

# OPTIKA



- Nastava: UTORAK od 10-12h (301),  
petak 13-14h (301) - svake druge nedelje!!
- Vežbe: sreda, od 14-16h (301)

- Usmeni ispit (do 30 poena)
- Predispitne obaveze:
- pismeni ispit (4 zadatka –  $\Sigma=20$  poena)
- dva kolokvijuma (2 pitanja (10 poena) i 2 zadatka (10 poena))  
 $\Sigma=40$  poena
- domaći zadaci (10 poena)

## SADRŽAJ:

### I KOLOKVIJUM

#### Elektromagnetni talasi

- Izvođenje jednačine za elektromagnetne talase.
- Ravan elektromagnetni talas.
- Polarizacija ravnog elektromagnetnog talasa.
- Energija i impuls elektromagnetnog talasa.
- Zračenje električnog dipola. Hercovi ogledi.
- Elektromagnetni spektar. Talasne dužine i boja svetlosti.
- Prostiranje svetlosti u dielektričnim sredinama. Indeks prelamanja.
- Fazna i grupna brzina svetlosti.
- Astronomske metode za određivanje brzine svetlosti.
- Fizičke metode za određivanje brzine svetlosti.

### **Geometrijska optika**

Zakoni geometrijske optike. Fermat-ov princip.  
Odbijanje svetlosti od ravnog ogledala.  
Odbijanje svetlosti od konkavnog i konveksnog sfernog ogledala.  
Prelamanje svetlosti kroz planparalelnu ploču.  
Prividna dubina tela u providnoj sredini.  
Prelamanje svetlosti kroz optičku prizmu.  
Disperzija svetlosti.  
Totalna refleksija. Optički fiberi.  
Prelamanje svetlosti kroz konkavnu i konveksnu sfernu površinu.  
Izvođenje jednačine optičkog sočiva. Tanka sočiva.  
Izvođenje Gausovih jednačina za debelo sočivo.  
Sistem tankih sočiva.  
Lupa. Optički mikroskop.

## **II KOLOKVIJUM**

### **Fotometrija**

Svetlosni fluks. Jačina svetlosti.  
Osvetljenost. Osvetljaj.  
Sjaj površine izvora. Svetlosna ekspozicija.

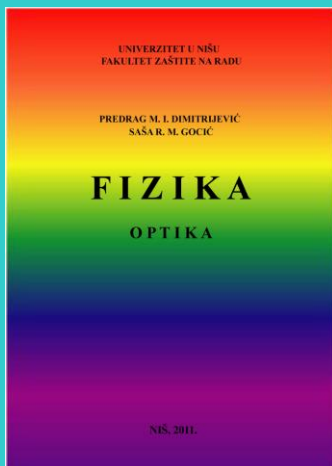
## Talasna optika

Interferencija svetlosti. Jangov eksperiment.  
Raspodela osvetljenosti zaklona kod Jangovog  
eksperimenta.  
Interferencija svetlosti na planparalelnom sloju.  
Interferencija svetlosti na klinastom sloju.  
Njutnovi prstenovi.  
Stojeći svetlosni talasi.  
Majkelsonov interferometar.  
Frenelova interpretacija difrakcije svetlosti.  
Fraunhoferova interpretacija difrakcije svetlosti.  
Difrakcija svetlosti na jednom otvoru.  
Difrakcija svetlosti na dva otvora.

Difrakcija svetlosti na optičkoj rešetki.  
Disperzija optičke rešetke. Disperziona moć.  
Polarizovana svetlost.  
Polarizacija svetlosti pri prolasku kroz kristale.  
Dihroizam.  
Polarizacija svetlosti pri odbijanju i prelamanju.  
Polarizacija svetlosti dvojnim prelamanjem.  
Polarizaciona prizma.  
Optički aktivne supstance.  
Veštačka anizotropija.

## Literatura:

## 1. Udžbenik: Fizika-Optika P. Dimitrijević, S. Gocić

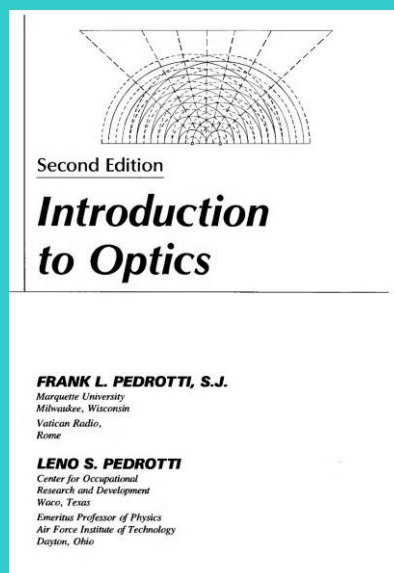
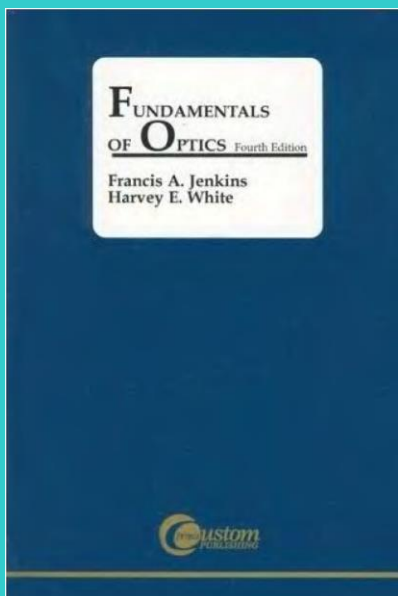


## 2. Zbirke:

I. E. Irodov, Zadaci iz opšte fizike

G. Dimić, M. Mitrinović, Zbirka zadataka Iz fizike, Viši kurs D

## 3. Dodatna literatura:



## ISTORIJSKI PREGLED

- Optika predstavlja deo fizike koji proučava **prirodu svetlosti, zakonitosti svetlosnih pojava i procesa**, kao i interakciju optičkog zračenja sa materijalnom sredinom.

- Prvo sistemsko pisanje o optici potiče od grčkih filozofa *Epedoklesa* [490-430 p.n.e.], *Platona* [428-348, p.n.e.], *Euklida* [300 p.n.e.].

Jedan od osnivača novog pristupa u optici je *Rene Dekart* [1596-1650]. On je smatrao da je svetlost u osnovi **pritisak koji se prenosi kroz idealnu elastičnu sredinu (ETAR) koji ispunjava ceo prostor** i pridružio je raznolikost boja kružnom kretanju čestica različitim brzinama.



**Zakon odbijanja** svetlosti bio je poznat još starim Grcima, a **zakon prelamanja** svetlosti je eksperimentalno otkrio *Snelijus* (1580-1626).



Njega je na granici vazduh-voda matematički objasnio Dekart na osnovu pretpostavke da je **svetlost struja brzih čestica** koja se u **vodi kreću većom brzinom nego u vazduhu**. Dekart je uveo ideju **korpuskularne (čestične) prirode svetlosti**.

*Galileo Galilej* (1564-1642) je prvi demonstrirao snagu eksperimentalnih metoda u optici. On je 7. januara 1610. godine usmerio **teleskop prema Jupiteru** i otkrio da oko njega kruže četiri meseca (Europa, Io, Ganymedi i Callisto).

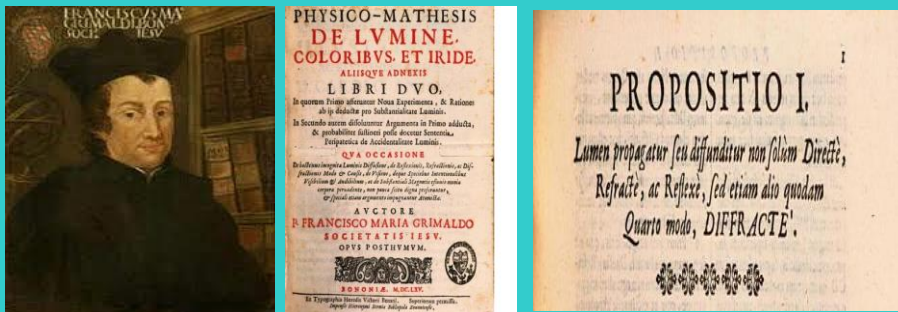


Galileo je pokušao da eksperimentalno odredi brzinu prostiranja svetlosti paljenjem i gašenjem dva fenjera na velikom rastojanju (između dva brda). Zaključio da se svetlost prostire veoma velikom brzinom, tj. skoro trenutno na posmatranom rastojanju.

Prvo ozbiljnije **merenje brzine svetlosti** izvršio je *Olaf Remer* 1676. godine. On je ponovio Galilejev eksperiment, ali je sa zemaljskih prešao na rastojanja između nebeskih tela. **Posmatra je kretanje Jupiterovih meseca** koje je otkrio Galilej i dobio brzinu od 215.000 km/h.

*Pier de Fermat* je 1657. godine objavio proslavljen ***Princip najkraćeg vremena*** u obliku "Priroda ide uvek najkraćim putem" (Nature always acts by the shortest course). Na osnovu tog principa on zaključuje da svetlost *uvek prolazi putem koji je dovodi do cilja u najkraćem vremenu*. Iz tog principa sledi zakon prelamanja svetlosti, ako se u obzir uzmu različiti "otpori" prostiranju svetlosti u različitim sredinama.

*Francisko Grimaldi je pojavu difrakcije opisao u delu „Fizika i matematika svetlosti, boja i duge“.*



Prvo saopštenje sa opisom rezultata ogleda i njihovo tumačenje je publikovano 1665. god., dve godine posle njegove smrti. U prvoj propoziciji on kaže „Svetlost produžuje da difunduje ne samo direktno, odbijanjem i prelamanjem, već i, na dostojan divljenju četvrti način, difrakcijom“.

*Grimaldi je prvi zapazio pojavu boja pri difrakciji svetlosti, prilikom uvođenja sunčevih zraka kroz mali otvor u zamračenu sobu. Radeći oglede sa dva otvora, podešena tako da se osvetljeni delovi delimično poklapaju, Grimaldi pokazuje da „svetlost dodata svetlosti“ može dati tamu.*



Fenomen interferencije svetlosti, različite boje tankih listića/filmova, koji su poznati danas kao **Njutnovi prstenovi**, nezavisno su otkrili *Robert Bojl* (1627-1691) i *Robert Huk* (1635-1691) u drugoj polovini XVII veka.

Huk je takođe primetio i prisustvo svetlosti u geometrijskoj senci (difrakcija svetlosti) što je ranije primetio i Grimaldi.

Huk je prvi zastupao stanovište da se svetlost sastoji od **brzih vibracija koje se prostiru trenutno**, ili sa velikom brzinom preko bilo kog rastojanja.

Takođe, verovao je da u homogenoj sredini svaka **vibracija stvara sferu koja se širi koncentrično**. Na osnovu te ideje pokušao je da objasni fenomen prelamanja i različite boje svetlosti.

Progres u opažanju različitih boja svetlosti je učinio *Njutn* (1643-1727) kada je 1666. godine otkrio da se **bela svetlost** sastoji od **osnovne (dugine) boje** prilikom prelamanja na staklo.



Newtonova teorija imala u objašnjavanju pravolinijskog prelamanja svetlosti i **fenomen polarizacije** (koji je otkrio Hajgens, 1690. godine) su uticale na Njutna da se prikloni korpuskularnoj teoriji svetlosti, na osnovu koje se svetlost prostire od izvora u formi **sitnih (svetlosnih) čestica**.



Sa druge strane, talasna teorija svetlosti je značajno unapređena i proširena od strane *Kristijana Hajgensa* (1629-1695). On je objavio **princip** na osnovu koga je svaka tačka etra pogođena upadnom svetlošću (poremećajem) može posmatrati kao centar novog poremećaja koji se prostire u **formi sfernog talasa**.

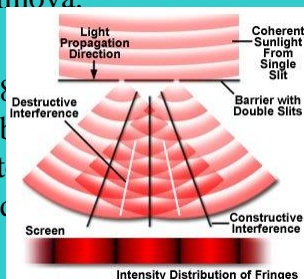
Sekundarni sferni talasi se kombinuju na takav način da njihova obvojnica (envelopa) određuje talasni front u bilo kom narednom trenutku. Na osnovu tog principa, on je objasnio zakone odbijanja i prelamanja svetlosti.

Hajgens je objasnio i efekat **dvojnog prelamanja** svetlosti na **kristalu islandskog kalcita** (efekat koji je otkrio Bartolomej, 1669.) Pretpostavio je da se u kristalu pored primarnog sfernog talasa, prostire i sekundarni, elipsoidni talas.

U okviru tog istraživanja, Hajgens je učinio fundamentalno otkriće **polarizacije svetlosti**. Svaki od dva zraka nastala prelamanjem na kristalu kalcita **može biti potpuno blokiran** ako se na put njegovog prostiranja postavi drugi kristal od istog materijala koji se rotira oko pravca prostiranja zraka.

Ovo otkriće je iniciralo **zaključak da svetlost čine transferzalni talasi!** Za Njutna i ostale pobornike čestične teorije, taj zaključak je bio neprihvatljiv, pošto su bili familijarni sa longitudinalnim talasima u vazduhu (kod prostiranja zvuka). Sve to je dovelo do **odbacivanja talasne teorije** u narednih 100 godina.

Prvo u nizu otkrića koje je dovelo do opšteg prihvatanja talasne teorije svetlosti desilo se 1801. godine, kada je Yung (1773-1829) objavio princip **interferencije** svetlosti (**eksperiment na dva proreza**) i objasnio boje tankih filmova.



1801. godine Augustin

Pariske akademije

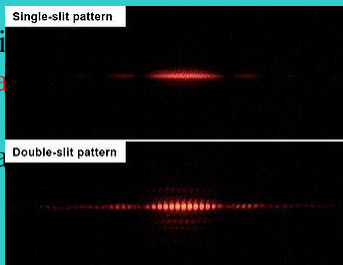
objavio svoj eksperiment

na interferenciju svetlosti i to na

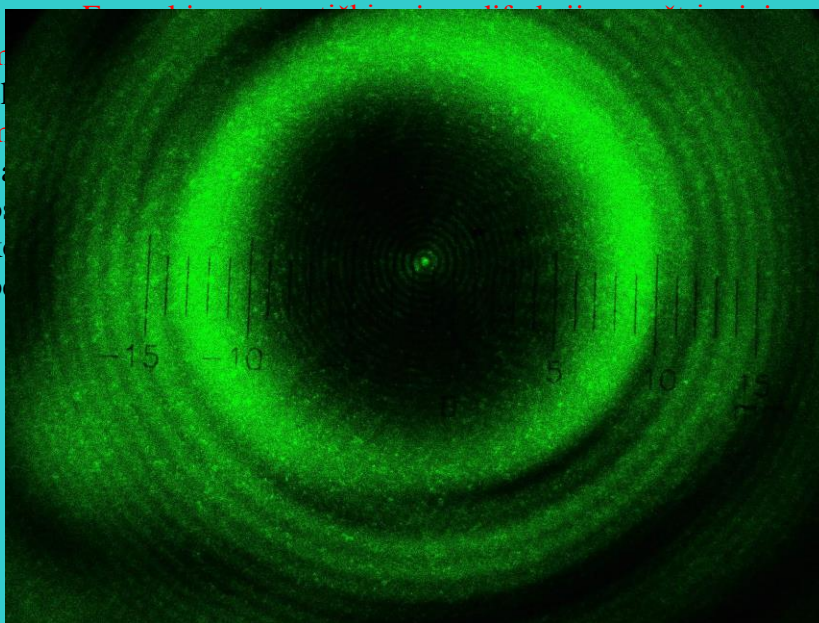
odnosno nekoliko godina nakon

objave Huygensove teorije.

U ovom radu



Hajgensovog principa konstrukcije envelope sekundarnih talasa i Yungovog principa interferencije. To tumačenje je bilo dovoljno da se objasni ne samo pravolinijsko prostiranje svetlosti već i pojava malih odstupanja od njega - difrakcionih fenomena.



Žan Fuko i Fizo su 1850. godine sproveli **krucijalni eksperiment merenja brzine svetlosti u vazduhu i vodi**, koji je prvi predložio Arago. Po tumačenju korpuskularne teorije, prelamanje svetlosti se na granici dve različite sredine dešava zbog privlačenja svetlosnih čestica ka **optički gušćoj** sredini što dovodi do **veće brzine prostiranja svetlosti u njoj**.

Sa druge strane talasna teorija, u skladu sa Hajgensovom konstrukcijom, zahteva **manju brzinu prostiranja svetlosti u gušćoj sredini**. Direktna merenja brzine svetlosti u vazduhu i vodi su nedvosmisleno potvrdili stav talasne teorije i doneli joj prednost.

Paralelno sa istraživanjima u optici razvijala su se i istraživanja na polju elektrostatike i magnetizma. *James Clar Maxwell* (1831-1879) je uspeo da sumira sva prethodna istraživanja u sistem jednačina (**Maksvelove jednačine**) koje imaju važnu posledicu - **postojanja elektromagnetnih talasa**. Ti elektromagnetni talasi se prostiru brzinom  $c = (\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$

Na osnovu dve električne veličine koje su izmerene nezavisno eksperimentalno ( $\mu_0, \epsilon_0$ ) Weber (1804-1891), dobijena je **teorijska vrednost brzine koja je jednaka brzini prostiranja svetlosti u vazduh** (koja se u to vreme uspešno merila.)

Poklapanje tih dveju brzina je navelo Maksvela na pretpostavku da su **svetlosni talasi - elektromagnetni talasi**. Ta pretpostavka je kasnije bila potvrđena u eksperimentima koje je izvodio Heinrich Hertz (1857-1894).

Iako je opisala sve pojave vezane za prostiranje svetlosti, Maksvelova teorija nije bila u mogućnosti da objasni procese *emisije i apsorpcije svetlosti*, u kojima se manifestuju finije osobine interakcije između materije i optičkog polja. Zakoni koji opisuju te pojave predstavljaju osnovu moderne optike i fizike.

Priča počinje otkrićem odgovarajućih pravilnosti u spektrima svetlosti koje emituju pojedini izvori. **Prvi korak je bilo Fraunhoferovo otkriće tamnih linija u spektru Sunčeve svetlosti i njihova interpretacija kao apsorpcionih linija, u eksperimentima Bunzena i Kirhofa.**

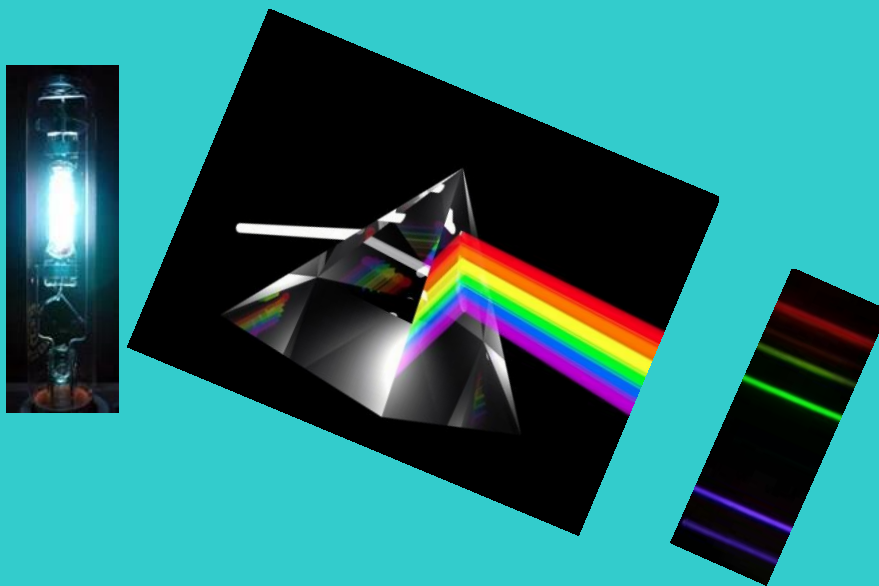
**Kirhof prvi pokazao da dati hemijski element može apsorbovati ili emitovati svetlost samo određene frekvencije i da se te frekvencije poklapaju!!!**

Nemački fizičar *Jozef Fraunhofer* (1787-1826) je dobro poznao princip funkcionisanja **difrakcione rešetke**, koje je sam pravio kako bi njima vršio merenja. Zanimljivo je napomenuti da je u spektru Sunca uspeo da uz pomoć rešetke otkrije oko **700 tamnih apsorpcionih linija** (danas nose njegovo ime). Fraunhofer je prvi izmerio talasne dužine ovih spektralnih linija. Najvažnije je to što je Fraunhofer otkrićem **spektralnih linija u Sunčevom zračenju** veoma uspešno povezo **nauku o svetlosti sa naukom o građi supstancije**.

Svetlost kontinualnog spektra koju emituje površina Sunca, prolazi kroz hladnije gasove u njegovoj atmosferi i **gubi apsorpcijom upravo one talasne dužine koje emituju ti gasovi.**

Ovo otkriće predstavlja osnovu spektralne analize, koja je zasnovana na činjenici da svaki gasoviti hemijski element poseduje karakterističan spektar.

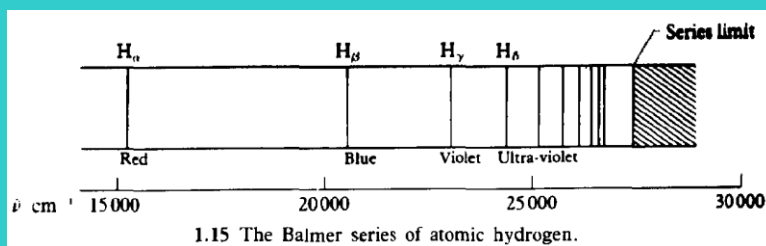
## Linijski spektri u emitovanoj i apsorbovanoj svetlosti



Najvažnije otkriće u traženju zakonitosti emisije linijskih spektara načinio je J. Balmer 1885. godine, koji je uočio da se između frekvencije emitovanih linija u vidljivom spektru vodonika može uspostaviti veza:

$$\nu_{ab} = R \left( \frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right); n_a = 1, 2 \dots$$

$$n_b = 2, 3 \dots$$



$H_\alpha=656.3 \text{ nm}$ ,  $H_\beta=486.1 \text{ nm}$ ,  $H_\gamma=434.0 \text{ nm}$ ,  $H_\delta=410.2 \text{ nm}$ , granica  $364.6 \text{ nm}$   
 $n_a=2$ ,  $n_b=3, 4, 5, 6 \dots$  granica za  $n_b$  teži beskonačnosti.

Problemi emisije i apsorpcije svetlosti u atomima nisu samo optičke prirode već uključuju i mehanizme u samim atomima. Zbog toga je spektroskopska analiza preasla u posebnu disciplinu koja predstavlja empirijsku osnovu **za atomsku i molekularnu fiziku**.

Uvođenjem **kvantne teorije** 1900. godine (*Max Planck*) i njene primene na strukturu atoma, dovodi 1913. godine do objašnjenja linijskog spektra gasova (*Nils Bor*, Borov model atoma vodonika).

Plank je prvi izneo predlog koji je suprostavljen klasičnim idejama. Naime, **oscilatorni električni sistem** ne prenosi svoju energiju elektromagnetnom polju u kontinualnom iznosu, nego u konačnom, određenom iznosu ili **kvantu**, proporcionalnom frekvenciji zračenja.

### Borov model atoma vodonika

Uvođenjem **kvantne teorije** 1900. godine (*Max Planck*) i njene primene na strukturu atoma, dovodi 1913. godine do objašnjenja linijskog spektra gasova (*Nils Bor*, Borov model atoma vodonika).

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

$$L = mvr = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$v = \frac{Ze^2}{(4\pi\epsilon_0)\hbar n}$$

$$E_n = T + V = -\frac{m}{2\hbar^2} \left( \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{n^2}$$

$$r = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2 n^2}{Ze^2 m}$$

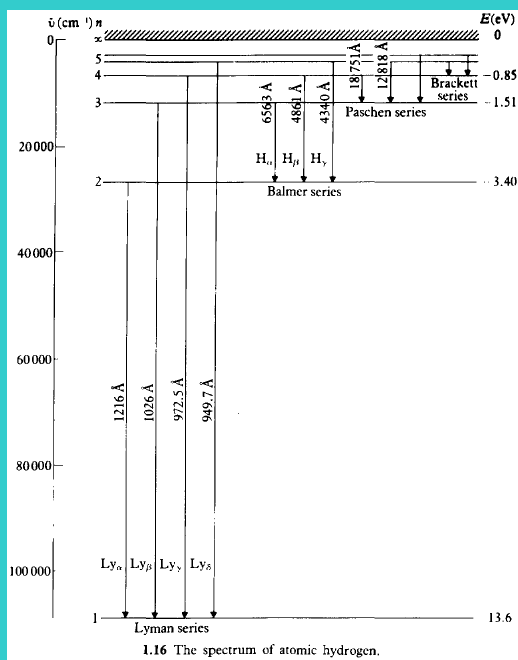
$$\nu_{ab} = \frac{m}{4\pi\hbar^3} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right), \quad n_b > n_a$$

## Borov model atoma vodonika

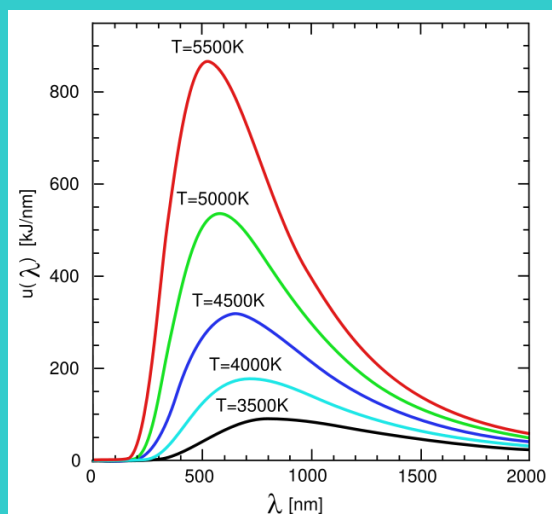
$$E_n = -I_P/n^2, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

$$I_P = \frac{1}{2} \frac{m}{\hbar^2} \left( \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 = 13.6 Z^2 \text{ eV}$$

$$h\nu = E_b - E_a$$



## Zračenje apsolutno crnog tela - eksperimenti



Štefan-Bolcmanov zakon:

$$E = \frac{W}{St}$$

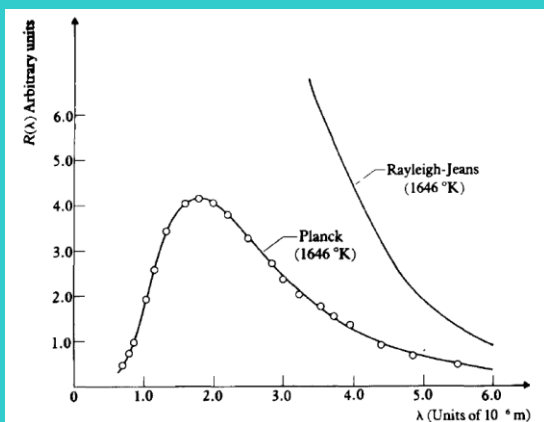
$$E_0 = \sigma_0 T^4$$

Vinov zakon:

$$T\lambda_m = b$$

Snaga koju aps. crno telo zrači po jedinici površine u intervalu talasne dužine  $\lambda$ ,  $\lambda + d\lambda$

## Zračenje apsolutno crnog tela, klasična elektrodinamika vs. Plankova „kvantna“ teorija



Rejli-Džinsonov zakon:

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4} (kT)$$

Ultravioletna katastrofa:

$$\rho_{\text{tot}} = \int_0^{\infty} \rho(\lambda) d\lambda$$

Plankov zakon zračenja:

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$E = h \cdot \nu$$

## Fotoelektrični efekat

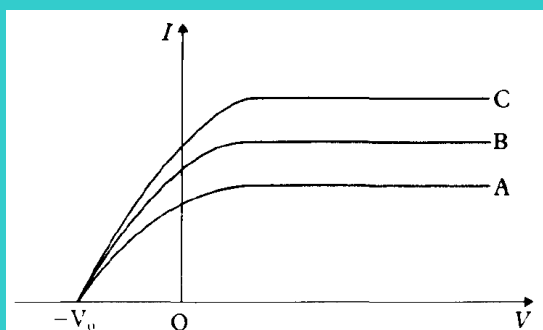
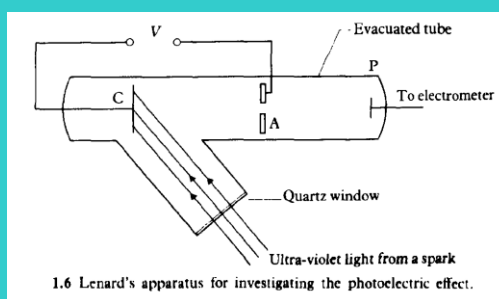


Foto-struja u funkciji različitog intenziteta svetlosti  $I_a < I_b < I_c$ , iste talasne dužine.

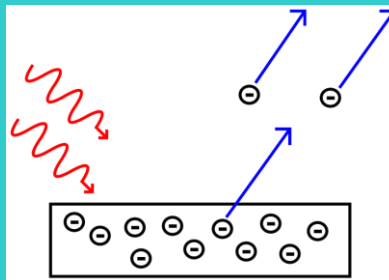
$V_0$ - zakočni potencijal

$$eV_0 = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2$$



## Šta je utvrđeno eksperimentom?

1. Postoji minimalna frekvencija svetlosti ispod koje nema emisije elektrona, bez obzira na intenzitet svetlosti.
2. Emitovani elektroni imaju brzinu od 0 do  $v_{\max}$  a maksimalna kinetička energija linearno zavisi od frkvencije svetlosti, a ne zavisi od intenziteta.
3. Za upadnu svetlost date frekvencije, broj emitovanih elektrona u jedinici vremena zavisi od intenziteta svetlosti .
4. Elektronska emisija nastaje trenutno posle ozračivanja, bez kašnjenja koje predviđa klasična elektrodinamika.



$$h\nu = A_i + E_k$$

Ajnštajn, 1905.

Na osnovu Plankove teorije, Ajnštajn je 1905. godine oživeo korpuskularnu teoriju svetlosti u novom obliku, pretpostavljajući da Plankovi **kvanti energije** postoje kao **realne svetlosne čestice fotoni**. Uspeo je time da objasni neke fenomene koji su otkriveni u to vreme a koje nije bilo moguće objasniti talasnom teorijom. Glavni među njima je **fotolektrični efekat** (Nobelova nagrada 1921. "*for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect*").).

Sve veći broj eksperimenata od tada je pokazivao da svetlost treba posmatrati **i kao talas i kao česticu**, što dovodi do čuvenog **dualizma talas-čestica**. U to vreme je i De Brojli je 1924. godine proširio dualaističko shvatanje i na elektrone i protone, postavivši smelu hipotezu da i čestice koje se kreću velikom brzinom imaju talasna svojstva. **Otkriće difrakcije elektrona na kristalima je bila potvrda njihove dualne prirode, čestica-talasa.**