OSOBINE SVETLOSTI

UVOD

- Odgovor na pitanje ,,**šta je svetlost** '' ljudi su tražili još od antičkih vremena.
- Reč ,,**svetlost**'' počeli su da upotrebljavaju stari Grci za opisivanje pojava koje, delujući na naše čulo vida, izazivaju subjektivni osećaj viđenja.
- Shvatanja o prirodi svetlosti menjala su se sa razvojem nauke.
- **Dva nezavisna tumačenja**: jedno, prema kome je svetlost skup malih i veoma brzih čestica čije kretanje podleže zakonima klasične mehanike (Njutnova korpuskularna, odnosno čestična teorija) i drugo, prema kome je svetlost talasni proces (Hajgensova talasna teorija).
- Sve do početka XIX veka obe ove teorije egzistirale su paralelno.
- Zahvaljujući eksperimentima kojima su realizovane pojave interferencije, difrakcije, disperzije i polarizacije, svojstvene isključivo talasnim procesima, talasna teorija ustalila se kao jedina ispravna, dok je korpuskularna gotovo u potpunosti zaboravljena.

- Pred kraj XIX i početkom XX veka sprovedena su istraživanja čiji se rezultati nisu mogli objasniti pretpostavkom da svetlost poseduje isključivo talasnu prirodu. Najpoznatiji takvi primeri su: toplotno zračenje (koje je takođe elektromagnetne prirode), fotoelektrični efekat, Komptonov efekat i pojave emisije i apsorpcije svetlosti u atomima.

- Nastojanja da se ovi problemi reše doveli su do novih shvatanja o prirodi svetlosti, koja su na neki način predstavljali povratak na korpuskularnu teoriju.

- Dvojica velikana koji se danas smatraju tvorcima kvantne mehanike: Maks Plank i Albert Ajnštajn, pretpostavili su da se svetlost kroz prostor ne prenosi kontinualno, već u elementarnim delićima – **kvantima.**

- Ti kvanti nisu mehaničke čestice u klasičnom smislu i nazivaju se **fotonima**, a karakteriše ih energija kojom raspolažu.

- Prema tome, na pitanje o prirodi svetlosti nije moguće dati jednoznačan i nedvosmislen odgovor.

- Svetlost se u pojedinim situacijama ponaša kao skup **elektromagnetnih talasa**, a u drugim kao skup ,,**svetlosnih čestica**", odnosno fotona, ali nikada istovremeno i kao talas i kao čestica.

- Najispravnije je stoga reći da svetlost poseduje **dvojnu (dualističku)** prirodu.

Svetlost kao elektromagnetni talas

- U svojoj teoriji elektromagnetizma, nastaloj šezdesetih godina XIX veka, Maksvel je objedinio do tada poznate zakone koji se odnose na električne i magnetne pojave kroz četiri jednačine, koje u svom najjednostavnijem obliku (za vakuum) glase:

$$div\vec{E} = 0$$
$$div\vec{B} = 0$$
$$rot\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$rot\vec{B} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

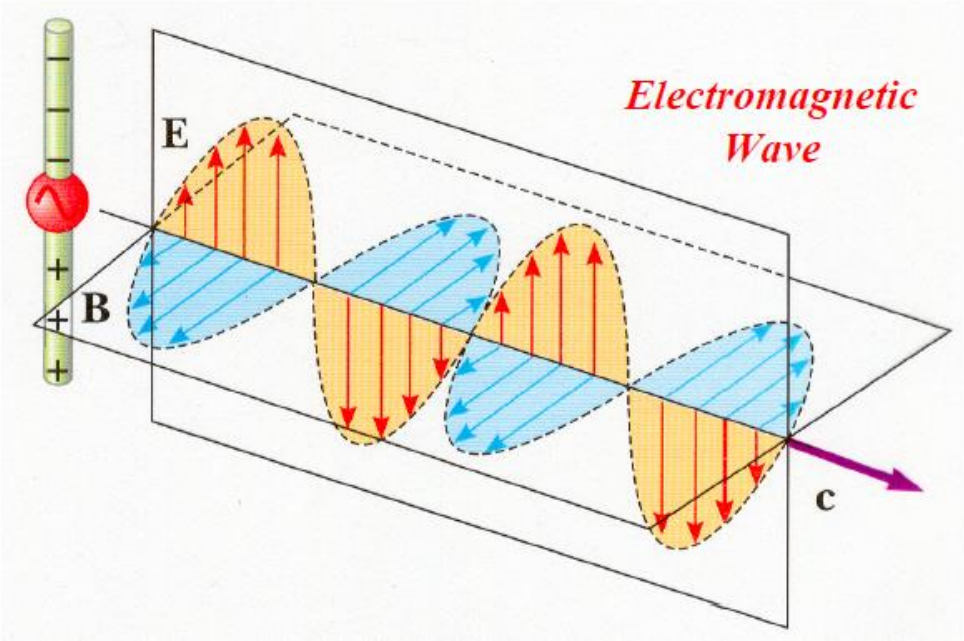
Ovde su $\vec{E} \equiv \vec{E}(x, y, z, t)$ i $\vec{B} \equiv \vec{B}(x, y, z, t)$ vektori električnog odnosno magnetnog polja, a c brzina svetlosti.

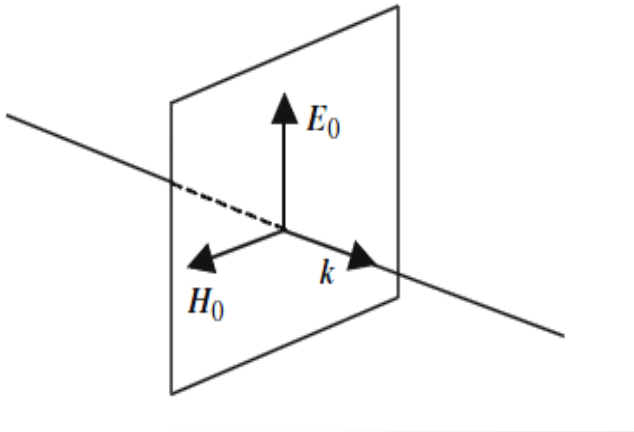
1. Prva Maksvelova jednačina je diferencijalni oblik Gausovog zakona i izražava činjenicu da je fluks električnog polja kroz zatvorenu površinu u odsustvu naelektrisanja jednak nuli.
2. Druga jednačina ukazuje na to da je fluks magnetnog polja kroz zatvorenu površinu uvek jednak nuli s obzirom da ne postoje magnetni dipoli (Gausov zakon za magnetno polje).
3. Treća jednačina je sažeti zapis Faradejevog zakona indukcije, prema kojem vremenski promenljivo magnetno polje dovodi do formiranja promenljivog električnog polja čije linije sile obuhvataju pravac promene magnetnog polja.
4. Četvrta jednačina opisuje suprotan proces od onog koga opisuje treća jednačina: vremenski promenljivo vrtložno električno polje indukuje nastanak magnetnog polja sa linijama sile koje obuhvataju linije sile električnog polja (uopšteni Amperov zakon).

Prema tome, u svim tačkama prostora u kojima postoji promenljivo magnetno polje istovremeno se javlja i promenljivo električno polje nezavisno od toga da li u prostoru postoji provodnik ili ne. Ova polja su međusobno spregnuta i čine jedinstveno **elektromagnetno polje.**

Svetlost kao elektromagnetni talas

- Uzajamno indukovanje promenljivih električnih i magnetnih polja širi se kroz prostor.
- Naime, vremenski promenljivo magnetno polje u jednoj oblasti u prostoru izaziva u okolini nastanak promenljivog električnog polja, koje - sa svoje strane - ponovo u okolini stvara promenljivo magnetno polje.
- Dakle, nastanak jednog od ova dva polja u bilo kojoj oblasti prostora širiće se u svim pravcima čineći **elektromagnetni talas.**
- U svakoj tački prostora kroz koji se prostire elektromagnetni talas postoji istovremeno i električno i magnetno polje. **Vektori ovih polja su normalni kako međusobno, tako i na pravac prostiranja talasa.**





- Za razliku od mehaničkih talasa, kakav je na primer zvučni talas, koji se mogu prostirati samo kroz materijalne sredine, elektromagnetni talasi se mogu prostirati i kroz vakuum.
- U svojoj teoriji elektromagnetizma Maksvel je pokazao da brzina elektromagnetnog talasa zavisi od dielektričnih i magnetnih osobina sredine kroz koju se on prostire i to na sledeći način:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}}$$

gde su ε_0 i μ_0 dielektrična i magnetna propustljivost vakuuma, a ε_r i μ_r relativna dielektrična i relativna magnetna propustljivost posmatrane sredine.

Za vakuum je $\varepsilon_r = 1$ i $\mu_r = 1$, na osnovu čega sledi:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 m/s \qquad v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n}$$

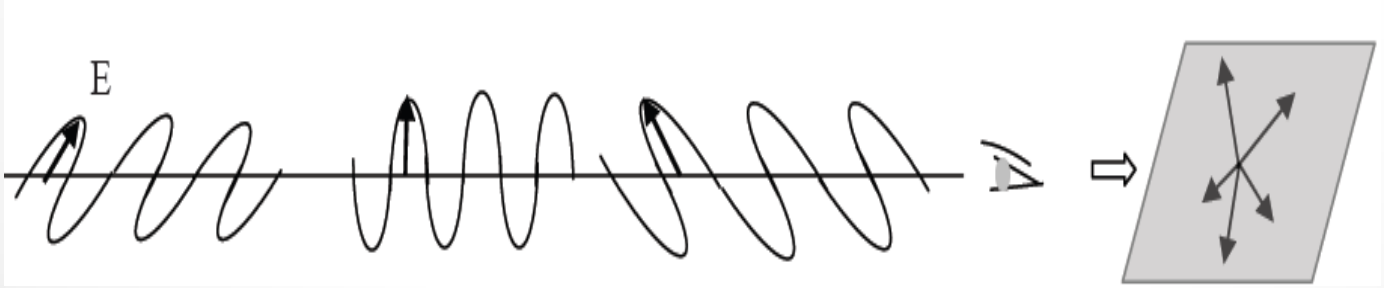
gde je $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ – apsolutni indeks prelamanja za posmatranu sredinu.

- Vrednost brzine elektromagnetnih talasa dobijena na ovaj način poklapa se sa eksperimentalnom vrednošću, što je predstavlja prvi dokaz u prilog ispravnosti Maksvelove teorije.

Svetlost kao elektromagnetni talas

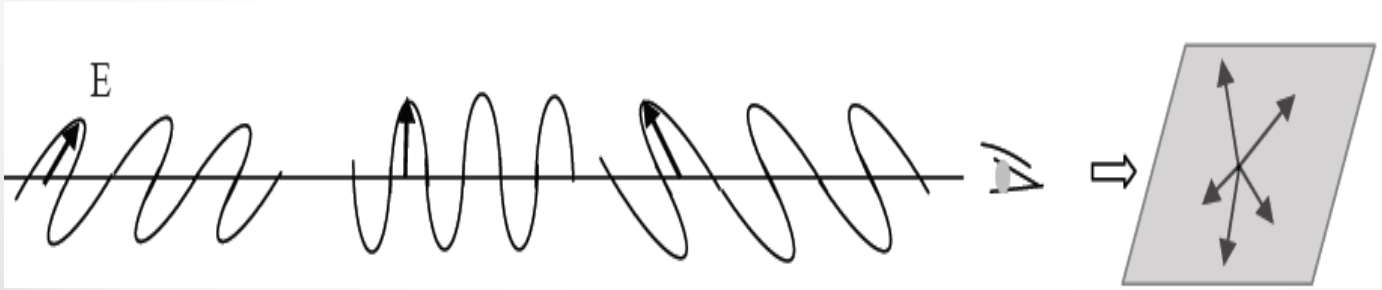
Zračenje nekog svetlosnog izvora sastoji se od talasa koje emituju atomi izvora.

- Trajanje zračenja svakog pojedinog atoma je oko 10^{-8}s.
- Obična svetlost ima slučajnu orijentaciju vektora električnog polja *E* u prostoru.
- Ako bi bili u mogućnosti da stanemo tako da posmatramo položaj vektora *E* svetlosnog talasa koji dolazi ka nama tada bi vektor stalno menjao pravac.



Svetlost kao elektromagnetni talas

- Ako orijentacija vektora električnog polja sledi neku pravilnost kažemo da je ta svetlost **polarizovana** u širem smislu.
- Ako vektor električnog polja osciluje stalno u **istoj ravni**, kažemo da je svetlost **linearno ili ravanski polarizovana**.
- Ako vektor *E* rotira oko pravca prostiranja zraka njegov vrh gledano u pravcu prostiranja zraka može da opisuje **elipsu**, pa je tada svetlost **eliptično polarizovana**.
- Ako pri rotiranju vektora E njegov vrh opisuje **kružnicu** tada je svetlost **kružno polarizovana**.

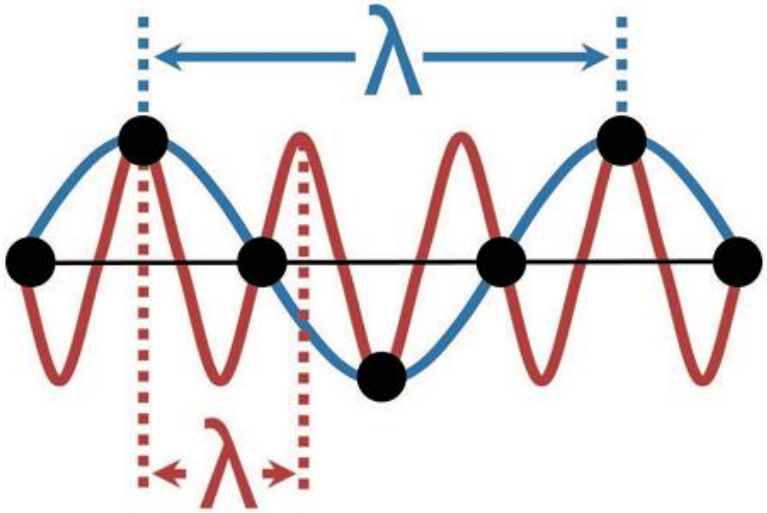


Spektar elektromagnetnog zračenja

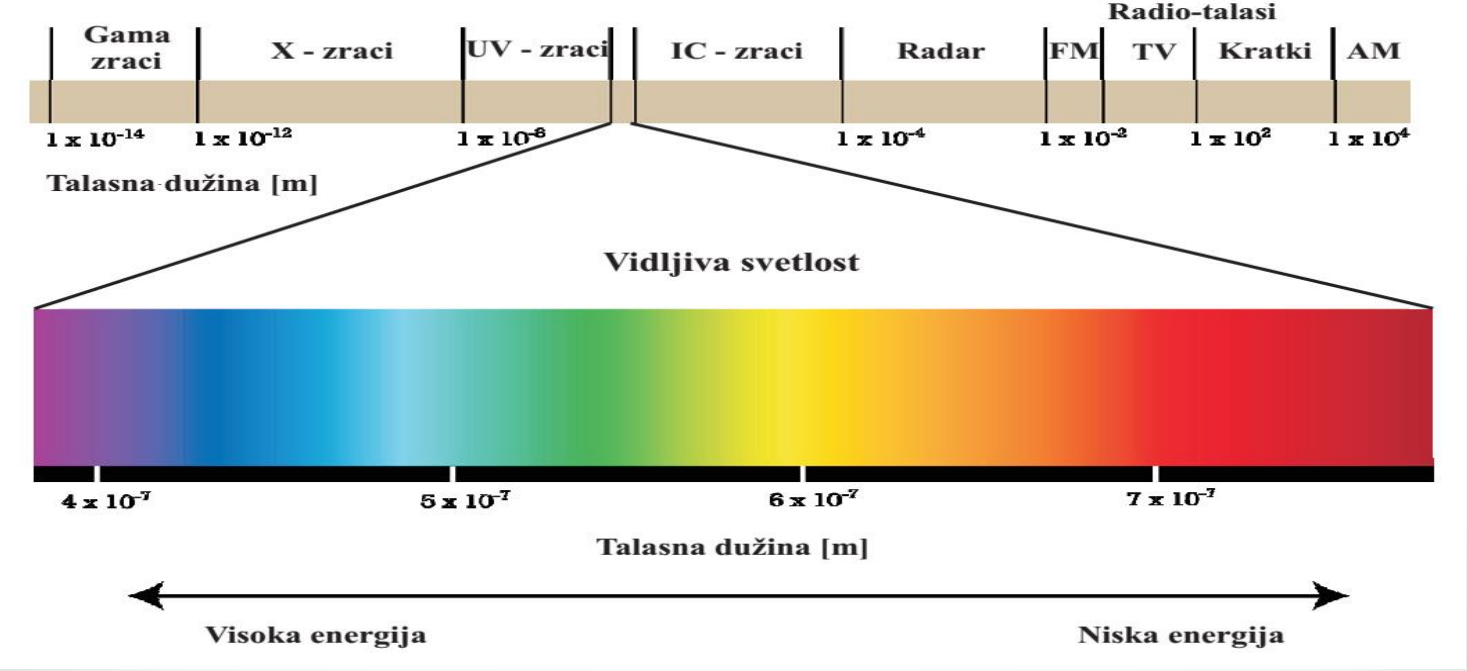
- **Talasna dužina svetlosti (λ)** predstavlja najmanje rastojanje između dve tačke koje prilikom prostiranja talasa – osciluju u istoj fazi .
- Talasna dužina svetlosti **nije njena osnovna karakteristika** jer se menja u zavisnosti od sredine kroz koju svetlost prolazi, tj. **zavisi od indeksa prelamanja.**
- **Osnovna karakteristika svetlosti je frekvencija (ν).** Nju određuje stanje atoma koji emituju svetlost i ne može da se menja.
- Talasna dužina i frekvencija svetlosti povezani su relacijom

$$\lambda \cdot \nu = v ,$$

gde je v−brzina prostiranja svetlosti (u vakuumu v ≡ c).

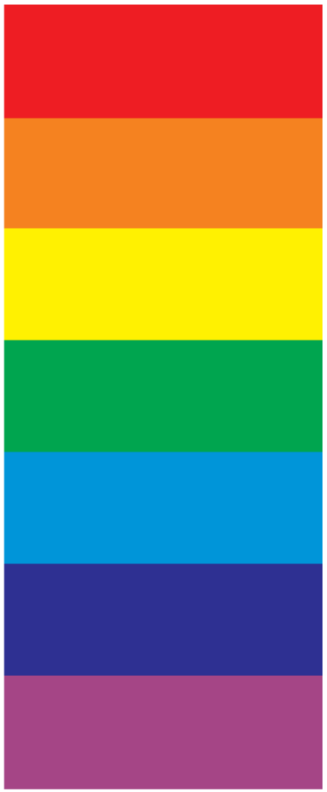


- **Spektar elektromagnetnih talasa** čine zračenja koja se razlikuju po talasnim dužinama.
- Talasna dužina emitovanih talasa zavisi jedino od **dimenzija emitera**: ukoliko je njegova dimenzija manja, utoliko je manja i talasna dužina elektromagnetnog talasa.
- **Talase veoma malih talasnih dužina** emituju molekuli, atomi, odnosno atomska jezgra.
- Intenzitet snopa elektromagnetnih talasa je ukupna energija talasa koji prolaze kroz jediničnu površinu, normalnu na pravac njihovog prostiranja.
- Ako su talasne dužine (odnosno energije) svih talasa u snopu jednake, radi se o **monoenergijskom ili monohromatskom snopu**.
- Ako su energije različite, govorimo o **snopu polihromatskog zračenja**.
- Prema načinu nastanka, kao i prema njihovoj primeni i delovanju na materiju, elektromagnetni talasi se razdvajaju u nekoliko oblasti.



Opseg vidljive svetlosti

- Talasni interval vidljive svetlosti podeljen je na **sedam** karakterističnih zona.
- Svakoj zoni odgovara po jedna osnovna boja svetlosti.
- Najmanju talasnu dužinu ima **ljubičasta**, a najveću **crvena boja.**



crvena	660 - 760 nm
narandžasta	610 - 660 nm
žuta	560 - 610 nm
zelena	510 - 560 nm
plava	460 - 510 nm
modra	440 - 460 nm
ljubičasta	380 - 440 nm

Interesantno je spomenuti da je ovu podelu prvi formulisao Isak Njutn, a veruje se da je **„modru (indigo)"** boju dodao kako bi se uspostavila korespodencija između sedam boja vidljive svetlosti i sedam tonova osnovne muzičke skale.

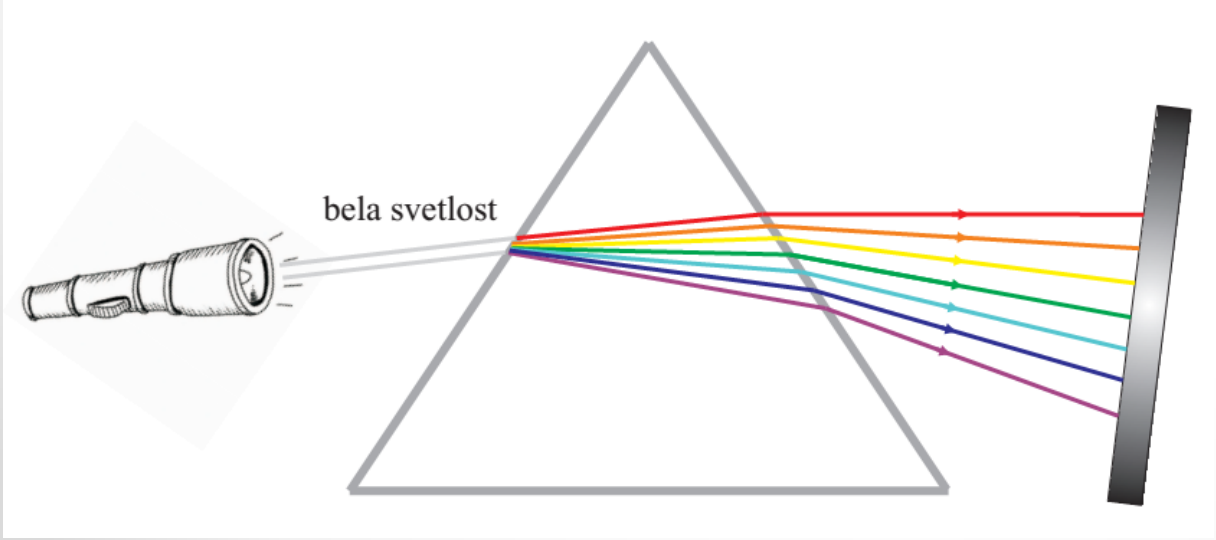
- Granice vidljivog spektra nalaze se u intervalu od 380−760 nm.
- Elektromagnetne talase sa gornjeg (dugotalasnog) kraja spektra opažamo kao crvenu boju, dok se svetlo sa donjeg kraja prikazuje kao ljubičasta boja.
- Između te dve krajnosti nalaze se sve boje koje oko percipira i to redom: narandžasta, žuta, zelena, plava i indigo (modra).
- Spektralni tonovi unutar ovih oblasti nemaju jasno određenu granicu, ali se pojavljuje kontinualna nijansa od jednog tona do sledećeg preko opsega boja nejednake širine.
- Svetlost sama po sebi ne **poseduje boju**, već se ona može promeniti u zavisnosti od uslova u kojima se svetlost posmatra.
- Na primer, crveno svetlo se može pojaviti kao crveno, tamno crveno, ružičasto, braon ili čak crno.
- **Prirodna bela** (Sunčeva) svetlost je **polihromatska,** tj. sastavljena je od kontinualnog niza svih boja vidljivog spektra, tj. sadrži jednaku količinu fotona svih vidljivih talasnih dužina.
- Pri tome se pojedinačni foton jedne boje razlikuje od fotona druge boje samo po svojoj energiji. Vidljivo svetlo je sastavljeno od fotona u energijskom opsegu od oko 1, 8 − 3, 2 eV

Disperzija svetlosti

- Svetlosni talasi različitih talasnih dužina u **vakuumu se prostiru istom brzinom** ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s), dok se u sredinama ispunjenim atomima i molekulima kreću **različitim brzinama**.
- Zbog toga indeks prelamanja, koji je definisan kao količnik brzine talasa u vakuumu i brzine u datoj sredini, zavisi od talasne dužine:

$$n = \frac{c}{c_{sr}} = f(\lambda) \ .$$

- Ova pojava se naziva disperzija svetlosti i uslovljena je interakcijom svetlosnih talasa sa elektronima u atomskim i molekulskim omotačima. Sa povećanjem talasne dužine svetlosti, indeks prelamanja opada.
- Spektar je skup elektromagnetnih talasa različitih talasnih dužina.



Crvena boja, koja ima najveću talasnu dužinu u vidljivom delu spektra najmanje se prelama, dok se ljubičasta, sa najmanjom talasnom dužinom, prelama najviše.

Korpuskularna priroda svetlosti

- Rezultati nekih pojava i eksperimenata nisu mogli da se objasne talasnom predstavom o prirodi svetlosti.

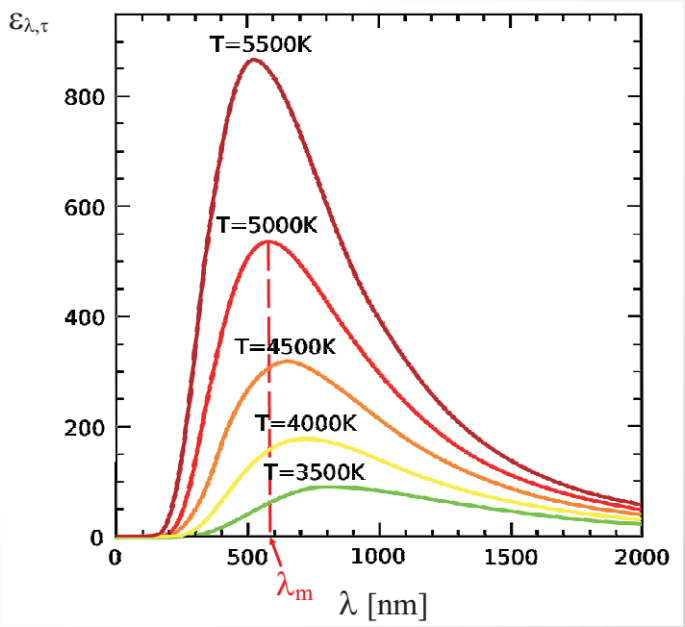
- **Toplotno zračenje**-
  - Elektromagnetno zračenje koje tela emituju na račun promene svoje unutrašnje energije.

  Emisiona i apsorpciona sposobnost tela

  - Apsorpciona moć: $A = \frac{W_\lambda^{(aps)}}{W_\lambda^{(up)}}$
  - Emisiona moć tela $E = \frac{W}{S\,t}$
  - Spektar toplotnog zračenja

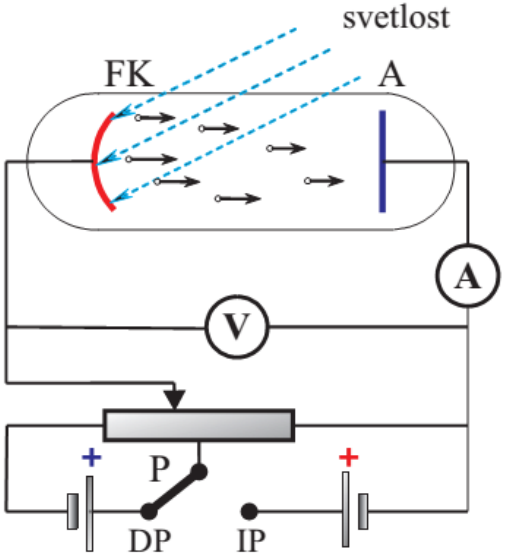
Za ma koju proizvoljnu temperaturu postoji talasna dužina λ_m koja odgovara maksimumu emisione moći i naziva se **najverovatnija talasna dužina u spektru**.

Sa povećanjem temperature položaj maksimuma spektra pomera se ka kraćim talasnim dužinama

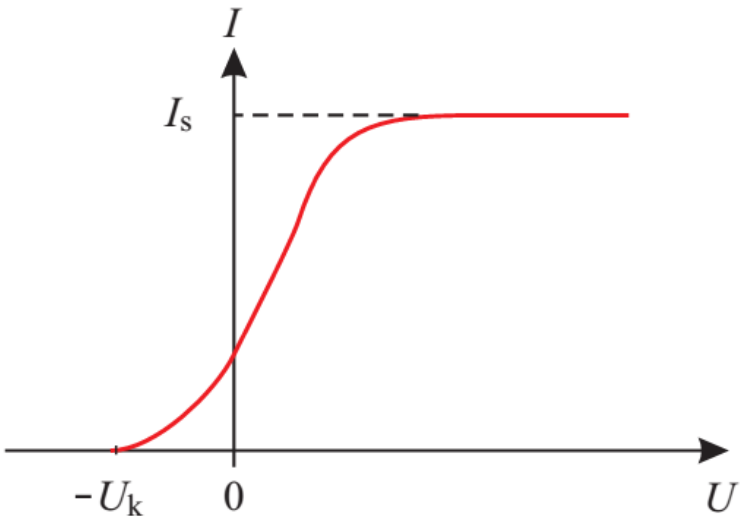


- **Fotoelektrični efekat,**

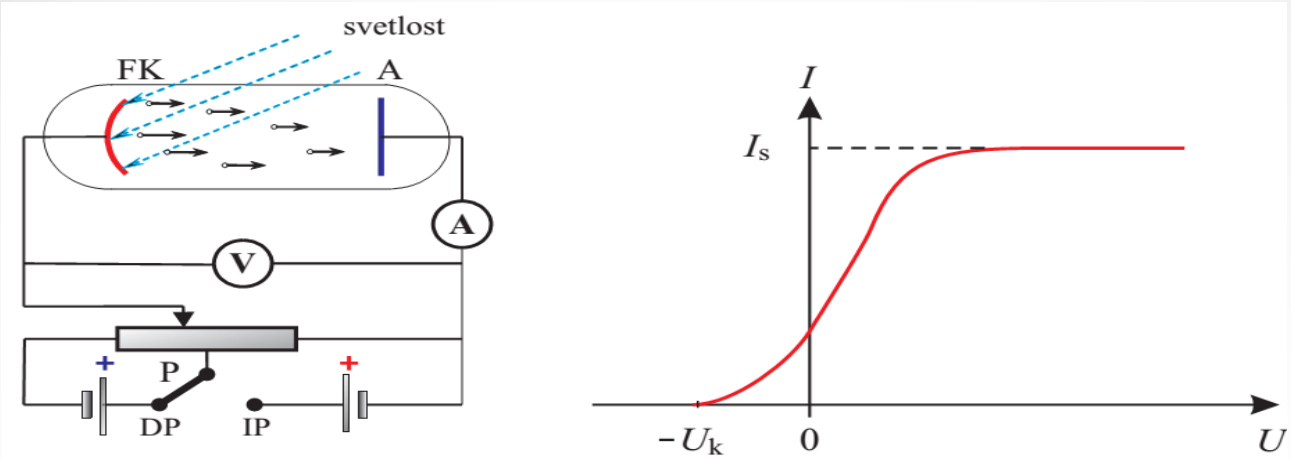
  - **Fotoelektrični efekat (fotoefekat)** je pojava izbijanja elektrona iz materijala (najčešće metala) kada se on obasja elektromagnetnim zračenjem, tj. svetlošću.
  - Da bi elektron napustio metal, on mora da primi energiju kako bi mogao da izvrši rad protiv električne sile kojom ga privlače pozitivni joni iz kristalne rešetke. Minimalna energija koju elektron mora da primi da bi napustio površinu metala naziva se **izlazni rad (A).**
  - Najvažniji deo aparature za ispitivanje fotoelektričnog efekta je vakuumska elektronska cev koja se naziva fotoćelija. Ona se sastoji od dve elektrode:fotokatode (FK), koja je napravljena od metala sa malim izlaznim radom i anode (A).



Električno kolo sa fotoćelijom



Strujno–naponska karakteristika fotoćelije



- Fotokatoda se obasjava svetlošću, usled čega na njenoj površini dolazi do fotoefekta. Neki od emitovanih fotoelektrona uspevaju da stignu do anode, zatvarajući na taj način strujno kolo, i ampermetar registruje proticanje struje čak i kada između elektroda u fotoćeliji ne postoji nikakva razlika potencijala, tj. napon (U = 0).

- Ako se foto ćelija direktno polarizuje (U > 0) postavljanjem anode na viši potencijal u odnosu na fotokatodu (prekidač P u položaju DP), uspostavljeno električno polje omogućava da sve veći broj izbijenih fotoelektrona stigne do anode i jačina struje raste. Ovaj porast jačine fotostruje je ograničen vrednošću koja se naziva struja zasićenja (Is). Do zasićenja dolazi kada svi elektroni izbijeni fotoefektom stignu do anode, tako da povećanje napona ne izaziva porast jačine fotostruje.

- Ako se, međutim, fotoćelija polarizuje inverzno (U < 0) postavljanjem anode na niži potencijal u odnosu na fotokatodu (prekidač P u položaju IP), uspostavljeno električno polje usporava elektrone izbijene s fotokatode i pri nekoj tačno određenoj vrednosti napona Uk potpuno ih zaustavlja. Ovo se objašnjava time što pri naponu Uk emitovani fotoelektroni svoju celokupnu kinetičku energiju potroše da bi savladali rad sile električnog polja koje vlada između fotokatode i anode.

- Napon pri kome se zaustavlja struja u fotoćeliji Uk naziva se **zakočni ili zaustavni napon.**

Ispitivanja vršena sa fotoefektom pokazala su:

- da je broj izbijenih elektrona srazmeran intenzitetu svetlosti;
- da maksimalna kinetička energija (tj. brzina) elektrona ne zavisi od intenziteta, već se linearno povećava sa porastom frekvencije zračenja;
- da se fotoefekat ne javlja uvek, već samo kada je frekvencija svetlosti veća od neke granične vrednosti koja zavisi od materijala;
- da se fotoefekat dešava trenutno.

Ove zakonitosti nisu mogle biti objašnjene klasičnom predstavom o svetlosti kao elektromagnetnom talasu.

Prema klasičnoj teoriji, elektron osciluje u elektromagnetnom polju svetlosnog talasa i ako mu je amplituda dovoljno velika, trebalo bi da se otrgne od kristalne rešetke i napusti metal.

U tom slučaju morao bi da postoji minimalni intenzitet svetlosti pri kome će oscilovanje biti toliko intenzivno da elektron može da savlada izlazni rad.

Ako je intenzitet svetlosti veći, elektronu će – nakon što savlada izlazni rad i napusti metal – ostati veća kinetička energija.

I konačno, elektron ne bi trebalo da odmah napusti metal jer je potrebno izvesno vreme da sakupi dovoljno energije od svetlosnog talasa.

Ajnštajnovo objašnjenje fotoefekta

- Problem neslaganja eksperimentalnih rezultata sa teorijom kod fotoelektričnog efekta razrešio je Albert Ajnštajn (1905).
- Prema Ajnštajnu, fotoefekat je zapravo neelastičan sudar između dve čestice: slobodnog elektrona u metalu i fotona, pri čemu foton predaje celokupnu energiju elektronu.
- Jedan deo te energije troši se na izlazni rad, deo može biti predat kristalnoj rešetci, a preostali deo ostaje elektronu u vidu njegove kinetičke energije:

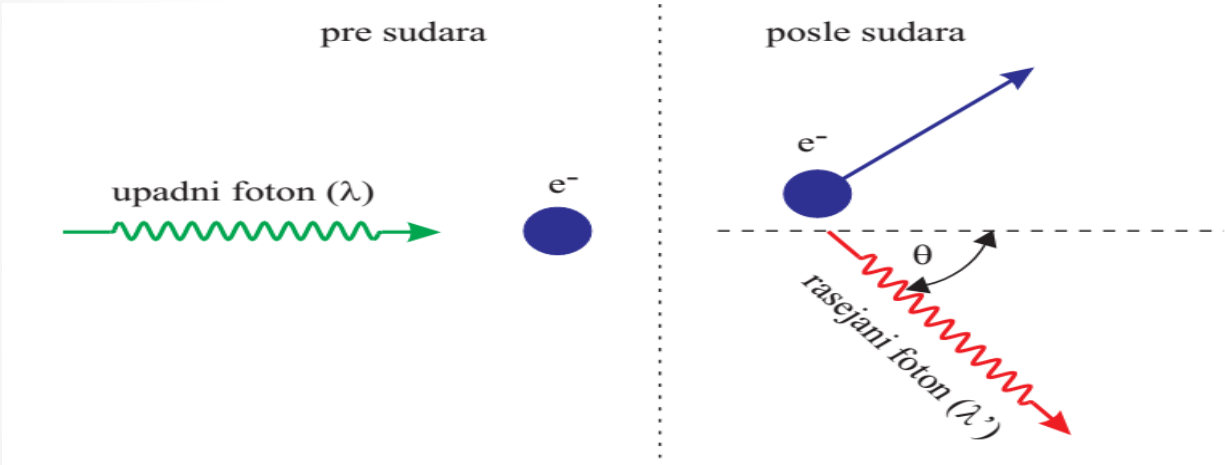
$$h\nu = A + E_{kin} ,$$

Pomoću Ajnštajnove jednačine se objašnjavaju sve eksperimentalne činjenice koje su bile nerazumljive sa stanovišta klasične fizike:

- veći intenzitet svetlosti - veći broj fotona, više izbijenih fotoelektrona.
- maksimalna kinetička energija elektrona ne zavisi od broja fotona, već od njihove energije.
- ako je energija fotona manja od izlaznog rada elektron neće biti izbačen iz metala, čime se objašnjava pojava da se fotoefekat ne javlja uvek. Samo onda kada je energija fotona $h\nu > A$ elektron će napustiti metal sa kinetičkom energijom $E_{kin} = h\nu - A$.
- *minimalna frekvencija* ν_g *pri kojoj* dolazi do fotoefekta naziva se **granična frekvencija,** dok je njoj odgovarajuća maksimalna talasna dužina λ_g **crvena granica fotoefekta.**
- čim svetlost padne na metal elektron apsorbuje kvant energije i zato se fotoefekat dešava trenutno.

- **Komptonov efekat**
  - Pod Komptonovim efektom podrazumeva se elastična interakcija fotona elektromagnetnog (rentgenskog) zračenja energije hν i slabo vezanog atomskog elektrona.
  - Kao posledica ove interakcije foton nastavlja kretanje sa većom talasnom dužinom (λ′) od one koju je do tada imao (λ), a razlika talasnih dužina upadnog i rasejanog fotona iznosi: $$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{n}{m_e\, c}\,(1 - \cos\theta) = \lambda_c\,(1 - \cos\theta)\ ,$$

gde je m_e masa mirovanja elektrona, θ ugao pod kojim se rasejao upadni foton, a $\lambda_c = h/m_0c = 2{,}42 \cdot 10^{-12}$ m Komptonova talasna dužina.

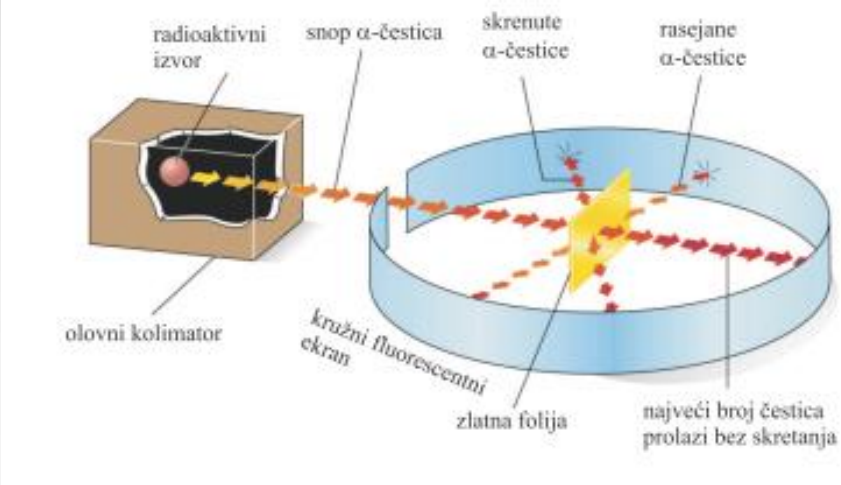


Prema elektromagnetnoj teoriji o prirodi svetlosti zračenje velike frekvencije dovodi elektrone sredine u stanje prinudnog oscilovanja, što rezultuje emisijom sekundarnog elektromagnetnog zračenja od strane tih elektrona, sa frekvencijom jednakom upadnoj frekvenciji rentgenskog zračenja.

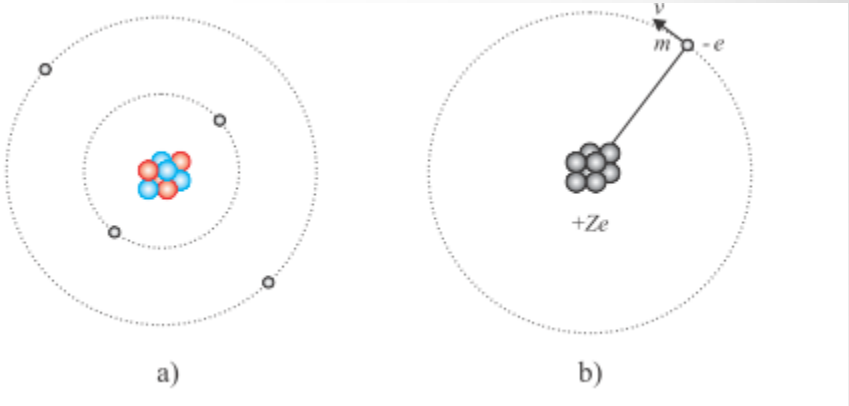
Eksperimenti koje je izvodio fizičar Artur Kompton pokazali su da se upadnim zracima povećava talasna dužina u zavisnosti od ugla rasejanja: sa porastom ugla povećava se broj fotona koji menjaju talasnu dužinu u odnosu na broj onih koji je ne menjaju. Pri tome, ova promena talasne dužine ne zavisi od vrste materijala. Ove eksperimentalno utvrđene činjenice bile su u potpunoj suprotnosti sa elektromagnetnom teorijom.

Borov model atoma

- Raderfordov model atoma



Raderfordov eksperiment



a) Atom berilijuma
b) Planetarni model atoma.

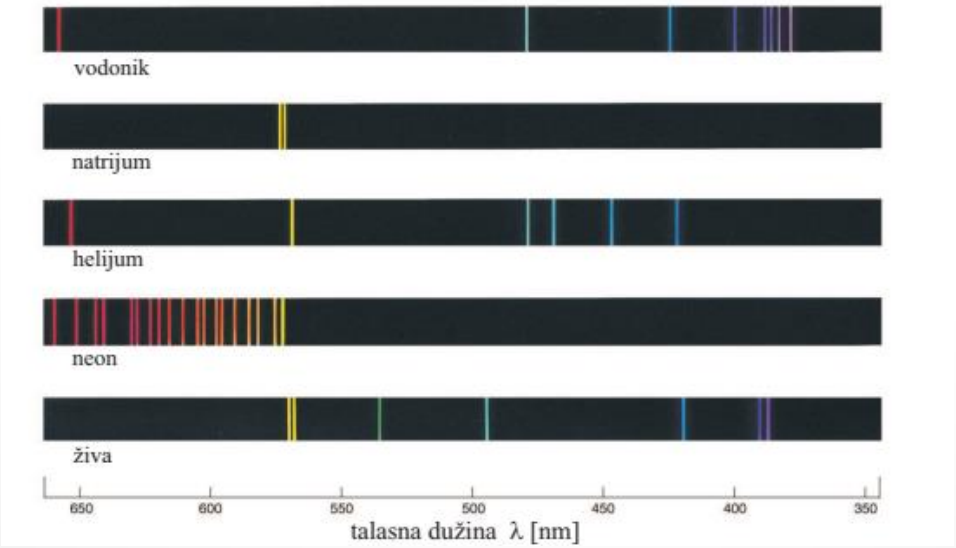
- Raderford- posmatrao rasejanje α− čestica pri prolasku kroz tanku foliju od zlata.
- Najveći deo α − čestica nastavlja da se kreće prvobitnim pravcem, dok je izvestan broj skretao pod raznim uglovima, pri čemu je broj skrenutih čestica opadao sa povećanjem ugla.
- Jedan mali broj upadnih α−čestica se odbijao od folije i vraćao unazad, skrećući pod uglom od 180° .
- Raderford je zaključio da najveći deo atoma zapravo zauzima ,,prazan prostor" u kome se nalaze elektroni (oni zbog veoma male mase nemogu promeniti pravac kretanja α− čestica), dok je skretanje čestica izazvano delovanjem jakih ,,centara" pozitivnog naelektrisanja koje je Raderford nazvao jezgrima atoma.
- Činjenica da se raseje veoma mali broj α čestica ukazuje na to da su dimenzije jezgra izuzetno male.
- Raderford je postavio tzv. planetarni model atoma, prema kome je atom izgrađen od pozitivno naelektrisanog jezgra i elektrona koji kruže oko njega po putanjama.

- Raderfordov model atoma-nedostaci

- Ovako postavljen model atoma ne može u potpunosti odgovarati stvarnosti iz sledeća dva razloga:

- Elektron se u atomu, prema postavci planetarnog modela, kreće po kružnoj putanji, odnosno ubrzano. Iz elektrodinamike je poznato da naelektrisana čestica koja menja brzinu svog kretanja emituje elektromagnetno zračenje i gubi energiju, odnosno smanjuje svoju brzinu. Time bi se elektron gotovo trenutno po spiralnoj putanji sunovratio na jezgro, što se očigledno ne događa, imajući u vidu da je atom veoma stabilna konfiguracija razdvojenih elektrona i jezgra;

- Zbog kontinuiranog smanjivanja energije elektrona trebalo bi da se na isti način menjaju i talasne dužine u spektru zračenja koje atomi emituju. Međutim, kao što je već ranije pokazano, atomski spektri su linijkog tipa, tj. nisu kontinualni.



Borov model atoma

Da bi objasnio protivurečnosti koje su proizilazile iz Raderfordovog modela atoma, danski fizičar Nils Bor je 1913. godine formulisao sledeće postulate:

- Postulat o stacionarnim stanjima (I Borov postulat): Od svih mogućih orbita elektrona u atomu dozvoljene su samo one za koje je moment impulsa elektrona jednak celobrojnom umnošku konstante $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, gde je h Plankove konstanta:

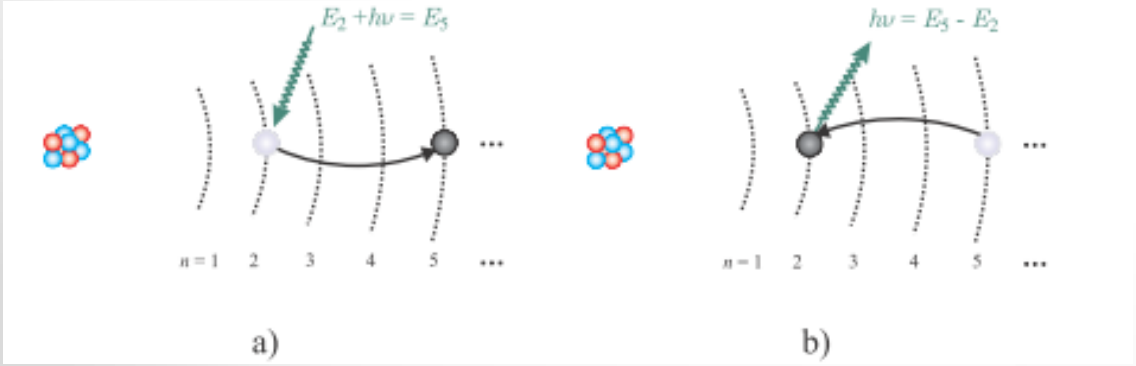
$$L = m_e v r = n\hbar \quad , \qquad (n = 1, 2, 3, ...) \ .$$

- Elektronske putanje za koje je zadovoljen gornji uslov nazivaju se stacionarnim elektronskim orbitama i određene su vrednošću glavnog kvantnog broja n. Pri kretanju elektrona po nekoj od njih atom ne zrači elektromagnetnu energiju, što znači da za njegovo kretanje u atomu ne važe zakoni klasične elektrodinamike.

Postulat o kvantnim prelazima (II Borov postulat): Pri prelasku elektrona sa orbite kojoj odgovara energija En na orbitu sa energijom Ek, emituje se ili apsorbuje foton čija je energija jednaka razlici energija koje elektron poseduje u tim stanjima:

$$h\nu = |E_n - E_k| \ .$$

Ukliko je n < k, tj. ako elektron prelazi iz stanja sa nižom u stanje sa višom energijom, radi se o apsorpciji fotona dok je u suprotnom slučaju u pitanju proces emisije fotona



Borov model atoma:
a) apsorpcija
b) emisija fotona

Fotoni i njihove osobine

- Karakteristike fotona

Ukoliko svetlost poseduje frekvenciju ν, odnosno talasnu dužinu λ, energija fotona iznosi:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h\,c}{\lambda}\,.$$

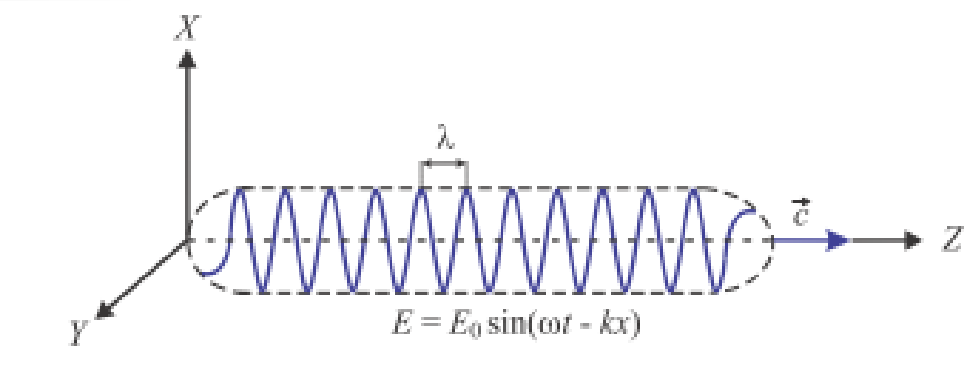
Sa druge strane, na osnovu Ajnštajnove teorije relativnosti, foton kao i svaka druga čestica poseduje energiju:

$$E = m\,c^2\,.$$

S obzirom da se obe navedene relacije odnose na isti objekat (foton), njihovim izjednačavanjem dobija se:

$$\frac{h\,c}{\lambda} = m\,c^2 \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{h}{m \cdot c}\,,$$

odnosno:

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

- Mehanizam emitovanja kvantnih elektromagnetnih talasa koji se odvija u atomima pokazuje suštinsku razliku u odnosu na emisiju klasičnih elektromagnetnih talasa (antena) koje na zadovoljavajući način opisuje Maksvelova teorija.
- Iz antene se talas emituje kontinualno, šireći se na sve strane i pri tome mu intenzitet opada sa rastojanjem slično kao kod mehaničkog talasa.
- Atomi, sa druge strane, emituju fotone pojedinačno, diskretno, brzim prelazima sa viših na niže kvantne energijske nivoe.
- Svaki takav prelaz odvija se u vremenu čiji je red veličine nanosekunda ($\tau_e \sim 10^{-9}$s), a budući da se foton prostire brzinom $c = 3 \cdot 10^8$m/s, proizilazi da za vreme emisije τ_e atom ,,kreira'' talas konačne dužine $\ell_f = c \cdot \tau_e \sim 0,3$ m. Dakle, ovaj ,,kvantni talas'' je lokalizovan u prostoru i energija elektromagnetnog polja je spakovana u tanku ,,strelu'' čija je dužina reda veličine metra.