

# Demonstracijski pokusi u nastavi fizike: kvantna fizika u osnovnoj školi

---

**Maruna, Petra**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*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:217:020444>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-22**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

Petra Maruna

**DEMONSTRACIJSKI POKUSI U NASTAVI  
FIZIKE: KVANTNA FIZIKA U OSNOVNOJ  
ŠKOLI**

Diplomski rad

Zagreb, RUJAN, 2018.

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

1. \_\_\_\_\_, **predsjednik**

2. \_\_\_\_\_, **član**

3. \_\_\_\_\_, **član**

4. \_\_\_\_\_, **član**

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

Potpisi članova povjerenstva:

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

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

Petra Maruna

**DEMONSTRACIJSKI POKUSI U NASTAVI  
FIZIKE: KVANTNA FIZIKA U OSNOVNOJ  
ŠKOLI**

Diplomski rad

Voditelj rada:

Doc. dr. sc. Dalibor Paar

Zagreb, RUJAN, 2018.

*Zahvaljujem se mentoru prof. doc. dr. sc. Daliboru Paaru na pomoći, trudu te strpljenju pri izradi ovog diplomskog rada.*

*Hvala roditeljima, sestri i prijateljima na podršci i pomoći tijekom studiranja.*

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Važnost pokusa u nastavi fizike .....	3
2.1. Koraci izvođenja pokusa i izazovi .....	7
2.2. Strategije kod neočekivanih ishoda.....	9
3. Kognitivni modeli.....	11
3.1. Naivna fizika .....	11
3.2. Kvantna mehanika je zastrašujuća .....	14
3.3. Kognitivna pristranost.....	17
4. Školski sustav .....	20
4.1 Školski sustav u Hrvatskoj i kvantna fizika .....	20
4.2 Školski sustav u svijetu i kvantna fizika .....	22
4.2.1. Norveška .....	22
4.2.2 Njemačka .....	24
4.2.3 Australija.....	28
4.3. Korak dalje .....	30
5. Pokusi u nastavi kvantne fizike .....	34
5.1. Fotoelektrični efekt .....	34
5.1.1 Fotoelektrični efekt i suvremeno obrazovanje.....	40
5.1.2 Simulacija fotoelektričnog efekta .....	41
5.2. Spektroskop.....	47
5.2.1 Upute za izradu i provođenje aktivnosti .....	47
6. Zaključak .....	52
7. Literatura .....	54
Sažetak .....	59

Summary .....	60
Životopis .....	61

## 1. Uvod

Da je način na koji se podučava fizika zastario složio bi se velik broj učenika, ali i nekolicina nastavnika. Svijet 21. stoljeća koji nas okružuje temelji se na suvremenim tehnologijama i uređajima. Mogu li učenici na temelju Newtonove fizike i koncepata klasične fizike to razumjeti? Našla bi se zasigurno nekolicina nastavnika fizike koji su mišljenja da nema razloga za podučavanjem Einsteinove fizike. Prošlo je 100 godina od formuliranja Einsteinove opće teorije relativnosti i spoznaja da je prostor zakrivljen. Nije li to dovoljno dugo da škole uhvate korak s vremenom. Moderna fizika uključuje „sablansnu čudnovatost“ kvantne mehanike i misterije koje još u potpunosti ne razumijemo. Odnosno poprilično dobro razumijemo kako funkcioniraju, ali ih ne možemo percipirati kroz iskustva u makroskopskom svijetu oko nas koja prikupljamo od rođenja. Upravo je to izazovno znanstvenicima. Postoje otvorena pitanja te mnogo toga što se još treba otkriti, a samo otkrivanje izgleda poput prave avanture. Svi znamo koliko je uzbudljivije učiti i čitati o pravom otkriću nečeg novoga i do tada nepoznatoga nego li učiti stare činjenice. Nije ni čudo da djeca izbjegavaju znanost. Oni nauče više moderne fizike iz crtića, stripova, dokumentaraca, igranih filmova i interneta nego li u razredu. Pokus australskih znanstvenika pokazuje da dijete s 14 godina lako može asimilirati nove ideje, a često i bolje od mozga nekoga tko je kraju svog školskog obrazovanja. Stoga treba mijenjati i teme i metode kojima učimo u školi. U ovom radu dotaknut ćemo se jednog i drugog. Kada govorimo o metodama u nastavi fizike, u središte stavljamo pokus. U uvodnom dijelu rada navedena je uloga i važnost pokusa u nastavi fizike kao i koraci koji nastavnicima mogu olakšati njihovo izvođenje. Dane su neke strategije koje mogu olakšati nošenje sa situacijama kad se izvođenje pokusa ne odvija kako je planirano. Diskutirani su kognitivni modeli i kako i zašto vode ljude da sustavno gledaju svijet na pristran način. Tu su četiri pravila naivne fizike koja su temelj svih intuitivnih objašnjenja fizikalnog svijeta, a koje je predložila dječja psihologinja Elizabeth Spelke [22]. Ta četiri pravila su ključna u raspravi o utjecaju kognitivnih pristranosti na teorije kvantne mehanike. Zatim je ilustrirano kako kvantna mehanika, a točnije Kopenhaška interpretacija kvantne mehanike, krši naše urođeno razumijevanje kako bi svijet trebao funkcionirati. Opisana je i situacija u školskom sustavu u svijetu i



u Hrvatskoj. Dan je prikaz istraživanja Müllera i Wiesnera o učeničkim koncepcijama o kvantnoj mehanici i projekt ReleQuant norveških škola koji se bavi istraživanjem obrazovnog sustava radi poboljšanja nastave i učenja tema kvantne fizike i relativnosti. Opće prihvaćeno je mišljenje da ne možemo naučiti istinu bez da prvo naučimo stare teorije kao temelje. Samo nekolicina učenika nastavlja i nauči ispravne teorije na sveučilištu. Fizičari i odgojitelji u zapadnoj Australiji stavili su ovu tezu o znanstvenom obrazovanju na test, oni donose pojmove iz moderne fizike u osnovne škole. Osvrnut ćemo se na pitanje: „Ima li smisla čitanje kvantne fizike djeci vrtićkog uzrasta?“. U završnom dijelu predloženi su pokusi koji se mogu uklopiti u nastavni program. Demonstracija fotoelektričnog efekta može biti izvediva i u razredu u kombinaciji s računalnom simulacijom. U drugom pokusu opisana je izrada spektroskopa pomoću DVD medija i kartonske kutije.

## 2. Važnost pokusa u nastavi fizike

Fizika opisuje prirodu od mikroskopskih skala do dimenzija svemira. Sve zakonitosti u fizici proizlaze iz promatranja prirode i prirodnih procesa, dakle iz pokusa. Teorijski fizikalni model može biti prihvaćen samo ako je pažljivo potvrđen pokusima. Pokusi su već dugo dio obrazovnog programa nastave fizike. U posljednja dva desetljeća njihova učinkovitost kao alata za podučavanje učenika znanstvenim konceptima ispitivana je kroz više studija. Kroz kolegij Metodika nastave fizike i Metodička praksa nastave fizike sustavno smo istražili prednosti istraživački usmjerene nastave i ulogu pokusa u istoj. Zašto su pokusi bitni u nastavi fizike i kako je mogu obogatiti te je učiniti zanimljivijom?

Pokusi u nastavi daju motivaciju i polazište za razvijanje učeničkih ideja. Omogućuju učenicima stjecanje iskustva o fizikalnim pojavama, omogućuju testiranje učeničkih predviđanja te korigiranje njihovog zaključivanja. Kao što svi znamo čine nastavu interesantnijom i dojmlijivijom. Još jedan jako bitan ishod pokusa u nastavi je stjecanje vještina. U drugom dijelu devetnaestog stoljeća, pod utjecajem radova H. E. Armstronga, pojam učenika koji sam izvodi pokus postao je uobičajen dio školskih kurikuluma u mnogim zemljama. Heuristički se pristup vratio se 1960-ih i 1970-ih, zagovarajući uobičajeni izraz: "Čujem i zaboravljam, vidim i sjećam se, radim i razumijem". Ipak, krajem 1970-ih godina, počelo se raspravljati o umjetnoj i ograničenoj prirodi otkrića koja je dostupna učenicima. Od učenika se očekivalo da pokušaju "biti znanstvenici", ali pritom ih se uključivalo u aktivnosti koje uvijek dovode do unaprijed određenih "pravih" odgovora. Stoga se javlja nova struja koja je za cilj laboratorijskog rada imala „proces i vještine“. Ovaj pristup stavlja naglasak na poučavanje onoga što znanstvenici rade (na znanstvenoj metodi), a ne na poučavanje samo znanstvenim činjenicama. Očekuje se da će učenici ovladati raznovrsnim sposobnostima kao što su precizno promatranje, postavljanje hipoteza, klasifikacija i tako dalje. Kako je prevladavajući pristup postao "proces i vještina", cilj znanstvene edukacije usmjeren je na određivanje onoga što znanstvenici zapravo rade, koje vještine koriste i kako ih prenijeti učenicima. Prema [51] navedeni su ciljevi samostalnog eksperimentalnog rada učenika:

1. Osigurati eksperimentalne temelje za uvedene teorijske pojmove. Važno je da učenici imaju priliku provjeriti neke od ideja samostalno.

2. Upoznati učenike s eksperimentalnim aparatom, znanstvenom metodom i metodama analize podataka kako bi imali neku ideju o induktivnom procesu kojim su ideje nastale. Pokazati kako činiti oprezna eksperimentalna zapažanja i kako donositi zaključke iz takvih podataka.

3. Uvođenje metoda za procjenu i metoda vezanih uz eksperimentalne neodređenosti, uključujući jednostavne ideje u teoriji vjerojatnosti i razlike između slučajnih (statističkih) i sistemskih "pogrešaka". Ovo je neophodno za razumijevanje valjanosti zaključaka koji se mogu izvesti iz eksperimentalnih podataka. Ispravno dobiveni ti zaključci su valjani bez obzira na neodređenost samih podataka.

4. Da bi naučili kako napisati izvješće koje sadrži znanstvene informacije na jasan i sažet način.

5. Uvesti nove koncepte i tehnike koje imaju široku primjenu u eksperimentalnoj znanosti, ali nisu još uvedeni kroz dotadašnju nastavu. To može zahtijevati od učenika da se posavjetuje dodatnim udžbenicima.

Učenici trebaju biti svjesni da samostalno izvođenje pokusa kao i rad u skupinama nije natjecanje čiji je cilj dobiti "pravi odgovor". Cilj je naučiti kako stjecati znanje proučavanjem stvarnosti, a ne pokušavajući prilagoditi stvarnost urođenim ili stvorenim predrasudama. Bitno je da učenici nauče kako biti opažač, kako bi stvarno vidjeli što se događa i nosili se s informacijama koje primaju s određenim integritetom. Čak i ako dobiju rezultate potpuno neusklađene s teorijom, što se može dogoditi zbog pogreške ili sistemske neodređenosti, trebaju biti svjesni da će dobiti odgovarajući ocjenu ako pokažu da razumiju što su učinili i kako su dobili rezultate. S druge strane, ako postignu savršeno slaganje teorije s praksom tako da lažiraju svoje podatke neće biti nagrađeni. Sposobnost provođenja pokusa i analize podataka se obično stječe kroz praksu i iskustvo. Praksa je vrlo važna za učenje bilo koje nove discipline. Dobro izlaganje nastavnika može biti vrlo korisno, ali ne i potpuno bez stvarne prakse učenika. Praksa je neophodna za povezivanje teorije i iskustva.

Unatoč svim navedenim pogodnostima pokusa u nastavi, vjerojatno smo se svi tijekom svog školovanja susreli s nedostatkom istih ili tijekom osnovnoškolskog ili

srednjoškolskog obrazovanja. Neki od glavnih razloga zašto se pokusi ne izvode u nastavi, a koje možemo čuti od nastavnika su: neopremljenost potrebnim postavom i nepostojanje mjesta za pohranu potrebnih materijala, nedostatak vremena za pripremu i izvođenje samog pokusa. Nerijetko profesor, ali i učenik smatra da je važnije riješiti zadatak nego li „gubiti vrijeme“ na izvođenje pokusa koji možda i neće uspjeti. O zastupljenosti eksperimentalnog rada može se zaključiti iz vrednovanja nastavnih programa osnovnih škola gdje su predmetni nastavnici i učenici osmog razreda dali svoju procjenu učestalosti pojedinih oblika nastave. Nastavnici fizike su od petnaest ponuđenih aktivnosti izvođenje pokusa naveli kao petu najčešću aktivnost koju izvode s učenicima [41]. Kad se gledaju svi predmeti zajedno izvođenje pokusa je druga najrjeđa aktivnost. U usporedbi s ostalim predmetima u nastavi fizike pokusi se izvode najčešće. Kod procjene učenika izvođenje pokusa nije bila jedna od kategorija koja je bila ispitivana. Većina nastavnika koji omogućavaju učenicima da izvode pokuse to čine redovito. Manji broj nastavnika nikad ne izvodi pokuse, dok svi ostali izvode barem demonstracijske pokuse. Značajan broj nastavnika omogućava učenicima da izvode pokuse u grupama ili samostalno. Iako većina nastavnika ima pozitivne stavove o korištenju pokusa, smatraju da nije posve jednostavno ostvariti željene ishode. Za učenike je zahtjevno samostalno izvoditi zaključke i povezivati teoriju i praksu. Također postoji opasnost od krivog tumačenja pokusa te se često koriste iz krivih motiva, učenici se zbog pokusa mogu osjećati dobro, ali to ne znači nužno i da su naučili više. Od razloga za korištenje pokusa, nastavnici uglavnom navode da oni pomažu učenicima u povezivanju teorijskih znanja s praksom, olakšavaju zaključivanje, omogućavaju zornije predočavanje fizikalnih koncepata, pomažu pri bržem i lakšem pamćenju i učenju. Demonstracijski pokusi su dobri kod poticanja razredne rasprave i motivacije učenika na razmišljanje, fizika ne ostaje samo nešto što piše u udžbeniku i nema veze sa stvarnim svijetom. Tri osnovne vrste pokusa prema ulozi su opservacijski, istraživački i aplikacijski pokusi. Opservacijski pokusi koriste se prilikom opažanja i upoznavanja nove pojave. Svrha je opažanje nove pojave kako bi se shvatilo o čemu se radi i uočilo neke pravilnosti. Izvodi se uglavnom u uvodnom dijelu sata kao temelj za uvođenje i upoznavanje nove pojave, problema. Istraživački pokus kao što mu i ime kaže koristi se prilikom istraživanja pojave i testiranja hipoteza i izvodi se u središnjem dijelu sata, a od učenika zahtijeva da osmisle eksperimentalni test za hipotezu i predvide ishod

pokusa koji bi potvrdio hipotezu. Svrha je istraživanje međuovisnosti varijabli koje utječu na promatranu pojavu i provjera mogućih objašnjenja pojave. Aplikacijski pokus koristi se kod primjene znanja pri rješavanju novih problema. Svrha je primjena poznatih koncepata u novom kontekstu. Učenici primjenjuju koncepte koje su konstruirali kako bi objasnili druge fenomene. Koriste se uglavnom u završnom dijelu sata. Prema načinu izvođenja razlikujemo frontalne i učeničke pokuse. Frontalni pokus nastavnik izvodi pred cijelim razredom. Mogu biti opservacijski (demonstracijski), istraživački i aplikacijski. Učenički pokus izvode učenici grupno ili individualno. Najčešće se radi o istraživačkim, a rjeđe o opservacijskim i aplikacijskim pokusima. U tu „skupinu“ spadaju i kućni pokusi i projekti, laboratorijske vježbe. Računalne simulacije i animacije omogućuju variranje parametara i istraživanje kad ne možemo izvesti pravi pokus. Animacije omogućavaju lakšu vizualizaciju nekih fizikalnih modela. Tijekom izvođenja frontalnog pokusa bitno je da je on dobro vidljiv sa svih mjesta u razredu. Bitna je jasnoća, kako je što spojeno, postavljeno za daljnje razumijevanje. Prije izvođenja pokusa potrebno je učenicima kratko opisati eksperimentalni postav, provjeriti poznaju li učenici instrumente koji će se koristiti te što i kako oni mjere. Nastavnik treba prije izvođenja pokusa govoriti što će učiniti, ali ne i što će se dogoditi. Dobro je uvijek pa čak i kod demonstracijskih pokusa pitati učenike što očekuju da će se dogoditi. Nakon izvedenog pokusa, potrebno je pitati učenike što su opazili. U slučaju neslaganja učenika oko opaženoga potrebno je ponoviti pokus i usmjeriti im pozornost na ono što želimo da promatraju. Pokus se treba izvoditi polako i više puta, kako bi ga učenici mogli pažljivo promotriti i uvjeriti se u svoja opažanja. Tek kada su se usuglasili oko opažanja potrebno je prijeći na interaktivno tumačenje. Učenici samostalno skiciraju i opisuju pokus u bilježnici te svojim riječima zapisuju zaključke. Snimljeni pokusi su vrlo korisni kada je teško ili nemoguće izvesti pokus u razredu ili za pokuse koji zahtijevaju posebne instrumente ili veliku vještinu. Snimljene pokuse kao i simulacije treba prezentirati prema istim pravilima kao i pravi pokus.

Tijekom Metodičke prakse iz nastave fizike u osnovnoj školi bila sam u prilici vidjeti kako novi sustav naobrazbe profesora zahtjeva od nastavnika fizike koji će polagati stručne ispite da organiziraju istraživački orijentiranu nastavu. Učenici su redovito izvodili pokuse u manjim skupinama ili su kroz razrednu diskusiju raspravljali o pokusu

koji je nastavnik demonstrirao. Svi prisutni mogli smo primijetiti veliki zaokret u načinu podučavanja koji se dogodio u posljednjih desetak godina kad smo i sami sjedili u školskim klupama.

## **2.1. Koraci izvođenja pokusa i izazovi**

Tijekom prvih izvođenja pokusa u razredu vjerojatno je dobra ideja upotrijebiti pokus koji je netko drugi pripremio. Korisno se služiti bilješkama koje idu uz odabrani pokus. Ovisno radi li se o demonstracijskom pokusu ili učenici samostalno rade potrebno je dobro poznavati samu teoriju pokusa koji se provodi. Provođenje pokusa u učionici uključuje nekoliko važnih koraka [52]:

### **1. Priprema nastavnika**

Nastavnici rutinski prilagođavaju nastavu svojim učenicima. Neke od stvari o kojima nastavnici trebaju razmisliti prije izvedbe pokusa u učionici uključuju: odlučivanje o tome kako najbolje ugraditi pokuse u nastavni sadržaj, određivanje odgovarajuće količine vremena za pokus (neki pokusi mogu trajati više od jednog školskog sata dok drugi mogu potrajati samo nekoliko minuta). Potrebna je prilagodba pokusa dobi učenika, ozračju (redovna nastava, dodatna nastava), osobnosti i stilu učenja učenika (veće ili manje učeničke skupine, poznavanje radne atmosfere učenika koji tvore određenu skupinu pri grupnom radu). Važan je odabir strategije za rješavanje mogućih tehničkih poteškoća: raspored klupa, broj učenika, dostupnost računala i računalne učionice (ako se promatra simulacija, snimka pokusa).

### **2. Priprema učenika**

Pripremanje učenika za pokus ključno je za uspješno iskustvo učenja. Od učenika se može zatražiti da prije pokusa pročitaju upute koje objašnjavaju pokus i njihovu ulogu u istome, dovrše čitanje teorijske osnove vezane uz pokus, a možda započeto na prethodnom satu, naprave predviđanja o ishodu pokusa. Učenicima je potrebno osigurati materijale bilo u papirnatom ili digitalnom obliku. Potrebno je imati na umu i vremensku uštedu koja je velika u odnosu na to kad učenik o pokusu čita prvi puta tek dok se on izvodi. Unaprijed pripremljeni materijali omogućuju učenicima da postave pitanja u vezi s mogućim nejasnoćama prije same izvedbe. Također priprema učenika olakšava učenicima s teškoćama u razvoju koji npr. trebaju pomoć pri čitanju. Također građa koja je zadana kao zadaća za pripremu za naredni sat može se

koristiti za testiranje razumijevanja učenika te se može uključiti i koristiti pri ocjenjivanju. Kod materijala koji nisu namijenjeni kao zadaća za čitanje prije sata već su namijenjeni radu tijekom sata najbolje je da nastavnik ili učenik čita upute naglas, tako da učenici ne prelete preko uputa, također nastavnik može istaknuti važne komponente.

### 3. Izvođenje pokusa i prikupljanje podataka

Rad kroz logistiku izvođenja pokusa je važan za uspješno iskustvo učenika. Često je korisno tijekom izvedbe pokusa imati jednog ili dva učenika koji će „pomoći“ pri izvođenju demonstracijskog pokusa, kako bi sama izvedba bila dinamičnija i potakla zanimanje ostatka razreda. Razvijanje uravnoteženog procesa odgovaranja na pitanja i prikupljanja podataka je bitno i razvija se s iskustvom i dobrom pripremom. Moguće je razmotriti prilagodbu pokusa za vrlo velike razrede, možda pomoću računala. Također potrebno je razmotriti ako se takva nastava izvodi i o dostupnosti (vidljivosti) pokusa u online nastavi.

### 4. Analiza podataka i produljenje iskustva

Nakon prikupljanja podataka vrlo je važno je komentirati rezultate s učenicima i povezati ih s onim što uče na satu. Korisno je da učenici vide podatke koje su prikupili drugi učenici ili grupe, a ne samo svoje rezultate. Ponekad možda nije praktično objediniti podatke cijelog razreda na jedno mjesto, stoga je potrebno razmisliti ima li smisla prikazati prikupljene podatke na sljedećem satu te kako će učenici stupiti u interakciju s podacima. U nekim je situacijama korisno da nastavnik organizira podatke u grafikone, što može biti dio učeničkog iskustva i korelacije s informatikom. Učenici trebaju tumačiti značenje rezultata umjesto da ih samo prezentiraju na način na koji bi to učinili kod seminarskog rada. Nastavnik je taj koji vodi razrednu raspravu o tome kako se pokus odnosi na gradivo koje se trenutno obrađuje. Samo izvođenje pokusa nije dovoljno. Potrebno je voditi učenike kroz proces tumačenja i učenja iz onog što su upravo promatrali. Iskustvo pokusa nije samo onaj trenutak dok su učenici u učionici. Često se može uspješno koristiti kao zajedničko iskustvo koje je temelj za gradivo koje će se obrađivati dalje tijekom godine. Također može biti katalizator koji pomaže učenicima da počnu razmišljati izvan granica materijala koji im se prezentiraju. Pred kraj razredne diskusije o

pokusu potrebno je pitati učenike: "Što bi se dogodilo ako promijenimo neki parametar pokusa?". Učenike je potrebno potaknuti na razmišljanje kako izmijeniti pokus kako bi testirali novu hipotezu.

## 5. Procjena učeničkih postignuća ciljeva učenja

Standardni testovi, kvizovi i zadaci za domaće zadaće mogu se koristiti za mjerenje onoga što učenici uče tijekom eksperimentalnog rada. Može se razmotriti dodavanje drugih mjera za procjenu. Učenici uglavnom odgovaraju na pitanja o samom pokusu. Osnovna pitanja na koje se traži odgovor su da se opišu važne značajke samog pokusa i sažmu rezultati. Od učenika se može traži da izvrše izračune slične onima u pokusu ili da tumače neke slične podatke. Naprednija pitanja se usredotočuju na predviđanje rezultata u pokusima koji se odnose na obrađivano gradivo, a povezani su s pokusom koji je upravo diskutiran. Učenici također mogu analizirati sličan pokus i predložiti izmjene na temelju vlastitog iskustva. Važno je i postavljanje pitanja koja učenicima omogućuju da razmisle o svojim iskustvima i daju osvrt o tome što su naučili ili nisu iz pokusa. To su korisne informacija za samog nastavnika i poboljšanje pokusa za sljedeće polugodište. Tipična pitanja su: jesu li upute pokusa jasne, što ste smatrali zbunjujućim, što ste naučili iz pokusa, na koji način vam pokus pomaže da bolje razumijete lekciju koja se obrađuje na satu?

Jedan od velikih strahova nastavnika koji nikada nisu provodili pokus u učionici je "Što ako stvari ne idu kako sam planirao?". To je naravno valjan razlog za brigu jer mnogo je toga što pri izvođenju pokusa ili simulacije može krenuti krivo. Učenici možda ne slijede upute, nestanak struje ili internetske usluge može biti valjan razlog za brigu kod prikaza simulacija. Međutim, postoje strategije za rješavanje takvih poteškoća, a često se na greškama najbolje uči.

## 2.2. Strategije kod neočekivanih ishoda

Kako je rad namijenjen nastavniku kao motivacija i inspiracija za uključivanje većeg broja pokusa u nastavni proces, u nastavku će biti navedeno nekoliko savjeta što učiniti kada se situacija ne odvija kao što je planirano. Iako se nastavnik možda dok izvodi pokus osjeća nesigurno, iz učeničke perspektive situacija ne izgleda loše. Učenici u većini slučajeva uživaju u odmaku od rutine sata i brzo će zaboraviti manje pogreške ako se jave. Naravno, bitno je uvijek naglasiti gdje i zašto je došlo do pogreške.



Izvođenje pokusa je vještina koja se najbolje stječe iskustvom, ali uz dobru pripremu mala je vjerojatnost većih pogrešaka, posebice ako se provode pokusi za koje postoji detaljna literatura i upute. Iako je gotovo svaka od nadalje navedenih situacija malo vjerojatna, nije nemoguća. Na primjer: nastavnik može zaboraviti neke ključne materijale potrebne za izvedbu pokusa, učenici možda ne slijede upute, školski razglas počne prenositi neku vijest u ključnom dijelu pokusa i pažnja učenika odluta, nastava može biti otkazana zbog vremenskih nepogoda. Stoga je uvijek dobra ideja imati rezervni plan. U [52] govori se o važnosti analiziranja što je pošlo po krivu i učenja iz grešaka. Također svaki izvedeni pokus je prilika za učenje i poboljšanje. Potrebno je razmisliti i zabilježiti kako je "pogreška" utjecala na pokus i pokušati analizirati što se dogodilo, a što se trebalo dogoditi. Tijekom izvedbe ili prije sljedećeg izvođenja pokusa korisno je konzultirati se s vlastitim bilješkama. Ako će nastavnik pokus izvoditi tek sljedeće godine vrlo je vjerojatno da će, ako nema zabilježeno zaboraviti neke sitne napomene na kojima je namjeravao poraditi tijekom idućeg izvođenja pokusa. Jako je bitno uvijek sa sobom imati rezultate sličnih mjerenja jer u situaciji kada se ne dobivaju očekivani rezultati ipak možemo objasniti zašto se situacija ne odvija planirano i pitati učenike što misle što rezultati „rezervne“ studije odnosno izvedenog pokusa trebaju govoriti. Isti pokus može se provesti na sljedećem satu kada se eliminiraju smetnje koje su se javile. Važno je ne zaboraviti pitati za pomoć. Uvijek se dobro raspitati kod starijih kolega na kakve su oni poteškoće naišli pri izvođenju pokusa i na što savjetuju da se obrati pažnja. Također jedna od bitnih napomena je strpljenje. Ako određeni pokus iz raznih razloga ne uspijeva potrebno je znati stati i ostaviti pitanje otvoreno do sljedećeg sata, pritom nema razloga za paniku niti sumnju u vlastite sposobnosti. Potrebno je ostati usredotočen i ne žuriti kroz ostatak vremena.

Gledajući sa aspekta kako se znanost stvarno izvodi, nije loše da neki pokusi ne uspiju, odnosno da daju rezultate koji nisu fizikalno očekivani. Važno je da učenici dobiju uvid kako razvoj znanosti funkcionira, zašto je u povijesti znanosti bilo teorija i modela koji su kasnije zamijenjeni novima. Uobičajeni dijelovi znanstvene metode su neprestana provjeravanja postojećih znanja i teorija, ponavljanje pokusa s boljim mjernim instrumentima i metodama te dopunjavanje teorijskih modela ili definiranje novih. Kako nastavnici u većini ne izvode znanstvena istraživanja, o ovim aspektima treba napraviti odgovarajuću edukaciju.

### **3. Kognitivni modeli**

Još od vremena Platona i Aristotela rasprava o tome jesu li ljudi rođeni s intrinzičnim znanjem pa čak i sustavom obrade znanja, fascinirala je najveće svjetske mislioce. Iako su prve takve rasprave bile ograničene prvenstveno na filozofe, suvremena istraživanja potaknula su tu raspravu u sustavu obrazovanja i znanosti, a osobito su utjecala na rad mnogih znanstvenika na području kognitivne psihologije. Dok su stoljećima filozofi i rani psiholozi raspravljali o potencijalnim kognitivnim naslijeđima od tabule rase do inatizma, tek je u posljednjih pola stoljeća došlo do empirijskih podataka koji potvrđuju postojanje urođene „psihe“.

Ove predisponirane strukture misli, koje su zajedničke novorođenčadi i vrlo maloj djeci, nazvane dječjim kognitivnim modelima, daju im urođeno znanje koje im omogućuje da na određene načine obrađuju nove informacije [8]. Istraživanja su pokazala da su kognitivni modeli uključeni u sposobnost djeteta da između ostalog procesira i utvrdi jezik [9], razlikuje sebe od drugih [10] i oslanja se na trajnost objekta [11]. Rano istraživanje Piageta [12] pokazalo je kako kognitivni modeli vode ljude da sustavno gledaju svijet na pristran način, djelovanje koje se zove kognitivna pristranost. Kognitivne pristranosti možda ne odgovaraju stvarnosti. Na primjer, ove kognitivne predrasude mogu uzrokovati sustavne pogreške kod tumačenja teorije pokreta [13]. Prema tome, čini se razumnim tvrditi da naivna fizika koju Proffitt definira kao "razumna uvjerenja koja ljudi drže o načinu na koji svijet funkcionira" [14], možda ima slično pristrano tumačenje kvantne mehanike. Početkom 21. stoljeća dolazi do snažnog razvoja spoznaja o mogućnostima i važnosti učenja djece u najranijoj dobi. Europski obrazovni standardi uvode obavezno rano učenje od 4. godine života. Vrijeme je i da se hrvatski obrazovni sustav snažnije transformira u tom smjeru.

#### **3.1. Naivna fizika**

Čudni i neintuitivni fenomeni kvantne mehanike ne mogu se ugraditi u koherentnu kognitivnu sliku bez pomoći pažljivo odabranih osnovnih pojmova koji im pomažu organizirati ih. Istraživanja su pokazala da su mnoga temeljna uvjerenja u djece učvršćena u vrlo mladoj dobi ili su posve urođena. Tijekom analize intuitivnih uvjerenja o kretanju utvrđeno je da imaju više zajedničkog sa srednjovjekovnom (Aristotelskom) mehanikom, nego li s klasičnom Newtonovom mehanikom.

Nersessian i Resnick prikazuju intuitivna uvjerenja o kretanju kako slijedi [15]:

1. Svako kretanje zahtijeva uzročno objašnjenje.
2. Gibanje je uzrokovano „silom“.
3. Kontinuirano gibanje održava se „pohranjenom silom“.
4. Aktivna i pasivna gibanja se razlikuju.
5. Gibanje prema dolje je prirodno.
6. Teži objekti padaju brže.

U mnogim studijama zabilježeno je djetetovo urođeno uvjerenje u pohranjenu silu ili poticaj koje ponekad vodi i do pogrešnih zaključaka. Na primjer, krivolinijska pristranost je pogrešna predodžba u kojoj se pretpostavlja da predmeti ograničeni na zakrivljenu stazu nastavljaju slijediti zakrivljenu stazu jednom kad su otpušteni [16]. Suprotno našoj urođenoj krivolinijskoj pristranosti, predmeti oslobođeni iz zakrivljenih staza kreću se po tangenti s obzirom na točku oslobađanja, a ne nastavljaju slijediti zakrivljenu stazu. Mnogi aspekti naivne fizike kao što je krivolinijska pristranost često nastavljaju u odrasloj dobi [17]. Fascinantna je činjenica da se čak i oni koji su "obučeni u fizici" često vraćaju na vrednovanje svojih kognitivnih predrasuda ako je to potrebno da bi dali odgovor na određeni fizički problem u ispitnoj situaciji [18], [19].

Još jedan poznati primjer dječjih kognitivnih pristranosti u fizici koji može dovesti do krivih zaključaka je poznat kao gravitacijska pogreška. To je pogreška koja proizlazi iz urođenog uvjerenja da je "kretanje prema dolje prirodno". Psiholog Bruce Hooda tvrdi da se ova pogreška pojavljuje u djece koja ne shvaćaju da određeni zakoni mogu utjecati na zakon gravitacije. Hood je otkrio da gledajući loptu koja je pala u jednu od triju rupa, mala djeca uvijek gledaju u džep koji se nalazi odmah ispod početne rupe u koju je lopta bačena. Ta djeca nisu učena da to učine već se činilo da instinktivno znaju da objekti padaju ravno. Zanimljiv preokret u pokusu pokazao je da djeca i dalje to rade čak i kada je cijev povezana s otvorom početne rupe ali skreće i završava u džepu koji nije izravno ispod. Dojenčad će i dalje tražiti loptu neposredno ispod početne rupe u koju je lopta bačena i potpuno zanemariti džep do kojeg vodi cijev [20].

Postoji još mnogo drugih primjera ovakvih naivnih shvaćanja fizike. Kada se loptica za tenis baci u zrak, očekujemo da se vrati. Kad se jedan predmet sudari s drugim, očekujemo da se zaustavi ili odbije, a ne da prođe kroz drugi predmet. Bruce Hood u

svojoj knjizi SuperSense [21], iznosi četiri pravila naivne fizike koja su temelj svih intuitivnih objašnjenja fizikalnog svijeta, a koje je predložila dječja psihologinja Elizabeth Spelke [22]. Ova četiri pravila su ključna u raspravi o utjecaju kognitivnih pristranosti na teorije kvantne mehanike [21]:

**Pravilo 1:**

Predmeti ne idu u i izvan postojanja poput mačke iz popularne dječje literature Alisa u Zemlji čudesa. Njihova čvrstoća određuje da nisu duhovi koji se mogu kretati kroz zidove. Isto tako, drugi čvrsti objekti ne mogu se kretati kroz njih.

**Pravilo 2:**

Objekti su omeđeni tako da se ne mogu rastaviti i opet jednako kao prije sastaviti. Ovo pravilo pomaže u razlikovanju između čvrstih predmeta, poput jabuke i tekućina.

**Pravilo 3:**

Objekti se kreću po neprekidnim stazama tako da se ne mogu teleportirati s jednog mjesta na drugo bez da se vidi taj prelazak.

**Pravilo 4:**

Objekti se općenito kreću samo kad ih nešto tjera da se kreću, silom ili sudarom. Inače se vjerojatno radi o živim organizmima.

Spelkina pravila su izvanredna nekome tko je upoznat s kvantnom mehanikom jer su gotovo upravo suprotna od fenomena koje promatramo u kvantnom području. Mnoge kognitivne predrasude, uključujući one koje je detaljno opisala Spelke, ostaju u odrasloj dobi, ali se većina naivnih fizikalnih uvjerenja također mijenja tijekom vremena. Odrasla osoba će vjerojatno u Hoodovom gravitacijskom pokusu odabrati džep koji se nalazi na kraju cijevi, a ne izravno ispod mjesta gdje je lopta bačena. Čini se da ljudi mogu svjesno prevladati neke urođene zakone fizike, ali mnogi dokazi pokazuju da u osnovi još uvijek ostaju četiri temeljna uvjerenja koje je Spelke podržala [22]. Većina odraslih bi se zasigurno složila da predmeti ne nestaju i nastaju sami od sebe, ne mogu se vratiti u stanje u kojem su bili prije razbijanja, nemaju nevidljive sposobnosti

teleportiranja i kreću se samo kada nešto djeluje na njih. Doista, pojave koje krše ova uvjerenja, kao što su nestajanje zečeva i lebdeći stolovi, obično se smatraju magijom [21].

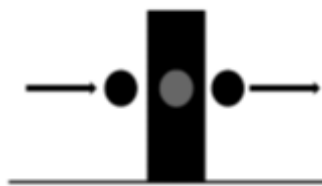
Ovdje treba istaknuti još jedan aspekt razumijevanja prirodnih znanosti koji se kroz loše obrazovanje povlači i u 21. stoljeće. Još su stari Grci utvrdili da je empirijsko znanje – znanje dobiveno kroz opažanja – nepouzdana! David Hume je u 18. stoljeću to dodatno pojasnio da je nemoguće zaključiti (da je model ispravan) na temelju konačnog niza promatranja. Što to znači? Da ako djecu ne naučimo znanstveno razmišljati i razumijevati znanstvene metode i modele, ona će na temelju empirijskog znanja (uz potporu istomišljenika s interneta) početi vjerovati da je Zemlja ravna ploča i stara par tisuća godina te da razvoj znanosti čovječanstvu ne treba. To je jedan od jasnih argumenata zašto djeci treba od rane dobi prezentirati složene znanstvene koncepte, kao što su oni iz kvantne fizike te njihovu ulogu u današnjim tehnologijama i inženjerstvu.

### 3.2. Kvantna mehanika je zastrašujuća

Tijekom dvadesetog stoljeća kvantna mehanika se razvila u bogatu, lijepu i primamljivu teoriju. Međutim, način na koji se fizički objekti ponašaju u kvantnom području vrlo su različiti od ponašanja koje promatramo svakodnevno, ali i od naivnog shvaćanja fizike. Uzimajući Spelkina pravila urođenog znanja o predmetima i uspoređujući ih s kvantnim mehaničkim fenomenima, vidimo velike razlike:

**Pravilo 1:** Predmeti ne idu u i izvan postojanja poput mačke iz popularne dječje literature Alisa u Zemlji čudesa. Njihova čvrstoća određuje da nisu duhovi koji se mogu kretati kroz zidove. Isto tako, drugi čvrsti objekti ne mogu se kretati kroz njih.

U kvantnoj mehanici, čestice se mogu pojaviti i nestati same od sebe! Kvantna mehanika predviđa da su svuda oko nas cijelo vrijeme čestice zvane virtualne čestice koje se neprestano pojavljuju i nestaju [23]. Slično tome, čestice se mogu kretati kroz zidove. Klasično, kad se čestice sudaraju s preprekom, bez dovoljno energije da probiju prepreku, odbijaju se, ali u kvantnoj mehanici, ponekad čestice koje nemaju dovoljno energije da probiju barijeru i dalje prolaze kroz nju procesom poznatim kao kvantno tuneliranje, vidi sliku 1.



*Slika 1. Kvantno tuneliranje kroz prepreku*

**Pravilo 2:** Objekti su omeđeni tako da se ne mogu rastaviti i opet jednako kao prije sastaviti. Ovo pravilo pomaže u razlikovanju između čvrstih predmeta, poput jabuke i tekućina.

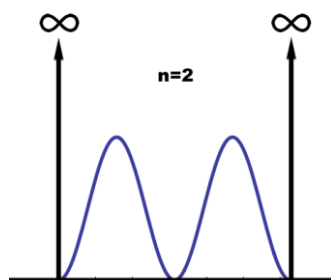
Kada samo jedan foton udari u polupropusno zrcalo, vidi sliku 2, intuicija bi nam rekla da će on napustiti zrcalo ili u okomitom ili vodoravnom smjeru. Foton bi se zatim reflektirao s jednog od zrcala, a potom udario u polupropusno zrcalo koje se nalazi neposredno prije detektora. Na drugom polupropusnom zrcalu bi ponovno očekivali da će foton napustiti zrcalo ili u vertikalnom ili horizontalnom smjeru te bismo stoga trebali detektirati pola fotona na detektoru A i pola fotona na detektoru B. Međutim, pri izvođenju ovog pokusa 100% fotona detektira se na detektoru A i ništa na detektoru B. Taj je učinak poznat kao jednočestična interferencija. Čak i kad se kroz aparat šalje samo jedan foton, čini se kao da se fotoni rascjepe, putuju duž oba puta i sastave kako bi interferirali sami sa sobom. Ako se odlučimo promatrati put kojim foton putuje, doista ga vidimo kako putuje po samo jednom putu, kao što bi se očekivalo, ali ono što je zanimljivo je da se utjecaj interferencije više se ne vidi, odnosno vidimo da su jednaki iznosi fotona stigli na oba detektora. Jednočestični interferencijski efekt očito se događa samo kada ne gledamo. Čudno je da se taj izbor hoćemo li gledati ili ne može napraviti nakon što je foton već u mjernom uređaju i dobit ćemo isti rezultat. [24], [25]. To razmatranje poznato je kao Wheelerov pokus o naknadnoj odluci.



*Slika 2. Čini se da se foton razdvaja i putuje duž oba puta.*

**Pravilo 3:** Objekti se kreću po neprekidnim stazama tako da se ne mogu teleportirati s jednog mjesta na drugo bez da se vidi taj prelazak.

U kvantnoj mehanici, čestice se mogu teleportirati s jednog mjesta na drugo bez prijelaza između ta dva mjesta. Na primjer, ako se čestica nalazi unutar zidova kutije koji su neprobojne prepreke (tako da ne može tunelirati), onda postoje određena stanja u kojima se čestica može promatrati, na lijevoj strani kutije ili na desnoj strani kutije, ali nikad u sredina. Ponekad kada pogledamo, vidjet ćemo česticu na lijevoj strani kutije, a ponekad ćemo je vidjeti na desnoj strane kutije, ali kako nam intuicija nalaže nikad nećemo promatrati česticu u sredini kutije koja putuje s jedne na drugu stranu, vidi sliku 3.



*Slika 3. Čestica u kutiji. Vjerojatnost pronalaženja čestice u sredini je nula.*

**Pravilo 4:** Objekti se općenito kreću samo kad ih nešto tjera da se kreću, silom ili sudarom. Inače se vjerojatno radi o živim organizmima.

U kvantnoj mehanici, sve čestice, čak i one koje su u stanju najniže moguće energije (osnovnom stanju) i dalje imaju energiju nulte točke. Ta temeljna energija omogućuje da sve čestice budu u stalnom gibanju bez da na njih djeluje neka vanjska sila ili sudar, čak i na apsolutnoj nuli.

Kao što možemo vidjeti, kvantni fenomeni ne samo da se protive našem svakodnevnom iskustvu, oni se protive i našim urođenim kognitivnim modelima. To ne samo da čini kvantnu mehaniku teškom za razumjeti, već je čini i teškom i za prihvatiti. Za one koji

su školovani u kvantnoj mehanici, to je čak i gore. Kopenhaška interpretacija postulira da ne samo da su rezultati kvantne mehanike nelokalni, već da je sama stvarnost nelokalna. Poznate Feynmanove riječi su: „Paradoks je samo sukob između stvarnosti i vašeg osjećaja o tome što bi stvarnost trebala biti.“ [26]. Drugi kvantni fenomeni koji izgledaju nevjerovatno i ne odgovaraju našoj intuiciji uključuju: Heisenbergov princip neodređenosti, kvantno sprezanje, valno čestična dualnost.

**Heisenbergov princip neodređenosti** navodi da nije moguće istovremeno znati točan položaj i brzinu (količinu gibanja) čestice. Upravo je ta neodređenost u prirodi, ono što je Einstein u početku odbio prihvatiti u Kopenhaškoj interpretaciji izjavivši: „Kvantna mehanika svakako je impozantna. Ali unutarnji glas mi govori da to još nije prava stvar. Teorija kaže puno, ali zapravo ne dovodi nas bliže cilju. Ja sam, u svakom slučaju, uvjeren sam da On ne baca kockice“ [27].

**Kvantno sprezanje:** kvantno sprezanje se pojavljuje kad dvije čestice međudjeluju na način koji se ne može opisati neovisno. Mjerenje svojstva jedne od čestica utječe na stanje druge čestice koja u trenutku mjerenja može biti na velikoj udaljenosti. Opet, ovaj kvantno-mehanički efekt se protivi našoj intuiciji i izgleda magično, nadahnjujući Einsteina da ga nazove "sablansnim djelovanjem u daljini" [28].

**Valno čestična dualnost:** U kvantnoj mehanici čestice se mogu ponašati i kao čestice i kao valovi. Kao što smo vidjeli kod jednočestične interferencije, način na koji će se ponašati ovisi o tome hoćemo li ih promatrati ili ne. Drugi primjer gdje se to može vidjeti je kod pokusa s dvostrukom pukotinom gdje se čestice šalju na ogibnu rešetku na kojoj se ogibaju ponašajući se time poput valova. Slično imamo u praktičnoj primjeni kod elektronskog mikroskopa gdje se elektroni ponašaju kao valovi. Valno - čestičnu dualnost Feynman je opisao kao kvantni misterij koji ne može nestati [29].

### 3.3. Kognitivna pristranost

U radu [40] Naivna fizika i kvantna mehanika: kognitivna pristranost Everetovog tumačenja mnogih svjetova Andrew SID Lang i Caleb J Lutz razgovaraju o ulozi koju intuitivne teorije fizike imaju u interpretaciji kvantne mehanike. Uspoređuju i suprotstavljaju naivnu fiziku s kvantnom mehanikom i tvrde da je kvantna mehanika ne samo teška za razumjeti već da je teška i za povjerovati. O kvantnoj mehanici često se



raspravlja u kontekstu „kvantne čudnovatosti“, a kvantno sprezanje poznato je kao "sablasni rad na daljinu". Sva ta „čudnovatost“ ne samo da je uzrokovana činjenicom da kvantna mehanika ne odgovara našem svakodnevnom iskustvu već ona ne odgovara kognitivnim modelima naivne fizike. Andrew SID Lang i Caleb J Lutz smatraju da Everettovim tumačenjem kvantne mehanike mnogih svjetova čuvamo oblik determinističkog razmišljanja koji može ublažiti neke uočene čudnovatosti svojstvene drugim tumačenjima kvantne mehanike, uz cijenu da se svemir dijeli na paralelne svjetove na svakom kvantnom mjerenju. Proučavajući ulogu koju kognitivni modeli igraju u tumačenju kvantne mehanike, Lang i Lutz zaključuju da tumačenje kvantne mehanike mnogih svjetova uključuje kognitivnu pristranost koja se ne vidi u Kopenhaškoj interpretaciji.

Niels Bohr je rekao: „Oni koji nisu šokirani kad se prvi put susretnu s kvantnom teorijom, nemoguće da su je shvatili“ [37].

Za one koji prvi put uče o kvantnoj mehanici, čini se da je to teorija koja ne može opisivati stvarnost. Zapravo, što više toga učimo o kvantnoj mehanici to neintuitivnijom ona postaje. Dok je teorija matematički elegantna i predviđanja teorije su testirana i provjerena, postoji nešto u kvantnoj mehanici što se jednostavno ne čini ispravnim. Može li priroda stvarnosti biti tako bizarna? Trenutno, dva prevladavajuća tumačenja kvantne mehanike su Kopenhaško tumačenje koje su razvili Bohr i Heisenberg u Kopenhagenu 1920-ih [38] te tumačenje mnogih svjetova koje je prvi put predložio Hugh Everett 1957. [39]. Dok tumačenje iz Kopenhagena objašnjava iznenađujuće rezultate kvantne teorije postavljanjem da je priroda nelokalna, tumačenje mnogih svjetova pokušava ispraviti ovu neintuitivnost postulirajući da se svemir stalno razdvaja. Rad Langa i Lutza predlaže da je pridržavanje tumačenju mnogih svjetova pristrano zbog ljudske percepcije stvarnosti koja proizlazi iz urođenog razumijevanja fizike. Zbog toga se nelokalnost iz Kopenhaškog tumačenja čini pogrešnom, a ponekad i mističnom, čineći tumačenje mnogih svjetova privlačnijom teorijom.

Kao što smo vidjeli, naivne teorije fizike rezultiraju netočnim zaključcima o tome kako svijet funkcionira i svi, uključujući i fizičare, imaju određene urođene pristranosti koje onemogućuju objektivnost prilikom evaluacije znanstvenih objašnjenja [33]. Zbog neuzimanja tih urođenih ili stečenih predrasuda u obzir, neke znanstvene teorije ispaštaju pri čemu pogrešno tumačeni znanstveni rezultati izgledaju kao objektivni

zaključci. Kako bi zadovoljili svoja urođena uvjerenja, mnogi fizičari odlučili su podržati minimalno neintuitivno i kognitivno optimalno [35], [36] tumačenje mnogih svjetova. Čineći to ne moraju se suočiti s kolapsom valne funkcije, niti problemom nelokalnosti. Kad nesvjesno djeluju pod utjecajem tih predrasuda koje mogu biti i naučene i urođene, znanstvenici često izvode zadovoljavajuće zaključke, zaboravljajući da bi trebali biti skeptičniji [34].

## 4. Školski sustav

### 4.1 Školski sustav u Hrvatskoj i kvantna fizika

Početak 20. stoljeća srednjoškolsku naobrazbu imalo je manje od 10% stanovništva. Danas situacija naravno nije takva. Dok je prije naglasak bio na reprodukciji sadržaja, danas se sve veći naglasak želi staviti na razumijevanje i sposobnost primjene znanja. Susretanje s nepoznatim neuobičajenim konceptima, zadacima i problemima koji još nisu razriješeni postala je misao vodilja obrazovnih sustava mnogih zemalja poput Norveške i Njemačke. U hrvatskim školama i dalje prevladava predavačka nastava na razini 20. stoljeća u kojoj su učenici većinom pasivni promatrači. Taj oblik nastave nije prikladan za zanimanja i život 21. stoljeća te ga treba hitno mijenjati.

U postojećem sustavu učenici se za izbor srednje škole moraju opredijeliti već krajem 8. razreda osnovne škole. Do tada su samo dvije godine imali nastavu fizike, u sedmom i u osmom razredu. Jesmo li im do tada pružili dovoljno informacija o tome čime se današnja fizika (odnosno STEAM struke) bavi? Jesmo li ih uopće upoznali s izazovima pred kojima se nalazi razvoj suvremene znanosti i tehnologije?

U okviru postojećih programa „količina“ fizike s kojom će se učenik susresti ovisi o izboru srednje škole. U dvogodišnjem osnovnoškolskom periodu učenici se susreću s brojnim temama. Krenuvši u sedmom razredu od mjerenja duljine, građe tvari, preko pojma sile, poluge, tlaka, rada, energije, toplinskog širenja tijela, pojma unutarnje energije i topline dolazi se do osmog razreda. U osmom razredu učenici kreću od strujnih krugova, magneta i magnetskog djelovanja električne struje, nastavljaju zatim s električnim nabojima i njihovim međudjelovanjem, električnim naponom i Ohmovim zakonom. Pred kraj osmog razreda teme koje se obrađuju su gibanje, brzina, i akceleracija, postanak i vrste valova, zvuk, i konačno rasprostiranje svjetlosti i razlaganje svjetlosti na boje. Upravo je kraj osmog razreda nakon posljednje predviđene nastavne cjeline pogodno mjesto za susret učenika s osnovnim kvantnim konceptima. Koncept fotoelektričnog efekta nadovezuje se na gradivo optike, uvodeći koncept čestične prirode svjetlosti. Kako se učenici osmog razreda već uvelike služe apstraktnim razmišljanjem te su se kroz dvije godine fizike upoznali s nekim temeljnim

neintuitivnim konceptima potrebno je napraviti korak dalje i upoznati učenike s konceptima koji još više odstupaju od onoga što svakodnevno promatraju.

Kao što smo mogli vidjeti nastavni plan i program fizike u osnovnoj školi sadrži brojne teme na kojima se učenici više ili manje zadržavaju. Izborom srednje škole učenici će uvelike utjecati hoće li se ikada sresti s pojmovima iz kvantne mehanike ili će oni ostati nešto „mistično“ o čemu će u najboljem slučaju samo čuti u nekoj dokumentarnoj emisiji. Ono što je svakako potrebno izbjeći je negativna konotacija koja se veže uz kvantu fiziku kao neshvatljivu i tešku. Kako bi se izbjegle predrasude potrebno je učenicima omogućiti da od najranije dobi otkrivaju koliko daleko kvantni fenomeni odstupaju od našeg klasičnog svakodnevnog iskustva. Naravno da nije logično započeti s matematičkim formalizmom, ali odgovori na neka konceptualna pitanja kvantne mehanike na uvodnoj razini svakako su primjereni.

U hrvatskim školama teme iz kvantne fizike obrađuju se u srednjoj školi. U strukovnim školama s jednogodišnjim programom fizike nije predviđeno učenje pojmova iz kvantne fizike dok se u gimnazijskom četverogodišnjem programu teme iz moderne i kvantne fizike detaljno obrađuju kroz cijeli 4. razred. Prvu cjelinu četvrtog razreda čine: zakoni zračenja crnog tijela, fotoelektrični efekt, Comptonov učinak, Heisenbergova relacija neodređenosti. Druga nastavna cjelina četvrtog razreda bavi se Thomsonovim i Rutherfordovim modelom atoma, Bohrovim modelom atoma, emisijom fotona i kvantno-fizičkim modelom atoma. U nastavku učenici obrađuju neke od tema nuklearne fizike, fizike elementarnih čestica, fizike čvrstog stanja i astrofizike. Sadržaji iz kvantne fizike se provjeravaju i na državnoj maturi. Znatna raskorak Hrvatskog obrazovnog sustava od onih u ostatku svijeta vidljiv je ako se pogleda sveučilišna razina. Na većini norveških sveučilišta, kvantna mehanika se počinje učiti na prvoj godini studija. Studenti su razdvojeni s obzirom na razinu predznanja i usmjerenje. Kvantna mehanika se na hrvatskim studijima fizike obično počinje učiti na 3. godini preddiplomskog studija. Zaključak je da je svakako potrebno krenuti ranije s naobrazbom kako fizike općenito tako i kvantne fizike.

## 4.2 Školski sustav u svijetu i kvantna fizika

Moderna fizika nema međunarodno poznato mjesto u osnovnoškolskoj kao i srednjoškolskoj fizici. U nekim zemljama uopće nije dio nastavnog plana i programa, a tamo gdje je uključena, postoji širok spektar sadržaja i pristupa (više u [54] i [55]). Da kvantna fizika može biti zahtjevna za učenike, ali i za učitelje opće je poznata činjenica. Ona također ima potencijal učenicima prikazati fiziku kao fascinantnu i značajnu znanost, i to su primijetile države poput Norveške, Njemačke i Australije koje su istražile kako unaprijediti podučavanje kvantne fizike u školama.

### 4.2.1. Norveška

Projekt ReleQuant norveških škola bavi se istraživanjem obrazovnog sustava radi poboljšanja nastave i učenja tema kvantne fizike i relativnosti [2]. Rad se fokusira na prvi ciklus razvoja nastavnog modela o kvantnoj fizici te je opisano kako su načela implementirana. Model je osmišljen pregledavajući relevantnu literaturu i provodeći tri pilot studije. U Norveškoj, kvalitativni pristupi i filozofski aspekti moderne fizike nisu bili dovoljno naglašavani, ali nakon nekoliko provedenih studija školski sustav podvrgnut je određenim promjenama. Školski sustav u Norveškoj može se podijeliti u tri dijela: osnova škola (6-13 godine života), niža srednja škola (13-16 godine života) i viša srednja škola (16-19 godine). U Norveškom višem srednjoškolskom kurikulumu za fiziku iz 2006. godine navode se sljedeći ishodi koji se očekuju od učenika u 13. godini obrazovanja: navesti postulate koji čine osnovu specijalne teorije relativnosti, diskutirati o kvalitativnim posljedicama ove teorije za vrijeme, količinu gibanja i energiju i dati kvalitativni opis opće teorije relativnosti. Od učenika se očekuje da će znati opisati: Einsteinovo objašnjenje fotoelektričnog učinka, Comptonovo raspršivanje i valnu prirodu čestica, itd. Ove kompetencije zahtijevaju nove načine podučavanja koji se razlikuju od tradicionalnog načina podučavanja fizike. To omogućava učenicima da zadiru dublje u prirodu znanosti i može potaknuti motivaciju učenika i konceptualno razumijevanje fizike. Kvantna fizika i teorija relativnosti su među temama koje angažiraju i motiviraju norveške učenike. Pokazano je da norveški učenici žele više kvalitativne rasprave u nastavi fizike [65]. To je bio pokazatelj da su potrebni novi i privlačniji pristupi poučavanju koji motiviraju učenike za više konceptualnog

razumijevanja u fizici. Postupak je rezultirao sljedećim ključnim načelima za podučavanje kvantne fizike:

- 1) razjasniti kako se kvantna fizika ne podudara s klasičnom fizikom,
- 2) koristiti simulacije fenomena koji se ne mogu izravno doživjeti,
- 3) omogućiti učenicima pisane materijale i usmeno izlaganje,
- 4) govoriti i raspravljati o valno-čestičnoj dualnosti i načelu neodređenosti,
- 5) koristiti primjere konceptualnog razvoja iz povijesti fizike,
- 6) pokazati primjere kako se suvremeni fizičari mogu ne slagati oko tumačenja kvantne fizike,
- 7) prezentirati tehničke primjene.

Rezultati istraživanja predlažu upotrebu novih nastavnih pristupa i nastavnih materijala s naglaskom na korištenje jezika, animacija i simulacija, kvalitativno razumijevanje, epistemološke implikacije kao i povijesne i tehnološke perspektive. Što se tiče konceptualnog razumijevanja učenika, rezultati pokazuju da mnogi učenici imaju razumijevanje središnjih pojmova. Na primjer, mnogi mogu prepričati ono što u udžbenicima piše o valno i čestičnoj prirodi svjetlosti. Međutim, odgovori učenika na pitanja esejskog tipa pokazuju neadekvatno razumijevanje i zablude. Primjer toga je i odgovor da se čestice gibaju po putanjama koje nalikuju onima koje imaju valovi. Učenici pokušavaju uklopiti kvantne pojave u klasično razumijevanje fizike. [66] sugeriraju da bi takvi problemi mogli biti uzrokovani nedostatkom pažnje posvećene različitim tumačenjima kvantne teorije. Rezultati iz pilot studija ukazuju da jednostavna pitanja u upitnicima ne obuhvaćaju u potpunosti neodgovarajuće konceptualno razumijevanje učenika. Učenici mogu reproducirati formulacije iz udžbenika bez dubljeg razumijevanja. Nastavni resursi bi trebali omogućiti učenicima pristup dubljem razumijevanju valno čestične prirode korištenjem vlastitog jezika u izražavanju ključnih koncepata. Učeničke diskusije o posljedicama moderne fizike s vršnjacima, uz odgovarajuće resurse (npr. misaoni pokusi i vizualizacije), trebale bi biti ključ boljem razvoju konceptualnog razumijevanja među učenicima [67].

### 4.2.2 Njemačka

U Njemačkim osnovnim školama atomi i kvanti energije standardni su dijelovi nastavnog plana i programa. Međutim, naglasak je bio uvelike na aspektima poput fotoelektričnog efekta ili Bohrova modela atoma koji ne ispituju klasične koncepte koji prevladavaju u učeničkim umovima [1]. U studiji koju su Rainer Müller i Hartmut Wiesner proveli u Münchenu istraženo je kako konceptualna pitanja kvantne mehanike podučavati na uvodnoj razini. Novi program Müllera i Wiesnera bavio se prvenstveno konceptualnim pitanjima kvantne mehanike. Naglasak je bio na nefizičarima i kvalitativnom razmišljanju. Fizičari se uvijek mogu osloniti na svoje znanje o kvantno mehaničkom formalizmu kako bi prevladali konceptualne poteškoće za razliku od nefizičara koji ne posjeduju takvu snažnu potporu. Stoga je konceptualna jasnoća u tom slučaju još više važna. U kontekstu virtualnih laboratorija, učenici su otkrivali od samog početka kako daleko kvantni fenomeni odstupaju od našeg klasičnog svakodnevnog iskustva. Rezultati nakon provedenog programa pokazali su da je većina učenika stekla odgovarajuće shvaćanje kvantne mehanike. Pritom su izbjegnute mnoge uobičajene zablude s kojima se susreće tradicionalna nastava pri poučavanju ove tematike.

U skladu s prethodnim istraživanjima iz Norveške [63], [64] i ispitanici iz Njemačke smatraju kvantnu fiziku motivirajućim područjem fizike. Za neke je to bilo zbog filozofskih aspekata dok su drugi uglavnom navodili kako su intelektualni zahtjevi moderne fizike izazovni, ali i motivirajući. Također neki ispitanici navodili su da su bili zainteresirani zbog same reputacije kvantne fizike kao teške i izazovne. Učitelji su se u pilot studijama izjasnili da imaju manje samopouzdanja u podučavanju nastavnih sadržaja iz moderne fizike u usporedbi s drugim područjima nastavnog plana. Sukladno tome željeli su dodatne nastavne resurse iz tih temama. Neki nastavnici pretvorili su svoje neadekvatno znanje o predmetu u prednost, koristeći ga kako bi demonstrirali učenicima brojna otvorena i izazovna pitanja u fizici suprotstavljajući se tipičnoj nastavi fizike koja ima prvenstveno naglasak na objektivnost, strogost, individualno rješavanje problema, točnije odgovore. Nastavnici su spomenuli vizualizacije, povijesni kontekst, referencije na popularnu znanost i suvremenu tehnologiju kao potencijalne načine za stvaranje kvantne fizike pristupačnije učenicima. Posebice, povijesni pristupi mogu potkrijepiti razumijevanje konceptualnog sadržaja, kao i prirode fizike i načina na koji

se ona razvija. Potrebno je naglasiti učenicima da su neslaganja i argumentacije također važni za razvoj fizike.

U nastavku će biti izložen program Müllera i Wiesnera koji se temelji na istraživanju učeničkih koncepcija o kvantnoj mehanici. Poznato je da će nakon tradicionalnog pristupa podučavanju učenici vjerojatno pokazati greške zaključivanja temeljene na dotadašnjem iskustvu i pomiješati klasične i kvantne pojmove. S obzirom na neintuitivnost same kvantne mehanike, ove greške zaključivanja su očekivane. Da bismo ih izbjegli i doveli učenike na ispravnog razumijevanja kvantne mehanike važno je da su nastavnici upoznati s uobičajenim miskoncepcijama koje se javljaju. Müller i Wiesner u svom radu stoga navode neke od glavnih posljedica krivog zaključivanja i poteškoće koje tada nastaju pri razumijevanju kvantne mehanike. Provedeno je nekoliko istraživanja u edukaciji fizike o ovoj temi. Veliki dio rezultata istraživanja je iz Frankfurta, Bremena i Berlina, ali dio anketa proveden je i u Engleskoj [42-45]. 523 učenika gimnazije odgovorilo je na upitnik o svojim koncepcijama o kvantnoj fizici nakon provedenog programa. Osim toga, 27 je učenika intervjuirano usmeno. Intervjui su trajali oko 1 sat. Pitanja su se kretala od reprodukcije činjenica ("Kako bi mjerili atomski spektar") do interpretacijskih pitanja kao, što su njihova gledišta o determinizmu /indeterminizmu. U drugom projektu [46-47], 37 studenata (budućih nastavnika fizike) bili su intervjuirani na sličan način. 52% ih je već čulo o kvantnoj fizici u školi, a 79% je prisustvovalo predavanju kvantne mehanike. Zanimljivo je da su obje skupine pokazale sličan uzorak odgovora. Ovo ukazuje da se rezultati mogu smatrati "tipičnima". U nastavku Müller i Wiesner daju pregled glavnih miskoncepcija pronađenih u provedenim istraživanjima.

Prve tri stavke pokazuju kako učenici razlikuju klasične i kvantne objekte:

#### **Koje su bitne osobine klasičnih objekata?**

Odgovori učenika mogu se svrstati u sljedeće skupine (moguće je više odgovora): masa, težina (85%), veličina, volumen, oblik (43%), brzina, pokret (38%), količina gibanja (27%), položaj (15%), gustoća (15%), energija (12%). Značajno je da su gotovo svi učenici spomenuli masu, ali samo nekoliko položaj. Dinamička svojstva kao što su brzina/količina gibanja smatrana su važnijima od položaja ili energije.

#### **Koje su bitne osobine kvantnih objekata?**



Odgovori učenika: masa (37%), naboj (37%), brzina/ količina gibanja (37%), energija (26%), spin (22%), energetske razine / kvanti (15%), položaj koji nije točno određen (11%), nepostojanje apsolutne mase (11%), de Broglieva valna duljina (7%). Za kvantne objekte, masa nije toliko dominantan odgovor kao za klasične. Sada se često spominje naboj.

Sljedeća pitanja daju pregled zajedničkih koncepcija i zablude o kvantnim objektima kao što su fotoni i atomi. Da bi pružili još živopisniju sliku, Müller i Wiesner uključili su i neke od tipičnih učenički odgovora.

### **Što mislite pod pojmom "foton":**

Trećina učenika opisala je foton kao česticu svjetlosti koja ima valna i čestična svojstva, 17% pogrešno je tumačilo valovitu liniju koja simbolizira foton u mnogim dijagramima Comptonova efekta kao putanju fotona. (Učenik: „Foton označava kvant svjetlosti, čestica koja se kreće u obliku vala (povlači valovitu strelicu).“) 25% učenika primjećuje da fotoni nemaju masu mirovanja „oni imaju samo masu kad se kreću brzinom svjetlosti“, 17% definira foton kao kvant energije, i 8% navodi da se foton emitira pri prijelazu atoma iz pobuđenog stanja u osnovno stanje.

### **Kako zamišljate elektrone u atomu?**

Bohrov atomski model ili planetarni model opisuje 17% učenika. „Imamo krugove oko jezgre, to su orbite. Elektroni su na različitim orbitama. Oni se kreću po tim orbitama i mogu skočiti iz jedne orbite na drugu, ako dobiju više energije, mogu skočiti na višu orbitu.“ Bohrov model s primjedbama opisuje 24% učenika. „Ja još uvijek imam sliku orbita u glavi kad pomislim na atom. Rečeno mi je da to nije točno, ali sam toliko naviknut, a i naposljetku stalno to koristimo.“ Konkretno ideje „oblaka“/ razmazanih naboja ima 14% učenika. Orbitale s vjerojatnosti distribucije opisuje 38% studenta. „To je valna funkcija koja predstavlja čestice, postoji i teorija orbitala, orbitale se mogu prezentirati i u prostoru. Onda znate gdje su elektroni otprilike i cijela stvar funkcionira uz tumačenje vjerojatnosti.“

Dvije dominantne koncepcije su dvije varijante Bohrova modela (ukupno 41%) i slike orbitala (38%). Zanimljivo je da čak i ako se spominju kvantno mehaničke ideje, Bohrov se model gotovo uvijek koristi kao polazište rasprave. Iako sigurno nije kompatibilan s kvantno mehaničkom koncepcijom atoma, Bohrov model može biti

neizbježan srednji korak [19]. Vjerojatno nedostatak lake vizualizacije kvantno mehaničkog modela prisiljava učenike da se pridržavaju ovog modela. Ako je ova pretpostavka istinita, cilj prema Mülleru i Wiesneru ne bi bio brisanje Bohrova modela iz učeničkih umova već prenošenje i svjesna uporaba fizičkih modela te uvid u ograničenja samog modela.

### **Određeni položaj**

Učenicima je postavljeno pitanje : **Ima li elektron u atomu određeni položaj u svakom vremenskom trenutku?**

Odgovori su bili sljedeći: elektron ima određeno, ali nepoznato mjesto smatra 21% učenika. Učenik: „Da, mora biti negdje, ali nam ta informacija nije dostupna putem mjerenja.“ Učenik: „Rekao bih da u načelu ima određeni položaj, ali mi ne znamo gdje je to.“ Da elektron ima položaj, ali nema putanju (zbog nedostatka podataka o početnim uvjetima smatra 7% učenika. Da se elektron nalazi u nekoj regiji s nekom vjerojatnošću smatra 25%. Učenik: „Ne možete mu odrediti točan položaj, možete samo odrediti vjerojatnost pronalaženja.“ Ostali nisu dali nikakav odgovor.

Prikazani rezultati činili su empirijsku osnovu za razvoj programa. Želeći izbjeći klasične zablude i pomoći učenicima da izgrade odgovarajuće kvantno mehaničko razumijevanje, usredotočili su se na one značajke kvantne mehanike koje su potpuno nove u usporedbi s klasičnom mehanikom.

Dostupno je mnogo literature s ovom tematikom gdje autori prate polu kvalitativni pristup u kvantnoj mehanici. Prije svega postoje poglavlja o pokusu na dvije pukotine u Feynmanovim poznatim predavanjima [3]. On je imao veliki utjecaj na većinu naknadnih pokušaja podučavanja konceptualnih aspekata kvantne mehanike. Od novijih pristupa spominju knjige autora: Rae [4], Albert [5] i Silverman [6] koji daju dojam o temeljima kvantne mehanike na umjerenoj matematičkoj razini. Primjer sveučilišnog tečaja posvećenoga prvenstveno studentima ne fizičkih studijskih programa je Zollmanov projekt vizualne kvantne mehanike [7], gdje se traži praktičan pristup primjenama kvantne mehanike.

### 4.2.3 Australija

Naše suvremeno razumijevanje svemira temelji se na dvije fizikalne teorije: teoriji gravitacije, nazvanoj Einsteinova opća teorija relativnosti i teoriji interakcija čestica pod nazivom kvantna mehanika. Einsteinova fizika vrhunac je rasprave u fizici 20. stoljeća. Iako se većina još uvijek drži Newtonovih ideja da su prostor, vrijeme i materija nezavisni i razdvojivi entiteti, moderna fizika potvrđuje da su prostor, vrijeme i materija međusobno povezani. Znamo također da je euklidska geometrija samo aproksimacija. David Blair direktor Australskog međunarodnog istraživačkog gravitacijskog centra s kolegama iz Sveučilišta Western Australia istraživao je mogu li djeca od 12 godina razumjeti neke Einsteinove koncepte. Djeca su istražila povijest ideja o prostoru od Pitagore do Newtona i Einsteina. Razgovarali su o smislu ravne linije i naučili da je put zrake svjetlosti jedini sudac kojeg imamo. Učenici su crtali trokutiće i pratili putove paralelnih linija na balonima. Vidjeli su da su neki od Euklidovih koncepata koje su već naučili istiniti samo ako je prostor ravan. Na primjer, doznali su da zbroj kutova trokuta ne mora uvijek biti  $180^\circ$  i da se paralelne linije mogu presjeći. Govorili su o zakrivljenosti prostora oko Sunca. Nakon još nekoliko kreativnih predavanja i istraživanja rad je kulminirao predstavom koju su izveli učenici šestih razreda za studente Fizike na Sveučilištu Western Australia. U predstavi su učenici jasno pokazali svoje razumijevanje Einsteinovih koncepata. Postavlja se logično pitanje, je li to previše za tako malu djecu. Jedna od zanimljivih stvari u pokusu bila je to što za razliku od odrasle publike, učenici nisu pokazivali nikakve znakove zbunjenosti ili iznenađenja. Naučili su razmišljati o jedinstvu prostora i vremena. Naučili i prihvatili da su pad s tornja i lebdenje u svemirskoj postaji isti. Ono što je najvažnije, sami učenici su mislili da je to doista zanimljivo i da nisu premladi da bi naučili te pojmove. Trenutačno su se timu australskih znanstvenika pridružili profesori Mario Zadnik i profesor Bernard Carr, kako bi proširili program na podučavanje kvantne mehanike. U [56] su izloženi rezultati istraživanja dobivenih iz Einsteinovih programa fizike koje su vodili različiti instruktori s dobnim skupinama koje su se nalazile u 6, 9, 10 i 11 godini obrazovnog sustava Australije koristeći modele i analogije opisane u [57] i [58]. Istraživanje je imalo za cilj utvrditi je li moguće podučavati učenike osnovnoškolskog uzrasta Einsteinovoj fizici i kako će to utjecati na promjene u stavovima učenika prema fizici općenito uvodeći moderne koncepte koji odgovaraju trenutnoj tehnološkoj situaciji. Rezultati su pokazali

da su se učenici lako nosili s konceptima Einsteinove fizike. Učenici su smatrali da nisu premladi za prikazane nastavne materijale i koncepte. Ono što je bilo iznenađujuće i neočekivano u svim dobnim skupinama je da su djevojke znatno više poboljšale svoj stav prema fizici u usporedbi s dječacima i tako postigle gotovo iste rezultate kao dječaci na kraju programa. Zaključak programa bio je da slični modeli i analogije kao u [57] i [58] mogu biti učinkoviti nastavni alati u školovanju učenika od 11 do 16 godina. Rezultati testiranja konceptualnih znanja prije provedbe programa pokazali su da su u svim dobnim skupinama učenici imali vrlo malo znanja o temeljnim konceptima Einsteinove fizike. To se pokazalo istinitim čak i na nacionalnoj razini, odnosno samo 25% 16-godišnjaka koji su sudjelovali u Nacionalnom Forumu za znanost mladih, postiglo je rezultate prije provedbe programa od oko 50%, dok je samo 10% 11-godišnjakinja bilo na toj razini. Što je jako bitno, pokazano je da je program u skladu sa sposobnosti učenika svih dobnih skupina. Sve su dobne skupine pokazale bitno poboljšanje konceptualnog razumijevanja Einsteinove fizike. Najznačajniji napredak postignut je kod učenika 9. godine školskog programa. To su učenici dobi 14-15 godina, a u Hrvatskoj bi to odgovaralo 7 i 8. razredu osnovne škole. Napredak te dobne skupine bio je značajan, s 23% na 91%. U svim je programima bilo jasno da je učenje moderne fizike pozitivno utjecalo na učeničke stavove i interes za učenje fizike općenito. Autori programa nisu bili iznenađeni velikim interesom učenika prema modernoj fizici, ali rezultati napretka djevojčica i dječaka bili su neočekivani. Veći napredak djevojčica u odnosu na dječake ponovio se u svim dobnim skupinama. Djevojčice su imale početno niže rezultate, ali na kraju programa postižu iste rezultate kao i dječaci. Autori programa to pripisuju činjenici da su učenici svjesni da je trenutni nastavni plan temeljen na zastarjelim konceptima. Također, smatraju da su djevojke vjerojatno sklonije konceptualnim zadacima i učenju orijentiranom na grupni rad, za razliku od dotadašnjeg konvencionalnog pristupa. Rezultat pokazuje da uvođenje Einsteinove fizike i više inzistiranje na konceptualnom razumijevanju mogu imati snažnu prednost u poticanju ravnoteže spolova u STEM obrazovanju i odabiru karijere. Rezultati istraživanja koji su izloženi rezultat su studije koja je prvenstveno za cilj imala istražiti mogućnosti uvođenja Einsteinove fizike u ranoj dobi. Ispitivanje nije procijenilo dugoročno zadržavanje konceptualnog razumijevanja niti učinak koji bi program imao kroz nekoliko godina uključujući objedinjenje Einsteinove fizike s Newtonovim

aproksimacijama. Prikazani rezultati su snažna osnova za daljnja istraživanja usmjerena na rekonstrukciju školskog sustava unutar Einsteinove fizikalne paradigme.

### 4.3. Korak dalje

Kad smo vidjeli kakvo je stanje u svijetu i Hrvatskoj, svakako bi trebali razmisliti o uvođenju fizike u niže razrede osnovne škole. Već od prvog razreda učenici bi mogli početi usvajati koncepte iz fizike. Do petog razreda kada učenici već imaju razvijeno apstraktno razmišljanje moći će se susresti s nekim složenijim konceptima pa i onima iz kvantne fizike. Pitanje koje se javilo, a predstavljalo je još jedan korak dalje u tom razmišljanju bilo je: Ima li smisla čitanje kvantne fizike djeci vrtićkog uzrasta? Odgovor nekolicine stručnjaka na ovo pitanje bio je da. U nastavku ću navesti njihova razmišljanja i obrazloženja.

Čitanje znanstvenih knjiga maloj djeci korisno je iz više razloga: njeguje kritičko razmišljanje i preispitivanje već poznatoga, potiče promišljanje o svakidašnjim pojavama, promovira znatiželju, stvara djecu sposobnu rješavanju novih problema. Dakle, kada je CEO tvrtke Facebook objavio da već razmišlja o čitanju "Kvantne fizike za bebe" novorođenom djetetu, samo se djelomično šalio. Slikovnicu navedene tematike napisao je australski kvantni fizičar Chris Ferrie "Kvantna fizika za bebe". U njoj u jednostavnim terminima opisuje, "energiju" i zašto se atomi stalno kreću. Dakle, Ferrie tvrdi nema razloga zašto ne bi, baš kao što govorimo i prepričavamo bajku ili više puta čitamo stvari o životinjama, mjestima ili stvarima, prikazujemo slova, brojeve i boje kako bi pomogli djeci da ih prepoznaju, isto tako kroz više navrata u jednostavnim terminima upoznavati djecu sa znanstvenim terminima i znanstvenim objašnjenjima svijeta. Dijete će se prije ili kasnije povezati s pričama koje čuje. Dugoročna korist ranog upoznavanja djeteta sa znanosti zasigurno je uklanjanje straha od predmeta poput matematike i fizike, koji se u dosta djece obično razvije kasnije tijekom školovanja. Predstavljanje znanosti malom djetetu, razbijajući komplicirane stvari u jezik koji je jednostavno pratiti, nesumnjivo pomaže razvoju djece koja će u budućnosti dati neki značajan doprinos svijetu. To bi svakako bio jedan od ciljeva obrazovanja.

Kvantna mehanika često se smatra problematičnim područjem znanosti upravo zbog neintuitivnosti koja se veže uz nju. Profesor kvantne informatičke znanosti Vlatko

Vedral sa sveučilišta na Oxfordu i Singapuru raspravlja o tome zašto bi četverogodišnjaci mogli biti najbolji učenici kvantne mehanike. On smatra da problem leži u činjenici da se učenici upoznaju s kvantnom mehanikom prvi put u dobi od 18 godina i kasnije. Do tada je većina izgubila prilagodljivost i fleksibilnost četverogodišnjaka, a predrasude o načinu na koji svijet funkcionira postale su čvrsto utemeljene u već formiranu sliku svijeta. Vedral smatra da što smo ranije izloženi stvarnoj prirodi svijeta koji nas okružuje i upoznamo se sa svim njegovim suptilnostima, više ćemo imati otvorenih, manje pristranih i dogmatskih ideja u kasnijoj dobi. Neke predrasude bi zasigurno lakše prevladali, a mnoge ne bi imale priliku za nastajanjem. Stoga Vedral predlaže izmjenu školskog kurikulumuma kako bi se kvantna fizika i podučavala već i četverogodišnjacima.

Kažu da su Einstein i Tesla imali prve znanstvene realizacije već u dobi od četiri godine. Zasigurno smo se svi nekad zapitali je li moguće da novi naraštaji imaju bolje znanstveno razumijevanje svijeta koji ih okružuje već u vrtićkoj dobi? Intuicija nam govori, a moderna psihologija potvrđuje da uz ispravan pristup većina djece može imati znanstvene realizacije koje nisu bile uobičajene za njihove vršnjake nekoliko desetljeća ranije. Većina djece je znatiželjna i želi znati više o svijetu oko sebe, pokušava napraviti smisao od onog što vide i percipiraju. Činjenica je da je um najplastičniji u ranoj dobi i nije iznenađenje da se neke osnovne vještine i koncepti stječu upravo tada. To će zasigurno potvrditi svatko tko je pokušao naučiti voziti biciklu ili koturaljke u odrasloj dobi. Kako vrijeme odmiče potrebno je uložiti više truda i vremena za stjecanje nekih vještina koje dijete stekne gotovo nesvjesno. Ono oko čega se zasigurno svi u obrazovanju slažu je da je potrebno prilagoditi obrazovanje kako bi maksimizirali njegove učinke kasnije u životu.

Da je čitanje rano i često važno smatra i dr. Thomas DeWitt iz Dječje bolnice Cincinnati. On kaže kako je potrebno uložiti svjesne napore kako bi negovali znanstveni razvoj male djece kroz: interaktivne aktivnosti, igre, jednostavne fizikalne pokuse poput kotrljanja lopte, šetnje po prirodi u kojima se djeca mogu naučiti imenovati biljke, identificirati cvijeće, insekte i druge životinje. Noćni izleti mogu biti savršena prilika za promatranje i učenje o zvijezdama, mjesecu i pojmovima iz astronomije. Miješanje pijeska i vode, vode i soli mogu također biti zabavna i edukativna igra. Kada se djeci pokaže u stvarnom svijetu ono o čemu im se čita ili ako

oni mogu dodirnuti ili osjetiti ono što vide, sve je mnogo stvarnije i realističnije te pamtljivije. Ne samo da će to poticati, promicati i oblikovati njihove logičke vještine već ćemo im pomoći da razviju znanstvenu narav koja je nužna u današnjem svijetu. Djeca neće odmah upiti mnogo kvantne fizike ili znanosti općenito samim time što im čitamo više puta iste znanstvene priče. Također to ne znači da će ta djeca kad odrastu postati znanstvenici ili uopće biti zainteresirani za znanost u odrasloj dobi. Jedan od ciljeva pristupa je da djeca budu svjesna kako se primjerice, kugla ili jabuka ponašaju na određeni način u određenoj situaciji, izložiti ih svijetu novih ideja, znanstvenim terminologijama i radnjama što prije. Odrastanje u atmosferi koja potiče znanost vjerojatno će pridonijeti kako ranijem tako i bržem te oštrijem razvoju mentalnih sposobnosti. Utjecaj takvog pristupa mogao bi se vidjeti već u dječjoj dobi. Djeca će biti analitičnija i znatijeljnija pri rješavanju problema koji se stave pred njih, za razliku od vršnjaka koji nisu imali doticaj sa znanosti u ranoj dobi.

Uz slova, brojeve, životinje, oblike, boje i veličine trebali bi upoznati djecu na zabavan i ugodan način s pojmovima poput mase, gravitacije, brzine pa čak i teorije relativnosti. Zapravo možemo dati djeci veliku „prednost“ već na početku njihovog boravka u svijetu koji se sve brže razvija i zahtjeva sve veće količine znanja, analitičkog razmišljanja i vještine rješavanja problema. Upravo bi vrtići i škole trebali biti ti koji će dati novim naraštajima tu prednost. Ono što je zasigurno lijepo za znati je da je i Hrvatska ovog puta malim koracima, ali ipak krenula s predstavljanjem nekih jednostavnih kvantnih koncepata vrtićkoj djeci. Iako se radi trenutno o samo jednom vrtiću možda je to upravo ono što je potrebno za poticanje drugih [53]. U okviru redovitih odgojno-obrazovnih aktivnosti u Dječjem vrtiću Izvor u Samoboru 2018. započela je izvedba programa pod nazivom “Kvantna fizika u vrtiću”. Program od 8 radionica je usklađen sa suvremenim obrazovnim programima Europske unije gdje se naglasak stavlja na znanstveno obrazovanje 21. stoljeća kod djece u najmlađoj dobi. Cilj programa je da se djecu izloži i nekim od najsloženijih tema prirodnih znanosti. Pri tome naglasak nije na usvajanju i povezivanju činjenica već na razvijanju načina razmišljanja, poticanju da se postavljaju pitanja i da se istražuje. Upoznavanje sa složenošću svijeta oko nas usmjereno je ka shvaćanju da ima puno važnih i neodgovorenih pitanja na koja odrasli ne znaju odgovore. Znanstveno obrazovanje djece je zajednički projekt vrtića, obitelji i vrhunskih stručnjaka. Ovaj program u vrtiću dio je

petogodišnjeg projekta Hrvatskog fizikalnog društva (2018.-2023.) pod nazivom „Znanstveno (STEM) obrazovanje od rane dobi – prema suvremenom obrazovanju za zanimanja i građane 21. stoljeća“.



## 5. Pokusi u nastavi kvantne fizike

Razvoj informatičkih tehnologija, virtualnih okruženja i računalnih simulacija otvara brojne mogućnosti učenja kompleksnih i apstraktnih tema kao što je kvantna fizika. Iako ćemo se u ovom prikazu dotaknuti digitalnih alata, krećemo od onoga što je za fiziku i prirodoslovlje temeljno, a to su pokusi. Da bi učenike potaknuli na razmišljanje, motivirali i zaintrigirali, potrebna su opažanja stvarnih pojava i procesa. Zato i ovdje krećemo od pokusa koji se mogu razumjeti jedino u okviru kvantne fizike. Tijekom proučavanja pokusa iz odabrane tematike traženi su oni koji ne zahtijevaju velike materijalne resurse i koji odgovaraju vremenskim okvirima školskog sata. Cilj je naravno da se pokusi koriste u nastavi pa su njihova materijalna dostupnost kao i ograničeno vrijeme izvedbe nužan kriterij. S obzirom na navedene kriterije kao najpraktičniji su se pokazali:

1. **fotoelektrični efekt**
2. **kvantizacija energije u atomima:** analiza spektara svjetlosti iz plinskih žarulja

### 5.1. Fotoelektrični efekt

Fotoelektrični efekt u većini se aktualnih srednjoškolskih udžbenika za 4. razreda gimnazije pojavljuje već na prvih nekoliko stranica, odmah nakon zakona zračenja crnog tijela. Koristi se kao uvodna pojava za poučavanje kvantne fizike jer se nadovezuje na gradivo optike te je od velikog povijesnog značenja. Preko fotoelektričnog efekta se uvodi koncept čestične prirode svjetlosti, što je osnova za daljnje proučavanje valno-čestične prirode svjetlosti i materije. Učenici osnovnoškolskog uzrasta mogu razumjeti i usvojiti sam koncept. Kod većine pronađenih nastavnih materijala za srednje škole podrazumijeva se da škola raspolaže s klasičnim eksperimentalnim postavom za fotoelektrični efekt, što obuhvaća fotoćeliju (ili vakuumsku fotocijev), promjenjivi izvor napona, multimetar i monokromatske izvore svjetlosti (obično se koristi živina lampa u kombinaciji sa specijaliziranim filtrima). Nabavka postava može biti glavna prepreka pri samom izvođenju pokusa. U nastavku je opisan pojednostavljeni pokus kod kojega su potrebni materijali: elektroskop, polivilni štap, krpa, pločica od aluminijske folije, žarulja s priključnicama na gradsku mrežu, UV

lampa, staklo. U osnovnoj školi sam pokus bi se mogao pojednostavniti, ne gubeći konceptualni značaj. Treba napomenuti i da su suvremeni trendovi u nastavi fizike pa i na najboljim svjetskim sveučilištima, da pokusi budu što jednostavniji, da se koristi što više priručnih materijala sa što manje skupih instrumenata ili unaprijed priređenih postava koji učenicima ili studentima predstavljaju crne kutije i ne dovode do dubljeg razumijevanja proučavane pojave.

Danas nastavnik treba imati na umu da za svaku tematiku postoji pregršt (često besplatnih) web simulacija i virtualnih laboratorija koji imaju izvođeni pokus u svome postavu. Prednost takvih postava je što ono što je ostalo nevidljivo u stvarnom pokusu zorno prikazuju. U slučaju fotoelektričnog efekta simulacija pokazuje što se događa nabijanjem ploče, ali i omogućuje konstrukciju fizikalnog modela koji opisuje ponašanje izbijenih elektrona [60]. Eksperimentalni postav, u kome učenik može upravljati ulaznim fizikalnim varijablama, omogućava kontrolu fizikalnih veličina pomoću kojih se može izmjeriti zaustavni napon te preko toga doći do kinetičke energije koju elektron ima pri izlasku iz metalne ploče. Ovakva simulacija svakako bi bila od iznimnog značaja za učenike srednjih škola, ali za učenike osnovnih škola na redovnoj nastavi pojednostavljena verzija koja je opisana u nastavku omogućit će usvajanje potrebnih koncepata.

Naravno, potrebno je razmisliti kako eventualno uklopiti složeniju verziju pokusa u dodatnu nastavu. Može se i razmišljati izvan nametnutih okvira. Ako je neki pokus toliko značajan, zašto mu se ne bi posvetilo višestruko više vremena u okviru redovite nastave. U okviru suvremenog obrazovanja uopće nije upitno je li bolje dublje i sa svih aspekata obraditi jednu važnu temu ili površno napraviti 10 tema u istom vremenu.

U idealnoj situaciji ovaj eksperimentalni postav uključivao bi mogućnost mjerenja strujno-naponske karakteristike fotoćelije, simulaciju koja bi omogućila uvid u ponašanje dijela modela koji nije očit kroz direktna mjerenja kao što se događa s elektronima kad ih svjetlost izbije iz metalne ploče, a na fotoćeliju je postavljen napon koji je jednak zaustavnom naponu. Za demonstracijske pokuse prikladniji su jednostavniji eksperimentalni postavi koji omogućavaju brz prikaz učinaka. Kod fotoelektričnog efekta stoga je najjednostavnije koristiti cinčanu pločicu spojenu na elektroskop. Zatim se ta pločica osvjetljava s različitim izvorima svjetlosti, a elektroskop pokazuje izbijanje cinčane ploče ako se osvijetli ultraljubičastim svjetlom.

Ovaj pokus omogućava zorni prikaz fizikalnog modela kojeg učenici trebaju usvojiti, a to je da kod fotoelektričnog efekta emisija elektrona iz metala ovisi o frekvenciji elektromagnetskog zračenja, a ne o njegovom intenzitetu.

Opis pokusa iz udžbenika za 4. razred gimnazije [48]: Cinčanu pločicu očistimo brusnim papirom i učvrstimo na središnji štap elektroskopa. Pločicu naelektriziramo negativno. Približimo li pločici upaljenu živinu svjetiljku bez staklenog balona, opažamo da se otklon kazaljke elektroskopa smanjuje. Osvijetlimo li pločicu običnom žaruljom jednake ili veće snage, otklon kazaljke se ne mijenja. U nastavku se navodi da pokus pokazuje da elektromagnetsko zračenje izbija negativan naboj iz metala. Nosioci negativnog naboja su elektroni, što znači da pod utjecajem elektromagnetskog zračenja iz metala izlijeću elektroni. Izbijanje elektrona iz metala elektromagnetskim zračenjem naziva se fotoelektrični učinak (efekt).

U nastavku se nalazi primjer radnog listića koji bi se mogao koristiti pri obradi ovog pokusa u osnovnoj školi. Nije nužna upotreba u obliku nastavnog listića, moguće je provođenje i razredne diskusije, ali je bitno angažirati što više učenika da sudjeluju u raspravi. Svaki učenik dobiva listić. Nastavnik govori što će sve koristiti pri izvođenju pokusa. Opisuje elektroskop i ponavlja s učenicima ukratko što znaju o naboju. Tu nastavnu cjelinu obrađivali su sredinom osmog razreda. Nakon izvedenog pokusa, ako je potrebno i više puta da svi vide što se događa, učenici popunjavaju nastavni listić.

Potreban pribor za izvođenje pokusa: elektroskop, polivilni štap, krpa, pločica od aluminijske folije, žarulja s priključnicama na gradsku mrežu, UV lampa, staklo.

### **Što je elektroskop?**

Elektroskop je uređaj kojim se može pokazati je li neko tijelo električki nabijeno.

### **Od čega se sastoji elektroskop?**

Sastoji se od kućišta i metalne kuglice ili pločice na jednom kraju izvan kućišta, a na drugome u kućištu obješena su dva tanka metalna listića.

### **Što se događa ako kuglicu elektroskopa dodirnemo nekim naelektriziranim tijelom?**

Ako se kuglica elektroskopa dodirne nekim naelektriziranim tijelom, šipka koja povezuje kuglicu i listiće u kućištu će se nabiti električnom pa će se i listići na kraju šipke nabiti.

**Kakvom vrstom električnoga su nabijeni listići i kamo su se pomakli?**

Listići su nabijeni istom vrstom električnoga, međusobno će se odbijati i razmaknuti.

**Kako možemo postići veći razmak listića?**

Razmak listića možemo povećati ako povećamo količinu naboja dovedenu na kuglicu elektroskopa.

**Kako možemo negativno nabiti elektroskop?**

Pomoću plastičnog štapa i vunene krpice.

**Opišite što ste vidjeli tijekom demonstracije pokusa?**

Elektroskop negativno nabijemo, na vrh stavimo aluminijsku foliju, približimo običnu lampu i ništa se ne događa. Kada približimo UV lampu razmak između listića elektroskopa se smanjuje.

**Što nam predstavlja smanjenje razmaka između listića elektroskopa?**

Odlazak elektrona.

Učenici su na nekom od prethodnih sati upoznati ili ih nastavnik upoznaje sa sljedećim činjenicama. Izvor svjetlosti emitira kvante svjetlosti (fotone). Svaki foton ima energiju  $E = h\nu$ . Nastavnu cjelinu koja se bavi energijom učenici su obrađivali u 7. razredu, a sa svjetlosti se bave na kraju osmog razreda. Što je frekvencija svjetlosti veća, veća je i energija fotona. Proporcionalnost se obrađuje u 7. razredu na satu matematike. Nastavnik zatim govori učenicima da se prilikom upada fotona na površinu metala on sudara s elektronom te mu predaje svoju energiju i nestaje, dok elektron koji je preuzeo dovoljno veliku energiju biva izbačen iz metala. Dio energije fotona troši se na oslobođenje elektrona, što zovemo izlaznim radom, a dio se pretvara u kinetičku energiju izbačenog elektrona.

**Što mislite zašto UV lampa može izbijati elektrone, a obična lampa to nije mogla?**

Svjetlost UV lampe ima fotone koji imaju više energije.

**Što nam znači veća energija fotona?**

Veću frekvenciju.

**Kako je moguće da su elektroni mogli otići, otkud im energija?**

Od fotona.

**Što se dogodilo kad smo između elektroskopa i UV lampe stavili staklo? Što zaključujete?**

Kad smo između elektroskopa i UV lampe stavili staklo elektroni se prestanu izbijati. Obično staklo ne propušta (apsorbira) UV zrake.

Na slici je prikazan postav koji se koristi na fakultetu. Za očekivati je da živina lampa prikazana na slici nije dostupna za upotrebu u osnovnoj školi. Učenici se s takvim postavom mogu susresti tijekom posjeta institutima ili fakultetu. Uvijek je potrebno naglasiti učenicima da nikako ne gledaju u svjetlost lampe zbog opasnosti od oštećenja vida.



*Slika 4.: Postav za demonstraciju fotoelektričnog efekta na fakultetu.*

Za demonstraciju fotoefekta u osnovnim školama bit će primjerena neka od UVC žarulja prikazana na slici. Ove žarulje koriste se uglavnom kao oprema za vrtna jezerca

te se mogu pronaći po cijenama već od 150 do 200 kn, ali zbog neadekvatne konstrukcije (sigurnost vida) nisu nikako primjerene za rad u školi. Pogodnija opcija zbog sigurnosti za vid su UVC lampe za ubijanje bakterija koje se u internet prodaji mogu naći po istim cijenama od oko 200 kn, a gornji zaštitni sloj sprječava direktno gledanje u svjetlost. Rukovanje samom lampom primjereno je naravno samo za nastavnika. Demonstracija pomoću UVC lampe dostupna je u [50].



*Slika 5.: UVC žarulja dostupna kao oprema za vrtna jezerca, UVC lampa dostupna u internet prodaji za ubijanje bakterija [62].*

Svakako je dobro ako je moguće projicirati otklon kazaljke na zidu kako bi bio vidljiv cijelom razredu.





*Slika 6.: Demonstracija otklona listića elektroskopa na zidu.*

### **5.1.1 Fotoelektrični efekt i suvremeno obrazovanje**

U okviru suvremenog obrazovanja cijela priča se može postaviti puno atraktivnije i intrigantnije. Prvo, učenicima se demonstrira pokus koji ne mogu objasniti na temelju klasične fizike. Daje im se vremena da pojavu i sami istražuju (istraživački pokus) i predlažu moguća objašnjenja. Nastavnik treba saslušati objašnjenja i argumentirano diskutirati zašto jesu ili nisu moguća. Kada učenici ne uspiju objasniti pojavu, nastavnik počne zanimljivu priču o istraživaču kojeg je to zaintrigiralo isto kao i njih. Taj istraživač se zvao Albert Einstein. U konceptima suvremenog obrazovanja ističe se da je vrlo učinkovito ako se učenici stavljaju u vrijeme i poziciju istraživača koji su danu pojavu otkrivali i objašnjavali. Kako slavne fizičare često prate mnoge zanimljive i zabavne priče, to predstavlja izvrstan obrazovni materijal na temelju kojeg i teške znanstvene teme mogu učenicima postati zabavne, intrigantne i što je jako važno pamtljive na dulje staze. Priča o fotoelektričnom efektu i Einsteinovim promišljanjima o kvantnoj fizici vrlo je zanimljiva i poticajna. Einstein je objavio teoriju fotoelektričnog efekta 1905. godine, iste godine kada je objavio specijalnu teoriju relativnosti i rad o molekularnim dimenzijama (doktorat na Sveučilištu u Zurichu). No uvođenje ideje čestične prirode svjetlosti izazvalo je značajan otpor u znanstvenoj zajednici. Čak je i jedan od otaca kvantne fizike Max Planck odbacio ideju koja je na prvi pogled izgledala da se znanost vraća stotinu godina unazad. 1913. godine, u procesu primanja u Prusku akademiju znanosti, predlagatelji su zapisali: „Nema niti jednog velikog problema

moderne fizike u kome Einstein nije dao značajan doprinos. To što je ponekad promašio cilj špekulirajući, kao na primjer u slučaju hipoteze kvanta svjetlosti, ne može se uzeti previše protiv njega, nije moguće uvoditi nove ideje u najegzaktnijoj znanosti bez da se ponekad riskira“ [59]. Tek 16 godina nakon otkrića, Einstein dobiva Nobelovu nagradu za teoriju fotoelektričnog efekta.

Neusporedivo učinkovitije je da nastavnik dio vremena posveti ovakvom pristupu nasuprot suhoparnim definicijama i formulama koje učenici vrlo brzo zaborave. Ključ u ovakvom pristupu je vrhunsko i stalno obrazovanje nastavnika. Izvrstan nastavnik će upotrijebiti brojne metode kako bi potaknu učenika na razmišljanje, postavljanje pitanja i u konačnici na stjecanje trajnih znanja i vještina. Iskusan nastavnik može potaknuti učenika na rad i razmišljanje i izvan okvira same nastave. Koji učenik bi na primjer odolio izazovu da izvede prema uputi nastavnika uz lako dostupna priručna sredstva (bezopasan) pokus kod kuće pod nazivom „Ja san novi Albert Einstein“ uz zadatak da svoj fenomenalan rezultat dokumentira i objavi na razrednom Facebooku.

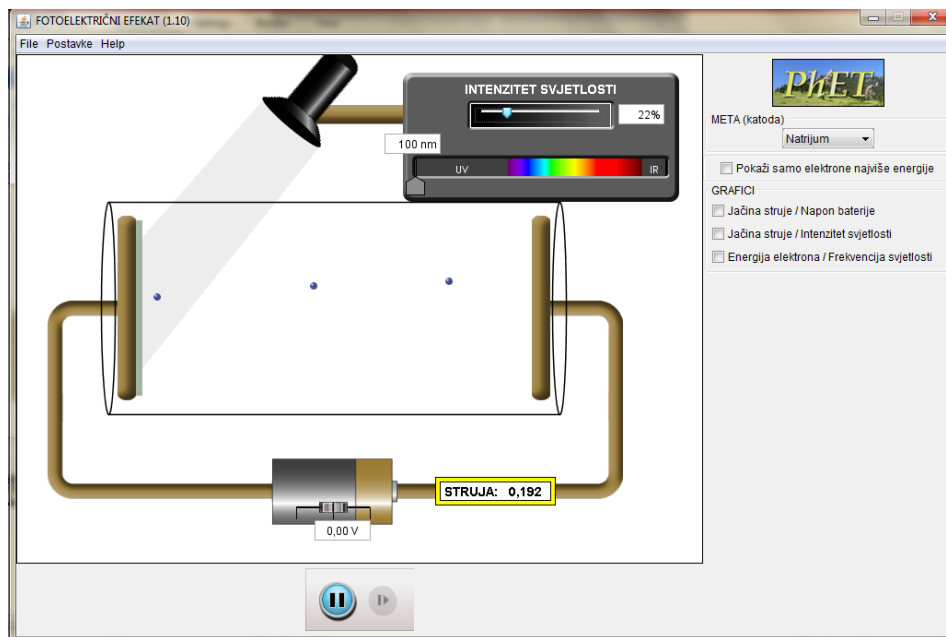
### **5.1.2 Simulacija fotoelektričnog efekta**

Simulacije nikako ne bi smjele biti izgovor ili razlog da se pokusi u fizici ne izvode. Simulacije treba promatrati kao jedan od alata kojima se dodatno pridonosi razumijevanju fizikalnih modela i pojava. Bez stvarno izvedenog pokusa, učenici mogu sumnjati u vjerodostojnost rezultata. Danas djeca od rane dobi gledaju crtiće i igrane filmove u kojima je svašta moguće, npr. putovanje kroz vrijeme. No ispravka, putovanje kroz vrijeme u jednom smjeru je moguće i sukladno Einsteinovim teorijama relativnosti. To je još jedna od važnih i intrigantnih tema koje treba uvesti u škole.

Istraživanje koje se bavilo korištenjem nastavnica i učenicima besplatno dostupnih PhET simulacija [49] pokazalo je pozitivne učinke na razumijevanje učenika. Zaključak istraživanja je bio da samo izvođenje pokusa uživo ne predstavlja ključan utjecaj na konceptualno razumijevanje učenika. Ono ima važnu ulogu u opažanju fizikalne pojave i postavljanju pitanja. Objašnjenja mogu dati tek dublja teorijska razmatranja. Kada su teorijski koncepti presloženi za određenu obrazovnu razinu, od velike pomoći mogu biti simulacije kao lako razumljive vizualne interpretacije često složenih teorijskih opisa.

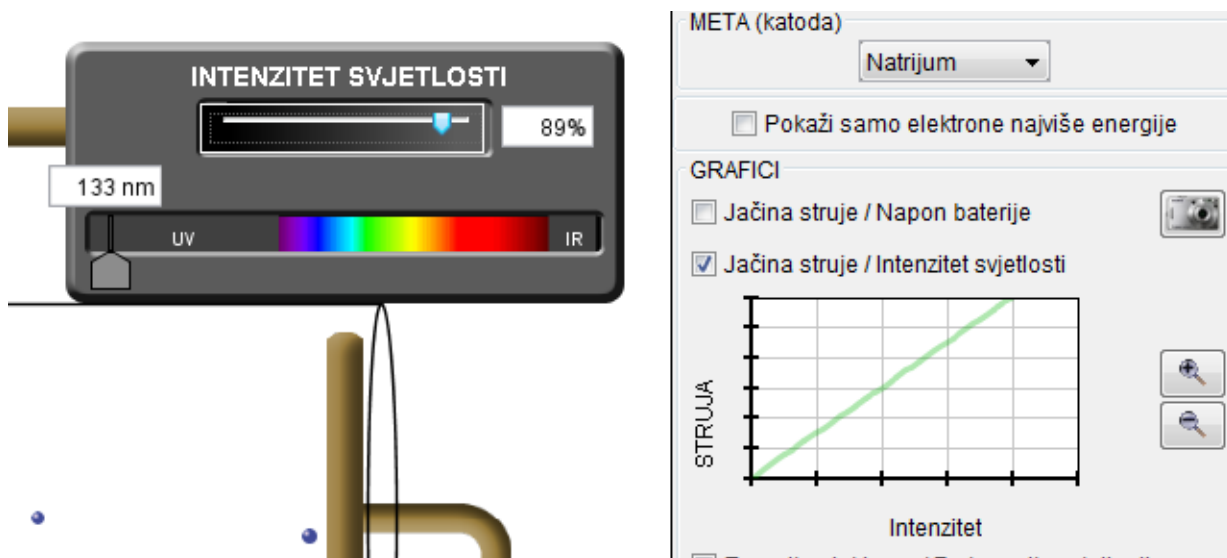


U nastavku ću opisati spomenutu PhET simulaciju. Simulacija je besplatna i dostupna na hrvatskom. Pri korištenju je potrebno imati instaliranu Javu na računalo, što je brza i besplatna instalacija. Sama se simulacija može odmah koristiti ili spremiti na računalo za kasnije korištenje.



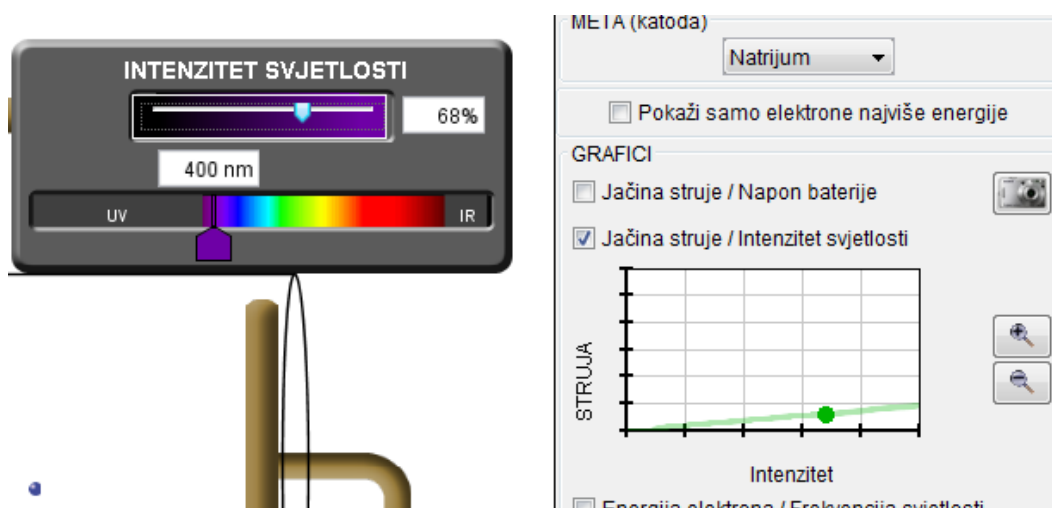
Slika 7.: PhET simulacija fotoelektričnog efekta [60].

Prednost simulacije zasigurno je mogućnost odabira različitih metala koje obasjavamo svjetlošću. Na raspolaganju su pločice natrija, cinka, bakra, platine, kalcija, magnezija. Pri odabiru različitih pločica mijenja se i boja u samoj simulaciji. Natrijeva pločica je svjetlo zelene boje, bakrena je narančasta, cinčana je siva itd. Osim različitih vrsta materijala iz kojih izbijamo elektrone možemo birati i intenzitet svjetlosti te valnu duljinu. Na simulaciji je jako lijepo prikazano povećanje odnosno smanjenje broja izbijenih elektrona pri povećanju odnosno smanjenju intenziteta svjetlosti. Simulacija ima mogućnost prikaza grafičke ovisnosti struje o intenzitetu svjetlosti.

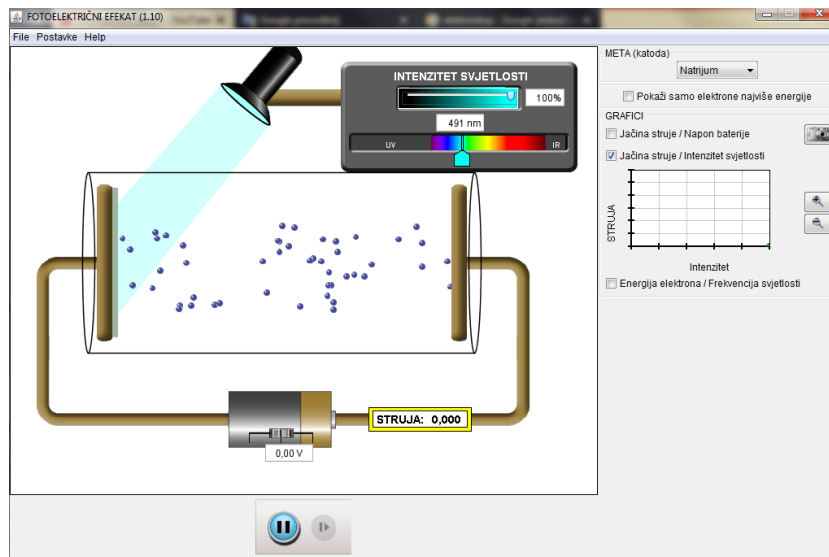


Slika 8.: Ovisnost struje uslijed fotoelektričnog efekta o intenzitetu pri valnoj duljini od 133 nm [60].

Može se lako uočiti kako maksimalna vrijednost struje opada s povećanjem valne duljine, ali ovisnost je i dalje proporcionalna, odnosno za koliko se poveća intenzitet za toliko se poveća vrijednost struje. Mijenjanjem intenziteta mijenja se položaj zelene točke na pravcu (slika 9.). Učenici mogu uočiti da prelaskom iz plavog u zeleni dio spektra tj. povećanjem valne duljine ne samo da se maksimalna vrijednost struje smanjila u odnosu na UV dio spektra, već da je na spomenutom prijelazu i dalje prema crvenom dijelu spektra vrijednost struje nula bez obzira koliki je intenzitet svjetlosti. Povećanjem intenziteta i dalje se povećava broj izbijenih elektrona, ali oni se znatno sporije kreću.

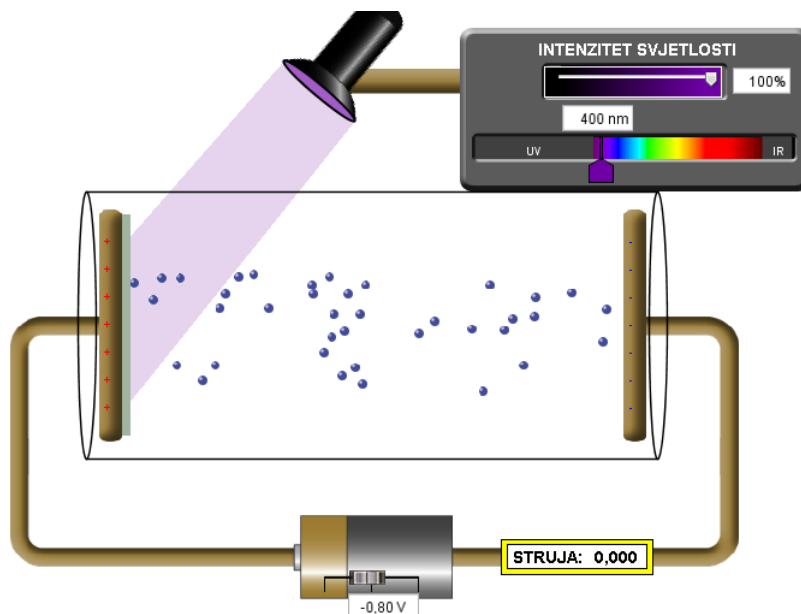


Slika 9.: Ovisnost struje uslijed fotoelektričnog efekta o intenzitetu svjetlosti valne duljine 400 nm [60].



Slika 10.: Unatoč maksimalnom intenzitetu svjetlosti valne duljine 491 nm, nema fotoelektričnog efekta, vrijednost struje jednaka je nuli [60].

Energija koju imaju izbijeni elektroni određena je pomoću izvora napona tj. baterije koja zaustavlja elektrone. Ako drugu ploču negativno nabijemo tj. stavimo na bateriji napon  $-2\text{ V}$  (u simulaciji se i promjeni položaj baterije) tada ona odbija elektrone od sebe. Kada odredimo ispravan napon za izabrani metal možemo postići da nijedan od elektrona ne dotakne drugu ploču. Tada će također struja pasti na nulu. Kada je struja nula možemo pronaći energiju tih elektrona iz izraza u kojemu je napon baterije (izvora) potreban za zaustavljanje elektrona (struja jednaka nuli) jednak kvocijentu kinetičke energije elektrona i naboja elektrona.



Slika 11.: Postavljanje napona potrebnog za zaustavljanje elektrona izbijenih iz pločice natrija svjetlošću valne duljine 400 nm [60].

Možemo promatrati i ovisnost energije elektrona o frekvenciji svjetlosti mijenjajući valnu duljinu. Vidimo da se smanjenjem frekvencije svjetlosti smanjuje i energija izbijenih elektrona. Kada dođemo do frekvencije za koju je energija izbijenih elektrona jednaka nuli odnosno nema elektrona koji su izbijeni iz metala došli smo do granične frekvencije za taj metal. Kako dalje idemo prema crvenom dijelu spektra elektroni neće izlaziti iz metala. Mijenjanjem materijala učenici se mogu upoznati s različitim graničnim frekvencijama za različite metale. Ono što je bitno uočiti je nagib grafa koji je cijelo vrijeme isti, a predstavlja poznatu Plankovu konstantu. Izlazni rad se nalazi ispod x-osi i zato imamo negativan predznak, odnosno predstavlja nam odsječak pravca na y-osi. Sada je lako učenike upoznati s izrazom za kinetičku energiju izbijenih elektrona i što on predstavlja.

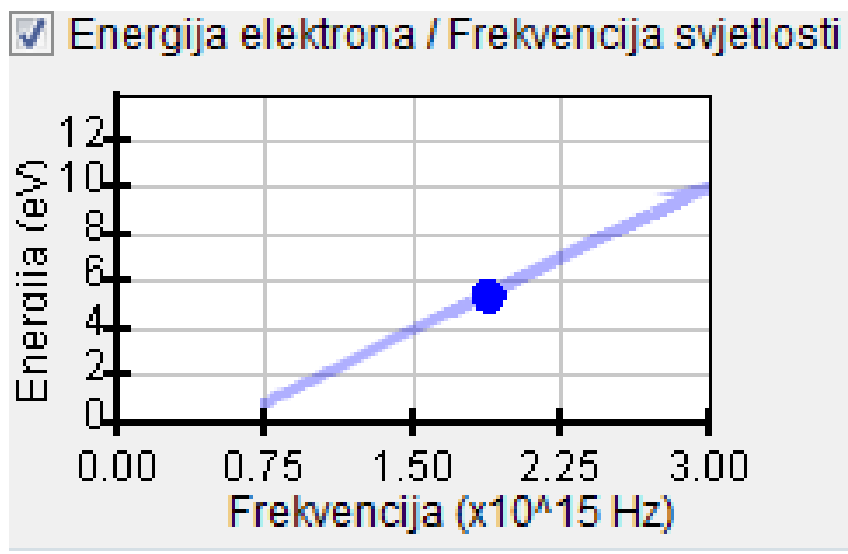
$$E_k = hf - W_{izlazni}$$

$E_k$  - kinetička energija izbijenih elektrona

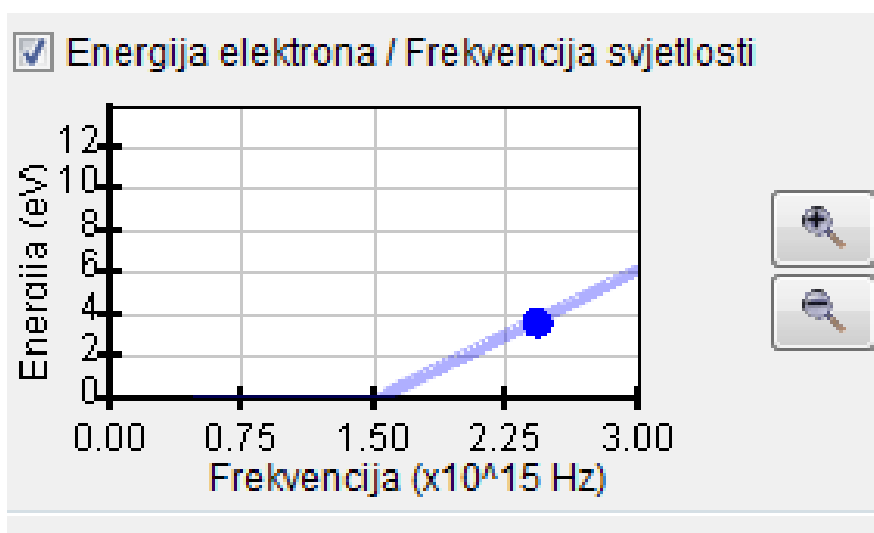
$h$  - Plankova konstanta

$f$  - frekvencija izbijenih elektrona

$W_{izlazni}$  - izlazni rad, različit za različite materijale



Slika 12.: Ovisnost energije elektrona u kalciju o frekvenciji svjetlosti kojom obasjavamo [60].



Slika 13.: Ovisnost energije elektrona u platini o frekvenciji svjetlosti kojom obasjavamo [60].

Ne smijemo izbjegavati korištenje simulacija u nastavi fizike, one mogu biti jako koristan i valjan način za prikaz nekih pokusa koji se iz raznih razloga ne mogu izvesti. U nastavi matematike kako u osnovnim tako i u srednjim školama već se uvelike koriste razni programi dinamičke geometrije poput GeoGebre i Sketchpada za prikaz nekih tvrdnja, poput zbroja kutova u trokutu, položaja težišta i ortocentra kod tupokutnog, raznostraničnog, šiljastokutnog trokuta itd. Iako takvi prikazi nisu dokazi, prikladni su posebice u nižim razredima za pokazivanje bitnih činjenica i predstavljaju veliku

vremensku uštedu u usporedbi s uobičajenim pristupom. U srednjoj školi česta je upotreba 3D GeoGebra kod prostorne geometrije u drugom razredu ili kod interpretacije derivacije u četvrtom razredu srednje škole. U nastavi fizike trebao bi se povećati broj interaktivnih nastavnih materijala, ne samo zbog materijalnih ograničenja već i s ciljem vremenske uštede.

## **5.2. Spektroskop**

Kroz navedenu literaturu spominje se nekoliko postava za spektroskopiju. U nastavku ću navesti neke od njih. Za jedan od osnovnih jednostavnih postava potrebno je: holografske optičke rešetke, dva lasera (crveni i zeleni) za kalibraciju i video kamere. Promatraju se razni izvori svjetlosti i zatim analiziraju pomoću programa kako bi se dobila frekvencijska raspodjela iz snimke spektra [30]. Noviji praktičan prijedlog za izradu koristi DVD medij, karton i digitalni fotoaparatus. Modifikacija koja čini taj postav praktičnim za demonstracije koristeći video kameru i osciloskop [31]. Postav koji mi se najviše svidio posebice za djecu osnovnoškolskog detaljno je opisan u nastavku.

Primjećujem da je oprema za pokuse sa spektroskopijom dostupna, ali ipak zahtijeva određeni angažman nastavnika. Najveći problem predstavljaju izvori svjetlosti. Neki se mogu jednostavno nabaviti (npr. kompaktne fluorescentne žarulje za promatranje dijela spektra žive), dok se drugi mogu nabaviti samo od specijaliziranih dobavljača za didaktičku opremu i koštaju značajno više (npr. vodikova plinska žarulja). Postavi koji se koriste na sveučilištima koriste opremu komercijalnih dobavljača pa nisu najekonomičniji odabir za većinu osnovnih škola, ali učenici se s njima naravno uvijek mogu susresti tijekom posjeta otvorenim danima sveučilišta ili institutima. Kao i do sada, za škole i učenike kod kojih su sveučilišta i instituti nedostupna opcija bilo zbog udaljenosti ili nekih drugih razloga tu su brojne simulacija.

### **5.2.1 Upute za izradu i provođenje aktivnosti**

Predviđeno vrijeme za ovu aktivnost su dva školska sata. Razred možemo podijeliti u dvije skupine od 10 učenika ili u slučaju brojnijeg razreda, tri skupine. Učenici sami izrađuju spektroskop od pripremljenih materijala te pomoću njega razlikuju izvore svjetlosti. Sat započinje razrednom diskusijom o svjetlosti. Učenici ponavljaju što do sad znaju o svjetlosti. Kao što je već prije napomenuto učenici se s pojmom svjetlosti u nastavi fizike susreću već krajem osmog razreda. Nakon nastavne cjeline valovi i zvuk,

govore o rasprostiranju svjetlosti, sfernim zrcalima, lećama te razlaganje svjetlosti na boje. Kao izborna tema ove cjeline obrađuje se laserska svjetlost. Upravo je ovdje prikladan trenutak za upoznavanje s različitim izvorima svjetlosti kroz zabavnu i upečatljivu aktivnost izrade spektroskopa.

Potreban materijal je prema [61]: upute za izradu za svakog učenika, olovke, A4 list krutog papira ili tanjeg kartona, škare ili skalpel, žileti, neprozirna traka, ravnalo kartonska kutija, CD, papir, monitori, razne žarulje (fluorescentne žarulje, žarulje sa žarnom niti), razni izvori svjetlosti poput: LED dioda, crveni laser, svjetleći štapići (kemijski izvor), plazma lampa. Materijali koji nisu nužni u izradi, ali mogu biti zanimljivi i korisni pri izvođenju su: „elementi u spreju“: Na, Sr, K, Ba, Ca. Razrijeđeni elementi koji se stave u male bočice spreja kako bi se lagano mogli ubacivati u plamen. Naravno u tom slučaju potrebno je imati i plamenik. Fotoaparat za snimanje nekih spektara koji se slabije opažaju golim okom može biti koristan, ali ne i nužan. Prostorija u kojoj će se provoditi promatranje spektara mora imati mogućnost dobrog zamračivanja. Korisno je svakako da učenici donesu svoje kutije adekvatnih dimenzija. Na isti način bi se mogla olakšati nabavka drugih materijalima poput skalpela, škara, ravnala. Sprejeve s elementima moguće je nabaviti od kolega kemičara. Naglasak u uvodnom dijelu sata je od čega se sastoji naš spektroskop i kako radi. U slučaju dostupnosti više vremena, bilo bi korisno uložiti dio vremena na razgovor o tome kako atom izgleda, kako se odvija apsorpcija i emisija svjetlosti. Za samu izradu se predviđa oko sat vremena.

Napravimo pukotinu na jednoj strani kutije, postavimo CD na drugoj. Kada pogledamo kroz otvor kutije gdje smo stavili CD pukotina na drugom kraju kutije ne smije biti preširoka niti preuska, inače će linije spektra biti mutne. Širina pukotine bi trebala biti oko 0.2 mm. Kroz usku pukotinu od žileta upada tanka zraka svjetlosti koja se na difrakcijskoj rešetki (CD-u) razlaže po valnim duljinama te se kroz otvor za gledanje na CD-u vidi spektar.



*Slika 14.: Spektroskop od kutije riže, strelica pokazuje na mjesto gdje se nalazi pukotina.*

Preporučeno je koristiti manju kutiju poput one od riže ili žitnih pahuljica. Tako dizajniran spektroskop omogućava da se nagib CD-a prilagođava nakon što se izradi cijeli spektroskop. Inače umjesto CD-a možete koristiti i DVD, koji će dati veću rezoluciju, ali će i jače raspršiti svjetlost pa obično cijeli vidljivi spektar neće stati na površinu DVD-a i morat će se prilagođavati nagib.



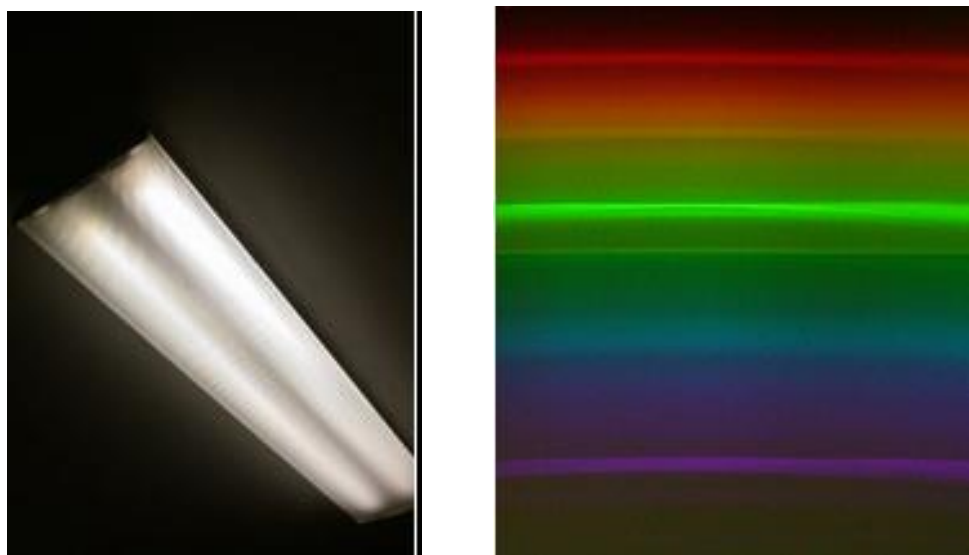


*Slika 15.: Spektar žarulje sa žarnom niti.*

Nakon što su spektroskopi gotovi slijedi promatranje raznih izvora svjetlosti. Učenici promatraju spektar sunčeve svjetlosti te spektre elemenata koje možemo lako opaziti raspršivanjem u plamen i sl.. Za početak je prikladno koristiti štedne žarulje jer imaju prilično izraženi linijski spektar pa je tako lako provjerite je li spektroskop ispravno radi. Većina jakih izvora moći će se promatrati golim okom, ali za slabije izvore potrebno se poslužiti digitalnim fotoaparatom koji ima opciju dugu ekspoziciju. U ovom trenutku nastavnik procjenjuje hoće li učenik sam provesti potrebnu snimku ili je potrebna asistencija. Potrebno je nadgledati rad svake pojedine skupine učenika. Na ovaj način je moguće snimiti sve spektre koji se promatraju. Spektri nekih elemenata mogu se promatrati ako ih se spali pomoću plamena na plinskom kuhalu, ali intenzitet je obično preslab da bi se mogli lako vidjeti golim okom. Naravno ako će se nešto slično provoditi potrebno je imati na umu sigurnosne mjere i onemogućiti učenicima nekontrolirano „igranje“ zapaljivim predmetima. Potrebno je imati na umu da se spektrometar ne smije usmjeravati direktno u Sunce zbog opasnosti od oštećenja vida.

Zračenje žarulja sa žarnom niti je karakteristično zračenje crnog tijela s kontinuiranim spektrom. Primijetimo da u spektru nema crnih linija kao niti kod spektra

halogen svjetiljke, što je moguće vidjeti u spektru sunca na zalasku, poznato i kao Fraunhoferove linije. Fluorescentna svjetlost sadrži plin žive koji emitira, uglavnom ultraljubičasto svjetlo aktivirajući fosfor. On emitira vidljivu svjetlost širokog spektra. Zato vidimo „jake“ živine spektre.



*Slika 16.: Fluorescentna svjetlost.*

Moguće je naravno promatrati brojne druge spektre, a sve ovisi o resursima škole, angažiranosti nastavnika.

## 6. Zaključak

Kvantna mehanika nedvojbeno je najuspješnija teorija svih vremena koja je promijenila ne samo način na koji promatramo svijet oko nas već i dovela do razvoja suvremene znanosti i tehnologija. Istodobno njeni koncepti i način na koji opisuje prirodu predstavljaju intelektualni izazov svakome tko se s njome upozna. Od prvih godina svog razvoja kvantna mehanika izaziva žustre rasprave u znanstvenoj zajednici koje prate uzbudljiva eksperimentalna otkrića i razvoj novih tehnologija.

Školski kurikulumi neopravdano kvantnu mehaniku guraju na začelje školskog obrazovanja, kada učenici nisu više u stanju percipirati jedan potpuno novi, intrigantni, otkačen fizikalni svijet koji je potpuno stran urođenim percepcijama stvarnosti.

Kvantna mehanika stoga oblikuje naš pogled na svijet na potpuno nov način. Mislim da ne bi samo fizičari trebali imati privilegiju da shvate taj novi pogled na svijet. Obrazovani građani trebali bi imati barem mogućnost da se upoznaju s neobičnostima i ljepotom kvantnih pojava. Činjenica je, međutim, da većina građana koji nisu studirali fiziku nikada ne dobiju pravu priliku upoznati se sa uzbudljivim i danas nerazjašnjenim pitanjima kvantne mehanike i upravo je to ono to bi trebalo promijeniti. Već djeci osnovnoškolskog uzrasta treba omogućiti susret s dosezima i ograničenjima moderne fizike. Stadij razvoja formalnih (apstraktnih) operacija prema Piagetu kreće već od 11. godine života, dakle već od 5. razreda učenici mogu govoriti o nekim apstraktnim konceptima. Do kraja 8. razreda učenici su upoznati s brojnim temama fizike, a jedna od njih, ali i posljednja je i svjetlost. Učenicima osnovnih škola, posebice učenicima na kraju osmog razreda potrebno je dopustiti da otkriju na kakav uzbudljiv i bizaran način kvantni fenomeni odstupaju od našeg klasičnog svakodnevnog iskustva. Istodobno je potrebno pružiti konceptualni okvir unutar kojeg se može stvoriti solidno razumijevanje. Zemlje poput Norveške i Njemačke su istražile kako unaprijediti podučavanje kvantne fizike te je učiniti dostupnijom i učenicima i nastavnicima. Teorijski pojmovi i odnosi koji se uvode u predavačkom dijelu nastave fizike opisuju prirodu i ponašanje stvarnih pojava. Oni su na odgovarajući način, otkriveni pažljivim promatranjem i promišljenom analizom stvarnih pokusa. To je upravo ono čega bi svaki učenik trebao biti svjestan nakon sata fizike. Fizika nije nešto što postoji samo u udžbeniku. Pravo razumijevanje podrazumijeva sposobnost

povezivanja apstraktnih ideja s određenim činjenicama na koje se te ideje odnose. Doista, pokusi namijenjeni dokazivanju određenih ideja često su pokazali upravo suprotno. Unatoč brojnim pogodnostima pokus je često izostavljen u nastavi fizike. Stoga su u radu navedene prednosti i ciljevi pokusa u nastavi fizike, kao i mogući nedostaci i prepreke s kojima se nastavnik može susresti. Također, navedeni su načini na koje fizika, posebice kvantna mehanika ne mora ostati nešto nedostupno i nepristupačno kako učenicima tako i nastavnicima, koji se često, bez odgovarajuće stručne podrške, osjećaju obeshrabrenima za podučavanje ove tematike.

## 7. Literatura

- [1] R. Müller, H. Wiesner, *Teaching quantum mechanics on an introductory level*
- [2] Bungum B., Henriksen E.K., Angell C., Vetleseter M., *ReleQuant– Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research*
- [3] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. III,9.* (Addison-Wesley, Reading 1966).
- [4] A. Rae, *Quantum Physics: Illusion or Reality*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1986).
- [5] M. P. Silverman, *More than one Mystery. Explorations in Quantum Interference*, (Springer, New York, 1995).
- [6] D. Z. Albert, *Quantum Mechanics and Experience*, (Harvard University Press, Cambridge, 1992).
- [7] Kansas State University, <http://www.phys.ksu.edu/perg/vqm>, 1.7.2018.
- [8] Coltheart M., *Modularity and cognition, Trends in cognitive sciences 1999*
- [9] Chomsky N., *Rules and representations, Behavioral and brain sciences 1980*
- [10] Pronin E. *How we see ourselves and how we see others.*
- [11] Spelke ES, Breinlinger K, Macomber J, & Jacobson K. *Origins of knowledge. Psychological review, 1992*
- [12] Piaget J. *The origins of intelligence in children*
- [13] McCloskey M. *Naive theories of motion. Mental models 1983*
- [14] Proffitt DR. *Naive physics. The MIT encyclopedia of the cognitive sciences 1999*
- [15] Nersessian NJ, Resnick LB., *Comparing historical and intuitive explanations of motion: Does “naive physics” have a structure. In Proceedings of the Eleventh Annual Conference of the Cognitive Science Society 1989*
- [16] McCloskey M., Kohl D., *Naive physics: the curvilinear impetus principle and its role in interactions with moving objects. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition 1983*
- [17] Film. *Wanted*. Dir. Timur Bekmambetov. Perf. Angelina Jolie, James McAvoy and Morgan Freeman. Universal Pictures and Spyglass Entertainment, 2008.
- [18] McCloskey M. *Intuitive physics. Scientific American, 1983*

- [19]Järnefelt E, Canfield CF & Kelemen D. *The divided mind of a disbeliever: Intuitive beliefs about nature as purposefully created among different groups of non-religious adults. Cognition 2015*
- [20] Hood, BM. *Gravity rules for 2-to 4-year olds? Cognitive Development 1995*
- [21]Hood BM. *SuperSense: Why we believe the in the unbelievable. New York: HarperCollins 2009.*
- [22]Spelke ES. *Core knowledge. American psychologist 2000*
- [23]Kane G. (2006). *The dawn of physics beyond the standard model. Scientific American 2006*
- [24]Wheeler JA. *Mathematical Foundations of Quantum Theory, edited by A.R. Marlow, Academic Press 1978.*
- [25]Manning AG, Khakimov RI, Dall RG, Truscott AG. *Wheeler's delayed-choice gedanken experiment with a single atom. Nature Physics 2015*
- [26]Feynman RP, Leighton RB, Sands M & Hafner EM. *The feynman lectures on physics; vol. iii. American Journal of Physics 1965.*
- [27]Einstein A, Mayer J & Holmes J. *Bite-size Einstein: Quotations on just about everything from the greatest mind of the twentieth century. Macmillan 1996.*
- [28]Hardy L. *Spooky action at a distance in quantum mechanics. Contemporary physics 1998*
- [29]Feynman RP. *There's plenty of room at the bottom. Engineering and science 1960*
- [30]Brown, D. *Spectroscopy Using the Tracker Video Analysis Program. Poster presented at AAPT Summer Meeting. Salt Lake City, UT.*
- [31]Kraftmakher, Y. (2012). *Demonstrations of optical spectra with a video camera. Physics Education*
- [32]Krsnik, R. (2008). *Suvremene ideje u metodici nastave fizike. Zagreb: Školska knjiga*
- [33]Shtulman A. *How Lay Cognition Constrains Scientific Cognition. In press.*
- [34]Strickland B & Mercier H. *Bias neglect: a blind spot in the evaluation of scientific results. The Quarterly Journal of Experimental Psychology 2014*

- [35] Lane JD & Harris PL. *Confronting, Representing, and Believing Counterintuitive Concepts Navigating the Natural and the Supernatural. Perspectives on Psychological Science* 2014
- [36] Banerjee K, Haque OS & Spelke ES. *Melting lizards and crying mailboxes: Children's preferential recall of minimally counterintuitive concepts. Cognitive science* 2013
- [37] Bohr N. 1952. *Quoted by Werner Heisenberg. Physics and Beyond. New York: Harper and Row* 1971.
- [38] Kumar M. *Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate about the Nature of Reality. W. W. Norton & Company* 2011.
- [39] Everett H. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, Princeton University* 1957.
- [40] Andrew SID Lang i Caleb J Lutz, *Naïve Physics and Quantum Mechanics: The Cognitive Bias of Everett's Many-Worlds Interpretation*
- [41] Baranović, B. (Ed.) (2006). *Nacionalni kurikulum za obvezno obrazovanje u Hrvatskoj : različite perspektive. Zagreb: Institut za društvena istraživanja.*
- [42] H. Niedderer, T. Bethge, H. Cassens, *A Simplified Quantum Model: A teaching Approach and Evaluation of Understanding*, in: P. L. Lijnse et al. (Ed.): *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles: A Central Problem in Secondary Science Education*
- [43] J. Petri, H. Niedderer, *A Learning Pathway in high-school level atomic physics, Int. J. Sci. Educ.*
- [44] H. Fischler, M. Lichtfeldt, *Learning Quantum Mechanics*, in: R. Duit, F. Goldberg, H. Niedderer (Eds.): *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, IPN, Kiel (1991).
- [45] H. Fischler, M. Lichtfeldt, *Modern Physics and Students' Conceptions*, *Int. J. Sci. Educ.*
- [46] R. Müller, H. Wiesner, *Vorstellungen von Lehramtsstudenten zu begrifflichen Problemen der Quantenmechanik*, in: *Didaktik der Physik, Beiträge zur 62. Physikertagung, Regensburg (1998)*

- [47] R. Müller, H. Wiesner, *Students' Conceptions on Quantum Physics, Papers presented at the Annual Meeting National Association for Research in Science Teaching (1999)*
- [48] Labor J., *Udžbenik za 4. razred gimnazije, Zagreb 2007, Alfa*
- [49] Mckagan, S. B., Handley, W., Perkins, K. K., & Wieman, C. E. , *A Research-Based Curriculum for Teaching the Photoelectric Effect. American Journal of Physics*
- [50] Product demo-Photoelectric efect, <https://www.youtube.com/watch?v=z-3XaXCvjZw>, 18.7.2018.
- [51] *Frank L. H. Wolfs*, Department of Physics and Astronomy University of Rochester, *The Purpose of the Laboratory in education*
- [52] Pedagogy in action, <https://serc.carleton.edu/sp/service/index.html>, 19.7.2018.
- [53] radiosamobor.hr, <http://www.radiosamobor.hr/2018/02/16/kvantna-fizika-u-vrticu/>, 20.7.2018.
- [54]Henriksen, E. K., & Angell, C. (2010). *The role of 'talking physics' in an undergraduate physics class using an electronic audience response system. Physics Education, 45(3), 278.*
- [55] Henriksen, E. K., Bungum , B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T., & Bøe, M. V. (2014). *Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: Challenges, opportunities and proposed approaches. Physics Education, 49(6), 678–684.*
- [56] T. Kaur, D. Blair, J. Moschilla, W. Stannard and M. Zadnik; *Teaching Einsteinian Physics at Schools: Part 3, Review of Research Outcomes*
- [57] T. Kaur, D. Blair, J. Moschilla, W. Stannard and M. Zadnik; *Teaching Einsteinian Physics at Schools: Part 2, Models and Analogies for Quantum Physics*
- [58] T. Kaur, D. Blair, J. Moschilla, W. Stannard and M. Zadnik; *Teaching Einsteinian Physics at Schools: Part 1, Models and Analogies for relativity*
- [59] A. Pais, "Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein," New York: Oxford University Press, 1982, p. 382
- [60] PhET interactive simulations, <https://phet.colorado.edu/bs/simulation/photoelectric>, 22.7.2018.
- [61] Ljetna tvornica znanosti, <http://www.tvornica-znanosti.org/arhiva/2007/izrada-spektroskopa>, 24.7.2018.



- [62] svijetvode.com, <https://svijetvode.com/uvc-zarulja-9-w-172>, 24.7.2018.
- [63] Renstrøm, R. (2011). *The development of quantum physics - in physics textbooks, in the history of science, and in the classroom. Ph.D. thesis, University of Oslo.*
- [64] Rødseth, S., & Bungum, B. (2010). *Nordic Studies in Science Education, 2010(1).*
- [65] Angell, C., Guttersrud, Ø., Henriksen, E. K., & Isnes, A. (2004). *Views of Physics and Physics Teaching. Science Education*
- [66] Cheong, Y. W. & Song, J. (2013): *Different levels of meaning of wave-particle duality in a suspensive perspective on the interpretation of quantum theory. Science & Education, 23(5), 1011–1030.*
- [67] Velentzas, A., & Halkia, K. (2011). *The 'Heisenberg's Microscope' as an example of using thought experiments in teaching physics theories to students of the upper secondary school. Research in Science Education, 41(4), 525–539.*

## Sažetak

Istaknuta je uloga i važnost pokusa u nastavi fizike kao i koraci koji nastavnicima mogu olakšati njihovo izvođenje. Predstavljene su neke strategije koje mogu olakšati nošenje sa situacijama kad se izvođenje pokusa ne odvija kako je planirano. Na temelju četiri pravila naivne fizike ulazi se u diskusiju o utjecaju kognitivnih pristranosti na teorije kvantne fizike. Zašto kvantna mehanika krši naše urođeno razumijevanje kako bi svijet trebao funkcionirati. Kada djeci treba o tome početi pričati? U vrtiću, razrednoj nastavi ili na fakultetu? U obrazovanju 20. stoljeću vladalo je mišljenje da se suvremena znanja ne mogu učiti bez starih teorija kao temelja. U fizici je to dovelo do toga da većina učenika, osim nekolicine na sveučilištu, nikada ne stekne znanja i vještine na razini današnjih znanja i tehnologija. Obrazovanje 21. stoljeća kreće od novih principa, da se priča gradi oko današnjih problema i tehnologija i s time se kreće već od najranije dobi, najkasnije od 4. godine života. U ovom radu ćemo prikazati nekoliko primjera kako koncepte kvantne fizike možemo demonstrirati učenicima.

Ključne riječi: suvremena nastava fizike, kvantna fizika, osnovna škola

## **Summary**

### **Demonstration Experiments in Physics Education: Quantum Physics in Elementary School**

#### **Abstract**

The essential role of experiments in the process of teaching physics has been demonstrated, as well as some of the steps that can facilitate their performance for the teachers. Several strategies have been presented for situations when the experiments do not function according to plan. On the basis of the four rules of naïve physics, the influence of cognitive bias on the theories of quantum physics is discussed. Why do the quantum mechanics go against our innate understanding of the manner in which the world should function? When should we start presenting it to children? In kindergarten, primary school or at university? During the 20<sup>th</sup> century the prevailing opinion was that new knowledge cannot be taught without being based on old theories. In physics, as a result of this, apart from a small number of students at the university level, most of them never acquire knowledge and skills at the level of contemporary knowledge and technology. In the 21<sup>st</sup> century education system, the starting point are new principles, building the story up around contemporary problems and technologies from the earliest age, 4<sup>th</sup> year of life at the latest. This thesis will provide several examples of demonstrating the concepts of quantum physics to students.

Key words: modern physics classroom, quantum physics, primary school

## **Životopis**

Petra Maruna rođena je 9.7.1992. godine u Zadru gdje završava osnovnu školu Bartula Kašića, a potom i srednju školu Gimnaziju Franje Petrića. Nakon toga 2012. godine upisuje Prirodoslovno - matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.