

Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama

Uvod i fizikalne osnove – I
Energijske tehnologije
FER 2008.

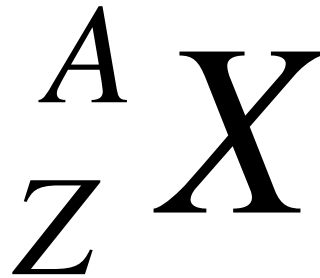


- Nuklearna fizika
- Građa atoma i jezgre
- Energija veze
- Radioaktivnost
- Fisija/fuzija

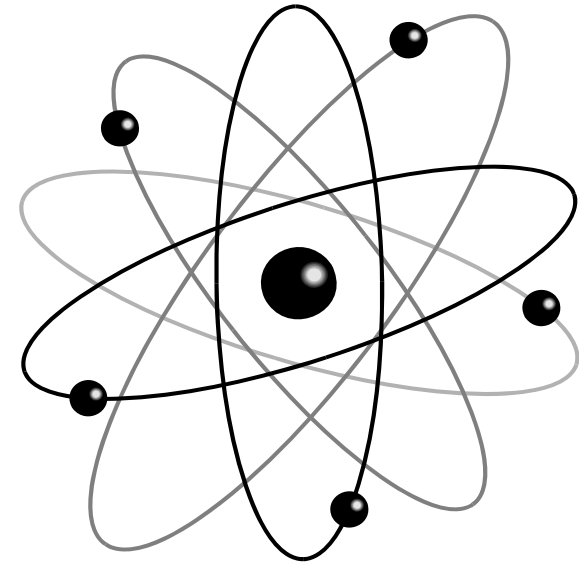


Atom i jezgra

- Nukleoni
 - protoni
 - neutroni



- Elektroni



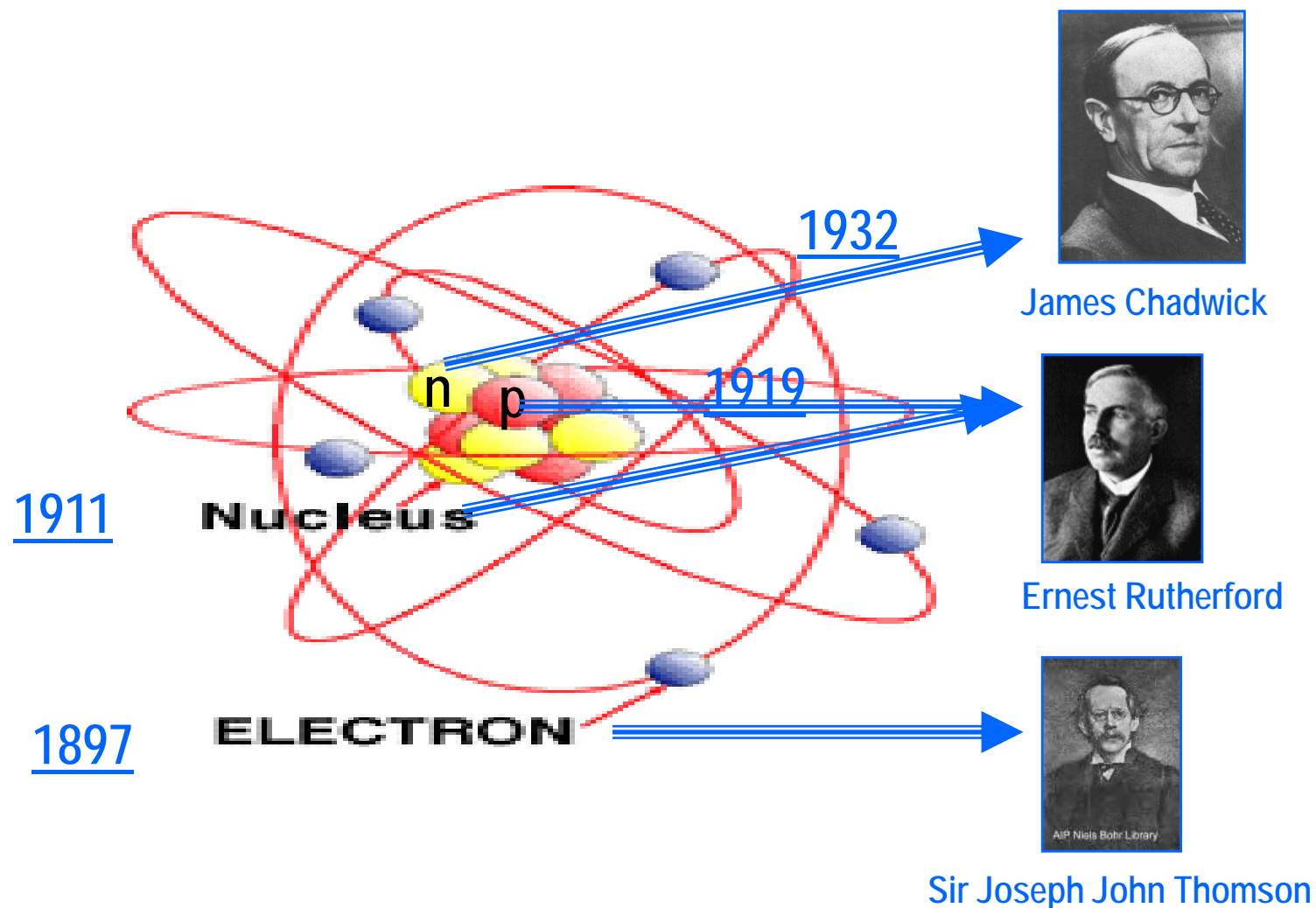
Z Atomski broj = broj protona

A Atomska masa

= broj protona (Z) + broj neutrona (N)

X = kemijski simbol elementa iz periodnog sustava

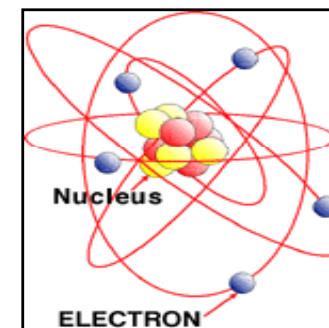
Zbivanja ključna za formiranje sadašnje slike o atomu i jezgri



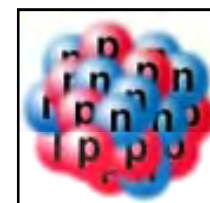
Građa atoma i atomske jezgre

- **Trenutno stajalište:**

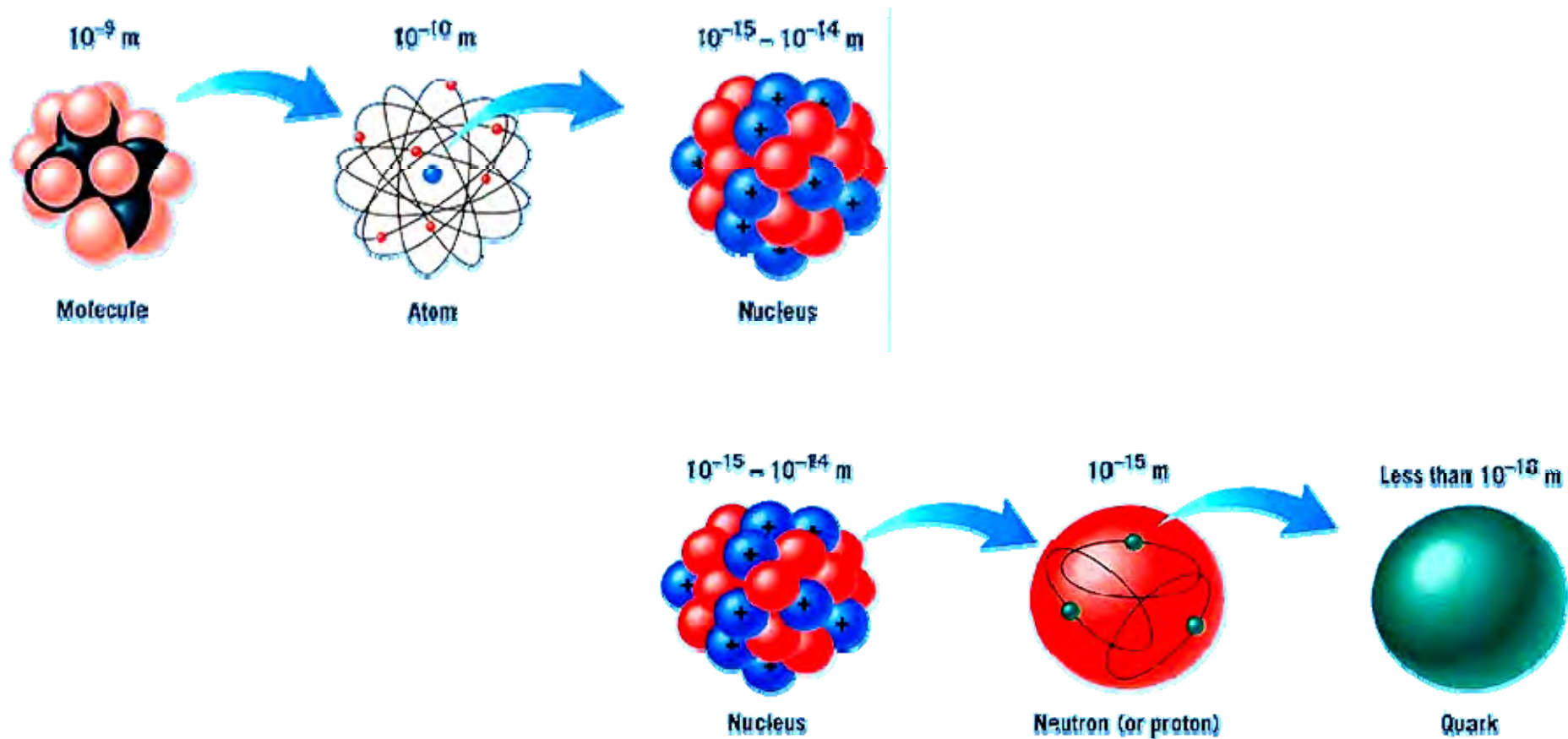
- elektroni su u stalnom gibanju u putanjama oko jezgre u formi elektronskog oblaka,
- nuklearna jezgra je sastavljena od protona i neutrona,
- unutrašnju građu protona i neutrona čine kombinacije čestica koje zovemo kvarkovi.



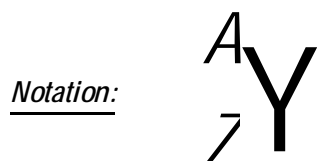
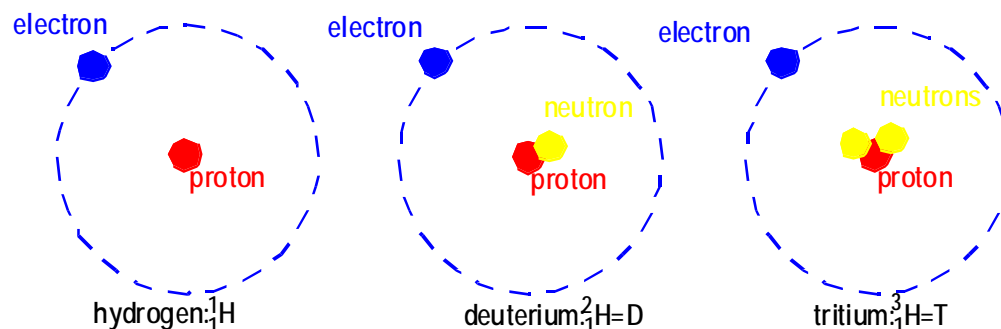
- Najjednostavnija je jezgra vodika, sastavljena od jednog protona.



Karakteristične dimenzije



Izotopi



$A = Z + N$: atomic mass number
 N : number of neutrons
 Z : number of nuclear charge (atomic number)
 Y : atomic symbol from Periodic Table (Fig.4)

Ukupni električni naboj jezgre = $+Ze$

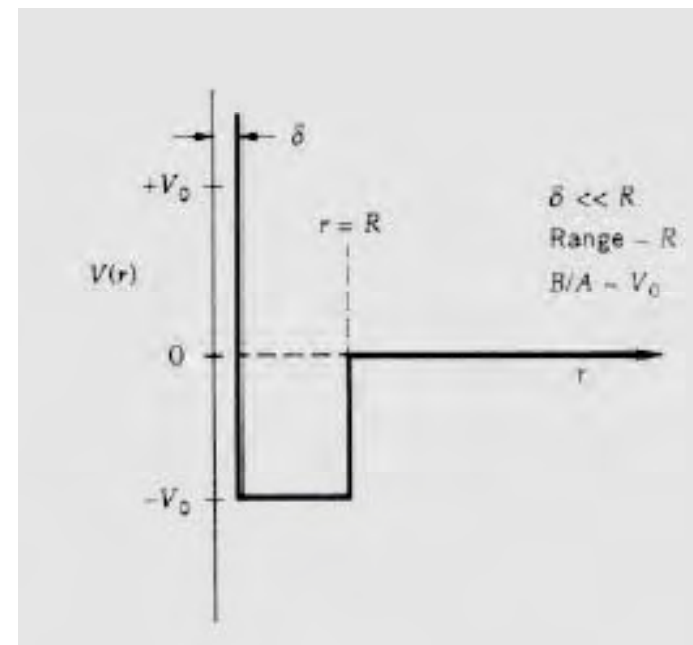
U neutralnom atomu broj elektrona = broj protona

- Naboj protona ($+e$) = $+1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Naboj elektrona ($-e$) = $-1,60210 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Izotopi jednog elementa imaju isti broj protona a različit broj neutrona, kemijska i fizikalna svojstva su im praktično ista.

Nuklearne sile

- Drže nukleone u jezgri na okupu
- Kratak domet (red veličine dimenzije nukleona)
- Privlačne i snažne (formiraju jezgru velike gustoće) ne ovise o naboju
- Na vrlo malim udaljenostima pokazuju odbojna svojstva (manje od 0.5 fm)
- Djeluju između parova nukleona
- Pokazuju svojstvo zasićenja
- Ovisе o parnosti broja nukleona i protona
- Pokazuju izraziti porast za takozvane magične brojeve (popunjenost energetskih ljuski)
- Karakteristične energije su reda MeV ($1.602 \cdot 10^{-13}$ J)
- Uz pretpostavku konstantne gustoće (10^{17} kg/m³) veličina jezgra ovisi o broju nukleona

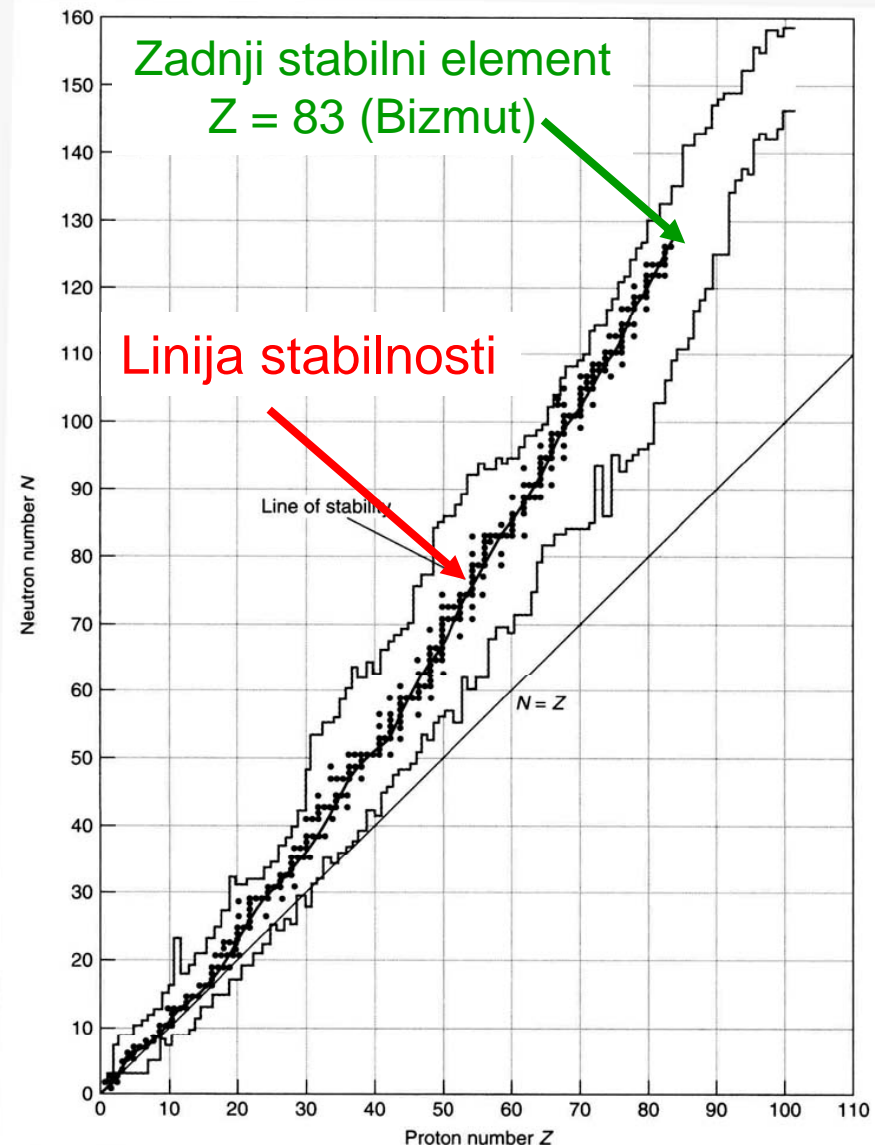


Potencijalna energija
neutrona vezanog u jezgri

Stabilnost građe jezgra

ovisnost o omjeru broja neutrona i protona

- 3000 poznatih izotopa,
266 stabilnih!
 $Z > 83$ nema stabilnih elemenata
- Za male Z $N \approx Z$,
za velike Z $N > Z$.
(potreban veći broj neutrona da kompenzira odbojnu silu protona)
- Posebno su stabilna jezgra s magičnim brojevima nukleona
 $Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$
(analogno elektronskim ljuskama)



Granice stabilnosti i radioaktivnost

- Nuklidi s **viškom neutrona** podložni su beta raspadu (neutron se pretvara u proton i beta česticu).
- Nuklidi s **manje neutrona** nego što odgovara liniji stabilnosti emitiraju pozitron ili apsorbiraju elektron iz omotača (jedan proton se pretvara u neutron).
- β^- i β^+ raspad uobičajeno prate emisije kvanta energije (γ zrake)
- Teški nuklidi na vrhu krivulje stabilnosti problem svoje stabilnosti rješavaju emisijom **alfa čestice**.
- Navedene transformacije jezgre kojima jezgra prelazi u energetski stabilniju konfiguraciju nazivamo radioaktivni raspad ili radioaktivnost.

Zakon radioaktivnog raspada

- Zakon radioaktivnog raspada opisuje kako se mijenja broj radioaktivnih jezgara N u vremenu.
- Brzina promjene broja radioaktivnih jezgara, dN/dt , se zove aktivnost, R , radioaktivnog izotopa i proporcionalna je trenutnom broju jezgara. Konstanta proporcionalnosti, λ , se zove **konstanta radioaktivnog raspada**

$$R = \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$R = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

- Vrijeme za koje se početni broj jezgara smanji na pola zove se **vrijeme poluraspada** $t_{1/2}$
 $\tau = 1/\lambda =$ *očekivano vrijeme trajanja života radioaktivne jezgre (44% dulje od vremena $t_{1/2}$)*

Radioaktivnost: mjerne jedinice

Aktivnost: **Becquerel (Bq)** = 1 raspad / s

1 curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ raspada / s (Bq)
(brzina dezintegracije 1g radija)

Ekspozicijska doza: broj ionskih parova proizvedenih prolazom zračenja
Roentgen = $2,6 \times 10^{-4}$ C/kg_{air} (0,0084 J/kg_{air})

Energetska doza ([Gy]): **rad** = 0,01 J/kg ([Gy])

– Energija zračenja apsorbirana po jedinici mase tvari

Biološka doza ([Sv]): **rem** = 0,01 J/kg ([Sv])

– Biološka doza = energetska doza × faktor kvalitete ($\alpha=10$, β , $\gamma=1$)

Iznosi:

0,5 rem / god = prirodno zračenje okoline

5 rem / god = granična doza za zaposlene u NE

500 rem = 50% smrtnosti unutar mjesec dana

750 rem = fatalna doza (5000 rem = smrt unutar tjedan dana)

Tip zračenja: α , β , γ

Tip zračenja

Naboj/Masa

Prodornost

alfa α = jezgro He ($2p + 2n$)

$+2q/4m_p$

list papira

beta β = elektron ili pozitron

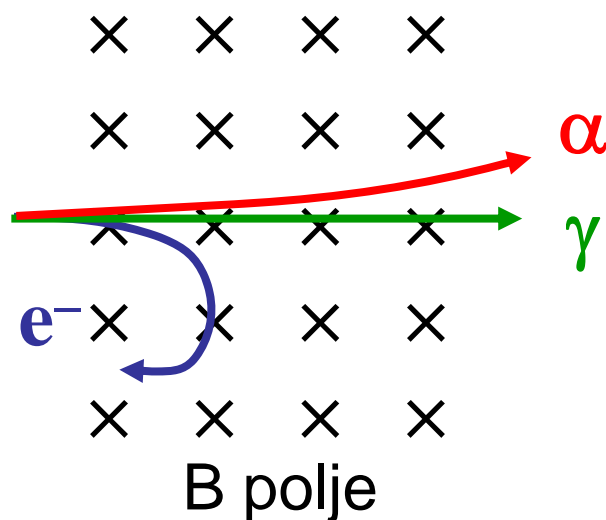
$-q/m_e$ or $+q/m_e$

mm metala

gama γ = visokoenergetski kvant

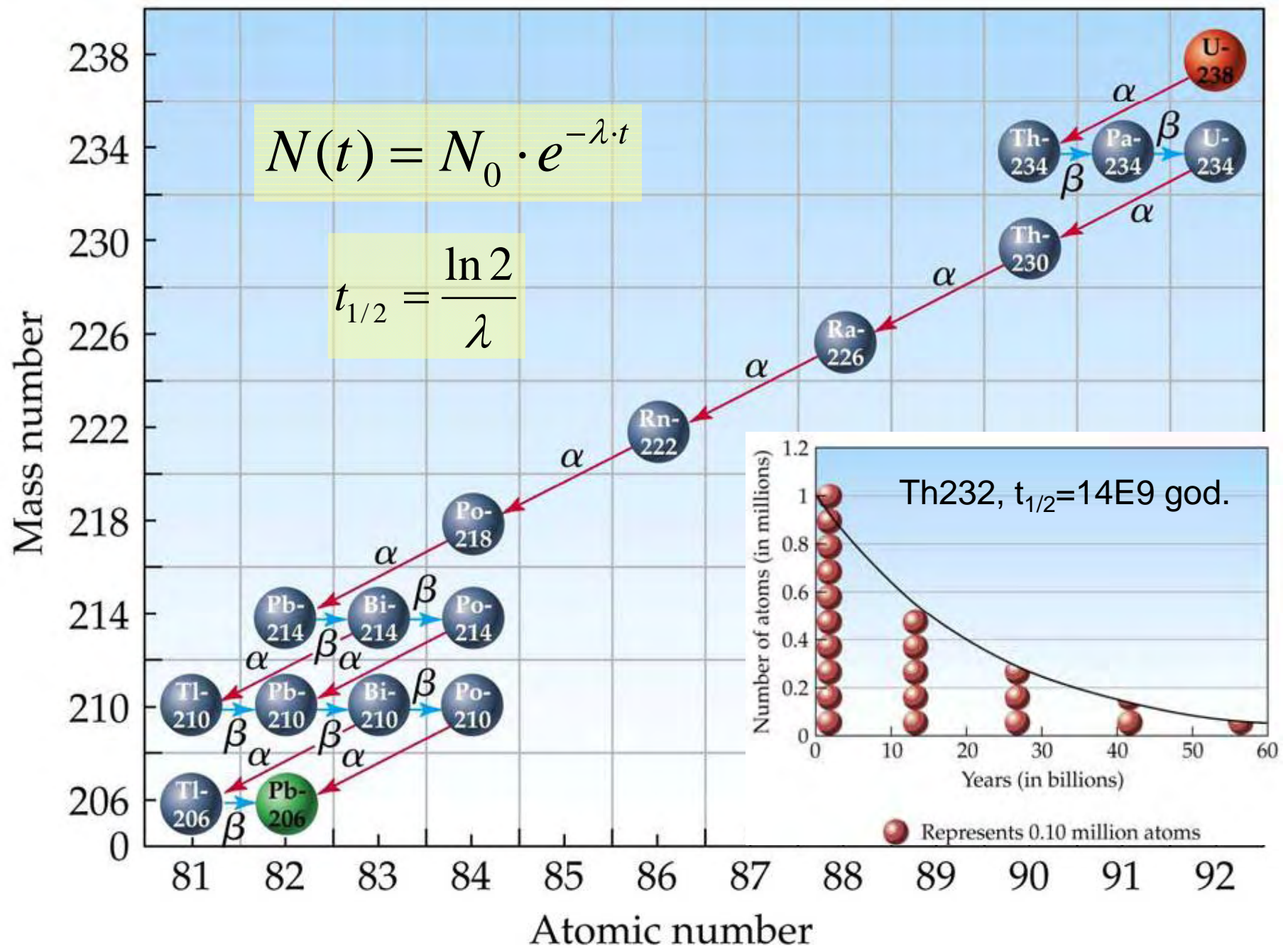
bez naboja

cm Pb



Radioaktivni nizovi u prirodi

- Uranij ($^{238}_{92}\text{U}$ i $^{235}_{92}\text{U}$) i Torij ($^{232}_{90}\text{Th}$)
 - postoje u prirodi ($t_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$, $0,7 \cdot 10^9$ i $14 \cdot 10^9$ godina)
 - završavaju olovom ($^{206}_{82}\text{Pb}$, $^{207}_{82}\text{Pb}$ i $^{208}_{82}\text{Pb}$ respektivno)
- Neptunij ($^{237}_{93}\text{Np}$)
 - ne postoji u prirodi ($t_{1/2} = 2,1 \cdot 10^6$ godina)
 - završava bizmutom ($^{209}_{83}\text{Bi}$)
- Postoje i drugi radioaktivni nizovi, npr.: $^{14}_6\text{C}$ i $^{40}_{19}\text{K}$



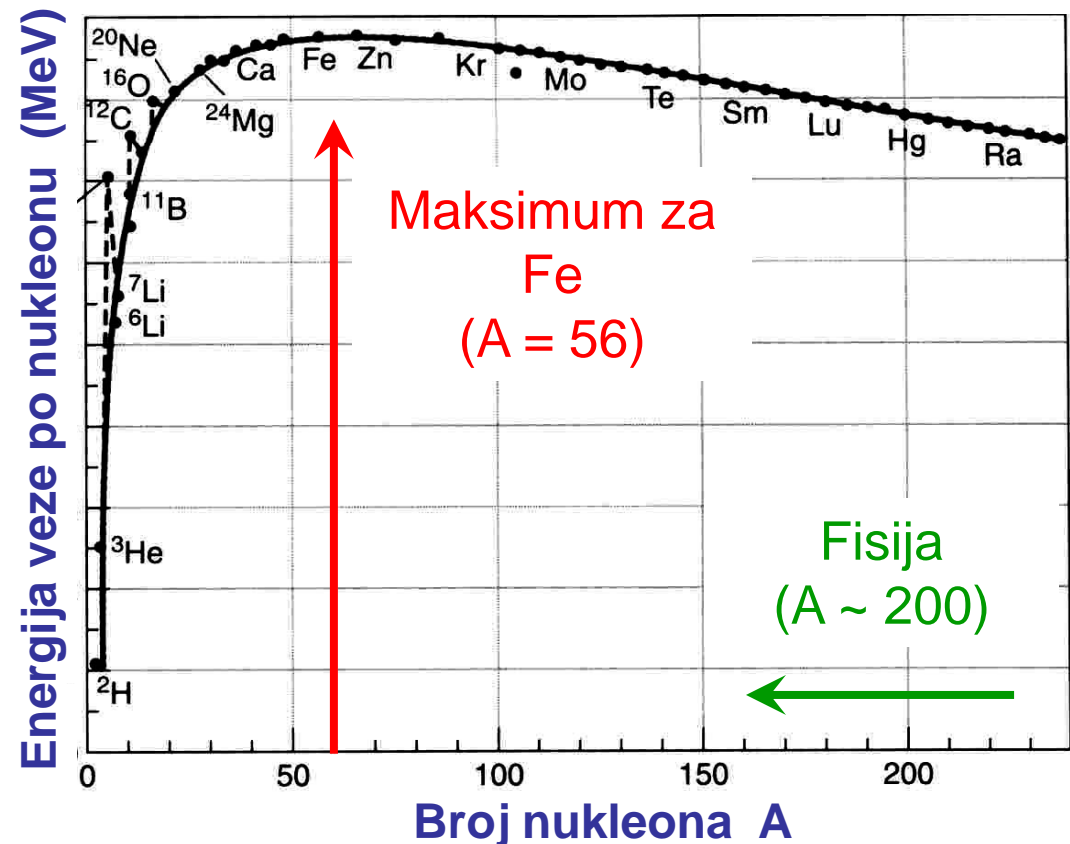
Energija vezanja

Energija vezanja je energetska ekvivalent defekta mase (razlika mase jezgre i ukupne mase pojedinačnih nukleona). Nuklidi s velikom energijom vezanja su stabilni.

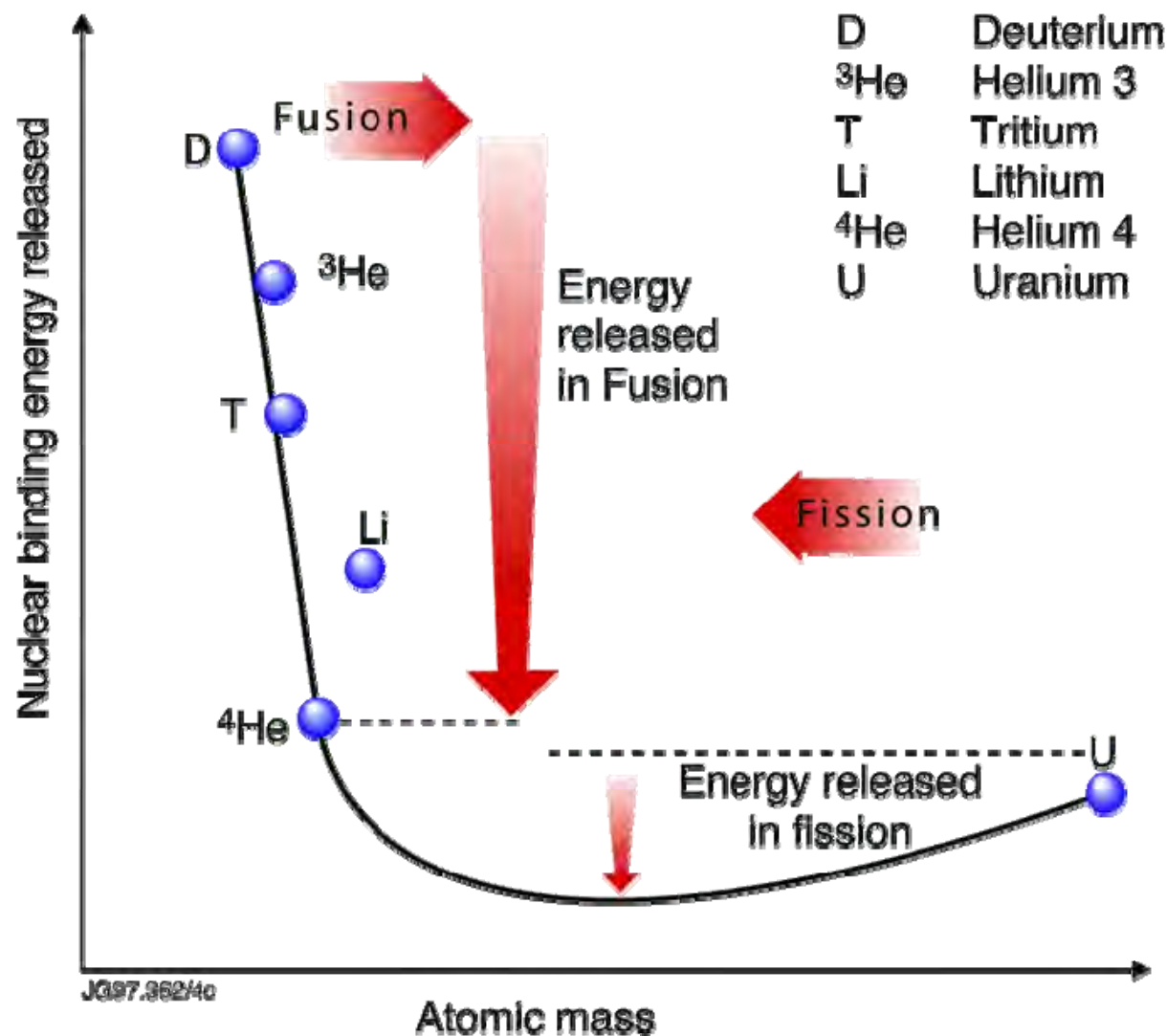
$$B_{\text{nuclear}} = [Z m_H c^2 + N m_n c^2] - [M_A c^2]$$

$m_H = 1.007825 \text{ ajm}$ i $m_n = 1.008665 \text{ ajm}$ (atomska jedinica mase $1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

- Energija vezanja se oslobađa kad se formira jezgra. Istu količinu energije je potrebno uložiti da se jezgra rastavi na sastavne dijelove.
- Energija vezanja po nukleonu ima maksimum za $A = 56$ ($\sim 8,5 \text{ MeV/nukleon}$).
- Sve reakcije koje vode nastanku nuklida s većom energijom veze od polaznih nuklida oslobađaju energiju.



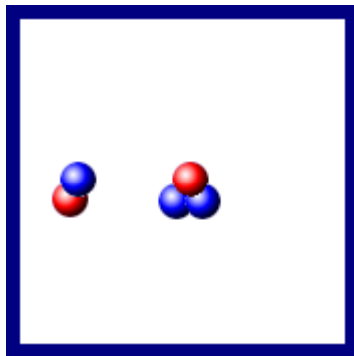
Oslobađanje energije vezanja - fisija/fuzija



Energija iz atomske jezgre

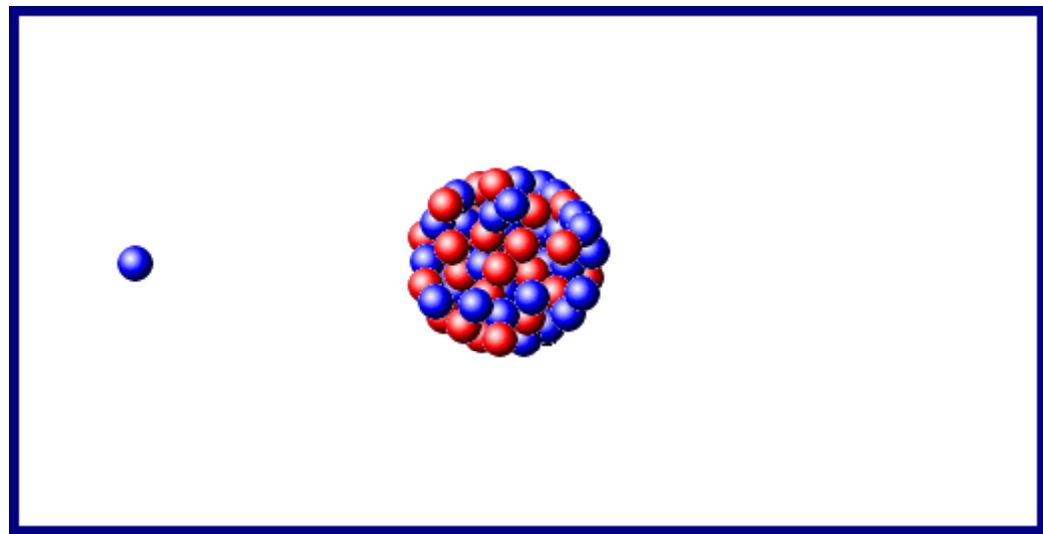
Fuzija

Spajanje manjih
jezgri u veću


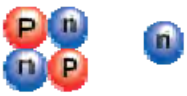











Fisija

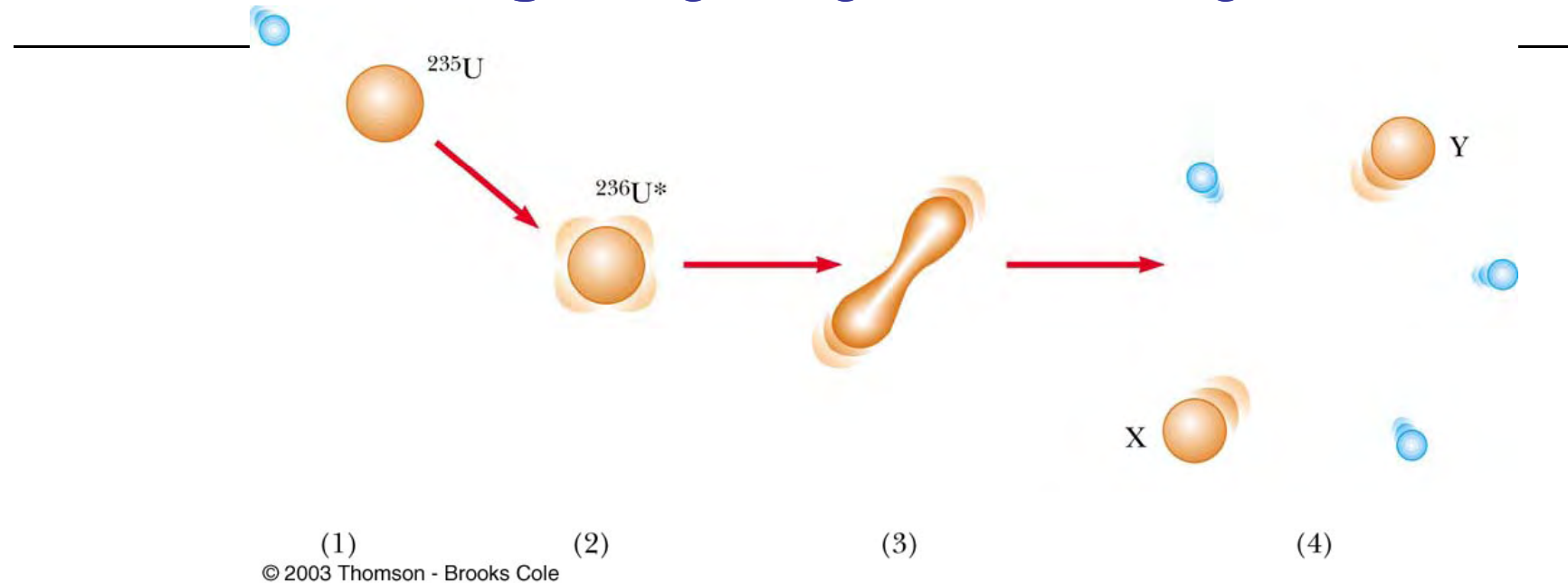
Raspad teških jezgri na
lakše



Fuzijske reakcije

Reaction		Ignition Temperature		Output Energy
Fuel	Product	(millions of °C)	(keV)	(keV)
$D + T$ 	${}^4\text{He} + n$ 	45	4	 17,600
$D + {}^3\text{He}$ 	${}^4\text{He} + p$ 	350	30	 18,300
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$ 	400	35	 ~4,000
	$T + p$ 	400	35	 ~4,000

Sekvenca događaja tijekom fisije

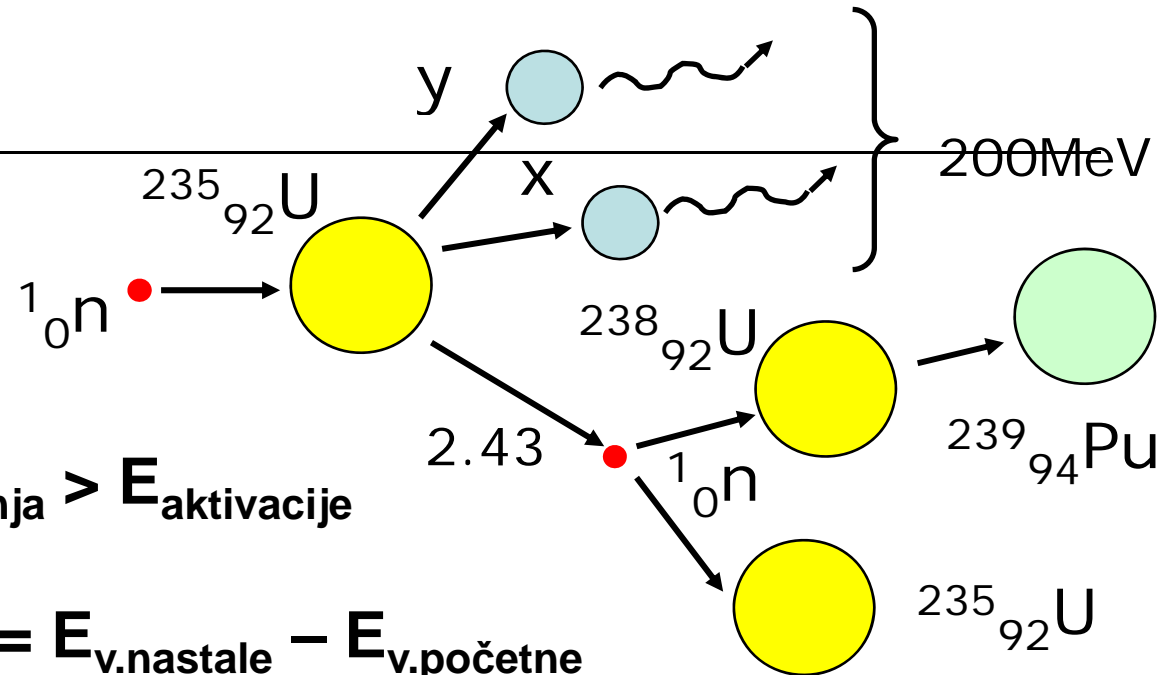
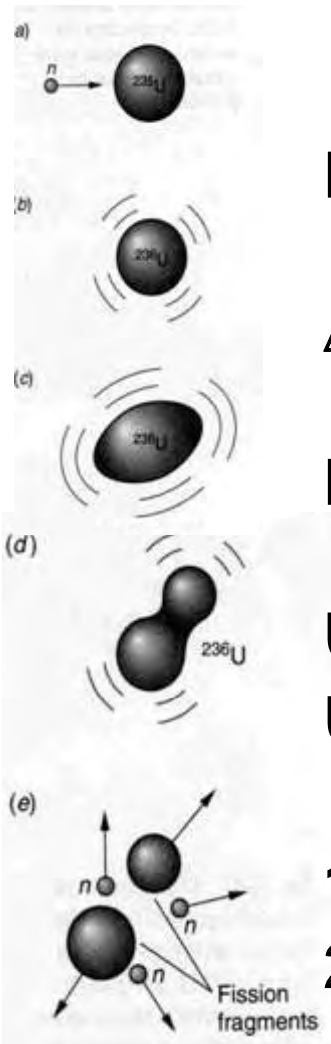


- Jezgra ^{235}U uhvati neutron
- Formira se složena jezgra $^{236}\text{U}^*$, koja raspolaže viškom energije (energija veze + kinetička energija neutrona) i počinje oscilirati i mijenjati oblik
- Za velika izobličenja jezgra $^{236}\text{U}^*$ privlačne nuklearne sile slabe i prevladavaju odbojne sile među protonima
- Jezgra se cijepa na dva dijela uz emisiju 2 do 3 neutrona i oslobađanje energije (proces fisije traje oko $1\text{e-}12\text{ s}$)

Energija oslobođena u procesu fisije

- Energija veze za inicijalnu tešku jezgru je oko 7,2 MeV po nukleonu
- Energija veze za novonastale jezgre (fisijski fragmenti) je oko 8,2 MeV po nukleonu
- Fisijski fragmenti imaju manju energiju mirovanja nego početna jezgra, smanjenje mase po nukleonu rezultira u oslobađanju energije tijekom fisije
- Procjena oslobođene energije za U-235
 - 235 nukleona
 - Oslobađa se oko 1 MeV energije po nukleonu (8,2 MeV – 7,2 MeV)
 - Ukupna oslobođena energija je oko 235 MeV
 - 85% navedene energije je kinetička energija fisijskih fragmenata
- Napomena: red veličine energije oslobođene pri kemijskim procesima je desetak eV

Fisija Urana



Fisija: $\Delta E_{\text{vezanja}} > E_{\text{aktivacije}}$

$$\Delta E_{\text{vezanja.jezgre}} = E_{\text{v.nastale}} - E_{\text{v.početne}}$$

$E_{\text{aktivacije}}$ = potrebna energija za fisiju

U235 – fisibilan

U238 – fisibilan s pragom

$$1 \text{ eV} = 1,60219 \text{ E-19 J}$$

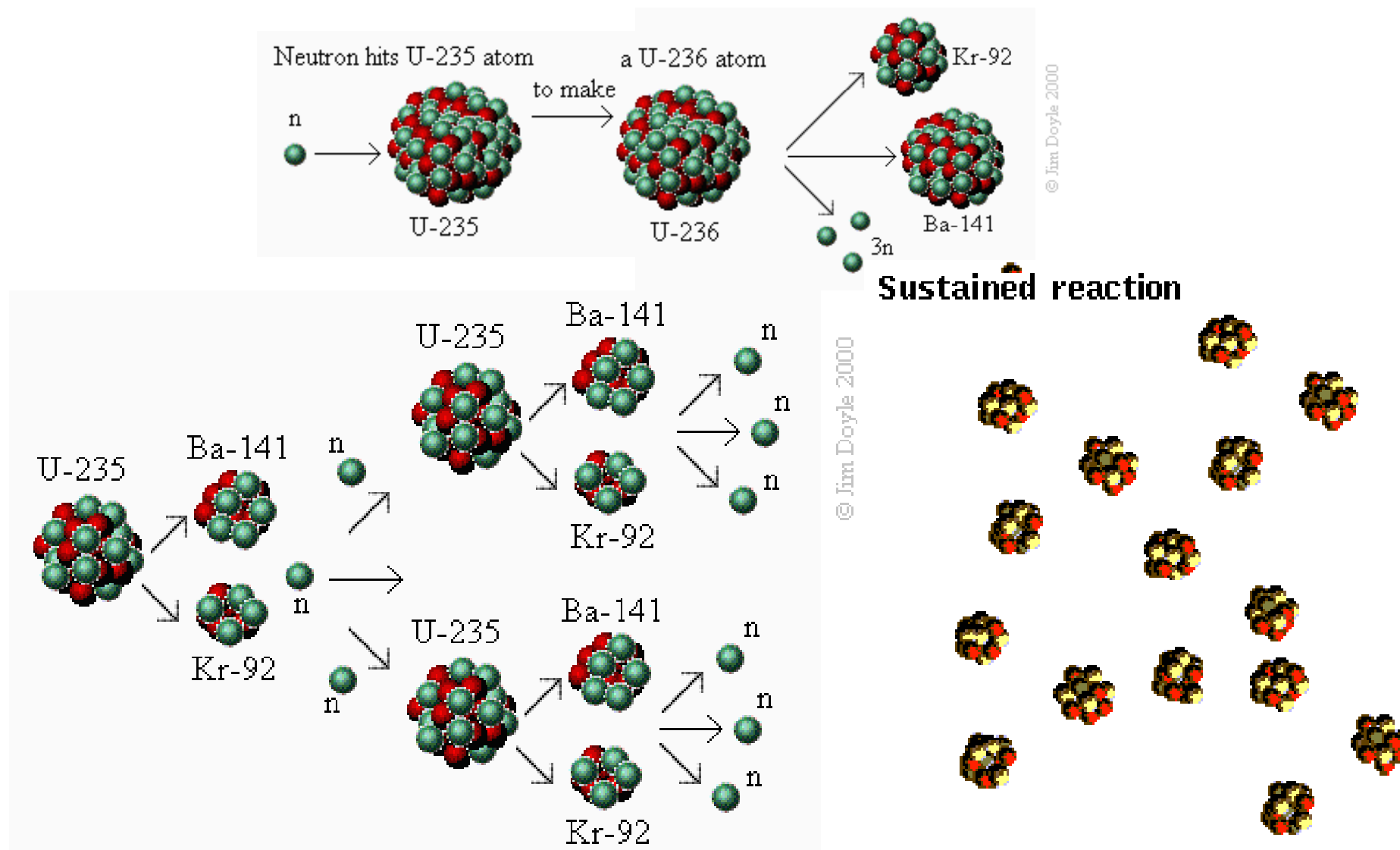
$$200 \text{ MeV} = 3,204 \text{ E-11 J}$$

Energija iz fisije	
Kinetička fragmenata	83.5%
Trenutne γ -zrake	2.5%
Kinetička neutrona	2.5%
β -raspad fragmenata	3.5%
γ zrake fragmenata	3.0%
Energija neutrina	5.0%

Fisijski, fisibilni i oplodni nuklearni materijali

- Fisijski materijal – fisija je moguća neutronima bilo koje energije (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241)
- Fisibilni materijal – fisija neutronima je moguća ali može ovisiti o energiji neutrona (energija aktivacije), (U-238, Pu-240, Pu-242 + svi fisijski nuklearni materijali)
- Oplodni materijal – materijal koji uhvatom neutrona prelazi u neki od fisijskih materijala, (Th-232, U-238)

Fisija urana i lančana reakcija



Lančana reakcija

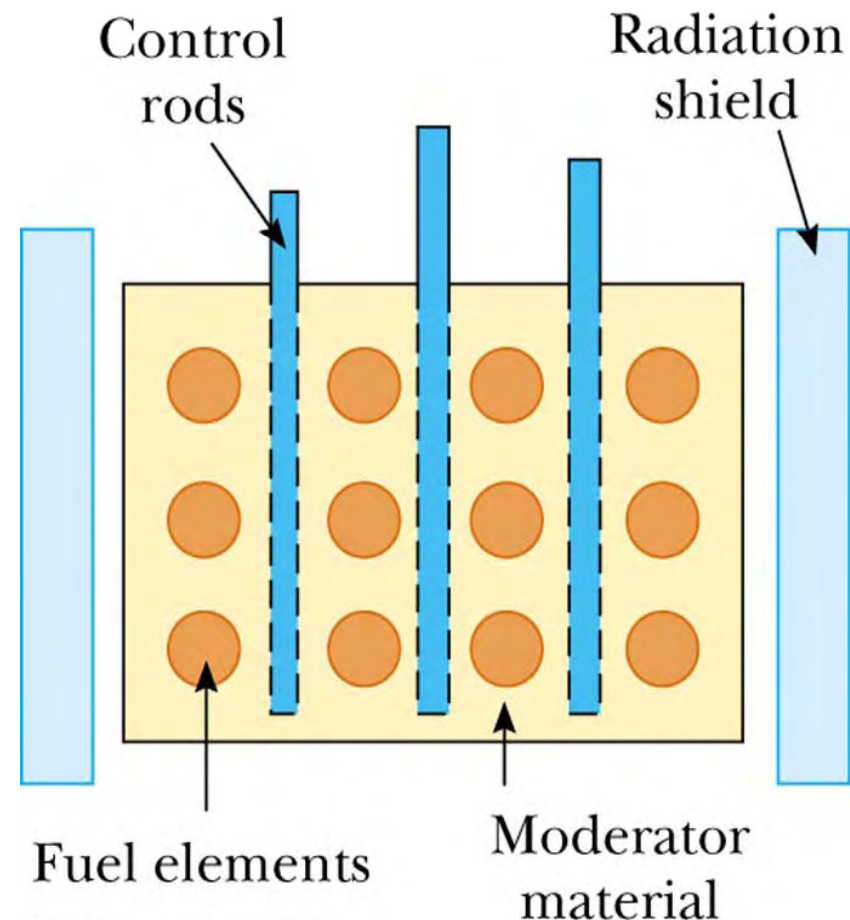
- Slobodnih neutrona nema u prirodi (neutron van jezgra se raspada s vremenom poluraspada od oko 12 min) pa su neutroni nastali pri fisiji od velikog značaja za energetske primjene fisije
- **1942**: Fermi prva samoodržavajuća nuklearna lančana reakcija.
- Ovisno o uvjetima multiplikacije neutrona njihov broj može rasti ili padati
- Nekontrolirani porast rezultira nuklearnom eksplozijom ali samo ako je koncentracija jezgara urana U-235 dovoljno velika da podrži porast broja neutrona po geometrijskoj progresiji

Nuklearni reaktor

- Nuklearni reaktor je sustav projektiran da omogući kontroliranu samoodržavajuću nuklearnu reakciju fisije
- Parametar koji opisuje tijek odvijanja procesa naziva se multiplikacijski faktor k .
- Definiran je kao omjer srednjeg broja neutrona u dvije susjedne generacije neutrona (prije i poslije fisije)
- Da bi se nuklearna reakcija mogla nadzirati njegova vrijednost ne smije biti puno veća od 1
- Reaktor koji ima $k=1$ zovemo **kritičnim reaktorom** i on održava konstantan broj neutrona i snagu proizvedenu fisijom
- Ako je $k<1$ broj neutrona i snaga reaktora će se s vremenom smanjivati i reaktor zovemo **podkritičnim** a ako je $k>1$ broj neutrona u reaktoru i snaga reaktora će se povećavati i reaktor zovemo **nadkritičnim**
- Kako je k u praksi vrlo blizu 1 uvedena je veličina koja se naziva reaktivnost i definirana je kao $\rho=(k-1)/k$ i predstavlja relativno odstupanje reaktora od kritičnog stanja

Osnovni izgled reaktora

- Nuklearno gorivo je organizirano u gorivne elemente
- Moderator je materijal koji ima sposobnost usporavanja neutrona
- Rashladno sredstvo odvodi toplinu iz reaktora
- Posebni kontrolni elementi napravljeni od materijala koji absorbiraju neutrone služe za nadzor broja neutrona raspoloživih za fisiju
- Nuklearno gorivo, moderator, rashladno sredstvo i kontrolni element čine jezgru reaktora
- Jezgra je okružena štitom od zračenja



© 2003 Thomson - Brooks Cole

Korisne definicije:

a_i atomski sadržaj ili izotopska učestalost

w_i maseni udjel

A_i atomska masa izotopa i

A prosječna atomska masa elementa s izotopskim sastavom

N_i broj jezgara

$$a_i = \frac{N_i}{\sum_{j=1}^n N_j}$$

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_{j=1}^n a_j A_j}$$

$$A = \sum_{i=1}^n (a_i \bullet A_i)$$

$$\frac{1}{A} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{A_i}$$

$$w_i = \frac{A_i N_i}{\sum_{j=1}^n A_j N_j}$$

Zadatak 1

Odredite ogrjevnu moć antracita u MJ/kg ako je poznato da se izgaranjem atoma ugljika oslobađa 4,79 eV energije. Pretpostaviti da je težinski udjel ugljika u antracitu 0,98 i da izgori kompletan ugljik.

Na isti način odredite ogrjevnu moć 1 kg prirodnog urana (izotopske učestalosti su 99,282% za U-238, 0,712% za U-235, 0,006% za U-234) i 1 kg 3% obogaćenog UO_2 goriva.

Obogaćenje (e) je definirano kao maseni udjel U-235 u ukupnom uranu ($e = m_{\text{U-235}}/m_{\text{U}} \cdot 100\%$).

Pretpostaviti da se fisijom jezgra U-235 oslobodi 200 MeV energije.

Zadatak 1: rješenje

- **A) za potpuno izgaranje broj jezgara ugljika u 1 kg antracita = broj oksidacija**

$$N_C = 0,98 \text{ m } N_A / A_C = 0,98 \cdot 1 \cdot 6,022 \cdot 10^{26} / 12 = 4,918 \cdot 10^{25} \text{ atoma C}$$

$$\text{Proizvedena energija: } 4,79 \text{ eV } 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV } N_C = 37,69 \text{ MJ/kg}$$

- **B) broj jezgara U-235 u 1kg prirodnog urana = broj fisija**

$$N_{235} = a_{235} \text{ m } N_A / (a_{234} A_{234} + a_{235} A_{235} + a_{238} A_{238})$$

$$N_{235} = 0,00712 \cdot 1 \text{ kg} \cdot 6,022 \cdot 10^{26} / (0,00006 \cdot 234 + 0,00712 \cdot 235 + 0,9982 \cdot 238) = 1,792 \cdot 10^{22} \text{ atoma}$$

$$\text{Proizvedena energija: } 200 \text{ MeV } 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV } N_{235} = 57,34 \cdot 10^4 \text{ MJ/kg}$$

- **C) broj jezgara U-235 u 1kg 3% obogaćenog urana = broj fisija**

$$\text{Atomska masa uran metala } A_U^{-1} = 0,03/235 + 0,97/238, A_U = 237,91$$

$$\text{Obogaćenje } e = m_{U235} / m_U \cdot 100\%$$

$$\text{Atomska masa } UO_2 \text{ } A_{UO2} = 237,91 + 2 \cdot 16 = 269,91$$

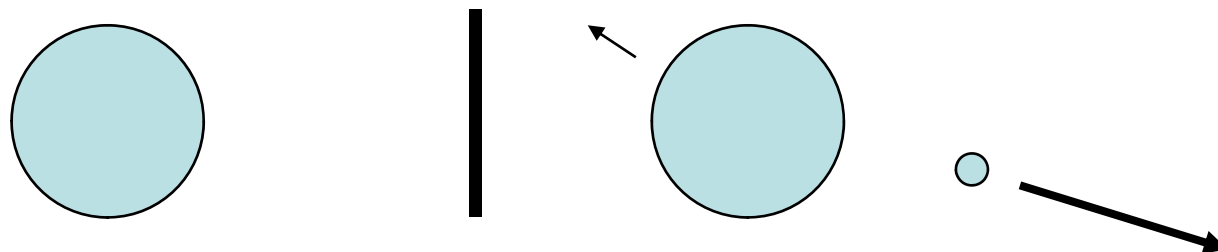
$$\text{Težinski udjel urana u } UO_2 \text{ } w_U = 237,91 / 269,91 = 0,8814$$

$$N_{235} = e w_U m_{UO2} N_A / A_{U235} = 0,03 \cdot 0,8814 \cdot 1 \cdot 6,022 \cdot 10^{26} / 235 = 6,776 \cdot 10^{22}$$

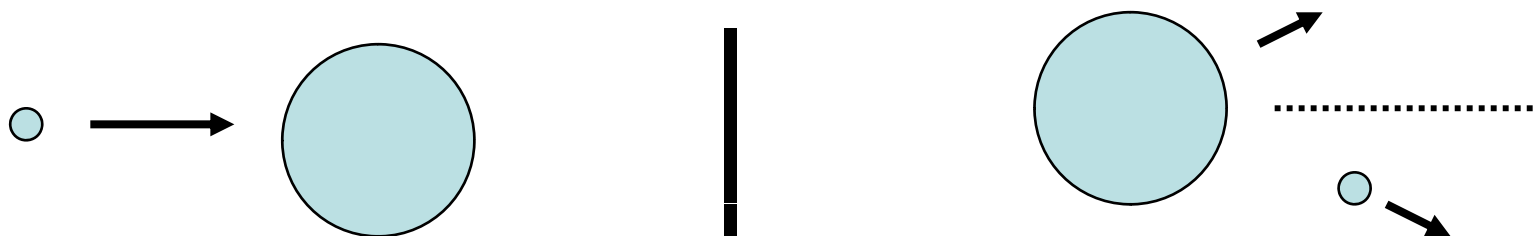
$$\text{Proizvedena energija: } 200 \text{ MeV } 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV } N_{235} = 2,17 \cdot 10^6 \text{ MJ/kg}$$

Dva tipa nuklearnih reakcija

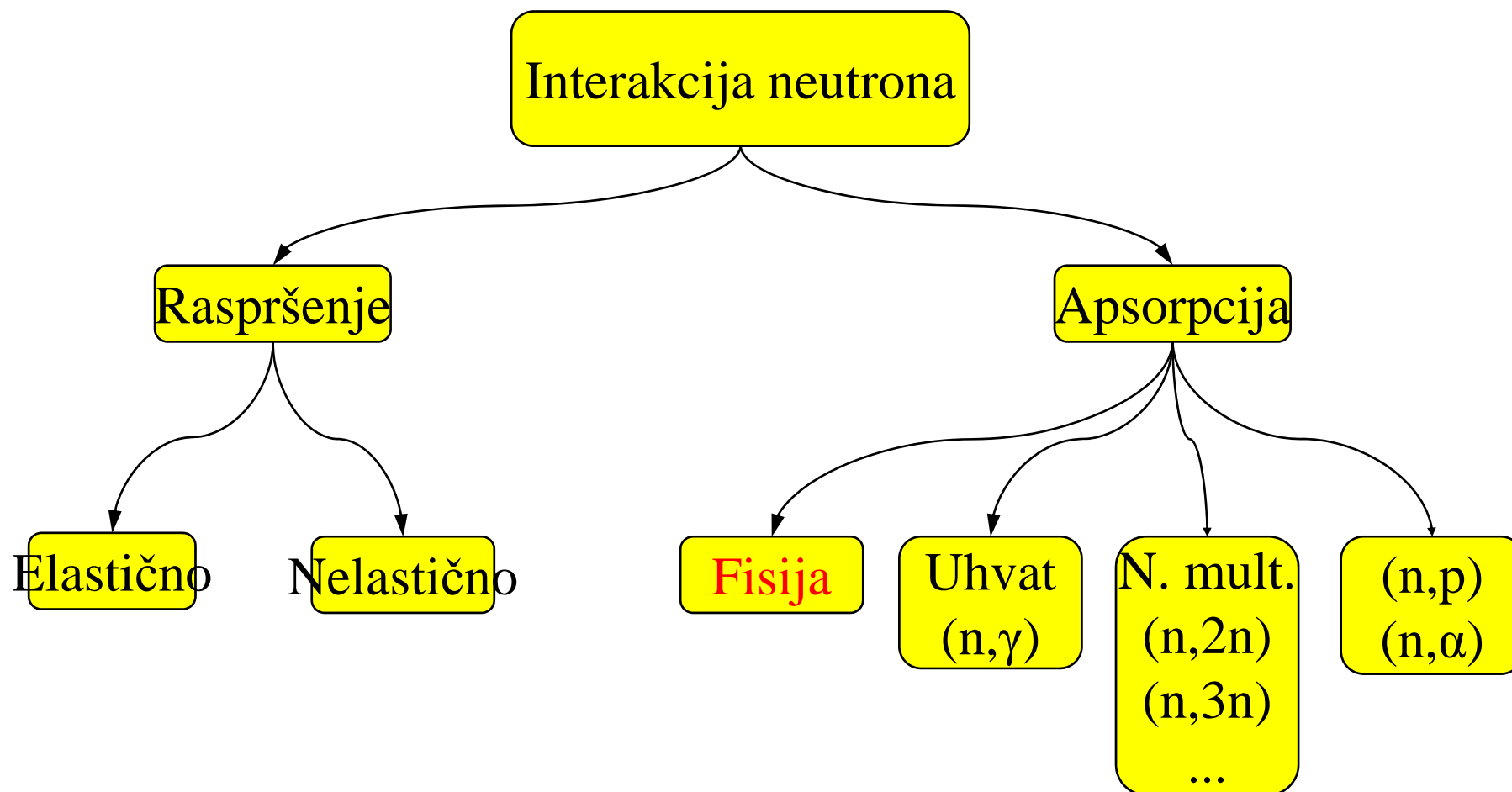
Radioaktivni raspad – jezgra se spontano raspada emitirajući česticu/kvant energije (α , β , γ -raspad)



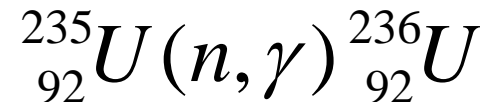
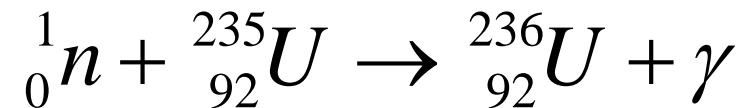
Sudar neutrona i jezgre – raspršenje ili apsorpcija



Interakcija neutrona s materijom



Način zapisivanja nuklearne reakcije



Projektil, meta, rezultirajuća jezgra, emitirana čestica

Energetski prinos nuklearne reakcije

$$E = mc^2$$

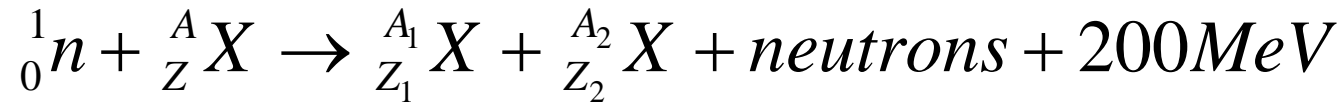
$$Q = \left[(M_a + M_b) - (M_c + M_d) \right] c^2$$

$$Q > 0 \quad \text{exothermic}$$

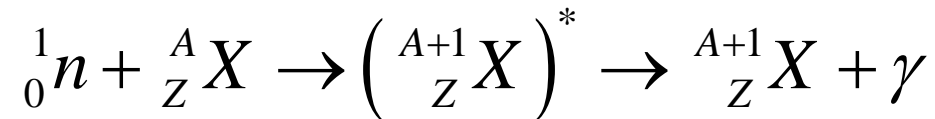
$$Q < 0 \quad \text{endothermic}$$

Najvažnije reakcije s neutronima

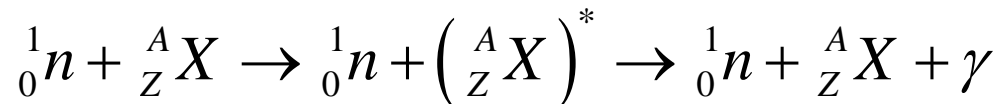
Nuklearna fisija (n, fis)



Radijativni uхват (n, γ)



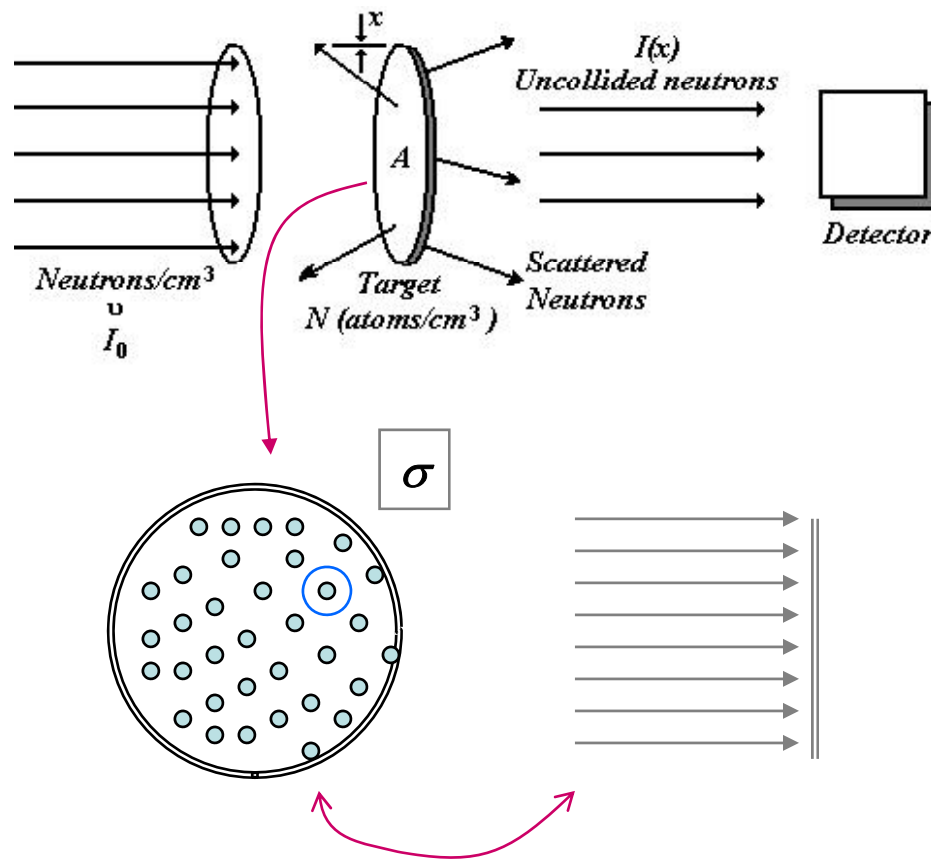
Raspršenje (n, n) or (n, n')



inelastic scattering (n, n')

Mikroskopski udarni presjek za nuklearnu reakciju

Predstavlja vjerojatnost da dođe do nuklearne reakcije



Ovisi o čestici koja izaziva reakciju i njenoj energiji, tipu reakcije i materijalu mete. Ima dimenziju površine (cm², m², barn=1,e-24 cm²).

Za velike energije se približava površini presjeka projekcije jezgre i projektila ali je kvantnomehanička veličina.

Oznaka: σ .

$$\sigma = \frac{\text{reaction / s nucleus}}{\text{neutrons / cm}^2 \text{ s}} = \frac{\text{reaction cross section (cm}^2\text{)}}{\text{neutron nucleus}}$$

Gustoća reakcija

$$R = \sigma I N_A$$
$$\left[\frac{\#}{cm^2 s} \right] \left[cm^2 \right] \left[\frac{\#}{cm^2 s} \right] \left[\frac{\#}{cm^2} \right]$$

Broj sudara u jedinici vremena po jedinici površine (R) proporcionalan je intenzitetu neutrona u snopu (I) i plošnoj gustoći jezgara mete (N_A) – konstanta proporcionalnosti zove se neutronske mikroskopske udarni presjek (σ)

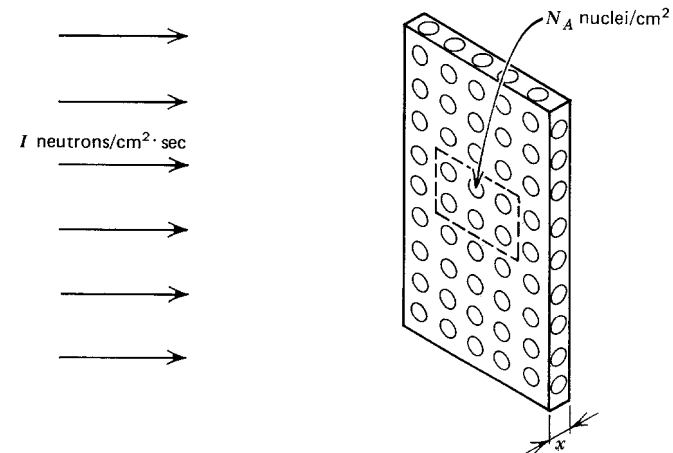


FIGURE 2-1. A monoenergetic neutron beam incident normally upon a thin target.

Ukupni mikroskopski udarni presjek

- Ukupni udarni presjek je suma presjeka za pojedine reakcije (parcijalni udarni presjeci):
 - elastično + neelastično raspršenje, uhvat + fisija, emisija nabijene čestice, emisija neutrona

$$\sigma_t(E) = \left\{ \begin{array}{ll} \sigma_s(E) & \text{elastic scattering} \\ + \sigma_{in}(E) & \text{inelastic scattering} \end{array} \right\} = \sigma_s(E) \quad \text{scattering}$$
$$\left\{ \begin{array}{ll} + \sigma_c(E) & \text{capture} \\ + \sigma_f(E) & \text{fission} \end{array} \right\} = \sigma_a(E) \quad \text{absorption}$$
$$+ \sigma_{n,2n}(E) \quad (n,2n) \text{ reaction}$$

Intenzitet neutronske struje $I(x)$

Smanjenje intenziteta snopa po jedinici duljine jednako je broju reakcija s materijalom mete. Broj neutrona u snopu se smanjuje po eksponencijalnom zakonu.

$$\frac{dI(x)}{dx} = -N\sigma_t I(x)$$

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma_t x}$$

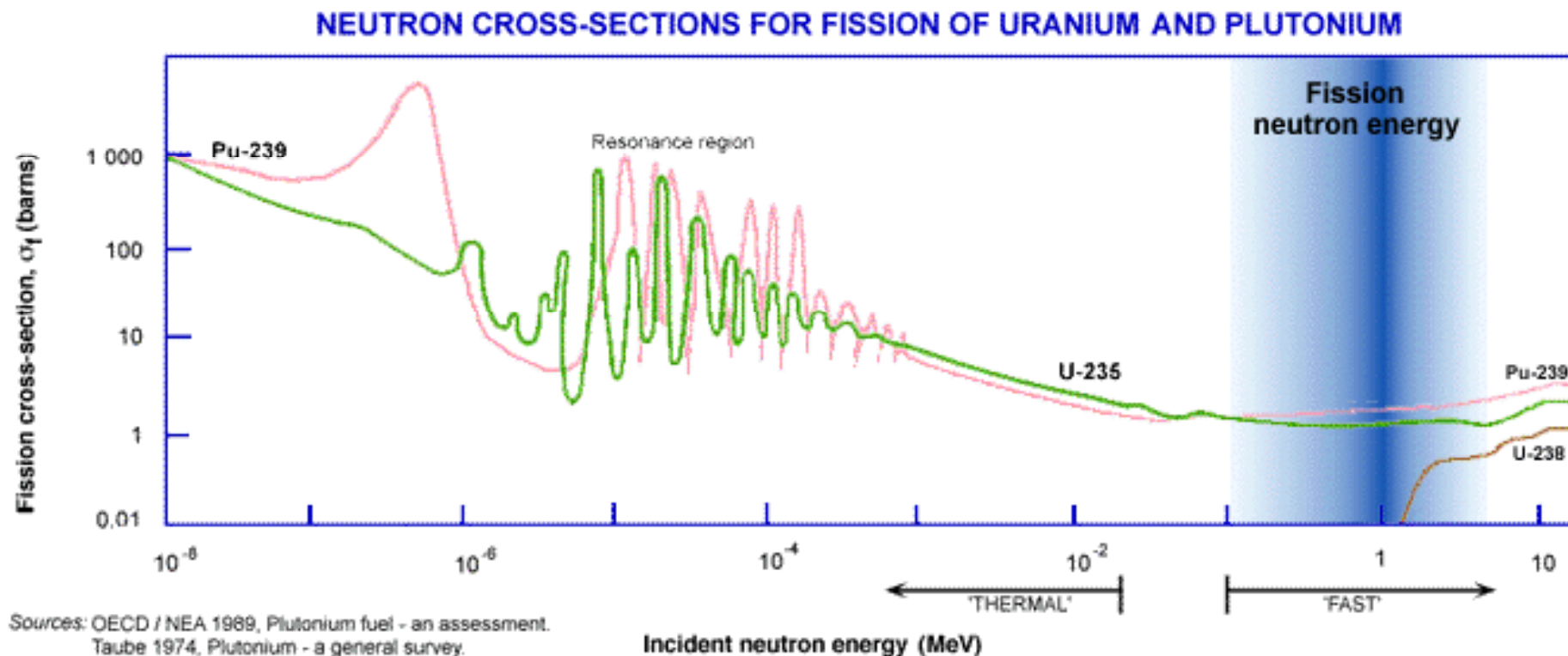
Produkt mikroskopskog udarnog presjeka i gustoće jezgara mete zove *makroskopski udarni presjek* (Σ).

$$\Sigma_t \equiv N \sigma_t$$
$$\left[cm^{-1} \right] = \left[\# / cm^3 \right] \left[cm^2 \right]$$

Udarni presjek za fisiju

Udarni presjek ovisi o energiji i uglavnom se smanjuje s porastom energije neutrona

Veća je vjerojatnost izazivanja fisije sporim neutronima



Snaga nuklearnog reaktora

- Ovisi o broju fisija u jedinici vremena i o energetske prinosu fisije
- Broj fisija u jedinici volumena i jedinici vremena jednak je produktu neutronskega toka i makroskopskog udarnog presjeka za fisiju ($\Phi \Sigma$)
- Neutronske tok Φ je broj neutrona koji u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu u reaktoru (skalarna je veličina)
- Makroskopski udarni presjek je produkt gustoće jezgara fisibilnog materijala i mikroskopskog presjeka za fisiju
- V je volumen reaktora

$$\nu \approx 2.5 \text{ n/fis}$$

$$\epsilon_f \approx 200 \text{ MeV/fis}$$

$$\text{MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$P_{\text{th}} = N_{\text{fisija}} \cdot \epsilon_f = \Phi \cdot \Sigma_{\text{fis}} \cdot V \cdot \epsilon_f$$

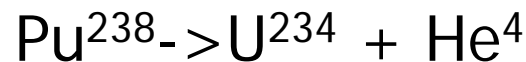
$$[\text{W}] = [\text{\#fis/s}] \cdot [\text{MeV/fis}] \cdot [\text{J/MeV}]$$

Zadatak 2

- SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power) generator koristi kao toplinski izvor reakciju ${}_{94}\text{Pu}^{238} \rightarrow {}_{92}\text{U}^{234} + {}_2\text{He}^4$. Inicijalno punjenje sadrži 475 g Pu^{238}C . Gustoća PuC je $12,5 \text{ g/cm}^3$. Vrijeme poluraspada za ${}_{94}\text{Pu}^{238}$ je 86 godina a za ${}_{92}\text{U}^{234}$ je $2,47 \cdot 10^5$ godina. Atomske mase su za Pu^{238} 238,0496 ajm, ${}_{92}\text{U}^{234}$ 234,0409 ajm, ${}_2\text{He}^4$ 4,0026 ajm i C^{12} 12,01 ajm. Odrediti početnu volumnu gustoću toplinske snage i ukupnu toplinsku snagu izvora.
- $1 \text{ ajm} \approx 1,660538782 (83) \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 931,494027 (23) \text{ MeV}/\underline{c^2}$ ($c=299\,792\,458 \text{ m/s}$)

Zadatak 2: rješenje

- Odrediti snagu i volumnu gustoću termoionskog generatora u kome kao izvor topline služi alfa emiter



- Odrediti energetske prinos reakcije preko defekta mase
 $\Delta m = 238,0496 - 234,0409 - 4,0026 = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ ajm}$
- Energetski ekvivalent defekta mase od 1 ajm je 931,49 MeV, $\Delta E = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ ajm} \cdot 931,49 \text{ MeV/ajm} = 5,682 \text{ MeV}$
- Konstanta radioaktivnog raspada plutonija
 $\lambda = \ln 2 / T = \ln 2 / (86 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600) = 2,556 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$
- Atomska masa PuC $A_{\text{PuC}} = 238,0496 + 12,01 = 250,0596$
- Broj jezgara Pu u jedinici volumena
- $N = \rho N_A / A_{\text{PuC}} = 12,5 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} / 250,0596 = 3,01 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

Zadatak 2: rješenje

- Aktivnost izvora

$$R = \lambda \cdot N = 2,556 \cdot 10^{-10} \cdot 3,01 \cdot 10^{22} = 7,69 \cdot 10^{12} \text{ raspad/cm}^3\text{s}$$

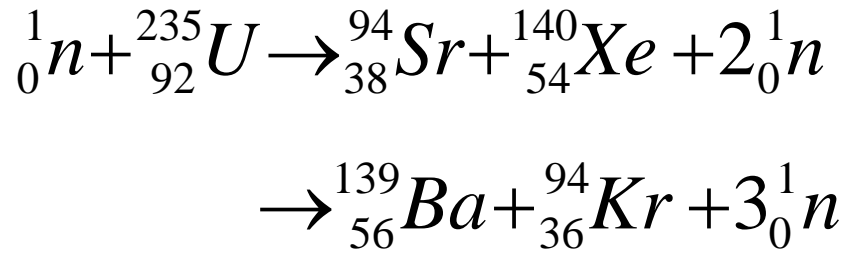
- Volumna gustoća snage je

$$\begin{aligned} R \cdot \Delta E &= 7,69 \cdot 10^{12} \cdot 5,682 \text{ MeV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV} = \\ &= 6,994 \text{ W/cm}^3 \end{aligned}$$

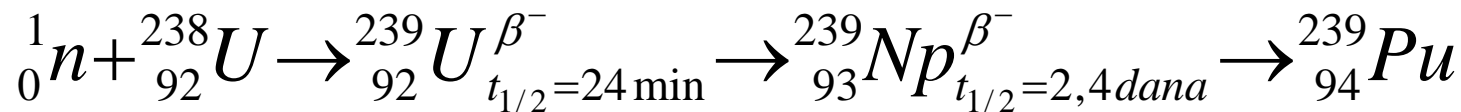
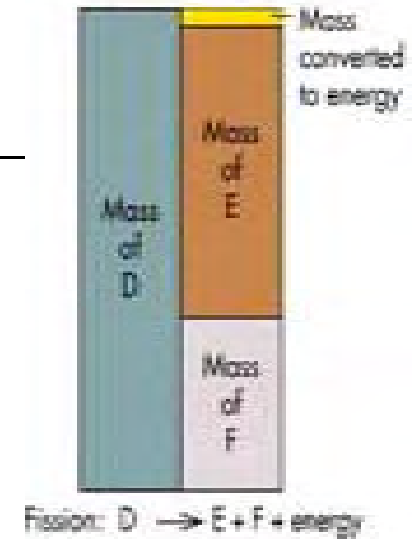
- Ukupna snaga izvora je ($V = m/\rho$)

$$\begin{aligned} &6,994 \text{ W/cm}^3 \cdot V = \\ &= 6,994 \text{ W/cm}^3 \cdot 475 \text{ g} / 12,5 \text{ g/cm}^3 = 265,8 \text{ W} \end{aligned}$$

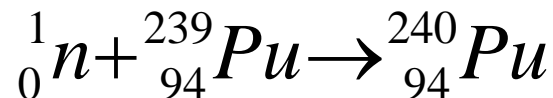
Fisijski produkti



fisija



uhvat



Veći dio neutrona se pojavi neposredno nakon fisije i zovemo ih **promptni neutroni**.

Manje od 1% neutrona je rezultat raspada fisijskih produkata i zovemo ih **zakašnjeli neutroni** (prosječno vrijeme kašnjenja par sekundi do par desetaka sekundi).

Ostatna toplina

- Fisijom nastaju nova jezgra – fisijski fragmenti
- Postoji stotinjak načina na koji se teška jezgra može cijepati
- Novonastala jezgra su beta i gama radioaktivna jer imaju višak neutrona obzirom na broj protona Z
- Približno 180 MeV energije se oslobodi neposredno pri fisiji a oko 20 MeV je posljedica radioaktivnog raspada fisijskih produkata
- Brzina osobađanja te zakašnjele energije ovisi o konstantama radioaktivnog raspada
- Radioaktivnost fisijskih produkata i pripadajuća toplina (zovemo je **ostatna toplina**) osnovni su sigurnosni problem u reaktoru
- Zaustavljanjem lančane reakcije ovaj izvor ne nestaje
- Neposredno nakon obustave reaktora ostatna toplina iznosi približno 6% nominalne snage na kojoj je reaktor radio
- Zbog velikog broja fisijskih produkata iznos ostatne topline uzimamo u obzir aproksimativnim relacijama

Ostatna toplina - izvor

⁸⁰Br fisijski produkt, energetski prinos

β⁻ raspad: ⁸⁰Br → ⁸⁰Kr + e⁻ + $\bar{\nu}_e$

$$Q(\beta^-) = M(^{80}\text{Br})c^2 - M(^{80}\text{Kr})c^2 \\ = 79,918528 \text{ ajmc}^2 - 79,916377 \text{ ajmc}^2$$

$$Q(\beta^-) = (0,002151 \text{ ajmc}^2) (931,5 \text{ MeV/ajmc}^2) = \underline{2,00 \text{ MeV}}$$



$$Q \text{ (MeV)} = \left[\text{Mass} \left({}^A_Z X \right) - \text{Mass} \left({}^A_{Z+1} D \right) \right] c^2$$

*electron mass included in daughter nucleus

Ostatna toplina

**Generirana snaga
nakon obustave reaktora:**

- ostatna toplina posljedica je radioaktivnog raspada fisijskih produkata

P_0 – snaga reaktora prije obustave

t_0 – vrijeme rada reaktora

t – vrijeme rada i obustave

(vremena su u danima)

$$P = P_0 \cdot 0,0061 \cdot \left[(t - t_0)^{-0,2} - t^{-0,2} \right]$$

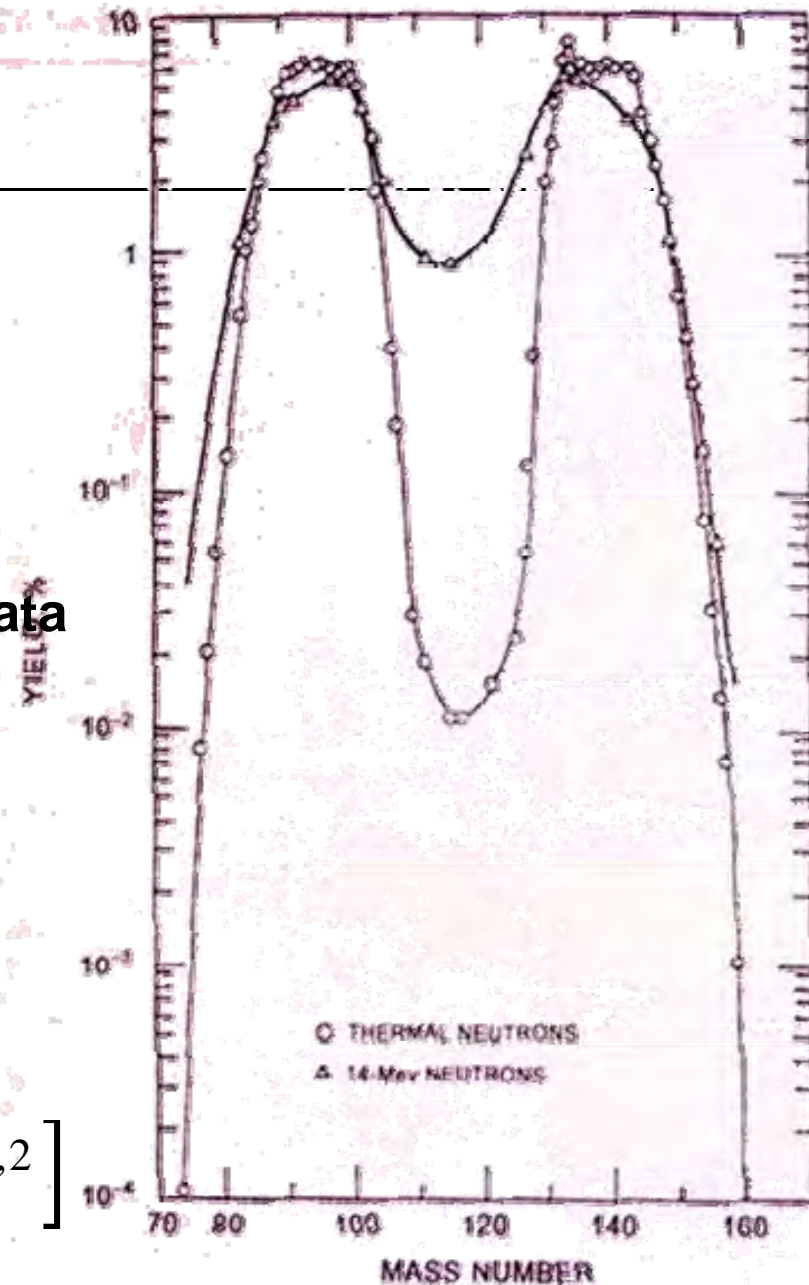


Fig. 1.9. Yield versus mass number for ^{235}U fission. (From Ref. 15.)

Zadatak 3

- Jezgra nuklearnog reaktora sastavljena je od 193 gorivna elementa, svaki s 517,4 kg UO_2 goriva. Prosječno težinsko obogaćenje je 2,78% U-235. Srednji neutronske tok u jezgri reaktora je $2,327 \cdot 10^{17} \text{ n}/(\text{m}^2\text{s})$ na punoj snazi. Reaktor je radio 6 mjeseci na 95% pune snage. Izračunati koliki je porast temperature hladioca u jezgri reaktora treći dan nakon obustave, ako je maseni protok sustava za odvođenje ostatne topline (RHR) 163 kg/s. Udarni presjek za fisiju u U-235 je $\sigma_f = 582 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$, energija oslobođena pri fisiji je 200 MeV, a specifični toplinski kapacitet hladioca $c_p = 4,2 \text{ kJ/kgK}$.

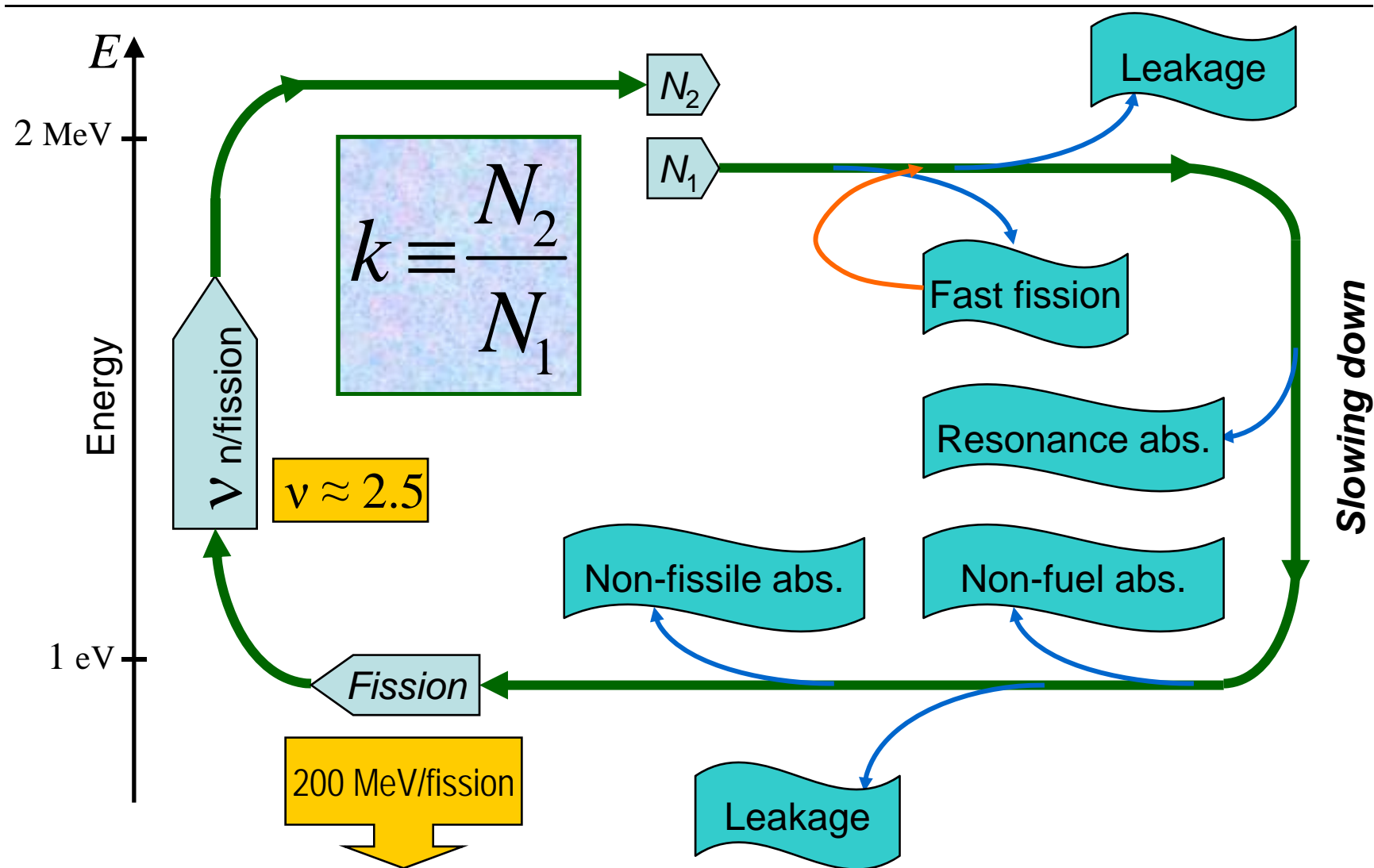
Zadatak 3: rješenje

- Ukupna masa UO_2 (FA=gorivni element)
 - $m = 193\text{FA} \cdot 517,4 \text{ kg/FA} = 99858,2 \text{ kg}$
 - Toplinska snaga reaktora je
 - $P = 200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot N_{235} \cdot \sigma_{235} \cdot \Phi$
 - Broj jezgara U-235 je (270 je masa UO_2)
 - $N_{235} = e \cdot m \cdot 238/270 \cdot N_A/235 =$
 $= 0,0278 \cdot 99858,2 \cdot 238/270 \cdot 6,022 \cdot 10^{26}/235 = 6,27 \cdot 10^{27}$
 - $P = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,27 \cdot 10^{27} \cdot 582 \cdot 10^{-28} \cdot 2,327 \cdot 10^{17} = 2717 \text{ MW}$
($200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} = 3,2 \cdot 10^{-11}$)
- **$P_0 = P \cdot 0,95 = 2581 \text{ MW}$**

Zadatak 3: rješenje

- $P(t)/P_0 = 6,1 \cdot 10^{-3} ((183-180)^{-0,2} - 183^{-0,2}) = 0,00274$
- $P(t) = 0,00274 \cdot 2581 \text{ MW} = 7,07 \text{ MW}$
- Porast temperature rashladnog sredstva odredimo iz
$$P(t) = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$
- $\Delta T = 7,07 \cdot 10^6 / (4,2 \cdot 10^3 \cdot 163) = 10,33 \text{ K}$

Ciklus neutrona u reaktoru



Ciklus neutrona u reaktoru

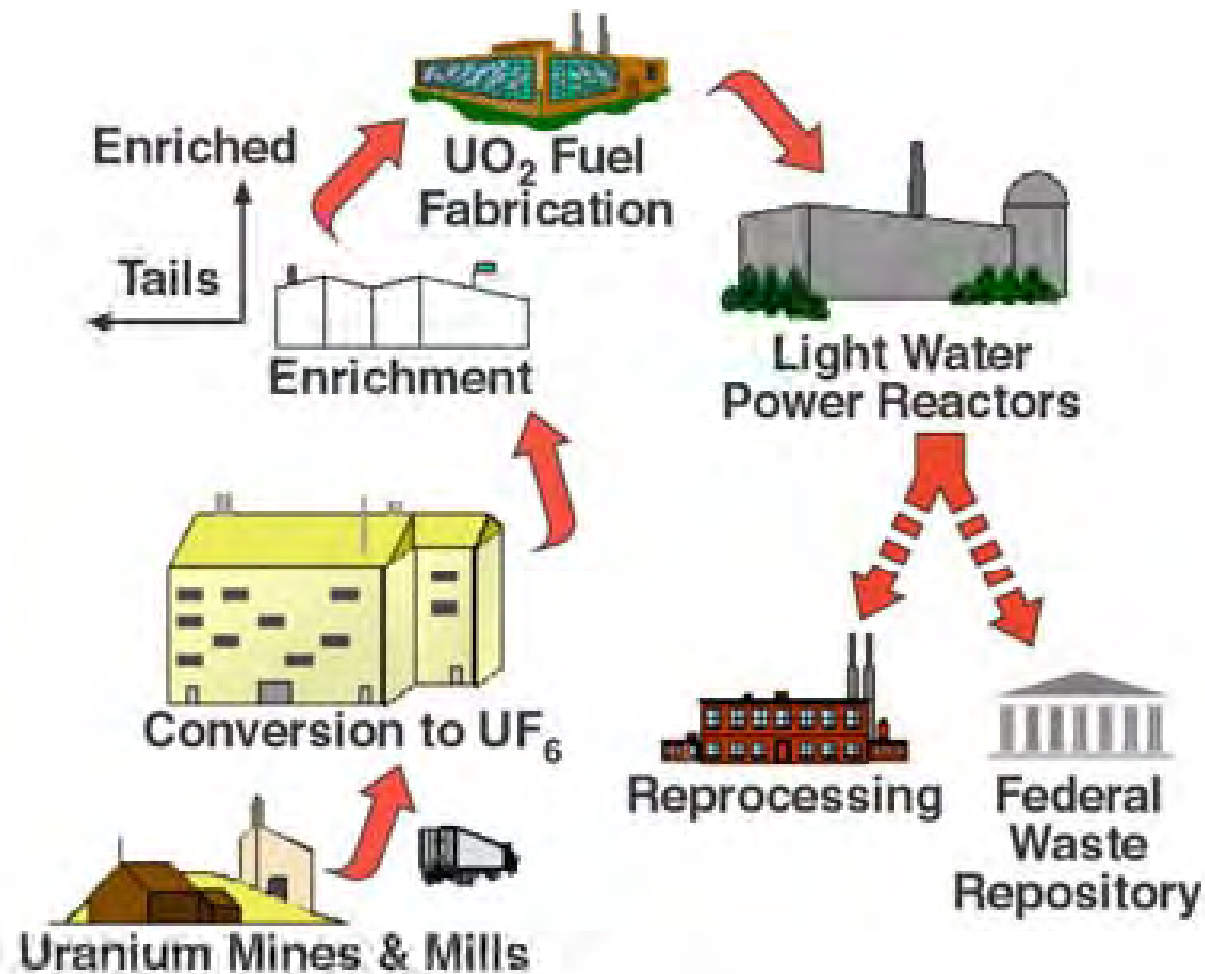
- Ciklus neutrona počinje fisijom a završava proizvodnjom iduće generacije neutrona
- Omjer broja neutrona u dvije susjedne generacije je faktor multiplikacije
- Neutron u reaktoru može biti apsorbiran, izazvati fisiju ili pobjeći van granica reaktora
- Neutron nastaje kao brzi neutron (energija oko 1 MeV) i treba ga usporiti jer se time povećava vjerojatnost fisije
- Najveći broj fisija u termičkim reaktorima izazivaju termički (spori) neutroni energije od 0,0253 eV do 0,625 eV
- Proces snižavanja energije događa se tijekom elastičnih sudara neutrona i materijala koji se zove moderator

Ciklus neutrona u reaktoru

- Neutroni su unutar reaktora podvrgnuti procesu difuzije (struje od mjesta veće gustoće prema mjestu niže gustoće)
- Za kritičnost reaktora bitne su dvije vrste neutrona
- Promptni neutroni nastaju direktno pri fisiji
- Zakašnjeli neutroni su rezultat raspada fisijskih produkata
- Udjel zakašnjelih neutrona u ukupnom broju neutrona je od 0,22% (Pu-239) do 0,65% (U-235)
- Najveći broj zakašnjelih neutrona se pojavi unutar 70 s nakon procesa fisije
- Zakašnjeli neutroni su bitni za kontrolu reaktora

Dodatak

Nuklearni gorivi ciklus

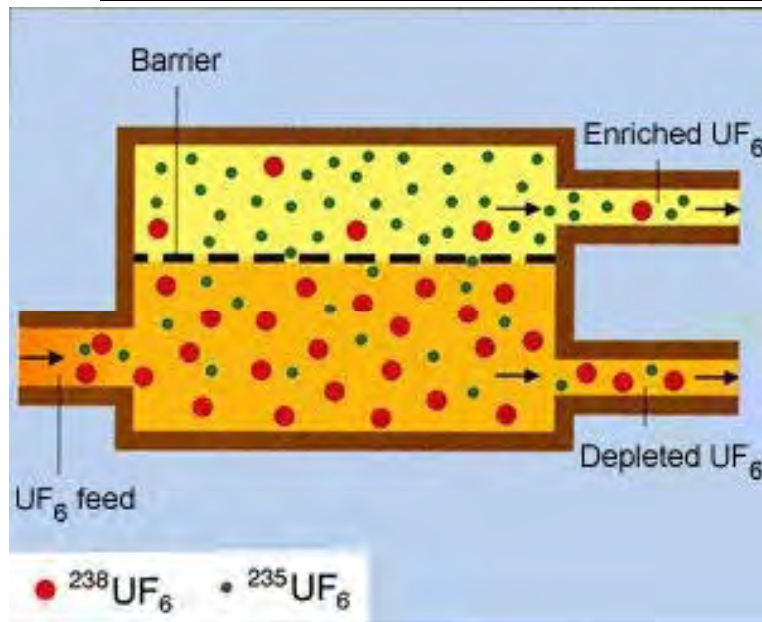


Obogaćenje (proces povećanja izotopskog udjela)

- Plinska difuzija
 - UO_2 pretvoren u uran heksafluorid
 - Difuzija kroz porozne (polupropusne membrane)
 - Kinetička energije ovisi o temperaturi
 - Manja masa – veća brzina
 - Izotop manje mase difundira brže kroz membranu
 - Velik broj kaskada
 - Veliki potrošak energije
- Centrifuge
 - Centrifugalna sila
 - Izotop veće mase ide na periferiju centrifuge
 - Manja potrošnja energije
- Lasersko obogaćenje
 - Energetski pobudni nivoi ovise o izotopu
 - Još u fazi razvoja

Obogaćivanje urana

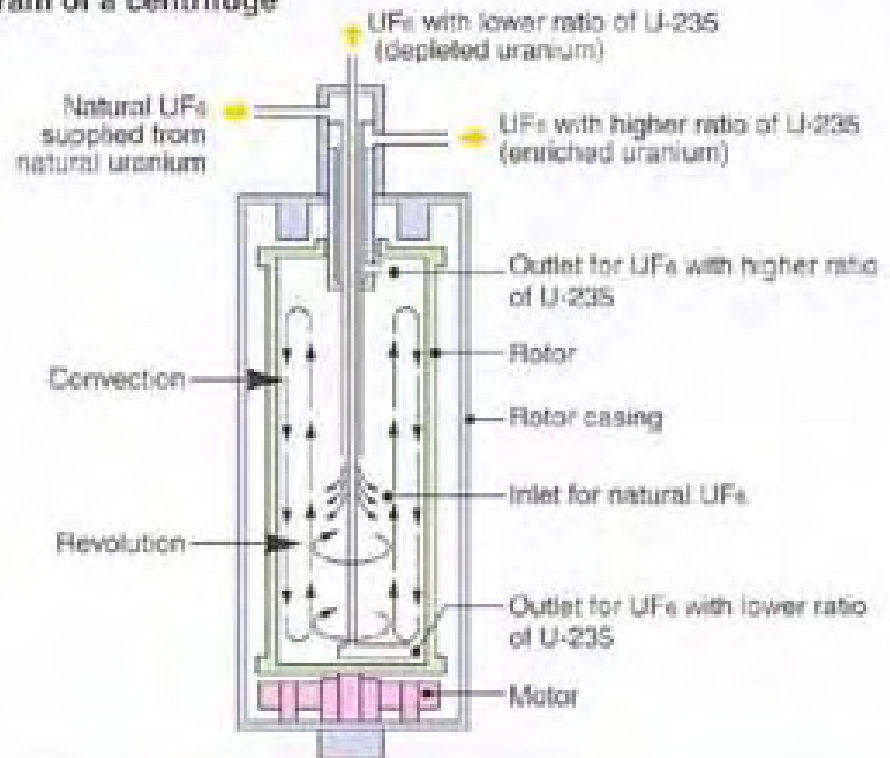
(postupak povećanja težinskog udjela U-235)



Obogaćivanje uranija, Tricastin FR, 3 GWe



Diagram of a centrifuge

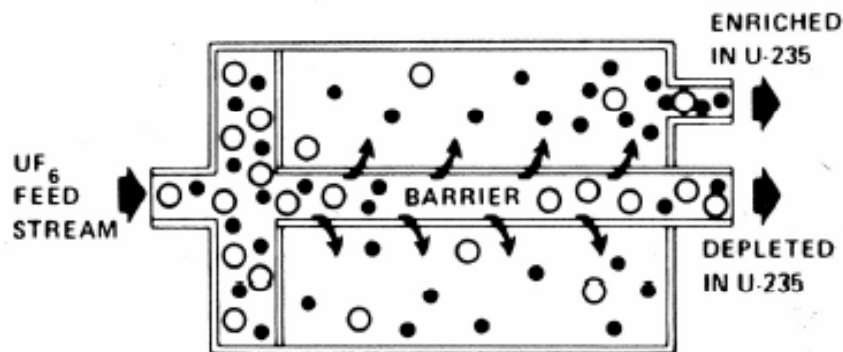


Obogaćenje – plinska difuzija

- Koristi plinoviti uran heksafluorid UF_6
 - Plinska difuzija
 - Lakše molekule imaju veću brzinu za istu kinetičku energiju
 - $E_k = 1/2 mv^2$
 - za $^{235}\text{UF}_6$ i $^{238}\text{UF}_6$
- $^{235}\text{UF}_6$ češće udaraju u poroznu barijeru

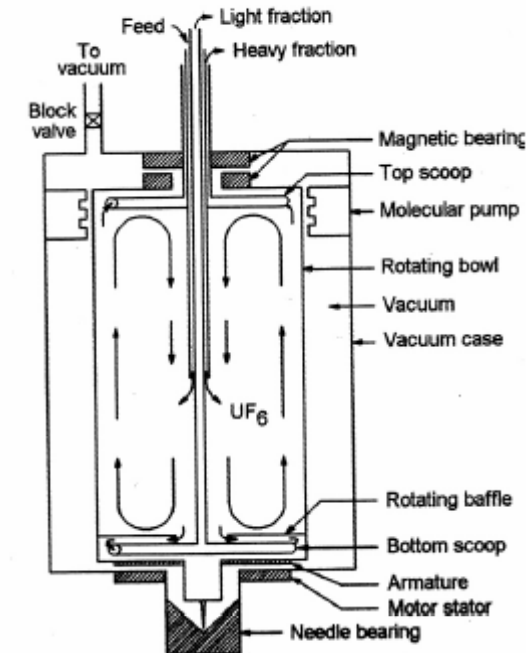
$$m_{235} v_{235}^2 = m_{238} v_{238}^2$$

$$v_{235} / v_{238} = \left(\frac{m_{238}}{m_{235}} \right)^{1/2} = \left(\frac{314}{311} \right)^{1/2} = 1.0043$$



Obogaćenje – plinska centrifuga

- Centrifugalna sila potiskuje teže molekule $^{238}\text{UF}_6$ prema zidu dok centralni dio sadrži više lakših molekula $^{235}\text{UF}_6$
 - Teži plin se skuplja pri vrhu
- Obogaćeni UF_6 konvertira se u UO_2 u dva stupnja
 - $\text{UF}_6(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{HF}$
 - $2\text{UO}_2\text{F}_2 + 6\text{NH}_4\text{OH} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7 + \text{NH}_4\text{F} + 3\text{H}_2\text{O}$
- Kalcinacija u zraku da se proizvede U_3O_8 koji se grijanjem u struji vodika reducira na UO_2



Atomska i molekularna masa

- Atomska masa je definirana kao relativna masa atoma u odnosu na dvanestinu mase izotopa C^{12}
- Atomska masa elementa je definirana kao srednja masa mješavine izotopa koji ga sačinjavaju:

$$A = \sum a_i A_i / 100$$

$a_i \rightarrow$ izotopska učestalost $(N_i / \sum N_i)$, %

$A_i \rightarrow$ atomska masa izotopa i

Atomska i molekularna masa - primjer

- Odrediti atomsku masu kisika ako je poznat njegov izotopski sastav:

Isotop	Učestalost (%)	Atomska masa
^{16}O	99.8	15.99492
^{17}O	0.04	16.99913
^{18}O	0.20	17.99916

- $A = \sum (a_i A_i)/100$
- $A = 0,998 \times 15,99492 + 0,04 \times 16,99913 + 0,20 \times 17,00016 = 16,0037$
- **Atomska masa atoma je bezdimenzionalna veličina**

● **Gram-mol je količina elementa koja ima masu u gramima jednaku odgovarajućoj atomskoj masi**

● **Primjer: jedan gram mol kisika u opisanom primjeru ima masu od 16,0037 grama.**

Atomska i molekularna masa

- **Molekularna masa je definirana kao relativna masa molekule u odnosu na dvanaestinu mase izotopa C¹²**
- Molekularna masa je suma atomskih masa atoma koji sačinjavaju molekulu.
- Primjer za ozon: O_3 , $3 \times 16,0037 = 48,0112$
- Broj atoma ili molekula u gram molu je neovisan o promatranoj tvari i zove se Avogadrov broj
- $N_A = 6,02217 \times 10^{23}$ atoma(molekula)/mol
- U masi od m grama ima N atoma prema izrazu:

$$N = m N_A / A$$

Gustoća atoma/molekula

- **gustoća atoma ($1/\text{cm}^3$)**

$$N = \rho N_A / A$$

- **Atomska jedinica mase** (oznaka *ajm*, *jm*, ili *amu* (atomic mass unit)) je definirana kao:
 $1 \text{ ajm} = m(^{12}\text{C}) / 12$

Primjer

Odrediti gustoću jezgara izotopa ^{238}U za uran sljedećeg sastava i gustoće $\rho = 19 \text{ g/cm}^3$

Izotop	Učestalost (%)	Atomska masa
^{234}U	0.0055	234.0409456
^{235}U	0.7200	235.0439231
^{238}U	99.274	238.0507826

Gustoća jezgara ^{238}U .

- **Gustoća jezgara**

$$N = \rho N_A / A$$

- $A = \sum a_i \quad A_i = 238,028$

- $$N = (19 \text{ g/cm}^3) \times (6,022 \times 10^{23} \text{ 1/mol}) \times (0,99274) / 238,028(\text{g/mol})$$
$$= 0,048 \times 10^{24} \text{ atom/cm}^3$$

Obogaćenje U²³⁵

- Maseni udjel U-235 u uranu
- Obično se označava s e (enrichment)
- Odrediti broj jezgara U-235 u 1 kg 3% obogaćenog UO₂ goriva (pretpostaviti da su približne atomske mase U-235, U-238 i O, 235, 238 i 16, respektivno).

Atomska masa 3% obogaćenog urana je

$$1/A_U = e/A_{U-235} + (1-e)/A_{U-238}, \quad A_U = 237,9$$

Atomska masa UO₂ je $237,9 + 2 \cdot 16 = 269,9$

$$N_{U-235} = 1 \cdot 237,9 / 269,9 \cdot 0,03 \cdot N_A / A_{U-235} = 6,776 \cdot 10^{22}$$