

---

# Istraživanje strukture atoma u srednjoj školi primjenom suvremene tehnologije

Luka Zurak<sup>1</sup>, Marko Barac<sup>1</sup>, Ljubomir Špirić<sup>1</sup>, Nataša Erceg<sup>1</sup>, Marin Karuza<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>*Odjel za fiziku, Sveučilište u Rijeci, Rijeka*

<sup>2</sup>*Centar za mikro i nano znanosti i tehnologije, Sveučilište u Rijeci, Rijeka*

<sup>3</sup>*Fotonika i kvantna optika, Znanstveni centar izvrsnosti za napredne materijale i senzore, Sveučilište u Rijeci, Rijeka*

<sup>4</sup>*INFN Sezione di Trieste, Trieste*

**Sažetak.** U ovom radu opisan je pokus kojim se analizira struktura energijskih razina atoma nepoznatog plina unutar staklene cijevi. U pokusu se pobuđuju atomi plina sudarima s elektronima malih kinetičkih energija te se analizira izmjerena struja nastala prikupljanjem spomenutih elektrona koji su izgubili kinetičku energiju uslijed neelastičnih sudara sa elektronima iz elektronskog omotača atoma. Uz pomoć jeftinog multifunkcionalnog uređaja *RedPitaya* mjerena je struja elektrona koji su izgubili kinetičku energiju u sudarima, odnosno posredno energetske razine u elektronskom omotaču atoma. Isti uređaj upotrijebljen je i za kalibraciju ubrzavajućeg napona. Usporedbom rezultata dobivenih eksperimentom (obrađenih računalnim programom *QtiPlot*) te poznatih vrijednosti, moguće je odrediti vrstu plina kojim je ispunjena staklena cijev. Iako je ovaj eksperiment u proširenom obliku namijenjen za sveučilišnu nastavu u sklopu kolegija *Praktikum iz strukture tvari* na Odjelu za fiziku Sveučilišta u Rijeci, moguće ga je prilagoditi za srednjoškolsku nastavu, uz primjenu različitih nastavnih metoda i oblika rada. U skladu sa srednjoškolskim nastavnim planom i programom, pokus obuhvaća koncepte iz atomske fizike, elektriciteta i mehanike. Stoga, primjerice u 4. razredu može poslužiti za dublje razumijevanje koncepata koji se tek uvode (npr. atomski spektar i energija atoma), za usustavljanje ranije usvojenih pojmova (npr. električni potencijal, gibanje naboja u električnom polju, električna struja i napon, neelastični sudari), te za direktnu primjenu suvremene tehnologije u okvirima odgovarajućih srednjoškolskih sadržaja iz fizike.

**Ključne riječi:** nastava fizike, struktura atoma, kritični potencijal, *Red Pitaya*, *QtiPlot*.

## O EKSPERIMENTU

U *Praktikumu iz strukture tvari* ponavljaju se eksperimenti koji su pisali povijest moderne fizike i na kojima studenti po prvi puta dobivaju eksperimentalni odnosno direktni uvid u strukturu tvari. Eksperimentalni postavi su nabavljeni od renomiranih proizvođača edukacijske opreme *Phywe* i *3bScientific*. Budući da su nabavljeni prije desetak godina uređaji koji čine postav su u raskoraku sa trenutnim stanjem tehnologije koja je u zadnjih deset godina prilično napredovala. Tu treba dodati za naše prilike visoku cijenu uređaja uključenih u postave i skromnu mogućnost uporabe izvan zadanih okvira postava. Eksperimenti koji se izvode uključuju Comptonovo i Rutherfordovo raspršenje, kritični potencijal i Mosley-ev zakon (vidjeti na primjer upute za vježbe [1-4]). Vježbe dolaze sa svom potrebnom opremom i uputama tako da samo postavljanje i priprema nisu pretjerano zahtjevni, no ono što odmah upada u oči je zastarjelost opreme za prikupljanje podataka i nedostatak mogućnosti neposrednog prikaza signala što predstavlja ograničenje budući da studenti teško vizualiziraju što se događa sa signalom i kako on izgleda od njegovog nastanka u detektoru do trenutka kada se prikaže u obliku brojke na ekranu. U tu svrhu moguće je koristiti osciloskope, koji su u nekim slučajevima i korišteni, no budući se radi o modelima analognih osciloskopa nedostajale

su neke od korisnih funkcija, kao što je na primjer prikupljanje i spremanje podataka u digitalnom obliku. Mogućnost spremanja podataka u digitalnom obliku je posebno bitno svojstvo jer omogućuje studentima naknadnu obradu i analizu podataka, te usporedbu sa teorijskim modelima što onda mogu uključiti u svoje izvještaje. Osim toga u današnjem digitalnom svijetu koji je posebno blizak današnjim učenicima i studentima primjerenije je korištenje podataka u digitalnom obliku. Oprema isporučena uz vježbe u nekoj mjeri to i podržava, no ograničena je u kako u mogućnostima samog hardvera, odnosno rezoluciji analogno digitalnog pretvarača, tako i softvera koji je vrlo skroman u smislu fleksibilnosti, tako da smo odlučili provjeriti što se može naći na tržištu što bi zadovoljilo zahtjeve i naišli smo na proizvod kompanije sa slovenskom adresom *Instrumentation Technologies* koja projektira i izrađuje instrumente za jedne od složenijih sustava na Zemlji – ubrzivače čestica. Dakle uređaj, nazvan po plodu tropskog kaktusa - pitaji, zapravo se proizvodi u susjedstvu i nosi naljepnicu *Made in Slovenia*.

## TEORIJSKI UVOD

Neusuglašenost Rutherfordova planetarnog modela atoma s Maxwellovom teorijom i u to vrijeme popularna Planckova hipoteza kvantiziranosti utjecale su na rađanje Bohrovog modela atoma. Niels Bohr je svojom teorijom stacionarnih orbita uspješno opisao do tada poznati spektar najjednostavnijeg elementa, vodika, no već u pokušaju opisivanja atoma helija Bohrova teorija se suočava sa poteškoćama. Potpun opis atomske strukture daje kvantna mehanika [5]. U cilju provjere teorijskih predviđanja, unutarnju strukturu atoma moramo opisati opazivom veličinom koja je lako usporediva sa veličinama uporabljenim u teorijskom razvoju. Primjerice elektrone u elektronskom omotaču atoma možemo opisati njihovom energijom koja je prema kvantnoj teoriji diskretna. Dakle, energijska stanja elektronskog omotača moguće je indeksirati prirodnim brojevima  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_\infty$ . Stanje  $E_1$  nazivamo osnovnim i ono je stanje najniže energije dok su  $E_2, E_3$  su redom prvo pobuđeno i drugo pobuđeno, a  $E_\infty$  je energija ionizacije odnosno energija potrebna da bi najslabije vezani elektron izašao iz elektronskog omotača. Elektroni u elektronskom omotaču, ukoliko to rubni uvjeti dopuštaju, se nalaze u stanju sa najmanjom energijom. Njihovo pobuđivanje u stanja veće energije zahtijeva dovođenje energije. Primjerice da bi elektron prešao iz stanja  $E_n$  u stanje  $E_{n+1}$  prema zakonu očuvanja energije on treba apsorbirati energiju  $\Delta E = E_{n+1} - E_n$ . Elektron se može pobuditi u više energijsko stanje apsorpcijom fotona ili sudarnim procesom. Energija potrebna za pobuđivanje elektrona je reda veličine 10 eV što je više od kinetičke energije koju posjeduju atomi na sobnoj temperaturi. Dakle elektroni u elektronskom omotaču svih atoma tvari u plinovitom stanju na sobnoj temperaturi nalaze se u stanju najniže energije. U ovom eksperimentu razmatra se sudarno pobuđivanje elektrona u elektronskim omotačima atoma plina sa elektronima ubrzanima u razlici potencijala  $U$ . Ubrzani elektroni u savršeno neelastičnom sudaru s elektronima iz elektronskog omotača atoma plina predaju svoju kinetičku energiju i pobuđuju elektronski oblak iz osnovnog u neko od pobuđenih stanja. Uz dostatnu energiju moguća je i ionizacija atoma plina. Energija potrebna za prijelaz iz osnovnog u viša stanje vezana je uz razliku potencijala u kojoj se elektroni ubrzavaju kako je vidljivo u sljedećem izrazu (1),

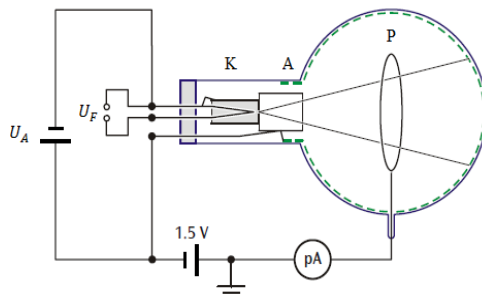
$$eU_{n-1} = \Delta E_{n-1} = E_n - E_1; n \geq 2 \quad (1)$$

gdje su  $U_{n-1}$  ubrzavajući naponi.

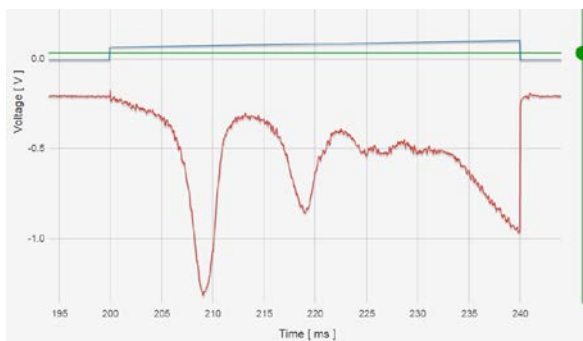
## EKSPERIMENTALNI POSTAV I METODE MJERENJA

Ekperimentalni se postav sastoji od izvora napona, baterije, staklene cijevi ispunjene plinom, kontrolne jedinice, osciloskopa, voltmetra i računala. Središnji dio postava je staklena cijev prikazana na slici 1. U cilindričnom dijelu cijevi nalaze se katoda K i anoda A. Katoda emitira elektrone koji se zatim ubrzavaju u razlici potencijala  $U_A$  između katode i anode koja ima oblik pile i periodički se ponavlja s frekvencijom od 20 Hz [1] – plavi signal na slici 2. Signal prikazujemo na osciloskopu dok oblik reguliramo na kontrolnoj jedinici postavljanjem donje i gornje vrijednosti napona koji je promjenjiv u rasponu od 0 do 60 V. Ubrzani elektroni pri prolasku kroz cijev sudaraju se s elektronima u atomima plina te za određene napone ubrzanja pobuđuju elektrone u elektronskom omotaču iz osnovnog u stanje više energije. U sudarima ubrzani elektroni, ukoliko je njihova kinetička energija jednaka energiji prijelaza između energijskih razina u elektronskom omotaču, predaju svoju kinetičku energiju i zaustavljaju se u kuglastom dijelu staklene cijevi. Kako bi bili prikupljeni u cijevi se nalazi kolektorski prsten P, koji se dodavanjem baterije ( $U \approx 1,5\text{ V}$ ) u strujni krug, postavlja na viši pozitivni potencijal te zaustavljeni elektroni kreću prema prstenu gdje bivaju prikupljeni i tvore strujni signal reda veličine nA koji se pojačava i pretvara u naponski signal koji je moguće opaziti na osciloskopu. Oblik signala ovisi o ubrzavajućem naponu dok njegova amplituda ovisi o temperaturi katode. Kako se ubrzavajući napon povećava ubrzani elektroni pobuđuju elektrone u atomima plina u viša energijska stanja što rezultira izraženim maksimumima signala kolektorske struje – crveni signal na slici 2. Kada kinetička energija elektrona dosegne vrijednost dovoljnu za ionizaciju plina opažamo nagli kontinuirani porast struje elektrona (sl. 2).

Tijekom izvedbe pokusa napravljena su dva mjerenja. U prvom mjerenju promatra se struja elektrona, dok se u drugom mjerenju promatra struja iona u istom naponskom intervalu ubrzavajućeg napona. Struju iona promatramo okretanjem baterije i postavljanjem kolektorskog prstena na negativni potencijal. Prsten sakuplja pozitivne ione što je potvrda da se u prvom mjerenju atomi ioniziraju.



SLIKA 1. Shema postava (slika preuzeta s <https://www.3bscientific.com> [3])



SLIKA 2. Primjer signala koji se dobije na osciloskopu. Plavi signal odgovara naponu ubravanja  $U_A$  dok crveni signal odgovara kolektorskoj struji.

## Osciloskop i program za obradu podataka

*Red Pitaya* dolazi u pakiranju u kojem se nalazi ploča ne veća od mobilnog telefona i ponosi se sa dva radio frekvencijska ulaza te isto toliko izlaza pojasne širine 50 MHz te brzine uzorkovanja 125 miliona uzoraka u sekundi. Rezolucija analogno digitalnog i digitalno analognog pretvarača iznosi 14 bita što uz ulazni, odnosno izlazni napon od  $\pm 1$  V daje rezoluciju od 61  $\mu$ V. Uz spomenute ulaze i izlaze postoji još cijeli niz kanala: 4 ulazna i 4 izlazna kanala brzine 100 tisuća uzoraka u sekundi i 12 bitne rezolucije, 16 digitalnih ulazno izlaznih konektora i dva puta serijski konektor "SATA tipa". Osim navedenih moguće je iskoristiti USB izlaz za proširenja kao što su Wi-Fi ili WLAN adapter, eksterni hard disk i slično. Bogatstvo izlaza i ulaza kontrolirano je od strane *Xilinx Zynq 7010 Silicon on Chip (SoC)* i dvoj jezrenog *ARM Cortex – A9* procesora. Ono što se ne nalazi u pakiranju su napajanje, SD kartica i konektori koje je moguće i zasebno kupiti, a isto tako je moguće kupiti i pakiranje u kojem je sve potrebno i sadržano.

Operativni sustav se podiže sa SD kartice, spajanje je moguće preko LAN mreže ili direktno sa računala preko USB veze. Spajanje preko LAN mreže radi jako dobro ukoliko je dostupna internetska veza. *RedPitaya* se pristupa sa računala upisujući u neki od internet preglednika (*Firefox, Chrome, Internet Explorer ...*) IP adresu uređaja.

Mjerenja su rađena sa starijom i nešto jednostavnijom inačicom operativnog sustava (*ecosystem 0.92*) sa aplikacijom *Calscope* [6] koja dozvoljava snimanje tragova osciloskopa sa ekrana na računalo jednim klikom na tipku miša. Tu treba spomenuti da odnedavno *RedPitaya* radi i sa *Linux* operativnim sustavom i da postoje naprednije inačice programa odnosno mjernih instrumenata. Isto tako moguće je programirati *Xilinx-ov SoC* i pisati vlastite programe za mjerne instrumente ovisno o potrebama i eksperimentalnim postavima u kojima će biti korištena. Moguće je na jednostavniji način kontrolirati sve mogućnosti *RedPitaye* preko *SCPI-a (Standard Control for Programming Instrumentation)* koristeći *Matlab/Labview* ili *RedPitayin* jezik za vizualno programiranje [7] što može biti vrlo korisno iskorišteno u srednjoškolskoj nastavi, i to ne samo fizike nego i informatike.

Podaci se lako učitavaju u računalni program za obradu podataka i istraživačku vizualizaciju *QtiPlot* koji omogućava korištenje naprednih mogućnosti od računanja nelinearne regresije raznim metodama do oduzimanja baseline-a što je i korišteno u ovoj vježbi i obradi podataka.

## REZULTATI I DISKUSIJA

### Kalibracija

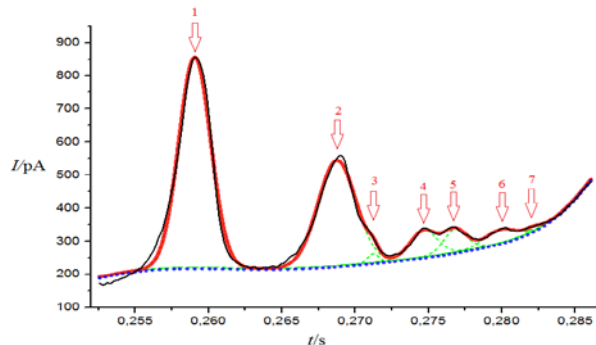
Sustav se kalibrira pridruživanje stvarnih naponskih vrijednosti početnoj i konačnoj točki ubrzavajućeg napona čime se kalibrira vremenska skala. Uz očitavanje vrijednosti napona očitava se i standardna pogreška koja se uzima kao polovica preciznosti mjernog uređaja. Izvođenjem podataka s osciloskopa signal se prikazuje i analizira u programu *QtiPlot* sl.3. a). Da bi se precizno odredili položaji početnog i konačnog ubrzavajućeg napona signal se derivira i u dva područja najvećih promjena deriviranog signala prilagođava se Gaussova funkcija sl.3. b). Iz dobivenih položaja točaka i pripadnih napona, vremenskoj skali pridružujemo naponsku skalu kalibracijskim pravcem.

Nakon određivanja položaja maksimuma  $t$  za spomenuta mjerenja pomoću kalibracijskog pravca pridružujemo im se ubrzavajući napon  $U$ , a time i kinetičku energiju ubrzanih elektrona  $eU$ . Standardna pogreška napona (2) pridruženog jednom od maksimuma proizlazi iz pogrešaka koeficijenata prilagodbe  $SE_a, SE_b$ , te iz pogreške položaja maksimuma  $SE_t$ .

$$SE_U = \sqrt{(t \cdot SE_a)^2 + (a \cdot SE_t)^2 + SE_b^2} \#(2)$$

## Određivanje položaja maksimuma i zone ionizacije

U prvom mjerenju položaji maksimuma su određeni prilagođavanjem Gaussiana i pozadine preko signala (sl.4). Crvenom bojom označen je kumulativna prilagodba maksimuma i pozadine, dok su crnom označeni izmjereni podatci.



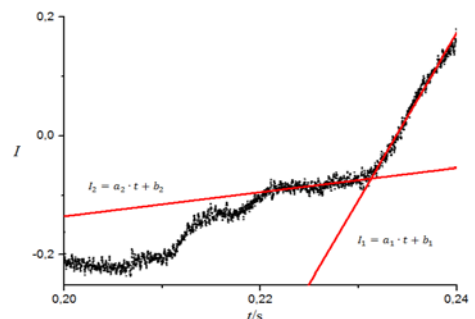
SLIKA 4. Kritični potencijali. Vrhovi označavaju trenutke u kojima ubrzani elektroni predaju svoju energiju elektronima u atomima.

U tablici 1 prikazani su podatci za položaje sedam maksimuma, pripadne standardne pogreške i teorijske vrijednosti za plin neon. Eksperimentalno dobivene vrijednosti unutar jedne standardne pogreške odstupaju od tabličnih vrijednosti za neon [8] što je dovoljno točno da bi se moglo utvrditi s kojim je plinom ispunjena cijev.

TABLICA 1. Prva zona.

$n$	orbitala	$eU_n/eV$	$SE$	$\Delta E_n$
1	3s	16,3	0,3	16,6
2	3p	18,1	0,3	18,4
3	3p	18,5	0,3	18,7
4	4s	19,2	0,3	19,7
5	3d	19,6	0,3	20,0
6	4p	20,1	0,3	20,4
7	4d	20,6	0,3	20,7

Iz slike 4 moguće je iščitati i energiju ionizacije.<sup>1</sup> Dobivena vrijednost iznosi oko 21,2 eV. Da bi se dokazalo da se radi upravo o ionizaciji mijenja se polaritet napona na prstenu P okretanjem baterije u njenom držaču. Mjerenje s obrnutom baterijom prikazano je na slici 5. Da bi se odredila točka u kojoj se događa nagli porast struje iona područje neposredno prije i poslije ionizacije aproksimiramo pravcima čije parametre su određeni prilagodbom na eksperimentalne podatke.



SLIKA 5. Struja iona.

Iz uvjeta za sjecište dvaju pravaca (3)

<sup>1</sup> Ionizacija se određuje kao i u drugom mjerenju.

$$I_1 = I_2 \Rightarrow t_I = -\frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} \#(3)$$

moguće je odrediti energiju ionizacije dok se standardna pogreška vrijednosti energije ionizacije računa se iz koeficijenata  $a$  i  $b$  i njihovih standardnih pogrešaka. Iz podataka dobije se vrijednost energije ionizacije koja iznosi  $E_{\text{ion}} = (21,3 \pm 0,6)$  eV dok se iz tablica iščitava 21,6 eV.

## ZAKLJUČAK

U ovom radu pokazano je da je energijska struktura elektronskog omotača atoma diskretna te su izmjerene i njihove relativne energije u odnosu na osnovno stanje. Prema izmjerenim podacima moguće je zaključiti koji se plin nalazi u staklenoj cijevi, odnosno da se izmjerena struktura elektronskog omotača poklapa sa strukturom elektronskog omotača atoma neona. Usporedbom izmjerenih i teorijskih vrijednosti uočava se da su izmjerene vrijednosti sistematski niže za oko 0,3 eV što može biti objašnjeno kinetičkom energijom elektrona različitom od nule pri izlasku iz katode. Uporabom suvremene opreme, odnosno multifunkcionalnog uređaja *RedPitaya*, bilo je moguće spremiti podatke visoke razlučivosti u digitalnom obliku te ih naknadno analizirati u računalnom programu za obradu podataka. Na taj način su izmjerene energije sedam ljusaka u elektronskom omotaču atoma neona te je određena i energija ionizacije. U ovom postavu nisu iskorištene sve mogućnosti *RedPitaye* no one mogu biti uporabljene u nekim od drugih eksperimenata koji se izvode u ovom praktikumu, bez dodatnog troška.

Eksperiment je moguće prilagoditi i za srednjoškolsku nastavu, uz primjenu različitih nastavnih metoda i oblika rada. U skladu sa srednjoškolskim nastavnim planom i programom, pokus obuhvaća koncepte iz atomske fizike, elektriciteta i mehanike. Stoga, primjerice u 4. razredu može poslužiti za dublje razumijevanje koncepata koji se tek uvode (npr. atomski spektar i energija atoma), za usustavljivanje ranije usvojenih pojmova (npr. električni potencijal, gibanje naboja u električnom polju, električna struja i napon, neelastični sudari), te za direktnu primjenu suvremene tehnologije u okvirima odgovarajućih srednjoškolskih sadržaja iz fizike.

## ZAHVALA

Sveučilištu u Rijeci čijim je projektom "Unapređenje izvedbenih modusa nastave - Razvoj mjera i postupaka kako bi najmanje 50% kolegija na studijskim programima koristilo napredne alate za e-učenje" nabavljena navedena oprema i računalni program. Tvrtki *Primotronic* koja nam je ustupila prvu *RedPitayu* za testiranje.

## LITERATURA

1. 3B Scientific, Critical Potentials Tube S with Ne-Filling 1000621, URL: [https://www.3bscientific.com/product-manual/1000621\\_EN.pdf](https://www.3bscientific.com/product-manual/1000621_EN.pdf) (7.3.2017.)
2. Phywe, Rutherford experiment with MCA, URL: <https://www.phywe.com/en/rutherford-experiment-with-mca.html#tabs1> (26.2.2017.)
3. Phywe, Compton effect with the multichannel analyser, URL: <https://www.phywe.com/en/compton-effect-with-the-multichannel-analyser.html> (26.2.2017.)
4. Phywe, X-ray fluorescence and Mosley law's, URL: [http://www.nikhef.nl/~h73/knlc/praktikum/phywe/LEP/Experim/5\\_2\\_47.pdf](http://www.nikhef.nl/~h73/knlc/praktikum/phywe/LEP/Experim/5_2_47.pdf) (7.3.2017.)

5. Wolfgang Demtroeder, Atoms, Molecules and Photons, An Introductory to Atomic-, Molecular- and Quantum Physics, 2nd Edition, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
6. Dashpi, RedPitaya Applications, URL : <https://github.com/dashpi/RedPitaya/tree/master/Applications> (27.2.2017.)
7. RedPitaya, Redpitaya documentation, URL: <http://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/> (14.3.2017.)
8. NIST, Basic Atomic Spectroscopic Data, URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/neontable5.htm> (14.3.2017.)