



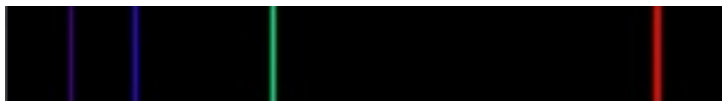
Одређивање Ридбергове константе (помоћу водоникове лампе и дифракционе реšetке)

1 Увод

Jedna od bitnih primena spektroskopije je za proučavanje elektronske strukture atoma i molekula. Primarni podaci kao položaj, širina i intenzitet spektralnih linija dovode do strukturnih podataka, npr. energijskih nivoa, energije jonizacije, energije disocijacije i sl. Atomska spektroskopija proučava efekte sudara, električnog i magnetnog polja i druge interakcije između atoma i njegove okoline, dok se pomoću molekulske spektroskopije može ispitivati struktura molekula. Istorijski gledano, spektroskopija je imala veliku ulogu u razvoju prvobitnih modela atoma. Otkriće Zemanovog i Štarkovog efekta, apsorpcija zračenja u eksperimentima sa natrijumovom parom i zakonitosti pojavljivanja atomskih spektara opisane Ridbergovom formulom potvrdile su važenja Borovog modela atoma i dovele do razvoja kvantne mehanike. U ovoj vežbi ćemo analizirati spektar vodonika i testirati valjanost Ridbergove formule, samim tim i valjanost Borovog modela atoma za slučaj vodonika. Osim toga posmatraćemo i vibracioni spektar molekula vodonika.

2 Spektar atoma vodonika i Ridbergova formula

Najranija istraživanja spektra atoma vodonika potiču iz 19-og veka. Uočeno je da se u vidljivom delu spektra (vidljivim pomoću spektroskopa, tj. golim okom) sastoji iz spektralnih linija crvene (656,3 nm), plavo-zelene (486,1 nm), i ljubičaste (434,1 nm i 410 nm) boje (slika 1). Osim u vidljivom delu spektra, uočeno je postojanje serija linija i u ultraljubičastom i infracrvenom delu spektra.



Slika 1. Spektar atoma vodonika

Švajcarski matematičar Johan Balmer analizirao je seriju linija koja se javlja u vidljivom delu spektra vodonika. Uočio je da se spektralne linije ne javljaju nasumično, već da postoji neka zakonitost. Naime, on je uočio da su talasne dužine svih linija umnošci broja 364,51. Na osnovu ovog zapažanja, on je 1885. godine metodom probe i pokušaja došao do empirijske formule koja predviđa talasne dužine svih linija u vidljivom delu spektra:

$$\lambda = C \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (1)$$

gde je $C = 364,51 \text{ nm}$, dok je $n = 3, 4, 5, \dots$ [1-4]. Nedostatak ove formule je bilo to što nije mogla da opiše serije linija u ultraljubičastom i infracrvenom delu spektra. Analizirajući spektre alkalnih metala, Ridberg je uočio da se i kod njih linije javljaju u obliku serija, kao i kod vodonika. Pokušavajući da nađe model koji bi opisao date linije, posmatrao je talasni broj umesto talasne dužine. Uočio je da postoji neka funkcionalna zavisnost između talasnog broja i rednog broja linije u seriji. Konačno 1888. godine, on je transformisao Balmerovu formulu u opštiji oblik koji se može primeniti za određivanje svih serija spektralnih linija vodonika (i alkalnih metala, uz korekciju), bez obzira u kome delu spektra se nalaze [1-3]:

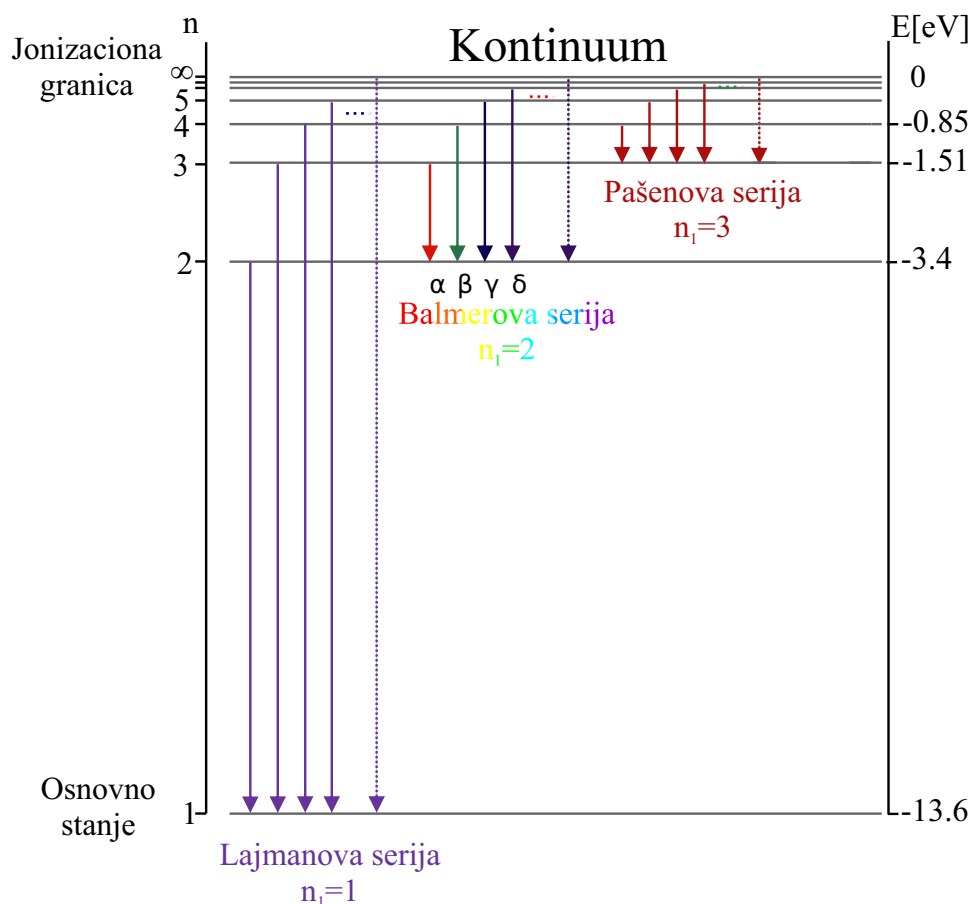
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (2)$$

gde je R - Ridbergova konstanta, a n_1 i n_2 su celi brojevi za koje važi da je $n_1 \geq 1$ i $n_2 > n_1$. Na osnovu ove formule, fiksirajući vrednost za n_1 i varirajući n_2 mogu se dobiti i druge serije linija u spektru vodonika. Na primer, za $n_1 = 1$ i $n_2 = 2, 3, 4, \dots$ dobija se Lajmanova serija, za $n_1 = 2$ i $n_2 = 3, 4, 5, \dots$ dobija se već pomenuta Balmerova serija, za $n_1 = 3$ i $n_2 = 4, 5, 6, \dots$ dobija se Pašenova serija, itd. (Slika 2). Dakle, pokazao je da je serija određena brojem n_1 , dok je linija u seriji određena brojem n_2 . Ipak, sve do Borovog modela atoma, nije bilo fizičkog objašnjenja ove formule.

3 Borova teorija atoma i fizičko objašnjenje Ridbergove formule

Klasična teorija atoma nije mogla da objasni stabilnost atoma, kao ni diskretnost i raspored spektralnih linija. Danski fizičar Nils Bor je 1913. godine, polazeći od Raderfordovog modela i uvodeći dodatne postulate, došao do planetarnog modela atoma. Bor je pretpostavio da se elektroni u atomu kreću po kružnim orbitama poluprečnika r oko jezgra, i pritom niti primaju niti gube energiju tj. nalaze se u određenim energijskim stanjima E_1, E_2, E_3, \dots . Promena energije može nastati samo prelaskom elektrona iz jednog u drugo stanje, pritom emitujući ili apsorbujući tačno određenu količinu energije

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu \quad (3)$$



Slika 2. Dijagram energijskih nivoa Lajmanove, Balmerove i Pašenove serije spektra atoma vodonika

gde je h Plankova konstana, dok je ν frekvencija.

Dalje je pretpostavio da je jačina ugaonog momenata elektrona kvantovana i da je jednaka celobrojnom umnošku Plankove konstante

$$|L| = mvr = n\hbar \quad (4)$$

gde je m masa, a v brzina elektrona. S druge strane, na osnovu klasične teorije kretanja, Kulonova sila je jednaka centripetalnoj sili

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (5)$$

gde Z predstavlja redni broj atoma, e elementarno naelektrisanje, dok je ϵ_0 dielektrična

konstanta vakuuma. Na osnovu (4) i (5) sledi da je brzina elektrona jednaka

$$v = \frac{n\hbar}{mr} \quad (6)$$

dok je poluprečnik orbite onda

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi Z m e^2}. \quad (7)$$

Energija elektrona u atomu je jednaka sumi kinetičke i potencijalne energije

$$E = T + V = \frac{mv^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}. \quad (8)$$

Zamenom (7) i (8) u (9) dobija se da je energija elektrona u atomu kvantovana

$$E_n = -\frac{Z^2 m e^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2} \quad (9)$$

gde n predstavlja glavni kvantni broj, koji može biti bilo koji celi broj $n = 1, 2, 3, \dots$. Može se uočiti da su energije elektrona negativne i približavaju se nuli kako $n \rightarrow \infty$. To znači da se elektron nalazi u vezanom stanju i može imati samo tačno određene diskretne vrednosti energije E_n . Promenom energijskog stanja elektrona, emitovaće se ili apsorbovati foton energije $h\nu$. U slučaju emisijonog spektra spektralne linije su posledice prelaza elektrona iz višeg (početnog) E_2 u niže (krajnje) stanje E_1 u atomu, pa će se emitovati foton tačno određene frekvencije ν , odnosno talasne dužine λ :

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{Z^2 m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (10)$$

gde je c brzina svetlosti u vakuumu. Talasni broj je onda jednak

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{Z^2 m e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (11)$$

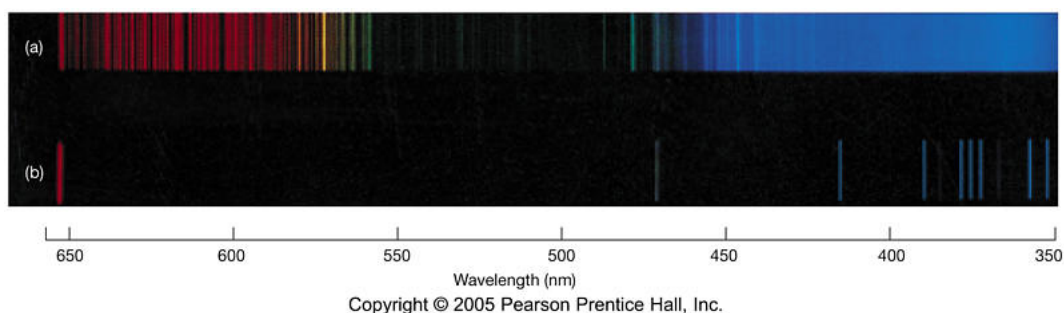
što je ništa drugo nego Ridbergova formula. Odatle sledi da je Ridbergova konstanta za vodonik jednaka

$$R = \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}. \quad (12)$$

Vrednost Ridbergove konstante izračunata na osnovu ove relacije je $R = 109737,31 \text{ cm}^{-1}$ [1, 2]. Upoređivanjem teorijski dobijene vrednosti sa eksperimentalnom vrednošću postiže se izuzetno slaganje, što je bilo jedna od prvih potvrda kvantne teorije u fizici. Danas je Ridbergova konstanta jedna od najtačnije određenih fizičkih konstanti [3, 4].

4 Spektar molekula vodonika

U spektru tinjavog pražnjenja u vodoniku se, osim linijskog spektra, može uočiti i postojanje trakastog spektra. Trakaste spektre emituju dvoatomski ili višeatomski molekuli usijanih gasova i para, čije temperature nisu dovoljno visoke da bi svi molekuli disocijirali u atome i jone. Dakle, postojanje trakastog spektra u tinjavom pražnjenju u vodoniku ukazuje da nije došlo do disocijacije svih molekula vodonika. Posmatranjem trakastog spektra vodonika može se videti da je on mnogo složeniji u odnosu na atomski spektar [5] (slika 5). U molekulima osim elektronskih prelaza dolazi i do oscilacije jezgara i rotacije molekula kao celine u odnosu na centar mase, tako da se mogu uočiti vibracione trake, a pomoću spektrometra sa velikom moći razlaganja, mogu se uočiti i rotacione linije.

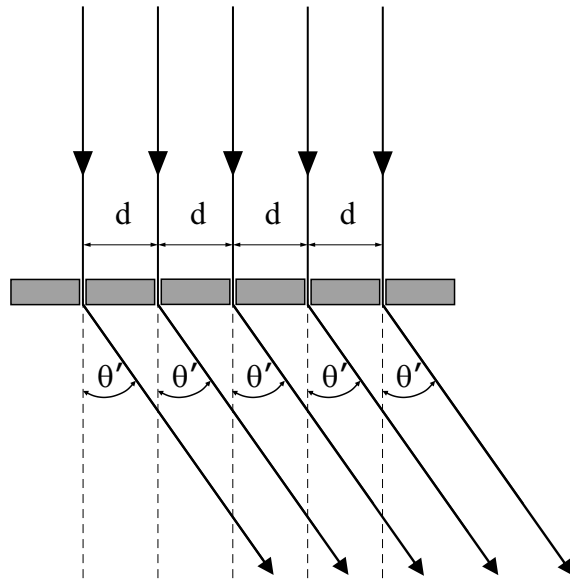


Slika 3. Spektar a) molekula vodonika upoređen sa b) spektrom atoma vodonika

5 Eksperimentalni detalji

Merenja spektra vrši se pomoću spektroskopa. Spektroskop predstavlja najjednostavniji instrument za vizuelnu registraciju spektra i na izlazu ima okular. Osnovne komponente spektroskopa su: ulazni prorez, kolimatorski sistem, disperzioni element, objektiv durbina i sistem za registraciju (okular durbina). Svetlost koja prođe kroz uzani prorez prostire se divergentno do sočiva kolimatora a nakon toga prelazi u paralelan snop koji pada na disperzioni element. Kao disperzioni element mogu se koristiti prizma ili rešetka. U našem slučaju koristićemo difrakcionu rešetku. Difrakciona rešetka se sastoji od velikog broja bliskih, paralelnih i ekvidistantnih zarezna na ravnoj ili konkavnoj površini stakla. Zarezi rešetke deluju kao koherentni izvori sekundarnih talasa koji interferuju konstruktivno ili destruktivno pri određenim uglovima dajući maksimume ili minimume intenziteta. Ako na transmisionu rešetku sa prostornim periodom d pada ravanski talas pod uglom θ u odnosu na normalu (kosi upad), uslov konstruktivne interferencije je:

$$d(\sin \theta + \sin \theta') = m\lambda, \quad (13)$$



Slika 4. Difrakcija talasa na transmisionoj rešetki

gde ceo broj m označava red interferencije, a θ' je difrakcioni ugao. Za slučaj kada je upadni ugao nula (normalni upad, Slika 4), skretanje svetlosnog zraka je:

$$\sin \theta' = \frac{m\lambda}{d}. \quad (14)$$

Nakon prolaska kroz rešetku, razložena svetlost pada na objektiv durbina. U okularu durbina nalazi se končanica (tanka vertikalna nit), a ceo durbin se može obrtati oko vertikalne ose koja prolazi kroz centar kružne skale. Ugao obrtanja durbina θ može se čitati na kružnoj skali. Kada se končanica durbina postavi preko spektralne linije, onda se na kružnoj skali očitava ugao θ pod kojim se obrazuje ova linija u odnosu na osu kolimatorske cevi, odnosno, to je ugao skretanja zraka ove talasne dužine pri prolasku kroz rešetku. Na ovaj način se položaj pojedinih linija određuje prema kružnoj skali, koja je obično podeljena u lučnim stepenima, a durbin je vezan sa lučnim nonijusom za preciznije očitavanje uglova. Prilikom merenja traži se lik prvog reda ($m = 1$) i to najpre sa leve strane od nultog lika i podesi da končanica padne tačno na centar lika. Na kružnoj skali treba očitati ugao θ'_{1l} , a zatim lagano pomerati cev durbina dok se končanica ne poklopi sa likom prvog reda sa desne strane i očita ugao θ'_{1d} . Tražena srednja vrednost ugla difrakcije je:

$$\theta'_m = \frac{\theta'_{ml} + \theta'_{md}}{2} \quad (15)$$

i na osnovu ovog ugla i izraza (14) određuje se talasna dužina.

Kao izvor svetlosti koristi se tinjavo pražnjenje u vodoniku. Cev ispunjena vodonikom je povezana na jednosmerni izvor napona od $1.5kV$. Pritiskom na prekidač, pušta se u rad. Kako se radi o kapilari sa uskim zidovima dolazi do njihovog zagrevanja. Zato cev ne sme da gori duže od 30 sekundi kako ne bi došlo do pucanja zidova. U ovoj vežbi snima se emisijski spektar vodonika, određuju se talasne dužine karakterističnih linija vodonika i na osnovu njih se pomoću relacije (2) izračunava Ridbergova konstanta. Izračunavanje se vrši na dva načina: analitički (na osnovu $H\alpha$ i $H\beta$ linija) i grafički crtajući grafik sa koga se linearizacijom $\frac{1}{\lambda}(\frac{1}{n_2^2})$ iz nagiba određuje Ridbergova konstanta.

6 Zadatak

1. Snimiti spektar atoma vodonika pomoću spektroskopa
2. Odrediti Ridbergovu konstantu na osnovu spektra i naći relativnu grešku merenja u odnosu na teorijsku vrednost.

Literatura

- [1] V. Marković Eksperimentalne metode u fizici (Prirodno-matematički fakultet u Nišu, Niš, 2003)
- [2] F. Biraben, Eur. Phys. J. Special Topics 172 (2009) 109–119
- [3] R. Eagan, Experimental Determination of Rydberg's Constant (2011)
- [4] P.J. Mohr, B.N. Taylor, and D.B. Newell (2011), "The 2010 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants" (Web Version 6.0)
- [5] E. Chaisson and S. McMillan Astronomy Today Volume 2: Stars and Galaxies, 9th Edition (Pearson, London, 2018)