



Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Studij računarstava

Fizika 2

Auditorne vježbe – 11

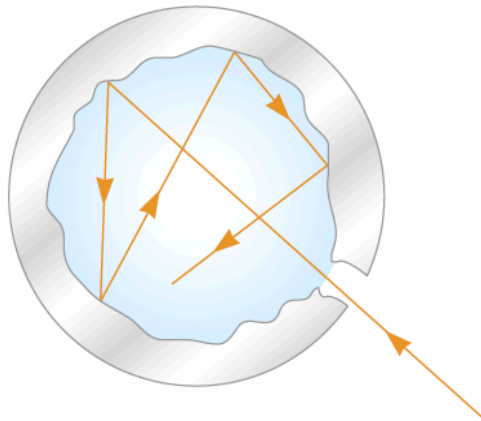
Kvatna priroda svjetlosti, Planckova hipoteza, fotoefekt,
Comptonov efekt

Ivica Sorić

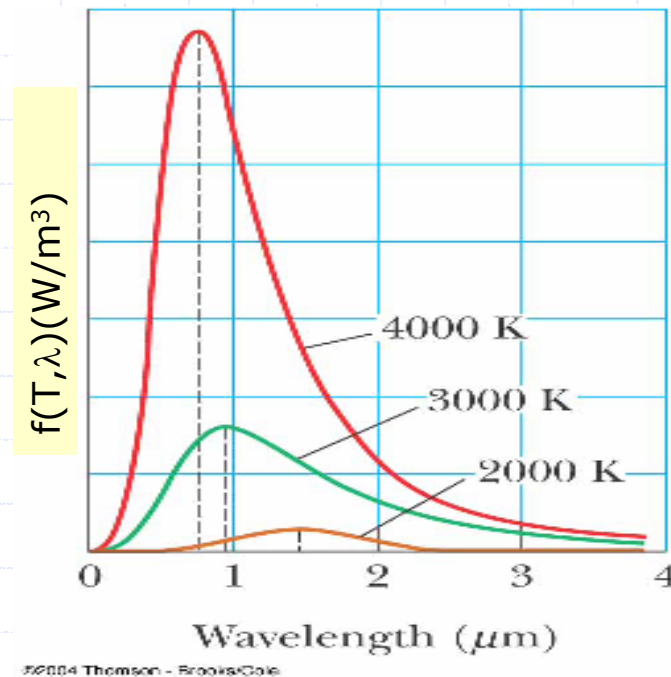
(Ivica.Soric@fesb.hr)

Planckov zakon zračenja za crno tijelo

Tijelo koje apsorbira sve valne duljine elektromagnetskog zračenja koja padju na njega je idealno crno tijelo



Spektar zračenja crnog tijela



Klasična fizika prema kojoj atom koji izvodi harmoničko titranje frekvencijom ν može kontinuirano mijenati svoju energiju ne može objasniti spektar zračenja crnog tijela

Planckov zakon zračenja crnog tijela

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

Stefan-Boltzmannov zakon

$$I = \int_0^{\infty} f_{ct}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

Wienov zakon

$$\frac{df_{ct}(\lambda, T)}{d\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_m T = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$$

Wienova formula

$$\lambda \ll \frac{hc}{kT} \Rightarrow f_{ct}(\lambda, T) = \frac{A}{\lambda^5} e^{-\frac{B}{\lambda T}}$$

Jeans-Rayleighova formula

$$\lambda \gg \frac{hc}{kT} \Rightarrow f_{ct}(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \bar{E} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$

Primjer 1

- ◆ Maksimum spektralne gustoće zračenja sunca odgovara svjetlosti valne duljine $0,5 \mu\text{m}$.
- A) Kolika je temperatura Sunčeve površine, uz pretpostavku da Sunce zrači kao idealno crno tijelo?
- B) Koliku snagu zrači četvorni metar Sunčeve površine?
- C) Kolika je ukupna snaga koju zrači cijela površina Sunca?
- D) Kolika je srednja gustoće energijskog toka koja od Sunca stigne na Zemlju, ako zanemarimo gubitke u atmosferi?

Rješenje: a) $T = 5796 \text{ K}$; b) $P = 64 \text{ MW}$; c) $P = 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$; d) $I = 1,38 \text{ kW/m}^2$.

Primjer 2

- ◆ Radio antena ima snagu od 150 kW na frekvenciji $f=99,7$ MHz. Koliko fotona u sekundi emitira antena.

Rješenje: $n=2,27 \times 10^{30}$

Ponavljanje – fotoelektrični efekt

- Energija fotona definirana je produktom: $E = h\nu$.
- Fotoelektrični efekt je pojava izbacivanja elektrona iz materijala pod utjecajem elektromagnetskog zračenja. Einsteinova relacija za fotoelektrični efekt je:

$$\frac{mv^2}{2} \leq h\nu - W_i$$

gdje je W_i izlazni rad materijala, m masa elektrona, v brzina oslobođenog elektrona, a ν frekvencija upadnog zračenja. Za zračenje s frekvencijom nižom od granične frekvencije ne može doći do fotoelektričnog efekta.

$$\nu_g = \frac{W_i}{h}$$

- Sudar fotona frekvencije ν s mirnim elektronom (Comptonov efekt) je elastičan sudar za kojega vrijedi zakon očuvanja energije i zakona očuvanja količine gibanja.

Primjer 1

- ◆ Kada se neka površina obasja svjetlošću valne duljine $\lambda_1=589$ nm, oslobađaju se elektroni za čije je zaustavljanje potreban napon $U_{z1}=0,2$ V.
 - a) Koliki je izlazni rad i granična frekvencija fotoelektričnog efekta za zadani materijal?
 - b) Koliki je napon zaustavljanja ako se površina osvijetli zračenjem valne duljine $\lambda_2=405$ nm?

◆ Rezultat: a) $W_i=1,9$ eV= $3,05 \cdot 10^{-19}$ J, $\nu_g=4,6 \cdot 10^{14}$ Hz, b) $U_{z2}=1,16$ V.

Primjer 2

- ◆ Odredite maksimalnu brzinu fotoelektrona, koji s površine srebra (izlazni rad $W_i=4,7$ eV) izlijeće ozračen
 - a) ultraljubičastim zračenjem valne duljine $\lambda_1=0,155$ μm ,
 - b) γ -zračenjem valne duljine $\lambda_2=2,7$ pm.

◆ Rezultat: a) $v_1=1,08 \cdot 10^6$ m/s, b) $v_2=2,55 \cdot 10^8$ m/s.

Primjer 3

- ◆ Potencijal zaustavljanja za fotoelektrone emitirane iz kalija žutom svjetlošću valne dužine $5890 \text{ \AA}$ je $0,36 \text{ V}$, a isti potencijal iznosi $3,14 \text{ V}$ za fotoelektrone izbačene ultraljubičastom svjetlošću valne dužine $2537 \text{ \AA}$. Izračunati iz navedenih podataka Planckovu konstantu.

- ◆ Rezultat: $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

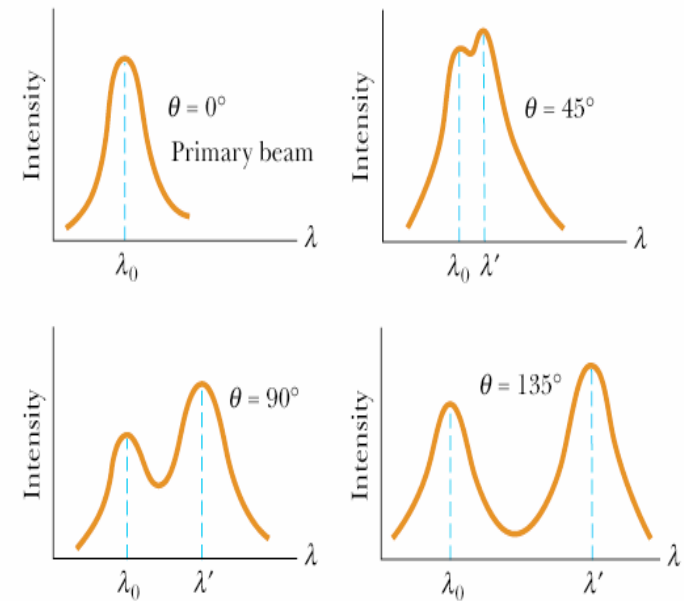
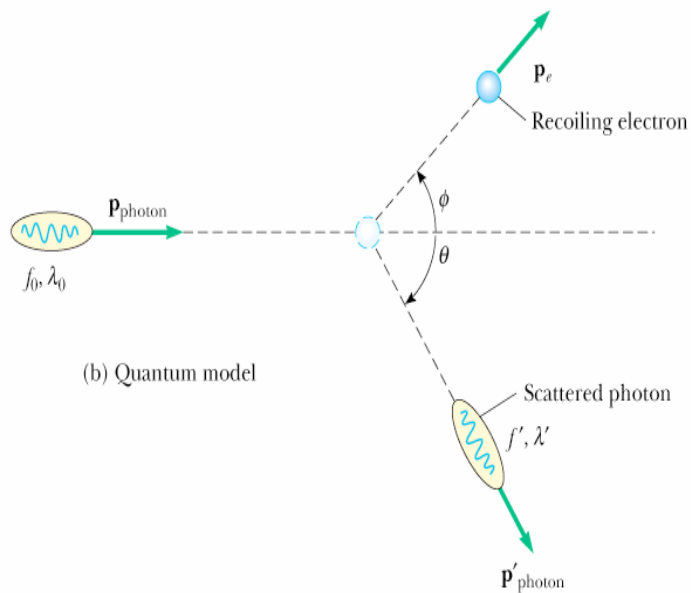
Primjer 4 (domaći rad)

- ◆ Najveća valna duljina koja još izaziva fotoefekt kod cinka je $2930 \text{ \AA}$. Kolikom će najvećom brzinom izlaziti fotoelektroni ako se cink obasja svjetlošću od $2000 \text{ \AA}$?

◆ Rezultat: $v = 8.319 \cdot 10^5 \text{ m/s}$

Ponavljanje – Comptonov efekt

- Pri raspršenju fotona na elektronu, valna dolžina fotona se povečava ovisno o kutu raspršenja.



$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \vartheta) = 2 \lambda_c \sin^2 \frac{\vartheta}{2}$$

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = 2,42 \times 10^{-12} \text{ m} \quad \text{Comptonova valna dolžina}$$

m - masa elektrona

Ponavljanje

Promjena valne duljine fotona ovisi o kutu pod kojim se rasprši:

$$\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \vartheta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

λ_c -Comptonova valna duljina

Primjer 1

- ◆ Foton energije $4 \cdot 10^{-14}$ J raspršuje se na mirnom elektronu. Nađite kut između smjera odbijenog elektrona i raspršenog fotona ako se valna duljina fotona promijenila za $1,5 \cdot 10^{-12}$ m.

- ◆ Rezultat: $\alpha = 112,7^\circ$.

Primjer 2

- ◆ Foton energije 0,66 MeV raspršuje se na slobodnom elektronu i pritom se njegova valna duljina promijeni za 10%. Izračunajte kut između smjerova odbijenog elektrona i raspršenog fotona, te kinetičku energiju elektrona nakon raspršenja.

- ◆ Rezultat: $\alpha = 83,08^\circ$, $E_k = 60 \text{ keV}$.

Primjer 3

- ◆ Foton koji ima energiju 10 keV sudari se sa slobodnim elektronom koji je u stanju mirovanja i rasprši se pod kutem od 60° , naći: a.) promjenu u energiji i valnoj duljini fotona, b.) kinetičku energiju elektrona, količinu gibanja i kut raspršenja elektrona

- ◆ Rješenje: a.) $\Delta E = 100 \text{ eV}$, $\Delta \lambda = 0,012 \times 10^{-10} \text{ m}$
b.) $E = 100 \text{ eV}$, $\phi = 59,5^\circ$, $p = 5,28 \times 10^{-24} \text{ kgm/s}$

Primjer 4

◆ X-zrake valne duljine 173 pm (K_α zraka željeza) se raspršuju Comptonovim efektom u smjeru koji je suprotan upadnom. Izračunajte koliko se posto od energije upadnog fotona izgubi raspršenjem i koliko iznosi kinetičku energiju elektrona nakon raspršenja.

◆ Rezultat: $\Delta E/E = 2,7 \%$, $\Delta E = 196 \text{ eV}$

◆ Gama zraka iz uzorka ^{137}Cs valne dužine 1,88 pm raspršuje se Comptonovim efektom u smjeru koji je suprotan upadnom. Izračunajte koliko se posto od energije upadnog fotona izgubi raspršenjem i koliko iznosi kinetičku energiju elektrona nakon raspršenja.

◆ Rezultat: $\Delta E/E = 72,1 \%$, $\Delta E = 476 \text{ MeV}$

Primjer 5

- ◆ Odredite energiju koja se u procesu Comptonova raspršenja predaje elektronu i manifestira kao njegova kinetička energija:
- a) ako je kut raspršenja mali, $\theta \approx 0$,
 - b) ako je kut raspršenja $\theta = \pi$ (raspršenje fotona unatrag).

$$E'_k = \frac{E_f}{mc^2} \frac{1 - \cos \Theta}{1 + \frac{E_f}{mc^2} (1 - \cos \Theta)}$$

◆ Rezultati:

a) $E'_k \approx 0$

b) $E'_k = \frac{2E_f^2}{mc^2 + 2E_f}$