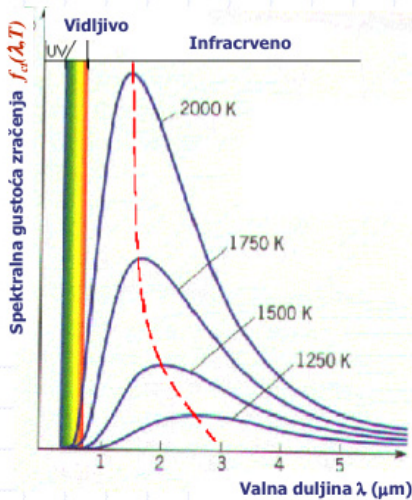


## predavanje 10: Kvantna priroda svjetlosti

1. Skicirajte spektar zračenja crnog tijela, navedite Stefan-Boltzmannov i Wienov zakon, što je ultraljubičasta katastrofa.



- **Wienov zakon:** valna duljina koja odgovara maksimumu izračene energije ( $\lambda_m$ ) obrnuto je proporcionalna temperaturi:

$$\lambda_m \cdot T = 2,889 \cdot 10^{-3} (m \cdot K)$$

- **Stefan-Boltzmannov zakon** (Jozef Stefan eksperimentalno, a Ludwig Boltzmann teorijski, su došli do spoznaje da je energija koju zrači četvorni metar površine crnog tijela u jednoj sekundi razmjeran četvrtoj potenciji apsolutne temperature tijela:

$$I = \int_0^{\infty} f_{ct}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left( \frac{W}{m^2 K^4} \right)$$

$\sigma$  - Stefan - Boltzmannova konstanta

16

Krajem 19. stoljeća, nakon što je izmjeren spektar zračenja crnog tijela, pomoću statističke mehanike i valne teorije svjetlosti pokušao se objasniti oblik krivulja spectra za pojedine temperature i dobiti kvantitativna ovisnost energije zračenja o valnoj duljini.

Dva najvažnija rezultata klasične fizike u pokušajima objašnjenja spectra zračenja crnog tijela su Wienova formula (dobra za male valne duljine) i Rayleigh-Jeansova formula (dobra za velike valne duljine; veliko neslaganje u ultraljubičastom području=**ultraljubičasta katastrofa**)

**Jeans-Rayleighovi Wienov rezultat nisu u skladu s eksperimentom, ali ne zato što se u izvodu potkrala neka greška, već zato što klasična fizika svojim zakonima ne može objasniti sve pojave u prirodi.**

2. Ukratko objasnite Planckov zakon zračenja crnog tijela.

**Planckov zakon zračenja crnog tijela:** harmonički oscilator mijenja svoju energiju samo u određenim obrocima, **kvantima energije**  $h \cdot \nu$ , gdje je  $\nu$  frekvencija titranja, a  $h$  Planckova konstanta.

( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js)

Uz ovu hipotezu Planck je izveo novi izraz za spektralnu gustoću  $f_{ct}(\lambda, T)$  koji se izvrsno slagao s eksperimentalnim podacima:

$$f_{ct}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

3. Ukratko objasnite fotoelektrični efekt i Comptonov efekt. (obavezno)

**Fotoelektrični efekt:** je pojava kod koje metali zbog utjecaja elektromagnetskih valova emitiraju elektrone. Elektromagnetsko zračenje donekle oslobađa elektrone iz metala.

Kada foton upada na površinu metala, sudara se s elektronom, predaje mu svu svoju energiju, foton nestaje, apsorbira se, a elektron, ako je dobio dovoljnu energiju može izaći iz metala.

Dio energije fotona pritom se troši na oslobađanje elektrona iz metala (izlazni rad  $W_i$ ), tj. na svladavanje potencijalne energije kojom je elektron vezan u metalu, a ostatak se pretvara u kinetičku energiju fotoelektrona.

### Comptonov efekt

Pri sudaru fotona i mirujućeg elektrona, foton izgubi dio svoje energije i zato mu se smanji frekvencija, a poveća valna duljina. Sudar fotona i elektrona je elastičan. Iz zakona očuvanja energije i očuvanja količine gibanja dobije se izraz za promjenu valne duljine:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) = \lambda_c (1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

gdje je  $m_e$  masa elektrona u mirovanju.

### 4. Objasnite problem zračenja crnog tijela i kako je riješen Planckovom hipotezom o kvantiziranosti zračenja.

Spektralna gustoća zračenja crnog tijela bila je prva pojava koju klasična fizika nije uspjela objasniti. Klasična teorija zračenja polazi od pretpostavke da svjetlost zrače harmoničko oscilatori (npr. elektroni u atomima) koji mogu imati bilo koju vrijednost energije.

Spektralnu gustoću zračenja je objasnio M. Planck. Postavio je dvije pretpostavke:

- Energija oscilatora može poprimiti samo određene diskretne vrijednosti  $E_n$ ,  $E_n = nh\nu$
- Oscilator (tj. atom ili molekula) emitira ili apsorbira energiju samo u diskretnim obrocima, i tad prelazi iz jednog kvantnog stanja u drugo.

Došao je do zaključka da spektralnu gustoću  $f_{ct}(\lambda, T)$  savršeno opisuje izraz:

$$f_{ct}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

gdje je:  $c$  - brzina svjetlosti u vakuumu,  
 $k$  - Boltzmannova konstanta,

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js - konstanta koju je Planck podesio tako da se njegova teorijska krivulja slaže s eksperimentalnom. Nađeno je da vrijednost ovog parametar ne ovisi o materijalu od kojeg je napravljeno crno tijelo ni o temperaturi, odnosno da je to prirodna fundamentalna konstanta koja se naziva **Planckova konstanta**.

Pri izvodu te formule nužno je pretpostaviti da harmonički oscilator mijenja svoju energiju samo u određenim obrocima, **kvantima energije  $h\nu$** , gdje je  $\nu$  frekvencija titranja, a  $h$  nova prirodna konstanta koja će kasnije biti nazvana Planckovom konstantom. Dakle, atom ne može primiti ili emitirati bilo kakvu malenu količinu energije, već samo određene količine (kvante) energije ili višekratnike tog kvanta.

### 5. Objasnite fotoelektrični efekt: koji su problemi sa tumačenjem fotoefekta u klasičnoj fizici, te kako je Einstein objasnio fotoefekt.

**Fotoelektrični efekt:** je pojava kod koje metali zbog utjecaja elektromagnetskih valova emitiraju elektrone. Elektromagnetsko zračenje donekle oslobađa elektrone iz metala.

Klasična fizika nije mogla objasniti slijedeće značajke fotoelektričnog efekta:

- kinetička energija izbijenih elektrona ne zavisi o **intenzitetu** svjetlosti, nego o njenoj **frekvenciji**,
- postoji minimalna (granična) frekvencija svjetlosti  $\nu_g$  ispod koje ne dolazi do fotoelektričnog efekta.

Einstein je objasnio fotoelektrični efekt. Svjetlost je predočio korpuskulama energije. Energija svjetlosti konstantne frekvencije sastoji se od kvanta energije – fotona, a svaki foton ima energiju:

$$E = h \cdot \nu$$

Kada foton upada na površinu metala, sudara se s elektronom, predaje mu svu svoju energiju, foton nestaje, apsorbira se, a elektron, ako je dobio dovoljnu energiju može izaći iz metala.

Dio energije fotona pritom se troši na oslobađanje elektrona iz metala (izlazni rad  $W_i$ ), tj. na svladavanje potencijalne energije kojom je elektron vezan u metalu, a ostatak se pretvara u kinetičku energiju fotoelektrona:

$$h \nu = W_i + \frac{1}{2} m_e v_{maks}^2$$

\*pazite na razliku između  $\nu$  (frekvencije) i  $v$  (brzine)

Budući da elektron na putu kroz metal može izgubiti dio svoje kinetičke energije, onda možemo pisati:

$$\frac{1}{2} m_e v_{maks}^2 \leq h \nu - W_i$$

Fotoelektrični efekt nastat će samo onda kada elektron dobije energiju veću od izlaznoga rada ( $W_i = h \cdot \nu_g$ ). U suprotnome ako je energija manja od izlaznoga rada, elektron se neće izbiti sa površine metala. Svaki metal posjeduje najmanju graničnu vrijednost frekvencije ( $\nu_g$ ) ispod koje nema fotoelektričnog efekta bez obzira kako bio velik intenzitet upadne svjetlosti:

$$h \nu = W_i + \frac{1}{2} m_e v_{maks}^2 \quad \rightarrow \quad h \nu = h \nu_g + \frac{1}{2} m_e v_{maks}^2 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2} m_e v_{maks}^2 = h(\nu - \nu_g)$$

Jakost svjetla utječe samo na broj emitiranih elektrona. Što je svjetlosna jakost veća, broj fotoelektrona je veći.

## 6. Objasnite Comptonov efekt.

Američki fizičar Compton otkrio je još jedan efekt s kojim se može dokazati korpuskularna priroda zračenja. Pri raspršenju rendgenskog zračenja (el. valova kratke valne duljine, manje od  $10^{-10}$  m) na elektronima u komadu grafita, opazio je da raspršeno zračenje ima dvije komponente, prva ima valnu duljinu kao i ulazni snop, a druga malo veću valnu duljinu. Razlika valnih duljina ( $\Delta\lambda$ ) tih dviju komponenta ovisi o kutu raspršenja.

Pri sudaru fotona i mirujućeg elektrona, foton izgubi dio svoje energije i zato mu se smanji frekvencija, a poveća valna duljina. Sudar fotona i elektrona je elastičan. Iz zakona očuvanja energije i očuvanja količine gibanja dobije se izraz za promjenu valne duljine:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) = \lambda_c (1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\text{gdje je } \lambda_c = \frac{h}{m_e \cdot c} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} = 0.00243 \text{ nm} - \text{Comptonova valna duljina}$$

a  $m_e$  masa elektrona u mirovanju. Comptonov eksperiment je dokazao Einsteinovu pretpostavku da svaki foton ima količinu gibanja:

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