

Powstawanie i wczesny odbiór szczególnej teorii względności*

II. Równoważność masy i energii

Stanisław L. Bazański

Instytut Fizyki Teoretycznej, Uniwersytet Warszawski

Formulation and early reception of the special theory of relativity II. The equivalence of mass and energy

Abstract: This essay is based on a lecture delivered by the author to the Albert Einstein Symposium, held at the Department of Physics of the Warsaw University on May 12, 2005. After some introductory remarks, in section 1, an overview of the second Einstein's relativity paper of 1905 is presented. In section 2 the author carries out an analysis (along the lines worked out by Stachel and Torretti) of some critical remarks about the paper which appeared in the literature. In section 3 the early reception of the Einstein 1905 relativity papers both in German-speaking countries and at the Jagiellonian University in Cracow is also touched upon, and in section 4 a list of documented contacts of Polish scientists with Einstein is presented.

1. Pierwsza praca o równoważności masy i energii

Wkrótce po wysłaniu do publikacji swej pierwszej pracy [1] na temat nowej zasady względności Einstein spostrzegł, że uwadze jego umknęło istnienie niezwykle istotnej, wcześniej w ogóle nieznannej konsekwencji tej zasady. W ciągu zaledwie kilku tygodni napisał nową, piątą już w owym roku pracę [2] o tytule (w polskim tłumaczeniu) „Czy bezwładność ciała zależy od wielkości energii w nim zawartej?”. Do redakcji *Annalen der Physik* nadeszła ona 27 września 1905 r., a została opublikowana 21 listopada tegoż roku.

Uważnego czytelnika poprzedniej publikacji [1] już na samym początku lektury pracy [2] czeka niespodzianka, gdyż Einstein stwierdza tu, iż jego poprzednie badania oparte były na dwóch podstawach: po pierwsze, na równaniach Maxwella–Hertza w pustej przestrzeni wraz z maxwellowskim wyrażeniem na gęstość energii w takiej przestrzeni, i po drugie, na relatywistycznej zasadzie względności. Gdzie jest więc zasada niezmienniczości prędkości światła, stosowana przecież w pracy czerwcowej i, wydawałoby się, tak silnie tam podkreślana? Otóż w przypisie Einstein wyjaśnia, iż zasada ta jest konsekwencją obu fundamentalnych zasad wymienionych w tekście i, co jest już naszym domysłem, jego ówczesnego przekonania, że to właśnie równania Maxwella dostarczają poprawnego opisu rozchodzenia się światła w próżni.

Liczba założeń fizycznych, z których korzysta się w tej przełomowej dla rozwoju fizyki pracy, jest bardzo skromna. Oto lista wyników uzyskanych w pracy czerwcowej, które zostały wykorzystane we wrześniu.

1) Einsteinowska zasada względności.

2) Prawo transformacyjne, jak Einstein pisał wtedy, straty energii przez źródło promieniowania, które wysłało ciąg elektromagnetycznych fal płaskich:

$$\tilde{L} = L \frac{1 - (v/c) \cos \varphi}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (1)$$

gdzie L oraz \tilde{L} są wartościami energii wyniesionymi przez ciąg fal w kierunku tworzącym kąt φ z osią x , mierzonymi odpowiednio względem inercjalnych układów współrzędnych: wyjściowego \mathcal{K} oraz układu $\tilde{\mathcal{K}}$ poruszającego się względem \mathcal{K} ze stałą prędkością v o składowych $(v, 0, 0)$.

Ponadto jedynymi wynikami fizyki newtonowskiej i jej relacji z nową zasadą względności, z jakich korzysta się w omawianej pracy, są: a) ogólna zasada zachowania energii, b) zasada korespondencji z mechaniką newtonowską, c) newtonowskie wyrażenie $\frac{1}{2}mv^2$ na energię kinetyczną.

Historycznie pierwsze, nigdzie przez Einsteina później niepowtarzane wyprowadzenie głównego wyniku pracy autor rozpoczyna od rozważenia następującego doświadczenia myślowego. Weźmy pod uwagę ciało A, o bliżej nieokreślonej strukturze, mające

*Wykład wygłoszony 12 maja 2005 r. na sympozjum „Albert Einstein – rok 1905” zorganizowanym przez Instytut Fizyki Teoretycznej UW.

kształt prostopadłościanu. Niech ciało to przez cały czas spoczywa względem trójwymiarowego inercyjnego układu \mathcal{K} współrzędnych $\{x, y, z\}$. Niech ponadto przez cały czas inny układ współrzędnych $\{\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}\}$, nazwijmy go $\tilde{\mathcal{K}}$, porusza się ruchem postępowym i jednostajnym z prędkością \mathbf{v} o składowych $(v, 0, 0)$ względem układu \mathcal{K} , co oznacza, że ciało A porusza się względem $\tilde{\mathcal{K}}$ z prędkością $-\mathbf{v}$. Załóżmy następnie, że przed ustaloną chwilą t_0 z ciałem A nic się nie dzieje i że w każdej chwili $t < t_0$ jego energia całkowita względem układu \mathcal{K} jest równa E_0 , a względem $\tilde{\mathcal{K}}$ – równa \tilde{E}_0 . Niech z kolei w chwili t_0 dwie przeciwległe, równoległe do siebie ścianki ciała zaczynają emitować promieniowanie elektromagnetyczne w dwu wzajemnie przeciwnych kierunkach, prostopadle do obu tych ścianek. Na etapie rozważań ogólnych przyczyna bądź mechanizm odpowiedzialne za to promieniowanie nie grają żadnej roli¹. Następnie Einstein zakłada, że promieniowanie ustaje w chwili $t_1 > t_0$, przy czym energia całkowita wyniesiona przez promieniowanie z ciała w skończonym przedziale czasu $[t_0, t_1]$ w układzie \mathcal{K} wynosi L , gdyż przyjmuje, że energia wyniesiona poprzez każdą z obu emitujących ścianek w układzie \mathcal{K} równa się $\frac{1}{2}L$. Aby obliczyć wypromieniowaną energię całkowitą \tilde{L} w układzie $\tilde{\mathcal{K}}$, Einstein korzysta ze wzoru (1) i otrzymuje

$$\begin{aligned} \tilde{L} &= \frac{1}{2}L \frac{1 + (v/c) \cos \varphi}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} + \frac{1}{2}L \frac{1 - (v/c) \cos \varphi}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \\ &= \frac{L}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \end{aligned}$$

Z założonego scenariusza wynika, iż w trakcie promieniowania ciało nie doznaje odrzutu względem \mathcal{K} i dla $t > t_1$ nadal będzie w tym układzie spoczywać, przy czym jego energia w układzie \mathcal{K} równa będzie E_1 , a w układzie $\tilde{\mathcal{K}}$ – równa \tilde{E}_1 . Na podstawie dalszego rozumowania Einsteina można się jedynie domyślić, że za wielkości znane w tym doświadczeniu uważa on E_0 , L , v oraz c .

Oto i całe doświadczenie. Z kolei Einstein przechodzi do jego analizy, która polega na sporządzeniu bilansu energii całkowitej zgodnego z klasyczną zasadą zachowania energii. Jego zasada względności wymaga, żeby bilans taki spełniony był zarówno w układzie \mathcal{K} , jak i $\tilde{\mathcal{K}}$.

Einstein pisze więc równania bilansu energii w układzie \mathcal{K} :

$$E_0 - E_1 = L, \quad (2)$$

i w układzie $\tilde{\mathcal{K}}$:

$$\tilde{E}_0 - \tilde{E}_1 = \frac{L}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad (3)$$

¹ W podsumowaniu pracy Einstein wysuwa hipotezę, że opisany przez niego model mógłby opisywać zjawisko rozpadu promieniotwórczego. Obecnie wiemy, iż jego prorocza w zasadzie intuicja, wobec prostoty opisanego tu doświadczenia myślowego, trafna była tylko częściowo, gdyż promieniowanie elektromagnetyczne związane jest z zaledwie jednym z występujących trzech rodzajów produktów rozpadu. Istnieje wiele bardziej prozaicznych mechanizmów, które Czytelnik mógłby przyjąć za przyczynę opisanego tu promieniowania.

a odejmując stronami równanie (2) od (3), otrzymuje, że

$$(\tilde{E}_0 - E_0) - (\tilde{E}_1 - E_1) = L \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right). \quad (4)$$

Ponieważ nie można przewidzieć, jak transformuje się energia ciała o nieznannej strukturze, przyjmuje, że

$$\begin{aligned} \tilde{E}_0 - E_0 &= K_0 + C, \\ \tilde{E}_1 - E_1 &= K_1 + C, \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie K_i , dla $i = 0, 1$, są wartościami funkcji K czasu i prędkości względem układu odniesienia \mathcal{K} , takimi że $K(t_i, 0) = 0$, $K(t_i, v) = K_i$, a stała C jest równa ewentualnie nieznikającej różnicy pomiędzy stałymi cechowania energii w układach \mathcal{K} i $\tilde{\mathcal{K}}$. W tekście pracy, bez jakichkolwiek komentarzy, funkcja K nazywana jest energią kinetyczną rozważanego ciała. W następnym kroku Einstein podstawia równania (5) do (4) i dochodzi do równania

$$K_0 - K_1 = L \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right). \quad (6)$$

Powyższy związek uzupełnia dwuzdaniowym komentarzem, który cytuję w możliwie wiernym tłumaczeniu.

Energia kinetyczna ciała w układzie $\{\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}\}$ ulega zmniejszeniu wskutek wysyłania światła, i to o wielkość niezależną od cech jakościowych tego ciała. Ponadto różnica $K_0 - K_1$ zależy od prędkości dokładnie tak samo, jak energia kinetyczna elektronu ([1], §10).

Rozwijając wreszcie prawą stronę równania (6) w szereg względem potęg $(v/c)^2$ i pozostawiając tylko pierwszy wyraz tego rozwinięcia, Einstein otrzymuje ostatnie, wyróżnione z tekstu równanie tej pracy

$$K_0 - K_1 = \frac{1}{2}L(v/c)^2. \quad (7)$$

Po napisaniu powyższej równości następuje krótkie podsumowanie, którego tłumaczenie podaję poniżej.

Gdy ciało oddaje energię L w postaci promieniowania, jego masa zmniejsza się o L/c^2 . Ponieważ nie jest przy tym oczywiście istotne, że odbierana ciału energia przechodzi właśnie w energię promieniowania, doprowadza to nas do ogólniejszego wniosku:

masa ciała jest miarą zawartej w nim energii; gdy energia zmienia się o L , masa zmienia się o $L/(9 \cdot 10^{20})$, przy czym energię mierzy się w ergach, a masę w gramach.

Nie jest wykluczone, że w przypadku ciał, których zawartość energii znacznie się zmienia (np. dla soli radu), teorię tę uda się potwierdzić.

Jeśli przedstawiona tu teoria jest zgodna z rzeczywistością, to promieniowanie przenosi bezwładność z emitujących je ciał do tych, które je absorbują.

I tym stwierdzeniem kończy się ta tak niezwykle lakonicznym językiem napisana praca. We współczesnych wykładach teorii względności już się nie powtarza tego oryginalnego i fizycznie pięknego rozumowania Einsteina. Teraz bowiem uzbrojeni w potężne narzędzie formalne, geometrię Minkowskiego, potrafimy w mechanice relatywistycznej, jakby mimochodem, uzyskać nieco nawet mocniejszy wynik. W mechanice newtonowskiej energia mechaniczna, jako całka równań ruchu, wyznaczona jest z dokładnością do nieokreślonej stałej. Sens fizyczny mają więc tam tylko różnice energii. W mechanice relatywistycznej energia też jest całką równań ruchu, ale aparat formalny geometrii Minkowskiego pozwala jednoznacznie wyznaczyć pojawiającą się tu stałą całkowania jako równą mc^2 , gdzie m jest masą spoczynkową poruszającego się ciała. Pod tym więc względem zasada względności spełnia w stosunku do skali energii podobną funkcję, jak druga zasada termodynamiki w stosunku do skali temperatury.

2. Dalsze dzieje tej pracy

Ponieważ zarówno sam Einstein, jak i inni podawali później inne dowody na związek masy z energią, opisane np. w [3], wynik uzyskany w [2] został powszechnie uznany, a w miarę dalszego rozwoju różnych działów fizyki był coraz bardziej doceniany. Z powodu jednak swej zwięzłości praca Einsteina dla wielu okazała się niezrozumiała. Zaczęto więc głosić opinię, że wynik otrzymany w pracy [2] został tam udowodniony tylko w przybliżeniu drugiego rzędu względem v/c , w odróżnieniu od niektórych dowodów podanych później. Co więcej, głoszony też był niekiedy pogląd, że praca [2] oparta jest na poważnym błędzie logicznym (patrz [4], a także [3], s. 377), gdyż przyjęcie przez Einsteina równań (5) jest jakoby automatycznie założeniem, że promieniowanie zachodzi kosztem zmiany masy, a nie np. energii wewnętrznej².

W roku 1982 John Stachel i Roberto Torretti opublikowali wnikliwą analizę [5], z której wynika, że jeżeli uważnie czyta się każde słowo Einsteina w pracy [2], to okazuje się, iż jest ona jak najbardziej poprawna. Analiza ta jest tak pouczająca i prosta, że nie mogą się oprzeć chęci przedstawienia tu trochę, moim zdaniem, ulepszonej jej wersji.

W celu ułatwienia analizy Stachel i Torretti zakładają, że energie: początkowa \tilde{E}_0 i końcowa \tilde{E}_1 ciała, które porusza się ruchem postępowym z prędkością v względem jakiegoś układu inercjalnego \mathcal{K} , są wartościami funkcji wielu zmiennych $\tilde{E}_i = E(v, S_i)$ ($i = 0, 1$), gdzie v jest zmienną kolektywną zastępującą zespół składowych wektora prędkości, a S_i ($i = 0, 1$)

są wartościami przyjmowanymi przez zmienną kolektywną S opisującą stan wewnętrzny ciała za pomocą ciągu zmiennych (s_1, s_2, \dots, s_n) , którego elementy s_i ($i = 1, 2, \dots, n$) są parametrami wewnętrznymi określającymi strukturę ciała³ odpowiednio w stanie początkowym, opisywanym przez S_0 , i końcowym – przez S_1 . Zgodnie z zasadą względności, parametry s_i są niezależne od v .

Funkcja $K(v, S) = E(v, S) - E(0, S)$ jest energią kinetyczną ciała, którego struktura opisana jest przez S i które porusza się względem \mathcal{K} ruchem postępowym z prędkością v , przy czym $K(0, S)$ znika tożsamościowo dla każdej wartości S . Zdanie to oczywiście nie jest założeniem, lecz definicją. Z definicji bowiem energia kinetyczna równa jest pracy potrzebnej do nadania ciału spoczywającemu prędkości v , a w przypadku, gdy nie ma wymiany ciepła, praca ta jest równa różnicy energii $E(v, S) - E(0, S)$. Te właśnie fakty miał Einstein na myśli, nazywając w [2] wielkości K_i ($i = 0, 1$), które wystąpiły w (5), wartościami przyjmowanymi przez energię kinetyczną. W doświadczeniu myślowym rozważanym w pracy [2] ciało porusza się względem układu $\tilde{\mathcal{K}}$ jednostajnym ruchem postępowym z prędkością równą $-v$. Oznacza to, że wielkości występujące w opisie tego doświadczenia w [2] można wyrazić jako wartości wprowadzonych w [5] funkcji E i K :

$$\begin{aligned} E_0 &= E(0, S_0), & \tilde{E}_0 &= E(-v, S_0), & K_0 &= K(-v, S_0), \\ E_1 &= E(0, S_1), & \tilde{E}_1 &= E(-v, S_1), & K_1 &= K(-v, S_1), \end{aligned} \quad (8)$$

a równanie (6) przyjmuje wtedy postać

$$K(-v, S_0) - K(-v, S_1) = L \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right). \quad (9)$$

W sytuacji ogólnej, gdy struktura ciała jest nieznaną, nie można niczego powiedzieć o postaci funkcji $K(v, S)$. Równanie (9) pozwala jednak stwierdzić, że różnicę dwóch wartości funkcji K dla tej samej wartości v i dwóch różnych stanów S_0 oraz S_1 można przedstawić jako iloczyn pewnej nieokreślonej funkcji $L = L(S_0, S_1)$ i ściśle określonej funkcji modułu v , dokładnie równej, jak to Einstein zauważył w drugim zdaniu swej pierwszej z cytowanych tu wypowiedzi, tej funkcji zmiennej v , która wystąpiła w podanym w [1] wyrażeniu na energię kinetyczną elektronu.

Pierwsze zdanie tej wypowiedzi wskazuje z kolei na pewną uniwersalność zachodzącą w sytuacji, gdy ciało, poruszając się względem $\tilde{\mathcal{K}}$ jednostajnym ruchem postępowym, wysyła światło w taki sposób, żeby

² Zauważmy, że gdyby po prawej stronie równań zamiast stałej C postawić dwie różne stałe C_0 oraz C_1 i interpretować je jako dwie różne, niezależne od prędkości energie wewnętrzne, to do lewej strony równania (6) dodałaby się różnica $C_0 - C_1$. Wtedy z (6), dla $v = 0$, wynikałoby, że $C_0 = C_1$. Trudno sądzić, iż Einstein tego nie wiedział.

³ Jednym z parametrów s_i może być energia wewnętrzna. Przyjęta notacja uwzględnia też teorie, w których energia całkowita nie jest po prostu sumą energii kinetycznej i wewnętrznej, lecz zależy od tej ostatniej nieliniowo.

nie miało to wpływu na stan jego ruchu. Wtedy energia kinetyczna ciała się zmniejsza, mimo iż jego prędkość pozostaje stała, a wielkość tej zmiany jest jednoznacznie wyznaczona przez globalną energię, mierzoną w układzie spoczynkowym ciała, która została wyniesiona z ciała w czasie rozważanego procesu emisji. Związek między wielkościami zmian energii kinetycznej i energii wyniesionej z ciała przez promieniowanie jest niezależny od jego specyficznych cech. Od cech tych może natomiast zależeć np. sama możliwość zajścia takiego rodzaju procesów promieniowania, a jeżeli są one możliwe, to także ich wpływ na rozmaite charakterystyki związane z przebiegiem tych procesów. Równanie (9) jest więc stwierdzeniem pewnego prawa ogólnego, które należy interpretować jedynie jako warunek konieczny, a nie dostateczny na to, aby procesy takie mogły zachodzić. Druga z przytoczonych powyżej wypowiedzi Einsteina świadczy właśnie o tym, że dokładnie tak rozumiał on fizyczną treść zawartą zarówno w równaniu (9), jak i we wszystkich jego konsekwencjach.

Równanie (9) jest spełnione w sposób ścisły dla każdej wartości $v \in (-c, c)$, a dla $v = 0$ przechodzi w tożsamość postaci $0 = 0$. Również wszystkie równania, jakie można otrzymać, różniczkując obie strony (9) względem v , będą równaniami ścisłymi dla każdej wartości $v \in (-c, c)$. W wyniku zróżniczkowania względem v równanie (9) przechodzi w równanie

$$\frac{\partial K(-v, S_1)}{\partial v} - \frac{\partial K(-v, S_0)}{\partial v} = \frac{L}{c^2} \frac{v}{\sqrt{(1 - (v/c)^2)^3}}. \quad (10)$$

Zgodnie z formalizmem Lagrange'a, wyrażenie $\partial K(-v)/\partial v = -p$ trzeba interpretować jako pęd (ze znakiem minus) rozważanego układu mechanicznego. Dla $v = 0$ równanie (10) przechodzi w warunek postaci $p(S_0) - p(S_1) = 0$. Interpretując zaś wyrażenie $\lim_{v \rightarrow 0} (1/v)(\partial K(v, S_i)/\partial v) = m_i$ jako masę bezwładną ciała w stanie S_i , co jest zgodne z założoną zasadą korespondencji nowej teorii z teorią Newtona, widzimy, że z (10) wynika, iż

$$m_0 - m_1 = \frac{L}{c^2}, \quad (11)$$

co w tekście pracy [2] Einstein wyraził w pierwszym zdaniu, jakie napisał po odpowiedniku równania (7).

Zauważmy, że równanie (11) jest ścisłą, a nie otrzymaną w przybliżeniu konsekwencją związku (9). Zasada korespondencji posłużyła jedynie do znalezienia fizycznej interpretacji lewej strony równania (11). Równanie to można także otrzymać, podstawiając $v = 0$ do rezultatu dwukrotnego zróżniczkowania względem v obu stron równania (9). Zgodnie z zasadą korespondencji należy wtedy uznać, że wyrażenia

$\partial^2 K(0, S_i)/\partial v^2 = m_i$ ($i = 0, 1$) są masami spoczynkowymi tego samego ciała odpowiednio w stanach S_0 oraz S_1 . Ciało to jest przy tym w spoczynku względem układu \mathcal{K} , a ponieważ $v = 0$, także względem \mathcal{K} .

Prawo fizyki przedstawione przez relację (11) jest prawem ogólnym, a jego status jest podobny do statusu, jaki przypisuje się zasadom termodynamiki fenomenologicznej. I tak właśnie Einstein je pojmował, gdy w drugiej z przytoczonych tu wypowiedzi stwierdził, że energia L wyniesiona z ciała przez promieniowanie może w równaniu (11) być zastąpiona przez równoważną jej, dowolną (w sensie pierwszej zasady termodynamiki) postać energii.

Należy podkreślić, że w pracy [2] Einstein wykazał, iż jego zasada względności prowadzi do fizycznie istotnych, nowych konsekwencji także w przypadku ciał spoczywających, a nie tylko poruszających się z dużymi prędkościami, jak to nawet dziś jeszcze sądzą niektórzy fizycy, a co prawdopodobnie było przyczyną krytyki wyrażonej m.in. w pracach [3] i [4].

3. Wczesny odbiór prac Einsteina

Zgodnie z relacją jego siostry, Mai Winteler-Einstein, już po opublikowaniu pracy [1] Einstein niecierpliwie oczekiwał jakiegokolwiek znaku, iż publikacja ta została w ogóle przez kogokolwiek przeczytana. Jak pisze Maja (por. [6]), pierwszym sygnałem od czytelnika był list od Maksa Plancka, który drobiazgowo wypytywał o rozmaite szczegóły pracy [1], co ogromnie ucieszyło młodego autora. W maju 1906 r. Einstein pisze do Maurice'a Solovine'a, że w swym ostatnim liście Max Planck, bardzo pozytywnie oceniając pracę [1], komunikuje mu o podjęciu własnych badań w tym samym kierunku. Najpewniej ów list Plancka dotyczył jego publikacji [7] z marca 1906 r., będącej pierwszą pracą innego autora niż Einstein na temat einsteinowskiej zasady względności. W pracy tej, dokładniej skomentowanej w cz. I niniejszego artykułu, dokonany został bardzo istotny postęp.

Powracając do roku 1905, Max von Laue stwierdza w [8], iż w Berlinie jesienią 1905 r. na jednym z pierwszych konwersatoriów z fizyki Planck⁴ referował pracę [1]. W tymże roku Planck zlecił Lauemu, swemu ówczesnemu asystentowi, by zajął się tematyką związaną z zasadą względności, a swemu doktorantowi, Kurdowi von Mosengeilowi, by uwzględnił tę zasadę w pisanej wtedy pracy doktorskiej poświęconej promieniowaniu stacjonarnemu w doskonale czarnej, poruszającej się wnęce (patrz [9]). Wyjaśnia to także, dlaczego właśnie Laue jest autorem pierwszego, bardzo dobrego podręcznika [10] tej dziedziny.

Na uniwersytecie w Würzburgu jesienią 1905 r., jak to wynika z relacji w [11] i [12], zasadzie względności poświęcono jedno z pierwszych semina-

⁴ Redaktorem naczelnym *Annalen der Physik* był wtedy Paul Drude, a jego zastępcami – Max Planck, który pilotował pracę [1], i Wilhelm Wien.

riów prof. Wilhelma Wiena. Referentem był tam pochodzący z Polski doktorant Wiena, Jakub Jan Laub.

Trzecie seminarium jesienią 1905 r. na ten sam temat odbyło się w Krakowie, na Uniwersytecie Jagiellońskim. O fakcie tym dowiedziałem się z ust prof. Stanisława Lorii, którego wykłady „Fizyki doświadczalnej”, jak się wtedy nazywał pierwszy uniwersytecki kurs fizyki ogólnej, słuchałem w latach 1949–51 w czasie studiów na Uniwersytecie Wrocławskim. Prof. Loria, wówczas już starszy pan, rozmawiał ze mną parę razy prywatnie o moich zainteresowaniach i przy takich okazjach opowiadał mi też o niektórych zdarzeniach z przeszłości. Zgodnie z jego przekazem, gdy wczesną jesienią 1905 r. powrócił z wakacji do Krakowa, prof. August Witkowski, którego Loria był wtedy asystentem, polecił mi zapoznać się z publikacją [1] i zreferować ją na jednym z najbliższych seminariów Witkowskiego w semestrze zimowym tegoż roku. Przekazując Lorii tę pracę, Witkowski porównał Einsteina do nowego Kopernika. Mimo że dosłownie pamiętam przekazaną mi wtedy wypowiedź Witkowskiego, nie cytuję jej, gdyż w późniejszych wspomnieniach samego Lorii [13] oraz w książce Infelda [14] są już cytowane dwie różne, choć zbliżone jej wersje. Loria opowiadał mi również, a pisze o tym zarówno on sam, jak i Infeld, że na zjeździe przyrodników i lekarzy niemieckich we Wrocławiu w roku 1907 spytał swego kolegę ze studiów w Getyndze, Maksa Borna, co sądzi o pracy [1], i wtedy okazało się, że ani Born, ani nikt z tam obecnych fizyków, znajomych Lorii, w ogóle o pracy tej nie słyszał. Loria poszedł więc z Bornem do biblioteki uniwersyteckiej i znalazł mu odpowiedni zeszyt *Annalen der Physik*. Dwa lata później Born ogłosił dwie istotne prace [15] z tej dziedziny, a w latach późniejszych wniósł znaczny wkład do fizyki relatywistycznej. W swych wspomnieniach [16], napisanych pod koniec życia, Born rzeczywiście potwierdza, iż z pracą [1] zapoznał się stosunkowo późno, podczas pobytu we Wrocławiu, nie wymieniając jednak nazwiska Lorii.

Pierwszą w ogóle publikacją, w której cytuje się pracę [1], była krótka notatka [17] Walthera Kaufmanna przedstawiona Pruskiej Akademii Nauk 30 listopada 1905 r. Rozszerzona jej wersja, jako artykuł [18], dotarła do redakcji *Annalen der Physik* 3 stycznia 1906 r. Począwszy od roku 1901 Kaufmann prowadził badania nad doświadczalnym potwierdzeniem hipotezy o zmienności masy poruszającego się ciała naładowanego elektrycznie, wysuniętej przez Josepha Johna Thomsona w roku 1881. Thomson uzasadniał swą hipotezę, kierując się ogólnymi własnościami pola elektromagnetycznego opisanymi w równaniach Maxwella. Na przełomie XIX i XX wieku powstały w zasadzie dwie konkurujące ze sobą teorie opisujące zjawisko zmienności masy. Pierwszą z nich była teoria elektronowa Hendrika Antoona Lorentza sformu-

ułowana w kolejnych pracach w latach 1895–1904 (por. [19]), a drugą – teoria Maksa Abrahama, który zaproponował sztywną, poruszającą się i elektrycznie naładowaną kulkę (o stałej gęstości objętościowej lub powierzchniowej ładunku) jako model elektronu, którego masa jest całkowicie określona przez energię jego oddziaływania z wypromieniowanym, własnym polem elektromagnetycznym kulki. W roku 1903, korzystając z równań Maxwella oraz z tych samych dwu założeń, Abraham wyznaczył dwie masy, podłużną⁵ i poprzeczną, w jego modelu elektronu jako funkcje prędkości, promienia i całkowitego ładunku kulki. Rok później Lorentz uzyskał inne wyrażenia na obie masy, korzystając z elektrodynamiki Maxwella uzupełnionej zarówno o wprowadzoną już w 1895 r. siłę, nazwaną później siłą Lorentza, rozumianą jako siła, z jaką eter oddziałuje na poruszające się w nim ciała naładowane, jak i o przeszło 10 dodatkowych założeń, wśród których były: założenie o deformowalnym elektronie, hipoteza kontrakcji, sformułowane przez niego prawa transformacji współrzędnych i czasu, żądanie, by wszystkie siły miały to samo prawo transformacyjne, co siła elektromagnetyczna, a także postulat, iż prędkość światła jest maksymalnie możliwą prędkością spotykaną w przyrodzie.

W pracy [18] Kaufmann przedstawił wyniki swych doświadczeń mających rozstrzygnąć, która z obu tych formuł masowych bardziej odpowiada rzeczywistości. Artykuł [18] poprzedził zwięzłym przeglądem obu konkurujących teorii i zreferował tam także inne, nowe publikacje teoretyczne, które uznawał za warianty którejś z nich. Po bardzo więc krytycznym omówieniu pracy Lorentza referuje pracę [1] w sposób świadczący o zaskakująco dobrym jej zrozumieniu, i wysoko ją ocenia z poznawczego punktu widzenia. W podsumowaniu wyników pomiarów wskazuje jednak, iż przemawiają one za teorią Abrahama–Bucherera (praca tego drugiego też pojawiła się w 1905 r.), a świadczą na niekorzyść teorii Lorentza–Einsteina.

Einstein prace [17,18] pominął w ogóle milczeniem, co w podobnych sytuacjach było też i później jego zwyczajem. Planck natomiast, który w pracy [7] wykazał, że poprawione tam einsteinowskie równania ruchu elektronu wynikają z zasady wariacyjnej, właśnie dlatego, w przeciwieństwie do teorii Abrahama, gdzie takich zasad nie było, faworyzował teorię, jak ją nazywał, w z g l ę d n ą (Relativtheorie). Podał więc starannej analizie prace [17,18], a jej konkluzje opublikował w [20]. W rezultacie wykazał, ale bez komentarza, podając tylko dane numeryczne, iż z danych uzyskanych przez Kaufmanna wynika m.in., iż elektrony użyte w pomiarach miały prędkość $v > c$. Coś więc było nie całkiem w porządku z danymi Kaufmanna! We wrześniu 1906 r. na jednej z sesji na zjeździe w Stuttgarcie wywiązała się zatem ostra dyskusja między zwo-

⁵ Zdefiniowaną jako współczynnik w równaniach ruchu przy składowej przyśpieszenia w kierunku stycznym do toru elektronu.

lennikami obu teorii. Opisana jest ona w rocznikach zjazdu, a brali w niej udział wszyscy chyba czołowi niemieccy specjaliści. W dyskusji tej nazwisko Einsteina padało często, ale tylko w określeniu teoria Lorentza–Einsteina, gdyż pracę [1] uważano powszechnie jedynie za inne sformułowanie teorii Lorentza. Sam Einstein nie był tam obecny. Wieść o jego pracach rozeszła się więc stosunkowo wcześniej, przynajmniej wśród specjalistów z niemieckiego obszaru językowego. Przytoczona powyżej wypowiedź prof. Lorii świadczy jednak, że musiało jeszcze upłynąć kilka lat, zanim dowiedział się o nich szerszy krąg fizyków.

Przeglądając dostępną mi niemieckojęzyczną literaturę naukową z lat 1906–10, znalazłem ok. 50 publikacji z fizyki teoretycznej tematycznie ściśle związanych z pracami [1] i [2]. Ich autorzy pochodzili z krajów, gdzie język niemiecki był w prawie powszechnym użyciu. W czasopiśmie anglojęzycznym znalazłem natomiast tylko dwie prace napisane w tym okresie. Po francusku zaś, nie licząc prac Henri Poincarégo dotyczących jego własnej teorii, o ile mi wiadomo, nic na ten temat nie zostało wtedy opublikowane.

W roku akademickim 1908/09, w semestrze zimowym, pierwszy regularny cykl wykładów na temat teorii względności wygłosił Arnold Sommerfeld na Uniwersytecie w Monachium. W następnej dekadzie XX wieku szczególna teoria względności zaczynała przez niektórych być traktowana jako zamknięta już gałąź fizyki, ale wbrew tej opinii przez następne dwie lub trzy dekady sposób jej rozumienia nadal ulegał zmianie.

4. Kontakty Polaków z Einsteinem

Na opisanym powyżej tle ogólnoeuropejskim upowszechnienie wiedzy o nowej teorii wśród fizyków polskich przedstawiało się w tamtych wczesnych latach wcale nie najgorzej. Zawdzięczamy to przede wszystkim dwóm osobom: prof. Augustowi Witkowskiemu i Jakubowi Janowi Laubowi (patrz [12]).

Profesor August Witkowski (1854–1913), choć był przede wszystkim fizykiem doświadczalnym, w swym dorobku miał też wykłady i oryginalne publikacje z fizyki teoretycznej. Od dłuższego czasu interesował się rolą, jaką eter miał odgrywać w propagacji fal elektromagnetycznych, i dlatego od razu pojął znaczenie pracy [1]. W seminariach na UJ i odczytach w PAU rozpowszechnił więc wśród fizyków, matematyków i filozofów informację o powstaniu i znaczeniu nowej teorii. Liczne obowiązki akademickie nie pozwoliły mu na podjęcie badań w nowej dziedzinie, ale zachęcał do tego niektórych ze swych asystentów. I tak, Stanisław Loria zajął się popularyzowaniem tego tematu, a Kamil Kraft (1872–1945) podjął badania teoretyczne, których wyniki ogłosił w pięciu pracach w języku niemieckim w latach 1912–13; niektóre z nich doczekały się cytowań za granicą [12]. W tym wczesnym okresie działalność popularyzatorską prowadzili ponadto Maksymilian Huber (1872–1950) i Zygmunt Zawirski

(1882–1952), a trochę później także Ludwik Silberstein (1872–1948).

Jakub Jan Laub (1881–1962) po rozpoczęciu studiów fizyki na UJ kontynuuje je na uniwersytetach w Wiedniu i Getyndze. Kończąc studia, w 1905 r. podejmuje badania doświadczalne w dziedzinie optyki pod kierunkiem prof. Wiena w Würzburgu, uwieńczone obroną rozprawy doktorskiej pod koniec 1906 r. Na seminarium Wiena przedstawia m.in. pracę [1], a podczas obrony daje się poznać jako gorący zwolennik nowej teorii Einsteina. W roku 1907 publikuje dwie prace [21] wnoszące wkład do nowej teorii. Utrzymuje kontakty z Polską, drukując w *Wiadomościach Matematycznych* polskie wersje swoich prac i przyjeżdżając do Polski na zjazdy fizyków. Opisana została dyskusja z profesorami Witkowskim i Natansonem po wystąpieniu Lauba na takim zjeździe [12]. W 1908 r. wysłała do Einsteina list z pytaniem, czy mógłby przyjechać do Berna w celu nawiązania współpracy. Po pozytywnej odpowiedzi zostaje pierwszym współpracownikiem Einsteina, publikując z nim trzy prace [22] na temat elektrodynamiki relatywistycznej w ośrodku ciągłym. W roku 1910 ogłasza pracę przeglądową [23] ze szczególnej teorii względności, a nie mogąc się habilitować w ówczesnych Niemczech, w 1911 r. emigruje do Argentyny. Po I wojnie światowej podejmuje tam pracę w dyplomacji i jest przedstawicielem Argentyny w różnych stolicach europejskich (w tym w latach 1937–39 w Warszawie). Po II wojnie światowej powraca do Europy i do śmierci jest profesorem fizyki na uniwersytecie we Fryburgu.

Kontakty z Einsteinem, osobiste lub korespondencyjne, utrzymywało 12 uczonych polskich; dokładniejszy opis tych kontaktów Czytelnik znaleźć może w publikacjach prof. Bronisława Średniawy [12]. W zamieszczonej na s. 268 ramce zebrałem, na podstawie tych publikacji, zaledwie garść danych o tych kontaktach.

Literatura

- [1] A. Einstein, „Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik* **17**, 891 (1905).
- [2] A. Einstein, „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?”, *Annalen der Physik* **18**, 639 (1905).
- [3] A.I. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905–1911)* (Addison-Wesley, Reading, MA 1981).
- [4] H.I. Ives, „Derivation of the Mass–Energy Relation”, *J. Opt. Soc. Am.* **42**, 540 (1952).
- [5] J. Stachel, R. Torretti, „Einstein's first derivation of mass–energy equivalence”, *Am. J. Phys.* **50**, 760 (1982).
- [6] *The Collected Papers of Albert Einstein: The Swiss Years: Writings, 1900–1909*, t. II, red. John Stachel (Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1989).
- [7] M. Planck, „Das Prinzip der Relativität und die Grundgleichungen der Mechanik”, *Verh. d. Phys. Ges.* **4**, 136 (1906).

- [8] M. v. Laue, „Mein physikalischer Werdegang. Eine Selbstdarstellung”, w: *Schöpfer des neuen Weltbildes*, red. H. Hartmann (Athenäum-V., Bonn 1952), s. 178–210.
- [9] K. Mosengeil, „Theorie der stationären Strahlung in einem gleichförmig bewegten Hohlraum”, *Annalen der Physik* **22**, 867 (1907).
- [10] M. v. Laue, *Das Relativitätsprinzip* (F. Vieweg u. Sohn, Braunschweig 1911).
- [11] L. Peynson, „Einstein's early scientific collaborators”, *Hist. St. Phys. Sci.* **7**, 83 (1976); L. Peynson, *The young Einstein* (Hilger, Bristol 1985), s. 219–225.
- [12] B. Średniawa, „Kontakty naukowe i współpraca polskich fizyków z Einsteinem”, *Kw. Hist. Nauki i Techn.* **41**, 59 (1996); *Historia filozofii przyrody i fizyki w Uniwersytecie Jagiellońskim* (Kom. Hist. Nauki i Techniki PAN, Warszawa 2001); „History of theoretical physics at Jagellonian University in Cracow in XIX-th century and in the first half of XX-th century”, *Zeszyty Nauk. UJ*, t. DCCXXVII, Prace Fiz., zeszyt 24 (PWN, Kraków 1985).
- [13] S. Loria, „Einstein a fizyka kwantowa”, *Postępy Fizyki* **6**, 500 (1955).
- [14] L. Infeld, *Albert Einstein* (PWN, Warszawa 1956).
- [15] M. Born, „Die träge Masse und das Relativitätsprinzip”, *Annalen der Physik* **28**, 571 (1909); „Die Kinematik des starren Elektrons in der Kinematik des Relativitätsprinzips”, *Annalen der Physik* **30**, 1 (1909).
- [16] M. Born, *Physics in my generation* (Springer Verlag, New York 1969).
- [17] W. Kaufmann, „Über die Konstitution des Elektrons”, *Berl. Ber.* **45**, 949 (1905).
- [18] W. Kaufmann, „Über die Konstitution des Elektrons”, *Annalen der Physik* **19**, 487 (1906).
- [19] H.A. Lorentz, *Collected Papers*, t. I–IX (Martinus Nijhoff, The Hague 1935–39).
- [20] M. Planck, „Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkbarkeit der β -Strahlen in ihrer Bedeutung für die Dynamik der Elektronen”, *Phys. Z.* **7**, 753 (1906).
- [21] J. Laub, „Zur Optik bewegter Körper”, *Annalen der Physik* **23**, 738 (1907); „Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip”, *Annalen der Physik* **23**, 989 (1907); „Zur Optik bewegter Körper II”, *Annalen der Physik* **25**, 175 (1908).
- [22] A. Einstein, J. Laub, „Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegter Körper”, *Annalen der Physik* **26**, 532 (1908); korekta: **27**, 232 (1908); uwagi i suplement: **28**, 445 (1909); „Über die im elektromagnetischen Felde auf ruhende Körper ausgeübten ponderomotorischen Kräfte”, *Annalen der Physik* **26**, 541 (1909).
- [23] J. Laub, „Über die experimentellen Grundlagen des Relativitätsprinzips”, *Jahrb. Radioakt.* **7**, 405 (1910).

Uczeni polscy i ich osobiste lub korespondencyjne kontakty z Einsteinem

(PS – rok pierwszego spotkania, RK – rok rozpoczęcia korespondencji)

- Jakub Jan Laub (1881–1962), PS: 1908, RK: 1908
Regularna korespondencja między nimi trwała aż do śmierci Einsteina.
- Marian Smoluchowski (1872–1917), PS: ?, RK: 1908
Istnieją sprzeczne relacje, czy rzeczywiście się spotkali.
- Józef Wierusz-Kowalski (1866–1927), PS: 1909, RK: 1907
Wierusz-Kowalski był profesorem fizyki we Fryburgu, a Einstein został w 1909 r. profesorem w Zurychu, spotykali się więc przy różnych okazjach.
- Ignacy Mościcki (1881–1946), PS: 1909, RK: –
Będąc asystentem Wierusza-Kowalskiego, spotykał też Einsteina.
- Maria Skłodowska-Curie (1867–1934), PS: 1909, RK: 1913
Spotykali się na zjazdach i w Lidze Narodów.
- Stanisław Loria (1883–1958), PS: 1913, RK: 1919
Rozmawiali ze sobą na Zjeździe w Wiedniu.
- Mieczysław Wolfke (1883–1947), PS: 1913, RK: 1946
W Zurychu Einstein był jednym z recenzentów pracy habilitacyjnej Wolfkego i bywał gościem w jego domu, grając tam na skrzypcach przy akompaniamencie gospodarza.
- Władysław Natanson (1864–1937), PS: 1914, RK: 1915
W drodze do Krakowa Natanson musiał z powodu wojny na prawie rok zatrzymać się w Berlinie, gdzie bywał u Einsteina. W zbiorach UJ znajduje się 5 listów Einsteina do Natansona.
- Jan Weyssenhoff (1889–1972), PS: 1916, RK: –
Podczas I wojny światowej Weyssenhoff przebywał w Zurychu i gdy Einstein dwukrotnie tam przyjeżdżał, spotykał się z nim oraz słuchał jego wykładów.
- Leopold Infeld (1898–1968), PS: 1920, RK: 1934
Infeld na rok wyjechał do Berlina, by ukończyć studia. Starając się o przyjęcie na uniwersytet, złożył Einsteiniowi wizytę. W latach 1936–39 był bliskim współpracownikiem Einsteina w Princeton. Po 1939 r. kontynuowali współpracę częściowo korespondencyjnie, gdy Infeld był w Kanadzie, a po powrocie Infelda do Polski pisywali do siebie dość regularnie.
- Ludwik Silberstein (1872–1948), PS: 1921, RK: 1918
Silberstein zajmował się teorią względności od roku 1914. Pierwsza faza jego kontaktów z Einsteinem dotyczyła kontrowersji na temat ich różnych sposobów podejścia do zagadnienia dwu ciał w OTW. Wytykali więc sobie nawzajem różne techniczne błędy, rzeczywiste bądź urojone. W 1936 r., po ugodowym artykule Einsteina, w którym przyznał się do jednego z błędów, Silberstein przeprosił Einsteina i nastąpiła bardziej już koncyliacyjna faza ich kontaktów.
- Myron Mathisson (1897–1940), PS: –, RK: 1929
Po pięciu latach od ukończenia studiów fizyki na UW, Mathisson samodzielnie napisał istotną pracę na temat zagadnienia ruchu w OTW. Jej kopię wraz z listem przesłał do Einsteina, którego interwencja u prof. Białobrzeskiego zaowocowała doktoratem Mathissona. Był to początek wymiany korespondencji Einsteina i Mathissona. Trwała ona aż do przedwczesnej śmierci drugiego z nich. W Archiwum Einsteińskim znajduje się 19 listów Mathissona, a odpowiedzi Einsteina, o których istnieniu wiadomo, zaginęły.