

BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenį
VIII paskaita

1 γ spinduliavimas

- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

1 γ spinduliavimas

- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

1 γ spinduliavimas

• Branduolių γ spinduliavimas

- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

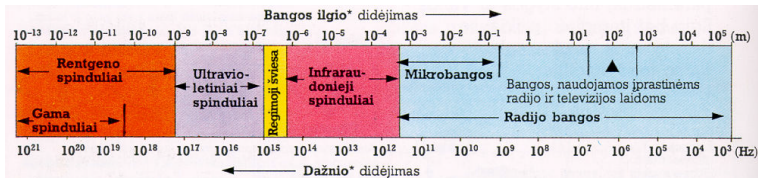
Branduolių γ spinduliavimas

- γ spindulių prigimtis buvo išaiškinta 1913 m. po to, kai buvo susekta Rentgeno spindulių difrakcija ir interferencija kristaluose. 1914 m. E. Rezerfordas ir E. N. Andrade (E. N. da Costa Andrade) kristalų metodu pirmą kartą išmatavo kai kurių γ spindulių bangos ilgį. Tai buvo nelengva dėl dviejų priežasčių:
 - 1 mažo γ spindulių intensyvumo ir negalėjimo juos sukoncentruoti;
 - 2 labai mažo bangos ilgio, t.y. tiek mažo, kad ir kristalinės gardelės buvo per stambios.
- Vis dėlto patobulintomis priemonėmis pasisekė kristalo metodu išmatuoti γ spindulių bangos ilgį iki $16 \cdot 10^{-13}$ m, o panaudojant sulenktus kristalus difrakciniu metodu – net iki $9 \cdot 10^{-13}$ m.
- Visa tai parodė, kad γ spinduliai yra Rentgeno spindulių tęsinys į trumpųjų bangų pusę ir iš dalies vieni ir kiti tam tikroje spektro srityje sutampa. Seniau γ spindulių šaltiniai buvo gamtiniai radioaktyvieji elementai, dabar branduolinėse reakcijose gaunama daugybė dirbtinai radioaktyviųjų nuklidų, kurių γ spinduliuotė yra daug skvarbesnė, t.y. kvantai turi didesnę energiją, ir gali būti didesnio intensyvumo.

Branduolių γ spinduliavimas

- γ spinduliams apibūdinti nurodomas jų bangos ilgis arba, kaip yra patogiau ypač labai trumpų bangų srityje, γ kvantų energija, nes tuomet lengviau palyginti su branduolių energinėmis savybėmis. γ spinduliai, panašiai kaip ir Rentgeno, skirstomi į minkštuosius, t.y. mažiau skvarbius ir ilgesnių bangų ir į kietuosius – skvarbesnius ir trumpų bangų. Gamtinių radioaktyviųjų elementų γ spindulių išmatuotos bangų ilgio ir energijos ribos yra tokios:

$$\begin{array}{ll} \text{minkščiausių} & \lambda = 392 \cdot 10^{-13} \text{ m, arba } h\nu = 0,0315 \text{ MeV} \\ \text{kiečiausių} & \lambda = 4,66 \cdot 10^{-13} \text{ m, arba } h\nu = 2,65 \text{ MeV} \end{array}$$

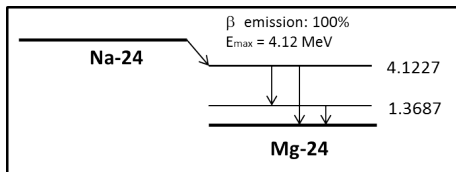


Branduolių γ spinduliavimas

- Dabar γ spinduliams gauti yra daugiau priemonių ir jų energija labai padidėjo. Dirbtinai radioaktyviųjų elementų γ spindulių energija yra iki 8 MeV, branduolinėse reakcijose gaunama apytiksliai iki 20, o betatronuose – iki 300 MeV.
- Gamtiniai ir dirbtiniai radioaktyvūs elementai dažniausiai spinduliuoja γ kvantus po β skilimo, kai antrinis branduolys sužadintas. γ sužadavimo trukmė yra nuo 10^{-11} iki 10^{-7} s, todėl praktinis γ spindulių šaltinis turi būti ne pats γ spindulis, o pirminis nuklidas. Pavyzdžiui, ThD 2,6 ir 0,6 MeV energijos γ spinduliams gauti reikia turėti atitinkamą kiekį ThC”.

Branduolių γ spinduliavimas

- Kitą pavyzdį paimsime iš dirbtinai radioaktyviųjų nuklidų srities. Ampulė su dirbtiniu būdu pagamintu ${}^{24}_{11}\text{Na}$ yra kelias paras veikiantis skvarbių γ spindulių šaltinis, nors faktiškai γ spinduoelis yra ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ nuklidai, atsirandantys iš ${}^{24}_{11}\text{Na}$ β^- skilimo būdu. Ampulės sienelės sulaiko β spindulius, o per jas pereina tik ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ γ spinduliai, kurių energija E_γ yra 2,7 ir 1,4 MeV.



Branduolių γ spinduliavimas

- Monochromatinis γ spindulių pluoštas, pereidamas per medžiagą, silpsta pagal eksponentinį dėsnį:

Eksponentinis silpimo dėsnis

$$I = I_0 \exp(-\mu x); \quad (1)$$

čia: I – γ spindulių intensyvumas, x – medžiagos sluoksnio storis, o μ – silpimo koeficientas. Gali būti 3 skirtingos intensyvumo mažėjimo priežastys:

- 1 fotoelektrinė sugertis, kurios metu γ spinduliai sugeriami ir iš atomų išlekia foto elektronai (fotoelektrinis efektas);
- 2 spindulių sklaida;
- 3 elektronų ir pozitronų porų sukūrimas, kai γ spindulių energija yra didesnė negu 1 MeV.

Branduolių γ spinduliavimas

- γ spindulių bangos ilgiui ir kvantų energijai matuoti yra ne tik tiesioginis metodas tiriant jų difrakciją kristaluose, bet ir labai dažnai vartojamas netiesioginis – vidinės konversijos elektronų energiją matuojant magnetiniais spektrografais. Įvairių konstrukcijų magnetiniai spektrografai yra pagrindiniai prietaisai β ir γ spinduliams tirti.

1 γ spinduliavimas

- Branduolių γ spinduliavimas
- **Vidinė konversija**
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Vidinė konversija

- Sužadintas atomo branduolys gali savo energiją ne tik atiduoti γ kvantams, bet dėl elektromagnetinės sąveikos tarp branduolio ir jį supančių atomo elektronų perduoti tiesiog vienam iš šių elektronų. Tokiu atveju išlėks ne γ kvantas, o elektronas. Šie elektronai vadinami *vidinės konversijos elektronais*, o pats reiškinys *vidine konversija*. Konversijos elektrono energija lygi branduolio sužadinimo energijai $h\nu$, atėmus iš jos elektrono išlaisvinimo energiją. Konversija gali vykti iš įvairių sluoksnių: K , L_I ($S_{1/2}$), L_{II} ($P_{1/2}$), L_{III} ($P_{3/2}$), M , ..., o juose elektrono ryšio energija yra įvairi: $E_K, E_{L_I}, E_{L_{II}}, \dots$. Todėl konversijos elektronų energija yra:

$$E_1 = h\nu - E_K,$$

$$E_2 = h\nu - E_{L_I},$$

$$E_3 = h\nu - E_{L_{II}},$$

.....

Vidinė konversija

- Energija $E_K, E_{L_I}, E_{L_{II}}, \dots$ yra įvairių atomo sluoksnių jonizacijos energija, tiksliai žinoma iš Rentgeno spektrų analizės. Išmatavus įvairių konversijos elektronų kinetinę energiją E_1, E_2, E_3, \dots , iš aukščiau parašytų sąryšių galima rasti sužadinimo energiją:

$$h\nu = E_1 + E_K,$$

$$h\nu = E_2 + E_{L_I},$$

$$h\nu = E_3 + E_{L_{II}},$$

.....

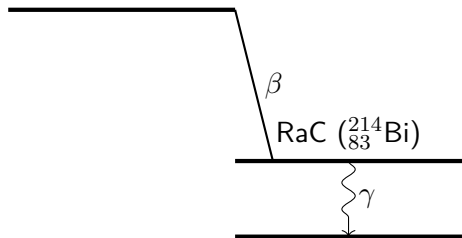
taip parenkant jonizacijos ir konversijos elektronų energijas, kad visos sumos būtų lygios. Tai paprastai galima gauti iš kelių energijų kombinacijų. Vieno pirmųjų tokiu metodu RaC ($^{214}_{83}\text{Bi}$) sužadinimo energijos skaičiavimų rezultatai pateikti lentelėje.

Vidinė konversija

Konversijos elektronų energija, keV	Jonizacijos energija, keV	Konversijos sluoksnis	$h\nu$, keV
36,74	16,34	L_I	53,08
37,37	15,67	L_{II}	53,04
39,63	13,38	L_{III}	53,01
48,85	3,99	M_I	52,84
51,90	0,93	N_I	52,83

Vidurkis $h\nu = 52,91$ keV.

RaB ($^{214}_{82}\text{Pb}$)



Vidinė konversija

Kvantinio šuolio *vidinės konversijos koeficientu* α vadinamas konversijos elektronų N_e ir γ kvantų N_γ skaičių santykis

Vidinės konversijos koeficientas

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma}. \quad (2)$$

Šis santykis kinta labai plačiame intervale: $10^{-4} < \alpha < 10^{-2}$. Koeficientas α didesnis, jei γ kvantų spinduliavimo tikimybė dėl atrankos taisyklių mažesnė. Ypatingas vaidmuo tenka vidinės konversijos reiškiniui vadinamųjų 0–0 šuolių atveju, kada branduolio pagrindinio ir pirmojo sužadinto lygmenų sukiniai yra lygūs nuliui.

Vidinė konversija

Pirmas eksperimentiškai konstatuotas toks atvejis buvo pastebėtas tiriant RaC' ($^{214}_{84}\text{Po}$) γ spektrą. Vykstant RaC β skilimui susidaro sužadintas antrinis RaC' branduolys, turintis 12 energijos lygmenų. Iš visų jų, išskyrus vieną, kurio energija 1,412 MeV, randami γ spinduliai ir konversijos elektronai, tačiau iš minėtojo lygmens yra tik konversijos elektronai. Tai rodo, kad šis kvantinis šuolis turėtų būti 0–0, o tokiu atveju spinduliavimas yra uždraustas.

1 γ spinduliavimas

- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- **Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai**
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai

Iš įvairių radioaktyvumo reiškinių žinome, kad branduolyje yra griežtai apibrėžti energijos lygmenys, kurių kiekvienas turi atitinkamą charakteristiką – energiją, judesio kiekio momentą ir lyginumą. Spinduliavimo metu energija mažėja ir kartu keičiasi branduolio charakteristika, fotonas kartu su energija išneša ir tam tikrą judesio kiekio momentą ir lyginumą.

Fotonui tiesiogiai negalima taikyti judesio kiekio momento sąvokos. Taip yra todėl, kad:

- 1 fotono rimties masė lygi nuliui,
- 2 fotono sukinyis lygus 1.

Fotonas neturi būsenų su apibrėžtomis l vertėmis, žymimų s, p, d, \dots . Todėl fotonams yra tokių būsenų analogai, kuriuos vadiname multipoliais.

Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai

Elektromagnetinio lauko multipolis – tai laisvai sklindančio lauko būseną, turinti apibrėžtą pilnutinį momentą L ir lyginumą P . Laisvo fotono galimos būsenos, kai pilnutinis momentas L yra lygus 1,2,3... Kiekvienai šiai vertei tenka po 2 būsenas: viena su teigiamu lyginumu ir viena su neigiamu. Kiekviena fotono būseną su apibrėžtu momentu ir lyginumu vadinama apibrėžtu multipoliu. Apibrėžiama taip:

Elektrinis 2^L multipolis, jei momentas L , lyginumas $(-1)^L$,

Magnetinis 2^L multipolis, jei momentas L , lyginumas $-(-1)^L$,

Priklausomai nuo multipolio momento spinduliuotė vadinama:

dipoline $E1, M1$, kai $L = 1$

kvadrupoline $E2, M2$, kai $L = 2$

oktupoline $E3, M3$, kai $L = 3$

16-poline $E4, M4$, kai $L = 4$

Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai

Elektrinių multipolių spinduliavimą sąlygoja elektrinių krūvių pasiskirstymo branduolyje pokyčiai.

Magnetinių multipolių spinduliavimą sąlygoja sukininių ir orbitinių magnetinių momentų pokyčiai.

Su multipolių momentais ir branduolio lygmenų sukiniais siejama pirmoji γ spindulių kvantinių šuolių atrankos taisyklė, kuri yra judesio kiekio momento tvermės dėsnio pasekmė. Jei branduolio pradinio ir galinio lygmenų sukiniai yra \mathbf{I}_1 ir \mathbf{I}_2 ir γ kvanto pilnutinis momentas \mathbf{L} , tai galioja lygybė

Judesio kiekio momento tvermės dėsnis

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 + \mathbf{L}, \quad (3)$$

arba

$$\mathbf{L} = \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2. \quad (4)$$

Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai

Iš šios vektorinės lygybės plaukia γ kvanto multipoliškumo apribojimas:

Judesio kiekio momento tvermės dėsnis

$$|I_1 - I_2| \leq L \leq I_1 + I_2 \quad (5)$$

ir γ spinduliavimo atrankos taisyklės, kurios surašytos lentelėje.

L vertė		1	2	3
Pavadinimas		Dipolis	Kvadrupolis	Oktupolis
Žymuo	Elektrinis	$E1$	$E2$	$E3$
	Magnetinis	$M1$	$M2$	$M3$
Sukinio pokytis $\Delta I \leq$		0, ± 1	0, ± 1 , ± 2	0, ± 1 , ± 2 , ± 3
Sąlyga		$I_1 + I_2 \geq 1$	$I_1 + I_2 \geq 2$	$I_1 + I_2 \geq 3$

lentelė: Atrankos taisyklės.

Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai

Antroji atrankos taisyklė yra būsenos funkcijos lyginumo tvermės dėsnio pasekmė. Leistini multipoliai, kai branduolio lyginumas pakinta ($\Delta P \neq 0$) ir nepakinta ($\Delta P = 0$), pateikti lentelėje.

$(\Delta P \neq 0)$	$E1$	$E3$	$M2$	
$(\Delta P = 0)$	$E2$	$M1$	$E4$	$M3$

lentelė: Lyginumo pokytis.

Šios atrankos taisyklės galioja taip pat ir optiniams spektrams, tai paprastai yra elektrinė dipolinė spinduliuotė $E1$, sąlygojama šuolių tarp skirtingo lyginumo lygmenų. Retais atvejais spinduliuojami multipoliai $E2$ ir $M1$ – vadinamosios *draustinės linijos*, atitinkančios šuolius tarp vienodo lyginumo lygmenų.

Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai

Kai branduolio radiusas R yra daug mažesnis už redukuotąjį spinduliuojamos bangos ilgį $\frac{\lambda}{2\pi}$, t.y. $2\pi R/\lambda \ll 1$, spinduliuotę sudaro tik žemiausi galimi multipoliniai. Jei tarp dviejų lygmenų pagal atrankos taisyklės yra galimi kvantiniai įvairių multipoliškumų šuoliai, visada spinduliuojamas mažiausio L multipolis, kurio tikimybė didžiausia. Jeigu multipoliškumas vienodas, magnetinio spinduliavimo tikimybė daugikliu $\left(\frac{2\pi R}{\lambda}\right)^2$, t.y. 100 ar 1000 kartų mažesnė už elektrinio. Maždaug vienodos $E2$ ir $M1$ spinduliavimo tikimybės. Multipoliškumui didėjant, spinduliavimo tikimybė labai sparčiai mažėja.

Jei tarp dviejų žemiausių lygmenų yra didelis sukinių skirtumas ΔI (pvz., $\Delta I \geq 4$), tai šuolio tikimybė yra tokia maža, kad gali susidaryti *metastabilūs lygmenys*.

1 γ spinduliavimas

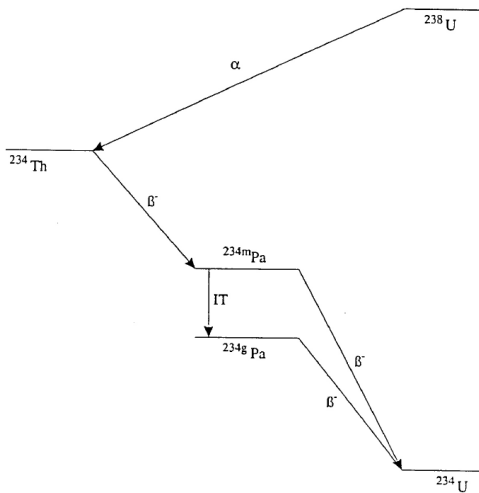
- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- **Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai**
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai

Branduolių izomerija yra reiškinys, kai du branduoliai, turintys tokį pat protonų ir neutronų skaičių, skiriasi kai kuriomis savo savybėmis, pvz., skilimo pusamžiais. Pirmas toks atvejis buvo pastebėtas dar 1921 m., kai O. Hanas (O. Hahn) konstatavo, kad du, anksčiau laikomi skirtingais, radioaktyvieji elementai UX_2 ir UZ faktiškai yra tas pat nuklidas (${}_{91}^{234}\text{Pa}$ – Protaktis), t.y. jie yra kartu ir izobarai, ir izotopai. Jie susidaro vykstant UX_1 (${}_{90}^{234}\text{Th}$) β^- skilimui.

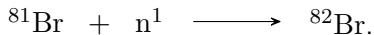
Nors jų masės A ir atominiai Z skaičiai vienodi, β skilimo pusamžiai yra nevienodi: $T_{UX_2} = 1,18$ min, $T_{UZ} = 6,7$ h. Abu šie branduoliai susidaro iš UX_1 ir po β^- skilimų virsta U_{III} . Skirtingos taip pat jų β^- spektrų ribos. Ilgą laiką buvo žinomas tik toks vienas branduolių izomerijos atvejis.

Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai



Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai

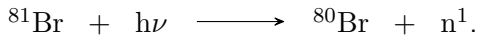
1935 m. fizikų grupė – broliai B. V. ir I. V. Kurčatovai ir L. V. Mysovskis ir Rusinovas – tyrė bromo dirbtinį radioaktyvumą, žadinamą neutronais, t.y. $\text{Br}(n, \gamma)$ reakciją. Bromas turi du stabiliuosius izotopus ^{79}Br ir ^{81}Br , kuriuos veikiant neutronais buvo galimos reakcijos:



Dėl to galėjo atsirasti 2 nauji nuklidai, kurių masės skaičiai 80 ir 82. Tačiau eksperimentiškai užregistruoti 3 γ pusamžiai: 18 min, 4,2 h ir 36 h. Taigi vienam iš naujų nuklidų turėjo priklausyti du pusamžiai. Tai reiškė, kad čia irgi yra izomerijos atvejis, nežinia tik, kuriam nuklidui priklauso 2 pusamžiai ir kaip tie visi pusamžiai pasiskirsto tarp dviejų naujai gautųjų nuklidų.

Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai

Problema išsprendė vokiečių mokslininkai V. V. G. F. Botė (W. W. G. F. Bothe) ir V. Gentneris (W. Gentner), atlikę kryžminį eksperimentą. Jie irgi veikė bromą, bet fotonais, ir tyrė vykstančią jame fotobranduolinę reakciją dviejuose izotopuose:



Susidarė 2 nauji radioaktyvieji nuklidai ${}^{78}\text{Br}$ ir ${}^{80}\text{Br}$, bet užregistruoti taip pat 3 pusamžiai: 5min, 16 min ir 4,5 h. Atsžvelgiant į eksperimentų paklaidas du iš jų sutapo su užregistruotais $\text{Br}(n,\gamma)$, o vienas buvo visai skirtingas. Abiem atvejais buvo gautas tik vienas bendras nuklidas ${}^{80}\text{Br}$. Šių eksperimentų rezultatai buvo suderinti, o pusamžiai paskirstyti taip:

Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai

	T pradinis	T patikslintas
^{78}Br	5 min	6,5 min
^{79}Br	stabilus	
^{80}Br	16 ir 18 min	17,6 min
^{80}Br	4,2 ir 4,5 h	4,38 h
^{81}Br	stabilus	
^{82}Br	36 h	35,3 h

Vėlesni eksperimentai, atlikti įvairiose laboratorijose, atskleidė daugybę kitų izomerijos atvejų ir dabar jų žinoma labai daug ir su labai įvairiais pusamžiais. Štai keli pavyzdžiai:

Elementas	Skilimas	Pusamžis
^{52}Mn	β^+	5,60 d ir 21,1 min
^{60}Co	β^-	5,26 m ir 10,5 min
^{71}Zn	β^-	3,92 h ir 2,4 min
^{107}Ag	γ	stabilus ir 44,3 s

Paskutinis ^{107}Ag yra pavyzdys, kai iš dviejų izomerinių branduolių vienas yra stabilus, kitas γ radioaktyvus. Toliau – izomerijos priežastys.

1 γ spinduliavimas

- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- **Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė**
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė

Jau anksčiau minėta, kad γ spindulių kvantinio šuolio tikimybė labai priklauso nuo pradinio ir galutinio lygmenų sukinių skirtumo ΔI arba nuo γ kvantų multipoliškumo L . Be to, ji priklauso ir nuo γ kvantų energijos E arba nuo γ spindulių redukuotojo bangos ilgio Λ santykio su branduolio radiusu R . Redukuotasis bangos ilgis

Redukuotasis bangos ilgis

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c\hbar}{E} \approx \frac{2 \cdot 10^{-11}}{E(\text{MeV})} \text{ cm.} \quad (6)$$

Branduolių spinduliuojamų γ kvantų energijos paprastai yra nuo $20 \text{ keV} = 0.02 \text{ MeV}$ iki 4 MeV , o tai atitinka redukuotuosius bangos ilgius nuo 10^{-9} iki $5 \cdot 10^{-12} \text{ cm}$, t.y. visada daug didesni negu branduolio radiusas.

Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė

Todėl visada

Branduolio radiuso ir redukuotojo bangos ilgio santykis

$$\frac{R}{\Lambda} \ll 1. \quad (7)$$

Nuo šio santykio priklauso γ kvantų spinduliavimo tikimybė P . Su šia tikimybe yra susijusi sužadinto lygmens gyvavimo trukmė $\tau = \frac{1}{P}$ ir pusamžis $T = 0,693\tau$. Tikimybė, pusamžis ir multipoliškumas yra tarp savęs susiję taip:

elektrinio L multipolinio šuolio

$$P_E = \frac{1}{\tau} \sim \frac{1}{T} \sim \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{R}{\Lambda}\right)^{2L},$$

magnetinio L multipolinio šuolio

$$P_M = \frac{1}{\tau} \sim \frac{1}{T} \sim \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{R}{\Lambda}\right)^{2(L+1)}.$$

Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė

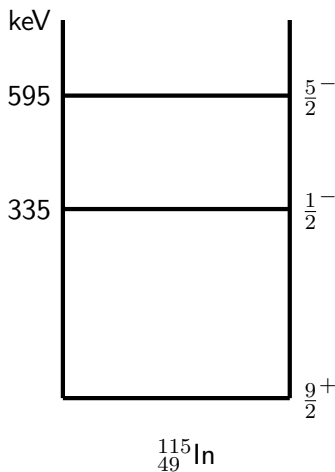
Iš čia matome, kad didelių multipoliškumų kvantų spinduliavimo tikimybė yra labai maža, kitaip sakant, tokie šuoliai yra stipriai uždrausti. Labiausiai leistinas yra elektrinis dipolinis šuolis $E1$, po jo labiausiai leistini $E2$ ir $M1$.

Jeigu iš kokio nors aukštesnio lygmens yra galimi keli įvairių multipoliškumų šuoliai, vyksta tik toks šuolis arba tokia jų kombinacija, kad multipoliškumai būtų mažiausi.

Kai tarp žemiausių branduolio lygmenų yra dideli sukinių skirtumai, kai galimi tik didelio multipoliškumo šuoliai, kurių tikimybės labai mažos, aukštesnio lygmens gyvavimo trukmė gali būti labai didelė, matuojama sekundėmis, valandomis ir daugiau. Tokios uždelsto spinduliavimo būsenos vadinamos metastabiliomis. Schemose jos žymimos meta arba dar trumpiau – raide m.

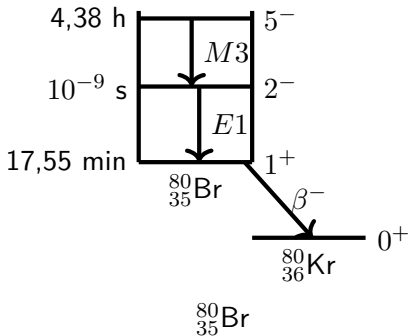
Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė

Tokių metastabiliųjų būsenų susidarymas yra izomerijos priežastis, nes čia, greta normalių, nesužadintų branduolių, atsiranda ir sužadinti, kurie lėtai spinduliuoja. Indžio $^{115}_{49}\text{In}$, kurio žemesnio lygmens sukiny yra labai didelis ($9/2^+$), atveju galimas kvantinis šuolis žemyn tik M4. Jo tikimybė tokia maža, kad šio sužadinto lygmens gyvavimo trukmė yra 4,5 h. Dėlto, šalia įprastinių indžio branduolių, yra izomeriniai branduoliai, spinduliuojantys γ kvantus pusamžiu $T = 4,5$ h.



Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė

Kitas pavyzdys yra bromo nuklidas $^{80}_{35}\text{Br}$. Čia metastabilus lygmuo yra tas, kurio charakteristika 5^- , iš jo žemyn galimas vienintelis tikimiausias šuolis $M3$ yra stipriai draustinas. Šios būsenos trukmė yra 4.38 h. Branduolinės reakcijos metu susidarius nuklidui $^{80}_{35}\text{Br}$, atsiranda visi grafike pavaizduoti lygmenys. Iš žemiausiojo (1^+) vyksta β^- skilimas pusamžiu 17,6 min, jis gan greit ištuština lygmenį (1^+), po to kis papildomas pusamžiu 4,38 h iš lygmens (5^-). Todėl tolesnis (β) skilimas vyks jau pusamžiu 4,38 h.



Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė

Taigi, taip aiškinamos ${}_{49}^{115}\text{In}$ ir ${}_{35}^{80}\text{Br}$ izomerijos.

Izomeriniai branduoliai periodinėje elementų sistemoje aptinkami tam tikrose vietose, t.y. kaip tik ten, kur randami didesni branduolių sukiniai. Pagal sluoksninį branduolio modelį dideli nuklidų sukiniai prasideda artėjant prie magiškujų skaičių, t.y. tada, kai protonų ar neutronų skaičiai pradeda artėti prie 50, 82 ir 126. Taigi izomerai susigrupuoja ties vadinamosiomis izomerijos salomis – aplink magiškuosius skaičius. Izomerijos sąlyga: $\Delta I \geq 4$. Izomerijos salos yra vienas iš argumentų, pateisinančių sluoksninį branduolio modelį.

1 γ spinduliavimas

- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- **Mesbauerio reiškinys**
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Mesbauerio reiškiny

Vienas iš svarbių γ spektroskopijos taikymų yra 1958 m. Mesbauerio (R. L. Mossbauer) aptiktas reiškinys, pavadintas jo vardu. Reiškinio esmė yra analogiška atominėje spektroskopijoje žinomai rezonansinei fluorescencijai, kai atomai sugeria ir vėl išspinduliuoja rezonansinės linijos spinduliuotę. Pavyzdžiui, praretinti natrio garai, apšviesti Narezonansinio dubleto $\lambda = 5890$ ir $\lambda = 5896 \text{ \AA}$ monochromatine šviesa, ją sugeria ir vėl to paties bangos ilgio šviesą išspinduliuoja.

Panašaus reiškinio galima laukti ir branduolinio spinduliavimo atveju. Vieno branduolio spinduliuojamą γ kvantą galėtų sugerti kitas toks pat branduolys (rezonanso reiškinys), po to jis vėl išspinduliuotų to paties dažnio ir energijos γ kvantą, o tai atitiktų rezonansinę fluorescenciją. Tačiau iki 1958 m. tokios rezonansinės sugerties ir spinduliavimo nerasta.

Mesbauerio reiškiny

Pasirodo, kad dėl didelės γ spindulių energijos ir su tuo susijusios branduolinės atatrunkos spinduliavimo ir sugerties linijų energijos nesutampa. Fotono judesio kiekis randamas iš Einšteino formulės

Fotono judesio kiekis

$$mc^2 = h\nu; \quad (8)$$

$$p = mc = \frac{h\nu}{c}. \quad (9)$$

Su šiuo judesio kiekiu yra susijusi energija, kurią pavadinsime atatrunkos energija R

Atatrunkos energija

$$R = \frac{(Mv)^2}{2M} = \frac{p^2}{2M} = \frac{(h\nu)^2}{2Mc^2}. \quad (10)$$

Ji yra suteikiama spinduliuojančiam ar sugeriančiam branduoliui, kurio masė yra M .

Mesbauerio reiškiny

Dėl atatranks spinduliuojamo ar sugeriamo kvanto energija pasikeičia šitokiu būdu. Jei kvanto energija atitiktų branduolio lygmenų energijų skirtumą $h\nu_0 = E_2 - E_1$, ji būtų visais atvejais vienoda. Spinduliuojant su atatranka, ši energija atiduodama γ kvantui ir branduoliui kaip atatranks energija

Energija

$$h\nu_0 = (h\nu)_{\text{sp}} + R \text{ ir } (h\nu)_{\text{sp}} = h\nu_0 - R. \quad (11)$$

Matome, kad spinduliuojamo kvanto energija $(h\nu)_{\text{sp}}$ yra mažesnė už lygmenų energijų skirtumą $h\nu_0$. Sugerdamas γ kvantą, branduolys turi įgyti ne tik sužadavimo energiją $h\nu_0$, bet ir kvanto suteikiamą judesio kiekį, t.y. turi būti patenkinta sąlyga

Energija

$$(h\nu)_{\text{sug}} = h\nu_0 + R. \quad (12)$$

Mesbauerio reiškiny

Palyginę (11) ir (12) formules, matome, kad $(h\nu)_{\text{sp}}$ ir $(h\nu)_{\text{sug}}$ nesutampa, jų skirtumas yra

Energijų skirtumas

$$(h\nu)_{\text{sug}} - (h\nu)_{\text{sp}} = 2R = \frac{(h\nu)^2}{Mc^2}. \quad (13)$$

Jis yra be galo mažas šviesos kvantams, pvz., kai $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ ir atominė masė $M = 100 u$, $2R = 7 \cdot 10^{-11} \text{ eV}$. Tuo tarpu γ spindulių srityje, pvz., $h\nu = 500 \text{ keV}$, šis skirtumas $2R = 2,7 \text{ eV}$, o tai yra gan daug ir visai pakankama, kad rezonansas neįvyktų.

Mesbauerio reiškiny

Rezonansą galime atstatyti, jei spinduliuojamiems γ kvantams suteiksime papildomą energiją. Tai galima įvykdyti panaudojant Doplerio reiškinį. Jei γ spindulių šaltinis tam tikru greičiu v judės link branduolių, sugeriamas dažnis bus didesnis:

Dažnis

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right). \quad (14)$$

Padauginę abi puses iš h ir pažymėję $h\nu = E$, gauname

Energijos pokytis

$$h\nu = h\nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right) \text{ ir } E = E_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (15)$$

arba

$$\Delta E = E_0 \frac{v}{c}. \quad (16)$$

Mesbauerio reiškiny

Tokie eksperimentai su judančiais spindulių šaltiniais buvo atlikti ir iš tikrųjų gauta rezonansinė sugertis bei fluorescencija.

1 γ spinduliavimas

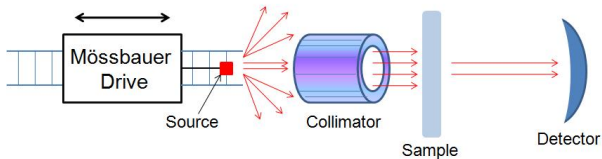
- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės

Mesbaueris konstatavo kitą faktą, kuris grindžiamas kvantine teorija. Kadangi atatranka yra labai maža, šis procesas gali būti nagrinėjamas jau kvantiniu požiūriu. Jei spinduliuojantis ar sugeriantis branduolys yra kristalinėje gardelėje, tai kai kuriais atvejais atatranka perduodama ne branduoliui, o visai gardelei, kurios masė palyginus su branduolio mase, yra nepaprastai didelė. Tuomet pagal (10) atatrankos energija $R = 0$ (čia M reikia laikyti gardelės mase). Tokiais atvejais gali įvykti rezonansinė sugertis. Sąlygos jai vyksti tuo geresnės, kuo žemesnė temperatūra, t.y. kuo "ramesnė" yra gardelė. Kai kuriems izotopams reiškinį galima stebėti kambario temperatūroje, bet dažniausiai tenka dirbi labai žemoje temperatūroje.

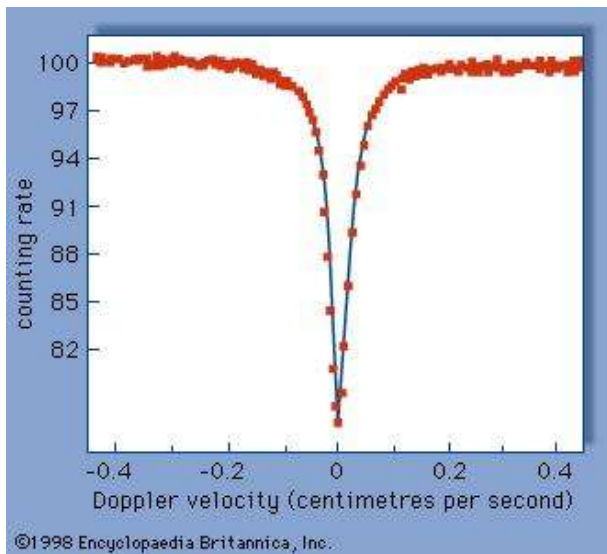
Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės

Mesbauerio reiškiniui eksperimentiškai stebėti dažniausiai vartojamas įrenginys, kurio schema yra tokia.



γ spindulių šaltinis įtaisomas ant judančio pagrindo, kurio greitį v galima keisti ir taip dėl Doplerio reiškinių didinti arba mažinti γ kvantų energiją. Spinduliai patenka į sugėriklį (sample), susidedantį iš tokių pačių branduolių, o iš jo išėję – registruojami skaitikliu. Jei rezonanso nėra, spinduliai laisvai pereina per sugėriklį ir impulsų skaičius skaitiklyje yra pastovus. Kai pasiekus atitinkamą greitį v įvyksta rezonansas, sugertis staigiai padidėja ir impulsų skaičius smarkiai mažėja. Toliau kintant greičiui v , sugertis taip pat staigiai išnyksta ir susidaro sugerties linija.

Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės



Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės

Linijos plotis Γ yra labai mažas, ir jį galima apskaičiuoti iš Heizenbergo sąryšio. Jei sužadinto branduolio gyvavimo trukmė $\tau = \Delta t$, o energijos neapibrėžtumas, kuris atitinka linijos plotį Γ , yra $\Delta E = \Gamma$, tai $\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar$, arba $\Gamma \tau \approx \hbar$, iš čia

Linijos plotis

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}. \quad (17)$$

Geležies izotopo ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ sužadintos būsenos pusamžis $T = 10^{-7}$ s, o vidutinė gyvavimo trukmė $\tau = T/0,693$, tad linijos plotis $\Gamma = \frac{\hbar}{\tau} = 4,7 \cdot 10^{-12}$ keV, pirmojo sužadinto lygmens energija $E = 14,4$ keV. Mesbauerio reiškinyms leidžia nepaprastai dideliu tikslumu matuoti energijos pakitimus. Paminėto ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ lygmens energija gali būti nustatoma santykiniu tikslumu (kita skaidrė)

Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės

Tikslumas

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Gamma}{E} = \frac{4,7 \cdot 10^{-12} \text{ keV}}{14,4 \text{ keV}} = 3 \cdot 10^{-13}. \quad (18)$$

Yra branduolių, kuriems šis tikslumas prilygsta 10^{-16} .

Labai didelis tikslumas, matuojant nedidelius energijos pakitimus Mesbauerio reiškiniu, leidžia jį panaudoti kai kuriems atominės ir molekulinės fizikos vyksmams tirti. Nedideli atomų išorinių elektronų sluoksnių pakitimai dėl skirtingos ryšio energijos įvairiuose junginiuose arba kristalinėse gardelėse, išorinės mechaninės įtampos ir pan. labai mažai paveikia branduolių lygmenų energiją. Šiuos net labai nedidelius pakitimus galima stebėti panaudojant Mesbauerio reiškinių, todėl jis tapo svarbia priemone molekulių ir kristalinių gardelių sandarai tirti.

1 γ spinduliavimas

- Branduolių γ spinduliavimas
- Vidinė konversija
- Dipoliniai, kvadrupoliniai ir multipoliniai šuoliai
- Izomerija. Kurčatovo ir Rusinovo eksperimentai
- Metastabilieji lygmenys. Izomerų spinduliavimo tikimybė ir gyvavimo trukmė
- Mesbauerio reiškinys
- Branduolių, esančių kristalinėje gardelėje, spinduliavimo ir sugerties ypatybės
- Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Einšteino bendrojoje reliatyvumo teorijoje (1911) pagrįstas ekvivalentiškumo principas tvirtina, kad gravitacijos jėgų laukas tam tikroje erdvės dalyje yra ekvivalentus sistemos judėjimui pastoviu pagreičiu prieš lauko kryptį. Kitaip tariant, visi reiškiniai, kurie vyksta Žemės laboratorijoje, vyktų taip pat, jei ji būtų erdvėje be gravitacijos jėgų ir judėtų pastoviu pagreičiu g priešinga negu Žemės pagreitis g kryptimi. Tai būtų vadinamasis Einšteino liftas. Iš šio principo išplaukia, kad gravitacijos laukas veikia fotonus taip pat kaip krintantį ar kylantį akmenį.

Paskaičiuokime fotono dažnio pokyčius dviem atvejais.

Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

- Laboratorija yra *erdvėje be gravitacijos lauko* ir juda pastoviu pagreičiu g *i viršų*. Šaltinis S (viršuje) yra nuotoliu l nuo imtuvo P (apačioje). Fotonas nulekia kelią l iki imtuvo per laiką $t = l/c$, o imtuvas, per tą laiką įgyja papildomą greitį $v = gt = gl/c$. Dėl Doplerio reiškinių imtuvas užregistruos dabar didesnę fotono dažnį

Doplerio efektas dažniui

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right) = \nu_0 \left(1 + \frac{gl}{c^2}\right) = \nu_0 + \Delta\nu; \quad (19)$$

čia

$$\Delta\nu = \nu_0 \frac{gl}{c^2}. \quad (20)$$

Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

- Laboratorija *nejuda*, bet joje *veikia Žemės trauka*, apibūdinama pagreičiu g . Krintančio apačion fotono energija padidės dėl svorio jėgos atlikto darbo mgl ; čia m yra fotono masė, randama iš Einšteino sąryšio: $m = \frac{h\nu}{c^2}$. Padidėjusi fotono energija apačioje prie imtuvo bus

Dažnio pokytis

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{h\nu_0}{c^2}gl \quad (21)$$

o iš čia

$$\Delta\nu = \nu_0 \frac{gl}{c^2}. \quad (22)$$

- Abiem atvejais dažnio pokytis yra toks pats, t.y. jie yra ekvivalentiški. Antrąjį atvejį galima patikrinti eksperimentiškai.

Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Išvados iš šio principo yra šios:

- fotonas, judantis žemyn, prie Žemės paviršiaus turės didesnę energiją negu viršuje;
- fotonas, išspinduliuotas iš didelės masės ir mažo skersmens žvaigždės, kurios paviršiuje yra labai didelis gravitacinis pagreitis, registruojant turės mažesnę energiją (vadinamasis raudonasis poslinkis) negu spinduliavimo momentu;
- fotonas, pralekiantis pro tokią žvaigždę, pritraukiamas, ir jo kelias bus kiek užlenktas.

Visi šie pokyčiai yra labai maži ir labai sunkiai registruojami, nes tam reikia labai stiprių gravitacinių laukų.

Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Astrofizikoje žinomi tokie laukai prie žvaigždžių – baltųjų nykštukių paviršiaus. Pavyzdžiui, paviršiuje Sirijos palydovo, kurio masė yra maždaug lygi mūsų Saulės masei, o diametras labai mažas (maždaug 3 Žemės diametrai), gravitacijos pagreitis yra $30000 g$; čia g yra Žemės traukos pagreitis. Pasisekė išmatuoti šio palydovo spektro linijų raudonąjį poslinkį, kuris 10 proc. tikslumu atitiko Einšteino prielaidą.

Žemės sąlygomis "mėlynąjį poslinkį" fotonui judant žemyn, atrodė, neįmanoma užregistruoti. Iš tikrųjų, kai $l = 20$ m,

Mėlynasis poslinkis

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{gl}{c^2} = 2 \cdot 10^{-15}. \quad (23)$$

Eksperimentinis Einšteino ekvivalentiškumo principo patikrinimas

Tokį mažą santykinį dažnio pokytį buvo galima išmatuoti panaudojant Mesbauerio reiškinį. Eksperimentą atliko 1959 m. R. V. Paundas (R. V. Pound) ir Rebka (Rebka) Harvardo universiteto bokšte, kurio aukštis 21 m. Jo viršuje buvo įtaisytas $^{57}_{26}\text{Fe}$ γ spindulių šaltinis. Apačioje imtuvu buvo stebimas rezonansas, kai šaltinis nedideliu greičiu judėjo į viršų. Šis judėjimas buvo reikalingas, kad Doplerio reiškinys kompensuotų judančio žemyn fotono "mėlynąjį poslinkį". Eksperimento ir teorinių skaičiavimų rezultatai sutapo didesniu negu 1 proc. tikslumu.