

POSTĘPY FIZYKI

CZASOPISMO
POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU
WIEDZY FIZYCZNEJ

TOM VI ❖ ZESZYT 5

PTF

1 ❖ 9 ❖ 5 ❖ 5

RADA REDAKCYJNA

Przewodniczący — Szczepan Szczeniowski (Poznań)
Członkowie — Władysław Kapuściński (Warszawa)
Henryk Niewodniczański, czł. koresp. PAN (Kraków)
Wojciech Rubinowicz, czł. rzecz. PAN (Warszawa)
Leonard Sosnowski (Warszawa)

KOMITET REDAKCYJNY

Redaktor Naczelny — Ludwik Natanson (Warszawa)
Zastępca Redaktora Naczelnego — Karol Majewski (Warszawa)
Red. Działu Fizyki Teoretycznej — Wojciech Królikowski (Warszawa)
Red. Działu Fizyki Doświadczalnej — Zdzisław Małkowski (Warszawa)
Sekretarz Redakcji — Barbara Wojtowicz (Warszawa)

Adres Redakcji: Warszawa, Hoża 69

Maszynopisy prac należy nadsyłać w 2 egzemplarzach pod adresem redakcji.
O przyjęciu pracy do druku decyduje Rada Redakcyjna. Autorzy otrzymują
25 odbitek bezpłatnie.

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

0001353
UNIWERSYTEC MARII CURIE-SKŁODOWSKIEJ
Instytut Fizyki
ul. Marii Curie-Skłodowskiej
20-031 Lublin

POSTĘPY FIZYKI

CZASOPISMO POŚWIĘCONE UPOWSZECHNIANIU
WIEDZY FIZYCZNEJ

TOM VI • ZESZYT 5

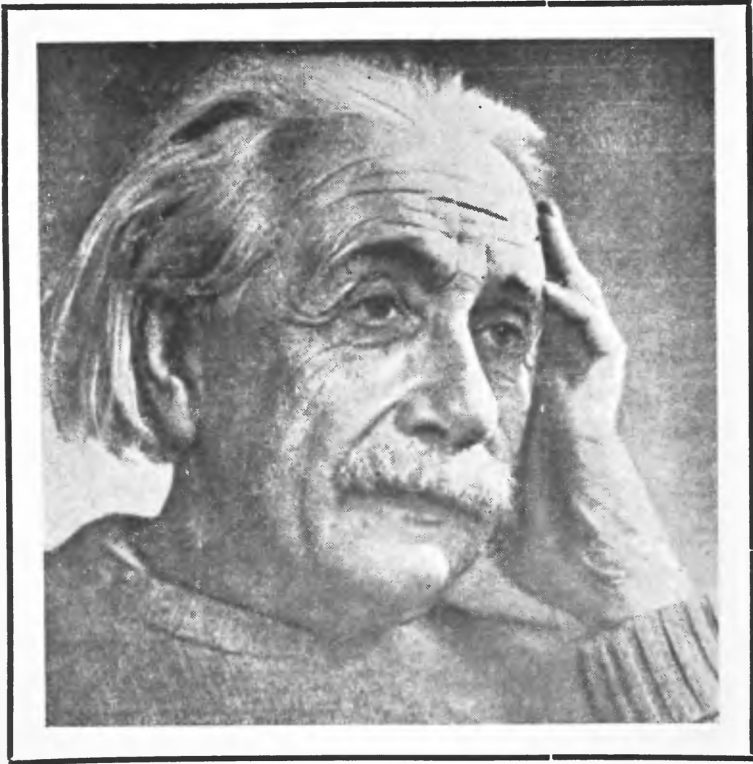
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

1 9 5 5

**PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — DZIAŁ CZASOPISM
WARSZAWA, KRAKOWSKIE PRZEDMIEŚCIE 79**

| | |
|--|--------------------------------|
| Nakład 2565 + 104 egz. | Do składania 7 VII 1955 |
| Ark. wyd. 7,2, druk. 6 | Podpisano do druku 10 X 55 |
| Papier dr. sat. 70 g V kl. 70 × 100 cm | Druk ukończ. w październiku 55 |
| Cena zł 9,— | Zamówienie nr 329/123 K-6-1224 |

POZNAŃSKA DRUKARNIA NAUKOWA — POZNAŃ, FREDRY 10



ALBERT EINSTEIN
(1879—1955)

„Qui genus humanum ingenio superavit“

W dniu 19 maja br. odbyło się w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego uroczyste wspólne posiedzenie Prezydium Polskiej Akademii Nauk, Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk i Polskiego Towarzystwa Fizycznego. Posiedzenie poświęcone było uczczeniu pamięci Alberta Einsteina. Przemówienia wygłoszone przez prof. J. Weysenhoffu, prof. L. Infelda i prof. S. Lorie zamieszczamy w niniejszym zeszycie, który również zawiera odczyt prof. M. Borna wygłoszony w Berlinie na obchodzie pięćdziesięciolecia teorii względności i teorii zjawiska fotoelektrycznego.

Jan Weysenhoff

Zakład Fizyki Teoretycznej
Uniwersytetu Jagiellońskiego

Uwagi o życiu i twórczości Einsteina na tle własnych wspomnień

W jednym tomie *Annalen der Physik*, siedemnastym, ukazały się w krótkich odstępach czasu trzy prace niejakiego Alberta Einsteina. Pierwsza z nich wpłynęła do redakcji 18 marca, druga 11 maja, trzecia już 30 czerwca 1905 roku. Wszystkie trzy okazały się przełomowymi w dziejach rozwoju fizyki.

W pierwszej z nich Einstein wprowadził po raz pierwszy pojęcie „kwantów świetlnych” — zwanych dzisiaj „fotonami” — urągających wszystkiemu, o czym pouczyła ogólnie wówczas przyjęta teoria światła; w te same prace ukazały się po raz pierwszy owe przedziwne, jak na owe czasy, i całkiem nieoczekiwane prawa zjawiska fotoelektrycznego, za które Einstein miał siedemnaście lat później, w roku 1922, otrzymać nagrodę Nobla „za rok 1921” i to, jak nie wszyscy może wiedzą, nie wyraźnie za teorię względności, lecz — jak głosi akt nadania nagrody — „za zasługi w dziedzinie fizyki teoretycznej, a specjalnie za odkrycie praw zjawiska fotoelektrycznego”.

Druga praca podawała po raz pierwszy ilościowe wytłumaczenie właściwości ruchów Browna; powrócę do niej za chwilę. Trzecia praca, która ukazała się niecałe dwa miesiące po drugiej, była ową słynną pracą, w której Einstein położył podwalinę pod tak zwaną dzisiaj teorię względności. Ukazała się ona pod tytułem: „O elektrodynamice ciał w ruchu”. Nie było więc winą Einsteina, że teoria ta została potem ochrzczona mianem teorii względności i przez to nazwa jej złała się z nazwą od dawna znanego odłamu filozofii, co doprowadziło potem do tyłu nieporozumień i zniekształceń właściwej treści nowej teorii Einsteina, która jest teorią czysto fizyczną. Praca, o której mowa, usuwała za jednym zamachem wszystkie trudności i rozstrzygała długoletnie spory co do sposobu uogólnienia praw Maxwella, rządzących polem elektromagnetycznym w próżni i w ciałach spoczywających (lub dostatecznie powoli poruszających się), do przypadku ciał poruszających się z wielkimi prędkościami, chociażby nawet zbliżonymi do prędkości światła

w próżni, E i n s t e i n rozwiązał to zagadnienie w sposób prosty i nieoczekiwany, podważając przez to wiele z dawna zakorzenionych i zdawałoby się niewzruszalnych zapatrywań na istotę przestrzeni i czasu. Nigdy jeszcze przedtem ani potem jedna krótka praca nie wystąpiła tak wyraźnie jako kamień milowy rozwoju myśli ludzkiej.

Kim był ów młody, bo zaledwie 26 lat liczący uczoney, który w tak rewelacyjny sposób zadebiutował w literaturze naukowej? W okresie czasu, w którym przygotowywał te prace, był ekspertem w państwowym urzędzie patentowym w Bernie. Znalaziono go kiedyś nad ranem zemdlonego w pokoiku na poddaszu, leżącego na podłodze wśród niezliczonej ilości niedopałków „Stumpfen“ (taniego gatunku cygar, bardzo rozpowszechnionego w Szwajcarii). Czyż można się dziwić, że w ekstazie twórczej, która miała na długie lata zaważyć na losach rozwoju myśli ludzkiej, zapomniał o świecie bożym, aż organizm upomniał się o swoje prawa? Jedenaście lat przedtem jako piętnastoletni chłopiec, mały Albert, urodzony w Ulm w Wirtembergii, przywędrował bez żadnych papierów osobistych do Szwajcarii i został tam zapisany jako „vaterlandsloser Geselle“; ukończył szkołę kantonálną w Aargau, następnie politechnikę w Zurychu — bez odznaczenia, tym gorzej dla jego egzaminatorów!

O tych czasach pisze E i n s t e i n w swoich wspomnieniach autobiograficznych z roku 1949: „Większość czasu pracowałem w laboratorium fizycznym, zafascynowany bezpośrednim zetknięciem się z doświadczeniem“. Na wyznanie to zwracam szczególną uwagę naszym młodym adeptom fizyki teoretycznej! O tym, jak dobrze musiał się E i n s t e i n orientować w szczegółach eksperymentalno-technicznych, świadczy chociażby długotrwałość jego działalności w charakterze eksperta państwowego urzędu patentowego w Bernie (7 lat). „Przez swoje studia techniczno-doświadczone — pisze H a d a m a r d — E i n s t e i n nie był obciążony erudycją matematyczną, przyswajając sobie stopniowo z tej nauki tylko to, co mu się mogło w danej chwili przydać przy własnych badaniach, jeżeli nie odnajdywał samodzielnie teoryj, które mu były potrzebne“. Tak samo postępować radził E i n s t e i n wszystkim przygotowującym się do kariery twórczego fizyka-teoretyka. Również we wspomnianej już autobiografii E i n s t e i n pisze: „Miałem przy tym szczęście zetknąć się z książkami, które nie przykładają zbytnej wagi do ścisłości logicznej, ale za to uwypuklają wyraźnie ogólne biegi myśli“.

Po tych kilku ogólnych uwagach powrócmy jednak do trzech prac pionierskich, o których była mowa na początku. O pierwszej będzie jeszcze z pewnością mówił profesor L o r i a, o trzeciej — profesor I n f e l d. Zatrzymam się więc nieco dłużej na drugiej. Ta dwunastostronicowa praca, chociaż tak krótka, jak wszystkie niemal prace E i n s t e i n a, nosi nieco

przydługi tytuł: „O wymaganych przez molekularno-kinetyczną teorię ciepła ruchach cząstek zawieszonych w nieruchomej cieczy“. Mowa tu o nieregularnych, ustawicznych, powszechnych ruchach wszelkich dostatecznie drobnych cząstek zawiesiny, obserwowalnych pod mikroskopem lub ultramikroskopem. Ruchy te zostały zauważone po raz pierwszy już w roku 1827 przez botanika angielskiego Roberta Browna i od niego noszą też nazwę. Co prawda, wiadano już przed Einsteinem, że ruchy te nie mają nic wspólnego z życiem organicznym i podejrzewano, że są one dostrzegalnym skutkiem niewidzialnego ruchu cieplnego drobin, uderzających z wszystkich stron obserwowane cząstki zawiesiny, ale nie umiano tego poprzeć rachunkiem, a nawet wyniki orientacyjnych rachunków zdawały się temu przeczyć. Dopiero Einsteinowi — i niemal równocześnie Smoluchowskiemu — udało się niezbitnie udowodnić, że przypuszczenie to było słuszne. Właściwie nawet Smoluchowski wykonał swoje rachunki o parę lat wcześniej, ale nie ogłaszał ich, gdyż chciał je najpierw sprawdzić doświadczalnie*; opublikował je dopiero wskutek ukazania się pracy Einsteina. Zresztą gdyby ktoś nawet nie znał osobiście Smoluchowskiego i nie miał absolutnego zaufania do jego słów, to i tak nie mógłby w żaden sposób posądzać go o plagiat, gdyż sposoby podejścia do zagadnienia obu tych wielkich uczonych były krańcowo odmienne i charakterystyczne dla stylu pracy każdego z nich. Smoluchowski, mistrz w konkretnym opracowywaniu szczegółów i dostrzeganiu ciekawych i nie zauważonych przedtem cech zjawisk nawet od dawna badanych przez innych, śledził w myśli każdą cząstkę, losy jej poddawał wnikliwej analizie matematycznej i stąd dopiero wnioskował o jej dostrzegalnym zachowaniu się pod mikroskopem. Einstein, myślący wielkimi kategoriami i bardziej abstrakcyjnie, doszedł do tych samych wzorów znacznie prościej, opierając się jednak nie tylko na ogólnych prawach statystyki fizycznej, ale również i na pewnych założeniach specjalnych, które u wielu fizyków budzą nieco więcej zastrzeżeń niż żmudna droga Smoluchowskiego.

Najważniejszą wspólną cechą prac Einsteina i Smoluchowskiego było jednak to, że obaj zrozumieli po raz pierwszy, co należy mierzyć, a przeto i co należy obliczać w tych zjawiskach. Przedtem usiłowano mierzyć średnią prędkość poszczególnych cząstek dostrzeganych pod mikroskopem. Okazuje się jednak, że jest to wielkość zasadniczo niemierzalna, jej wartość zależy bowiem od odstępów czasu pomiędzy poszczególnymi obserwacjami i wzrasta przy coraz to szybszym wykonywaniu obserwacji jednej po drugiej, gdyż wtedy wszystkie obserwo-

* Smoluchowski pomiarów tych sam nigdy nie wykonał. Uczynił to dopiero Zsigmondy wkrótce po ukazaniu się pracy Einsteina.

wane odcinki zygzaków rozpadają się na coraz to subtelniejsze zygzaki *. Niezależny od częstości obserwacji jest natomiast średni kwadrat przesunięcia cząstki w określonym przedziale czasu. Właśnie ta wielkość występuje zarówno we wzorach Einsteina, jak i Smoluchowskiego.

Można by sądzić, że prace wyjaśniające tylko jeden, bardzo szczególny rodzaj zjawisk nie mogą być uważane za przełomowe. Jednakże epokowość tych prac polega na tym, że po raz pierwszy zostały w nich ilościowo ujęte i przeliczone — następnie potwierdzone doświadczalnie — odstępstwa od drugiej zasady termodynamiki (w jej bezkompromisowym sformułowaniu, uznawanym powszechnie w XIX wieku). Za każdym razem, gdy cząstka ** zawieszony wznosi się do góry, czyni to na koszt energii cieplnej otoczenia; wiemy, że nic podobnego nie odbywa się nigdy na większą skalę i zjawisko takie stoi w rażącej sprzeczności z drugą zasadą termodynamiki (w jej dawnym sformułowaniu). W dalszych konsekwencjach odpowiednio zinterpretowane ruchy Browna stały się jednym z ważkich argumentów na korzyść atomistycznej struktury substancji materialnych.

*

Tyle już pisano o Einsteinie, że aby się nie powtarzać, pozwolę sobie w dalszym ciągu nawiązać do moich trzech spotkań z Einsteinem, ponieważ do każdego z nich dadzą się dołączyć pewne interesujące uwagi o jego życiu i twórczości.

Na początku moich studiów na uniwersytecie zurychskim zostałem polecony profesorowi Zanggerowi, wybitnemu znawcy medycyny sądowej i przyjacielowi Einsteina. Po pewnym czasie, gdy sądziłem, że profesor Zangger zupełnie o mnie zapomniał, otrzymuję w r. 1916 kartkę od niego: „Proszę przyjść jutro o szóstej po południu i przynieść ze sobą manuskrypt swej pracy doktorskiej. Będzie profesor Einstein“. Z sercem na ramieniu poszedłem. Po kilku minutach przyszedł Einstein. Profesor Zangger powiedział: „To jest pan Weyssenhoff z manuskrytem swej pracy, to jest profesor Einstein, wobec tego ja jestem niepotrzebny“ — i pozostawił nas samych. Nawiasem mówiąc, Einsteinowi moja praca spodobała się, ale to nie należy teraz do rzeczy. Dość, że nastąpiła potem kolacja, na której oprócz wyżej wymienionych był również obecny cichy współtwórca ogólnej teorii względności, przyjaciel Einsteina, znacznie od niego starszy, inżynier Besso; w dyskusjach

* Z makroskopowego punktu widzenia mamy tu do czynienia z czymś podobnym do krzywej ciągłej nie posiadającej stycznej w żadnym punkcie lub — jeżeli chodzi o zależność od czasu — z funkcjami ciągłymi nie posiadającymi nigdzie pochodnych.

** O gęstości większej od otaczającego ją płynu.

z nim — według słów samego Einsteina — powstała ogólna teoria względności. Otóż po kolacji byłem niemy świadkiem jednej z takich dyskusyj. Był cudowny czerwcowy wieczór, siedzieliśmy w półmroku na balkonie, pod nami w oddali błyszczały światła Zurychu, nad nami gwiazdy. Einstein mówił powoli, z namysłem, jakby myśląc na głos, lecz niemal bez dłuższych przerw; z rzadka tylko Besso dorzucał kilka słów, świadczących w każdym razie o tym, że podąża za biegiem jego myśli. Chociaż wówczas nie znałem jeszcze ogólnej teorii względności, pamiętam, że dyskutowali kwestię wzajemnego ruchu dwóch odległych od siebie układów inercjalnych w przestrzeniach międzygwiazdowych.

Einstein był już wówczas dyrektorem Kaiser Wilhelm Institut für Physik w Berlinie. Po dwóch z górą latach przyjechał znowu do Zurychu na dwumiesięczny cykl wykładów o obu teoriach względności w styczniu i lipcu 1919 roku. Brał wówczas udział w konwersatoriach fizycznych (zwanym tam Physikalisches Colloquium), na których byłem jednym z dwóch najgorliwszych referentów i wówczas, a szczególnie na wspólnych posiedzeniach w kawiarni, odbywających się po każdym konwersatorium, miałem sposobność bliższego kontaktowania się z Einsteinem. Sława Einsteina rozeszła się już wówczas szeroko po całym świecie. Kilka lat przedtem, w r. 1911 w Pradze, Einstein miał na swych wykładach tylko trzech słuchaczy. O dwóch się już przekonał, że nic nie rozumieją, unikał więc jak ognia rozmowy z trzecim, aby zachować chociażby iluzję, że nie wyklada do pustej sali. Teraz w Zurychu takie tłumy przybyły na jego pierwszy wykład, że z sali wykładowej fizyki teoretycznej publiczność przeniesiono najpierw do głównej sali wykładowej fizyki doświadczalnej, a gdy i ta okazała się zbyt mała — do auli. Czy wszyscy z obecnych byli dostatecznie przygotowani do słuchania wykładu, nie wiem, w każdym razie byli to solidni Szwajcarzy, tak że frekwencja utrzymała się aż do końca na tym samym poziomie. Przekonałem się, że Einstein wyklada świetnie, spokojnie, konsekwentnie, szczegół za szczegółem, z łatwością można śledzić za biegiem jego myśli; podobnie do Bohra, który mówi zresztą znacznie bardziej nerwowo, obrazowe ruchy jego rąk pomagają w zrozumieniu i świadczą o tym, jak konkretnie sobie Einstein wyobraża wszystko, o czym wyklada.

Trzecie moje spotkanie z Einsteinem, w roku 1935 w Princeton pod New Yorkiem, było najkrótsze, ale historia nawiązująca do niego jest najdłuższa. Przy pierwszym spotkaniu Einstein, zdaje mi się, nie poznał mnie, ale już następnego dnia widocznie sobie mnie przypomniał, gdyż już z daleka kiwał do mnie na popołudniowej kawo-herbatce w Instytucie Studiów Zaawansowanych (Institute for Advanced Study), zaprosił mnie następnie do swego gabinetu na dłuższą rozmowę i wyłożył mi przy sposobności ogólne wytyczne swej najnowszej teorii;

na tablicy były już z góry wypisane wszystkie potrzebne wzory. Do dzisiaj pamiętam ten „prywatny wykład“ Einsteina, tak jak gdyby odbył się kilka tygodni temu. Einstein streścił w nim dopiero co ukończoną pracę, wykonaną wspólnie z Rosenem, dotyczącą materii w polu grawitacyjnym jako miejscach, w których znika wyznacznik g współczynników $g_{\mu\nu}$ tensora metrycznego. Wyszedłem po tej rozmowie jak oszołomiony, głęboko oczywiście przekonany — przynajmniej na razie — o słuszności i niepowszednim znaczeniu nowej teorii. Już wkrótce potem Einstein sam uznał tę (nadzwyczaj zresztą ciekawą) próbę za nieudaną i bez wahania porzucił ją, aby szukać na innych drogach rozwiązania trapiących go drobnych niedomagań stworzonej przez siebie wiekopomnej teorii pola grawitacyjnego, bardziej znanej dzisiaj pod nazwą ogólnej teorii względności.

Parę miesięcy potem w drodze powrotnej do kraju spotkałem w Anglii Schrödingera, który mi opowiedział, że podobne historie powtarzały się już niejednokrotnie w Berlinie, w okresie od r. 1914 do 1933, który, nawiasem mówiąc, Einstein uważał za najszcześniejszy okres swego życia. Począwszy od jakiegoś roku 1923 Einstein podejmował coraz to nowe próby skonstruowania unitarnej teorii pola, do której zaraz powrócę. Otóż po każdej takiej nowej próbie Einstein, nie mogąc widocznie oderwać ani na chwilę myśli od swych nowych pomysłów, zwykł był zapraszać do siebie każdego, kto tylko mógł go chociaż częściowo zrozumieć, i wykladał mu swą nową teorię. Tak jak w moim przypadku w Princeton, wzory czekały już na tablicy od poprzedniej rozmowy. Zapytywany o losy teorii sprzed roku lub dwóch, Einstein zwykł był odpowiadać: „Ach, das war ja Blödsinn“ — „Ach, to było zupełne głupstwo“ lub coś w tym rodzaju.

Był więc Einstein typowym romantykiem wśród uczonych — według terminologii Ostwalda z jego popularno-naukowego dzieła „Wielcy ludzie“. Tworzył szybko, nie wahał przyznać się otwarcie do błędu, gdy tylko go zauważył, lub nawet odwołać chociażby całą pracę, jak się to na przykład zdarzyło z pewną publikacją o nieregularnościach ruchu księżyca. W odróżnieniu od niego „klasyk“ Newton opracowywał długo wszystkie swoje dzieła, ale następnie w razie jego zaatakowania bronił z uporem każdego szczegółu.

Wróćmy jednakże do sedna sprawy, do teorii pola unitarnej. Charakterystyczną cechą tej „teorii“ jest to, że właściwie nie jest ona — przynajmniej dotychczas — żadną teorią, a raczej tylko programem stworzenia teorii, która by wychodząc ze wspólnej podstawy była zdolna wytłumaczyć za jednym zamachem zarówno wszystkie właściwości pola grawitacyjnego, jak i elektromagnetycznego (a w dalszym rozwoju również i jądrowego). Pierwsze próby w tym kierunku sięgają jeszcze roku

1918 i pochodzą od wielkiego matematyka Hermana Weyla i sławnego astronoma Artura Eddingtona. Następnie Einstein przejął się myślą rzuconą przez Weyla i począwszy mniej więcej od r. 1923 wypuszczał w świat coraz to nowe teorie, dążące w tym samym lub zbliżonych kierunkach; tylko niektóre z nich można scharakteryzować krótkimi nazwami, jak np. teoria równoległości na odległość (Fernparalelismus), teoria pięciowymiarowych wektorów w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, (która rozwinęła się następnie do tzw. rzutowej teorii względności i nie tak dawno do konforemnej teorii względności), teoria semi-wektorów, geometria falowa Mimoury-Einsteina i różne teorie z niesymetrycznymi lub zespolonymi tensorami metrycznymi. Czyż można stąd wnioskować, że wszystkie te wysiłki Einsteina poszły na marne? Bynajmniej! Wielu fizyków i matematyków mniejszego kalibru, a imię ich legion, zajmowało się tymi samymi problemami i o niektórych z nich można by może powiedzieć, że marnowali czas, ale nie o Einsteinie. Każda jego nowa próba otwierała nowe możliwości do zbadania, wiele z nich poruszało lawiny nowych ciekawych prac, w niektórych Einstein tworzył nowe dziedziny geometrii, w innych odkrywał na nowo i użyźniał nie stosowane jeszcze w fizyce działy geometrii, znane tylko nielicznym matematykom.

Mój wykład dobiega końca, ale nie mogę urwać go w miejscu, gdzie chociażby najłżejsza chmurka rzuca cień na gigantyczny dorobek naukowy jednego z największych geniuszów ludzkości. Dlatego zwrócę jeszcze tylko z naciskiem uwagę na to, że praca nad teorią pola unitarnego nie wypełniła bynajmniej Einsteinowi drugiej mniej więcej połowy jego pracowitego żywota. W czasie tym odniósł on wiele innych niepoślednich sukcesów naukowych, że wspomnę chociażby tylko o (dokonanym wspólnie z Infeldem) ukoronowaniu w pewnym sensie ogólnej teorii względności przez sprowadzenie jej dwóch podstawowych założeń do jednego i wyprowadzenie równań ruchu cząstek materialnych, rozpatrywanych jako osobliwości pola grawitacyjnego, z równań różniczkowych, rządzących tym polem.

Druga sprawa, której chciałem jeszcze na zakończenie kilka słów poświęcić, nosi całkiem odmienny charakter i dotyczy ustosunkowania się Einsteina do rozwoju współczesnej fizyki kwantowej. Było ono wyraźnie negatywne, co mogłoby być poczytywane za tym dziwniejsze, że Einstein był jednym z twórców tej tak bujnie rozwijającej się dzisiaj gałęzi wiedzy. Jednakże chodzi tu tylko o ostatnią fazę rozwoju tej teorii (zapoczątkowaną w latach 1924—26 przez de Broglie'a Schrödingera, Borna, Heisenberga i Jordana), tzw. mechanikę kwantową (lub falową) i kwantową teorię pól. W nadzwyczaj ciekawym artykule dyskusyjnym, ogłoszonym w r. 1949, Einstein

pisze: „Jestem głęboko przekonany, że zasadniczo systematyczny charakter współczesnej fizyki kwantowej należy wyłącznie przypisać temu faktowi, że teoria ta operuje niekompletnym opisem układów fizycznych“. Przy tym *Einstein* zastrzega się jednak, że oczywiście „uznaje w zupełności nader ważny postęp wniesiony do fizyki teoretycznej przez statystyczną mechanikę kwantową“. Kilka stron dalej *Einstein* pisze: „Dyskusja powyższa miała tylko na celu uwypuklić, co następuje. Usiłowanie zachowania tezy, że statystyczna teoria kwantowa jest w zasadzie zdolna dostarczyć zupełny opis indywidualnego układu fizycznego, doprowadza do nader nieprawdopodobnych koncepcji teoretycznych. Z drugiej strony te trudności interpretacyjne znikają, gdy się ma do czynienia z kwantowo-mechanicznym opisem całych zbiorowisk („ensembłów“) takich układów... funkcja ψ ma być więc rozumiana jako opisująca nie jeden układ, ale zbiorowisko układów“.

Otóż jeszcze przed niewiele laty zapatrywania *Einsteina* wywoływały — według jego własnych słów — „uśmiech politowania“ na twarzach „pozytywistycznie usposobionych“ zagorzałych zwolenników współczesnych teorii kwantowych. Dzisiaj obraz ten uległ dość radykalnej zmianie. Zrażeni długotrwałą i niepomysłną w wielu punktach walką z trudnościami, nawet aż do niedawna tak dufni w słuszność swojej sprawy „kwanciści-indeterminiści“ coraz częściej dezertują do przeciwnego obozu „deterministów“, że wymienię chociażby tylko *de Broglie'a* i jego współpracowników z *Vigierem* na czele we Francji, *Bohma* w Stanach Zjednoczonych, *Fenyesa* na Węgrzech... Co prawda — o ile mi wiadomo — *Einstein* nie wspominał nigdzie o „ukrytych parametrach“ (*Bohm*, *Fenyés*) ani tym bardziej o „teorii podwójnego rozwiązania“ (*de Broglie*), ale czy nie na to samo wychodzi, gdy pisze: „Jeżeli statystyczna teoria kwantowa nie pretenduje do wyczerpującego opisywania poszczególnych układów (i ich rozwoju w czasie), to wydaje się rzeczą nieuniknioną szukać gdzie indziej takiego indywidualnego opisu; przy tym byłoby od samego początku jasne, że elementy takiego opisu nie są zawarte w schemacie pojęciowym * statystycznej teorii kwantowej. Przez to samo uznaloby się też w zasadzie, że ten schemat nie może służyć za podstawę fizyki teoretycznej. Po doprowadzeniu do celu wysiłków osiągnięcia zupełnego opisu fizycznego, statystyczna teoria kwantowa zajęłaby w budowie fizyki przyszłości analogiczną poniekąd pozycję do mechaniki statystycznej w strukturze mechaniki klasycznej. Jestem przekonany, że taki właśnie będzie rozwój fizyki teoretycznej, ale droga będzie nader długa i uciążliwa“.

* Dzisiejszej.

Leopold Infeld

Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytetu Warszawskiego

Historia teorii względności

W bieżącym roku mija pół wieku od powstania teorii względności. Obecnie teoria ta jest już przez fizyków zaliczana do teorii klasycznych i wydaje się, że lata, w których była ona kwestionowana i atakowana, dawno już minęły. Dotyczy to szczególnej teorii względności, nie jest jednak zupełnie słuszne odnośnie do ogólnej. Chciałbym tutaj zacytować pewne zdanie profesora von *L a u e* z przedmowy do jego podręcznika, wydanego w roku 1921. Czytamy tam:

„Często podziwiana i często obrzucana kalumniami — taka jest dzisiaj ogólna teoria względności. Najgłośniejszych krzykaczy po obu stronach łączy przy tym to, że niesłychanie mało z niej rozumieją“.

To zdanie jest dzisiaj o wiele mniej słuszne, niż było w roku 1921. Jednak podczas gdy szczególna teoria względności nie spotyka wśród fizyków poważnych przeciwników, to ogólna teoria względności przez niektórych fizyków nie jest uznawana. Jedni wysuwają jakąś inną teorię grawitacji, a inni chcieliby zmienić *Einsteinowską* interpretację ogólnej teorii względności.

Ze względu na historię rozwoju fizyki szczególna teoria względności jest znacznie ważniejsza; ze względu zaś na dorobek myśli ludzkiej ogólna teoria względności ma większe znaczenie. Chciałbym tutaj przytoczyć rozmowę, jaką miałem na ten temat z *E i n s t e i n e m*. Kiedyś w *Princeton* powiedziałem do *E i n s t e i n a*: „Wierzę, że szczególna teoria względności zostałaby sformułowana również wtedy — i to bez większego opóźnienia — gdyby pan tego nie zrobił. *P o i n c a r é* był bardzo bliski szczególnej teorii względności“. *E i n s t e i n* odpowiedział: „Tak, to prawda, jednak nie dotyczy to ogólnej teorii względności. Wątpię, czy byłaby ona dzisiaj znana“.

Ogólna teoria względności wyrosła ze szczególnej teorii. Przeglądając historię rozwoju teorii względności w ciągu ostatnich 50 lat, musimy ogólnej teorii względności poświęcić trochę więcej czasu niż szczególnej; trudno byłoby mi bowiem powiedzieć o szczególnej teorii względności coś, co byłoby jeszcze nie znane dla jakiegokolwiek fizyka teoretyka. Ogólna teoria względności jest natomiast znacznie mniej znana; można uprawiać

fizykę nie znając jej. Jest ona okrzyczana przez niektórych fizyków jako formalna i mało związana z doświadczeniem; jej trzy sprawdziany — jak mówią niektórzy fizycy — są wątpliwe, a fakty, które one uwzględniają, nie interesujące!

Należę to tych fizyków, którzy wierzą, że sądy takie są fałszywe; że ogólna teoria względności rozwiązuje problem grawitacji; że stanowi ona przepiękny przykład nieliniowej teorii pola; że będzie wzrastał jej wpływ na inne gałęzie fizyki. Nie wierzę jednak, że będzie ona mogła rozwiązać zagadnienie cząstek elementarnych.

Po tych wstępnych uwagach przejdziemy do krótkiego przeglądu historii teorii względności; nie będzie on ani zupełny, ani obiektywny. Sam przedmiot nie dopuszcza obiektywności, a przepisany czas trwania mojego wykładu — zupełności.

Wydany w roku 1905 siedemnasty tom *Annalen der Physik* zawiera 30-stronicową pracę Einsteina „O elektrodynamice ciał w ruchu“. Tytuł ten brzmi skromnie, jednak czytając ją można się od razu przekonać, że praca ta różni się zasadniczo od innych ówczesnych prac z tej dziedziny. Nie zawiera ona w ogóle odsyłaczy do literatury fachowej, nie cytuje się tam żadnych autorytetów, a niewielka ilość odnośników ma jedynie charakter objaśniający. Styl tej pracy jest niezwykle prosty, a większa część jej treści jest dostępna nawet dla osób bez zbyt zaawansowanych wiadomości fachowych. Jest to nieomal dziwne, że recenzenci — jeżeli w ogóle byli tacy — przepuścili tę pracę, tak bardzo odbiegającą swą formą od ogólnie przyjętej; szczególnie zaś dlatego, że pełne jej zrozumienie wymaga głębi myśli, która jest rzadziej spotykana i bardziej wartościowa niż pedantyczna wiedza. Do dzisiaj jeszcze nie stracił nic ze swej świeżości styl i sposób przedstawienia treści tej pracy; jest ona nadal najlepszym źródłem do studiowania teorii względności. Autor pracy był człowiekiem znajdującym się poza oficjalnym kręgiem ludzi nauki, nie był nawet wykładowcą w jakiejś szkole wyższej. Wówczas, przed 50 laty, był on młodym dwudziestosześcioletnim doktorem filozofii, pracownikiem urzędu patentowego w Bernie.

W drugiej części tej pracy czytamy:

1. Prawa opisujące zmiany stanu układów fizycznych nie zależą od tego, do którego z dwóch układów współrzędnych, poruszających się względem siebie jednostajnym ruchem postępowym, omawiane zmiany stanu zostaną odniesione.

2. Promień świetlny porusza się w spoczywającym układzie współrzędnych z określoną prędkością c , niezależnie od tego, czy został on wyemitowany przez spoczywające, czy przez ruchome ciało.

Są to dwa postulaty — Galileuszowska zasada względności i zasada stałości prędkości światła — z których, jak wiadomo, wynika transfor-

macja Lorentza. Są to podstawy, na których oparta jest szczególna teoria względności. Są to te założenia, które doprowadziły do radykalnej rewizji naszych podstawowych pojęć, dotyczących przestrzeni i czasu.

W następnym tomie *Annalen der Physik* pojawiła się krótka praca Einsteina pt. „Czy bezwładność ciała jest zależna od jego zasobu energii“. Nie będzie wcale przesadą, gdy się uzna, że myśli wypowiedziane w tej pracy wstrząsnęły światem, tutaj bowiem znajdujemy po raz pierwszy teoretyczne ujęcie możliwości zajścia nowego zjawiska, które otworzyło nieograniczone horyzonty dla nauki i techniki. Ten krótki artykuł zawiera stwierdzenie, że zastosowanie energii atomowej jest w zasadzie możliwe. Czterdzieści lat później udowodniono, że zastosowanie energii atomowej jest możliwe do celów wojennych. Dowód był tak wyraźny, jak zburzenie Hiroshimy, Nagasaki i jak tragiczna śmierć 200 000 ludzi. Prawie pięćdziesiąt lat później dostarczono dowodu, że energia atomowa może być również użyta dla dobra ludzkości. Tkwi w tym gorzka ironia, że fundament, na którym opierają się oba zastosowania energii atomowej, położył najbardziej pokojowo usposobiony człowiek na świecie — człowiek samotny, który brzydził się gwałtem i nienawidził przemocy. Gorzka ironia kryje się w tym, że burząca siła energii atomowej najpierw zniszczyła dwa miasta i wiele istnień ludzkich, zanim dziesięć lat później w Związku Radzieckim zbudowano pierwszą małą elektrownię atomową.

W zakończeniu krótkiego artykułu Einsteina spotykamy się z następującą wypowiedzią:

„Masa ciała jest miarą zasobu jego energii. Kiedy energia zmienia się o L , odpowiednio zmienia się i masa o $L/9 \cdot 10^{20}$, gdy energię mierzymy w ergach, a masę w gramach. Nie jest wykluczone, że w wypadku ciał, w których zasób energii jest w wysokim stopniu zmienny (np. u soli radu), uda się uzyskać potwierdzenie teorii“.

Jakie znaczenie miały te dwie prace? Początkowo nie były one prawie wcale zauważone. W dzisiejszych czasach ważne prace są szybciej poznawane, a przełomowa praca wywołuje często potok nowych przyczynków do tego samego problemu. Chociaż historia nauki naszego stulecia zna również kontrprzykłady; weźmy na przykład dwuletnią ciszę po pierwszych pracach de Broglie'a. Podobnie zostały przyjęte prace Einsteina. Fala rozpraw dotycząca teorii względności pojawiła się dopiero cztery lata później, około 1909 roku. Upłynął więc dostatecznie długi okres czasu, zanim fizycy przyjęli do wiadomości jedną z najważniejszych rozpraw, jakie się kiedykolwiek ukazały.

Wiem jednak, że istnieli fizycy, którzy w tym czasie czytali bardzo starannie prace Einsteina i poznali w nich narodziny nieskończone dalekowzrocznych myśli. Mój przyjaciel profesor Loria opowiadała mi, że jego nauczyciel profesor Witkowski z Krakowa, fizyk o dużym

wykształceniu i subtelnym smaku, zalecał mu z zachwytem: „Niech pan przeczyta rozprawę Einsteina, jest on nowym Kopernikiem“.

Gdy prof. Loria spotkał później na pewnym zjeździe fizyków profesora Maxa Borna, opowiadał mu o Einsteinie, nowym Koperniku, i spytał Borna, czy przeczytał on te prace. Okazało się, że ani Born, ani nikt z obecnych nie słyszał o Einsteinie. Born natychmiast przeczytał w miejscowej bibliotece pracę Einsteina i od razu rozpoznał wielkość jego idei, a także potrzebę uogólnienia ich ze strony formalnej. Później własna praca Borna, dotycząca teorii względności, stała się jednym z ważniejszych przyczynków, do tej gałęzi wiedzy w jej początkowym okresie.

Dopiero jednak około roku 1909 uwaga większej liczby fizyków została skierowana na prace Einsteina. Jedną z okoliczności, które przyczyniły się do rozpowszechnienia teorii względności, było wygłoszenie w roku 1908 przez Minkowskiego wykładu pt. „Przestrzeń i czas“. Ów słynny wykład, który Minkowski wygłosił na osiemnastym kongresie Towarzystwa Niemieckich Przyrodników i Lekarzy, był chyba jego ostatnim publicznym wykładem, ponieważ wkrótce zmarł on przedwcześnie. Pierwsze słowa wykładu Minkowskiego były proroczą wypowiedzią głębokiego wpływu, jaki idee Einsteina miały wyrzeźnić na poglądy współczesne.

„Moi Panowie! Poglądy na przestrzeń i czas, które chciałbym przed wami rozwinąć, wyrosły z eksperymentalnego, fizycznego podłoża. W tym leży ich siła. Tendencja ich jest radykalna. Od tej chwili winny pojęcia przestrzeni jako takiej i czasu jako takiego usunąć się zupełnie w cień, a tylko pewien ich związek powinien zachować samodzielne istnienie“.

Matematyczny geniusz Minkowskiego nadał myślom Einsteina nową geometryczną postać, która całkowicie ukazała ich piękno i prostotę. Wiemy od czasu prac Minkowskiego, że wszystkie prawa przyrody dadzą się przedstawić w postaci wektorowej czy tensorowej, gdzie wektory i tensory są tworamii w czterowymiarowej rozmaitości przestrzenno-czasowej. W dalszym rozwoju do wektorów i tensorów doszły jeszcze spinory.

Z historycznego punktu widzenia dalsza rozbudowa szczególnej teorii względności jest związana z ogólną teorią względności. Ponieważ chcemy tutaj oddzielnie rozpatrywać te dwie teorie, chciałbym tylko parę słów powiedzieć o szczególnej teorii względności, by następnie móc spokojnie przejść do ogólnej teorii względności.

Dalsza rozbudowa i rozwój szczególnej teorii względności jest triumfalnym pochodem poprzez szlaki naszego poznania. Tutaj chciałbym tylko wspomnieć o trzech zjawiskach, stanowiących wspaniałe potwierdzenie szczególnej teorii względności: o zależności masy od prędkości, o pięknym

doświadczeniu Ivesa dotyczącym zmiany rytmu poruszającego się zegara i o zależności czasu życia mezonów od ich prędkości. Te doświadczenia, obok wielu innych, przemawiają za szczególną teorią względności, a nie jest znane doświadczenie przemawiające przeciw niej.

Historia dwóch największych triumfów naszego stulecia w przepowiadaniu zjawisk jest ściśle związana z historią szczególnej teorii względności. Myślę mianowicie o falach de Broglie'a i o teorii pozytronów. Koncepcja „fal materii“ de Broglie'a jest istotnie związana z transformacją Lorentza, a teoria pozytronów — z relatywistyczną postacią Diracowskich równań elektronu.

Niech wolno mi będzie tutaj wspomnieć jeszcze o jednym zjawisku. Młody polski fizyk *W e r l e* pokazał, że w relatywistycznej postaci równań ruchu nukleonu wynika odpychanie jego od drugiego nukleonu, jeżeli obydwa nukleony są bardzo blisko siebie i gdy przyjmie się skalarnie lub pseudoskalarnie (jednak nie wektorowe) pole mezonowe. Jest to efekt czysto relatywistyczny. Tak więc przypuszczenie *J a s t r o w a* i *L e v y' e g o* może być wydedukowane z równań pola mezonowego za pomocą szczególnej teorii względności.

Pozostawmy teraz szczególną teorię względności, aby przejść do ogólnej teorii względności.

E i n s t e i n często mówił mi o tym, że w 15 czy 16 roku życia zastanawiał się nad następującymi problemami:

1. Co się dzieje, gdy ktoś usiłuje dogonić i złapać promień świetlny?
2. Co się dzieje, gdy ktoś znajduje się w swobodnie spadającej windzie?

Z odpowiedzi na pierwsze pytanie wyrosła szczególna, z odpowiedzi na drugie — ogólna teoria względności.

Powstanie szczególnej teorii względności było, można powiedzieć, konieczne. Sprzeczności, które usuwa teoria względności, były od dawna znane fizykom. *P o i n c a r é* był w roku 1904 bardzo bliski jej sformułowania. Rany na ciele fizyki były dla wielu widoczne. Jednak nie dotyczy to ogólnej teorii względności. *E i n s t e i n* był jedynym, który ciągle jeszcze widział trudności i pracował nad ich usunięciem. Ogólna teoria względności była lekarstwem na poważną chorobę, której nie dostrzegał nikt poza *E i n s t e i n e m*. Nawet *P l a n c k* mawiał do *E i n s t e i n a*:

„Wszystko jest teraz tak pięknie wytłumaczone. Dlaczego martwi się pan jeszcze z powodu tych zagadnień?“. Jednak *E i n s t e i n* martwił się dalej i przy tym zupełnie samotnie. Osiem lat upłynęło pomiędzy sformulowaniem szczególnej a ogólnej teorii względności. Osiem lat ciągłego myślenia, które ostatecznie przyniosło owoc w nowym rozwiązaniu wielkiego zagadnienia powszechnego ciężenia.

Pierwsza praca, atakująca problem grawitacji, ukazała się w roku 1911 w *Annalen der Physik* pt. „O wpływie siły ciężenia na rozchodzenie się światła“. Jest to bardzo interesująca praca. Zawiera ona przedstawienie biegu myśli Einsteina, które częściowo są fałszywe. Są w niej połowiczne prawdy, przypuszczenia, daje ona wyraz przeświadczeniu, że właściwa prawda, chociaż jeszcze nie odgadnięta, nie jest zbyt oddalona. Jest ona pierwszym promykiem światła przebijającym się poprzez ciemności. Wskazuje ona także na zamiłowanie Einsteina do eksperymentów myślowych i na jego dziecięcą zdolność dziwienia się z powodu prostych rzeczy — z powodu rzeczy, które są tak proste i nie wywołujące wątpliwości, że pozostają przez innych zupełnie nie zauważone.

Od czasów Galileusza fizycy wiedzieli, że wszystkie ciała spadają z jednakowym przyspieszeniem. U nikogo w naszym stuleciu, z wyjątkiem Einsteina, prawo to nie wywoływało już zdziwienia. Doświadczenie wykazało, że prawo to jest ściśle słuszne, i uwierzono, że tym samym problem jest zamknięty.

Nauczanie zabija zdolność dziwienia się. W ostatnich trzech stuleciach rozwoju wiedzy Einstein był pierwszym, który w równości przyspieszeń widział wyraźny drogowskaz dla nowych idei. Możemy bowiem wyobrazić sobie taki świat, w którym tego rodzaju prawo nie jest spełnione; świat, w którym słońce tak powoli spada, że prawie wiszą w powietrzu, gdy tymczasem niemowlęta spadają na ziemię z niebezpiecznym przyspieszeniem. Jednak pole ciężkości naszej ziemi pozwala niemowlętom i słońcom spadać z jednakowym przyspieszeniem. Co oznacza ta ważna wskazówka, dotycząca równości masy bezwładnej i ciężkiej? W ramach mechaniki klasycznej równość ta uchodzi za czysty przypadek.

Wspomniałem poprzednio, że obraz człowieka w spadającej windzie, o którym Einstein myślał już jako młody chłopiec, doprowadził go po wielu latach do kręgu zagadnień ogólnej teorii względności. W pracy Einsteina, o której teraz mówimy, znajdujemy implicite obraz człowieka w spadającej windzie; tutaj — wychodząc z tego przykładu — Einstein przewidział ugięcie się promieni świetlnych w polu grawitacyjnym. Obliczona w ten sposób wielkość efektu ugięcia się światła jest za mała. Einstein nie dysponował jeszcze pełną znajomością ogólnej teorii względności. Miał on ją zdobyć dopiero w ciągu następnych czterech lat, gdy powrócił do swych obliczeń i poprawił je. Przewidywanie tego zjawiska pojawiło się już jednak w pracy Einsteina w roku 1911. Pracę tę zakończył on następującymi godnymi uwagi słowami:

„Byłoby wskazane, żeby astronomowie zajęli się poruszonym tutaj zagadnieniem zarówno wówczas, gdy podane powyżej rozważania byłyby uzasadnione, jak i wówczas, gdyby okazały się zupełnie dziwaczne. Niezależnie bowiem od jakiegokolwiek teorii należy się zastanowić, czy za

pomocą dostępnych dzisiaj środków można stwierdzić wpływ pól grawitacyjnych na rozchodzenie się światła“.

Upłynęło osiem lat, zanim przysłała odpowiedź na postawione przez Einsteina pytanie. W tym czasie Einstein przenosi się z Pragi do Zurychu, a następnie z Zurychu do Berlina. Tutaj zastał go wybuch pierwszej wojny światowej i tutaj zakończył on swą pracę o ogólnej teorii względności.

Teoria względności znalazła powoli uznanie w coraz szerszym kręgu fizyków teoretyków, pozyskując następnie fizyków-eksperymentatorów, astronomów, matematyków i filozofów. Była ona uważana za nadzwyczaj trudny przedmiot. W Cambridge opowiadano, że podczas wojny w roku 1918 Sir Arthur E d d i n g t o n miał wykład na temat ogólnej teorii względności. Po wykładzie pewien fizyk odezwał się do Sir Arthura: „Był to bardzo piękny wykład. Pan jest jednym spośród trzech ludzi na świecie, którzy znają i rozumieją teorię względności“. Skoro na twarzy E d d i n g t o n a pojawił się wyraz powątpiewania, fizyk ten zauważył: „Panie profesorze, pan nie powinien być tym zażenowany; pan jest zbyt skromny“. Sir Arthur odpowiedział na to: „Ja nie jestem zażenowany, zastanawiam się tylko nad tym, kto jest tym trzecim“.

W czasach tych zrozumienie ogólnej teorii względności wymagało znajomości metod matematycznych, która nie była wtedy powszechna. W rzeczywistości dopiero ogólna teoria względności wpłynęła na dalszy rozwój geometrii Riemannowskiej, a następnie nie-Riemannowskiej. Teoria względności silnie pobudziła wzrost tych gałęzi matematyki.

Dopiero po pierwszej wojnie światowej rozszerzyła się znajomość ogólnej teorii względności w Anglii, Związku Radzieckim oraz w innych krajach. W roku 1919 zostały zorganizowane dwie ekspedycje angielskie — jedna do Sobral w Brazylii, a druga do Principe na wybrzeżu afrykańskim, żeby w czasie zaćmienia słońca przeprowadzić obserwacje, które pozwoliłyby sprawdzić, czy promienie świetlne wysyłane przez gwiazdy uginają się w polu siły ciężkości słońca i czy efekt ten zgadza się ilościowo z przewidzianym przez ogólną teorię względności. Wyniki, które wówczas uzyskano, potwierdzały wspaniale przewidywania Einsteina. Chociaż wydaje się, że późniejsze pomiary nie potwierdzają tej zgodności, to jednak nie ma dzisiaj wątpliwości, że promienie świetlne rzeczywiście uginają się pod wpływem pola siły ciężkości.

Zjawisko uginających się promieni świetlnych w grawitacyjnym polu słońca zafascynowało wówczas cały cywilizowany świat. Wkrótce po 1920 roku najbardziej skromny człowiek, Einstein, stał się najsłynniejszym na świecie uczonym. Wierzę, że u podstaw tej nagle wzrastającej sławy Einsteina leżała tęsknota ludzkości za pokojem. Występowało tutaj tak wzniosłe i tak tajemnicze zjawisko przyrody, jak niebo pokryte

gwiazdami w czasie zaćmienia słonecznego. Występowało tu zjawisko przyrody, którego teorię sformułował niemiecki, a sprawdził angielski uczony. Istnieje tu współpraca uczonych dwóch narodów, które jeszcze przed dwoma laty walczyły ze sobą. Moim zdaniem było to też przyczyną, dlaczego siły reakcji zwalczały E i n s t e i n a. E i n s t e i n był chyba naj-słynniejszym, najbardziej wychwalanym, a jednocześnie i najbardziej wyśmiewanym człowiekiem na świecie. Opinie te były dla niego tak samo obojętne, jak i wiele innych szczegółów zewnętrznego życia. Być może, że mniej niż ktokolwiek inny zdawał on sobie sprawę ze swej tak nagle wzrastającej sławy.

Rozwój ogólnej teorii względności postępował stosunkowo powoli, E i n s t e i n formułował ją stopniowo i przerabiał w pracach ogłaszanych w *Berichte der Preussischen Akademie*. Wnikając coraz głębiej i głębiej w problem grawitacji, nieraz musiał on wracać na własny ślad i poprawiać błędy. Około roku 1916 gmach ogólnej teorii względności był już ukończony i teoria została raz jeszcze zebrana w dłuższej pracy, która pojawiła się w *Annalen der Physik* pt. „Podstawy ogólnej teorii względności“. Nie wprowadzono później żadnych zasadniczych zmian, chociaż dodano i rozwinięto wiele wyników.

Wśród wniosków, które można wyciągnąć z ogólnej teorii względności, a których nie podobna wyprowadzać z założeń mechaniki klasycznej, znajduje się jeden, zapewne dobrze znany: dotyczy on ruchu perihelium Merkurego. W roku 1916 dostarczył on pierwszego potwierdzenia ogólnej teorii względności. Wniosek ten był w tym czasie wyprowadzony w sposób ścisły z równań E i n s t e i n a przez słynnego astronoma S c h w a r z s c h i l d a. Jednak z pewnych względów ujęcie to stanowi zbyt wielkie uproszczenie. Pełna historia tego problemu jest złożona, udzielię więc tylko krótkich informacji na ten temat.

Ogólna teoria względności w postaci sformułowanej około roku 1916 spoczywała na dwóch filarach. Jednym z nich były równania pola, tzn. równania opisujące zmiany pola ciężkości lub — jeśli kto woli — geometrycznego pola metrycznego przestrzeni i czasu. Drugi stanowiły równania ruchu informując nas o tym, jak w takim polu ciężkości porusza się dane ciało. Równania te, tzn. równania linii geodezyjnej, zastępowały stare Newtonowskie równania ruchu, w którym siła ciężkości była wprost proporcjonalna do przyspieszenia. Teraz jednak w ogólnej teorii względności równania ruchu są słuszne, tak jak wszystkie prawa natury, nie tylko w jakimś inercjalnym układzie współrzędnych, lecz w dowolnym układzie.

Jeżeli chcemy więc na przykład wyznaczyć ruch planety w polu ciężkości Słońca, to musimy znaleźć pole grawitacyjne Słońca za pomocą równań pola ogólnej teorii względności, a następnie musimy zastosować

równania ruchu do tego samego pola i znaleźć ruch planety. To właśnie z dużą matematyczną zręcznością wykonał Schwarzschild. Jego wynik był jednak słuszny tylko dla planety bardzo małej w porównaniu ze Słońcem. A co dzieje się w przypadku gwiazd podwójnych, tzn. co dzieje się w przypadku zagadnienia dwóch ciał, a nie jednego? Wówczas nie możemy zastosować metody Schwarzschilda. Drugi filar ogólnej teorii względności nie daje nam wtedy żadnych korzyści.

Mamy co prawda równania pola i równania ruchu, jednak te ostatnie posiadają tylko ograniczony zakres zastosowań. Do roku 1938 nie znaleźliśmy rozwiązania zagadnienia ruchu gwiazd podwójnych według ogólnej teorii względności, chociaż rozwiązanie tego zagadnienia na gruncie mechaniki klasycznej jest prawie trywialne; nie jest ono dużo trudniejsze niż zagadnienie jednego ciała, tzn. zagadnienie Słońca i małej planety.

Od dawna już Einstein wyrażał pogląd, że w ogólnej teorii względności równania ruchu są zbyteczne; że równań takich nie trzeba zakładać, lecz można je otrzymać z równań pola, że możemy zrezygnować z równań ruchu i odrzucić je jako niezależny postulat, że równania pola są jedynym filarem, na którym spoczywa ogólna teoria względności.

Okazało się, że jest to słuszne, dowód wymagał jednak długiego czasu. Wszystkie techniczne środki potrzebne do tego znajdowały się już około roku 1916 w rękach matematyków i fizyków. Znali oni równanie pola. Trzeba było tylko dowieść, że równania pola zawierają już w sobie równania ruchu. Sytuacja była taka, jak gdyby wykopywano głęboko ukryty skarb, którego kryjówkę znano. Einstein kilkakrotnie atakował ten problem, pozostawiał go, przechodził do wielu innych zagadnień i wracał do niego znowu. W tym czasie do władzy doszedł Hitler. Einstein wyjechał z Berlina i osiadł w roku 1933 w Princeton jako profesor przy Institute for Advanced Study. W roku 1938 ukazała się praca, w której po raz pierwszy z równań pola wydedukowano słuszne równania ruchu gwiazd podwójnych w przybliżeniu wychodzącym poza równania Newtonowskie.

Powiedziałem poprzednio, że mój wykład nie będzie zupełny, a tym bardziej obiektywny. Chciałbym jednak dla porządku wymienić najważniejsze, brakujące tutaj tematy. Są nimi trzecie zjawisko przewidziane wyłącznie przez ogólną teorię względności, tj. przesunięcie prążków widmowych ku czerwieni, oraz poszukiwanie jednolitej teorii, któremu Einstein poświęcił 35 lat życia i nad którym pracował do ostatniej chwili swego życia. Wybór problemów, którymi zająłem się w krótkim moim przeglądzie historycznego rozwoju teorii względności, był oczywiście subiektywny.

Chciałbym jeszcze spróbować udzielić tutaj odpowiedzi na następujące pytanie: co myśli ogół fizyków o ogólnej teorii względności?

Wierzę, że jest ona jedyną poprawną i piękną teorią pola grawitacyjnego, z czym zgodzi się zapewne większość fizyków. Istnieje co prawda kilka innych teorii, jednak teoria Einsteińska przewyższa je głębią i logiczną zwartością. Niektóre z tych teorii opisują ruch perihelium Merkurego tylko poprzez specyfikację pewnej stałej, która w nich występuje. Teoria Einsteina — i to jest jej olbrzymia zaleta — nie wprowadza żadnych nowych stałych. Często w tych innych teoriach grawitacji przyjmuje się inercjalny układ odniesienia szczególnej teorii względności; w niektórych z nich środek masy gwiazd podwójnych porusza się ruchem przyspieszonym. Natomiast w Einsteińskiej ogólnej teorii względności zachowuje się on porządnie, tzn. porusza się ruchem jednostajnym. Dla fizyków, którzy mają własną teorię grawitacji, Einsteińska teoria jest zbyt radykalna. Wierzę jednak, że właśnie w tym leży jej siła. W rzeczywistości Einsteińska teoria grawitacji nie ma żadnej poważnej konkurencji. Ogólna teoria względności liczy czterdzieści lat! Bohrowska teoria atomu, która powstała w tym samym okresie, została po dwunastu latach życia zastąpiona teorią Schrödingera i Heisenberga. Godne jest uwagi to, że Einsteińska teoria po czterdziestu latach swego istnienia jest nadal żywotna, że zjawiają się jeszcze ważne prace z tej dziedziny, chociaż nie znajdują się one w centrum zainteresowań fizyków.

Jak już powiedziałem, istnieje bardzo mała grupa fizyków, którzy z różnych względów wolą inne teorie grawitacji. Istnieje jednak może nieco większa grupa fizyków, którzy przyjmują co prawda matematyczny aparat ogólnej teorii względności, jednak nie zgadzają się z Einsteińską interpretacją podstawowych pojęć. Dwie główne idee ogólnej teorii względności polegają na tym, że:

1. Pole grawitacyjne i pole metryczne są identyczne.
2. Słuszna jest ogólna zasada względności, tzn. dozwolone są wszystkie transformacje układów współrzędnych.

Obie te idee są kwestionowane przez niektórych fizyków. Jedni fizycy, zgadzający się z Einsteińskimi równaniami pola, widzą w nich równania określające tylko pole grawitacyjne, podczas gdy pole metryczne pozostaje u nich nadal pseudoeuklidesowe. Inni fizycy nie wierzą w ogólną teorię względności i to w następującym sensie: przyjmują oni warunki na układ współrzędnych wyróżniające klasę układów współrzędnych związaną z transformacją Lorentza. Warunki te są dodawane do równań pola.

Wykład mój nie jest polemiką. Chciałbym jednak zauważyć, że według zdania Einsteina istota jego teorii polega właśnie na przyjęciu obu wyżej wymienionych zasad, a szczególnie na przyjęciu ogólnej zasady względności. Odchylenie od tej zasady według Einsteina stanowi odwrót od idei, z których wyrosła ogólna teoria względności.

Na zakończenie jeszcze jedna uwaga.

Wyniki badań Einsteina wywarły już dzisiaj swe piętno, głęboko wpływając na świat w sensie materialnym oraz stawiając przed nim ważne zagadnienia natury politycznej i moralnej. Historia rozwoju energii atomowej rozpoczęła się einsteinowską zasadą wzajemnego związku pomiędzy masą i energią. Einstein należał do pierwszych, którzy po odkryciu zjawiska rozszczepienia jądra uranu byli świadomi olbrzymich możliwości zastosowania energii atomowej oraz niebezpieczeństwa związanego z jej nadużyciem.

Od lat Einstein walczył namiętnie przeciw nadużyciu energii atomowej do celów zbrodniczych i za utrzymaniem pokoju na świecie. W jego orędziu, skierowanym w czasie wojny do ludności Ameryki, czytamy:

„Na nas uczonych, którzy wyzwolili tę potworną siłę, spoczywa przytłaczająca odpowiedzialność za takie skierowanie energii atomowej, żeby służyła ona dla dobra, a nie do zniszczenia ludzkości“.

Dzisiaj już nie ma Einsteina wśród żyjących. Ale niech mi wolno będzie wyrazić nadzieję, że jego nauka oraz idee pokoju, dla których pracował, zapadną na wieki w umysły i serca ludzkie.

Stanisław Loria

Zakład Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytetu Poznańskiego

Einstein a fizyka kwantowa

Treścią mego referatu będzie odpowiedź na pytanie: jaki był udział Einsteina w rozwoju fizyki kwantowej?

Nie ma to być wykład systematyczny, lecz raczej garść uwag, wysnu-tych ze wspomnień osobistych fizyka, któremu dane było przeżyć 50 lat przy warsztacie badawczej pracy naukowej.

Pierwsze samodzielne badania naukowe Einsteina (1902—1904), poświęcone były zagadnieniom z zakresu termodynamiki.

Problemem kwantowym zajął się dopiero w swojej czwartej z kolei publikacji, która ukazała się w *Ann. d. Phys.* **17**, 132 (1905). Ma ona tytuł dość znamienity: „Über einen, die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“.

To ostrożne sformułowanie nie było przypadkowe. Aby zrozumieć intencję tej ostrożności, należy sobie uprzytomnić, jaka była sytuacja w fizyce w pierwszych latach XX stulecia, w latach 1900—1903.

Był to okres ożywionej działalności badawczej w dziedzinie nauki o promieniowaniu. Grupa fizyków teoretyków tej miary, co Boltzmann, Lorentz, Rayleigh, Wien, Planck, Jeans i in. oraz eksperymentatorów takich, jak Kurlbaum, Paschen, Rubens, Lummer, Pringsheim i inni borykała się z trudnościami zagadnienia o fundamentalnym znaczeniu. Sformułował je Kirchhoff jeszcze w r. 1859. Zawierało ono dwa proste pytania:

1. Jak się zmienia całkowita emisja promieniowania tzw. „ciała czarnego“ (temperaturowego, zrównoważonego) z temperaturą?
2. Jaki jest rozkład energii tego promieniowania na różne przedziały widma w różnych temperaturach?

Odpowiedź na pierwsze pytanie dali Stefan i Boltzmann. Jest ona zawarta w tzw. prawie Stefana-Boltzmanna.

Odpowiedź szczegółową i wyczerpującą dali na drugie pytanie eksperymetatorzy. Poszukiwanie poprawnego teoretycznego wytłumaczenia wszystkich prawidłowości stwierdzonych doświadczalnie doprowadziło w końcu — poprzez błędne lub tylko częściowo potwierdzone prawa

(Rayleigha-Jeansa i Wiena) — dopiero Plancka do dobrej formuły rozkładu. Ale powodzenie to osiągnął drogą okrężną, kosztem dużych ofiar i niepokojących koncesyj. Trzeba było zrezygnować z dobrze wypróbowanej i dotychczas sprawnie pracującej zasady ekwipartycji i dopuścić, że wymiana energii między atomami może odbywać się nie w sposób ciągły, falami, lecz „porcjami“, kwantami $h\nu$.

Równocześnie w innej dziedzinie zjawisk świetlnych, w badaniach dość dobrze już znanego zjawiska fotoelektrycznego, dokonał L e n a r d (1902) odkryć nowych, niezmiernie doniosłych. Stwierdził, że:

1) energia kinetyczna wyzwolonych krótkofalowym światłem elektronów nie zależy od natężenia użytego światła, lecz tylko od jego częstości ν i natury ciała naświetlanego. Zależność jest liniowa;

2) natężenie prądu fotoelektrycznego jest proporcjonalne do natężenia światła;

3) istnieje progowa wartość częstości ν_0 , która jest różna dla różnych metali:

$$E_{\text{kin}} = \text{const} (\nu - \nu_0)$$

albo

$$E_{\text{kin}} = h\nu - A$$

(A — praca wyjścia);

4) efekt występuje bez opóźnienia nawet wtedy, gdy natężenie światła jest bardzo słabe.

W tych warunkach wystąpił E i n s t e i n, człowiek młody, fizyk nie znany jeszcze w sferach naukowych, z niezwykle śmiałą hipotezą, idącą znacznie dalej niż nie bez wahania, ostrożnie, wysunięta kwantowa koncepcja P l a n c k a.

Przypuśćmy, że kwant $h\nu$ zachowuje się jak korpuskuła, że porusza się po linii prostej z prędkością światła, zderza się z elektronem atomu metalowej katody i oddaje mu całą energię, która zostaje zużyta na wykonanie pracy wyjścia A , i na energię kinetyczną wyrzuconego elektronu $\frac{1}{2}mv^2$. Tę można zmierzyć sposobem podanym po raz pierwszy przez L e n a r d a :

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - A = eV.$$

Pierwsza rozprawa E i n s t e i n a z r. 1905 zawierała już *in nuce* ideę przewodnią, program oraz metodę dalszej rozbudowy kwantowej teorii promieniowania, która dała początek całej współczesnej fizyce kwantowej. Wykonanie tego programu wymagało 20 lat pracy.

Nie podobna w krótkim referacie oddać całego czaru tych przeżyć, które były udziałem ówczesnej generacji młodych fizyków, będących świadkami kolejnych etapów rozwoju tej teorii. Problematy, koło których

skupiało się skoncentrowane, przenikliwe myślenie Einsteina oraz tych, którzy brali udział w ożywionej dyskusji, dotyczyły argumentów przemawiających na korzyść koncepcji korpuskularnie pojętych „kwantów światła“, a przeciw koncepcji „fali świetlnej“. Problemy te odegrały bardzo ważną rolę w historii teorii kwantów. Dzisiaj nie budzą już takiego zainteresowania, ich rozwiązania stały się bowiem pomnikami, które niby znaki drogowe wytyczają tor, jakim niegdyś zdążyły twórcze, pionierskie myśli Einsteina.

Formuła Plancka była niewątpliwie prawdziwa. Dowodziły tego wyniki doświadczeń Lummera-Pringsheima i wielu innych. Dowodziły bogate konsekwencje jej zastosowania do zjawisk cieplnych w fizyce ciała stałego. Ale była to formuła interpolacyjna, uzyskana drogą półempiryczną. Jej wywód był skażony wewnętrzną niekonsekwencją. Planck wyszedł bowiem z klasycznej elektrodynamiki i klasycznej termodynamiki, posługiwał się w całym wywodzie metodami klasycznymi, a rozwiązanie problemu odnalazł w... kwantowaniu.

Hipoteza korpuskularnie pojmowanych „kwantów światła“, czyli „fotonów“ (G. N. Lewis), okazała się heurystycznie obiecująca, ale zobowiązywała do znalezienia konsekwentnego, wyłącznie na ogólnych zasadach statystyki opartego wyvodu makrofizycznie sprawdzonej formuły planckowskiej, która obejmuje jako przypadki szczegółowe zarówno formułę Rayleigha-Jeansa, jak i formułę Wiena. Rozwiązaniu tego zadania poświęcone były prace Einsteina z lat 1909, 1912, 1914 i 1917.

Banalnością byłoby przypominanie tu treści tych rozpraw, streszczanych już niejednokrotnie w wielu podręcznikach.

Atoli nie banalne będą może uwagi, które uwydatniają pewne nader charakterystyczne cechy umysłowości ich autora.

Zapytajmy, jak Einstein ujmował to zagadnienie.

Czynił to nieomal równocześnie trzema drogami:

Pierwsza polegała na rozważaniu fluktuacji gęstości energii w polu promieniowania temperaturowego, zrównoważonego w kirchhoffowskiej wnęce (1909).

Druga wiodła poprzez szczegółową analizę elementarnych procesów skierowanej emisji i absorpcji fotonów w promieniowaniu zrównoważonym. Doprowadziła ona do wniosku, że w obu tych procesach elementarnych zachodzi nie tylko przenoszenie energii ($h\nu$) między drobiną a promieniowaniem, lecz równocześnie i przenoszenie (oraz odrzut) pędu $\left(\pm \frac{h\nu}{c}\right)$.

Trzecia droga polegała na obliczeniu prawdopodobieństwa przejścia drobinę (izolowanej lub wystawionej na działanie promieniowania z zewnątrz) z pewnego poziomu energii wewnętrznej na inny poziom z jednoczesnym aktem emisji lub absorpcji (r. 1917).

Wszystkie te trzy sposoby rozważania miały dwie cechy wspólne:

1. Wszystkie były zgodne z zasadą odpowiedniości, którą Einstein stosował już rok przed jej wyraźnym sformułowaniem i ogłoszeniem przez B o h r a (r. 1918). Widocznie — może podświadomie, intuicyjnie — wyczuwał sprawność tej zasady i stosował ją w sposób odpowiedni i skuteczny tam, gdzie mogła być pożyteczna („różdżka czarodziejska“ — S o m m e r f e l d).

2. Wszystkie posługują się klasyczną statystyką Boltzmannna. Wiadomo, że te trzy próby rozwiązania fundamentalnego problemu starej teorii kwantów zawiodły pokładane w nich nadzieje. Prowadziły do prawa Wiena, a nie do formuły wyrażającej prawo Plancka. Aby uzyskać tę ostatnią, należałoby fotonom oprócz energii i pędu przypisać jeszcze inną cechę, ujawniającą ich wzajemną od siebie zależność. Cecha ta odgrywałaby rolę analogiczną do tej, jaka w teorii falowej przypada fazie. Takie założenie było jednak nie do przyjęcia. Sprowadziłoby ono nową korpuskularną teorię światła do starej kompromisowej hipotezy Newtona.

Pozwoliłem sobie w tej części mego referatu przypomnieć w możliwie jak najzwięźlejszym skrócie rzeczy niewątpliwie wszystkim bardzo dobrze znane. Uczyniłem to w tym celu, aby na jednym przykładzie, zaczerpniętym z wczesnej fazy rozwoju teorii kwantowej, wskazać wyraźnie niezatarte jeszcze ślady twórczych impulsów pochodzących od E i n s t e i n a, a zarazem rzucić nieco światła na bardzo znamienne cechy jego oryginalnej metody pracy. Ujawniło mi ją interesujące osobiste przeżycie, które utkwiło mi żywo w pamięci, ponieważ często pomagało mi podczas późniejszych studiów teorii względności.

Osobiście poznałem Einsteina bardzo dawno, w roku 1912, na zjeździe Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w Wiedniu. Miałem wtedy lat 29, byłem docentem Uniwersytetu Jagiellońskiego. Einstein, o 4 lata ode mnie starszy, był już profesorem w Zurychu. Było to w lecie. O tej porze roku Wiedeń zazwyczaj jest bardzo piękny. Odbywaliśmy dłuższe spacery po Praterze i oczywiście rozmawialiśmy przeważnie o fizyce. Pozostała mi w pamięci jedna taka rozmowa.

W pewnej chwili zadałem Einsteinowi pytanie dotyczące problemu, który był przedmiotem rozmowy. Otrzymałem odpowiedź, która mnie zdumiała. Nie mogłem znaleźć związku pomiędzy treścią tej odpowiedzi a moim pytaniem. W milczeniu spojrzałem w jego stronę i dostrzegłem, że obserwował mnie z uśmiechem, jak gdyby oczekiwał takiej reakcji. „Pan nie widzi związku pomiędzy swoim pytaniem a moją odpowiedzią?“ — zapytał. Potwierdziłem skinieniem. „Rozumiem to — ja już tak długo i tak intensywnie myślałem o tych sprawach, tak wielostronnie je analizowałem, że są one w moim umyśle w dziwny sposób ze sobą powiązane. Czasem mam wrażenie, jak gdyby mój mózg znajdował się

w ciasno go obejmującej siatce. Gdy ktoś pociągnie za jeden z węzłów, ciągnięcie to rozchodzi się na wszystkie inne węzły i wywołuje reakcję, której się mój towarzysz zgoła nie spodziewa“.

Dopiero po latach zrozumiałem ukrytą treść tego przygodnego wyznania. Ale powróćmy do teorii kwantów.

Stwierdziliśmy, że wszelkie próby wyprowadzenia formuły Plancka za pomocą statystyki Boltzmannna kończyły się niepowodzeniem. Dlaczego?

Dzisiaj znamy odpowiedź na to pytanie — i wydaje się nam ona niezwykle prosta i przekonująca. Ale zważmy, że około problemów związanych z tym pytaniem krążyły myśli Einsteina uparcie przez lat 7 (1917—1924), aż drobny impuls, zawarty w bystrej uwadze indyjskiego fizyka S. N. Bosego [1], skierował je na drogę wiodącą do nowej, pierwszej, właściwej statystyki kwantowej [2], znanej odtąd pod nazwą „statystyki Bosego-Einsteina“.

Warto przypomnieć treść rozumowania, które prowadzi do wykrycia powodu dotychczasowych niepowodzeń. Wszystkie metody rozważań, jakimi Einstein usiłował rozwiązać podjęty problemat, były przezeń stosowane w innych przypadkach już dawniej i zawsze pracowały bez błędu. Dotyczyło to i teorii wahań gęstości promieniowania, i teorii ruchów Browna, i obliczania prawdopodobieństwa „przejść indukowanych“ dwójakiego rodzaju. Przyczyna bezsilności tych metod w rozważanym właśnie problemie musiała więc kryć się w czymś, co jest wspólne tym wszystkim rozważaniom, a co leży poza nimi, być może w podstawach klasycznej statystyki Boltzmannna. Należałoby więc zanalizować troskliwie treść formuły wyrażającej prawo boltzmannowskiego rozkładu, $n = Ae^{-\beta e}$, fizyczne znaczenie wszystkich założeń, na których się ona opiera, oraz skontrolować legitymację stosowalności warunków dodatkowych, które służą do wyznaczenia stałych A i β — aby wykryć i wykazać ewentualną niewłaściwość stosowania jej bez zmiany w przypadku fotonów.

Niewątpliwie wszystkim tu obecnym znany jest wynik tej analizy i mogą bez szkody ograniczyć się tylko do tej ogólnikowej wskazówki.

Chciałbym natomiast z naciskiem podkreślić, że w tym właśnie postawieniu pytania — co należy odrzucić i co zmienić w podstawach statystyki klasycznej — w tym konkretnym, nieubłaganym legitymowaniu każdego pojęcia, każdego założenia, każdego warunku dodatkowego, zdawałoby się samo przez się zrozumiałego, w tym przewyciężaniu głęboko zakorzenionych, przyzwyczajeniowych form myślenia przejawia się swoista, właściwa Einsteinowi, metoda pokonywania zasadniczych trudności.

Jej rewolucyjny, przełomowy charakter przywodzi na myśl tylko jedną analogię; jest ona podobna do metody nie Newtona, który był

wielkim systematykiem, lecz Galileusza, tego największego rewolucjonisty w historii nauki.

Nie wspomniałem dotychczas ani słowem o einsteinowskiej teorii względności. Temat ten jest przedmiotem osobnego referatu. Jeśli jednak mam dać pełny obraz udziału Einsteina w rozwoju teorii kwantów, muszę w kilku bodaj zdaniach podkreślić znaczenie ścisłego zespolenia szczegółowej teorii względności z kwantowym obrazem świata fizycznego. W okresie pięćdziesięciolecia 1905—1955 działalność naukowa Einsteina rozwijała się równocześnie dwoma torami: jeden wiódł do poznania praw zjawisk w mikrokosmosie — to teoria kwantów; drugi zmierzał do poznania struktury makrokosmosu — to teoria przestrzeni, czasu i grawitacji oraz szukanie inwariantnej formy ogólnych praw fizycznego świata, krócej — „ogólna teoria względności“. Oba te tory bieły zrazu równolegle i od siebie niezależnie. Ale wyniki teorii względności szczegółowej, w zasadzie zbudowanej już w r. 1905, przeniknęły bardzo wcześniej do teorii kwantów, modyfikując, kształtując i wzbogacając jej treść oraz przyspieszając jej rozwój. Toteż szukając śladów wpływu Einsteina we współczesnej fizyce kwantowej, znajdujemy je wszędzie tam, gdzie rolę istotną odgrywają wszelkie efekty relatywistyczne. Przejawi się on na przykład w teorii zjawiska Comptona, w teorii fal Louis de Broglie'a, w mechanice falowej Schrödingera itd. . . . aż do relatywistycznego równania Diraca i jego rozlicznych, teoretycznych i doświadczalnych konsekwencji. Do triumfu einsteinowskiej fizyki zaliczyć by więc można — żeby wymienić bodaj kilka przykładów — i odkrycie dyfrakcji elektronów, i mikroskopię elektronową, i stwierdzenie zależności masy ciała od jego prędkości liniowej, zależności czasu życia mezonów od ich prędkości, jako też związek

$$m = \frac{E}{c^2},$$

który przyczynił się walcnie do wyzwolenia energii jądra. Toteż możliwość zużytkowania olbrzymich zapasów energii, zawartych w jądrze atomu, przewidział Einstein już w r. 1905 [3].

Nazwisko Einsteina usłyszałem po raz pierwszy z ust Augusta Witkowskiego. Było to kilka miesięcy po ukazaniu się rozprawy „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“. Witkowski zalecał mi gorąco jak najprędzej zapoznać się z tą pracą. Wyraził opinię, że zmieni ona niezadługo nasze dzisiejsze podstawowe pojęcia fizyki. O jej młodym autorze mówił entuzjastycznie. „Okaze się on może w przyszłości drugim Kopernikiem“.

Kiedy dwa lata później pytałem moich kolegów i rówieśników w niemieckim wówczas Wrocławiu, Ladenburga i Borna, co sądzą o tej

pracy Einsteina, stwierdziłem, że żaden jeszcze jej nie znał i żaden nawet nie wiedział o jej istnieniu.

Z fizyków polskich niewielu miało sposobność zetknąć się z Einsteinem osobiście. Serdeczne stosunki, oparte na wspólnocie zainteresowania problemem ruchów Browna, na wzajemnym uznaniu i głębokim szacunku, łączyły Smoluchowskiego z Einsteinem. Świadczą o tym listy, których wyjątki ogłosił niedawno docent dr A. Teske w swej świetnej książce o Marianie Smoluchowskim; świadczy napisane z głębokim wzruszeniem wspomnienie pośmiertne pióra Einsteina, opublikowane w 5 roczniku czasopisma *Die Naturwissenschaften* w grudniu 1917 r.

O swoich osobistych kontaktach z Einsteinem mówili moi przedmówcy. Po roku 1912 nie spotkałem go już nigdy. Dochodziły do mnie jednak często o nim wiadomości, przekazywane przez wspólnych przyjaciół — Ehrenfesta, Millikana, Berlinera, Bornai innych.

Dwukrotnie jeszcze miałem sposobność nawiązać z nim kontakt listowny. Następstwa tych kontaktów miały dla mnie walor miłych osobistych przeżyć, ponieważ zawsze ujawniały jego ujmującą życzliwość i gotowość do koleżeńskiej przysługi.

Po raz pierwszy napisałem do niego wkrótce po objęciu we Lwowie katedry fizyki teoretycznej w r. 1919. Znalazłem się tam w sytuacji z naukowego punktu widzenia bardzo trudnej. Składały się na to ciężkie warunki egzystencji, zupełny brak nowszych książek, czasopism i środków na sprowadzenie ich skądkolwiek, osamotnienie z powodu braku towarzyszy pracy o podobnych zainteresowaniach naukowych, brak jakiegokolwiek zachęty i pobudki do pracy badawczej. W tych warunkach zwróciłem się do kilku znajomych fizyków zagranicznych, między nimi i do Einsteina, z prośbą, by mi przysłali odbitki swoich prac, opublikowanych w ostatnich kilku latach. Einstein przysłał mi wtedy cały pakiet publikacji z lat 1913—1919 z bardzo miłym listem, w którym przeproszał, że nie posyła wszystkich, ponieważ niektórych już mu zabrakło. Na szczęście między tymi, które doszły do mnie z tego i z innych źródeł, było dość materiału do studium teorii względności. Owocem tych studiów były najpierw odczyty i dyskusje w Polskim Towarzystwie Politechnicznym w listopadzie i grudniu 1920 r., a potem dwa wydania pierwszej polskiej książki na temat teorii Einsteina.

Po raz drugi zwróciłem się do Einsteina wtedy, gdy wypadło mi zapytać jego (i Schrödingera), czy zechcą podjąć się wydania opinii o pracach proponowanego przeze mnie kandydata do stypendium Rockefellerera. Kandydatem był ówczesny mój asystent i docent Uniwersytetu Lwowskiego. Odpowiedź Einsteina przyszła natychmiast. Była znowu

nader przyjazna i serdeczna, a opinia, która dzięki kwalifikacjom kandydata mogła być pozytywna, okazała się skuteczna.

Wspomniałem o dwóch tych kontaktach listownych z Einsteinem nie tylko dlatego, że dały mi one wiele osobistej satysfakcji, lecz że stanowiły także realną pomoc w mej pracy naukowej i zawodowej.

Losy sprawiły, że ten mój ówczesny kandydat, który nie zawiódł pokładanych w nim nadziei, przebywał potem w ciągu wielu lat w kręgu najbliższych współpracowników i przyjaciół Einsteina, że powrócił do kraju, aby swą wiedzą, talentem i doświadczeniem przyczynić się do odbudowy, rozbudowy i tworzenia fizyki teoretycznej w Polsce i że mógł nam dzisiaj na tym posiedzeniu poświęconym uczczeniu pamięci Einsteina opowiedzieć o nim i o jego dziele więcej, lepiej i serdeczniej niż ktokolwiek inny.

Literatura

1. S. N. Bose, Z. Phys. **26**, 178 (1924).
2. A. Einstein, Berl. Ber., 267 (1924).
- " " , **3**, 18 (1925).
3. A. Einstein, Ann. d. Phys., **18** (1905).

Max Born
Bałt Pymont

Einstein a foton*

Zostałem zaproszony do wypowiedzenia się z okazji pięćdziesięciolecia ukazania się pierwszej pracy Einsteina o fotonach „O pewnym heurystycznym ujęciu wytwarzania i przemiany światła“. Było to dla mnie wielkim wyróżnieniem i uważałem za swój obowiązek podjąć się tego zadania, tym bardziej że z Einsteinem łączyła mnie blisko pięćdziesięcioletnia przyjaźń, a co więcej pierwsza katedra uniwersytecka, którą zajmowałem, była w Berlinie, gdzie w ciągu wielu lat wykładałem obok Einsteina, będąc z nim w stałym kontakcie. Potem jednak nasunęły mi się wątpliwości. Kiedy przed półtora rokiem zrzekłem się katedry w Edynburgu ze względu na wiek, postanowiłem nie brać więcej czynnego udziału w pracy naukowej (jeżeli nie liczyć przygotowania do druku dwóch książek od dawna rozpoczętych). Wycofałem się do cichej miejscowości, pozbawionej uniwersytetu i biblioteki, sprzedałem większą część książek i czasopism. Brak mi było całego literackiego warsztatu by odświeżyć swoje wspomnienia. A jednak nie chciałem uchylić się od wezwania. Niewielu jest przecież żyjących fizyków, którzy brali udział od początku w emocjonującym, wspaniałym przeżyciu powstawania nowoczesnej fizyki. Proszę mi wybaczyć, jeżeli zatem to, co piszę, opiera się zasadniczo na pamięci i być może w niektórych szczegółach będzie niezupełnie ściśle. Spróbuję przedstawić stan nauk fizycznych na początku bieżącego stulecia i udział Einsteina w rozwoju fizyki, a w szczególności w rozwoju pojęcia kwantu światła.

W roku 1905 w tym samym tomie *Annalen der Physik* ukazały się dwie podstawowe rozprawy Einsteina: pierwsza o teorii względności, druga zaś o ruchach Browna. Chociaż obie dotyczą odmiennych dziedzin fizyki, to jednak zachodzi między nimi pewien związek. W szczególności einsteinowska teoria fluktuacji i teoria ruchów Browna opierają się na podobnych założeniach jak pojęcie kwantu światła. Fakt ten postaram się

* Odczyt wygłoszony na posiedzeniu Berlińskiego Towarzystwa Fizycznego w Berlinie-Charlottenburgu w dniu 18 marca 1955. Oryginalny tekst niemiecki ukazał się w *Naturwissenschaften*, 42, 425 (1955).

zinterpretować jako przykład dążenia do jednolitego wszystko ogarniającego pojmowania rzeczywistości, które cechowało Einsteina do ostatniej chwili.

Chciałbym rozpocząć od jego nagłego pojawienia się jako nowej gwiazdy na firmamencie fizyki i opowiedzieć w kilku słowach o jego życiu. Einstein urodził się 14 marca 1879 r. w Ulm. Rodzice niedługo po jego urodzeniu przenieśli się do Monachium, a potem do Pawii we Włoszech, pozostawiając syna w gimnazjum Luitpolda w Monachium. Młody Einstein uznał naukę w szkole za tak jałową, iż samowolnie w 1894 r. opuścił gimnazjum, nie mając zdanych ostatecznych egzaminów. Przybył do rodziców do Mediolanu, ale to samo poczucie niezależności zmusiło go wkrótce do opuszczenia gminy żydowskiej i do zrzeczenia się obywatelstwa niemieckiego. W 1895 r. Einstein udał się do Szwajcarii, gdzie został przyjęty do szkoły w kantonie Aargau, w której panowała bardziej świeża atmosfera i gdzie znalazł przyjaciół podobnie jak on myślących.

Po zdaniu końcowych egzaminów wstąpił w 1896 r. na Politechnikę w Zurychu, by studiować matematykę i fizykę. Pomiedzy jego nauczycielami był Herman Minkowski, który potem odegrał decydującą rolę przy rozwoju teorii względności. Minkowski był również i moim nauczycielem w Getyndze. Po ukazaniu się einsteinowskiej teorii względności powiedział do mnie: „Nigdy bym Einsteina o to nie podejrzewał“. W roku 1900 złożył Einstein egzamin dyplomowy na zawodowego nauczyciela, miał jednak trudności w znalezieniu posady. Przez jakiś czas był zastępcą nauczyciela w Winterthur i w Schaffhausen. W 1902 r. został zaangażowany do Berna do Urzędu Patentowego w charakterze eksperta III klasy przy „Eidgenossisches Amt für geistiges Eigentum“. Po kłopotach materialnych okresu szkolnego i studenckiego niewielki stały dochód wydawał mu się wybawieniem, a osiem godzin pracy przy biurku nad suchymi pismami patentowymi, nie przeszkadzały mu zastanawiać się nad problemami filozoficzno-fizycznymi. W tym środowisku, z dala od jakiegokolwiek szkoły wyższej, powstały wszystkie te wielkie prace Einsteina. Kiedy wiele lat później zwracałem się do Einsteina z prośbą o pomoc w znalezieniu posady dla któregoś z moich uczniów, otrzymywałem zwykle odpowiedź mniej więcej takiej treści: „Niech będzie szewcem lub ślusarzem; jeżeli chęć wiedzy ma we krwi i jest czegoś wart, sam odnajdzie swą właściwą drogę“. Jednakże pomimo tych słów Einsteina, jeżeli mógł, zawsze pomagał. Myśl, że poznanie naukowe nie ma nic wspólnego z pracą zarobkową, nie opuściła go nigdy, a w ostatnim okresie życia była bardziej żywa niż kiedykolwiek, z przyczyn, do których jeszcze powrócę.

W tym samym roku 1900, gdy Einstein składał swój egzamin dyplomowy, Max Planck przedstawił w Niemieckim Towarzystwie Fizycznym swoje prawo rozkładu widmowego energii (19 października) [1] i jego teoretyczną interpretację, tj. hipotezę kwantów (14 grudnia) [2]. O reakcji na tę publikację nie mogę nic powiedzieć z własnego doświadczenia, ponieważ sam byłem wówczas jeszcze w szkole w przededniu złożenia egzaminu maturalnego. Na Wielkanoc 1901 r. rozpocząłem studia uniwersyteckie, nie ograniczyłem się jednak z początku do matematyki i fizyki, ale studiowałem tak różnorodne przedmioty jak zoologię, ekonomię, astronomię i filozofię. Również i w następnych latach we Wrocławiu, Heidelbergu, Zurychu i Getyndze uczęszczałem na wykłady wybitnych matematyków, a także zajmowałem się nieco fizyką. Dowiedziałem się, wtedy — głównie przez Minkowskiego — o trudnościach panujących w elektrodynamice ciał w ruchu, które to kłopoty doprowadziły do powstania teorii względności, nie dowiedziałem się jednak niczego o kwantach. Te były jeszcze sprawą specjalistów od promieniowania i uchodziły — pomimo doświadczalnego potwierdzenia wzoru promieniowania Plancka — za osobliwą hipotezę stworzoną *ad hoc*, której nie brano zupełnie poważnie.

Einstein jednak wziął sprawę na serio. Był on, jeśli chodzi o wiek, starszy ode mnie o 4 lata, ale intelektualnie przerastał mnie o lat 8 lub więcej. Pomędzy 12 a 16 rokiem życia przyswoił sobie z książek rachunek różniczkowy i całkowy i z zapałem studiował inne gałęzie matematyki, gdy tymczasem ja uczyłem się tych przedmiotów dopiero jako student, co prawda również z wielkim zapałem. Wykładowcom Politechniki w Zurychu prawdopodobnie rzuciła się w oczy nieregularność w uczęszczaniu i pewna obojętność Einsteina, ale przyczyna tkwiła zapewne w tym, że większość wykładanych przedmiotów miał on już opanowaną i zajęty był głębszymi problemami.

W latach od 1900 do 1905 teoria kwantów nie poczyniła, zdaje się, żadnych postępów. Obszerna i godna zaufania książka Sir Edmunda Whittakera — „Historia teorii eteru i elektryczności“, której nowo-wydany drugi tom obejmuje lata od 1900 do 1926 (Edynburg, Th. Nelson & Sons, Ltd, 1953) nic nas o tym okresie nie informuje.

Gdy przed 50 laty pojawiła się rozprawa Einsteina [3] sześć pierwszych rozdziałów zawierało rozważania teoretyczne, które zainteresowały nielicznych specjalistów, natomiast ostatnie trzy paragrafy traktowały o zupełnie nowym zastosowaniu kwantów, a mianowicie do reguły Stokesa w zjawiskach luminescencji, do zjawiska fotoelektrycznego i do jonizacji gazów. Wszystkie te zjawiska zostały ujęte z jednego punktu widzenia jako przekształcenie się energii kinetycznej E jednego elektronu w jeden kwant światła $h\nu$ lub też odwrotnie, tak że musi obowiązywać

liniowy wzór

$$E = h\nu + \text{const},$$

przedstawiony na wykresie (E, ν) jako linia prosta o nachyleniu h , gdzie h jest uniwersalną stałą Plancka, której wartość sam Planck obliczył na podstawie pomiarów promieniowania. Otrzymujemy więc prawo, które można sprawdzić eksperymentalnie. Nic więc dziwnego, że fizycy doświadczalni od razu wzięli się do tego zadania.

Nie jest moim zamiarem przedstawienie historii prac doświadczalnych, prowadzonych w tym kierunku. Wystarczy zauważyć, że praca Einsteina była impulsem do wielkiej liczby doświadczeń i uporządkowała po raz pierwszy wszystkie zjawiska, które wiążą się z wytwarzaniem i pochłanianiem promieniowania. Powróćmy jednak obecnie do owych sześciu teoretycznych paragrafów pracy Einsteina, ponieważ one to właściwie odsłaniają całą głębię i moc dowodową jego rozważań.

Jak to sam Einstein nieustannie podkreślał, żadna jednoznaczna i logiczna droga nie prowadzi od faktów doświadczalnych do teoretycznych systemów fizyki: są one produktem niczym nie skrepowanej fantazji i spekulacji. A jednak bez wątpienia wartość teorii i nasze zaufanie do niej jest tym większe im mniejsza jest dowolność wyboru, im silniejsza jest logiczna konieczność. Wydaje mi się, że rezultaty osiągnięte przez Maxa Plancka i Alberta Einsteina są bliskie temu ideałowi. Spróbuję twierdzenie to wyjaśnić przy użyciu stosowanych dziś metod rozumowania i współczesnego słownictwa.

W czasie swojej wieloletniej pracy badawczej Planck odkrył statystyczny charakter promieniowania ciała doskonale czarnego i rozwinął teoretyczne metody ujęcia tego zjawiska. Przy tym doszedł on do przekonania, że entropia, dzięki odkrytemu przez Boltzmann'a związkowi z prawdopodobieństwem stanu, jest rozstrzygającą wielkością w układzie termostatycznym. O gęstości promieniowania ρ wiadomo było, że powinna ona wyrażać się wzorem

$$\rho = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$$

uwarunkowanym prawem przesunięcia Wiena (skąd wynika prawo Stefana-Boltzmann'a dla całości promieniowania) a ponadto dwa przypadki graniczne: dla wysokich temperatur — prawo Rayleigha (proporcjonalność do temperatury T), oraz dla niskich temperatur — prawo Wiena (proporcjonalność do $e^{-\frac{a}{T}}$).

Pierwszy krok Plancka polegał na tym, by badanie promieniowania zastąpić analizą układu jednakowych oscylatorów harmonicznycch o częstości ν , które pozostają z promieniowaniem w równowadze statystycznej. Ścisły rachunek elektrodynamiczny daje dla stosunku gęstości

promieniowania ρ do średniej energii u wartość oscylatora równą $8\pi\nu^2/c^3$. Następnie Planck oblicza drugą pochodną entropii S względem energii U , którą wyrażam w sposób skrócony wzorem

$$\frac{d^2S}{dU^2} = -k\gamma \quad (1)$$

gdzie k jest stałą gazową liczoną na cząsteczkę gazu doskonałego. Dalej będę używał zamiast temperatury T wielkości $\beta = \frac{1}{kT}$. Stąd mamy proste rozważanie termodynamiczne (patrz uzupełnienie A)

$$\gamma = - \left(\frac{d\mu}{d\beta} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Zapis ten ma tę zaletę, że w obu wymienionych przypadkach granicznych energia u , odnosząca się do oscylatora, jest szczególnie prostą funkcją β , tak że można od razu napisać wyrażenie (2). Mamy dla

$$\begin{array}{l} T \text{ wysoka (Rayleigh)} \\ T \text{ niska (Wien)} \end{array} \quad u = \begin{cases} \beta^{-1} \\ u_0 e^{-\varepsilon_0 \beta} \end{cases} \quad \frac{du}{d\beta} = \begin{cases} -u^2 \\ -\varepsilon_0 u \end{cases}. \quad (3)$$

Planck dokonuje teraz śmiałego posunięcia [1]: wstawia między te dwa przypadki sumę $(-u^2 - \varepsilon_0 u)$, która w przypadkach granicznych większych lub mniejszych gęstości promieniowania przyjmuje odpowiednie wartości. Całkując z uwzględnieniem prawa przesunięcia Wiena dla średniej energii oscylatora (uzupełnienie B), otrzymujemy

$$u = \frac{\varepsilon_0}{e^{\beta\varepsilon_0} - 1}, \quad \varepsilon_0 = h\nu, \quad (4)$$

gdzie h jest stałą. Przy pomocy podanego czynnika transformacji dojdziemy do wzoru Plancka dla gęstości promieniowania ρ .

Naturalnie, nie możemy tego uważać za pochodną, ponieważ wielkość γ^{-1} została dowolnie dobrana do interpolacji.

W drugiej pracy interpretuje Planck energię oscylatora (4) jako średnią wartość rozkładu Boltzmann'a skończonej ilości kwantów energii $\varepsilon_n = \varepsilon_0 n = h\nu n$, ($n = 0, 1, 2, \dots$).

$$\mu = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n e^{-\beta\varepsilon_n}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta\varepsilon_n}} = - \frac{d}{d\beta} \log \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\beta\varepsilon_n} = \frac{\varepsilon_0}{e^{\beta\varepsilon_0} - 1}.$$

Tylko ten, kto tak jak ja wychował się na tradycjach klasycyzmu, może w pełni docenić śmiałość tej idei. Sam Planck skłonny był uważać rozkład energii dla skończonych kwantów nie za właściwość samego

promieniowania, lecz jego zmiennego oddziaływania z oscylatorami. Tutaj wkroczył Einstein. Odkrył on proste fizyczne znaczenie wielkości γ^{-1} użytej przez Plancka do interpolacji, która to wielkość bezpośrednio prowadzi do pojęcia niezależnych kwantów światła, a ponadto sama usprawiedliwia taką, a nie inną interpolację. Einstein opiera swoje rozważania na Boltzmannowskim stosunku pomiędzy entropią S i prawdopodobieństwem P .

$$S = k \log P. \quad (5)$$

Ponieważ wzór (5) bynajmniej nie był w owym czasie ogólnie przyjęty, daje Planck prosty dowód, który i dzisiaj jeszcze wydaje mi się najlepszy. Następujące rozważania wiążą się ściśle z Einsteinowską teorią drgań i ruchów Browna.

Główna myśl polegała na tym, by wzór (5) odwrócić, przyjmując prawdopodobieństwo jako funkcję entropii

$$P = e^{S/k} \quad (6)$$

i wykorzystać odpowiednie właściwości termodynamiczne funkcji S .

Wyobraźmy sobie pewien układ, znajdujący się w równowadze termicznej, podzielony na małe, jednakowe części. Wtedy energia E w jednej części wobec statystycznego charakteru ciepła nie będzie równa energii $\bar{E} = U$, przypadającej średnio na każdą część, lecz powstaną fluktuacje $\Delta E = E - \bar{E}$. Entropię badanej części można (przy stałej objętości) uważać za funkcję E i rozwinąć względem potęg ΔE ; łączna entropia nie posiada wówczas żadnego liniowego członu, ponieważ dla adiabatycznie izolowanego układu suma rozciągnięta na wszystkie części równa się $\sum \Delta E = 0$. Mamy więc z uwagi na skrót (1)

$$\sum S = \text{const} - \frac{1}{2} k \gamma \sum (\Delta E)^2 + \dots$$

A więc z (6) otrzymuje się w przybliżeniu

$$P = e^{S/k} = P_0 e^{-\frac{1}{2} \gamma \sum (\Delta E)^2}; \quad (7)$$

stąd widzimy w myśl (2) (uzupełnienie C), że

$$\overline{(\Delta E)^2} = \frac{1}{\gamma} = - \frac{dU}{d\beta}. \quad (8)$$

Jest to podstawowy wzór na fluktuacje energii w takiej postaci, jak w einsteinowskiej teorii ruchów Browna. Jeżeli rozpatrzemy np. jakiś materialny układ o stałej objętości, to otrzymamy znane prawo Einsteina

$$\overline{(\Delta E)^2} = k T^2 c_v$$

gdzie $c_v = dU/dT$ jest ciepłem właściwym.

W przypadku promieniowania, E jest całą energią promieniowania o częstości ν , znajdującą się w małym jednostkowym elemencie objętości, tak więc średnio energia ta równa jest ρ . Wygodnie jest zamiast tego wziąć wielkość $u = \rho c^3 / 8\pi\nu^2$, nie zwracając uwagi na fakt, że u określamy jako średnią energię oscylatora, znajdującego się w równowadze z promieniowaniem. Zresztą okazało się później, że wielkość u ma znaczenie dla samego promieniowania; można mianowicie zrobić analizę Fourierską pola promieniowania i wtedy każda składowa rozwinięcia Fourierskiego odpowiada jednemu oscylatorowi, zaś $8\pi\nu^2/c^3$ jest liczbą oscylatorów promieniowania w jednostce objętości dla przedziału częstości 1, a u — energią jednego z tych oscylatorów.

Einstein rozpatruje teraz wienowski przypadek niskich temperatur, gdzie energia promieniowania wyrażona miarą u dana jest wzorem:

$$u = u_0 e^{-\varepsilon_0 \beta}.$$

Wówczas z (8) wynika

$$\overline{(\Delta E)^2} = \varepsilon_0 u \quad (T \text{ niskie}). \quad (9)$$

Jeżeli przyjmiemy E jako n — tą wielokrotność małego „kwantu energii“

$$E = n\varepsilon_0, \quad (10)$$

to otrzymamy $u = \varepsilon_0 \bar{n}$ gdzie \bar{n} jest średnią liczbą kwantów, zaś dla średniego kwadratu fluktuacji n :

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n} \quad (T \text{ niskie}). \quad (11)$$

Wzór ten oznacza zgodnie ze znanymi prawami statystycznymi, że energia promieniowania zachowuje się w taki sposób, jak gdyby składała się z niezależnych części składowych (wielkości $\varepsilon_0 = h\nu$).

Na tym polega główna myśl teoretycznej części pracy Einsteina.

To samo rozważanie przeprowadzone jest w granicznym (Rayleighowskim) przypadku wysokich temperatur, gdzie $u = \beta^{-1}$. Mamy wtedy:

$$\overline{(\Delta E)^2} = u^2 \quad (T \text{ wysokie}) \quad (12)$$

lub

$$\overline{(\Delta n)^2} = \bar{n}^2 \quad (T \text{ wysokie}). \quad (13)$$

Interpolacja Plancka przez dodanie odpowiednich wartości w obu przypadkach granicznych usprawiedliwiona jest tym, że średnie kwadraty wahań są addytywne, jeżeli zachodzą na skutek niezależnych działań.

Czym więc są oba te procesy? Jeden z nich Einstein objaśnił w ten sposób: dla niskich temperatur jak również i małych gęstości promieniowania, promieniowanie zachowuje się jak gaz doskonały. Ale czym jest ten drugi proces, który występuje przy wysokich temperaturach? H. A. Lorentz wykazał, że statystyczna mieszanina płaskich fal o do-

wolnych amplitudach i fazach prowadzi bezpośrednio do wyrażenia (13) dla fluktuacji energii.

Widzimy więc, że już w pracy Einsteina *implicite* zawiera się w zupełności dualizm falowo-cząstkowy. Przy małych gęstościach energii pojawiają się cząstki, których liczba waha się w myśl (11); dla dużych gęstości obowiązuje (13), a dla średnich gęstości mamy

$$(\overline{\Delta n})^2 = \overline{n} + \overline{n}^2 = \overline{n}(\overline{n} + 1). \quad (14)$$

Pojawia się więc tutaj ta szczególna właściwość efektu kwantowego, która polega na tym, że otrzymujemy prawidłowe wzory kwantowe z wzorów klasycznych, jeśli zamienimy n^2 przez $n(n+1)$.

Jak przyjęto tę ideę? Odpowiem na to na podstawie własnych przeżyć. Ani w Getyndze, o ile sobie przypominam, nie dowiedziałem się wiele o kwantach, ani w Cambridge, gdzie wiosną i latem 1906 r. słuchałem w ciągu kilku miesięcy wykładów J. J. Thomsona i Larmora, i przechodziłem doświadczalny kurs w Cavendish Laboratory. Dopiero gdy jesienią 1906 r. udałem się we Wrocławiu do Lummera i Pringsheima, znalazłem się we właściwej „kwantowej” atmosferze. Obaj oni przyczynili się w sposób istotny do eksperymentalnego zbadania promieniowania ciała doskonale czarnego. Chociaż wzór Plancka był podówczas ośrodkiem dyskusji, fizycy skłonni byli uważać kwantową koncepcję energii oscylatora, podaną przez Plancka, jedynie za tymczasową hipotezę roboczą, zaś Einsteinowskich kwantów światła w ogóle nie brano poważnie. Lummer był przecież też wielkim specjalistą optyki falowej — przypomnijmy sobie choćby płytkę Lummera — wielu trzeba było zatem wówczas dowodów na to, by ktoś, kto codziennie obserwował interferencję, uwierzył w odrodzenie teorii korpuskularnej. Próbowano prawo $E = h\nu$ pojmować klasycznie. Ja sam także mam na sumieniu takie przestępstwo i chcę je tu przedstawić dla żartu. Proszę sobie wyobrazić jabłoń, dla której długość l szypułki jabłka ubywa odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu wysokości H ponad ziemią; wtedy mamy $\nu \sim \frac{1}{\sqrt{l}} \sim H$. Kiedy

więc potrząsamy drzewo z określoną częstością, jabłka na określonej wysokości wpadają w rezonans, spadają w dół i dobiegają do ziemi z energią kinetyczną, która jest proporcjonalna do wysokości spadku, a zatem do częstości potrząsania: *Voilà!* Dziś wydaje nam się to trochę naiwne, by nie powiedzieć — dziecinne. Ale na moje usprawiedliwienie muszę przytoczyć fakt, że sam Max Planck na jakimś wykładzie podał ten przykład. W jaki sposób o nim się dowiedział, tego do dziś nie wiem.

Na początku 1907 r. pojawił się drugi podstawowy przyczynek Einsteina do teorii kwantów — teoria ciepła właściwego [4]. Wykazała ona jasno, że nie chodzi tu — jak sądził Planck — o wymianę energii

między cząstkami i promieniowaniem, ale że mamy tu do czynienia z nową, najzupełniej ogólną zasadą, która obejmuje mechanikę i elektrodynamikę. Nie mogę sobie dziś dokładnie przypomnieć, w jaki sposób przyswoilem sobie stopniowo tę nową interpretację. W tym czasie poznałem osobiście Einsteina i rozmowy z nim więcej mnie nauczyły niż jego prace. Przyjmując Einsteinowski punkt widzenia, ogłosiłem wspólnie z moim przyjacielem Teodorem v. Kàrmànem pracę o ciepłe właściwym siatek krystalicznych. Oparliśmy się na rozważaniach Einsteina uwzględniając jednak widma drgań, w czym zresztą Debye uprzedził nas o parę tygodni. Nastąpiło to jednak dopiero w 1912 r. W następnym roku dojrzał plan Akademii Berlińskiej, by Einsteina, który wówczas był profesorem Politechniki w Zurychu, powołać do Berlina. Dla poparcia tego planu czterej najznakomitsi fizycy niemieccy — Planck, Nernst, Rubens i Warburg — złożyli podanie do Pruskiego Ministerstwa Oświaty, w którym przedstawiali i oceniali osiągnięcia Einsteina. Znajduje się tam zdumiewający ustęp, który mogę podać bez obawy niedyskrecji, ponieważ jest on wydrukowany w pięknej książce Karola Seeliga — „Albert Einstein i Szwajcaria“. Czytamy tam: „Reasumując można powiedzieć, że wśród wielkich problemów, w które współczesna fizyka obfituje, nie ma chyba takiego, w którym Einstein nie odegrał znaczącej roli. Jeżeli nawet w niektórych spekulacjach ponosiła go zbyt daleko fantazja, jak na przykład w hipotezie kwantów światła, nie należy mu tego brać za złe. Bez ryzyka bowiem nie można być nowatorem nawet w najbardziej ścisłej nauce o przyrodzie, jaką jest fizyka“.

Widzimy stąd, jak wielki sceptycyzm panował wówczas wśród fizyków w stosunku do pojęcia kwantu światła. Nie zamierzam podawać tu stopniowych przemian w tym poglądzie. Wspomnę jeszcze tylko o paru ważnych wydarzeniach w fizyce. Wymieńmy zatem najpierw odkrycie J. J. Thomsona w 1907 r., że liczba atomów zjonizowanych przez promienie Roentgena maleje wraz z oddalaniem źródła promieni, chociaż do poszczególnego aktu jonizacji potrzebna jest taka sama energia. J. J. Thomson wnioskuje stąd, że promieniowanie nie składa się z jednakowych fal kulistych, ale że raczej zachowuje się jak deszcz cząstek. Później (1916 r.) Einstein ugruntował statystycznie tę ideę „promieniowania igiełkowego“ obliczając pęd, który otrzymuje i oddaje przy absorpcji i emisji cząstka poruszająca się w polu promieniowania. Warunek, by normalne ruchy Browna nie były przez to zakłócone jest wtedy spełniony, gdy promieniowanie zachowuje się jak gaz złożony z cząstek o energii $h\nu$ i pędzie $h\nu/c$.

W tym czasie (1913 r.) ukazały się prace Bohra z kwantowej teorii elektronów w atomach i o pochodzeniu widma. Odtąd stało się już rzeczą

pewną, że fizyką przyszłości będzie rządzić hipoteza kwantów. W toku dyskusji o warunkach kwantowania i regułach wyboru, które ciągle wynajdywano chcąc opisać ruchy elektronów, prawie całkowicie zapomniano o kwantowej strukturze światła. Dopiero w 1922 r. sprawa ta stała się znowu aktualna dzięki odkryciu zjawiska Comptona i objaśnieniu tego zjawiska jako zderzeń fotonów z elektronami. Interpretacja ta polega na przeprowadzeniu bilansu energii i pędu, przy czym zastosowano jednocześnie oba odkrycia Einsteina: wzory relatywistyczne dla elektronu

$$E=mc^2, \quad p=mc, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

i wzór kwantowy dla fotonu

$$E=h\nu, \quad p=h\nu/c.$$

Do tej dziedziny należy praca Smekala, który w następnym roku (1923) zwrócił uwagę na fakt, iż według bilansu energetycznego dla jakiegoś układu, składającego się z jednego atomu (lub drobiny) i jednego fotonu, można oczekiwać nowego rodzaju rozproszenia świetlnego ze zmianą częstości. Dało to okazję do zrewidowania teorii rozproszenia ze stanowiska kwantowego. Dokonali tego Ladenburg, Kramers i Heisenberg. Był to ważny krok na długiej drodze rozwoju, który ostatecznie doprowadził do mechaniki kwantowej. Przepowiedziane przez Smekala zjawisko, nazwane obecnie zjawiskiem Ramana, wykrył Raman dopiero w 1928 r. dla cząsteczek, a Landsberg i Mandelstam — dla kryształów.

Co się zaś tyczy wzoru dla promieniowania, to Einstein sam wyprowadził go w 1916 r. z założeń Bohrowskich stanów stacjonarnych [6], traktując emisję i absorpcję kwantu światła na podobieństwo rozpadu radioaktywnego. A_{nm} — symetria prawdopodobieństwa przejścia pomiędzy dwoma stanami n i m ($A_{nm}=A_{mn}$) była ważnym drogowskazem na drodze do mechaniki kwantowej. Wyprowadzenie wzoru dla promieniowania z prawdopodobieństwa przejścia odpowiada w teorii gazów zastosowaniu wzoru Boltzmann'a do zderzenia cząsteczek. Można też uzyskać prawa równowagi gazu nie rozpatrując procesów zderzeń, tylko określając stan najprawdopodobniejszy. Czy nie byłoby możliwe otrzymanie również wzoru promieniowania jako energetycznego równania stanu fotonowego gazu? Początkowe badania fluktuacji przez Einsteina idą właśnie w tym kierunku, ale doprowadzają dla małych gęstości promieniowania do wzoru (11), który jest charakterystyczny dla gazu, gdy w ogólności obowiązuje skomplikowany wzór (14). Sprawa ta przez długi czas zajmowała i niepokoiła Einsteina i kiedy w 1924 r. Hindus Bose znalazł rozwiązanie, przyjmując statystycznie do obliczenia zasadę nie-

rozdzielności fotonów, Einstein podjął natychmiast tę myśl i rozciągnął ją na cząstki materialne [7]. Wiedział on już wtedy o śmiałej koncepcji mechaniki falowej de Broglie'a (ogłoszonej w krótkich publikacjach od 1923 r., zebranych w jego sławnej dysertacji doktorskiej z 1924). Statystyka Bose-Einsteina jest ostatnim przyczynkiem Einsteina do teorii kwantów. Na tym kończę swój przegląd historyczny. Odtąd postawa Einsteina w stosunku do dalszego rozwoju przez niego samego stworzonych zasad teorii kwantów staje się coraz bardziej krytyczna i sceptyczna.

On sam stworzył paradoksalny dualizm fal i cząstek. Głównym zadaniem fizyki teoretycznej było usunięcie tej pozornej sprzeczności. Starano się tego dokonać z jednej strony przez rozwinięcie teorii Bohra, skąd powstała mechanika macierzy. Podwaliny jej położył Heisenberg, który rozwinął ją wspólnie z Jordanem i ze mną, jak również — niezależnie od nas — Dirac. Z drugiej zaś strony z założeń de Broglie'a powstała mechanika falowa, której twórcą był Schrödinger. Obie metody uznano wkrótce za różne przedstawienia tej samej teorii.

Formalizm nowej teorii był już szeroko przyjęty i ugruntowany, zanim udało się znaleźć jego rozsądną fizyczną interpretację. Nowa teoria kwantów różni się od teorii klasycznej tym, że rezygnuje z dokładnego wyznaczenia przyszłych stanów fizycznych; daje ona tylko prawdopodobieństwo ich występowania. Ogromna większość fizyków, w szczególności eksperymentatorów, przyjęła chętnie to statystyczne ujęcie, ponieważ odpowiadało ono dokładnie sytuacji doświadczalnej w zakresie fizyki atomowej.

Jednakże Einsteina interpretacja ta nie zadowala i wciąż próbuje ją obalić. Przyjmując interpretację kwadratów funkcji falowej jako prawdopodobieństwa dochodzimy z powrotem do rozważań Einsteinowskich. Jego to bowiem było myśłą, że średnie zgęszczenia fotonów w jednym promieniu świetlnym powinny odpowiadać zgęszczeniom energii fal elektromagnetycznych, które opisują ten promień. Jest to ta sama myśl, dziś rozpowszechniona i stosowana, którą wyraziłem w r. 1927 chcąc zinterpretować funkcję falową Schrödingera. Pozorna sprzeczność, która powstaje przez jednoczesne zastosowanie pojęcia fali i cząstki, została wyjaśniona przez Heisenberga w jego zasadzie nieoznaczoności. Wreszcie pojęcie komplementarności, wprowadzone przez Nielsa Bohra, dało całej mechanice kwantowej teoriopoznawcze podstawy.

Sam foton jest w istocie szczególną cząstką, która nie ma masy i porusza się stale z jednakową prędkością. Nie należy on do właściwej mechaniki kwantowej, ale raczej do elektrodynamiki kwantowej. Już w pierwszych pracach Heisenberga, Jordana i moich własnych kwantowano pole elektrodynamiczne przez ustalenie wymiennych stosunków

między składowymi pola. Celem wyprowadzenia wzoru (14) dla promieniowania ciała doskonale czarnego użyto interferencji skwantowanych fal, przy czym oba wyrazy $n+n^2$ pojawiły się automatycznie. Z rozważań tych powstała dzisiejsza wyrafinowana elektrodynamika kwantowa, rozwinięta przez Tomonagę, Schwingera, Feynmana i innych.

Ale ani filozofia Bohra, ani sukcesy zwykłej mechaniki kwantowej i zdumiewająca ścisłość wyników osiągniętych przy pomocy elektrodynamiki kwantowej nie skłoniły Einsteina do uznania tych teorii. Nie zaprzecza on ich użyteczności, uważa je jednak za niepełne i tymczasowe. Sądzi, że z czasem powinny być zastąpione przez teorie lepsze i pełniejsze.

Stanowisko Einsteina opiera się na jego światopoglądzie filozoficznym. Pozwolę sobie przytoczyć dwa ustępy z listów, które otrzymałem od niego, opublikowane za jego zgodą w mojej książce „Natural Philosophy of Cause and Chance” (Clarendon Press, Oxford 1949). 7 listopada 1944 r. pisał:

„W naszych naukowych dociekaniach doszliśmy obaj do biegunowo przeciwnych wniosków. Ty wierzysz, że przyrodą rządzą prawa gry w kości, ja natomiast wierzę w pełną prawidłowość obiektywnego świata, który staram się poznać metodami spekulatywnymi. Mam nadzieję, że uda się komuś pójść bardziej realistyczną drogą lub znaleźć bardziej uchwytną podstawę dla takiego ujęcia niż to, które było moim udziałem. Pomimo wielkiego początkowego powodzenia teorii kwantów nie mogę przecież uwierzyć, że przyrodą rządzą zasady gry w kości“.

A oto ustęp z drugiego listu, z 3 grudnia 1947 r.:

„Nie mogę Ci uzasadnić mojej postawy w ten sposób, abyś mógł jakkolwiek uznać ją za rozsądną. Przyznaję, że w interpretacji statystycznej, której konieczność w istniejącym formalizmie sam przecież pierwszy wykazałeś, zawiera się część prawdy. Nie mogę w to jednak całkowicie uwierzyć, ponieważ interpretacja ta jest w sprzeczności z zasadą, że fizyka powinna przedstawiać rzeczywistość w czasie i przestrzeni bez niewyjaśnionych działań na odległość... Jestem głęboko przekonany, że zostanie stworzona wreszcie jakaś teoria, w której wszystkie zjawiska w przyrodzie nie będą mierzone prawdopodobieństwami, lecz będą realnymi rzeczywistościami, co do niedawna zdawało się rzeczą samą przez się zrozumiałą. Na uzasadnienie tego przekonania nie mogę podać żadnych logicznych przesłanek, a tylko postawić mój mały palec na świadka, a więc żaden autorytet, mogący wzbudzić jakikolwiek respekt poza mną“.

W mej korespondencji z Einsteinem sprzed roku znajduję znowu tę samą myśl, tj. odrzucenie prawdopodobieństwa jako właściwej podstawy teorii fizycznej. Myśl tę Einstein rozwinął na jednym przykładzie. Zastanawiając się nad nim, zwątpiłem, czy mechanika klasyczna może przy-

jąc założenia deterministyczne. Przekonałem się wtedy, że determinizm mechaniczny opiera się na założeniu, które przeczy całemu sposobowi myślenia dzisiejszej fizyki, uzasadnionemu zresztą przez samego Einsteina. Mechanika deterministyczna opiera się na postulatcie, że wszystkie założenia, których nie można sprawdzić doświadczalnie, nie mają sensu. Artykuł w tej sprawie opublikowałem w „*Physikalische Blätter*“. Okazuje się, że klasyczna mechanika może też przyjąć tylko założenia prawdopodobieństwa.

Zarzut więc Einsteina przeciw statystycznemu ujęciu mechaniki kwantowej wydaje mi się bezpodstawny. Z przytoczonych listów i późniejszej korespondencji wynika, że nie tyle sprawa determinizmu powoduje odrzucenie przez Einsteina dzisiejszej fizyki kwantowej, co jego wiara w obiektywną rzeczywistość zjawisk fizycznych, niezależnych od obserwatora. Jest to znacznie poważniejszy problem, którego nie chcę tu poruszać. Na innym miejscu wykazałem, że można jednak dyskutować z Einsteinem, gdy analizujemy sens założeń realności przedmiotów fizycznych, stosując przy tym matematyczne pojęcie niezmienności względem transformacji.

Einstein nie zadowolili się krytyką statystycznej interpretacji mechaniki kwantowej, lecz ustawicznie starał się stworzyć inne podstawy fizyki. Punktem wyjścia była dla niego ogólna teoria względności, którą starał się uogólnić mając nadzieję znaleźć w końcu wytłumaczenie zjawisk kwantowych i zderzeń cząstek elementarnych. Nie osiągnął on jednak żadnych pozytywnych wyników i fizycy mało skorzystali z jego wielkich i trudnych prac.

Dzięki temu Einstein znalazł się w odosobnieniu, które byłoby tragiczne, gdyby nie pogodne, optymistyczne usposobienie chroniące go od zgorzknienia. Był on zawsze człowiekiem chodzącym własnymi drogami. Szukał uznania dla własnego zadowolenia, a nie dla materialnej korzyści czy sławy. Tragedia jego życia jest tragedią całej nauki współczesnej, którą wykorzystuje się dla celów walki politycznej między narodami. Warto tu przytoczyć fragment listu Einsteina do amerykańskiego wydawcy czasopisma *The Reporter*:

„Zapytywał mnie Pan, co myślę o Pańskich artykułach na temat sytuacji naukowców w Ameryce. Odpowiedź na to pytanie sformułuję krótko, nie analizując problemu: gdybym był znów młodym człowiekiem i miał obrać sobie jakiś zawód, to nie starałbym się być uczonec lub nauczycielem. Wolałbym być blacharzem lub domokrążcą, mając nadzieję, że w ten sposób będę choć w małym stopniu niezależny, co w pełni w dzisiejszych czasach nie jest osiągalne“.

Jest to ta sama myśl, którą polecał mi w radzie udzielanej młodym fizykom, w stosunkowo beztrudnych czasach przed 40 laty. Jest to chyba

najogłędniejsza a równocześnie najostrzejsza forma potępienia stosunków panujących w nauce współczesnej, która nie służy już sprawom ducha, ale potęgom świata. Jednak nie należy to do naszego tematu.

Ocena Einsteina jako badacza i myśliciela byłaby jednak niekompletna, gdyby się nie wspomniało o Einsteinie - człowieku. Zakończę fragmentem jego listu do mnie:

„Odczucie jak być powinno a jak być nie powinno rośnie i wiednie jak drzewo, a żadne nawożenie nie wiele może tu zdziałać. Jednostce pozostaje możliwość dawania dobrego przykładu i odważnego zajmowania etycznej postawy wobec cynizmu. Zawsze do tego dążyłem i starałem się tak postępować — ze zmiennym powodzeniem“.

Są to słowa rezygnacji człowieka, który również w stosunkach ludzkich wierzył w predestynację z uwzględnieniem jednak działania etycznej osobowości. Jest to godny uwagi sposób zachowania wolności moralnej, jednakże z filozoficznego punktu widzenia stanowisko to może podlegać krytyce. Wydaje mi się, że do filozofii fizyki Einsteina należy również odnieść się krytycznie. Nie mąciło to naszej przyjaźni; nie chodzi bowiem o doktryny, lecz o czystość i uczciwość myśli i uczuć. Czcimy Einsteina, gdyż jest on w tym dla nas wzorem i mistrzem.

Uzupełnienia

A. Dla każdego układu termodynamicznego obowiązuje przy stałej objętości

$$dS = \frac{dU}{T} = k\beta dU, \quad (1)$$

stąd

$$-k\gamma = \frac{d^2S}{dU^2} = \frac{d}{dU}(k\beta) = k \frac{d\beta}{dU}, \quad (2)$$

$$\gamma = - \left(\frac{dU}{d\beta} \right)^{-1}$$

B. Przyjmując założenie Plancka:

$$\frac{du}{d\beta} = -u^2 - \varepsilon_0 u, \quad (3)$$

z prostego całkowania, przy warunkach granicznych, że dla $\beta = 0$ wynika prawo Rayleigha $u = \beta^{-1}$ mamy:

$$u = \frac{\varepsilon_0}{e^{\beta\varepsilon_0} - 1}. \quad (4)$$

Z prawa przesunięcia Wiena $\varrho = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right)$ wypływa dla $u = \varrho c^3 / 8\pi\nu^2$

$$u = \nu F(\nu\beta), \quad (5)$$

więc musi być

$$\varepsilon_0 = h\nu. \quad (6)$$

C. (7) jest gaussowskim rozkładem zmiennej $\Delta E = x$. Jeśli łączne prawdopodobieństwo unormujemy do 1

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P dx = P_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}\gamma x^2} dx = P_0 \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} = 1, \quad (7)$$

to musi być $P_0 = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}}$, tak że jest

$$P(x) = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\gamma x^2}. \quad (8)$$

Stąd otrzymujemy średnią wartość

$$\begin{aligned} \overline{\Delta E} = \bar{x} &= \int_{-\infty}^{+\infty} x P(x) dx = 0, \\ (\overline{\Delta E})^2 = \bar{x}^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 P(x) dx = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 e^{-\frac{\gamma}{2}x^2} dx = \frac{1}{\gamma}. \end{aligned} \quad (9)$$

Literatura

1. M. Planck, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2, 202 (1900).
2. M. Planck, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges., 2, 237 (1900).
3. A. Einstein, Ann. Phys., 17, 132 (1905); Ann. Phys., 20, 199, (1906); Phys. Z., 10, 185, 817 (1909).
4. A. Einstein, Ann. Phys., 22, 180 (1907).
5. A. Einstein, Mitt. Phys. Ges. Zürich, nr. 18 (1916); Phys. Z., 18, 121 (1917).
6. A. Einstein, Ber. Deutsch. Phys. Ges., 18, 318 (1916).
7. A. Einstein, Sitzgsber. Preuss. Akad. Berlin, 261 (1924); 3 i 18 (1925).

Przemysław Zieliński
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytetu Warszawskiego

Metody statystyczne przy interpretacji pomiarów

Wstęp

Gdy na podstawie wyników pomiarów wnioskujemy o wartościach wielkości fizycznych, to dokonywamy zawsze analizy statystycznej. Analiza może być jednak bardzo uproszczona: często ograniczamy się do korzystania z elementarnych wzorów rachunku błędów. Stosowanie dokładniejszych metod statystycznych pozwala lepiej określić daną wielkość. Często jednak skuteczniejsze i łatwiejsze jest wykonanie dalszych pomiarów, które zaostrza naszą wiedzę o szukanej wielkości. Z tym związany jest fakt, że liczne metody statystyczne nie są stosowane powszechnie przez fizyków.

Są jednak przypadki, kiedy musimy się zadowolić daną ilością pomiarów. Jeżeli zależy nam przy tym na uzyskaniu możliwie zupełnych informacji, które z materiału doświadczalnego można wydobyć, to musimy posłużyć się udoskonalonymi metodami statystycznymi. Sytuacja taka wytworzyła się na przykład w wielu ważnych zagadnieniach promieniowania kosmicznego, w szczególności w badaniach za pomocą emulsji jądrowych. Z niewielkiej ilości pomiarów, obarczonych przy tym często dużymi błędami statystycznymi i pomiarowymi, chcemy uzyskać maksimum informacji o właściwościach nowo poznawanej cząstki, np. o jej masie lub średnim czasie życia.

Celem niniejszego artykułu jest wskazanie kilku prostych zagadnień statystycznych. Są to rzeczy bardzo dobrze znane statystykom, zasługują jednak, wydaje się, na uwagę ogółu fizyków. Wybieram rzeczy szczególnie proste, ale podaję literaturę, w której znaleźć można dalsze zagadnienia. W artykule staram się wskazać tylko na niektóre fragmenty rozległej dziedziny, lecz mam nadzieję, że te wstępne uwagi będą pożyteczne.

Wyzyskanie wiedzy a priori za pomocą twierdzenia Bayesa

Niekiedy wyrażamy wątpliwości, czy otrzymana wartość wielkości jest bliska prawdziwej, mimo że poprawnie przeanalizowaliśmy materiał pomiarowy. Powiadamy na przykład, że otrzymaliśmy „zbyt dużą“ war-

tość. Tego rodzaju sądy są wyrazem naszej wiedzy o przedmiocie, zaczerpniętej z innych źródeł, niezależnie od wykonanej aktualnie serii pomiarów. Innymi słowy, na nasz sąd o wielkości fizycznej wpływa nie tylko aktualny rezultat pomiarowy, lecz również wiedza *a priori*. W jaki sposób ująć to ilościowo?

Przypomnę kilka określeń i twierdzeń [1, 2, 3].

Iloczynem zdarzeń A i B nazywamy zdarzenie C , polegające na tym, że zachodzi A i zachodzi B . Oznaczamy je przez $A \cdot B$.

Sumą zdarzeń A i B nazywamy zdarzenie D , polegające na tym, że zachodzi A lub B . Oznaczamy sumę przez $A+B$.

Prawdopodobieństwem warunkowym zdarzenia A ze względu na B nazywamy prawdopodobieństwo A przy założeniu, że zaszło B . Oznaczamy je przez $P(A|B)$.

Zdarzenia A i B nazywamy wyłączającymi się, jeżeli iloczyn ich jest zdarzeniem niemożliwym. Zapisujemy to w postaci $A \cdot B=0$.

Zdarzenia A i B nazywamy (stochastycznie) niezależnymi, jeżeli przy założeniu, że zaszło jedno z nich, prawdopodobieństwo drugiego nie ulega zmianie: $P(B|A)=P(B)$ lub $P(A|B)=P(A)$ (albo jeżeli $P(A)=0$ lub $P(B)=0$).

Twierdzenie.

$$P(B|A) = \frac{P(A \cdot B)}{P(A)}. \quad (1)$$

O słuszności tego twierdzenia (podawanego niekiedy za definicję prawdopodobieństwa warunkowego) można się natychmiast przekonać intuicyjnie, stosując klasyczną definicję prawdopodobieństwa Laplace'a

$$\left(\text{prawdopodobieństwo} = \frac{\text{ilość zdarzeń pomyślnych}}{\text{ilość zdarzeń możliwych}} \right).$$

Twierdzenie. Jeżeli zdarzenia A i B są niezależne, to

$$P(A \cdot B) = P(A) P(B). \quad (2)$$

Wynika to z poprzedniego twierdzenia i z definicji.

Twierdzenie Bayesa. Dane są wyłączające się zdarzenia A_1, A_2, \dots, A_n , które nazwiemy hipotezami, oraz zdarzenie B , realizujące się przez zajście jednej z hipotez. Z założenia B realizuje się na jednej z dróg A_1, A_2, \dots, A_n , to znaczy

$$P(B) = P(B|A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(B|A_1) + P(B|A_2) + \dots + P(B|A_n). \quad (3)$$

Ze wzoru (1) mamy:

$$P(A_i \cdot B) = P(B|A_i) P(A_i) \quad \text{oraz} \quad P(A_i \cdot B) = P(A_i|B) P(B)$$

i stąd

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) P(A_i)}{P(B)}. \quad (4)$$

Korzystając ze wzoru (3) otrzymujemy twierdzenie Bayesa:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(B|A_i) P(A_i)}. \quad (5)$$

Wzór ten określa prawdopodobieństwo danej hipotezy A_i *a posteriori*, tzn. po zajściu B , przez prawdopodobieństwa *a priori*, niezależnie od zajścia B , hipotez $A_1, A_2 \dots A_n$ oraz przez prawdopodobieństwa zajścia B przy założeniu, że zaszły odpowiednio $A_1, A_2 \dots A_n$. Jeżeli zatem znamy prawdopodobieństwa występujące z prawej strony wzoru (5), to przy założeniu, że zaszło B , możemy wyliczyć prawdopodobieństwo, że stało się to na drodze A_i . Z tego powodu twierdzenie Bayesa, które ma charakter ogólniejszy, można w szczególności nazwać — ze względu na zastosowania — twierdzeniem o sprawdzaniu hipotez. Twierdzenie to posłuży nam do uzasadnienia metody uwzględniania wiedzy *a priori*.

Interesuje nas wielkość fizyczna θ , na przykład średni czas życia określonych cząstek nietrwałych. Nie mierzymy jednak jej wprost, lecz za pośrednictwem pomiaru innej wielkości (lub zbioru wielkości) x ; w naszym przykładzie x jest długością toru w komorze. Wielkość x nie określa θ jednoznacznie. Znanе jest natomiast — zakładamy — prawdopodobieństwo dla danego θ , że x leży w przedziale $x, x+dx$. Nazwijmy gęstość prawdopodobieństwa w tym rozkładzie przez $T(x|\theta)$ (litera T przypomina, że jest to rozkład znany np. teoretycznie). W podanym przykładzie jest to — dla czasów życia odpowiadających długościom toru — rozkład Poissona

$$T(t|\tau) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad (6)$$

t — mierzony czas życia,

τ — średni czas życia.

Interesują nas jednak prawdopodobieństwa *a posteriori* wartości θ dla danego w doświadczeniu x , gdyż chcemy znaleźć z danych doświadczalnych najlepszą estymatę nieznaną prawdziwej wartości θ . Oznaczmy gęstość tego rozkładu przez $B(\theta|x)$ — (litera B wskaże nam, że otrzymamy tę gęstość z twierdzenia Bayesa).

Załóżmy dalej, że mamy wiedzę aprioryczną o częstości występowania — w danych warunkach fizycznych — wartości θ , opisaną rozkładem z gęstością $A(\theta)$ (litera A od słowa „abundance“). Możemy na przykład wiedzieć z pomiarów innych wielkości (ładunków, mas itd.), że mamy

do czynienia z dwoma rodzajami cząstek występującymi w określonej proporcji, a zatem że występują dwa średnie czasy życia w określonej proporcji, ale nie znamy wartości średnich czasów życia.

Wprowadźmy jeszcze rozkład wartości x , niezależny od wartości θ , którego gęstość oznaczmy przez $X(x)$.

Przenosząc wzory (1—5) na przypadek zmiennych o widmie ciągłym, z którym mamy tu do czynienia, będziemy mogli napisać wzór analogiczny do (4) dla gęstości prawdopodobieństw:

$$T(x|\theta) A(\theta) = B(\theta|x) X(x). \quad (7)$$

Dopiszmy odpowiednie różniczki:

$$T(x|\theta) dx \cdot A(\theta) d(\theta) = B(\theta|x) d\theta X(x) dx. \quad (8)$$

Całkując po całym obszarze zmienności θ — przy założeniu, że wszystkie prawdopodobieństwa są unormowane do jedności — otrzymujemy wzór:

$$X(x) = \int T(x|\theta) d\theta. \quad (9)$$

Podobnie, całkując po x , otrzymujemy:

$$A(\theta) = \int X(x) B(\theta|x) dx. \quad (10)$$

Łącząc (7) i (9) otrzymujemy analogiczny do (5) wzór, wyrażający twierdzenie Bayesa:

$$B(\theta|x) = \frac{A(\theta) T(x|\theta)}{\int A(\theta) T(x|\theta) d\theta}. \quad (11)$$

Jeżeli zatem mamy pewną wiedzę aprioryczną o parametrze θ , wyrażoną przez rozkład $A(\theta)$, to możemy za pomocą wzoru Bayesa uwzględnić ją przy estymacji wartości θ . Wiedza aprioryczna wywrze wpływ na estymację wartości θ z bezpośrednich wyników pomiarów, przesuwając w mniejszym lub większym stopniu wartość estymaty.

Przykład z teorii wielokrotnego kulombowskiego rozpraszania [7,8]

Mamy tor cząstki w wielopłytywowej komorze Wilsona i szukamy wartości $k = pv$ (p — pęd, v — prędkość), mierząc zrzutowane kąty odchylenia toru φ_i w kolejnych płytach, $i = 1, 2, \dots, n$. Estymowanym parametrem jest zatem wielkość k , a rolę wielkości x spełnia z b i ó r mierzonych kątów, który oznaczamy przez φ_i .

Z teorii rozpraszania kulombowskiego znamy (przybliżony) rozkład prawdopodobieństwa odchylenia się toru w płycie o kąt φ :

$$f(\varphi) d\varphi = N_1 k \exp\left(-\frac{k^2 \varphi^2}{A^2}\right) d\varphi, \quad (12)$$

A — wielkość, która zależy od rodzaju płyty, nie zależy od k ,

N_1 — czynnik normalizacyjny, nie zależy od φ i od k .

Stąd łatwo (wzór (2)) otrzymujemy rozkład:

$$T(\varphi_i|k) = f(\varphi_1)f(\varphi_2)\dots f(\varphi_n) = N_1^n k^n \exp\left(-\frac{k^2}{A^2} \sum_{i=1}^n \varphi_i^2\right) \quad (13)$$

(kąty kolejnych odchyień w płytach są niezależne).

Znamy także częstość występowania różnych energii w promieniowaniu kosmicznym, którą — w naszym zagadnieniu — potraktujemy jako wiedzę *a priori*:

$$A(k) = \begin{cases} 0 & k < k_0 \\ N_2 k^{-\gamma} & k \geq k_0, \end{cases} \quad (14)$$

N_2 — czynnik normalizacyjny,

γ — stała wyznaczona doświadczalnie (w wielu przypadkach $\gamma \cong 3$).

Na podstawie wzorów (13) i (14) otrzymujemy z twierdzenia Bayesa (11) rozkład

$$B(k|\varphi_i) = \begin{cases} 0 & k < k_0 \\ N_3 k^{n-\gamma} \exp\left(-\frac{k^2}{A^2} \sum_{i=1}^n \varphi_i^2\right) & k \geq k_0, \end{cases} \quad (15)$$

N_3 — czynnik normalizacyjny.

Jest to rozkład prawdopodobieństwa wielkości k dla danych w pomiarze wartości kątów odchylenia, przy czym uwzględniony jest rozkład *a priori*.

Jeżeli za estymatę prawdziwej wartości k przyjąć — jako jedną z możliwych w tym przypadku estymat — wartość najbardziej prawdopodobną $k_{n.p.}$ rozkładu k , to z przyrównania pochodnej funkcji (15) do zera otrzymamy

$$k_{est} = k_{n.p.} = \begin{cases} k_0 & n < \gamma \\ A \left(\frac{n-\gamma}{2}\right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^n \varphi_i^2\right)^{-1/2} & n > \gamma. \end{cases} \quad (16)$$

Łatwo spostrzec, że gdybyśmy nie uwzględniali wiedzy *a priori*, tj. rozkładu (14), to otrzymalibyśmy inną wartość jako estymatę.

Rozważaliśmy tutaj przypadek, w którym znamy całkowicie rozkład *a priori*. Ważne są jednak również przypadki, w których znamy rozkład *a priori* tylko częściowo. Przypuśćmy na przykład, że wyodrębniliśmy w kliszy jądrowej pewną ilość torów, przy czym zakładamy na podstawie pomiaru ładunku i masy, że wybrane tory należą do jednego rodzaju cząstek, lecz nie znamy jeszcze średniego czasu życia badanego mezonu. W tym przypadku możemy tylko powiedzieć, że rozkład *a priori*

dany jest przez funkcję Diraca (cząstki mają jedną, określoną wartość średniego czasu życia):

$$A(\tau) = \delta(\tau - \tau_0),$$

przy czym nie znamy wartości τ_0 .

Omówienie przypadków, w których rozkład *a priori* znany jest częściowo, znaleźć można w interesującym artykule [7]: M. Annis, W. Cheston, H. Primakoff, „On Statistical Estimation in Physics“, *Rev. Mod. Phys.* 25, 818 (1953). Inne zastosowania metody w rachunku błędów podane są w artykule Deminga i Birge'a [6].

Metoda największej wiarygodności Fishera

Przejdźmy teraz do innego zagadnienia, które ma w statystyce podstawowe znaczenie, a mianowicie do problemu znalezienia najlepszych estymat z danych wyników pomiaru.

Załóżmy, że znamy rozkład teoretyczny $\varphi(x)$ wielkości fizycznej X ; w rozkładzie występują jednak parametry $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_N$, których nie znamy. Przyjmijmy na razie dla prostoty, że rozkład zawiera tylko jeden parametr θ . Przypuśćmy teraz, że dokonaliśmy n pomiarów wielkości X , otrzymując wartości $x_1, x_2 \dots x_n$. Pytamy, jak znaleźć z wyników pomiarów najlepszą estymatę θ_{est} parametru θ , przy czym $\theta_{\text{est}} = \theta_{\text{est}}(x_1, x_2 \dots x_n)$.

Przykład. Prawo rozpadu nietrwałych cząstek jest dane przez rozkład Poissona

$$\varphi(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (17)$$

t — czas życia, τ — parametr (jedyne w rozkładzie Poissona): średni czas życia. Pomierzaliśmy dla n rozpadów czasu życia $t_1, t_2 \dots t_n$. Jak ocenić średni czas życia τ ?

Bardzo ogólną a równocześnie efektywną i prostą metodą znajdowania estymat jest metoda największej wiarygodności Fishera. Przedstawię jej zasadę.

Gęstość prawdopodobieństwa znalezienia wartości $x_1, x_2 \dots x_n$ w n niezależnych pomiarach dla rozkładu o gęstości $\varphi(x)$ dana jest wzorem

$$P(x_1, x_2 \dots x_n; \theta) = \varphi(x_1) \varphi(x_2) \dots \varphi(x_n), \quad (18)$$

przy czym w funkcji P wymieniałem w nawiasie, oprócz zmiennych x_1, x_2, \dots, x_n , także, po średniku, parametr θ .

Uważajmy teraz $x_1, x_2 \dots x_n$ za ustalone, a θ za zmienną i nazwijmy P funkcją wiarygodności. Metoda największej wiarygodności proponuje za estymatę θ_{est} przyjąć taką wartość θ , która przy ustalonych $x_1, x_2 \dots x_n$ maksymalizuje funkcję P .

Mamy zatem warunek

$$P = \text{maximum!}$$

lub równoważny warunek

$$L = \ln P = \text{maximum!} \quad (19)$$

Rozwiązując równanie

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (20)$$

otrzymujemy estymatę θ_{est} , którą nazywamy estymatą najbardziej wiarygodną. Niżej podam jej własności potwierdzające nazwę.

Przykład: Estymata najbardziej wiarygodna parametru w rozkładzie Poissona:

Rozkład Poissona (17) zawiera jeden parametr τ . Celem znalezienia estymaty utwórzmy funkcję wiarygodności

$$P(t_1, t_2 \dots t_n; \tau) = \varphi(t_1) \varphi(t_2) \dots \varphi(t_n) = \frac{1}{\tau^n} \exp\left(-\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n t_i\right) \quad (21)$$

oraz

$$L = \ln P = -n \ln \tau - \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n t_i.$$

Pochodną

$$\frac{\partial L}{\partial \tau} = -\frac{n}{\tau} + \frac{1}{\tau^2} \sum_{i=1}^n t_i$$

przyrównujemy do zera:

$$-\frac{n}{\tau} + \frac{1}{\tau^2} \sum_{i=1}^n t_i = 0.$$

Otrzymujemy estymatę najbardziej wiarygodną

$$\tau_{\text{est}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i. \quad (22)$$

A zatem estymatą najbardziej wiarygodną parametru w rozkładzie Poissona jest średnia arytmetyczna wartości zmierzonych. Ten sam wynik otrzymujemy dla rozkładu Poissona w postaci ogólnej:

$$\varphi(m) = \frac{\mu^m}{m!} e^{-\mu}, \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (23)$$

Analogicznie postępujemy w przypadku występowania kilku parametrów w rozkładzie. Rozwiązania równań

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0 \dots \quad \frac{\partial L}{\partial \theta_N} = 0 \quad (24)$$

określają estymaty najbardziej wiarygodne.

Jakie ogólne warunki powinny spełniać estymaty?

Przede wszystkim żądamy, aby estymata była zgodna, to znaczy, żeby przy ilości pomiarów dążących do nieskończoności jej średnia wartość dążyła stochastycznie do θ :

$$\overline{\theta_{\text{est}}}_{\substack{\text{in p} \\ n \rightarrow \infty}} \rightarrow \theta. \quad (25)$$

Symbol $\overline{\theta_{\text{est}}}_{\substack{\text{in p} \\ n \rightarrow \infty}}$ rozumiemy następująco: dla dowolnego $\varepsilon > 0$ prawdopodobieństwo spełnienia nierówności $|\theta_{\text{est}} - \theta| < \varepsilon$ przy $n \rightarrow \infty$ dąży w (zwykłym sensie) do jedności.

Estymata θ_{est} ma swój rozkład $\varphi(\theta_{\text{est}})$ i jej wartość średnią określamy jako

$$\overline{\theta_{\text{est}}} = \int \theta_{\text{est}} \varphi(\theta_{\text{est}}) d\theta_{\text{est}}. \quad (26)$$

Zgodność estymaty określa jej zachowanie się przy $n \rightarrow \infty$, ale interesuje nas również zachowanie się dla skończonych n . Co więcej — istnieje nieskończenie wiele estymat zgodnych dla danego rozkładu i danego parametru θ , bo jeżeli θ_{est} jest zgodną estymatą, to jest nią również wielkość $g_n \theta_{\text{est}}$, gdzie g_n jest dowolnym ciągiem dążącym do jedności przy $n \rightarrow \infty$. Żądamy zatem także, by estymata była nieobciążona, to znaczy, by spełniała warunek:

$$\overline{\theta_{\text{est}}} = \theta, \quad \text{dla każdego } n. \quad (27)$$

Spośród dwóch estymat zgodnych i nieobciążonych damy pierwszeństwo tej, której rozkład będzie bardziej skoncentrowany wokół θ , tj. będzie miał mniejszą dyspersję. Miarą dyspersji (a raczej wariancji) jest wielkość $\sigma^2 \{ \theta_{\text{est}} \} = \overline{(\theta_{\text{est}} - \overline{\theta_{\text{est}}})^2}$. Estymata jest z założenia nieobciążona, więc możemy napisać ostatnią równość w postaci

$$\sigma^2 \{ \theta_{\text{est}} \} = \overline{(\theta_{\text{est}} - \theta)^2}. \quad (28)$$

Przy bardzo ogólnych założeniach można pokazać, że dla danego θ i n zachodzi nierówność

$$\sigma^2 \{ \theta_{\text{est}} \} \geq \sigma_0^2, \quad (29)$$

gdzie σ_0^2 jest pewną liczbą określoną wzorem

$$\sigma_0^2 = - \frac{1}{n \frac{\partial^2 \ln \varphi}{\partial \theta^2}} > 0, \quad (30)$$

przy czym φ oznacza dany rozkład $\varphi(x|\theta)$. Jeżeli dla danej estymaty zachodzi znak równości, to estymatę nazywamy najefektywniejszą.

Naturalne jest żądanie, by estymata posiadała wymienione własności.

Okazuje się, że jeżeli dla danego rozkładu istnieje estymata najefektywniejsza (a tym samym nieobciążona i zgodna), to jest nią estymata najbardziej wiarygodna. Jeżeli estymata najefektywniejsza nie istnieje, to estymata najbardziej wiarygodna jest w każdym razie zgodną estymatą. Twierdzenia te usprawiedliwiają nazwę estymaty najbardziej wiarygodnej i wskazują na wartość metody.

Pokażę na prostym przykładzie fizyczne zastosowanie tych rozważań.

Peierls przedyskutował [7, 9] kilka metod używanych do określania średniego życia w rozpadzie promieniotwórczym. Jedna z nich polega na zmierzeniu ilości rozpadów n w pewnym odpowiednio dobranym czasie l do ilości wszystkich rozpadów N . Stosunek ten przy dużych n i N „powinien” wynosić $\frac{n}{N} = l^{-1}\tau$ a zatem mierząc n i N możemy estymować czas τ . Druga metoda polega na mierzeniu ilości rozpadów w krótkich odstępach czasu i odkładaniu logarytmu ilości rozpadów jako funkcji czasu. Prowadzimy następnie linię prostą przez otrzymane punkty; nachylenie prostej określa wartość τ . Aczkolwiek metody te określają istotnie wartość τ , to okazuje się, że lepiej jest brać po prostu średnią arytmetyczną z mierzonych czasów, gdyż przy tym ostatnim sposobie — jak wykazał Peierls — błąd statystyczny jest mniejszy.

Metodą największej wiarygodności można wniosek ten otrzymać natychmiast [7, 10]. Dla rozkładu Poissona istnieje najefektywniejsza estymata; z podanego wyżej twierdzenia wynika, że jest nią estymata najbardziej wiarygodna, a przekonaliśmy się (wzór (22)), iż estymatą najbardziej wiarygodną jest średnia arytmetyczna. Zatem istotnie najefektywniejszą (mówimy tylko o błędzie statystycznym, błąd pomiaru pomijamy) estymatą wartości τ jest średnia arytmetyczna mierzonych czasów.

Ograniczam się do tych krótkich uwag o metodzie największej wiarygodności. Dokładniejsze omówienie i przykłady znaleźć można w [1, 4, 7, 10].

Granice ufności

Dotychczas omawialiśmy statystyczne procesy fizyczne i z tym związany był probabilistyczny charakter rozważań. Rozpatrzmy teraz zagadnienie, w którym element statystyczny wnosi przyrząd pomiarowy, jego skończona dokładność, powodująca rozrzut wartości mierzonych wokół wartości prawdziwej. Zagadnienie należy zatem do dziedziny rachunku

błędów, który należy uważać za gałąź statystyki. Tak się niefortunnie złożyło, że rachunek błędów rozwijał się do pewnego stopnia niezależnie i dopiero w ostatnich latach zdobycze statystyki przenoszone są do zagadnień rachunku błędów. Zagadnieniem tego rodzaju jest znajdowanie granic ufności. W większości książek problem traktowany jest metodami klasycznego rachunku błędów, które nie są poprawne i w szczególności zmieniają błędnie przedział ufności dla małych ilości pomiarów. Z tego powodu omówię pokrótce nowsze ujęcie. Dokładniejsze przedstawienie obu metod oraz krytykę metody klasycznej znaleźć można w [5] (nowszą metodę także np. w [1]).

Rachunek błędów przyjmuje, że rozrzut wartości mierzonych wokół prawdziwej wartości wielkości fizycznej dany jest przez rozkład normalny (Gaussa):

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (31)$$

przy czym przyjmujemy, że parametr μ — wartość średnia (a zarazem najbardziej prawdopodobna) rozkładu — reprezentuje nieznaną wartość prawdziwą wielkości fizycznej X , a dyspersja σ jest miarą błędu pomiaru. Jeżeli mianowicie na pewien rozkład składa się bardzo wiele rozkładów, które same mogą odbiegać znacznie od normalnego, to rozkład ten — na mocy jednego z twierdzeń rachunku prawdopodobieństwa — jest normalny. A właśnie na pokazania przyrządów wpływa wiele bardzo czynników, jak wahania temperatury, zmiany atmosferyczne, drobne wstrząsy i inne.

Przypuśćmy teraz, że dokonaliśmy n pomiarów wielkości X otrzymując wartości x_1, x_2, \dots, x_n . Co na podstawie tych pomiarów możemy powiedzieć o wartości prawdziwej? W jakich granicach powinna się znajdować? Odpowiedź określająca granice ufności będzie oczywiście probabilistyczna. Będziemy mogli powiedzieć, czy proponowana wartość wielkości prawdziwej jest „do pogodzenia” z otrzymanymi wynikami pomiarów, tzn. czy mieści się w granicach przedziału ufności na danym poziomie prawdopodobieństwa. Poziom ten ustalić możemy różnie, często przyjmujemy 5%. Jeżelibyśmy zmienili 5% na 1%, to powiększylibyśmy granice ufności, dobieramy zatem poziom prawdopodobieństwa do wymagań zależnych od rodzaju zagadnienia. Granice ufności znajdujemy w następujący sposób:

Utwórzmy średnią arytmetyczną wartości pomiarów

$$m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (32)$$

oraz wielkość s (estymatę σ)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2}. \quad (33)$$

Okazuje się, że wielkość

$$t = \frac{m - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (34)$$

posiada rozkład Studenta

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{(n-1)\pi}} \frac{\left(\frac{n-2}{2}\right)!}{\left(\frac{n-3}{2}\right)!} \frac{1}{\left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{\frac{n}{2}}}. \quad (35)$$

W tabelicy I podane jest dla rozkładu Studenta przy różnych n rozwiązanie następującego równania:

prawdopodobieństwo nierówności

$$\left| \frac{m - \mu}{s/\sqrt{n}} \right| \geq t \text{ równa się } 5\%.$$

Prawdopodobieństwo to oznaczmy przez t (5%, n).

Tabela I

Wielkość $t(\alpha, n)$ dla rozkładu Studenta
według: Fisher and Yates, *Statistical Tables, Table III*

| α | 0,05 | 0,01 | 0,001 |
|----------|--------|--------|---------|
| $f=n-1$ | | | |
| 1 | 12,706 | 63,657 | 636,619 |
| 2 | 4,303 | 9,925 | 31,598 |
| 3 | 3,182 | 5,841 | 12,941 |
| 4 | 2,776 | 4,604 | 8,610 |
| 5 | 2,571 | 4,032 | 6,859 |
| 6 | 2,447 | 3,707 | 5,959 |
| 7 | 2,365 | 3,499 | 5,405 |
| 8 | 2,306 | 3,355 | 5,041 |
| 9 | 2,262 | 3,250 | 4,781 |
| 10 | 2,228 | 3,169 | 4,587 |
| 11 | 2,201 | 3,106 | 4,437 |
| 12 | 2,179 | 3,055 | 4,318 |
| 13 | 2,160 | 3,012 | 4,221 |
| 14 | 2,145 | 2,977 | 4,140 |
| 15 | 2,131 | 2,947 | 4,073 |
| 16 | 2,120 | 2,921 | 4,015 |
| 17 | 2,110 | 2,898 | 3,965 |
| 18 | 2,101 | 2,878 | 3,922 |
| 19 | 2,093 | 2,861 | 3,883 |
| 20 | 2,086 | 2,845 | 3,850 |

Równanie to możemy przepisać w postaci:

$$P\left(\left|\frac{m-\mu}{s/\sqrt{n}}\right| \geq t(5\%, n)\right) = 5\%,$$

czyli

$$P\left(\left|\frac{m-\mu}{s/\sqrt{n}}\right| \leq t(5\%, n)\right) = 95\%.$$

Przekształcając nierówność otrzymujemy:

$$P\left(m - \frac{s}{\sqrt{n}} t(5\%, n) \leq \mu \leq m + \frac{s}{\sqrt{n}} t(5\%, n)\right) = 95\%,$$

a stąd przedział ufności dla μ (na poziomie 5%):

$$\left[m - \frac{s}{\sqrt{n}} t(5\%, n), \quad m + \frac{s}{\sqrt{n}} t(5\%, n) \right]. \quad (37)$$

Przykład [1].

Dziesięć pomiarów długości przy pomocy śruby mikrometrycznej dało wartości:

4,078 4,080 4,071 4,076 4,081 4,077 4,075 4,073 4,079 4,069.

Jakie są granice ufności dla prawdziwej wartości? Czy wartość 4,070 można uważać za zgodną z tymi wynikami pomiarów?

Wyliczamy

$$m = 4,0759, \quad s = 0,0039.$$

Z tablicy I (dla $f = n - 1 = 9$) mamy $t(5\%, 10) = 2,262$.

Stąd otrzymujemy przedział ufności

$$[4,0732, 4,0786].$$

Wartość 4,070 leży zatem poza przedziałem ufności. Jeżelibyśmy przyjęli poziom 1%, to wciąż jeszcze wartość 4,070 znajdowałaby się za granicami ufności. Powinniśmy zatem uznać ją za niezgodną.

Testy statystyczne

Ważnym zagadnieniem statystycznym jest określanie nieznanego rozkładu. Nie znając rozkładu możemy zakładać w charakterze hipotezy jego kształt lub własności. Każde takie przypuszczenie nazywamy hipotezą statystyczną, a metodę sprawdzania hipotezy — testem statystycznym. Jeżeli znamy kształt rozkładu, a nie znamy wartości występujących w nim parametrów, to mamy prostszy szczególny przypadek hipotezy i testu parametrycznego. Rozpatrując granice ufności w przykładzie pomiarów długości, wiedzieliśmy, że rozkład jest normalny, lecz nie znaleźliśmy wartości parametrów. Wysunęliśmy hipotezę,

że wartość parametru μ jest równa 4,070. Po sprawdzeniu okazało się, że hipotezę należy odrzucić.

Jeżeli nie znamy zupełnie rozkładu, to hipotezę o całym przebiegu rozkładu weryfikujemy za pomocą testu zgodności. Oczywiście jest to zagadnienie bardziej złożone niż zagadnienie parametryczne.

Bardzo rozpowszechnionym, ze względu na swoją prostotę, sposobem sprawdzania proponowanego przebiegu rozkładu, tj. testu zgodności, jest test χ^2 Pearsona.

Podam zasadę stosowania testu. Dokładniejsze omówienie oraz uzasadnienie znaleźć można w [3, 4].

Hipotetycznym rozkładem jest $\varphi(x)$. Dzielimy cały zakres zmienności x na r przedziałów. Prawdopodobieństwa dla tych przedziałów, otrzymane z $\varphi(x)$, równe $\varphi(x_i) \Delta x_i$, $i=1, 2, \dots, r$, oznaczamy przez π_i . Empirycznie mamy n_i pomiarów w i -tym przedziale. Całkowita ilość pomiarów jest

$$\text{równa } n = \sum_{i=1}^r n_i.$$

Wielkość

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - n\pi_i)^2}{n\pi_i}, \quad (38)$$

która jest pewnego rodzaju miarą odchylenia od proponowanego rozkładu, ma rozkład (w przybliżeniu)

$$\varphi(\chi^2) = \frac{1}{2^{\frac{f}{2}} \Gamma\left(\frac{f}{2}\right)} (\chi^2)^{\frac{f-2}{2}} e^{-\frac{\chi^2}{2}}, \quad (39)$$

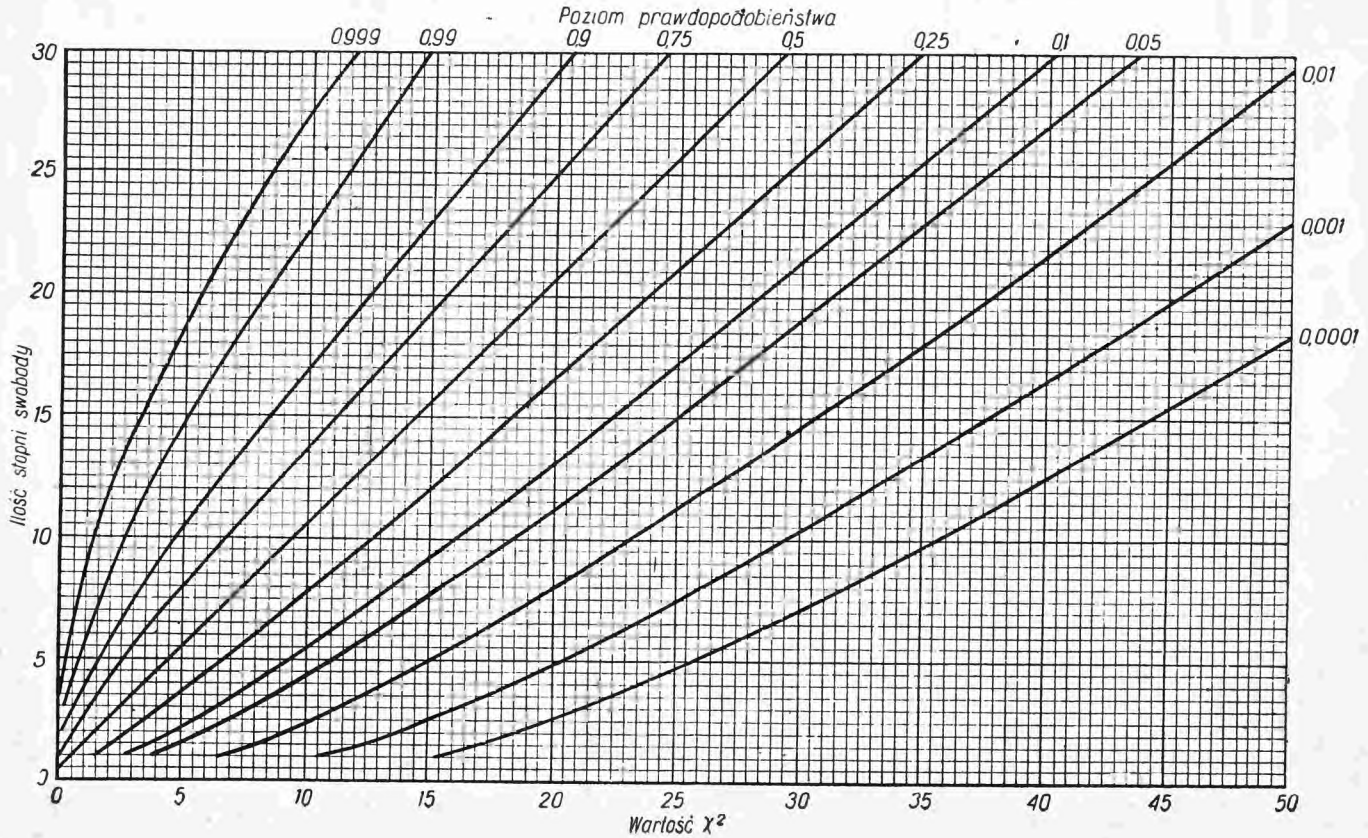
przy czym $f=r-1$ nazywamy ilością stopni swobody.

W tablicy II podany jest diagram (tablice liczbowe podane są na przykład w [3, str. 357]) prawdopodobieństwa $P(\chi^2 \geq \chi_\alpha^2)$, gdzie χ_α^2 jest daną dla poziomu α wartością dla różnych ilości stopni swobody. To prawdopodobieństwo pozwala określić, które wartości χ^2 prowadzą do odrzucenia hipotezy (na danym poziomie). Wyliczenie zatem χ^2 dla danego problemu daje test hipotezy.

Przy stosowaniu testu winniśmy mieć na uwadze, że test opiera się na przybliżeniu: powinniśmy mieć $r > 4$ oraz poszczególne $n\pi_i > 4$. Jeżeli jest $r \leq 4$, to odpowiednio $n\pi_i$ powinny być większe. Staramy się zatem dzielić rozkład na odpowiednie przedziały.

Rozpatrzmy następujący przykład schematyczny. Chcemy sprawdzić, czy kostka do gry jest rzetelna, tzn. czy jest dostatecznie dokładnie wykonana. Rzucamy nią $n=60$ razy.

Tablica II
 Diagram wartości χ^2 dla różnych ilości stopni swobody $f=r-1$ i dla różnych wartości poziomu prawdopodobieństwa (według M. Kendall, *The Advanced Theory of Statistics*, Vol. 1).



Wyniki rzutów są następujące:

| | | | | | |
|-------------|------------|------|--------------|------------|------|
| jedno oczko | $n_1 = 9$ | razy | cztery oczka | $n_4 = 12$ | razy |
| dwa oczka | $n_2 = 10$ | „ | pięć oczek | $n_5 = 6$ | „ |
| trzy „ | $n_3 = 8$ | „ | sześć „ | $n_6 = 15$ | „ |

Wyliczamy $\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - n\pi_i)^2}{n\pi_i}$. Mamy $r=6$, wszystkie π_i są równe

(hipoteza) $\frac{1}{6}$. Stąd

$$\chi^2 = \frac{1}{10} [(-1)^2 + 0^2 + (-2)^2 + (+2)^2 + (-4)^2 + (+5)^2] = 5.$$

W tabelicy II znajdujemy dla $f=r-1=5$ i poziomu 5% wartość $\chi^2_{\alpha}=11$. W naszym przypadku wartość $\chi^2=5$ nie przekracza tej wartości. Odchylenie zatem przebiegu empirycznego od sprawdzanego rozkładu nie przekracza dopuszczalnych granic, a więc nie ma podstaw do przypuszczenia, że kostka nie jest rzetelna.

Literatura

1. N. Arley and K. Rander Buch, *Introduction to the Theory of Probability and Statistics*, New York—London, Chapman & Hall, 1950.
2. W. Gliwienko, *Rachunek prawdopodobieństwa* (tłum. z ros.), Polskie Towarzystwo Matematyczne, Warszawa—Wrocław 1953.
3. M. Fis, *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna*. PWN, Warszawa 1954.
4. M. G. Kendall, *The Advanced Theory of Statistics*, Griffin & Co., London 1948.
5. W. I. Romanowski, *Podstawowe zagadnienia teorii błędów* (tłum. z ros.), PWN, Warszawa 1955.
6. W. E. Deming and R. T. Birge, *Rev. Mod. Phys.* 6, 119 (1934).
7. M. Annis, W. Cheston and H. Primakoff, *Rev. Mod. Phys.* 25, 818 (1953).
8. S. Olbert, *Phys. Rev.* 87, 319 (1952).
9. R. Peierls, *Proc. Roy. Soc. A* 149, 467 (1935).
10. M. S. Bartlett, *Phil. Mag. A* 154, 124 (1936); 44, 249, 1407 (1953).

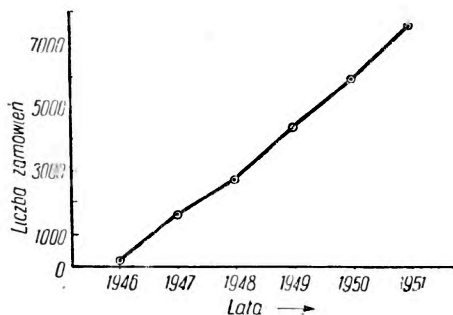
Zdzisław Wilhelmi

Instytut Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytetu Warszawskiego

O pewnych zastosowaniach izotopów promieniotwórczych w badaniach naukowych i przemyśle

Są w dziejach fizyki odkrycia, które czekać musiały nieraz setki lat, by dłoń wynalazcy podniosła je z pyłu zapomnienia i wprzegła do pracy dla człowieka. Są jednak i takie, które z pracowni uczonego wprost poszły w życie, od razu dały poznać swą ważność praktyczną i stały się prawdziwym motorem postępu; takim niewątpliwie było odkrycie promieniotwórczości wzbudzonej [1]. Dziś, po dwudziestu z górą latach od tego szczęśliwego zdarzenia, możemy powiedzieć, że izotopy promieniotwórcze — to zaiste jeden z najwspanialszych darów, jakie fizyka XX wieku ofiarowała światu. Dziś, kiedy w różnych krajach wytwarza się w dziesiątkach reaktorów jądrowych wielkie ilości radioizotopów, rola ich, rola tego cennego i, jak się teraz wydaje, niezastąpionego narzędzia badań naukowych wzrasta coraz bardziej. Oczywiście i przed powstaniem pierwszych reaktorów izotopy promieniotwórcze były wytwarzane. Stosowano w tym celu przede wszystkim akceleratory, jednakże koszt ich produkcji był wówczas bardzo duży, a otrzymywane ilości radioizotopów pozwalały jedynie na prowadzenie badań, w których można było się

zadowolić stosunkowo niewielką aktywnością. Z tego to właśnie powodu szybki rozwój badań opartych na użyciu radioizotopów, badań prowadzonych w różnych gałęziach nauki i przemyśle, rozpoczął się właściwie dopiero wraz z oddaniem do szerszego użytku pierwszych reaktorów. Pewne pojęcie o wielkiej szybkości tego procesu może dać rys. 1, który pokazuje, jak w latach 1946—1951 wzrastała liczba zrealizowanych przez tak zwany Wydział Izotopów Kom-



Rys. 1

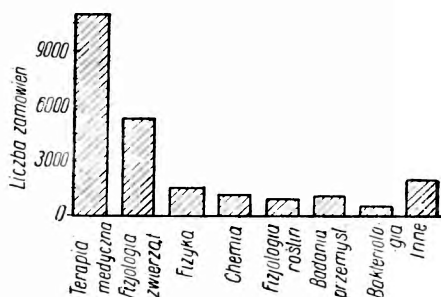
sji do Spraw Energii Atomowej (USA) zamówień na izotopy promieniotwórcze. Jak widać, w ciągu tych pięciu lat nastąpił 25-krotny wzrost zapotrzebowań w tej dziedzinie. Z innych statystyk wiadomo, że w tym samym czasie rozproszono pomiędzy 1500 różnych instytucji nauko-

wych i przemysłowych — około 2300 curie* materiałów promieniotwórczych.

Wzrasta również i obszar zastosowań izotopów promieniotwórczych. Można by bez przesady powiedzieć, że w każdej niemal dziedzinie nauk przyrodniczych i w wielu innych dyscyplinach radioizotopy okazały się wielce cennym instrumentem badań. Podobnie i w różnych gałęziach przemysłu oddały one i oddają duże usługi przyczyniając się do usprawnienia rozmaitych procesów technologicznych, do radykalnego uproszczenia wielu metod pomiarowych i systemów regulacji i kontroli. Równie wiele ma im do zawdzięczenia i medycyna. Rys. 2 oparty, jak i poprzedni, na dostępnych źródłach amerykańskich daje pogląd na obszar zastosowań izotopów.

Nie jest celem tego artykułu omawiać wyczerpująco sposoby stosowania izotopów w badaniach naukowych — ramy jego są o wiele za szczupłe. Chciałbym tylko w jak najbardziej popularny sposób określić zwięźle rolę izotopów promieniotwórczych w różnych gałęziach nauki i techniki oraz podać kilka typowych przykładów ich zastosowań**. Znaczenie ich dla medycyny nie będzie tu omawiane.

Przyjęło się w literaturze światowej wyodrębnić dwa wielkie obszary, dwa pola zastosowań radioizotopów. W jednym z nich izotopy te stanowią źródło promieniowania mniej lub bardziej przenikliwego. Kwestią prawie obojętną, a na pewno drugorzędną jest tutaj sprawa właściwości chemicznych danego izotopu czy związku chemicznego, w jakim on występuje. Ważny jest przede wszystkim charakter promieniowania, jego przenikliwość. W tej więc dziedzinie badań preparat promieniotwórczy charakteryzujemy jego aktywnością i widmem promieniowania. Ważny jest również, oczywiście, i okres połowicznego rozpadu, nie ma natomiast większego znaczenia czy stosujemy jako źródło promieniowania β ^{14}C , czy ^{35}S , oba te izotopy mają bowiem podobne widmo (energia maksymalna równa odpowiednio 0,155 i 0,169 MeV). Podobnie i ^{60}Co użyty jako źródło γ może nieźle zastąpić preparat radowy. O wy-



Rys. 2

* 1 c (curie) jest to ilość materiału promieniotwórczego, w którym w ciągu 1 sekundy rozpada się $3,7 \cdot 10^{10}$ jąder. Odpowiada to aktywności 1 g radu.

** Artykuł Olgierda Wołczka pt. „Analiza aktywacyjna pierwiastków“ (Postępy Fizyki t. V, z. 1, s. 89, 1954) omawia bardziej szczegółowo jedno z zastosowań, poruszone zresztą również przez autora (przyp. Red.).

borze tego czy innego izotopu decydują przede wszystkim względy ekonomiczne, a zwłaszcza łatwość wytworzenia i koszt produkcji.

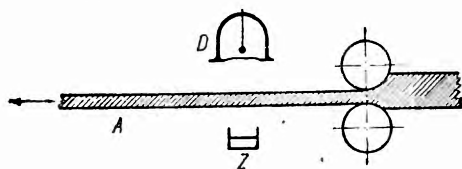
W drugiej, znacznie ważniejszej wielkiej dziedzinie zastosowań radioizotopów występują one jako *wskaźniki*, to jest jako „atomy znaczone“. Wykorzystuje się tutaj fakt, że właściwości chemiczne atomów prawie nie zależą od liczby masy, lecz tylko od liczby atomowej. Wobec tego różne izotopy tego samego pierwiastka zachowują się w reakcjach chemicznych i biochemicznych niemal identycznie. Wprowadzając więc do substancji złożonej z atomów izotopu trwałego jakiegoś pierwiastka atomy izotopu promieniotwórczego tegoż pierwiastka, możemy obserwując promieniotwórczość tych „atomów znaczonych“ śledzić drogi pierwiastka w organizmie zwierzęcym czy roślinnym, badać mechanizm złożonych reakcji chemicznych, procesy dyfuzji, osmozy itd. Jasne jest, że w tej dziedzinie, w przeciwieństwie do poprzednio wspomnianej, nie jest obojętną sprawą, jakiego pierwiastka izotop stosujemy w badaniach. Jednak również i tu ważne jest widmo i okres połowicznego rozpadu izotopu.

Przejrzyjmy teraz szybko obie dziedziny zastosowań, oba pola zwycięstw jednego z najwspanialszych oręży nauki i techniki współczesnej — izotopów promieniotwórczych.

Radioizotop jako źródło promieniowania

Stosowanie izotopów promieniotwórczych jako źródła promieniowania sprowadza się głównie do praktycznego wyzyskania absorpcji promieniowania β i γ tych izotopów. Stosowane są one tu najczęściej do pomiarów gęstości, grubości warstw, wielkości powierzchni, a przede wszystkim w celach radiograficznych, defektoskopowych.

Omówmy najpierw krótko pomiary grubości — najpospolitsze to chyba obok radiografii pole przemysłowych zastosowań radioizotopów. Różne są rozwiązania konstrukcyjne urządzeń służących do tego celu [2, 3, 4]. Zasada ich działania da się przedstawić w uproszczeniu za pomocą



Rys. 3

rys. 3. Badane ciało A, którego grubość mierzymy, umieszczone jest między źródłem promieniotwórczym Z i detektorem D, którym jest komora jonizacyjna, licznik G-M, licznik scyntylicyjny lub klisza fotograficzna. Do detektora dociera tym mniejsza liczba elektronów β lub fotonów γ , im większa jest grubość ciała A. W przypadku pomiaru grubości małych, rzędu 100 mg/cm^2 , źródłem promieniowania jest izotop β — promieniotwórczy. Wybór jego zależy od grubości mierzonej: im jest większa, tym wyższa powinna być energia maksymalna widma β ($E_{\beta \text{ max}}$)

— rozumiałe jest przecież, że grubość ta nie może przewyższać zasięgu R cząstek β , który zgodnie ze wzorami empirycznymi Glendenina [5] wynosi

$$R = (0,542 \cdot E_{\beta_{\max}} - 0,133) \text{ g/cm}^2 \text{ dla } E_{\beta_{\max}} > 0,8 \text{ MeV}, \quad (1)$$

$$R = 0,407 \cdot E_{\beta_{\max}} \text{ g/cm}^2 \text{ dla } 0,15 \text{ MeV} < E_{\beta_{\max}} < 0,8 \text{ MeV}. \quad (2)$$

Pożądane jest przy tym, aby użyte izotopy były czystymi emiterami β , wtedy bowiem dokładność pomiaru jest większa i bardzo upraszcza się sprawa osłony źródła. Dla uniknięcia zbyt częstego cechowania urządzenia nie powinno się brać izotopów nadających się do pomiarów małych grubości (tabl. I).

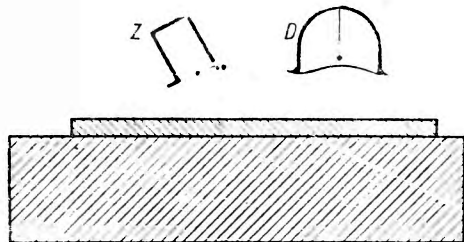
Tablica I

| Izotop | $E_{\beta_{\max}}$ MeV | Półokres | Najczęstsze źródło izotopu |
|-------------------|------------------------|----------|----------------------------|
| ^{106}Ru | 0,0392 | 200 dni | Produkt rozszczep. |
| ^{14}C | 0,155 | 6000 lat | (n, γ) ; (n, p) |
| ^{35}S | 0,169 | 87,1 dni | (n, γ) ; (n, p) |
| ^{45}Ca | 0,25 | 152 dni | (n, p) ; (n, γ) |
| ^{90}Sr | 0,6 | 30 lat | (n, γ) |
| ^{201}Tl | 0,77 | 2,7 lat | (n, γ) |

Ze względu na dokładność pomiaru aktywność użytego źródła nie może być zbyt mała i powinna wynosić od 1 do 10 milicurie.

Dzięki licznym zaletom metody (pomiar bardzo krótki i bez dotykania mierzonego przedmiotu) znalazła ona szerokie zastosowanie w przemyśle, np. przy pomiarach grubości wychodzącej bezpośrednio spod walców folii metalowej, papieru, gumy, „plastyków“. Pomiaru te mogą być wykonywane bez zatrzymywania maszyny, a co najważniejsze, te same urządzenia mogą służyć równocześnie do auto-

matycznej regulacji grubości. Oczywiście, przy produkcji grubych blach, płyt itp. można zastosować podobną metodę, ale przy użyciu izotopu będącego emiterem γ . Do pomiaru cienkich błonek naniesionych na grube podłoże korzysta się nie z absorbcji elektronów, ale z ich rozpraszania wstecznego (rys. 4). Jak wiadomo, różne substancje rozpraszają elektrony wstecz w różny sposób zależnie od liczby atomowej, grubości warstwy i gęstości. Dlatego warunkiem koniecznym w tej metodzie jest, by podkład, na którym spoczywa mierzona warstwa, był z innego niż ona, najlepiej gęstszego materiału. Dokładność uzyskiwana w tego rodzaju pomiarach dochodzi do 3μ .



Rys. 4

Bardzo ważne dla techniki znaczenie ma tak zwana *gammografia*, to jest defektoskopia oparta na użyciu preparatów promieniotwórczych. Zagadnienie to zasługiwałoby na szerokie omówienie, tutaj jednak możemy mu poświęcić zaledwie kilka słów. Gammografia stanowi bardzo poważną



Rys. 5

konkurencję dla szeroko stosowanej w całym świecie defektoskopii rentgenowskiej. Ma ona nad swą starą rywalką wielką przewagę; jej stosowanie jest znacznie prostsze, łatwiejsze, urządzenia są o wiele lżejsze, łatwo przenośne (rys. 5 i 6) i — co bardzo ważne — tańsze. Podobnie jak w pomiarach grubości za pomocą izotopów β — promieniotwórczych, także i tu byłoby pożądane dobieranie dla danych grubości badanych obiektów izotopów najodpowiedniejszej „twardości“ promieniowania. W praktyce jednak stosuje się najczęściej kilka tylko izotopów odpowiadających nieźle wymogom technicznym i ekonomicznym. Najważniejsze z nich — to ^{170}Tm *, ^{192}Ir , ^{182}Ta , ^{60}Co (tabl. II). Do badań materiałów lekkich, na przykład stopów aluminiowych, nadaje się miękkie widmo ^{170}Tm . Do płyt

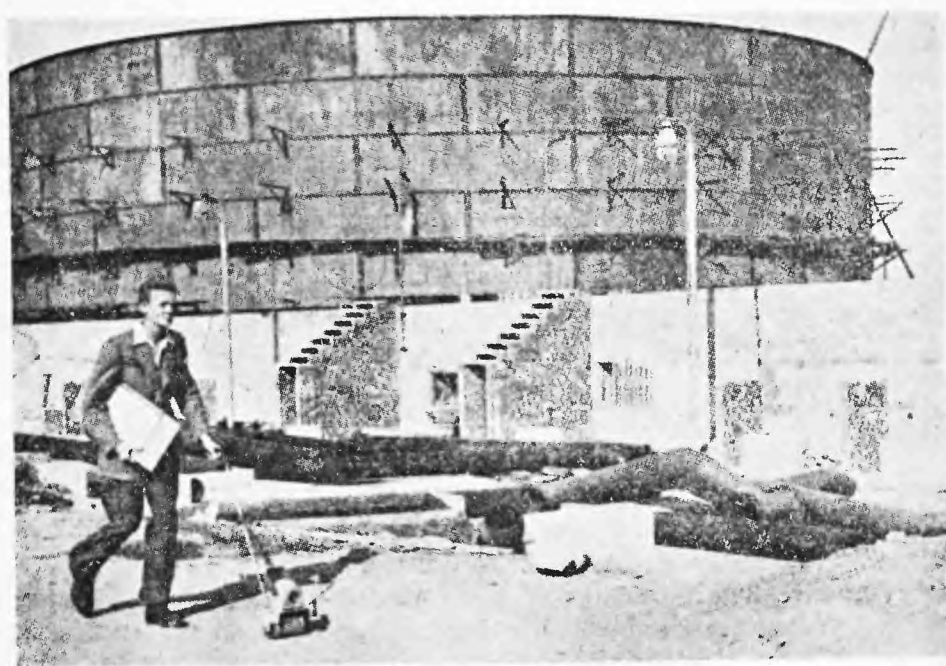
* Tm — pierwiastek z grupy ziem rzadkich (zwany dawniej tamarem Tm), o numerze porządkowym 69 (przyj. Red.).

stalowych o grubości od 1 do 5 cm dobry jest ^{192}Ir , do prześwietlania grubszych przedmiotów aż do 20 cm trzeba używać twardszego widma, na przykład takiego, jakie daje ^{60}Co .

Tablica II

| Nazwa izotopu | Energia γ MeV | Półokres | Zwyczajny sposób produkcji |
|-------------------|----------------------|-----------|----------------------------|
| ^{170}Tm | 0,085 | 120 dni | (n, γ) |
| ^{192}Ir | 0,14 – 0,88 | 74,4 dni | (n, γ) |
| ^{182}Ta | 0,07 – 1,19 | 111,2 dni | (n, γ) |
| ^{60}Co | 1,17 – 1,33 | 4,95 at | (n, γ) |

Ponieważ gammografia polega w zasadzie na fotografowaniu „cienia” rzucanego przez przedmiot (rys. 7), ważne jest, by cień ten był ostry. Jest to możliwe do uzyskania tylko wówczas, gdy wymiary geometryczne źródła promieniowania są bardzo małe lub gdy jest ono umieszczone



Rys. 6

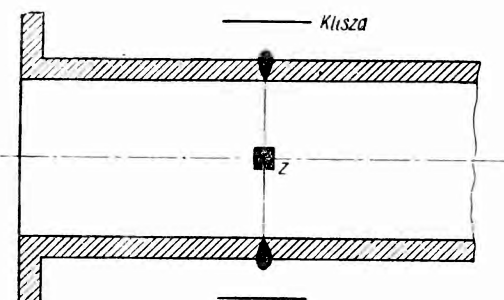
w znacznej odległości od badanego ciała. W tym ostatnim przypadku źródło musi mieć wielkie natężenie bądź też czas ekspozycji musi być bardzo długi. Z tych powodów jest ważne, aby aktywność właściwa źródła, to jest aktywność przypadająca na jednostkę masy, była możliwie wielka.

Pod tym względem izotopy o stosunkowo krótszym okresie mają przewagę nad izotopami w okresie dłuższym. Jeżeli bowiem oznaczymy przez

A_1 i A_2 ciężary atomowe dwóch izotopów, a przez T_1 i T_2 —ich okresy, to stosunek aktywności właściwych tych czystych izotopów ν_1 i ν_2 będzie równy

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{T_2 A_2}{T_1 A_1} \quad (3)$$

Dlatego właśnie rad, stosowany niegdyś tu i ówdzie do celów defektoskopii, mający, jak wiadomo, okres 1622 lata (^{226}Ra),



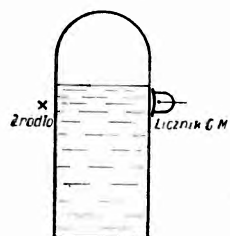
Rys. 7

ustępuje pod tym względem radonowi lub izotopom sztucznie promieniotwórczym, dziś pospolicie używanym i mającym krótszy okres (tabl. II). Trzeba jednak powiedzieć dla uniknięcia nieporozumień, że jako źródło do celów gammografii nie używa się czystych, wyodrębnionych izotopów promieniotwórczych, lecz próbek powstałych z naświetlania w reaktorze materiału naturalnego, np. kobaltu (^{59}Co), irydu (^{191}Ir , ^{193}Ir) czy tantalu (^{181}Ta). I tak jednak otrzymuje się aktywność właściwą rzędu kilku curie na gram źródła, a więc kilka razy większą niż dla radu. Poza tym należy zauważyć, że momentem decydującym o zwycięstwie izotopów sztucznie promieniotwórczych nad radem było głównie nie to, lecz względy ekonomiczne. Cena radu jest znacznie wyższa, a jego ilości dotychczas w świecie wyprodukowane ograniczają się do dwóch czy trzech tysięcy curie (tj. 2—3 kilogramów), podczas gdy w ciągu jednego tylko roku (od lipca 1950 do lipca 1951), w jednym tylko ośrodku (Oak Ridge) wyprodukowano około 500 curie ^{60}Co .

Z innych przemysłowych zastosowań radioizotopów, a jest ich liczba wielka i wciąż rosnąca, należałoby wspomnieć o dowcipnym ich użyciu w przemyśle naftowym. Jak wiadomo, przez rurociągi biegnące na przestrzeni setek kilometrów od kopalni do miejsca odbioru przepuszcza się tym samym przewodem różne gatunki ropy naftowej. Na stacji odbiorczej różne te ciecze, płynące nieprzerwaną strugą jedna za drugą, trzeba posegregować, to jest skierować do odpowiednich rozgałęzień (rys. 8). Wobec tego, chcąc uniknąć strat, trzeba umieć z możliwie dużą dokładnością określić miejsce styku różnych gatunków ropy. Dotychczas osiągnano to w dość skomplikowany sposób i niezbyt dokładnie. Obecnie kłopotliwą tę sprawę rozwiązało użycie izotopów promieniotwórczych. Otóż niewielka ilość radioizotopu, wprowadzona do rury wraz z pierwszą porcją każdej nowej partii, tj. nowego gatunku ropy, zapewnia możliwość śledzenia ruchu

tego „czoła“ porcji wzdłuż przewodu, powodując automatyczne otwarcie odpowiedniego odgałęzienia przewodu we właściwym czasie. Metoda taka została zastosowana po raz pierwszy na odcinku o długości z górą 800 km z Salt Lake City do Pasco.

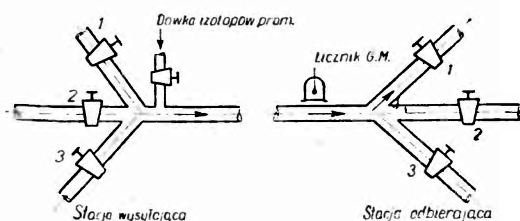
Trzeba by również powiedzieć, że coraz częściej izotopów promieniotwórczych używa się do oznaczania poziomu cieczy. W zamkniętych zbiornikach zarówno źródło promieniowania, jak i detektor (licznik GM) umieszcza się na zewnątrz zbiornika, po jego przeciwnych stronach (rys. 9). Dopóki są one oddzielone od siebie cieczą, promieniowanie γ nie dociera do licznika. Kiedy poziom cieczy opadnie, promieniowanie nie jest już pochłaniane i licznik może zadziałać uruchamiając sygnalizację lub urządzenia automatycznej regulacji [6, 2].



Rys. 9

Na zakończenie podajemy jeszcze, że niekiedy wykorzystuje się zdolność jonizującą promieniowania radioizotopów do neutralizacji ładunków statycznych, powstających w niektórych procesach technologicznych. Ładunki te stanowią nieraz na przykład przy tkaniu materiałów nylonowych — powód nieprzyjemnych komplikacji, toteż jonizując za pomocą radioizotopów (np. talu lub strontu) powietrze w otoczeniu materiału i neutralizując te ładunki, ułatwia się bardzo proces produkcji i poprawia jakość produktu.

Wielkie pole zastosowań stanowi dla izotopów użytych jako źródło promieniowania przemysł spożywczy, farmaceutyczny i chemiczny. Wiadomo, że silne promieniowanie zabija drobnoustroje. Jak wynika z pewnych badań eksperymentalnych, do całkowitej sterylizacji pospolicie używanych produktów żywnościowych wystarcza od $0,5 \cdot 10^6$ do $2 \cdot 10^6$ rentgena, co wymagałoby zużycia preparatu około 200 c na każdy kilogram sterylizowanego w ciągu jednej doby produktu. Pasteryzacja mogłaby przebiegać przy dziesiątki razy słabszym źródle promieniowania. Co prawda, nie jest jeszcze zupełnie pewne, czy tak przeprowadzona sterylizacja nie wpływa szkodliwie na wartość odżywczą produktów, a ponadto wartość smakowa niekiedy wyraźnie obniża się przy tej operacji. Całkiem jest jednak pewne, że jeśli nie w przemyśle spożywczym, to w każdym razie w przemyśle farmaceutycznym metoda taka ma wielką



Rys. 8

przyszłość. Także i w rolnictwie izotopy promieniotwórcze, szczególnie — ze względu na taniść — w postaci produktów rozszczepienia, będą stosowane na dużą skalę do sterylizacji nasion.

Radioizotopy jako wskaźniki

Z olbrzymiej liczby najróżnorodniejszych zastosowań wskaźników promieniotwórczych wybierzemy kilka przykładów z niektórych dziedzin przemysłu i nauki.

B a d a n i a d y f u z j i. Jednym ze zjawisk fizycznych, badania których radykalnie upraszcza metoda atomów znaczonych, są zjawiska dyfuzji, a szczególnie samodyfuzja. Zjawiska te odgrywają podstawową rolę w niektórych gałęziach techniki, a przede wszystkim w metalurgii i w niektórych działach przemysłu chemicznego. Leżą one u podstaw tak ważnych procesów technologicznych jak cementacja, odwęglanie, zgrzewanie, spawanie itd. Nic więc dziwnego, że dobra znajomość wielkości charakteryzujących dyfuzję, a więc przede wszystkim stałej dyfuzji, jest niezbędna dla właściwego zrozumienia tych procesów i dla trafnego przewidywania, czy to właściwości projektowanych nowych stopów, czy to skuteczności nowych zamierzanych procesów technologicznych.

Badania dyfuzji jednego ciała w ciele innym były prowadzone na drodze rentgenowskiej, optycznej czy mikroanalizacyjnej. Jednakże metody te nie nadawały się wcale do badań migracji atomów jakiegoś ciała w nim samym. Tymczasem zjawisko to jest szczególnie interesujące zarówno ze względów teoretycznych, jak i praktycznych, stanowi ono przecież fundament takich procesów, jak np. „męczenie się“ metali, rekrytalizacja itp.

Próby rozwiązania tego zagadnienia w ten sposób, że zamiast atomów danego pierwiastka używało się atomów pierwiastka innego (Hevesy [7]), nie dały dobrych wyników. Sprawę miały rozstrzygnąć dopiero izotopy promieniotwórcze. Pierwsze próby ich stosowania do badań dyfuzji (nie samodyfuzji) pochodzą jeszcze z roku 1929, kiedy to pionier metody indykatorów promieniotwórczych G. H e v e s y zastosował α -promieniotwórczy naturalny izotop ołowiu ThB do wyznaczania stałej dyfuzji ołowiu w chlorku ($PbCl_2$) i jodku ołowiu (PbJ_2) w funkcji temperatury. Ten sam autor wraz ze swymi współpracownikami zaatakował w parę lat później (1933—34) [10, 11] zagadnienie samodyfuzji ołowiu w ołowiu i znalazł, stosując znowu ThB, że zależność stałej dyfuzji od temperatury da się przedstawić w prosty sposób:

$$D = 5,76 \cdot 10^5 \cdot e^{-28050 kT} \text{ cm}^2/\text{dzień}.$$

Metoda wskaźników naturalnie promieniotwórczych nie mogła, rzecz jasna, mieć szerszego znaczenia, gdyż liczba wchodzących w grę radio-

izotopów naturalnych jest bardzo ograniczona. Nic więc dziwnego, że dopiero wykrycie promieniotwórczości wzbudzonej otworzyło nowe perspektywy.

Spośród wczesnych prac związanych z samodiffuzją bardzo interesujące wydają się prace Z a g r u b s k i e g o, 1937 [12, 13], dotyczące dyfuzji izotopu złota ^{198}Au w złocie, a z nieco późniejszych — J o h n s o n a [14], zajmująca się dyfuzją izotopów srebra ^{105}Ag i ^{106}Ag w srebrze. W obu tych pracach zastosowano podobną metodę badania. W pracy [14] nałożono elektrolitycznie izotop srebra promieniotwórczego na płytkę srebra, a następnie po dłuższym, parodniowym wygrzewaniu w określonej temperaturze zdejmowano na tokarce cienkie warstwy równoległe do warstwy aktywnej. Strużyny rozpuszczone w kwasie azotowym badano za pomocą licznika GM. W pracy [12] warstwy zdejmowano przez rozpuszczanie w kwasach.

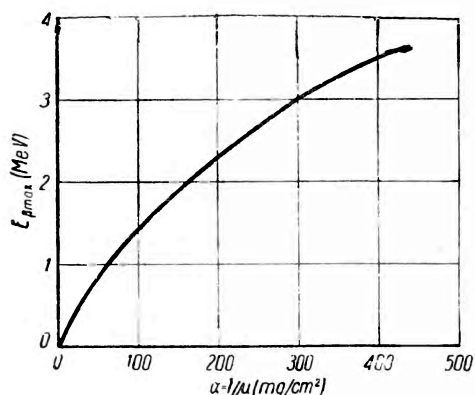
Prostszą metodę obserwacji rozkładu dyfundujących w głąb metalu atomów α -promieniotwórczych zastosowali inni autorzy (S t e i g m a n, S h o c k l e y i N i x [15, 16]). W metodzie tego typu — zresztą szeroko stosowanej — wykorzystuje się absorpcję elektronów rozpadu β w materiale próbki badanej. Próbkę tę odwraca się warstwą aktywną w kierunku licznika. W miarę tego, jak atomy aktywne przenikają coraz bardziej w głąb materiału, wysyłane przez nie czątki β są coraz silniej absorbowane. Z n_0 elektronów wychodzących w kierunku licznika tylko n zdoła przejść przez warstwę o grubości x g/cm². Zależność $\frac{n}{n_0}$ od grubości warstwy można w przybliżeniu przedstawić w postaci

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\mu x}, \quad (4)$$

gdzie współczynnik absorpcji μ wyznacza się na podstawie danych doświadczalnych rys. 10 [17] lub ze wzoru empirycznego

$$\mu = \frac{22}{E_{\beta \max}^{1,33}} \text{ cm}^2/\text{g}. \quad (5)$$

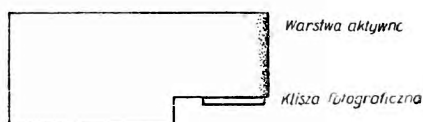
$E_{\beta \max}$ oznacza energię maksymalną cząstek β wyrażoną w MeV. Znając współczynnik μ można ze wzoru (4) wyliczyć, na podstawie wskazań licznika, zmieniający się w czasie rozkład atomów promieniotwórczych w próbce i stąd — stałą dyfuzji. W metodzie tej jest ważne, by użyte izotopy promieniotwórcze były czystymi emiterami β . W przeciwnym



Rys. 10

razie dokładność metody zmniejsza się.

Inny bardzo wygodny sposób obserwacji dyfuzji w ciele stałym [18, 19, 20] opiera się na autoradiogramie przekroju prostopadłego do warstwy aktywnej (rys. 11). Po od-



Rys. 11

powiednio długim wytrzymaniu badanej próbki z naniesioną warstwą aktywną w danej temperaturze rozcina się ją prostopadle do warstwy i umieszcza na emulsji kliszy. Może to być np. klisza rentgenowska. Po dostatecznie długiej ekspozycji — zależnej od rodzaju izotopu, jego aktywności i czułości emulsji — kliszę wywołuje się i bada otrzymany autodiagram. Zamiast kliszy można zastosować licznik z odpowiednią przesłoną i szczeliną.

Reakcje chemiczne

Badania mechaniczne reakcji chemicznych — to najstarsza dziedzina zastosowań indykatorów promieniotwórczych. Począwszy od 1920 roku, kiedy Hevesy i Zechmeister użyli ThB do sprawdzenia możliwości wymiany między jonami ołowiu i atomami ołowiu w roztworze pewnego złożonego związku — opublikowano do dziś setki prac poświęconych radioizotopom użytym do badań reakcji chemicznych. Istotnie problemy te dla chemików są pasjonujące. Stare, przeważnie optyczne metody badania stadiów pośrednich reakcji były bezsilne wobec niektórych, nieraz bardzo ważnych reakcji. W wielu przypadkach otrzymano sprzeczne wyniki. Zasadnicza trudność badań mechanizmu reakcji polega na tym, że atomy tego samego pierwiastka, występujące w różnych reagujących ze sobą cząsteczkach lub w różnych miejscach tej samej cząsteczki, są nierozróżnialne. Dlatego możliwość „znaczenia“ atomów przez wprowadzenie do cząsteczki na miejsce danego izotopu trwałego — izotopu promieniotwórczego rewolucjonizuje całe to zagadnienie, stwarza zawrotne wprost możliwości badawcze. Sięgnijmy po jeden choćby przykład. Bardzo ważnym w chemii organicznej procesem jest tzw. *synteza Fischera-Tropscha*, w której z wodoru i tlenku węgla otrzymuje się węglowodory. Ważną rolę odgrywają tu katalizatory metaliczne, np. żelazo. Było wielce

interesujące dowiedzieć się, czy w czasie reakcji nie powstaje jako stadium pośrednie węgiel metalu (np. Fe_2C). Eksperyment [21] wykonano w następujący sposób. Na powierzchni katalizatora utworzono warstewkę węgla zawierającego promieniotwórczy ^{14}C . Gdyby istotnie w procesie syntezy tworzył się jako człon pośredni węgiel metalu, to pierwsze partie syntetyzowanych węglowodorów powinny zawierać ^{14}C . Okazało się, że tylko nieznaczna część węglowodorów (10% przy temperaturze 260° i katalizatorze żelaznym) tworzy się na tej drodze, reszta zaś na innej drodze — bez tworzenia węgla. Dodatkowy eksperyment sprawdzający, w którym wykonano syntezę przy użyciu mieszaniny $\text{H}_2 + ^{14}\text{CO}$, potwierdził te wyniki.

Rolnictwo

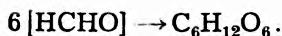
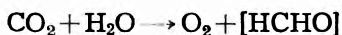
Wielkim polem zastosowań izotopów promieniotwórczych jest rolnictwo. Cały szereg zagadnień związanych z działaniem nawozów, z właściwszym sposobem i czasem ich podawania, zagadnień związanych z mechanizmem przyswajania przez roślinę różnych pierwiastków — można było rozwiązać dopiero wówczas, gdy do badań rolniczych zaczęto stosować izotopy promieniotwórcze. Niestety, nie wszystkie interesujące agronomię pierwiastki mogą być stosowane w postaci radioizotopów. Niektóre z nich, jak na przykład bardzo ważny dla życia rośliny tlen, nie mają izotopów promieniotwórczych o okresie wystarczająco długim dla badań. W tych przypadkach trzeba się uciekać do pomocy izotopów trwałych (np. ^2H , ^{15}N , ^{18}O), których zastosowań, zresztą bardzo rozległych i ważnych, w artykule tym w ogóle nie omawiamy. Spośród radioizotopów stosowanych w badaniach rolniczych najważniejszą rolę grają te, których okres mierzy się na miesiące i lata, a przede wszystkim ^{14}C (5720 lat), ^{22}Na (2,6 lat), ^{36}Cl ($0,4 \cdot 10^6$ lat), ^{45}Ca (163 dni), ^{59}Fe (47,1 dnia), ^{60}Co (4,95 lat). Poza tym stosowane są często i inne, o krótszym półokresie, na przykład ^{32}P (14,3 dnia), ^{35}S (87,1 dnia). Zaletą stosowania izotopów promieniotwórczych, bardzo ważną dla problemu nawożenia gleby, jest możliwość odróżniania pobieranych przez roślinę atomów danego pierwiastka pochodzących z gleby od atomów tego samego pierwiastka, pochodzących z podanych nawozów. Stosując ^{32}P stwierdzono, że w czasie pierwszych 10—20 dni po wysianiu pszenica, zasiana na glebie nawożonej związkami fosforu, pobiera fosfor niemal wyłącznie z nawozu. Począwszy od 30—35 dni silnie wzrasta pobór fosforu z gleby, a po 60 dniach pszenica pobiera go wyłącznie z gleby.

W wyniku innych badań, przeprowadzonych przez U c z e w a t k i n a i B o r o d u l i n a [24] za pomocą ^{32}P , stwierdzono, że fosfor naniesiony na liść jest znacznie szybciej asymilowany niż wtedy, gdy podawany jest roślinie za pośrednictwem korzeni. Oparte na tych i na podobnych obser-

wacjach odpowiednie nawożenie, bawełny przez opylanie liści dało wzrost urodzaju o 10—30%.

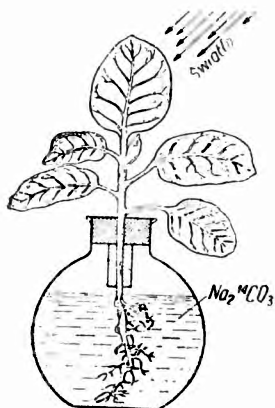
Weźmy inny przykład. Dotyczy on jednego z najważniejszych procesów świata roślinnego, a mianowicie *fotosyntezy*. Do niedawna jeszcze wydawało się zupełnie pewne, że cały potrzebny węgiel roślina czerpie z atmosfery za pośrednictwem liści. Uważano, że dwutlenek węgla łączy się z chlorofilem, który przekazuje mu pochłoniętą przez siebie energię Słońca i powoduje jego rozkład: tworzy się więc tlen, który ucieka do atmosfery, zaś węgiel wraz z obecną w roślinie wodą daje aldehyd mrówkowy [HCHO], ten zaś ulegając kondensacji tworzy glukozę; polimeryzacja glukozy prowadzi z kolei do powstania skrobi. W dalszych procesach powstają tłuszcze i białka.

W uproszczeniu można by proces asymilacji przedstawić za pomocą schematu



Prosty ten obraz okazał się jednak niesłuszny. W 1940 roku Winogradow, Wernadski i Tejs [21, 22] stosując „znaczone” atomy tlenu (^{18}O zamiast ^{16}O) wykazali, że wydzielający się tlen O_2 ma skład izotopowy taki, jak tlen z wody, a nie z dwutlenku węgla, że zatem światło pochłonięte przez chlorofil powoduje rozpad wody, tj. fotolizę wody, a nie CO_2 .

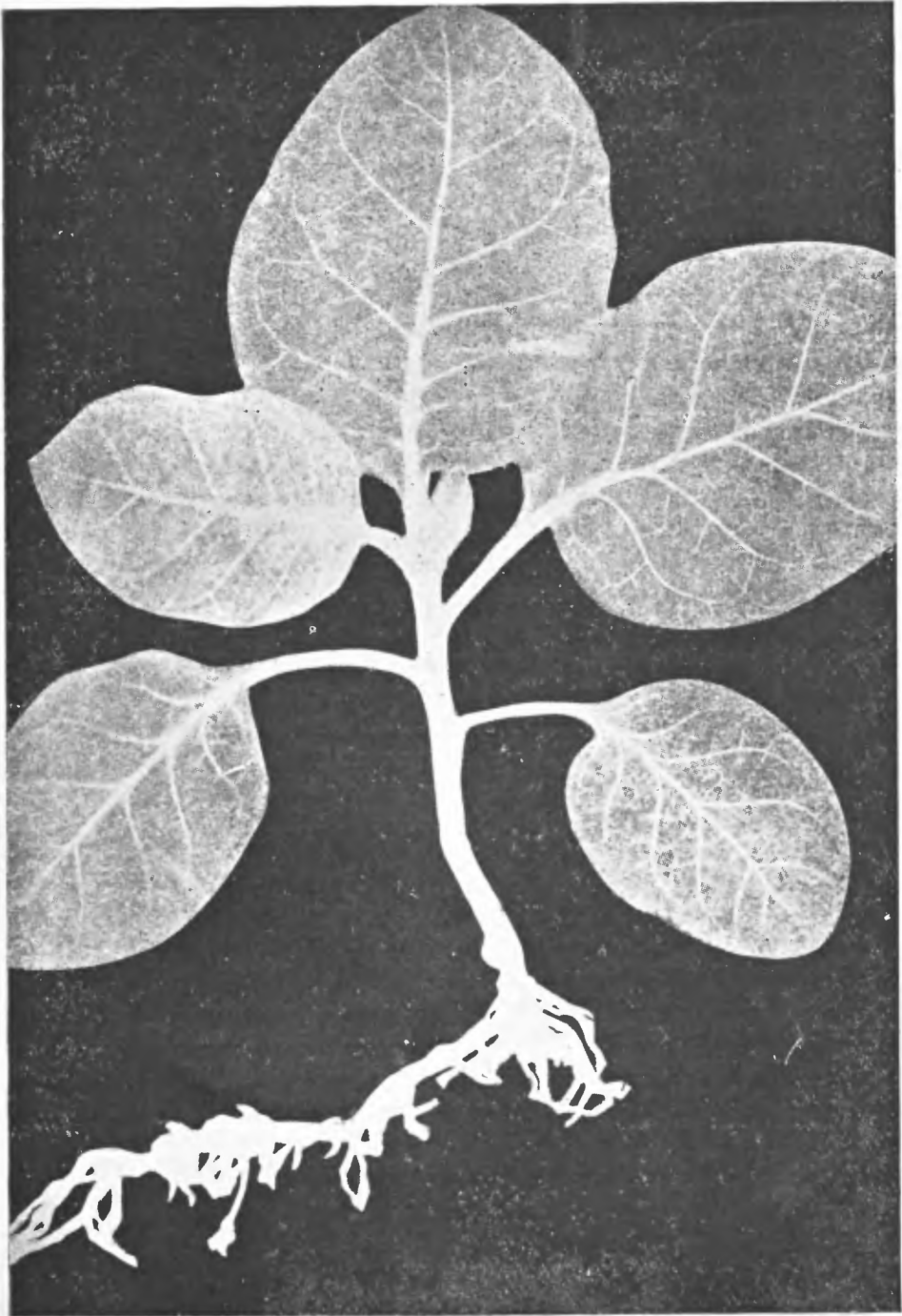
Inne eksperymenty doprowadziły do równie zadziwiających wniosków: umieszczając roślinę zieloną w atmosferze, w której obecny dwutlenek węgla zawierał promieniotwórczy węgiel ^{11}C , wykazano, że i w zupełnej ciemności liść pochłania dwutlenek węgla — stwierdzono bowiem obecność aktywnego ^{11}C w pewnych kwasach organicznych, tworzących się w roślinie. Inni badacze [23] stosując zamiast krótkożyjącego ^{11}C (20,4 min.) izotop ^{14}C (5720 lat), prześledzili dokładniej to zagadnienie i stwierdzili, że uprzednie naświetlenie rośliny zwiększa wielokrotnie szybkość asymilacji CO_2 w ciemności.



Rys. 12

Te i inne doświadczenia, przeprowadzone za pomocą „atomów znaczonych”, nie tylko zmieniły całkowicie poglądy na tę arcyważną dla biologii i rolnictwa reakcję, jaką jest fotosynteza, ale i doprowadziły do pewnych prak-

tycznych wniosków w sprawie nawożenia gleby. Okazało się bowiem, że roślina może pobierać węgiel nie tylko z atmosfery, ale i z czerpanych wprost z ziemi soli mineralnych, na przykład Na_2CO_3 . Doświadczenie było przeprowadzone bardzo prosto (rys. 12 i 13) [24].



Rys. 13

„Znaczone” $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ w roztworze wodnym był dokładnie izolowany od atmosfery. W roślinie, której korzenie zanurzone były w tym roztworze, stwierdzono — stosując metodę autoradiograficzną, tj. za pomocą emulsji fotograficznej, zetkniętej bezpośrednio z rośliną — obecność promieniotwórczego ^{14}C . Przeprowadzając ten eksperyment w ciemności i na świetle wykazano, że tylko w drugim przypadku ilość ^{14}C w liściach była znaczna, co świadczy o zachodzącej asymilacji. Podobne eksperymenty wykazały, że dwutlenek węgla może być pobierany także i przez korzenie rośliny [24]. Okazało się również [25], że asymilacja dwutlenku węgla w procesie fotosyntezy odbywa się nie tylko w liściach, ale i w łodydze rośliny, w jej komórkach zielonych.

Tak więc w wyniku rozległych badań, w których rolę zasadniczą odegrały wskaźniki promieniotwórcze, a zwłaszcza ^{14}C , stwierdzono, że dużą część węgla pobiera roślina za pośrednictwem korzeni. Stąd wypłynęły wnioski praktyczne w sprawie stosowania nawozów węglanowych i organicznych, których realizacja dała pewne pozytywne wyniki.

Na zakończenie tego paragrafu należy powiedzieć, że w badaniach przeprowadzanych z organizmami żywymi nie można stosować zbyt dużych ilości izotopu promieniotwórczego, gdyż silne promieniowanie wpływałoby wówczas na same badane procesy prowadząc do błędów. Z drugiej strony operowanie zbyt słabymi aktywnościami zwiększa trudności eksperymentalne, wymaga znacznego doświadczenia i także obniża dokładność pomiaru. Na ogół w eksperymentach z izotopami o długim i wielomiesięcznym okresie operuje się dziesiątkami μc , a przy bardziej krótkożytych — odpowiednio większymi ilościami.

Zagadnienia korozji

I tu także izotopy promieniotwórcze, występujące jako indykatory, mają wiele do powiedzenia. Ograniczymy się do jednego przykładu — korozji stopu Zn-Al-Pb w parze wodnej [26]. Chodziło tu o poznanie wpływu domieszki Pb na korozję próbki. Jako wskaźnik użyty został ThB. Po wykonaniu stopu sporządzono autoradiogram próbki, który wykazał, że ołów skupia się głównie wzdłuż granic ziaren eutektyku Zn-Al. Następnie próbkę tę trzymano w ciągu kilkunastu godzin w parze wodnej o temperaturze 95° . Okazało się, że miejsca najsilniejszej korozji pokrywały się z miejscami najobfitszej koncentracji ołowiu.

· Analiza chemiczna

Na zakończenie tego krótkiego przeglądu zastosowań izotopów wspomnijmy w paru zdaniach o ich znaczeniu dla analizy chemicznej. Można tu odróżnić dwie główne metody:

- 1) metoda aktywacyjna,
- 2) metoda rozcieńczenia izotopowego.

W metodzie aktywacyjnej badaną próbkę, zawierającą interesujący nas izotop X naświetlamy silnym strumieniem neutronów (najczęściej neutronów termicznych uzyskiwanych z reaktora) lub prędkich jonów (najczęściej deuteronów, protonów lub cząstek α otrzymywanych z akceleratora). Cząstki te wchodzące w reakcję z jądrami różnych izotopów zawartych w próbce dają różnego rodzaju izotopy promieniotwórcze. Między innymi w próbce zachodzi reakcja z interesującym nas izotopem



gdzie a oznacza cząstkę wyzwalającą ruchy, b — cząstkę wylatującą z jądra złożonego w czasie reakcji, Y — produkt reakcji, zazwyczaj promieniotwórczy. Analiza polega na wykryciu promieniowania izotopu Y . Jeżeli aktywność tego izotopu mierzy się za pomocą odpowiedniego detektora, na przykład licznika GM, można, znając przekrój czynny reakcji (6) i strumień cząstek padających w czasie ekspozycji na próbkę, obliczyć liczbę atomów X w próbce. Jeżeli badamy próbkę o nieznanym składzie, to pomiary półokresów izotopów, powstałych w niej przy naświetlaniu, pozwalają nam określić jej zawartość.

Przy wyborze najwłaściwszej reakcji (a, b) należy brać pod uwagę wielkości przekrojów czynnych na reakcję z cząstką a wszystkich izotopów zawartych w próbce i wybrać taką, przy której interesujący nas izotop X da izotop Y o możliwie najsilniej występującej aktywności.

Dokładność metody aktywacyjnej może być bardzo duża. Dysponując silnym strumieniem neutronów termicznych rzędu 10^{12} neutr./cm².sek. można wykryć w próbce izotop występujący w ilości 10^{-10} g — jeśli jego przekrój czynny nie jest mniejszy od 10 barnów*. Zauważmy, że przekrój

Tabela III (wg [27])

| Źródło neutronów | Strumień neutronów cm ² ·sek | Masa dająca 100 impulsów licznika na minutę |
|---|---|---|
| Reaktor | $10^{10} - 10^{12}$ | $10^{-8} - 10^{-10}$ g |
| Cyklotron | $10^8 - 10^9$ | $10^{-6} - 10^{-7}$ g |
| Niskonapięciowy generator neutronów D-D | $10^5 - 10^6$ | $10^{-3} - 10^{-4}$ g |
| 1 g Ra=Be | $10^4 - 10^5$ | $10^{-2} - 10^{-3}$ g |

rzędu 10 barnów zalicza się do przekrojów średnio wielkich. Jeśli nie dysponujemy tak silnym źródłem neutronów, wykrywalne ilości są odpowiednio mniejsze, chyba że przekrój interesującego nas izotopu jest bar-

* Barn jest jednostką przekroju czynnego, równą 10^{-24} cm² (przyp. Red.).

dzo duży. Dla ilustracji podajemy w tabl. III orientacyjne zestawienie dających się wykryć ilości substancji przy operowaniu źródłami neutronów termicznych o różnej wydajności. W tabelicy tej przyjęto sprawność liczenia 0,25 i przekrój czynny 10 barnów.

Metoda rozcieńczenia izotopowego

Jeśli chcemy wykryć w badanej próbce masę X substancji A , to dodajemy do próbki a gramów promieniotwórczej substancji A o aktywności ν_a (c/g). Wydobywamy teraz z próbki pewną ilość M badanej substancji A i mierzymy jej aktywność właściwą ν . Szukana wielkość X może być wyznaczona z oczywistego związku:

$$a \cdot \nu_a = (X + a) \nu. \quad (7)$$

Metoda rozcieńczenia izotopowego X jest bardzo wygodna ze względu na to, że nie wymaga ilościowego wydzielania mierzonej substancji i określania całkowitej ilości danego pierwiastka. Zyskuje ona sobie duże znaczenie, zwłaszcza w biochemii.

Poprzestańmy na tym. Podobnych przykładów można by bardzo wiele przytoczyć i tak jednak nie zdołalibyśmy w jednym artykule choćby tylko musnąć wszystkich dziedzin przemysłu i nauki, w których izotopy promieniotwórcze już dziś odgrywają niepoślednią rolę. Niech więc ta garstka na pewno nie najtrafniej dobranych przypadków stosowania radioizotopów stanie się zaczątkiem całej serii obszernych referatów, w których by naświetlono sprawy krzepnącej wciąż metodyki prac izotopowych i jasno, wyczerpująco omówiono sukcesy osiągnięte w poszczególnych dziedzinach nauki i praktyki za pomocą tego tak sprawnego i gibkiego, subtelnego i zarazem prostego narzędzia badań, jakim są izotopy promieniotwórcze.

Literatura

1. I. Curie, F. Jolliot, C. R., 198, 254 (1934).
2. M. Blau, J. R. Carlin, Electronics, 21, Nr 4, 78 (1948).
3. J. R. Carlin, Electronics, 22, Nr 10, 110 (1949).
4. D. J. M. Smith, Electronics, 20, Nr 10, 106 (1947).
5. L. E. Glendenin, Nucleonics, 2, Nr 1, 13 (1948).
6. A. P. Schreiber, Nucleonics, 2, Nr 1, 33 (1948).
7. G. Hevesy i W. Seith, Z. Elektrochem. 37, 528 (1931).
8. G. Hevesy i W. Seith, Z. Phys. 56, 790 (1929).
9. G. Hevesy i W. Seith, Z. f. Phys. 57, 869 (1929).
10. G. Hevesy, W. Seith, A. Keil, Z. Phys. 79, 197 (1932).
11. W. Seith, A. Keil, Z. Metallkunde, 25, 104 (1933).
12. А. М. Загубски, Изв. АН СССР, сер. физ., 6, 903 (1937).
13. A. M. Zagubski, Phys. Zeit. d. Sowjetunion, 12, 118 (1937).

14. W. Johnson, *Trans. A. IMME*, 143, 107 (1941).
15. I. Steigman, W. Shockley, F. Nix, *Phys. Rev.* 55, 605 (1939).
16. I. Steigman, W. Shockley, F. Nix, *Phys. Rev.*, 56, 13 (1939).
17. L. Seren, H. N. Friedlander, S. H. Turkel, *Phys. Rev.*, 72, 888 (1947).
18. J. R. Johnson, *J. appl. Phys.*, 20, 129 (1949).
19. J. Jędrzejewski, *Acta phys. Pol.*, 2, 137 (1932).
20. J. T. Kummer, T. W. de Witt, P. H. Emmet, *J. Am. Chem. Soc.* 70, 3632 (1948).
21. А. П. Виноградов, *Изв. АН СССР, сер. биол.*, 409 (1947).
22. В. И. Вернадски, А. П. Виноградов, Р. В. Теис, *ДАН СССР*, 31, 574 (1941).
23. A. A. Benson, J. A. Basham, M. Calvin, *J. A. Chem. Soc.* 72, 1712 (1950).
24. А. М. Кузин, *Меченые атомы, Изв. АН СССР*, 1954.
25. А. Л. Курсанов, *Изв. АН СССР, сер. биол.*, nr 1,8 (1954).
26. K. Löberg, *Metallforschung*, 2, 230 (1947).
27. T. J. Taylor, W. W. Havens, *Nucleonics*, 6 Nr 4, 54 (1950).

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

Zebranie sprawozdawcze Zakładu Izotopów Promieniotwórczych Instytutu Fizyki PAN

W dniach 25 i 26. III. br. odbyła się w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie pierwsza sesja sprawozdawcza Zakładu Izotopów Promieniotwórczych.

W posiedzeniach sesji oprócz pracowników Zakładu Izotopów Promieniotwórczych brali udział fizycy z Krakowa, Wrocławia i Łodzi. Przeciętna ilość obecnych na posiedzeniach wynosiła 50 osób. Odbyły się 4 posiedzenia: dwa w piątek 25 i dwa w sobotę 26. III. Wygłoszono ogółem 17 referatów omawiających stan prac doświadczalnych z dziedziny fizyki jądrowej.

Referowane prace prowadzone są przez dwa zespoły. Referaty zespołu pracującego pod kierownictwem prof. A. Sołtana dotyczyły fizyki jądra atomowego, budowy aparatury detekcyjnej, budowy akceleratora typu Van de Graaffa i produkcji ciężkiej wody. Drugi zespół, kierowany przez prof. M. Danysza, referował prace z dziedziny promieniowania kosmicznego i techniki kliszowej.

Otwarcia sesji dokonał prof. A. Sołtan i po odczytaniu porządku obrad zaproponował wybranie na przewodniczącego pierwszego posiedzenia prof. H. Niewodniczańskiego. Prof. Sołtan, charakteryzując prace grupy jądrowej, wyjaśnił, że wiele prac objętych planem naukowym ma charakter techniczno-laboratoryjny ze względu na konieczność budowy aparatury własnymi środkami.

Następnie prof. M. Danysz podał charakterystykę prac grupy kliszowej. Referat dotyczył badań skoncentrowanych nad zagadnieniem nie-trwałych cząstek elementarnych promieniowania kosmicznego i związanych z tym prac nad opanowaniem metod doświadczalnych. Poruszana była również sprawa możliwości produkcji i naświetlania klisz jądrowych w kraju. W referacie wspomniano o rozwijającej się współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi, którą należy kontynuować i rozszerzać. Nad wygłoszonymi referatami odbyła się dyskusja, w której głównie poruszono sprawę produkcji emulsji jądrowych i zagadnienie zorganizowania lotów balonowych.

Po zakończeniu dyskusji nad wstępnymi referatami, inż. L. B o r o w s k i zapoznał zebranych ze stanem budowy ciśnieniowego akceleratora taśmowego (typu Van de Graaffa), podkreślając, że największe trudności związane są z uzyskaniem odpowiednich materiałów i elementów konstrukcyjnych. Tempo prac jest również hamowane niedotrzymaniem terminów przez zakłady przemysłowe, które przyjęły zamówienia na wykonanie części do aparatury. Wykończenie zasadniczej konstrukcji przewidziane jest na miesiąc lipiec br. Następnie uczestnicy sesji udali się na „halę atomową“ i obejrzeli budowany akcelerator z generatorem taśmowym. Na tym zakończyło się pierwsze posiedzenie.

Posiedzenie popołudniowe pod przewodnictwem prof. M. M i ę s o w i c z a rozpoczęło się referatem mgr E. S k r z y p c z a k o w e j. Referat dotyczył analizy gwiazd rejestrowanych w emulsjach G5 ze względu na emisję hyperfragmentów.

Drugim referującym z grupy kliszowej był A. W r ó b l e w s k i, który mówił o analizie zderzeń prowadzących do emisji hyperfragmentów. W dyskusji nad tymi referatami najwięcej uwagi poświęcono omówieniu informacji dotyczących jednoczesnej emisji ciężkich fragmentów i ciężkiego mezonu. Pierwszy dzień sesji sprawozdawczej zakończyło konwersatorium, na którym wygłosili referaty prof. M. D a n y s z i prof. M. M i ę s o w i c z a.

Na przedpołudniowym posiedzeniu sobotnim przewodniczył prof. H. N i e w o d n i c z a ń s k i. Mgr K. B l i n o w s k i i inż. O. W o ł c z e k zreferowali stan prac nad wydzielaniem ciężkiego izotopu wodoru. Przedstawiono budowę działającej aparatury, która służy do wstępnego wzbogacenia wody w ciężką wodę, oraz opisano działanie urządzenia pozwalającego na wydzielenie ciężkiej wody z frakcji wzbogaconej w pierwszych stopniach elektrolizy. Podany został również szkic projektu nowej aparatury do produkcji ciężkiej wody.

Tematem następnego referatu wygłoszonego przez S. O t w i n o w s k i e g o, była strona techniczna badań reakcji (d, p) i (n, γ) z izotopem $^{12}_5\text{B}$. Referat dotyczył zagadnienia budowy aparatury detekcyjnej.

Następnie mgr Z. R y l l podała przegląd aktualnego stanu różnych prac, a mianowicie: budowy akceleratora liniowego dla elektronów, produkcji kryształów do liczników scyntylacyjnych, urządzeń dyskryminacyjnych do fotonowielaczy oraz stanu pracy nad moderacją neutronów przy ich przechodzeniu przez materię. Z powodu choroby inż. T. D o m a ń s k i e g o referat o jego pracy nad czasem moderacji neutronów nie został wygłoszony.

W kolejnym, czwartym referacie Z. S u j k o w s k i omówił zagadnienia związane z badaniem anihilacji jednokwantowej.

Mgr J. Rydygier opisał konstrukcję zbudowanej aparatury, służącej do detekcji neutronów. Działanie aparatury oparte jest na zjawisku rozszczepienia jąder uranu, spowodowanym przez neutrony.

Stan prac związanych z budową spektrometru β o dużej zdolności rozdzielczej został przedstawiony przez R. Sosnowskiego. Pierwsze próby działania tego spektrometru mają być przeprowadzone w czerwcu br.

W referacie kand. Z. Wilhelmięgo został omówiony projekt separatora izotopów o dużej wydajności.

Mgr M. Hurwiczowa przedstawiła stan pracy nad poszukiwaniem promieniotwórczości naturalnej ^{123}Sb .

Na ostatnim posiedzeniu popołudniowym przewodniczył prof. M. Mięsowicz. Omawiano metody pomiarowe stosowane w technice emulsji jądrowych.

Prof. J. Gierula dokonał przeglądu metod pomiarowych ze szczególnym uwzględnieniem metody stałego sygnału. Zostały przytoczone wyniki uzyskane przez pracowników zespołu prof. Danysz a.

Mgr P. Ciok wygłosiła referat na temat pomiaru masy cząstek naładowanych metodą liczenia przerw.

W dyskusji nad tym referatem prof. Danysz podkreślił dokładność tej metody i zwrócił uwagę na zagadnienie opłacalności czasowej przy jej stosowaniu.

Po dyskusji mgr T. Saniewska mówiła o identyfikacji cząstek naładowanych metodami: fotometryczną i liczenia promieni delta *. W wypowiedziach dyskusyjnych zwrócono uwagę, że mimo małej dokładności informacji uzyskiwanych na tej drodze, jest to metoda niezależnego pomiaru mas.

Ostatnim referatem zamykającym pierwszą sesję sprawozdawczą Zakładu Izotopów Promieniotwórczych był referat teoretyczny mgra A. Legatowicza, poświęcony statystycznej analizie metod pomiarowych stosowanych w technice emulsji jądrowych. Na tym wyczerpano porządek dzienny i przewodniczący prof. Mięsowicz ogłosił zamknięcie sesji.

K. Blinowski

* Promienie delta są to tory rozproszonych wtórnych elektronów. Liczba promieni delta na określonej długości toru cząstki zależy od masy i ładunku cząstki. Pomiar liczby promieni delta pozwala uzyskać dodatkową i niezależną informację o tych wielkościach, charakteryzujących cząstkę.

Zebranie sprawozdawcze Zakładu Fizyki Jądra Atomowego Instytutu Fizyki PAN

W dniach 6 i 7 maja odbyło się w Krakowie zebranie sprawozdawcze Zakładu Fizyki Jądra Atomowego Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Obradom przewodniczył kolejno prof. A. Sołtan, prof. J. Pniowski, prof. M. Danysz.

Pierwszego dnia, po otwarciu konferencji, prof. H. Niewodniczański podał ogólną charakterystykę prac prowadzonych w Zakładzie Fizyki Jądra Atomowego.

Stan prac i trudności, jakie napotyka Zakład przy budowie cyklotronu, przedstawił mgr J. Hannel. Wybudowany w Zakładzie akcelerator jonów z generatorem elektrostatycznym Van de Graaffa oraz możliwości zastosowania go do badań nad reakcjami fotojądrowymi omówił mgr S. Świerszczewski. W swoim referacie prof. A. Strzałkowski zaznajomił zebranych ze skonstruowaną przez siebie aparaturą do przyśpieszania protonów do energii 50 keV i ze stanem badań nad reakcjami (p, α) dla małych energii protonów. W wyżej wymienionych akceleratorach używane są źródła jonów z zimną katodą, opracowane przez mgra L. Pomorskiego.

Prace mgra K. Grotowskiego, mgra L. Jarczyka i mgra Z. Lewandowskiego są pracami przygotowawczymi głównie do badań reakcji fotojądrowych. Mgr L. Jarczyk i mgr Z. Lewandowski badali właściwości emulsji jądrowych, wyprodukowanych przez Katedrę Fototechniki Politechniki Wrocławskiej, i możliwości ich zastosowania do badań procesów jądrowych. Oprócz tego opracowali oni sposób selektywnego zmniejszania tła pochodzącego od promieniowania gamma. Mgr K. Grotowski przedstawił stan prac nad budową impulsowej proporcjonalnej komory jonizacyjnej. Oprócz tego mgr K. Grotowski omówił badania zależności temperaturowej tła w fotoczułych licznikach GM, prowadzone wspólnie z prof. drem H. Niewodniczańskim i doc. drem A. Hrynkiem.

Jedną z ważniejszych inwestycji Zakładu Fizyki Jądra Atomowego jest budowana pod kierunkiem doc. dra A. Hrynkiem aparatura do badań rezonansu jądrowego. Budowa aparatury jest na ukończeniu i grupa rezonansu jądrowego przystępuje już do badań wstępnych.

Doc. dr J. Janik zreferował badania struktury cieczy i opracowaną pod jego kierunkiem metodę wyznaczania wilgotności muru przez pomiar rozproszenia neutronów. Ponadto prelegent omówił pracujące w Zakładzie liczniki iskrowe i scyntylacyjne, przystosowane do liczenia neutronów.

Z kolei mgr F. Leś zapoznał zebranych z projektowaną tematyką badań własności jąder atomowych z nadsubtelnej budowy linii widmowych. W tym celu zbudował aparaturę do napyłania płytek interferencyjnych Fabry-Pérotta cienkimi warstwami metalicznymi. Budowę spektrometru scyntylacyjnego na promienie gamma oraz sposób otrzymania scyntylatorów krystalicznych omówili w kolejnych referatach prof. dr H. Niewodniczański i doc. dr A. Hryniewicz. Na zakończenie pierwszego dnia zebrania mgr W. Czyż przedstawił swoją pracę teoretyczną, dotyczącą fotorozszczepienia ${}^7\text{Li}$, a mgr O. Daszkiewicz omówił prowadzone w Zakładzie prace elektronowe. W czasie przerw uczestnicy zebrania zwiedzili pracownie naukowe Zakładu V IF PAN.

Posiedzenie sobotnie było poświęcone sprawozdaniu grupy promieniowania kosmicznego. Na wstępie prof. dr M. Mięśowicz scharakteryzował prace kierowanej przez siebie grupy.

W dwóch referatach mgra J. Babeckiego i w referacie doc. dra J. M. Massalskiego zostały omówione badania nad wielkimi pękami promieniowania kosmicznego i aparatura składająca się z 5 tac licznikowych, przeznaczona do powyższych badań.

Grupa promieniowania kosmicznego w referacie mgra inż. L. Turka przede wszystkim zwróciła uwagę na budowę dużego hodoskopu licznikowego. Powyższa aparatura jest już częściowo uruchomiona. Prof. dr L. Jurkiewicz omówił budowę komory Wilsona, przystosowanej do badań kosmicznych.

Prace wstępne z techniki pomiarów w emulsjach jądrowych przedstawiła mgr O. Stanisłowa; mgr W. Wolter referował bardzo ciekawy przypadek kaskady dużej energii zaobserwowanej w emulsjach warstwowych.

Badania Grupy Łódzkiej nad promieniowaniem kosmicznym, prowadzone za pomocą aparatury hodoskopowej, scharakteryzował prof. A. Zawadzki. W ostatnim referacie prof. dr L. Jurkiewicz omówił kilka prac, głównie z zastosowań technicznych fizyki.

W czasie i po referatach toczyły się ciekawe i ożywione dyskusje, które dostarczyły wiele cennych wniosków.

Na zakończenie dyrektor Instytutu Fizyki PAN prof. dr. L. Sosnowski podkreślił duże znaczenie tego rodzaju zebrania sprawozdawczych.

W zebraniu uczestniczyło około 200 osób, w tym 103 spoza Krakowa.

L. Jarczyk

R E C E N Z J E

Czesław Biało-brzeski, *Termodynamika*, PWN, Warszawa 1955, str. 238
cena 16,60 zł

Podręcznik termodynamiki prof. C. Biało-brzeskiego obejmuje treściwy kurs termodynamiki fenomenologicznej wraz z termodynamiką promieniowania temperaturowego oraz zasadami termodynamiki wnętrza gwiazd.

Rozdział pierwszy książki, noszący tytuł „Równanie stanu“ zaczyna się od określenia pojęć zasadniczych, a więc temperatury, ciepła i ciepła właściwego, potem następuje omówienie równania stanu gazów idealnych i równania Van der Waalsa. przy czym autor nawiązuje stale do faktów doświadczalnych. Pojęcia zasadnicze omówione są dość pobieżnie, jednak wydaje się, że rozważania nad pojęciem temperatury są zbyt pobieżne i że nie omówiono dokładniej pojęcia równowagi cieplnej, co w podręczniku teoretycznym byłoby pożądane.

W dwóch dalszych rozdziałach omawia autor pierwszą i drugą zasadę termodynamiki. Omówione jest tu pojęcie pracy i energii, sformułowana zasada zachowania energii, następnie zdefiniowane są pojęcia fazy, przemiany quasi-statyczne i przemiany odwracalne. Pojęcia przemian nie są jednak zdefiniowane całkiem precyzyjnie i można się obawiać, że studiujący nie zrozumieją ich dostatecznie na podstawie tego podręcznika. Po zdefiniowaniu i omówieniu tych pojęć przechodzi autor do sformułowania pierwszej zasady termodynamiki i jej zastosowań, po czym omawia drugą zasadę termodynamiki. Na początku wyłożone są właściwości motorów cieplnych i cykl Carnota, następnie sformułowana jest druga zasada termodynamiki i jej związek z nieodwracalnością zjawisk w przyrodzie. W dalszym ciągu zdefiniowane jest pojęcie entropii i prawo jej wzrostu. Rozdział kończy się uwagami o motorach cieplnych stosowanych w technice.

Po omówieniu obu zasad termodynamiki przechodzi autor do rozważania równowagi termodynamicznej. Po określeniu przemian wirtualnych i ogólnych warunków równowagi termodynamicznej następuje określenie funkcji charakterystycznych oraz zastosowania ich do układów jednorodnych, jednoskładnikowych wielofazowych oraz wieloskładnikowych wielofazowych (reguła faz Gibbsa). Jako zastosowanie równań równowagi wyprowadza autor prawo działania mas oraz rozwija teorię roztworów rozcieńczonych. Rozdział kończy się rozważaniami nad powinowactwem chemicznym oraz sformułowaniem trzeciej zasady termodynamiki. Materiał wyłożony jest w tym rozdziale w sposób zwięzły i w ścisłej łączności z doświadczeniem, przez co wykład różni się w sposób korzystny od niektórych podręczników, gdzie zagadnienia te podawane są rozwlekłe i nużąco. Nasuwa się tu jedna uwaga: czy nie lepiej jest w rozważaniach odnoszących się do równowagi termodynamicznej posługiwać się entalpią swobodną zamiast potencjałami termodynamicznymi. Enthalpia swobodna, która jest analogonem energii swobodnej w procesach izotermiczno-izobarycznych, ma bardziej bezpośredni związek z pracą wykonaną przez układ i z powinowactwem chemicznym niż potencjał termodynamiczny, przez co odpowiednie rozważania nabierają większej jasności.

W dalszym rozdziale zajmuje się autor właściwościami termodynamicznymi promieniowania temperaturowego zrównoważonego, wyprowadzając prawa Kirchhoffa, Stefana-Boltzmann'a i Wiena. Rozdział o promieniowaniu kończy wyprowadzenie prawa Plancka za pomocą założeń o charakterze statystycznym, (co autor wyraźnie podkreśla).

W ostatnim rozdziale zajmuje się autor termodynamiką wnętrza gwiazd, działem termodynamiki, w którym był wybitnym specjalistą, rozważając zagadnienia równowagi termodynamicznej i promienistej wewnątrz gwiazd, omawiając modele gwiazd i kończąc uwagami o ewolucji gwiazd.

Książka prof. Białobrzeskiego zawiera jasny i zrozumiały wykład termodynamiki i będzie dużą pomocą zarówno dla studentów, jak i dla wykładowców. Ostatni rozdział tej książki wskazuje na możliwości zastosowań termodynamiki do działów nauki, które się dzisiaj intensywnie rozwijają. Podkreślić należy też fakt, że w książce znajduje się szereg uwag o charakterze filozoficznym, pochodzących zarówno od autora, jak i od redaktora podręcznika.

B. Średniawa.

Stanisław Ziemecki, *O prawach przyrody*. Wiedza Powszechna, Warszawa 1954, str. 335, cena 13.50 zł.

Prof. S. Ziemecki dał nam znowu piękną książkę popularną, poświęconą opisowi najważniejszych zjawisk fizycznych i praw nimi rządzących.

Książka składa się, prócz wstępu, z dziewięciu rozdziałów, które z kolei dzielą się na krótsze, nieraz 1—2 stronicowe ustępy. Autor układa materiał w sposób częściowo odbiegający od tradycyjnego porządku. Tak np. już we „Wstępie“ jest mowa o zjawisku odrzutu, o napędzie raketowym, nawet o jego możliwych zastosowaniach astronautycznych. Z kolei idą rozdziały poświęcone mechanice (z dygresjami astronomicznymi), nauce o ciepłe, o przemianach energii, o elektryczności i magnetyzmie. Trzy rozdziały ostatnie, obejmujące przeszło $\frac{1}{3}$ część książki, omawiają budowę materii. Zamykają książkę „Przypisy“, w których autor opisuje możliwości wykorzystania energii jądrowej oraz korpuskularno-falowe oblicze materii i mikroskop elektronowy.

Wykład obytywa się zupełnie bez wzorów i zakłada znajomość co najwyżej działań arytmetycznych oraz znajomość fizyki w zakresie... dawno zapomnianej szkoły powszechnej. Sposób przedstawienia rzeczy jest wszędzie bardzo jasny i przystępny, oparty na prostych doświadczeniach, a także na przykładach zaczerpniętych z życia codziennego. Tam, gdzie autor ze zrozumiałych względów nie może zagłębiać się w bliższe wyjaśnienia trudniejszych zagadnień, nie ukrywa on przed czytelnikiem owych nieuniknionych luk i trudności. Udaje mu się jednak przekazać czytelnikowi w sposób prosty i niewymuszony bardzo pokazną sumę wiadomości o zjawiskach przyrody, ich wzajemnych powiązaniach i prawach z uwzględnieniem najnowszych odkryć fizyki atomowej. Autor podkreśla często znaczenie badań fizycznych dla poznania otaczającego nas świata, dla postępu wszelkiej wiedzy; jednocześnie zaś przy każdej sposobności wskazuje na powiązania rozwoju fizyki z potrzebami praktyki oraz na zastosowania poznanych praw i zjawisk w życiu i w technice. Jest to więc książka w najlepszym znaczeniu tego słowa popularna, nie można jednak chyba nazwać jej „łatwą“ w tym znaczeniu, że przyswojenie sobie jej treści miałyoby przyjść niemal bez wysiłku komuś, kto w fizyce jest jeszcze „białą kartą“. Stopień trudności wzrasta, rzecz rozumiała, w miarę zbliżania się do końca książki, mimo to jednak każdy tzw. „laik“, który ją uważnie przeczyta, będzie rozumiał, o co

chodzi w najważniejszych zagadnieniach fizyki. Co więcej, może ona oddać duże usługi nauczycielom, prelegentom popularnym, uczestnikom szkolnych kółek fizycznych, a nawet studentom tych wydziałów uczelni wyższych, gdzie fizyka jest przedmiotem pomocniczym, jak np. słuchaczom medycyny. Wyjaśni im ona niejedno i niejednym zainteresuje.

Autor umie ożywić wykład ciekawymi opisami doświadczeń (z podaniem nawet wskazówek dotyczących ich wykonania prostymi środkami). Nie tylko cenną informacją, ale i pewnym odprężeniem dla czytelnika są bardzo interesujące wzmianki biograficzne, którym poświęcone są nieraz całe ustępy: o Fraunhoferze, Galileuszu, Newtonie, Einsteinie, Faradayu, Łomonosowie, Mendelejewie, uczonych polskich, jak Wróblewski, Olszewski, Smoluchowski, Maria Skłodowska-Curie. Wzmianki te mają dużą wartość wychowawczą, uczą bowiem, jak wielką siłą jest umiłowanie prawdy naukowej, z jakim wysiłkiem pokonywali wszelkie przeszkody ci prawodawcy nauki, jak walory umysłu spletały się w nich z walorami charakteru.

Język i styl książki jest bardzo poprawny, potoczysty i gładki. Co się tyczy wyposażenia ilustracyjnego, to nie może ono wszędzie zadowolić. Już to profesor Ziemecki zdaje się nie mieć szczęścia do swych ilustratorów, którzy nie zawsze zdają sobie sprawę z tego, że prostota a prymityw to nie jedno i to samo.

W kilku miejscach można podyskutować z Autorem na temat słuszności takiego czy innego ujęcia lub wyrażenia, takich czy innych danych liczbowych. Są to jednak drobiazgi, nie zmniejszające w niczym wartości tej pięknej książki, która niewątpliwie da wiele zadowolenia i pożytku swym czytelnikom, a niejednego spośród nich zachęci do bliższego zapoznania się z naszą nauką.

W. Kapuściński.

Polska Akademia Nauk

W poniedziałek, dnia 28 lutego 1955 r. odbyło się XXIV plenarne zebranie III Wydziału Polskiej Akademii Nauk, na którym sekretarz Wydziału prof. M. Śmiałowski omówił działalność Wydziału w roku 1954.

W dniu 28 marca 1955 r. odbyło się XXV posiedzenie naukowe Wydziału III PAN, na którym zostały zreferowane następujące prace z fizyki:

R. Gajewski — „Promieniowanie dipola w falowodzie w stanie nieustalonym“ (praca zgłoszona przez członka rzeczywistego PAN prof. W. Rubinowicza).

S. Wiktor — „Wysokoenergetyczna część widma promieni gamma ThD wyznaczona za pomocą komory dyfuzyjnej“ (praca zgłoszona przez członka korespondenta PAN, prof. H. Niewodniczańskiego).

W dniu 25 kwietnia 1955 r. odbyło się XXVI zebranie naukowe Wydziału III Polskiej Akademii Nauk, na którym zostały omówione osiągnięcia Zakładu Aparatów Matematycznych Instytutu Matematycznego PAN oraz zademonstrowano działanie analizatora wielomianów algebraicznych (AWA) i analizatora równań różniczkowych (ARR).

W dniu 16 maja 1955 r. odbyło się XXVII posiedzenie naukowe Wydziału III Polskiej Akademii Nauk.

Instytut Badań Jądrowych w Polsce

Uchwałą Prezydium Rządu PRL z dnia 4 czerwca br. został utworzony Instytut Badań Jądrowych Polskiej Akademii

Nauk. Instytut otrzyma dostarczony przez Związek Radziecki stos atomowy i duży cyklotron. Stos atomowy będzie zbudowany w okolicy Warszawy, a cyklotron zostanie zainstalowany w Zakładzie Fizyki Jądra Atomowego w Krakowie.

Fizyka w Związku Radzieckim w 1954 r.

W dniu 2 lutego 1955 r. odbyło się doroczne plenarne posiedzenie Akademii Nauk ZSRR. W słowie wstępnym prezydent Akademii, akademik A. N. Niesmiejanow, poświęcił dużo uwagi rozwojowi fizyki w Związku Radzieckim, a w szczególności fizyki jądrowej, fizyki teoretycznej, radiofizyki i fizyki półprzewodników.

Główny sekretarz Akademii ZSRR, akademik A. W. Topczijew, omówił w swym referacie całokształt dorobku naukowego Akademii w roku 1954, przedstawiając między innymi niektóre rezultaty prac nad wykorzystaniem energii atomowej w celach pokojowych. Wspominając o uruchomionej w maju 1954 r. elektrowni atomowej o mocy 5000 kW, Topczijew zakomunikował o postępie prac nad uruchomieniem znacznie większej elektrowni atomowej, o mocy 50—100 MW.

W 1954 r. rząd Związku Radzieckiego wyraził gotowość wzięcia udziału w Międzynarodowej konferencji poświęconej zagadnieniom pokojowego wykorzystania energii atomowej oraz powziął decyzję okazania innym krajom naukowej i technicznej pomocy w dziedzinie rozwoju badań jądrowych przez dostarczenie im stosów atomowych i akceleratorów cząstek elementarnych.

W ubiegłym roku wykonano w Związku Radzieckim wiele ważnych prac z zakresu wykorzystania energii atomowej przez zamianę jej na energię elektryczną lub elektrochemiczną. Szerokim frontem prowadzone były badania nad zastosowaniem izotopów promieniotwórczych w medycynie i w przemyśle. W przemyśle zastosowano je między innymi do kontroli i automatyzacji różnych procesów technologicznych, do sterylizacji produktów żywnościowych oraz do intensyfikacji i aktywacji wielu ważnych procesów chemicznych, jak polimeryzacja, utlenianie, wulkanizacja itp.

Metoda znaczonych atomów znalazła liczne zastosowania w biologii, pozwalając zbadać szereg skomplikowanych procesów w organizmach zwierzęcych i roślinnych. Zbadano szybkość przenoszenia się w roślinach produktów fotosyntezy oraz procesy tworzenia sacharozy, nikotyny i innych cennych produktów roślinnych. W 1954 r. ponad 30 zakładów naukowych w Związku Radzieckim przeprowadzało badania nad optymalnymi warunkami nawożenia gleby pod różne kultury rolne, posługując się superfosfatem zawierającym znaczone fosfor. Znaczone atomy umożliwiły zbadanie wielu praw rządzących reakcjami chemicznymi, jak np. wodorowa wymiana aldehydów oraz tworzenie i rozkład politianitów. Zastosowano je również w technice do śledzenia procesów dyfuzji i międzyatomowego oddziaływania w stopach, a także do badania ścierania się części maszyn.

W dziedzinie teoretycznej i doświadczalnej fizyki jądrowej na uwagę zasługują prace z elektrodynamiki kwantowej, z teorii cząstek elementarnych, z zagadnień promieniowania kosmicznego i ze spektroskopii β i γ ciał promieniotwórczych. Prace nad promieniami kosmicznymi dotyczyły przede wszystkim badania hyperonów i oddziaływania protonów i neutronów wielkich energii z jądrami atomowymi. W dziedzinie spektroskopii β i γ wykonano szereg intere-

sujących prac, które pozwoliły wyjaśnić schematy rozpadu różnych jąder oraz dostarczyły informacji o ich poziomach energetycznych. Wyznaczono na przykład schemat rozpadu jądra ^{140}Ce , które ma wypełnioną powłokę neutronową i odznacza się niezwykle wysoką energią wzbudzenia pierwszego poziomu.

W dalszej części referatu akademik Topczijew omówił szereg wyników osiągniętych w innych działach fizyki. W Instytucie im. Lebediewa wykonano liczne prace z kwantowej teorii pól, z teorii metali i z teorii nadprzewodnictwa. Przy opracowywaniu problemu półprzewodników i ich zastosowań technicznych otrzymano nowe dane, dotyczące fizycznych podstaw teorii prostowania i wzmacniania w urządzeniach półprzewodnikowych, oraz przystosowano do tych urządzeń liczne nowe materiały. W Instytucie Akustyki przeprowadzono badania rozchodzenia się fal w różnych niejednorodnych środowiskach i rozpraszania fal na nierównościach powierzchni. Laboratorium Analizy Spektralnej Instytutu im. Lebediewa uzyskało ważne wyniki w dziedzinie kontroli produkcji metali, które pozwolą ulepszyć i przyspieszyć kontrolę jakości stali i stopów.

Uroczyste posiedzenie dla uczczenia dziesięciolecia śmierci L. I. Mandelsztama

15 grudnia 1954 r. Wydział Nauk Fizyczno-Matematycznych Akademii Nauk ZSRR zorganizował uroczyste posiedzenie poświęcone pamięci zmarłego przed dziesięciu laty akademika L. I. Mandelsztama, którego prace z optyki fizycznej, teorii drgań i radiofizyki wywarły wielki wpływ na rozwój tych dziedzin nauki.

Referaty na temat życia i działalności Mandelsztama wygłosili A. I. Berg, G. S. Landsberg, I. E. Tamm i S. M. Rytow.

Międzynarodowa konferencja w Paryżu

Z inicjatywy wybitnych fizyków francuskich została zorganizowana w Paryżu

międzynarodowa konferencja poświęcona wpływowi powłoki elektronowej atomu na zjawiska promieniotwórczości. Konferencja odbyła się w dniach od 28 czerwca do 3 lipca 1954 r. Oprócz fizyków francuskich wzięli w niej udział fizycy z Anglii, Danii, Holandii, Stanów Zjednoczonych, Szwajcarii, Szwecji i Związku Radzieckiego.

Omówiono następujące zagadnienia: wychwyty orbitalnych elektronów przez jądro, konwersja wewnętrzna promieni γ , jonizacja atomów przy rozpadzie α , β i przy chwytaniu K , emisja monoenergetycznych pozytonów, korelacja kątowa $\gamma - \gamma$ oraz rozkład kątowy promieniowania γ zorientowanych jąder.

Wykorzystanie energii wiatru i promieniowania słonecznego

W końcu 1954 r. w New Delhi w Indiach odbyła się konferencja poświęcona zagadnieniom wykorzystania energii wiatru i promieniowania słonecznego. Konferencja została zorganizowana przez rząd Indii i UNESCO. Oprócz fizyków w konferencji wzięli udział liczni chemicy, energetycy, geofizycy, agrotechnicy, botanicy i biologowie z Anglii, Danii, Francji, Francuskiej Afryki Zachodniej, Holandii, Indii, Indonezji, Izraela, Niemiec, Stanów Zjednoczonych, Związku Północno-afrykańskiego i Związku Radzieckiego.

Wygłoszono 9 referatów na temat energetyki wiatru i 11 referatów na temat energetyki słonecznej. Omówione zostały zastosowania promieniowania słonecznego do ogrzewania domów mieszkalnych, gotowania pokarmów, topienia metali i otrzymywania wysokich temperatur dla wielu procesów chemicznych. Uczestnicy konferencji zwiedzili laboratorium Instytutu Fizyki w New Delhi, w którym zademonstrowano liczne urządzenia wykorzystujące energię promieniowania słonecznego, między innymi kuchnie słoneczne z parabolicznymi zwierciadłami o powierzchni 1 m², pracujące z mocą

około 350 W, oraz motor słoneczny poruszający małą pompkę wodną.

IX Konferencja poświęcona spektroskopii w ZSRR

Od 5 do 11 lipca 1954 r. odbywała się w Tartu, w Estońskiej SRR, wszechzwiązkowa konferencja na temat spektroskopii. W konferencji wzięło udział około 750 osób. Byli to fizycy, chemicy, pracownicy przemysłu i przedstawiciele innych gałęzi nauk, stosujący w swej pracy metody analizy spektralnej. Wygłoszono ogółem 184 referaty. Prace konferencji odbywały się w trzech sekcjach: 1) spektroskopii molekularnej, 2) spektroskopii atomowej, i 3) analizy spektralnej. Zagadnienia metodyczne i aparaturowe zostały omówione w drugiej sekcji. Wiele ogólnych referatów wygłoszono na posiedzeniach plenarnych.

Pierwiastek o liczbie atomowej 101

Na ostatnim posiedzeniu Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego doniesiono o wytworzeniu pierwiastka 101. Otrzymał go prof. Seaborg i jego współpracownicy na Uniwersytecie Kalifornijskim w Berkeley. Dotychczas o nowym pierwiastku wiadomo bardzo niewiele. Wytworzono go przez bombardowanie lżejszych pierwiastków w cyklotronie. Odkrywczy zaproponowali dla niego nazwę Mendelew (symbol Me) na cześć twórcy periodycznego układu pierwiastków. Do wypełnienia całej grupy aktywności brakuje już tylko dwóch pierwiastków — 102 i 103. Własności pierwiastka 104, jeżeli uda się go otrzymać, będą świetnym sprawdzianem dzisiejszych koncepcji struktury elektronowej atomów.

15-litrowy blok emulsji jądrowej

Uniwersytet w Bristolu i kilka uniwersytetów włoskich wysłały wspólnym wysiłkiem olbrzymi blok emulsji jądrowej na wysokość około 30 km w celu zbada-

nia reakcji jądrowych występujących na tej wysokości. Blok uczulonej emulsji, dostarczony przez firmę Ilford, ma wymiary $37 \times 27 \times 15 \text{ cm}^3$ (15 litrów), składa się z 250 warstw emulsji o grubości 600μ i waży około 60 kg. Balon, którym została wysłana emulsja, jest sporządzony z polytenu, ma długość 61 m a średnicę 23 m. Wstępne badania naświetlonej emulsji dostarczyły niezwykle ciekawych informacji, dotyczących ciężkich mezonów.

Skutki prób broni atomowej

Dr J. C. B u g h e r, amerykański ekspert w dziedzinie medycznych efektów promieniotwórczości, stwierdził, że podczas próby bomby wodorowej na atolu Bikini w 1954 r. oprócz rybaków japońskich 300 mieszkańców Wysp Marshalla i część personelu wojskowego, biorącego udział w próbie, otrzymało dużą dawkę promieniowania. 84 osoby zostały poważnie naświetlone i zdrowiu ich zagraża niebezpieczeństwo.

Bomby atomowe a pogoda

Często słyszy się dyskusje nad możliwością wpływu wybuchów bomb A i H na pogodę. Na ten temat wypowiedzieli się ostatnio uczeni amerykańscy L. M a c h t a i L. H a r r i s z Biura Meteorologicznego w Washingtonie oraz Sir G r a h a m S u t t o n, dyrektor Służby Meteorologicznej Wielkiej Brytanii. Z ich rozważań wynika, że energia wyzwolona przez wybuch bomby, aczkolwiek olbrzymia w skali środków wybuchowych, jest względnie mała wobec energii odgrywającej rolę w procesach meteorologicznych. Na przykład energia wyzwolona przez kondensację wody podczas burzy odpowiada kilkunastu bombom A, a energia kinetyczna średniego cyklonu (o średnicy 1400 km) jest równa energii czterech bomb H. Hipoteza, wg której chmury pyłu rozproszonego w atmosferze wskutek wybuchów zmniejszają natężenie promieniowania słonecznego docho-

dzącego do powierzchni Ziemi, nie jest słuszna. Wynika to z badań efektu osłabienia natężenia promieniowania słonecznego po wybuchu wulkanu Krakatoa w 1883 r., który wyrzucił w atmosferę ziemską nieporównywalnie większą ilość pyłu niż bomba H. Również wzrost liczby jonów w atmosferze wskutek działania promieniowania wywołanego przez wybuch bomby nie może, wg S u t t o n a, mieć dostrzegalnego wpływu na ilość opadów atmosferycznych na całej kuli ziemskiej.

W każdym więc razie nie można obecnie dowieść, że wybuchy bomb atomowych mogły być przyczyną zimnego lata w Europie zachodniej w roku 1954. Jeżeli stanowiły one pewien drobny czynnik dodatkowy, to dla stwierdzenia tego należy przeprowadzić analizę statystyczną, która może dać pewne wyniki dopiero po wielu latach.

Sztuczne diamenty

Próby wytworzenia sztucznych diamentów datują się od początku XIX wieku. Pierwszą bezspornie udaną próbę wykonał w 1880 r. J. B. H a n n a y w Glasgow. Udało mu się wytworzyć olbrzymie ciśnienie w zatopionej z obu końców, rozgrzanej do czerwonoci czerwonej żelaznej, wypełnionej olejem, parafiną i metalicznym litem. W tych warunkach powstało 12 małych kryształków, które w 1942 r. metodą krystalograficzną promieni X zostały zidentyfikowane jako prawdziwe diamenty. W lutym br. w laboratorium badawczym General Electric w Schenectady uzyskano diamenty o wymiarach 1,5 mm i o wadze $\frac{1}{16}$ karata (33 mg), poddając odpowiednie związki węgla w ciągu szeregu godzin ciśnieniu 120 000 atmosfer w temperaturze 2600°C . Wysokie ciśnienie osiągnięto za pomocą olbrzymiej prasy. Odpowiada ono ciśnieniu panującemu na głębokości 400 km pod powierzchnią ziemi. Na razie przedwczesne byłoby twierdzenie, że uda się otrzymać tą metodą duże diamenty. przy-

datne do celów jubilerskich. Jednak, o ile koszty produkcji zostaną zmniejszone, sztuczne diamenty z pewnością zostaną zastosowane w przemyśle do cięcia i polerowania, wypierając z tej dziedziny diamenty naturalne.

Mieszane półprzewodniki

Zostały wyprodukowane ostatnio mieszane kryształy krzemu i germanu, które mają właściwości pośrednie między właściwościami obu składników. Właściwości te można zmieniać w sposób ciągły przez zmianę stosunku zawartości germanu i krzemu. Dzięki temu stała się możliwa produkcja tranzystorów o dużym wzmocnieniu charakteryzującym german i o wytrzymałości na wysokie temperatury, którą odznacza się krzem. Należy się spodziewać bardzo interesujących wyników, jeżeli nowa technika pozwoli na produkcję mieszanych kryształów pierwiastków czwartej kolumny układu periodycznego i związków intermetalicznych lub też mieszanych kryształów dwóch związków intermetalicznych.

Temperatura 55 000° w warunkach laboratoryjnych

Najwyższe temperatury w warunkach laboratoryjnych można uzyskać w łuku elektrycznym. Temperatura w łuku zależy od mocy wydzielonej w jednostce objętości, czyli od gęstości prądu elektrycznego. Aby otrzymać wysokie temperatury, trzeba więc ograniczyć przekrój poprzeczny łuku. Ponieważ żadna stała przesłona nie wytrzyma wysokiej temperatury łuku, Gerdien tak skonstruował przesłonę, że była ona stale pokryta cienką warstewką wody. Mac-ker znacznie udoskonalił metodę Gerdiena. Jego łuk palił się w rurce, której wewnętrzna powierzchnia była stale obmywana wstrzykiwanym strumieniem wody. Dzięki sile odśrodkowej woda pokrywała wewnętrzną ściankę, tworząc wzdłuż osi rurki cienki kanał dla łuku. Przy prądzie o natężeniu 1450 A

i średnicy kanału 2,4 mm temperatura na osi łuku wynosiła 55 000°.

Mikroskop na promienie X

W zakładach General Electric został skonstruowany mikroskop, w którym obserwowane przedmioty są oświetlane promieniami X. Zasada mikroskopu jest bardzo prosta. Obserwuje się cień przedmiotu na fluoryzującym ekranie, przy czym powiększenie jest równe stosunkowi odległości ekranu od źródła promieni X do odległości przedmiotu od źródła. Zdolność rozdzielcza przyrządu zależy od wymiarów źródła promieni X. Osiągnięcie powiększenia 1500 razy zostało umożliwione dzięki opracowaniu metody niezwykle precyzyjnego ogniskowania wiązki elektronów na anodzie lampy roentgenowskiej, co pozwoliło uzyskać źródło promieni X o wymiarach 0,25 μ . Zmieniając długość fali promieni X można regulować kontrastowość obrazu. Obraz może być fotografowany na filmie, przy czym odpowiednia przystawka pozwala na natychmiastowe wywołanie naświetlonego filmu.

Magnesy stałe z Columaxu

Angielskie Stowarzyszenie Magnesów Stałych wyprodukowało w swych laboratoriach badawczych nowy stop o budowie anizotropowej (wszystkie kryształy zorientowane w ten sam sposób), który odznacza się bardzo cennymi właściwościami magnetycznymi. Stop ten nazwano columaxem. Anizotropową strukturę columaxu uzyskuje się przez stopniowe ochładzanie stopionej masy począwszy od jednej jej powierzchni. Magnesy stałe sporządzone z columaxu mają bardzo wysoką jakość. Maksymalna wartość iloczynu BH (iloczyn natężenia pola rozmagnesowania przez pozostałość indukcji odpowiadającą temu polu), charakteryzująca jakość magnesu, osiąga wartość 8,5 MGOe, gdy dotychczasowe magnesy stałe miały BH nie przekraczające 5,7 MGOe. Remanencja magnesu wynosi 13 000—14 000 G, a koercja przekracza 750 Oe.

Władze CERN-u

Europejska Organizacja Badań Jądrowych (CERN) jest kierowana przez Radę, w której skład wchodzi po dwóch przedstawicieli każdego kraju należącego do Organizacji. Pierwsze zebranie Rady odbyło się w Genewie w październiku 1954 r. Prezydentem Rady został wybrany Sir Ben Lockspeiser, sekretarz Departamentu Badań Przemysłowych i Naukowych Wielkiej Brytanii. Wiceprezydentami mianowano prof. J. Nielsena, sekretarza Duńskiej Akademii Nauk, i wybitnego prawnika włoskiego A. Pennette. Dyrektorem Organizacji jest na razie prof. F. Bloch (Szwajcaria), a jego zastępcami są profesorowie E. Amaldi (Włochy) i C. J. Bakker (Holandia). Ponieważ prof. Bloch zrezygnował ze swego stanowiska, miejsce jego zajmie od 1 września prof. Bakker. Poszczególnymi agendami Organizacji kierują następujące osoby: synchrocyklotron — C. J. Bakker (Holandia), synchrotron protonowy — J. M. Adams (Wielka Brytania), badania teoretyczne — M. C. Møller (Dania), służba naukowa i techniczna — L. Kowarski (Francja), umiejscowienie i budynki — P. Preiswerk (Szwajcaria), administracja — C. Dankin (Wielka Brytania). Rada Organizacji wyłoniła poza tym trzy inne organy. Jednym z nich jest Komitet Rady, składający się z prezydenta, obu wiceprezydentów, dwóch przewodniczących pozostałych komitetów i reprezentantów dwóch krajów należących do Organizacji (w 1955 r., Francji i Holandii). Drugim organem jest Komitet Dyrektyw Naukowych, składający się z Nielsa Bohra (Dania), L. Leprince-Ringueta (Francja), G. Bernardiniego (Włochy), P. Scherrera (Szwajcaria), H. Alfvena (Szwecja), Sir Johna Cockcrofta (W. Brytania) i P. M. Blacketta (W. Brytania). Przewodniczącym tego Komitetu jest W. Heisenberg (Niemcy). Trzecim wreszcie organem jest Komitet Finansów, składający

się z przedstawicieli każdego kraju członkowskiego, pod przewodnictwem M. J. Willemsa (Belgia).

Brytyjskie „Atomic Energy Authority“ otrzymało herb

Kolegium Heroldów Wielkiej Brytanii zatwierdziło herb dla Atomic Energy Authority. Poniżej zamieszczamy rysunek tego herbu. Motto „Maxima e Minimis“ znaczy „największe z najmniejszych“. Barwy herbu nie zostały jeszcze definitywnie ustalone.



Nowi członkowie Royal Society

Pośród nowowybranych członków Royal Society są: Samuel Devons, profesor fizyki w Imperial College w Londynie, znany fizyk jądrowy, badacz krótkotrwałych stanów jąder atomowych, i Reginald William James, profesor fizyki na uniwersytecie w Cape Town, wyróżniony za swe badania struktury materii metodą promieni X, a w szczególności za badania ruchów termicznych atomów w kryształach. Zagranicznymi członkami Royal Society zostali wybrani: Werner Heisenberg (Göttingen) i Lise Meitner (Stockholm).

Wizyta fizyków polskich w Związku Radzieckim

W związku z propozycją rządu ZSRR dostarczenia Polsce reaktora atomowego

i akceleratora cząstek w pierwszych dniach kwietnia br. odwiedziła Związek Radziecki delegacja polska, w której skład wchodził następujący fizycy: prof. B. Buras, prof. H. Niewodniczański, prof. A. Sołtan, doc. Z. Wilhelm i prof. I. Złotowski. Delegacja zwiedziła laboratoria fizyczne w Moskwie, Leningradzie, Charkowie i Kijowie oraz uruchomioną w ubiegłym roku elektrownię atomową.

Kosmos

Ukazał się pierwszy zeszyt *Kosmosu*, serii B: przyroda nieożywiona. *Kosmos* jest organem Polskiego Towarzystwa Przyrodników im. Kopernika. Redaktorem Naczelnym czasopisma jest prof. Leopold Infeld. W słowie wstępnym Redakcja podaje, jakie cele sobie postawiła. Pierwszym z nich jest przedstawianie zagadnień nauki współczesnej na wysokim poziomie popularyzacyjnym, drugim zaś — stworzenie terenu dla dyskusji ideologicznej nad podstawowymi zagadnieniami nauki.

Pierwszy zeszyt jest poświęcony dwudziestej rocznicy śmierci Marii Skłodowskiej-Curie, a artykuły w nim zawarte są zaczerpnięte głównie z sesji naukowej Polskiej Akademii Nauk, która odbyła się w październiku 1954 r. ku uczczeniu tej rocznicy.

Prace opublikowane

H. Chęcińska i L. Sosnowski — „Fotoprzewodnictwo warstw mikrokrystalicznych z tellurku ołowiu“. *Bull. Acad. Polon. Sci. Cl. III*, 2, 383 (1954).

Streszczenie: Opracowano metodę otrzymywania cienkich warstw mikrokrystalicznych z PbTe, wykazujących wybitne fotoprzewodnictwo w niskich temperaturach (-180°C) pod wpływem promieniowania podczerwonego. Przeprowadzono systematyczne badania wpływu różnych czynników, przede wszystkim działania tlenu na aktywację fotoelektryczną. Zbadano charakter przewodnictwa otrzymanych warstw za pomocą po-

miarów siły termoelektrycznej i podano interpretację procesów aktywacji. Otrzymane komórki fotoelektryczne są niewrażliwe na działanie powietrza atmosferycznego, co ma duże znaczenie praktyczne przy użyciu ich jako detektorów promieniowania podczerwonego.

P. Ciok, M. Danysz i J. Gierula — „Opóźniony rozpad ciężkich fragmentów wyrzucanych z gwiazd promieniowania kosmicznego“. *Nuovo Cimento*, 11, 436 (1954).

Streszczenie: Porównano dane dotyczące siedmiu wypadków wytwarzania i rozpadu nietrwałych fragmentów jądrowych i przedyskutowano różne interpretacje tego zjawiska. We wszystkich siedmiu wypadkach nietrwałe fragmenty zostały wytworzone w procesie oddziaływania o energii leżącej w obszarze $(10-90) 10^9\text{eV}$, polegającym na mniej więcej centralnym zderzeniu neutralnej lub pojedynczo naładowanej cząstki z ciężkim jądrem emulsji. Czas życia nietrwałych fragmentów przekracza 10^{-12}sec . Ocena całkowitej energii wyzwalającej się podczas ich rozpadu zgadza się z wartością $Q=175\text{MeV}$, ale nie z wartością 145MeV . Rozkład energii między naładowane produkty rozpadu wykazuje wyraźną asymetrię. W większości wypadków nie zaobserwowano mezonów między produktami rozpadu. Wszystkie dyskutowane zdarzenia potwierdzają hipotezę związanej w jądrze cząstki V zarówno z punktu widzenia mezonowego, jak i niemezonowego typu jej rozpadu.

J. Dąbrowski i J. Sawicki — „Rozkład kątowy deuteronów z reakcji ${}^9\text{Be}(p,d){}^8\text{Be}$ “. *Nuovo Cimento*, 12, 293 (1954).

Streszczenie: Przy zastosowaniu przybliżenia Borna i modelu dwóch ciał (${}^8\text{Be}+n$) dla ${}^9\text{Be}$ otrzymano krzywe teoretyczne rozkładu kąтового deuteronów dla protonów o energiach $6,5\text{MeV}$ i 22MeV .

J. Dąbrowski i J. Sawicki — „Prosty model jądra ${}^6\text{Li}$ i reakcji ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ “. *Phys. Rev.*, 97, 1002 (1955).

Streszczenie: Model jądra ${}^6\text{Li}$, składającego się z cząstki α i deuteronu, zastosowano do obliczenia rozkładów kątowych reakcji ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ dla różnych energii neutronów przy założeniu występowania zjawiska „pickup”. Przebieg obliczonych rozkładów kątowych jest zbliżony do danych doświadczalnych. Niezgodność między doświadczeniem i teorią dla dużych kątów została przypisana tworzeniu się jądra złożonego.

A. Feltynowski, I. Glass, T. Piwkowski i A. Toruń — „Mikrostruktura warstw przewodzących z siarczku ołowiu”. *Bull. Acad. Polon. Sci. Cl. III*, 2, 389 (1954).

Streszczenie: Stosując metodę pseudoreplik udało się uzyskać preparaty uwidaczniające w mikroskopie elektronowym budowę mikrokryształiczną warstw fotoprzewodzących PbS. Mikrokryształki posiadają kształt słupów o długości od 1000 do 3000 Å i szerokości od 250 do 900 Å. Przeprowadzono również elektrodyfraktograficzne badanie preparatu. Zaobserwowano liczne silne pierścienie PbS i szereg słabych pierścieni, na razie nie zidentyfikowanych.

T. Grabowski i L. Natanson — „Absorpcja w aluminium promieniowania pozytonowego ${}^{13}\text{N}$ ”. *Bull. Acad. Polon. Sci. Cl. III*, 2, 379 (1954).

Streszczenie: Wykonano metodą licznikową pomiary absorpcji w aluminium pozytonów emitowanych przez ${}^{13}\text{N}$. Otrzymano na współczynnik absorpcji wartość $10,6 \pm 0,3 \text{ cm}^2/\text{g}$, a na praktyczny zasięg pozytonów — $0,47 \pm 0,01 \text{ g/cm}^2$. Stosując wzór na zależność między zasięgiem a maksymalną energią E_0 widma otrzymano $E_0 = 1,185 \text{ keV}$, wartość zgodną w granicach błędu z wartością wyznaczoną za pomocą spektrometru magnetycznego.

W. Hanus — „O formalizmie β Kemmera i jego kwantyzacji na gruncie zasady wariacyjnej Schwingera”. *Acta Phys. Polon.*, 13, 275 (1954).

Streszczenie: Opierając się na kwantowo-mechanicznej zasadzie waria-

cyjnej Schwingera, wyprowadzono podstawy „formalizmu β ” Kemmera i jego kwantowanie kanoniczne w jawnie relatywistycznej postaci. Przedyskutowano szczegółowo problem więzów. Otrzymano kanoniczne reguły przemienności dla składowych dynamicznie niezależnych i zależnych oraz dla ich sum, stanowiących całkowite składowe pola. Porównanie otrzymanych w ten sposób reguł przemienności z regułami Kemmera oraz z relatywistyczną postacią reguł przemienności, podaną przez Pauliego, wykazuje całkowitą zgodność i równoważność tych formuł. Wykazano również, że macierze β_μ Duffina-Kemmera oraz macierze γ_μ Diraca są jedynymi możliwymi wypadkami operatorów hermitowskich o wartościach własnych $0, \pm 1$ (lub ± 1), prowadzącymi do równań pola typu równań Diraca.

A. Jabłoński — „Wydatność antystokesowskiej fluorescencji roztworów barwników”. *Acta Phys. Polon.* 13, 239 (1954).

Streszczenie: Podano nowe tłumaczenie ostrego spadku wydajności fluorescencji przy przejściu od pobudzenia stokesowskiego do antystokesowskiego. Zgodnie z tym tłumaczeniem spadek wydajności jest spowodowany nakładaniem się długofalowej części pasma absorpcyjnego nieluminizujących dimerów na długofalową część pasma absorpcyjnego monomerów.

W. Królikowski — „Związki między metodą aproksymacyjną Einsteina—Infelda i metodą perturbacji”. *Bull. Acad. Polon. Sci. Cl. III*, 2, 375 (1954).

Streszczenie: Wykazano, że stacjonarne rozwiązanie równania Schrödingera $i\hbar(\partial\psi/\partial t) = (H_0 + H_1)\psi$ metodą perturbacji w reprezentacji Schrödingera można również otrzymać przez zastosowanie metody aproksymacyjnej Einsteina—Infelda.

W. Królikowski — „Funkcje falowe fotonów i ich równanie konfiguracyjne”. *Nuovo Cimento*, 12, 852 (1954).

Streszczenie: W pierwszej części pracy przedyskutowano konfiguracyj-

ne funkcje falowe fotonów zarówno typów Tamma-Dancoffa i Bethe-Salpetera, jak i bardziej ogólnego typu podanego przez Günthera. W drugiej części wprowadzono równanie konfiguracyjne dla fotonów, odpowiadające równaniu Bethe-Salpetera. Otrzymane wyniki mogą być zastosowane do mezonów po dokonaniu odpowiednich zmian.

J. Ostrowski i L. Sosnowski — „Badanie kinetyki fotoprzewodnictwa w siarczku talu“. *Bull. Acad. Polon. Sci. Cl. III*, 2, 385 (1954).

Streszczenie: Przedmiotem badania były fotokomórki Tl₂S, przedłużone metodą opisaną przez A. Wolską. Przeprowadzono systematyczne badania fotoprądu, czułości fotoprzewodnictwa S i czasu relaksacji τ w zależności od natężenia promieniowania J . Stwierdzono, że zarówno fotoczułość, jak i czas relaksacji zależą w silnym stopniu od J . Znalezione związki wykreślono w skali podwójnie logarytmicznej. Dla dużych natężeń promieniowania można je ująć w następujące empiryczne wzory:

$\sigma = aJ^{1/3}$, $S = bJ^{-1}$, $\tau = cJ^{-2/3}$, skąd otrzymujemy $\tau^3 \sigma = \text{const}$. Otrzymane wyniki rzucają światło na mechanizm fotoprzewodnictwa w Tl₂S i stanowią podstawę do dyskusji teoretycznej.

J. Rayski — „O systematyzacji ciężkich mezonów i hyperonów“. *Nuovo Cimento*, 12, 945 (1954).

Streszczenie: Dokonano próby klasyfikacji znanych cząstek elementarnych przy założeniu występowania pola odpowiadającego każdej nieredukowalnej reprezentacji grupy obrotów i odbić.

J. Sawicki — „Polaryzowalność deuteronu i jej wpływ na rutherfordowskie rozproszenie“ *Acta Phys. Polon.*, 13, 225 (1954).

Streszczenie: Przyczynk do energii deuteronu, spowodowany przez polaryzację został obliczony metodą klasyczną przez Krusego, Malenkę

i Ramseya. Autor oblicza ten przyczynk inną metodą i dyskutuje z punktu widzenia mechaniki kwantowej odstępstwo od rozproszenia rutherfordowskiego deuteronu, spowodowane jego pola yzacja w polu kulombowskim.

M. Suffczyński — „Kwantyzacja nieliniowej elektrodynamiki“. *Acta Phys. Polon.*, 13, 291 (1954).

Streszczenie: Nieliniowa elektrodynamika Borna-Infelda została wprowadzona do postaci hamiltonowskiej za pomocą metody podanej przez Diraca w 1950 r.

M. Suffczyński — „Stan podstawowy mezoatomu“. *Nuovo Cimento*, 12, 455 (1954).

Streszczenie: Całkowanie numeryczne równania Diraca dla jamy potencjalnej postaci $\varrho(r) = (Ze/2a^3)\exp(-r/a)$ daje na energię stanu podstawowego mezoatomu wartości $-10,258 \pm 0,003$ MeV dla $a = 1,865 \cdot 10^{-13}$ cm i $-10,754 \pm 0,004$ MeV dla $a = 1,696 \cdot 10^{-13}$ cm.

T. Tietz — „Uwaga o rozwiązaniu równania Schrödingera dla układów ograniczonych“. *Nuovo Cimento*, 12, 449 (1954).

Z. Wilhelmi — „Przekroje czynne jąder atomowych na reakcje (n,p) “. *Acta Phys. Polon.*, 13, 243 (1954).

Streszczenie: Zmierzone przekroje czynne ²⁵Mg, ²⁷Al, ⁵²Cr, ⁵⁶Fe, ⁷⁵As, ¹¹⁶Sn i ¹¹⁸Sn na reakcje (n,p) przy zastosowaniu neutronów otrzymywanych z reakcji Li(d,n). Opracowano prostą metodę wyznaczania poprawki spowodowanej rozproszeniem i absorpcją elektronów β w materiale naświetlonych próbek. Wykryto dwie nowe reakcje ¹¹⁶Sn(n,p)¹¹⁵In i ¹¹⁸Sn(n,p)¹¹⁷In. Otrzymane wyniki porównano z przekrojami czynnymi obliczonymi na podstawie teorii Weisskopfa i Ewinga. Przedyskutowano przyczyny rozbieżności, biorąc pod uwagę zależność przekrojów czynnych od promienia jądra, temperatury jądra i progów reakcji.

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD

Przewodniczący

Prof. dr LEOPOLD INFELD, czł. rzecz. PAN

Wiceprzewodniczący

Prof. dr ANDRZEJ SOŁTAN, czł. koresp. PAN

Sekretarz

Kand. JANUSZ DĄBROWSKI

Skarbnik

Prof. dr JERZY PNIEWSKI

Członek Zarządu

Prof. dr LEONARD SOSNOWSKI

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW TOWARZYSTWA

Gdańsk — Prof. dr IGNACY ADAMCZEWSKI

Głwice — Prof. dr KAZIMIERZ GOSTKOWSKI

Kraków — Prof. dr LEOPOLD JURKIEWICZ

Lublin — Prof. dr STANISŁAW ZIEMECKI

Łódź — Prof. dr FELIKS J. WIŚNIEWSKI

Poznań — Prof. dr ARKADIUSZ PIEKARA

Toruń — Prof. dr WANDA HANUSOWA

Warszawa — Prof. kand. ZDZISŁAW WILHELMI

Wrocław — Prof. dr BOLESŁAW MAKIEJ

SPIS TREŚCI

| | |
|---|-----|
| <i>J. Weysenhoff</i> — Uwagi o życiu i twórczości Einsteina na tle własnych wspomnień | 481 |
| <i>L. Infeld</i> — Historia teorii względności | 489 |
| <i>S. Loria</i> — Einstein a fizyka kwantowa | 500 |
| <i>M. Born</i> — Einstein a foton | 508 |
| <i>P. Zieliński</i> — Metody statystyczne przy interpretacji pomiarów | 523 |
| <i>Z. Wilhelmi</i> — O pewnych zastosowaniach izotopów promieniotwórczych w badaniach naukowych, przemyśle i rolnictwie | 538 |
| ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI | |
| Zebranie sprawozdawcze Zakładu Izotopów Promieniotwórczych Instytutu Fizyki PAN (K. Blinowski) | 556 |
| Zebranie sprawozdawcze Zakładu Fizyki Jądra Atomowego Instytutu Fizyki PAN (L. Jarczyk) | 559 |
| RECENZJE | |
| <i>C. Białobrzeski</i> — Termodynamika (rec. B. Sredniawa) | 561 |
| <i>S. Ziemecki</i> — O prawach przyrody (rec. W. Kapuściński) | 562 |
| KRONIKA | 564 |

Zawiadamiamy naszych Czytelników,
że od r. 1955 POSTĘPY FIZYKI ukazują się
jako dwumiesięcznik.
