

BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015–2018 rudenį
XIII paskaita

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- Neutronų šaltiniai
- Neutronų registravimo metodai
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- Neutronų šaltiniai
- Neutronų registravimo metodai
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- Neutronų šaltiniai
- Neutronų registravimo metodai
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

Neutrono atradimas

Dar 1920 m. Rezerfordas išskėlė prielaidą, kad gali egzistuoti dar du tuo laiku nežinomi branduoliai (nuklidai):

nuklidas, kurio masė $m = 2$ ir krūvis $Z = 1$ (tai būtų deutonas),

nuklidas, kurio masė $m = 1$ ir krūvis $Z = 0$ (tai būtų neutronas).

Eksperimentinės tokių dalelių paieškos tada nedavė rezultatų. Jos buvo atrastos vėliau, išstobulėjus branduolio fizikos tyrimo metodams. O neutrono atradimo istorija tęsėsi beveik 2 metus.

1930 m. H. A. Betė ir H. Bekeris (H. Becker) pastebėjo, kad bombarduojant α dalelėmis lengvus elementus (Be, Li, B ir kt.) gaunama labai skvarbi spinduliuotė, pereinanti storą švino sluoksnį. Didelio skvarbumo iliustracija galėjo būti faktas, kad, pvz., γ spinduliai iš Th(C+C') susilpninami pusiau po 1,5 cm Pb, o spinduliai iš (α +Be) tiek pat susilpninami tik po 5 cm. Laikant ją γ spinduliuote, tektų jau priskirti apytiksliai 5 MeV energijos, o tai atrodė nepriimtina.

Neutrono atradimas

1931 m. I. Kiuri ir F. Žolio konstatavo, kad jei tarp šios spinduliuotės šaltinio ir jonizacijos kameros, panaudotos kaip spinduliuotės detektoriaus, įstatomas sluoksnis medžiagos su vandeniliu – jonizacijos kameroje srovė ne sumažėja, o priešingai, smarkiai padidėja.

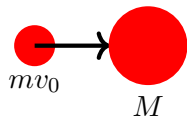
Vėlesni tyrimai, atlikti Vilsono kameroje, parodė, kad dėl šios nematomos ir skvarbios spinduliuotės poveikio kameroje atsiranda daug atatrunkos branduolių, tarp kitko, gaunami protonai su siekiais ore iki 26 cm. Atatrunkos branduoliai buvo gauti taip pat azote ir net kriptone. Tai rodė, kad ši spinduliuotė gali suteikti didelius impulsus net sunkiems branduoliams. Jei tai būtų fotonai, jų energija turėtų būti ne 5 MeV, o apytiksliai 50 MeV.

Neutrono atradimas

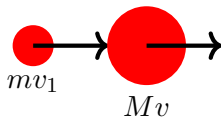
Problemą 1932 m. išaiškino Dž. Čedvikas. Jis pamatavo Vilsono kameroje atatrunkos atomų greičius azote ir vandenilyje ir juos palyginęs nustatė, kad kameroje vyksta tų atomų susidūrimai su nejonizuojančiomis dalelėmis, kurių masė $m \approx 1 u$.

Dž. Čedviko skaičiavimas buvo toks: jei nežinomos dalelės masė yra m , o atomo masė M , tai centrinio susidūrimo metu įvyksta energijos ir judesio kiekio pokyčiai, aprašomi mechanikos dėsniais.

prieš susidūrimą



po susidūrimo



Neutrono atradimas

Energijos lygtis

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}mv_1^2, \quad (1)$$

judesio kiekio lygtis

$$mv_0 = Mv + mv_1. \quad (2)$$

Eliminavę iš šių lygčių v_1 , randame

Greičių santykis

$$\frac{v}{v_0} = \frac{2m}{m + M}. \quad (3)$$

Neutrono atradimas

Buvo ištirti susidūrimai vandenilyje ($M = 1$) ir azote ($M = 14$):

Greičių santykis

$$\frac{v_H}{v_0} = \frac{2m}{m+1} \text{ ir } \frac{v_N}{v_0} = \frac{2m}{m+14}, \quad (4)$$

iš čia

Greičių santykis

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m+14}{m+1}. \quad (5)$$

Greičiai v_H ir v_N buvo išmatuoti eksperimentiškai, ir iš paskutinės lygybės gauta

Masė m

$$m \approx 1,15 \pm 0,12. \quad (6)$$

Neutrono atradimas

Pirmųjų eksperimentų paklaida, nustatant neutrono masę pagal pėdsakų ilgį Vilsono kameroje, buvo gana didelė (apie 10 proc.). Toliau neutrono masė buvo tikslinama kitais metodais, panaudojant branduolines reakcijas, kuriose dalyvauja neutronas ir kiti nuklidai su tiksliai žinomomis masėmis. Parenkami tokie reakcijų ciklai, iš kurių galų gale gaunamas neutrono ir protono masių (arba rimties energijų) skirtumas. Yra žinomi 8 tokie ciklai. Iš jų gaunamas toks neutrono ir protono rimties energijų skirtumas:

Masių skirtumas $n - p$

$$n - p = 1,293 \text{ MeV.} \quad (7)$$

Neutrono atradimas

Palyginimui pateikiamos visų lengviausių branduolio fizikos dalelių masės, išreikštos atominės masės vienetais u :

Masės

$$\begin{aligned}m_p &= 1,007276 \text{ u} = 938,2796 \text{ MeV}, \\m_n &= 1,008665 \text{ u} = 939,5731 \text{ MeV}, \\m_H &= 1,007825 \text{ u} = 938,7906 \text{ MeV}, \\m_e &= 1,000549 \text{ u} = 0,5110 \text{ MeV}.\end{aligned}\tag{8}$$

Neutrono savybės trumpai:

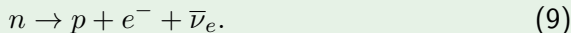
Neutrono sukinytis toks pat kaip protono, būtent jo kvantinis skaičius $s = 1/2$. Taigi neutronas yra fermionas.

Neutrono magnetinis momentas $s = -1,91$ branduolio magnetono, jo kryptis priešinga sukiniio kryptčiai.

Neutrons atradimas

Neutrons ir protono branduolinės savybės labai artimos, pagrindinis skirtumas – yra krūvis ar ne, todėl jie laikomi dviem būsenomis tos pačios elementarios dalelės – nukleono. Neutrons energija yra didesnė, todėl laisvasis neutrons yra nestabilus, skyla.

Neutrons virtimas protonu



Laisvojo neutrons vidutinė gyvavimo trukmė $\tau = 15,3 \text{ min} = 918 \text{ s}$ (jį atitinka pusamžis $T = 636 \text{ s} = 10,6 \text{ min}$). Neutronai stabiliai gali egzistuoti tik branduoliuose, laisvieji neutronai gamtoje nerandami, nėra jų, pavyzdžiui, kosminiuose spinduliuose.

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- **Neutronų ir medžiagos sąveika**
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- Neutronų šaltiniai
- Neutronų registravimo metodai
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

Neutronų ir medžiagos sąveika

Neutronai yra dalelės, neturinčios elektrinio krūvio, todėl jų sąveika su medžiaga, konkrečiai – su atomų branduoliais, yra visai kitokio pobūdžio negu elektringųjų dalelių – protonų, α dalelių, deutronų, elektronų ir kt. Jie nepatiria elektrostatiinių Kulono jėgų, jiems neegzistuoja atstumiantis potencialo barjeras, todėl jie nekliudomi gali priartėti prie pat branduolio, patekti į branduolinių jėgų veikimo sritį ir sąveikauti su kiekvienu branduoliu nepriklausomai nuo jo krūvio. Vis dėlto sąveikos su medžiaga rezultatai, taip pat praktiniai neutronų panaudojimai labai priklauso nuo jų energijos, todėl iš pradžių susipažinsime su neutronų klasifikacija. Energijos kitimo sritys ir kiekvienoje jų tam tikros vienos energijos vertė, kuriai nurodyta atitinkama temperatūra T , vidutinis greitis v ir de Broilio bangos ilgis λ , pateiktos lentelėje.

Neutronų ir medžiagos sąveika

Netronai	Energijos kitimo sritis, eV	E , eV	T , K	v , cm/s	λ , cm
Šaltieji	$<0,01$	0,001	11,6	$4,37 \cdot 10^4$	$9,04 \cdot 10^{-8}$
Šiluminiai	0,01–0,1	0,025	293	$2,20 \cdot 10^5$	$1,80 \cdot 10^{-8}$
Rezonansiniai	0,1–50	1,0	$1,16 \cdot 10^4$	$1,38 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^{-9}$
Lėtieji	50–500	100	$1,16 \cdot 10^6$	$1,38 \cdot 10^7$	$2,86 \cdot 10^{-10}$
Tarpinių energijų	$500-10^5$	10^4	$1,16 \cdot 10^8$	$1,38 \cdot 10^8$	$2,86 \cdot 10^{-11}$
Greitieji	10^5-10^7	10^6	$1,16 \cdot 10^{10}$	$1,38 \cdot 10^9$	$2,86 \cdot 10^{-12}$
Lab. did. energ.	10^7-10^9	10^8	$1,16 \cdot 10^{12}$	$1,38 \cdot 10^{10}$	$2,79 \cdot 10^{-13}$
Reliatyvistiniai	$>10^9$	10^{10}	$1,16 \cdot 10^{14}$	$2,99 \cdot 10^{10}$	$1,14 \cdot 10^{-14}$

Neutronų ir medžiagos sąveika

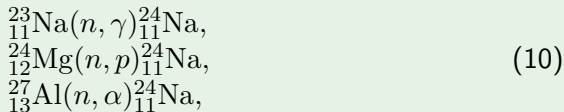
Apšvitinus neutronais įvairias medžiagas, dažniausiai jose sužadinamas vadinamasis *dirbtinis radioaktyvumas*. Neutronai sąveikauja su įvairiais nuklidais ir, jei jų energija nėra labai didelė, vyksta (n,γ) , (n,p) ir (n,α) reakcijos. Visos jos padidina palyginus su protonais, santykinį neutronų skaičių, todėl, jei naujai atsiradęs nuklidas nėra stabilus, jis yra β^- radioaktyvus (neutronų perteklius).

Tokias reakcijas 1934 m. plačiu mastu pradėjo tirti E. Fermi su savo bendradarbiais. Per 40 įvairių elementų buvo apšvitinti neutronais ir ištirti sužadinto radioaktyvumo pusamžiai. Kad eksperimentas vyktų greičiau (svarbu buvo išlaikyti prioritetą), pasinaudota tokia metodika. Iš tiriamojo elemento skardos buvo padaromas ritinys, į jo vidų įstatomas neutronų šaltinis – ampulė su $(\text{Be}+\text{Rn})$ ir švitinama tam tikrą laiką. Po to ritinio viduje į tą pačią vietą įstatomas Geigerio ir Miulerio skaitiklis, registruojamas aktyvumo mažėjimas ir randamas sužadinto radioaktyvumo pusamžis. Taip buvo nustatoma naujai atsiradusio nuklido charakteristika.

Neutronų ir medžiagos sąveika

Kai kuriems elementams izotopų buvimas neleisdavo vienareikšmiškai priskirti pusamžių konkreitiems nuklidams. Bet kartais tai buvo galima, jei, pavyzdžiui, tas pats pusamžis gaunamas iš 3 gretimų elementų, kaip buvo atveju ^{24}Na , gauto reakcijomis

Neutrono virtimas protonu



kurių metu buvo užregistruotas vienodas pusamžis: $T = 15$ h.

Neutronų ir medžiagos sąveika

Tarp daugelio naujai kostatuotų radioaktyviųjų nuklidų buvo ir gautieji iš apšvitinto urano. E. Fermis numatė, kad juose po β^- skilimo gali atsirasti nauji transuraninių elementų nuklidai, kurie iš tikrųjų vėliau buvo atrasti.

Tolesnė neutronų fizikos raida buvo susijusi su galingų neutronų šaltinių – branduolinių reaktorių – sukūrimu, nes tada jau buvo galima labai tiksliai nustatyti neutronų sąveiką su įvairiomis medžiagomis, esant įvairiai energijai. Čia pagrindinį vaidmenį suvaidino praktiniai sumetimai – branduolinių reaktorių konstravimas ir jų tobulinimas energetikos reikalams.

Neutronų sąveika su medžiaga pasireiškia 2 būdais – vyksta jų pagava, t.y. branduolinės (n, γ) reakcijos, vadinamos *radiacine pagava*, ir *neutronų tamprioji ar netamprioji sklaida*, t.y. (n, n) vyksmai. Abu tie reiškiniai vyksta vienas greta kito, ir jų tikimybės kinta savotišku būdu priklausomai nuo nuklido charakteristikos ir nuo neutrono energijos.

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- **Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida**
- Neutronų šaltiniai
- Neutronų registravimo metodai
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamproji ir netamproji sklaida

Bendras sąveikos skerspjūvis susideda iš pagavos skerspjūvio σ_{pag} (nuo jų priklauso branduolinių reakcijų tikimybė) ir sklaidos skerspjūvio σ_{skl} :

Skerspjūvis

$$\sigma_t = \sigma_{\text{pag}} + \sigma_{\text{skl}}. \quad (11)$$

Panagrinėsime praktiniu požiūriu vieną svarbiausių problemų – lėtųjų neutronų pagavą ir sklaidą. Eksperimentai pateikia didelę skerspjūvių įvairovę – nuo 0 iki 10^6 barnų. Kai kurių elementų, o kai kuriais atvejais ir atskirų izotopų pagavos skerspjūviai σ_{pag} pateikti lentelėje. Greta, jei žinomi, pateikti ir sklaidos skerspjūviai σ_{skl} (kita skaidrė...)

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamproji ir netamproji sklaida

Elementai	$\sigma_{\text{pag, b}}$	$\sigma_{\text{skl, b}}$	Elementai	$\sigma_{\text{pag, b}}$	$\sigma_{\text{skl, b}}$
^1H	0,33	38	O_{gamt}	0,0002	4,2
^2D	0,00046	7	^{23}Na	0,5	4
^3He	5400	1	Fe_{gamt}	2,62	11
^4He	0	–	Cd_{gamt}	2540	7
^6Li	945	–	^{113}Cd	20000	–
Li_{gamt}	71	1,4	Hg_{gamt}	370	20
^9Be	0,01	7	^{209}Bi	0,034	9
B_{gamt}	760	4	U_{gamt}	7,7	8,3
^{10}B	3840	–	^{235}U	683	15
C_{gamt}	0,004	4,8	^{238}U	2,7	–
Gd_{gamt}	46600	–	Sm	40000	–
$^{155}_{64}\text{Gd}$	56000	–	Xe_{gamt}	35	4,3
$^{157}_{64}\text{Gd}$	242000	–	^{135}Xe	2700000	–
^{147}Sm	~ 100	–	^{136}Xe	< 5	–

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida

Matome, kad dideliais skerspjūviais išsiskiria kai kurių retųjų žemių elementų ir Xe nuklidai.

Laibai maži skerspjūviai lengvųjų nuklidų: ^2D , ^4He , ^9Be , C, O, o tarp jų esančių ^6Li ir ^{10}B – šimtus kartų didesni. Ypač didelis skirtumas yra tarp ^3He ir ^4He .

Svarbią praktinę reikšmę turi labai didelis kadmio (Cd), taip pat ir boro skerspjūvis. Kadmio skarda vartojama apsaugai nuo lėtųjų neutronų, o boro ir kadmio strypai – branduolinių reaktorių darbui reguliuoti.

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamproji ir netamproji sklaida

Iš kvantmechaninių skaičiavimų matyti, kad nedidelių energijų neutralių dalelių egzoterminių reakcijų skerspjūvis

$1/v$ dėsnis

$$\sigma \sim \frac{1}{v} \quad (12)$$

yra atvirkščiai proporcingas dalelės, mūsų atveju neutrono, greičiui. Tai yra labai svarbus neutronų fizikoje vadinamasis $1/v$ dėsnis, kurį E. Fermis atskleidė paprastais samprotavimais apie neutronų elgesį branduolio aplinkoje. Paprasčiausiai šis dėsnis aiškinamas tuo, kad neutrono pagavos tikimybė proporcinga laiko tarpui, kurį neutronas yra arti branduolio, ir kad jo neveikia Kulono jėga.

Kitoje skaidrėje – grafikas, iliustruojantis $1/v$ dėsnį.

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamproji ir netamproji sklaida

Cross Section versus Neutron Energy

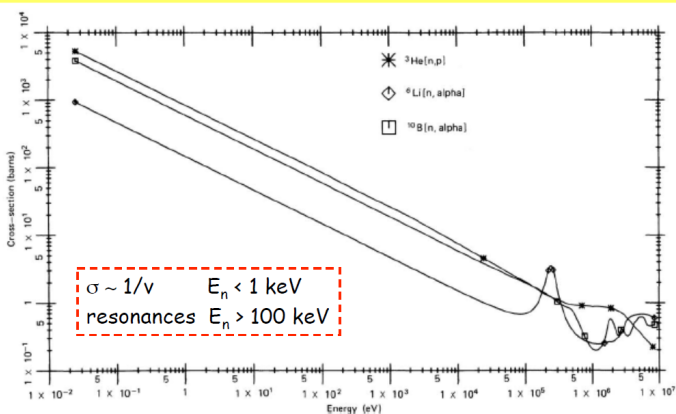


Figure 14.1 Cross section versus neutron energy for some reactions of interest in neutron detection.

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida

Kitas dalykas, nuo kurio gali labai priklausyti neutrono sąveikos skerspjūvis, yra rezonanso reiškinys. Kiekviename nuklide yra tam tikri energijos lygmenys, į kuriuos patekti neutronui yra labai didelė tikimybė. Jei neutrono energija priartėja prie tos energijos E_0 , pagavos tikimybė ir pagavos skerspjūvis σ padidėja pagal Breito ir Vignerio formulę:

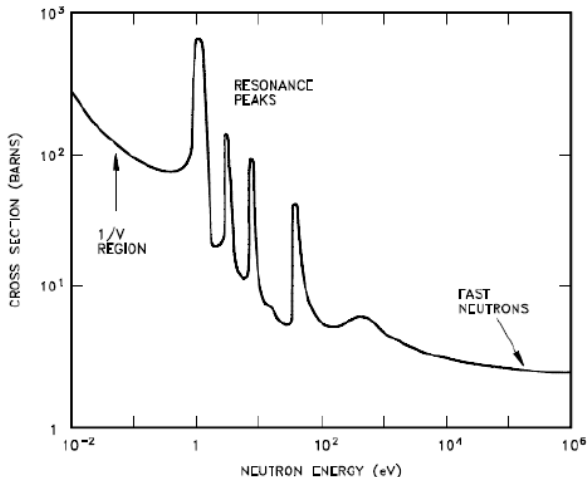
Breito ir Vignerio formulė

$$\sigma_{n\gamma} = \pi\Lambda^2 \frac{\Gamma_n \Gamma_\gamma}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}; \quad (13)$$

čia Γ_n – neutrono sklaidos plotis (išleikia neutronas) ir Γ_γ – radiacinis plotis (neutronas pagaunamas, išspinduliuojamas γ).

Kitoje skaidrėje – rezonansinė kreivė.

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida



Tipinis skerspjūvio grafikas.

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamproji ir netamproji sklaida

Eksperimentai rodo, kad rezonanso atveju σ gali padidėti 100–1000 kartų. Pavyzdžiui, indžio atveju, kai $E_n = 1,45$ eV, skerspjūvis yra 30000 barnų, o greta, kai $E_n = 3$ eV, -tik 2,7 barnų.

Greta radiacinės pagavos vyksta taip pat tamproji sklaida. Jos skerspjūvis σ_{nn} arti rezonansinio maksimumo ties E_0

Breito ir Vignerio formulė

$$\sigma_{nn} = \pi \Lambda_n^2 \frac{\Gamma_n^2}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}, \quad (14)$$

o pilnutinis skerspjūvis

Breito ir Vignerio formulė

$$\sigma_t = \sigma_{n\gamma} + \sigma_{nn} = \pi \Lambda_n^2 \frac{\Gamma_n \Gamma}{(E - E_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}, \quad (15)$$

Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamproji ir netamproji sklaida

Pasekime, koks yra sąryšis tarp skerspjūvių σ_{nn} ir $\sigma_{n\gamma}$. Radiaciniai pločiai yra apytiksliai vienodi visiems nuklidams ir nedaug priklauso nuo neutronų energijos. Apytiksliai galioja lygybė $\Gamma_\gamma \approx 0,1$ eV, o tai atitinka lygmenų gyvavimo trukmę $\tau \approx 10^{-14}$ s. Tik lengviesiems branduoliams pločiai šiek tiek didesni ir apytiksliai prilygsta 1 eV. Neutroninis plotis Γ_n yra proporcingas neutronų greičiui: $\Gamma_n \sim v$. Todėl visiems branduoliams yra tokia mažų neutronų greičių sritis, kurioje $\Gamma_n \ll \Gamma_\gamma$, kitaip tariant, yra tokia mažų energijų sritis, kurioje neutrono pagavos tikimybė yra daug didesnė negu tamprosios sklaidos.

Atsižvelgus į visus čia minėtus sąryšius mažų greičių neutronams, galioja $\Gamma_n \sim v \rightarrow 0$, $\Gamma_\gamma = \text{const}$, $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma = \text{const}$

ir

$\Lambda \sim \frac{1}{v} \rightarrow \sigma_t \sim \frac{1}{v}$ (iš (15) formulės).

Taigi, esant mažai neutronų energijai vyrauja radiacinė pagava ($1/v$ dėsnis), energijai didėjant jos tikimybė mažėja, o paskui pradeda vyrauti tamproji neutronų sklaida.

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- **Neutronų šaltiniai**
- Neutronų registravimo metodai
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

Neutronų šaltiniai

Neutronai yra dalelės, kurių nėra laisvų, o kadangi jos neturi elektrinio krūvio, jų negalima nei pagreitinti, nei fokusuoti elektriniais arba magnetiniais laukais. Todėl sukurti patogius neutronų šaltinius, kurie pateiktų monoenerginį dalelių pluoštą, reikalingą jų savybėms įvairiomis sąlygomis pažinti, nėra taip paprasta.

Pagal neutronų gavimo būdą visus jų šaltinius galima suskirstyti į tris grupes:

- 1 Pirmai priklauso šaltiniai, kuriuose neutronai gaunami branduolinėmis reakcijomis, veikiant radioaktyviajai nuklidų spinduliuotei,
- 2 antrai – tie, kuriuose neutronai gaunami taip pat branduolinėmis reakcijomis, kurios vykdomos elektringomis dalelėmis, gaunamomis įvairiais greitintuvais,
- 3 ir trečiai grupei priklauso branduoliniai reaktoriai.

Neutronų šaltiniai

Šias tris šaltinių grupes apibūdinsime plačiau.

1. Seniausi, bet ir dabar aktualūs, neutronų šaltiniai, naudoja reakciją, kuri pasitarnavo neutrono atsiradimui:

Branduolinė reakcija



Reakcijai vykdyti reikalingos α dalelės, gaunamos iš įvairių α spinduolių, pvz., polonio Po, plutonio Pu, radono Rn ir kt. Pats šaltinis atrodo labai paprastai: tai yra vamzdelis su Be milteliais (miltelių yra didesnis paviršius negu nesmulkintų gabaliukų) ir su atitinkamu radioaktyviuoju elementu. α dalelės bombarduoja Be atomus, bet pačios per sienelės nepereina, tuo tarpu neutronai pereina laisvai. Neutronų skaičius priklauso nuo α dalelių skaičiaus ir jų energijos. Šaltiniai su Po pateikia vienam kiuriui α aktyvumo apie $3 \cdot 10^6$ neutronų per sekundę.

Neutronų šaltiniai

Šaltinio nepatogumas yra labai didelė neutronų energijos įvairovė (nuo 0,5 MeV iki 10 MeV), taip pat neilgas amžius, nes Po pusamžis yra 138 dienos. Jo pranašumas – nedidelis kiekis γ spindulių, kurių didelė skvarba dažnai trukdo eksperimentams. Pradėjus pramoniniu būdu gaminti plutonio nuklidą ^{239}Pu , kurio pusamžis $T = 24400$ metų, atsirado nepaprastai ilgai veikiančys (Be+Pu) šaltiniai. Jie teikia vienam kiuriui plutonio aktyvumo $1,7 \cdot 10^6$ neutronų per sekundę.

Kai reikalingi labiau monoenerginiai neutronai, vartojami γ neutronų šaltiniai, pvz., su radioaktyviuoju $^{24}_{11}\text{Na}$ ($T = 15$ h), kurio γ spindulių energija $E_\gamma = 2,76$ MeV. Mišinys ($^{24}\text{Na} + ^9\text{Be}$) emituoja 0,8 MeV energijos neutronus. Tačiau γ neutronų šaltinių rimtas trūkumas yra mažas jų našumas ir trumpas amžius.

Neutronų šaltiniai

2. Šaltiniai neutronų, gaminamų pagreitintomis dalelėmis, išsiskiria dviem svarbiais pranašumais:

- 1 galima gauti gana monoenerginčius neutronų pluoštus
- 2 ir jų energija gali būti keičiama labai plačiame intervale: nuo kelių dešimčių kiloelektronvoltų iki kelių šimtų ir net tūkstančių megaelektronvoltų.

Bendras jų veikimo principas – elektringų dalelių srauto nukreipimas į taikinį, kuriame vyksta neutronus išskirianti reakcija. Pavyzdžiui, nedidelės energijos neutronams gauti naudojama (p,n) reakcija, veikiant taikinį litį: ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$. Iš šios reakcijos gaunami monoenerginiai neutronai nuo 30 iki 500 keV. Įdomus šaltinis gaunamas veikiant protonais tritį: $t(p,n){}^3\text{He}-0,764\text{ MeV}$. Reakcija yra endoterminė, tačiau neaukšto slenksčio. Tritio taikinyje paruošiamas naudojant cirkonį (Zr). Tuo tikslu cirkonio plokštelė įsotinama sunkiuoju vandenilio izotopu ${}^3\text{H}$ ir bombarduojama protonais.

Neutronų šaltiniai

Didesnės energijos neutronams gauti naudojamos egzoterminės atplėšimo reakcijos:

Branduolinės reakcijos



Reakcijos metu išspinduliuotų neutronų energija 14 MeV. Labai didelės energijos neutronai gaunami taip pat atplėšimo (d,n) reakcijomis, veikiant labai didelės energijos deutonais vidutinius ir sunkiuosius branduolius. Kadangi atplėšimo reakcijos yra tiesioginės, neutronų pluoštus būna nukreiptas pirmyn (90 proc.) ir pakankamai monoenerginis.

Neutronų šaltiniai

3. Galingiausi neutronų šaltiniai yra branduoliniai reaktoriai, apie kuriuos bus kalbama vėliau. Čia tik trumpai paminėsime, kad susidaro neutronų srautai apie $10^{15} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ir daugiau. Neutronų energijų pasiskirstymas paprastai labai platus ir priklauso nuo reaktoriaus tipo.

Neutronų monochromatizavimas. Norint geriau pažinti neutronų savybes ir jų sąveiką su branduoliais, tiksliau išaiškinti rezonansinių lygmenų energiją, būtina atlikti tyrimus su monoenerginiais, arba, kaip įprasta sakyti, monochromatiniais, neutronais. Vartojami du būdai neutronams monochromatizuoti.

Neutronų šaltiniai

1. Pirmu būdu iš impulsinių neutronų šaltinių (pvz., iš impulsinių greitintuvų) trumpas įvairių greičių neutronų spiečius įleidžiamas į ilgą kelių dešimčių arba kelių šimtų metrų vamzdį, kuriame šis spiečius išsitiesia pagal neutronų greičius. Vamzdžio gale įtaisoma sklendė, kuri automatiškai atsidaro trumpai akimirkai, praleisdama tik tam tikro greičio neutronus.

2. Antru būdu naudojamas mechaninis neutronų greičių atrinktuvas. Vamzdžio, pro kurį praleidžiamas neutronų pluoštas, galuose ant vieno ilgo (iki kelių dešimčių metrų) veleno įtaisyti 2 nepralaidūs neutronams skrituliai (pvz., iš kadmio) su siauromis sektorinėmis špjovomis. Išpjovos viena kitos atžvilgiu pasukamos kintamu kampų φ . Jei skritulių kampinis greitis ω , tai neutronas kelią tarp skritulių nubėga per laiką $t = L/v = \varphi/\omega$, o iš čia neutrono greitis $v = \frac{L\omega}{\varphi}$. Mechaniniai atrinktuvai gerai rūšiuoja neutronus, kurių greičiai atitinka energijos intervalą nuo kelių tūkstantųjų iki kelių elektronvoltų.

1 Neutronų fizika

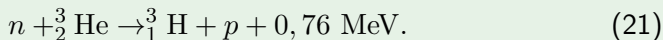
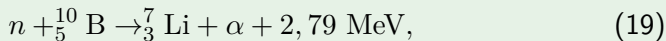
- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- Neutronų šaltiniai
- **Neutronų registravimo metodai**
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

Neutronų registravimo metodai

Neutronų detektoriai. Visi branduolinių dalelių detektoriai tiesiogiai reaguoja į jonizuojantį poveikį, t.y. registruoja elektringąsias daleles. Neutronai, kaip neturinčius elektrinio krūvio dalelės, nejonizuoja aplinkos. Jiems registruoti galima panaudoti tik netiesioginius metodus, kai neutronai, sąveikaudami su medžiaga, sukuria elektringąsias daleles, kurios paskui registruojamos įprastiniais būdais. Galiojant $1/v$ dėsniai labiausiai sąveikauja lėtieji neutronai ir jų registravimas yra efektyviausias.

Lėtiesiems neutronams registruoti tinka tik egzoterminės reakcijos, kurių yra trys:

Branduolinės reakcijos



Neutronų registravimo metodai

Greta reakcijų su lengvaisiais elementais, registravimui tinka ir kai kurių sunkiųjų nuklidų, pvz., ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu ir kt., dalijimosi reakcijos. Elektringoms dalelėms, kurios atsiranda šiose reakcijose, registruoti naudojami proporcingieji ir scintiliaciniai skaitikliai ir jonizacijos kameros. Geigerio ir Miulerio skaitikliai dabar retai vartojami, nes juose neutronų impulsai neatskiriami nuo fotonų ir elektronų impulsų.

Šiuo metu naudojami 3 pagrindinių rūšių neutronų skaitikliai. Trumpai juos apibūdinsime.

Neutronų registravimo metodai

1. Proporcingieji skaitikliai su boro, ličiu ar lengvuoju heliu ^3He . Dažniausiai naudojami boro skaitikliai, kuriuos sudaro įprastinis proporcingasis skaitiklis, užpildytas BF dujomis. Jo jautris (dėl $1/v$ dėsnio) yra didžiausias lėtiesiems neutronams. Kai $E_n > 100$ keV, skaitiklio efektyvumas mažėja, tačiau jį galima padidinti apsupant skaitiklį lėtinančio parafino sluoksniu. Be to, jautris gerokai padidėja, jei vietoje įprastinio boro – 20 proc. ^{10}B ir 80 proc. ^{11}B – naudojamas retasis nuklidas ^{10}B , nes ^{11}B yra neutronams nejautrus.

Didesnės energijos neutronams (0,5–2 MeV) registruoti tinka skaitikliai, užpildyti ^3He .

2. Scintiliaciniuose skaitikliuose paprastai naudojamas ličio jodido Lil kristalas, aktyvuotas taliu. Lil kristale vyksta (20) reakcija, kurios produktai t ir α registruojami įprastu tiems skaitikliams būdu.

Neutronų registravimo metodai

3. Dalijimosi kameros neutronams registruoti – tai jonizacijos kameros, kurių elektrodai padengti plonu urano oksido $^{235}\text{U}_3\text{O}_8$ sluoksniu. Šis urano izotopas dalijasi veikiamas lėtųjų neutronų, o dalijimosi reakcijoje susidaranti sunkiosios skeveldros labai smarkiai jonizuoja, nes jų bendra energija yra apie 200 MeV. Jautriui padidinti kamera gaminama iš daugelio sluoksnių. Tokioje kameroje galima registruoti iki kelių procentų visų neutronų.

Neutronų registravimo metodai

Kai yra dideli neutronų srautai, rūpi ne tiek atskirų neutronų energija, kiek jų intensyvumas. Jam matuoti naudojama panaši metodika, būtent boro skaitikliai ir dalijimosi kameros, kuriose neatskiriami atskiri impulsai, ir dar vienas naujas būdas – aktyvacijos metodas. Jo esmė yra ta, kad tam tikra medžiaga – aktyvatorius – apšvitinama neutronų srautu ir sužadinas dirbtinis β arba γ radioaktyvumas. Šis indukuotas radioaktyvumas po to matuojamas įprastiniais būdais, kurie taikomi jonizuojančiai spinduliutei, ir iš jo sprendžiama apie neutronų pluošto intensyvumą. Kaip aktyvatoriai gali būti In, Au, Co ir kt. medžiagų plonos plokštelės arba folijos. Metodas yra nesudėtingas, pigus, tačiau jo trūkumas – ilgoka rezultatų apdorojimo trukmė (aktyvatoriaus pusamžio ilgio).

Atskira ir daug sudėtingesnė problema yra labai didelės energijos neutronų registravimas. Čia, tarp kitko, naudojamas protonų atatrunkos dėl susidūrimų su neutronais metodas. Iš protonų energijos ir judesio kiekio sprendžiama apie neutronų energiją.

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- Neutronų šaltiniai
- Neutronų registravimo metodai
- **Neutronų lėtinimas**
- Dirbtinis radioaktyvumas

Neutronų lėtinimas

Neutronų lėtinimas – labai svarbus procesas, nes daugumos šaltinių (reaktoriai, Be+Rn ampulė ir kt.) neutronų energija yra nuo kelių dešimčių kiloelektronvoltų iki kelių megaelektronvoltų, tuo tarpu reakcijų, kurias sužadina neutronai, išeiga pagal $1/v$ dėsnį yra didžiausia esant mažoms energijoms. Todėl labai svarbu žinoti, kokių nuotoliu nuo šaltinio neutronai sulėtėja iki šiluminių greičių ir kaip toli jie pasklinda dėl difuzijos.

Efektingiausias lėtiklis yra vandenilis, nes protono ir neutrono masės yra beveik lygios, tad vidutiniškai po kiekvieno susidūrimo greito neutrono energija sumažėja pusiau. Susidūrimuose su sunkesniais atomais neutrono energijos nuostolis vieno susidūrimo metu yra mažesnis, pvz., po susidūrimo su ^{12}C atomu neutrono energija vidutiniškai sumažėja iki 0,8 pradinės energijos. Vadinasi, energija sumažėja pusiau tik po 3 susidūrimų. Taigi geriausi lėtikliai yra medžiagos su lengvaisiais branduoliais. Neutronų susidūrimų su atomais skaičiai, sulėtinant juos nuo 2 MeV iki 0,025 eV, pateikti lentelėje (kita skaidrė).

Neutronų lėtinimas

Nuklidai	Susidūrimų skaičius
^1H	18
^2D	25
^4He	43
^9Be	86
^{12}C	114

Be to, geras lėtiklis neturi sugerti neutronų, jo neutronų pagavos skerspjuvis turi būti mažas. Geriausias toks lėtiklis būtų ^4He , kuris neutronų visai nesugeria (nėra nuklido ^5He). Tačiau He, kaip dujos, yra mažo tankio, todėl nepakankamas susidūriamųjų branduolių tankis.

Neutronų lėtinimas

Maži neutronų pagavos skerspjūviai yra deuterio ir deguonies, todėl labai geras lėtiklis yra sunkusis vanduo D_2O . Blogesnis, bet dažnai vartojamas lėtiklis yra gamtinis vanduo H_2O , tačiau jame vandenilis sugeria neutronus daug stipriau negu deuteris, žr. lentelę.

Nuklidas	Šiluminių neutronų pagavos skerspjūvis σ , barnais
1H	0,3
2D	0,0005
4He	0
9Be	0,01
^{12}C	0,004
O_{gamt}	0,0002
^{235}U	680
^{238}U	3

Neutronų lėtinimas

Sulėtėjus neutronams iki 1–0,5 eV, prasideda jų termalizacija, t.y. jų vidutinės energijos priartėjimas prie aplinkos dalelių vidutinės energijos, atitinkančios Maksvelo greičių pasiskirstymą tam tikroje temperatūroje. Kambario temperatūroje $T = 293$ K tikimiausias neutronų greitis yra

Tikimiausias greitis

$$v_{\text{tik}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 2200 \text{ m/s.} \quad (22)$$

Šį greitį įprasta laikyti šiluminiu neutronų greičiu, jį atitinka neutrono energija $E = 0,025$ eV. Pasiekę šiluminę energiją, neutronai difunduoja į visas puses nuo šaltinio, kol pagaliau aplinka juos sugeria. *Vidutinis difuzijos ilgis*, t.y. nuotolis L , išmatuotas tiesės kryptimis nuo šiluminio neutrono atsiradimo taško iki jo sugerties taške A (paveikslas!), labai priklauso nuo medžiagos savybių ir jos neutronų pagavos skerspjūvio (lentelė kitoje skaidrėje).

Neutronų lėtinimas

Lėtiklis	Difuzijos ilgis L , cm
H ₂ O	2,7
D ₂ O	120,0
Be	21,0
Grafitas	50,0

Svarbi neutronų savybė, turinti daug taikymų, ypač reaktorių konstrukcijoje, yra jų gebėjimas atsispindėti nuo įvairių medžiagų. Šis atsispindėjimas yra difuzinio pobūdžio. Neutronas, patekęs į tam tikrą terpę, difunduoja, susidurdamas su terpės atomais, netvarkingai keičia savo kryptį ir po vieno ar kelių susidūrimų gali vėl išlėkti iš jos. Tokio išlėkimo atgal tikimybė vadinama *neutronų atgalinės sklaidos koeficientu* šiai terpei. Suprantama, kad šis koeficientas tuo didesnis, kuo didesnė sklaidos tikimybė ir kuo mažesnis pagavos skerspjūvis. Be to, dydis priklauso nuo terpės sluoksnio storio ir medžiagos.

Neutronų lėtinimas

Atšvaitas / Storis	20 cm	40 cm	60 cm	∞
H ₂ O	0,811	0,811	0,811	0,811
D ₂ O	0,853	0,922	0,947	0,981
Be	0,881	0,907	0,910	0,911
Grafitas	0,834	0,903	0,923	0,936

lentelė: Šiluminių neutronų atgalinės sklaidos koeficientas

Gerai atšvaitų sluoksniai grąžina atgal į aktyviają zoną apie 90 proc. neutronų ir naudojami įrenginiuose, kuriuose reikia palaikyti didelį neutronų tankį ir neleisti jiems išlėkti išorėn, pvz., branduoliniuose reaktoriuose arba atominėje bomboje.

1 Neutronų fizika

- Neutrono atradimas
- Neutronų ir medžiagos sąveika
- Neutronų $1/v$ dėsnis. Tamprioji ir netamprioji sklaida
- Neutronų šaltiniai
- Neutronų registravimo metodai
- Neutronų lėtinimas
- Dirbtinis radioaktyvumas

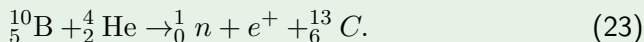
Dirbtinis radioaktyvumas

Dar prieš neutrono atradimą 1932 m. jau keliuose radioaktyvumo laboratorijose buvo žinoma, kad boro arba aliuminio bandiniai, apšvitinti α dalelėmis, pasidarydavo radioaktyvūs. Net po Dž. Čedviko atradimo praėjo dar 2 metai, kol šis paslaptingas radioaktyvumas buvo išaiškintas. Priežastis buvo ta, kad tyrimo aparatūra buvo pritaikyta protonams registruoti po laukiamos (α, p) reakcijos ir buvo nejautri β^+ dalelėms.

Atradus pozitroną, prasidėjo tos naujos dalelės tyrimai, atitinkamai buvo paruošta aparatūra ir patobulinti stebėjimo metodai. Ir tikrai, greitai buvo pastebėta, kad elektronų ir pozitronų poros atsiranda paveikus šviną ThC'' γ spinduliais ($E = 2,62 \text{ MeV}$). I. Kiuri ir F. Žolio 1933 m. pastebėjo, kad boras, paveiktas α dalelėmis, spinduliuoja pozitronus. Tas pats buvo pastebėta bombarduojant α dalelėmis ir aliuminį. Iš pradžių šie faktai buvo interpretuojami neteisingai, būtent kad čia vyksta reakcija (kita skaidrė)

Dirbtinis radioaktyvumas

Klaidinga reakcija

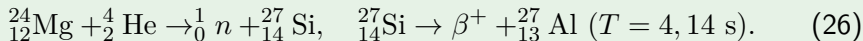
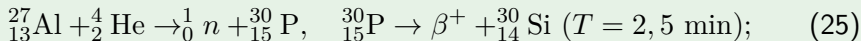
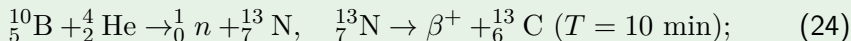


Kiti tyrinėtojai tos reakcijos nepatvirtino. Taip laimingai atsitiko, kad po 6 mėnesių I. Kiuri ir F. Žolio pastebėjo, kad apšvitinus α dalelėmis boras skleidžia pozitronus ir po to, kai α dalelių šaltinis pašalintas. Ir tai jau buvo naujo, dirbtinio, pozitroninio radioaktyvumo atradimas.

Tolesni tyrimai 1934 m. parodė, kad B, Al, Mg folijos, pašvitinus 10 minučių α dalelėmis iš Po, spinduliuoja pozitronus ir nutraukus švitinimą. Pozitronų emisija mažėjo eksponentiškai su kiekvienam elementui būdingu pusamžiu. Kartu nebuvo pastebėta jokių β^- dalelių. Taip po ilgų tyrimų buvo konstatuotas trijų naujų dirbtinai radioaktyvių elementų atsiradimas pagal reakcijas (kita skaidrė):

Dirbtinis radioaktyvumas

Teisingos reakcijos



Naujai aptiktus β^+ radioaktyviuosius elementus I. Kiuriu ir F. Žolio pavadino radioazotu, radiofosforu ir radiosiliciu. Cheminės analizės patvirtino šias reakcijas. Pavyzdžiui, su ${}^{13}_7\text{N}$ nuklidu buvo gautas β^+ radioaktyvusis amoniakas (NH_3).

Dirbtinis radioaktyvumas

Šios (α, n) reakcijos padidindavo santykinį protonų skaičių branduolyje, todėl naujai atsiradę nuklidai buvo β^+ radioaktyvieji. Tai sutapo su tuo laiku E. Fermio paskelbta β skilimo teorija. Tuoju pat E. Fermis su savo bendradarbiais pradėjo švitinti neutronais daugybę elementų, vykdydami (n, γ) , (n, p) ir (n, α) reakcijas, kuriose protonų santykinis skaičius buvo mažinamas ir po to atsirasdavo β^- radioaktyvieji nuklidai. Tokiu būdu buvo aptikta keliasdešimt naujų dirbtinai β^- radioaktyvių elementų.

Dabar žinoma per 2000 radioaktyviųjų nuklidų, iš jų tik apie 100 yra gamtiniai, visi kiti gauti branduolinėmis reakcijomis. Labai daug jų gaunama branduoliniuose reaktoriuose, kuriuose galingais neutronų srautais galima švitinti įvairius elementus. Tiek pat daug jų gaunama iš dalijimosi produktų, kuriuose visada yra didelis neutronų perteklius ir todėl tie nuklidai yra β^- radioaktyvieji.