

OTKRIĆE FISIJE I ULOGA PAVLA SAVIĆA

Dragoslav Nikezić

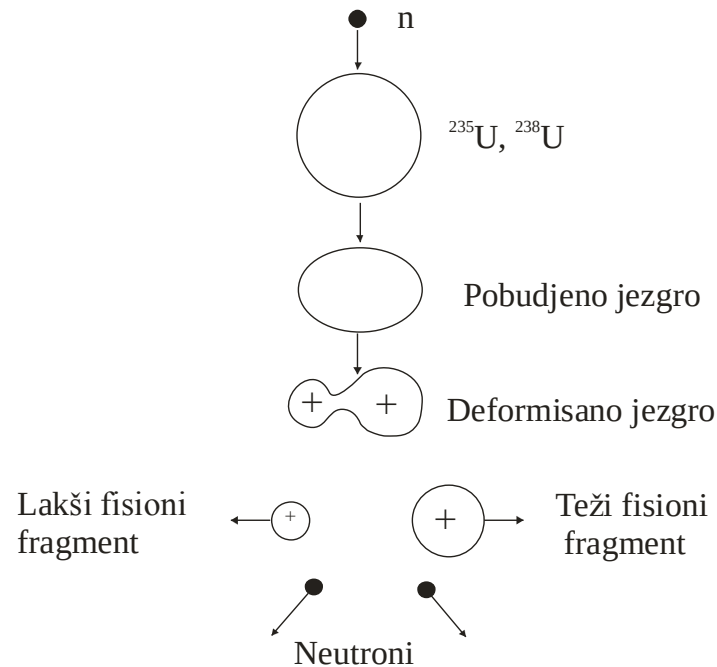
Prirodno- matematički fakultet

UNIVERZITET U KRAGUJEVCU

nikezic@kg.ac.rs

www.pmf.kg.ac.rs/radijacionafizika

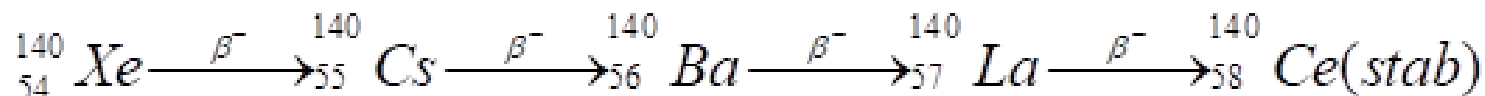
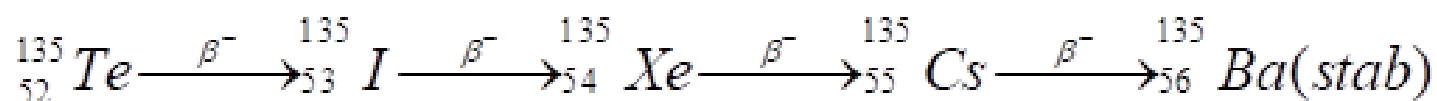
Šta je fisija



200 MeV energije oslobođeno
kroz kineticku energiju
fragmenata

- „Fisija“ znači deljenje i pozajmljena je iz biologije, gde se deljenje ćelije naziva i fisija. U nuklearnoj fizici fisija je cepanje teških jezgara u dva lakša. Fisija je prvobitno otkrivena na jezgrima urana i torijuma i to posle ulaska neutrona u jezgro.
- Cepanje jezgra se odvija na mnogo, **više od 40, različitih načina.**

- Novodobijena jezgra, nazvani fisioni produkti, imaju višak neutrona, i oslobadjaju se tog viška preko niza beta raspada koji se nazivaju fisioni lanci. Svi fisioni produkti, bez izuzetka, su beta minus radioaktivni – u transformaciji jezgra emituje se elektron.



- Formira se **veliki broj različitih izotopa**. Aktivnost ozračenog urana opada na **vrlo komplikovan način**.

ŠTA SU TRANSURANSKI ELEMENTI

- Transurani su **elementi sa atomskim brojevima većim od 92 (urana) i zato se nazivaju transurani**. U prirodi se mogu naći prva dva transurana Neptunijum i Plutonijum u vrlo malim količinama u uranskim rudama. Trka u dobijanju transurana počela oko 1936. i traje...

93 Np Neptuniju
94 Pu Plutonijum
95 Am Americijum
96 Cm Kirijum
97 Bk Berklijum

98 Cf Kalifornijum
99 Es Ajnštajnijum
100 Fm Fermijum
101 Md Mendeljevijum
102 No Nobelijum
103 Lw Lorencijum

OSOBINE TRANSURANA

- Svi prethodni TU pripadaju grupi aktinida (14) i imaju vrlo slične hemijske osobine što je jedan od problema pri njihovoj separaciji i njihovom otkrivanju. Vrlo inovativni i intigrantni eksperimenti su korišćeni za otkrivanje ovih elemenata. Popunjava se 5f unutrašnja podljuska.
- Sledeći element $_{104}\text{Rf}$ (Raderfordijum) je sličan hafnijumu.

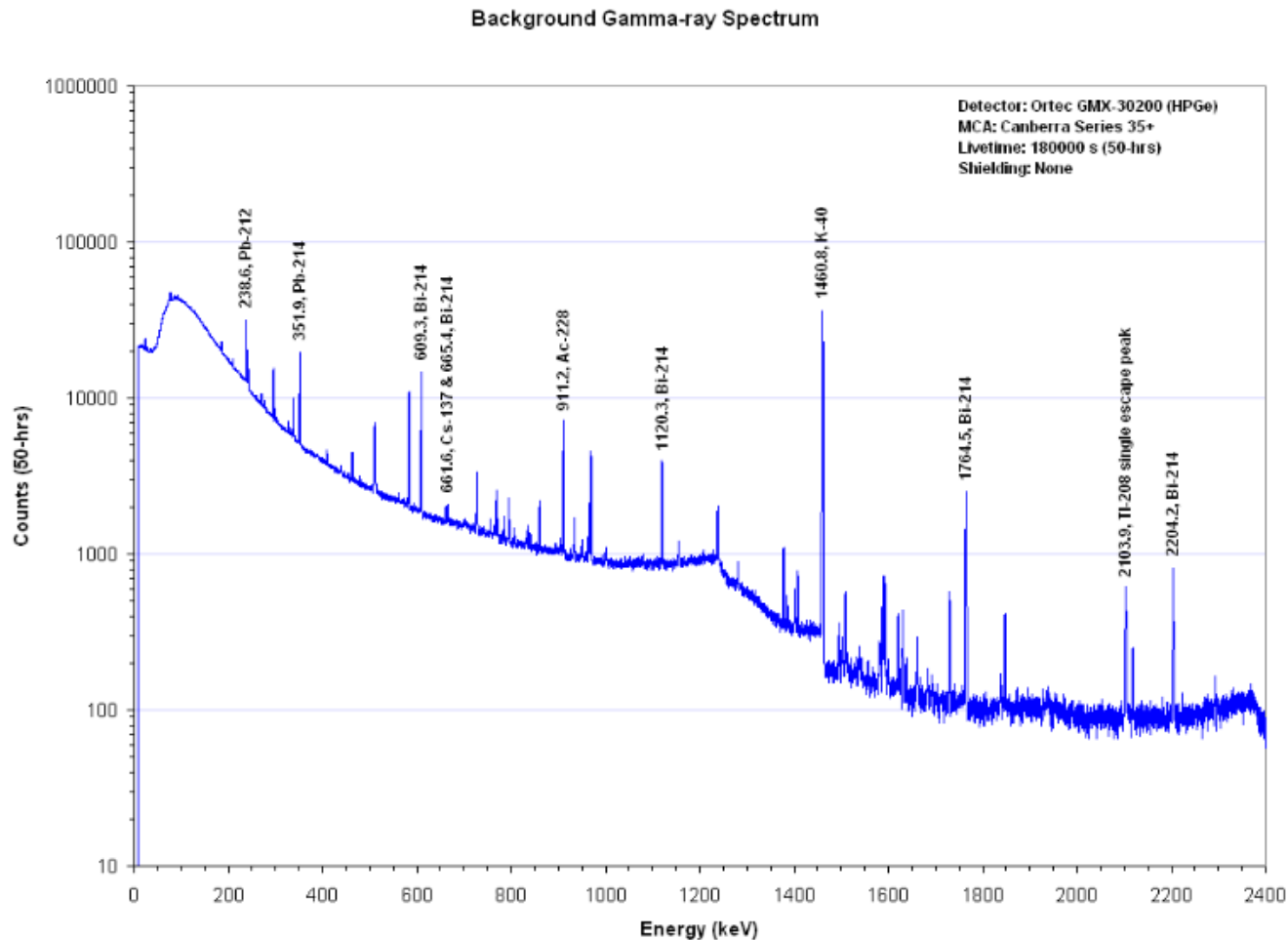
Šta se događa u uranu izloženom sporim neutronima

- Uran u prirodi ima dva izotopa ^{235}U i ^{238}U
- u odnosu 0,72% :99.28%
- $^{235}\text{U} + n \rightarrow \text{fisija} + (2-3)n$ (fisija)
- $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ (transurani)

Identifikacija izotopa

- Jedan od problema pri otkriću fisije je bio **identifikacija izotopa**, tj., koji se stvarno radioaktivni elementi nalaze u komadu urana ozračenom neutronima.
- Danas se to radi gama spektroskopijom visoke rezolucije. Primer

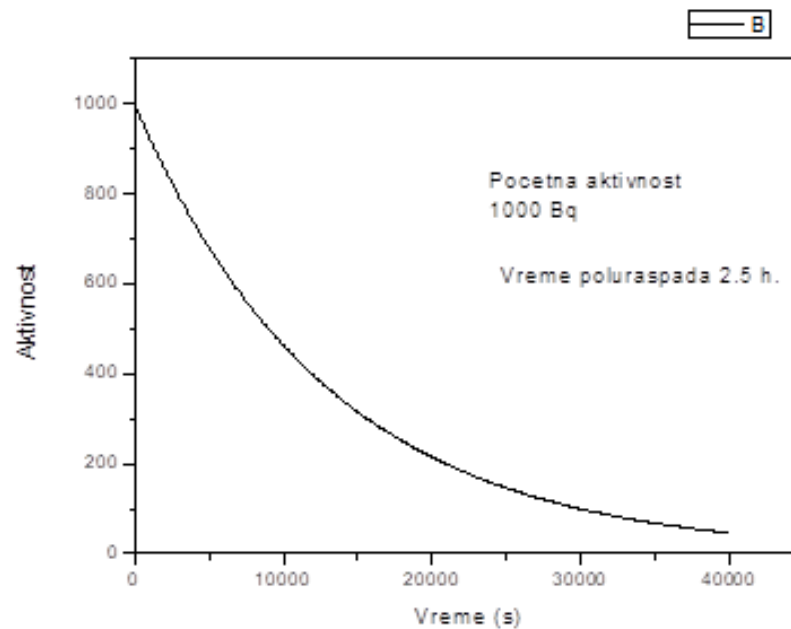
Spektar prirodnog zračenja dobijen Ge detektorom



Identifikacija 1935-39

- Po vremenu poluraspada . Aktivnost se smanjuje eksponencijalno sa vremenom

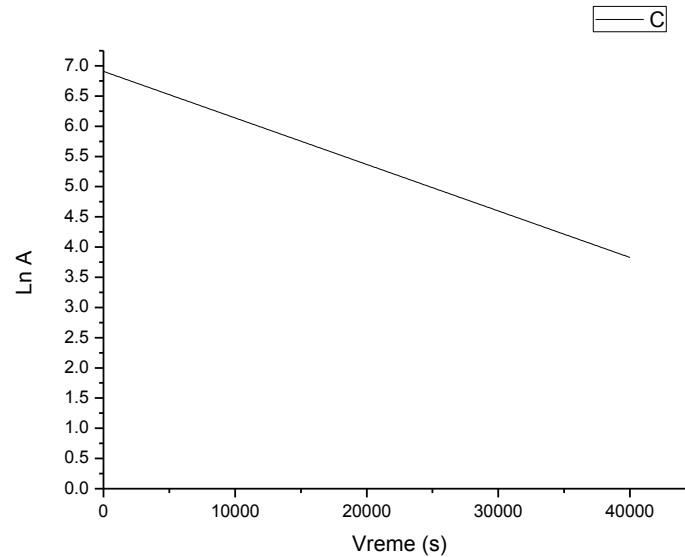
$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$



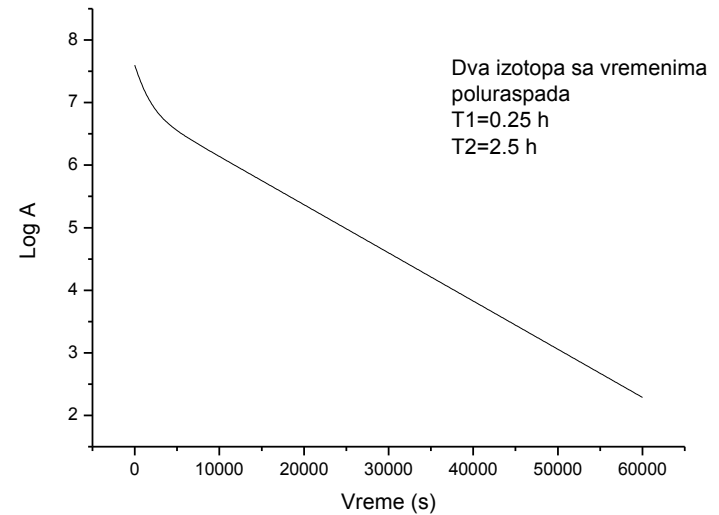
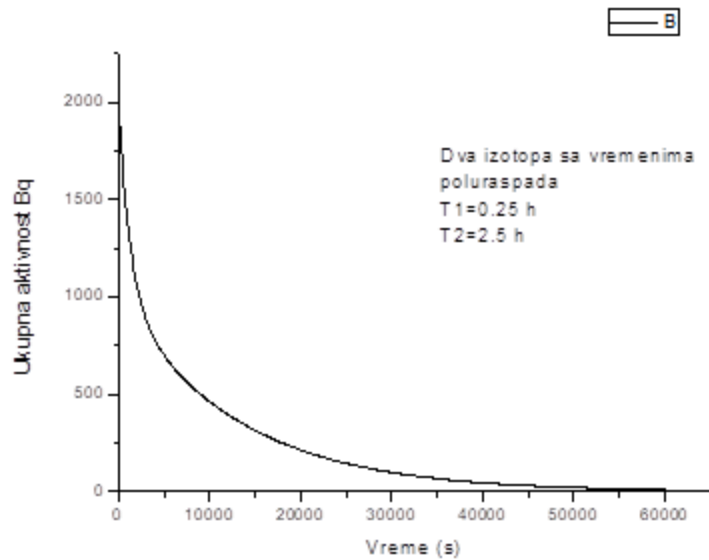
Logaritmovanje

$$\ln A(t) = -\lambda t + \ln A_0$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$



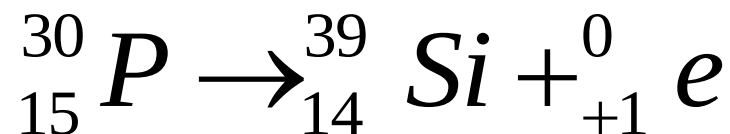
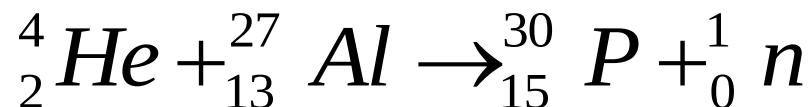
Dva izotopa



- U slučaju većeg broja izotopa u uzorku, situacija se **znatno komplikuje** i primenjivane su metode “ljuštenja” grafika, polazeći od izotopa koji najduže živi.
- Ova metoda je dosta zahtevna i vremenski i računski. Kao rezultat odrede se vremena poluraspada prisutnih izotopa i na osnovu toga se oni identifikuju.
- **Primena ove metode na fisione produkte (ima ih više od 80) je krajnje problematična.**
- *Nisu imali boljih mogućnosti.* Primenjivane su tehnike radiohemijske separacije u cilju izvlačenja pojedinih izotopa i njihove analize.
- ***Frakciona kristalizacija.***

Otkriće veštačke radioaktivnosti

- Frederic Joliot Cuiri i Irena Cuiri.
- Ozračivanje folije **aluminujuma alfa** česticama iz **Po**.



- **Frederikov prst!!** (Bio kontaminiran i služio se tim prstom da proveriti da li GM brojač radi)

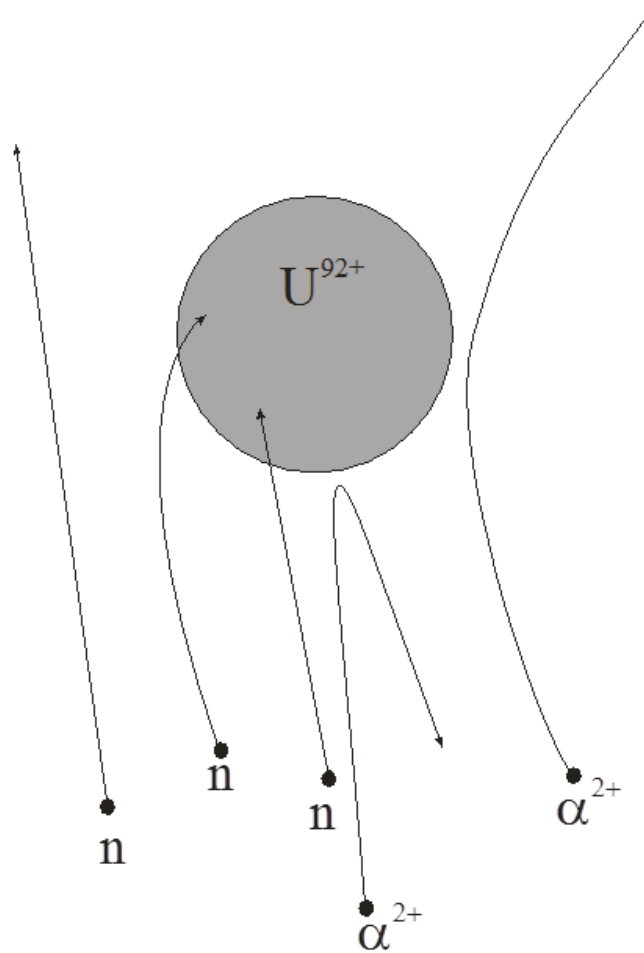
- 7 Solvay Konferenciji u Briselu 1933,
- **Doživeli kritike!**
- F i I. Cuiri (1934) su napisali sledeće *„konačno, moguće je po prvi put, pomoću spoljašnjeg agensa izazvati radioaktivnost nekih atomskih jezgara, koja je merljiva i nakon prestanka ekscitujućeg agensa“*.
- Nobelova Nagrada za otkriće veštačke radioaktivnosti F. Joliot Cuiri i Irena Cuiri.
- **E. Lawrence i M.S. Livingston** - ova depresija. Ozračivali razne metale na ciklotronu i izazivali veštačku radioaktivnost, ali je GM brojač bio vezan na isto napajanje kao i ciklotron. Gaseći ciklotron, gasili su i GM brojač- nisu primetili izazvanu radioaktivnost.

Istraživanja neutronske interakcije u Rimu

1934. E. Fermi

- Teorijski fizičar- počeo eksperimentalni rad
- Shvatio da naelektrisane čestice teško prodiru u jezgro
- Umesto alfa čestica počeo je ozračivanje neutronima.

Neutroni i alfa čestice na uranu



Fermijev rad

- Konstruisao prvi neutronske izvor ($\text{Rn} + \text{Be}$).
- Neutronima ozračivao sve elemente sistematski počev od najlakšeg.
- Nije bilo rezultata, tj., izazvane nuklearne reakcije.
- Skoro odustao od daljeg rada. Ipak prvu reakciju je dobio na fluoru.
- Nastavio rad ozračivanjem sve do urana.

- **Dobio veći broj nuklearnih reakcija.**
- Konačno stigao do urana.
- Pokazalo se da aktivnost urana dosta raste posle ozračivanja neutronima.
- Slučajno je na put neutrona stavljen blok parafina. Aktivnost urana je izuzetno mnogo porasla. Parafin jako usporava neutrone....
- Shvatio da spori neutroni više izazivaju povećanje aktivnosti urana od brzih.
- Razvio teoriju usporavanja neutrona. Koristi se i danas u nuklearnim reaktorima.

- U ozračenom uranu otkrio je sledeća vremena poluraspada
- 10 s, 40 s, 13 min, 40 min i 1 dan.
- Nije znao da je izazivao fisiju jezgra urana.
- Pretpostavio je da su formirani transuranski elementi sa atomskim brojevima 93, 94 i 95 (kasnije nazvani neptunijm $_{93}\text{Np}$, plutonijum $_{94}\text{Pu}$ i americijum $_{95}\text{Am}$).

Periodni sistem iz 1934

1934

H 1																		He 2		1KMz - 166L																
Li 3		Be 4												B 5		C 6		N 7			O 8		F 9		Ne 10											
Na 11		Mg 12												Al 13		Si 14		P 15			S 16		Cl 17		Ar 18											
K 19		Ca 20		Sc 21		Ti 22		V 23		Cr 24		Mn 25		Fe 26		Co 27		Ni 28			Cu 29		Zn 30		Ga 31		Ge 32		As 33		Se 34		Br 35		Kr 36	
Rb 37		Sr 38		Y 39		Zr 40		Nb 41		Mo 42		Ma 43		Ru 44		Rh 45		Pd 46			Ag 47		Cd 48		In 49		Sn 50		Sb 51		Te 52		I 53		Xe 54	
Cs 55		Ba 56		La 57 71		Hf 72		Ta 73		W 74		Re 75		Os 76		Ir 77		Pt 78		Au 79		Hg 80		Tl 81		Pb 82		Bi 83		Po 84		Rn 86				
		Ra 88		Ac 89		Th 90		Pa 91		U 92		93		94		95		96																		

LANTHANIDS

La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60		Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
----------	----------	----------	----------	--	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

- Transuranski elementi sa atomskim brojevima 93,94, 95 i 96, se nalaze u grupi Re, Os, Ir i Pt, i trebalo bi da imaju osobine slične elementima iznad. Ovo je bilo potpuno pogrešno jer ovi elementi pripadaju grupi aktinida i imaju slične osobine (već rečeno).
- Element sa a.b. 93 je nazvan EkoRe, sa 94 EkoOs , sa 95 EkoIr i td.

- Fermi je sumnjao u objašnjenje da se radi o transuranskim elementima. Rezultati su bili dosta kontradiktorni. Ništa nije bilo jasno.
- **Slavljen u Italiji.** Fašistička država pruža mogućnost za vrhunska naučna dostignuća.
- **Pobegao iz Italije odmah po dobitku Nobelove Nagrade 1938-** supruga je bila jevrejka.
- Prestao sa radom u ovoj oblasti- „**pokupio sav kajmak**“.
- **Čestitka od Raderforda** na uspešnom begu iz Teorijske fizike (inferiorne) u eksperimentalnu.

Preporuke Fermija

- 1. Nuklearne reakcije sasvim malo menjaju jezgro urana. Mogu se dobiti elementi koji su susedni uranu ili bar blizu njega.
- 2. Ne treba očekivati elemente sa atomskim brojem ispod 82 (olovo).
- 3. Dobijaju se transurani ekaRe, ekaOs, ekaIr, ekaPt
- Ove preporuke su bile **pogrešne** i nanele su veliku štetu kasnijim istraživanjima.

Kritika Fermijevog rada

- Ida Noddack:
- Otkrila renijum i elemente Re ($Z=75$) i $Z=43$ (Mazurijum, Ma- danas Tehnicipum Tc).
- *it is conceivable that the nucleus breaks up into several large fragments, which would of course be isotopes of known elements but would not be neighbours of the irradiated element."*
- **Jezgro se može podeliti u nekoliko većih fragmenata, koji mogu biti izotopi poznatih elemenata, ali ne moraju biti susedi ozračenog elementa. Bila je potpuno u pravu!**

- Njena ideja je gotovo ismejana; ona je *nekompetentna, nepoštena, smešna, apsurdna do nemoguće*. Kako neutron energije manje od 1 eV može pocepiti teško jezgro kao što je uran.
- Njen rad je publikovan u *slabom časopisu*. Otkriće renijuma je priznato ($Z=75$), ali ne i elementa sa a.b. 43. Nije ulivala poverenje!
- Bila je potpuno u pravu.

Nastavak rada ka otkriću transuranskih elemenata

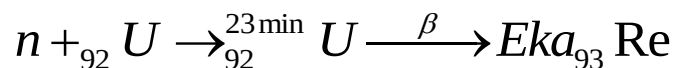
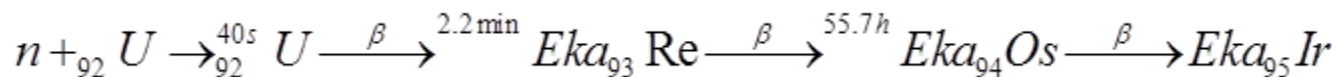
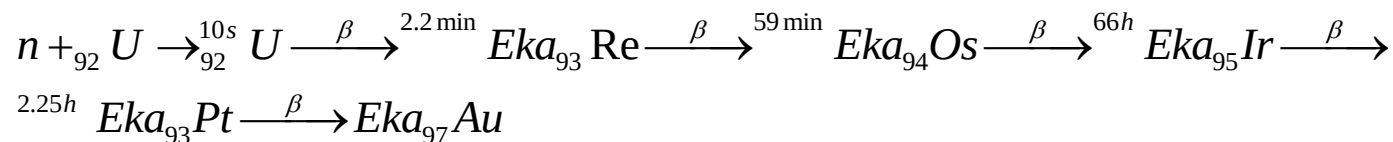
- Dve grupe:
- **Berlin :**
Otto Hahn, Lise Meitner, Fritz Strassman
- **Pariz:**
- Irena Curie, Pavle Savić

Rad grupe u Berlinu

- Neutronima su ozračivali uran.
- Pored perioda poluraspada koje je otkrio Fermi otkrili su ubrzo još 10.
- Hemijska analiza je obavljana rastvaranjem ozračenog urana u kiselinama, i frakcionom kristalizacijom.
- Problem je bila mala količina dobijenih izotopa.
- Nisu znali da se fisija odvija na ^{235}U koga ima svega 0.72 % u prirodnom uranu, a ne na ^{238}U .

- Ubedjeni da se dobijaju transuranski elementi i koristili su Re za taloženje. (pogrešno).
- One izotope koje žive kratko, reda nekoliko sekundi, nisu mogli da analiziraju radiohemijski. Orijentisali su se na one koji žive reda nekoliko sati ili dana (čekali su par sati posle ozračivanja).
- Razvili su šeme kojima su pokušali da objasne dobijene rezultate.

Hahn, Meitner, Strassmann šeme



Predložene šeme su bile pogrešne, bez neke velike veze sa realnošću.

- Hahn i dr publikuju veći broj radova sa većim brojem vremena poluraspada.
- Lisa Meitner (jevrejsko poreklo)
napušta Nemačku.

Nemačka vlada je zabranila izlazak naučnika iz zemlje. Lisa je uspela da predje granicu ka Holandiji uz pomoć Nilsa Bohra, koji je spasao veći broj naučnika jevrejskog porekla.

Otišla je u Stokholm, u laboratoriju Seighbahna.

Hahn i Meitner su nastavili saradnju, ali ne i koautorstvo, jer bi Hahn bio u opasnosti.

Rad grupe u Parizu

Cuiri i Savić

- Prvobitno su ozračivali Th, u nadi da će dobiti transuranske elemente. Otkrili su **četiri aktivnosti** sa različitim vremenima poluraspada.
- Ubrzo, 1937., napuštaju ozračivanje torijuma i kreću sa ozračivanjem urana (nije se svidelo Hahn-u).

Prvi proboj ka fisiji

- Irena i Pavle obavljaju frakcionu kristalizaciju 8 grama urana ozračenog neutronima.
- Umesto renijuma, kao nosilac u kristalizaciji koriste lantan. U Periodnom sistem La je iznad Ac. Nadali su se da će izolovati neki od izotopa Ac.
- Više puta ponovljenakristalizacija. Na kraju je ostao element sa vremenom poluraspada od 3.5 h.

Slika iz originalnog rada. Aktivnost 3.5 h. Publikovano Jul 1938.

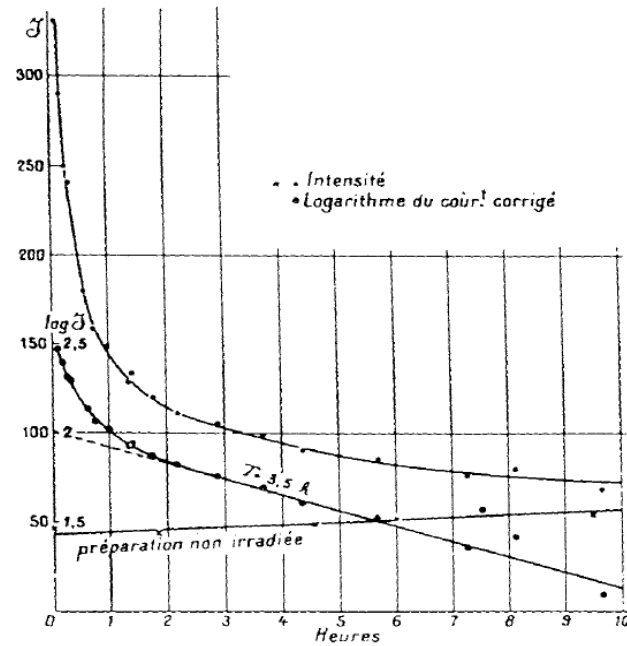


Fig. 8. The 3.5-h activity found in uranium irradiated by neutrons and measured directly as published by *I. Curie* and *P. Savitch* [86] in Paris, July 1938. Upper curve: activity measured with the sample covered by a copper foil of $0.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ thickness, depicted linearly as a function of time; lower curve: build-up of natural decay products in uranium, also depicted linearly; middle curve: difference between the two measurements in semilogarithmic representation with 16-min "eka-rhenium" at the beginning followed by a pure decay with 3.5 h half-life.

- Početak aktivnosti od 3.5h interpretiraju kao ekaRe. (I dalje zavedeni Fermijevim preporukama).
- Dobijenu aktivnost su **prvo interpretirali kao izotop Ac**, ali se uzorak ne ponaša kao Ac.
- Ponašao se **kao lantan**, što i jeste bilo.

Dva publikovana rada

- Curie, I., Savitch, P.: Sur la nature du radioe'le'ment depe'riod 3.5 heures forme' dans l'uranium irradiation by neutrons (Concerning the nature of the radioactive element with 3.5-hour half-life, formed from uranium irradiated by neutrons). Comptes Rendus Acad. Sci. Paris 206, 1643–1644 (1938a)
-
- Curie, I., Savitch, P.: On the radioelements formed in uranium irradiated with neutrons—Part II. Journal de Physique et le Radium 9(7), 355–359 (1938b)

- Irena Cui i Pavle Savić su razmatrali mogućnost stvaranja lakših elemenata posle ozračivanja urana neutronima.
- Irena je čak jednom izjavila „**da joj se čini da imaju ceo periodni sistem u ozračenom uranu**“. Nije bila daleko od istine.
- **Bili su na pragu otkrića fisije**. Trebalo je da veruju onom što su našli, La , a ne autoritetu Fermija.
- U ovom momentu grupa u Parizu je bila ispred grupe u Berlinu.

Berlin-ponovo

- Produkt od 3.5 h se **nikako nije mogao uklopiti** u šeme transformacija koje su razvili Hahn i Strassman.
- Grupa iz Berlina nije verovala ovim rezultatima, i Hahn je komentarisao kao zbrku, neljubaznost i profesionalnu ljubomoru: Produkt od 3.5 h je nazvao **kuriozitetom**. H&S su pisali Curiju, sugerišući da je podatak o 3.5 h pogrešan i da je potrebno da povuku publikovani rad. Rasla je napetost između ovih dveju grupa i konačno je Hahn zamolio Frederika da zaustavi Irenu i Savića u publikovanju radova koji pobijaju njegove rezultate.

- Iako nije verovao rezultatima Irene i Pavla, Hahn i Strassmann su ponovili njihov rad.
- Umesto La, koristili su **Ba** kao nosilac. Ba se nalazi u PS iznad radijuma, i nadali su se da će da izoluju neke izotope radijuma.
- Dobili su produkt koji **prati barijum (Z=56)**. Pretpostavili su (**opet pogrešno**) da su to izotopi radijuma Ra.
- Ni jedni ni drugi nisu novodobijene rezultate prepoznali kao lantan ili barijum.

- U Hahnovom pismu Lisi Meitner iz **19.12.1938.** Hahn je pisao „*naš izotop radijuma ne ponaša se uopšte kao radijum već kao barijum.* Možda ti (Lisa) možeš da daš **neko fantastično objašnjenje.** Mi shvatamo da uran ne može da se sagori i pretvori se u barijum.

- Tri dana kasnije, **22.12.1938**. Hahn i Strassman podnose rad koji je publikovan 1939. u Januaru.
- U ovom radu ne pominje se reč fisija.
- Hahn, O., Strassmann, F.: Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle (Concerning the existence of alkaline earth metals resulting from neutron irradiation of uranium). Naturwissenschaften 27, 11–15 (1939a)

- U ovom radu H i S su napisali
- Kao hemičari, zaista treba da preuredimo naše šeme raspada i da pišemo simbole Ba, La, Ce umesto Ra, Ac i Th. Medjutim, kao nuklearni hemičar, radeći vrlo blizu fizici, ne možemo da preduzmemo tako drastični korak koji se protivi celokupnom prethodnom iskustvu u nuklearnoj fizici. Moguće je da je neki niz neobičnih slučajnosti doveo do pogrešne indikacije.
- Hahn i Strassmann, kao i Irena i Pavle, i dalje su sumnjali u rezultate dobijene dobrim eksperimentalnim radom.
- Kasnije, H&S su hemijski potvrdili prisustvo Ba u ozračenom uranu.

Sledeći rad Hahn Strassmann

- Hahn, O., Strassmann, F.: Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstficke bei der Uranspaltung (Proof of the formation of active isotopes of barium from uranium and thorium irradiated with neutrons; proof of the existence of more active fragments produced by uranium **fission**). Naturwissenschaften 27(6), 89–95 (1939b). **Rad publikovan 10.02.1939.**

Objašnjenje- konačno fisija

- Lisa Meitner i Otto Frish
- Diskusija na snegu na Božić, 25.12.1938. god.
- Otto Frish (teorijski fizičar, radio u Bohrovom Institutu za teorijsku fiziku u Kopenhagenu).
- Frish se setio modela jezgra – model tečne kapi. (Gamov i Bohr).
- Kao i kap, i jezgro se može podeliti u dva dela usled nekog malog poremećaja.

- Meitner, L., Frisch, O.R.: Disintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction. *Nature* 143, 239–240 (1939a)
- Rad je podnet **16.01.1939.**
- **Publikovano 11.02.1939.**
- Deo iz pisma časopisu *Nature*

It Seems therefore possible that the uranium nucleus has only small stability of form, and may, after neutron capture, divide itself into two nuclei of roughly equal *size* (the precise ratio of sizes depending on finer structural features and perhaps partly on chance). These two nuclei will repel each other and should gain a total kinetic energy of c. 200 MeV., calculated from nuclear radius and charge. This amount of energy may actually be expected to be available from the difference in packing fraction between uranium and the elements in the middle of the periodic system. The whole 'fission' process can thus be described in an essentially classical way, without having to consider quantum-mechanical 'tunnel effects', which would actually be extremely small, on account of the large masses involved.

-

- Čini se da jezgro urana ima neku formu male stabilnosti i može se posle zahvata neutrona podeliti u dva jezgra približno iste veličine (tačan odnos veličina zavisi od fine strukture i možda delimično od šanse). Ova dva jezgra se odbijaju i dobijaju kinetičku energiju oko 200 MeV, izračunato iz nuklearnog radijusa i naelektrisanja. Ovaj iznos energije se može očekivati iz razlike energije veze po nukleonu između urana i elemenata iz sredine periodnog sistema. Ceo proces fisije se tako može opisati na klasičan način, bez razmatranja kvantno-mehaničkog tunel efekta, koji bi trebalo da je ekstremno mali s obzirom na velike mase koje učestvuju u procesu.

- Rad Hahna i Strassmanna je koji u naslovu ima reč fisija, je publikovan **1 dan** pre rada Meitner Frish.

Otkriće fisije je pripisano Otto Hahnu i Fritz Strassmannu za koje su dobili Nobelovu Nagradu za hemiju 1944. godine. Pored njihovih imena stoji „*Treći Rajh*“!!

- Frish saopštava Bohru o fisiji- tajna do objavljivanja.
- Bohr. *O kakvi smo idioti svi mi bili.*
- Nastavak priče na brodu ka Americi i u Njujorku.
- Bohr odaje tajnu Rosenbergu.
- Konferencija u Njujorku.

Epilog

- **Ida Noddack** nije primila nikakvo priznanje, kao **prva osoba** kojoj je fisija pala na pamet.
- Lisa Meitner nije dobila Nobelovu nagradu, iako je po svoj prilici ona bila ta u saradnji sa Otto Frishom koja je objasnila o čemu se radi. Kasnije je elemenat sa $Z=109$ dobio ime po njoj, naziva se **Meitnerium**. Ovo se smatra većim priznanjem od Nobelove nagrade.

- Otto Frish, koji je učestvovao u diskusiji, i koji je iskoristio model tečne kapi za objašnjenje fisije, nije dobio nikakvo slično priznanje.
- Grupa **Irena Cui i Pavle Savić**, koji su prvi opazili elemente iz sredine periodnog sistema **nisu dobili nikakvo priznanje**. Oni su najveći gubitnici jer su bili na pragu otkrića neutrona i fisije.

POSLEDICE

- Konstruisan prvi nuklearni reaktor – Fermi
- Nuklearno oružje-uticaj na **politiku** i dr.
- Nuklearna energetika-uticaj na **ekonomiju**.
- Otkriven veliki broj izotopa- velika primena u **medicini i industriji**.
- Otkriće fisije ima veliki **civilizacijski** značaj.