

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 28 (2000/2001)

Številka 2

Strani 74-80

Zoran Arsov:

LUMINESCENCA

Ključne besede: fizika, svetloba, inkandescenca, luminescenca, bioluminescenca, energijska stanja.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/28/1432-Arsov.pdf>

© 2000 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

LUMINESCENCA

Vsi procesi v naravi potekajo tako, da se energija pretaka iz ene oblike v drugo. Pri prostem padu prehaja potencialna energija v kinetično, mehanska energija se pri gnetenju kepe plastelina spreminja v toploto, pri igranju na glasbila se mehanska energija delno prenese v energijo zvočnega valovanja, pri sevanju telesa pa se toplotna energija pretvori v svetlobo. Ogledali si bomo skupino takih procesov, kjer se različne oblike izhodiščne energije pretvorijo v svetlobo.

ENERGIJA \implies (VIDNA) SVETLOBA

V shemi smo zapisali vidna svetloba, ker so običajno taki procesi še bolj zanimivi. V primeru, da energije v izhodiščni obliki ne zaznamo, se zdi namreč tako, kot da bi se svetloba vzela iz nič.

Procese zgornje vrste delimo v grobem na *inkandescenco* (lat. *in candela*, v sveči) in *luminescenco* (lat. *lumen*, luč). Inkandescenca je pretvorba toplotne energije v svetlobo. Če izhodiščna energija ni v obliki toplote, govorimo o luminescenci oziroma t.i. hladni svetlobi. Različne pojave imenujemo z ustreznimi predponami pred -luminescenco oziroma -escenco.

Preden se posvetimo opisu posameznih pojavov, naj povemo nekaj besed o principih, ki so skriti za vpijanem (absorpcijo) energije v snovi in oddajanjem (emisijo) energije v obliki svetlobe. Molekule (ali atomi) v snovi imajo določeno energijo, pravimo, da so v določenih energijskih stanjih. Če sestavni del snovi pridobi ali izgubi ustrezno količino energije, lahko preide iz obstoječega v drugo energijsko stanje. Podobno bi lahko trdili, da je človek po zaužitju (absorpciji) hrane v drugačnem 'energijskem' stanju kot pred tem. V primeru, da se zgodi prehod med stanji zaradi svetlobne energije, lahko energijsko razliko ΔE med stanjema molekule zapišemo kot

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

kjer je h Planckova konstanta, ν frekvenca svetlobe, c svetlobna hitrost in λ valovna dolžina svetlobe. Če gre molekula iz višjega v nižje energijsko stanje, pri tem izseva (emitira) svetlobo z ustrezno valovno dolžino, iz nižjega v višje stanje pa preide po absorpciji svetlobe. Ker so energijska stanja za določeno molekulo točno določena, je točno določena tudi energijska razlika med njimi. Za prehod mora torej molekula absorbirati količino svetlobe, ki nosi energijo hc/λ . Takšno količino svetlobe imenujemo 1 kvant svetlobe (1 foton). Od tod izhaja tudi ime *kvantna fizika*,

ki se ukvarja z opisom narave na nivoju atomov oz. molekul in njihovih sestavnih delov.

Kot bo razvidno iz primerov, predstavljenih kasneje, so energijske razlike med stanji molekul v mnogih primerih v območju, kjer lahko prehodi med stanji potekajo z izsevanjem vidne svetlobe. Pod pojmom vidne svetlobe razumemo svetlobo, ki ima valovne dolžine približno od 400 nm (modra barva) do 750 nm (rdeča barva), zelena barva ima npr. $\lambda = 500$ nm, rumena pa $\lambda = 550$ nm ($0,000000001$ m = 10^{-9} m = 1 nm).

Za boljšo predstavbo bomo energijska stanja molekule primerjali z energijskimi stanji kamna, ki ga dvignemo s tal na polico pri določeni višini. Za potencialno energijo kamna z maso m velja

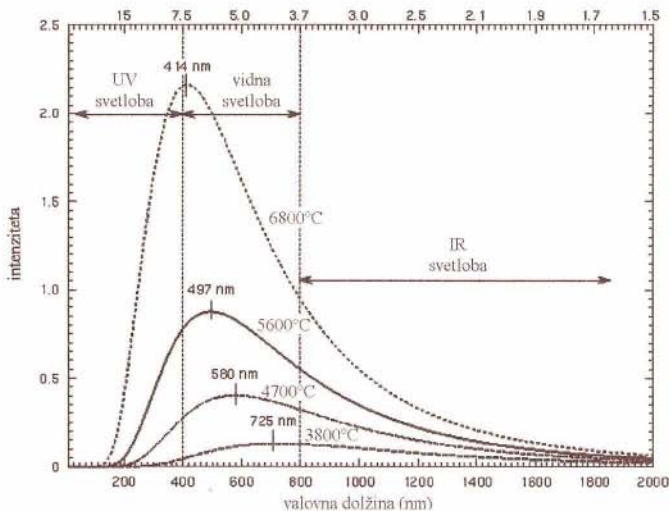
$$W_p(h) = mgh,$$

s težnim pospeškom g in višino h , na kateri je polica. Pri konstantni masi in težnem pospešku je potencialna energija sorazmerna višini. Ko je kamen na tleh ($h = 0$), je njegova potencialna energija enaka nič. Kamnu se energija kvečjemu lahko poveča. Tudi za molekulo obstaja neko najnižje energijsko stanje; tako stanje imenujemo *osnovno stanje*. Če okolica ne moti molekule, bo molekula v tem stanju tudi ostala. Podobno bo kamen vztrajal na tleh, dokler ga ne dvignemo. (Ste že kdaj videli kamen, ki bi poskočil sam od sebe?) V višje energijsko stanje bo molekula prešla, če bo za to iz okolice dobila potrebno energijo ΔE , npr. z absorpcijo svetlobe. Višja energijska stanja imenujemo *vzbujena stanja*. Z dvigom kamen spravimo v višje energijsko stanje. Najpomembnejša razlika med kamnom in molekulo je, da lahko kamen dvignemo na poljubno visoko polico, molekula pa lahko preide le v energijsko točno določena stanja (višine poličk za molekulo ne moremo poljubno spreminjati). Različne molekule imajo energijska stanja različno razporejena.

Do inkandescence pride, če snov dovolj segrejejo (torej, če ji dovedemo dovolj toplotne energije), da seva vidno svetlobo. Poleg tega mora biti snov gosta; inkandescenco opazimo pri trdninah, kapljevinah in gostih plinih, pri redkih plinih pa ne. Lep primer je segreto jeklo v železarnah, ki pri določeni temperaturi začne žareti. Jeklo, ki rdeče žari, oddaja poleg rdeče tudi svetlobo drugih barv, vendar rdeča prevladuje. Barva svetlobe, ki je snov največ odda, je določena le s temperaturo, ne pa z vrsto molekul v snovi (različne snovi se pri isti temperaturi obnašajo podobno). Pri razumevanju inkandescence si zato ne moremo pomagati s predstavo o energijskih stanjih, ponazorjenih s policami.

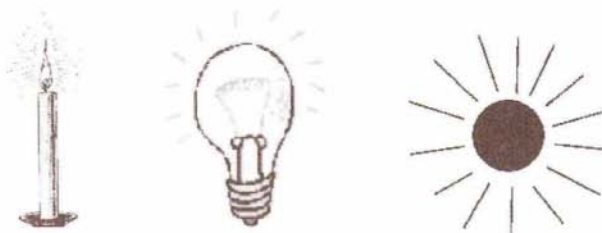
V inkandescentni svetlobi so torej različno močno zastopane komponente svetlobe z različnimi valovnimi dolžinami. Diagramu, ki kaže

količino izsevane svetlobe (intenziteto) v odvisnosti od valovne dolžine, pravimo *spekter*. Spekter sevanja segretega telesa vidimo na sliki 1. Manj segreta telesa oddajajo predvsem infrardečo (IR) svetlobo ($\lambda > 750$ nm), ki je z očmi ne moremo zaznati. IR svetlobo čutimo kot toploto, ki prihaja od segretega telesa. Če telo dovolj segrejemo, seva tudi precej ultravijolične (UV) svetlobe ($\lambda < 400$ nm), ki ima krajšo valovno dolžino kot modra svetloba.



Slika 1. Spektri segrelih teles pri različnih temperaturah. Na diagramu so označene tudi valovne dolžine, pri katerih telesa najbolj sevajo.

Izvori inkandescentne svetlobe so plamen sveče (ognja), običajna žarnica, zvezde (slika 2). Del plamena sveče, ki je rumene barve, nastane zaradi inkandescence ogljikovih delcev, ki nastanejo po izgorevanju voska. Žarnica sveti potem, ko skozi tanko žičko spustimo električni tok. Ker tanka žička predstavlja za tok veliko oviro (ima velik upor), se segreva in inkandescentno zasveti. Mimogrede omenimo še, da na podoben način deluje tudi halogenska luč, le da je v halogenki prisoten plin, ki omogoča luči daljšo življenjsko dobo in večjo intenziteto svetlobe. Tudi svetloba zvezd je inkandescentnega izvora. Potrebna izhodiščna energija nastane pri jedrskih reakcijah v jedru zvezde. Ta energija se preko različnih procesov prenese na površino zvezde, ki seva svetlobo. Površina Sonca ima okrog 5600°C . Ker ima spekter pri tej temperaturi maksimum pri valovni dolžini okrog $\lambda = 500$ nm (glej sliko 1), Sonce seva svetlobo rumeno-zelene barve. Zanimivo je, da so oči človeka najbolj občutljive prav pri tej valovni dolžini.



Slika 2. Primeri inkandescence.

Sedaj si bomo поблиže ogledali še luminescenco. V tem procesu izhodiščna energija, ki jo absorbira snov, ni toplotna energija. Zato snov, ki oddaja svetlobo pri luminescenci, ni vroča. Glede na to, v kakšni obliki oziroma od kod prihaja izhodiščna energija, ločimo različne pojave. Nekaj je zapisanih spodaj.

fluorescenca Izhodiščna energija izvira iz absorpcije svetlobne energije.

Običajno na material posvetimo z UV svetlobo. Ker UV svetlobe ne vidimo, fluorescentna snov pa seva vidno svetlobo, se zdi, kot da izsevamo svetlobo dobimo iz nič. Fluorescentne snovi uporabljamo v različne namene, najdemo jih, npr. v fluorescentni luči, v mineralih, ki fluorescirajo, v nekaterih pisalih.

fosforescenca Snov absorbira svetlobno energijo. Sevanje svetlobe ne sledi neposredno po absorpciji, ampak poteka z zakasnitvijo. Na ta način lahko snov oddaja svetlobo tudi v popolni temi, če smo jo pred tem obsevali s svetlobo. Fosforescentne snovi uporabljamo kot premaz na urnih kazalcih, pri otroških igračah.

kemoluminescenca Pri nekaterih kemijskih procesih se energija po končani reakciji sprosti v obliki svetlobe (in ne toplote). Tem reakcijam pravimo kemoluminescentne. Kot primer kemoluminescence omenimo svetleče palčke.

bioluminescenca O bioluminescenci govorimo, ko živi organizmi zaradi kemoluminescentnih reakcij oddajajo svetlobo. Najbolj vsakdanji primer so kresničke, gljive, zelo pogosta pa je bioluminescenca pri globokomorskih organizmih.

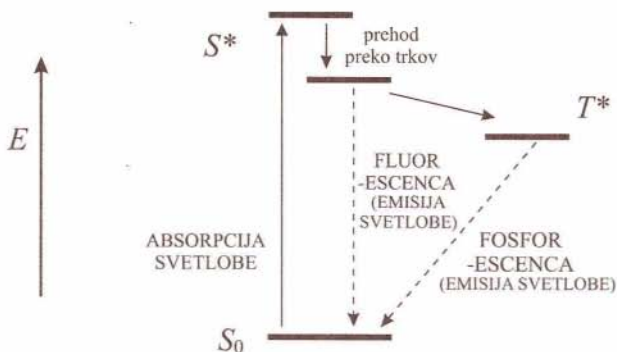
elektroluminescenca Elektroluminescenco povzroči tok nabitih delcev. Kinetična energija delcev se porabi za vzbujanje atomov oz. molekul v snovi v višja energijska stanja. Primeri so televizijski ekran, neonska luč, severni sij, strele.

radioluminescenca Izhodiščna energija je posledica radioaktivnih razpadov. Nekatero starejše ure so imele na kazalcih radioaktivni premaz, zaradi česar so kazalci svetili tudi ponoči.

triboluminescena Pri triboluminescenci (gr. *tribo*, podrgniti, popraskati) je sevanje svetlobe posledica absorpcije mehanske energije. Do tega pojava lahko npr. pride, ko med seboj podrgnemo dva kosa primerne kamnine.

termoluminescena To je posebna oblika pojava fosforescence. V nekaterih materialih se fosforescena pojavi šele, ko material dovolj segrejemo.

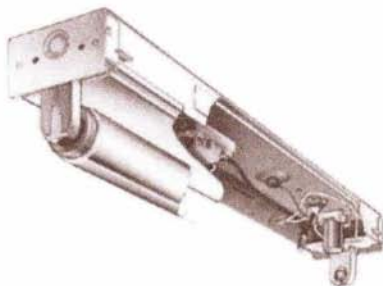
Najprej si oglejmo pojava *fluorescence* in *fosforescence*. Imeni izhajata iz kemijskih elementov fluora in fosforja, saj so pojava najprej opazili pri nekaterih spojinah, ki vsebujejo ta dva elementa. Valovna dolžina fluorescenčne in fosforescenčne svetlobe je odvisna od strukture in postavitve energijskih stanj molekul, ki sestavljajo snov. Valovna dolžina izsevane svetlobe je torej odvisna od kemijske sestave snovi (za razliko od inkandescence). Pri razumevanju fluorescence in fosforescence si lahko pomagamo s predstavo o energijskih stanjih kot policah, med katerimi prehajajo molekule.



Slika 3. Energijska stanja v molekuli (E ... energija). S_0 je osnovno stanje, S^* in T^* pa predstavljata vzbujena stanja molekule.

Pri obeh pojavih ima izsevana svetloba v primerjavi z absorbirano svetlobo večjo valovno dolžino (npr. pri fluorescenci snov absorbira UV svetlobo in izseva vidno). Pri fluorescenci je ta značilnost posledica prehodov znotraj vzbujenega stanja S^* (glej sliko 3). Lahko bi rekli, da je vzbujeno stanje S^* polica, ki je sama sestavljena še iz nekaj poličk (v našem primeru iz višje in nižje poličke). Med temi poličkami lahko molekula prehaja zaradi trkov z ostalimi molekulami, pri čemer lahko molekula izgubi nekaj energije. Energija emitirane svetlobe je zato manjša od

energije absorbirane svetlobe; iz ΔE (emisija) $<$ ΔE (absorpcija) res sledi λ (emisija) $>$ λ (absorpcija). Pri fluorescenci si po vrsti sledijo naslednji prehodi molekule med energijskimi stanji: $S_0 \rightarrow S_{\text{višje}}^*$ (absorpcija energije), $S_{\text{višje}}^* \rightarrow S_{\text{nižje}}^*$ (prehod preko trkov) in na koncu $S_{\text{nižje}}^* \rightarrow S_0$ (emisija svetlobe). Fluorescenca je osnova za delovanje fluorescentne luči (slika 4). Plin v cevi seva svetlobo zaradi *elektroluminescence* (med koncema cevi je določena napetost). Če plin seva vidno svetlobo, govorimo o neonski luči. V primeru fluorescentne luči seva plin UV svetlobo. Ker je cev premazana s fluorescentno snovjo, luč v resnici sveti zaradi fluorescence.



Slika 4. Fluorescentna luč.

Tudi fosforescenco razložimo z lastnostmi energijskih stanj sistema. Nekatera vzbujena stanja so bolj dolgoživa kot druga, na sliki 3 je to T^* . Pri absorpciji energije imamo prehod $S_0 \rightarrow S^*$. Preko posebnih procesov pride do prehoda $S^* \rightarrow T^*$. Nazadnje se zgodi prehod $T^* \rightarrow S_0$ (emisija svetlobe). Zopet velja λ (emisija) $>$ λ (absorpcija). V stanju T^* ostane molekula dalj časa kot v običajnem vzbujenem stanju S^* . To pomeni, da fosforescentna snov emitira svetlobo še dolgo potem, ko jo je absorbirala. Zato lahko vidimo na uro, pri kateri so kazalci premazani s fosforescentno snovjo, tudi ponoči. Če dalj časa spremljamo svetlost kazalcev, lahko opazimo, da s časom postajajo temnejši. Če bi imeli uro dovolj dolgo v temi, kazalcev ne bi več videli. To je razumljivo, saj poide shranjena absorbirana energija. Ko postanejo kazalci pretemni, moramo kazalce zopet 'napolniti' z energijo. To najlažje storimo, če postavimo uro neposredno pod luč ali kakšen drug močan izvor svetlobe.

Pojav, ki je še bolj privlačen za opazovanje, je *bioluminescenca*. Kdo še ni bil navdušen nad letečimi lučkami – kresničkami? Tako smo že navajeni, da so svetilna telesa priključena na nek poseben vir energije (običajno na izvor električne energije), da nas čudi, kako lahko kresnička sveti, ne da bi za sabo vlekla kakšen kabel ali baterijo. Živali in rastline, pri katerih opazimo bioluminescenco, imajo v sebi posebne snovi, ki lahko reagirajo med seboj; pri reakciji se sprošča svetloba (*kemoluminescenca*). Kresničke uporabljajo bioluminescenco pri parjenju, pri globokomorskih organizmih ima pojav še druge biološke funkcije.

V globlinah oceanov vladajo posebne razmere. Tam najdemo zelo zanimive in drugačne oblike življenja. Če hočejo organizmi v takih ekstremnih razmerah preživeti, morajo imeti razvite posebne sposobnosti. Bioluminescenco tako organizmi v oceanih uporabljajo za pomoč pri lovljenju plena, za obrambo, pri parjenju, za osvetljevanje. Ta sposobnost koristi tudi raziskovalcem morja, saj lahko z merjenjem bioluminescence v določenih predelih morja spremljajo živahnost in količino življa.

Večina morskih organizmov oddaja modro svetlobo. Tako so se prilagodili okolju, ker ima v vodi največji doseg modro-zelena svetloba (se najkasneje absorbira). Pomen dosega je velik, saj premorejo organizmi le šibke izvore svetlobe. Poleg tega imajo čutnice, ki so največkrat občutljive le na modro svetlobo. Obstaja nekaj izjem, ki znajo proizvajati tudi rdečo svetlobo. Ti organizmi svojo prednost s pridom izkoriščajo, saj lahko plen, ki rdeče svetlobe ne zaznava, zalezujejo neopazno.

Posamezni pojavi, katerih osnova sta inkandescenca in luminescenca, se po vrsti energije, ki jo snov absorbira, precej razlikujejo. Njihova skupna lastnost pa je, da jih vse lahko razložimo, če upoštevamo, da je energijska razlika ΔE med energijskimi stanji molekul točno določena. Stanja imajo namreč lahko le nekaj izbranih energij (spomnite se na primerjavo med kamnom in molekulo). Zgoraj opisane pojave lahko torej razumemo le s pomočjo kvantne fizike.



Slika 5. Kresnička.