

Po klęsce bardzo racjonalnego modelu atomu stworzonego przez Rutherforda (MT 08/07) jedynym wyjściem stało się zakwestionowanie klasycznej fizyki na wzór rewolucji, jakiej dokonał w 1900 roku Max Planck. Jest oczywiste, że każda taka próba na początku jest zawsze przyjmowana z wielką ostrożnością i poddawana wnikliwym sprawdzeniom. Nierzadko jest również przedmiotem ostrej krytyki świata naukowego. Właśnie tak – z wielkim niedowierzaniem, ale i entuzjazmem – odebrano pierwszy nieklasyczny model budowy atomu stworzony przez Nielsa Bohra w 1913 roku. Szybko okazało się, że nowa koncepcja dość dobrze wyjaśnia wcześniej niewytłumaczalne wyniki eksperymentów.



**Tomasz Sowiński** w 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej. Obecnie jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. Z zamiłowania zajmuje się popularyzacją nauki.

W roku 2005 był nominowany do nagrody w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji oraz Polską Agencję Prasową.

Tomasz Sowiński

# Narodziny kwantowego modelu atomu!

## PROBLEM RUTHERFORDA RAZ JESZCZE

Głównym mankamentem teorii Rutherforda było to, że elektron krążący po orbicie wokół atomowego jądra nieustannie emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Musi się tak dziać, bo wynika to bezpośrednio z praw Maxwella – fundamentu elektrodynamiki klasycznej, na której opierał się Rutherford. Na skutek tego promieniowania elektron traci swoją energię i jego prędkość w ruchu po orbicie spada. Tym samym odległość pomiędzy elektronem i jądrem ciągle się zmniejsza. To nieuchronnie prowadzi do zderzenia i zniszczenia atomu. Doświadczenie przekonuje nas jednak, że nic takiego jak samodestrukcja atomów w przyrodzie nie zachodzi. Model ten, choć zgodny z elektrodynamiką klasyczną, nie może zatem być prawdziwy.

## DOGLĘBNA ANALIZA PROBLEMU

Niels Bohr zdawał sobie doskonale sprawę, że jeśli tylko istnieje jakieś logiczne wytłumaczenie, dlaczego atomy w przyrodzie nie ulegają zniszczeniu wbrew klasycznym prawom fizyki, musi to być spowodowane jakimś NIEKLASYCZNYM mechanizmem, który tego zabrania. Elektrodynamika klasyczna, wbrew której atomy na świecie istnieją, jest bowiem teorią bardzo fundamentalną – doskonale i prosto opisującą bardzo wiele fenomenalnych zjawisk w przyro-

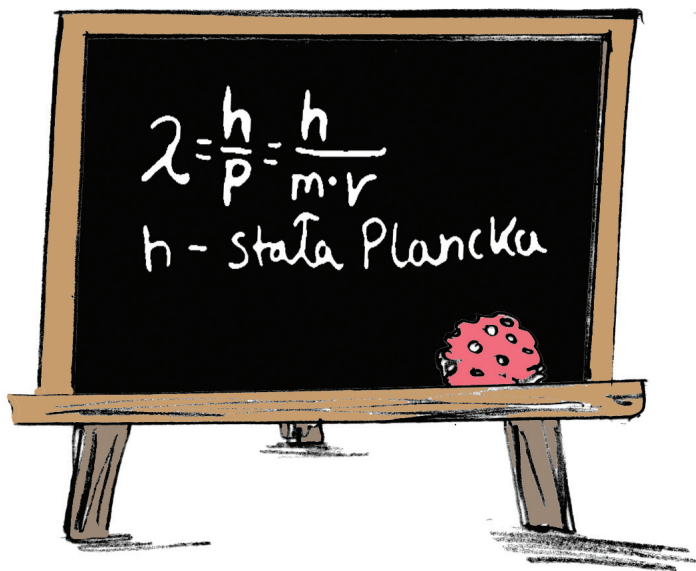
dzie. Zatem tylko jakiś jeszcze bardziej fundamentalny mechanizm może sprawić, że w pewnych przypadkach nie będzie ona działać. Oczywiście cała sztuczka z nieklasycznym mechanizmem musi być na tyle subtelna, że będzie obowiązywała tylko na małych skalach – wtedy gdy będziemy interesowali się budową atomu. Gdy natomiast przejdziemy do rozważania problemów w makroskali, powinna ona automatycznie ulegać zmarginalizowaniu.

## DROGA DO PIERWSZEGO POSTULATU

Rozumowanie, które doprowadziło Bohra do odkrycia prawidłowego rozwiązania powyższego problemu, rozpoczyna się od już przez nas omawianej (MT 04/07) hipotezy de Broglie'a. Przypomnijmy, że jest ona konsekwencją tzw. dualizmu korpuskularno-falowego, który początkowo został odkryty dla promieniowania elektromagnetycznego, a później dla cząstek materii (MT 03/07). Zgodnie z tą hipotezą z każdą cząstką fizyczną stowarzyszona jest pewna fala materii rozchodząca się w przestrzeni, której długość  $\lambda$  jest bezpośrednio związana z pędem cząstki  $p$  niesionym przez tę cząstkę (pęd  $p$  to iloczyn masy cząstki  $m$  oraz jej prędkości  $v$ ). Przy czym związek jest odwrotnie proporcjonalny, tzn. im cząstka ma większy pęd, tym długość fali materii jest mniejsza

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

Wielkość  $h$  to stała Plancka, o której wielokrotnie już wspominaliśmy.



### Dla dociekliwych

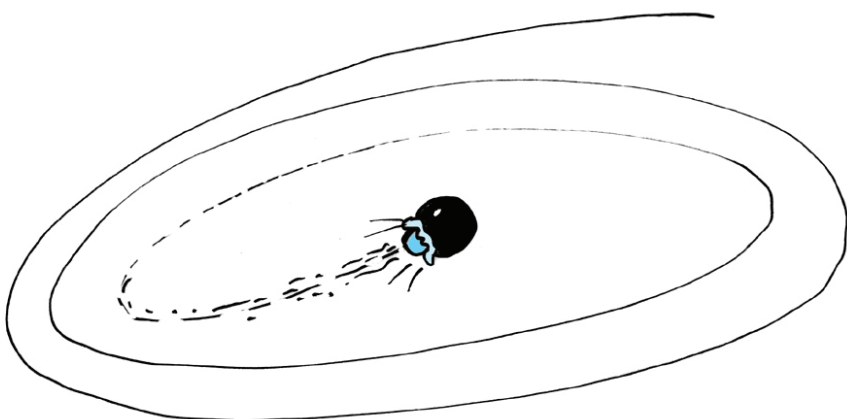
Stała Plancka to fundamentalna wielkość występująca w przyrodzie zmierzona z fenomenalną wręcz dokładnością. Na dzień dzisiejszy jej wartość to

$$h = 6,62606896(3) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Ostatnia cyfra wzięta w nawias w tym przypadku nie oznacza „trzy w okresie”, ale jest umową mówiącą, że na bazie aktualnych doświadczeń fizycy nie mają pewności co do tej cyfry i wszystkich następujących.

Fala materii jest przypisana do każdego obiektu (również makroskopowego) i jak pamiętamy, opisuje ona zachowanie się cząstek wtedy, gdy wymiary liniowe przeszkody (np. szerokość szczeliny) są porównywalne z długością tej fali. Mówimy wtedy, że zachowaniem cząstek rządzi prawa fizyki kwantowej. Ze wzoru de Broglie'a wynika, że dla obiektów dość dużych (jak np. piłka tenisowa) poruszających się z typowymi dla nich prędkościami długość fali materii jest znikomo mała (MT 04/07). To właśnie dlatego nie musimy stosować praw fizyki kwantowej do opisu ruchu takich ciał. Wtedy wystarczy się ograniczyć do zwykłej mechaniki Newtona.

Niels Bohr był przekonany, że to właśnie prawa mechaniki kwantowej rządzą ruchem elektronu, który krąży wokół jądra atomowego. Łatwo się o tym przekonał, wyliczając długość fali de Broglie'a, jaka jest stowarzyszona z poruszającym się wokół jądra elek-

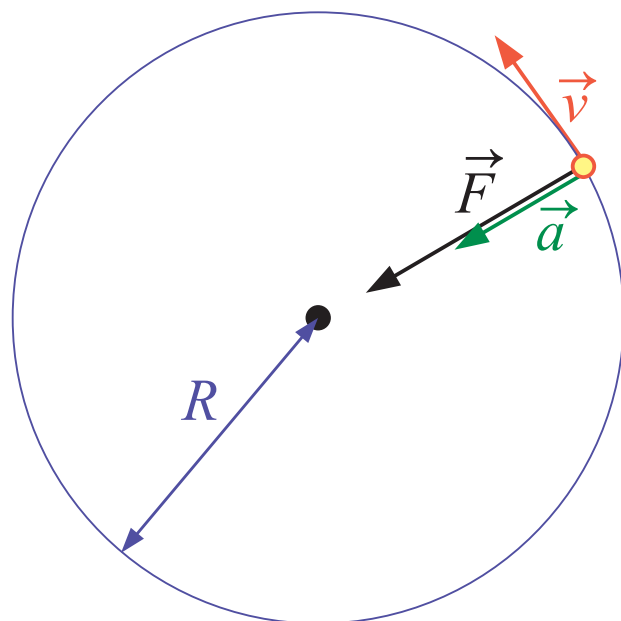


model atomu Rutherforda

tronem. Przyjrzyjmy się temu rachunkowi, bo jest on bardzo prosty, a jednocześnie bardzo pouczający. W tym celu założmy dla uproszczenia, że elektron utrzymuje się na orbicie kołowej wokół jądra, której promień  $R$  jest rzędu  $10^{-10}$  m (taki mniej więcej jest rozmiar przeciętnego atomu, co wynika z doświadczeń Rutherforda). Elektron utrzymuje się na tej orbicie dzięki temu, że siła oddziaływania elektrostatycznego pomiędzy jądrem a elektronem nadaje mu przyspieszenie (tzw. przyspieszenie dośrodkowe), które działając prostopadle do prędkości, zmienia kierunek jego prędkości. Nie zmienia ono natomiast wartości prędkości (MT 08/07). Z lekcji fizyki wiemy, że przyspieszenie dośrodkowe dla ciała poruszającego się po okręgu jest dane wzorem

$$a = \frac{v^2}{R}$$

gdzie  $v$  jest prędkością ciała, a  $R$  promieniem orbity.



Zgodnie z prawem Coulomba, o którym już wielokrotnie wspominaliśmy, siła oddziaływania pomiędzy dwoma obiektami obdarzonymi ładunkami elektrycznymi  $q$  i  $Q$  znajdującymi się w odległości  $R$  dana jest wzorem

$$F = -k \frac{qQ}{R^2}$$

Znak minus w tym wzorze pełni jedynie funkcję informacyjną, że obiekty obdarzone ładunkami o tych samych znakach odpychają się, a o przeciwnych przyciągają. We wzorze tym stała  $k$  to tzw. stała oddziaływania elektrostatycznego. Z doświadczeń Coulomba przeprowadzonych jeszcze w XIX wieku wiemy, że wynosi ona z dobrym przybliżeniem

$$k \approx 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Oczywiście w przypadku oddziaływania jądra z elektronem ładunki  $q$  i  $Q$  są sobie równe co do

wartości (jedynie mają przeciwne znaki), którą historycznie nazywa się ładunkiem elementarnym i oznacza się małą literą  $e$  (od ang. *elementary*). Wynosi ona (MT 06/07)

$$e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Jeśli dodatkowo uwzględnimy II zasadę dynamiki Newtona, czyli wszystkim dobrze znany związek pomiędzy siłą a nadawanym przez nią przyspieszeniem ciała o masie  $m$  (masa elektronu wynosi  $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ )

$$F = m \cdot a$$

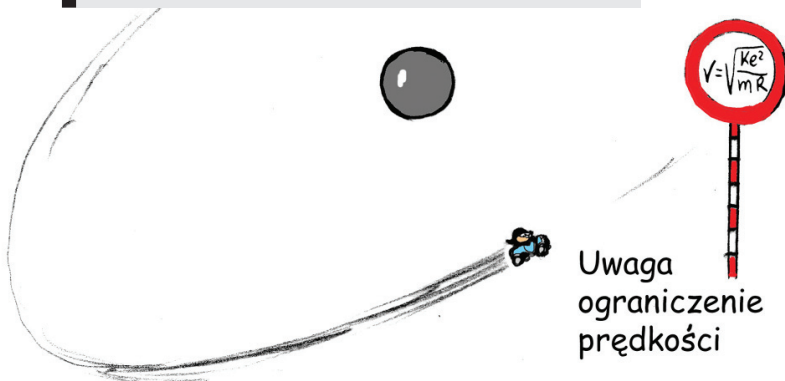
i zbierzemy wszystkie powyżej podane informacje razem, łatwo otrzymamy wzór na prędkość elektronu krążącego po orbicie wokół jądra

$$v = \sqrt{\frac{ke^2}{mR}}$$

MINI QUIZ MT  
CZYTAM, WIĘC WIEM

Z doświadczeń Rutherforda wynika, że promień atomu to około

- a)  $4,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
- b)  $9,0 \cdot 10^9 \text{ m}$
- c)  $10^{-10} \text{ m}$



Po podstawieniu wartości liczbowych daje to dość dużą prędkość elektronu rzędu **1600 km/s**. Podkreślmy, że przeprowadzone przez nas rozumowanie oparte jest na czysto klasycznych prawach – mechanice Newtona i prawie Coulomba. Jest zatem całkowicie zgodne z modelem Rutherforda, który jak wiemy nie może być prawdziwy. Do tej pory nie wyszliśmy ani na krok poza ramy fizyki końca XIX wieku, a udało nam się już oszacować prędkość elektronu na orbicie w atomie! Teraz dopiero przeprowadzimy analizę, która doprowadziła Bohra do ciekawego pomysłu.

## W ATOMIE RZĄDZI MECHANIKA KWANTOWA

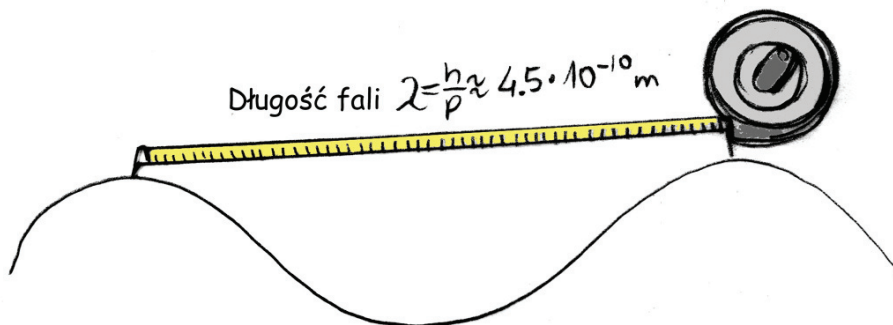
Jak już wcześniej wspominaliśmy, z każdą cząstką materii w przyrodzie związana jest fala materii de Broglie'a. Skoro znamy już prędkość elektronu na orbicie atomowej, to bez problemu jesteśmy w stanie wyliczyć, jaka jest długość tej fali, która mu odpowiada. W tym celu musimy najpierw znaleźć pęd (iloczyn masy i prędkości) elektronu na orbicie. Każdy łatwo sprawdzi, że choć prędkość elektronu jest bar-

dzo duża, to ze względu na mikroskopijnie małą masę pęd elektronu jest bardzo mały i wynosi

$$p = m \cdot v \approx 1,45 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

W związku z tym możemy się spodziewać, że długość fali materii mu odpowiadająca będzie dość duża. Elementarny rachunek pokazuje, że długość tej fali to

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$



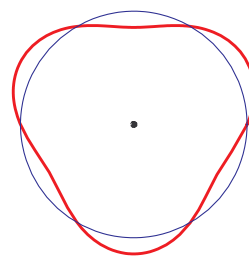
Po otrzymaniu tego wyniku, jak widzimy bardzo elementarnymi rachunkami, powinniśmy się bardzo ucieszyć. Wynik ten, choć może jeszcze Czytelnik nie zdaje sobie z tego sprawy, całkowicie tłumaczy dlaczego teoria Rutherforda nie mogła dobrze działać w przypadku opisu atomu. Jako pierwszy zrozumiał to właśnie Niels Bohr w 1913 roku.

Zauważmy, że otrzymana przez nas długość fali materii elektronu krążącego wokół jądra jest porównywalna z rozmiarami samego atomu. Średnica atomu to ok.  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , czyli tylko dwa razy mniej niż otrzymana przez nas długość  $\lambda$ . Jeśli natomiast porównamy ją z długością orbity, po jakiej krąży elektron (obwód okręgu o promieniu  $R$  to  $2\pi R$ ), okazuje się, że jest ona nawet mniejsza. Oczywiście wszystkie nasze rachunki są czysto szacunkowe i nie powinniśmy wierzyć w ich dokładność. Niewątpliwie jednak obie wielkości: długość fali materii i rozmiar atomu, są tego samego rzędu. To zdecydowanie powinno nas przekonać, że w atomie nie mogą rządzić prawa klasyczne, bo... powtórzmy to jeszcze raz: **zawsze, gdy rozmiary rozważanych przeszkód lub obiektów (w tym przypadku wielkość atomu) są porównywalne z długością fali de Broglie'a cząstek materii, to dynamiką tychże rządzą prawa mechaniki kwantowej!** Nie ulega więc żadnej wątpliwości, że model atomu Rutherforda, który był oparty na czysto klasycznych prawach, nie może dobrze opisywać atomu. W atomie bez wątpienia **mechanika kwantowa ma najwięcej do powiedzenia**. Problem w tym, że poza kilkoma ogólnikami w naszych rozważaniach w ogóle o prawach mechaniki kwantowej nie mówiliśmy. Przeto dla Czytelnika jest ona jeszcze nieznana. Ale w 1913 roku nie była ona znana nikomu i pierwszy krok wykonał właśnie Niels Bohr. W ten sposób narodził się tzw. **postulat kwantowania Bohra** – pierwsze prawo rodzącej się mechaniki kwantowej, która miała w końcu poprawnie opisywać zjawiska subatomowe.

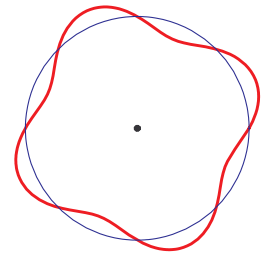
## PIERWSZY POSTULAT BOHRA

Zauważmy, że z klasycznych rozważań na temat krążącego elektronu wokół jądra nie wynikają żadne warunki, jakie musi spełniać promień orbity. Z góry zadaliśmy, że promień atomu to ok.  $10^{-10}$  m. Liczbę tę wzięliśmy prosto z doświadczeń Rutherforda, które pozwoliły ją oszacować z dość dobrą dokładnością. Jednak z żadnego prawa fizyki do tej pory nie było można wyliczyć tej wielkości teoretycznie. Krótko mówiąc, jeśli atomem rządziłyby prawa fizyki klasycznej, to równie dobrze mogłyby istnieć atomy, których orbity są dużo mniejsze od tej doświadczalnej wielkości. Nic nie stałoby również na przeszkodzie, aby istniały i takie, których orbity są znacznie większe (np. większe niż Układ Słoneczny). To oczywiście jest nonsensem, bo wiemy, że takie atomy nie istnieją. Jednak fizyka klasyczna nie wyróżnia żadnego rozmiaru atomu. Z punktu widzenia teoretycznego wszystkie rozmiary są równie dobre.

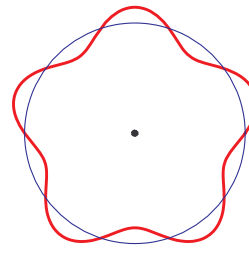
Gdy dopuścimy myśl, że z elektronem krążącym po orbicie związana jest fala materii, natychmiast okaże się, że pewne rozmiary orbit są w naturalny sposób wyróżnione. Zauważmy, że z elektronem posiadającym pęd  $p$  krążącym po orbicie o promieniu  $R$  związana jest fala o ściśle określonej długości  $\lambda$ .



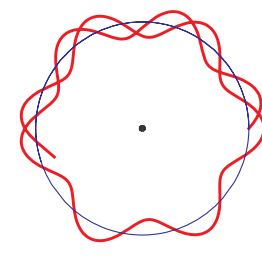
Orbita dozwolona  
 $n=3$



Orbita dozwolona  
 $n=4$



Orbita dozwolona  
 $n=5$



Orbita NIEDOZWOLONA

— orbita klasyczna elektronu

— fala de Broglie'a elektronu

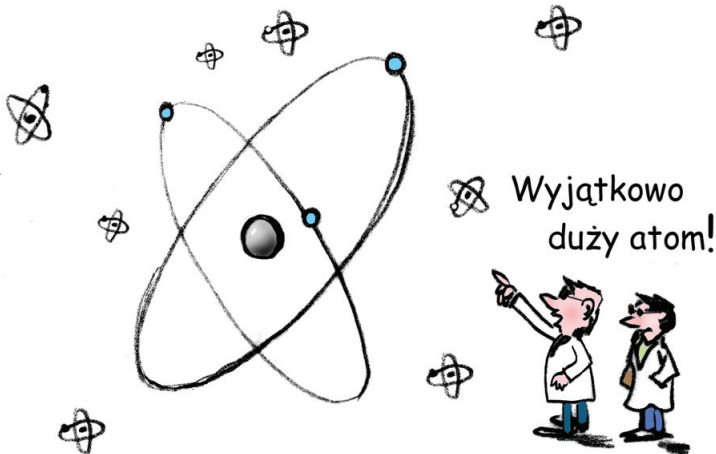
Wykorzystując wzór na długość fali de Broglie'a, wzór Bohra można przepisać do innej postaci określającej warunek na iloczyn pędu elektronu na orbicie i jej promienia (taką wielkość fizycy nazywają **momentem pędu**). Łatwo Czytelnik sprawdzi, że ma on postać

$$p \cdot R = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

W powyższym wzorze wprowadziliśmy specjalne oznaczenie  $\hbar$  (czytaj: „ha kreślone”) na wartość stałej Plancka  $h$  podzielonej przez  $2\pi$ . Okazuje się bowiem, że tak zdefiniowana wielkość występuje dużo częściej w fizyce kwantowej i wydaje się mieć bardziej fundamentalne znaczenie.

### CO TO ZA CYRKOWE SZTUCZKI?

W tym miejscu Czytelnik zapewne zastanawia się, czy rzeczywiście taka „cyrkowa” sztuczka, jaką niewątpliwie jest pierwszy postulat Bohra, jest w stanie wnieść coś nowego do naszych rozważań, a przede wszystkim, czy jest w stanie powiedzieć nam coś interesującego o budowie atomu. Czy wzięty niczym z sufitu postulat całkowicie burzący klasyczny porządek, a jednocześnie bardzo prosty i niewątpliwie posiadający ładną interpretację geometryczną może wnieść coś ciekawego do dyskusji? Odpowiedź już za miesiąc! ●



Wszystkie teoretycznie możliwe orbity można podzielić na takie, dla których długość fali  $\lambda$  mieści się całkowitą liczbą razy na ich obwodzie i na całą resztę, które nie mają tej własności. To doprowadziło Bohra do pewnego pomysłu zwanego dziś **POSTULATEM KWANTOWANIA BOHRA**. Brzmi on następująco: **przyroda dopuszcza tylko takie orbity, dla których długość fali materii elektronu mieści się na orbicie całkowitą liczbą razy**. Tzn. że możliwe są tylko takie orbity, dla których spełniony jest warunek

$$2\pi R = n\lambda$$

gdzie  $n$  jest liczbą naturalną (1, 2, 3, ... itd.), numerującą kolejne dopuszczalne orbity. Wszystkie inne orbity, zgodnie z postulatem Bohra, są zabronione.

