostatecznie daleko idącego przystosowania reszty systemu”? Czy zamiast szczególnej teorii względności ok. 1905 r. mógł pojawić się inny system fizyki?

Gdyby Quine miał rację, to trzeba by zadać pytanie, dlaczego w tym czasie wszyscy niemal teoretycy próbujący rozwiązać zagadkę braku wpływu ruchu Ziemi na przebieg zjawisk elektromagnetycznych, w tym świetlnych, zmierzali na dobrą sprawę w tym samym kierunku? Owszem, różne były ich wyobrażenia czy komentarze, które dodawali do publikowanych wzorów. Ale jeśli uwzględnimy jedynie matematyczną stronę ich dociekań, to różnice znikają: wszyscy, krok po kroku, doskonalili wzory transformacyjne, które w granicy były identyczne, przynajmniej z dokładnością do pewnej funkcji prędkości. Czy ten brak alternatyw należy tłumaczyć tym, że fizykom zabrakło wyobraźni twórczej? A z drugiej strony, jak wyjaśnić tę zbieżność rezultatów dociekań? Czy tylko presją, jaką jedni teoretycy wywierali na innych?

Logiczne i matematyczne relacje między raz sformułowanymi twierdzeniami zachodzą niezależnie od intencji ich twórców. Choć wyobrażenia może nas kierować na poznawcze manowce, to takie relacje wywierają presję na myślenie ludzi wytrenowanych w stosowaniu logiki i matematyki. Lorentz, Larmor, Poincaré i inni byli przekonani o prawdziwości zarówno mechaniki klasycznej, łącznie z leżącymi u jej podstaw założeniami na temat czasu i przestrzeni, jak i elektrodynamiki Maxwella (którą mieli nadzieję zredukować do mechaniki). Ale badając zjawiska optyczne, używali równań Maxwella jako równań autonomicznych, które nie tylko uniknęły redukcji do mechaniki, lecz także samodzielnie dostarczały matematycznych modeli fal świetlnych.

Z punktu widzenia logiki, niezależnie od towarzyszących dociekaniom wyobrażeń, sytuacja przedstawiała się następująco: z koniunkcji równań Maxwella i transformacji Galileusza wynikało, że jeśli w danym układzie odniesienia spełnione są równania Maxwella, to w układzie poruszającym się względem niego ruchem jednostajnym obowiązują równania nieco odmienne, a stopień odmienności rośnie z prędkością. Tymczasem eksperymenty uparcie wykazywały, że światło — zarówno pochodzące z gwiazd, jak i wytwarzane w laboratorium — rozchodzi się na powierzchni Ziemi tak, jakby zawsze obowiązywały te same równania. Na mocy *modus tollens* wynikało stąd, że albo fałszywe są równania Maxwella, albo błąd tkwi w transformacjach Galileusza. Jednocześnie każdy eksperyment potwierdzał Maxwellowską elektrodynamikę. Oczywiście, nie twierdzę, że wyniki eksperymentów dowodziły prawdziwości równań Maxwella — tego się w naukach osiągnąć nie da. Ale żadne wyniki eksperymentów nie dostarczały przesłanek pozwalających te równania zmodyfikować. W tej sytuacji *nie było wyboru*: modyfikacji musiano poddać transformacje czasoprzestrzenne. Z sugerowanego przez wyniki eksperymentów wymogu niezmienniczości równań Maxwella w różnych układach inercjalnych wynika *jedna* klasa transformacji, a transformacje te tworzą grupę jedynie wtedy, gdy we wzorach Lorentza z 1899 r. podstawimy $\epsilon = 1$.

Wspominałem też wcześniej o takich sytuacjach w historii nauki, w których istniało wiele możliwości dalszego rozwijania systemu teoretycznego stojącego w obliczu anomalii doświadczalnych³ i w których rozwój systemu faktycznie przez pewien czas biegł różnymi drogami. Jednak również wówczas stopień niedookreśloności jest — zwłaszcza z powodów, które wskazałem w części 2 — dużo mniejszy, niż by to Quine i jego zwolennicy chcieli przyznać. Natomiast w przypadku prowadzonych w latach 1887-1905 badań nad elektrodynamiką ciał w ruchu, o czym dziś częściej mówi się jako o procesie budowania szczególnej teorii względności, stan wiedzy teoretycznej z jednej strony, a wyniki eksperymentów z drugiej, narzucały takie ograniczenia, że pozostawała tylko jedna droga rozwoju.

BIBLIOGRAFIA

- Cohn E. (1904), *Zur Elektrodynamik bewegter Systeme I & II*, „Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften” 40, 1294-1303; 43, 1404-1416.
- Einstein A. (1905), *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, „Annalen der Physik” 322(10), 891-921; wyd. pol. *O elektrodynamice ciał w ruchu* [w:] *Pięć prac, które zmieniły oblicze fizyki*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2005, 121-156.
- FitzGerald G. (1889), *The Ether and the Earth's Atmosphere*, „Science” 13(328), 390.
- Fresnel A. (1818), *Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique*, „Annales de chimie et de physique” 9, 57-66.
- Larmor J. (1897), *On a Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium*, „Philosophical Transactions of the Royal Society” 190, 205-300.
- Larmor J. (1900), *Aether and Matter*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Lorentz H. A. (1892a), *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants*, „Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles” 25, 363-552.
- Lorentz H. A. (1892b), *De relatieve beweging van de aarde en den aether*, „Verslag van de Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam” 1, 74-79.
- Lorentz H. A. (1895), *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Leiden: Brill.
- Lorentz H. A. (1899), *Simplified Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Systems*, „Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences” 1, 427-442.
- Lorentz H. A. (1904), *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with Any Velocity Smaller than That of Light*, „Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences” 6, 809-831.

³ Tak było w przypadku tych, którzy również po 1887 r. ignorowali elektromagnetyczną teorię światła i usiłowali wyjaśnić wyniki eksperymentów od Arago do Michelsona, stosując jedynie równania mechaniki klasycznej.

- Maxwell J. C. (1855-1856), *On Faraday's Lines of Force*, „Transactions of the Cambridge Philosophical Society” 10, 155-229.
- Maxwell J. C. (1861-1862), *On Physical Lines of Force*, „Philosophical Magazine” 21, 161-175, 281-291, 338-348; 23, 12-24, 85-95.
- Maxwell J. C. (1864), *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, „Philosophical Transactions of the Royal Society of London” 155, 459-512.
- Michelson A. A., Morley E. W. (1886), *Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light*, „American Journal of Science” 31, 377-386.
- Michelson, A. A., Morley, E. W. (1887), *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, „American Journal of Science” 34, 333-345.
- Poincaré H. (1902), *La science et l'hypothèse*, Paris: Flammarion; wyd. pol. *Nauka i Hypoteza*, Warszawa 1908.
- Poincaré H. (1905), *Sur la dynamique de l'électron*, „Comptes Rendus” 140, 1504-1508.
- Poincaré H. (1906), *Sur la dynamique de l'électron*, „Rendiconti del Circolo matematico di Palermo” 21, 129-176.
- Quine W. V. O. (1951), *Two Dogmas of Empiricism* [w:] *From a Logical Point of View*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 20-46.
- Röntgen, W. (1895), *Über eine neue Art von Strahlen*, „Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinische Gesellschaft zu Würzburg”, 137-147.
- Stanford K. (2016), *Underdetermination of Scientific Theory* [w:] *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2016 Edition), E. N. Zalta (ed.), <https://goo.gl/tPqx73>.
- Stokes G. G. (1845), *On the Aberration of Light*, „Philosophical Magazine” 27, 9-15.