

# Fotoelektrični i Comptonov efekt

---

**Prpić, Katarina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:931074>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-17**



image not found or type unknown *Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Katarina Prpić**

**Fotoelektrični i Comptonov efekt**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij  
Urbano inženjerstvo**

**Katarina Prpić  
JMBAG: 0114026401**

**Fotoelektrični i Comptonov efekt**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2023.**

## IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

Katarina Prpić

U Rijeci, 17.09.2023.



## **SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu biti će detaljno istraženi ključni aspekti fotoelektričnog efekta i Comptonovog efekta, dva važna fenomena u području fizike, te njihove značajne primjene u različitim industrijama i znanstvenim poljima. Rad počinje uvodom koji kontekstualizira ova dva pojma i najavljuje glavne teme obrađene u radu. U središtu istraživanja je fotoelektrični efekt, čiji se mehanizam emisije elektrona analizira detaljno, uključujući eksperimentalne rezultate. Rad također istražuje različite interpretacije ovog fenomena, uključujući klasičnu i kvantnu teoriju, s posebnim naglaskom na Einsteinov doprinos i kvantizaciju polja elektromagnetskog zračenja. Nadalje, rad istražuje širok spektar primjena fotoelektričnog efekta, uključujući fotomultiplikatore, senzore slike, fotoelektronsku spektroskopiju, uređaje za noćno gledanje, svemirske letjelice i solarne ćelije, ilustrirajući tako važnost ovog fenomena u tehnološkom razvoju. Povijest fotoelektričnog efekta također je temeljito istražena, prateći njegov razvoj tijekom 19. i 20. stoljeća, čime se ističe njegova važna uloga u napretku moderne fizike. Comptonov efekt je drugi ključni fenomen obrađen u radu, u kojem se analizira teorijsko objašnjenje ovog efekta te njegova suvremena primjena u fizici. Također se istražuje kako se fotoelektrični efekt i Comptonov efekt koriste u građevinarstvu, posebno se fokusirajući na betonske artefakte, infra-crvenu termografiju te njihovu ulogu u procjeni vodovoda, stanju betona, testiranju napetosti armature i identifikaciji šupljina u betonu. Zaključak sažima ključne zaključke iz ovih istraživanja, ističući važnost fotoelektričnog i Comptonovog efekta u raznim primjenama, te doprinos ovog rada boljem razumijevanju i primjeni tih fenomena u znanstvenim i industrijskim kontekstima, posebice u građevinarstvu.

**KLJUČNE RIJEČI** : fotoelektrični efekt, comptonov efekt, fotoni, emisija elektrona, raspršenje, Einsteinova teorija, kvantna interpretacija

## **ABSTRACT**

In this thesis, the key aspects of the photoelectric effect and the Compton effect, two important phenomena in the field of physics, and their significant applications in various industries and scientific fields will be investigated in detail. The paper begins with an introduction that contextualizes these two terms and announces the main topics covered in the paper. At the center of the research is the photoelectric effect, whose mechanism of electron emission is analyzed in detail, including experimental results. The paper also explores different interpretations of this phenomenon, including classical and quantum theory, with special emphasis on Einstein's contribution and the quantization of the electromagnetic radiation field. Furthermore, the paper explores a wide range of applications of the photoelectric effect, including photomultipliers, image sensors, photoelectronic spectroscopy, night vision devices, spacecraft and solar cells, thus illustrating the importance of this phenomenon in technological development. The history of the photoelectric effect is also thoroughly explored, following its development during the 19th and 20th centuries, highlighting its important role in the progress of modern physics. The Compton effect is another key phenomenon dealt with in the paper, which analyzes the theoretical explanation of this effect and its contemporary application in physics. It also explores how the photoelectric effect and the Compton effect are used in construction, with a particular focus on concrete artifacts, infrared thermography and their role in plumbing assessment, concrete condition, rebar tension testing and concrete void identification. The conclusion summarizes the key findings from these research, emphasizing the importance of the photoelectric and Compton effect in various applications, and the contribution of this work to a better understanding and application of these phenomena in scientific and industrial contexts, especially in construction.

**KEY WORDS:** photoelectric effect, Compton effect, photons, electron emission, scattering, Einstein's theory, quantum interpretatio

## SADRŽAJ

Popis tabica .....	I
Popis slika .....	II
1 UVOD .....	1
2 FOTOELEKTRIČNI EFEKT .....	3
2.1 Mehanizam emisije .....	5
2.1.1 Eksperimentalno promatranje fotoelektričog učinka.....	6
2.1.2 Fotoemisija elektrona iz atoma, molekula i krutih tvari.....	8
2.2 Eksperimentalni rezultati fotoelektričnog efekta .....	10
2.3 Klasična interpretacija .....	14
2.4 Einsteinova teorija .....	15
2.5 Kvantna interpretacija.....	16
2.6 Kvantizacija polja elektromagnetskog zračenja .....	18
3 UPOTREBA I UČINCI FOTOELEKTRIČNOG EFEKTA .....	19
3.1 Fotomultiplikatori .....	20
3.2 Senzori slike .....	20
3.3 Fotoelektronska spektroskopija .....	22
3.4 Uređaji za noćno gledanje .....	23
3.5 Svemirske letjelice i mjesečeva prašina .....	24
3.6 Solarne ćelije.....	24
4 POVIJEST FOTOELEKTRIČNOG EFEKTA .....	26
4.1 19.stoljeće .....	26
4.2 20.stoljeće .....	28
5 COMPTONOV EFEKT .....	31
5.1 Teorijsko objašnjenje Comptonovog efekta .....	31
5.2 Comptonov efekt u modernoj fizici.....	34



6	PRIMJENA COMPTONOVOG EFEKTA.....	39
6.1	Magnetsko Comptonovo raspršenje .....	39
6.2	Inverzno Comptonovo raspršenje.....	40
6.3	Nelinearno inverzno Comptonovo raspršenje.....	41
7	FOTOELEKTRIČNI I COMPTONOV UČINAK U GRAĐEVINARSTVU.....	43
7.1	Fotoelektrični učinak na betonske artefakte proizvedene dodatkom luminiscentnih tvari i ostalih polimera.....	45
7.2	Infracrvena termografija u građevinarstvu .....	47
7.2.1	Određivanje prodiranja vlage .....	48
7.2.2	Procjena vodovoda .....	49
7.2.3	Određivanje svježeg i očvrslog stadija betona .....	49
7.2.4	Precizan test napetosti armature .....	51
7.2.5	Određivanje i lociranje šupljina u betonu .....	51
8	ZAKLJUČAK.....	52
9	LITERATURA .....	54

## Popis tablica

Tablica 1 Vrijednosti izlaznog rada nekih elemenata [1] .....	5
Tablica 2 Rezultati Comptonovog raspršenja[1] .....	35
Tablica 3 Koeficijenti emisije građevinskih materijala [Autor].....	48

## Popis slika

Slika 1 Emisija elektrona s metalne ploče uzrokovana svjetlosnim kvantima – fotonima[16].....	3
Slika 2 Shema pokusa za demonstraciju fotoelektričnog efekta.[10].....	7
Slika 3: Shematski prikaz fotoelektričnog efekta[1] .....	10
Slika 4 Fotoelektrična struja $I$ prikazana je kao funkcija napona $V$ primijenjenog između emitera i kolektora za danu frekvenciju $f$ svjetlosti za tri različita intenziteta svjetlosti.[1].....	11
Slika 5: Fotoelektrična struja $I$ prikazana je kao funkcija primijenjenog napona za tri različite frekvencije svjetlosti.[1] .....	12
Slika 6: Potencijalna energija usporavanja $eV_0$ (maksimalna kinetička energija elektrona) ucrtana je u ovisnosti o frekvenciji svjetlosti za tri emitirana materijala.[1].....	13
Slika 7: Fotoelektrična struja $I$ je linearna funkcija intenziteta svjetlosti za konstante $f$ i $V$ . [1] .....	13
Slika 8 Milikanovi podaci o fotoelektričnom učinku[1].....	17
Slika 9 Fotomultiplikatorska cijev[23].....	19
Slika 10 fotoelektrične ćelije – otvarač za vrata[10].....	19
Slika 11 Solarna ploča[20] .....	19
Slika 12 Fotomultiplikator[10] .....	20
Slika 13 Farnsworthov disektor slike[10] .....	21
Slika 14 Eksperiment kutno razlučne fotoemisijske spektroskopije (ARPES). Žarulja s izbojem helija obasjava ultraljubičasto svjetlo na uzorak u ultra visokom vakuumu. Hemisferični analizator elektrona mjeri distribuciju izbačenih elektrona s obzirom na energiju i moment.[10] .....	22
Slika 15 Uređaj za noćno gledanje[8] .....	23
Slika 16 Konvencionalna solarna ćelija od kristalnog silicija (od 2005.). Električni kontakti napravljeni od sabirnica (veće trake srebrne boje) i prstiju (onih manjih) otisnuti su na silikonsku pločicu.[24].....	25
Slika 17 Elektroskop sa zlatnim listićima za demonstraciju fotoelektričnog efekta.[10].....	27
Slika 18 Comptonov efekt[22].....	31

Slika 19 Shematski dijagram Comptonovog pokusa[16] .....	32
Slika 20 Foton valne duljine $\lambda$ dolazi s lijeva, sudara se s metom u mirovanju, a novi foton valne duljine $\lambda'$ izlazi pod kutom $\theta$ . Cilj se trza, odnoseći količinu upadne energije koja ovisi o kutu.[16] .....	33
Slika 21 Comptonovo raspršenje fotona na elektronu koji uglavnom miruje.[1] ....	34
Slika 22 Comptonovi izvorni podaci[1].....	37
Slika 23 Vrući akrecijski disk crne rupe, koji pokazuje relativističke efekte nametnute svjetlosti kada se emitira u područjima podložnim ekstremnoj gravitaciji.[19] .....	40
Slika 24 Prva mjerenja toplinskog učinka Sunyaev–Zeldovich iz Atacama Large Milimeter Array s jednim od najmasivnijih poznatih klastera galaksija, RX J1347.5-1145.[21].....	41
Slika 25 Nelinearno inverzno Comptonovo raspršenje[18].....	42
Slika 26 Biciklistička staza napravljena od fotoluminiscentnog betona[11] .....	46
Slika 27 Termografija prodiranja vlage u nadstrešnicu.[15] .....	48
Slika 28 Prodor vlage ispod prozora zidane konstrukcije predstavljen tamnim trakama[15] .....	49
Slika 29 (a) Vizualna slika (b) Toplinska slika[15] .....	49
Slika 30 Toplinska slika bubnja kamiona za gotovu mješavinu betona[15].....	50
Slika 31 Toplinska slika betona koji teče kroz cijev[15].....	50
Slika 32 Toplinska slika deformirane šipke pod vlačnim testom[15] .....	51

# 1 UVOD

Proučavanje elektromagnetskih interakcija na atomskim i subatomskim razinama bilo je ključno u razvoju moderne fizike. Dva temeljna fenomena, električni efekt i Comptonov efekt, stoje kao kamen temeljac u našem razumijevanju ponašanja čestica pod utjecajem elektromagnetskih polja. Ovi učinci, otkriveni početkom 20. stoljeća, revolucionirali su konceptualni okvir kvantne mehanike i postavili temelje za niz tehnoloških primjena.

Fotolektrični efekt, koji je prvobitno uočio Heinrich Hertz u kasnom 19. stoljeću, iznio je na vidjelo zbujujući fenomen: izbacivanje elektrona s površine materijala kada je podvrgnut elektromagnetskom zračenju. Ovaj fenomen, koji je dalje razjasnio Albert Einstein 1905. godine, iz temelja je promijenio klasično shvaćanje interakcije svjetla i materije. Objašnjenje koje je postavio Einstein, sadržano u njegovoj revolucionarnoj jednadžbi pokazalo je da bi svjetlost mogla pokazivati dvojno ponašanje čestičnog vala.

Comptonov efekt, koji je otkrio Arthur H. Compton 1923. godine, uveo je ključni koncept u području fizike čestica: kvantizaciju elektromagnetskog zračenja. Comptonovi revolucionarni eksperimenti, koji su uključivali raspršivanje X-zraka na elektronima u ciljnom materijalu, otkrili su empirijski odnos između upada i raspršenih fotona, pružajući nedvojbene dokaze čestične prirode elektromagnetskih valova. Ovo otkriće, sadržano u Comptonovoj formuli raspršenja, označilo je prijelomni trenutak u sintezi klasične i kvantne teorije zračenja.

Ovaj diplomski rad nastoji proniknuti u zamršenost električnih i Comptonovih učinaka, razjašnjavajući njihove teorijske temelje, eksperimentalne provjere i šire implikacije u područjima fizike i tehnologije. Ispitivanjem povijesnog konteksta u kojem su ovi fenomeni otkriveni i kasnijih teorijskih razvoja koji su uslijedili, ovaj rad ima za cilj pružiti sveobuhvatan pregled ovih temeljnih načela i njihovog trajnog značaja, kako u modernom znanstvenom krajoliku, tako i u samom području građevinarstva.

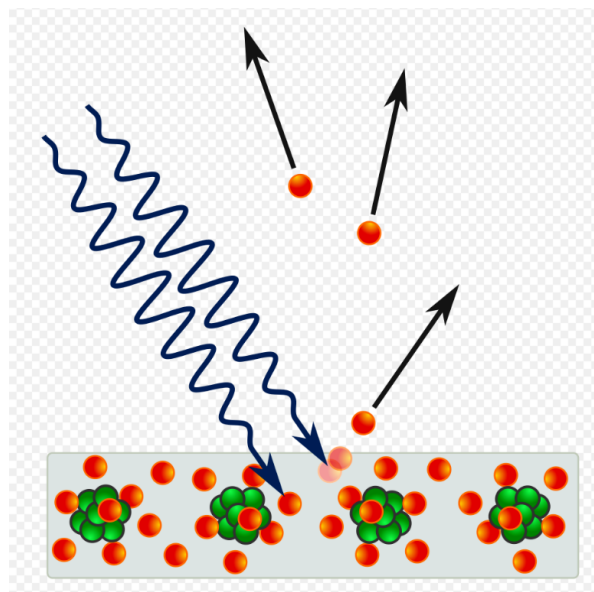
U sljedećim poglavljima krenut ćemo s detaljnim istraživanjem električnog učinka, izlažući njegov teorijski okvir, eksperimentalnu provjeru i praktične primjene. Nakon

toga, zadubit ćemo se u Comptonov efekt, razotkrivajući njegove empirijske temelje i ispitujući njegove implikacije za naše razumijevanje ponašanja fotona i elektrona. Dodatno, dotaknut ćemo se međudjelovanja ovih fenomena i njihovih doprinosa širem području kvantne mehanike.

## 2 FOTOELEKTRIČNI EFEKT

Fotoelektrični efekt je emisija elektrona kada elektromagnetsko zračenje, poput svjetlosti, pogodi materijal. Elektroni emitirani ovim načinom nazivaju se fotoelektroni. Ovaj fenomen proučava se u fizici kondenzirane tvari, čvrstom stanju i kvantnoj kemiji kako bi se izveli zaključci o svojstvima molekula, atoma i krutih tvari. Fotoelektrični učinak je pronašao primjenu u elektroničkim uređajima specijaliziranim za detekciju svjetlosti i precizno tempiranu emisiju elektrona.[1]

Eksperimentalni rezultati nisu u skladu s klasičnim elektromagnetizmom, koji predviđa da kontinuirani svjetlosni valovi prenose energiju na elektrone, nakon čega bi bili emitirani nakon što akumuliraju dovoljno energije. Promjena intenziteta svjetlosti u teoriji bi promijenila kinetičku energiju emitiranih elektrona, pri čemu bi dovoljno slabo svjetlo rezultiralo odgođenom emisijom. Umjesto toga, eksperimentalni rezultati pokazuju kako samo kada svjetlost prijeđe određenu frekvenciju, elektroni se istiskuju; bez obzira na trajanje izloženosti ili intenzitet svjetlosti. Budući da niskofrekventna zraka visokog intenziteta ne stvara energiju koja je potrebna za proizvodnju fotoelektrona (kao što bi bio bilo u slučaju da se energija svjetlosti akumulirala iz kontinuiranog vala tijekom vremena), Albert Einstein predložio je da zraka svjetlosti nije val koji se širi kroz svemir, nego roj diskretnih energetske paketa, poznatih kao fotoni - termin koji je skovao Gilbert N. Lewis 1926. godine.[10]



Slika 1 Emisija elektrona s metalne ploče uzrokovana svjetlosnim kvantima – fotonima[16]

Emisija vodljivih elektrona iz karakterističnih metala zahtijeva nekoliko elektron-voltnih (eV) svjetlosnih kvanta, što odgovara kratkovalnoj vidljivoj ili ultraljubičastoj svjetlosti. U posebnim slučajevima, emisije su inducirane s fotonima koji se približavaju nultoj energiji, kao u sustavima koji imaju negativni afinitet elektrona te emisiju iz pobuđenih stanja, ili nekoliko stotina keV fotona za jezgrene elektrone unutar elementa s visokog atomskog broja. Proučavanje fotoelektričnog efekta dovelo je do važnih zaključaka potrebnih za razumijevanje kvantne prirode svjetlosti i elektrona te je utjecalona formiranje koncepta dualnosti čestica-val. Neki od ostalih fenomena kod kojih svjetlost utječe na kretanje električnih naboja su: fotonaponski učinak, fotovodljivi učinak te fotoelektrokemijski učinak.

Možda najuvjerljiviji i svakako najjednostavniji dokaz za kvantizaciju energije zračenja dolazi iz jedinog prihvatljivog objašnjenja fotoelektričnog efekta. Dok je Heinrich Hertz 1887. izvodio svoj poznati eksperiment koji je potvrdio Maxwellovu teoriju elektromagnetskih valova svjetlosti, primijetio je da kada ultraljubičasto svjetlo padne na metalnu elektrodu, proizvodi se naboj koji razdvaja listove njegovog elektroskopa. Iako je Hertz prepoznao ovo otkriće onoga što će postati poznato kao fotoelektrični efekt, ono mu je u to vrijeme bilo od male koristi, pa je iskorištavanje efekta prepustio drugima, posebice Philippu Lenardu. Fotoelektrični efekt je jedan od nekoliko načina na koje materijali mogu emitirati elektrone. Do ranih 1900-ih bilo je poznato da su elektroni vezani za materiju. Valentni elektroni u metalima su "slobodni"—mogu se lako kretati od atoma do atoma, ali ne mogu napustiti površinu materijala. Sada poznate metode kojima se elektroni mogu natjerati da napuste materijal uključuju:

1. Termionska emisija: Primjena topline omogućuje elektronima da dobiju dovoljno energije da pobjegnu.
2. Sekundarna emisija: Elektron dobiva dovoljno energije prijenosom od čestice velike brzine koja udara u materijal izvana.
3. Emisija polja: Jako vanjsko električno polje izvlači elektron iz materijala.
4. Fotoelektrični učinak: Upadno svjetlo (elektromagnetsko zračenje) koje obasjava materijal prenosi energiju na elektrone, dopuštajući im da pobjegnu.



Nije iznenađujuće da elektromagnetsko zračenje stupa u interakciju s elektronima unutar metala i daje elektronima povećanu kinetičku energiju. Budući da su elektroni u metalima slabo vezani, očekuje se da svjetlost može elektronima dati dovoljno dodatne kinetičke energije da im omogući da pobjegnu. Izbačeni elektroni nazivaju se fotoelektronima.[10]

Minimalna dodatna kinetička energija koja omogućuje elektronima da pobjegnu iz materijala naziva se izlazni rad  $\Phi$ . Izlazni rad je minimalna energija vezanja elektrona na materijal. U tablici 1 su prikazane vrijednosti izlaznog rada za nekoliko elemenata.

Tablica 1 Vrijednosti izlaznog rada nekih elemenata [1]

Element	$\phi$ (eV)	Element	$\phi$ (eV)	Element	$\phi$ (eV)
Ag	4.64	K	2.29	Pd	5.22
Al	4.20	Li	2.93	Pt	5.64
C	5.0	Na	2.36	W	4.63
Cs	1.95	Nd	3.2	Zr	4.05
Cu	4.48	Ni	5.22		
Fe	4.67	Pb	4.25		

## 2.1 Mehanizam emisije

Fotoni svjetlosnog snopa imaju tipičnu energiju proporcionalnu frekvenciji svjetlosti. Ta karakteristična energija naziva se energija fotona. U procesu fotoemisije elektron će vjerojatno biti izbačen, kada unutar nekog materijala apsorbira energiju fotona i dobije više energije od svoje energije vezanja. Elektron ne može izaći iz materijala ukoliko je preniska energija fotona. Budući da povećanje intenziteta niskofrekventnog svjetla samo povećava broj niskoenergetskih fotona, ova promjena intenziteta ne stvara niti jedan foton koji ima dovoljno energije da bi izbacio elektron. Naime, energija emitiranih elektrona u tom slučaju ne ovisi o intenzitetu ulazne svjetlosti dane frekvencije, nego isključivo o energiji zasebnih fotona.

Slobodni elektroni imaju sposobnost apsorpcije bilo koje energije kada su ozračeni. Ukoliko nakon toga slijedi neposredna ponovna emisija, kao i kod Comptonovog učinka, sva energija iz jednog fotona apsorbira se u kvantnim sustavima ako je proces dopušten kvantnom mehanikom. Dio dobivene energije koristi se pri oslobađanju elektrona od njegovog atomskog vezanja, dok preostala dobivena energija pridonosi kinetičkoj energiji elektrona u funkciji slobodne čestice. Obzirom da u materijalu elektroni zauzimaju mnoga različita kvantna stanja s različitim energijama vezanja i obzirom da na svojem putu iz materijala mogu podnijeti gubitke energije, emitirani elektroni imaju niz kinetičkih energija. Najveću kinetičku energiju imaju elektroni iz najviše okupiranih stana. U metalima se ti elektroni emitiraju s Fermijeve razine.[5]

Kada se fotoelektron emitira u čvrsto tijelo umjesto u vakuum, to se često naziva unutarnja fotoemisija, a emisija u vakuum se razlikuje od vanjske fotoemisije.

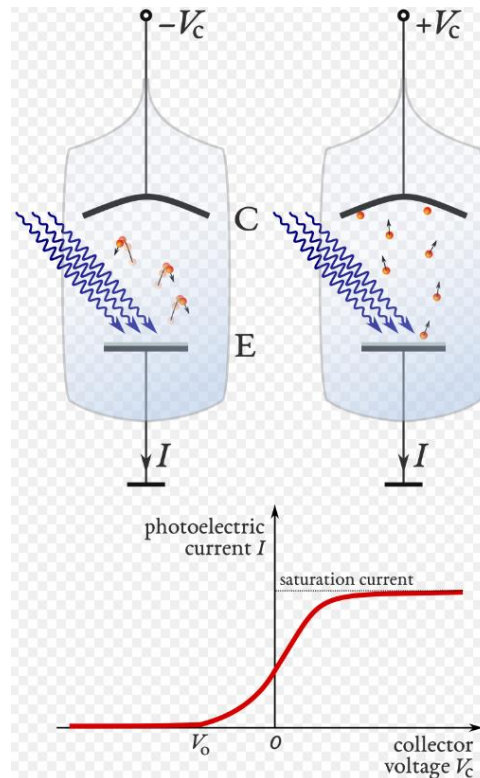
### *2.1.1 Eksperimentalno promatranje fotoelektričog učinka*

Premda se fotoemisija pojavljuje iz bilo kojeg materijala, najlakše ju je uočiti kod metala i ostalih vodiča. Razlog tome je što proces proizvodi neravnotežu naboja koja, ukoliko se protokom struje ne neutralizira, dovodi do povećanja potencijalne barijere sve dok emisija ne prestane u potpunosti. Energetska barijera fotoemisiji obično se povećava nevodljivim oksidnim slojevima na metalnim površinama, tako da se većinom za provođenje eksperimenata i funkcioniranje uređaja koji se temelje na fotoelektričnom učinku površine od metala unutar vakuumske cijevi. Vakuum također pomaže pri promatranju elektrona, obzirom da sprječava plinove u ometanju protoka elektrona između elektroda.

Budući da sunčeva svjetlost, radi atmosferske apsorpcije, ne daje mnogo ultraljubičastog svjetla, iz lučne svjetiljke ili pomoću spaljivanja magnezija nekada se dobivala svjetlost puna ultraljubičastih zraka. Trenutno prevladavaju žarulje sa živinom parom, UV žarulje s izbojem plemenitih plinova i izvori radiofrekvencijske plazme, ultraljubičasti laseri i izvori svjetlosti sa sinkrotronskim insercijskim uređajima.

Karakteristična postavka za promatranje fotoelektričnog efekta upodrazumijeva izvor svjetlosti, skup filtera za monokromatizaciju svjetlosti, vakuumsku cijev prozirnu za

ultraljubičasto svjetlo, emitirajuću elektrodu **E** izloženu svjetlu te kolektor **C** čiji je napon **VC** moguće kontrolirati izvana.



Slika 2 Shema pokusa za demonstraciju fotoelektričnog efekta.[10]

Filtrirana, monokromatska svjetlost određene valne duljine pogađa emitirajuću elektrodu **E** u vakuumskoj cijevi. Elektroda kolektora **C** je prednaponska na napon  $V_C$  koje moguće namjestiti da kada je pozitivan privlači emitirane elektrone, odnosno kada je negativan, da sprječava bilo koji od njih u dopiranju do kolektora (Slika 2).

Na kolektor se, fotoemitirani elektroni usmjeravaju korištenjem vanjskog pozitivnog napona. Ukoliko su intenzitet i frekvencija upadnog zračenja fiksni, porastom pozitivnog napona fotoelektrična struja  $I$  raste, zato što se usmjerava na elektrodu sve više elektrona. Kada se dodatni elektroni ne mogu prikupiti, fotoelektrična struja postiže zasićenje. Jedino povećanjem intenziteta svjetlosti, ova struja može rasti.

Što je veći negativni napon, to bolje sprječava sve elektrone osim onih s najvećom energijom da dođu do kolektora. Ukoliko struja nije opažena u cijevi, to znači da je negativni napon dosegnuo vrijednost dovoljno visoku da uspori i zaustavi najenergičnije fotoelektrone kinetičke energije  **$K_{max}$** . Ova vrijednost napona pri usporavanju naziva se zaustavni potencijal ili prekidni potencijal  **$V_0$** . Budući da je rad

potencijala usporavanja pri zaustavljanju elektrona naboja  $e$ ,  $eV_0$ , sljedeće mora vrijediti  $eV_0 = K_{max}$ .

Krivulja struja-napon je sigmoidna, međutim točan oblik krivulje ovisi o svojstvima materijala elektrode i eksperimentalnoj geometriji.

Za svaku metalnu površinu postoji već predodređena minimalna frekvencija upadnog zračenja. Ona se naziva frekvencija praga te se fotoelektroni se ispod te frekvencije ne emitiraju. Povećanjem frekvencije upadnog snopa svjetlosti također se povećava maksimalna kinetička energija svih emitiranih fotoelektrona, dok se zaustavni napon povećava. Može se također promijeniti i broj emitiranih elektrona budući da je funkcija energije elektrona osiguravanje mogućnosti da svaki foton rezultira emitiranim elektronom.

Povećanjem intenziteta jednake monokromatske svjetlosti (sve do trenutka kada intenzitet postaje previsok), proporcionalno broju fotona koji u nekom vremenu padaju na površinu, povećava se brzina izbacivanja elektrona, odnosno fotoelektrična struja  $I$ , međutim zaustavni napon ostaje isti kao i kinetička energija. Za frekvenciju upadnog zračenja i dani metal, brzina izbacivanja fotoelektrona izravno je proporcionalna intenzitetu upadnog svjetla.

Od pojave zračenja do emisije fotoelektrona vrlo je mali vremenski period, manji od  $10^{-9}$  sekundi. Kutna raspodjela fotoelektrona značajno je ovisna o polarizaciji upadne svjetlosti (odnosno smjeru električnog polja), kao i o kvantnim svojstvima materijala koji emitira kao što su, elektronska tračna struktura kristalnih krutina te molekularne i atomske orbitalne simetrije. U materijalima koji nemaju makroskopski red, distribucija elektrona teži vrhuncu u smjeru polarizacije linearno polarizirane svjetlosti. Kutno razlučna fotoemisijaska spektroskopija je eksperimentalna tehnika kojom se mogu izmjeriti te distribucije kako bi se zaključila svojstva materijala.[10]

### *2.1.2 Fotoemisija elektrona iz atoma, molekula i krutih tvari*

Elektroni koji su vezani u atomima, molekulama i čvrstim tijelima zauzimaju različita stanja dobro definiranih energija vezanja. Kada kvanti svjetlosti isporuče pojedinom elektronu količinu energije veću od energije vezanja, elektron tada može biti emitiran u slobodni prostor s viškom kinetičke energije  $h\nu$ , koja je veća od energije vezivanja

elektrona. Raspodjela kinetičke energije iz tog razloga odražava raspodjelu energije vezanja elektrona u kristalnom, molekularnom ili atomskom sustavu: elektron emitiran iz stanja s energijom vezanja  $E_B$  nalazi se na kinetičkoj energiji  $E_k = h\nu - E_B$ . Ova je raspodjela jedna od glavnih odlika kvantnog sustava te ju je moguće koristiti u daljnim istraživanjima na području kvantne kemije i kvantne fizike.

Elektronička svojstva uređenih, kristalnih krutih tijela određena su raspodjelom elektronskih stanja s obzirom na energiju i količinu gibanja - elektronska tračna struktura krutog tijela. Teorijski modeli fotoelektrične emisije iz krutih tijela pokazuju kako je ova raspodjela, najvećim dijelom, očuvana u fotoelektričnom učinku. Fenomenološki model za pobuđivanje ultraljubičastim i mekim X-zrakama učinak dijeli na slijedeća tri koraka:

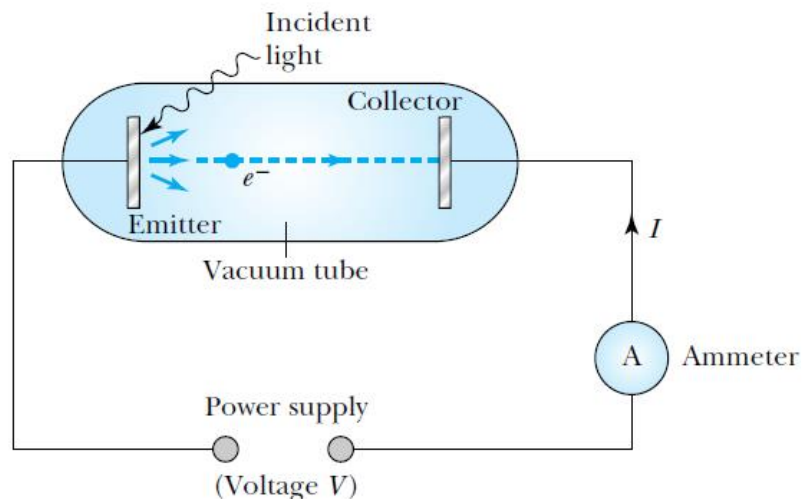
- Unutarnji fotoelektrični učinak u masi materijala izravan je optički prijelaz između zauzetog i nezauzetog elektronskog stanja. On podliježe kvantno-mehaničkim pravilima selekcije za dipolne prijelaze. Praznina koja ostaje iza elektrona može izazvati sekundarnu emisiju elektrona ili takozvani Augerov efekt, kojkojeg je moguće primjetiti čak i kada primarni fotoelektron nije napustio materijal. Unutar molekularnih čvrstih tijela, fotoni se pobuđuju u ovom koraku te se mogu vidjeti u konačnoj energiji elektrona kao satelitske linije.
- Širenje elektrona do površine gdje se dio elektrona može raspršiti radi interakcije sa ostalim sastojcima krutine. Veća je vjerojatnost da će elektroni nastali dublje u čvrstom tijelu pretrpjeti sudare i izaći s promijenjenim zamahom i energijom. Njihov srednji slobodni put je univerzalna krivulja koja ovisi o energiji elektrona.
- Elektron kroz površinsku barijeru bježi u stanje vakuuma jer je slično slobodnim elektronima. Kod ovog koraka elektron gubi energiju količine jednake kao rad površine, dok istovremeno dolazi do gubitka impulsa u smjeru okomitom na površinu. Obzirom da je energija vezanja elektrona u čvrstim tijelima izražena prikladno uzimajući u obzir najviše zauzeto stanje pri Fermijevoj energiji  $E_F$ , a razlika u energiji vakuuma, odnosno slobodnog prostora je rad površine, kinetička energija elektrona emitirana iz čvrstih tvari uglavnom se prikazuje kao :  $E_k = h\nu - W - E_B$

Ima slučajeva gdje ovaj model u tri koraka ne može objasniti osobitosti distribucije intenziteta fotoelektrona. Razrađeniji model u jednom koraku tretira fotoelektrični efekt kao koherentan proces fotopobude u konačnom stanju konačnog kristala za koji je

valna funkcija slična slobodnom elektronu kojise nalazi izvan kristala, ali unutar kristala ima opadajuću ovojnicu. [17]

## 2.2 Eksperimentalni rezultati fotoelektričnog efekta

Eksperimenti provedeni oko 1900. godine pokazali su da se fotoelektroni proizvode kada vidljivo i/ili ultraljubičasto svjetlo padne na čiste metalne površine. Fotoelektricitet je proučavan pomoću eksperimentalnog uređaja koji je shematski prikazan na slici 3. Prikupljaju se elektroni koji se emitiraju kada svjetlost obasja površinu i mjeri se fotostruja  $I$ . Negativan napon, u odnosu na emiter, može se primijeniti na kolektor. Kada je taj napon usporavanja dovoljno velik, emitirani elektroni se odbijaju, a struja u kolektor pada na nulu.[1]

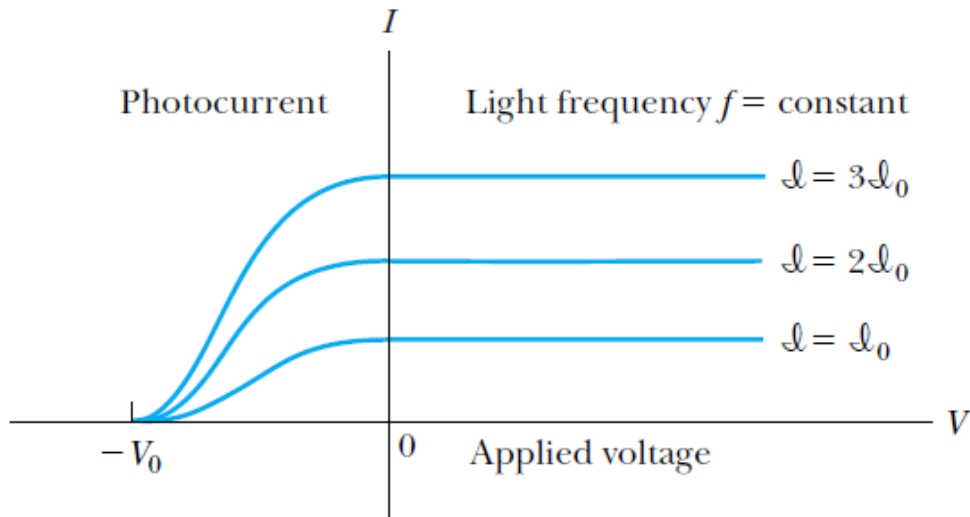


Slika 3: Shematski prikaz fotoelektričnog efekta[1]

Upadna svjetlost koja pada na emiter (koji se naziva i fotokatoda ili katoda) izbacuje elektrone. Neki od elektrona putuju prema kolektoru (također se naziva anoda), gdje je ili negativan (usporavanje) ili pozitivan (ubrzanje) primijenjeni napon  $V$  nametnut napajanjem. Struja koja se izmjeri u ampermetru (fotostruja) nastaje protokom fotoelektrona od emitera do kolektora.

Odgovarajuće eksperimentalne činjenice o fotoelektričnom učinku su sljedeće:

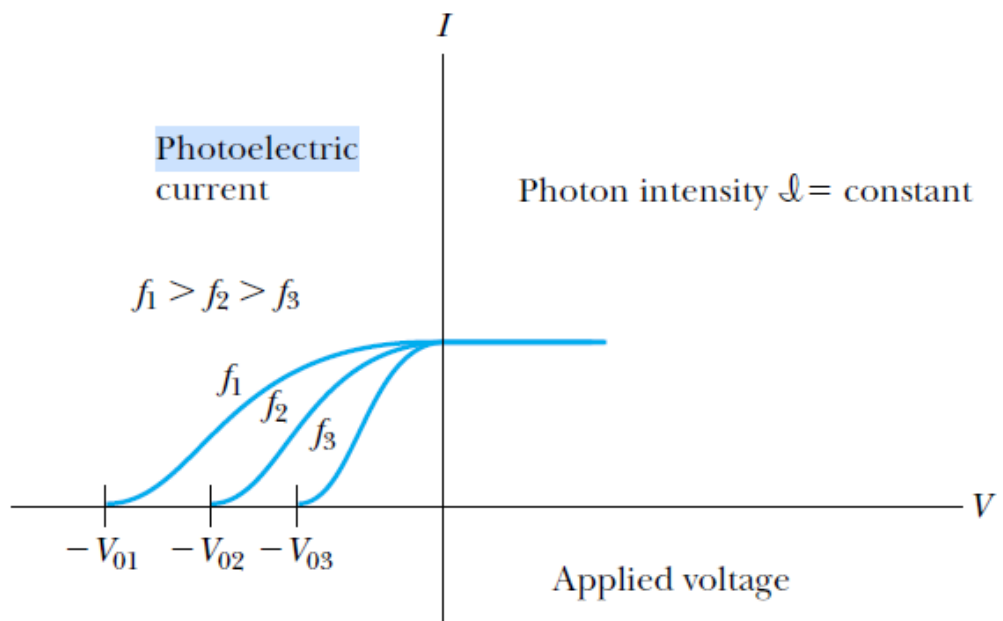
1) Kinetička energija fotoelektrona ne ovisi o intenzitetu svjetlosti. Drugim riječima, zaustavni potencijal (primijenjeni napon)  $-V_0$  je dovoljan da zaustavi sve fotoelektrone, bez obzira na intenzitet svjetlosti, kao što je prikazano na slici 4. Za određeni intenzitet svjetlosti postoji maksimalna fotostruja, koja se postiže povećanjem primijenjenog napona od negativnih do pozitivnih vrijednosti.



Slika 4 Fotoelektrična struja  $I$  prikazana je kao funkcija napona  $V$  primijenjenog između emitera i kolektora za danu frekvenciju  $f$  svjetlosti za tri različita intenziteta svjetlosti.[1]

Može se primijetiti da struja ne teče za potencijal usporavanja negativniji od  $-V_0$  i da je fotostruja konstantna za potencijale blizu ili iznad nule (ovo pretpostavlja da su emiter i kolektor blisko razmaknuti ili u sfernoj geometriji kako bi se izbjegao gubitak fotoelektrona).

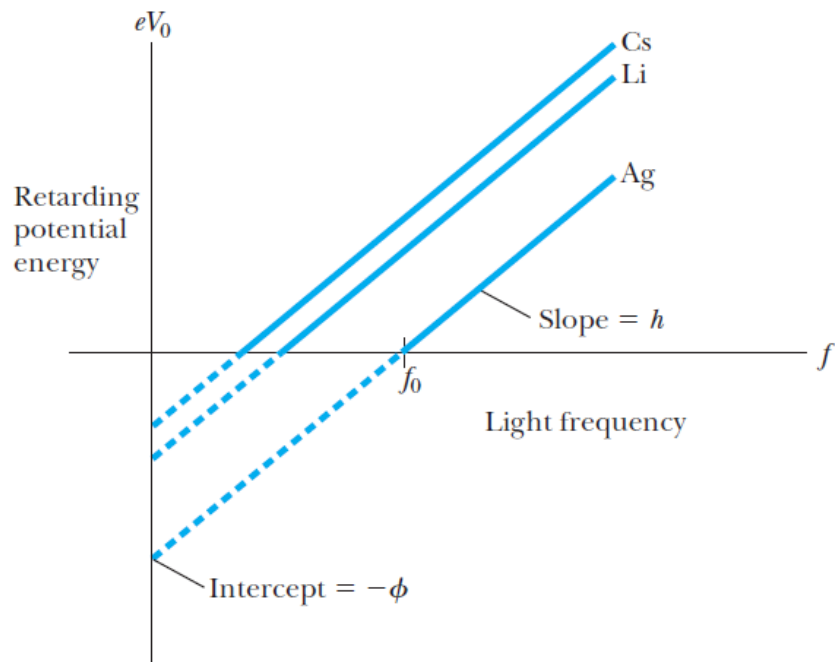
2) Maksimalna kinetička energija fotoelektrona, za dati materijal koji emitira, ovisi samo o frekvenciji svjetlosti. Drugim riječima, za svjetlost različite frekvencije (Slika 4) potreban je drugačiji potencijal usporavanja  $-V_0$  da bi se zaustavili najenergičniji fotoelektroni. Potencijal usporavanja  $-V_0$  različit je za svaki  $f$  i negativniji je za veći  $f$ . Vrijednost  $V_0$  ovisi o frekvenciji  $f$  ali ne i o intenzitetu (Slika 5).



Slika 5: Fotoelektrična struja  $I$  prikazana je kao funkcija primijenjenog napona za tri različite frekvencije svjetlosti.[1]

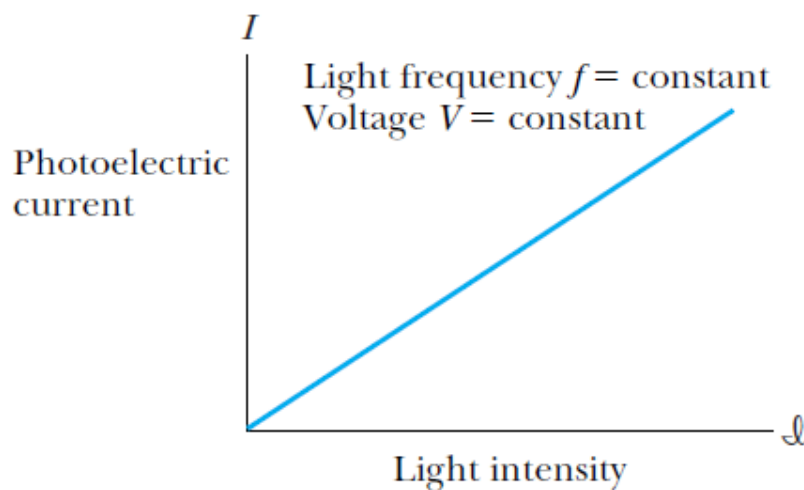
3) Što je manji izlazni rad  $\Phi$  materijala emitera, niža je granična frekvencija svjetlosti koja može izbaciti fotoelektrone. Za frekvencije ispod ove granične frekvencije ne stvaraju se fotoelektroni, bez obzira na intenzitet. Podaci slični Millikanovim rezultatima (o kojima se raspravlja kasnije) prikazani su na Slici 6, gdje su frekvencije praga  $f_0$  izmjerene za tri metala.





Slika 6: Potencijalna energija usporavanja  $eV_0$  (maksimalna kinetička energija elektrona) ucrtana je u ovisnosti o frekvenciji svjetlosti za tri emitirana materijala.[1]

4) Kada se fotoelektroni proizvode, njihov je broj proporcionalan intenzitetu svjetlosti kao što je prikazano na Slici 7. Odnosno, maksimalna fotostruja proporcionalna je intenzitetu svjetlosti.



Slika 7: Fotoelektrična struja  $I$  je linearna funkcija intenziteta svjetlosti za konstante  $f$  i  $V$ . [1]

5) Fotoelektroni se emitiraju gotovo trenutačno ( $\leq 3 \times 10^{-9}$  s) nakon osvjetljenja fotokatode, neovisno o intenzitetu svjetla.

Osim rezultata 5, ove eksperimentalne činjenice bile su poznate u rudimentarnom obliku do 1902., prvenstveno zahvaljujući radu Philippa Lenarda, koji je bio Hertzov pomoćnik 1892. nakon što se Hertz preselio iz Karlsruhea u Bonn. Lenard, koji je opsežno proučavao fotoelektrični učinak, dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 1905. za ovo i druga istraživanja o identifikaciji i ponašanju elektrona.[1]

### 2.3 Klasična interpretacija

Kao što je prethodno navedeno, klasična teorija dopušta da elektromagnetsko zračenje izbaci fotoelektrone iz materije. Međutim, klasična teorija predviđa da ukupna količina energije u svjetlosnom valu raste s povećanjem intenziteta svjetlosti. Stoga, prema klasičnoj teoriji, elektroni bi trebali imati veću kinetičku energiju ako se poveća intenzitet svjetlosti. Međutim, prema eksperimentalnom rezultatu 1 i Slici 4, karakteristični potencijal usporavanja  $-V_0$  dovoljan je da zaustavi sve fotoelektrone za danu frekvenciju svjetlosti  $f$ , bez obzira na intenzitet. Klasična elektromagnetska teorija ne može objasniti ovaj rezultat. Slično, klasična teorija ne može objasniti rezultat 2, jer maksimalna kinetička energija fotoelektrona ovisi o vrijednosti frekvencije svjetlosti  $f$ , a ne o intenzitetu.

Postojanje granične frekvencije, prikazano u eksperimentalnom rezultatu 3, potpuno je neobjašnjivo u klasičnoj teoriji. Klasična teorija ne može predvidjeti rezultate prikazane na Slici 6. Klasična teorija predviđa da će broj izbačenih fotoelektrona rasti s intenzitetom u skladu s eksperimentalnim rezultatom 4.

Konačno, klasična bi teorija predvidjela da će za ekstremno niske intenzitete svjetlosti proći dosta vremena prije nego što bilo koji elektron dobije dovoljno energije da pobjegne. Primijećuje se, međutim, da se fotoelektroni izbacuju gotovo trenutno.

Na primjer, pokusi su pokazali da je intenzitet svjetlosti ekvivalentan osvjetljenju koje proizvodi žarulja sa žarnom niti od 100 W na udaljenosti od 1000 km na površini od 1 cm<sup>2</sup> dovoljan da proizvede fotoelektrone unutar jedne sekunde.[1]

## 2.4 Einsteinova teorija

Albert Einstein bio je zaintrigiran Planckovom hipotezom da se polje elektromagnetskog zračenja mora apsorbirati i emitirati u kvantiziranim količinama. Einstein je odveo Planckovu ideju korak dalje i predložio da je samo polje elektromagnetskog zračenja kvantizirano i da energija svjetlosne zrake koja se širi iz točkastog izvora nije kontinuirano raspoređena preko sve većeg prostora, već se sastoji od konačnog broja kvanta energije koji su lokalizirani u točkama u prostoru, koji se kreću bez dijeljenja, i koji se mogu proizvesti i apsorbirati samo kao cjelovite jedinice. Te kvante energije sada se nazivaju fotonima svjetlosti. Prema Einsteinu svaki foton ima kvant energije:

$$E = h * f$$

gdje je  $f$  frekvencija elektromagnetskog vala povezanog sa svjetlom, a  $h$  je Planckova konstanta.

Može se primjetiti da je ova jednadžba u skladu s Planckovom relacijom za kvant energije ( $\Delta E = h f$ ). Foton putuje brzinom svjetlosti  $c$  u vakuumu, a njegova je valna duljina dana s:

$$\lambda f = c$$

Drugim riječima, Einstein je predložio da uz svoj dobro poznati valoviti aspekt, koji se obilno pokazuje u fenomenima interferencije, treba smatrati da svjetlost ima i aspekt sličan česticama. Einstein je predložio da foton (kvant svjetlosti) isporučuje svoju cjelokupnu energiju  $hf$  jednom elektronu u materijalu. Da bi napustio materijal, udareni elektron mora predati određenu količinu energije  $f$  kako bi prevladao svoje vezanje u materijalu. Elektron može izgubiti nešto dodatne energije interakcijom s drugim elektronima na svom putu do površine. Kakva god energija preostala pojavit će se kao kinetička energija elektrona dok on napušta emiter. Očuvanje energije zahtijeva :

$$hf = \Phi + K.E. (electron)$$

*K.E. (electron) - kinetička energija elektrona*

Budući da su energije koje su ovdje uključene reda veličine elektron volta, sigurno je korištenje nerelativističkog oblika kinetičke energije elektrona,  $\frac{1}{2} mv^2$ . Kinetička energija

elektrona smanjit će se dok prolazi kroz materijal emitera, tako da, strogo govoreći, želi se eksperimentalno otkriti maksimalnu vrijednost kinetičke energije.

$$hf = \Phi + \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

Potencijali usporavanja izmjereni u fotoelektričnom učinku su stoga suprotni potencijali potrebni za zaustavljanje najenergičnijih elektrona.

$$eV_0 = \frac{1}{2}mv_{max}^2$$

[1]

## 2.5 Kvantna interpretacija

Potrebno je preispitati eksperimentalne rezultate fotoelektričnog učinka kako bi se vidjelo može li Einsteinova kvantna interpretacija objasniti sve podatke. Prvi i drugi eksperimentalni rezultat (koji pokazuju da kinetičke energije fotoelektrona ovise o frekvenciji ali ne i intenzitetu svjetlosti) mogu se objasniti. Kinetička energija elektrona,  $K.E. (electron) = hf - \Phi$  uopće ne ovisi o intenzitetu svjetlosti, već samo o frekvenciji svjetlosti i radnoj funkciji materijala.

$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = eV_0 = hf - \Phi$$

Potencijal malo pozitivniji od  $-V_0$  neće moći odbiti sve elektrone, a za blisku geometriju emitera i kolektora, praktički će svi elektroni biti prikupljeni kada je napon usporavanja blizu nule. Za vrlo velike pozitivne potencijale svi elektroni će biti prikupljeni, a fotostruja će se smanjiti kao što je prikazano na slici 4. Ako se intenzitet svjetlosti poveća, bit će više fotona po jedinici površine, više izbačenih elektrona, a time i veća fotostruja, kao što se može vidjeti na slici 4. Ako se koristi drugačija frekvencija svjetlosti, recimo  $f_2$ , tada je potreban drugačiji zaustavni potencijal za zaustavljanje najenergičnijih elektrona  $eV_{02} = hf_2 - \Phi$

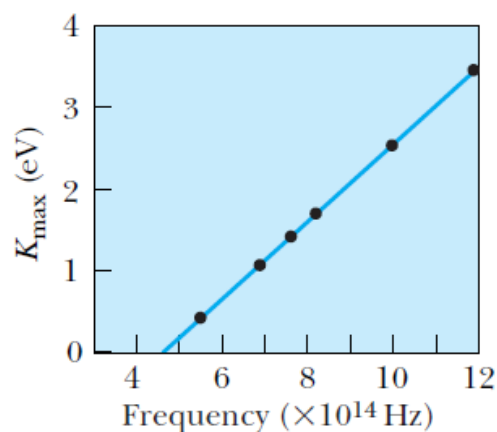
Za konstantan intenzitet svjetlosti (točnije, konstantan broj fotona/površina/vrijeme), potreban je drugačiji zaustavni potencijal  $V_0$  za svaki  $f$  maksimalna fotostruja se neće

promijeniti, jer je broj izbačenih fotoelektrona konstantan (slika 5). Kvantna teorija lako objašnjava sliku 7, jer broj fotona raste linearno s intenzitetom svjetlosti, proizvodeći više fotoelektrona, a time i više fotostruje.

Jednadžba koju je predložio Einstein 1905., predviđa da će potencijal zaustavljanja biti linearno proporcionalan frekvenciji svjetlosti, s nagibom  $h/e$ , gdje je  $h$  ista konstanta koju je pronašao Planck. Nagib je neovisan o metalu koji se koristi za izradu fotokatode. Jednadžba se može prepisati :

$$eV_0 = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = hf - hf_0 = h(f - f_0)$$

Gdje  $\Phi = hf_0$  predstavlja negativno od  $y$  presjeka. Frekvencija  $f_0$  predstavlja frekvenciju praga za fotoelektrični efekt (kada je kinetička energija elektrona jednaka nuli). Podaci dostupni 1905. godine nisu bili dovoljno točni ni da dokažu ni opovrgnu Einsteinovu teoriju, a čak je i sam Planck, između ostalih, na teoriju gledao sa sumnjom. R. A. Millikan, tada na Sveučilištu u Chicagu, pokušao je pokazati da je Einstein bio u krivu poduzimajući niz elegantnih eksperimenata za koje je bilo potrebno gotovo 10 godina. Godine 1916. Millikan je objavio podatke prikazane na slici 8 koji su potvrdili Einsteinovo predviđanje.



Slika 8 Millikanovi podaci o fotoelektričnom učinku[1]

Millikan je 1916. objavio podatke o fotoelektričnom učinku u kojem je obasjao svjetlo različite frekvencije na natrijevu elektrodu i izmjerio maksimalne kinetičke energije fotoelektrona. Otkrio je da nijedan fotoelektron nije emitiran ispod frekvencije od  $4,39$

$\times 10^{14}$  Hz (ili duže od valne duljine od 683 nm). Rezultati su bili neovisni o intenzitetu svjetlosti, a nagib ravne linije povučene kroz podatke proizveo je vrijednost Planckove konstante koja se izvrsno slaže s Planckovom teorijom. Iako je Millikan priznao da su njegovi vlastiti podaci dovoljan dokaz Einsteinove jednadžbe fotoelektričnog učinka, Millikan nije bio uvjeren u koncept fotona za svjetlost i njegovu ulogu u kvantnoj teoriji.

Utvrдио je da vrijednost  $h$  iz nagiba crte na slici 8 iznosi  $4.1 \times 10^{-15}$  eV, što se dobro slaže s vrijednošću  $h$  koju je za zračenje crnog tijela odredio Planck. Einsteinova teorija fotoelektričnog efekta postupno je prihvaćena nakon 1916.; konačno je 1922. dobio Nobelovu nagradu za 1921. godinu, prvenstveno za svoje objašnjenje fotoelektričnog efekta.[1]

## 2.6 Kvantizacija polja elektromagnetskog zračenja

Trebali bismo sažeti ono što smo naučili o kvantizaciji polja elektromagnetskog zračenja. Dakle, iz svega do sada navedenoga o kvantizaciji elektromagnetskog polja može se ustanoviti da se elektromagnetsko zračenje sastoji od fotona, koji su slični česticama (ili korpuskularnim), a svaki se sastoji od energije  $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$  gdje su  $f$  i  $\lambda$  frekvencija i valna duljina svjetlosti. Ukupna energija snopa svjetlosti je zbroj energije svih fotona, a za monokromatsku svjetlost je integralni višekratnik  $hf$  (općenito je cijeli broj vrlo velik).

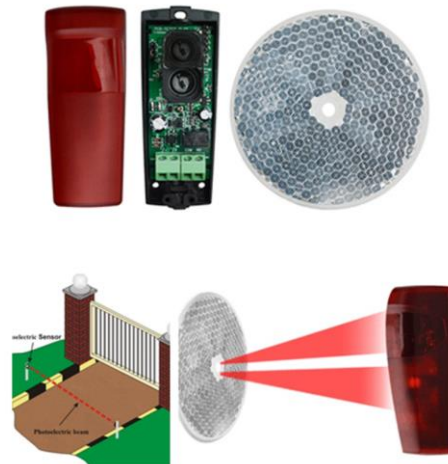
Ovaj prikaz fotonske slike mora biti istinit u cijelom elektromagnetskom spektru od radio valova do vidljive svjetlosti, x zraka, pa čak i visokoenergetskih gama zraka. To mora biti točno jer foton dane frekvencije, promatran iz pokretnog sustava, može biti pomaknut u crveno ili u plavo za proizvoljno veliki iznos, ovisno o brzini sustava i smjeru gibanja. Tijekom emisije ili apsorpcije bilo kojeg oblika elektromagnetskog zračenja (svjetlosti, x zraka, gama zraka itd.), fotoni se moraju stvoriti ili apsorbirati. Fotoni imaju samo jednu brzinu: brzinu svjetlosti (=c u vakuumu).[1]

### 3 UPOTREBA I UČINCI FOTOELEKTRIČNOG EFEKTA

Fotoelektrični efekt odgovoran je za mnoge primjene u detekciji svjetlosti. To uključuje fotomultiplikatorsku cijev za brojanje pojedinačnih svjetlosnih impulsa ( slika 9), fotoelektrične ćelije za uređaje koji se aktiviraju svjetlom (kao što su otvarači vrata i protuprovalni alarmi)(slika 10) i solarne ploče(Slika 11). [6]



Slika 9 Fotomultiplikatorska cijev[23]



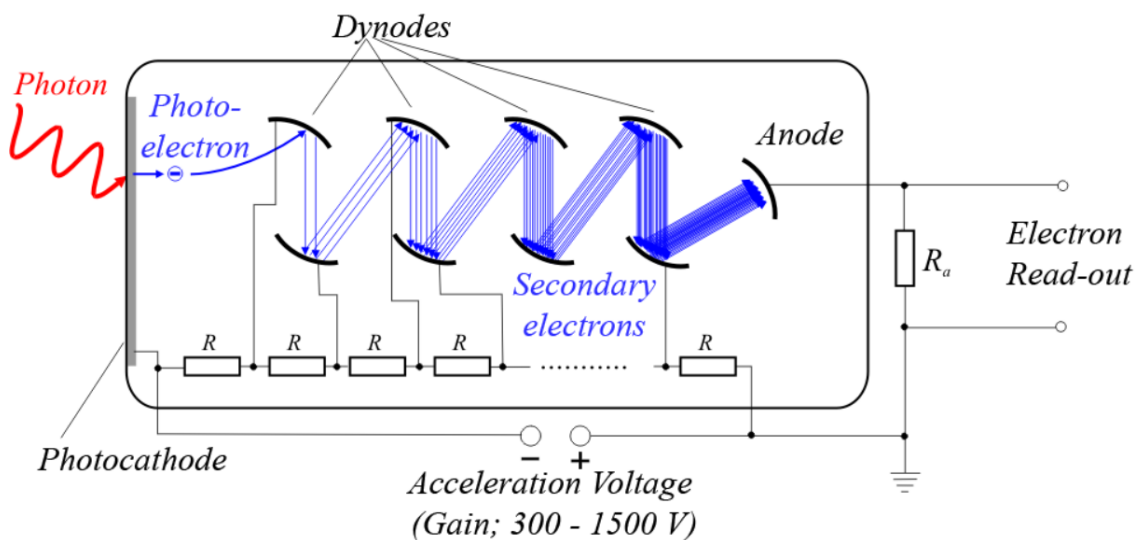
Slika 10 fotoelektrične ćelije – otvarač za vrata[10]



Slika 11 Solarna ploča[20]

### 3.1 Fotomultiplikatori

To su vakuumske cijevi iznimno osjetljive na svjetlo s obloženom fotokatodom unutar ovojnice. Fotokatoda sadrži materijale kao što su antimon, cezij i rubidij, čije su kombinacije posebno odabrane za pružanje niske radne funkcije, tako da fotokatoda spremno otpušta elektrone čak i kada je osvijetljena vrlo niskim razinama svjetlosti. Uz pomoć niza elektroda (dinoda) na sve višim potencijalima, elektroni se ubrzavaju te se značajno povećava njihov broj kroz sekundarnu emisiju i na taj način se osigurava izlazna struja koju je lako detektirati. Fotomultiplikatori se još uvijek često koriste tamo gdje je potrebno detektirati niske razine svjetla.[14][13]

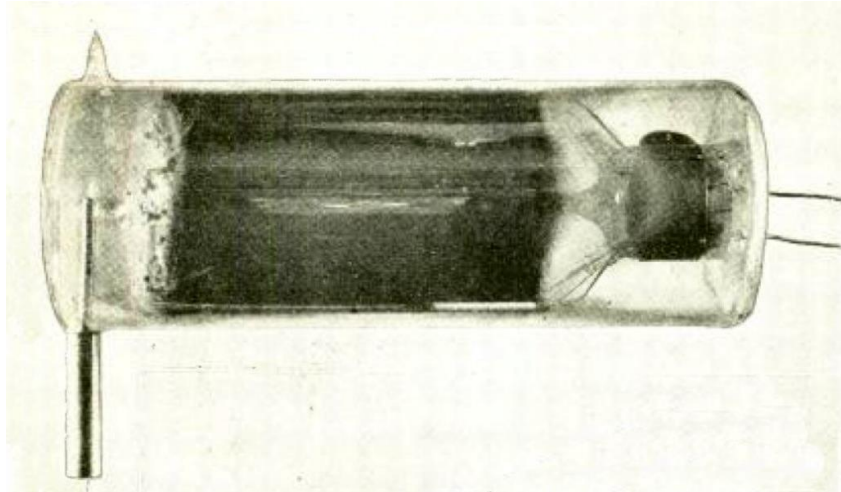


Slika 12 Fotomultiplikator[10]

### 3.2 Senzori slike

U počecima televizije cijevi unutar video kamera koristile su fotoelektrični efekt. Tako je primjerice disektor slike („Image dissector“-slika 13) Phila Farnswortha koristio ekran koji se punio na principu fotoelektričnog efekta za transformaciju optičke slike u skenirani elektronički signal.





*Slika 13 Farnsworthov disektor slike[10]*

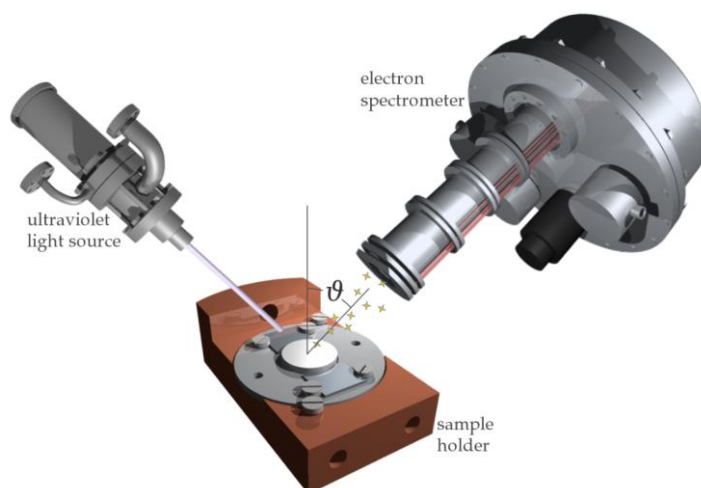
Disektor slike, koji se naziva i disektorska cijev, je cijev video kamere unutar koje emisije fotokatode stvaraju "elektronsku sliku" koja se zatim pomiče gore, dolje i preko anode kako bi se proizveo električni signal koji predstavlja vizualnu sliku. Zapošljava magnetska polja kako bi elektronska slika bila u fokusu, a kasniji modeli koristili su multiplikator elektrona da pokupe elektrone. Izraz se također koristio za druge vrste ranih cijevi video kamera. Disektoru su korišteni samo kratko za istraživanje u televizijskim sustavima prije nego što su zamijenjeni različitim mnogo osjetljivijim cijevima temeljenim na fenomenu pohrane naboja poput ikonoskopa tijekom 1930-ih. Unatoč tome što su cijevi kamera koje se temelje na ideji tehnologije disektora slike brzo i potpuno izbačene iz upotrebe na području televizijskog emitiranja, nastavile su se koristiti za snimanje slika u ranim meteorološkim satelitima i lunarnom lenderu te za praćenje položaja zvijezda u Space Shuttle i Međunarodna svemirska postaja.

Cijevi video kamera bili su uređaji temeljeni na katodnoj cijevi koji su se koristili u televizijskim kamerama za snimanje televizijskih slika, prije uvođenja senzora slike uređaja s spregnutim nabojem (CCD) u 1980-ima. Nekoliko različitih vrsta cijevi bilo je u upotrebi od ranih 1930-ih, pa sve do 1990-ih.

U tim je cijevima snop elektrona skeniran preko slike scene koja se emitirala fokusirana na cilj. To je generiralo struju koja je ovisila o svjetlini slike na meti u točki skeniranja. Veličina udarne zrake bila je malena u usporedbi s veličinom mete, dopuštajući 480–486 vodoravnih linija skeniranja po slici u NTSC formatu, 576 linija u PAL-u i čak 1035 linija u Hi-Visionu.[6][10]

### 3.3 Fotoelektronska spektroskopija

Obzirom da je kinetička energija emitiranih elektrona jednaka energiji upadnog fotona od koje se oduzima energija vezivanja elektrona unutar atoma, molekule ili krutine, energija vezanja može se odrediti obasjavanjem monokromatske X-zrake ili UV svjetlom poznate energije i mjerenjem kinetičke energije fotoelektrona. Distribucija energija elektrona je korisna je u proučavanju kvantnih svojstava ovih sustava. Između ostalog, može se koristiti i pri određivanju elementarnog sastava uzoraka. Kada su u pitanju krute tvari, kinetička energija i raspodjela kuta emisije fotoelektrona mjere se kako bi se u potpunosti odredila elektroničkog pojasa u smislu dopuštenih energija vezanja i momenta elektrona. Moderni instrumenti za fotoemisiju spektroskopiju s kutnom rezolucijom te veličine mogu mjeriti s preciznošću većom od  $1 \text{ meV}$  i  $0,1^\circ$ .



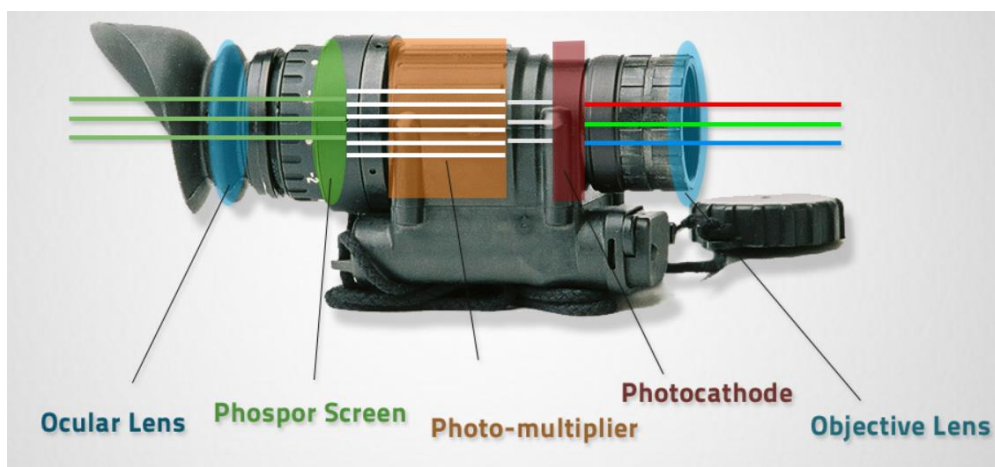
*Slika 14 Eksperiment kutno razlučne fotoemisijске spektroskopije (ARPES). Žarulja s izbojem helija obasjava ultraljubičasto svjetlo na uzorak u ultra visokom vakuumu. Hemisferični analizator elektrona mjeri distribuciju izbačenih elektrona s obzirom na energiju i moment. [10]*

Mjerenja fotoelektronske spektroskopije obično se izvode u okruženju visokog vakuumu, jer bi elektrone raspršile molekule plina da su prisutne. Danad postoje tvrtke koje prodaju proizvode pomoću kojih je omogućena fotoemisija u zraku. Laser, ispusna cijev ili izvor sinkrotronskog zračenja neki su od izvora svjetlosti.

Koncentrični hemisferični analizator tipičan je mjerni uređaj energiju elektrona. Analizator koristi električno polje između dviju hemisfera za promjenu (raspršivanje) putanje upadnih elektrona ovisno o njihovoj kinetičkoj energiji. [10]

### 3.4 Uređaji za noćno gledanje

Fotoni koji se sudaraju s tankim slojem alkalijskog metala ili poluvodičkog materijala poput galijeva arsenida unutar cijevi za pojačivač slike uzrokuju izlazak fotoelektrona radi fotoelektričnog efekta. Nakon toga, ti fotoelektroni se ubrzavaju putem elektrostatskog polja i sudaraju se sa zaslonom prekrivenim fosforom, pretvarajući elektrone ponovno u fotone. Povećanje jačine signala može se postići ili ubrzanjem elektrona ili povećanjem njihovog broja putem sekundarnih emisija, kao što je primjerice mikrokanalna ploča. Nekada se koristi kombinacija ovih dviju metoda. Dodatna kinetička energija potrebna je kako bi elektron prešao iz vodljivog pojasa na razinu vakuuma. Ovaj fenomen poznat je kao afinitet fotokatode prema elektronima i predstavlja još jednu prepreku fotoemisiji, osim zabranjenog pojasa koji je objašnjen modelom energetskog razmaka. Neke materijale, kao što je galijev arsenid, karakterizira efektivni afinitet prema elektronima koji je niži od razine vodljivog pojasa. Unutar takvih materijala, svi elektroni koji se kreću prema vodljivom pojasu imaju dovoljno energije za emitiranje iz materijala, što omogućava da film iz kojeg se apsorbiraju bude relativno debeo. Takvi materijali su poznati kao materijali s negativnim afinitetom prema elektronima.



Slika 15 Uređaj za noćno gledanje[8]

### 3.5 Svemirske letjelice i mjesečeva prašina

Fotoelektrični efekt će uzrokovati da svemirske letjelice izložene sunčevoj svjetlosti razviju pozitivan naboj, što potencijalno može biti veliki problem, budući da se drugi dijelovi letjelice nalaze u sjeni, radi čega dolazi do razvijanja negativnog naboja iz obližnje plazme. Neravnotežu je moguće isprazniti pomoću osjetljivih električnih komponenata. Statički naboj stvoren fotoelektričnim učinkom je samoograničavajući, iz razloga što objekt s višim nabojem ne odustaje od svojih elektrona tako lako kao objekt s nižim nabojem.

Radi sunčeve svjetlosti koja udara u mjesečevu prašinu, ona zbog fotoelektričnog efekta postaje pozitivno nabijena. Takva pozitivno nabijena prašina se zatim odbija i podiže s površine Mjeseca pomoću elektrostatske levitacije. To se očituje gotovo kao "atmosfera prašine", vidljivo kao tanka izmaglica i zamućenje dalekih obilježja, a vidljivo kao prigušeni sjaj nakon sunca je postavio. Ovu su pojavu prvi put fotografirale sonde programa Surveyor 1960-ih, a nedavno je rover Chang'e 3 primijetio taloženje prašine na mjesečevom kamenju visokom oko 28 cm. Smatra se da se i najmanje čestice odbijaju kilometrima od površine te da se one kreću u "fontanama" dok se pune i prazne.[6]

### 3.6 Solarne ćelije

Fotonaponska energija je čist, obnovljiv izvor energije koji koristi sunčevo zračenje kao resurs u proizvodnji električne energije. Ova vrsta energije temelji se na fotoelektričnom učinku - emisiji elektrona kada elektromagnetsko zračenje (tj. svjetlost) pogodi materijal. Ovim načinom emitirani elektroni poznati su kao fotoelektroni i oni generiraju električnu struju.[9]

Solarna ili fotonaponska ćelija, elektronički je uređaj koji pomoću fotonaponskog učinka pretvara energiju svjetlosti izravno u električnu, što je fizički fenomen. Predstavlja vrstu fotoelektrične ćelije koja je definirana kao uređaj čija električna svojstva, kao što su napon, otpor ili struja, variraju kada su izloženi svjetlu. Individualni uređaji solarnih ćelija sastavni su dijelovi fotonaponskih modula, popularno poznatih kao solarni paneli. Karakteristična solarna ćelija od silicija s jednim spojem može proizvesti maksimalni napon otvorenog kruga od približno 0,5 do 0,6 volti.



*Slika 16 Konvencionalna solarna ćelija od kristalnog silicija (od 2005.). Električni kontakti napravljeni od sabirnica (veće trake srebrne boje) i prstiju (onih manjih) otisnuti su na silikonsku pločicu.[24]*

Solarne ćelije se opisuju kao fotonaponske, neovisno o tome je li izvor umjetna ili sunčeva svjetlost. Izuzev proizvodnje energije, koriste se i kao fotodetektor; na primjer infracrveni detektori; za detektiranje svjetlosti ili druge vrste elektromagnetskog zračenja u blizini vidljivog raspona ili se pomoću njih može mjeriti intenzitet svjetlosti.[10]

Rad fotonaponske (PV) ćelije iziskuje tri osnovna atributa:

- Apsorpcija svjetlosti odnosno generiranje ekscitona (vezanih parova elektron-šupljina), nevezanih parova elektron-šupljina (preko ekscitona) ili plazmona
- Razdvajanje nositelja naboja suprotnih vrsta.
- Odvojena ekstrakcija tih nositelja u vanjski krug

Suprotno od toga, solarni toplinski kolektor osigurava toplinu apsorpiranjem sunčeve svjetlosti, s ciljem direktnog grijanja ili indirektno proizvodnje električne energije iz topline. S druge strane fotoelektrolitička ili fotoelektrokemijska ćelija odnosi se na vrstu fotonaponske ćelije, poput one koju je razvio Edmond Becquerel i modernih solarnih ćelija osjetljivih na boju), ili na uređaj koji izravno vodu razdvaja na kisik i vodik koristeći isključivo osvjetljenje od sunca.[7]

Solarni kolektori i fotonaponske ćelije su dva načina proizvodnje solarne energije.

## 4 POVIJEST FOTOELEKTRIČNOG EFEKTA

### 4.1 19.stoljeće

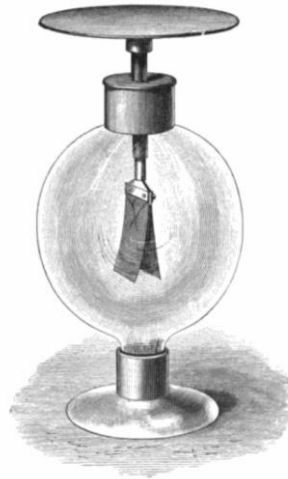
Godine 1839. Alexandre Edmond Becquerel otkrio je fotonaponski učinak dok je proučavao učinak svjetlosti na elektrolitičke ćelije. Iako nije ekvivalentan fotoelektričnom učinku, njegov rad na fotonaponskim uređajima bio je ključan u pokazivanju snažnog odnosa između svjetla i elektroničkih svojstava materijala. Godine 1873., Willoughby Smith otkrio je fotovodljivost u selenu dok je ispitivao svojstva visoke otpornosti metala u kombinaciji sa svojim radom koji je uključivao podmorske telegrafске kabele.

Johann Elster (1854. – 1920.) i Hans Geitel (1855. – 1923.), studenti u Heidelbergu, istraživali su učinke svjetlosti na elektrificirana tijela i razvili prve praktične fotoelektrične ćelije koje su se mogle koristiti za mjerenje intenziteta svjetlosti. Poredali su metale s obzirom na njihovu moć pražnjenja negativnog elektriciteta: rubidij, kalij, legura kalija i natrija, natrij, litij, magnezij, talij i cink; za bakar, platinu, olovo, željezo, kadmij, ugljik i živu učinci s običnim svjetlom bili su premali da bi se mogli izmjeriti. Redoslijed metala za ovaj učinak bio je isti kao u Voltinom nizu za kontaktni elektricitet, najelektropozitivniji metali daju najveći fotoelektrični učinak.

Godine 1887. Heinrich Hertz opazio je fotoelektrični efekt i izvijestio o proizvodnji i prijemu elektromagnetskih valova. Prijemnik u njegovom uređaju sastojao se od zavojnice s iskrištem, gdje bi se vidjela iskra nakon detekcije elektromagnetskih valova. Aparaturu je stavio u zamračenu kutiju kako bi bolje vidio iskru. Međutim, primijetio je da je maksimalna duljina iskre smanjena kada je unutar kutije. Staklena ploča postavljena između izvora elektromagnetskih valova i prijemnika apsorbirala je ultraljubičasto zračenje koje je pomoglo elektronima da preskoče prazninu. Kada bi se uklonio, duljina iskre bi se povećala. Nije uočio smanjenje duljine iskre kada je staklo zamijenio kvarcom, budući da kvarc ne apsorbira UV zračenje.

Hertzova otkrića dovela su do niza istraživanja Hallwachsa, Hooraa, Righija i Stoletova o učinku svjetlosti, a posebno ultraljubičaste svjetlosti, na električno nabijena tijela. Hallwachs je spojio cinčanu ploču s elektroskopom (Slika 17). Pustio je da ultraljubičasto svjetlo padne na svježe očišćenu cinčanu ploču i primijetio da je cinčana ploča postala nenabijena ako je u početku negativno nabijena, pozitivno nabijena ako

je u početku nenabijena, te više nabijena ako je u početku pozitivno nabijena. Iz tih opažanja zaključio je da je cinčana ploča emitirala neke negativno nabijene čestice kada je bila izložena ultraljubičastom svjetlu.



*Slika 17 Elektroskop sa zlatnim listićima za demonstraciju fotoelektričnog efekta.[10]*

Kada je elektroskop negativno nabijen, dolazi do viška elektrona i listovi se odvajaju. Ako visokofrekventno svjetlo kratke valne duljine (kao što je ultraljubičasto svjetlo dobiveno iz lučne svjetiljke, ili spaljivanjem magnezija, ili korištenjem indukcijske zavojnice između cinkovih ili kadmijevih terminala za stvaranje iskrenja) svijetli na poklopcu, elektroskop se prazni i lišće mlitavo pada. Međutim, ako je frekvencija svjetlosnih valova ispod granične vrijednosti za čep, listovi se neće ispuštati, bez obzira na to koliko dugo se svjetlom obasjava čep.

S obzirom na Hertzov učinak, istraživači su od samog početka pokazali složenost fenomena fotoelektričnog zamora—progresivno smanjenje učinka opaženog na svježim metalnim površinama. Prema Hallwachs, ozon je imao važnu ulogu u fenomenu, a na emisiju su utjecali oksidacija, vlaga i stupanj ugljicanosti površine. U to vrijeme nije bilo jasno postoji li umor u vakuumu.

U razdoblju od 1888. do 1891. detaljnu analizu fotoefekta izvršio je Aleksandr Stoletov s rezultatima objavljenim u šest publikacija. Stoletov je izumio novu eksperimentalnu postavu koja je bila prikladnija za kvantitativnu analizu fotoefekta. Otkrio je direktnu proporcionalnost između jakosti svjetlosti i inducirane fotoelektrične struje (prvi zakon fotoefekta ili Stoletovljev zakon). Mjerio je ovisnost jakosti fotoelektrične struje o tlaku plina, pri čemu je utvrdio postojanje optimalnog tlaka plina koji odgovara maksimalnoj fotostruji; ovo je svojstvo iskorišteno za izradu solarnih ćelija.

Mnoge tvari osim metala ispuštaju negativan elektricitet pod djelovanjem ultraljubičastog svjetla. G. C. Schmidt i O. Knoblauch sastavili su popis tih tvari.

Godine 1897. J. J. Thomson je istraživao ultraljubičasto svjetlo u Crookesovim cijevima. Thomson je zaključio da su izbačene čestice, koje je on nazvao korpuskulama, iste prirode kao katodne zrake. Te su čestice kasnije postale poznate kao elektroni. Thomson je metalnu ploču (katodu) zatvorio u vakuumsku cijev i izložio je visokofrekventnom zračenju. Smatralo se da oscilirajuća elektromagnetska polja uzrokuju rezonanciju polja atoma i, nakon postizanja određene amplitude, uzrokuju emitiranje subatomske korpuskule i detektiranje struje. Količina ove struje varirala je s intenzitetom i bojom zračenja. Veći intenzitet ili frekvencija zračenja proizvela bi veću struju.

Tijekom godina 1886. – 1902. Wilhelm Hallwachs i Philipp Lenard detaljno su istraživali fenomen fotoelektrične emisije. Lenard je uočio da struja teče kroz vakuumsku staklenu cijev koja okružuje dvije elektrode kada ultraljubičasto zračenje padne na jednu od njih. Čim se prekine ultraljubičasto zračenje, prestaje i struja. To je pokrenulo koncept fotoelektrične emisije. Otkriće ionizacije plinova ultraljubičastim svjetlom otkrio je Philipp Lenard 1900. godine. Budući da je učinak bio proizveden na nekoliko centimetara zraka i davao je veći broj pozitivnih iona nego negativnih, bilo je prirodno protumačiti fenomen, kao što je J. J. Thomson učinio, kao Hertzov učinak na čestice prisutne u plinu.[10]

## **4.2 20.stoljeće**

Godine 1902. Lenard je primijetio da je energija pojedinačnih emitiranih elektrona neovisna o primijenjenom intenzitetu svjetla. To se činilo u suprotnosti s Maxwellovom valnom teorijom svjetlosti, koja je predviđala da će energija elektrona biti proporcionalna intenzitetu zračenja.

Lenard je promatrao varijacije u energiji elektrona s frekvencijom svjetlosti pomoću snažne električne lučne svjetiljke koja mu je omogućila da istraži velike promjene u intenzitetu. Međutim, Lenardovi rezultati bili su kvalitativni, a ne kvantitativni zbog poteškoća u izvođenju pokusa: pokuse je trebalo izvesti na svježe izrezanom metalu



kako bi se uočio čisti metal, ali on je oksidirao u nekoliko minuta čak i u djelomičnom vakuumu. koristi se. Struja koju emitira površina određena je intenzitetom svjetlosti ili svjetlinom: udvostručenje intenziteta svjetlosti udvostručilo je broj elektrona emitiranih s površine.

Lenardovo početno istraživanje fotoelektričnog učinka u plinovima nastavio je J. J. Thomson, a potom još odlučnije Frederic Palmer, Jr.. Fotoemisija plinova je proučavana i pokazala je vrlo različite karakteristike od onih koje joj je Lenard isprva pripisao.

Godine 1900., dok je proučavao zračenje crnog tijela, njemački fizičar Max Planck je u svom radu "O zakonu raspodjele energije u normalnom spektru" predložio da se energija nošena elektromagnetskim valovima može osloboditi samo u paketima energije. Godine 1905. Albert Einstein objavio je rad u kojem je zastupao hipotezu da se svjetlosna energija prenosi u diskretnim kvantiziranim paketima kako bi objasnio eksperimentalne podatke iz fotoelektričnog učinka. Einstein je postavio teoriju da je energija u svakom kvantu svjetlosti jednaka frekvenciji svjetlosti pomnoženoj s konstantom, kasnije nazvanom Planckova konstanta. Foton iznad frekvencije praga ima potrebnu energiju da izbacijedan elektron, stvarajući promatrani učinak. To je bio korak u razvoju kvantne mehanike. Godine 1914. Robert A. Millikanova vrlo točna mjerenja Planckove konstante iz fotoelektričnog efekta poduprla su Einsteinov model, iako je korpuskularna teorija svjetlosti za Millikana u to vrijeme bila "prilično nezamisliva". Einstein je 1921. dobio Nobelovu nagradu za fiziku za "svoje otkriće zakona fotoelektričnog efekta", a Millikan je dobio Nobelovu nagradu 1923. za "svoj rad o elementarnom naboju elektriciteta i fotoelektričnom efektu". U teoriji kvantne perturbacije atoma i čvrstih tijela na koje djeluje elektromagnetsko zračenje, fotoelektrični učinak se još uvijek obično analizira u smislu valova; dva su pristupa ekvivalentna jer se apsorpcija fotona ili vala može dogoditi samo između kvantiziranih energetske razina čija je energetska razlika jednaka energiji fotona.

Matematički opis Alberta Einsteina o tome kako je fotoelektrični učinak uzrokovan apsorpcijom kvanta svjetlosti bio je u jednom od njegovih radova Annus Mirabilis, pod nazivom "O heurističkom gledištu u vezi s proizvodnjom i transformacijom svjetlosti". Rad je predložio jednostavan opis kvanta energije i pokazao kako oni objašnjavaju spektar zračenja crnog tijela. Njegovo objašnjenje u smislu apsorpcije diskretnih kvanta svjetlosti slagalo se s eksperimentalnim rezultatima. To je objasnilo zašto

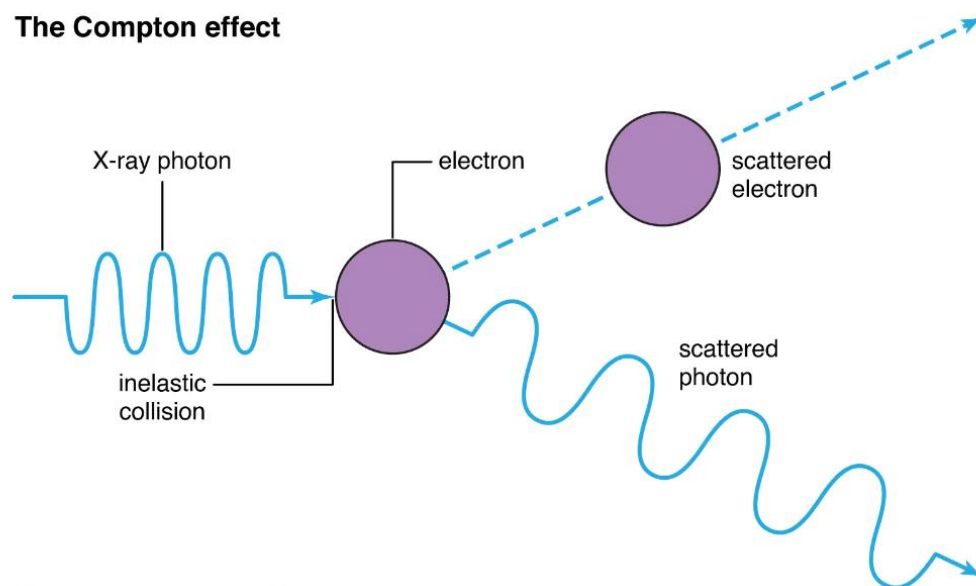
energija fotoelektrona ne ovisi o intenzitetu upadne svjetlosti. Ovo je bio teorijski skok, ali koncept je isprva naišao na snažan otpor jer je proturječio valnoj teoriji svjetlosti koja je prirodno proizašla iz jednadžbi elektromagnetizma Jamesa Clerka Maxwella, i općenito, pretpostavci beskonačne djeljivosti energije u fizičkim sustavima.

Einsteinov rad predviđa da energija pojedinačnih izbačenih elektrona raste linearno s frekvencijom svjetlosti. Možda iznenađujuće, točan odnos u to vrijeme nije bio testiran. Do 1905. bilo je poznato da energija fotoelektrona raste s povećanjem frekvencije upadne svjetlosti i da je neovisna o intenzitetu svjetlosti. Međutim, način porasta nije bio eksperimentalno utvrđen sve do 1914. kada je Millikan pokazao da je Einsteinovo predviđanje bilo točno.

Fotoelektrični efekt pomogao je pokrenuti tada nastajući koncept dualnosti val-čestica u prirodi svjetlosti. Svjetlost istodobno posjeduje karakteristike i valova i čestica, a svaka se manifestira prema okolnostima. Učinak je bilo nemoguće razumjeti u smislu klasičnog valnog opisa svjetlosti, budući da energija emitiranih elektrona nije ovisila o intenzitetu upadnog zračenja. Klasična teorija predviđala je da će elektroni 'sakupiti' energiju tijekom određenog vremenskog razdoblja, a zatim biti emitirani.[10]

## 5 COMPTONOV EFEKT

Comptonovo raspršenje, također nazvano Comptonovim efektom (Slika 18), koje je otkrio Arthur Holly Compton je raspršenje fotona visoke frekvencije nakon interakcije s nabijenom česticom, obično elektronom. To rezultira smanjenjem energije (povećanjem valne duljine) fotona (koji može biti foton X-zraka ili gama-zraka), što se naziva Comptonov efekt. Dio energije fotona prenosi se na česticu koja se trza. Inverzno Comptonovo raspršenje ima suprotan učinak, događa se kada visokoenergijska nabijena čestica prenese dio svoje energije na foton, što rezultira povećanjem energije (smanjenjem valne duljine) fotona.[4]



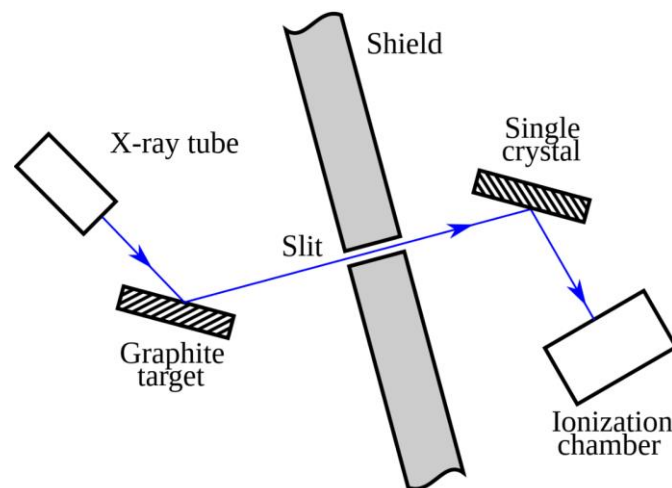
Slika 18 Comptonov efekt[22]

### 5.1 Teorijsko objašnjenje Comptonovog efekta

Comptonovo raspršenje se obično opisuje kao neelastično raspršenje, jer je energija u raspršenom fotonu manja od energije upadnog fotona. Energija upadnog fotona prenosi se na elektron (povratni udar) ali samo kao kinetička energija u laboratorijskom okviru. Elektron ne dobiva unutarnju energiju, odgovarajuće mase ostaju iste, što je znak elastičnog sudara. Iz ove perspektive, Comptonovo raspršenje može se smatrati elastičnim jer se unutarnje stanje elektrona ne mijenja tijekom procesa raspršenja.

Hoće li se Comptonovo raspršenje smatrati elastičnim ili neelastičnim ovisi o specifičnoj definiciji ovih pojmova koji se koriste.

U Comptonovom izvornom eksperimentu (vidi sliku 19), energija fotona X zraka bila je značajno veća od energije vezanja atomskog elektrona, pa se elektrone nakon raspršenja moglo smatrati slobodnima. Količina za koju se mijenja valna duljina svjetlosti naziva se Comptonov pomak. Iako Comptonovo raspršenje jezgre postoji, Comptonovo raspršenje obično se odnosi na interakciju koja uključuje samo elektrone atoma. Comptonov efekt primijetio je Arthur Holly Compton 1923. godine na Sveučilištu Washington u St. Louisu, a u godinama koje su uslijedile dodatno ga je potvrdio njegov student Y. H. Woo.



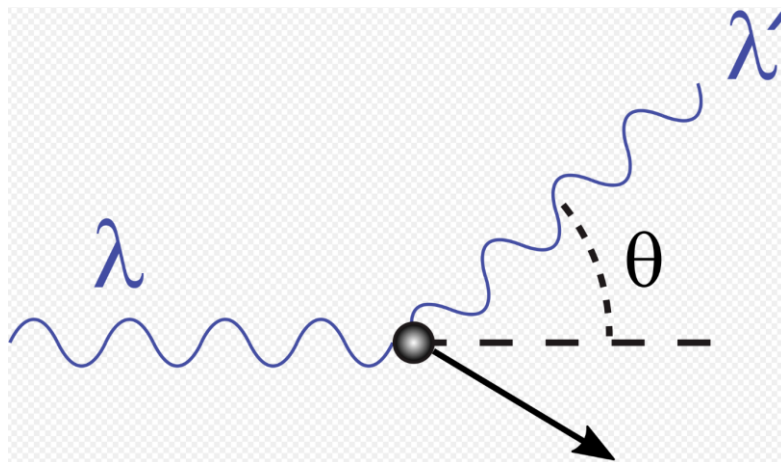
Slika 19 Shematski dijagram Comptonovog pokusa[16]

Comptonovo raspršenje događa se u grafitnoj meti s lijeve strane. Prorez propušta fotone X-zraka raspršene pod odabranim kutom. Energija raspršenog fotona mjeri se pomoću Braggovog raspršenja u kristalu s desne strane u kombinaciji s ionizacijskom komorom; komora bi mogla mjeriti ukupnu energiju taloženu tijekom vremena, a ne energiju pojedinačnih raspršenih fotona.[16]

Učinak je značajan jer pokazuje da se svjetlost ne može objasniti isključivo kao valni fenomen. Thomsonovo raspršenje, klasična teorija elektromagnetskog vala raspršenog na nabijenim česticama, ne može objasniti pomake valne duljine pri niskom intenzitetu: klasično, svjetlost dovoljnog intenziteta da električno polje ubrza nabijenu česticu do relativističke brzine uzrokovat će trzaj tlaka zračenja i povezani Dopplerov pomak raspršene svjetlosti, ali učinak bi postao proizvoljno mali pri dovoljno niskim intenzitetima svjetlosti bez obzira na valnu duljinu. Dakle, ako se želi objasniti

Comptonovo raspršenje niskog intenziteta, svjetlost se mora ponašati kao da se sastoji od čestica. Ili je pretpostavka da se elektron može tretirati kao slobodan nevažeća što rezultira efektivno beskonačnom masom elektrona jednakom nuklearnoj masi (vidi npr. komentar ispod o elastičnom raspršenju X-zraka koje proizlazi iz tog učinka). Comptonov eksperiment uvjerio je fizičare da se svjetlost može tretirati kao tok objekata nalik česticama (kvanti zvani fotoni), čija je energija proporcionalna frekvenciji svjetlosnog vala.[12]

Kao što je prikazano na slici 20, interakcija između elektrona i fotona rezultira time da elektron dobiva dio energije (što ga tjera na trzaj), a foton preostale energije emitira se u drugom smjeru od izvornog, tako da ukupni momentum sustava je također očuvan. Ako raspršeni foton još ima dovoljno energije, proces se može ponoviti. U ovom scenariju, elektron se tretira kao slobodan ili labavo vezan. Eksperimentalna provjera očuvanja momenta u pojedinačnim Comptonovim procesima raspršenja od strane Bothea i Geigera kao i od strane Comptona i Simona bila je važna u opovrgavanju BKS teorije(Bohr–Kramers–Slaterova teorija).[2]



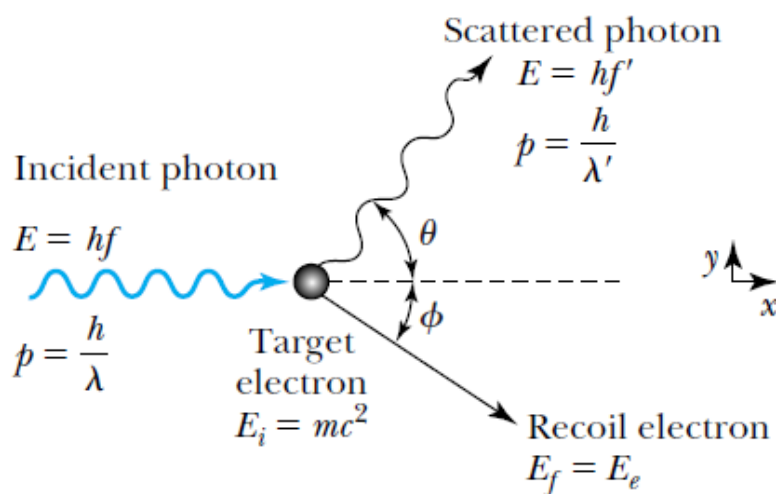
*Slika 20 Foton valne duljine  $\lambda$  dolazi s lijeva, sudara se s metom u mirovanju, a novi foton valne duljine  $\lambda'$  izlazi pod kutom  $\theta$ . Cilj se trza, odnoseći količinu upadne energije koja ovisi o kutu.[16]*

Comptonovo raspršenje je jedan od četiri konkurentna procesa kada fotoni stupaju u interakciju s materijom. Pri energijama od nekoliko eV do nekoliko keV, što odgovara vidljivoj svjetlosti kroz meke X-zrake, foton može biti potpuno apsorbiran i njegova energija može izbaciti elektron iz atoma domaćina, proces poznat kao fotoelektrični efekt. Fotoni visoke energije od 1,022 MeV i više mogu bombardirati jezgru i uzrokovati stvaranje elektrona i pozitrona, proces koji se naziva proizvodnja para; fotoni čak i više

energije (iznad praga energije od najmanje 1,670 MeV, ovisno o uključenim jezgrama), mogu izbaciti nukleon ili alfa česticu iz jezgre u procesu koji se naziva fotodeintegracija. Comptonovo raspršenje je najvažnija interakcija u intervenirajućem energetskom području, pri energijama fotona većim od onih tipičnih za fotoelektrični učinak, ali manjim od praga proizvodnje para.[17]

## 5.2 Comptonov efekt u modernoj fizici

Kada foton uđe u materiju, vjerojatno će stupiti u interakciju s jednim od atomskih elektrona. Prema klasičnoj teoriji, elektroni će oscilirati na frekvenciji fotona zbog interakcije elektrona s električnim i magnetskim poljem fotona i ponovno će zračiti elektromagnetsko zračenje (fotone) na toj istoj frekvenciji. To se zove Thomsonovo raspršenje. Međutim, početkom 1920-ih Arthur Compton eksperimentalno je potvrdio ranije opažanje J. A. Graya da se, posebno pod kutovima raspršenja unatrag, čini da postoji komponenta emitiranog zračenja (nazvana modificirani val) koja ima dužu valnu duljinu od izvorne primarne (nemodificirani) val. Klasična elektromagnetska teorija ne može objasniti ovaj modificirani val. Compton je tada pokušao teoretski razumjeti takav proces i mogao je pronaći samo jedno objašnjenje: Einsteinov koncept fotonske čestice mora biti točan. Proces raspršenja prikazan je na slici 21.



Slika 21 Comptonovo raspršenje fotona na elektronu koji uglavnom miruje.[1]

Compton je 1923. predložio da se foton raspršuje od samo jednog elektrona, a ne od svih elektrona u materijalu, te da se zakoni očuvanja energije i količine gibanja primjenjuju kao u svakom elastičnom sudaru između dviju čestica. Impuls čestice koja se giba brzinom svjetlosti (foton) dan je izrazom :

$$\mathbf{p} = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Foton se tretira kao čestica s određenom energijom i količinom gibanja. Raspršenje se odvija u ravnini koja se smatra ravninom xy na slici 21. I x i y komponente količine gibanja moraju biti očuvane zbog vektorske prirode linearne količine gibanja. Energija i količina gibanja prije i poslije sudara (tretirano relativistički) dani su u tablici 2.

Tablica 2 Rezultati Comptonovog raspršenja[1]

Energy or Momentum	Initial System	Final System
Photon energy	$hf$	$hf'$
Photon momentum in x direction ( $p_x$ )	$\frac{h}{\lambda}$	$\frac{h}{\lambda'} \cos \theta$
Photon momentum in y direction ( $p_y$ )	0	$\frac{h}{\lambda'} \sin \theta$
Electron energy	$mc^2$	$E_e = mc^2 + \text{K.E.}$
Electron momentum in x direction ( $p_x$ )	0	$p_e \cos \phi$
Electron momentum in y direction ( $p_y$ )	0	$-p_e \sin \phi$

Upadni i raspršeni fotoni imaju frekvencije  $f$ , odnosno  $f'$ . Povratni elektron ima energiju  $E_e$  i impuls  $p_e$ . U konačnom sustavu ukupna energija elektrona povezana je s njegovom količinom gibanja jednadžbom:

$$E_e^2 = (mc^2)^2 + p_e^2 c^2$$

Sada se mogu napisati zakoni očuvanja, početno = konačno, kao:

$$\text{Energija } hf + mc^2 = hf' + E_e$$

$$p_x \quad \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + p_e \cos \Phi$$

$$p_y \quad \frac{h}{\lambda'} \sin \theta = p_e \sin \Phi$$

Promjena valne duljine  $\Delta\lambda=\lambda' - \lambda$  povezuje se sa kutom raspršenja fotona  $\theta$ . Prvo se eliminira kut trzaja  $\Phi$  kvadriranjem jednadžbi  $p_x$  i  $p_y$  i njihovim zbrajanjem, što rezultira:

$$p_e^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{\lambda}\right)\left(\frac{h}{\lambda'}\right) \cos \theta$$

Iz zadnje jednadžbe se zamijeni  $p_e$ , a iz jednadžbe za energiju  $E_e$  u jednadžbu  $E_e^2 = (mc^2)^2 + p_e^2 c^2$  uz postavljanje  $\lambda = c/f$ :

$$[h(f - f') + mc^2]^2 = m^2 c^4 + (hf)^2 + (hf')^2 - 2(hf)(hf') \cos \theta$$

Kvadriranje lijeve strane i poništavanje članova ostavlja

$$mc^2(f - f') = hff'(1 - \cos \theta)$$

Preoblikovanje izraza daje:

$$\frac{h}{mc^2} (1 - \cos \theta) = \frac{f - f'}{ff'} = \frac{\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda'}}{\frac{c^2}{\lambda\lambda'}} = \frac{1}{c} (\lambda' - \lambda)$$

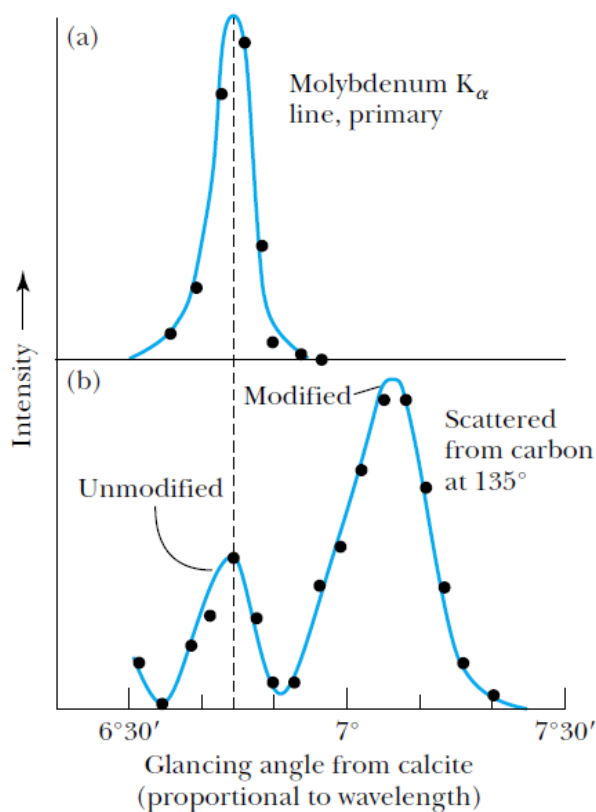
Ili :

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

što je rezultat koji je Compton pronašao 1923. za povećanje valne duljine raspršenog fotona.[1]

Compton je zatim nastavio s provjerom valjanosti svog teorijskog rezultata izvođenjem pažljivog eksperimenta u kojem je raspršio x zrake valne duljine 0,071 nm od ugljika pod nekoliko kutova. Pokazao je da se modificirana valna duljina dobro slaže s njegovim predviđanjem.\* Dio njegovih podataka prikazan je na slici 22, gdje su identificirani i modificirani ( $\lambda'$ ) i nemiđificirani ( $\lambda$ ) raspršeni valovi.





Slika 22 Comptonovi izvorni podaci[1]

Također se mogu izračunati kinetička energija i kut raspršenja povratnog elektrona. Ubrzo su provedeni pokusi u kojima su detektirani povratni elektroni, čime je Comptonova teorija u potpunosti potvrđena. Proces elastičnog raspršenja fotona od elektrona danas se naziva Comptonov efekt.

Treba imati na umu da razlika u valnoj duljini  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ , ovisi samo o konstantama ***h***, ***c*** i ***m<sub>e</sub>*** uz kut raspršenja  $\theta$ .

Količina  $\lambda_c = h/m_e c = 2.426 \times 10^{-3} \text{ nm}$  naziva se Comptonova valna duljina elektrona. Samo za valne duljine istog reda kao  $\lambda_c$  (ili kraće) će frakcijski pomak  $\Delta\lambda/\lambda$  biti velik. Za vidljivo svjetlo, na primjer s  $\lambda=500\text{nm}$ , maksimalni  $\Delta\lambda/\lambda$  je reda veličine  $10^{-5}$  i  $\Delta\lambda$  bi bilo teško otkriti. Vjerojatnost pojave Comptonovog efekta za vidljivu svjetlost također je prilično mala. Međutim, za rendgenske zrake valne duljine 0,071 nm koje

koristi Compton, omjer  $\Delta\lambda/\lambda$  je  $\sim 0.03$  i lako se može uočiti. Stoga je Comptonov učinak važan samo za x-zrake ili fotone g-zraka, a mali je za vidljivu svjetlost.[1]

Fizikalni proces Comptonovog efekta može se opisati na sljedeći način. Foton se elastično raspršuje od uglavnom slobodnog elektrona u materijalu. (Energija fotona toliko je veća od energije vezanja gotovo slobodnog elektrona da se energija vezanja atoma može zanemariti.) Novostvoreni raspršeni foton tada ima modificiranu, dužu valnu duljinu. Ako se foton rasprši na jednom od čvrsto vezanih unutarnjih elektrona tada energija vezanja nije zanemariva i elektron se možda neće pomaknuti. Raspršenje je u ovom slučaju učinkovito od cijelog atoma (jezgra + elektroni). Tada je masa u jednadžbi Comptonovog efekta nekoliko tisuća puta veća od  $m_e$ , a  $\Delta\lambda$  je odgovarajuće manji. Raspršenje od čvrsto vezanih elektrona rezultira nemodificiranim raspršenjem fotona ( $\lambda=\lambda'$ ), što je također promatrano na slici 22. Prema tome, kvantna slika također objašnjava postojanje nemodificirane valne duljine predviđene klasičnom teorijom (Thomsonovo raspršenje) na koju je ranije aludirano.

Uspjeh Comptonove teorije uvjerljivo je pokazao ispravnost i kvantnog koncepta i čestične prirode fotona. Korištenje zakona održanja energije i količine gibanja relativistički primijenjenih na točkasto raspršenje fotona od elektrona konačno je uvjerilo veliku većinu znanstvenika u valjanost nove moderne fizike. Compton je za ovo otkriće 1927. godine dobio Nobelovu nagradu za fiziku.[7]

## 6 PRIMJENA COMPTONOVOG EFEKTA

Comptonovo raspršenje je od primarne važnosti za radiobiologiju, jer je najvjerojatnija interakcija gama zraka i X-zraka visoke energije s atomima u živim bićima i primjenjuje se u terapiji zračenjem. Comptonov efekt je važan učinak u gama spektroskopiji koji dovodi do Comptonovog ruba, budući da je moguće da se gama zrake rasprše izvan korištenih detektora. Comptonova supresija koristi se za otkrivanje zalutalog raspršenog gama zračenja kako bi se suzbio ovaj učinak.[4]

### 6.1 Magnetsko Comptonovo raspršenje

Magnetsko Comptonovo raspršenje je proširenje prethodno spomenute tehnike koja uključuje magnetizaciju uzorka kristala pogođenog visokoenergetskim, cirkularno polariziranim fotonima. Mjerenjem energije raspršenih fotona i mijenjanjem magnetizacije uzorka, generiraju se dva različita Comptonova profila (jedan za momente vrtnje prema gore i jedan za momente vrtnje prema dolje). Uzimajući razliku između ova dva profila, dobiva se magnetski Comptonov profil (MCP), dan s  $J_{mag}(p_z)$  - jednodimenzionalnom projekcijom gustoće spina elektrona.

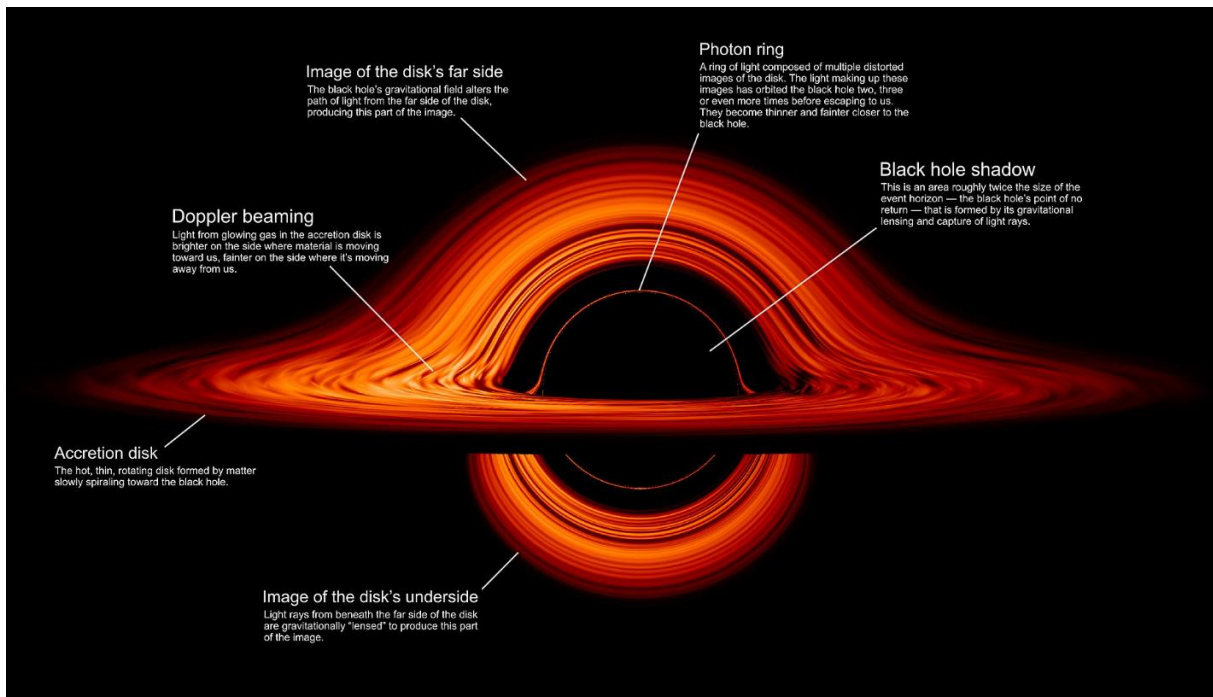
$$J_{mag}(p_z) = \frac{1}{\mu} \int \int_{-\infty}^{\infty} (n_{\uparrow}(p) - n_{\downarrow}(p)) dp_x dp_y$$

gdje je  $\mu$  broj spin-nesparenih elektrona u sustavu,  $n_{\uparrow}(p)$  i  $n_{\downarrow}(p)$  su trodimenzionalne distribucije impulsa elektrona za većinu spinski odnosno manjinski spinski elektroni.

Budući da je ovaj proces raspršenja nekoherentan (nema faznog odnosa između raspršenih fotona), MCP je reprezentativan za skupna svojstva uzorka i sonda je osnovnog stanja. To znači da je MCP idealan za usporedbu s teorijskim tehnikama kao što je teorija funkcionala gustoće. Područje ispod MCP-a izravno je proporcionalno momentu vrtnje sustava i stoga se, u kombinaciji s metodama mjerenja ukupnog momenta (kao što je SQUID magnetometrija), može koristiti za izolaciju doprinosa spina i orbite ukupnom momentu sustava. . Oblik MCP-a također daje uvid u porijeklo magnetizma u sustavu.[16]

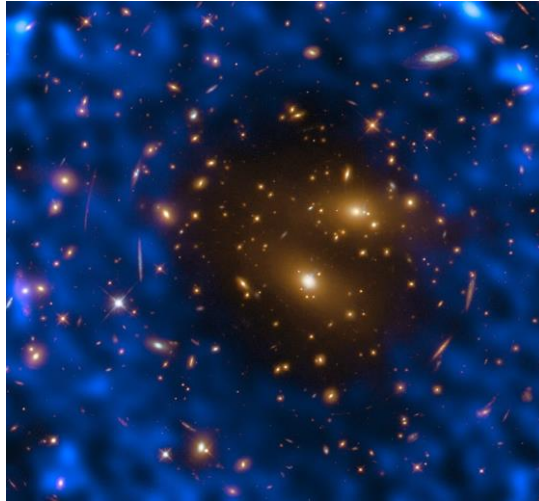
## 6.2 Inverzno Comptonovo raspršenje

Inverzno Comptonovo raspršenje važno je u astrofizici. U rendgenskoj astronomiji, pretpostavlja se da akrecijski disk koji okružuje crnu rupu proizvodi toplinski spektar (Slika 23). Fotoni niže energije proizvedeni iz ovog spektra se raspršuju na više energije relativističkim elektronima u okolnoj koroni. Pretpostavlja se da to uzrokuje komponentu zakona snage u spektru X-zraka (0,2–10 keV) crnih rupa koje se nakupljaju.



*Slika 23 Vrući akrecijski disk crne rupe, koji pokazuje relativističke efekte nametnute svjetlosti kada se emitira u područjima podložnim ekstremnoj gravitaciji. [19]*

Učinak se također opaža kada se fotoni iz kozmičke mikrovalne pozadine (CMB) kreću kroz vrući plin koji okružuje klaster galaksija. Elektroni u ovom plinu raspršuju CMB fotone na više energije, što rezultira Sunyaev–Zel'dovichevim efektom. Promatranja efekta Sunyaev–Zel'dovich daju gotovo neovisan o crvenom pomaku način otkrivanja klastera galaksija. [16]

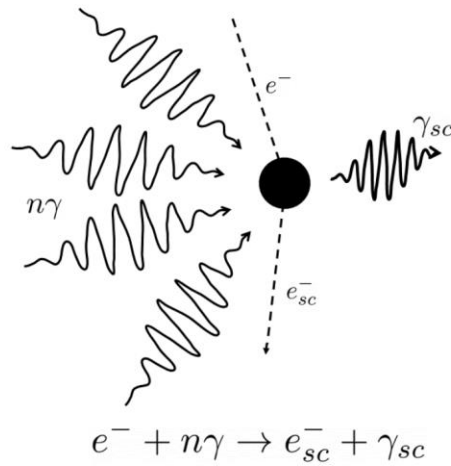


*Slika 24 Prva mjerenja toplinskog učinka Sunyaev–Zeldovich iz Atacama Large Milimeter Array s jednim od najmasivnijih poznatih klastera galaksija, RX J1347.5-1145.[21]*

Neki objekti za sinkrotronsko zračenje raspršuju lasersko svjetlo s pohranjene elektronske zrake. Ovo Comptonovo povratno raspršenje proizvodi visokoenergetske fotone u rasponu od MeV do GeV koji se koriste u eksperimentima nuklearne fizike.

### **6.3 Nelinearno inverzno Comptonovo raspršenje**

Nelinearno inverzno Comptonovo raspršenje (NICS) je raspršenje višestrukih niskoenergetskih fotona, zadanih intenzivnim elektromagnetskim poljem, u visokoenergetskom fotonu (rendgenske ili gama zrake) tijekom interakcije s nabijenom česticom, kao što je elektron. Također se naziva nelinearno Comptonovo raspršenje i višefotonsko Comptonovo raspršenje. To je nelinearna verzija inverznog Comptonovog raspršenja u kojoj se uvjeti za višefotonsku apsorpciju od strane nabijene čestice postižu zbog vrlo intenzivnog elektromagnetskog polja, primjerice onog koje proizvodi laser.



Slika 25 Nelinearno inverzno Comptonovo raspršenje[18]

Nelinearno inverzno Comptonovo raspršenje zanimljiv je fenomen za sve primjene koje zahtijevaju visokoenergetske fotone budući da je NICS sposoban proizvesti fotone s energijom usporedivom s energijom mirovanja nabijene čestice i većom. Kao posljedica toga, NICS fotoni se mogu koristiti za pokretanje drugih fenomena kao što su kao proizvodnja parova, Comptonovo raspršenje, nuklearne reakcije i može se koristiti za ispitivanje nelinearnih kvantnih učinaka i nelinearnog QED-a (kvantna elektrodinamika). [16]

## **7 FOTOELEKTRIČNI I COMPTONOV UČINAK U GRAĐEVINARSTVU**

Comptonov efekt opisuje neelastično raspršenje x zraka ili  $\gamma$  zraka od elektrona u ciljnom materijalu. Ima dvije primjene u području istraživanja materijala. Na osnovnoj razini, spektralna distribucija raspršenog zračenja otkriva informacije o distribuciji impulsa elektrona u meti. Manje dublja uporaba proizlazi iz proporcionalnosti između intenziteta raspršenog signala i gustoće elektrona od kojih su oni raspršeni. Rezultat je denzitometrija i slikanje iz povratno raspršenog signala u situacijama kada su tehnike prijenosa neučinkovite za nedestruktivna ispitivanja.[17]

Područje građevinarstva uvelike se oslanja na kvalitetu i svojstva građevinskih materijala. Razumijevanje ovih materijala na atomskoj i molekularnoj razini ključno je za osiguravanje strukturalnog integriteta, sigurnosti i učinkovitosti zgrada i infrastrukture. Fotoelektrični učinak, kako ga je opisao Albert Einstein 1905. godine, uključuje emisiju elektrona s površine materijala kada je izložen fotonima (svjetlu). Ovaj fenomen ima duboke implikacije na analizu materijala u građevinarstvu.

Fotoelektrični učinak koristi se za određivanje elementarnog sastava materijala. Kada fotoni s dovoljnom energijom pogode površinu materijala, istiskuju elektrone iz atoma unutar materijala. Energija tih emitiranih elektrona izravno je povezana s atomskom strukturom materijala. Mjerenjem energetskog spektra emitiranih elektrona, inženjeri i znanstvenici mogu odrediti elemente prisutne u materijalu. Ova tehnika je posebno korisna u građevinarstvu za provjeru sastava građevinskih materijala kao što su čelik, beton i legure. Za sigurnost i dugovječnost građevinskih projekata ključno je osigurati da ti materijali zadovoljavaju specificirane standarde i mjere kontrole kvalitete.

Fotoelektrični efekt također omogućuje analizu sastava površine. Variranjem energije upadnih fotona, istraživači mogu selektivno ispitivati različite slojeve površine materijala. Ova sposobnost je vrijedna za procjenu površinskih obrada, premaza ili korozije u građevinskim materijalima. Inženjeri mogu odrediti učinkovitost zaštitnih premaza na konstrukcijama poput mostova ili procijeniti stanje armature u betonu.

Fotoelektrični senzori sastavni su dijelovi uređaja za ispitivanje integriteta materijala. Ovi senzori mjere interakciju između fotona i površine materijala, pomažući u otkrivanju pukotina, šupljina ili raslojavanja unutar građevinskog materijala. Ovaj pristup testiranju bez razaranja osigurava sigurnost i trajnost konstrukcija bez nanošenja štete.

Ovaj fenomen također je ključan za funkciju solarnih panela, koji se često koriste za proizvodnju električne energije iz sunčeve svjetlosti. Solarni kolektori ili fotonaponski paneli sastoje se od fotoćelija osjetljivih na svjetlost. Kada fotoni sunčeve svjetlosti padnu na te ćelije, fotoelektrični učinak uzrokuje oslobađanje elektrona iz materijala unutar stanica. Ovaj proces stvara električni napon i električnu energiju, koji se zatim koriste za napajanje električne opreme u građevinskim projektima ili za napajanje samih zgrada. Ovaj oblik obnovljive energije pomaže smanjiti potrebu za fosilnim gorivima i smanjuje emisije stakleničkih plinova, pridonoseći održivosti građevinske industrije.

Comptonov efekt, koji je otkrio Arthur Compton 1923. godine, uključuje raspršenje X-zraka ili gama-zraka kada one djeluju s elektronima unutar materijala. Ovaj učinak ima važne primjene u analizi materijala za građevinarstvo. Metode ispitivanja bez razaranja nezamjenjive su u građevinarstvu za procjenu cjelovitosti materijala bez nanošenja štete. Comptonov učinak igra središnju ulogu u NDT tehnikama kao što su rendgenska radiografija i kompjuterizirana tomografija (CT). Ove se metode oslanjaju na raspršenje X-zraka ili gama-zraka elektronima unutar materijala. Analizom rezultirajućih uzoraka raspršenja, inženjeri mogu stvoriti detaljne slike unutrašnjosti materijala, otkrivajući sve nedostatke, praznine ili nepravilnosti.[17]

NDT tehnike se intenzivno koriste tijekom građevinskih projekata za pregled zavarenih spojeva, betonskih konstrukcija, cjevovoda i drugih kritičnih komponenti. Time se osigurava da građevinski materijali zadovoljavaju standarde kvalitete i regulatorne zahtjeve, pridonoseći sigurnosti i pouzdanosti konstrukcija. Comptonov učinak također omogućuje određivanje gustoće materijala. Mjerenjem stupnja raspršenja X-zraka ili gama-zraka, inženjeri mogu izračunati prosječnu gustoću elektrona unutar materijala. Ove informacije su bitne za procjenu strukturnih svojstava i performansi građevinskih materijala.



## **7.1 Fotoelektrični učinak na betonske artefakte proizvedene dodatkom luminescentnih tvari i ostalih polimera**

Fotoluminiscencija je jedna od praktičnih primjena kvantne fizike u suvremenom istraživanju. Fenomen je prvobitno konceptualizirao Albert Einstein (1905.) kada je objašnjavao prirodu fotona ili svjetlosnog kvanta u fenomenu fotoelektričnog efekta. Moguće je objasniti kako neki materijali emitiraju fotone (svjetlost na određenoj frekvenciji) nakon što su bili izloženi izvoru energije, kao što je sunčeva svjetlost. U prirodi se ovaj učinak može vidjeti kada su tvari izložene ultraljubičastom zračenju ili sunčevom zračenju. Emisija svjetlosti fotoluminiscencijom je oblik luminescentne emisije koja nastaje kada je materijal pobuđen, emitirajući elektromagnetsko zračenje u obliku fotona na određenoj frekvenciji.

Fotoluminiscencija je posljednjih godina dobila brojne primjene u različitim procesima u medicini. Luminescentni nanomaterijali su superiorniji u odnosu na svojstva drugih materijala u odnosu na emisiju fotona, stabilnost, kemijska svojstva i biokompatibilnost u biološkim i medicinskim primjenama. Razvoj novih, jeftinih i učinkovitih luminescentnih materijala omogućuje primjenu u fizici visokih energija, medicini, rasvjeti, sigurnosti, poljoprivredi i drugima. Među čvrstim tvarima rijetki zemljani metali izdvajaju se iz dobro promišljene dugoročne dinamičke strategije razrađene globalnim industrijskim procesima, uključujući 15 lantanida s atomskim brojevima od 57 do 71 u periodnom sustavu. Naziv rijetko-zemljani nastao je u 18. i 19. stoljeću kada su elementi izolirani iz metalnih oksida poznatih kao zemnoalkalijski metali. Na razini nanomaterijala, luminescentni efekti koje proizvode ti obrađeni materijali imaju primjenu u različitim kontekstima. Pretraživanje literature otvara put korištenju svojstava luminescentnih zlatnih nanoklastera (AuNC) i omogućuje buduće primjene kvantnog kemijskog/bioosjećaja. Luminescentni materijali dopirani lantanidima zanimljivi su za optičko-elektroničku industriju, posebno zato što emitiraju čiste boje.[3]

Korištenje rijetkih zemljanih materijala iz sinteze luminescentnih spojeva može se koristiti kao optički marker u medicinskim ispitivanjima ili u proizvodnji molekularnih uređaja koji emitiraju svjetlost. I, kada su podvrgnuti ultraljubičastom zračenju, ioni rijetke zemalje emitiraju fotone različitih frekvencija, kao što je itrijevo crveno dopirano europijem; plava boja su stroncijevi fosfati dopirani europijem; a zelena boja koja ima terbijev ion, što rezultira fotoluminiscencijom u tri primarne boje.[3]

Rijetko zemljani materijali doprinose održivosti primijenjenih projekata energetske učinkovitosti. U inženjerstvu se ove tvari primjenjuju u dizajnu fotonaponskih panela i u učinkovitijim tehnologijama rasvjete. U Meksiku su betonskim artefaktima dodavani rijetko zemljani materijali kako bi se proizveli fotoluminiscentni efekti za korištenje u vanjskim okruženjima. . U Europi je učinak primijenjen i na osvijetljene staze za pješake i bicikliste. Luminescencija u betonu ovisi o kemijskom sastavu upotrijebljenog materijala, a emitirana svjetlost može imati različite valne duljine. Fizikalni mehanizam luminiscencije povezan je s proizvodnjom i transformacijom svjetlosti fotoelektričnim efektom: tijekom dana materijal prima svjetlosnu energiju sunčevog zračenja, a noću se ta energija oslobađa emitirajući u obliku fotona. Tako sunčeva energija koja se usmjerava na beton u svijetlom razdoblju (danu) može osvijetliti put pješacima i biciklistima u tamnom razdoblju.[11]

Beton proizveden dodatkom polimernih aglomerata povećava prijenos sunčevog zračenja i posljedično povećava emisiju fotona u blokovima koji se koriste za osvijetljavanje staza za pješake i bicikliste. A s obzirom na to da polimerni otpad dolazi od recikliranja, njegova bi uporaba mogla pridonijeti apsorpciji zračenja na održiv način.



*Slika 26 Biciklistička staza napravljena od fotoluminiscentnog betona[11]*

Mješavina fotoluminiscentnih materijala i polimera smanjuje čvrstoću betona, ali ne ometa proizvod, s obzirom da je svrha osvijetljavanje staza za pješake i bicikliste. Korištenje fotoluminiscentnih materijala je inovativan proces u niskogradnji i

istraživanje primjene ovih materijala može doprinijeti primjeni tehnologije u segmentu.[3]

## **7.2 Infracrvena termografija u građevinarstvu**

Infracrvena termografija ima primjenu u ocjeni svojstava građevinskih materijala i konstrukcija u građevinarstvu. U području niskogradnje, nije potrebno samo izgraditi objekte prema planu, već i biti siguran da s godinama zgrada ima iste performanse kao što je procijenjeno. Za to je procjena zgrade neophodan faktor. U ovoj se generaciji podjednaka važnost pridaje i studiji izgradnje zgrade kao i studiji ocjenjivanja zgrade. To je dovelo do mnogo sofisticiranih, ali točnih metoda za procjenu sadašnjeg strukturnog stanja zgrade, kako bi se ona sačuvala za budućnost. Infracrvena termografija je tako velika inovacija koja pomaže u istraživanju stanja u kojem je zgrada i vodi u otklanjanju oštećenja. Ova metoda je vrsta nedestruktivne metode koja procjenjuje bez ikakvog kontakta. Imaju veliku potražnju za provođenjem brzih istraga. Ali njegova istaknutost u istraživanju zgrada i dalje raste.[15]

Metoda infracrvene termografije uključuje prikupljanje podataka i njihovu analizu uz pomoć termovizijskih uređaja koji rade bez ikakvog kontakta s materijalom koji se analizira. S godinama se metoda razvila na sve vještiji način jer su razvijene izvrsne infracrvene kamere koje podržavaju metodu pretvaranjem zračenja u slike (termalne slike). Koncept rada je jednostavan. Metoda uključuje pretvaranje infracrvenog zračenja koje emitira (tijelo koje se promatra) u toplinske slike ili termografe. Termografija znači pisanje topline. Podaci se dobivaju iz promatranog materijala na temelju toplinskog zračenja koje emitiraju. Karakteristike emitiranog zračenja temelje se na temperaturi tijela, stanju njihove površine kao i toplinskim svojstvima. Infracrvena kamera ovdje ima ulogu u očitavanju toplinske energije iz tijela. Emitirana energija može biti posljedica refleksije ili prijenosa ili izravno zračene energije. Ovi osjetilni podaci pretvaraju se u termografe ili toplinske slike. Oni donose samo rezultate temeljene na energiji zračenja i ne uzimaju u obzir vidljivo svjetlo. Toplinske slike su potpuno različite od vizualnih slika. Ove slike mogu se snimiti u potpunom mraku.[15]

Jedna od glavnih primjena infracrvene termografije u građevinarstvu ovisi o građevinskoj termografiji. Kako se rezultati temelje na emisijskim svojstvima materijala,

potrebno je izvršiti dobru procjenu tog područja. Emisijska svojstva građevinskih materijala prikazana su koeficijentima emisije koji se uglavnom kreću između 0,90 i 0,96. Koeficijenti emisije građevinskih materijala prikazani su u tablici 3.

Tablica 3 Koeficijenti emisije građevinskih materijala [Autor]

Beton	0,94
Pijesak	0,93
Opeka	0,93-0,94
Vapnenac	0,96
Žbuka	0,90-0,96
Staklo	0,93-0,96
Drvo	0,96
Filc	0,93
Gips	0,90
Boja	0,90-0,95
Glina	0,95

Infracrvena termografija ima široku primjenu u području građevinarstva, što je objašnjeno u nastavku.

### 7.2.1 Određivanje prodiranja vlage

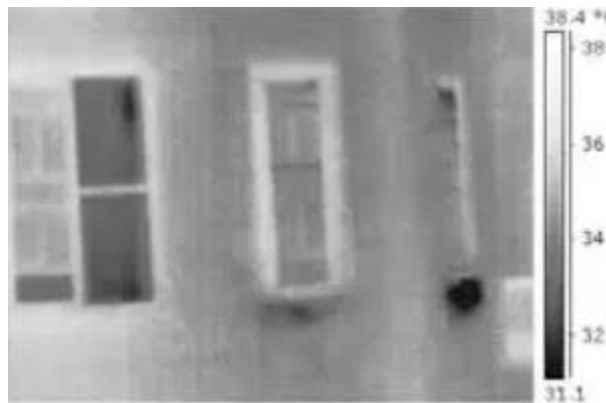
Metoda pokazuje varijaciju vlage putem fotografija, koje se nazivaju termografi. Ove slike prikazuju različite boje sjenila za određenu temperaturu. Materijal pod normalnom temperaturom, ako je podvrgnut bilo kakvom prodoru vlage, bit će na nižoj temperaturi. Ove razlike mogu biti vidljive na termografima. Slika-1 prikazuje termografiju prodiranja vlage u nadstrešnicu.



Slika 27 Termografija prodiranja vlage u nadstrešnicu.[15]

Prikazana je temperatura za odgovarajuće boje traka. Slika je nastala u večernjim satima jednog ljetnog dana. Zidana konstrukcija je uglavnom izložena temperaturi od 47°C zbog sunčevog zračenja. Utvrđeno je da promatrana zidana konstrukcija ima tri

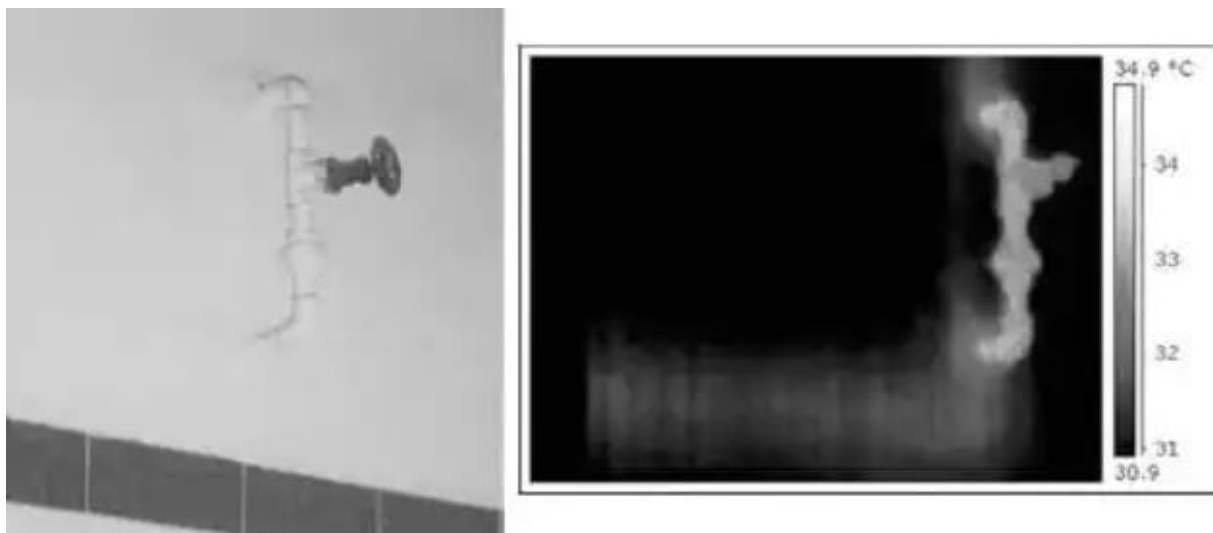
slobodne strane koje su bile izložene kišnici. Uz to blato i prašina su se taložili duž linija koje su dovele do smanjenja temperature, što je prikazano tamnim prugama. Slika 28 prikazuje prodor vlage na dnu prozora zidane konstrukcije pri temperaturi nižoj od 31 stupnja Celzija. [15]



Slika 28 Prodor vlage ispod prozora zidane konstrukcije predstavljen tamnim trakama[15]

### 7.2.2 Procjena vodovoda

Termografi pomažu u procjeni performansi vodova i cjevovoda. Slika 29 predstavlja vizualni prikaz i termografiju regulacijskog ventila. Slike su snimljene po vrućem danu. Voda koja teče bila je topla, jer je spremnik za vodu koji se nalazi na terasi bio izložen suncu. Zid sa slike ima 31 stupanj Celzijusa, skrivena cijev i izložena cijev imaju 32 odnosno 33 stupnja Celzijusa.[15]



Slika 29 (a) Vizualna slika (b) Toplinska slika[15]

### 7.2.3 Određivanje svježeg i očvrstlog stadija betona

Slika 30 prikazuje toplinsku sliku kamiona za isporuku gotove betonske smjese na gradilištu tijekom vruće klime. Uočeno je da je guma kamiona na 46 stupnjeva

Celzijusa, pumpa na 50 stupnjeva, a bubanj kamiona na 38 stupnjeva. Ali ujednačena boja bubnja jasno daje do znanja da ima dobro miješanje i kvalitetu.



*Slika 30 Toplinska slika bubnja kamiona za gotovu mješavinu betona[15]*

Slika 31 prikazuje protok betona kroz cijev. Vidljive su određene mrlje koje pokazuju curenje smjese na spojevima.

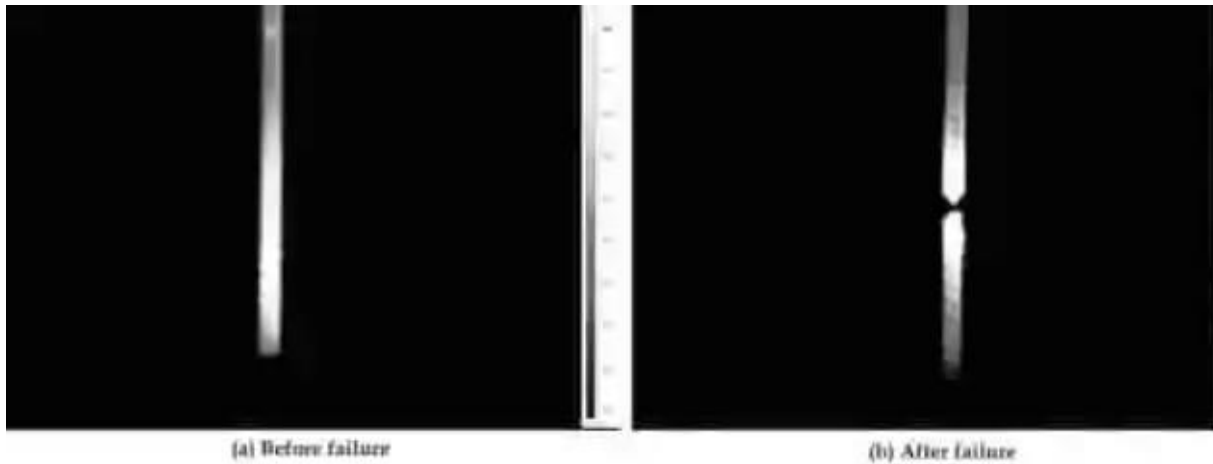


*Slika 31 Toplinska slika betona koji teče kroz cijev[15]*

Jasno je da se svaka smetnja u protoku može vidjeti na licu mjesta i prema tome se mogu poduzeti korektivne mjere. Sustav se može primijeniti u lijevanju ploče. Tijekom zbijanja, istovremeno se može proučavati kako temperatura varira kroz veliko područje, što pomaže u poznavanju problema bržeg isparavanja koji rezultiraju neadekvatnom hidratacijom betona. Metoda se primjenjuje za upoznavanje učinka stvrdnjavanja. Stupovi koji se stvrdnjavaju gunny vrećama i prskanjem mogu se razlikovati po različitim nijansama boja prikazanim za različite temperature.[15]

#### 7.2.4 Precizan test napetosti armature

Zna se da armaturne šipke, padaju na vlačnom testu, formiranjem grla. I presjek ne uspijeva na ovom formiranom vratu. Normalna vlačna ispitivanja ne daju točnu ideju o granici tečenja.



Slika 32 Toplinska slika deformirane šipke pod vlačnim testom[15]

Uočeno je da je vrh oštećenog dijela na višoj temperaturi u usporedbi s bilo kojom točkom uzorka. Dakle, ova metoda pomaže u davanju preciznijih mjerenja naprezanja, u usporedbi s konvencionalnim metodama.[15]

#### 7.2.5 Određivanje i lociranje šupljina u betonu

Metoda se također može koristiti za utvrđivanje postojanja šupljina u betonu. Ovo se može testirati kako bi se odredila kvaliteta očvrslog betona. Time se također mjeri učinkovitost zbijanja, a time i izrada.[15]

## 8 ZAKLJUČAK

Fotoelektrični efekt i Compton efekt dvije su vrste interakcija između svjetlosti i materije. Oba efekta pokazuju čestičnu prirodu elektromagnetskih valova. Fotoelektrični efekt objasnio je Albert Einstein. Arthur Compton primijetio je i objasnio Comptonov učinak. U fotoelektričnom učinku, cjelokupnu energiju upadnog fotona preuzima jedan elektron, ali u Comptonovom učinku upadni foton prenosi samo dio svoje energije na elektron. Fotoelektrični efekt je fenomen niske energije, a fotoni u interakciji nestaju čim predaju svoju energiju elektronima. S druge strane, Comptonov efekt je fenomen srednje energije, a fotoni u interakciji se raspršuju na elektronima. Ovo je glavna razlika između fotoelektričnog učinka i Comptonovog učinka.

Zaključno se može reći kako električni i Comptonov učinak, iako se razlikuju u svojim manifestacijama, konvergiraju u svojim dubokim implikacijama za polje kvantne fizike. Njihovo pojašnjenje ne samo da je revolucioniralo naše razumijevanje temeljnih interakcija između materije i zračenja, već je i utrlo put bezbrojnim tehnološkim napretcima koji nastavljaju oblikovati naš moderni svijet. Kroz sveobuhvatno istraživanje ovih fenomena, nastoji se steći dublje razumijevanje zamršenosti kvantnog carstva i trajnog naslijeđa ovih temeljnih otkrića. Također se može zaključiti da su fotoelektrični i Comptonov učinak neprocjenjivi su alati u analizi materijala za građevinarstvo. Fotoelektrični efekt omogućuje analizu elementarnog i površinskog sastava, kao i ispitivanje cjelovitosti materijala, dok Comptonov efekt ima ključnu ulogu u ispitivanju bez razaranja i određivanju gustoće materijala. Ove tehnike su temeljne u osiguravanju kvalitete, sigurnosti i trajnosti građevinskih materijala, što u konačnici pridonosi uspjehu građevinskih projekata.

U ovom diplomskom radu duboko su obrazložena dvama temeljna fenomena u području fizike. Oba ova fenomena igraju ključnu ulogu u razumijevanju ponašanja svjetlosti i materije na atomskim i subatomskim razinama, a njihovo se značenje proteže izvan područja čiste znanosti, posebice u području konstrukcije.



Fotoelektrični efekt, koji je prvi sveobuhvatno objasnio Albert Einstein, bio je ključan u pomaku razumijevanja svjetlosti s čisto valne prirode na onu koja pokazuje ponašanje poput čestica. Taj je učinak pronašao praktičnu primjenu u raznim tehnologijama, uključujući fotonaponske ćelije i senzore koji se koriste u građevinskoj industriji. Solarni paneli, na primjer, oslanjaju se na fotoelektrični učinak za pretvaranje sunčeve svjetlosti u električnu energiju, osiguravajući održivi izvor energije za zgrade i infrastrukturu.

S druge strane, Comptonov efekt, kako ga je razjasnio Arthur H. Compton, demonstrirao je kvantizaciju elektromagnetskog zračenja i dao ključnu osnovu za naše razumijevanje dualnosti val-čestica fotona. U građevinarstvu i inženjerstvu ovo je znanje pridonijelo razvoju naprednih tehnika snimanja poput rendgenske radiografije i infracrvene tomografije (ICT). Te su tehnologije neprocjenjive za pregled struktura, otkrivanje nedostataka i osiguravanje sigurnosti i integriteta zgrada i infrastrukture.

Nadalje, principi koji leže u osnovi i fotoelektričnog i Comptonovog efekta odigrali su značajnu ulogu u razvoju suvremenih materijala koji se koriste u građevinarstvu. Kvantna mehanika, koja upravlja ovim fenomenima, dovela je do dizajna i proizvodnje novih materijala sa specifičnim elektroničkim svojstvima, poboljšavajući učinkovitost i performanse različitih građevinskih materijala, kao što su poluvodiči koji se koriste u elektroničkim sustavima i energetski učinkoviti građevinski materijali. Iz svega navedenog može se konstatirati kako fotoelektrični i Comptonov učinak ne samo da produbljuju razumijevanje temeljne prirode svjetlosti i materije, već također nalaze praktične primjene u građevinskoj industriji. Oni doprinose razvoju održivih izvora energije, naprednih tehnologija snimanja i poboljšanih građevinskih materijala. Ova dva fenomena predstavljaju primjer zamršene veze između fundamentalne fizike i praktičnih izazova s kojima se suočava svijet građevinarstva i inženjerstva, pokazujući trajan i dalekosežan utjecaj znanstvenih otkrića na naše svakodnevne živote.

## 9 LITERATURA

- [1] Thornton, S. T., Rex, A. F. , Modern Physics for Scientists and Engineers, Boston 2013
- [2] Cooper, M.J., Compton scattering and electron momentum determination, Radiation Physics and Chemistry, Volume 50, Issue 1, 1997
- [3] Photoelectric effect on concrete artifacts produced with the addition of luminescent substances and polymer residues, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2021
- [4] <https://www.slideshare.net/AIAminIslam14/compton-effect-93066138> , pristup 21.07.2023.
- [5] <https://pediaa.com/difference-between-photoelectric-effect-and-compton-effect/>, pristup 23.07.2023.
- [6] <https://gkscientist.com/applications-of-photoelectric-effect/>, pristup 22.07.2023.
- [7] [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials\\_Science/Supplemental\\_Modules\\_\(Materials\\_Science\)/Electronic\\_Properties/Compton\\_Effect](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Electronic_Properties/Compton_Effect), pristup 25.07.2023.
- [8] <https://geekswipe.net/technology/electronics/how-night-vision-systems-work/>, pristup 30.07.2023.
- [9] <https://www.power-and-beyond.com/the-photoelectric-effect-and-its-role-in-solar-photovoltaics-a-ed89bb3f856ceb245963a222daebeb5d/>, pristup 10.08.2023.
- [10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect#Experimental\\_observation\\_of\\_photoelectric\\_emission](https://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect#Experimental_observation_of_photoelectric_emission), pristup 23.07.2023.
- [11] <https://www.scientificamerican.com/article/glow-hard-luminous-cement-could-light-roads-structures/>, pristup 12.08.2023.
- [12] <https://docplayer.gr/110988105-Fizika-2-auditorne-vjezbe-11-kvatna-priroda-svjetlosti-planckova-hipoteza-fotoefekt-comptonov-efekt-ivica-soric.html>, pristup 25.07.2023.
- [13] <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/photomultiplier-tubes>, pristup 10.08.2023.
- [14] [https://www.matsusada.com/application/ps/photomultiplier\\_tubes/](https://www.matsusada.com/application/ps/photomultiplier_tubes/), pristup 10.08.2023.

- [15] <https://theconstructor.org/construction/infrared-thermography-construction/15313/>, pristup 05.09.2023
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Compton\\_scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/Compton_scattering), pristup 26.07.2023.
- [17] Buschow, K.H.J., Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier, 2001
- [18] [https://en.wikipedia.org/wiki/Non-linear\\_inverse\\_Compton\\_scattering](https://en.wikipedia.org/wiki/Non-linear_inverse_Compton_scattering), pristup 14.08.2023.
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Accretion\\_disk](https://en.wikipedia.org/wiki/Accretion_disk), pristup 14.08.2023.
- [20] <https://www.tportal.hr/tehnolo/clanak/dolaze-nam-bolje-neutrovne-solarne-ploce-20140506>, pristup 18.08.2023.
- [21] <https://www.eso.org/public/images/potw1708a/>, pristup 20.08.2023.
- [22] <https://www.britannica.com/science/Compton-effect>
- [23] [https://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier\\_tube](https://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier_tube), pristup 10.08.2023.
- [24] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna\\_fotonaponska\\_energija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Solarna_fotonaponska_energija), pristup 18.08.2023.