

Fotoni i valovi materije

- korpuskularna slika svjetlosti: foton kvant svjetlosti
- valna slika svjetlosti: $f = \frac{c}{\lambda}$
- energija fotona: $E = hf$
- Planckova konstanta: $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
- apsorpcija: atom apsorbira svjetlost frekvencije f , pri čemu se energija fotona hf premjesti sa svjetlosti na atom
- emisija: atom emitira svjetlost frekvencije f , pri čemu se energija hf premješta s atoma na svjetlost

Fotoni i valovi materije: kratko pitanje

Rangirajte navedena zračenja po njihovoj energiji fotona počevši od najvećeg:

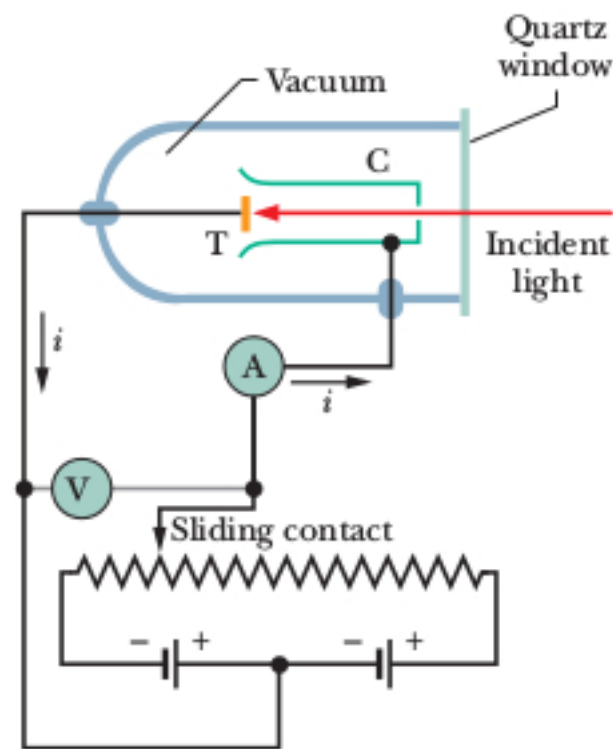
- (a) plava svjetlost iz fluorescentne lampe;
- (b) gama zračenje koje emitira radioaktivna jezgra;
- (c) radio valovi koje emitira antena radio stanice;
- (d) mikrovalno kozmičko pozadinsko zračenje.

Fotoni i valovi materije: primjer

Lampa je stavljena u središte velike sfere koja apsorbira svo zračenje koje na nju padne. Snaga kojom lampa emitira energiju je 100 W. Pretpostavite da je sva emitirana energija valne duljine 450 nm. Kojom brzinom su fotoni apsorbirani u sferi?

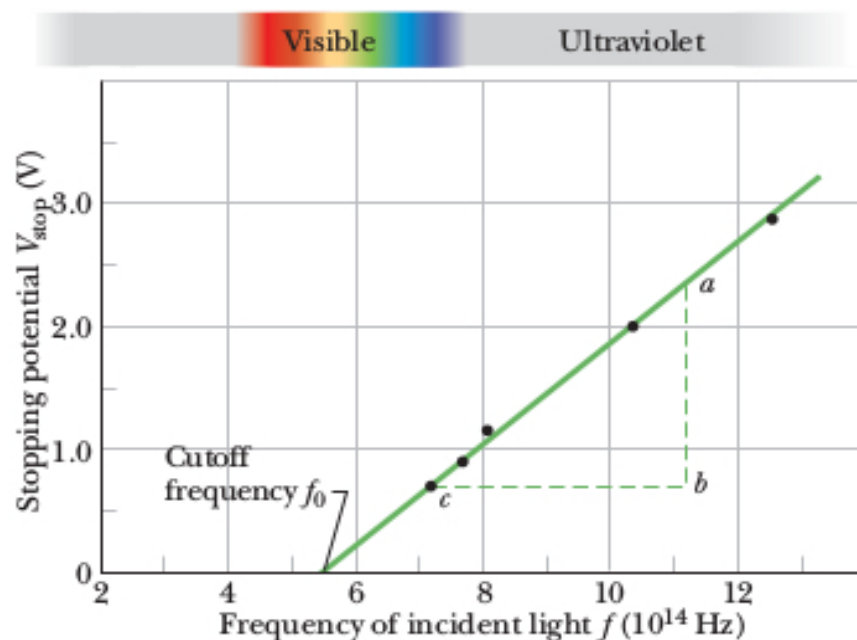
Fotoelektrični efekt

- snop svjetlosti dovoljno kratke valne duljine upadajući na metalnu plohu čini da elektroni napuštaju površinu metala
- svjetlost frekvencije f usmjerena je na metu T iz koje izbacuje elektrone
- između mete T i kolektora C je razlika potencijala V
- u kolektoru C se skupljaju fotoelektroni
- nastaje fotoelektrična struja i
- namješta se razliku potencijala V kako bi se usporilo izbačene elektrone
- na potencijalu zaustavljanja su svi elektroni najveće energije vraćeni, a njihova kinetička energija je: $K_{\max} = eV_{\text{stop}}$



Fotoelektrični efekt

- eksperimentalno je utvrđeno da maksimalna kinetička energija ne ovisi o intenzitetu izvora svjetlosti
- energija koju ulazno svjetlo može predati atomu jest energija jednog fotona
- povećanje intenziteta ulazne svjetlosti povećava broj fotona svjetlosti, no energija fotona, hf , ostaje nepromijenjena
- mijenjanjem frekvencije f ulaznog svjetla te mjerenjem potencijala zaustavljanja dobije se ovisnost prikazana grafom
- fotoelektrični efekt se ne odvija ako je frekvencija manja od određene granične frekvencije, što ne ovisi o intenzitetu ulazne svjetlosti
- elektrone u meti drže električne sile
- kako bi izašao iz mete elektron mora preuzeti najmanju energiju, tzv. energiju rada

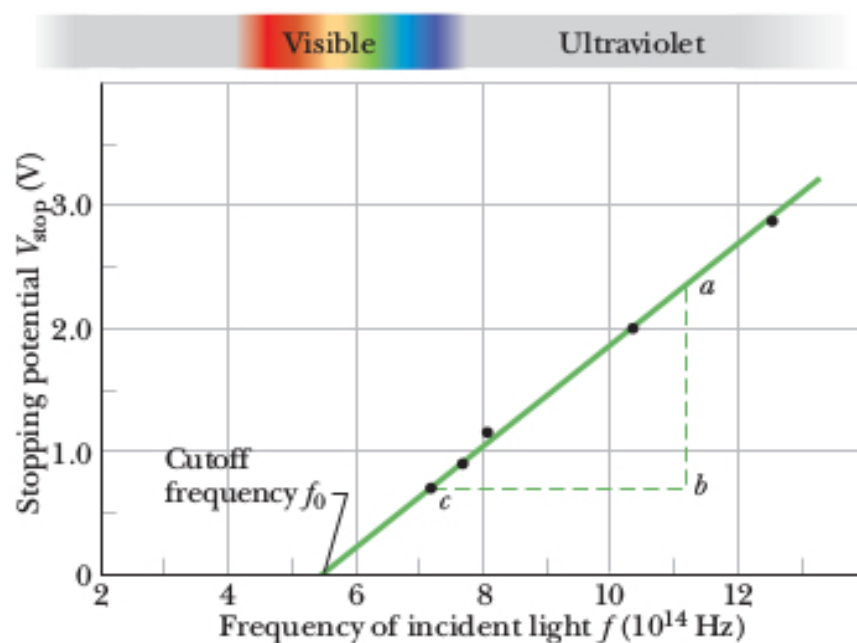


Fotoelektrični efekt

- ako je energija koja s fotona prijede na elektron veća od funkcije rada materijala mete, elektron će izaći iz mete
- jednađba fotoelektričnog efekta: $hf = K_{\max} + \Phi$

$$V_{\text{stop}} = \left(\frac{h}{e}\right)f - \frac{\Phi}{e}$$

$$\frac{h}{e} = \frac{ab}{bc} = \frac{2.35 \text{ V} - 0.72 \text{ V}}{(11.2 \times 10^{14} - 7.2 \times 10^{14}) \text{ Hz}}$$
$$= 4.1 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s}$$

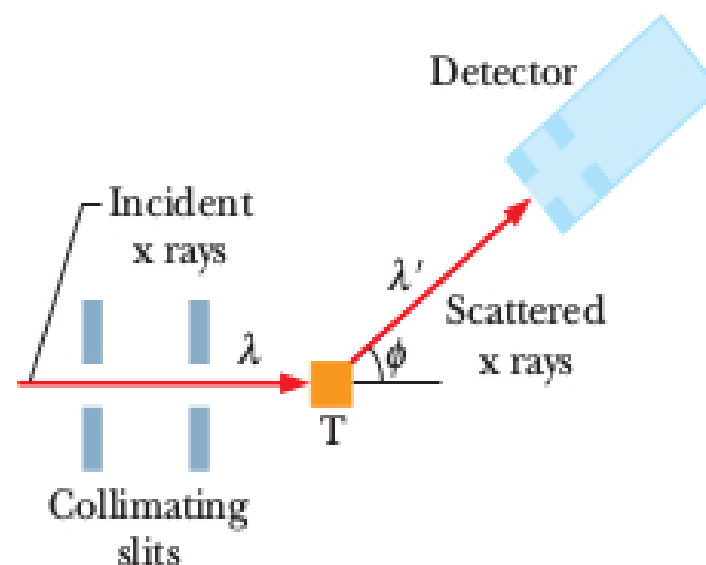


Impuls fotona

- kvant svjetla energije hf ima impuls iznosa:

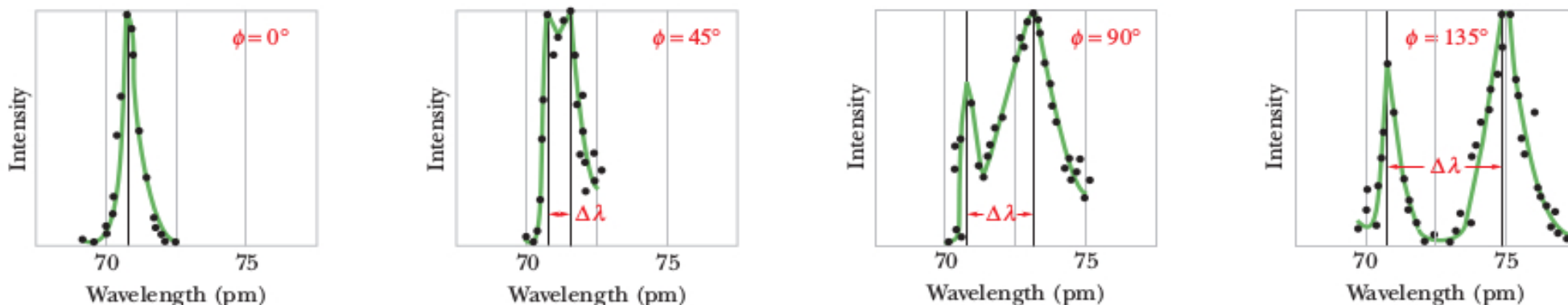
$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- kad je foton u interakciji s materijom, prenosi se energija i impuls
- Comptonov eksperiment pokazuje da fotoni prenose i impuls i energija
- snop X-zraka usmjeren je na metu T načinjenu od ugljika
- mjerene valne duljine i intenziteti X-zraka raspršenih s mete



Impuls fotona

- rezultati Comptonovog eksperimenta:

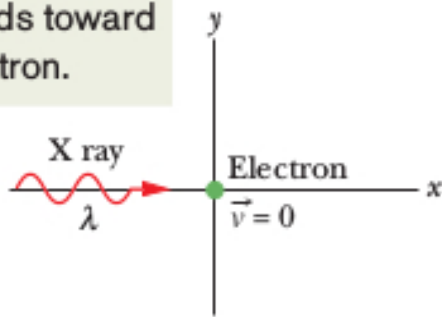


- iako je u ulaznom snopu samo jedna valna duljina, raspršeno X-zračenje sadrži niz valnih duljina sa dva prominentna vrha u intenzitetu
- jedan vrh je centriran na ulaznoj valnoj duljini, a drugi je je pomaknut za tzv. Comptonov pomak
- Comptonov pomak ovisi o kutu pod kojim je raspršeno zračenje mjereno
- Comptonov pomak:

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

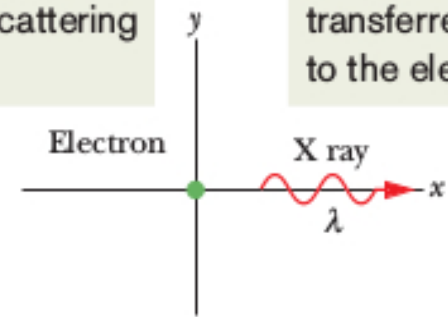
Impuls fotona

An x ray heads toward a target electron.



(a)

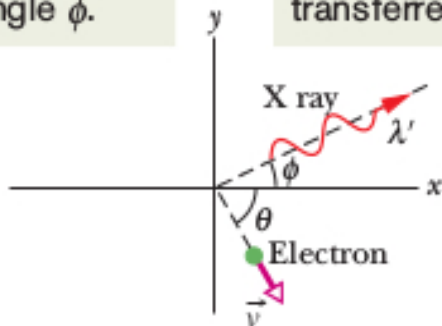
The x ray can bypass the electron at scattering angle $\phi = 0$.



(b)

No energy is transferred to the electron.

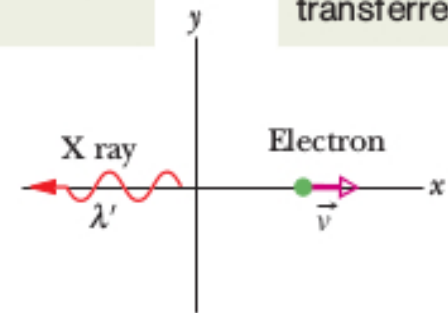
Or it can scatter at some intermediate angle ϕ .



(c)

Intermediate energy is transferred.

Or it can backscatter at the maximum angle $\phi = 180^\circ$.



(d)

Maximum energy is transferred.

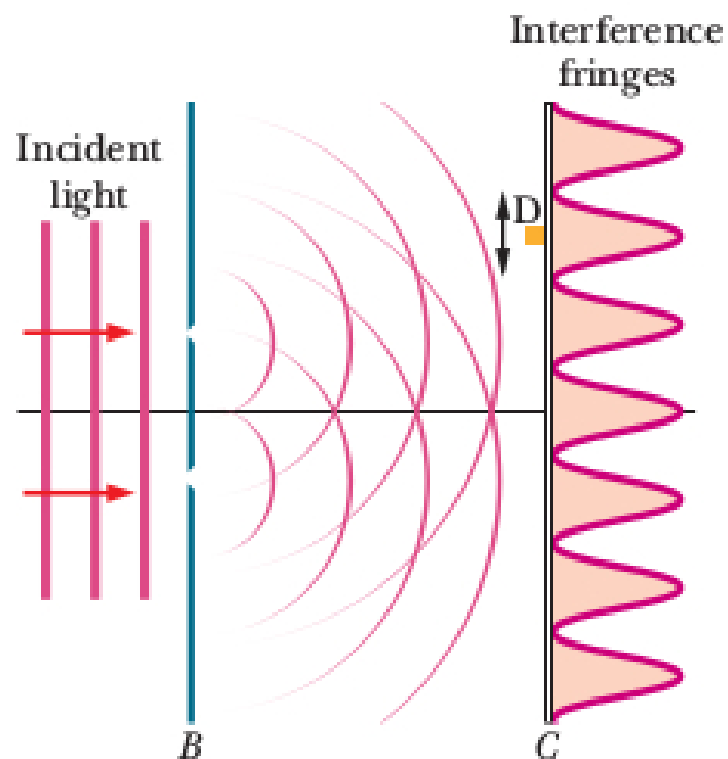
Impuls fotona: primjer

X-zrake valne duljine $\lambda=22$ pm, tj. energije fotona 56 keV, raspršeni su sa ugljikove mete, a raspršene zrake su otkrivene 85° na ulazni snop.

- (a) Koliki je Comptonov pomak raspršenih zraka?
- (b) Koliki postotak ulazne energije fotona u X-zrakama je prenesen na elektron pri takvom raspršenju?

Svjetlost kao val vjerojatnosti

- Youngov eksperiment s dva procjepa
- dokaz valne prirode svjetlosti
- vjerojatnost po jediničnom intervalu vremena da će foton biti detektiran u nekom malom volumenu centriranom u zadanoj točki u svjetlosnom valu proporcionalna je kvadratu amplitude vektora električnog polja vala

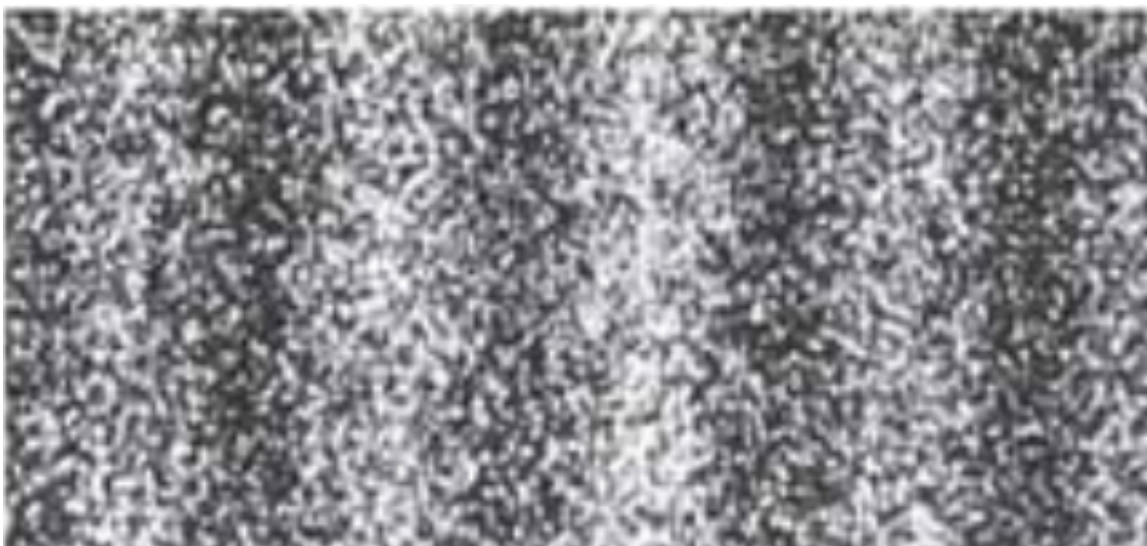
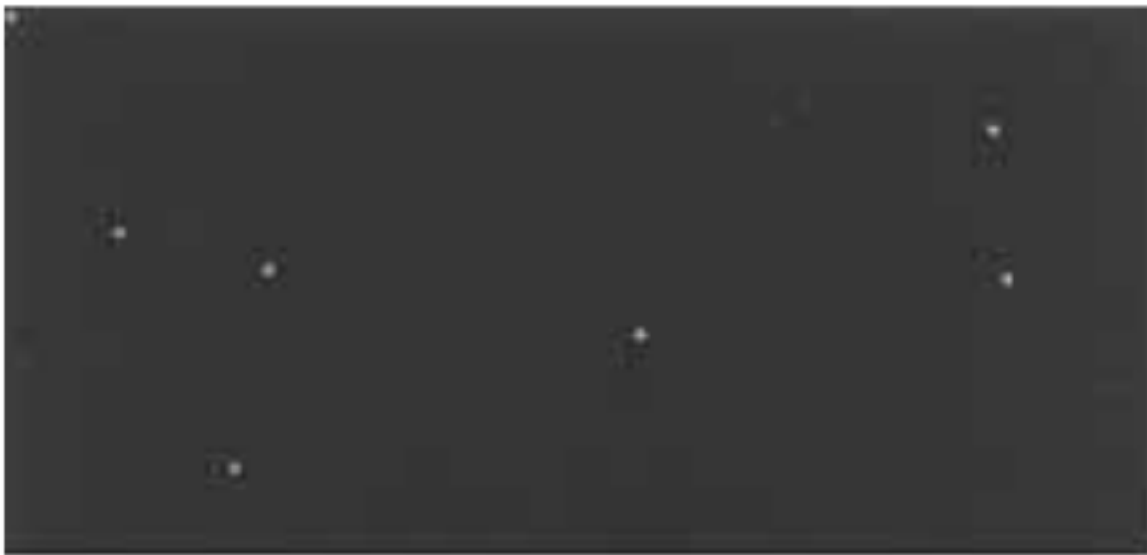


Elektroni i valovi materije

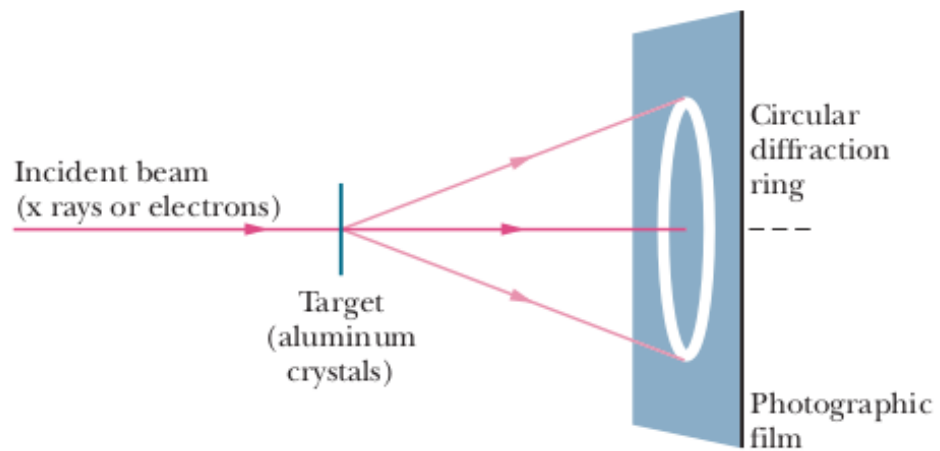
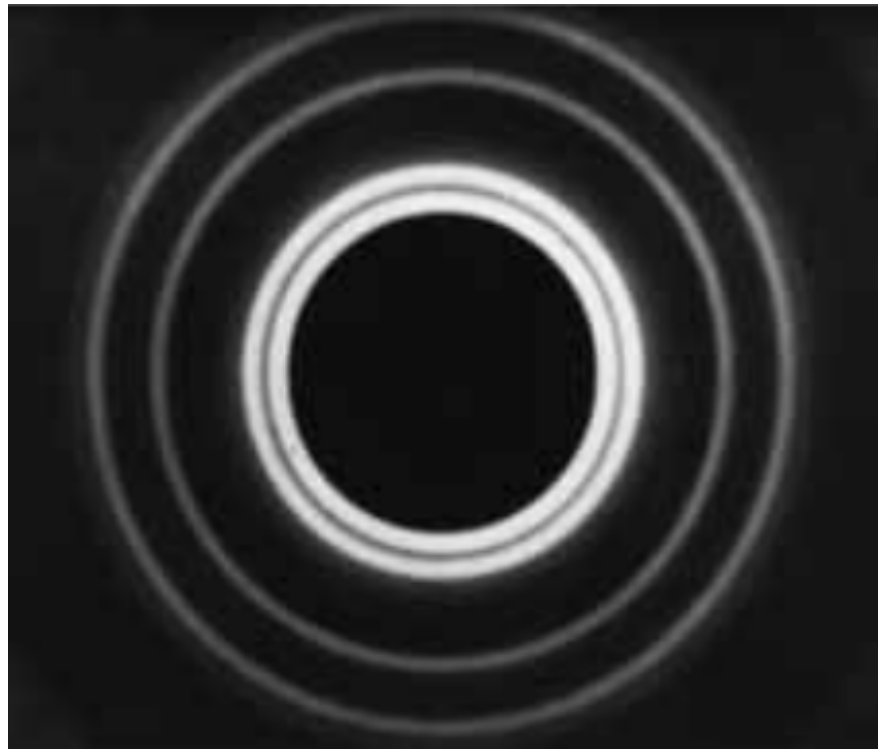
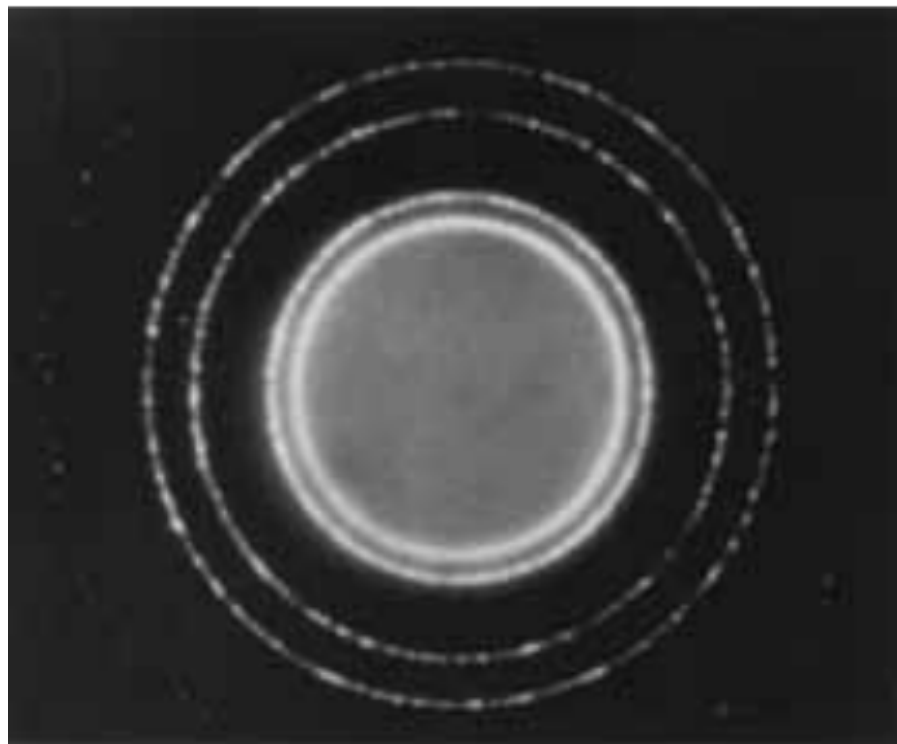
- Louis de Broglie: ako je svjetlost val koji u nekim točkama materiji prenosi energiju i impuls putem fotona, onda i snop čestica ima ista svojstva
- elektron koji se giba je val materije koji prenosi energiju i impuls
- de Broglieva valna duljina:

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

Val elektrona u eksperimentu s dva procjepa



Difrakcija X-zračenja i snopa elektrona



Elektroni i valovi materije: primjer

Kolika je de Broglijeva valna duljina elektrona kinetičke energije 120 eV?

Schrödingerova jednačba

- valna funkcija: $\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) e^{-i\omega t}$
- gustoća vjerojatnosti
- vjerojatnost po jedinici vremena detektiranja čestice u malom volumenu centriranom na danoj točki na valu materije proporcionalna je gustoći materije u toj točki
- valovi materije su rješenje Schrödingerove jednačbe:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} [E - U(x)]\psi = 0$$

- za slobodnu česticu: $\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} \left(\frac{mv^2}{2}\right)\psi = 0,$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \left(2\pi\frac{p}{h}\right)^2\psi = 0.$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0$$

Schrödingerova rovnice

- řešení Schrödingerovy rovnice za volnou částici:

$$\psi(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$$

$$\begin{aligned}\Psi(x, t) &= \psi(x)e^{-i\omega t} = (Ae^{ikx} + Be^{-ikx})e^{-i\omega t} \\ &= Ae^{i(kx - \omega t)} + Be^{-i(kx + \omega t)}\end{aligned}$$

Heisenbergove relacije neodređenosti

- položaj i impuls čestice nije moguće mjeriti istovremeno neograničenom preciznošću

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

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar$$

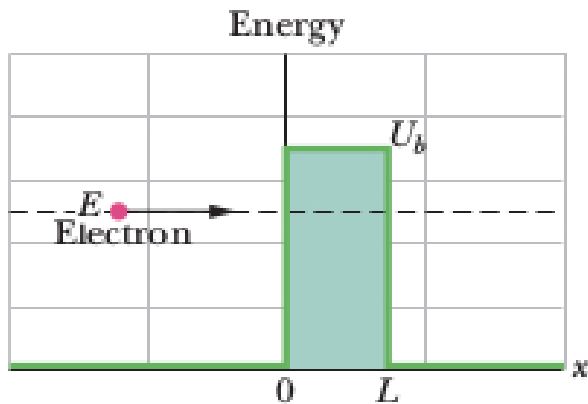
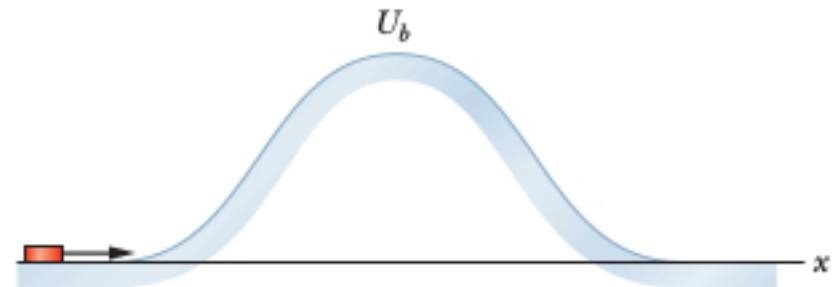
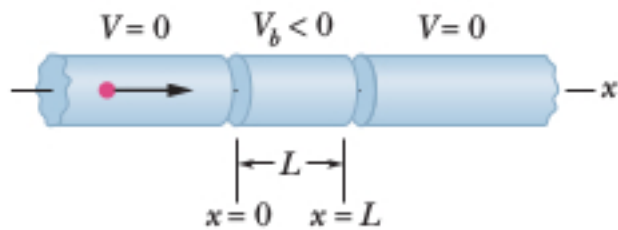


Heisenbergove relacije neodređenosti - primjer

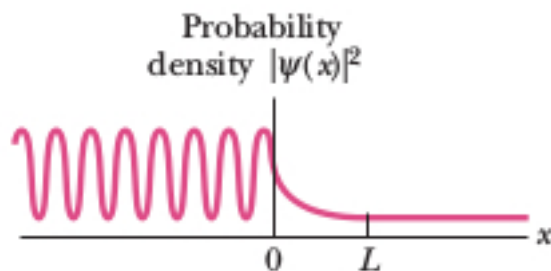
Elektron se giba duž x -osi. Brzinu mu se mjeri kao $2.05 \cdot 10^6$ m/s, sa preciznošću 0.50%. Kolika je najmanja neodređenost s kojom se istovremeno može mjeriti položaj elektrona duž x -osi?

Tuneliranje

- potencijalna barijera



$$T \approx e^{-2bL},$$
$$b = \sqrt{\frac{8\pi^2m(U_b - E)}{h^2}},$$



Tuneliranje vala materije: primjer

Elektron ima ukupnu energiju $E=5.1$ eV. Približava se barijeri visine $U_b=6.8$ eV i debljine $L=750$ pm.

- (a) Kolika je približno vjerojatnost da će se elektron transmitirati kroz barijeru te se pojaviti i biti detektabilan s druge strane barijere?
- (b) Kolika je približno vjerojatnost da će proton jednake ukupne energije $E=5.1$ eV biti transmitiran kroz barijeru te se pojaviti i biti detektabilan s druge strane barijere?

Zračenje crnog tijela

- objekti emitiraju elektromagnetsko zračenje ovisno o temperaturi
- na sobnoj temperaturi objekti zrače pretežno u infracrvenom području
- elektromagnetsko zračenje koje pada na objekt biti će djelomično apsorbirano, djelomično reflektirano i djelomično transmitirano
- npr. komad drveta ne dopušta transmisiju vidljive svjetlosti, dok staklo dopušta transmisiju gotovo sve vidljive svjetlosti, no neprozirno je na UV i IR frekvencijama
- reflektirano Sunčevo zračenje u vidljivom području omogućava nam da vidimo objekte tijekom dana
- dio zračenja koji Zemlja apsorbira, kasnije emitira u IR području
- crno tijelo je idealni objekt koji apsorbira svo zračenje koje padne na njega (nama se čini crno jer apsorbira sve vidljive frekvencije zračenja)
- crno tijelo također emitira zračenje, koje zovemo zračenjem crnog tijela

Zračenje crnog tijela

- spektar zračenja crnog tijela određen je temperaturom
- specifični intenzitet zračenja crnog tijela koje emitira objekt temperature T jest:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3/c^2}{e^{h\nu/kT} - 1} ;$$

- ili preko valne duljine:

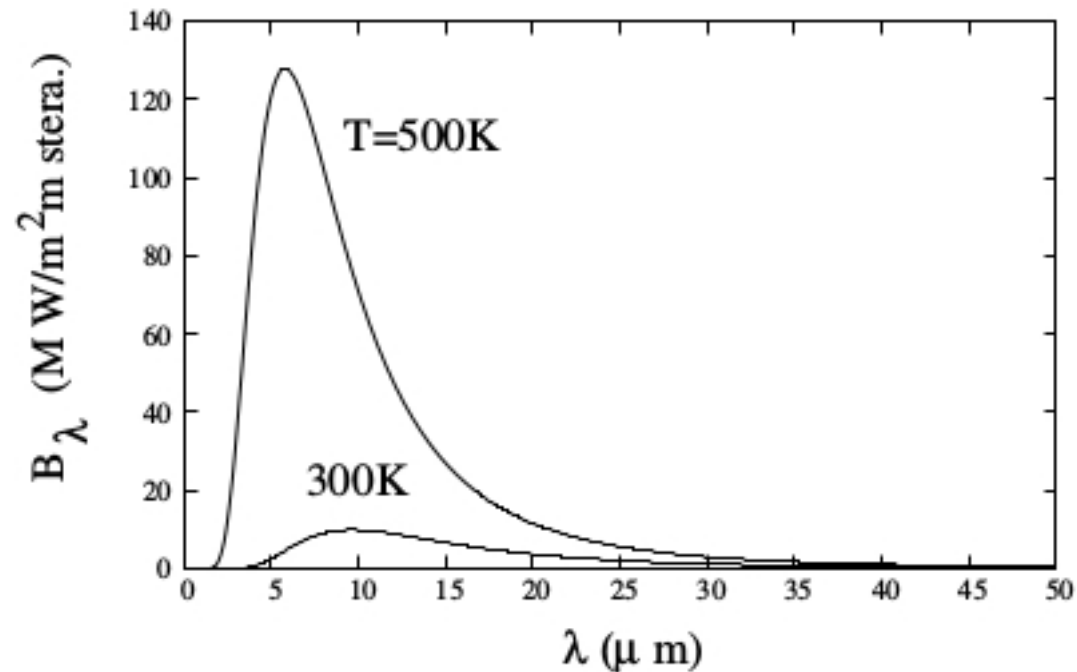
$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

- pri čemu je:

$$\int_0^\infty d\lambda B_\lambda = \int_0^\infty d\nu B_\nu = B$$

Zračenje crnog tijela

- ovisnost specifičnog intenziteta o valnoj duljini za dvije temperature



- vrhunac u zračenju crnog tijela dan je sa Wienovim zakonom pomaka:

$$\lambda_{\max}T = 0.290 \text{ cm K}$$

Zračenje crnog tijela

- totalni intenzitet zračenja crnog tijela dobije se integracijom specifičnog intenziteta po svim frekvencijama:

$$B = \sigma T^4 / \pi$$

$$\sigma = 5.670 \times 10^{-5} \frac{\text{erg}}{\text{s cm}^2 \text{ K}^4},$$

- totalni luminozitet crnog tijela je:

$$L = \sigma T^4 S$$

- idealno crno tijelo emitira maksimalnu moguću energiju za objekt na određenoj temperaturi, dok svi drugi objekti na istoj temperaturi imaju manju emisiju
- luminozitet realnog objekta dan je pomoću faktora efikasnosti, ϵ , kao:

$$L = \epsilon \sigma T^4 S$$

Zračenje crnog tijela

- idealno crno tijelo može se konstruirati pomoću šupljine čiji zidovi su neprozirni i koja ima mali otvor kroz koji ulazi zračenje
- zračenje interagira sa zidovima šupljine, uzastopno se reflektirajući, bivajući parcijalno apsorbirano te ponovo emitirano od zidova
- zidovi su neprozirni pa zračenje ne može napustiti šupljinu koja je, dakle, savršeni apsorber
- zidovi na kraju postižu termički ekvilibrij na temperaturi T
- zračenje u šupljini dostiže stacionarno stanje, bez daljnje izmjene energije sa zidovima šupljine
- pretpostavljamo da je šupljina dovoljno velika da geometrija zidova ne utječe na narav polja zračenja, što je točno ako smo dovoljno daleko od zidova
- zračenje u takvoj šupljini je gotovo istovjetno zračenju idealnog crnog tijela
- to zračenje može se sakupiti kroz mali otvor u zidovima šupljine

Sunčev spektar zračenja crnog tijela

