

Einstein, czasoprzestrzeń, grawitacja*

PL ISSN 0028—1271
NAUKA POLSKA
nr 3—4, 1980

ANDRZEJ TRAUTMAN

Członek rzeczywisty PAN

Przypadająca w bieżącym roku setna rocznica urodzin Alberta Einsteina jest obchodzona z uwagą i uroczystością w wielu krajach. Organizowane są liczne konferencje i wystawy oraz przygotowywane specjalne wydawnictwa. Zainteresowanie rocznicą wykracza poza grono fizyków i historyków nauki, czego dowodem są rzesze zwiedzających wystawy einsteinowskie, takie jak urządzona przez Muzeum Techniki NOT w Warszawie.

Jakie są przyczyny stałego zainteresowania, a nawet pewnej fascynacji, osobą i twórczością uczonego, którego teorie są uznawane za trudne i w pełni zrozumiałe tylko dla stosunkowo nielicznego grona fachowców? Dlaczego bardziej intryguje nas Einstein niż twórcy silnika spalinowego, telewizora lub detergentów, twórcy rzeczy, które spełniają dużą rolę w codziennym życiu? Odpowiadając na to pytanie trzeba wziąć pod uwagę zarówno indywidualność Einsteina, jego niezwykłą osobowość oraz trwałe znaczenie jego dzieła, jak i dość powszechne wśród ludzi zainteresowanie podstawowymi pojęciami czasu, przestrzeni, światła, energii i grawitacji. Ciekawość „podstawowych mechanizmów świata” jest jedną z godnych wysokiego szacunku cech natury ludzkiej; właśnie taka ciekawość zapoczątkowuje i podtrzymuje wszelką poznawczą działalność naukową.

Prawie ćwierć wieku, jakie minęło od śmierci Einsteina, przyniosło rozwój jego idei, potwierdzając ich świeżość i aktualność. Działanie maserów i laserów opiera się na zjawisku promieniowania wymuszonego, opisanym przez Einsteina w 1916 r. Nowe techniki pomiarowe, obserwacje astronomiczne i badania Kosmosu przyniosły liczne potwierdzenia einsteinowskiej teorii grawitacji oraz wynikających z niej modeli rozwoju Wszechświata. Wielkie zainteresowanie wzbudziły prace nad „czarnymi dziurami”, których możliwość występowania wynika z ogólnej teorii względności (choć sam Einstein ich nie rozpatrywał), a istnienie wydaje się być potwierdzone przez obserwacje.

Albert Einstein kojarzy się wszystkim z teorią względności i bombą atomową. Jest on istotnie twórcą fizycznej teorii czasu i przestrzeni, obejmującej zjawiska przy dużych prędkościach, nazwanej — może niezbyt fortunnie — teorią względności. Załączki pierwszej części tej teorii, pomijającej zjawiska grawitacyjne i zwanej szczególną teorią względności, znajdowały się w pracach poprzedników Einsteina (Voigt, Lorentz,

* Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego w dn. 31 X 1979 r. na sesji naukowej Wydziału III PAN, poświęconej uczczeniu setnej rocznicy urodzin Alberta Einsteina.

Fitzgerald, Larmor, Poincaré). Mówi się czasem — chyba nie bez racji — że teoria szczególna powstałaby nawet bez Einsteina w pierwszej dekadzie bieżącego stulecia. Inaczej jest z ogólną teorią względności, czyli relatywistyczną teorią grawitacji, zawdzięczającą Einsteinowi wszystkie podstawowe idee fizyczne.

Zupełnie nowy, o doniosłym znaczeniu światopoglądowym, był pomysł Einsteina sprowadzenia grawitacji do geometrii i związania krzywizny czasoprzestrzeni z ruchem i rozkładem materii.

Znacznie trudniej jest określić stopień związku Einsteina z opanowaniem przez ludzkość energii jądrowej i ocenić jego wpływ na powstanie broni atomowej. Słynny einsteinowski wzór $E=mc^2$, ustalający związek między energią E i masą m ciała, umożliwił oszacowanie energii, jaka wyzwala się w wyniku przemian jąder atomowych. Stało się to aktualne dopiero w latach trzydziestych, dzięki intensywnym badaniom zerzeń i rozpadów jąder, badaniom, które doprowadziły do odkrycia neutronu (1932) oraz zjawiska rozszczepienia uranu pod wpływem bombardowania neutronami (1938). Znamienne jest, że sam Einstein — a także niektórzy fizycy jądrowi, jak np. Rutherford — przez długi czas nie wierzyli w rychłe opanowanie energii jądrowej i odrzucali możliwość zbudowania broni wykorzystującej tę energię. Według przekazu Ph. Franka, po wykładzie Einsteina w Pradze w 1921 r. zbliżył się do niego młody człowiek próbując mu przedstawić pomysł urządzenia zdolnego wywołać wybuch dzięki wyzwoleniu energii zamkniętej w atomach. Einstein miał odpowiedzieć: „Proszę się uspokoić. Niczego Pan nie straci jeśli nie omówimy szczegółów Pana pracy. Na pierwszy rzut oka widać, że jest ona nierozsądna” ([43], str. 211, moje tłum. tego fragmentu i innych cytowanych ze źródeł obcojęzycznych — A. T.). W 1938 i 1939 r. zaszły wydarzenia, zarówno naukowe, jak i polityczne, które spowodowały, że wyzwolenie energii jądrowej stało się możliwością, a perspektywa skonstruowania przez hitlerowskie Niemcy bomby atomowej — bardzo poważną groźbą dla ludzkości.

Pod wpływem L. Szilarda i E. Wignera, fizyków i uchodźców z Węgier, Einstein podpisał list datowany 2 VIII 1939 r. i zaadresowany do prezydenta F. D. Roosevelta. W liście tym, powołując się na prace E. Fermiego, F. Jolioty i L. Szilarda, Einstein wskazywał na możliwość wywołania reakcji łańcuchowej w uranie, co doprowadzi do wyzwolenia znacznej energii i powstania nowych pierwiastków promieniotwórczych. Wykorzystując te zjawiska, będzie zapewne można zbudować nowy rodzaj bomby, ale — zastrzegał się Einstein — bomba taka, ze względu na ciężar, prawdopodobnie nie będzie nadawała się do przenoszenia samolotami. Einstein zwraca uwagę na to, że w Niemczech są wykonywane badania nad uranem oraz proponuje wzmożenie prac prowadzonych w Stanach Zjednoczonych. List ten dotarł do Roosevelta dopiero w październiku, a jego wpływ na bieg wydarzeń był nieznaczny. W związku z tym, w marcu 1940 r., Einstein napisał do A. Sachsa, ekonomisty i przyjaciela prezydenta, prosząc go o ponowne zwrócenie uwagi Roosevelta na groźną sytuację, jaka wynika z rozszerzenia zakresu badań jądrowych w Niemczech. W tym drugim liście Einstein sugerował także potrzebę wstrzymania w Ameryce publikacji na temat reakcji łańcuchowej. Wreszcie, w trzecim liście, z kwietnia 1940 r., Einstein odmówił udziału w spotkaniu naukowców z przedstawicielami rządu i wojska w celu omówienia potrzeby rozszerzenia badań jądrowych

w USA. Proponował on natomiast, aby powołać organizację, której celem będzie uzyskanie funduszy na badania o dużej skali, zmierzające do rozpoznania praktycznych zastosowań zjawisk jądrowych. Dalsze wydarzenia i decyzje odbywały się już bez udziału Einsteina. Dużą rolę spełnił opracowany w lecie 1941 r. brytyjski projekt budowy bomby atomowej (*Maud Report*). W 1942 r. rozpoczął się amerykański Program Manhattan, o którego istnieniu Einstein mógł początkowo tylko się domyślać. W końcu 1944 r. odwiedził Einsteina jego kolega z okresu praskiego, O. Stern, będący konsultantem Programu Manhattan. Pod wpływem tego, czego dowiedział się od Sterna, Einstein napisał list do N. Bohra, wyrażając obawę o to, że „gdy wojna się skończy, we wszystkich krajach wystąpią potajemnie przygotowania wojenne, oparte na środkach technicznych nieuchronnie prowadzących do wojen prewencyjnych i zniszczeń straszniejszych nawet od obecnych strat życia ludzkiego. Politycy nie doceniają tych możliwości i w konsekwencji nie znają stopnia zagrożenia” (cytowane za [5], s. 575). W dalszej części listu Einstein proponował, aby użyć wpływów uczonych, takich jak Compton w Stanach Zjednoczonych, Lindemann w Anglii oraz Kapica i Joffe w Związku Radzieckim, w celu przekonania rządów tych krajów o potrzebie „umiędzynarodowienia potęgi wojskowej”. Sam Bohr, w rozmowach z Churchillem i Rooseveltem, wysunął już wcześniej nieco bardziej realistyczne propozycje stworzenia, w okresie powojennym, wspólnie z Rosjanami, systemu kontroli nad bronią jądrową, opartego na zaufaniu i współpracy. Wysiłki Bohra spełzyły na niczym, a — jak to się później okazało — Roosevelt i Churchill 19 IX 1944 r. podpisali aide-mémoire, którego ostatnie zdanie brzmiało: „Należy zbadać działalność profesora Bohra i podjąć kroki w celu uniemożliwienia z jego strony przecieków informacji, szczególnie do Rosjan” (cyt. za [55], s. 208). Nic więc dziwnego, że list Einsteina wprowadził Bohra w zakłopotanie; w czasie spotkania w dn. 22 XII 1944 r. Bohr przekonał Einsteina o „niecelowości jakichkolwiek dyskusji, które mogłyby skomplikować mężom stanu ich delikatne zadanie”. Szilard, od początku związany z Programem Manhattan, wiosną 1945 r. dostrzegł bezpośrednie niebezpieczeństwo: mimo że Rzesza chyli się ku upadkowi i hitlerowcy nie mają już szans na zbudowanie bomby atomowej, rząd amerykański może zdecydować się na jej użycie przeciwko Japonii, co później wywoła wyścig zbrojeń. Einstein napisał wówczas do Roosevelta list wprowadzający, który miał otworzyć Szilardowi drzwi Białego Domu i umożliwić przedstawienie prezydentowi zastrzeżeń co do celowości dalszej pracy nad bombą. List ten nie dotarł do Roosevelta, który zmarł 12 IV 1945 r. Próby Szilarda wpłynięcia na Trumana nie powiodły się. Decyzje zostały podjęte bez udziału środowiska naukowego. Dnia 6 VIII 1945 r. spadła bomba atomowa na Hiroszimę.

W pierwszych latach powojennych Einstein proponował stworzenie rządu ogólnosiwiatowego i powierzenie mu kontroli nad bronią jądrową. W tym duchu wypowiedział się m.in. w liście skierowanym do światowego kongresu intelektualistów, przywiezionym do Wrocławia przez O. Nathana, przyjaciela Einsteina. Niestety, organizatorzy kongresu zniekształcili posłanie Einsteina, usuwając z niego kilka fragmentów [53]. Przed samą śmiercią Einstein podpisał zainicjowany przez B. Russella apel do narodów i rządów o zaniechanie wyścigu zbrojeń i o pokojowe rozstrzygnięcie wszystkich sporów. Apel Russella—Einsteina, pod-

pisany później przez kilkunastu wybitnych uczonych (wśród nich był Leopold Infeld), doprowadził do powstania Ruchu Pugwash, który odegrał ważną rolę w przygotowaniu pierwszych porozumień międzynarodowych na temat zaprzestania prób z bronią jądrową.

Niektórzy znawcy historii powstania broni jądrowej twierdzą, że listy Einsteina do Roosevelta miały znikomy wpływ na decyzję o wszczęciu Programu Manhattan. Sam Einstein czuł się jednak odpowiedzialny. W rozmowie z L. Paulingiem powiedział: „Zrobiłem w życiu jeden wielki błąd — wtedy, gdy podpisałem list do Roosevelta zalecający produkcję bomb. Ale było pewne uzasadnienie — niebezpieczeństwo tego, że Niemcy je zrobią”.

*

Albert Einstein urodził się 14 III 1879 r. w Ulm, niewielkim bawarskim mieście nad Dunajem. Ojciec Alberta, Herman Einstein, prowadził tam warsztat elektromechaniczny. Niepowodzenia w interesach zmusiły Einsteinów do przeprowadzki w 1880 r. do Monachium. Młody Albert uczęszczał tam do szkoły elementarnej, a później do gimnazjum, którego jednak nie ukończył. Nauka nie szła mu początkowo zbyt dobrze; podobno kierownik szkoły, zapytany przez ojca, jaki zawód Albert powinien obrać, odpowiedział: „To nieważne jaki. I tak nic mu się nie uda”. W 1894 r. trudności gospodarcze skłaniają rodzinę Einsteinów do przeprowadzki do Włoch. Albert pozostał w Monachium w celu ukończenia gimnazjum, ale po sześciu miesiącach opuścił szkołę — a właściwie został z niej usunięty — i dołączył do rodziny. Jesienią 1895 r. Albert Einstein próbował dostać się na studia na Politechnice (ETH) w Zurychu. Ze względu na brak matury musiał zdawać egzamin wstępny, co zakończyło się niepowodzeniem. Rodzina zdecydowała, że Albert powinien otrzymać szwajcarskie świadectwo dojrzałości i wysłała go do szkoły kantonowej w Aarau. Po ukończeniu szkoły w 1896 r. Albert Einstein podjął studia na ETH w Zurychu. W tym samym czasie zrezygnował z obywatelstwa niemieckiego. Na Politechnice uczył się od wybitnych matematyków, H. Minkowskiego i A. Hurwitza, ale wydawał się być rozczarowany wykładami fizyka H. Webera, który nie uwzględniał w programie teorii Maxwella. Nawiązał przyjaźń z M. Grossmannem i Milewą Marič, serbską studentką, która w 1903 r. została pierwszą żoną Alberta Einsteina. W 1900 r. ukończył z dobrymi wynikami studia, ale doznał zawodu: wbrew oczekiwaniom nie dostał asystentury na Politechnice i przez dwa lata pracował dorywczo, dając korepetycje z matematyki i fizyki. W 1901 r. przyjął obywatelstwo szwajcarskie, a w 1902 r. rozpoczął pierwszą pracę, jako „rzeczoznawca techniczny trzeciej kategorii”, w Urzędzie Patentowym w Bernie. Einstein chwalił sobie to zajęcie, stwierdzając w szkicu autobiograficznym z 1955 r., że: „Sporządzanie opracowań patentowych było dla mnie błogosławieństwem. Dawało mi to sposobność do częstego myślenia o fizyce. Prócz tego zawód praktyczny jest w ogóle ratunkiem dla takich ludzi jak ja — działalność akademicka zmusza młodzieńca do bezustannego dostarczania produkcji naukowej i jedynie silne natury są przy tym w stanie oprzeć się pokusie powierzchownej analizy” [57]. Einstein sam brał udział w rozwiązywaniu zagadnień technicznych i jest współautorem kilkunastu patentów. W związku z zainteresowaniem chło-

dziarkami wysuwał wtedy pomysł użycia płynnego sodu jako chłodziwa, co znalazło ostatnio ważne zastosowanie w pewnego typu reaktorach jądrowych. W wyniku dobrej pracy, w 1906 r. Einstein awansował na rzeczoznawcę drugiej kategorii. Równocześnie prowadził on niezwykle intensywną i wielokierunkową działalność badawczą.

Pierwsze prace naukowe Einsteina, opublikowane w latach 1901—1904, dotyczyły zjawiska włoskowatości, różnicy potencjałów w elektrolitach oraz podstaw termodynamiki. W 1905 r., w siedemnastym tomie *Annalen der Physik*, ukazały się trzy prace Einsteina, z których każda oddzielnie zapewniłaby autorowi trwale miejsce w historii fizyki.

Pierwsza z nich [7] dotyczyła samej istoty światła: nawiązując do wcześniejszej pracy M. Plancka na temat promieniowania, Einstein proponował przyjąć, że światło ma budowę ziarnistą i składa się z elementarnych „cegiełek” (nazwanych później fotonami), o energii proporcjonalnej do częstości fali świetlnej. Hipoteza Einsteina wyjaśniała w prosty sposób m.in. prawa rządzące zjawiskiem fotoelektrycznym, sprzeczne z wyobrażeniami fizyki klasycznej. Przyjmowana początkowo przez fizyków nieufnie, praca ta miała duży wpływ na rozwój mechaniki kwantowej. Stwierdzając, że światło ma naturę jednocześnie falową i ziarnistą, Einstein dał pierwszy przykład tego, co później określano mianem dualizmu korpuskularno-falowego, cechującego każdy rodzaj materii w skali mikroświata. Interesujące jest to, że Einstein, będący współtwórcą fizyki kwantowej, w późniejszym okresie życia odrzucał mechanikę kwantową i jej probabilistyczną interpretację, która wyrasta z dualizmu cząstka—fala.

Znaczenie pracy o korpuskularnej naturze światła zostało docenione przez Komitet Nagród Nobla, który przyznając Einsteinowi nagrodę w dziedzinie fizyki za rok 1921, stwierdził, że czyni to w uznaniu „jego zasług dla fizyki teoretycznej, a szczególnie za odkrycie prawa zjawiska fotoelektrycznego”. Ostatnia część sformułowania Komitetu nie jest jednak ścisła. Prawidłowości występujące w zjawisku wybijania elektronów przez światło padające na powierzchnię metalu zostały odkryte przez Ph. Lenarda, który wcześniej otrzymał nagrodę Nobla za swe badania. Einstein powoływał się w swojej pracy na wyniki Lenarda i wykazał, że łatwo je wyprowadzić z hipotezy kwantów świetlnych. Ponadto Komitet Nagrody Nobla nie chciał się zaangażować w ocenę einsteinowskiej teorii względności, stwierdzając, że nagroda zostaje przyznana „niezależnie od wartości, jaka będzie przypisywana jego (tzn. Einsteina — A. T.) teoriom względności i grawitacji, jeśli zostaną one potwierdzone” (cytowane za [5], s. 295). Sformułowania te spowodowały protest Lenarda, przeciwnika teorii względności. Napisał on w tej sprawie gorzki list do Szwedzkiej Akademii Nauk. Nawiasem mówiąc, po dojściu Hitlera do władzy, Lenard propagował „fizykę niemiecką”, której jedynym oryginalnym elementem były niewybredne ataki na Einsteina i innych „niaryjskich” fizyków.

Druga słynna praca z 1905 r. dotyczyła ruchów Browna, tzn. bezładnych ruchów cząstek zawiesiny w cieczy. Einstein wykazał, że ruchy te są spowodowane fluktuacjami zderzeń licznych i lekkich cząsteczek cieczy ze stosunkowo dużymi i ciężkimi cząstkami zawiesiny. Ruch tych ostatnich można obserwować pod mikroskopem, co jako pierwszy uczynił botanik R. Brown około 1827 r. Cząsteczki cieczy — podobnie jak atomy — są natomiast niewidzialne, a więc ich rozmiarów nie można

bezpośrednio określić. Ta niemożliwość była punktem wyjścia rozumowania takich uczonych, jak E. Mach i W. Ostwald, którzy na przełomie XIX i XX w. krytykowali rozpowszechnione już wtedy przekonanie o atomowej budowie materii. Einstein pokazał, że mierząc prędkość dyfuzji cząstek zawiesiny można łatwo obliczyć średnicę cząsteczek cieczy. Wynik ten odegrał ważną rolę w przekonaniu ówczesnych fizyków i chemików o realnym istnieniu atomów i cząsteczek. W tym samym czasie, niezależnie od Einsteina, teorię ruchów Browna rozwijał Marian Smoluchowski. Einstein bardzo wysoko cenił prace Smoluchowskiego i nawiązywał do nich w swoich późniejszych badaniach. We wspomnieniu pośmiertnym o Smoluchowskim, jakie Einstein napisał w 1917 r., znajduje się zwięzła wypowiedź na temat stanu nauki o ciepłe i teorii cząsteczkowej na początku XX w. oraz ocena wpływu prac obu uczonych na ugruntowanie się teorii kinetycznej [24]:

„5 września odszedł od nas jeden z najbardziej wnikliwych współczesnych teoretyków, Marian Smoluchowski. Zmarł on, osiągnąwszy zaledwie 45 lat, w czasie epidemii dyzenterii w Krakowie.

Krąg zainteresowań naukowych Smoluchowskiego obejmował cząsteczkową teorię ciepła. Zajmowały go szczególnie te wnioski z teorii kinetycznej, których nie można było zrozumieć w ramach klasycznej termodynamiki; czuł on, że jedynie badając takie właśnie zjawiska, można będzie pokonać silne opory, z jakimi spotykała się teoria cząsteczkowa ze strony uczonych końca XIX w. Ten sam sceptycyzm, który przyczynił się do postępu w elektrodynamice, uwalniając ją od zbędnych wyobrażeń mechanicznych, hamował rozwój nauki o ciepłe. Z chwilą gdy fizycy zrozumieli, że można budować jasne i pełne teorie nie opierając ich na mechanice, wyrzekli się teorii mechanicznych we wszystkich działach fizyki... Kinetyczna teoria ciepła zdobyła sobie powszechne uznanie dopiero w latach 1905—1906, kiedy pokazano, że może ona ilościowo wyjaśnić dawno odkryte chaotyczne ruchy zawiesin w cieczy, tzw. ruchy Browna. Smoluchowski stworzył szczególnie elegancką i pogładową teorię tego zjawiska, wychodząc z kinetycznego prawa ekwipartycji energii... Wyjaśnienie istoty ruchów Browna doprowadziło do rozwiązania wątpliwości co do słuszności poglądów Boltzmana na prawa termodynamiki...”

Praca *O elektrodynamice ciał w ruchu* [8] zawierała pierwszy wykład szczególnej teorii względności. Zasada względności obowiązywała w fizyce przedrelatywistycznej, ale jedynie w odniesieniu do zjawisk mechanicznych. Głosiła ona, że zjawiska te przebiegają w jednakowy sposób we wszystkich inercjalnych układach odniesienia. Według poglądów z końca XIX w., podłożem zjawisk elektromagnetycznych miał być hipotetyczny eter wyróżniający pewien układ odniesienia (układ spoczynkowy eteru). Czynione były próby — bezskuteczne — zmierzenia prędkości Ziemi względem eteru (Michelson i Morley; 1881, 1887). Prekursorem teorii Einsteina był Poincaré, który już w 1895 r. przeczuwał zasadę względności pisząc: „doświadczenie dostarczyło wielu faktów, które dają się uogólnić w następujący sposób: nie można stwierdzić absolutnego ruchu materii lub, dokładniej, ruchu materii względem eteru. Można jedynie obserwować ruch materii ważkiej względem materii ważkiej” [54]. H. A. Lorentz i G. F. Fitzgerald wysunęli hipotezę o skracaniu się w stosunku $\sqrt{1-V^2/c^2}$:1 wymiarów ciał poruszających się względem eteru z prędkością V . Hipoteza ta wyjaśniała negatywne wyniki pomiarów Michelsona i Morleya. W 1900 r. J. J. Larmor podał wzory noszące dziś miano przekształceń Lorentza, natomiast sam Lorentz wykazał w 1903 r. niezmienniczość równań elektrodynamiki względem tych przekształceń. Mimo tych cząstkowych wyników, jakie poprzedziły pracę *O elektrodynamice ciał w ruchu*, słusznie uważa się

ją za punkt zwrotny w rozwoju szczególnej teorii względności, a Einsteina za głównego autora tej teorii. Istotnym wkładem Einsteina było uzupełnienie postulatu względności zasadą niezależności prędkości światła od ruchu źródła. Okazało się, że połączenie tych dwóch prostych zasad prowadzi do rewizji pojęcia równoczesności i w ogóle do przebudowy pojęcia czasu.

W pracy, jaka ukazała się w 18 tomie *Annalen der Physik* z 1905 r., Einstein wysunął ideę związku między bezwładnością ciał oraz ich energią. Wynikała z niej także zależność masy od prędkości ciał. W dwa lata później idea ta znalazła ostateczny wyraz w słynnym wzorze $E=mc^2$ [11]. Ważną rolę w rozwoju teorii względności spełniła praca H. Minkowskiego zawierająca geometryczne, czterowymiarowe ujęcie czasu i przestrzeni oraz przekształceń Lorentza.

W 1905 r. Einstein uzyskał na Uniwersytecie w Zurychu stopień doktorski. Oczywiście, rozprawa doktorska nie mogła być oparta na żadnej z omówionych wyżej, rewolucyjnych prac. Rozprawa, opublikowana w 1906 r. pt. *Nowy sposób określenia wielkości cząsteczek*, zawierała — oprócz tego, co zapowiada tytuł — nową metodę obliczania liczby Avogadry.

W 1908 r. Einstein został „prywatnym docentem” na Uniwersytecie w Bernie, tzn. uzyskał prawo wykładania bez wynagrodzenia. W roku akademickim 1908/1909 wykladał teorię promieniowania początkowo dla czterech słuchaczy, a później — dla jednego.

Wkrótce po powstaniu szczególnej teorii względności zainteresowania Einsteina skierowały się ku problemowi zbudowania relatywistycznej teorii zjawisk grawitacyjnych. Już w pracy z 1907 r. proponował on rozszerzenie zasady względności na nieinercjalne układy odniesienia, zauważając, że stałe pole grawitacyjne jest równoważne siłom powstającym w układzie poruszającym się jednostajnie przyspieszonym ruchem postępowym. Uogólniając to spostrzeżenie oraz formułując zasadę równoważności pól grawitacyjnych i sił bezwładności, Einstein przewidział dwa nowe zjawiska: zmianę długości fali oraz ugięcie promieni światła biegnącego w polu grawitacyjnym. Stąd wynikało od razu, że szczególna teoria względności obowiązuje jedynie tam, gdzie nie ma pól grawitacyjnych. Zjawisko ugięcia promieni świetlnych sugerowało zależność prędkości światła od rozkładu mas.

W 1909 r. trzydziestoletni Einstein spotkał się z pierwszymi dowodami uznania swojej twórczości naukowej: otrzymał doktorat honorowy Uniwersytetu Genewskiego i został profesorem nadzwyczajnym Uniwersytetu w Zurychu. W 1911 r. objął katedrę fizyki teoretycznej na niemieckim Uniwersytecie w Pradze. Przychodząca z Wiednia nominacja na tę katedrę wymagała od kandydata deklaracji przynależności do jednej z uznanych religii. Początkowo, zgodnie ze swymi przekonaniem, Einstein zadeklarował się jako bezwyznaniowy, co jednak było nie do przyjęcia dla urzędników austro-węgierskiej monarchii. W końcu, w odpowiedniej rubryce ankiety personalnej, znalazło się określenie „wyznanie mojżeszowe”. Pobyt w Pradze miał dla Einsteina duże znaczenie: zaprzyjaźnił się tam z G. Pickiem, matematykiem, który skierował jego uwagę na geometrię różniczkową i rachunek tensorowy, jako narzędzia pomocne w formułowaniu teorii grawitacji. Jesienią 1911 r. Einstein uczestniczył w słynnym zebraniu naukowym w Brukseli, zwanym obecnie pierwszym kongresem Solvaya.

Spotkał tam po raz pierwszy wielu najwybitniejszych fizyków europejskich. Byli tam de Broglie, Jeans, Kammerlingh Onnes, Langevin, Lorentz, Nernst, Planck, Poincaré, Rutherford, Skłodowska-Curie, Sommerfeld. Z pobytu w Pradze pochodzą także ważne prace Einsteina. Jedna z nich dotyczy ugięcia promieni świetlnych w polu grawitacyjnym, a inna zawiera sformułowanie podstawowego prawa rządzącego reakcjami fotochemicznymi.

W 1912 r. Einstein został profesorem zwyczajnym na Politechnice w Zurychu. Autorem jednej z opinii polecających, potrzebnych do objęcia tego ważnego stanowiska, była M. Skłodowska-Curie. Oto jej słowa ([5], s. 149): „Odnoszę się z wielkim podziwem do opublikowanych przez p. Einsteina prac dotyczących nowoczesnej fizyki teoretycznej. Ponadto, sądzę, że wszyscy fizycy matematyczni uważają te prace za godne wysokiego uznania. W Brukseli, gdzie uczestniczyłam w konferencji naukowej, w której brał udział p. Einstein, mogłam podziwiać jasność jego myśli, siłę argumentacji i głębię wiedzy. Biorąc pod uwagę, że p. Einstein jest jeszcze bardzo młody, można z nim wiązać największe nadzieje i widzieć w nim, w przyszłości, jednego z czołowych teoretyków”.

Warto także zacytować fragment drugiej opinii, pióra H. Poincaré (cyt. za [44], s. 99):

„P. Einstein jest jednym z najbardziej oryginalnych myślicieli wśród tych, których znam... Nie jest skrępowany klasycznymi zasadami, a gdy napotyka zagadnienie fizyczne, rychło rozpatruje wszystkie możliwości, jakie w nim się kryją. Prowadzi go to natychmiast do przewidywania nowych zjawisk, które mogą być pewnego dnia sprawdzone w doświadczeniu. Nie chcę przez to powiedzieć, że wszystkie te przewidywania przejdą próbę doświadczenia, gdy odpowiednie eksperymenty będą wykonane. Przeciwnie, skoro prowadzi on poszukiwania w wielu kierunkach, należy przypuszczać, że większość dróg, jakimi posuwa się, doprowadzi do ślepego zaułka. Równocześnie można mieć nadzieję, że jeden ze wskazanych przez niego kierunków jest prawidłowy. I to wystarczy. Tak właśnie należy postępować. Zadaniem fizyki matematycznej jest zadawanie pytań, na które odpowiedzi może udzielić jedynie doświadczenie”.

Pobyt Einsteina, jako profesora, w Zurychu był krótki. W tym czasie już wiele czołowych ośrodków naukowych starało się go pozyskać; miał propozycje profesury w Utrechcie, Leiden i Wiedniu. W 1914 r., za usilną namową Plancka i Nernsta, Einstein przeniósł się do Berlina, gdzie otrzymał godność członka Pruskiej Akademii Nauk i dyrektora Instytutu Fizyki im. Cesarza Wilhelma. Według własnych słów uczonogo „przyjął on tę synekurę, gdyż prowadzenie wykładów działa mu na nerwy, a w Berlinie nie będzie takich obowiązków”. Pewien wpływ odegrały prawdopodobnie względy osobiste: w Berlinie mieszkała dalsza rodzina Einsteina. W 1919 r. Einstein rozwiódł się z Milewą i zawarł nowy związek małżeński ze swoją kuzynką Elzą Löwenthal.

Pobyt w Berlinie był także okresem wyjątkowo intensywnej pracy naukowej i sukcesów. W 1915 r. Einstein współpracował z W. J. de Haasem nad pomiarem stosunku między momentem magnetycznym i momentem pędu atomów. Odkryte w wyniku tych doświadczeń zjawisko odegrało później ważną rolę w rozwoju pojęcia spinu elektronu. W latach 1914–1916 powstało ostateczne sformułowanie ogólnej teorii względności. Podstawowe równania tej teorii, ustalające związek między krzywizną czasoprzestrzeni, a gęstością i ruchem materii, zostały ustalone w listopa-

dzie 1915 r., niemal równocześnie przez D. Hilberta i Einsteina. W następnych latach teoria względności szybko się rozwijała; opracowano przybliżoną metodę rozwiązywania równań pola i przy jej pomocy zbadano zjawisko promieniowania grawitacyjnego. Dużym sukcesem było wyjaśnienie anomalnej składowej ruchu perihelionowego Merkurego. W celu zastosowania swojej teorii do Wszechświata jako całości Einstein wprowadził do równań pola „człon kosmologiczny”, opisujący nieobserwowane dotąd, hipotetyczne siły wzrastające z odległością. Otrzymany model Wszechświata był statyczny; pod wpływem odkrycia zjawiska „ucieczki galaktyk” i wyników teoretycznych A. Friedmanna, Einstein zrezygnował później z członu kosmologicznego i akceptował model Wszechświata rozszerzającego się.

Rok 1919 przyniósł dobitne i ogólnie zrozumiałe potwierdzenie einsteinowskiej teorii grawitacji. W maju tego roku ma miejsce całkowite zaćmienie Słońca, widoczne m.in. w Brazylii i u zachodniego wybrzeża Afryki; udały się tam dwie angielskie wyprawy naukowe z zadaniem sprawdzenia, czy istotnie promienie świetlne uginają się w polu grawitacyjnym Słońca tak, jak to przewiduje ogólna teoria względności. W czasie zaćmienia widoczne były gwiazdy w pobliżu tarczy słonecznej, a ugięcie pochodzącego od nich światła objawiło się niewielkim przesunięciem tych gwiazd w polu widzenia. A. Eddington, który kierował wyprawą u wybrzeża Afryki, donosił na wspólnym posiedzeniu Royal Society i Royal Astronomical Society w dniu 6 XI 1919 r. o pozytywnym wyniku obserwacji. Sukces ten wywołał wielkie wrażenie zarówno w świecie nauki, jak i wśród zmęczonych wojną społeczeństw Europy. Einstein dał wyraz swoim uczuciom w artykule opublikowanym w londyńskim „The Times” z 28 XI 1919 r.: „Po godnej pożałowania przerwie w kontaktach między uczonymi, z zadowoleniem korzystam z okazji, aby wyrazić uczucia radości i wdzięczności dla astronomów i fizyków Anglii. W pełnej zgodności ze wspaniałymi tradycjami pracy naukowej w waszym kraju, wybitni uczeni poświęcili czas i trud, a wasze instytucje naukowe nie szczędziły wydatków, aby sprawdzić przewidywania teorii, która została opracowana i opublikowana podczas wojny w kraju waszych nieprzyjaciół”. Od tego czasu Einstein stał się sławny, podziwiany i wielbiony przez jednych, atakowany i wyśmiewany przez innych. W Niemczech już na początku lat dwudziestych została rozwinęta kampania antysemitka, skierowana przeciwko teorii względności i jej twórcy. W 1921 r. odwiedził on Pragę, Wiedeń, Londyn i Manchester oraz odbył triumfalną podróż po Stanach Zjednoczonych. W 1922 r. wykładał w Collège de France, ale nie mógł odwiedzić Francuskiej Akademii Nauk, której dożywotni sekretarz, É. Picard, oświadczył, że „teoria względności doprowadza go do białej gorączki”. Jesienią 1922 r., w czasie podróży do Japonii, Einstein dowiedział się o przyznaniu mu nagrody Nobla za 1921 r. Wracając z Japonii odwiedził Palestynę i Hiszpanię. W lipcu 1923 r. wygłosił w Göteborgu odczyt laureata nagrody Nobla. Często odwiedzał P. Ehrenfesta w Leiden, gdzie także spotkał się po raz pierwszy z N. Bohrem. W 1925 r. udał się do Ameryki Południowej, w 1930 r. ponownie do Anglii, a w latach 1931 i 1932/1933 przebywał w Stanach Zjednoczonych. Brał udział w kilku kolejnych kongresach Solvaya.

W 1924 r. Einstein przetłumaczył na niemiecki i przekazał do druku pracę hinduskiego fizyka S. Bosego, zawierającą nowe wprowadzenie

wzoru Plancka na rozkład promieniowania w równowadze z ciałem doskonale czarnym. Idea Bosego, uogólniona przez Einsteina na przypadki gazu doskonałego [28] doprowadziła do powstania tzw. statystyki Bosego-Einsteina i przewidzenia zjawiska kondensacji tych gazów w pobliżu zera bezwzględnego. Kondensacja Bosego-Einsteina wiąże się z własnościami ciekłego helu i zjawiskiem nadprzewodnictwa.

W Berlinie Einstein podjął problem, który go zajmował do końca życia i wysunął się na czoło jego zainteresowań. Nawiązując do wcześniejszych prac H. Weyla i T. Kaluzy, próbował budować jednolitą teorię pola grawitacyjnego i elektromagnetycznego. We wczesnych latach dwudziestych wydawało się, że wszystkie występujące w przyrodzie oddziaływania można sprowadzić do grawitacji i elektromagnetyzmu. Zjawiska kwantowe odgrywały coraz większą rolę w badaniach fizyków, ale nie rozpowszechniło się jeszcze przekonanie o wynikającej z teorii tych zjawisk potrzebie gruntownej przebudowy całej fizyki. Powodzenie ogólnej teorii względności, a także podobieństwo prawa Coulomba i prawa powszechnego ciężenia, przemawiało za geometrycznym, łącznym ujęciem grawitacji i elektromagnetyzmu. Intensywna w tym kierunku działalność Einsteina — a także innych fizyków i matematyków — była później ostro krytykowana. Próbam budowania jednolitej teorii pola zarzucano pomijanie oddziaływań jądrowych i ignorowanie wielkiego bogactwa zjawisk mikroświata. Oceniając, z dzisiejszego punktu widzenia, einsteinowski program unifikacji fizyki, trzeba podkreślić, że choć dotychczasowe próby połączenia grawitacji i elektromagnetyzmu nie powiodły się, to jednak badania w tej dziedzinie wpłynęły na rozwój teorii pól z cechowaniem i przyczyniły się do stosowania metod geometrii różniczkowej w fizyce. Najważniejsze jest, być może, to, że wysiłki Einsteina podtrzymywały zainteresowanie fizyków samą ideą unifikacji oddziaływań, ideą, która obecnie znajduje wyraz w teorii Weinberga-Salama i innych próbach łączenia sił elementarnych w jedną całość teoretyczną.

W okresie berlińskim Einstein uczestniczył w działalności społecznej i politycznej, występując przeciwko wojnie, militarystyce i nacjonalizmowi, za pokojem, rozbrojeniem i współpracą międzynarodową. Już w październiku 1914 r. podpisał *Apel do Europejczyków*, będący odpowiedzią na manifest 93 niemieckich naukowców, którzy usprawiedliwiali inwazję na Belgię i udział Niemiec w wojnie. Wkrótce potem Einstein wstąpił do organizacji pacyfistycznej Bund Neues Vaterland. W 1915 r. odwiedził w Szwajcarii Romain Rollanda, proponując mu współpracę w odbudowie zrozumienia między narodami w powojennej Europie. W końcowym okresie wojny uczestniczył w ruchu domagającym się abdykacji cesarza i ustanowienia republiki. W grudniu 1918 r. podpisał, wraz ze stu innymi intelektualistami, apel do głów państw spotykających się w Wersalu na konferencji w sprawie układu pokojowego. Autorzy apelu domagali się „pokoju, który by nie niósł załóżków przyszłej wojny”. Pobyt w Berlinie i antysemityzm, z jakim tam się spotykał, rozbudziły u Einsteina poczucie solidarności z narodem żydowskim. Udzielił on poparcia ruchowi syjonistycznemu, zmierzającemu do utworzenia w Palestynie państwa żydowskiego. W maju 1922 r. został członkiem Commission internationale de coopération intellectuelle, organizacji związanej z Ligą Narodów, która była prekursorem UNESCO. Udział Einsteina w tej Komisji był wynikiem subtelnych zabiegów dyploma-

tycznych, potrzebnych ze względu na to, że Niemcy jeszcze wtedy nie należały do Ligi Narodów. Wkrótce potem, głównie pod wrażeniem zabójstwa ministra Rathenau przez bojówki skrajnej prawicy, Einstein zgłosił rezygnację z członkostwa Komisji, ale wycofał ją na prośbę M. Skłodowskiej-Curie i P. Comerta, sekretarza do spraw informacji Ligi Narodów. Zrezygnował ponownie w 1923 r., pod wpływem zajęcia Zagłębia Ruhry przez Francję, co przekonało go o bezsilności Ligi wobec samowoli mocarstw. Pod wpływem perswazji przyjaciół, w 1924 r. Einstein przyjął ponownie członkostwo Komisji i brał udział w jej pracach do 1932 r., kiedy zrezygnował ostatecznie, zniechęcony małą skutecznością działania Ligi Narodów. Poglądy pacyfistyczne Einsteina z tego okresu znalazły wyraz w korespondencji z Sigmundem Freudem, która ukazała się w postaci książki pt. *Why War?* (Londyn, 1934).

Hitler doszedł do władzy w czasie, gdy Einstein odbywał kolejną podróż po Ameryce. Łatwo zrozumieć, że Einstein, pacyfista, antyfaszysta i Żyd, był solą w oku władz hitlerowskich Niemiec. Władze Pruskiej Akademii Nauk postanowiły się go pozbyć. Ubiegł on je posyłając list, w którym zrzekł się niemieckiego obywatelstwa i członkostwa Akademii. Oto początek złożonego w 1933 r. oświadczenia Einsteina, zawierającego dobitne potępienie faszystowskich Niemiec: „Dopóki to będzie w mojej mocy, będą zamieszkiwał tylko taki kraj, gdzie w stosunku do wszystkich obywateli obowiązywać będzie wolność polityczna, tolerancja i równość wobec prawa. Pod słowem «wolność polityczna» rozumie się wolność wyrażania na piśmie i w mowie swoich przekonań politycznych, pod słowem «tolerancja» — poszanowanie wszelkich przekonań jednostki. W chwili obecnej warunki te nie są dotrzymywane w Niemczech” (cyt. za [64], s. 210—211). Einstein wrócił do Europy, ale nie do Niemiec. Po krótkim pobycie w Holandii, Anglii i Belgii wyjechał do Ameryki, gdzie przyjął stanowisko w Institute for Advanced Study w Princeton (stan New Jersey).

Pobyt w Princeton był dla Einsteina okresem intensywnej pracy nad jednolitą teorią pola, a także nad zagadnieniem ruchu ciała i fal grawitacyjnych. W 1935 r. ukazała się wspólna praca Einsteina, B. Podolsky'ego i N. Rosena [33], podsumowująca krytyczne stanowisko autorów wobec opisu rzeczywistości przez mechanikę kwantową. Praca ta wzbudziła duże zainteresowanie i trwające do dziś dyskusje. W obronie adekwatności opisu kwantowego wystąpił wtedy sam N. Bohr [2].

Interesującej ewolucji ulegały poglądy społeczne Einsteina. W późniejszym okresie życia dochodzi do wniosku, że ludzkość przechodzi kryzys, którego istota kryje się w stosunku między jednostką a społeczeństwem. Za kryzys ten czynił odpowiedzialnym ustrój kapitalistyczny, a jego rozwiązanie widział w socjalizmie:

„...W moim przekonaniu, prawdziwym źródłem zła jest istniejąca dziś anarchia ekonomiczna społeczeństwa kapitalistycznego... Produkcję prowadzi się dla zysku, a nie dla spożycia. Nie zapewnia się zatrudnienia wszystkim, którzy są w stanie i chcą pracować; niemal stale istnieje «armia bezrobotnych». Robotnik musi obawiać się utraty zarobku... Nieograniczona konkurencja prowadzi do ogromnego marnotrawstwa ludzkich wysiłków i do okaleczenia społecznej świadomości jednostki, ... które to okaleczenie uważam za największe zło kapitalizmu. Cały nasz system wychowawczy cierpi od tego. W przesadny sposób nastawia się uczniów na rywalizację w życiu i w celu przygotowania do przyszłej kariery wpaja się im szacunek dla sukcesów materialnych. Jestem przekonany, że na to zło jest tylko jedna rada: trzeba zbudować gospodarkę socjalistyczną i wprowadzić system wychowania nastawiony na cele społeczne. W takiej gospodarce środki produkcji są

własnością społeczeństwa, które wykorzystuje je w sposób planowy. W gospodarce planowej produkcja jest dostosowana do potrzeb społeczeństwa, a praca rozdzielona między wszystkich zdolnych do pracy, tak że każdy ma zapewnione środki utrzymania. Zadaniem wychowania — w miejsce dzisiejszego sławienia władzy i powodzenia — będzie rozwijanie, obok zdolności wrodzonych, poczucia odpowiedzialności jednostki wobec ludzi, z którymi żyje” ([38], s. 123—126).

Znamienne było wystąpienie Einsteina dotyczące Komitetu Kongresu do spraw działalności antyamerykańskiej (Komitetu McCarthy’ego). Odpowiadając na prośbę o radę nauczyciela wezwanego przed ten komitet, Einstein napisał list, opublikowany 12 VI 1953 r. przez „New York Times”, w którym nawoływał do odmawiania składania zeznań przed Komitetem McCarthy’ego, nawet jeśli to ma pociągnąć „więzienie i ruinę ekonomiczną”.

Po śmierci Elzy Einstein w grudniu 1936 r. uczonym opiekowały się trzy kobiety: siostra Maja (zmarła w 1951 r.), Margot Einstein, córka Elzy z jej pierwszego małżeństwa, oraz sekretarka Helen Dukas. Po śmierci C. Weizmanna w 1952 r., zaproponowano Einsteinowi objęcie stanowiska prezydenta Izraela, ale uczony odmówił.

Jedną z charakterystycznych cech Einsteina była jego skromność, niechęć do rozgłosu, ceremonii i zaszczytów. Nie rozumiał i nie pragnął swojej sławy. Zapewne te względy wpłynęły na treść ostatniej woli uczonego. Po śmierci w dniu 18 IV 1955 r. jego prochy zostały rozsypane na wietrze. Nie ma grobu Einsteina.

*

Einstein nigdy nie był w Polsce, ale miał liczne i bliskie związki z polskimi uczonymi, a jego teorie wcześniej spotkały się w naszym kraju z żywym oddźwiękiem¹. Profesorowie August Witkowski i Stanisław Loria rozpoznali geniusz Einsteina wkrótce po ukazaniu się 17 tomu *Annalen der Physik*. Na jednym z międzynarodowych spotkań fizyków w 1907 r. Loria zwrócił, jako pierwszy, uwagę Maxa Borna na prace Einsteina ([50], s. 66). Maksymilian T. Huber przetłumaczył przystępny wykład *O szczególnej i ogólnej teorii względności* [39] i przyczynił się do popularyzacji tej teorii. O związkach Einsteina z M. Smoluchowskim i M. Skłodowską-Curie była już poprzednio mowa. O obu tych uczonych Einstein napisał wspomnienia pośmiertne. W czasie, gdy Einstein był profesorem w ETH, w tamtejszym seminarium fizyki teoretycznej brał udział Mieczysław Wolfke. W 1913 r. Wolfke habilitował się w Zurychu przed komisją, w skład której wchodził Einstein i Marceli Grossmann, bliski współpracownik i przyjaciel Einsteina. M. Wolfke prowadził w latach 1915—1917 w Zurychu wykład pt. *Das Relativitätsprinzip*; po powrocie do Polski w 1922 r. został profesorem Politechniki Warszawskiej. Podobnie jak w innych częściach Europy, teoria względności wywoływała początkowo w Polsce gorące dyskusje: w Krakowie atakował ją matematyk S. Zaremba, a bronił — astronom T. Banachiewicz.

W 1920 r. Leopold Infeld kończył studia w Uniwersytecie Jagiellońskim i przygotowywał się do zrobienia doktoratu pod kierunkiem Władysława Natanson. Infeld pojechał wtedy na kilka miesięcy do Berlina, gdzie po raz pierwszy spotkał Einsteina. Po powrocie doktoryzował

¹ Obszerniejsze omówienie związków Einsteina z polskimi uczonymi można znaleźć w artykule Macieja Suffczyńskiego [58].

się na podstawie pracy z teorii względności. W 1936 r. Infeld wyjechał do Princeton i rozpoczął ścisłą współpracę z Einsteinem, której owocem były trzy artykuły na temat zagadnienia ruchu ciał w ramach teorii względności [35—37] i książka popularnonaukowa [42]. Po powrocie z Kanady do Polski w 1950 r. Infeld stworzył w Warszawie szkołę fizyki teoretycznej i rozwinął badania w dziedzinie teorii względności [46]. Trwały wkład do rozwoju tej teorii wnieśli także polscy fizycy: J. Lubański, M. Mathisson, A. Raabe i J. Weyssenhoff.

*

Czasoprzestrzeń jest pojęciem, które powstało wraz z teorią względności i dlatego rzadko podkreśla się to, że w fizyce newtonowskiej — a nawet w życiu codziennym — mamy także do czynienia z czterowymiarowym kontinuum zdarzeń. Czwarty wymiar bywa przez popularyzatorów otaczany mgiełką zbędnej tajemniczości. Każdy, rozpoczynając pisanie listu, daje wyraz wierze w czterowymiarowość czasoprzestrzeni. Podając nazwę miejscowości ustalamy położenie w przestrzeni; można ją zastąpić trzema liczbami (np. szerokością i długością geograficzną oraz wysokością nad poziomem morza). Data stanowi ową czwartą współrzędną, potrzebną dla pełnego określenia zdarzenia, jakim jest pisanie listu.

Okazuje się, że wiele elementów geometrii czasoprzestrzeni — nie tylko wymiar — jest wspólne dla teorii Newtona i Einsteina. Wszystkie w ogóle dotychczasowe zadowalające teorie fizyczne opierają się na założeniu, że czasoprzestrzeń jest czterowymiarową różniczkową („kontinuum”). Jeśli pominąć grawitację, to istnieją ruchy swobodne określające w czasoprzestrzeni strukturę różniczkową afiniczną, tzn. przestrzeni, w której dane są twory liniowe takie, jak proste i płaszczyzny. Dopiero struktura metryczna zależy od rodzaju teorii; według Newtona składa się ona z czasu absolutnego t i euklidesowej metryki w trójwymiarowych przestrzeniach $t = \text{const}$. W szczególnej teorii względności jest natomiast tylko jeden element metryczny (pseudoeuklidesowa metryka Minkowskiego), określający zarówno odstępy czasu, jak i odległości.

Opis zjawisk grawitacyjnych wymaga odejścia od struktury przestrzeni afinicznej i zastąpienia jej ogólniejszą geometrią „infinitesimalnie afiniczną”. Z grubsza mówiąc, spadki swobodne cząstek wyznaczają koneksję liniową, a rozchodzenie się światła określa pole stożków świetlnych, czyli tzw. geometrię konforemną. Naturalne warunki zgodności tych dwóch struktur, połączone z założeniem o znikaniu skręcenia, prowadzą do geometrii Riemanna, będącej matematyczną podstawą ogólnej teorii względności.

Wiele przewidywań relatywistycznej teorii grawitacji zostało w ostatnich latach sprawdzonych z dużą dokładnością, rzędu 1%. Przy pomocy efektu Mössbauera zmierzono zmianę częstości promieniowania elektromagnetycznego w polu grawitacyjnym Ziemi [1]. Dzięki rozwojowi interferometrii radiowej potwierdzono z dużą dokładnością przewidywania teorii Einsteina na temat ugięcia fal elektromagnetycznych przez Słońce. Wykorzystano technikę badań kosmicznych do pomiaru relatywistycznego opóźnienia sygnałów radiowych przechodzących w pobliżu Słońca. Liczne obserwacje radioastronomiczne potwierdzają modele rozszerzającego się Wszechświata. Wysuwane są przypuszczenia, że nie-

które obserwowane we Wszechświecie źródła promieniowania rentgenowskiego (np. źródło X1 w gwiazdozbiornie Łabędzia) zawierają czarne dziury. Wiele wysiłku włożono w próby wykrycia fal grawitacyjnych, jakie zapewne padają na Ziemię z Kosmosu. Szczególne nadzieje związane z badaniami J. Webera, który zapoczątkował prace doświadczalne w dziedzinie promieniowania grawitacyjnego, budując pierwszą „antnę grawitacyjną” w postaci aluminiowego walca, zaopatrzonego w czułe detektory piezoelektryczne. Obserwacje powtórzone przez kilka niezależnych grup badawczych nie potwierdziły pierwszych, optymistycznych doniesień Webera. Czułość dotychczas stosowanych anten i detektorów nie jest dostateczna, aby wykryć promieniowanie grawitacyjne, wytwarzane przez gwiazdy podwójne oraz wybuchy supernowych w sąsiednich galaktykach. Rozpoczynając swoje doświadczenia, Weber kierował się nadzieją, że istnieją nieznanne dotychczas źródła promieniowania grawitacyjnego, o znacznie większym natężeniu. Okazało się, że trzeba będzie jednak zwiększyć czułość anten grawitacyjnych o kilka rzędów wielkości, aby móc odebrać na Ziemi promieniowanie grawitacyjne z Kosmosu. Obecne prace w tym kierunku opierają się na zastosowaniu anten w postaci kryształów o dużej dobroci i użyciu niskich temperatur, w celu usunięcia zakłócającego wpływu szumów cieplnych.

Wśród prac teoretycznych z ostatnich dziesięcioleci należy wymienić liczne próby „skwantowania” pola grawitacyjnego, tzn. zbudowania mikroskopowej teorii oddziaływań grawitacyjnych, na wzór elektrodynamiki kwantowej. Wydaje się, że problem ten nie został jeszcze rozwiązany i stanowi jedno z najtrudniejszych zagadnień fizyki teoretycznej. Wiele uwagi poświęcano falam i promieniowaniu grawitacyjnemu; opracowano liczne przybliżone metody obliczania wielkości promieniowanej energii i wpływu fal grawitacyjnych na ruch ciał. Szczególnie ciekawe były prace na temat czarnych dziur, ich własności termodynamicznych oraz zjawiska kreacji par cząstek przez silne pole grawitacyjne w pobliżu czarnej dziury (efekt Hawkinga). Dzięki pracom S. Hawkinga, R. Gerocha i R. Penrose’a wyjaśniło się, że przyczyna osobliwości występujących w modelach kosmologicznych Friedmanna tkwi głęboko w strukturze teorii Einsteina a nie, jak przedtem sądzono, w wysokiej symetrii tych modeli. Dużą rolę odegrały prace na ten temat opublikowane przez E. M. Lifszycy, I. M. Chałatnikowa i W. A. Bielinskiego. W związku z problemem osobliwości, a także pod wpływem rozwoju metod geometrycznych i teorii pól cechowania, zaczęto ostatnio analizować różne warianty relatywistycznej teorii grawitacji, stanowiące mniej lub bardziej istotną modyfikację teorii Einsteina. Np. w teorii Einsteina-Cartana dopuszcza się skręcenie czasoprzestrzeni wiążąc je ze spinem materii, a w teoriach zapoczątkowanych pracą Chen Ning Yanga rozpatruje funkcje Lagrange’a będące formami kwadratowymi krzywizny i skręcenia, w przeciwieństwie do teorii Einsteina, opartej na liniowym lagranżianie. Najśmielszą modyfikacją teorii Einsteina jest ostatnio proponowana teoria „supergravitacji”, w której do opisu oddziaływań grawitacyjnych wprowadza się dodatkowe, antykomutujące pole cząstek o masie 0 i spinie $3/2$.

*

Einstein przywiązywał dużą wagę do metodologii badań i często się na ten temat wypowiadał ([56], s. 1—94). Jego poglądy filozoficzne i sta-

nowisko epistemologiczne były przedmiotem licznych analiz [56] [44]. Poniższe uwagi są ograniczone nikłą kompetencją autora w tej dziedzinie i będą dotyczyły jedynie paru aspektów „robienia fizyki” przez Einsteina.

Punktem wyjścia dla Einsteina — jak dla każdego przyrodnika — była wiedza oparta na obserwacjach zjawisk. Jednak interesowała go głównie wiedza uogólniająca, a nie fenomenologiczny opis faktów. Kierowało nim przekonanie o jedności przyrody, uniwersalności podstawowych cech materii oraz szerokim zakresie ważności i prostocie fundamentalnych praw fizyki. Wysuwając hipotezę kwantowej natury światła opierał się nie tylko na doświadczeniach Lenarda, ale — przede wszystkim — na przekonaniu, że skoro materia ważka jest ziarnista, to światło też takie być powinno. We współczesnych wykładach szczególnej teorii względności sporo miejsca poświęca się doświadczeniom Michelsona i Morley’a, które wykazały, że nie można stwierdzić ruchu Ziemi względem eteru. Ale Einstein w 1905 r. prawdopodobnie nie wiedział o wynikach tych doświadczeń. Rozszerzając zasadę względności na elektromagnetyzm powodował się przekonaniem o uniwersalności podstawowych praw, a powoływał jedynie na to, że obserwacje zjawisk elektromagnetycznych przynajmniej w przybliżeniu nie wyróżniają żadnego układu odniesienia. Podobnie było z powstaniem relatywistycznej teorii grawitacji: tu w ogóle nie było żadnych doświadczeń przemawiających za koniecznością modyfikacji teorii Newtona. Einstein kierował się potrzebą usunięcia logicznej sprzeczności między prawem ciężenia powszechnego, zakładającym natychmiastowe przenoszenie oddziaływania na odległość, a wnioskiem ze swojej teorii z 1905 r., mówiącym o nieprzekraczalności prędkości światła. Jedyne wyniki obserwacyjny, jaki legł u podstaw ogólnej teorii względności, to równość masy bezwładnej i ważkiej.

Einstein był ostatnim wielkim fizykiem klasycznym. Mimo że sam przyczynił się do powstania idei kwantowych, większą część życia poświęcił opisowi rzeczywistości przy pomocy pola klasycznego, spełniającego równania nieliniowe. Występował przeciwko powszechnie przyjętej, probabilistycznej interpretacji mechaniki kwantowej.

Einstein w znacznym stopniu określił kształt współczesnej fizyki, wpłynął na filozofię i matematykę, odegrał rolę w rozwoju kultury i świadomości społecznej.

Za najważniejszy i najbardziej osobisty wkład Einsteina do nauki uważam to, co jest istotą jego teorii grawitacji: stwierdzenie ścisłego związku między geometrią świata, a materią i jej ruchem.

PIŚMIENNICTWO

Istnieje wiele biografii Einsteina i przystępnych książek na temat jego dzieła. Poniższa lista nie jest kompletna, ale uwzględnia ważniejsze pozycje, jakie ukazały się po polsku. Zawiera ona także dane o pracach Einsteina wzmiankowanych w tekście.

1. Albert Einstein i teoria grawitacji (w jęz. ros.), zbiór artykułów pod red. Komitetu Grawitacji AN ZSRR wydany w stulecie urodzin Einsteina, Izd. Mir, Moskwa 1979.
2. N. Bohr: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, „Phys. Review” 48 (1935) 696—702.
3. H. Bondi: *Relativity and Common Sense: a New Approach to Einstein*, Doubleday, Garden City 1964 (tłum. rosyjskie, Izd. Mir, Moskwa 1967).
4. M. Born: *Einstein's Theory of Relativity*, Dover, New York, 1962 (tłum. rosyjskie, Izd. Mir, Moskwa 1964).
5. R. W. Clark: *Einstein: the Life and Times*, The World Publ. Co., New York 1971.
6. J. A. Coleman: *Teoria względności dla laika*, z ang. tłum. J. Ryteń, przedmowę napisał J. Plebański, PWN, Warszawa 1962.
7. A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, „Ann. d. Phys.” 17 (1905), 132—148.
8. —: *Zur Elektrodynamik der bewegter Körper*, ibid. 17 (1905), 891—921.
9. —: *Über die von der molekular-kinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, ibid. 17 (1905), 549—560.
10. —: *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*, ibid. 19 (1906), 289—306.
11. —: *Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie*, ibid. 23 (1907), 371—384.
12. —: *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, „Jahrb. d. Radioaktivität u. Elektronik” 4 (1907), 411—462.
13. —: *Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*, „Ann. d. Phys.” 35 (1911), 898—908.
14. —: *Thermodynamische Begründung des photochemischen Äquivalentgesetzes*, ibid. 37 (1912), 832—838 i 38 (1912), 881—884.
15. —: *État actuel du problème des chaleurs spécifiques*, 1^{er} Conseil de Physique, Institut Solvay, Rapports (1911), 407—435, Gauthier, Paris 1912.
16. —: *Die formale Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss. (1914), 1030—1085.
17. A. Einstein und W. J. de Haas: *Experimenteller Nachweis der Ampèreschen Molekularströme*, Naturwiss. 3 (1915), 237—238.
18. A. Einstein: *Zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss. (1915), 778—786 i 799—801.
19. —: *Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*, ibid. (1915), 831—839.
20. —: *Feldgleichungen der Gravitation*, ibid. (1915), 844—847.
21. —: *Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, „Ann. d. Physik” 49 (1916), 769—822.
22. —: *Strahlungs-emission und -absorption nach der Quantentheorie*, „Verh. Deutsche phys. Gesellschaft” 18 (1916), 318—323.
23. —: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss. (1916), 688—696,
24. —: *Marian von Smoluchowski*, „Naturwiss.” 5 (1917), 737—738.
25. —: *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss. (1917), 142—152.
26. —: *Gravitationswellen*, ibid. (1918), 154—167.
27. —: *Theory of the Affine Field*, „Nature”, 112 (1923), 448—449.
28. —: *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss. (1924), 261—267 i (1925), 3—14.

29. —: *Théorie unitaire du champ physique*, „Ann. Inst. H. Poincaré” 1 (1930), 1—24.
30. —: *Tribute to Marie Curie*, „New York Times”, 24 I 1935.
31. —: *Introduction* w książce L. Infelda: *The World in Modern Science*, Gollancz, London 1934.
32. —: *The World As I See It*, Lane, London 1935.
33. A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen: *Can Quantum — Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, „Phys. Review” 47 (1935), 777—780.
34. A. Einstein and N. Rosen: *On Gravitational Waves*, „J. Frank'in Inst.” 223 (1937), 43—54.
35. A. Einstein, L. Infeld and B. Hoffmann: *Gravitational Equations and the Problem of Motion*, „Ann. of Math.” 39 (1938), 65—100.
36. A. Einstein and L. Infeld: *Gravitational Equations and the Problem of Motion II.*, *ibid.* 41 (1940), 455—464.
37. —: *Motion of Particles in General Relativity Theory*, „Canad. J. Math.” 3 (1949), 209—241.
38. A. Einstein: *Out of My Later Years*, Philosophical Library, New York 1950.
39. —: *O szczególnej i ogólnej teorii względności* (wykład przystępny), w przekładzie i z przedmową M. T. Hubera, Książnica Polska Tow. Nauczycieli Szkół Wyższych, Lwów—Warszawa 1922.
40. —: *Cztery odczyty o teorii względności* wygłoszone w 1921 r. na Uniwersytecie w Princeton, tłum. A. Gottfryda, Renaissance-Verlag, Wien i Stanisławów 1923.
41. —: *Istota teorii względności*, z ang. tłum. A. Trautman, PWN, Warszawa 1958.
42. A. Einstein i L. Infeld: *Ewolucja fizyki*, z ang. tłum. R. Gajewski, PWN, Warszawa 1962.
43. Ph. Frank: *Einstein: His Life and Times*, J. Cape, London 1948.
44. B. Hoffmann (with H. Dukas): *Albert Einstein: Creator and Rebel*, The Viking Press, New York 1972.
45. G. Holton: *On the Origin of the Special Theory of Relativity*, „Amer. J. Physics”, 28 (1960), 627—636.
46. E. Infeld (ed.) *Leopold Infeld: His Life and Scientific Work*, w serii *Polish Men of Science*, PWN, Warszawa 1978.
47. L. Infeld: *Moje wspomnienia o Einsteinie*, Iskry, Warszawa 1956.
48. —: *Szkice z przeszłości*, PIW, Warszawa 1964.
49. —: *Why I Left Canada*, (translated by H. Infeld, with preface by A. Schild and L. Pyenson) Mc Gill-Queen's Univ. Press, Montreal 1978.
50. —: *Albert Einstein*, z ang. tłum. R. Gajewski, PWN, Warszawa 1979.
51. B. G. Kuzniecowa: *Albert Einstein*, z ros. tłum. Z. Mroczek i A. Zambrowski, PWN, Warszawa 1966.
52. H. Melcher: *Albert Einstein wider Vorurteile und Denkgewohnheiten*, Akademie-Verlag, Berlin 1979.
53. O. Nathan and H. Nordon (eds.): *Einstein on Peace*, London 1963.
54. H. Poincaré: *L'Eclairage Électrique*; 3 (1895), 5—13, 285—295 i 5 (1895), 5—14, 385—392.
55. S. Rozental (ed.): *Niels Bohr*, North-Holland, Amsterdam 1968.
56. P. A. Schilpp (ed.): *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (two vols), Open Court Publ. Co., La Salle, Illinois 1949.
57. C. Seelig (ed.): *Helle Zeit-dunkel Zeit*, Zurich 1956 oraz *Albert Einstein: Leben und Werk*, Europa Verlag, Zurich 1960.
58. M. Suffczyński: *W stulecie Einsteina*, „Postępy Fizyki” 30 (1979), 557—569.

ANDRZEJ TRAUTMAN

59. J. L. Synge: *Porozmawiajmy o teorii względności*, z ang. tłum. W. Woźniakowski, PWN, Warszawa 1974.
60. A. Trautman i W. Tulczyjew: *Grawitacja i niezmienniczość*, „Postępy Fizyki” **9** (1958), 3—25.
61. A. Trautman: *O promieniowaniu grawitacyjnym*, *ibid.* **10** (1959), 301—308.
62. —: *Teoria względności*, Ossolineum, Wrocław 1971.
63. —: *Zagadnienie promieniowania grawitacyjnego w pracach Alberta Einsteina*, „Postępy Fizyki” **30** (1979), 107—115.
64. A. Vallentin: *Dramat Alberta Einsteina*, PIW, z franc. tłum. I. Wachłowska i I. Wieczorkiewicz, Warszawa 1957.