

Foton

Kvantne zakonitosti energijskim vozlom omogočajo ustvarjanje stabilnih snovnih oblik v snovnih delčkih, foton pa je predstavljal primer kvantnega pojava.

Svetloba je elektromagnetno valovanje. Ustvarja jo medsebojno pretakanje električnega in magnetnega polja po prostoru, kot to prikazuje Slika 5.1 v poglavju *Snov*.

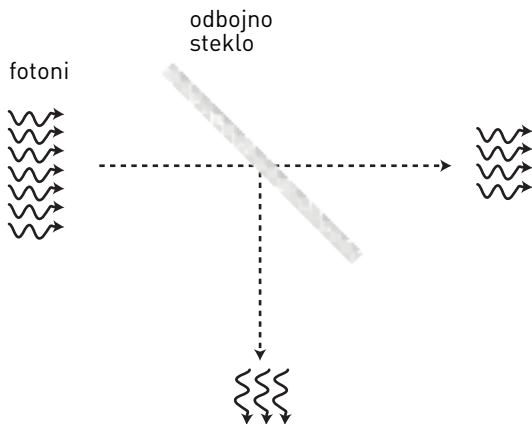
Planck in energijski kvanti

Planck je meril energijo fotona (delčka svetlobe) tako, da je s pomočjo svetlobe izbijal elektron iz atomske lupine. Izmeril je, da je učinkovitost svetlobe pri tem izbijanju odvisna le od barve svetlobe, ne pa tudi od svetlosti žarka.

Na atom je posvetil s svetlobo nizke frekvence in svetloba ni izbila elektrona iz atomske lupine. Nato je povečal svetlost žarka, vendar ni spreminjal frekvence svetlobe. Svetloba elektrona kljub temu ni izbila iz atomske lupine.

Planck je ugotovil, da svetlost žarka ne vpliva na sposobnost izbijanja elektronov. Na to vpliva samo višanje frekvence oziroma sprememba barve svetlobe. Posledično tudi oddaljenost svetila ne vpliva na sposobnost izbijanja elektronov iz atomske lupine. Svetloba je enako učinkovita pri izbijanju elektronov, če je njen izvor na Zemlji ali milijone svetlobnih let daleč v vesolju.

Celo več, če neko koherentno verigo elektromagnetnih valov na polprepustnem ogledalu razcepim na dvoje, kot kaže Slika 6.1, bodo posamezni odbiti fotoni imeli enako energijo pred razcepom kot tudi po njem.



Slika 6.1

Opažamo, da se del fotonov energijsko neokrnjenih odbije v eno smer, drug del pa v drugo smer.

Če na polprepustno ogledalo pošljemo le dva fotona tako, da se bosta odbila vsak v svojo smer, bo vsak od njiju imel enak vpliv na izbijanje elektronov iz atomske lupine kot pred odbojem od polprepustnega ogledala. Sprašujem se torej, kaj fotonom izbrane frekvence zagotavlja vedno enako energijo.

Energijski kvant

Kvantne lastnosti svetlobe, ki zagotavljajo vnaprej določene oblike nihanj in valovanj in ki jih je raziskoval Planck, se ne pojavljajo le pri svetlobi. Atomska jedra ustvarjajo vase zavozlana nihanja in valovanja, ki morajo imeti kvantne lastnosti, če naj ta valovanja ustvarjajo stabilne snovne oblike kvarkov drugih snovnih tvorb.

Kvantne lastnosti so temelj obstoja snovi

Vse oblike nihanj energijskih polj niso primerne za ustvarjanje atomskih jeder. V snovi vsebovana nihanja morajo nujno imeti kvantne lastnosti.

Ko na primer opazujem nihajočo utež, vidim, da sčasoma niha vse bolj umirjeno. Na koncu se ustavi. Utež znova zaniha, ko jo sunem. Takšna nihanja so lahko pestra in so zelo odvisna od zunanjih okoliščin.

Če bi bila nihanja in valovanja v atomskih jedrih in elektronih okrog njih tako zelo odvisna od zunanjih okoliščin, ne bi bila sposobna ustvarjati stabilne snovi.

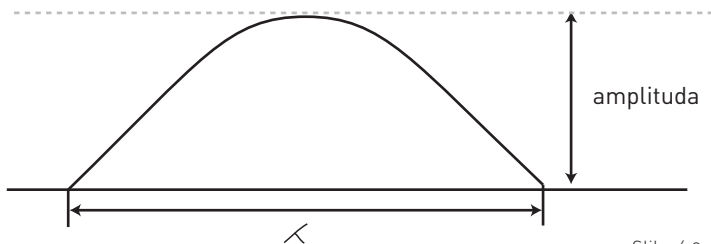
Tako kot snov tudi svetloba potrebuje kvantne lastnosti. Če jih svetloba ne bi imela, bi se svetlobni žarki posušili in iznihali že daleč v vesolju in nam ne bi prinašali slik oddaljenega vesolja.

Kvantne lastnosti temeljijo na težnji narave k minimalnemu energijskemu stanju

V poglavju Energija je pojasnjeno, da fizikalne lastnosti pogosto izhajajo iz težnje narave k minimalnemu energijskemu stanju. Vodni val na primer teži k čim manjši amplitudi, dokler se ne izniha.

Nasprotno pri nihanjih in valovanjih visokih frekvenc, ki ustvarjajo osnovne snovne delčke, ter pri svetlobi opazamo, da

narava ne teži k čim manjši amplitudi valovanja, ampak k izbrani kvantni energiji vala, pri kateri je amplituda valovanja v določenem razmerju z valovno dolžino. Slika 6.2 prikazuje primer takega vala.



Slika 6.2

Ta ugotovitev je tu le omenjena, utemeljena bo pozneje, na Sliki 6.5 in Sliki 6.6.

Predvsem kadar gre za valovanja kratkih valovnih dolžin razreda mikrometrov in manj, skuša val zavzeti neko valovni dolžini pripadajočo amplitudo.

Dežne kaplje

Razumevanje pripadnosti določene energije valovanja posamezni valovni dolžini, to je razumevanju kvantne energije valovanja, si v nadaljevanju skušam ilustrirati na izposojenem pojavu. Izposodim si ga s področja, ki ne spada v področje kvantne fizike. Privzamem ga predvsem kot osnovo za vzpostavitev razumljivega miselnega modela o kvantnem dogajanju.

Ko opazujem dežne kaplje, vidim, da je hitrost padanja vsake kaplje v izbranih klimatskih pogojih odvisna le od njene velikosti. Velike in težke kaplje padajo hitreje, majhne kaplje počasneje. To lahko izrazim takole:

Hitrost padanja kaplje je funkcija velikosti kaplje.

Opazujem lahko milijarde kapelj in vse bodo praviloma padale v skladu z opisano zakonitostjo.

Velikost dežne kaplje in njena hitrost sta v določenem razmerju, podobno, kot sta v razmerju valovna dolžina elektromagnetnega vala in njegova optimalna energija; to razmerje je pojasnjeno v nadaljevanju.

Vodna kaplja določene prostornine si vsakič izbere optimalno hitrost padanja. Kadar se kaplja ne giblje z njej pripadajočo hitrostjo, se skuša na osnovi težnje narave k minimalnemu energijskemu stanju svoji optimalni hitrosti približati čim hitreje.

Izjeme potrjujejo pravilo

Toda četudi med milijardami kapelj ne opazimo nobene, ki bi kršila opisano zakonitost, oziroma četudi sploh nikoli ne bi opazili kaplje, ki bi potovala drugače od opisane zakonitosti, bi bilo še vedno neupravičeno trditi, da kaplja vsaj izjemoma ne more imeti drugačne hitrosti.

Kadar se kaplja razbije na veji drevesa, majhne kapljice z mesta trka odletijo s hitrostjo, ki ni skladna s prej opisano zakonitostjo. Šele po nekaj centimetrih potovanja od mesta odboja kapljice znova preidejo v njim optimalno energijsko stanje.

Kaplja si torej vsakič kar najhitreje izbere svoji velikosti pripadajočo hitrost padanja. V prenesenem pomenu kaplji pripada 'kvantna' kinetična energija, ki izhaja iz velikosti kaplje.

Na podoben način moram razumeti tudi energijo elektromagnetnega vala svetlobe oziroma fotona ter druga podobna valovanja majhnih razsežnosti.

Energijski diskurzi fotonov

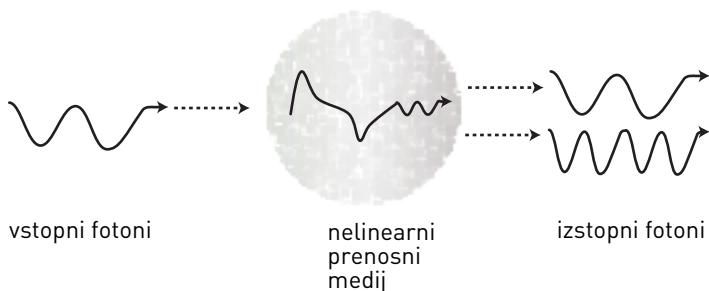
Tudi pri fotonih opazamo vedno enako energijsko stanje, podobno kot pri deževnih kapljah. Čeprav v naravi opazamo le fotone

točno določenih energij, ima fizika možnost izvajanja poskusov tudi s fotoni drugačnih energij. Ti so redki in neobstojni, zato jih moramo umetno ustvariti.

Elektromagnetni val lahko zmotimo v njegovem optimalnem energijskem stanju tako, da ga pošljemo skozi nelinearno električno polje, na primer tako, da koherentno svetlobo usmerimo skozi nelinearne optične medije, kot to opisujeta W. Lauterborn in T. Kurz v knjigi *Coherent Optics* (2003).

Opazimo, da na izhodu iz takega nelinearnega polja ne dobimo le svetlobe tiste frekvence, kot smo jo usmerili v nelinearni medij, ampak izidejo tudi višje harmonske frekvence svetlobe. Večja pestrost frekvenc svetlobe pa pomeni pojav fotonov drugih energij.

Opisan in na Sliki 6.3 prikazan pojav so prvič izmerili že leta 1963 in s tem eksperimentalno pokazali razgradnjo elektromagnetnega vala na višje harmonske frekvence. Ob tem pa se pojavi zahteva po prerazporeditvi energij med fotoni. Energija vstopnih fotonov se prerazporedi na energije izstopnih fotonov.



Slika 6.3

Takšen energijsko spremenjen elektromagnetni val na poti skozi nelinearni medij v fazi preoblikovanja valov in tudi takoj ob izhodu iz medija praviloma ni v kvantnem energijskem stanju

ter tudi ni obstojen. Ko izide iz nelinearnega medija, se skuša po vzoru opisanih dežnih kapelj kar najhitreje preoblikovati v optimalno energijsko stanje.

Energijska deformacija elektrona v krožnici

Začasno energijsko odstopanje valovanja od kvantne energije se lahko dogodi tudi v kvarkih v atomskih jedrih in tudi v elektronih, ki krožijo okrog atomskega jedra.

Kvantna energija valovanja omogoča, da elektroni ne padejo na atomsko jedro in da se atomska jedra ne sesedejo sama vase.

Po drugi strani si preskakovanje elektrona med orbitami okrog atomskega jedra smemo predstavljati kot hiter, vendar zvezen energijski prehod med dvema kvantnima stanjema.

Kadar se elektron zaradi zunanjih vplivov znajde med dvema krožnicama, se zaradi težnje vračanja h kvantnemu energijskemu stanju skuša čim hitreje umestiti v optimalno krožnico, kjer njegova energija znova sovпада z optimalno kvantno energijo.

Splošen in poenostavljen model fotona vidne svetlobe

Foton določene frekvence teži k vnaprej določeni energiji, zato si zanj lahko omislimo neki preprost in razumljiv model. Fotoni, ki energijsko odstopajo, so redki in neobstojni ter jih v tem poenostavljenem miselnem modelu lahko zanemarim.

Fotone si torej lahko zamislimo kot vedno enake energijske kvante elektromagnetnega valovanja. Še več, tudi prostorskih lastnosti fotonov nam ni treba upoštevati. Fotone si torej lahko predstavljamo kot energijske točke brez prostorskih dimenzij.

Toda na tako poenostavljen kvantni model fotonov ne smemo gledati naivno in ne smemo izključevati možnosti, da se lahko v

izjemnih primerih vsaj za kratek čas energija fotona tudi spremeni.

Poenostavljen kvantni pogled predvsem olajša razumevanje lastnosti svetlobe za splošno rabo. Kadar pa želimo lastnosti svetlobe razumeti v celoti, poenostavljen kvantni model fotona ne zadošča. Celovito razumevanje fotona zahteva upoštevanje vseh lastnosti svetlobe, tudi energijska stanja prehodov med kvantnimi stanji.

Energija elektromagnetnega vala

V nadaljevanju skušam primerjati energijo enega fotona z energijo enega elektromagnetnega vala svetlobe. Energijo fotona primerjam z energijo električnega in magnetnega polja v enem nihaju elektromagnetnega valovanja.

Domžalski srednjevalovni oddajnik oddaja elektromagnetno moč v razredu 100 kW pri frekvenci približno 1 MHz. Ker oddajnik v eni sekundi odda približno milijon elektromagnetnih valov, to pomeni, da je energija enega elektromagnetnega vala v razredu 0,1 džula.

Po drugi strani je energija fotona po Planckovem zakonu pri frekvenci 1 Mhz $6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 10^6 = 6,6 \cdot 10^{-28}$ džula.

En elektromagnetni val domžalskega oddajnika lahko torej vsebuje do 10^{27} ‚fotonov‘. V enem elektromagnetnem valu nastopa veliko število fotonov, podobno kot v enem kamnu obstoja veliko število molekul.

Fotoni ne sodelujejo pri izbijanju elektrona

Tu se pojavi vprašanje, zakaj ti fotoni v elektromagnetnem valu med seboj ne sodelujejo in zakaj, ko zadenejo v oviro, ne delujejo povezano, podobno kot sodelujejo molekule kamna.

Če vržem kamen v steklo, pri razbijanju le-tega s svojo maso sodelujejo vse molekule kamna. Če svetloba zadene v oviro, pa fotoni po Plancku delujejo nepovezano. Če en foton ne more zbiti elektrona iz atomske lupine, mu pri tem sosednji fotoni ne pomagajo.

Fotoni zelo visokih frekvenc

Zgornji primer kaže razmerje med energijo fotona v primerjavi z elektromagnetnim valom nizkih frekvenc. V nadaljevanju se ozrem še na energijsko dogajanje pri zelo visokih frekvencah, frekvencah, ki krepko presegajo vidno svetlobo.

Foton vidne svetlobe praviloma vsebuje samo toliko energije, da lahko izbije elektrone iz zadnjih atomskih lupin nekaterih elementov. Ti so namreč šibko vezani na atom in za njihovo zbitje ni potrebne veliko energije.

Vidna svetloba ima frekvenco v razredu 10^{15} Hz. V naravi opažamo tudi mnogo večje frekvence elektromagnetnega valovanja, ki dosežejo do 10^{20} Hz in več. Fotoni takih frekvenc bi morali po Planckovem zakonu imeti milijonkrat več energije kot fotoni vidne svetlobe.

To pa so tako velike energije, da bi lahko izbile elektrone tudi iz katere koli atomske lupine. Ko bi foton visoke frekvence in s tem visoke energije izbil elektron iz spodnje lupine, bi izpraznjeno mesto kar najhitreje zapolnil elektron iz sosednje, višje lupine. Elektroni bi na spodnje izpraznjene lupine padali postopno oziroma kaskadno, iz lupine na lupino.

Ko bi fotoni visokih frekvenc, in po Plancku tudi visokih energij, obsijali neko snov, bi ta morala zasvetiti. Fotoni bi iz atomskih lupin masovno izbijali elektrone, ki bi sproti padali nazaj in pri tem oddajali svetlobo.

Ko bi na primer človeka obsijali z rentgenskimi žarki, bi moral osvetljeni del telesa zasvetiti kot žarnica, vendar se to ne zgodi. Še

več, ko frekvence elektromagnetnega valovanja povečujemo do zelo visokih, so fotoni teh frekvenc pri izbijanju elektrona iz atomske lupine precej neuspešni; manj uspešni so kot fotoni vidne svetlobe.

Področje veljavnosti Planckovega zakona

Planckov zakon torej določa energijo fotona predvsem približno na področju vidne svetlobe. Na področju visokih frekvenc poskusi Planckovega zakona ne potrjujejo.

Ugotovitev, da Planckov zakon ni univerzalen za vse frekvence elektromagnetnega valovanja, zahteva, da se poglobimo v raziskavo lastnosti fotona ter samega Planckovega zakona.

Za začetek si torej skušam ustvariti predstavo o tem, kako elektromagnetni val svetlobe izbije elektron iz atomske lupine. Ta predstava mi bo v nadaljevanju omogočila poglobljeno razumevanje fotona in Planckovega zakona.

Elektron v prostranstvih elektromagnetnega vala

V izhodišču primerjam velikostni razred elektrona z velikostnim razredom elektromagnetnega vala svetlobe. Velikostni razred elektrona¹ je ocenjen na približno 10^{-12} m. Velikostni razred elektromagnetnega vala vidne svetlobe (valovna dolžina) je v velikostnem razredu od 10^{-7} do 10^{-6} m.

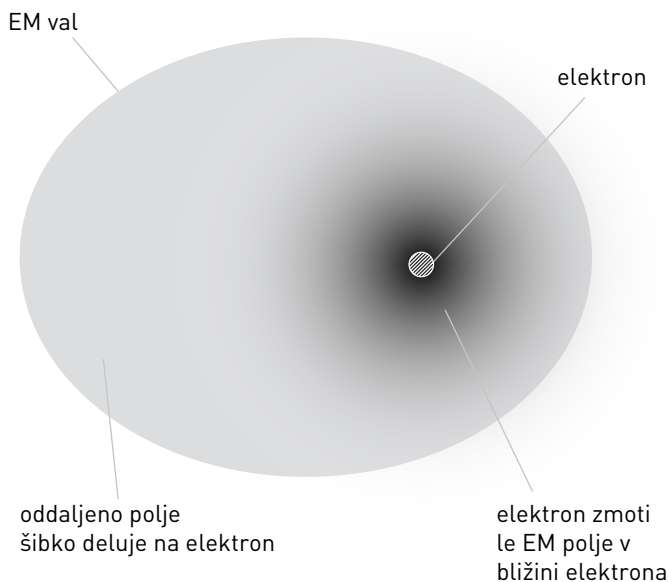
Ugotavljam, da je elektromagnetni val vidne svetlobe v primerjavi z elektronom zelo velik, saj je njegov premer milijonkrat večji od elektronovega. Po prostornini je razlika med njima še mnogo večja.

¹ David L. Bergman: Shape & Size of Electron, Proton & Neutron, maj 2004.

Majhen elektronček se tako rekoč izgubi v velikem, po prostornini deset do dvajset razredov večjem elektromagnetnem valu svetlobe.

Povezanost energij elektromagnetnega vala in elektrona

Svetlobni elektromagnetni val in elektron v svoji okolici ustvarjata električno in magnetno polje. Polji elektrona in elektromagnetnega vala svetlobe ob preletu elektrona skozi elektromagnetni val vplivata drug na drugega.



Slika 6.4

Prostranost elektromagnetnega vala svetlobe elektronu ne onemogoča, da bi bil v povezavi s celotnim elektromagnetnim poljem svetlobnega vala. Elektron čuti prisotnost le delčka elektromagnetnega vala, tistega delčka, v katerem trenutno je.

Ko elektron potuje skozi 'prostranstva' elektromagnetnega vala svetlobe, prihaja do medsebojnega vpliva obeh polj, kot to prikazuje Slika 2.10 v poglavju *Energija*.

Električno polje elektrona zmoti elektromagnetni val svetlobe, čemur se ta upira, saj želi ohraniti optimalno obliko svojega elektromagnetnega polja. Na 'vsiljivca' začne zato delovati s silo, v obliki sunka sile ($F \cdot t$).

Samo del energije elektromagnetnega vala svetlobe deluje na elektron s sunkom sile

Ko je elektron znotraj elektromagnetnega vala svetlobe, je bližnji del elektromagnetnega polja svetlobe v močnem stiku z elektronom, oddaljen del tega polja pa je z njim v šibkejšem stiku in nanj nima večjega vpliva.

Radijski val domžalskega oddajnika je po energiji močan, vendar s sunkom sile le šibko deluje na elektron, ker je le neznamen del energije tega vala v stiku z elektronom.

Velika energija elektromagnetnega vala domžalskega oddajnika ne more izbiti elektrona iz atomske lupine, medtem ko ga mnogo manjša energija elektromagnetnega vala vidne svetlobe lahko. To pa zato, ker na zbitje elektrona iz atomske lupine vpliva le tista energija elektromagnetnega vala, ki je elektronu dovolj blizu. Če je polje v elektronu bližnjemu delu elektromagnetnega vala dovolj močno, lahko izbije elektron iz krožnice. Pri tem skupna energija elektromagnetnega vala ni odločilna.

Sunek sile je sorazmeren s spremembo magnetnega polja

Sila na elektron, ki je znotraj elektromagnetnega vala, je enaka produktu električne poljske jakosti svetlobnega elektromagnetnega vala na lokaciji elektrona in naboja elektrona ($F = q \cdot E$).

Po Maxwellovih enačbah je električna poljska jakost linearno proporcionalna hitrosti spremembe magnetne gostote (dB/dt), zato je sila, ki deluje na elektron v elektromagnetnem polju elektromagnetnega vala tudi premo sorazmerna hitrosti spremembe magnetnega polja ($F = k \cdot dB/dt$).

Za zbitje elektrona iz atomske lupine morata biti izpolnjena dva pogoja:

- sila elektromagnetnega polja, ki deluje na elektron, mora biti močnejša od privlačne sile atoma na elektron in
- energija, ki jo elektronu preda sunek sile ($F \cdot t$), mora biti večja od vezalne energije elektrona.

Planckov zakon

V kakšnih okoliščinah foton lahko izbije elektron iz atomske lupine, je proučeval Planck. Ugotovil je, da foton elektronu (v atomski lupini) odda energijo, ki je enaka produktu frekvence in Planckove konstante ($E = f \cdot h$).

Kvantna energija elektromagnetnega vala

Ker elektromagnetni val svetlobe na elektron ne vpliva z vso svojo energijo, me zanima, kakšno je razmerje med energijo fotona in energijo enega elektromagnetnega vala svetlobe.

Energijo fotona določa Planckov zakon, zato me v nadaljevanju zanima predvsem energija enega elektromagnetnega vala svetlobe. Preveriti želim:

- Ali je kvantna tudi energija enega elektromagnetnega vala, kot to napoveduje Slika 6.2?

- Kakšno je razmerje med energijo fotona po Plancku in celotno energijo enega elektromagnetnega vala svetlobe?

Napravim miselno povezavo dveh zakonitosti:

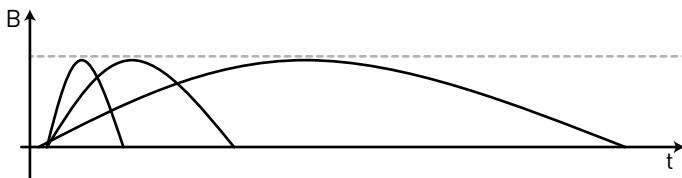
- Planckovega zakona, ki ugotavlja linearno povezavo med frekvenco fotona in delom energije ($E = f \cdot h$), ki jo elektromagnetni val prenese na elektron ob izbijanju le-tega iz atomske lupine in
- zakonitosti o delovanju sile na elektron, ki pravi, da v električnem polju na elektron deluje sila $F = q \cdot E$ oziroma $F = q \cdot dB/dt$.

Magnetna gostota (B) elektromagnetnega valovanja

Če izpostavim, da:

- sposobnost zbitja elektrona po Plancku narašča linearno s frekvenco fotona,
- in če sila na elektron narašča linearno z naklonom spremembe magnetnega polja dB/dt ,
- lahko sklepam, da se sprememba magnetnega polja dB/dt pri prehodu magnetnega polja skozi ničlo v primeru optimalne (kvantne) energije elektromagnetnega valovanja povečuje linearno s frekvenco.

Na osnovi tega spoznanja lahko ugotovimo, da je amplituda magnetne gostote optimalnega oziroma kvantnega elektroma-



Slika 6.5

gnetnega valovanja enaka za vse frekvence, kot kaže Slika 6.5 in kot je pojasnjeno v nadaljevanju.

Matematična utemeljitev diagrama na Sliki 6.5 je naslednja: Magnetna gostota elektromagnetnega vala niha sinusno $b = B \cdot \sin(\omega t)$. Odvod sinusne krivulje pri majhnih kotih je enak odvodu kota po času $d(\sin(\omega t))/dt = d(\omega t)/dt = \omega$. Sila F na elektron je $dB/dt = B \cdot \omega$.

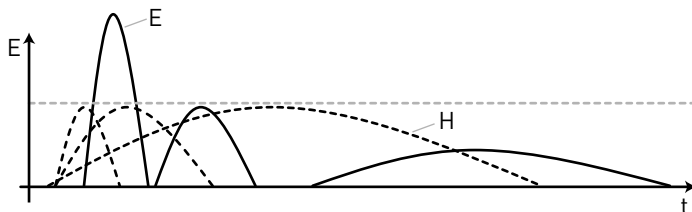
Sila na elektron se lahko povečuje linearno s frekvenco, kot to določa Planckov zakon, le v primeru konstantne magnetne gostote kvantnega elektromagnetnega valovanja. Planckov zakon in matematična izpeljava torej kažeta na vedno enako amplitudo magnetne gostote optimalnega oziroma kvantnega elektromagnetnega valovanja pri vseh frekvencah valovanja.

Slika 6.5 prikazuje za različne frekvence valovanja in različne valovne dolžine enako amplitudo magnetne gostote valovanja v primeru optimalnega (kvantnega) svetlobnega valovanja.

Električno polje energijsko optimalnega elektromagnetnega valovanja

Ob spoznanju, da kvantno valovanje teži k vedno enaki amplitudi magnetne gostote (B), me zanima še amplituda električnega polja (E) optimalnega kvantnega elektromagnetnega valovanja.

Električno polje elektromagnetnega valovanja je sorazmerno odvodu magnetne gostote po času dB/dt . Odvod magnetne



Slika 6.6

gostote z vedno enako amplitudo magnetne gostote po času je večji pri višjih frekvencah, kar pomeni velike amplitude električnih polj višjih frekvenc in nižje amplitude električnih polj nižjih frekvenc, kot to prikazuje Slika 6.6.

Na desni strani diagrama na Sliki 6.6 vidimo majhno amplitudo električne poljske jakosti (E) energijsko optimalnega valovanja nižjih frekvenc. Na levi strani so prikazane vse večje amplitude jakosti električnega polja višjih frekvenc. Večje amplitude električne poljske jakosti so posledica hitrejših sprememb magnetne gostote višjih frekvenc energijsko optimalnega valovanja.

Pogoj zadostne sile za zbitje elektrona iz atomske lupine, večje od privlačne sile atomskega jedra ($F = q \cdot E$), torej omogočajo le višje frekvence, kot to ugotavlja tudi Plack.

Vsiljena energijska stanja valovanj

Enaka amplituda magnetne gostote valovanj vseh frekvenc v nekem prostoru velja le za energijsko optimalna valovanja, to je valovanja s kvantno energijo. Vsako valovanje, tako svetlobno kot radijsko valovanje, ima lahko tudi vsiljena; energijsko obogatena ali osiromašena valovanja.

V primeru energijsko obogatene ali osiromašene valovanja je amplituda magnetne gostote valovanja lahko večja ali manjša od amplitude magnetne gostote energijsko optimalnega valovanja.

Težnja narave k energijsko optimalnim valovanjem

Na primeru opaženih lastnosti svetlobnega valovanja vidim, da energija elektromagnetnega valovanja teži k optimalni kvantni energiji.

V splošnem je kvantna energija elektromagnetnega valovanja tista energija pri določeni frekvenci, kateri se elektromagnetno

valovanje skuša približati. Drugačne energije (amplitude) elektromagnetnega valovanja so valovanju vsiljene.

Po Maxwellovih zakonitostih je taka vsiljena energija elektromagnetnega valovanja možna, vendar se, ko so za to ustvarjeni pogoji, elektromagnetno valovanje preuredi v optimalno energijo, to je v kvantno energijsko stanje.

V primeru svetlobnega valovanja opazamo izrazito nagnjenje h kvantizaciji, saj tako rekoč ne opazamo elektromagnetnih valov, ki ne bi vsebovali kvantne energije. V primeru radijskih valov na osnovi opazovanj nimamo občutka, da bi ti imeli veliko težnjo po kvantizaciji.

Posledično moramo dopuščati različno stopnjo težnje elektromagnetnih valov po kvantizaciji, večjo v primeru višjih frekvenc, manjšo v primeru nižjih frekvenc. Zakonitost, ki bo določala težnjo narave h kvantizaciji valovanja mora znanost še izmeriti in raziskati.

Kvantna energija elektromagnetnega vala

Elektromagnetni val na izbijanje elektrona iz atomske lupine deluje le z delom svoje energije, s takim delom, kot določa Planckov zakon. Naša pozornost pa je še naprej usmerjena v presojo celotne količine energije v enem energijsko optimalnem elektromagnetnem kvantnem valu svetlobe.

Na osnovi Planckove zakonitosti ($E = f \cdot h$) torej ne morem sklepati o celotni energiji elektromagnetnega vala. Lahko pa o celotni energiji optimalnega elektromagnetnega vala sklepam na osnovi ugotovitev, prikazanih na Sliki 6.5 in na Sliki 6.6, in sicer:

- Amplituda magnetne gostote (B) optimalnega valovanja je konstantna pri vseh frekvencah in se ne spreminja.
- Amplituda optimalne električne poljske jakosti (E) energijsko kvantnega valovanja se s frekvenco linearno povečuje.

- Valovna dolžina elektromagnetnega valovanja (λ) se s frekvenco linearno zmanjšuje. Posledično smem oceniti, da se prostornina elektromagnetnega vala zmanjšuje s tretjo potenco frekvence.

Energija elektromagnetnega vala je sorazmerna produktu električne poljske jakosti, magnetne gostote in prostornine elektromagnetnega vala ($E \cdot B \cdot V$), zato lahko sklepam, da je energija energijsko optimalnega elektromagnetnega vala enaka $W_0 = k_5 \cdot E \cdot B \cdot V$, pri čemer je k_5 neka konstanta in W_0 optimalna kvantna energija enega vala elektromagnetnega valovanja.

Vse tri spremenljivke so v primeru energijsko optimalnega kvantnega valovanja odvisne le od frekvence, zato lahko napravim prej opisane zamenjave: $B = K_2$, $E = K_3 \cdot f$, $V = k_4/f^3$. Vstavitev v zgornjo enačbo da rezultat: $W_0 = k/f^2$.

Enačba ponuja hipotezo, da se optimalna energija elektromagnetnega vala zmanjšuje z drugo potenco frekvence oziroma povečuje s kvadratom valovne dolžine.

Tudi energijsko šibek elektromagnetni val lahko izbije elektron iz atomske lupine

Ugotovitev o zmanjševanju kvantne energije elektromagnetnega vala s povečevanjem frekvence daje slutiti, da se ob zadostnem povečanju frekvence zgodi, da elektromagnetni val kljub dovolj hitri spremembi dB/dt ne premore dovolj energije za zbitje elektrona iz atomske lupine. Fotoni zelo visokih frekvenc torej niso sposobni izbijati elektronov iz atomskih lupin.

Foton in elektromagnetni kvant

Lastnosti elektromagnetnega vala kažejo, da je foton po Plancku tisti del energije enega elektromagnetnega vala, ki je sposoben

delovati na elektron. Kolikšen del elektromagnetnega vala deluje na elektron je, kot rečeno, odvisno od geometrijske velikosti elektromagnetnega vala in od velikosti elektrona. Ion ima na primer drugačno velikost od elektrona, zato elektromagnetni val s kvantno energijsko vrednostjo na ion deluje z drugačno silo in energijo kot na elektron.

Pojem fotona je torej lastnost energijskega delovanja izključno med elektromagnetnim valom in elektronom. Elektromagnetni val z vrednostjo energije $E = f \cdot h$ deluje le na elektron. Pojma energije fotona ne moremo uporabiti pri določanju delovanja elektromagnetnega vala na ion zaradi drugačnega električnega in geometrijskega odnosa med elektromagnetnim valom in ionom.

Bolj uporabna kot foton je torej kvantna energija enega elektromagnetnega vala v celoti, to je elektromagnetna energija, ki jo vsebuje en elektromagnetni val in znaša $E = k/f^2$.

Tu naletimo na problem poimenovanja: nimamo namreč pojma, s katerim bi poimenovali celotno energijo enega elektromagnetnega vala. Dokler se v fiziki ne bo pojavil ustrezen pojem, problem rešujem z uporabo opisnega poimenovanja.

Pojem:

- **Foton** je tradicionalno ime za kvantno energijo fotona po Planckovem zakonu. To je tista energija energijsko optimalnega elektromagnetnega vala, s katero elektromagnetni val deluje na elektron.
- **Elektromagnetni val** je tradicionalno ime enega elektromagnetnega vala, ne glede na njegovo energijo.
- **Elektromagnetni kvant** naj v nadaljevanju predstavlja energijske lastnosti enega elektromagnetnega vala, kadar je ta v optimalnem (kvantnem) energijskem stanju.

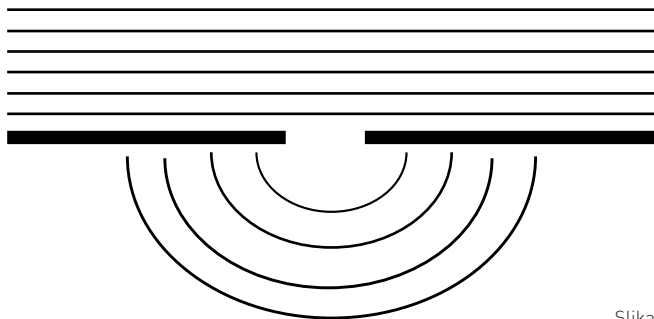
Elektromagnetni valovi se povezujejo v grozde

Ni nujno, da elektromagnetni val deluje le na elektron ali ion. Elektromagnetni valovi lahko vplivajo tudi drug na drugega. O tem razmišljam v nadaljevanju.

Kadar raziskujem, kako elektromagnetni valovi delujejo drug na drugega, je odveč in celo moteče razmišljanje o fotonu oziroma o tem, kako elektromagnetni val deluje na elektron. Zakonitosti medsebojnega delovanja elektromagnetnih valov so drugačne kot v primeru delovanja elektromagnetnega vala na elektron. Tisti del vala, s katerim elektromagnetni val vpliva na elektron, to je foton, za to raziskovanje povezovanja med elektromagnetnimi valovi ni odločilen.

Oblike valovanj

V naravi opažamo, da se valovanja ali nihanja lahko pojavljajo v eni, v dveh ali treh prostorskih razsežnostih.



Slika 6.7

V primeru vodnega valovanja, ki je prikazano na Sliki 6.7, se valovi širijo vzdolžno. Prečno na smer valovanja je vodni greben po vsej dolžini enako visok. Kadar je to mogoče, se skuša vodni

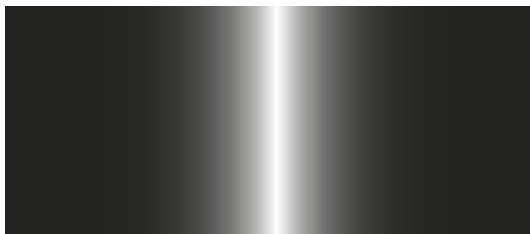
greben čim bolj razširiti levo in desno. Pred oviro z režo to ni mogoče, ker mu to preprečuje nivo vode v grebenu vodnega vala na levi in desni. Ko pa vodni val pride skozi režo, se na drugi strani ovire vodni greben razširja v polkrogu.

Ohranjanje energije elektromagnetnega vala kaže na njegovo prostorsko zaokroženost

Podoben poskus napravim z elektromagnetnim valom oziroma novo pojmovanim elektromagnetnim kvantom. Meritve kažejo, da je elektromagnetni kvant ob gibanju skozi prazen prostor energijsko in prostorninsko zaokrožen in se ne razširja podobno, kot se razširja in podaljšuje greben vodnega vala.

Poskus, ki ga je Thomas Young izvedel v začetku 19. stoletja, kaže, da elektromagnetni val pri potovanju skozi prostor ne spreminja svoje prostorske oblike. Elektromagnetni val oziroma elektromagnetni kvant skozi prostor potuje kot prostorsko zaokrožena energijska tvorba, podobno kot hiter delec.

Ko je Young spustil svetlobo skozi ozko pokončno režo, je na zaslonu za režo opazil ozek snop svetlobe; prikazuje ga Slika 6.8.



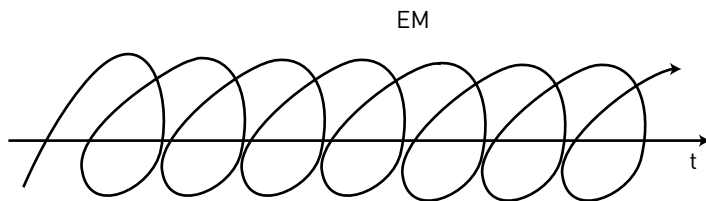
Slika 6.8

Elektromagnetni kvanti skozi režo praviloma potujejo brez uklanjanja, tako, kot bi potovali snovni delci. Elektromagnetni kvant ima (podobno kot snovni delec) frekvenci pripadajočo prostornino, energijo in obliko.

Elektromagnetni val rotira (niha) v treh prostorskih smereh

Vodno valovanje valuje v smeri potovanja valov, prečno v smeri valovnega grebena pa ne niha niti ne valuje. Ker pri elektromagnetnem valu opažam prostorsko zaokroženost, lahko sklepam, da niha oziroma rotira v vseh treh prostorskih razsežnostih. Valovanje in nihanje oziroma rotiranje je namreč tisti instrument, ki je sposoben v vsaki od prostorskih razsežnosti (x , y , z) uokviriti energijo polja, s tem pa zaokroži energijo v valovanju ali nihanju pripadajoči prostornini.

Rotiranje elektromagnetnega vala v vseh treh razsežnostih matematično opisujejo Maxwelllove enačbe.



Slika 6.9

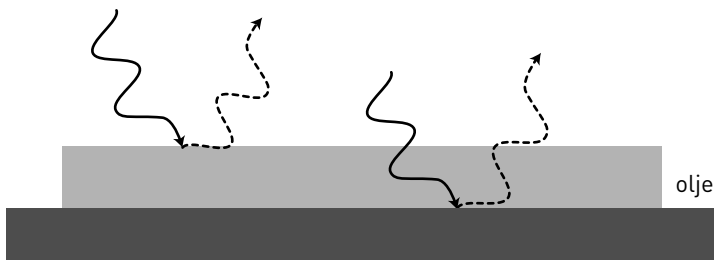
Elektromagnetno valovanje si lahko predstavljam tudi kot rotirajoče elektromagnetne kolobarje, ki jih prikazuje Slika 6.9. Vsak tak kolobar zavzema določeno prostornino. Posamezen kolobar oziroma elektromagnetni val se ohranja znotraj te prostornine in nima teženj po njenem povečevanju.

Koherenca elektromagnetnih valov

Elektromagnetni valovi oziroma elektromagnetni kvanti pogosto potujejo v povezani verigi, kot to nakazuje Slika 6.9.

Koherenco oziroma povezovanje elektromagnetnih valov v verige opazim tudi na primeru odboja svetlobe od oljnega madeža na mokri podlagi, kot to prikazuje Slika 6.10.

Fotoni različnih verig prihajajo v naključnih fazah, zato lahko pride do interference le v okviru iste verige.



Slika 6.10

Interferenčni odboj od oljnega madeža

Kadar se na mokri površini znajde tanek oljni madež, opazim, da se svetloba odbija v obliki barvne mavrice.

Odboj svetlobe se pojavlja tako na vrhu oljne plasti, na spoju olja in zraka, kot tudi na spodnji strani oljne plasti, to je na spoju olja in vode. Od takega oljnega madeža odbita svetloba ima mavrično barvo.

Opažena mavrica je posledica interferenčnega delovanja delnega odboja svetlobe na zgornji oljni ploskvi z delnim odbojem od spodnje ploskve, ki ločuje olje od vode.

Kadar je debelina plasti olja mnogokratnik valovne dolžine svetlobe, se na gornji plasti oljnega madeža srečata in seštejeta:

- odbito valovanje od vrhnje oljne ploskve in
- odbito valovanje od ploskve pod oljem,
- kar krepi določeno barvo (frekvenco) svetlobe.

Do interference lahko pride le v okviru fazno usklajenih elektromagnetnih valov

Interferenca lahko nastane v okviru fazno usklajene verige elektromagnetnih valov na način, da se del opazovane verige odbije na vrhnji ploskvi olja, del pa potuje do ploskve pod oljem, se tam odbije in vrne na zgornjo ploskev, kjer se združi in prišteje tistemu delu te elektromagnetne verige, ki se odbije od ploskve nad oljem.

Elektromagnetni val opazovane verige se sešteje z elektromagnetnim valom iste verige, ki zamuja ravno toliko, kolikor časa potrebuje za pot skozi oljni madež in nazaj na vrhno ploskev.

Vnovična združitev elektromagnetne verige krepi svetlost tiste frekvence oziroma tiste barve svetlobe, pri kateri debelina olja sovpada z mnogokratnikom valovne dolžine svetlobe.

Pogoji za mavrični odboj

Eden od pogojev za mavrični odboj zahteva, da je elektromagnetna veriga (koherenca svetlobe) daljša od dvojne debeline oljnega madeža. Mavrični odboj v splošnem opazimo, kadar so:

- elektromagnetni valovi povezani v verige,
- verige elektromagnetnih valov daljše od dvojne debeline plasti olja,
- elektromagnetni valovi iste verige med seboj fazno usklajeni,
- kadar se del verige elektromagnetnih valov odbije od zgornje, del verige pa od spodnje oljne ploskve.

Merjenje koherence

Spoznanje, da mavrične odboje ustvarjajo le dovolj dolge verige elektromagnetnih valov, nam omogoča merjenje koherence oziroma dolžine verige elektromagnetnih valov.

Meritev dolžine koherentnega žarka izvedem tako, da povečujem debelino oljnega sloja, pri tem pa opazujem intenzivnost mavričnega odboja. Z večanjem debeline oljne plasti se intenzivnost mavričnega odboja zmanjšuje. Vse manj verig elektromagnetnih valov ima namreč zadostno dolžino za ustvarjanje mavrične interference.

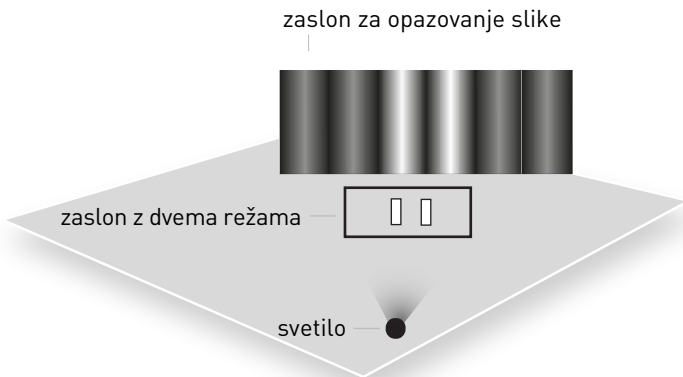
Tista debelina oljne plasti na Sliki 6.10, pri kateri ravno še opazim skromne ostanke mavričnega odboja, predstavlja polovico dolžine najdaljših koherentnih elektromagnetnih verig valov.

Meritve kažejo, da ima sončna svetloba koherentne verige elektromagnetnih valov, ki so dolge celo več metrov, laserski žarek pa seva še mnogo daljše neprekinjene koherentne verige elektromagnetnih valov.

Youngov poskus z dvojno režo

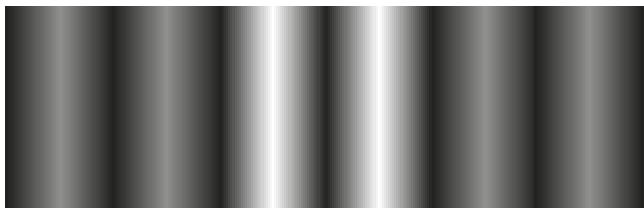
Predstavo o lastnostih elektromagnetnega vala dodatno izostri Youngov poskus z dvojno režo. Shema je prikazana na Sliki 6.11.

S svetilom, ki oddaja koherentno svetlobo, posvetim na zaslon z dvema vzporednima režama.



Slika 6.11

Ko je Young svetlobi omogočil hkratno pot skozi obe reži, je na zaslonu poleg dveh glavnih lis opazil še stranske lise, kot to prikazuje Slika 6.12.

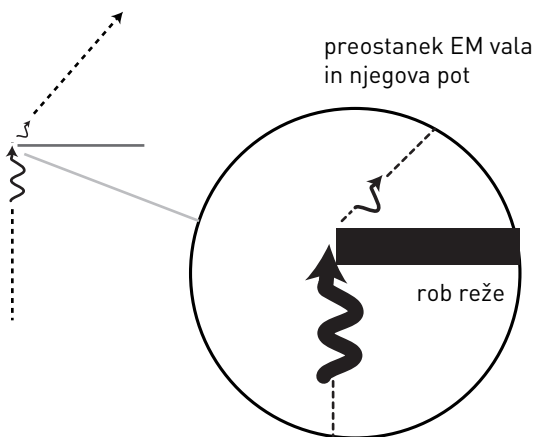


Slika 6.12

Izvor stranskih lis

Nekateri elektromagnetni valovi skozi režo potujejo neovirano. Nekateri oplazijo rob reže, lahko pa na režo priletijo tako, da se ob robu reže raztreščijo.

Ko elektromagnetni kvant (elektromagnetni val z optimalno kvantno energijo) oplazi rob reže, kot to prikazuje Slika 6.13, se zgodi dvoje: ob dotiku elektromagnetni kvant izgubi del energije, poleg tega dotik elektromagnetnemu valu spremeni smer gibanja.



Slika 6.13

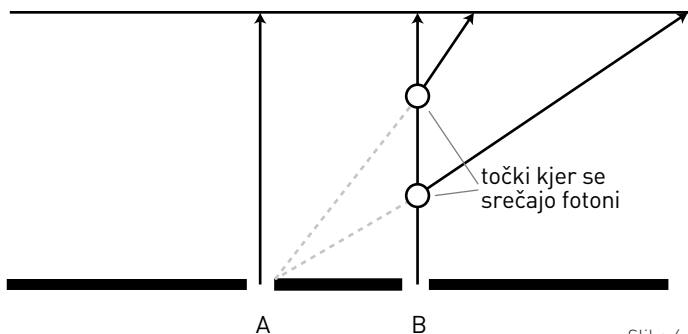
Energijsko osiromašeni elektromagnetni valovi se od roba reže naključno odbijejo v mnogih smereh.

Z večjo silo kot elektromagnetni kvant trešči ob rob reže, več energije (v obliki toplote) pusti na robu reže ter bolj razbit in energijsko osiromašen nadaljuje pot.

Svetloba druge reže energijsko šibkim elektromagnetnim valovom vrne energijo

Kadar svetlobi omogočimo prehod skozi obe reži, razbiti in energijsko osiromašeni ostanki elektromagnetnih valov prve reže, na Sliki 6.14 označeni črtkano, prehajajo skozi energijsko bogate elektromagnetne valove druge reže, skozi žarek B.

Elektromagnetni valovi preidejo drugi skozi druge. Osiromašeni ostanki elektromagnetnih valov iz reže A preidejo skozi



Slika 6.14

energijsko bogate verige elektromagnetnih valov iz reže B. Ob prehodu enih elektromagnetnih valov skozi druge pride med njimi do izmenjave energije.

Energijsko siromašne verige elektromagnetnih valov iz reže A se energijsko ojačajo pod določenimi pogoji, opisanimi v nadaljevanju. Energijsko bogate verige elektromagnetnih valov iz reže B pa izgubijo del energije.

Izmenjava energije se dogaja med fazno usklajenimi elektromagnetnimi valovi

Črte na zaslonu (Slika 6.12) kažejo, da žarek A v nekaterih smereh ob preletu žarkov prejema od žarka B več energije, v drugih smereh pa manj.

Primerjam dolžini poti elektromagnetnih valov žarka A in žarka B, ki jih ta napravita na poti do njunega srečanja (Slika 6.14). V različnih smereh poti žarka iz reže A do srečanja z žarkom B so faze valovanja ob njunem srečanju neke bolj, drugje manj usklajene.

Stranske črte Youngove meritve na Sliki 6.12 kažejo, da si elektromagnetni valovi ob srečanju izmenjujejo energijo le pri nekaterih dolžinah poti.

V točkah srečanja, kjer so faze valovanja dovolj usklajene, podobno kot pri oljnem madežu na Sliki 6.10, prihaja do povezovanja elektromagnetnih valov v koherentne verige in s tem do izmenjave energije med elektromagnetnimi valovi.

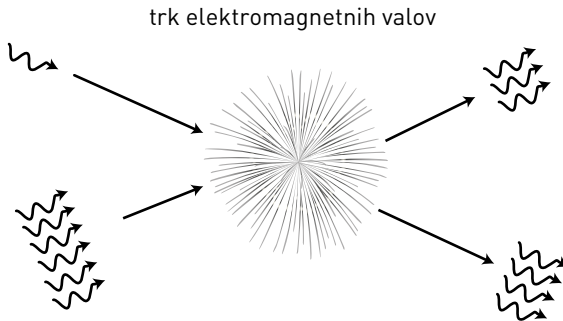
Izmenjava energije med elektromagnetnimi valovi je torej odvisna od fazne usklajenosti elektromagnetnih valov iz reže A in B ob srečanju.

Na osnovi opazovanja interferenčnih črt lahko sklepam, da energijsko siromašni elektromagnetni valovi v primeru fazne usklajenosti prejmejo energijo od energijsko bogatih elektromagnetnih valov. Elektromagnetni valovi, ki ob srečanju niso v fazi, si energije ne izmenjajo.

Energija žarka B se lahko zmanjša

Na izmenjavo energije med verigama elektromagnetnih valov ne kažejo le stranske črte, temveč tudi zmanjšana energija osnovnega žarka B. Meritve namreč kažejo energijsko oslabitev žarka B, kadar se ta srečuje z energijsko šibkimi elektromagnetnimi valovi iz reže A.

Pri Youngovem poskusu lahko izmerimo precejšnje povečanje energije elektromagnetnih valov v stranskih snopih, po drugi strani pa opazno zmanjšano energijo osnovnih črt. Pojav si lahko razlagam tako, kot kaže Slika 6.15. Puščice predstavljajo elektromagnetne kvante in deli puščic energijsko osiromašene elektromagnetne valove.



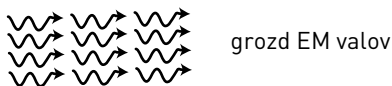
Slika 6.15

Opisano dogajanje pri srečevanju elektromagnetnih valov potrjuje tudi Mach-Zhenderjev interferometer, ki sta ga neodvisno drug od drugega leta 1896 izdelala fizika Mach in Zhander.

Grozd elektromagnetnih valov

V nadaljevanju me zanima, ali se elektromagnetni valovi oziroma elektromagnetni kvanti povezujejo v verige le vzdolžno, drug za drugim v smeri leta, ali se verige elektromagnetnih valov lahko povezujejo tudi v snope vzporednih elektromagnetnih valov, tako kot prikazuje Slika 6.16.

Elektromagnetni kvant ima neko obliko, ki je odvisna od frekvence svetlobe. Elektromagnetni val se torej v nobeni koordinati



Slika 6.16

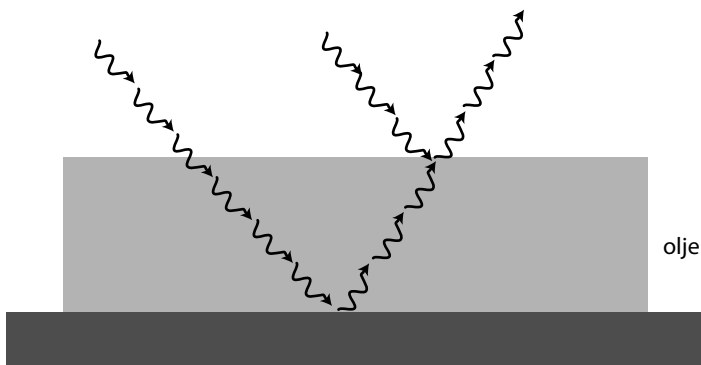
(x, y, z) ne razširja preko zanj optimalne velikosti, četudi njegovega razširjanja ne ovirajo zunanje razmere. Elektromagnetni val torej na levi in na desni pušča prostor za druge elektromagnetne valove.

Povezovanje elektromagnetnih valov v verige je posledica medsebojnega energijskega sodelovanja med elektromagnetnimi valovi. V verigo povezana elektromagnetna kvanta imata manjšo skupno energijo kot dva nepovezana elektromagnetna kvanta, zato elektromagnetna kvanta oziroma elektromagnetna vala vztrajata v povezanosti.

Vzporedne verige elektromagnetnih kvantov

Elektromagnetni valovi iste verige zaporednih elektromagnetnih valov bi se pri odboju od oljnega madeža med seboj lahko povezovali le ob popolnoma navpičnem vpadu verige elektromagnetnih valov na oljni madež, ne pa pod kotom.

Interferenca se dogodi med dvema vzporednima valoma znotraj istega grozda EM valov.



Slika 6.17

Slika 6.17 prikazuje odboj svetlobe od oljnega madeža pod kotom. Na osnovi geometrije lahko sklepam, da se ob vpadu verige elektromagnetnih valov pod kotom elektromagnetnega vala iste verige zaporednih elektromagnetnih valov ne srečata.

Pri vpadu svetlobe pod kotom se lahko srečajo le elektromagnetni valovi ene verige z elektromagnetnimi valovi vzporedne verige znotraj istega grozda elektromagnetnih valov.

Vzporedna veriga elektromagnetnih valov mora biti del skupnega grozda elektromagnetnih valov, sicer vzporedni verigi elektromagnetnih valov ne bi bili fazno usklajeni in ne bi omogočali interference svetlobe.

Mavrico na oljnem madežu opažam pod kotom, kar pomeni, da se interferenca dogaja tudi med elektromagnetnimi valovi vzporednih verig, ki pripadajo istemu grozdu elektromagnetnih valov.

Grozd elektromagnetnih valov

Grozd elektromagnetnih valov še bolj nazorno opazim v poskusu Thomasa Younga (Slika 6.11) ob prehodu elektromagnetnih kvantov skozi dvojno režo.

Elektromagnetni valovi za režo lahko interferirajo v obliki prikazanih črt na Sliki 6.12 le v primeru fazne usklajenosti med elektromagnetnimi valovi, to je kadar elektromagnetni valovi, ki vpadajo na obe reži, izhajajo iz istega, med seboj fazno usklajenega grozda elektromagnetnih valov.

V poskusu Thomasa Younga morata biti reži druga drugi dovolj blizu, da del elektromagnetnih valov istega grozda preide skozi eno režo in del skozi drugo. Le na vhodu fazno usklajeni elektromagnetni valovi se na drugi strani reže povezujejo v obliki na Sliki 6.12 prikazanih črt.

Kadar sta reži preveč razmahnjeni, ju isti grozd elektromagnetnih valov ne more zaobjeti. V takih primerih ne opazimo značilne interference, ki jo prikazuje Slika 6.12.

Youngov poskus omogoča merjenje širine grozda elektromagnetnih valov

Opazena odvisnost razdalje med režama v Youngovem poskusu in pojava interference daje možnost merjenja širine grozda elektromagnetnih valov.

Povečujem razdaljo med režama v Youngovem poskusu ter opazujem stranske črte na zaslonu. Večja, kot bo razdalja med režama, manj verjetno bodo elektromagnetni valovi skozi eno in drugo režo pripadali istemu grozdu elektromagnetnih valov in manj izrazite bodo stranske črte.

Za režo lahko interferirajo le elektromagnetni valovi istega grozda, ki prehajajo skozi obe reži, del jih prehaja skozi eno režo, del skozi drugo. Razdalja med režama, pri kateri se ravno še opazi medle obrise stranskih črt, predstavlja največjo širino grozdov opazovanih elektromagnetnih valov.

Na oljnem madežu torej lahko merimo dolžino verige elektromagnetnih valov, ki je hkrati dolžina grozda elektromagnetnih valov, z Youngovem poskusom pa lahko merimo premer grozda elektromagnetnih valov. Merimo lahko velikost grozda elektromagnetnih valov. Merimo nekaj, česar neposredno ne moremo videti, prikrite lastnosti grozda elektromagnetnih valov.

Energijska stabilnost elektromagnetnega kvanta

Na osnovi opisanih poskusov lahko sklepam, da je grozd elektromagnetnih valov neka skupnost elektromagnetnih valov, ki:

- potuje v paketu,
- ima neko zaokroženo prostornino,
- elektromagnetni valovi v grozdu pa energijsko sodelujejo, in sicer gre za:

- izmenjavo energije med elektromagnetnimi valovi in
- uravnavanje fazne usklajenosti med elektromagnetnimi valovi.

Energijsko sodelovanje med elektromagnetnimi valovi v grozdu je način za ohranjanje kvantnih lastnosti posameznih elektromagnetnih kvantov ter fazne usklajenosti in prostorninske zao-kroženosti grozda elektromagnetnih valov tudi takrat, kadar je slednji podvržen vplivom okolja.

Delni odboj svetlobe

Pri delnem odboju svetlobe, na primer na polprepustnem ogledalu, kot je prikazan na Sliki 6.1, se energija elektromagnetnega grozda razdeli v dve smeri. Elektromagnetni valovi v eni in drugi smeri ohranijo svoji frekvenci lastno kvantno energijo. To pome-ni, da se grozd elektromagnetnih valov razdeli v dva grozda po energiji neokrnjenih elektromagnetnih kvantov, energijsko ta-kih, kot so prispeli do polprepustnega ogledala.

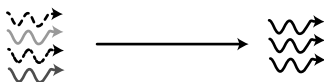
Če pri odboju ni energijskih izgub, je vsota elektromagnetnih kvantov enega in drugega grozda enaka številu elektromagne-tnih kvantov vpadnega grozda na polprepustno ogledalo.

Energijska rekonstrukcija elektromagnetnih kvantov

Hipec po delnem odboju dobimo dva grozda energijsko siromašnih elektromagnetnih valov.

Ker odbiti elektromagnetni valovi tvorijo grozd, se tak grozd energijsko siromašnih elektromagnetnih valov po odboju preobli-kuje na osnovi izmenjave energije med elektromagnetnimi valovi v grozdu.

Elektromagnetni grozd se preoblikuje v manj številčni grozd energijsko optimalnih elektromagnetnih kvantov, tako da vsak elektromagnetni kvant vsebuje frekvenci pripadajočo kvantno energijo.



Grozd štirih energijsko osiromašenih fotonov se preuredi v tri energijsko optimalne fotone.

Slika 6.18

Grozd štirih elektromagnetnih valov na Sliki 6.18 na primer žrtvuje en elektromagnetni val z namenom, da grozd treh elektromagnetnih kvantov svojo pot nadaljuje kot grozd elektromagnetnih kvantov s frekvenci pripadajočo kvantno energijo.

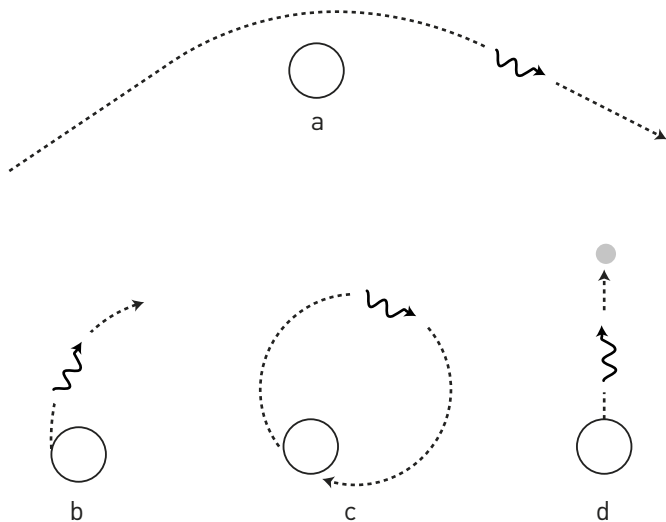
Energijske motnje elektromagnetnega kvanta

Elektromagnetni val ne doživlja opisanih energijskih deformacij in rekonstrukcij le v primeru delnih odbojev. Elektromagnetni valovi so podvrženi energijskim stresom tudi na primer v okoljih velike gravitacije. Elektromagnetni val posledično ne more pobegniti gravitaciji črne luknje v vesolju.

Elektromagnetni valovi se rojevajo tudi v okoljih z veliko gravitacijo

Pri opazovanju svetlobe iz nebesnih teles z veliko gravitacijo, kot so na primer aktivna galaktična središča ali supernove, opažam, da velika gravitacija ne omejuje rojevanja elektromagnetnih valov. Ti nastajajo tudi v okoljih z veliko gravitacijo, ta pa v nadaljevanju vpliva na energijo in smer leta elektromagnetnega valovanja.

Literatura običajno prikazuje vpliv gravitacije na smer poti svetlobe na način, kot je prikazan v primeru a na Sliki 6.19. Tako se na primer giblje svetloba mimo Sonca.



Slika 6.19

Ni nujno, da opazujem ravno svetlobo, ki ima izvor izven gravitacijskega polja. Zamislim si lahko na primer svetlobo, ki ima izvor na nebesnem telesu z veliko gravitacijo; ta gravitacija v nadaljevanju tudi krivi smer poti svetlobe.

Primer b na Sliki 6.19 prikazuje žarek, ki je izšel iz masivnega nebesnega telesa z močno gravitacijo. Žarek naj izide na robu tega nebesnega telesa, zato gravitacija tega telesa krivi pot žarka, ta pa po zakrivljeni poti uspe pobegniti njegovi močni gravitaciji.

V nadaljevanju v mislih gravitacijo tega telesa še povečam. Primer c na Sliki 6.19 prikazuje žarek, ki je skušal pobegniti povečani gravitaciji, vendar ga je ta pritegnila nazaj.

Različne geometrijske razmere izstopa žarka v primeru c ožijo in širijo zanko poti žarka. Kadar žarek izide naravnost od nebesnega telesa, se zanka zoži v premico, kot to prikazuje primer d na Sliki 6.19.

V primeru d elektromagnetni val izide iz nebesnega telesa, vendar tega zaradi velike gravitacije ne more zapustiti; to se dogaja v črnih luknjah.

Potovanje elektromagnetnega vala po gravitaciji

V poglavju Masa je pojasnjeno, da ima elektromagnetni val maso in posledično nanj deluje gravitacijska sila. Gravitacijska sila ovira elektromagnetni val pri dvigovanju iz gravitacije. Elektromagnetni val gravitacijo premaguje s silo na poti, pri čemer izgublja energijo.

Energija elektromagnetnih valov se pri premagovanju gravitacije zmanjšuje skladno z enačbo $A = F \cdot s$, pri čemer je F sila, s katero deluje gravitacija na elektromagnetni val, in s pot, ki jo ta val opravi.

Ko opazujem elektromagnetne valove, ki prispejo s Sonca ali celo z nebesnih teles s še večjo gravitacijo, pa zmanjšanja energije elektromagnetnih kvantov ne opažam v smislu njihovega energijskega siromašenja. Vsi elektromagnetni kvanti na Zemljo prispejo s frekvenci pripadajočo kvantno energijo. Meritve kažejo vedno enake energije elektromagnetnih kvantov izbranih frekvenc.

Energijsko stabilnost elektromagnetnih kvantov smem pripisati izmenjavi energije med elektromagnetnimi kvanti znotraj elektromagnetnega grozda, kot to prikazuje Slika 6.18.

Elektromagnetni valovi se na izvoru rojevajo v obliki elektromagnetnih grozdov. Vsak elektromagnetni val v okviru elektromagnetnega grozda ima frekvenci pripadajočo kvantno energijo.

Ob energijskih izgubah elektromagnetnega grozda na poti pri premagovanju gravitacije se zmanjšuje število elektromagnetnih valov v grozdu. Energijsko osiromašeni elektromagnetni valovi svojo energijo predajo preostalim elektromagnetnim valovom v elektromagnetnem grozdu, kot to prikazuje Slika 6.18.

Ne bojim se priznati nobene nasprotne zamisli, ker pričakujem, da bo prav od tam prišla resnica, ki je še ne poznam.

— *W. M. Pepper*

Elektromagnetni valovi grozda na poti tako ohranjajo elektromagnetnemu kvantu optimalno (kvantno) energijo, ne ohranja pa se število elektromagnetnih kvantov v grozdu. Elektromagnetni grozd iz gravitacijskega polja izide z manj elektromagnetnimi kvanti, manj številčen, kot je bil na izvoru.

V črni luknji se elektromagnetni grozd posuši

Črne luknje so zelo masivna nebesna telesa, ki jih obkroža izjemno močna gravitacija. Črna luknja praviloma ne oddaja svetlobe, kar pomeni, da elektromagnetni valovi nimajo dovolj energije za pobeg iz nje.

Izsevani elektromagnetni grozdi na poti pobega iz izjemne gravitacije črne luknje izgubljajo val za valom, in sicer tako, kot prikazuje Slika 6.18, dokler elektromagnetni grozd ne ostane brez vseh elektromagnetnih valov.

Na neki višini v fazi pobega elektromagnetnega grozda iz črne luknje, ko je elektromagnetni grozd porabil že skoraj vso svojo energijo, ostane poslednji elektromagnetni val, ki ob nadaljnjem dvigovanju iz črne luknje še naprej izgublja preostalo energijo. Nazadnje še poslednji elektromagnetni val ostane brez energije in z dokončno izgubo svoje energije ne obstaja več.

Od elektromagnetnega grozda ne ostane nič,

- ne obstaja več njegova elektromagnetna energija in
- ne obstaja več njegova negativna vezalna energija, ki je izhajala iz lokacije njegovega nastanka.

Elektromagnetni grozd se tako dokončno in v celoti izniči, na način, ki je podrobneje opisan v poglavju Energija.

Črne luknje rastejo in se krčijo

Črna luknja privlači snovne delce in s tem povečuje svojo maso. S tem se povečujeta tako njean energija kot tudi negativna vezalna energija.

Obraten proces se dogaja pri sevanju svetlobe. Za nastajanje in sevanje svetlobe črna luknja uporabi del lastne energije.

Svetloba zaradi velike gravitacije ne more zapustiti črne luknje. Ob poskusu pobega se izniči. Po izničenju elektromagnetnih valov ob poskusu njihovega pobega iz črne luknje, slednja ostane brez dela svoje energije, brez tistega dela, ki ga je porabila za nastajanje izsevanih elektromagnetnih valov.

Izničevanje izsevanih elektromagnetnih valov zmanjšuje maso črne luknje.

Če črna luknja za nastajanje svetlobe porabi več energije, kot je pridobi z vsrkavanjem snovnih delcev, se njena masa zmanjšuje. V nasprotnem primeru se ta povečuje.

Zaključek

To poglavje govori predvsem o kvantni energiji svetlobnega valovanja ter okoliščinah, ki vplivajo na energijo tega valovanja.

V nadaljevanju želimo pogledati, kako okoliščine, na primer gravitacija, vplivajo na druge lastnosti elektromagnetnega valovanja, to je na frekvenco in valovno dolžino svetlobnega valovanja.

V literaturi je na primer opisan gravitacijski rdeči zamik spektralne črte (»Gravitational redshift«), ki govori, kako potovanje svetlobnega žarka skozi gravitacijsko polje vpliva na spremembo valovne dolžine svetlobe, kar pa je že tema naslednjega poglavja.