Uvod u kvantnu teoriju

Krajem XIX veka pojavila su se dva problema koja nisu mogla biti u potpunosti objašnjena tadašnjim shvatanjem elektromagnetnih talasa.

Ova dva problema su bila:

- nepoklapanje teorijskih predviđanja sa eksperimentalno izmerenim rezultatima zračenja apsoplutno crnog tela i
- nemogućnost teorijskog objašnjenja eksperimentalno merene zavisnosti jačine fotostruje od boje (tj. talasne dužine) svetlosti kojom je izazvan fotoefekat.

Prvi problem je razrešio Maks Plank svojom kvantnom hipotezom 1900. godine, a drugi problem je rešio Albert Ajnštajn 1905. godine upotrebivši u ovom objašnjenju upravo pomenutu Plankovu kvantnu hipotezu. Ovo je ujedno i rad za koji je Ajnštajn dobio svoju jedinu Nobelovu nagradu za fiziku 1921. godine.

Prvi, Plankov rad, je doveo do novog razumevanja prirode elektromagnetnog zračenja, dok je drugi, Ajnštajnov rad potvrdio tačnost te Plankove hipoteze.

Toplotno zračenje i zakoni zračenja apsolutno crnog tela

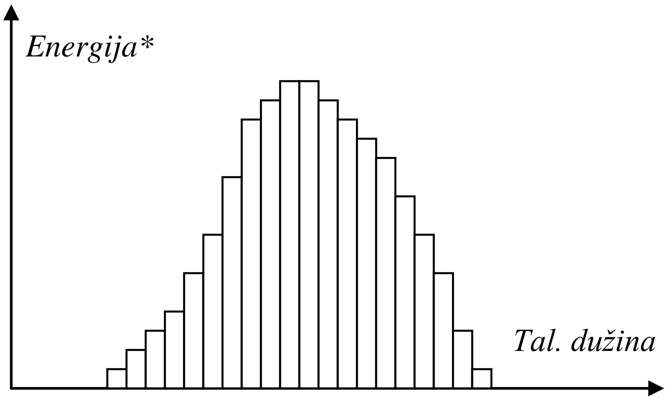
Da bi objašnjenje Plankove hipoteze o kvantima uopšte bilo moguće mora se poći od teorijskih i eksperimentalnih otkrića u vezi sa toplotnim zračenjem apsolutno crnog tela.

Pre svega treba znati da svako telo koje je toplije od svoje okoline zrači sa svoje površine energiju u vidu elektromagnetnih talasa. Fizičari su u drugoj polovini XIX veka otkrili da hladnija tela emituju veće talasne dužine, dok toplija tela emituju kraće talasne dužine, pri pokušaju da uspostave temperaturnu ravnotežu sa svojom okolinom. Sa ovim i mi imamo neposredno iskustvo. Poznato je da postoji crveno usijanje (žar, gvozdena šipka stavljena u vatru itd.), ali i belo usijanje (vlakno sijalice, površina Sunca i drugih zvezda itd.). Temperatura na kojoj se nalazi telo kada je crveno usijano je niža (oko 1000 ^{o}C) nego temperatura tela koje je belo usijano (iznad 2500 ^{o}C). Na još višim temperaturama telo zrači nevidljivo ultraljubičasto zračenje, dok na temperaturama nižim od temperature crvenog usijanja telo emituje, takođe nevidljivo, infracrveno zračenje – recimo radijatori kod klasičnog parnog grejanja.

Sada je nužno uvesti neke nove fizičke veličine koje su fizičari iz druge polovine XIX veka upotrebljavali za opisivanje ovih fenomena. Ove nove veličine su:

- ***Emisiona moć tela*** $E_{\lambda T}$ ***na datoj temperaturi (T) je brojno jednaka onoj količini energije koju to telo emituje sa jedinice svoje površine u jedinici vremena, ali u izabranom uskom opsegu talasnih dužina: od*** λ ***do*** $\lambda + \Delta\lambda$ ***.***
- ***Ukupna emisiona moć tela*** E_T ***na datoj temperaturi (T) je brojno jednaka onoj količini energije koju to telo emituje sa jedinice svoje površine u jedinici vremena, ali na svim talasnim dužinama elektromagnetnog zračenja koje to telo emituje.*** Dakle ukupna emisiona moć tela se može dobiti sumiranjem emisionih moći tog tela po celom intervalu talasnih dužina koji to telo emituje.

Da bi dve prethodne definicije bile razumljive potrebno je pretpostaviti da neko telo emituje sa svoje površine energiju (zato što je toplije od svoje okoline), ali da ne zrači ceo elektromagnetni spektar od radio talasa pa do gama i kosmičkih zraka nego samo onaj deo elektromagnetnog spektra koji se nalazi između, recimo 50 000 *nm* i 20 000 *nm* – dakle deo infracrvenih talasa. Dalje treba pretpostaviti – a u realnosti je upravo tako – da ovo telo ne emituje jednaku količinu energije na svim talasnim dužinama. Recimo, grafički prikaz ovog emitovanja bi mogao da izgleda kao na sl. 1. Na ovom grafiku su na apscisu nanete talasne dužine koje ovo telo emituje, dok je na ordinatu naneta količina energije koju to telo emituje sa jedinice svoje površine i u jedinici vremena. Tada je površina jednog uskog pravougaonika na grafiku jednaka emisionoj moći, dok je ukupna emisiona moć tada jednaka zbiru površina svih pravougaonika.



sl. 1.

- ***Apsorpciona moć tela*** $A_{\lambda T}$ ***na datoj temperaturi (T) pokazuje koji deo energije – od one koja pada na jedinicu površine tela u jedinici vremena, a u uskom opsegu talasnih dužina od*** λ ***do*** $\lambda + \Delta\lambda$ ***- biva apsorbovan.***

- ***Ukupna apsorpciona moć tela*** A_T ***na datoj temperaturi (T), analogno ukupnoj emisionoj moći, pokazuje koji deo – od celokupne količine energije (dakle uzevši u obzir sve talasne dužine, tj. ceo spektar elektromagnetnog zračenja) koja padne na jedinicu površine tog tela u jedinici vremena – biva apsorbovan.*** Zaključak je da se ukupna apsorpciona moć tela može izračunati sumiranjem apsorpcionih moći tog tela po celom intervalu talasnih dužina koje padaju na to telo, tj. koje to telo apsorbuje.

Sada treba objasniti šta je to apsolutno crno telo. Svako telo na koje pada elektromagnetno zračenje reaguje istovremeno na tri načina. Jedan deo zračenja se reflektuje o površinu tog tela, drugi deo telo apsorbuje, dok preostali deo energije prolazi kroz telo. Ako je telo osvetljeno kompleksnom belom svetlosti, tada se može desiti da ono jako reflektuje samo jednu boju (dok ostale apsorbuje i propušta) i u tom slučaju ćemo videti da je telo baš one boje koju dobro reflektuje. Ako telo podjednako dobro reflektuje sve boje svetlosti, tada ćemo videti da je ono bele boje. Međutim ako telo apsorbuje skoro svu svetlost koja na njega pada, a reflektuje zanemarljivo malu količinu energije, tada ćemo videti da je to telo crno. ***Apsolutno crno telo bi bilo ono telo koje totalno apsorbuje svu količinu energije koja dospe na njegovu površinu.*** Na osnovu prethodnih definicija može se lako zaključiti da apsorpciona moć, ali i ukupna apsorpciona moć apsolutno crnog tela moraju biti jednake jedinici:

$$A_{\lambda T}^{act} = 1, \quad \text{tj.} \quad A_T^{act} = 1.$$

Na prvi pogled ovakvo telo, kao uostalom i bilo koju drugu idealizaciju realnog tela, je nemoguće pronaći, ali u ovom slučaju postoji realno telo koje bi praktično bilo apsolutno crno. Zamislimo jednu loptu čija bi unutrašnja površina bila presvučena nekim odličnim apsorberom (za to bi odlično mogla da posluži čađ, ali i svaki drugi materijal koji je crne boje). Ako se u zidu te lopte nalazi jedan mali otvor, tada sam taj otvor možemo smatrati apsolutno crnim telom. Zato što bi praktično zrak koje uđe kroz otvor, posle višestrukog odbijanja o unutrašnje zidove lopte (pri čemu bi znatan deo energije, pri svakom sudaru, bio apsorbovan od strane čađi), bio potpuno apsorbovan pre nego što bi odbijeni zrak uspeo da slučajno pogodi otvor iznutra i da izađe napolje. Dakle, spolja gledano otvor na ovakvoj lopti (ali ne i cela lopta) bi se uklopio u definiciju apsolutno crnog tela.

Sada treba prihvatiti kao činjenicu mogućnost da dato apsolutno crno telo emituje elektromagnetno (toplotno) zračenje ako je toplije od svoje okoline. Recimo ako malopre opisanu loptu zagrejemo do temperature belog usijanja, tada će iz unutrašnjosti lopte, a kroz otvor, biti emitovana bela svetlost, što uopšte ne narušava činjenicu da će lopta u svojoj unutrašnjosti i dalje totalno apsorbovati svaki zrak koji kroz otvor uđe u nju. Dakle apsolutno crno telo se ne karakteriše samo svojom apsorpcionom moći (koja je uvek jednaka jedinici), već u slučaju da je ono toplije od svoje okoline ono se može okarakterisati i njegovom emisionom moći. A upravo u vezi sa ovom emisionom moći apsolutno crnog tela su se pojavili problemi koje je Plank rešio svojom kvantnom hipotezom.

U narednom delu teksta ćemo videti najvažnije zakone koji su bili otkriveni pre Plankove hipoteze a odnose se na topotno zračenje kako nekog običnog tela tako i apsolutno crnog tela.

Prvo je nemački fizičar Kirhof (poznat po svoja dva pravila o proticanju struje kroz razgranato kolo) otkrio, polovinom XIX veka, da: ***odnos emisione i apsorpcione moći ma kog tela ne zavise od svojstava samog tela, već samo od talasne dužine zračenja i temperature tela***:

$$\frac{E_{\lambda T}}{A_{\lambda T}} = f(\lambda, T),$$

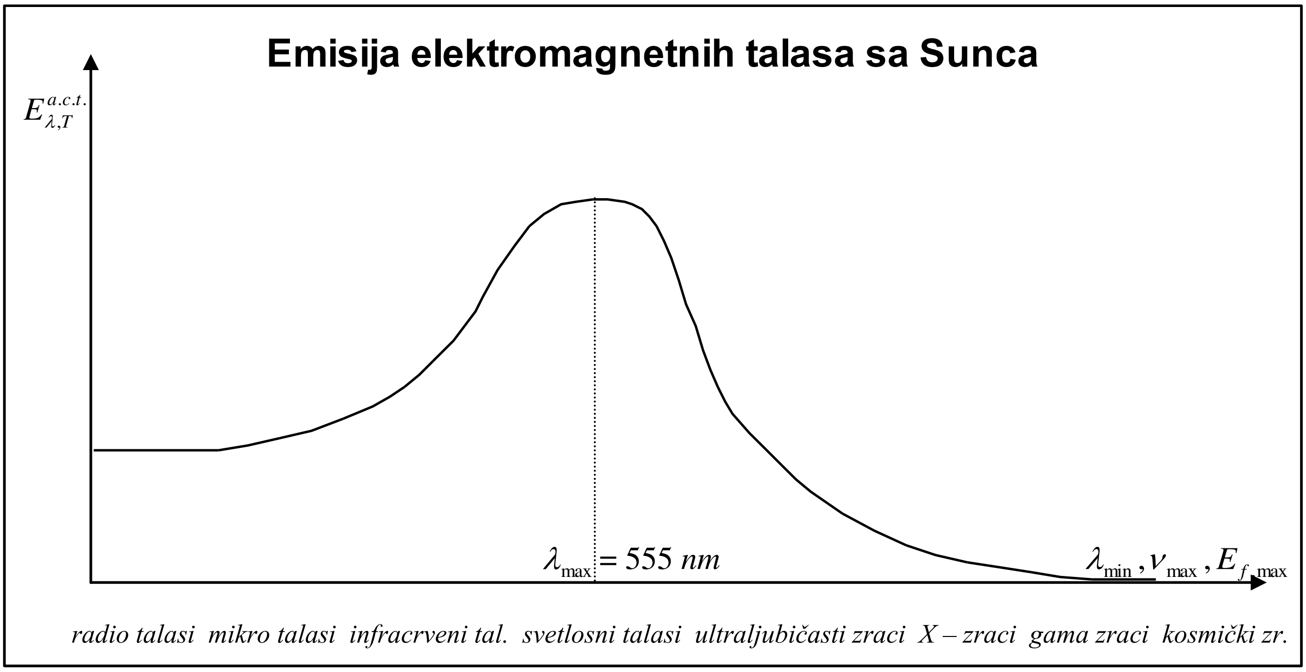
gde je $f(\lambda, T)$ neka univerzalna funkcija, tj. ona mora biti ista za sva tela. Pošto važi za sva tela, ova relacija mora da važi i za apsolutno crno telo. Međutim, tada Kirhofov zakon dobija jednostavniji oblik:

$$\frac{E_{\lambda T}^{act}}{A_{\lambda T}^{act}} = f(\lambda, T),$$

i kako je: $A_{\lambda T}^{act} = 1$

sledi: $E_{\lambda T}^{act} = f(\lambda, T).$

Desna strana prethodne relacije, koja predstavlja Kirhofov zakon primenjen na apsolutno crno telo, je postala predmet naučnog traganja krajem XIX veka. Sa jedne strane eksperimentatori su merili ovu zavisnost emisione moći apsolutno crnog tela od talasne dužine zračenja koje ono emituje i od njegove površinske temperature. Rezultate svojih merenja su mogli prikazati u obliku grafika, kao što je i grafik na sl. 2. Istovremeno došlo je i do nekoliko teorijskih prodora koji su doveli do dva zakona koji su se delimično uklopili u dobijene grafičke rezultate. To su Štefan – Bolcmanov zakon i Vinov zakon pomeranja.



sl. 2.

Krajem XIX veka slovenački fizičar Jožef Štefan i austrijski fizičar Ludvig Bolcman su matematički izveli da je: ***ukupna emisiona moć apsolutno crnog tela direktno srazmerna četvrtom stepenu njegove apsolutne temperature***, što predstavlja definiciju Štefan – Bolcmanovog zakona. Ovaj zakon se može prikazati i sledećom relacijom:

$$E_T^{act} = \sigma \cdot T^4,$$

gde je $\sigma = 5{,}672 \cdot 10^{-8} \dfrac{W}{m^2 K^4}$ Štefan – Bolcmanova konstanta. Ovaj zakon omogućava izračunavanje ukupne emisione moći apsolutno crnog tela, tj površine ispod grafika na sl. 2. i to samo ako je poznata njegova temperatura.

Grafik na sl. 2. ima maksimum na jednoj strogo određenoj talasnoj dužini zračenja, međutim Vin je izveo da: ***proizvod talasne dužine kojoj odgovara maksimum emisione moći apsolutno crnog tela - $\lambda_{\max}$ i njegove apsolutne temperature mora biti uvek isti***:

$$\lambda_{\max} \cdot T = b,$$

gde je $b = 2{,}8972 \cdot 10^{-3} m \cdot K$ Vinova konstanta. Ovaj zakon se obično naziva Vinov zakon pomeranja, zato što je njegovo direktno značenje da sa porastom temperature apsolutno crnog tela dolazi do pomeranja $\lambda_{\max}$ ka kraćim talasnim dužinama. Na sl. 2. prikazana je zavisnost emisione moći našeg Sunca od talasne dužine na kojoj vrši emisiju. Pritom je uzeto da Sunce približno smatramo za apsolutno crno telo. Greška koju pritom pravimo nije velika, zato što iz Kirhofovog zakona sledi da tela koja jako emituju istovremeno i jako apsorbuju zračenje, a za Sunce sa sigurnošću možemo reći da je odličan emiter, što znači da je i odličan apsorber a to ga već približava idealu apsolutno crnog tela. Na ovom grafiku $\lambda_{\max} = 555 nm$, što odgovara njegovoj površinskoj temperaturi od T = 5220 K. Taj maksimum se nalazi u zelenoj boji spektra. Dakle Sunce emituje najviše svetlosti u odnosu na ostale delove spektra (zato i vidimo baš svetlost), a grafik dobro pokazuje i količine energije koje ono emituje u ostalim delovima elektromagnetnog spektra. Vinov zakon znači da će površinski toplije zvezde od našeg Sunca imati maksimum zračenja pomeren ka ultraljubičastoj i rentgenskoj oblasti spektra, dok bi maksimum zračenja kod hladnijih zvezda bio pomeren prema infracrvenoj i mikrotalasnoj oblasti. Dakle, mogli bi očekivati da eventualna živa bića koja žive na planeti koja orbitira, recimo oko neke hladnije zvezde nego što je to naše Sunce, vide infracrveno zračenje a ne svetlost kao mi.

I Štefan – Bolcmanov i Vinov zakon pomeranja se dobro uklapaju u rezultate eksperimentalnih merenja zračenja apsolutno crnog tela.

<u>Problem je nastao pri pokušaju da se matematičkim jezikom, tj. teorijskim izvođenjem dobije konkretan oblik funkcije na desnoj strani Kirhofovog zakona</u>. U ovim pokušajima su nastale dve formule: Rejlej – Džinsova i Vinova. Obe su bile delimično tačne. Rejlej – Džinsova formula:

$$E_{\lambda T}^{act} = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT$$

se dobro slagala sa rezultatima merenja, tj sa grafikom na sl. 2., samo u oblasti većih talasnih dužina, dok je u oblasti kraćih talasnih dužina ova relacija predviđala, umesto opadanja emisione moći, njeno dalje narastanje – što je u fizici poznato pod nazivom »ultraljubičasta katastrofa«.

Sa druge strane Vinova formula:

$$E_{\lambda T}^{act} = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{C_2}{kT}}$$

je dobro opisivala zračenje apsolutno crnog tela u oblasti kratkih, ali ne i u oblasti većih talasnih dužina – obrnuto u odnosu na Rejlej – Džinsovu formulu.

Do prvog nagoveštaja rešenja ovog problema došlo je kada je nemački teorijski fizičar Maks Plank 1900. godine prvo otkrio matematički oblik formule koja se poklapa sa krivom na sl. 2. koji glasi:

$$E_{\lambda T}^{act} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}.$$

U pokušaju da matematički izvede ovu formulu Plank je upotrebio raniju Bolcmanovu ideju o »kvantovanju energije«. Ovo znači da: ***telo koje emituje elektromagnetno zračenje može zračiti ovu energiju samo u određenim količinama koje predstavljaju celobojne umnoške jedne osnovne količine energije (kvanta).***

Prethodna formulacija je <u>Plankov zakon zračenja</u> i predstavlja osnovu <u>Plankove hipoteze</u>. Za energiju jednog kvanta Plank je dobio formulu:

$$E_{kv} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda},$$

gde je $h = 6{,}625 \ 10^{-34} \ Js$ univerzalna Plankova konstanta, a $c = 3 \ 10^{8} \ m/s$ brzina svetlosti. ν i λ su frekvencija i talasna dužina elektromagnetnog talasa koji to telo emituje.

1905. godine Ajnštajn dokazuje Plankovu hipotezu o kvantima uspešno ih primenivši na objašnjenje fotoefekta. Pritom je Ajnštajn proširio Plankovu hipotezu u smislu da se energija elektromagnetnog zračenja ne samo emituje u vidu kvanata, već da se tako i prenosi i na kraju apsorbuje u nekoj prepreci kada je pogodi. Umesto Plankovog naziva – kvanti (porcije), Ajnštajn je predložio naziv – fotoni (delići svetlosti). Ajnštajnov naziv je danas opšteprihvaćen ali je u čast Plankovog naziva čitava moderna teorija mikrosveta – nastala na temeljima Plankove hipoteze o kvantima – nazvana kvantna teorija.

Ideja o fotonima (kvantima) znači sledeće: <u>energija elektromagnetnih talasa ima zrnastu strukturu</u>. Ova zrnca energije su u stvari fotoni (kvanti). Plankova fomula za energiju jednog fotona pokazuje da različiti elektromagnetni talasi imaju fotone nejednakih energija. Kako je energija fotona obrnuto srazmerna talasnoj dužini zračenja, to znači da minimalnu energiju fotona imaju elektromagnetni talasi sa maksimalnom talasnom dužinom – a to su radio talasi, dok maksimalnu energiju fotona ima onaj deo spektra koji ima minimalne talasne dužine – a to su kosmički zraci.

$\nu_{\min}, \lambda_{\max}, E_{f\,\min}$ $\longrightarrow$ $\nu_{\max}, \lambda_{\min}, E_{f\,\max}$

radio talasi mikro talasi infracrveni talasi svetlost ultraljubičasti zraci rentgenski zraci gama zraci kosmički zraci

Sledeći ovu logiku dobijamo da crvena boja svetlosti max. talasne dužine od 750 *nm* ima energiju fotona od:

$$E_{f,c} = h\frac{c}{\lambda} = 6{,}625\cdot 10^{-34}\,Js\cdot\frac{3\cdot 10^{8}\,\frac{m}{s}}{7{,}5\cdot 10^{-7}\,m} = 2{,}65\cdot 10^{-19}\,J.$$

Kako je $1\ eV = 1{,}6\ 10^{-19}\ J$, sledi:

$$E_{f,c} = 2{,}65\cdot 10^{-19}\cdot\frac{1}{1{,}6\cdot 10^{-19}}\,eV = 1{,}656\,eV\ .$$

Na sličan način možemo izračunati da je energija jednog fotona ljubičaste svetlosti na min. talasnoj dužini od 390 *nm*:

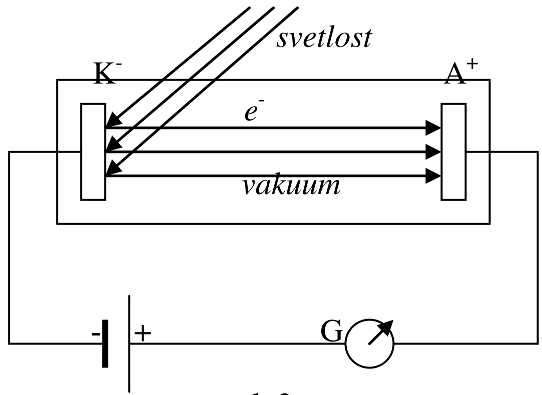
$$E_{f,lj} = 3{,}185\,eV\ .$$

1 *eV* je jedinica za energiju primerena mikrosvetu. Nju inače dobije, u vidu kinetičke energije, jedan elektron koji se ubrzava homogenim električnim poljem između dve naelektrisane ploče čija je razlika potencijala 1 *V*, a koje se nalaze na rastojanju od 1 *m*. Uslov je da ovaj elektron kreće iz mirovanja i sa površine negativne ploče.

Fotoelektrični efekat – fotoefekat

Fotoefekat je pojava izbacivanja elektrona iz metala pomoću svetlosti ili ultraljubičastog zračenja.

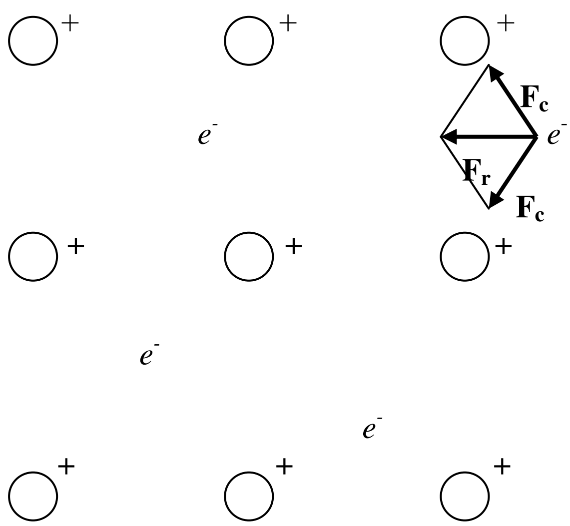
Fotoefekat je otkrio Lenard 1899. godine.
U vakumiranoj cevi se nalaze, na suprotnim stranama, katoda i anoda. Kako se obe nalaze na sobnoj temperaturi elektroni ne mogu napustiti metal katode, pa je zato strujno kolo u prekidu između katode i anode i galvanometar ne pokazuje struju. Međutim ako katodu osvetlimo pomoću svetlosti tada elektroni iskaču iz katode, prelaze na anodu i na taj način zatvaraju strujno kolo, pa galvanometar pokazuje struju koju nazivamo fotostruja (sl. 3.).



sl. 3.

Da bi bilo razumljivo – na koji način svetlost omogućava iskakanje elektrona iz metala katode – treba razumeti prvo zbog čega elektroni ne iskaču iz hladne i neosvetljene katode. Atomi metala su raspoređeni u čvorovima kristalne rešetke. Zbog male energije potrebne za jonizaciju iz valentnog nivoa atoma metala, najveći broj atoma je ispustio jedan, dva ili tri elektrona (što zavisi od toga da li je metal elemenat I, II ili III grupe periodnog sistema) u međuatomski prostor. Zato se u čvorovima kristalne rešetke metala nalaze pozitivni joni (atomi sa manjkom elektrona), dok je međuatomski prostor metala ispunjen oblakom elektrona (sl. 4.) koji se kreću haotično, ali su im brzine jako male, što ukazuje na njihovu zanemarljivo malu kinetičku energiju.

Posmatrajmo sada jedan elektron koji je slučajno krenuo ka izlazu iz metala, ali koji pritom mora da prođe između dva granična jona. Kako su oni pozitivni, a elektron je negativan, joni na elektron deluju jakom Kulonovom privlačnom silom – vukući ga nazad ka metalu rezultantnom silom $\mathbf{F_r}$. Zato se u fizici kaže da izlazak elektrona iz metala sprečava <u>Kulonova barijera</u> . Da bi uspeo da izađe iz metala elektron mora da ima dovoljno veliku brzinu za savladavanje ovog privlačenja, tj. da ima dovoljno veliku kinetičku energiju za savladavanje Kulonove barijere. Kako je kinetička energija elektrona u međuatomskom prostoru



sl. 4.

zanemarljivo mala, jasno je da elektron ne može da napusti metal bez pomoći sa strane. Upravo to postižemo kada metal osvetlimo. Elektroni apsorbuju energiju svetlosti i na taj način povećavaju svoju kinetičku energiju, tj. brzinu tako da postanu sposobni da savladaju Kulonovu barijeru.

U slučaju da elektron dobije dovoljno energije da savlada Kulonovu barijeru, logično je da će pri njenom savladavanju doći do smanjivanja njegove brzine (jer ga rezultujuća Kulonova sila vuče u smeru suprotnom od smera njegovog kretanja). To znači da će doći do smanjenja kinetičke energije tog elektrona, tj. elektron će morati da potroši izvesnu količinu energije da bi izašao iz metala.Ta potrošena količina energije je jednaka izlaznom radu elektrona iz metala - A_i. Izlazni rad za većinu metala iznosi nekoliko elektronvolti – ne više od 10 eV- a. Potrošena kinetička energija se, u skladu sa zakonom održanja energije, pretvara u kinetičku energiju jona, tj. u unutrašnju energiju tog metala.

Sada treba da pogledamo šta je to u fotoefektu što klasična fizika nije bila u stanju da objasni.

Lenard je otkrio da jačina fotostruje zavisi od sledeća tri faktora:

1. od jačine upotrebljene svetlosti,
2. od boje upotrebljene svetlosti i
3. od vrste metala od koga je napravljena katoda.

Klasična fizika – čija se predstava o elektromagnetnim talasima zasnivala na pogrešnoj pretpostavci da je energija elektromagnetnog talasa ima neprekidnu strukturu – nije mogla da objasni zavisnost jačine fotostruje od boje svetlosti. Tada je Ajnštajn pokušao i uspeo da fotoefekat objasni uz pomoć Plankove kvantne hipoteze.

Po Ajnštajnu, foton svetlosti uleće u metal katode, slučajno pogađa neki od slobodnih elektrona u međuatomskom prostoru metala, pri čemu ga elektron apsorbuje. Sa povećanom kinetičkom energijom elektron uspeva da probije Kulonovu barijeru, pri čemu troši deo ove dobijene energije (izlazni rad) i sa preostalom energijom, u vidu kinetičke energije, nastavlja svoje kretanje prema anodi – zatvarajući na taj način strujno kolo. Ako zanemarimo energiju koju je elektron imao pre apsorpcije fotona svetlosti, imamo vrlo jednostavnu relaciju za fotoefekat koja glasi:

$$E_f = A_i + E_k$$

što znači da energiju dobijenu od fotona (E_f) elektron delom troši na izlazni rad (A_i) dok preostali deo zadržava u vidu kinetičke energije (E_k). U potpunom obliku ova Ajnštajnova relacija za fotoefekat glasi:

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_i + \frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2 \ .$$

gde je λ talasna dužina upotrebljene svetlosti, a v_e brzina elektrona po izlasku iz katode.

Primer: uzmimo da je izlazni rad iz metala $A_i = 2\ eV$, a da je boja svetlosti, kojom je katoda osvetljena, ljubičasta i to talasne dužine 390 nm:

$$\begin{array}{r} E_{f,\,lj} = 3{,}185\ eV \\ \underline{-\quad A_i = 2\ eV} \\ E_k = 1{,}185\ eV. \end{array}$$

Sada ćemo pogledati Ajnštajnova objašnjenja zavisnosti jačine fotostruje od tri napred navedena faktora. Pre toga se moramo setiti obrasca za jačinu struje:

$$i = n \cdot e \cdot v \cdot S \ ,$$

gde je $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} C$ naelektrisanje jednog elektrona, n je koncentracija elektrona kao slobodnih nosioca naelektrisanja, tj. struje, v je brzina njihovog kretanja, dok je S površina poprečnog preseka provodnika kroz koji ta struja teče.

1. Lenard je otkrio da jača svetlost izaziva jaču fotostruju. Ajnštajn je pretpostavio da jača svetlost ima veću gustinu tj. koncentraciju fotona, pa će zato takva svetlost izbaciti iz metala katode veći broj elektrona, što povećava koncentraciju (n) elektrona u prostoru između katode i anode, a zbog obrasca: $i = n \cdot e \cdot v \cdot S$ u ovom slučaju je i struja jača.

2. Za klasičnu fiziku neobjašnjiva zavisnost od boje svetlosti postaje lako razumljiva ako primenimo Plankovu kvantnu hipotezu. Uzmimo da isti metal izlaznog rada $A_i = 1\ eV$ osvetlimo prvo crvenom svetlošću talasne dužine 750 nm, čija energije fotona je $E_{f,\,c} = 1{,}656\ eV$, a u drugom slučaju ljubičastom svetlosti talasne dužine 390 nm, tj. energije fotona $E_{f,\,lj} = 3{,}185\ eV$. Sledi:

$$\begin{array}{r} E_{f,\,c} = 1{,}656\ eV \\ A_i = 1\ eV \\ \hline E_{k1} = 0{,}656\ eV \end{array} \qquad\qquad \begin{array}{r} E_{f,\,lj} = 3{,}185\ eV \\ A_i = 1\ eV \\ \hline E_{k2} = 2{,}185\ eV \end{array}$$

Vidi se da su elektroni izbačeni ljubičastom svetlošću zadržali pri izlasku veću kinetičku energiju što znači da su brži od elektrona izbačenih crvenom svetlosti. Uzevši u obzir da je $i = n \cdot e \cdot v \cdot S$, jasno je da ljubičasta svetlost daje jaču fotostruju od crvene svetlosti.

3. Na sličan način se objašnjava da što je izlazni rad iz metala katode veći dobijamo slabiju fotostruju. Uzmimo sada u oba slučaja istu svetlost, recimo ljubičastu sa $E_{f,\,lj} = 3{,}185\ eV$, kojom osvetljavamo dva metala, jednog sa izlaznim radom $A_{i1} = 1\ eV$ i drugog sa izlaznim radom $A_{i2} = 2\ eV$. U ovom slučaju je:

$$\begin{array}{r} E_{f,\,lj} = 3{,}185\ eV \\ A_{i1} = 1\ eV \\ \hline E_{k1} = 2{,}185\ eV \end{array} \qquad\qquad \begin{array}{r} E_{f,\,lj} = 3{,}185\ eV \\ A_{i2} = 2\ eV \\ \hline E_{k2} = 1{,}185\ eV. \end{array}$$

U drugom slučaju gde je izlazni rad veći elektroni potroše više energije na izlazni rad, pa im je kinetička energija pri izlasku iz katode manja, što opet znači da su oni u ovom slučaju sporiji, pa iz obrasca $i = n \cdot e \cdot v \cdot S$ sledi da je u tom slučaju fotostruja slabija.

Ajnštajn je uspeo da objasni i pojavu crvene granice za fotoefekat. Ova pojava je posledica neobičnog ponašanja elektrona u metalu. Pogođen fotonom čija je energija veća ili jednaka izlaznom radu, elektron apsorbuje taj foton, zadržava njegovu energiju i kasnije pomoću nje izlazi iz metala. Međutim, ako je energija fotona manja od izlaznog rada tada ga elektron pogođen njime ne apsorbuje. Jedini način da objasnimo ovakvo ponašanje elektrona je da zaključimo da elektron »zna« koliki je izlazni rad, pa da prema tome i podešava svoje ponašanje. Očigledno je da ovo i nije neko objašnjenje, jer kako bi elektron mogao da išta »zna«. Bez obzira na naše nerazumevanje ovakvog »ponašanja« elektrona, oni se ponašaju baš tako, što dovodi do toga da elektromagnetni talas (svetlost), čija je energija fotona manja od izlaznog rada elektrona iz metala, ne može izazvati fotoefekat. Naime, kada bi elektron ipak apsorbovao i foton čija je energija manja od izlaznog rada, tada bi mogao da naknadno apsorbuje još jedan takav foton, pa još jedan, sve dok apsorbovana energija ne bi postala dovoljna za izlazak iz metala.

Dakle, svetlost čija je energija fotona jednaka izlaznom radu elektrona iz metala još uvek može izazvati fotoefekat, ali u tom slučaju elektroni potroše svu energiju dobijenu od fotona na izlazak iz katode, pa se po izlasku iz metala zaustave jer im ništa ne preostane za kinetičku energiju. Ovakva svetlost se naziva crvena granica za fotoefekat. Svetlost veće talasne dužine nema dovoljnu energiju fotona da bi izazvala fotoefekat, dok svetlost kraće talasne dužine izaziva fotoefekat.

Kao primer možemo uzeti metal sa izlaznim radom od $A_i = 2eV$. Svetlost čija energija fotona iznosi $2\ eV$ je žuta svetlost granične talasne dužine od oko $\lambda_{cg} = 621\ nm$. Tada važi:

$$\begin{array}{r} E_{f,\,ž} = 2\ eV \\ -\,A_i = 2\ eV \\ \hline E_k = 0. \end{array}$$

Dakle:

nema fotoefekta — *ima fotoefekta*

$\nu_{\min}, \lambda_{\max}, E_{f\,\min}$ | $\lambda_{cg} = 621\ nm$ → $\nu_{\max}, \lambda_{\min}, E_{f\,\max}$

radio talasi mikro talasi infracrveni talasi svetlost ultraljubičasti zraci rentgenski zraci gama zraci kosmički zraci

Za objašnjenje fotoefekta i za dokaz Plankove kvantne hipoteze Ajnštajn je dobio svoju jedinu Nobelovu nagradu za fiziku 1921. *godine. Za svoju kvantnu hipotezu Nobelovu nagradu za fiziku dobio je i Maks Plank* 1918. *godine.*

De Broljevi talasi materije

Do početka XX veka u fizici je postojao sukob mišljenja oko toga: šta je važnije čestica ili talas? Rešenje ovog neobičnog problema je pronađeno početkom XX veka, a samo rešenje je mnogo neobičnije od samog problema.

Sukob je poticao još iz vremena Njutna i Hajgensa. Dok je Njutn smatrao da je u osnovi sveta čestica – korpuskula, dotle je Hajgens smatrao da se osnovi sveta nalaze talasi. Oni su i osnivači dve suprotstavljene teorije: korpuskularne i talasne. Pokazalo se da je glavno pitanje u ovom sukobu da li je svetlosni zrak mlaz korpuskula ili talas. Njutn je smatrao da se zrak svetlosti sastoji od malih korpuskula svetlosti. Međutim, ono što je bilo neprihvatljivo u kasnijem razvoju klasične fizike, mi danas možemo prihvatiti, jer Plankova kvantna hipoteza predstavlja samo produžetak ovakve Njutnove linije razmišljanja.

Da bi bilo jasnije rešenje ovog sukoba do koga je došla moderna fizika navešću nekoliko osnovnih osobina po kojima možemo razlikovati čestice od talasa. Može se reći da čestice imaju čestične, dok talasi imaju talasne osobine:

čestica	**talas**
ima sledeće čestične osobine:	ima sledeće talasne osobine:
1. čestica ima masu m	1. talas ima talasnu dužinu λ
2. kada se kreće čestica ima impuls $p = m \cdot v$	2. talas može vršiti difrakciju
3. pri sudaru sa nepokretnom preprekom čestica vrši pritisak na nju.	3. pri susretu – dva koherentna talasa vrše interferenciju.

Do početka XIX veka primat je imala korpuskularna Njutnova teorija, međutim posle eksperimenata Janga i Frenela u kojima je nedvosmisleno potvrđena interferencija i difrakcija svetlosti, prevagu je odnela talasna teorija.

Prvi nagoveštaj novog pristupa je sledeće Ajnštajnovo razmišljanje: ako se njegova čuvena formula: $E = m \cdot c^2$ važi i za energiju fotona tada imamo:

$$E_f = m_f \cdot c^2$$

i iz Plankove kvantne hipoteze:

$$E_f = h\frac{c}{\lambda}$$

sledi:

$$m_f \cdot c^2 = h\frac{c}{\lambda}$$

tj.

$$m_f = \frac{h}{c \cdot \lambda}$$

što bi predstavljalo masu fotona. Međutim, ako foton ima masu on mora imati i ostale čestične osobine, dakle on pre svega mora imati impuls:

$$p_f = m_f \cdot v_f = m_f \cdot c = \frac{h}{c \cdot \lambda} \cdot c$$

tj. konačno:

$$p_f = \frac{h}{\lambda}.$$

Ako ima masu i impuls foton mora da vrši pritisak na nepokretnu prepreku na koju naiđe, tj. svetlost bi trebalo da vrši pritisak na prepreku na koju pada. Upravo tako je i izvršena eksperimentalna provera. Svetlost je puštena da pada na vrlo laganu vrtešku koja se nalazi u vakuumu, pri čemu je sila trenja pri obrtanju smanjena na minimum. I... vrteška se obrtala pod pritiskom svetlosti. Mi danas znamo da je upravo pritisak zračenja sa Sunca (sunčev vetar) ono što izaziva da repovi kometa budu uvek na liniji Sunce – kometa, ali iza komete. Znači pri približavanju komete Suncu prvo ide glava pa rep komete, ali pri udaljavanju komete prvo ide rep pa njena glava. Pritisak svetlosti iz jezgra zvezde je ono što se suprotstavlja gravitacionom privlačenju i sprečava urušavanje zvezde same u sebe. Futurolozi planiraju za budućnost svemirske jedrenjake koji će se kretati kroz naš Sunčev sistem koristeći upravo »sunčev vetar«.

Ovo je bila sjajna potvrda ideje da fotoni imaju čestične osobine, a istovremeno i trijumf korpuskularne teorije.

No ovakva slika nije dugo potrajala, za šta se pobrinuo Luj de Brolji, koji je 1924. godine u svojoj doktorskoj disertaciji načinio korak dalje u odnosu na Ajnštajna. On je naime pretpostavio da relacija za impuls fotona:

$$p_f = \frac{h}{\lambda}$$

ne važi samo za fotone, već da važi i za čestice, tj. korpuskule:

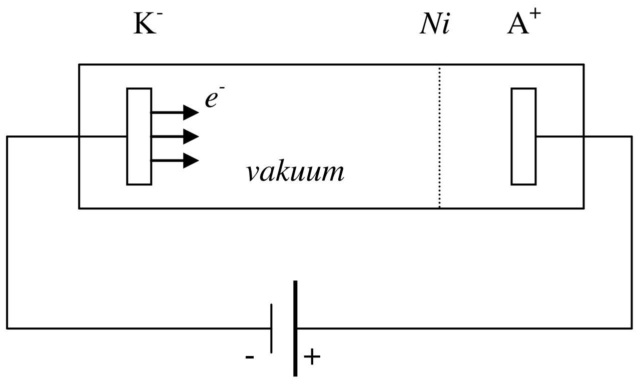
$$p_k = \frac{h}{\lambda_k}$$

To znači da je talasna dužina korpuskule:

$$\lambda_k = \frac{h}{p_k} = \frac{h}{m_k \cdot v_k}.$$

Ovo je de Broljeva relacija, koju možemo protumačiti samo na jedan način: <u>svaka čestica koja se kreće mora da ima i talasnu dužinu</u>.

De Brolji nije uspeo da odbrani ovaj doktorat jer nije imao eksperimentalne potvrde ove svoje ideje. Međutim, Ajnštajn je doznao za njegov rad i u njemu video više od obične pretpostavke. Na njegov predlog dve grupe eksperimentatora su pokušale da provere ovu hiptezu. U Americi Dejvison i Džermer, a u Engleskoj Tomson junior pokazali su difrakciju i interferenciju elektrona na difrakcionoj rešetki, čime je de Broljeva ideja bila nedvosmisleno dokazana. Na sl. 5. je prikazan eksperiment Dejvisona i Džermera. Elektroni izleću iz katode i ubrzavaju se u električnom polju između katode i anode. Njihovu brzinu je moguće izračunati iz izjednačavanja energije električnog polja koja se troši na ubrzavanje elektrona:



sl. 5.

$$E_{ep} = e \cdot U$$

i kinetičke energije elektrona u koju se ona pretvara:

$$E_{ke} = \frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2,$$

gde je U napon između katode i anode, a $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} C$ naelektrisanje jednog elektrona:

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v_e^2 = e \cdot U.$$

Sledi:

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}},$$

a ovu vrednost brzine bilo je lako izračunati. Sada je bilo lako izračunati i de Broljevu talasnu dužinu elektrona iz njegove formule:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e \cdot v_e}.$$

U konkretnom eksperimentu Dejvisona i Džermera ovako izračunata talasna dužina je bila: 0,123 *nm*. Oni su na put elektrona, a ispred anode postavili kristal nikla čije rastojanje između atoma je 0,123 *nm*. Na taj način kristal nikla je igrao ulogu difrakcione rešetke. I elektroni su napravili difrakciju na otvorima rešetke, a interferenciju na zaklonu koji je predstavljala anoda. Na površini anode su se pojavili karakteristični svetli i tamni prstenovi kao da je kroz nikl prolazilo x – zračenje talasne dužine 0,123 *nm*. Jedini mogući zaključak je bio da elektroni stvarno imaju talasnu dužinu.

I ovaj i Tomsonov eksperiment su izvedeni 1927. godine za šta su Dejvison i Tomson jr. dobili Nobelovu nagradu 1937. godine, dok je de Brolji dobio Nobelovu nagradu nešto ranije – 1929. godine.

Svakako zanimljiva igra slučaja je da je Tomsonov otac dobio 1906. godine Nobelovu nagradu za fiziku za otkriće da su elektroni čestice, dok ju je Tomson jr. dobio trideset godina kasnije za dokaz da su elektroni talasi. Ovo nije bila greška Nobelovog komiteta, zato što je istina da elektroni jesu i čestice i talasi.

Ajnštajnov i de Broljev rad su pokazali da i čestice i talasi imaju dvojaku prirodu, zato jer i jedni i drugi poseduju i čestične i talasne osobine. Ispostavilo se da je sukob u fizici: šta je u osnovi sveta – čestice ili talasi nepostojeći. Ovo je takođe predstavljalo osnovu za ujedinjenje do tada dve suprotstavljene teorije: korpuskularne i talasne u jednu modernu korpuskularno – talasnu teoriju.

Zanimljivo je da su kasniji eksperimenti pokazali da čestice, a isto tako i talasi, nikada u istoj pojavi ne pokazuju obe svoje prirode. Ovo pravilo u kvantnoj fizici je poznato kao <u>princip komplementarnosti</u>. Dakle, u nekim pojavama svetlost pokazuje isključivo svoju talasnu prirodu, dok u drugim pokazuje isključivo čestične osobine, tj. u tim slučajevima fotoni se ponašaju samo kao čestice, a pri tome ne pokazuju ni jednu svoju talasnu osobinu.

Hajzenbergov princip neodređenosti

Ovaj zakon je tipičan primer kvantnog zakona. To je zakon koji važi u mikrosvetu, ali ne važi ni u makro ni u megasvetu.

Jedna od relacija neodređenosti glasi:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}.$$

U ovoj relaciji: Δx je greška koju pravimo pri merenju položaja date mikročestice koja se kreće, a Δp je greška koju pravimo pri merenju njenog impulsa, dok je h univerzalna Plankova konstanta.

Do značenja ove relacije možemo doći sledećom analizom:

1. u relaciji znak $=$ se može upotrebiti ako su obe greške minimalne. To su tzv. objektivne greške pri merenju, dakle greške koje je nemoguće izbeći. Znak $>$ se može primeniti ako su greške pri merenju veće od minimalnih i mi ih nazivamo subjektivnim greškama, jer su najčešće posledica nepažnje samog eksperimentatora, ali mogu biti posledica i nesavršenosti aparature za merenje, itd. U daljoj analizi, radi jednostavnosti, pretpostavljamo da su greške objektivne, dakle minimalne. Zbog toga ćemo u relaciji koristiti samo znak $=$:

$$\Delta x_{\min} \cdot \Delta p_{\min} = \frac{h}{2\pi}$$

2. kako je količnik $\frac{h}{2\pi}$ broj koji je veći od nule, jasno je da nijedna od dve greške ne može biti jednaka nuli, zato što bi tada i njihov proizvod bio jednak nuli, a sama relacija to ne dopušta.

3. kako je količnik $\frac{h}{2\pi}$ univerzalna konstanta, jasno je da svako smanjenje jedne greške na levoj strani jednačine mora biti praćeno povećanjem druge greške – da bi njihov proizvod mogao ostati konstantan.

4. jedini način da se razume pojavljivanje obe ove greške u istoj relaciji je da su one načinjene pri istovremenom merenju i to nad istom mikročesticom.

Ako sada izreknemo sledeći skraćeni prikaz ove analize dobićemo definiciju principa neodređenosti:

Nemoguće je istovremeno, a bez ikakve greške izmeriti položaj i impuls date mikročestice koja se kreće.

Kada je objavljen 1925. godine ovaj princip je izazvao priličan otpor u redovima eksperimentalnih fizičara, jer su oni pogrešno protumačili da je Hajzenberg u njemu omalovažio njihovu sposobnost da tačno izmere veličine u mikrosvetu.

Međutim, duhovi su se brzo smirili kada je malo pažljivijim analizama ustanovljeno da Hajzenberg uopšte ne govori o tome, već naprotiv on tvrdi da će svaki, ma kako zamišljen i postavljen, eksperiment – u kome se pokuša merenje položaja i impulsa mikročestice – dovesti do neizbežnih (objektivnih) grešaka.

Postoji mogućnost da se na sledeći način objasni nužnost pojavljivanja ovih grešaka:

Da bi ma kakav aparat za merenje odredio položaj mikročestice potrebno ju je osvetliti, ali ne pomoću svetlosti, već pomoću nekog kratkotalasnog zračenja kao što su rentgenski ili gama zraci, zato što je čestica utoliko bolje osvetljena tj. vidljiva ukoliko je talasna dužina zračenja upotrebljenog za njeno osvetljavanje manja od dimenzija same čestice.

Za osvetljavanje makrotela koristimo svetlost jer je njena talasna dužina mnogo manja od dimenzija stvari čije položaje merimo. U mikrosvetu, zbog izuzetno malih dimenzija mikročestica, jedino bi odgovarajući bili kratkotalasni kosmički zraci, koji su nam teorijski ali ne i praktično dostupni. Čak i rentgenski i gama zraci bi bili sa prevelikom talasnom dužinom, a posmatrana mikročestica bi bila vidljiva samo kao mrlja čija bi veličina bila jednaka upotrebljenoj talasnoj dužini. Zato je nemoguće tačno izmeriti njen položaj – jer ju je, pre svega, nemoguće precizno locirati.

Sa druge strane, što upotrebimo kraću talasnu dužinu za merenje položaja čestice, to je energija fotona tog zračenja veća, pa čestica pogađana njima naglo menja brzinu – što sprečava precizno merenje same brzine, a to znači i impulsa čestice. Treba se setiti da se oba merenja vrše istovremeno.

Ako uzmemo zračenje sa manjom energijom fotona, da bi smanjili grešku u merenju brzine tj. impulsa mikročestice, to zračenje će imati veću talasnu dužinu što će dovesti do veće neodređenosti njenog položaja, a samim tim i do veće greške pri njegovom merenju (što objašnjava tačku 3. u analizi).

Sada se postavlja pitanje značaja ovog principa. Još je Njutn otkrio da ako znamo položaj i istovremeno i impuls datog tela, kao i sile koje na njega deluju, da onda možemo da precizno izračunamo unapred sve buduće položaje i impulse tog tela, tj. da naučno predvidimo buduće događaje vezane za to telo. Upravo je to ono što nam u mikrosvetu onemogućava Hajzenbergov princip neodređenosti, što predstavlja još jedno značenje njegovog naziva.

Kasnije je Maks Born, inače Hajzenbergov mentor, otkrio mogućnost da izračunavamo bar verovatnoće budućih događaja u mikrosvetu, što se zasniva na jako velikom broju mikročestica u svakom makro ili megatelu. Za ove svoje radove obojica su dobili Nobelove nagrade za fiziku, Hajzenberg 1932. a Born 1954. godine.

Princip neodređenosti ne važi u makro i megasvetu. Makro i megatela imaju velike dimenzije pa ih je lako osvetliti, a pri tome ona imaju preveliku masu tj. inerciju da bi im fotoni te svetlosti mogli značajnije da promene brzinu, a samim tim i impuls. Razlozi za greške postoje samo u mikrosvetu, pa Hajzenbergov princip važi samo u njemu.

Na kraju treba reći da princip neodređenosti važi i za druge parove veličina (čiji proizvod ima dimenzije dejstva Js), kao što je recimo i par: energija i vreme.

$$\Delta x \cdot \Delta p = \Delta x \cdot F \cdot \Delta t = A \cdot \Delta t = \Delta E \cdot \Delta t\,.$$

Relacija neodređenosti:

$$\Delta E \cdot \Delta t = \frac{h}{2\pi}$$

ima veliki značaj u objašnjavanju načina delovanja osnovnih interakcija u prirodi: gravitacione, elektromagnetne i nuklearnih sila.