

## Nuklearne reakcije

**Fuzija:** spajanje lakih jezgara u težu uz oslobođanje energije; potrebne velike kinetičke energije, a oslobođena energija se zove još i termonuklearna energija.

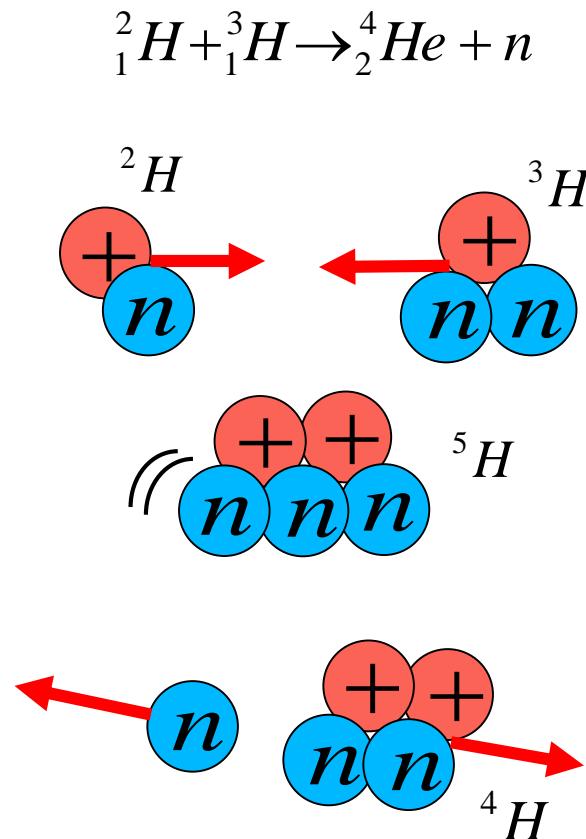
Primjer.

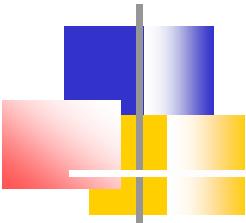


$$E_v({}^{12} C) = 12 \cdot 7 MeV$$

$$E_v(2 \cdot {}^6 Li) = 6 \cdot 6 MeV + 6 \cdot 6 MeV$$

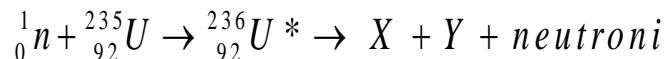
$$\begin{aligned} E_v({}^{12} C) - E_v(2 \cdot {}^6 Li) &= \\ &= 12 \cdot 7 MeV - 12 \cdot 6 MeV \approx 10 MeV \end{aligned}$$



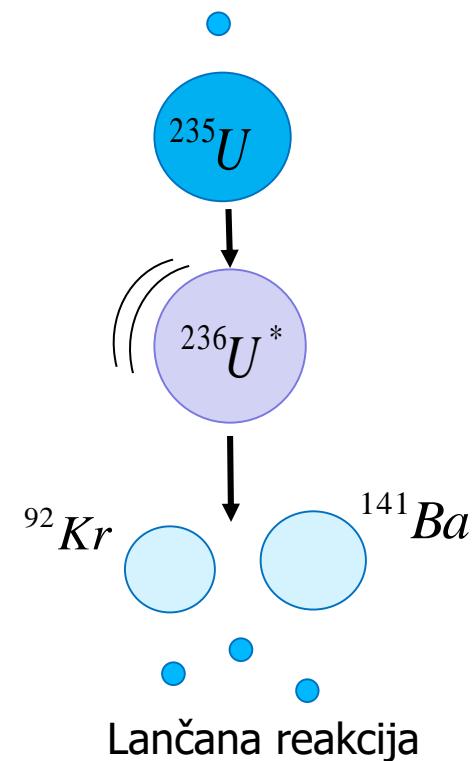


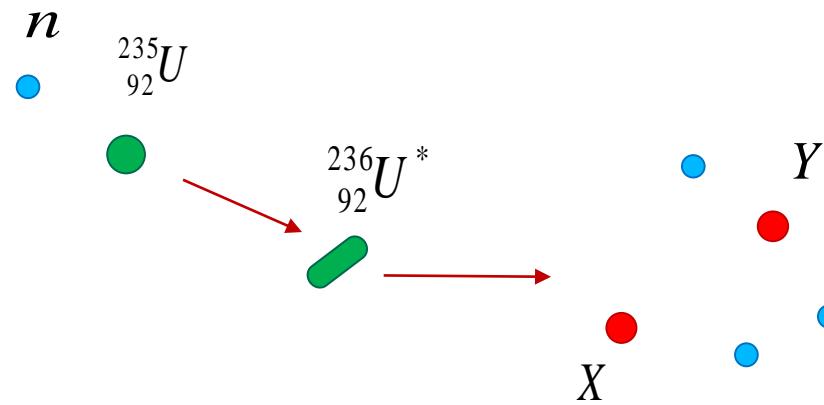
**Fisija;** proces cijepanja teške jezgre na dva približno jednaka manja fragmenta uz oslobođanje energije; najčešće se izaziva sporim neutronima.

- Otkrili su je 1939 Otto Hahn i Fritz Strassman
- Lise Meitner i Otto Frisch objasnili su je nedugo nakon toga
- Fisija  $^{235}\text{U}$  izazvana niskoenergijskim neutronima

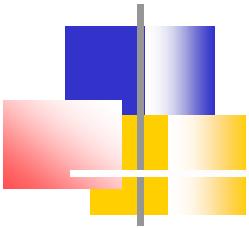


- ${}_{92}^{236}\text{U}^*$  kratko živi
- X i Y su *fragmenti fisije*
  - Mnoge kombinacije X i Y zadovoljavaju zakone sačuvanja energije i naboja

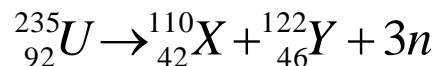




- Jezra  $^{235}\text{U}$  uhvati spori neutron
- Ovo rezultira stvaranjem  $^{236}\text{U}^*$ , a povećanje energije ove jezgre rezultira snažnim oscilacijama
- Jezgra  $^{236}\text{U}^*$  postaje jako izdužena, a odbojna sila među protonima nastoji povećati izobličenje
- Jezgra se raspada na dva fragmenta uz emisiju nekoliko neutrona



Primjer.



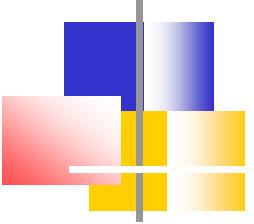
$$E_v(^{235}_{92}U) = 235 \cdot 6 \text{ MeV}$$

$$E_v(X, Y) = 232 \cdot 7 \text{ MeV}$$

$$E_v(n) = 0$$

$$E_v(X, Y) - E_v(^{235}_{92}U) = 232 \cdot 7 \text{ MeV} - 235 \cdot 6 \text{ MeV} \approx 200 \text{ MeV}$$

Fuzija je energijski isplativija jer po jedinici mase dobijemo više energije.



## Energija pri fisiji

---

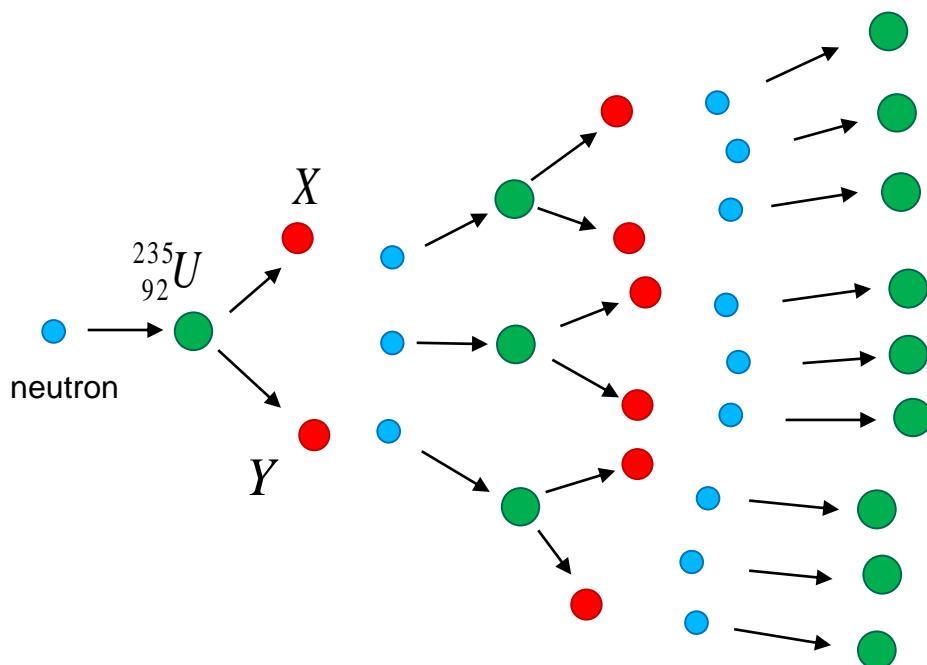
- Energija vezanja za tešku jezgru je oko 7.2 MeV po nukleonu
- Energija vezanja za srednju jezgru je oko 8.2 MeV po nukleonu
- Stoga, fragmenti fisije imaju manju ukupnu masu nego nukleoni u originalnoj jezgri
- Ovo smanjenje mase po nukleonu pojavljuje se kao oslobođena energija pri fisiji
- Procjena oslobođene energije
  - Pretpostavimo 240 nukleona
  - Oslobađa 1 MeV po nukleonu
    - $8.2 \text{ MeV} - 7.2 \text{ MeV}$
  - Ukupna oslobođena energija je oko 240 MeV
- Ovo je vrlo velika količina oslobođene energije u odnosu na energiju oslobođenu u kemijskim procesima



- Međutim, svi neutroni ne pobude jezgre, jer prije nego pobude jezgru, mogu napustiti komad urana
- To će se i dogoditi ako je masa urana manja od *kritične mase*
- *Kritična masa* je ona masa urana za koju se dogodi opisana *lančana reakcija*
  - Ako se dva komada urana s pojedinačnom masom manjom od kritične, ali s ukupnom masom većom od kritične spoje, zbog stalnog prisustva neutrona uslijed kozmičkog zračenja, doći će do lančane reakcije pri kojoj će se osloboditi ogromna količina razorne energije. Ovo je princip rada *atomske bombe*

## Lančana reakcija

- Neutroni emitirani pri fisiji  $^{235}\text{U}$  pokreću fisiju drugih jezgri
- Ovaj proces se naziva *lančana reakcija*
  - Ako je nekontrolirana, dolazi do razorne eksplozije
  - Ovaj princip je u osnovi nuklearne bombe, kod koje 1 g urana može  $^{235}\text{U}$  oslobođiti energiju jednaku energiji 20000 tona TNT-a

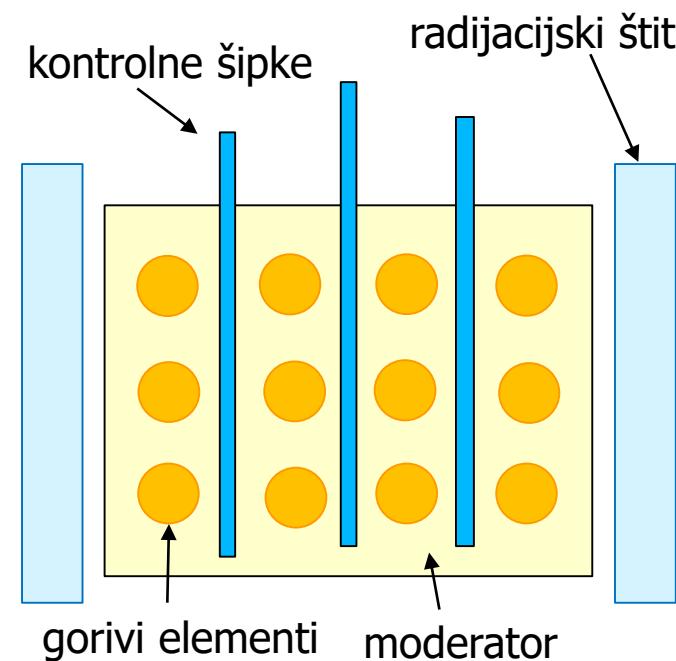


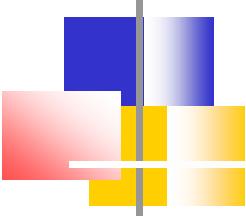
## Nuklearni reaktori

- *Nuklearni reaktor* je sustav dizajniran za *samoodrživu lančanu reakciju*
- Elementi koji se koriste kao gorivo u nuklearnim elektranama su  $^{235}U$ ,  $^{238}U$ ,  $^{239}Pu$ ,  $^{232}Th$
- U prirodnom uranu koncentracija  $^{238}U$  je 140 puta veća od koncentracije  $^{235}U$

### Osnovni dizajn reaktora

- Gorivi elementi sastoje se od obogaćenog urana
- *Moderator* pomaže pri usporavanju neutrona. Jezgra atoma moderatora mora imati masu istog reda veličine kao i neutron da bi pri srazu što veća energija prešla s neutrona na jezgru moderatora. Kao moderator koristi se grafit, teška voda, berilij i berilijev oksid.
- *Kontrolne šipke* apsorbiraju neutrone i kontroliraju opasnost od pregrijavanja. Koriste se bor ili kadmij.

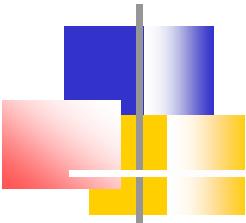




## Modeli jezgre atoma

---

- Dvije temeljne teškoće koje se javljaju pri formiranju teorije jezgre su
  - *nepotpuno poznavanje potencijalne energije (sile) među nukleonima*
  - *problem mnoštva čestica*
- **Model kapljice** predložio je Niels Bohr. Jezgra se poimlje kao kapljica. Analogija između ove dvije strukture leži u činjenicama da su
  - sile među česticama kratkodosežne
  - gustoća materije u oba sistema je neovisna o veličini kapljice
  - stišljivost materije je mala
- **Model Ijske** predložila je Marija Goeppert-Mayer. U ovom modelu prepostavlja se da se nukleoni neovisno gibaju u centralno-simetričnom polju. Diskretne energijske nivoe (kao u vodikovu atomu) popunjavaju nukleoni. Pri popunjavanju potrebno je voditi računa o Paulijevu principu. Nivoi su grupirani u **Ijske** koje nose točno određeni broj nukleona.



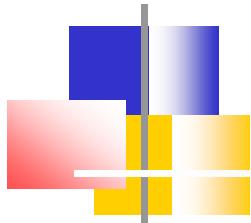
- Izvor ovog modela su eksperimentalni rezultati prema kojima su osobito stabilne jezgre kod kojih je broj protona, ili broj neutrona, ili broj nukleona jednak 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126
- Ovi brojevi se nazivaju [magični brojevi](#).
- Jezgre kod kojih je broj protona Z ili neutrona N jednak magičnom broju nazivaju se [magične jezgre](#)
- Ako su i Z i N magični brojevi, jezgre se nazivaju [dvostruko magične](#). Poznato je ukupno 5 dvostruko magičnih jezgara



- Ove jezgre su izuzetno stabilne

## Nuklearne sile

- Velika energija vezanja nukleona u jezgri ukazuje da u jezgri postoji jako privlačno međudjelovanje nukleona.
- Ova sila drži nukleone na okupu na udaljenosti od  $\sim 10^{-13}$  cm, usprkos Coulombovoj odbojnoj sili.
- Međudjelovanje nukleona naziva se *jako međudjelovanje*.
- Značajke jakog međudjelovanja su
  - Nuklearne sile su kratkodosežne. Doseg je  $\sim 2 \cdot 10^{-13}$  cm . Na udaljenostima većim od dosega protoni se odbijaju Coulombovom odbojnom silom.
  - Jako nuklearno međudjelovanje ne ovisi o naboju nukleona.
  - Jako nuklearno međudjelovanje ovisi o orijentaciji spina.  
Tako npr. neutron i proton čine vezano stanje deuterij samo u slučaju antiparalelnih spinova.

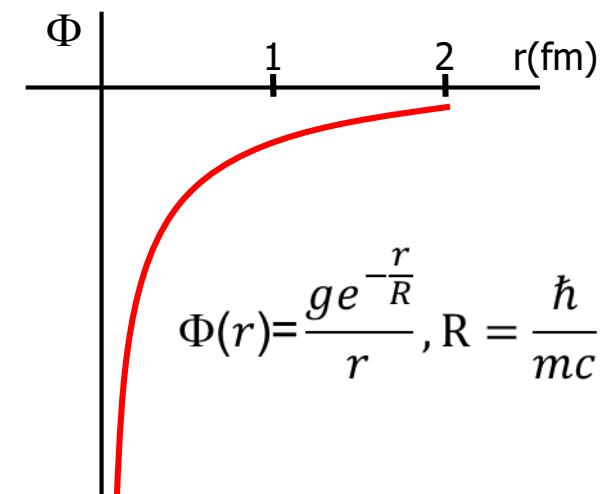
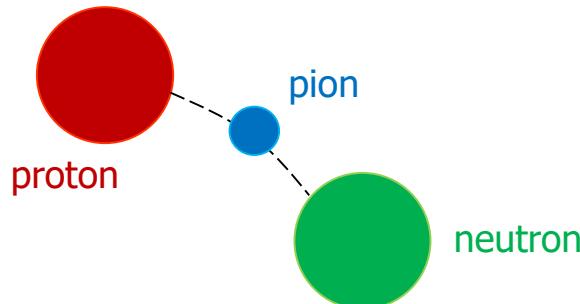


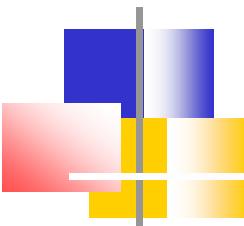
- Nuklearne sile nisu centralne (jer ovise o orijentaciji nukleonskih spinova).
- Nuklearne sile pokazuju svojstvo zasićenosti.
  
- Promatramo li elektromagnetske sile one se odvijaju izmjenom fotona.
- Kemijske sile idu izmjenom elektrona.
- 1935. Yukawa se pitao kakva mora biti čestica da se njenom **izmjenom** manifestira nuklearna sila.
- Jedno je bilo jasno, foton ima masu nula, te je stoga doseg elektromagnetske sile beskonačan.
- Čestice koje se izmjenjuju pri manifestacijama nuklearne sile moraju biti konačne mase i dosta teške jer je domet nuklearnih sila jako malen.



- Yukawa je postulirao: postoje čestice  $\pi$  (pioni,  $\pi$ -mezoni) čijom izmjenom se manifestiraju nuklearne sile
  - Potencijal tih sila (Yukawin potencijal) je prikazan na slici
  - Doseg sile je  $R$
  - Znamo da je doseg nuklearne sile reda veličine  $2 \cdot 10^{-13}$  cm
  - Iz izraza za  $R$  dobije se masa piona  $1.6 \cdot 10^{-25}$  g  $\sim 100 \text{ MeV}/c^2$

$$m_\pi \sim \frac{1}{10} m_p \sim 200 m_e$$



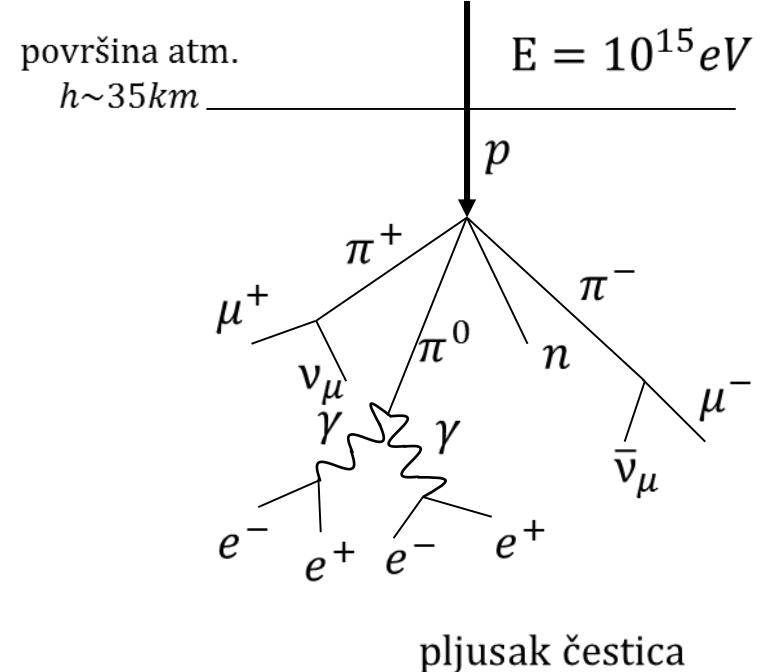


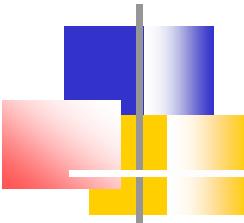
- 1947. Powell je našao u kozmičkom zračenju  $\pi$ -mezon
- Postoje pozitivni  $\pi^+$ , negativni  $\pi^-$  i neutralni  $\pi^0$  mezon
- Kozmičko zračenje je zračenje visoke energije koje dopire na Zemlju iz svemira.

Dijeli se na primarno i sekundarno.

**Primarno zračenje** dolazi iz svemira do Zemljine atmosfere i sastoji se većinom od atomske jezgare (oko 90% čine protoni, oko 10% jezgre helija, a preostali dio uključuje ostale lake atomske jezgre).

**Sekundarno zračenje** nastaje sudarom primarnog zračenja s jezgrama koje se nalaze u atmosferi (uglavnom dušikom i kisikom). Takvim sudarima nastaju **mezoni**.





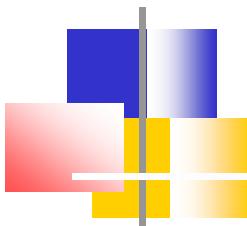
- Naboј  $\pi^+$  i  $\pi^-$  mezona jednak je elementarnom naboju e
- Spin piona je 0
- Masa nabijenih piona je  $140\text{MeV}/c^2$ , a masa neutralnog je  $135\text{MeV}/c^2$
- Najčešći raspad nabijenih piona je

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^- + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

gdje su  $\mu^+$  i  $\mu^-$  pozitivan i negativan muon

- Vrijeme poluživota

$$\tau_{\pi^\pm} = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{s}, \quad \tau_{\pi^0} = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{s}$$



## Dodatni materijali

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/nuclear-fission>