

Fotoelektrični efekt i Einsteinova fotonska hipoteza

Dubravko Klabučar¹

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

O povijesti i značenju fotoelektričnog efekta

Fotoelektričnim efektom, ili skraćeno foto-efektom, nazivamo izbijanje elektrona iz tijela (tipično, iz poliranih metalnih ploča) na koja pada elektromagnetsko zračenje: vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, itd. Taj efekt je nađen i proučavan prvenstveno u pokusima Heinricha R. Hertza (1887), Wilhelma Hallwachsa (1888), Josepha J. Thomsona (1899), Philippa Lenarda (1899), te Roberta A. Millikana (1916). Osobita važnost foto-efekta je u tome što klasična fizika nije dovoljna da bi ga se objasnilo, već se mora primijeniti Planckova hipoteza o kvantima energije. Štoviše, čak se i ona mora radikalizirati proširenjem na Einsteinovu hipotezu o kvantima elektromagnetskog polja - dakle, «česticama svjetlosti», kasnije nazvanim fotonima.

Albert Einstein je dakle (1905. godine) otkrio da je foto-efekt prvi i vrhunski dokaz da svjetlost - i elektromagnetsko zračenje općenito - ima i čestičnu, a ne samo valnu prirodu. Hertzovo prvotno otkriće zato predstavlja poseban kuriozitet u povijesti znanosti. Naime, on je slučajno opazio foto-efekt baš prilikom onih slavnih pokusa, kojima je dokazao postojanje upravo elektromagnetskih valova.

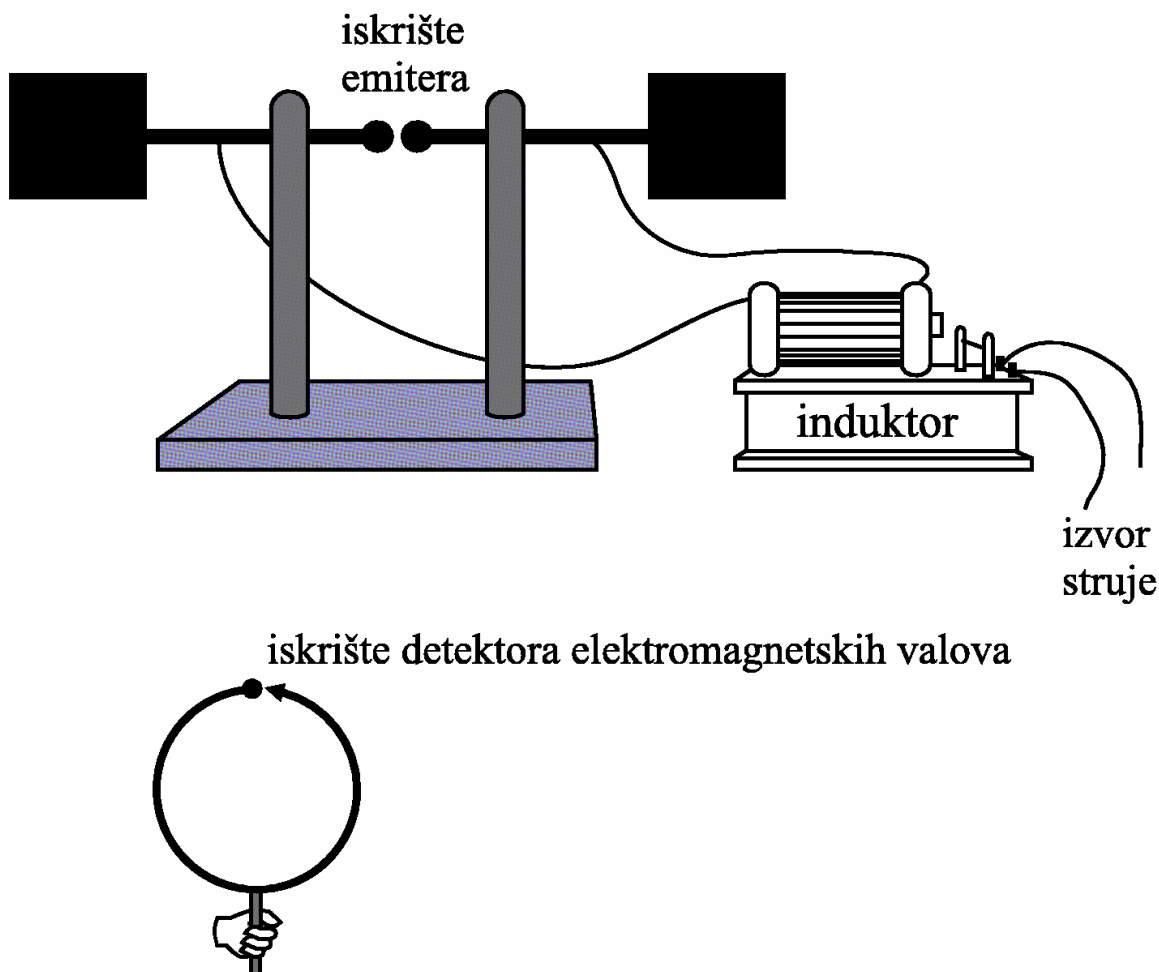
Hertzovo otkriće foto-efekta

Prvi eksperimentalni odašiljač je Hertz sastavio od visokonaponskog induktora spojenog na dva mjedena cilindra (proširena velikim metalnim pločama da se poveća kapacitet prihvatanja naboja) - vidi Sliku 3-1. Na krajevima cilindara bile su kuglice razmaknute za petinu milimetra. Time je načinio iskrište jer bi iskre preskakale zbog visokog napona iz induktora. Hertz je naime zamislio da će, čim iskra stvori vodljivu stazu između dva mjedena vodiča, električni naboj hitro oscilirati prelazeći naizmjenice s jednog vodiča na drugi, te u skladu s Maxwelllovom teorijom emitirati elektromagnetske valove valne duljine približne dimenzijama tih vodiča. Ali, da bi dokazao da su ti valovi zaista emitirani, morao ih je i detektirati. Hertzov detektor, dakle prvi prijemnik, bio je komad bakrene žice duljine približne (ukupnoj) duljini emitterskih vodiča, da bi prirodna (svojstvena) frekvencija oscilacije električne struje u toj žici bila bliska frekvenciji oscilacija u emiteru. Žicu s mjedenom kuglicom na jednom kraju i šiljkom na drugom kraju, Hertz je savio u krug, da bi se inducirane oscilacije naboja u žici razotkrile iskrenjem preko malenog razmaka između kuglice i

¹ Copyright ©D. Klabučar 2005. Autor pridržava sva prava.



šiljka (vidi Sliku 3-1). Zamisao je bila uspješna: čim bi se induktor stavio u pogon, u iskrištu «prijemnika» bi počele preskakati iskrice.

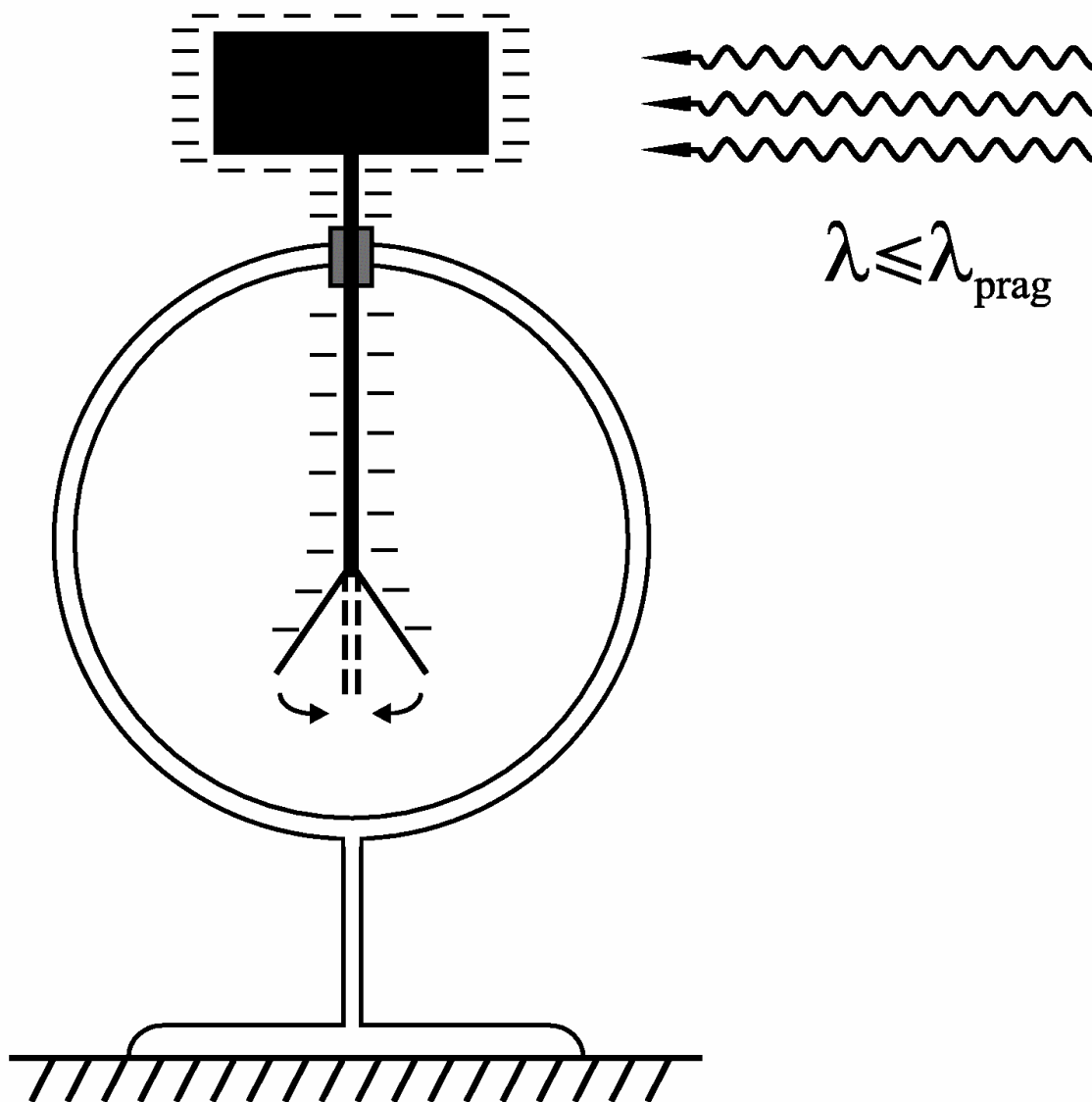


Slika 3-1: Prvi radio-odašiljač i prijemnik: Hertzov emiter i detektor elektromagnetskih valova. Pomoću njih je Hertz dokazao postojanje Maxwellovih valova, ali je istovremeno otkrio i fotoelektrični efekt. Naime, primijetio je da električna iskra lakše izbija na metalnom iskrištu ako ga obasjava ultraljubičasta svjetlost.

Razradom osnovne ideje u nizu briljantnih eksperimenata, Hertz je nepobitno dokazao postojanje Maxwellovih elektromagnetskih valova. Ono što je pak dovelo do otkrića foto-efekta, bilo je Hertzovo nastojanje da poboljša detekciju time da bolje vidi iskrice. To je pokušavao postići zamračivanjem iskrišta detekora njegovim zatvaranjem u kutiju, ali je opazio da je time primjetno smanjena maksimalna duljina iskrica; odnosno, maksimalni razmak između kuglice i šiljka morao se znatno smanjiti da bi iskrice preskakale i sada. Dakle, zatvaranje u kutiju je otežalo iskrenje u odnosu na prethodnu situaciju. Uklanjanjem raznih dijelova kutije, vidjelo se da to otežanje uzrokuje samo onaj dio koji zaklanja iskrište detekora od iskara na emiteru, i to nezavisno od položaja te prepreke. Važno je bilo samo da li iskre emitera nesmetano obasjavaju iskrište detekora ili ne, pa je Hertz konačno zaključio da to obasjavanje na neki način olakšava iskrenje detekora. Upornim izvođenjem raznovrsnih pokusa pokazao je i da taj efekt ne izaziva vidljiva svjetlost, nego ultraljubičasta. Naime,

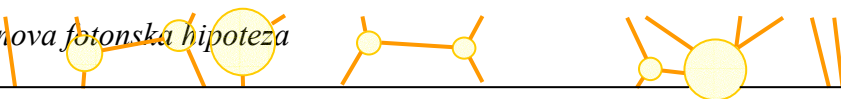


zasjenjenje izvora izazivale su i sasvim prozirne ploče ako su bile od običnog stakla, a one od kvarcnog stakla nisu. Znalo se da zračenje iskara uz vidljivu svjetlost ima i ultraljubičastu komponentu. Nju kvarcno staklo propušta, ali obično staklo ne. Na koncu je Hertz kvarcnom prizmom rastavio svjetlost iskara odašiljača na komponentne valne duljine i dokazao da one ultraljubičaste, dakle kraće od vidljivih, na neki tajnoviti način olakšavaju i pojačavaju električne izboje, t.j. iskrenje detektora.



Slika 3-2: Demonstracija foto-efekta pomoću negativno nabijenog elektroskopa. Sklapanje listića elektroskopa pokazuje brz gubitak naboja uslijed foto-efekta. On se događa tek kad metalnu pločicu obasjava svjetlost valne duljine λ manje od neke valne duljine praga λ_{prag} , koja ovisi o tome od kojeg metala je pločica. Na pr., laki alkalni metali imaju λ_{prag} u vidljivom dijelu spektra: za kalij $\lambda_{\text{prag}} = 5.50 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0.550 \mu\text{m}$, za natrij $0.540 \mu\text{m}$, te za litij $0.500 \mu\text{m}$. U originalnom Hallwachsovom pokusu to je bio cink, pa je $\lambda_{\text{prag}} = 0.287 \mu\text{m}$, što je u ultraljubičastom dijelu elektromagnetskog spektra. Za željezo i srebro na primjer, λ_{prag} su još kraće, $0.262 \mu\text{m}$ odnosno $0.261 \mu\text{m}$.

Daljnji eksperimentalni razvoj



Hertzovo slučajno otkriće foto-efekta zbilo se u kontekstu pokusa namijenjenog drugoj svrsi (emisiji i detekciji elektromagnetskih valova), gdje su okolnosti bile prekomplikirane a da bi se moglo doći do daljnjih spoznaja o čemu se tu radi. Zato je W. Hallwachs već sljedeće, 1888. godine načinio jednostavan pokus koji nam i danas služi kao školski primjer foto-efekta. Izoliranu pločicu cinka (kao u originalnom Hallwachsovom pokusu) ili nekog drugog metala spojimo na elektroskop koji može biti nabijen negativno ili pozitivno da bi mu listići bili razdvojeni. Ako pazimo da sve bude dobro izolirano, naboj će se gubiti vrlo sporo, t.j., dugo će vremena trebati da primijetimo i najmanje sklapanje listića elektroskopa. Zatim, metalnu pločicu obasjavamo svjetlom raznih intenziteta i valnih duljina. Bez obzira na povećanje intenziteta, t.j. jakosti izvora svjetla, opažamo sljedeće:

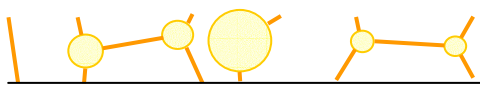
a) Ako je instrument pozitivno električno nabijen, nikad ne opažamo nikakav učinak tog obasjavanja, kakvo god ono bilo.

b) Ako je pak instrument nabijen negativno, opažamo brz gubitak naboja ako pločicu obasjavamo svjetlom koje sadrži dovoljno kratke valne duljine λ , odnosno dovoljno visoke frekvencije $\nu=c/\lambda$. Kolika je maksimalna valna duljina λ_{prag} odnosno minimalna frekvencija ν_{prag} pri kojoj opažamo brz izboj, ovisi o kemijskom sastavu pločice. Ako je ona od cinka, kao u originalnom Hallwachsovom pokusu, potreban nam je svjetlosni izvor koji sadrži ultraljubičastu komponentu (na pr. živina lampa ili plamen izgaranja magnezija). Obasjavanje cinčane pločice nema nikakvog učinka ako izvor zrači samo valne duljine veće od ultraljubičaste, t.j. samo vidljivu i infracrvenu svjetlost (kao na pr. obična žarulja).

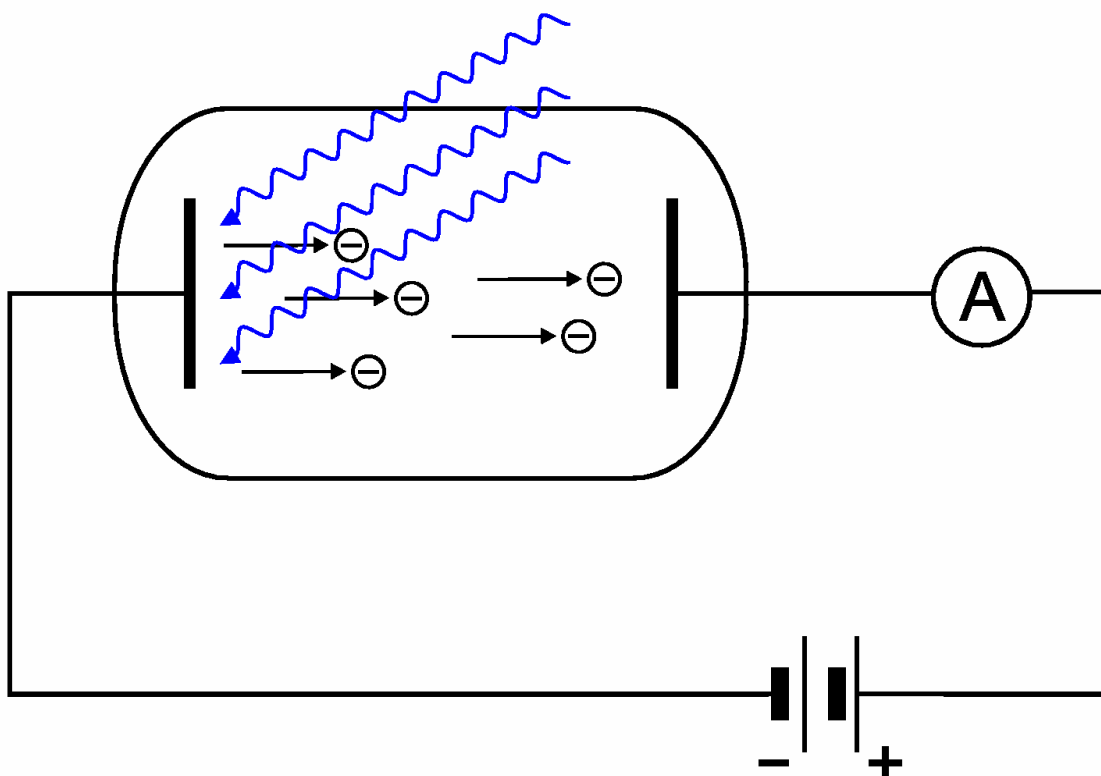
c) Ako instrument u početku niti nije bio nabijen, obasjavanje metalne pločice valnim duljinama kraćim od λ_{prag} , uzrokovat će na instrumentu mali pozitivni naboj.

Nakon Hallwachsovog pokusa je postalo jasno da se kod fotoelektričnog efekta pod utjecajem svjetlosti događa izbacivanje negativnog naboja iz metala (pa se tako olakšava i iskrenje u Hertzovim pokusima). Ali, nije postojala nikakva teorija, nikakvo adekvatno objašnjenje što se, kako i zašto sve to događa. Misterij se počeo razrješavati 1899. godine. Tada su J. J. Thomson i P. Lenard pokusima s vakuumskim cijevima pokazali da se pri foto-efektu izbacuju negativno nabijene čestice i da su to upravo elektroni.

Međutim su Lenardovi pokusi 1902. godine otkrili nove misteriozne činjenice. Proučavajući kako svojstva izbačenih elektrona ovise o intenzitetu i frekvenciji svjetlosti, ustanovio je da o intenzitetu (dakle energiji koju donosi svjetlost u jedinici vremena) ovisi samo broj izbačenih elektrona, ali njihova energija ovisi samo o frekvenciji. Lenard je u biti došao do empiričkih činjenica koje smo temeljito i pažljivo izrekli u sljedećoj sekciji, te označili s I, II i III. Einstein je 1905. godine na temelju Lenardovih rezultata formulirao svoju hipotezu o kvantima elektromagnetskog polja, «česticama svjetla», fotonima.



Lenardovi su rezultati bili dosta neprecizni jer su u ono vrijeme takvi eksperimenti bili teško provedivi. Einsteinovu znanstvenu intuiciju, smjelost i duboko razumijevanje fizike pokazuje i to što je bio u stanju uvesti ideju fotona na temelju takvih ograničenih, kvalitativnih eksperimentalnih podataka. S druge strane, to je značilo da Einsteinova teorija zapravo još *nije* bila eksperimentalno dokazana. Vodeći američki eksperimentalni fizičar R. Millikan, kao i mnogi drugi, nije prihvaćao fotonsku hipotezu jer ju je gledao kao napad na valnu teoriju svjetla i elektromagnetizma općenito. Zato se poduhvatio toga da sve što je u vezi foto-efekta radio Lenard, on napravi precizno, kvantitativno i potpuno, kako bi opovrgao Einsteina i potvrdio valnu, klasičnu elektrodinamiku. Radio je deset godina uporno i mukotrpno da nadiđe Lenardova ograničenja. Na primjer, razvio je tehniku struganja i poliranja metala unutar vakuumskih cijevi, jer je oksidacija metala (zbog nesavršenog vakuuma) bila jedan od problema koji su Lenardu ograničili preciznost.



Slika 3-3: Foto-efekt je pogodno proučavati u vakuumskim cijevima. Valovite linije označavaju elektromagnetsko zračenje koje upada na jednu od elektroda. U eksperimentalnoj fazi kad je u pitanju sama detekcija foto-efekta, zgodno je tu elektrodu priključiti na negativni, a suprotnu na pozitivni potencijal. To naime pogoduje skupljanju što većeg broja izbijenih elektrona na kolektorskoj elektrodi i tako omogućava ampermetru (A) detekciju struje i kod vrlo slabih intenziteta elektromagnetskog zračenja. (Naravno, valja primijeniti samo slabe potencijale, za koje nema nikakve sumnje da bi mogli nekako - na pr. hladnom emisijom - utjecati na sâm proces nastanka foto-efekta i izazvati spuriozno pojačanje fotoelektrične struje.)

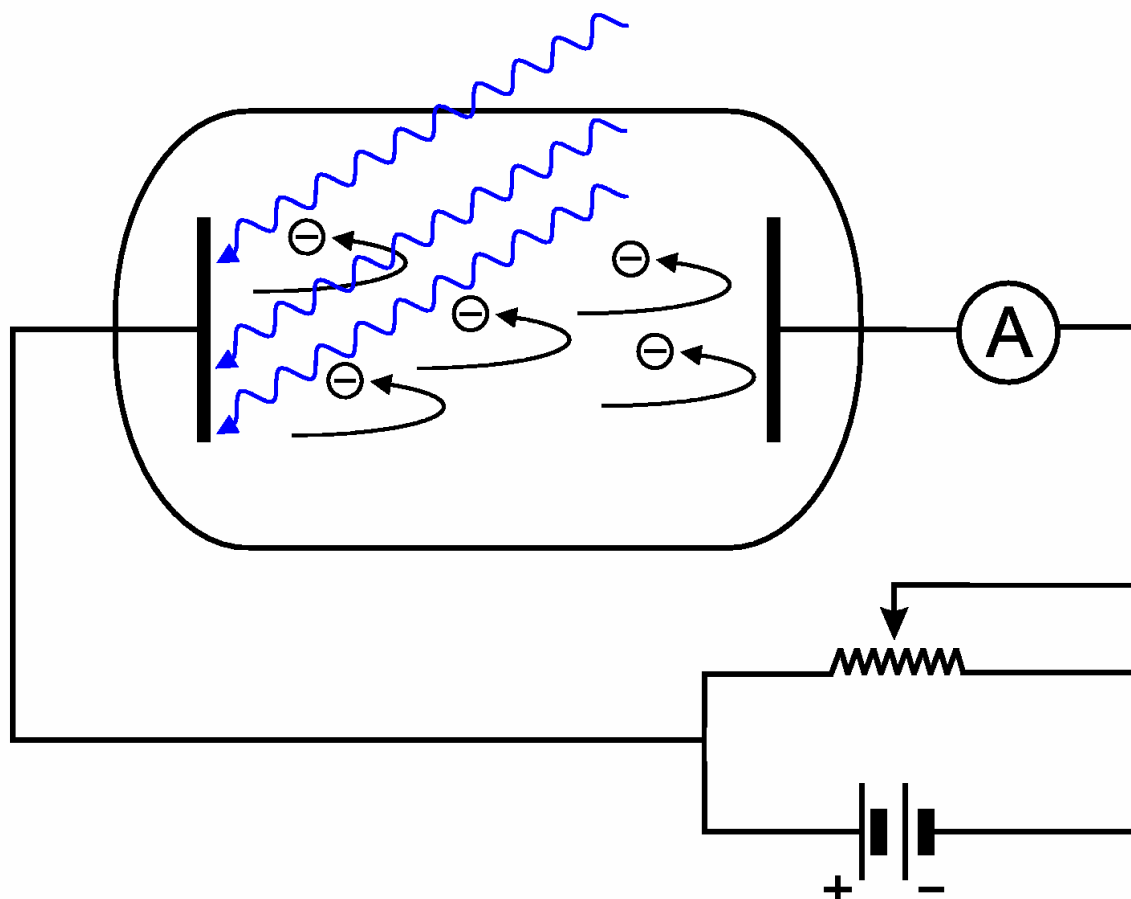
Kao što ćemo vidjeti u idućoj sekciji, Millikan je usput našao novu metodu mjerenja Planckove konstante do na 0.5 % točnosti, te na koncu 1916. godine morao zaključiti da njegovi eksperimenti nipošto ne ruše, nego naprotiv, nepobitno dokazuju



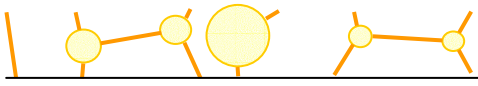
Einsteinovo objašnjenje foto-efekta. Za njega je Einstein dobio Nobelovu nagradu 1921. godine. Sâ m Millikan se međutim sigurno utješio kad je i on (1923. godine) također dobio Nobelovu nagradu za svoje precizne eksperimente s foto-efektom.

Einsteinovo objašnjenje foto-efekta

Sâ mo postojanje foto-efekta nije iznenađujuće sa stanovišta klasične elektromagnetske teorije, jer se znalo da materija sadrži elektrone, i da se baš unutar metala relativno «slobodno» kreće jako mnogo elektrona jer to metalima i daje visoku električnu vodljivost. Uostalom, i proučavanje termoemisivnosti elektrona iz vrućih metala pokazuje da pojedini elektron može napustiti metal ako mu se zagrijavanjem dade neka minimalna energija, tzv. *izlazni rad*. Onda je jasno da se u principu i apsorpcijom elektromagnetskog zračenja elektroni mogu tako ubrzati da pobjegnu iz potencijala koji ih inače sprečava da napuste komade metala. Ipak, valna teorija svjetlosti, kao ni klasična fizika općenito, nikako ne može objasniti foto-efekt. Naime, ako razmotrimo četiri bitne *kvantitativne* empirijske činjenice u donjem tekstu, istaknute debelim tiskom kao I – IV, postaje jasno da druga i treća zahtijevaju Planckovu kvantnu hipotezu, te da se čak i ona mora proširiti i radikalizirati zbog četvrte točke.



Slika 3-4: Mjerenje frekventne ovisnosti maksimalne energije $\mathcal{E}_{\max}$ koju postižu foto-elektroni lako se postiže malom modifikacijom eksperimentalnog postava s prethodne slike. Upotrijebimo svjetlo relativnog velikog intenziteta koje izbija vrlo mnogo foto-elektrona. Tada ih dovoljno pristigne na kolektorsku elektrodu tako da ampermetar može registrirati fotoelektričnu struju čak i onda kad polaritet izvora napona obrnemo tako da kolektorska elektroda postane odbojna. Zatim potencijetrom postepeno



povećavamo taj odbojni napon V_{stop} tako da je elektronima sve teže stići na kolektorsku elektrodu, pa ampermetar registrira sve slabiju fotoelektričnu struju. Kad ona padne na nulu, znači da je V_{stop} tako velik da je zaustavio i odbio čak i one elektrone koji su foto-efektom primili najveću moguću energiju $\mathcal{E}_{max}$, te da smo je izmjerili jer $\mathcal{E}_{max} = eV_{stop}$. Rezultati takvih mjerenja za razne frekvencije ν dani su na Slici 3-5.

I. Kad postoji fotoelektrični efekt, to jest kad se može opaziti struja izbijenih elektrona, ona je proporcionalna intenzitetu izvora svjetlosti, dakle kvadratu amplitude elektromagnetskog polja koje izbija elektrone iz tijela. - Ova činjenica je shvatljiva i očekivana i sa stanovišta klasične fizike, jer je energija koju nosi elektromagnetski val proporcionalna njegovom intenzitetu, t.j. kvadratu njegove amplitude E . Jednostavno zbog sačuvanja energije, tome mora biti proporcionalan i broj elektrona izbijenih u jedinici vremena.

II. Da li foto-efekta uopće ima, t.j. da li se iz pojedinog metala izbijaju elektroni ili ne, ovisi samo o frekvenciji svjetlosti koja ga obasjava. Za svaki metal postoji za njega karakteristična *frekvencija praga* ν_{prag} , i **samo elektromagnetsko zračenje frekvencije ν veće od ν_{prag} može izbiti elektrone iz tog metala.** - Dakle, ako previše smanjimo frekvenciju, nestat će foto-efekta bez obzira koliko je velik intenzitet ($\sim E^2$) zračenja. S druge strane, bez obzira koliko mi taj intenzitet smanjili, za $\nu > \nu_{prag}$ registrirat ćemo izbijene elektrone, jedino što njihov broj (t.j. fotoelektrična struja) pada s intenzitetom u skladu s točkom I. Ovakva «sve ili ništa» zavisnost o frekvenciji praga je vrlo čudna sa stanovišta klasične elektromagnetske teorije, gdje energija elektromagnetskog vala ovisi jedino o njegovom intenzitetu, a nikako o njegovoj frekvenciji. Iz istog razloga, još je misteriozniji i treći skup činjenica:

III. Energija izbijenih elektrona je neovisna o intenzitetu svjetlosti koja izaziva foto-efekt, ali ovisi o frekvenciji. Eksperiment prikazan na Slici 3-4 daje osobito jasnu frekventnu ovisnost *maksimalne* kinetičke energije ($\mathcal{E}_{max}$) izbijenih fotoelektrona - vidi Sliku 3-5. S nje je očito da $\mathcal{E}_{max}$ **o frekvenciji ovisi linearno**:

$$\mathcal{E}_{max} = h\nu - \Phi. \quad (1)$$

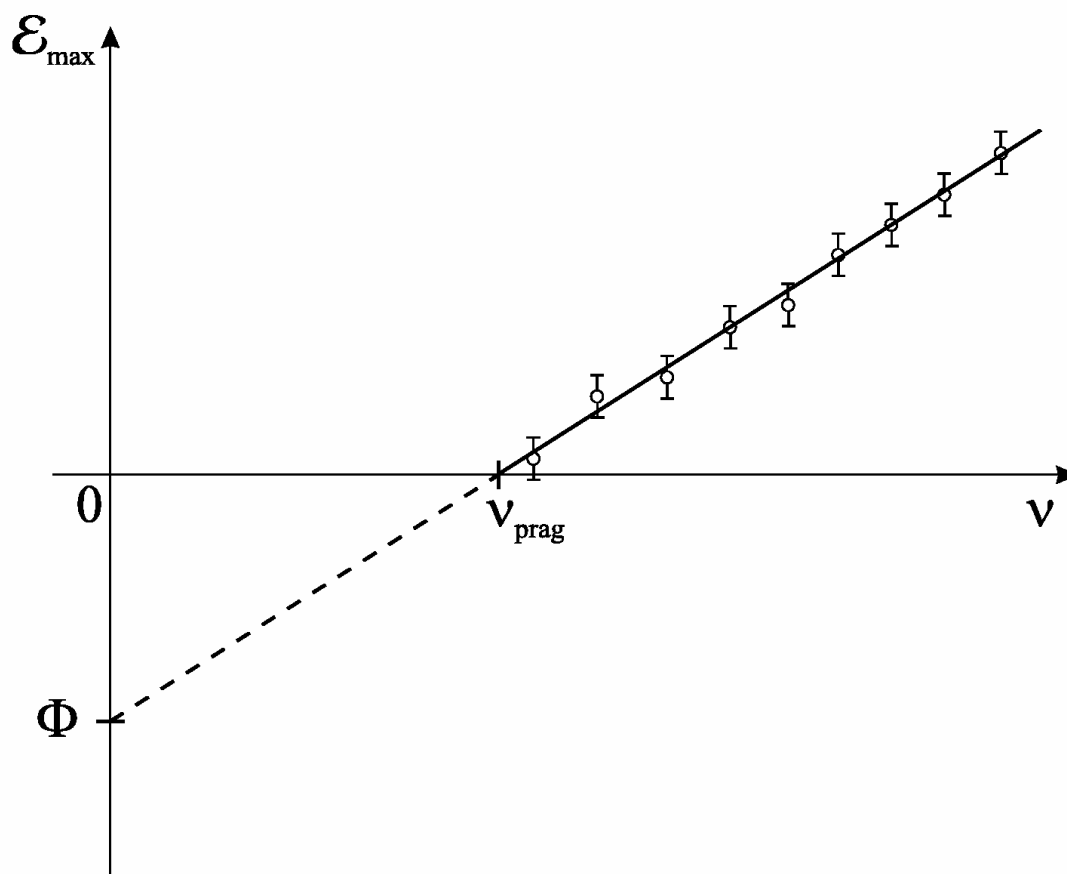
Precizna mjerenja $\mathcal{E}_{max}$ (na pr. Millikan, 1916) pokazuju da je koeficijent smjera dat Planckovom konstantom h . Simbol Φ označava izlazni rad. On je različit za svaki pojedini metal, a s frekvencijom praga povezan je Planckovom konstantom:

$$\Phi = h\nu_{prag}. \quad (2)$$

Frekventne ovisnosti **II** i **III**, a osobito precizna frekventna ovisnost (1) nikako se ne mogu objasniti klasično, dakle bez Planckove hipoteza o apsorpciji energije u diskretnim porcijama - kvantima $h\nu$. Einstein je uočio da je s njom, naprotiv, objašnjenje vrlo lagano, elegantno i prirodno. Od elektromagnetskog zračenja frekvencije ν , elektron vezan u metalu prima kvant energije $h\nu$ - vidi Sliku 3-6. Oni



elektroni koji u tom metalu imaju najvišu energiju E_M , moraju od novodobivene energije $h\nu$ potrošiti samo energiju Φ da pobjegnu iz potencijala koji ih veže u metalu. To su upravo oni fotoelektroni koji pri datoj frekvenciji ν imaju maksimalnu² kinetičku energiju $\mathcal{E}_{max}$, i evo nam formule (1). S druge strane, ako je frekvencija elektromagnetskog zračenja $\nu < \nu_{prag}$, apsorbirani kvant energije $h\nu < \Phi$ i elektron nije dobio dovoljno energije³ da se odvoji od metala, pa ne dolazi do foto-efekta.

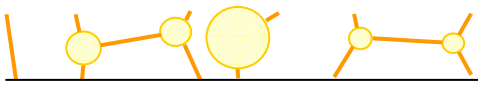


Slika 3-5: Eksperimentalne točke pokazuju da je ovisnost maksimalne energije foto-elektrona o frekvenciji elektromagnetskog zračenja data formulom (1).

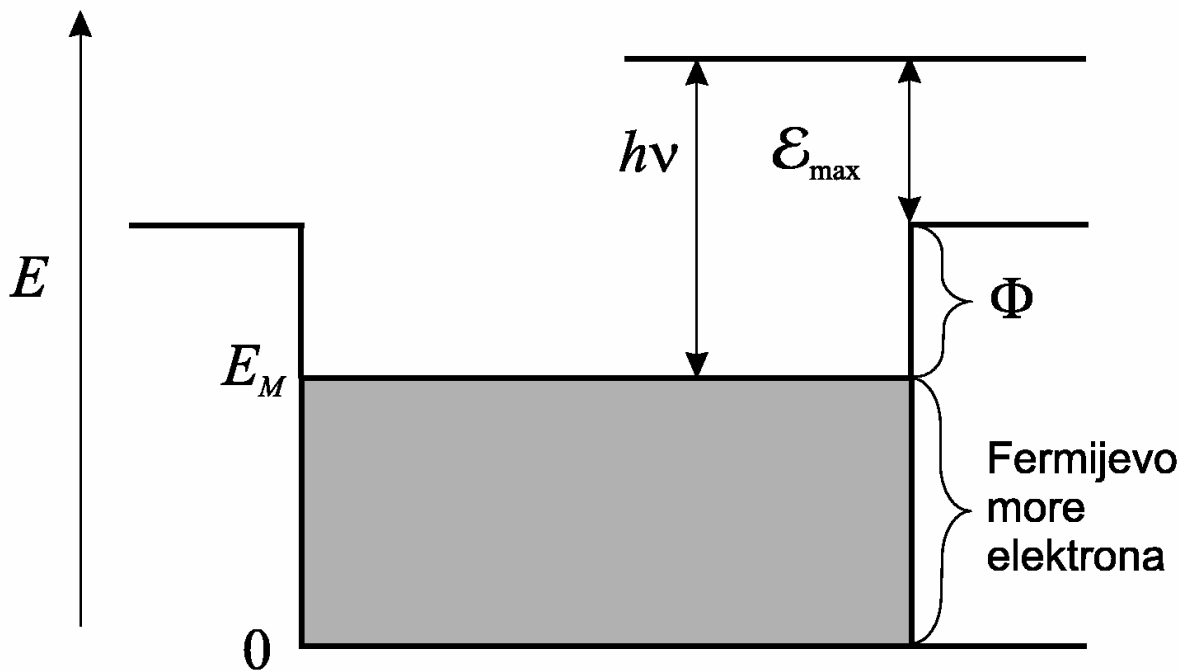
Dakle, kvantna hipoteza je uspješna i ovdje. Zamijetite da dosad nije bilo potrebno pretpostaviti ništa više nego kod Planckovog objašnjenja zračenja crnog tijela, t.j. da se energija može emitirati i apsorbirati samo u diskretnim porcijama, kvantima

² Naravno, iz razmatranja otpadaju oni elektroni koji su dio apsorbirane energije prije izlaska iz metala opet izgubili, na pr. u nekom sudaru, jer takvi ne mogu postići maksimalnu energiju $\mathcal{E}_{max}$.

³ Doduše, dovoljno energije da nadmaši Φ iako $\nu < \nu_{prag}$, elektron može dobiti tzv. multi-fotonskom apsorpcijom. To je slučaj kada elektron apsorbira dva ili više fotona simultano, ili u tako brzom slijedu (unutar $\sim 10^{-15}$ s) da ne stigne pasti iz pobuđenog stanja prije nove apsorpcije. Međutim, zbog vrlo male vjerojatnosti takve višestruke apsorpcije, za nju je potrebna goleme gustoća fotona. Zato se ona može realizirati tek uz upotrebu posebnih lasera veoma visokog intenziteta, a ne kod običnog foto-efekta, pa tu mogućnost ovdje ne razmatramo.

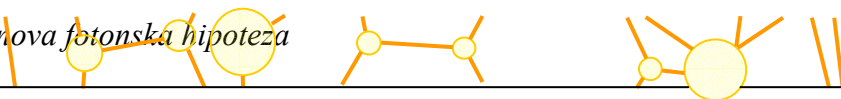


$h\nu$. Primjerice, dovoljna je pretpostavka da elektron može iz elektromagnetskog polja apsorbirati energiju samo u porcijama $h\nu$. Dovoljna je i, također planckovska, pretpostavka o *kvantizaciji energija oscilacija*. Ako je kvantizirana energija harmonički oscilirajućih naboja u izvoru elektromagnetskog zračenja, onda i od njih stvoreno elektromagnetsko polje na frekvenciji ν ima energiju $Nh\nu$ gdje je N cijeli broj. Zato je, posljedično, i ta energija kvantizirana. Ali, nigdje se nije pretpostavilo da je i *sâmo elektromagnetsko polje kvantizirano*.



Slika 3-6: Tzv. Sommerfeldov model raspodjele elektronskih energija u metalu koji objašnjava ovisnost $\mathcal{E}_{\max} = h\nu - \Phi$ (1) i $\Phi = h\nu_{\text{prag}}$ (2). Njegov shematski karakter ne utječe na općenitu valjanost rezultata (1) i (2), jer nisu važni nikakvi detalji nego samo činjenica da je najviša energija elektronâ u metalu, E_M , za izlazni rad Φ manja od potencijalne energije elektrona koji se upravo oslobodio iz potencijalne jame koja ga je vezala u metalu. (Vrijednost najviše elektronske energije E_M na apsolutnoj nuli temperature naziva se Fermijeva energija, E_F , tog metala.)

Međutim, u svom slavnom objašnjenju foto-efekta 1905. godine, Einstein je upravo tom pretpostavkom otišao i dalje od Planckove hipoteze o kvantima energije. Elektromagnetsko polje nije više zamišljao kao klasičan, kontinuiran val, već da je ono na neki način «zrnato» na mikroskopskom nivou. Naime, postulirao je da se elektromagnetsko zračenje frekvencije ν sastoji od diskretnih kvanata, fotona, od kojih svaki pojedini nosi energiju $h\nu$. Dakle, *kvantno* elektromagnetsko polje bi se sastojalo od tih elementarnih pobuđenja, «česticâ svjetla». Tek u fizikalnim procesima u kojima istovremeno sudjeluje ogroman broj fotona, elektromagnetsko polje možemo opisati kao klasično valno polje Maxwelllove elektromagnetske teorije. Doduše, tu spadaju gotovo sve elektromagnetske pojave koje možemo zapaziti u našem makroskopskom svijetu, uz rijetke iznimke kao što je foto-efekt, pa je teorija zasnovana na klasičnim Maxwellovim jednažbama ipak spektakularno uspješna. Tu valja istaći i brojne



uspjeha tzv. *poluklasičnog* pristupa kvantnim pojavama, u kojem se za elektromagnetsko zračenje upotrebljavaju klasična polja, a kvantni aspekti su drugdje, kao na pr. u tretmanu elektrona i druge «materije» i u njihovim diskretnim, kvantiziranim energijama. Na primjer, u kvantnomehaničkom opisu atoma i molekula dovoljno je već i klasično Coulombovo polje da se vrlo točno opiše interakciju između elektrona i jezgara. Obično se ne mora uzimati u obzir da ono zapravo potječe od emisije i apsorpcije fotona⁴ na električnim nabojima.

Zapravo, gore smo vidjeli da se i činjenice **I**, **II**, **III** o foto-efektu također mogu shvatiti kroz planckovsku hipotezu o apsorpciji diskretnih energetske kvanta ali uz klasično elektromagnetsko polje, dakle bez Einsteinovog fotonskog koncepta. Međutim, njega čini potpuno neizbježnim to što kod foto-efekta imamo i ovu empiričku činjenicu:

IV. Nikad nema vremenskog zaostatka od trenutka kad svjetlost padne na metal do trenutka emisije foto-elektrona (odnosno, to vrijeme je vrlo kratko, reda veličine $\sim 10^{-9}$ sekundi ili manje).

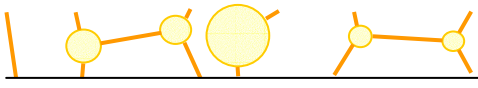
Ono što je dostatno da objasni **I**, **II** i **III**, naime Planckova kvantna hipoteza da elektroni apsorbiraju diskretne porcije energije $h\nu$ iz elektromagnetskog polja, zbog **IV** više nije dovoljno ako je elektromagnetsko polje klasično. Naime, količina energije koju na metal donosi klasično elektromagnetsko zračenje snopom presjeka površine A u vremenu τ , iznosi $c\epsilon_0\langle E^2\rangle A\tau$, gdje $\langle E^2\rangle$ znači srednju vrijednost kvadrata električnog polja E . Zato bi za vrlo slab intenzitet svjetla, dakle vrlo maleni E^2 , bilo potrebno razmjerno dugo vrijeme

$$\tau > \frac{\Phi}{c\epsilon_0\langle E^2\rangle A} \quad (3)$$

da se apsorbira energija $h\nu$ potrebna da nadmaši izlazni rad Φ i da emisija foto-elektrona započne. Ali, to se nikad ne nalazi eksperimentalno, nego uvijek činjenica **IV**, bez obzira koliko se oslabi polje E . Dakle, ako u ovoj situaciji inzistiramo na klasičnom elektromagnetskom polju, foto-efekt bi značio nesačuvanje energije. S druge strane, fotonska teorija, t.j. koncept kvantnog elektromagnetskog polja, nema tu nikakvih problema jer implicira da do foto-efekta dolazi tako da se apsorpcija energije na elektronu događa *odjednom*, u trenutku interakcije elektrona i «zrnca svjetlosti» - fotona. Kvadrat amplitude polja, koji je u klasičnoj teoriji polja proporcionalan gustoći energije zračenja, u kvantnoj je teoriji polja proporcionalan i prosječnom broju fotona po jedinici volumena, pa očito ni u njoj nema problema s objašnjenjem činjenice **I**.

Ne čudi da je Plancku i mnogim drugima koji su prihvaćali kvante energije, bilo vrlo teško prihvatiti Einsteinove kvante elektromagnetskog polja, fotone. Mnogo je

⁴ Emisija i apsorpcija fotona, dakle efekti kvantne teorije elektromagnetskih polja, moraju se u atomskoj fizici uzeti u obzir tek kad se zahtijevaju tako velike točnosti teorijskog opisa da bi se mogli objasniti izvanredno fini efekti kao što je tzv. Lambov pomak.



lakše bilo povjerovati da su kvantizirane oscilacije «materije» (na pr. naboja u materijalu predmeta koji su emitirali elektromagnetsko zračenje) nego da je kvantizirano samo elektromagnetsko polje. Bilo je tako jer se o atomima znalo toliko malo da je bilo prostora da im se pripišu najneobičnija svojstva kako bi se objasnile fizikalne pojave. Nasuprot tome, elektromagnetsko zračenje se činilo savršeno opisano klasičnim Maxwellovim jednadžbama pa tu naizgled nije bilo prostora za ikakve promjene ili dopune. Fotonska teorija je zato postala općeprihvaćena tek nakon što je dobila odlučnu potvrdu kroz Comptonov efekt, ali je onda postala začetak daljnjeg razvoja kvantne teorije u smjeru **kvantne teorije polja**. Po njoj su sve elementarne kvantne čestice («mikro-čestice») zapravo diskretna pobuđenja odgovarajućeg kvantiziranog polja, po analogiji s fotonima, «česticama svjetlosti» elektromagnetskog polja.

Autor zahvaljuje dipl. ing. Davoru Horvatiću za pomoć kod crtanja slika.

Zadaci s foto-efektom

- 1.) Kolika je $\mathcal{E}_{max}$ elektrona koje iz cinka izbija ultraljubičasto zračenje valne duljine 240 nm? Izlazni rad cinka je 3.6 eV. Da li i vidljivo svjetlo može proizvesti foto-efekt na cinku?
- 2.) Kolika može biti energija foto-elektrona koju iz površine komada volframa izbija ultraljubičasto svjetlo valne duljine 200 nm? Valna duljina fotoelektričnog praga volframa je 230 nm. Da li i vidljivo svjetlo može proizvesti foto-efekt na volframu?
- 3.) Koliki je izlazni rad cezija ako se foto-elektroni izbijeni iz njega ultraljubičastim svjetlom valne duljine 200 nm, zaustavljaju potencijalom $V_{stop}=4.21$ V? Da li i vidljivo svjetlo može proizvesti foto-efekt na ceziju?

3. Fotoelektrični efekt i Einsteinova fotonska hipoteza

