

## 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 kiterjedésér  $10^{-5}$ -öd részében összpontosul, sűrűsége  $10^{14} \text{g/cm}^3$



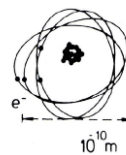
$10^{14} \text{m}$

**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



$10^{-10} \text{m}$

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

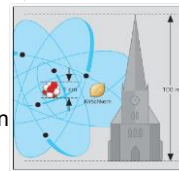
$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$$

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

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

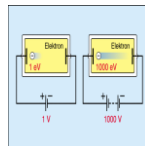
Különösen hasznos egység a tömeghiány kifejezése atomi tömegegységben (atomic mass unit, AMU):

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



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I



1

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. A mag sűrűsége óriási ( $10^{14} \text{g/cm}^3$ ), azaz  $10^{13}$ -szor nagyobb, mint a köznapi életben megszokott sűrűség ( $1-10 \text{g/cm}^3$ ).

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

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

Atommagok kötési energiája függ a tömegszámtól:

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

$$\text{kötési-energia} = \Delta m_{\text{AMU}} \times 931 \text{ MeV} / \text{amu}$$

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  $^{56}\text{Fe}$  magnál maximális, előtte és utána csökken!

Az egyes elemek maganyagának sűrűsége kb. állandó.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

2

**A  ${}^4_2\text{He}$  keletkezése**

Dr. Páztay György
Radiokémia-I
3

Az elektronok kötési energiája 4-100 eV, a nukleonoké 1,113-8,77 MeV ! A He nagy kötési energiája miatt nehéz atommagoknak ( $E < 7$  MeV/nukleon) alfa sugárzás a bomlás

Quantum #    1                    2    3    4    5    6    7

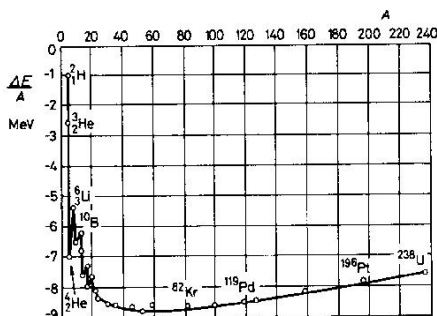
Maximum Electron Capacity    2                    8    18    32    50    72    98

Nuklid	Összes kötési energia MeV	1 nukleonra eső kötési energia MeV
${}^2_1\text{H}$	2,225	1,113
${}^3_1\text{H}$		
${}^4_2\text{He}$	7,7118	2,573
${}^6_3\text{Li}$		
${}^7_3\text{Li}$	39,244	5,606
${}^{16}_8\text{O}$	127,620	7,976
${}^{35}_{17}\text{Cl}$	298,20	8,52
${}^{56}_{26}\text{Fe}$	499,90	8,770
${}^{107}_{47}\text{Ag}$	915,387	8,555
${}^{176}_{71}\text{Lu}$	1418,40	8,059
${}^{208}_{82}\text{Pb}$	1636,455	7,868
${}^{238}_{92}\text{U}$	1783,889	7,591

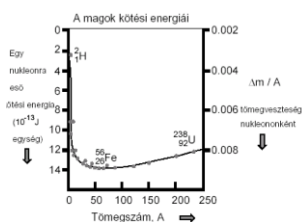
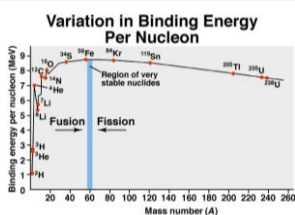
Dr. Páztay György
Radiokémia-I
4

Egy nukleonra eső kötési energia:

$$\frac{\Delta m \cdot c^2}{A} = \frac{\Delta E}{A} = \frac{M - Z \times m_p - N \times m_n - Z \times m_e}{A}$$



Egy energis szinten csak 2 proton és 2 neutron lehet



Az 1 nukleonra eső kötési energia a tömegszám függvényében

**IZOTÓP** azonos protonszámú (rendszámú) de különböző neutronszámú (tömegszámú) atommagok, az elemek zöme izotópok keveréke

**IZOBÁR** különböző protonszámú és neutronszámú, de azonos tömegszámú atommagok. **Csak egy rendszám lehet stabilis egy izobár sorozaton belül!!!!**

**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 (  $^{16}_8\text{O}$ ,  $^{24}_{12}\text{Mg}$ ,  $^{28}_{14}\text{Si}$ ,  $^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  $^{56}_{26}\text{Fe}$ ,  $^{88}_{38}\text{Sr}$ ,  $^{138}_{54}\text{Xe}$ ,  $^{208}_{82}\text{Pb}$  )

**IZOMEREK** mind a rendszámuk, mind a tömegszámuk egyezik, csak a belső energiájuk különböző

Hydrogen

Carbon

ATOMOK

Proton  
Neutron  
Electron

Carbon-11  
6 Protons  
5 Neutrons  
Unstable

Carbon-12  
6 Protons  
6 Neutrons  
Stable

Carbon-13  
6 Protons  
7 Neutrons  
Stable

Carbon-14  
6 Protons  
8 Neutrons  
Unstable

A SZÉN IZOTÓPJAI

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

7

A hidrogén izotópjai és az atomtömeg

Isotóp	Atom tömeg	gyakoriság	atomm tömeg • gyakoriság
$^1\text{H}$	1.00782503	0.99985	1.007674
$^2\text{H}$	2.014102	0.000148	0.000298
$^3\text{H}$	3.016049	nyomnyi	

A H atomtömege =  $1.007674 + 0.00298 = 1.007972$

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

8

s-Elemente										p-Elemente									
Periode	I A	II A	E A						III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A	IX A				
1	H 1.008																		
2	Li 6.941	Be 9.012																	
3	Na 22.99	Mg 24.31																	
4	K 39.10	Ca 40.08																	
5	Rb 85.47	Sr 87.62																	
6	Cs 132.9	Ba 137.3																	
7	Fr (223)	Ra (226)																	

d-Elemente															
II B		III B		IV B		V B		VI B		VII B		VIII B		I B	
4	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 52.00	Mn 54.94	Fe 55.85	Co 58.93	Ni 58.71	Cu 63.55	Zn 65.39					
5	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.94	Tc 98.91	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41					
6	La 138.91	Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.85	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59					
7	Ac (227)	Rf (261)	Rh (263)	Hs (265)	Mt (267)										

f-Elemente															
Lanthanide		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Actinide		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

Dr. Pátzay György 9

Group <sup>ns</sup>																				
Period	1											11	12	13	14	15	16	17	18	
	IA											IIA	IIIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
1	H 1.008											He 4.003								
2	Li 6.941	Be 9.012											B 10.81	C 12.01	N 14.01	O 16.00	F 18.99	Ne 20.18		
3	Na 22.99	Mg 24.31	Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.06	Cl 35.45	Ar 39.95												
4	K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 52.00	Mn 54.94	Fe 55.85	Co 58.93	Ni 58.71	Cu 63.55	Zn 65.39	Ga 69.72	Ge 72.59	As 74.92	Se 78.96	Br 79.90	Kr 83.80		
5	Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.94	Tc (98)	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.60	I 126.90	Xe 131.3		
6	Cs 132.9	Ba 137.3	La <sup>a</sup> 138.9	Hf 178.5	Ta 181.0	W 183.8	Re 186.2	Os 190.2	Ir 192.2	Pt 195.1	Au 197.0	Hg 200.6	Tl 204.4	Pb 207.2	Bi 208.9	Po (210)	At (210)	Rn (222)		
7	Fr (223)	Ra (226)	Ac <sup>a</sup> (227)	Rf (261)	Db (262)	Sg (263)	Bh (264)	Hs (265)	Mt (266)											

Lanthanide Series <sup>c</sup>	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	140.1	140.9	144.1	(147)	150.4	152.0	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173.0	175.0

Actinide Series <sup>c</sup>	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	232.0	(231)	(238)	(237)	(243)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)	(258)	(259)	(261)

Dr. Pátzay György 10

*© Los Alamos National Laboratory's Chemistry Division*

## A RADIOAKTIVITÁS FÖLFEDEZÉSE

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



Röntgen feleségének keze

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.

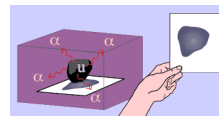
A rossz időjárás miatt egy elkezdett kísérletet nem tudott befejezni és a mintát sötét helyre tette el.

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

## A RADIOAKTIVITÁS FÖLFEDEZÉSE

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

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



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

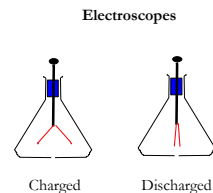
### A Curie házaspár – 1898

Marie Curie használta először a „radioaktivitás” kifejezést.

Megfigyelte, hogy a tórium az uránhoz hasonló sugárzást tud kibocsátani és egyes uránérczek „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 uránszurokércsből 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.

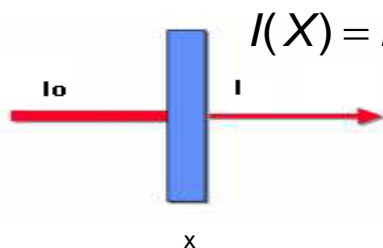
### RUTHERFORD 1898

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



$$I(X) = I_0 - \Delta I$$

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

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

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

Ahol

$x$  – adszorbens lemez vastagsága (cm)

$\mu$  – adszorpciók együttható (1/cm)

$\mu$  értéke a rendszámmal növekedett.

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

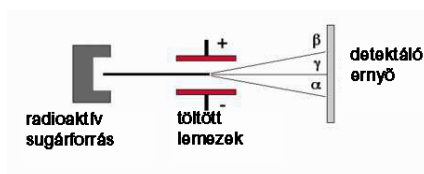
$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

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



## 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 részecskéknél nagyobb tömegű részecskék vannak jelen.
  - Úgy találta, hogy a  $\text{He}^{2+}$  magok sebessége 0,1C.
  - A hélium magok az uránból és a tóriumból távoztak.
- Egy harmadik, nagyobb áthatolóképességű sugárzást is fölfedeztek ( $\gamma$ ), mely nem térült el az elektromos vagy mágneses tér hatására.

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

17

## 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!

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

18

## A RADIOAKTÍV BOMLÁS

Kis időintervallumok esetén egy radioaktív atom bomlási valószínűsége:

$$p = \lambda \Delta t$$

Ahol:

$\lambda$  – 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:

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

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

19

## 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:

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

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

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

20

### A RADIOAKTÍV BOMLÁS

A  $\lambda$  bomlási állandó értéke függ a radioaktív mag minőségétől.

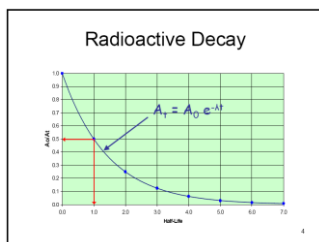
- Ez a radioaktív izotópok fontos jellemzője.
- Általában ennek alternatív formáját a felezési időt ( $t_{1/2}$ ) használjuk. Ez az időtartam, melynek során a radioaktív atommagok 50%-a elbomlik.

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

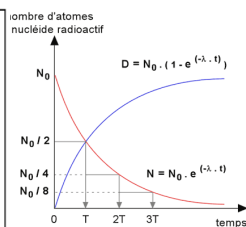
$$\ln(1/2) = -\lambda t_{1/2}$$

vagy

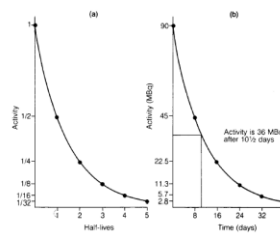
$$t_{1/2} = \ln(2)/\lambda = 0,693/\lambda$$



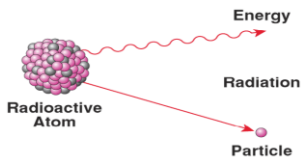
Dr. Pátzay György



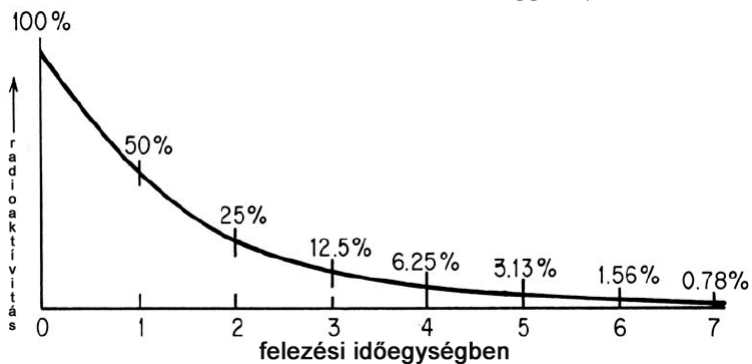
Radiokémia-I



21



A radioaktivitás az eltelt idő függvényében



Dr.

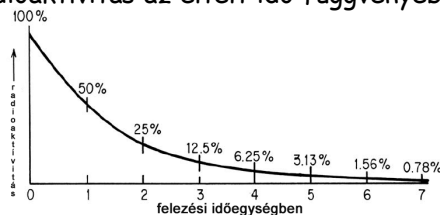
22

## Mikor tekinthető egy radioaktív izotóp elbomlottnak??

Kiindulási aktivitás (Bq)	Eltelt bomlási idő felezési idő egységben			
	$1 \times T_{1/2}$	$10 \times T_{1/2}$	$20 \times T_{1/2}$	$30 \times T_{1/2}$
100	50	0.097656	9.53674E-05	9.31323E-08
1000	500	0.976563	0.000953674	9.31323E-07
10000	5000	9.765625	0.009536743	9.31323E-06
100000	50000	97.65625	0.095367432	9.31323E-05
1000000	500000	976.5625	0.953674316	0.000931323
10000000	5000000	9765.625	9.536743164	0.009313226

**10-30 felezési időnek megfelelő bomlási idő után gyakorlatilag minden radioaktív sugárforrás elbomlottnak tekinthető!**

## A radioaktivitás az eltelt idő függvényében



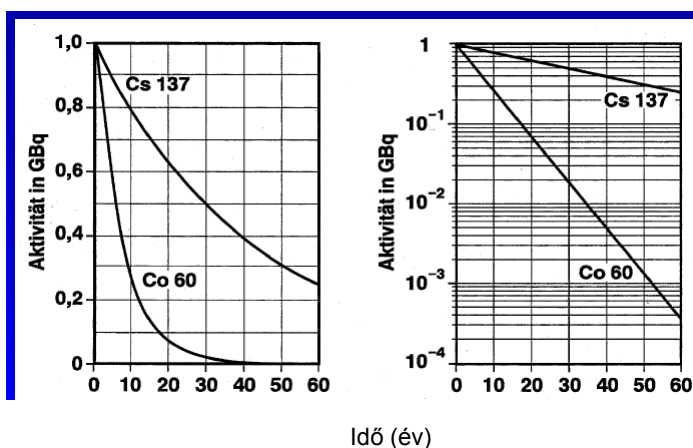
Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

23

## A bomlási görbe linearizálása:

- Logaritmizálva a mért beütésszámokat lineáris léptékben
- A mért beütésszámok ábrázolása féllogaritmikus papíron



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

24

## A RADIOAKTÍV ELEMÉK

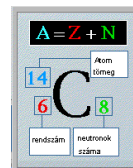
A 83-nál nagyobb rendszámú összes elem radioaktív. A legtöbb elem 140-es tömegszám fölött ugyancsak radioaktív. A vegyészek stabilnak tekintenek egy nuklidot, ha  $t_{1/2} \geq 10^{12}$  év. 200 fölötti tömegszám esetén a magok labilisak és spontán hasadással (SF) bomlanak.

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:

$^{14}\text{C}$  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.

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

25

Aktivitás = bomlások száma/eltelt idő

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

Aktivitás = beütésszám/eltelt idő

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{0,693}{t_{1/2}} t}$$

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:

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

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  $^{226}\text{Ra}$  aktivitása). Kisebb egységei a millicurie (mCi), mikrocurie ( $\mu\text{Ci}$ )

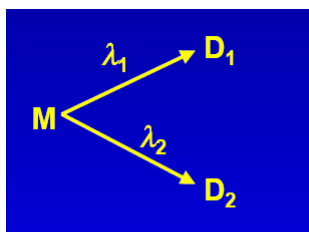
Új (SI) egysége az 1 Becquerel (1 Bq), 1 bomlás/másodperc, dps. Egyéb nagyobb egységei a kilobecquerel (kBq), megabecquerel (MBq), gigabecquerel (GBq) és a terabecquerel (TBq).

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

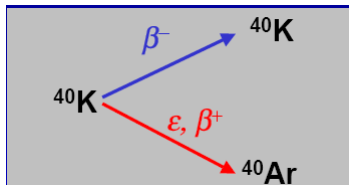
26

## Elágazó bomlási sémák



$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$\frac{1}{T_{1/2}} = \frac{1}{T_{1/2,1}} + \frac{1}{T_{1/2,2}}$$



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

27

## ÖSSZETETT BOMLÁS

Gyakori az az 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.

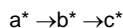
### 1. eset



c és d stabil magok.

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

### 2. eset



c az anya-leányelem rendszer stabil terméke.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

28

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

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

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

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

egyensúlyban

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

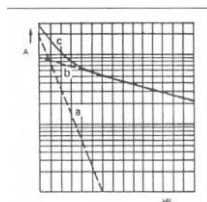
Az utolsó összefüggés exponenciális része adott idő után elhanyagolható, így:

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

Dr. Páztay György

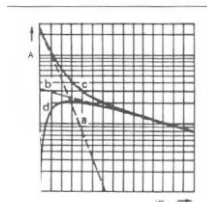
Radiokémia-I

29

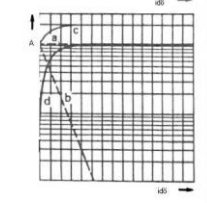


### ÖSSZETETT BOMLÁSOK

- 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



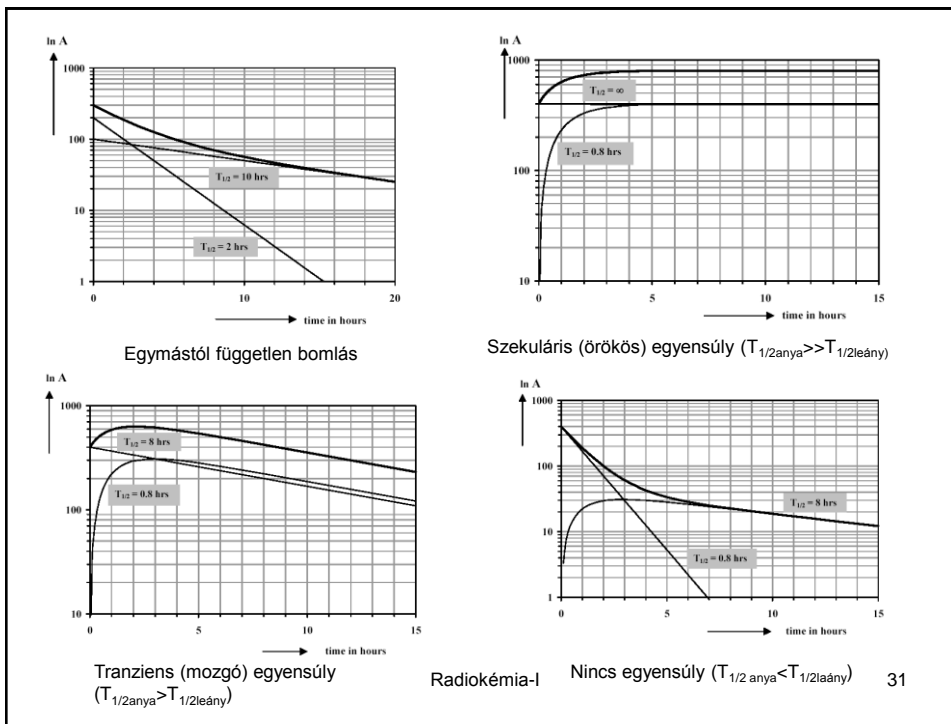
- $t_{a,1/2} \ll t_{b,1/2}$
- a – a\* bomlási görbéje
- b – b\* bomlási görbéje
- c – összaktivitási görbe
- d –  $A_b$ , b\* aktivitása, ha kezdetben csak a\* van jelen
- $A_a = A_b$

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

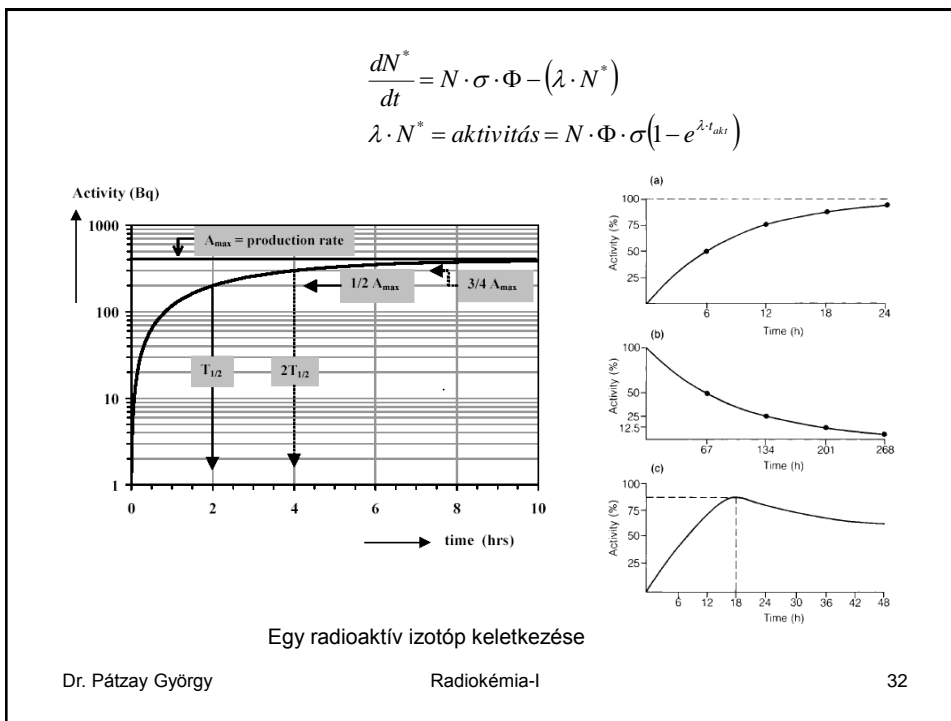
Dr. Páztay György

Radiokémia-I

30



Radiokémia-I Nincs egyensúly ( $T_{1/2\text{anya}} < T_{1/2\text{leány}}$ ) 31



Egy radioaktív izotóp keletkezése

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

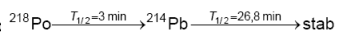
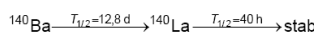
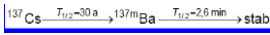
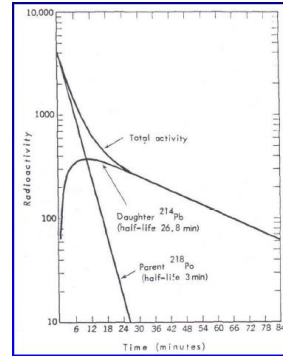
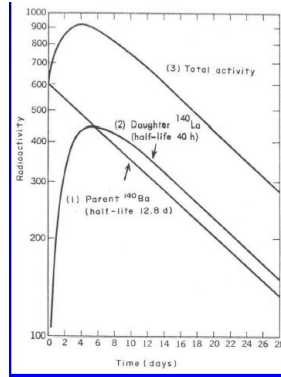
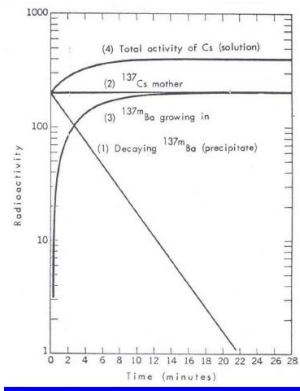
32



Szekuláris

tranzien

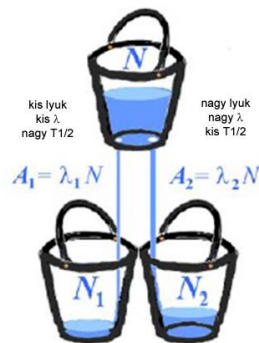
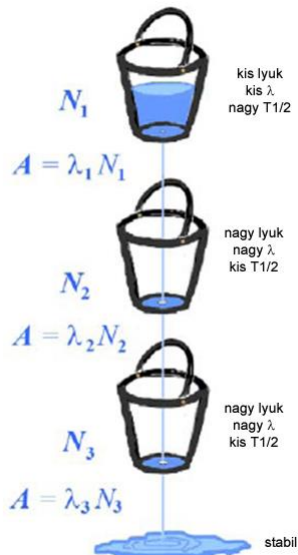
nincs egyensúly



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

33

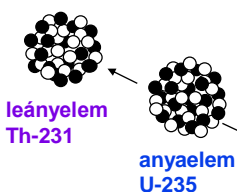


### A RADIOAKTÍV BOMLÁS OKAI

- A magban túl sok nukleon (proton és neutron) van összezsúfolva, ezen belül nem elég a neutron fölösleg (túl sok proton,  $\alpha$ -bomlás).
- A magban túl sok a proton ( $\beta^+$ -bomlás vagy elektronbefogás).
- A könnyebb és közepes nagyságú magokban túl sok a neutron ( $\beta^-$ -bomlás)
- A magnak túl nagy az energiája, gerjesztett állapotban van ( $\gamma$  kvantumok kibocsátása). Gyakran egyéb (pl.  $\beta$ -bomlás) kísérő jelensége.

### AZ $\alpha$ SUGÁRZÁS

Alfa sugárzás 



$$p^+ \text{-csökkenés} = 92 - 2 = 90$$

$$\% \text{-an} = 1 - 90/92 = 0,02174 \rightarrow 2,174\%$$

$$n \text{-csökkenés} = 143 - 2 = 141$$

$$\% \text{-an} = 1 - 141/143 = 0,01399 \rightarrow 1,399\%$$

**A protonok száma %-an jobban csökken**



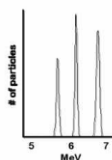
Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

35

${}^4\text{He}^{2+}$  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 vonalakkól áll.



A  $\alpha$ -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  $\alpha$ -sugárzást bocsátanak ki.

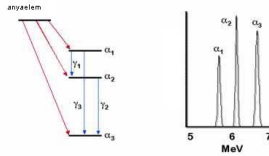
Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

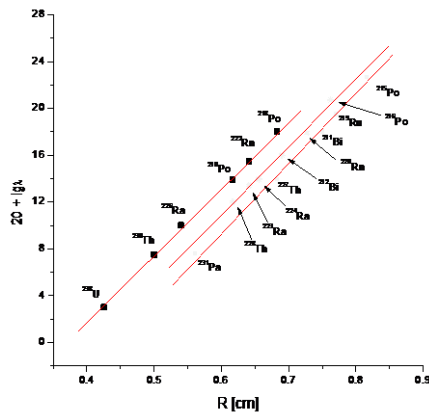
36

isotope	$t_{1/2}$	MeV $\alpha$
Np-237	$2.16 \times 10^6$ 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  $\alpha$ -spektrum:



A többszörös vonalak akkor keletkeznek, ha az  $\alpha$  bomlás több úton lehetséges. Bomlás közben  $\gamma$  kvantumokat is bocsáthat ki.



A Geiger\_Nuttal szabály

$$\lg \lambda = a \cdot R + b$$

$$\lg \lambda = a \cdot \sqrt{E} + b'$$

Visszalökési energia:

•Egy  $\alpha$ -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  $\alpha$  részecske azonos kinetikai energiával rendelkezik:

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

Így a teljes átmenet energiája számítható. Néha a kémiai kötés felszakad (Szilárd-Chalmres effektus).

Példa: számítsa ki egy 4 MeV energiájú  $\alpha$  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.

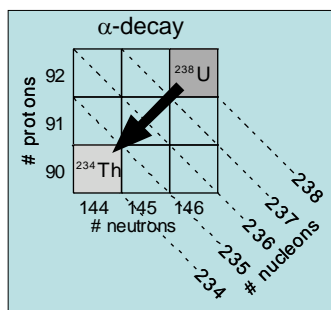
Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

39

## $\alpha$ -bomlás

Emission of an  $\alpha$ -particle or  ${}^4\text{He}$  nucleus (2 neutrons, 2 protons)



The parent decreases its mass number by 4, atomic number by 2.

Example:  ${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + {}^4\text{He}$

Mass-energy budget:

${}^{238}\text{U}$	238.0508 amu
${}^{234}\text{Th}$	-234.0436
${}^4\text{He}$	-4.00260

mass defect 0.0046 amu  
 $= 6.86 \times 10^{-10} \text{ J/decay}$   
 $= 1.74 \times 10^{12} \text{ J/g } {}^{238}\text{U}$   
 $= 7.3 \text{ kilotons/g}$

This is the preferred decay mode of nuclei heavier than  ${}^{209}\text{Bi}$  with a proton/neutron ratio along the valley of stability

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

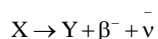
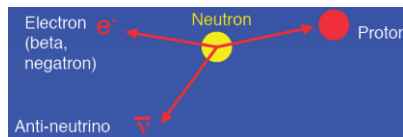
40

## A $\beta$ SUGÁRZÁS

A  $\beta$ -bomlás háromféleképpen mehet végbe:

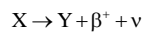
1. Negatron ( $\beta^-$ ) kibocsátásával.

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



2. Pozitron ( $\beta^+$ ) kibocsátásával.

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

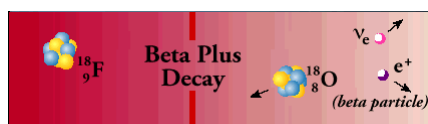
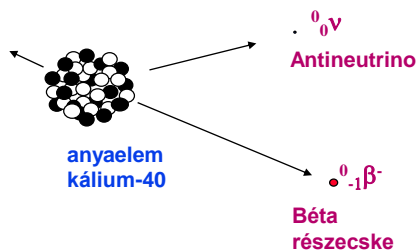


Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

41

Negatív béta sugárzás 



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

42

Spectra of the  $\beta^-$  and  $\beta^+$  particles emitted by  $^{64}\text{Cu}$

Repeat

A  $\beta^+$  és  $\beta^-$  sugárzások folytonos energiával rendelkeznek

- Az atommag körüli elektronok befolyásolják
- Karakterisztikus  $E_{\text{max}}$  energiával rendelkeznek

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

$$\beta^+ + e^- \rightarrow 2\gamma(0,51\text{MeV})$$

A két  $\gamma$  foton egymáshoz képest  $180^\circ$ -ban repül ki a momentum megmaradása miatt.

$$\beta^+ (\text{lassú}) + e^- \rightarrow \gamma(1,02\text{MeV})$$

Kevésbé jellemző.

Dr. Pátzay György Radiokémia-I 43

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

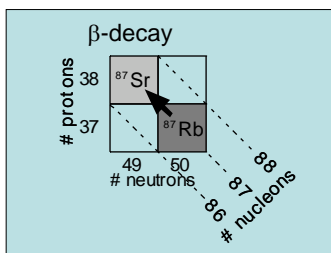
3. Elektronbefogással (EC)

- 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  $< 2m_0c^2$  ( $< 1,02$  MeV).
- Magemisszió ritkán kíséri az elektronbefogást, ha csak 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.

Dr. Pátzay György Radiokémia-I 44

## $\beta$ -bomlás

Emission of an electron (and an antineutrino) during conversion of a neutron into a proton



The mass number does not change, the atomic number *increases* by 1.

Example:  $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + e^- + \bar{\nu}$

Mass-energy budget:

$$\begin{array}{r} ^{87}\text{Rb} \quad 86.909186 \text{ amu} \\ ^{87}\text{Sr} \quad \underline{-86.908882} \end{array}$$

$$\begin{aligned} \text{mass defect} & 0.0003 \text{ amu} \\ & = 4.5 \times 10^{-11} \text{ J/decay} \\ & = 3.0 \times 10^{11} \text{ J/g } ^{87}\text{Rb} \\ & = 1.3 \text{ kilotons/g} \end{aligned}$$

This is the preferred decay mode of nuclei with excess neutrons compared to the valley of stability

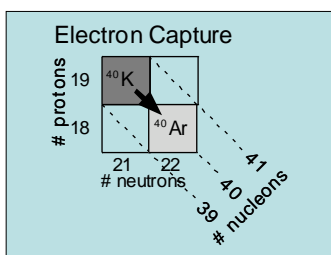
Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

45

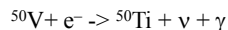
## $\beta^+$ -bomlás és elektron befogás

Emission of a positron (and a neutrino) *or* capture of an inner-shell electron during conversion of a proton into a neutron



The mass number does not change, the atomic number *decreases* by 1.

Examples:  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + e^+ + \nu$



In positron emission, most energy is liberated by remote matter-antimatter annihilation. In electron capture, a gamma ray carries off the excess energy.

These are the preferred decay modes of nuclei with excess protons compared to the valley of stability

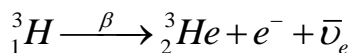
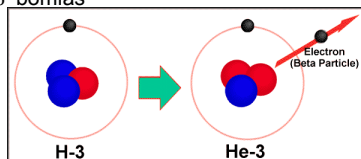
Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

46

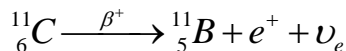
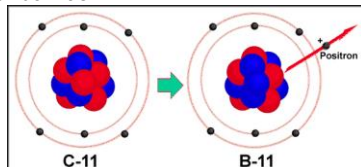
## $\beta$ bomlás – három esete

### 1) $\beta^-$ bomlás



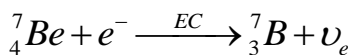
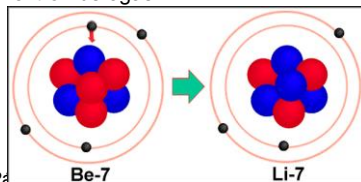
- Egy neutronból proton lesz, elektron és antineutrino
- A nem változik, de más elem jön létre
- anti-neutrino bocsát ki (nincs töltés és tömeg)

### 2) $\beta^+$ bomlás



- Egy protonból neutron lesz, pozitron és neutrino
- A nem változik, de más elem jön létre
- Neutrino bocsát ki

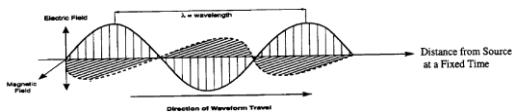
### 3) Elektron befogás



Dr. Pátzay György Radiokémia-I

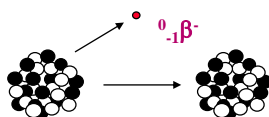
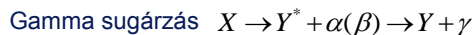
47

## A $\gamma$ SUGÁRZÁS



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

Sok esetben az energia felesleg csak gerjesztett mag keletkezésével jár, melyet gamma-sugárzás formájában ad le. Felléphet önállóan, vagy alfa- vagy béta-sugárzás kísérőjeként. Sokszor az energia felesleg nem gamma-sugárzás révén csökken, hanem egy héjelektron repül ki a helyéről. Ez az ún. Auger elektron sugárzás karakterisztikus!!!



Anyaelem  
Co-60

Leányelem  
Ni-60

Gamma sugarak

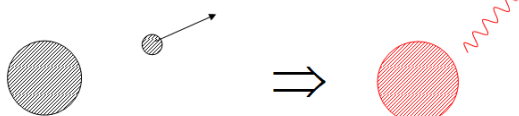
Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

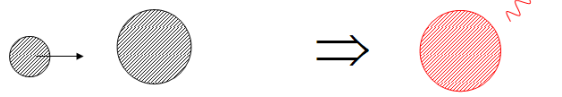
48



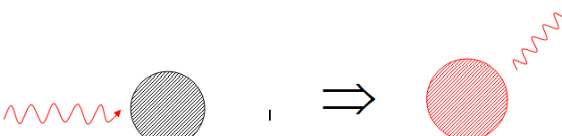
1. Bomlás ( $\alpha, \beta, sf, \dots$ )



2. Magreakció

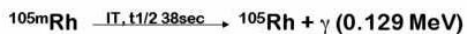


3. Elektromágneses kölcsönhatás

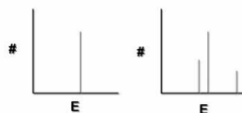


Dr. Pátzay György 49

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



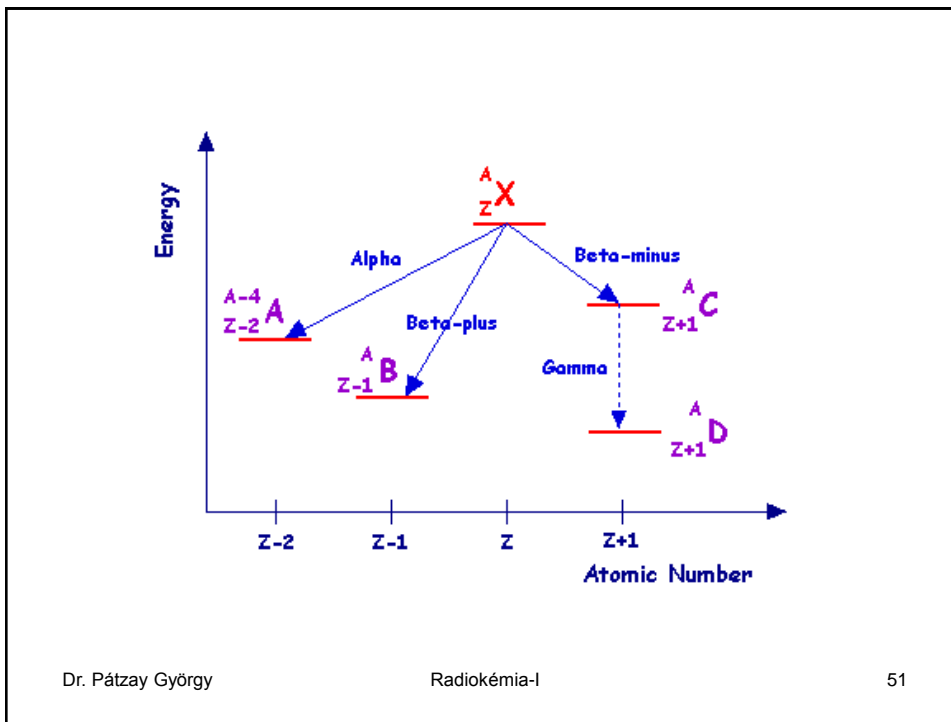
A  $\gamma$ -sugárzás diszkrét energiájú sugárzás, mely egy vagy több vonalas spektrumot ad.



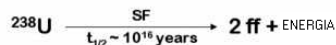
### MÁS BOMLÁSI MÓDOK

#### 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:



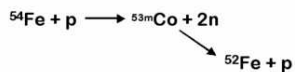
### KÉSLELTETETT NEUTRON EMISSZIÓ

- A hasadási termékek gyakran neutronban dúsak, melyek  $\beta^-$  bomlással alakulnak tovább.
- A  $\beta^-$  bomlás után a mag még általában gerjesztett állapotban van és gyakran  $\gamma^-$  bomlással szabadul meg az energiafeleslegtől.
- Néha a leányelem neutron 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 részecskével 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.

energiaszemes Elektron  
e<sup>-</sup>

Bremsstrahlung (Röntgenquant)

Fékezési Röntgen sugárzás  
(Bremsstrahlung)

Elektron  
Célmag  
Wolfram

Röntgen sugár

Anód (+)

β

attractive force

+Ze

β

x-ray

Dr. Páztay György
Radiokémia-I
53

Elektron kölcsönhatása az atommal

Target atom

Incident electrons

1 •

2 •

3 •

Nucleus

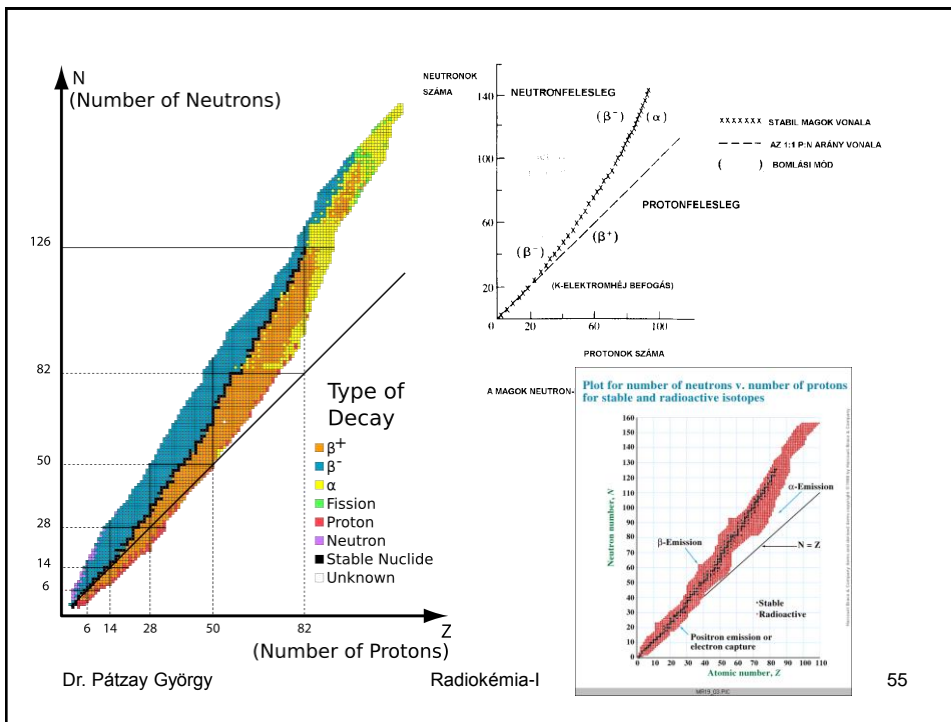
Creates a polychromatic spectrum

Close interaction: Moderate energy

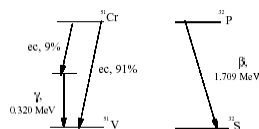
3 Distant interaction: Low energy

1 Impact with nucleus: Maximum energy

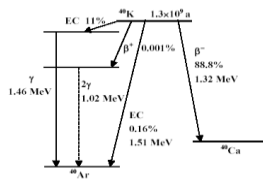
Dr. Páztay György
Radiokémia-I
54

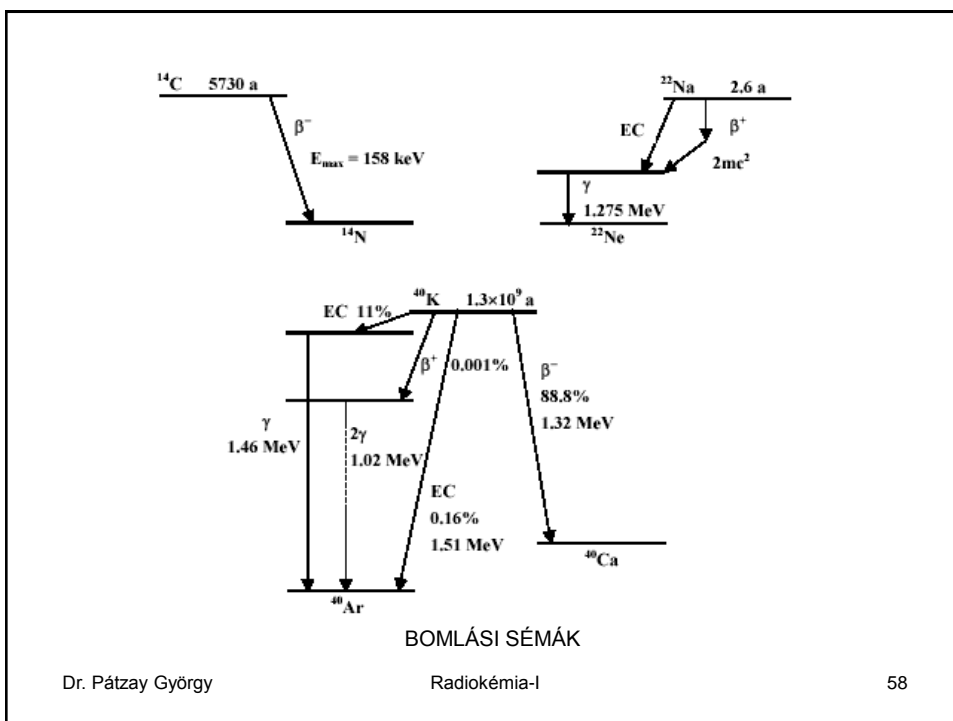
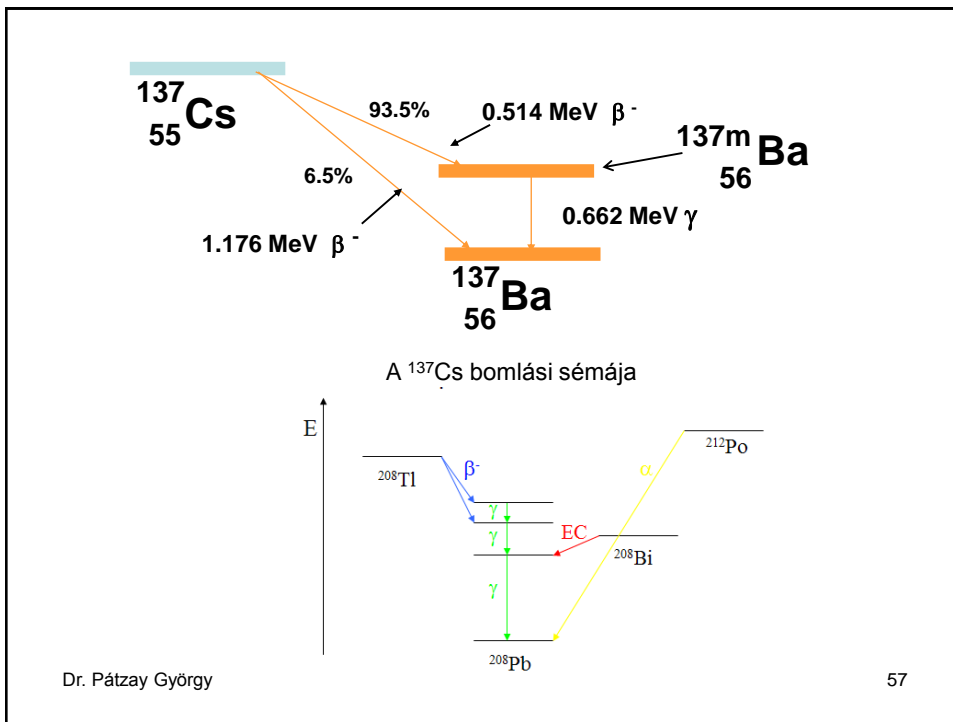


### MAGREAKCIÓK ÉS BOMLÁSOK SORÁN VÉGBEMENŐ VÁLTOZÁS



Protonszám növekedéssel ( $\beta^-$  bomlás) járó átmenet esetén a nyilak lefelé és jobbra, protonszám csökkenéssel ( $\alpha$ -bomlás, elektronbefogás) járó átmenet esetén lefelé és balra,  $\gamma$ -sugárzással járó átmenet esetén függőlegesen lefelé mutatnak. A legtöbb radionuklid tiszta béta sugárzó (pl.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$  stb.) Néhány radionuklid vagy béta-gamma sugárzó, vagy elektronbefogással bomlik ( $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{125}\text{I}$ ). Így például a  $^{51}\text{Cr}$  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  $^{40}\text{K}$  bomlási sémája.

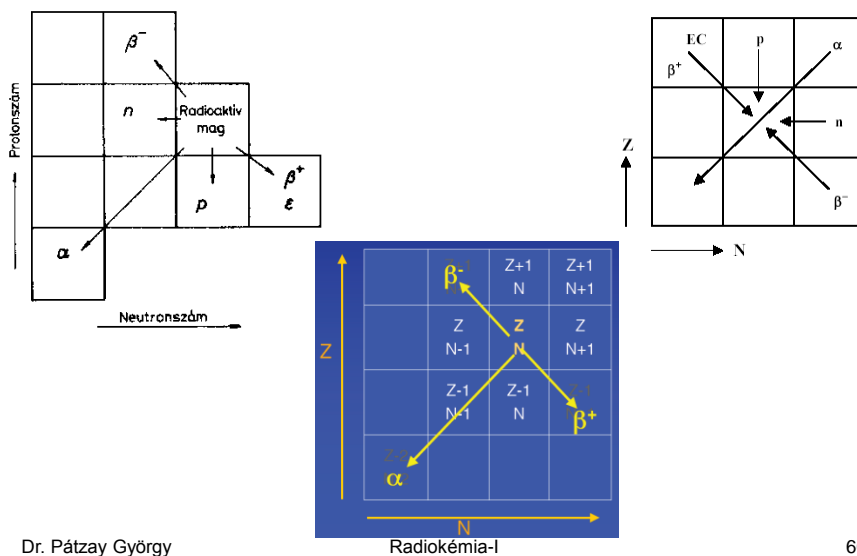




## A magreakciók csoportosítása

	Belépő részecske	Magreakciók
Töltés nélküli részecske	neutron	$n, \gamma; n, p; n, \alpha; n, 2n; n, f$ (hasadás)
	gamma-foton	$\gamma, n; \gamma, p$
Töltött részecske	proton	$p, \gamma; p, n; p, \alpha$
	deuteron	$d, n; d, p; d, \alpha; d, 2n$
	alfa	$\alpha, n; \alpha, p$
	nehezebb magok	lásd transzuránok előállítása

### MAGREAKCIÓK ÉS BOMLÁSOK SORÁN VÉGBEMENŐ VÁLTOZÁS



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

60

### IZOTÓPTÁBLÁZATOK

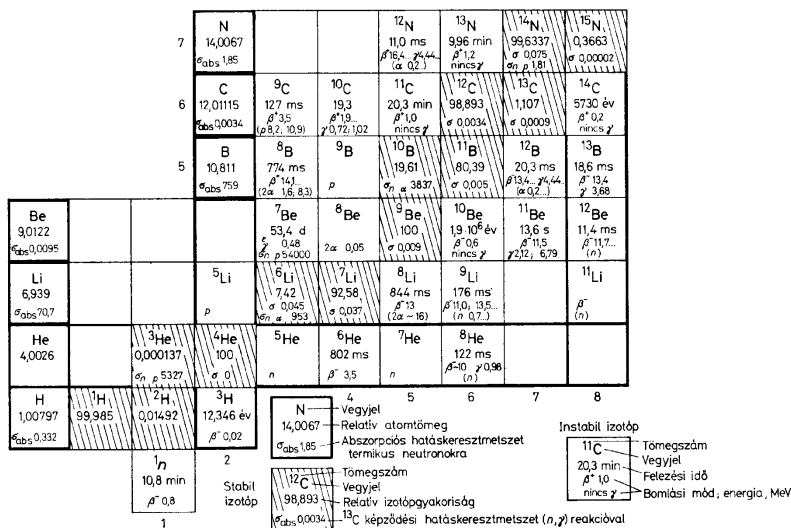
Z	Izotóp	T <sub>1/2</sub>	Bomlási mód	Részecskeenergia, MeV	γ-energia, MeV	η, %	Előállítás	σ' = fσ* 10 <sup>28</sup> , m <sup>2</sup>	Leányelem
27					2,02 11 % 2,60 16 % 2,99 1 % 3,25 12 % 3,47 1 %				
	<sup>57</sup> Co	270 d	E.X.	100 %	0,014 6 % 0,122 88 % 0,136 10 %	83 % 1 % 1 %	<sup>56</sup> Fe(d,n) <sup>60</sup> Ni(p,α)	0,9	
	<sup>58</sup> Co	71,3 d	E.X. β <sup>+</sup>	85 % 15 %	0,81 100 % 1,62 0,5 % 0,51 (β <sup>+</sup> )		<sup>58</sup> Ni(n,p)		
	<sup>60m</sup> Co	10,5 min	I	100 %	0,059 0 %	≈100%	<sup>59</sup> Co(n,γ)	19	<sup>60</sup> Co
	<sup>60</sup> Co	5,27 a	β <sup>-</sup>	0,31 ≈ 100 % 1,48 0,01 %	1,17 100 % 1,33 100 %		<sup>59</sup> Co(n,γ)	37	
28	<sup>63</sup> Ni	92 a	β <sup>-</sup>	0,067 100 %			<sup>62</sup> Ni(n,γ)	0,77	
	<sup>65</sup> Ni	2,521 h	β <sup>-</sup>	0,60 ≈ 23 % 1,01 ≈ 8 % 2,10 ≈ 69 %	0,37 5 % 1,11 13 % 1,49 18 %		<sup>64</sup> Ni(n,γ)	0,016	
29	<sup>64</sup> Cu	12,9 h	β <sup>-</sup> β <sup>+</sup> E.X.	0,57 38 % 0,66 19 % 43 %	0,51 (β <sup>+</sup> ) 1,34 0,6 %		<sup>63</sup> Cu(n,γ)	3,0	
	<sup>66</sup> Cu	5,10 min	β <sup>-</sup>	0,76 < 0,2 % 1,59 ≈ 9 % 2,63 ≈ 91 %	0,83 0,2 % 1,04 9 %		<sup>65</sup> Cu(n,γ)	0,56	

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

61

### IZOTÓPTÁBLÁZATOK



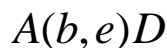
3.3. ábra. Részlet egy izotóptáblázatból

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

62

### Magreakciók energia mérlege a Q érték



Energiamérleg: 
$$E_A + M_A \cdot c^2 + E_b + M_b \cdot c^2 = E_D + M_D \cdot c^2 + E_e + M_e \cdot c^2$$

$$[(E_D + E_e) - (E_A + E_b)] = [(M_A + M_b) - (M_d + M_e)] \cdot c^2 = Q$$

Ahol E a mozgási,  $M \cdot c^2$  pedig a tömeggel ekvivalens energia.

$Q > 0$  exoterm,  $Q < 0$  endoterm magreakció,  $\text{abs}(Q)$ - küszöbenergia

### ÖSSZEFÜGGÉS A FAJLAGOS AKTIVITÁSOK ÉS A FELEZÉSI IDŐ KÖZÖTT

$$A = \lambda \cdot N^* = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \cdot N^* \quad \text{Az aktív atommagok száma pedig} \quad N^* = \frac{m}{M} \cdot f \cdot 6,023 \cdot 10^{23}$$

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

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  $^{32}\text{P}$  ( $t_{1/2} = 14,3$  nap) tömege  $3,5 \cdot 10^{-9}$  g, azaz 3,5 nanogramm, míg ugyanilyen aktivitású 1 mCi  $^{226}\text{Ra}$  ( $t_{1/2} = 1600$  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 nyílak 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

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

65

## Fajlagos aktivitások

nuklid	T(1/2)	1/lambda	lambda 1/s	n(1Bq)	m(1 Bq) g
Pa-234m	1,18E+00 m	1,70E+00 m	9,79E-03	1,02E+02	3,97E-20
Na-24	1,50E+01 h	2,17E+01 h	1,28E-05	7,81E+04	3,11E-18
P-32	1,43E+01 d	2,06E+01 d	5,61E-07	1,78E+06	9,47E-17
S-35	8,75E+01 d	1,26E+02 d	9,17E-08	1,09E+07	6,34E-16
Na-22	2,60E+00 a	3,75E+00 a	8,45E-09	1,18E+08	4,32E-15
Co-60	5,27E+00 a	7,61E+00 a	4,17E-09	2,40E+08	2,39E-14
H-3	1,23E+01 a	1,78E+01 a	1,78E-09	5,62E+08	2,80E-15
Pb-210	2,23E+01 a	3,22E+01 a	9,86E-10	1,01E+09	3,54E-13
Sr-90	2,85E+01 a	4,11E+01 a	7,71E-10	1,30E+09	1,94E-13
Cs-137	3,01E+01 a	4,34E+01 a	7,30E-10	1,37E+09	3,11E-13
Ra-226	1,60E+03 a	2,31E+03 a	1,37E-11	7,28E+10	2,73E-11
C-14	5,74E+03 a	8,28E+03 a	3,83E-12	2,61E+11	6,07E-12
Pu-239	2,44E+04 a	3,52E+04 a	9,01E-13	1,11E+12	4,40E-10
I-129	1,57E+06 a	2,27E+06 a	1,40E-14	7,14E+13	1,53E-08
U-235	7,04E+08 a	1,02E+09 a	3,12E-17	3,20E+16	1,25E-05
U-238	4,47E+09 a	6,45E+09 a	4,92E-18	2,03E+17	8,04E-05
Th-232	1,41E+10 a	2,03E+10 a	1,56E-18	6,39E+17	2,46E-04

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

66

## Bomlási sorok

A	Bomlási sor	Anyaelem	$T_{1/2}$ [a]	Végtermék
4n	Tórium	$^{232}\text{Th}$	$1,40 \cdot 10^{10}$	$^{208}\text{Pb}$
4n+1	Neptúnium	$^{237}\text{Np}$	$2,14 \cdot 10^6$	$^{209}\text{Bi}$
4n+2	Urán-rádium	$^{238}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$	$^{206}\text{Pb}$
4n+3	Aktínium	$^{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$	$^{207}\text{Pb}$

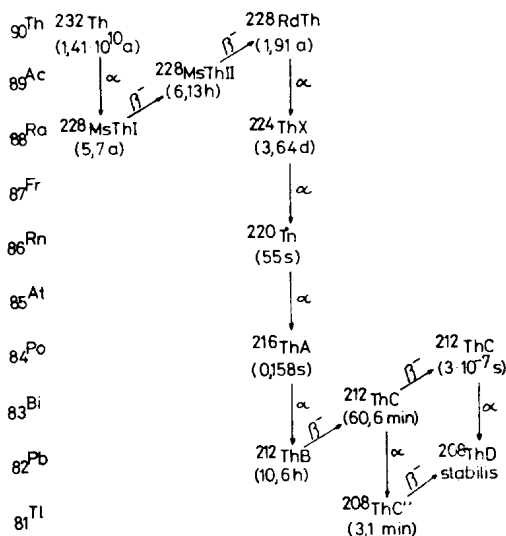
Bomlási sor	Kezdő	$T_{1/2}$	Vég	Gáz ( $T_{1/2}$ )
Tórium	$^{232}\text{Th}$	$1.4 \times 10^{10}$ év	$^{208}\text{Pb}$	$^{220}\text{Rn}$ (55.6 sec) toron
Uránium	$^{238}\text{U}$	$4.5 \times 10^9$ év	$^{206}\text{Pb}$	$^{222}\text{Rn}$ (3.8 days) radon
Aktínium	$^{235}\text{U}$	$7.1 \times 10^8$ év	$^{207}\text{Pb}$	$^{219}\text{Rn}$ (4.0 sec) aktinon

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

67

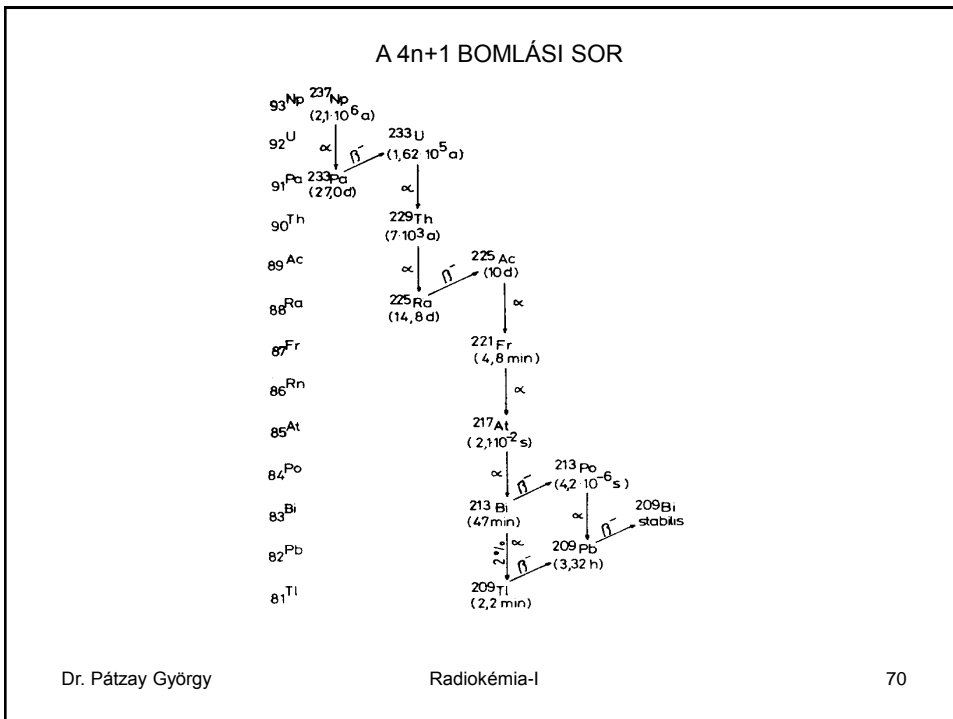
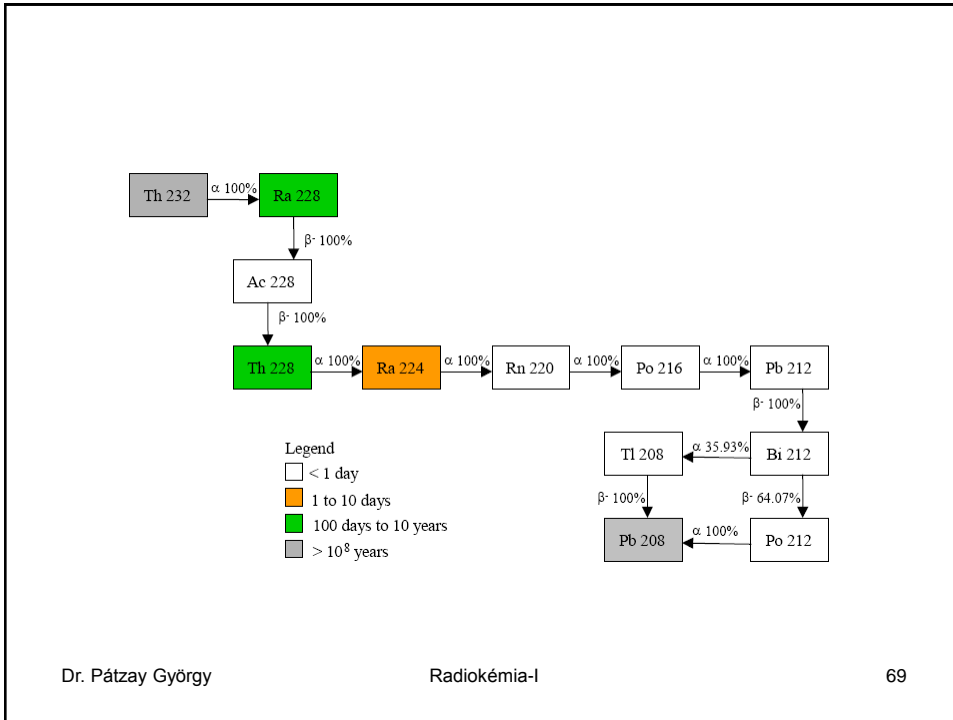
### A 4 n BOMLÁSI SOR



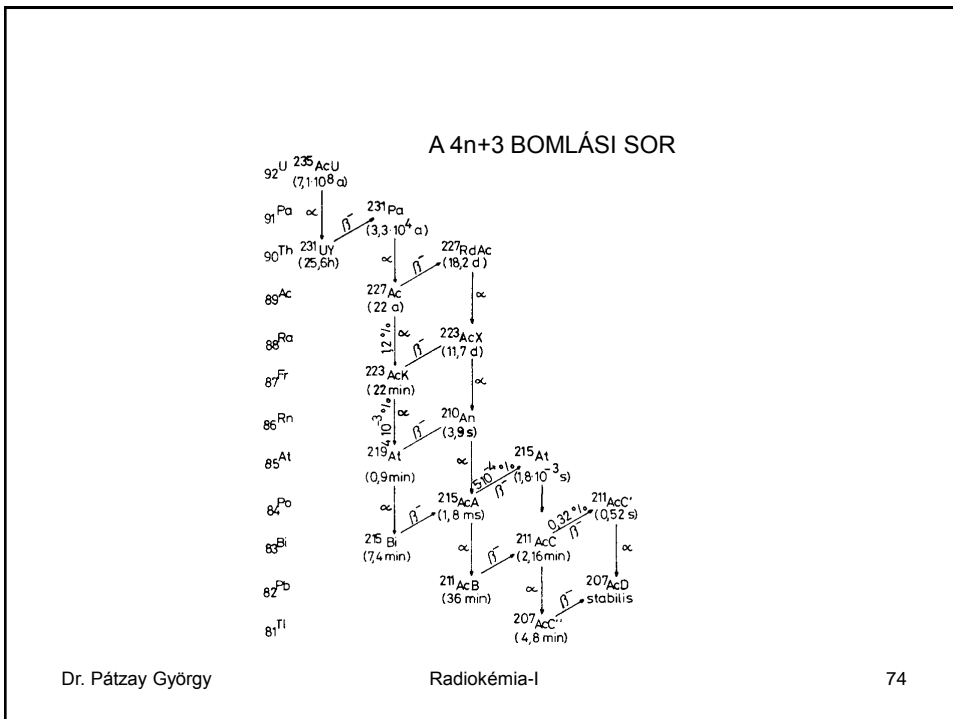
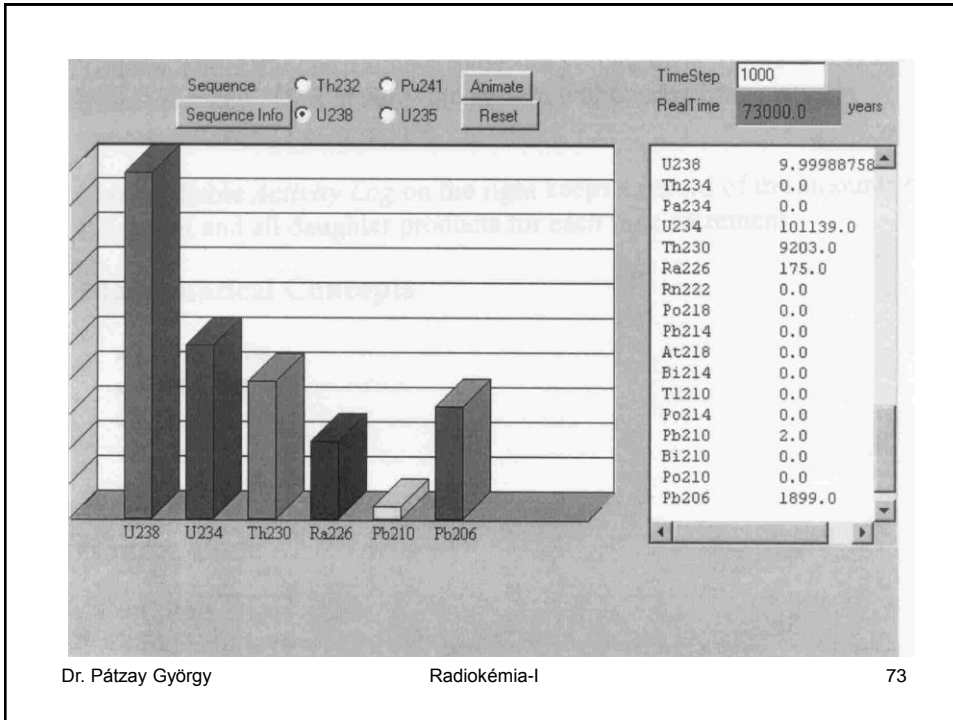
Dr. Pátzay György

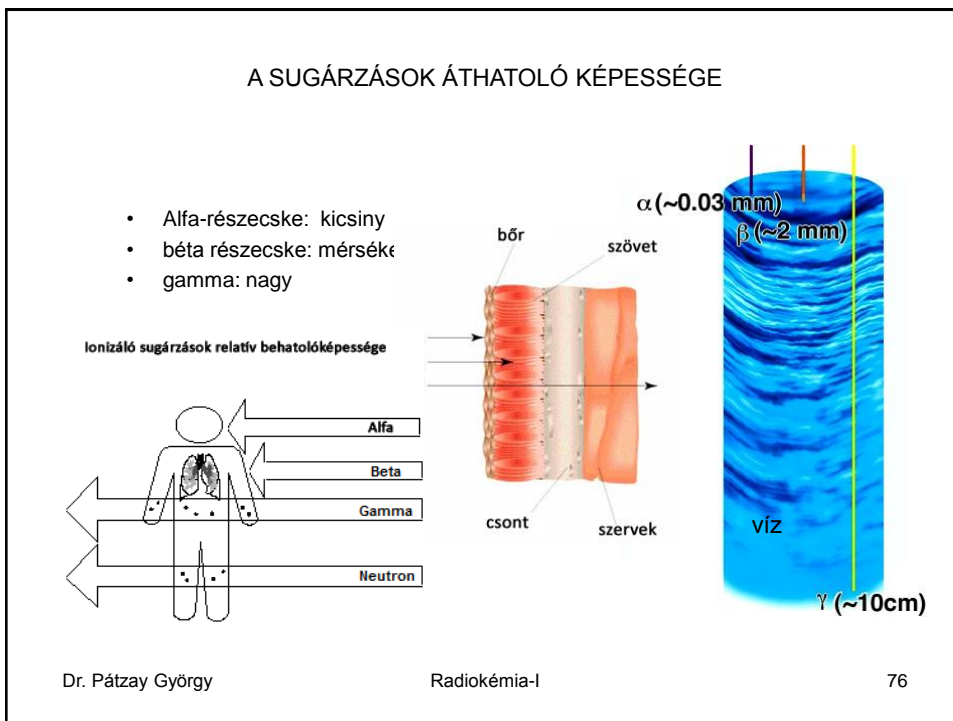
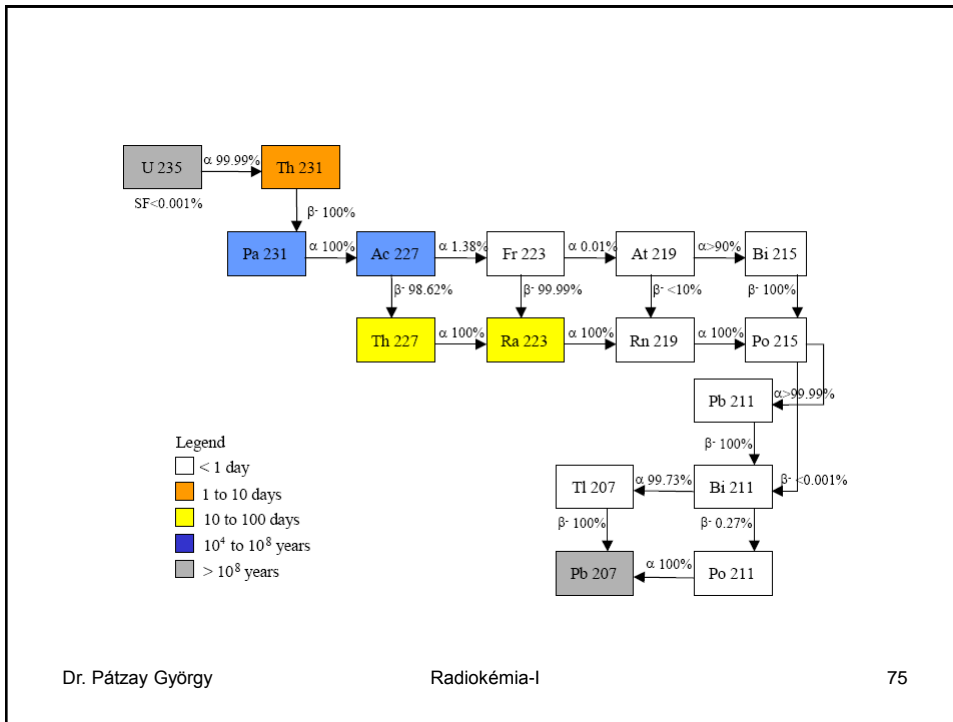
Radiokémia-I

68

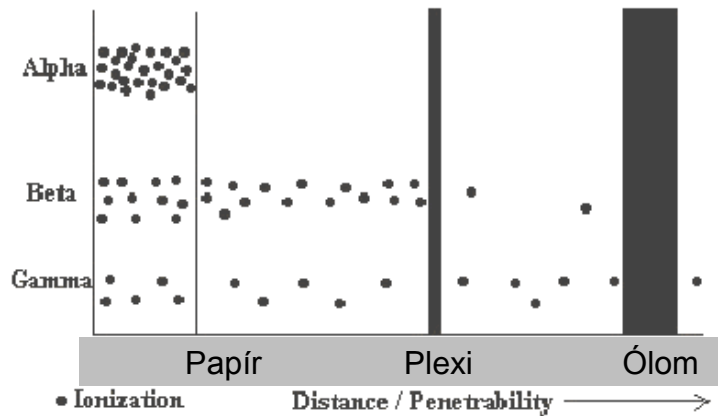




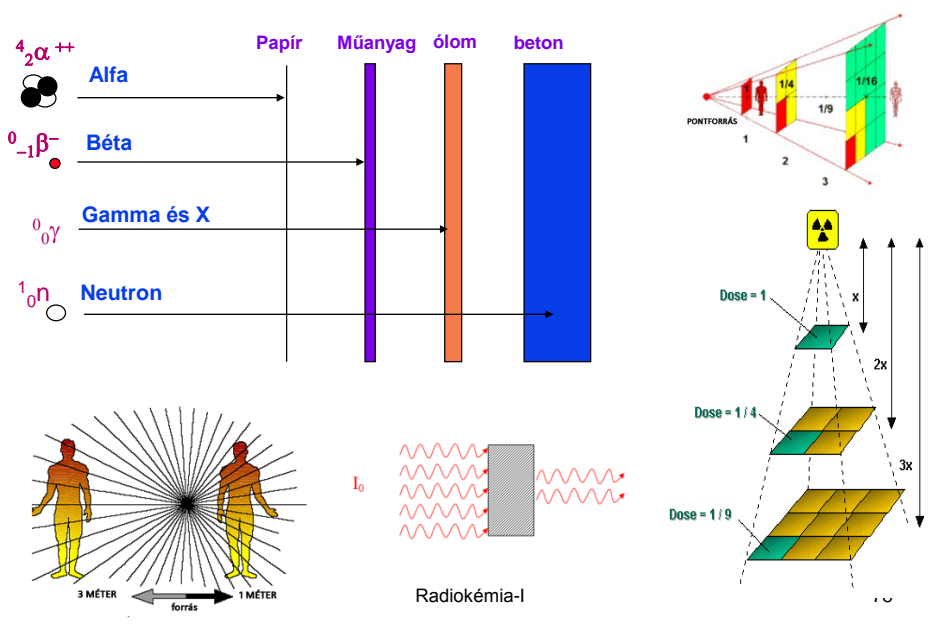




# Linear Energy Transfer (LET)



## A RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSOK ÁTHATOLÓKÉPESSÉGE



## Sugárnyékolás

**Gamma-sugárzás:** ólom, urán, baritbeton



**Béta-sugárzás:** plexi, alumínium  
NEM ÓLOM! (fékezési rtg sugárzás)



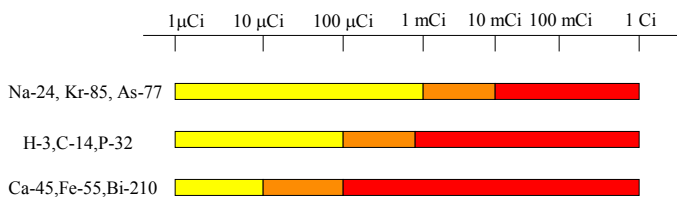
**Neutronsugárzás:** víz, műanyag (sok hidrogén)

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

## Radioaktív izotópok veszélyességének szempontjai

- Felezési idő
- Sugárzás energiája és a bomlás típusa
- Elhelyezkedése (szervezeten kívül-belül)
- Kiürülés sebessége
- Az alkalmazott mennyiségek és azok kezelési módjai



Dr. Páztay György

Radiokémia-I

80



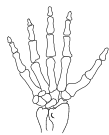
## Radioizotópok csoportosítása Egységnyi aktivitásra eső relatív toxicitásuk alapján

I. csoport									
Pb-210	Po-210	Ra-226	Ra-226	Ac-227	Th-227	Ra-228	Th-228	Th-230	U-230
Pa-231	U-232	U-233	U-234	Np-237	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Am-241
Pu-242	Cm-242	Am-243	Cm-243	Cm-244	Cm-245	Cm-246	Cf-249	Cf-250	Cf-252
II. csoport									
Na-22	Cl-36	Ca-45	Sc-46	Mn-54	Co-56	Co-60	Sr-89	Sr-90	Y-91
Zr-95	Ru-106	Ag-110m	In-114m	Cd-115m	Sb-124	Sb-125	I-124	I-126	Te-127m
Te-129m	I-131	I-133	Cs-134	Cs-137	Ba-140	Ce-144	Ba-152	Ba-154	Tm-170
Hf-181	Ta-182	Ir-192	Tl-204	Bi-207	Bi-210	At-211	Pb-212	Ra-224	Ac-228
Pa-230	Th-234	U-236	Bk-249	Tb-250					
III. csoport									
Be-7	C-14	F-18	Na-24	Cl-38	Si-31	P-32	S-35	A-41	K-42
K-43	Ca-47	Sc-47	Sc-48	V-48	Cr-51	Mn-52	Fe-52	Fe-55	Mn-56
Co-57	Co-58	Fe-59	Ni-63	Cu-64	Ni-65	Zn-65	Zn-69m	Ga-72	As-73
As-74	Se-75	As-76	As-77	Br-82	Sr-85	Kr-85m	Kr-87	Rb-86	Y-90
Sr-91	Y-92	Y-93	Nb-93m	Nb-95	Tc-98	Zr-97	Tc-97	Ru-97	Tc-97m
Tc-99	Mo-99	Ru-103	Pd-103	Ru-105	Rh-105	Ag-105	Pd-109	Cd-109	Ag-111
Sn-113	Cd-115	In-115m	Sn-125	Sb-122	I-125	Te-125m	Te-127	Te-129	I-130
Cs-131	Ba-131	Te-131m	Te-132	I-132	I-134	I-135	Xe-135	Cs-136	La-140
Ce-141	Pr-142	Ce-143	Pr-143	Nd-147	Pm-147	Nd-149	Pm-149	Sm-151	Bu-152m
Sm-153	Gd-153	Bu-155	Gd-159	Dy-185	Dy-186	Ho-186	Er-189	Er-171	Tm-171
Yb-175	Lu-177	W-181	Re-183	W-185	Os-185	Re-186	W-187	Re-188	Ir-190
Os-191	Pt-191	Os-193	Pt-193	Ir-194	Au-196	Pt-197	Au-198	Au-199	Hg-197
Hg-197m	Tl-200	Tl-201	Tl-202	Hg-203	Pb-203	Bi-206	Bi-212	Rn-220	Rn-222
Th-231	Pa-233	No-236							
IV. csoport									
H-3	O-15	A-37	Co-58m	Ni-59	Zn-69	Ge-71	Kr-85	Sr-95m	Rb-87
Y-91m	Zr-93	Nb-97	Tc-99m	Tc-99m	Rh-103m	In-113m	I-129	Xe-131m	Xe-133
Cs-134m	Cs-135	Sm-147	Re-187	Os-191m	Pt-193m	Pt-197m	Th-232	Th-Nat	U-235
U-238	U-Nat								

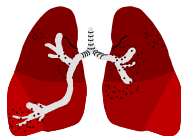
Dr. Pátz

81

## Kritikus szervek



P-32  
Ra-226  
Pu-239

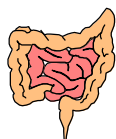


Rn-222

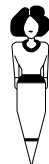


vagy

H-3



Cr-51  
Co-60  
Tc-99m  
Au-198  
Ir-192  
U-235



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

82

**Csökkenés a szervezetben:  
Effektív felezési idő**

$$T_{effektiv} = \frac{T_{1/2} * T_{1/2b}}{T_{1/2} + T_{1/2b}}$$

$T_{1/2}$ -felezési idő  
 $T_{1/2b}$ -biológiai felezési idő

Diagram labels and associated isotopes:

- pajzsmirigy: I-126, I-131
- izomzat: K-42, Cs-137
- máj: Co-60, Te-132, Pu-239
- vesék: Ru-106
- petefészkek: K-42, Co-60, Zn-65, Ru-106, I-131, Cs-137, Ba-140, Pu-239
- bőr: S-35
- tüdő: Kr-85, Rn-222, U-233, Pu-239
- lép: Po-210
- csontvelő: Sr-90, Ru-106
- herék: H-3
- csontrendszer: C-14, P-32, Zn-65, Sr-90, Ba-140, Pm147, Ra-226, Th-234, Pu-239

**Radioaktív izotópok felhalmozódása az emberi testben**

Dr. Pátzay György      Radiokémia-I      83

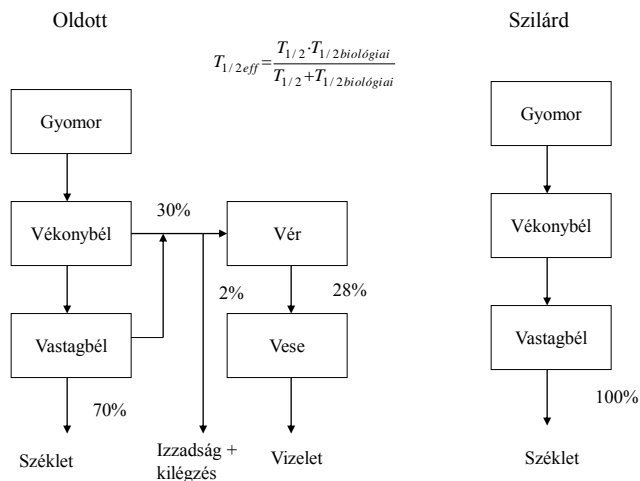
Effektív felezési idők

**Effektive Halbwertszeiten von Radionukliden**

Radionuklid	kritisches Organ	$T_p$ (d)	$T_b$ (d)	$T_{eff}$ (d)
H 3	Körpergewebe	4500	12	12
C 14	Fett	$2 \cdot 10^6$	40	40
Na 22	Gesamtkörper	950	11	11
P 32	Knochen	14.3	1155	14.1
S 35	Hoden	87.1	90	44.3
Ca 45	Knochen	164	$1.8 \cdot 10^4$	162
Co 60	Gesamtkörper	$1.9 \cdot 10^3$	9.5	9.5
Sr 90	Knochen	$1 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	$6.4 \cdot 10^3$
I 131	Schilddrüse	8	138	7.6
Cs 137	Gesamtkörper	$1.1 \cdot 10^4$	70	70
Au 198	Nieren	2.7	280	2.7
Ra 226	Knochen	$5.9 \cdot 10^5$	$1.64 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^4$
U 235	Nieren	$2.6 \cdot 10^{11}$	15	15
Pu 239	Knochen	$8.9 \cdot 10^6$	$7.3 \cdot 10^4$	$7.2 \cdot 10^4$

Dr. Pátzay György      Radiokémia-I      84

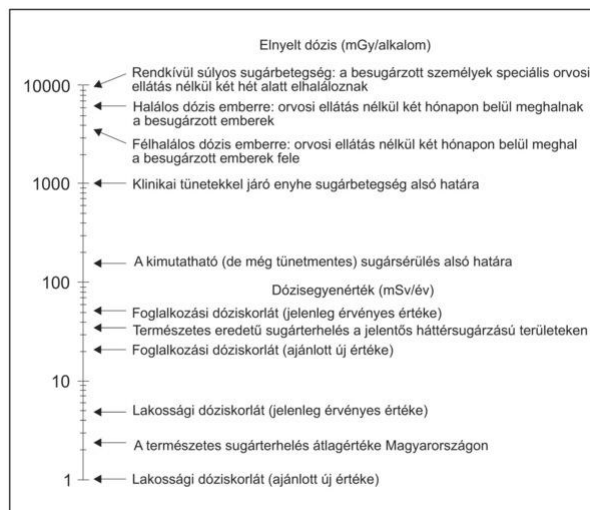
### Oldott és szilárd halmazállapotú radioaktív izotópok távozási útvonalai a szervezetből



Dr. Páztay György

Radiokémia-I

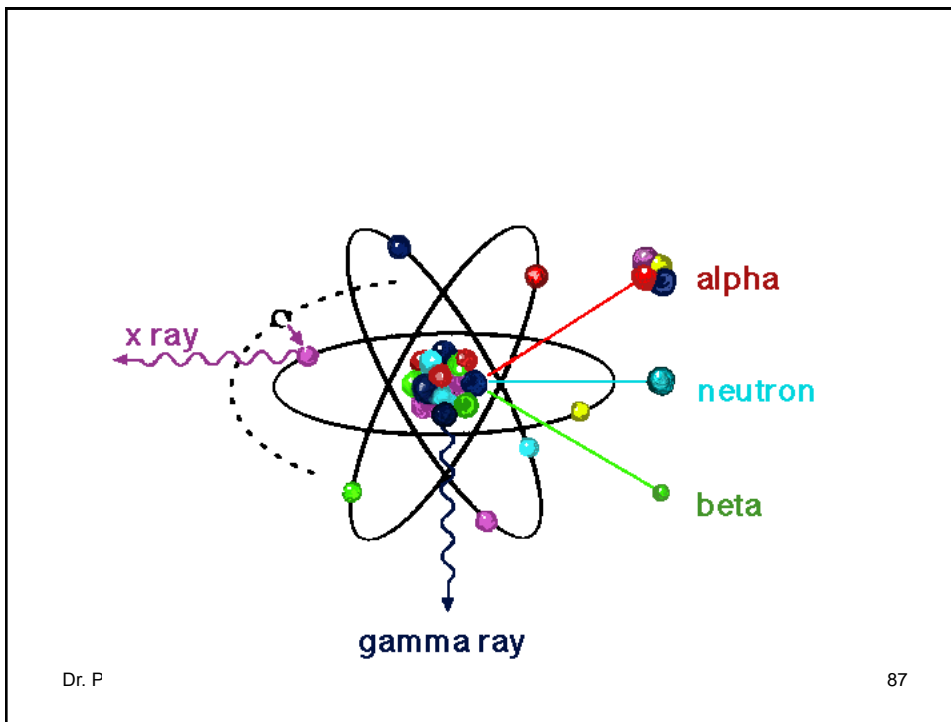
85



Dr. Páztay György

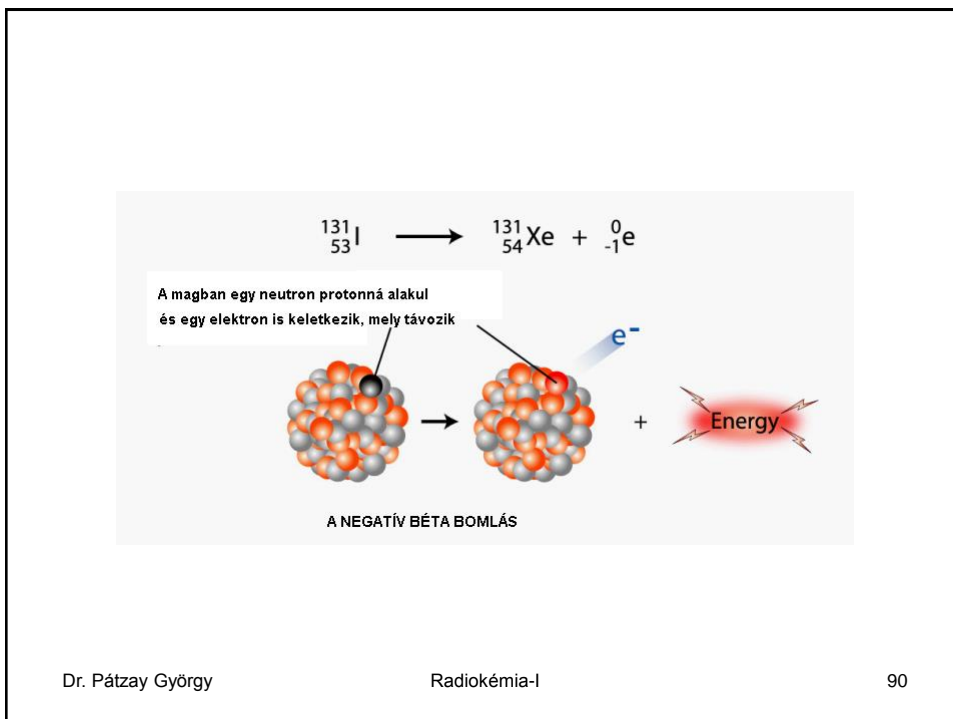
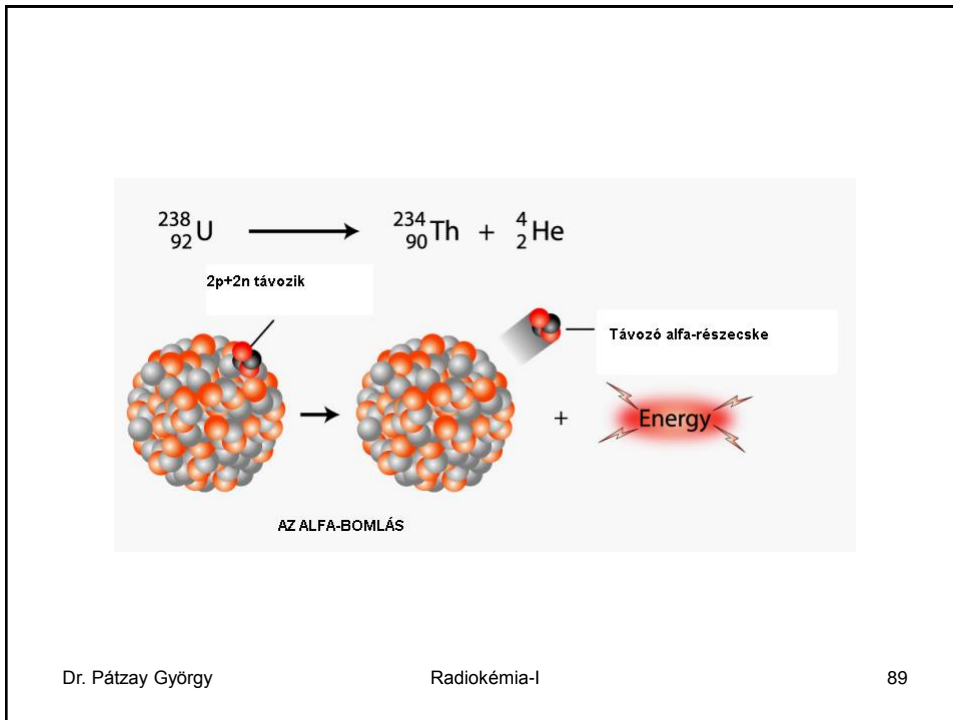
Radiokémia-I

86



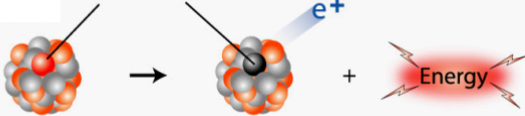
## A sugárzások típusai

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



$${}^{40}_{19}\text{K} \longrightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + {}^0_{+1}\text{e}$$

A magban egy proton neutronná alakul  
 és a keletkezett pozitron távozik

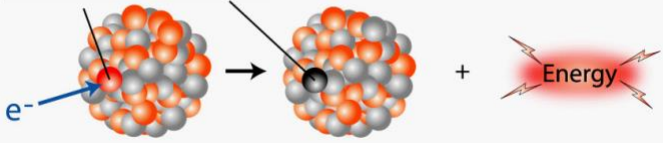


A POZITÍV BÉTA BOMLÁS

Dr. Pátzay György Radiokémia-I 91

$${}^0_{-1}\text{e} + {}^{125}_{53}\text{I} \longrightarrow {}^{125}_{52}\text{Te}$$

Egy pályaelektron egy magban lévő protonnal  
 a magban neutront képez



ELEKTRON BEFOGÁS

Dr. Pátzay György Radiokémia-I 92

$${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni}^* + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + \gamma\text{-photon}$$

Gerjesztett állapot Béta részecske gamma foton

A GAMMA BOMLÁS

Dr. Pátzay György
Radiokémia-I
93

<b>ALFA BOMLÁS</b>	${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ $92 \quad \quad 90 \quad + \quad 2 \quad = \quad 92$
<b>NEGATÍV BÉTA BOMLÁS</b>	${}_{53}^{131}\text{I} \rightarrow {}_{54}^{131}\text{Xe} + {}_{-1}^0\text{e}$ $53 \quad \quad 54 \quad + \quad (-1) \quad = \quad 53$
<b>POZITÍV BÉTA BOMLÁS</b>	${}_{19}^{40}\text{K} \rightarrow {}_{18}^{40}\text{Ar} + {}_{+1}^0\text{e}$ $19 \quad \quad 18 \quad + \quad 1 \quad = \quad 19$
<b>ELEKTRON BEFOGÁS</b>	${}_{-1}^0\text{e} + {}_{53}^{125}\text{I} \rightarrow {}_{52}^{125}\text{Te}$ $-1 \quad + \quad 53 \quad = \quad 52 \quad \quad 52$

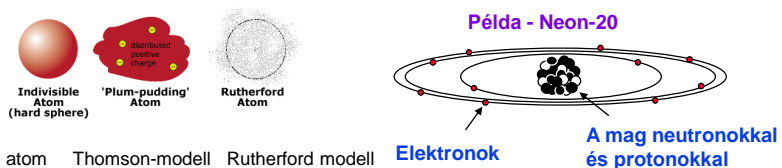
Dr. Pátzay György
Radiokémia-I
94

ALFA BOMLÁS	${}^A_Z X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$
NEGATÍV BÉTA BOMLÁS	${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$
POZITÍV BÉTA BOMLÁS	${}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e$
ELEKTRON BEFOGÁS	${}^0_{-1} e + {}^A_Z X \longrightarrow {}^A_{Z-1} Y$

Dr. Pátzay György Radiokémia-I 95

## AZ ATOM

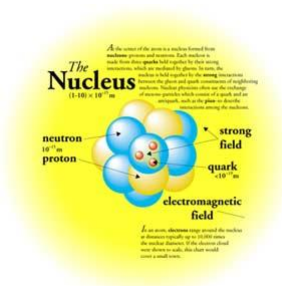
- Görögül – tovább nem osztható.
- Thomson „plum-pudding” modell. Elkent pozitív töltésekben (puding) negatív elektronok (szilvaszemek) vannak elkeverve. Semleges.
- 1911 Ernest Rutherford  $\alpha$ -részecskék szóródása arany fólián. Kis pozitív mag, az atom főtömege, negatív elektronok helyezkednek el körülötte. Körpályán mozgó töltések energiát vesztenek. Miért nem zuhannak be a negatív elektronok a magba?
- Niels Bohr 1913 vannak olyan diszkrét elektronpályák, 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



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

97

## 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! ( $\gamma$  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.

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

98

## 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

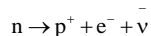
Az atommagokban kötést létesítő erőhatás a nukleonok között. Ezek vonzóerők, nem elektromos erők (a semleges neutronra is hatnak) és nem is gravitációs erők. Rendkívül kis tartományban ( $1-2 \cdot 10^{-13}$  cm) fejtik ki a hatásukat, rövid hatótávolságú erő. Két protont közelítve eleinte csak az elektromágneses 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:

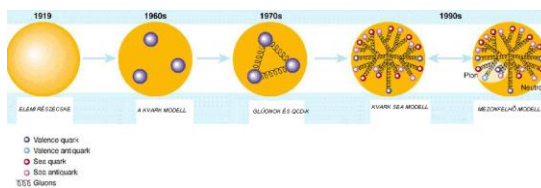


A neutron élettartama kb. 15 perc. A többi metastabil részecske (műonok, mezonok) élettartama lényegesen kisebb. A gyenge kölcsönhatás jellemző ideje  $10^{-10}$  sec.

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 (udd), 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.



Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

101

## 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	$1,5 \cdot 10^{-15}$

Dr. Pátzay György

Radiokémia-I

102

### NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

• Henry Becquerel Pierre Curie Marie Curie	A spontán radioaktivitás felfedezése	1903
• Ernest Rutherford	Elemek bomlása, radioaktív elemek kémiaija	1908
• Marie Curie	A rádium és polónium felfedezése	1911
• Frederick Soddy	A radioaktív elemek kémiaija, 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

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

103

### NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

• Enrico Fermi	Új radioaktív elemek előállítás neutron besugárással	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 sugárással 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 kémiaiában	1951
• John Cockroft Ernest Walton	A magok transzmutációja gyorsított részecskékkel	1951

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

104

### NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

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

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

105

### NOBEL DÍJAS KUTATÓK A RADIOAKTIVITÁS KUTATÁSÁBAN

- |                  |   |      |
|------------------|---|------|
| • Rosalind Yalow | Inzulin vizsgálata radioaktív nyomjelzők<br>segítségével                          | 1977 |
| • William Fowler | Kémiai elemeket termelő magreakciók<br>tanulmányozása asztrofizikai folyamatokban | 1983 |

Dr. Páztay György

Radiokémia-I

106