

## Fizika atomskog jezgra

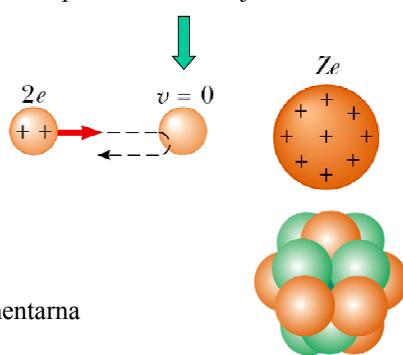
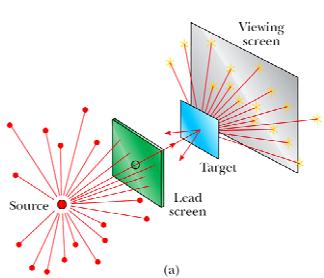
### Sadržaj

Osnovne karakteristike atomskog jezgra	415	Radioaktivni niz	429
Defekt mase jezgra i energija veze	417	Interakcija radioaktivnog zračenja sa materijom	430
Stabilnost atomskog jezgra	419	Detekcija radioaktivnog zračenja	434
Radioaktivni raspad	422	Nuklearne reakcije	438
Zakon radioaktivnog raspada	423	Energetski bilans nuklearne reakcije	439
Vrste radioaktivnog raspada	424	Nuklearna fisija	440
$\alpha$ -radioaktivni raspad	425	Nuklearna fisija i proizvodnja nuklearne energije	442
$\beta$ -radioaktivni raspad	426	Nuklearna fuzija	444
$\gamma$ -radioaktivni raspad	428		

414

## Osnovne karakteristike atomskog jezgra

- Otkriće atomskog jezgra (Raderford, 1911., **rasejanje  $\alpha$ -čestica**) - skoro celokupna masa atoma je skoncentrisana u prostoru dimenzija  $10^{-15}$  m.



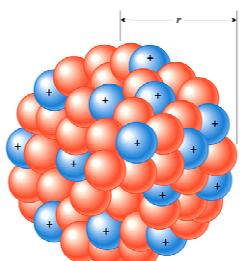
- Jezgro sadrži **protone** (pozitivna elementarna nanelektrisanja) i **neutronе**.
- Broj protona  $Z$  određuje redni broj elementa u Periodnom sistemu, a zbir broja protona ( $Z$ ) i neutrona ( $N$ ) daje **atomski maseni broj  $A$**  (nekad se naziva i **broj nukleona** i treba ga razlikovati od relativne atomske mase  $A_r$ ):

$$A = Z + N \quad {}_Z^AX$$

415

## Osnovne karakteristike atomskog jezgra

- **Izotopi** nekog hemijskog elementa su atomi čija jezgra imaju jednak redni broj  $Z$  (protoni), a različit broj neutrona  $N$ .
- *Primer:* vodonik ima tri izotopa -  ${}^1_1\text{H}$  -  ${}^2_1\text{H}$  (deuterijum) -  ${}^3_1\text{H}$  (tricijum)
- Izotopi istog hemijskog elementa se u prirodi nalaze u veoma različitom međusobnom odnosu, a nekih čak ni nema u prirodi, već se u veštačkim (laboratorijskim) uslovima pojavljuju – kao rezultat nuklearnih reakcija.
- *Primer:* ugljenik -  ${}^{12}_6\text{C}$  - 98.9%  ${}^{13}_6\text{C}$  - 1.1% postoje i  ${}^{11}_6\text{C}$  i  ${}^{14}_6\text{C}$
- Jezgro **nema oštru ivicu**, približno je sfernog oblika, a veličina poluprečnika jezgra zavisi od masenog atomskog broja:



$$r \approx 1.2 \cdot A^{1/3} \quad [10^{-15} \text{ m}]$$

- **Gustina jezgra** je približno ista kod svih atoma, tj. ne zavisi od vrste atoma.

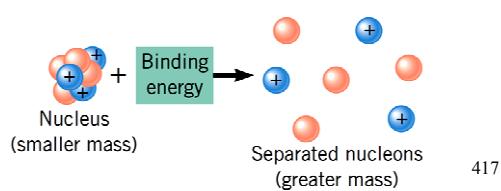
416

## Defekt mase jezgra i energija veze

- Ukupna masa jezgra nije jednaka zbiru masa protona i neutrona koji ga sačinjavaju, već je uvek nešto manja. Razlika u masi jezgra i njegovih sastavnih delova se naziva **defekt mase  $\Delta m$**  i odgovara **energiji veze  $E_v$**  nukleona u jezgru.

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_j(A, Z)$$

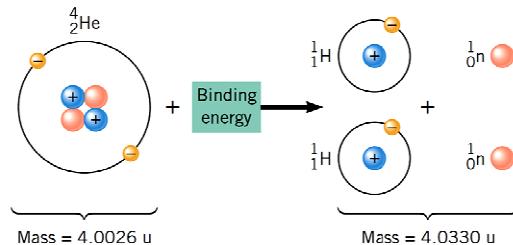
- **Energija veze  $E_v$**  je energija koju je potrebno uložiti za razlaganje jezgra, odnosno energija koja se oslobodi pri stvaranju jezgra.
- Prema Ajnštajnovoj relaciji o **ekvivalentnosti mase i energije**, defektu mase  $\Delta m$  odgovara energija veze  $E_v$  izražena preko relacije:  
$$E_v = \Delta m c^2$$
- Što je energija veze veća, veća je i stabilnost jezgra.



417

## Defekt mase jezgra i energija veze - primer

- Primer za **defekt mase** i **energiju veze** kod jezgra atoma **helijuma**, koje sadrži dva protona i dva neutrona.



$$2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n > m_{\text{He}} = 4.0026 \text{ u}$$

$$2 \cdot (1.0078 \text{ u}) + 2 \cdot (1.0087 \text{ u}) = 4.0330 \text{ u}$$

$$\Delta m = 4.0330 \text{ u} - 4.0026 \text{ u} = 0.0304 \text{ u}$$

*u* - atomska jedinica mase

$$1 \text{ u} = 1.6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \Rightarrow E(1 \text{ u}) = m(\text{u}) \cdot c^2 = 931.5 \text{ MeV}$$

$$E_\nu(0.0304 \text{ u}) = 28.3 \text{ MeV} \Rightarrow E_\nu / A \approx 7.1 \text{ eV/nukleonu}$$

\* masa elektrona je zanemarljivo mala i ne uzima se u obzir

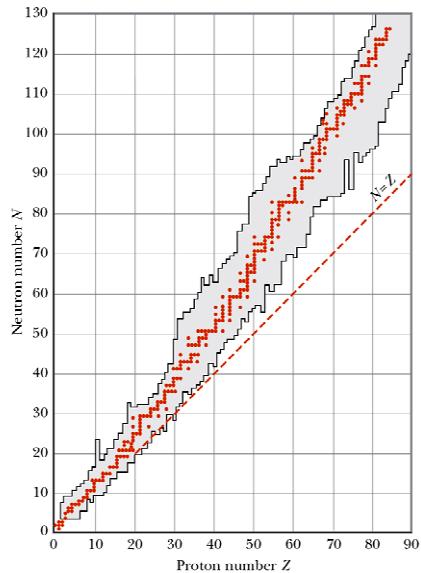
418

## Stabilnost atomskog jezgra

- U jezgru osim **odbojne elektrostatičke** sile između protona, deluje **jaka nuklearna sila (interakcija)** koja drži sve nukleone (protone i neutrone) na okupu (gravitaciona privlačna sila je zanemarljiva).
- Jaka nuklearna interakcija je odgovorna za **stabilnost** jezgara hemijskih elemenata.
- Jaka nuklearna interakcija je sila **kratkodometnog** tipa (domet  $10^{-15} \text{ m}$ ) i **ne zavisi** od nanelektrisanja (približno je jednaka između dva protona, dva neutrona ili protona i neutrona).
- Pošto proton u jezgru deluje **odbojnom** elektrostatičkom silom na sve druge protone, a **privlačne** jake nuklearne sile deluju samo između najблиžih suseda, da bi jezgro ostalo **stabilno**, sa porastom broja protona u jezgru raste i broj neutrona .

419

## Stabilnost atomskog jezgra

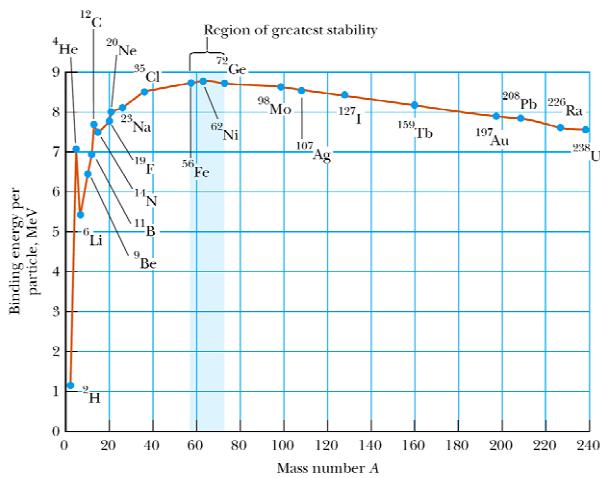


- Nakon izvesnog broja protona ( $Z>83$ ) i neutrona u jezgru, dalje povećanje broja neutrona više ne može održati stabilnost jezgra. Takva nestabilna jezgra se **spontano raspadaju** (dezintegrišu).
- *Slika:* nesrazmerno povećanje broja neutrona u jezgrima sa porastom broja protona radi održanja stabilnosti jezgara.
- Rezultati raspada jezgara su nova jezgra – stabilna ili nestabilna (koja se dalje dezintegrišu u nove produkte radioaktivnog raspada).
- Prateća pojava radioaktivnog raspada je spontana emisija nevidljivog zračenja – **radioaktivnost** (Bekkerel, 1896.).

420

## Stabilnost atomskog jezgra

- **Najstabilnija** jezgra imaju jednak broj protona i neutrona.
- *Slika:* zavisnost energije veze po nukleonu od atomskog masenog broja  $A$ .

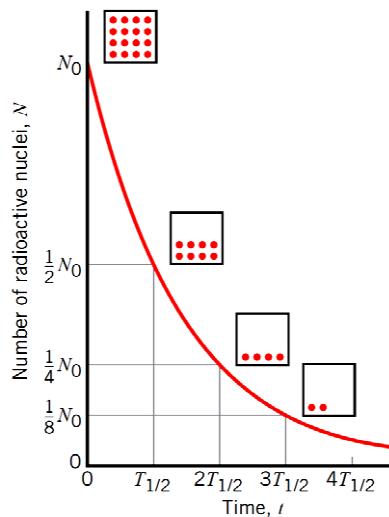


- Kod masivnijih jezgara, energija veze po nukleonu u toj meri opadne da je nedovoljna da održi jezgra u stabilnom stanju – dolazi do pojave **spontanog radioaktivnog raspada**.

421

## Radioaktivni raspad

- Pri spontanoj dezintegraciji (raspadu) nestabilnih masivnih jezgara dolazi do emisije izvesnih čestica i/ili visokoenergetskih fotona – **radioaktivno zračenje**.



- Radioaktivnost je otkrio Anri Bekerel 1896. godine.
- Radioaktivni raspad je **slučajan, statistički proces** – ne može se tačno predvideti koje jezgro će se u kom trenutku raspasti, ali se može odrediti broj jezgara koji će se raspasti posle izvesnog intervala vremena.

422

## Zakon radioaktivnog raspada

- Zakon radioaktivnog raspada** definiše broj  $N$  neraspadnutih jezgara radioaktivnog elementa nakon proteklog vremena  $t$ :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \Rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$A = \lambda N$  - **aktivnost** radioaktivnog materijala,  
broj radioaktivnih raspada u jedinici vremena [Bq].

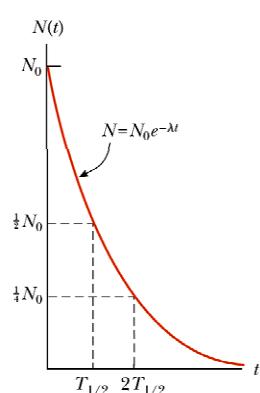
$\lambda$  - **konstanta radioaktivnog raspada**,  
određuje verovatnoću raspada.

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

- **period poluraspada  $T$** , vremenski interval nakon kojeg se broj **neraspadnutih** jezgara smanji na polovinu u odnosu na početni.

Table 31.2 Some Half-Lives for Radioactive Decay

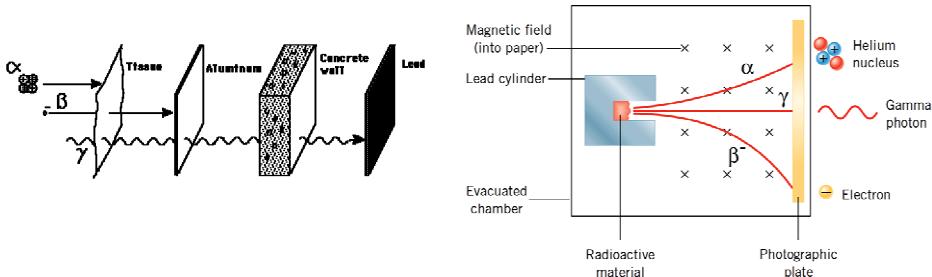
Isotope	Half-Life
Polonium $^{214}_{84}\text{Po}$	$1.64 \times 10^{-4}$ s
Krypton $^{83}_{36}\text{Kr}$	3.16 min
Radon $^{222}_{86}\text{Rn}$	3.83 d
Strontium $^{90}_{38}\text{Sr}$	29.1 yr
Radium $^{226}_{88}\text{Ra}$	$1.6 \times 10^3$ yr
Carbon $^{14}_{6}\text{C}$	$5.73 \times 10^3$ yr
Uranium $^{238}_{92}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$ yr
Indium $^{115}_{49}\text{In}$	$4.41 \times 10^{14}$ yr



423

## Vrste radioaktivnog raspada

- Postoje 3 vrste radioaktivnog raspada, prema vrsti zračenja koje se emituje:  $\alpha$ -raspad,  $\beta$ -raspad i  $\gamma$ -raspad.
- Emitovano radioaktivno zračenje račičito prodire kroz materiju – prodornost raste pri promeni alfabetne oznake zračenja.

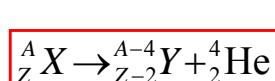


- U radioaktivnim raspadima jezgara važe opšti zakoni fizike – zakoni održanja mase/energije, nanelektrisanja, količine kretanja i momenta količine kretanja, a njima se dodaje i zakon održanja broja nukleona u procesu dezintegracije jezgra.

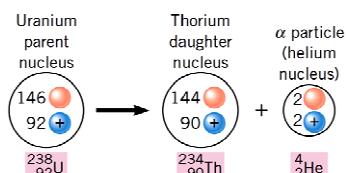
424

## $\alpha$ - radioaktivni raspad

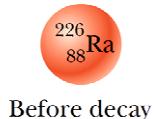
- U  $\alpha$ -raspadu se emitiše  **$\alpha$ -čestica** (jezgro helijuma, pozitivno nanelektrisana čestica), pri čemu se dešava tzv. **transmutacija jezgra**, proces promene jezgra jednog u jezgro drugog elementa.



Primer I:  ${}^{238}_{92} U \rightarrow {}^{234}_{90} Th + {}^4_2 He$



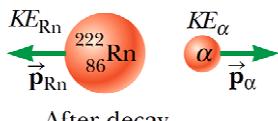
Primer II:  ${}^{226}_{88} Ra \rightarrow {}^{222}_{86} Rn + {}^4_2 He$



$$KE_{Ra} = 0$$

$$\vec{p}_{Ra} = 0$$

Before decay



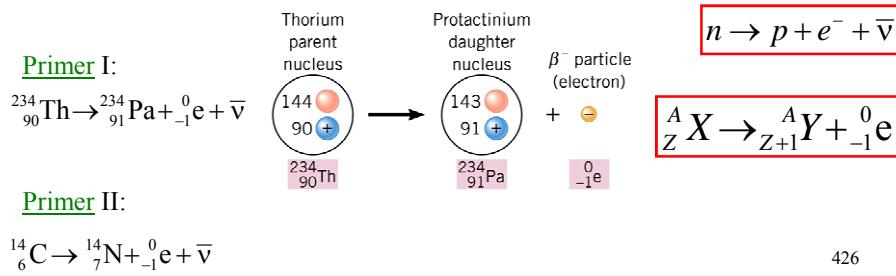
After decay

- Energija oslobođena u radioaktivnom raspadu se raspodeljuje na **kinetičke energije** proizvoda koji nastaju.
- Za vreme  $\alpha$ -raspada, može se formirati i emitovati i **kvant  $\gamma$ -zračenja**.

425

## **$\beta$ - radioaktivni raspad**

- Postoje tri vrste  $\beta$ -raspada:  $\beta^-$ -raspad,  $\beta^+$ -raspad i K-zahvat.
- 1. U  **$\beta^-$ -raspadu** se emituje  **$\beta^-$ -čestica** (elektron, negativno elementarno nakelektrisanje; stvara se u toku raspada) pri čemu se takođe dešava **transmutacija jezgra**.
- Jedan **neutron** u jezgru se, preko delovanja tzv. **slabe nuklearne interakcije** (sile), transformiše u **proton**, pri čemu se uz emisiju **elektrona** javlja i **antineutrino**.
- Antineutrino je čestica praktično nulte mase (tačnije, veoma male mase), bez nakelektrisanja, antičestica od neutrina. On deli **energiju** oslobođenu u raspadu sa ostalim produktima raspada.

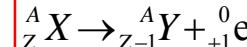
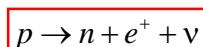
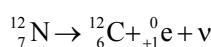


426

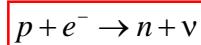
## **$\beta$ - radioaktivni raspad**

- 2. U  **$\beta^+$ -raspadu** se emituje  **$\beta^+$ -čestica** (pozitron, pozitivno elementarno nakelektrisanje, antičestica elektrona; stvara se u toku raspada) i **neutrino**.
- Jedan **proton** u jezgru se, preko delovanja tzv. **slabe nuklearne interakcije \*** (sile), transformiše u **neutron**.

Primer:



- 3. U **K-zahvatu** se jezgro oslobađa viška energije zahvatom elektrona iz atomske orbitale (najčešće K-ljuska, glavni kvantni broj  $n=1$ ), pri čemu se proton jezgra transformiše u neutron, a jedina emitovana čestica je **neutrino**.



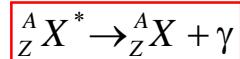
\* Slaba nuklearna interakcija (sila) i elektromagnetna sila su dva različita oblika ispoljavanja tzv. **elektroslabe sile**. Elektroslaba, gravitaciona i jaka nuklearna sila čine **tri osnovne interakcije** u prirodi.

427

## γ - radioaktivni raspad

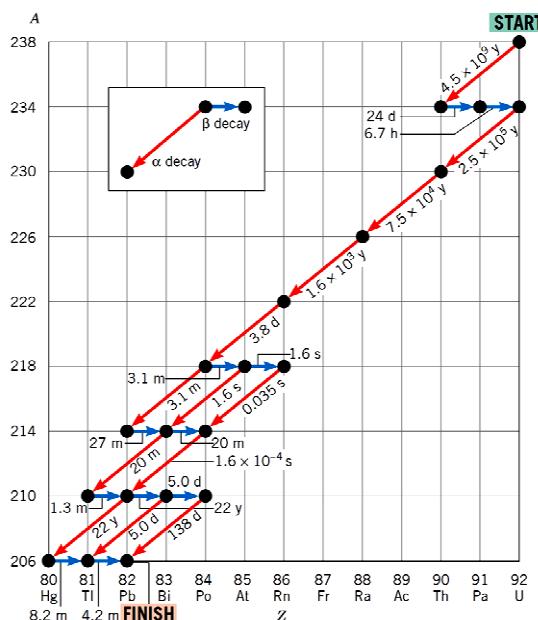
- **Jezgra** atoma su, slično elektronima u atomskim omotačima, takođe okarakterisana **energetskim stanjima**, osnovnim i pobuđenim (u koja se mogu dovesti u procesima apsorpcije energije).
- **γ-raspad** je prelaz jezgra iz pobuđenog u niže energetsko ili osnovno stanje, što je praćeno **emisijom** visokoenergetskog **γ-kvanta** i tzv. **internom konverzijom** (višak energije se predaje nekom elektronu u atomskom omotaču).
- γ-raspad obično sledi **nakon α- ili β-raspada**, kada nastala jezgra nisu u osnovnom (stabilnom) stanju, već u nekom pobuđenom stanju.
- γ-raspad **ne uzokuje transmutaciju** jezgra.

Primer: 
$$\begin{array}{c} {}_{\text{5}}^{\text{12}} \text{B} \xrightarrow{\beta} {}_{\text{6}}^{\text{12}} \text{C}^* + {}_{\text{-1}}^{\text{0}} \text{e} + \bar{\nu} \\ {}_{\text{6}}^{\text{12}} \text{C}^* \xrightarrow{\gamma} {}_{\text{6}}^{\text{12}} \text{C} + \gamma \end{array}$$



428

## Radioaktivni raspad - radioaktivni niz

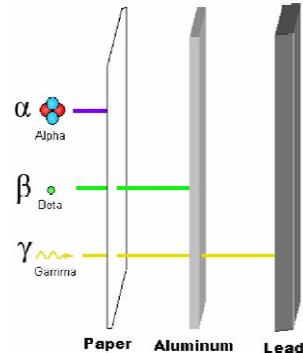


- Radioaktivni niz čine serije radioaktivnih transformacija jezgara, gde se od jednog jezgra, na kraju niza, dospeva u sasvim drugi, ali stabilni oblik, u vidu drugog hemijskog elementa.

429

## Interakcija radioaktivnog zračenja sa materijom

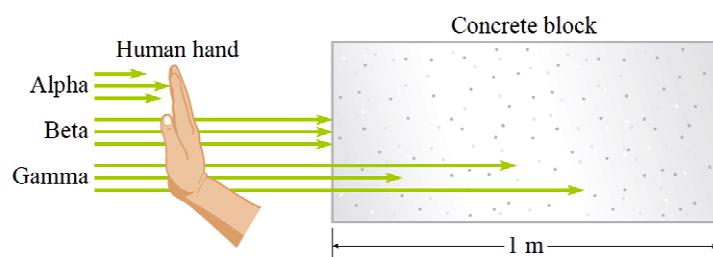
- Emitovano radioaktivno zračenje različito prodire kroz materiju – prodornost raste sa promenom alfabetne oznake zračenja.
- Pri prolasku radioaktivnog zračenja kroz materiju, dolazi do gubitka, tj. predaje energije apsorbujućem materijalu.
- **α-čestice** na svom putu (usled velike mase putanja im je prava linija) **jonizuju** ili **ekscituju** čestice materije kroz koju prolaze, brzo gube energiju i imaju veoma mali domet (u vazduhu oko 10 cm).
- Zaustavlja ih sloj papira, sloj izumrlih ćelija kože ili sloj vazduha od samo nekoliko cm. Znatno veća opasnost od α-čestica preti ako se radioaktivni materijal koji ih emitiše nalazi u živom organizmu, jer deluje na žive ćelije.



430

## Interakcija radioaktivnog zračenja sa materijom

- **β-čestice** (elektroni) pri prolasku kroz materiju takođe vrše **ekscitaciju** (pobudivanje) elektrona u orbitama atoma materije i/ili **jonizaciju** i imaju izlomljenu putanju.
- Pored toga, usled **naglog usporavanja** nanelektrisanih β-čestica (elektroni ili pozitroni) emituje se i tzv. **zakočno X-zračenje**.
- Domet β-čestica u vazduhu ne prevaziđa nekoliko metara. Zaustavlja ih i tanak sloj pleksiglasa. Opasnost dolazi, međutim, od pratećeg zakočnog X-zračenja, kao i od γ-zračenja koje prati β-radioaktivni raspod i za njih treba birati teške materijale za zaštitu.



431

## Interakcija radioaktivnog zračenja sa materijom

- **γ-zraci** (kvanti elektromagnetnog zračenja) imaju najveći domet i predaju materiji svoju energiju u nekoliko procesa:
  1. **Fotoelektrični efekat** – potpuno predaju energiju elektronima atomskih omotača koji izlaze iz atoma materijala apsorbera. Takvi *elektroni*, slično β-česticama, u sekundarnom efektu **jonizuju** sredinu kroz koju se kreću. Ovaj efekat je dominantan pri **niskim energijama γ-kvanata**.
  2. **Komptonovo rasejanje** na kvazi-slobodnim elektronima – proces kada γ-kvanti samo delimično gube energiju, a deo energije primaju elektroni u materijalu apsorbera. Ovi *elektroni* se dalje ponašaju kao i β-čestice i vrše **ekscitaciju** elektrona ili **jonizaciju** atoma materije, a oslabljeni γ-kvanti izazivaju fotoefekat. Ovaj efekat je dominantan pri **srednjim energijama γ-kvanata**.

432

## Interakcija radioaktivnog zračenja sa materijom

- 3. **Stvaranje para elektron-positron** – par-efekat; kada fotoni γ-zraka imaju energiju **veću** od dvostrukе energije mirovanja elektrona  $E_\gamma > 2m_0c^2$ , može doći u polju jezgra atoma apsorbera do stvaranja *elektrona* i njegove antičestice, *pozitrona*. Nastali elektron i pozitron **ekscituju** i **jonizuju** sredinu kroz koju se kreću. Ako im je energija mala, oni **anihiliraju** – ponovo se stvaraju 2 γ-kvanta koji zatim preko fotoelektričnog efekta i Komptonovog rasejanja interaguju sa materijom.
- Slabljene intenzitete **γ-zračenja** pri prolasku kroz materijal debljine  $x$  ima eksponencijalni oblik (**zakon apsorpcije γ-zračenja**):

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

μ – linearni koeficijent apsorpcije (atenuacije);  
zavisi od **vrste** apsorbera i **energije** γ-zraka.

433

## Detekcija radioaktivnog zračenja

- Detekcija  $\alpha$ -,  $\beta$ - ili  $\gamma$ -zračenja vrši se preko efekata ionizacije koje radioaktivno zračenje ispoljava pri prolasku kroz materiju.

Podela detektora – prema načinu detekcije ionizacije:

1. **Električni detektori** – ionizacija se pretvara u električni signal (Gajgerov brojač, proporcionalni brojač, scintilacioni brojač).

2. **Vizuelni** detektori – dejstvo zračenja se pretvara u vizuelnu informaciju (maglena komora, mehurasta komora, fotografска emulzija).

Podela detektora – prema nameni:

1. **Dozimetri** – mera ukupan efekat zračenja (dozu) na dati materijal.

2. **Brojači** – registruju broj ionizujućih čestica ili  $\gamma$ -kvantata, bez obzira na njihovu vrstu ili energiju.

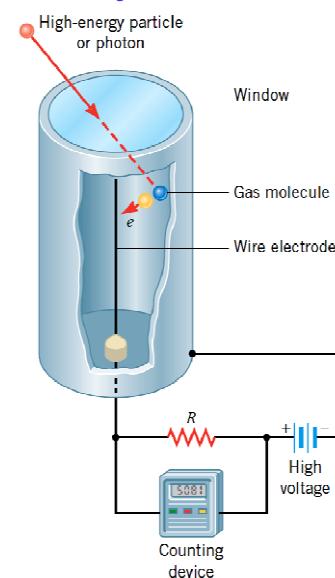
3. **Spektrometri** – daju informaciju o intenzitetu i energiji radioaktivnog zračenja.

434

## Detekcija radioaktivnog zračenja

- **Gajger-Milerov brojač** (gasni detektor električnog tipa) – svaka čestica ili kvant ionizujućeg zračenja proizvodi električnu struju (impuls) u razređenom gasu u telu detektora, koji se registruje u obliku odbroja. →

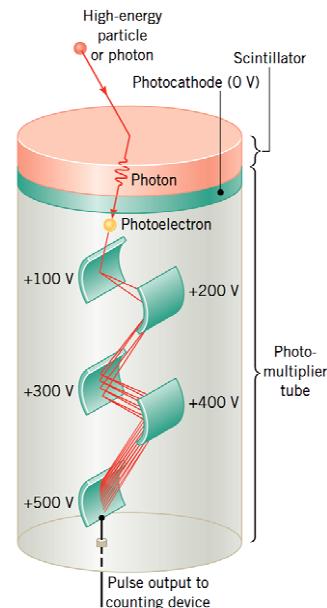
- **Proporcionalni brojač** je najjednostavniji oblik brojača i spektrometra, kod kojeg je visina izlaznog impulsa struje proporcionalna *energiji* upadnog zračenja. Radi na istom principu kao i Gajgerov brojač, ali u nižem opsegu napona u samom detektoru.



435

## Detekcija radioaktivnog zračenja

- **Scintilacioni brojač** – na vrhu fotomultiplikatorske vakuumске cevi je tzv. **scintilator** (kristal, plastični materijal, tečnost, gas) u kome se, pod uticajem upadnog ionizujućeg zračenja, stvaraju fotoni koji iz najbliže elektrode (fotokatode) izbijaju **fotoelektrone**. Struja fotoelektrona se u fotomultiplikatoru višestruko pojačava i beleži kao odbroj, slično Gajgerovom brojaču.
- **Poluprovodnički detektori** – ionizujuće zračenje izaziva stvaranje parova nosilaca nanelektrisanja u poluprovodniku (elektron-šupljina), čiji broj zavisi od energije zračenja.



436

## Detekcija radioaktivnog zračenja

- **Maglena komora** – (vizuelni detektor) gas u komori je ohlađen do temperature na kojoj pri prolasku ionizujućeg zračenja dolazi do pojave kapljica (kondenzacije) u prostoru komore na mestima pojave ionizacije u gasu - trag se snima i koristi za analizu.
- **Mehurasta komora** - radi na principu maglene komore, s tom razlikom da umesto gasa koristi pregrejanu tečnost na temperaturi ključanja. Na mestima prolaska ionizujućeg zračenja, javlaju se mehurići ključale tečnosti koji se snimaju. ➔
- **Fotografska emulzija** se direktno koristi za snimanje puta čestica ionizujućeg zračenja. Joni stvoreni u emulziji duž puta jonizacije uzrokuju taloženje srebra nakon razvijanja.



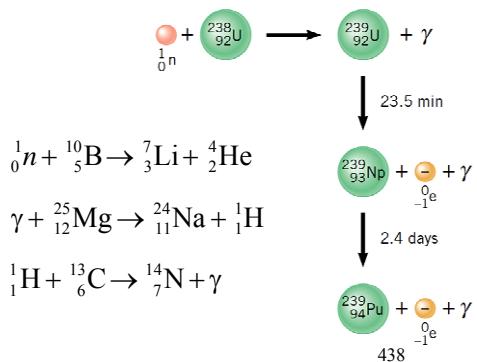
437

## Nuklearne reakcije

- Osim spontane dezintegracije (transmutacije) jezgara, promene u strukturi jezgra je moguće i **veštački izazvati**, tj. moguće je **indukovati raspad** stabilnih jezgara u sudaru sa drugim jezgrima, subatomnim česticama ili  $\gamma$ -fotonima.
- (Indukovane) **nuklearne reakcije (transmutacije)** su procesi transformacije atomskih jezgara u interakciji sa česticama, drugim jezgrima ili fotonima.
- Kao i za radioaktivni raspad, i za nuklearne reakcije **važe zakoni održanja**.



- **a** – projektil;
- **X** – jezgro meta;
- **Y** – novonastalo jezgro;
- **b** – produkt reakcije  
(oslobodjeno radioaktivno zračenje –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , subatomna čestica, ...).



## Energetski bilans nuklearne reakcije

- **Energija nuklearne reakcije** je razlika u kinetičkoj energiji između produkata nuklearne reakcije i čestica koje ulaze u reakciju.
- Energija reakcije se može naći iz **razlike masa čestica** koje ulaze u reakciju i koje su produkti reakcije.

$$Q = [(m_X + m_a) - (m_Y + m_b)] c^2$$

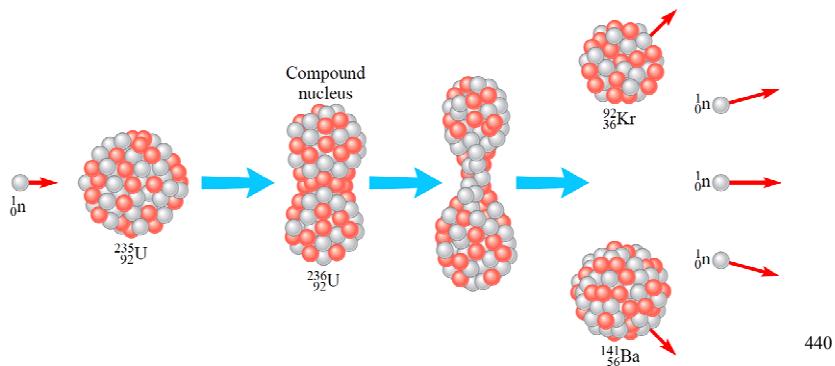
$$Q = (E_k^Y + E_k^b) - E_k^a$$

\* Prepostavka je da jezgro meta X miruje pre reakcije.

- Reakcija je **egzotermna** (oslobađanje energije), ako je  $Q > 0$ .
- Reakcija je **endotermna** (ostvaruje se na račun energije čestice x koja izaziva reakciju), ako je  $Q < 0$ .

## Nuklearna fisija

- Reakcija **cepanja** masivnog jezgra na dva manje masivna fragmenta je tzv. **nuklearna fisija** (Fermi - 1934.; Han, Majtner, Štrasman, Friš, 1939.).
- U-235 je jedini prirodni izotop urana, koji se u procesu fisije može cepati pod uticajem sporih, tzv. **termalnih** neutrona (energija 0.04 eV ili manja).
- Proces fisije prikazan na slici je samo **jedan od niza mogućih**, čiji ishod su uvek drugi fragmenti (druga jezgra) i različit broj novostvorenih neutrona.

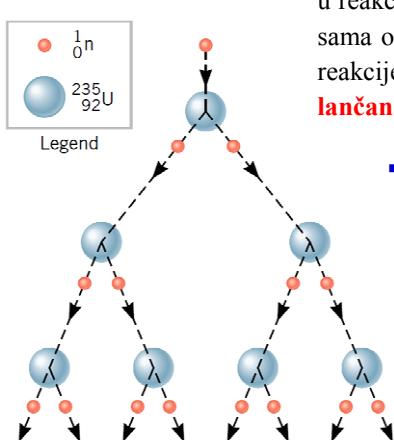


## Nuklearna fisija

- Prilikom **jedne fisije** U-235 se oslobađa energija, približno oko **200 MeV**, od čega veći deo otpada na **kinetičku energiju** produkata fisije, što je  **$10^8$**  puta više nego u običnoj hemijskoj reakciji (sagorevanju fosilnog goriva).

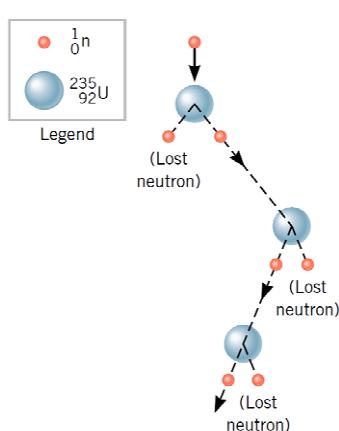
▪ Prilikom fisije urana, prosečan broj neutrona stvorenih u reakciji je 2.5 što je više nego dovoljno da se reakcija sama održava. Neutroni nastali pri fisiji uzrokuju nove reakcije fisije i tako nastaje niz vezanih reakcija ili tzv. **lančana reakcija**.

▪ Za vreme **nekontrolisane** lančane reakcije, u veoma kratkom vremenu (milioniti delovi sekunde) izvrši se na hiljade fisionih reakcija i oslobodi se ogromna količina energije – primer atomske bombe.



## Nuklearna fisija i proizvodnja nuklearne energije

- Ograničavanjem (kontrolisanjem) broja neutrona koji učestvuju u reakcijama fisije, moguće je uspostaviti stanje da samo jedan novostvoreni neutron izaziva novu fisiju. To je tzv. **kontrolisana fisija** koja se primenjuje u **nuklearnim reaktorima** za proizvodnju nuklearne energije.



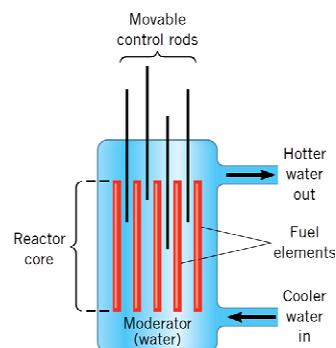
- Zajedničko za većinu nuklearnih reaktora su tri osnovna elementa: **nuklearno gorivo**, **neutronski moderator** i **kontrolne šipke**.

- Najčešće **gorivo** je **U-235**, čiji sadržaj u rudnim sirovinama ne prelazi 1 % (ostatak je U-238, nepogodan za reakcije fisije), pa se pre korišćenja gorivo mora obogaćivati, tj. dovesti u stanje sa većim procentom jezgara (3 %) koja se cepaju u sudaru sa sporim, termalnim neutronima.

442

## Nuklearna fisija i proizvodnja nuklearne energije

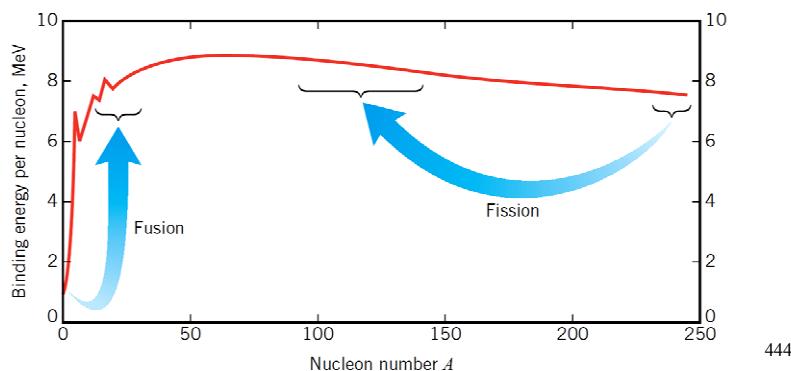
- Neutronski moderator** služi za usporavanje brzih, visokoenergetskih neutrona nastalih u procesima fisije i neophodnih za nove reakcije.
- Najčešće korišćeni moderator je **grafit**, **voda**, **teška voda** (voda obogaćena deuterijumom, izotopom vodonika sa 1 neutronom u jezgru).
- U reaktoru se usporavanjem fisionih produkata njihova kinetička energija transformiše u vodenu paru koja pokreće turbine i tako mehanički rad pretvara u električnu energiju.
- Za održavanje procesa nuklearne fisije u proseku od 100 novonastalih neutrona neophodan je 41. Iako se deo neutrona gubi u raznim neželjenim procesima, praktično ih uvek ima više nego što je neophodno.
- Kontrolne šipke** (čelik legiran sa B, Cd, ...) služe za kontrolisanje broja neutrona i stvaranje tzv. **kritičnog** (stacionarnog) **režima** u kome jedna fisija stvara jedan neutron za sledeći proces fisije.



443

## Nuklearna fuzija

- U procesima **fisije** (cepanja) masivnija atomska jezgra sa energijom veze po nukleonu od oko 7.6 MeV se raspada na fragmente sa energijom veze po nukleonu od oko 8.5 MeV (stabilnija i lakša jezgra). Razlika od 0.9 MeV je energija koja se oslobodi po jednom nukleonu u fisiji.
- **Spajanje lakih jezgara** takođe sugerise na mogućnost egzotermne nuklearne reakcije (sa oslobođanjem energije)



## Nuklearna fuzija

- **Nuklearna fuzija** je proces spajanja lakih jezgara, sa relativno malom energijom veze po nukleonu, u masivnije jezgro veće energije veze po nukleonu. **Oslobode-na energija** u tom procesu je znatno **veća** nego u procesima fisije (3.5 MeV po nukleonu), a problem goriva ne postoji, jer se ono može dobiti iz vode.
- Za ostvarivanje fuzije, neophodno je **savladavanje elektrostaticke sile** odbijanja između pozitivnih jezgara koje ulaze u proces.
- Velika kinetička energija većem broju jezgara se može saopštiti jedino na temperaturama reda  $10^8$  K, prevođenjem fuzionog goriva u stanje **plazme** (smeša elektrona i jezgara – ionizovana materija).
- Problem **kontrole** (održavanja) stanja plazme još uvek **nije uspešno rešen**.

