

BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenį
IV paskaita

Turinys

1 Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Turinys

1 Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Branduolio sukiniš, kaip tam tikro kvantuoto judesio kiekio momento branduolyje, idėją iškėlė V. Paulis 1924 m. Tai buvo dar prieš Dž. E. Ulenbekui (G. E. Uhlenbeek) ir S. A. Gaudsmitui (S. A. Gaudsmit) 1925 m. apibrėžiant elektrono sukiniš. Šios sąvokos taikymas branduolio teorijoje dažnai susidurdavo su priešaravimais, kurie buvo pašalinti tik po neutrono atradimo. Tada paaiškėjo visi branduolio sukiniš dėsningumai, ir jis tapo svarbia branduolio charakteristika.
- *Sukinyš* – tai elementariosios dalelės savasis, pasižymintis kvantmechanine prigimtimi, judesio kiekio momentas, nesusijęs su bet kokio kitu dalelės judėjimu. Tačiau branduolio sukiniu vadinamas bendras viso branduolio judesio kiekio momentas, kurį sudaro atskirų nukleono sukiniš ir jų orbitiniai momentai. Branduolys yra taip pat stipriai susieta sistema, kad daugeliu atveju, nežiūrint savo sudėtingumo, gali būti laikoma viena dalele su jai būdingu sūkiniu.

Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Mikropasaulyje, kaip rodo kvantinė mechanika, branduolio judesio kiekio momentas \mathbf{I} gali turėti tik tam tikras kvantuotas vertes, apibrėžiamas taip:

Branduolio judesio kiekio momentas

$$|\mathbf{I}|^2 = I(I + 1)\hbar^2, \text{ arba } |\mathbf{I}| = \sqrt{I(I + 1)}\hbar. \quad (1)$$

- Projektuojant į bet kokią išskirtinę, pvz. magnetinio lauko kryptį, šio momento dedamoji gali būti tik $m_I\hbar$: čia $m_I = I, I - 1, I - 2, \dots, -I$. Didžiausia projekcija $I\hbar$ yra ta, kurią galima realiai stebėti, ir ji vadinama judesio kiekiu momentu (arba sukiniu).
- Kadangi judesio kiekio momentas turi dimensiją \hbar ir visada yra sveikas arba pusinis skaičius, padaugintas iš \hbar , tai įprasta momentus, taip pat ir sukinius, pateikti vien tik skaičiais prie \hbar . Pavyzdžiui, sakoma, kad elektrono sukinyš $s = \frac{1}{2}$, tai reikia suprasti, kad elektrono savasis judesio kiekio momentas yra $\sqrt{s(s + 1)}\hbar = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2}}\hbar$.

Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

Branduolys yra sistema, sudaryta iš nukleonų, kurių viena dalis yra protonai, kita – neutronai. Ir protonų, ir neutronų sukiniai yra tokie pat kaip elektrono: $s = \frac{1}{2}$. Iš atomo fizikos ir spektrų teorijos paaiškėjo, kad sukiniai, kaip vektoriai, dalelių sistemose gali būti vienos krypties arba priešingų kryptių. Kadangi orbitinis kvantuotas judesio kiekio momentas gali būti išreikštas tik sveikaisiais kvantiniais skaičiais, tai aišku, kada branduolių sukiniai gali būti išreikšti sveikaisiais, o kada pusiniais kvantiniais skaičiais.

Visų eksperimentinių tyrimų rezultatai yra tokie:

lyginių lyginių nuklidų	$I = 0$	(visada) $\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow$;
lyginių nelyginių	$I = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	(visada pusiniai);
nelyginių nelyginių	$I = 1, 2, 3$	(visada sveiki ir nelygūs nuliui).

Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Branduolių sukiniai yra nedideli skaičiai. Didžiausias stabilijų nuklidų $I = \frac{9}{2}$, o tai rodo, kad nukleonų sukiniai branduolyje dažniausiai būna poromis ir priešingos orientacijos. Nestabiliųjų nuklidų sukiniai randami didesni; didžiausiais yra nuklido ${}_{83}^{200}\text{Bi}$, kurio $I = 7$.
- Nelyginių nuklidų, kurių yra nedaug, branduolio sukinius galima išvardyti visus:

$$\begin{array}{cccc} {}_1^2\text{D} & {}_3^6\text{Li} & {}_5^{10}\text{B} & {}_7^{14}\text{N} \\ I & 1 & 3 & 1 \end{array}$$

- Jei $I \neq 0$, branduolio sukinyš yra vienintelis dydis, kuris leidžia jį orientuoti. Branduolių, kurių $I = 0$, orientuoti negalima.

Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Branduolio sukinyš, kaip judesio kiekio momentas, yra grynai mechaninis dydis ir todėl dažnai, kai kalbama kartu apie branduolio sukinyš ir magnetinį momentą, vadinamas mechaniniu momentu.
- Mikropasaulyje dalelės su sukiniu, t.y. turinčios mechaninį momentą, visada turi ir magnetinį momentą. Vadinasi, branduolys sudarytas iš nukleonų, kurių sukiniai $\frac{1}{2}$, gali turėti nenulinį magnetinį momentą. Panašiai ir atomo fizikoje. Primename, kad atominių sistemų magnetiniai momentai, sąlygojami elektronų sukinių ir orbitinių momentų, matuojami *Boro magnetonais*:

Boro magnetonas

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,274 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2; \quad (2)$$

čia m_e yra elektrono masė.

Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Atomo magnetinio momento μ ir jo judesio kiekio momento J santykis

Giromagnetinis koeficientas

$$\gamma = \frac{\mu}{J} = g \frac{e}{2m_e} \quad (3)$$

vadinamas *giromagnetiniu koeficientu*, o g – atomo g daugikliu.

- Pagrindinis įnašas į branduolio magnetinį momentą priklauso protonams, todėl branduolio magnetiniams momentams matuoti pasirinktas (analogiškai (2)) vienetas – branduolinis magnetonas μ_N , kurio išraiškoje elektrono masės m_e vietoje yra masė m_p :

Branduolinis magnetonas

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Am}^2. \quad (4)$$

Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Kadangi $m_p = 1836m_e$, tai branduolinis magnetonas tiek pat kartų mažesnis už Boro magnetoną:

Branduolinis magnetonas

$$\mu_N = \frac{1}{1836} \mu_B. \quad (5)$$

- Analogiškai (3) branduolio fizikoje branduolio magnetinio momento μ ir jo sukinio I santykis

Branduolio giromagnetinis koeficientas

$$\gamma = \frac{\mu}{I} = g \frac{e}{2m_p} \quad (6)$$

vadinamas *branduolio giromagnetiniu koeficientu*, o g – branduolio g daugikliu. Jo dydis priklauso nuo protonų ir neutronų sukinių, orbitinių momentų ir jų savitarpio orientacijos branduolyje.

Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Branduolio magnetinio momento dydis išreiškiamas branduoliniais magnetonais taip:

Branduolio magnetinis momentas

$$\mu\mu_N. \quad (7)$$

Dydis μ paprastai vadinamas branduolio magnetiniu momentu ir visada duodamas lentelėje.

- Turint omenyje, kad branduolio mechaninio momento, t.y. sukinio, realiai matuojams dydis yra $I\hbar$, tarp abiejų momentų ir juos apibrėžiančių skaičių iš (6) gauname tokį sąryšį:

Santykis

$$\frac{\mu \frac{e\hbar}{2m_p}}{I\hbar} = g \frac{e}{2m_p}. \quad (8)$$

Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Iš čia

Santykis

$$\frac{\mu}{I} = g, \text{ arba } \mu = gI. \quad (9)$$

Tai pagrindinis sąryšis, kuris sieja magnetines ir mechanines branduolio charakteristikas ir leidžia jas eksperimentiškai matuoti.

Turinys

1 Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Nukleonų magnetiniai momentai

- Protono ir neutrono sukiniai yra lygūs $\frac{1}{2}$, todėl protonas turi 2 galimybes: jei jis elgtųsi klasiškai, kaip tolygiai įelektrintas rutulys, jo magnetinis momentas būtų lygus $\frac{1}{2}$ branduolio magnetono; jei jis elgtųsi kaip Dirako reliatyvistinė dalelė, jo magnetinis momentas turėtų būti 1 branduolinis magnetonas. Matavimai parodė, kad jis lygus 2,79 branduolinių magnetonų, t.y.

Protono magnetinis momentas

$$\mu_p = 2,79. \quad (10)$$

Nukleonų magnetiniai momentai

- Sprendžiant pagal tai, kad neutronas neturi krūvio, jo magnetinis momentas turėtų būti lygus 0. Tačiau tyrimai parodė, kad jo magnetinis momentas yra

Neutrono magnetinis momentas

$$\mu_n = -1,91. \quad (11)$$

Minuso ženklas reiškia, kad magnetinio momento kryptis yra priešinga sukiniio kryptčiai, atseit yra taip, tarytum neutrono magnetinį momentą kurtų besisukąs sukiniio krypttimi neigiamas krūvis.

- Abu šie rezultatai rodo sudėtingą protono ir neutrono struktūrą, kurios negalima išaiškinti lig šiol žinomomis fizikos prielaidomis.

Turinys

1 Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Deutono magnetinis momentas

- Deutono magnetinis momentas nėra lygus protono ir neutrono magnetinių momentų sumai, nors jų sukinių suma yra tiksliai lygi deutono sukiniui. Visos pagrindinių elementariųjų dalelių momentų vertės pateiktos lentelėje.

Momentas	I	μ
Dalelė Vienetai	\hbar	μ_N
Elektronas e	$\frac{1}{2}$	$1 (\mu_B)$
Protonas p	$\frac{1}{2}$	2,793
Neutronas n	$\frac{1}{2}$	-1,913
Deutonas $d = p + n$	1	0,857

lentelė: Elementariųjų dalelių momentų vertės

- Protono ir neutrono magnetinių momentų algebrinė suma yra 0,880, t.y. 0,023 vienetais didesnė negu deutono. Skirtumas nėra didelis, bet jis peržengia paklaidos ribas ir jo reikšmė branduolio teorijoje yra labai didelė.

Deutono magnetinis momentas

- Išvada iš šių rezultatų yra ta, kad branduolių magnetiniai momentai yra neadityvūs. Ši savybė konstatuojama ir kituose lengvuose branduoliuose, ten ją lengviau galima patikrinti. Bendra išvada yra tokia: branduolių sukiniai yra adityvūs dydžiai, magnetiniai momentai – neadityvūs.
- Lyginių lyginių nuklidų $I = 0$, taip pat ir $\mu = 0$.
- Nuklidų su nelyginiu nukleonų skaičiumi magnetiniai momentai svyruoja nuo $\mu = -2, 12$ iki $\mu = 6, 16$.
- Nelyginių nelyginių nuklidų sukiniai yra sveiki skaičiai, o magnetiniai momentai visi yra teigiami ir nedideli.

Turinys

1 Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Turinys

1 Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Sąveikos rūšys

Gamtoje egzistuoja įvairialypė kūnų sąveika. Makroskopinių kūnų tarpusavio sąveika suvedama į juos sudarančių dalelių sąveiką.

Šiuolaikinėje fizikoje išskiriamos keturios fundamentalios sąveikos: *gravitacinė*, *silpnoji*, *elektromagnetinė* ir *stiprioji*. (Aštuntojo dešimtmečio pabaigoje buvo sukurta teorija, pagal kurią elektromagnetinė ir silpnoji sąveikos sudaro vieningą elektrosilpnąją sąveiką.)

Viena sąveika nuo kitos skiriasi sąveikos stiprumo konstanta α , veikimo siekiu r_0 ir sąveikos trukme τ .

Sąveikos tipas	α	r_0 , m	τ , s
Gravitacinė	10^{-39}	∞	
Silpnoji	10^{-14}	10^{-18}	10^{-10}
Elektromagnetinė	10^{-2}	∞	10^{-21}
Stiprioji	1	10^{-15}	10^{-23}

lentelė: Įvairių sąveikų stiprumo konstanta α , veikimo siekis r_0 ir trukmė τ

Fundamental interaction

Interaction	Current Theory	Mediators	Source	Relative Strength	Law	Range(in m)
Gravitation	General Relativity	gravitons (not yet discovered)	mass	1	$G\frac{mM}{r^2}$	infinite
Electromagnetic	Quantum electrodynamics	photons	electric charge	10^{36}	$k\frac{q_1q_2}{r^2}$	infinite
Strong	Quantum chromodynamics	gluons	hadrons (protons, neutrons, mesons)	10^{38}	-	10^{-15}
Weak	Electroweak Theory	W and Z bosons	quarks, leptons	10^{25}	-	10^{-18}

lentelė: Fundamental interaction classification

Sąveikos rūšys

- *Gravitacinės sąveikos* siekis yra begalinis ir ši sąveika yra universali, t.y. pasireiškia tarp visų dalelių, tačiau yra labai silpna ir mikropasaulio reiškiniams, o taip pat ir branduolio fizikoje apčiuopiamos įtakos neturi.
- *Silpnoji sąveika* yra žymiai stipresnė už gravitacinę, tačiau jos veikimo siekis yra labai mažas ($r_0 \sim 10^{-18}$ m) ir ji lemia vienu nestabilių dalelių virsmą kitomis, branduolio radioaktyvųjį skilimą ir kai kuriuos kitus virsmus.
- *Elektromagnetinė sąveika* yra gerokai stipresnė už silpnąją ir gravitacinę, begalinio siekio ($r_0 \rightarrow \infty$) ir būdinga visoms elektringoms dalelėms ir dalelėms, kurių sukinyš nelygus 0.
- *Stiprioji sąveika* yra visų stipriausia, bet jos siekis labai mažas ($r_0 \sim 10^{-15}$ m). Subatominės dalelės, kurioms būdinga stiprioji sąveika, vadinamos *hadronais*.

Turinys

1 Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

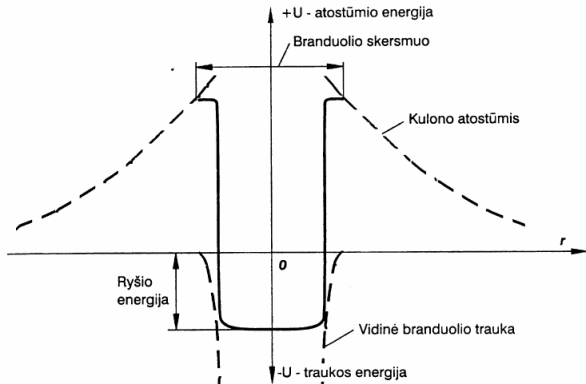
Branduolinės jėgos

- Kadangi branduoliai gana pastovūs, tai protonus ir neutronus juose turi laikyti kažkokios labai stiprios jėgos. Aišku, kad tai ne gravitacinės ir ne silpnosios jėgos. Branduolio pastovumo negalima paaiškinti ir elektromagnetine sąveika, nes elektrinių jėgų veikiami protonai vienas kitą stumia, o neutronai neturi elektros krūvio.
- Nukleonus, kurie yra hadronai, branduolyje išlaiko stiprioji sąveika arba vadinamosios branduolinės jėgos. Šios jėgos staiga mažėja didėjant atstumui tarp dalelių. Branduolinės jėgos veikimo siekis r_0 dviems protonams yra apie 2,8 fm. Tokiu atstumu esančių protonų potencinė energija lygi 10,5 MeV. Pagal susitarimą traukos energija yra laikoma neigiama, o atostūmio – teigiama.

Branduolinės jėgos

- Lengviausia tirti jėgas, veikiančias tarp 2 dalelių. Branduolio fizikoje dviejų dalelių negalima išlaikyti bent kiek ilgiau norimu nuotoliu ir tiesiogiai išmatuoti jų tarpusavio sąveiką. Lieka netiesioginiai metodai: susietos (surištos) 2 dalelių būsenos tyrimas ir dalelių sklaidos eksperimentai. Tokia surišta sistema yra deutonas $d = p + n$. Iš tyrimų visumos galima atstatyti apytikslę nukleonų sąveikos energijos priklausomybę nuo atstumo tarp dalelių.

Branduolinės jėgos



Branduolinių jėgų sukurta potencinės energijos duobė, kurioje randasi branduolį sudarantys nukleonai. Neutronus veikia tik stipriosios branduolinės jėgos, o protonus – dar ir Kulono atostūmis.

Branduolinės jėgos

Branduolinių jėgų teorija kol kas neužbaigta, bet jau yra pasiekusi nemažai laimėjimų. Pagrindiniai nukleonų tarpusavio sąveikos bruožai yra:

- Sąveika yra trumpasiekė ($r_0 < 2 - 3$ fm).
- Ji nepriklauso nuo nukleonų krūvinės būsenos: protonas su protonu, protonas su neutronu ir neutronas su neutronu sąveikauja beveik vienodai.

Branduolinės jėgos

Pratęsimas...

- Branduolinės jėgos yra necentrinės (tenzorinės) jėgos – sąveikos energija priklauso nuo nukleonų sukinių orientacijos. Pavyzdžiui, protonas ir neutronas sudaro deuterio branduolį tik tuomet, kai jų sukiniai vienas kitam lygiagretūs. Deutono sukiny $I = 1$. Tokia būseną vadinama tripletine. Singuletinė būseną, atitinkanti priešingus protono ir neutrono sukinius ir $I = 0$, neegzistuoja, yra nestabili. Deutono magnetinis momentas $\mu_d = 0,86$ nėra lygus protono $\mu_p = 2,79$ ir neutrono $\mu_n = -1,91$ (čia magnetiniai momentai išreikšti branduoliniais magnetonais) algebrinei sumai. Vadinasi deutone turi būti ir tam tikra orbitinio judėjimo magnetinio momento dalis. Tyrimais išaiškinta, kad deutono būseną yra dviejų būsenų superpozicija tokiu santykiu: būseną 3S ($l = 0$) – 96 proc. ir būseną 3D ($l = 2$) – 4 proc. Deutonas turi kvadrupolinį elektrinį momentą. Vadinasi, jis neišsiskiria būdinga S būsenai sferine simetrija.
- Branduolinės jėgos pasižymi įsotinimu, t.y. tarpusavyje sąveikauja ne bet koks nukleonų skaičius.

Branduolinės jėgos

Tikslios teorijos, paaiškinančios stipriosios sąveikos prigimtį ir dėsningumus, dar nėra. Kvantinė mechanika dalelių sąveiką aiškina jų energijos tarpusavio kaita, apsikeitimu virtualiomis dalelėmis. Pavyzdžiui, dviejų elektronų sąveiką kvantinė mechanika aiškina virtualiųjų fotonų kaita: iš to, kad nukleonų sąveika yra trumpasiekė ($r_0 \sim 1$ fm), galima įvertinti virtualios dalelės masę, kuri turėtų būti maždaug 300 kartų didesnė už elektrono masę. Remdamasis šiais samprotavimais, japonų fizikas H. Jukava 1935 m. postulavo, kad gamtoje turi egzistuoti šitokios masės dalelės – *mezonai* – tarpinės tarp elektrono ir nukleono masės dalelės. Tokiomis savybėmis pasižymi π mezonai arba pionai, kurie buvo atrasti 1947 m. Teigiamo (π^+) ir neigiamo (π^-) pionų krūvis lygus elementariajam krūviui $\pm e$, o masė lygi $273 m_e$. Neutralaus piono (π^0) masė lygi $264 m_e$. Pionai sukinio neturi ($s = 0$) ir yra nestabilūs. Elektringųjų pionų gyvavimo trukmė apie $2,6 \cdot 10^{-8}$ s, o neutraliųjų – $0,8 \cdot 10^{-16}$ s.

Branduolinės jėgos

- Šiuo metu gyvuoja pioninė branduolinių jėgų hipotezė. Pagal ją kiekvieną nukleoną gaubia virtualiųjų pionų debesėlis, sudarantis branduolinį lauką. Kai vieno nukleono virtualųjį pioną sugeria kitas nukleonas – tarp jų susidaro stiprioji sąveika.
- Nukleonų virtualiosios būsenos trukmę τ su jo energijos neapibrėžtumu ΔE sieja neapibrėžtumo sąryšis $\Delta E \tau \geq \hbar$. Su energija ΔE susijęs masės neapibrėžtumas $\Delta m = \Delta E/c^2$. Kad šis nukleono masės neapibrėžtumas būtų piono masės eilės, sąveikos trukmė τ turi būti maždaug $5 \cdot 10^{-24}$ s. Taigi, stiprioji sąveika susidarys, jeigu nukleonai maždaug per $5 \cdot 10^{-24}$ s apsikeis virtualiaisiais pionais. Per šį laiką, judėdamas šviesos greičiu, pionas įveikia apie 1-2 fm kelią. Tai ir yra branduolinių jėgų veikimo siekis r_0 .
- H. Jukavos pasiūlytas stipriosios sąveikos mezoninis modelis paaiškino pagrindinius branduolinius reiškinius, tačiau jis nepaaiškina nukleonų sandaros.

Turinys

1 Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- **Atomo branduolių ryšio energija**
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Atomo branduolių ryšio energija

Branduolio fizikoje svarbiausia – branduolio ryšio energijos sąvoka. Energija, kurios reikia branduoliui visiškai suskaldyti į atskirus nukleonus, vadinama branduolio ryšio energija. Jeigu sugebėtume "ištraukti" iš branduolio po vieną visus nukleonus, tai tam tektų suvartoti energijos kiekį, lygų branduolio ryšio energijai. Pagal energijos tvermės dėsnį, sujungiant tuos nukleonus į branduolį, turi išsiskirti lygiai tiek pat energijos, kiek jos atsiranda dėl to, kad tam tikra besijungiančių nukleonų masė pereina į energiją. Ši energija milžiniška, tačiau šiuo metu dar neįmanoma pakankamai tiksliai apskaičiuoti branduolio ryšio energiją, kaip kad apskaičiuojama elektronų ryšio energija atome.

Atomo branduolių ryšio energija

Vis dėlto galima sužinoti kiekvieno branduolio ryšio energiją, tiksliai išmatavus jo masę ir pritaikius Einšteino 1905 m. nustatytą masės ir energijos proporcingumo formulę

Einšteino sąryšis

$$E = mc^2; \quad (12)$$

čia E ir m – atitinkamai kūno energija ir masė, o $c = 3 \cdot 10^8$ m/s – šviesos greitis vakuume. Jeigu kinta sistemos masė, tai kinta ir jos energija, $\Delta E = \Delta mc^2$. Ir atvirkščiai.

Tikslūs matavimai rodo, kad atomo branduolio rimties masė m_b visada yra keliomis dešimtosiomis procento mažesnė už jį sudarančių laisvųjų nukleonų rimties masių sumą $Zm_p + Nm_n$, t.y. $m_b < Zm_p + Nm_n$. Skirtumas Δm :

Masės defektas

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_b \quad (13)$$

Atomo branduolių ryšio energija

Remdamiesi Einšteino energijos ir masės sąryšio lygtimi (12), galime išreikšti atomo branduolio ryšio energiją:

Ryšio energija

$$E_r = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_b] c^2 \quad (14)$$

Susidarant branduoliui iš dalelių, sumažėja dalelių sistemos masė, o tuo pačiu ir energija. Šis pokytis lygus ryšio energijai (14). **Kurgi dingsta energija E ir masė Δm ?**

Sintezuojantis branduoliui iš protonų ir neutronų, šios dalelės, veikiamos branduolinių jėgų, milžinišku pagreičiu skrieja viena prie kitos. Dėl to spinduliuojami γ kvantai, kurie turi energiją, o tuo pačiu ir masę $m = E/c^2$. Be to, dalį energijos nusineša kitos dalelės, nesurišamos branduolyje, bet dalyvaujančios branduolinės sintezės reakcijoje.

Atomo branduolių ryšio energija

- Sąryšiu (13) apibrėžtas masės defektas ir ryšio energija (14) visada yra teigiami. Pavyzdžiui, helio branduolio masė yra 0,76 proc. mažesnė už dviejų protonų ir dviejų neutronų masių sumą. Atitinkamai helio vieno molio masės defektas $\Delta m = 0,03$ g, o susidarant 4 g helio išsiskiria tiek pat energijos, kaip ir sudeginus 2 vagonus akmens anglies. Tai milžiniška energija, apytiksliai $10^6 - 10^7$ karto didesnė už tokios pat masės medžiagos degimo metu išsiskiriančią energiją.
- (13) ir (14) sąryšiuose vietoje branduolio masės m_b galima įrašyti atomo masę m_a ir tuo pačiu vietoje protono masės m_p reikia rašyti pročio masę m_H . Taip galima daryti todėl, kad atliekant šiuos pakeitimus dešinėje lygčių pusėje prisideda ir atsiima Z elektronų masė, o nukleonų ryšio energija yra apie 10^5 karto didesnė už elektrono sąveikos su branduoliu energiją ir pastaroji pastebimos įtakos branduolio masės defektui neturi.

Atomo branduolių ryšio energija

Jeigu masės išreiškiamos atominės masės vienetais u , tai branduolio ryšio energiją megaelektronvoltais patogiau apskaičiuoti pagal formulę:

Ryšio energija

$$E_r = 931,5 [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a]; \quad (15)$$

čia $m_H = 1,00783$ – vandenilio atomo masė, $m_n = 1,00867$ – neutrono masė, m_a – nuklido masė atominės masės vienetais.

Kai kurių izotopų atominės masės yra pateiktos 3 priede.

Atomo branduolių ryšio energija

Pastebėsime, kad kol nuklidų masės nebuvo tiksliai išmatuotos, F. V. Astonas (F. V. Aston) pasiūlė klasikinį apibrėžimą, pagal kurį masės defektas Δ yra lygus atominės masės ir masės skaičiaus A skirtumui:

Masės defektas Δ_a

$$\Delta_a = m_a - A. \quad (16)$$

Taip apibrėžus masės defektą, šis dydis gali būti ir teigiamas, ir neigiamas. Tik anglies 1_6C nuklidui $\Delta_{{}^1_6C} = 0$. Neutronui $\Delta_n = m_n - 1$, vandeniliui $\Delta_H = m_H - 1$.

Žinant masės defektą branduolio ryšio energija gali būti apskaičiuota pagal formules, analogiškas (14) ir (15):

Ryšio energija

$$E_r = [Z\Delta_H + (A - Z)\Delta_n - \Delta_a] c^2; \quad (17)$$

Daugelyje žinytų pateikiama ne nuklidų masės, bet jų masės defektai apibrėžti išraiška (16).

Turinys

1 Branduolio sukiny ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- **Savitoji ryšio energija**
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Savitoji ryšio energija

Svarbią informaciją apie branduolių savybes teikia vienam nukleonui tenkanti ryšio energija arba specifinė, savitoji ryšio energija, t.y. dydis E_r/A .

Rasime deutono, kobalto-56 ir urano-235 masės defektus, ryšio energiją ir savitąją ryšio energiją. Deuterio 2_1H masė $m_H = 2,01410$. Pagal formulę (15) deutonui

Deutonas

$$E_r = 931,5(1,00793 + 1,00867 - 2,01410) = 2,24 \text{ MeV}, \quad (18)$$

$$\Delta m = 0,0024 \text{ u}, \quad E_r/A = E_r/2 = 1,12 \text{ MeV/nukleonui}. \quad (19)$$

Savitoji ryšio energija

Kobalto ${}_{27}^{56}\text{Co}$ masė $m_{{}^{56}\text{Co}} = 55,95769$, taigi

Kobaltas

$$E_r = 931,5(27 \cdot 1,00783 + (56 - 27)1,00867 - 55,95769) = 470,55 \text{ MeV}, \quad (20)$$

$$\Delta m = 0,50515 \text{ u}, \quad E_r/A = 8,4 \text{ MeV/nukleonui}. \quad (21)$$

Savitoji ryšio energija

Kobalto ${}_{92}^{235}\text{U}$ masė $m_{235\text{U}} = 235,04299$, todėl

Uranas

$$E_r = 931,5(92 \cdot 1,00783 + (235 - 92)1,00867 - 235,04299) = 1785,85 \text{ MeV}, \quad (22)$$

$$\Delta m = 1,91718 \text{ u}, \quad E_r/A = 7,6 \text{ MeV/nukleonui}. \quad (23)$$

Savitoji ryšio energija

Matome, kad įvairių nuklidų savitoji ryšio energija yra įvairi. Tačiau galima atskleisti ir tam tikrus dėsningumus. Pastebėsime dar, kad tričio savitoji ryšio energija yra 2,83 MeV, o α dalelės – 7,04 MeV. Taigi, kol nukleonų skaičius mažas, $A \leq 4$, didėjant jų skaičiui branduolyje savitoji ryšio energija auga. Tačiau jau α dalelei ji pasidarė artima savitajai urano branduolio ryšio energijai

Anglies-12 savitoji ryšio energija $E_r/A = 7,68 \text{ MeV} / \text{nukleonui}$.

Daugumai lengvų stabiliųjų nuklidų iki azoto-15 imtinai formule (16) apibrėžtas masės defektas yra teigiamas. Tai rodo, kad jų savitoji ryšio energija yra mažesnė už ^{12}C izotopo savitąją ryšio energiją. Daugumos nuklidų nuo deguonies-16 iki polonio-210 masės defektas neigiamas – jų savitoji ryšio energija didesnė negu 7,68 MeV / nukleonui. Tuo tarpu sunkiausių nuklidų, pradedant radonu-222 masės defektas vėl tampa teigiamu – jų savitoji ryšio energija yra mažesnė negu anglies-12.

Turinys

1 Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

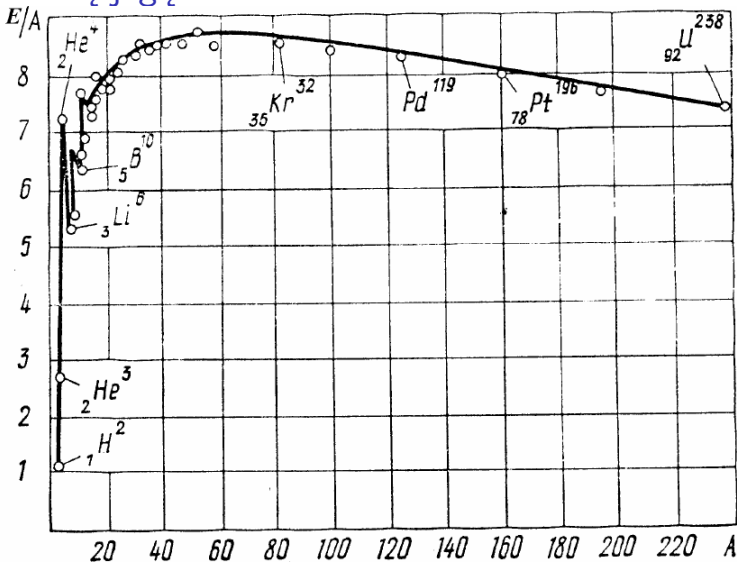
- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Branduolinių jėgų sotis

Branduolinėms jėgoms yra būdinga soties savybė, pasireiškianti tuo, kad jėgos veikia tik tarp nedidelio kiekio artimų dalelių. Tai panašu į cheminį valentingumą. Soties savybė yra labai susijusi su branduolinių jėgų artiveikiu pobūdžiu. Dėl šios savybės branduolio tūris yra proporcingas nukleonų skaičiui A , o nukleonų tankis lengvuose ir sunkiuose branduoliuose yra maždaug vienodas. Jeigu nebūtų soties, o branduolinės jėgos būtų toliveikės ir veiktų tarp visų branduolio nukleonų, jų sąveikų skaičius būtų lygus galimų susidaryti porų skaičiui $A(A - 1)$ arba apytiksliai A^2 .

α dalelėje branduolinės jėgos jau pasiekė sotį. Tai patvirtina dar ir tai, kad nėra stabiliųjų branduolių su 5 ir 8 nukleonais. Pasiekus $A = 4$ – branduolinių jėgų sotį, penktasis nukleonas jau nebetraukiamas. Panašiai ir su 8-ių nukleonų branduoliu, kurį sudaro 2 soties būsenoje esančios nukleonų grupės. Tos grupės tarpusavyje nesąveikauja ir stabilių branduolių su $A = 8$ nėra.

Branduolinių jėgų sotis



Nukleonų savitosios ryšio energijos priklausomybė nuo branduolio masės skaičiaus

Branduolinių jėgų sotis

Stabilių branduolių savitosios ryšio energijos priklausomybė nuo branduolio masės skaičiaus grafiškai parodyta paveiksle.

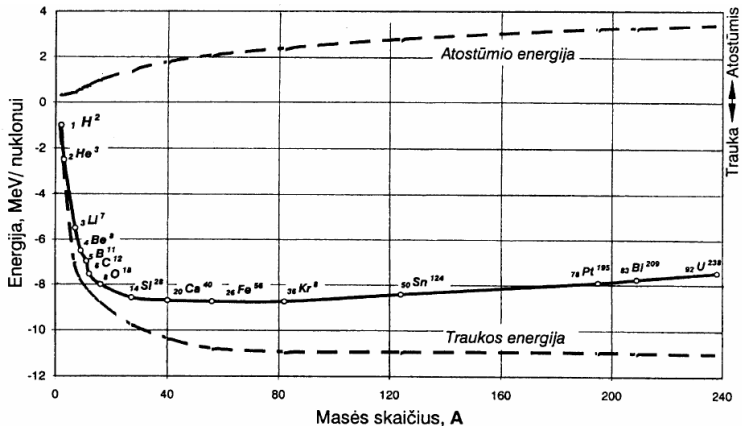
Matome, kad iki $A = 50 - 60$, t.y. **geležies** ir artimų jai elementų savitoji ryšio energija didėja, didėjant A . Kreivės maksimumas yra branduoliams, kurių masės skaičius nuo 50 iki 60. Čia $E_r/A \approx 8,6$ MeV. Toliau didėjant branduolio masės skaičiui, dydis E_r/A monotoniškai mažėja ir sunkiausio natūralaus elemento urano ($Z = 92$) pasidaro apie 7,5 MeV/nukleonui.

Branduolinių jėgų sotis

Šitaip apibrėžta savitoji ryšio energija yra lygi energijai, kurią vidutiniškai reiktų suteikti kiekvienam iš nukleonų skaldant branduolį į laisvus protonus ir neutronus. Tai galima įsivaizduoti ir kitaip, analogiškai elektronų ryšio energijai atome, pavaizduojant kiek nukleonų vidutinė energija branduolyje yra mažesnė už laisvų nukleonų energiją.

Šiuo atveju turime sekančio paveikslo grafiką, vaizduojantį nukleonų ryšio energiją branduolyje lyg potencialinėje duobėje.

Branduolinių jėgų sotis



Nukleono ryšio energija branduolyje ir jos sudėtinės dalys priklausomai nuo branduolio masės skaičiaus

Turinys

1 Branduolio sukinyš ir magnetinis momentas

- Nukleonų magnetiniai momentai
- Deutono magnetinis momentas

2 Branduolinės jėgos

- Sąveikos rūšys
- Branduolinės jėgos
- Atomo branduolių ryšio energija
- Savitoji ryšio energija
- Branduolinių jėgų sotis
- Branduolių stabilumas

Branduolių stabilumas

Atomo branduolį sudarančius nukleonus sujungia stiprios jėgos, kurios veikia tik artimiausius kaimynus, o protonus vienas nuo kito stumia toliasiekės elektrinės jėgos. Branduolio neutronų ir protonų skaičiaus santykis yra artimas vienetui tik pirmiesiems 20 stabilų periodinės lentelės elementų. Toliau šio santykio reikšmė ima didėti ir lentelės gale priartėja prie 1,6. Neutronų perteklius sunkiųjų elementų branduoliuose padeda įveikti elektrostatinio atostūmio jėgas, veikiančias tarp branduolio protonų. Didžiausią atostūmio jėgą patiria protonai, kurie yra branduolio paviršiaus sluoksnyje. Išorinį protoną veikia likusiųjų $(Z - 1)$ protonų Kulono jėga apytiksliai tokia kaip branduolio centre esantis $(Z - 1)e$ elektrinis krūvis:

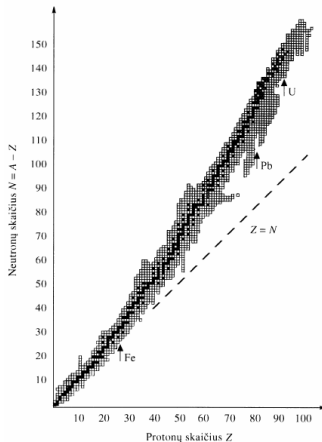
Kulono jėga

$$F = k_c \frac{(Z - 1)e^2}{R^2}. \quad (24)$$

Branduolių stabilumas

Kuo branduolyje daugiau neutronų, tuo didesnis jo spindulys R , tuo mažesnė išorinius protonus veikianti atostūmio jėga. Tačiau, kita vertus, neutronų perteklius šiek tiek mažina traukos energiją, tenkančią vienam nukleonui. Be to, neutronai yra linkę virsti protonais, turinčiais mažesnę masę. Nuo to neutronus sulaiko tik protonų kaimynystė. Tad branduoliai būna stabilūs tik tada, kai neutronų skaičius truputį viršija protonų skaičių. Didėjant protonų skaičiui branduolyje, elektrinės stūmos jėgoms įveikti reikia vis didesnio neutronų skaičiaus – branduolių stabilumo takai tolsta nuo tiesės, kuri atitinka branduolius su vienodu protonų ir neutronų skaičiumi (sekantis paveikslas).

Branduolių stabilumas



Atomo branduolių stabilumo takas – stabilių branduolių neutronų ir protonų skaičiaus santykis. Juodi kvadratėliai žymi stabilius branduolius, tušti – gamtoje sutinkamus radioaktyvius branduolius, o perbraukti kryželiu – dirbtinai sukurtus nestabilius branduolius.

Branduolių stabilumas

Stabilumo take taškai išsidėstę gana siaurame ruože. Taškų su tam tikra absise $Z = \text{const}$ skaičius yra lygus duotojo elemento *izotopų* skaičiui. Horizontalus $N = \text{const}$ stabilumo tako pjūvis rodo *izotonus*, o pjūvis 45° kampu, kuriame $A = Z + N = \text{const}$ – *izobarus*. Stabilumo take didėjant branduolio masės skaičiui A , branduolio neutronų ir protonų skaičiaus santykis didėja nuo 1 iki maždaug 1,56. Kiekvienam masės skaičiui egzistuoja palyginti nedidelis šio santykio nukrypimas, kuriam esant branduoliai dar išlieka stabilūs.

Jeigu branduolio neutronų ir protonų santykis neatitinka tų ribų intervalo, tai branduolys yra radioaktyvus ir laikui bėgant pavirsta į stabilesnį branduolį.

Jeigu branduolyje yra per daug neutronų, tai neutronas virsta protonu (β^- skilimas), o jeigu yra protonų perteklius, tai protonas virsta neutronu (β^+ skilimas). Dažnai tik po kelių teigiamų arba neigiamų β skilimų branduolys tampa stabilus.

Branduolių stabilumas

Elementai sunkesni už šviną ir bismutą ($Z > 83$), jau nebeturi stabilių izotopų – daugiau kaip 83 protonai ir bet koks skaičius neutronų nesudaro stabilaus branduolio. Čia baigiasi stabiliųjų elementų seka ir visi tolimesni elementai turi tik radioaktyvius izotopus.

Peržiūrint stabiliųjų nuklidų sąrašą pastebimas didelis skirtumas tarp elementų su lyginiu ir nelyginiu atominiu skaičiumi Z . Iš visų 276 stabiliųjų nuklidų lyginių lyginių nuklidų (su lyginiu protonų ir lyginiu neutronų skaičiumi) yra 164, lyginių nelyginių (su nelyginiu N) yra dar 55, nelyginių lyginių (su nelyginiu Z ir lyginiu N) – 53, o nelyginių nelyginių – tik 4 – pačių lengviausiųjų elementų su mažiausiais nelyginiais, bet lygiais tarp savęs Z ir N skaičiais 1, 3, 5 ir 7, t.y. ${}^2_1\text{D}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$ ir ${}^{14}_7\text{N}$. Taigi, iš 276 stabiliųjų nuklidų net 219 yra *lyginiųjų elementų* (su lyginiu Z) ir tik 57 – nelyginiųjų.

Nelyginiai elementai niekada neturi daugiau kaip 2 stabiliuosius izotopus. Šią taisyklę nustatė F. V. Astonas dar 1923 m. Daug nelyginių elementų turi vienintelį stabilų nuklidą.