

BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenį
X paskaita

- 1 γ spindulių ir medžiagos sąveika
 - Eksponentinis sugerties dėsnis
 - Fotoelektrinė sugertis
 - γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
 - Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
 - Porų kūrimas
 - Pozitronų ir elektronų anihiliacija

1 γ spindulių ir medžiagos sąveika

- Eksponentinis sugerties dėsnis
- Fotoelektrinė sugertis
- γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
- Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
- Porų kūrimas
- Pozitronų ir elektronų anihiliacija

1 γ spindulių ir medžiagos sąveika

- Eksponentinis sugerties dėsnis
- Fotoelektrinė sugertis
- γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
- Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
- Porų kūrimas
- Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Eksponentinis sugerties dėsnis

γ spindulių pluoštas, pereidamas per medžiagos sluoksnį, yra silpninamas. Sugerties medžiagoje dėsnis skiriasi nuo α ir β spindulių atitinkamų dėsnų. Taip yra todėl, kad γ fotono energija visais atvejais, išskyrus Komptono sklaidą, yra atiduodama ne dalimis, kaip α ir β dalelių atveju, o iš karto, vienu aktu ji visa sunaudojama kokiam nors virsmui. Tokio tipo sugertį atitinka eksponentinis dėsnis:

Eksponentinis gesimo dėsnis

$$I = I_0 e^{-\mu x}; \quad (1)$$

čia: I – γ pluošto intensyvumas, perėjus sluoksnį x , I_0 – pradinis intensyvumas, x yra medžiagos storis, o μ – silpimo koeficientas.

Eksponentinis sugerties dėsnis

Šios sugerties priežastis gali būti trys skirtingi ir visai tarpusavyje nepriklausomi reiškiniai:

- 1 fotoelektrinė sugertis, kurią apibrėžia atitinkamas koeficientas τ ;
- 2 nekoherentinė (Komptono) sklaida, kurią apibrėžia sklaidos koeficientas σ ;
- 3 elektronų ir pozitronų porų sukūrimas, galimas tik didesnės energijos fotonams, apibūdinamas sugerties koeficientu κ .

Kadangi visų šių trijų procesų tikimybės nepriklauso viena nuo kitos, bendras silpimo koeficientas

Silpimo koeficientas

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa. \quad (2)$$

Su kiekvienu reiškiniu susipažinsime atskirai.

1 γ spindulių ir medžiagos sąveika

- Eksponentinis sugerties dėsnis
- Fotoelektrinė sugertis
- γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
- Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
- Porų kūrimas
- Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Fotoelektrinė sugertis

Beveik visos minkštosios γ spinduliuotės sunkiuosiuose elementuose priežastis yra fotoelektrinis efektas. Energijos požiūriu šį reiškinį apibrėžia Einšteino dėsnis

Einšteino dėsnis

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2 = eV_i + \frac{1}{2}mv^2; \quad (3)$$

čia: W yra elektrono išlaisvinimo darbas, $\frac{1}{2}mv^2$ – išlaisvinto elektrono kinetinė energija ir V_i – i -ojo atominio sluoksnio jonizacijos potencialas. Fotoelektrinė sugertis gali vykti įvairiuose atomo elektronų sluoksniuose K , L , M , ..., kurių ryšio energija įvairi. Į tuščią po elektrono išlaisvinimo iš vidinio sluoksnio vietą gali pereiti elektronas iš aukštesniųjų sluoksnių, o tai sukelia Rentgeno spindulius arba išspinduliuojamas Ožė elektronus.

Fotoelektrinė sugertis

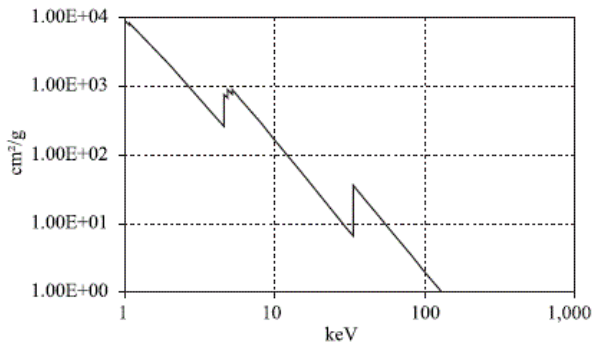
Sugerties spartą sąlygoja fotoelektrinės sugerties koeficientas τ . Vienos tikslios formulės, kuri aprašytų τ kitimą įvairiais atvejais, nėra. Labai grubiai orientacijai galima naudotis apytiksliau sąryšiu

τ išraiška

$$\tau \sim \frac{Z^4}{(h\nu)^3}. \quad (4)$$

Vykstant sugerčiai įvairiuose sluoksniuose K, L, M, \dots , kurių elektronų ryšio energija yra nevienoda, galima kalbėti apie atskirus fotoelektrinės sugerties koeficientus $\tau_K, \tau_L, \tau_M, \dots$, kurių kiekvienas virsta nuliu, jei fotono energija yra mažesnė už atitinkamą jonizacijos energiją. Peržengus tą energiją, τ iš karto padidėja, po to vėl mažėja pagal $\frac{1}{\nu^3}$ dėsnį.

Fotoelektrinė sugertis



Masinio silpimo koeficiento priklausomybė nuo energijos. Jodas.

Fotoelektrinė sugertis

Energijai, didesnei, negu reikia elektronams iš K sluoksnio išlaisvinti, geriau tinka tokia koeficiento τ priklausą:

τ išraiška

$$\tau \sim \frac{Z^5}{(h\nu)^{7/2}}. \quad (5)$$

Matome, kad fotoefektas yra pagrindinė minkštosios spinduliuotės sugerties sunkiose medžiagose priežastis.

1 γ spindulių ir medžiagos sąveika

- Eksponentinis sugerties dėsnis
- Fotoelektrinė sugertis
- γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
- Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
- Porų kūrimas
- Pozitronų ir elektronų anihiliacija

γ spindulių sklaida. Komptono sklaida

γ spindulių sklaidos reiškiniuose fotonas neišnyksta, o dėl susidūrimo su atomo elektronais tarytum išsklaidomas į šoną ir todėl pradinio tiesiai sklindančio spindulių pluošto intensyvumas sumažėja. γ spindulių, panašiai kaip ir Rentgeno spindulių, sklaida pasireiškia dvejopai:

- be dažnio pakitimo, vadinamoji klasikinė, arba koherentinė, arba Tomsono, sklaida;
- su dažnio pakitimu, nekoherentinė, arba Komptono, sklaida.

γ spindulių sklaida. Komptono sklaida

Koherentinę elektroninę sklaidą be dažnio pakitimo skaičiavo Dž. Tomsonas. Ši sklaida pasireiškia tik mažos energijos kvantams, kuriuose vyrauja banginės savybės. Sklaidančiojo elektrono skerspjūvis yra gaunamas iš radiuso, kuris artimas išskaičiuotam pagal klasikinės elektrodinamikos elektrono radiuso formulę $r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_0 c^2$, iš kurio gaunamas sklaidos skerspjūvis, lygus $\frac{e^4}{16\pi\epsilon_0^2 m_0^2 c^4}$.

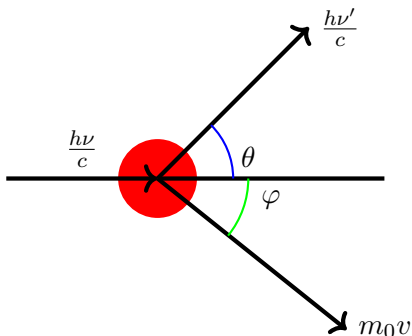
Jis yra pastovus visoms energijoms. Kadangi šios sklaidos metu dažnis nekinta, išsklaidyta spinduliuotė yra koherentinė ir gali sudaryti interferencinius vaizdus.

γ spindulių sklaida. Komptono sklaida

Tačiau didesnės energijos fotonams labiau būdingos dalelinės savybės, ir todėl sklaida pasidaro nekoherentinė, dar vadinama jos atradėjo vardu – Komptono sklaida.

Komptono sklaidą, arba Komptono reiškinį, galima nagrinėti kaip fotono ir atomo elektrono tamprųjį susidūrimą. Kadangi elektronų ryšio energija atomuose yra nedidelė, palyginus su γ fotonų energija, elektronus galima laikyti laisvomis dalelėmis. Fotono judesio kiekis yra lygus $p = h\nu/c$, susidūrimo su elektronu metu dalis jo perduodama elektronui, kuris dėl atatrankos įgyja greitį v .

γ spindulių sklaida. Komptono sklaida



Komptono sklaidos schema.

Iš energijos ir judesio kiekio tvermės dėsnių gauname:

Komptono sklaida: energija ir judesio kiekis

$$h\nu = h\nu' + \frac{1}{2}m_0v^2, \quad (6)$$

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \theta + m_0v \cos \varphi, \quad (7)$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \theta + m_0v \sin \varphi. \quad (8)$$

γ spindulių sklaida. Komptono sklaida

Yra 3 lygtys su 4 nežinomaisiais: ν' , θ , φ , v . Iš jų galima rasti sąryšį tarp 2 mums reikalingų dydžių: ν' ir θ . Išsklaidyto fotono energija yra mažesnė už $h\nu$ ir priklauso nuo sklaidos kampo θ . Matematiškai sprendžiant šią lygčių sistemą, skaičiuojamas dažnio ν pokytis, t.y. skirtumas $\nu - \nu'$. Galutinis rezultatas bus paprastesnis, jei užrašysime ne dažnio, bet bangos ilgio pokytį $\Delta\lambda$:

Bangos ilgio pokytis

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) = \Lambda(1 - \cos\theta). \quad (9)$$

Konstanta $\Lambda = \frac{h}{m_0c} = 0,0242 \text{ \AA}$ vadinama Komptono bangos ilgiu. Ji atitinka bangos ilgį tokio fotono, kurio masė lygi elektrono masei (patikrinkite patys).

γ spindulių sklaida. Komptono sklaida

Kaip matome, bangos ilgio pokytis (pailgėjimas) nepriklauso nuo bangos ilgio, t.y. gaunamas vienodas įvairių energijų γ spinduliams ir priklauso tik nuo sklaidos kampo. Didžiausias bangos ilgio pokytis gaunamas fotonams, išsklaidytiems atgal kampu $\theta = \pi$: $\Delta\lambda = 2\lambda = 0,0484 \text{ \AA}$.

Komptono sklaidos koeficiento σ priklauso nuo γ spindulių energijos ir sklaidos kampo išreiškiama sudėtingomis formulėmis. Yra sukurta Komptono sklaidos teorija (O. Kleinas ir J. Nišina). Žemiau pateiktoje lentelėje surašytos σ vertės, išreikštos barnais (10^{-28} m^2), Al ir Pb (visam atomui, o ne atskiram elektronui) elementams įvairioms γ fotonų energijoms E_γ .

E_γ	10 keV	100 keV	1 MeV	10 MeV
Al	0,50	0,39	0,17	0,04
Pb	1,80	1,40	0,57	0,13

Sunkių elementų sklaidos koeficientai yra didesni ir mažėja, γ fotonų energijai didėjant.

- 1 γ spindulių ir medžiagos sąveika
 - Eksponentinis sugerties dėsnis
 - Fotoelektrinė sugertis
 - γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
 - Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
 - Porų kūrimas
 - Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas

Trečioji priežastis, dėl kurios medžiagoje silpnėja γ spindulių pluoštas, yra energijos eikvojimas elektrono ir pozitrono poroms sukurti. Šis reiškinys prasideda tik tada, kai γ fotonų energija pasidaro didesnė už dviejų elektronų rimties energiją $2m_0c^2$.

Elektrono rimties energija

Elektrono rimties energija

$$m_0c^2 = \frac{9,109 \cdot 10^{-31} \cdot (2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2}{1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV}} = 0,511 \text{ MeV.} \quad (10)$$

Taigi sąlyga poroms sukurti yra

Elektrono ir pozitrono poros sukūrimo sąlyga

$$E_\gamma \geq 2m_0c^2 \approx 1 \text{ MeV.} \quad (11)$$

Kai fotonų energija didesnė negu 1 MeV, energijos nuostoliai poroms sukurti tampa vyraujantys.

Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas

Dabar susipažinsime su pozitronu, kaip su pirmąja žinoma antidalele, su jo atradimu ir savybėmis.

K. D. Andersonas 1932 m., tirdamas kosminių dalelių pėdsakus Vilsono kameroje, esančioje stipriame magnetiniame lauke, gavo nuotrauką, kurioje matėsi pėdsakas. Greitoji dalelė, kuri pagal pėdsako išvaizdą turėtų būti elektronas, magnetinio lauko buvo užlenkta į priešingą pusę taip, kaip turėtų judėti teigiamas krūvis. Šis pėdsakas negalėjo priklausyti greitam protonui, kuris pagal apskaičiuotas iš kreivumo radiusų energijas, negalėtų pereiti 6 mm švino plokštelę, įstatytą skersai kameroje. Beliko tik viena išvada, kad pėdsakas priklauso dalelei, tokios pat masės kaip ir elektrono, bet priešingo krūvio. Dalelė buvo pavadinta *pozitronu*, nors kartais vartojamas ir terminas pozitonas (tuomet atitinkamai elektronas – negatonas). Netrukus po to pozitronų pėdsakų buvo rasta naujose ir net kai kuriose senose nuotraukose, kur jų niekas anksčiau neatpažino. Taip eksperimentiškai buvo atrasta pirmoji antidalelė.

- 1 γ spindulių ir medžiagos sąveika
 - Eksponentinis sugerties dėsnis
 - Fotoelektrinė sugertis
 - γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
 - Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
 - Porų kūrimas
 - Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Porų kūrimas

Teoriškai pozitrono egzistavimą numatė P. A. M. Dirakas dar prieš jo eksperimentinį atradimą. 1928 m. Dirakas išvedė reliatyvistinę elektrono lygtį

Dirako lygtis

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4; \quad (12)$$

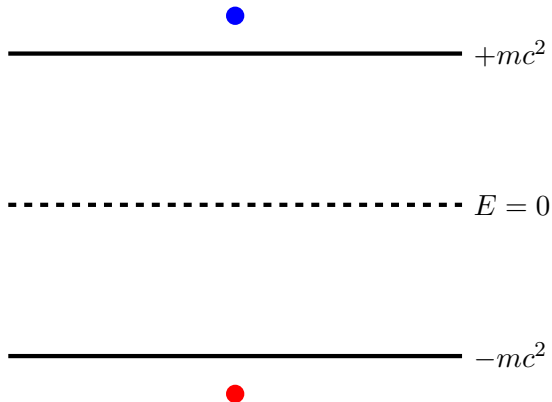
čia: m_0 – elektrono rimties masė, p – jo judesio kiekis, E – visa jo energija, c – šviesos greitis. Ši lygtis turi 2 sprendinius:

Sprendiniai

$$E = \pm \sqrt{c^2 p^2 + m_0^2 c^4}. \quad (13)$$

Įprasta buvo imti tik teigiamą sprendinį, kuris aprašydavo elektrono savybes, o neigiamas sprendinys buvo atmetamas, kaip neturintis fizikinės prasmės. Tačiau P. A. M. Dirakas atkreipė dėmesį, kad ir antrasis neigiamas sprendinys privalo turėti realią prasmę.

Porų kūrimas



Elektronas gali egzistuoti dviejose energijos srityse: $E \geq +mc^2$ arba $E \leq -mc^2$. Teigiamos energijos srityje yra įprastiniai mūsų elektronai, o apatinėje, neigiamos energijos, srityje elektronų savybės būtų visai neįprastos. Iš formulės $E = -mc^2$ matome, kad tų elektronų masė neigiama.

Porų kūrimas

Tokie elektronai turėtų judėti priešinga, negu veikia jėga, kryptimi, kaip tai išplaukia iš lygties $\mathbf{F} = -m\mathbf{a}$. Bet tą keistenybę galima interpretuoti ir kitaip: elektromagnetiniuose laukuose dalelių judėjimas priklauso nuo santykio e/m . Neigiamos energijos elektronui šis santykis bus

Krūvio ir masės santykis

$$\frac{-e}{-m} = \frac{+e}{+m}, \quad (14)$$

t.y. elektronas pasireiškia kaip dalelė su teigiamu krūviu $+e$.

Kitas keblumas atsiranda štai dėl ko. Jei elektrono būsenos su neigiama energija yra galimos, tai elektronai iš viršutinės srities turėtų pereiti į mažesnės energijos būsenas, t.y. į neigiamos energijos sritį, taigi turėtų kažkoku būdu išnykti. Šuolių žemyn tikimybės buvo apskaičiuotos ir pasirodė, kad jos visai nemažos. Tačiau elektronas yra patvari dalelė, žemyn nekrinta.

Porų kūrimas

A. M. Dirakas paaiškino ir šį reiškinį. Elektronams galioja Paulio principas, t.y. kiekviename lygmenyje gali būti tik visiškai apibrėžtas elektronų skaičius. Tad jei visi neigiamos energijos lygmenys yra užimti, šuoliai žemyn yra negalimi ir elektronai viršutinėje srityje lieka stabilūs. O visa sritis su užpildytais neigiamos energijos lygmenimis yra absoličiai vienoda, be jokių išsiskiriančių objektų ir todėl mums lieka nepastebima.

Tačiau, jei iš tos srities perkelsime vieną elektroną į viršutinę sritį, o tam reikalinga energija turi būti ne mažesnė už $2m_0c^2$, o apačioje susidarys skylė, t.y. vieno neigiamos energijos elektrono trūkumas, kuris pasireiškia kaip teigiamas krūvis, tai ir bus pozitronas. Kartu viršuje atsiranda vienas naujas įprastinis elektronas arba iš viso elektrono ir pozitrono pora. Tokiai porai sukurti reikia ne mažiau kaip $2m_0c^2$ energijos, arba apytiksliai 1MeV.

Porų kūrimas

Skylės, t.y. pozitrono gyvavimo trukmė, negali būti ilga ten, kur aplink yra elektronų. Kadangi yra didelė tikimybė elektronui pereiti į žemesnį laisvą lygmenį, vienas elektronas iš viršaus pereina apačion ir užima išlaisvintą vietą. Šiuo atveju išnyksta skylė (pozitronas) ir vienas elektronas. Šis įvykis vadinamas poros anihiliacija, arba poros išmedžiagėjimu. Kartu išsiskiria energija, atitinkanti lygmenų energijos skirtumą. Aišku, kad $E_{\text{anihil}} = 2m_0c^2 \approx 1 \text{ MeV}$. Ši energija išsiskiria dviejų (rečiau trijų) γ fotonų pavidalu.

Porų kūrimas

Taip nagrinėdami turėjome galvoje tik energijos tvermės dėsnį. Bet visuose šiuose procesuose turi būti patankintas ir judesio kiekio tvermės dėsnis. Fotono ir dalelės judesio kiekiai, esant tai pačiai jų energijai, yra skirtingi. Fotono judesio kiekis yra visada didesnis.

Tvermės dėsniai

fotono judesio kiekis

$$p' = \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c}, \quad (15)$$

dalelės judesio kiekis

$$p = mv = \frac{mc^2v}{c^2} = \frac{E\beta}{c}, \quad (16)$$

jų santykis

$$\frac{p'}{p} = \frac{1}{\beta} > 1. \quad (17)$$

Porų kūrimas

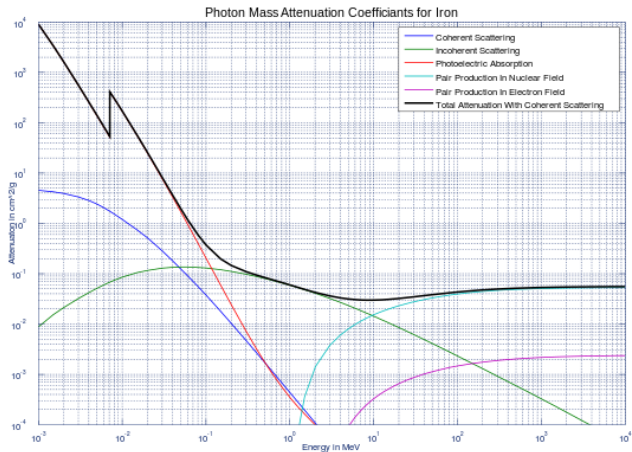
Iš to plaukia papildoma judesio kiekio tvermės sąlyga. Jei fotonas sukuria porą, jis kartu su energija turi atiduoti ir savo judesio kiekį. Atsiradusių elektrono ir pozitrono bendras judesio kiekis, esant tai pačiai energijai, yra mažesnis, taigi šiame procese turi dalyvauti dar viena dalelė, kuri paimtų likusią judesio kiekio dalį. Vadinasi, poros sukūrimas yra galimas tikrai dalyvaujant dar vienai dalelei – branduoliui arba elektronui, kuriam perduodama judesio kiekio dalis. Negali poros sukurti vakuume, nors energijos tam ir pakaktų. Reikia pastebėti, kad jei šis kūrimas vyksta elektrono lauke, γ fotono energija, reikalinga porai sukurti, turėtų būti ne mažesnė kaip $4m_0c^2 = 2,022 \text{ MeV}$. Taip yra dėl mažos elektrono masės, kuri pati susidūrimo metu gauna didelį impulsą.

Porų kūrimas

Visi išdėstyti formalūs teoriniai samprotavimai buvo patvirtinti eksperimentais. Kietiesiems γ spinduliams pereinant per medžiagą, kuriamos elektronų ir pozitronų poros, ir didelės energijos fotonams tai yra svarbiausia sugerties priežastis. Porų sukūrimo sugerties koeficientuose priklausomybė nuo γ spindulių energijos ir medžiagos savybių yra sudėtinga ir čia nepateikiama.

Sekančioje skaidrėje pateikiamas grafikas atvaizduojantis visų trijų mechanizmų įtaką γ spindulių sugerčiai švine.

Porų kūrimas



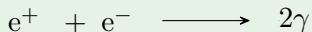
1 γ spindulių ir medžiagos sąveika

- Eksponentinis sugerties dėsnis
- Fotoelektrinė sugertis
- γ spindulių sklaida. Komptono sklaida
- Elektronų ir pozitronų poros. Pozitronas
- Porų kūrimas
- Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Pozitronų ir elektronų anihiliacija

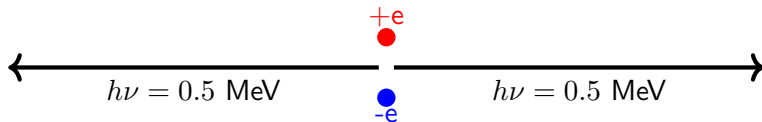
Jau minėjome, kad pozitronas mus supančioje aplinkoje, kur yra labai daug elektronų, gyvuoja neilgai. Suartėjęs su elektronu, jis susijungia su juo, o jų abiejų bendra energija $2mc^2$ virsta elektromagnetinės spinduliuotės energija

Anihiliacijos reakcija



Šis procesas vadinamas elektrono ir pozitrono anihiliacija (išmedžiagėjimu). Čia medžiaginė materijos forma (dalelė) virsta spinduline materijos forma. Kartu su energijos lygybe turi galioti ir judesio kiekio tvermės dėsnis. Kadangi anihiliacija paprastai vyksta tarp sulėtinto pozitrono ir aplinkoje aptikto elektrono, kurio energija labai maža (taip pat ir abu judesio kiekiai), galima sakyti, kad anihiliacijos akimirką bendras judesio kiekis yra lygus nuliui. Toks pat jis turi likti ir po anihiliacijos, atsiradus fotonams. Tai paprastai įvykdoma, jei atsiranda du vienodos energijos ir vienodų judesio kiekių fotonai, judantys į priešingas puses.

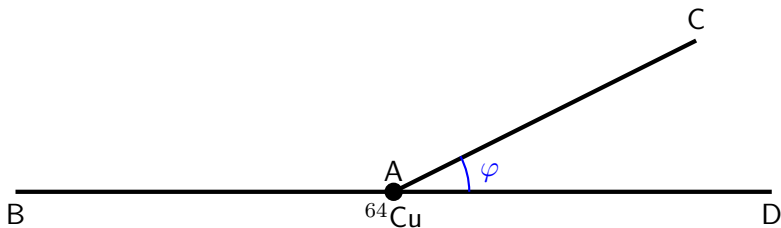
Pozitronų ir elektronų anihiliacija



Eksperimentiškai tokią anihiliacijos eigą patvirtino 1950 m. atliktas A. A. Vlasovo (A. A. Vlasov) ir V. P. Dželepovo (V. P. Dželepov) tyrimas.

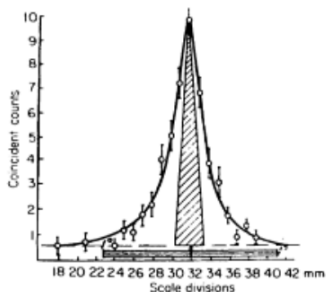
Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Pozitronų šaltinis buvo radioaktyvus vario izotopas ^{64}Cu , kuris spinduliuoja β^- ir β^+ daleles (taške A). Iš abiejų pusių buvo įtaisytos γ spindulių skaitiklių grupės B ir C, įjungtos į sutapčių grandinę. Impulsai buvo registruojami tik tada, kai jų atsiradimo momentai sutapdavo abiejose grupėse. Skaitikliai C galėjo būti pasukami tiesės BD atžvigių įvairiais kampais φ .



Pozitronų ir elektronų anihiliacija

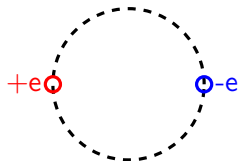
Ekspimento rezultatas.



γ spindulių sutapčių skaičius labai padidėdavo, kai abi skaitiklių grupės būdavo vienoje tiesėje su spinduliu. Padidinus kampą iki 1° , jų skaičius labai sumažėdavo. Tai įrodo, kad anihiliacijos spinduliavimas vyksta dviem γ kvantais į priešingas puses, kaip to reikalauja judesio kiekio tvermės dėsnis.

Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Tačiau yra galimybė anihiliacijos metu atsirasti ir 3 fotonams štai dėl kokios priežasties. Pozitronui priartėjus prie elektrono, jie gali pradėti sukis vienas apie kitą ir sudaryti dviejų dalelių sistemą, panašią į vandenilio atomą, kurioje teigiamo protono vietoje bus teigiamas pozitronas. Kadangi abiejų dalelių masės vienodos, abi suksis apie bendrą masės centrą viduryje tarp jų. Susidaro sistema, vadinama pozitroniu, cheminis ženklas Ps, tai būtų paprasčiausia dirbtinė atominė sistema. Joje redukuotoji elektrono masė yra $m/2$, ir sistemai galima taikyti visas vandenilio atomo Boro teorijos formules.



Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Pozitronio radiusas yra dukart didesnis už vandenilio atomo radiusą ($\sim 1 \text{ \AA}$), o jonizacijos energija dukart mažesnė (6,7 eV). Tik ši sistema yra nestabili, greit anihiliuoja. Tačiau kol tai įvyksta, joje galimi įvairūs energijos ir būsenų pakitimai.

Kadangi abi dalelės turi sukinį $\frac{1}{2}h$, pozitronyje sukinių orientacija gali būti vienodų arba priešingų krypčių. Taip susidaro 2 pozitronio rūšys:

- parapozitronis – sukiniai priešingų krypčių, bendras sukiny $S = 0$, singuletinė būsena;
- ortopozitronis – sukiniai vienakrypčiai, bendras sukiny $S = 1$, tripletinė būsena.

Pozitronų ir elektronų anihiliacija

Nevienoda abiejų pozitronio gyvavimo trukmė iki anihiliacijos:

parapozitronio $\tau = 1,25 \cdot 10^{-10}$ s,

ortopozitronio $\tau = 1,4 \cdot 10^{-7}$ s.

Taip pat nevienodas abiejų pozitronių rūšių ir anihiliacijos rezultatas:

parapozitronis anihiliuoja į 2 γ kvantus, o ortopozitronis, turintis papildomą judesio kiekio momentą, – į 3 γ kvantus. Šis antrasis skilimo būdas į 3 fotonus yra daug retesnis.