

# FIZYKA WSPÓŁCZESNA

Janusz Adamowski

Wykłady dla studentów 2. stopnia studiów  
inżynierskich AGH

## Motto wykładów:

**FIZYKA (WSPÓŁCZESNA) stanowi podstawę działania przyrządów obecnej i przyszłej techniki oraz przebiegu nowoczesnych procesów technologicznych.**

# 1 Wstęp

## Wstęp

### Co rozumiemy przez "fizykę współczesną" ?

Zwykle przez **fizykę współczesną** rozumiemy te działy fizyki, rozwijane w XX i XXI wieku, które poświęcone są badaniom **kwantowej i relatywistycznej natury Wszechświata**.

Jako początek fizyki współczesnej przyjmuje się **podanie przez Maxa Plancka w 1900 roku prawa promieniowania ciała doskonale czarnego**. Odkryte wcześniej doświadczalnie własności tego promieniowania były sprzeczne z prawami fizyki klasycznej.

Odkrycie Plancka zapoczątkowało **erę fizyki kwantowej**.

Po roku 1900 rozpoczął się szybki rozwój fizyki, który zaowocował "rewolucyjnymi" wynalazkami techniki, które w sposób istotny zmieniły życie ludzi na Ziemi.

**Fundamentalne ("rewolucyjne") teorie fizyki XX wieku:**

- **mechanika kwantowa**
- **elektrodynamika kwantowa**
- **mechanika relatywistyczna (szczególna teoria względności)**

Opis relatywistyczny własności czasoprzestrzeni jest bardzo ważny, jednakże najważniejsze zastosowania techniczne fizyki współczesnej związane są z **kwantowymi własnościami cząstek i promieniowania**.

⇒ Wykłady te będą poświęcone głównie **zjawiskom kwantowym** i ich wykorzystaniu w technice.

Nie będę się zajmował efektami kwantowymi zachodzącymi w organizmach żywych.

### Znaczenie fizyki dla inżynierów

- Współczesna technika posługuje się **językiem fizyki**.
- Działanie każdego przyrządu (urządzenia) technicznego opiera się na **wykorzystaniu praw fizyki**.
- Fizyka współczesna jest podstawą działania przyrządów współczesnej i przyszłej techniki. ⇒ **technologie przyszłości**

## Zastosowania fizyki współczesnej w technice (przykłady)

- elektronika, w tym m.in. komputery konwencjonalne
- lasery (optyka kwantowa)
- najnowsze (rozwijane od ~1990) technologie kwantowe, nanoelektronika, spintronika
- obliczenia kwantowe  $\implies$  komputer kwantowy
- energetyka jądrowa
- nawigacja satelitarna (poprawki relatywistyczne)

### Uwaga:

Fizyka rozwijana po roku ~1990 to **fizyka najbardziej (rzeczywiście) współczesna**.

## Fizyka przełomu XX i XXI wieku (fizyka rzeczywiście współczesna)

- poszukiwania nowych cząstek elementarnych
- badania i projektowanie nowych materiałów
- nanotechnologia, nanoelektronika, spintronika
- obliczenia kwantowe, komputery kwantowe

## 2 Program wykładu

### Program wykładu

- (1) Promieniowanie ciała doskonale czarnego, zastosowania
- (2) Zjawisko fotoelektryczne, zastosowania
- (3) Interferencja i dyfrakcja cząstek, dualizm falowo-korpuskularny
- (4) Równania mechaniki kwantowej, funkcja falowa
- (5) Orbitalny dipol magnetyczny
- (6) Spin

- (7) Atomy: atom wodoru, atomy wieloelektronowe, układ okresowy pierwiastków
- (8) Wiązania chemiczne, molekuly
- (9) Półprzewodniki samoistne i domieszkowane, zastosowania
- (10) Przyrządy elektronowe
- (11) Przyrządy fotonowe
- (12) Fizyka rzeczywiście współczesna: spintronika, komputer kwantowy

### 3 Literatura

#### Literatura

- (1) E.H. Wichmann, "Fizyka kwantowa" (PWN, Warszawa, 1973)
- (2) C. J. Foot, "Atomic Physics" (Oxford University Press, 2005)
- (3) S.M. Sze, "Semiconductor Devices: Physics and Technology" (John Wiley and Sons, 2002)
- (4) J.-L. Basdevant, J. Dalibard, "Quantum Mechanics" (Springer, Berlin, 2005)
- (5) R. Shankar, "Mechanika kwantowa" (PWN, Warszawa, 2006)
- (6) K.F. Brennan, "The Physics of Semiconductors" (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003)

### 4 Egzamin

#### Egzamin

- samodzielnie przygotowana praca egzaminacyjna na wybrany temat z zakresu zastosowań fizyki współczesnej w technice (lista proponowanych tematów zostanie podana)
- tematy sugerowane przez wykładowcę lub wybierane samodzielnie przez studentów (wymagana akceptacja wykładowcy)
- tematy wybierane przez studentów powinny się różnić między sobą (na tyle, na ile jest to możliwe)
- prezentowane prace egzaminacyjne **muszą być różne**

- praca zapisana w pliku nazwisko-imię-studenta.doc lub docx, obejmującym na ~5-6 stron formatu A4 (tekst, wzory, rysunki)
- na ostatniej stronie powinna być podana literatura wykorzystana do przygotowania pracy

### Egzamin (c.d)

- pliki przesłane na adres [adamowski@fis.agh.edu.pl](mailto:adamowski@fis.agh.edu.pl) (ew. w paczkach po kilka/kilkanaście plików)
- podana zostanie końcowa data wysyłania prac
- oceniana będzie wartość merytoryczna pracy egzaminacyjnej, a także sposób prezentacji
- ocena końcowa zostanie wystawiana dopiero po porównaniu prac egzaminacyjnych różnych studentów na ten sam temat
- tematy mogą być wybierane (po uzgodnieniu z wykładowcą) od początku do końca semestru
- 2-3 studenci odpowiedzialni za przygotowanie listy wybranych tematów oraz kontakt z wykładowcą

### Konsultacje

wtorek 14-15, p. 231, D-10

(po uprzednim umówieniu się, np. drogą e-mailową)

## 5 Zarys historii fizyki współczesnej

### Zarys historii fizyki współczesnej

#### Prekursorzy

- 1895, W.C. Röntgen, odkrycie promieni Röntgena
- 1897, Joseph J. Thomson, odkrycie elektronu
- **1900, Max Planck, prawo promieniowania ciała doskonale czarnego**

- 1905, Albert Einstein, teoria efektu fotoelektrycznego
- 1905, Albert Einstein, szczególna teoria względności
- 1913, Niels Bohr, model atomu wodoru (jednak błędny!)
- 1921, doświadczenie Sterna-Gerlacha, odkrycie spinu
- 1923, Louis de Broglie, podstawy falowego opisu cząstek
- 1925, Enrico Fermi, statystyka Fermiego cząstek kwantowych
- 1926, Erwin Schrödinger, równanie falowe opisu cząstek kwantowych
- 1926, Max Born, interpretacja probabilistyczna funkcji falowej
- 1927, Werner Heisenberg, zasada nieoznaczoności
- ~ 1930, Paul Dirac, relatywistyczna mechanika kwantowa
- ~ 1930, Wolfgang Pauli, teoria spinu, zakaz Pauliego
- ~ 1940, Richard Feynman, całki po trajektoriach

## ”Rewolucje kwantowe”

### I rewolucja kwantowa

Obejmuje okres: od roku 1900 do lat ~1940.

Opracowanie teoretycznych i eksperymentalnych podstaw mechaniki kwantowej.

#### Najważniejsze zastosowania fizyki kwantowej XX wieku

- tranzystor bipolarny
- dioda na złączu półprzewodnikowym  $p - n$
- dioda tunelowa
- tranzystor MOSFET
- maser (wzmacniacz promieniowania mikrofalowego)
- lasery atomowe i półprzewodnikowe
- diody elektroluminescencyjne
- pamięci magnetyczne i półprzewodnikowe

- obwody scalone
- ...

### ⇒ komputery (konwencjonalne)

W roku 1959 Richard Feynman wygłosił w Caltech referat zatytułowany: "There is plenty of room at the bottom"<sup>†</sup> w którym zaproponował wykorzystanie pojedynczych atomów i molekuł do zapisu informacji.

<sup>†</sup>Engineering and Science, Caltech, Vol. XXIII, p. 22 (1960)

### Pionierski pomysł w rozwoju technologii kwantowych:

**bezpośrednie wykorzystanie zjawisk kwantowych w technologii.**

#### Uwaga:

Dotychczasowe zastosowania, np. tranzystory, wykorzystują zjawiska kwantowe w sposób pośredni (wyjątkiem jest nadprzewodnictwo).

Np. zapis/odczyt 1 bitu za pomocą tranzystora konwencjonalnego wymaga przepływu **od ok. miliona do miliarda elektronów**.

Natomiast zapis/odczyt 1 bitu kwantowego może być dokonany za pomocą **pojedynczego elektronu**.

## II rewolucja kwantowa (faza inżynierii kwantowej)

W ostatnich latach implementowane są **technologie kwantowe**, które **wykorzystują zjawiska kwantowe w sposób bezpośredni**.

### Technologie kwantowe

- kwantowe algorytmy obliczeniowe
- kryptografia kwantowa
- teleportacja kwantowa
- tranzystor jednoelektronowy ⇒ nanoelektronika
- jednoelektronowa komórka pamięci
- tranzystor spinowy ⇒ spintronika
- lasery atomowe
- nanolitografia
- metrologia kwantowa

### ⇒ komputery kwantowe

## 6 Budowa Wszechświata

### Budowa Wszechświata

Ogólnie:

#### cząstki + promieniowanie

Cząstki posiadają niezerową masę spoczynkową ( $m_0 \neq 0$ ).

Promieniowanie charakteryzuje się zerową masą spoczynkową ( $m_0 = 0$ ).

### Fundamentalne składniki Wszechświata

#### Cząstki elementarne

- (1) leptony: elektron ( $e^-$ ), mezon  $\mu^-$  (mion), mezon  $\tau^-$  (taon), neutrino elektronowe ( $\nu_e$ ), neutrino mionowe ( $\nu_\mu$ ), neutrino taonowe ( $\nu_\tau$ ) + ich antycząstki  
np. antycząstką elektronu jest pozyton  $e^+$
- (2) kwarki: u (up), c (charm), t (top, true), d (down), s (strange), b (bottom, beauty) + ich antycząstki
- (3) bozony pośredniczące: foton, gluon, bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$ , grawiton (jeszcze nie znaleziony)
- (4) bozon Higgsa  $H$  (odkryty w 2012 roku)

Proton (p) i neutron (n) składają się z trzech kwarków:

p = uud

n = udd

Budowa atomu (przypomnienie):

dotądnie jądro (złożone z Z protonów i N neutronów) + Z elektronów

Z punktu widzenia zastosowań w technice i biologii najważniejsza jest struktura materiałów rozumiana następująco:

#### rdzenie atomowe (jony dodatnie) + elektrony walencyjne

Energia wiązania elektronu rdzenia  $\simeq$  keV

Przypomnienie:  $1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ J}$

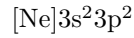
Energia wiązania  $W$  elektronu walencyjnego  $\simeq 1 \div 10 \text{ eV}$

$\implies W =$  energia reakcji chemicznych

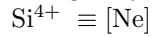
$\implies$  energia  $W$  odpowiada energii promieniowania widzialnego, podczerwonego i nadfioletowego

#### Przykład: kryształ krzemu

konfiguracja elektronowa swobodnego atomu krzemu Si:



konfiguracja elektronowa atomu Si związanego w kryształe krzemu:



+ 4 elektrony walencyjne tworzące wiązanie kowalencyjne

⇒ energia wiązania kryształu krzemu  $\simeq 4 \text{ eV/atom}$

⇒ **Budowa materiałów**

**rdzenie atomowe + elektrony walencyjne**

Elektrony walencyjne odpowiedzialne są za stabilność oraz własności chemiczne, elektryczne, magnetyczne i mechaniczne materiałów.

## 7 Miniaturyzacja przyrządów elektronicznych

### Miniaturyzacja przyrządów elektronicznych

#### Skala rozmiarów nanometrowych

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10 \text{ \AA}$$

#### Przykład: kryształ krzemu

W kryształe krzemu odległość pomiędzy sąsiednimi najbliższymi sobie atomami wynosi 0.0235 nm.

⇒ Na odcinku kryształu o długości 1 nm mieści się  $\sim 40$  atomów krzemu.

⇒  $1 \text{ nm}^3$  zawiera  $\sim 64000$  atomów krzemu.

Dla tych rozmiarów istotną rolę odgrywają **efekty kwantowe**.

Dla przyrządów elektronicznych o rozmiarach  $l < \sim 100 \text{ nm}$  pojawiają się **zjawiska kwantowe**.

Prowadzą one do efektów o dwojakim charakterze:

- (1) niekorzystnym: prądy tunelowe przez warstwy izolatora  
⇒ przebicie warstwy izolującej
- (2) korzystnym: bezpośrednie wykorzystanie zjawisk kwantowych w nanoelektronice  
⇒ przyrządy jednoelektronowe i spintroniczne, obliczenia kwantowe

Przyjmuje się, że **rozmiary  $\sim 10 \text{ nm}$**  stanowią

**granicę miniaturyzacji przyrządów wytwarzanych w laboratoriach.**

Dla rozmiarów  $< \sim 10 \text{ nm}$  mamy do czynienia z naturalnymi molekułami i atomami, których nie da się kształtować w procesie technologicznym.

Naturalne molekuły znajdują zastosowanie w

⇒ **elektronice molekularnej.**