



Temelji suvremene kvantne fizike

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the slide, creating a modern, layered effect. A thin, light gray line also extends from the bottom right towards the center of the slide.

Uvod u suvremenu fiziku

Klasična fizika

Newtonova
mehanika

Toplinske pojave,
termodinamika

Elektricitet i
magnetizam, optika

Klasična fizika - svaka pojava je kontinuirana, neprekinuta promjena.

Krajem 19. stoljeća opaža se niz pojava koje klasična fizika ne može objasniti:

- ▶ Zračenje crnog tijela
- ▶ Fotoelektrični efekt
- ▶ Pomak u valnim duljinama spektra X-zraka (Comptonovo raspršenje)...

1900. g. Planck - objašnjava spektar toplinskog zračenja pretpostavkom da se energija mijenja u skokovima, ne kontinuirano - kvantna hipoteza → početak suvremene, kvantne fizike!

Toplinsko zračenje

Toplinsko zračenje nastaje kad atomi ili molekule tijela, pobuđeni termičkim gibanjem emitiraju elektromagnetske valove.

Tijelo na bilo kojoj temperaturi zrači kontinuirani spektar elektromagnetskog zračenja (toplinsko zračenje). Karakteristike zračenja ovise o temperaturi tijela i o svojstvima površine tijela:

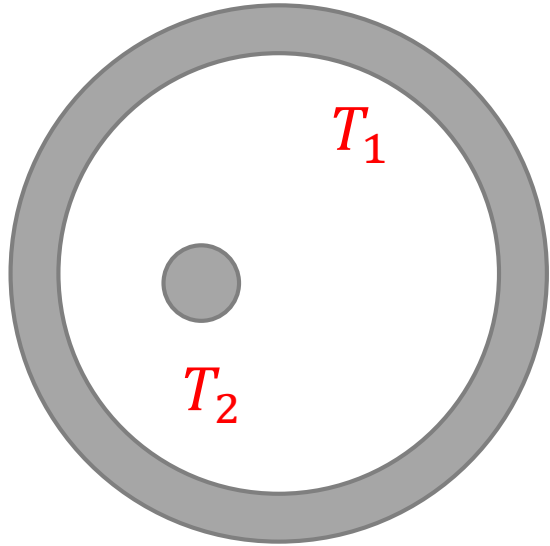
- ▶ Na sobnoj temperaturi valne duljine toplinskog zračenja su u infracrvenom području.
- ▶ Kako temperatura raste valne duljine iz infracrvenog područja pomiču se prema vidljivom ($T \geq 800 \text{ K}$) pa ultraljubičastom dijelu spektra.



Kontinuirani spektar - puno valnih duljina, nejednak intenzitet zračenja za različite valne duljine λ ; spektar ovisi o temperaturi T .

Termička ravnoteža

Zamislamo šuplju posudu u kojoj je vakuum i neko tijelo temperature T_2 :



Posuda je izvana toplinski izolirana, a unutarnja stijenka je na temperaturi $T_1 < T_2$.

Tijelo ne dodiruje stijenke posude → Toplina prelazi zračenjem, temperature se izjednačuju, nastupa **termička ravnoteža**.

Krajem 19. stoljeća brojna mjerenja, empirijski su dobiveni zakoni zračenja:

- Kirchhoffov zakon
- Stefan-Boltzmannov zakon
- Wienov zakon

Međudjelovanje zračenja i tvari

Energija u jedinici vremena, tok (ϕ_{uk}), koja dolazi na tijelo može se: reflektirati, apsorbirati ili transmitirati:

$$\phi_{uk} = \phi_r + \phi_a + \phi_t$$

gdje su ϕ_r , ϕ_a i ϕ_t reflektirani, apsorbirani i transmitirani energijski tokovi.

Možemo definirati tri koeficijenta:

1. koeficijent refleksije: $\rho(\lambda, T) = \frac{\phi_r}{\phi_{uk}}$

2. koeficijent transmisije: $\tau(\lambda, T) = \frac{\phi_t}{\phi_{uk}}$

3. koeficijent apsorpcije : $\alpha(\lambda, T) = \frac{\phi_a}{\phi_{uk}}$

Svi koeficijenti se mijenjaju ovisno o valnoj duljini i temperaturi:

$$0 < \rho, \tau, \alpha < 1$$



$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

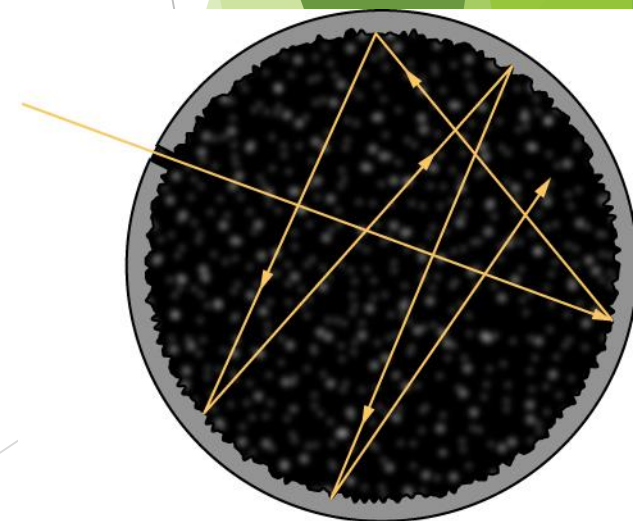
$$[\phi] = W$$

$$I = \frac{\phi}{S}$$

$$[I] = Wm^{-2}$$

Crno tijelo

- Uvijek vrijedi: $\rho + \tau + \alpha = 1$
- Idealni slučajevi:
 1. idealno sjajno (bijelo) tijelo $\rho = 1$
 2. idealno prozirno tijelo $\tau = 1$
 3. idealno crno tijelo $\alpha = 1$
- **Crno tijelo** je tijelo čija površina potpuno apsorbira EM zračenje svih valnih duljina (ništa ne reflektira pa izgleda crno, primjer čađa). Kontinuirani spektar, koji se emitira, naziva se **zračenje crnog tijela**. Dobra aproksimacija je šupljina s malim otvorom.





Kirchhoffov zakon

- ▶ Tijelo koje je u toplinskoj ravnoteži s okolinom, istodobno s apsorpcijom energiju mora i emitirati:

$$I = \frac{\phi_e}{s}, \quad \varepsilon = \frac{\phi_e}{\phi_{uk}}$$

emitirani tok zračenja

Koeficijent emisije

- ▶ U toplinskoj ravnoteži je faktor emisije jednak faktoru apsorpcije $\varepsilon = \alpha$ (Kirchhoffov zakon)
- ▶ Za idealno crno tijelo vrijedi: $\varepsilon = \alpha = 1$
- ▶ Realna tijela, „siva”: $\varepsilon < 1$

Kontinuirani spektar

Intenzitet emitiranog zračenja:

$$I = \frac{\phi_e}{S}$$

Intenzitetom su obuhvaćene sve valne duljine pa se za kontinuirani spektar može pisati i:

$$I = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \left(\frac{dI}{d\lambda} \right) d\lambda$$

Spektralna gustoća zračenja:

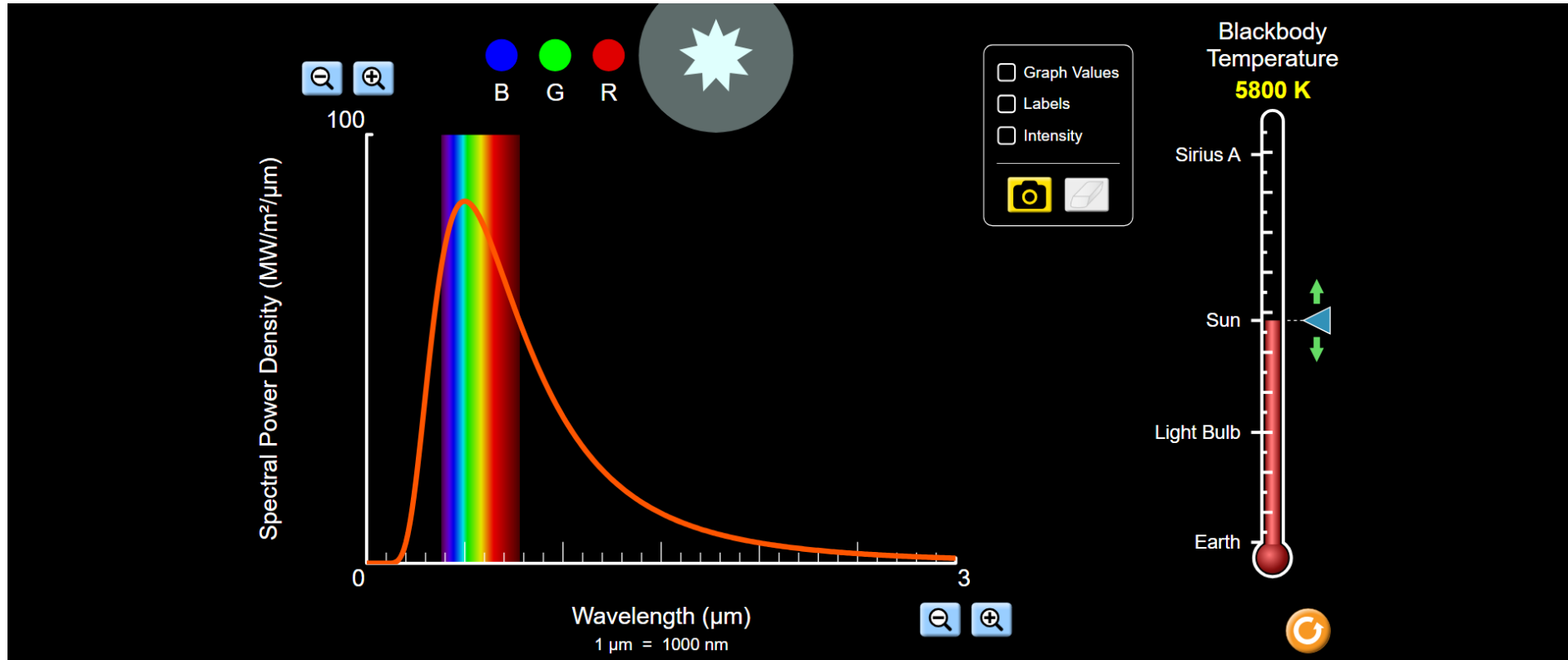
$$f(\lambda, T) = \left(\frac{dI}{d\lambda} \right)$$

Gustoća energije za interval valnih duljina od λ do $d\lambda$:

$$w(\lambda, T) = \frac{dW}{dV d\lambda}$$

$$f(\lambda, T) = \frac{c}{4} w(\lambda, T)$$

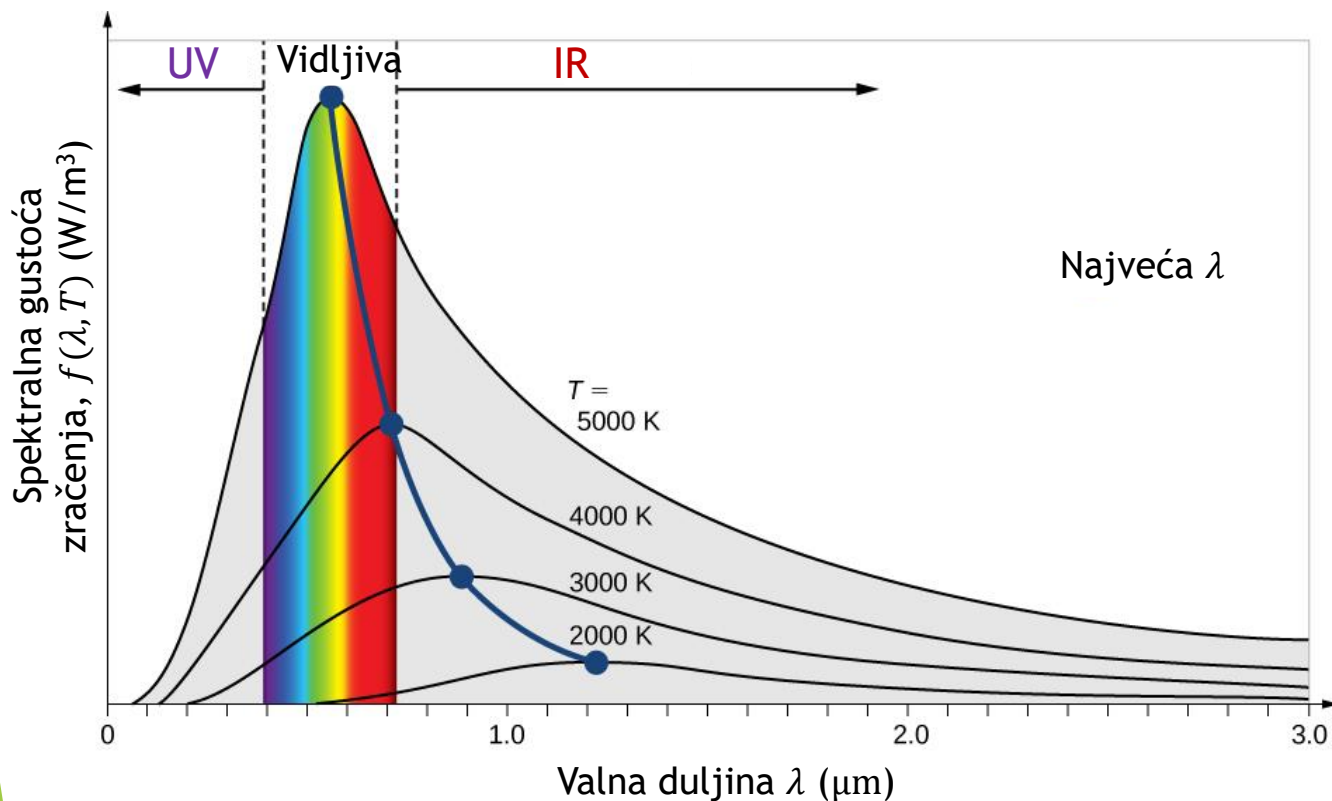
Simulacija: Zračenje crnog tijela



Blackbody Spectrum

Spektar zračenja crnog tijela

Spektar zračenja crnog tijela za nekoliko različitih temperatura:



► Distribucija intenziteta po valnim duljinama $\frac{dI}{d\lambda} = f(\lambda, T)$ se može mjeriti.

► $f(\lambda, T)$ – intenzitet u rasponu valnih duljina između λ i $\lambda + d\lambda$. Ukupni intenzitet po svim valnim duljinama je:

$$I = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda$$

► Spektar zračenja bitno ovisi o temperaturi tijela: što je temperatura veća, to je i ukupna izračena energija tj. Intenzitet veći (površine ispod krivulja na slici).

► Svaki spektar ima maksimum na određenoj valnoj duljini λ_m .

Spektar zračenja crnog tijela

Eksperimentalno utvrđene karakteristike toplinskog zračenja:

- **Wienov zakon pomaka** - valna duljina na kojoj je $f(\lambda, T)$ maksimalna obrnuto je proporcionalna temperaturi:

$$\lambda_m T = b = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$$

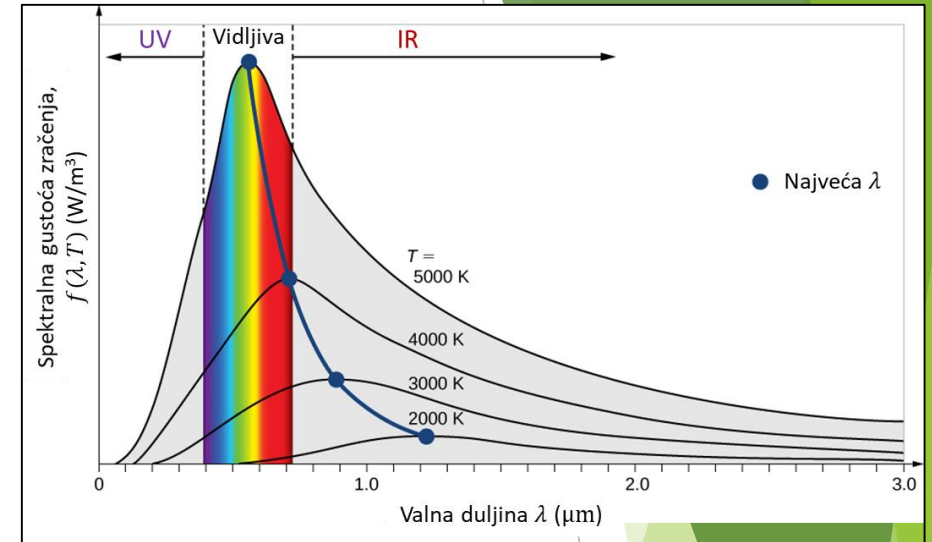
Zvijezde zrače kao crna tijela i njihova boja ovisi o temperaturi → može se izračunati temperatura zvijezde iz vrijednosti valne duljine za koju je intenzitet zračenja maksimalan.

- ▶ **Stefan-Boltzmannov zakon** - Jožef Stefan eksperimentalno, a Ludwig Boltzmann teorijski, došli su do spoznaje da je energija koju zrači četvorni metar površine crnog tijela u jednoj sekundi razmjernan četvrtoj potenciji apsolutne temperature tijela:

$$I = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Stefan-Boltzmannova konstanta



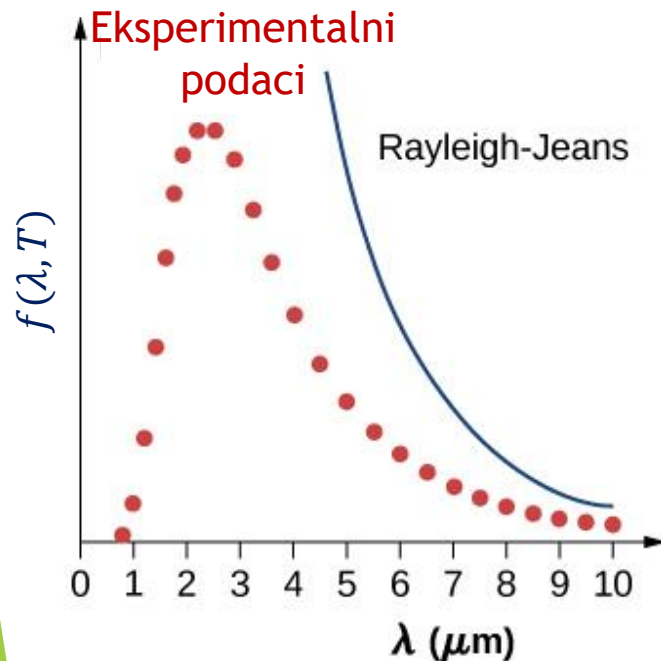
Ultraljubičasta katastrofa

- ▶ **Mogu li zakoni klasične fizike (mehanike i elektrodinamike) objasniti toplinsko zračenje?**
- ▶ **Osnovna pretpostavka: EM valove emitiraju harmonički oscilatori (npr. elektroni u atomima) koji mogu imati bilo koju vrijednost energije.**

Rayleigh i Jeans proučavali su (stojni) EM val u izotermnoj šupljini i njegove normalne modove titranja. Uključujući energije električnog i magnetskog polja, pretpostavili su da prosječna energija po pojedinom modu titranja iznosi kT . Računajući broj normalnih modova koji odgovara intervalu valnih duljina $d\lambda$ izračunali su očekivanu distribuciju valnih duljina EM zračenja šupljine i distribuciju intenziteta $f(\lambda, T)$ EM zračenja šupljine:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

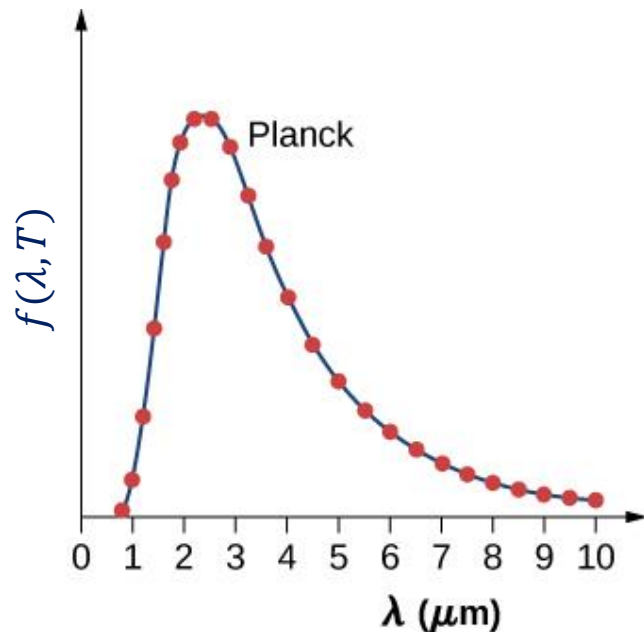
Ultraljubičasta katastrofa



- ▶ Na velikim valnim duljinama formula se slaže sa eksperimentom, no za male valne duljine dramatično odstupa.
- ▶ $f(\lambda, T)$ za male valne duljine divergira i ukupni intenzitet je beskonačan → ultraljubičasta katastrofa.
- ▶ Iako je ova teorija imala očigledno silne probleme, poslužila je Plancku kao polazište za svoju ispravnu teoriju.

Planckov zakon zračenja crnog tijela

- ▶ Ultraljubičasta katastrofa nije posljedica krivog računa, već je posljedica nemogućnosti opisa zračenja crnog tijela u okviru klasične fizike.
- ▶ Planck je pretpostavio da EM oscilatori (atomi) u Rayleighovoj šupljini koji vibriraju frekvencijom ν mogu imati samo određene vrijednosti energija (kvante) koje su višekratnik od $h\nu$ ($nh\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$):



$$W = E = h\nu$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Planckova konstanta

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)}$$

Planckova formula za spektralnu gustoću zračenja

Kvantizacija energijskih nivoa pokazala se kao ključan korak u rođenju kvantne fizike.

Planckov zakon zračenja crnog tijela

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{ili} \quad f(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Rayleigh-Jeans

$$h\nu \ll kT: e^{\frac{h\nu}{kT}} \rightarrow 1 + \frac{h\nu}{kT}$$

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$

Stefan-Boltzmann

$$I = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4$$

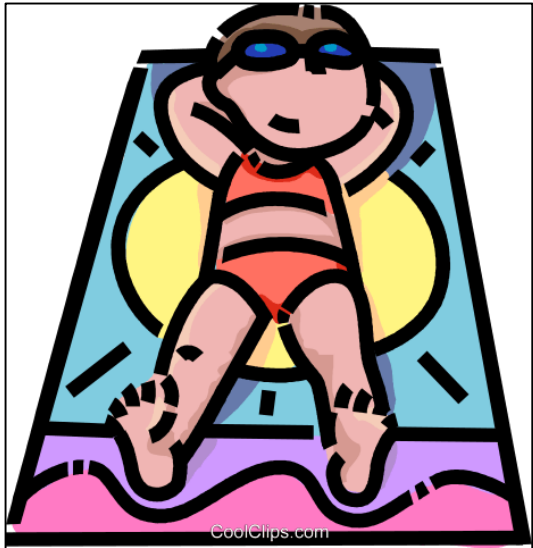
Wien

$$\frac{df(\lambda, T)}{d\lambda} = 0$$

$$\lambda_m T = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}$$



Termogram



Malo povijesti...

17. Stoljeće

Isaac Newton



- ▶ Svjetlost je čestične prirode
 - ▶ Bijela svjetlost se prolaskom kroz prizmu razlaže na spektar boja, prolaskom kroz drugu prizmu opet se spoji u bijelu boju - mora se sastojati od čestica koje sadrže boju!

Robert Hooke



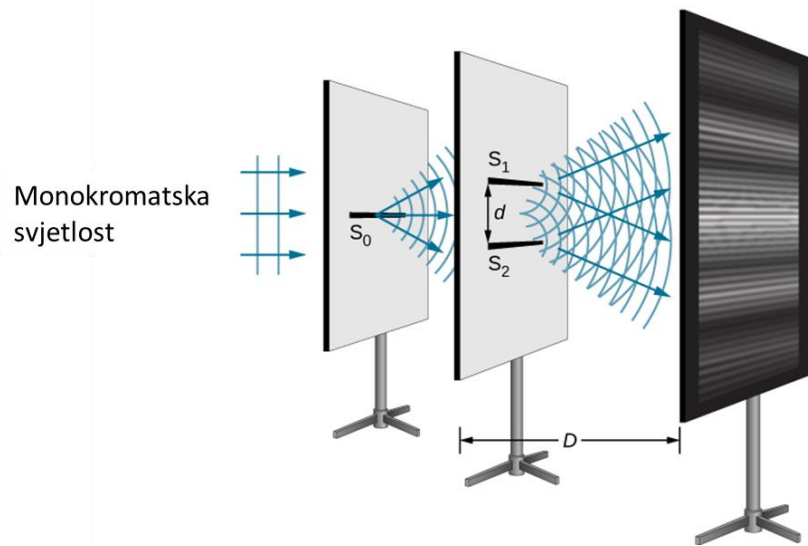
Christiaan Huygens



- ▶ Svjetlost je val
 - ▶ Bijela svjetlost prolaskom kroz prizmu ili leću se „pokvari” i postane obojana.

Eksperimentalna potvrda valne prirode svjetlosti

- ▶ 1801. Thomas Young - *eksperiment s dvostrukom pukotinom*



- ▶ 1816. objašnjena difrakcija svjetlosti

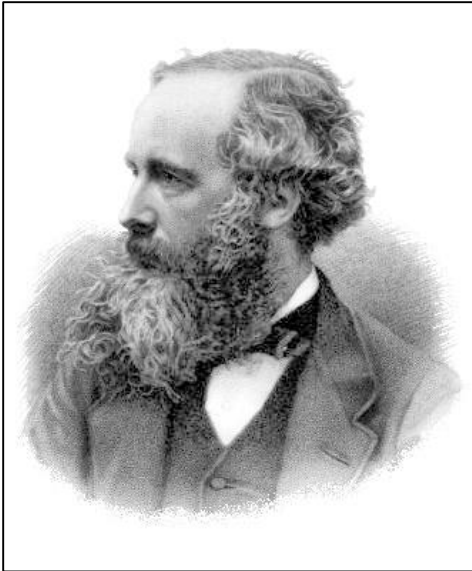


- 1850. Foucault - eksperimentalno otkriva da svjetlost brže putuje zrakom nego kroz vodu - slaganje s valnom teorijom

Svjetlost - elektromagnetski val

► 1864. James Maxwell - matematička teorija

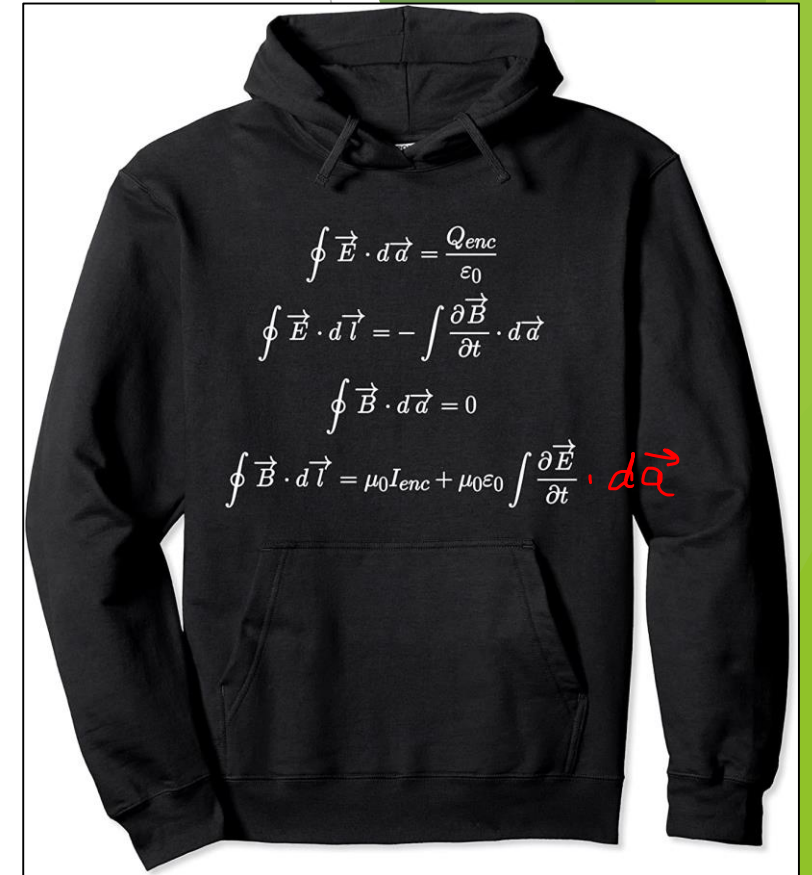
- osnovne zakone elektrodinamike prikazuje pomoću četiri jednažbe
- iz toga proizlazi da je svjetlost elektromagnetski val



James Maxwell



Heinrich Hertz



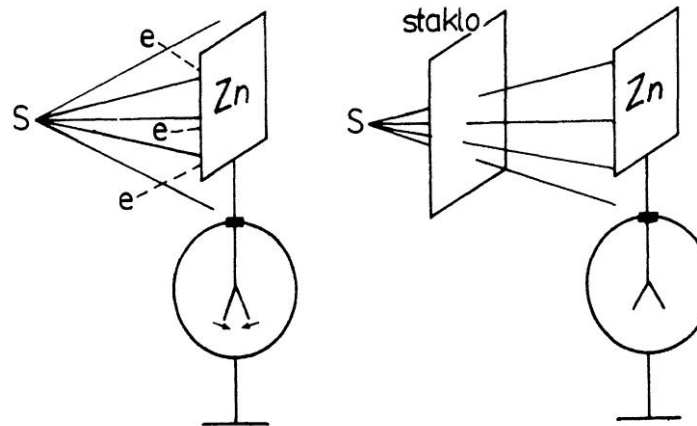
Amazon.com

► 1885. Heinrich Hertz - eksperimentalna potvrda

Je li se sve posložilo?

- ▶ **1887. H. Hertz** - intenzitet iskre na metalnom iskrištu povećava se ako je negativna elektroda obasjana ultraljubičastim zračenjem.
- ▶ To je potaknulo niz eksperimenata o utjecaju svjetlosti:
- ▶ **1902. Philipp Lenard**
Demonstrirao je da iz svjetlošću obasjanog metala izlaze nabijene čestice i da su te čestice identične elektronima, koje je 1897. otkrio britanski fizičar Joseph John Thompson.

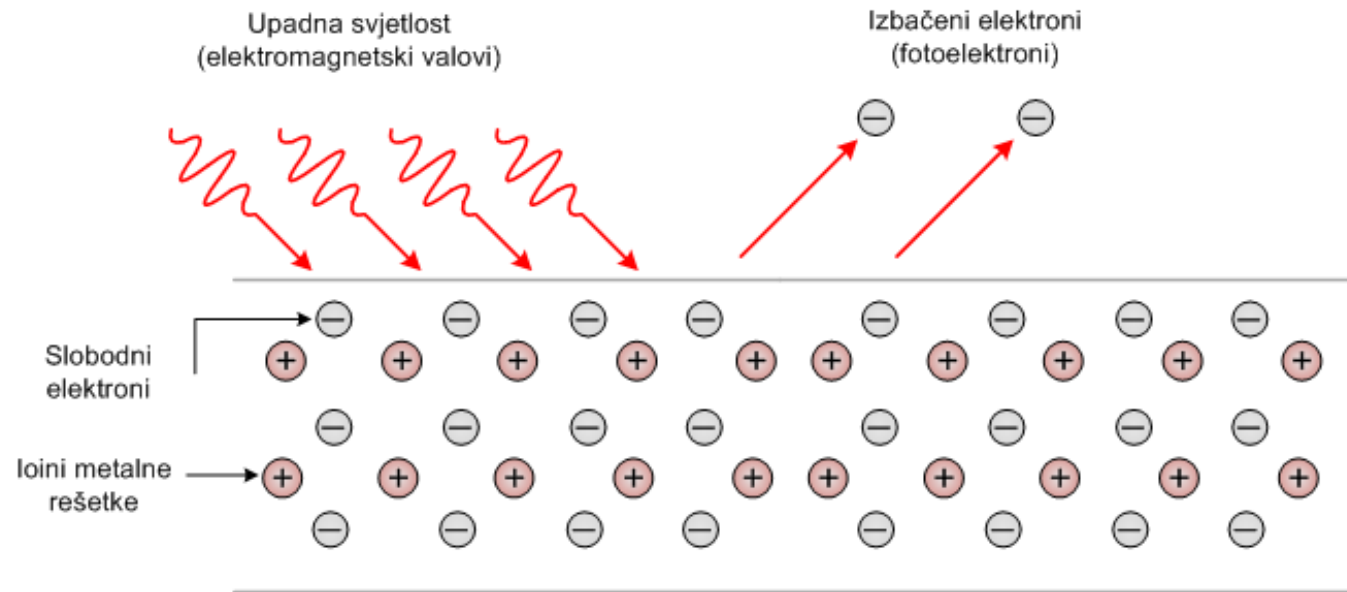
- ▶ **1888. Wilhelm Hallwachs**
- ▶ Halwachov ili fotoelektrični efekt.





Fotoelektrični efekt

- ▶ *Fotoelektrični efekt* = pojava u kojoj elektroni izlaze iz površine metala pod djelovanjem elektromagnetskog zračenja - vidljiva svjetlost i ultraljubičasto zračenje.



- ▶ Prilično jednostavno za objasniti. Ili...

Simulacija: Fotoelektrični efekt

Fotoelektrični efekt (1.10)

Datoteka Postavke Pomoć

Intenzitet

0%

400 nm

UV IC

Meta

Natrij

Prikaži samo elektrone najveće energije

Dijagrami

Struja / Napon baterije

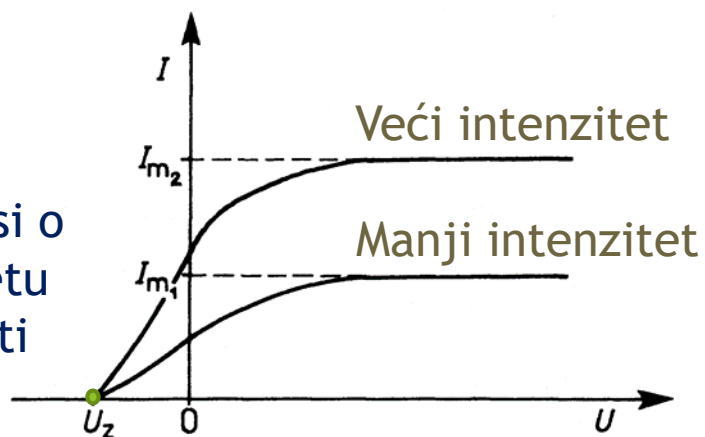
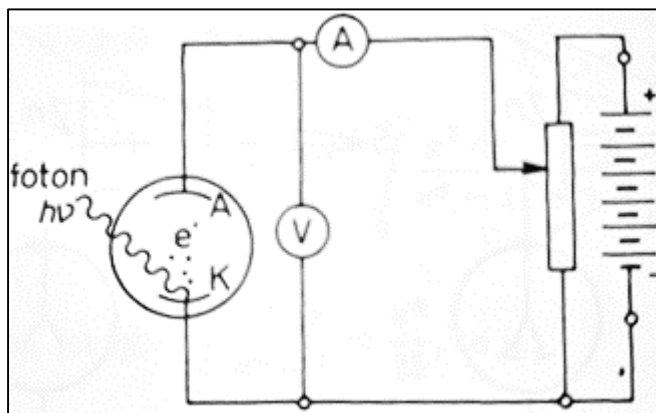
Struja / Intenziteta svjetlosti

Energija elektrona / Frekvencija svjetlosti

Struja: 0.000

0.00 V

Što eksperimenti pokazuju?



U_z ne ovisi o intenzitetu svjetlosti

Ovisnost fotostruje I o naponu između elektroda U pri stalnom intenzitetu svjetlosti.

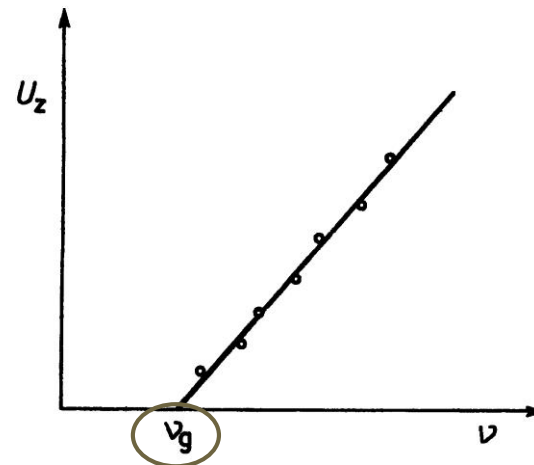
- Kako se napon povećava, raste i fotostruja do zasićenja.
- Struja zasićenja ovisi o intenzitetu svjetlosti, veći intenzitet \rightarrow veća struja zasićenja.
- Ako se spoji negativan napon na anodu, struja pada do zaustavljanja, za napon U_z .
- Mjereći napon zaustavljanja mogu se odrediti najveća brzina i kinetička energija fotoelektrona.

$$\frac{m_e v_{max}^2}{2} = eU_z$$

- U_z ne ovisi o intenzitetu svjetlosti.

Što još eksperimenti pokazuju?

- Napon zaustavljanja (najveća energija oslobođenih elektrona) ovisi samo o frekvenciji!
- Za svaki metal postoji najmanja tzv. **granična frekvencija** svjetlosti ν_g ispod koje **nema fotoelektričnog efekta** koliko god bio velik intenzitet upadne svjetlosti.
- Za frekvenciju veću od granične (ν_g) fotoelektrični efekt nastaje i pri malom intenzitetu svjetlosti.
- Intenzitet svjetlosti utječe samo na broj emitiranih fotoelektrona (struju).



Ovisnost napona zaustavljanja o frekvenciji.

Mogu li se ta nova opažanja objasniti valnom teorijom?

Valna teorija:

- Energija koju elektromagnetski val predaje elektronu u metalu ovisi o intenzitetu svjetlosti → kinetička energija elektrona bit će veća za veći intenzitet svjetlosti.
- Intenzitet svjetlosti ovisi samo o amplitudi, ne i o frekvenciji → fotoelektrični učinak treba se dogoditi za sve frekvencije svjetla.
- Ako je intenzitet svjetlosti mali, treba neko vrijeme da površina absorbira dovoljno energije da bi se izbacio elektron → očekujemo kašnjenje u izlasku elektrona u odnosu na trenutak uključivanja svjetla.

Kako objasniti eksperimente?

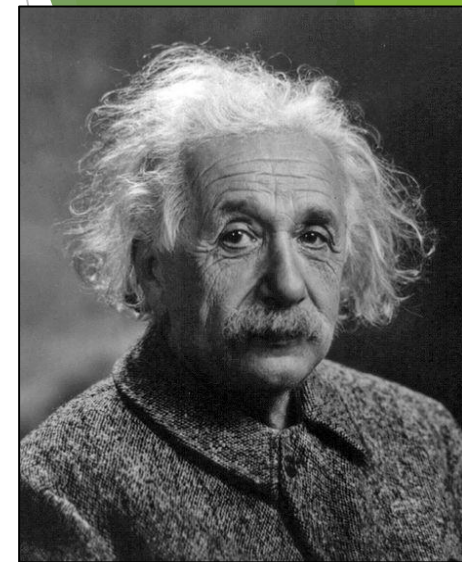
- ▶ 1905. Albert Einstein
- ▶ Svjetlost sačinjena od malih paketa energije: *kvanti* ili **fotoni**

$$E = h\nu$$

- ▶ Kad foton padne na površinu metala sudara se s elektronom i predaje mu svoju energiju ($h\nu$). Foton pri tome nestaje, apsorbira se.
- ▶ Dio dobivene energije od fotona elektron troši na svladavanje potencijalne energije kojom je vezan u metalu (rad izlaza W_i), ostatak prelazi u kinetičku energiju elektrona:

$$E_k = h\nu - W_i$$

$$h\nu = W_i + \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2$$



Fotoelektrični efekt

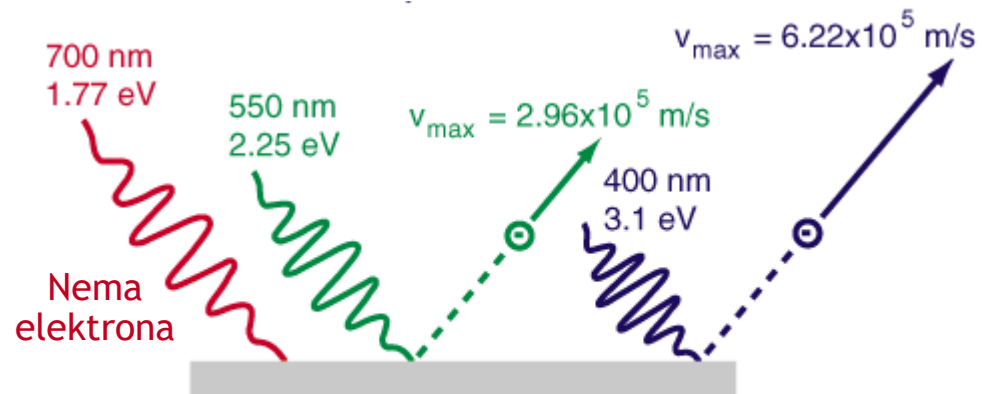
$$h\nu = W_i + \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2$$

- ▶ Ako je frekvencija upadne svjetlosti takva da vrijedi: $h\nu < W_i$ nema fotoelektričnog efekta jer elektron ne može izaći iz metala.

$$E_{\text{fotona}} = h\nu$$

$$W_i = h\nu_g \Rightarrow \nu_g = \frac{W_i}{h}$$

$$\frac{1}{2}m_e v_{\max}^2 = h(\nu - \nu_g)$$




Kalij - 2,0 eV potrebno da se izbacij elektron

Fotoelektrični efekt

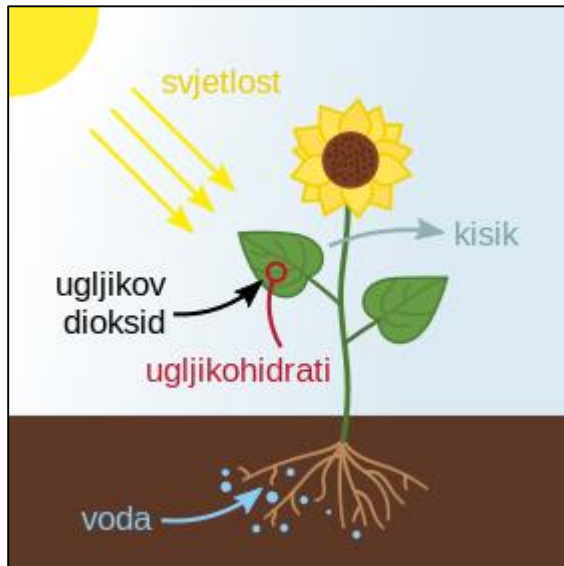
Metal	Rad izlaza (eV)
Na	2,46
Al	4,08
Fe	4,50
Cu	4,70
Zn	4,31
Ag	4,73
Pt	6,35
Pb	4,14

Fotoelektrični efekt

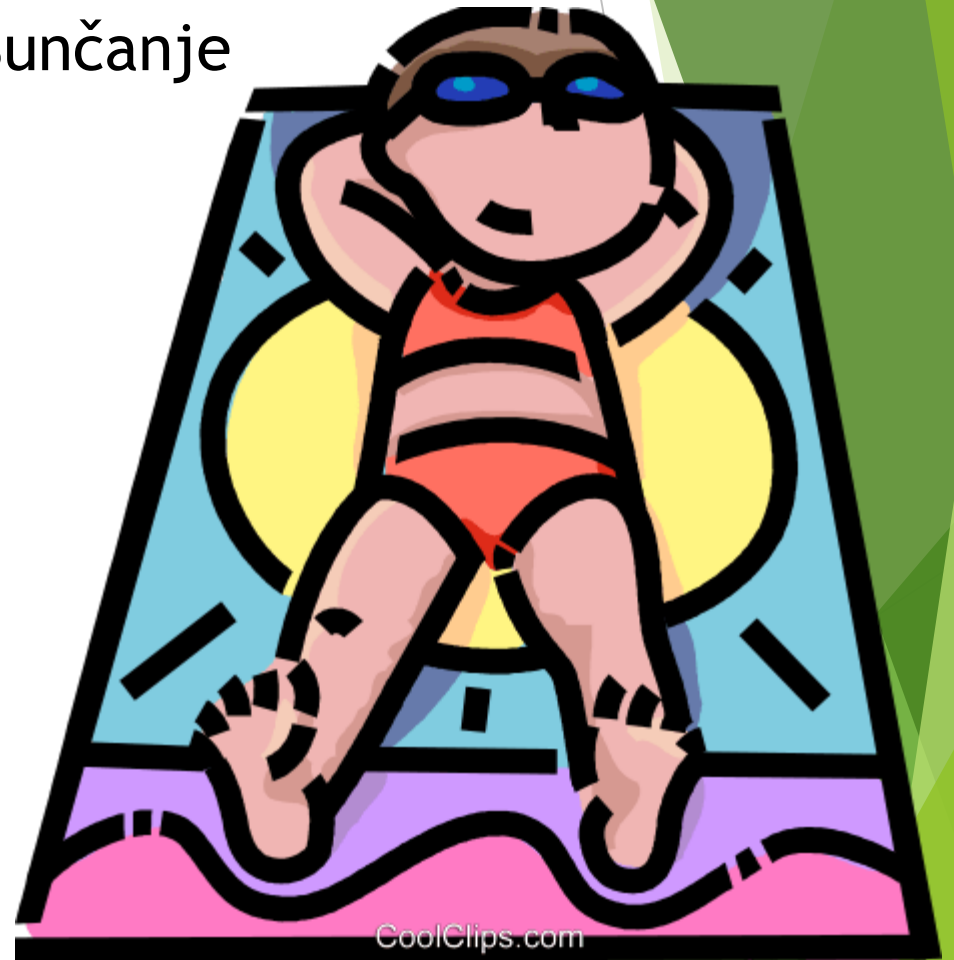
- ✓ Fotostruja je direktno proporcionalna intenzitetu:
 - ✓ veći intenzitet = više fotona -> više izbijenih elektrona = veća struja.
- ✓ Kinetička energija fotoelektrona (time i zaustavni napon) proporcionalna je frekvenciji svjetlosti, ne ovisi o intenzitetu.
- ✓ Postoji granična frekvencija, različita je za različite materijale.
- ✓ Proces se odvija trenutačno.
- Svjetlost posjeduje i čestična i valna svojstva **DUALNA PRIRODA SVJETLOSTI**
 -  Otvara polje kvantne fizike

Gdje se sve nalazi fotoelektrični efekt

► Fotosinteza



• Sunćanje



Primjena fotoelektričnog efekta

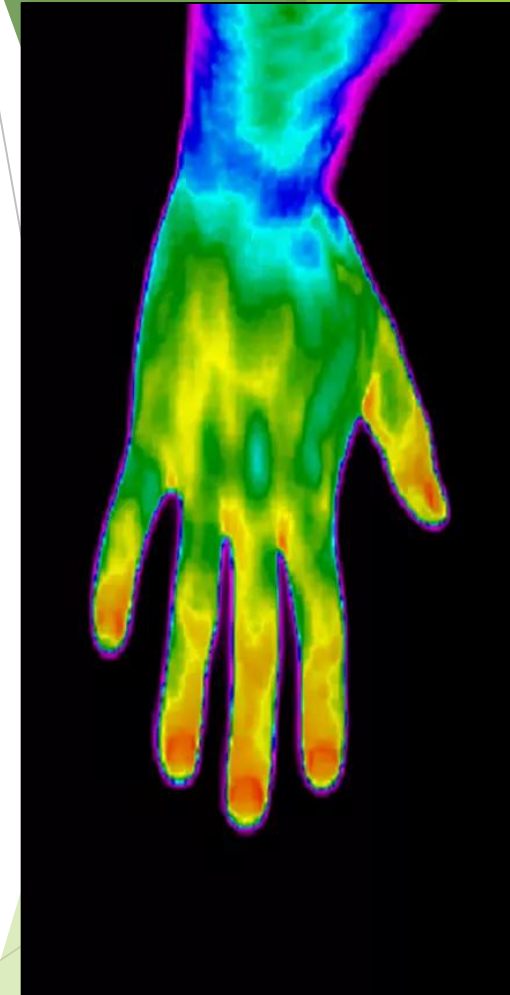
- ▶ Fotovodljive ćelije od poluvodiča :
- ▶ Vidljivi dio spektra: (CdS)
 - ▶ Svjetlomjer - fotometar u fotoaparatu.
 - ▶ Automatski prekidači za uličnu rasvjetu.
- ▶ Infracrveni dio spektra
 - ▶ Senzori za uređaje za noćno gledanje.



- ▶ Fotodetektor
 - ▶ „electric eye” - detektira prekid zrake svjetlosti.
 - ▶ Npr. Sigurnosni sustav za garažna vrata.
 - ▶ Obično se koristi IR zračenje da se ne vidi.



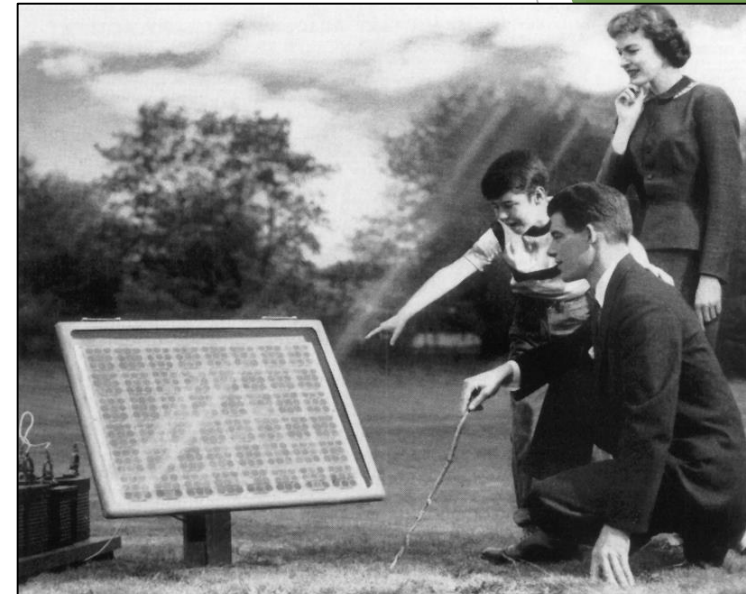
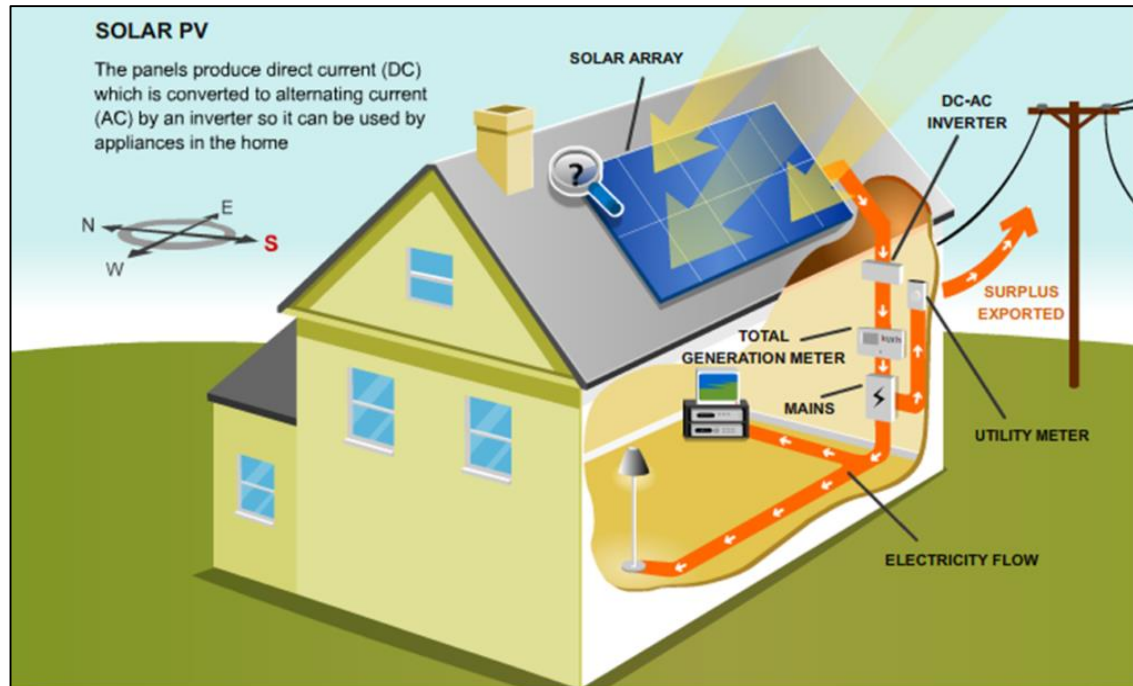
- ▶ Fotomultiplikatori
 - ▶ Iznimno osjetljivi fotodetektor, prvotnu fotostruju umnažaju na dinodama i do 10^8 puta; spektroskopija, medicina (CAT scan).





Fotoćelije

- ▶ 1950. prve fotoćelije od silicija.
- ▶ Princip rada se nije puno promijenio od prvih fotoćelija, učinkovitost raste (od 4 do max. 20% upadne svjetlosti).
- ▶ Solarni paneli sastavljeni su od niza pojedinačnih fotoćelija.



Something New Under the Sun. It's the Bell Solar Battery, made of thin discs of specially treated silicon, an ingredient of common sand. It converts the sun's rays directly into usable amounts of electricity. Simple and trouble-free. (The storage batteries beside the solar battery store up its electricity for night use.)

Bell System Solar Battery Converts Sun's Rays into Electricity!

Bell Telephone Laboratories invention has great possibilities for telephone service and for all mankind

Ever since Archimedes, men have been searching for the secret of the sun.

For it is known that the same kindly rays that help the flowers and the grains and the fruits to grow also send us almost limitless power. It is nearly as much every three days as in all known reserves of coal, oil and uranium.

If this energy could be put to use — there would be enough to turn every wheel and light every lamp that mankind would ever need.

The dream of ages has been brought closer by the Bell System Solar Battery. It was invented at the Bell Telephone Laboratories after

long research and first announced in 1954. Since then its efficiency has been doubled and its usefulness extended.

There's still much to be done before the battery's possibilities in telephony and for other uses are fully developed. But a good and pioneering start has been made.

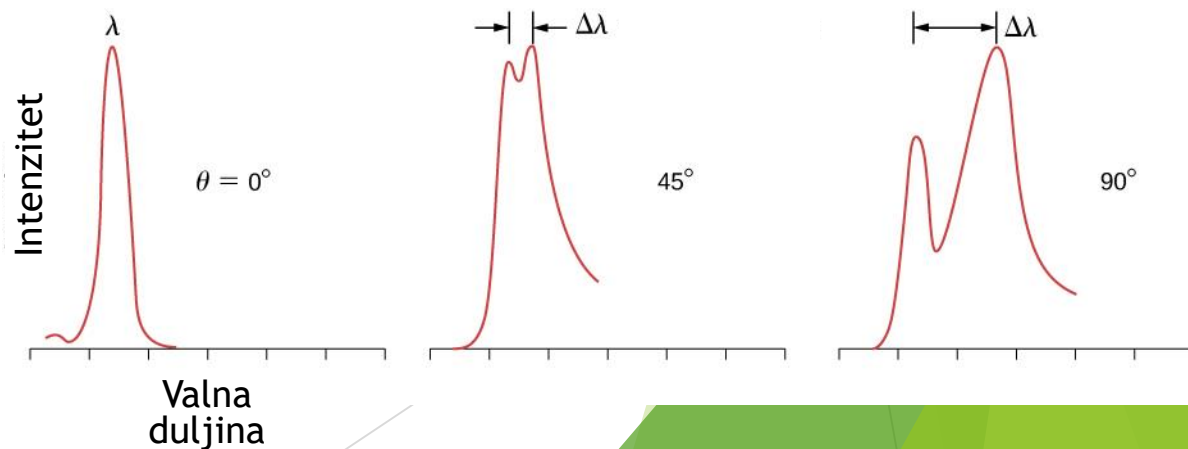
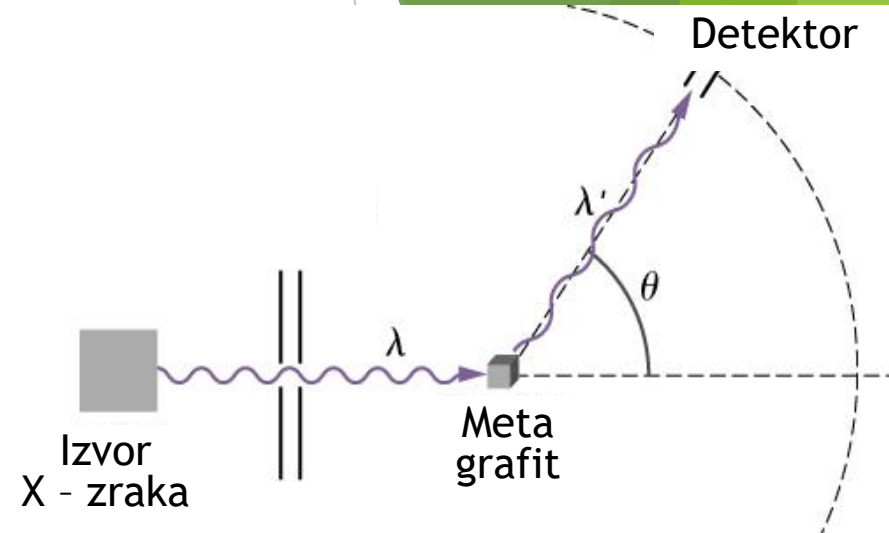
The progress so far is like the opening of a door through which we can glimpse exciting new things for the future. Great benefits for telephone users and for all mankind may come from this forward step in putting the energy of the sun to practical use.

BELL TELEPHONE SYSTEM



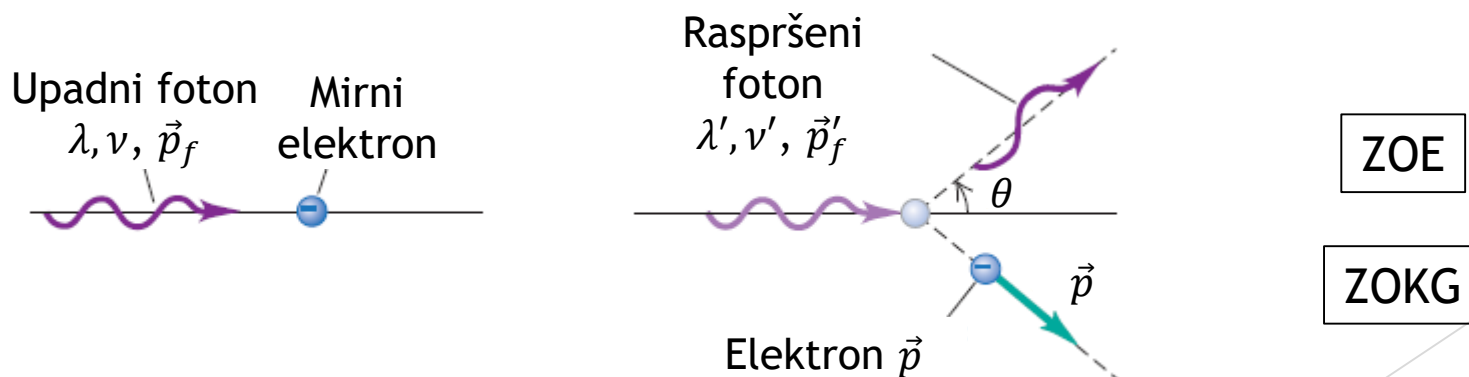
Comptonovo raspršenje

- 1923. A. H. Compton u svojim eksperimentima potvrđuje korpuskularnu (čestičnu) prirodu zračenja.
- Snop rendgenskih zraka valne duljine λ pada na grafit. Mjeri se intenzitet raspršenog zračenja pod različitim kutovima θ .
- Iako upadno zračenje ima jednu valnu duljinu, kod raspršenog zračenja opažaju se maksimumi intenziteta za dvije valne duljine, jednu jednaku valnoj duljini upadnog zračenja (λ), i drugu λ' , veću od upadne valne duljine za $\Delta\lambda$.
- Pomak $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ ovisi o kutu pod kojim se raspršeno zračenje promatra.
- Valna teorija ne može objasniti zašto se valna duljina dijela zračenja nakon raspršenja nešto povećala.



Comptonovo raspršenje

- Compton je rezultate objasnio pretpostavivši da upadno rendgensko zračenje nije val frekvencije ν nego snop fotona; svaki foton ima energiju $h\nu$.
- Upadni fotoni sudaraju se sa slobodnim elektronima iz mete, fotoni izašli iz sudara čine zračenje raspršeno pod kutom θ .
- Budući da upadni foton preda dio svoje energije elektronu s kojim se sudara, raspršeni foton mora imati manju energiju E' , a time i manju frekvenciju $\nu' = E'/h$.
- Manja frekvencija znači veću valnu duljinu $\lambda' = c/\nu'$ što objašnjava pomak u valnoj duljini $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$.



Comptonovo raspršenje

Kako izračunati pomak u valnoj duljini?

➤ Zakon očuvanja energije: $E_f + mc^2 = E'_f + E_k + mc^2$

➤ Zakon očuvanja količine gibanja: $\vec{p}_f = \vec{p}'_f + \vec{p}$; $\vec{p}_f \cdot \vec{p}'_f = p_f p'_f \cos \theta$

Energija (relativistička) elektrona:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

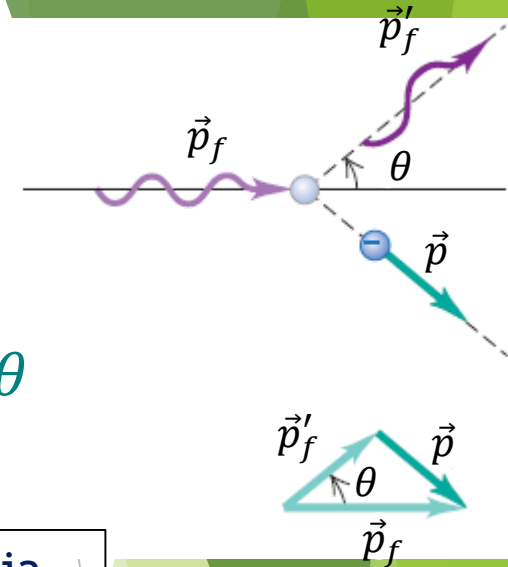
$$p_f = \frac{E_f}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

Količina gibanja
fotona

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = 2,427 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Comptonova
valna duljina

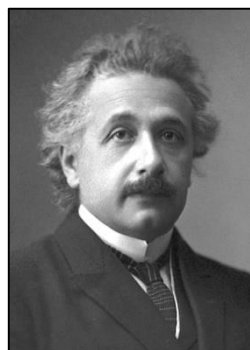


Nobelove nagrade

- 1900. Kvanti energije - Max Planck (1918.)
- 1905. Fotoelektrični učinak - Albert Einstein (1921.)
- ▶ 1916. Eksperimentalni dokaz fotoelektričnog učinka - Robert Andrew Millikan (1923.)
- ▶ 1923. Raspršenje X-zraka na elektronima - Arthur Holly Compton (1927.)



Planck



Einstein



Millikan

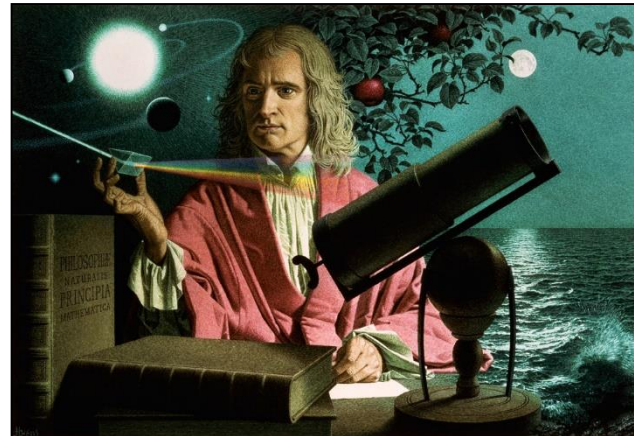
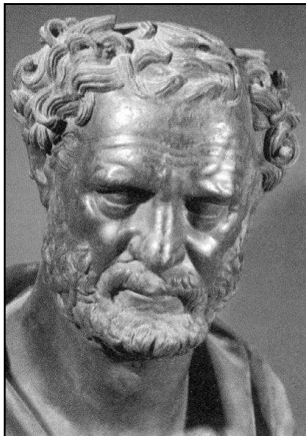


Compton

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

Povijesni pregled atoma (1)

- Leukip i Demokrit (5. stoljeće pr. Kr.).
- Svijet se sastoji od praznog prostora i nedjeljivih čestica (atom) (primjer kruha).
- Atomi su ograničeni, puni, masivni (slobodno se kreću, sudaraju, prepliću u praznom prostoru).
- Ponovno otkrivanje - suprotnost s kršćanstvom (14 st.).
- Robert Boyle, Isaac Newton prihvaćaju atomizam (17 st.).



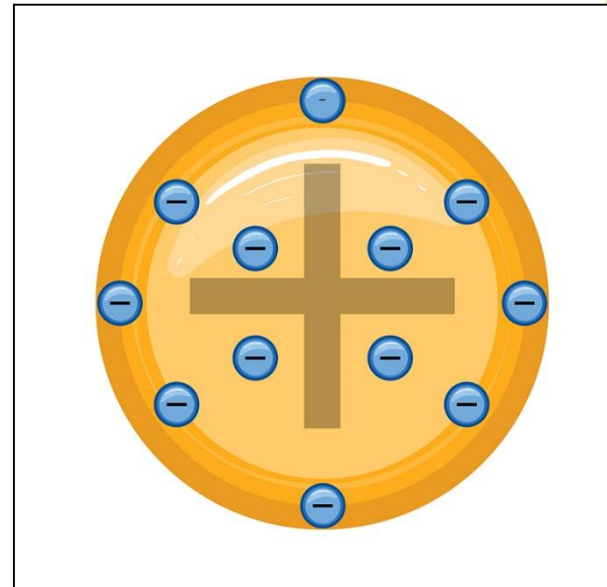
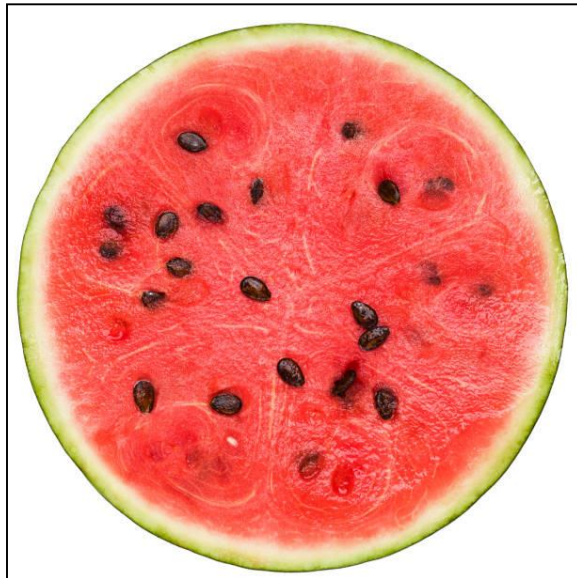
Naboj

- Sredinom 19 st. eksperimenti s katodnim cijevima.
- Postoje čestice koje nose pozitivne i negativne naboje.
- Nositelji negativnih naboja su elektroni.
- Masa 1837 puta manja od mase atoma vodika.
- Pozitivne čestice još nisu razjašnjene.



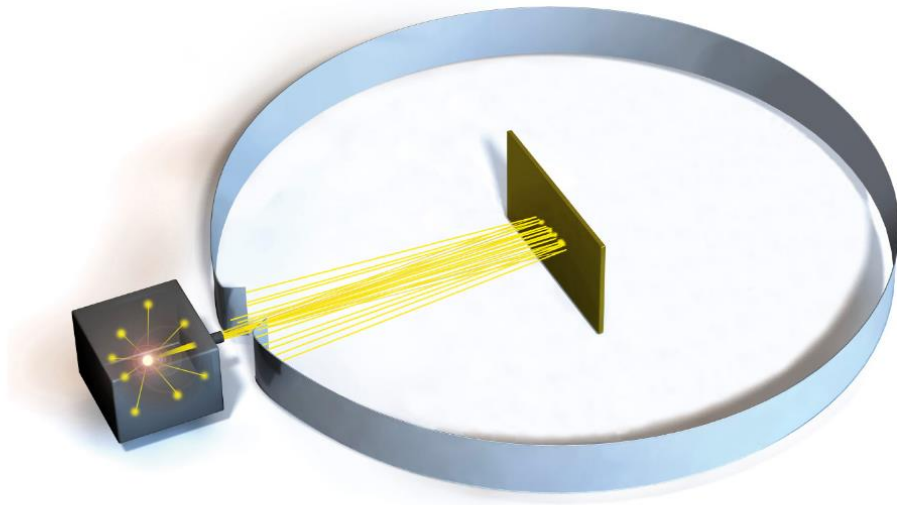
Thomson

- Nije nedjeljiv (subatomske čestice).
- Masa.
- Stabilan (energija potrebna za izbijanje elektrona).
- Joseph J. Thomson 1904. na temelju eksperimentalnih činjenica (kuglasti grumen (10^{-10} m) pozitivnog naboja u kojega su utisnuti elektroni)

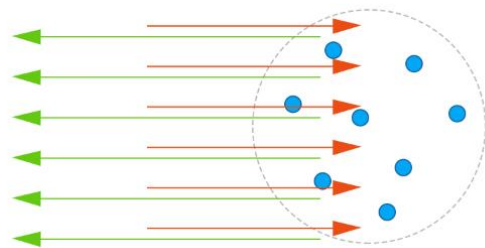


Rutherford (1)

- α -čestice treba propustiti kroz guste atome (npr. listiće zlata).



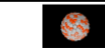
U slučaju modela ispunjenog prostora ni jedna α -čestica ne prolazi kroz listić zlata, tj. sve se reflektiraju kao svjetlost u zrcalu.



Simulacija: Rutheford i Thompson

The simulation interface features a central black workspace with a 3D model of a Rutherford atom (a nucleus of red and white spheres). To the left, a yellow trapezoidal source emits alpha particles, with a dashed line indicating their path. A scale bar at the bottom of the workspace is labeled 1.5×10^{-13} m (nuclear scale). On the right, a control panel includes a legend, an alpha particle energy slider (min to max), a 'Traces' checkbox, and atom configuration sliders for protons (set to 79) and neutrons (set to 118). At the bottom of the workspace are pause, play, and refresh buttons.

Rutherford Scattering



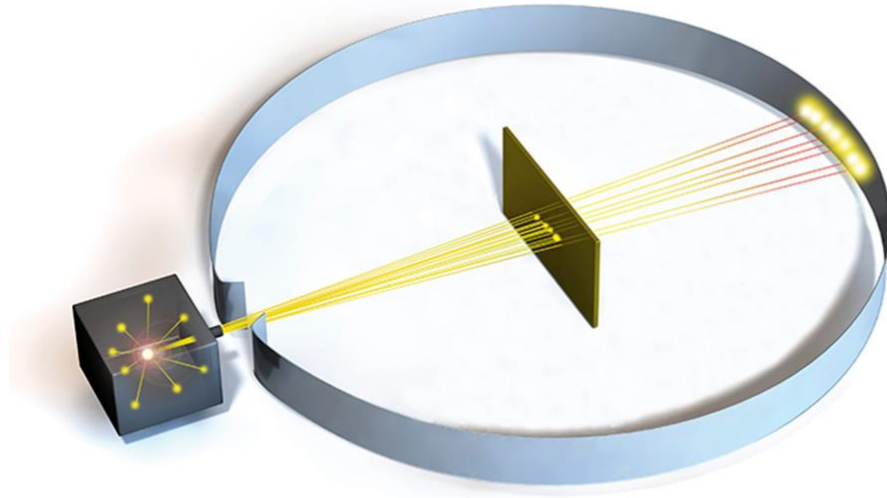
Rutherford Atom



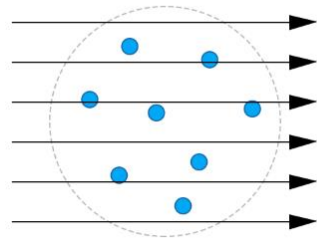
Plum Pudding Atom



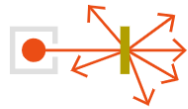
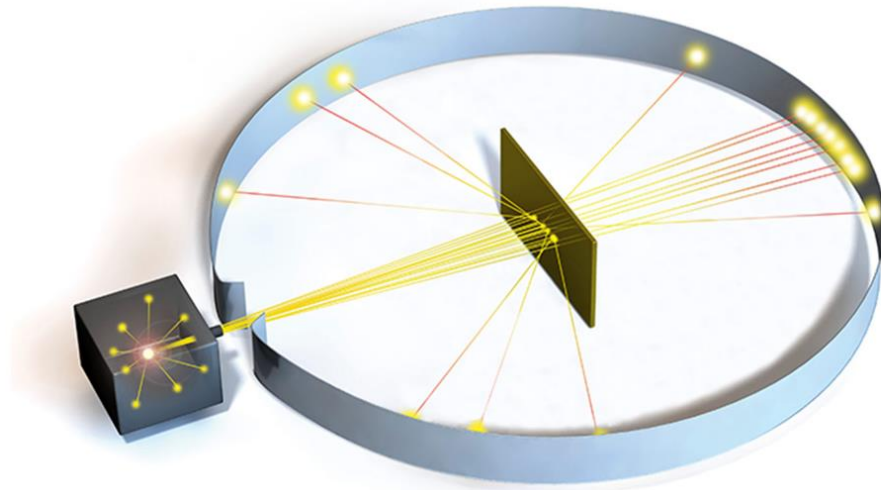
Rutherford (2)



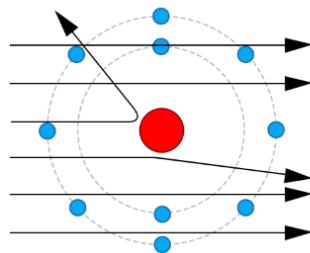
U slučaju Thomsonovog modela sve α -zrake prolaze kroz listić zlata.



Rutherford (3)

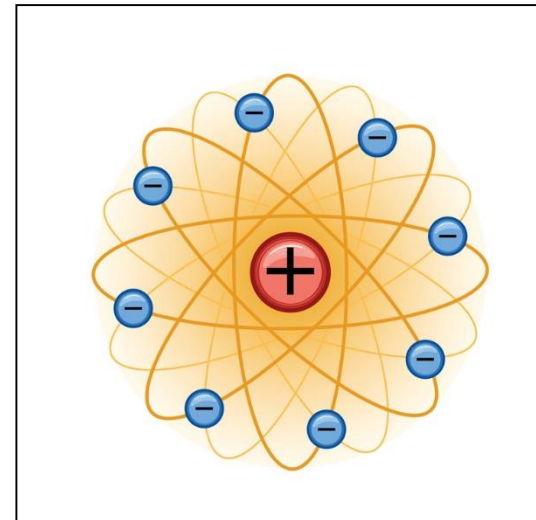


U slučaju modela s jezgrom i elektronskim omotačem većina α -čestica prolazi kroz listić, ali neke se raspršuju.

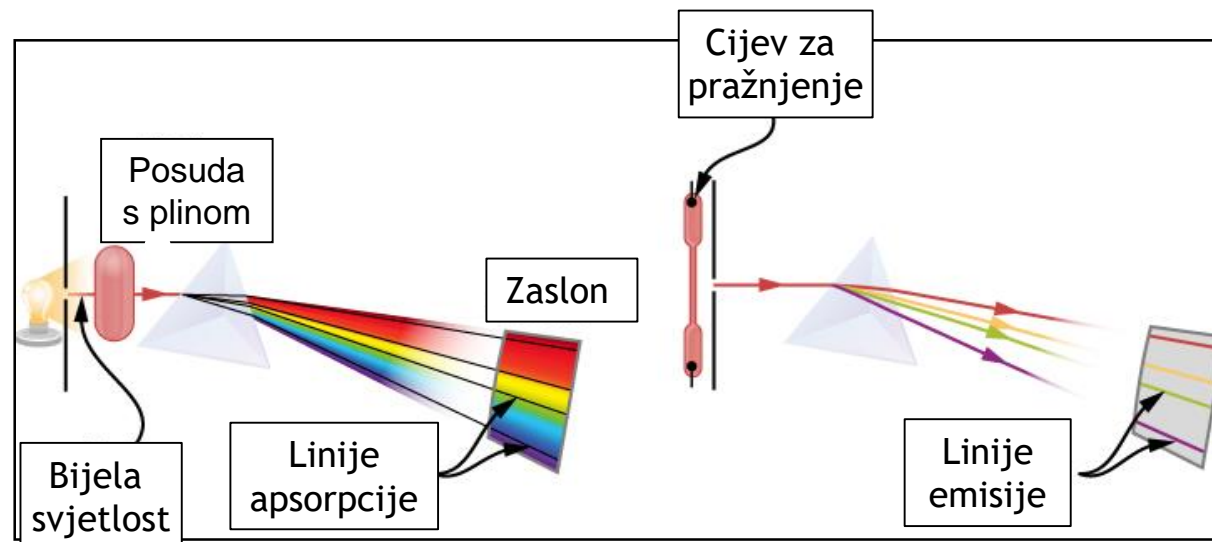


Rutherfordov model

- α -čestice prošle kroz foliju bez odklona (atomi su uglavnom prazni).
- Neke čestice su se reflektirale pod kutem blizu 180° (sudar dvije masivne čestice istoimenog naboja). Pozitivan naboj u atomima zlata nije jednoliko raspoređen, nego je koncentriran u jednom malom dijelu atoma.
- Reflektira se samo jedna od 20 000 čestica (promjer te pozitivno nabijene jezgre oko 20 000 puta manji od promjera atoma).
- Rutherfordov „Planetarni” model:
 - Pozitivan naboj Ze u centru (masa u jezgri- 10^{-14} m).
 - Veći dio atoma je prazan prostor.
 - Stabilnost (elektrostatsko privlačenje).
 - Elektroni kruže oko jezgre (orbite) (Coulombova sila).
 - Elektroni zrače i padaju u jezgru (ZOE) !?!?!
 - Kontinuirani spektar.



Linijski spektri



- Tamne linije u apsorpcijskom spektru nalaze se upravo tamo gdje su svijetle linije u emisijskom spektru pare. Emisijski i apsorpcijski spektri su jedinstveni za svaki element. → Atomi mogu zračiti samo određene valne duljine i te iste mogu apsorbirati.
- Ideja: proučavajući linijske spektre atoma (elemenata) saznati više o strukturi atoma.
- Linijski spektar vodika (jedan od najjednostavnijih spektara) proučavan je još krajem 19. stoljeća – Balmer

Linijski spektri i stacionarna stanja

- ▶ Zračenje rastavljamo pomoću prizme ili optičke rešetke.
- ▶ Užarena čvrsta tijela, tekućine i plinovi pri visokom tlaku emitiraju svjetlost s *kontinuiranim* valnim duljinama – kontinuirani spektar.
- ▶ Razrijeđeni plinovi i pare metala emitiraju svjetlost *samo određenih* valnih duljina –linijski (diskretni) spektar.



(a)

Emisijski spektar atoma vodika



(b)

Emisijski spektar helija



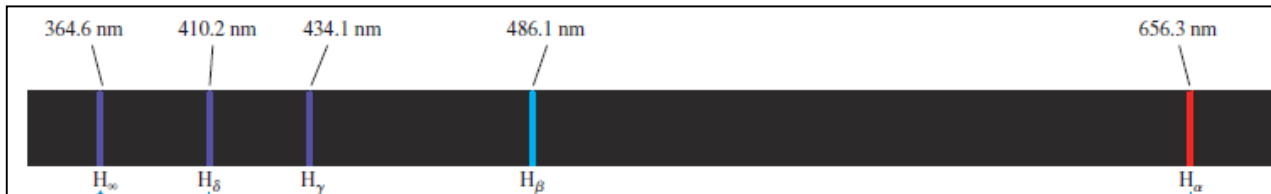
(c)

Apsorpcijski spektar Sunca

- Rutherford -> „Svaki atom zrači kontinuirani spektar”

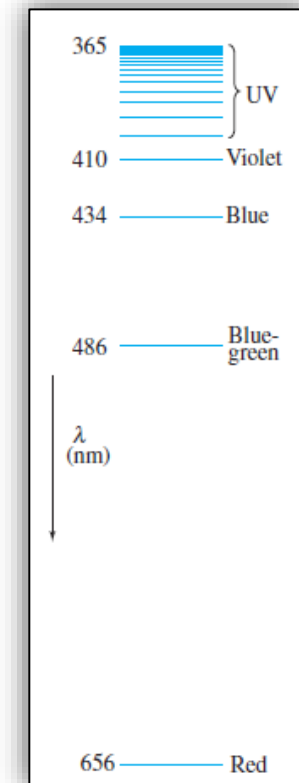
Linijski spektri – atom vodika

- Balmer – prvi uočio vezu između pojedinih valnih duljina vodikova spektra:



Sve Balmerove linije ispod H_δ su u ultraljubičastom dijelu spektra

H_α, H_β, H_γ i H_δ su u vidljivom dijelu spektra



$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, 6 \dots \quad \text{Balmerova serija (1885.)}$$

$$R_{\infty} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \quad \text{Rydbergova konstanta}$$

Linijski spektri – atom vodika

- Usavršavanjem spektrografskih uređaja pronađene su i druge serije u ultraljubičastom i infracrvenom dijelu spektra vodika:

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 2, 3, 4 \dots$$

Lymanova serija (1916.)

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

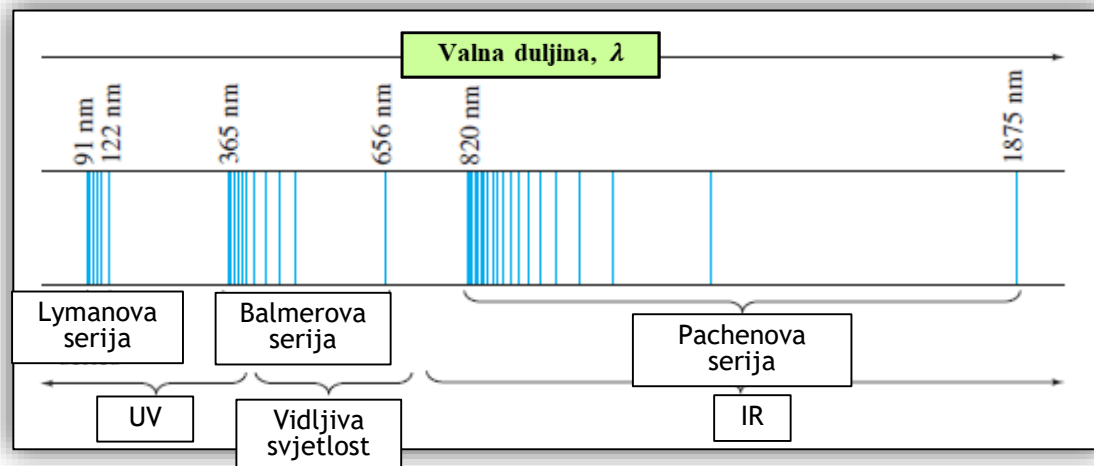
$$n = 4, 5, 6 \dots$$

Pachenova serija (1908.)

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 5, 6, 7 \dots$$

Brackettova serija (1922.)



Opći izraz

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = m + 1, m + 2, m + 3 \dots$$

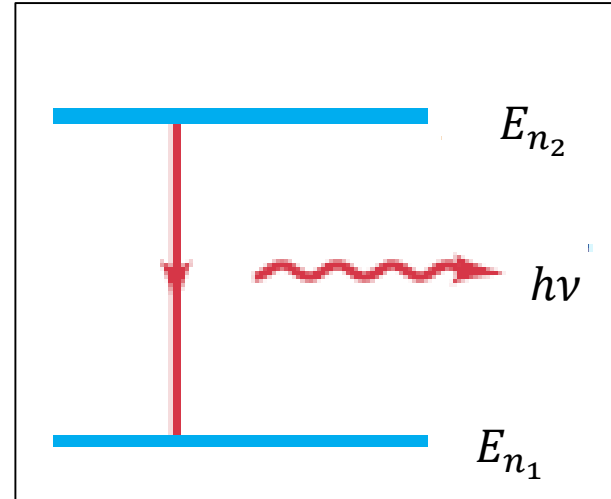
- Zašto postoje takve zakonitosti spektara ??????

Bohrov model atoma

- ▶ **1913. Bohr:**
- ▶ Atomi (i drugi sustavi atomskih dimenzija) ne mogu imati bilo koju energiju – nalaze se u stanjima točno određene energije: $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots \rightarrow$ stacionarna stanja
- ▶ Energije su kvantizirane.
- ▶ Kad je atom u stacionarnom stanju – ne gubi energiju.
- ▶ Atom zrači energiju ako prelazi iz jednog stacionarnog stanja (n_2) u drugo (n_1) – pritom zrači kvant elektromagnetskog zračenja energije $h\nu$:

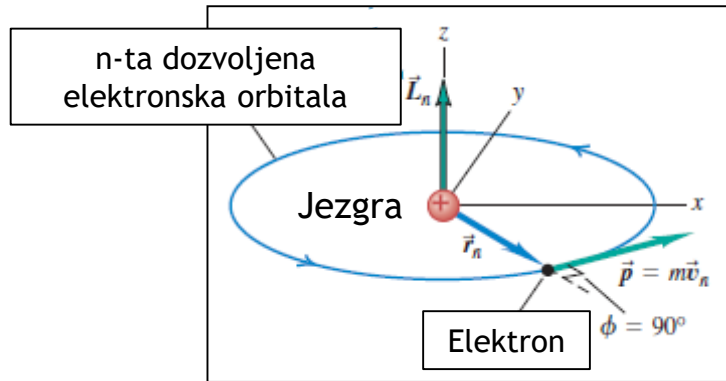
$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}$$

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h}$$



Bohrov model atoma – vodikov atom

- Elektron se giba oko jezgre, pod djelovanjem elektrostatske sile, po kružnicama radijusa r .



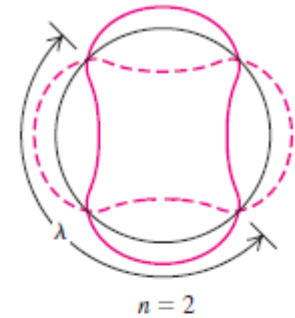
$$F_{elektr} = F_{centripet}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \rightarrow v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr}$$

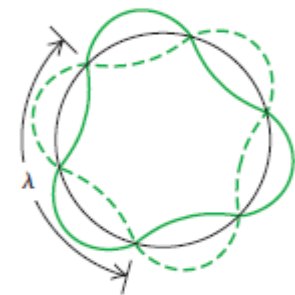
- Dopuštene su samo one kružne staze za koje moment količine gibanja elektrona (\vec{L}) može biti cjelobrojni višekratnik od $h/2\pi$:

$$L = mvr = \underbrace{n}_{\substack{\uparrow \\ \text{cjelobrojni višekratnik}}} \frac{h}{2\pi} \rightarrow v^2 = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 r^2}$$

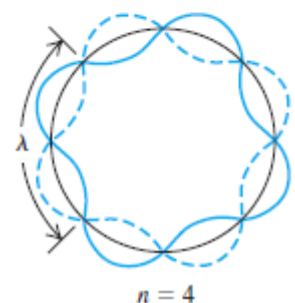
$$2r\pi = n\lambda$$



$n = 2$



$n = 3$



$n = 4$

Bohrov model atoma – vodikov atom

- Polumjer staze:

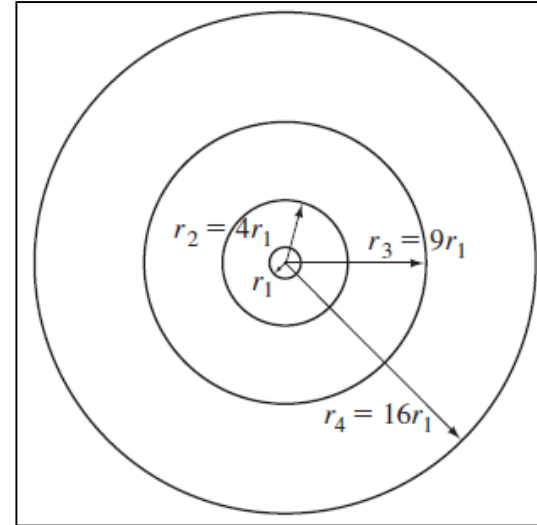
$$v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr} = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 r^2}$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} = n^2 r_1$$

$$r_1 = a_0 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$a_0 \approx 0,053 \text{ nm}$$

BOHROV RADIJUS – polumjer najmanje staze vodikovog atoma



- Brzina elektrona:

$$v_n = n \frac{h}{2\pi m r_n} \rightarrow v_n = \frac{1}{n} \frac{e^2}{2\epsilon_0 h}$$

$$v_1 = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Bohrov model atoma – vodikov atom

- Energija:

$$E = E_{kin} + E_{pot}$$

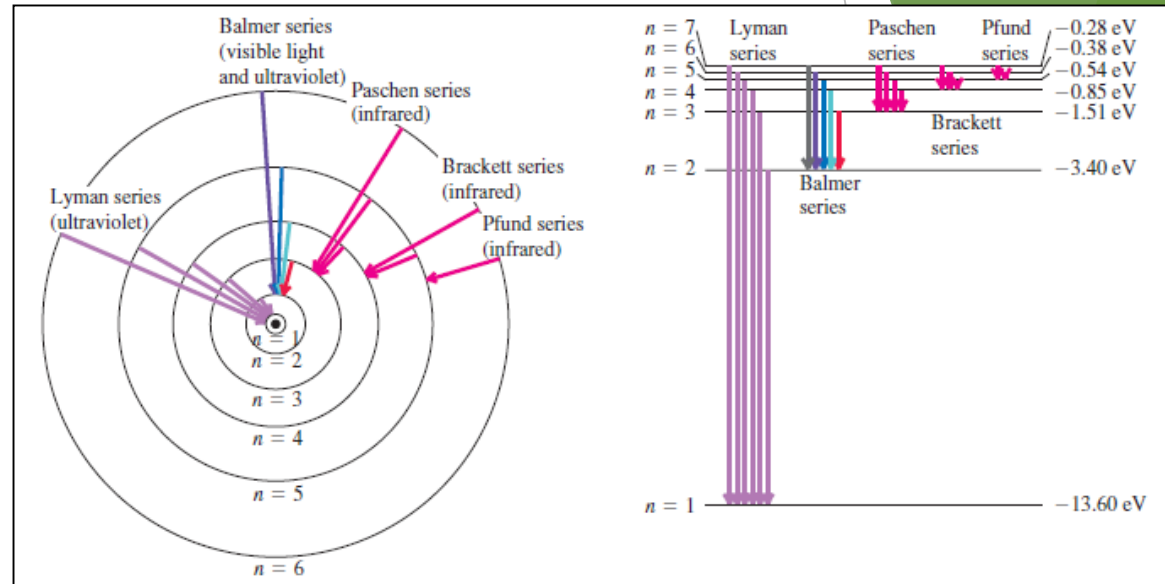
$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}; \quad v_n = \frac{1}{n} \frac{e^2}{2\epsilon_0 h}$$

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = E_1 \frac{1}{n^2}$$

$$E_1 = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13,6 \text{ eV}$$

Energija osnovnog stanja vodikovog atoma



Atom zrači energiju pri prelasku iz stanja n u m :

$$h\nu = E_n - E_m = hc/\lambda$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_\infty \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R_\infty = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Bohrov model – jednoelektronski atomi

- Bohrov model uspješno opisuje i spektre atoma sličnih atomu vodika tj. onih atoma koji su ionizirani tako da u njima kruži samo jedan elektron npr.: He⁺, Li⁺⁺, Be⁺⁺⁺
- Naboj jezgre je +Ze, a oko jezgre kruži jedan elektron:

Coulombova sila:

$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}$$

Potencijalna energija:

$$E_{pot} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

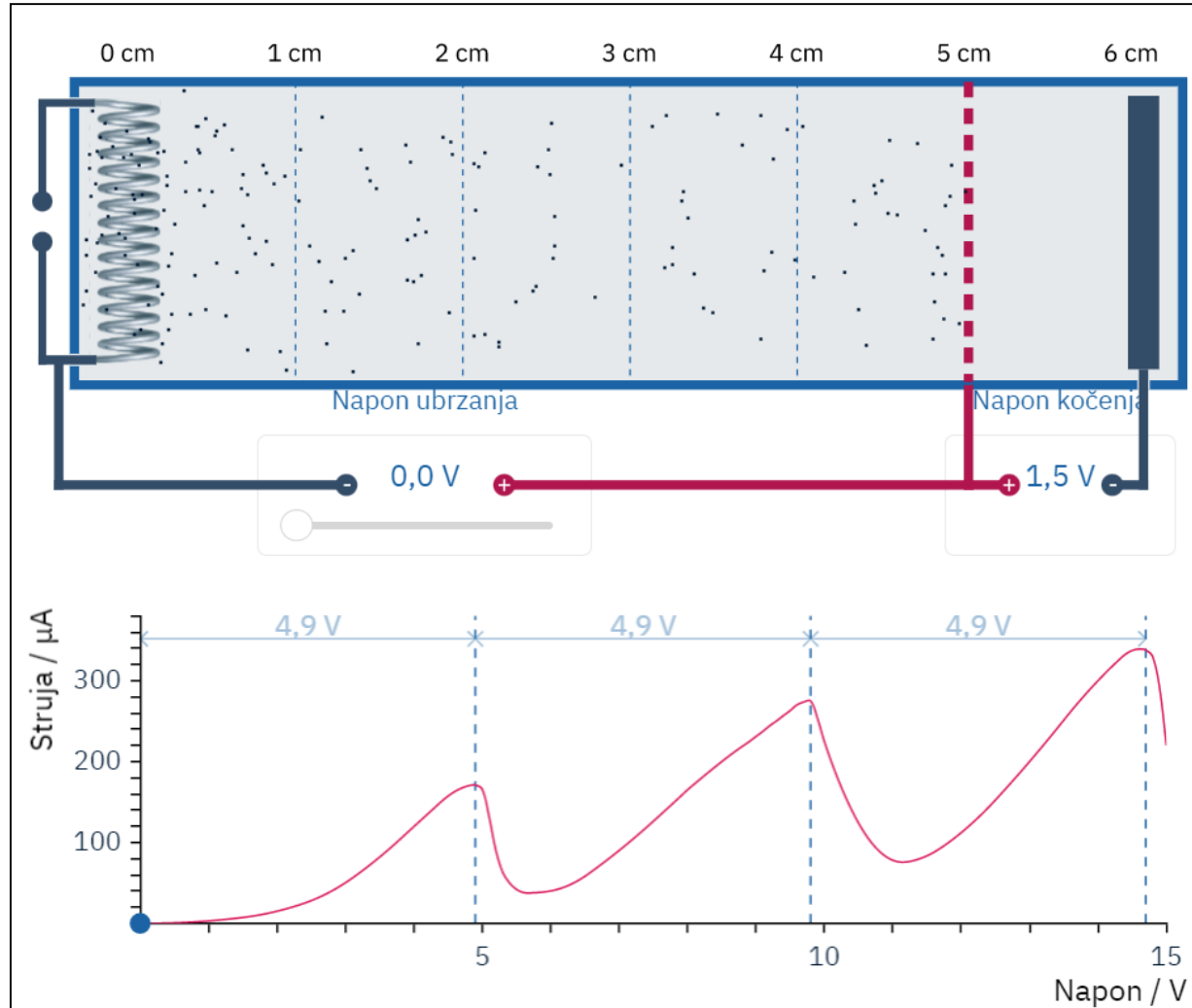
$$r_n = a_0 \frac{n^2}{Z}; \quad v_n = \frac{h}{2\pi m a_0} \frac{Z}{n}$$

$$E_n^{(Z)} = E_1 \frac{Z^2}{n^2}$$



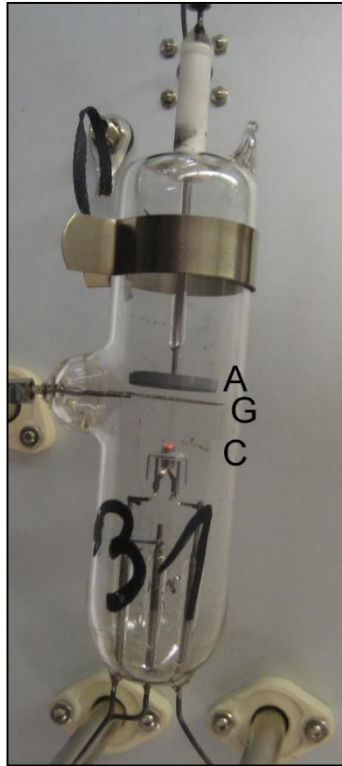
$$h\nu = E_{n_2}^{(Z)} - E_{n_1}^{(Z)} = -E_1 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) Z^2$$

Frank-Hertzov eksperiment

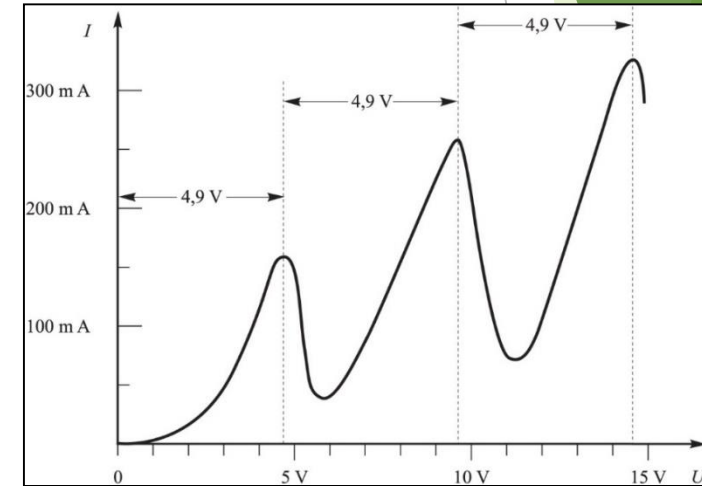


Frank-Hertzov eksperiment

- Eksperimentalna potvrda postojanja stacionarnih stanja i diskretnih energijskih razina u atomima – potvrda Bohrove teorije.



- Elektronska cijev s razrijeđenim živinim parama.
- Neelastičnim sudarom elektroni svoju kinetičku energiju prenose na atome živinih para čiji elektroni zbog dobivene energije preskoče iz orbitale niže energije u orbitalu više energije i pri povratku emitiraju svjetlost.
- Elektroni nakon sudara ostaju bez energije, sporo se gibaju i ne stižu do anode – slabljenje jakosti električne struje. Skokovi struje pojavljuju se za svakih 4,9 V – odgovara energiji valne duljine živine svjetlosti od 253 nm (odgovara prijelazu iz osnovnog u prvo pobuđeno stanje, UV):



$$h\nu = eU; \quad c = \nu\lambda$$

Kvantna mehanika

Relacije neodređenosti

- Pri svakom mjerenju postoje odstupanja, pogreške.
- Precizniji uređaji rezultiraju preciznijim mjerenjima - manje pogreške.
- Prema kvantnoj teoriji, postoji granica točnosti do koje možemo poznavati stanje nekog fizikalnog sustava!
- Heisenberg:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \gtrsim h$$

Neodređenost položaja čestice Neodređenost količine gibanja čestice, $p = mv$

$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim h$$

Primjer Usmeni: Coulombov zakon

a.) Definicija

b.) Jednadžba

c.) Primjena na primjeru

a.) Definicija

Coulombov kaže da je električna sila F između dvaju električno nabijenih točkastih naboja (odbojna ili privlačna, ovisno o tome jesu li tijela jednakih ili suprotnih električnih naboja) razmjerna je količinama električnoga naboja q a obrnuto razmjerna kvadratu udaljenosti r između tijela.

Primjer Usmeni: Coulombov zakon

b.) Jednadžba

$$F_{12} = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Kako se sila F_{12} odnosi naspram naboja Q_1 ? (sve druge veličine su konstantne)

Gledamo da li se naboj nalazi u brojniku ili nazivniku. Ako se naboj nalazi u brojniku tada sila raste (proporcionalno) a ako je u nazivniku tada sila pada (obrnuto proporcionalno). Općenito vrijedi za sve varijable.

Odgovor: Sila F_{12} raste povećanjem naboja Q_1 tj. proporcionalna je naspram naboja Q_1 .

Primjer Usmeni: Coulombov zakon

Kako se naboj Q_1 odnosi naspram naboja Q_2 ? (sve druge veličine su konstantne)

Q_1 trebamo izlučiti da bude samostalan na jednoj strani. Npr. $Q_1 = \frac{F_{12} \cdot r^2}{k \cdot Q_2}$

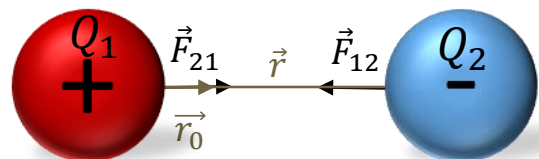
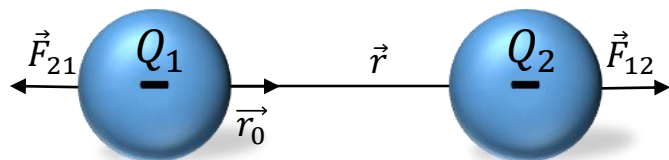
Gledamo da li se naboj Q_2 nalazi u brojniku ili nazivniku. Zaključujemo da se nalazi u nazivniku.

Odgovor: Naboj Q_1 se smanjuje povećanjem Q_2 tj. obrnuto je proporcionalan naspram naboja Q_2 .

Primjer: Usmeni

c.) Primjena na primjeru

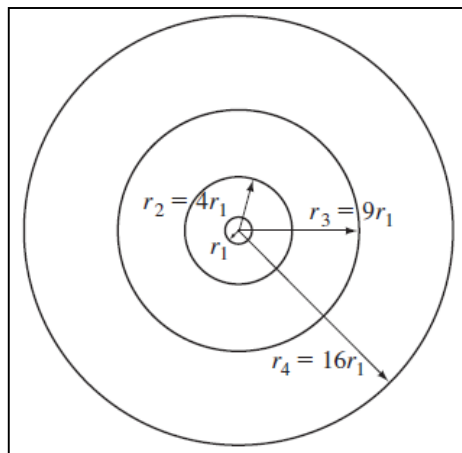
- Crtanje vektora i objašnjavanje interakcije dvaju naboja.



- **Ključno je da naučite odnose između veličina tj. kako se jedna veličina ponaša naspram druge npr. raste/pada tj. proporcionalno/ obrnuto proporcionalno.**

Primjer 1

- Zašto je elektron u Bohrovom modelu vodikovog atoma slabije vezan ako se nalazi u razini $n = 3$ u odnosu na elektron u razini $n = 1$?



$n = 3$ nam govori da je elektron na 3. energijskoj razini, koja se nalazi dalje od jezgre u odnosu na 1. energijsku razinu. Zato na elektron na razini $n = 3$ slabije djeluje jezgra (privlačna sila opada s kvadratom udaljenosti) pa je i slabije vezan.

Primjer 2

- Kolika bi bila energija emitirane svjetlosti ako zamislimo da elektron iz vanjskog prostora zauzme najnižu energijsku razinu vodikovog atoma?
- Elektron dolazi iz vanjskog prostora, pa je $n_i = \infty$. Najniža energijska razina je $n_f = 1$.

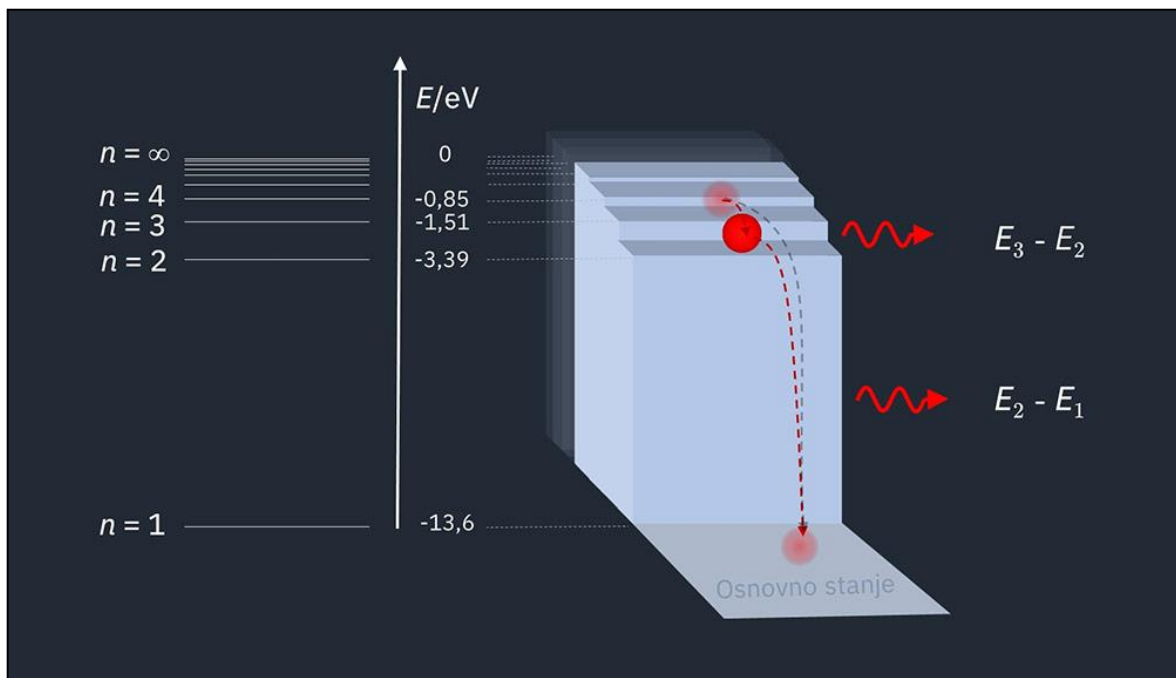
$$E = E_{n_f}^{(Z)} - E_{n_i}^{(Z)} = -E_1 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) Z^2$$

- Atomi broj vodika $Z = 1$.

$$E = -13,6 \cdot (1 - 0)$$

$$E = -13,6 \text{ eV}$$

Primjer 3



a.) Koliko fotona je emitirano pri prijelazu iz drugog pobuđenog u osnovno stanje ?

Jedan foton

b.) Koliko fotona bi bilo emitirano kad bi elektron iz drugog pobuđenog stanja prvo prešao u prvo pobuđeno stanje, a zatim u osnovno stanje ?

Dva fotona