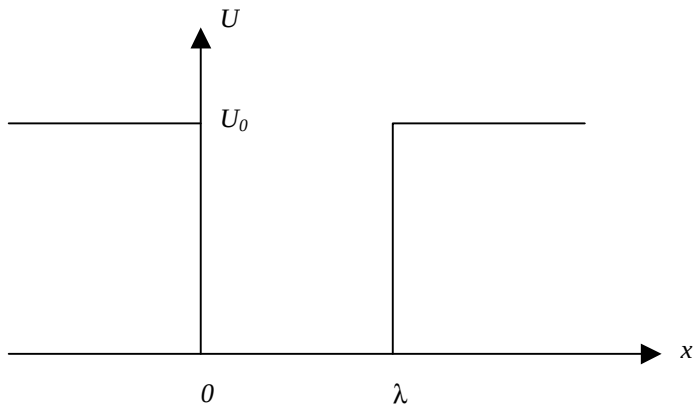
Temat: Przykłady zjawisk kwantowych.

Cele poznawcze:

- mechanika klasyczna jest teorią. deterministyczną - cząstki które poruszają się w tym samym polu sił i mają te same warunki początkowe będą w każdej chwili zachowywać się identycznie,
- jamą potencjału nazywamy obszar, w którym energia potencjalna cząstki jest mała w porównaniu z obszarami sąsiednimi, w związku z tym cząstka uwięziona jest w tym obszarze,
- w przypadku, gdy ruch cząstki jest jednowymiarowy a zależność jej energii potencjalnej od położenia przedstawia wykres:



to tak ograniczony dla ruchu cząstki obszar nazywamy jednowymiarową prostokątną studnią (jamą) potencjału, przy czym, gdy U_0 dąży do nieskończoności, to wtedy nazywamy ten obszar nieskończenie głęboką, jednowymiarową prostokątną studnią potencjału,

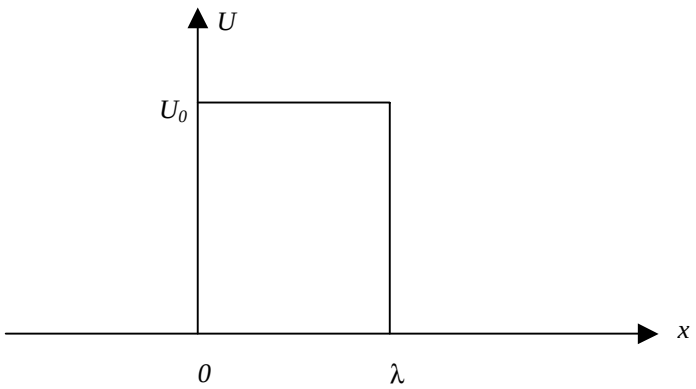
- falocząstki padające na jamę potencjału odbijają, się od niej z pewnym prawdopodobieństwem, a z pewnym przechodzą,
- przykład ruchu cząstki znajdującej się w jamie potencjału jest podobny do przypadku ruchu elektronu zamkniętego w strefie oddziaływania jądra atomu,
- jeżeli zgodnie z teorią de Broglie'a wibrującemu elektronowi między ściankami jamy potencjału przypiszemy pewną długość fali λ, to elektronowa fala stojąca będzie mogła powstać jedynie wtedy, gdy spełniony będzie warunek podobny do warunku powstania fali stojącej w strunie o długości λ,
- między długością fali elektronowej, a pędem, elektronu istnieje relacja $p_n = \frac{h}{\lambda_n}$, więc możemy zapisać:

$$p_n = \frac{nh}{2\lambda}, \qquad gdzie\ n = 1,2,3,...$$

- energia kinetyczna elektronu przyjmuje, wtedy wartości dyskretne (skwantowane):

$$E_n = \frac{p_n^{\ 2}}{2m} = \frac{n^2 h^2}{8\lambda^2 m}$$

- skwantowanie energii jest cechą charakterystyczną zachowania się falocząstki w każdym przypadku, gdy znajduje się ona w obszarze zamkniętym, na przykład w przypadku ruchu elektronu w atomie,
- w przypadku gdy ruch cząstki jest jednowymiarowy, a wykres zależności jej energii potencjalnej od położenia:



przyjmuje kształt bariery, to taki obszar ($0<x<\lambda$) nazywa się barierą potencjału,

- efekt przenikania cząstki o energii E mniejszej od energii potencjalnej U_0 odpowiadającej wierzchołkowi bariery nosi nazwę zjawiska tunelowego,
- prawdopodobieństwo przeniknięcia cząstki przez obszar bariery potencjalnej jest tym większe im "węższa" i "niższa" jest ta bariera.

Cele kształcące:

- zdefiniować pojęcia: jama potencjału, jednowymiarowa prostokątna, nieskończenie głęboka jama potencjału,
- wskazać podobieństwa i różnice w zachowaniu się:
  a) cząstek w jamie potencjału i elektronu w atomie,
  b) elektronu traktowanego jako fali w atomie, a przypadku fali stojącej w strunie,
- wyjaśnić co jest cechą charakterystyczną ruchu falowego cząstki w przypadku, gdy ruch odbywa się w obszarze zamkniętym,
- wyjaśnić pojęcie: bariera potencjału,
- wyjaśnić na czym polega zjawisko tunelowe.

Plan lekcji

1. Powtórzenie - celem jest podkreślenie, że
   a) model Bohra jest słuszny tylko dla atomu wodoru,
   b) wiele argumentów świadczy za sensownością włączenia teorii fal de Broglie'a do teorii budowy atomu,
   c) elektron w atomie jest uwięziony.
2. Opracowanie materiału nauczania.
   2.1. Pogadanka wprowadzająca w zagadnienia traktowania elektronu w atomie jako cząstki w jamie potencjału lub fali stojącej w strunie.
   2.2. Rozpatrywanie modeli:
   a) przypadek klasycznej cząstki w dole,
   b) przypadek falocząstki w jamie potencjału.
   2.3. Poszukiwanie podobieństw i różnic między:
   a) cząstką w jamie potencjału, a elektronem w atomie,
   b) kwantowaniem energii cząstki w jamie potencjału i energią elektronową w atomie.
   2.4. Sytuacja z barierą potencjału.
   a) definicja bariery potencjału,
   b) przykład zjawiska z efektem tunelowym.
3. Podsumowanie.

Ad l.

Przypomnienie wiadomości

Nauczyciel zadaje pytania.

A. Model Bohra okazał się niewystarczający, aby wyjaśnić pewne zjawiska. Jakie?
B. Na podstawie jakich przesłanek włączono teorię falową de Broglie'a do wyjaśnienia budowy atomu?
C. Na jakiej podstawie przyjęto, że fala elektronowa w atomie jest falą stojącą?

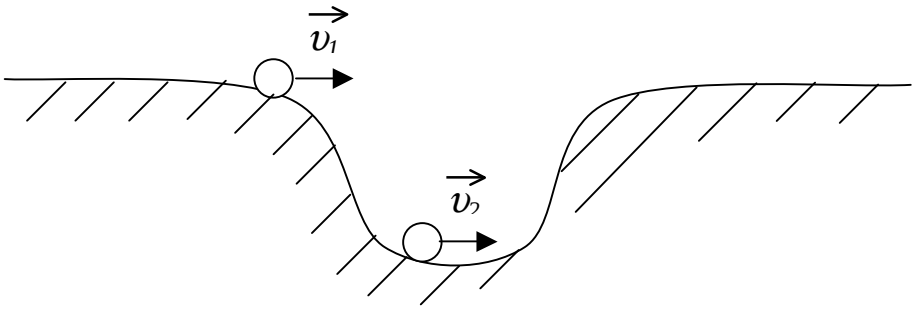
Ad 2.

Podstawy teoretyczne

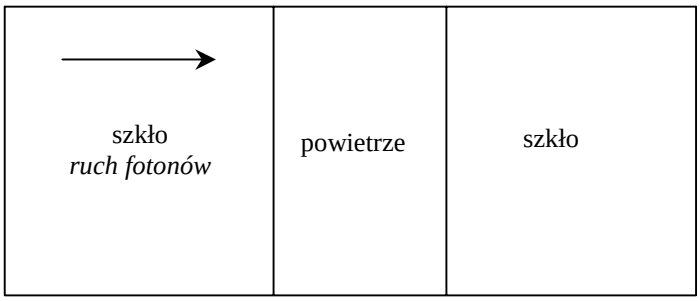
Lekcja prowadzona jest w formie -wykładu. Należy jednak prowokować do dyskusji uczniów, dotyczącej np. kształtu zbocza dołu - paraboli dopasowanej do toru kulki w rzucie poziomym itp.

Chcąc dowiedzieć się w sposób poglądowy jak przebiegają zjawiska kwantowe, musimy sobie wyobrazić analogiczną sytuację zachodzącą dla dowolnego ruchu falowego. W rzeczywistości bowiem fala materii porusza się dokładnie tak samo jak każda inna fala, na przykład głosowa czy świetlna. Wyobraźnia pozwala nam śledzić ruch fal materii, problem powstaje w chwili, kiedy chcemy nasze obserwacje zinterpretować.

Aby pomóc naszej wyobraźni prześledźmy następujące doświadczenie. Zwróćmy uwagę na rysunek, który przedstawia przekrój małego fragmentu powierzchni Ziemi.



Niech kulka posuwa się bez tarcia od lewej strony do prawej. Nim wpadnie do dołka jej energia kinetyczna na poziomym odcinku nie ulega zmianie (υ_1 - *const).* Kiedy znajdzie się na dnie dołu uzyska kosztem ubytku energii potencjalnej dodatkową energię kinetyczną. Innymi słowy, na dnie dołu kulka będzie poruszać się z większą prędkością υ_2. Kiedy kulka dotrze do przeciwnej krawędzi zacznie się wspinać na nią, a ponieważ ruch zachodzi bez tarcia, wydostanie się z dołu i będzie dalej biec z początkową prędkością. Zauważmy, że identyczne kulki poruszające się przed dołkiem z taką samą prędkością będą zachowywać się w ten sam sposób. Oznacza to, że mechanika klasyczna jest teorią deterministyczną, mianowicie cząstki, które poruszają się w tym samym polu sił i mają te same warunki początkowe, będą w każdej późniejszej chwili zachowywać się identycznie. Wiemy już jak poruszają się cząstki klasyczne w pewnym określonym przypadku, a jak będą poruszać się falocząstki w analogicznej sytuacji przedstawionej na rysunku.

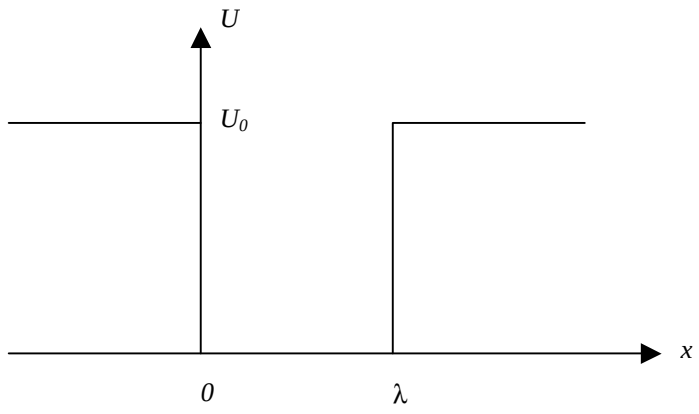


Łatwo zauważyć podobieństwo obydwu sytuacji. Jak wiemy prędkość światła szkle jest mniejsza niż w powietrzu. W przypadku fali świetlnej na granicy szkło - powietrze nastąpi częściowe odbicie fali, tylko jej część przedostanie się do obszaru wypełnionego powietrzem. Ta część, która się przedostała do powietrza będzie poruszać się z prędkością większą niż w szkle, aż do ponownego napotkania granicy ośrodków. W tym miejscu także ulegnie częściowemu odbiciu, a część przedostanie się do szkła i będzie biec dalej.

W ten właśnie sposób będzie zachowywać się każda fala materii na przykład fala elektronowa. Gdy dobiegnie do "dołu", w którym energia potencjalna cząstek zmaleje, fala ta częściowo ulegnie odbiciu, a częściowo zostanie przez „dół” przepuszczona. Na brzegach „dołu” powstanie więc fala odrzucona wstecz.

W przypadku przechodzenia cząstek, mających własności falowe przez granicę dwóch obszarów ekwipotencjalnych o różnych potencjałach, mamy prawo się spodziewać fali przechodzącej i odbitej. Funkcja opisująca te fale. tzw. **funkcja falowa** związana jest z prawdopodobieństwem odbicia lub przepuszczenia cząstki czyli znalezienia jej w określonej części przestrzeni. Falę materii często nazywa się też falą prawdopodobieństwa.

Jak widać jest to zjawisko dość intrygujące i dziwne. W przypadku jednowymiarowym sytuację przedstawioną powyżej możemy zilustrować rysunkiem:



Energia potencjalna elektronu (cząstki) jest równa:

$$U(x) = \begin{cases} U_0 & dla \quad x \le 0 \\ 0 & dla \quad 0 < x < \lambda \\ U_0 & dla \quad x \ge \lambda \end{cases}$$

Tak ograniczoną dla ruchu cząstki przestrzeń nazywamy jamą lub **studnią potencjału.** W przypadku, gdy w obszarze od *0* do λ znajduje się cząstka, a wartość U_0 dąży do nieskończoności (nieskończenie głęboka jama potencjału) cząstka nie ma możliwości wydostania się, musi w niej pozostawać.

Sytuację, tę możemy odnieść do przypadku ruchu elektronu zamkniętego w strefie oddziaływania jądra atomu. W atomie możliwe stany odpowiadają sytuacjom, w których fala elektronu (fala de Broglie'a) tworzy falę stojącą. W rzeczywistości trójwymiarową falę stojącą. W takim razie obie te sytuacje (cząstka w jamie potencjału i elektron w atomie) możemy porównać do wspomnianego już wcześniej przypadku struny umocowanej z obu końców.

Pamiętamy, że warunkiem powstania fali stojącej w strunie o długości λ jest, aby w długości struny mieściła się całkowita wielokrotność połowy długości fali, czyli;

$$n\frac{\lambda}{2} = \lambda, \qquad gdzie\ n = 1,2,3,...$$

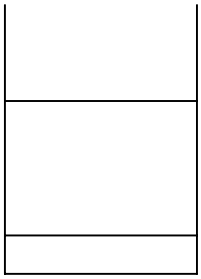
Jeśli więc dla fali de Broglie'a odpowiadającej elektronowi poruszającemu się w nieskończenie głębokiej jamie potencjału, spełnione jest to równanie, to pęd tego elektronu:

$$p = \frac{h}{\lambda} = n\frac{h}{2\lambda},$$

a energia kinetyczna:

$$E = \frac{p^2}{2m} = n^2 \frac{h^2}{8m\lambda^2}.$$

Z ostatniego wzoru widać, że energia elektronu zamkniętego w studni potencjału może przyjmować jedynie dyskretne wartości.

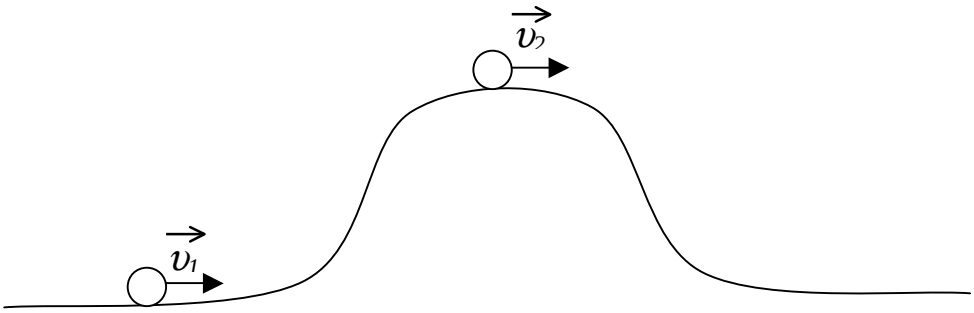


$$E_2 = 4\frac{h^2}{8m\lambda^2}$$

$$E_1 = \frac{h^2}{8m\lambda^2}$$

W przypadku jamy o skończonej głębokości będzie podobnie, różnica będzie polegać na tym, że liczba stanów energetycznych w jamie o skończonej głębokości jest skończona, podczas gdy w jamie nieskończenie głębokiej jest nieskończona.

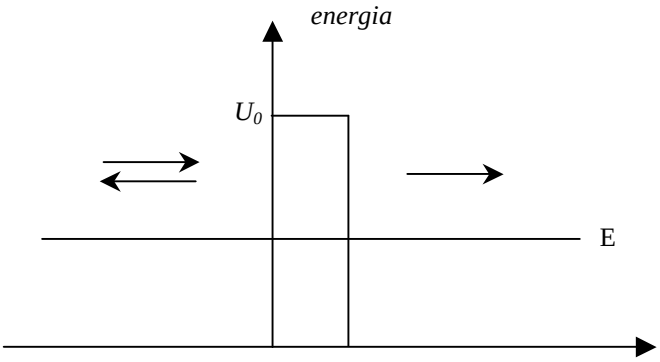
"Odbijanie się" faloczastki od dołu wygląda dość dziwnie, ale istnieją jeszcze zjawiska bardziej intrygujące w świecie falocząstek. Wyobraźmy sobie cząstkę klasyczną, która biegnie z lewej strony do prawej, a na drodze napotyka barierę w postaci wału jak na rysunku.



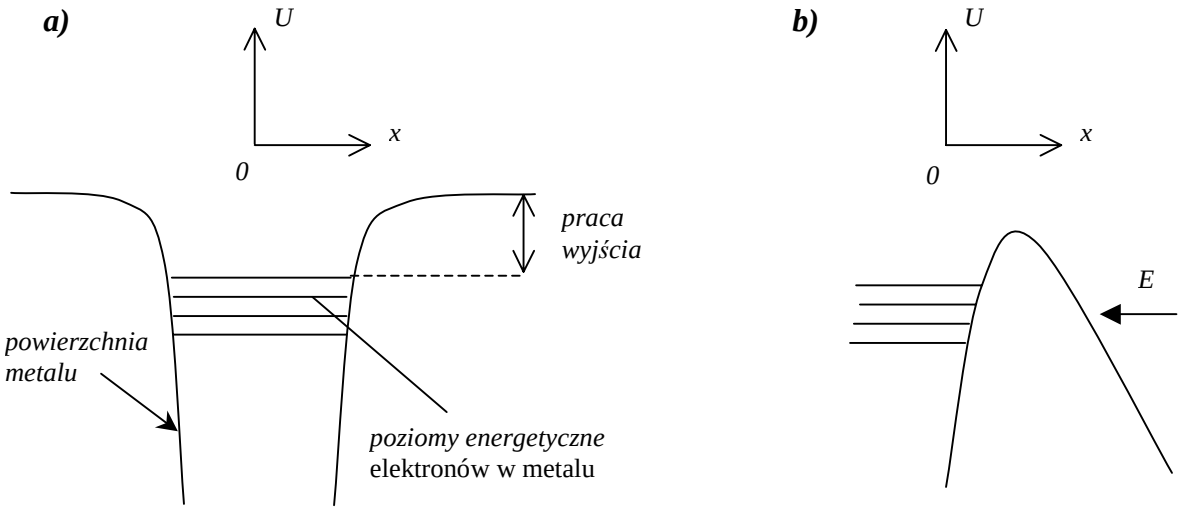
Gdy energia cząstki jest dostatecznie duża zdoła się ona wspiąć na wał (pomijamy tarcie). Wtedy jej prędkość zmaleje ($\upsilon_2 < \upsilon_1$). Zsuwając się z wału odzyska utraconą prędkość. Jednak w przypadku gdy energia kinetyczna cząstki jest niewielka, nie będzie ona w stanie wspiąć się na wał.

Okazuje się, że falocząstka o niskiej energii docierając do wału przedostaje się na drugą stronę z pewnym prawdopodobieństwem, zależnym od grubości i wysokości wału. Falocząstka przedostaje się przez wał, jakby wywierconym w nim tunelem. Dlatego zjawisko nazywamy **zjawiskiem tunelowym.**

Prostym przykładem zjawiska fizycznego, które zachodzi wyłącznie dzięki przejściom tunelowym przez **barierę potencjału** (rysunek) jest tzw. zimna emisja elektronów z powierzchni metalu.



Na elektrony znajdujące się przy powierzchni metalu działają siły, które wciągają je do wnętrza metalu, Innymi słowy, wykres energii potencjalnej elektronów w metalu przypomina jamę potencjału. Aby elektrony wyzwolić z metalu, trzeba zwiększyć ich energię, znanymi sposobami (termoemisja, fotoemisja itd..). Ale można elektrony uwolnić z metalu nie dostarczając im energii, wystarczy przy powierzchni metalu wytworzyć dostatecznie silne pole elektryczne o natężeniu skierowanym do powierzchni metalu. Wykres energii potencjalnej elektronu będzie miał wtedy postać jak na rysunku. Powierzchnia metalu nie jest



wtedy nieskończenie grubą ścianą, ale stanowi barierę potencjalną o grubości tym mniejszej im silniejsze jest pole elektryczne. Taka emisja elektronów ma miejsce i nazywa się ją autoemisją lub emisją zimną.

Ad 3.

Widzimy, ze do tego aby przedstawić realnie istniejące obiekty niedostrzegalne naszym zmysłom zastępujemy je dziwnymi modelami – nie podobnymi w żadnym calu do realnego obiektu. Dołek czy górka lub struna – nie widać podobieństwa do atomu. Ale jak wygląda atom? Najłatwiejszy do wizualizacji jest model Bohra, ale według niego atomy powinny być płaskie, więc nie jest to jednak dobry portret atomu.