

BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenį
XIV paskaita

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

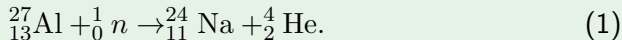
1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Branduolių dalijimosi atradimas

Neutrono atradimas buvo svarbus įvykis tiriant branduolines reakcijas. Kadangi neutronai neturi krūvio, tai jie be pasipriešinimo prasiskverbia į atomų branduolius ir sukelia jų virsmus. Pavyzdžiui, vyksta tokia reakcija:

Branduolio dalijimosi reakcija



Italų fizikas Enrikas Fermi pirmasis pradėjo tyrinėti neutronų sukeltas reakcijas ir nustatė, kad vienus branduolius paverčia kitais ne tik greitieji, bet ir lėtieji neutronai.

Beje, lėtieji neutronai dažniausiai kur kas efektyvesni už greituosius. Todėl greitintuvuose neutronus tikslinga sulėtinti. Jie sulėtinami paprastame vandenyje. Mat jame yra daug vandenilio branduolių – protonų, kurių masė beveik lygi neutronų masei. O susidūrus vienodos masės rutuliams, kinetinė energija perduodama efektyviausiai.

Branduolių dalijimosi atradimas

Veikiant uraną lėtiesiems neutronams, faktiškai atsirasdavo Mendelejevo lentelės vidurinėsios dalies elementai. Tačiau Fermis čia neįžvelgė urano branduolių dalijimosi.

1938 m. vokiečių fizikai O. Hanas ir F. Štrasmanas neutronais apšaudomame urane aptiko periodinės elementų lentelės vidurio elementus barį ir lantaną. Šį reiškinį išaiškino kiti du vokiečių fizikai O. Frišas ir L. Meitner. Pagal juos, neutroną sugėręs urano branduolys dalijasi į dvi panašaus didumo dalis – dalijimosi skeveldras. Taigi priverstinai pasidalijus sunkiam branduoliui, susidaro nauji, periodinės lentelės viduryje esantys elementai.

Branduolių dalijimosi atradimas

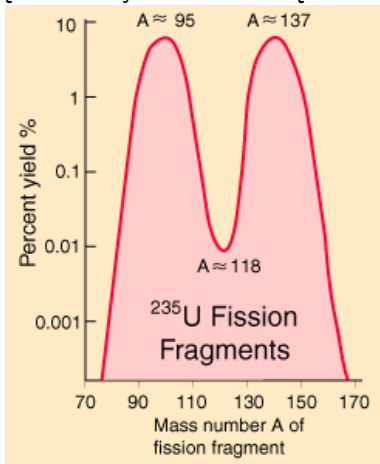
Tuo pat laiku I. Kiuri ir P. Savičius (P. Savič) po $U+n$ reakcijos rado naują medžiagą su pusamžiu $T = 3,5$ h, kurios cheminės savybės buvo tokios pat kaip elemento lantano (La, $Z = 57$), o tai buvo visai nesuprantama. Tyrimus toliau tęsė O. Hanas ir F. Štrasmanas ir, be to, dar konstatavo, kad atsiranda taip pat Ba ($Z = 56$). Po šių rezultatų 1939 m. jie paskelbė apie naujo tipo branduolinę reakciją – branduolio dalijimąsi.

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- **Branduolių dalijimosi ypatumai**
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Branduolių dalijimosi ypatumai

Vėlesni tyrimai parodė, kad urano dalijimasis yra statistinio pobūdžio, t.y. gali susidaryti per 80 įvairaus dydžio skeveldrų.



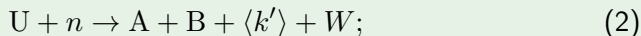
$^{235}_{92}\text{U}$ izotopo skeveldrų išeiga skaldant šiluminiais ar lėtaisiais neutronais.

Branduolių dalijimosi ypatumai

Paveiksle matyti, kad didžiausia yra tikimybė susidaryti skeveldroms, kurių masių santykis $2/3$.

Dalijantis išsilaisvina keletas neutronų. Šio dalijimosi schema:

Urano dalijimosi reakcija

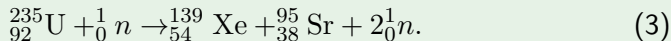


čia A ir B – branduolio dalijimosi skeveldros, $\langle k' \rangle$ – vidutinis antrinių neutronų skaičius, W – išsiskyrusios energijos kiekis. Urano branduoliams vidutiniškai $\langle k' \rangle \approx 2,5$. Antriniai neutronai išsiskiria todėl, kad A ir B skeveldrose neutronų santykis su protonais viršija šį santykį vidutinės masės branduoliams. Didžioji dalis (99,25 proc.) antrinių neutronų išsiskiria per laiką, trumesnį kaip 10^{-14} s, likusieji vėluoja nuo 0,05 s iki 1 min. Todėl pastarieji vadinami *vėluojančiais antriniais neutronais*.

Branduolių dalijimosi ypatumai

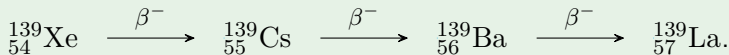
Tačiau dar ir po dalijimosi skeveldrų neutronų santykis su protonais yra didesnis už šiems elementams būdingą santykį. Todėl dauguma dalijimosi skeveldrų yra β^- radioaktyvios. Kadangi šis skilimas yra neutrono virsmas protonu, tai po keleto skilimo aktų skeveldros protonų ir neutronų santykis atitinka stabiliam izotopui būdingą didumą. Pavyzdžiui, urano izotopo ${}_{92}^{235}\text{U}$ branduolys gali dalytis ir šitaip:

Urano dalijimosi reakcija



Po trijų β^- skilimo aktų dalijimosi skeveldra ${}_{54}^{139}\text{Xe}$ virsta stabilium lantano izotopu:

β^- skilimai



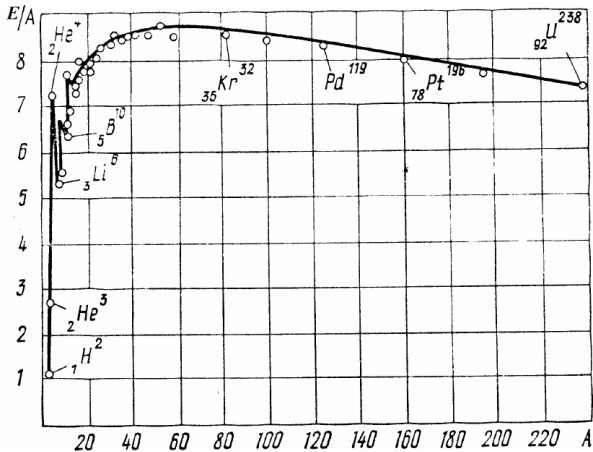
Branduolių dalijimosi ypatumai

β^- skilimą lydi elektroninių antineutrinų ir γ kvantų spinduliavimas.

Sunkusis branduolys gali skilti, nes jo rimties masė didesnė už dalijantis susidariusių skeveldrų masių sumą. Būtent dėl to išsiskiria didelė energija, proporcinga dalijimosi reakcijoje susidariusiam rimties masės sumažėjimui. Beje visa masė nepakinta, nes dideliu greičiu judančių skeveldrų masė didesnė už jų rimties masę.

Sunkiųjų branduolių dalijimąsi galima paaiškinti ir remiantis specifinės ryšio energijos priklausomybės nuo masės skaičiaus A grafiku (kita skaidrė).

Branduolių dalijimosi ypatumai



Nukleonų savitosios ryšio energijos priklausomybė nuo branduolio masės skaičiaus

Branduolių dalijimosi ypatumai

Atomų, kurie užima periodinėje sistemoje paskutiniąsias vietas ($A > 200$), branduolių specifinė ryšio energija maždaug 1 MeV mažesnė už periodinės sistemos viduryje esančių elementų ($A \approx 100$) atomų branduolių specifinę ryšio energiją. Todėl sunkiųjų branduolių dalijimasis į periodinės elementų sistemos vidurinės dalies elementus yra "energijos požiūriu naudingas". Po dalijimosi sistema pereina į būseną, kurios vidinė energija yra mažiausia. Juk juo didesnė branduolio ryšio energija, juo didesnė energija išsiskiria, susidarant branduoliui, ir, antra vertus, juo mažesnė susidariusios sistemos vidinė energija.

Branduolių dalijimosi ypatumai

Dalijantis branduoliui, savitoji ryšio energija padidėja apie 1 MeV. Vadinasi, išsiskyrusi energija turėtų pasiekti milžinišką dydį – apie 200 MeV. Jokiose kitose branduolinėse reakcijose (nesusijose su dalijimusi) neišsiskiria tokios didelės energijos. Dalijantis urano ${}_{92}^{235}\text{U}$ branduoliui išsiskirianti energija buvo tiesiogiai išmatuota. Šis spėjimas patvirtino – buvo nustatytas apytiksliai 200 MeV dydis. Be to, didesnė šios energijos dalį (168 MeV) sudarė skeveldrų kinetinė energija.

Branduoliams dalijantis išsiskirianti energija yra elektrostatinės, o ne branduolinės kilmės. Didesnę skeveldrų kinetinę energiją lemia Kulono stūmos jėgos.

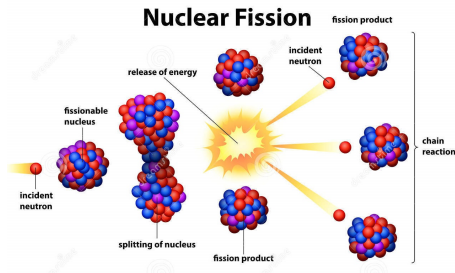
1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- **Branduolio dalijimosi mechanizmas**
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Branduolio dalijimosi mechanizmas

Atomo branduolio dalijimasį galima paaiškinti branduolio lašeliniu modeliu. Pagal šį modelį nukleonų debesėlis panašus į įelektrinto skysčio lašelį. Branduolinės jėgos tarp nukleonų, kaip ir jėgos tarp skysčio molekulių, veikia trumpais atstumais. Kartu su didžiulėmis elektrostatinėmis protonų stūmos jėgomis, kurios stengiasi suskaidyti branduolį, veikia ir didelės branduolinės traukos jėgos. Jos neleidžia branduoliui suirti.

Branduolio dalijimosi mechanizmas



Urano-235 branduolys yra rutulio formos. Absorbavęs neutroną, branduolys susižadina ir pradeda deformuotis, temptis. Jis "tempiasi" tol, kol stūmos jėgos tarp ištęsto branduolio galų pasidaro didesnės už "kaklelyje" veikiančias sankibos jėgas. Po to branduolys sprogs į dvi dalis. Kulono stūmos jėgų veikiamas, šios skeveldros išsilaksto greičiu, lygiu $1/30$ šviesos greičio.

Branduolio dalijimosi mechanizmas

Neutronų išmetimas dalijantis branduoliui. Svarbiausia, kad, dalijantis branduoliui, išlekia du trys neutronai. Būtent dėl to galima praktiškai panaudoti branduolio vidinę energiją.

Kodėl atsiranda laisvieji neutronai, galima paaiškinti taip. Žinome, kad santykinis neutronų skaičius stabiliose branduoliuose didėja didėjant atominiams numeriai. Todėl kiekvienoje skeveldroje esančių neutronų ir protonų skaičių santykis yra didesnis negu Mendelejevo lentelės vidurinėsios dalies elementų atomų branduoliuose. Dėl to, dalijantis branduoliui, keletas neutronų tampa laisvi. Jų energija būna įvairi – nuo kelių milijonų elektronvoltų iki visiškai mažų, artimų nuliui, verčių.

Branduolio dalijimosi mechanizmas

Dažniausiai branduolys dalijasi į nevienodos masės skeveldras, kurios būna labai radioaktyvios, nes turi neutronų perteklių. Po β skilimų serijos galiausiai susidaro stabilūs izotopai.

Reikėtų pasakyti, kad urano branduoliai dalijasi ir *spontaniškai* (savaime). Šį reiškinį aptiko G. Fliorovas ir K. Petržakas. Spontaninio dalijimosi pusamžis lygus 10^{16} metų. Jis 2 milijonus kartų didesnis už urano α skilimo pusamžį.

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- **Aktyvacijos energija**
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Aktyvacijos energija

Teorinis dalijimosi nagrinėjimas panaudojant lašelinį branduolio modelį parodė, kad jis galimas sunkesniems branduoliams, kurių masės skaičius A yra didesnis už 100. Kad dalijimasis yra energetiškai naudingas, matėme iš nukleonų savitosios energijos eigos. Urano atveju (235 nukleonai) išsilaisvinusi energija bus apytiksliai 200 MeV.

Tačiau branduolio nukleono persigrupavimui, kuris dalija jį į 2 skeveldras, iš pradžių reikalinga tam tikra deformacija. Jai įvykdyti būtina aktyvacijos energija E_{akt} potencialo barjerui nugalėti. Deformacijos metu pasireiškia paviršiaus įtempimo ir Kulono jėgos, kurių poveikį galima įvertinti iš Vaiczekerio formulės.

Aktyvacijos energija

Vaiczekerio formulėje paviršiaus įtempimo jėgos stengiasi sumažinti branduolio paviršių iki rutulio, kurio paviršiaus energija yra mažiausia:

Paviršiaus įtempimo energija

$$E_{\text{pav}} = a_2 A^{2/3}. \quad (4)$$

Kulono stūmos jėgos stengiasi suskaidyti branduolį į dalis. Kulono energijos išraiška

Kulono stūmos energija

$$E_{\text{Kul}} = a_3 Z^2 A^{-1/3}. \quad (5)$$

Deformuoto branduolio ateitis priklauso nuo šių energijų santykio. Jei $E_{\text{pav}} > E_{\text{Kul}}$, deformuotas branduolys grįžta į rutulio pavidalą, o jei $E_{\text{pav}} < E_{\text{Kul}}$ – branduolys deformuojasi ir suskyla.

Aktyvacijos energija

Taigi branduolio dalijimasis priklauso nuo santykio

Kulono/Paviršiaus įtempimo santykis

$$\frac{E_{\text{Kul}}}{E_{\text{pav}}} = \frac{a_3 Z^2 A^{-1/3}}{a_2 A^{2/3}} = \text{const} \frac{Z^2}{A}. \quad (6)$$

Krizinė santykio $\frac{Z^2}{A}$ vertė yra 45. Jei $\frac{Z^2}{A} > 45$, branduolys dalijasi, jei $\frac{Z^2}{A} < 45$, jis gali būti stabilus. Lengva patikrinti, kad nuklido ${}_{92}^{236}\text{U}$ šis santykis yra $\frac{92^2}{236} \approx 36$, taigi jo dalijimuisi reikalinga aktyvacijos energija, kuri įgyjama iš įėjusio į branduolį neutrono ryšio energijos.

Aktyvacijos energija

Sunkiųjų branduolių periodinės elementų sistemos gale aktyvacijos energija yra tarp 4 MeV ir 7 MeV, maždaug tame pačiame intervale yra ir neutrono ryšio energija, kurios pakanka arba nepakanka aktyvacijos energijai pasiekt. Ypatingą reikšmę branduolinei energetikai turi urano izotopų ^{235}U (0,7 proc.), ^{238}U (99,3 proc.) ir ^{239}Pu sugretinimas, pateiktas lentelėje.

Nuklidai	Neutrono ryšio energija, MeV	Aktyvacijos energija, MeV	Dalijimasis nuo šiluminio neutrono
$^{235}\text{U}+n \rightarrow ^{236}\text{U}$	6,54	5,8	vyksta
$^{238}\text{U}+n \rightarrow ^{239}\text{U}$	4,78	6,3	nevyksta
$^{239}\text{Pu}+n \rightarrow ^{240}\text{Pu}$	6,52	4,8	vyksta

Aktyvacijos energiją branduoliams taip pat galima suteikti bombarduojant sunkiuosius branduolius protonais, deutonais, α dalelėmis ir didelių energijų γ fotonais. Juo lengvesni yra branduoliai, tuo santykis $\frac{Z^2}{A}$ yra mažesnis (toliau nuo krizinės vertės, kuri apytiksliai lygi 45) ir aktyvacijos energija yra didesnė.

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- **Dalijimosi energija**
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Dalijimosi energija

Dalijimosi energija, palyginus su kitų branduolinių reakcijų energija, yra labai didelė. Įvairiems sunkiesiems nuklidams ji šiek tiek skiriasi, o bendras jos dydis yra apytiksliai 200 MeV. Dalijimosi $^{235}\text{U}+n$ atveju ji pasiskirsto taip:

- skeveldrų kinetinė energija: 165 MeV
- γ spinduliai: 8 MeV
- neutronų kinetinė energija: 6 MeV
- skeveldrų radioaktyviojo skilimo β ir γ energija: 21 MeV
- iš viso: 200 MeV

Prie išsiskiriančios energijos reiktų dar pridėti apie 10 MeV neutrinių išnešamos energijos, kuri dalijimosi sistemoje nepasilieka. Visa išvardyta energija, kuri lieka sistemoje, galų gale paverčiama šiluma.

Dalijimosi energija

Dalijimosi neutronų energijos spektras maždaug atitinka Maksvelo greičių pasiskirstymą, kai maksimumas pasiekiamas ties 0,7 MeV ir vidutinė kinetinė energija $E \approx 2$ MeV.

Galima paskaičiuoti, kad 1 W galiai pasiekti reikia $3,1 \cdot 10^{10}$ dalijimųsi per sekundę (Bq).

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- **Momentiniai ir vėluojantieji neutronai**
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Momentiniai ir vėluojantieji neutronai

Dalijimosi reakcijoje išsiskiria dažniausiai 2 arba 3 neutronai ir dauguma jų yra vadinamieji *momentiniai* neutronai, kurie atsiranda dalijimosi momentu. Tačiau kai kurie iš jų atsiranda kiek vėliau, jie vadinami *vėluojančiais* neutronais. Šis vėlavimas gali būti net iki kelių minučių, ir tų neutronų skaičius kinta panašiai kaip radioaktyviųjų nuklidų – pagal eksponentinį dėsnį su tam tikru pusamžiu.

Vėluojančių neutronų skaičius nėra didelis, visi jie kartu sudaro 1,6 proc. bendro neutronų skaičiaus. Vėluojantieji neutronai pagal savo pusamžius skirstomi į 6 grupes, jos yra labai panašios įvairiose dalijimosi reakcijose. Duomenys apie $^{235}\text{U} + n$ reakcijos neutronus pateikti lentelėje (kita skaidrė).

Momentiniai ir vėluojantieji neutronai

Grupės numeris	Pusamžis, s	Santykinis skaičius	Vidutinė energija, keV
1	55,7	0,03	250 ± 20
2	22,7	0,22	460 ± 10
3	6,22	0,20	405 ± 20
4	2,30	0,39	450 ± 20
5	0,61	0,12	420 ± 60
6	0,23	0,04	–

lentelė: Duomenys apie $^{235}\text{U} + n$ reakcijos neutronus.

Įdomus jų atsiradimo mechanizmas. Po dalijimosi reakcijos atsiranda nuklidai – skeveldros su dideliu neutronų pertekliumi. Po to įvyksta daugybė β^- skilimų su jiems būdingais pusamžiais. Po kai kurių β^- skilimų atsiranda smarkiai sužadinti antriniai nuklidai, kurių sužadinimo energija gali būti didesnė negu neutrono ryšio energija. Tokiu atveju ši energija gali būti išspinduliuota γ kvantais arba tiesiog perduota neutronui, ir jis "išgaruoja".

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- **Savaiminis dalijimasis**
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Savaiminis dalijimasis

1940 m. G. N. Fliorovas (G. N. Fliorov) ir K. A. Petržakas (K. A. Petržak, Sovietų Sąjunga) aptiko, kad urane, visai apsaugotame nuo neutronų poveikio, vyksta savaiminis branduolių dalijimasis, aiškinamas tuneliniu reiškiniu, panašiai kaip α skilimas, pereinant per potencialo barjerą be aktyvacijos energijos. Pirmais eksperimentais jų aparatūra buvo konstatuojami 6 dalijimaisi per valandą. Dalijimosi reiškinys čia konkuruoja su būdingu uranui α skilimu, kurio tikimybė yra apie 10^6 kartų didesnė. Tolesniais tyrimais buvo tiksliai nustatytas urano dalijimosi pusamžis: $T = 8 \cdot 10^{15}$ m., tuo tarpu α skilimo $T = 4,5 \cdot 10^9$ m.

Savaiminis dalijimasis yra reiškinys, būdingas visiems sunkiausiems nuklidams, ir jo tikimybė didesnė esant didesniai atominei skaičiui Z , t.y. didesniai protonų branduolyje skaičiui. Kai $Z > 100$, dalijimosi tikimybės jau yra tokios didelės, kad ši priežastis yra pagrindinė, dėl kurios sunku gauti tuos elementus ir turėti jų atomus tam tikrą ilgesnį laiko tarpą, per kurį būtų galima atlikti kai kuriuos tyrimus. Kai kurių nuklidų savaiminio dalijimosi pusamžiai pateikti lentelėje (kita skaidrė).

Savaiminis dalijimasis

Nuklidas	Savaiminio dalijimosi pusamžiai	Vidutinis neutronų skaičius
${}_{92}^{235}\text{U}$	$1,9 \cdot 10^{17}$ m.	–
${}_{92}^{238}\text{U}$	$8,0 \cdot 10^{15}$ m.	1,6
${}_{94}^{240}\text{Pu}$	$1,2 \cdot 10^{11}$ m.	2,2
${}_{96}^{242}\text{Cm}$	$7,2 \cdot 10^6$ m.	2,6
${}_{98}^{250}\text{Cf}$	$1,5 \cdot 10^4$ m.	–
${}_{98}^{252}\text{Cf}$	85 m.	3,8
${}_{100}^{256}\text{Fm}$	2,7 h	–
${}_{100}^{257}\text{Fm}$	100 m.	–
${}_{104}^{260}\text{Unq}$	0,3 s	–

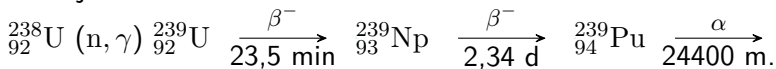
lentelė: Duomenys apie savaiminį dalijimąsi.

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- **Transuraniniai elementai**
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Transuraniniai elementai

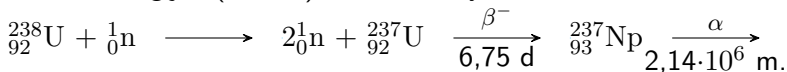
E. Fermis pirmasis iškėlė prielaidą, kad paveikus uraną neutronais galima gauti transuraninius elementus. Pirmuosius tyrimus šia kryptimi prieš 1939 m. labai apsunkino urano dalijimosi produktai, kurių, kaip žinome, yra daug ir kurie buvo priskiriami transuraniniams elementams, nes (n, f) reakcija buvo dar nežinoma. Atradus dalijimosi reakciją pradėta nauja darbų serija jau daug aiškesnėje situacijoje. Visų pirma buvo išaiškinta reakcijos



eiga ir naujam transuraniniam nuklidui su pusamžiu 2,3 d. pasiūlytas pavadinimas neptunis (pagal planetą už urano). Toliau šioje grandinėje atsirado antras transuraninis nuklidas ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ su labai ilgu pusamžiu – 24400 m. Dabar dideliuose branduoliniuose reaktoriuose jo susidaro šimtai kilogramų.

Transuraniniai elementai

Kita reakcija, kuri taip pat vyksta branduoliniuose reaktoriuose veikiant didelės energijos (8 MeV) neutronais, yra

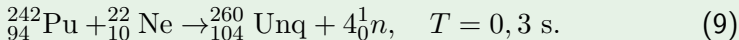
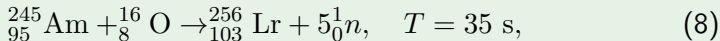
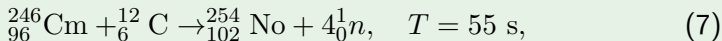


kurios metu atsiranda ilgaaamžis nuklidas ${}_{93}^{237}\text{Np}$ – ketvirtosios radioaktyviosios šeimos ($A = 4n + 1$) pirmapradis elementas. Tai yra patvariausias neptunio izotopas, dideliuose reaktoriuose susidarantis kilogramais.

Kiti transuraniniai elementai su $Z > 94$ gauti veikiant didelės energijos neutronais jau turimus nuklidus su $Z = 93$ ir $Z = 94$, o dar tolesni – bombarduojant α dalelėmis iš didelių greitintuvų. Branduolių krūviam padidinti buvo pritaikyti ciklotronai sunkiesiems jonams greitinti, ir branduolius pradėta bombarduoti jonais ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{8}^{16}\text{O}$, ${}_{8}^{18}\text{O}$, ${}_{10}^{22}\text{Ne}$ su didesniais protonų skaičiais. Žemiau pateikiamos kelios tokio tipo branduolinės reakcijos, kuriose buvo gauti labai tolimi transuraniniai elementai (kita skaidrė).

Transuraniniai elementai

Branduolinės reakcijos



Atkreiptinas dėmesys, kaip didėjant Z ir artėjant prie krizinės vertės $\frac{Z^2}{A} = 45$ trumpėja pusamžiai. Kadangi tų nuklidų gaunami labai maži kiekiai (kartais skaičiuojami pavieniai atomai), eksperimentinės priemonės čia turi būti nepaprastai preciziškos ir tobulos.

Žinomi šie transuraniniai elementai: neptunis, plutonis, americis, kiuris, berklis, kalifornis, einšteinis, fermis, mendelevis, nobelis, laurencis unkvadis, unipentis ir kt.

Transuraniniai elementai

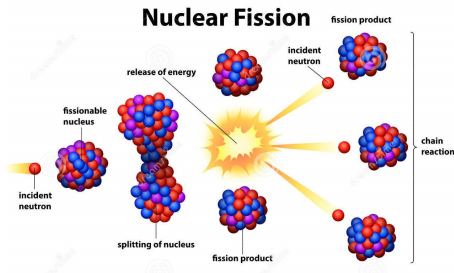
Atradus daugiau transuraninių elementų, ypač paskutinių, ir dar tokiais kiekiais, kurie leido atlikti chemines mikroanalizės tyrimus, paaiškėjo tų elementų vieta periodinėje elementų sistemoje. Pasirodė, kad panašiai kaip 6-ame periode po La eina 14 retųjų žemių elementų (lantanoidai) su $4f$ posluksnį laipsniškai užpildančiais elektronais, taip analogiškoje 7-ojo periodo vietoje po aktinio ${}_{89}\text{Ac}$ eina 14 elementų su elektronais, užpildančiais $5f$. Jie sudaro grupę, pavadinantą aktinoidais. Juos pradeda atomai Th, Pa, U ir po to einai transuranai.

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- **Grandininė reakcija**
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Grandininė reakcija

Urano dalijimosi reakcijai vykdyti reikia iš pradžių vieno neutrono, o jai įvykus, kartu su 2 branduolių skeveldromis atsiranda 2 arba 3 nauji neutronai. Juos galima panaudoti tolesnėms reakcijoms, po kurių dar naujai atsiradę neutronai galės tęsti tas reakcijas toliau ir, jei tik aplinkoje bus pakankamas urano atomų skaičius, labai dideliame tūryje galės vykti grandininė reakcija.



Grandininė reakcija

Palankiomis sąlygomis, jei aplinkoje yra daug urano atomų, reakcija plečiasi labai greit. Tarkime, kad po kiekvieno akto į reakciją įsijungia 2 neutronai. Tada

Grandininė reakcija

Pirmoje kartoje turėsime $k = 2$ neutronų
antroje – $k = 2 \times 2 = 4 = 2^2$ neutronų
trečioje – $k = 4 \times 2 = 8 = 2^3$ neutronų
ketvirtoje – $k = 8 \times 2 = 16 = 2^4$ neutronų,
.....
80-oje – 2^{80} neutronų

Tai jau labai didelis skaičius, apytiksliai 10^{24} neutronų. Kadangi vienos neutronų kartos gyvavimo trukmė yra $10^{-7} - 10^{-8}$ s, tai 80-oji karta atsiras per $10^{-5} - 10^{-6}$ s. Per šį trumpą laikotarpį 10^{24} urano branduolių dalijimasis išlaisvins energijos (kita skaidrė)

Grandininė reakcija

Išlaisvinta energija

$$10^{24} \cdot 200 \text{ MeV} = 2 \cdot 10^{26} \text{ MeV} \approx 2 \cdot 10^{26} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ J}.$$

Žinant, kad naftos kaloringumas yra apie $40 \text{ MJ/kg} = 4 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$, randame, kad per 10^{-5} s tokioje grandininėje reakcijoje išskirtoji energija atitiks šilumos kiekį, išskiriamą sudegus

Palyginimas su naftos deginimu

$$\frac{3 \cdot 10^{13} \text{ J}}{4 \cdot 10^7 \text{ J/kg}} \approx 0,75 \cdot 10^6 \text{ kg} \approx 750 \text{ tonų naftos.}$$

Visa tai vyksta per labai mažą sekundės dalį, taigi, jei tik būtų pakankamas besidalijančių branduolių skaičius, įvyktų nepaprastai stiprus sproginimas. Tokio tipo sproginimas įvyksta atominėje bomboje.

Grandininė reakcija

Panagrinėkime grandininės reakcijos panaudojimo galimybes praktiniams energijos gavimo reikalams. *Valdomai* branduolių dalijimosi grandinei reakcijai tinka 3 nuklidai: ^{235}U , ^{233}U ir ^{239}Pu . Pirmasis mažais kiekiais randamas kaip retasis (0,7 proc.) gamtinio urano izotopas, kiti du gali būti pagaminti pramoniniu būdu.

Praktikoje, ieškant pigesnio būdo dalijimosi energijai grandininės reakcijos būdu gauti, daugiausia naudojamas gamtinis uranas, kurio sudėtyje yra 99,3 proc. urano ^{238}U ir 0,7 proc. ^{235}U . Tokiame urane, sudarius tam tikras sąlygas, galima vykdyti valdomą grandininę reakciją.

Urano izotopai. $^{235}_{92}\text{U}$ branduoliai dalijasi veikiami tiek greitųjų, tiek lėtųjų neutronų. O $^{238}_{92}\text{U}$ branduoliai gali dalytis tik veikiami labai greitų neutronų, kurių energija didesnė negu 1 MeV. Tokią energiją turi maždaug 60 proc. neutronų, atsirandančių dalijantis branduoliui. Tačiau apytiksliai vienas iš penkių neutronų gali sukelti $^{238}_{92}\text{U}$ dalijimąsi. Likusius neutronus nesidalydamas pasiglemžia šis izotopas. Dėl to, naudojant izotopą $^{238}_{92}\text{U}$, grandininės reakcijos sukelti neįmanoma.

Grandininė reakcija

Neutronų daugėjimo koeficientas. Grandininė reakcija vykty, nors ne kiekvienas išsilaisvinęs neutronas keltų branduolio dalijimasį. Tačiau į branduolius turėtų patekti grandininei reakcijai reikalingas neutronų skaičius.

Taip bus, kai *neutronų daugėjimo koeficientas* k bus didesnis už vienetą. Koeficientas k lygus kurios nors "kartos" neutronų skaičiaus ir juos išlaisvinusios "kartos" neutronų skaičiaus santykiui. "Kartų" kaitą reikia suprasti kaip branduolių dalijimasį, kurio metu absorbuojami senosios "kartos" neutronai ir atsiranda nauji neutronai.

Jeigu $k \geq 1$, neutronų skaičius laikui bėgant didėja arba būna pastovus, ir vyksta grandininė reakcija. Jeigu $k < 1$, neutronų skaičius laikui bėgant mažėja, ir grandininė reakcija nevyksta.

Grandininė reakcija

Daugėjimo koeficiento didumą lemia šie keturi veiksniai:

- 1 Absorbavus lėtuosius neutronus urano izotopo ${}_{92}^{235}\text{U}$ branduolių dalijimasis arba absorbavusių greituosius neutronus izotopų ${}_{92}^{235}\text{U}$ ir ${}_{92}^{238}\text{U}$ branduolių dalijimasis.
- 2 Absorbavusių neutronus urano branduolių nesidalijimas.
- 3 Neutronų patekimas į dalijimosi produktus, lėtiklį (apie jį bus toliau) ir įrenginio konstrukcinius elementus.
- 4 Neutronų išlėkimas iš skylančios medžiagos į išorę.

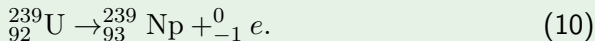
Neutronų skaičius didėja tik pirmajame procese (daugiausia dėl ${}_{92}^{235}\text{U}$ dalijimosi). Kituose jis mažėja. Gryname izotope ${}_{92}^{238}\text{U}$ grandininė reakcija negali įvykti, nes $k < 1$ (nesidalydami branduoliai absorbuoja daugiau neutronų, negu jų susidaro po branduolių dalijimosi).

Grandininė reakcija gali būti pastovi tik tada, kai neutronų daugėjimo koeficientas tiksliai lygus vienetui. Kai $k = 1,01$ beveik akimirksniu įvyksta sproginimas.

Grandininė reakcija

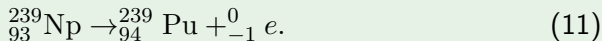
Plutonio susidarymas. Labai svarbu, kad urano izotopo $^{238}_{92}\text{U}$ branduoliai absorbuoja lėtuosius neutronus. Tada susidaro radioaktyvusis izotopas $^{239}_{92}\text{U}$, kurio pusamžis 23 min. Skilus uranui, išmetamas elektronas ir susidaro pirmasis transuraninis elementas – *neptunis*:

Neptunio susidarymas



Neptunis yra β^- radioaktyvus. Jo pusamžis – apie dvi dienos. Skilus neptuniui, susidaro kitas transuraninis elementas – plutonis:

Plutonio susidarymas



Plutonis palyginti stabilus, nes jo pusamžis didelis – maždaug 24000 metų. Svarbiausia plutonio savybė yra ta, kad jis, kaip ir izotopas $^{235}_{92}\text{U}$, dalijasi veikiamas lėtųjų neutronų. Todėl plutonyje taip pat gali vykti grandininė reakcija ir išsiskirti milžiniškas energijos kiekis.

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- **Daugėjimo koeficientas**
- Krizinis dydis

Daugėjimo koeficientas

Kad grandininė reakcija galėtų vykti tam tikroje realioje terpėje, reikia, kad reakcijos eigoje išsiskiriančių neutronų skaičius nemažėtų. Šio skaičiaus kitimą apibrėžia vadinamasis daugėjimo koeficientas k , lygus neutronų skaičiaus tam tikroje kartoje santykiui su neutronų skaičiumi prieš tai buvusioje kartoje. Pagal šį apibrėžimą, jei iš pradžių buvo N neutronų, tai sekančioje kartoje jų bus Nk , o n -oje katoje jau Nk^n . Kai $k = 1$, neutronų skaičius nekinta, grandininė reakcija vyksta pastoviu greičiu, kai $k < 1$, reakcija gęsta, o kai $k > 1$, reakcija plinta (sprogimas). Kai $k = 1$, reakcijos veika vadinama *krizine*, kai $k < 1$ – prieškrizine, ir kai $k > 1$ – virškrizine.

Daugėjimo koeficientas

Pasakytina, kad tos pačios reakcijos daugėjimo koeficientas k , be kitko, priklauso ir nuo terpės, kurioje vyksta reakcija, dydžio, nuo jos geometrijos. Jei terpė būtų be galo didelė, daugėjimo koeficientas būtų didesnis, jis tada žymimas k_{∞} . Realioje baigtinio dydžio terpėje visada tam tikra dalis neutronų išeina iš aktyviosios zonos. Atitinkamai sumažėja daugėjimo koeficientas. Jei tikimybė pasilikti aktyviojoje zonoje yra P , tai

Daugėjimo koeficientas

$$k = Pk_{\infty}. \quad (12)$$

Dydis P priklauso nuo aktyviosios zonos sandaros, jos dydžio ir formos, taip pat nuo to, kaip aplinka atspindi neutronus ir grąžina juos atgal.

1 Branduolių dalijimasis

- Branduolių dalijimosi atradimas
- Branduolių dalijimosi ypatumai
- Branduolio dalijimosi mechanizmas
- Aktyvacijos energija
- Dalijimosi energija
- Momentiniai ir vėluojantieji neutronai
- Savaiminis dalijimasis
- Transuraniniai elementai
- Grandininė reakcija
- Daugėjimo koeficientas
- Krizinis dydis

Krizinis dydis

Nuo neutronų galimybės išlėkti iš aktyviosios zonos priklauso viso įrenginio vadinamasis *krizinis dydis*. Taip vadinamas toks aktyviosios zonos dydis, kuriam esant $k = 1$. Atitinkama aktyviosios zonos masė vadinama *krizine mase*. Aišku, kad esant aktyviosios zonos dydžiui, mažesniau už krizinį, reakcija nevyks, nes dalis neutronų išlėks išorėn. Antra vertus, jei aktyviosios zonos matmenys bus pastebimai didesni už krizinius, reakcija taps nebevaldoma ir įvyks sproginimas. Krizinį dydį atitinka tikimybė

Krizinis dydis

$$P_{\text{kriz}} = \frac{1}{k_{\infty}}. \quad (13)$$

Krizinis dydis, priklausomai nuo aktyviosios zonos išdėstymo, aplinkos savybių ir kitų priešasčių gali svyruoti labai plačiame intervale.

Krizinis dydis

Neutronų tankio pasiskirstymo rutulyje, sudarytame iš gryno ^{235}U , matematiniai skaičiavimai, kai daugėjimo koeficientas pasiekia vertę $k = 1$, t.y. kai gali prasidėti grandininė reakcija, rodo, kad krizinio rutulio radiusas $r_{\text{kriz}} = 8,2 \text{ cm}$. Žinant urano tankį $d = 18,7 \text{ g/cm}^3$, randama krizinio rutulio masė

Krizinė masė

$$m_{\text{kriz}} = 43 \text{ kg.} \quad (14)$$

JAV mokslininkų duomenimis, jei reaguojančią terpę sudaro daug plonų ^{235}U sluoksnių su plonais polietilininiais tarpikliais ir viskas apsupta atspindinčiu berilio apvalkalu, krizinė masė sumažėja iki 242 gramų. Manoma, kad tai yra minimali galima krizinė masė.