

# Einstein i fizyka 100 lat temu\*

Andrzej Kajetan Wróblewski

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

## Einstein and physics hundred years ago

*Abstract:* In 1905 Albert Einstein published four papers which revolutionized physics. Einstein's ideas concerning energy quanta and electrodynamics of moving bodies were received with scepticism which only very slowly went away in spite of their solid experimental confirmation.

## Wstęp

W końcu XIX wieku wśród fizyków i chemików panowało nieuzasadnione – jak dziś wiemy – przekonanie, że w naukach ścisłych pozostało już niewiele do zbadania. Istniały wprawdzie fakty trudne do wyjaśnienia przez ówczesne teorie, uważano jednak, iż są to tylko drobne, mało znaczące detale. Słynny fizyk holenderski Pieter Zeeman wspominał, że kiedy był młodym człowiekiem, ostrzegano go (około 1883 r.), żeby nie studiował fizyki, która przestała być dziedziną obiecującą.

Podobne wspomnienia miał Max Planck [1].

Kiedy rozpoczynałem moje studia fizyczne i u mego cziogodnego nauczyciela Philippa von Jolly'ego zasięgałem opinii na temat ich warunków i perspektyw, przedstawił mi on fizykę jako naukę wysoko rozwiniętą, prawie całkowicie dojrzałą, która po ukoronowaniu jej osiągnięć przez odkrycie zasady zachowania energii miała już wkrótce przyjąć ostateczną postać. Wprawdzie w tym czy innym zakątku pozostaje jeszcze do zbadania i usunięcia jakiś pyłek czy pęcherzyk, ale jeśli chodzi o system jako całość, to jest on dość ugruntowany, a fizyka teoretyczna wyraźnie zbliża się do osiągnięcia takiej doskonałości, jaka od stuleci jest właściwa geometrii.

Sławny francuski chemik Marcellin Berthelot wyraził to lapidarnie w 1885 r. w pierwszym zdaniu swej książki o początkach alchemii [2]: „Le monde est aujourd'hui sans mystère” (Świat nie ma już dziś dla nas tajemnic). Sławny fizyk amerykański Albert A. Michelson wyraził w 1894 r. (w przemówieniu podczas otwarcia laboratorium Ryersona na University of Chicago) opinię, że:

Wszystkie najważniejsze fundamentalne prawa i fakty w fizyce zostały już odkryte i tak dobrze ustalone, iż jest znikome prawdopodobieństwo, że zostaną one uzupełnione w wyniku nowych odkryć. (...) Przyszłych nowych prawd w fizyce trzeba będzie szukać na szóstym miejscu po przecinku.

27 kwietnia 1900 r. lord Kelvin wygłosił w Royal Institution w Londynie sławny odczyt pod tytułem „Dziwienastowieczne obłoki nad dynamiczną teorią ciepła”. Rozszerzona wersja tego wykładu ukazała się drukiem

w następnym roku [3]. Kelvin wypowiedział tam słynne, wielokrotnie potem cytowane zdania:

Piękno i przejrzystość teorii dynamicznej, według której ciepło i światło to rodzaje ruchu, są obecnie przesłaniane przez dwa obłoki. Pierwszy pojawił się wraz z falową teorią światła i był rozpatrywany przez Fresnela i dr. Thomasa Younga: jest to pytanie, jak Ziemia może się poruszać poprzez sprężyste ciało stałe, jakim w zasadzie jest światłonośny eter? Drugi to doktryna Maxwella–Boltzmanna dotycząca ekwipartycji energii.

Kelvin podjął różne próby znalezienia wyjścia z sytuacji zaistniałej po negatywnym wyniku doświadczenia Michelsona–Morleya. Rozważał nawet możliwość rezygnacji z postulatu, że dwie porcje materii ważkiej nie mogą zajmować tego samego miejsca w przestrzeni. Gdy próby zakończyły się niepowodzeniem, uznał, że „ten obłok należy nadal traktować jako bardzo gęsty”. Inaczej wyglądała sprawa obłoku nr 2, który Kelvin uważał za mniej groźny, gdyż sądził wtedy, że zasadę ekwipartycji uda się w przyszłości obalić.

W kilku ostatnich latach XIX stulecia dokonano kilku niespodziewanych odkryć: promieni X w końcu 1895 r., naturalnej promieniotwórczości parę miesięcy później (luty 1896 r.), korpuskularnej natury promieni katodowych (1897), a w samym końcu wieku, w grudniu 1900 r., Planck zapoczątkował teorię kwantów. Fizycy zgromadzeni na I Międzynarodowym Kongresie Fizyków w Paryżu, w sierpniu 1900 r., byli jednak w większości przekonani, że fizyka znakomicie objaśnia świat.

Pięć lat później cztery artykuły, które miały zmienić obraz fizyki, opublikował Albert Einstein. Urodził się 14 marca 1879 r. w Ulm, w żydowskiej rodzinie kupieckiej, która wkrótce przeniosła się do Monachium, bardziej odpowiedniego miejsca do prowadzenia interesów. Einstein osiągał w szkole bardzo dobre stopnie z matematyki oraz łaciny i studiował książki matematyczne wykraczające poza program szkolny. Gdy w 1894 r. jego rodzice przenieśli się do Mediolanu, Albert najpierw pozostał w Monachium, ale wkrótce, nie ukończywszy gim-

\*Na podstawie wykładu wygłoszonego podczas XXXVIII Zjazdu Fizyków Polskich w Warszawie (wrzesień 2005) w sesji plenarnej.

nazjum, pojechał do rodziny do Włoch i tam próbował samodzielnie przygotować się do egzaminu wstępnego na znaną szwajcarską politechnikę w Zurychu (później, od 1911 r., znaną jako Eidgenössische Technische Hochschule, w skrócie ETH). W październiku 1895 r. egzaminu tego nie zdał, więc spędził jeszcze rok w gimnazjum w szwajcarskim mieście Aarau. Uzyskał tam z bardzo dobrymi stopniami maturę i wstąpił na politechnikę. W tym samym czasie zrezygnował z niemieckiego obywatelstwa, by w 1901 r. otrzymać obywatelstwo szwajcarskie. W 1900 r. ukończył studia po czterech latach, uzyskując na egzaminie dyplomowym bardzo dobre oceny z matematyki, fizyki i astronomii. Próby uzyskania posady asystenta na uczelni były nieudane, Einstein dawał więc prywatne lekcje i pracował dorywczo jako nauczyciel matematyki w szkołach technicznych w Winterthur i Schaffhausen. W 1902 r. znalazł wreszcie zatrudnienie w urzędzie patentowym w Bernie. Tam, pozbawiony kontaktów z ówczesnymi uczonymi i ośrodkami naukowymi, prowadził w czasie wolnym od pracy urzędniczej samodzielne rozważania na temat najbardziej podstawowych kwestii fizyki.

W roku 1905 skromny, nieznanym nikomu ekspert patentowy trzeciej klasy z Berna zadziwił świat czterema artykułami opublikowanymi w *Annalen der Physik*, jednym z najważniejszych ówczesnych czasopism fizycznych<sup>1</sup>. Pierwsza praca przedstawiała nowe spojrzenie na procesy emisji i pochłaniania światła oraz zjawisko fotoelektryczne, druga dotyczyła ruchów Browna, trzecia – elektrodynamiki ciał w ruchu, a czwarta zawierała pierwszą postać słynnego wzoru  $E = mc^2$ .

## Kwanty energii

Artykuł „O pewnym heurystycznym punkcie widzenia na wytwarzanie i przemianę światła” nadszedł do redakcji 17 marca i ukazał się 9 czerwca [4]. W pracy tej Einstein wyszedł poza ideę Plancka o kwantowym charakterze procesów emisji i absorpcji promieniowania. Już we wstępie stwierdzał:

Istnieje głęboka różnica formalna między pojęciami teoretycznymi, które fizycy utworzyli na temat gazów i innych ciał ważkich, oraz teorią Maxwella procesów elektromagnetycznych w tzw. pustej przestrzeni. Chociaż uważamy, że stan ciała jest całkowicie wyznaczony przez położenia i prędkości bardzo wielkiej, ale skończonej liczby atomów i elektronów, do opisu stanu elektromagnetycznego elementu przestrzeni używamy ciągłych funkcji przestrzennych, tak że skończonej liczby wielkości nie można uznać za wystarczającą do całkowitego opisu stanu elektromagnetycznego przestrzeni. Według teorii Maxwella energię traktuje się jako ciągłą funkcję przestrzenną dla wszystkich czysto elektromagnetycznych procesów, natomiast zgodnie z obecnymi

poglądami fizyków energię ciała ważkiego powinno się przedstawiać jako sumę po atomach i elektronach.

Próbując usunąć tę różnicę podejść, Einstein zajął się entropią. Zależność entropii monochromatycznego promieniowania od objętości opisywano wtedy wzorem Wiena. Na jego podstawie Einstein otrzymał wzór na przyrost entropii  $S$  odpowiadający przyrostowi objętości  $v$  zajmowanej przez promieniowanie o częstotliwości  $\nu$ . Miał on postać:  $S - S_0 = (E/\beta\nu) \ln(v/v_0)$ . Natomiast ze wzoru Boltzmannna na entropię gazu Einstein wyprowadził wyrażenie na przyrost entropii gazu w zależności od prawdopodobieństwa termodynamicznego  $W$  jako  $S - S_0 = (R/N) \ln W$ , gdzie  $R$  oznacza uniwersalną stałą gazową, a  $N$  – liczbę cząsteczek w gramorównoważniku gazu (liczbę Avogadra). Można było zauważyć formalne podobieństwo obu wzorów, ponieważ z prostych rozważań kombinatorycznych dla rozkładu w przestrzeni  $n$  cząsteczek wynika  $W = (v/v_0)^n$ , czyli  $\ln W = n \ln(v/v_0)$ . Einstein doszedł do wniosku, że możliwe jest wprowadzenie „ziarnistości” promieniowania. Napisał więc:

Wydaje mi się, że obserwacje „promieniowania ciała czarnego”, fotoluminescencji, wytwarzania promieni katodowych przez światło nadfioletowe i inne zjawiska związane z emisją oraz przemianą światła są łatwiej zrozumiałe, jeśli się założy, że energia światła jest w przestrzeni rozłożona w sposób nieciągły. Zgodnie z rozważanym tu założeniem, przy rozchodzeniu się wysłanego ze źródła punktowego promienia świetlnego jego energia nie jest rozłożona w sposób ciągły w stale zwiększającej się objętości przestrzeni, lecz składa się ze skończonej liczby kwantów energii, które są zlokalizowane w punktach przestrzeni, poruszają się bez podziału i mogą być pochłaniane lub wytwarzane tylko jako kompletne całości.

Często się powiada, że ta pierwsza praca Einsteina z 1905 r. dotyczyła wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego. Tymczasem większa jej część była poświęcona dyskusji kwantowego charakteru promieniowania, a dopiero w krótkim urywku w końcowej części Einstein wykazał, że przyjęcie jego hipotezy kwantów energii pozwala na wyjaśnienie obserwowanych cech zjawiska fotoelektrycznego. Po dalszych przekształceniach, które tu opuszczamy, wyprowadził mianowicie wzór dla energii  $E$  wyrzucanych elektronów,  $E = h\nu - P$ , gdzie  $P$  oznacza pracę wyjścia elektronów<sup>2</sup>.

Jeżeli ten wzór jest poprawny, to  $\Pi$  wykreślone we współrzędnych kartezjańskich jako funkcja częstotliwości padającego światła musi dać linię prostą o nachyleniu niezależnym od natury badanej substancji.

Wydaje mi się, że ta koncepcja zjawiska fotoelektrycznego nie jest sprzeczna z jego właściwościami, które obserwował pan Lenard. Jeżeli każdy kwant energii padającego światła przekazuje swą energię elektronowi niezależnie od innych, to rozkład prędkości elektronów, czyli natura wytworzonych promieni ka-

<sup>1</sup> Polskie tłumaczenie tych prac oraz rozprawy doktorskiej Einsteina dokonane przez Piotra Amsterdamskiego opublikowały Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego w 2005 r. jako *Albert Einstein – 5 prac, które zmieniły oblicze fizyki*. Donosiliśmy o tym w Kronice 2/2005, a w zeszycie 2/2006 zamieściliśmy recenzję tej książki pióra Adama Bechlera – red.

<sup>2</sup> Einstein używał innych oznaczeń i zapisywał swoje równanie jako  $\Pi\varepsilon = R\beta\nu/N - P$ , gdzie  $\Pi$  to potencjał hamujący, przy którym elektrony przestają docierać do anody, a  $\varepsilon$  – ładunek elektronu. Być może, pisząc  $R\beta/N$  zamiast wprowadzonej pięć lat wcześniej stałej Plancka  $h$ , Einstein chciał podkreślić, że jego hipoteza jest niezależna od rozważań Plancka i idzie dużo dalej.

todowych, nie będzie zależał od natężenia padającego światła. Z drugiej strony, przy wszystkich innych identycznych okolicznościach, liczba elektronów opuszczających ciało będzie proporcjonalna do natężenia padającego światła.

Warto podkreślić, że Einstein nie wykluczał wtedy możliwości, że elektron może pochłonąć tylko część energii kwantu światła, i zaznaczył, iż w takim wypadku w równaniu zjawiska fotoelektrycznego mieliśmyby znak równości lub mniejszości:  $E \leq h\nu - P$ .

Zjawisko fotoelektryczne odkrył w 1887 r. Heinrich Hertz przy okazji swych badań nad falami elektromagnetycznymi. Dalsze badania doświadczalne prowadził w 1888 r. fizyk niemiecki Wilhelm Hallwachs oraz rosyjski fizyk Aleksandr Stoletow, który skonstruował pierwszą fotokomórkę. On także stwierdził, że od oświetlenia katody do wystąpienia emisji elektronów upływa nie więcej niż jedna milisekunda. W latach 1899–1902 systematyczne badania zjawiska fotoelektrycznego prowadził Philipp Lenard. Stwierdził on, że od natężenia światła padającego na katodę fotokomórki zależy natężenie prądu fotoelektronów, nie zaś ich energia, jak to by wynikało z teorii światła jako fali elektromagnetycznej. Wbrew temu, co można przeczytać w niektórych podręcznikach, Lenard nie udowodnił, że energia elektronów zależy od częstości padającego światła (słowo częstość w ogóle się w jego artykule nie pojawia!), stwierdził tylko, iż jego wyniki zależały od rodzaju użytej lampy; stosował on dwie lampy o nieco odmiennym składzie widmowym światła [5]. Do 1905 r. opublikowano już ok. 200 artykułów na temat zjawiska fotoelektrycznego, ale spora ich część albo była błędna, albo zawierała wyniki mało wartościowe. Einstein powoływał się tylko na pracę Lenarda z 1902 r. i wykazał wielką intuicję, ponieważ to właśnie Lenard przedstawił najbardziej istotne wyniki, otrzymane na podstawie swoich wyjątkowo starannych doświadczeń.

Zgodnie z fizyką klasyczną energia światła zależy od amplitudy fali elektromagnetycznej. Gdyby więc ta energia miała być przekazywana elektronom w zjawisku fotoelektrycznym, to ich energia powinna być proporcjonalna do natężenia światła, czemu przeczyły doświadczenia Lenarda. Czasem w dzisiejszych podręcznikach można przeczytać nieprawdziwe zdanie, że wobec tego fizyka klasyczna nie była zdolna do wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego. Ówczesni fizycy doskonale jednak wiedzieli, że źródło energii fotoelektronów musi być inne. Już Lenard w swojej pracy z 1902 r. podał teorię, zgodnie z którą światło padające na katodę fotokomórki pełniło tylko funkcję „wyzwalacza”, uwalniającego elektrony – obdarzone wewnątrz materii znaczną energią. Następne klasyczne teorie zjawiska fotoelektrycznego podali w 1910 r. Joseph John Thomson, a w 1911 r. – Arnold Sommerfeld i jego asystent Peter Debye.

W roku 1912 Owen Richardson, późniejszy laureat Nagrody Nobla z fizyki za badania zjawiska termoemisji, rozważał elektrony w metalu jako pewien szczególny gaz, który pod wpływem padającego światła „paruje”. W ramach tej teorii [6] udało mu się nawet wyprowadzić wzór na zależność energii fotoelektronów od częstości padają-

cego światła, formalnie identyczny z wzorem Einsteina. Richardson, podobnie jak ogromna większość ówczesnych fizyków, był przeciwny einsteinowskiej hipotezie kwantów energii, więc swój wynik opatrzył komentarzem, iż w tej sytuacji nawet doświadczalne potwierdzenie, że energia elektronów istotnie zależy liniowo od częstości padającego światła, nie musi dowodzić słuszności hipotezy Einsteina. Przez pewien okres w literaturze fizycznej mówiono wobec tego o wzorze Einsteina–Richardsona.

Sceptycyzm wobec hipotezy Einsteina wyrażał także Hendrik Lorentz, który wyobrażał sobie kwant jako pewną „kulę światła” i próbował nawet, w 1910 r., oceniać „rozciągłość” kwantów. Zdaniem Lorentza, eksperymenty interferencyjne Lummera i Gehrckego, z różnicą dróg optycznych do 80 cm, dają ocenę rozciągłości podłużnej kwantu światła, podczas gdy największy wówczas teleskop na Mount Wilson o średnicy zwierciadła 150 cm pozwala na ocenę rozciągłości poprzecznej kwantu światła. – Jak to się dzieje – pytał zdumiony Lorentz – że tak wielki obiekt może padać na siatkówkę naszego oka, nie ulegając podziałowi? – Najwidoczniej uznawał wtedy ideę niepodzielnych kwantów światła za absurd.

Jedynym właściwie fizykiem popierającym wtedy Einsteina i jego hipotezę kwantów energii był Johannes Stark, tylko pięć lat starszy od Einsteina, a więc należący do tego samego, młodego wówczas pokolenia. W roku 1909 Stark jako pierwszy opublikował artykuł, w którym wypisał wzór, że pęd niesiony przez kwant światła jest równy  $h\nu/c$ . Ironią losu było, że później to właśnie Stark stał się nazistą oraz zażartym antysemitą i w niewybredny sposób atakował Einsteina oraz jego „żydowską fizykę”.

Ustalenie zależności energii fotoelektronów od częstości  $\nu$  padającego światła okazało się bardzo trudne. W roku 1907 Emil Ladenburg doszedł do wniosku, że z jego pomiarów wynika proporcjonalność energii elektronów do  $\nu^2$ . Podobny wniosek podał w roku 1911 Jakob Kunz, ale w tymże roku Frederick Lindemann znalazł proporcjonalność energii elektronów do  $\nu^{2/3}$ . Arthur Hughes w 1913 r. potwierdził zależność liniową, którą wyprowadził Einstein, ale wyniki uzyskane w tymże roku w eksperymentach Davida Corneliusa, a także Richardsona i Karla Comptona mogły być opisane równie dobrze przez proporcjonalność energii fotoelektronów do  $\nu^2$ , ale także do  $\nu^3$ , a nawet  $\log \nu$ . Dowodzi to niewielkiej dokładności ówczesnych pomiarów [7].

W roku 1913 Max Planck oraz Walther Nernst, Heinrich Rubens i Emil Warburg napisali do Pruskiego Ministerstwa Oświaty, proponując wybór Einsteina do Pruskiej Akademii Nauk. W liście rekomendacyjnym napisali m.in. (cytat z książki [8]):

„Nie należy mieć mu za złe, że niekiedy w swych spekulacjach posuwał się być może zbyt daleko, jak np. w swej hipotezie kwantów światła, ponieważ nawet w najbardziej ścisłej nauce nie może być przełomu bez zgadzania się czasem na ryzykowny krok.

Sprawa zależności energii fotoelektronów od częstości padającego światła została rozstrzygnięta dopiero

dzięki bardzo starannym i precyzyjnym pomiarom wykonanym w 1916 r. przez Roberta Millikana. Opublikował on ich wyniki w dwóch obszernych artykułach w *Physical Review* [9,10]. Pierwszy artykuł, który ukazał się w styczniu, zaczynał się od krytycznego zdania na temat teorii kwantów energii.

Równanie fotoelektryczne Einsteina na maksymalną energię emisji ujemnego elektronu pod wpływem światła nadfioletowego, a mianowicie  $mv^2/2 = Ve = hv - P$ , nie może być, w mej opinii, uznawane obecnie za oparte na jakichkolwiek zadowalających podstawach teoretycznych.

W drugim artykule Millikan szczegółowo przedstawił metodę przeprowadzania pomiarów. Na wstępie ponownie wyraził swą krytyczną opinię na temat kwantów światła.

W roku 1905 Einstein po raz pierwszy powiązał zjawisko fotoelektryczne z teorią kwantową, wysuwając śmiało, żeby nie powiedzieć lekkomyślną hipotezę elektromagnetycznej korpuskuły światła o energii  $\varepsilon = hv$ , która przy absorpcji jest przekazywana elektronowi. Hipoteza może być słusznie nazwana lekkomyślną, ponieważ po pierwsze, zaburzenie elektromagnetyczne, które pozostaje zlokalizowane w przestrzeni, wydaje się gwałcić samą koncepcję zaburzenia elektromagnetycznego, a po drugie, uderza ona w dokładnie ustalone fakty dotyczące interferencji.

W zakończeniu artykułu Millikan stwierdził:

Przypuszczalnie jest jeszcze za wcześnie, aby z całą pewnością potwierdzić ogólność i dokładną stosowalność równania Einsteina. Przyznać jednak należy, że obecne eksperymenty stanowią znacznie lepsze uzasadnienie tego potwierdzenia niż dotychczas znalezione. Jeśli to równanie ma taką stosowalność, to z pewnością musi być uznane za jedno z najbardziej fundamentalnych i najdalej sięgających równań fizyki, gdyż musi rządzić przekształcaniem się całej energii elektromagnetycznej krótkich fal w ciepło. Jednakże półkorpuskularna teoria, dzięki której Einstein doszedł do swego równania, wydaje się obecnie zupełnie nie do utrzymania.

## Ruchy Browna

Druga praca Einsteina, „O wynikającym z molekularno-kinetycznej teorii ciepła ruchu cząstek zawieszonych w cieczach w spoczynku” [11] (nadesłana do redakcji 11 maja 1905 r.), dotyczyła ruchów Browna. Nad tym samym zagadnieniem pracował wtedy Marian Smoluchowski, którego wyniki, uzyskane nieco odmienną metodą, zostały ogłoszone drukiem w następnym roku [12]. Einstein i Smoluchowski wykazali, że bezładne ruchy cząstek zawieszonych w cieczy wynikają z ich bombardowania przez cząsteczki cieczy. Doświadczalnie można wyznaczać średnie kwadratowe przesunięcie wybranej cząstki w określonym kierunku. Wielkość ta została powiązana z liczbą Avogadra i temperaturą cieczy w podstawowym wzorze opisującym ilościowe cechy ruchów Browna, zwanym dziś wzorem Einsteina–Smoluchowskiego. Odkrycie dokonane niezależnie przez obu uczonych było doskonałym potwierdzeniem słuszności kinetyczno-molekularnej teorii materii i przyczyniło się do ugruntowania wyobrażeń o jej atomistycznej strukturze.

## Elektrodynamika ciał w ruchu

Trzecia praca Einsteina, trzydziestostronicowy artykuł „O elektrodynamice ciał w ruchu” [13], wpłynęła do redakcji *Annalen der Physik* 30 czerwca. Artykuł ten, podobnie jak poprzednie, zaczyna się od sformułowania problemu, który niepokoił Einsteina: dlaczego utrzymuje się asymetria w wyjaśnianiu identycznych zjawisk.

Dobrze wiadomo, że elektrodynamika Maxwella – jak się ją dziś rozumie – w zastosowaniu do ciał w ruchu prowadzi do asymetrii, które nie wydają się nieodłączne od zjawisk. Weźmy na przykład oddziaływanie elektromagnetyczne między magnesem i przewodnikiem. Obserwowane tu zjawisko zależy tylko od względnego ruchu przewodnika i magnesu, podczas gdy zwyczajowe ujęcie wprowadza wyraźne zróżnicowanie między dwoma przypadkami, w których jedno lub drugie z tych ciał jest w ruchu. Jeśli bowiem magnes jest w ruchu, a przewodnik w spoczynku, to w otoczeniu magnesu powstaje pole elektryczne o określonej energii; pole to wytwarza prąd elektryczny wszędzie tam, gdzie znajdują się części przewodnika. Jeśli natomiast magnes jest w spoczynku, a przewodnik w ruchu, to w otoczeniu magnesu nie powstaje żadne pole elektryczne, natomiast w przewodniku pojawia się siła elektromotoryczna, której nie odpowiada żadna energia *per se*, lecz która prowadzi – przy założeniu równości ruchu względnego w obu przypadkach – do powstania prądów elektrycznych o takim samym natężeniu i kierunku jak te, które są wytwarzane przez siły elektryczne w pierwszym przypadku.

Podobne przykłady, jak również bezowocne próby wykrycia ruchu Ziemi względem „ośrodka światłonośnego”, prowadzą do przypuszczenia, że nie tylko zjawiska mechaniczne, lecz także elektrodynamiczne nie mają właściwości odpowiadających pojęciu absolutnego spoczynku. Należy raczej przypuszczać, że te same prawa elektrodynamiki i optyki są słuszne we wszystkich układach współrzędnych, w których obowiązują prawa mechaniki, co już zostało udowodnione dla wielkości pierwszego rzędu. Temu przypuszczeniu, które będziemy dalej nazywali „zasadą względności”, nadamy rangę postulatu; ponadto wprowadzimy jeszcze jeden postulat, tylko pozornie sprzeczny z pierwszym, że światło w próżni rozchodzi się zawsze z określoną prędkością, która nie zależy od stanu ruchu ciała je wysyłającego. Te dwa postulaty wystarczają do podania prostej, wolnej od sprzeczności elektrodynamiki ciał w ruchu, opartej na teorii Maxwella dla ciał spoczywających. Wprowadzenie „światłonośnego eteru” okaże się zbyteczne, ponieważ w przedstawionych tu poglądach ani nie ma potrzeby „przestrzeni w absolutnym spoczynku” obdarzonej szczególnymi właściwościami, ani też potrzeby przypisywania wektora prędkości jakiegokolwiek punktowi pustej przestrzeni, w której zachodzą procesy elektromagnetyczne.

Teoria tu rozwijana, podobnie jak każda inna elektrodynamika, opiera się na kinematyce ciała sztywnego, ponieważ twierdzenia każdej teorii tego rodzaju dotyczą związków między ciałami sztywnymi (układami współrzędnych), zegarami i procesami elektromagnetycznymi. Niedostateczne uwzględnienie tej okoliczności jest źródłem trudności, z jakimi zmagają się obecnie elektrodynamika ciał w ruchu.

Praca Einsteina oprócz powyższego wstępu składa się z dziesięciu rozdziałów zgrupowanych w dwóch częściach.

A. Część kinematyczna (1. Definicja równoczesności; 2. Względność długości i czasu; 3. Teoria transformacji współrzędnych czasowych i przestrzennych z układu stacjonarnego do układu, który jest względem niego w jednostajnym ruchu prostoliniowym; 4. Znaczenie fizyczne

otrzymanych równań w przypadku poruszających się ciał sztywnych i zegarów; 5. Dodawanie prędkości).

B. Część elektrodynamiczna (6. Transformacja równań Maxwella–Hertza dla pustej przestrzeni. O naturze sił elektromotorycznych powstających wskutek ruchu w polu magnetycznym; 7. Teoria zjawiska Dopplera i aberracji; 8. Transformacja energii promieni świetlnych. Teoria ciśnienia wywieranego przez promieniowanie na doskonałe zwierciadła; 9. Transformacja równań Maxwella–Hertza przy uwzględnieniu prądów konwekcyjnych; 10. Dynamika powoli przyspieszanego elektronu).

Ta praca Einsteina, zwłaszcza jej pierwsza część, odznacza się wyjątkową przejrzystością. Na podstawie swych dwóch postulatów autor wykazał, że muszą się zmienić nasze wyobrażenia o przestrzeni i czasie, a niektóre pojęcia, traktowane jako bezwzględne, w rzeczywistości zależą od układu, w którym spoczywa obserwator. Tak jest np. z pojęciem równoczesności.

Widzimy więc, że pojęciu równoczesności nie możemy przypisać znaczenia bezwzględnego, lecz że dwa zdarzenia, które – rozpatrywane z danego układu współrzędnych – są równoczesne, rozpatrywane z układu poruszającego się względem tamtego nie mogą być już uważane za zdarzenia równoczesne.

Konsekwencją wspomnianych dwóch postulatów okazało się, że odstęp czasu między dwoma zdarzeniami nie ma charakteru absolutnego, lecz zależy od obserwatora, podobnie jak mierzona przezeń długość odcinka. Te dwa ważne wyniki – relatywistyczną dylatację czasu i skrócenie długości – potwierdzono następnie w wielu doświadczeniach. Dzisiaj przyjmujemy wartość prędkości światła w próżni  $c$  za jedną z podstawowych stałych przyrody. Einstein wyprowadził ze swych postulatów także inne ważne wnioski, jak wzory przekształcenia, które dziś nazywamy transformacją Lorentza, wzory opisujące zjawisko Dopplera, wzór na siłę Lorentza oraz wzór wyrażający zależność masy elektronu od jego prędkości.

Czwarta praca Einsteina z 1905 r., „Czy bezwładność ciała zależy od zawartej w nim energii?” [14] wpłynęła do redakcji *Annalen der Physik* w dniu 27 września. Dotyczyła ona wzoru  $E = mc^2$ . W oryginale sformułowanie Einsteina brzmi: „Jeżeli ciało emituje energię  $L$  w postaci promieniowania, to jego masa zmniejsza się o  $L/V^2$ ”.

## Poprzednicy Einsteina

Przed Einsteinem kilku fizyków publikowało prace, w których zawarte były wyniki formalnie identyczne lub zbliżone do tych z jego artykułu o elektrodynamice ciał w ruchu. Jako odkrywcę transformacji Lorentza wymienia się czasem niesłusznie Woldemara Voigta z Getyngi, który w 1887 r. opublikował pracę z wynikami swych rozważań na temat rozchodzenia się fal odkształceń w ośrodku sprężystym. Stwierdził tam, że zastosowanie transformacji wyrażonej wzorami

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, & y' &= y(1 - v^2/\omega^2), \\z' &= z(1 - v^2/\omega^2), & t' &= t - vx/\omega^2,\end{aligned}$$

gdzie  $\omega$  oznacza prędkość fazową fali, zapewnia niezmienniczość wyników przy przejściu między dwoma układami

poruszającymi się względem siebie z prędkością  $v$ . Jak widać, wzory Voigta są tylko podobne do transformacji Lorentza; nie wynika z nich np. zjawisko skrócenia ciała w kierunku ruchu ( $x$ ), wynika natomiast zjawisko dylatacji w kierunkach prostopadłych ( $y$  oraz  $z$ ). Sam Voigt nigdy nie twierdził, że wyprzedził Lorentza.

Nad teorią zjawisk elektromagnetycznych dla ciał będących w ruchu najbardziej intensywnie pracował Lorentz. Chcąc wyjaśnić negatywny wynik doświadczenia Michelsona–Morleya, przyjął on w 1892 r. założenie, że podczas ruchu ciała względem nieruchomego, sprężystego eteru jego długość w kierunku ruchu ulega skróceniu o czynnik  $(1 - v^2/c^2)$ . Trzy lata później, w kolejnej pracy na ten temat, Lorentz zrezygnował z pewnych przybliżeń rachunkowych i poprawił wartość czynnika skrócenia rozmiarów ciała na  $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ . Wcześniej, w 1889 r., fizyk irlandzki George FitzGerald niezależnie wpadł na pomysł, że powinno wystąpić skrócenie wymiarów ciał i otrzymał identyczny wynik na jego wartość. Po pewnym czasie przyjęła się nazwa „skrócenie FitzGeralda–Lorentza”. Trzeba podkreślić, że ówczesni fizycy traktowali skrócenie ciała jako zjawisko rzeczywiste, wynikające z właściwości sił molekularnych, podczas gdy w szczególnej teorii względności Einsteina jest to efekt kinematyczny.

W roku 1899 Lorentz rozważał także ewentualność zmiany skali czasu w jego transformacji. Wprowadził wówczas „czas lokalny”, który – jak zobaczymy niżej – traktował tylko jako pewne narzędzie matematyczne, niemające związku z rzeczywistym czasem fizycznym. Lorentz przekonał się, że jeżeli w układzie poruszającym się użyje się właśnie czasu lokalnego, to równania teorii elektronowej zachowują w tym układzie taką samą postać, jak w układzie spoczywającym względem eteru.

Fizyk angielski Joseph Larmor rozwijał elektronową teorię materii i również założył prawdziwość wzorów transformacyjnych (takich samych jak transformacja Lorentza) dla współrzędnych  $x$ ,  $y$ ,  $z$  i czasu  $t$  oraz wyprowadził stąd skrócenie FitzGeralda–Lorentza. Wyniki te ogłosił najpierw w 1897, a potem w 1900 r., w głośnej książce *Eter i materia (Aether and Matter)*. Larmor podał także wzory transformacyjne dla pól elektrycznych i magnetycznych, podkreślał jednak, że jego wyniki są słuszne tylko z dokładnością do czynnika rzędu  $v^2/c^2$ . Nie rozwinął swej teorii tak, aby była słuszna dla wszystkich rzędów stosunku  $v/c$ .

W roku 1902 lord Rayleigh zwrócił uwagę na to, że jeśli istnieje skrócenie FitzGeralda–Lorentza, to ciała w ruchu względem eteru powinny doznawać wewnętrznych naprężeń, które, jak było od dawna wiadomo, wywoływały zjawisko dwójłomności. Rayleigh przetestował wiele przezroczystych cieczy i ciał stałych, ale nie stwierdził zauważalnego podwójnego załamania światła (efekt, jeśli w ogóle istniał, był mniejszy niż 1% efektu przewidywanego na podstawie teorii Lorentza). W roku 1904 DeWitt Brace powtórzył ten eksperyment z większą dokładnością i także nie zauważył żadnego efektu. Rok wcześniej, w 1903 r., Frederick Trouton i Henry Noble bezsku-

tecnie poszukiwali momentu sił, jaki powinien działać na naładowany kondensator.

Teoria Lorentza z 1899 r. nie mogła wyjaśnić tych faktów doświadczalnych, opracował więc on nową, doskonałą wersję swej teorii i ogłosił ją w 1904 r. Założył słuszność wzorów transformacyjnych (które obecnie, za sugestią Poincarégo, nazywamy transformacją Lorentza) i wykazał, że równania Maxwella są niezmiennicze względem takiej transformacji. W tejże pracy wysunął nową teorię elektronu.

## Elektromagnetyczna teoria materii

Pod koniec XIX w. zaczął zdobywać popularność pogląd o elektromagnetycznym pochodzeniu masy. W roku 1881 J.J. Thomson rozważał ruch naładowanej kuli w eterze i wykazał, że uzyskuje ona pozorną masę, podobnie jak kula poruszająca się w nieściśliwej cieczy. Podobne rachunki wykonał Oliver Heaviside, który uważał, że masa elektromagnetyczna jest tak samo realna jak masa mechaniczna. W roku 1894 Emil Wiechert wyraził przekonanie, że masa mechaniczna może być tylko zewnętrznym przejawem prawdziwej masy pochodzenia czysto elektromagnetycznego, której źródłem mogłyby być wzbudzenia w eterze.

W roku 1900 Wilhelm Wien ogłosił artykuł „O możliwości elektromagnetycznych podstaw mechaniki” [15], w którym postulował, że być może cała masa jest pochodzenia elektromagnetycznego. Uważa się, że dopiero ten artykuł zapoczątkował kierunek badań zmierzających do utrwalenia czysto elektromagnetycznego obrazu świata. Według Wiena materia składa się z elektronów, które są cząstkami elektryczności, a nie cząstkami materii, na których przenoszone mogą być ładunki elektryczne. Z analizy Wiena wynikało, że masa elektromagnetyczna, a więc masa elektronu, powinna zależeć od prędkości ruchu w eterze.

Max Abraham z Getyngi rozwinął program zastąpienia praw mechaniki newtonowskiej prawami elektrodynamiki Maxwella, które miały zostać uznane za podstawowe prawa fizyki. W 1902 r. wprowadził założenie, że ładunek elektronu jest rozłożony równomiernie na sztywnej powierzchni kulistej, która nie ulega deformacji podczas ruchu względem eteru. Walter Kaufmann już w 1901 r. rozpoczął pomiary stosunku  $e/m$ , ładunku do masy, dla promieni  $\beta$  emitowanych przez chlorek radu i potwierdził, że masa elektronów istotnie zmienia się wraz z ich prędkością, a w następnych publikacjach stwierdził, że zależność masy od prędkości jest taka, jaką przewidywała teoria Abrahama.

We wrześniu 1904 r. w St. Louis (Missouri, USA) przy okazji Wystawy Światowej odbył się Kongres Umiejętności i Nauki, w którym brało udział wielu wybitnych uczonych z całego świata. Teksty wygłoszonych tam referatów stanowią dziś świetne świadectwo ówczesnych poglądów. Przeglądowy referat, podsumowujący osiągnięcia fizyki w XIX w., wygłosił podczas kongresu amerykański fizyk Carl Barus, profesor Brown University i prezes

Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego; zakończył on swój wykład [16] stanowczym stwierdzeniem:

Zostało już teraz z pewnością potwierdzone, że masa elektronu jest w całości pochodzenia elektromagnetycznego i wobec tego, jak wykazał Abraham (1902) korzystając z danych Kaufmanna (1901) o wzroście masy elektromagnetycznej wraz z prędkością korpuskuły, równania ruchu Lagrange’a mogą zostać przeobrażone na postać elektromagnetyczną.

Tymczasem model sztywnego, kulistego elektronu podany przez Abrahama spotkał się z krytyką. Hermann Minkowski wyraził się ironicznie, że wprowadzanie sztywnego elektronu do teorii Maxwella przypomina pójście na koncert z watą w uszach. Pojawiły się konkurencyjne propozycje. W pracy opublikowanej w roku 1904 Lorentz przyjął założenie, że wprawdzie elektron ma kształt kulisty, a na jego powierzchni jest równomiernie rozłożony ładunek, lecz kulka ta ulega deformacji (skróceniu) w kierunku ruchu względem eteru. Alfred Bucherer w 1904 r. i niezależnie Paul Langevin (1905) przyjęli, jak Lorentz, iż ładunek jest rozłożony równomiernie na powierzchni kulistego elektronu, który wprawdzie ulega deformacji podczas ruchu względem eteru, ale tak, że jego objętość pozostaje stała.

Wszystkie wymienione teorie przewidywały zmienność masy elektronu w ruchu, lecz postać zależności masy od prędkości była w każdej z nich nieco inna. Widać to wyraźnie ze wzorów przedstawiających rozkład zależności  $m = m_0\psi(\beta)$  na szereg względem  $\beta = v/c$  (opuszczamy wyrazy wyższych rzędów niż czwarta potęga prędkości):

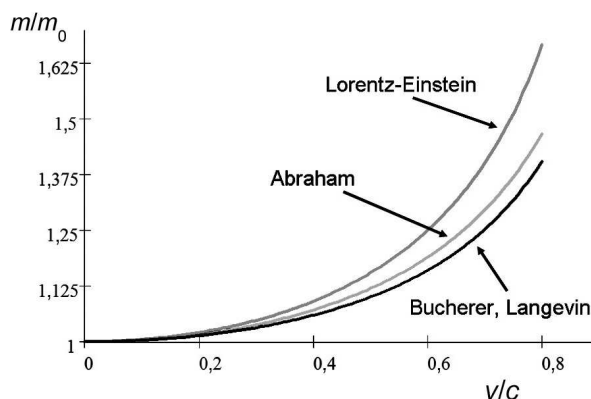
$$\psi(\beta) \approx 1 + \frac{2}{5}\beta^2 + \frac{9}{35}\beta^4 + \dots \quad (\text{Abraham}),$$

$$\psi(\beta) \approx 1 + \frac{1}{2}\beta^2 + \frac{3}{8}\beta^4 + \dots \quad (\text{Lorentz, Einstein}),$$

$$\psi(\beta) \approx 1 + \frac{1}{3}\beta^2 + \frac{2}{9}\beta^4 + \dots \quad (\text{Bucherer, Langevin}).$$

Zależność przewidywana przez Lorentza była formalnie identyczna ze wzorem wyprowadzonym przez Einsteina. Koincydencja ta była myląca, ponieważ sens fizyczny obu teorii był odmienny. Mimo to mniej więcej do 1915 r. zależność tę nazywano wzorem Lorentza–Einsteina.

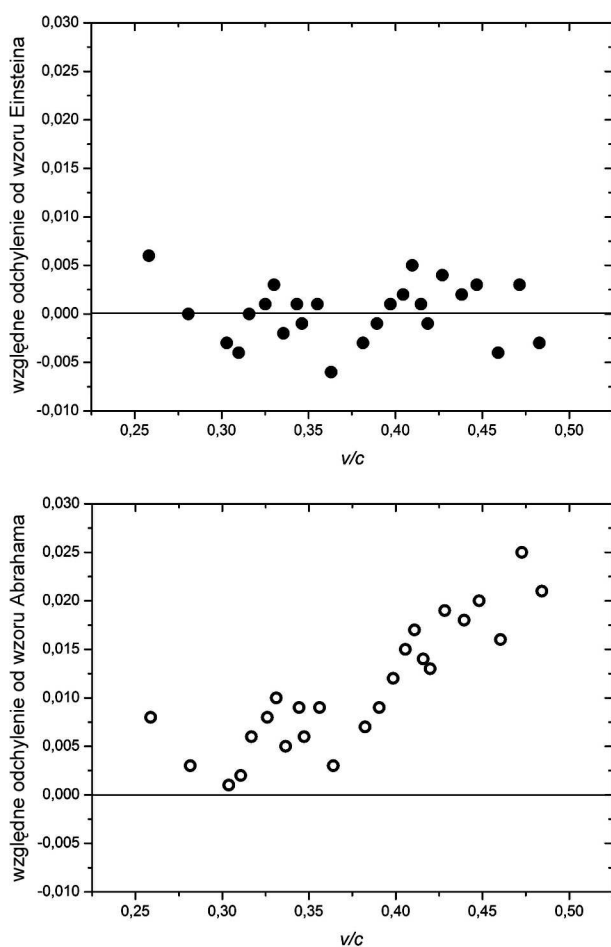
Rozróżnienie doświadczalne między tymi przewidywaniami okazało się trudne. Kaufmann wyznaczał stosu-



Rys. 1. Zależność masy elektronu od prędkości w różnych teoriach elektronowych oraz w szczególnej teorii względności Einsteina

nek  $e/m$  elektronów na podstawie odchylenia ich torów w równoległych polach elektrycznym i magnetycznym. Nie znał dokładnie ani prędkości elektronów, ani wartości ładunku elektronu (wartość tę – ładunek elementarny – wyznaczył dobrze dopiero Millikan w 1910 r.). Jego wyznaczanie zależności masy elektronu od prędkości polegało na dość niepewnym dopasowywaniu obserwowanych odchyleń torów elektronów do przewidywań teorii.

Kaufmann utrzymywał, że wyniki jego pomiarów są sprzeczne ze wzorem Lorentza–Einsteina. W 1906 r. wyraził dość stanowcze przekonanie, że obala to „próbę oparcia całej fizyki, w tym elektrodynamiki i optyki, na zasadzie względności”. Utrzymywał też, że jego wyniki zgadzają się jednakowo dobrze z przewidywaniami Abrahama i Bucherera.



Rys. 2. Pomiary zależności masy elektronu od jego prędkości, które wykonali w 1915 r. Guye i Lavanchy, ostatecznie wykazały, że z doświadczeniem zgadza się teoria Einsteina, a nie teoria Abrahama

W roku 1907 Adolf Bestelmeyer mierzył odchylenie toru elektronów w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym, ale doszedł do wniosku, że jego wyniki nie mogą wprowadzić rozróżnienia między trzema konkurującymi teoriami. Rok później taką samą metodą zastosował Bucherer, stwierdzając, że wyniki nieco lepiej zga-

dzają się ze wzorem Lorentza–Einsteina. Wzór ten został ostatecznie potwierdzony przez dokładne pomiary, które wykonali Günther Neumann (1914) oraz Charles-Eugène Guye i Charles Lavanchy (1915).

## Einstein i Lorentz

Gerald Holton wykazał [17], że w pracy z 1904 r. Lorentz musiał wprowadzić aż 11 założeń *ad hoc*, a mianowicie: że prędkości są małe ( $v \ll c$ ), że słuszne są wzory transformacyjne (Lorentza), że eter jest w spoczynku, że elektron w spoczynku jest kulisty, że ładunek elektronu jest rozłożony równomiernie, że cała masa jest pochodzenia elektromagnetycznego, że elektron w ruchu ulega skróceniu o czynnik  $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ , że siły między cząstkami nienaładowanymi i naładowanymi podlegają takim samym wzorom transformacji jak siły elektrostatyczne, że wszystkie ładunki w atomach są zawarte w pewnej liczbie „elektronów”, że na każdy z tych „elektronów” oddziałują tylko „elektrony” tego samego atomu, że wreszcie atom w ruchu deformuje się tak jak elektron.

Einstein natomiast, jak widzieliśmy, oparł swoją teorię na dwóch ogólnych postulatach: 1) Prędkość światła w próżni  $c$  jest jednakowa w każdym kierunku we wszystkich inercjalnych układach odniesienia, niezależnie od wzajemnego ruchu obserwatora i źródła; 2) Prawa fizyki są identyczne w układach będących względem siebie w ruchu jednostajnym prostoliniowym (zasada względności). Einstein przyjął ponadto założenie, że przestrzeń jest jednorodna i izotropowa, jak również postulaty logiczne dotyczące synchronizacji zegarów (jeżeli zegar w układzie A chodzi synchronicznie z zegarem w B, to zegar w B chodzi synchronicznie z zegarem w A itp.).

Na podstawie tak ogólnych i nielicznych założeń Einstein wprowadził wzory transformacji (Lorentza) dla współrzędnych przestrzennych, czasu i pól; wprowadził także wzór na dodawanie prędkości i wzór na siłę Lorentza (który Lorentz w 1895 r. tylko postulował). To porównanie najlepiej pokazuje wyższość einsteinowskiej teorii względności.

Trzeba dodać, że teoria Lorentza z 1904 r. przewidywała istnienie układu wyróżnionego, tego, który spoczywa względem eteru. W tym właśnie układzie pręty miały mieć największą długość, a w innych układach, będących względem eteru w ruchu, ulegały one skróceniu. Transformacja odwrotna, z układu ruchomego do układu spoczywającego względem eteru, przewidywała wydłużenie prętów. Tymczasem w teorii Einsteina skrócenie jest efektem czysto kinematycznym i symetrycznym między dwoma układami będącymi względem siebie w ruchu.

Lorentz był bardzo wybitnym uczonym i szybko dostrzegł wyższość teorii względności. W 1927 r. wypowiedział się tak (cytat wg [18]):

Wprowadziłem pojęcie czasu lokalnego, ale nigdy nie myślałem, że ma to coś wspólnego z czasem rzeczywistym. Dla mnie czas rzeczywisty był nadal zgodny z klasycznym pojęciem czasu absolutnego. (...) Traktowałem moją transformację czasu tylko jako heurystyczną hipotezę roboczą. Teoria względności jest zatem wyłącznie dziełem Einsteina.

## Einstein i Poincaré

Francuski matematyk i fizyk Henri Poincaré przekonywał o potrzebie wprowadzenia nowej teorii fizycznej, zanim zostały opublikowane prace Einsteina. Podczas Kongresu w St. Louis (1904) miał wykład [19], z którego przytaczamy tu wyjątek.

Zgodnie z zasadą względności prawa fizyczne muszą być jednakowe dla obserwatora spoczywającego i dla obserwatora, który jest względem niego w jednostajnym ruchu translacyjnym, tak że nie mamy i nie możemy mieć żadnego sposobu, aby się dowiedzieć, czy uczestniczymy w takim ruchu. (...) Najbardziej niezwykłym przykładem nowej fizyki matematycznej jest bez wątpienia elektromagnetyczna teoria światła Maxwella. Nie wiemy nic o eterze, jak są rozmieszczone jego cząsteczki, czy się przyciągają czy odpychają; wiemy jednak, że ośrodek ten przenosi jednocześnie zaburzenia optyczne i zaburzenia elektryczne; wiemy, że to przenoszenie musi być zgodne z ogólnymi zasadami mechaniki i to wystarcza nam do ustalenia równań pola elektromagnetycznego. (...) Może powinniśmy zbudować całą nową mechanikę (...), w której bezwładność rośnie z prędkością, a prędkość światła stanowi nieprzekraczalną granicę. Zwykła, prostsza mechanika pozostanie pierwszym przybliżeniem, ponieważ będzie prawdziwa tylko dla prędkości niezbyt wielkich.

W cytowanym tekście Poincaré po raz pierwszy użył nazwy „zasada względności”. Zwróćmy jednak uwagę na to, że nadal trzymał się on dawnej koncepcji eteru oraz rozważał obserwatora spoczywającego, nie było to więc nowe spojrzenie na ruch, które rok później zaprezentował Einstein.

W czerwcu 1905 r., a więc równocześnie z Einsteinem, Poincaré ogłosił artykuł na temat dynamiki elektronu [20]. W tym właśnie artykule zaproponował, aby wzory podane przez Lorentza w pracy z 1904 r. nazwać „transformacją Lorentza”. Rozważał tam także hipotezę dotyczącą skrócenia wymiarów elektronu podczas ruchu względem eteru.

Możliwe wyjaśnienie skrócenia elektronu otrzymuje się zakładając, że deformowalny i ściśliwy elektron jest poddany jakimś stałemu zewnętrznemu ciśnieniu, którego działanie jest proporcjonalne do zmiany objętości.

Cytat ten świadczy wyraźnie o tym, że mimo przekonywania o potrzebie przyjęcia zasady względności Poincaré nadal trzymał się starych koncepcji eteru i deformowalnego elektronu. Konserwatyzm Poincarégo był jeszcze wyraźniej widoczny w jego wykładach na temat nowej mechaniki (*La Mécanique nouvelle*), które wygłosił w 1909 r. w Getyndze. Swą nową mechanikę oparł na trzech hipotezach: 1) żadne ciało nie może się poruszać z prędkością większą lub równą prędkości światła; 2) prawa fizyki są takie same we wszystkich układach inercjalnych; 3) ciało

w ruchu translacyjnym doznaje deformacji w kierunku, w którym się porusza. Trzeci postulat Poincarégo opatrzył komentarzem: „Jakkolwiek dziwne może się to nam wydawać, musimy przyznać, że ta trzecia hipoteza jest doskonale potwierdzona”. Tak więc, cztery lata po pracy Einsteina, Poincaré nadal nie rozumiał, że skrócenie prętów jest konsekwencją dwóch postulatów Einsteina.

Lorentz, Poincaré i inni znakomici fizycy widzieli więc potrzebę wprowadzenia nowej fizyki i odkryli kilka ważnych faktów, ale do końca byli przekonani o istnieniu eteru i dlatego ich wyniki miały mały związek z nowatorskim podejściem Einsteina<sup>3</sup>.

Einstein spotkał Poincarégo na Kongresie Solvaya w 1911 r. Po powrocie napisał do swego przyjaciela Heinricha Zanggera (cytat wg [21]): „Poincaré odnosił się z antypatią do teorii względności i mimo swej bystrości umysłu wykazywał brak zrozumienia sytuacji”.

★ ★ ★

Einstein umiał wynajdywać proste „eksperymenty myślowe”, których rozważanie prowadziło go do największych odkryć. Jego drogę do szczególnej teorii względności najlepiej ilustrują poniższe wyjątki z notatek autobiograficznych, które Einstein napisał w 1949 r. [22]<sup>4</sup>. Wspominał tam, iż wkrótce po roku 1900, tj. krótko po opublikowaniu pracy Plancka, doszedł do wniosku, że:

Ani mechanika, ani elektrodynamika nie mogą sobie rościć pretensji do ścisłej poprawności – poza przypadkami granicznymi. Stopniowo zacząłem wątpić w możliwość wykrycia prawdziwych praw przez konstruktywne wysiłki oparte na znanych faktach. Im dłużej i bardziej rozpaczliwie się o to starałem, tym bardziej dochodziłem do przekonania, że tylko odkrycie jakiejś uniwersalnej zasady formalnej może doprowadzić do pewnych rezultatów. Przykładem była termodynamika. W niej ogólną zasadę wyrażało twierdzenie: prawa natury są takie, że niemożliwe jest zbudowanie *perpetuum mobile* (pierwszego i drugiego rodzaju). Jak więc można by znaleźć taką uniwersalną zasadę? Zrodziła się ona po dziesięciu latach mych rozmyślań z paradoksu, na który natknąłem się już w wieku 16 lat: jeżeli podążę za promieniem światła z prędkością  $c$  (prędkością światła w próżni), to taki promień powinienem widzieć jako pole elektromagnetyczne w spoczynku, ale oscylujące w przestrzeni. Wydaje się jednak, że coś takiego nie może istnieć – wynika to zarówno z doświadczenia, jak i z równań Maxwella. Od samego początku wydawało mi się intuicyjnie jasne, że z punktu widzenia takiego obserwatora wszystko musi się dziać zgodnie z tymi samymi prawami, co dla obserwatora pozostającego w spoczynku względem Ziemi. W jaki bowiem sposób pierwszy obserwator mógłby wiedzieć czy stwierdzić, że jest w szybkim ruchu jednostajnym?

Widzimy, że paradoks ten zawiera już zarodek szczególnej teorii względności. Dziś każdy oczywiście wie, że wszelkie próby jego wyjaśnienia były dopóty skazane na niepowodzenie,

<sup>3</sup> Nie mógł tego zrozumieć brytyjski matematyk i historyk E.T. Whittaker, który w tomie 2 swego dzieła *A History of the Theories of Aether and Electricity* (1953) napisał, że „Einstein ogłosił artykuł, w którym przedstawił teorię względności Poincarégo i Lorentza z pewnymi ulepszeniami, co przyciągnęło wiele uwagi”. Abraham Pais tak skomentował tę opinię: „brak zrozumienia fizyki dorównuje ignorancji tego autora”. Einstein wyraził się krótko: „Nie muszę czytać tej książki”.

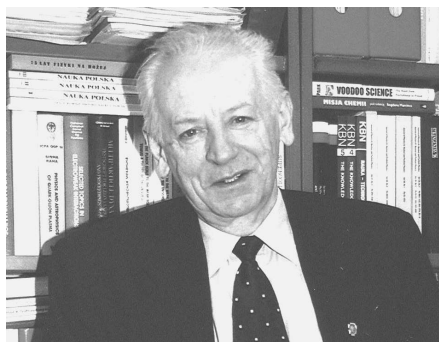
<sup>4</sup> Wspomnienia te, napisane w języku niemieckim, zostały potem przełożone na angielski i wydane w tomie *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (1949). W 1979 r. ukazało się dwujęzyczne wydanie tej książki (Open Court Publishing Company). W miesięczniku *Problemy*, nr 3 (1979) zostało opublikowane polskie tłumaczenie, które jednak było niekompletne i zawierało błędy merytoryczne.

dopóki w naszej podświadomości tkwił aksjomat o absolutnym charakterze czasu. Właściwie już rozpoznanie tego aksjomatu i jego arbitralnego charakteru zawierało w sobie zasadnicze elementy rozwiązania problemu.

Po ogłoszeniu swych prac w 1905 r. Einstein stał się znany tylko wśród fizyków. Po habilitacji w 1908 r. zatrudniono go jako wykładowcę fizyki teoretycznej na uniwersytecie w Bernie, a jesienią następnego roku objął stanowisko profesora na uniwersytecie w Zurychu. Od wiosny roku 1911 Einstein spędził rok jako profesor na uniwersytecie w Pradze, następnie rok na ETH w Zurychu, a w kwietniu 1914 r. objął prestiżowe stanowisko profesora w Instytucie Cesarza Wilhelma w Berlinie. Stanowisko to nie wiązało się z obowiązkiem wykładania, tak że Einstein mógł cały czas poświęcać na pracę naukową. W Berlinie ukończył pracę nad ogólną teorią względności, a także ogłosił ważne artykuły na temat teorii promieniowania i statystyki kwantowej. W 1922 r. otrzymał wreszcie Nagrodę Nobla z fizyki (za rok 1921), choć – paradoksalnie – przyznano mu ją nie za stworzenie teorii względności, lecz „za zasługi dla fizyki teoretycznej, zwłaszcza za odkrycie prawa zjawiska fotoelektrycznego”. Do nagrody tej był wysuwany już od 1910 r., ale Komitet Noblowski był odporny na te sugestie, chociaż wyróżnił takich dziś już częściowo zapomnianych uczonych, jak Szwed Nils Gustaf Dalén, laureat z 1912 r. (za opracowanie nowego sposobu oświetlenia dla latarni morskich) i Francuz Charles Édouard Guillaume (1920, za odkrycia w zakresie anomalii właściwości stali niklowych).

## Literatura

- [1] M. Planck, „Vom Relativen zum Absoluten”, *Naturwiss.* **13**, 59 (1925), odczyt w Monachium 1 grudnia 1924 r., tłum. polskie Ryszard i Samuel Kernerowie w: M. Planck, *Jedność fizycznego obrazu świata: wybór pism filozoficznych* (Książka i Wiedza, Warszawa 1970).
- [2] M. Berthelot, *Les Origines de l'alchimie* (Georges Steinheil, Éditeur, Paris 1885), nowe wydanie: Librairie des Sciences et des Arts, Paris 1938.
- [3] Lord Kelvin, „Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light”, *Phil. Mag.*, ser. 6, **2**, 1 (1901).
- [4] A. Einstein, „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, *Ann. Phys.* **17**, 132 (1905).
- [5] Ph. Lenard, „Über die lichtelektrische Wirkung”, *Ann. Phys.* **8**, 149 (1902).
- [6] O.W. Richardson, „Some Applications of the Electron Theory of Matter”, *Phil. Mag.* **23**, 616 (1912); „The Theory of Photoelectric Action”, *Phil. Mag.* **24**, 570 (1912).
- [7] R. Pohl, P. Pringsheim, „On the Long-Wave Limits of the Normal Photoelectric Effect”, *Phil. Mag.* **26**, 1017 (1913).
- [8] J. Mehra, *The Solvay Conferences on Physics* (Reidel, Dordrecht-Boston 1975).
- [9] R. Millikan, „Einstein's Photoelectric Equation and Contact Electromotive Force”, *Phys. Rev.* **7**, 18 (1916).
- [10] R. Millikan, „A Direct Photoelectric Determination of Planck's Constant »h«”, *Phys. Rev.* **7**, 355 (1916).
- [11] A. Einstein, „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen”, *Ann. Phys.* **17**, 549 (1905).
- [12] M. Smoluchowski, „Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen”, *Ann. Phys.* **21**, 755 (1906).
- [13] A. Einstein, „Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Ann. Phys.* **17**, 891 (1905).
- [14] A. Einstein, „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?”, *Ann. Phys.* **18**, 639 (1905).
- [15] W. Wien, „Über die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik”, *Recueil de travaux offerts par les auteurs à H.A. Lorentz à l'occasion du 25ème anniversaire de son doctorat le 11 décembre 1900*, *Archives Néerlandaises* **5**, 96 (Haga 1900).
- [16] C. Barus, „The progress of physics in the nineteenth century”, w: *Physics for a New Century*, wybór: K.R. Sopka (Tomash Publishers, American Institute of Physics, 1986), s. 64.
- [17] G. Holton, „On the Origins of the Special Theory of Relativity”, *Am. J. Phys.* **28**, 627 (1960).
- [18] J. Mehra, „The Historical Origin of the Special Theory of Relativity”, w: J. Mehra, *The Golden Age of Theoretical Physics*, t. 1 (World Scientific, Singapore 2002), s. 226.
- [19] H. Poincaré, „The Principles of mathematical physics”, w: *Physics for a New Century*, wybór: K.R. Sopka (Tomash Publishers, American Institute of Physics, 1986), s. 281.
- [20] H. Poincaré, „Sur la dynamique de l'électron”, *C. R.* **140**, 1504 (1905).
- [21] A. Pais, *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, Oxford 1982), s. 170; polski przekład: *Pan Bóg jest wyrafinowany... Nauka i życie Alberta Einsteina*, tłum. P. Amsterdamski (Prószyński i S-ka, Warszawa 2001).
- [22] A. Einstein, *Autobiographical Notes* (Open Court Publishing Company, Chicago 1979), s. 49.



ANDRZEJ KAJETAN WRÓBLEWSKI (ur. 1933) pracuje w Uniwersytecie Warszawskim od 1954 r., w latach 1975–81 był dyrektorem Instytutu Fizyki Doświadczalnej, w latach 1986–89 – dziekanem Wydziału Fizyki, a w latach 1989–93 – rektorem Uniwersytetu Warszawskiego. Członek Polskiej Akademii Nauk, Polskiej Akademii Umiejętności i Towarzystwa Naukowego Warszawskiego. Autor prac naukowych z fizyki wielkich energii i historii fizyki. Jego obszerna książka *Historia fizyki od czasów najdawniejszych do współczesności* ukaże się jesienią tego roku nakładem PWN.