

# BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenio  
V paskaita

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Branduolio modeliai

Žinant branduolio sudėtį ir kai kurias jo savybes, kitas žingsnis yra sukurti jo modelį, kuris teoriškai paaiškintų visas žinomas branduolio savybes ir leistų numatyti naujas. Kuriant nuoseklią branduolio teoriją susiduriama su daugeliu sunkumų:

- nepakankamai gerai žinomos branduolinės jėgos, veikiančios tarp branduolį sudarančių nuklidų,
- dėl didelio branduolį sudarančių dalelių skaičiaus jas aprašančios lygtys yra labai sudėtingos,
- dėl stiprios sąveikos tarp nukleonų reikia atsižvelgti į jų judėjimo kolektyvinį pobūdį ir t.t.

Taigi šiuo metu nuoseklios branduolio teorijos nėra, todėl naudojamos apytikslės ir vienpusiškos branduolio sandaros schemas – modeliai, aiškinantys svarbiausias branduolio savybes ir procesus.

# Branduolio modeliai

Galima išskirti bent 3 branduolio modelius. Tai:

- kolektyvinio judėjimo pagrindu besiremiantis lašelinis branduolio modelis,
- dalelių nepriklausomo judėjimo pagrindu sukurtas sluoksninis branduolio modelis
- apibendrintasis branduolio modelis.

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

- Vienas pirmųjų branduolio modelių buvo lašelinis. Jo esmė ta, kad branduolys sudarytas iš nukleonų, prilyginamas skysčio lašeliui, kurio viduje yra molekulės. 1936 m. N. Boras ir J. Frenkelis nepriklausomai vienas nuo kito atkreipė dėmesį į atomo branduolio ir skysčio lašelio panašumą. Abiem atvejais tarp dalelių veikia trumpasiekės jėgos ir joms būdingas soties reiškinys. Lašo ir branduolio forma yra sferinė, skystis yra praktiškai nespūdas, todėl mažo ir didelio lašo tankis yra vienodas, ir šias savybes turi branduolys. Rutulio forma susidaro dėl paviršiaus įtempimo, kuris pasireiškia ir skysčiuose, ir branduoliuose.
- Yra ir tam tikri skirtumai tarp lašo ir branduolio. Visų pirma tai, kad dalis branduolį sudarančių nukleonų yra skirtingos dalelės, dėl to branduolys turi papildomos elektrostatinės energijos, o skysčio lašelyje to nėra.

## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

- Remdamasis šiuo modeliu K. F. Vaiczekeris (C. F. von Weizsäcker) pasiūlė pusempirinę branduolio energijos formulę. Ši formulė paaiškina reakcijų, tarp jų ir branduolio dalijimosi mechanizmus.
- Teoriškai lašeliniame modelyje atomo branduolio masės, kaip parametru  $Z$  ir  $A$  formulė, grindžiama šiomis prielaidomis:
  - 1 Neutralaus atomo masė, jeigu nebūtų tarp nukleonų jokios sąveikos, būtų

### Branduolio masė be pataisų

$$m_0(Z, A) = Zm_H + (A - Z)m_n. \quad (1)$$

- 2 Toliau masės išraiška tikslinama keletu pataisų:



# Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

Pataisos (pratęsimas...):

- **Tūrinės energijos** pataisa įskaito masės sumažėjimą dėl  $A$  nukleonų savitosios ryšio energijos ir yra proporcinga nukleonų skaičiui  $A$ :

Tūrinės energijos pataisa

$$\Delta m_1 = -a_1 A. \quad (2)$$

- **Paviršiaus įtempimo** pataisa įvertina energijos, o kartu ir masės padidėjimą dėl paviršiaus įtempimo energijos, proporcingos branduolio paviršiaus plotui  $A^{2/3}$ :

Paviršiaus įtempimo pataisa

$$\Delta m_2 = a_2 A^{2/3}. \quad (3)$$

# Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

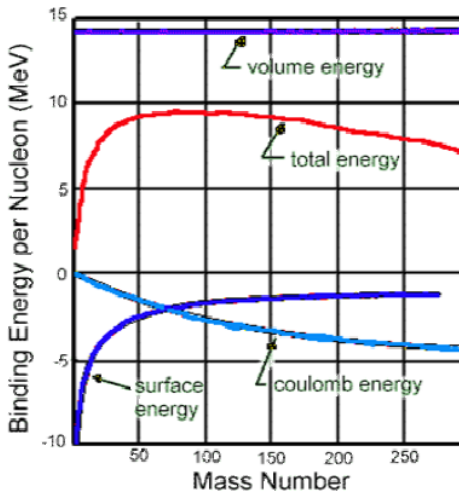
Pataisos (pratęsimas...):

- **Kulono energijos** pataisa įvertina energijos padidėjimą dėl elektrostatinio stūmimo tarp protonų porų. Ji proporcinga protonų porų skaičiui  $Z(Z - 1) \approx Z^2$  ir atvirkščiai proporcinga branduolio spinduliui  $R \propto A^{1/3}$ , todėl

Kulono energijos pataisa

$$\Delta m_3 = a_3 Z^2 A^{-1/3}. \quad (4)$$

## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė



Tūrinė, paviršinė, kuloninė ir jų suma (visa) ryšio energijos tenkančios vienam nukleonui, priklausomai nuo branduolio masės skaičiaus.

## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

Pataisos (pratęsimas...):

- **Asimetrijos energijos** pataisa grindžiama tuo, kad  $(n,p)$  branduolinės traukos jėgos yra stipresnės už  $(n,n)$  ir  $(p,p)$  jėgas. Šiuo požiūriu stabiliausi branduoliai, kurių  $N = Z = A/2$ . Ši pataisa simetrinė  $N$  ir  $Z$  atžvilgiu ir atvirkščiai proporcinga  $A$ :

Asimetrijos energijos pataisa

$$\Delta m_4 = a_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A}. \quad (5)$$

# Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

Pataisos (pratęsimas...):

- **Lyginumo pataisa.** Nelyginių ir dvigubai nelyginių nuklidų yra daug mažiau, jų procentinis kiekis cheminio elemento sudėtyje taip pat paprastai mažesnis. Tai rodo jų mažesnį stabilumą, mažesnę ryšio energiją ir didesnę masę. Kuris skaičius,  $Z$  ar  $N$  yra nelyginis, didelės reikšmės neturi. Norint jį tai atsižvelgti, į nuklido masės išraišką įvedama dar viena, vadinamoji lyginumo, pataisa  $\delta(Z, A)$ , kurios pavidalas parenkamas empiriškai:

## Lyginumo pataisa

$$\delta(Z, A) = \begin{cases} -0,036A^{-3/4} & \text{lyginiams lyginiams} \\ 0 & \text{lyginiams nelyginiams} \\ +0,036A^{-3/4} & \text{nelyginiams nelyginiams} \end{cases} \quad (6)$$

## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

Prie nulinio artinio (1) išraiškos atomo masei pridėję visas išvardintas pataisas, gauname nuklido masės išraišką (Vaiczekerio formulė):

### Vaiczekerio formulė

$$m(Z, A) = m_0(Z, A) - a_1 A + a_2 A^{2/3} + a_3 Z^2 A^{-1/3} + a_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta. \quad (7)$$

Į išraišką (1) įeinančios vandenilio atomo ir neutrono masės yra žinomos pakankamai tiksliai:  $m_H = 1,00783$ ,  $m_n = 1,00867$  unifikuotų masės vienetų  $u$ , o kitų 4 formulės (7) koeficientų vertės parenkamos empiriškai taip, kad gautoji formulė geriausiai aprašytų įvairių nuklidų masės priklausomybę nuo  $Z$  ir  $A$ . Šios vertės įvairiuose žinynuose šiek tiek skiriasi.

## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

Unifikuotais masės vienetais jos yra maždaug tokios:

### Vaiczekerio formulės koeficientai

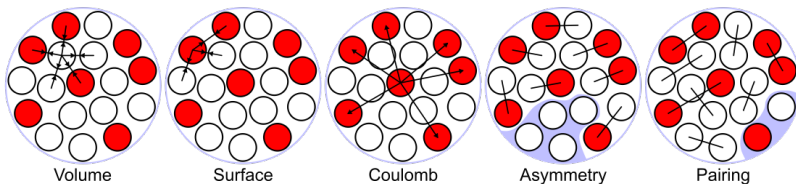
$$\begin{aligned} a_1 &= 0,01691; & a_2 &= 0,0191; \\ a_3 &= 0,000762; & a_4 &= 0,1018. \end{aligned} \quad (8)$$

Įrašę tokias vertes į (7) ir sutraukę narius, gauname formulę nuklido masei:

### Vaiczekerio formulė

$$m(Z, A) = 0,99176A - 0,00084Z + 0,0191A^{2/3} + 0,000762 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + 0,1018 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta. \quad (9)$$

# Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė





## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

Atitinkamai galime gauti išraišką ir nuklido masės defektui

$\Delta m = m_0(Z, A) - m(Z, A)$  bei savitajai nukleono ryšio energijai (MeV):

### Vaiczekerio formulė

$$\frac{E_r}{A} = 15,75 - \frac{17,8}{A^{1/3}} - \frac{0,71Z^2}{A^{4/3}} - 94,8 \frac{(A/2 - Z)^2}{A^2} + \frac{34}{A^{7/4}} \delta_r. \quad (10)$$

Čia

### Lyginumo pataisa

$$\delta_r = \begin{cases} 1 & \text{lyginiams lyginiams} \\ 0 & \text{lyginiams nelyginiams} \\ -1 & \text{nelyginiams nelyginiams} \end{cases} \quad (11)$$

Šias išraiškas ir vadinsime *Vaiczekerio formule*.

## Lašelinis branduolio modelis. Vaiczekerio formulė

- Formulės (10) ir (11) tinka ne tik stabiliųjų, bet ir nestabiliųjų nuklidų masėms, jų ryšio energijoms įvertinti. Jos neblogai atkartoja išmatuotas vidutines nukleonų su tam tikrais  $A$  ir  $Z$  ryšio energijas, tačiau nepaaiškina ypatingo tam tikrų branduolių stabilumo.
- Nors ir būdama apytiksle Vaiczekerio formulė suvaidino didelį euristinį vaidmenį branduolio fizikos raidoje. Ji įgalino numatyti nelyginių urano ir plutonio izotopų skilimą paveikus juos lėtais neutronais. Taip ji parodė teisingą branduolinio kuro atominei energetikai paieškos kryptį.
- Remiantis lašelinio modeliu vėliau buvo paaiškintas branduolinių reakcijų, tarp jų ir branduolio dalijimosi, mechanizmas.
- Be Vaiczekerio formulės egzistuoja ir kitos pusiauempirinės lašelinio branduolio modelio formulės branduolių ryšio energijai apskaičiuoti. Vienos nuo kitų jos skiriasi tik pataisos nariais, įskaitančiais nukrypimus nuo idealaus rutulio formos vienalyčio lašo.

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Izotopai, izobarai, izotonai

Žinomi 276 stabilūs nuklidai priklauso 83 elementams nuo  ${}^1_1\text{H}$  iki  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ .  
Pagal protonų  $Z$  ir neutronų  $N$  skaičius jie skirstomi į 3 nuklidų rūšis

- **Izotopai**,  $Z = \text{const}$ , to paties cheminio elemento nuklidai, kurie skiriasi masės  $A$  ir neutronų  $N$  skaičiais. Pavyzdžiui  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$  ir  ${}^{18}\text{O}$  yra 3 stabilūs deguonies izotopai.
- **Izobarai**,  $A = \text{const}$ , nuklidai, turintys vienodą nukleonų skaičių, bet priklausantys skirtingiems elementams, pvz.,  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$  ir  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  arba  ${}^{124}_{50}\text{Sr}$ ,  ${}^{124}_{52}\text{Te}$  ir  ${}^{124}_{54}\text{Xe}$ .
- **Izotonai**,  $N = \text{const}$ , nuklidai, turintys vienodą neutronų skaičių, pvz.,  ${}^{38}_{18}\text{Ar}$  ir  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  arba  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$  ir  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ .

## Izotopai, izobarai, izotonai

Kalbėdami apie branduolių stabilumą jau užsiminėme apie lyginių stabilijų nuklidų dominavimą. Čia pratęsimė pradėtąją analizę.

- *Lyginiai lyginiai* nuklidai sudaro apie 60 proc. visų stabilijų nuklidų. Pradedant deguonimi visi lyginiai lyginiai nuklidai su  $Z > 7$  turi ne mažiau kaip po 3 stabiliuosius izotopus. Daugiausia izotopų turi nuklidai, susigrupavę apie alavą, kurio atominis skaičius  $Z = 50$  yra *magiškasis*. Tai  ${}_{48}\text{Cd}$  turi 8,  ${}_{50}\text{Sn}$  – 10,  ${}_{52}\text{Te}$  – 8,  ${}_{54}\text{Xe}$  – 9 stabilius izotopus. Dauguma jų lyginiai lyginiai.
- Dėsnįgumus izobarų srityje galima nagrinėti naudojantis Vaiczekerio formule (9). Esant izobarų sąlygai  $A = \text{const}$ , gauname kvadratinę  $Z$  atžvilgiu funkciją – parabolę. Ant jos išsidėsto nuklidai su įvairiais  $Z$ , priklausantys įvairiems elementams.
- Nelyginiam masės skaičiui  $A$  formulėje (9) lyginumo pataisa  $\delta = 0$ . Parabolės minimumą, kuris atitinka stabiliausiojo nuklido (su mažiausia energija) atominį skaičių  $Z_{stab}$ , randamas iš minimumo sąlygos  $dm(Z, A)/dZ|_{A=\text{const}} = 0$

## Izotopai, izobarai, izotonai

- Atlikę skaičiavimus gauname

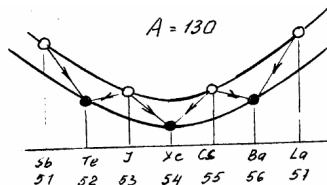
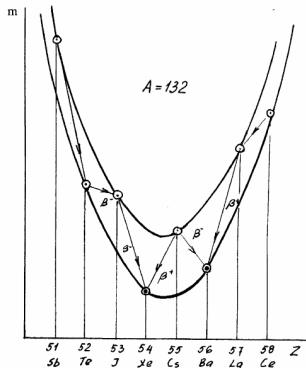
$Z_{\min}$

$$Z_{\min} = Z_{stab} = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}} \quad (12)$$

- Formulė (12) atskleidžia jau minėtus neutronų ir protonų santykio stabiluose branduoliuose dėsningumus: mažiems  $A$ ,  $Z_{stab} \approx A/2$ , todėl  $N \approx Z$ . Masės skaičiui  $A$  didėjant, neutronų skaičius  $N$  branduolyje pradeda vis labiau viršyti protonų skaičių  $Z$ .
- Iš formulių (9) ir (12) seka, kad nelyginiam  $A$  gali būti tik vienas stabilusis nuklidas, turintis mažiausią masę. Visi kiti, esantys ant parabolės aukščiau, bus nestabilūs, ir  $\beta^-$  arba  $\beta^+$  skilimu virs stabilioju su mažiausia energija. Tai *1-oji Mataucho taisyklė*: nelyginiam masės skaičiui gali būti tik vienas stabilusis nuklidas, t.y. nelyginiam masės skaičiams nėra izobarų.

# Izotopai, izobarai, izotonai

- Lyginiam masės skaičiui  $A$  skaičiui  $Z$  ir  $N$  gali būti arba abu lyginiai, arba abu nelyginiai. Nuo to priklauso pataisos  $\delta$  Vaiczekerio formulėje ženklas. Todėl lyginiams  $A$  yra dvi parabolės, vaizduojančios nuklidų masės priklausomybes nuo  $Z$ : viršutinė nelyginiams nelyginiams nuklidams ( $\delta > 0$ ), o apatinė ( $\delta < 0$ ) – lyginiams lyginiams nuklidams



Lyginių izobarų masės priklausomybė nuo atominio skaičiaus  $Z$  ir beta skilimų sekoje liekantis stabilūs izobarai, kurių atominiai skaičiai skiriasi dviem vienetais.

## Izotopai, izobarai, izotonai

- Atominiam skaičiui  $Z$  didėjant, o neutronų skaičiui mažėjant su sąlyga  $A = Z + N = \text{const}$ , nuklidai nuosekliai atsiduria tai ant vienos, tai ant kitos parabolės. Ant viršutinės parabolės esantys nuklidai visi yra nestabilūs  $\beta$  skilimui, o ant apatinės stabilūs yra žemiausieji. Tokių gali būti 1, 2 arba 3. Jų atominiai skaičiai skiriasi dviem vienetais. Tai yra *2-oji Matacho taisyklė*: stabilieji izobarai galimi tik lyginiam lyginiam nuklidams ir jie priklauso elementams, kurių atominiai skaičiai  $Z$  skiriasi dviem vienetais. Arba gretimi elementai negali turėti stabiliųjų izobarų.
- Yra daug stabiliųjų izobarų porų ir tik 4 stabiliųjų izobarų trijulės  $A = 96$ ,  $Z = 40, 42$  ir  $44$ ;  $A = 124$ ,  $Z = 50, 52$  ir  $54$ ;  $A = 130$ ,  $Z = 52, 54$  ir  $56$ ;  $A = 136$ ,  $Z = 54, 56$  ir  $58$ .



# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- **Magiškieji skaičiai**
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Magiškieji skaičiai

- Tyrimai rodo, kad ypač pastovūs yra branduoliai, jei protonų skaičius  $Z$ , arba neutronų skaičius  $N$  lygus vienam iš šių skaičių:

## Magiškieji skaičiai

$$2, 8, (14), 20, 28, 50, 82, 126. \quad (13)$$

Šie skaičiai vadinami *magiškaisiais*, o atitinkami atomai – *magiškaisiais nuklidais*.

- Branduoliai, kurių magiškieji ir  $Z$ , ir  $N$ , vadinami *dvigubai magiškaisiais*. Šie nuklidai ypač patvarūs. Tokie žinomi tik 5 branduoliai: (žr. sekančią skaidrę)

# Magiškieji skaičiai

Dvigubai magiškieji branduoliai:

- ${}^4_2\text{He}$  –  $\alpha$  dalelė, helio branduolys, labai stabili sistema, kuri daugelyje branduolinių procesų elgiasi kaip viena dalelė. Labai dideli helio kiekiai yra saulėje ir kosmose.
- ${}^{16}_8\text{O}$  – deguonies izotopas ( $Z = N = 8$ ), kuris kartu su savo junginiais sudaro apie 50 proc. visos Žemės medžiagos.
- ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  – ( $Z = N = 20$ ) – labai paplitęs Žemėje elementas kalcis.
- ${}^{208}_{82}\text{Pb}$  – ( $Z = 82, N = 126$ ) – sunkusis elementas švinas, kuriuo virsta visi sunkiausiai Žemėje randami elementai (išskyrus  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ ).
- Skaičius  $N = 126$  yra magiškas tik neutronams.  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$  yra už stabiliųjų nuklidų ribos ( $Z = 82$ ), tačiau jis dar yra stabilus dėl magiškojo neutronų skaičiaus  $N = 126$ .
- $Z = N = 14$  yra kiek silpnesnis magiškas skaičius. Jį atitinka silicis  ${}^{28}_{14}\text{Si}$  (dvigubai magiškas), kurio junginiai sudaro apie 25 proc. mūsų planetos.

## Magiškieji skaičiai

- Magiškųjų nuklidų savitoji ryšio energija  $E_r/A$  visada yra didesnė negu kaimyninių branduolių. Tokie branduoliai yra sferinės formos, jų kvadrupoliniai elektriniai momentai lygūs nuliui, o neutronų pagavos skerspjūviai labai maži. Magiškieji nuklidai turi daug daugiau izotopų ir izotonų negu jų kaimynai.
- Šie duomenys patvirtina prielaidą, kad ir branduoliuose yra ypač stabilios nukleonų konfigūracijos, kurios atitinka tam tikrus užpildytus nukleonų sluoksnius.
- Pastebėsime, kad atomai su užpildytais elektronų sluoksniais – inertinių dujų atomai, turi 2, 10, 18, 36, 54, 86 elektronus. Šie elektronų skaičiai, išskyrus 2, skiriasi nuo magiškųjų skaičių atomo branduoliams. Tai rodo, kad branduolyje nukleonai yra pasiskirstę kitaip negu elektronai atome, kuriame veikia stiprus branduolių laukas ir palyginti silpnesnė sąveika tarp elektronų, negu tarp nukleonų branduolyje. Magiškųjų skaičių branduolyje kilmę paaiškina sluoksninis branduolio modelis.

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Sluoksninis branduolio modelis

Prieš pradėdami nagrinėti sluoksninį branduolio modelį, prisiminkime periodinę elementų sistemą (II paskaita).

Čia susidūrėme su atomo magiškaisiais skaičiais, kurie atitinka pilnai užpildytas atomų orbitales:

## Atomo magiškieji skaičiai

$$2, 10, 18, 36, 54. \quad (14)$$

Pavyzdžiui, inertinių dujų argono Ar ( $Z = 18$ ) atomas turi uždarą sluoksnį, atitinkantį  $n = 1, 2$  uždarus sluoksnius ir pasluoksnį  $n = 3, l = 0, 1$ .

Priminsime, kad atomo kvantiniai skaičiai yra šie:  $(n, l, m, m_s)$  - pagrindinis, orbitinis, magnetinis ir sukinio magnetinis kvantiniai skaičiai.

# Sluoksninis branduolio modelis

Kvantinio skaičiaus pavadinimas	Žymėjimas	Galimos vertės
Pagrindinis	$n$	$1, 2, 3, \dots, \infty$
Orbitinis (šalutinis)	$l$	$0, 1, 2, \dots, n - 1$
Magnetinis	$m$	$0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
Sukinio magnetinis	$m_s$	$\pm 1/2$

lentelė: Atomo elektrono būseną nusakantys kvantiniai skaičiai

Lygmenyje su pagrindiniu kvantiniu skaičiumi  $n$  gali būti

$$2 \sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = 2n^2 \text{ elektronų.}$$

Uždariems sluoksniams arba pasluoksniams  $\sum m_s = 0$  ir  $\sum m = 0$ . Tokiu atveju elektronai yra suporuoti ir nėra valentinių elektronų. Tokie atomai būna chemiškai inertiniai. Pavyzdys - minėtasis argonas.

# Sluoksninis branduolio modelis

Branduolio fizikoje magiškieji skaičiai yra šie:

## Magiškieji skaičiai

$$N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. \quad (15)$$

$$Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82. \quad (16)$$

Branduoliai su magiškaisiais nukleonų skaičiais turi daugiau stabilių izotopų. Jie turi mažą elektrinį dipolinį momentą; sumažėjusį neutronų pagavos skerspjūvį lyginant su kaimyniniais branduoliais.



## Sluoksninis branduolio modelis

Didelis žingsnis į priekį magiškųjų skaičių kilmės supratime buvo 1949 m. M. Majer (M. Mayer) ir D. Dženseno (D. Jensen) pasiūlymas pridėti prie nukleonų potencialo orbitinės–sukininės sąveikos narį. Potencialas užrašomas taip:

### Potencialas

$$V = V_c(r) + V_{ls}(r)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}, \quad (17)$$

čia  $\mathbf{L}$  ir  $\mathbf{S}$  yra orbitinio ir sukulinio judesio kiekio momentų operatoriai. Centrinis ir sąveikos potencialai  $V_c$  ir  $V_{ls}$  yra radialiosios koordinatės funkcijos. Atkreipsime dėmesį į tai, kad  $V_c$  nėra Kulono sąveikos potencialo pavidalo.

Kadangi susidūriame su  $\mathbf{L}$  ir  $\mathbf{S}$  sąveikos nariu, tai kvantiniai skaičiai  $m$  ir  $m_s$  daugiau 'geri'. Mes turime operuoti su tikrinėmis pilnutinio judesio kiekio momento  $\mathbf{J}$  būsenomis.

## Sluoksninis branduolio modelis

Judesio kiekio momentas  $\mathbf{J}$  apibrėžiamas kaip  $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ , todėl

$\mathbf{J}^2$

$$\mathbf{J}^2 = \mathbf{L}^2 + \mathbf{S}^2 + 2\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \quad (18)$$

arba

$\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} = \frac{1}{2}(\mathbf{J}^2 - \mathbf{L}^2 - \mathbf{S}^2). \quad (19)$$

Iš čia gauname, kad laukiamos operatoriaus  $\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$  vertės  $\langle ls \rangle$  yra

$\langle ls \rangle$

$$\langle ls \rangle = \frac{\hbar^2}{2} [j(j+1) - l(l+1) - s(s+1)] = \hbar^2 \begin{cases} l/2 & j = l + 1/2 \\ -(l+1)/2 & j = l - 1/2 \end{cases} \quad (20)$$

## Sluoksninis branduolio modelis

Čia kiekvienam nukleonui priskiriamas tam tikras orbitinis kvantinis skaičius  $l$  ir jam atitinkantis judesio kiekio momentas  $\sqrt{l(l+1)}\hbar$ . Be to, kiekvienas nukleonas turi sukinį  $\sqrt{s(s+1)}\hbar$  (ir jam atitinkantį sukinio projekcijos kvantinį skaičių  $m_s = \pm\frac{1}{2}$ ). Sukinys sudėtas su orbitiniu judesio kiekio momentu sudaro atstojamąjį momentą, kurio kvantinis skaičius  $j = l \pm s$ . Pilnutinis nukleono momentas  $j$  gali turėti  $2j + 1$  projekcijos kvantavimo ašies kryptimi verčių, kurioms atitinka skirtingi magnetiniai kvantiniai skaičiai  $m$  ( $m = -j, -j + 1, \dots, +j$ ).

Iš (20) matome, kad atstumas tarp suskilusių lygmenų yra

### Lygmenų suskilimas

$$\Delta E_{ls} = \frac{2l+1}{2} \hbar^2 \langle V_{ls} \rangle. \quad (21)$$

$\langle V_{ls} \rangle$  yra neigiamas, taigi  $j = l + 1/2$  lygmuo yra žemesnis nei  $j = l - 1/2$  lygmuo. Tai yra atvirkštinė situacija nei atomuose.

## Sluoksninis branduolio modelis

Be to, iš (21) lygybės matome, kad suskilimas auga tiesiškai didėjant  $l$ . Dėl to gali atsirasti persikirtimas tarp lygmenų.

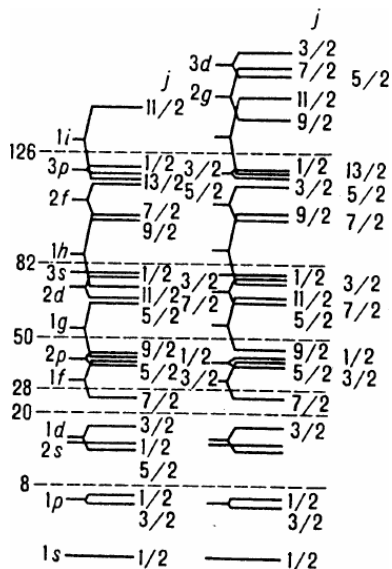
Tokiu būdu kiekvienas lygmuo žymimas pagrindiniu ir orbitiniu (vietoje pastarojo rašoma atitinkama raidė  $s, p, d, f, \dots$ ) kvantiniais skaičiais bei dešinėje apačioje žymint pilnutinį momentą  $j$ . Pavyzdžiui,  $2p_{3/2}$  reiškia, kad lygmens pagrindinis skaičius yra 2, orbitinis  $l = 1$ , o pilnutinis momentas  $j = l + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$ . Šiame lygmenyje yra  $2j + 1 = 4$  būsenos, į kurias pagal Paulio principą "telpa" iki 4 nukleonų-fermionų. Esminis skirtumas nuo atomo teorijos čia yra tas, kad branduolio lygmens pagrindinis kvantinis skaičius gali būti ir mažesnis už orbitinį kvantinį skaičių, nes potencialas nėra Kulono.

Viendalelio artinio tinkamumas branduoliui, kaip labai tankiai sistemai, paaiškinamas tuo, kad nors branduolyje ir vyksta labai dažni nukleonų susidūrimai, tačiau susidūrimai yra tamprūs, nes visi nukleonai užima žemiausius energijos lygmenis ir susidūrimų metu negali savo energijos atiduoti kitai dalelei.

# Sluoksninis branduolio modelis

Sluoksninis branduolio modelis gerai tinka aiškinant lengvų ir vidutinių branduolių pagrindines savybes, kai jie nesužadinti arba silpnai sužadinti, magiškujų skaičių prasmę, įvairių branduolių patvarumo laipsnį, jų savybių kitimo periodiškumą. Magiškieji skaičiai atitinka tam tikrų branduolio būsenų sluoksnių arba posluoksnių pilnam užpildymui. Jei dalelės užpildo tam tikrą lygmenį, tai jų atskiri momentai susikompensuoja ir bendras visos sistemos momentas yra lygus nuliui. Tokiose būsenose nukleonai yra stipriausiai surišti ir sudaro sferiškai simetrinę sistemą.

# Sluoksninis branduolio modelis



Sluoksninio atomo branduolio energijos lygmenys. Iš kairės pažymėti pagrindinis ir orbitinis kvantiniai skaičiai, iš dešinės – pilnutinio momento kvantinis skaičius  $j$ . Viena lygmenų grupė atitinka neutronų būsenoms, kita – protonų. Kairėje surašyti nukleonų skaičiai reikalingi užpildyti visus žemesnius sluoksnius iki punktyru pažymėtos linijos. Šie skaičiai ir yra branduolio magiškieji skaičiai.

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Apibendrintasis branduolio modelis

Atomo branduolio tyrimų metu atskleidžiami vis nauji efektai, gaunama naujų duomenų. Daugelio jų nei lašelinis, nei sluoksninis modeliai paaiškinti negali. Tam kuriami nauji modeliai, sintezuojantys lašelinį su sluoksniniu arba kt. Tokių apibendrintųjų modelių esmė – kolektyvinė centrinė branduolio dalis ir sluoksninė išorinė dalis. Apibendrintieji branduolio modeliai taikomi visų pirma sužadintųjų branduolių savybių ir procesų aiškinimui.



# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Stabiliesiems nuklidams būdingas tam tikras pusiausvyrusis neutronų ir protonų santykis. Jei susidaro nuklidas, kuriame nukleonų skaičiai neatitinka pusiausvyrų, su protonų arba neutronų pertekliumi, jis būna nestabilus ir po  $\beta^+$  arba  $\beta^-$  skilimo virsta stabiliu.
- Sunkieji branduoliai su dideliu protonų skaičiumi yra nestabilūs dėl tarp protonų veikiančios stūmos jėgos, kuri stengiasi juos išstumti iš branduolio. Dėl to daugelis sunkiųjų branduolių yra  $\alpha$  radioaktyvieji ir kiekvieno  $\alpha$  skilimo metu jų protonų skaičius sumažėja dviem.
- Branduolio skilimas turi būti energetiškai naudingas, t.y. po skilimo naujojo branduolio ir visų atsiradusių dalelių masių suma turi būti mažesnė už pradinio branduolio masę.

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

# Radioaktyvumas

Radioaktyvumu vadinamas nestabiliųjų atomų branduolių savaiminis kitimas, kurio metu išspinduliuojami lengvesni branduoliai (dalijimosi skeveldros,  $\alpha$  dalelės) arba subatominės dalelės (elektronai, pozitronai, neutronai, protonai,  $\gamma$  kvantai). Gamtoje randama apie 300 įvairių elementų radioaktyviųjų izotopų. Jų radioaktyvumas vadinamas gamtiniu. Gamtinį radioaktyvumą 1898 m. aptiko prancūzų fizikas A. Bekerelis. 1934 m. prancūzų mokslininkai I. Kiuri ir F. Žolio-Kiuri (Joliot-Curie) bombarduodami lengvus elementus  $\alpha$  dalelėmis atrado naują reiškinį – dirbtinį radioaktyvumą. Dabar žinoma apie 2000 dirbtinių radioaktyviųjų nuklidų.

Radioaktyvumui priskiriama:

- alfa skilimas;
- visi beta skilimai;
- protoninis radioaktyvumas;
- sunkiųjų branduolių savaiminis dalijimasis.

Gamtinio ir dirbtinio radioaktyviųjų skilimų savybės ir dėsniai yra tokie pat.

# Radioaktyvumas



Iren ir Frederikas Žolio-Kiuri. 1935 Nobelio premija.

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

## Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai

Radioaktyvusis skilimas yra statistinis reiškinys. Negalima nustatyti, kada nestabilus atomo branduolys suskils. Galima tik nustatyti skilimo tikimybę per tam tikrą laiko tarpą. Skilimo spartą nusako skilimo konstanta  $\lambda$  – tikimybė branduoliui suskilti per laiko vienetą. Atskiri atomo branduoliai skyla nepriklausomai, todėl per mažą laiko tarpą  $dt$  suskilusių branduolių skaičius  $dN$ , kuriuo sumažės nestabiliųjų branduolių skaičius, proporcingas nestabiliųjų branduolių skaičiui  $N$  ir laikotarpiui  $dt$ , t.y.

### Radiaktyviojo skilimo dėsnis

$$dN = -\lambda N dt. \quad (22)$$

Minuso ženklas parodo, kad nestabiliųjų branduolių skaičius mažėja.

## Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai

Suintegravę lygtį (22) gauname *radioaktyviojo skilimo dėsnį*

### Radiaktyviojo skilimo dėsnis

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (23)$$

čia  $N_0$  – pradinis (laiko momento  $t = 0$ ) branduolių skaičius. Formulė (23) leidžia apskaičiuoti, kiek nesuskilusių branduolių bus laiko momentu  $t$ , jeigu pradiniu laiko momentu  $t = 0$  jų buvo  $N_0$ .

Laiko tarpas  $T$ , per kurį suskyla pusė pradinių branduolių, vadinamas *skilimo pusamžiu*. Iš lygybės (23)

### Radiaktyviojo skilimo dėsnis

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T} \quad (24)$$

seka (žr. kitą skaidrę)



# Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai

## Skilimo pusamžis

$$T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda. \quad (25)$$

Radioaktyvaus skilimo dėsnį galima užrašyti ir taip:

## Radiaktyviojo skilimo dėsnis

$$N = N_0 2^{-t/T}. \quad (26)$$

*Vidutinė gyvavimo trukmė*  $\tau$  lygi visų atomo branduolių gyvavimo iki suskilimo vidurkiui (amžių sumai padalintai iš bendro branduolių skaičiaus  $N_0$ ). Laiko momentu  $t$  per laiko intervalą  $dt$  suskylančių branduolių skaičius  $\lambda N(t)dt$  gyvavo laiką  $t$ . Vadinasi, vidutinė gyvavimo trukmė

## Vidutinė gyvavimo trukmė

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (27)$$

# Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai

Taigi

Trukmės

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = 1,44T; \quad (28)$$

$$T = \tau \ln 2 = 0,693\tau; \quad (29)$$

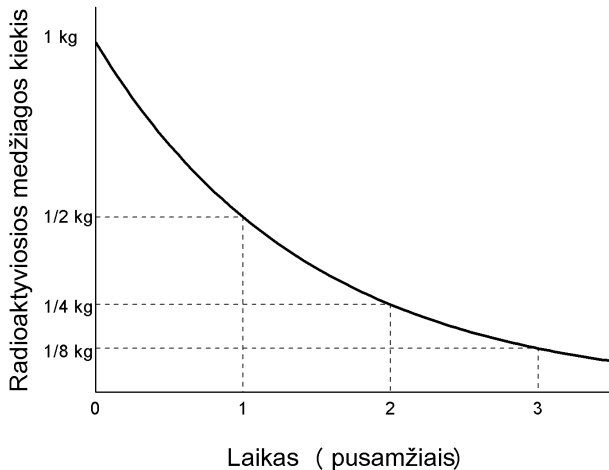
$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}. \quad (30)$$

Per laiko tarpą  $t = \tau$  radioaktyviųjų branduolių skaičius sumažėja  $e = 2,718\dots$  karto.

Radioaktyviojo skilimo sparta nepriklauso nuo to, ar radioaktyvieji atomai yra laisvi, ar junginyje su kitais atomais. Nepriklauso ir nuo kūno temperatūros, slėgio bei kitų įvairių poveikių. Minėti poveikiai keičia atomo elektroninę būseną, tačiau nekeičia branduolio būsenos.

*Radioaktyvusis skilimas yra branduolinis procesas.*

## Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai



Radioaktyviosios medžiagos mažėjimas, vykstant jos skilimui. Pradiniu laiko momentu  $t = 0$  medžiagos buvo 1 kg.

## Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai

Laikui bėgant nesuskilusių branduolių skilimo sparta nekinta. Vadinasi, radioaktyvieji atomai "nesensta". Susidaręs po radžio skilimo radono atomas turi vienodą tikimybę suskilti per pirmąją sekundę ir per sekundę praėjus keletui skilimo pusamžių (jeigu iki to laiko jis "netyčia" nesuskilo).

Suskilusių per tam tikrą laiko tarpą  $\Delta t$  branduolių skaičius yra atsitiktinis. Tikimybę, kad per laiko intervalą suskils  $n$  branduolių  $P_n$  gauname iš Puasono skirstinio

### Puasono skirstinys

$$P_n = \frac{(\bar{n})^n e^{-\bar{n}}}{n!}. \quad (31)$$

Čia  $\bar{n}$  – vidutinis per laiko tarpą  $\Delta t$  suskylančių branduolių skaičius.

## Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai

Puasono pasiskirstymo dispersija lygi vidurkiui:  $\sigma^2 = D = \overline{n^2} - (\overline{n})^2 = \overline{n}$ , o santykinis nuokrypis nuo vidurkio mažėja didėjant vidurkiui:  $\frac{\sigma}{\overline{n}} = \frac{1}{\sqrt{\overline{n}}}$ .

Taigi, esant nusistovėjusioms sąlygoms per vienodus laiko tarpus suskylančių branduolių skaičius fliktuoja apie vidurkį  $\overline{n}$ , o standartinio nukrypimo nuo vidurkio intervalas yra  $(\overline{n} - \sqrt{\overline{n}}, \overline{n} + \sqrt{\overline{n}})$ .

# Turinys

## 1 Branduolio modeliai

- Lašelinis branduolio modelis. Vajczerio formulė
- Izotopai, izobarai, izotonai
- Magiškieji skaičiai
- Sluoksninis branduolio modelis
- Apibendrintasis branduolio modelis

## 2 Nestabilūs branduoliai. Radioaktyvumas

- Radioaktyvumas
- Bendrieji radioaktyviojo skilimo dėsniai
- Aktyvumas ir jo vienetai

## Aktyvumas ir jo vienetai

Praktikoje didelę reikšmę turi ne radioaktyviosios medžiagos kiekis, o kiek skilimų per laiko vienetą joje įvyksta ir kiek išspinduliuojama dalelių. Skilimų skaičius per laiko vienetą vadinamas aktyvumu. SI aktyvumo vienetas yra *bekereelis* (Bq) – vienas skilimas per 1 s.  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ . Tai labai mažas aktyvumas. Todėl praktikoje dar naudojami nesisteminiai aktyvumo vienetai *kiuris* (Ci) ir *rezerfordas* (Rd).

## Aktyvumas ir jo vienetai

Rezerfordas yra toks radioaktyviosios medžiagos aktyvumas, kai joje per 1 s įvyksta  $10^6$  branduolių skilimo aktų:

### Rezerfordas

$$1 \text{ Rd} = 10^6 \text{ Bq} = 10^6 \text{ s}^{-1}. \quad (32)$$

Kiuris – aktyvumas radioaktyviojo preparato, kuriame per 1 s įvyksta  $3,7 \cdot 10^{10}$  branduolių skilimo aktų:

### Kiuris

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37000 \text{ Rd} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1}. \quad (33)$$

1 Ci atitinka aktyvumui radono, esančio radioaktyvioje pusiausvyroje su 1g radžio.

Kiuris yra labai didelis aktyvumas, todėl vartojami ir mažesni vienetai milikiuris ( $1 \text{ mCi} = 37 \text{ Rd}$ ) ir mikrokiuris ( $1 \mu\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ Bq}$ ).