

# BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenio  
XII paskaita

## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

## 1 Branduolinės reakcijos

### • Bendros pastabos

- Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

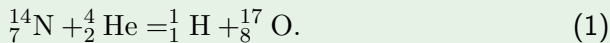
## Branduolinės reakcijos. Bendros pastabos

Branduolinėmis reakcijomis siauresne prasme vadinami tokie sąveikos vyksmai, kuriuose suartėjus dviem dalelėms (branduoliams arba branduoliui ir nukleonui) arba dėl kvanto poveikio branduolys pakeičia savo sudėtį. Nukleonus branduolyje jungia labai didelės stipriosios sąveikos jėgos, tad jo sudėčiai pakeisti reikia labai didelės energijos, maždaug  $10^6$  kartų didesnės negu cheminiams junginiams sukurti ar suardyti. Todėl cheminėmis priemonėmis (sprogimais, keliant temperatūrą ir pan.) branduolinių reakcijų vykdyti negalima (išimtį sudaro neutronai). Visada reikia labai didelės energijos dalelių. Pirmame branduolio fizikos periode tokios dalelės buvo radioaktyviųjų elementų skleidžiamos  $\alpha$  dalelės, kurių energija apytiksliai siekia iki 8 MeV.

## Bendros pastabos

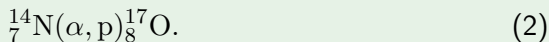
Pirmąją branduolinę reakciją 1919 m. įvykdė E. Rezerfordas apšaudęs  $\alpha$  dalelėmis azoto branduolius. Reakcijos eiga gali būti įvairiai užrašoma. Seniausias būdas buvo cheminis, branduolių simbolius papildant dar dviem indeksais – branduolio krūviu ir masės skaičiumi. Pirmoji Rezerfordo branduolinė reakcija galėjo būti užrašyta

### Pirmoji branduolinė reakcija



Vėliau pradėtas vartoti ir dabar dažniausiai taikomas sutrumpintas būdas, panaudojant skliaustus ir dažniausiai aptinkamų dalelių simbolius. Ta pati reakcija, užrašyta šiuo būdu, atrodytų taip:

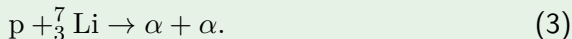
### Sutrumpintas užrašymas



## Bendros pastabos

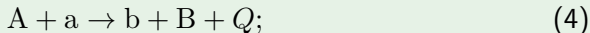
Kartais vartojamas mišrus būdas, jei jis patogesnis, trumpesnis ir aiškesnis. Pavyzdžiui, pirmoji dirbtinė Kokrofto ir Voltono reakcija gali būti užrašyta

### Kokrofto ir Voltono reakcija



Jei svarbus yra energinis reakcijos rezultatas, reakcijos dešinėje pusėje prirašoma energija  $Q$ , pvz.:

### Branduolinės reakcijos užrašymas



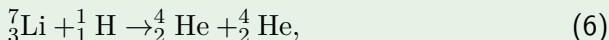
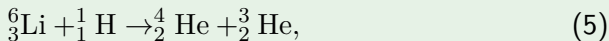
čia  $a$  – dalelė sviedinys,  $A$  – branduolys taikiny,  $b$  – išlekianti po reakcijos lengvoji dalelė,  $B$  – naujai atsiradęs branduolys,  $Q$  – išskirtoji energija.

## Bendros pastabos

Panašių ( $\alpha$ , p) reakcijų vėliau rasta ir kitiems lengviems elementams: B, F, Na, Al, P. Šios reakcijos buvo naujo branduolinės fizikos laikotarpio pradžia, kai fizikai sugebėjo ardyti ir kurti naujus atomų branduolius. Tačiau tai nebuvo visiškai dirbtinės branduolinės reakcijos, nes jose dalyvavusios  $\alpha$  dalelės buvo gamtinės.

Pirmoji dirbtinė tikraja to žodžio prasme branduolinė reakcija įvykdyta 1932 m. Dž. Kokrofto (J. D. Cockcroft) ir E. T. S. Voltono (E. T. S. Walton) panaudojant vandenilį ir litį, iš kurių buvo gautas helis. Jie sukonstravo nedidelį 0,7 MeV greitintuvą, kuriuo pagretino vandenilio jonus, t.y. protonus, ir jais apšaudė litį. Su dviem ličio izotopais buvo gautos šitokios reakcijos:

### Pirmoji dirbtinė branduolinė reakcija



Taip buvo pradėtos tirti naujo tipo – (p,  $\alpha$ ) reakcijos.



# Bendros pastabos

Tolesnė branduolinių reakcijų tyrimo raida buvo susijusi su taikymu naujų greitintuvų, greitanančių daleles iki daug didesnės energijos negu gamtinių  $\alpha$  dalelių.

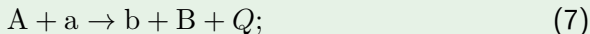
Bendrai imant, branduolinėms reakcijoms vykdyti naudojamos šios priemonės:

- radioaktyviųjų elementų spinduliai  $\alpha$  ir  $\gamma$ , jų energija nedidelė (gamtinių spindulių nėra didesnė kaip 10 MeV),
- greitintuvai – pagrindinė šiuo metu priemonė,
- branduoliniai reaktoriai – galingi neutronų šaltiniai,
- kosminiai spinduliai, kuriuose pasitaiko labai didelės energijos dalelių, tik reakcijos vyksta retai ir labai sunkiai kontroliuojamos.

# Bendros pastabos

## Reakcijoje

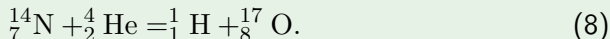
### Branduolinės reakcijos užrašymas



a ir b dalelėmis gali būti neutronas (n), protonas (p), deutonas (d),  $\alpha$  dalelė ir  $\gamma$  fotonas.

## Rezerfordas reakcijos

### Pirmoji branduolinė reakcija

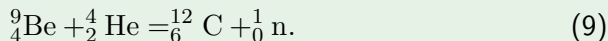


metu gautąją teigiamai įelektrintą ir palyginti sunkią dalelę pavadino protonu. Tiriant branduolines reakcijas, buvo atrastas ir neutronas.

## Bendros pastabos

1930 m. vokiečių fizikai V. Botė ir H. Bekeris, greitosiomis  $\alpha$  dalelėmis apšaudydami berilio atomus, gavo spinduliavimą, kuris prasiskverbė pro 20–30 cm storio švininę plokštelę. Iš pradžių manyta, kad tai didelės energijos  $\gamma$  kvantų srautas. Tačiau anglų fizikas Dž. Čedvikas, 1932 m. ištyręs šį spinduliavimą Vilsono kameroje, nustatė, kad jį sudaro neutralių ir palyginti sunkių dalelių srautas. Naujai atrastoji dalelė buvo pavadinta neutronu. Taigi neutronai buvo aptikti atlikus šitokią branduolinę reakciją:

### Branduolinė reakcija



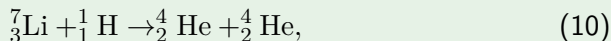
Be protonų, deutonų, neutronų,  $\alpha$  dalelių ir  $\gamma$  fotonų reakcijoms naudojami ir sunkūs jonai:  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$  ir kt.

## Bendros pastabos

Reakciją sukėlusios dalelės ir branduolio sistemai galioja masės, elektros krūvio, energijos, judesio kiekio bei sukinio tvermės dėsniai. Vienose branduolinėse reakcijose energija išskiriama, o kitose, atvirkščiai – sugeriama. Pirmosios vadinamos egzoterminėmis, o antrosios – endoterminėmis reakcijomis.

Reakcijoje

### Kokrofto ir Voltono branduolinė reakcija



atsirado 17 MeV  $\alpha$  dalelių kinetinė energiją. Ši reakcija yra žinoma kaip pirmasis Einšteino energijos ir masės sąryšio eksperimentinis patvirtinimas.

## Bendros pastabos

Jeigu pakinta branduolių ryšio energija, vadinasi, reakcijoje dalyvaujančių dalelių rimties energijų suma nelieka pastovi. Juk branduolio rimties energija  $Mc^2$  susijusi su ryšio energija. Pagal energijos tvermės dėsnį kinetinės energijos pokytis branduolinėje reakcijoje turi būti lygus reakcijoje dalyvaujančių branduolių ir dalelių rimties energijos pokyčiui.

Branduolinės reakcijos energijos išeiga vadinamas branduolių ir dalelių rimties energijų prieš reakciją ir po jos skirtumas. Branduolinės reakcijos energijos išeiga taip pat lygi reakcijoje dalyvaujančių dalelių kinetinės energijos pokyčiui.

Kai branduolių ir dalelių kinetinė energija po reakcijos didesnė negu prieš ją, sakoma, kad energija išsiskiria. Priešingu atveju, vykstant reakcijai, energija sugerama.

## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose

Visoms branduolinėms reakcijoms galioja keli tvermės dėsniai, kai kurie iš jų peržengia klasikinėje fizikoje žinomų dėsnų ribas.

**Elektrino krūvio tvermės dėsnis** griežtai galioja visiems branduoliniams procesams. Elektrinis krūvis (jo skaičius branduolio fizikoje visada žymimas  $Z$ ) visuomet yra sveikas (neimant dėmesin kvarkų hipotezės), ir visų krūvių suma prieš ir po reakcijos lieka pastovi. Jei užrašant reakcijos lygtį reikia nurodyti ir jos dalyvių krūvius, jie žymimi kaip apatiniai indeksai ir jų sumos abejose pusėse turi būti vienodos.

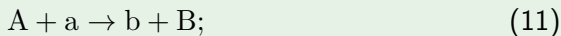
**Barioninio krūvio tvermės dėsnis** taip pat griežtai galioja visoms branduolinėms reakcijoms. Protono ir neutrono barioninis krūvis lygus 1, elektrono ir  $\gamma$  kvanto barioninis krūvis lygus 0. Jei reakcijose nedalyvauja antidalelės, barioninis krūvis yra lygus masės skaičiui  $A$ . Šio dėsnio esmė yra ta, kad bendras nukleonų skaičius nesikeičia.

## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje

**Energijos tvermės dėsnis** galioja visoms branduolinėms reakcijoms.

Jei visų reakcijos

### Branduolinė reakcija



dalyvių mases (įskaitant ir jų kinetines energijas) pažymėsime  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ , tai

### Energijos tvermės dėsnis

$$m_1 + m_2 = m_3 + m_4. \quad (12)$$



## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje

Žymėdami rimties mases  $m_{10}$ ,  $m_{20}, \dots$  ir kinetines energijas  $T_1$ ,  $T_2, \dots$ , energijos tvermės dėsnį galime užrašyti

### Energijos tvermės dėsnis

$$m_{10} + \frac{T_1}{c^2} + m_{20} + \frac{T_2}{c^2} = m_{30} + \frac{T_3}{c^2} + m_{40} + \frac{T_4}{c^2}. \quad (13)$$

Tuomet

### Energijos tvermės dėsnis

$$m_{10} + m_{20} = m_{30} + m_{40} + \frac{Q}{c^2}; \quad (14)$$

$$Q = (T_3 + T_4) - (T_1 + T_2) \quad (15)$$

yra vadinamoji *reakcijos energija*.

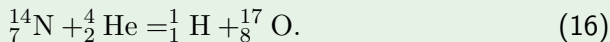
## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje

Jei  $Q > 0$ , reakcijos metu energija išsiskiria, reakcija vadinama egzotermine, o jei  $Q < 0$  – energija yra sugerama, reakcija vadinama endotermine. Reakcijos energiją galima apskaičiuoti iš žinomų reakcijos dalyvių masių.

Pavyzdžiui, paskaičiuokime Rezerfordo reakcijos energiją.

Reakcija:

### Rezerfordo reakcija



Masės:

$$\begin{aligned} m_0({}^1_7\text{N}) &= 14,003074 \text{ u}, & m_0({}^{17}_8\text{O}) &= 16,999133 \text{ u}, \\ m_0({}^4_2\text{He}) &= 4,002603 \text{ u}, & m_0({}^1_1\text{H}) &= 1,007825 \text{ u}. \end{aligned}$$

## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje

Sudedame mases:

$$m_0({}^{14}_7\text{N}) + m_0({}^4_2\text{He}) = 18,005677 \text{ u}, \quad m_0({}^{17}_8\text{O}) + m_0({}^1_1\text{H}) = 18,006958 \text{ u},$$

iš čia

### Reakcijos energija

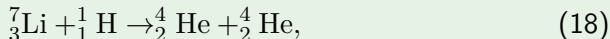
$$\frac{Q}{c^2} = -0,001281 \text{ u}, \quad \text{ir} \quad Q = -1,19 \text{ MeV}. \quad (17)$$

Reakcija yra endoterminė.

# Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose

Panašiai Kokrofto ir Voltono reakcijoje

## Kokrofto ir Voltono reakcija



masės

$$m_0({}^7_3\text{Li})=7,016005 \text{ u}, \quad m_0({}^4_2\text{He})=4,002603 \text{ u}, \\ m_0({}^1_1\text{H})=1,007825 \text{ u}, \quad m_0({}^4_2\text{He})=4,002603 \text{ u}.$$

$$m_0({}^7_3\text{Li})+m_0({}^1_1\text{H})=8,023830 \text{ u}, \quad m_0({}^4_2\text{He})+m_0({}^4_2\text{He})=8,005206 \text{ u},$$

## Reakcijos energija

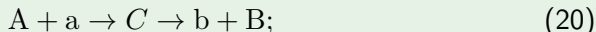
$$\frac{Q}{c^2} = 0,018624u, \text{ ir } Q = 17,33 \text{ MeV}. \quad (19)$$

Reakcija yra egzoterminė.

## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje

**Judesio kiekio tvermės dėsnis.** Parašykime jį reakcijai

### Branduolinė reakcija



čia C yra trumpam laikui susidaręs tarpinis branduolys, kurio masė

$$M_C = m_a + m_A,$$

Judesio kiekio tvermės dėsnis:

### Judesio kiekio tvermės dėsnis

$$\mathbf{p}_A + \mathbf{p}_a = \mathbf{p}_C = \mathbf{p}_b + \mathbf{p}_B. \quad (21)$$

Paprastai branduolys taikiny A yra rimtyje, t.y.  $\mathbf{p}_A = 0$  ir

### Judesio kiekis

$$\mathbf{p}_C = \mathbf{p}_a. \quad (22)$$

## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje

Tarpinio branduolio kinetinė energija:

$T_C$

$$T_C = \frac{p_C^2}{2M_C} = \frac{p_a^2}{2M_C} = \frac{m_a}{M_C} \frac{p_a^2}{2m_a} = \frac{m_a}{M_C} T_a = \frac{m_a}{m_a + m_A} T_a. \quad (23)$$

Ši kinetinė energija  $T_a$  pasilieka reakcijos metu kinetinė ir reakcijai negali būti panaudota, nes abi dalelės  $a$  ir  $A$  juda kartu. Reakcijai vykdyti lieka energija

$Q$

$$Q = T_a - T_C = T_a - \frac{m_a}{m_a + m_A} T_a = T_a \left( 1 - \frac{m_a}{m_a + m_A} \right); \quad (24)$$

$$Q = \frac{m_A}{m_a + m_A} T_a. \quad (25)$$

## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje

Energija  $T_a$  paprastai matuojama laboratorinėje sistemoje, ją galime pavadinti  $T_{\text{Lab}}$  ir užrašyti

$T_{\text{Lab}}$

$$T_{\text{Lab}} = \frac{m_a + m_A}{m_A} Q. \quad (26)$$

Gautas svarbus rezultatas: energija laboratorinėje sistemoje turi būti didesnė už reakcijos energiją. Ši energija vadinama reakcijos slenkstine energija

$T_{\text{sl}}$

$$T_{\text{sl}} = Q \left( 1 + \frac{m_a}{m_A} \right). \quad (27)$$

## Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose

Pavyzdžiui, Rezerfordo reakcijai  ${}^1_7\text{N} + {}^4_2\text{He} = {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$  įvykdyti reikia 1,19 MeV energijos, tačiau  $\alpha$  dalelės energija turi būti ne mažesnė kaip tos reakcijos slenkstis

### Rezerfordo reakcijos slenkstis

$$T_{\text{sl}} = \left(1 + \frac{4}{14}\right) \cdot 1,19 = 1,53 \text{ MeV}. \quad (28)$$



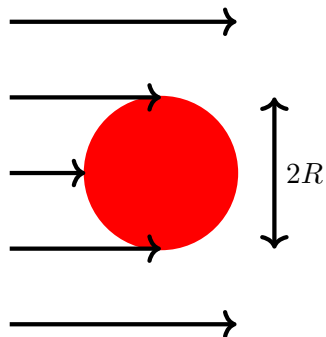
## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemoje
- **Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga**
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

## Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga

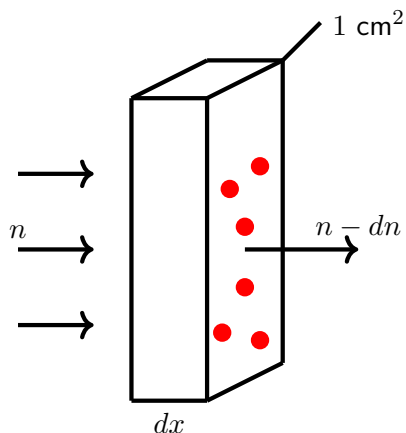
Tas pats greitų dalelių pluoštas įvairiose medžiagose, laikomose panašiomis sąlygomis, įvykdo nevienodą branduolinių reakcijų skaičių. Tai parodo, kad įvairių reakcijų tikimybės yra nevienodos. Jos labai priklauso nuo bombarduojančių dalelių energijos ir kiekvienu atveju kinta labai savotišku būdu.

## Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga



Reakcijų tikimybes nusako nuklido efektinio skerspjūvio  $\sigma$  sąvoka. Nuklidas vaizduojamas kaip nepermatomas radiuso  $R$  ir skerspjūvio ploto  $\pi R^2 = \sigma$  rutuliukas, į kurį pataikius, įvyksta reakcija.

## Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga



Tegu į  $1 \text{ cm}^2$  ploto ir  $dx$  storio ploną medžiagos sluoksnį krinta  $n$  dalelių. Dalis jų  $dn$  pataiko į branduolius ir sulaikoma. Tuomet, jei vieno nuklido efektinis skerspjūvis yra  $\sigma$ , užstoto ploto dalis yra

$$\frac{dn}{n}$$

$$-\frac{dn}{n} = N\sigma \cdot dx; \quad (29)$$

čia  $N$  – sąveikaujančių branduolių skaičius tūrio vienetu.

# Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga

Integruodami

Integravimas

$$-\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = N\sigma \int_0^x dx, \quad (30)$$

gauname dalelių skaičiaus priklausą nuo pereito per medžiagą atstumo  $x$ :

$n$

$$n = n_0 \exp(-N\sigma x); \quad (31)$$

čia  $n_0$  – pradinis dalelių skaičius. Iš šio sąryšio galima apskaičiuoti  $\sigma$ .  
Efektiniai skerspjūviai  $\sigma$  matuojami barnais:  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^2 \text{ fm}^2$ .  
Elektingų nedidelės energijos dalelių branduolinių reakcijų skerspjūviai  $\sigma$  yra barno dydžio. Ypač dideli yra lėtųjų neutronų skerspjūviai, apie juos bus kalbama toliau. (Lėtieji neutronai:  $>0,03 \text{ eV}$  ir  $< 100 \text{ eV}$  energijos).

## Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga

Nuo efektinio skerspjūvio dydžio priklauso branduolių reakcijų išeiga – branduolinės reakcijos aktų skaičiaus santykis su krintančiu į  $1 \text{ cm}^2$  taikinio plotą dalelių skaičiumi. Žinant  $\sigma$ , galima apskaičiuoti, kiek dalelių sviedinių reikia panaudoti, kad sluoksnyje, kurio storis yra ne mažesnis kaip dalelės siekis toje medžiagoje, įvyktų tam tikra reakcija viename branduolyje.

Reakcija	Dalelės energija E, eV	Dalelių skaičius, reikalingas vienai reakcijai įvykdyti
$^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$	7,80	$5,00 \cdot 10^5$
$^{19}\text{F}(\alpha, p)^{22}\text{Ne}$	7,80	$5,00 \cdot 10^6$
$^{27}\text{Al}(\alpha, p)^{30}\text{Si}$	7,80	$1,25 \cdot 10^5$
$^{19}\text{F}(\alpha, n)^{22}\text{Na}$	7,00	$3,00 \cdot 10^4$
$^{10}\text{B}(d, p)^{11}\text{B}$	0,57	$1,60 \cdot 10^8$
$^{27}\text{Al}(d, n)^{28}\text{Si}$	2,15	$5,00 \cdot 10^6$
$^{19}\text{F}(p, \alpha)^{20}\text{Ne}$	1,00	$8,00 \cdot 10^8$

Branduolinių reakcijų veikiant  $\gamma$  fotonais efektingi skerspjūviai yra maži, maždaug  $10^{-3}$  barno.

## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakcijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- **Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė**
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

## Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė

Kaip žinome iš  $\alpha$  ir  $\gamma$  spektrų, energijos lygmenys branduoliuose yra kvantuoti. Sužadintajame lygmenyje branduolys pasilieka tik trumpą laiką  $\tau$ , po to pereina į žemesnįjį arba pagrindinį lygmenį. Tarp sužadintojo lygmens energijos  $E$  ir gyvavimo tame lygmenyje trukmės galioja Heizenbergo sąryšis:

### Heizenbergo sąryšis

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \quad (32)$$

čia:  $\Delta t$  yra laiko trukmė, kurios metu galima matuoti būsenos energiją  $E$ , o  $\Delta E$  – tos energijos neapibrėžtumas

### Energijos neapibrėžtumas

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t} \quad (33)$$



## Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė

Taigi branduolio tam tikro lygmens energija  $E$  nėra absoliučiai tiksliai apibrėžta, o turi tam tikrą neapibrėžtumo plotį, kurį žymėsime  $\Gamma$ , o lygmens gyvavimo trukmę –  $\tau$ . Tuomet (33) perrašome

### Lygmens plotis

$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau}. \quad (34)$$

Dydis  $\Gamma$  matuojamas energijos vienetais ir vadinamas lygmens pločiu. Lygmens pločio sąvoka turi prasmę tik tada, jei jis ne didesnis negu atstumas tarp gretimų kvantuotų energijos lygmenų. Pavyzdžiui, jei branduolio lygmens gyvavimo trukmė  $\tau = 10^{-14}$  s, tai šio lygmens plotis

### Lygmens plotis

$$\Gamma = \frac{10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{10^{-14} \text{ s}} \approx 0,06 \text{ eV}. \quad (35)$$

# Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė

Energijos lygmenų išsidėstymas branduolyje yra toks: virš nesužadinto pagrindinio lygmens pirmieji aukštesnieji yra gan toli prasiskyrę vienas nuo kito, vidutinis jų atstumas yra apytiksliai 0,2 MeV. Aukščiau jie tankėja vis labiau ir labiau, ir pakankamai aukštai taip sutankėja, kad dėl nenulinių lygmenų pločių pradeda susiliesti, ir tuomet branduolys gali turėti ir sugerti bet kokią energiją.

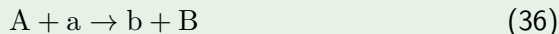
## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- **Tarpinio branduolio Boro teorija**
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

# Tarpinio branduolio Boro teorija

Tiriant pirmąsias branduolines reakcijas atrodė, kad jos vyksta akimirksniu, t.y. dalelei sviediniui  $a$  pataikius į branduolį taikinį  $A$  pagal reakciją

## Branduolinė reakcija



dalelė  $b$  išlekia tuojau pat, kaip po smūgio. Tačiau vėlesni tyrimai parodė, kad taip nėra, kad dalelė  $b$  išlekia po šimtus kartų ilgesnio laiko tarpo negu perlėkimo per branduolį trukmė, trumpai vadinama *branduoline trukme*.

## Tarpinio branduolio Boro teorija

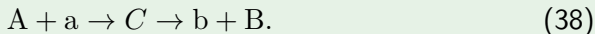
Branduolinė trukmė skaičiuojama taip: jei branduolio A radiusas yra apytiksliai  $10^{-15}$  m, o bombarduojančios dalelės a greitis  $v = \frac{1}{3}c = 10^8$  m/s, tai perlėkimo per branduolį trukmė tokiu atveju

### Branduolinė trukmė

$$\tau = \frac{R}{v} \approx \frac{10^{-15}}{10^8} = 10^{-23} \text{ s.} \quad (37)$$

Tuo tarpu dalelė b atsiranda tik po  $10^{-14}$ – $10^{-10}$  s, vadinasi, daug vėliau. N. Boras 1931 m. iškėlė teoriją, kad iš pradžių susidaro tarpinis (angl. compound) branduolys C ir visa reakcija vyksta dviem pakopomis:

### Branduolinė reakcija



## Tarpinio branduolio Boro teorija

Reakcija vyksta per tarpinį branduolį tada, kai dalelės  $a$  energija nėra labai didelė. N. Boras jos eigą vaizdavo taip. Dalelė  $a$ , patekusi į branduolį  $A$ , atiduoda visą savo kinetinę energiją, o prie jos dar prisideda ryšio energija, ir susidaro stipriai sužadintas tarpinis branduolys  $C$ . Patekusios dalelės energija pasiskirsto tarp kitų nukleonų, ir tarpiniame branduolyje prasideda intensyvus visų dalelių judėjimas, pakyla branduolio temperatūra. Dalelių energija padidėja, bet, bendrai imant, yra nepakankama, kad jos galėtų iššokti iš branduolio. Turi praeiti ilgas laikas, palyginus su branduoline trukme  $\tau$  ( $10^{-23}$  s), laikotarpis, kol dėl energijos fliktuacijų ji susikoncentruos kurioje nors vienoje dalelėje, kuri galės "išgaruoti" iš branduolio. Išlekianti dalelė  $b$  išneša energijos perteklių, ir branduolys  $B$  lieka normalioje būsenoje.

## Tarpinio branduolio Boro teorija

Jeigu mes visą procesą nagrinėjame inercijos centro sistemoje, kurioje tarpinis branduolys  $C$  nejuda, išlekiančių dalelių  $b$  kryptys nepriklauso nuo įlekiančios dalelės krypties, t.y. jų pasiskirstymas išsiskiria sferine simetrija. Be to, tikimybė išlėkti vienai ar kitai dalelei, t.y. išėjimo kanalo tikimybė, visai nepriklauso nuo to, koku kanalu tarpinis branduolys buvo susidaręs. Iki dalelės  $b$  išlėkimo praeina toks ilgas, palyginus su branduoliniu, laiko tarpas, kad tarpinis branduolys užmiršta savo atsiradimo istoriją.

Reakcijos, kurios vyksta per tarpinį branduolį, skirstomos į rezonansines ir nerezonansines. Branduolys gali turėti tik tam tikrą energiją, kuri atitinka energijos lygmenis. Kad susidarytų tarpinis branduolys, reikia, kad įlekiančios dalelės energija atitiktų branduolio lygmens energiją. Jei tie lygmenys toli vienas nuo kito, bus pastebimas rezonanso reiškinys, reakcija vyks tik tam tikroms energijoms. Jei energijos lygmenys išsidėstę taip tankiai, kad savo pločiais susilieja, branduolys galės įgyti bet kokią energiją ir tokia reakcija bus nerezonansinė.

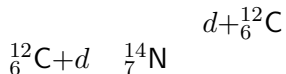
## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos



## Įvairių reakcijos kanalų tikimybės

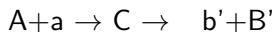
Reakcijos per tarpinį branduolį gali vykti taip pat įvairiais būdais. Žemiau parodytas pavyzdys reakcijos, kurios tarpinis branduolys yra  ${}^7_{14}\text{N}$



Kiekviena iš parodytų galimų reakcijos eigų vadinama reakcijos kanalu. Iš kairės pusės surašyti įėjimo kanalai, iš dešinės – išėjimo. Tarpinis branduolys gali susidaryti įvairiais būdais. Išėjimo kanalų tikimybės nepriklauso nuo to, koku kanalu tarpinis branduolys susidarė. Tarpinio branduolio gyvavimo trukmė yra labai didelė, palyginus su branduoline trukme, ir todėl jis užmiršta, koku būdu susidarė, o tolesnis skilimas vyksta pagal kiekvienam išėjimo kanalui būdingą tikimybę.

## Įvairių reakcijos kanalų tikimybės

Panagrinėkime reakciją



.....

Reakcijų, vykstančių per tarpinį branduolį, įvairių išėjimo kanalų skerspjūvius, kurie nepriklauso nuo įėjimo kanalo, galima išreikšti kaip sandaugą dviejų daugiklių – tarpinio branduolio C susidarymo skerspjūvio  $\sigma_{aC}$  ir jo skilimo b kanalu tikimybės  $\Gamma_b/\Gamma$

### Kanalo skerspjūvis

$$\sigma_{ab} = \sigma_{aC} \cdot \frac{\Gamma_b}{\Gamma}; \quad (39)$$

čia

$$\Gamma = \Gamma_a + \Gamma_b + \Gamma_{b'} + \dots \quad (40)$$

yra vadinamoji *parcialinių plokčių suma*,  $\Gamma$  – pilnutinis plotis, o  $\Gamma_a/\Gamma$  – tarpinio branduolio skilimo įėjimo kanalu tikimybė.

## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

## Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė

Jei branduolyje yra izoliuotas energijos lygmuo  $E_0$ , tai yra galima rezonansinė branduolinė reakcija su rezonansiniu maksimumu. Kvantinėje mechanikoje įrodoma, kad šios reakcijos skerspjūvio  $\sigma$  funkcija aprašoma Breito (G. Breit) ir Vignerio (E. P. Wigner) formule

### Breito ir Vignerio formulė

$$\sigma_{ab} = \pi \Lambda_a^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \quad (41)$$

( $\Lambda_a = \frac{\lambda_a}{2\pi} = \frac{\hbar}{p_a}$  yra "perbrauktas" de Broilio bangos ilgis), turi maksimumą. Iš pateiktos formulės matome, kad rezonansas yra tuo smalesnis, kuo  $\Gamma$  yra mažesnis. Vadinasi,  $\Gamma$  yra plotis energijos lygmens, kuriame vyksta reakcija.

## Rezonansinēs reakcijas. Breito ir Vignerio formulē

Sudējus visus galimū kanalu skersspjūvius, apibrēztus (41) formulē, gaudama skersspjūvis tarpiniam branduoliui susidaryti

### Skersspjūvis

$$\sigma_{aC} = \pi \Lambda_a^2 \frac{\Gamma_a \Gamma}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}. \quad (42)$$

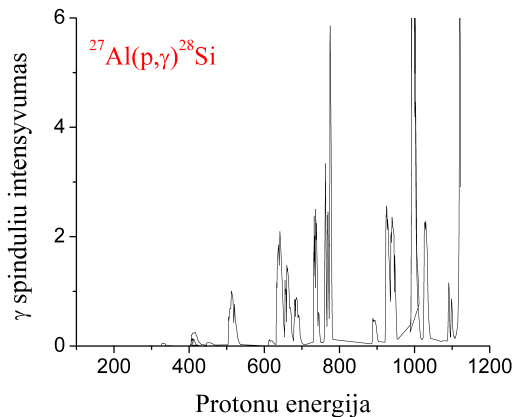
Jā padauginē iš skilimo b kanalu tikimybēs, gaudame

### Skersspjūvis

$$\sigma_{ab} = \pi \Lambda_a^2 \frac{\Gamma_a \Gamma}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}} \cdot \frac{\Gamma_b}{\Gamma}. \quad (43)$$

## Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė

Charakteringas rezonansinės reakcijos dar nagrinėsime skyriuje apie neutronus. Labai ryškus rezonansinis pobūdis konstatuojamas protonų ( $p, \gamma$ ) reakcijose.



## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- **Tiesioginės branduolinės reakcijos**
- Fotobranduolinės reakcijos

## Tiesioginės branduolinės reakcijos

Yra reakcijų, kurios vyksta sparčiai, t.y. per dalelės lėkimo per branduolį trukmę, maždaug  $10^{-23}$ – $10^{-22}$  s. Tokios reakcijos, kuriose nesusidaro tarpinis branduolys, vadinamos tiesioginėmis reakcijomis. Šiais atvejais įlekianti dalelė perduoda savo energiją ir judesio kiekį tiesiog kokiai nors vienai branduolio dalelei. Tokioms reakcijoms būdingi keli charakteringi bruožai.

Pirma, kadangi krintanti dalelė savo judesio kiekį perduoda tik vienam nukleonui, tasai dažniausiai išlekia pirmyn.

Antra, jo energija turi būti didelė, artima krintančios dalelės energijai.

Trečia, šiose reakcijose su vienoda tikimybe gali išlėkti protonai ir neutronai, nes esant didelei energijai Kulono potencinis barjeras mažai tereiškia.



## Tiesioginės branduolinės reakcijos

Paminėsimė kelis tokių branduolinių reakcijų tipus:  $(n, n)$ ,  $(n, p)$ ,  $(p, n)$ ,  $(p, p)$ . Šios reakcijos dažniausiai vyksta bombarduojant kelių dešimčių megaelektronvoltų energijos nukleonais.

Tiesioginėmis laikomos ir tokios reakcijos, kuriose deutonas arba kitas lengvas nuklidas tik užkliūva už kito branduolio krašto ir įvyksta mainai pačioje branduolio išorėje.

Atplėšimo (angl. *stripping*) reakcijos – tai  $(d, p)$ ,  $(d, n)$  reakcijos, kurių metu nuo deutono, kuriame protono ir neutrono ryšio energija labai maža (2,11 MeV), vienas nukleonas atplėšiamas ir pasilieka branduolyje, kitas lekia toliau pirmine kryptimi.

Pagrobimo reakcija (angl. *pick-up*) yra atvirkštinė atplėšimo reakcijai. Tai  $(p, d)$ ,  $(n, d)$ ,  $(d, {}^3\text{H})$  reakcijos, kuriose greitoji dalelė, užkabinusi branduolį, pagrobia iš jo vieną nukleoną.

## Tiesioginės branduolinės reakcijos

Tiesioginių reakcijų pobūdis pasikeičia, jeigu krintančių dalelių energija  $E$  labai didelė, didesnė negu nukleonų ryšio branduolyje energija. Tuomet susidaro galimybės kitokiems procesams vykti.

Kvazitamprus išmušimas, arba  $(p, 2p)$  ( $p, pn$ ) reakcijos, vyksta, kai krintančio nukleono energija  $E > 100$  MeV. Įlėkęs nukleonas susiduria su vienu branduolio nukleonu ir, perdavęs jam dalį savo energijos, išlekia iš branduolio kartu su juo kaip po tampraus susidūrimo.

Kai bombarduojančių dalelių – nukleonų arba kitų branduolių – energija yra labai didelė, kelių šimtų megaelektronvoltų ir daugiau, vyksta branduolių "sprogimai", kurių metu pirminis branduolys suskyla į daug smulkesnių skeveldrų. Šitoks procesas vadinamas *fragmentacija*, o išlekiantieji branduoliai skeveldros – *fragmentais*. Tokie fragmentai gali būti lengvųjų atomų branduoliai, pvz., Li, Be, B ir kt. Šitokios sprogo branduolinės reakcijos – fragmentizacijos nuotraukos burbulinėje kameroje arba fotografinėje emulsijoje pagal savo išvaizdą vadinamos "žvaigždėmis".

## 1 Branduolinės reakcijos

- Bendros pastabos
- Tvermės dėsniai. Reakijų slenksčiai masių centro ir laboratorinėje sistemose
- Efektinis branduolinės reakcijos skerspjūvis ir išeiga
- Energinis lygmens plotis ir gyvavimo trukmė
- Tarpinio branduolio Boro teorija
- Įvairių reakcijos kanalų tikimybės
- Rezonansinės reakcijos. Breito ir Vignerio formulė
- Tiesioginės branduolinės reakcijos
- Fotobranduolinės reakcijos

# Fotobranduolinės reakcijos

Fotobranduolinės reakcijos yra tokios, kuriose esminis vaidmuo tenka elektromagnetiniam laukui. Paveikus branduolius  $\gamma$  kvantai, kurių energija gali būti nuo kelių megaelektronvoltų iki kelių šimtų, vyksta įvairios reakcijos, kuriose atsiranda neutronai, protonai ir kitos dalelės. Tokios reakcijos vadinamos *fotobranduolinėmis*, o pats fotobranduolinis reiškinys yra analogiškas įprastiniams fotoefektui, žinomam iš atominės fizikos reiškinių, tik šiuo atveju išlaisvinami ne elektronai iš atomo sluoksnių, o nukleonai iš branduolio, atitinkamai ir energijos yra apytiksliai  $10^6$  kartų didesnės. O kai fotonų energija pasiekia šimtus megaelektronvoltų, gali atsirasti neigiami ir neutralūs pionai:

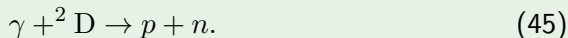
## Fotobranduolinės reakcijos

$$\gamma + n \rightarrow p + \pi^- \text{ ir } \gamma + p \rightarrow p + \pi^0. \quad (44)$$

## Fotobranduolinės reakcijos

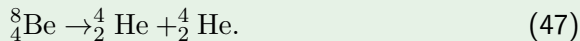
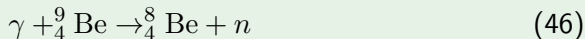
Seniausiai žinoma fotobranduolinė reakcija buvo deutono fotoskaldymas veikiant ThC''  $\gamma$  spinduliais ( $E_\gamma = 2,6 \text{ MeV}$ )

### Fotobranduolinė reakcija



Antroji reakcija buvo berilio branduolio skaldymas veikiant RaC'  $\gamma$  fotonais ( $E_\gamma = 1,78 \text{ MeV}$ )

### Fotobranduolinė reakcija



## Fotobranduolinės reakcijos

Tai buvo viskas, ką buvo galima pasiekti gamtiniais radioaktyviųjų branduolių  $\gamma$  spinduliais. Kituose nukliduose nukleono atskyrimas fotobranduoliniu reiškiniu reikalavo didesnės energijos, t.y. ne mažesnės kaip nukleono ryšio energija: 8 MeV.

Tokios energijos  $\gamma$  kvantai iš pradžių buvo gauti kai kurių branduolinių reakcijų būdu, o paskui atsirado galimybė gauti net labai didelės energijos  $\gamma$  fotonus stabdomuoju spinduliavimu iš didelės energijos elektronų, pagreitintų betaronais, mikrotronais, sinchrotronais ir linijiniais greitintuvais. Tada prasidėjo sistemingas fotobranduolinių reakcijų tyrimas.

Pagrindiniai fotobranduolinių reakcijų tipai yra  $(\gamma, n)$  ir  $(\gamma, p)$ . Ir mažos, ir didelės  $\gamma$  fotonų energijos reakcijų skerspjūviai  $\sigma$  yra maži, milibarnų dydžio, taigi daug mažesni negu atitinkamos energijos reakcijų, sužadintų elektringomis dalelėmis. Tai susiję su tuo, kad elektromagnetinė sąveika yra apytiksliai  $10^2$  kartų silpnesnė už stipriąją branduolinę sąveiką.