

# Nuklearna fizika

Nuklearna fizika proučava atomsko jezgro ( nukleus lat. – jezgro )

## Struktura atomskog jezgra

Atomsko jezgro se nalazi u središtu atoma i sastoji od nukleona ( čestice jezgra ), tj. od protona i neutrona. Kako su protoni pozitivne čestice (  $q_p = e = +1.6 \cdot 10^{-19} C$  ), a neutroni su neutralni, to znači da je atomsko jezgro pozitivno, a njegovo naelektrisanje je:  $q_j = Z \cdot e$ , gde je  $Z$  broj protona u jezgru. Broj neutrona u jezgru se obično obeležava sa  $N$ .

Uobičajeno je da se atomsko jezgro obeležava hemijskim simbolom datog elementa, njegovim rednim (  $Z$  ) i masenim (  $A$  ) brojem na sledeći način  $X_Z^A$ , gde je  $X$  hemijski simbol. Na primer:

$H_1^1$  - vodonik,  $He_2^4$  - helijum,  $Li_3^7$  - litijum,  $C_6^{12}$  - ugljenik,  $Fe_{26}^{56}$  - gvožđe,  $U_{92}^{238}$  - uranijum, itd.

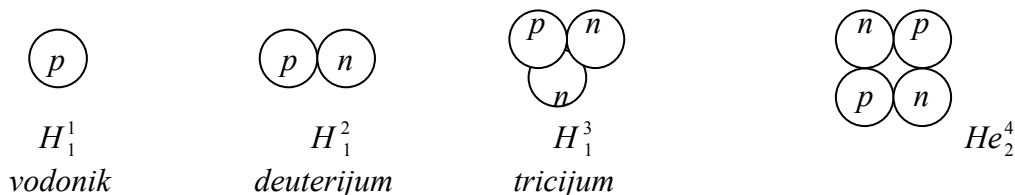
$Z$  – je redni broj datog elementa, ili broj protona u jezgru njegovog atoma, ili broj elektrona u njegovom elektronskom omotaču ( pod uslovom da atom nije jonizovan ).

$A$  – je maseni broj datog elementa ili ukupan broj nukleona u jezgru, tj. zbir broja protona i neutrona.

Kako u označavanju jezgra nema broja neutrona, jasno je da se njihov broj može izračunati kao razlika masenog i rednog broja:

$$N = A - Z.$$

Protoni i neutroni u jezgru su »gusto pakovani«, pa se jezgra mogu prikazati na sledeći način:



Prva tri jezgra prikazuju izotope vodonika ( izo topos *grčki* – isto mesto ). Svi oni predstavljaju isti element – vodonik zato što broj protona određuje koji je element u pitanju. Ali razlika u broju neutrona u jezgru čini da se njihove osobine razlikuju. U odnosu na vodu, teška voda, koja je sastavljena od dva atoma deuterijuma i atoma kiseonika, je jedan od najačih otrova u prirodi. Obično je jedan izotop mnogo rasprostranjeniji od ostalih. Kod vodonika to je izotop  $H_1^1$ , dok ostala dva izotopa u prirodi postoje samo u tragovima. Atomska masa vodonika je  $1 \text{ gr/mol}$ , deuterijuma  $2 \text{ gr/mol}$ , a tricijuma  $3 \text{ gr/mol}$ . U periodnom sistemu elemenata atomska masa vodonika je  $1.008 \text{ gr/mol}$ , što znači da je uzeta prosečna atomska masa svih izotopa vodonika, pri čemu je normalno uzeta u obzir procentualna zastupljenost svih tih izotopa u prirodi. Samo izotopi vodonika imaju imena jer su oni prvi otkriveni. Kasnije je postalo jasno, zato što svaki element ima izotope ( olovo čak ima 10 izotopa ), da je mnogo bolje sve izotope zvati imenom elementa uz dodatak njegovog masenog broja. Npr.  $U_{92}^{235}$  - uranijum 235, a  $U_{92}^{238}$  - uranijum 238. Masa protona je:  $m_p = 1836.79 \cdot m_e$ , dok je masa neutrona malo veća:  $m_n = 1838.43 \cdot m_e$ .

Kako je masa elektrona:  $m_e = 9.108 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ , to znači da su mase protona i neutrona:

$$m_p = 1.6729 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad \text{i} \quad m_n = 1.6744 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

U atomskoj fizici za jedinicu mase uzima se:  $u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  – atomska jedinica mase. Ona se definiše kao dvanaesti deo mase atoma ugljenika, pa se tako i izračunava:

$$u = \frac{M_C}{12 \cdot N_A} = \frac{12 \frac{\text{gr}}{\text{mol}}}{12 \cdot 6.0225 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}} = 1.66 \cdot 10^{-24} \text{ gr} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg},$$

gde je:  $M_C$  - molarna masa ugljenika, a  $N_A$  - Avogadrov broj, tj. broj atoma ugljenika u jednom molu.

Izražene u atomskim jedinicama mase mase protona i neutrona su:

$$m_p = 1.0078 \cdot u \quad \text{i} \quad m_n = 1.0087 \cdot u .$$

Dimenzije atomskog jezgra su jako malene, čak i u odnosu na sam atom. Poluprečnik atomskog jezgra je oko 100 000 puta manji od poluprečnika atoma. Da bi imali predstavu koliki je taj odnos poređenje je sledeće: ako zamislimo da je atom uvećan toliko da postane veličine fudbalskog stadiona ( zajedno sa tribinama – oko 200 m u prečniku ), tada je pri proporcionalnom uvećanju jezgro tek veličine glave špenadle. Pri tom uvećanju elektroni su još uvek nevidljivi golim okom. To znači da je ogroman deo prostora u atomu prazan, a s obzirom na malopre navedene mase čestica koje čine atom jasno je da je najveći deo mase atoma skoncentrisan u njegovom jezgru. Ako se u obzir uzme da atomi u materijalima nisu gusto pakovani, već da se nalaze na velikim međuatomskim rastojanjima ( oko 10 atomskih prečnika), tada postaje jasno zašto je gustina jezgra ogromna:

$$\rho_j \approx 10^{17} \frac{kg}{m^3}$$

u odnosu na gustinu obične materije. Recimo, prosečna gustina Zemlje kao planete je:

$$\rho_z = 5.5 \frac{gr}{cm^3} = 5500 \frac{kg}{m^3} .$$

To, na primer, znači da bi kockica stranice  $a = 2 \text{ mm}$ , do vrha napunjena atomskim jezgrima, imala masu od oko 1 000 000 tona. Ovakva gustina materije se može sresti još i kod pulsara, tj. neutronske zvezde.

Od svih jezgara najmanji poluprečnik ima jezgro atoma vodonika – to je praktično poluprečnik jednog protona – i on iznosi:  $r_H = 1.3 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ nm}$ . Poluprečnik mase drugog jezgra se može približno izračunati iz relacije:

$$r = r_H \cdot \sqrt[3]{A} . \quad (1)$$

Kada na umu imamo sliku materije sačinjene od atoma između kojih je ogroman prazan prostor, pa onda i ogromnu prazninu i u samim atomima, tada postaje jasno da čvrsti materijali nisu čvrsti zato što su ispunjeni materijom. Ali šta je onda to što ih čini čvrstim? Za čvrstinu su odgovorne međuatomske, tj. međumolekularne sile u čijoj osnovi su Kulonovska privlačenja i odbijanja naelektrisanih čestica od kojih su atomi sačinjeni. Kada stojite na površini zemlje vi, u stvari, levitirate na oko  $10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$  iznad nje, zato što se elektroni u omotačima površinskih atoma vaših stopala vrlo jako odbijaju sa elektronima u omotačima površinskih atoma podloge na kojoj stojite. Da nije ovih odbojnih Kulonovih sila mi bi smo mogli da, recimo, prolazimo kroz zidove ( isto kao Patrik Svejzi u filmu Duh ).

### Jaka nuklearna sila

Na početku se postavlja pitanje: šta je to što drži jezgro atoma na okupu, tj. šta je to što je u stanju da savlada izuzetno jako kulonovsko odbijanje protona zbijenih u vrlo mali deo prostora koji jezgro zauzima?

Odgovor na ovo pitanje se nameće sam od sebe. To mora biti neka privlačna sila koja je jača od Kulonovog odbijanja protona. Postojanje te sile je potvrđeno i ona je nazvana – jaka nuklearna sila.

Ako se dva protona dodiruju ( što se i dešava u atomskim jezgrima ) tada je jako nuklearno privlačenje između njih oko 100 puta jače od njihovog elektrostatičkog odbijanja.

Kada prihvatimo postojanje ovakvih sila postavljaju se sledeća dva pitanja:

- zašto su atomi tako mali, tj. zašto ne postoji atom recimo veličine fudbalske lopte? i
- zašto postoje samo 92 elementa u prirodi i na kraju, a zašto baš 92?

Pre nego što razmotrimo ove probleme, zanimljivo je da je na oba postavljena pitanja odgovor isti.

A odgovor se krije u osobinama sila koje su suprotstavljene u jezgru atoma. Pogledajmo te osobine.

Elektrostatička ( Kulonova ) sila je vrlo jaka, ima jako dug domet, a između dva protona je uvek odbojna. Neutroni ne učestvuju u ovoj vrsti interakcije zato što nisu naelektrisani.

Jaka nuklearna sila je najača sila u prirodi, ima izuzetno kratak domet, a deluje privlačno između mase dva nukleona (  $pp$ ,  $pn$  ili  $nn$  ). Izuzetno kratak domet jake nuklearne sile znači da ona praktično deluje između dva nukleona samo ako se dodiruju.

Ako sada počnemo da gradimo jedno jezgro dodajući mu sve više protona i neutrona, jasno je da se svaki dodati proton odbija sa svim protonima koji su pre njega dodati jezgru. Uzrok tome je dug doomet elektrostatičke sile. Nasuprot tome dodati proton se privlači samo sa protonima ili neutronima sa kojima se dodiruje pri ulasku u jezgro. Uzrok tome je kratak doomet jake nuklearne sile. Upoređujući ova dva suprotstavljena dejstva moramo imati na umu da je svako pojedinačno nuklearno privlačenje oko 100 puta jače od Kulonovog odbijanja.

Međutim, slika je ipak malo složenija. U pokušajima Kulonove sile da razori jezgro, kao i u pokušajima nuklearne sile da to isto jezgro drži na okupu učestvuju i drugi faktori na strani jedne ili druge sile. Najvažniji od tih faktora je lična ( kinetička ) energija nukleona koja potpomaže Kulonovu silu u destabilizaciji jezgra, a u tome mu se pridružuje i sledeći faktor, a to je privlačenje protona sa elektronima u omotaču atoma. Nasuprot tome prisustvo neutrona u jezgru potpomaže nuklearnu silu na dva načina: naime neutroni umetnuti između protona smanjuju jačinu Kulonovog odbijanja zbog, na taj način, povećanog rastojanja između protona, ali i tako što svaki dodati neutron povećava ukupan broj privlačenja, ali ne i ukupan broj odbijanja u jezgru koje na ovaj način nastaje.

Kada sve ove faktore uzmemo u obzir ispada da je pomenuti odnos 100 : 1 značajno smanjen, ali je i dalje je u korist nuklearne sile. U daljem tekstu pod pojmom privlačenja ili odbijanja se ne uzima samo dejstvo sila već se u obzir uzimaju i svi ostali faktori koji potpomažu dejstva ovih sila.

U početku ( pri malom broju protona u jezgru ) svako dodavanje novog protona brže povećava zbir svih privlačenja nego zbir svih odbijanja – pa su naredna jezgra sve stabilnija.

Međutim sa svakim novim protonom zbir svih odbijanja sve brže raste i otprilike na broju od 26 protona ( jezgro atoma gvožđa ) brzina porasta ukupnog Kulonovog odbijanja dostiže brzinu porasta svih nuklearnih privlačenja ( brzina porasta ukupnog nuklearnog privlačenja je približno konstantna ) – pa se zato od jezgra gvožđa može očekivati najveća stabilnost.

Pri daljem dodavanju protona ukupno Kulonovo odbijanje brže raste od ukupnog nuklearnog privlačenja – pa se može očekivati smanjenje stabilnosti tako nastalih jezgara.

Početna prednost ukupne nuklearne sile u jačini se tako konačno istopi na broju od 92 protona. Na broju od 92 protona ukupna nuklearna sila još uvek drži jezgro – ali jedva. Dokaz su jezgra urana koja postoje u prirodi ( jezgra uranijuma se ipak prirodno raspadaju ali vrlo sporo – da bi se raspala polovina od početne količine uranijuma 238 potrebno je da prođe 4.6 milijardi godina ).

Ako jezgru tada dodamo još jedan proton ( ili više njih ) ukupna Kulonova sila će nadjačati ukupnu nuklearnu silu, pa će se takvo jezgro raspasti – za šta su dokaz 93.-ći Neptunijum i ostali veštački elementi iznad njega jer ih nema u prirodi.

Ako se vratimo na početna dva pitanja, postaje jasno da prethodna analiza daje odgovor na oba.

Prikaz posledica prethodne analize možemo videti na grafiku u narednoj lekciji.

### **Defekt mase i stabilnost atomskog jezgra**

Preciznim merenjima masa pojedinačnih čestica ( protona i neutrona ) i masa atomskih jezgara može se uočiti sledeća nepravilnost.

Primer.

Uzmimo prvo po dva pojedinačna protona i neutrona i izmerimo njihove pojedinačne mase, a onda ih saberimo u ukupnu masu sve četiri čestice:  $m_p = 1.0078 \cdot u$  i  $m_n = 1.0087 \cdot u$ , pa je:

$$2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 2 \cdot 1.0078 \cdot u + 2 \cdot 1.0087 \cdot u = 4.0330 \cdot u .$$

Ako sada najpreciznije moguće izmerimo masu atomskog jezgra  $He_2^4$  - koje se sastoji baš od dva protona i dva neutrona, mogli bi smo očekivati istu masu kao što je zbir masa pojedinačnih čestica, ali rezultat merenja je:

$$m_j = 4.0026 \cdot u .$$

Očigledno je da postoji defekt ( gubitak ) mase jednak razlici izmerenih masa:

$$\Delta m = 4.0330 \cdot u - 4.0026 \cdot u = 0.0304 \cdot u .$$

Dakle ako po dva pojedinačna protona i neutrona spojimo ( fuzija ) u atomsko jezgro helijuma – 4 doći će do defekta mase koji iznosi:

$$\Delta m = 0.0304 \cdot u .$$

Ovaj gubitak mase, po Ajnštajnovom obrascu  $E = \Delta m \cdot c^2$ , znači i gubitak energije, tj. zbog toga se protoni i neutroni u jezgru nađu sa manjkom energije ili drugim rečima u vezanom stanju. Ovo vezivanje je posledica njihovog međusobnog delovanja privlačnom jakom nuklearnom silom. Formalno se može reći da ukupna energija veze jezgra helijuma – 4 korespondira izgubljenoj masi:

$$E_v = \Delta m \cdot c^2 = 0.0304 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 28.4 \text{ MeV},$$

gde je korišćena veza između jedinica:  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Ovo dalje znači da je jedan nukleon u jezgru helijuma – 4 vezan energijom:

$$E_{v,N} = \frac{E_v}{A} = \frac{28.4 \text{ MeV}}{4} = 7.1 \text{ MeV},$$

a  $E_{v,N}$  se naziva energija veze po nukleonu.

U nuklearnoj fizici se za izračunavanje ukupne energije veze jezgra koristi sledeći obrazac:

$$E_v = \Delta m \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_j) \cdot c^2. \quad (2)$$

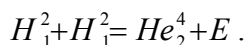
Energija veze po jednom nukleonu je utvrđena za sve postojeće elemente, a to je prikazano na sledećem grafiku.



Ako analizu iz prethodne lekcije uporedimo sa grafikom videćemo da je svaka posledica analize prisutna na grafiku. Energija veze po nukleonu, tj. stabilnost jezgara se povećava od prvog vodonika do 26.-og gvožđa. Početni podatak od 1 MeV-a po nukleonu se ne odnosi na običan vodonik – on i ne može da ima nikakvu energiju veze jer se sastoji od samo jednog protona – već na njegov izotop deuterijum. Najstabilnije jezgro u prirodi je jezgro gvožđa  $Fe_{26}^{56}$  sa 8.7 MeV-a po nukleonu. Od 26.-og gvožđa do 82.-og olova primetno je sporo slabljenje energije veze po nukleonu, što znači da su jezgra tih elemenata sve nestabilnija. Na kraju, kod zadnjih 10 elemenata imamo nešto brže opadanje stabilnosti, tako da je poslednje jezgro uranijuma – 238 sa 7.6 MeV-a po nukleonu.

Na kraju treba dokazati da se energija oslobađa samo pri spajanju lakih ili cepanju teških atomskih jezgara.

Uzmimo najjednostavniju relaciju fuzije u kojoj se spajaju dva jezgra deuterijuma u jedno jezgro helijuma – 4:



Da bi se objasnila pojava oslobođene energije na desnoj strani relacije potrebno je napraviti njen energetski bilans. Svaki od nukleona u deuterijumu ima manjak energije od 1 MeV-a, a na levoj strani relacije je 4 takva nukleona. Svaki od četiri nukleona u jezgru helijuma ima manjak energije od 7.1 MeV. Da bi energija na levoj strani relacije bila jednaka energiji desne strane (zbog zakona održanja energije) potrebno je desnoj strani dodati pozitivnu količinu energije u iznosu od 24.4 MeV-a:

$$2 \cdot (-1 \text{ MeV}) + 2 \cdot (-1 \text{ MeV}) = 4 \cdot (-7.1 \text{ MeV}) + E$$

$$-4 \text{ MeV} = -28.4 \text{ MeV} + E,$$

pa se rešavanjem ove jednačine dobija oslobođena energija:

$$E = +24.4 \text{ MeV}.$$

Zaključak je da se energija može dobiti uvek kada od jezgara sa manjom energijom veze dobijemo jezgra sa većom energijom veze po nukleonu. To se dešava uvek kada je smer relacije takav da se krećemo uz grafik! Kretanje uz grafik je moguće u dva slučaja: kada se spajaju laka atomska jezgra (kao u razmatranom slučaju fuzije deuterijuma u helijum) ili u slučaju deobe (fisije) jednog teškog atomskog jezgra (recimo uranijuma) na dva jezgra iz sredine periodnog sistema.

Važno je istaći (zbog kasnijeg objašnjenja životnog ciklusa jedne zvezde) da se fuzijom može dobijati energija sve do fuzije u gvožđe. Fuzija gvožđa u teže elemente je moguća, ali pri ovoj fuziji neće doći do oslobađanja energije već naprotiv doći će do njene apsorpcije.

Na kraju treba prodiskutovati pikove na grafiku. Oni prikazuju jezgra koja su stabilnija nego što bi se to moglo očekivati. Najveći pik je kod jezgra  $He_2^4$  sa  $7.1 \text{ MeV}$  po nukleonu u odnosu na prethodni deuterijum sa  $1 \text{ MeV}$ -om po nukleonu i sledeći  $Li_3^7$  sa  $5.3 \text{ MeV}$ -a po nukleonu. Jezgra sa ovako povećanom stabilnošću imaju za svoj redni ili maseni broj jedan od sledećih brojeva:

$$2, 8, 14, 20, 40, 50, 82, 126, \dots$$

Ovi brojevi su u nuklearnoj fizici poznati kao magični brojevi. Primeri ovakvih elemenata – koji imaju povećanu stabilnost, a samim tim su rasprostranjeniji u prirodi – su:

$$He_2^4, N_7^{14}, O_8^{16}, Ca_{20}^{40}, Pb_{82}^{206}, \dots$$

### Prirodna radioaktivnost

Prirodno su radioaktivni svi prirodni elementi iznad olova. To znači da su ovi elementi skloni jednom od tri načina na koji se jezgra raspadaju, a to su:  $\alpha$ -raspad,  $\beta$ -raspad (tri vrste) i  $\gamma$ -raspad.

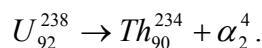
Prirodni elementi koji su prirodno radioaktivni, dakle koji se nalaze iznad olova, su:

$Bi_{83}$  - bizmut,  $Po_{84}$  - polonijum,  $At_{85}$  - astat,  $Rn_{86}$  - radon,  $Fr_{87}$  - francijum,  $Ra_{88}$  - radijum,  $Ac_{89}$  - aktinijum,  $Th_{90}$  - torijum,  $Pa_{91}$  - protaktinijum i  $U_{92}$  - uranijum. Masene brojeve nisam naveo zato što svaki od njih ima više prirodnih izotopa, ali se svi ti maseni brojevi nalaze u rasponu od 200 do 240.

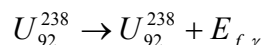
Kao što će se iz narednih analiza ovih raspada videti, pri radioaktivnom raspadu dolazi do pretvaranja (transmutacije) jednih elemenata u druge, osim kod  $\gamma$ -raspada. Jako dugo su alhemičari bezuspešno tragali za transmutacijom ne znajući da se ona svakodnevno odvija u prirodi oko nas.

#### $\alpha, \beta, \gamma$ - zračenje

Pri alfa - raspadu iz jezgra izleće  $\alpha$  čestica, koja predstavlja jezgro atoma helijuma  $He_2^4 = \alpha_2^4$ , tj. ona se sastoji od 2 protona i 2 neutrona. Primer:

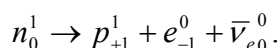


Pri gama - raspadu iz jezgra se emituje foton  $\gamma$  zračenja, pri čemu se smanjuje energija jezgra, a to znači da jezgro prelazi u stabilnije stanje. Primer:



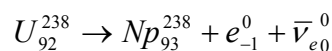
Beta - raspad se može desiti na tri različita načina:

1.  $\beta^-$  raspad se dešava tako što se jedan od neutrona u jezgru raspadne na proton, elektron i elektronski antineutrino:

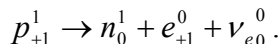


Pritom proton ostaje u jezgu, a elektron kao  $\beta^-$  čestica zajedno sa antineutrinom napušta jezgro brzinom bliskom svetlosnoj.

Primer:

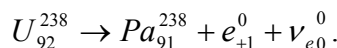


2.  $\beta^+$  raspad se dešava kada se jedan proton u jezgu raspadne na neutron, pozitron ( aničesticu elektrona ) i elektronski neutrino:

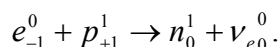


Pritom neutron ostaje u jezgu dok pozitron kao  $\beta^+$  čestica zajedno sa neutrinom napušta jezgro.

Primer:

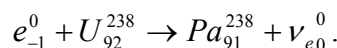


3. Elektronski zahvat se dešava kada neki spoljašnji elektron upadne u jezgro. Tada se on sjedini sa jednim od protona iz jezgra gradeći neutron i elektronski neutrino:



Neutron ostaje u jezgu, a neutrino napušta jezgro kao neutrinско zračenje.

Primer:



### Zakon radioaktivnog raspada

Važno otkriće u vezi sa radioaktivnošću različitih prirodnih elemenata je da se oni ne raspadaju istom brzinom. Najbrži od svih je radijum, a najsporiji uranijum. Različitom brzinom se raspadaju i izotopi istog elementa.

Mera za brzinu raspada jezgara atoma datog elementa je vreme poluraspada  $T$  ( s ). To je, baš kako mu i ime kaže, vreme za koje se raspadne polovina od ukupnog broja početnih jezgara, dok druga polovina očigledno ostaje neraspadnuta. Tako je vreme poluraspada radijuma:  $T \approx 2$  minuta, dok je za uranijum:  $T = 4.6 \cdot 10^9$  godina .

Primer: uzmimo da je početni broj atomskih jezgara datog izotopa  $N_0 = 800$ , a da je period poluraspada tog izotopa  $T = 7$  dana. Inače, ovaj period poluraspada ima radioaktivni izotop jod-131. Postavlja se pitanje koliko će jezgara ostati neraspadnuto posle, recimo, vremena od 3 nedelje, dakle:  $t = 21$  dan.

Problem je lako rešiv na sledeći način:

- posle prve nedelje broj raspadnutih jezgara je polovina od početnog broja, dakle:  $N_R = 400$ , što znači da je i broj neraspadnutih jezgara isti:  $N = 400$

- druga nedelja započinje sa 400 neraspadnutih jezgara i na njenom kraju imamo ponovo raspadnutu polovinu tog početnog broja, dakle:  $N_R = 200$ , dok je polovina ostala neraspadnuta, dakle:  $N = 200$

- treća nedelja počinje sa 200 neraspadnutih jezgara, a do kraja te nedelje se raspadne ponovo polovina tog početnog broja jezgara, dakle:  $N_R = 100$ , a neraspadnuto ostane:  $N = 100$  jezgara.

Isti rezultat se može dobiti iz obrasca:

$$N = N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}, \quad (3)$$

gde su:  $N_0$  - početni broj radioaktivnih jezgara,  $T$  - vreme njihovog poluraspada, dok je  $N$  - broj neraspadnutih jezgara po isteku vremena  $t$ .

$$N = 800 \cdot 2^{\frac{-7 \text{ dana}}{21 \text{ dan}}} = 800 \cdot 2^{-3} = \frac{800}{2^3} = \frac{800}{8} = 100.$$

Broj raspadnutih jezgara se može izračunati iz razlike početnog broja i broja neraspadnutih jezgara:

$$N_R = N_0 - N$$

Koristeći logiku prethodnog primera, zakon radioaktivnog raspada se može izvesti na sledeći način: posle jednog celog vremena poluraspada broj neraspadnutih jezgara je:

$$N = \frac{N_0}{2},$$

posle dva vremena poluraspada:

$$N = \frac{N_0}{2^2},$$

posle tri vremena poluraspada:

$$N = \frac{N_0}{2^3} \dots$$

a posle  $n$  vremena poluraspada:

$$N = \frac{N_0}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n}.$$

Kako se broj proteklih vremena poluraspada ( $n$ ) može odrediti deljenjem ukupnog proteklog vremena  $t$  sa vremenom poluraspada  $T$ :  $n = \frac{t}{T}$ ,

sledi konačno:

$$N = N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}.$$

Ovaj oblik zakon radioaktivnog raspada je jako zgodan kada je vreme  $t$  deljivo vremenom poluraspada  $T$ , tj. kada je  $n$  ceo broj.

Međutim kada  $n$  nije ceo broj, tada je prethodni obrazac praktično neupotrebljiv za izračunavanja. Tada je izračunavanje potrebno koristiti obrazac:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

gde su:  $e$  – osnova prirodnog logaritma, a  $\lambda$  – konstanta radioaktivnog raspada, koja predstavlja meru verovatnoće da se dato radioaktivno jezgro raspadne u jedinici vremena. Ako imamo više jezgara istog izotopa tada je ova verovatnoća ista za sva ta jezgra, što je razlog da se u imenu ove veličine pojavi reč – konstanta. Za izvođenje obrasca (4) potrebna je viša matematika.

Moguće je uspostaviti vezu između konstante radioaktivnog raspada i perioda poluraspada i to na sledeći način: ako je proteklo vreme  $t$  jednako jednom celom periodu poluraspada:

$$t = T,$$

tada je broj neraspadnutih jezgara posle tog vremena:

$$N = \frac{N_0}{2}.$$

Zamenom u izraz (4) dobija se:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{e^{\lambda T}}$$

$$e^{\lambda T} = 2$$

$$\ln e^{\lambda T} = \ln 2$$

$$\lambda \cdot T \cdot \ln_e e = \ln 2$$

kako je po definiciji logaritma:  $\ln_e e = 1$ , sledi:

$$\lambda \cdot T = \ln 2,$$

tj.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T} \quad (5)$$

Sada je obrazac (4) moguće napisati i na sledeći način:

$$N = N_0 \cdot e^{\frac{-0,693 \cdot t}{T}} \quad (6)$$

Zanimljivo je da je pomoću zakona radioaktivnog raspada konačno rešen jedan od velikih problema u nauci, a to je koliko je stara Zemlja, tj. kolika je starost Sunčevog sistema.

Kada je utvrđeno da period poluraspada uranijuma-238 iznosi 4.6 milijardi godina, ispostavilo se da u svim nalazištima uranijuma u kori naše planete postoji mešavina uranijuma i olova i to tako što je približno polovina te rude uranijum, a druga polovina je olovo. Znajući da se uzastopnim nizom  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ - raspada uranijum, preko niza elemenata na kraju pretvara u olovo i znajući da ni jedan element iz radioaktivnog niza raspada uranijuma nema neko veće vreme poluraspada, možemo zaključiti da je od nastanka elemenata, od kojih je sačinjen naš planetarni sistem, prošlo približno jedno vreme poluraspada uranijuma. Ovi elementi su nastali u eksploziji supernove, a vrlo brzo zatim je došlo i do formiranja Sunčevog sistema. Tako je starost Zemlje određena na 4.5 do 4.6 milijardi godina.

Starost Sunčevog sistema je prvi odredio američki geolog sa Kalteha Kler Paterson 1953. godine. Zbog velike koncentracije atmosferskog olova (prevashodno od izduvnih gasova automobila), koje »zagađuje« stene i remeti odnos uranijuma i olova u njima, Paterson je merio koncentracije uranijuma i olova u uzorcima meteorita, pri čemu je morao da pazi da oni budu što manje u kontaktu sa atmosferom.

Usput jedan ne tako nevažan zaključak. Prirodno radioaktivni elementi između uranijuma i olova imaju u odnosu na uranijum vrlo kratka vremena poluraspada i do sada ih uopšte i ne bi trebalo biti u kori naše planete. S obzirom na ogromnu starost naše planete ovi elementi su morali da se već potpuno raspadnu. Ono što ipak čini da su oni i dalje prisutni u zemljinoj kori je to što se uranijum (sa svojim ogromnim vremenom poluraspada) upravo preko ovih elemenata raspada do olova, pa sve dok ima uranijuma, biće u kori naše planete i ovih elemenata.

Treća zanimljivost u vezi sa zakonom radioaktivnog raspada je upotreba ugljenika-14 za određivanje starosti raznih istorijskih i arheoloških artefakata i paleontoloških nalaza.

$C_6^{14}$  je izotop ugljenika (normalan ugljenik je  $C_6^{12}$ ) sa periodom poluraspada  $T = 5600$  godina. Ovog ugljenika ima u vazduhu u određenoj poznatoj koncentraciji. Prilikom disanja svaki živi organizam unosi u sebe i ovaj ugljenik, tako da je, bez obzira što se ovaj izotop raspada, njegova koncentracija u živim bićima uvek ista i odgovara spoljašnjoj koncentraciji ovog izotopa u vazduhu. Međutim, kada organizam umre tada nema više disanja, pa nema ni nadoknađivanja raspadnutog izotopa. Zbog toga se koncentracija ovog izotopa u posmrtnim ostacima biljaka i životinja smanjuje. S obzirom na njegov period poluraspada od 5600 godina, jasno je da se merenjem koncentracija ovog izotopa u nađenim biljnim i životinjskim ostacima (papiirus, pergament, ostaci skeleta itd.) može da se utvrdi njihova starost i to utoliko preciznije ukoliko su ovi artefakti stariji. Postoji i ograničenje u tom smislu, pošto se smatra da je, kada prođe 10 vremena poluraspada, koncentracija početnog radioaktivnog izotopa zanemarljiva. Tako se ova metoda koristi za određivanje starosti do oko 50 000 godina u prošlost. Pritom nije loše naglasiti da se ovom metodom može ustanovljavati starost samo onih artefakata koji potiču od živih bića.

### **Aktivnost radioaktivnog izvora $A$ (Bq – Bekerel)**

U praksi je veoma važno znati koliko se raspada dešava u radioaktivnom izvoru u jedinici vremena. Zato je u nuklearnu fiziku uvedena veličina koja određuje broj raspada u jedinici vremena u datom radioaktivnom izvoru, a naziva se aktivnost radioaktivnog izvora. Jedinica je Bekerel.

Radioaktivni izvor ima aktivnost od jednog Bekerela ako se u njemu u toku jedne sekunde desi jedan radioaktivni raspad. To znači da je:  $Bq = s^{-1}$ .

Trenutna aktivnost radiativnog izvora se izračunava kada se konstanta radioaktivnog raspada pomnoži sa trenutnim brojem neraspadnutih jezgara u tom radioaktivnom materijalu:

$$A = \lambda \cdot N \quad (7)$$

Ako i levu i desnu stranu zakona radioaktivnog raspada pomnožimo sa konstantom radioaktivnog raspada dobija se:



$$\lambda \cdot N = \lambda \cdot N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}$$

Kako je  $\lambda \cdot N = A$ , možemo  $\lambda \cdot N_0$  proglasiti za početnu aktivnost  $A_0$ . U tom slučaju dobijamo:

$$A = A_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T}}, \quad (8)$$

gde su:  $A_0$  – početna aktivnost datog radioaktivnog izvora,  $T$  – vreme poluraspada tog materijala, dok je  $A$  – preostala trenutna aktivnost tog izvora na kraju vremena  $t$ .

Na isti način se dobija:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (9)$$

## DETEKTORI RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA

### Udarne jonizacija

Kada naelektrisana čestica prolazi kroz materijalnu sredinu, ona može izvršiti udarnu jonizaciju materije na dva načina:

1. sudarom sa elektronom koji orbitira oko jezgra svog atoma i njegovim izbacivanjem iz atoma u međuatomski prostor tog materijala i
2. bliskim prolaskom pored elektrona u atomu, pri čemu naelektrisana čestica Kulonovom silom deluje na elektron i izbacuje ga u međuatomski prostor tog materijala.

Na oba ova načina nastaje slobodni elektron u međuatomskom prostoru te materijalne sredine – kao laki negativni jon i atom sa manjkom elektrona – kao teški pozitivni jon.

Naelektrisana čestica koja vrši udarnu jonizaciju pritom gubi energiju, a verovatnoća dešavanja udarne jonizacije raste sa porastom njene mase (veličine) – u prvom slučaju i njenog naelektrisanja – u drugom slučaju.

Udarnu jonizaciju može vršiti i neutralna čestica, ali je verovatnoća jonizacije tada znatno manja jer se ona tada dešava samo na prvi način tj, sudarima te čestice sa elektronima u atomima materijalne sredine.

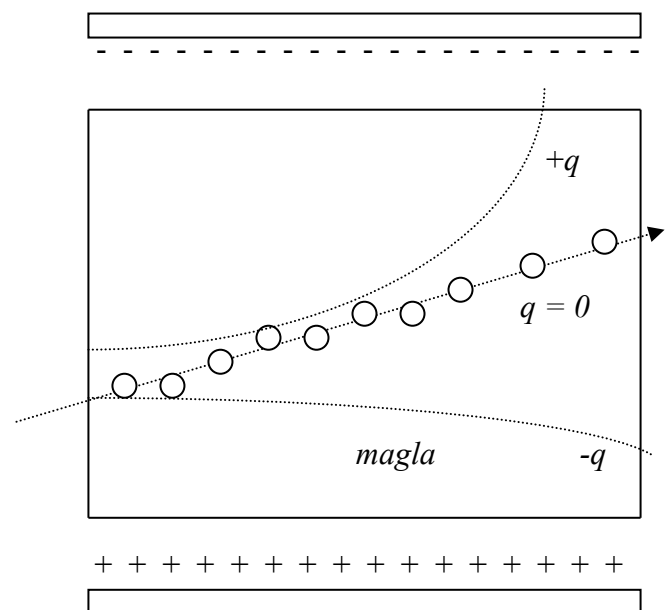
### Vilsonova maglena komora

Ovo je sprava za otkrivanje radioaktivnog zračenja, tj. za detekciju naelektrisanih čestica koje prolaze kroz nju. Sastoji se od staklene posude u kojoj se nalazi magla, tj. prehladna vodena para na temperaturi oko  $0^\circ\text{C}$ . Ovo je metastabilno stanje vode koje je moguće ako su iz vodene pare uklonjeni svi centri za kondenzaciju, tj. centri za nastajanje kapi.

Kondenzacija vodene pare u kapi, pri njenom hlađenju, je moguća samo ako u pari postoje centri za kondenzaciju. To mogu biti čestice prašine, dima, čađi ili neke druge nečistoće, a mogu biti i joni. Kap nastaje tako što se molekuli pare lepe za centar za kondenzaciju, i taložeći se na njemu postepeno formiraju kap.

Dakle da bi napravili maglu u komori potrebno je da i komora i vodena para budu sterilno čisti i da para bude neutralisana.

Kada kroz maglu u komori prođe naelektri-



sl. 1.

sana čestica, ona vrši udarnu jonizaciju molekula magle i vazduha, pri čemu na njenom tragu nastaje veliki broj jona, a oni posluže kao centri za kondenzaciju. Zato na tragu čestice nastaju kapi vode pa je trag čestice vidljiv kao kapljični trag. Slično ovome i avion ostavlja trag na nebu, samo što on ne jonizuje vazduh i vodenu paru, već izbacuje dim čiji molekuli posluže kao centri za kondenzaciju...

Pored mogućnosti da se odredi broj čestica koje prolaze kroz komoru – na osnovu broja tragova, ova komora pruža mogućnost da se odredi i naelektrisanje, masa i brzina svake čestice koja ostavlja trag. Na slici je prikazano ovo određivanje pomoću spoljašnjeg električnog polja. Trag čestice se savija u zavisnosti od njenog naelektrisanja, ali iskustvo u radu sa ovom komorom pokazuje da svaka poznata naelektrisana čestica ostavlja karakterističan trag koji se razlikuje od tragova ostalih čestica, jer u stepenu savijenosti traga učestvuje i njena masa i brzina. Ovo se može ostvariti i pomoću spoljašnjeg magnetnog polja gde se karakteristično savijanje traga dobija zbog dejstva Lorencove sile na česticu.

Ovo je dakle komora koja može otkriti i vrstu čestice koja kroz nju prolazi.

### Mehurasta komora

Mehurasta komora radi na principu pregrevane tečnosti, a i to je metastabilno stanje vode. Pregrejana voda može nastati ako u vodi i u posudi u kojoj je zagrevamo nema centara za pravljenje mehurova. Kao centri mogu poslužiti čestice prašine, dima, čađi i drugih nečistoća, a to mogu biti i joni.

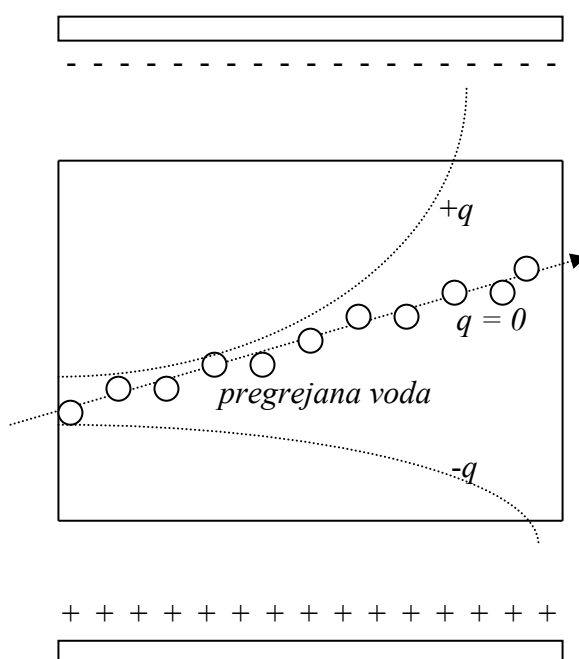
Mehuri nastaju tako što se molekuli vodene pare unutar vode lepe za npr. česticu prašine i taložeći se na njoj postepeno formiraju mehur.

Dakle, da bi dobili pregrejanu vodu potrebno je da pri zagrevanju posuda i voda u njoj budu sterilno čiste i neutralisane.

Upravo tako i izgleda mehurasta komora. U providnoj posudi se nalazi pregrejana voda ( iznad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ). Kada kroz nju prođe čestica ona izvrši udarnu jonizaciju vode, pa na njenom tragu nastane veliki broj jona, a oni posluže kao centri za pravljenje mehurova, a kako je voda pregrejana iznad tačke ključanja na tragu čestice se naglo stvori veliki broj mehurova, tj. tečnost, doslovce, proključa na tragu čestice.

Ako se posuda nalazi u spoljašnjem električnom ( kao na slici ) ili magnetnom polju moguće je na osnovu oblika traga čestice odrediti naelektrisanje, masu i brzinu čestice, tj. moguće joj je odrediti identitet.

U odnosu na Vilsonovu maglenu komoru mehurasta komora ima radnu sredinu veće gustine, pa se pomoću nje mogu detektovati sitnije čestice.



sl. 2.