

# Co by było gdyby, czyli zjawiska kwantowe w makroświecie

■ WOJCIECH JERZY STĘPNIOWSKI

Jak wiadomo, mikroświat rządzi się prawami mechaniki kwantowej, a makroświat regułami mechaniki klasycznej. W dużej mierze mechanika kwantowa, to zbiór abstrakcyjnych zjawisk, nie mających swoich odpowiedników w świecie rządzonego mechaniką Newtona. Często zjawiska kwantowe są nieintuicyjne, a wręcz kłócą się ze „*zdrowym rozsądkiem*”, bo nie mają swoich odpowiedników w życiu codziennym. A co by było gdyby miały? Jak wpłynęłoby to na nasz świat? Artykuł ten ma za zadanie popętnienie herezji z premedytacją, ponieważ zostaną tu podjęte próby adaptacji zjawisk z mikroświata w „*życiu codziennym*”, a także ma za zadanie przemyślenie w sposób humorystyczny pewnej dozy wiedzy, która poprzez szukanie tych odpowiedników, może zostać wytłumaczona osobom na niższym stopniu wtajemniczenia w zjawiska kwantowe.

## Kwantowanie

W mikroświecie energia jest przekazywana w formie pewnych porcji, czyli kwantów. Determinuje to występowanie w cząstkach, takich jak atomy, elektrony, cząsteczki, pewnych ściśle określonych poziomów energetycznych, w których może znajdować się cząstka. Nie może za to znajdować się pomiędzy nimi. Mówiąc z grubsza, z poziomami energetycznymi w cząstkach jest, jak z chodzeniem po drabinie. Cząstka może znajdować się tylko na pewnych poziomach. Tak samo, my wychodząc, lub schodząc po drabinie, możemy znajdować się tylko na określonych szczeblach, ponieważ nie wesprzemy się w powietrzu pomiędzy dwoma szczeblami. Z kolei makroświat jest światem ciągłym. Natura w makroświecie

nie zastosowała kwantowania. Przykładowo, odczucia takie, jak radość, ból, czy głód, nie są skwantowane. Przykładowo, ból głowy bólowi głowy nie jest równy. Można mieć raz słabszy, raz mocniejszy ból, ale nie jeden ból, czy osiem bólów. Tak samo, można być szczęśliwym mniej lub bardziej, i tak samo, jest to odczucie którego nie można sklasyfikować w formie dyskretnej skali. Jednakże w makroświecie istnieją, o dziwo, skwantowane rzeczy. Wynalazek ludzki, jakim jest pieniądz, to przykład skwantowania. W naszym systemie monetarnym „*kwantem*” jest grosz. Można mieć jeden, czy dwa grosze, ale nie można mieć kwoty pomiędzy, analogicznie, jak ze szczeblami w drabinie, zatem można w makroświecie znaleźć analogię do kwantowania z mikroświata.

## Stany superponowane

Jednym z postulatów mechaniki kwantowej jest superpozycja stanów kwantowo-mechanicznych. Mówi ona, że dowolny stan układu  $Y$  można przedstawić jako superpozycję, czyli kombinację liniową, wszystkich funkcji własnych danego operatora, a funkcje te stanowią zbiór zupełny [1]. Ponadto kwadrat modułu współczynnika rozwinięcia danej funkcji jest prawdopodobieństwem z jakim dana funkcja opisuje stan kwantowomechaniczny (1).

$$\Psi = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \Psi_k \quad (1)$$

Przykładowo, niech funkcje falowe  $\Psi_1$  i  $\Psi_2$  będą z pewnymi prawdopodobieństwami  $|c_1|^2$  i  $|c_2|^2$ , opisywać stan kwantowomechaniczny pewnego obiektu. Daje to równanie (1) w następującej formie:

$$\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2 \quad (2)$$

przy czym pamiętać należy, że:

$$|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1 \quad (3)$$

Taki stan rzeczy oznacza w praktyce, że robiąc pomiary uzyskuje się wyniki raz zgodne ze stanem  $\Psi_1$ , a raz ze stanem  $\Psi_2$ , z prawdopodobieństwem odpowiednio  $|c_1|^2$  i  $|c_2|^2$ . Na przykład, gdy oba współczynniki rozwinięcia  $c_1$  i  $c_2$  są równe, to uzyskuje się 50% wyników odpowiadających  $\Psi_1$  i drugie 50% dla  $\Psi_2$ .

Gdyby postulat ten sprawdzał się w makroświecie, to wówczas z niezerowym prawdopodobieństwem można by nawet powiedzieć, że „białe jest białe, a czarne jest czarne” i nie być w błędzie. Wówczas nic nie byłoby jednoznaczne, lecz występowałyby z mniejszym lub większym prawdopodobieństwem. W takiej sytuacji cały układ binarny „diabły by wzięli”, bo 0 byłoby 0 tylko z pewnym prawdopodobieństwem, tak samo jak 1 byłaby 1 też tylko z pewnym prawdopodobieństwem, przy czym 0 mogłoby być 1, a 1 z pewnym prawdopodobieństwem byłaby 0. Z pewnością ciekawe byłby wówczas komunikaty wyświetlane przez systemy operacyjne na komputerach. Odpowiedź nie byłaby wówczas jedną z jednoznacznych „tak”, „nie”, „anuluj”, lecz byłaby kombinacją liniową tych trzech „stanów”! A co ze światłami na skrzyżowaniach? Sygnały również byłyby kombinacjami liniowymi stanu zielonego, żółtego i czerwonego. Konkludując, postulat ten sporo mógłby namieszać w naszym klasycznym świecie, jeśli tylko manifestowałby się w naszym codziennym życiu.

### Reguła nieoznaczoności Heisenberga

Reguła nieoznaczoności Heisenberga wynika bezpośrednio z algebry komutatorów (operatory przesunięcia i pędu nie komutują ze sobą) i mówi, że jednoczesne dokładne (ostromierzalne) określenie położenia i pędu cząstki jest niemożliwe (4):

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \quad (4)$$

gdzie  $\Delta x$  oznacza niedokładność wartości współrzędnej  $x$ ,  $\Delta p_x$  – niedokładność warto-

ści składowej pędu  $p_x$ , a  $h$  jest stałą Plancka i wynosi  $6,2608 \cdot 10^{-34}$  J·s. Reguła ta mówi, że im dokładniej znamy położenie badanej cząstki, tym mniej dokładnie znamy jej pęd i na odwrót. Ponadto jest ona konsekwencją faktu, że sam akt pomiaru jest ingerencją w układ. Przykładowo chcąc zbadać dokładnie położenie cząstki np. pod mikroskopem, oświetlamy ją i wówczas znamy w miarę dokładnie jej położenie, ale efekt Comptona powoduje, że nie będziemy w stanie już określić jej pierwotnego pędu. Próbuując dokonać drugiego pomiaru, aby określić pęd tej cząstki, tak naprawdę badamy już cząstkę w innym stanie [1]. Dostyc ciekawa jest relacja Bohra [2], będąca konsekwencją reguły nieoznaczoności Heisenberga (5):

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h \quad (5)$$

Najbardziej intrygujący jest fakt, że zgodnie z tą niewinnie wyglądającą nierównością, energia może ulegać fluktuacjom. Fluktuacje kwantowe z kolei polegają na tym, że w niewyobrażalnie małym odcinku czasu pojawia się para cząstka–antycząstka i prawie natychmiastowo ulega ona anihilacji. Byłaby to tylko czysta teoria, gdyby nie doświadczenie Casimira, które polegało na zbudowaniu swoistego wzmacniacza dla subtelnych fal cząstek i antycząstek powstających i znikających wskutek fluktuacji kwantowych.

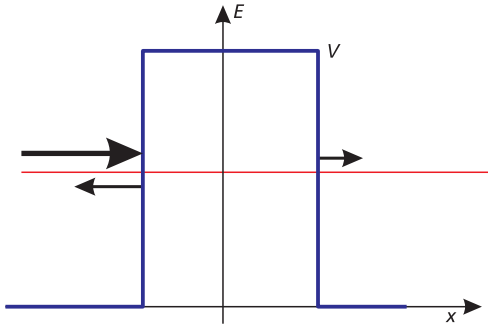
A co by było gdyby reguła nieoznaczoności obowiązywała w świecie makro, bo stała Plancka byłaby powiedzmy, o 40 rzędów większa (tylko na potrzeby tego rozważania)? Po pierwsze nie płacilibyśmy mandatów za przekroczenie prędkości! Dlaczego? Otóż policjant namierzając nas radarem, musiałby znać bardzo dokładnie nasze położenie, aby pomiar wykonać dokładnie. Znając bardzo dokładnie nasze położenie, nie znałby i to bardzo, naszego pędu, czyli iloczynu prędkości i masy. Jednakże taki stan rzeczy miałby też negatywne skutki. Z pewnością wejście do pociągu, lub jakiegokolwiek innego pojazdu, czy środka komunikacji byłoby bardzo utrudnione. Czemu? Jeżeli chcielibyśmy wsiąść do za-

parkowanego samochodu, to znając bardzo dokładnie jego położenie, nie wiedzielibyśmy, czy do niego wsiąść, czy nie, ponieważ nie znalibyśmy jego pędu, co oznacza, że dla obserwatora, zaparkowany samochód mógłby być tak naprawdę pozornie w ruchu. Z kolei, gdyby obserwator wiedział, że

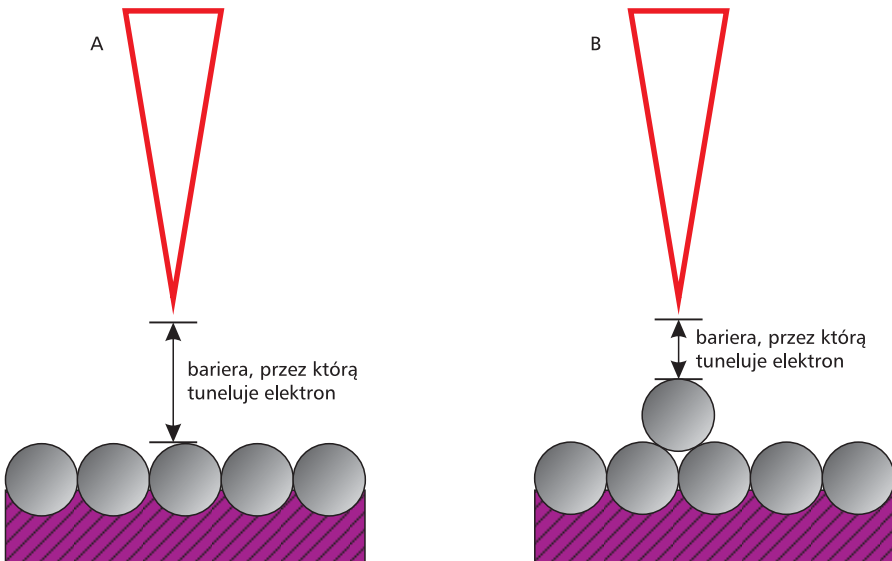
na pewno samochód jest zaparkowany i stoi, to... nie mógłby go znaleźć.

### Efekt tunelowy

Efekt tunelowy jest jednym z najmniej intuicyjnych zjawisk zachodzących w świecie rządzonego przez prawa mechaniki kwantowej. Polega on na tym, że cząstka o pewnej energii, niższej niż bariera, którą napotyka jest w stanie z pewnym prawdopodobieństwem przedostać się przez nią (rys. 1). Dokładny, modelowy opis zjawiska można znaleźć w literaturze fachowej [2]. Tunelowanie znalazło zastosowanie w mikroskopii STM (Skaningowa Mikroskopia Tunelowa). W przypadku skaningowej mikroskopii tunelowej, barierą, przez którą tunelują elektrony jest próżnia, która znajduje się pomiędzy elektrodą mikroskopu, a badanym materiałem (rys. 2). W związku z powyższym są dwa tryby pracy skaningowego mikroskopu tunelowego [3]. Albo można utrzymywać stałą odległość elektrody od badanej powierzchni i wówczas zmiany prądu tunelowania (grubsza bariera, czyli większa



Rys. 1. Poglądowy rysunek przedstawiający efekt tunelowania. Czerwona linia oznacza poziom energetyczny cząstki, a granatowa barierę potencjału, przez którą zachodzi tunelowanie. Grubość strzałek oznacza liczbę elektronów. W przypadku gdy bariera jest dość gruba, to wówczas więcej cząstek zostanie odbitych od niej, niż ulegnie tunelowaniu (przypadek z rysunku)

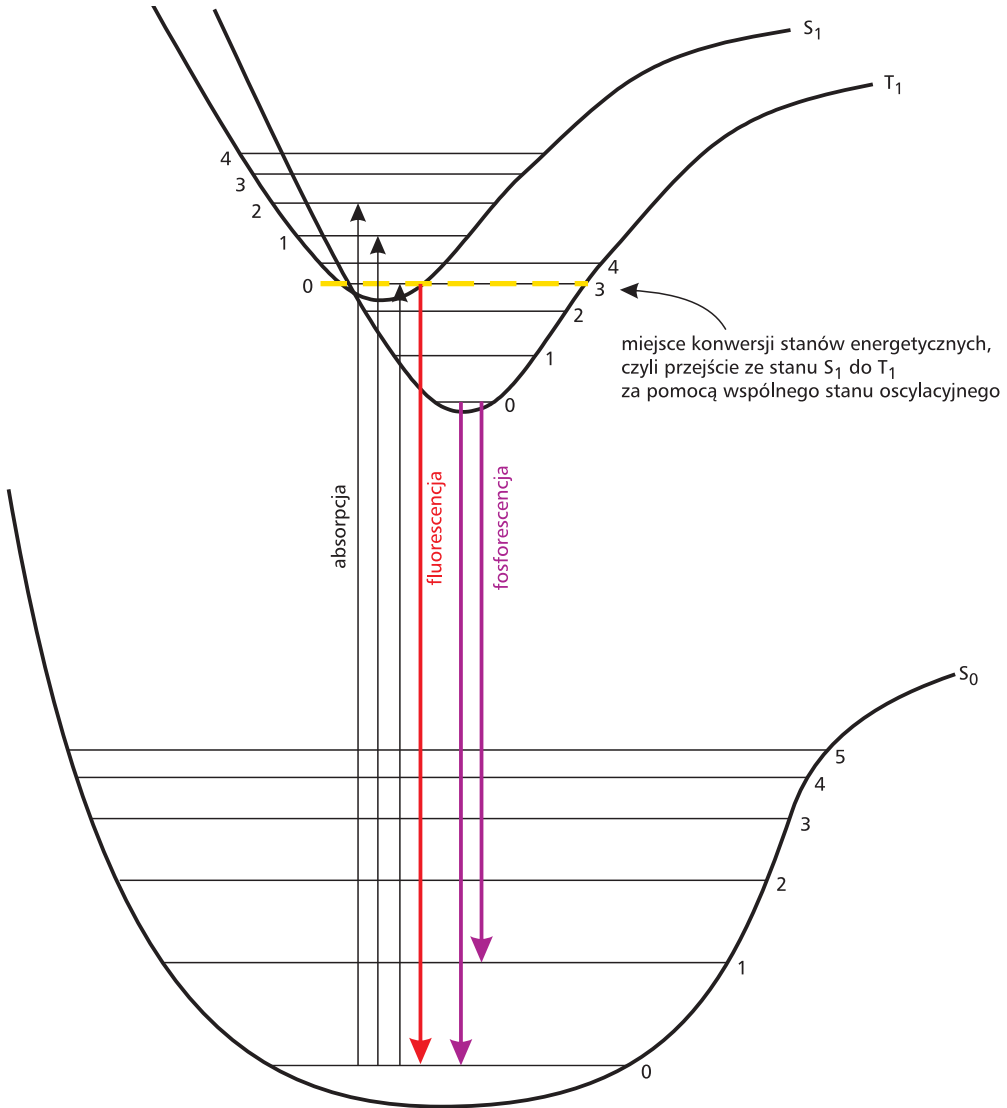


Rys. 2. Wyjaśnienie, jak działa STM podczas utrzymywania stałej odległości elektrody mikroskopu od badanego materiału. W przypadku (A) bariera do pokonania dla elektronu jest grubsza, przez co tunelowanie zachodzi z mniejszym prawdopodobieństwem, co daje mniejszy prąd. Z kolei, gdy na powierzchni pojawi się wzniesienie (B), to wówczas odległość elektrody od powierzchni jest mniejsza, przez co tunelowanie zachodzi z większym prawdopodobieństwem, dzięki czemu prąd jest większy

odległość to mniejszy prąd tunelowy) (rys. 2), albo można utrzymywać stały prąd tunelowania i w takim przypadku elektroda będzie raz wyżej, raz niżej w zależności od topografii powierzchni badanej próbki.

Dosyć niecodziennym zjawiskiem byłoby przechodzenie przez ściany, jednakże takie byłyby konsekwencje tunelowania w makroświecie. Jak wiadomo, w mechanice klasycz-

nej, obowiązującej w naszym codziennym życiu, takie zjawisko jest niemożliwe, ponieważ rozpędzając się, jakbyśmy się nie starali nie przenikniemy przez ścianę. Co najwyżej doznamy uszczerbku na zdrowiu i zniszczymy ścianę. Nie przebije się głową muru, a tym bardziej nie „przetuneluje” się przez mur głową. Nasza codzienna egzystencja byłaby dość dziwna, gdyby zjawisko tunelowania by-



Rys. 3. Układ krzywych energii potencjalnych stanów singletowych i trypletowej, wraz z zaznaczeniem konwersji międzysystemowej

ło dla nas dostępne. Otóż wówczas każdy, by bronić swojej prywatności budowałby domy z możliwie jak najgrubszych ścian, ponieważ zwiększenie grubości bariery zmniejsza prawdopodobieństwo tunelowania, aby przypadkiem „życzliwy” sąsiad, nie wpadł do nas niespodziewanie przez ścianę.

### Reguła Francka-Condona

Jednym z podstawowych praw spektroskopii molekularnej jest reguła Francka-Condona, która mówi, że ruch elektronów jest tak szybki w stosunku do ruchu jąder atomowych, że dla elektronów jądra się nie ruszają [4]. Konsekwencją tego prawa jest fakt, że na typowych wykresach energii od odległości między jądrami widać wzbudzenia i emisje tylko w formie linii pionowych, co oznacza, że w praktyce dozwolone są tylko przejścia elektronowe przy stałej odległości między jądrami. Reguły te dały podwaliny pod budowę schematu przejść elektronowych zaprezentowaną przez wybitnego polskiego fizyka, Aleksandra Jabłońskiego. Opublikowany przez niego w 1933 roku diagram, nosi w literaturze światowej nazwę Diagramu Jabłońskiego. Zgodnie z diagramem Jabłońskiego i regułą Francka-Condona, dozwolone są tylko przejścia z elektronowego stanu podstawowego  $S_0$ , na wzbudzony stan singletowy  $S_1$ . Powrotne przejście ze stanu  $S_1$  do  $S_0$  nazywa się fluorescencją. We wzbudzonym stanie elektronowym  $S_1$  może również zajść konwersja między systemowa i przejście ze stanu  $S_1$  w stan trypletowy  $T_1$ , ale tylko wówczas, gdy poziomy te mają co najmniej jeden wspólny stan oscylacyjny. Wówczas może mieć miejsce przejście z  $T_1$  do  $S_0$  i nazywa się ono fosforescencją (rys. 3).

A teraz kolejny raz pozwólmY popuścić sobie wodzy fantazji. Gdyby reguła Francka-Condona obowiązywała nie tylko w spektroskopii, ale w świecie fizyki klasycznej, to wówczas obiekty bardzo małe poruszałyby się nieskończenie szybko w stosunku do obiektów dużych, a duże niesamowicie powoli w stosunku do małych. Elektron jest prawie dwa tysiące razy lżejszy od nukleonu,

zatem mając pewną małą cząsteczkę, można powiedzieć, że elektron w stosunku do niej może być co najwyżej kilkadziesiąt tysięcy razy lżejszy. Jeśli takie zjawisko występowałoby w naszym świecie, to przykładowo człowiek nie mógłby zauważać owadów, ponieważ są one wiele tysięcy razy lżejsze od nas i poruszałyby się w tak wielką szybkością, że byłyby poza zasięgiem naszych zmysłów. Z drugiej strony, my jako ludzie nie odczuwalibyśmy skutków ruchów Ziemi w Kosmosie, ponieważ nasz ruch, a co za tym idzie również tempo życia byłoby tak szybkie, że nie dość, że żylibyśmy w jednej porze roku, to na dodatek w jednej porze dnia, bo w jednej tylko chwili życia naszej planety!

### Efekt fotoelektryczny i efekt Comptona

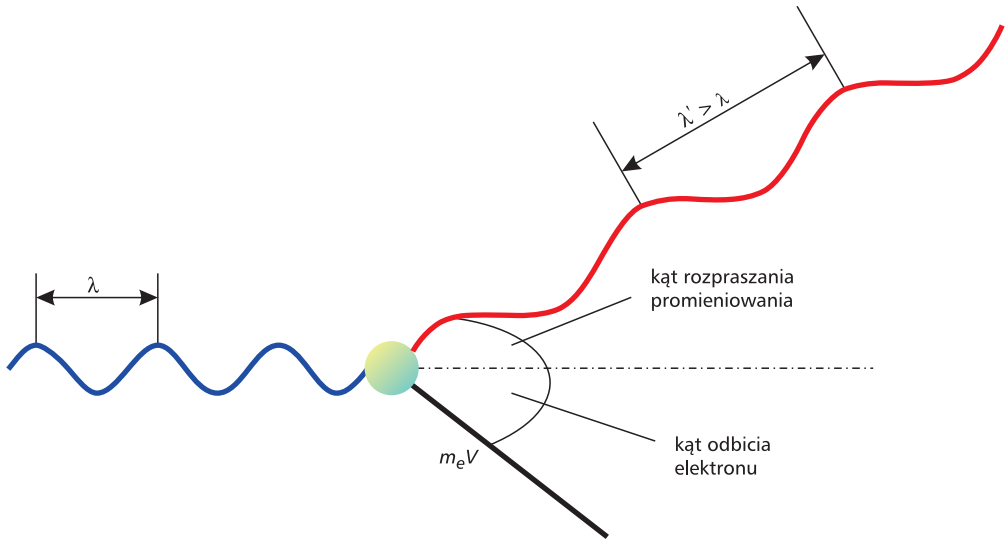
Zjawisko polegające na tym, że światło wybija z atomu elektron, jest dowodem na jednoczesny falowy, jak i korpuskularny charakter fotonów i nazywa się efektem fotoelektrycznym, opisanym ilościowo ponad 100 lat temu przez Alberta Einsteina. Według Einsteina foton padając na warstwę metalu zderza się z jednym z elektronów i przekazuje mu swoją energię, równą  $h\nu$ . Część tej pracy zużyta zostaje na wyrwanie elektronu i nosi nazwę pracy wyjścia, a pozostała energia przekształca się z energią kinetyczną elektronu wybitego przez foton [1], co podaje równanie Einsteina (6):

$$h\nu = \frac{1}{2} m_e v^2 + W \quad (6)$$

gdzie:

- $h$  – stała Plancka,
- $\nu$  – częstość padającego na metal promieniowania elektromagnetycznego,
- $m_e$  – masa elektronu,
- $v$  – prędkość elektronu,
- $W$  – praca wyjścia.

Z hipotezy Einsteina wynika, że im większe jest natężenie padającego promieniowania, tym więcej elektronów może ulec wybiciu, ponieważ większe natężenie światła to więcej fotonów, które może doprowadzić do większej liczby zderzeń z elektronami. Ponadto, maksymalna prędkość wybitych



Rys. 4. Ilustracja efektu Comptona. Foton będący falą o długości  $\lambda$  nadaje podczas zderzenia elektronowi pęd  $m_e V$  i zmienia tym samym swoją długość fali do  $\lambda' > \lambda$ .

elektronów nie zależy od natężenia padającego nań promieniowania, a od jego częstotliwości. Hipoteza Einsteina została całkowicie potwierdzona w 1923 roku, kiedy to amerykański fizyk, Compton dokonał rozproszenia promieniowania Roentgena na alkanach [1–2]. Zjawisko (efekt) Comptona polega na tym, że foton wybijając elektron zmienia długość swojej fali na większą (rys. 4). W 1967 roku znaleziono zastosowanie w spektroskopii efektu fotoelektrycznego, za co w 1981 roku szwedzki fizyk Kai Siegbahn dostał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki [4]. Stosując promieniowanie, czy to nadfioletowe, czy rentgenowskie można wybić odpowiednio elektron z powłoki walencyjnej, lub z najgłębszej ( $K$  lub  $L$ ) i wówczas do czynienia mamy ze spektroskopią fotoelektronów UV lub X (w skrócie stosuje się odpowiednio akronimy UPS i XPS). W spektroskopii fotoelektronów również chodzi o zjonizowanie badanej próbki, przy czym z grubsza mówiąc metoda ta opiera się na uzyskaniu informacji na temat energii jonizacji i energii wybitych elektronów [3–4].

Jakie byłyby konsekwencje, gdyby bombardowanie fotonami działało nie tylko na elektrony, ale również dawałoby rezul-

taty w makroświecie? Wystarczy wyobrazić sobie przesuwanie różnego typu przedmiotów za pomocą promieniowania.

### Podsumowanie

Paradoksalnie, hipotetyczne przeniesienie nieintuicyjnych zjawisk opisanych przez mechanikę kwantową w świat życia codziennego, może spowodować, że można na te zjawiska patrzeć w sposób bardziej zrozumiały. A może taki zabieg dydaktyczny, przemycający pod postacią niemożliwych w makroświecie zjawisk, na pozór abstrakcyjną wiedzę, pozwoli na jej zrozumienie, a wręcz może nią zainteresować.

#### WOJCIECH JERZY STĘPNIOWSKI

Absolwent Wydziału Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, doktorant na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie

#### LITERATURA

- [1] A. Gołębiowski, *Elementy mechaniki i chemii kwantowej*, PWN 1984.
- [2] R.F. Nalewajski, *Podstawy i metody chemii kwantowej – wykłady*, PWN, 2001.
- [3] P.W. Atkins, *Chemia fizyczna*, PWN, 2003.
- [4] Z. Kęcki, *Podstawy spektroskopii molekularnej*, PWN, 1998.