

# Pokusi i simulacije u interaktivnoj nastavi moderne fizike

---

**Babić, Martina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:691048>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-08**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET**  
**MATEMATIČKI ODSJEK**

Martina Babić

**POKUSI I SIMULACIJE U**  
**INTERAKTIVNOJ NASTAVI MODERNE**  
**FIZIKE**

Diplomski rad

Voditelj rada:  
dr. sc. Ana Sušac

Zagreb, lipanj, 2016

Ovaj diplomski rad obranjen je dana \_\_\_\_\_ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. \_\_\_\_\_, predsjednik
2. \_\_\_\_\_, član
3. \_\_\_\_\_, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom \_\_\_\_\_.

Potpisi članova povjerenstva:

1. \_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

*Zahvaljujem se mentorici, dr. sc. Ani Sušac, na neizmjenoj podršci prilikom odabira teme i pisanja samog diplomskog rada. Roditeljima zahvaljujem što su mi omogućili studiranje te na svoj potpori koju su mi pružili, a zaručniku što je bio glas razuma i savjeta u svakoj situaciji. Ponajviše zahvaljujem Gospodinu što mi je bio sigurno utočište u svim olujama.*



# Sadržaj

<b>Sadržaj</b>	<b>iv</b>
<b>Uvod</b>	<b>2</b>
<b>1 Nastava moderne fizike u srednjim školama</b>	<b>3</b>
1.1 Moderna fizika u kurikulumima nekih europskih država . . . . .	3
<b>2 Učeničke poteškoće u razumijevanju koncepata moderne fizike</b>	<b>5</b>
2.1 Poteškoće s modelima atoma . . . . .	5
2.2 Poteškoće s atomskim spektrima . . . . .	7
2.3 Poteškoće s valno-čestičnim modelom . . . . .	8
2.4 Pokušaji nadvladavanja poteškoća . . . . .	9
<b>3 Uporaba računalnih simulacija u nastavi moderne fizike</b>	<b>13</b>
3.1 Simulacija <i>Fotoelektrični efekt</i> . . . . .	14
<b>4 Zračenje crnog tijela</b>	<b>17</b>
<b>5 Fotoelektrični efekt</b>	<b>27</b>
5.1 Fotoelektrični efekt (1) . . . . .	27
5.2 Fotoelektrični efekt (2) . . . . .	37
<b>6 Atomski spektri</b>	<b>48</b>
6.1 Spektri (1) . . . . .	48
6.2 Modeli atoma . . . . .	56
6.3 Spektri (2) . . . . .	69
<b>7 Osvrti na održane satove</b>	<b>78</b>
7.1 Spektri (1) . . . . .	78
7.2 Modeli atoma . . . . .	79
7.3 Spektri (2) . . . . .	80

*SADRŽAJ*

v

**Bibliografija**

**82**

# Uvod

Nastavne teme iz fizike u četvrtom razredu srednje škole učenicima su prilično apstraktne. S opipljivog dijela svijeta i problematike koja im je relativno bliska, učenici se spuštaju prema oku nevidljivim pojavama, česticama i teškim pojmovima. Samo izvođenje nastave iz moderne fizike je zahtjevno. Od nastavnika zahtijeva duboko razumijevanje pojmova i pojava te sposobnost njihovog prenošenja učenicima takvim jezikom kojim će oni shvatiti o čemu se zapravo radi. Osim toga, nema puno pokusa koji se mogu raditi u nastavi moderne fizike. Ili je nemoguće u školskim uvjetima izvoditi pokuse koji bi učenicima približili određene pojave ili je aparatura preskupa. Stoga su nastavnici dijelom osuđeni na vlastitu maštu. Suhoparno iznošenje činjenica bi trebalo izbjegavati, jer kod učenika smanjuje interes i stvara odbojnost.

Učenicima je moderna fizika zanimljiva. Mnoge nove serije i filmovi im daju informacije o kvantnim pojavama i pojmovima ili im golicaju maštu nedorečenim. Također se u svakodnevnom životu često koriste uređaji koji počivaju upravo na kvantnim efektima i potrebno je da učenici razumiju njihove principe rada. Općenito je potrebno učenicima posvijestiti koliko se fizika koristi u svakodnevnom životu, a posebno kvantna koja im je ponekad tako apstraktna i teška. Upravo zbog ovih razloga sam se ja odlučila u diplomskom radu posvetiti nastavi moderne fizike i pokušati donijeti neki novi pristup, koji je skoro svima moguć. Ukoliko smo zainteresirani za unaprjeđenje nastave, potrebno je pratiti novitete. Jedna od njih su i računalne simulacije PhET sa Sveučilišta Colorado iz SAD-a koje se nalaze na linku [1]. One s jedne strane omogućuju nastavnicima da učenicima zornije prikažu teme iz moderne fizike, a s druge strane učenicima omogućavaju *dodir* sa svijetom koji im je apstraktan. Simulacije nisu načinjene samo da grafički prikažu razne pojave, nego da učenici u njima mogu istraživati svoje hipoteze, i uz stručno vođenje od strane nastavnika doći do ispravnih zaključaka. Provjeravane su na velikom broju učenika i studenata te ažurirane od strane autora shodno rezultatima istraživanja.

Nekoliko tema iz uvoda u kvantnu fiziku su razrađene za primjenu u nastavi, uz korištenje pokusa i simulacija. U prvom poglavlju su opisane teme iz moderne fizike u nastavi srednjih škola u Hrvatskoj i nekih europskih država. Zanimljivo je uočiti da svaka zemlja ima

svoj jedinstveni pristup tom problemu. U drugom i trećem poglavlju su navedene učeničke poteškoće u shvaćanju koncepata moderne fizike te način primjene računalnih simulacija u nastavi. U četvrtom poglavlju je navedena nastavna priprema na temu Zračenje crnog tijela, u petom dvije pripreme na temu Fotoelektrični efekt, a u šestom tri pripreme na temu Spektri. Tri nastavna sata na temu Spektri su održana u školama, a osvrti na te satove nalaze se u sedmom poglavlju.

# Poglavlje 1

## Nastava moderne fizike u srednjim školama

### 1.1 Moderna fizika u kurikulumima nekih europskih država

U Hrvatskoj se iz moderne fizike obrađuje zračenje crnog tijela, fotoelektrični efekt, atomski spektri i modeli atoma, valno-čestična svojstva tvari i elektromagnetskog zračenja, načelo neodređenosti u kvantnoj mehanici, spontana i stimulirana emisija fotona, struktura atomske jezgre, defekt mase i energija vezanja jezgre, radioaktivnost, nuklearne reakcije, elementarne čestice i niz tema iz specijalne teorije relativnosti, [2]. U svakom slučaju, teme moderne fizike su jako zastupljene u gimnazijskim programima i ispituju se na Državnoj maturi, [3]. U izradi je i novi kurikulum koji se u temama moderne fizike ne razlikuje bitno od trenutno važećega programa fizike, [4]. U prijedlogu novog kurikula stavljen je nešto veći naglasak na primjenu koncepata moderne fizike na razumijevanje pojava i uređaja s kojima se učenici susreću u svakodnevnom životu.

Velika Britanija ima dugu tradiciju poučavanja tema iz moderne fizike u srednjoj školi, tako da su sadržaji iz tog područja prisutni u kurikulumima svih dijelova te zemlje (Engleska, Wales, Škotska i Sjeverna Irska). U zadnja dva razreda srednje škole u Engleskoj i Walesu iz kvantne fizike obrađuju se fotoelektrični efekt, čestični model elektromagnetskog zračenja, sudari elektrona s atomima, linijski spektri, energijske razine i emisija fotona, valno-čestična dualnost, [15]. Iz nuklearne fizike uključene su teme kao što su svojstva jezgre, radioaktivnost, radioaktivni raspadi, nuklearna fisija i fuzija, izvori nuklearne energije. I Irska ima puno tema iz moderne fizike u kurikulumu iz fizike, [5].

U Francuskoj se tek 2012. godine, nakon 20 godina odsustva, moderna fizika vratila u nastavni plan i program srednjih škola [20]. Učenici biraju smjer u srednjoj školi i ako

izaberu prirodoslovlje u kurikulumu, susreću se s nizom tema iz kvantne fizike; poseban je naglasak stavljen na nuklearnu fiziku. U Belgiji se moderna fizika jako malo obrađuje, iako neki nastavnici samoinicijativno uvode te teme u svoj program, [5].

U Njemačkoj svaka pokrajina ima svoje kurikule iz fizike koji se razlikuju i po vrsti srednje škole. U većini škola i pokrajina se obrađuju nuklearna fizika, dok su teme iz kvantne fizike prisutne u srednjim školama koje su više orijentirane na prirodoslovlje, [5]. Bilo je i pokušaja uvođenja novih eksperimentalnih programa iz moderne fizike s naglaskom na koncepte i formalizam kvantne fizike, [22]. U Nizozemskoj je također razvijen eksperimentalni kurikulum iz kvantne fizike za učenike zadnjeg razreda srednje škole u kojemu se kroz 35 nastavnih tema organiziranih u tri kategorije obrađuje: struktura materije, reakcijski procesi i interpretacija koncepata kvantne fizike, [5]. U Austriji je slična situacija kao u Njemačkoj.

Finska se često spominje kao primjer zemlje s uspješnim obrazovnim sustavom, barem što se tiče uspjeha na testiranjima kao što je PISA (*Programme for International Student Assessment*). Teme koje se obrađuju iz moderne fizike su vrlo slične kao u Hrvatskoj: zračenje crnog tijela; fotoelektrični efekt; čestična priroda zračenja i valna priroda čestica; atomski modeli kao što je Bohrov model atoma; kvantizacija, linijski spektri, energijska stanja elektrona i dijagrami energijskih razina; struktura atomske jezgre; radioaktivnost i zaštita od zračenja; ekvivalencija mase i energije; nuklearne reakcije i nuklearna energija; najmanje čestice tvari i njihova klasifikacija, [6]. U Norveškoj je kurikulum nekoliko puta doživio reformu, ali se koncept moderne fizike nije posebno mijenjao. Učenici se uglavnom susreću s rendgenskim zračenjem, fotoelektričnim efektom i drugim jednostavnijim modelima kvantnih pojava, [23]. U Poljskoj, Češkoj, Slovačkoj i Mađarskoj se iz moderne fizike obrađuju slične teme kao u Hrvatskoj.

U Španjolskoj kurikulum iz fizike ne sadrži teme iz moderne fizike. Slična je situacija i u Portugalu gdje se neki pojmovi kao što su molekulske orbitale i kvantni brojevi obrađuju u zadnjem razredu srednje škole iz kemije, [5]. Vrijedi spomenuti da je slična situacija i u SAD-u gdje nema nacionalnog kurikula iz fizike, ali postoji standardizirano testiranje. Teme iz moderne fizike uglavnom nisu prisutne u srednjoškolskoj nastavi fizike.

## Poglavlje 2

# Učeničke poteškoće u razumijevanju konceptata moderne fizike

### 2.1 Poteškoće s modelima atoma

Modeli atoma su važna tema u nastavi fizike. Daju osnovu za razumijevanje niza pojava, od osnovnih jedinica koje grade prirodu do modernih tehnologija. Za nastavu su značajni jer potiču znanstveno razmišljanje i zaključivanje na temelju uočenih pojava te izgradnju modela. Razmatrajući povijesni pregled nastanka i razvitka modela atoma, učenici prolaze kroz složenu mrežu rasuđivanja o tome kako su novi modeli izgrađeni, a zbog čega su stari odbačeni.

U jednom istraživanju u SAD-u je srednjoškolcima rečeno da opišu atom, [27]. Učenički odgovori na to pitanje mogli su se svrstati u nekoliko kategorija. U prvoj kategoriji su bili oni odgovori koji ukazuju na to da su atomi građevne jedinice tvari. Drugu kategoriju su činili odgovori vezani uz sastavne dijelove atoma – protone, elektrone i neutrone. U trećoj kategoriji nalazili su se modeli atoma, a učenici su uglavnom crtali Bohrov model atoma. Neki su uz njega davali opise, a neki su samo skicirali crteže. U opisima atoma se moglo naći nekoliko zanimljivih stvari. Uglavnom su svi učenici pisali da su atomi osnovne građevne jedinice tvari. Mnogi su pisali o elektronima, protonima i neutronima kao sastavnim dijelovima atoma, ali tu informaciju nisu povezivali s prethodnom. Tek je nekolicina učenika dala probabilističku interpretaciju. 69% učenika je odgovorilo da se atomi mogu vidjeti pomoću naprednih tehnologija, ili da će u budućnosti biti vidljivi. Iz toga se može zaključiti da učenici atome doživljavaju kao nešto jako sitno, ali ipak uočljivo. Nadalje, istraživanje je pokazalo da većina učenika misli da je moguće dobiti energiju iz atoma, i tu su najčešće spominjali nuklearnu energiju. Neki učenici odgovorili su da se energija dobiva iz elektromagnetskog zračenja, elektriciteta i kemijskih reakcija. Prisutno je i mišljenje da

atomi proizvode energiju.

Jedno od glavnih pitanja prilikom upoznavanja učenika s modelima atoma je treba li predstaviti Bohrov model atoma, te kako to učiniti. Stručnjaci iz područja edukacijske fizike podvojeni su po tom pitanju. Neki smatraju da je Bohrov model atoma važan dio u razumijevanju atoma jer pokazuje kontrast između klasične i kvantne fizike. Druga pak strana smatra da ga treba izbjegavati jer je prepreka za učenje prave kvantne prirode atoma. Učenici u osnovnoj i srednjoj školi u raznim predmetima (posebno kemiji), ali i popularnoj kulturi susreću Bohrov model atoma, stoga izbjegavanje te teme u nastavi fizike u stvarnosti nije moguće jer su se učenici s njim već upoznali.

Ključno istraživačko pitanje istraživanja koju su proveli McKagan i suradnici 2008. godine na američkim studentima bilo je stvara li Bohrov model atoma prepreku učenju Schrödingerovog modela, [30]. Idealno bi bilo da jedna grupa učenika obradi Bohrov model atoma, a druga ne, te da se testiranjem utvrdi postoje li veće poteškoće u razumijevanju modela atoma kod grupe koja je obrađivala Bohrov model. Međutim, nemoguće je neko sveučilište nagovoriti na takav pothvat. Jedina mogućnost bila je provesti dobro osmišljeni pristup obrade Bohrovog modela koji neće biti prepreka za učenje Schrödingerovog modela. Nastava je uključivala konceptualne testove, poduku vršnjaka (eng. *peer instruction*), grupne domaće zadaće te interaktivne simulacije. Prilikom prikazivanja povijesnog razvoja modela atoma naglašavali su se nedostaci pojedinog modela, a učenici su davali prijedloge kako te nedostatke ukloniti. Za svaki model su trebali navesti prednosti i ograničenja. U konačnici nisu riješili Schrödingerovu jednadžbu, ali su objasnili kako je riješena i koja su svojstva tog rješenja. Na kraju nastavne cjeline učenici su dobili pitanje na pismenom ispitu iz kojega je jasno vidljivo kako doživljavaju atom. Crtežom i dijagramima studenti su trebali opisati strukturu vodikovog atoma u najnižem energijskom stanju. U svom opisu su trebali uključiti najmanje dvije ideje važne za točan opis vodikovog atoma, dijagram energijskih razina s naznačenim iznosom energije koju elektron ima kad se nalazi u osnovnom stanju te crtež koji prikazuje kako treba točno razmišljati o udaljenosti elektrona od jezgre. U toj zadnjoj sekvenci pitanja učenici su bili primorani razlikovati Bohrov model u kojemu je udaljenost elektrona od jezgre fiksna od Schrödingerovog modela u kojemu se elektroni nalaze na različitim udaljenostima od jezgre. Pitanje je namjerno postavljeno tako da se ne koristi riječ „model“, jer bi ih to odvelo u smjeru korištenja Schrödingerovog modela kojeg inače ne bi koristili. Veliki dio studenata je prilikom opisa vodikovog atoma koristio više modela, bilo miješajući ideje iz raznih modela bilo eksplicitnim razdvajanjem ideja pojedinih modela. Cilj nastavne intervencije bio je da svi studenti koriste Schrödingerov model, ali ne uz isključenje ostalih modela. Na kraju većina studenata jest koristila Schrödingerov model, ali oko 25% je i dalje koristilo samo Bohrov model.



Prilikom provođenja prve faze ovog istraživanja, studenti su prvo radili razvoj modela atoma do de Broglievog, a zatim su pet tjedana proveli proučavajući valove pridružene elektronima, Schrödingerovu jednadžbu i njene primjene, a tek su onda prešli na Schrödingerov model atoma, ne vraćajući se na već spomenute modele atoma. Analizirajući odgovore u intervjuima i pregledavajući domaće zadaće uočeno je da studenti nisu povezali Schrödingerov model atoma s prethodnim modelima, nego su ga vidjeli kao još jednu primjenu Schrödingerove jednadžbe. U sljedećoj fazi istraživanja na novoj skupini studenata, koncept obrade ove nastavne teme promijenjen je tako da se Schrödingerov model povezao s prijašnjim modelima. Konačni rezultati bili su značajno poboljšani, te su autori zaključili da Bohrov model ne sprječava učenje Schrödingerovog. Rezultati ove studije slažu se s rezultatima slične studije iz Grčke, u kojoj je pokazano da studenti u velikoj većini na kraju kolegija crtaju kvantni model atoma, iako su obradili Bohrov model atoma.

Nadalje, McKagan i suradnici su zaključili da je neophodna komponenta kurikula naglasiti nedostatke Bohrovog modela. Također su uočili da studenti na kraju kolegija znaju nabrojiti modele atoma, ali ne i zašto je jedan model nadmašio drugi. U svrhu rješavanja ovih problema, u suradnji s programerima, napravljene su dvije PhET simulacije. Korištenje ovih simulacija u nastavi nije povećalo uporabu Schrödingerovog modela, ali je povećalo uporabu različitih modela i diskusiju o njihovim ograničenjima. Simulacija *Modeli vodikovog atoma* napravljena je zato što je uočeno da mnogi studenti nemaju jasnu mentalnu sliku različitih modela atoma i ne razumiju razloge koji vode do određenih modela. U simulaciji studenti mogu vidjeti animirani vizualni prikaz svakog modela, kakve spektre bi dali pojedini modeli atoma te vezu između fizičke slike atoma i energijskog dijagrama. Simulacija *Rutherfordovo raspršenje* je razvijena jer studenti nisu razumjeli zašto se  $\alpha$ -čestice odbijaju od jezgre i zašto se rezultati pokusa razlikuju od previđanja Thomsonovog modela *kolača s grožđicama*. U njoj studenti mogu vidjeti što se događa s  $\alpha$ -česticama u Thomsonovom, a što u Rutherfordovom modelu. Obje te simulacije korištene su u ovom diplomskom radu.

## 2.2 Poteškoće s atomskim spektrima

Jedno istraživanje studentskih poteškoća u razumijevanju atomskih emisijskih i apsorpcijskih spektara provedeno je na sveučilištima u Washingtonu i Zagrebu, [17]. Glavni cilj istraživanja bio je ispitati u kojoj mjeri studenti povezuju valnu duljinu i spektralne linije s prelaskom elektrona između energijskih razina u atomu te prepoznati uvjete pod kojima nastaju diskretni spektri. Studenti su pokazali niz miskoncepcija vezanih uz atomske spektre. Najveći izvor pogrešaka bio je u povezivanju svake pojedine linije u spektru s jednom energijskom razinom u atomu. U skladu s tim, studenti su izjednačavali energiju spektralnih linija s energijom energijskih razina u atomu. U nekim zadacima, razmatrali

su broj različitih boja u diskretnom spektru, a ne ukupni broj spektralnih linija. Manji broj studenata nije smatrao osnovnu energijsku razinu energijskom razinom. Čini se da je jedan manji dio ispitanika mislio da su mogući samo prijelazi na osnovno stanje tj. oni nisu razmatrali prijelaze iz jednog pobuđenog stanja u drugo. Mnogi studenti su davali točne odgovore uz nepotpuna ili netočna obrazloženja. Često nisu naznačili da su elektroni objekti koji mijenjaju energiju, nego su umjesto njih spominjali fotone, spektralne linije ili same energijske nivoe. Inače su studenti u mnogim slučajevima neprikladno koristili pojmove spektralna linija, energija fotona, energijska razina i sl., često ih zamjenjujući. Tako su govorili o prijelazima „između spektralnih linija“ umjesto „između energijskih razina“. Slične poteškoće u razumijevanju spektara su uočene kod studenata sveučilišta u Zagrebu i Washingtonu i nisu se javljale samo kod studenata nižih godina nego i kod starijih studenata.

Na temelju ovih rezultata, ista grupa istraživača razvila je tutorijal – nastavne materijale namijenjene za rad u manjim grupama s ciljem poboljšanja učenja i poučavanja ove teme, [16]. Tutorijal se sastoji od radnih listova i zadataka za domaću zadaću koji bi kod učenika trebali ispraviti sve uočene miskoncepcije. Istraživanje je pokazalo da primjena razvijenih nastavnih materijala dovodi do poboljšanja razumijevanja atomskih emisijskih spektara kod studenata.

### 2.3 Poteškoće s valno-čestičnim modelom

Valno-čestična dualnost potpuno je novi koncept za većinu učenika u srednjoj školi, stoga ne čudi da mnogi učenici imaju poteškoće i miskoncepcije vezane uz tu temu. Moguće je da su te poteškoće rezultat zdravorazumskog razmišljanja i znanja iz klasične fizike. Također je moguće da naš jezik nije u mogućnosti točno izreći kvantno-mehaničku sliku svijeta. Dva su načina poučavanja kvantne fizike: poučavanje formalnim matematičkim jezikom kvantne mehanike koji onda isključuje većinu nestručnjaka ili poučavanje vrlo apstraktnih matematičkih modela pomoću vizualnih modela i manje formalnim jezikom tako da ih većina ljudi razumije. Za drugi način poučavanja potrebno je koristiti koncepte i analogije iz klasične fizike, npr. „čestica“ i „val“, što u konačnici dovodi do poteškoća.

U jednom norveškom istraživanju, učenici zadnjeg razreda srednje škole su nedugo nakon što su obradili kvantne pojave u okviru testa odgovarali na pitanja vezana za različite dijelove kvantne fizike, [23]. Između ostalih pitanja, učenici se dobili dva pitanja višestrukog izbora i jedno pitanje otvorenog tipa koji su ispitivali njihovo razumijevanje dualne prirode svjetlosti i elektrona. U prva dva pitanja, učenici su trebali odgovoriti jesu li svjetlost/elektroni valovi ili čestice i obrazložiti odgovor. Cilj ovih pitanja je bio da se vidi imaju li učenici simetričan pogled na prirodu svjetlosti i elektrona. Analizirajući odgovore

uočeno je da objašnjenja često nisu bila konzistentna sa zaokruženom tvrdnjom, iako je u uvodnom dijelu udžbenika iz fizike dan argument simetrije. 77% učenika odgovorilo je da svjetlost ima i valna i čestična svojstva, ali ih većina to nije znala obrazložiti. Uglavnom su se referirali na pojave koje su upoznali – interferenciju, fotoelektrični efekt, apsorpciju i emisiju. 59% učenika odgovorilo je da su elektroni čestice, uglavnom zbog toga što imaju masu, naboj i količinu gibanja. Očito je da se koncept čestice veže uz postojanje mase. U trećem zadatku učenici su trebali objasniti što se misli pod pojmom val i što predstavlja valna duljina elektrona. Više od 50% učenika nije dalo nikakav odgovor na ovo pitanje. Manje od 25% učenika je dalo nekakav odgovor koji je naslućivao njihovo razumijevanje valne prirode elektrona. Nekolicina učenika je valnu duljinu elektrona povezala s brzinom, količinom gibanja i kinetičkom energijom. Ova studija pokazuje da je valno-čestična dualnost težak koncept, čak i za sveučilišnu razinu, i autori smatraju da se kvantna fizika ne treba povezivati s tim konceptom. Cilj kvantne fizike ne bi trebao biti izračunavanje raznih veličina vezanih za ovo područje, nego razumijevanje ideja koje kvantnu fiziku odvajaju od klasične.

U istraživanju provedenom u Engleskoj i Walesu uočeno je da učenici misle da se elektroni gibaju po točno određenim putanjama velikim brzinama i da Newtonova mehanika može točno predvidjeti njihovo ponašanje, [15]. Na temelju rezultata svojih istraživanja autor predlaže moguća poboljšanja u nastavi moderne fizike. Na primjer, smatra da je važno pokazati ogib elektrona pomoću Teltron cijevi te raspraviti interferencijski uzorak koji se dobiva prolaskom elektrona kroz dvije pukotine i rezultate Frank-Hertzovh pokusa. S obzirom da učenici fotone povezuju s klasičnim česticama, fotoelektrični efekt se može obrazložiti kroz promatranje svjetlosti kao niza kvantnih objekata, a ne fotona. Autor se slaže s preporukama koje su dali Fischler and Lichtfeldt, [14] da se prilikom obrade kvantnih pojava ne treba spominjati veza s klasičnom fizikom; fotoefekt treba početi s elektronima, a ne fotonima; kod vodikovog atoma ne treba spominjati Bohrov model. Također treba koristiti statističku interpretaciju uočenih pojava, a izbjegavati dualistički opis.

## 2.4 Pokušaji nadvladavanja poteškoća

Osim gore spomenutih, bilo je još pokušaja i savjeta za nadvladavanje učeničkih poteškoća s konceptima iz moderne fizike. U nastavku navodimo neke od njih.

Zbog lošijeg učeničkog razumijevanja kvantnih pojava Lawrence je 1996. godine predstavio jednostavne modele i eksperimente za učeničko razumijevanje kvantizacije, valno-čestične dulanosti, nelokalnosti i tuneliranja koje sam ja dijelom iskoristila u diplomskom radu, [21]. Cilj je bio kvantni pogled na svijet učiniti shvatljivim, a ne samo skupom standardnih odgovora ili specijaliziranih alata za pojedine problemske situacije. Za ideju

kvantizacije koristio je pribor iz učeničkog svakodnevnog života – žarulju sa žarnom niti i LED-diodu (eng. *light - emitting diode*). To mu je omogućilo da učenicima predoči da energija dolazi u paketima. Prvo su povezali boju i razliku potencijala koristeći običnu žarulju. Zatim su pomoću LED-diode uočili da postoji minimalna energija koja proizvodi svjetlost samo jedne boje, odnosno uspostavili su odnos između boje emitirane svjetlosti i razlike potencijala, a pomoću toga energije i valne duljine. Koristeći LED-diode, učenici su izmjerili napon potreban da ona taman zasvijetli i grafički su prikazali ovisnost napona i valne duljine, no nisu dobili linearnu ovisnost pa su pokušali s frekvencijom. Dobili su linearnu ovisnost, a iz mjerenja su mogli odrediti i vrijednost Planckove konstante  $h$ . Ovakav pristup problemu učenicima je omogućio da iznose svoje pretpostavke i očekivanja te uspoređuju vlastite rezultate s rezultatima ostalih grupa. Na kraju su učenici došli do objašnjenja zašto u svakodnevnom životu ne uočavamo zrnatost svjetlosti. Računali su broj emitiranih fotona obične žarulje koja se koristi u kućanstvu i uočili da je broj fotona toliko velik da ih se ne može uočiti kao pojedinačne strukture. Vrlo sličan eksperiment s LED-diodama je korišten u ovom diplomskom radu.

U procesu izrade novog kurikula iz moderne fizike u Njemačkoj, provedeno je istraživanje razumijevanja kvantnih pojmova i pojava na gimnazijskim učenicima i studentima fizike, [22]. Ispitivanje se sastojalo se od pismenog i usmenog dijela, a obje grupe su dale podjednake odgovore. Za osnovne karakteristike klasičnih objekata učenici i studenti su najčešće naveli masu, veličinu, volumen, oblik, brzinu, količinu gibanja, položaj, energiju. Za kvantne objekte su naveli slične karakteristike, ali i neodređen položaj i de Broglievu valnu duljinu. Za većinu učenika i studenata postojao je gladak prijelaz s kvantne na klasičnu fiziku. Kad su objekti sve manji, do izražaja sve više dolaze kvantna obilježja. Foton su definirali kao česticu svjetlosti koja ima i valna i čestična svojstva te u mirovanju nema masu, dok je nekolicina rekla da se oni pojavljuju prilikom prelaska atoma iz pobuđenog u osnovno stanje. Za model atoma su uglavnom uzimali Bohrov model, ali su neki spominjali orbitale i vjerojatnost pronalaženja elektrona u njima.

Na temelju rezultata tog istraživanja osmišljen je i testiran novi kurikulum. U tom eksperimentalnom kurikulumu nastava kvantne fizike održava se u dva odvojena dijela. Naglasak prvog, osnovnog, dijela je kvalitativno rasuđivanje. Učenici istražuju temelje kvantne fizike bez korištenja formalizma. U simuliranim laboratorijima se susreću sa situacijama u kojima se očituju čudna ponašanja čestica o kojima se onda raspravlja. Prvo se upoznaju s fotonima preko fotoelektričnog efekta, upoznavanja valno-čestične dualnosti i probablističke interpretacije. Nakon toga istražuju elektrone pomoću difrakcije, eksperimenta s dvije pukotine te dolaze do relacije neodređenosti. U drugom, naprednom, dijelu se daje uvod u matematički formalizam koji je usko povezan s raspravom iz osnovnog dijela. Uvode se valne funkcije i operatori, svojstvene vrijednosti, Schrödingerova jednadžba, te

se promatraju spektri atoma. Podjela u dva dijela omogućava da i učenici u strukovnim školama, u kojima nije toliko naglašena fizika, dobiju uvid u kvantnu sliku svijeta. Ovaj model poučavanja kvantne fizike je prvi puta isproban u pet razreda gimnazije. Dva su bila nespecijalizirana za fiziku (s tri sata fizike tjedno), a tri su bila specijalizirana za fiziku (s pet sati fizike tjedno). Učenici nisu imali udžbenike, nego su dobili tekst s nastavnim sadržajem na otprilike 100 stranica. Učinkovitost novog pristupa mjerila se na razne načine: testiranjima učeničkog razumijevanja koncepata, usmenim razgovorima te propitivanjem interesa za fiziku. Nakon godinu dana su ti učenici ponovno testirani, ali i grupa učenika koja je na tradicionalan način obrađivala kvantnu fiziku (kontrolna grupa). Eksperimentalna grupa imala je izraženije kvantno-mehaničko razumijevanje od kontrolne grupe. Na tvrdnju da je građa atoma slična razmješčaju planeta oko Sunca većina učenika u eksperimentalnoj grupi napisala je da se čvrsto ne slažu s tim, dok učenici iz kontrolne grupe nisu bili sigurni. Također su trebali nacrtati kako oni zamišljaju atom. Većina učenika iz kontrolne grupe nacrtala je Bohrov model atoma, dok su učenici iz eksperimentalne grupe crtali „oblake vjerojatnosti”. Rezultati su pokazali da je eksperimentalni kurikulum bio uspješan u razvoju razumijevanja kvantno-mehaničkih koncepata kod učenika.

S obzirom da u Francuskoj kvantna fizika dugo vremena nije bila prisutna u kurikulumu, većina nastavnika u svom radnom vijeku nije imala iskustvo poučavanja kvantnih pojava, [20]. Autori smatraju da koncepti kvantne fizike nisu bitno teži od drugih dijelova nastavnog plana i programa, ali nastavnici koriste različit vokabular za opisivanje istih pojava. Razvile su se dvije struje koje nude dva različita rješenja ovog problema. Prvu struju možemo nazvati konzervativnom. Ona zastupa mišljenje da prilikom opisivanja kvantnih pojava treba koristiti vokabular klasične fizike, odnosno da se za opisivanje kvantnih pojava ne trebaju konstruirati novi pojmovi. Dok je kvantna fizika bila još u povojima, Niels Bohr i David Wallace su zastupali ovu ideju. Smatrali su da se kvantna fizika razvila iz klasične i stoga je ispravno koristiti isti vokabular. Drugu struju možemo nazvati inovativnom, jer oni zastupaju mišljenje da se treba uvesti nova terminologija za kvantne pojave. Utemeljitelj tog pristupa bio je Mario Bunge koji je 60-tih godina prošlog stoljeća uveo naziv „kvanton“ koji se treba koristiti u svim sustavima koji podliježu zakonima kvantne fizike da bi se izbjegla ideja valno-čestične dualnosti. *Kvanton* nema točno određen ni položaj ni količinu gibanja, ali je povezan s dobro definiranom distribucijom varijabli položaja i količine gibanja koje se mijenjaju tijekom vremena djelovanjem okoline.

Lautesse i suradnici smatraju da učenici trebaju postati svjesni razlika u prirodi klasične i kvantne fizike, ali bez uočavanja razlika u matematičkom formalizmu, [20]. Stoga su u nekoliko francuskih udžbenika za srednju školu proučili pristup kvantnoj fizici – konzervativni ili inovativni. Uočili su da je tek jedan, od njih pet, u potpunosti ostao pri konzervativnoj terminologiji, a ostali su koristili i klasične i nove pojmove. Svi udžbenici koriste pojam

„čestica“, bilo kvantna ili materijalna. Čini se da autori udžbenika nerado napuštaju poznate klasične pojmove, iako su otvoreni za inovativne koncepcije. Samo dva udžbenika koriste naziv „kvanton“, iako bi ga prema službenom kurikulumu svi trebali koristiti. No, ujedno koriste i naziv „čestica“ i „val“. Jedan od ta dva udžbenika pokušava pomiriti dva opisana pristupa poučavanju kvantne fizike, a drugi „kvanton“ predstavlja na kraju, ukazujući time da se uvođenjem tog pojma nemoguće vratiti na klasične pojmove. Korištenje inovativnih pojmova u tim udžbenicima javlja se isključivo zbog nemogućnosti opisa kvantnih pojava pomoću valno-čestičnog modela, ali njima ne pokušavaju zamijeniti klasične pojmove. U svim udžbenicima nedostaje rasprava o prirodi kvantnih objekata koja bi mogla produbiti i istaknuti sličnosti i razlike između klasične i kvantne fizike, a što je službeni kurikulum naglasio. Cilj ovog istraživanja bio je vidjeti kako prevladati epistemološke razlike između klasične i kvantne fizike te kako smjestiti nastavu kvantne fizike u srednjoj školi s obzirom na ta dva položaja. Prednost konzervativnog pristupa je u tome što osigurava kontinuitet u terminologiji između klasične i kvantne fizike, iako ta prednost može predstavljati problem kad se u kvantnoj fizici shvaća doslovno. Stoga ovaj pristup mora biti popraćen porukama upozorenja o statusu vala i čestice u kvantnoj slici kao i mogućnosti primjene tog modela. Udžbenici koji su izabrali taj pristup su razumljivi i dosljedni. Jedino preostaje pitanje iznošenja tog pristupa učenicima i njihovog shvaćanja. Inovativni pristup, s druge strane, pravi prekid između klasične i kvantne fizike, osiguravajući tako bolje konceptualno razumijevanje novih pojmova iz kvantne fizike. Iako je službeni kurikulum propisao da se klasična terminologija ostavi po strani kad se govori o kvantnoj fizici, ova studija je pokazala da ni u jednom udžbeniku to nije tako napravljeno. Lako se može doći do zaključka da, ukoliko se želi koristiti inovativni pristup, sam taj koncept se mora bolje razraditi. No, dok se to ne učini, učenici će barem biti svjesni ograničenja i nesavršenosti korištenja klasičnih koncepata prilikom opisivanja kvantnih pojava.

## Poglavlje 3

# Uporaba računalnih simulacija u nastavi moderne fizike

Kvantna mehanika je zahtjevna za učenje jer nije intuitivna, teška je za vizualizaciju, apstraktna i iza nje stoji kompliciran matematički aparat. U sklopu projekta PhET (*Physics Education Technology*) američkog sveučilišta Colorado Boulder razvijene su računalne simulacije za učenje i poučavanje fizike, [1]. Simulacije uključuju nekoliko značajnih aspekata koji učenicima i studentima pomažu u gradnji mentalnih kvantno-mehaničkih modela: vizualizaciju apstraktnih koncepata i mikroskopskih procesa koji nisu vidljivi golim okom, vezu sa svakodnevnim životom te učinkovite izračune kako bi se studenti fokusirali na koncepte, a ne na matematički formalizam. Mogu se koristiti u srednjim školama, ali i na fakultetima. Razvijale su se koristeći rezultate edukacijskih istraživanja i testirane su u nastavi. To su animirane, interaktivne simulacije koje ponekad nalikuju na igrice u kojima učenici uče istraživanjem. Naglašavaju vezu između pojava iz svakodnevnog života i znanstvenih obrazloženja tih pojava, a dva glavna cilja su povećani angažman učenika te poboljšano učenje. Svaka od 18 simulacija vezanih za kvantne pojave ima svoju web-stranicu na kojoj se nalazi kratak opis, ishodi učenja te savjeti za nastavnike u kojima su opisane najčešće učeničke poteškoće i prijedlozi za njihovu uporabu u razredu. Pomoću simulacija se mogu vizualizirati elektroni, fotoni, atomi, interferencija valova i druge kvantne pojave koje se inače ne mogu direktno vidjeti. Iako se neki eksperimenti mogu vidjeti u laboratorijima, ne može se vidjeti što se događa na mikrorazini, a simulacije upravo to omogućuju. Simulacija *Modeli atoma* učenicima omogućuje uvid što se događa unutar atoma, *Kvantna valna interferencija* im omogućuje da vide svjetlosni val od izvora, preko pukotina dok ne interferira i ne pojavi se točka na ekranu. PhET simulacije su izrazito interaktivne, jer spajaju animacije s učeničkim aktivnostima. Kao odgovor na mijenjanje određenih parametara odmah se pojavljuje promjena u vizualnom sučelju simulacije. Upravo ta interaktivnost pomaže učenicima da se usmjere na sadržaj i uspostavlja uzročno-posljedičnih veze. Go-

tovo sve PhET simulacije su usmjerene na svakodnevne situacije i primjene. Na primjer, simulacija *Neonska svjetla i druge izbojne lampe* omogućava učenicima da shvate princip rada neonskih lampi koji je utemeljen na konceptu energijskih razina u atomu.

Programeri i stručnjaci iz edukacijske fizike razvijaju početnu verziju simulacije koja se razvija prema ishodima učenja za pojedinu simulaciju, te rezultatima edukacijskih istraživanja. Nakon stvaranja početne verzije, u radu sa studentima uočavaju se eventualni problemi i poteškoće te se provjerava ostvarenost ishoda. Nakon toga se simulacija popravlja i ponovno u radu sa studentima korigira dok se ne uklone sve poteškoće. Proces nastanka PhET simulacije uključuje cijeli niz istraživanja u raznim područjima. Vizualizacija i interaktivnost studentima pomažu u stvaranju mentalnih modela; stavljanje fizike u stvarni kontekst pomaže povezati stare koncepte s novima. U simulacijama su uklonjeni svi nebitni detalji čime se smanjuje kognitivno opterećenje i studentima se pomaže izgraditi razumijevanje koristeći prvo jednostavne korake simulacije i postupno istražujući složenije značajke određene pojave. Svaka simulacije se može koristiti na više načina kako bi se postigli različiti ishodi učenja. Sam izgled simulacije je takav da otklanja sve učeničke poteškoće koje su detektirane u prijašnjim istraživanjima i razgovorima. Simulacije se mogu integrirati u nastavu, ali mogu služiti i za domaće zadaće. Na primjer, domaća zadaća uz simulaciju *Laseri* može početi s nekoliko pitanja o apsorpciji i stimuliranoj emisiji, te u nekoliko koraka doći do eseja u kojemu se treba obrazložiti inverzija populacije koja je potrebna za izgradnju lasera te zašto su potrebni atomi s barem tri energijska nivoa. Većina učenika uspijeva dati točna detaljna objašnjenja u tim esejima. Istraživanja su pokazala da simulacije imaju značajan učinak na ostvarenje ishoda učenja. Reakcije učenika i studenata na simulacije uglavnom su pozitivne, [28].

### 3.1 Simulacija *Fotoelektrični efekt*

Razumijevanje fotoelektričnog efekta ključni je korak u razumijevanju prirode svjetlosti. Ova tema se mnogim sveučilišnim nastavnicima čini jako jednostavna i na nju izdvajaju jedan sat, odnosno jedno predavanje. Međutim, istraživanja pokazuju da studenti imaju značajne poteškoće u razumijevanju osnovnih aspekata fotoelektričnog efekta. Dva osnovna ishoda učenja fotoelektričnog efekta su da studenti mogu točno predvidjeti eksperimentalne rezultate fotoelektričnog efekta te opisati kako ti rezultati vode do čestičnog modela svjetlosti. Većina nastavnika, njih 80%, misli da su studenti ostvarili te ishode, [29]. Mnoga istraživanja su pokazala da nakon standardne nastave studenti ne razumiju Einsteinovo objašnjenje fotoefekta. Misle da je relacija  $U = I \cdot R$  vezana za fotoelektrični efekt te da je foton nabijena čestica; ne razlikuju intenzitet svjetlosti od njene frekvencije, nisu u mogućnosti predvidjeti  $I - U$  graf za eksperiment s fotofektom te objasniti ulogu fotona u fotoefektu, [26], [25]. U istraživanju koje su proveli McKagan i suradnici 2008.



godine u SAD-u opet su uočene sve ove poteškoće, osim da se foton smatra nabijenom česticom, [29].

Istraživači su razvili novi kurikulum o fotoefektu koji se sastojao se od tri 50-minutna interaktivna predavanja, konceptualnih i računskih zadataka za domaću zadaću te interaktivne računalne simulacije *Fotoelektrični efekt* koju su izradili u suradnji s PhET-om. Domaće zadaće su uključivale pitanja višestrukog izbora i esejska pitanja vezana za simulaciju. Prosječno vrijeme koje su studenti provodili radeći zadaću iz fotoelektričnog efekta je 2 sata i 16 minuta, a polovica njih je zadatke rješavala u skupinama. Tijekom interaktivnog predavanja korištena je simulacija, a studenti su trebali predvidjeti ovisnost kinetičke energije elektrona o frekvenciji svjetlosti. Rezultati su bili bolji za studente koji su radili u grupama. Nadalje, studenti su imali bolje rezultate kad su im odgovori bili ponuđeni, nego kad su sami morali crtati graf.

Simulacija omogućuje kontrolu ulaznih podataka poput intenziteta i valne duljine svjetlosti, napona na bateriji. Studenti mogu odmah vidjeti grafove struje u ovisnosti o naponu, struje u ovisnosti o intenzitetu svjetlosti i energije elektrona u ovisnosti o frekvenciji svjetlosti. Studenti grafove i njihove promjene uočavaju čim promijenjene neki ulazni podatak. Na taj način povezuju grafove i eksperiment. Prijašnja istraživanja su pokazala kako učenici imaju problema u razumijevanju sheme strujnog kruga koji se koristi za fotoefekt, stoga su autori simulacije tu shemu zamijenili slikom pravog eksperimenta u boji. Promjenjivi izvor su zamijenili običnom baterijom s klizačem te na taj način uklonili sve detalje koji su studente zbunjivali. Najkontroverzniji dio ove simulacije je prikaz elektrona koji putuju od jedne ploče prema drugoj, jer to se ne može vidjeti u pravom eksperimentu. Međutim, studentima je taj aspekt simulacije vrlo koristan jer mogu vizualizirati učinak promjene napona, odnosno lako uočavaju da se povećanjem napona elektroni ubrzavaju, a smanjenjem se usporavaju. Pokazalo se da mnogi studenti imaju poteškoća u povezivanju struje i brzine elektrona. U ovoj simulaciji studenti mogu uočiti da se povećanjem brzine elektrona ne povećava broj elektrona koji u jedinici vremena prođu kroz neki poprečni presjek, odnosno iznos struje ostaje isti. Prikaz elektrona u simulaciji također omogućuje vizualizaciju značenja zaustavnog potencijala, koji je jedan od težih koncepata u razumijevanju fotoefekta. Kad se napon baterije u simulaciji smanjuje i postavi na vrijednost zaustavnog napona, vidi se da elektroni dođu do nasuprotne ploče i počnu se vraćati nazad. To je studentima zgodno i sjećaju se toga i dugo nakon korištenja simulacije.

Pasivno promatranje ove simulacije neće dovesti do izgradnje mentalnih modela, nego rad treba biti interaktivan. Za razliku od elektrona, fotoni nisu prikazani kao posebni objekti, nego kao svjetlosni snop. Uočeno je da kad studenti sudjeluju u diskusiji i prate pripremljena predavanja, onda postavljaju razna pitanja. I nakon izvođenja ove simula-

cije, studentima često nije jasno zašto intenzitet ne ovisi o frekvenciji kod svjetlosti, a kod zvuka ovisi, mogu li dva fotona dati energiju elektronu, kako foton odlučuje gdje će udariti u metalnu ploču, trebaju li elektroni koji ubrzavaju isijavati svjetlost, zašto svjetlost izbacuje samo elektrone, a ne i protone. Nastavnici trebaju biti svjesni ovih pitanja i pripremiti odgovore, ukoliko ona budu postavljena. Na studentima koji su radili pomoću opisane simulacije provedeno je isto testiranje kao na studentima koji su koristili neku drugu simulaciju. Rezultati grupe koja je koristila ovdje opisanu simulaciju su bili puno bolji, [29]. Razlog tomu je bolja vizualizacija prilikom promjene napona. Najčešća pogreška u testu (42%) je bila pogrešna primjena Ohmovog zakona, prema kojemu je napon nužan ili dovoljan za pojavu struje elektrona. Također je nekoliko studenata (5%) mislilo da će povećanjem intenziteta poteći struja ako je energija fotona manja od izlaznog rada. Također je ispitano mogu li studenti opisati kako rezultati eksperimenta s fotoefektom vode do čestičnog modela svjetlosti. Većina studenata uspješno je navela zapažanja i zaključke ključne za fotoelektrični efekt, ali su ih teško povezivali. Međutim, ukupni rezultati su značajno bolji od rezultata studenta koji su na tradicionalni način obradili fotoelektrični efekt.

## Poglavlje 4

# Zračenje crnog tijela

Uvod u kvantnu fiziku obično započinje problemom zračenja crnog tijela. Prolazeći korak po korak kroz njega, učenici dobivaju uvid u sve probleme s kojima su se susreli fizičari toga razdoblja. Pri pisanju pripreme korišteni su srednjoškolski udžbenici iz fizike za gimnazijske programe, [18], [19], [24].

**UVODNI PROBLEM:** Ljeto je, sunčano je i vani je  $38^{\circ}\text{C}$ . Krenuli ste se šetati s prijateljem/prijateljicom, a na vama su crne hlače i crna majica. Mama kaže da se presvučete, jer je u crnoj odjeći toplije nego u nekoj svijetloj. Što mislite, je li mama u pravu? Zašto?

- Prikupljanje učeničkih ideja.
- Crna majica „upija“ više topline.

Kako bismo to mogli provjeriti? Možete li osmisliti pokus koji bi nam bilo lako provesti u razredu? Čime bi mogli zamijeniti majice crne i svijetle boje? Što bi moglo biti izvor topline? Čime bismo mogli izmjeriti temperaturu?

- Učenici daju ideje za pokus.

**POKUS:** „Temperatura tkanine“

Potrebni materijal: komadić crne tkanine i tkanine neke druge boje, dva termometra i dvije manje ili jedna velika lampa. Zamjena za tkaninu mogu biti crni i bijeli papir.

Tijek pokusa: pod lampu se stave obje tkanine i ispod njih se stave termometri te se upali jedna velika ili dvije manje lampe. Sačeka se kratko vrijeme da se tkanine ugriju.

Kako moramo postaviti lampu i tkanine? Je li bitno na kojoj su udaljenosti obje tkanine od lampe? Što bi se dogodilo da jednu tkaninu stavimo jako blizu, a drugu podalje od lampe?

- Iz svakodnevnog života učenici znaju da volframove žarulje isijavaju toplinu.
- Tkanine se moraju staviti na jednaku udaljenost od lampe i pod istim kutom u odnosu na lampu.

U slučaju da radimo s dvije lampe potrebno je s učenicima prodiskutirati i o vremenu uključivanja i isključivanja obiju lampi.

Na što bi još u ovom pokusu trebali pripaziti? Je li bitno koliko dugo ćemo obasjavati tkanine? Kad moramo uključiti, odnosno isključiti lampe?

- Lampe treba istovremeno uključiti i isključiti da bi vrijeme obasjavanja tkanina bilo jednako.
- Diskutirajući o izvođenju ovog pokusa, učenici provode kontrolu varijabli.

Što očekujete da će se dogoditi?

- Učenici zapisuju svoje pretpostavke, te kreću izvođenje pokusa.
- Učenici očitavaju temperature na termometrima te uočavaju da je temperatura ispod tkanine (papira) crne boje veća nego ispod tkanine (papira) bijele boje.

Kako biste to objasnili? Zašto je temperatura ispod tkanine (papira) crne boje veća?

- Učenici zapisuju svoja opažanja (temperatura ispod tkanine crne boje je veća).
- Tkanina crne boje bolje/više apsorbira energiju (zračenje).

Zamislimo neko šuplje tijelo koje je iznutra crno, a na sebi ima vrlo malu šupljinu. Što bi se dogodilo sa zrakom svjetlosti koja bi ušla u taj otvor?

- Učenici skiciraju problem i riječima opisuju svoje pretpostavke.
- Zraka svjetlosti će se više puta reflektirati unutar tijela.
- Pretpostavljam da neće svi učenici nacrtati da intenzitet zrake slabi prilikom refleksije o stijenke tijela, pa bi ih trebalo podsjetiti na apsorpciju i refleksiju.

Hoće li ijedan dio te zrake izaći izvan tijela? Što je vjerojatnije, da zraka izađe izvan tijela ili da se apsorbira?

- S obzirom da je šupljina kroz koju je zraka ušla vrlo mala, onda je vjerojatnije da će biti apsorbirana.

Na koji način bismo mogli biti sigurni da će neko zračenje izaći iz tog šupljeg tijela? Što bi se s njime trebalo učiniti?

→ Treba ga zagrijati.

→ Ukoliko učenici ne budu dali ovakav odgovor, možemo se poslužiti nekim primjerom koji im je bliži (npr. Što se događa kad komad žice zagrijavamo? → Žica isijava svjetlost i toplinu).

Što izlazi iz šupljine? Što biste mjerili?

→ Iz šupljine izlazi elektromagnetsko zračenje. (Učenici se prisjećaju infracrvenog dijela elektromagnetskog spektra.). Možemo mjeriti valnu duljinu i frekvenciju.

Koju fizikalnu veličinu bismo još mogli mjeriti, s obzirom da znamo da ovo tijelo zrači i da ima konačnu površinu?

→ Intenzitet zračenja (snagu koju emitira jedinična površina crnog tijela).

Rekli smo da ćemo tijelo i zagrijavati. Što bismo onda još trebali mjeriti? Dakle, koje fizikalne veličine treba mjeriti?

→ Valnu duljinu, intenzitet i temperaturu.

Koja bi bila tema današnjeg sata?

→ Zračenje tijela (još uvijek nismo spomenuli naziv crno tijelo, pa ga ni učenici neće reći).

Fizičari su tijelo koje potpuno apsorbira zračenje koje padne na njega, nazvali crno tijelo. Naša šupljina se ponaša upravo tako.

→ Pišem naslov na ploču *Zračenje crnog tijela*.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Kako izgleda zračenje crnog tijela?

Koju ovisnost ćemo istraživati ako temperaturu crnog tijela držimo stalnom?

→ Ovisnost intenziteta zračenja o valnoj duljini.

Što će biti na  $x$ -osi, a što na  $y$ -osi?

→ Na  $x$ -osi valna duljina, a na  $y$ -osi intenzitet.

Kako bismo mogli izmjeriti tu ovisnost?

→ Učenici iznose svoje ideje.

Fizičari krajem 19. stoljeća također su htjeli istražiti zračenje crnog tijela. Njemački fizičari Lummer i Pringsheim napravili su uređaj koji se sastojao od male peći unutar koje je bila velika šupljina, a na površini se nalazio uski otvor. Stijenke su se održavale na konstantnoj temperaturi. Na nekoj stalnoj temperaturi peći, mjerili su valnu duljinu i intenzitet zračenja koje je tijelo emitiralo.

S obzirom da u razredu ne možemo realizirati takav eksperimentalni postav, poslužiti ćemo se simulacijom.

Kakav grafički prikaz očekujete?

→ Učenici iznose svoje pretpostavke.

Na računalu prikazujem PhET simulaciju *Zračenje crnog tijela* i učenicima objašnjavam na koji se način mijenja temperatura (slika 4.1). Sa strane se nalazi termometar na kojemu su naznačene temperature nekih objekata.

Kakav grafički prikaz se dobiva?

→ Grafički prikaz je učenicima nepoznata krivulja.

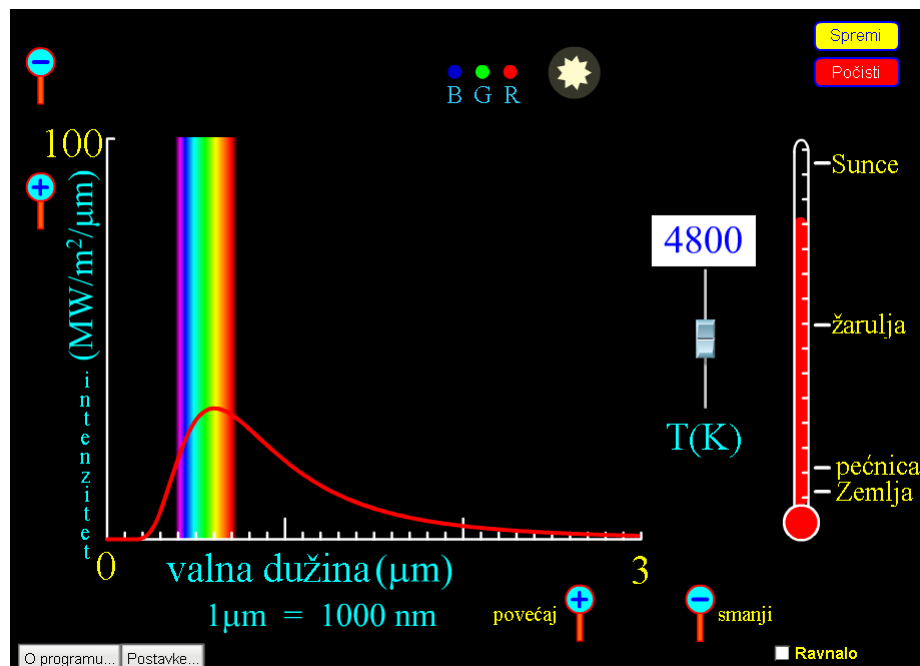
Što predstavljaju ove dugine boje? Zašto se one tu nalaze?

→ To je područje vidljivog spektra.

Detektira li se ikakvo zračenje na temperaturi od 300 K? Kako to znate? Čemu odgovara ta temperatura? Koliko iznosi temperatura od 300 K u Celzijevim stupnjevima?

→ Na temperaturi od 300 K nema nikakvog grafičkog prikaza.

→ Temperatura od 300 K odgovara temperaturi Zemlje i to je otprilike 27°C (slika 4.2).



Slika 4.1: Izgled simulacije Zračenje crnog tijela

Ne možemo reći da nema zračenja, nego je intenzitet jako mali pa se ne vidi na grafu. Ako promijenimo skalu na y-osi, vidjet ćemo grafički prikaz.

Povećamo temperaturu na nekoliko tisuća kelvina. Kakva je ovisnost intenziteta o valnoj duljini?

→ Učenici opisuju krivulju.

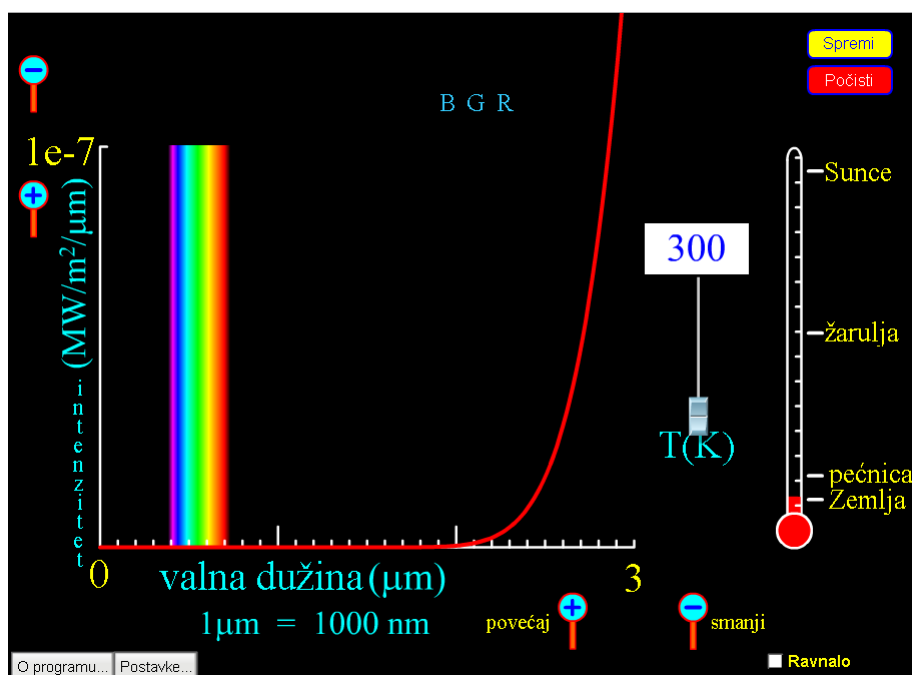
→ Pojavljuje se grafički prikaz.

Ima li krivulja koju ste dobili neke karakteristične točke?

→ Ima maksimum.

Što očekujete da će se dogoditi ako još više povećavamo temperaturu?

→ Pretpostavljam da će učenici reći da će se krivulja „podizati prema gore“, ali da neće reći da će tjeme krivulje „pomicati“ ulijevo.



Slika 4.2: Izgled simulacije Zračenje crnog tijela pri temperaturi 300 K

Polako povećavam temperaturu. Zapišite svoje zapažanje.

→ Vrh krivulje se povećanjem temperature pomiče ulijevo.

→ Povećanjem temperature se maksimalna valna duljina smanjuje (slika 4.3).

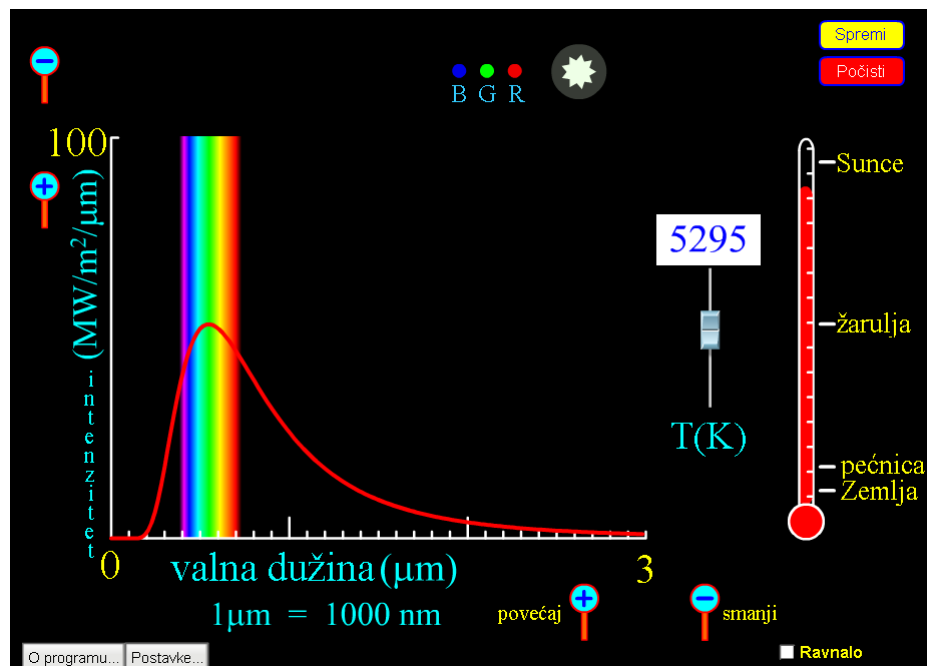
Kako možemo istražiti postoji li neka veza između maksimalne vrijednosti valne duljine i temperature na kojoj se ona postiže?

→ Za nekoliko vrijednosti temperature očitat ćemo maksimalnu vrijednost valne duljine.

Povećavam temperaturu, a učenici očitavaju maksimalnu vrijednost valne duljine za tu temperaturu i unose ih u tablicu. Dovoljno je da svaki učenik ima četiri vrijednosti. Ako je potrebno, uputim ih da traže količnik i umnožak temperature i pripadne maksimalne vrijednosti valne duljine.

Uočavate li nekakvu pravilnost za količnik?





Slika 4.3: Izgled simulacije Zračenje crnog tijel prilikom povećanja temperature

→ Ne uočavamo.

Uočavate li neku pravilnost za umnožak?

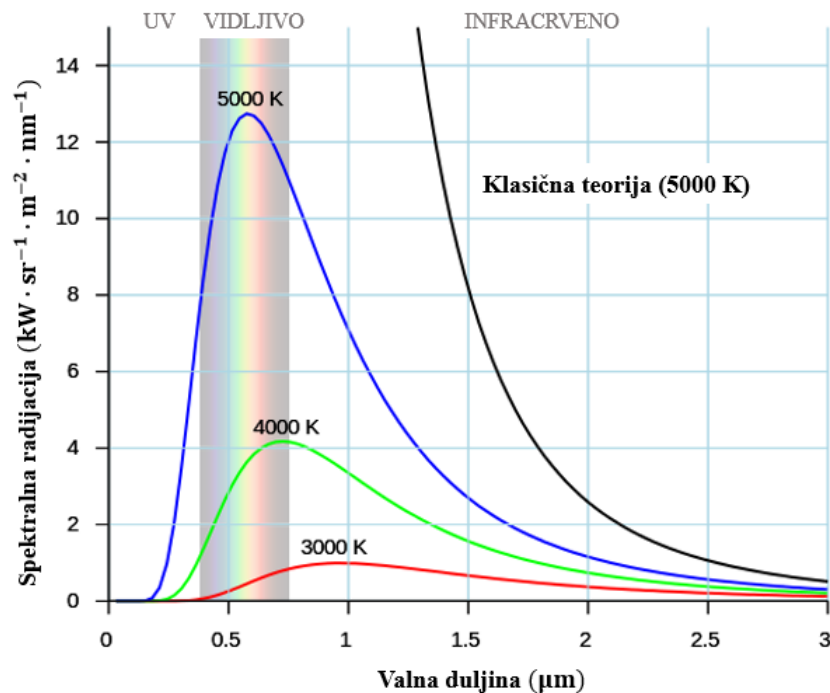
→ Uočavamo. Umnožak temperature i maksimalne vrijednosti valne duljine za tu temperaturu su jednake nekoj konstanti.

Koliko iznosi konstanta koju ste dobili?

→ Konstanta iznosi  $2.9 \cdot (10)^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ .

To je uočio i njemački fizičar Wilhelm Wien, pa se taj zakon prema njemu i naziva Wienov zakon.

Kako bih s učenicima raspravila „ultraljubičastu katastrofu“ pokažem im sljedeću sliku (slika 4.4).



Slika 4.4: Ovisnost spektralne radijacije o valnoj duljini

Ovu pojavu su istraživali i neki fizičari prije Wiena i Lummera. To su bili Britanci Rayleigh i Jeans. No, oni su problem zračenja crnog tijela promatrali s teorijskog stajališta i zaključili su da bi grafički prikaz trebao biti onakav kako je naznačeno na slici (pokažem na krivulju desno).

Što prikazuje ova plava krivulja? Je li vam poznata?

→ Učenici uočavaju da su tu krivulju već vidjeli u simulaciji i da je to zapravo grafički prikaz zračenja crnog tijela.

U kojem području valnih duljina je odstupanje ovih dviju krivulja manje, a gdje je najveće?

→ Manje odstupanje je za valne duljine koje odgovaraju infracrvenom zračenju i za valne duljine koje su veće od njih.

→ Najveće odstupanje je za male valne duljine, tj. za područje ljubičastog i ultraljubičastog zračenja.

S obzirom da je najveća razlika teorijskih i eksperimentalnih rezultata za zračenje crnog tijela bila u području ultraljubičastog zračenja, ta kontradikcija je dobila i svoj naziv – *ultraljubičasta katastrofa*.

Ti problemi su zaokupili i berlinskog profesora Maxa Plancka koji je pronašao empirijsku jednadžbu koja izvrsno opisuje zračenje crnog tijela. Međutim, kad je pokušao izvesti tu jednadžbu pomoću temeljnih načela klasične fizike, uvidio je da je to nemoguće. Da bi dokazao svoj zakon, uveo je dvije pretpostavke: energija nije kontinuirana, tj. dolazi u *paketićima (kvantima)* i energija *kvanta* proporcionalna je frekvenciji zračenja. Planck je bio nezadovoljan jer u klasičnoj fizici nije nikako mogao pronaći argumente za svoje pretpostavke, ali je ipak objavio svoje rezultate.

Što je zapravo u Planckovim pretpostavkama revolucionarno? U klasičnoj fizici čestica koja titra može poprimati kontinuirane vrijednosti energije. Planck je pretpostavio suprotno, da titrajuća čestica može emitirati ili apsorbirati energiju samo u sasvim malim, ali određenim iznosima koje je nazvao *kvantima*. Veličina kvanta energiji ovisi o frekvenciji kojom čestica titra:

$$E = h \cdot f, \quad (4.1)$$

gdje je  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Js. Konstanta  $h$  se, u čast Plancku, naziva Planckova konstanta.

S ovim pretpostavkama teorijski rezultati savršeno su se slagali s eksperimentalnima. No, to je također značilo i odstupanje od klasične fizike.

Lord Kelvin je potkraj 19. stoljeća izjavio da se (tadašnja) postojeća fizika čini poput čistog plavog neba na kojemu se nalaze još samo dva oblačića (zračenje crnog tijela i problem etera), ali da će i oni ubrzo nestati.

Iz ovih Planckovih pretpostavki, potrebnih za rješavanje problema zračenja crnog tijela, kasnije se razvila kvantna fizika, a iz problema etera se razvila specijalna teorija relativnosti.

U završnom dijelu sata učenicima možemo dati zadatke.

Zadatak 1. Žarulja s volframovom niti svijetli na  $2500^\circ \text{C}$ .

- Na kojoj valnoj duljini se emitira najviše snage?
- Objasnite zašto uporaba žarulje s volframovom niti nije energetski povoljna?

Zadatak 2. Snaga zračenja apsolutno crnog tijela temperature  $273^\circ \text{C}$  iznosi 1600 W. Kolika je snaga zračenja toga tijela na temperaturi  $0^\circ \text{C}$ ?

- 0 W
- 100 W
- 200 W
- 800 W.[7]

Zadatak 3. Kojoj valnoj duljini pripada najveća energija zračenja apsolutno crnog tijela koje ima temperaturu jednaku temperaturi ljudskog tijela, tj.  $37^{\circ}\text{C}$ ?[8]

# Poglavlje 5

## Fotoelektrični efekt

Iako mnogi nastavnici smatraju da je fotoelektrični efekt lagana tema kojoj ne treba posvetiti puno vremena, istraživanja su pokazala upravo suprotno. Učenici imaju mnogo poteškoća vezanih za fotoelektrični efekt, stoga mu je potrebno posvetiti barem dva školska sata. U prvom satu se učenici upoznaju sa samom pojavom i dolaze do zaključka da ju, s dosadašnjim znanjem iz fizike, ne mogu objasniti. Uz pomoć nastavnika dolaze do ideje *kvanata* energije. U drugom školskom satu učenici uz pomoć simulacije istražuju o čemu ovisi fotoefekt. Mijenjaju razne parametre i zaključuju kako oni utječu na tu pojavu.

### 5.1 Fotoelektrični efekt (1)

POKUS „Elektroskop i UV-lampa“

Na stolu se nalaze elektroskop, žarulje različite snage (npr. 40 W i 100 W), UV-lampa (slika 5.1), komad stakla, polivinilni štap i krpa. Na pločici elektroskopa nalazi se aluminijska folija čiji je veći dio vertikalno postavljen tako da ju je lako osvijetliti (slika 5.2).

Elektroskop negativno nabijem tako da otklon kazaljke bude jasno vidljiv svim učenicima. Što očekujete da će se dogoditi ukoliko nabijeni elektroskopu osvijetlim običnom žaruljom?

→ Neće se dogoditi ništa.

Učenicima demonstriram pokus. Što uočavate?

→ Učenici potvrđuju svoje predviđanje.

Bi li se išta promijenilo kad bi uzeli žarulju veće snage? Učenicima to demonstriram.



Slika 5.1: UV-lampa



Slika 5.2: Elektroskop s aluminijskom folijom

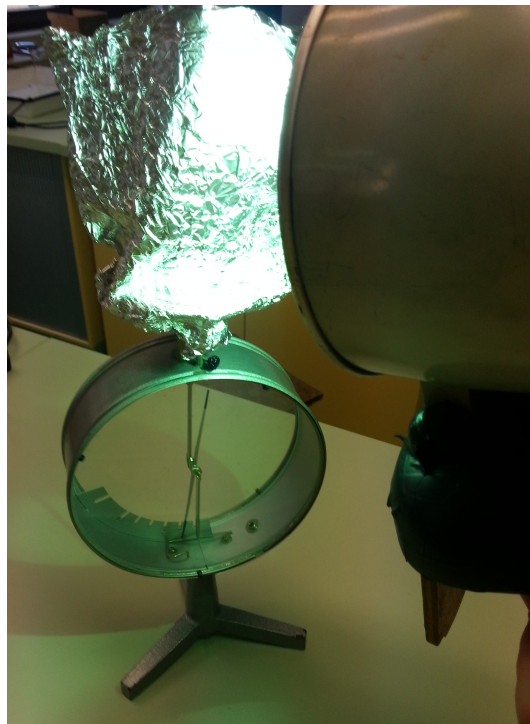
→ Učenici uočavaju da se opet ništa nije dogodilo.

Što će se dogoditi ako elektroskop osvjetlim UV-lampom? Učenicima to demonstriram (slika 5.3). Što ste uočili?

→ Otklon kazaljke se smanjio.

Što to znači?

→ Elektroni su otišli s elektroskopa.



Slika 5.3: Izbijanje elektrona pomoću UV-lampe

Ponovno negativno nabijem elektroskop. Između UV-lampe i aluminijske folije stavim staklo. Što uočavate? Odlaze li i sada elektroni?

→ Učenici uočavaju da se otklon kazaljke ne mijenja, odnosno da elektroni ne odlaze s elektroskopa.

Maknem staklo. Što sad uočavate?

→ Učenici uočavaju da se smanjuje otklon kazaljke elektroskopa, tj. elektroni odlaze.

Ponovno vratim staklo između UV-lampe i aluminijske folije. Učenici uočavaju da prestaje izbijanje elektrona. Što zaključujete? Koja je uloga stakla u ovom pokusu?

→ Staklo zaustavlja izbijanje elektrona.

Što je, dakle, zaslužno za napuštanje elektrona s površine metala?

→ UV-zračenje. Učenici se vjerojatno neće odmah sjetiti da staklo apsorbira UV- zračenje, pa ću ih na to podsjetiti kroz raspravu.

Potamni li vam ten kad se ljeti vozite u automobilu zatvorenih prozora? Kad će vam koža potamniti?

→ Ne potamnimo. Potamnit ćemo kad neki dio tijela stavimo direktno na sunce, npr. ruku na prozor.

Koja je uloga stakla?

→ Sprečava UV-zračenju da dođe do nas.

Što staklo čini sa zračenjem koje dolazi od UV-lampe?

→ Upija ga.

Skicirajte pokus koji smo izveli i zapišite zapažanja.

→ Učenici skiciraju pokus i bilježe zapažanja.

Ova pojava izbijanja elektrona s površine metala uz pomoć svjetlosti naziva se fotoelektrični efekt ili skraćeno fotoefekt.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Zašto dolazi do fotoelektričnog efekta i o čemu on ovisi?

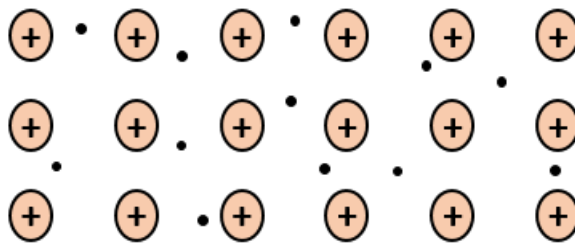


Kako su elektroni smješteni u kristalnoj rešetci? Skicirajte u bilježnicu neku pravilnu kristalnu rešetku i naznačite elektrone.

→ Postoje slobodni elektroni u kristalnoj rešetci (slika 5.4).

Mogu li slobodni elektroni napustiti kristalnu rešetku? Kako?

→ Slobodni elektroni mogu napustiti kristalnu rešetku ako dobiju dovoljno energije za to.



Slika 5.4: Grafički prikaz kristalne rešetke metala

Kako nazivamo tu energiju kojom je elektron vezan za kristalnu rešetku?

→ Energija vezanja.

Je li za svaki metal energija vezanja jednakog iznosa?

→ Nije, svaki metal ima *svoju* energiju vezanja.

Zapravo možemo zamisliti da se elektron nalazi u potencijalnoj jami. To slikovito možemo prikazati na sljedeći način: u jami se nalaze nogometne lopte koje predstavljaju elektrone i jedan nogometaš (slika 5.5).

Može li lopta sama izaći iz jame? Što je potrebno napraviti?

→ Lopta ne može sama izaći iz jame. Nogometaš ju može *ispucati* prema gore.

Ako se lopta nalazi na dubini  $h$ , kolika mora biti minimalna energija udarca ako želimo



Slika 5.5: Nogometaš ispuca lopte iz jame na dubini  $h$  - analogija s elektronima u kristalnoj rešetci

da lopta izađe iz jame?

→ Minimalna energija udarca mora biti jednaka  $mgh$ , gdje je  $m$  masa lopte.

Što će se dogoditi ako nogometaš jače ispuca loptu i ona dobije energiju veću od  $mgh$ ?  
U što će se pretvoriti taj ostatak energije?

→ Ostatak energije će se pretvoriti u kinetičku energiju lopte i ona će se nakon izlaska iz jame gibati nekom brzinom.

Kako to možemo zapisati?

$$\rightarrow E_{udarca} = mgh + E_k$$

Što će se dogoditi ako je jama dublja (slika 5.6)? Hoće li za izlazak lopte iz jame biti potrebna ista energija kao prije?

→ Neće. Bit će potrebna veća energija,  $mgh_1$ .

Vratimo se na elektrone koristeći ovu analogiju. Što je potrebno da elektron napusti metal?

→ Potrebno je elektronu dati energiju koja je barem jednaka energiji vezanja tog metala.

Tu energiju nazivamo *izlazni rad*.

Vratimo se na pokus s početka sata. S obzirom da smo rekli da je elektronima potrebno do-



Slika 5.6: Nogometaš ispucava lopte iz jame na dubini  $h_1$  - analogija s elektronima u kristalnoj rešetci

vesti energiju da napuste metal, odakle im je došla energija kad smo pločicu elektroskopa obasjali UV-lampom?

→ Od svjetlosti lampe, tj. od elektromagnetskog zračenja.

Jesu li sve lampe kojima smo obasjavali elektroskop izbile elektrone s površine metala? Koja je to uspjela napraviti?

→ Nisu sve lampe uspjele izbiti elektrone s površine metala. Samo smo s UV-lampom imali takve rezultate.

Koja je razlika između ultraljubičaste i vidljive svjetlosti prouzročila da je ultraljubičasta svjetlost uspjela izbiti elektrone, a vidljiva svjetlost nije?

→ Pretpostavljam da će učenici reći da sva zračenja nemaju jednaku energiju koju predaju elektronima u metalu.

To pitanje je mučilo fizičare krajem 19. stoljeća, kad je fotoelektrični efekt otkriven. Oni su ovu pojavu promatrali sa stanovišta klasične fizike.

Ustanovljeno je da je svjetlost elektromagnetski val kojega karakterizira intenzitet i valna duljina (tj. frekvencija).

Na koji način su povezani energija vala i njegova amplituda titranja?

→ Energija je proporcionalna kvadratu amplitude titranja vala.

Kako su povezani energija i intenzitet?

→ To su proporcionalne veličine.

Što su onda fizičari pretpostavljali da će se dogoditi kad se povećava intenzitet svjetlosti kojom se obasjava metal?

→ Povećava li se intenzitet svjetlosti kojom se obasjava metal, elektroni dobivaju dovoljno energije da napuste metal.

Što pokazuje pokus?

→ Ako nema izbijanja elektrona, povećanje snage izvora (zamjena žarulje od 40 W žaruljom od 100 W) nije prouzročilo fotoefekt.

A što su fizičari očekivali da će se dogoditi ako metal obasjavamo svjetlošću duže vrijeme?

→ Nakon dovoljno vremena, elektron nakupi dovoljno energije kako bi izašao iz metala. Dakle, fotoefekt bi se trebao dogoditi i kod svjetlosti manjeg intenziteta, samo bi kasnio.

Ukoliko učenici ne budu znali odgovor na ovo pitanje ispričat ću im analogiju s valovima i stijenom. Kad veliki val prilikom olujnog nevremena udari u stijenu, moguće je da ju odvali. Međutim, kad mali val udari u stijenu, nema dovoljno energije da ju odvali. Ali, ako mali val dovoljno dugo udara u stijenu, ipak će ju uspjeti odvaliti. Na isti način su fizičari očekivali da će se prilikom obasjavanja metala svjetlošću manjeg intenziteta dogoditi fotoefekt, ali nešto kasnije, tek kad elektron nakupi dovoljno energije za izlazak iz metala. Pokusi nisu potvrdili ova teorijska predviđanja.

Što su fizičari očekivali sa stajališta klasične fizike krajem 19. stoljeća? Zašto?

→ Sa stanovišta klasične fizike frekvencija svjetlosti nije trebala imati nikakav utjecaj, jer je za izbijanje elektrona bitna samo energija, tj. intenzitet svjetlosti koji je u uskoj vezi s amplitudom, a ne s frekvencijom.

Lennard je istraživao ovisnost fotoelektrične struje o raznim parametrima i utvrdio da za frekvencije koje su niže od neke kritične frekvencije, fotoelektrične struje uopće nema, tj. nema izbijanja elektrona.

Rješenje je ponudio Albert Einstein. On je na svjetlost primijenio ideju o kvantiziranosti koju je Planck koristio kod objašnjenja zračenja crnog tijela. Pretpostavio je da se svjetlost sastoji od kvantata energije (fotona). Energija fotona je određena izrazom  $E = h \cdot f$ .

Također je pretpostavio da jedan foton međudjeluje s jednim elektronom i da se fotoefekt događa odmah, odnosno bez zakašnjenja.

Foton prodire u površinski sloj metala. Tijekom sudara fotona s elektronom u kristalnoj rešetci foton svu svoju energiju preda elektronu.

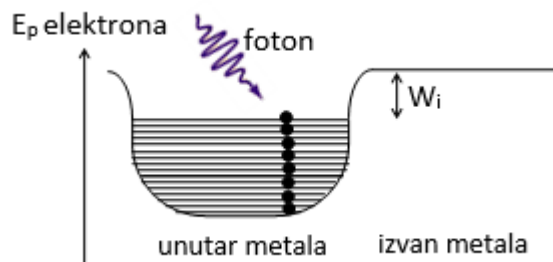
Na što će elektron u metalu potrošiti energiju koju dobije od fotona?

→ Da savlada energiju vezanja u tom metalu, tj. izlazni rad.

Što ako foton elektronu preda energiju veću od energije vezanja u tom metalu? Na što će elektron potrošiti preostalu energiju?

→ Na gibanje, tj. pretvorit će se u kinetičku energiju.

Ovu situaciju možemo prikazati slično kao s nogometašem u jami. Nogometaš je foton, a nogometne lopte su elektroni (slika 5.7).



Slika 5.7: Shematski prikaz fotoelektričnog efekta

Izlazni rad možemo označiti s  $W_i$ , kinetičku energiju s  $E_k$ , a energiju koju donosi foton  $E_{fotona}$ . Što se događa s energijom koju foton preda elektronu?

→ Jedan dio te energije utroši se na izlazni rad, a ostatak se pretvori u kinetičku energiju.

Kako možemo matematički zapisati taj odnos kinetičke energije, izlaznog rada i energije koju foton predaje elektronu?

$$\rightarrow E_{fotona} = E_k + W_i$$

$$\rightarrow h \cdot f = E_k + W_i$$

Ovo je zapravo zakon očuvanja energije.

Obično govorimo o maksimalnoj kinetičkoj energiji, jer promatramo elektrone koji imaju najvišu energiju u metalu. U analogiji s loptama koje se nalaze u jami, to bi bile najviše lopte, crno označene na slikama 5.5 i 5.6.

U završnom dijelu sata učenicima možemo dati zadatke.

Zadatak 1. Kako se može povećati maksimalna kinetička energija izbačenih elektrona pri fotoelektričnom efektu?

- a) Smanjivanjem frekvencije upadnog zračenja.
- b) Povećanjem frekvencije upadnog zračenja.
- c) Povećanjem valne duljine upadnog zračenja.
- d) Povećanjem intenziteta upadnog zračenja. [9]

Zadatak 2. Svjetlost određenoga intenziteta pada na metal čiji je izlazni rad 2 eV. Izbijeni elektroni imaju maksimalnu kinetičku energiju 1 eV. Intenzitet svjetlosti poveća se dva puta. Kolika će biti maksimalna kinetička energija izbijenih elektrona?

- a) 0.5 eV,
- b) 1 eV,
- c) 2 eV,
- d) 3 eV.[10]

Zadatak 3. Fotoni energije 9 eV dolaze na metalnu pločicu zbog čega iz nje izlaze elektroni kinetičke energije 6 eV. Kolika je kinetička energija elektrona koji izlaze iz te metalne pločice ako na nju dolaze fotoni energije 18 eV?

- a) 6 eV,
- b) 9 eV,
- c) 12 eV,
- d) 15 eV.[11]

Zadatak 4. U tablici su navedene vrijednosti izlaznog rada za nekoliko metala.

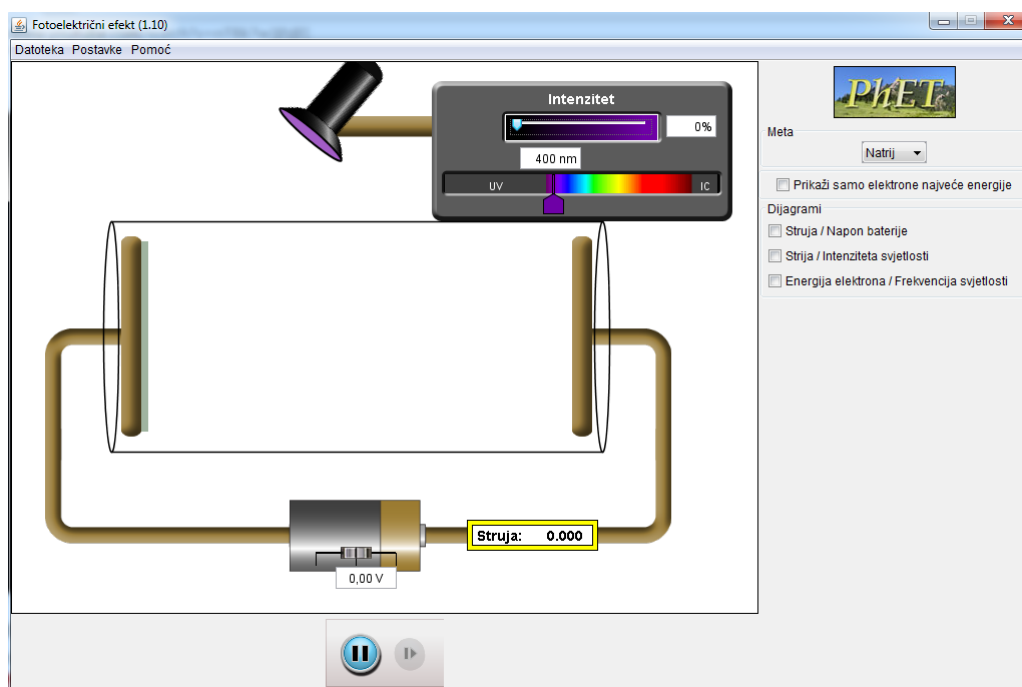
- a) Poredajte ih od najmanjeg prema najvećem s obzirom na to kojemu je potrebna veća energija za oslobađanje elektrona. Objasnite.
- b) Za svaki metal izračunajte graničnu valnu duljinu pri kojoj se događa fotoelektrični efekt. Kod kojih metala vidljiva svjetlost izbija elektrone?

Metal	Izlazni rad (eV)
Natrij	2.27
Cezij	1.89
Bakar	4.47
Kalij	2.15
Cink	3.74

Tablica 1. Izlazni rad za neke metale

## 5.2 Fotoelektrični efekt (2)

Učenicima upalim računalnu PhET simulaciju pod nazivom *Fotoelektrični efekt* (slika 5.8).

Slika 5.8: Izgled simulacije *Fotoelektrični efekt*

Dvije metalne ploče u vakuumu priključene su na promjenljivi istosmjerni napon. Svjetlost promjenljive valne duljine i intenziteta osvjetljava jednu ploču. Mjeri se struja između ploča. U izborniku sa strane može se odabrati neka druga vrsta metala. U okviru simulacije moguće je crtati razne grafove koje ćemo upoznati tijekom ovog sata.

Na početku sata učenicima samo pokazujem sve elemente simulacije.

Kako se mogu izbiti elektroni s lijeve ploče?

→ Metal treba obasjati svjetlošću.

Bateriju ostavim na 0 V i ploču obasjavam nekom svjetlošću dovoljne energije tako da se počnu izbijati elektroni. Kako nazivamo taj efekt?

→ Fotoelektrični efekt.

Što će se dogoditi ako povećamo napon na bateriji?

→ Elektroni će ubrzavati.

Stavim napon na bateriji na 0 V. Polako povećavam napon. Što uočavate?

→ Elektroni se brže gibaju.

Zašto se elektroni ubrzavaju?

→ Kada postoji neki napon između ploča, postoji električno polje i električna sila koja djeluje na elektrone.

Što će se dogoditi sa strujom ako povećavam napon?

→ Učenici će vjerojatno odgovoriti da će se struja povećavati.

Napon ponovno vratim na 0 V te ga postupno povećavam. Uputim učenike da sada gledaju iznos struje. Što se događa?

→ Struja je stalno istog iznosa.

Zašto se ne mijenja iznos struje?

→ Učenici iznose svoje ideje.

Što je struja?



→ Usmjereno gibanje elektrona.

O čemu ovisi iznos struje?

→ Iznos struje ovisi o količini naboja koji prođe kroz poprečni presjek u jedinici vremena.

Je li se povećanjem napona povećao broj elektrona koji je prošao poprečnim presjekom ove cijevi u jedinici vremena?

→ Nije, broj elektrona je ostao isti. Povećala se samo brzina gibanja elektrona.

Ovisi li struja o naponu u ovom slučaju?

→ Ne ovisi.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Kako na fotoelektrični efekt utječu frekvencija i intenzitet svjetlosti?

Kad pomičem klizač u lijevo, smanjuje se valna duljina svjetlosti. Što se pritom događa s frekvencijom?

→ Frekvencija se povećava.

Kako na fotoelektrični efekt utječe frekvencija svjetlosti?

→ Učenici iznose svoje pretpostavke.

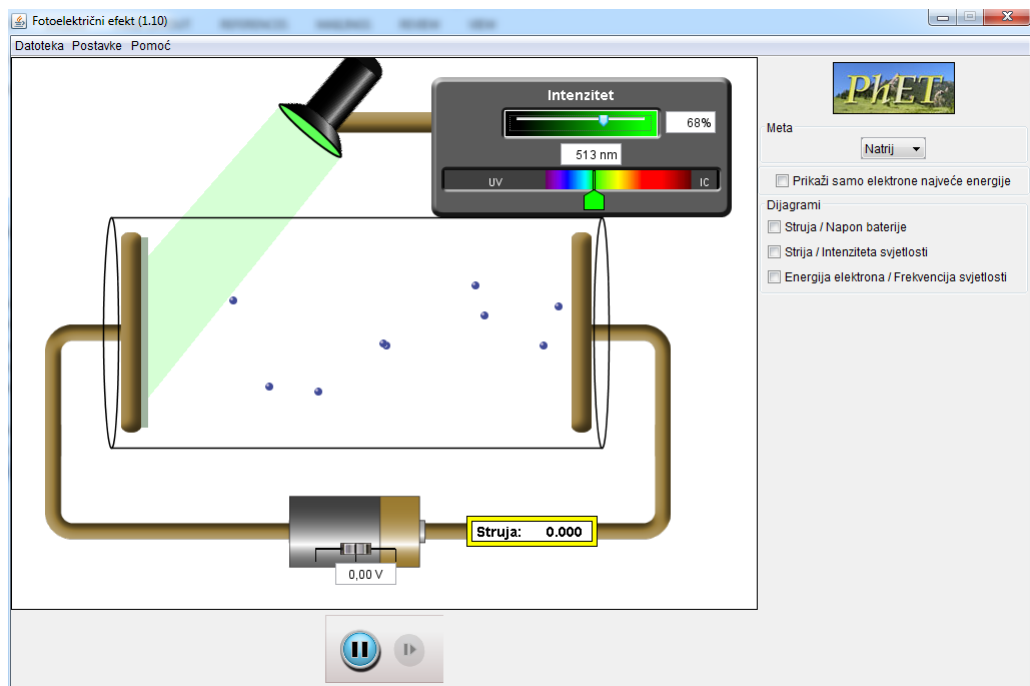
Stavim intenzitet na otprilike 50%. Polako pomičem klizač valne duljine svjetlosti od infracrvenog područja prema višim frekvencijama. Učenici uočavaju da se i dalje ništa ne događa. Kad klizač dođe do zelene svjetlosti pojave se elektroni (slika 5.9). Što se događa?

→ Svjetlost izbija elektrone iz metalne ploče.

Što će se dogoditi ako dalje povećavam frekvenciju svjetlosti?

→ Učenici iznose svoje pretpostavke.

Polako pomičem klizač prema još višim frekvencijama. Što se događa s elektronima?



Slika 5.9: U simulaciji *Fotoelektrični efekt* prikazan je izboj elektrona s natrijeve ploče zelenom svjetlošću

→ Elektroni se brže gibaju.

Ponovno vratim klizač u infracrveno područje i polako ga pomičem prema ultraljubičastom području. Zapišite što opažate i što možete zaključiti o utjecaju frekvencije na fotoefekt.

Svi učenici pišu opažanja i zaključke, a nekoliko ih pročita što su zapisali.

→ Fotoefekt se ne događa za sve frekvencije svjetlosti. Tek svjetlost zelene boje počne izbijati elektrone iz metala. Svjetlost viših frekvencija od zelene također izbija elektrone.

Kako biste nazvali tu frekvenciju svjetlosti prije koje nema fotoefekta, a nakon koje se fotoefekt događa?

→ Granična frekvencija.

Promijenim vrstu metala, intenzitet ostavim na oko 50% i klizač valne duljine pomičem

od infracrvenog prema UV-području. Što uočavate?

→ Fotoefekt se počeo događati kod neke druge frekvencije, tj. granična frekvencija za ovaj metal je različita.

Što možemo zaključiti?

→ Svaki metal ima drugačiju vrijednost granične frekvencije.

Prisjetimo se pokusa s prošlog sata s izbijanjem metalne pločice elektroskopa. Kojom svjetlošću smo elektrone uspjeli izbiti, a kojom nismo?

→ UV-svjetlošću smo uspjeli izbiti elektrone s pločice elektroskopa, a s običnim žaruljama nismo.

Jesu li frekvencije tih dvaju zračenja jednake? Kako to povezujete sa zaključkom o graničnoj frekvenciji?

→ Frekvencije tih dvaju zračenja nisu jednake. Aluminij od kojeg je načinjena folija koju smo osvjetljavali ima neku graničnu frekvenciju. Obične žarulje očito imaju frekvenciju manju od granične, pa se fotoelektrični efekt nije dogodio, a UV- lampa ima ili točno graničnu ili višu od nje pa je došlo do izbijanja elektrona.

Kako na fotoelektrični efekt utječe intenzitet svjetlosti?

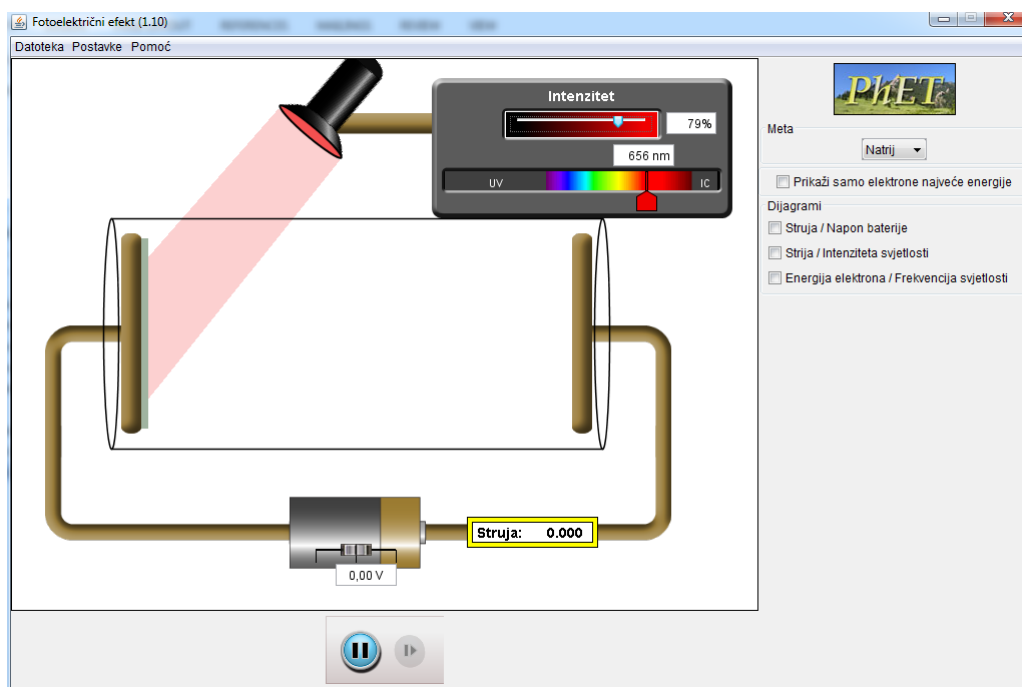
→ Učenici iznose svoje pretpostavke.

Vratim se na prvi metal kojeg smo promatrali u simulaciji (Na) i odaberem valnu duljinu svjetlosti za koju nema fotoefekta te povećavam intenzitet (slika 5.10). Što se događa kako povećavamo intenzitet? Zašto?

→ Povećanjem intenziteta ništa se ne događa jer metal obasjavamo svjetlošću frekvencije niže od granične.

Odaberem valnu duljinu svjetlosti za koju se događa fotoefekt, postavim intenzitet na oko 50%, te povećavam intenzitet. Što se događa kako povećavamo intenzitet? Zašto?

→ Brzina elektrona se nije povećala, samo ih je više. Ako povećamo intenzitet svjetlosti,



Slika 5.10: U simulaciji *Fotoelektrični efekt* metal je obasjan svjetlošću frekvencije niže od granične, a velikog intenziteta

više fotona dolazi na metal, pa mogu izbiti više elektrona.

Što se događa sa strujom ako povećavamo intenzitet svjetlosti? Zašto?

→ Struja se povećava jer se povećava broj izbijenih elektrona.

Zapišite što ste uočili i što možete zaključiti o utjecaju intenziteta svjetlosti na fotoefekt. Svi učenici pišu opažanja i zaključke, a nekoliko ih pročita što su zapisali.

Kako intenzitet svjetlosti utječe na fotoefekt?

→ Ako je frekvencija svjetlosti kojom obasjavamo metal manja od granične frekvencije tog metala, do fotoefekta neće doći ni za koji intenzitet. Ako je frekvencija svjetlosti jednaka ili veća od granične, onda će se fotoefekt dogoditi. Tada će se povećanjem intenziteta povećavati broj izbačenih elektrona, tj iznos struje.

Kako se gibaju elektroni kad ih svjetlost izbije iz metala? Zašto?

→ Elektroni se gibaju jednoliko pravocrtno, tj. stalnom brzinom jer na njih ne djeluje nikakva sila.

U strujnom krugu imamo i bateriju. Ona je za sada na 0 V. Kako to da je struja teče, ako je napon 0 V?

→ Neki elektroni koje svjetlost uspije izbiti imaju dovoljno energije da dođu do druge ploče te potekne struja.

Što će se dogoditi ako povećam napon baterije? Kako će se elektroni gibati?

→ Elektroni će se gibati jednoliko ubrzano.

Koliki rad izvrši električno polje na elektron dok se on giba od jedne ploče prema drugoj.

→  $W = q \cdot U$ .

Koliko iznosi kinetička energija elektrona kad dođe na drugu ploču?

→  $E_k = \frac{1}{2}mv_{max}^2 + q \cdot U$ .

Što će se dogoditi ako zamijenimo polove baterije?

→ Učenici iznose svoje pretpostavke.

Zamijenim polove baterije i stavim da je napon  $U = -0.4$  V. Kako se sada gibaju elektroni? Kakav je iznos struje?

→ Učenici uočavaju da elektroni teže dopiru do nasuprotne ploče.

→ Elektroni se gibaju jednoliko usporeno.

→ Struja se smanjuje. Nemaju svi dovoljno energije da dođu do druge ploče, pa se smanjuje njihov broj, tj. struja.

Još više povećavam napon u suprotnom smjeru, ali pazim da ne dođem do zaustavnog napona. Što se događa s elektronima?

→ Elektroni se gibaju sve sporije i sporije.

Kako se mijenja kinetička energija elektrona kada idu od jedne do druge ploče?

→ Kinetička energija se smanjuje.

Koliki rad izvrši električno polje na elektron dok se on giba od jedne do druge ploče ?  
Kakav je predznak tog rada?

→ Električno polje izvrši negativan rad  $W = -q \cdot U$ . Koliko iznosi kinetička energija elektrona kad dođe na drugu ploču?

$$\rightarrow E_k = \frac{1}{2}mv_{max}^2 - q \cdot U.$$

U kojem trenutku elektron ima energiju jednaku  $\frac{1}{2}mv_{max}^2$ ?

→ Kad napušta prvu ploču.

Dalje povećavam napon u suprotnom smjeru i dođem do zaustavnog napona. Tu stanem.  
Što se događa s elektronima?

→ Elektroni taman dođu do nasuprotne ploče i vrate se nazad.

Dakle, postoji neki napon koji zaustavlja gibanje elektrona. Najmanji napon između ploča koji uspijeva spriječiti elektrone koji imaju maksimalnu kinetičku energiju da dođu do druge ploče naziva se *zaustavni napon* i označava s  $U_z$ .

Što možemo odrediti mjereći zaustavni napon? Kako?

→ Mjereći zaustavni napon možemo odrediti maksimalnu kinetičku energiju elektrona.  
U slučaju zaustavnog napona elektron nema dovoljno energije da dođe do druge ploče.

$$\rightarrow 0 = \frac{1}{2}mv_{max}^2 - q \cdot U_z$$

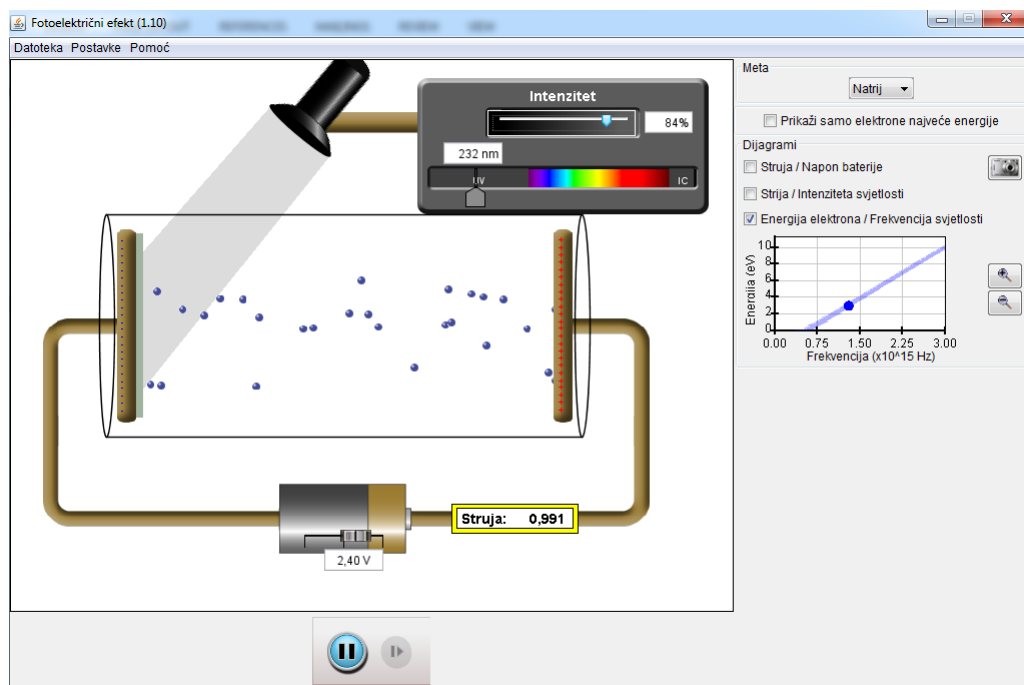
$$\rightarrow \frac{1}{2}mv_{max}^2 = q \cdot U_z$$

Na taj se način eksperimentalno određuje maksimalna kinetička energija elektrona. Dalje nećemo naglašavati da je riječ o maksimalnoj kinetičkoj energiji jer smo rekli da promatramo samo „površinske“ elektrone.

Skicirajte kako izgleda graf ovisnosti energije izbačenih elektrona o frekvenciji svjetlosti.

→ Učenici skiciraju svoje pretpostavke.

Na simulaciji uključim opciju crtanja tog grafa (slika 5.11). Mijenjam frekvenciju svjetlosti i učenici uočavaju traženi grafički prikaz te ga crtaju u bilježnice (ako se razlikuje od njihove pretpostavke).



Slika 5.11: U simulaciji *Fotoelektrični efekt* je uključena opcija crtanja  $E - f$  grafa

Promotrite dobiveni  $E - f$  graf. Gdje pravac siječe  $x$ -os? Koje je značenje te vrijednosti? Što primjećujete? Čemu odgovara granična frekvencija?

→ Pravac siječe  $x$ -os u vrijednosti granične frekvencije. Za manje frekvencije od granične nema fotoefekta, Ako smo u području iznad granične frekvencije, što je veća frekvencija, elektroni se brže gibaju, tj. imaju veću kinetičku energiju.

Ako je potrebno ponovim crtanje grafa na simulaciji, uz promatranje brzine elektrona na lijevoj strani simulacije.

Pravac produžite tako da siječe i y-os. Koja je općenita jednadžba pravca?

$$\rightarrow y = kx + l.$$

Koja energijska jednadžba vrijedi za fotoefekt?

$$\rightarrow h \cdot f = E_k + W_i.$$

Koja se od ovih energija nalazi na y-osi grafa?

→ Kinetička energija.

Koja veličina se nalazi na x-osi?

→ Frekvencija.

Napišite energijsku jednadžbu tako da onu veličinu koja se nalazi na y-osi ostavite s jedne strane, a sve ostalo stavite na drugu stranu jednadžbe.

$$\rightarrow E_k = h \cdot f - W_i.$$

Tu jednadžbu napišite ispod one općenite jednadžbe pravca. Što predstavlja  $h$ , a što  $W_i$ ?

→ Planckova konstanta je koeficijent smjera pravca, a izlazni rad je odsječak na osi ordinata.

U završnom dijelu sata učenici mogu istražiti kako izgleda graf ovisnosti kinetičke energije elektrona o frekvenciji upadne svjetlosti za neki drugi metal.

U istom koordinatnom sustavu skicirajte ovisnost energije elektrona o frekvenciji svjetlosti za natrij i cink (izlazni rad za Na je 2.27 eV, a za Zn 3.74 eV).

→ Učenici skiciraju svoje pretpostavke.

Na simulaciji prvo „fotografiram“ graf za Na (pritiskom na ikonu s fotografskim aparatom), a onda promijenim metal u cink, nacrtam graf za Na i Zn, „fotografiram“ i stavim ispod grafa za Što uočavate, kakvi su dobiveni pravci? Zašto?



→ Pravci su paralelni, jer im je koeficijent smjera Planckova konstanta  $h$ .

Kakvi su odsječci na osi ordinata za ta dva grafa? Zašto?

→ Odsječak na osi ordinata veći je za Zn jer on ima veći izlazni rad.

Kakvi su odsječci na osi apscisa za ta dva grafa? Zašto?

→ Odsječak na osi apscisa veći je za Zn jer on ima veću graničnu frekvenciju (u UV-području).

Kako su povezani granična frekvencija i izlazni rad?

→  $h \cdot f_g = W_i$ .

# Poglavlje 6

## Atomski spektri

Istraživanja su pokazala da je i ova tema učenicima vrlo kompleksna i da imaju jako puno miskoncepcija vezanih za nju. Nastavnici se s učenicima trebaju spustiti na mikro razinu, a u tomu im uvelike mogu pomoći računalne simulacije. Za početak je učenike potrebno upoznati sa spektrima, iako su ih vidjeli u svakodnevnom životu, ali možda nisu shvaćali odakle *dolaze*. So obzirom da su atomski spektri usko povezani s građom atoma, u drugom satu se pomoću računalne simulacije može proći kroz glavne povijesne modele atoma. U trećem satu učenici upoznaju energijske razine, opet pomoću računalne simulacije, te uočavaju na koji način nastaju spektri.

### 6.1 Spektri (1)

Učenicima dajem ručne spektroskope da promatraju svjetlost oko sebe. Gledaju Sunčevu svjetlost, svjetlost stolnih i stropnih lampi, itd.

→ Uočavaju da dobiju kontinuirani spektar kad spektroskop usmjere u Sunčevu svjetlost. Kada promatraju svjetlost nekih lampi osim kontinuiranog spektra dobiju i izražene neke linije.

Što u spektroskopu omogućuje da vidimo različite valne duljine?

→ U spektroskopima se nalazi prizma ili optička rešetka koji razlažu svjetlost na različite valne duljine.

O čemu ovisi izgled spektra?

→ Spektar ovisi o izvoru.

Cilj ovog dijela sata je da učenici uoče da izvori svjetlosti daju nekakve spektre i da se oni razlikuju. Sunčeva svjetlost ima kontinuirani spektar (boje se prelijevaju jedna u drugu, bez nekih prijelaza).

Neke lampe imaju i linijski spektar (dvije/tri linije nekih boja su naglašene).  
Je li svjetlost val? Koja se fizikalna veličina povezuje s valom?

→ Frekvencija, amplituda, period, valna duljina.

Znate li vezu valne duljine i frekvencije? Koja je?

$$\rightarrow \lambda = \frac{c}{f}.$$

Što je Einstein rekao, od čega se sastoji svjetlost?

→ Od *kvanata* energije.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Kako možemo valnu duljinu svjetlosti povezati s energijom fotona?

Ovdje imam diodu. Jeste li ikada čuli za diode? Znate li nešto o njima? Gdje se koriste diode?

→ Koriste se u raznim električnim uređajima (npr. perilicama za rublje i posuđe) gdje signaliziraju je li uređaj uključen ili isključen. U novije vrijeme koriste se kao izvori svjetlosti za rasvjetu, u TV-ekranima itd.

Kako radi LED-dioda? Što bi se dogodilo da ju sad spojim na neki napon? Što očekujete da će se dogoditi?

Spojim LED-diodu u propusnom smjeru i učenici vide da LED-dioda svijetli. Zatim je okrenem i učenici uočavaju da LED-dioda sad ne svijetli.

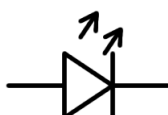
Je li to neka tvornička greška ili ju nisam dobro spojila?

→ Dobro sam spojila i nije nikakva tvornička pogreška. Zapravo, LED-diode imaju propustan i nepropustan smjer struje.

Što mislite da se dogodi kad LED-diodu u strujni krug spojim u propusnom, a što u nepro-

pusnom smjeru?

→ LED-dioda spojena u strujni krug u propusnom smjeru svijetli, a u nepropusnom smjeru ne svijetli. Simbol za diode prikazan je na slici 6.1.



Slika 6.1: Simbol za LED-diodu

Što mislite koje je propusni, a koje nepropusni smjer?

→ U smjeru strelice je propusni smjer.

Što se događa na mikroskopskoj razini? Koji naboji su nositelji struje u ovom strujnom krugu?

→ Elektroni.

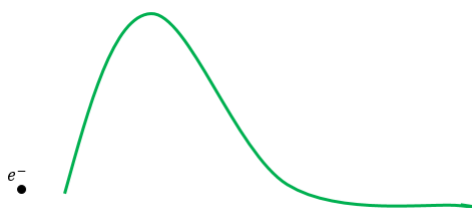
Promotrimo prvo nepropusni smjer LED-diode. U tom slučaju možemo zamisliti da se elektron, koji je nositelj struje, nalazi ispred neke prepreke. Na ploču nacrtam kuglicu koja predstavlja elektron i ispred njega veće *brdo* (slika 6.2). Kad LED-diodu u strujni krug uključimo u nepropusnom smjeru, što nacrtani elektron „želi“?

→ Elektron se „želi“ popeti na *brdo*.

Što elektronu treba da bi se popeo i prešao ovo *brdo*?

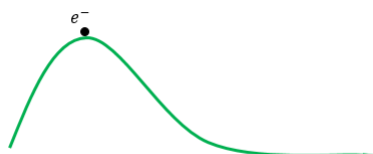
→ Elektronu treba velika energija.

Nacrtano *brdo* možemo smatrati energijskom barijerom. Uključivanjem LED-diode u nepropusnom smjeru elektron dobije neku energiju da se pokrene, ali nikad neće dobiti dovoljno energije da preskoči tu energijsku barijeru, i zato LED-dioda ne svijetli.



Slika 6.2: Grafički prikaz elektrona kada je LED-dioda spojena u nepropusnom smjeru

Promotrimo sada propusni smjer LED-diode. U tom slučaju možemo zamisliti da se elektron nalazi na vrhu brežuljka. Na ploči nacrtam brežuljak i kuglicu koja predstavlja elektron (slika 6.3).



Slika 6.3: Grafički prikaz elektrona kada je LED-dioda spojena u propusnom smjeru

Od kuda elektronu potencijalna energija? Koliko ona iznosi?

→ Elektron ima energiju zbog razlike potencijala (napona) na koji je spojen. Ta energija iznosi  $E = e \cdot U$

Što se događa s potencijalnom energijom elektrona kada se on skotrlja niz brežuljak?

→ Dolazi do pretvorbe energije.

U što se pretvori ta energija?

→ Električna potencijalna energija elektrona u LED-diodi prelazi u svjetlosnu energiju. Odnosno, kad se elektron „spušta“ niz *brežuljak* emitira foton.

Ono što će nas sad zanimati, jest koliko je energije potrebno da se elektron pokrene s

*brežuljka*, odnosno kolika je energija potrebna da LED-dioda taman zasvijetli.

Učenicima pokažem taj trenutak (mijenjanjem otpora na promjenjivom otporniku, mijenja se sjaj LED-diode).

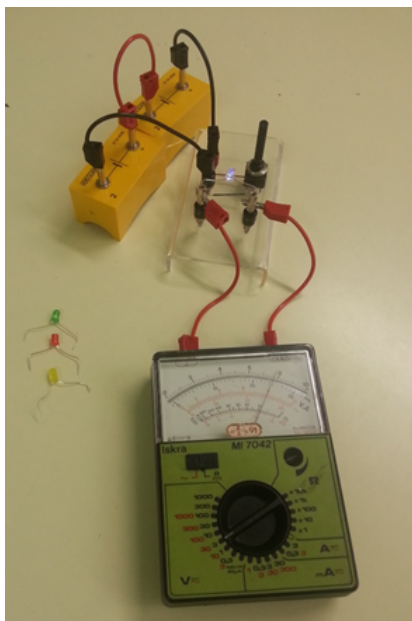
#### POKUS „Diode“

Učenici će se podijeliti u grupe. Svaka grupa će dobiti pribor za rad koji se sastoji od različitih LED dioda, postolja na kojemu je zalemljen otpornik u seriji s promjenljivim otpornikom, dva nosača s baterijama od 1.5 V, te stalaka za LED-diode (slika 6.4 i 6.5). Paralelno LED-diodama trebaju spojiti voltmetar.



Slika 6.4: Aparatura za pokus

Mijenjajući otpor na promjenljivom otporniku, učenici moraju pronaći trenutak kad će LED-dioda taman zasvijetliti. Trebaju očitati napon za koji se to događa te pomoću njega izračunati energiju fotona koje ta LED-dioda emitira. LED-diode su različitih boja i za svaku boju imaju zadanu valnu duljinu. Iz tih podataka učenici trebaju odrediti frekvencije fotona, te nacrtati  $E - f$  graf. Ove zadatke učenici rješavaju na radnom listu. Prvo trebaju izmjeriti napon pri kojemu svaka LED-dioda taman zasvijetli te pomoću njega izračunati energiju emitiranih fotona. Iz informacije o valnoj duljini trebaju izračunati frekvenciju. Dobivene vrijednosti trebaju grafički prikazati. Računanjem koeficijenta smjera dobivenog pravca uočavaju da je ona jednaka Planckovoj konstanti.



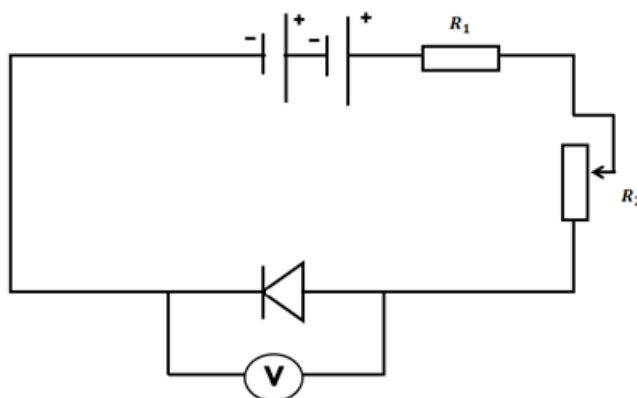
Slika 6.5: Spojeni pokus s plavom LED-diodom

*Radni list*

Kako ćete odrediti energiju fotona koje emitiraju LED diode?

Pogledajte shemu ispod. Stalni otpornik štiti diode od pregaranja. Za što služi promjenjivi otpornik?

Spojite strujni krug kao na slici 6.6. Za izvor uzmite dvije baterije od 1.5 V.



Slika 6.6: Shema strujnog kruga

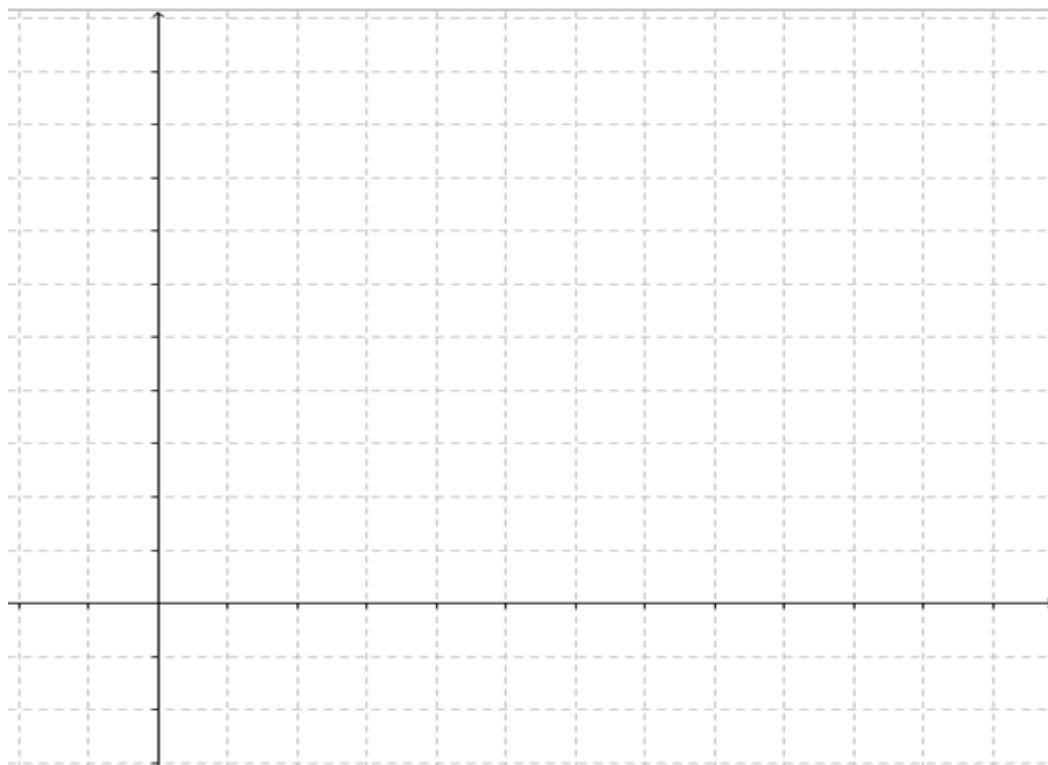
U tablici su napisane valne duljine crvene, plave, zelene i žute svjetlosti koje daju diode koje koristite. Izračunajte pripadne frekvencije.

Napravite mjerenja i odredite energiju fotona za različite LED diode.

Boja LED-lampice	Valna duljina / nm	Frekvencija / $10^{14}$ Hz	Napon / V	Energija / J	
plava	470				
zelena	563				
žuta	585				
crvena	650				



Nacrtajte  $E$ - $f$  graf (slika 6.7).



Slika 6.7: Prostor za crtanje  $E - f$  grafa

U kakvoj su ovisnosti energija i frekvencija fotona?

Kako je Einstein povezoao energiju i frekvenciju kvanata zračenja? Što bi bio nagib ovog pravca?

Odredite nagib pravca.

Možete li i iz tablice odrediti iznos te konstante? Upišite naziv u zaglavlje zadnjeg stupca u tablici. Odredite srednju vrijednost i maksimalno odstupanje.

U završnom dijelu sata učenicima se mogu dati zadaci.

Zadatak 1. Plavi i crveni monokromatski izvor imaju jednake snage. Koji izvor emitira više fotona?

- a) Plavi izvor emitira više fotona.
- b) Crveni izvor emitira više fotona.
- c) Oba izvora emitiraju isti broj fotona.

Obrazložite odgovor.

Zadatak 2. Koliko fotona u sekundi emitira žuta dioda valne duljine 600 nm i snage 0.05 W?

Zadatak 3. Odredite energiju u elektronvoltima kvanata elektromagnetskog zračenja sljedećih valnih duljina:

Vrsta zračenja	$\lambda$	$E / \text{eV}$
Gama zrake	10-3 nm	
Rendgenske zrake	0.1 nm	
Ljubičasta svjetlost	420 nm	
Zelena svjetlost	510 nm	
Crvena svjetlost	700 nm	
Mikrovalovi	2 cm	
Radiovalovi	250 m	

Tablica 2. Valne duljine za neke vrste zračenja

Komentirajte dobivene vrijednosti.

## 6.2 Modeli atoma

Pomoću riječi i crteža opišite što je atom i kako ga vi zamišljate.

→ Učenici će vjerojatno nacrtati planetarni model atoma, neki će možda nacrtati pozitivnu jezgru i elektronski oblak.

→ U ovom dijelu sata želim učenike motivirati za današnju temu.

Danas ćemo vidjeti kako se kroz povijest razvijala ideja atoma, koje su bile poteškoće, te koji su se modeli atoma razvili kako bi objasnili pojedine eksperimentalne rezultate.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Kako su se razvijali modeli atoma kroz povijest? Koji model atoma najbolje objašnjava eksperimentalne rezultate?

Sjećate li se tko je prvi uveo naziv atom i što je on smatrao da atom jeste?

→ Demokrit, oko 4./5. st. pr. Kr.

→ Atomi su malene kuglice od kojih se sastoje tvari i one se više ne mogu dijeliti na još manje čestice. (grč. *a-tomos* = nedjeljiv).

→ Nije poznavao strukturu atoma.

Ako atom promatramo kao biljarsku kuglu, što bi se dogodilo kad bi na atom došla neka svjetlost? Kako možemo zamisliti svjetlost?

→ Učenici iznose svoje pretpostavke. Svjetlost možemo zamisliti kao fotone, vrlo male čestice koje bi se odbile od atoma.

Pogledajmo u simulaciji što bi se dogodilo ako svjetlost pada na atome koji su tvrde biljarske kugle.

Pustim učenicima dio simulacije u kojemu je atom prikazan kao biljarska kugla (slika 6.8). Uočavaju da se svi fotoni koji padnu na atom odbiju i on ostane onakav kakav je bio.

Što mislite da je nedostatak ovog modela atoma?

→ Učenici iznose svoje pretpostavke.

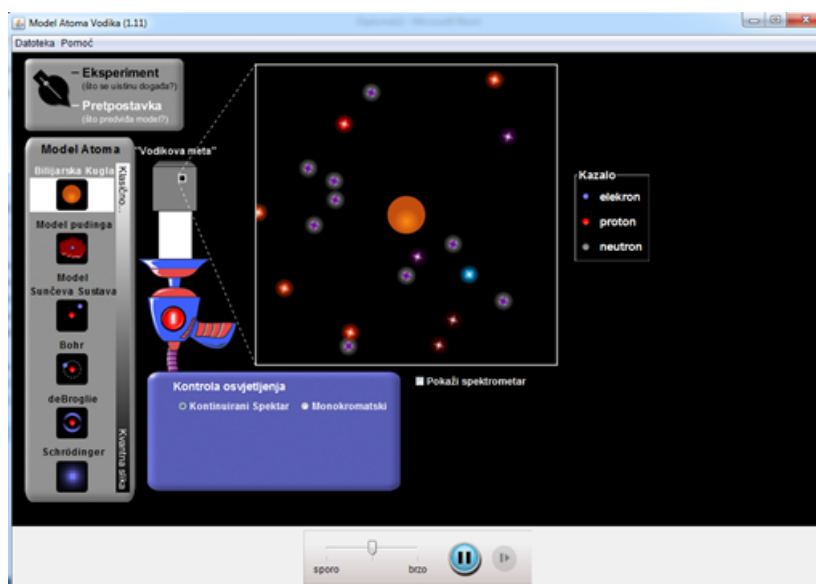
Fizičari su u drugoj polovici 19. stoljeća otkrili da katodne zrake prolaze kroz tanke metalne listiće. S obzirom da su atomi u metalu gusto zbijeni, katodne zrake su pri prolasku kroz listić morale proći kroz tisuće atoma.

Što su fizičari mogli iz toga zaključiti? (Je li se i dalje moglo misliti da kroz atome ništa ne prolazi?)

→ Fizičari su zaključili da atomi nisu neprobojni, jer su katodne zrake ipak prošle kroz njih.

Učenici zapisuju naziv modela i ono što su uočili, a to je upravo nedostatak ovog modela.

1897. godine J.J. Thomson je otkrio da se katodne zrake sastoje od sitnih negativno nabitih čestica, koje je nazvao elektroni. No, tada se znalo da je atom neutralan.



Slika 6.8: U simulaciji *Modeli vodikovog atoma* prikazan je model atoma kao biljarske kugle

Ako je Thomson otkrio da se unutar atoma nalaze negativne čestice, a atom je neutralan, koji zaključak je mogao iz toga izvesti?

- Unutar atoma se nalazi i pozitivan naboj.
- Ukupan iznos pozitivnog naboja mora biti jednak ukupnom iznosu negativnog naboja da bi atom bio neutralan.

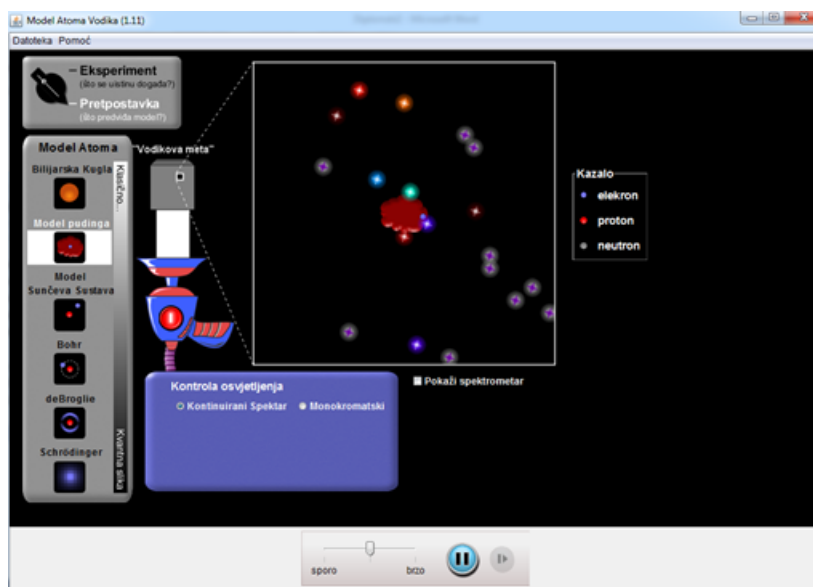
Thomson nije znao kako su pozitivni i negativni naboji raspoređeni u atomu. Kako biste vi na Thomsonovom mjestu zamislili model atoma?

- Možda učenici dođu na ideju sličnu Thomsonovoj.

On je predložio svoj model atoma: pozitivan naboj jednoliko ispunja cjelokupni prostor atoma, a u njemu se nalaze negativne čestice - elektroni. Taj model je slikovito uspoređen s grožđicama (elektroni) u tijestu (pozitivni naboj), pa je nazvan model *kolača s grožđicama*. (Britanci imaju božićni kolač koji je donekle sličan našem kuglofu s grožđicama). Što pretpostavljate da će se dogoditi ako na ovaj model atoma pustimo bijelu svjetlost?

- Učenici zapisuju naziv modela i svoju pretpostavku.

Na simulaciji prebacim na model *kolača s grožđicama* i pustim bijelu svjetlost (slika 6.9). Učenici uočavaju da se elektron može pobuditi i gibati unutar atoma. Pri tome elektron emitira neku „česticu“.



Slika 6.9: U simulaciji *Modeli vodikovog atoma* prikazan je model atoma kao *kolača s grožđicama*

Što je to Thomsonov model mogao objasniti, a da prethodni model nije mogao?

→ Elektroni se pobuđuju na titranje oko ravnotežnih položaja i pritom emitiraju elektromagnetske valove.

→ Učenici zapisuju glavnu Thomsonovu ideju te što je model mogao objasniti u odnosu na model biljarske kugle.

Thomson je izračunao frekvencije emitiranih valova i dobio da približno odgovaraju vidljivoj svjetlosti. Fizičari su u 19. stoljeću znali da tvari mogu emitirati elektromagnetske valove i detaljno su proučavali spektre različitih tvari.

Fizičari su nastavili istraživanja atoma bombardiranjem atoma snopovima  $\alpha$ -čestica.

Što je  $\alpha$ -čestica?

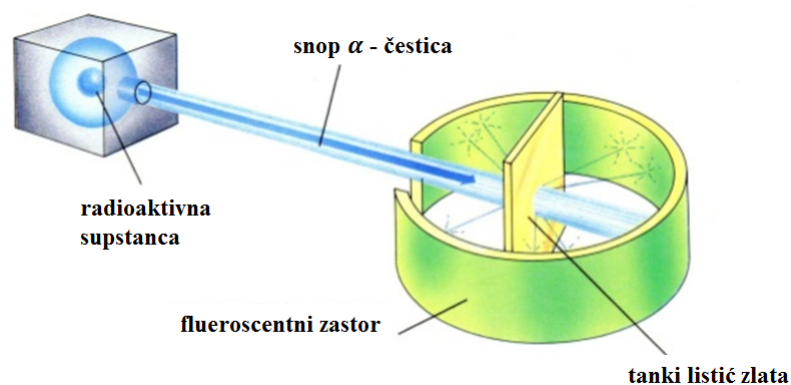
→  $\alpha$ -čestica je jezgra helija.

Kakvog je naboja  $\alpha$ -čestica?

→  $\alpha$ -čestica je pozitivnog naboja.

Znate li možda kako je Ernest Rutherford proveo eksperiment i što je dobio kao rezultat? (Možda će neki učenici već znati za Rutherfordove rezultate.)

Ernest Rutherford je snop  $\alpha$ -čestica usmjerio prema tankom listiću zlata i istraživao kako se pritom mijenja smjer gibanja  $\alpha$ -čestica. Uokolo je postavio fluorescentni zastor na kojemu je gledao tragove  $\alpha$ -čestica. Crtam Rutherfordov eksperimentalni postav na ploči (slika 6.10, [12]).



Slika 6.10: Rutherfordovo raspršenje

Ako je model *kolača s grožđicama* ispravan, kako bi se  $\alpha$ -čestica trebala ponašati kad putuje od izvora prema listiću zlata? Kako bi na njih utjecao pozitivni naboj koji je raspršen unutar cijelog atoma?

→ Pozitivan naboj bi  $\alpha$ -čestice malo usporio.

Bi li elektroni mogli utjecati na gibanje  $\alpha$ -čestica? Kakva je masa elektrona u odnosu na masu  $\alpha$ -čestica?

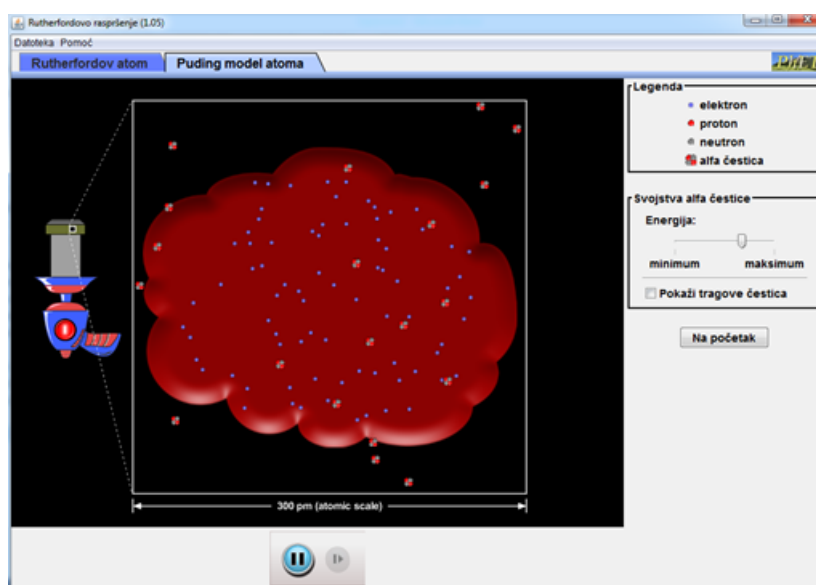
→ Masa elektrona je puno manja od mase  $\alpha$ -čestice, pa oni ne bi mogli znatno utjecati na putanju  $\alpha$ -čestice.

Kako bi se onda  $\alpha$ -čestice gibale kroz tanki listić zlata?

→  $\alpha$ -čestice bi gotovo nesmetano trebale proći kroz listić zlata. Njihova putanja bi se mogla samo vrlo malo promijeniti (za mali kut).

Pokrećem simulaciju koja prokazuje mikroskopsku sliku poznatog Rutherfordovog eksperimenta.

Prvo pokazujem atom kao model *kolača s grožđicama* (slika 6.11). Učenici uočavaju da ako se atom prikaže tim modelom, ništa značajno se neće dogoditi.



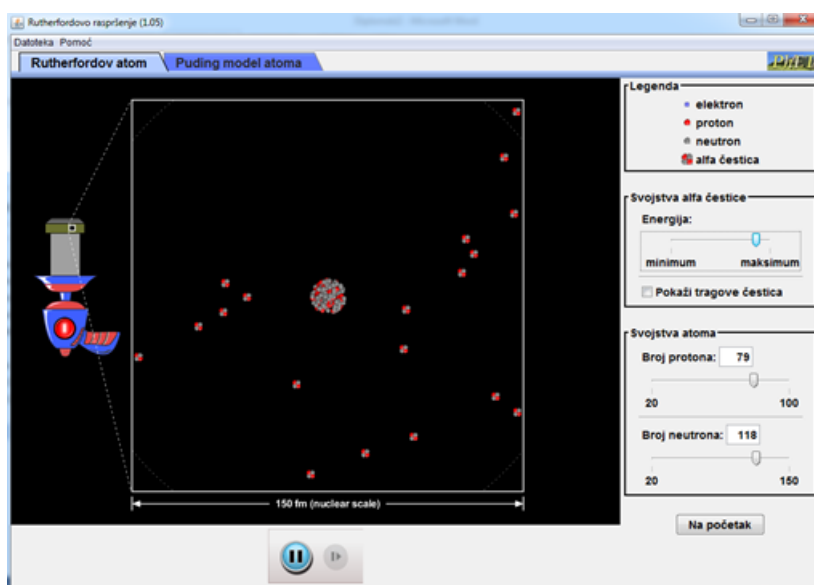
Slika 6.11: U simulaciji *Rutherfordovo raspršenje* prikazan je model atoma kao *kolača s grožđicama*

Smatrate li da je Rutherford upravo to uočio?

→ Nije (pretpostavljam će učenici ovo pretpostaviti, jer inače ne bi niti isticali ovaj eksperiment).

Pogledajmo što je Rutherford dobio u svom eksperimentu. Na simulaciji prebacujem na Rutherfordov atom. Puštam  $\alpha$ -čestice (slika 6.12).

→ Učenici promatraju što se događa. Uočavaju da se neke  $\alpha$ -čestice odbijaju pod velikim kutovima.



Slika 6.12: U simulaciji *Rutherfordovo raspršenje* prikazan je atoma kakvim su ga tada zamišljali

Što je Rutherford mogao zaključiti na temelju ovog eksperimenta o raspodjeli pozitivnog naboja u atomu?

→ Sav pozitivan naboj i gotovo cijela masa atoma zlata koncentrirani su u jednom sićušnom dijelu atoma, atomskoj jezgri.

Kakva sila djeluje između  $\alpha$ -čestice i jezgre, kad joj se  $\alpha$ -čestica dovoljno približi?

→ Odbojna električna sila; jača je što  $\alpha$ -čestica dođe bliže jezgri.

Model *kolača s grožđicama* nije mogao objasniti Rutherfordovo otkriće da je pozitivan naboj skoncentriran u jezgri. Kakav su model atoma fizičari prihvatili nakon ovih eksperimenata?



menata?

→ Fizičari su prihvatili planetarni model – atom se sastoji od pozitivno nabijene jezgre oko koje kruže elektroni, kao mali planeti.

No, postojale su određene poteškoće s tim modelom. Već se u 19. stoljeću znalo da svaka električno nabijena čestica koja ima akceleraciju, emitira elektromagnetsko zračenje. Što bi to značilo za elektron koji se giba po kružnoj putanji oko jezgre? Koju akceleraciju ima elektron ako se kružno giba?

→ Ima centripetalnu akceleraciju, što znači da stalno emitira elektromagnetsko zračenje.

Ako elektron stalno zrači, što se događa s njegovom kinetičkom energijom i brzinom?

→ Kinetička energija se smanjuje; brzina se smanjuje. Što bi se pritom događalo s polumjerom po kojem elektron kruži oko jezgre?

→ Polumjer bi se također smanjivao.

Kako bi zapravo izgledala putanja elektrona oko jezgre?

→ Elektron bi se gibao po spiralnoj putanji, sve bliže i bliže prema jezgri; u konačnici bi pao na nju.

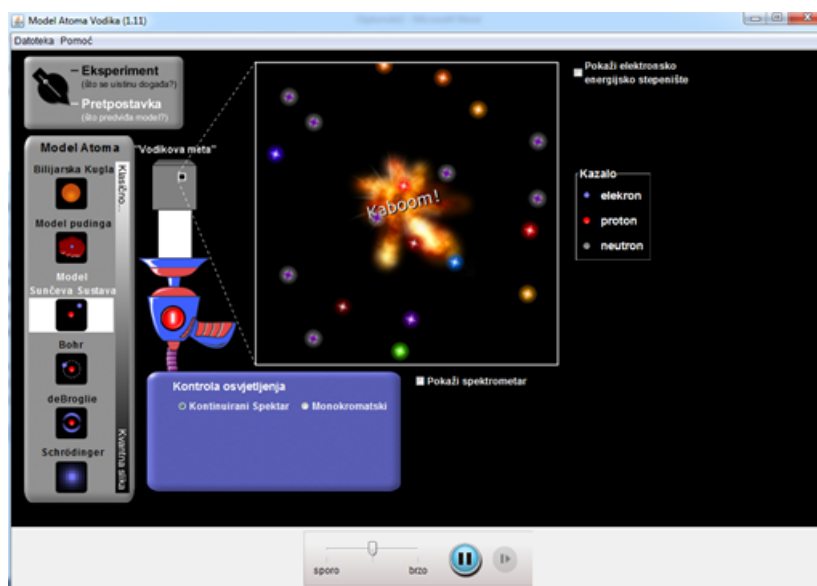
U simulaciji prebacujem na planetarni model atoma. Učenici uočavaju da elektron vrlo brzo pada na jezgru dolazi do eksplozije (slika 6.13). Kažem im da bi vrijeme života takvog atoma bilo oko 10-11 s. Slaže li se rezultat ovog modela s onim što uočavamo u prirodi?

→ Ne slaže se; atomi su stabilni.

Što mislite kakav bi spektar emitirao atom kod planetarnog modela?

→ Kako bi elektron padao na jezgru, polumjer putanje bi se kontinuirano smanjivao ( $f = \frac{v}{2r\pi}$ ), frekvencija elektromagnetskog zračenja bi se kontinuirano povećavala. Dakle spektar bi bio kontinuiran.

Kao što smo već spomenuli fizičari su tada već poznavali spektre različitih elemenata i znali su da su oni diskretni, a ne kontinuirani (tj. da svaki element emitira samo neke linije u spektru).



Slika 6.13: U simulaciji *Modeli vodikovog atoma* prikazan je planetarni model atoma

Učenici zapisuju kako su fizičari došli do planetarnog modela atoma i što je bio problem s tim modelom.

Danski fizičar Niels Bohr predložio je novi model. Znete li već nešto o Bohrovom modelu atoma?

→ Učenici su ovaj model već spominjali na kemiji, pa je moguće da već znaju neke korisne informacije.

Što se događalo s polumjerom putanje po kojoj je kružio elektron oko jezgre? Kako biste vi to riješili da se nalazite na Bohrovom mjestu?

→ Polumjer putanje po kojoj je elektron kružio oko jezgre se smanjivao. Očekujem da će učenici predložiti da se polumjer putanje ne mijenja.

Upravo je to Bohr i pretpostavio, da se elektron giba oko jezgre samo po određenim kružnim stazama. Svakoj stazi pripada jedno stacionarno stanje. Gibajući se po dopuštenoj stazi, tj. u stacionarnom stanju, elektron ne zrači elektromagnetske valove.

Dok izgovaram Bohrov prvi postulat, ujedno i na simulaciji pokazujem stacionarne putanje.

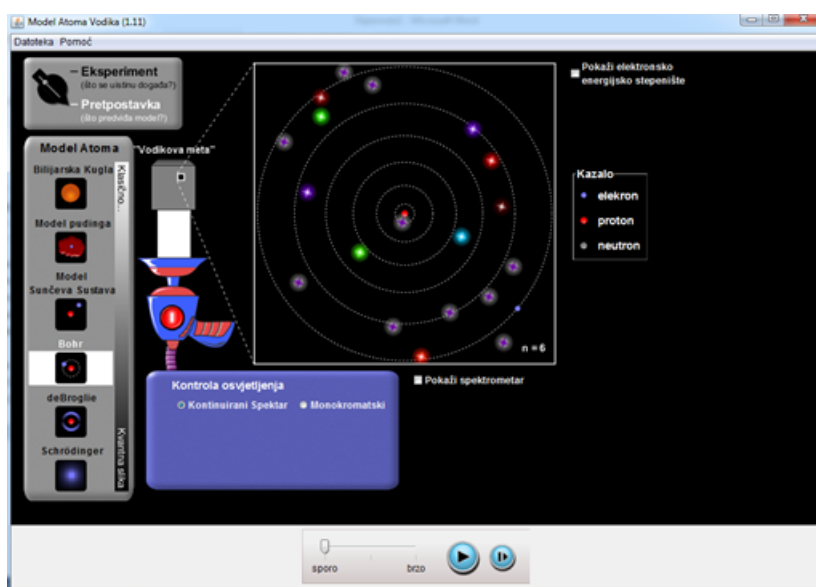
Može li atom ipak emitirati elektromagnetsko zračenje? Bohr je pretpostavio da zračenje

nastaje samo kad elektron prelazi s kružne staze više energije na kružnu stazu niže energije. Kako bismo mogli dovesti elektrone u stanje više energije?

→ Trebamo mu dovesti neku energiju – možemo ga zagrijavati ili mu dovesti svjetlosnu energiju.

Mi ćemo dovesti svjetlosnu energiju atomu. Na simulaciji pustim bijelu svjetlost na atom i usporim ju (slika 6.14). Kažem učenicima da prate elektron.

→ Uočavaju da je elektron u jednom trenutku *upio*, tj. apsorbirao foton i preskočio u višu putanju.



Slika 6.14: U simulaciji *Modeli vodikovog atoma* prikazan je Bohrov model atoma - elektron je apsorbirao foton

Što se dogodi s energijom fotona?

→ Foton predaje svoju energiju elektronu.

Što se događa s elektronom?

Elektron prelazi u putanju većeg radijusa i veće energije.

Što se dalje događa?

→ Učenici uočavaju da u određenom trenutku elektron otpusti, tj. emitira jedan foton i vrati se na nižu putanju.

Što se sada dogodilo s energijom elektrona? Zašto?

→ Energija elektrona se smanjila jer je elektron emitirao foton (elektromagnetsko zračenje).

Bohrov model ćete detaljno raditi na sljedećem satu, ali ovdje možemo spomenuti važan rezultat. Frekvencija emitiranog zračenja određena je relacijom  $E_{fotona} = hf = E_p - E_k$ , gdje je  $E_p$  energija početnog stanja, a  $E_k$  energija konačnog stanja. Kako je Bohrov model doprinio objašnjenju spektara?

→ Spektri dolaze od prelaska elektrona s više energijske razine na nižu, pri čemu se emitira foton. Budući da atomi mogu imati samo određene energije, energije emitiranih fotona mogu imati samo određene vrijednosti.

Bohrov model je dobro opisao nastajanje vodikovog spektra. Međutim ovaj model nije mogao objasniti spektre složenijih atoma.

Atomi su stabilni, tj. ne dolazi do padanja elektrona na jezgu. Kako Bohrov model to objašnjava?

→ Bohrov model ne objašnjava zašto je atom stabilan, već jednostavno tvrdi da je to tako.

→ Učenici zapisuju što je Bohrov model uspio objasniti, ali što je još uvijek bio problem.

Što je foton? Je li to čestica ili val? Tko ga je uveo?

→ Foton ima i valna i čestična svojstva. Uveo ga je Einstein.

Koji je de Brogliev doprinos fizici? Što je on predložio?

→ On je predložio da čestice tvari (npr. elektroni) imaju valna svojstva.

Ono što se de Broglie nadalje pitao jest kojim valom predstaviti elektron.

Zamislimo stojni val na opruzi. Može li se stojni val proizvesti za svaku frekvenciju?

→ Ne može. Stojni val se dobije sam za točno određenu frekvenciju.

Zamislamo sad elektron kao kružni stojni val. Crtam na ploči stojni val s puno čvorova i sa samo dva čvora (i trbuha).

Koji od ovih valova ima veću frekvenciju?

→ Val s puno trbuha i čvorova.

Koliko ovaj stojni val ima čvorova (trbuha)?

→ Dva.

Gdje bismo mogli reći da se elektron nalazi?

→ Na mjestu konstruktivne interferencije, na mjestu trbuha.

Može li ovaj elektron imati bilo kakvu frekvenciju, odnosno energiju?

→ Ne, elektron ima određene frekvenciju, tj. energiju.

U simulaciji prebacim na de Brogliev model atoma, učenici uočavaju da je elektron predstavljen stojnim valom (slika 6.15). Pogledajmo što se događa kad dovedemo energiju.

→ Učenici uočavaju da elektroni prelaze u pobuđena stanja gdje imaju više čvorova i trbuha tj. veću frekvenciju odnosno energiju. Pri povratku u stanje niže energije emitiraju fotone.

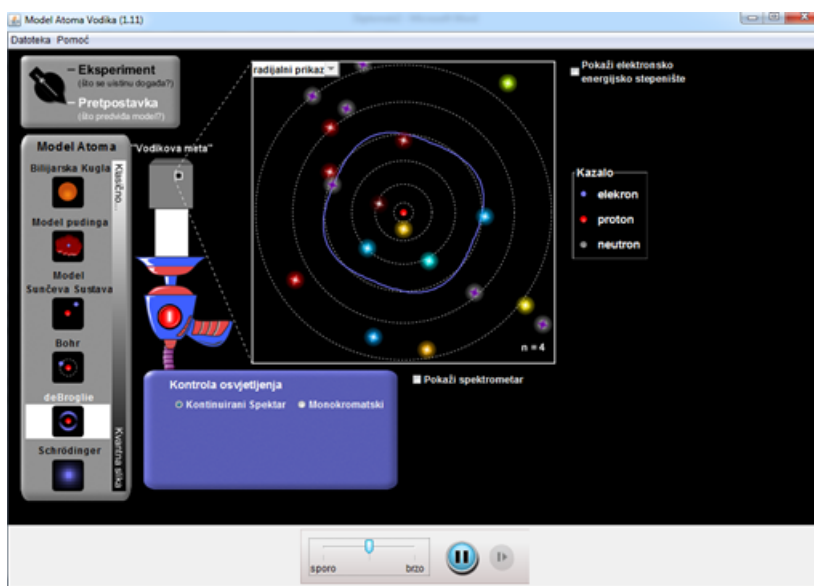
Koja je prednost de Broglieevog modela nad Bohrovim modelom?

→ I jedan i drugi model objašnjavaju spektar vodikovog atoma, ali de Broglieev model daje razlog za diskretne tj. točno određene energije elektrona.

No, i de Brogliev model je mogao objasniti samo spektar vodikovog atoma.

→ Učenici zapisuju što je de Broglieev model uspio objasniti, ali što je još uvijek bio problem.

Ako je de Broglie elektronu pridružio valna svojstva, može li se onda napisati i valna



Slika 6.15: U simulaciji *Modeli vodikovog atoma* prikazan je de Brogliev model atoma

jednadžba za taj val? Znete li možda tko je napisao tu jednadžbu?

→ Erwin Schrödinger je napisao tu valnu jednadžbu.

Rješenja te valne jednadžbe daju vjerojatnost da se elektron nađe na nekom mjestu u atomu.

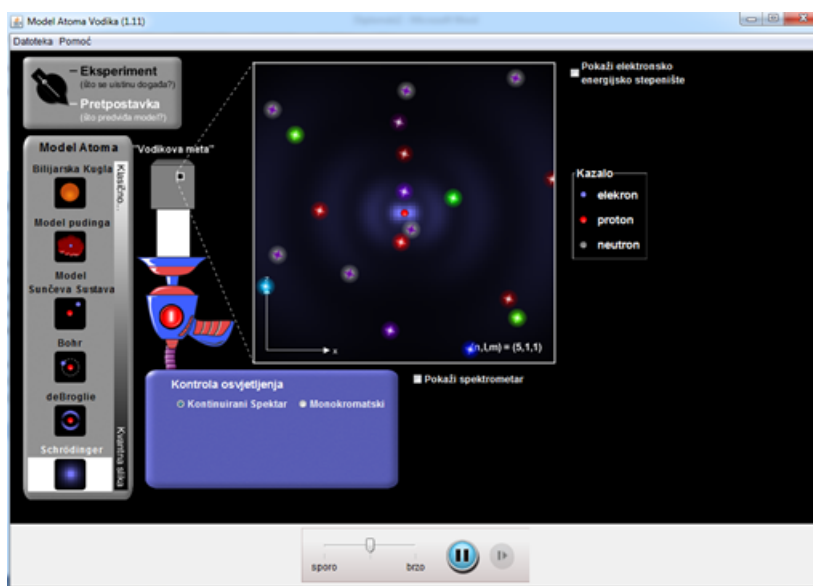
U simulaciji prijeđem na Schrödingerov model atoma (slika 6.16). Na što vas ovo podsjeća?

→ Na orbitale iz kemije.

Što znače ovi oblaci? Gdje je veća vjerojatnost da nađemo elektron?

→ Tamo gdje je veća gustoća oblaka.

U kvantnoj slici atoma više ne možemo točno reći gdje je elektron, nego sam govorimo o vjerojatnosti pronalazjenja elektrona na nekom mjestu.



Slika 6.16: U simulaciji *Modeli vodikovog atoma* prikazan je Scrodingerov model atoma

### 6.3 Spektri (2)

POKUS: „Linijski spektri otopina soli“

Filtre namočene u otopine raznih soli ( $NaCl$ ,  $LiCl$ ,  $CuSO_4...$ ) zapalim na plinskom plameniku. Učenici uz pomoć ručnih spektroskopa promatraju spektre. Uočavaju samo linije određenih boja. Za svaku otopinu uočavaju različite boje linija.

Kakav ste spektar dobili? Kako su boje bile raspoređene?

→ Vidjeli smo odvojene linije različitih boja.

O čemu ovisi koje boje linija vidite?

→ Ovisi o soli. Različite soli daju različite valne duljine u spektru.

Kakav spektar daje Sunčeva svjetlost i svjetiljke u razredu? Pogledajte.

→ Sunčeva svjetlost daje kontinuirani spektar.

Kakvi spektri mogu biti?

→ Spektri mogu biti linijski i kontinuirani.

ISTRAŽIVAČKO PITANJE: Kako možemo povezati energijska stanja atoma s emisijskim spektrom?

Što mislite kako nastaju linije koje ste danas uočili pomoću spektroskopa? Kako možemo povezati linije u spektru s onim što se događa u atomu? Kakva su energijska stanja atoma nekog plina (npr. vodika)?

→ Energijska stanja su diskretna, tj. atom može imati samo određene energije.

U kojim energijskim stanjima se nalaze atomi?

→ Atomi se uglavnom nalaze u najnižem, osnovnom, energijskom stanju.

Na koji se način mogu pobuditi atomi plina?

→ Atomi plina se mogu pobuditi zagrijavanjem. Možda će se neki učenici sjetiti da atome plina možemo gađati nekim česticama i tako im prenijeti energiju.

Na jednom od prošlih sati gledali smo spektar neonske svjetiljke.

Pokrenem simulaciju *Neonske svjetiljke i druge izbojne lampe* i pokažem sliku neonske i drugih izbojnih svjetiljki.

Sad ćemo pogledati što se događa u takvoj svjetiljci kada je spojimo na napon. Za početak ćemo uzeti da u svjetiljci imamo atome nekog nepoznatog elementa. Odabrat ćemo da atom ima 3 energijske razine. Razina 1 odgovara osnovnom stanju, stanju najniže energije. Više razine su pobuđena stanja. (Postavim prvu pobuđenu razinu tako da daje fotone u vidljivom dijelu spektra.) Izaberem prikaz s jednim atomom kojeg pomaknem da ga elektroni ne mogu pogoditi i pokrenem stalnu proizvodnju elektrona (slika 6.17).

O čemu ovisi koliko će elektrona napustiti metalnu ploču?

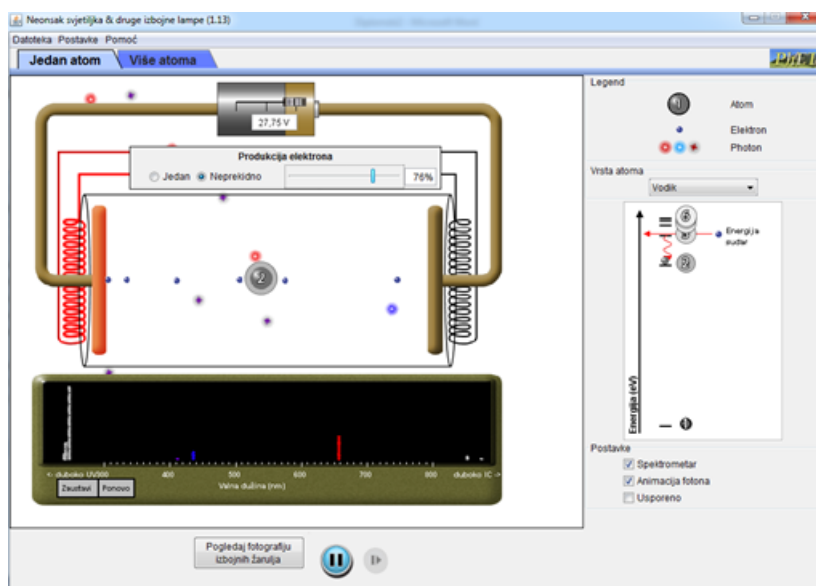
→ Broj elektrona ovisi o tome koliko smo zagrijali ploču.

Na što utječe napon na koji su ploče spojene?

→ Napon utječe na brzinu elektrona, pa prema tome i na njihovu kinetičku energiju.

Odaberem pojedinačnu proizvodnju elektrona i atom pomaknem tako da ga elektron može pogoditi. Emitiram jedan elektron s ploče i pitam učenike što se događa s elektronom.





Slika 6.17: U simulaciji *Neonske svjetiljke i druge izbojne lampe* prikazan je jedan vodikov atom

→ Elektron se sudari s atomom i pri tome mu preda dio svoj energije. (Ako je potrebno podsjećam učenike na sudare iz mehanike).

Takvo pobuđivanje atoma plina zove se električni izboj. Što se događa u atomu kad mu elektron preda dio energije u sudaru? Promotrimo s desne strane energijske razine atoma. (Postavim simulaciju na usporeni prikaz i napon postavim tako da je energija sudara nešto veća od prvog pobuđenog stanja.) Pustim elektron da krene prema atomu. Kad elektron pogodi atom, zaustavim sliku.

Što sada piše na atomu?

→ Učenici uočavaju da na atomu sada piše broj 2.

Gdje se nalazi atom ako pogledamo u shemu energijskih razina s desne strane?

Atom se nalazi na onoj razini, koja piše na njemu (na razini 2).

→ Atom apsorbira (upija) energiju i prelazi iz stanja niže energije u stanje više energije (pobuđeno stanje).

Zadržava li se atom u tom stanju?

→ Ne. Atom spontano prelazi u stanje niže energije.

Što se dogodi prilikom prelaska atoma u stanje niže energije?

→ Atom emitira foton određene energije.

O čemu ovisi energija emitiranog fotona?

→ Ovisi o razlici energija početnog i konačnog stanja.

$$E_{\text{fotona}} = E_p - E_k$$

Kako će izgledati spektar koji nastaje u ovom slučaju? (Pitam za predviđanje, a zatim uključim opciju prikazivanja spektra).

→ Nastaje jedna linija neke boje.

Kako je povezana boja svjetlosti s energijom fotona?

→ Boja svjetlosti ovisi o valnoj duljini, a valna duljina je povezana s energijom fotona na sljedeći način  $E_{\text{fotona}} = h \cdot c = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ .

Kako bismo dobili liniju neke druge boje?

→ Trebalo bi promijeniti razliku između energije početnog i konačnog stanja.

$h \cdot \frac{c}{\lambda} = E_k - E_p$  (Promijenim energiju prvog pobuđenog stanja i vidimo da dobijemo različitu valnu duljinu.)

Što će se dogoditi ako povećam napon izvora? (Pitam za predviđanje, izvedem pokus pomoću simulacije i pitam učenike što su uočili i kako to objašnjavaju.)

→ Elektron će dobiti više energije koju može predati atomu, i atom može prijeći u drugo pobuđeno stanje. Pri povratku u osnovno stanje emitiraju se fotoni.

Kako se pobuđeni atom može vratiti na energijsku razinu 1?

→ Postoje dvije mogućnosti. S treće razine može odmah prijeći na prvu ili s treće na drugu i s druge na prvu.

Koliko fotona se emitira prilikom tih prelazaka?

→ Prilikom prelaska elektrona s treće energijske razine na prvu, emitira se jedan foton, a prilikom prelaska elektrona s treće energijske razine na drugu, pa s druge na prvu emitiraju se dva fotona.

Jesu li svi ti fotoni jednaki? Zašto?

→ Nisu jednaki jer je razlika u energiji između tih razina različita, pa ni emitirani fotoni neće biti jednaki.

Pitam učenike za predviđanje kako će izgledati spektar u ovom slučaju. Koliko će biti linija i koje će biti boje?

Povećam proizvodnju elektrona na 100% te uključim opciju *Usporeno* i uključim *Spektrometar*. Objasnim da je svaki emitirani foton prikazan jednom točkicom u spektrometru i to prema valnoj duljini koju ima.

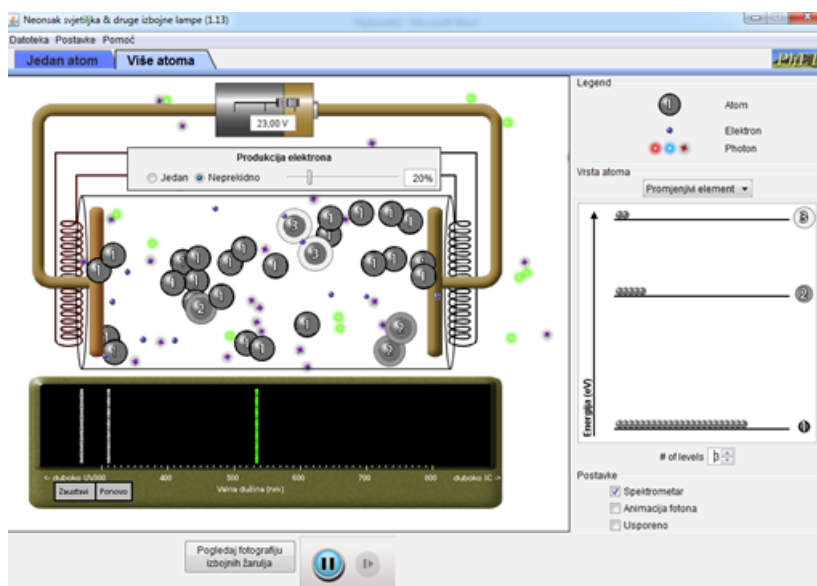
Učenici promatraju što se događa i uočavaju da se pojavljuju samo fotoni određene boje i da nastaju tri linije u spektru. Zatim u simulaciji prebacim na opciju *Više atoma*, gdje sada uočavaju da ima puno atoma koje pogađaju elektroni, stoga je emisija fotona puno veća i brža (slika 6.18). Opet uočavaju tri linije u spektrometru.

Koliko ćemo dobiti linija u spektru ako atom ima 4 energijske razine? (Pitam za predviđanje, izvedem pokus pomoću simulacije i pitam učenike što su uočili i kako to objašnjavaju.)

→ Učenici uočavaju da nastaje 6 linija u spektru. Skiciraju energijske nivoe i sve moguće prijelaze atoma.

Kojem prijelazu atoma između energijskih razina odgovara spektralna linija najveće valne duljine?

→ Fotoni najveće valne duljine imaju najmanju frekvenciju, pa prema tome i najmanju energiju. Oni nastaju prelaskom atoma između dva stanja koja imaju najmanju razliku u energijama. Učenici pokazuju koja su to dvije energijske razine.



Slika 6.18: U simulaciji *Neonske svjetiljke i druge izbojne lampe* stavljeno je na prikaz *Više atoma* te uključen spektrometar

Promotrimo sada kako izgleda spektar nekog stvarnog atoma, npr. atoma vodika (slika 6.19). Ostavim na opciji *Više atoma* i učenici promatraju što se događa.

U kojem sve dijelu spektra nastaju linije?

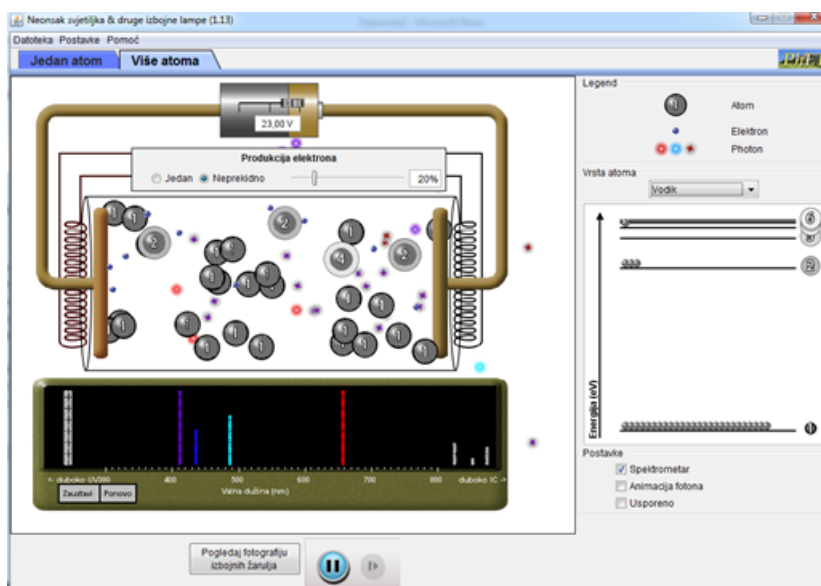
→ Učenici uočavaju da linije nastaju u vidljivom, ultraljubičastom i infracrvenom dijelu spektra.

Nakon toga u simulaciji odaberem neki drugi element (npr. živu).

→ Učenici uočavaju da se ponovno elektroni pobuđuju i prilikom vraćanja na osnovnu razinu emitiraju foton(e). Također uočavaju da linije nisu jednake boje kao kod vodika. Sad se pojavljuju linije ljubičaste, plave, svjetlozelene i žute boje.

Ponovno u simulaciji promijenim element (npr. natrij).

→ Učenici uočavaju da se sad pojavljuju linije narančaste i žute boje.



Slika 6.19: U simulaciji *Neonske svjetiljke i druge izbojne lampe* je odabran vodikov atom

Što se dogodilo s energijskim razinama kad smo promijenili element?

→ Bliže su jedna drugoj.

Što bi to značilo za iznos energija emitiranih fotona?

→ Energije fotona su manje nego kod prethodnog elementa jer energije fotona ovise o razlici energija početnog i konačnog stanja.

Možete li sada odgovoriti na pitanje s početka sata? Otkuda one linije koje ste uočili u spektroskopu kad ste promatrali plamen otopina različitih soli? Zašto su otopine imale svoje karakteristične boje?

→ Učenici povezuju sliku koju su vidjeli u spektroskopu na početku sata sa slikama koju su vidjeli u spektrometru u simulaciji. Pobuđeni atomi prelaze u viša energijska stanja i prilikom povratka u osnovno stanje emitiraju foton(e). Svaki foton ima točno određenu valnu duljinu, odnosno energiju koja je jednaka razlici energija početnog stanja i konačnog stanja elektrona. U različitim atomima te energijske razine su različitoga iznosa i ima ih različit broj. Stoga atomi prilikom prelaska iz pobuđenog stanja u osnovno emitiraju različit broj fotona i oni imaju različite valne duljine, tj. energije.

U simulaciji smo promatrali situaciju kada atom iz višeg energijskog stanja prelazi u niže i pri tome emitira foton. To se očituje kao linija određene boje u spektru tog atoma. Zamislimo da spremnik s atomima nekog plina osvjetljavamo bijelom svjetlošću tj. fotonima različitih valnih duljina. Što se dogodi kad atom apsorbira foton?

→ Atom prijeđe u više energijsko stanje.

Može li atom apsorbirati foton bilo koje valne duljine.

→ Ne može. Energija fotona mora biti jednaka razlici neka dva energijska stanja atoma.

Kako se u spektru očituje apsorpcija fotona? Nastane li i tada neka linija? Koje je boje?

→ Nastane crna linija na kontinuiranom spektru. Crna linija je na valnoj duljini apsorpcije fotona.

Kako biste nazvali spektar koji nastaje emisijom fotona, a kako onaj koji nastaje apsorpcijom fotona? Koje su im sličnosti, a koje razlike?

→ Spektar koji nastaje emisijom fotona nazvali bismo emisijski spektar, a spektar koji nastaje apsorpcijom fotona nazvali bismo apsorpcijski spektar. Emisijski spektar ima linije određenih boja. Apsorpcijski spektar ima crne linije na određenim mjestima kontinuiranog spektra.

Ako preklopimo emisijski i apsorpcijski spektar nekog elementa, što mislite da bismo dobili?

→ Kontinuirani spektar.

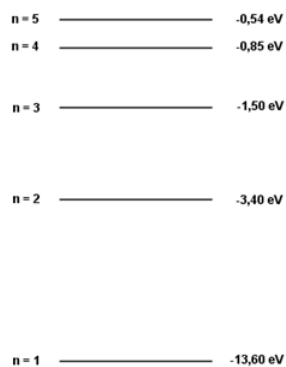
U završnom dijelu sata s učenicima možemo prokomentirati na koji način se iz spektra neke zvijezde može odrediti njen sastav te riješiti nekoliko zadataka.

Pomoću spektara možemo odrediti sastav dalekih zvijezda. Kad astronomi svjetlost zvijezde puste kroz spektrometar dobiju njen spektar, to apsorpcijski. Onda ga uspoređuju sa spektrom pojedinih atoma i na taj način utvrde od kojih se elemenata sastoji zvijezda.

Ovdje, [13], su prikazani spektri četiri elementa: kalcija, vodika, željeza i magnezija. Vaš zadatak je da na temelju spektara ovih elemenata odredite sastav nepoznate zvijezde. Učenici predlažu elemente koji se nalaze u zvijezdi. Ukoliko odabir nije točan, pokušamo se ispraviti dok ne dođemo do točnog odgovora.

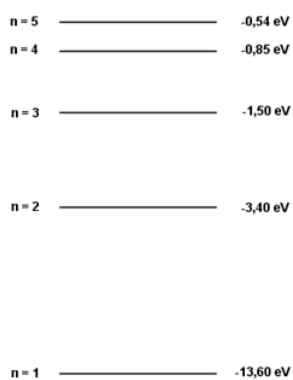
U završnom dijelu sata učenici mogu rješavati zadatke.

Zadatak 1. Vodikov atom prijeđe iz stanja  $n = 4$  u stanje  $n = 2$  (slika 6.20). Kolike su energija i valna duljina emitiranog fotona?



Slika 6.20: Energijske razine vodikovog atoma

Zadatak 2. Na energijskom dijagramu s pomoću strelice prikažite apsorpciju fotona koji ima najmanju valnu duljinu za dane energetske nivoe (slika 6.21). Kolika je ta valna duljina?



Slika 6.21: Energijske razine vodikovog atoma

# Poglavlje 7

## Osvrti na održane satove

U nastavi moderne fizike nema mnogo pokusa, stoga se treba osloniti na sva moguća sredstva koja donose korist, a jedno od njih su i računalne simulacije. One u nastavi još uvijek nisu zaživjele, jer većina nastavnika za njih ni ne zna. S obzirom da su u pripremama priloženima u diplomskom radu korištene simulacije, bilo je potrebno isprobati ih u školi. Sati na temu Spektri (1) i (2) su održani u jednoj zagrebačkoj prirodoslovno-matematičkoj gimnaziji, a sat na temu Modeli atoma u općoj gimnaziji u Zagrebu.

### 7.1 Spektri (1)

Glavni cilj ovog sata je bio da učenici povežu valnu duljinu svjetlosti i energiju fotona. Promatranje linijskog i kontinuiranog spektra pomoću ručnih spektroskopa učenicima je bilo zanimljivo. Potrebno je učenicima objasniti koja se strana spektroskopa stavlja na oko, jer je bilo zabuna u svezi toga. Ukoliko se koristi UV-lampa, učenike treba upozoriti da u nju ne gledaju golim okom.

U radu u skupinama učenici su uglavnom dobro surađivali. Uočeno je da su u nekim skupinama pojedinci obavljali sav posao, te ih je trebalo usmjeravati da svi trebaju sudjelovati u mjerenjima. Također su neki učenici samostalno odgovarali na pitanja na radnim listovima, bez diskusije s ostalim članovima skupine. I tu je trebalo intervenirati i uputiti ih da rade grupno. Učenici općenito u grupnom radu i ispunjavanju radnih listova nisu skloni odgovarati na sva pitanja, stoga ih treba poticati da ih ne preskaču. Ako se uoči neki problem, ili ako je nešto posebno važno, dobro je prekinuti rad u grupama i to komentirati s cijelim razredom, tj. provesti razrednu raspravu. U ovom satu je to bilo potrebno napraviti nakon prvog pitanja u kojemu su trebali odgovoriti na koji način će odrediti energiju fotona koje emitiraju LED-diode te čemu služi promjenjivi otpornik. Jedan dio učenika nije odgovorio na ta dva pitanja, jer im to nije zanimljivo.



Kod mjerenja je najveći problem bio što su učenici mjerili napon pri jačem sjaju LED-diode nego im je rečeno. Trebali su izmjeriti napon za sve četiri dobivene diode, ali ne bilo koji nego onaj na kojemu dioda taman zasvijetli. Iako sam više puta cijelom razredu naglasila tu uputu, ipak je nekoliko skupina mjerilo pogrešan napon, tj. nisu mjerili najmanji napon potreban da dioda zasvijetli. Neke skupine su kasnije završile pokus jer su trebale ponoviti mjerenja. Da bi se to izbjeglo, potrebno je još više naglasiti uputu na radnom listu (otisnuti masnim slovima) i usmeno se uvjeriti da učenici znaju koji napon treba mjeriti.

Iako su neke grupe pogriješile u mjerenju i morale ga ponovno provesti, ipak su svi do kraja sata uspjeli nacrtati graf i odrediti nagib pravca, tj. Planckovu konstantu  $h$ . Taman smo prije zvona uspjeli na ploču napisati dobivene rezultate. Vrijednosti  $h$  su bile jako blizu prave vrijednosti. Učenici su istražili vezu između energije i valne duljine svjetlosti.

## 7.2 Modeli atoma

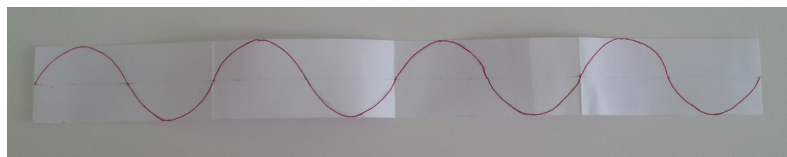
Glavni cilj ovog sata je bio da učenici prolazeći kroz najznačajnije modele atoma u povijesti uoče prednosti i nedostatke svakoga od njih. Na satu se jako puno koristila računalna simulacija koja je davala grafički prikaz svakog modela te tako učenicima olakšavala vizualizaciju.

Tijekom objašnjavanja pojedinog modela spominju se neki pojmovi (npr. katodne zrake) koje učenici do sada nisu susreli, pa nastavnici trebaju biti svjesni toga. Tijekom sata je potrebno jasno naglašavati ideje svakog modela i njegove nedostatke. Dobro je da učenici sami pokušaju uvidjeti nedostatak pojedinog modela i razmisliti kako bi oni riješili taj problem.

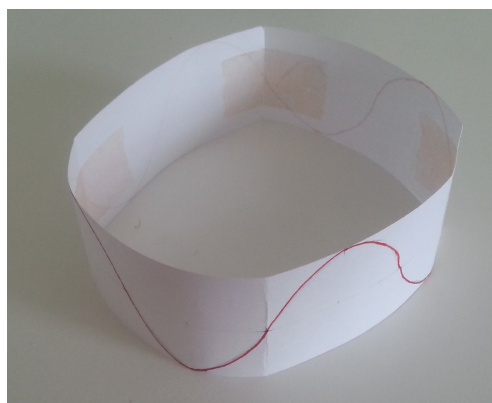
Za provedbu ovog sata posebno je važno izvještiti se u rukovanju simulacijom. Kad se u simulaciji prebaci na model *kolača s grožđicama*, bijela svjetlost pobudi elektron i on emitira foton. Tu česticu je možda teže uočiti jer je sitna i njena boja nije bitno različita od boje ostalih fotona. Na to treba skrenuti pažnju učenika. Potrebno je postupak više puta ponoviti i zaustaviti sliku točno u trenutku emitiranja fotona. Kod Rutherfordovog raspršenja potrebno je energiju  $\alpha$ -čestica podesiti tako da ih se mali broj odbija unatrag, jer je to najbliže rezultatima stvarnog eksperimenta.

U de Broglievom modelu, ukoliko nastavnik želi nacrtati kružni stojni val na ploči, prije sata ga treba dobro uvježbati, jer ga je dosta teško nacrtati. Jako dobro rješenje tog problema je traka od papira na kojem je nacrtan val. Papir je presavijen na svakoj sljedećoj valnoj duljini (slika 7.1). Na taj način se može ilustrirati stojni val s jednom, dvije, tri ili više valnih duljina (slika 7.2).

S obzirom da je potrebno da nastavnik prije održavanja sata dobro uvježba korištenje simulacije, moguće je da na satu počne prelaziti s jednog modela na drugi tempom koji učenici ne mogu pratiti. Treba biti svjestan vremena koje je učenicima potrebno da promotre ani-



Slika 7.1: Val



Slika 7.2: Kružni stojni val

macije i shvate što se događa na njoj i koja je fizikalna pozadina iza toga. Također je učenicima potrebno ostaviti dovoljno vremena da napišu svoje pretpostavke, razmišljanja, skiciraju svoje ideje ili ono što su vidjeli tijekom izvođenja simulacije. Učenici su uočili koje su bile prednosti te nedostaci modela atoma kroz povijest, te koji ga model najbolje opisuje.

### 7.3 Spektri (2)

Ovaj sat je isto zamišljen pomoću rada s računalnom simulacijom. Glavni cilj sata je bio da učenici energijske razine u atomu povežu s emisijskim spektrom. Učenici su jako dobro surađivali i budno pratili sve promjene u simulaciji.

Na početku je učenicima potrebno objasniti što prikazuju pojedini dijelovi simulacije te naglasiti što u pojedinim trenucima promatramo. Nastavniku se može činiti samorazumljivim na što treba obratiti pažnju, ali učenici se prvi put susreću s takvim prikazom i važno je usmjeravati njihovu pažnju tijekom izvođenja simulacije. S obzirom da je potrebno da učenici uoče emisiju fotona zajedno s prijelazom elektrona s jedne energijske

razine na drugu, svaki pothvat se mora izvesti nekoliko puta kako bi učenici uočili ono što želimo. U simulaciji postoji opcija usporenog prikaza, ali treba je znati efikasno koristiti. Nije poželjno tratiti vrijeme na gledanje fotona koji putuje prema atomu, nego je potrebno usporiti onaj dio animacije koji pokazuje emisiju fotona iz atoma. Tek kad su učenici dobro savladali što se događa s jednim atomom, može se prebaciti na prikaz gdje ima više atoma. Taj prikaz više služi za brzo dobivanje spektra pojedinog atoma te malo realniju sliku stvarne pojave. U simulaciji postoji opcija mijenjanja vrste elemenata. Dobro je i nju iskoristiti kako bi učenici dobili zorniji prikaz da se uočena pojava događa kod svih atoma, a ne samo kod vodikovog. Na ovaj način također uočavaju razlike između atoma pojedinih elemenata.

Na održanom satu nismo stigli prokomentirati apsorpcijski spektar, kao ni određivanje sastava dalekih zvijezda pomoću njihovih spektara, ali je glavni cilj sata ostvaren.

# Bibliografija

- [1] <https://phet.colorado.edu/>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [2] [http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni\\_plan/gimnazije/obvezni/fizika.pdf](http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni_plan/gimnazije/obvezni/fizika.pdf), preuzeto u lipnju, 2016.
- [3] [http://dokumenti.ncvvo.hr/Ispitni\\_katalozi\\_15-16/Hrvatski/FIZ\\_IK\\_16.pdf](http://dokumenti.ncvvo.hr/Ispitni_katalozi_15-16/Hrvatski/FIZ_IK_16.pdf), preuzeto u lipnju, 2016.
- [4] [http://mzos.hr/datoteke/10-Predmetni\\_kurikulum-Fizika.pdf](http://mzos.hr/datoteke/10-Predmetni_kurikulum-Fizika.pdf), preuzeto u lipnju, 2016.
- [5] <http://teachers.web.cern.ch/teachers/materials/syllabus.htm>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [6] [http://www.oph.fi/download/47678\\_core\\_curricula\\_upper\\_secondary\\_education.pdf](http://www.oph.fi/download/47678_core_curricula_upper_secondary_education.pdf), preuzeto u lipnju, 2016.
- [7] <https://www.ncvvo.hr/dm-2014-2015-jesenski-rok/>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [8] <http://www.halapa.com/fizpdf/15fs101.pdf>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [9] <https://www.ncvvo.hr/drzavna-matura-2015-2016-ljetni-rok/>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [10] <https://www.ncvvo.hr/dm-2014-2015-ljetni-rok/>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [11] <https://www.ncvvo.hr/dm-2013-2014-ljetni-rok-jesenski/>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [12] <http://www.slideshare.net/saharshjain/rutherford-model-of-the-atom>, preuzeto u lipnju, 2016.
- [13] [http://www.learner.org/teacherslab/science/light/color/spectra/spectra\\_2.html](http://www.learner.org/teacherslab/science/light/color/spectra/spectra_2.html), preuzeto u lipnju, 2016.

- [14] H. Fischler i M. Lichtfeldt, *Modern physics and students' conceptions*, Int. J. Sci. Ed. **14** (1992), 181–90.
- [15] G. Ireson, *The quantum understanding of pre-university physics students*, Phys. Educ. **35** (2000), br. 1, 15–21.
- [16] L. Ivanjek, P. S. Schaffer, L. C. McDermott, M. Planinic i D. Veza, *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. II. Addressing student difficulties with atomic emission spectra*, Am. J. Phys. **83** (2015), br. 2, 171–178.
- [17] L. Ivanjek, , P. S. Schaffer, M. McDermott, L. C. Planinic i D. Veza, *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory spectroscopy. I. Identifying student difficulties with atomic emission spectra*, Am. J. Phys. **83** (2015), br. 1, 85–90.
- [18] R. Krsnik, *Fizika 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije*, Školska knjiga, 2000.
- [19] J. Labor, *Fizika 4, udžbenik za 4. razred gimnazije*, Alfa, 2008.
- [20] P. Lattes, A. V. Valls, F. Ferlin, J. L. Heraud i H. Chabot, *Teaching quantum physics in upper secondary school in France*, Sci. And Educ. **24** (2015), 937–955.
- [21] I. Lawrence, *Quantum physics in school*, Phys. Educ. **31** (1996), 278–87.
- [22] R. Müller i H. Wiesner, *Teaching quantum mechanics on an introductory level*, Am. J. Phys. **70** (2002), br. 3, 200–209.
- [23] R. V. Olsen, *Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway*, Int. J. Sci. Ed. **24** (2002), br. 6, 565–574.
- [24] V. Paar, *Fizika 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije*, Školska knjiga, 2005.
- [25] R. N. Steinberg i G. E. Oberem, *Research-based-instructional software in modern physics*, J. Comp. Math. Sci. Teach. **19** (2000), br. 115.
- [26] R. N. Steinberg, G. E. Oberem i L. C. McDermott, *Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect*, Am. J. Phys. **64** (1996), br. 1370.
- [27] R. Unal i D. Zollman, *Students' description of an atom: A phenomenographics analysis*, 1–24, <https://web.phys.ksu.edu/papers/vqm/atommodels.pdf>.
- [28] C. E. Wieman, K. K. Perkins, M. Dubson, C. Malley, S. LeMaster, R.; Reid i S. B. McKagan, *Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics*, Am. J. Phys. **76** (2008), br. 406, 1–13.

- [29] C. E. Wieman, K. K. Perkins, W. Handley i S. B. McKagan, *A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect*, Am. J. Phys. **77** (2009), br. 87, 1–13.
- [30] C. E. Wieman, K. K. Perkins i S. B. McKagan, *Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively*, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **4** (2008), br. 010103, 1–10.

# Sažetak

Moderna fizika ima značajnu ulogu u srednjoškolskom kurikulumu fizike u Hrvatskoj s mnogim temama iz kvantne i nuklearne fizike te specijalne teorije relativnosti. Ti su fizički sadržaji prisutni na srednjoškolskoj razini više nego u većini europskih zemalja. Ovaj diplomski rad usmjeren je na uvod u kvantnu fiziku.

Edukacijska istraživanja u fizici pokazala su da i učenici i studenti imaju poteškoća s idejama u kvantnoj fizici. Istraživanja su također pokazala da je interaktivna nastava vrlo učinkovita u razvijanju konceptualnog razumijevanja moderne fizike. Pokusi mogu biti vrlo korisni za uključivanje učenika u raspravu i aktivno učenje. Nažalost, moderna se fizika u hrvatskim školama poučava na tradicionalan način. Cilj ovog diplomskog rada bio je razviti interaktivne nastavne materijale koji bi se mogli izravno koristiti u razredu.

S obzirom na prirodu kvantne fizike i slabu opremljenost u školama, nema puno pokusa iz moderne fizike koji se mogu raditi u razredu. Ipak, neki relativno jednostavni i dostupni pokusi se trebaju izvesti. Osim toga, interaktivne računalne simulacije također se mogu koristiti kao neki oblik pokusa u istraživački usmjerenom učenju i poučavanju. Simulacije pomažu u vizualnim prikazima apstraktnih koncepata i mikroskopskih procesa koji se ne mogu izravno promatrati.

Rad sadrži nastavne pripreme s pokusima i interaktivnim simulacijama za uvođenje zračenja crnog tijela, fotoelektričnog efekta, spektara i modela atoma. Neki nastavni materijali testirani su u školi, i to iskustvo je također opisano.

# Summary

Modern physics has an important role in the high school physics curriculum in Croatia with many topics from quantum and nuclear physics, and special theory of relativity. This physics content is present at the high school level more than in most of European countries. The diploma thesis is focused on introduction to quantum physics.

Physics education research has shown that both pupils and students have difficulties with the ideas in quantum physics. The research has shown that interactive teaching is very effective in developing a conceptual understanding of modern physics. Experiments can be very useful for involving students in the discussion and active learning. Unfortunately, modern physics is taught in traditional way in Croatian schools. The aim of this diploma thesis was to develop interactive teaching materials that could be directly used in the classroom.

Due to the nature of quantum physics and poor equipment in schools, not many of modern physics experiments can be done in the classroom. However, some relatively simple and available experiments should be performed. In addition, interactive computer simulations can be used as some form of the experiment in enquiry-based teaching and learning. Simulations help in visual representations of abstract concepts and microscopic processes that cannot be directly observed.

The thesis contains lesson plans with experiments and interactive simulations for introducing blackbody radiation, photoelectric effect, spectra and models of atoms. Some teaching materials have been tested in school, and this experience is also described.



# Životopis

Zovem se Martina Babić. Rođena sam 30. srpnja 1992. godine u Stuttgartu u Njemačkoj. Pohađala sam Osnovnu školu "Mijat Stojanović" u Babinoj Gredi, gdje sam i provela svoje djetinjstvo. U srednju školu sam išla u "Gimnazija Županja" u Županji. Školovanje na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu sam započela 2011. godine.