

# Wykłady z Fizyki 10



Zbigniew Osiak

**Kwanty**

## **ORCID**

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

## **OZNACZENIA**

**B** – notka biograficzna

**C** – ciekawostka

**D** – propozycja wykonania doświadczenia

**H** – informacja dotycząca historii fizyki

**I** – adres strony internetowej

**K** – komentarz

**P** – przykład

**U** – uwaga

**Zbigniew Osiak** (Tekst)

**WYKŁADY Z FIZYKI**  
Kwanty

**Małgorzata Osiak** (Ilustracje)

© Copyright 2013 by  
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.  
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji  
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej  
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3938-9

e-mail: [zbigniew.osiak@gmail.com](mailto:zbigniew.osiak@gmail.com)

“*Wykłady z Fizyki – Kwanty*” są dziesiątym z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem dziesiątego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Angielsko-polski i polsko-angielski słownik terminów fizycznych*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

- 
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
  - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

# Fizyka kwantowa I

**dr Zbigniew Osiak**

Rysunki wykonała

**Małgorzata Osiak**

- 
- Podstawowe pojęcia i prawa fizyki kwantowej 09
  - Podstawowe doświadczenia fizyki kwantowej 28
  - Równanie falowe Schrödingera 32
  - Działy fizyki kwantowej 39
  - Promieniowanie ciała doskonale czarnego 45
  - Widma 62
  - Kwantowy model atomu wodoru 73
  - Serie widmowe wodoru 92



- Kwant 10
- Fale de Broglie'a 11
- Zasada nieokreśloności Heisenberga 13
- Spin elektronu 15
- Fermiony 18
- Bozony 19
- Zakaz Pauliego 20
- Statystyka Bosego-Einsteina 21
- Statystyka Fermiego-Diraca 22
- Bariera potencjału 23
- Poziom energetyczny 24
- Energia Fermiego 25
- Gaz Fermiego 26
- Ciecz Fermiego 27

- 
- Kwant  $\Leftrightarrow$  porcja, minimalna wartość zmiany danej nieciągłej wielkości.

- Fale de Broglie'a  $\Leftrightarrow$  fale o długości ( $\lambda$ ) odwrotnie proporcjonalnej do wartości pędu ( $p$ ) cząstki.

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

- $h$  – stała Plancka
- Według hipotezy fal materii, sformułowanej przez de Broglie'a w 1923, cząstki elementarne zachowują się tak jak fale o długości określonej powyższym wzorem.

**B** Louis Victor Pierre Raymond de Broglie (1892-1987), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1929.

**P** Neutronowi (termicznemu) o energii kinetycznej ( $E_k$ )

$$E_k = \frac{3kT}{2}, \quad T = 293 \text{ K}$$

- $k$  – stała Boltzmannna
- $T$  – temperatura bezwzględna

odpowiada długość fali de Broglie'a około  $2 \cdot 10^{-10}$  m.

- Zasada nieokreśloności Heisenberga  $\Leftrightarrow$  zasada głosząca, że istnieją pary wielkości, których nie można jednocześnie zmierzyć z dowolną dokładnością. Parami tymi są m.in. położenie i pęd cząstki oraz energia i czas.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

- $h$  – stała Plancka
- $\Delta x$  – nieokreśloność pomiaru położenia cząstki
- $\Delta p_x$  – nieokreśloność pomiaru pędu cząstki
- $\Delta E$  – nieokreśloność pomiaru energii
- $\Delta t$  – nieokreśloność pomiaru czasu

**K** Zasada nieokreśloności nie ma nic wspólnego z dokładnością przyrządów pomiarowych. Jest ona związana z wpływem aktu pomiaru na przebieg zjawiska.

**H** Zasadę nieokreśloności sformułował Heisenberg w 1927.

**B** Werner Karl Heisenberg (1901-1976), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1932.

- Spin elektronu ( $\mathbf{K}_s$ )  $\Leftrightarrow$  wielkość wektorowa charakteryzująca elektron, której wartość określona jest poniżej.

$$K_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \hbar = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar, \quad s = \frac{1}{2}, \quad [K_s] = J \cdot s$$

- $\hbar = h/2\pi$    •  $h$  – stała Plancka   •  $s$  – spinowa liczba kwantowa
- W zewnętrznym polu magnetycznym spin ustawia się tak, aby jego rzut ( $K_{sB}$ ) na kierunek wektora indukcji ( $\mathbf{B}$ ) przyjmował jedną z dwóch dozwolonych wartości ( $+0,5 \hbar$ ) lub ( $-0,5 \hbar$ ).

$$K_{sB} = m_s \cdot \hbar, \quad m_s = \pm \frac{1}{2}$$

- $m_s$  – spinowa magnetyczna liczba kwantowa

- Spin nazywany jest też własnym momentem pędu.

**U** Spinowa liczba kwantowa nazywana jest potocznie spinem.

**K** Pojęcie spinu można rozszerzyć na inne cząstki elementarne oraz jądra atomowe.

$$K_s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar$$

- Spinowe liczby kwantowe ( $s$ )
- bozonów są dodatnimi liczbami całkowitymi lub zerem (0, 1, 2, 3, ...),
- fermionów są dodatnimi liczbami połówkowymi (1/2, 3/2, 5/2, ...).
- Rzut ( $K_{sB}$ ) spinu na kierunek wektora indukcji (**B**) zewnętrznego pola magnetycznego może przyjmować jedną z  $(2s+1)$  wartości.

$$K_{sB} = m_s \cdot \hbar, \quad m_s = s, (s-1), (s-2), \dots, (-s)$$



---

**H** Pojęcie spinu elektronu wprowadzili Uhlenbeck i Goudsmit w 1925.

**B** George Eugene Uhlenbeck (1900-1988), amerykański fizyk pochodzenia holenderskiego.

**B** Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), amerykański fizyk pochodzenia holenderskiego.

---

- Fermiony  $\Leftrightarrow$  cząstki elementarne mające spiny połówkowe. Fermionami są leptony, kwarki oraz bariony. Najbardziej znanym fermionem jest elektron, którego spin ma wartość  $1/2$ .

**C** Nazwa fermion pochodzi od nazwiska Fermi.

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

---

- Bozony  $\Leftrightarrow$  cząstki elementarne o spinach całkowitych. Bozonami są mezony oraz nośniki oddziaływań silnych, słabych i elektromagnetycznych. Najbardziej znanym bozonem jest foton, którego spin ma wartość równą 1.

**C** Nazwa bozon pochodzi od nazwiska Bose.

**B** Satyendra Nath Bose (1894-1974), hinduski fizyk-teoretyk.

• Zakaz Pauliego  $\Leftrightarrow$  zasada głaszająca, że w danym stanie kwantowym może znajdować się tylko jeden fermion. Z zakazu Pauliego wynikają m.in. reguły dotyczące rozmieszczenia elektronów w atomach. Na danej powłoce elektronowej, określonej główną liczbą kwantową ( $n$ ), może znajdować się nie więcej niż  $(2n^2)$  elektronów.

**H** Zasadę zakazu sformułował Pauli w 1925.

**B** Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958), szwajcarski fizyk teoretyk pochodzenia austriackiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1945.

---

- Statystyka Bosego-Einsteina  $\Leftrightarrow$  statystyka kwantowa, której podlega układ identycznych bozonów.

**H** Statystykę Bosego-Einsteina podał dla fotonów Bose w 1924, a następnie uogólnił Einstein w latach 1924-1925.

**B** Satyendra Nath Bose (1894-1974), hinduski fizyk teoretyk.

**B** Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Statystyka Fermiego-Diraca  $\Leftrightarrow$  statystyka kwantowa, której podlega układ identycznych fermionów.

**H** Statystykę Fermiego-Diraca wprowadzili Fermi i Dirac w 1926.

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

**B** Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), angielski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933.

- 
- Bariera potencjału  $\Leftrightarrow$  obszar, w którym energia potencjalna cząstki ma maksimum. Według fizyki klasycznej cząstka może przejść przez barierę potencjału tylko wtedy, gdy jej energia całkowita jest większa od tego maksimum.

- Poziom energetyczny  $\Leftrightarrow$  energia danego układu kwantowego, która może zmieniać się tylko w nieciągły sposób. Najniższy poziom energetyczny nazywany jest stanem podstawowym, a wyższe poziomy energetyczne – stanami wzbudzonymi.



- Energia Fermiego ( $E_F$ )  $\Leftrightarrow$  maksymalna energia jaką mogą mieć elektrony przewodnictwa w metalu w temperaturze zera bezwzględnego.

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

- Gaz Fermiego  $\Leftrightarrow$  gaz utworzony z nieoddziałujących ze sobą fermionów, odpowiednik gazu doskonałego w fizyce klasycznej. Cząstki kwantowego gazu Fermiego podlegają statystyce Fermiego-Diraca.

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

• Ciecz Fermiego  $\Leftrightarrow$  ciecz o odpowiednio niskiej temperaturze, utworzona z fermionów.

**P** Ciekły hel w niskich temperaturach (ale wyższych od tej, w której przechodzi w stan nadciekły) jest cieczą Fermiego. Odnotujmy, że atom helu jest fermionem, ponieważ składa się z nieparzystej liczby fermionów (dwóch protonów, jednego neutronu i dwóch elektronów).

**H** Fenomenologiczną teorię cieczy Fermiego opracował Landau w 1956.

**B** Enrico Fermi (1901-1954), włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938.

**B** Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1962.

- Doświadczenie Davissona-Germera 29
- Doświadczenie Sterna-Gerlacha 30

- Doświadczenie Davissona-Germera  $\Leftrightarrow$  eksperyment przeprowadzony przez Davissona i Germera w 1927, potwierdzający występowanie dyfrakcji i interferencji fal de Broglie'a elektronów. Elektrony rozproszone na równoległych względem siebie płaszczyznach sieciowych monokryształu niklu spełniały prawo Braggów.

**B** Clinton Joseph Davisson (1881-1958), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1937.

**B** Lester Halbert Germer (1896-1971), amerykański fizyk.

- Doświadczenie Sterna-Gerlacha  $\Leftrightarrow$  eksperyment przeprowadzony przez Sterna i Gerlacha w 1922. Wykazali oni, że wiązka obojętnych elektrycznie atomów srebra w niejednorodnym polu magnetycznym ulega rozszczepieniu na dwie wiązki składowe poruszające się symetrycznie względem toru wiązki przy braku pola magnetycznego.

**B** Otto Stern (1888-1969), niemiecko-amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1943.

**B** Walter Gerlach (1889-1979), niemiecki fizyk.

**K** Moment magnetyczny atomu srebra jest równy momentowi magnetycznemu elektronu z zewnętrznej powłoki.

W niejednorodnym polu magnetycznym atom o momencie magnetycznym równoległym do pola magnetycznego jest wciągany w obszar silniejszego pola, a atom o momencie magnetycznym antyrównoległym jest wciągany w obszar słabszego pola. Moment magnetyczny elektronu jest sumą momentów orbitalnego i spinowego. W zewnętrznym polu magnetycznym orbitalny moment magnetyczny przyjmuje nieparzystą liczbę ustawień, a spinowy – dwa ustawienia. Przyczyną rozszczepienia na dwie wiązki może być spinowy moment magnetyczny.

- Równanie falowe Schrödingera 33
- Funkcja falowa 35
- Statystyczna interpretacja funkcji falowej 36
- Kot Schrödingera 37



- Równanie falowe Schrödingera  $\Leftrightarrow$  podstawowe równanie nierelatywistycznej mechaniki kwantowej.

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi + U\Psi = i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t}$$

- $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$
- $i = \sqrt{-1}$
- $\Delta$  – operator Laplace’a
- $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$  – funkcja falowa
- $U = U(x, y, z, t)$  – energia potencjalna
- $m$  – masa cząstki
- $\hbar$  – zredukowana stała Plancka

**U** Równania Schrödingera nie wyprowadza się, lecz zakłada. Jedynym kryterium poprawności równania falowego jest zgodność z doświadczeniem przewidywań opartych na tym równaniu.

**H** Równanie falowe podał Schrödinger w 1926.

**B** Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961), austriacki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933.

- 
- Funkcja falowa ( $\Psi$ )  $\Leftrightarrow$  funkcja będąca rozwiązaniem równania falowego Schrödingera, opisująca stany kwantowe cząstki.

- Statystyczna interpretacja funkcji falowej  $\Leftrightarrow$  interpretacja funkcji falowej podana przez Borna w 1926. Sens fizyczny ma kwadrat modułu funkcji falowej  $|\Psi|^2$ .

$$|\Psi(x, y, z, t)|^2 = \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

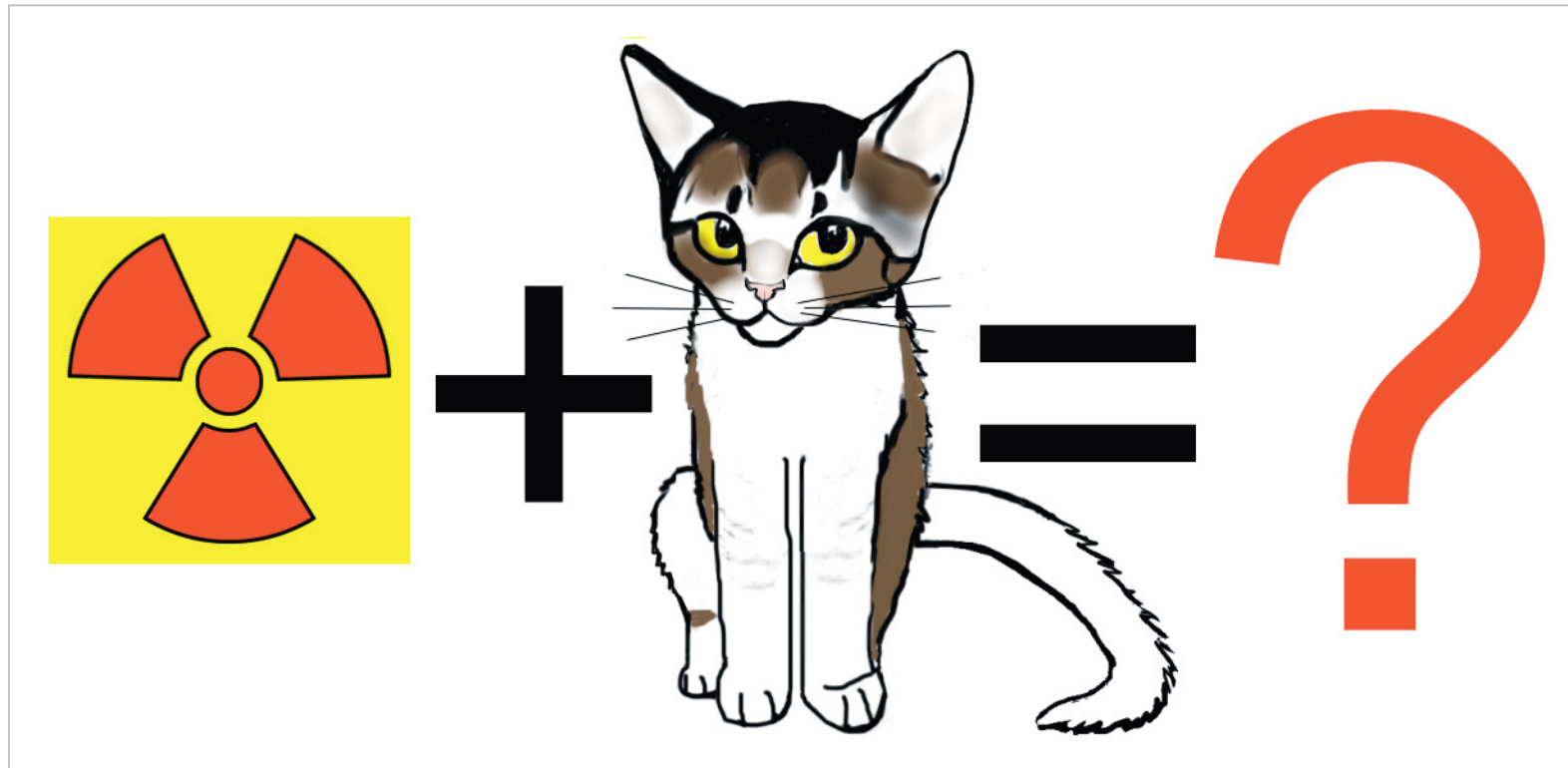
- $\Delta P$  – prawdopodobieństwo znalezienia się cząstki w chwili (t) w objętości ( $\Delta V$ ) zawierającej punkt (x, y, z)

**B** Max Born (1882-1970), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1954.

•Kot Schrödingera  $\Leftrightarrow$  eksperyment myślowy zaproponowany przez Schrödingera w 1935 w celu polemiki z poglądem Bohra, że dany stan kwantowy może być zrealizowany z przypisanym mu prawdopodobieństwem dopiero wskutek aktu pomiaru (obserwacji). Eksperyment Schrödingera polega na tym, aby w szczelnie zamkniętym nieprzezroczystym pudle umieścić żywego kota oraz urządzenie uwalniające trujący gaz po rozpadzie radioaktywnego atomu. Według Bohra kot powinien być w takim układzie jednocześnie częściowo żywy i częściowo nieżywy, dopóki obserwator nie stwierdzi, jak jest naprawdę.

**B** Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (1887-1961), austriacki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933.

**B** Niels Henrik David Bohr (1885-1962), duński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1922.



•Kot Schrödingera

- Mechanika kwantowa 40
- Relatywistyczna mechanika kwantowa 41
- Elektrodynamika kwantowa 43
- Grawitacja kwantowa 44

- Mechanika kwantowa  $\Leftrightarrow$  teoria opisująca zjawiska przebiegające w skali mikroświata. Podstawowym równaniem nierelatywistycznej mechaniki kwantowej jest równanie falowe Schrödingera, a podstawowym pojęciem – funkcja falowa. W mechanice kwantowej nie ma pojęcia toru cząstki. Zamiast dokładnego zlokalizowania cząstki, możemy jedynie podać prawdopodobieństwo tego, że znajduje się ona w danym miejscu. Klasyczne pojęcie cząstki w mechanice kwantowej traci sens.



- Relatywistyczna mechanika kwantowa  $\Leftrightarrow$  teoria będąca połączeniem mechaniki kwantowej i szczególnej teorii względności. Pierwsze sformułowanie relatywistycznej mechaniki kwantowej podał Dirac w 1928.
- Z relatywistycznie współzmienniczego równania falowego Diraca wynika, że
  - elektron ma własny moment pędu – spin,
  - elektron ma własny moment magnetyczny – spinowy moment magnetyczny,
  - istnieje antycząstka elektronu, czyli cząstka o masie równej masie elektronu, lecz o ładunku elektrycznym i momencie magnetycznym różniącymi się tylko znakiem od odpowiednich wartości dla elektronu,
  - występuje możliwość kreacji elektronu i antyelektronu z fotonu o odpowiedniej energii,
  - występuje możliwość anihilacji elektronu i antyelektronu.

**B** Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), angielski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1933.

- Elektrodynamika kwantowa  $\Leftrightarrow$  kwantowa teoria oddziaływań elektromagnetycznych.

**H** Elektrodynamikę kwantową sformułowali niezależnie Feynman, Schwinger i Tomonaga. Zgodność ich teorii wykazał Dyson.

**B** Richard Phillips Feynman (1918-1988), amerykański fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1965.

**B** Julian Seymour Schwinger (1918-1994), amerykański fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1965.

**B** Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979), japoński fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1965.

**B** Freeman John Dyson (ur. 1923), brytyjsko-amerykański fizyk teoretyk.

- 
- Grawitacja kwantowa  $\Leftrightarrow$  teoria usiłująca opisać pole grawitacyjne w ramach mechaniki kwantowej.

- Spektralna zdolność absorpcyjna 46
- Spektralna zdolność emisyjna 47
- Całkowita zdolność emisyjna 48
- Ciało doskonale czarne 49
- Ciało doskonale białe 50
- Ciało doskonale przezroczyste 51
- Promieniowanie cieplne 52
- Promieniowanie ciała doskonale czarnego 53
- Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego 54
- Prawo promieniowania Plancka 55
- Prawo Kirchhoffa 57
- Prawo przesunięć Wiena 58
- Temperatura barwowa 60
- Prawo Stefana-Boltzmannna 61

- Spektralna zdolność absorpcyjna ( $a_\nu$ )  $\Leftrightarrow$  bezwymiarowa wielkość skalarna będąca stosunkiem energii absorbowanej ( $E_\nu$ ) przez dane ciało do energii ( $E_{ov}$ ) padającej na to ciało. Przy czym powierzchnia ciała oświetlanego światłem o częstotliwościach z przedziału od ( $\nu$ ) do ( $\nu + \Delta\nu$ ) oraz czas oświetlenia powinny być ustalone.

$$a_\nu = \frac{E_\nu}{E_{ov}}$$

- Spektralna zdolność emisyjna ( $r_\nu$ )  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna mierzona w watach na metr kwadratowy i na herc, będąca stosunkiem natężenia światła ( $\Delta I_\nu$ ) tuż przy powierzchni emitera do wartości przedziału częstotliwości ( $\Delta\nu$ ) emitowanych fal. Przy czym pomiar natężenia dotyczy światła o częstotliwościach z przedziału od ( $\nu$ ) do ( $\nu + \Delta\nu$ ).

$$r_\nu = \frac{\Delta I_\nu}{\Delta\nu}, \quad [r_\nu] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{Hz}}$$

- Całkowita zdolność emisyjna (I)  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna mierzona w watach na metr kwadratowy [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], będąca stosunkiem energii (E) wysłanej przez źródło światła w czasie (t) z powierzchni (S) do czasu emisji i wartości pola (S) tej powierzchni.

$$I = \frac{E}{S \cdot t}, \quad [I] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$



- Ciało doskonale czarne  $\Leftrightarrow$  ciało całkowicie pochłaniające padające nań fale elektromagnetyczne. Modelem ciała doskonale czarnego jest powierzchnia małego otworu w dużej zamkniętej wnęce o nieprzezroczystych ściankach. Spektralna zdolność absorpcyjna ciała doskonale czarnego jest równa jedności.

$$a_v^* = 1$$

**H** Pojęcie ciała doskonale czarnego wprowadził Kirchhoff w 1862.

**B** Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), niemiecki fizyk.



- Przykład ciała doskonale czarnego

- 
- Ciało doskonale białe  $\Leftrightarrow$  hipotetyczne ciało całkowicie odbijające padające nań fale elektromagnetyczne.

- 
- Ciało doskonale przezroczyste  $\Leftrightarrow$  hipotetyczne ciało całkowicie przepuszczające padające na nie fale elektromagnetyczne.

- 
- Promieniowanie cieplne  $\Leftrightarrow$  energia emitowana w postaci fal elektromagnetycznych przez ciało o temperaturze większej od temperatury zera bezwzględnego.

- Promieniowanie ciała doskonale czarnego  $\Leftrightarrow$  promieniowanie cieplne emitowane przez ciało doskonale czarne. Spektralna zdolność emisyjna ciała doskonale czarnego w danej temperaturze bezwzględnej jest większa niż innych ciał.

- Widmo promieniowania ciała doskonale czarnego  $\Leftrightarrow$  wykres zależności spektralnej zdolności emisyjnej ( $E_\lambda$ ), przy ustalonej temperaturze ( $T$ ), od długości fali ( $\lambda$ ) promieniowania ciała doskonale czarnego.

- Prawo promieniowania Plancka  $\Leftrightarrow$  równanie opisujące kształt widma promieniowania cieplnego emitowanego przez ciało doskonale czarne. Podaje ono zależność spektralnej zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego od temperatury bezwzględnej (T) i od częstotliwości ( $\nu$ ).

$$r_{\nu}^* = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

- h – stała Plancka
- k – stała Boltzmannna

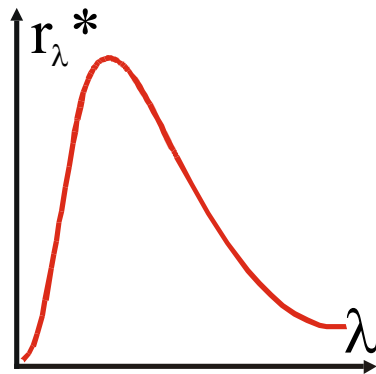
Wzór ten zapisywany jest też w innej postaci.

$$r_{\lambda}^* = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

- $\lambda$  – długość fali

**H** Prawo promieniowania ciała doskonale czarnego sformułował Planck w 1900 i opublikował w 1901. Aby poprawnie opisać kształt widma, Planck założył, że emisja energii przez atomy i cząsteczki odbywa się w postaci kwantów o wartości  $h\nu$ . Hipoteza ta dała początek fizyce kwantowej.

**B** Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1918.



- Wykres zależności spektralnej zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego od długości fali ( $\lambda$ ) emitowanego promieniowania



- Prawo Kirchhoffa  $\Leftrightarrow$  prawo stanowiące, że stosunek spektralnej zdolności emisyjnej ( $r_v$ ) do spektralnej zdolności absorpcyjnej ( $a_v$ ) jest dla wszystkich ciał równy spektralnej zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego ( $r_v^*$ ).

$$\frac{r_v}{a_v} = r_v^*$$

**H** Prawo to sformułował Kirchhoff w 1859.

**B** Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), niemiecki fizyk.

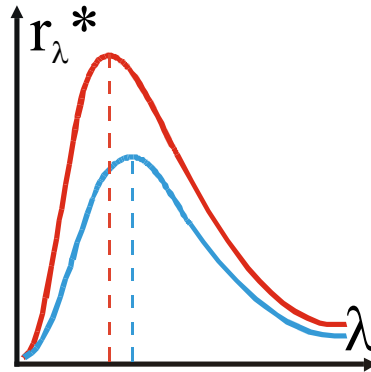
- Prawo przesunięć Wiena  $\Leftrightarrow$  prawo głoszące, że długość fali ( $\lambda_{\max}$ ), której odpowiada maksimum spektralnej zdolności emisyjnej w widmie promieniowania cieplnego, jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury bezwzględnej (T) ciała doskonale czarnego.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

- b – stała Wiena

**H** Prawo to sformułował Wien w 1893.

**B** Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1911.



- Wykres zależności spektralnej zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego od długości fali ( $\lambda$ ) emitowanego promieniowania; kolorem czerwonym zaznaczono wykres odpowiadający ciału o wyższej temperaturze.

- 
- Temperatura barwowa  $\Leftrightarrow$  temperatura ciała doskonale czarnego emitującego promieniowanie o widmie podobnym do widma danego źródła światła.

- Prawo Stefana-Boltzmannna  $\Leftrightarrow$  prawo stwierdzające, że całkowita zdolność emisyjna ( $R^*$ ) ciała doskonale czarnego, emitującego promieniowanie cieplne, jest wprost proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej ( $T$ ) emitera.

$$R^* = \sigma T^4$$

- $\sigma$  – stała Stefana-Boltzmannna

**H** Prawo to odkrył doświadczalnie Stefan w 1879, a uzasadnił teoretycznie Boltzmann w 1894.

**B** Josef Stefan (1835-1893), austriacki fizyk.

**B** Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), austriacki fizyk teoretyk.

- Widmo 63
- Widmo emisyjne 64
- Widmo absorpcyjne 65
- Linia widmowa 66
- Szerokość połówkowa linii widmowej 67
- Linie Fraunhofera 68
- Widmo liniowe 69
- Widmo pasmowe 70
- Widmo ciągłe 71
- Widmo atomowe 72

- 
- Widmo  $\Leftrightarrow$  obraz niemonochromatycznego promieniowania elektromagnetycznego rozszczepionego na składowe wiązki monochromatyczne.

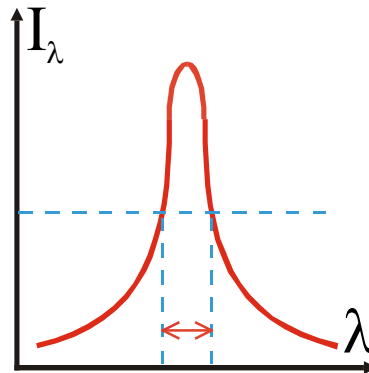
- 
- Widmo emisyjne  $\Leftrightarrow$  widmo światła emitowanego przez atomy lub cząsteczki.



- Widmo absorpcyjne  $\Leftrightarrow$  widmo w postaci ciemnych linii lub pasm, pojawiające się na tle ciągłego widma światła przechodzącego przez badaną substancję. Substancja ta pochłania fotony o ściśle określonych energiach. W ten sposób w pierwotnym widmie ciągłym powstają ciemne linie lub pasma. Widmo absorpcyjne danej substancji pokrywa się z jej widmem emisyjnym.

- 
- Linia widmowa  $\Leftrightarrow$  fragment widma odpowiadający wąskiemu przedziałowi częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego. Szerokość linii widmowej zależy między innymi od efektu Dopplera. Poszerzenie linii widmowych gazów wzrasta wraz ze wzrostem temperatury.

- Szerokość połówkowa linii widmowej  $\Leftrightarrow$  szerokość wykresu przedstawiającego dla danej linii widmowej zależność natężenia światła od długości fali, zmierzona w połowie jego wysokości.



- Szerokość połówkowa linii widmowej na wykresie zależności natężenia światła ( $I_\lambda$ ) od długości fali ( $\lambda$ )

- Linie Fraunhofera  $\Leftrightarrow$  widmo absorpcyjne pierwiastków (w stanie gazowym) znajdujących się w górnych warstwach Słońca.

**H** Linie te odkrył Fraunhofer w 1814.

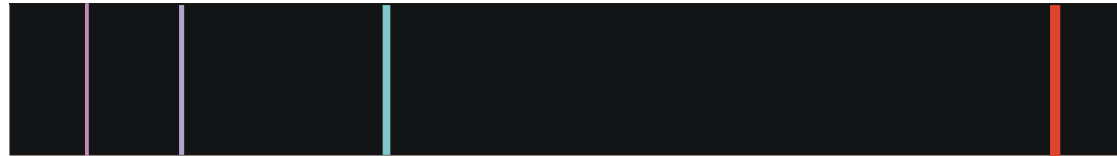
**B** Joseph von Fraunhofer (1787-1826), niemiecki astronom i fizyk.

- 
- Widmo liniowe  $\Leftrightarrow$  widmo składające się z oddzielnych wąskich linii.

- 
- Widmo pasmowe  $\Leftrightarrow$  widmo składające się z oddzielnych pasm.

- 
- Widmo ciągłe  $\Leftrightarrow$  widmo składające się z linii widmowych rozmieszczonych w sposób ciągły.

- Widmo atomowe  $\Leftrightarrow$  widmo światła emitowanego przez atomy powracające ze stanów wzbudzonych do stanów podstawowych. Widma atomowe rozrzedzonych gazów jednoatomowych są widmami liniowymi.



- Widmo wodoru atomowego w zakresie widzialnym



- Model atomu wodoru Bohra 74
- Zasada kombinacyjna Ritza 77
- Reguły wyboru 78
- Spinowy moment magnetyczny elektronu 79
- Orbitalny moment pędu 81
- Orbitalny moment magnetyczny elektronu 82
- Liczby kwantowe elektronu 85
- Główna liczba kwantowa 86
- Orbitalna liczba kwantowa 87
- Spinowa liczba kwantowa 88
- Magnetyczna liczba kwantowa 89
- Spinowa magnetyczna liczba kwantowa 90
- Energia jonizacji 91

• Model atomu wodoru Bohra  $\Leftrightarrow$  model atomu wodoru, w którym ujemny elektron krąży wokół dodatniego jądra (protonu). Formułując ten model, Bohr przyjął poniższe postulaty:

**I** Atom wodoru może znajdować się jedynie w niektórych ściśle określonych stanach kwantowych, zwanych stanami stacjonarnymi, o całkowitej energii  $E_1, E_2, E_3, \dots$ . Znajdując się w stanie stacjonarnym, atom nie emituje fal elektromagnetycznych.

**II** Stany stacjonarne wyznaczone są przez następujący warunek kwantowy: orbitalny moment pędu elektronu jest całkowitą wielokrotnością zredukowanej stałej Plancka ( $\hbar$ ).

$$m v_n r_n = n \hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- $m$  – masa elektronu
- $n$  – główna liczba kwantowa
- $v_n$  – wartość prędkości elektronu na  $n$ -tej stacjonarnej orbicie kołowej o promieniu  $r_n$

**III** Przejście atomu z początkowego stanu stacjonarnego o energii ( $E_n$ ) do końcowego stanu stacjonarnego o mniejszej energii ( $E_m$ ) powoduje emisję monochromatycznego promieniowania elektromagnetycznego w postaci fotonu o energii ( $h\nu$ ).

$$h\nu = E_n - E_m$$

- $\nu$  – częstotliwość
- $h$  – stała Plancka
- Ostatni postulat nazywany jest warunkiem częstotliwości Bohra. Podczas absorpcji fotonu przez atom warunek częstotliwości także musi być spełniony.

- Z przyjętych postulatów wynikają między innymi wyrażenia na promień ( $r_n$ ) n-tej dozwolonej orbity stacjonarnej oraz energię ( $E_n$ ) n-tego dozwolonego stanu stacjonarnego.

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{m e^2} \cdot n^2 = r_1 \cdot n^2 = (0,529 \cdot 10^{10} \cdot n^2) \cdot \text{m}$$
$$E_n = -\frac{m e^4}{8 \epsilon_0 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \cdot \text{eV}$$

- $e$  – elementarny ładunek elektryczny
  - $\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni
  - Teoria Bohra umożliwia interpretację wzorów Balmera i Rydberga.
- H** Model atomu wodoru podał Bohr w 1913.
- B** Niels Henrik David Bohr (1885-1962), duński fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1922.

- Zasada kombinacyjna Ritza  $\Leftrightarrow$  prawo, odkryte przez Ritza w 1908, głoszące, że częstotliwość (liczba falowa) każdej linii spektralnej jest równa różnicy lub sumie częstotliwości dwóch innych linii widmowych danego pierwiastka.

**B** Walter Ritz (1878-1909), szwajcarski fizyk teoretyk i matematyk.

- Reguły wyboru  $\Leftrightarrow$  reguły określające wartości liczb kwantowych stanów, między którymi możliwe są przejścia kwantowe.

**P** Orbitalna liczba kwantowa ( $l$ ) oraz magnetyczna liczba kwantowa ( $m_l$ ) zmieniają się przy przejściach kwantowych o jeden lub pozostają niezmiennione.

$$\Delta l = \pm 1, 0$$

$$\Delta m_l = \pm 1, 0$$

**H** Reguły te podał Rubinowicz w 1918.

**B** Wojciech Rubinowicz (1889-1974), polski fizyk teoretyk.

- Spinowy moment magnetyczny elektronu ( $\mathbf{p}_{ms}$ )  $\Leftrightarrow$  moment magnetyczny związany ze spinem elektronu ( $\mathbf{K}_s$ ).

$$\mathbf{p}_{ms} = g_s \mathbf{K}_s, \quad g_s = -\frac{e}{m_e}$$

- $g_s$  – stosunek żyromagnetyczny momentów spinowych
- $e$  – ładunek elementarny
- $m_e$  – masa elektronu

- Rzut ( $p_{msB}$ ) spinowego momentu magnetycznego elektronu na kierunek wektora indukcji ( $\mathbf{B}$ ) zewnętrznego pola magnetycznego, w którym znajduje się elektron, może przyjmować tylko wartość  $(+\mu_B)$  lub  $(-\mu_B)$ .

$$p_{msB} = \pm\mu_B = -2\mu_B m_s, \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}, \quad m_s = \pm\frac{1}{2}$$

- $\mu_B$  – magneton Bohra
- $\hbar = h/2\pi$
- $h$  – stała Plancka
- $m_s$  – spinowa magnetyczna liczba kwantowa



- 
- Orbitalny moment pędu ( $\mathbf{K}_1$ )  $\Leftrightarrow$  moment pędu elektronu poruszającego się po orbicie wokół jądra atomowego.

- Orbitalny moment magnetyczny elektronu ( $\mathbf{p}_{ml}$ )  $\Leftrightarrow$  moment magnetyczny związany z orbitalnym ruchem elektronu w atomie. Krążący po orbicie elektron można traktować jako jedno-elektronowy prąd elektryczny o natężeniu (I).

$$I = \frac{e}{T}$$

- e – ładunek elementarny
- T – okres obiegu orbity
- Wartość ( $\mathbf{p}_{ml}$ ) orbitalnego momentu magnetycznego dana jest poniższym wzorem.

$$\mathbf{p}_{ml} = IS = \frac{eS}{T}$$

- S – pole powierzchni orbity

- Wektor orbitalnego momentu magnetycznego ( $\mathbf{p}_{ml}$ ) jest antyrównoległy do wektora orbitalnego momentu pędu ( $\mathbf{K}_l$ ).

$$\mathbf{p}_{ml} = g_l \mathbf{K}_l, \quad g_l = -\frac{e}{2m_e}$$

- $g_l$  – stosunek żyromagnetyczny momentów orbitalnych
- $m_e$  – masa elektronu

Rzut ( $p_{m_lB}$ ) orbitalnego momentu magnetycznego elektronu na kierunek wektora indukcji ( $\mathbf{B}$ ) zewnętrznego pola magnetycznego, w którym znajduje się elektron, może przyjmować tylko skwantowane wartości.

$$p_{m_lB} = -\mu_B m_l, \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}, \quad m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

- $\mu_B$  – magneton Bohra
- $\hbar = h/2\pi$
- $h$  – stała Plancka
- $m_l$  – magnetyczna liczba kwantowa

- Liczby kwantowe elektronu  $\Leftrightarrow$  opisujące stan kwantowy danego elektronu w atomie.
- Główna liczba kwantowa ( $n$ ) zadaje energię elektronu.
- Orbitalna liczba kwantowa ( $l$ ) określa wartość orbitalnego momentu pędu elektronu.
- Magnetyczna liczba kwantowa ( $m_l$ ) wyróżnia kierunek orbitalnego momentu pędu elektronu.
- Spinowa liczba kwantowa ( $s$ ) określa wartość spinu elektronu.
- Spinowa magnetyczna liczba kwantowa ( $m_s$ ) wyróżnia kierunek spinu elektronu.
- Możliwe kombinacje liczb kwantowych warunkują konfiguracje elektronów w atomach znajdujących się w stanach podstawowych.

- 
- Główna liczba kwantowa ( $n$ )  $\Leftrightarrow$  dodatnia liczba całkowita, informująca, na której powłoce elektronowej znajduje się dany elektron w atomie.

- Orbitalna liczba kwantowa ( $l$ )  $\Leftrightarrow$  liczba kwantowa określająca wartość ( $K_l$ ) orbitalnego momentu pędu elektronu w atomie.

$$K_l = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar, \quad [K_l] = \text{J} \cdot \text{s}$$

- $\hbar = h/2\pi$
- $h$  – stała Plancka
- Orbitalna liczba kwantowa może przyjmować następujące wartości

$$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

- $n$  – główna liczba kwantowa
- Orbitalna liczba kwantowa nazywana jest też azymutalną lub poboczną liczbą kwantową.

- Spinowa liczba kwantowa ( $s$ )  $\Leftrightarrow$  liczba kwantowa związana z wartością ( $K_s$ ) spinu cząstki elementarnej lub jądra atomowego.

$$K_s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar$$

- $\hbar = h/2\pi$
- $h$  – stała Plancka
- Fermionom odpowiadają spinowe liczby kwantowe ( $s$ ) będące dodatnimi liczbami połówkowymi ( $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ ), a bozonom – dodatnimi liczbami całkowitymi lub zerem ( $0, 1, 2, 3, \dots$ ).

**U** Spinowa liczba kwantowa nazywana jest potocznie spinem.

**P** Elektron:  $s = 1/2$ . Proton:  $s = 1/2$ . Neutron:  $s = 1/2$ . Foton:  $s = 1$ .



- Magnetyczna liczba kwantowa ( $m_l$ )  $\Leftrightarrow$  liczba kwantowa związana z rzutem ( $K_{lB}$ ) orbitalnego momentu pędu na kierunek wektora indukcji ( $\mathbf{B}$ ) zewnętrznego pola magnetycznego.

$$K_{lB} = m_l \cdot \hbar$$

- Magnetyczna liczba kwantowa ( $m_l$ ) może przyjmować następujące wartości:

$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$$

- $l$  – orbitalna liczba kwantowa

- Spinowa magnetyczna liczba kwantowa ( $m_s$ )  $\Leftrightarrow$  liczba kwantowa związana z rzutem ( $K_{sB}$ ) spinu na kierunek wektora indukcji ( $\mathbf{B}$ ) zewnętrznego pola magnetycznego.

$$K_{sB} = m_s \cdot \hbar$$

- Spinowa magnetyczna liczba kwantowa ( $m_s$ ) może przyjmować jedną z  $(2s+1)$  wartości.

$$m_s = s, s-1, s-2, \dots, -s$$

- $s$  – spinowa liczba kwantowa

- Energia jonizacji  $\Leftrightarrow$  minimalna energia potrzebna do usunięcia elektronu z atomu lub cząsteczki.

**P** Energia jonizacji atomu wodoru znajdującego się w stanie podstawowym wynosi 13,6 eV.

- Liczba falowa 93
- Wzór Balmera 94
- Wzór Rydberga 95
- Powłoka elektronowa 96
- Orbital 97
- Serie widmowe wodoru 98
- Seria Lymana od 10,20 eV do 13,60 eV 99
- Seria Balmera od 1,89 eV do 3,40 eV 101
- Seria Paschena od 0,66 eV do 1,51 eV 104
- Seria Bracketta od 0,31 eV do 0,85 eV 106
- Seria Pfunda od 0,17 eV do 0,54 eV 108
- Seria Humphreysa od 0,10 eV do 0,38 eV 110

- Liczba falowa ( $k$ )  $\Leftrightarrow$  wielkość skalarna będąca odwrotnością długości fali ( $\lambda$ ).

$$k = \frac{1}{\lambda}, \quad [k] = \frac{1}{\text{m}}$$

- Wzór Balmera  $\Leftrightarrow$  wzór opisujący widmo atomów wodoru w zakresie widzialnym.

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, 6$$

- $\lambda$  – długość światła
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga

**H** Wzór ten podał Balmer w 1885.

**B** Johann Jakob Balmer (1825-1898), szwajcarski matematyk.

- Wzór Rydberga  $\Leftrightarrow$  wzór Balmera uogólniony przez Rydberga w 1888.

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > m, \quad m = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, \quad n = 2, 3, 4, 5, 6 \dots$$

- $\lambda$  – długość światła emitowanego przez atomowy wodór
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga

**B** Johannes Robert Rydberg (1854-1919), szwedzki fizyk.

- 
- Powłoka elektronowa  $\Leftrightarrow$  zbiór orbitali odpowiadających danej głównej liczbie kwantowej. Powłoki elektronowe są numerowane kolejno, poczynając od powłoki znajdującej się najbliżej jądra, dodatnimi liczbami całkowitymi.



- 
- Orbital  $\Leftrightarrow$  obszar przestrzeni, w którym może znajdować się dany elektron w atomie lub cząsteczce. Orbital jest uogólnieniem pojęcia orbity. Występują cztery rodzaje orbitali atomowych, oznacza się je literami s, p, d, f.

- Serie widmowe wodoru  $\Leftrightarrow$  widma liniowe odpowiadające przejściom elektronu w atomie wodoru na powłokę o głównej liczbie kwantowej ( $m$ ) z powłok o większych głównych liczbach kwantowych ( $n$ ). Każdej serii odpowiada inna ustalona wartość głównej liczby kwantowej ( $m$ ). Częstotliwości ( $\nu_{n \rightarrow m}$ ) w danej serii opisuje poniższy wzór.

$$\nu_{n \rightarrow m} = cR_{\infty} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > m$$

- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga

- Seria Lymana od 10,20 eV do 13,60 eV  $\Leftrightarrow$  seria widmowa utworzona z fotonów, z których każdy jest emitowany przez atom wodoru podczas przejścia elektronu na pierwszą powłokę z powłoki wyższej. Częstotliwości ( $\nu_{n \rightarrow 1}$ ) odpowiadające fotonom w serii Lymana dane są poniższym wzorem.

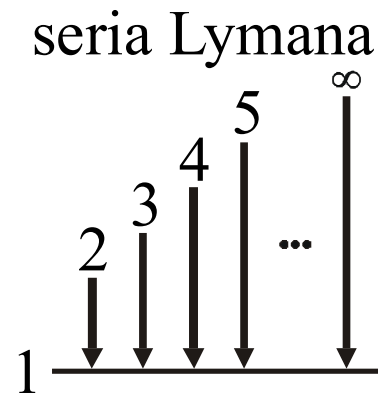
$$\nu_{n \rightarrow 1} = cR_{\infty} \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > 1$$

- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga
- $n$  – główna liczba kwantowa powłoki, z której elektron przechodzi na pierwszą powłokę

**H** Serię tę wyznaczył doświadczalnie Lyman w 1906.

**B** Theodore Lyman (1874-1954), amerykański fizyk.

- Energie fotonów w serii Lymana zawarte są w przedziale od 10,20 eV do 13,60 eV. Odpowiadają im częstotliwości fal elektromagnetycznych od  $24,68 \cdot 10^{14}$  Hz do  $32,91 \cdot 10^{14}$  Hz oraz długości fal w powietrzu od 121,57 nm do 91,15 nm. Seria Lymana leży w nadfiolecie.



- Seria Lymana; każda pionowa strzałka reprezentuje przejście elektronu na pierwszą powłokę z powłoki wyższej.

- Seria Balmera od 1,89 eV do 3,40 eV  $\Leftrightarrow$  seria widmowa utworzona z fotonów, z których każdy jest emitowany przez atom wodoru podczas przejścia elektronu na drugą powłokę z powłoki wyższej. Częstotliwości ( $\nu_{n \rightarrow 2}$ ) odpowiadające fotonom w serii Balmera dane są poniższym wzorem.

$$\nu_{n \rightarrow 2} = cR_{\infty} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > 2$$

- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga
- $n$  – główna liczba kwantowa powłoki, z której elektron przechodzi na drugą powłokę

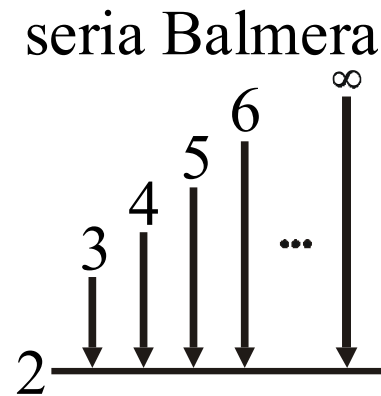
- Energije fotonów w serii Balmera zawarte są w przedziale od 1,89 eV do 3,40 eV. Odpowiadają im częstotliwości fal elektromagnetycznych od  $4,56 \cdot 10^{14}$  Hz do  $8,22 \cdot 10^{14}$  Hz oraz długości fal w powietrzu od 656,28 nm do 364,56 nm.
- Cztery linie w serii Balmera leżą w zakresie widzialnym, są nimi:

$H_{\alpha}$ :	$\lambda_{3 \rightarrow 2} = 656$ nm,	czerwona
$H_{\beta}$ :	$\lambda_{4 \rightarrow 2} = 486$ nm,	niebiesko - zielona
$H_{\gamma}$ :	$\lambda_{5 \rightarrow 2} = 434$ nm,	fioletowa
$H_{\delta}$ :	$\lambda_{6 \rightarrow 2} = 410$ nm,	fioletowa

- Pozostałe linie leżą w nadfiolecie.

**H** Serię tę opisał Balmer w 1885.

**B** Johann Jakob Balmer (1825-1898), szwajcarski matematyk.



- Seria Balmera; każda pionowa strzałka reprezentuje przejście elektronu na drugą powłokę z powłoki wyższej.



- Widmo wodoru odpowiadające serii Balmera

- Seria Paschena od 0,66 eV do 1,51 eV  $\Leftrightarrow$  seria widmowa utworzona z fotonów, z których każdy jest emitowany przez atom wodoru podczas przejścia elektronu na trzecią powłokę z powłoki wyższej. Częstotliwości ( $\nu_{n \rightarrow 3}$ ) odpowiadające fotonom w serii Paschena dane są poniższym wzorem.

$$\nu_{n \rightarrow 3} = cR_{\infty} \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > 3$$

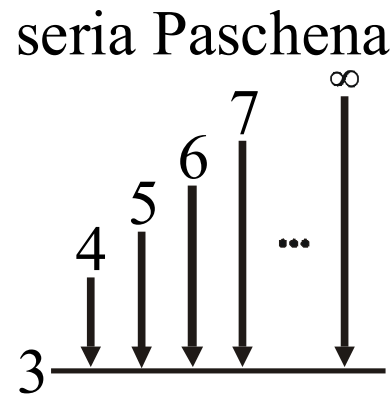
- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga
- $n$  – główna liczba kwantowa powłoki, z której elektron przechodzi na trzecią powłokę

**H** Serię tę odkrył Paschen w 1908.

**B** Louis Carl Heinrich Friedrich Paschen (1865-1947), niemiecki fizyk.



- Energie fotonów w serii Paschena zawarte są w przedziale od 0,66 eV do 1,51 eV. Odpowiadają im częstotliwości fal elektromagnetycznych od  $1,60 \cdot 10^{14}$  Hz do  $3,66 \cdot 10^{14}$  Hz oraz długości fal w powietrzu od 1874,5 nm do 820,1 nm. Seria Paschena leży w podczerwieni.



- Seria Paschena; każda pionowa strzałka reprezentuje przejście elektronu na trzecią powłokę z powłoki wyższej.

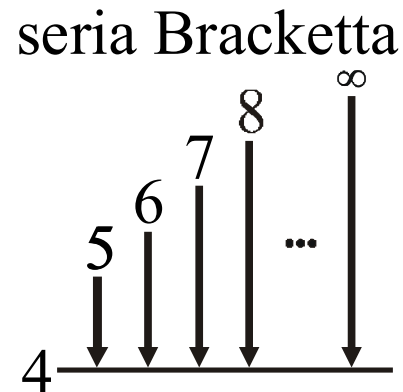
- Seria Bracketta od 0,31 eV do 0,85 eV  $\Leftrightarrow$  seria widmowa utworzona z fotonów, z których każdy jest emitowany przez atom wodoru podczas przejścia elektronu na czwartą powłokę z powłoki wyższej. Częstotliwości ( $\nu_{n \rightarrow 4}$ ) odpowiadające fotonom w serii Bracketta dane są poniższym wzorem.

$$\nu_{n \rightarrow 4} = cR_{\infty} \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > 4$$

- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga
- $n$  – główna liczba kwantowa powłoki, z której elektron przechodzi na czwartą powłokę

**B** Frederick Sumner Brackett (1896-1972), amerykański fizyk.

- Energie fotonów w serii Bracketta zawarte są w przedziale od 0,31 eV do 0,85 eV. Odpowiadają im częstotliwości fal elektromagnetycznych od  $0,74 \cdot 10^{14}$  Hz do  $2,06 \cdot 10^{14}$  Hz oraz długości fal w powietrzu od 4052,5 nm do 1459 nm. Seria Bracketta leży w podczerwieni.



- Seria Bracketta; każda pionowa strzałka reprezentuje przejście elektronu na czwartą powłokę z powłoki wyższej.

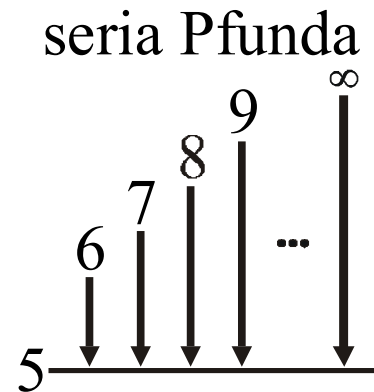
- Seria Pfunda od 0,17 eV do 0,54 eV  $\Leftrightarrow$  seria widmowa utworzona z fotonów, z których każdy jest emitowany przez atom wodoru podczas przejścia elektronu na piątą powłokę z powłoki wyższej. Częstotliwości ( $\nu_{n \rightarrow 5}$ ) odpowiadające fotonom w serii Pfunda dane są poniższym wzorem.

$$\nu_{n \rightarrow 5} = cR_{\infty} \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > 5$$

- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga
- $n$  – główna liczba kwantowa powłoki, z której elektron przechodzi na piątą powłokę

**B** August Hermann Pfund (1879-1949), amerykański fizyk.

- Energie fotonów w serii Pfunda zawarte są w przedziale od 0,17 eV do 0,54 eV. Odpowiadają im częstotliwości fal elektromagnetycznych od  $0,40 \cdot 10^{14}$  Hz do  $1,36 \cdot 10^{14}$  Hz oraz długości fal w powietrzu od 7460 nm do 2280 nm. Seria Pfunda leży w podczerwieni.



- Seria Pfunda; każda pionowa strzałka reprezentuje przejście elektronu na piątą powłokę z powłoki wyższej.

- Seria Humphreysa od 0,10 eV do 0,38 eV  $\Leftrightarrow$  seria widmowa utworzona z fotonów, z których każdy jest emitowany przez atom wodoru podczas przejścia elektronu na szóstą powłokę z powłoki wyższej. Częstotliwości ( $\nu_{n \rightarrow 6}$ ) odpowiadające fotonom w serii Humphreysa dane są poniższym wzorem.

$$\nu_{n \rightarrow 6} = cR_{\infty} \left( \frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n > 6$$

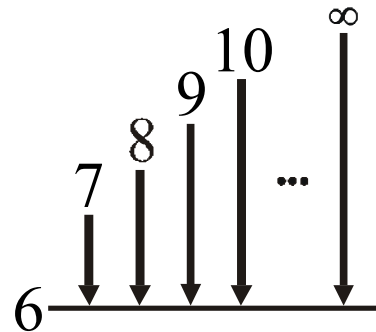
- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $R_{\infty}$  – stała Rydberga
- $n$  – główna liczba kwantowa powłoki, z której elektron przechodzi na szóstą powłokę

**H** Serię tę wyznaczył doświadczalnie Humphreys w 1953.

**B** Curtis Judson Humphreys (1898-1986), amerykański fizyk.

- Energie fotonów w serii Humphreysa zawarte są w przedziale od 0,10 eV do 0,38 eV. Odpowiadają im częstotliwości fal elektromagnetycznych od  $0,24 \cdot 10^{14}$  Hz do  $0,91 \cdot 10^{14}$  Hz oraz długości fal w powietrzu od 12368 nm do 3281,4 nm. Seria Humphreysa leży w podczerwieni.

seria Humphreysa



- Seria Humphreysa; każda pionowa strzałka reprezentuje przejście elektronu na szóstą powłokę z powłoki wyższej.

# Fizyka kwantowa II

**dr Zbigniew Osiak**

Rysunki wykonała

**Małgorzata Osiak**



- 
- Promieniowanie rentgenowskie 114
  - Luminescencja 130
  - Zjawisko fotoelektryczne 144
  - Zjawisko Comptona 152
  - Nadprzewodnictwo 155
  - Nadpłynność (nadciekłość) 161
  - Wybrane pozostałe zjawiska kwantowe 166
  - Wybrane urządzenia kwantowe 191

- Promieniowanie rentgenowskie 115
- Lampa rentgenowska 116
- Antykatoda 117
- Promieniowanie rentgenowskie o widmie ciągłym 118
- Granica krótkofalowa ciągłego widma promieniowania rentgenowskiego 120
- Promieniowanie rentgenowskie o widmie charakterystycznym (liniowym) 121
- Prawo Moseleya 122
- Prawo pochłaniania promieniowania rentgenowskiego 123
- Grubość warstwy połówającej 125
- Dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego 127
- Interferencja promieniowania rentgenowskiego 128
- Prawo Braggów 129

• Promieniowanie rentgenowskie  $\Leftrightarrow$  fale elektromagnetyczne o częstotliwościach zawartych w przedziale  $3 \cdot 10^{16} \text{ Hz} \div 3 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$  i o długościach w powietrzu z przedziału  $10 \text{ nm} \div 0,1 \text{ nm}$ . Odpowiadają im fotony o energiach od  $124 \text{ eV}$  do  $12,4 \text{ keV}$ . Promieniowanie rentgenowskie nazywane jest też skrótowo promieniowaniem rtg.

**P** Promieniowanie rentgenowskie wykorzystywane jest między innymi w diagnostyce i terapii medycznej oraz w badaniach struktury kryształów.

**H** Promieniowanie rtg odkrył Roentgen w 1895 i nazwał je promieniowaniem X.

**B** Wilhelm Conrad Roentgen (Röntgen) (1845-1923), niemiecki fizyk, laureat pierwszej Nagrody Nobla z fizyki w 1901.

•Lampa rentgenowska  $\Leftrightarrow$  lampa elektronowa będąca źródłem promieniowania rentgenowskiego. Elektrony są przyspieszane w lampie przez napięcie elektryczne między katodą i anodą. Promieniowanie rtg powstaje w wyniku hamowania elektronów na anodzie (antykatodzie). Zaledwie 1% energii elektronów zostaje zamieniony na energię promieniowania rtg, pozostała część energii powoduje ogrzanie anody (antykatody). Lampy rentgenowskie dzielą się na jonowe i z żarzoną katodą. Lampa jonowa wypełniona jest częściowo zjonizowanym gazem o ciśnieniu rzędu jednej setnej paskala, elektrony powstają w wyniku bombardowania katody przez jony. Lampa z żarzoną katodą jest lampą próżniową, elektrony powstają w wyniku termoemisji.

**B** Wilhelm Conrad Roentgen (Röntgen) (1845-1923), niemiecki fizyk, laureat pierwszej Nagrody Nobla z fizyki w 1901.

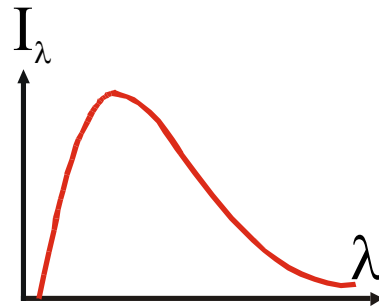
- 
- Antykatoda  $\Leftrightarrow$  elektroda jonowej lampy rentgenowskiej umieszczona między katodą a anodą. Jej rolą jest hamowanie elektronów rozpędzonych w polu elektrycznym wytworzonym przez dwie pozostałe elektrody.

- Promieniowanie rentgenowskie o widmie ciągłym  $\Leftrightarrow$  promieniowanie rtg powstające w wyniku hamowania elektronów na anodzie (antykatodzie) lampy rentgenowskiej. W widmie tego promieniowania istnieje ostra granica od strony fal krótkich. Graniczna długość ( $\lambda_{\min}$ ) zależy od napięcia (U) między katodą i anodą (antykatodą). Jej wartość odpowiada sytuacji, gdy cała energia kinetyczna elektronu zostaje zamieniona na energię fotonu rentgenowskiego.

$$\frac{m_e v_e^2}{2} = eU = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

- $m_e$  – masa elektronu
- $v_e$  – wartość prędkości elektronu w momencie zderzenia z anodą (antykatodą)
- $e$  – elementarny ładunek elektryczny
- $h$  – stała Plancka
- $c$  – wartość prędkości światła w próżni

- Promieniowanie rentgenowskie o widmie ciągłym nazywane jest też promieniowaniem hamowania.



- Wykres zależności natężenia promieniowania rentgenowskiego ( $I_\lambda$ ), emitowanego przez lampę rentgenowską, od długości fali ( $\lambda$ )

- Granica krótkofalowa ciągłego widma promieniowania rentgenowskiego ( $\lambda_{\min}$ )  $\Leftrightarrow$  długość fali promieniowania rentgenowskiego o widmie ciągłym, której odpowiada maksymalna wartość energii fotonów emitowanych przez lampę rentgenowską.

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

- $h$  – stała Plancka
- $c$  – wartość prędkości światła w próżni
- $e$  – elementarny ładunek elektryczny
- $U$  – napięcie elektryczne między katodą i anodą lampy rentgenowskiej



## Promieniowanie rtg o widmie charakterystycznym (liniowym) 121

---

- Promieniowanie rentgenowskie o widmie charakterystycznym (liniowym)  $\Leftrightarrow$  promieniowanie rtg powstające w wyniku wybijania przez elektrony, przyspieszane w polu elektrycznym lampy rentgenowskiej, elektronów z wewnętrznych powłok elektronowych atomów anody (antykatody). Na zwolnione miejsca spadają elektrony z wyższych powłok, emitując nadmiar energii w postaci fotonów. Częstotliwości tych fotonów opisuje prawo Moseleya.

- Prawo Moseleya  $\Leftrightarrow$  empiryczne prawo dotyczące widm charakterystycznych (liniowych) promieniowania rentgenowskiego pierwiastków. Częstotliwość fotonu ( $\nu_{n \rightarrow m}$ ) emitowanego przy przejściu z powłoki (n) na powłokę (m) zależy od liczby atomowej (Z) pierwiastka.

$$\nu_{n \rightarrow m} = aR_{\infty} (Z - \sigma)^2$$

- $R_{\infty}$  – stała Rydberga
- a – stała zależna od głównych liczb kwantowych powłok, między którymi następuje przejście
- $\sigma$  – stała ekranowania

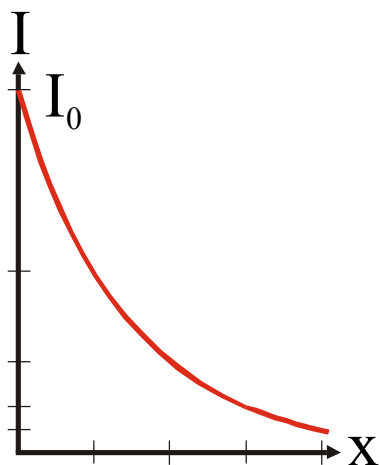
**H** Prawo to odkrył Moseley w 1910.

**B** Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915), angielski fizyk.

- Prawo pochłaniania promieniowania rentgenowskiego  $\Leftrightarrow$  prawo opisujące pochłanianie promieniowania rentgenowskiego przez ośrodek jednorodny.

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

- $I$  – natężenie promieni rtg wychodzących z ośrodka o grubości ( $x$ )
- $I_0$  – natężenie promieni rtg wchodzących do ośrodka
- $\mu$  – współczynnik pochłaniania (absorpcji)



- Wykres zależności natężenia promieniowania rtg lub gamma ( $I$ ), wychodzącego z ośrodka, od grubości ( $x$ ) tego ośrodka

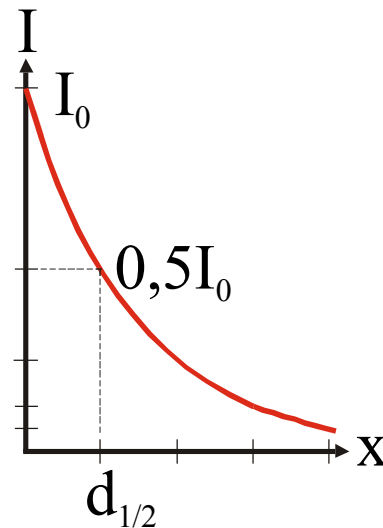
- Współczynnik pochłaniania zależy od częstotliwości ( $\nu$ ) promieniowania rtg oraz od gęstości ( $\rho$ ), liczby atomowej ( $Z$ ) i liczby masowej ( $A$ ) pierwiastka pochłaniającego.

$$\mu \sim \frac{\rho Z^3}{\nu^3 A}$$

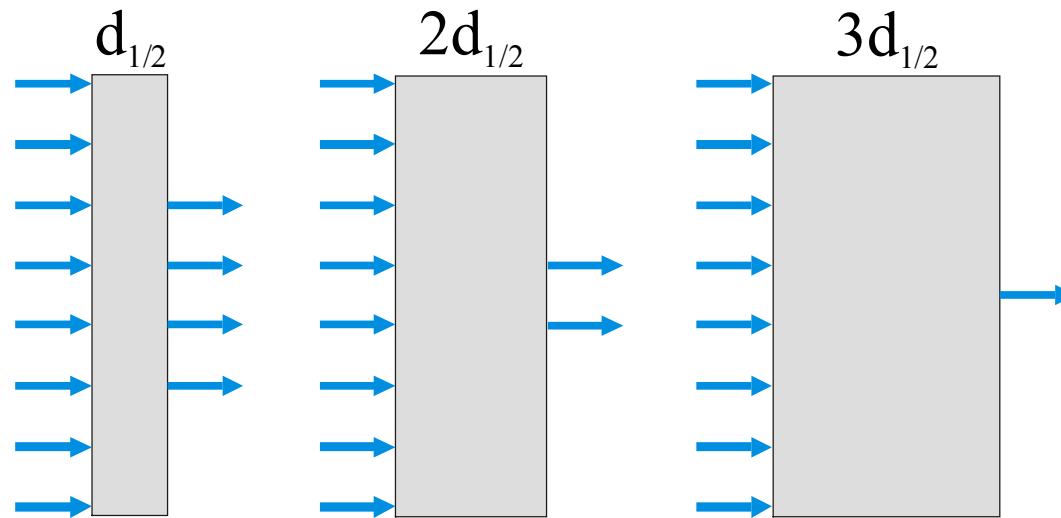
**P** Zależność współczynnika pochłaniania od trzeciej potęgi liczby atomowej sprawia, że promieniowanie rtg jest wykorzystywane w diagnostyce medycznej (zdjęcia rentgenowskie).

**P** Promieniowanie rtg jest szkodliwe biologicznie, ponieważ powoduje jonizację atomów i cząsteczek organizmów.

- Grubość warstwy połówającej ( $d_{1/2}$ )  $\Leftrightarrow$  grubość absorbera zmniejszającego o połowę natężenie pochłanianego przezeń promieniowania rentgenowskiego lub gamma.



- Wykres zależności natężenia promieniowania rentgenowskiego lub gamma ( $I$ ), wychodzącego z ośrodka, od grubości ( $x$ ) tego ośrodka;  $d_{1/2}$  jest grubością warstwy połówającej.



- Natężenie promieniowania rentgenowskiego lub gamma po przejściu przez jedną, dwie, trzy warstwy połówające, zmniejsza się odpowiednio dwu-, cztero-, ośmiokrotnie.

• Dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na sprężystym rozpraszaniu promieniowania rentgenowskiego na elektronach związanych w atomach kryształu.

**H** Dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego w kryształach została odkryta przez Laue'go w 1912.

**H** Pierwszy wyraźny obraz dyfrakcyjny siarczku cynku uzyskali Friedrich i Knipping (studenci Laue'go) w 1912.

**B** Max Theodor Felix von Laue (1879-1960), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1914.

**B** Walter Friedrich (1883-1969), niemiecki fizyk.

**B** Paul C. M. Knipping (1883-1935), niemiecki fizyk.

- Interferencja promieniowania rentgenowskiego  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na nakładaniu się fal promieniowania rentgenowskiego ulegających dyfrakcji w kryształach. Warunek na wzmocnienie interferencyjne podaje prawo Braggów.



- Prawo Braggów  $\Leftrightarrow$  relacja między długością fali ( $\lambda$ ) promieniowania rentgenowskiego, stałą sieci krystalicznej ( $d$ ) oraz kątem odbłyску ( $\alpha_n$ ), czyli kątem zawartym między kierunkiem promieni padających na kryształ a odbijającą płaszczyzną sieciową, przy którym wiązka promieni odbitych osiąga maksymalne natężenie.

$$n\lambda = 2d \sin\alpha_n$$

- $n$  – rząd odbicia (liczba naturalna)

**H** Prawo to sformułowali Braggowie (ojciec i syn) w 1913.

**B** Sir William Henry Bragg (1862-1942), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1915.

**B** William Lawrence Bragg (1890-1971), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1915.

- Luminescencja 131
- Fluorescencja 132
- Fosforescencja 133
- Fotoluminescencja 134
- Elektroluminescencja 135
- Radioluminescencja 136
- Chemiluminescencja 137
- Bioluminescencja 138
- Tryboluminescencja 139
- Wydajność kwantowa fotoluminescencji 140
- Prawo Stokesa 141
- Prawo Wawiłowa 142
- Luminofor 143

---

- Luminescencja  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na emisji światła spowodowanej innymi czynnikami niż odpowiednio wysoka temperatura emitera. Luminescencja, nazywana też zimnym świeceniem, może zachodzić lokalnie w małych obszarach ośrodka.

**H** Nazwę luminescencja zaproponował Wiedemann w 1888.

**B** Eilhard Ernst Gustav Wiedemann (1852-1928), niemiecki fizyk.

- Fluorescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja, która szybko wygasa po ustąpieniu czynnika powodującego świecenie. Natężenie światła ( $I_t$ ) po czasie ( $t$ ), liczonym od momentu zaprzestania wzbudzania fluorescencji, opisuje poniższe równanie.

$$I_t = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- $I_0$  – natężenie światła w momencie zaprzestania wzbudzania fluorescencji
- $\tau$  – średni czas przebywania atomów lub cząsteczek luminoforu w stanie wzbudzonym
- Wartości średniego czasu życia fluorescencji są zawarte w przedziale od  $0,5 \cdot 10^{-9}$  s do  $20 \cdot 10^{-9}$  s.

- Fosforescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja, która powoli wygasa po ustąpieniu czynnika powodującego świecenie. Czas zaniku fosforescencji jest dłuższy od  $20 \cdot 10^{-9}$  s i może wynosić nawet wiele miesięcy.

- 
- Fotoluminescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja spowodowana przez fotony światła widzialnego.

- 
- Elektroluminescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja spowodowana przez zderzenia elektronów, przyspieszanych w polu elektrycznym, z cząsteczkami luminoforu. Przykładami elektroluminescencji są m.in.:
  - świecenie rozrzedzonego gazu pod wpływem przepływającego prądu elektrycznego,
  - świecenie substancji fluoryzującej, pokrywającej od wewnątrz ekran lampy oscyloskopowej, wskutek bombardowania jej elektronami.

- Radioluminescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja spowodowana przez promieniowanie jonizujące.



- 
- Chemiluminescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja spowodowana przebiegiem reakcji chemicznych.

- 
- Bioluminescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja pochodząca z wyspecjalizowanych narządów występujących u wielu zwierząt.

- 
- Tryboluminescencja  $\Leftrightarrow$  luminescencja spowodowana tarcie.  
Przykładem tryboluminescencji jest świecenie rozcieranych kryształów cukru.

- 
- Wydajność kwantowa fotoluminescencji  $\Leftrightarrow$  stosunek liczby fotonów emitowanych do liczby fotonów absorbowanych.

- Prawo Stokesa  $\Leftrightarrow$  prawo głoszące, że widmo światła emitowanego w zjawisku fotoluminescencji jest przesunięte w kierunku fal dłuższych względem widma światła wywołującego fotoluminescencję.
- Prawo Stokesa nazywane jest też regułą Stokesa.

**B** Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), brytyjski matematyk i fizyk.

- Prawo Wawiłowa  $\Leftrightarrow$  prawo stanowiące, że wydajność kwantowa fotoluminescencji nie zależy od częstotliwości światła absorbowanego (wywołującego fotoluminescencję).

**H** Prawo to sformułował Wawiłow w 1927.

**B** Siergiej Iwanowicz Wawiłow (1891-1951), radziecki fizyk.

- 
- Luminofor  $\Leftrightarrow$  substancja, w której może zachodzić luminescencja.

- Foton 145
- Praca wyjścia 146
- Zjawisko fotoelektryczne 147
- Fotokomórka 149
- Fotodioda 150
- Fotopowielacz 151



- Foton  $\Leftrightarrow$  kwant pola elektromagnetycznego poruszający się w próżni z prędkością o wartości  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s. Fotony są bozonami o spinie 1, nie mają masy oraz ładunku elektrycznego. Energia (E) oraz wartość pędu (p) fotonu określone są poniżej.

$$E = h\nu$$

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

- h – stała Plancka
- $\nu$  – częstotliwość drgań wektorów natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej

**H** Pojęcie fotonu wprowadził Einstein w 1905.

**H** Nazwę foton zaproponował Lewis w 1926.

**B** Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

**B** Gilbert Newton Lewis (1875-1946), amerykański fizyko-chemik.

- 
- Praca wyjścia  $\Leftrightarrow$  minimalna energia potrzebna do przeniesienia elektronu z wnętrza metalu na zewnątrz. Praca wyjścia przyjmuje wartości rzędu kilku elektronowoltów i jest w przybliżeniu równa połowie energii jonizacji swobodnego atomu.

- Zjawisko fotoelektryczne  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu przez fotony. Fakty doświadczalne związane ze zjawiskiem fotoelektrycznym można wyjaśnić w ramach teorii bazującej na dwóch założeniach:
  - Jeden foton, o odpowiedniej energii, wybija jeden elektron.
  - Energia fotonu ( $h\nu$ ) powinna być sumą pracy wyjścia ( $W$ ) elektronu z metalu i energii kinetycznej ( $E_k$ ) wybitego elektronu.

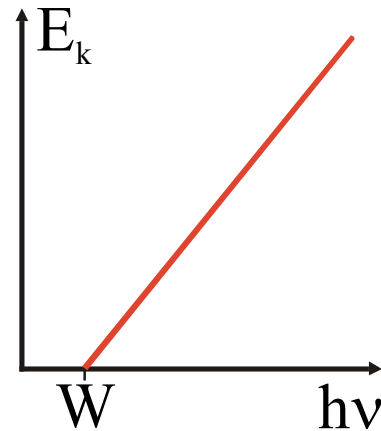
$$h\nu = W + E_k$$

**H** Zjawisko fotoelektryczne odkrył Hertz w 1887.

**H** Teorię zjawiska fotoelektrycznego podał Einstein w 1905.

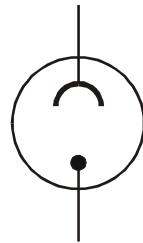
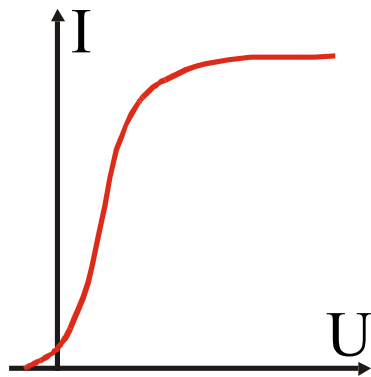
**B** Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), niemiecki fizyk.

**B** Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.



- Wykres zależności energii kinetycznej fotoelektronów ( $E_k$ ) od energii fotonów ( $h\nu$ ); ( $W$ ) jest pracą wyjścia elektronu z metalu.

- Fotokomórka  $\Leftrightarrow$  próżniowa bańka szklana, wewnątrz której znajdują się dwie elektrody. Katoda wykonana jest z metalu o pracy wyjścia nie większej od energii padających na nią fotonów. Oświetlona katoda, wskutek zjawiska fotoelektrycznego, emituje elektrony. Dzięki temu fotokomórka może przewodzić prąd elektryczny.



• Symbol fotokomórki

• Charakterystyka prądowo-napięciowa fotokomórki

- Fotodioda  $\Leftrightarrow$  dioda półprzewodnikowa, która po oświetleniu przewodzi prąd elektryczny w kierunku zaporowym.

- Fotopowielacz  $\Leftrightarrow$  lampa elektronowa składająca się z katody, anody i znajdujących się między nimi elektrod zwanych dynodami. Światło padające na katodę powoduje emisję elektronów wskutek zjawiska fotoelektrycznego. Każda dynoda emituje więcej elektronów, niż ich absorbuje. Liczba elektronów na wyjściu fotopowielacza jest  $10^6 \div 5 \cdot 10^8$  razy większa od liczby fotoelektronów padających na pierwszą dynodę.

- Zjawisko Comptona 153



- Zjawisko Comptona  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na sprężystym zderzeniu fotonu ze spoczywającym elektronem, w wyniku którego foton przekazuje część swojej energii elektronowi. Przyrost długości fali ( $\Delta\lambda$ ) światła rozproszonego w wyniku zjawiska Comptona oraz kąt rozproszenia ( $\alpha$ ), czyli kąt zawarty między kierunkiem ruchu fotonu przed zderzeniem z elektronem i po zderzeniu, powiązane są poniższą relacją.

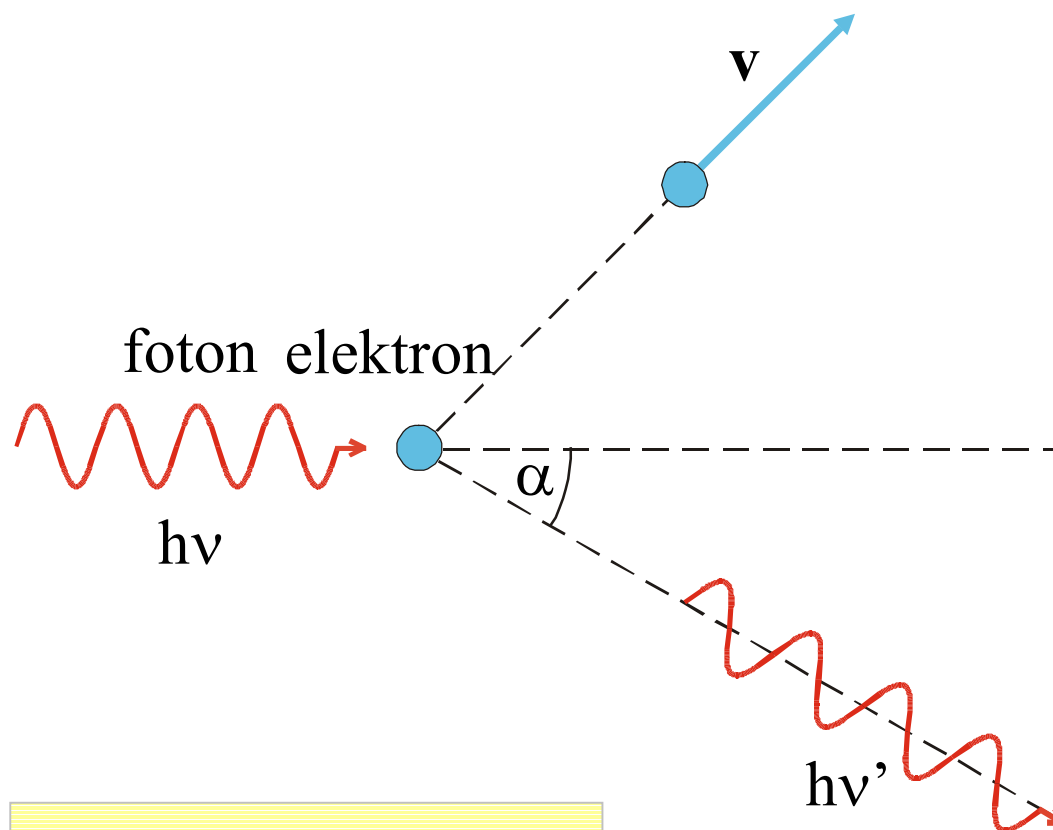
$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\alpha)$$

- $h$  – stała Plancka
- $m$  – masa elektronu
- $c$  – wartość prędkość światła w próżni

- Wielkość  $\lambda_c = \frac{h}{mc}$  nazywana jest komptonowską długością fali.

**H** Zjawisko to odkrył i wyjaśnił Compton w 1923.

**B** Arthur Holly Compton (1892-1962), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla w 1927.



• Zjawisko Comptona

- Nadprzewodnictwo 156
- Efekt Meissnera-Ochsenfelda 159
- Nadprzewodniki wysokotemperaturowe 160

- Nadprzewodnictwo  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na gwałtownym zaniku oporu elektrycznego i względnej przenikalności magnetycznej niektórych metali i stopów w bardzo niskich temperaturach bezwzględnych, nazywanych temperaturami krytycznymi. Metale wykazujące nadprzewodnictwo noszą nazwę nadprzewodników. Temperatura krytyczna ( $T_c$ ) zależy odwrotnie proporcjonalnie od pierwiastka z liczby masowej ( $A$ ) danego izotopu nadprzewodnika.

$$T_c \sim \frac{1}{\sqrt{A}}$$

• Nadprzewodnictwo zanika, gdy natężenie zewnętrznego pola magnetycznego osiąga lub przekracza wartość krytyczną ( $H_C$ ) dla danej temperatury krytycznej, oraz gdy w nadprzewodniku płynie prąd elektryczny o zbyt dużym natężeniu. Krytyczna wartość natężenia pola magnetycznego zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się temperatury krytycznej. Zewnętrzne pole magnetyczne, o natężeniu mniejszym od krytycznego dla danej temperatury krytycznej, jest wypychane z nadprzewodnika znajdującego się w stanie nadprzewodzącym.

**H** Nadprzewodnictwo rtęci odkrył Kamerlingh-Onnes w 1911.

**H** Fenomenologiczną teorię nadprzewodnictwa podali Ginzburg i Landau w 1950.

**H** Mikroskopową teorię nadprzewodnictwa sformułowali Bardeen, Cooper i Schrieffer w 1957. Nazywana jest ona teorią BCS.

**B** Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926), holenderski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1913.

**B** Witalij Lazarewicz Ginzburg (1916-2009), rosyjski fizyk teoretyk i astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2003.

**B** Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1962.

**B** John Bardeen (1908-1991), amerykański fizyk, dwukrotny laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1956 oraz 1972.

**B** Leon Neil Cooper (ur. 1930), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1972.

**B** John Robert Schrieffer (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1972.

---

- Efekt Meissnera-Ochsenfelda  $\Leftrightarrow$  zjawisko odkryte w 1933 przez Meissnera i Ochsenfelda, polegające na tym, że zewnętrzne pole magnetyczne o natężeniu mniejszym od krytycznego dla danej temperatury krytycznej jest wypychane z nadprzewodnika znajdującego się w stanie nadprzewodzącym.

**B** Fritz Walther Meissner (1882-1974), niemiecki fizyk.

**B** Robert Ochsenfeld (1901-1993), niemiecki fizyk.

• Nadprzewodniki wysokotemperaturowe  $\Leftrightarrow$  materiały wykazujące nadprzewodnictwo w temperaturze wyższej od temperatury skraplania azotu (77 K).

**H** W 1986 Bednorz i Müller odkryli nadprzewodnictwo tlenku barowo-lantanowo-miedziowego w temperaturze 35 K.

**B** Johannes Georg Bednorz (ur. 1950), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1987.

**B** Karl Alexander Müller (ur. 1927), szwajcarski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1987.



- Nadpłynność (nadciekłość) 162
- Hel I 164
- Hel II 165

• Nadpłynność (nadciekłość)  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na zaniku lepkości ciekłego helu  ${}^4_2\text{He}$  i  ${}^3_2\text{He}$  w bardzo niskich temperaturach bezwzględnych. Hel  ${}^4_2\text{He}$  staje się nadciekły poniżej temperatury 2,19 K, a hel  ${}^3_2\text{He}$  – poniżej temperatury 0,0027 K.

**H** Nadpłynność helu  ${}^4_2\text{He}$  odkrył Kapica w 1937.

**H** Teorię nadciekłości helu  ${}^4_2\text{He}$  opracował Landau w 1941.

**H** Nadpłynność helu  ${}^3_2\text{He}$  odkryli i zbadali Osheroff, Lee i Richardson w 1972.

**B** Piotr Leonidowicz Kapica (1894-1984), radziecki (rosyjski) fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978.

**B** Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), radziecki (rosyjski) fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1962.

**B** David Morris Lee (ur. 1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1996.

**B** Robert Coleman Richardson (1937-2013), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1996.

**B** Douglas Dean Osheroff (ur. 1945), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z Fizyki w 1996.

- 
- Hel I  $\Leftrightarrow$  ciekły hel  ${}^4_2\text{He}$  o temperaturze bezwzględnej większej od 2,19 K. W temperaturze bezwzględnej 2,19 K hel I przechodzi w hel II.

- 
- Hel II  $\Leftrightarrow$  ciekły hel  ${}^4_2\text{He}$  o temperaturze bezwzględnej mniejszej od 2,19 K. Hel II wykazuje nadpłynność. Współczynnik lepkości helu II jest mniejszy niż  $10^{-12}$  Pa·s.

- Rozszczepienie linii widmowych 167
- Zjawisko Zeemana 169
- Zjawisko Paschena-Backa 170
- Zjawisko Ramana 171
- Zjawisko (efekt) Starka 172
- Dyfrakcja elektronów 173
- Dyfrakcja neutronów 174
- Efekt Augera 175
- Efekt Casimira 176
- Efekt tunelowy 177
- Elektronowy rezonans paramagnetyczny 178
- Jądrowy rezonans magnetyczny 179
- Emisja wymuszona (stymulowana) 181
- Emisja polowa (autoemisja, zimna emisja) 182
- Termoemisja 183
- Zjawisko Josephsona 184

- Kondensat Bosego-Einsteina 186
- Precesja Larmora 188
- Jonizacja gazu 190

- 
- Rozszczepienie linii widmowych  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na tym, że dana linia widmowa pod wpływem czynników zewnętrznych rozdziela się na kilka linii składowych.



• Zjawisko Zeemana  $\Leftrightarrow$  zjawisko odkryte przez Zeemana w 1896, polegające na rozszczepieniu linii widmowych emitera znajdującego się w zewnętrznym polu magnetycznym. Wyróżniamy normalne zjawisko Zeemana zachodzące w silnym polu magnetycznym oraz anomalne zjawisko Zeemana zachodzące w słabym polu magnetycznym. W zależności od kierunku obserwacji względem natężenia pola magnetycznego mówimy o podłużnym lub poprzecznym zjawisku Zeemana. W normalnym podłużnym zjawisku Zeemana zamiast linii występującej przy braku zewnętrznego pola magnetycznego, obserwujemy dwie linie składowe położone względem niej symetrycznie. W normalnym poprzecznym zjawisku Zeemana obserwujemy wszystkie trzy wymienione poprzednio linie. Anomalne zjawisko Zeemana charakteryzuje się większą złożonością rozszczepienia linii widmowych.

**B** Pieter Zeeman (1865-1943), holenderski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902.

- Zjawisko Paschena-Backa  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na przejściu od anomalnego do normalnego zjawiska Zeemana podczas zwiększania natężenia zewnętrznego pola magnetycznego.

**B** Friedrich Paschen (1865-1947), niemiecki fizyk.

**B** Ernst Emil Alexander Back (1881-1959), niemiecki fizyk.

• Zjawisko Ramana  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na tym, że w wyniku rozpraszania światła przez ciało stałe lub ciecz linia widmowa o częstotliwości ( $\nu_0$ ) zostaje rozszczepiona na linie widmowe o częstotliwościach ( $\nu_a > \nu_0$ ) i ( $\nu_s < \nu_0$ ). Linie stokesowskie (s) i antystokesowskie (a) tworzą widmo ramanowskie cząsteczek ośrodka rozpraszającego światło. Natężenia linii (s) są mniejsze od natężeń linii (a). Natężenia linii (s) wzrastają wraz ze wzrostem temperatury. Natężenia linii (a) nie zależą od temperatury.

**B** Chandrasekhara Venkata Raman (1888-1970), indyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1930.

• Zjawisko (efekt) Starka  $\Leftrightarrow$  zjawisko odkryte przez Starka w 1913, polegające na rozszczepieniu linii widmowych emitera znajdującego się w zewnętrznym polu elektrycznym. W słabych polach elektrycznych wielkość rozszczepienia zależy liniowo od natężenia pola elektrycznego (liniowe zjawisko Starka). Rozszczepione linie są rozmieszczone symetrycznie względem linii nierozszczepionej (obserwowanej przy braku zewnętrznego pola elektrycznego). W silnych polach elektrycznych wielkość rozszczepienia zależy od kwadratu natężenia pola elektrycznego (kwadratowe zjawisko Starka). Rozszczepione linie są rozmieszczone, względem linii nierozszczepionej, po stronie dłuższych fal.

**B** Johannes Stark (1874-1957), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1919.

**C** W 1947 wyrokiem niemieckiego sądu denazyfikacyjnego Starka skazano na cztery lata obozu pracy za to, że od 1930 był członkiem partii nazistowskiej.

- Dyfrakcja elektronów  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na rozpraszaniu wiązki elektronów na pojedynczych atomach lub cząsteczkach oraz na kryształach. Fale de Broglie'a odpowiadające elektronom po dyfrakcji na węzłach sieci krystalicznej ulegają interferencji. W pewnych kierunkach zostają wzmocnione, a w innych – osłabione.

- Dyfrakcja neutronów  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na rozpraszaniu wiązki neutronów przechodzącej przez gazy, ciecze lub kryształy. Fale de Broglie'a neutronów termicznych po dyfrakcji na węzłach sieci krystalicznej nakładają się. W pewnych kierunkach ulegają wzmocnieniu, a w innych – osłabieniu. Dyfrakcja neutronów w kryształach opisywana jest prawem Braggów.

- Efekt Augera  $\Leftrightarrow$  zjawisko odkryte przez Augera w 1925, polegające na bezpromienistym przejściu atomu ze stanu wzbudzonego do stanu o niższej energii, w wyniku emisji elektronu.

**B** Pierre Victor Auger (1899-1933), francuski fizyk.

•Efekt Casimira  $\Leftrightarrow$  zjawisko przewidziane przez Casimira w 1948, polegające na przyciąganiu się dwóch nienaładowanych zwierciadeł metalowych znajdujących się bardzo blisko siebie w próżni. Siła ta została wyznaczona doświadczalnie 10 lat później. Jest ona wprost proporcjonalna do powierzchni zwierciadeł i odwrotnie proporcjonalna do czwartej potęgi odległości między nimi. Na przykład dwa zwierciadła o powierzchni  $1 \text{ cm}^2$  odległe o  $1 \mu\text{m}$  przyciągają się z siłą Casimira wynoszącą około  $10^{-7} \text{ N}$ , ale już z odległości  $10 \text{ nm}$  siła ta wynosi około  $10 \text{ N}$ .

**C** Z punktu widzenia fizyki kwantowej siła Casimira jest wynikiem fluktuacji próżni. W ramach kwantowej grawitacji sformułowano hipotezę, że grawitacja jest długozasięgową siłą Casimira.

**B** Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909-2000), holenderski fizyk.



- Efekt tunelowy  $\Leftrightarrow$  efekt kwantowy polegający na przenikaniu cząstki przez barierę potencjału. Efekt tunelowy nie ma odpowiednika w fizyce klasycznej.

**P** Przykładami efektu tunelowego są m.in. emisja polowa, rozpad alfa i zjawisko Zenera.

- Elektronowy rezonans paramagnetyczny  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na rezonansowym (selektywnym) pochłanianiu fal elektromagnetycznych o częstotliwościach mikrofalowych przez substancję paramagnetyczną znajdującą się w zewnętrznym polu magnetycznym. Za rezonansowe pochłanianie energii odpowiedzialne są niesparowane elektrony. W zewnętrznym stałym polu magnetycznym spinowy moment magnetyczny elektronu ( $\mathbf{p}_{ms}$ ) może przyjmować jedno z dwóch ustawień względem wektora indukcji magnetycznej ( $\mathbf{B}$ ). Każdemu ustawieniu wektora ( $\mathbf{p}_{ms}$ ) odpowiada inna energia. Rezonansowe pochłanianie energii następuje, gdy energia fotonu jest równa różnicy energii dwóch położenia wektora ( $\mathbf{p}_{ms}$ ). Na określenie elektronowego rezonansu paramagnetycznego używana jest też nazwa **EPR** pochodząca od pierwszych liter angielskich słów **E**lectron **P**aramagnetic **R**esonance.

- Jądrowy rezonans magnetyczny  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na rezonansowym (selektywnym) pochłanianiu fal elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych przez jądra atomowe substancji znajdującej się w zewnętrznym polu magnetycznym. Za rezonansowe pochłanianie energii odpowiedzialne są jądra mające moment magnetyczny.

W zewnętrznym stałym polu magnetycznym wektor momentu magnetycznego jądra ( $\mathbf{p}_m$ ) może przyjmować ściśle określone (skwantowane) ustawienia względem wektora indukcji magnetycznej ( $\mathbf{B}$ ). Ponadto wektor ( $\mathbf{p}_m$ ) wykonuje ruch precesyjny wokół wektora ( $\mathbf{B}$ ). Każdemu ustawieniu wektora ( $\mathbf{p}_m$ ) odpowiada inna energia.

- Rezonansowe pochłanianie energii następuje, gdy spełnione są dwa następujące warunki:
  - Energia fotonu musi być równa różnicy energii dwóch położeń wektora ( $\mathbf{p}_m$ ).
  - Składowa magnetyczna padającej fali elektromagnetycznej musi być prostopadła do wektora ( $\mathbf{B}$ ).
- Na określenie jądrowego rezonansu magnetycznego używana jest też nazwa **NMR** pochodząca od pierwszych liter angielskich słów **Nuclear Magnetic Resonance**.

**H** Jądrowy rezonans magnetyczny odkryli niezależnie Bloch i Purcell w 1946.

**B** Felix Bloch (1905-1983), amerykański fizyk pochodzenia szwajcarskiego, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1952.

**B** Edward Mills Purcell (1912-1997), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1952.

- Emisja wymuszona  $\Leftrightarrow$  przejście atomu lub cząsteczki ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego wywołane przez foton. Przy czym foton wymuszający emisję nie jest pochłaniany, ma fazę i częstotliwość taką jak foton emitowany.
- Emisja wymuszona nazywana jest też emisją stymulowaną.

**H** Zjawisko emisji wymuszonej przewidział Einstein w pracach z lat 1916 i 1917.

**B** Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Emisja polowa (autoemisja, zimna emisja)  $\Leftrightarrow$  emisja elektronów z metalu pod wpływem silnego pola elektrycznego o natężeniu  $10^8$  V/m i większym. Elektrony przenikają przez barierę potencjału w wyniku zjawiska tunelowego. Zależność wartości gęstości prądu ( $j$ ) emisji polowej od wartości natężenia pola elektrycznego ( $E$ ) opisywana jest równaniem Fowlera-Nordheima. Odkryli oni i opisali to zjawisko w 1928.

$$j = K_1 \cdot E^2 \cdot e^{-\frac{K_2}{E}}$$

- $K_1, K_2$  – stałe charakteryzujące dany metal

- Gęstość prądu emisji polowej nie zależy od temperatury emitera.
- Emisja polowa jest także nazywana autoemisją lub zimną emisją.

**P** Przykładem wykorzystania tego zjawiska jest mikroskop polowy.

**B** Ralph Howard Fowler (1889-1944), brytyjski fizyk i astronom.

**B** Lothar Wolfgang Nordheim (1899-1985), niemiecki fizyk.

- Termoemisja  $\Leftrightarrow$  emisja elektronów z ogrzewanego metalu. Zależność wartości gęstości prądu termoemisji ( $j$ ) od temperatury bezwzględnej ( $T$ ) podał Richardson w 1901.

$$j = C T^2 e^{-\frac{W}{kT}}$$

- $C$  – stała Richardсона
- $k$  – stała Boltzmannna
- $W$  – praca wyjścia elektronu z metalu

- Równanie to nazywane jest prawem Richardсона.

**P** Zjawisko termoemisji jest wykorzystywane w lampach elektronowych.

**H** Termoemisję odkrył Edison w 1880.

**B** Thomas Alva Edison (1847-1931), amerykański wynalazca.

**B** Sir Owen Willans Richardson (1879-1959), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1928.

• Zjawisko Josephsona  $\Leftrightarrow$  przepływ prądu elektrycznego przez złącze składające się z dwóch nadprzewodników rozdzielonych cienką warstwą dielektryka. Złącze takie nazywane jest złączem Josephsona. W zależności od natężenia prądu płynącego przez złącze wyróżnia się stałoprądowe zjawisko Josephsona (brak napięcia na złączu), gdy natężenie prądu jest mniejsze od krytycznego, i zmiennoprądowe zjawisko Josephsona (stałe napięcie na złączu), gdy natężenie prądu jest większe od krytycznego. W drugim przypadku emitowane są fale elektromagnetyczne o częstotliwości ( $f$ ) danej poniższym wzorem.

$$f = \frac{2eU}{h}$$

- $e$  – ładunek elementarny
- $U$  – napięcie na złączu
- $h$  – stała Plancka



**H** Zjawisko to zostało przewidziane przez Josephsona w 1962 i w następnym roku potwierdzone doświadczalnie przez innych badaczy.

**B** Brian David Josephson (ur. 1940), angielski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1973.

• Kondensat Bosego-Einsteina  $\Leftrightarrow$  nowa forma materii, tworzą ją identyczne bozony, które w temperaturze bliskiej zera bezwzględnego znajdują się w takim samym stanie kwantowym o najniższej dozwolonej energii. Bozony te zachowują się jak pojedynczy “superatom”.

**H** Istnienie kondensatu zostało przewidziane niezależnie przez Bosego i Einsteina w 1924.

**H** Pierwszy kondensat utworzyli Cornell, Wieman i współpracownicy 5 czerwca 1995 w Joint Institute for Laboratory Astrophysics w Boulder (Kolorado). Ochłodzili oni 2000 atomów rubidu  ${}^{87}_{37}\text{Rb}$  do temperatury  $1,7 \cdot 10^{-7}$  K, uzyskali kondensat Bosego-Einsteina i utrzymali go przez 10 sekund.

**B** Satyendra Nath Bose (1894-1974), hinduski fizyk teoretyk.

**B** Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

**B** Eric Allin Cornell (ur. 1961), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2001.

**B** Carl Edwin Wieman (ur. 1951), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2001.

- Precesja Larmora  $\Leftrightarrow$  precesja orbitalnego momentu pędu ( $\mathbf{K}_l$ ) oraz orbitalnego momentu magnetycznego ( $\mathbf{p}_{ml}$ ) elektronu w atomie znajdującym się w zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji ( $\mathbf{B}$ ). Precesja zachodzi wokół osi równoległej do wektora indukcji magnetycznej i przechodzącej przez jądro atomowe. Prędkość kątowna precesji ( $\omega$ ), nazywana częstotliwością Larmora, dana jest poniższym wzorem.

$$\omega = \frac{e}{2m_e} \cdot \mathbf{B}$$

- $e$  – ładunek elementarny
- $m_e$  – masa elektronu

- Precesja Larmora powoduje powstanie dodatkowego momentu magnetycznego skierowanego przeciwnie do wektora indukcji zewnętrznego pola magnetycznego.

**K** Orbitalny moment pędu elektronu jest prostopadły do orbity, po której porusza się elektron. Precesja tego wektora oznacza “kołysanie się” orbity.

**H** Precesję orbit elektronowych w atomie opisał Larmor w 1897.

**B** Joseph Larmor (1857-1942), irlandzki fizyk teoretyk i matematyk.

- 
- Jonizacja gazu  $\Leftrightarrow$  zjawisko polegające na wybijaniu elektronów z atomów lub cząsteczek gazu. W wyniku jonizacji w gazie pojawiają się dodatkowo jony i swobodne elektrony.

- Laser 192
- Maser 193
- Graser 194
- Mikroskop elektronowy 195
- Mikroskop polowy 196

- Laser  $\Leftrightarrow$  źródło spójnego światła monochromatycznego o energiach fotonów należących do przedziału  $1,24 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \div 124 \text{ eV}$ . Działanie lasera oparte jest na zjawisku emisji wymuszonej.
- Nazwa **laser** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **light amplification by stimulated emission of radiation**.

**H** Pierwszy laser (rubinowy) zbudował Maiman w 1960.

**H** Nazwę laser zaproponował Gould w 1959.

**B** Theodore Harold Maiman (1927-2007), amerykański fizyk.

**B** Gordon Gould (1920-2005), amerykański fizyk.



- Maser  $\Leftrightarrow$  źródło spójnego, monochromatycznego promieniowania elektromagnetycznego w zakresie mikrofalowym. Działanie masera oparte jest na zjawisku emisji wymuszonej.
- Nazwa **maser** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **m**icrowave **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation.

**H** Pierwszy maser (amoniakalny) zbudowali Townes w 1953 i niezależnie Basow z Prochorowem w 1955.

**B** Charles Hard Townes (1915-2015), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1964.

**B** Nikołaj Giennadyjewicz Basow (1922-2001), radziecki (rosyjski) fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1964.

**B** Aleksandr Michajłowicz Prochorow (1916-2002), radziecki (rosyjski) fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1964.

- 
- Graser  $\Leftrightarrow$  źródło spójnego, monochromatycznego promieniowania rentgenowskiego lub gamma o energiach fotonów z przedziału 6 keV ÷ 120 keV. Działanie graseru oparte jest na zjawisku wymuszonej emisji bezdrutowego promieniowania izomerów jądrowych.
  - Nazwa **graser** pochodzi od pierwszych liter angielskich słów **gamma-ray amplification by stimulated emission of radiation**.

• Mikroskop elektronowy  $\Leftrightarrow$  mikroskop, w którym rolę światła spełniają fale de Broglie'a elektronów, a rolę soczewek – odpowiednio ukształtowane pola magnetyczne lub elektryczne. Zdolność rozdzielcza mikroskopu elektronowego jest kilkaset razy większa od zdolności rozdzielczej mikroskopu optycznego.

**H** Pierwszy mikroskop elektronowy zbudował Ruska w 1933.

**B** Ernst August Friedrich Ruska (1906-1988), niemiecki fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1986.

• Mikroskop polowy  $\Leftrightarrow$  mikroskop, za pomocą którego można otrzymać powiększone obrazy atomów lub cząsteczek. W próżniowej bańce szklanej znajduje się cienkie metalowe ostrze o wysokim potencjale ujemnym, powodującym emisję polową elektronów. Elektrony wylatujące z ostrza są rozpraszane na atomach zaadsorbowanych na powierzchni ostrza, po zderzeniu z luminoforem, pokrywającym od wewnątrz ekran mikroskopu, powodują lokalnie jego fluorescencję.

**H** Mikroskop polowy wynalazł Mueller w 1936.

**B** Erwin Wilhelm Mueller (1911-1977), niemiecko-amerykański fizyk.



# Wykłady z Fizyki 10



Zbigniew Osiak

**Kwanty**