

Strugalski, Zbigniew

O zasadzie nieoznaczoności Wernera Heisenberga

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 24/r2, 355-366

1979

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



Zbigniew Strugalski
(Warszawa)

O ZASADZIE NIEOZNACZONOŚCI WERNERA HEISENBERGA

„Nasz zwykły język zmusza nas do zadawania bezsensownych pytań, na przykład takich «jaka jest orbita elektronu, poruszającego się wokół jądra atomowego?» Ani słowo «orbita», ani słowo «poruszającego się», nie są dostatecznie określonymi ze względu na relacje nieokreśloności, a zatem nie ma sensu i samo pytanie”.

W. Heisenberg: *Cosmic Radiation and Fundamental Problems in Physics*, 1976.

Pięćdziesiąt lat wstecz, w roku 1927, ukazała się praca Wernera Heisenberga pt. *O treści fizycznej kwantowoteoretycznej kinematyki i mechaniki*¹. Zawarte w niej stwierdzenia wywarły decydujący wpływ na wybór kierunku dalszego rozwoju teorii atomu zapoczątkowanej pracami Ernesta Rutherforda² i Nielsa Bohra³ oraz wzbudziły do dziś nieustające dyskusje w sferze filozofii, zwłaszcza odnośnie problemu przychytności i teorii poznania⁴.

Główna teza dotyczyła zagadnienia możliwości uzyskania dokładnej informacji o stanie kinematycznym mikroobiektu — elektronu — w danej chwili poprzez jednoczesny pomiar jego położenia i prędkości. Informacja taka, jak sądzono, pozwoliłaby odtworzyć stan kinematyczny mikroobiektu w dowolnym momencie w przeszłości i przewidzieć jego stan ruchu w dowolnym momencie czasu w przyszłości, analogicznie jak tego można dokonać w mechanice newtonowskiej w odniesieniu do obiektów o istotnie większych masach — makroskopowych. W. Heisenberg stwierdził, że nie jest możliwy do wykonania jednoczesny dokładny pomiar położenia \vec{q} i pędu \vec{p} mikroobiektu. Precyzyjny pomiar jednej z tych wielkości, na przykład \vec{q} , powoduje nie dającą się określić zmianę stanu ruchu lokalizowanego obiektu i uniemożliwia dokonanie pomiaru prędkości \vec{q} lub pędu \vec{p} tego obiektu, odpowiadających położeniu \vec{q} . W procesie pomiaru następuje zmiana stanu ruchu mikroobiektu; nie jest to następstwem technicznego ograniczenia naszych zdolności pomiaro-

¹ W. Heisenberg: *Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. „Zeitschrift für Physik” 1927 V. 43 s. 172.

² E. Rutherford: *The scattering of α — and β — particles by matter and the structure of the atom*. „London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science” 1911 Ser. 6 V. 21 s. 669.

³ N. Bohr: *On the Constitution of Atoms and Molecules*. „Philosophical Magazine” 1913 V. 26 s. 1, 476, 857; N. Bohr: *The Spectra of Helium and Hydrogen*. „Nature” 1913 V. 92 s. 231.

⁴ D. Bohm: *Causality and Chance in Modern Physics*. London 1957. Вопросы причинности в квантовой механике. Сборник переводов под редакцией Я. П. Терлецкого, А. А. Гусева. Москва 1955; V. Weisskopf: *Physics in the Twentieth Century*. London 1972. Massachusetts Press. Massachusetts Institute of Technology. W. Heisenberg. *The Representation of Natur in Contemporary Physics*. „Dedalus” München 1958.

wych, które może być w przyszłości pokonane, lecz jest to koniecznym następstwem dwojakiej natury obiektów świata atomów — dualizmu korpuskularno-falowego — o czym będziemy szerzej jeszcze mówić.

W artykule niniejszym, napisanym z okazji minionego niedawno 50-lecia wprowadzenia do fizyki zasady nieoznaczoności W. Heisenberga, podana będzie krótko sekwencja ważniejszych zdarzeń, zaistniałych w badaniach w dziedzinie świata atomów, poprzedzających sformułowanie tej zasady. Zaczniemy od zwięzłego przedstawienia osobowości naukowej jej odkrywcy.

1. WERNER KARL HEISENBERG (1901—1976)

Sława naukowa Wernera Heisenberga ściśle związana jest z historią rozwoju teorii kwantów. Przyszedł on na świat w Würzburgu w Bawarii w dniu 5 grudnia 1901 roku, w roku kiedy teoria ta cicho i bezpretensjonalnie zaczęła swoje istnienie.

Uczęszczał do tego samego Gimnazjum Maximilianowskiego w Monachium, w którym 40 lat wcześniej uczył się Max Planck, inicjator teorii kwantów. Tam Heisenberg po raz pierwszy spotkał się z problemami nauki. Na lekcjach geometrii, początkowo traktowanych przez niego jako nadzwyczaj nudne i oderwane od otaczającego świata, zainteresował się jej aksjomatami; doszedł do wniosku, że formalna logika tego działu matematyki odpowiada jednak strukturze realnego otoczenia. Tak dla niego, podobnie jak niegdyś dla Alberta Einsteina⁵, geometria stała się przedmiotem zasługującym na wielki podziw, dostarczającym bogatych przeżyć, a dążenie do wyrażania językiem matematyki otaczającego świata stało się jego pasją, codzienną zabawą, dla której poczuł potrzebę studiowania matematyki i fizyki. Przestudiował więc różne działy tych nauk; strona matematyczna jego nowej pasji. (bowiem wcześniej darzył nadzwyczaj silnym zainteresowaniem języki starożytne — łacinę i grekę oraz filozofię) interesowała go jednak najbardziej.

Przy studiowaniu fizyki spotkał w podręcznikach ówczesnych różne chemiczne schematy molekuł — atomy w tych schematach wyobrażano jako punkty, z których wychodzą różne pętle i haki; jednocześnie tuż obok, stwierdzano, że atom jest niezmiernie małą niepodzielną cząstką materii. Czytając to, odnosił się wielce sceptycznie do wymyślnych obrazów molekuł i odrzucał je; jeśli bowiem ściśle traktować definicję atomu, to nie może on mieć złożonych właściwości reprezentowanych przez skomplikowane schematy w symbolach graficznych molekuł. Intuicja nie zawiodła go — później okazało się, że to co nazwano w podręcznikach atomem, nie było i nie jest w istocie tym najprostszym, co mieli na myśli starożytni filozofowie, zwłaszcza Demokryt. To — co wówczas, a także dziś — zwą atomem jest w istocie tworem złożonym; historycznie tak się stało, że nazwy atom użyto nieprawidłowo.

Zagadnienie atomu zaczęło nurtować W. Heisenberga jeszcze bardziej. Zwrócił uwagę na określenie atomu u Demokryta, u starożytnych. Dowiedział się, że starożytni filozofowie pojęcie „atom” traktowali bardziej abstrakcyjnie — jako matematyczną niematerialną kategorię. Ugruntowało to jego pogląd, że ówczesna wiedza o atomie jest dalece niepełna;

⁵ A. Einstein: *Geometrie und Erfahrung*. „Sitzungsberichten Preussischen Akademie des Wissenschaften” 1921 V. 1 s. 123

fizyka atomu stała się obiektem jego zainteresowań. Sprzyjały ich kulturowaniu informacje o prowadzonych przed kilku laty eksperymentach Ernesta Rutherforda, poświęconych badaniu struktury atomu⁶ oraz niedawne prace Nielsa Bohra nad zbudowaniem modelu atomu⁷. W. Heisenberg nie był zwolennikiem modeli atomowych, skłonny był jednak zapoznać się z nimi. Był wówczas 17-letnim młodzieńcem, uczniem ostatniej klasy gimnazjalnej. Nie przestawał interesować się filozofią, zwłaszcza tymi jej fragmentami, gdzie omawiano poglądy starożytnych na atomistykę. Doprowadziło go to do zetknięcia się z *Timaiosem* Platona⁸.

U Platona nieskończone zróżnicowanie obiektów w przyrodzie tłumaczone jest w kategoriach nierealnych form geometrycznych i ich kombinacji. Ta myśl Platona, że fundamentalne cząstki materii, kombinacje których dają nieskończone bogactwo form i właściwości obiektów otaczającego świata, są obiektami bardziej abstrakcyjnymi aniżeli realnymi, wywarła na Heisenbergu nieprzemijające wrażenie i wydała mu się dostatecznie rozsądną. Poglądy te często znajdowały odzwierciedlenie w jego późniejszej twórczości, czy to w sceptycznym stosunku do wszystkich prób opisu tych fundamentalnych cząstek w sposób poglądowy, czy w szerszych jego poglądach na fizykę atomu i cząstek elementarnych⁹.

Jesienią 1920 roku W. Heisenberg zaczął studiować w Uniwersytecie Monachijskim; zapisał się na Wydział Matematyki, kierując się swoim wyjątkowym zainteresowaniem tą gałęzią wiedzy. Przyjaźnię do niego ustosunkowany Arnold Sommerfeld, wybitny fizyk teoretyk i pedagog, od razu zaangażował go do badań w zakresie teorii atomu — zadaniem początkującego studenta było opracowanie interpretacji linii występujących w tak zwanym efekcie Zeemana¹⁰, stosując model atomu Bohra; konkretnie należało określić, jak wyrażają się odległości między liniami częstotliwości w widmie za pomocą zbioru parametrów występujących w teorii Bohra — liczb kwantowych. Heisenberg musiał zapoznać się z modelem Bohra. Miało to ważne znaczenie dla jego dalszej działalności naukowej, która przez długie lata, począwszy od roku 1922, przebiega w ścisłym kontakcie z N. Bohrem.

Heisenberg spotkał się z Bohrem pierwszy raz w roku 1922 na tak zwanych *wolfskehlowskich wykładach* w Getyndze.

Zwyczaj urządzania cykli wykładów wolfskehlowskich wygłaszanych przez zapraszanych znakomych, aktywnie pracujących w dziedzinie fizyki uczonych ma ciekawą historię. Związany jest z wypowiedzianym przez Pierra Fermata w roku 1637 — tak zwanym wielkim twierdzeniem Fermata. Twierdzenie to, według którego nie istnieją liczby całkowite, x , y , z spełniające równanie $x^n + y^n = z^n$ dla $x \neq 0$, $y \neq 0$, $z \neq 0$ i $n > 2$,

⁶ E. Rutherford: *The scattering of α — and β — particles by matter and the structure of the atom*. „London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science” 1911 V. 21 s. 669.

⁷ N. Bohr: *On the Constitution of Atoms and Molecules*. „Philosophical Magazine” 1913 V. 26 s. 1, 476, 857; N. Bohr: *The Spectra of Helium and Hydrogen*. „Nature” 1913 V. 92 s. 231.

⁸ Platon: *Timaios*. W: *Opera*. V. 1—5. Ed. J. Burnet. Oxford 1956—1962.

⁹ W. Heisenberg: *Der Teil und das Ganze*. München 1969. A. Piper Co Verlag; W. Heisenberg: *The Nature of Elementary Particles*. „Physics Today” 1976 V. 29 s. 32.

¹⁰ P. Zeeman: *Over den invloed eener magnetisatie op den aard van het door een stof uitgezonden Licht*. „Zittingsversl” Amsterdam 1896 V 5, s. 181, 242; tłumaczenie angielskie: *Doublets and triplets in the Spectrum produced by external magnetic forces*. „Philosophical Magazine” 1897 V. 44 s. 55, 255 i tamże 1898 V. 45 s. 197.

nie jest do dziś udowodnione, mimo, że dowodowi jego poświęcono bardzo dużą ilość prac — oczywiście wszystkie błędne. W roku 1906, 13 września matematyk z Darmstadtu P. Wolfskehl przekazał Królewskiej Akademii Nauk w Getyndze 100 000 marek na nagrodę dla tego, kto pierwszy w ciągu następnych 100 lat poda dowód wielkiego twierdzenia Fermata. Utworzono komisję działającą w tej sprawie, która postanowiła dochód pochodzący z odsetek, a wynoszący 5 000 marek rocznie, wykorzystywać regularnie na pokrywanie kosztów pobytu zapraszanych do Getyngi wybitnych lektorów. Pierwszym zaproszonym był w roku 1908 H. Poincaré; wykladał on od 22 do 28 kwietnia o równaniach Fredholma i o teorii względności. Następnym był H. A. Lorentz; w dniach od 24 do 29 października mówił *O starych i nowych problemach fizyki*. W roku 1913 zaproszono Mariana Smoluchowskiego na wykłady o dyfuzji, ruchach Browna i o koagulacji koloidów; wygłosił je w dniach od 21 do 23 kwietnia.

Od 12 do 22 czerwca 1922 roku z wykładami wolfskehlowskimi wystąpił Niels Bohr; przedmiotem ich była teoria atomu. Na wykłady przybyli znamienici matematycy z Getyngi, zjechali się studenci z różnych miast, z różnych uniwersytetów. Wykłady nazwano „sezonem festiwalowym Bohra”. Na tę imprezę postanowił przybyć i Heisenberg — chciał z ust słynnego twórcy modelu atomu dowiedzieć się czegoś o atomach.

Podczas wykładów, jak to było we zwyczaju, zadawano lektorowi pytania. W dyskusji zabrał głos Heisenberg komunikując beceremonialnie Bohrowi, że szereg argumentów wydaje mu się nieprzekonywających. Bohr odpowiedział na zarzuty młodego fizyka, lecz czując, że odpowiedzi nie są dostatecznie uzasadnione zaproponował mu po dyskusji wspólne śniadanie w jednej z podmiejskich restauracji. Dyskusja sam na sam okazała się bardzo korzystna dla obu — Bohr zorientował się, że ma przed sobą wielce utalentowanego młodego fizyka, Heisenberg zaś znalazł w teorii Bohra coś, nad czym warto dalej pracować.

Po powrocie do Monachium Heisenberg zajmuje się jeszcze intensywniej studiami fizyki, a po kilku latach, po zakończeniu studiów uniwersyteckich, wyjeżdża do Kopenhagi, aby współpracować z Bohrem. Po pewnym czasie wraca do Niemiec, nie zrywając jednak kontaktów z kopenhaską grupą fizyków; bywa tam często.

Rezultatem tej współpracy jest jego poważny, decydujący wkład w rozwój wielu działów fizyki kwantów. Z jego imieniem ściśle związane jest stworzenie mechaniki kwantowej, następnie zaś fizyki atomów i molekuł, jąder atomowych, teorii pola i fizyki cząstek elementarnych. Sformułowana przez niego zasada nieoznaczoności, która przyniosła mu nagrodę Nobla, jest tylko niewielkim fragmentem jego twórczości naukowej. Pracował aktywnie do końca swoich dni; tuż przed odejściem, jak testament, pozostawił nam artykuł o cząstkach elementarnych, który miał zreferować w r. 1976 w Monachium⁴¹ na konferencji poświęconej promieniom kosmicznym.

Teoria kwantów jest dziełem wielu fizyków — przede wszystkim M. Plancka, N. Bohra, W. Heisenberga, W. Pauliego, E. Schrödingera, P.A.M. Diraca, A. Einsteina, L. de Broglie'a, M. Borna. Jej tworzenie obfitowało w momenty wzruszające i dramatyczne — właściwe historii rozwoju myśli ludzkiej. Bogate w treść wspomnienia o tym jednym

⁴¹ W. Heisenberg: *The Nature of Elementary Particles*. „Physics Today” 1976 V. 29 s. 32.

z najbardziej wspaniałych epizodów w historii nauki można znaleźć w obszernych opracowaniach zarówno twórców tej teorii, jak i historyków nauki¹². Opisana w niniejszym artykule ewolucja pojęć, która doprowadziła do sformułowania zasady nieoznaczoności, jest drobnym tylko tego fragmentem. Zasada nieoznaczoności stanowi jak gdyby ukoronowanie wysiłków fizyków w ich dążeniach do zrozumienia fizyki atomu.

2. ZJAWISKA FIZYCZNE BĘDĄCE POWODEM KONIECZNOŚCI SFORMUŁOWANIA ZASADY NIEOZNACZONOŚCI

Zasada nieoznaczoności sformułowana została w toku tworzenia teorii budowy atomu i mechaniki atomu, bazujących na rezultatach teorii kwantów. Powstanie tej ostatniej związane było nie z zagadnieniem struktury atomu, lecz z próbą wyjaśnienia mechanizmu procesu promieniowania obiektu doskonale czarnego. Poszukiwania prostego objaśnienia tego nieskomplikowanego, jak mogło się wydawać, zjawiska na podstawie klasycznej elektrodynamiki i termodynamiki nie dawały pozytywnego rezultatu. Spotkano się z trudnościami nie do pokonania w zakresie tych klasycznych teorii¹³.

Problem rozwiązał w roku 1900 Max Planck, który swoje badania w tej dziedzinie, rozpoczęte w roku 1895, rozwijał analizując model obiektu doskonale czarnego — wnękę, której ściany zbudowane były z promieniujących oscylatorów harmoniczných, stanowiących u Plancka modele promieniujących atomów. Uzyskana formuła opisująca widmo promieniowania badanego obiektu, początkowo będąca odgadniętym pół-empirycznym wzorem, zgadzała się znakomicie z rezultatami subtelnie przeprowadzonych przez Pringsheima, Rubensa i Kurlbauma badań eksperymentalnych promieniowania obiektu doskonale czarnego. Planck zauważył jednak szybko, że formuła jego ma taką postać, jak gdyby atom — oscylator promieniował energię nie w sposób ciągły lecz oddzielnymi małymi porcjami — kwantami, co oznaczałoby możliwość pozostawiania oscylatora tylko w pewnych wybranych określonych nieciągłych — dyskretnych — stanach energetycznych. Rezultat ten tak różnił się od wszystkiego, co w zakresie promieniowania oscylatorów wiedziano w fizyce klasycznej, że M. Planck początkowo sam z niedowierzaniem odnosił się do niego. Było dla niego oczywiste, że uzyskany rezultat podważa same podstawy opisu przyrody i, jeśli jest słuszny, to podstawy te muszą ulec istotnym zmianom. Opublikował jednak w roku 1900 swoją formułę¹⁴.

Max Planck próbował następnie pogodzić ten nowy i obcy fizyce klasycznej rezultat ze starymi poglądami fizyki klasycznej; próby spełzyły na niczym.

¹² B. L. Cline: *The Questioners: Physicists and the Quantum Theory*. New York 1969. T. Y. Growell Comp.; W. Heisenberg: *Die Physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*. Leipzig 1930 Hirzel Verlag; M. Борн: *Физика в жизни моего поколения*. Москва 1963. J. Mehra: *The Birth of Quantum Mechanics*. Geneva 1976. Report 76—10. CERN — European Organization For Nuclear Research; N. Bohr: *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory*. „Nature” Suppl. 1928 V. 121 s. 580.

¹³ Z. Strugałski: *W 75 lecie Wielkiego odkrycia Maxa Planca. Fundamentalna stała przyrody h*. „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki” T.21:1976 s. 393.

¹⁴ M. Planck: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung in Normalspektrum*. „Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft” 1900 V. 2 s. 237.

Przez około 5 lat stosunek świata fizyków do rezultatu M. Plancka był mniej więcej taki: przyjęto do wiadomości fakt istnienia zgodności planckowskiej formuły z danymi eksperymentalnymi, poza tym w sprawie tej panowało milczenie¹⁵.

Spodziewanego pogodzenia nowego rezultatu z duchem fizyki klasycznej nie doczekano się w miarę upływu lat; wręcz przeciwnie, ukazały się prace eksperymentalne P. Lenarda¹⁶, na temat zjawiska fotoelektrycznego i teoretyczne A. Einsteina¹⁷, które dostarczyły nowych argumentów wskazujących na konieczność dalszego jeszcze odejścia od starych pojęć fizyki. Eksperymenty P. Lenarda wskazywały, że energia elektronów emitowanych z powierzchni metali pod wpływem światła zależy nie od jego natężenia, lecz od barwy, a więc od częstotliwości lub długości fali promieniowania elektromagnetycznego. Tego nie można było objaśnić na podstawie klasycznej elektrodynamiki i zbudowanej w jej ramach klasycznej teorii promieniowania. W celu objaśnienia tych rezultatów A. Einstein wykorzystał hipotezę M. Plancka, przydając jej następujący sens: światło składa się z tak zwanych fotonów — porcji energii, które poruszają się w przestrzeni zupełnie tak samo jak atomy lub molekuly, różniąc się od nich tym, że nie posiadają masy spoczynkowej; ich prędkość jest zawsze równa prędkości światła i energia równa jest częstotliwości odpowiedniej fali elektromagnetycznej pomnożonej przez stałą Plancka h . Ponadto, istniejąca wówczas teoria pojemności cieplnej ciał stałych była zadowalająco zgodna z danymi eksperymentalnymi w obszarze wysokich temperatur, natomiast przy niskich temperaturach rezultaty teorii były w wyraźnej niezgodności z rezultatami eksperymentu. A. Einstein znowu zdołał pokazać, że zauważona niezgodność może być usunięta poprzez zastosowanie hipotezy Plancka do teorii kinetyczno-molekularnej ciepła: „[...] do tej pory sądzono, że ruch molekuł podporządkowany jest dokładnie takim prawom, jakim podporządkowany jest ruch ciał w naszym codziennym doświadczeniu (z dodaniem tylko jednego postulatu zupełnej odwracalności), teraz natomiast należy założyć, że dla drgających z określoną częstością jonów, uczestniczących w wymianie energii między materią i promieniowaniem, liczebność stanów, w których mogą przebywać te jony, jest mniejsza, jak dla ciał z naszego codziennego doświadczenia. Winniśmy przy tym zakładać taki mechanizm przekazu energii, że energia tworów elementarnego może przybierać tylko wartości $0, (R/N)\beta v, 2(R/N)\beta v, \dots$ itd.”¹⁸.

Znaczenie tych prac dla nowej teorii, teorii kwantów, było ogromne — stwierdzono istnienie procesów dyskretnych w przyrodzie, stwierdzono

¹⁵ W. Strugalski: *W 75 lecie wielkiego odkrycia Maxa Plancka. Fundamentalna stała przyrody h*. „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki” T.21:1976 s. 393; M. Planck: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung in Normalspektrum*. „Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft” 1900 V. 2. s. 237; M. Planck: *Zur Geschichte der Auffindung der Physikalischen Wirkungsquantum. Vortrage und Erinnerungen*. Stuttgart 1949. Springer Verlag.

¹⁶ P. Lenard: *Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht*. „Annalen der Physik” 1902 V. 8 s. 149. P. Lenard: *Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht*. „Annalen der Physik” 1903 V. 12 s. 469.

¹⁷ A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. „Annalen der Physik” 1905 V. 17 s. 132. A. Einstein: *Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der Spezifischen Wärme*. „Annalen der Physik” 1907 V. 22. s. 180.

¹⁸ A. Einstein: *Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der Spezifischen Wärme*. „Annalen der Physik” 1907 V. 22. s. 180.

istotną rolę stałej Plancka w dziedzinie fizyki nie związanej bezpośrednio z problemem promieniowania cieplnego.

Rezultaty te wywarły decydujący wpływ na dalszy rozwój fizyki, wywarły one głęboko rewolucyjny charakter hipotezy M. Plancka. W interpretacji A. Einsteina teorii kwantów pogląd nasz na naturę światła uległ zupełnej zmianie. To światło, które od czasów Huygensa, a następnie dzięki pracom J. C. Maxwella i H. Hertza, traktowano jako rozprzestżenie się fal elektromagnetycznych, wykazujące właściwe tylko falom zjawiska dyfrakcji i interferencji, okazało się czymś jeszcze innym, co składa się z oddzielnych porcji energii — kwantów światła — poruszających się w przestrzeni z prędkością rozchodzenia się sygnałów świetlnych. W fizyce pojawiła się niezrozumiała sprzeczność — coś może być i falą i korpuskułą. Ta dwoista natura światła i, jak się później okazało, nie tylko światła, lecz i elektronów, protonów, atomów, molekuł i w ogóle mikroobektów, było powodem wyboru obecnej drogi rozwoju teorii kwantów, zwłaszcza mechaniki kwantowej, drogi — jaką wybrano w początkowych latach dwudziestych, na jakiej pojawiła się zasada nieoznaczoności W. Heisenberga.

Tymczasem teoria kwantowa triumfowała i w latach następnych, dając możliwości objaśnienia takich faktów eksperymentalnych, w obszarze fizyki atomów, objaśnienia których fizyka klasyczna dać nie mogła. Faktów tego rodzaju zaczęto gromadzić coraz więcej, był to przecież okres intensywnych badań struktury atomów.

Badania eksperymentalne, prowadzone w laboratorium E. Rutherforda przez Marsdena i Geigera, dotyczące rozpraszania cząstek alfa na cienkich foliach metalowych doprowadziły do odkrycia rozprożeń pod dużymi kątami, a zatem do konieczności stwierdzenia istnienia w atomach jąder o średnicach około 100 000 razy mniejszych od średnic atomów, skupiających w sobie całą prawie masę atomu¹⁹. E. Rutherford tak wspomina wrażenia, jakie wywarła na nim informacja Geigera o istnieniu rozprożeń pod dużymi kątami²⁰: „Bardzo dawno już obserwowałem rozpraszanie cząstek alfa, a Geiger w swym laboratorium szczegółowo je badał. Zaobserwował on, że rozproszenie na cienkich foliach metali ciężkich jest zazwyczaj niewielkie, rzędu 1°. Pewnego razu Geiger przyszedł do mnie i powiedział: »Czy nie sądzi Pan, że nastąpiła pora, aby młody Marsden, którego uczę metod radioaktywnych rozpoczął proste badania?« Sądziłem tak samo, więc odpowiedziałem: »Dlaczego nie powierzyć mu, aby zobaczył, czy nie mogą niektóre z cząstek alfa rozpraszać się pod dużymi kątami?« W sekrecie powiem wam, że nie przypuszczałem, aby mogły one tak rozpraszać się, ponieważ było wiadomo, iż cząstki alfa — to bardzo szybkie i masywne cząstki, posiadające nadzwyczaj dużą energię. Można przekonać się, że jeśli rozproszenie jest rezultatem nałożenia pewnej liczby małych rozprożeń, to prawdopodobieństwo rozproszenia do tyłu jest dla cząstki alfa bardzo małe. Pamiętam, że za dwa lub trzy dni przyszedł do mnie bardzo podniecony Geiger i powiedział: »Udało się nam obserwować cząstki alfa rozproszone do tyłu [...]«. Było to najbardziej nieprawdopodobne zdarzenie, które przeżyłem. Było to prawie tak nieprawdopodobne, jak gdybyście wystrze-

¹⁹ E. Rutherford: *The scattering of α — and β — particles by matter and the structure of the atom*. „London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science” 1911 V. 21 s. 669.

²⁰ E. Rutherford: *Background to Modern Science*. Cambridge 1940 s. 47.

lili 15 calowy pocisk w kartkę bibułki papierowej, a on powróciłby i ugodził w was. Po namyśle zrozumiałem, że takie rozproszenie winno być rezultatem pojedynczego zderzenia, a gdy dokonałem obliczeń, to zobaczyłem, iż nie jest możliwe uzyskanie wartości tego rzędu, jeżeli nie założyć, że zderzenie zachodzi z układem, w którym większa część masy skoncentrowana jest w małym jądrze". Tak więc w roku 1911 E. Rutherford zaproponował planetarny model atomu. Atom składa się z jądra atomowego, dodatnio naładowanego, zawierającego prawie całą masę atomu i elektronów poruszających się wokół jądra, podobnie jak planety wokół Słońca ²¹.

Wprowadzenie takiego modelu także nie mieściło się w ramach mechaniki klasycznej. Tak zbudowany atom nie byłby stabilny, jeśli podlegałby jej prawom. Żaden bowiem układ planetarny, podporządkowany prawom mechaniki newtonowskiej po zderzeniu z innym tego rodzaju układem, nie powróci do swojego stanu pierwotnego. Z teorii kinetycznej materii, dobrze opisującej obserwowane zjawiska fizyczne, wiadano jednak, że atomy muszą ulegać częstym zderzeniom, pozostając w ustawicznym ruchu. Wiedziano i to, że jednak po takich zderzeniach atomy pozostają takimi, jakimi były, że zachowują swą indywidualność także wchodząc w reakcje chemiczne. Słowem, mechanika klasyczna nie mogła dać objaśnienia istniejących faktów.

Wytłumaczenie trwałości atomu Rutherforda podał w roku 1913 Niels Bohr; musiał jednak wykorzystać hipotezę kwantową M. Plancka ²². Objaśnienie to sprowadzało się do następującego stwierdzenia: Jeżeli atom może, zgodnie z hipotezą M. Plancka, zmieniać swoją energię tylko w sposób nieciągły, skokami, w postaci małych porcji — kwantów, to znaczy, że może on przebywać tylko w stanach dyskretnych stacjonarnych: stan energetyczny najniższy jest stanem normalnym, stanem stabilności atomu. Po dowolnym oddziaływaniu, po dowolnym zderzeniu, atom będzie zawsze powracał do tego stanu normalnego.

Teoria Bohra dała nie tylko objaśnienie obserwowanej stabilności atomów. Objaśniła ona liniowe widmo promieniowania wodoru; można było według niej obliczyć częstotliwość wypromieniowanego przez atom światła — rezultaty obliczeń doskonale odpowiadały rezultatom pomiarów eksperymentalnych. Objaśniła ona jakościowo właściwości chemiczne atomów. Dalsze badania pokazały jednak, że obliczone wartości częstości drgań promieniowania w wyższych harmonicznym różniły się od zaobserwowanych; świadczyć to mogło albo o zupełnej nieprawidłowości teorii, albo o niedoskonalej jeszcze jej postaci. Poważnej dozy prawdy jednak odmówić tej teorii nie można było — była zbyt pociągająca i objaśniała wiele. Tym bardziej, że istnienie dyskretnych stanów energetycznych atomów wkrótce stwierdzono bezpośrednio eksperymentalnie w pracach Franka i Hertza ²³ oraz Sterna i Gerlacha ²⁴.

²¹ E. Rutherford: *The Structure of the Atom*. „Nature” 1913 V. 92 s. 423.

²² N. Bohr: *On the Constitution of Atoms and Molecules*. „Philosophical Magazine” 1913 V. 26 s. 1, 476, 857; N. Bohr: *The Spectra of Helium and Hydrogen*. „Nature” 1913. V. 92 s. 231.

²³ J. Frank, G. Hertz: *Über die Erzeugung der Quecksilberresonanzlinie 253, 6 durch Elektronenstöße*. „Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft” 1914 V. 16 s. 457.

²⁴ O. Stern, W. Gerlach: *Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms*. „Zeitschrift für Physik” 1921 V. 8 s. 110; O. Stern, W. Gerlach: *Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld*. „Zeitschrift für Physik” 1922 V. 9. s. 349.

W roku 1923 Compton stwierdził eksperymentalnie, że częstotliwość rozproszonych na atomach promieni rentgenowskich różni się od częstotliwości promieni rozpraszanych²⁵. Do chwili przeprowadzenia tego eksperymentu, na podstawie poprzednich doświadczeń dotyczących interferencji światła rozproszonego, było wiadomo, że rozproszenie promieniowania elektromagnetycznego, a więc także światła oraz promieni rentgenowskich, przebiega w sposób następujący: światło padające wybija z atomu elektron wprawiony w drgania z taką samą częstotliwością jaka odpowiada częstotliwości światła rozpraszanego, a następnie ten drgający elektron emituje światło o tej samej częstotliwości w postaci fali sferycznej rozchodzącej się w przestrzeni. Nowy rezultat uzyskany przez Comptona można było wyjaśnić tylko wówczas gdy założono, że rozproszenie stanowi proces zderzenia się kwantu świetlnego ze swobodnym lub quasiswobodnym elektronem — przy zderzeniu energia kwantu świetlnego zmienia się, a ponieważ równa jest ona iloczynowi stałej Plancka h przez częstotliwość ν , $E = h\nu$, to winna zmieniać się i częstotliwość promienia rozproszonego.

Tak więc, w jednych eksperymentach światło przejawia się jako fala, w innych zaś jako złożone z porcji energii — kwantów świetlnych lub fotonów, zachowujących się jak zwykle cząstki materii — elektrony, protony. Zjawisk tego rodzaju zauważono coraz więcej, w końcu fizycy skłonni byli stwierdzić, że te jawne sprzeczności mają głęboką przyczynę leżącą w samej naturze światła.

W roku 1923 L. de Broglie przystąpił do badań nad stwierdzonym dualizmem korpuskularno-falowym światła — szedł nie drogą usunięcia tego dualizmu; wręcz przeciwnie, rozszerzył go z dziedziny promieniowania elektromagnetycznego na wszystkie mikroobiekty, takie jak elektron, proton, molekuly. Píše on o tym sam w sposób następujący:

„[...] należało związać ruch cząstek materii z rozprzestrzenianiem się fali i, w przypadku światła, powiázać przemieszczenie się fotonów z rozprzestrzenianiem się fali Fresnela-Maxwella. Na podstawie przesłanek, wynikających z teorii względności i mechaniki analitycznej, udało mi się opracować wówczas teorię syntetyczną, która przybrała charakter »mechaniki falowej«”.

Wyraziła ona powiázenie między prostoliniowym i równomiernym ruchem cząstki swobodnej o energii E i jej ilością ruchu p , z jednej strony, i rozprzestrzenianiem się fali płaskiej monochromatycznej o częstotliwości ν i długości λ , z drugiej strony, z pomocą dwóch fundamentalnych formuł:

$$E = h\nu, \quad p = h/\lambda. \quad (1)$$

W zastosowaniu do szczególnego przypadku światła formuły te od razu dają wzory Einsteina, leżące u podstawy jego teorii kwantów światła (fotonów): związek Einsteina wszedł jako przypadek szczególny do obszernego, syntetycznego schematu, danego przez mechanikę falową. W zastosowaniu do elektronów wewnątrz atomu mechanika falowa pozwala interpretować warunki kwantowe, określające stacjonarne orbity Bohra jako analog warunków rezonansu, i wyrażające ten fakt, że fala, skojarzona z elektronem, jest falą stojącą. Pojawienie się w tych warunkach liczb stałych stało się zupełnie uzasadnione²⁶.

²⁵ A. H. Compton: *Directed quanta of scattered X-rays*. „The Physical Review” 1923 V. 21 s. 483, 1923 V. 22 s. 409.

²⁶ L. de Broglie: *Sur les sentiers de la Science*. Ed Albin Michel. Paris 1960.

Następnie falową naturę elektronów spostrzeżono w eksperymentach C. J. Davissona i L. H. Germera²⁷.

Dziś możemy stwierdzić, że falowa natura cząstek ujawnia się w wielu przypadkach. Cząstki ulegają dyfrakcji i interferencji podobnie jak fale²⁸.

W świetle takich faktów pojawił się problem — jak może światło, jak może elektron w ruchu przejawiać falową naturę i jednocześnie w niektórych zjawiskach foton przejawiać się jak cząstka; elektron jest w rzeczywistości tym, z czym zetknęliśmy się przede wszystkim jako z cząstką — tworem mającym masę. Przecież w końcu dokładne prześledzenie elektronu wzdłuż toru jego ruchu winno dać odpowiedź na to pytanie i pozwolić zaliczyć elektron albo do cząstek, albo do fal.

Podeszliśmy zatem do zagadnienia możliwości wykonywania pomiarów w świecie mikroobiektów. Czy możliwe jest dokonanie takiego dokładnego prześledzenia ruchu elektronu? Czy możliwe jest zrealizowanie odpowiednich pomiarów? Próby odpowiedzi na to pytanie doprowadziły W. Heisenberga do sformułowania zasady nieoznaczoności²⁹. Fakt ten uczczono przyznaniem jej twórcy nagrody Nobla.

3. ZASADA NIEOZNACZONOŚCI

Wyobraźmy sobie, że — analogicznie jak obserwowane przez nas makroobiekty — mikroobiekt, powiedzmy elektron, porusza się po pewnej trajektorii, na przykład po orbicie wokół jądra w atomie. Spróbujmy obserwować ten poruszający się elektron. Możemy sobie wyobrazić, że możliwe jest „oświetlenie” tego elektronu i „zobaczenie” go z pomocą mikroskopu. Wykorzystane do oświetlenia światło składa się jednak z fotonów, należy do oświetlenia wykorzystać co najmniej jeden kwant, który w zderzeniu z elektronem narusza stan jego ruchu. Energia Ξ kwantu równa jest $\Xi = h\nu$, gdzie ν oznacza częstość drgań odpowiedniej fali elektromagnetycznej; pęd kwantu $p = h\nu/c$, gdzie c oznacza prędkość rozchodzenia się sygnału świetlnego w próżni. Można by wyobrazić sobie, że stosując kwanty o mniejszej energii lub o mniejszym pedzie można będzie zlokalizować elektron dokładniej, nie zakłócając stanu jego ruchu. Jednak pojawia się nowa trudność, wynikająca z dwójakiej natury światła — korpuskularnej i falowej. Światło działa na elektron nie tylko jako cząstka, lecz także jako fala. W ramach falowej teorii światła dowodzi się, że fala świetlna, przechodząc przez soczewkę, daje obraz rozmyty oświetlonego obiektu; rozmiary obrazu proporcjonalne są do długości fali, która jest znowu odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości ν . Jeżeli częstotliwość jest mała, to długość fali jest duża, a więc obraz w mikroskopie będzie tak rozmyty, że nie będziemy mogli określić dokładnie położenia elektronu. Tak więc, w rezultacie korpuskularnej natury światła nie można uniknąć skażenia pędu Δp mikroobiektu, na skutek zaś falowej natury światła nie można uniknąć nieokreśloności Δq

²⁷ C. J. Davisson L. H. Germer: *Diffraction of Electrons by crystal of nickel*. „The Physical Review” 1927 V. 30 s. 705. I. Estermann, R. Frisch, O. Stern: *Monochromatisierung der de Broglie-Wellen von Molekularstrahlen*. „Zeitschrift für Physik” 1931 V. 73 s. 348.

²⁸ З. Г. Линскер: Диффракция электронов. Москва — Ленинград 1949. Изд. АН СССР.

²⁹ W. Heisenberg: *Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*. „Zeitschrift für Physik” 1927 V. 43 s. 172.

w lokalizacji mikroobiekta. Krótkie rozważania³⁰ prowadzą do następujących wniosków: dowolny pomiar współrzędnej \vec{q} i pędu \vec{p} , dowolny pomiar energii Ξ w momencie czasu t obarczony jest nieokreślonościami Δq , Δp i $\Delta \Xi$, Δt , których iloczyny nie mogą być mniejsze od stałej Plancka h :

$$\begin{aligned}\Delta q \cdot \Delta p &\geq h, \\ \Delta \Xi \cdot \Delta t &\geq h.\end{aligned}\tag{2}$$

Związki (2) wyrażają relacje między optymalnymi dokładnościami, z jakimi mogą być jednocześnie zmierzone współrzędne czasowo-przestrzenne i składowe wektora pędu — energii dla danego mikroobiekta.

Wyjawiona przez Heisenberga niemożliwość jednoczesnego dokładnego zmierzenia par wskazanych wyżej wielkości nie oznacza zwykłego technicznego ograniczenia, które być może w przyszłości zostanie pokonane i dokładne pomiary będą możliwe; jest ona koniecznym następstwem samej natury obiektów świata atomowego, następstwem postulatu kwantowego N. Bohra, następstwem obserwowanego dualizmu korpuskularno-falowego w świecie atomów i w dziedzinie zjawisk świetlnych. Obiekty mikroświata czuły są na ingerencję procesu pomiarowego.

Znaczenie rezultatu uzyskanego przez Heisenberga zostało docenione od razu po jego opublikowaniu. Zasada nieoznaczoności stała się podstawową zasadą mechaniki atomu; odzwierciedla ona istotę fizyczną zjawisk występujących w mikroświecie i wyjawia granicę stosowności takich pojęć mechaniki klasycznej jak trajektoria obiektu, jego położenie i pęd, określa granicę opisu zjawisk w świecie atomów w kategoriach formalizmu mechaniki klasycznej. Relacje nieokreśloności (2) usuwają możliwość zaistnienia takich sytuacji, w których jednocześnie przejawiałyby się aspekt korpuskularny i falowy zjawiska. W rezultacie uświadomienia sobie tego N. Bohr doszedł do wniosku, że zjawiska fizyczne w świecie atomów mogą być opisane tylko w tak zwanych dualnych kategoriach, w kategoriach wzajemnie dopełniających się obrazów, które w klasycznej fizyce wzajemnie wykluczałyby się³¹.

Recenzent: Bronisław Średniawa

3. Стругальски

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В. ГЕЙЗЕНБЕРГА

В статье, написанной по случаю 50 годовщины введения в физику принципа неопределенности В. Гейзенберга, коротко изложена последовательность событий в области исследования мира атомов, предшествовавших формулировке принципа. Наглядно представлено содержание этого принципа и описана научная личность автора.

³⁰ Tamże

³¹ N. Bohr: *Kausalität und Komplementarität*. „Erkenntnis” 1937 V. 6 s. 293.

Z. Strugalski

ON THE HEISENBERG'S UNCERTAINTY PRINCIPLE

In this paper written in 50 anniversary of the W. Heisenberg's uncertainty principle, the sequence of latest developments in the investigations of the atomic world before this principle formulation is shortly given. In a simple manner the content of this principle is explained and the scientific personality of its author is presented.