

3.5. Novi tipovi radioaktivnosti

3.5.1. Protonska radioaktivnost

Iz analize osobina jezgara sa manjkom neutrona, sledi da je u principu moguć novi tip radioaktivnog procesa, takozvana protonska radioaktivnost. Moguća su tri tipa protonske radioaktivnosti: emisija protona iz osnovnog stanja jezgra (protonski raspad), emisija protona iz pobudjenog stanja jezgra formiranog kao rezultat beta raspada (zakasneli protoni), i emisija protona iz izomernog stanja jezgra (izomerni protonski raspad).

3.5.1.a. Protonski raspad

Ako u jezgru postoji veliki višak protona onda zadnji proton može imati $\epsilon_p < 0$, tj., nuklearne sile mogu biti nedovoljno jake da ga zadrže u jezgru. Međutim, proton ostaje u jezgru neko vreme usled postojanja Kulonove potencijalne barijere. Situacija je slična slučaju alfa raspada. Proton sa $\epsilon_p < 0$ napušta osnovno stanje jezgra kao rezultat tunelovanja. Slično alfa raspadu, ovaj proces se naziva protonski raspad.

Sa teorijske tačke gledišta, protonski raspad je jednostavniji od alfa raspada, jer ne postoji problem formiranja alfa čestice koja napušta jezgro: protoni su već prisutni u jezgru i „spremni su za izlazak“. Međutim, eksperimentalna situacija je znatno komplikovanija u ovom slučaju nego kod alfa raspada zbog vrlo jake β^+ radioaktivnosti jezgra sa manjkom neutrona u blizini granice protonske stabilnosti.

Teorijska razmatranja pokazuju da broj emitovanih pozitrona može biti milion puta veći od broja emitovanih protona. Da bi se detektovao protonski raspad pri jakom fonu pozitronskog raspada, protonski poluživot mora biti manji od 0.1 s (što je manji poluživot to bolje). Pretpostavljajući da eksperimentalne tehnike omogućuju merenje poluživota do 10^{-12} s, sledeći energetske intervali su pogodni za detekciju protona

$$0.5 < E_p < 1.5 \text{ MeV za jezgra sa } Z \cong 50$$

$$0.5 < E_p < 1.5 \text{ MeV za jezgra sa } Z \cong 80$$

gde leva granica intervala odgovara $\tau_p = 0.1$ s, a desna granica $\tau_p = 10^{-12}$ s. Da bi se detektovao protonski raspad potrebno je izabrati neparne elemente (zbog manje energije odvajanja protona kod neparne jezgara u poredjenju sa parnim).

Protonski raspad je otkriven 1982. godine za jezgro sa velikim manjkom neutrona ${}_{71}^{151}\text{Lu}$ koje ima 24 neutrona manje od beta stabilnog izotopa ${}_{71}^{175}\text{Lu}$. Jezgro ${}_{71}^{151}\text{Lu}$ je dobijeno u nuklearnoj reakciji



izazvanoj jonima nikla ubrzanim do energijama 200 - 400 MeV na akceleratoru teških jona. Merenja su pokazala da je poluživot protonski aktivnog jezgra ${}_{71}^{151}\text{Lu}$ oko 0.085 s dok je energija emitovanog protona 1.23 MeV.

Posebna pažnja se mora posvetiti da se dokaže da se protoni emituju iz osnovnog stanja jezgra. Ovo je važno, jer jezgra sa manjkom neutrona imaju mnogo veću verovatnoću da emituju zakasnele protone i ekstremno je teško detektovati protonski raspad pri tako velikom fonu.

Zaključak da je proton emitovan iz osnovnog stanja se potvrđuje kinematikom raspada, merenjem ekscitacione funkcije za $^{151}_{72}\text{Lu}$ i protonske energije, kao i odsustvo anihilacije i karakterističnog rendgenskog zračenja, koje treba da se generiše za vreme konverzionih prelaza ekscitovanih jezgara, tj., za vreme emisije zakasnelih protona.

Kasnije je otkriven protonski aktivan izotop $^{147}_{69}\text{Tm}$ sa poluživotom 0.42 s u reakciji



Ovo jezgro emituje protone sa energijom od 1.04 MeV.

3.5.1.b Zakasneli protoni

Zakasnele protone je prvi otkrio Karnaukhov (1962.) godine, nakon ozračivanja Ni folije jonima ^{20}Ne . Slika 143 pokazuje energetski dijagram za emisiju zakasnelih protona. Kao rezultat β^+ raspada jezgro (A,Z) se transformiše u osnovno ili ekscitovano stanje jezgra $(A,Z-1)$. Ekscitacija jezgra se često otklanja emisijom gama zračenja. Međutim, ako je energija ekscitacije W jezgra $(A,Z-1)$ veća od energije odvajanja ε_p potrebnog za uklanjanje protona iz jezgra ($W > \varepsilon_p$), onda postaje moguća i emisija protona pored emisije gama kvanta. Kako se ovi protoni mogu emitovati samo posle β^+ raspada jezgra (A,Z) oni se nazivaju zakasneli protoni.

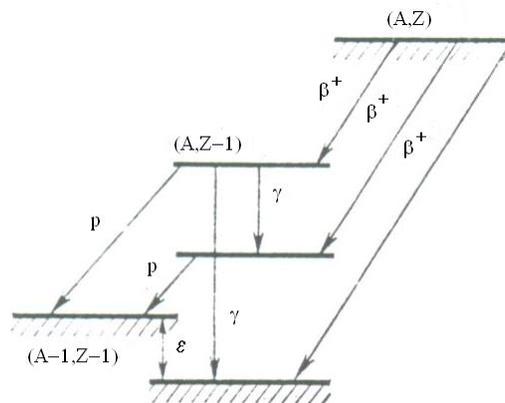


Fig. 143

Zakasneli protoni su monoenergetski i njihova energija je jednak $T_p = W - \varepsilon_p$. Verovatnoća emisije niskoenergetskih protona je vrlo mala (usled male propustljivosti Kulonove potencijalne barijere) i deekscitacija jezgra $(A, Z-1)$ se dominantno događa kroz emisiju gama zračenja ($\Gamma_\gamma > \Gamma_p$). Minimalna energija na kojoj se zakasneli protoni mogu registrovati je $T_p^{\min} \cong 1\text{MeV}$. Porastom energije protona, raste i propustljivost barijere i za izvesnu energiju T_p postaje $\Gamma_p > \Gamma_\gamma$.

Trenutno je poznato da postoji na desetine emitera zakasnelih protona, kako lakih tako i teških jezgara. Kao primer lakih emitera zakasnelih protona je jezgro ^{9}C koje

emituje protone sa energijama 10.92 i 8.24 MeV sa vremenom poluživota od $T_{1/2}=0.126$ s. Ovaj emiter se dobija u reakciji ${}^{14}_7N(p,2n)$. Možemo da

pomenemo i jezgro ${}^{17}_{10}Ne$ koje sa poluživotom od $T_{1/2}=0.108$ s, emituje pet grupa zakasnelih protona sa energijama od 1.68 MeV do 7.04 MeV. Jezgro ${}^{17}_{10}Ne$ se dobija u reakcijama ${}^{19}_9F(p,n)$, ${}^{16}_8O({}^3_2He,2n)$, i dr. Proučavanje lakih emitera protona, koji se karakterišu retkim energetske nivoima, omogućuje proučavanje njihovih karakteristika.

Kod težih emitera protona (počev od $Z>30$), gustina nukleona jezgra ($A,Z-1$) je tako velika da postaje teško izolovati pojedinačne prelaze. Na primer protonski spektar jezgra ${}^{111}_{52}Te$ ($T_{1/2}=19.3s$) se karakteriše velikim brojem pikova u intervalu energija od 2 do 5 MeV dok spektar jezgra ${}^{181}_{80}Hg$ ($T_{1/2}=3.6s$) ima široku raspodelu između 3 i 6 MeV. U ovom slučaju spektar protona pokazuje izvesnu finu strukturu koja potiče od fluktuacija intenziteta raznih prelaza. Analizirajući finu strukturu spektra, mogu se izvući zaključci o gustini nivoa raznih eksitacionih energija jezgra.

Druga primena zakasnelih protona je u vezi sa mogućnošću dobijanja informacija o razlici masa prethodnog i jezgra potomka, pri merenju protonskog spektra u koincidenciji sa gama kvantima.

3.5.1.c. Izomerni protonski raspad

Pobudjeno stanje sa $W>\varepsilon_{p^+}$ se može pojaviti, ne samo posle β^+ raspada, već i kao rezultat nuklearnih reakcija. Ako je ovo stanje izomerno, tj., ima dovoljno dug život, može se opaziti i protonski raspad. Jedini slučaj do sada poznat je metastabilno jezgro ${}^{54m}_{27}Co$ koje se dobija u reakciji ${}^{54}_{26}Fe(p,n){}^{53}_{27}Co$. Energija protona je $E_p=1.6$ MeV, i relativna verovatnoća je $\Gamma_p/\Gamma_{e^+}=0.15$

3.5.2. Dvostruka protonska radioaktivnost

Godine 1960., otkriven je još jedan tip egzotične radioaktivnosti, tj., istovremena emisija dva protona. Energija odvajanja dva protona od jezgra (A,Z) je jednaka

$$\varepsilon_{2p} = [2m_p + M(A-2, Z-2) - M(A, Z)]c^2$$

Jasno je da je

$$\varepsilon_{2p} = 2\varepsilon_p - P_p \tag{3.5.3}$$

gde je ε_p energija odvajanja jednog protona od jezgra (A,Z), i $P_p = \varepsilon_p(A, Z) - \varepsilon_p(A-1, Z-1)$. Kako je $\varepsilon_p \cong 0$ blizu granice protonske stabilnosti, i $P_p > 0$, za jezgra sa parnim Z , postojanje jezgra sa $\varepsilon_{2p} > 0$ i $\varepsilon_{2p} < 0$ je u principu moguće. Takva jezgra bi bila nestabilna u odnosu na emisiju dva protona, ali stabilna u odnosu na emisiju jednog protona.

Kao i jedno protonska aktivnost, i dvo protonska aktivnost se, u principu, može opaziti u tri različite forme: emisija dva protona iz osnovnog stanja jezgra (dvo protonski raspad), emisija dva protona iz eksitovanog stanja jezgra stvorenog kao rezultat β^+

raspada, i emisija dva protona iz izomernog ekscitovanog stanja (izomerna dvoprotonska radioaktivnost).

Dvoprotonska radioaktivnost je otkrivena u neutron deficitarnim jezgrima ${}^{22}_{13}\text{Al}$, i ${}^{26}_{15}\text{P}$ koja se moraju transformisati pozitronskim raspadom u visoko pobudjena jezgra ${}^{22*}_{12}\text{Mg}$, i ${}^{26*}_{16}\text{Si}$ koja mogu da emituju par protona. Takodje je primećena i u procesu



Kratkoživeće ($\tau \cong 0.07$ s) neutron deficitarno jezgro ${}^{22}\text{Al}$ je dobijeno ozračivanjem ${}^{22}_{13}\text{Mg}$ pomoću jona ${}^3\text{He}$ na energijama od 110 MeV. Protoni emitovani jezgrom ${}^{22*}\text{Mg}$ se registruju sistemom tri brojača spojenih u koincidentnom kolu. Opažene su dve grupe protona sa energijama od 4.139 i 5.636 MeV.

3.5.3. Neutronska radioaktivnost

Kako neutroni nemaju naelektrisanja, nema Kulonove barijere za njih. Tako, može se govoriti o neutronske radioaktivnosti sa merljivim životom, samo u dva slučaja: kada centrifugalna barijera ima značajnu ulogu tj., kada odlazeći neutron nosi nenulti orbitalni momenat $l_n \neq 0$ ili kada se neutroni emituju nakon β^- raspada (zakasnela neutronska radioaktivnost).

Za neutronske raspad izomernih nuklearnih stanja sa energijom ekscitacije $W > \varepsilon_n$ može se očekivati da odlazeći neutron ima sasvim veliku vrednost l_n . Procena propustljivosti centrifugalne potencijalne barijere i razmatranje strukturnog faktora pokazuju da život neutronske izomerije može dostići i do 10^2 s.

Za jezgra sa $W > 2\varepsilon_n$ u principu je moguća emisija dva neutrona. Dvo neutronske raspad osnovnog stanja se može teorijski odbaciti ako je $\varepsilon_{2n} < 0$ i $l_n \geq 3$. Eksperimentalna detekcija ovog procesa je krajnje teška. Na primer, nužan uslov za dvoneutronske raspad lakog ($A \cong 40$) neutronima bogatog jezgra je $l_n \geq 3$ i $E_{2n} < 20$. Nema procesa koji bi zadovoljio ove uslove.

Emisija zakasnelih neutrona je mnogo verovatnija. Razmotrićemo tri tipa ovog fenomena: zakasnela emisija jednog neutrona, dvoneutronska zakasnela emisija i zakasnela emisija tri neutrona.

3.5.3.a. Zakasneli neutroni

Ako se jezgro potomak formirano nakon β^- nadje u ekscitovanom stanju sa $W > \varepsilon_n$ onda se može emitovati neutron ili se može odigrati gama prelaz. Kako se neutroni emituju trenutno, tj., neposredno nakon beta raspada, karakterišu se istim vremenom poluraspada kao i beta raspad.

Energija T_n zakasnelih neutrona se određuje iz energije ekscitacije W i energije odvajanja neutrona ε_n :

$$T_n = W - \varepsilon_n \quad 3.5.5.$$

Zakasneli neutroni su prvo otkriveni u toku proučavanja fisije teških jezgara. Do sada, otkriveno je i proučeno preko 70 jezgara koja su izvor zakasnelih neutrona. Zakasneli neutroni su igrali veoma važnu ulogu u stvaranju prvog nuklearnog reaktora.

3.5.3.b Dvostruka zakasnela neutronska radioaktivnost

Energija ekscitacije jezgra formiranog kao rezultat β raspada može biti veća od energije odvajanja, ne jednog, već dva neutrona.

$$W > \varepsilon_{2n} \quad 3.5.6$$

U ovom slučaju može se opaziti dvostruka neutronska radioaktivnost. Kako je $\varepsilon_{2n} > \varepsilon_n$, ovaj proces se može dogoditi uz jak fon mnogo intenzivnijeg jednostruko neutronskeg raspada.

Zakasnela dvostruka neutronska radioaktivnost je prvi put otkrivena 1979. U CERN u. Izotop ${}^{11}_4\text{Be}$ se kreira kao rezultat β^- raspada jezgra ${}^{11}_3\text{Li}$, koje je pak dobijeno u separaciji produkata reakcije u interakciji visoko energetskeg protona 600 MeV sa bor ugljeničnom metom.

Spektar jednostruko zakasnelih neutrona je meren pomoću sistema tri jonizacione komore napunjene sa ${}^3\text{He}$. Kao rezultat merenja otkrivene su tri grupe monoenergetskih zakasnelih neutrona i širok kontinualni spektar koji odgovara emisiji zakasnelog para neutrona. Istovremena emisija oba neutrona je verifikovana koincidentnim neutron-neutron merenjima. Verovatnoća emisije para neutrona je oko 4 %.

Emisija zakasnelog para neutrona je otkrivena 1980. za tri neutronima bogata jezgra, ${}^{30}\text{Na}$, ${}^{31}\text{Na}$ i ${}^{32}\text{Na}$. Verovatnoće emisije para neutrona za ova tri jezgra je 1.2 %, 0.7 % i 5.1 %.

3.5.3.c. Zakasnela tro neutronska radioaktivnost

Grupa fizičara koja je otkrila zakasnelu dvo neutronska radioaktivnost na jezgru ${}^{11}\text{Be}$ u CERNu 1979 je 1980., objavila o tro neutronskeg emisiji sa ovog jezgra. Ovaj eksperiment je obavljen pod sličnim uslovima opisanim prethodno u tački 3c, ali sa savršenijim detektorom neutrona koji bolje separira istovremeno emitovana dva ili tri neutrona. Kao rezultat merenja, pokazano je da se u oko 2 % slučajeva jezgro ${}^{11}\text{Be}$ raspad istovremenom emisijom tri neutrona.

3.5.4. Ugljenična radioaktivnost

Novi tip radioaktivnosti, naime ugljenična radioaktivnost, otkrivena je u UK 1984. Radeći sa ΔT , T detektorom, autori su otkrili 11 jezgara ${}^{14}_6\text{C}$ formiranih nakon dezintegracije α radioaktivnog izotopa ${}^{223}_{88}\text{Ra}$ ($T_{1/2}=11.7$ dana, $T_\alpha=5.7$ MeV):



Energija jezgra ^{14}C je približno jednaka 30 MeV što je u dobroj saglasnosti sa teorijskom vrednošću dobijenoj iz energije raspada $Q=31.8$ MeV za proces 5.7.

$$T^{theor} = Q \frac{M_{Pb}}{M_{Ra}} = 31.8 \cdot \frac{209}{223} = 29.8 \text{ MeV} \quad 3.5.8$$

Prinos jezgara ^{14}C je 10^9 puta manji od prinosa α čestica:

$$\Gamma_{^{14}\text{C}} / \Gamma_{\alpha} = (8.5 \pm 2.5) \cdot 10^{-10} \quad 3.5.9$$

S obzirom na veoma nisku verovatnoću pri proučavanju ovog procesa, posebna pažnja je posvećena fonu, unutrašnjem i spoljašnjem. Efekat koji potiče od kosmičkog zračenja je meren u dužem vremenskom intervalu, a efekat od četvorostruke alfa koincidencije čija je energija bliska energiji jezgra ^{14}C je pažljivo procenjena.

Otkriće ugljenične radioaktivnosti je kasnije potvrđeno u SSSR i Francuskoj. Oba eksperimenta su obavljena sa $\Delta T, T$ tehnikom i dali su identične vrednosti za $\Gamma_{^{14}\text{C}} / \Gamma_{\alpha}$.

Kasnije su učinjeni napor da se otkrije neonska radioaktivnost. Prema preliminarnim eksperimentalnim procenama, vrednost $\Gamma_{Ne} / \Gamma_{\alpha}$ mora biti mnogo manja nego odgovarajuća vrednost za ugljeničnu radioaktivnost.

Teorijski, radioaktivni procesi sa emisijom jezgara koja su teža od alfa čestica nisu iznenađujući, jer ovi procesi nisu zabranjeni zakonima održanja. Medjutim, s obzirom na veoma nisku verovatnoću njihovo eksperimentalno opažanje je bilo nemoguće sve do razvoja novih eksperimentalnih tehnika.

Procene verovatnoće novih radioaktivnih procesa su zasnovane na modelima raspada jezgra sličnim modelu alfa raspada. Podsetimo se da je verovatnoća alfa raspada određena faktorom formiranja α čestica u jezgru roditelja i propustljivošću barijere koja eksponencijalno zavisi od energije raspada, visine barijere i redukovane mase. Takodje je pomenuto da je alfa energija posebno velika za alfa prelaze koji vode do formiranja magičnih ili blizu magičnih jezgara.

Svi ovi parametri i osobine se mogu proceniti za nove radioaktivne procese ako se izabere specifična verzija modela raspada. Kao i u slučaju alfa raspada, najozbiljnija teškoća je u vezi sa faktorom formiranja. Medjutim, s obzirom na eksponencijalnu prirodu izraza za propustljivost barijere, računanja su mnogo osetljivija na parameter koji definiše ovaj koeficijent, tj., na energiju raspada Q , i odavde od izbora jezgra potomka.

Nadjeno je da je proces 3.5.7 mnogo verovatniji od procesa emisije jezgra ^{12}C , koje mora da ima veći faktor formiranja (verovatnije je da se u jezgru formira ^{12}C nego manje simetrično ^{14}C). Ovo potiče iz činjenice da jegro potomak u procesu 3.5.7 ima magični broj protona, ali je i broj neutrona (127) blizak magičnom broju neutrona (126).

Može se reći da teorija novih radioaktivnih fenomena nije veoma tačna. Razlika eksperimentalne i teorijske vrednosti za poluvreme života je čak i do tri reda veličine.