

»Mladi za napredek Maribora 2016«

33. srečanje

AVTOFOSFORESCENCA OKRASNIH ZVEZDIC

Raziskovalno področje: fizika

Raziskovalna naloga

PROSTOR ZA NALEPKO

Avtor: KIM OBAHA

Mentor: MIHAEL GOJKOŠEK

Šola: ŠKOFIJSKA GIMNAZIJA A.M.SLOMŠKA MARIBOR

februar 2016, Maribor

»Mladi za napredek Maribora 2016«

33. srečanje

AVTOFOSFORESCENCA OKRASNIH ZVEZDIC

Raziskovalno področje: fizika

Raziskovalna naloga

PROSTOR ZA NALEPKO

februar 2016, Maribor

1. KAZALO VSEBINE

1. KAZALO VSEBINE	2
2. KAZALO SLIK.....	3
3. KAZALO GRAFOV	4
4. KAZALO PREGLEDNIC/TABEL	5
5. ZAHVALA.....	6
6. POVZETEK	7
6.1 Rezultati in ugotovitve	7
7. UVOD	8
7.1 Tematski uvod	8
7.2 Cilj/namen in raziskovalno vprašanje	8
7.3 Hipoteze.....	8
7.4 Predvidena nova spoznanja.....	8
7.5 Teoretično ozadje in rezultati dosedanjih raziskav.....	9
8. METODOLOGIJA DELA	16
8.1 Postopek	16
8.2 Sredstva in materiali.....	16
8.3 Eksperimenti.....	18
9. REZULTATI	28
10. RAZPRAVA, INTERPRETACIJA REZULTATOV	30
10.1 Ovrednotenje hipotez	32
10.2 Ovrednotenje rezultatov in metode dela ter možne izboljšave..	33
11. ZAKLJUČEK/SKLEPI	34
11.1 Tematski zaključek.....	35
12. UPOŠTEVANJE DRUŽBENE ODGOVORNOSTI	36
13. VIRI IN LITERATURA	37

2. KAZALO SLIK

Slika 1: Bolonjski kamen (Švent, 2012).....	9
Slika 2: Vibracijski in rotacijski energijski nivoji v molekuli (Švent, 2012)	12
Slika 3: Energije elektronskih stanj. Tripletno vzbujeno stanje ima nižjo energijo kot singletno vzbujeno stanje (Švent, 2012).....	12
Slika 4: Prehod iz vzbujenega singletnega v vzbujeno tripletno stanje pri fosforescenci (Švent, 2012)	13
Slika 5: Barvni spekter svetlobe	15
Slika 6: Dve enaki fosforescenčni plastični zvezdici in računalnik	17
Slika 7: Spektrofotometer.....	17
Slika 8: Spektralne cevi z različnimi elementi	17
Slika 9: Držalo in napetostni vir za spektralno cev	18
Slika 10: Zvezdici pred obsevanjem	19
Slika 11: Zvezdici po obsevanju.....	19
Slika 12: Zvezdica na papirju in zvezdica na ogledalu.....	20
Slika 13: Z vbočenim ogledalom pokrita leva zvezdica	20
Slika 14: Primerjanje zvezdic prvo minuto	20
Slika 15: Primerjanje zvezdic drugo minuto.....	21
Slika 16: Primerjanje zvezdic tretjo minuto	21
Slika 17: Primerjanje zvezdic četrto minuto	21
Slika 18: Končno primerjanje zvezdic na enaki podlagi	22
Slika 19: Vodik	24
Slika 20: Živo srebro.....	24
Slika 21: Dušik	25
Slika 22: Neon	25
Slika 23: Eksperiment UV-žarkov	26

3. KAZALO GRAFOV

Graf 1: Padanje jakosti svetlobe v odvisnosti od časa	14
-------------------------------------------------------------	----

4. KAZALO PREGLEDNIC/TABEL

Tabela 1: Različne vrste svetlobe in njihove valovne dolžine (Douglas C. Giancoli, 2005) (Zabeltitz, 2011) 15

Tabela 2: Elementi oz. snovi v spektralnih ceveh kot viri svetlobe različnih barv (Douglas C. Giancoli, 2005) (BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY, 2009)23

5. ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, ki mi je nudil pomoč, sredstva in prostor za eksperimente ter dajal nasvete in nudil pomoč pri raziskovanju. Zahvaljujem se tudi vsem tistim, ki so mi pri raziskovalni nalogi kakorkoli pomagali, mi svetovali in me pri tem podpirali. Vsekakor pa se moram zahvaliti še divjim poletnim dogodivščinam, brez katerih si ne bi zastavila vprašanja, ki me je navdihnilo za nadaljnje raziskovanje.

6. POVZETEK

Fosforescenčni materiali absorbirano svetlobo sevajo še dolgo po tem, ko jih več ne obsevamo. Dandanes jih uporabljajo pri izdelavi nekaterih števecv, ur, igrač in številnih drugih predmetov.

V svoji raziskovalni nalogi imam namen odgovoriti na naslednje vprašanje "Ali se lahko fosforescenčne zvezdice ali fosforescenčni predmeti katerekoli druge oblike napajajo s svetlobo, ki jo sami izsevajo?" in priti do pojasnila, zakaj je/ni tako. Takšna "avtofosforescenca" bi bistveno podaljšala čas sevanja in povečala uporabnost fosforescenčnih materialov.

Pri raziskovanju bom v laboratorijskih poskusih obsevala fosforescenčne zvezdice z različnimi svetili ter analizirala spekter izsevane svetlobe. S pomočjo eksperimentalnih ugotovitev, pogovora z izkušenimi ljudmi in pregleda literature bom ugotavljala, če je možno podaljšati čas, v katerem zvezdice oddajo svetlobo, in iskala pojasnila.

Pričakujem, da bi se zvezdice lahko same ali medsebojno napajale.

6.1 Rezultati in ugotovitve

Svoje prve hipoteze »Fosforescenčni predmeti se lahko napajajo s svetlobo, ki jo izsevajo« ne morem potrditi, saj fosforescenčne zvezdice v enostavnem modelu fosforescenčnega prehoda ne morejo napajati same sebe. Frekvenca svetlobe, ki jo zvezdice oddajajo, je namreč premajhna, saj je manjša od frekvence svetlobe, ki zvezdice vzbudi. Vendar pa hipoteze ne morem niti ovreči, saj sem prišla do spoznanja, da bi se zvezdice teoretično lahko tako napajale v primeru, da njihov spekter sestavlja več fosforescenčnih energijskih prehodov.

Svojo drugo hipotezo »Fosforescenčnim predmetom lahko podaljšamo čas, v katerem izsevajo vso svojo svetlobo« pa lahko potrdim, saj zvezdici lahko podaljšamo čas, v katerem izseva svojo svetlobo, in sicer tako, da jo napajamo s svetilom, ki ima večjo vsebnost UV žarkov, in da zvezdici znižamo temperaturo.

7. UVOD

7.1 Tematski uvod

S fosforescenco se nevede srečujemo že od malih nog. Morda še zmeraj v kakšni sobi strop krasijo naše zvezdice, ki svetijo v temi. Te so nam včasih pred spanjem, ko smo ugasnili luč, predstavljale nočno nebo, poslikano z zvezdami in luno. Otroške domišljije ni zanimalo, zakaj zvezdice svetijo. Z odraščanjem pa smo začeli drugače razmišljati in se včasih vrnili k temu, kar smo pustili daleč zadaj ter tako spoznali, da pri svetlečih zvezdicah gre za pojav fosforescence.

7.2 Cilj/namen in raziskovalno vprašanje

Moj glavni cilj oziroma namen je skozi raziskovanje dobiti odgovor na vprašanje "Ali se lahko fosforescenčne zvezdice ali fosforescenčni predmeti katerekoli druge oblike napajajo s svetlobo, ki jo sami izsevajo?". Poleg tega želim dobiti pojasnila, zakaj to je mogoče/ni mogoče, kar bom najverjetneje ugotovila z analiziranjem frekvenc oziroma valovnih dolžin izsevane in absorbirane svetlobe. Prav tako me zanima, če lahko fosforescenčnim predmetom kakorkoli podaljšamo čas, v katerem oddajo svojo svetlobo.

7.3 Hipoteze

1. Fosforescenčni predmeti se lahko napajajo s svetlobo, ki jo izsevajo.
2. Fosforescenčnim predmetom lahko podaljšamo čas, v katerem izsevajo vso svojo svetlobo.

7.4 Predvidena nova spoznanja

Predvidevam, da bom spoznala nekaj več o fosforescenčnih materialih in atomih, valovnih dolžinah oziroma frekvencah, se srečala z zame novimi

pojmi, kot so na primer fotoluminiscenca, tripletno vzbujeno stanje, rotacijski prehodi, ter se naučila veliko novega.

7.5 Teoretično ozadje in rezultati dosedanjih raziskav

Preden so znanstveniki odkrili fosfor, so pojav svetlikanja v temi poimenovali z nadpomenko luminiscenca. Luminiscenco pa so kasneje razdelili na več vrst. Ena izmed njih je bila fotoluminiscenca, katero so razdelili na fluorescenco in fosforescenco. Slednja je poimenovana po fosforju, ki ima to lastnost, da fosforescira. Prvi umetno odkriti luminifor¹, ki je fosforesciral, je bil tako imenovan »bolonjski kamen«. (Švent, 2012)



Slika 1: Bolonjski kamen (Švent, 2012)

Fosforescenca je bila velikokrat tema raziskovanj in konfliktov med znanstveniki, ki se pogosto niso strinjali o vzrokih fosforescence in niti ne o pravi naravi svetlobe. Raziskovanje fosforescence je kasneje vodilo tudi k odkritju radioaktivnosti. (Švent, 2012)

Fotoluminiscenca je posledica obsevanja snovi s kratkovalovno svetlobo, ultravijoličnimi (UV), rentgenskimi² ali gama (γ) žarki³, kjer snov zaradi obsevanja absorbira fotone⁴, skoči v višje energijsko stanje in nato odda fotone, pri čemer se zopet vrne v osnovno energijsko stanje. Vrsti fotoluminiscence sta fluorescenca in fosforescenca. (Archangel, 2014)

¹ Luminifor je snov, ki sveti v temi.

² Elektromagnetno valovanje z valovno dolžino v območju med 10 in 0,01 nm.

³ Žarek gama je visokoenergijski foton, ki nastane pri radioaktivnem razpadu.

⁴ Foton je osnovni delec svetlobe.

Valovanje je širjenje motnje, pri katerem delci snovi nihajo okrog svoje ravnovesne lege. Sestavljeno je iz valov. Val, v katerem se gibljejo deli sredstva prečno na smer potovanja vala, imenujemo prečni ali transverzalni val. Transverzalno valovanje je na primer tudi elektromagnetno valovanje in vidna svetloba. Pri longitudinalnem valovanju pa nihajo delci snovi v smeri širjenja motnje. Med longitudinalne valove sodi tudi zvok. (Peterlin, 2015) (Marjan Hribar, 2001)

Valovna dolžina je v fiziki najmanjša razdalja med točkama v potujočem valovanju, pri katerih je nihanje v valovanju sočasno. Valovno dolžino označimo z grško črko lambda (λ). Osnovna enota dolžine je meter (m), vendar valovno dolžino včasih zapišemo v nanometrih (nm)⁵. (Tegel, 2012)

Frekvenca je v fiziki količina, določena kot število ponavljajočih se dogodkov v časovni enoti. Običajno jo označujemo z grško črko ν (ni).

$$\nu = 1/t_0$$

ν – frekvenca; t_0 – nihajni čas

Frekvenca in valovna dolžina sta med seboj obratno sorazmerni. Z večanjem frekvence se namreč manjša valovna dolžina in obratno.

Formula za izračun frekvence z valovno dolžino in hitrostjo svetlobe:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

ν – frekvenca; c – hitrost svetlobe = $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s; λ = valovna dolžina

Fosforescenca se od fluorescence v glavnem razlikuje po tem, da material absorbirane energije ne seva takoj. Počasnejše emitiranje⁶ oziroma oddajanje fotonov je posledica zadrževanja elektronov v t.i. metastabilnih⁷ oziroma vzbujenih stanjih, ki jih pa vzbujeni elektroni sčasoma

⁵ 1 m = 1 000 000 000 nm = 10^9 nm

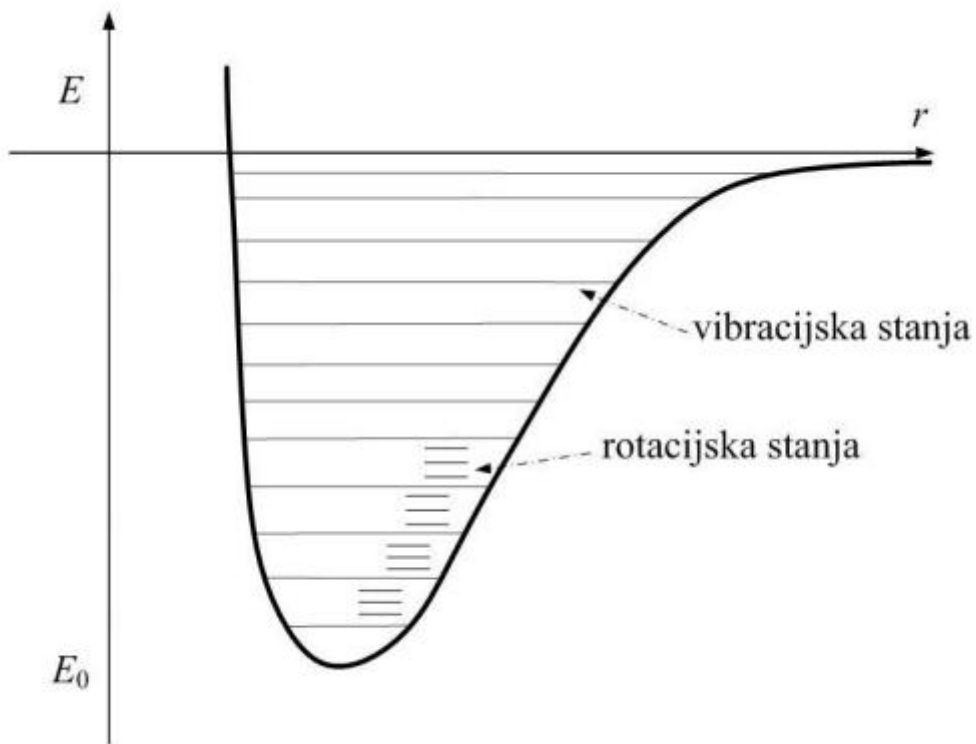
⁶ Emitiranje pomeni oddajati valove, delce, sevali.

⁷ Metastabilno stanje je vzbujeno stanje fizikalnega sistema.

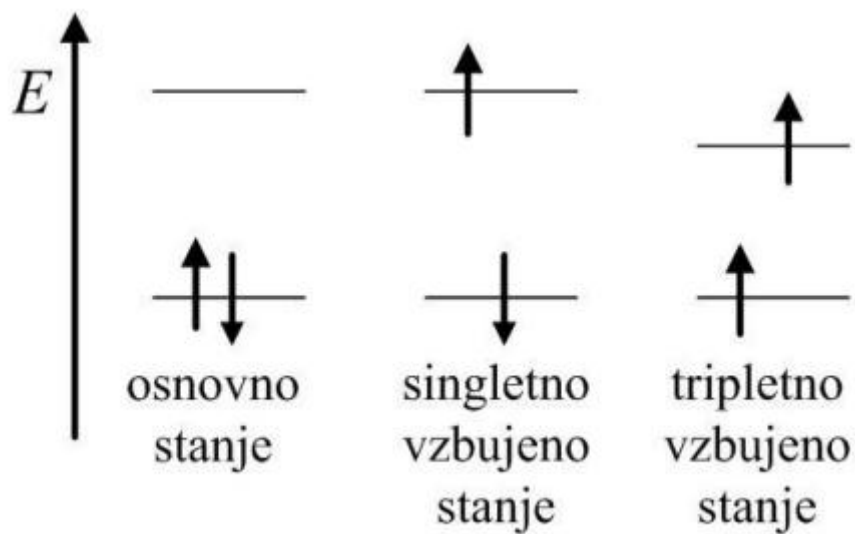
preskakujejo, da se absorbirana energija sprosti. Samo ime pa torej izvira od belega fosforja, ki v temi medlo sveti, pri obsevanju z UV žarki pa sveti intenzivno. (Archangel, 2014)

Fosforescenca je tesno povezana z atomi elementov in molekul. Možna je pri takih atomih in molekulah, ki imajo na zunanji elektronski lupini dva elektrona. S svetlobnim obsevanjem molekula ali atom absorbira foton in s tem dobi energijo za prehod iz nižjega v višje energijsko stanje. Po absorpciji fotonov se molekule vrnejo nazaj v nižje energijsko stanje z izsevanjem fotonov, ki imajo skupno enako energijo, kot jo je imel foton, ki se je absorbiral. V atomu in molekuli lahko elektroni prehajajo med različnimi energijskimi stanji. K energijskim nivojem molekule pa ne štejemo le elektronskih energijskih nivojev, ampak tudi vibracijske in rotacijske energijske nivoje. Vendar pa so energijske razlike med elektronskimi nivoji oziroma stanji veliko večje kot razlike med vibracijskimi ali rotacijskimi nivoji. (Švent, 2012)

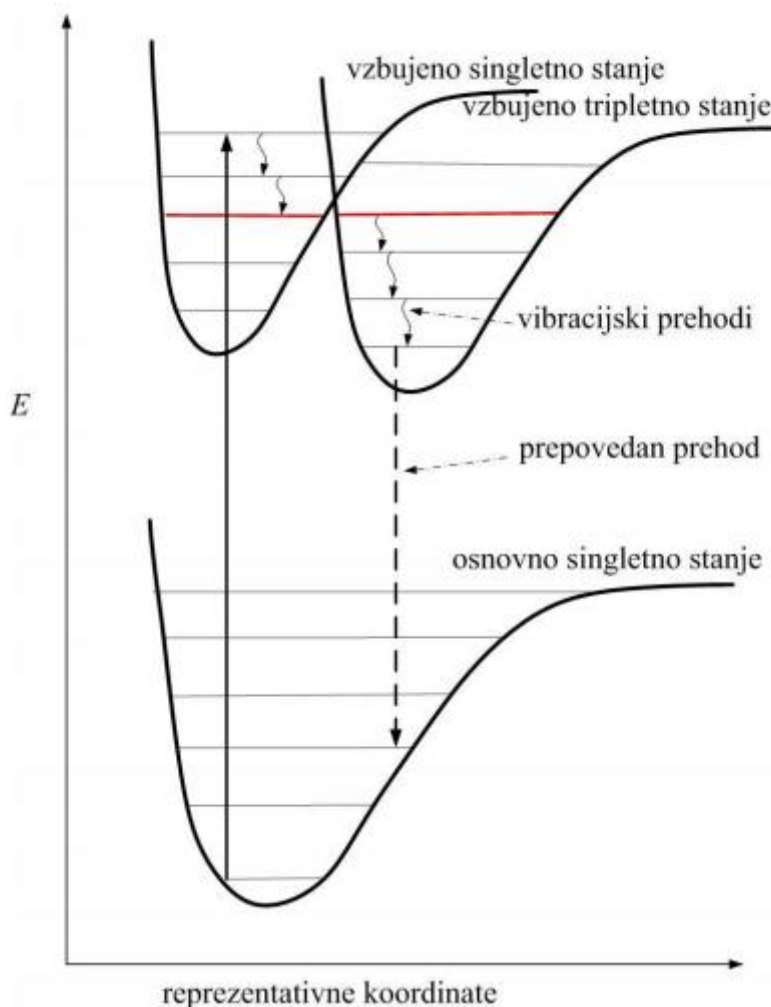
Pri fosforescenci se (podobno kot pri fluorescenci) energija molekule zmanjša preko vibracijskih in rotacijskih prehodov. Poleg tega pa se spremeni še spinska postavitev elektronov. Kombinacije parov elektronov, pri katerih sta spina elektronov na zunanji elektronski ovojnici nasprotno usmerjena, označujemo s pojmom singletno stanje. Pri tripletnem stanju pa sta spina elektronov na zunanji elektronski ovojnici enako usmerjena. Ko se spremeni spinsko stanje elektronov, se spremenijo tudi lastnosti molekule. Molekula po absorpciji fotona preide v singletno vzbujeno stanje, nato pa s trki oddaja vibracijsko energijo. V nekem trenutku se lahko zgodi, da ima molekula energijo enako energiji tripletnega stanja in tedaj obstaja določena verjetnost, da se zgodi preskok v tripletno stanje. Trki molekule, ki sledijo, zmanjšajo njeno vibracijsko energijo do podkritične točke, kjer je ujeta v tripletno stanje. Prehod iz tripletnega v singletno stanje je zelo malo verjeten (prepovedan), zato imajo ti prehodi dolgo življenjsko dobo. To pomeni, da bo snov, ki smo jo vzbudili, fosforescirala oziroma oddajala svetlobo še dalj časa po vzbuditvi (za razliko od fluorescence). (Švent, 2012)



Slika 2: Vibracijski in rotacijski energijski nivoji v molekuli (Švent, 2012)



Slika 3: Energije elektronskih stanj. Tripletno vzbujeno stanje ima nižjo energijo kot singletno vzbujeno stanje (Švent, 2012)



Slika 4: Prehod iz vzbujenega singletnega v vzbujeno tripletno stanje pri fosforescenci (Švent, 2012)

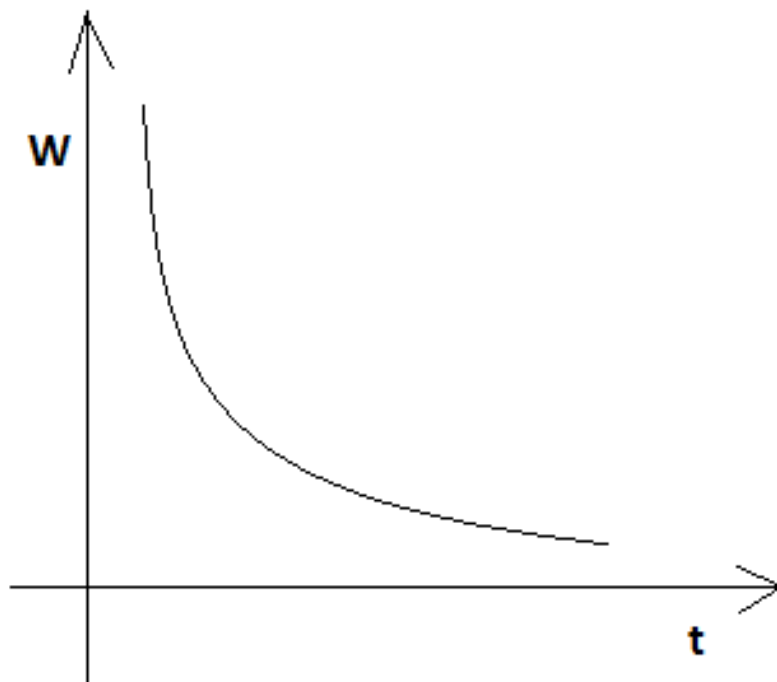
Vendar pa se vseeno nekateri atomi fosforescenčnega telesa veliko hitreje vrnejo v osnovno stanje, kot večina drugih atomov istega fosforescenčnega predmeta, ki lahko svetlobo oddajajo še kakšno uro. (Douglas C. Giancoli, 2005)

Fosforescenco najlažje opazujemo pri nizkih temperaturah ali v trdnih snoveh, ko doba tripletnega stanja traja tudi več minut. (Švent, 2012)

V 19. stoletju je Becquerel naredil prve kvantitativne meritve na področju upadanja izsevane svetlobe pri fosforescenci. Ugotovil je, da se v nekaterih primerih upadanje svetlobe pri fosforescenci v odvisnosti od časa bolje predstavi s tako imenovano stisnjeno oziroma raztegnjeno hiperbolo, ki jo nekateri imenujejo tudi Becquerelov upadni zakon. Pri fosforescenci je izsevana svetloba predvsem zelena, odvisno od vrste

fosforescenčnih predmetov pa se pojavljata tudi modra in rumena svetloba, vendar zelena večinoma prevladuje, kar pomeni, da je vrh fosforescence pri zeleni barvi (po navadi okoli 530 nm). (Šter, 2015) (Švent, 2012)

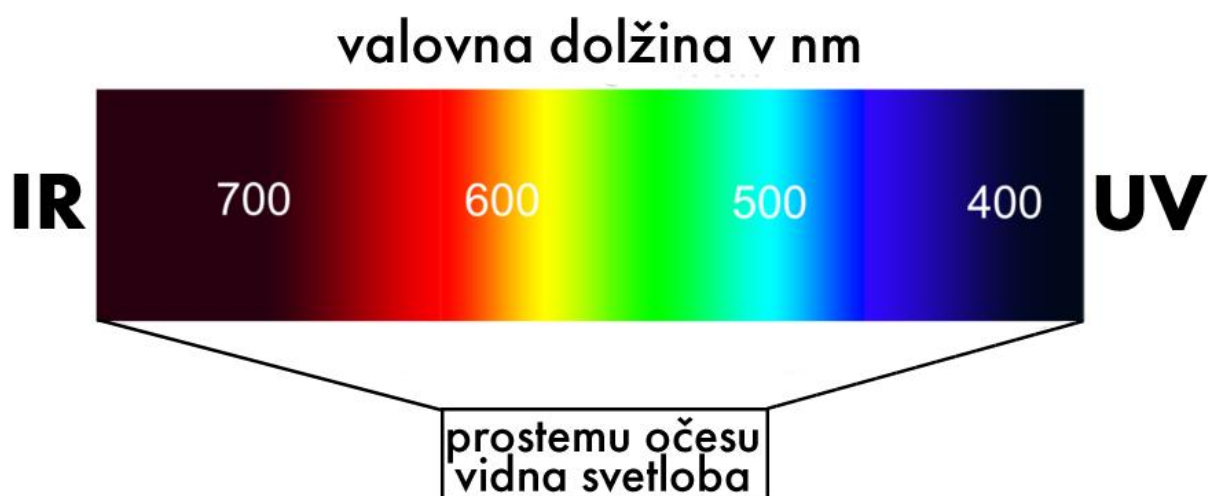
Graf 1: Padanje jakosti svetlobe v odvisnosti od časa



Rezultati dosedanjih raziskav so pokazali, da fosforescenčne zvezdice same sebe ne morejo napajati. Glavni vzrok je prenizka frekvenca svetlobe, ki jo zvezdice oddajajo. Z oddajano svetlobo namreč ne dosežejo dovolj visoke frekvence in s tem energije, ki jo potrebujejo za to, da bi prešle iz osnovnega v vzbujeno stanje.

Tabela 1: Različne vrste svetlobe in njihove valovne dolžine (Douglas C. Giancoli, 2005) (Zabeltitz, 2011)

Svetloba	Približna valovna dolžina
Ultravijolična	100-380 nm
Vidna svetloba	380-780 nm
Vijolična	380-400 nm
Modra	400-500 nm
Zelena	500-600 nm
Rdeča	600-700 nm
Intenzivna rdeča	700-780 nm
Infrardeča	780- 1 000 000 nm



Slika 5: Barvni spekter svetlobe

8. METODOLOGIJA DELA

8.1 Postopek

Da bi dobila odgovor na svoje glavno vprašanje, sem najprej poiskala osebe, ki se na to spoznajo. Nato sem začela preučevati pisne vire v knjigah, učbenikih, raznih spletnih straneh ... S tem sem si pridobila pomembno predznanje, ki sem ga potrebovala, da sem se lahko lotila eksperimenta. Seveda so se mi med eksperimentom s pridobljenimi odgovori postavljala nova vprašanja in tako sem se nenehno poglobljala v razne vire in se posvetovala z osebami, ki bi mi lahko pomagale. Ko sem z eksperimentiranjem in poskusi bolj ali manj zaključila, sem dobljene odgovore, ugotovitve in rezultate primerjala s tem, kar sem ugotovila s pomočjo pisnih virov in oseb, ki so mi pomagale pri iskanju odgovorov.

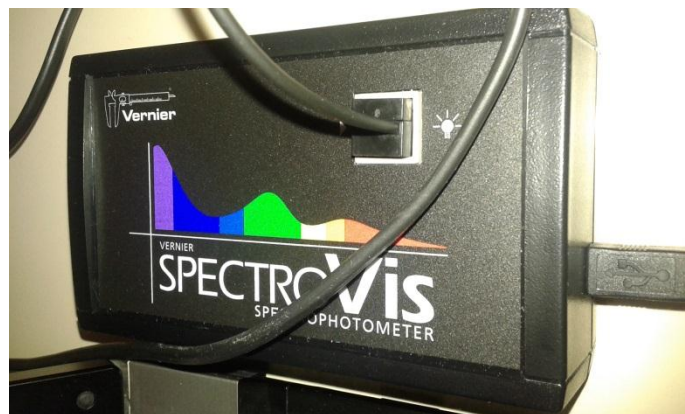
8.2 Sredstva in materiali

Pri svojem delu sem uporabila:

- fosforescenčne predmete:
 - dve enaki fosforescenčni plastični zvezdici,
 - druge fosforescenčne predmete;
- računalnik (s programom za analizo spektra);
- spektrofotometer
 - spektrofotometer je priprava za merjenje spektra, ki se poveže z računalnikom. Za njeno pravilno delovanje je potrebna tudi destilirana voda;
- spektralne cevi
 - v vsaki spektralni cevi je nek element, ki ob priključitvi na visoko napetost oddaja svetlobo tipičnih valovnih dolžin;
- držalo in napetostni vir za spektralno cev;
- filter, ki zmanjša prepuščanje UV žarkov;
- žarnico za obsevanje;
- ogledala;
- aluminijasto folijo, črn lepilni trak;
- zamrzovalnik.



Slika 6: Dve enaki fosforescenčni plastični zvezdici in računalnik



Slika 7: Spektrofotometer



Slika 8: Spektralne cevi z različnimi elementi



Slika 9: Držalo in napetostni vir za spektralno cev

8.3 Eksperimenti

Seveda sem najprej iskala odgovor na svoje glavno vprašanje in zato sem želela ugotoviti, če bi se fosforescenčne zvezdice lahko napajale s svetlobo, ki jo same izsevajo. Tega sem se lotila na več načinov:

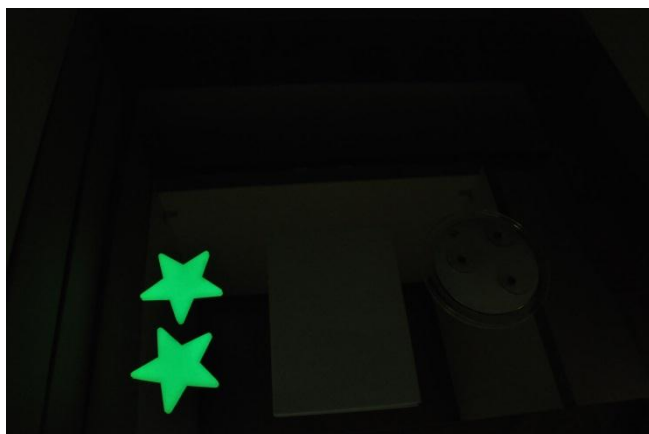
- Najprej sem vzela dve popolnoma enaki fosforescenčni zvezdici, ju obsevala z belo svetlobo, nato pa eno zavila v aluminijasto folijo drugo pa postavila v temo. Ko je zvezdica v temi izsevala dovolj svetlobe, da je postala opazno šibkejši vir, sem drugo zvezdico vzela iz folije in ju primerjala. Ugotovila sem, da obe svetita enako močno. S tem so se mi porodila nova vprašanja. Zakaj je tako? Kam gre svetloba? Kolikšna je frekvenca absorbirane svetlobe in svetlobe, ki jo zvezdice oddajajo?
- Da bi se še drugače prepričala o resničnosti svojega eksperimenta, sem postopek ponovila, le da sem začela zvečer, rezultate pa pregledala naslednje jutro, ko zvezdica v temi ni več svetila, vendar

pa zvezdica zavita v aluminijasto folijo prav tako ni več oddajala nobene svetlobe.

- Kasneje sem namesto aluminijaste folije uporabila ogledalo. Eno zvezdico sem položila v temo na bel papir, drugo pa sem dala na ogledalo in jo nato še prekrila z rahlo vbočenim ogledalom, tako da je popolnoma prekrilo zvezdico. Zvezdici sem primerjala vsako minuto in ju tudi fotografirala, tako da sem zvezdico, prekrito z ogledalom, v temi odkrila. Fotografiranje fosforescence je zahtevalo tudi drugačne nastavitve fotoaparata. Nato pa sem zvezdici na eni izmed fotografij na računalniku primerjala in ugotovila, da zvezdici res oddajata podobno količino svetlobe.



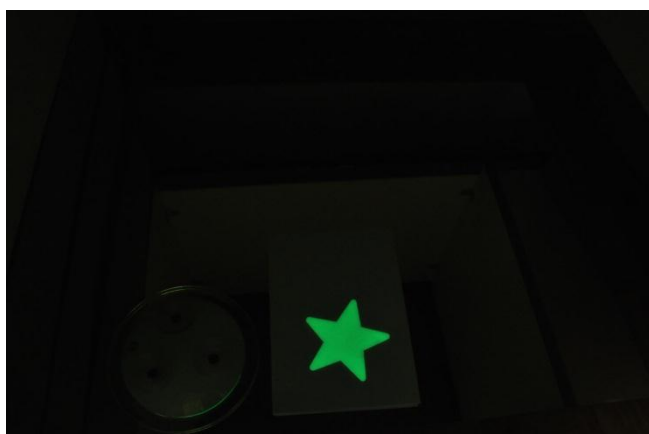
Slika 10: Zvezdici pred obsevanjem



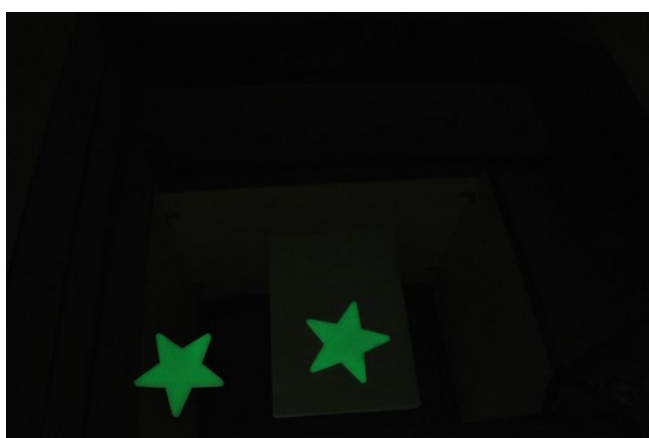
Slika 11: Zvezdici po obsevanju



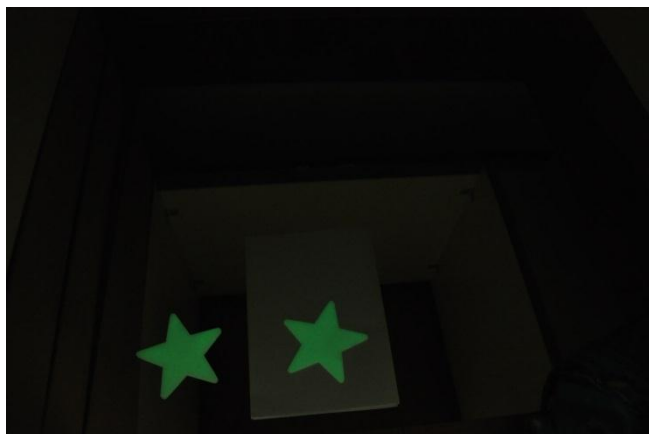
Slika 12: Zvezdica na papirju in zvezdica na ogledalu



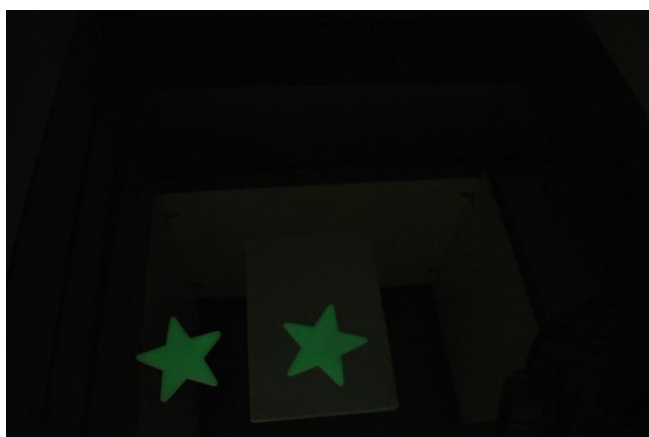
Slika 13: Z vbočnim ogledalom pokrita leva zvezdica



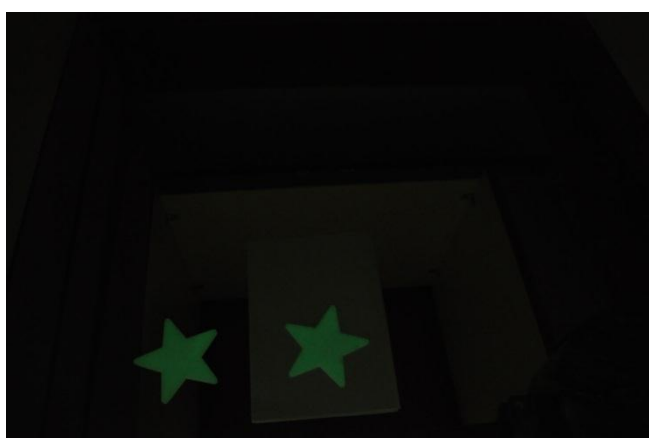
Slika 14: Primerjanje zvezdic prvo minuto



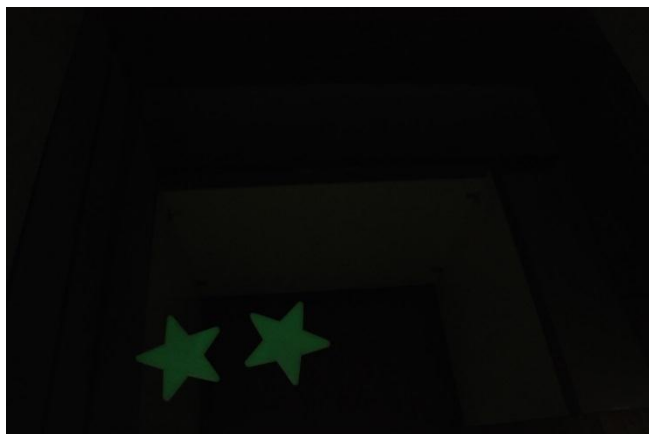
Slika 15: Primerjanje zvezdic drugo minuto



Slika 16: Primerjanje zvezdic tretjo minuto



Slika 17: Primerjanje zvezdic četrto minuto



Slika 18: Končno primerjanje zvezdic na enaki podlagi

- Želela pa sem se za vsak primer prepričati glede tega, kar se mi je že od nekdaj zdelo samoumevno. Eno zvezdico sem pri isti luči na enaki oddaljenosti obsevala manj časa kot drugo in ugotovila, da je zvezdica, ki je bila obsevana več časa, tudi dalj časa svetica kot zvezdica, ki je bila obsevana manj časa, kar sem tudi predvidevala.
- S pomočjo raznih virov in oseb, ki se na to spoznajo, sem dobila svoj odgovor na vprašane »Kam gre svetloba?«. Izvedela sem, da se svetloba ne odbija popolnoma, ampak se je zelo majhen del absorbira v okolico, med drugim tudi v naše oči, zato svetlobe ne moreš ujeti v škatlico, katere stene so navadna ogledala, saj se poleg odbijanja tudi absorbira.
- Vprašala sem se, če bi se morda vseeno lahko zvezdice medsebojno napajale. En krak neobsevane zvezdice v osnovnem stanju sem oblepila s črnim lepilnim trakom in zvezdico položila na kup drugih zvezdic, ki so bile vzbujene oziroma so oddajale svetlobo, in vse skupaj postavila v temo. Po nekaj minutah sem vzela neobsevano zvezdico z lepilnim trakom in le-tega odlepila, da bi se bolje prepričala, če del zvezdice brez traku oddaja kaj svetlobe. Krak, ki je imel na sebi lepilni trak, je bil seveda v osnovnem stanju, prav tako pa je bila v osnovnem stanju celotna zvezdica. Tako sem se dokončno prepričala, da se fosforescenčne zvezdice ne morejo same ali medsebojno napajati.

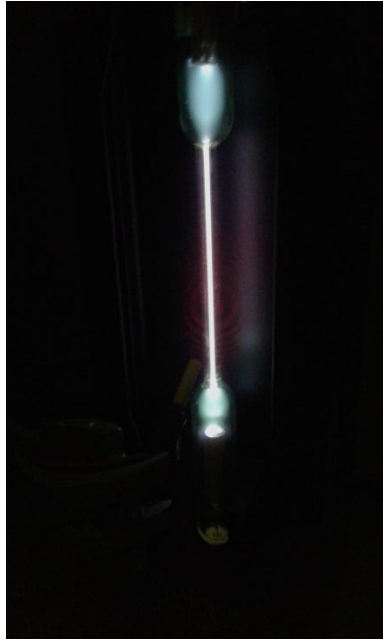
- Ugotovila sem, da so vzrok za to različne valovne dolžine oziroma frekvence absorbirane in izsevane svetlobe, ki sem jih želela določiti. Najprej sem želela s pomočjo spektrofotometra določiti spekter izsevane svetlobe fosforescenčnih zvezdic. Vendar pa to ni bilo uspešno, saj je bila izsevana svetloba, kljub temu da sem jo merila takoj po močnem vzbujanju, še vedno prešibka, da bi s spektrofotometrom lahko izmerila uporaben spekter. Šolska merilna naprava se je v tem primeru izkazala za premalo zmogljivo.
- Za analizo svetlobe, ki vzbudi zvezdice, sem potrebovala svetlobo različnih valovnih dolžin in ker na voljo nisem imela drugih barvnih svetlobnih virov, sem uporabila kar spektralne cevi, ki vsebujejo vsaka svoj element. Držalo z visoko napetostnim izvorom pa tem elementom omogoča oddajanje svetlobe različnih valovnih dolžin. Uporabila sem različne elemente in s tem različne valovne dolžine.

Tabela 2: Elementi oz. snovi v spektralnih ceveh kot viri svetlobe različnih barv (Douglas C. Giancoli, 2005) (BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY, 2009)

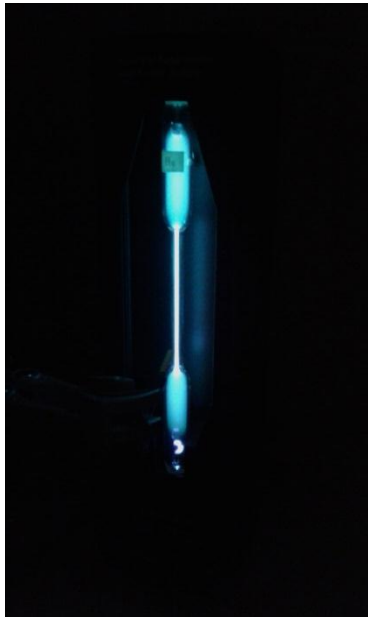
Oznaka elementa/ spojine	Element	Barva	Približna valovna dolžina ⁸
H ₂	Vodik	Modra	435-500 nm
Hg	Živo srebro	Svetlo modra	457,9-491,6 nm
N ₂	Dušik	Vijolično modra	428 nm
Ne	Neon	Rdeča	594-633 nm

Nekatere spektralne cevi so zvezdico vzbudile bolj, druge manj; vendar so jo vzbudile valovne dolžine izsevane svetlobe vseh elementov, ki sem jih imela na voljo, in tako nisem mogla določiti meje med valovnimi dolžinami, ki zvezdico vzbudijo in valovnimi dolžinami, ki jih zvezdice oddajajo, zato sem začela brskati po raznih virih.

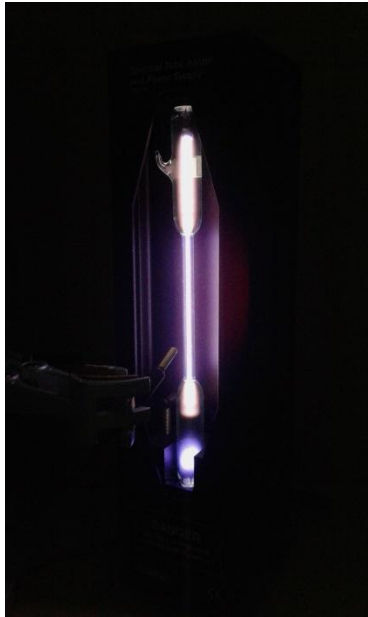
⁸ V tabeli je za vsako spektralno cev napisana le ena ali pa le nekaj valovnih dolžin (in s tem barv) izmed mnogih, ki jih lahko oddaja vsaka spektralna cev.



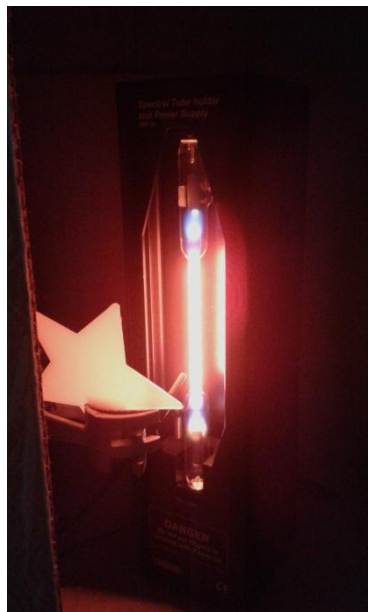
Slika 19: Vodik



Slika 20: Živo srebro



Slika 21: Dušik



Slika 22: Neon

- Zanimalo me je tudi, kako na fosforescenčne zvezdice vplivajo UV-žarki ter ali zvezdice vzbudi tudi vidna svetloba sama (torej brez vsebnosti UV-žarkov). Uporabila sem fotografski UV-filter, ki praktično ne prepušča UV-žarkov. Položila sem ga na sredino

zvezdice. Filter je bil manjši od zvezdice in okrogle oblike, tako da zvezdni kraki niso bili prekriti. Na dva kraka sem prilepila kos črnega lepilnega traku. Zvezdico sem spet obsevala z belo svetlobo. Ko je bila že močno vzbujena, sem odstranila steklo in opazila, da je območje, ki je bilo prekrito s filtrom, manj vzbujeno od zvezdnih krakov, ki s steklom niso bili prekriti; je pa bilo bolj vzbujeno od območij, na katerih je bil prilepljen lepilni trak. S tem sem ugotovila, da prisotnost UV-žarkov omogoči intenzivnejše napajanje fosforescenčnih materialov. Spoznala pa sem tudi to, da zvezdico napaja tudi svetloba, ki jo UV-filter prepušča, torej vidna svetloba sama. To pomeni, da se zvezdice bolje napajajo na soncu kot na navadni sobni luči, ki seva manj UV-žarkov kot sonce.



Slika 23: Eksperiment UV-žarkov

- Ob brskanju po raznih virih sem ugotovila, da bi zvezdici čas sevanja svetlobe lahko povečali tudi tako, da bi ji nižali temperaturo, zato sem dve enaki fosforescenčni zvezdici najprej vzbudila, nato pa eno postavila v zamrzovalnik, drugo pa v omaro, tako da sta bili obe v temi. Čez deset minut sem zvezdici primerjala in ugotovila, da zvezdica, ki je bila v zamrzovalniku, zares močnejše

sveti. Postopek sem ponovila, ko sta bili obe zvezdici spet enake temperature. Eno zvezdico sem v zamrzovalniku tokrat pustila pol ure, nato sem zvezdici ponovno primerjala in rezultat je bil enak – zvezdica, ki je bila v zamrzovalniku, je svetila bolj. Ko sta bili zvezdici ponovno enake temperature, sem postopek še zadnjič ponovila. Tokrat sem eno zvezdico v zamrzovalniku pustila za približno 36 ur. Zvezdica, ki je bila v temi na sobni temperaturi, je seveda že prenehala oddajati svetlobo, kar me ni presenetilo. Presenečena sem bila nad tem, da je zvezdica, ki je bila v temi v zamrzovalniku, še vedno oddajala svetlobo, čeprav zelo šibko. S tem sem potrdila to, kar sem zasledila v virih.

9. REZULTATI

Z različnimi načini eksperimentiranja sem torej ugotovila, da fosforescenčne zvezdice same sebe ne napajajo oz. je to napajanje za moje eksperimentalne in merske metode nezaznavno. Svoje meritve razlagam z ugotovitvijo, da fosforescenčne zvezdice oddajajo svetlobo nižjih frekvenc in s tem tudi nižjih energij, kot jih potrebujejo, da bi dosegle vzbujeno stanje oziroma svetlobo absorbirale.

Teoretično bi fosforescenčni material sicer lahko napajal samega sebe, vendar bi za to potrebovali material z večjim številom fosforescenčnih prehodov. Potrebno bi bilo namreč, da bi izsevana svetloba enega fosforescenčnega prehoda imela dovolj visoko energijo, da bi snov vzbudila v drugem fosforescenčnem prehodu. Taka snov bi torej sevala svetlobo pri vsaj dveh različnih valovnih dolžinah. Ker je izsevana fosforescenčna svetloba praviloma šibek svetlobni vir, bi bilo tako avtofosforescenco sicer zelo težko izmeriti. Povsem mogoče je, da je bila avtofosforescenca v mojih poskusih dejansko prisotna, vendar je bil njen efekt tako majhen, da z mojimi merskimi metodami dejansko ni bila zaznavna.

V glavnem sem z eksperimentiranjem in s pregledom literature spoznala naslednje:

- Fotoluminiscenca je posledica obsevanja snovi s kratkovalovno svetlobo, ultravijoličnimi (UV), rentgenskimi ali gama (γ) žarki, ko snov zaradi obsevanja absorbira fotone, skoči v višje energijsko stanje in nato odda fotone, pri čemer se zopet vrne v osnovno energijsko stanje. Vrsti fotoluminiscence sta fluorescenca in fosforescenca. Fosforescenca se od fluorescence v glavnem razlikuje po tem, da absorbirane energije ne seva takoj. Prvi umetno odkriti luminifor, ki je fosforesciral, je bil tako imenovan »bolonjski kamen«. (Archangel, 2014) (Švent, 2012)
- Svetloba se ne odbija popolnoma, ampak se je zelo majhen del absorbira v okolici - med drugim tudi v naših očeh.
- Različne barve svetlobe imajo različne valovne dolžine (glejte tabelo »Različne vrste svetlobe in njihove valovne dolžine«).

- Nekatere valovne dolžine lahko zvezdico vzbudijo bolj, druge manj.
- Ni mogoče, da bi zvezdici s svojimi sredstvi in poskusi na tako enostaven način (npr. s pomočjo aluminijaste folije) uspela podaljšati čas izsevanja svetlobe, in sicer tako, da bi zvezdica sama sebe napajala. Glavni vzrok je verjetno prenizka frekvenca svetlobe, ki jo zvezdice oddajajo. Z oddano svetlobo namreč ne dosežejo dovolj visoke frekvence in s tem energije, kot jo potrebujejo za to, da bi spet prešle iz osnovnega v vzbujeno stanje.
- Prisotnost UV-žarkov omogoči intenzivnejše napajanje fosforescenčnih materialov. To pomeni, da se zvezdice bolje napajajo na soncu kot na navadni sobni luči, saj je sonce močnejši vir UV-svetlobe od večine gospodinjskih svetil.
- Zvezdici bi lahko podaljšali čas sevanja, če bi jo napajali z več UV-žarki in če bi ji znižali temperaturo.
- Obstajajo različna stanja, med katerimi elektroni prehajajo (osnovno singletno, vzbujeno singletno, vzbujeno tripletno stanje) in različni prehodi (rotacijski, vibracijski, prepovedan).

10. RAZPRAVA, INTERPRETACIJA REZULTATOV

Ko sem se ukvarjala z eksperimentiranjem in s tem dobila neko novo znanje, nove podatke, sem veliko teh želela potrditi z raznimi drugimi viri. Tako sem na spletu in v različnih knjižnih virih iskala podobnosti in razlike s svojimi praktičnimi ugotovitvami ter tako rezultate svojega eksperimenta primerjala z raznimi viri in izsledki drugih. Ugotovila sem, da na tem področju ni tako veliko poskusov, kot sem sprva mislila. Vseeno sem v različnih literaturah zasledila podatek, da imajo pri fosforescenčnih predmetih izsevani fotoni manjšo frekvenco in s tem manjšo energijo kot absorbirani fotoni, zato izsevani fotoni ne bi mogli zlahka vzbuditi zvezdice. To je bilo zgolj pojasnilo, zakaj fosforescenčne zvezdice pri mojih poskusih same sebe niso napajale, vendar pa nikjer nisem zasledila podatka, da fosforescenčne zvezdice same sebe nikakor ne morejo napajati in zato sem se vprašala, če je to že komu uspelo in če je to sploh raziskano.

Recimo, da imamo nekaj atomov z elektroni, ki potrebujejo več energije in nekaj atomov z elektroni, ki potrebujejo manj energije za prehod iz osnovnega v vzbujeno singletno stanje. Obojni atomi so del iste fosforescenčne zvezdice. Zvezdico vzbudimo in v trenutku zavijemo v aluminijasto folijo (tako, da ne prepušča svetlobe). Ko zvezdico vzbudimo, elektroni v atomih zaradi absorbiranih fotonov preidejo iz osnovnega v vzbujeno singletno stanje. Nekateri elektroni za to potrebujejo več energije, drugi manj, mi pa vzbudimo obojne. Tako zvezdica začne oddajati svetlobo. Recimo, da je zvezdica takoj, ko začne oddajati svetlobo, že prekrita s folijo. Večina elektronov v obojnih atomih preide v vzbujeno tripletno stanje. Elektroni, ki potrebujejo več energije, da preidejo v singletno vzbujeno stanje, imajo tako ob prvih trenutkih vzbujenega tripletnega stanja dovolj visoko energijo, da vzbudijo elektrone, ki potrebujejo manj energije, da preidejo iz osnovnega v vzbujeno singletno stanje. Tako bi verjetno uspeli podaljšati čas, v katerem fosforescenčna zvezdica odda vso svetlobo oziroma vse fotone, vendar bi morali imeti snov, ki fosforescenčno pri enem prehodu seva svetlobo z dovolj visoko energijo, da z njo vzbuja drugi fosforescenčni prehod. Morda bi bilo celo boljše, če bi imeli eno zvezdico iz samih atomov z elektroni, ki potrebujejo več energije, in drugo zvezdico iz samih atomov z elektroni, ki potrebujejo manj energije, da preidejo iz osnovnega v

vzbujeno singletno stanje. Potem bi ob obsevanju prva zvezdica nespremenjeno izgubljala na svetlosti, z izsevano svetlobo pa bi napajala drugo, ki bi zato verjetno »ugašala« počasneje. To je le ena ideja, kako bi lahko ugotovili, če ena zvezdica zares napaja drugo in ji tako podaljša čas, v katerem izseva svojo svetlobo.

Ko sem končala s svojim prvim eksperimentom in sem ugotovila, da zvezdica sama sebe ni napajala, za razliko od tega, kar sem sprva pričakovala, so se mi postavila nova vprašanja »Zakaj je tako? Kam gre svetloba? Kolikšna je frekvenca absorbirane svetlobe in svetlobe, ki jo zvezdice oddajajo?«, na katera sem s pomočjo literature dobila odgovore. Spoznala sem, da se svetloba ne odbija popolnoma, pač pa se je nekaj tudi absorbira v okolico, vendar nisem nikjer zasledila količine oziroma procentov svetlobe, ki se absorbira in ki se odbije. Zato sem sklepala, da ta količina oziroma ti procenti niso vedno enaki in da so morda odvisni od predmetov v okolici. Tako mi je veliko ugotovitev postavilo tudi nova vprašanja. Ugotovila sem tudi, da se moja fosforescenčna zvezdica ni mogla sama napajati, ker je bila frekvenca in s tem energija izsevanih fotonov prenizka, da bi lahko ti zvezdico še dodatno vzbudili in ji tako podaljšali čas trajanja, zato sem v literaturi in virih iskala, kolikšna je najvišja možna frekvenca izsevane svetlobe in najnižja možna frekvenca svetlobe, ki zvezdico vzbudi, vendar natančnega podatka kljub dolgotrajnemu iskanju prav tako nisem zasledila. Zato sem predvidevala, da bi to bilo lahko odvisno od materiala oziroma spojine, iz katere je fosforescenčni predmet narejen, in morda še kakšnih drugih pogojev. Sem pa spoznala, da je izsevana svetloba predvsem zelena, odvisno od vrste fosforescenčnih predmetov pa se pojavljata tudi modra in rumena svetloba, vendar zelena večinoma prevladuje, kar pomeni, da je vrh fosforescence mnogokrat pri zeleni barvi (po navadi okoli 530 nm).

Ko sem namesto barvnega spektra uporabila spektralne cevi z različnimi elementi, ki so ob visoki napetosti sevali svetlobo, sem opazila, da se barve svetlobe, ki jih le-ti oddajajo, skladajo z valovnimi dolžinami barv v barvnem spektru, kar sem preverila s pomočjo različnih spletnih virov.

Na spletu sem prav tako prebrala, da se zvezdice bolje napajajo na soncu kot na navadni sobni luči, zato sem naredila poskus z UV-filtrom, ki zmanjša prepustnost UV-žarkov in ugotovila, da sonce zvezdice verjetno bolje napaja, ker vsebuje več UV-žarkov kot navadna sobna luč. Pri poskusu je namreč območje s steklom na fosforescenčni zvezdici po

vzbuditvi oddajalo manj svetlobe, kot del zvezdice, ki s steklom ni bil prekrit.

Ob branju raznih virov sem ugotovila, da bi zvezdici čas sevanja svetlobe lahko povečali tudi tako, da bi ji znižali temperaturo. Zato sem to želela še sama dokazati, tako da sem eno vzbujeno zvezdico dala v zamrzovalnik, drugo pa prav tako v temo, vendar na sobno temperaturo. Že po desetih minutah je zvezdica iz zamrzovalnika svetila bolj. S tem sem potrdila to, kar sem zasledila v virih.

Glede na dobljene rezultate lahko sklenem, da bi za podaljšanje časa izsevanja svetlobe fosforescenčnih predmetov morali le-ti biti v čim bolj trdnem agregatnem stanju, morali bi jih obsevati z več UV-žarki in ohranjati čim nižjo temperaturo teh predmetov. To bi namreč bistveno izboljšalo uporabo raznih izdelkov, ki so med drugim odvisni od fosforescence (npr. števcji, ure) in morda celo povečalo njihovo priljubljenost (npr. igrače). Svetlobnih lastnosti takih materialov pa žal na enostaven način s tako imenovano »avtofosforescenco« ne moremo izboljšati.

10.1 Ovrednotenje hipotez

Svoje prve hipoteze »Fosforescenčni predmeti se lahko napajajo s svetlobo, ki jo izsevajo« v glavnem ne morem ovreči, saj sem ugotovila, da bi se teoretično fosforescenčni predmeti res lahko napajali s svetlobo, ki jo sami izsevajo. Vendar pa se ta hipoteza tudi ni potrdila, saj mi ni uspelo z eksperimentom tega dokazati in s pomočjo virov in literature prav tako nisem uspela ugotoviti, če se je moja hipoteza že kdaj potrdila v praksi. Torej bi znotraj natančnosti svojih meritev hipotezo sicer lahko ovrgla, vendar te ugotovitve žal nisem uspela podkrepiti s spektralno analizo absorbirane in izsevane svetlobe.

Svoje druge hipoteze »Fosforescenčnim predmetom lahko podaljšamo čas, v katerem izsevajo vso svojo svetlobo« pa vsekakor ne morem ovreči, saj sem jo z eksperimentiranjem ter z raznimi viri in literaturo tudi potrdila. Ugotovila sem, da fosforescenčni predmeti sevajo dlje, če so v trdnem agregatnem stanju, vzbujeni z večjo količino UV-žarkov pri čim nižji temperaturi.

10.2 Ovrednotenje rezultatov in metode dela ter možne izboljšave

Mislím, da je bila moja metoda dela učinkovita, saj sem se najprej lotila osnov fosforescence, nato sem se začela ukvarjati z eksperimentiranjem, s čimer sem dobila veliko odgovorov, pojasnila zanje pa sem poiskala s pomočjo različnih virov in literature, kjer sem našla tudi podatke, ki sem jih želela preveriti z eksperimenti. Nazadnje sem vse skupaj še zapisala in oblikovala.

Menim, da je bila večina mojih rezultatov pri eksperimentiranju in raziskovanju skozi vire in literaturo zadovoljiva, saj sem si odgovorila na večino svojih vprašanj, ki so se mi skozi raziskovanje pojavila. Vseeno pa menim, da bi morda lahko dobila odgovore na nekatere nejasnosti, za katere nisem našla dovolj podatkov v literaturi oziroma za katere nisem vedela, kako bi jih razvozlala s pomočjo eksperimentiranja, če bi si lahko le vzela veliko več časa. V mislih so mi namreč ostale raziskave kot posledice vprašanj »Koliko procentov svetlobe se absorbira v okolico in ali je to odvisno od okolice?« ter »Kolikšna je najvišja možna frekvenca izsevane svetlobe fosforescenčnega predmeta in kolikšna je najnižja možna frekvenca svetlobe, ki jo isti fosforescenčni predmet potrebuje, da preide iz osnovnega v vzbujeno stanje?«.

Menim, da bi svoje raziskovanje lahko izboljšala, če bi lahko še veliko časa posvetila takšnim vprašanjem, si uspela odgovoriti na vsa podvprašanja, ki bi se mi na novo zastavila ter naredila še kak nov eksperiment. Res je, da bi lahko s tem izgubila rdečo nit, vendar je bistvo raziskovanja v tem, da raziščemo to, kar nas zanima in s tem spoznamo čim več novega.

11. ZAKLJUČEK/SKLEPI

Moja glavna naloga, ki sem si jo zastavila, je bila »ugotoviti, ali se lahko fosforescenčne zvezdice napajajo s svetlobo, ki jo same izsevajo«. Z eksperimentiranjem, katerega rezultate sem primerjala z različnimi viri in literaturo, sem ugotovila, da sama zvezdic ne bom mogla napajati na tako preprost način kot je ta, da dve enaki fosforescenčni zvezdici enako močno obsevam in eno zavijem v aluminijasto folijo, drugo pa postavim v temo in pričakujem, da bo zvezdica v foliji po dvajsetih minutah bolj sevala svetlobo kot tista, ki je v temi. Zvezdici v aluminijasti foliji bi se na tak način čas trajanja teoretično lahko povečal, če bi njeni elektroni, ki potrebujejo več energije, da preidejo v singletno vzbujeno stanje, imeli ob prvih trenutkih vzbujenega tripletnega stanja dovolj visoko energijo, da vzbudijo elektrone, ki potrebujejo manj energije, da preidejo iz osnovnega v vzbujeno singletno stanje.

Moje drugo zanimanje pa me je gnalo raziskati, če lahko fosforescenčnim zvezdicam kakorkoli podaljšamo čas, v katerem izsevajo vso svojo svetlobo oziroma vse fotone. Tokrat sem odgovor našla v literaturi, še preden sem se lotila eksperimentiranja, zato sem ga s poskusi želela potrditi. To sem tudi storila in se dokončno na lastne oči prepričala, da zvezdice dalj časa oddajajo svetlobo, če jih obsevamo z intenzivnejšo svetlobo z večjo vsebnostjo UV-žarkov in če jim znižamo temperaturo. Na tak način bi lahko namreč potencialno izboljšali uporabo različnih izdelkov, ki so med drugim odvisni od fosforescence in morda celo povečali njihovo priljubljenost. Poleg tega pa sem spoznala, da večinoma bolje fosforescirajo tisti fosforescenčni predmeti, ki so v trdnejšem agregatnem stanju.

Natančno sem spoznala definicijo fosforescence, da se svetloba ne odbija popolnoma, ampak se je majhen delež absorbira v okolico, da različne valovne dolžine oziroma barve svetlobe zvezdico različno močno vzbudijo, da sonce intenzivneje vzbudi zvezdice kot navadna sobna luč, saj ima večjo vsebnost UV-žarkov, da obstajajo različna stanja, med katerimi elektroni v zvezdici prehajajo (osnovno singletno, vzbujeno singletno, vzbujeno tripletno stanje) in različni prehodi (rotacijski, vibracijski, prepovedan) in še veliko drugega.

Kljub številnim zelo zadovoljivim odgovorom, ki sem si jih pridobila med raziskovanjem skozi eksperimentiranje in brskanje po razni literaturi, pa je ostalo kakšno vprašanje tudi neodgovorjeno. Odgovori, ki sem si jih pridobila, so mi namreč zastavili nova vprašanja in odprli poti do novih raziskovanj: »Koliko procentov svetlobe se absorbira v okolico in ali je to odvisno od okolice?« ter »Kolikšna je najvišja možna frekvenca izsevane svetlobe fosforescenčnega predmeta in kolikšna je najnižja možna frekvenca svetlobe, ki jo isti fosforescenčni predmet potrebuje, da pride iz osnovnega v vzbujeno stanje?«. Menim, da bi to lahko raziskala tako, da bi imela več časa in prava sredstva, s čimer se morda lahko srečam že v bližnji prihodnosti.

S svojimi rezultati sem kar zadovoljna, saj sem potrdila svojo drugo hipotezo, da »Fosforescenčnim predmetom lahko podaljšamo čas, v katerem izsevajo vso svojo svetlobo.« Ugotovila sem, da bi fosforescenčni predmeti sevali dlje, če bi bili v trdnem agregatnem stanju, vzbujeni z večjo količino UV-žarkov in imeli čim nižjo temperaturo. Res pa je, da me bo še naprej gnala želja po nadaljnjem raziskovanju zaradi svoje prve hipoteze »Fosforescenčni predmeti se lahko napajajo s svetlobo, ki jo izsevajo«, saj le-te ne morem niti ovreči (zaradi teoretičnega vidika), niti je ne morem potrditi (zaradi praktičnega vidika), saj ne vem, ali je bilo že kdaj praktično doseženo, da se je fosforescenčni predmet napajal s svetlobo, ki jo je sam izseval.

11.1 Tematski zaključek

Verjetno za fosforescenco še ni slišal, vendar mu zvezdica pred spanjem kljub temu polepša noč. Ne osvetli mu le pogleda, pač pa tudi sanje in srce. Tako ob pojemanju svetlobe zvezdice, ki krasi strop, ugaša tudi njegova razigranost in vzbudi mu domišljijo. Vendar pridejo časi odraščanja, ko ne more zaspati, in takrat prvič opazi, da lahko celo njegova zvezdica ugasne. Takrat se zaveda, da je minljivo vse, tako kot tudi otroštvo in svetloba v zvezdici. Ali pa morda ne?

12. UPOŠTEVANJE DRUŽBENE ODGOVORNOSTI

Pri mojem raziskovanju so bila upoštevana pravila družbene odgovornosti. Nisem škodovala ali slabo vplivala na naravo, okolje in družbo. Upoštevala sem etične vrednote, spoštovala, upoštevala in se odzivala na druge, ne samo na svoje interese. Spoštovala sem vladavino prava in človekove pravice. Pri delu nisem uporabljala snovi ali materialov, ki bi kakorkoli škodovali okolju, naravi ali družbi.

13. VIRI IN LITERATURA

- Archangel. (11. junij 2014). *Wikipedija*. Prevezeto 31. januar 2016 iz Fotoluminiscenca: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Fotoluminiscenca>
- BRIGHAM YOUNG UNIVERSITY. (2009). Prevezeto 31. januar 2016 iz Department of Electrical and Computer Engineering, Wavelength Chart: <http://www.photonics.byu.edu/WavelengthChart.phtml>
- Douglas C. Giancoli, J. M. (2005). *Physics, Sixth Edition, Volume 2*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Marjan Hribar, idr. (2001). *Elektrika, svetloba, snov*. Ljubljana: Modrijan.
- Peterlin. (21. september 2015). *Wikipedija*. Prevezeto 31. januar 2016 iz Valovanje: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Valovanje>
- Šter, P. (2015). *Univerza v Ljubljani, pedagoška fakulteta*. Prevezeto 6. februar 2016 iz Poskusi s fosforescenco, diplomsko delo: http://pefprints.pef.uni-lj.si/3012/1/Poskusi_s_fosforescenco.pdf
- Švent, L. (2012). *Spektrofotometrično merjenje fluorescence, fosforescence in sipanja*. Prevezeto 26. januar 2016 iz Univerza v Mariboru, fakulteta za naravoslovje in matematiko, diplomsko delo: file:///C:/Users/Uporabnik/Downloads/UNI_MB-diploma.pdf
- Tegel. (6. november 2012). *Wikipedija*. Prevezeto 31. januar 2016 iz Valovna dolžina: https://sl.wikipedia.org/wiki/Valovna_dol%C5%BEina
- Zabeltitz, C. v. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Berlin: Springer.