

Podstawy fizyki – sezon 2

9. Budowa atomu i materii

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

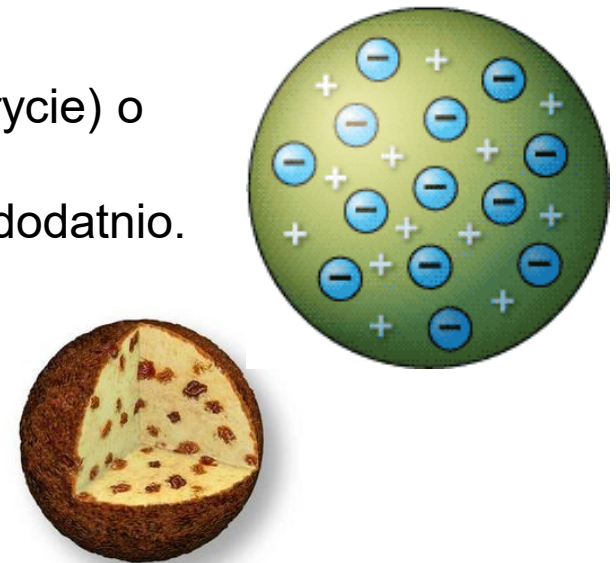
AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 106

amucha@agh.edu.pl

<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

Model atomu Bohra

- ▶ <1900 – stawało się jasne, że atom nie jest najmniejszym składnikiem materii: wiele pierwiastków miało cechy wspólne, ale wyraźnie nie wszystkie, podobne własności grupowały pierwiastki,
 - atomy i zjawiska elektromagnetyczne były ściśle ze sobą związane (materiały magnetyczne, własności elektryczne – izolatory, przewodniki, widma emisyjne)
 - odkrycie promieniotwórczości, promieniowania X i elektronów – wewnętrzna struktura
- ▶ 1900 – atomy składają się z elektronów (1897-odkrycie) o ładunku ujemnym.
„Reszta” atomu jest bardzo ciężka i naładowana dodatnio.
- ▶ 1904 Model Atomu Thomsona – „śliwki w budyniu”
 - Elektrony wibrowały, wypromieniowując energię.
 - Która jednak nie zgadzała się liniowym widmem otrzymanym doświadczalnie

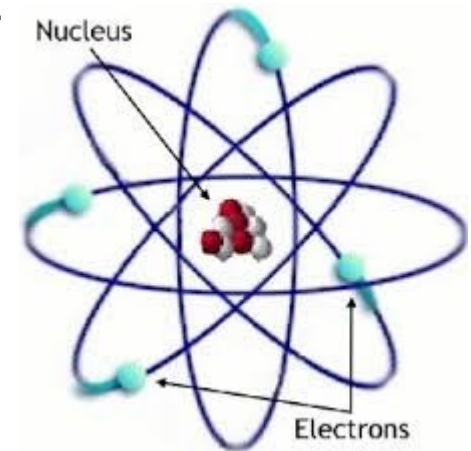


© 2008 Wileach & Partners, Tłumaczenie multimedia

Klasyczny model atomu

- ▶ Następna koncepcja potwierdzona doświadczalnie przez eksperymenty Rutheforda, Geigera i Marsdena (1913) – atom składa się z dodatnio naładowanego jądra i krążących wokół niego elektronów.
- ▶ Rozważmy atom jako układ planetarny, w którym siłą dośrodkową jest przyciągająca siła, wiążąca elektron z atomem.

$$F_d = F_c \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$



- ▶ Liczymy stąd:
 - energię kinetyczną, potencjalną, całkowitą,

$$E_K = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$E = E_K + E_p = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

Wydaje, że jeżeli tylko promień może przyjmować dowolne wartości, to i energia jest dowolna ;-(

Model atomu wodoru – moment pędu

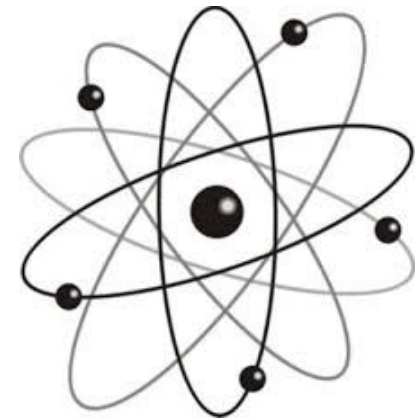
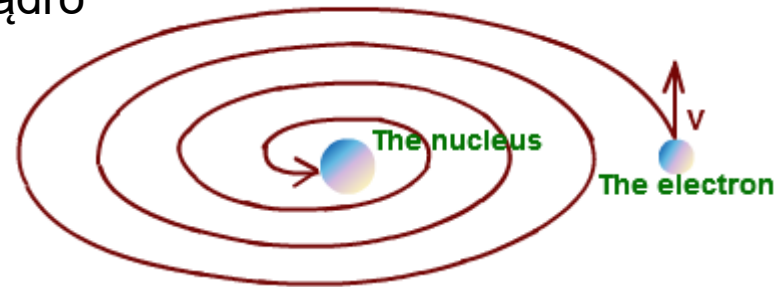
- ▶ W dodatku wg teorii elm, przyspieszany ładunek emituje falę elm, a zatem musiałby tracić energię i finalnie spaść na jądro
- ▶ Bohr zaproponował, że elektrony w atomie mogą zajmować tylko pewne orbity, dla których moment pędu wynosi:

$$L = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3$$

$$L = m r v$$

Wtedy energia całkowita wynosi:

$$E = -\frac{m e^2}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}, \quad n = 1, 2, 3$$



Model Bohra atomu wodoru

- ▶ Elektrony w atomie są w stanie stacjonarnym, w którym mają dobrze zdefiniowane energie E_n .
- ▶ Pomiędzy tymi stanami możliwe są przejścia z wypromieniowaniem kwantów światła o energii : $E = E_n - E_m = h\nu$.
- ▶ Elektron porusza się **TYLKO** po orbitach takich, że jego moment pędu wynosi:

$$L = mvr = n \hbar, \quad \hbar \equiv \frac{h}{2\pi},$$

co oznacza, że moment pędu jest skwantowany! Liczba n – oznacza główną liczbę kwantową.

Oznacza to również, że dozwolone orbity elektronu są skwantowane:

$$r_n = \underbrace{\frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m e^2}} \cdot n^2$$

promień pierwszej orbity – rozmiar atomu wodoru: $R_H = 0.53 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

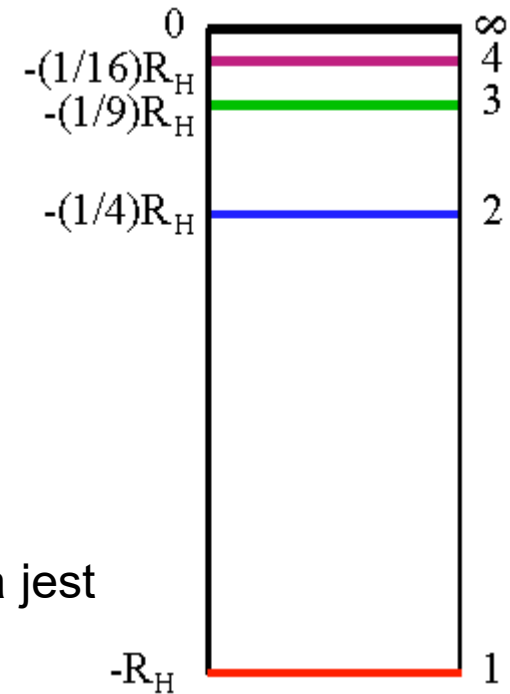
Poziomy energetyczne w modelu Bohra

- ▶ Również skwantowane są dozwolone energie elektronu:

$$E_n = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n}$$

$$E_n = \frac{E_0}{n^2}$$

$$E_0 = -13.6 \text{ eV}$$

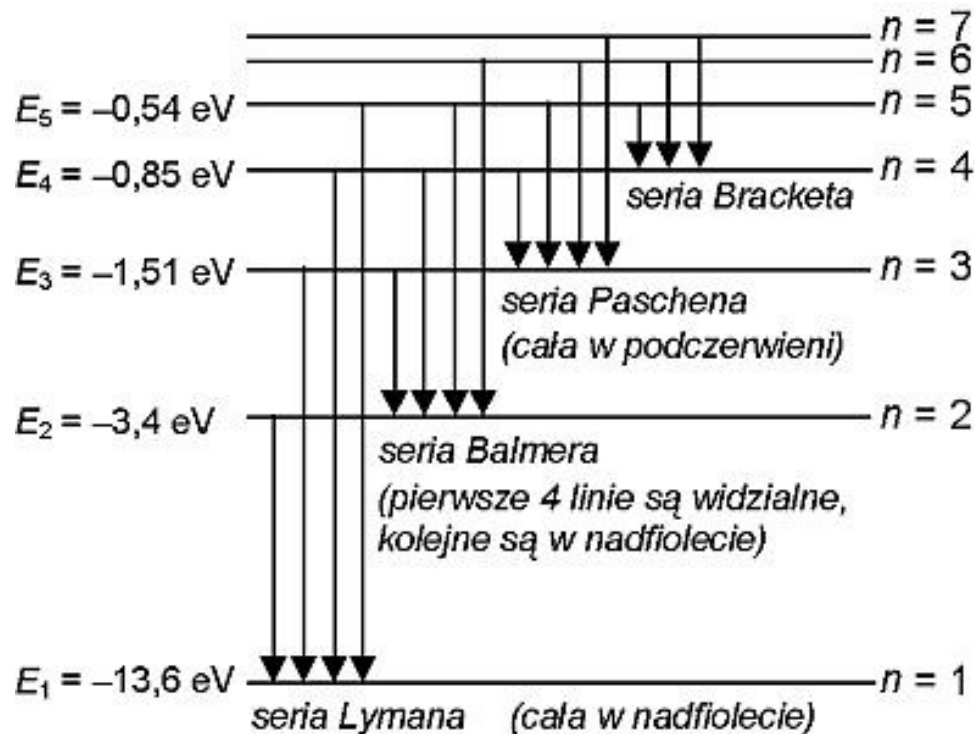


poziomy energetyczne dla wyższych liczb kwantowych zagęszczają się (ważne przy FCS) !

- ▶ A przy zmianie poziomu energetycznego wypromieniowana jest energia:

$$E = E_n - E_m = R_y \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R_y - \text{stała Ryndberga}$$

Poziomy energetyczne w modelu Bohra

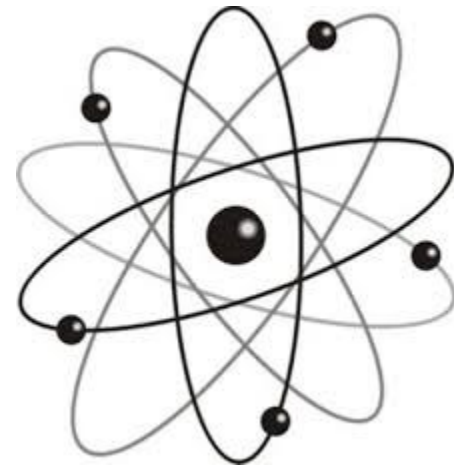


- ▶ Doświadczenia pokazały bardzo dobrą zgodność modelu Bohra.
- ▶ Promieniowanie wysyłane przy przejściach energetycznych identyfikuje pierwiastek – jest to tzw. promieniowanie charakterystyczne (p. X)

Model atomu Bohra-problemy

- ▶ Model Bohra to przełom w opisie materii, ale:
 - opisuje tylko jednoelektronowy atom „wodoropodobny”,
 - nie opisywał struktury subtelnej linii emisyjnych (oprócz linii głównych),
 - nie opisywał wiązań chemicznych pomiędzy molekułami

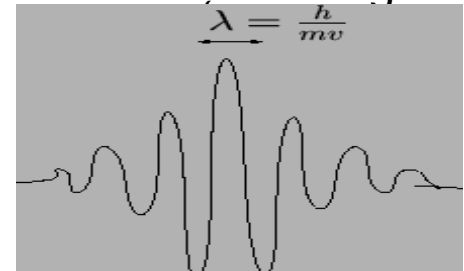
no ale, mamy jeszcze podejście falowe do cząstek, potraktujemy elektron jak falę...



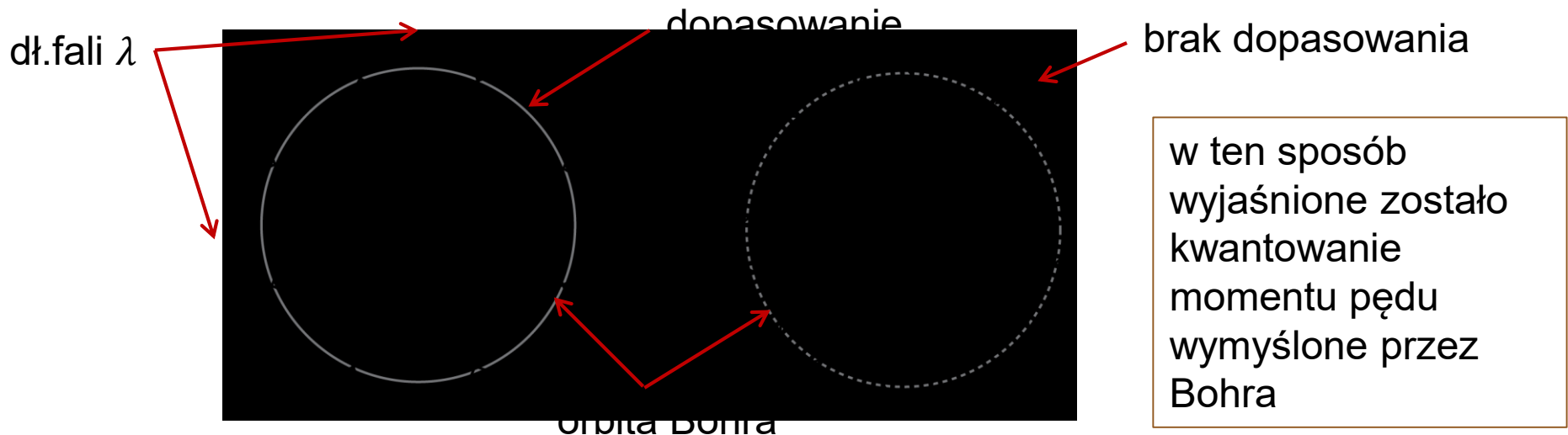
Hipoteza de Broigle'a

- 1924 - z każdą cząstką stowarzyszona jest fala – zwana falą de Broigle'a, o długości:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



- W atomie wodoru elektron przebywa w takich stanach, w których promień orbity jest wielokrotnością długości fali tego elektronu (jak fala stojąca)

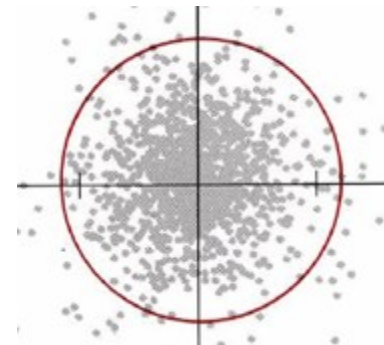
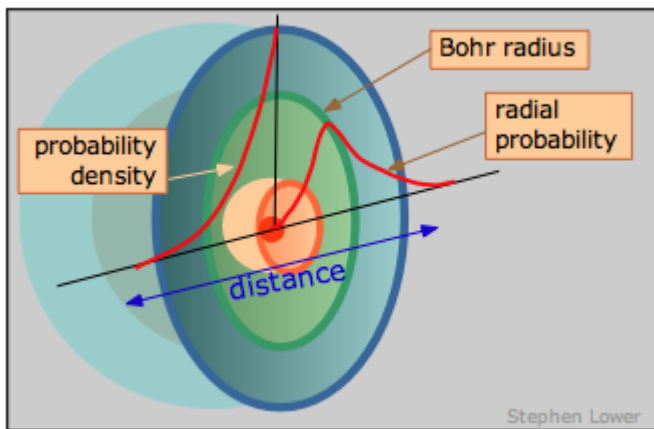


Cząstki jako fale

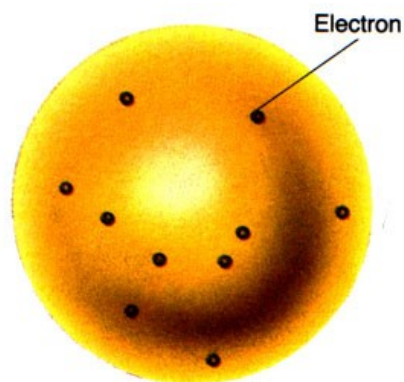
- ▶ Tylko... gdzie w takim razie jest ten elektron, którego falę widzimy?
- ▶ Nie wiadomo... mówi o tym zasada nieoznaczoności Heisenberga:
 - nie można jednocześnie wyznaczyć położenia i pędu cząstki materialnej, (ani energii i czasu)

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar$$

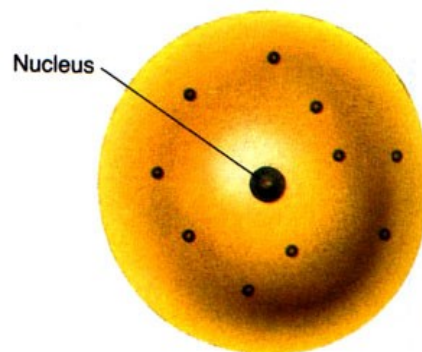
- ▶ Znamy jedynie prawdopodobieństwo przebywania elektronu w pewnej przestrzeni:



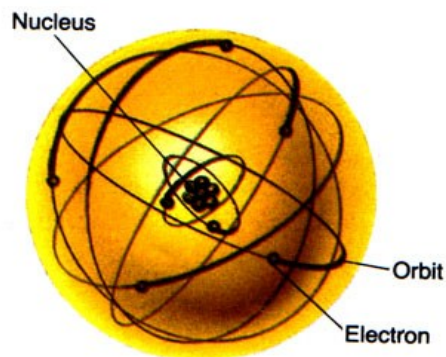
Ewolucja modeli atomu



a Thomson model

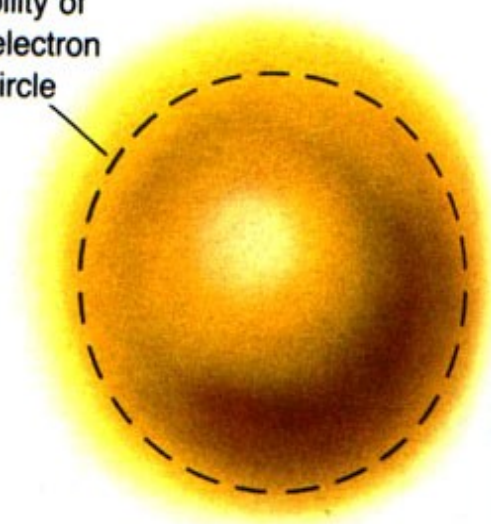


b Rutherford model



c Bohr model

90% probability of
finding the electron
inside this circle



d Quantum mechanical model

http://sun.menloschool.org/~dspence/chemistry/atomic/atomic_model.html

Równanie Schrödingera *

- Pomysł de Broglie'a – z ruchem każdej porcji materii związana jest fala. Zał., że cząstkom swobodnym o energii E i pędzie p odpowiadają fale płaskie:

$$\psi(x, t) = A \exp(kx - \omega t)$$

czyli zamiast (p, E) mamy (k, ν) . $\nu = \frac{E}{h}, k = \frac{p}{h}$,

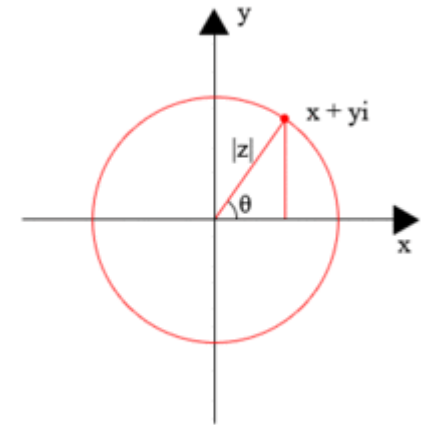
ale teraz zapiszemy funkcję falową w postaci zespolonej:

$$\psi(x, t) = A \exp\left\{\frac{i}{\hbar}(px - Et)\right\}$$

i poszukamy równania, którego jest ona rozwiązaniem:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + V\psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

jest to zależne od czasu równanie Schrödingera



$$Z = x + iy = r(\cos\theta + i\sin\theta) = r \exp(i\theta) \\ i = \sqrt{-1}$$

$$\text{policzymy: } \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{i}{\hbar} p^2 \psi, \quad E = \frac{p^2}{2m}$$

Rozwiązanie równania Schrödingera *

- ▶ Równanie niezależne od czasu (stacjonarne)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + V \psi(x) = E \psi(x)$$

$\psi(x)$ - funkcje falowe cząstki (np. elektronu)
 V – potencjał (np. kulombowski)

- ▶ Równanie to ma rozwiązania tylko dla wybranych wartości energii E :

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2} \quad n = 1, 2, 3 - \text{główna liczba kwantowa}$$

- oraz tylko dla niektórych wartości momentu pędu:

$$L = \hbar^2 l(l+1), \quad l = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad l - \text{orbitalna liczba kwantowa}$$

- oraz ich „trzecich” „z-owych” składowych:

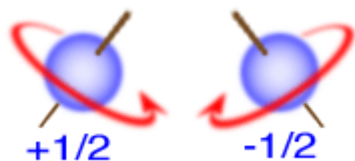
$$M_z = \hbar m, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l \quad m - \text{magnetyczna l.kwantowa}$$

- ▶ Funkcja $\psi(n, l, m)$ - jednoznacznie określa stan cząstki (np. elektronu w atomie wodoru)

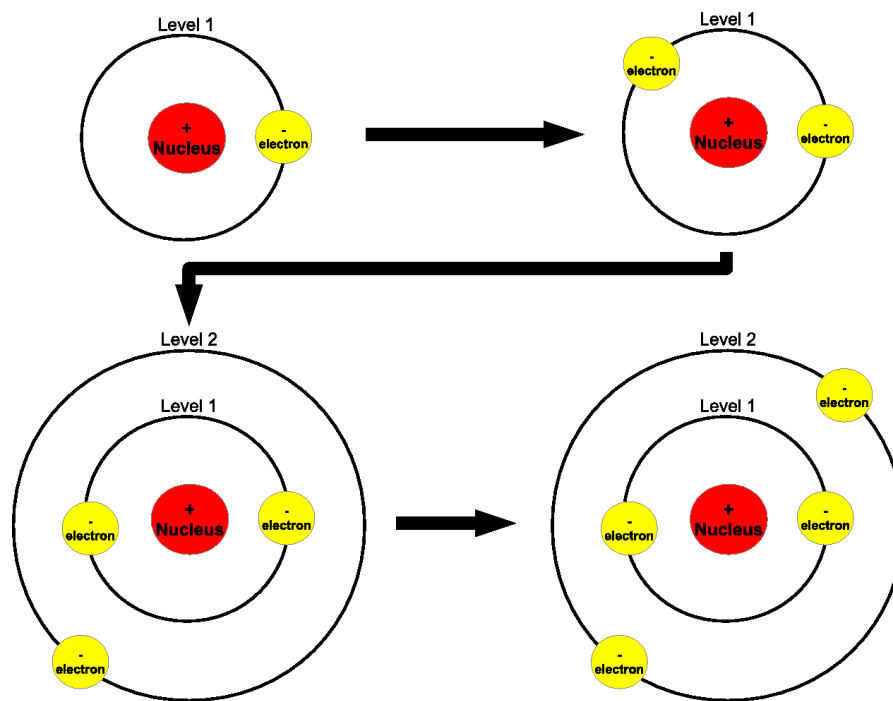
Atomy wieloelektronowe

- ▶ Elektrony zapełniają dozwolone poziomy energetyczne, od najniższego, ale zgodnie z **REGUŁĄ PAULIEGO**:

W jednym stanie energetycznym mogą znajdować się najwyżej dwa elektrony i muszą się one różnić ustawieniem spinu .



Spin może przyjmować wartości $+1/2$ i $-1/2$, klasycznie wyobrażamy sobie spin jako moment pędu wirującej kulki (ale elektron nie ma rozmiarów)



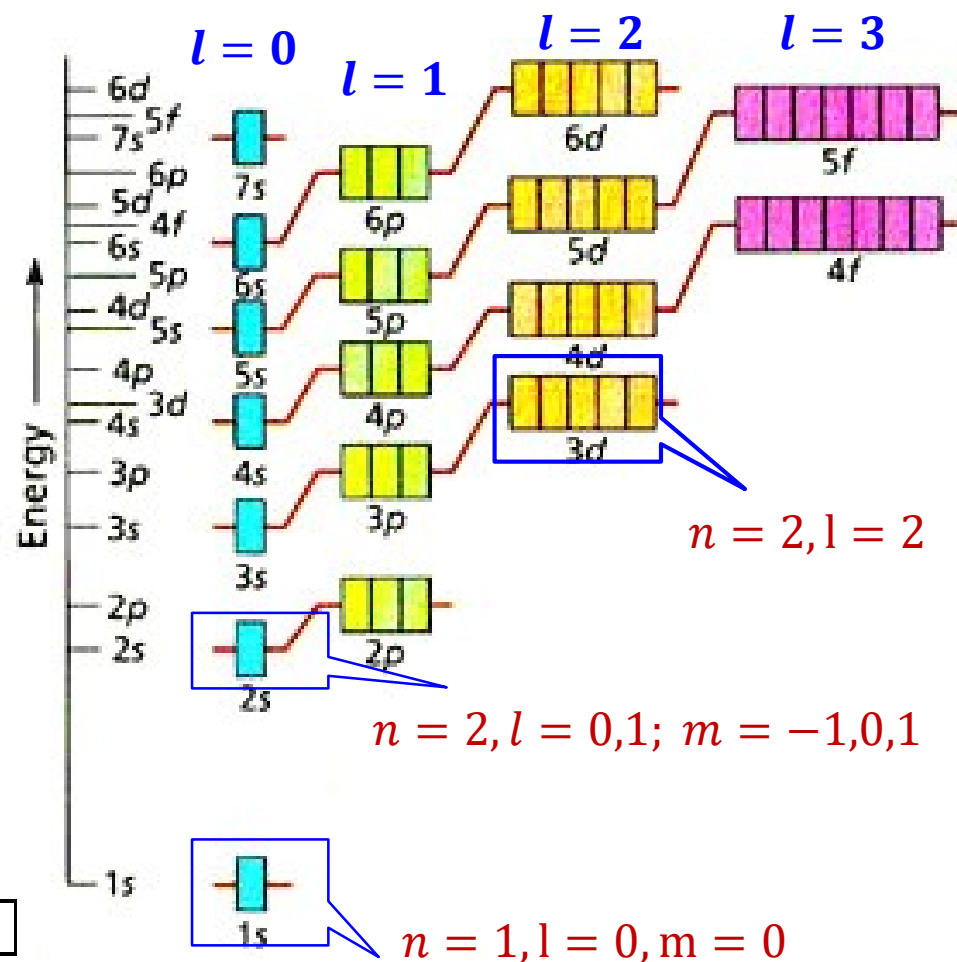
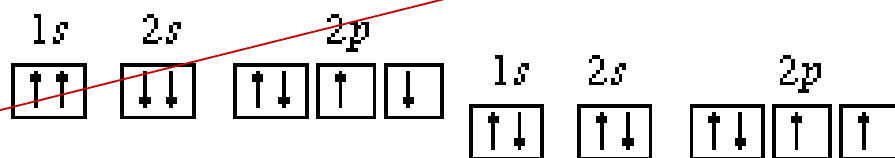
Podstawa zadań z powłokami na chemii..

Zapełnianie powłok elektronowych

- Elektrony w atomie zapełniają powłoki od najniższej, zgodnie z zakazem Pauliego i

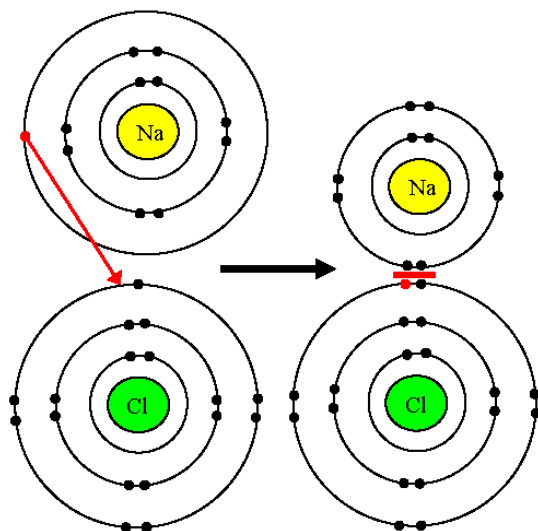
regule Hunda:

- liczba niesparowanych elektronów w danej podpowłoce powinna być możliwie jak największa,
- pary elektronów tworzą się dopiero po zapełnieniu wszystkich poziomów orbitalnych danej podpowłoki przez elektrony niesparowane,
- elektrony niesparowane w poziomach orbitalnych danej podpowłoki mają jednakową orientację spinu.

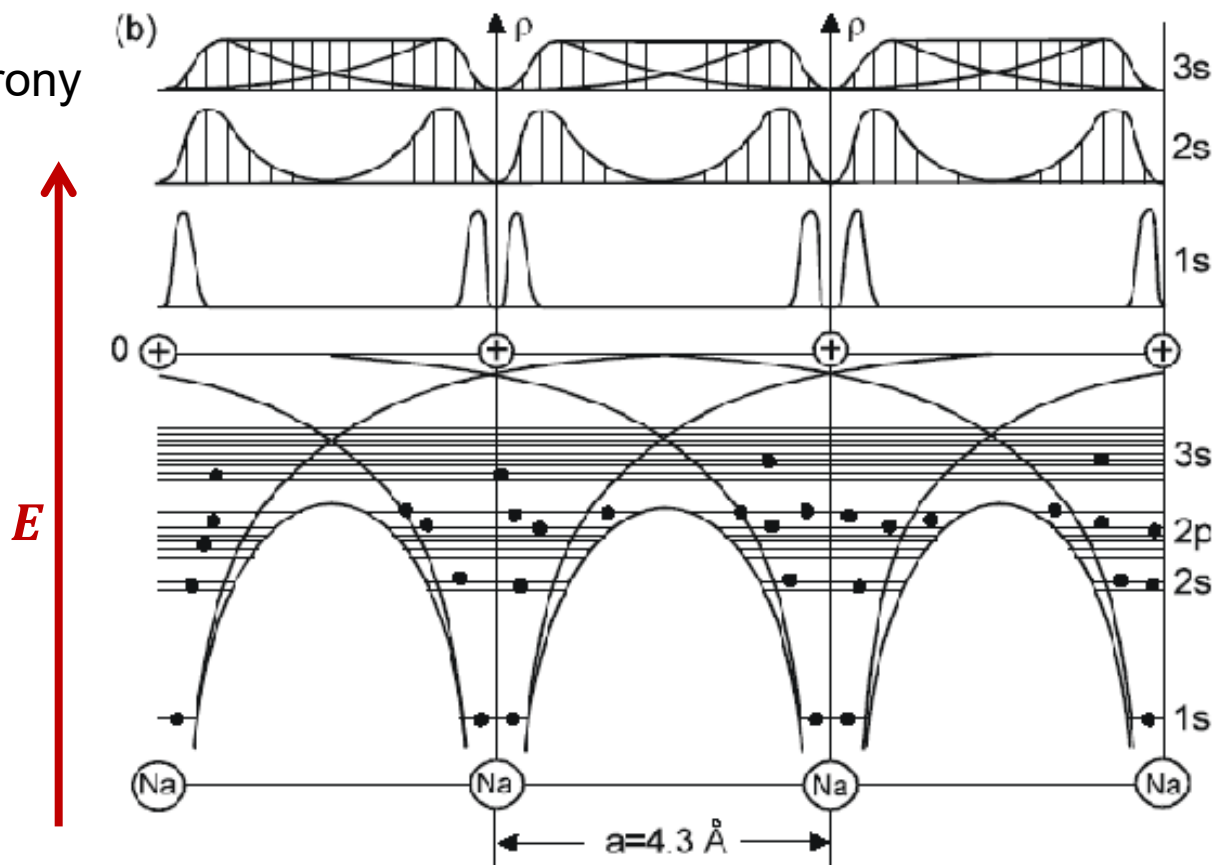


Pasma energetyczne

- ▶ W ciele stałym atomy i elektrony są blisko siebie.
- ▶ Elektrony jednego atomu oddziałują z elektronami sąsiednich atomów.



<http://edu.pjwstk.edu.pl/wyklady/fiz/scb/rW14.htm>



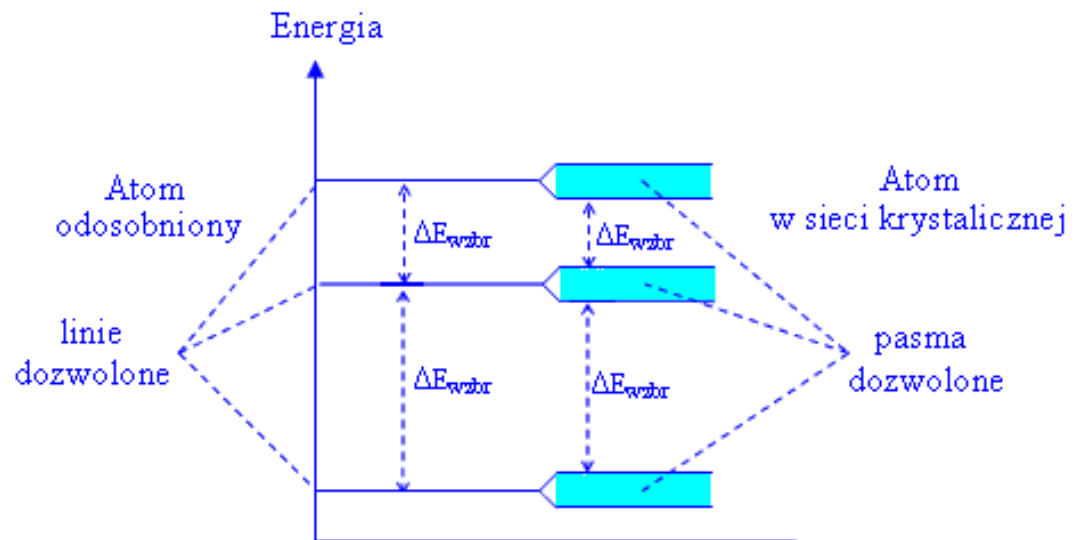
- ▶ Poziomy energetyczne się zagęszczają, aż powstają **PASMA ENERGETYCZNE**

Teoria pasmowa

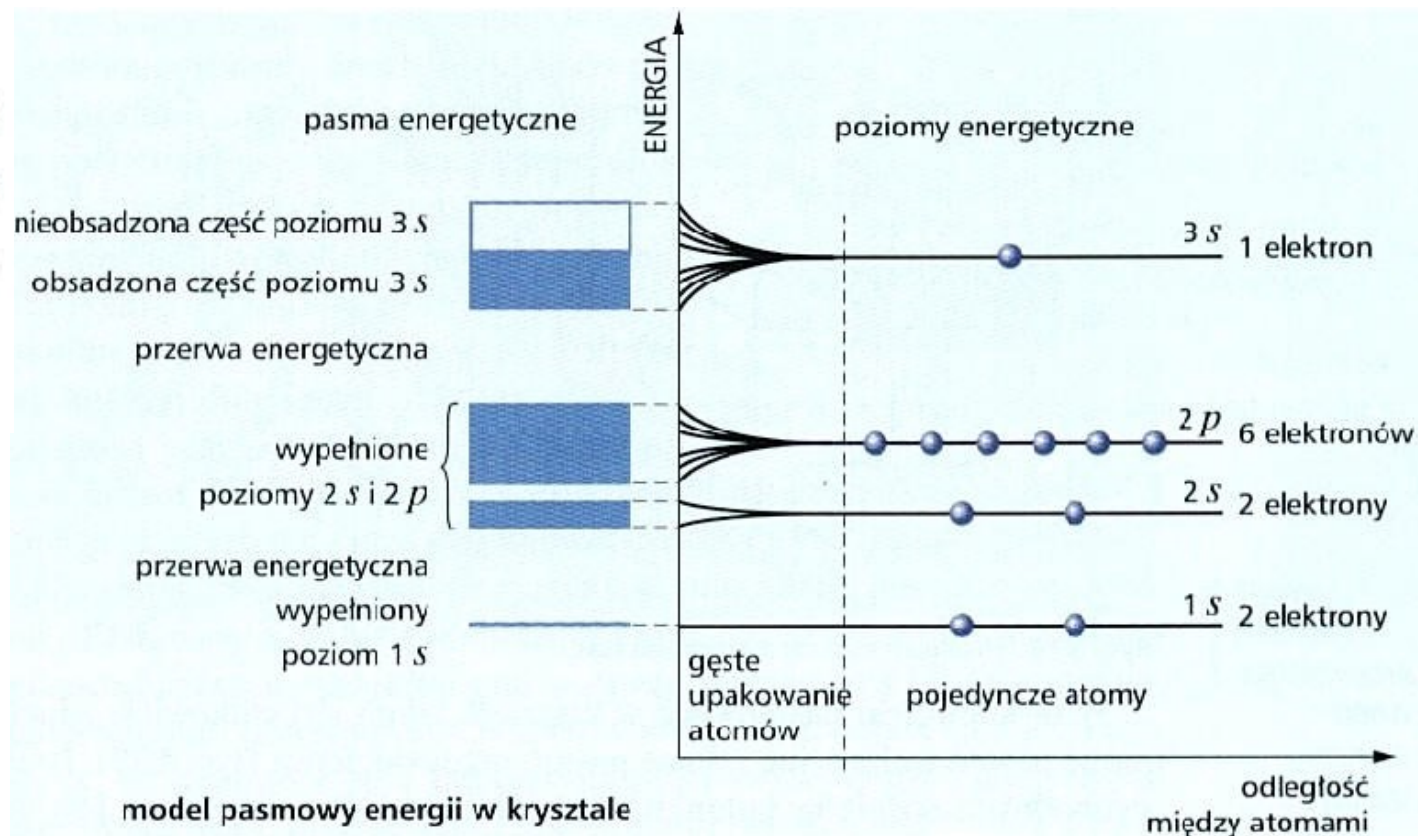
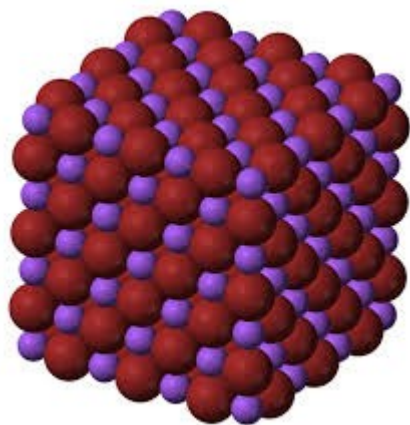
- ▶ Przy zmniejszaniu się odległości międzyatomowych poziomy energetyczne elektronów rozszczepiają się.
- ▶ Odległości energetyczne pomiędzy sąsiednimi poziomami są niewielkie – wszystkie podpoziomy powstałe z jednego poziomu energetycznego tworzą

PASMO ENERGETYCZNE

- ▶ Pasma energetyczne elektronów w ciele stałym odpowiadają poziomom energetycznym atomu.
- ▶ Pasma energetyczne rozdzielone są obszarami energii niedostępnych (**pasmami wzbronionymi**)



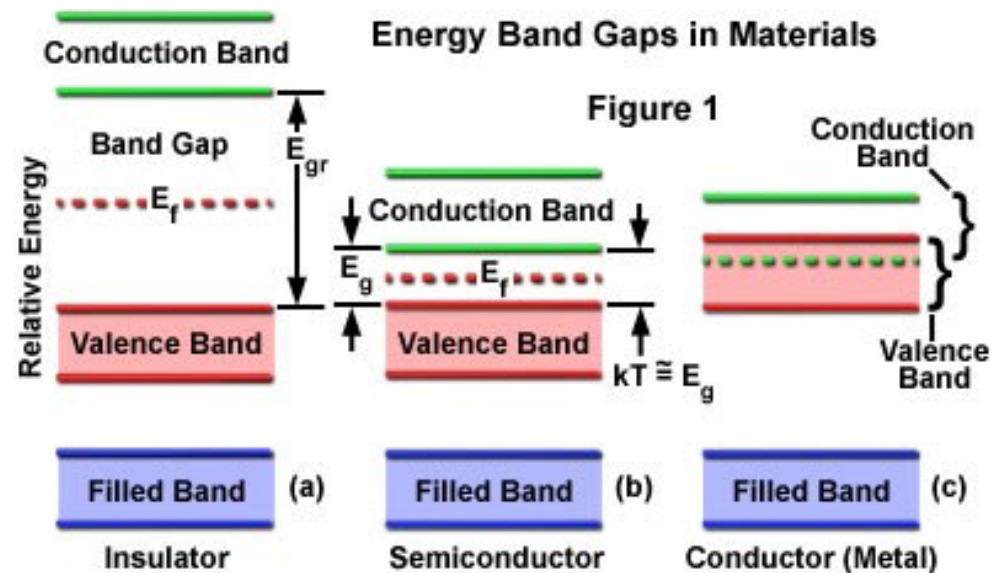
Model pasmowy ciała stałego



Własności elektryczne ciał stałych

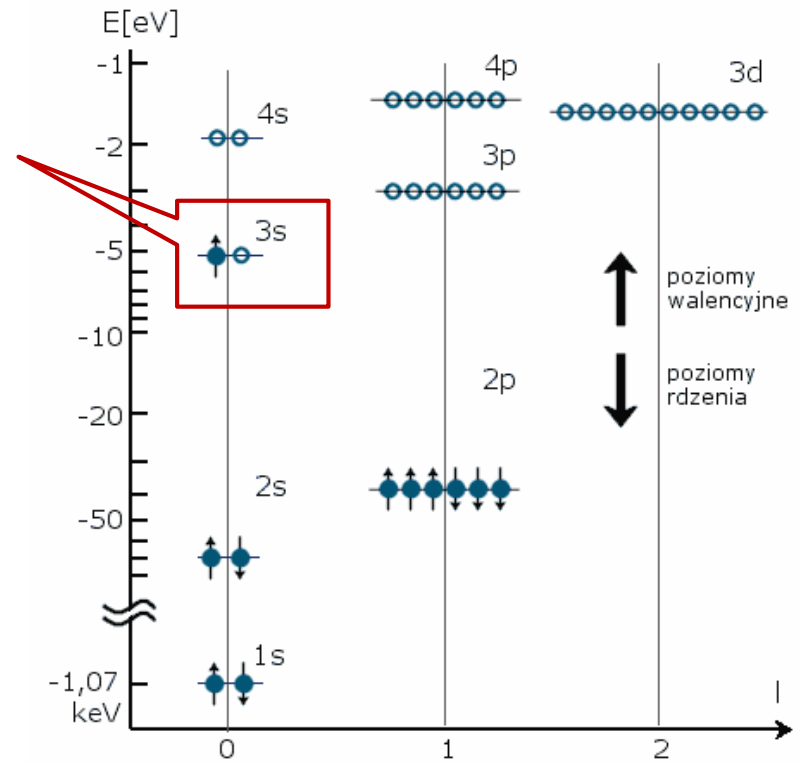
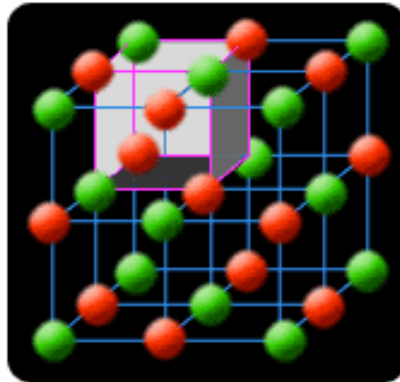
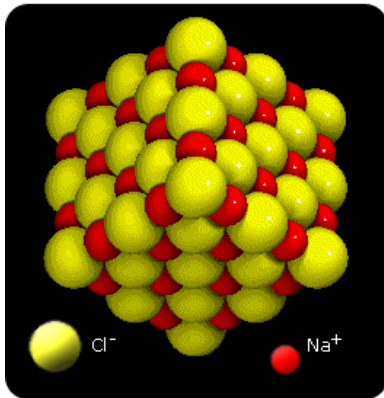
- ▶ W zależności od wartości przerwy energetycznej ciała stałe dzielimy na:
 - przewodniki – pasmo walencyjne pokrywa się z przewodnictwa
 - **półprzewodniki** - $E_g < 2 \text{ eV}$,
 - izolatory – $E_g > 2 \text{ eV}$

Przewodniki – mają pasma częściowo wypełnione, co zapewnia swobodny przepływ elektronów. Oporność metali zwiększa się po ogrzaniu.



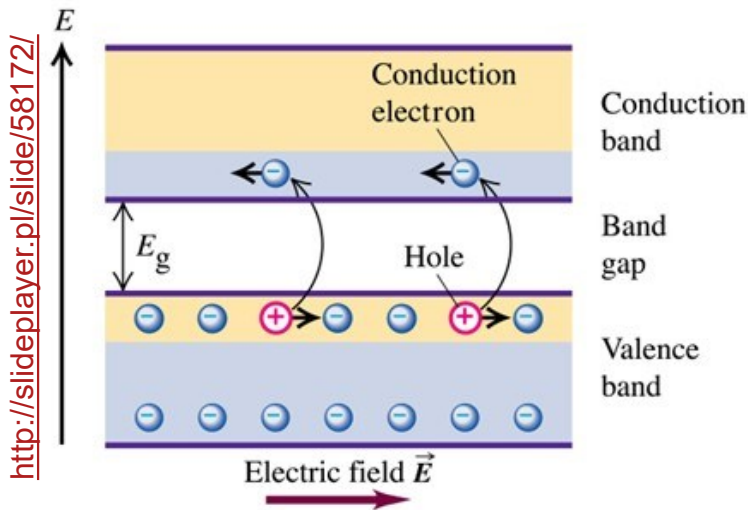
Metale

- ▶ Metale mają przeważnie uporządkowaną sieć krystaliczną.
- ▶ W metalach (np. sód) – poza poziomami całkowicie wypełnionym, są poziomy niepełne, na których jest np. jeden elektron.
- ▶ Jest on słabo związany i przy zbliżaniu do innego atomu zaczyna z nim oddziaływać (funkcje falowe się przekrywają)

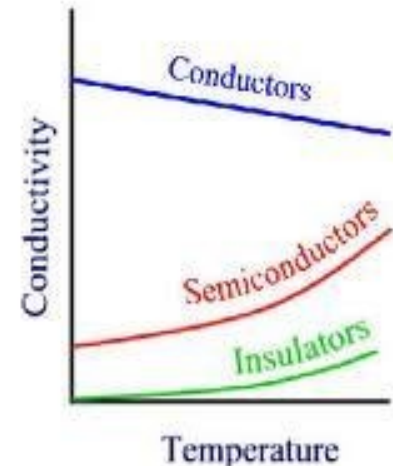


Półprzewodniki

- ▶ W temperaturze zera bezwzględnego – idealne izolatory, brak wolnych stanów do obsadzenia w paśmie walencyjnym, a pasmo przewodzenia jest za zbyt dużą przerwą energetyczną.
- ▶ W wyższych temperaturach elektrony mają wystarczającą energię, aby „przeskoczyć” do pasma przewodzenia. W paśmie walencyjnym powstają dziury.
- ▶ Zarówno elektrony, jak i dziury są nośnikami prądu.



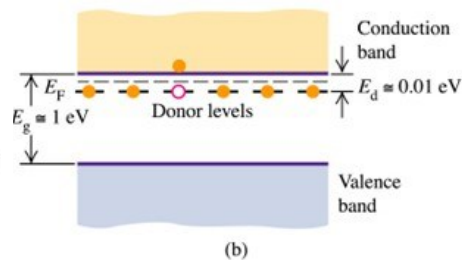
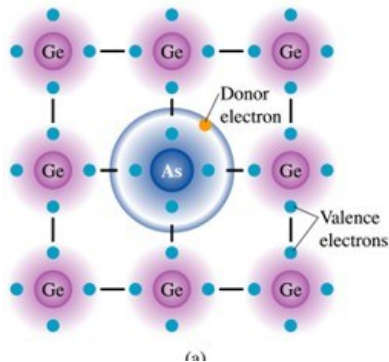
Bi, **Si**, Ge, As



- ▶ Oporność półprzewodników maleje ze wzrostem temperatury.
- ▶ Półprzewodniki samoistne („czyste”) - b.mало nośników -> domieszkowanie

Półprzewodniki domieszkowe

- ▶ Jeżeli do półprzewodnika z gr. IV (np. krzemu, german) dodamy atom z grupy V (fosfor, arsen), to powstanie dodatkowy poziom energetyczny, blisko walencyjnego, do którego łatwo wskoczy elektron i powstaną nośniki prądu (typ n).

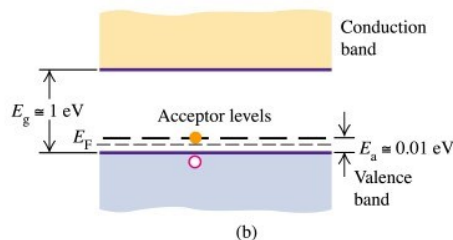
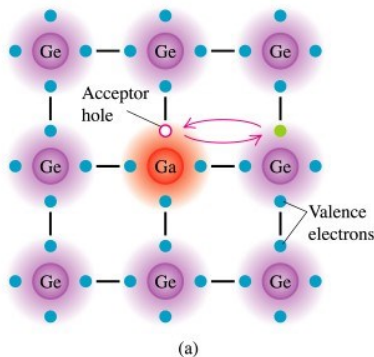


- ▶ typ n (donorowy)

każdy atom donoru dodaje jeden słabo związany elektron

- ▶ typ p (akceptorowy)

każdy atom np. boru (III gr) ma 3 el. walencyjne, jak je odda do galu, to w germanie zostanie jeden wolny poziom do obsadzenia (dziura)



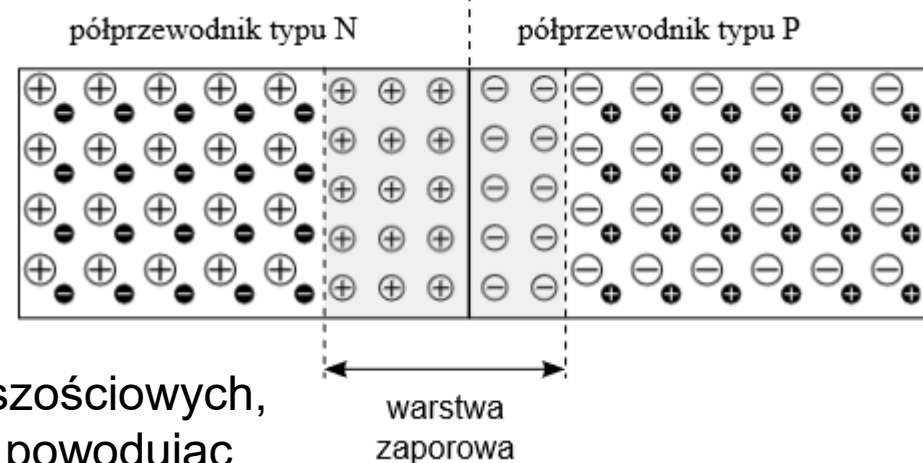
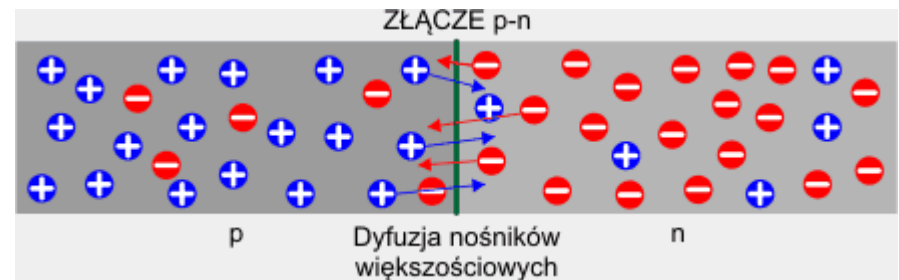
poprzez domieszkowanie
półprzewodników powstały nośniki:
elektrony i dziury

Diody półprzewodnikowe - fizyka

- ▶ Złącze p-n stanowi diodę półprzewodnikową – dyfuzja nośników większościowych wywołuje przepływ prądu (dyfuzji)

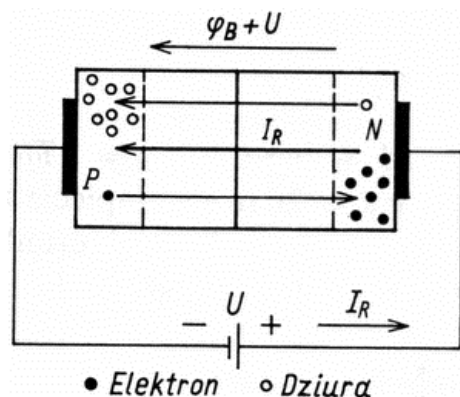
I_{dyf}

- ▶ Na złączu ładunki zrekombinowały, ale zostały nieruchome jony, czyli powstał obszar z ładunkiem przestrzennym (i polem elektrycznym), zwany obszarem zubożonym.
- ▶ Ten obszar utrudnia ruch nośników większościowych, ale pomaga nośnikom mniejszościowym powodując przepływ prądu unoszenia I_{dryf}
- ▶ W stanie równowagi w złączu prąd dyfuzji i dryfu się znoszą.
- ▶ Złącze ma na końcach różnicę potencjałów – jest w stanie równowagi

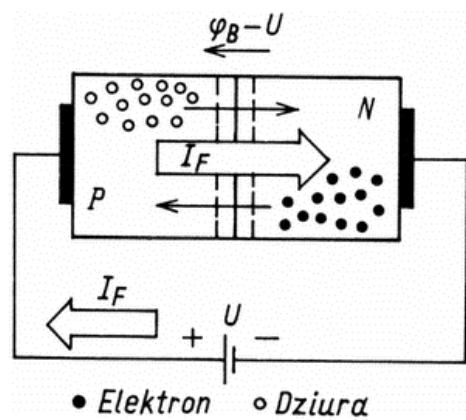


Diody półprzewodnikowe – polaryzacja złącza

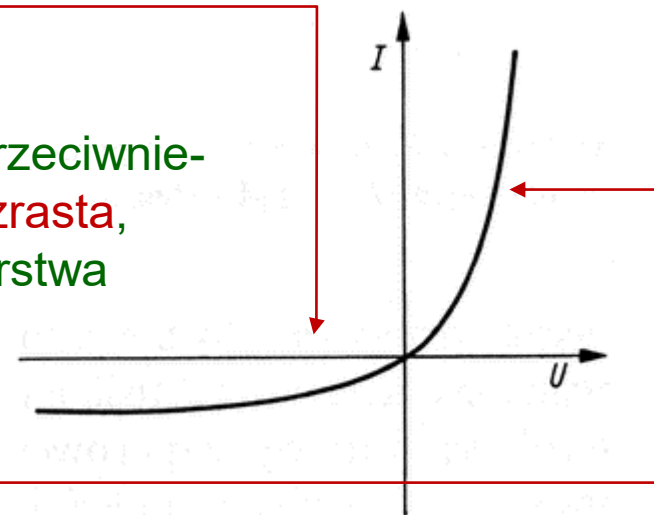
- ▶ Złącze pn podłączamy do zewnętrznego źródła napięcia na dwa sposoby:



n –połączony z „+”, p z „-”, pole elektryczne przyłożone tak, aby wyciągnąć nośniki ze złącza – zostają ciężkie jony, prąd dyfuzji maleje, prąd unoszenia nie zmienia się, powstaje szersza warstwa zaporowa- dioda działa **ZAPOROWO**



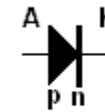
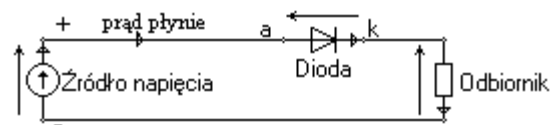
zasilanie przyłożone przeciwnie-
prąd dryfu znacznie wzrasta,
dyfuzji bez zmiany, warstwa
zaporowa maleje,
dioda w stanie **PRZEWODZENIA**



charakterystyka złącza p-n – prąd płynie tylko w kierunku przewodzenia - w zaporowym płynie mały prąd wsteczny

Diody półprzewodnikowe - elektronika

- ▶ Dioda półprzewodnikowa przewodzi prąd tylko w jednym kierunku - jeśli potencjał anody jest większy niż potencjał katody. W przeciwnym przypadku dioda jest zatkana.



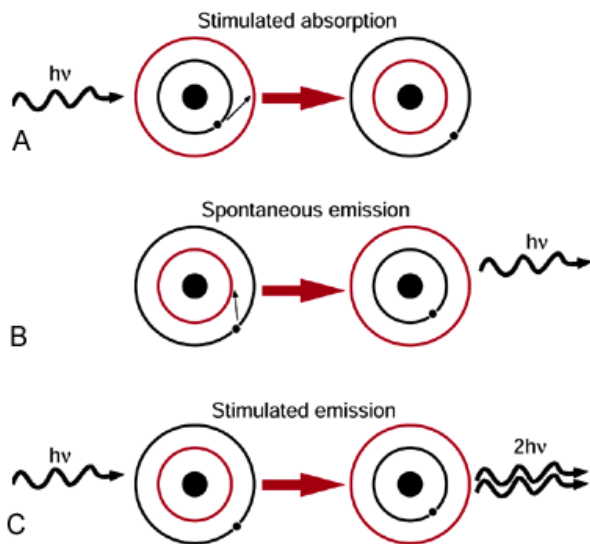
- ▶ Diody – do prostowania prądu, świecenia



Dioda silnie spolaryzowana w kier.przewodzenia- rekombinacja elektronu i dziury prowadzi do emisji światła w szerokim zakresie widma

Lasery

- ▶ **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) -wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania.
- ▶ Podstawą działania wszystkich laserów jest emisja fotonów przez wzbudzone elektrony.
- ▶ Emisja wymuszona- 1917 (Einstein): elektron pochłania foton, potem następuje emisja dwóch fotonów

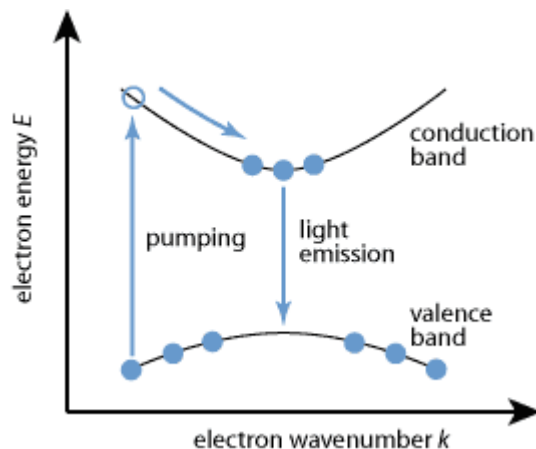


Akcja laserowa jest możliwa, gdy jest jak najwięcej elektronów w stanie wzbudzonym (inwersja obsadzeń) i gdy nastąpi lawinowy ich przejście do stanu podstawowego - bardzo wąska energetycznie, spójna, mało rozbieżna wiązka,

Najczęściej używane lasery: gazowe, półprzewodnikowe

Lasery półprzewodnikowe

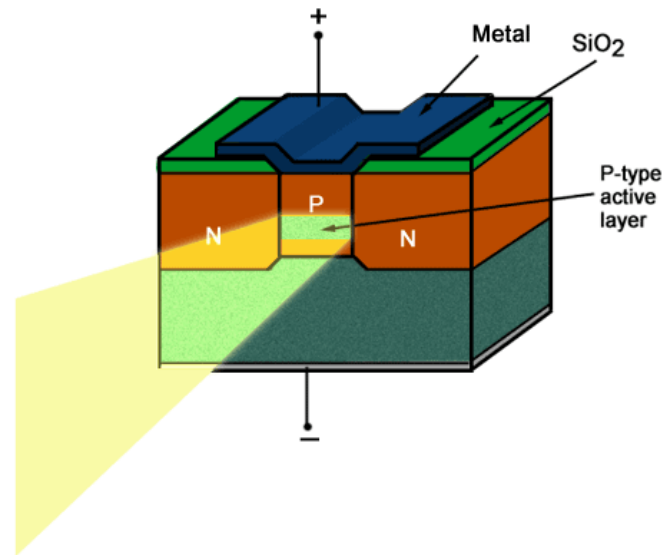
- ▶ Złącze pn (dioda) – kier. przewodzenia – gdy wystąpi inwersja obsadzeń (l. el. w paśmie przewodzenia jest większa niż w walencyjnym) może wystąpić akcja laserowa



Zastosowanie:

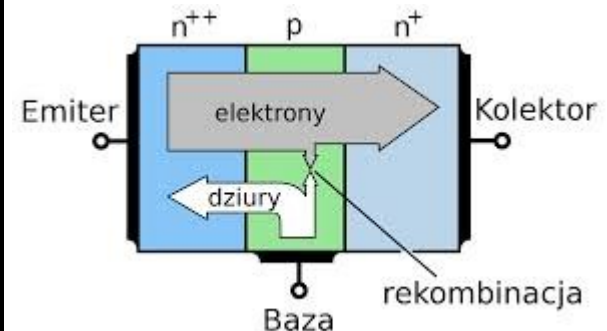
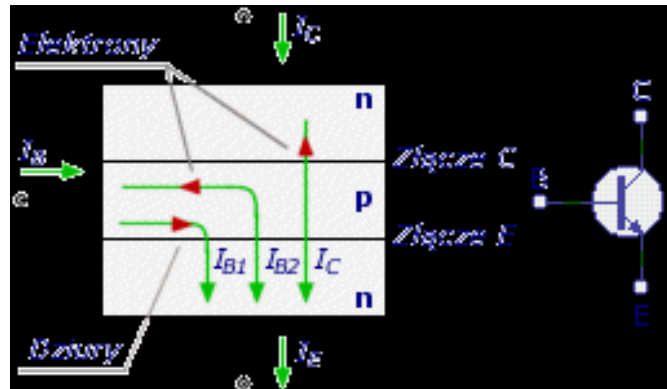
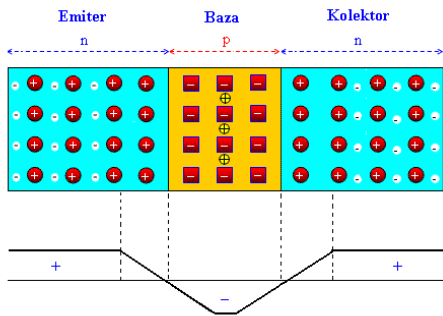
- medycyna,
- przemysł,
- odczyt CD, DVD, wskaźniki, łączność,

- ▶ światło w zakresie podczerwieni ($\lambda = 1,55 \mu m$ i $\lambda = 1,35 \mu m$) do telekomunikacji



Tranzystory

- ▶ Tranzystory bipolarne - przyrządy półprzewodnikowe do sterowania (transfer+rezystor) 1948 (Nobel 1956) – przełom w elektronice
- ▶ Składa się z dwóch złączy pn, na przykład npn:



Nośniki większościowe – elektrony przepływają z emitera (typ n) do bazy.

Mniejszościowe dziury - z bazy (typ p) do emitera.

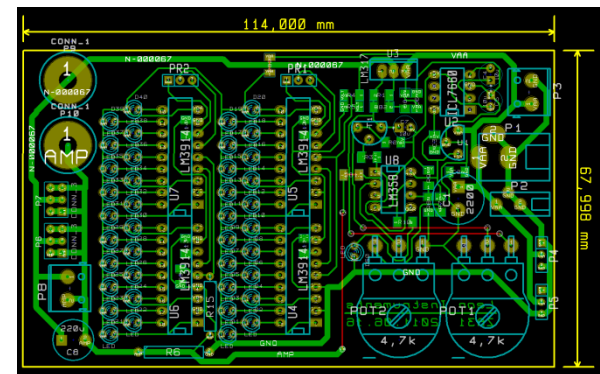
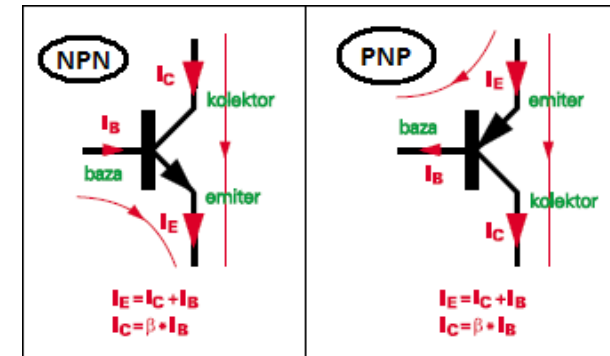
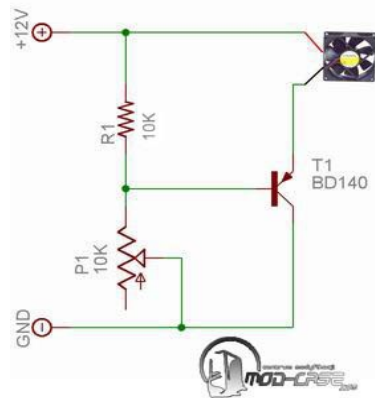
Część elektronów po dotarciu do bazy rekombinuje z dziurami.

Większość przepływa przez złącze BC (spolaryzowane zaporowo).

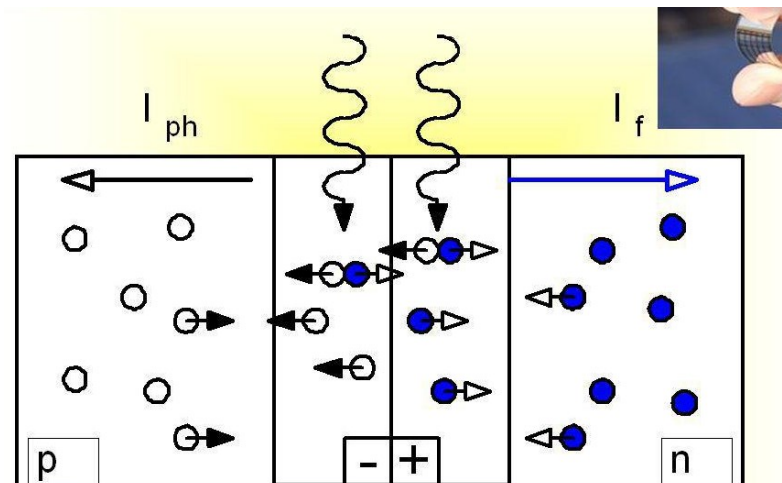
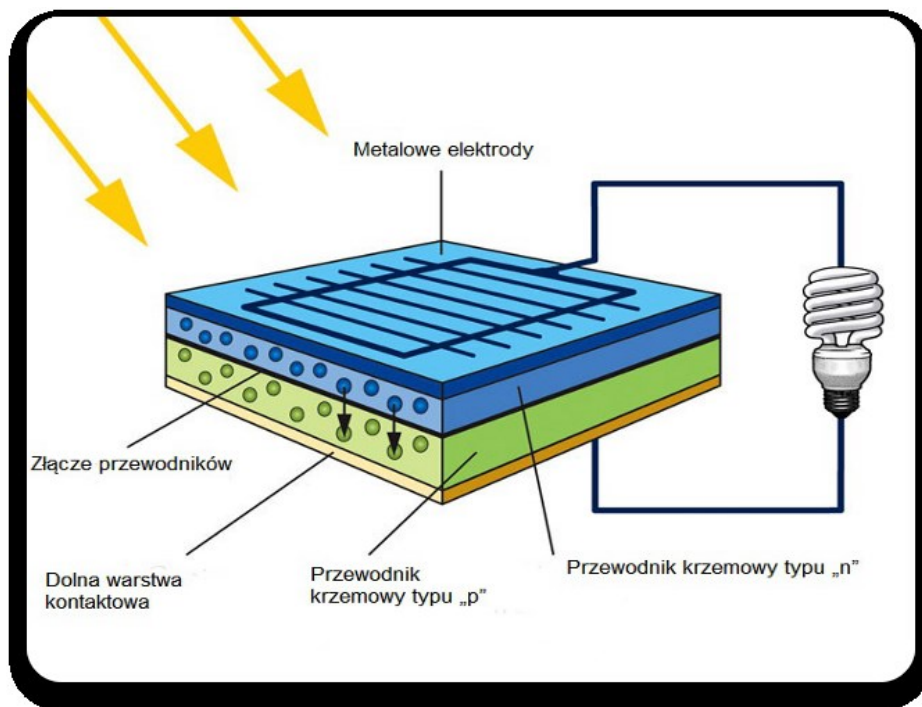
Wypływające z emitera elektrony swobodne tworzą prąd emitera I_E , który rozdziela się w obszarze bazy na mały prąd bazy I_B i duży prąd kolektora I_C

Tranzystory - elektronika

- ▶ Tranzystor wzmacnia prąd – niewielkie zmiany napięcia bazy powodują duże zmiany prądu.
- ▶ Zastosowania tranzystorów są ogromne (procesory, układy scalone, bramki logiczne)– nie wynaleziono od 60 lat nic lepszego



Ogniwa fotowoltaiczne



Arizona, USA, 290 MW



Podsumowanie

- ▶ Model atomu Bohra: założenia, konsekwencje
- ▶ Powstawanie poziomów energetycznych w atomie.
- ▶ Pasma energetyczne ciał stałych.
- ▶ Właściwości elektryczne ciał stałych.
- ▶ Półprzewodniki: rodzaje, domieszkowanie, zastosowanie.