



Model poziomów energii Piekary

Zofia Gołąb-Meyer

Fizyki kwantowej nie sposób pominąć zupełnym milczeniem w nauczaniu fizyki w szkole. To przecież jedna z wielkich teorii fizycznych o niebywałych sukcesach „praktycznych” i ogromnych implikacjach filozoficznych. Jej elementy należą do podstaw nauczania.

Nauczanie w szkole to nie lada wyzwanie, gdyż to, co w mechanice kwantowej jest jasne i dobrze zrozumiałe, jest skryte za zaawansowanym aparatem matematycznym, niedostępnym uczniowi, zaś to, co tyczy jej podstaw, interpretacji, to co przyciąga uwagę i zainteresowanie uczniów, stale nie jest w zasięgu aparatu pojęciowego ucznia.

Pomiary poziomów energii atomów, drobin, to uniwersalny sposób obserwacji w mikroświecie, w którym nie da się obiektów „ogłądać” gołym okiem. Pomiar poziomów energii dla atomów i drobin to jak zdejmowanie odcisków palców. Więcej, to nie tylko metoda identyfikacji, lecz również metoda badania dynamiki procesów.

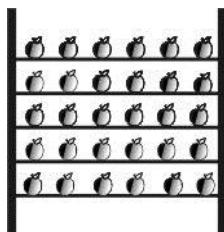
Aby przybliżyć uczniom pojęcie poziomów energii i promieniowania (przejsć między nimi), znakomity popularyzator Arkadiusz Piekara zaproponował model, nazwany „krzesłem Piekary” (*Foton* nr 12, październik 1992, na podst.: A. Piekara, *Nowe oblicza optyki, Wprowadzenie do elektroniki kwantowej, a w szczególności do optyki nieliniowej i optyki światła spójnego*. PWN, Warszawa 1976, s. 52).

Model dotyczy skwantowania poziomów energii potencjalnej w polu grawitacyjnym.

Dla przykładu rozważmy zbiór jabłek, które obrodziły na dorodnej jabłonce. Jest ich bardzo dużo, gałęzie jabłonki mogą być nieco elastyczne. Energia potencjalna jabłek (dla jabłka $E = mgh$, gdzie m – masa jabłka, h – wysokość nad powierzchnią Ziemi) znajduje się w pewnym paśmie od h_1 do h_2 . Jeśli jabłek jest dużo, możemy założyć widmo ciągłe, to znaczy każdy stan jabłka mgh ($h \in (h_1, h_2)$) jest obsadzony.



Inaczej jest, gdy jabłka po zbiorze umieszczone są na półkach. Ich energie są skwantowane – wysokość półek dyktuje „poziomy energetyczne”

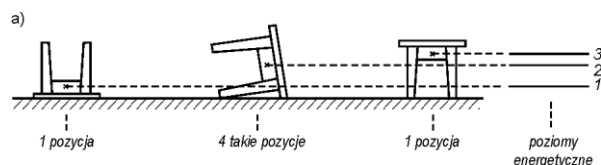


Jabłka przy przechodzeniu z poziomu na poziom oddają energię (gdy spadają) lub ją pobierają (trzeba wykonać pracę) przy przenoszeniu ich na wyższą półkę.

Kwantowane poziomy energii potencjalnej ma osobnik stojący na schodach. W stanie równowagi stoi sobie na dwóch nogach na jakimś konkretnym stopniu, którego wysokość dyktuje wartość energii potencjalnej grawitacji.

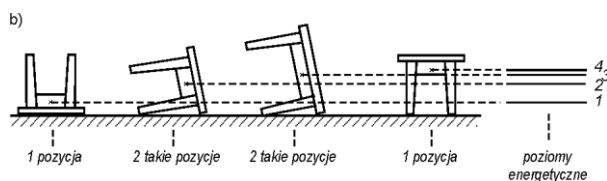
Gdy badanym obiektem nie jest zbiór jabłek, tylko bryła przestrzenna, np. sześcian, czworościan czy stołek, to w pozycji równowagi może mieć ona cały szereg poziomów równowagi. Piekara jako obiekt wybrał stołek. Cytuję:

„Každy układ ciał makroskopowych ma w dowolnej konfiguracji jakąś wartość energii: mówimy, że znajduje się na pewnym poziomie energetycznym. Jako przykład rozważmy kwadratowy stół spoczywający w rozmaitych pozycjach na podłodze (rys. 1a). Możemy zapytać: w ilu pozycjach może on stale przebywać? Odpowiedź nietrudna: w sześciu. Gdy stoi na blacie odwrócony do góry nogami, ma najmniejszą energię potencjalną, gdyż jego środek ciężkości zajmuje najniższe położenie; będziemy mówili, że układ nasz znajduje się na *najniższym poziomie energetycznym* albo inaczej w *stanie podstawowym*. Gdy położymy ten stół na jednym z boków (są cztery takie pozycje), wówczas jego środek ciężkości znajduje się wyżej i układ będzie miał większą energię potencjalną, czyli będzie się znajdował na wyższym poziomie energetycznym albo w *pierwszym stanie wzbudzonym*. Zauważmy, że układ nasz ma sześć możliwych konfiguracji, ale zaledwie trzy poziomy energetyczne, bowiem pierwszemu poziomowi wzbudzonemu odpowiadają cztery możliwe konfiguracje: mówimy, że poziom ten jest poczwórnje *zdegenerowany* (o krotności degeneracji mówi symetria stołka)”.



Rys. 1. a) Poziomy energetyczne stołka o płycie kwadratowej

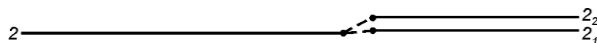
1 – poziom podstawowy, 2 – pierwszy poziom wzbudzony poczwórnje zdegenerowany, 3 – drugi poziom wzbudzony (pojedynczy)



Rys. 1. b) Poziomy energetyczne stołka o płycie prostokątnej

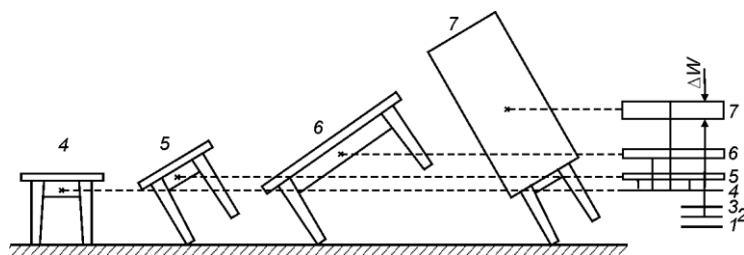
1 – poziom podstawowy, 2 i 3 – poziomy wzbudzone podwójnie zdegenerowane, 4 – trzeci poziom wzbudzony (pojedynczy)

Poczwórna degeneracja pierwszego poziomu wzbudzonego ma swoją przyczynę w wysokiej symetrii płyty stołu, która jest kwadratowa. Gdy zmniejszyć stopień symetrii i uczynić płytę stołu prostokątną, natychmiast poczwórnie zdegenerowany poziom *rozszczepia się* na dwa poziomy podwójnie zdegenerowane, niższy i wyższy, przy czym niższy odnosić się będzie do obu położen stołu, spoczywającego na jednej z dwóch dłuższych krawędzi płyty (rys. 1b). Gdy symetrię stołu dalej zubożymy, wbijając w środku jednej z dłuższych krawędzi płyty gwóźdź, wówczas niższy poziom podwójny rozszczepi się na dwa poziomy pojedyncze (rys. 2).



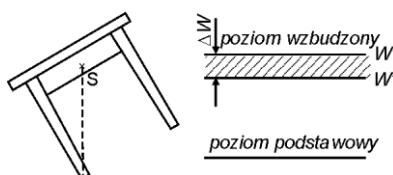
Rys. 2. Rozszczenie poziomu 2 na dwa poziomy (dublet) 2_1 2_2 jako skutek wbicia gwóźdźa w środek dłuższej krawędzi płyty, 2_1 – gwóźdź znajduje się w pozycji u dołu, 2_2 – gwóźdź znajduje się w pozycji u góry

Degenerację tego poziomu możemy przywrócić, wbijając symetrycznie do przeciwległej krawędzi stołu drugi taki sam gwóźdź: znów więc będziemy mieli jeden poziom podwójny. Istnieje pewien osobliwy sposób rozszczenia tego poziomu energetycznego, mianowicie gdy oba te gwoździe są stalowe, ustawione równoległe do siebie i do płaszczyzny stołu i namagnesowane w zgodnych kierunkach. Zadziałajmy polem magnetycznym równoległym do kierunku namagnesowania obu gwoździ: w jednym z położen stołu energia gwoździ, a więc i energia stołu zmniejszy się, podobnie jak zmniejsza się energia igły magnesowej kompasu, gdy ustawia się ona jednym swoim końcem ku północy. Jeżeli teraz stół nasz położymy na przeciwległym boku, energia jego nie będzie taka sama jak bez pola magnetycznego, lecz będzie zwiększona. A więc poprzedni podwójny poziom energetyczny został przez pole magnetyczne rozszczepiony na dwa poziomy, nieco wyższy i nieco niższy, i rozszczenie to jest tym większe, im silniejsze zastosowano pole magnetyczne. Zjawisko rozszczenia poziomów energetycznych w świecie atomów jest dobrze znane i nosi nazwę *zjawiska Zeemana*. Rolę namagnesowanych gwoździ spełniają tam wirujące elektrony.



Rys. 3. Z poziomów krótkożyjących 5, 6 i 7 stół przechodzi do poziomemu metatrwałego 4. Z poziomu tego do poziomu niższego 2 nie ma przejścia bezpośredniego; jest jednak przejście przez poziom wyższy 5

Stół, stojący w swej normalnej pozycji lub też dowolnie przewrócony, znajduje się na *trwałym* poziomie energetycznym. Ale oprócz poziomów trwałych istnieje wiele poziomów *nietrwałych*, odpowiadających pozycjom równowagi chwiejnej, a więc nietrwałej. Na rysunku 3 zaznaczone są tylko trzy najważniejsze poziomy nietrwałe: najwyższy z nich odpowiada pozycji stołu ustawionego na jednej nodze, tak by jego środek ciężkości znajdował się nad punktem podparcia; gdy stół ustawimy na dwóch nogach bliższych, otrzymamy poziom energetyczny nieco niższy, gdy zaś na dwóch nogach dalszych – otrzymamy poziom energetyczny jeszcze niższy. Wszystkie trzy stany energetyczne są nietrwałe, gdyż stół, będąc w równowadze chwiejnej, może w tych stanach przebywać zaledwie ułamek sekundy (zresztą zależy to od warunków, tzn. od *oddziaływań z otoczeniem*). O takich stanach powiemy, że ich czas życia jest krótki: w naszym przypadku wynosić może około pół sekundy. Inaczej powiemy o stanach energetycznych stołu znajdujących się w równowadze trwałej; czas życia tych stanów jest niezmiernie długi.



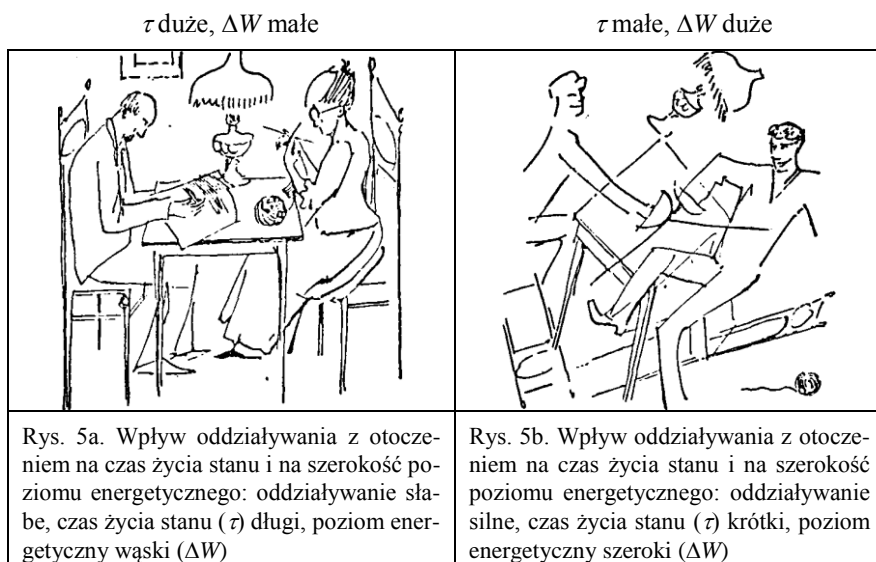
Rys. 4. U góry: czas życia stanu długi, poziom energetyczny wąski.

U dołu: czas życia stanu krótki, poziom energetyczny szeroki

A teraz proszę sobie wyobrazić, że w ciągu czasu życia jakiegoś stanu energetycznego naszego stołu wykonujemy wiele pomiarów jego energii potencjalnej: to znaczy mierzymy wysokość środka ciężkości stołu ponad podłogą i liczbę tę mnożymy przez ciężar stołu. Jeśli stół jest w równowadze trwałej, to nawet tysiąc pomiarów da w wyniku jedną i tę samą liczbę, powiedzmy W . Jeśli natomiast stół

jest w równowadze chwiejnej, to pomiary, oczywiście robione z taśmy filmowej, dadzą różne wyniki, zależne od chwili, w której klatka aparatu filmowego uchwyci chwiejący się stół. Znakomita większość tych wyników będzie zawarta między wartościami W' i W'' , tak że wielkość rozrzutu pomiarów wyniesie $\Delta W = W'' - W'$. Tę wielkość ΔW będziemy nazywali *szerokością poziomu energetycznego* stołu (ściślej definicji szerokości poziomu podawać tu nie będziemy). Na tej podstawie możemy powiedzieć, że szerokość poziomu energetycznego odpowiadającego stanowi o krótkim czasie życia jest duża, szerokość zaś poziomu o długim czasie życia jest mała (rys. 4).

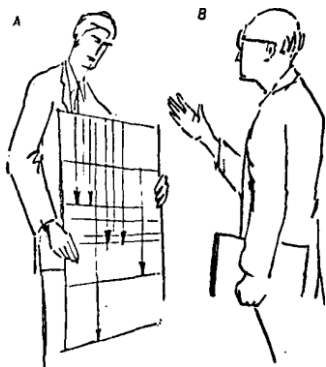
Zatem wszelkie czynniki, które skracają czas życia stanu (czegokolwiek, nie tylko stołu!), rozszerzają jego poziom energetyczny. Czynnikiem takim może być trzęsienie ziemi albo chłopcy bawiący się w Zorro (rys. 5b). W świecie molekuł i atomów czynnikami rozszerzającymi poziom energetyczny będą np.: ruch cieplny molekuł i atomów lub ich wzajemne oddziaływania i zderzenia. Zarówno obniżenie temperatury, jak i zmniejszenie ciśnienia zwążają poziomy energetyczne, a jednocześnie wydłużają czas życia stanów wzbudzonych.



(oryginalna ilustracja z książki *Nowe oblicza optyki*)

Co robi stół, stojący na dwóch nogach? Po pewnym czasie (równym przeciętnemu czasowi życia danego stanu) spada na cztery nogi albo przewraca się na bok. Powiemy ogólnie: przechodzi do niższego stanu energetycznego, albo: spada na

niższy poziom energetyczny. Nadmiar swojej energii oddaje przy tym na zewnątrz w postaci ciepła (ogrzeją się nieco i stół, i podłoga) oraz w postaci fali akustycznej, która niezawodnie zaalarmuje domowników. Na ich pytania odpowiecie naukowo: „Badam *emisję spontaniczną*, towarzyszącą przejściu stołu z wyższego poziomu energetycznego na niższy”. A gdybyście chcieli skorzystać z tej okazji i poprowadzić lekcję pogładową dalej, powtórzcie doświadczenie jeszcze raz, ale tak, aby stół ten padając przewrócił stół drugi. Wówczas powiecie: „Oto był przykład *emisji wymuszonej*, polegającej na tym, że stół drugi przeszedł ze wzbudzonego poziomu trwałego (możecie powiedzieć ‘metatrwałego’, tak mówią fizycy o atomach) do poziomu niższego, przy czym akt ten został wywołany przez emisję stołu pierwszego: bez tego oddziaływania obu stołów na próżno oczekivalibyśmy emisji spontanicznej, ponieważ wobec długiego czasu życia stanu metatrwałego emisja spontaniczna jest *niezmiernie mało prawdopodobna*”. Na zakończenie poproście Waszych słuchaczy, aby wzięli udział w absorpcji energii przez Wasz układ (tutaj obu stołów), to znaczy aby przenieśli stoły z niższego stanu energetycznego do wyższego, czyli aby je podnieśli.



Rys. 6. Wyobraźcie sobie taką rozmowę dwóch panów A i B:

- A. Oto schemat poziomów energetycznych mojego nowego nabytku. Zgadnij, co to jest?
- B. Oczywiście krzesło, i to bardzo piękne.
- A. Dobrze, a w jakim stylu?
- B. Sądząc ze stosunków odległości poziomów, to na pewno nie Biedermeier, raczej Ludwik XIV.

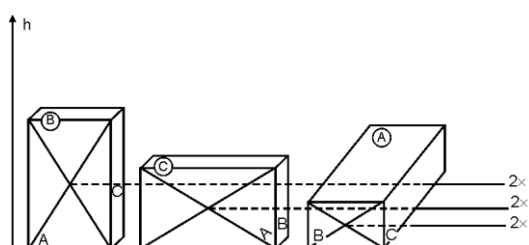
Jeżeli dalej wyobrażicie sobie, że pan B. wcale nie wie, jak wygląda styl taki czy inny (lecz potrafi odróżnić style według układu poziomów energetycznych), oraz że nigdy w ogóle nie widział krzesła, to będziecie mieli pojęcie o sytuacji i kunszcie fizyka współczesnego!

Tym językiem, językiem poziomów energetycznych, można opisać nie tylko stół, ale i dowolne ciała makroskopowe. Jednak w zastosowaniu do ciał makroskopowych opis ten byłby dość dziwaczny, a przede wszystkim niecelowy. Natomiast w zastosowaniu do atomów – jest to opis jedynie możliwy. Stół możemy opisać lepiej podając jego rozmiary, materiał, barwę, styl, aniżeli podając schemat jego poziomów energetycznych i możliwych przejść między nimi (rys. 6). Atomów nie możemy lepiej opisać, jak schematem poziomów energetycznych i poda-

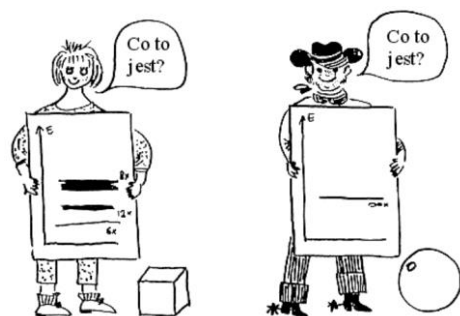
niem ich właściwości (degeneracja, czas życia, rozszczepienie w polu magnetycznym itd.), są to bowiem informacje dostarczane nam przez doświadczenie. Elektron-kulka obiegająca jądro, albo elektron-chmura – to obraz pomocniczy, to „mechanizm” – raczej naiwny, lecz mający siłę heurystyczną i pomocny w pracy – ale schemat poziomów to fakt podyktowany przez doświadczenie, to fundament naszej wiedzy o atomie.

Przyznacie Państwo, iż model zaprezentowany przez Piekarę jest majstersztykiem.

W mojej praktyce zamiast stołka posługuję się pudłem prostopadłościennym (po butach). Pudło ma 3 stany równowagi trwałej, każdy podwójnie zdegenerowany (rys. poniżej). Pudło posiada też stany równowagi niestabilnej, gdy stoi na krawędzi i na szpicach. Uczniowie mogą mieć dobrą i pouczającą zabawę dzięki studiowaniu zależności degeneracji poziomów z symetriami.



Poniżej przedstawiam rysunek wykonany przez uczennicę. Powstał on w czasie „zabawy”. Jedni uczniowie rysowali poziomy energetyczne prostych brył, a inni odgadywali, co to za bryły.



Odgadywano rodzaj bryły: sześcian, prostopadłościan, stożek, ostrosłup foremny i inne.