

Glava 8

REAKCIJE FORMIRANJA TRANSURANSKIH ELEMENATA

8.1. Neptunijum, prvi transuranski element. Metode njegovog proučavanja

Periodni sistem elemenata, koji se nalaze u prirodi se završavaju sa 92 im elementom, tj., uranom. Ova okolnost ne znači da transuranski elementi, tj. elementi sa $Z > 92$ ne mogu da postoje u prirodi, već ih nema usled opadanje perioda alfa raspada i spontane fisije sa povećanjem Z .

Sistematska analiza osobina radioaktivnih jezgara pokazuje da period alfa raspada i spontane fisije za $Z > 92$ moraju biti mnogo kraći nego što je starost zemlje. Kao rezultat, transuranski elementi koji su bili stvoreni, postepeno su iščezli usled raspada i više ih nema u prirodi.

Elementi sa $Z > 92$ se mogu stvoriti na veštački način, pomoću nuklearnih transformacija koje dovode do porasta naelektrisanja jezgra potomka u poredjenju sa naelektrisanjem jezgra mete. Ako se najteži prirodni element, tj., uran uzme kao meta, ovo će rezultirati u formiranu transuranskih elemenata.

Najprostija nuklearna transformacija ovog tipa je reakcija radijacionog zahvata neutrona na jezgru ${}_{92}^{238}\text{U}$ sa stvaranjem ${}_{93}^{239}\text{U}$ koje se dalje raspada β^- raspadom



Prvi transuranski element, neptunijum ${}_{93}\text{Np}$ je otkriven preko ovog procesa 1940. godine, od McMillan i Abelsona.

McMillanov eksperiment je bio sličan onom koji je obavljao F. Joliot Curie sa ciljem registrovanja fragmenata fisije formiranih u uranovoj meti. McMillan je uporedio osobine fragmenata sa onim koji se dobijaju iz uranove mete nakon ozračivanja i otkrio je da pored puluživota karakterističnih za ${}_{93}^{239}\text{U}$ i fisione fragmente, (koji se formiraju u fisiji, ali ne napuste metu), uranova meta ima još jedan poluživot od $T_{1/2}=2.35$ dana, a koji ne odgovara ni jednom od fragmenta fisije.

Bilo je prirodno pretpostaviti da ova vrednost $T_{1/2}=2.35$ dana odgovara ${}_{93}^{239}\text{Np}$. Hemijska identifikacija ovog izotopa neptunijuma je obavljena zajedno sa Abelsonom (1940). Pokazano je da poluživot od $T_{1/2}=2.35$ dana rezultuje od ${}_{93}^{239}\text{U}$ sa poluvremenom od 23 minuta.

Drugi izotop neptunijuma, ${}_{93}^{238}\text{Np}$ je dobijen ozračivanjem ${}_{92}^{238}\text{U}$, 16 MeV-skim deuteronomima:



Do sada je otkriveno jedanaest izotopa neptunijuma, sa masama od 231 d 241. Neptunijum je težak elemenat ($\rho=19.5 \text{ g/cm}^3$), metal, srebrnastog izgleda, koji sporo oksidiše na vazduhu. Tačka topljenja je $640 \text{ }^\circ\text{C}$.

U proučavanju transuranskih elemenata pojavljuju se tri problema; produkcija pojedinačnih izotopa, njihova separacija od smeše jedinjenja drugih elemenata i identifikacija njihovih masenih i atomskih brojeva.

Mogućnost dobijanja izotopa zavisi od izbora odgovarajuće nuklearne reakcije. Na primer, očigledno je da ako se reakcija 8.1.1. obavlja izvan nuklearnog reaktora u toku dužeg vremena, dovešće do sekundarnog efekta, tj., adhezije neutrona na izotopu ^{239}Np i kreiranja ^{240}Np . Slično reakcije izazvane brzim alfa česticama mogu da izazovu emisiju različitog broja neutrona ($(\alpha,2n)$, $(\alpha,3n)$) i formiranje različitih izotopa transuranskih elemenata. Isto važi i za druge nuklearne reakcije.

Vrlo je teško izdvojiti novi element od početnog materijala ili drugih supstanci formiranih zajedno sa elementom koji je od interesa. Teškoća leži u tome da treba izolovati mikroskopske količine supstance koje su sasvim slične po hemijskim osobinama (slično elementima retkih zemalja, kod formiranih transurana popunjavaju se unutrašnje elektronske ljuske). Transuranski elementi se izdvajaju korišćenjem radiohemijskih metoda. Neke od ovih metoda su opisane u sekciji 6.3, i zasnovane su na korišćenju nosača čije su hemijske osobine slične onim koje se proćavaju. Slične metode se koriste i za transuranske elemente.

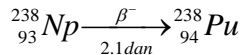
Transuranski elementi se izdvajaju pomoću *jonske hromatografije*. Ovaj metod je zasnovan na osobini nekih smola da izmenjuju jone sa odgovarajućim jonima soli. Efikasnost interakcije jona sa smolom zavisi od njegovog naelektrisanja i veličine, i odavde ima razne vrednosti za razne jone.

Ako se rastvor koji sadrži razne jone propusti kroz jon izmenjivački kolonu koja sadrži smolu, joni koji najefikasnije reaguju apsorbuju se na samom početku, tj., na ulazu u kolonu, dok se ostali joni raspoređuju duž kolone u skladu sa njihovom interakcijom. Da bi se ekstrahovali joni iz kolone, propušta se rastvarač kroz nju, isperu se joni koji su najslabije vezani na početku, a oni koji su najjače vezani se isperu na kraju. Separacija se može pojačati korišćenjem specijalnih rastvarača, čija se efikasnost interakcije sa jonima koji se izdvajaju, menja inverzno efikasnosti njihove interakcije sa smolom. Metod se široko primenjuje za izdvajanje transuranskih elementa do mendeljevijuma sa $Z=101$.

Treći problem u proučavanju transuranskih elemenata, tj., identifikacija izotopa, se rešava poredjenjem njihovih osobina sa odgovarajućim empirijskim pravilnostima u promeni Z sa A . Takve osobine uključuju energiju i poluživot alfa i beta raspada, poluživot spontane fisije i dr. U istom cilju mogu se koristiti podaci o akumulaciji izotopa u reakciji tipa 8.1.1 kao funkcija vremena, ili podaci prinosa datih izotopa kao funkcija energije incidentnih čestica. Direktna masena spektroskopska analiza se takodje može koristiti.

8.2. Plutonijum. Osobine i primene

Drugi transuranski element, je otkrio Seaborg i dr, 1940. zajedno sa ^{238}Np u reakciji 8.1.2. Nakon beta raspada ^{238}Np , dobija se izotop 94 tog elementa, tj., plutonijum:

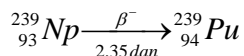


8.2.1.

Neptunijum i plutonijum su dobili imena po planetama Neptun i Pluton, koje se nalaze iza planete Uran u Sunčevom sistemu.

Izotop ${}^{238}\text{Pu}$ otkriven od Seaborg i dr., je alfa radioaktivan i ima vreme poluraspada $T_{1/2}=85.4$ godine. Sada se ovaj izotop koristi za pripremanje izotopskih izvora.

Sledeći plutonijumov izotop ${}^{239}\text{Pu}$, je otkrio Seaborg sa saradnicima, 1941. godine u produktima reakcije beta transformacije drugog neptunijumovog izotopa



8.2.2

Ovaj izotop je takodje alfa aktivan, sa poluzivotom od $2.44 \cdot 10^4$ godina. Kao rezultat alfa raspada ovaj izotop se transformiše u ${}^{235}\text{U}$. Može se pretpostaviti da oba ova jezgra, ${}^{239}\text{Pu}$ i ${}^{235}\text{U}$ moraju da doživljavaju fisiju u identičnim procesima. Oba jezgra sadrže paran broj protona i neparan broj neutrona i jako se ekscituju kada im se neutron pripoji. Pored toga, fisioni parametar Z^2/A je čak i veći za ${}^{239}\text{Pu}$ nego za ${}^{235}\text{U}$. Može se očekivati da ${}^{239}\text{Pu}$ takodje zadovoljava uslov fisije sa termalnim neutronima:

$$\varepsilon > W_{fis}$$

Analiza osobina ${}^{239}\text{Pu}$ potvrđuje ove pretpostavke i pokazuje da ovaj izotop ima veoma veliki efikasni presek za fisiju termalnim neutronima (738 b), emitujući u proseku 3 neutrona u svakom aktu fisije. Ovo otvara mogućnost korišćenja ${}^{239}\text{Pu}$ kao nuklearnog goriva, pored ${}^{235}\text{U}$. Tako, problem dobijanja velike količine ${}^{239}\text{Pu}$ po reakcij 8.1.1 postaje krajnje važan. Predloženo je da se ovaj problem reši separacijom plutonijuma iz urana iz nuklearnih reaktora posle dužeg rada.

Da bi se dizajniralo postrojenje za precesovanje ozračenog urana, nužno je znati hemijske osobine plutonijuma. Ovo je moguće samo separacijom ovog elementa u dovoljnoj količini. Jedini metod u toku 1941-1942 godine za dobijanje plutonijuma je bio ozračivanje urana u ciklotronu. Posle dugog vremena izlaganja (više od nekoliko meseci) nekoliko stotina kilograma urana u brojnim ciklotronima, oko 500 μg plutonijumove soli je dobijeno na kraju 1942. Nadjeno je da je ova količina dovoljna za proučavanje osobina plutonijuma metodama ultramikrohemijske. Plutonijum je danas izučen u celosti. Petnaest njegovih izotopa sa masenim brojevima između 232 i 246 je poznato do sada. To je sjajan metal, plavičaste boje. Gustina raznih modifikacija je između 15.9 i 19.8 g/cm^3 . Ima negativan koeficijent termalnog širenja.

8.3. Transuranski elementi sa $Z > 94$

8.3.1. Americijum i Kirijum

Sledeća dva transuranska elementa, americijum i kirijum su otkrivena 1944. Oba elementa su srebrnasta, i gustine su $\rho_{Am}=11.7 \text{ g/cm}^3$ i $\rho_{Cm}=7 \text{ g/cm}^3$. Americijum je prvo otkriven u reakciji:



koja se odigrava u nuklearnim reakcijama. Isti izotop americijuma je takodje dobijen ozračivanjem urana 40 MeV alfa česticama:



Trenutno, otkriveno je 11 izotopa americijuma sa masenim brojevima izmedju 237 i 247. Najznačajniji medju njima je ${}^{242}\text{Am}$ koji ima veliki efikasni presek za zahvat termalnih neutrona (oko 8000b) i izomerno stanje sa vrlo malim poluživotom u odnosu na spontanu fisiju:

$$T_{1/2}^{sp. fis} ({}_{95}^{242m}\text{Am}) = 1.4 \times 10^{-3} s$$

Otkriće ove izomerije u Dubni, je bilo startna tačka proučavanja vrlo interesantog fenomena izomerizma oblika. Trenutno, spontana fisija iz izomernog stanja je opažena kod mnogih transuranskih elemenata, od neptunijuma do berkljuma (kao i za uran).

Kirijum, 96 ti element je prvo otkriven u reakciji



Kasnije je isti izotop dobijen kao rezultat beta raspada americijuma stvorenog u lancu reakcije 8.3.1.

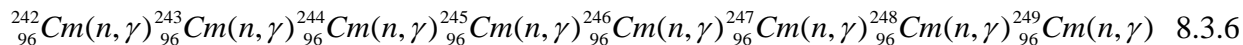


Pored ovoga, ${}^{242}\text{Cm}$, se može dobiti ozračivanjem Pu pomoću alfa emitera



Izotop ${}^{242}\text{Cm}$ emituje alfa čestice sa poluživotom od 162.7 dana. Njegova alfa aktivnost je tako visoka (10^{13} alfa čestica se emituje po minuti od 1 mg ovog izotopa), što dovodi do grejanja i čak dekompozicije vode ako je kirijumova so rastvorena u njoj, kao i do luminiscencije u mraku. Tako jaka alfa aktivnost se priprema u hermetički zatvorenim komorama načinjenim od provodne plastike. Izotop ${}^{242}\text{Cm}$ se koristi za pravljenje izotopskih radioaktivnih izvora struje (baterija) sa snagom do 100 W.

Drugi izotopi kirijuma se mogu dobiti pripajanjem neutrona jezgru ^{242}Cm u nizu (n,γ) reakcija nakon dužeg ozračivanja u reaktoru. Kako izotopi kirijuma sa masenim brojem većim od 242 imaju dugo vreme poluživota, dug lanac sukcesivnih (n,γ) reakcija daje:



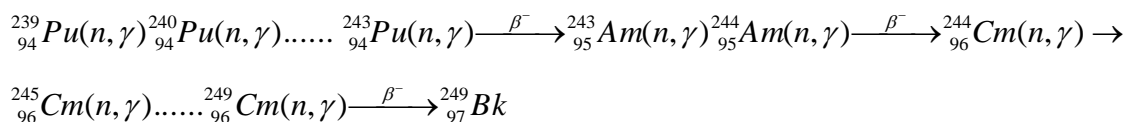
Ukupno trinaest izotopa kirijuma je poznato do sadasa masenim brojevima od 238 do 250.

8.3.2. Berklijum i Kalifornijum

Prvi izotop 97-mog elementa, tj., $^{243}_{97}\text{Bk}$, berklijum, imenovan po američkom gradu Berkliju, otkriven je 1949. godine ozračivanjem ^{241}Am pomoću 35 MeV-skih alfa čestica:



Drugi izotopi ovog elementa su otkriveni ozračivanjem americijumskih i kirijumskih meta u ciklotronima i dužim ozračivanjem plutonijumskih i americijumskim meta neutronima u reaktorima. Na primer izotop ^{249}Bk je dobijen dugim ozračivanjem ^{239}Pu u reaktoru



Poznata su osam izotopa berklijuma sa masenim brojevima od 243 do 251.

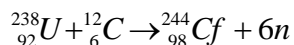
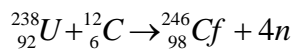
Element sa atomskim brojem 98, kalifornijum je otkriven 1950 na Univerzitetu u Kalifornije u Berkliju. Prvi izotop ovog elementa ^{245}Cf , je otkriven kao rezultat ozračivanja ^{242}Cm , 35 MeV skim alfa česticama



Drugi izotopi kalifornijuma su dobijeni u sličnim reakcijama sa emisijom različitog broja neutrona. Ovaj elemenat je dobijen u velikim količinama ozračivanjem ^{239}Pu u reaktorima. Proces se odigrava prema šemi 8.3.8 posle koga sledi lanac



Nove nuklearne reakcije korišćenjem ubrzanih jona ^{12}C su korišćene za dobijanje izotopa kalifornijuma:



8.3.11.

Joni se ubrzavaju u ciklotronu. Da bi se dobila najveća moguća energija (za prevazilaženje visoke Kulonove barijere $B_C = Zz/A^{1/3} \cong 92 \cdot 6/6 \cong 92$ MeV), ubrzavaju se višestruko jonizovani atomi C^{6+} . Takvi joni se proizvodi (u malim količinama, reda 0.1 %) kao rezultat interakcije dvostruko jonizovanih atoma (dobijenih u izvoru) sa preostalim gasom u komori ciklotrona. Računanja pokazuju da ciklotron namenjen za ubrzanje dvostrukojonizovanih atoma takodje ubrzava šestostruko jonizovane atome (C^{6+}). Joni C^{6+} ubrzani do 120 MeV se koriste u reakciji 8.3.11.

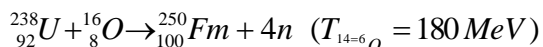
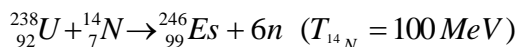
Izotopi kalifornijuma imaju kratko vreme poluživota u odnosu na spontanu fisiju. Tako ${}^{252}\text{Cf}$ ima vreme od 82 godine, dok je za ${}^{254}\text{Cf}$ to 60.5 dana. Lako se može videti da tako kratki poluživoti odgovaraju velikom broju akata spontane fisije po jedinici vremena i velikoj gustini fluksa fisionih neutrona oslobodjenih u ovim aktima.

Kao rezultat, izotop ${}^{252}\text{Cf}$ koji se može dobiti u velikim količinama, može se koristiti za proučavanje fisije i takodje kao izvor neutrona (1 g ovog izotopa mora emitovati $3 \cdot 10^{12}$ neutrona u sekundi). Šesnaest izotopa ovog elementa sa masenim brojevima od 240 do 255 je otkriveno do sada.

8.3.3. Ajnštajnijum i fermijum

Elementi ${}_{99}\text{Es}$ i ${}_{100}\text{Fm}$, su dobijeni u sledećim procesima:

- 1) kao rezultat dužeg izlaganja ${}^{239}\text{Pu}$ intenzivnom fluksu neutrona
- 2) u reakcijama sa višestrukonaelektrisanim jonima



8.3.12.

- 3) Ozračivanjem kalifornijumske mete alfa česticama

Oba ova elementa su otkrivena u analizi produkta formiranih termonuklearnom eksplozijom. Intenzivno ozračivanje urana (deo termonuklearne bombe) neutronima u momentu eksplozije dovodi do formiranja vrlo teških izotopa ${}^{253}, {}^{255}\text{U}$. Posle nekoliko beta transformacija ovi izotopi se transformišu u ${}^{253}\text{Es}$ i ${}^{255}\text{Fm}$.

Ajnštajnijum i fermijum imaju čak i kraći poluživot u odnosu na spontanu fisiju i alfa emisiju. Najduže živeći izotop ${}^{254}\text{Es}$ ima vreme poluživota za alfa raspad 480 dana, dok najduže živeći izotop ${}^{257}\text{Fm}$ ima 79 dana. Interesantno je zapaziti da izotop fermijuma ${}^{256}\text{Fm}$ ima vreme poluživota za spontanu fisiju 160 minuta.

Ukupno 14 izotopa ajnštajnijuma sa masenim brojevima između 243 i 256, i 15 izotopa fermijuma sa masenim brojevima 244 do 258 je poznato.

8.3.4. Mendeljevijum

Mendeljevijum, sa atomskim brojem 101, je otkrila Ghiorso ova grupa 1965. Dobijen je ozračivanjem ajnštajnijumske mete alfa česticama energije 41 MeV.



Meta je napravljena od zlatne folije na koju je nanet tanak sloj ajnštajnijuma sa oko 10^9 atoma. Meta je bombardovana od pozadi intenzivnim snopom alfa čestica. Emitovani (uzmaknuti) atomi mendeljevijuma su taloženi na zlatnoj detektorskoj foliji smeštenoj u blizini. Na kraju ozračivanja, detektorske folije su rastvorene i tako dobijen ratvor je propušan kroz jon izmenjivačku kolonu radi izdvajanja mendeljevijuma.

Fizičke osobine formiranog izotopa mendeljevijuma (maseni broj, tip radioaktivnosti, poluživot) su određene iz poluživota u odnosu na spontanu fisiju (160 minuta). Kako ova vrednost odgovara fermijumovom izotopu ${}^{256}\text{Fm}$, mendeljevijumov izotop jedino može biti ${}^{256}\text{Md}$ koji se preko elektronskog zahvata transformiše u ${}^{256}\text{Fm}$:



Interesantno je zapaziti da je u prvom eksperimentu, detektovano samo 17 atoma mendeljevijuma, ali je čak i ova količina bila dovoljna za identifikaciju novog elementa.

Pored ${}^{256}\text{Md}$, identifikovano je još četiri izotopa, ${}^{252,255,257,258}\text{Md}$. Određeni su tipovi njihovih radioaktivnosti (alfa i elektronski zahvat) i poluživota (od 8 do 290 minuta). Dva druga izotopa ${}^{250}\text{Md}$ i ${}^{253}\text{Md}$ su takodje nadjena, i doživljavaju elektronski zahvat. Sada je poznato 11 izotopa ovog elementa sa $A=248-258$.

8.3.5 Nobelijum, 102 element

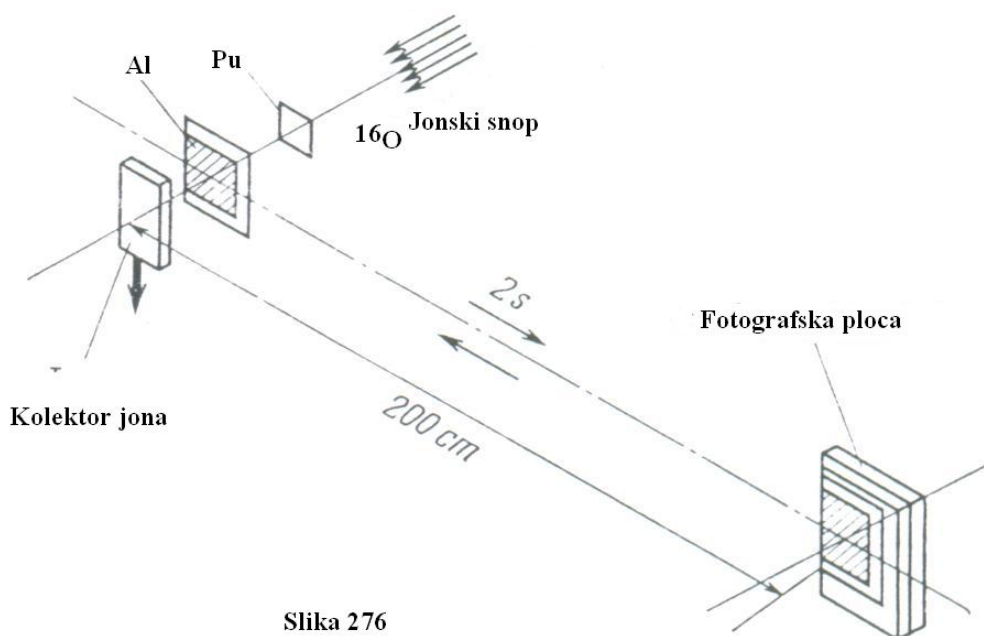
Mnogo teškoća je bilo potrebno da se prevaziđe u toku pokušaja sintetizovanja elementa sa rednim brojem 102. Prvi izveštaji o njegovoj sintezi su publikovani 1957 (ciklotronsko bombardovanje ${}^{244}\text{Cm}$ jonima ${}^{13}\text{C}$ u Stokholmu, Švedska) kada je i predloženo njegovo ime. Međutim, rezultati su bili kontradiktorni, na primer korespodencija između energije alfa čestica (8.5 MeV) i poluživota (10 minuta, iako se očekivalo 10 s).

Nedostaci prvih eksperimenta su poticali od korišćenja hromatografske analize koja je ranije uspešno primenjivana za elemente do mendeljevijuma $Z=101$. Ova metoda ne daje rezultate za elemente čiji je poluživot reda nekoliko sekundi, ili manje. Odavde za otkriće 102 elementa potrebno je za njegovu separaciju koristiti fizičke metode.

Međutim, na početku ni fizičke metode nisu dovele do dobrog rezultata. Prvi korektan rezultat u vezi sa elementom 102 je dobijen tek 1963. godine u Dubni, dok je zadovoljavajuće

slaganje između rezultata dvaju laboratorija (Dubna i Berkli) u proučavanju izotopa 102 og elementa dostignuto 1966-67. godine. Štaviše, možemo opisati ranije radove koji su popločali put za identifikaciju elementa 102 i daljih transuranskih elemenata pomoću zaista intrigantnih i komplikovanih eksperimenata. Ovi eksperimenti su počeli 1957. godine u USSR i u SAD. Grupu u Moskvi je rukodio Flerov, a u Berkliju Seaborg i Ghiorso.

Šema Flerovog eksperimenta je prikazana na slici 276. Joni ^{16}O energije 100 MeV su korišćeni za ozračivanje mete ^{239}Pu i ^{241}Pu . Jezgra formirana kao rezultat zahvata ^{16}O doživljavaju uzmak, usled čega napuštaju metu i padaju na aluminijumski reciver. Ovaj reciver se može pokrenuti za oko 2 m u toku 2 sekunde i smestiti u blizini fotografske ploče, koja registruje alfa čestice emitovane od strane jezgra na reciveru.



Slika 276

Merenje tragova registrovanih alfa čestica pokazuje da one imaju energiju od 8.8 MeV. Prema šemi raspada ove alfa čestice moraju doći od elementa 102. Eksperimenti su obavljani za razne brzine i pomeranja recivera i dali su sledeću procenu poluvremena života ovog elementa; $3\text{ s} < T_{1/2} < 40\text{ s}$. Eksperimenti su pokazali da se alfa čestice ove energije mogu očekivati od elementa Bi, Pb, Tl i Hg, koji su prisutni u plutonijumskoj meti. Međutim, ovo ne može objasniti opaženi efekat u potpunosti. Proučavanje prinosa elementa 102 za razne energije bombardovanja otkrilo je da je maseni broj elementa 102 jednak 153.

Ghiorsojev eksperiment je šematski prikazan na slici 277. Bombardovanje $^{246}_{96}\text{Cm}$ jonima ^{12}C dovelo je do stvaranja (jonizovanih) atoma 102 gog elementa. Usled dovoljne energije uzmaca, ovi atomi su napuštali metu i udarali na negativno naelektrisanu elektrodu (u obliku kaiša). Raspadom (alfa) elementa 102 formirani su atomi fermijuma ($Z=100$) koji su takodje

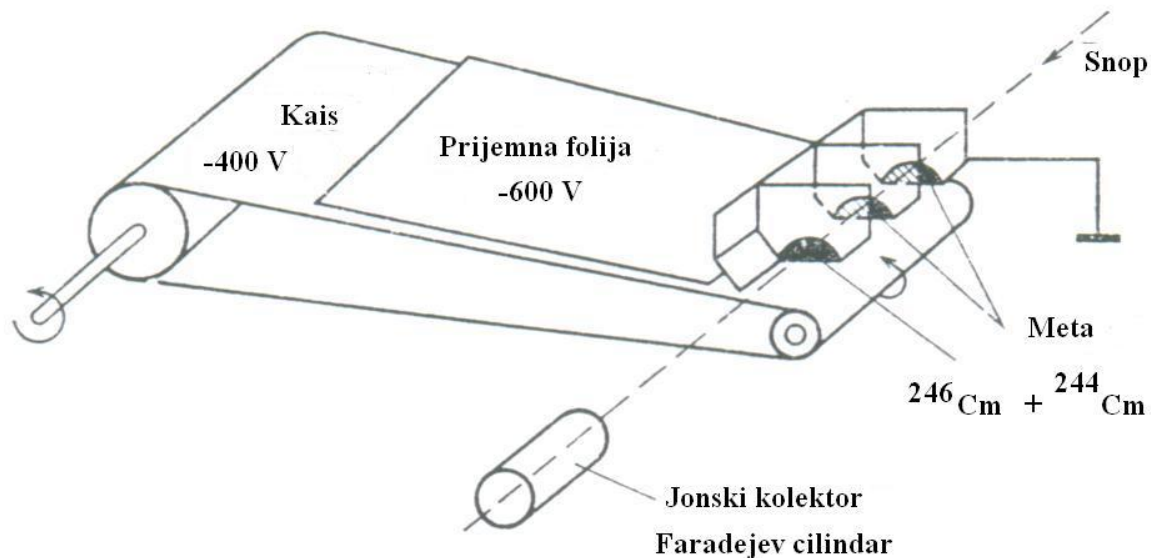
napuštali kaiš usled energije uzmarka i taložili se na prijemnoj foliji koja je bila naelektrisana negativno u odnosu na kaiš.

Analiza jezgra potomka pokazala je da su ona alfa radioaktivna ${}_{100}^{250}\text{Fm}$ ($T_{\alpha} = 7.7 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 30 \text{ min}$). Ovo je značilo da je roditeljsko jezgro izotop ${}^{254}_{102}$.

Da bi odredili poluživot ovog izotopa, proučavana je brojčana raspodela jezgara ${}_{100}^{250}\text{Fm}$ nataloženih u pravcu kretanja kaiša. Ovo je omogućeno poredjenjem alfa aktivnosti raznih segmenata folije. Poredjenje ovih rezultata sa brzinom premeštanja kaiša dalo je procenu poluživota izotopa ${}^{254}_{102}$. Nadjeno je da je to oko 3 s.

Maja 1963. je saopšteno da je izotop ${}^{256}_{102}$ sintetizovan u laboratoriji Flyrova u Dubni. Ovaj izotop je stvoren bombardovanjem ${}_{92}^{238}\text{U}$ jonima ${}^{22}\text{Ne}$.

Eksperimentalna tehnika koju je koristio Flyrov je u osnovi kao i u prethodnim eksperimentima (rotirajući valjak za sakupljanje jezgara ${}^{256}_{102}$ i stacionarni prijemnik produkata alfa raspada ovog jezgra, tj., ${}_{100}^{252}\text{Fm}$). Postojala je jedna značajna modifikacija. Prijemnik nastalih jezgara je izolovan od produkata primarne reakcije pomoću specijalnog električnog i mehaničkog uređaja. Izotop ${}^{256}_{102}$ je identifikovan iz osobina ${}_{100}^{252}\text{Fm}$ i njegov poluživot je određen poredjenjem raspodele Fm jezgara na prijemniku u funkciji brzine rotacije bubnja. Vrednost $T_{1/2}^{\text{exp}}$ je procenjena oko 8 s.



Slika 277

Ovo je bio prvi rezultat koji kasnije nije potvrđen. Ovo je iniciralo novu eru proučavanja ovog elementa, koja su dovela do univerzalno prihvaćenog rezultata.

Nužnost obavljanja novih eksperimenata je postala jasna nakon poredjenja poluživota novo otkrivenih izotopa $^{256}102$ i $^{254}102$ koji je otkriven ranije na Berkliju.

$$T_{1/2}^{\text{exp}}(256) > T_{1/2}^{\text{exp}}(254)$$

Medjutim, obrnuti rezultat se očekivao iz teorijskih razmatranja (postojanje podljuske sa 152 neutrona):

$$T_{1/2}^{\text{teor}}(256) < T_{1/2}^{\text{teor}}(254)$$

Sistematsko proučavanje osobina svih izotopa 102gog elementa otkrivenih do tada (A=251-257) je preduzeto od strane Flyrova u Dubni 1966. i Ghiora u Berkliju 1967. Kao rezultat ovih istraživanja, otkriveno je da su netačna vremena poluraspada bila dobijena od strane obe grupe. Univerzalno prihvaćene vrednosti poluživota elementa 102 su date u Tabeli 32.

Tabela 23

A	$T_{1/2}$, s (Dubna)	$T_{1/2}$, s (Berkeley)	A	$T_{1/2}$, s (Dubna)	$T_{1/2}$, s (Berkeley)
251	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.3	255	180 ± 10	180 ± 20
252	4.5 ± 1.5	2.3 ± 0.3	256	6 ± 2	3.2 ± 0.2
253	95 ± 10	105 ± 20	257	Nije proučavano	23
254	75 ± 15	75 ± 5			

Svi izotopi navedeni u Tabeli 32 su alfa radioaktivni. Energije alfa čestica su između 8.01 i 8.66 MeV (za sve izotope, praktično iste vrednosti energije su dobijene u obe laboratorije). Dva izotopa (A=254 i A=256) sa malom verovatnoćom (10^{-7} , i oko 0.007) doživljavaju spontanu fisiju.

Posle ovih eksperimenata, otkriveno je sedam izotopa elementa nobelijuma (još dva, sa A=258 i A=259 su otkrivena kasnije).

8.3.6. Lorencijum, 103 element

O otkriću 103 elementa obaveštenje je stiglo 1961. Ovaj element je nazvan Lorencijum, (^{103}Lw) po američkom fizičaru E.O. Lorencu (Lowrence) pronalazaču ciklotrona. Ovaj element je sintetizovan bombardovanjem kalifornijumske mete (Z=98, A=250-252) jonima bora, (Z=5, A=10-11). Identifikacija novog elementa je obavljena preko energije alfa čestica ($T_{\alpha} = 8.6 \text{ MeV}$). Izotop otkriven ovde je imao maseni broj A=257 i poluživot 8 s.

Drugi alfa aktivni izotop lorencijuma sa masenim brojem $A=256$ i $T_{1/2}=35+-10$ s je otkriven u Dubni 1965. u reakciji



Kasnije, 1967., godine je u istoj laboratoriji pokazano da je poluživot ${}^{257}\text{Lw}$ mnogo veći od 8 s, i da je približno 35 s. Takodje su se pojavile teškoće pri identifikovanju ovog elementa. Autori prvog izveštaja objasnili su ovu razliku u vrednosti $T_{1/2}$ (${}^{257}\text{Lw}$) činjenicom da su sintetizovali ${}^{258}\text{Lw}$ umesto ${}^{257}\text{Lw}$. Do sada je otkriveno osam izotopa ovog elementa sa masenim brojevima izmedju 253 i 260.

8.3.7. Kurčatovijum, 104 elemenat

Prvi izotop 104tog elementa sa masenim brojem $A=260$ je otkriven 1964 godine od strane Flyrova na 310 cm ciklotronu za ubrzavanje višestruko naelektrisanihč jona u Dubni. Novi elemenat je dobijen bombardovanjem plutonijumske mete (97 % ${}^{242}\text{Pu}$ +1.5 % ${}^{240}\text{Pu}$ + 1.5 % ${}^{238}\text{Pu}$) snopom ${}^{22}\text{Ne}$ ubrzanim do 115 MeV:

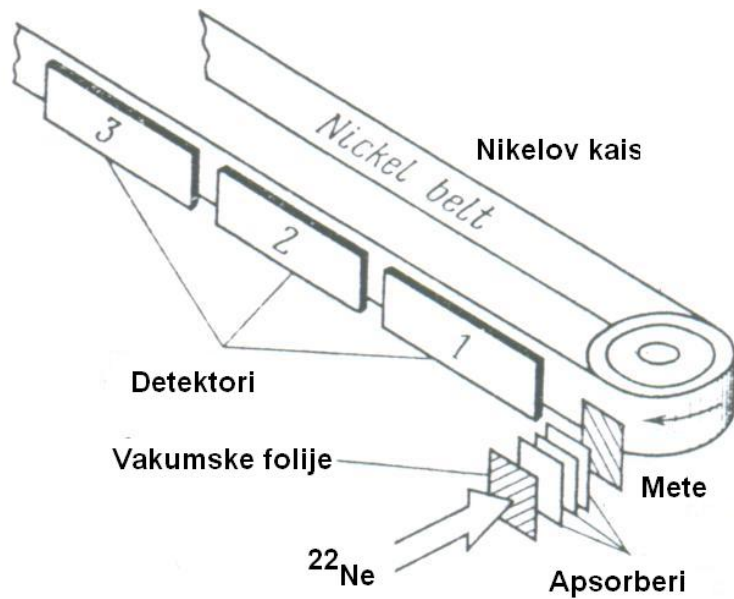


Po pravilu, medjujezgro ${}^{264}_{104}$ formirano u ovoj reakciji se raspada trenutno u dva fragmenta, i verovatnoća da se odigra kanal 8.3.16 je tek 10^{-4} .

Eksperimentalni uredjaj za dobijanje ovog novog elementa je šematski prikazan na slici 278. Absorberi su smešteni izmedju neonskog snopa i mete radi promene energije jona neona. Princip registracije i identifikacije jezgara 104og elementa je bio sledeći. Jezgra koja napuštaju metu usled uzmaka padaju na beskonačnu pokretnu traku od nikela i kreću se zajedno sa njom prema detektoru koji registruje spontane fisione fragmente.

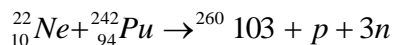
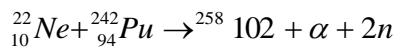
Detektori su načinjeni od specijalnih fosfatnih i silikatnih stakala na kojima fisioni fragmenti ostavljaju tragove. Usled njihovih krajnje malih veličina, ne mogu biti vidljivi pod običnim mikroskopom. Nakon tretiranja u kiselini, ovi tragovi postaju vidljivi. Korišćena su stakla sa malim sadržajem urana i torijuma, pošto fisioni fragmenti formirani kao rezultat interakcije sa fisionim neutronima ${}^{242}\text{Pu}$ mogu da imitiraju željeni efekat.

Poluživot ovog izotopa ovog elementa je procenjen na osnovu poredjenja pomeraja trake sa brojem fragmenata fisije registrovanih na raznim detektorima. Nadjena je vrednost od $T_{1/2}^{sp.,fis} \cong 0.3$ s.

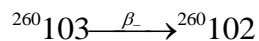


Slika 278

Čak i da je ova vrednost određena tačno, postoji sumnja da potiče od drugih jezgara. Tako, na primer, sledeće reakcije su moguće u interakciji ^{22}Ne sa ^{242}Pu .



8.3.17.



U ovim reakcijama dolazi do stvaranja novih izotopa elementa 102 i 103 koji mogu da imaju isto vreme poluraspada kao $^{260}_{104}$. Štaviše, jezgra nekih lakših transuranskih jezgara, na primer americijuma doživljavaju spontanu fisiju u izomernom stanju sa vrlo kratkim poluživotom. Ova vremena se mogu mešati sa $^{260}_{104}$.

Da bi se odbacile ove neželjene mogućnosti, ^{238}U jezgra su korišćena da se obavi komparativna analiza reakcije tipa $(^{22}\text{Ne}, 4n)$, koja je analogna reakciji 8.3.16., i reakcije tipa $(^{22}\text{Ne}, \alpha, 2n)$ i $(^{22}\text{Ne}, p, 3n)$. Nadjeno je da se reakcija 8.3.16 može realistično izolovati preko preseka i prirode ekscitacionih funkcija.

Konačno, odlučujuća potvrda otkrića elementa 104 je dobijena preko analize njegovih hemijskih osobina. Krajnje malo vreme poluživota zahtevalo je kreiranje specijalne gasne tehnike za brzu hemijsku separaciju produkata nuklearnih reakcija blizu mesta odvijanja. Takva

tehnika je razvijena od strane grupe Čehoslovačkih i Sovjetskih hemičara pod supervizijom Čehoslovačkog hemičara Zvara.

Tehnika korišćena od strane Zvara i saradnika koristi razliku u adsorpciji hlorida elementa treće i četvrte grupe periodnog sistem na čvrstim površinama. Bilo je prirodno koristiti ovu razliku, pošto je lorencijum poslednji elemenat treće grupe Periodnog sistema. Sledeći elemenat mora pripadati četvrtoj grupi, tj., mora biti analogan hafnijumu, a ne aktinijumu.

Eksperiment je postavljen na takav način da se na račun gorepomenute razlike osobina elemenata, na detektoru javljaju samo elementi četvrte grupe. Posle dužeg eksperimentisanja i biranja odgovarajućih radnih uslova (kompozicija gasne smeše, temperatura, pritisak filteri) i tipa detektora, Zvara i saradnici su bili u mogućnosti da registruju 12 slučajeva spontane fisije koji bi mogli da odgovaraju samo transuranskom elementu četvrte grupe, tj., elementu 104.

Jula 1966, akademski savet Dubne odlučio je da ime ovog elementa bud kurčatovijum, Ku, prema osnivaču Sovjetskog nuklearnog programa. Još tri izotopa ovog elementa sa masenim brojevima 257, 259 i 261 su otkrivena u US godine 1969. Svi ovi izotopi su alfa radioaktivni sa poluživotima 4.5, 3 i 60 s.

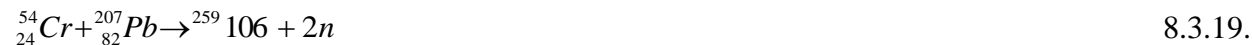
Sledeći korak u ovom pravcu je učinjen 1973. godine u Dubni, gde su još tri izotopa kurčatovijuma sa masenim brojevima (254, 256 i 258) dobijeni bombardovanjem jezgara olova jonima titanijuma ($Z=22$). Poluživot ovih elemenata je između 1 i 10 ms.

8.3.8. Elementi sa $Z=105-107$ i 109.

Otkriće elementa 105 je publikovano iz Dubne i Berklija u nekoliko radova od 1968. do 1970. U Dubni, ovaj elemenat je otkriven u reakciji



Pokazano je, primenom metoda brze hemijske analize da je elemenat 105 sličan tantalu. Godine 1974., Flyrov je obavestio o otkriću elementa 106 u reakciji



Ovo jezgro ima vreme poluraspada za spontanu fisiju oko 0.01 s. U ovom slučaju, čvrsto vezano magično jezgro ${}^{207}\text{Pb}$ je namerno izabrano kao meta, jer sjedinjavanje sa projektilom dovodi do formiranja manje ekscitovanih kompozitnih jezgara nego onih dobijenih običnim nemagičnim jezgrima meta. Niža ekscitaciona energija se manifestuje u emisiji manjeg broja neutrona (dva umesto četiri u prethodnim reakcijama) što dovodi do znatnog povećanja verovatnoće (oko 100) formiranja težih jezgara.

Slična reakcija je obavljena u istoj laboratoriji 1976 godine koristeći ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ magično jezgro kao metu. Ovde se formira jezgro 107og elementa



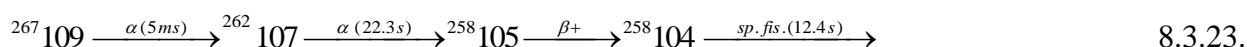
Izotop 107og elementa se raspada sa poluživotom 2 ms u sledeća dva kanala



Konačno, otkriće 109og elementa u Darmstatu (Nemačka) je obavljeno u jesen 1982 na konferenciji o nuklearnim interakcijama.



Izotop 109 og elementa dobijen u ovoj reakciji se raspada po šemi



8.4. Generalna zapažanja o transuranskim elementima

Ranije je pomenuto da transurani grade grupu jedinjenja sličnih hemijskih osobina.

Drugi poznati primer elemenata sa sličnim osobinama jesu elementi retkih zemalja. Njihove osobine su slične lantanu, i odatle im naziv lantanidi. Kako su osobine transuranskih elemenata slične aktinijumu, ovi elementi (kao i ${}_{90}\text{Th}$, ${}_{91}\text{Pa}$, i ${}_{92}\text{U}$) su nazvani aktinidi.

Specifične osobine lantanda potiču iz činjenice da se oni formiraju kroz postepeno popunjavanje 4f unutrašnje podljuske, a ne spoljašnjih ljuski koje određuju hemijske osobine elemenata (za lantanide 5d podljuska je najudaljenija). Slično, formiranje aktinida se dešava kroz postepeno popunjavanje 5f unutrašnje podljuske.

Maksimalni broj elektrona u stanju f je jednako $2(2l+1) = 2(2 \cdot 3 + 1) = 14$. tako, postoji 14 elemenata aktinida sa osobinama sličnim aktinijumu. Lako je videti da je poslednji element u ovoj grupi sa rednim brojem 103 (${}_{103}\text{Lw}$). Sledeći element sa $Z=104$, mora biti sličan hafnijumu.

Sličnost hemijskih osobina transuranskih elemenata dovelo je do izražaja fizičke metode njihove identifikacije na osnovu pravilnosti varijacije osobina jezgara sa brojem nukleona. Medju najvažnijim pravilnostima su alfa i beta raspad i šeme spontane fisije, kao i veoma interesantna osobina nazvana *energetski ciklus*. Ukratko ćemo opisati ovu osobinu.

Primeri regularnosti u vezi sa alfa raspadom su opisani u sekciji 3.2. Prva regularnost povezuje energiju alfa raspada sa masenim brojem A i atomskim brojem Z radioaktivnog jezgra. Ova zavisnost je predstavljena familijom (skoro) pravih linija, od kojih svaka odgovara raznim izotopima istog elementa (Slika 83).

Druga pravilnost uspostavlja vezu izmedju konstante radioaktivnog raspada λ , kinetičke energije T_α alfa čestice i atomskog broja Z alfa aktivnog jezgra.

Može videti sa slika 83 i 96 da su obe ove pravilnosti primenjive i na transuranske elemente. Odavde, one se mogu koristiti da se predvide osobine alfa raspada izotopa transuranskih elemenata koje nisu bili otkriveni, ili nisu izučeni u potpunosti.

Poredjenje beta radioaktivnih izotopa transuranskih elemenata podrazumeva korišćenje relacije koje povezuju energiju beta raspada E , maseni broj A i atomski broj Z beta radioaktivnih jezgara. Slično alfa raspadu, ova zavisnost je takodje predstavljena familijom skoro pravih linija. Vrlo važan zakon je ustanovljen proučavanjem spontane fisije transuranskih elemenata. Poredjenje poluživota spontane fisije $T_{1/2}^{sp.fis}$ za parno parna jezgra pokazalo je da se u prvoj aproksimaciji $T_{1/2}^{sp.fis}$ menja linearno sa parametrom fisije Z^2/A .

$$\ln(T_{1/2}^{sp.fis}) = a - bZ^2 / A. \quad 8.4.1.$$

Ova relacija je ustanovljena u najranijoj fazi proučavanja transurana i može se grubo koristiti za predviđanje poluživotaspontane fisije još uvek neotkrivenih elemenata. Interesantno je zapaziti da aproksimacija 8.4.1. daje najkraće moguće fisiono vreme $T_{min}=10^{-20}$ s (količnik nuklearnog radijusa i brzine fisionih fragmenata). Takodje daje vrednost $Z^2 / A = 40 - 50$, što je blisko vrednosti dobijenoj iz elementarne teorije fisije. Ovo dovodi do zaključka da se periodni sistem elemenata mora zvršiti sa elementima $Z=120-125$. Medjutim, uprkos činjenici da se ova dva predviđanja zasnovana na teoriji i eksperimentu slažu, moraju se uzeti sa pažnjom, jer teorija nije savršena, a eksperimentalni rezultati se koriste u obliku daleke ekstrapolacije.

Detaljnije proučavanje spontane fisije transuranskih elemenata pokazalo je da je linearna zavisnost izmedju $\ln(T_{1/2}^{sp.fis})$ i Z^2/A tek prva aproksimacija. Merenje poluživota parno parnih izotopa istog elementa je pokazalo da oni leže na sedlastoj krivoj od kojih su dve (za Cf i Fm) posebno oštre (Slika 279). Štaviše, početak ovih krivih je blisko povezan sa zavisnošću stabilnosti jezgara od količnika broja protona i neutrona koji ih grade što je opisano u Glavi 2. Oštre krive za Cf i Fm se pripisuju podljuskama sa $N=152$ neutrona (efekat ove podljuske je ranije opažen u specifičnim osobinama alfa raspada, Slika 83).

Podsetimo se da smo razmatrali samo parno parna jezgra. Poluživot u odnosu na spontanu fisiju jezgara sa neparnim masenim brojevima je nekoliko reda veličine duže nego za pridružena parno parna jezgra. Godine 1955, Svyatetski je pokazao da je poluživot spontane fisije vrlo osetljiv na odstupanje δm mase jezgra od glatke vrednosti koja odgovaraja poluempirijskoj formuli za masu.

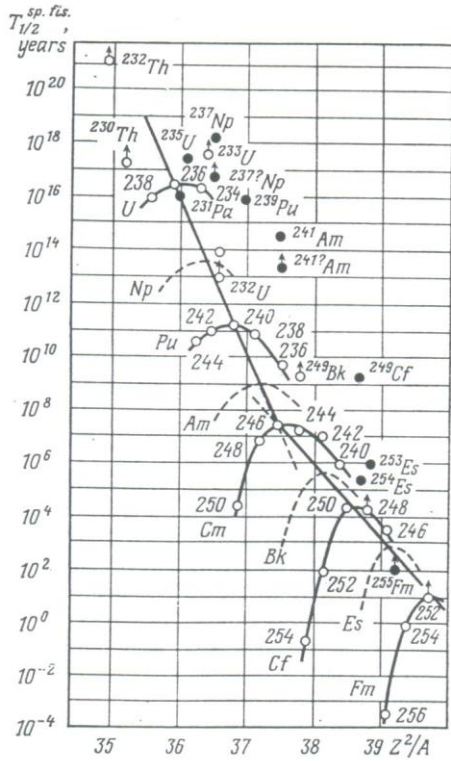


Fig. 279

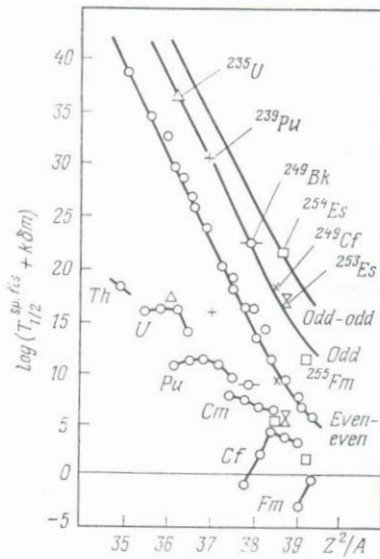


Fig. 280

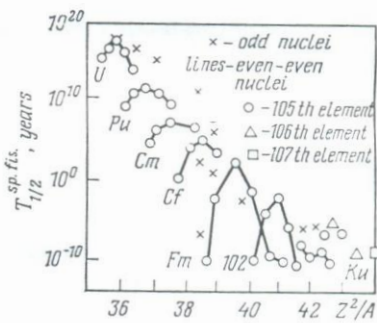


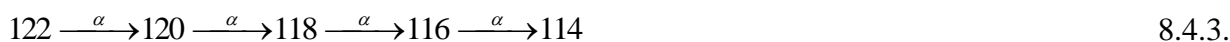
Fig. 281

Nadjeno je da $T_{1/2}^{sp. fis.}$ varira za faktor 10^5 za promenu $\delta m = 1 \text{ MeV}$. Ako se uvede korekcija $k\delta m$ gde je k empirijski izabran faktor, rezultati prikazani na slici 279 se transformišu u tri prave linije koje odgovaraju parno - parnim, neparnim i neparno- neparnim jezgrima (Slika 280).

Najteži otkriveni transuranski elementi ($Z=101-109$) zaslužuju posebnu pažnju. Iz poznatih razloga, informacije o poluživotima u odnosu na spontanu fisiju ovih elemenata su sporadični i nisu konkluzivni (Slika 281). Međutim, važan i čini se realističan zaključak se može izvesti iz ovih informacija. Poluživoti spontanih fisija ovih elemenata opadaju mnogo sporije nego što se očekuje iz formule 8.4.1. Tako, poluživot $T_{1/2}^{sp.fis}$ za jezgro $^{261}_{107}$ je 10^{10} puta veće od predviđanja formule 8.4.1. Ovo daje nadu da su još teža transuranska jezgra moguća i da će biti otkrivena u bliskoj budućnosti i da će biti još stabilnija od 107og elementa. Moderna teorija predviđa magične brojeve $Z=114$ i $N=184$. Jezgra sa takvim brojevima protona i neutrona su tražena i u prirodi a i na akceleratorima. Na primer, reakcija



je proučavana, uz nadu da će nakon serije alfa raspada jezgra $^{308}_{122}$ biti transformisano u stabilan elemenat $Z=114$.



Reakcije formiranja drugih superteških elemenata se sprovode u US, Francuskoj, UK i Rusiji. Međutim, još uvek nema jedinstvenih nalaza i rezultata.

Sistematska analiza osobina transuranskih elemenata nije samo pomogla identifikaciji novih elemenata, već je omogućila ustanovljavanje novih zakona za elemente otkrivene ranije. Tako je detaljna analiza transuranskih elemenata dovela do formiranja nedostajućeg radioaktivnog niza čiji maseni brojevi zadovoljavaju zakon

$$A = 4n + 1 \quad 8.4.4.$$

de je n ceo broj. Članovi ostala tri prirodna radioaktivna niza zadovoljavaju zakone $A=4n$, $A=4n+2$ i $A=4n+3$.

Ova familija je nazvana neptunijumska iako je njen prvi član $^{241}_{94}Pu$. Emisijom beta čestice, u kratkom intervalu vremena, ovo jezgro se transformiše u $^{241}_{95}Am$ koje alfa raspadom prelazi u dugoživeći izotop ($T_{1/2}=2.2 \cdot 10^6$ god) $^{237}_{93}Np$ po kome je serija i dobila ime. Alfa raspad $^{237}_{93}Np$ dovodi do stvaranja beta aktivnog $^{233}_{91}Pa$ posle čega se stvara alfa aktivan izotop urana, $^{233}_{92}U$.

Ranije je pomenuto da $^{233}_{92}U$ ima osobine slične $^{235}_{92}U$ i da se može koristiti kao nuklearno gorivo. Ovaj izotop se dobija u oplodnim reaktorima u kojima je stavljen torijum.

Značajni elementi u neptunijumovom nizu su izotopi $^{221}_{87}Fr$ i $^{217}_{85}At$. Ova dva elementa, francijum i aktinijum su među poslednjim elementima periodnog sistema (ne računajući transurane) koji

su otkriveni (1939 i 1940). Poslednji elemenat ove familije je izotop bizmuta $^{209}_{83}\text{Bi}$ koji sadrži magični broj neutrona (126).

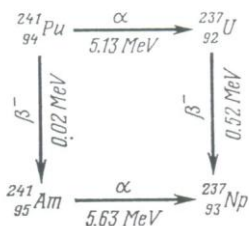


Fig. 282

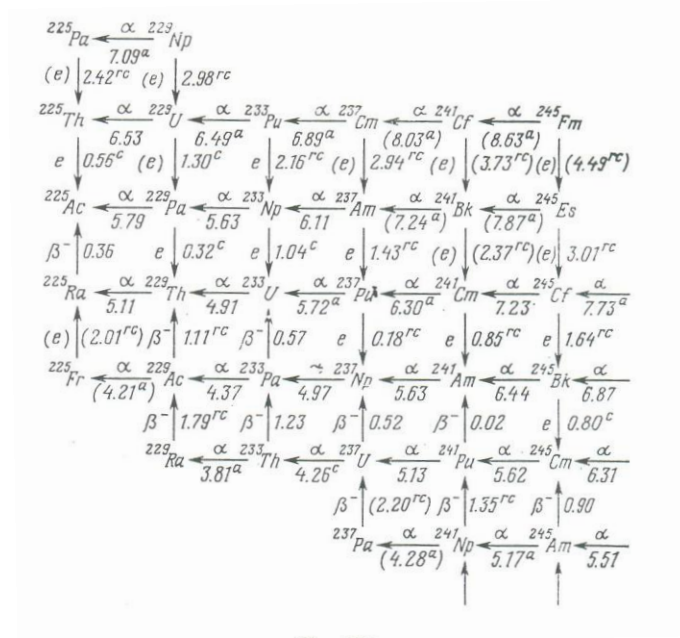
Postojanje kratkoživećeg jezgra na početku neptunijeve serije nije osobina ograničena samo na ovaj niz. Detaljna studija transuranskih elemenata otkrila je postojanje kratkoživećih roditelja i drugih radioaktivnih nizova koji se nalaze u prirodi (uranski, torijumski i aktinouranijumski). Pored toga, izotopi koji ne pripadaju ni jednom od ovih nizova su takodje otkriveni pri proučavanju transuranskih elemenata. Ova jezgra grade familije koje se spajaju na nekom mestu sa nekim od nizova.

Energetski ciklus, zakon pomenut ranije je opštiji zakon koji pokriva sve nizove zajedno sa njihovim kratkoživećim prethodnicima.

Osnovna ideja ovog zakona se može razumeti sa slike 282 koja pokazuje dve grane transformacije jezgra $^{241}_{94}\text{Pu}$ koje se završavaju na istom jezgru $^{237}_{93}\text{Np}$. Prirodno, ukupna energija alfa i beta prelaza u obe grane mora biti ista, činjenica koja je verifikovana u ovom slučaju.

Zatvoreni energetski ciklus raspada se može iskoristiti da se odredi vrednost četvrte nepoznate vrednosti energije, ako su ostala tri poznata. Upadljiva karakteristika ovog procesa je da neka jezgra mogu učestvovati u nekoliko ciklusa (do četiri) što omogućuje dodatne metode provere.

Slika 283 ilustruje mali deo grupa energetskih ciklusa koja sadrže jezgra sa masenim brojevima $A=4n+1$. Strelice i slova indiciraju pravce i prirodu procesa (alfa, beta raspad ili elektronski zahvat). Brojevi naznačuju vrednosti energije prelaza; brojevi bez gornjih indeksa označavaju rezultate merenja, indeks „a“ znači približne vrednosti dobijene iz zakona alfa i beta raspada, dok „c“ i „rc“ označavaju rezultate zatvorenih ciklusa koristeći eksperimentalne „c“ i grube proračune „rc“. Približne vrednosti energija prelaza i moguća priroda prelaza su date u zagradama.



Slika 283

Slične grupe postoje i za jezgra čiji maseni brojevi zadovoljavaju zakone

$$A = 4n, \quad A = 4n + 2 \quad i \quad A = 4n + 3$$

Očito, zatvoreni ciklusi predstavljaju dalji razvoj koncepta radioaktivnih nizova i čini se indiciraju glavne trendove transformacije teških jezgara date grupe u lakša jezgra.