

# NUKLEARNA FISIJA

**Đurdica Devčić**  
I. gimnazija Split

## ZAŠTO NUKLEARNA FISIJA

Nuklearna fisija ima posebno mjesto u fizici, jer pripada onim otkrićima koja su obilježila i promijenila svijet. Od **1939** g. nakon otkrića **Hahna** i **Strassmanna** počinje novo poglavlje povijesti, nuklearna era. Uz fisiju su, od otkrića do danas, vezane brojne dvojbe. Iz atomske jezgre je oslobođena ogromna količina energije koja je iznenadila i same znanstvenike. Ta energija je omogućila napredak i boljitak civilizacije i ublažila energetske krize. S druge strane ona je postala razorno oružje koje je uništilo stotine tisuća ljudskih života i trajno ozračilo velika područja. Fisija u modernom svijetu izaziva strah od havarija, radijacije i kontaminacije. Tako ova fizikalna tema otvara brojne aspekte: ekološki, energetski, ekonomski, povijesni, etički i politički, koji su međusobno isprepleteni.

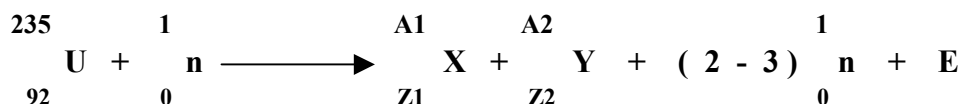
U ovom predavanju nastoji se sažeto izložiti najbitnije fizikalne zakonitosti i činjenice na kojima se temelji reakcija fisije. Učenicima se time nudi fizikalna baza na koju mogu nadograđivati svoja školska i izvanškolska znanja, te formirati pravilan pristup ovoj problematici, temeljem kojeg će u budućnosti moći kompetentno i odgovorno graditi stavove i donositi odluke vezane za radioaktivnost.

Učenici u pravilu pokazuju interes za ovu tematiku. Njihova brojna pitanja bila su poticaj ovom predavanju i putokaz u odabiru sadržaja.

## REAKCIJA FISIJE

Nuklearna fisija ili fisija atomske jezgre predstavlja cijepanje teške atomske jezgre pod utjecajem neutrona na dva, a vrlo rijetko i tri lakša fragmenta, 2-3 sekundarna neutrona, nekoliko elektrona i neutrina, uz oslobađanje velike količine energije od oko 200 MeV-a.

Reakcija se može prikazati slijedećom općom jednačicom.



Dakle, jezgra urana zahvaća neutron, prelazi u pobuđeno stanje i počinje vibrirati, pri čemu se toliko deformira, da se u jednom trenutku, poput kapljice tekućine, podijeli na dvije lakše jezgre koje odgovaraju energetski povoljnijem stanju. Proces fisije se odvija vrlo brzo, u vremenskom intervalu od  $10^{-14}$  s pod utjecajem jake nuklearne sile.

Ovo je veoma neobična reakcija u kojoj mali, niskoenergetski projektil pogađa metu 235 puta veće mase, gotovo je trenutno prepola i iz nje oslobodi ogromnu energiju.

## PRIMARNI NEUTRONI

Neutroni su čestice koje najlakše izazivaju nuklearne reakcije. Zbog svoje električne neutralnosti ne moraju svladavati elektrostatsku potencijalnu barijeru jezgre, te relativno malim brzinama i energijama dopiru do zone djelovanja jake nuklearne sile, ulaze u jezgru, i iniciraju nuklearnu reakciju.

**Primarni neutroni izazivaju fisiju, a sekundarni neutroni nastaju nakon fisije.** Prema kinetičkim energijama primarni neutroni se dijele na neutrone niske, srednje i visoke enerigije, tj. spore, intermedijarne i brze. Neutroni niske energije imaju brzine koje odgovaraju brzinama termičkog gibanja molekula plina, pa se zovu termalni neutroni. Energija termičkog gibanja je reda veličine  $kT$  ( $1/100$  eV), tj. između 0.025 eV i 0.4 eV. Brzi neutroni imaju energije veće od 1 MeV-a, a inermedijarnim neutronima pripadaju energije između 1 eV i 1 MeV

Osim neutrona fisiju mogu izazvati protoni, deuteroni i alfa čestice, ako se prethodno ubrzaju u akceleratoru i tako postignu dovoljno velike energije. Fisija se može izazvati gama zračenjem (fotofisija) i laserskim snopom.

Fisija teških elemenata se može dogoditi i bez induciranja, dakle spontano. Zanimljivo je da je **spontana fisija** otkrivena nakon inducirane, 1940 godine na uranu, a kasnije i na drugim teškim jezgrama. Najpoznatiji

prirodni fisijski reaktor u kome se fisija spontano događa već 2 milijarde godina je rudnik Okla u Gabonu. Zbog male brzine reakcije i male vjerojatnosti događanja spontana fisija nema većeg značaja.

## FISIBILNE JEZGRE

Relativno mali broj jezgri podliježe fisiji. Neke jezgre se cijepaju pod utjecajem sporih, a neke pod utjecajem brzih neutrona. Fisija sporim neutronima događa se na **U-235** (prirodni izotop urana), **U-233** (umjetni izotop) i **Pu-239** (umjetni izotop). Fisija se može dogoditi i na U-238 i Th-232, ali samo sa vrlo brzim neutronima. Fisiji podliježu i svi transuranski elementi, dakle elementi sa rednim brojem većim od 92. Međutim, u komercijalne svrhe za fisiju se koriste samo U-235, U-233 i Pu-239

## URAN

Uran je najteži element koji se u prirodi može naći. Otkriven je 1789 godine, a ime je dobio prema, u to doba otkrivenom, planetu Uranu. Sastavni je dio Zemljine kore, gradi stotinjak minerala, ali u malim koncentracijama. Dobrom uranovom rudom smatra se ona koja sadrži više od 0.1% urana.

Najpoznatija svjetska nalazišta su u Kongu, Kanadi i Češkoj. U Hrvatskoj je uranska mineralizacija nađena na Papuku, ali bez gospodarske važnosti, te u istarskim rudnicima Raša. Pepee termoelektrane Plomin sadrži nekoliko stotina grama urana po toni i predstavlja potencijalu (siromašnu) nuklearnu sirovinu.

Najčešći uranov mineral je **uraninit**, ili uranov smolinac, ili pehblenda. Po kemijskom sastavu to je uranov oksid **U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>**. Upravo ovu rudu (iz Češke) je koristila M. Curie i u njoj otkrila dva nova elementa, Ra i Po. Preradila je rukama 11 tona rude i izvela nekoliko tisuća kristalizacija, te je nakon 12 godina mukotrpnog rada izdvojila kapljicu čistog metalnog Ra mase 8,5 mg.

Prirodni uran je mješavina tri izotopa. To su:

<b>U-238</b>	<b>99.285%</b>	<b>T1/2 = 4.5 milijarde godina</b>
<b>U-235</b>	<b>0.710%</b>	<b>T1/2 = 0.71 milijarde godina</b>
<b>U-234</b>	<b>0.005%</b>	<b>T1/2 = 2400 godina</b>

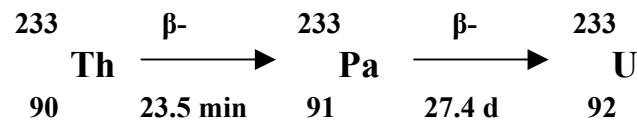
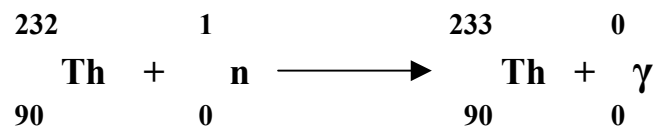
Prirodni uran sadrži 149 puta više U-238 nego U-235, tj od 150 atoma samo je jedan atom

U-235, dok su ostali atomi U-238.

Sva tri izotopa su  $\alpha$ emiteri slabe radioaktivnosti.

Pored ova tri prirodna ,poznato je još 13 umjetnih izotopa urana, od kojih najveću važnost ima **fisibilni U-233** koji se koristi kao nuklearno gorivo.Zanimljivo je da se U-233 ne dobija iz rude urana već iz torijeve rude.

Rezerve torija u prirodi su čak 4 puta veće od rezervi urana. Izotop Th-232 (jedini prirodni izotop torija) se bombardira neutronima te se pretvara u teži izotop Th-233 :



Th-233 je  $\beta^-$  radioaktivan i preko protaktinija se pretvara u U-233.Ovom nuklearnom reakcijom se torij koji nije fisibilan materijal pretvara u fisibilni uran. Proces u kome se nefisibilni materijal pretvara u fisibilni zove se **nuklearna konverzija**, a materijal koji daje fisibilne izotope **oplodni materijal**.U-233 je  $\alpha$ emiter sa vremenom poluraspada 162000 god.

## OBOGAĆIVANJE URANA

Ako se za fisiju koristi ruda urana potrebno je prethodno preraditi i pripremiti rudu za proces lančane reakcije. Prva faza postupka je **koncentriranje** rude, odnosno odvajanje uranovih spojeva od ostalih spojeva prisutnih u rudi. Rezultat je uranov koncentrat koji se zbog svog oblika i boje zove "žuti kolač" i sadrži 60-70% urana u obliku UO<sub>2</sub>.

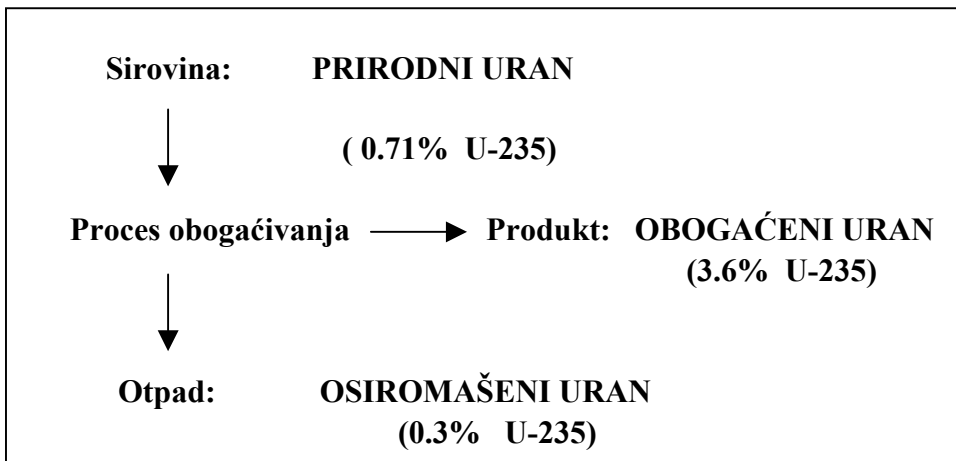
Druga faza obrade je postupak obogaćivanja rude izotopom <sup>235</sup>U. Pokusi su pokazali da reakcija fisije može teći lančano samo ako je sadržaj U-235 u rudi veći od 3%. To znači da je iz uranove rude potrebno separirati U-238 da bi se koncentracija U-235 povećala. Ovaj postupak je tehnološki vrlo složen i skup, jer izotopi urana <sup>235</sup>U i <sup>238</sup>U imaju identična kemijska svojstva, a po atomskim masama se razlikuju samo za 1.5 %. Najčešće se koristi metoda plinske difuzije UF<sub>6</sub> (plinovitog i otrovnog uranovog heksafluorida). Nakon procesa flotacije dobija se tzv. **obogaćeni uran** u kome je postotak U-235 iznad 3%. Ovisno o sadržaju U-235 razlikujemo: slabo obogaćeni uran (3%-5%), srednje obogaćeni uran (5%-30%) i jako obogaćeni uran (više od 30%) .

U procesu obogaćivanja urana nastaju velike količine otpada koje se mjere stotinama tisuća tona. Taj se otpad zove **osiromašeni uran**. U njemu je postotak U-235 manji od 0.3%, dakle dvostruko manji nego u prirodnoj rudi, dok je postotak U-238 povećan na 99.7%. Osiromašeni uran je osiromašen uranom <sup>235</sup>U, a obogaćen uranom <sup>238</sup>U.

U skladu sa trendovima recikliranja osiromašeni uran se koristi u brojnim tehnološkim procesima poput glaziranja boja, legiranja čelika, kataliziranja, izrade utega za razne instrumente, balastiranja zrakoplova, a u vojsci za oklopljivanje tenkova i ojačavanje municije. Prema američkim podacima takva je municija prvi put korištena u Zaljevskom ratu 1991. god i to oko 300 t streliva sa osiromašenim uranom, zatim iznad Kosova oko 10 t i u Bosni, u zoni oko Sarajeva, oko 3 tone.

Aktivnost osiromašenog urana je za 40% manja od aktivnosti prirodnog urana. Unatoč smanjenom radiološkom djelovanju, osiromašeni uran je kao i svi teški metali izuzetno kemotoksičan. Unešen u organizam, on slijedi metaboličke puteve kalcija te se deponira i retenira u kostima, bubrezima i plućima.

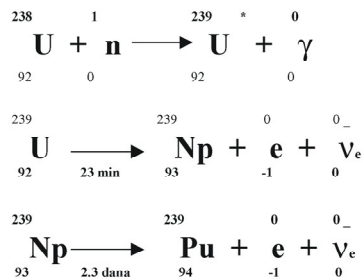
Jedna od mogućih shema obogaćivanja urana:



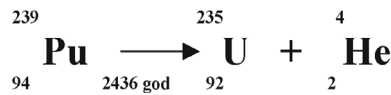
## PLUTONIJ

Plutonij je transuranski element, koji ne postoji u prirodi. Prvi put je izdvojen 1942 godine. Plutonij ima 15 izotopa (232-246) i svi su radioaktivni, fisibilni su Pu-239 i Pu-241, a komercijalnoj uporabi je **Pu-239**.

**Plutonij se danas smatra najboljim nuklearnim gorivom**, jer je njegova sklonost ka cjepanju pomoću sporih neutrona veća nego U-235. Pu-239 se dobija iz U-238. U-238 ozračen sporim neutronima se ponaša potpuno različito od U-235. Dok se U-235 cijepa na fragmente, dakle podliježe fisiji, U-238 apsorbira neutrone, pretvara se u nestabilni izotop U-239, te se kroz dva uzastopna  $\beta$ - raspada pretvara u Pu. To se svojstvo U-238 koristi za dobivanje Pu.

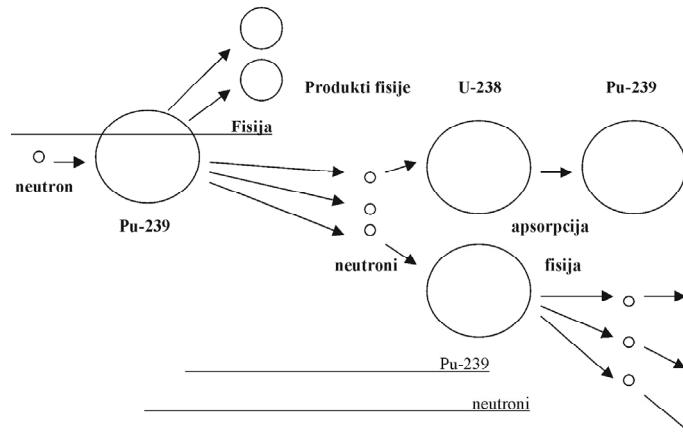


Pu-239 se  $\alpha$  raspadom sa vremenom poluraspada od 24360 godina pretvara u U-235, pa se zbog dugog vremena poluraspada može smatrati stabilnim izotopom.



Nuklearni reaktori koji služe za proizvodnju plutonija zovu se **brideri** ili oplodni reaktori (breeder-oplođivač). U njima se odvija vrlo zanimljiva nuklearna reakcija.

Zahvaljujući toj reakciji brideri proizvode više goriva nego što potroše, a uz to oslobađaju energiju.



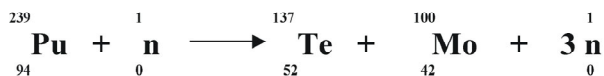
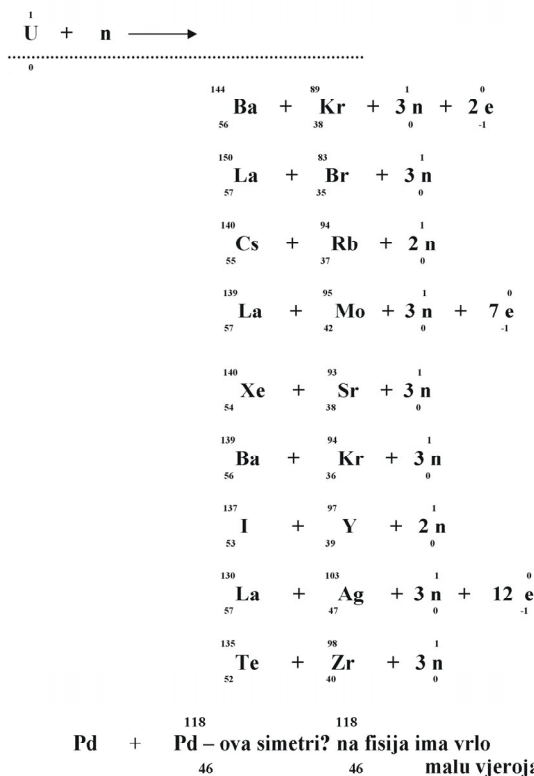
Gorivo je mješavina Pu-239 i U-238. Reakcija započinje fisijom plutonija. Neki neutroni nastali fisijom pogađaju jezgre U-238 koje se pretvaraju u U-239, a zatim dvostrukim  $\beta$ -raspadom prelaze u Pu-239. Drugi pak neutroni, također nastali fisijom Pu, pogađaju nove jezgre Pu i nastavljaju lančanu reakciju. U briderima je do danas u svijetu proizvedeno više stotina tona plutonija.

## PRODUKTI FISIJE

Teška jezgra se u procesu fisije cijepa na dva lakša fragmenta čiji su **omjeri masa 3:2** te se nalaze u sredini periodnog sustava. Međutim, ne postoje dva određena elementa koji bi bili stalni i jedini produkti fisije, odnosno ne postoji dinamička zakonitost, koja bi sa sigurnošću mogla predvidjeti koji će elementi nastati fisijom.

Postoji oko **50** različitih načina i puteva kojima se fisija može odvijati. To su tzv. **kanali fisije**. Za svaki kanal postoji, pri zadanim uvjetima, određena vjerojatnost, ali ona općenito ne prelazi 8%. **Pri fisiji**

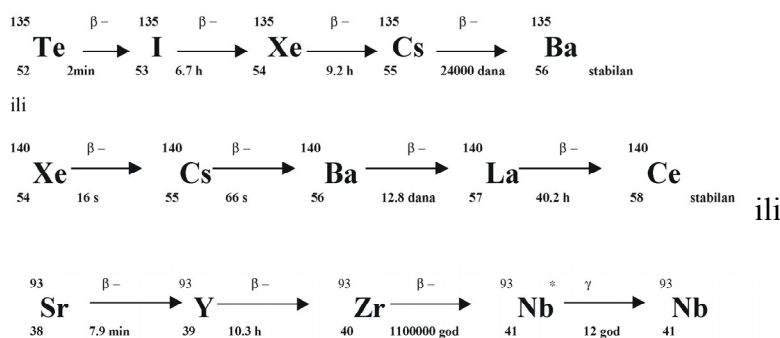
urana nastaje više od 100 izotopa, od oko 40 elemenata, čiji se maseni brojevi kreću od 72 do 161. Evo nekoliko mogućih reakcijskih kanala:



**Svi fragmenti fisije su radioaktivni, jer svi imaju višak neutrona**

Uvjet stabilnosti teških jezgri je 1 proton na 1.6 neutrona, dok je uvjet stabilnosti lakših jezgri 1 proton na 1 neutron. Stoga svi produkti fisije sadrže višak neutrona kojega se rješavaju  $\beta$ - raspadom. Vrlo često je višak neutrona toliko izražen da je potrebno nekoliko uzastopnih  $\beta$ - raspada da bi nastao stabilni izotop. Npr:





Fragmenti fisije imaju vrlo veliku energiju, te izazivaju jaku ionizaciju sredstva, sa dometom u zraku 2-2.5 cm. Njihova jaka radioaktivnost je činjenica o kojoj treba strogo voditi računa.

## SEKUNDARNI NEUTRONI

Za svaku lančanu reakciju je karakteristično da je čestica ili energija koja započinje reakciju također i produkt reakcije, pa je ona može ponovno izazvati. Pri svakoj fisiji se, uz dva fragmenta, uvijek oslobađaju dva do tri **brza neutrona** prosječne energije 1.3 MeV-a, koji mogu izazvati nove fisije, te ostvariti lančanu reakciju. Međutim, sekundarni neutroni nisu dovoljno brzi da bi mogli izazvati fisiju na U-238, niti dovoljno spori da bi mogli izazvati fisiju na U-235. Oni se apsorbiraju u U-238, koji se zatim putem  $\beta$ - raspada transformira prvo u Np, a zatim u Pu. Time se nuklearne transformacije usmjeravaju ka stvaranju transuranskih elemenata, a reakcija fisije se gasi.

**Da bi se lančana reakcija fisije održala nužno je usporiti sekundarne neutrone.** To se vrši pomoću materijala koji se zove **moderator ili usporivač**. Zadatak moderatora je da smanji energiju sekundarnih neutrona od 1 MeV-a do 0.1 eV, te da bude toliko učinkovit da neutrone uspori prije sudara sa U-238. Uz to sam moderator ne smije apsorbirati neutrone. Pokazalo se da takva svojstva imaju deuterij, odnosno teška voda, berilij i ugljik tj. grafit., te se oni koriste kao moderatori brzih neutrona. Kontrolirana lančana reakcija fisije sa stalnim intenzitetom reakcije se događa u nuklearnom reaktoru. Nekontrolirana reakcija fisije dovodi do eksplozije.

## ENERGIJA FISIJE

Energija oslobođena fisijom samo jedne uranove jezgre iznosi oko **200 MeV-a**. Ona se raspodjeljuje približno na slijedeći način:

Kinetička energija fisijskih fragmenata	- 169 MeV-a
<b>Energija sekundarnih neutrona</b>	<b>- 5 MeV-a</b>
<b>Energija <math>\beta</math> zračenja</b>	<b>- 7 MeV-a</b>
<b>Energija <math>\gamma</math> zračenja</b>	<b>- 7 MeV-a</b>
Energija neutrina	- 12 MeV-a

Kao što se vidi, najveći dio oslobođene energije nose fisijski fragmenti u obliku kinetičke enegrije, koja se u interakciji sa okolnim atomima pretvara u **toplinu**. Ostatak energije preuzimaju neutroni,  $\beta$  i  $\gamma$  zrake, te neutriini, pri čemu u reaktoru ostaje sva energije, osim energije neutrina.

$$\Delta m = (Z m_p - N m_n) - m_j \longrightarrow \text{defekt mase}$$

$$\Delta E = \Delta m c^2 \longrightarrow \text{energija vezanja}$$

$$\Delta E/A \longrightarrow \text{energija vezanja po nukleonu}$$

**Uobičajeno je da se mase iskazuju u unificiranim jedinicama mase – u , a energije u MeV-ima, te da se koristi energetski ekvivalent unificirane jedinice mase:**

$$1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV-a}$$

**Pri defektu mase od 1u oslobađa se energija od 931.5 MeV-a**

Oslobađanje energije je posljedica razlike između energije vezanja po nukleonu jezgre koja se cijepa i energije vezanja po nukleonu lakših elemenata koji nastaju fisijom. Protoni i neutroni su najteži kada su slobodni. Vezanjem u neku jezgru oni gube dio svoje mase. Razlika između mase slobodnog nukleona i njegove mase u jezgri zove se defekt mase. Prilikom spajanja nukleona u jezgru dio njihove mase se pretvara u

energiju, koja se oslobađa u trenutku formiranja jezgre. Oslobodena energija se naziva **energijom vezanja jezgre**. Što je defekt mase veći, veća je i energija vezanja, a jezgra je stabilnija. Veličina kojom uspoređujemo stabilnosti različitih jezgri je energija vezanja po nukleonu  $E/A$ . Najveću energiju vezanja po nukleonu, koja iznosi 8.7 MeV-a ima jezgra Fe-56. To je najstabilnija jezgra u prirodi sa najvećim defektom mase i "najlakšim" nukleonima. Energija vezanja po nukleonu za uran iznosi 7.6 MeV-a. Fragmenti fisije imaju mnogo veću energiju vezanja po nukleonu koja iznosi oko 8.5 MeV-a. Dakle, razlika u energiji vezanja za svaki nukleon iznosi:

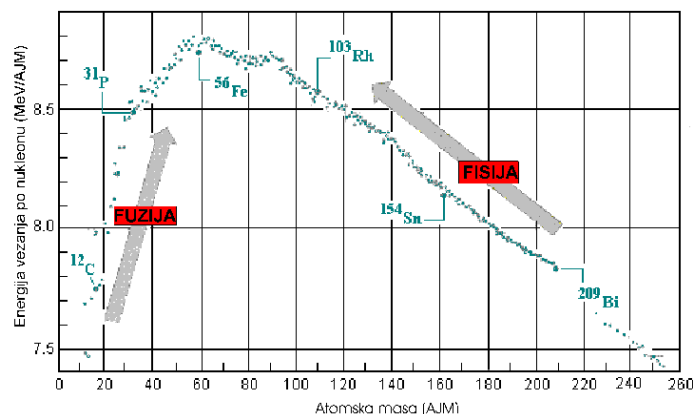
$$8.5 \text{ MeV} - 7.6 \text{ MeV} = 0.9 \text{ MeV} \text{ ili približno } 1 \text{ MeV.}$$

Stoga 1 atom urana koji ima 235 nukleona fisijom oslobađa energiju:

$$\Delta E = (8.5 \text{ MeV} - 7.6 \text{ MeV}) 235 = 200 \text{ MeV}$$

Fisijom jednog grama urana oslobađa se energija od 80 GJ, što je ekvivalentno toplini koja nastaje izgaranjem 3 t ugljena.

Graf energije vezanja po nukleonu u funkciji masenog broja jedan je od ključnih grafova nuklearne fizike. Sa grafa se mogu očitati i usporediti energije vezanja po nukleonu različitih atomskih jezgri. Graf pokazuje da će svaka nuklearna reakcija vođena u smjeru povećanja energije vezanja po nukleonu imati za rezultat oslobađanje energije.



## NUKLEARNA BOMBA

Eksplוזija nuklearne bombe se zasniva na nekontroliranoj reakciji fisije urana ili plutonija. Sastoji se iz obogaćenog U-235 (95%), odnosno

Pu-239 (90%). Kritična masa U je oko 25 kg, a Pu 10 kg. Eksplozija traje jednu mikrosekundu i razvija temperaturu od 1000000 K. Energija se oslobađa u obliku mehaničke, toplinske, svjetlosne, te energije radioaktivnog zračenja, pri čemu udarni val odnosi 50%, toplina i svjetlost 35%, a nuklearno zračenje 15% energije.

## KRATKA POVIJEST FISIJE

Fisija je otkrivena tijekom eksperimenata sa transuranskim elementima. Te je pokuse započeo E. Fermi sa suradnicima 1934. g. nakon otkrića neutrona. U nekim pokusima, među jezgrama nastalim nakon ozračivanja urana neutronima pronađeni su elementi relativno malih masa. Tako su Curie i Joliot pronašli lantan, a O. Hahn i F. Strassman barij, cerij i lantan. Oni su početkom 1939.g. objavili rezultate svojih istraživanja i ukazali na mogućnost cijepanja jezgre urana. L. Meitner i O. Frish iste godine daju objašnjenje procesa i predlažu naziv fisija, a N. Bohr i A.Wheeler daju teoriju fisije.

1942. g. potvrđena je mogućnost lančane reakcije i temeljem te ideje sagrađen je u Čikagu prvi nuklearni reaktor pod vodstvom E. Fermia.

Nuklearna energija je prvih desetak godina korištena isključivo u vojne svrhe, za izradu nuklearnog oružja. U sklopu projekta Manhattan SAD, za vrijeme drugog svjetskog rata, izrađuju prvu nuklearnu bombu. 06. kolovoza 1945. g. bačena je uranova bomba (20 kg U-235), na Hirošimu, a 09. kolovoza 1945. g. plutonijeva bomba na Nagasaki (5kg Pu-239).

### **Od tada je u svijetu eksplodiralo više od 2000 nuklearnih bombi.**

Primjena nuklearne energije u mirnodopske svrhe počinje nakon 1955. g. kada je u Ženevi održana prva međunarodna konferencija o uporabi nuklearne energije.

1956. g. puštena je u pogon prva komercijalna nuklearna elektrana u Velikoj Britaniji. Danas u svijetu radi više stotina nuklearnih reaktora različitih namjena i snaga.

## PITANJA I ZADACI

1. Objasni pojmove defekt mase, energija vezanja i energija vezanja po nukleonu, te objasni i pokaži kako se mogu izračunati.

2. Nacrtaj graf promjene energije vezanja po nukleonu u funkciji masenog broja, te pomoću njega objasni oslobađanje energije u procesu fisije.
3. Izračunaj energije vezanja jezgri atoma U-238 i U-235. (7.57 MeV, 7.6 MeV)
4. Opiši razliku između apsorpcije neutrona u U-235 i U-238.
5. Što je nuklearna konverzija, a što oplodni materijal ?
6. Napiši i objasni nuklearnu reakciju dobivanja plutonija iz urana.
7. Napiši i objasni nuklearnu reakciju dobivanja U-233 iz torija.
8. Zahvatom sporog neutrona jezgra U-235 se raspada na Xe-139, Sr-94 i 3 sekundarna neutrona. Napiši reakciju i izračunaj oslobođenu energiju. ( 179.5 MeV )
9. Izračunaj kolika se energija u J oslobađa pri fisiji 1 kg U-235, ako se pri fisiji jednog atoma oslobađa 200 MeVa. ( 82 TJ )
10. Kolika je dnevna potrošnja U-235 u nuklearni snage 15 MW, ako je njena korisnost 16%, a pri fisiji jednog atoma se oslobađa energija od 200 MeVa? ( 0.1 kg )
11. Nuklearni reaktor ima snagu od 60 MW. Izračunaj:
  - a) Broj raspada U-235 u 1 sekundi ako se pri jednom raspadu oslobodi 200 MeVa.
12.
  - a) Utrošak U-235 u toku 30 dana rada reaktora.
  - b) Masu U-235 koja se za to vrijeme pretvori u energiju uzimajući da je korisnost 100%
  - c) ( 1.9 E+ 18 ) , b) ( 1.92 kg ) , c) ( 1.73 g )
13. Reaktor atomskog ledolomca troši dnevno 200 g U-235. Snaga mu iznosi 32 MW. Fisijom jedne jezgre urana oslobodi se 200 MeVa. Odredi stupanj korisnosti motora ledolomca. ( 17% )
14. Izračunaj energiju oslobođenu fisijom 10 kg U-235 na Ba-141 i Kr-92 i 3 neutrona. (4.47E+27MeV)

## LITERATURA

1. V. Paar: "Što se zbiva u atomskoj jezgri", Izdanje: Školska knjiga, Zagreb 1987. god.
2. V. Knapp, P. Kulišić: "Novi izvori energije", Izdanje: Školska knjiga, Zagreb 1984 . god.
3. E. H. Wichmann: "Kvantna fizika "-prijevod, Izdanje: Tehnička knjiga 1988. god.
4. R. Muncaster: "Physics", Izdanje: British Library 1986. god.
5. Williams, Triunklein, Metcalfe: " Modern Physics", Izdanje: New York 1984. god.
6. L. Ponomarjev: "Kvantna kocka"-prijevod, Izdanje: Školska knjiga, Zagreb 1995. god.
7. D. Ivanović i V. Vučić: "Atomska i nuklearna fizika", Izdanje: Naučna knjiga 1984. god.