

Draga Krpan-Lisica



Hommage Lisi Meitner

(uz predavanje o fisiji)



FISIJA

Fisija je nuklearna reakcija kojom se teška jezgra cijepa na 2 lakše jezgre **usporedive (sumjerljive) mase**.

Sa stanovišta energetike zanimljiva je reakcija fisije koja se odvija u nuklearnom reaktoru: bombardiranjem fisibilne jezgre neutronima (nukl. projektili), jezgra postaje nestabilna (višak neutrona) zbog čega doživljava fisiju.

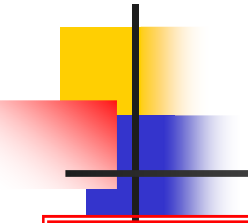
Reakcija fisije u nuklearnome reaktoru vodi se kontrolirano (jednak broj fisija u jedinici vremena).



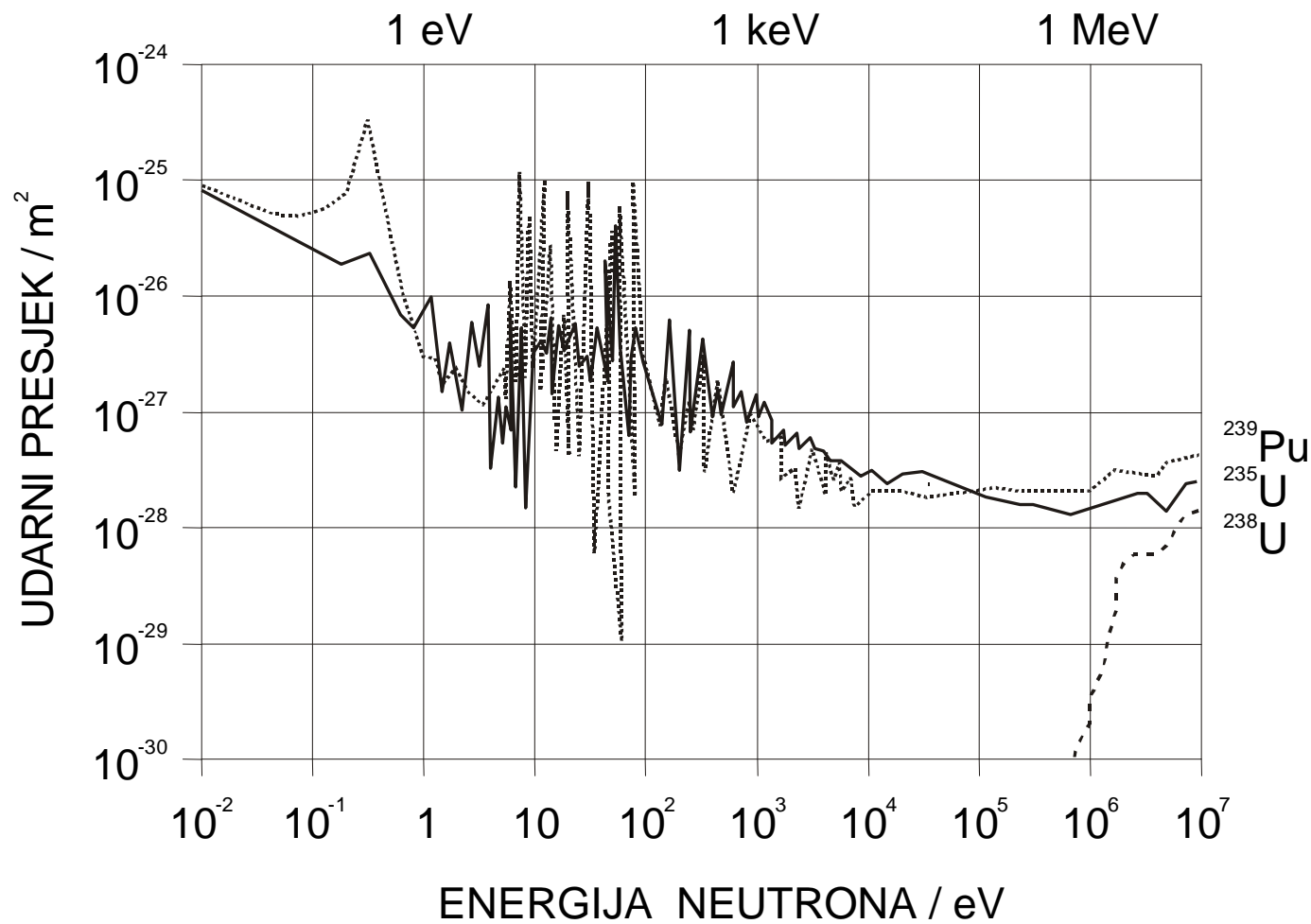
FIZIKALNI ASPEKTI FISIJE

Jedna od temeljnih značajki svake reakcije je **vjerojatnost** kojom se ona odvija.

Vjerojatnost nuklearne reakcije izražava se **udarnim presjekom, σ** : to je prividna površina koju jezgra izlaže upadnim česticama.



**Pri izlaganju nekoga fisibilnog materijala neutronima
broj izazvanih fisija bit će razmjernan
udarnom presjeku za fisiju toga nuklida.**



*Ovisnost udarnoga presjeka o energiji neutrona
za nuklide ²³⁸U, ²³⁵U i ²³⁹Pu*



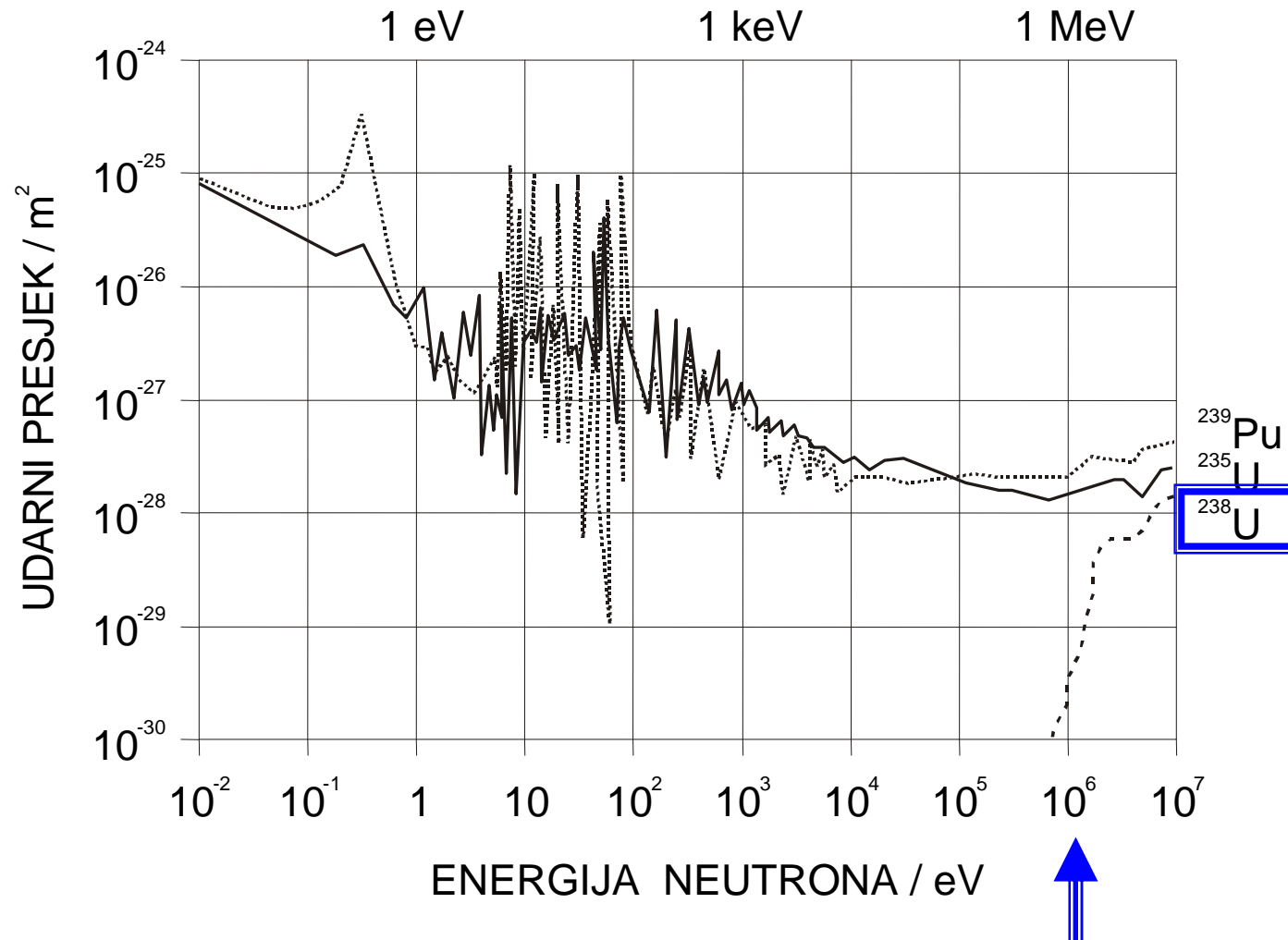
Objašnjenje grafa

Prema sklonosti fisiji promatrani nuklidi

^{238}U , ^{235}U i ^{239}Pu

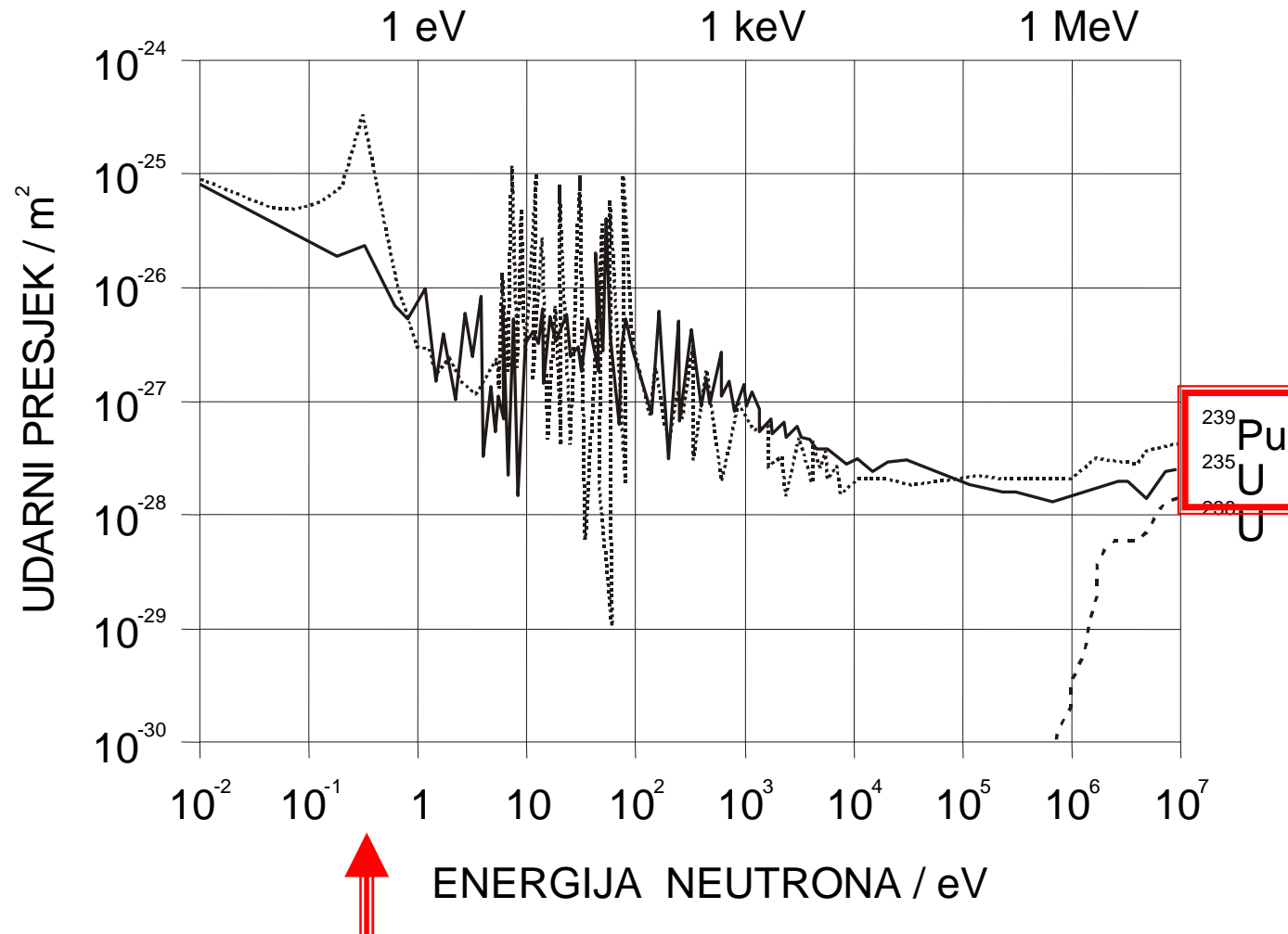
međusobno se razlikuju:

- Za cijepanje ^{238}U potrebno je da neutroni imaju **visoku energiju** (barem 1 MeV).



■ Naprotiv:

udarni presjeci, odnosno vjerojatnosti fisije ^{235}U i ^{239}Pu imaju relativno velike vrijednosti za neutrone niskih, tj. termičkih energija.



Štoviše:

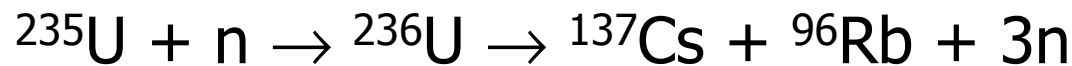
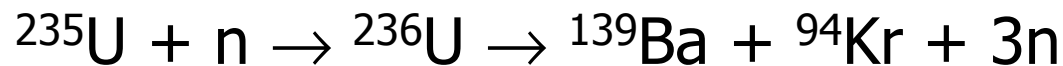
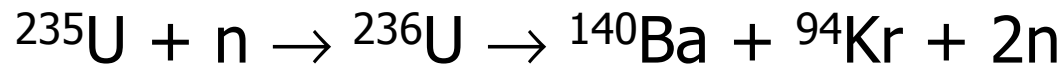
**udarni presjeci ^{235}U i ^{239}Pu
pri niskim energijama neutrona veći su i tisuću puta
nego pri visokim energijama.**

- Nuklidi s ovim svojstvom nazivaju se **fisibilnima**.
- Najvažniji fisibilni nuklidi su **^{235}U , ^{239}Pu i ^{233}U** .
- Jedini prirodni fisibilni nuklid je **^{235}U** .



Pri bombardiranju **prirodnoga uranija** sporim neutronima, samo izotop **^{235}U** doživljava **fisiju**.

Navest ćemo samo neke od velikog broja mogućih reakcija:




...

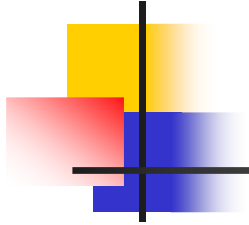
...

...

itd

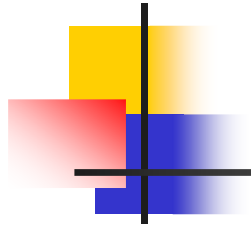


fisijski neutroni
fisijski fragmenti



Fisijom nastaju:

- **fisijski fragmenti;**
- **fisijski neutroni;**
- **energija.**



Fisijski fragmenti

(fisijski proizvodi)

Uglavnom su nestabilni



radioaktivno se raspadaju.



Fisijski neutroni

- **Promptni neutroni** (najveći dio fisij. neutrona) emitiraju se istodobno s fisijom.
- **Zakašnjeli neutroni** (manji dio fisij. neutrona: $\approx 0,65\%$) emitiraju se iz fisijskih fragmenata, uz srednje zakašnjenje od 13 s.



Neutronski prinos, η

(važan u oplodnoj energetici)

prosječan je broj fizijskih neutrona emitiranih po 1 neutronu apsorbiranom u fisibilnoj jezgri:

$$\eta = \frac{\text{broj emitiranih fizijskih neutrona}}{\text{broj neutrona apsorbiranih u fisib. jezgri}}$$



Energija ≈ 202 MeV/ jezgri



E nukl. reakcije \gg E kem. reakcije

Energija nuklearne reakcije uglavnom se javlja kao:

- E_k fisijskih fragmenata ≈ 80 %
 - E_k β -čestica i neutrona
- E zakašnjelog radioaktivnog raspada fisijskih fragmenata.

Dio oslobođene energije nuklearne reakcije se gubi (pr. energija neutrina, zbog njihove velike prodornosti).

Ipak, ako je gorivo dovoljno dugo u reaktoru, a reaktor dovoljno velik, najveći dio ove energije apsorbira se u reaktoru i pretvara u **toplinsku energiju:**

- veći dio u gorivnim elementima
- manji dio u drugim dijelovima postrojenja.

Toplinsku energiju oslobođenu fisijom moguće je koristiti.



Samoodržanje fisije – lančana reakcija

Emitiranje fisijskih neutrona pruža uzbudljivu mogućnost
samoodržanja fisije.

Samoodržanje fisije je moguće ako bar jedan od emitiranih fisijskih neutrona prouzroči novu fisiju:
time se reakcija sama nastavlja.

Govorimo o
lančanoj reakciji.

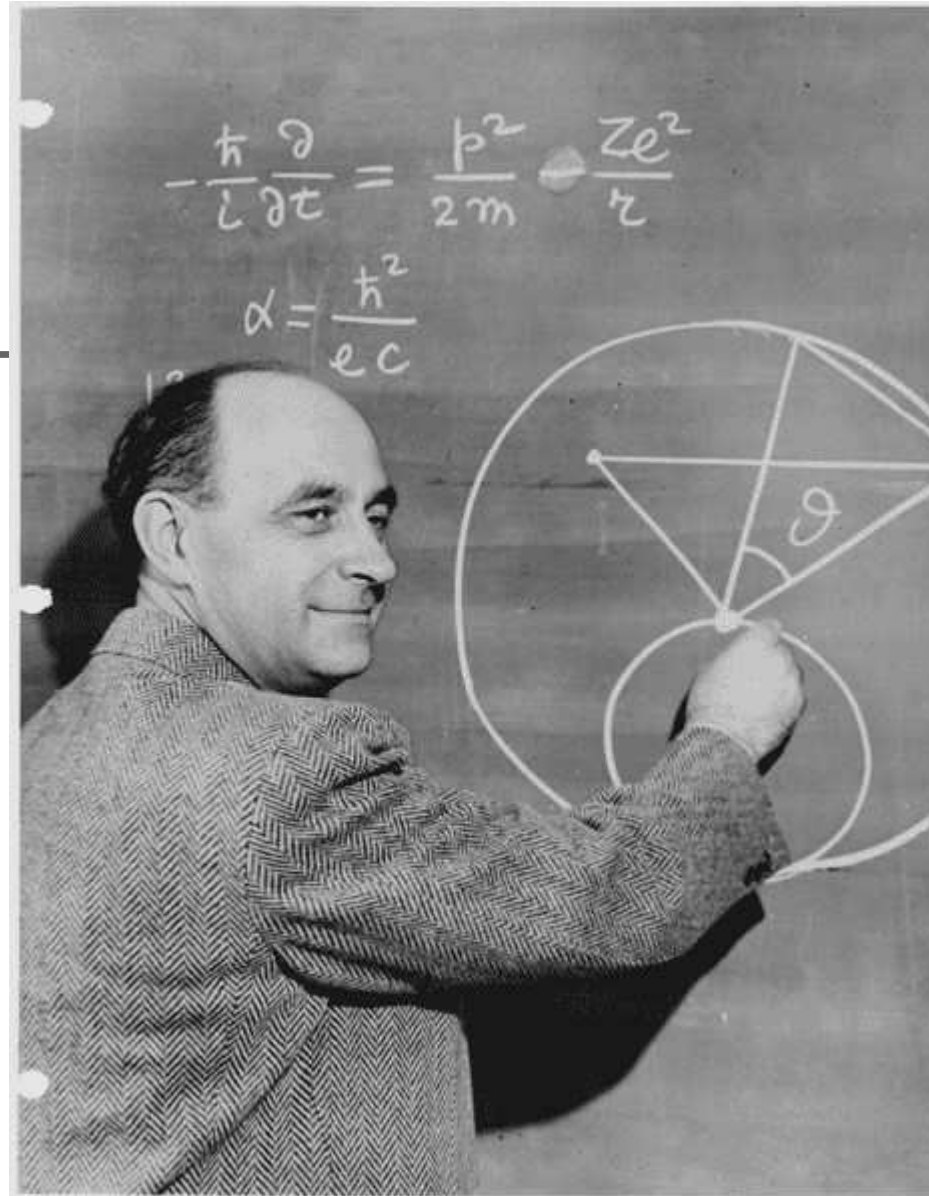
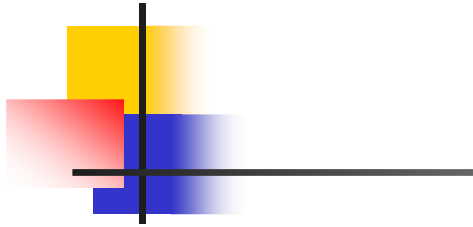


Kako je otkrivena fisija?

1934. god. E. Fermi i suradnici (u Rimu) bombardirali su jezgre različitih atoma sporim neutronima. Kod većine elemenata opažena radioaktivnost se uklapala u dotad već poznate procese β - i γ - raspadanja:



(Objašnjenje: bombardiranjem sporim neutronima od jezgre X nastaje jezgra Y, koja je radioaktivna; radioaktivnim raspadom jezgre Y nastaje jezgra Z).



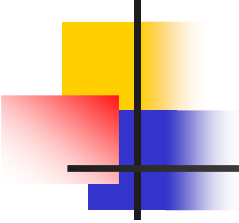
Enrico Fermi (1901. – 1954.)
NNF 1938. god.



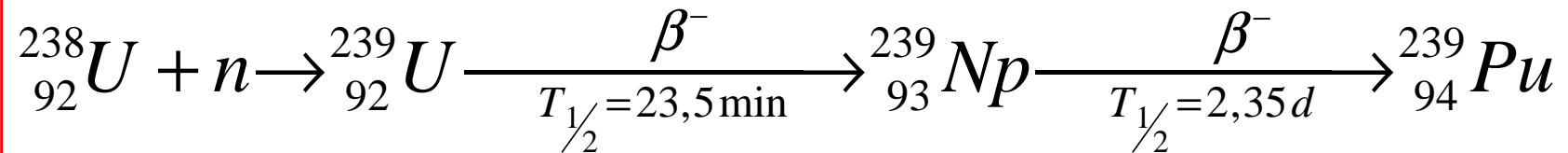
Međutim, kod uranija se rezultat bombardiranja neutronima nije mogao objasniti na taj način.

Proizvodi bombardiranja prirodnoga uranija pokazivali su radioaktivnost s različitim vremenima raspadanja:

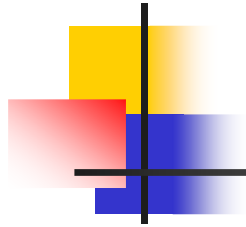
prir. U + n (spori) → [mnoštvo proizvoda s različitim $T_{1/2}$]



Jedan niz tih raspada Fermi je pripisao novonastalim transuranijskim elementima, što se kasnije pokazalo točnim:



No, glavina radioaktivnosti potjecala je od drugoga izvora. Mnogi znanstvenici pokušali su identificirati te proizvode.



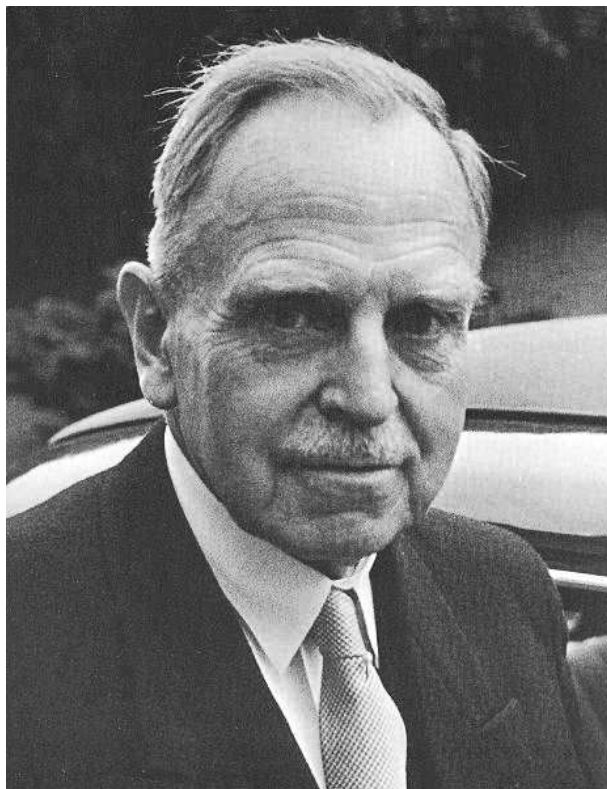
Kemičari **Otto Hahn i Friedrich Strassmann (1938. god.)** među mnogim proizvodima nastalim bombardiranjem U otkrili su **barij** – element srednjega atomskog broja, što su objavili u siječnju 1939. godine.

Zaključak:

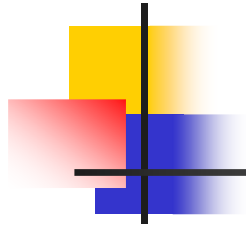
iz uranija su proizvedene jezgre upola manje mase.



Za ovo otkriće je Otto Hahn dobio
Nobelovu nagradu za kemiju 1944. godine.

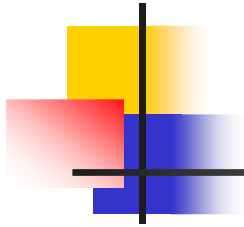


Otto Hahn (1879. – 1968.)
NNK 1944. god.



Friedrich Strassmann je zaobiđen pri dodjeli Nobelove nagrade, ali je za svoj rad kasnije dobio brojna priznanja. Između ostaloga, Međunarodna astronomska unija po njemu je prozvala jedan asteroid: 19136 Strassmann.

Posebice treba istaknuti da mu je Yad Vashem Holocaust Memorial dodijelio priznanje "Pravednik među narodima" (za svesrdnu pomoć Židovima za vrijeme II. svjetskog rata).



*Friedrich W. "Fritz" Strassmann
(1902. – 1980.)*



*Spomen-ploča O. Hahnu i F. Strassmannu
na Otto-Hahn zgradi Univerziteta Freien u Berlinu*



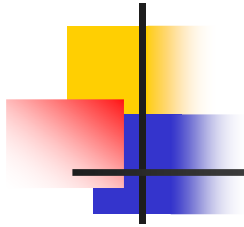
Lise Meitner i Otto Frisch (njezin nećak)

već su u veljači 1939. god.

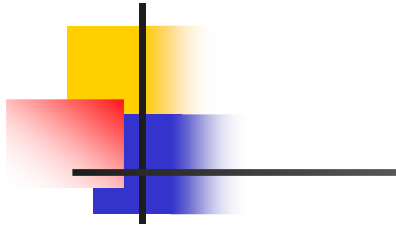
objavili rad u kojem su zaključili:

**Apsorpcijom sporoga neutrona
jezgra se deformira i cijepa na 2 dijela,
koji su zbog viška neutrona radioaktivni.**

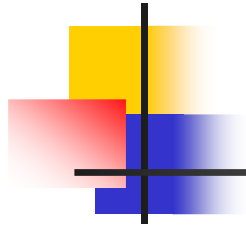
Oni su ovaj proces nazvali "**nuklearna fisija**".
Ujedno, dali su i prvo teorijsko objašnjenje procesa fisije,
koristeći za jezgru Bohrov "model kapljice".



Lise Meitner (1878. – 1968.)



Otto Robert Frisch (1904. – 1979.)



Nils Bohr (Copenhagen, Danska)

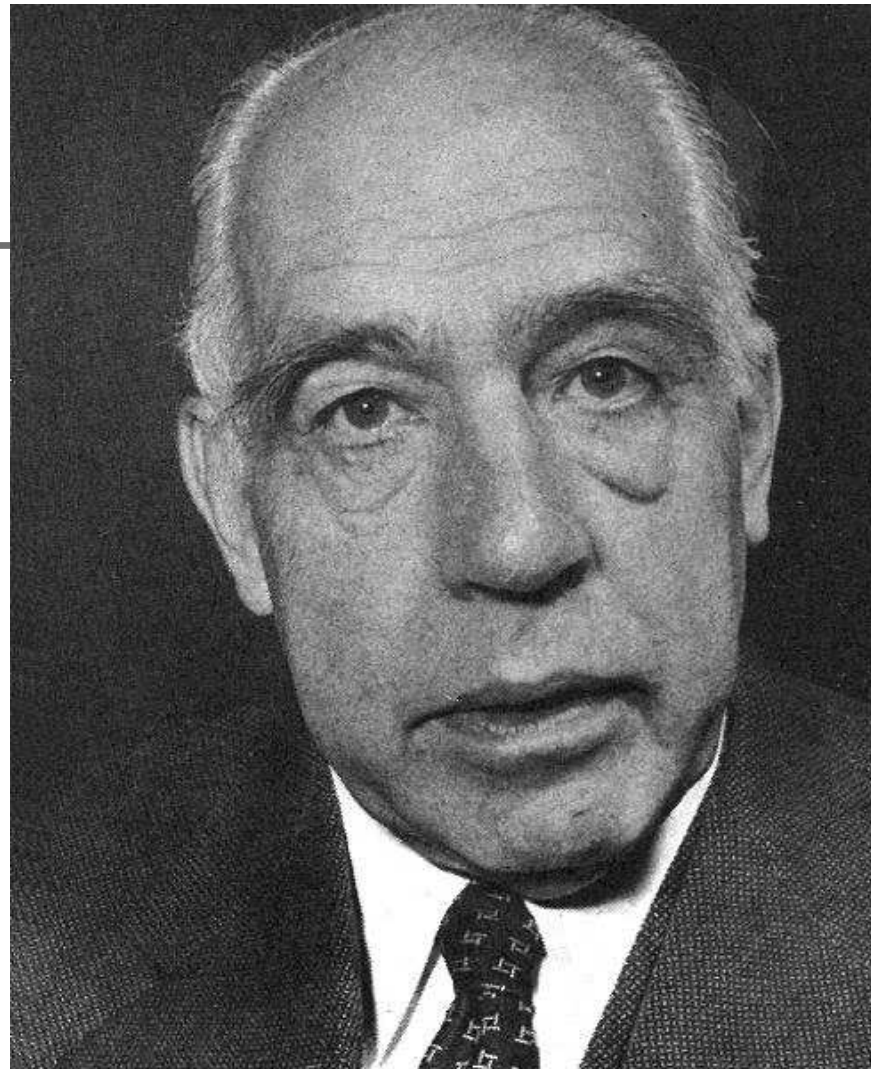
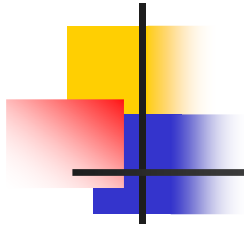
i

John Archibald Wheeler (Princeton, New Jersey, SAD)

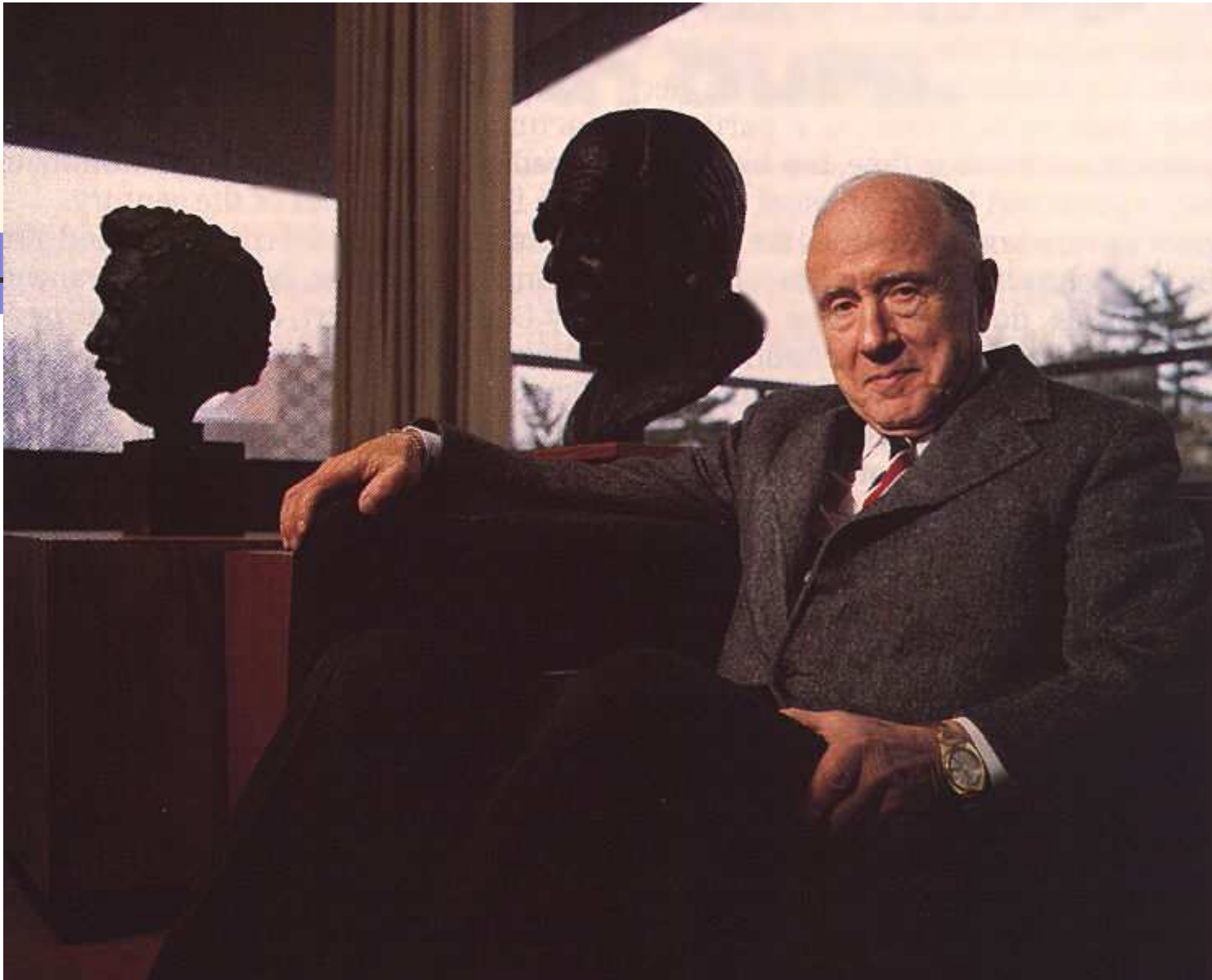
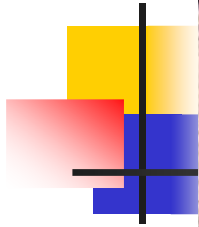
ustvrdili su:

“Fisijom se cijepa rijetki izotop uranija, ^{235}U .”

Ovo je ubrzo i eksperimentalno potvrđeno.



Niels Bohr (1885. – 1962.)
NNF 1922. god.



*John A. Wheeler (1911. – 2008.)
(on je dao naziv "crnim rupama")*



Lise Meitner:

"A physicist who never lost her humanity"
(epitaf)



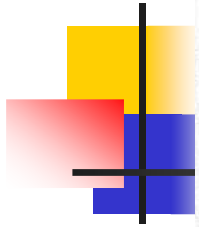
*Lise Meitner (1878. – 1968.):
od mlade djevojke do poznih godina*



L. Meitner bila je treće od osmero djece u bečkoj židovskoj obitelji (1908. prešla je na protestantizam).

Iako se žene u 19. st. nisu školovale nakon 14-e godine, ona je položila prijamni ispit i upisala studij. Na Univerzitetu u Beču profesor joj je bio Ludwig Boltzmann. Njezin nećak Otto Frisch napisao je da joj je "Boltzmann podario viziju fizike kao bitke za konačnu istinu, viziju koju ona nikad nije izgubila."

Doktorirala je 1905. godine.

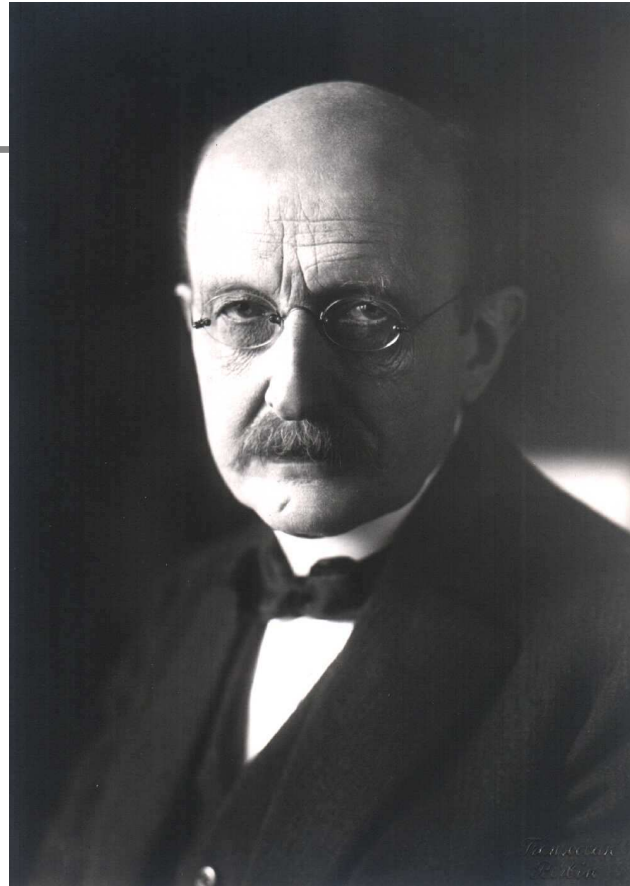
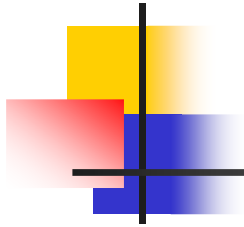


Ludwig Boltzmann
(1844. – 1906.)

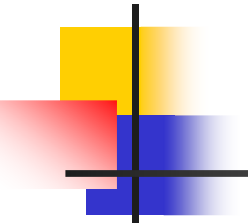
Lise Meitner, kao i cijela znanstvena javnost, bila je zaprepaštena njegovim samoubojstvom.

1907. god. otišla je u Berlin, da bi učila od Maxa Plancka: tada je, kao žena, trebala dobiti posebno dopuštenje da bi uopće prisustvovala njegovim predavanjima.

Planck ju je ljubazno primao u svojem domu, ali čak je i on sa skepsom gledao na žene na studiju i u znanosti. U domu Maxa Plancka upoznala je radiokemičara Otta Hahna: na glazbenim večerima, tada omiljenom obliku zabave, Planck je svirao klavir, violinu poznati virtuoz Josef Joackim (a kasnije i Einstein), dok je Hahn bio izvrstan tenor. Hahn je ubrzo shvatio njezinu vrijednost, a budući da je bio neformalan, ponudio joj je suradnju.



Max Planck
(1858. – 1947.)
NNF 1918. god.



Uskoro je s Ottom Hahnom započela suradnju:
na berlinskom Institutu za kemiju "Kaiser Wilhem"
Hahn je proučavao kemiju,
a ona fiziku radioaktivnih tvari (β -raspad).

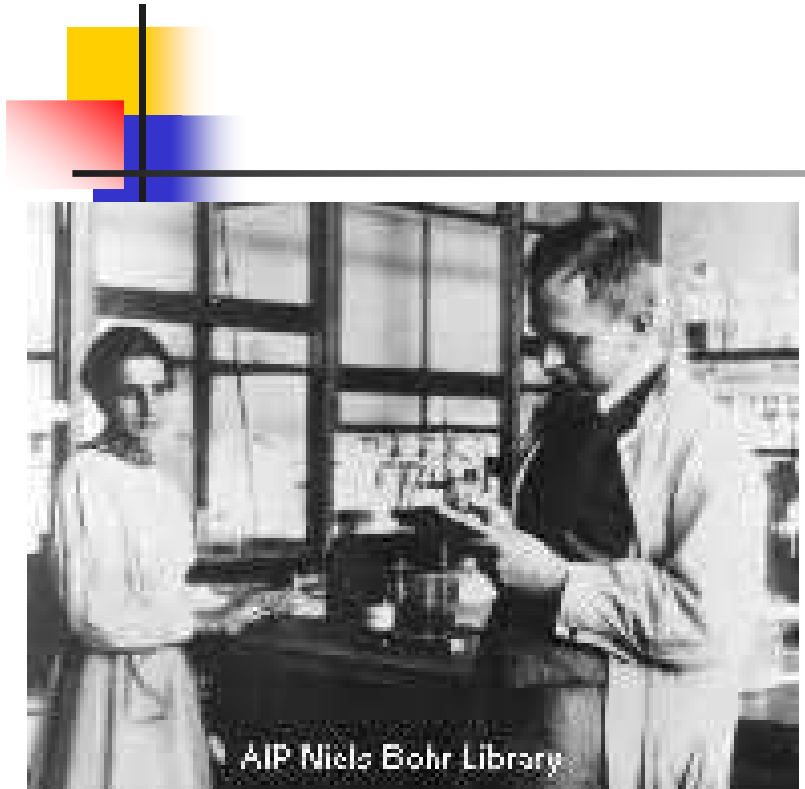
Međutim, ona nije imala nikakav profesionalni status,
štoviše, ženama nije bio dopušten ulazak na Institut.
Hahn je uspio izboriti za nju dopuštenje da radi
u jednoj prizemnoj sobici, s posebnim ulazom,
ali za rad nije bila plaćena
(bila je "nevidljiva žena").

Tijekom 30-godišnje suradnje postigli su važne rezultate pa se s vremenom i njezin profesionalni status poboljšavao.

Između ostalog, u nizu β -raspada ${}_{92}^{235}\text{U}$ 1917. god. otkrili su izotop elementa atomskog broja 91, kojeg su oni nazvali protaktinij (otkrili su izotop ${}_{91}^{231}\text{Pa}$). (Za ime elementa atomskog broja 91 neki su predlagali "lisonium" ili "lisottonium", njoj u čast.)



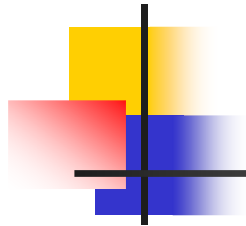
O. Hahn i L. Meitner (s kolegicom)



L. Meitner i O. Hahn u laboratoriju

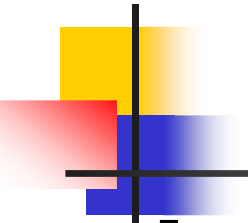
Nakon što je Fermi 1934. godine u Rimu bombardirao uranij sporim neutronima, L. Meitner je s Hahnom nastojala identificirati nastale umjetne radioaktivne izotope (navodno "transuranijskih elemenata"). Uskoro im se u istraživanjima pridružio i Fritz Strassmann, mladi analitički kemičar.

Osobitu pozornost posvetili su radu Irene Joliot-Curie i Pavla Savića, koji su, u Parizu, među radioizotopima, nastalim bombardiranjem U, utvrdili postojanje izotopa koji se kemijski ponašao slično La, a kojemu je atomska masa bila skoro upola manja od U.



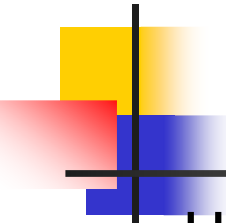
Opasnost od bujajućega nacizma prekinula je njihovu suradnju. Nakon Anschlussa (ožujak 1938.), kao Židovka (iako pokrštena), L. Meitner je, uz pomoć mnogih znanstvenika (i Nielsa Bohra), jedva uspjela emigrirati (preko Nizozemske) u Švedsku.

U Štokholmu, u Institutu Manne Siebaha (NNF 1924. god.), radila je sama, bez tima i suradnika, u teškim uvjetima.
Opet je postala "nevidljiva žena".



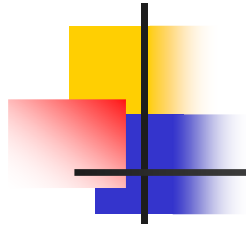
Ipak, na njezin poticaj, Hahn i Strassmann su u Berlinu nastavili s ispitivanjem ozračenoga uranija i u ponovljenom eksperimentu "Joliot-Curie-Savić" pažljivim analitičkim radom Strassmann je otkrio radioizotope **Ba**, elementa s upola manjom masom od U, o čemu je Hahn pismeno obavijestio L. Meitner, moleći ju da ponudi odgovarajuću teoriju.

Svoje otkriće Hahn i Strassmann su publicirali u siječnju 1939. godine.



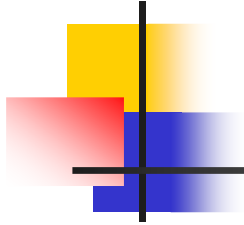
Upravo tada joj je u posjet (u Švedsku) došao nećak,
Otto Frisch, koji je u Copenhagenu radio s Nielsom Bohrom.
Lisa i Otto su se pozabavili ovim otkrićem,
nazvali su ga **"nuklearnom fisijom"**
i ponudili su teorijsko objašnjenje,
što su publicirali već u veljači 1939. godine.

Ujedno, Otto Frisch je u Copenhagenu dizajnirao eksperiment
kojim je detektirao visokoenergetske "fisijske fragmente"
(što je, također, objavljeno u veljači 1939. godine).



Edwin McMillan i Emilio Segrè,
dvojica znanstvenika koji su koristili ciklotron u Berkeleyu
za bombardiranje uranija neutronima,
među proizvodima tog bombardiranja
utvrdili su postojanje radioelementa
s β -aktivnošću i vremenom poluraspada 2,3 dana,
kojega je Segrè smatrao fizijskim fragmentom.

L. Meitner se nije slagala s njim, tvrdeći da se radi
o pravom transuranijskom elementu, atomskog broja **93**,
te da njegov β -raspad vodi do
još jednog transuranijskog elementa, atomskog broja **94**.



Da bi to dokazala, u travnju 1940. godine L. Meitner otputovala je u Copenhagen, kako bi na ciklotronu u Bohrovom institutu ponovila eksperiment "McMillan-Segrè". Na njezinu veliku žalost, u tome nije uspjela, jer je Njemačka baš tada okupirala Dansku.

Sedam tjedana kasnije McMillan i Philip Abelson identificirali su element atomskog broja **93**, postojanje kojega je L. Meitner predvidjela, i nazvali ga "**neptunij**".



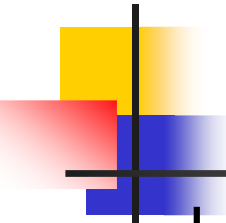
Sljedeći eksperimenti, izvedeni u Parizu i na Columbia University pokazali su da se pri fisiji neutroni ne samo troše, već i oslobađaju, što pruža uzbudljivu mogućnost "lančane reakcije".

Uz to, pri fisiji se oslobađa i velika količina energije.

Mogućnost pravljenja "uranijeve fizijske bombe" postala je očita nuklearnim fizičarima.


Njemački pokušaji u tome smjeru, srećom, nisu urodili plodom (uključeni su bili i Otto Hahn i Werner Heisenberg).

Nažalost, pokušaji u SAD-u rezultirali su razornim bombama bačenim na Hirošimu i Nagasaki.



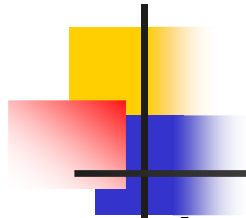
L. Meitner je bila apsolutno protiv nuklearnog oružja. Iako je bila pozvana da se pridruži grupi znanstvenika u Los Alamosu (New Mexiko, SAD), glatko je odbila: **bila je jedina od fizičara na strani saveznika koja nije htjela ništa imati s nuklearnom bombom.**

Nažalost, nakon što su bombe bačene, "angažirani nuklearci" bili su dobro skriveni od javnosti. Ona je bila jedina dostupna novinarima: postala je "Židovka koja je ukrala tajnu bombe od Hitlerovih fizičara i predala je svojim britanskim prijateljima".



Netko ju je, čak, nazvao i "Židovskom majkom bombe".
Tako je stekla, zaista nezaslužen, publicitet, dok ju je
zaobišla slava koju je zaslužila i imala pravo očekivati.

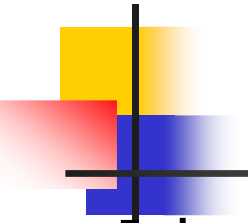
1944. godine Nobelova nagrada za kemiju
dodijeljena je samo O. Hahnu (za otkriće nuklearne fisije):
zaista, Hahnov (i Strassmannov) eksp. je utvrdio postojanje Ba,
ali je njezin (i Frischov) doprinos fizik. objašnjenju ignoriran.



Otkriće nuklearne fisije svakako je zaslužilo 2 Nobelove nagrade:

- za kemiju (Hahn i Strassmann)
- za fiziku (Meitner i Frisch).

Međutim, na odluku Odbora za dodjelu Nobelove nagrade, osim znanosti, utječe i politika, birokracija... pa je to bilo uzrokom da je taj put "zaobiđen" njezin doprinos u otkriću i objašnjenju fisije.

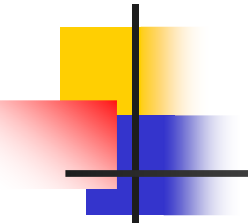


Iako je, neosporno, zaslužio Nobelovu nagradu za kemiju, u intervjuima koje je davao, Hahn niti jednom riječju nije spomenuo njihovu 30-godišnju suradnju: bio je to "one man show".

Lise Meitner je bila duboko nesretna zbog toga, ali nikad nije izrekla ništa osim duboke privrženosti prema O. Hahnu.



Zauvijek odana prijateljica



Kasnije je, ipak, doživjela zvjezdane trenutke. Uvidjelo se da je njezina uloga bila mnogo značajnija pa je "Nobel mistake" donekle ispravljena: L. Meitner, zajedno s O. Hahnom i F. Strassmannom, dobila je "Enrico Fermi Award" (1966. god. u SAD-u).

Njoj u počast element atomskog broja 109 nazvan je
Meitnerij: Mt



1960. god. otišla je iz Švedske u Englesku (Cambridge) da bi bila uz nećaka, Otta Frischa, i njegovu obitelj.

Lise Meitner je umrla nekoliko dana prije 90-og rođendana (Otto Hahn je umro nekoliko mjeseci ranije).

Sahranjena je na jednome seoskom groblju.

Natpis na nadgrobnom kamenu (Otto Frisch) glasi:

"Lise Meitner: a physicist who never lost her humanity".

Postigla je ono što je zaista zaslužila:
veličanstvenu karijeru, dug život, mnoge počasti
i bezbrojna trajna prijateljstva.