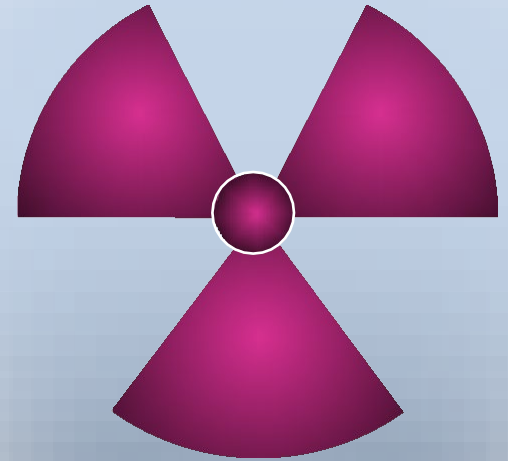


Radiobiologija (2+1+0)

prof. dr. sc. Vesna Benković
izv. prof. dr. sc. Duje Lisičić
Zavod za animalnu fiziologiju
Biološki odsjek
Prirodoslovno-matematički fakultet
Sveučilište u Zagrebu



Predavanja

Tematske cjeline: Uvod u radiobiologiju, Vrste zračenja, Doze i detekcija zračenja, Izvori zračenja, Neionizirajuća zračenja, Ionizirajuća zračenja, Djelovanje zračenja na organizme, Testovi za detekciju oštećenja DNA, Primjena zračenja u dijagnostici, Važnost zračenja u radioterapiji, Ekološka radiobiologija, Legislativa

Praktikum

Klinika za dječje bolesti Zagreb, Ul. Vjekoslava Klaića 16, 10000, Zagreb

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Ksaverska cesta 2, 10000 Zagreb

Ispit:

Preduvjet za pristupanje ispitu je redovito pohađanje nastave

- pismeni: 55 % za prolaz

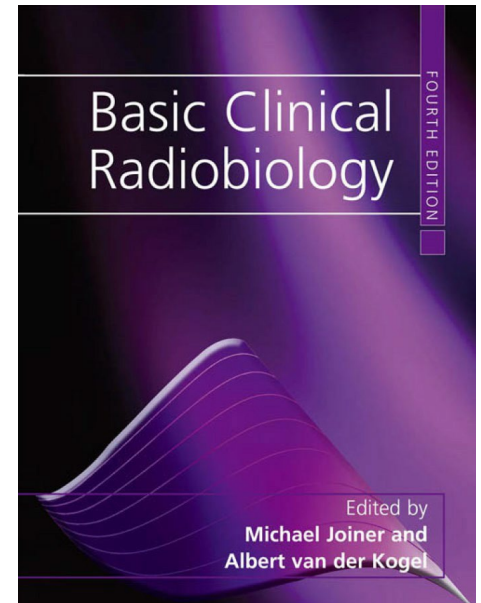
Literatura

Beyzadeoglu M, Ozyigit G, Ebruli C. Radiobiology.

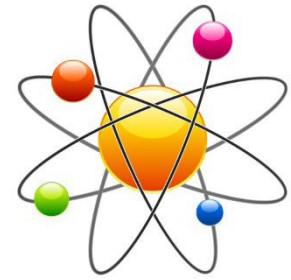
<https://www.researchgate.net/publication/227063437>

Joiner MC, van der Kogel AJ Basic clinical radiobiology 5th edition 2018. (PDF free)

IAEA. <https://www.iaea.org/publications>



Prezentacije sa predavanja - repozitorij



RADIOAKTIVNOST

RADIOAKTIVNI RASPAD

prof. dr. sc. Vesna Benković
Zavod za animalnu fiziologiju
Biološki odsjek
Prirodoslovno-matematički fakultet
Sveučilište u Zagrebu

Radiobiologija (radio- + biologija) (radijacijska biologija)

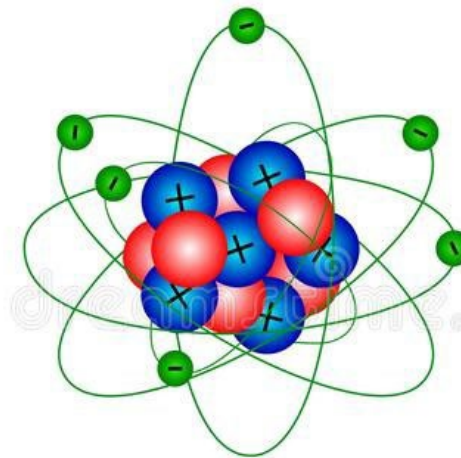
- djelovanje različitih vrsta zračenja na žive sustave, od substanične i stanične razine sve do cijelog organizma ili populacije, te primjenu u medicini i biomedicini.

Zračenje - prijenos energije elektromagnetskim valovima ili snopovima subatomske čestice koje se usmjereno kreću kroz prostor.

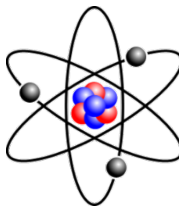
Atom (grč. ἄτομος: nedjeljiv) - osnovni djelić, najmanji dio na koji kemijska tvar može biti rastavljena, najmanji sastavni dio kemijskih elemenata, koji zadržava svojstva tog elementa.

promjer atoma iznosi od 0,1 do 0,5 nanometara, a relativna atomska masa od oko 1 za vodik do približno 244 za plutonij.

Struktura atoma ugljika



elektron	
proton	
neutron	



Maseni broj (A)

$$A = N(p^+) + N(n^0)$$

40

Ca

20

Redni broj (Z)

$$Z = N(p^+) = N(e^-)$$

Stabilnost atomske jezgre se objašnjava djelovanjem nuklearnih sila (jaka sila)

- privlačnog karaktera (veoma snažna)
- djeluje među nukleonima
- neovisna o naboju
- djeluje na vrlo malim udaljenostima (manje od 2×10^{-15} m)

- **John Dalton** (1766. - 1844.), engleski prirodoslovac, kemičar i fizičar.
- Zbog doprinosa razvoju atomske teorije smatra se jednim od utemeljitelja suvremenoga prirodoslovlja.
- U knjizi *Novi sustav kemijske filozofije* (*New System of Chemical Philosophy*, I, 1808., II, 1810.) pretpostavio je da se kemijski elementi sastoje od malih neuništivih čestica, atoma. Time je utemeljio **atomsku teoriju** građe tvari, ustvrdivši da se **svaki kemijski element sastoji od atoma iste vrste**, dok se kemijski spojevi sastoje od različitih atoma.
- Uveo je posebne simbole za kemijske elemente i spojeve i dao pregled relativnih atomskih masa.



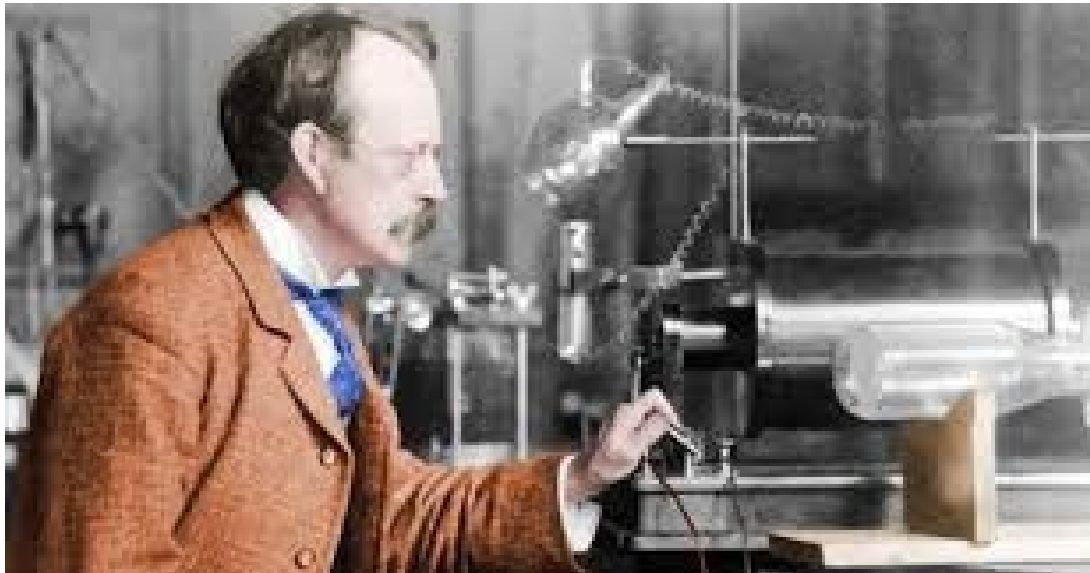
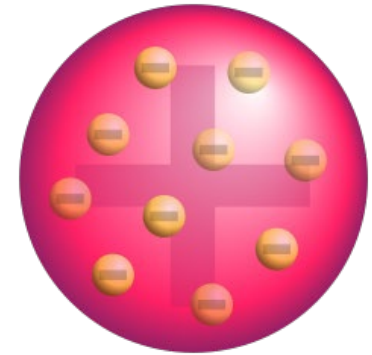
Rani modeli atoma

J.J. Thomson (1898.) - model pudinga

pretpostavio da se pozitivni naboji nalaze jednoliko raspoređeni po cijelom volumenu atoma koji je sfernog oblika.

U pozitivnu pozadinu ravnomjerno su utisnuti elektroni.

Atom kao cjelina je neutralan.



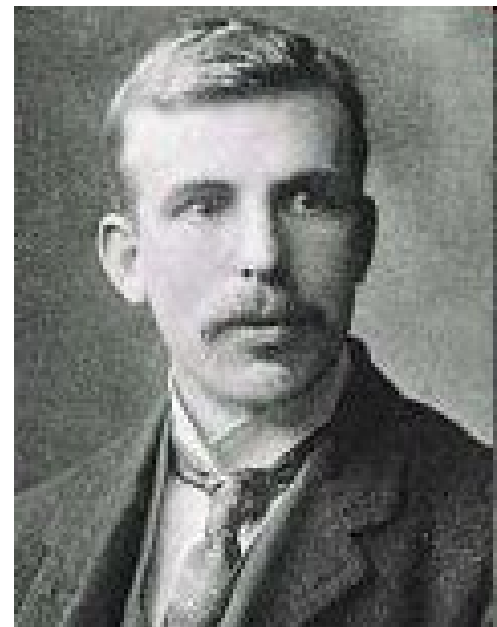
Ernest Rutherford (1871. – 1937.)

- 1909. godine otkrio da su α -čestice jezgra helija

Sastoje se od **2** protona (p^+) i **2** neutrona (n^0)

naboj: **$2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$** - Masa im je: **4,0039**

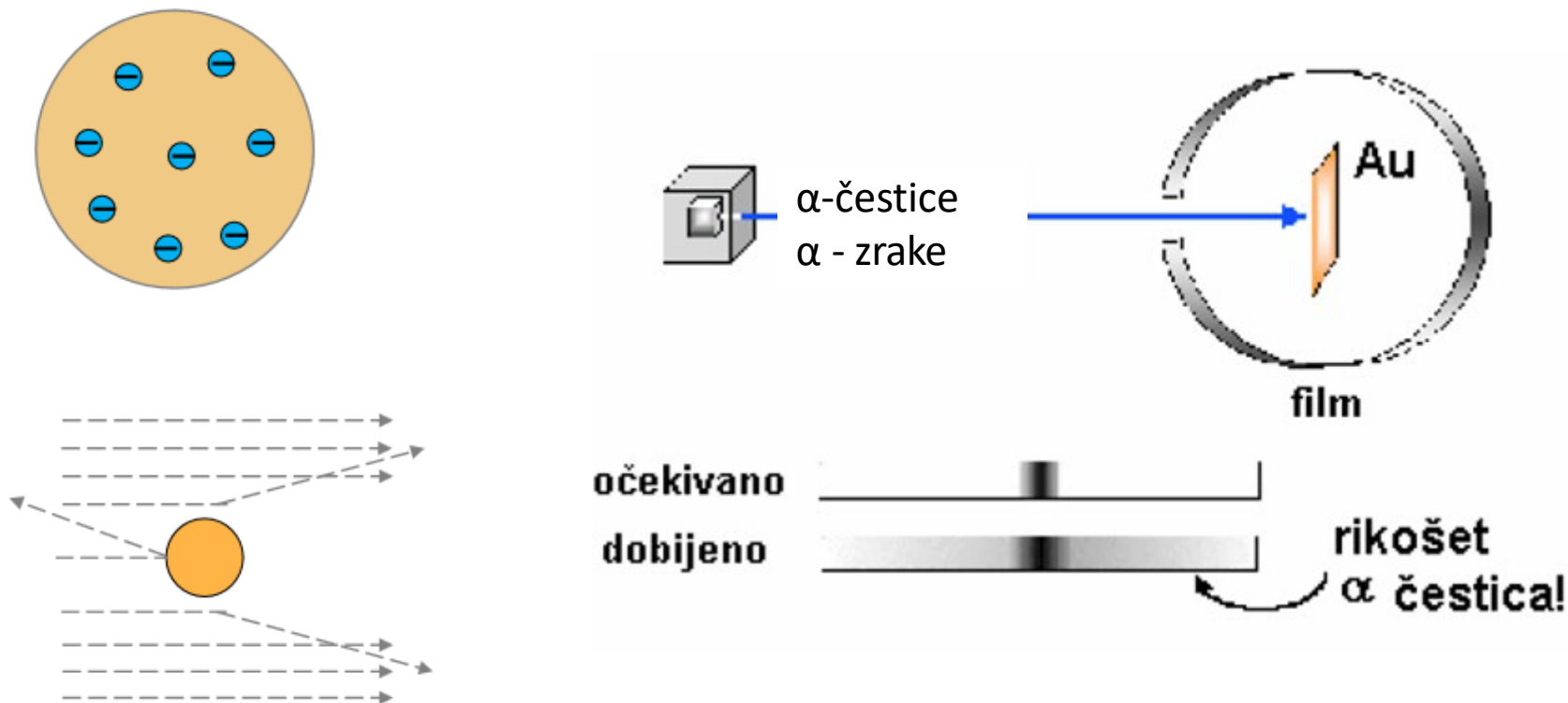
α -čestica ili ${}^4_2\text{He}^{2+}$



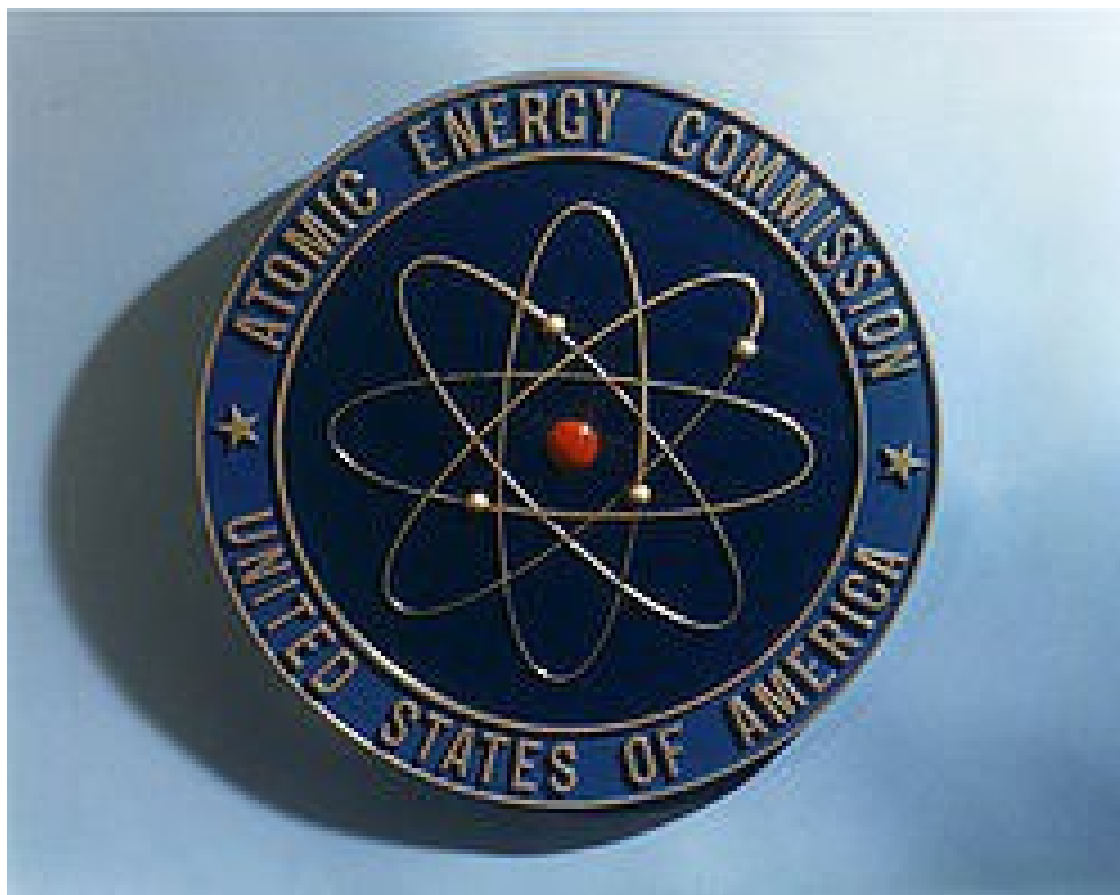
Rutherfordov model - Planetarni model (1910. g.)

- eksperimentalno je provjeravao Thomsonov model

- zasnovan na rezultatima eksperimenata u kojima su se α -čestice raspršivale na tankim listićima zlata i drugih kovina. Većina α -čestica je prošla direktno kroz listić zlata $\rightarrow$ atomi su većinom prazni prostor. Neke α -čestice su se raspršile ili odbile natrag. Pozitivan naboj je koncentriran u centru atoma, nazvanom jezgra (nucleus). Elektroni kruže oko jezgre kao planeti oko Sunca. Jezgra nosi gotovo cijelu masu atoma.



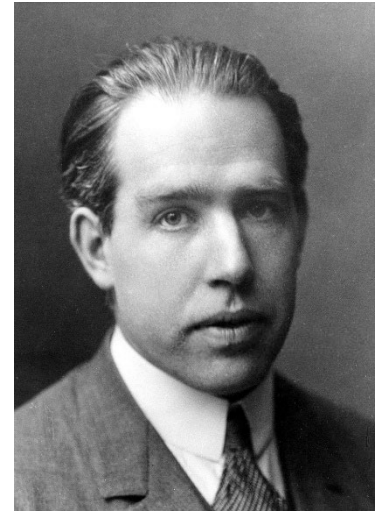
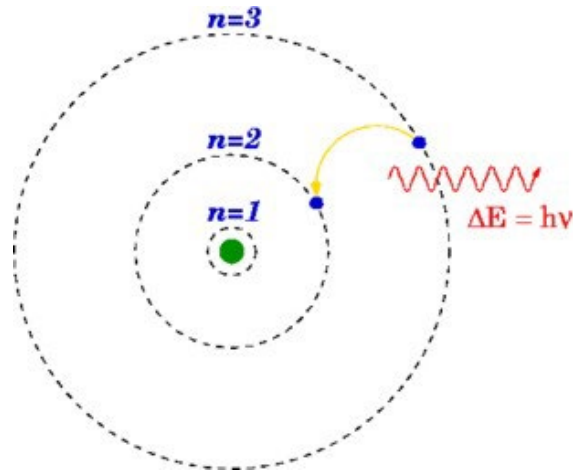
Rutherfordov model atoma - simbol Američke agencije za atomsku energiju



Niels Bohr (1885. - 1962.)

Bohrov model atoma (1913)

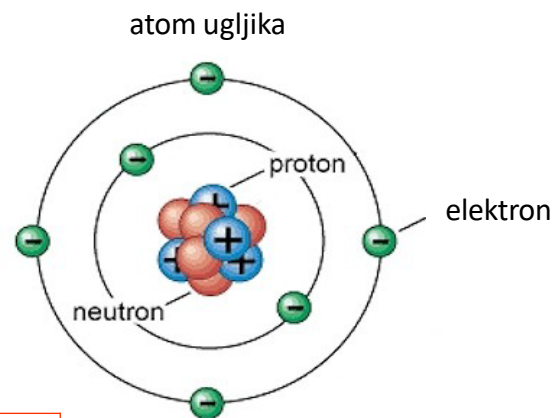
- ne postoji kontinuirani mogući razmak između jezgre i orbitale, nego su mogući samo neki razmaci. Ti razmaci i njima odgovarajuće energije ovise o konkretnom atomu
- pretpostavlja kvantizaciju energetske stanja elektrona u elektronskom omotaču



1932. James Chadwick otkrio je neutron.

Proučavanjem atoma bavi se više grana moderne fizike.

- Strukturu elektronskog omotača i međudjelovanje atoma proučava **atomska i molekularna** fizika.
- Jezgru atoma proučava **nuklearna** fizika, subatomske čestice (protone, neutrone i dr.) fizika **elementarnih čestica**.



čestica	masa (g)	naboj
proton (p^+)	$1,67262 \times 10^{-24}$	+1
neutron (n^0)	$1,67493 \times 10^{-24}$	0
elektron (e^-)	$0,00091 \times 10^{-24}$	-1

- **Izotop** (grč. *isos*: isti, *topos*: mjesto) je atom istoga kemijskog elementa (isti atomski broj Z) koji se međusobno razlikuje po broju neutrona u atomskoj jezgri, pa prema tome i po masenom broju, odnosno masi.
- Izotopi nekoga kemijskog elementa zauzimaju isto mjesto u periodnom sustavu, pa im odatle ime (**F. Soddy**, 1921. je primio Nobelovu nagradu za kemiju).
- Izotopi mogu biti:
 - stabilni i
 - nestabilni (radionuklidi ili radioizotopi)
- Stabilnost, odnosno nestabilnost jezgre je uvjetovana omjerom protona i neutrona. Ako je omjer optimalan, jezgra je stabilna.
Na primjer jezgra s 2 protona i 2 neutrona je stabilna jezgra. Pošto se protoni međusobno odbijaju dodaju se neutroni za ravnotežu.

Nestabilni izotopi - radioaktivni izotopi ili radionuklidi

- **Nuklid** je atom kemijskog elementa za koji je točno poznat redni ili atomski broj Z , i ukupan broj **nukleona** (protona i neutrona) u atomskoj jezgri.
- **radionuklidi** - atomi koji imaju omjer protona i neutrona veći ili manji od omjera potrebnog za stabilnost.
- jezgra radionuklida se spontano raspada prelazeći pri tome u neku drugu jezgru.
- teže stabilnosti, a to se postiže **radioaktivnim raspadom** (radioaktivnost) (F. Soddy i E. Rutherford 1903).
- prilikom raspada jezgra radionuklida emitira čestice i/ili elektromagnetske zrake kratke valne duljine (ionizirajuće zračenje) – **radioaktivnosti**
- **transmutacija** je spontani prijelaz jedne jezgre u drugu.
- posljedice - promjena mase i/ili kemijskih svojstava radionuklida uz istodobno emitiranje ionizirajućeg zračenja

- Svi elementi iznad rednog broja 82 (olovo) su nestabilni jer odbojnim silama protona više nisu dovoljni neutroni kao ravnoteža.

Od svih jezgri koje su pronađene u prirodi, mnoge su stabilne (kratkoživuće radioaktivne jezgre raspale su se tijekom povijesti Zemlje)

U prirodi se nalazi oko 270 stabilnih i oko 50 prirodnih radioaktivnih izotopa.

Tisuće drugih radioaktivnih izotopa umjetno su stvarani u laboratorijima.

- U radioaktivnim procesima, elementarne čestice ili elektromagnetska zračenja emitiraju se iz jezgri atoma. Najuobičajeniji oblici zračenja tradicionalno se nazivaju alfa-čestice (α), beta-čestice (β) i gama (γ) zračenjima.
- Zračenja iz jezgre se događaju i u drugim oblicima, uključujući emitiranje protona ili neutrona, te spontanih nuklearnih fisija (cijepanja) masivnih jezgri.
- Nuklearni raspad mora zadovoljiti nekoliko zakona očuvanja energije
Očuvane veličine su: ukupna energija (uključujući ekvivalent energije mase), električni naboj, linearna i kutna količina gibanja, broj nukleona, te leptonski broj (tj. suma broja elektrona, neutrina, te pozitrona i antineutrina i antičestice).
- Kad elektron pređe iz jedne orbitale u drugu energetska razlika se oslobađa (ili dobiva) u vidu kvanta energije (kojeg nazivamo **foton**) čija frekvencija direktno ovisi o energetskej razlici između dvije orbite.

IZOTOPI VODIKA

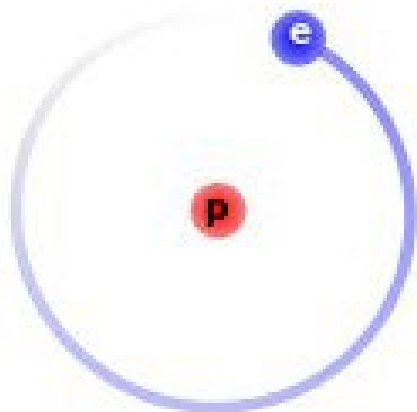
Vodik (${}^1\text{H}^1$) ima jedan proton, i jedan elektron, neutrona nema, dakle, vodik p1+e1, m=1.

Izotopi vodika su:

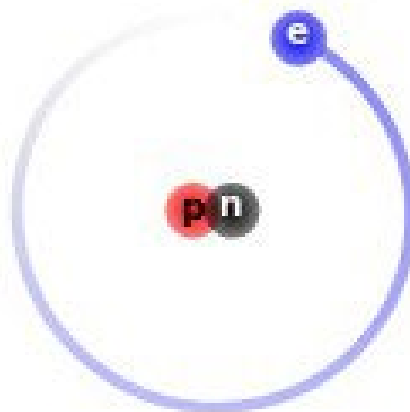
deuterij, ${}^2\text{H}^2$: p1+e1+n1, m=2

tricij, ${}^3\text{H}^3$: p1+e1+n2, m=3

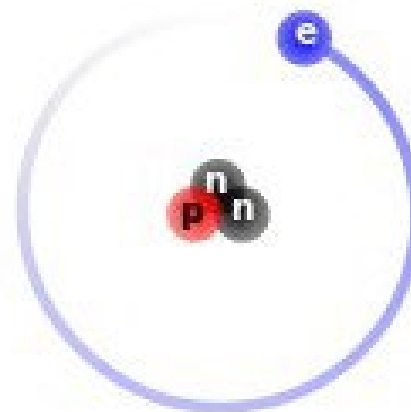
Tricij je nestabilan pa se raspada (ravnoteža je poremećena s 2 neutrona).



${}^1_1\text{H}$



${}^2_1\text{H}$



${}^3_1\text{H}$

vrijeme poluraspada ($t_{1/2}$) je vrijeme za koje početni broj radioaktivnih jezgara N_0 opadne na polovinu:

$$t_{1/2} = \frac{N_0}{2}$$

- karakteristična konstanta svakog radioaktivnog elementa.
- variraju od 10^{-6} do 10^{20} godina.

zakon radioaktivnog raspada

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

N_0 - broj radioaktivnih jezgara u početnom vremenu,

N - broj jezgara u vremenu **t**

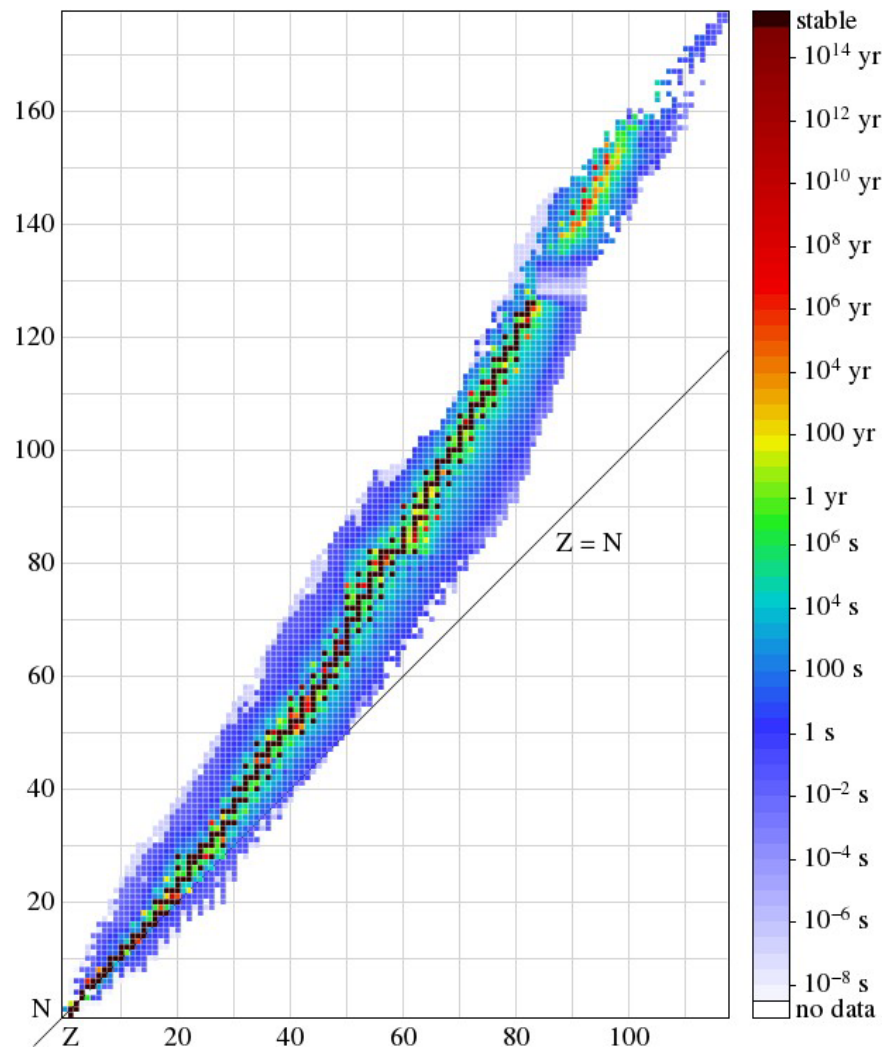
e – baza prirodnog logaritma (2,718)

λ - konstanta radioaktivnog raspada (predstavlja vjerojatnost raspada)

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

jedno od najvećih vremena poluraspada ima ^{235}U i iznosi **oko 4,5 milijarde godina**, dakle približno jednako starosti planeta Zemlje - danas se na Zemlji nalazi otprilike polovica urana od količine koja se tu nalazila u trenutku njezinog stvaranja, dok se druga polovica raspala.

Radioaktivni izotop	Vrijeme poluraspada
Berilij-7	53,28 dana
Argon-37	35,0 dana
Kalcij-41	$1,03 \cdot 10^5$ godina
Titaniij-44	52 godine
Vanadij-49	337 dana
Krom-51	27,7 dana
Mangan-53	$3,7 \cdot 10^6$ godina
Kobalt-57	271,8 dana
Nikal-56	6,10 dana
Galij-67	3,26 dana
Germanij-68	270,8 dana
Selenij-72	8,5 dana

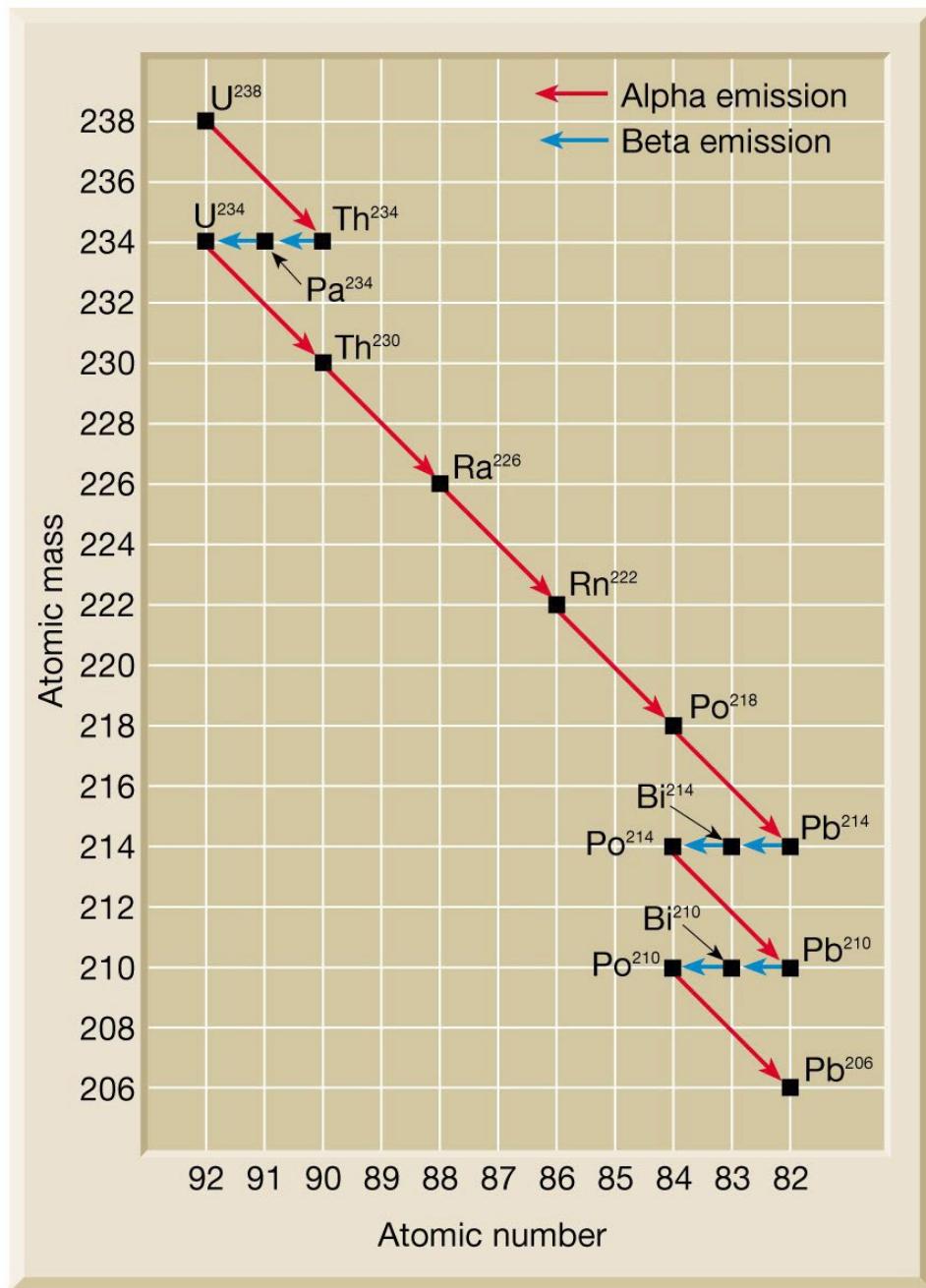


Teoretska linija za stabilne izotope $Z = N$ (Z – atomski broj i N - broj neutrona), razdvaja se od stvarnog odnosa atomskog broja i neutrona, što znači da se s povećanjem atomskog broja, povećava i nestabilnost atomskih jezgri.

Prirodno radioaktivni elementi čiji je redni broj $Z \geq 83$ smješteni su u tri radioaktivna niza:

1. Uranov (U) niz
2. Aktinijev (Ac) niz
3. Torijev (Th) niz

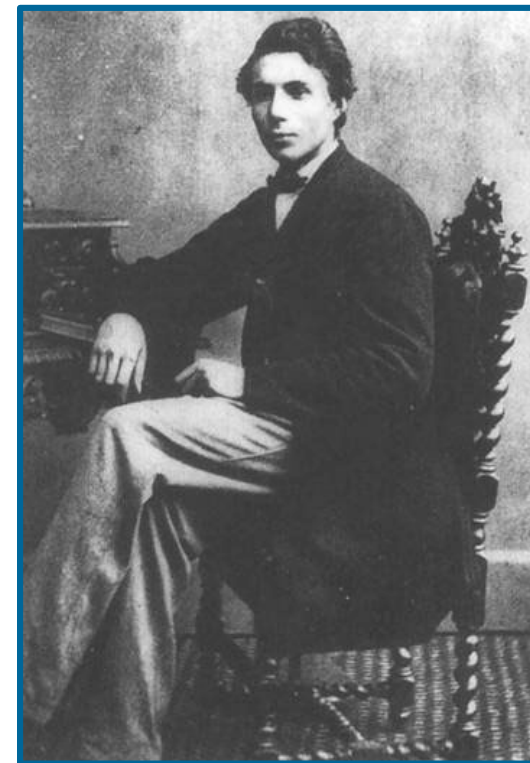
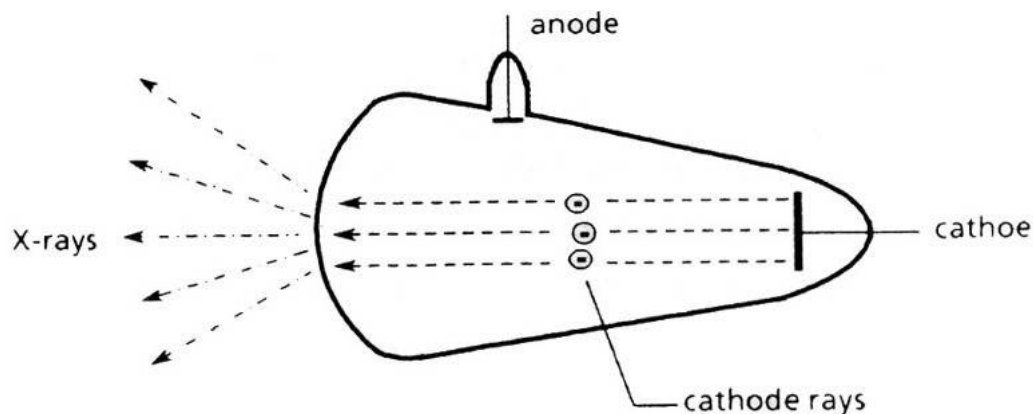
Uranov niz, uran (roditelj) se transformira kroz 14 koraka u olovo (kći).



1895. - OTKRIĆE ROENTGENSKIH ZRAKA

⇒ Wilhelm Conrad Roentgen

- eksperimentirao s katodnim cijevima, (Geisslerove i Crookesove cijevi). Primijetio je da kristali barijevog platin-cijanida svjetlucaju (fluoresciraju) u blizini katodne cijevi kad je kroz nju puštao električnu struju.



Eksperimentirajući, je utvrdio zacrnjenje fotografske ploče u blizini katodne cijevi kad je bila u “pogonu”, iako je fotografska ploča bila zaštićena od djelovanja svijetla

2004. Međunarodna unija za čistu i primijenjenu kemiju dala je 111. elementu u periodnom sustavu ime **roentgenij**.

8. 11. 1895. godine - laboratorij za eksperimentalnu fiziku u Wurzburgu

zaključio je da se radi o nekim novim, nevidljivim zrakama koje prolaze kroz materiju, do tada posve nepoznatim zrakama, pa ih je tako i nazvao- nepoznate, **X zrake**

22. 12. 1895. godine - novim zrakama snimio je ruku svoje žene Berte. Snimanje (ekspozicija) je trajalo punih petnaest minuta, a nakon fotografske obrade jasno su se prikazale kosti šake.



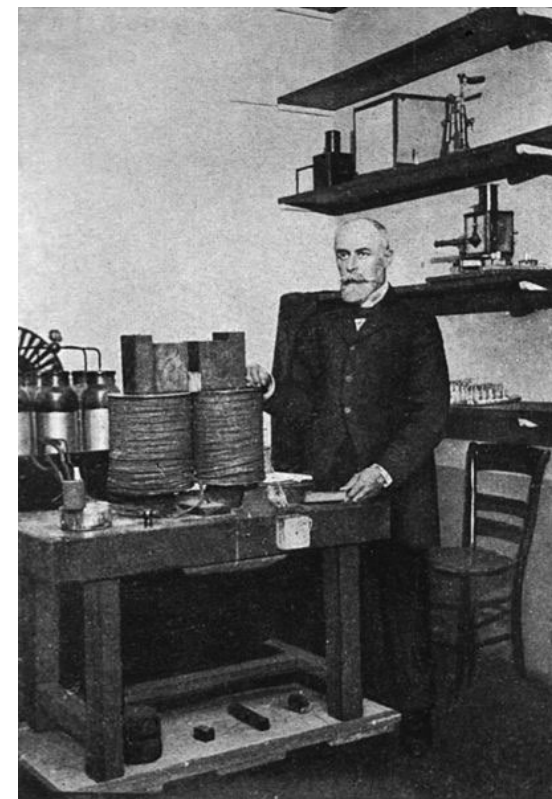
Otkriće radioaktivnosti – 1896.

Francuski fizičar **Henri Becquerel** otkrio je radioaktivnost „slučajno“

- bavi se proučavanjem svjetlucanja prirodno fluorescentnih elemenata
- Izlagao je soli urana sunčevim zrakama, umatao u taman papir i stavljao na fotografske ploče (uran upija energiju od Sunca te ju emitira u obliku rendgenskih zraka). Ova hipoteza je opovrgnuta kada zbog oblačnog vremena nije uspio izložiti uranove soli sunčevim zrakama, a nakon razvijanja fotografske ploče otkrio je jednako čiste slike. Dokaz da uran emitira zrake bez pomoći vanjskog izvora energije poput Sunca.
- Daljnjim ispitivanjem, Becquerel je pronašao da zračenje koje izazivaju uranijevi spojevi ioniziraju zrak (ionizirajuće zračenje), izazivaju fluorescenciju i prolaze kroz papir, pločice aluminija i bakra. Kroz zatvoreni spremnik one djeluju na fotografsku ploču. Utvrdio je da te zrake imaju slična svojstva kao rendgenske zrake, pa su se u početku nazivale **Becquerelove zrake**.

1899. otkrio je da te zrake skreću u magnetskom polju, pa se razlikuju od rendgenskih zraka, koje ne skreću u magnetskom polju.

- 1903. godine dobio je Nobelovu nagradu za fiziku



Prirodna radioaktivnost predstavlja pojavu spontanog zračenja elementa velike atomske mase, kojom prilikom se atomi razlažu.

(Definicija Marije Curie, 1900. god.)



Pjer Curie,
(1859 -1906)



Marija Skłodowska-Curie,
(1867 – 1934)

-otkrila je 1898. zračenje kod torijevih spojeva, te da se na zračenje ne može utjecati električnom strujom, zagrijavanjem, kemijskim reakcijama i sl.,
-da se radioaktivni kemijski elementi pretvaraju jedni u druge i da je vjerojatnost raspada neovisna o starosti pojedinog atoma.



- Otkrila je da uranijev mineral **uraninit** (uranijev smolinac) (sastoji se 75% od uranijevog oksida U_3O_8 , te: PbS, CaO, SiO_2 , FeO, MgO i Bi) emitira pet puta jače zrake nego čisti uran.
- mjerila zračenje pojedinih udjela, pomoću osjetljivog elektroskopa, uz primjenu piezoelektriciteta i ionizacije zraka. Utvrdila je da bizmut, dobiven iz uraninita, ima 60 puta jače zračenje od čistog uranija. Pronašla je da bizmutovo jako zračenje nastaje uslijed prisustva neznatne količine jednog nepoznatog kemijskog elementa, za koji se kasnije utvrdilo da je **radij**.
- Zato je predložila da se kemijski elementi koji izazivaju Becquerelove zrake nazovu **radioaktivni elementi**, a njihovo svojstvo **radioaktivnost**.
- Tek 1910. je uspjela izdvojiti radij.

Na početku XX stoljeća znalo se za pet elemenata koji imaju radioaktivna svojstva:

Uran (U), Aktinij (Ac), Polonij (Po), Torij (Th) i Radij (Ra)

Pod radioaktivnim svojstvima u to vrijeme smatralo se:

- Spontano i neprekidno zračenje,
- Sposobnost ionizacije plinova,
- Djelovanje na fotografsku ploču zbog velike prodornosti zraka,
- Zrake se ne mogu niti usporiti niti ubrzati vanjskim faktorima,
- Emisija toplotne energije.

Ernest Rutherford otkrio je 1899. da se zračenje radija sastoji od dvije komponente koje se različito apsorbiraju u tvarima. Onu vrstu zraka koje ne prolaze kroz aluminijsku pločicu debljine 0,02 mm nazvao je alfa-česticama, a onu vrstu koja je prolazila i kroz deblje slojeve nazvao je beta-česticama. Na osnovu skretanja u magnetskom polju, utvrđeno je da alfa-čestice imaju pozitivni električni naboj, a beta-čestice negativan električni naboj.

Paul Villard je 1900. otkrio još prodorniju komponentu, gama-zrake.

Ernest Rutherford i Frederick Soddy (1902.) na temelju analize gibanja zrakâ u magnetskom polju objasnili su prirodu radioaktivnosti.

Wolfgang Pauli postavio je 1930. hipotezu o postojanju neutrina, tadašnjim detektorima neuhvatljive čestice koja odnosi dio energije u beta-raspadu.

Enrico Fermi postavio je 1933. prvu strogu teoriju beta-raspada koja pretpostavlja da prijelaz neutrona u proton ili obratno uzrokuje slabo nuklearno međudjelovanje, a pritom dolazi do simultane emisije ili apsorpcije elektrona i neutrina.

Irène Joliot-Curie i Frederik Joliot-Curie prvi su 1934. g. umjetno izazvali radioaktivnost i proizveli umjetni radioizotop stabilnog elementa.

Bombardirali su atomske jezgre aluminijske s alfa-česticama: $4\text{He} + {}^{27}\text{Al} \rightarrow {}^{30}\text{P} + \text{n}$, te su primijetili da fosfor-30 zrači pozitrone

RADIOAKTIVNI RASPAD

Vrste radioaktivnog raspada:

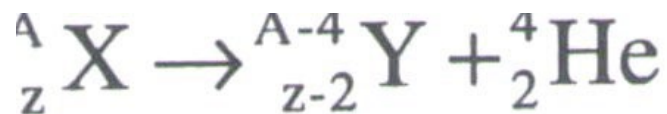
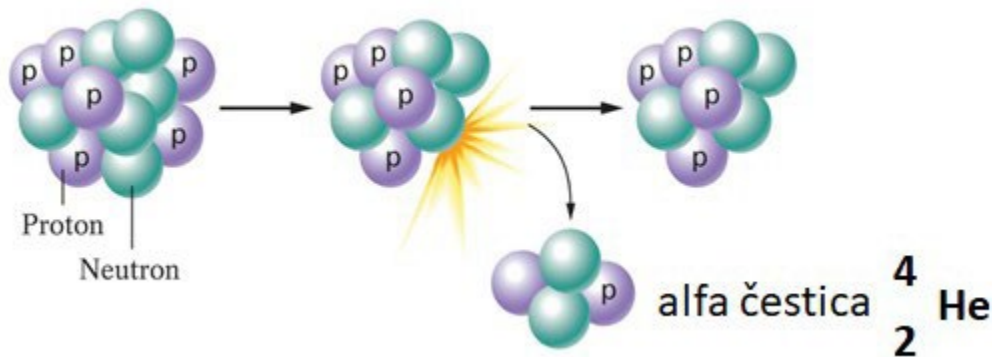
1. alfa raspad
2. beta minus raspad
3. beta plus raspad
4. elektronski zahvat
5. gama raspad
6. spontana fisija
7. unutarnja (interna) konverzija

IMENA, SIMBOLI I OSOBINE ČESTICA KOJE SUDJELUJU U NUKLEARNIM PROCESIMA

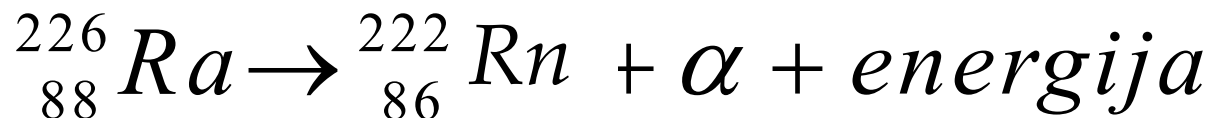
IME	SIMBOL	MASENI BROJ	MASA/u	NABOJ
proton	$p, {}^1_1p, {}^1_1H$	+1	1,007277	+1
neutron	$n, {}^1_0n$	1	1,008665	0
elektron	$e, e^-, {}^0_{-1}e, \beta^-$	0	0,000548	-1
pozitron	$e^+, {}^0_{+1}e, \beta^+$	0	0,000548	+1
foton	$h\nu, \gamma$	0	0	0
neutrino	ν	0	0	0
antineutrino	$\bar{\nu}$	0	0	0

ALFA RASPAD

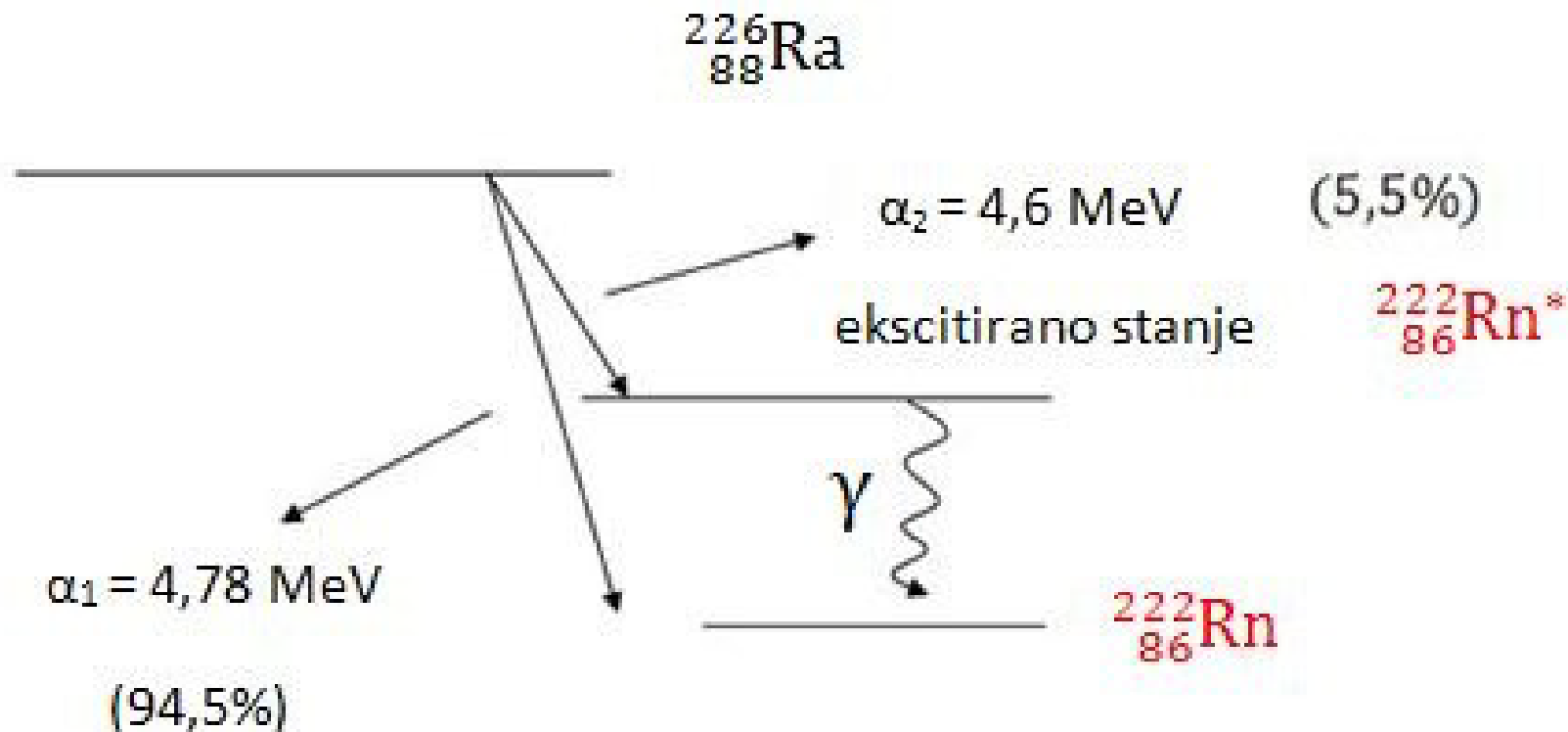
Alfa raspadom postiže se stabilnost težih elemenata, kao što su npr. uran i torij. Prilikom alfa raspada emitiraju se alfa čestice. Alfa čestice su čvrsto vezane jedinice koje se sastoje od 2 neutrona i 2 protona (jezgra helija). Redni atomski broj novonastalog atoma manji je za 2, a masa je manja za 4.



X - radioaktivna jezgra koja se raspada (roditelj)
Y - novonastala radioaktivna jezgra (kćer)



- *čisti alfa emiteri* su oni kod kojih je novonastala jezgra u osnovnom stanju, dok su
- *alfa-gama emiteri* oni kod kojih novonastala jezgra nije u osnovnom već u pobuđenom (ekscitiranom) stanju, pa se prijelaz u osnovno stanje dešava uz emisiju gama zračenja.

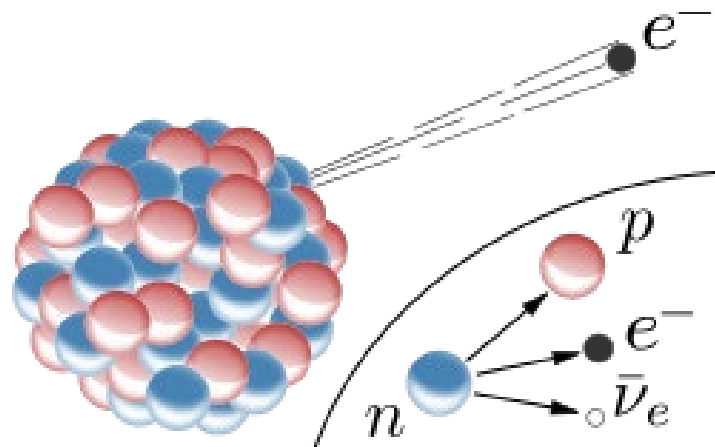
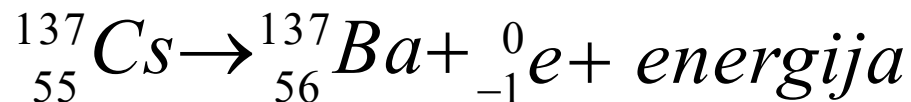
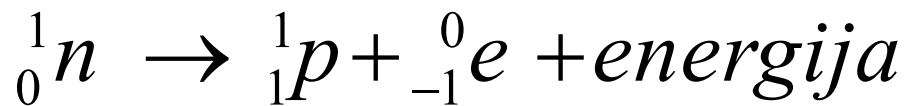


BETA MINUS RASPAD

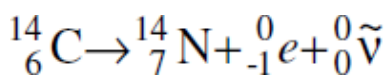
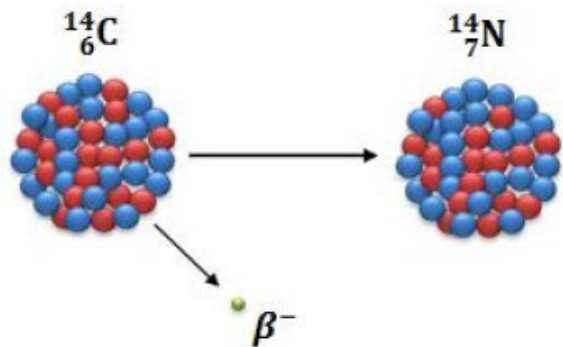
Beta minus raspadu podložne su nestabilne jezgre koje u **suvišku** imaju neutrone.

U beta minus raspadu jedan neutron iz jezgre transformira se u proton koji ostaje u jezgri, a iz jezgre izlijeće čestica po osobinama identična elektronu, koju zovemo beta minus čestica (${}^{-}\beta$) i antineutrino (${}^0_0\bar{\nu}$).

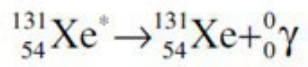
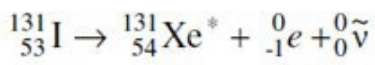
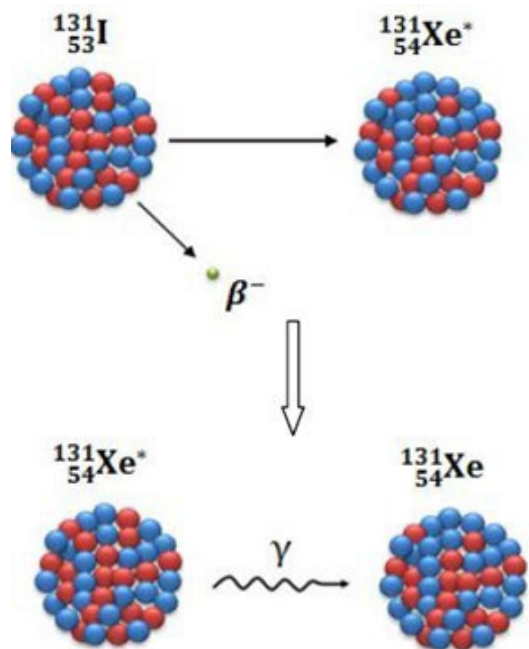
Pri tome se: N - smanji za 1, Z - poveća za 1, a A ostaje isti. Pri beta minus raspadu novonastala jezgra pomjera se za jedno mjesto u desno u periodnom sustavu elemenata, dakle dogodi se **transmutacija** atomske jezgre.



beta minus raspad

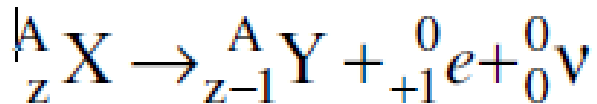


beta minus - gama raspad

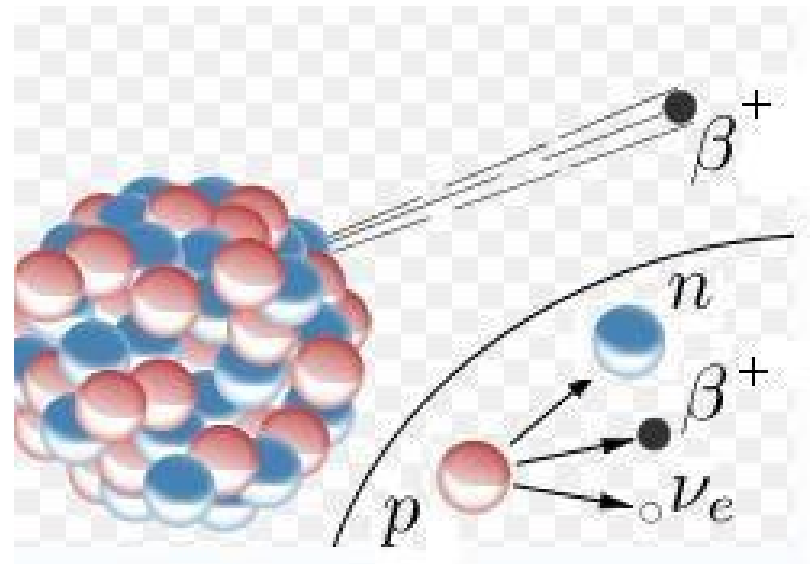
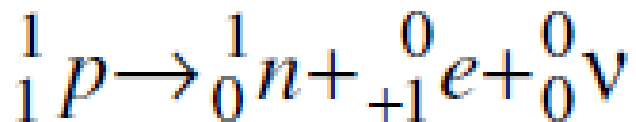


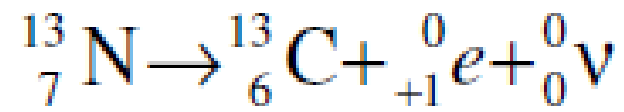
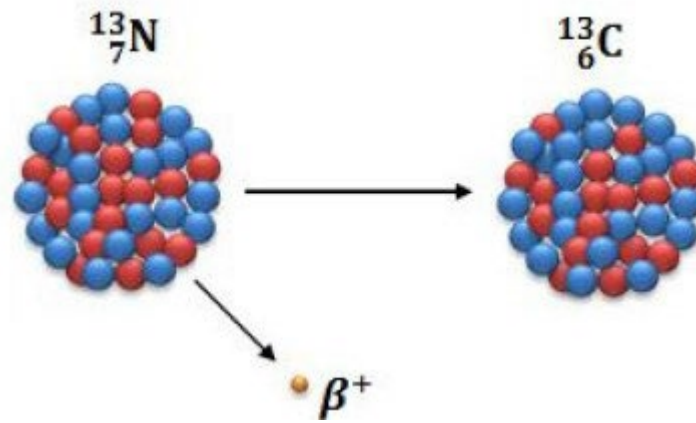
BETA PLUS RASPAD

- Beta plus raspadu podložne su nestabilne jezgre s **manjkom neutrona**. Kada jezgra doživi beta plus raspad ona ostaje s istim brojem nukleona, a proton iz jezgre transformira se u neutron, što prati emisija beta plus čestice (pozitrona) i neutrina.
- N se poveća za jedan, Z se smanji za jedan, A ostaje isti, tako da se novonastali element u periodnom sustavu pomjera za jedno mjesto u lijevo.



$${}^0_{+1}e = \beta^+$$

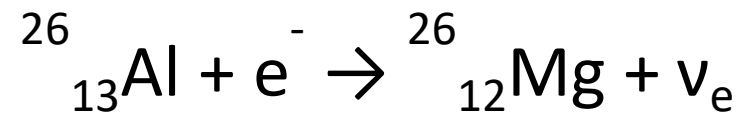
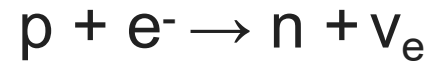
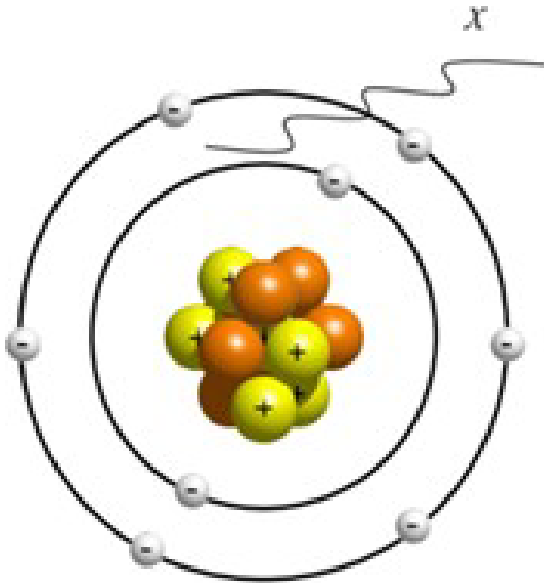




ELEKTRONSKI ZAHVAT

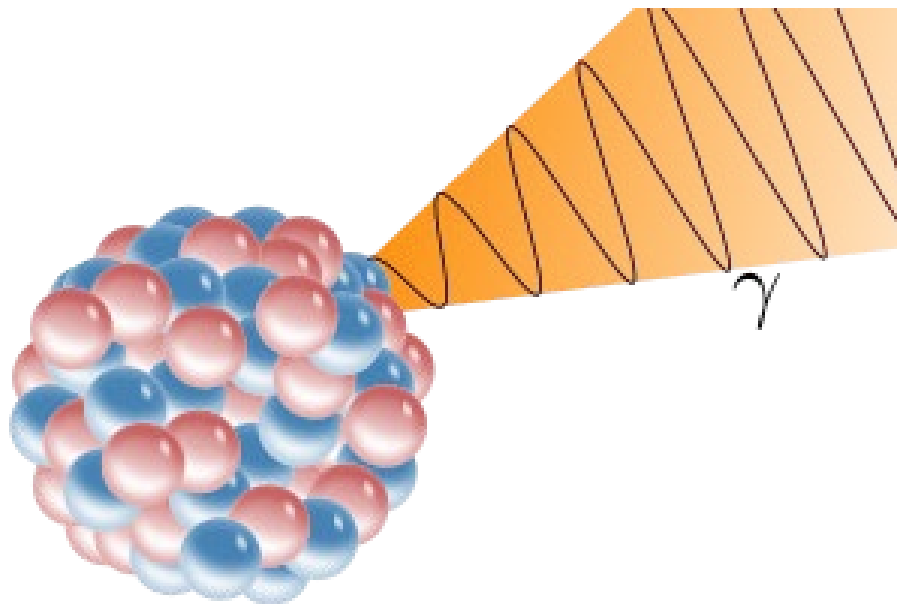
Elektronski zahvat nastaje ukoliko elektroni unutarnjih ljusaka reagiraju s jezgrom, odnosno protonima iz jezgre, tako da stvore neutron ($e + p = n$). Time je atom izgubio jedan proton i jedan elektron, a dobio je jedan neutron. Sumarno; masa ostaje gotovo ista, redni broj se smanji za 1 ($p + e$). Nije došlo do zračenja.

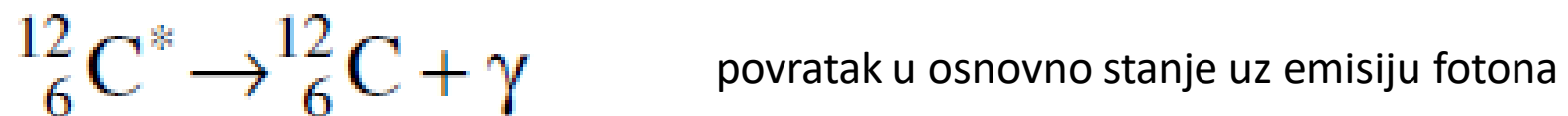
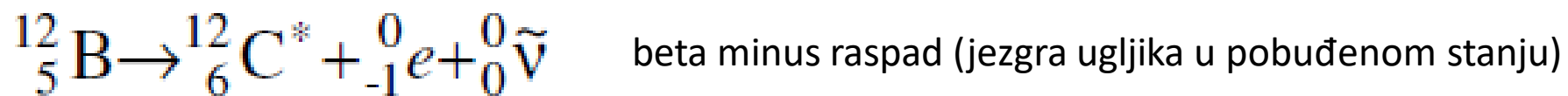
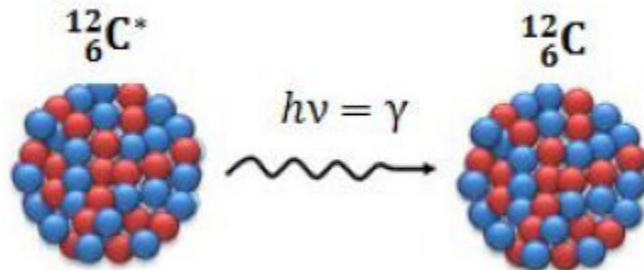
Kako je jedno mjesto u orbiti elektrona ispražnjeno, dolazi do re-aranžiranja elektrona. Tom prilikom elektroni iz udaljenih ljusaka popune to upražnjeno mjesto elektrona i dolazi do emisije x zraka.



GAMA RASPAD (izomerni prijelaz)

- Gama zračenje nastaje u slučaju kada jezgra koja je doživjela raspad (alfa ili beta) ostane u pobuđenom stanju.
- To nije raspad u pravom smislu riječi. Pri povratku u stanje niže energije dolazi do emisije gama zračenja.
- Gama zračenje je fotonske (elektromagnetske) prirode i pri njegovoj emisiji ne dolazi do promjene ni atomskog ni masenog broja. Tijekom tog procesa emitira se čista energija, pa jezgra dolazi u stabilnije stanje.





UNUTARNJA KONVERZIJA

proces pri kojem jezgra izravno predaje višak energije elektronu u unutarnjim slojevima atomskog omotača. Taj elektron napušta atom, a njegovo izbacivanje prati emisija rendgenskih zraka. Redni i maseni brojevi atoma ne mijenjaju se.

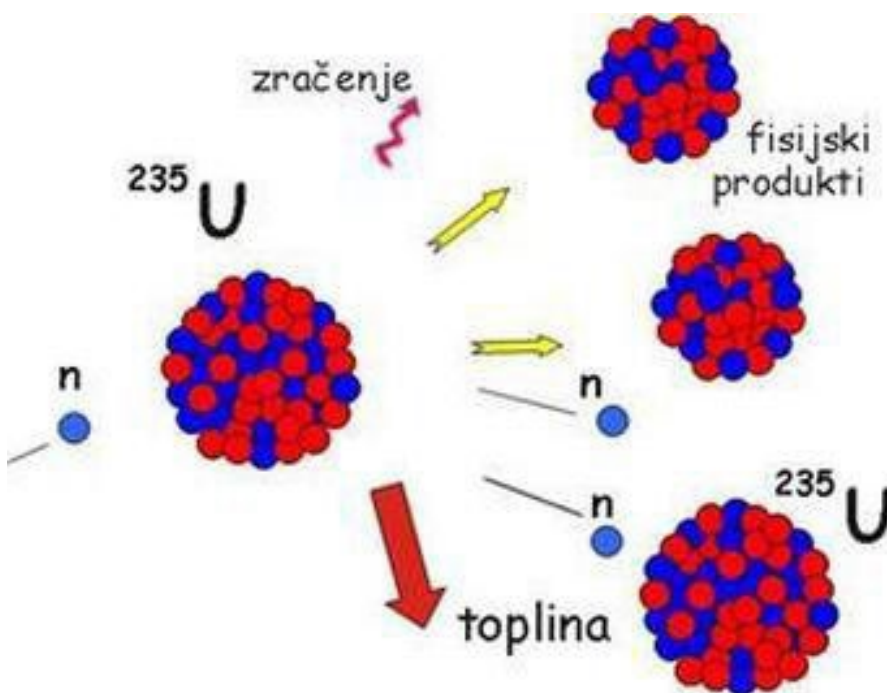
SPONTANA FISIJA

Vrlo teške jezgre imaju svojstvo da se same dijele. Ova nestabilnost je posljedica velikog broja protona u jezgri. Protoni se zbog istoimenog električnog naboja odbijaju i uzrokuju cijepanje jezgri. Zbog spontane fisije, teški transuranski elementi s atomskim brojem višim od 92 (atomski broj urana) su veoma nestabilni; s kratkim vremenom poluživota.

U prirodi se pojavljuju u ekstremno malim koncentracijama. Većina ih je umjetno sintetizirana. Najvažniji fisioni materijali su U^{238} , U^{235} i Pu^{239} (izotopi urana i plutonija).

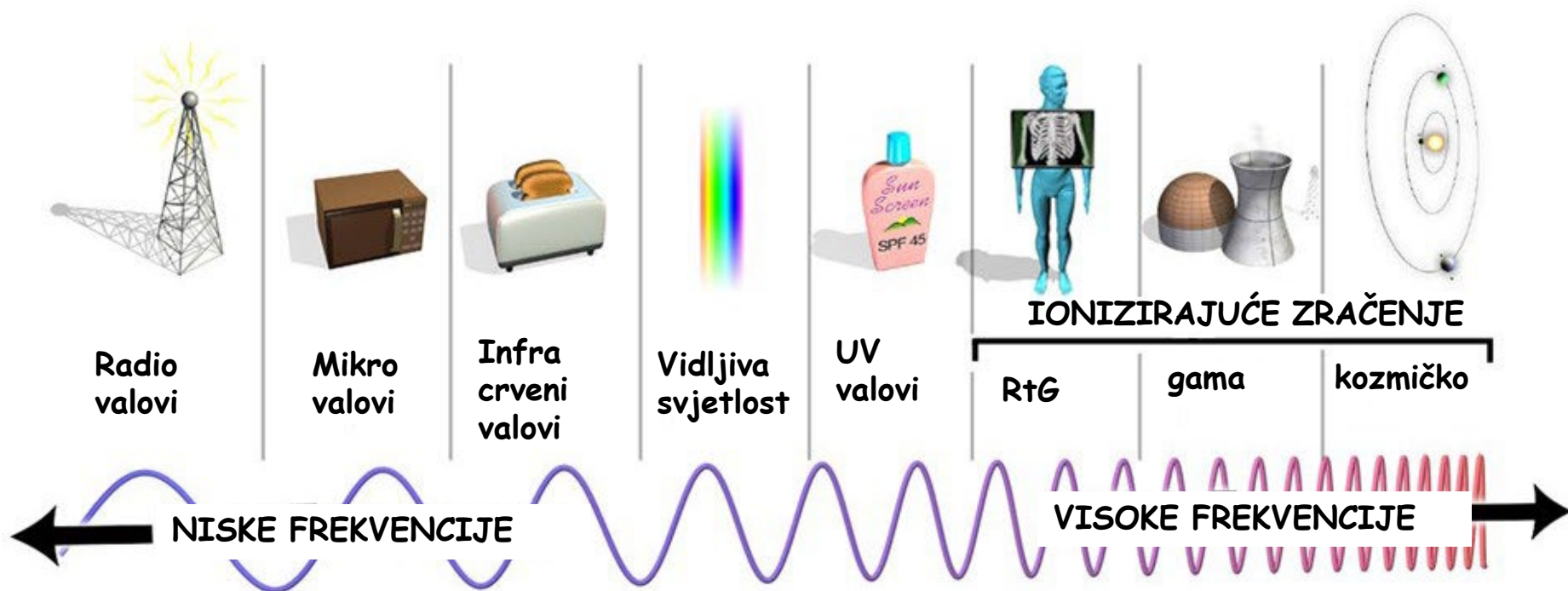
Atom urana 235 hvata neutron
cijepanje jezgre urana 235 na dva podjednaka
dijela – fragmenta (**barij i kripton**).
Oslobađanje 3-4 neutrona i energije (~200 MeV).
Oslobođeni neutroni nastavljaju reakciju s drugim
atomima urana 235 – **lančana fisijska reakcija**.

Masa fragmenata, kada se zbroji s masom
oslobođenih neutrona i masenim ekvivalentom
oslobođene energije ($m=E/c^2$) daju masu $235U$.



Osnovne skupine ionizirajućega zračenja:

- **elektromagnetsko** ili **fotonsko zračenje**,
- **čestično** ili **korpuskularno zračenje**.



IZVORI ZRAČENJA KOJIMA JE IZLOŽEN ČOVJEK

PRIRODNI IZVORI

- ✓ prirodne radioaktivne tvari koje se nalaze u: zemlji (građevinskom materijalu, stijenama), u zraku (radon), u vodi i u samom tijelu čovjeka
- ✓ zračenje koje neprestano dolazi iz svemira (zračenje sa sunca i udaljenih zvijezda)
- ✓ Količine zračenja kojima je čovjek izložen iz prirodnih izvora ovise o: mjestu življenja (sastavu tla, vode, zraka), nadmorskoj visini, zemljopisnom položaju i td.

UMJETNI IZVORI ZRAČENJA

- ✓ svi oni izvori koje je u bilo koje svrhe proizveo čovjek
- ✓ umjetni izvori zračenja dijele se na medicinske i nemedicinske
- ✓ medicinski izvori zračenja su: röntgenski uređaji, radionuklidi u nuklearnoj medicini (dijagnostička i terapijska primjena)
- ✓ nemedicinski izvori: nuklearne elektrane, akceleratori, talog pokusnih nuklearnih eksplozija, katodne cijevi (u gospodarstvu, istraživačkim laboratorijima i kućanstvu)

HVALA NA PAŽNJI!

