

1. Wstęp
2. Nośniki informacji w elektronice
3. Podstawy mechaniki kwantowej
4. Układy wieloatomowe
5. Struktury krystaliczne
6. Wykłady dr inż. M. Popena
7. Teoria względności

## Początki mechaniki kwantowej

- Idea, że cała materia jest zbudowana z malutkich cząstek (atomów) pojawiła się ok. roku 450 p.n.e. w spekulacjach Demokryta.
- Pomysł wrócił dopiero w XVII wieku – różne stany skupienia starano się opisać korzystając z modelu małych niezniszczalnych kuleczek poruszających się w różnych kierunkach.
- Dopiero Avogadro w 1811 r. zapostulował, że w jednostkowej objętości dowolnego gazu w tej samej temperaturze znajduje się tyle samo cząsteczek – umożliwiło to ilościowe wyjaśnienie wielu własności związanych z objętością materii – model cząsteczkowej budowy materii stał się akceptowanym.
- Materia nie jest ciągła. W skali atomowej ma strukturę dyskretną – **skwantowaną**.
- Okazuje się, że kwantową naturę mają także: **ładunek elektryczny, energia światła i energia oscylacji układu mechanicznego**.

Wprowadzenie pojęcia najmniejszych porcji energii – kwantów energii, doprowadziło do tego, że naukowcy zaczęli inaczej spoglądać na otaczający ich świat (głównie mikroskopowy), co doprowadziło do powstania nowej dziedziny fizyki – fizyki kwantowej (mechaniki kwantowej). Fizyka kwantowa choć głównie zajmuje się mikroświatem, to odpowiada także na wiele pytań dotyczących świata makro czy kosmologii.

Jest wiele wielkości, które istnieją tylko w pewnych minimalnych porcjach (zwanym kwantami) lub jako wielokrotności tych porcji. Mówimy, że wielkości te są skwantowane.

### Początki

#### Dualizm korpuskularno – falowy

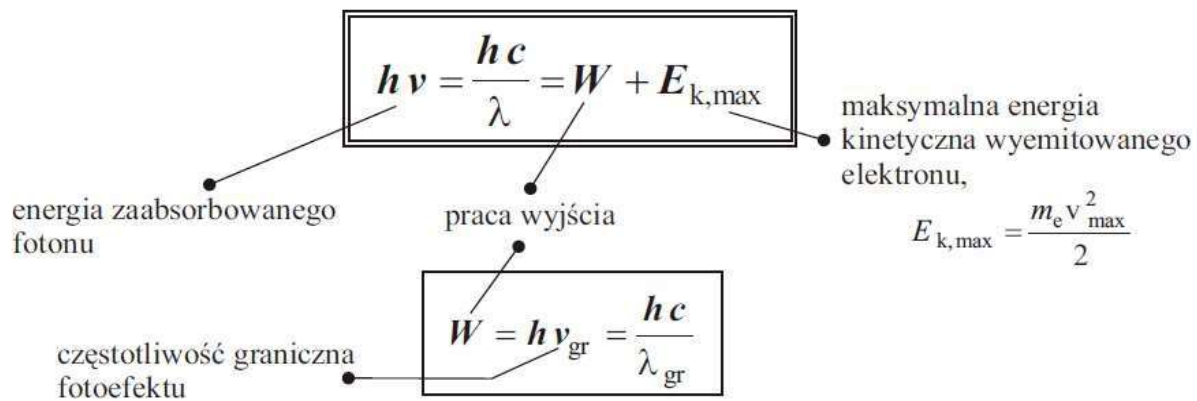
Widmo zawiera mieszaninę długości fal, ale nie zawsze te długości tworzą ciągły przedział wartości. Jeżeli na przykład w wodorze pod niskim ciśnieniem zachodzi wyładowanie elektryczne, to jest emitowane promieniowanie jedynie o niektórych długościach fal, więc widmo składa się z szeregu linii ( w zakresie widzialnym, nadfiolecie i podczerwieni).

Zjawisko fotoelektryczne odkryte przypadkowo przez Hertza w 1887 r.

Światło padając na metalową płytkę powoduje uwalnianie elektronów - przepływ prądu.

Zjawisko fotoelektryczne wyjaśnił Einstein (1905) wprowadzając kwanty światła  $E = h \nu$

Opis falowy przewidywał, że prąd zależy wyłącznie od natężenia światła, a nie zależy od częstotliwości! Doświadczenia wskazały, że energia uwalnianych elektronów zależy wyłącznie od częstotliwości światła (długości fali) i materiału katody.



### ■ Przewidywania modelu falowego:

- Dla odpowiednio dużego natężenia oświetlenia katody fala elektromagnetyczna o dowolnej długości powinna wywołać fotoefekt. **Własność nieobserwowana**
- Maksymalna energia kinetyczna elektronów powinna zależeć jedynie od natężenia oświetlenia, a nie od częstotliwości padającej fali. **Własność nieobserwowana**

### Zjawiska fotoelektryczne - fotoemisja

Fotoemisja w metalach jest procesem mało wydajnym, ponieważ tylko  $10^{-3} \div 10^{-4}$  wybitych elektronów przypada na jeden zaabsorbowany foton. Stosunkowo najlepszymi emiterni fotoelektronów są metale alkaliczne, które dodatkowo charakteryzują się niską pracą wyjścia. Wydajność specjalnie przygotowanych fotokatod osiąga 30% w wybranych obszarach widmowych. Fotokatody tego typu są używane w detektorach promieniowania elektromagnetycznego, takich jak fotokomórki i fotopowielacze.

Zjawiska termoelektryczne – termoemisja, emisja wtórna, emisja polowa

Termoemisja – emisja elektronów z powierzchni ciał stałych i cieczy pod wpływem temperatury

Emisja wtórna: wiązka padających elektronów wybija elektrony (wtórne) z powierzchni ciała stałego;

Emisja wtórna składa się z trzech etapów:

- – wzbudzenie elektronów w ciele stałym do wyższego stanu energetycznego;
- – transport wzbudzonych elektronów do granicy ciało stałe/próżnia;
- – emisja elektronów.

Emisja polowa elektronów, zwana także zimną emisją, jest wynikiem istnienia silnego pola elektrycznego na granicy metal-próżnia. Mechanizm tej emisji różni się od zjawiska termoemisji, ponieważ elektrony nie przechodzą ponad barierą potencjału, lecz ulegają zjawisku tunelowania

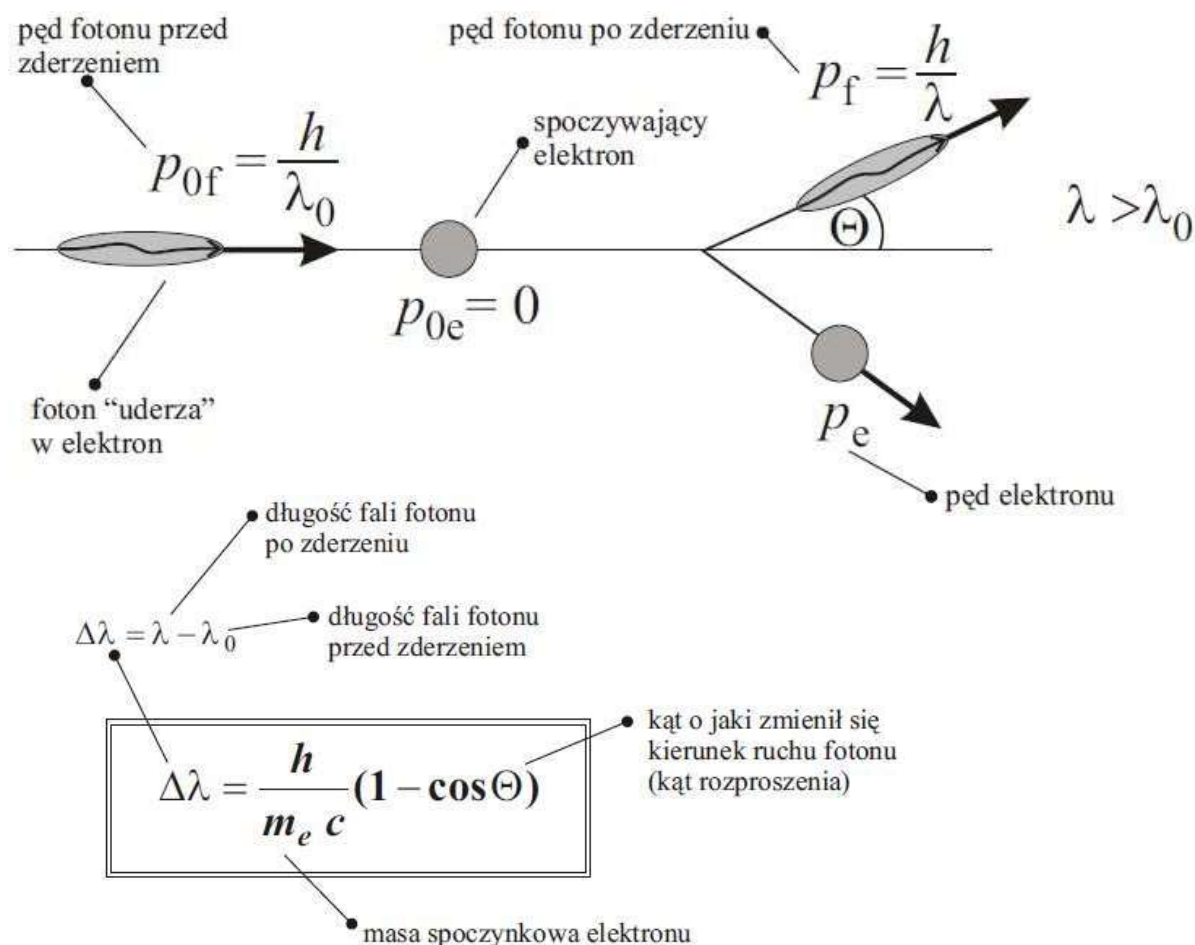
W 1916 Einstein zapostulował, że foton ma pęd

■ **Fotony.** Fala elektromagnetyczna jest strumieniem cząstek zwanych fotonami. Każdy foton posiada zerową masę spoczynkową i energię  $E$  zależną od częstotliwości  $\nu$  fali

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

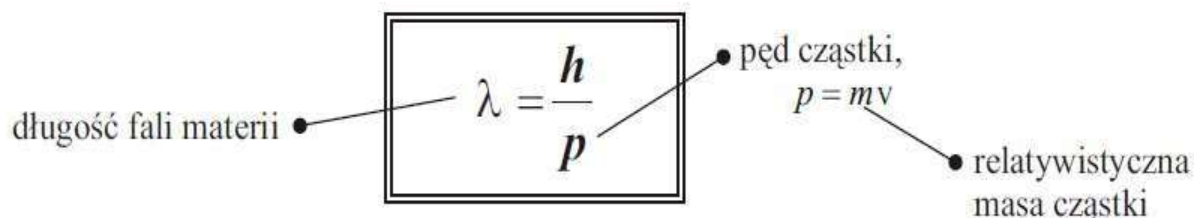
Mimo zerowej masy spoczynkowej każdy foton niesie ze sobą pęd równy  $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ .

W 1923 Compton potwierdził, że foton może przekazywać pęd i energię.



Fale materii - hipoteza de Broglie'a

■ **Fale de Broglie'a.** L. de Broglie założył, że dualizm cząstkowo - falowy jest własnością charakterystyczną nie tylko dla fali elektromagnetycznej, ale również dla cząstek o masie spoczynkowej różnej od zera. Oznacza to, że cząstki takie jak np. elektrony powinny również wykazywać własności falowe. Fale te nazwał on **falami materii**. Założył, że długość fal materii określona jest tym samym związkiem, który stosuje się do fotonów. Hipoteza de Broglie'a została po raz pierwszy eksperymentalnie potwierdzona w 1924 roku przez C.J.Davissona i L.G. Germera. Pokazali oni, że elektrony podobnie jak światło, mogą ulegać dyfrakcji.



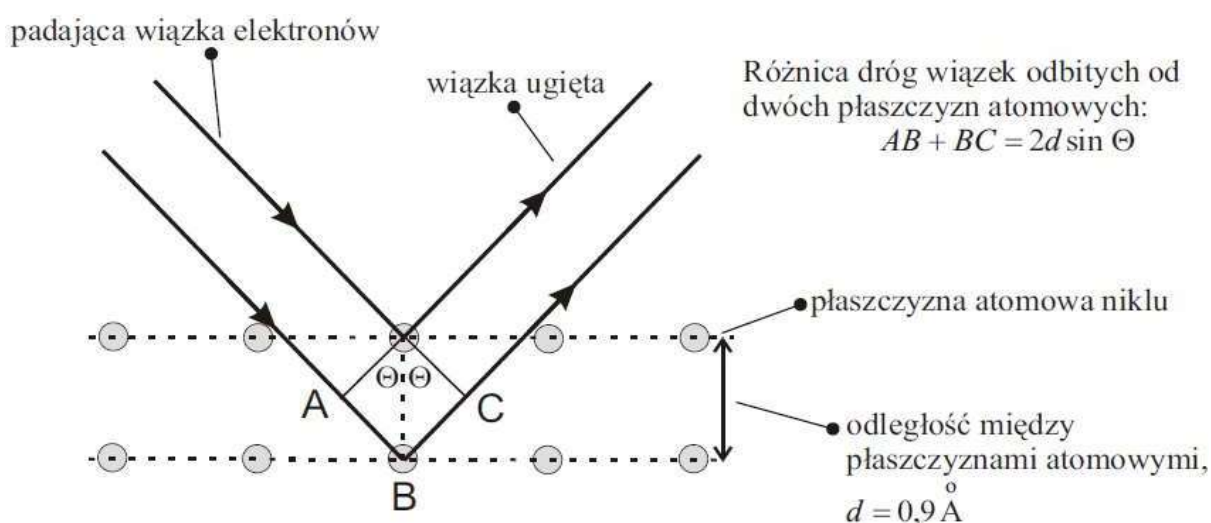
Elektrony mogą ulegać dyfrakcji i interferencji!

Jedna z interpretacji mechaniki kwantowej

**Teoria de Broglie-Bohma** (także: teoria fali pilotującej, mechanika Bohma, interpretacja Bohma lub interpretacja przyczynowa) – interpretacja mechaniki kwantowej zakładająca, że:

- stan układu fizycznego zależy od funkcji falowej, która jest określona w przestrzeni konfiguracyjnej układu oraz stanowi rozwiązanie równania Schrödingera,
- układ znajduje się w każdej chwili w jednej z możliwych konfiguracji (którą stanowią pozycje wszystkich cząstek układu lub stany wszystkich pól fizycznych),
- dynamikę układu zadaje tzw. równanie fali pilotującej, które określa wektor prędkości układu w danej chwili, dla zadanej konfiguracji; wektor ten zależy od funkcji falowej; dowodzi się, że tak zadana dynamika układu odtwarza efekty kwantowe.

Dualizm korpuskularno – falowy **Doświadczenie C.J.Davissona i L.G.Germiera 1927**



**Warunek wzmocnienia wiązki ugiętej**

$$2d \sin \Theta = m \lambda$$

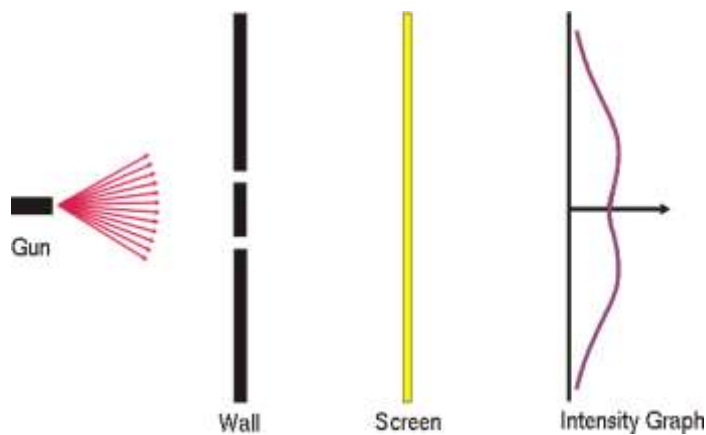
Labels for the equation:

- $2d$ : odległość pomiędzy płaszczyznami atomowymi
- $\sin \Theta$ : kąt pomiędzy padającą wiązką a płaszczyzną atomową
- $m$ : liczba całkowita,  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$
- $\lambda$ : długość fali elektronów

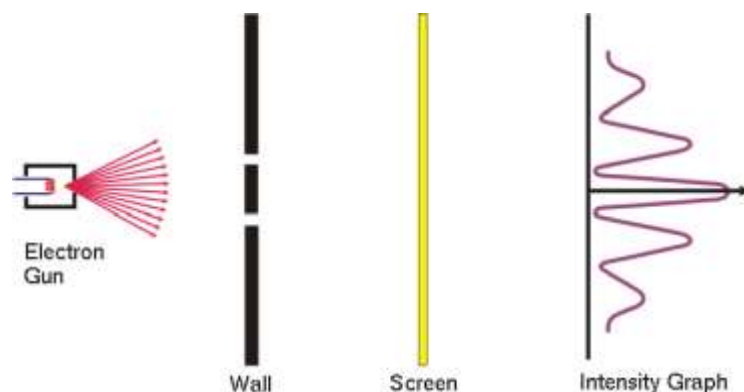
Podczas eksperymentu wydarzył się wypadek, w którym do komory dostało się powietrze powodując utlenienie się powierzchni niklu. Aby usunąć tlenek, Davisson i Germer ogrzali próbkę w wysokiej temperaturze, nie wiedząc, że to zmieniło poprzednią drobną polikrystaliczną strukturę niklu w duże obszary monokrystaliczne, których rozmiar był większy niż szerokość strumienia elektronów.

Kiedy ponownie rozpoczęli eksperyment, elektrony, które trafiły na powierzchnię, zostały rozproszone na atomach umieszczonych w strukturze krystalicznej niklu. W 1912 roku Max von Laue udowodnił, że struktura krystaliczna może służyć jako rodzaj trójwymiarowej siatki dyfrakcyjnej.

## Eksperyment z pociskami



Intensywność po przejściu przez dwie szczeliny jest sumą intensywności po przejściu przez każdą szczelinę z osobna.



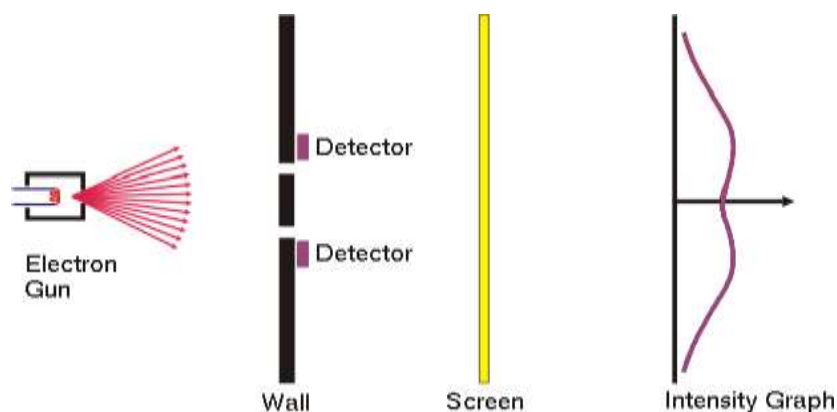
Intensywność po przejściu przez dwie szczeliny *nie* jest sumą intensywności po przejściu przez każdą szczelinę z osobna. Występują efekty interferencyjne, więc elektrony zachowują się jak fala!

Jedna z interpretacji mechaniki kwantowej

**Wieloświat** - hipotetyczny zbiór wszelkich możliwych wszechświatów, zawierający w sobie wszystko inne (w tym wszystkie możliwe, potencjalne – niezależnie od rozważanych czasoprzestrzeni lub wymiarów, w których się znajdują – wszechświaty; w tym także tak zwane wszechświaty równoległe).

Według kwantowej hipotezy wielu światów Hugh Everetta III, nazywanej przez niego „Wieloświatową Interpretacją Mechaniki Kwantowej” (ang. The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics), wszystko co może się zdarzyć, zdarza się na pewno w którejś z odnóg rzeczywistości, która przypomina wielkie, rozgałęziające się w każdej chwili drzewo życia.

## Eksperyment z elektronami i detektorami



Gdy elektrony są 'podglądane' przez detektory, intensywność po przejściu przez dwie szczeliny jest *inna* niż, gdy elektrony nie są 'podglądane'!

Przez którą szczelinę przeleci cząstka? - Odsyłam do funkcji falowej...

Funkcja falowa

- Formalizm matematyczny, za pomocą którego usuwa się te paradoksy, przypisuje każdej cząstce materialnej **funkcję falową  $\Psi(x,y,z,t)$**  będącą funkcją współrzędnych i czasu.
- Funkcja falowa jest na ogół funkcją zespoloną.
- Znajdując rozkład natężenia w obrazie dyfrakcyjnym można określić prawdopodobieństwo, że elektron padnie w określonym miejscu ekranu.
- Kwadrat amplitudy funkcji falowej jest proporcjonalny do gęstości prawdopodobieństwa znalezienia elektronu w danym elemencie obszaru.

Własności funkcji falowej

Prawdopodobieństwo znalezienia się elektronu w objętości  $dV=dx dy dz$  wynosi

$$P dV = |\Psi|^2 dx dy dz \quad \text{gdzie} \quad |\Psi|^2 = \Psi^2 = \Psi \cdot \Psi^*$$

warunek unormowania funkcji falowej

$$\int_V |\Psi|^2 dV = 1$$

- wówczas  $|\Psi|^2$  jest równe gęstości prawdopodobieństwa znalezienia elektronu

- zasada superpozycji: jeżeli zdarzenie może przebiegać w kilku wzajemnie wykluczających się sposobach to funkcja falowa takiego zdarzenia przedstawia sumę funkcji falowych każdego ze sposobów  $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$
- funkcja falowa powinna być ograniczona  $|\Psi| < \infty$
- funkcja falowa  $\Psi$  nie stanowi bezpośrednio obserwowanej wielkości. Fale klasyczne i fale odpowiadające cząstkom podlegają równaniom matematycznym tego samego typu. W przypadku klasycznym amplituda fali jest bezpośrednio obserwowana, a dla funkcji falowej  $\Psi$  – nie.

Funkcja falowa

Opisywany funkcją falową obiekt może się spiętrzać i marszczyć, opływać przeszkody, czy się wręcz przez nie „przesączać” ....

Problem polega na tym, że funkcja falowa nie jest obiektem fizycznym w żadnym normalnym sensie tego słowa – zgodnie z dominującą interpretacją mechaniki kwantowej (tzw. interpretacją kopenhaską), opisywany przez funkcję falową „ośrodek” nie powinien być traktowany jako realnie istniejący – jest to wyłącznie obiekt matematyczny służący do przewidywania, gdzie w danym momencie jest największe prawdopodobieństwa wykrycia wszelkich naprawdę istniejących obiektów, czyli cząstek elementarnych i złożonych.

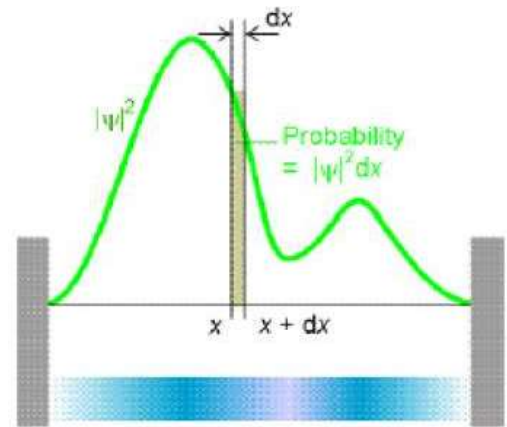
Max Born – interpretacja funkcji falowej



$|\Psi(x,t)|^2 dx$  opisuje prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w przedziale  $\langle x, x+dx \rangle$  w chwili  $t$ .

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x)|^2 dx = 1$$

Prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w całym obszarze.



Ta interpretacja funkcji  $\psi$  daje statystyczny związek pomiędzy falą i związaną z nią cząstką. Nie mówimy, gdzie cząstka jest, ale gdzie prawdopodobnie się znajdzie.

Postać funkcji falowej

Z hipotezy de Broglie'a  $p_0 = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k$  gdzie  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$   $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Funkcja falowa cząstki o pędzie  $p_0$  poruszającej się wzdłuż osi  $x$ , odpowiada równaniu fali o długości  $\lambda_0$  i wektorze falowym  $k$

$$\Psi = A \cos(kx - \omega t) \quad |\Psi|^2 = A^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

Rzeczywista postać funkcji falowej jest niewłaściwa, bo istniałyby punkty, gdzie nie można cząstki zaobserwować → **lepsza zespolona**

$$\Psi = A \exp[i(kx - \omega t)] \quad |\Psi|^2 = (A \exp[i(kx - \omega t)])(A \exp[-i(kx - \omega t)]) = A^2$$

Pokazaliśmy, że jeżeli pęd cząstki posiada określoną wartość, to cząstkę można znaleźć z jednakowym prawdopodobieństwem w dowolnym punkcie przestrzeni.

Inaczej mówiąc, jeżeli pęd cząstki jest dokładnie znany, to nic nie wiemy o jej miejscu położenia.

Zasada nieoznaczoności Heisenberga

Pewnych wielkości fizycznych nie można zmierzyć równocześnie z dowolną dokładnością. Iloczyn niepewności pomiaru dwóch takich wielkości jest nie mniejszy od stałej Plancka podzielonej przez  $2\pi$ .

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar / 2$$

$$\Delta p_y \Delta y \geq \hbar / 2$$

$$\Delta p_z \Delta z \geq \hbar / 2$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar / 2$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – nieokreśloność pomiaru położenia (odchylenie standardowe położenia)

$\Delta p_x$  itp. – nieokreśloność pomiaru pędu (odchylenie standardowe pędu),

$\Delta E$  – nieokreśloność pomiaru energii

$\Delta t$  – nieokreśloność pomiaru czasu

Ważne jest by podkreślić, że  $\Delta x$  itd. nie są niepewnościami pomiarowymi wynikającymi z niedoskonałości urządzeń lub metody pomiarowych, ale rozrzutami wyników (wariancją) wynikających z istoty samego pomiaru lub istoty samej mechaniki kwantowej (interpretacja kopenhaska).

Oszacować opierając się na zasadzie nieoznaczoności Heisenberga niepewność co do prędkości elektronu w atomie wodoru. ( $r_1 = 0,53 \text{ \AA}$ )

$$\Delta x = 2r_1$$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$$

$$\Delta x \Delta v_x \geq \frac{\hbar}{m}$$

$$\Delta v_x = \frac{\hbar}{\Delta x m} = \frac{\hbar}{2r_1 \cdot m}$$

Niepewność dla prędkości elektronu

$$\Delta v = \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2 + \Delta v_z^2}$$

Zakładając, że żaden kierunek nie jest wyróżniony

$$\Delta v = \sqrt{3} \Delta v_x$$

$$\Delta v = \frac{\sqrt{3} \hbar}{2r_1 \cdot m} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{0,106 \cdot 10^{-9} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} = 1,89 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$$

Z drugiego postulatu Bohra:  $m v_n r_n = n \hbar$

$$v_1 = \frac{\hbar}{m r_1} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,53 \cdot 10^{-10}} = 2,18 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$$

Zasada nieoznaczoności i fale materii

Cząstka kwantowa taka jak np. elektron, jest reprezentowana przez falę materii, której amplituda określa prawdopodobieństwo znalezienia cząstki.

Fala materii opisująca cząstkę nie rozciąga się na całą przestrzeń, ale jest skupiona w pewnym ograniczonym obszarze. Taka fala nosi nazwę paczki falowej i może być traktowana jako złożenie fal harmoniczných o różnych częstotliwościach.

Ponieważ prawdopodobieństwo znalezienia cząstki jest skończone (niezerowe) w całym obszarze paczki falowej to nie mamy pewności co do jej położenia (paczka fal jest rozciągnięta).

Nie mamy również pewności co do pędu, bo paczka falowa to złożenie fal o różnej długości, czyli o różnych pędach zgodnie z relacją de Broglie'a  $p = h/\lambda$

Te niepewności są „zależne od siebie”:

- więcej fal tworzących paczkę to lepsza lokalizacja cząstki, ale większa niepewność określenia pędu,
- mniej fal tworzących paczkę to lepsza znajomość pędu, ale większe rozmycie paczki, co oznacza większą niepewność określenia położenia cząstki.

Okazuje się, że nie jest możliwy jednoczesny dokładny pomiar położenia cząstki i jej pędu.

Zasada nieoznaczoności jest konsekwencją dualizmu korpuskularno-falowego



## Równanie Schrödingera

Funkcję falową dla danej cząstki lub bardziej złożonego układu fizycznego, otrzymujemy rozwiązując równanie różniczkowe Schrödingera.

**Funkcja falowa spełniająca to równanie**

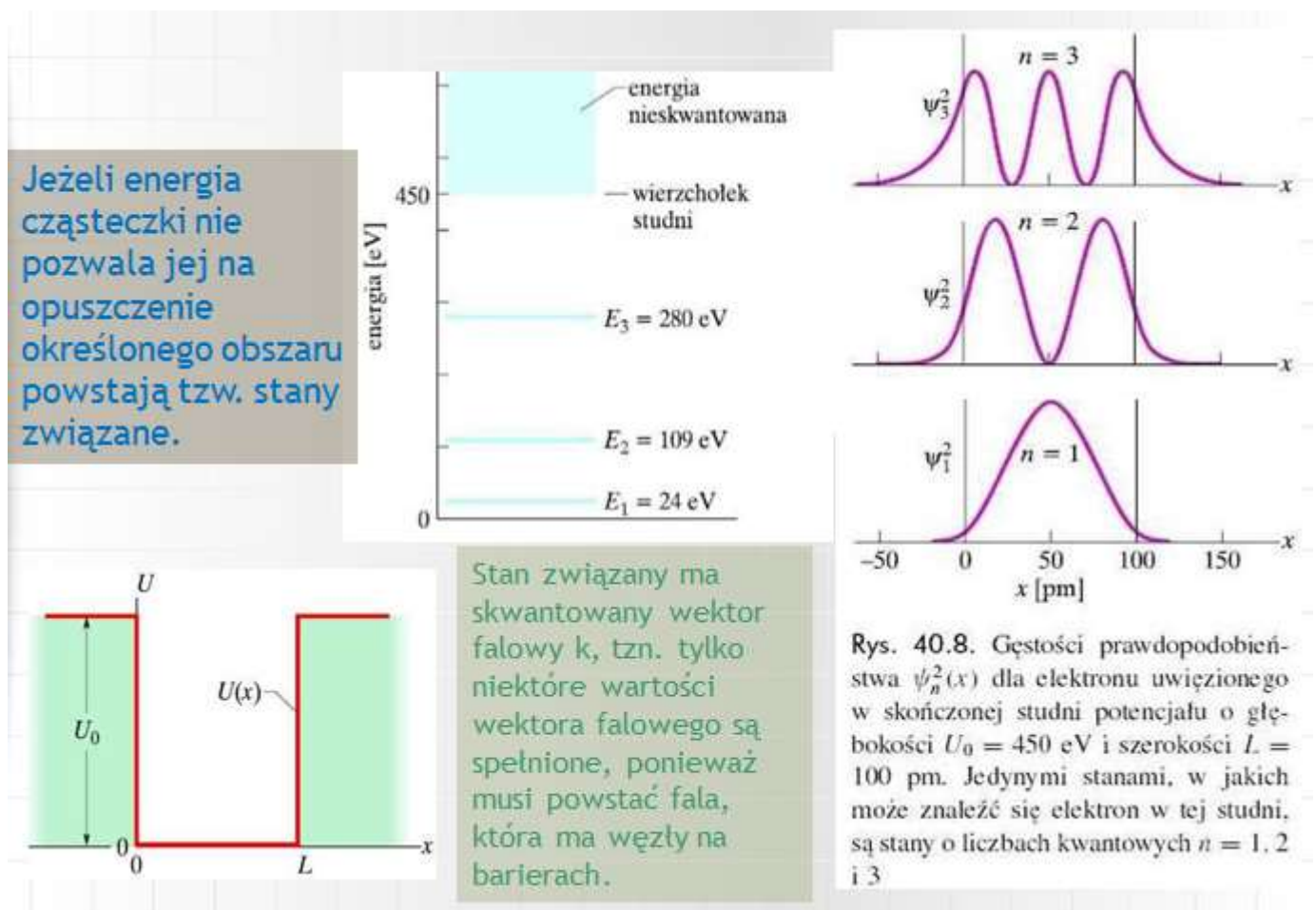
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} + V(x) \Psi(x) = E \Psi(x)$$

**Energia potencjalna cząstki zależna od jej położenia**

**Energia całkowita cząstki**

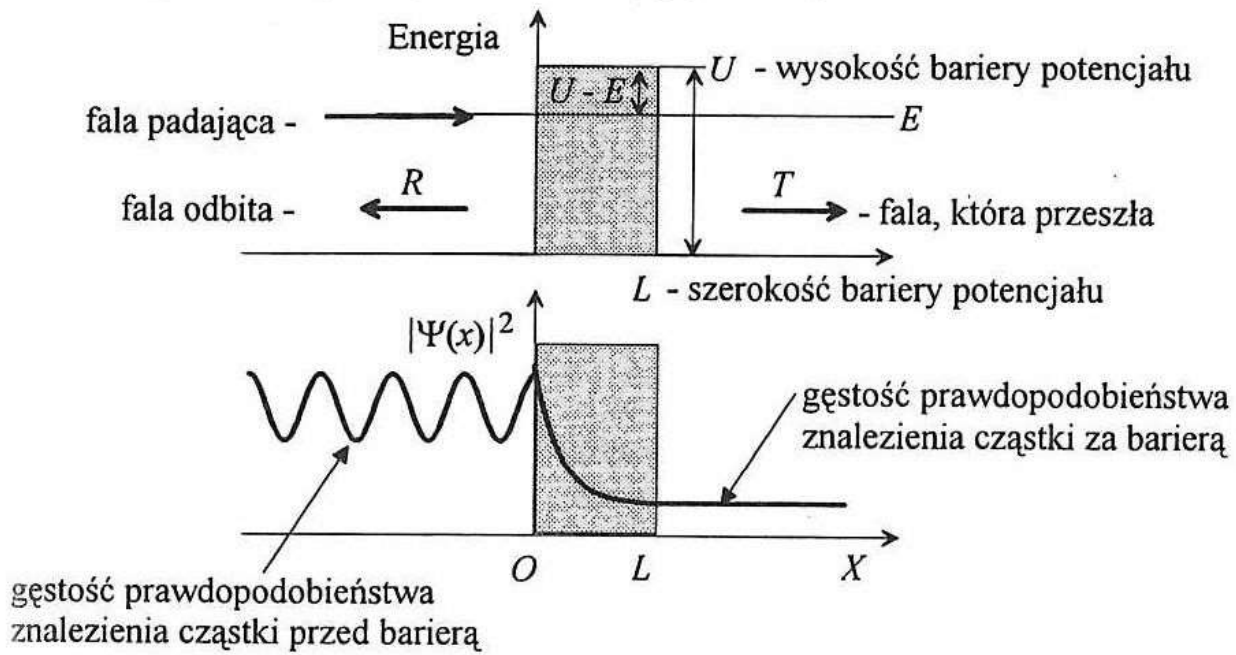
Brak zależności od czasu – stacjonarne równanie Schrödingera

Elektron w skończonej studni potencjału

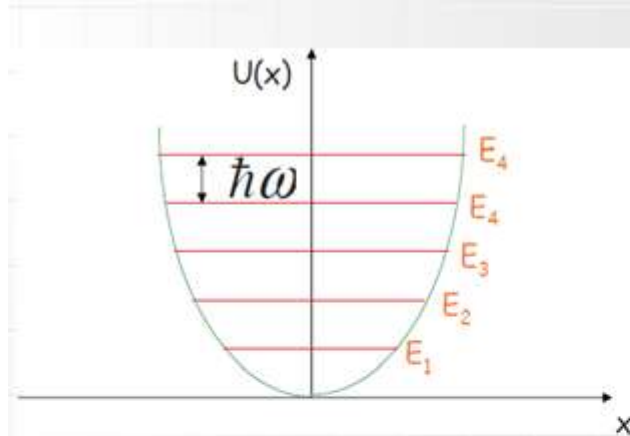


## Tunelowanie

Zjawisko tunelowe zwane też efektem tunelowym – zjawisko przejścia cząstki przez barierę potencjału o wysokości większej niż energia cząstki, opisane przez mechanikę kwantową.



Kwantowy oscylator harmoniczny



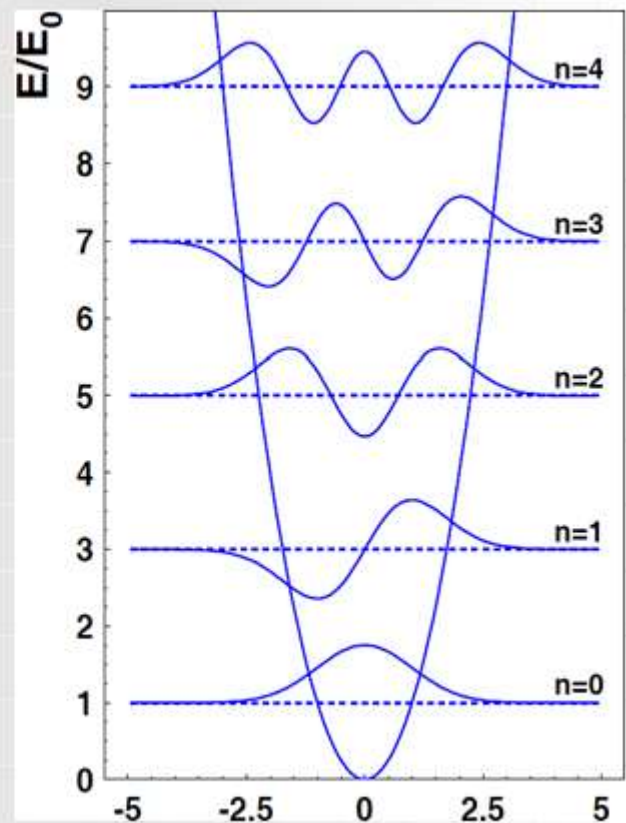
$$U(x) = \frac{1}{2} kx^2 \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Wniosek:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \omega \hbar \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

najniższa możliwa energia wynosi

$$E_0 = \frac{1}{2} \omega \hbar$$



## Kwantowe łączenie satelitarne

- Zespół chińskich badaczy za pomocą satelity przesłał kwantowo splątane kwanty światła na odległość ponad 1200 km. To światowy rekord. I początek globalnej sieci odpornej na podsłuch.
- W sieciach kwantowych poufność przekazywanej informacji gwarantują podstawowe prawa fizyki. Klucz szyfrowy przesyłany jest za pomocą pojedynczych kwantów światła (fotonów), których nie da się ukraść "skopiować".
- Każda próba przechwycenia i podglądania fotonów musi się skończyć zmianą ich stanu kwantowego, co alarmuje odbiorcę, że ktoś próbuje założyć podsłuch.

## Poza granicami światła: O teleportacji... na poważnie

- **Teleportacja kwantowa** – nie oznacza przeniesienia kwantów w przestrzeni, lecz oznacza analizę ich *stanu kwantowego* (polaryzacji i innych cech) w danym miejscu przestrzeni i odtworzenie tego stanu w innym miejscu.
- Wykorzystuje się zjawisko *splątania kwantowego*. Informacja (stan kwantowy) przesyłana jest bez opóźnień („upiorne działanie na odległość” - Einstein).
- Stan cząstek wprowadzonych w splątanie jest skorelowany. Badając jedną z nich, otrzymujemy informację o stanie jej "koleżanki", a ponieważ stan każdej z nich przed pomiarem jest nieokreślony, to mierząc go w przypadku jednej, determinujemy też stan tej drugiej.
- Celem obecnych badań jest wypracowanie metod wprowadzania cząstek w stan splątania i pomiaru ich cech. Te metody różnią się w zależności od tego, jaki rodzaj cząstki chcemy teleportować - atom, foton czy jon.

## Wczesne modele atomu

- W czasach Newtona atom uważany był za małą twardą kulkę – co dość dobrze sprawdzało się w rozważaniach dotyczących kinetycznej teorii gazów, ale nie uwzględniało elektrycznej natury atomu.
- W 1897 J.J. Thomson zaproponował model zatopionych w pozytywnie naładowanej kuli ładunków ujemnych.

## Doświadczenie Rutherforda

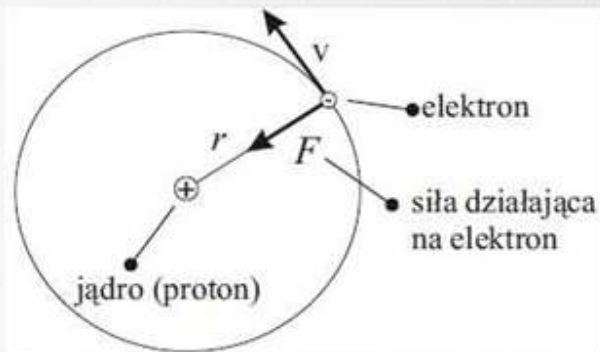


cała materia folii skupiona w ciężkim jądrze

atomy = ciężkie jądra naładowane dodatnio o b. małych rozmiarach ( $\sim 10^{-14}$  m  $\ll$  rozmiar atomu  $\sim 10^{-10}$  m) + lekkie elektrony

## Planetary model of the Rutherford atom

Since the mass of an electron is much smaller (approx. 1820 times) than the mass of a proton, and the attractive Coulomb force is similar to the gravitational force, the electron should move around the nucleus like a planet around the Sun.

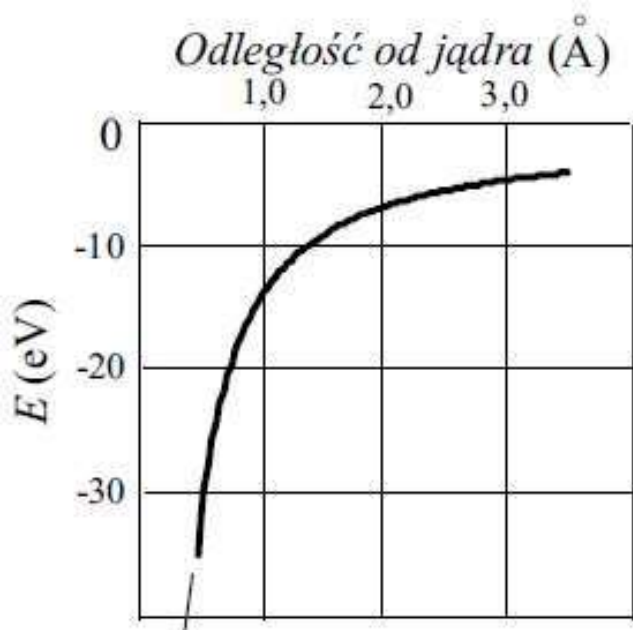


$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

energia całkowita  
elektronu na orbicie

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$



$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

energia potencjalna elektronu  
w odległości  $r$  od jądra

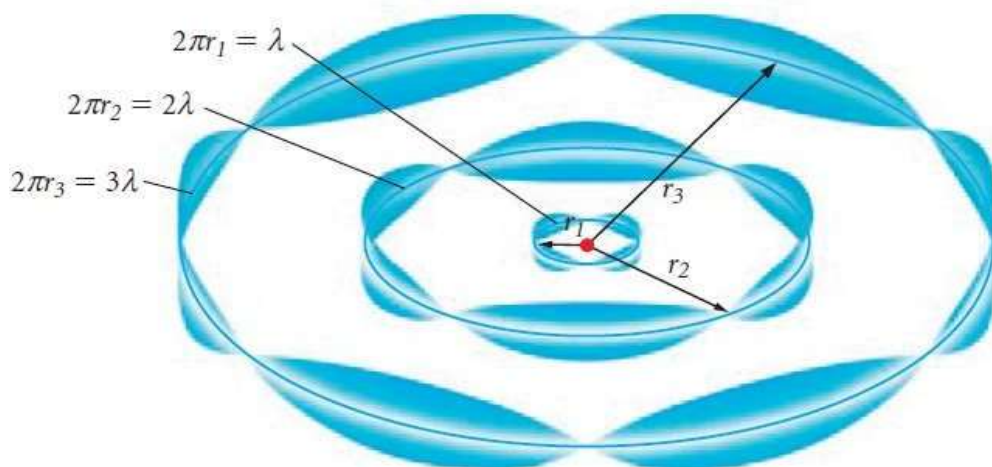
- z powyższego nie wynikają żadne ograniczenia ani na promień orbity, ani na prędkość elektronu na orbicie - na energię całkowitą elektronu,
- elektron krążący dookoła jądra powinien, według klasycznej elektrodynamiki, wypromieniowywać swoją energię spadając ostatecznie na jądro - atomy (wszystkie, nie tylko wodoru) w ogóle nie mogłyby istnieć!

The planetary model did not explain the existence of atomic emission spectra.



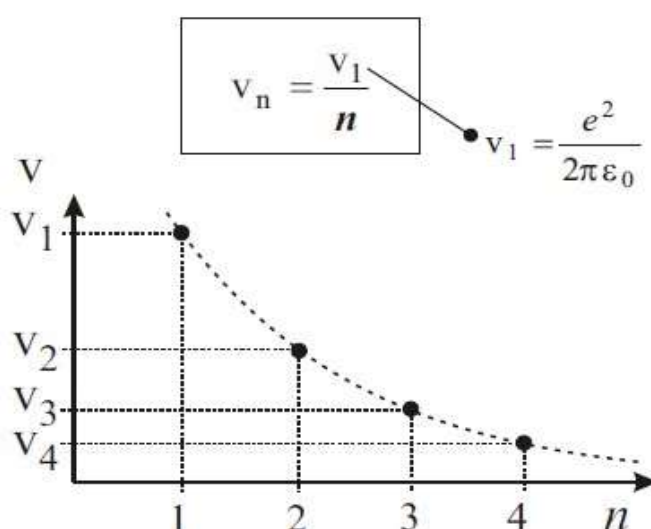
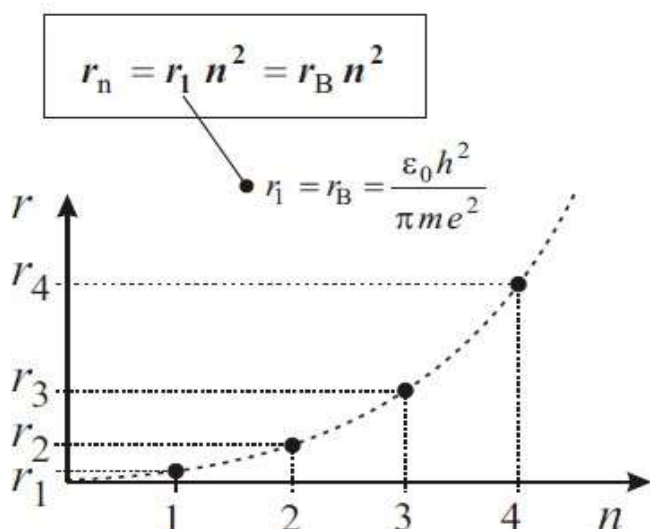
I. Dozwolone są tylko takie orbity, dla których moment pędu jest wielokrotnością stałej Plancka dzielonej przez  $2\pi$ :

$$m v r = n \frac{h}{2\pi}$$



II. Kiedy elektron krąży po jednej z dozwolonych orbit, nie emituje energii. Energia jest emitowana lub absorbowana podczas przeskoku elektronu z jednej z dozwolonych orbit na inną. Emitowany lub absorbowany kwant energii jest równy różnicy energii elektronu na dwóch dozwolonych orbitach, między którymi nastąpił skok.

### Promienie dozwolonych orbit i prędkości elektronu na orbitach



- Model Bohra atomu wodoru składa się z jądra, które jest pojedynczym protonem, i z krążącego wokół niego elektronu.
- Elektron o masie m porusza się po kołowych orbitach o promieniu  $r$  ze środkiem w miejscu, gdzie znajduje się jądro.
- Z II zasady dynamiki Newtona i z prawa Coulomba:  $F = ma$



$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Energia kinetyczna:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

Energia potencjalna:

$$E_p = V(-e) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Energia całkowita:

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

Promień orbity, może przyjmować dowolną wartość, więc energia  $E$  może być dowolna. Problem kwantowania energii sprowadza się do kwantowania promienia  $r$ .

Dozwolone energie elektronu w atomie wodoru

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

energia elektronu na  $n$ -tej orbicie

$$E_n = -\frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2}$$

energia stanu podstawowego

$$E_1 = -\frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13,6\text{eV}$$

Rozszerzenie modelu atomu Rutherforda z dodaniem postulatów:

**POSTULAT I. Warunek stanów stacjonarnych.**

Istnieją stany stacjonarne atomów, w których nie wypromieniowują one energii (stacjonarne orbity).

**POSTULAT II. Zasada kwantowania.**

Moment pędu elektronu znajdującego się w stanie stacjonarnym ma wartość daną wzorem

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$L = mVr = n\hbar$$

$$n \in$$

$$1,2,3,\dots$$

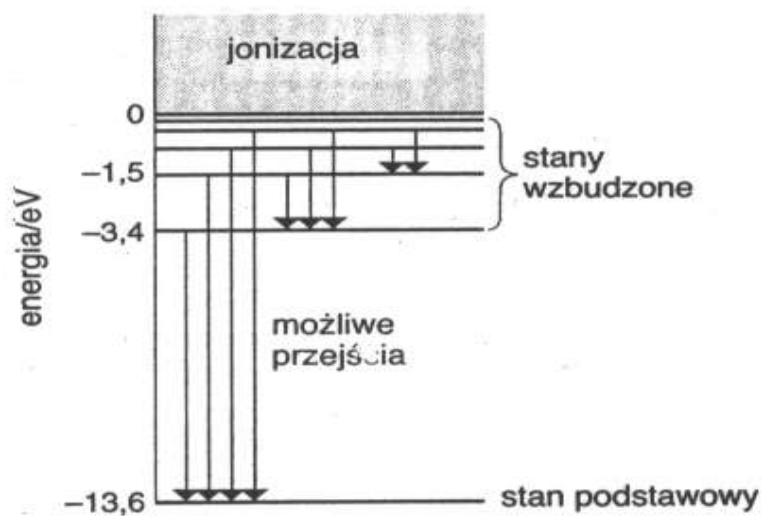
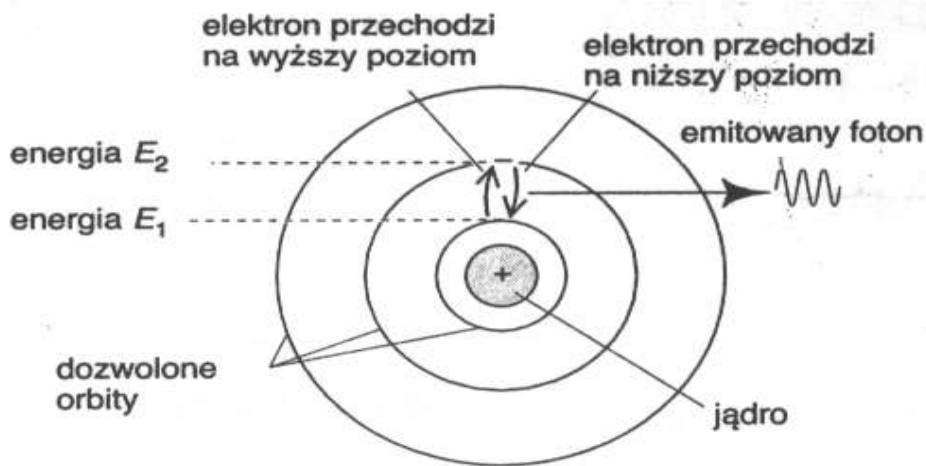
**POSTULAT III. Zasada częstości.**

Przy przechodzeniu atomu z jednego stanu stacjonarnego do innego zostaje wyemitowany lub pochłonięty kwant energii.

Wypromieniowanie energii następuje wtedy, gdy atom przechodzi ze stanu o wyższej energii  $E_k$  do stanu o niższej energii  $E_j$ . W wyniku przejścia światło o częstości  $\nu$  jest emitowane przez atom w postaci fotonu o energii:

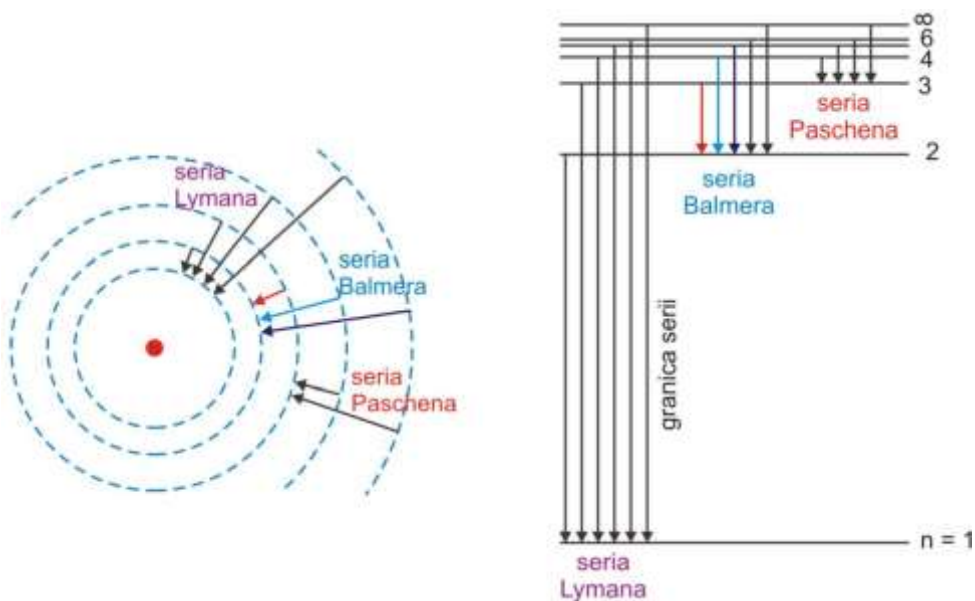
$$h\nu = E_k - E_j$$

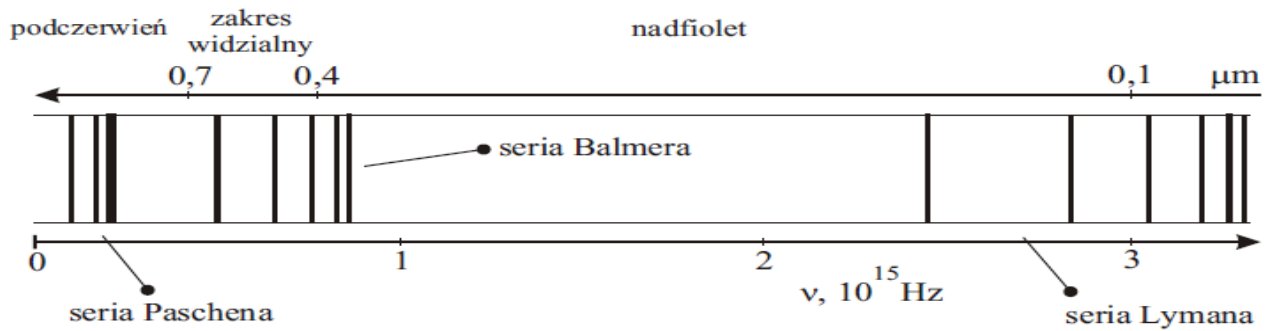
## Promieniowanie atomowe



Rysunek przedstawia główne poziomy energetyczne i dozwolone przejścia dla izolowanego atomu wodoru.

Teoria Bohra przewidywała istnienie serii leżącej w nadfiolecie, którą znalazł w 1914 r. Theodore Lyman





Przejścia elektronów pomiędzy poziomami energetycznymi elektronów na orbitach stacjonarnych

$$E_n - E_m = h\nu$$

energia wyemitowanego fotonu

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_n - E_m = \frac{E_1}{n^2} - \frac{E_1}{m^2} = E_1 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = |E_1| \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

stała Rydberga

długość emitowanej fali

$n = m + 1, m + 2, m + 3$

$m = 1$  (seria Lymana),  $2$  (seria Balmera),  $3$  (seria Paschena)

Modelu Bohra – problemy

Model Bohra był ważnym krokiem w rozwoju fizyki kwantowej, lecz:

- nie wyjaśniał widm atomów wieloelektronowych
- elektrony w atomie nie poruszają się kołowych po orbitach
- nie wyjaśniał subtelnej struktury linii emisyjnych (spowodowanych efektami relatywistycznymi i spinowymi)

Model Bohra został zastąpiony modelem falowo-mechanicznym:

- elektrony poruszają się orbitalach atomowych opisanych przez trzy liczby kwantowe.

1. Wstęp
2. Nośniki informacji w elektronice
3. Podstawy mechaniki kwantowej
4. Układy wieloatomowe
5. Struktury krystaliczne
6. Podstawy działania lasera
7. Teoria względności

## Atomy wieloelektronowe

Całkowita energia każdego z elektronów jest skwantowana i w konsekwencji skwantowana też jest energia całego atomu.

Funkcja falowa elektronu zależy od trzech liczb kwantowych  $n, l, m_l$ , przy czym główna liczba kwantowa  $n$  jest związana z kwantowaniem energii całkowitej elektronu w atomie wodoru.

Okazuje się, że liczby kwantowe  $l, m_l$  opisują z kolei kwantowanie przestrzenne momentu pędu elektronu.

Stany elektronu w atomie wieloelektronowym

### Równanie Schrödingera

The diagram shows the Schrödinger equation for a multi-electron atom. The main equation is enclosed in a box: 
$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(r) \right] \Psi = E \Psi$$
 Labels with arrows point to different parts: 

- A label "sferyczno-symetryczna funkcja energii potencjalnej elektronu" points to  $U(r)$ .
- A label "funkcja falowa elektronu w atomie wieloelektronowym" points to  $\Psi$ .
- A label "dozwolone energie elektronu w atomie" points to  $E$ .

 To the right of the main equation is a box containing  $E = E_{nl}$ . Below the main equation is a box containing the wave function  $\Psi = \Psi_{n,l,m_l,m_s}(r,\vartheta,\varphi)$ .

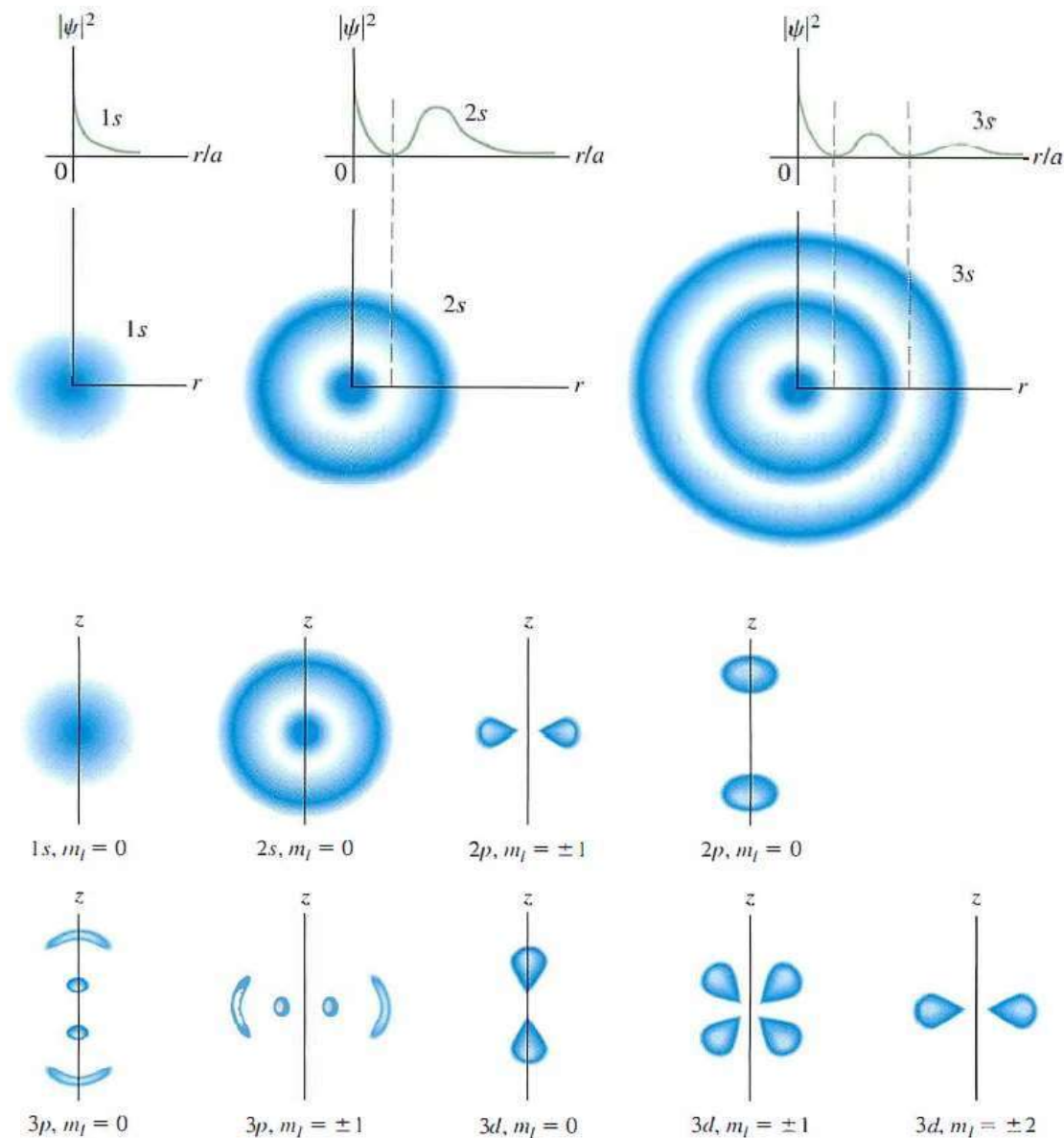
$n = 1, 2, 3, \dots$  – główna liczba kwantowa opisuje energię elektronu w atomie,

$l = 0, 1, \dots, n-1$  – orbitalna liczba kwantowa opisuje orbitalny moment pędu, zgodnie ze wzorem  $L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}$ ,

$m_l = -l, \dots, 0, \dots, l$  – magnetyczna liczba kwantowa opisuje rzut orbitalnego momentu pędu na wyróżniony (np. polem magnetycznym) kierunek w przestrzeni, zgodnie ze wzorem  $L_z = m_l \hbar$ ,

$m_s = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$  – spinowa liczba kwantowa opisuje rzut spinowego moment pędu na wyróżniony kierunek w przestrzeni,  $L_{sz} = m_s \hbar$

Trójwymiarowe rozkłady prawdopodobieństwa sferycznie symetrycznych funkcji falowych atomu wodoru, 1s, 2s i 3s.



Przekroje trójwymiarowych rozkładów prawdopodobieństwa dla kilku stanów kwantowych atomu wodoru.

Orbitalny moment pędu

Zgodnie z zasadami mechaniki klasycznej moment pędu elektronu krążącego wokół jądra w odległości  $r$  jest dany wyrażeniem

$$L = r \times m_e v = r \times p$$

Okazuje się, że dla elektronu krążącego wokół jądra można dokładnie wyznaczyć jego wartość (długość wektora  $L$ ) oraz rzut wektora  $L$  na pewną wyróżnioną oś w przestrzeni (na przykład oś  $z$ ) to znaczy wartość jednej jego składowej  $L_z$ . Pozostałe składowe  $L_x$  i  $L_y$  mają wartości nieokreślone. Wartości  $L$  oraz  $L_z$  są skwantowane.

Wartość orbitalnego momentu pędu elektronu w atomie i jego rzut na oś  $z$  przyjmują ściśle określone wartości zależne od liczb kwantowych  $l$



## Spin elektronu

- Na podstawie badania widm optycznych atomów wodoru i metali alkalicznych oraz doświadczeń nad oddziaływaniem momentów magnetycznych atomów z polem magnetycznym (doświadczenie Sterna-Gerlacha) odkryto, że wszystkie elektrony mają, oprócz orbitalnego, również wewnętrzny moment pędu, który został nazwany *spinowym momentem pędu (spinem)*.
- Okazuje się ponadto, że spin jest skwantowany przestrzennie i że dla danego stanu orbitalnego są możliwe *dwa kierunki spinu* czyli, że rzut wektora spinu na oś z może przyjmować tylko dwie wartości co określa *spinowa liczba kwantowa s*, która może przyjmować dwie wartości  $s = \pm 1/2$

## Atomy wieloelektronowe

Wodór ma liczbę atomową  $Z=1$  i jest prostym atomem. Zawiera tylko jeden elektron i jeden proton stąd potencjał opisuje oddziaływanie kulombowskie pomiędzy tymi dwoma ładunkami. Równanie Schrödingera dla atomu wodoru można rozwiązać analitycznie.

Następny pierwiastek w układzie okresowym: hel ( $Z=2$ ) jest złożonym atomem. Fakt, że atom helu zawiera dwa elektrony i dwa protony prowadzi do trzech członów w energii potencjalnej:

- dwa człony reprezentują oddziaływanie każdego z dwóch elektronów z dodatnim ładunkiem jądra
- trzeci człon opisuje odpychanie pomiędzy elektronami

Funkcje falowe dla atomu wieloelektronowego nie są takie same jak w przypadku atomu wodoru.

Równanie Schrödingera rozwiązuje się stosując metody numeryczne.

Pewne własności pierwiastków powtarzają się periodycznie w zależności od położenia w układzie okresowym (uporządkowanie). Przykładem jest energia jonizacji.

Uderzające podobieństwo właściwości chemicznych i fizycznych pierwiastków z każdej pionowej kolumny układu okresowego jest dostatecznym dowodem, że atomy skonstruowane są zgodnie z systematycznymi zasadami.

## Budowa układu okresowego

### Reguły

1. Elektrony obsadzają najpierw najniższe orbitale zgodnie z zasadą minimalizacji energii. Dla danego  $n$  podpowłoka zewnętrzna z najmniejszą wartością  $l$  ma najniższą energię.
2. Nie więcej niż dwa elektrony mogą obsadzić dany orbital. Zapełnione orbitale mają spiny przeciwne – wynika to z zakazu Pauliego.
3. Jeżeli zapełniane są orbitale o tej samej energii w danej podpowłoce, elektrony o spinach równoległych obsadzają pojedynczo najpierw różne orbitale.

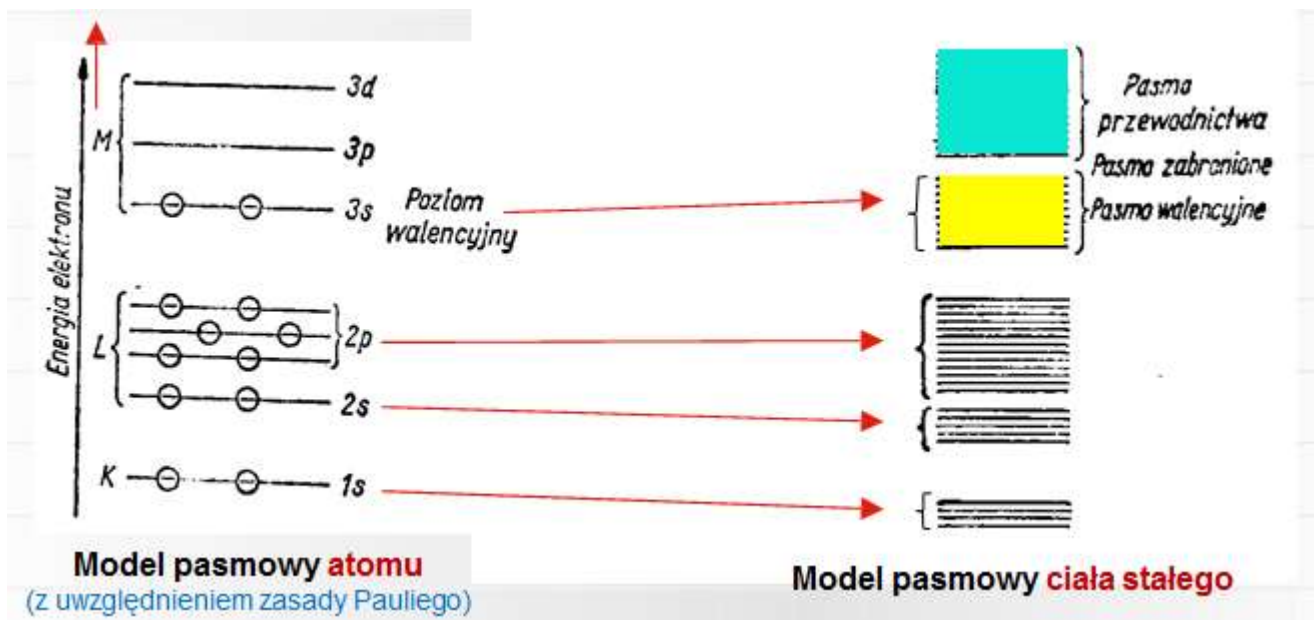
Notacja spektroskopowa – historyczne nazwy (linie spektralne „sharp”, „diffuse”)

Zgodnie z zasadą Pauliego liczba elektronów, które mogą obsadzić stan o danej liczbie kwantowej  $l$  wynosi  $2(2l+1)$

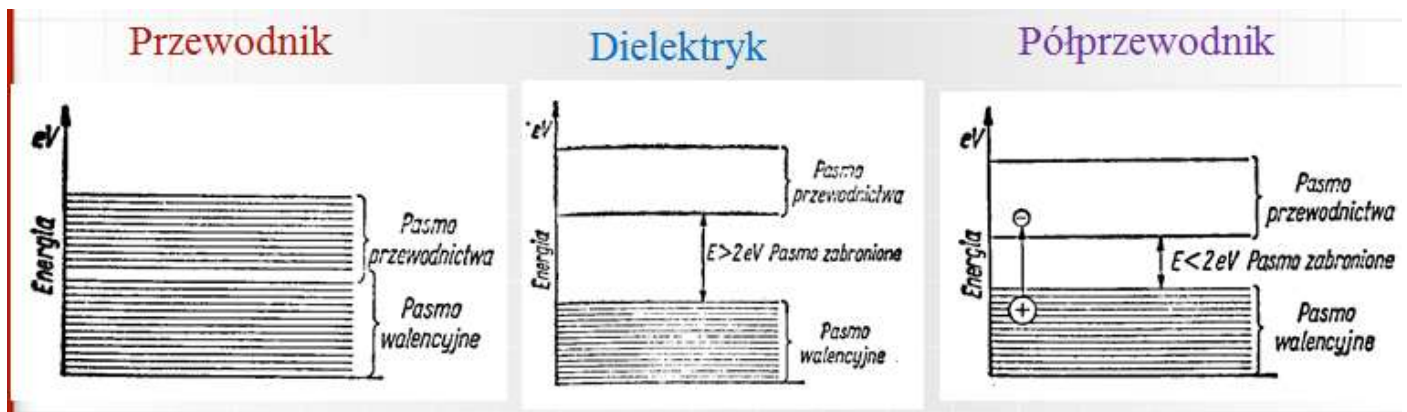
**Teoria pasmowa** - jest to teoria kwantowa opisująca stany energetyczne elektronów.

Struktura energetyczna ciała stałego

Powłoki (K,L,M...Q) – zawierające **podpowłoki**



- W **atomach** dozwolone stany energetyczne elektronów stanowią zbiór poziomów dyskretnych.
- W **ciałach stałych** dozwolone elektronowe stany energetyczne mają charakter pasm o szerokości kilku eV.
- Pasma walencyjne** – to zakres energii tych elektronów, które znajdują się na powłokach walencyjnych atomów.
- Pasma przewodnictwa** – to zakres energii tych elektronów, które nie są związane z atomami (*elektronów swobodnych*) i mogą poruszać się swobodnie w strukturze krystalicznej ciała stałego.



**Ciała stałe, pod względem ich właściwości elektrycznych, dzielimy na trzy grupy:**

- 1. Przewodniki**, w których pasmo walencyjne i przewodnictwa sąsiadują ze sobą (np. metale).
- 2. Dielektryki** dla których pasmo zabronione jest większe niż 2 eV (np. dla diamentu wynosi ona 5,4 eV). W normalnych warunkach dielektryki nie przewodzą prądu elektrycznego, ponieważ w pasmie przewodnictwa nie ma swobodnych nośników (elektronów walencyjnych uwolnionych z atomu).
- 3. Półprzewodniki**, np. **Si**, **Ge**, **GaAs**, dla których pasmo zabronione jest mniejsze niż 2 eV (np. dla krzemu wynosi 1.11 eV, germanu 0.67 eV, arsenku galu 1.43 eV przy  $T = 300\text{ K}$ ).

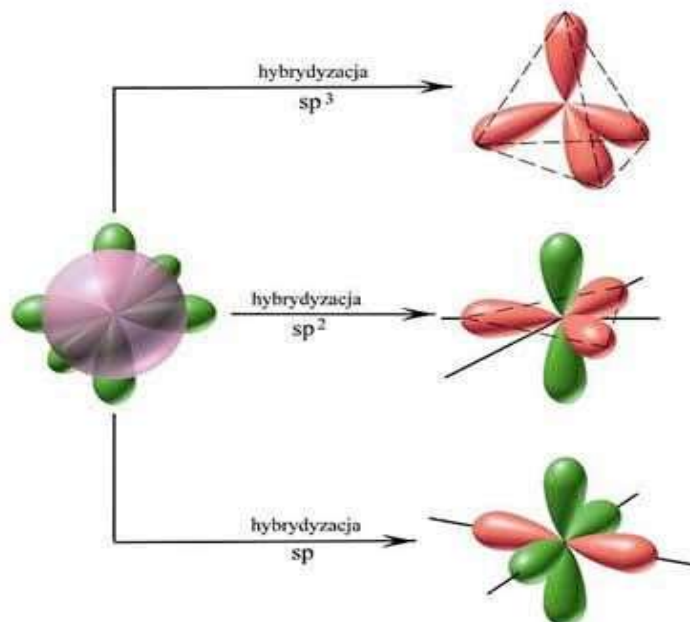
## Kowalencyjne

### Półprzewodniki

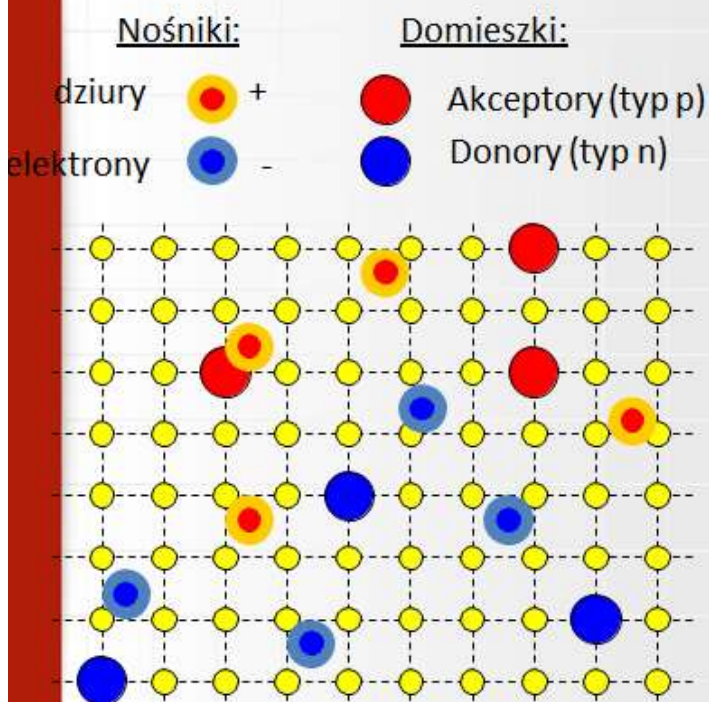
**Grupa IV:** diament, Si, Ge

**Grupy III-V:** GaAs, AlAs, InSb, InAs...

**Grupy II-VI:** ZnSe, CdTe, ZnO, SdS...



## Rodzaje wiązań



### Półprzewodniki

II	III	IV	V	VI
Be	B	C	N	O
Mg	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In		Sb	Te

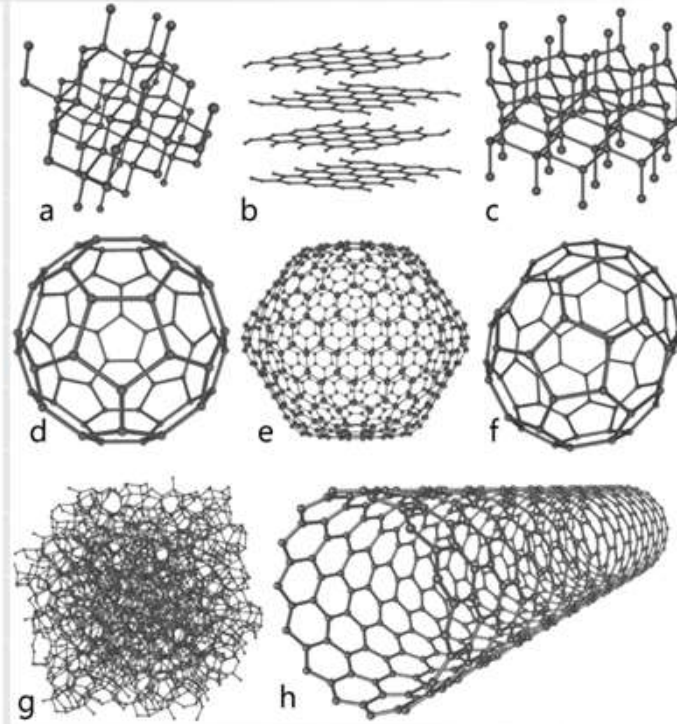
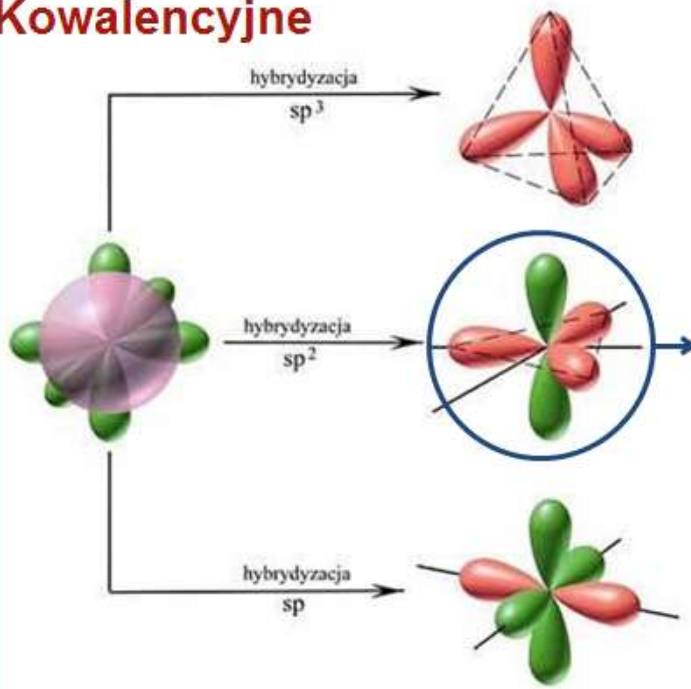
**Grupa IV:** diament, Si, Ge

**Grupy III-V:** GaAs, AlAs, InSb, InAs...

**Grupy II-VI:** ZnSe, CdTe, ZnO, SdS...



### Kowalencyjne



**Odmiany alotropowe węgla:** (Wikipedia)

a) diament, b) grafit, c) lonsdaleit  
 d) fuleren C60 e) fuleren C540 f) fuleren C70  
 g) węgiel amorficzny, h) nanorurka

### Grafen

#### Plan całości

1. Wstęp
2. Nośniki informacji w elektronice
3. Podstawy mechaniki kwantowej
4. Układy wieloatomowe
5. **Struktury krystaliczne**
6. Podstawy działania lasera
7. Teoria względności

### Materia skondensowana

Kiedy pierwiastek lub związek chemiczny, będący w stanie gazowym lub ciekłym, zostanie dostatecznie ochłodzony to krzepnie czyli przechodzi do stanu stałego.

Ciała stałe dzielimy na *kryształy*, *polikryształy* i *ciała bezpostaciowe*.

Ze względu na typy wiązań kryształy dzielimy na:

- Kryształy cząsteczkowe (molekularne),
- Kryształy o wiąźaniach wodorowych,
- Kryształy jonowe,
- Kryształy atomowe (kowalenne),
- Kryształy metaliczne.

## Kryształy jonowe

W kryształach jonowych elektrony są przenoszone z atomu jednego rodzaju do atomu drugiego rodzaju tak, że kryształ jonowy jest zbudowany z jonów dodatnich i ujemnych.

Jony są rozmieszczone w ten sposób, że przyciąganie kulombowskie pomiędzy jonami przeciwnego znaku jest silniejsze od odpychania kulombowskiego jonów tego samego znaku. Wiązanie jonowe jest wynikiem oddziaływania elektrostatycznego przeciwnie naładowanych jonów.

## Kryształy kowalencyjne

Wiązanie kowalencyjne tworzy się, gdy dwa elektrony z różnych atomów tworzą wspólną parę. Gęstość ładunku w obszarze pomiędzy atomami jest duża i elektrony walencyjne są w dużym stopniu „uwpólnione” przez dwa atomy.

Wiązanie kowalencyjne występuje szczególnie często w związkach organicznych.

Kryształy kowalenne są twarde i posiadają wysoką temperaturę topnienia. Brak elektronów swobodnych powoduje, że ciała atomowe nie są dobrymi przewodnikami elektryczności i ciepła. Czasami jednak, jak w przypadku Ge i Si są one półprzewodnikami.

## Wiązanie metaliczne

Metal składa się z dodatnich jonów zanurzonych w „morzu” ruchliwych elektronów.

Gaz elektronowy działa na każdy jon siłą przyciągania większą od odpychania pozostałych jonów w wyniku czego tworzy się wiązanie. Ponieważ istnieje wiele nie obsadzonych stanów elektronowych (na zewnętrznych powłokach są wolne miejsca) to elektrony mogą poruszać się swobodnie w kryształ od atomu do atomu. W konsekwencji kryształy metaliczne są doskonałymi przewodnikami elektryczności i ciepła.

## Kryształy czasowe

W 2012 roku prof. Frank Wilczek, fizyk teoretyk i laureat Nagrody Nobla, przewidział, że mogą istnieć nietypowe kryształy, w których atomy będą w stanie podstawowym, a mimo to struktura kryształu będzie się zmieniać okresowo w czasie.

## Stany skupienia

Tradycyjny podział stanów skupienia materii na ciało stałe, ciecz i gaz został wprowadzony ok. XVII wieku. Podział taki wynika z podstawowych własności substancji w danym stanie:

- **stały** - trudno zmienić objętość i kształt,
- **ciekły** - trudno zmienić objętość, a kształt łatwo,
- **gazowy** - łatwo zmienić objętość i kształt, ciało zajmuje całą dostępną mu przestrzeń.

Obecnie lista ta jest rozszerzona o kilka dodatkowych stanów:

- **plazma** (zjonizowany gaz),
- **kondensat Bosego-Einsteina**,
- **kondensat fermionów**.

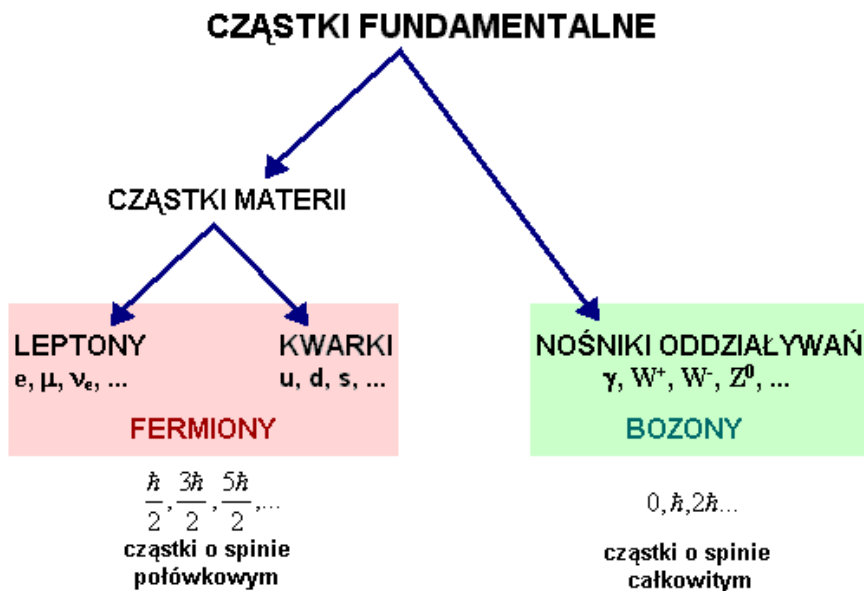
Uzyskanie kondensatu fermionów było trudniejsze i przez wiele lat wydawało się niemożliwe. Jak obejść zakaz Pauliego i otrzymać zbiór identycznych fermionów w kondensacie? Okazało się, że fermiony mogą się łączyć w pary, tak jak elektrony łączą się w pary Coopera w nadprzewodnikach. Zbadanie kondensatu fermionów być może pozwoli na lepsze zrozumienie zjawiska nadprzewodnictwa i może doprowadzić do opracowania nadprzewodników działających w temperaturze pokojowej.



## Klasyfikacja cząstek

Fizycy odkryli kilkaset cząstek elementarnych. Dzielą się one na kilka grup, w zależności od:

- masy
- wartości ładunku elektrycznego, liczby barionowej, liczby leptonowej, izospinu, hipertładunku, koloru, dziwności
- spinu (podział na fermiony i bozony) (momentu magnetycznego)
- rodzaju oddziaływań jakim ulegają



RYS. 2.2.1 - KLASYFIKACJA CZĄSTEK FUNDAMENTALNYCH

ze względu na rodzaj oddziaływań

1. Foton – podlegający oddziaływaniu e-m i grawitacyjnemu
2. Leptony – podlegające oddziaływaniom: grawitacyjnym, e-m (jeżeli posiadają ładunek) oraz słabym
  - a. Rodzina elektronowa (elektron i neutrino elektronowe)
  - b. Rodzina mionowa (mion, neutrino mionowe)
  - c. Rodzina ciężkiego leptonu (taon, neutrino taonowe)
3. Hadrony - podlegające oddziaływaniom: grawitacyjnym, e-m (jeżeli posiadają ładunek), słabym oraz silnym
  - a. Mezony – spin równy zeru lub liczbie całkowitej
  - b. Bariony – spin połówkowy (proton, neutron, kwarki)

Trwałymi cząstkami są protony, elektrony, neutrino i fotony.

Obecnie za niepodzielne (bez struktury wewnętrznej) uważa się kwarki, leptony i bozony przenoszące oddziaływania.

Hadrony są podzielne, np. bariony złożone są z 3 kwarków, a mezony – z kwarka i antykwarka.

## Kondensat Bosego-Einsteina

Choć kondensat Bosego-Einsteina znany jest nauce już od lat dwudziestych ubiegłego wieku, to dopiero niedawno udało się go otrzymać w temperaturze pokojowej, używając do tego lasera. Dzięki użyciu lasera, stworzono kondensat złożony z polarytonów ekscytonowych, czyli kwazicząstek będących połączeniem fotonu i układu elektron-dziura.

<https://whatnext.pl/kondensat-bosego-einsteina-pomoze-rozwoju-elektroniki/>

## Nowy rodzaj kondensatu Bosego-Einsteina

Na fińskim Aalto University uzyskano kondensat Bosego-Einsteina stworzony **ze światła i plazmonów powierzchniowych**. Ich wzajemne oddziaływanie tworzy polarytony plazmonów powierzchniowych.

W stworzonym kondensacie Bosego-Einsteina ze światła i elektronów poruszają się one na powierzchni złotych nanopręcików. W przeciwieństwie do większości wcześniej uzyskiwanych kondensatów ten z Aalto, jako że złożony jest głównie ze światła, pojawia się w temperaturze pokojowej, nie trzeba całości schładzać do temperatur bliskich zera absolutnego.

Światło laserowe i kondensacja Bosego-Einsteina dają jasne promienie, jednak koherencje światła mają różne właściwości.

Kondensat pozwala na uzyskiwanie niezwykle krótkich impulsów światła, które mogą zostać wykorzystane do szybkiego przekazywania i przetwarzania informacji.

### ☐ Nadprzewodzący układ fermionów

Grupa fizyków z Massachusetts Institute of Technology pod kierunkiem laureata nagrody Nobla z 2001 roku Wolfganga Ketterlego doniosła o uzyskaniu układu fermionów w stanie nadciekłości. Atomy litu 6 w bardzo niskiej temperaturze (milionowe części Kelwina) umieszczono w polu magnetycznym. Najpierw powstaje kondensat fermionów otrzymany wcześniej przez grupę Jin. Zwiększając to pole uzyskuje się nadciekły stan typu BCS.

### ☐ Zupa kwarkowo – gluonowa

W 2005 roku w laboratorium RHIC w Brookhaven w USA otrzymano po raz pierwszy plazmę kwarkowo - gluonową. Okazało się, że jest to substancja niemal idealnie płynna i porusza się prawie bez lepkości. Jądro atomu złota składa się ze 197 protonów i neutronów. Kiedy takie dwa rozpędzone i masywne jadra wpadną na siebie, protony i neutrony dosłownie zlewają się ze sobą i rozpadają na kwarki. Powstaje kropelka substancji niezwykle gęstej, rozpalonej do dwóch bilionów stopni i rozmiaru bilionowej części milimetra.

Taka materia istniała na początku Wszechświata w pierwszych chwilach po Wielkim Wybuchu.

## Plazma

**Plazma** (zwana często zjonizowanym gazem, ale zobacz też: pseudo-plazma) to gazowa substancja, zawierająca wolne, naładowane elektrycznie cząsteczki, takie jak elektrony, protony i inne jony, która bardzo silnie oddziałuje z polem elektromagnetycznym.

Lampa plazmowa ilustrująca niektóre bardziej złożone zjawiska plazmowe, włączając w to zwłóknianie plazmy. Kolory spowodowane są relaksacją elektronów w stanach wzbudzonych do stanów o niskiej energii, po tym, jak zrekombinują z jonami. Procesy te powodują emisję światła charakterystycznego dla wzbudzonego gazu.



## Plazma wytworzona sztucznie

Powszechne formy plazmy obejmują

- Znajdującą się w wyświetlaczach plazmowych, włącznie z TV
- Wewnątrz lamp fluorescencyjnych (nisko-energetyczna błyskawica), lampa neonowa
- Płomień wylotowy rakiety
- Obszar przed osłoną termiczną pojazdu kosmicznego podczas jego powrotu do atmosfery ziemskiej
- Badania nad energią termojądrową
- Łuk elektryczny w lampie łukowej, spawarce lub latarce plazmowej
- Kula plazmowa (nazywana też sferą plazmową lub globusem plazmowym)
- Plazma używana do skrobienia warstw dielektryka przy produkcji obwodów scalonych

## Ziemska plazma

Powszechne formy plazmy obejmują

- Płomienie ognia
- Błyskawica
- Piorun kulisty
- Ogień Św. Elma
- Krasnoludki, elfy i fontanny
- Jonosfera
- zorze polarne

## Kosmiczna plazma

Powszechne formy plazmy obejmują

- Słońce i inne gwiazdy (które są plazmą ogrzewaną fuzją jądrową)
- Wiatr słoneczny
- Ośrodek międzyplanetarny (przestrzeń pomiędzy planetami)
- Ośrodek międzygwiazdowy (przestrzeń pomiędzy układami gwiazdowymi)
- Ośrodek międzygalaktyczny (przestrzeń pomiędzy galaktykami)
- Tuba strumieniowa pomiędzy Io a Jowiszem
- Dyski akrecyjne
- Mgławice



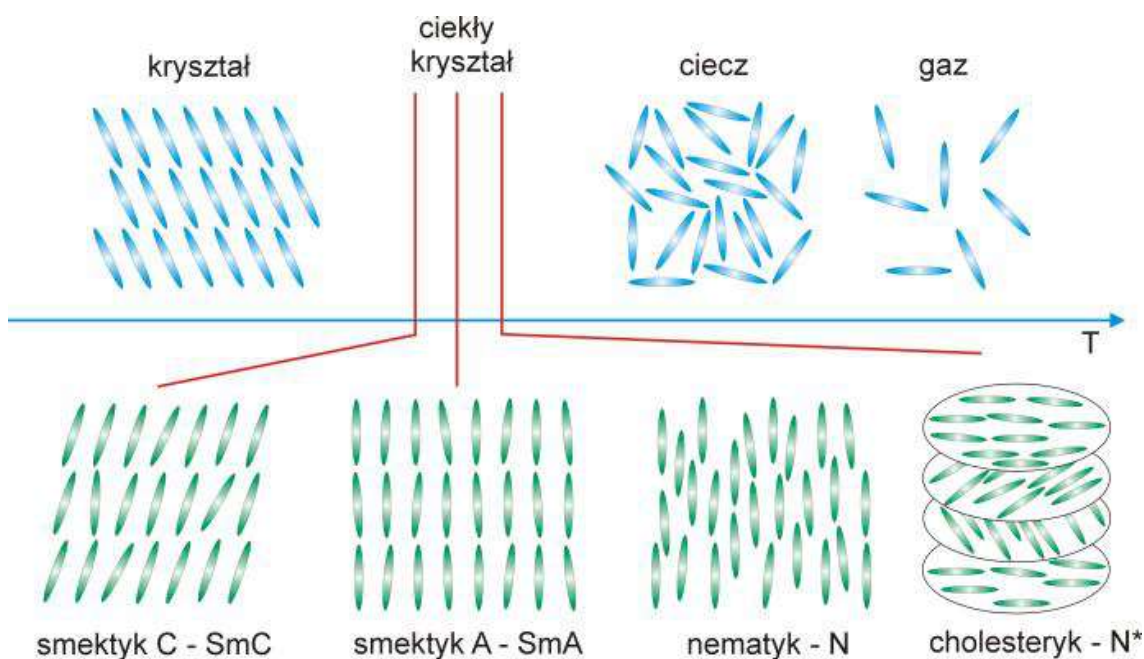
<http://plazmowy-wszechswiat.shoutwiki.com/wiki/Plazma>

Przyległy do pola prąd biegunowy Jowisz-Io, lub "tuby strumieniowe", tworzące nie wulkany, ale ogromne, długotrwałe wyładowania elektryczne, które rzeźbi powierzchnię Io i odkładającą ją w postaci jonów i gruzu w jego torusie plazmowym. Prawa autorskie: Nasa/Cassini Imaging Team

## Parametry plazmy

	Plazma ziemska	Plazma kosmiczna
<b>Rozmiar</b> w metrach	$10^{-6}$ m (w laboratorium) do $10^2$ m (piorun) (~8 rzędów wielkości)	$10^{-6}$ m (osłona pojazdu kosmicznego) do $10^{25}$ m (mgławica międzygalaktyczna)
<b>Czas życia</b> w sekundach	$10^{-12}$ s (plazma stworzona laserem) do $10^7$ s (światła fluorescencji)	$10^1$ s (rozbłyski słoneczne) do $10^{17}$ s (plazma międzygalaktyczna) ( $10^{17}$ s = 3 170 979 198 lat)
<b>Gęstość</b> w cząstkach na metr sześcienny	$10^7$ m <sup>-3</sup> do $10^{32}$ m <sup>-3</sup> (plazma bezwładna)	$10^0$ (i.e., 1) m <sup>-3</sup> (ośrodek międzygalaktyczny) do $10^{30}$ m <sup>-3</sup> (rdzeń gwiazdy)
<b>Temperatura</b> w kelwinach	~0 K (plazma krystaliczna, nie neutralna) do $10^8$ K (magnetyczna plazma fuzyjna)	$10^2$ K (zorza) do $10^7$ K (rdzeń słoneczny)
<b>Pola magnetyczne</b> w teslach	$10^{-4}$ T (w laboratorium) do $10^3$ T (plazma zasilana impulsowo)	$10^{-12}$ T (ośrodek międzygalaktyczny) do $10^{11}$ T (niemal gwiazda neutronowa)

## Ciekłe kryształy



**Ciekły kryształ** – to nazwa fazy pośredniej między ciekłym i krystalicznym stanem skupienia materii, którą charakteryzuje zdolność do płynięcia, charakterystyczna dla cieczy i jednocześnie istotne uporządkowanie tworzących ją cząsteczek, podobnie jak to ma miejsce w kryształach.

**Rozróżniamy 4 fazy ciekłych kryształów:**

**Faza smektyczna** – cząsteczki ułożone są w tym samym kierunku, a dodatkowo ułożone są warstwami jedna nad drugą.

**Faza nematyczna** – cząsteczki nie zajmują określonych pozycji, ale mają tendencję do ustawiania się w tym samym kierunku.

**Faza cholesteryczna** – cząsteczki ułożone są podobnie jak w fazie nematycznej, lecz każda następna warstwa skręcona jest o pewien kąt (struktura śrubowa)

**Faza kolumnowa** – cząsteczki ułożone w tym samym kierunku, a dodatkowo układają się w kolumny

Zmiana orientacji cząsteczek substancji ciekłokrystalicznych następuje pod wpływem pola elektrycznego

### **Ciekłe kryształy - właściwości**

Ciekłe kryształy wykazują anizotropowość następujących parametrów:

- ✓ stała dielektryczna i diamagnetyczna
- ✓ przewodnictwa ( $10^{-10}$  Ohm./cm, przewodnictwo typu jonowego, ze wzrostem temp anizotropia maleje, duży prąd powoduje rozkład kryształu (monitory LCD-niekorzystne), mały prąd powoduje porządkowanie direktora)
- ✓ optyczna (współczynnik załamania)
- ✓ podatność elektryczna i magnetyczna
- ✓ lepkość (problem opisu współczynniki Mięśowicza przepływy równoległe do direktora, prostopadłe do direktora, ale równoległe do ścianek, równoległe do direktora, ale prostopadłe do ścianek, bardziej złożony opis to współczynniki Lesliego)

### **Ciekłe kryształy – własności fizyczne**

- fluktuacje termiczne (lokalne zmiany gęstości ciekawe pod mikroskopem polaryzacyjnym)
- zachowanie anizotropii dielektrycznej w polu o zmiennej częstotliwości, kiedy cząstki ciekłego kryształu nie nadążają ze zmianami (-/+)
- niestabilności elektrodynamiczne (wirowe przepływy towarzyszące przewodnictwu dużego prądu)
- orientacja molekuł pod wpływem pola
- orientacja na granicy faz (stałe-kryształ)



## Ciekłe kryształy - Właściwości optyczne

- aktywność optyczna
- dichroizm liniowy i kołowy
- silne selektywne odbicie światła od struktur i tekstur aktywnych optycznie
- elektrooptyczny efekt Kerra, **100** razy silniejszy niż w nitrobenzenie
  - zmiana skoku helisy, a więc barwy światła odbitego
  - zmiana ośrodka jedno- w dwuosiowy

## Wybrane definicje z zakresu optyki falowej

Załamanie, odbicie, rozpraszanie, polaryzacja, selektywne pochłanianie (dichroizm), dwójłomność. – do samodzielnego przypomnienia

Znajomość stanu polaryzacji wiązki świetlnej ma fundamentalne znaczenie z uwagi na jego wpływ na następujące wielkości i zjawiska optyczne:

- ✓ współczynnik odbicia światła na granicy dwóch ośrodków,
- ✓ współczynnik absorpcji ośrodka,
- ✓ rozproszenie światła w ośrodku,
- ✓ współczynnik załamania materiałów anizotropowych (zaburzenia o różnych stanach polaryzacji propagują się z różnymi prędkościami i podlegają różnym opóźnieniom fazowym),
- ✓ obrót płaszczyzny polaryzacji w przypadku propagacji w tak zwanych aktywnych ośrodkach optycznych.

Selektywne pochłanianie

### **Kryształ dichroiczny**

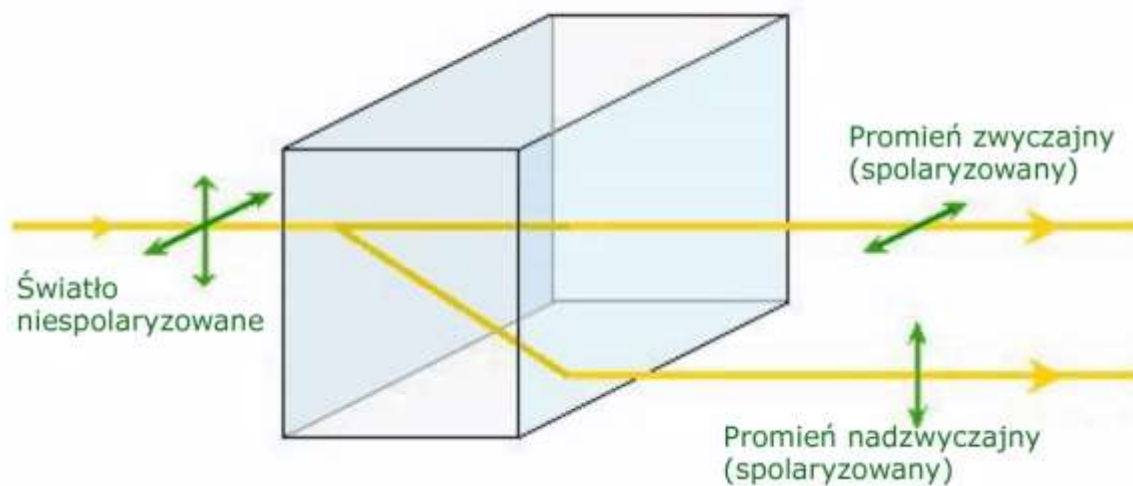
Dichroizm jest powodowany przez anizotropie struktury krystalicznej. Najlepiej znany minerał – turmalin. Składowa pola elektrycznego wiązki padającej prostopadle do osi optycznej kryształu jest silnie absorbowana.

### **Polaroidy**

Folie z tworzywa sztucznego rozciąga się, a następnie joduje (molekuły jodu „osiadają” na długich molekułach polimerów). Struktura stanowiącą odpowiednik polaryzatora rastrowego.

Dwójłomność

Przy propagacji światła w wielu typach kryształów obserwuje się na wyjściu dwie wiązki wzajemnie przesunięte względem siebie. Zjawisko to jest spowodowane tzw. dwójłomnością ośrodka. Nie należy jednak utożsamiać kryształów z ciałami anizotropowymi (**dwójłomnymi**) – ciałem anizotropowym może stać się również ośrodek izotropowy np. pod wpływem naprężeń.



Modulacja zewnętrzna

**Modulacja zewnętrzna (pośrednia)** – sterowanie parametrami ośrodka zewnętrznego, przez który przechodzi światło np. współczynnika załamania.

**Najczęściej wykorzystywane efekty fizyczne**

**Efekty absorpcyjne** – zmiana pochłaniania wywołana czynnikami zewnętrznymi:

- efekt Franza-Kiełdysza,
- QCSE (kwantowo ograniczony efekt Starka w studniach kwantowych),
- wypełnianie pasm swobodnymi elektronami (półprzewodniki).

**Efekty refrakcyjne** – zmiana współczynnika załamania wywołana czynnikami zewnętrznymi

- efekt Pockelsa,
- efekt Kerra,
- efekt akustoopotyczny.



Powyżej pewnej temperatury własności te znikają, co tłumaczy się niszczeniem struktur uporządkowanych cząsteczek w wyniku energii ruchu termicznego.

### Tekstura

Regularne lub nieregularne rozmieszczenie domen kryształów w materiałach, które są częściowo krystaliczne i częściowo amorficzne (ma ona duży wpływ na ich własności fizyczne). Swoiste tekstury występują też w ciekłych kryształach, umożliwiając rozróżnienie różnych ich typów.

- tekstura homeotropowa: oś optyczna jest równoległa do kierunku obserwacji, wskutek czego pole widzenia (w krzyżu polaryzacyjnym) jest ciemne (od cieczy izotropowej można tę sytuację odróżnić obserwacją w świetle zbieżnym)
- tekstura planarna: oś leży w płaszczyźnie powierzchni cieczy
- tekstura marmurowa: jednorodne, oddzielne obszary, w każdym z których oś może mieć inny kierunek
- tekstura nitkowata: w grubych próbkach na jasnym tle widoczne cienkie linie o nieregularnym kształcie
- tekstura węzłowa: w cienkich próbkach widoczne punktowe defekty uporządkowania
- tekstura konfokalna
- tekstura poligonalna
- tekstura wachlarzowata
- tekstura „odcisków palców”

### Od tekstury do komórki LC

- Jak przejść od struktury domenowej do uporządkowanej powierzchniowo?
- Budowa komórki LC: para cienkich płytek (z jednej strony elektrod), między którymi znajduje się ciekły kryształ.
- Zjawisko zakotwiczenia molekuł ciekłego kryształu na wewnętrznych powierzchniach płytek.
- Grzebieniowanie
- Skręcanie wzajemne płytek

Pierwsze wyświetlacze ciekłokrystaliczne zostały zdominowane przez **smektyki**. Wykorzystywano praktycznie jedynie ich cechę mętności.

Podwójne załamanie jest odpowiedzialne za ich mętność.

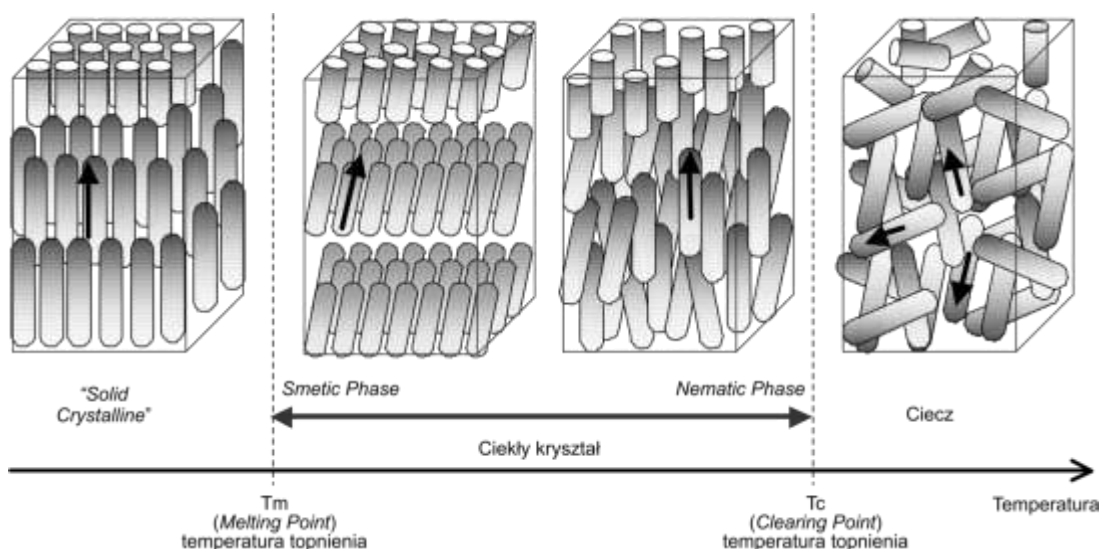
Bardzo ważnym jest, iż stan ciekłego kryształu można kontrolować przez umieszczenie go w zewnętrznym polu elektrycznym.

W świetle odbitym od **cholesteryków** obserwowane są ciekawe plamy barwne. Wykorzystano to w termografii do pomiaru rozkładu temperatur na podstawie plam na cieple pokrytym ciekłym kryształem.

Te ciekawe substancje wykorzystywane są także do budowy laserów cieczowych i detektorów promieniowania. Wykorzystuje się je także w technice światłowodowej.

## Wyświetlacze ciekłokrystaliczne

Molekuły ciekłego kryształu mają kształt silnie wydłużony w jednym kierunku („pałeczki”).



W polu elektrycznym ciekłe kryształy ulegają więc polaryzacji tworząc dipole. Dipol zaś (rozsunięte dwa ładunki przeciwnego znaku) ustawia się (zgodnie z zasadą minimum energii) równoległe do linii sił pola elektrycznego i nie jest wtedy aktywny optycznie dla kierunków prostopadłych. Po zaniku pola (po wyłączeniu napięcia) powraca naturalna skłonność do ułożenia molekuł zgodnie ze strukturą krystaliczną.

## Typy wyświetlaczy, w jakich pojawia się ciekły kryształ

### 1. Tryb transmisyjny

Pierwsza grupa wyświetlaczy polega na oświetlaniu ich z jednej strony, natomiast obrazy ogląda się po przeciwnej. Umożliwia to osiągnięcie dużej intensywności barw, co wykorzystane zostało w takich urządzeniach jak monitory komputerowe czy projektory multimedialne.

### 2. Tryb reflektyny

Wyświetlacze z drugiej grupy wyposażone są w lustro, które odbija światło dochodzące do powierzchni. Obrazy przedstawiane z pomocą tego wyświetlacza są mniej intensywne. Rozwiązanie to stosuje się w kalkulatorach, zegarkach, e-bookach, palmtopach.

### 3. Tryb trans-reflektyny

Ostatnia grupa łączy cechy wyświetlaczy transmisyjnych i reflektynnych. Mają możliwość generowania obrazu za pomocą oświetlania, jednak celem zmniejszenia zużycia energii można przełączyć je w tryb odbiciowy.