

RADIOKÉMIA

VILÁGUNK ATOMOS FELÉPÍTÉSŰ !

ATOM pozitív atommag, $r \sim 10^{-15} \text{m}$, protonok és neutronok, negatív elektronfelhő atomsugár $\sim 10^{-10} \text{m}$, a tömeg az atom kiterjedésének 10^{-5} -öd részében összpontosul

NUKLEONOK PROTONOK SZÁMA(Z)+NEUTRONOK SZÁMA(N)=TÖMEGSZÁM(A)

$$r_{\text{atommag}} = r_{\text{hidrogénmag}} \cdot \sqrt[3]{A} = 1,3 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A}$$

KÉMIAI REAKCIÓK vegyérték elektronok reakciói \rightarrow eV nagyságú energia

MAGREAKCIÓK a magok közötti reakciók \rightarrow MeV nagyságú energia

Elektron volt (eV) *Az az energiamegnyiség, melyet az elektron akkor nyer, amikor 1 volt potenciálkülönbség hatására gyorsul:*

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

A kötési energiát általában megaelektronvolt (MeV) egységben fejezzük ki:

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Különösen hasznos egység a tömeghiány kifejezése atomi tömegegységben (atomic mass unit, AMU):

$$1 \text{ AMU} = 931.5 \times 10^6 \text{ eV} = 931.5 \text{ MeV}$$

A protonok és neutronok egyesülésekor létrejött atommag tömege kisebb, mint az atommaghoz szükséges protonok és neutronok számának összege! A tömegkülönbséggel arányos energia a kötési energia.

Pl. Mg 12protonból+12 neutronból képződik, de a mag tömege valójában csak 23,985045!

Einstein tömeg-energia ekvivalencia összefüggése: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

1 g anyag $9 \cdot 10^{13}$ J energiával ekvivalens. 1 atomi tömegegység (atomic mass unit, AMU)

1 AMU = $1,66 \cdot 10^{-24}$ g \rightarrow $1,55 \cdot 10^{-10}$ J = 931 MeV

Atommagok kötési energiája függ a tömegszámtól:

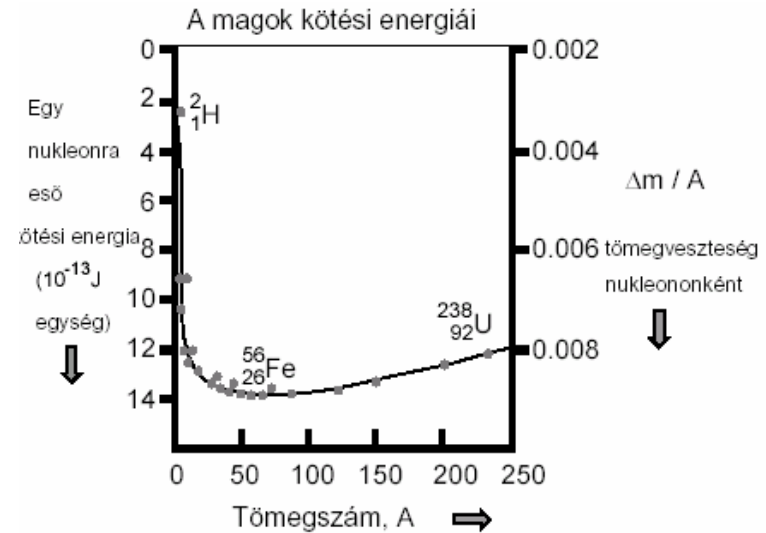
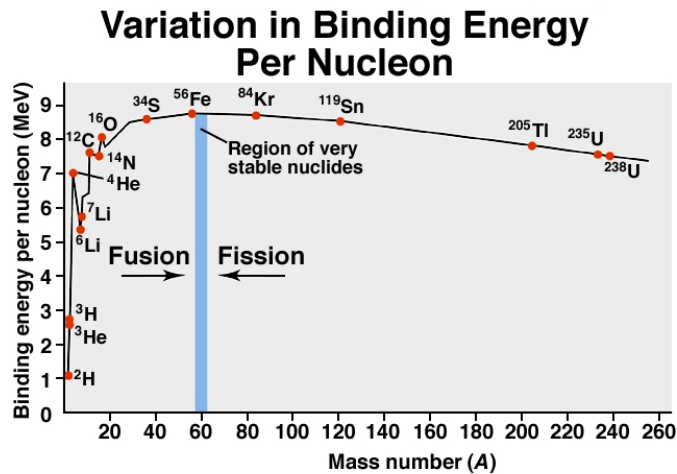
$$E_{\text{kötési}} = \Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (Z \cdot m_{\text{proton}} + N \cdot m_{\text{neutron}} - m_{\text{mag}}) \cdot c^2$$

Az 1 nukleonra eső (fajlagos) kötési energia:

$$E_{\text{kötési}} / A = \Delta E / A = \Delta m \cdot c^2 / A = (Z \cdot m_{\text{proton}} + N \cdot m_{\text{neutron}} - m_{\text{mag}}) \cdot c^2 / A$$

Értéke az ^{56}Fe magnál maximális, előtte és utána csökken!

Az egyes elemek maganyagának sűrűsége kb. állandó.



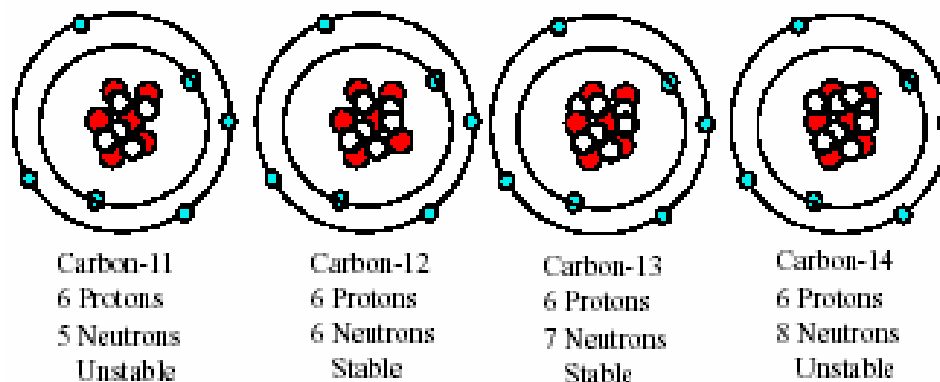
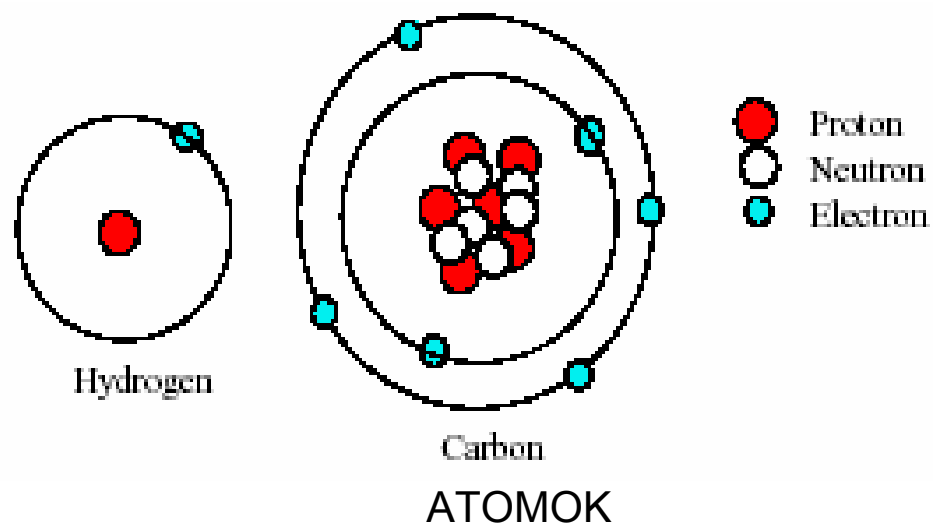
Az 1 nukleonra eső kötési energia a tömegszám függvényében

IZOTÓP azonos protonszámú (rendszámú) de különböző neutronszámú (tömegszámú) atommagok

IZOBÁR különböző protonszámú és neutronszámú, de azonos tömegszámú atommagok

IZOTÓN különböző protonszámú, de azonos neutronszámú atommagok

A legstabilabbak a földön a páros protonszámmal és páros neutronszámmal rendelkező (páros-páros) atommagok, ezek alkotják a föld kérgének 80%-át ($^{16}_8\text{O}$, $^{24}_{12}\text{Mg}$, $^{28}_{14}\text{Si}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$, $^{56}_{26}\text{Fe}$, $^{48}_{22}\text{Ti}$)



A SZÉN IZOTÓPJAI

A RADIOAKTIVITÁS FÖLFEDEZÉSE

Röntgen	1895	X-sugárzás felfedezése.
Becquerel	1896	Urániumsók foszforenciájának vizsgálata

Úgy tapasztalta, hogy ha a sókat napsugárzás érte röntgen sugárzás keletkezett.

Ez lett volna az első eset, hogy a fluoreszcencia során nagyobb energiájú sugárzás lépett volna ki.

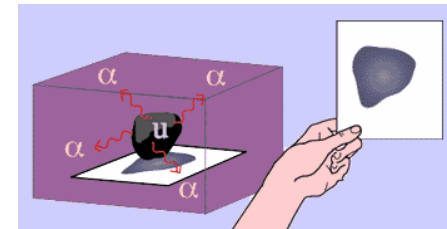
A rossz időjárás miatt egy elkezdett kísérletet nem tudott befejezni és a mintát sötét helyre tette el.

A részlegesen besugárzott lemezt és az urán sókat egy fiókba tette, hogy majd később a kísérletet folytathassa.

A RADIOAKTIVITÁS FÖLFEDEZÉSE

Amikor később eszébe jutott a lemez, elővette, hogy kiértékelje.

A besugárzott lemezen sokkal intenzívebb képet talált, mint a hosszú ideig napsugárzással kezelt lemezeken.



Tanulmányozta ezt a jelenséget különböző körülmények között és megállapította a következőket:

- A filmen kialakuló képhez nem volt szükség napsugárzásra.
- Az uránium só képes egy elektroszkóp kisütésére, még akkor is, ha nem került vele közvetlen kapcsolatba.

A CURIE HÁZASPÁR

A Curie házaspár – 1898

Marie Curie használta először a „radioaktivitás” kifejezést.

Megfigyelte, hogy a tórium az uránhoz hasonló sugárzást tud kibocsátani és egyes uránércek „erősebben” radioaktívak voltak mint a tórium.

Rávette az osztrák kormányt, hogy kutatási célra egy tonna földolgozott uránszurokércet (75% U_3O_8) adományozzon nekik

A házaspár négy év alatt egy elektroszkóp segítségével az uránszurokércből különválasztotta a komponenseket.

A CURIE HÁZASPÁR

A komponenseket 2 frakcióba osztották:

- az 1-es frakció főleg báriumot
- a 2-es frakció főleg bizmutot tartalmazott.

Mindegyik frakció egy „új” radioaktív elemet tartalmazott.

- Az 1-es frakció 0.1 g rádiumot tartalmazott. Azért nevezték el rádiumnak, mert ez a frakció látható fényt bocsátott ki.
- A 2-es frakció 0,00005 g polóniumot tartalmazott, melyet Marie Curie eredeti hazájáról, Lengyelországról neveztek el.

A polóniumot csak 1902-ben tudta Marchwald tiszta formában előállítani.

Egy harmadik elemet Debinerne, a házaspár munkatársa fedezett fel. Fölfedezte az aktíniumot,, mely $1/10^{10}$ arányban fordul elő az urán-szurokércben

A Curie házaspár által elválasztott rádium ma is megvan.

- A rádium eléggé népszerű lett. Órák világító számlapjához és rulett-golyók festéséhez, valamint rádium készítményekhez használták.

A SUGÁRZÁSOK TERMÉSZETE

A Curie házaspár, J.J. Thomson és mások, tudták, hogy a radioaktivitás képes:

- Kisütni egy elektroszkópot a környező levegő ionizálásával, mérhető áram keletkezése mellett.
- Előidézni egy fotólemez megfeketedését.

RUTHERFORD

1898

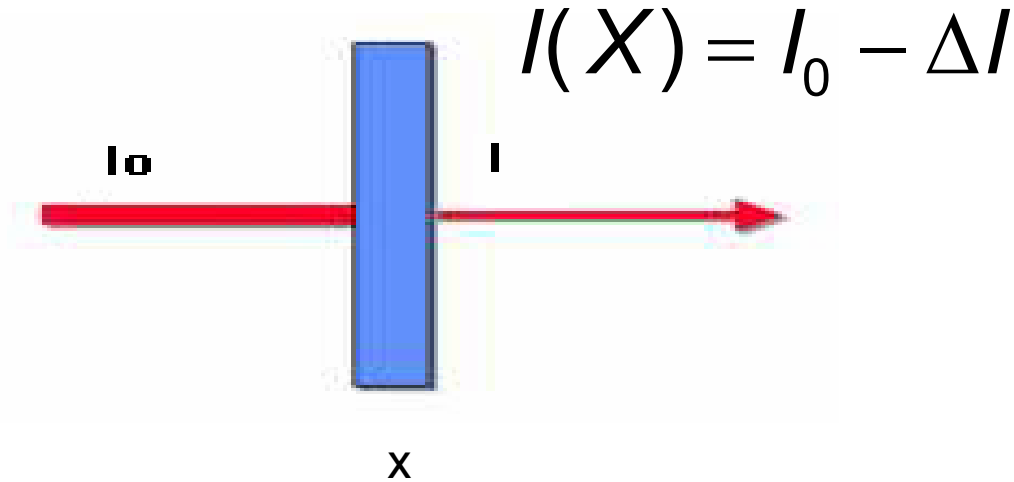
Tanulmányozta a radioaktív elemek által kibocsátott sugárzásokat. Fémfóliákat alkalmazott a sugárzások elnyelésére és két sugárkomponenst különböztetett meg:

- Az egyik komponenst, melyet a vékony alumínium lemez elnyelt, **alfa-sugárzásnak**,
- a másikat, melynek elnyeléséhez 100-szor vastagabb lemez kellett, **béta-sugárzásnak** nevezte el.

Megállapította, hogy az ionizációs hatás csökken az adszorbens lemez vastagságának növekedésével.

RUTHERFORD

1898



$$\Delta I = -\mu' \cdot \Delta X$$

$$\frac{dI}{dx} = -\mu' I$$

$$I = I_0 e^{-\mu' x}$$

Ahol

x – adszorbens lemez vastagsága (cm)

μ' – adszorpciós együttható (1/cm)

μ' értéke a rendszámmal növekedett.

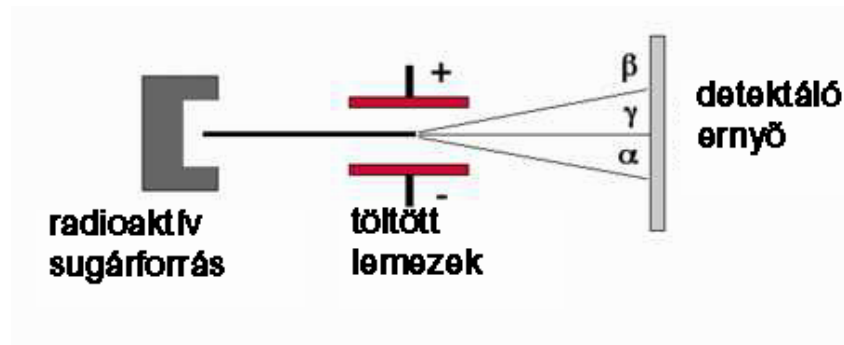
$$\mu = \frac{\mu'}{\rho} \quad d = x \cdot \rho$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

$$X_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\mu'}$$

KÉSŐBBI VIZSGÁLATOK

Az elektromágneses és elektrosztatikus elhajlási kísérletek eredményei a sugárzások fajtáinak jobb megértését eredményezték.



- A béta-sugárzás közel fénysebességgel haladó elektronsugárzás
- Az alfa-sugárzásban a béta részecskénél nagyobb tömegű részecskék vannak jelen.
 - Úgy találta, hogy a He^{2+} magok sebessége 0,1C.
 - A hélium magok az uránból és a tóriumból távoztak.
- Egy harmadik, nagyobb áthatólképességű sugárzást is fölfedeztek (γ), mely nem térült el az elektromos vagy mágneses tér hatására.

A RADIOAKTÍV BOMLÁS

Rutherford és Soddy transzformációs hipotézise 1900

- Észlelték, hogy tórium és rádium sókkal végzett méréseknél az elektroszkóp leolvasás hibás volt.
- A hatást tanulmányozták, miközben a számlálócsőbe egy inert gáz diffundált be.

Megfigyelték, hogy:

- Egy radioaktív anyag aktivitása nem tart örökké, hanem időben csökken, az adott anyagra jellemző mértékben.
- A radioaktív atomok kémiai tulajdonságai megváltoztak a folyamatok során.

E. Von Schweidler 1905

A radioaktív változásokat a bomlások elméletével magyarázta.

Feltételezések:

Egy ismert dt időintervallumban előforduló bomlás p valószínűsége független a korábban történt változásoktól. p csak dt függvénye!

A RADIOAKTÍV BOMLÁS

Kis időintervallumok esetén egy radioaktív atom bomlási valószínűsége:

$$p = \lambda \Delta t$$

Ahol:

λ – az adott radioaktív atom bomlására jellemző arányossági tényező.

Annak valószínűsége, hogy az adott időszakban egy radioaktív atom nem bomlik el:

$$1 - p = 1 - \lambda \Delta t$$

Annak a valószínűsége, hogy egy atom bomlás nélkül „túlél” n darab kis időintervallumot:

$$1 - p = (1 - \lambda \Delta t)^n$$

Mivel a teljes idő $t = n \cdot \Delta t$, annak a valószínűsége, hogy egy atom t idő eltelte után is változatlan:

$$1 - p = e^{-\lambda t}$$

Nagy kezdeti magszám esetén t idő eltelte után az el nem bomlott magok száma:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

A RADIOAKTÍV BOMLÁS

A radioaktív bomlási folyamatot elsőrendű reakciósebességű folyamatként is felfoghatjuk:

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

Integrálás után:

$$\ln(N_t) = -\lambda t + a$$

Ha $t=0$, $a=\ln(N_0)$, így:

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

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

A RADIOAKTÍV BOMLÁS

A λ bomlási állandó értéke függ a radioaktív mag minőségétől.

- Ez a radioaktív izotópok fontos jellemzője.
- Általában ennek alternatív formáját a felezési időt ($t_{1/2}$) használjuk. Ez azaz időtartam, melynek során a radioaktív atommagok 50%-a elbomlik.

Ha $t=t_{1/2}$, akkor $N_t=N_0/2$ így:

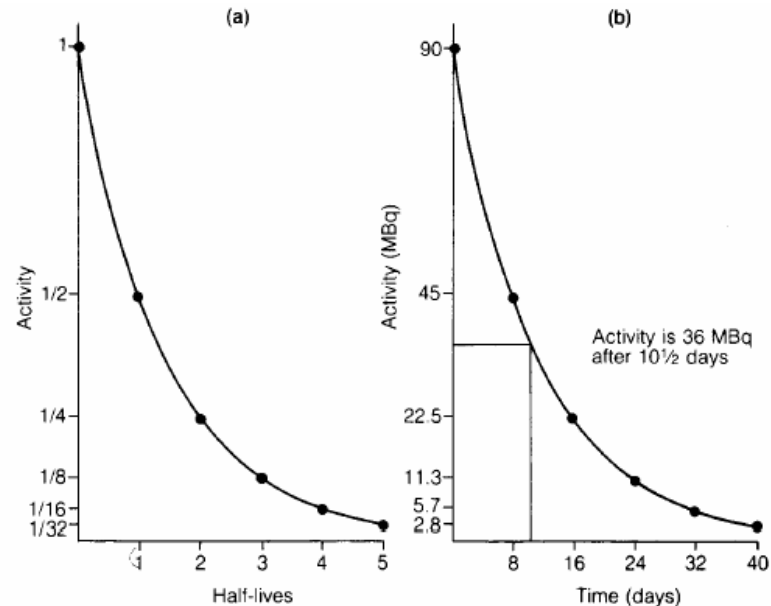
$$\ln(1/2)=-\lambda t_{1/2}$$

vagy

$$t_{1/2}=\ln(2)/\lambda=0,693/\lambda t$$

így

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln(2)}{t_{1/2}} t} = N_0 e^{-\frac{0,693}{t_{1/2}} t}$$



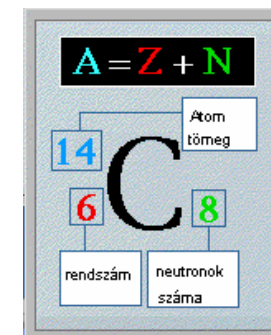
A RADIOAKTÍV ELEMÉK

A 83-nál nagyobb rendszámú összes elem radioaktív. A legtöbb elem 140-es tömegszám fölött ugyancsak radioaktív. A vegyészek stabilnak tekintenek egy nuklidot, ha $t_{1/2} \geq 10^{12}$ év. 200 fölötti tömegszám esetén a magok labilisak és spontán hasadással (SF) bomlanak.

A radioaktív magok felezési ideje 10^{-21} másodperc és 10^{12} év között bármekkora lehet. Mindegyik elemnek ismert radioaktív izotópja, akár természetes, akár mesterséges.

A radioaktív izotópok jelölésére két standard jelölésmódot alkalmazunk:

^{14}C vagy C-14. Mindkettőt szokás használni.



AZ AKTIVITÁS

A gyakorlatban nem tudjuk közvetlenül kifejezni N vagy dN/dt értékét. Ehelyett az **aktív atommagok időegységre eső megváltozását vagy bomlási sebességet, vagy aktivitást** használjuk.

Aktivitás = bomlások száma/eltelt idő

Vagy, ha egy bomláskor egy részecske keletkezik és a detektálási hatásfok 100%

Aktivitás = beütésszám/eltelt idő

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0,692}{t_{1/2}} \cdot t}$$

Ha a detektálás hatásfoka <100% és egy bomlásnál nem egy részecske emittálódik, a beütésszám csak arányosan változik az aktivitással. Mivel az aktivitás arányos az aktív magok számával, N-el:

$$I = I_0 e^{-\lambda t} = I_0 e^{-\frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot t}$$

Ez az összefüggés csak egy egyedül jelenlévő radionuklid bomlását írja le. Ha több, különböző nuklid szimultán bomlásáról van szó az összefüggés bonyolultabb.

Az aktivitás mértékegységei:

Régi 1 curie (1 Ci) $3,7 \cdot 10^{10}$ bomlás/másodperc, dps (1 g ^{226}Ra aktivitása). Kisebb egységei a millicurie (mCi), mikrocurie (μCi)

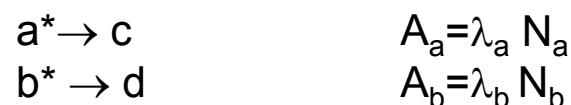
Új (SI) egysége az 1 Becquerel (1 Bq), 1 bomlás/másodperc, dps. Egyéb nagyobb egységei a kilobecquerel (kBq), megabecquerel (MBq), gigabecquerel (GBq) és a terabecquerel (TBq).

ÖSSZETETT BOMLÁS

Gyakori azaz eset, amikor a radioaktív sugárforrásban nem egy, hanem kettő, vagy több, szimultán bomló radioaktív izotóp sugároz. Ebben az esetben két alapesetet különböztetünk meg:

1. Kettő, vagy több, egymástól függetlenül bomló radioaktív izotóp van jelen, melyek nincsenek genetikai, anya-leányelem kapcsolatban.
2. Kettő, vagy több egymással genetikai kapcsolatban lévő radioaktív izotóp van jelen.

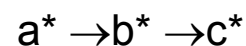
1. eset



c és d stabil magok.

$$A_{\text{sum}} = A_a + A_b = \sum A_i$$

2. eset



c az anya-leányelem rendszer stabil terméke.

$$A_b = \frac{dN_b}{dt} = -\lambda_b N_b + \lambda_a N_a$$

$$N_a = N_{a,0} e^{-\lambda_a t}$$

$$A_b = \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} A_{a,0} (e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t})$$

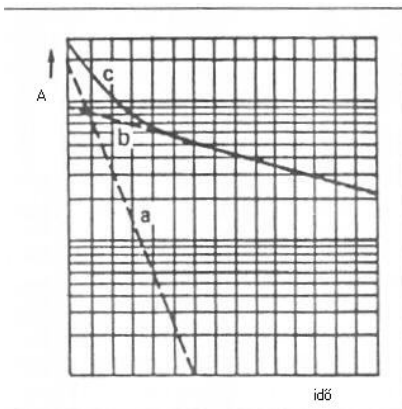
$$A_b = \frac{t_{a,1/2} A_{a,0}}{t_{a,1/2} - t_{b,1/2}} \left(e^{-\ln 2 \frac{t}{t_{a,1/2}}} - e^{-\ln 2 \frac{t}{t_{b,1/2}}} \right)$$

egyensúlyban

$$A_b = \frac{t_{a,1/2} A_a}{t_{a,1/2} - t_{b,1/2}} \left(1 - e^{-\ln 2 \left(\frac{1}{t_{b,1/2}} - \frac{1}{t_{a,1/2}} \right) t} \right)$$

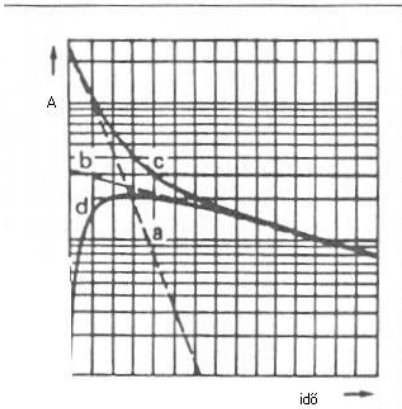
Az utolsó összefüggés exponenciális része adott idő után elhanyagolható, így:

$$\frac{A_a}{A_b} = 1 - \frac{t_{b,1/2}}{t_{a,1/2}}$$

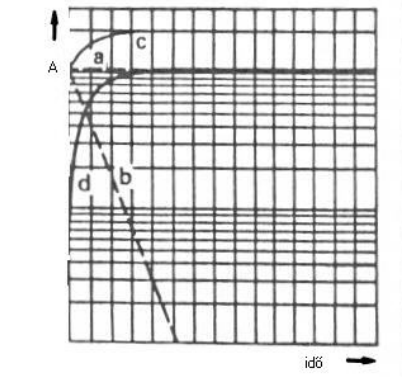


ÖSSZETETT BOMLÁSOK

- a – a* bomlási görbéje
- b - b* bomlási görbéje
- c – összaktivitási görbe

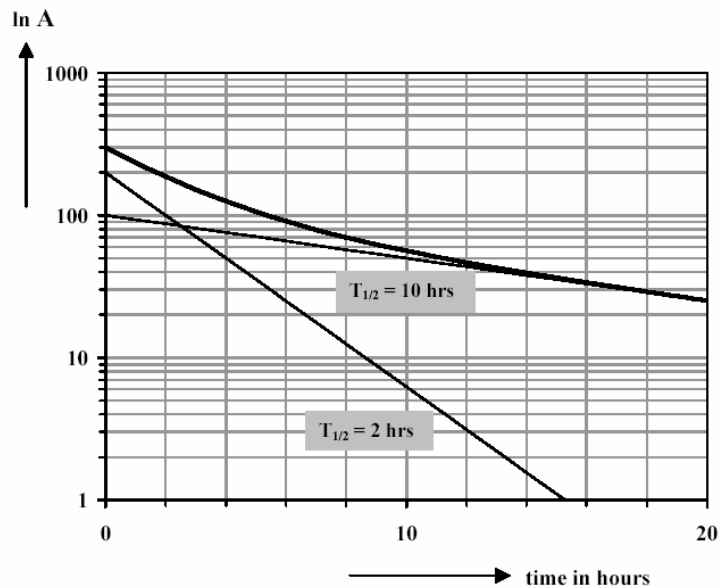


- $t_{a,1/2} < t_{b,1/2}$
- a – a* bomlási görbéje
- b - b* bomlási görbéje
- c – összaktivitási görbe
- d – A_b b* aktivitása, ha kezdetben csak a* van jelen

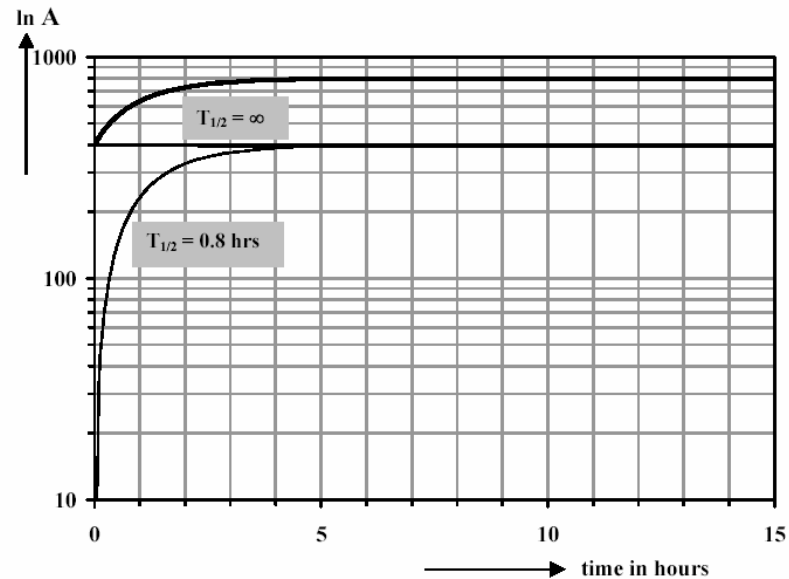


- $t_{a,1/2} \gg t_{b,1/2}$
- a – a* bomlási görbéje
- b - b* bomlási görbéje
- c – összaktivitási görbe
- d – A_b b* aktivitása, ha kezdetben csak a* van jelen
- $A_a = A_b$

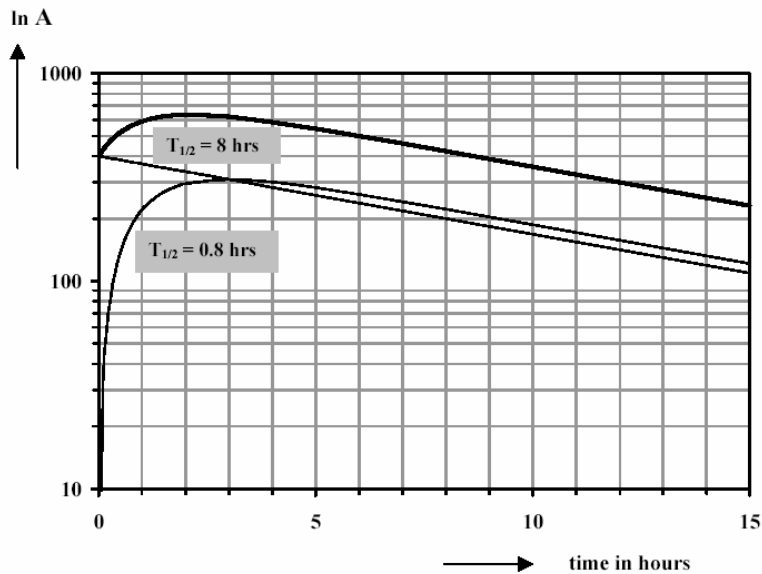
$$A_b = A_a (1 - e^{-\ln 2 \frac{t}{t_{b,1/2}}})$$



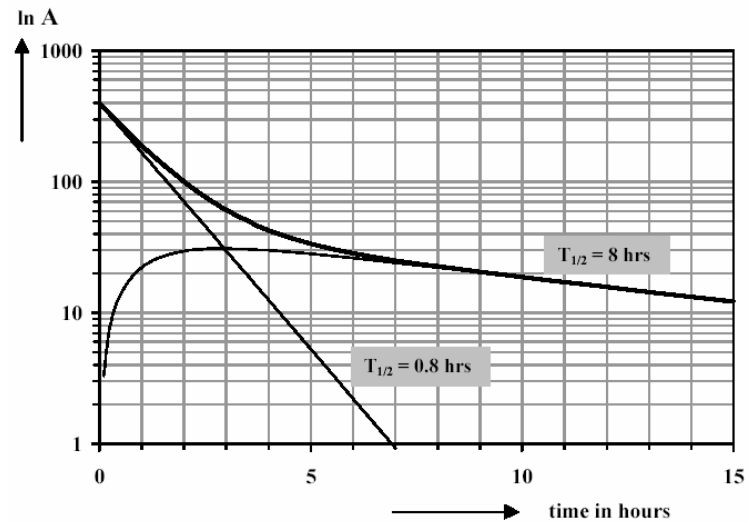
Egymástól független bomlás



Szekuláris (örökös) egyensúly ($T_{1/2\text{anya}} \gg T_{1/2\text{leány}}$)



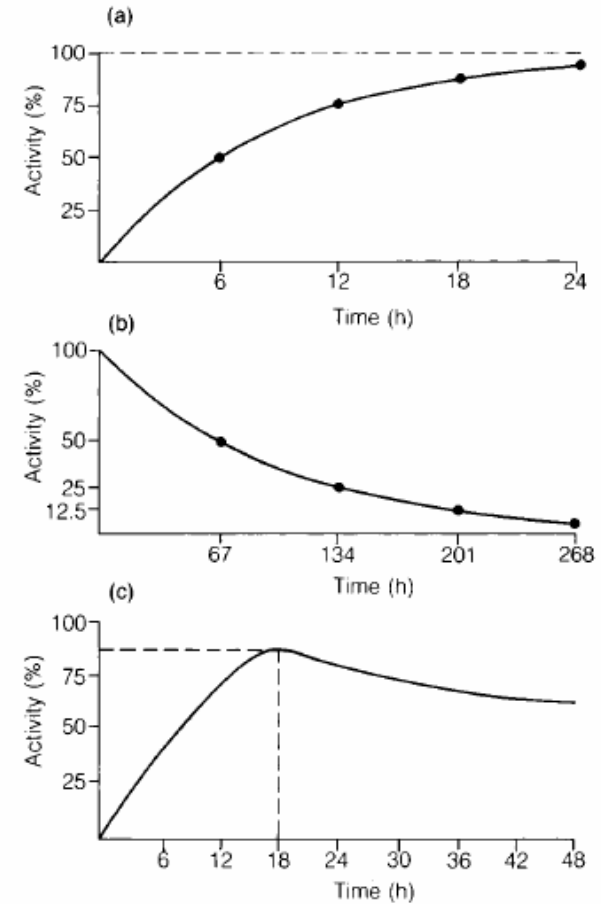
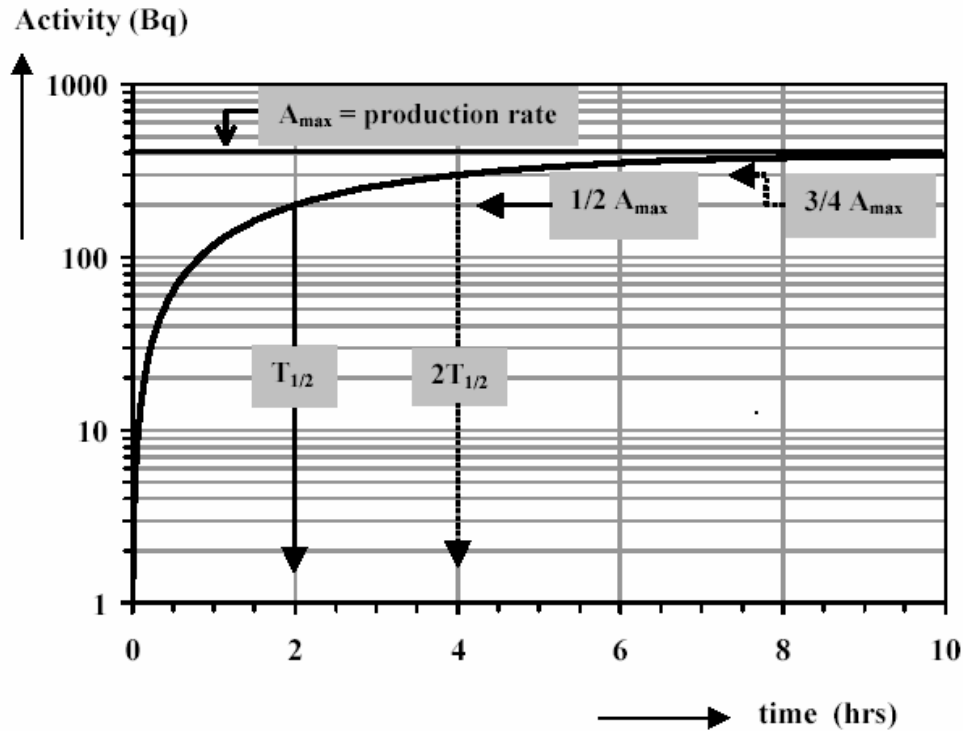
Tranziens (mozgó) egyensúly
($T_{1/2\text{anya}} > T_{1/2\text{leány}}$)



Radiokémia-I Nincs egyensúly ($T_{1/2\text{anya}} < T_{1/2\text{leány}}$)

$$\frac{dN^*}{dt} = N \cdot \sigma \cdot \Phi - (\lambda \cdot N^*)$$

$$\lambda \cdot N^* = \text{aktivitás} = N \cdot \Phi \cdot \sigma (1 - e^{-\lambda \cdot t_{akt}})$$



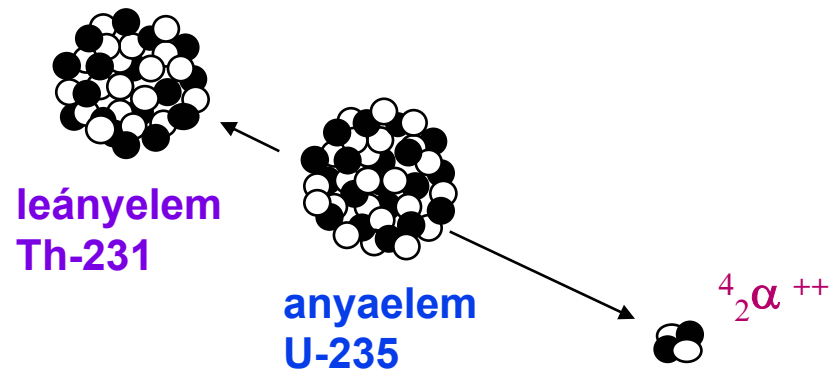
Egy radioaktív izotóp keletkezése

A RADIOAKTÍV BOMLÁS OKAI

- A magban túl sok nukleon (proton és neutron) van összezsúfolva, ezen belül túl sok a neutron (α -bomlás).
- A magban túl sok a proton (β^+ -bomlás vagy elektronbefogás).
- A könnyebb és közepes nagyságú magokban túl sok a neutron (β^- -bomlás)
- A magnak túl nagy az energiája, gerjesztett állapotban van (γ kvantumok kibocsátása). Gyakran egyéb (pl. β -bomlás) kísérő jelensége.

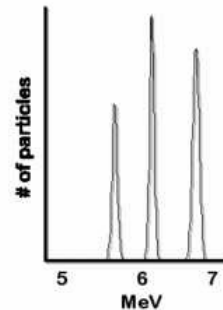
AZ α SUGÁRZÁS

Alfa sugárzás



${}^4\text{He}^{2+}$ részecskék távoznak a magból. Monoenergiás sugárzás, egy vagy több monoenergiás részecske távozik. 1,5 MeV (${}^{142}\text{Ce}$)-11,7 MeV (${}^{212\text{m}}\text{Po}$) közötti energiával.

Ideális esetben a spektrum egyszerű vonalakkból áll.



A α -sugárzás energiája és a radionuklid felezés ideje között fordított arányosság van.

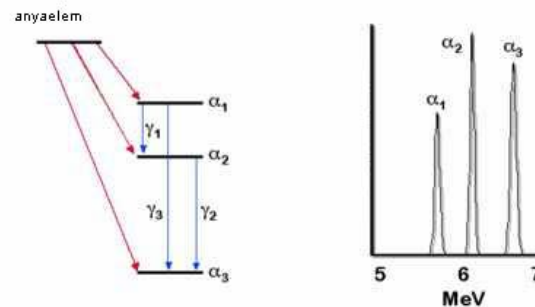
GEIGER-NUTTAL SZABÁLY:

$$\log(t_{1/2}) \propto (\log(E_{\alpha}))^{-1}$$

Tehát a nagyobb felezési idejű radioaktív izotópok kisebb energiájú α -sugárzást bocsátanak ki.

Isotope	$t_{1/2}$	MeV α
Np-237	2.16×10^6 y	4.9
Am-243	7370 y	5.3
Cf-249	351 y	6.1
Es-254	275.7 d	6.5
Fm-253	3.00 d	7.1

Egy α -spektrum:



A többszörös vonalak akkor keletkeznek, ha az α bomlás több úton lehetséges. Bomlás közben γ kvantumokat is bocsáthat ki.

Visszalökési energia:

- Egy α -részecske energiája nem egyezik pontosan az átmenet teljes energiájával.
- A momentum megmaradás miatt bizonyos energiát visszalökődés közben átad a keletkezett leányelemnek: $E_{\text{átmenet}} = E_{\alpha} + E_{\text{visszalökődési}}$
- $E_{\text{visszalökődési}}$ könnyen számítható.

Kinetikus energia $E = 0,5mv^2$

Momentum $p = mv$

A leányelem és az α részecske azonos kinetikai energiával rendelkezik:

$$E_{\text{visszalökődési}} = (m_{\alpha}/m_{\text{leány}})E_{\alpha}$$

Így a teljes átmenet energiája számítható.

Példa: számítsa ki egy 4 MeV energiájú α bomlás visszalökődési és teljes átmeneti energiáját, ha a leányelem tömege 200?

$$E_{\text{visszalökődési}} = (4/200)(4) = 0,08 \text{ MeV} \quad E_{\text{átmenet}} = 4 + 0,08 = 4,08 \text{ MeV}$$

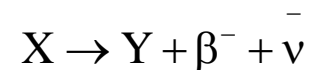
Mivel nagy tömegekről van szó a visszalökődési energia nem jelentős.

A β SUGÁRZÁS

A β -bomlás háromféleképpen mehet végbe:

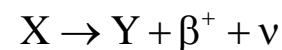
1. Negatron (β^-) kibocsátásával.

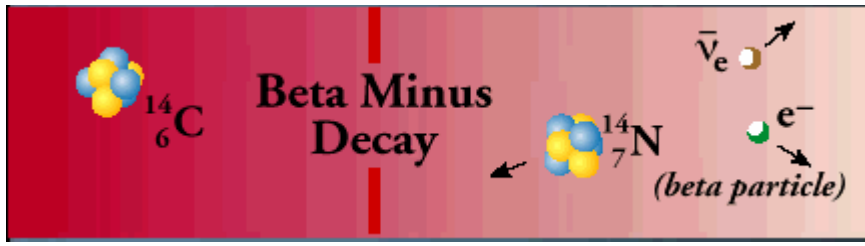
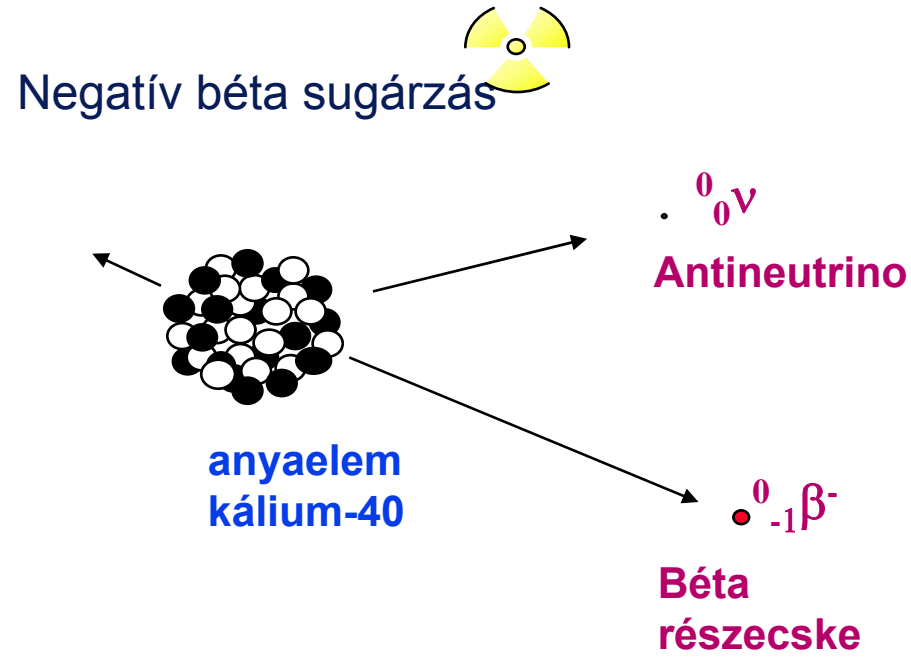
- A magból negatív elektron távozik.
- Tipikusan a neutroondús magok bomlása.
- Az elektron távozása a momentum megmaradás miatt antineutrínó kibocsátásával jár.



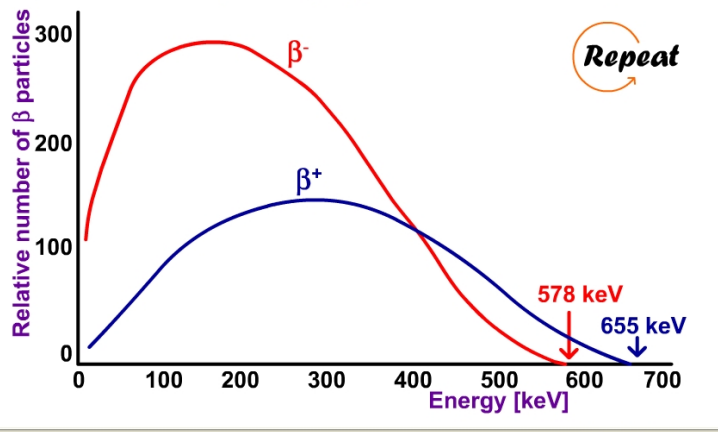
2. Pozitron (β^+) kibocsátásával.

- A magból pozitív elektron távozik.
- Tipikusan a protondús magok bomlása.
- A pozitron távozása a momentum megmaradás miatt neutrínó kibocsátásával jár.



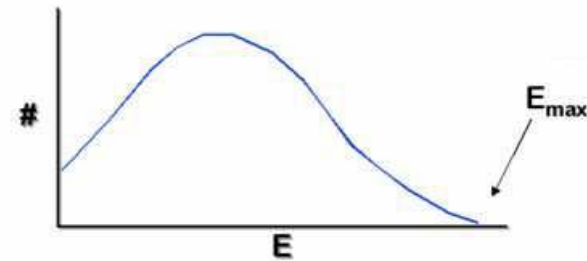


Spectra of the β^- and β^+ particles emitted by ^{64}Cu

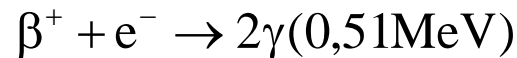


A β^+ és β^- sugárzások folytonos energiával rendelkeznek

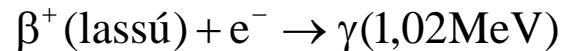
- Az atommag körüli elektronok befolyásolják
- Karakterisztikus E_{\max} energiával rendelkezik



A pozitron a földön nem stabil-antianyag. Negatronnal találkozáva annihilációs sugárzásban kétféle módon megsemmisül.



A két γ foton egymáshoz képest 180° -ban repül ki a momentum megmaradás miatt.

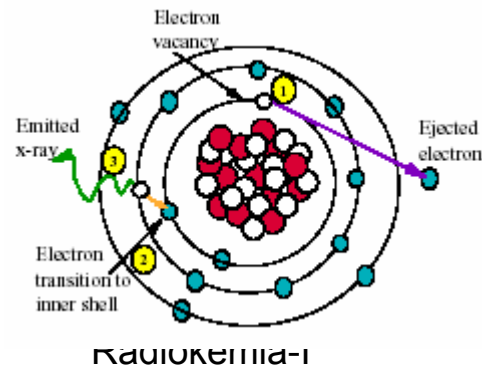


Kevésbé jellemző.

A 0,51 MeV γ -sugárzás gyakran detektálható és egy pozitron és elektron annihilációját jelzi. Ez nagyon hasznos a nukleonok azonosításánál.

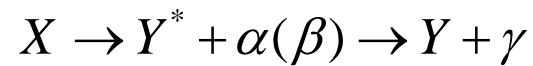
3. Elektronbefogással (EC)

- Ez a bomlás lehetővé teszi a rendszám (Z) csökkentését változatlan tömegszám (m) mellett. A pozitron-bomlás alternatívája.
- A legbelső K-héjról a mag egy elektront fog be.
- Előnyös bomlás forma ha a bomlási energia $< 2m_e c^2$.
- Magemisszió ritkán kíséri az elektronbefogást, hacsak az atommag nem maradt gerjesztett (metastabilis) állapotban.
- A K-héjon keletkezett „lyukat” egy külső pályáról elektron tölti be és a két pálya energiakülönbségének megfelelő karakterisztikus röntgen sugárzás keletkezik.

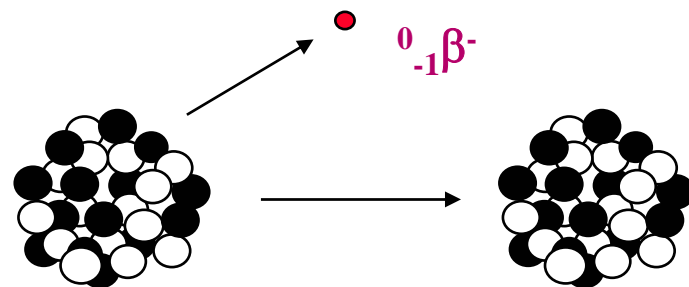
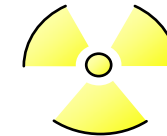


A γ SUGÁRZÁS

Az elektromágneses sugárzások röntgen feletti energiájú része. Diszkrét energiája 0,-10 MeV között lehet, ámbár 5 MeV fölött ritka. Az α - és β - bomlást kísérheti, melynek során az atommag gerjesztett állapotban maradhat.



Gamma sugárzás



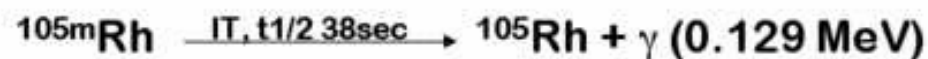
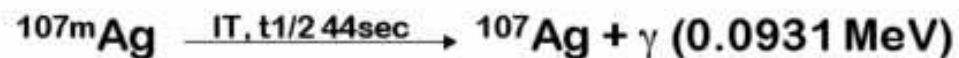
Anyaelem
Co-60

Leányelem
Ni-60

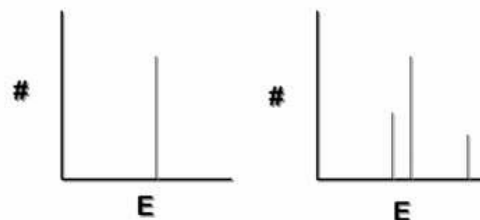


Gamma sugarak

Általában a γ -bomlás olyan gyors, hogy a felezési ideje nem mérhető. Néhány esetben azonban a γ -bomlás eléggé lassú ahhoz ($>10^{-14}$ sec), hogy mérhető legyen, metastabilis radioaktív izotóp jön létre, mely belső magátmenettel (IT) bomlik:



A γ -sugárzás diszkrét energiájú sugárzás, mely egy vagy több vonalas spektrumot ad.

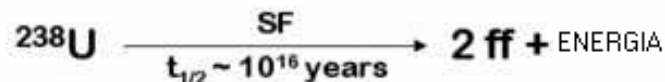


MÁS BOMLÁSI MÓDOK

Spontán maghasadás (SF)

SF akkor lép fel, ha $A \geq 100$, mivel ezek a magok negatív kötési energiával rendelkeznek hasadási átalakulás esetén.

Spontán maghasadást csak $A \geq 232$ esetén figyeltek meg. Ritka és a bomlás felezési ideje nagy:



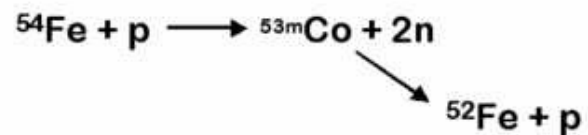
KÉSLELTETETT NEUTRON EMISSZIÓ

- A hasadási termékek gyakran neutronban dúsak, melyek β^- -bomlással alakulnak tovább.
- A β^- -bomlás után a mag még általában gerjesztett állapotban van és gyakran γ -bomlással szabadul meg az energiafeleslegtől.
- Néha a leányelem neutront is kibocsát. Ez ritka, mintegy 100 példa ismert. Csak mesterséges, neutronban gazdag izotópoknál ismert, pl. ${}^{252}\text{Cf}$, melyet neutronforrásként alkalmaznak.

KÉSLELTETETT PROTON EMISSZIÓ

- Hasonló a késleltetett neutron emisszióhoz, csak ritkább.
- A töltött részecskékkel bombázással előállított protonban dús magok bomlanak így.

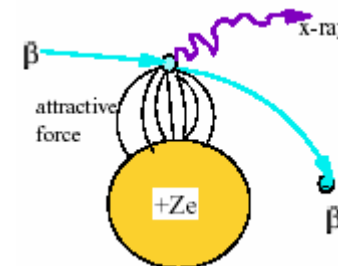
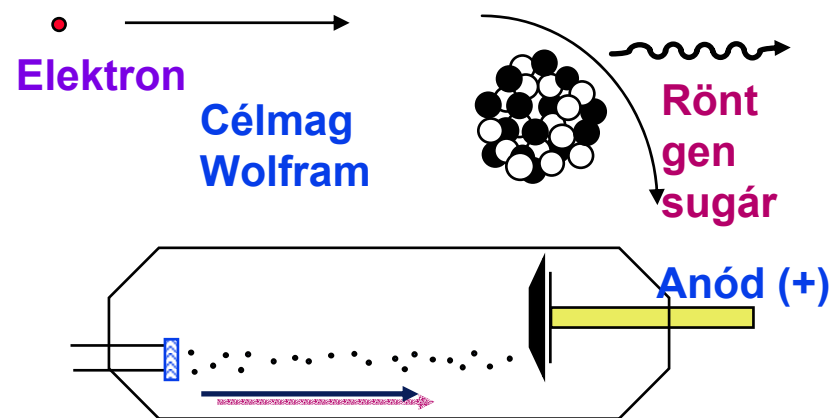
- A bombázás után a mag vagy proton emisszióval vagy pozitron bomlással bomlik:

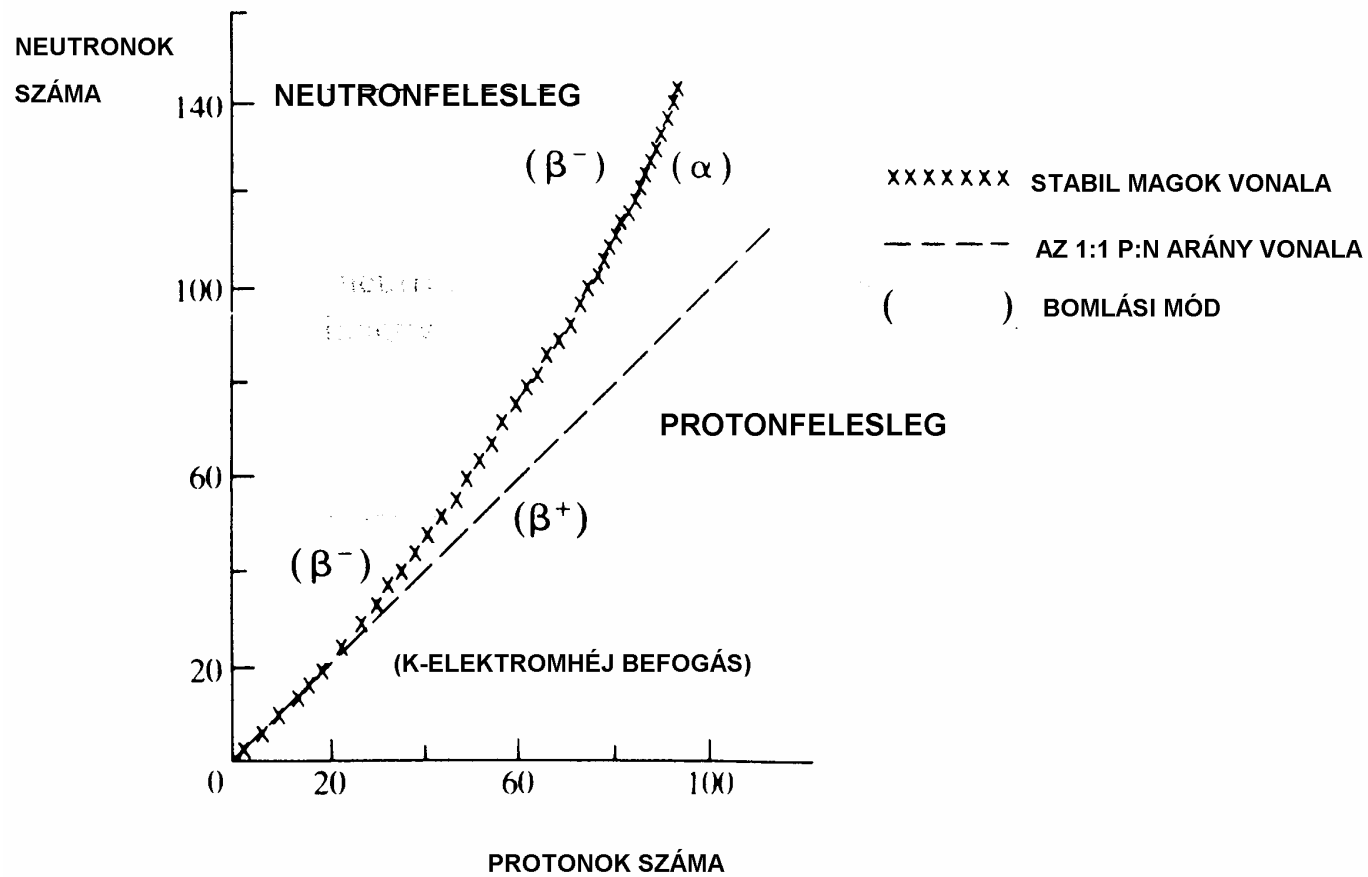


SPALLÁCIÓ (S)

A magok nagyenergiás szétesése (pl. kozmikus sugárzás hatására). Kis magtöredékek kaszkád emissziója lép fel, az atommag szétesik.

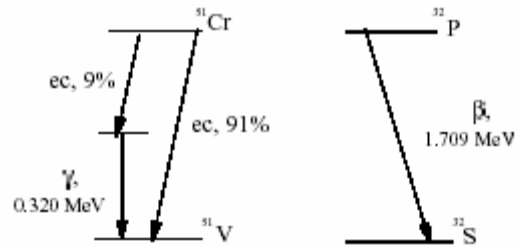
Fékezési Röntgen sugárzás
(Bremsstrahlung)



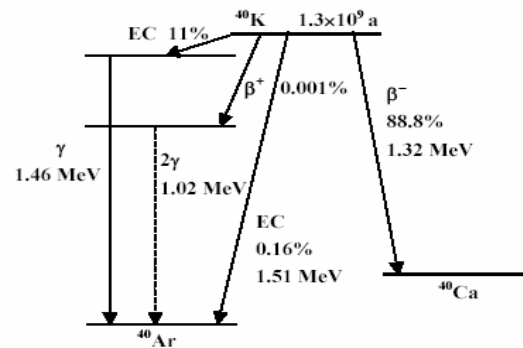


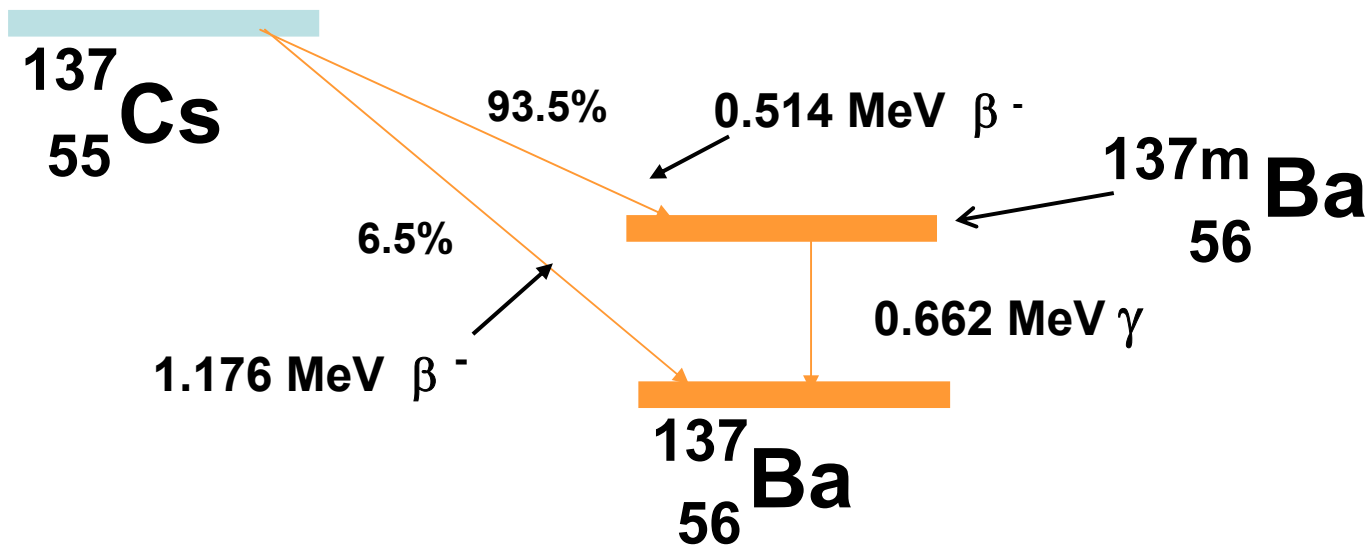
A MAGOK NEUTRON-PROTON SZÁMA, A STABILITÁSI VONAL ÉS A BOMLÁSI MÓDOK

MAGREAKCIÓK ÉS BOMLÁSOK SORÁN VÉGBEMENŐ VÁLTOZÁS

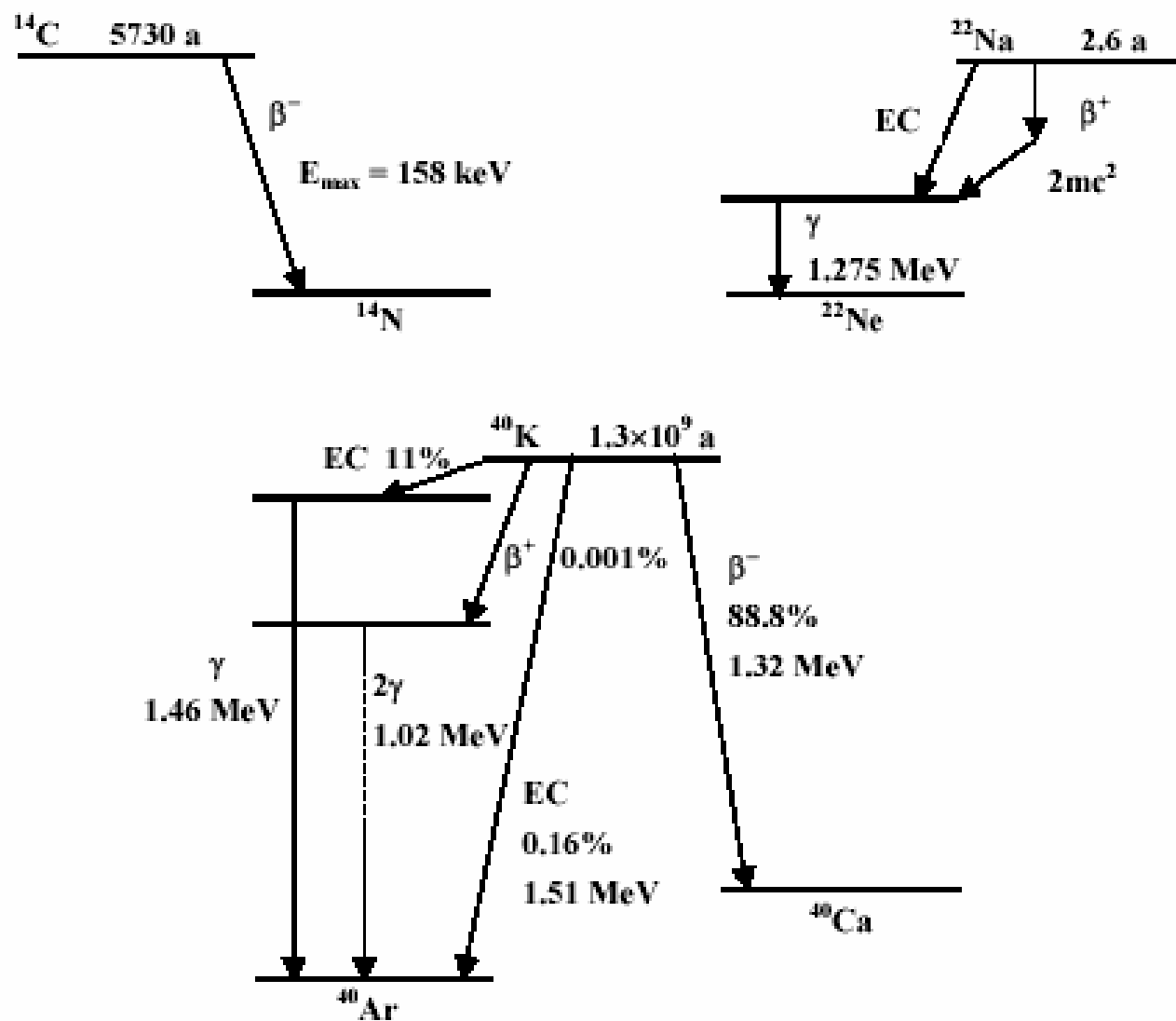


Protonszám növekedéssel (β^- bomlás) járó átmenet esetén a nyilak lefelé és jobbra, protonszám csökkenéssel (α -bomlás, elektronbefogás) járó átmenet esetén lefelé és balra, γ -sugárzással járó átmenet esetén függőlegesen lefelé mutatnak. A legtöbb radionuklid tiszta béta sugárzó (pl. ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S stb.) Néhány radionuklid vagy béta-gamma sugárzó, vagy elektronbefogással bomlik (^{51}Cr , ^{125}I). Így például a ^{51}Cr bomlásánál a bomlások 91%-ban elektronbefogás megy végbe és nem lép ki a magból sugárzás, míg a bomlások 9%-nál egy másik nagyobb energiájú elektron befogása megy végbe és mivel ez a befogott elektron túl sok energiát közöl a maggal az energia felesleget egy 320 keV energiájú gamma-foton alakjában a mag kisugározza. Másik példa a ^{40}K bomlási sémája.



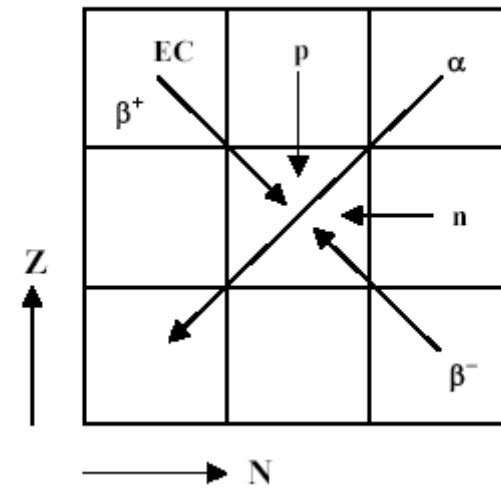
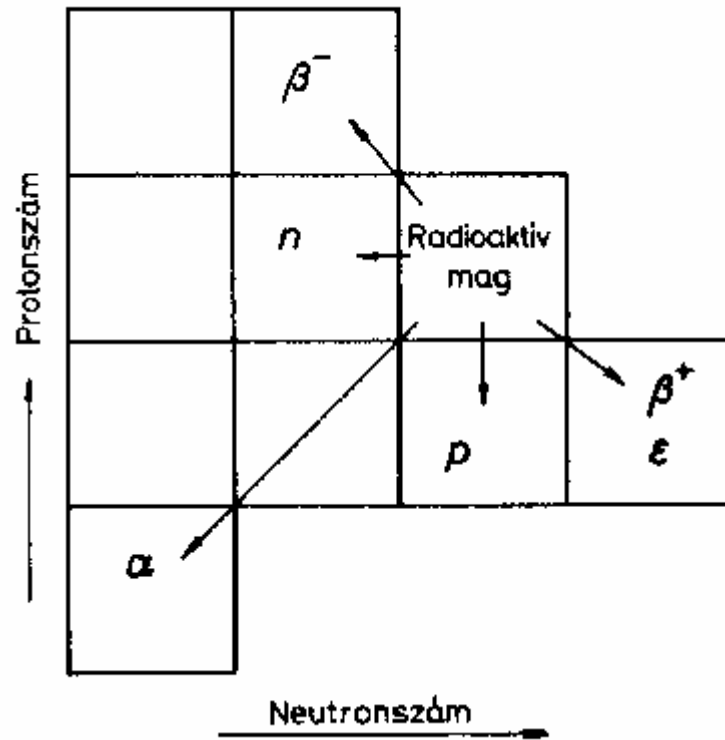


A ^{137}Cs bomlási sémája



BOMLÁSI SÉMÁK

MAGREAKCIÓK ÉS BOMLÁSOK SORÁN VÉGBEMENŐ VÁLTOZÁS



IZOTÓPTÁBLÁZATOK

Z	Izotóp	$T_{1/2}$	Bomlási mód	Részecskeenergia, MeV		γ -energia, MeV		η , %	Előállítás	$\sigma' = f\sigma^* 10^{28}, \text{m}^2$	Leányelem
27						2,02	11 %				
						2,60	16 %				
						2,99	1 %				
						3,25	12 %				
						3,47	1 %				
	^{57}Co	270 d	<i>E.X.</i>		100 %	0,014	6 %	83 %	$^{56}\text{Fe}(d,n)$ $^{60}\text{Ni}(p,\alpha)$	0,9	
						0,122	88 %	1 %			
						0,136	10 %	1 %			
	^{58}Co	71,3 d	<i>E.X.</i> β^+	0,47	85 % 15 %	0,81	100 %		$^{58}\text{Ni}(n,p)$		
						1,62	0,5 %				
						0,51 (β^+)					
	$^{60\text{m}}\text{Co}$	10,5 min	<i>I</i>		100 %	0,059	0 %	$\approx 100\%$	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	19	^{60}Co
	^{60}Co	5,27 a	β^-	0,31	$\approx 100\%$	1,17	100 %		$^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	37	
				1,48	0,01 %	1,33	100 %				
28	^{63}Ni	92 a	β^-	0,067	100 %				$^{62}\text{Ni}(n,\gamma)$	0,77	
	^{65}Ni	2,521 h	β^-	0,60	$\approx 23\%$	0,37	5 %		$^{64}\text{Ni}(n,\gamma)$	0,016	
				1,01	$\approx 8\%$	1,11	13 %				
2,10				$\approx 69\%$	1,49	18 %					
29	^{64}Cu	12,9 h	β^- β^+ <i>E.X.</i>	0,57	38 %	0,51 (β^+)			$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$	3,0	
				0,66	19 %	1,34	0,6 %				
					43 %						
	^{66}Cu	5,10 min	β^-	0,76	$< 0,2\%$	0,83	0,2 %		$^{65}\text{Cu}(n,\gamma)$	0,56	
				1,59	$\approx 9\%$	1,04	9 %				
				2,63	$\approx 91\%$						

ÖSSZEFÜGGÉS A FAJLAGOS AKTIVITÁSOK ÉS A FELEZÉSI IDŐ KÖZÖTT

$$A = \lambda \cdot N^* = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \cdot N^*$$

Az aktív atommagok száma pedig

$$N^* = \frac{m}{M} \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}$$

$$A = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}$$

A fajlagos aktivitás így

$$\frac{A}{m} = \frac{\ln(2) \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{t_{1/2} \cdot M} = \frac{0,693 \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{t_{1/2} \cdot M}$$

Az összefüggés alapján látható, hogy minél hosszabb az illető radioaktív izotóp felezési ideje, illetve minél nagyobb az atomsúlya, annál kisebb a fajlagos aktivitása. Példa. 1 mCi ^{32}P ($t_{1/2}=14,3$ nap) tömege $3,5 \cdot 10^{-9}$ g, azaz 3,5 nanogramm, míg ugyanilyen aktivitású 1 mCi ^{226}Ra ($t_{1/2}=1600$ év) tömege $1,011 \cdot 10^{-3}$ g, azaz 1,011 mg.

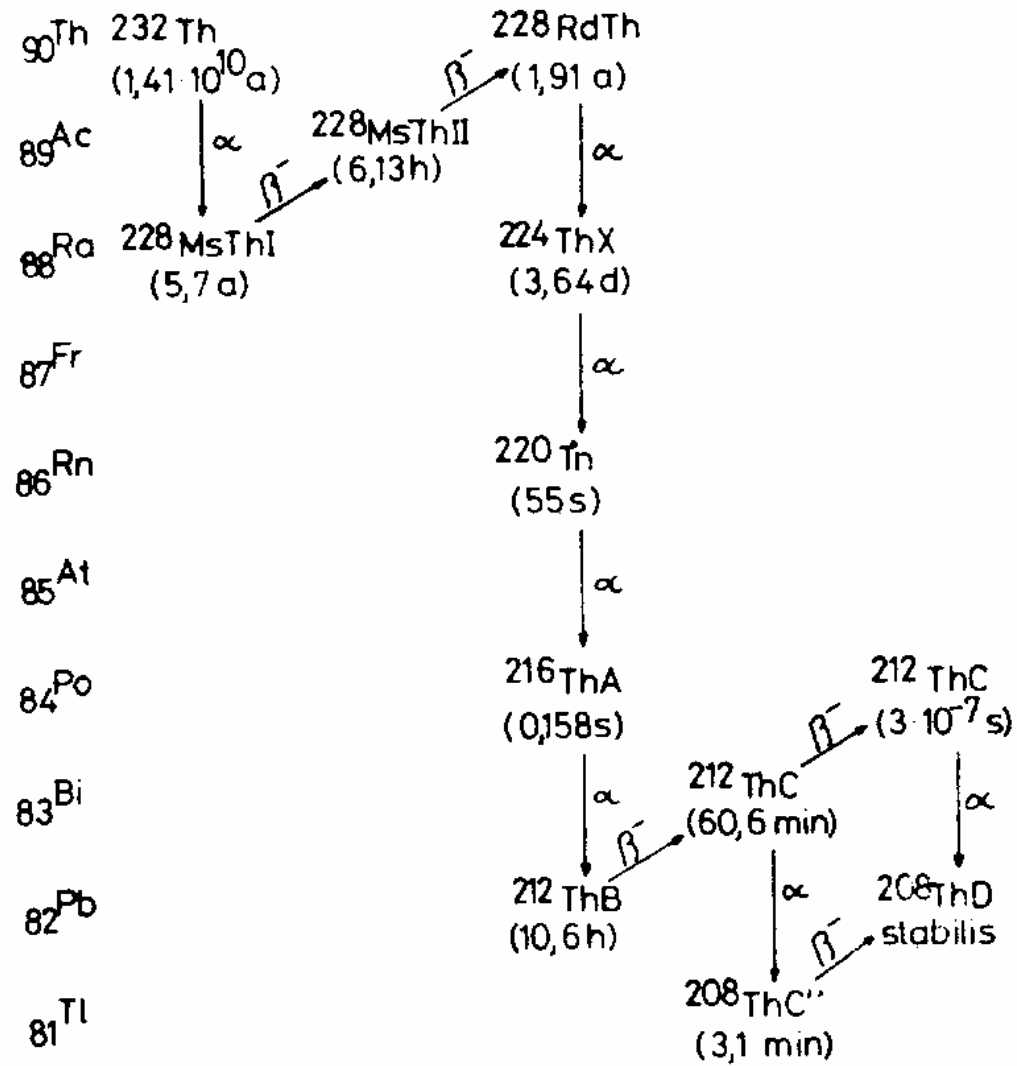
Bár a bomlások időegységre eső száma meghatározza az aktív anyag aktivitását, a radionuklidok többféle módon is bomolhatnak és többféle sugárzást bocsáthatnak ki a bomlás során. Egy speciális vonaldiagrammal, a bomlási sémával minden egyes radionuklid bomlása leírható. A vízszintes vonalakkal jelzett energianívók közötti átmeneteket nyilak jelzik. A magasabb energiaállapotú anyaelem sugárzás leadásával jut az alacsonyabb energia állapotú leányelemhez (lásd ábra).

Legfontosabb Izotópok

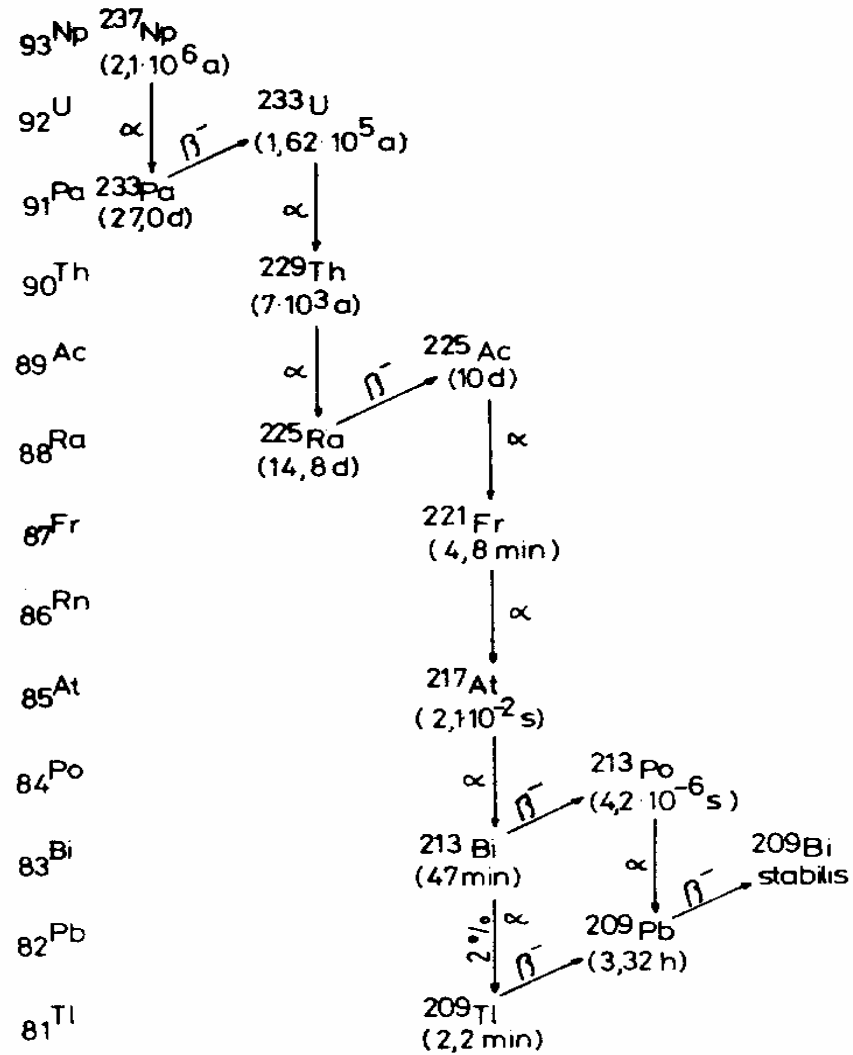
Izotóp	Ci/g	Ci/L → ppm szorozva:	ppm → Ci/L szorozva:
Ac-227	72.9	1.37E+01	7.29E-02
Ac-228	2.24E+06	4.46E-04	2.24E+03
Am-241	3.24E+00	3.09E+02	3.24E-03
Am-242m	9.72E+00	1.03E+02	9.72E-03
Am-242	8.09E+05	1.24E-03	8.09E+02
Am-243	1.85E-01	5.41E+03	1.85E-04
Am-244	1.27E+06	7.87E-04	1.27E+03
Ba-131	8.31E+04	1.20E-02	8.31E+01
Ba-140	7.29E+04>	1.37E-02	7.29E+01
Cd-109	2.64E+03	3.79E-01	2.64E+00
Cd-115m	2.60E+04	3.85E-02	2.60E+01
Cd-115	5.09E+05	1.96E-03	5.09E+02
Cs-137	87	1.15E+01	8.70E-02
Cs-138	4.20E+07	2.38E-05	4.20E+04

Izotóp	Ci/g	Ci/L → ppm szorozva:	ppm → Ci/L szorozva:
Co-57	8480	1.18E-01	8.48E+00
Co-60	1133	8.83E-01	1.13E+00
Mo-99	4.75E+05	2.11E-03	4.75E+02
Np-237	7.05E-04	1.42E+06	7.05E-07
Np-239	2.33E+05	4.29E-03	2.33E+02
Pu-238	17.4	5.75E+01	1.74E-02
Pu-239	0.0614	1.63E+04	6.14E-05
Pu-240	0.226	4.42E+03	2.26E-04
Pu-241	112	8.93E+00	1.12E-01
Pu-242	3.90E-03	2.56E+05	3.90E-06
Pu-243	2.59E+06	3.86E-04	2.59E+03
Pu-244	1.90E-05	5.26E+07	1.90E-08
Sr-89	2.78E+04	3.60E-02	2.78E+01
Sr-90	143	6.99E+0	1.4E-01
U-235	2.10E-06	4.76E+08	2.10E-09
U-238	3.33E-07	3.00E+09	3.33E-10

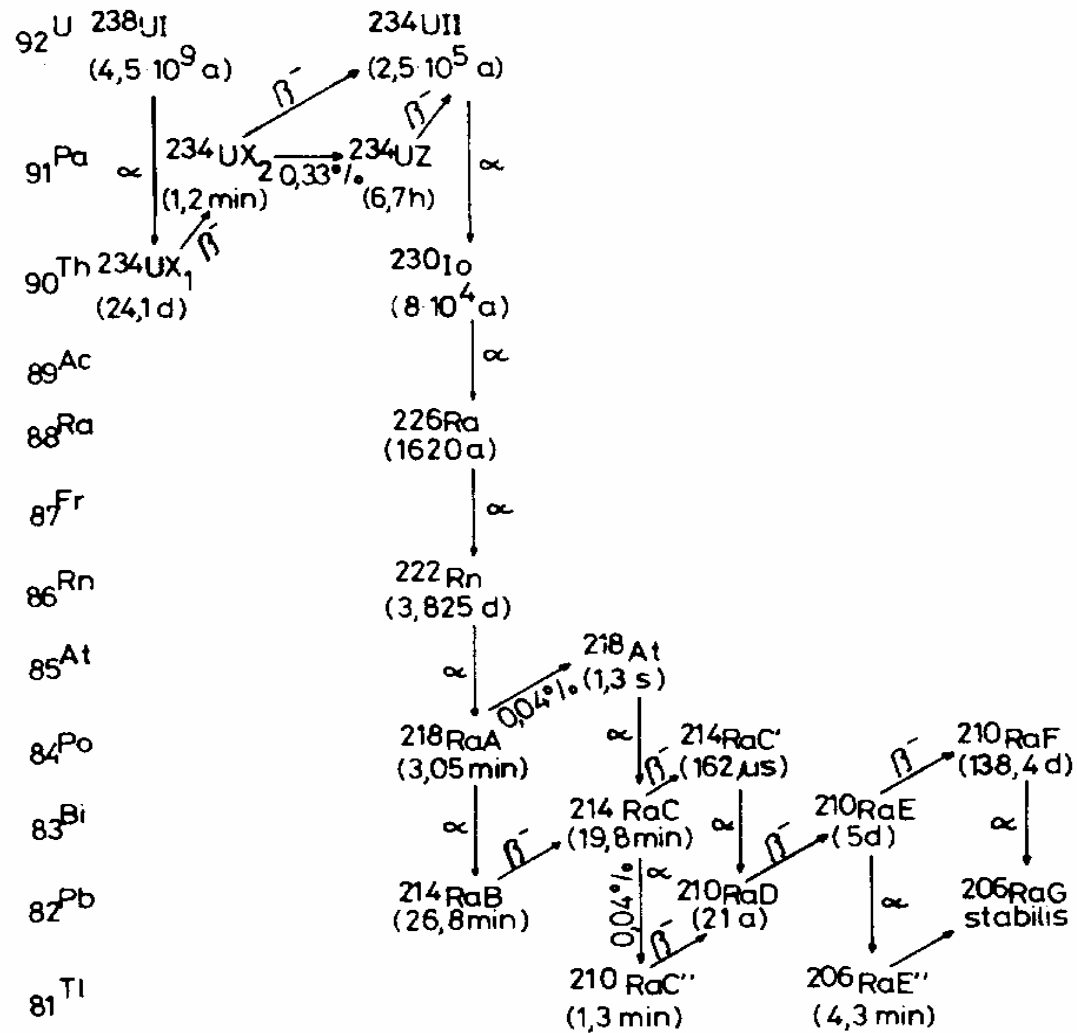
A 4 n BOMLÁSI SOR



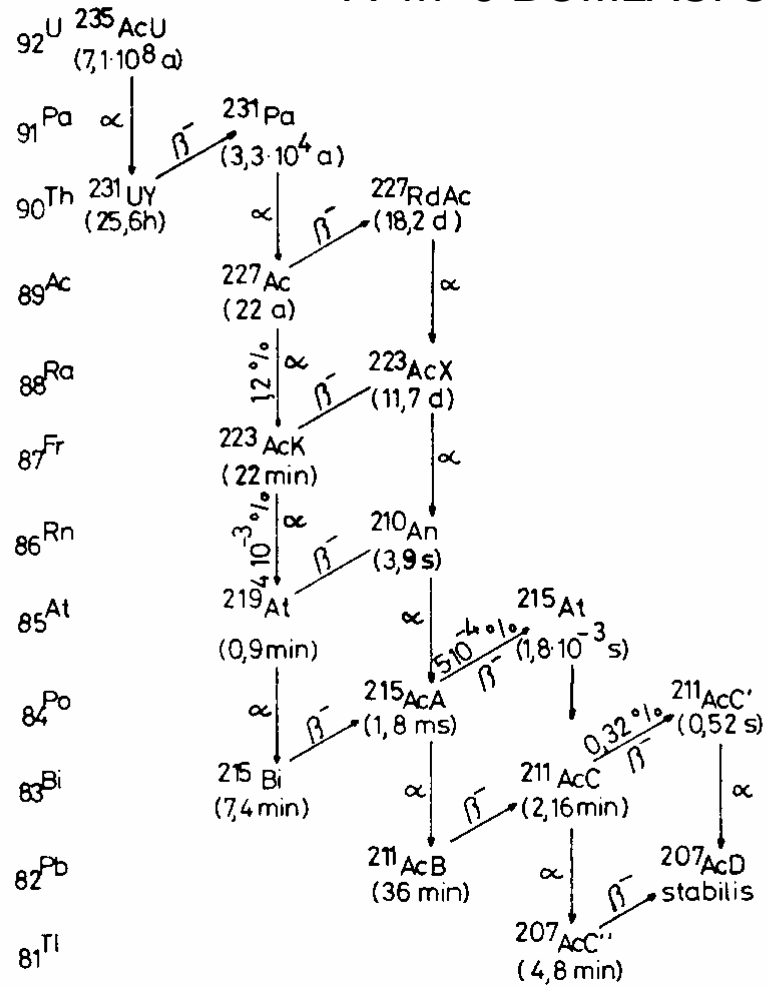
A 4n+1 BOMLÁSI SOR

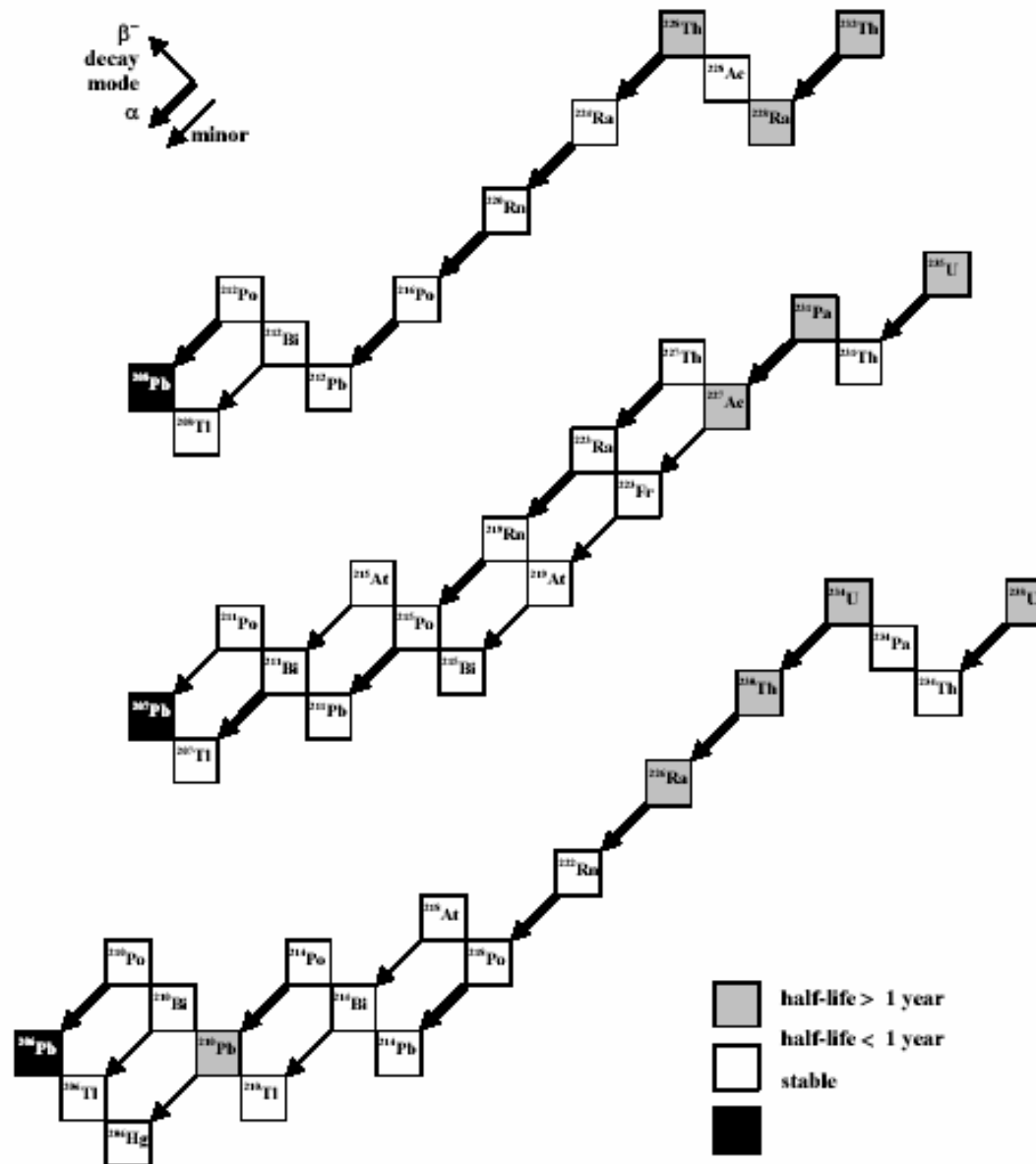


A 4n+2 BOMLÁSI SOR



A 4n+3 BOMLÁSI SOR

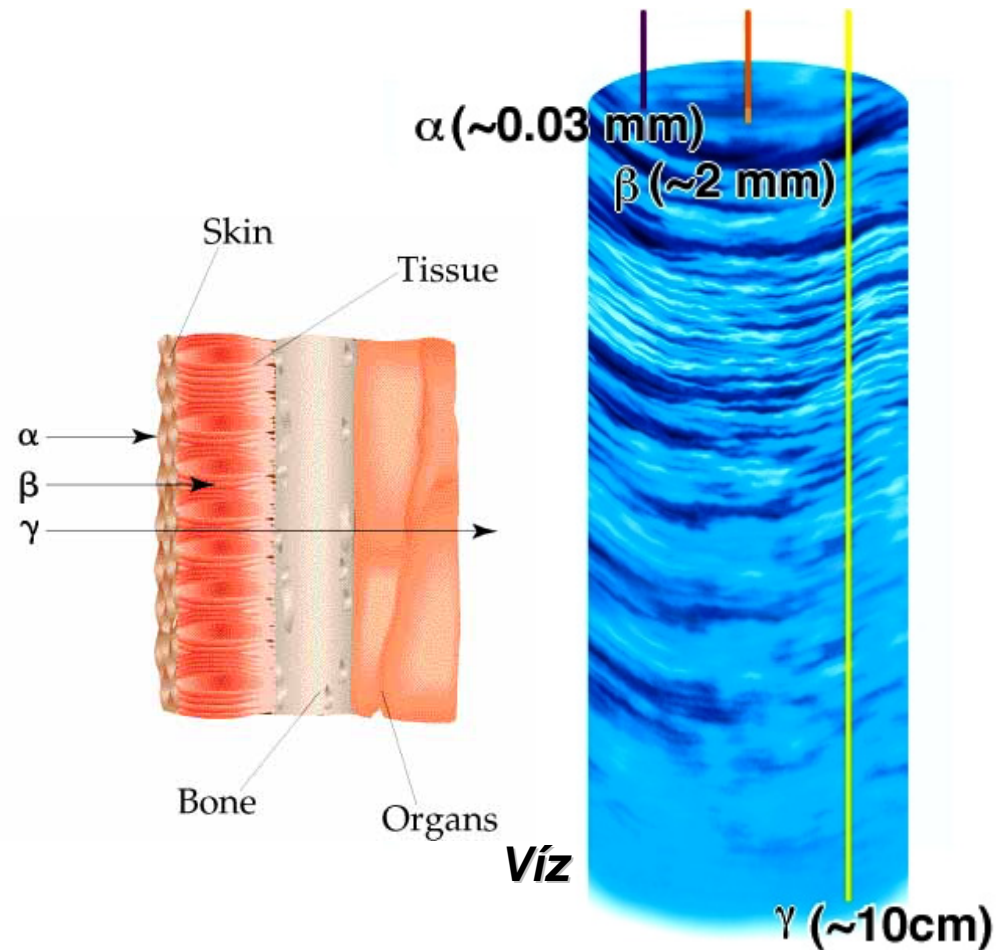




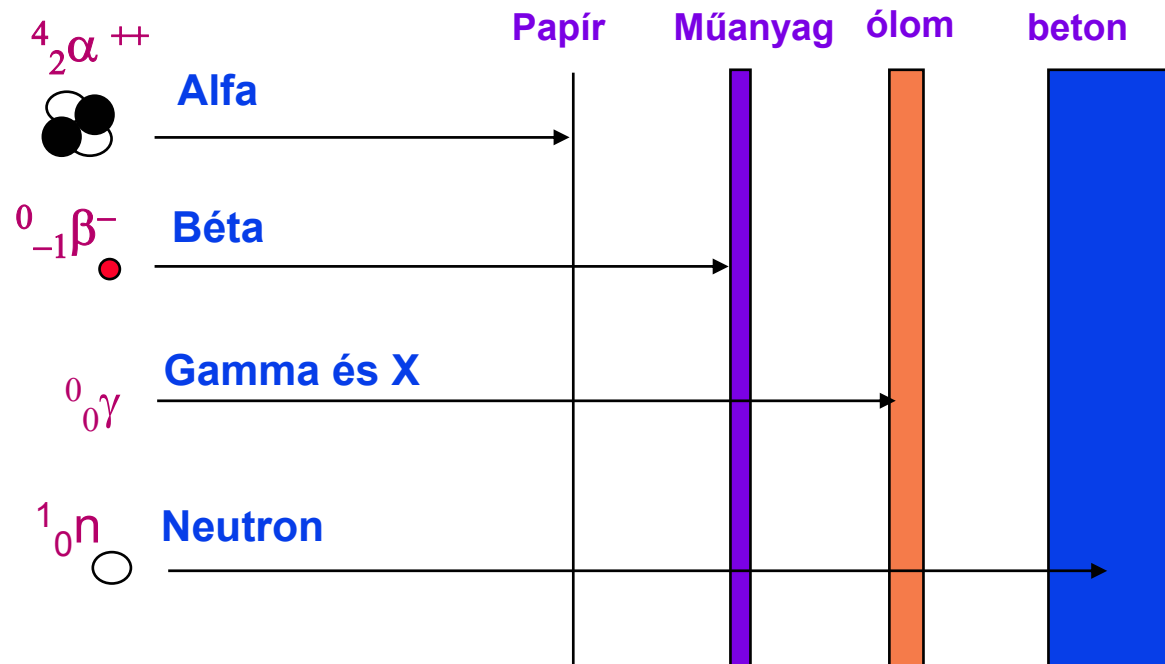
A SUGÁRZÁSOK ÁTHATOLÓ KÉPESSÉGE

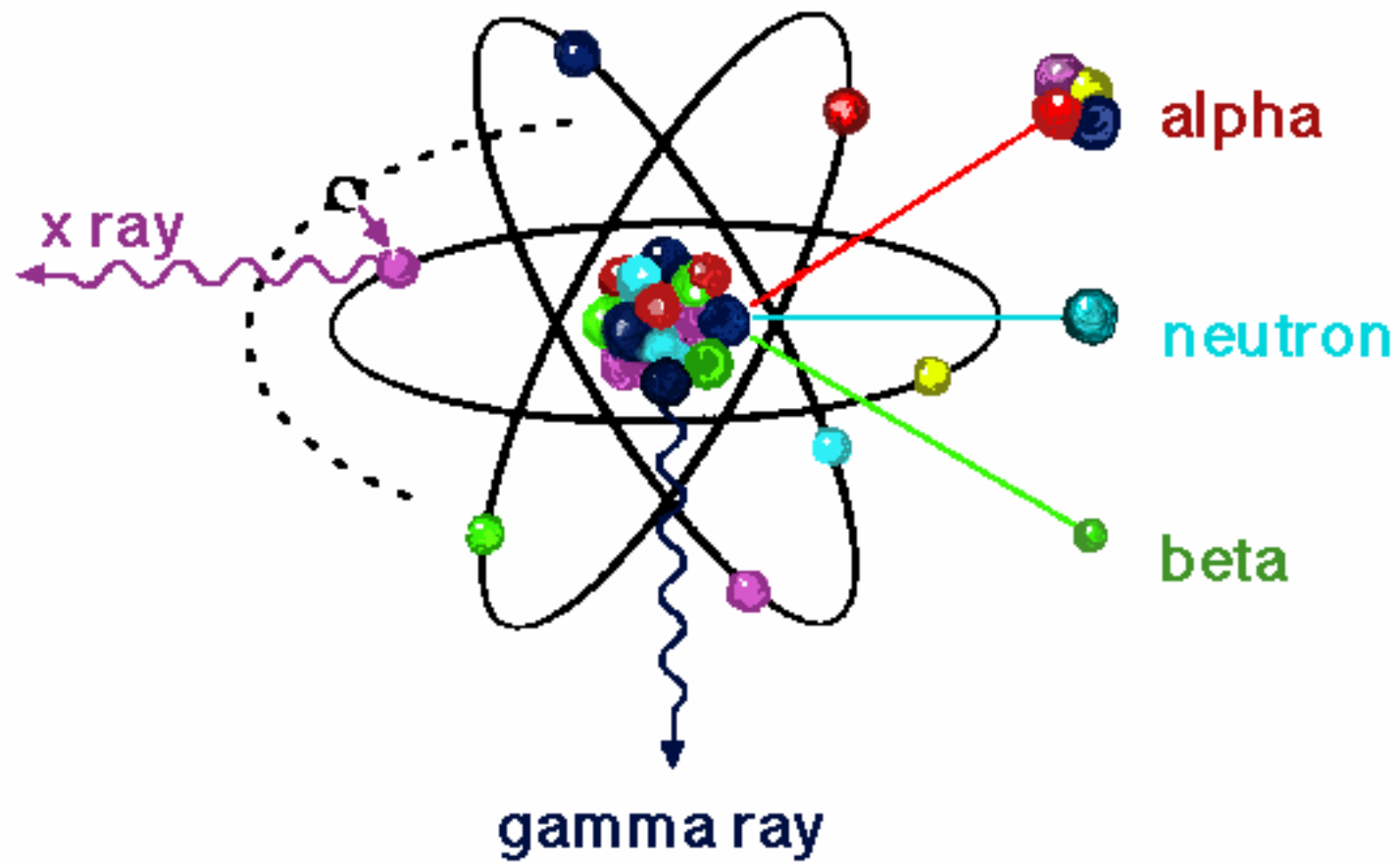
- Alfa-részecske: kicsiny
- béta részecske: mérsékelt
- gamma: nagy

- röntgen sugárzás ?



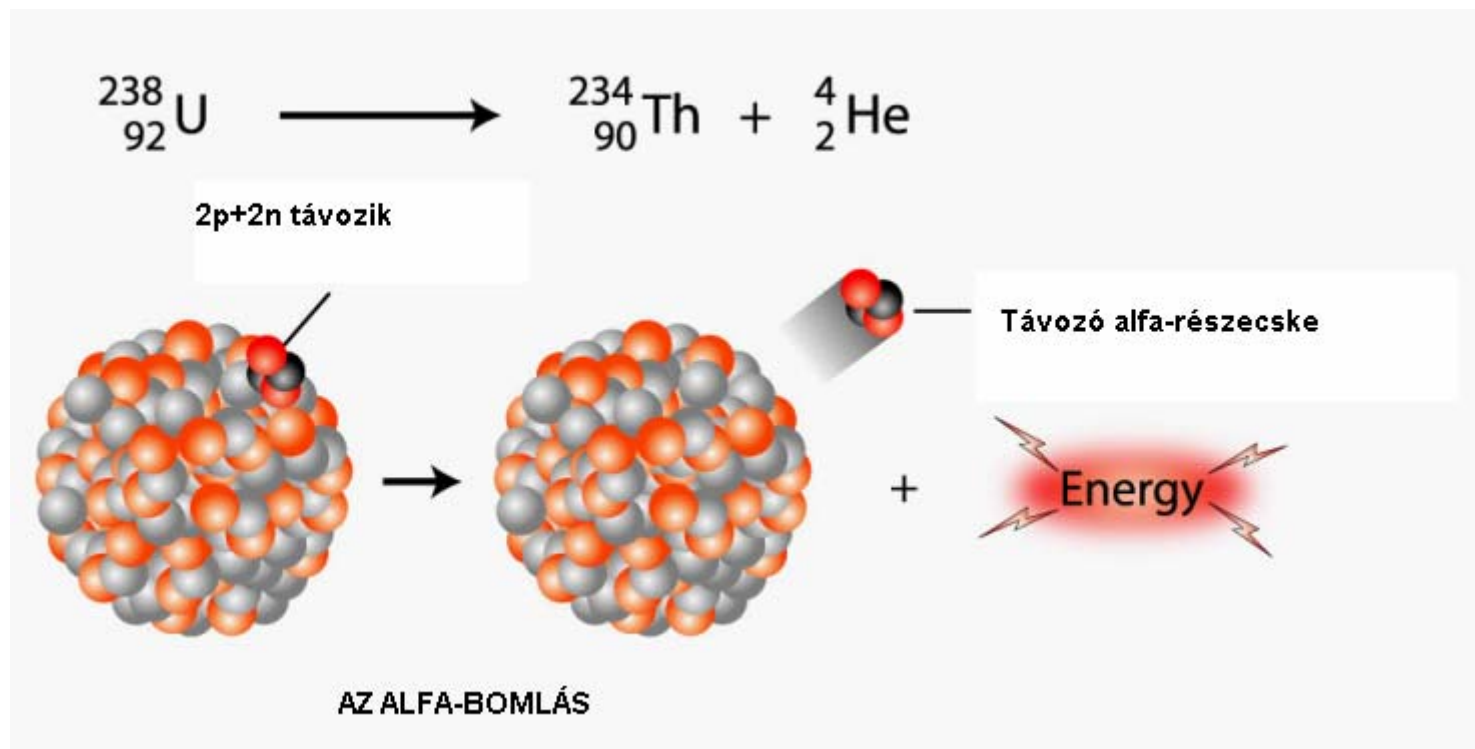
A RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSOK ÁTHATOLÓKÉPESSÉGE





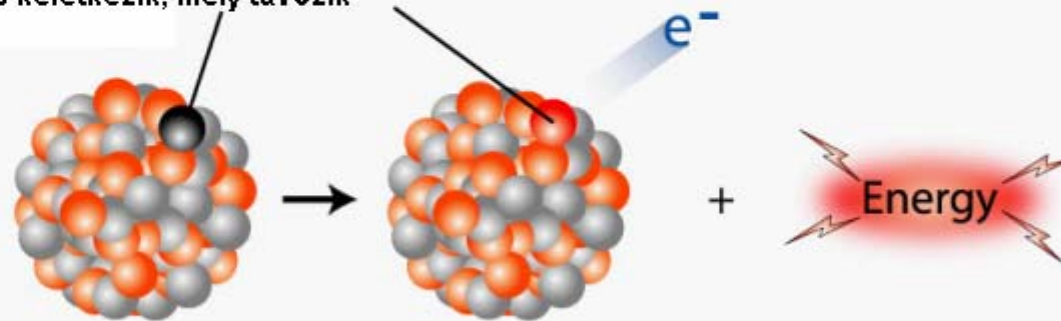
A sugárzások típusai

	Tömeg (amu)	Töltés	Úthossz levegőben
Alfa	4.0000	+2	néhány centiméter
Béta pozitív	0.0005	+1	Néhány méter
Béta negatív	0.0005	-1	Néhány méter
Gamma	0.0000	0	Sok-sok méter
Röntgen (X)	0.0000	0	Sok-sok méter
Neutron	1.0000	0	Sok-sok méter





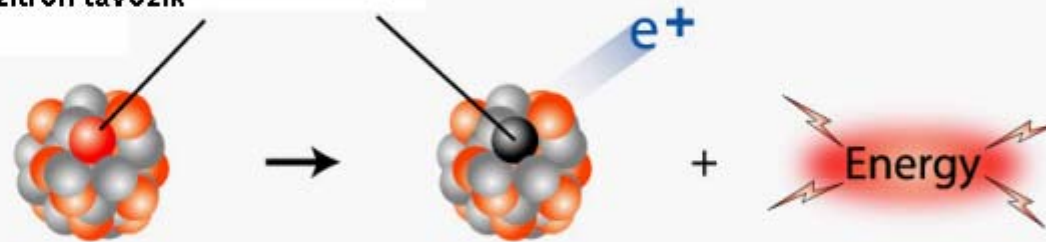
A magban egy neutron protonná alakul
és egy elektron is keletkezik, mely távozik



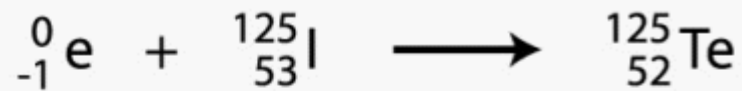
A NEGATÍV BÉTA BOMLÁS



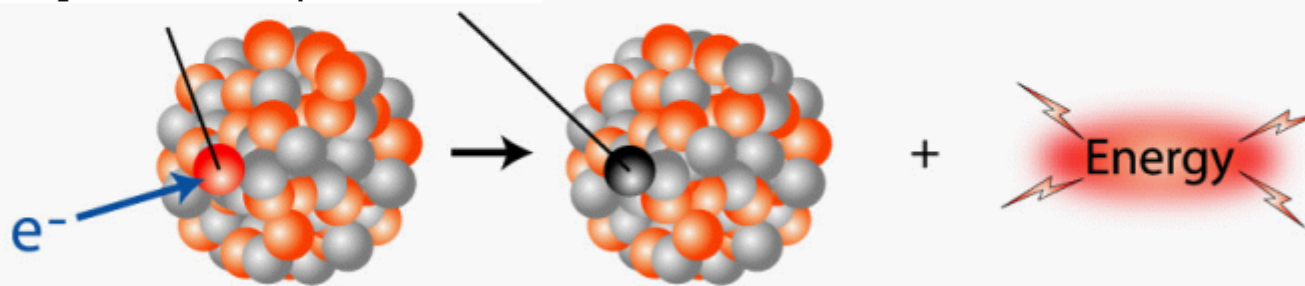
A magban egy proton neutronná alakul
és a keletkezett pozitron távozik



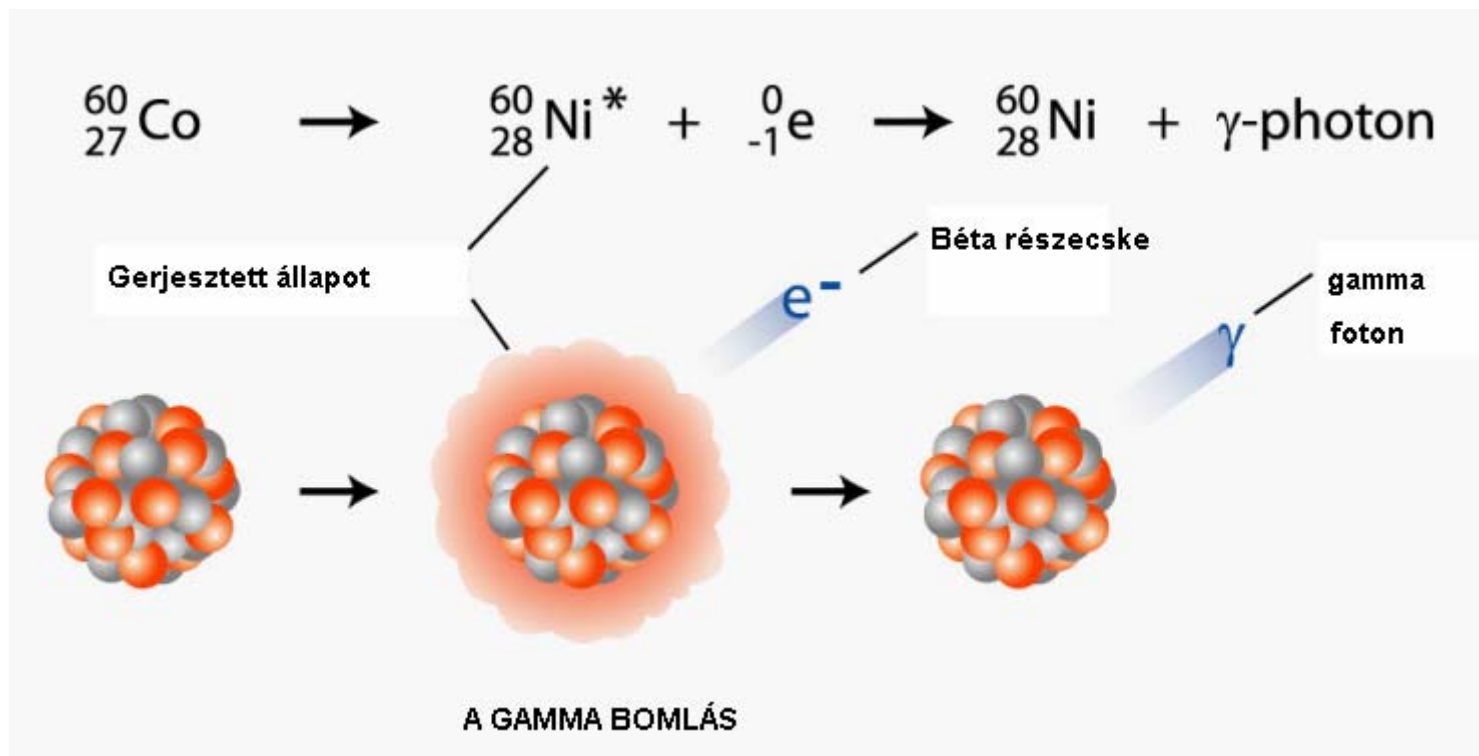
A POZITÍV BÉTA BOMLÁS

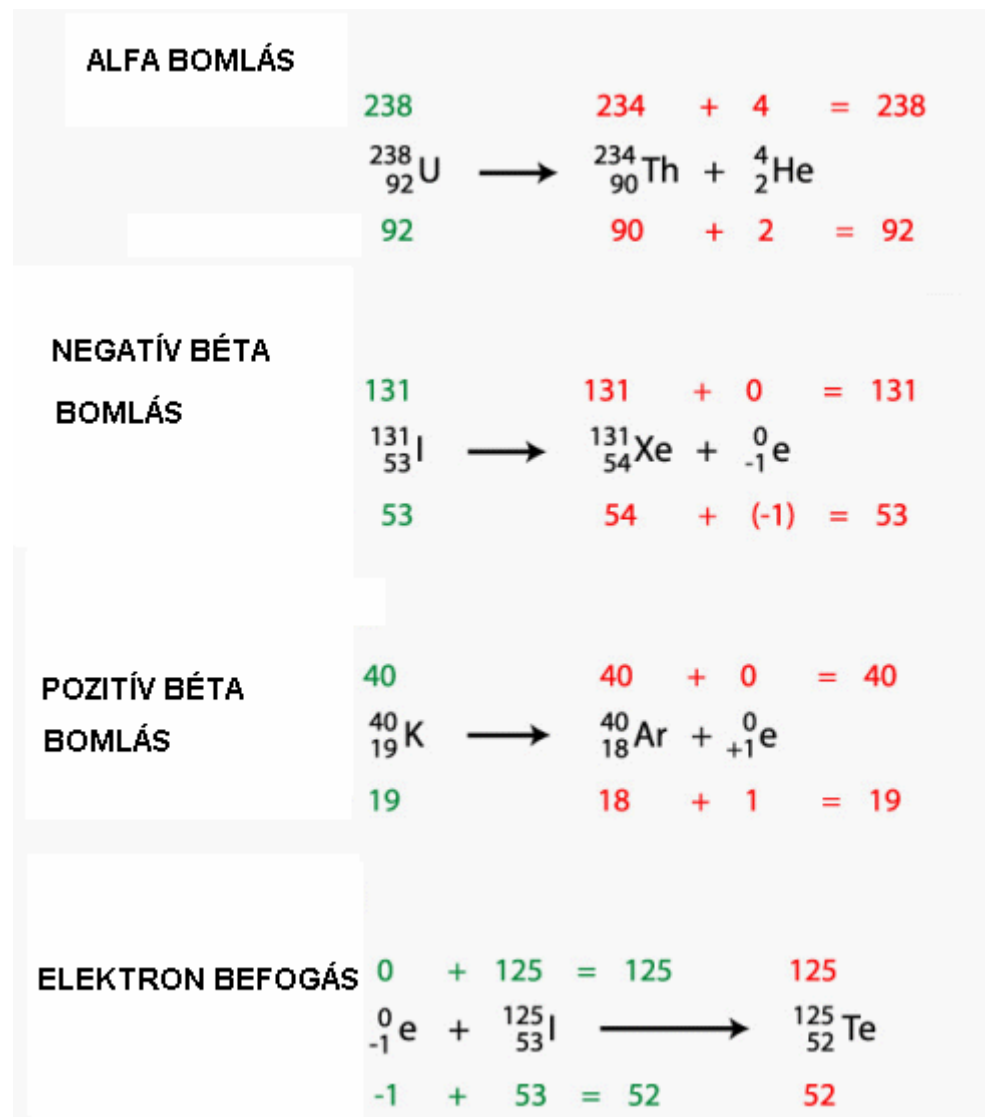


Egy pályaelektron egy magban lévő protonnal
a magban neutront képez



ELEKTRON BEFOGÁS





ALFA BOMLÁS



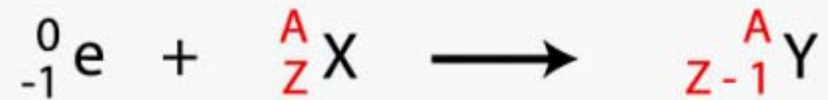
NEGATÍV BÉTA BOMLÁS



POZITÍV BÉTA BOMLÁS

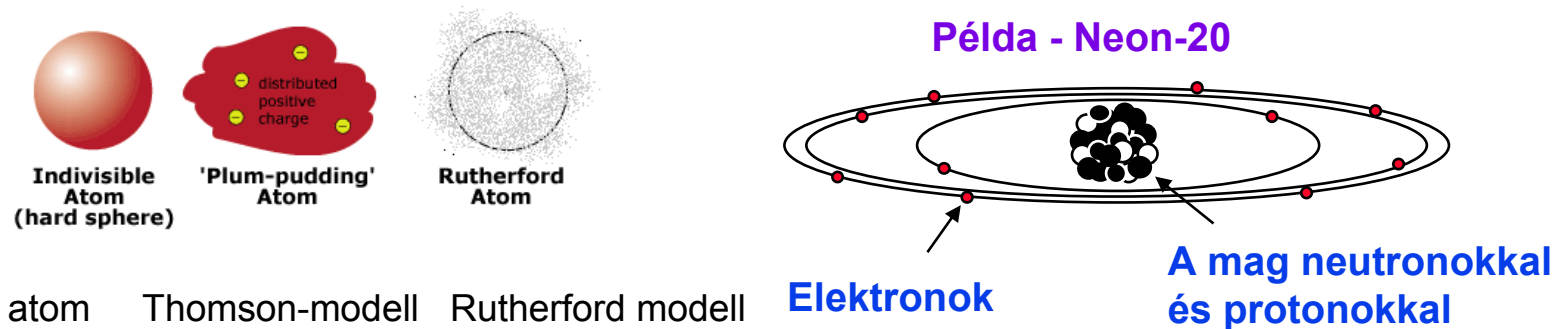


ELEKTRON BEFOGÁS



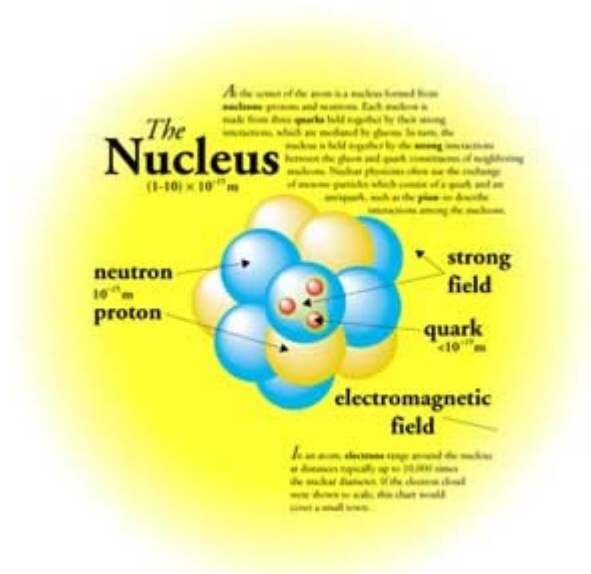
AZ ATOM

- Görögül – tovább nem osztható.
- Thomson „plum-pudding” modell. Elkent pozitív töltésekben (puding) negatív elektronok (szilvaszemek) vannak elkeverve. Semleges.
- 1911 Ernest Rutherford α -részecskék szóródása arany fólián. Kis pozitív mag, az atom fő tömege, negatív elektronok helyezkednek el körülötte. Körpályán mozgó töltések energiát vesztenek. Miért nem zuhannak be a negatív elektronok a magba?
- Niels Bohr 1913 vannak olyan diszkrét elektrópályák, melyeken a keringő elektron nem veszít energiát. A kvantummechanika (kvantum –adag) kezdete.



AZ ATOMMAG

Az atommag **nukleonokból, protonokból és neutronokból** áll. A protonok és neutronok **kvarkokból** épülnek föl és a kvarkok közötti **glüon**-csere következtében létrejövő „**erős kölcsönhatások**” tartják őket össze a magban. A több nukleonból álló magokban az effektív erős kölcsönhatásokat a **mezonok** (kvark-antikvark párokból fölépülő részecskék) cseréjével írhatjuk le. Egy proton, illetve neutron 3-3 kvarkból áll



A NÉGY ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁS

- A négy alapvető kölcsönhatás a gravitációs, az elektromágneses, az erős és a gyenge kölcsönhatások.
- A gravitációs és az elektromágneses kölcsönhatások jól ismertek.
- **A gravitációs kölcsönhatás.** Cavendish 1-1g tömegű, 1cm távolságban lévő test közötti erőhatást mérte.

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

A gravitációs kölcsönhatás nagy hatótávolságú, de a leggyengébb kölcsönhatás! (γ rendkívül kicsi). Ne tévesszen meg a földi gravitációs erő, mert a föld tömege óriási az emberi tárgyakhoz képest. Még a gyenge kölcsönhatás is 10^{26} -szor erősebb, mint a gravitációs kölcsönhatás.

A NÉGY ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁS

- Az elektromágneses kölcsönhatás.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Ez is nagy hatótávolságú kölcsönhatás. Mintegy 10^{36} -szor erősebb ez a kölcsönhatás, mint a gravitációs. Két, egymástól $2 \cdot 10^{-13}$ cm távolságban lévő proton között a gravitációs erőhatás $5 \cdot 10^{-30}$ dyn, az elektromágneses taszítóerő pedig $6 \cdot 10^6$ dyn.

- Az erős kölcsönhatás

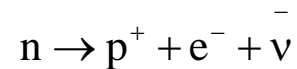
Az atommagokban kötést létesítő erőhatás a nukleonok között. Ezek vonzóerők, nem elektromos erők (a semleges neutronra is hatnak) és nem is gravitációs erők. Rendkívül kis tartományban ($1-2 \cdot 10^{-13}$ cm) fejtik ki a hatásukat, rövid hatótávolságú erő. Két protont közelítve eleinte csak az elektromágneses taszítóerők hatnak és csak 10^{-12} cm távolság után hatnak az erős kölcsönhatás vonzó erői. A magerők 100-1000-szer erősebbek, mint az elektromágneses erők, ezért az erős kölcsönhatás 100-1000-szer rövidebb idő alatt megy végbe (jellemző magidő 10^{-23} s).

A NÉGY ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁS

Egy nukleon csak néhány szomszédos nukleonnal lép kölcsönhatásba. A magerők töltés-függetlenek, azaz azonos a p-p, n-p és n-n kölcsönhatás. A kölcsönhatás során kicserélődhet a két részecske töltése, neutronból proton, protonból neutron képződhet.

•A gyenge kölcsönhatás $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$

•Az erős és elektromágneses kölcsönhatáshoz képest rendkívül gyenge, a gravitációs kölcsönhatáshoz képest erős kölcsönhatási forma, hatótávolsága rendkívül kicsi. A gyenge kölcsönhatás eredményeként nem jönnek létre kötött állapotok, ezért bomlási kölcsönhatásnak is nevezik. Példa: a neutronok béta-bomlása:

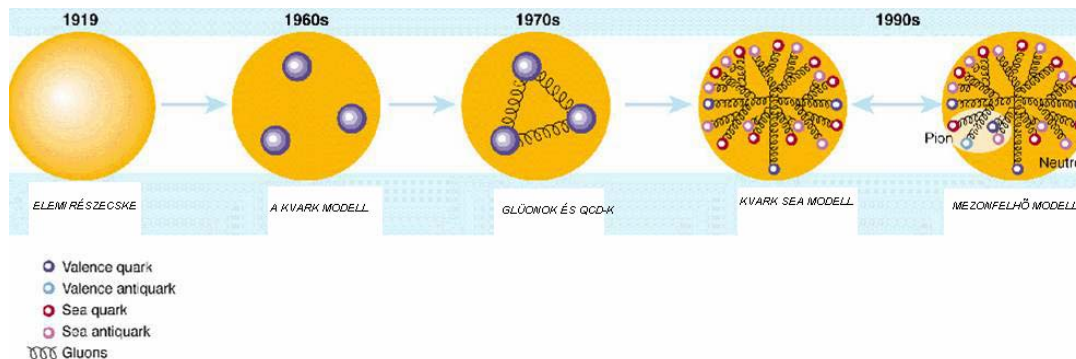


A neutron élettartama kb. 15 perc. A többi metastabil részecske (műonok, mezonok) élettartama lényegesen kisebb. A gyenge kölcsönhatás jellemző ideje 10^{-10} sec.

Két proton kölcsönhatása esetén mind a négy kölcsönhatás fellép. Ha az erős kölcsönhatás erősségét 1-nek vesszük, akkor az elektromágneses kölcsönhatás erőssége 10^{-2} - 10^{-3} , a gyenge kölcsönhatásé 10^{-13} - 10^{-14} , a gravitációs kölcsönhatásé pedig 10^{-39} .

A NÉGY ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁS

- Két proton között mind a négy kölcsönhatás fellép.
- Gyenge kölcsönhatás a béta-bomlásnál és a neutrino kölcsönhatásnál léphet föl.
- Az erős kölcsönhatás a magerőknél jelentkezik, a kvarkokat tartja össze, hogy barionokat(3 kvark) és mezonokat(1 kvark és 1 antikvark) képezzenek. Neutron (uud), proton (udd) kvarkokból áll.
- A nukleonokat összetartó magerők az egyes nukleonokban lévő kvarkok kölcsönhatásának az eredménye. (Hasonló a molekuláknál az elektronok kölcsönhatása révén kialakuló kovalens kötéshez.)
- Két objektum közötti erőhatás egy részecske cseréjével írható le. Energiát és momentumot visz át a két objektum között.



A NÉGY ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁS

Kölcsönhatás	Gravitációs	Gyenge	Elektromágnesess	Erős
Cserélődő részecske	Graviton	Z0	Foton	Pion
Tömeg mc^2 (eV)	0	$91 \cdot 10^9$	0	$135 \cdot 10^6$
Csatolási állandó C^2 (J.m)	$1,87 \cdot 10^{-64}$	$3,22 \cdot 10^{-31}$	$2,31 \cdot 10^{-28}$	$2,5 \cdot 10^{-27}$
Hatótávolság (m)	Végtelen	$2 \cdot 10^{-18}$	Végtelen	$1,5 \cdot 10^{-15}$

NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

- | | | |
|--|--|------|
| • Henry Becquerel
Pierre Curie
Marie Curie | A spontán radioaktivitás fölfedezése | 1903 |
| • Ernest Rutherford | Elemek bomlása, radioaktív elemek kémiája | 1908 |
| • Marie Curie | A rádium és polónium felfedezése | 1911 |
| • Frederick Soddy | A radioaktív elemek kémiája, radioaktív izotópok eredete és természete | 1921 |
| • Francis Aston | Izotópok felfedezése számos nem radioaktív elemben | 1922 |
| • Charles Wilson | Ködkamra kifejlesztése töltött részecskék detektálására | 1927 |
| • Harold Urey | A deutérium felfedezése | 1934 |
| • Frederic Joliot
Irene Joliot-Curie | Számos új radioaktív elem szintézise | 1935 |
| • James Chadwick | A neutron felfedezése | 1935 |
| • Carl David Anderson | A pozitron felfedezése | 1936 |

NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

- Enrico Fermi Új radioaktív elemek előállítása neutron besugárzással 1938
- Ernest Lawrence A ciklotron megalkotása 1939
- George de Hevesy Izotópok nyomjelzőként való alkalmazása kémiai folyamatok vizsgálatánál 1943
- Otto Hahn Nehéz atommagok hasadásának felfedezése 1944
- Patrick Blackett Ködkamra kifejlesztése, magfizikai és kozmikus sugárzással kapcsolatos felfedezések 1948
- Hideki Yukawa A mezonok létének előre jelzése 1949
- Cecil Powell Nukleáris folyamatok tanulmányozására fotografikus módszer kidolgozása 1950
- Edwin McMillan
Glenn Seaborg Felfedezések a transzurán elemek kémiájában 1951
- John Cockroft
Ernest Walton A magok transzmutációja gyorsított részecskékkel 1951

NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

- Felix Bloch
Edward Purcell Mágneses erőter mérése az atommagban 1952
- Walther Bothe A kozmikus sugárzás tanulmányozása a
koincidencia módszerrel 1954
- Willard Libby A ^{14}C kormeghatározás módszerének
kidolgozása 1960
- Robert Hostadter A magszerkezet vizsgálata elektronszórással 1961
- Rudolf Mössbauer A gamma sugarak magokon történő visszalökődés
nélküli rezonancia adszorpciójának felfedezése 1961
- Eugene Wigner A szimmetria elv alkalmazása magoknál 1963
- Marie Goeppert-Mayer A nukleáris shell-model kifejlesztése 1963
Hans Jensen
- Hans Bethe A nukleáris reakciók a csillagokban elmélet
kidolgozása 1967
- Aegle Bohr A magokban a kollektív állapot elméletének
Ben Moltenson kidolgozása 1975
James Rainwater

NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

- Rosalind Yalow Inzulin vizsgálata radioaktív nyomjelzők segítségével 1977
- William Fowler Kémiai elemeket termelő magreakciók tanulmányozása asztrofizikai folyamatokban 1983