

Wojciech Rubinowicz

Członek rzecz. PAN
Warszawa

Niels Bohr

1885—1962

Wieczorem dnia 18 listopada 1962 r. zmarł w Kopenhadze na zawał serca w wieku 77 lat profesor Niels Bohr. Wiadomość ta okryła szczerym i głębokim żalem wszystkich fizyków świata. Przestało bowiem bić serce bezsprzecznie największego fizyka obecnego stulecia. Kiedy na początku dwudziestego wieku nowe odkrycia doświadczalne i śmiałe koncepcje teoretyczne zachwiały podstawami fizyki klasycznej, Bohr wskazał w genialnej wizji drogę wiodącą do dzisiejszej fizyki kwantów, obejmującej obecnie całokształt wszystkich zjawisk fizycznych. Prace jego były początkiem i podstawą fenomenalnego wprost rozwoju fizyki obecnego stulecia. Otworzyły one nam drogę do kwantowej teorii elektronowej powłoki atomu i do interpretacji nowszej teorii kwantów, radykalnie zmieniającej dotychczasowe poglądy fizyczne i filozoficzne. Jakie znaczenie dla tych nauk posiadają lata 1913—1938, a więc 25-letni okres najbardziej aktywnej działalności Bohra, widać stąd, że Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne, łącznie z Amerykańskim Towarzystwem Filozoficznym, wyłoniło w r. 1961 specjalny komitet pod przewodnictwem prof. J. A. Wheelera w celu przeprowadzania wywiadów z czołowymi twórcami rewolucji kwantowej we wspomnianych latach i zabezpieczenia odpowiedniej dokumentacji.

Niels Bohr urodził się dnia 7 października 1885 r. jako najstarszy syn znakomitego fizjologa duńskiego Chrystiana Bohra. Już w dzieciństwie interesuje się fizyką i przeprowadza z zapałem doświadczenia fizyczne. Dziwnym może się wydawać, że późniejszy genialny uczony pasjonuje się w młodości piłkarstwem. Jako student, a nawet w latach późniejszych jako młody naukowiec, był bardzo popularnym w Danii piłkarzem.

W r. 1904 podejmuje na Uniwersytecie w Kopenhadze studia fizyki i matematyki i zaraz w pierwszym ich roku zostaje asystentem znanego fizyka prof. C. Christiansena, do którego odnosił się w latach późniejszych z wielką czcią.

Już jako 21-letni student ogłasza pierwszą swoją pracę fizyczną nagrodzoną złotym medalem przez Duńską Akademię Nauk, a dotyczącą pomiarów stałej

włoskowatości. Jest to wprawdzie jedyna jego praca doświadczalna — wykonana zresztą przy użyciu własnoręcznie sporządzonych aparatów — zawsze jednak, przez całe swoje późniejsze życie zachował zrozumienie dla doniosłości eksperymentu. Nie tylko sam opierał się w swoich pracach bardzo szeroko na wynikach prac doświadczalnych, ale był także gorącym orędownikiem ścisłej współpracy fizyków teoretyków i doświadczalników. Natychmiast po objęciu katedry założył dla poparcia tego dążenia w swoim zakładzie pracownię doświadczalną, którą rozbudował w okresie międzywojennym na wielką skalę. Niejedną z prac tam wykonywanych sam Bohr osobiście inspirował i dozorował.

W r. 1909 uzyskał Bohr magisterium, a w r. 1911 odbyła się na podstawie pracy o elektronowej teorii metali jego promocja doktorska, która w Danii jest już podstawą do objęcia docentury. W tym samym roku wyjeżdża Bohr na dalsze studia do Anglii, najpierw do Cambridge do J. J. Thomsona, którego poglądami na budowę atomu Bohr się wówczas interesował. Ale już na wiosnę następnego roku przenosi się do Manchesteru, gdzie Ernest Rutherford w swoich słynnych, wspólnie z H. Geigerem wykonanych doświadczeniach odkrył właśnie model jądrowy atomu.

W lecie tego samego roku żeni się Bohr z córką aptekarza i siostrą znanego matematyka duńskiego Małgorzatą Noerlund, która została jego idealną towarzyszką życia.

Zaraz na początku swojego pobytu w laboratorium Rutherforda, a więc już przy pierwszym zetknięciu się z jego modelem, dochodzi Bohr do wniosku, że elektronami atomu rządzić muszą prawa kwantowe. Nie opracowuje jednak tej myśli w szczegółach, ponieważ zajęty był wówczas przede wszystkim teorią hamowania cząstek α w ciałach stałych. Dopiero wiosną 1913 r. uprzytamnia sobie Bohr, że prawo kombinacji Ritza

$$\nu = T_m - T_n$$

(ν = częstość drgań linii widmowej, T_m i T_n = termy widmowe) zawiera wskazówkę, w jaki sposób należy stosować teorię kwantów do wyjaśnienia powstawania widm atomowych. W myśl koncepcji fotonów, wypowiedzianej w r. 1905 przez Einsteina, mógł bowiem Bohr interpretować prawo to pomnożone przez stałą Plancka h jako prawo zachowania energii dla emisji fotonu przy przejściu atomu ze stanu o energii

$$E_n = -T_n h \quad (1)$$

do stanu o energii $E_m = -T_m h$. Dla atomu wodoru należało przy tym przyjąć na mocy wzoru Balmera

$$T_n = \frac{R}{n^2}, \quad (2)$$

gdzie R oznacza stałą Rydberga. O ile założymy, że atom wodoru składa się z elektronu krążącego wokół protonu i że obie cząstki przyciągają się siłą

Coulomba, wtedy istnieje według praw mechaniki Newtonowskiej pomiędzy energią E_n a wielką osią $2a_n$ odpowiedniej elipsy Keplerowskiej znany związek

$$E_n = -\frac{e^2}{2a_n}, \quad (3)$$

gdzie e oznacza ładunek elementarny. Ponieważ energia stanu podstawowego $n = 1$ atomu wodoru równa jest na mocy (1) i (2)

$$E_1 = -Rh, \quad (4)$$

mógł Bohr na podstawie związku (3) dla $n = 1$ wnioskować, że wielka oś $2a_1$ elipsy Keplerowskiej w stanie podstawowym atomu wodoru jest rzędu wielkości średnic atomów, znanych z kinetycznej teorii gazów.

Aby otrzymać wyrażenie na stałą Rydberga R Bohr posługuje się wzorem

$$\nu = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi^2 ma^3}} \quad (5)$$

na liczbę ν obiegów elektronu o masie m wokół protonu, w jednostce czasu. Wzór ten jest identyczny właściwie z trzecim prawem Keplera. Stałą Plancka h wprowadza przy tym Bohr żądając, aby średnia energia kinetyczna T ruchu Keplerowskiego miała tę samą wartość co w przypadku oscylatora harmonicznego, tzn.

$$T = \frac{1}{2} h\nu. \quad (6)$$

Średnia energia kinetyczna oscylatora harmonicznego równa jest bowiem jego średniej energii potencjalnej, a jego całkowita energia dana jest przez $h\nu$. Ponieważ dla ruchu Keplerowskiego całkowita energia równa jest ujemnej średniej energii kinetycznej

$$E = -T, \quad (7)$$

z powyższych związków (3) do (7) wynika wzór

$$R = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3} \quad (8)$$

dla stałej Rydberga¹ R .

Tak Bohr przedstawił historię swojego wiekopomnego odkrycia w przemówieniu wygłoszonym ku czci swojego serdecznego przyjaciela Ernesta

¹ Za prekursora Bohra należy uważać Arthura Haasa (p. np. Phys. Z. 11, 537 (1910)), który opierał się jednak na modelu Thomsona. W atomie tym działa wprawdzie na elektron siła elastyczna, ale Haas wziął pod uwagę stan podstawowy tego atomu, w którym elektron porusza się na powierzchni kuli. Na elektron ten działa więc ta sama siła Coulomba, pochodząca od całkowitego ładunku protonu, jak w przypadku atomu Rutherforda. Wobec tego Haas używał wszystkie wzory (3) do (7), tylko z wyjątkiem wzoru (4). Haas uważał mianowicie, że stanowi podstawowemu atomu wodoru odpowiada granica $\nu = R/4$ serii Balmera, a nie serii Lymana $\nu = R$, jak to słusznie Bohr zakłada. Wobec tego wyrażenie Haasa na stałą Rydberga R różni się od wyrażenia (8) czynnikiem liczbowym. Należy zaznaczyć, że Bohr — jak sam to podaje — przeprowadzał swoje rozumowania nie znając odnośnych prac Haasa.

Rutherforda² i zgodnie z tym wyprowadza Bohr wzór (8) na stałą Rydberga w pracy pt. *On the Constitution of Atoms and Molecules*, która ukazała się jako pierwsza w serii prac opublikowanych w „Philosophical Magazine”. Praca ta nosząca pamiętną dla historii rozwoju fizyki datę ukończenia — 5 kwietnia 1913 r. — otwiera nową epokę w fizyce. Łączyła ona — jak to widziliśmy — w harmonijną całość trzy koncepcje fizyczne: model atomu Rutherforda, stany kwantowe Plancka oraz kwanty świetlne czyli fotony Einsteina.

Wyprowadzenie wzoru (8) przez Bohra wywarło z dwóch przyczyn ogromne wrażenie. Po pierwsze w skład tego wzoru na stałą Rydberga wchodziły tylko znane stałe uniwersalne e , m i h , a więc nie zawierał on żadnych stałych dowolnych. Po drugie wzór Balmera jest wzorem, który zgadza się doskonale z doświadczeniem. Ponieważ wartość liczbowa stałej Rydberga już za czasów Bohra znana była z przysłowiową astronomiczną dokładnością, wzoru (8) niebawem zaczęto używać do ustalania dokładniejszych wartości na stałe e , m i h .

Jako miarę wrażenia, jakie wywołała ta pierwsza praca, można uważać fakt, że tylko ona zawierała na końcu datę jej ukończenia. Dalsze prace Bohra drukował „Philosophical Magazine” już bez odnośnych dat, ponieważ, jak mi Bohr opowiadał, redakcja tego czasopisma je skreślała, aby móc jego prace publikować poza kolejką otrzymywania prac, obowiązującą w tym czasopiśmie.

Już w pierwszej pracy Bohra znajdujemy uwagę, że jego warunek kwantowy (6) jest dla torów kołowych równoważny żądaniu, aby moment pędu mva takiego toru o promieniu a był równy $nh/2\pi$. Wówczas mamy bowiem $v = 2\pi va$. Warunek (6) zgodny jest więc z kwantyzacją pędu, wynikającą z warunków Sommerfelda lub późniejszych Bohra, stosowaną zresztą jeszcze przed r. 1913 już przez Nicholsona i Bjerruma.

Stopień doktora uprawniał na uniwersytecie w Kopenhadze do objęcia stanowiska docenta. Bohr nie otrzymał jednak w r. 1911 po zdaniu doktoratu tej nominacji, ponieważ nie dopatrzoneo się w jego dysertacji niczego niezwykłego. Ale może właśnie ten ciężki i nieoczekiwany cios wzniecił w nim wraz z gniewem świętą iskrę genialności i młody 28-letni Bohr podyktował swojej żonie, jak głosi fama, w wiejskim zaciszu pracę, którą zreferowaliśmy, a która stała się załączkiem jego sławy.

Nominację na docenta uniwersytetu w Kopenhadze otrzymuje dopiero w r. 1913. W następnym roku wyjeżdża do Manchesteru, zaproszony przez Rutherforda na *Schuster readership* fizyki matematycznej na tamtejszym uniwersytecie. W r. 1916 stworzył wreszcie Uniwersytet Kopenhaski dla Bohra specjalną katedrę fizyki teoretycznej.

W ostatecznej postaci przedstawił Bohr ze swojego punktu widzenia starszą teorię kwantów w trzech pracach pt. *On the Quantum Theory of Line Spectra*, poświęconych pamięci prof. Christiansena i opublikowanych w rozprawach Duńskiej Akademii Nauk. Prace te zawierały w szczególności zasadę

² Niels Bohr, *The Rutherford Memorial Lecture 1958, Reminiscences of the founder of nuclear science and of some developments based on his work*, Proc. Phys. Soc. 78, 1083, 1961.

odpowiedności, która była, jak się następnie okazało, najcenniejszą zasadą starszej teorii kwantów. Umożliwiła ona bowiem w okresie przejściowym pomiędzy starszą a nowszą teorią kwantów odkrycie ilościowych praw kwantowych, których prawdziwość została następnie potwierdzona przez nowszą teorię kwantów. Bohr użył jej przede wszystkim do ustalenia reguł wyboru i polaryzacji. Największą zasługą tej zasady był jednak fakt, że doprowadziła ona ostatecznie do odkrycia przez Heisenberga mechaniki kwantów.

Jeszcze trzy inne prace Bohra należą do tej heroicznej epoki teorii kwantów. W pierwszej z nich Bohr wykazał, jak z widm optycznych poszczególnych atomów możemy odczytać ich budowę i w ten sposób zrozumieć własności chemiczne i fizyczne odnośnych pierwiastków i ich prawidłowości ujawniające się w układzie periodycznym. W drugiej pracy wykonanej wspólnie z D. Costerem zużytkowane zostały do tego samego celu widma rentgenowskie. W trzeciej pracy opublikowanej razem z H. A. Kramerssem i J. C. Slaterem autorzy starają się pogodzić ze sobą własności falowe i korpuskularne światła przy pomocy wirtualnych pól elektromagnetycznych. Postulują oni przy tym, że pola te indukują w atomach emisje lub absorpcje fotonów, których prawa określone są jedynie statystycznie. Dotyczyło to w szczególności także zasady zachowania energii. Teorię tę musiano jednak zarzucić, gdy stwierdzono, że w zjawisku Comptona odrzut elektronu i rozproszenie fotonu występują równocześnie, a więc bilans energetyczny spełniony jest przy każdym poszczególnym zderzeniu fotonu z elektronem zupełnie ściśle.

W r. 1922 otrzymał Bohr nagrodę Nobla.

Kiedy w r. 1920 przyjechałem po raz pierwszy do Instytutu Bohra zastałem tam, oprócz niego, tylko jego ówczesnego asystenta H. A. Kramersa. Budowa Zakładu Bohra na Blegdamsvej 15 była wówczas jeszcze nie ukończona, a gabinetem Bohra był mały pokój znajdujący się obok biblioteki Zakładu Fizyki Doświadczalnej prof. Martina Knudsen. W r. 1922, podczas następnego mojego pobytu w Kopenhadze w Zakładzie Bohra pracowało już sześciu czy siedmiu teoretyków a oprócz tego kilku doświadczalników. W późniejszych latach przebywało w Zakładzie Bohra do pięćdziesięciu fizyków z całego świata. Była to więc chyba największa szkoła fizyki w skali światowej. O atrakcyjności tej szkoły świadczy np. fakt, że J. A. Wheeler, nie będąc w stanie opłacić podróży statkiem z Ameryki do Danii, nie zawahał się odbyć jej jako pomocnik palacza okrętowego.

Do nowszej teorii kwantów doszli na dwóch różnych drogach i to niezależnie od siebie W. Heisenberg i E. Schroedinger. Droga Heisenberga była ściśle związana z Zakładem Bohra i została przemierzona, można powiedzieć, pod jego patronatem. Pierwszy krok w kierunku tej drogi postawił ówczesny najbliższy współpracownik Bohra, mianowicie H. A. Kramers, podając na podstawie zasady odpowiedności kwantowy wzór dyspersyjny. Współpracując w Kopenhadze ze sobą rozszerzyli go Kramers i Heisenberg następnie na Ramanowskie przejścia atomów; w r. 1925 uogólnienie to umożliwiło Heisenbergowi odkrycie mechaniki kwantowej.

Najważniejszy wkład Bohra w nowszą teorię kwantów stanowi zasada komplementarności, która jest jednym z głównych filarów statystycznej interpretacji tej teorii. Od r. 1905, tzn. od chwili gdy Einstein wykazał, że zjawisko fotoelektryczne można zrozumieć tylko przy pomocy fotonów, nieznośnie natarczywie dręczyło fizyków pytanie: czym jest właściwie światło — ruchem falowym czy strumieniem fotonów, a więc korpuskuł? Odkrycie fal elektromagnetycznych w r. 1927 przez C. J. Davissona i L. H. Germera oraz niezależnie przez G. P. Thomsona zaostrzyło jeszcze ten kryzys korpuskularno-falowy. Bohr zauważył, że pytanie *fale czy korpuskuły?* jest źle postawione, ponieważ zakłada, że każda z tych możliwości wyklucza drugą. Opierając się o zasadę nieokreśloności, odkrytą w r. 1927 przez Heisenberga, wykazał Bohr, że im wyraźniej w jakimś zjawisku fizycznym występują własności falowe, tym mniej wyraźnie uwidaczniają się jego własności korpuskularne. I na odwrót: im bardziej widoczne są cechy korpuskularne, tym trudniej możemy dostrzec cechy falowe. Według Bohra aspekty falowe i korpuskularne nie tylko nie wykluczają się, lecz wprost przeciwnie uzupełniają się, są więc komplementarne.

Praca, w której po raz pierwszy Bohr opublikował zasadę komplementarności, ukazała się w r. 1928. Ale Bohr powracał do tego tematu wielokrotnie, w szczególności sprowokowany do tego przez Einsteina, który kwestionował w ogóle interpretację statystyczną nowszej teorii kwantów. Bohr referował zasadę komplementarności, np. również w Warszawie na zorganizowanej w r. 1938 przez prof. Białobrzeskiego, pod egidą Międzynarodowej Unii Fizycznej, konferencji o nowych teoriach fizycznych. Bohr nie wahał się stosować jej nawet do zjawisk bio- i psychofizycznych, dotychczas nie zaliczanych do domeny badań fizycznych, jakby chcąc w ten sposób zaznaczyć, że do fizyki należą wszystkie bez żadnego wyjątku zjawiska przyrody. Jak bardzo cenił tę zasadę, wynika z faktu, że wybrał sobie jako hasło na herbie swoim, wmurowanym jeszcze za jego życia w ścianę kaplicy na zamku królewskim Fredriksborg, napis: *Contraria sunt complementa*.

Bohr posiada także wielkie zasługi w dziedzinie fizyki jądrowej. Tu posługiwał się kropkowym modelem jądra atomowego. Największy sukces osiągnął w pracy ogłoszonej wspólnie z J. A. Wheelerem, przepowiadając rozszczepialność jąder U^{235} , co umożliwiło wykorzystanie energii jądrowej.

Ostrzeżony przez policję duńską, że Niemcy go poszukują, ucieka Bohr podczas wojny z okupowanej przez Niemców Danii na małej barce przez cieśninę Sund najpierw do Szwecji, a następnie udaje się samolotem do Anglii, i stąd do Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej. Tu przebywa incognito ze swoim synem Aagem, również fizykiem, jako Nicholas Baker w ośrodku atomowym w Los Alamos. Jest to rzecz zrozumiała, ponieważ wiadomość, że Bohr tam przebywa musiałaby zwrócić uwagę wrogów na to, co się tam opracowuje. Do Danii powraca Bohr we wrześniu 1945 r.

W r. 1957 otrzymał Bohr nagrodę Fundacji Forda nadawaną pod hasłem *Atomy dla Pokoju*.

Na lipiec 1963 r. zapowiedziane zostały w Kopenhadze jeszcze za życia Bohra uroczystości „rodzinne“ z okazji pięćdziesiątej rocznicy ukazania się jego podstawowych prac kwantowych. Zaproszeni zostali na nie wszyscy współpracownicy Bohra z lat 1913 do 1946. Śmierć Bohra przyciemni jednak radosny nastrój tego obchodu.

Geniuszowi Bohra składał wyrazy hołdu oczywiście cały świat naukowy. Był członkiem około czterdziestu Akademii Nauk na całym świecie, szcycimy się, że także polskiej. Poza tym posiadał doktoraty honorowe 29 uniwersytetów, w tym również warszawskiego. Promocja jego w Warszawie miała odbyć się jesienią ubiegłego roku. Niestety, stan zdrowia nie pozwolił Bohrowi na przyjazd do Warszawy.

W życiu codziennym był czarujący i bardzo uczuciowy, posiadał zdrowy zmysł humoru. Był wzorem męża i ojca rodziny. Dla swoich współpracowników był bardzo troskliwy i odnosił się do nich zawsze serdecznie. Dlatego także i oni żywili dla niego jak największą cześć nie tylko jako dla najgenialniejszego fizyka obecnego stulecia, ale również jako dla człowieka w najszlachetniejszym tego słowa znaczeniu. Jego delikatność charakteryzuje może sposób, w jaki krytykował przedstawiane mu poglądy. Zawsze prawie zaczynał swoje zarzuty słowami: „Pana poglądy są bardzo interesujące, ale zastanawia mnie fakt, że...“ i dopiero wówczas następowała druzgocąca niekiedy krytyka.

Prace swoje opracowywał Bohr nadzwyczaj starannie. Każda praca była wielokrotnie poprawiana i przepisywana aż Bohr uznał, że znalazł dostatecznie jasne i precyzyjne sformułowanie swoich myśli. Prace jego niełatwe są do czytania, bo każde słowo ma w nich znaczenie ściśle sprecyzowane z punktu widzenia możliwie wielu aspektów.

W r. 1932 ofiarowali Bohrowi rodacy jego jako siedzibę honorową wspaśniały pałac „Gamle Carlsberg“, przeznaczony dla najwybitniejszego Duńczyka. Bohr, skromny jak zawsze, obrał dla siebie tu jako gabinet jeden z najmniejszych pokoi. O jego skromności świadczy również fakt, że jeszcze do niedawna przyjeżdżał do swojego Instytutu rowerem.

Dla nas Polaków był Bohr zawsze bardzo serdeczny. Jednym z najbliższych współpracowników Bohra był od r. 1939 aż do jego śmierci prof. Stefan Rozental, wychowanek Uniwersytetu Jagiellońskiego. W ciężkim dla nas okresie po wojnie brał Bohr żywy udział w pracach Duńskiego Komitetu Pomocy dla Polski, którego przewodniczącym był brat jego Harald. Pomoc ta pomogła nam zapełnić w naszych bibliotekach naukowych braki powstałe wskutek wojny. Więzy między Zakładem Bohra a Polską były zawsze bardzo żywe. Obecnie po wojnie wielu naszych młodszych fizyków przebywało na studiach w Kopenhadze. Będąc jednym z pierwszych jego współpracowników zachowuję niejedno spotkanie z Bohrem we wdzięcznej pamięci, a w słowach tego wspomnienia pragnąłbym złożyć jego pamięci wyrazy głębokiego hołdu.