

DFT Biofizika

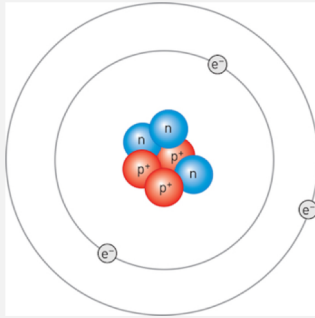
4. Magsugárzások

Radioaktív bomlás. Alfa-, béta- és gamma-sugárzás jellemzői. Orvosi képalkotás gamma-sugárzással: gamma-kamera, SPECT, PET.

Dr. Liliom Károly

karoly.liliom.mta@gmail.com

2023. 09. 19.



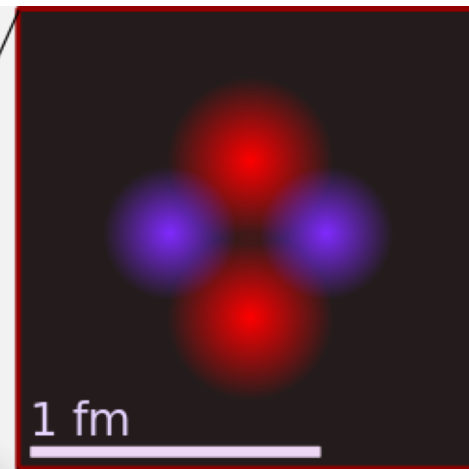
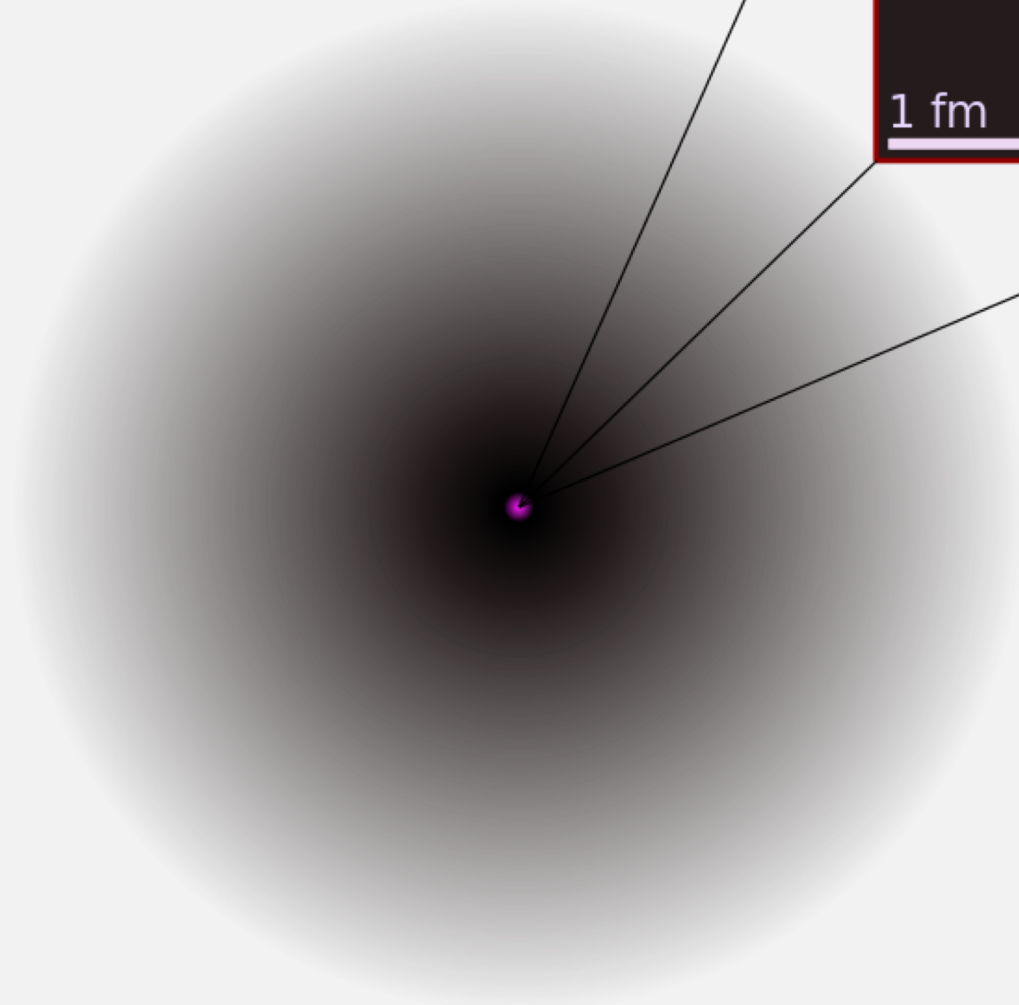
Az atomok alkotórészei

Particle	Symbol	Resting Energy (MeV)	Relative Charge*	Mass (kg)	Relative Mass (AMU)**
electron	e	0.51100	1-	9.11×10^{-31}	5.4858×10^{-4}
proton	p	938.272	1+	1.6726×10^{-27}	1.0072765
neutron	n	939.566	0	1.6749×10^{-27}	1.0086649

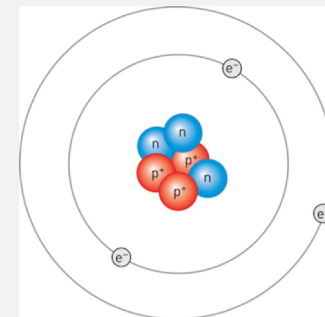
* elektronok töltése (elemi töltés): $-1.602 \times 10^{-19} \text{C}$

** Atomtömeg-egység: (^{12}C) atom 1/12-ed része

Az atommag mérete



$$1 \text{ \AA} = 100,000 \text{ fm}$$

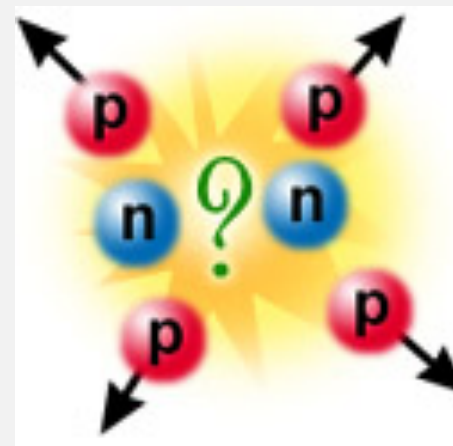


Atommag stabilitása

Protonok között erős az elektrosztatikus taszítás!

(mi tartja egyben a magot)

Kell, hogy legyen egy
vonzóerő a magon belül!



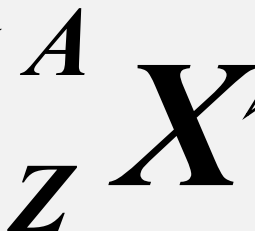
Rutherford, 1911 – magerő: rövid hatótávolságú vonzóerő, független a töltéstől és erősebb a Coulomb-erőknél.

A neutron hipotézise (Chadwick 1932, Nobel-díj 1935)

jelölések

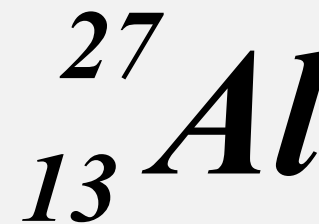
tömegszám

$$A = Z + N$$



*az elem kémiai
szimbóluma*

*rendszer =
protonok száma*



N = neutronok száma
nukleon = proton vagy neutron

A mag stabilitása

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

Tömegdefektus: az atommag tömege kisebb, mint az alkotó protonok és neutronok tömegeinek összege! A különbség Einstein tömeg-energia egyenértékűségi elvével magyarázható:

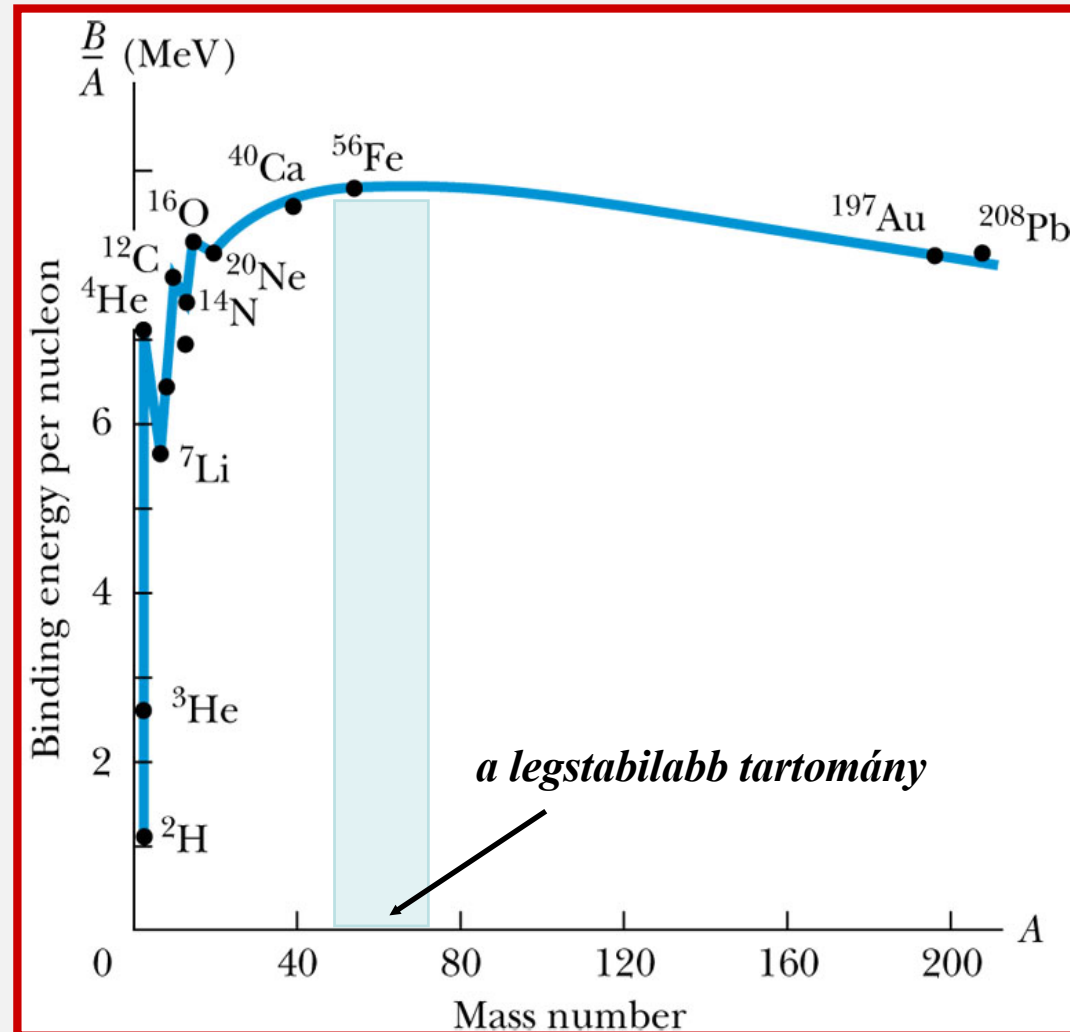
$$\Delta E = \Delta M c^2$$

A tömegdefektus = a kötési energia tömegegységben kifejezve.

Nukleonokra eső kötési energia

- Kis tömegszámoknál gyors növekedés
- Éles csúcsok páros-páros magoknál:
 ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, and ${}^{16}_8\text{O}$
- Maximum kb $A=56$

nukleon = proton vagy neutron



Izotópok

Görög *isos topos* = *azonos hely*

Egy elem izotópjai:

- azonos protonszámúak
- különböző neutronszámúak
- különböző tömegszámúak

izotóp = azonos rendszám

Mendeleev's Periodic Table of Elements

1 IA		Table of Common Polyatomic Ions										Element categories				State of matter at 25 °C					18 VIIIA
		acetate	$C_2H_3O_2^-$	silicate	SiO_3^{2-}	Alkali metals				Gas		Liquid	Solid	Artificially prepared		Unknown					
		chlorate	ClO_3^-	sulfate	SO_4^{2-}	Alkaline-earth metals				III A		IV A	V A	VIA	VII A						
		hydroxide	OH^-	thiosulfate	$S_2O_3^{2-}$	Transition metals				13		14	15	16	17						
		nitrate	NO_3^-			Other metals				IIIA		IVA	VA	VIA	VIIA						
		permanganate	MnO_4^-	arsenate	AsO_4^{3-}					5		6	7	8	9						
				phosphate	PO_4^{3-}					10.811		12.011	14.007	15.999	18.998						
		carbonate	CO_3^{2-}	ammonium	NH_4^+					13		14	15	16	17						
		chromate	CrO_4^{2-}	hydronium	H_3O^+					26.982		28.086	30.974	32.065	35.453						
		dichromate	$Cr_2O_7^{2-}$							2.3		2.4	2.5	2.6	2.7						
										Al		Si	P	S	Cl						
										2.8-3		2.8-4	2.8-5	2.8-6	2.8-7						
1	H 1.008 1																	He 4.003 2			
2	Li 6.941 2-1	Be 9.0122 2-2																Ne 20.179 2-8			
3	Na 22.990 2-8-1	Mg 24.305 2-8-2																Ar 39.948 2-8-8			
4	K 39.098 2-8-8-1	Ca 40.078 2-8-8-2	Sc 44.956 2-8-9-2	Ti 47.867 2-8-10-2	V 50.942 2-8-11-2	Cr 51.996 2-8-13-1	Mn 54.938 2-8-13-2	Fe 55.845 2-8-14-2	Co 58.933 2-8-15-2	Ni 58.693 2-8-16-2	Cu 63.546 2-8-18-1	Zn 65.39 2-8-18-2	Ga 69.723 2-8-18-3	Ge 72.64 2-8-18-4	As 74.922 2-8-18-5	Se 78.96 2-8-18-6	Br 79.904 2-8-18-7	Kr 83.80 2-8-18-8			
5	Rb 85.468 2-8-18-8-1	Sr 87.62 2-8-18-8-2	Y 88.906 2-8-18-9-2	Zr 91.224 2-8-18-10-2	Nb 92.906 2-8-18-11-1	Mo 95.94 2-8-18-13-1	Tc (98) 2-8-18-14-1	Ru 101.07 2-8-18-15-1	Rh 102.91 2-8-18-16-1	Pd 106.42 2-8-18-18	Ag 107.87 2-8-18-18-1	Cd 112.41 2-8-18-18-2	In 114.82 2-8-18-18-3	Sn 118.71 2-8-18-18-4	Sb 121.76 2-8-18-18-5	Te 127.60 2-8-18-18-6	I 126.90 2-8-18-18-7	Xe 131.29 2-8-18-18-8			
6	Cs 132.91 2-8-18-18-8-1	Ba 137.33 2-8-18-18-8-2		Hf 178.49 2-8-18-32-10-2	Ta 180.95 -18-32-11-2	W 183.84 -18-32-12-2	Re 186.21 -18-32-13-2	Os 190.23 -18-32-14-2	Ir 192.22 -18-32-15-2	Pt 195.08 -18-32-17-1	Au 196.97 -18-32-18-1	Hg 200.59 -18-32-18-2	Tl 204.38 -18-32-18-3	Pb 207.2 -18-32-18-4	Bi 208.98 -18-32-18-5	Po (209) -18-32-18-6	At (210) -18-32-18-7	Rn (222) -18-32-18-8			
7	Fr (223) -18-32-18-8-1	Ra (226) -18-32-18-8-2		Rf (261)	Db (262)	Sg (266)	Bh (264)	Hs (277)	Mt (268)	Uun (281)	Uuu (272)	Uub (285)	Uut (284)	Uuq (289)	Uup (288)	Uuh (291)	Uus (294)	Uuo (294)			
				La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24	Pm (145)	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26	Tm 168.93	Yb 173.04	Lu 174.97			
				Ac 227	Th 232.04	Pa 231.04	U 238.03	Np (237)	Pu (244)	Am (243)	Cm (247)	Bk (247)	Cf (251)	Es (252)	Fm (257)	Md (258)	No (259)	Lr (262)			

Selected Oxidation States

Atomic Number

Symbol

Electron Configuration

Atomic Mass

21	Sc
44.956	
2-8-9-2	

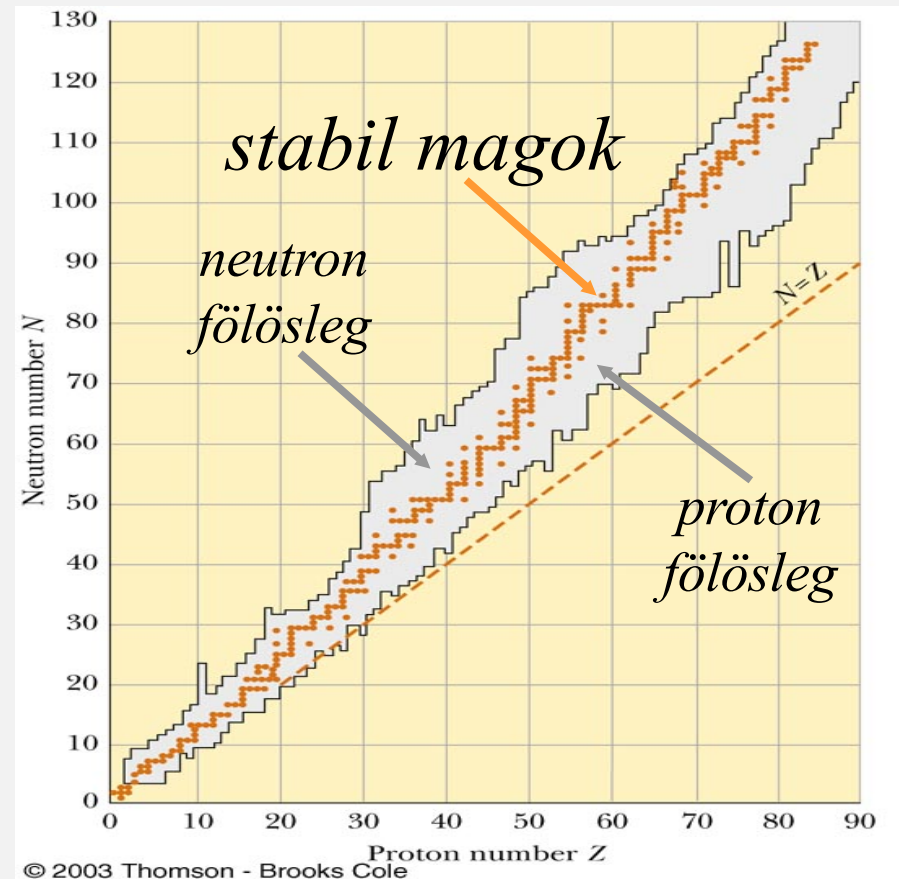
Atommag stabilitási diagramja

- könnyű magok stabilak, ha
 $N = Z$

- nehéz magok stabilak, ha
 $N > Z$

a protonszám növelésével növekszik
a Coulomb-féle taszítóerő, így
több neutron kell a mag egyben
tartására

- Nincs stabil mag, ha $Z > 83$



Mi történik, ha a mag nem stabil?

Radioaktív bomlás



Antoine Becquerel
1903 fizikai Nobel-díj a
radioaktivitás felfedezéséért



Becquerel fotólemeze, ami a fölé tett urániumsó sugárzása miatt exponálódott. A lemez és az urániumsó közé helyezett fém máltai kereszt jól kivehető (1896).

Radioaktív bomlás

- *Radioaktivitás*: az energia spontán kibocsátása részecskék vagy elektromágneses sugárzás útján
- a nem stabil atommagok bomlása hozza létre
- háromféle sugárzás keletkezhet

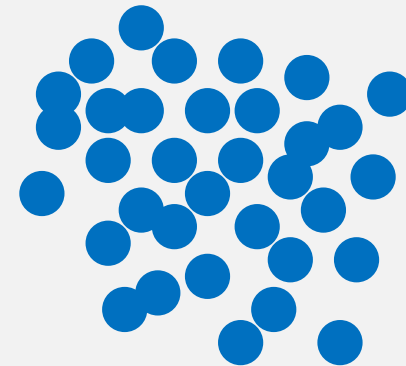
Alfa (α) részecske

Béta (β) részecske

Gamma (γ) sugarak

Radioaktív bomlás jellemzői

- statisztikai folyamat – az egyedi bomlások véletlenszerűen követik egymást
- a bomlásra képes magok száma csökken az idővel



A radioaktív bomlás jellemzői

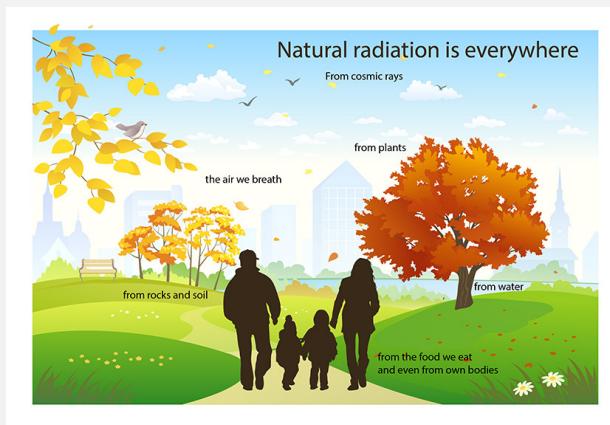
$$\text{Aktivitás: } \Lambda = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|$$

N: még el nem bomlott magok száma
t: idő

Aktivitás = egységnyi idő alatt elbomlott magok száma

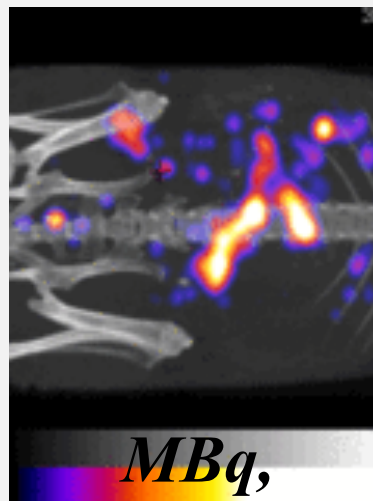
egysége: becquerel (Bq) 1Bq = 1 bomlás/s

háttérsugárzás



kBq,

diagnosztika



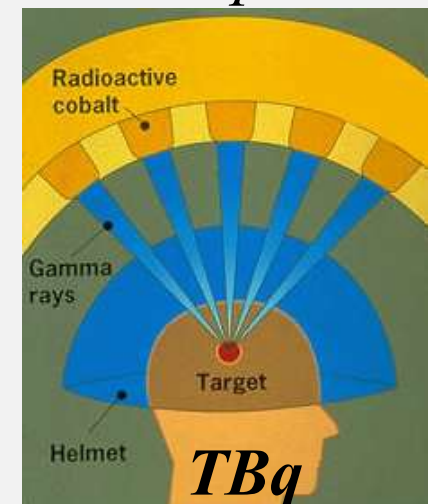
MBq,

*laboratóriumi
gyakorlat*



GBq,

terápia



TBq

Bomlástörvények

Differenciális alak:
$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

megoldás

λ : *bomlási állandó* (1/s)

Integrális alak:
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

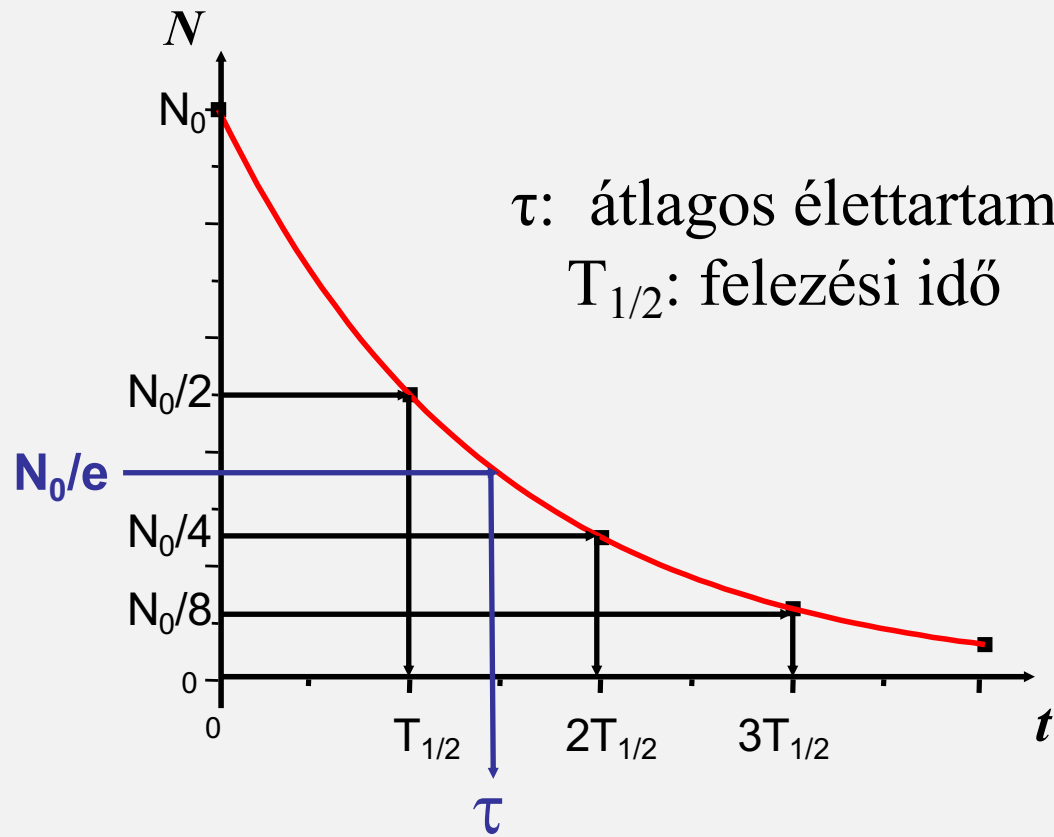
N_0 : bomlásra képes (rádioaktív) magok száma $t=0$ -kor,
 N : nem elbomlott magok száma egy későbbi t időpontban

Az aktivitás az izotóp típusától és a kezdetben jelen lévő bomlásra képes atommagok számától is függ.

Specifikus aktivitás: egységnyi tömegű izotóp aktivitása (Bq/kg)

Grafikus reprezentáció

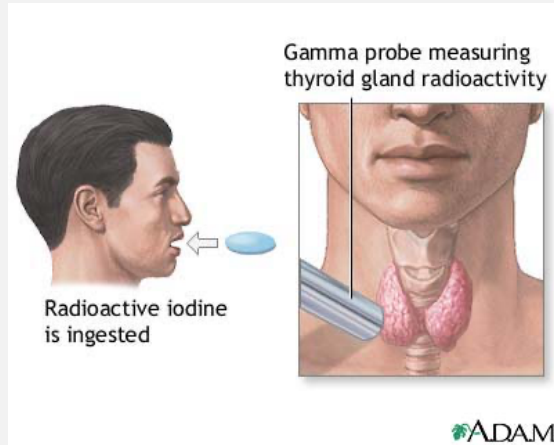
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$



$$\begin{aligned} t = \tau \\ \downarrow \\ N_0 / e = N_0 e^{-\lambda \tau} \\ \downarrow \\ \lambda = \frac{1}{\tau} \end{aligned}$$

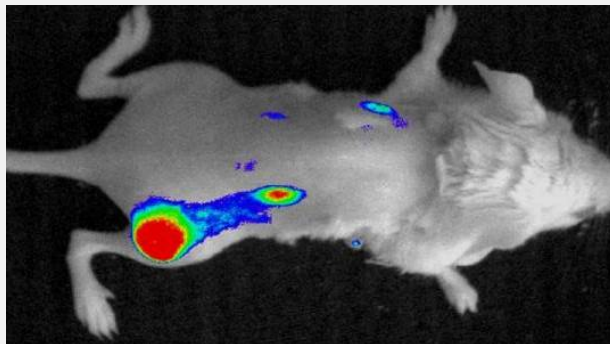
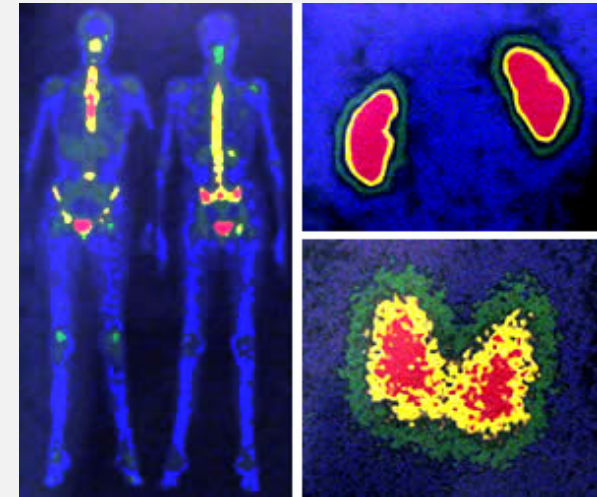
$$t = T_{1/2} \longrightarrow N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \longrightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

Felezési idők a gyógyászatban



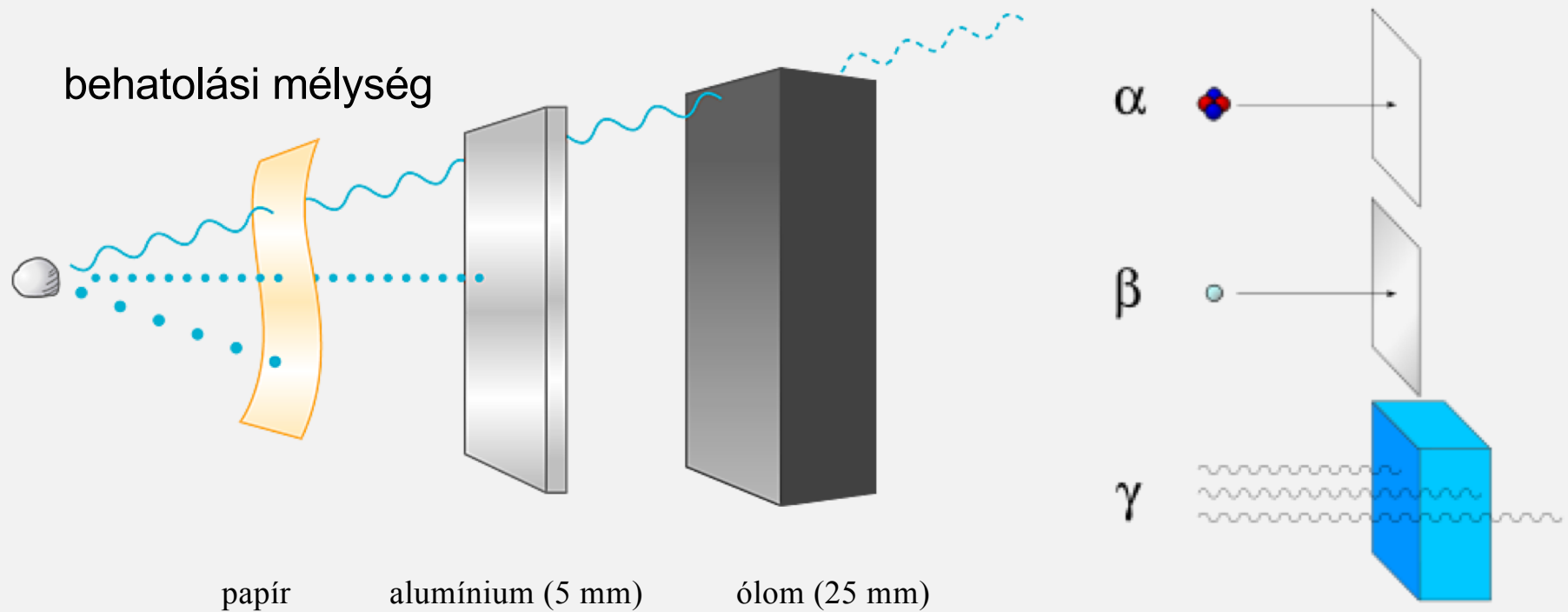
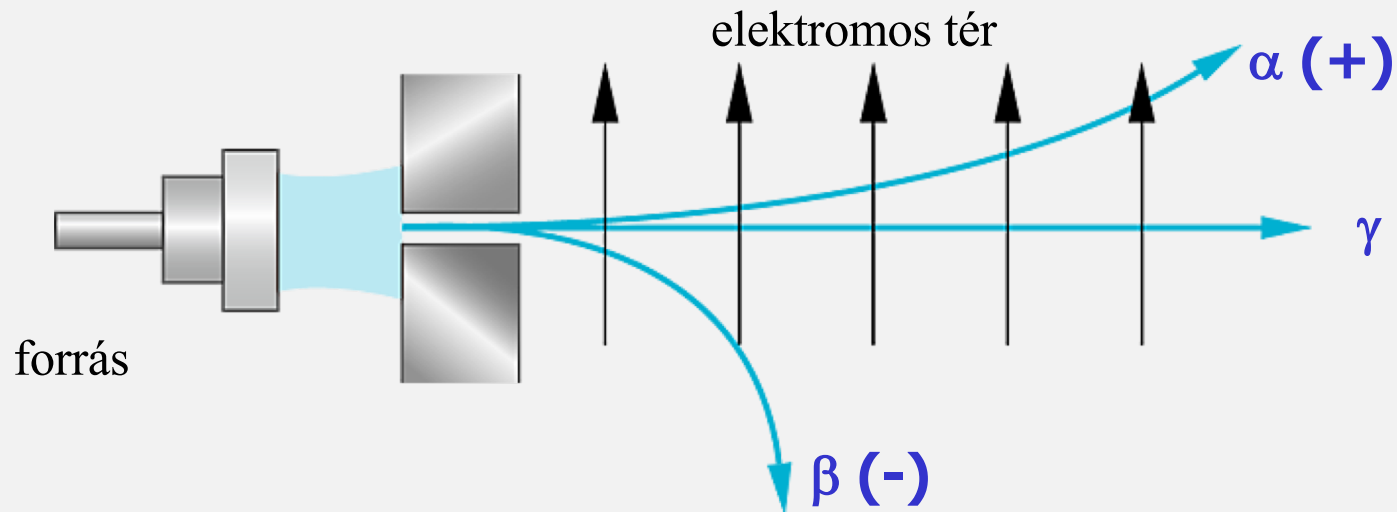
*Jód - 131 (^{131}I) - $T_{1/2} = 8$ nap
pajzsmirigy kezelés*

*Technécium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) - $T_{1/2} = 6$ óra
Izotóp diagnosztika*

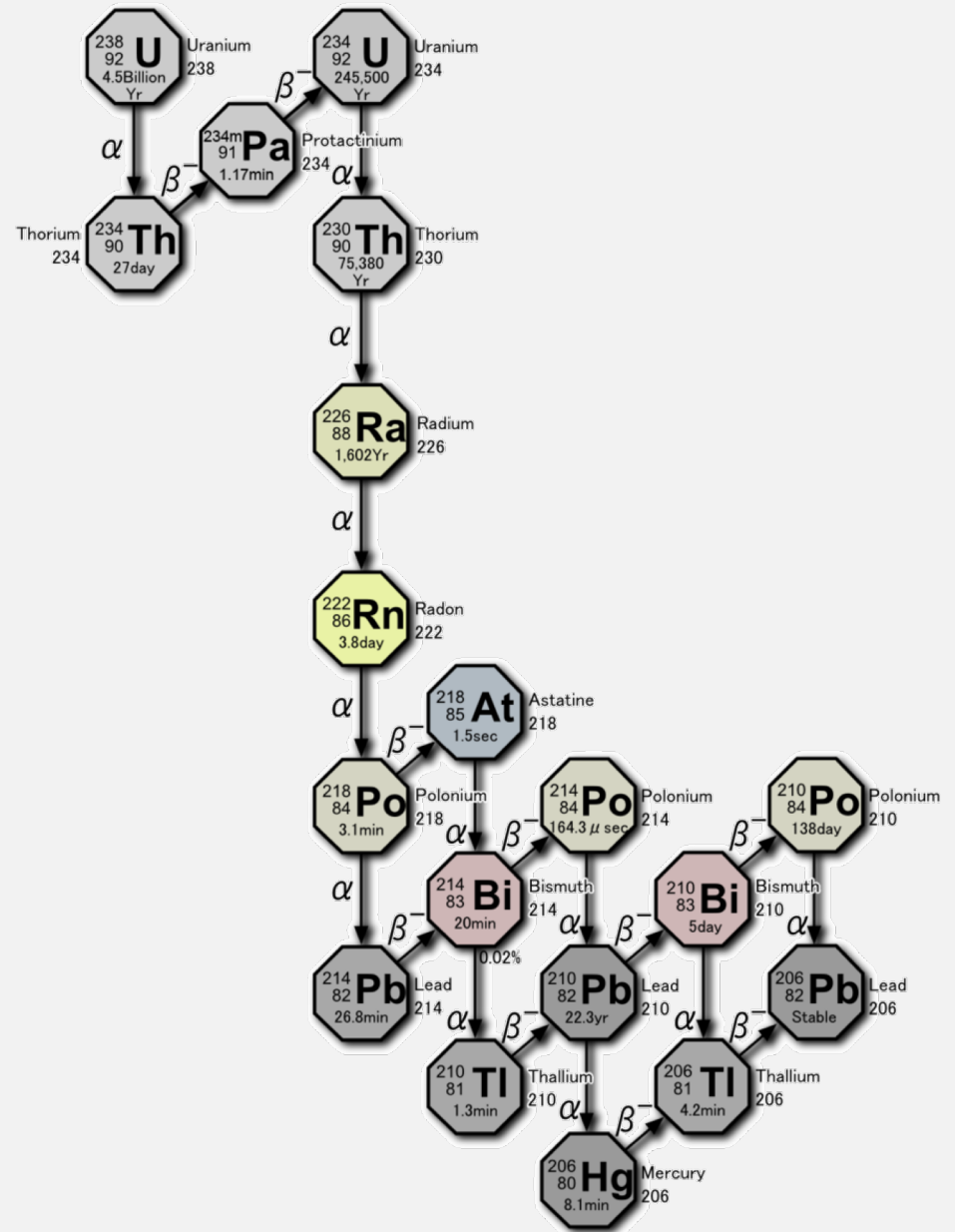
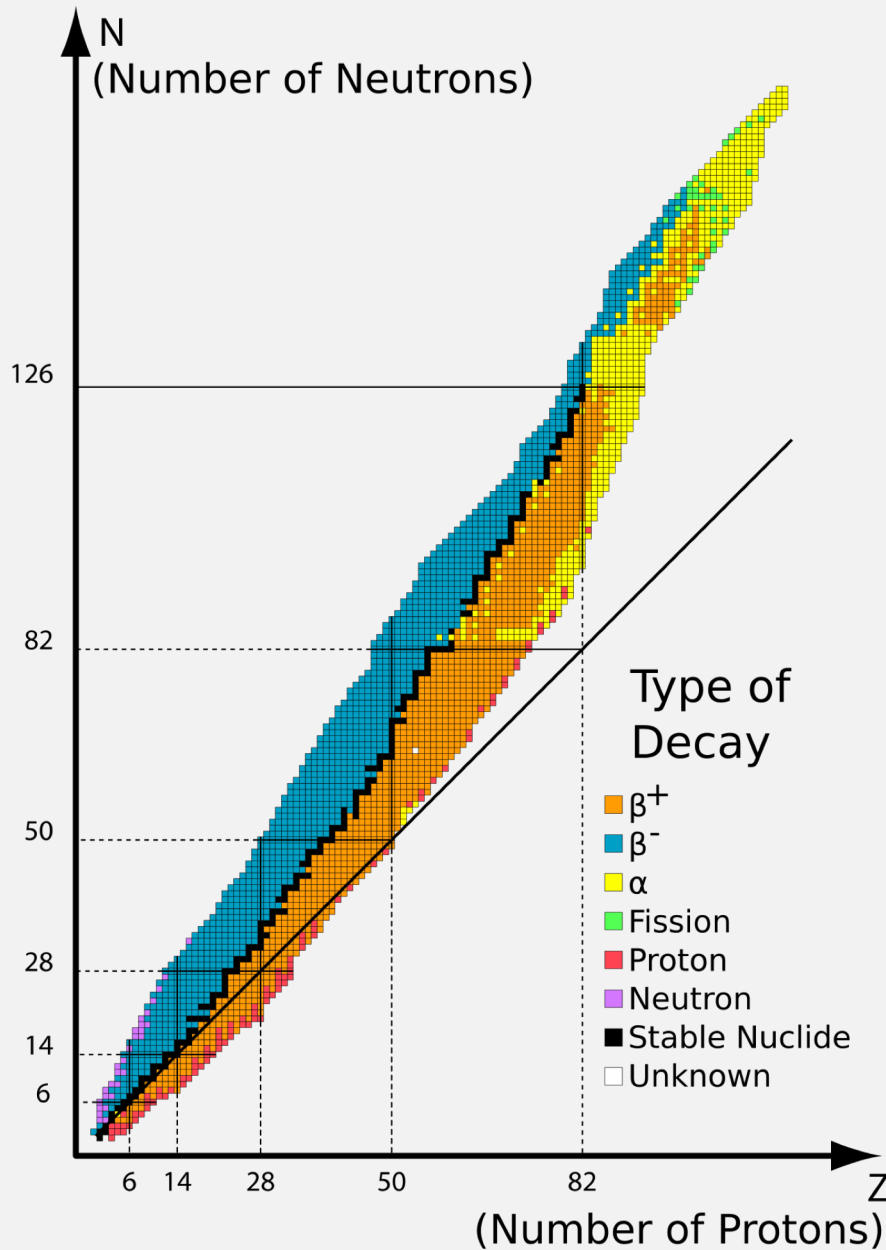


*Arany-198 (^{198}Au) - $T_{1/2} = 2,7$ nap
Tumorterápia*

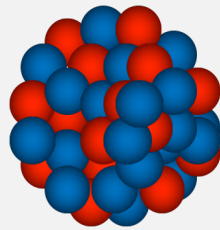
Radioaktív bomlás típusai



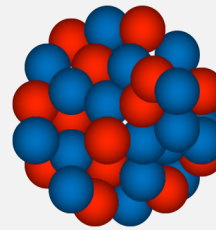
Radioaktív bomlás típusai



α bomlás



anyamag

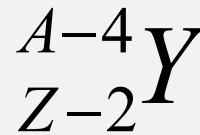
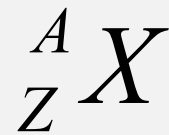


leánymag

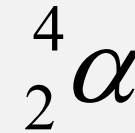
+



α részecske

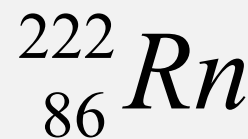
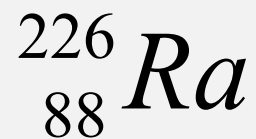


+

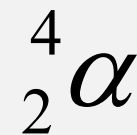


α részecske: a hélium atommagja, 2 proton és 2 neutron alkotja

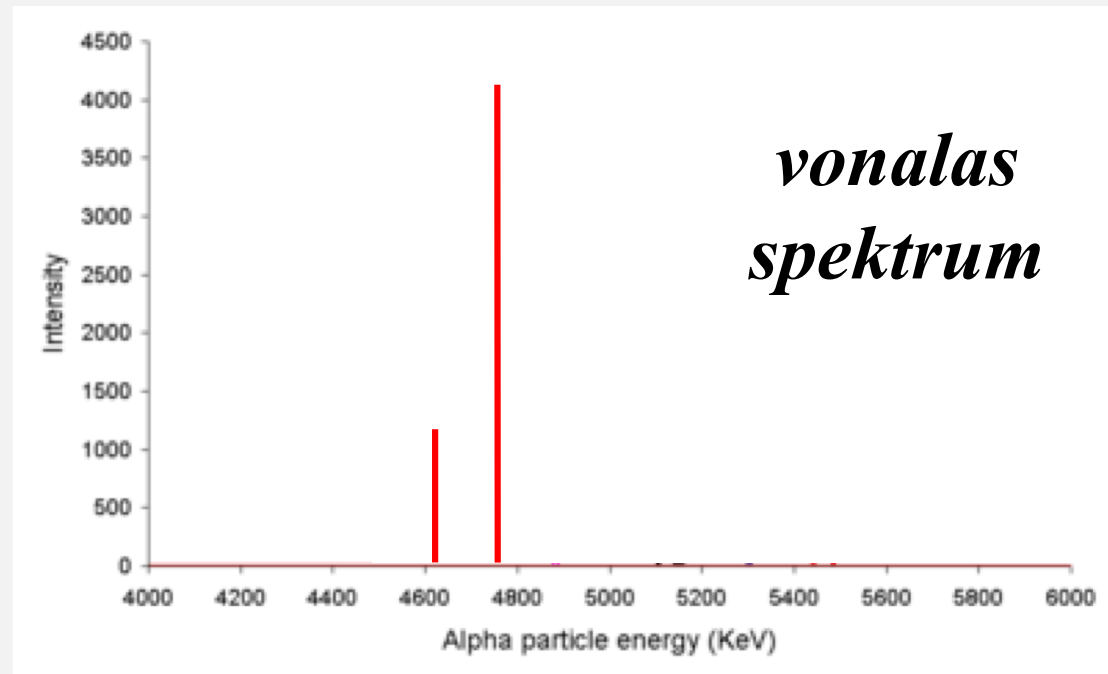
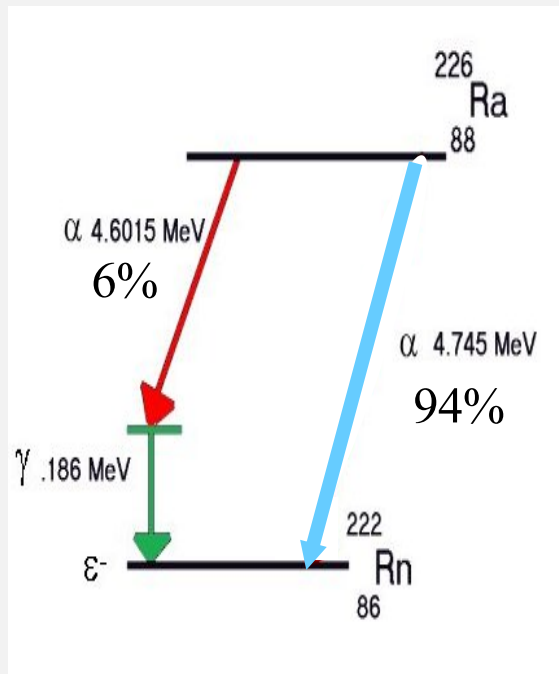
Nehéz magok ($A > 150$) tipikusan α részecske kibocsájtásával bomlanak



+

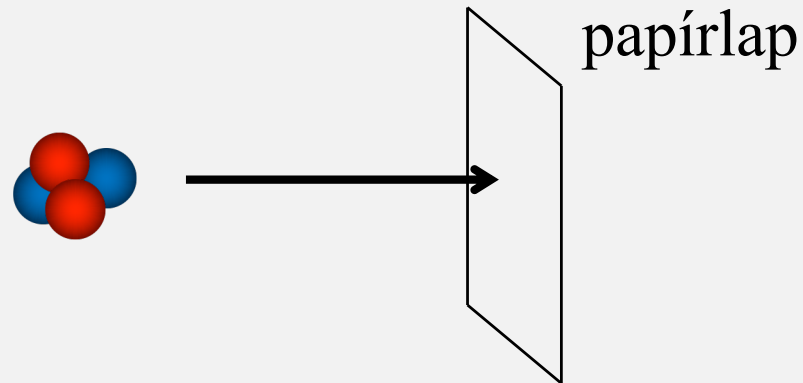


α sugárzás energia-spektruma



Az energiaszintek jellemzőek a magra

α részecskék behatolási mélysége

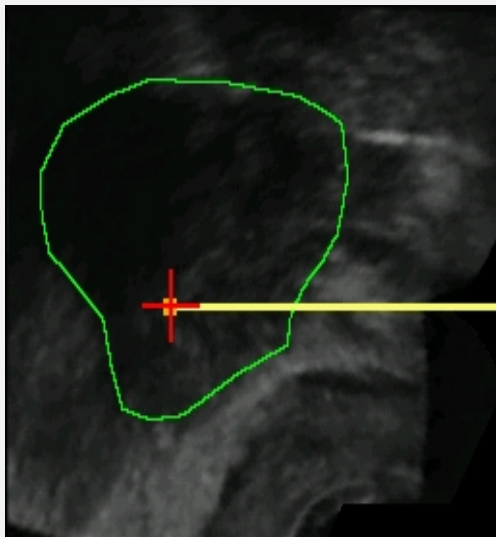


absorber	density	alpha range
air (STP)	1.2 mg/cm ³	3.7 cm
paper (20lb)	0.89 g/cm ³	53 μ m
water (soft tissue)	1.0 g/cm ³	45 μ m

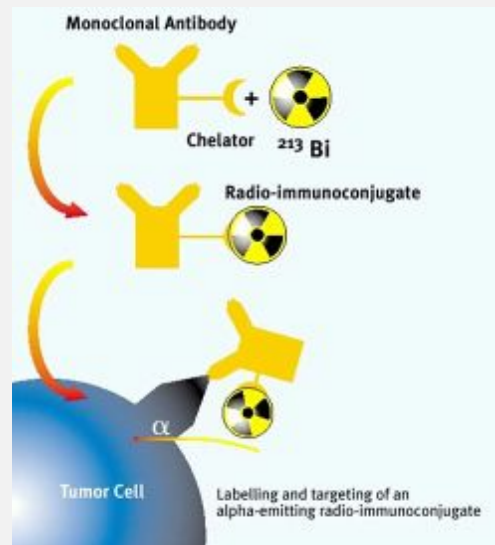
α sugárzás a gyógyászatban

Diagnózis: –

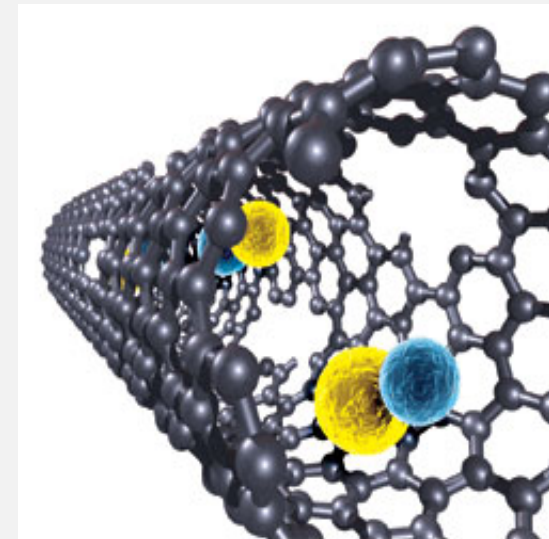
Célzott rákterápia α sugárzással



beültetés tűvel



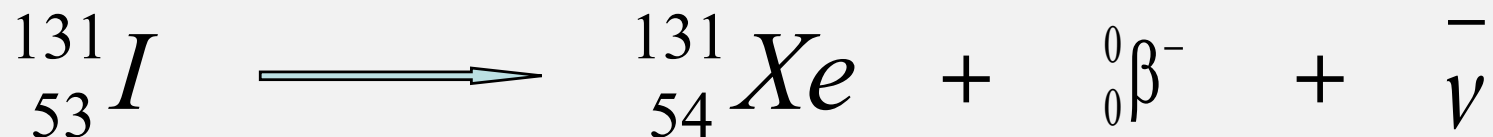
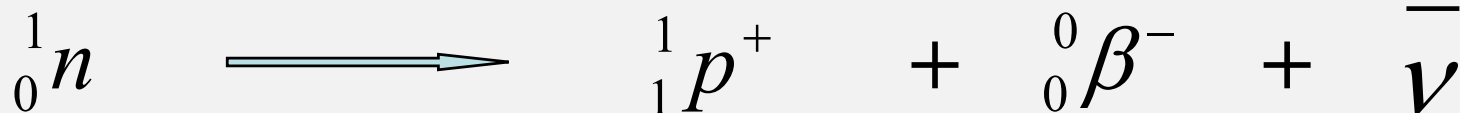
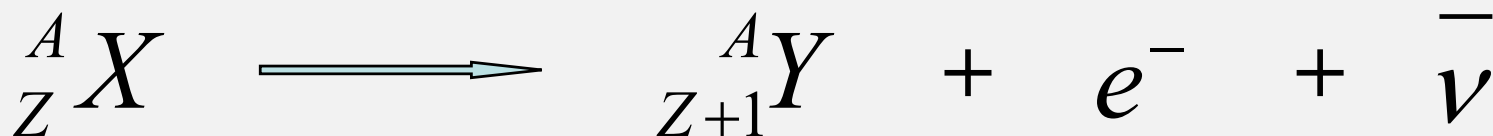
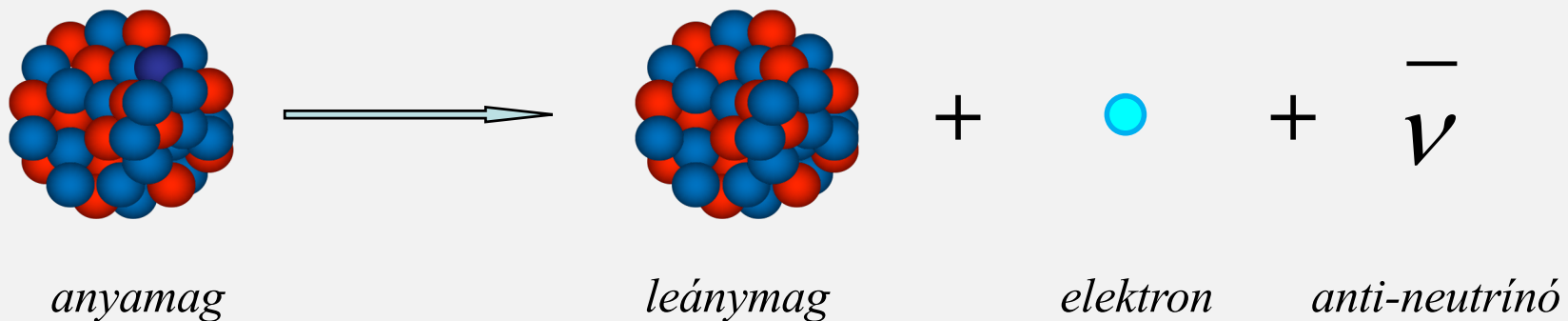
monoklonális antitest



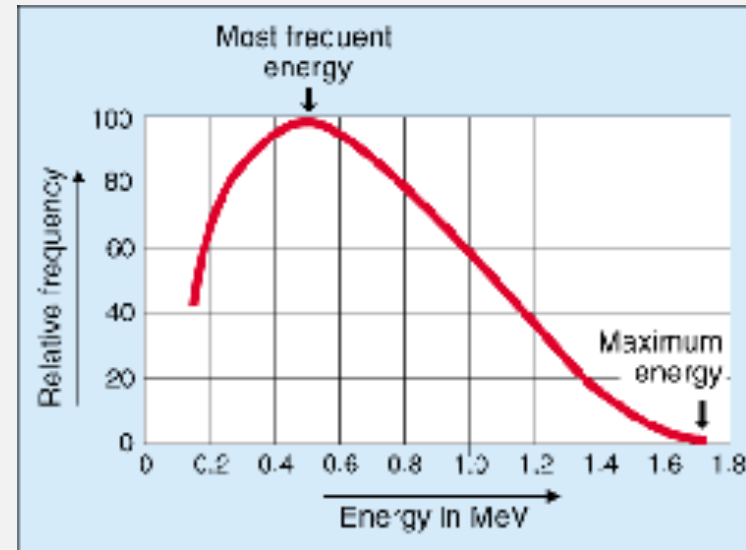
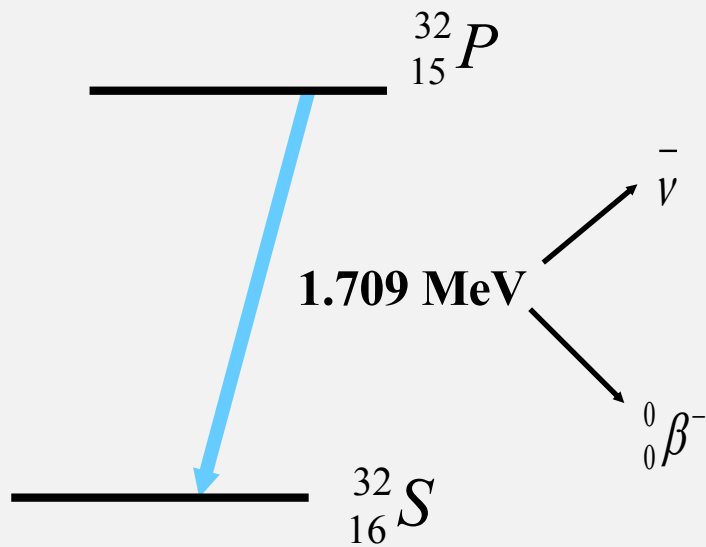
karbon nano-cső

β bomlás

1. Neutron-felesleg: β^- bomlás



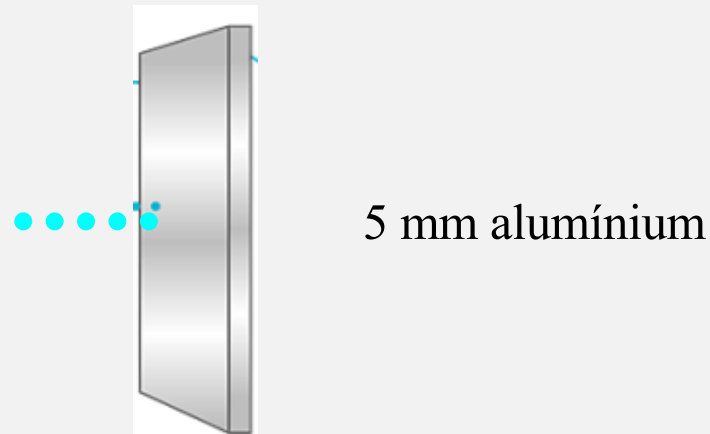
β sugárzás energia-spektruma



folytonos spektrum

DE, a β részecske energiájának van maximuma!

β^- részecskék behatolási mélysége

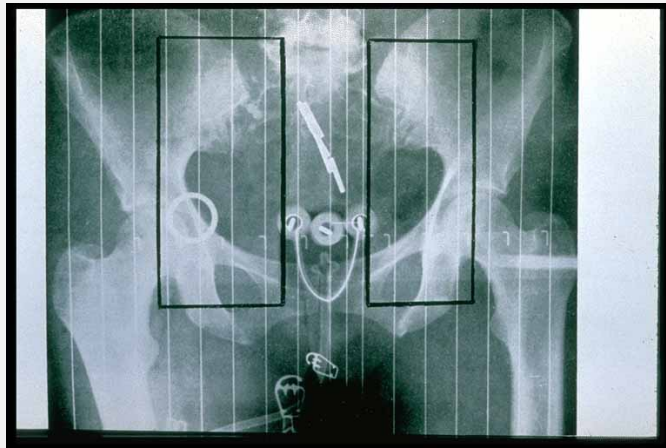


<i>absorber</i>	<i>density</i>	<i>maximum beta range</i>	
		<i>(2.3 MeV)</i>	<i>(1.1 MeV)</i>
air	1.2 mg/cm ³	8.8 m	3.8 m
water (soft tissue)	1.0 g/cm ³	11 mm	4.6 mm
aluminum	2.7 g/cm ³	4.2 mm	2.0 mm
lead	11.3 g/cm ³	1.0 mm	0.4 mm

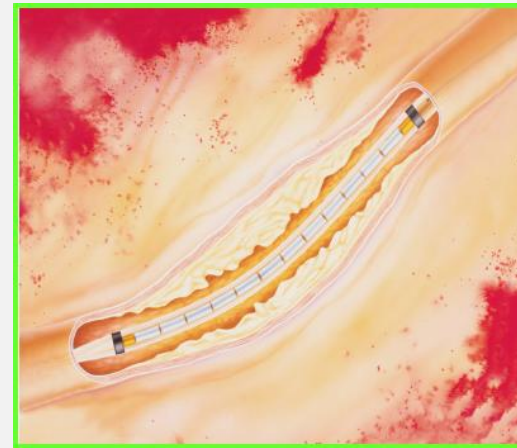
β^- sugárzás a gyógyászatban

Diagnózis: –

Célzott terápiák: hipertiroidizmus,
pajzsmirigy, prosztata és egyéb tumorok



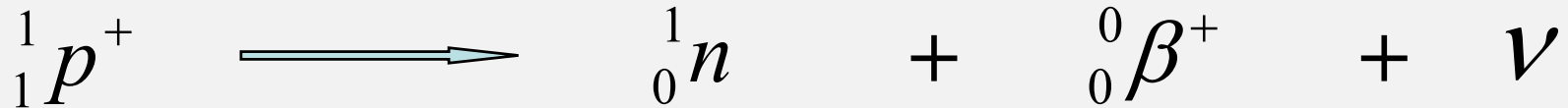
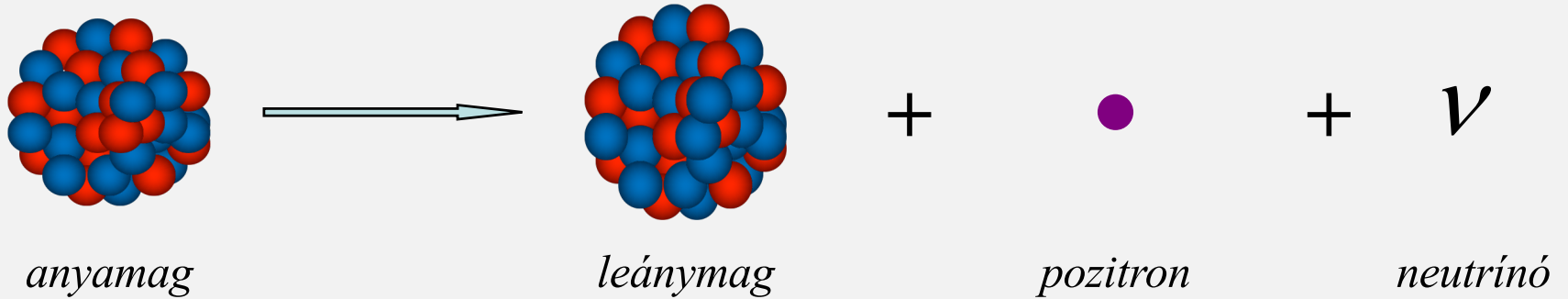
Brachytherapy:
implants into the
tumor



Endovascular
irradiation

β bomlás

2. Proton-felesleg: β^+ bomlás



Annihiláció - részecske-antirészecske párok megsemmisítik egymást

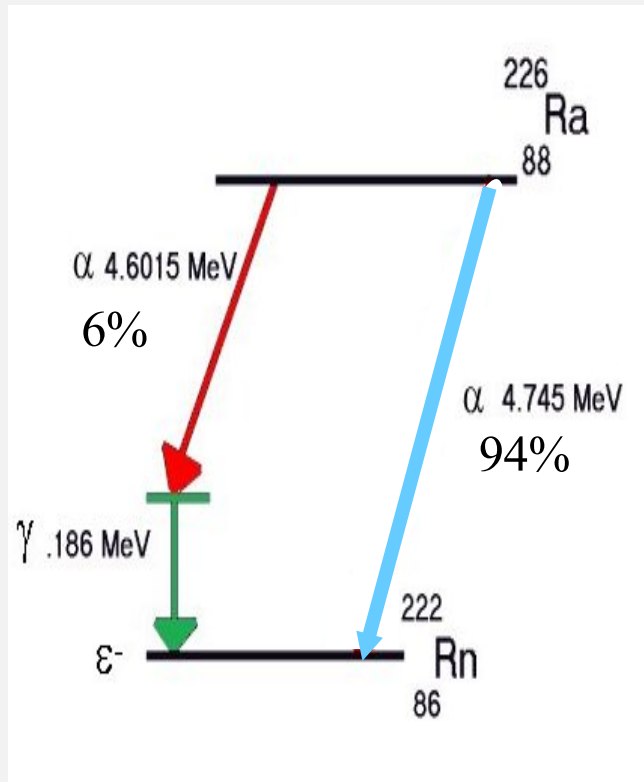


1. Lendület megmaradás törvénye: két egymással átellenesen kirepülő foton születik

2. Energiamegmaradás törvénye:

$$m_e c^2 + m_p c^2 = 2 h f$$

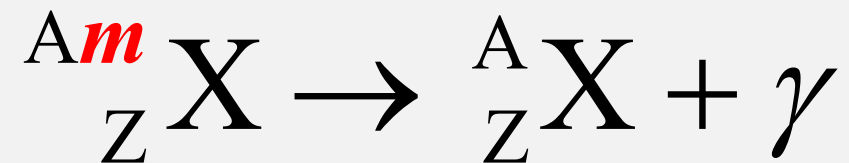
γ bomlás – nukleonok izomerizációja



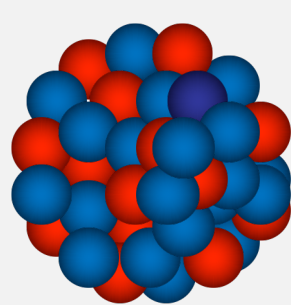
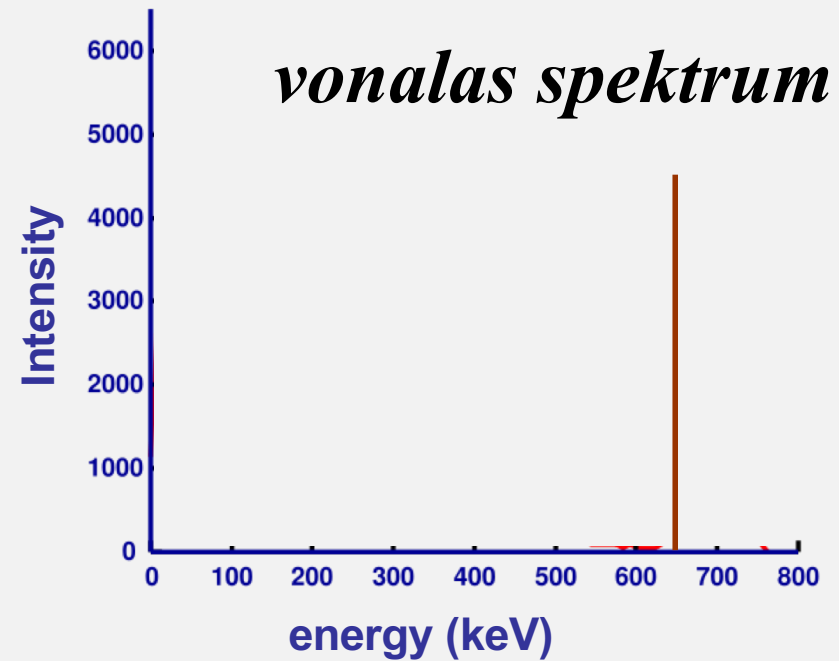
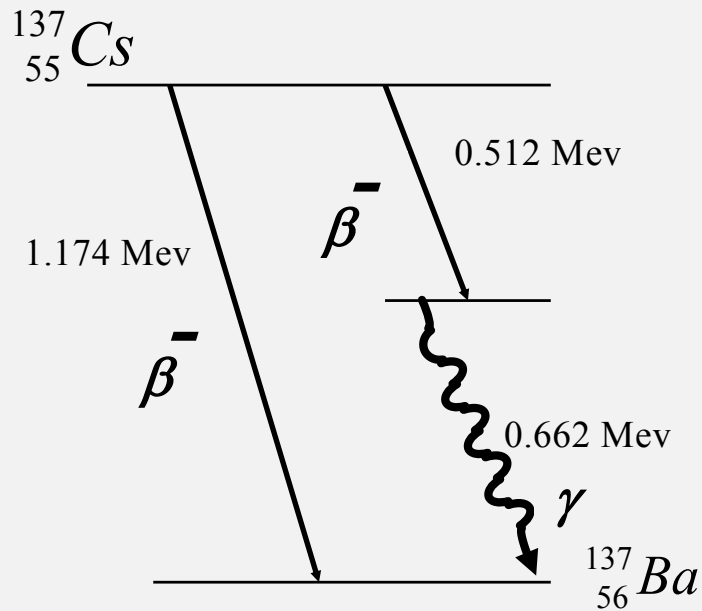
A leánymag néha gerjesztett állapotban van α vagy β bomlást követően.

A gerjesztett mag gamma-sugárzással szabadul meg fölös energiájától.

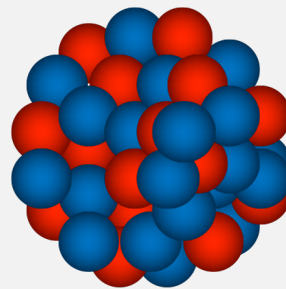
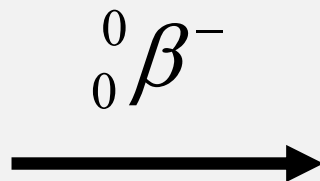
A fél-életidő néhány órától néhány száz évig változhat.



γ sugárzás energia-spektruma



anyamag



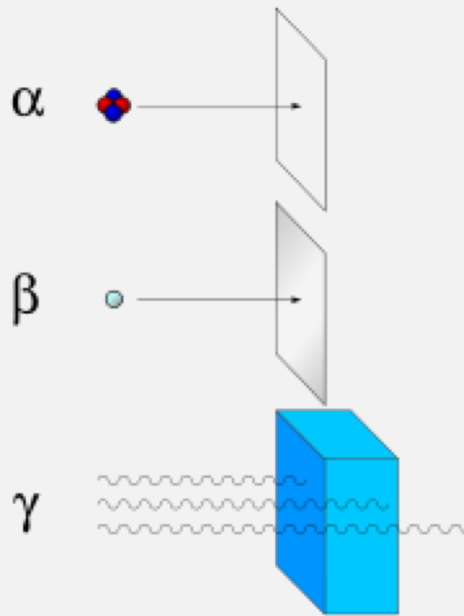
leánymag



gamma sugárzás

A gamma-energia jellemző a magra.

γ sugárzás behatolási mélysége

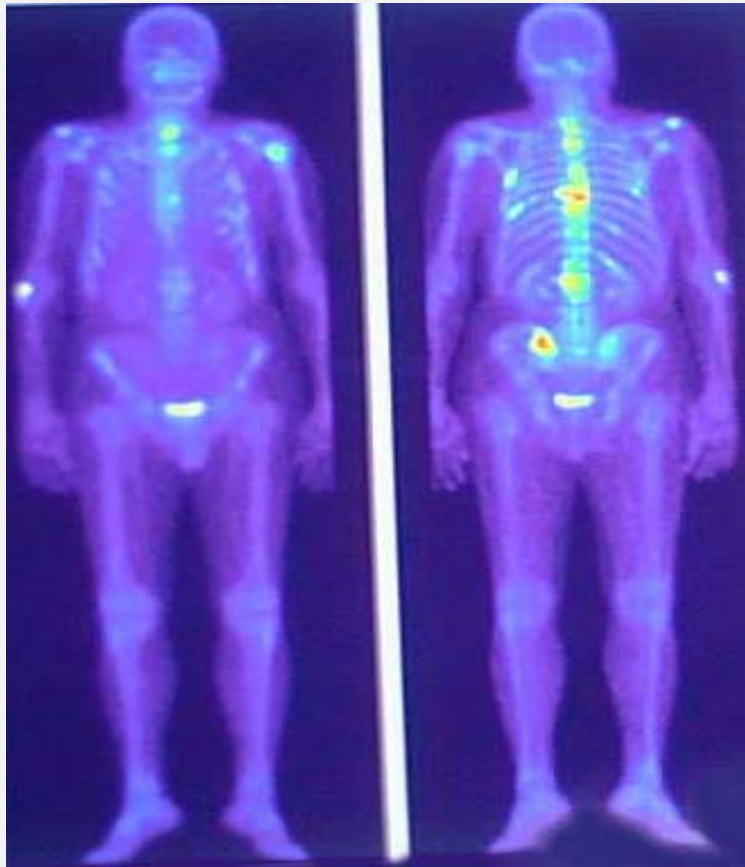


A gamma sugárzás behatolási mélysége sokkal nagyobb, mint az α vagy β részecskéké, és nagymértékben függ a gamma foton energiájától.

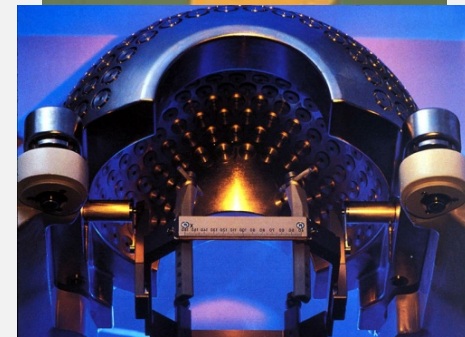
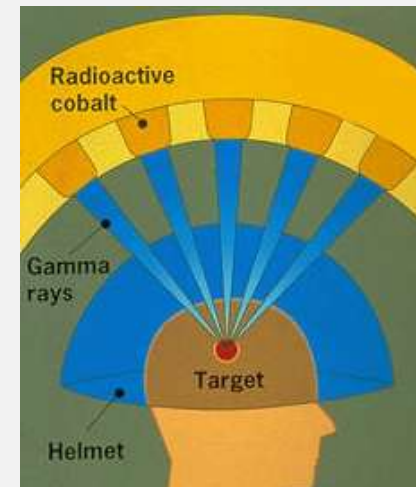
Gamma fotonok akár néhány száz métert is megtehetnek levegőben és könnyedén átszelik az emberi testet.

γ sugárzás a gyógyászatban

Diagnosztika: gamma kamera, SPECT (PET)



Csontfelvétel ^{99m}Tc -jelölt foszfátvegyülettel



terápia: gamma-kés

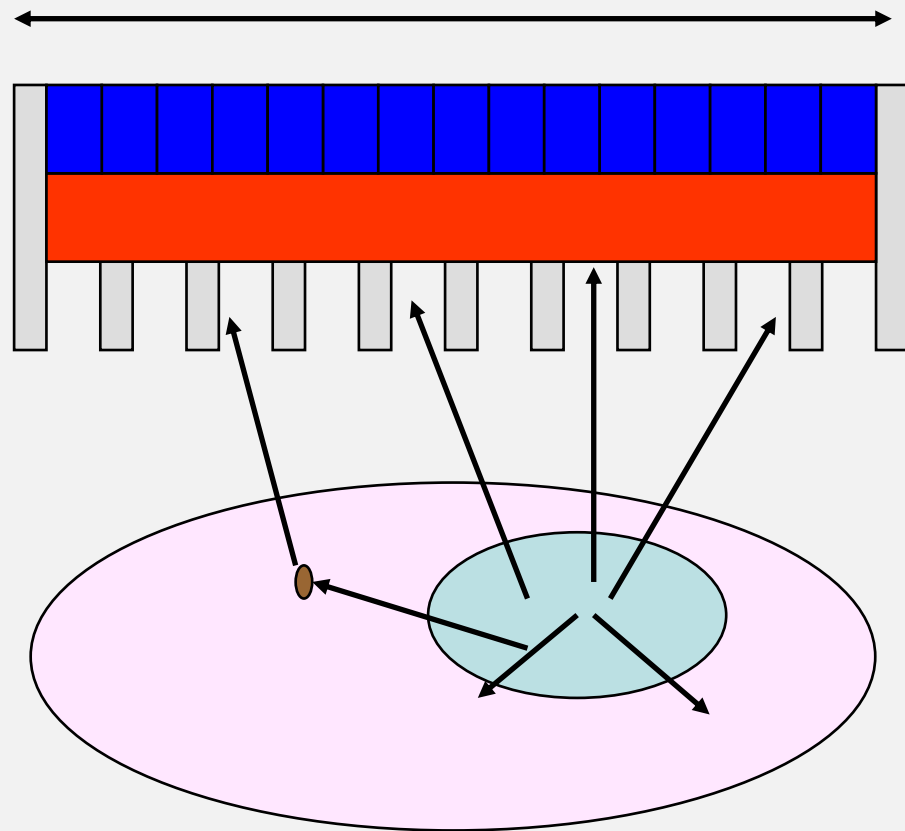


Hal Anger
1920-2005

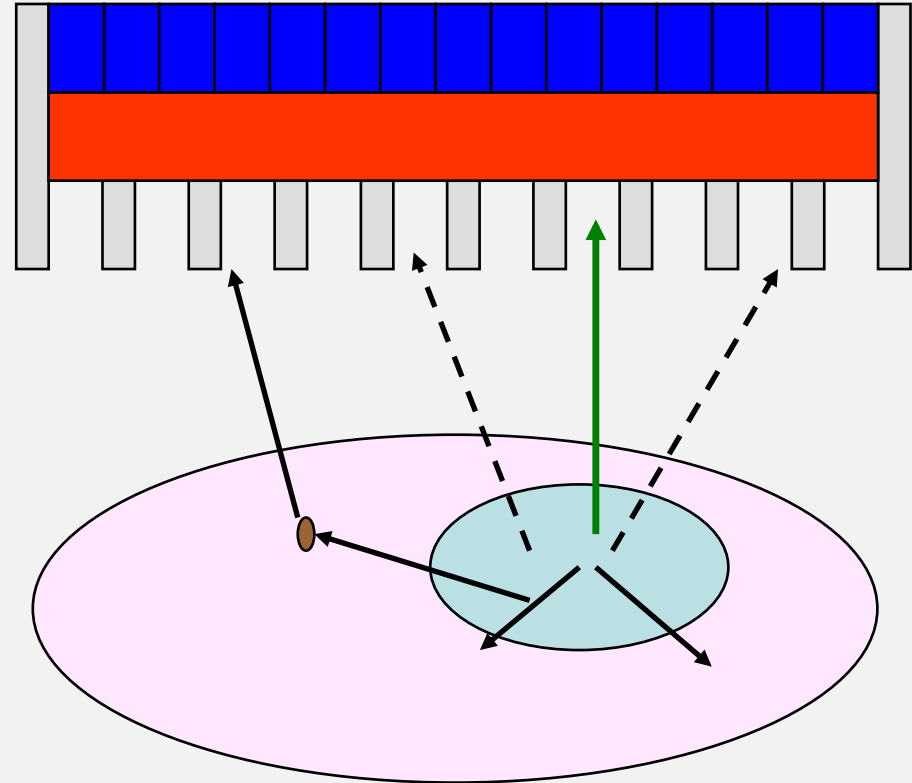
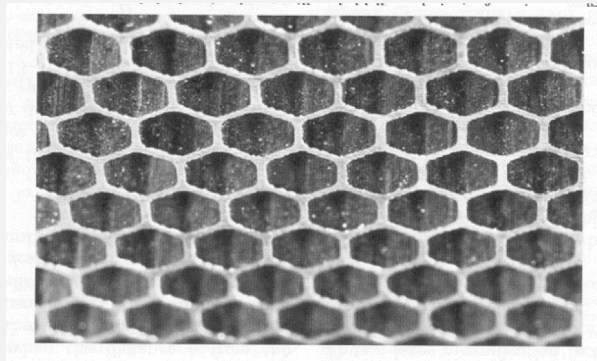
Gamma kamera

~40 cm

- PM cső* →
- Szcintillációs kristály* →
- Kollimátor* →



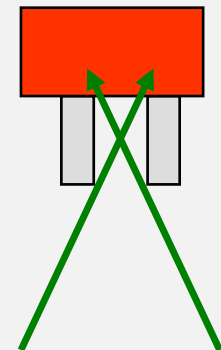
Kollimátor →



*Jó abszorpcióképességű anyagból
(ólom) álló csöves/lemezes rendszer.*

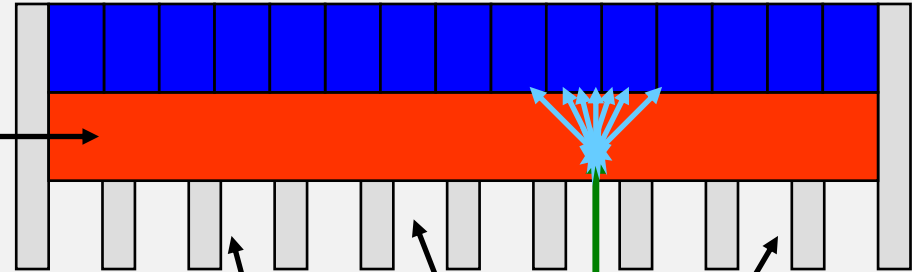
Csak bizonyos szög alatt érkező fotonokat enged át.

*A nyílások mérete, geometriája fontos az érzékenység és
a feloldóképesség szempontjából.*



detektorkristály

NaI(Tl) szcintillációs kristály



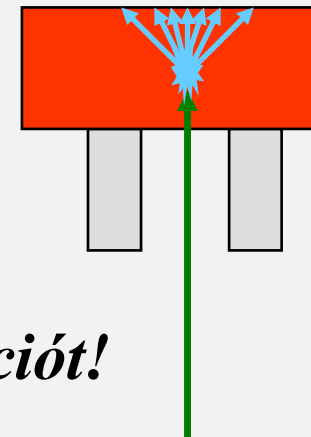
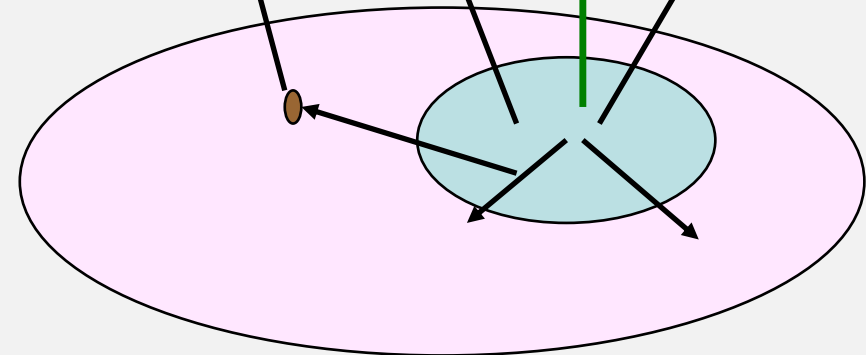
Megfelelő detektálási hatások

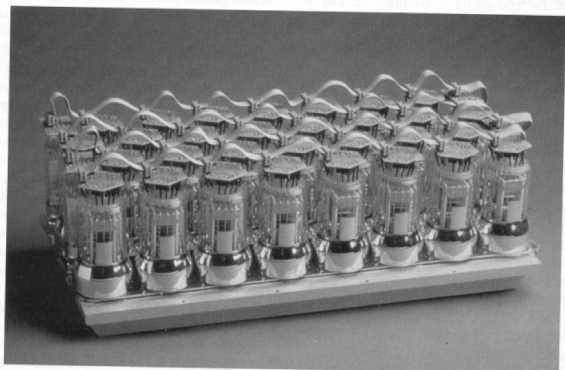
150 keV-os fotonra $\mu \sim 2.2 \text{ cm}^{-1}$

*Az emittált fény hullámhossza – 415 nm –
megfelel a PMT
követelményeinek.*

Sajnos törékeny, hőmérsékletérzékeny, higroszkópos.

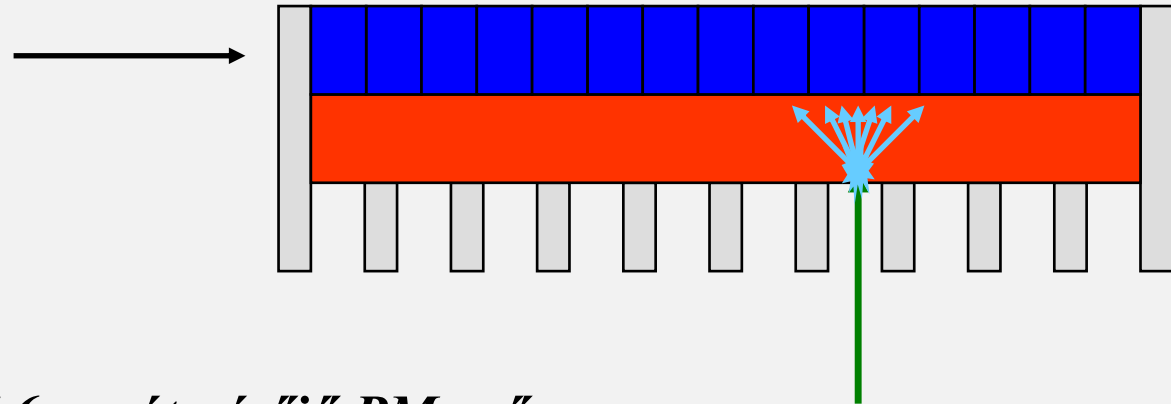
A szcintilláció befolyásolja a lokalizációt!





13-3. A rectangular gamma camera detector with the cover removed showing the photomultiplier (PMT)

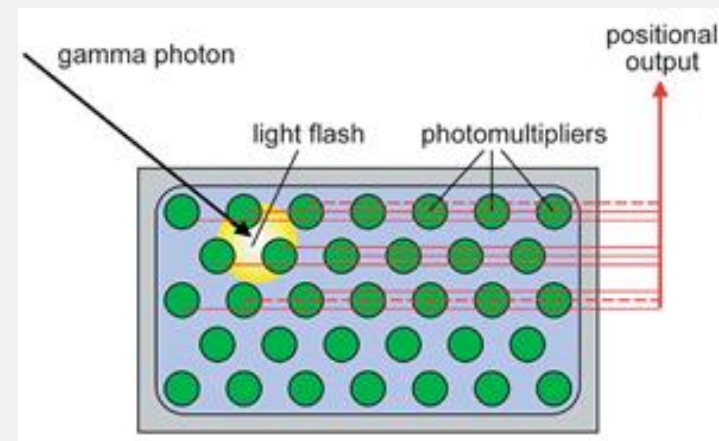
fotoelektronszorzók



Tipikusan 37-91 db, 5.1-7.6 cm átmérőjű PM-cső

*A keletkező feszültségimpulzusok
nagysága változatos, mert*

- egy γ -foton elnyelődése nemcsak egy fotoelektronszorzóban indukál elektromos jelet*
- nem csak fotoeffektus történik*



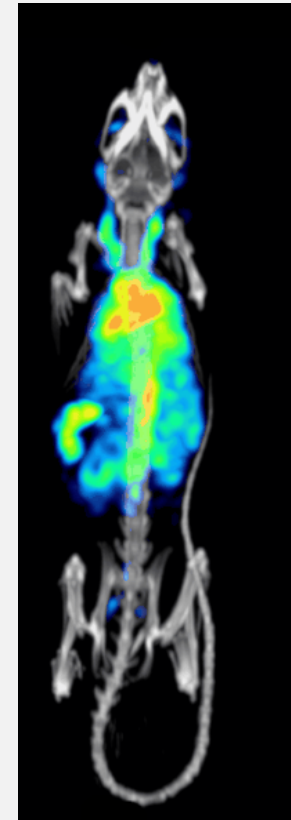
SPECT – Single Photon Emission Computed Tomography

Több gamma kamera szkennel egy-egy réteget – adatgyűjtés 360°-ban.

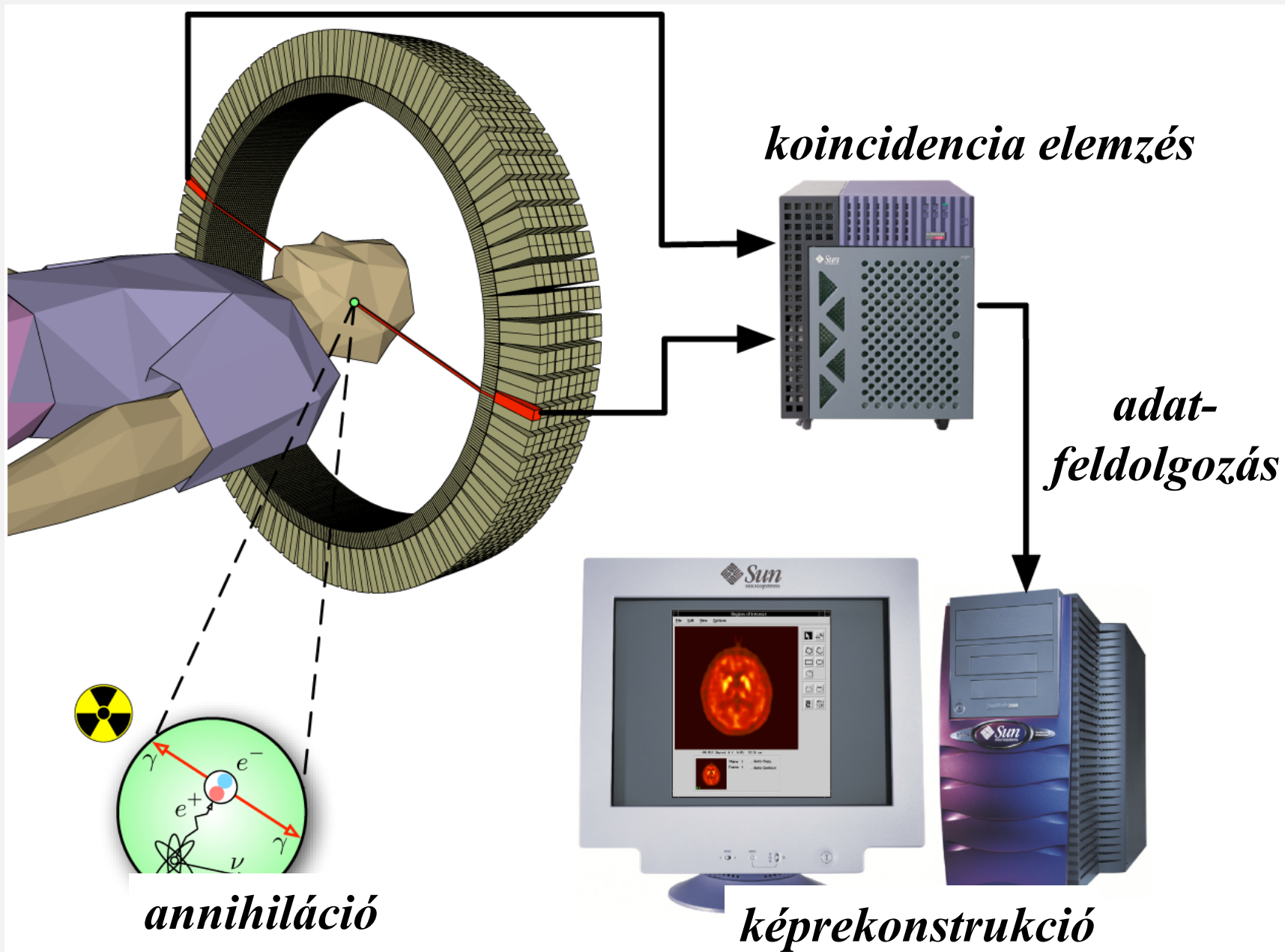
Az egyes szeletekben az aktivitás eloszlását a számítógép rekonstruálja.

Szinkódolt kép-rekonstrukció.

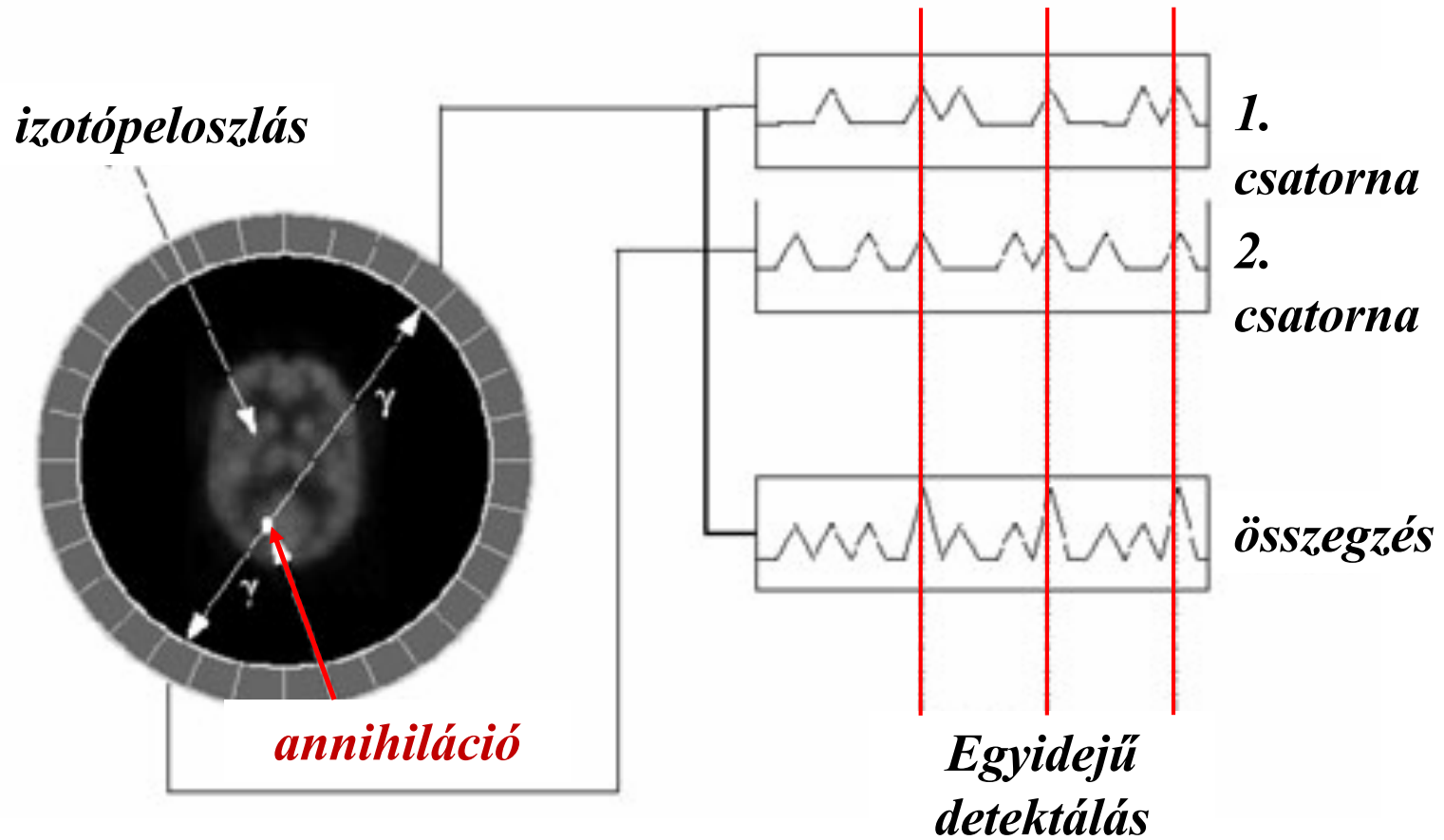
Egymást követő rétegek felvétele az x-tengely mentén.



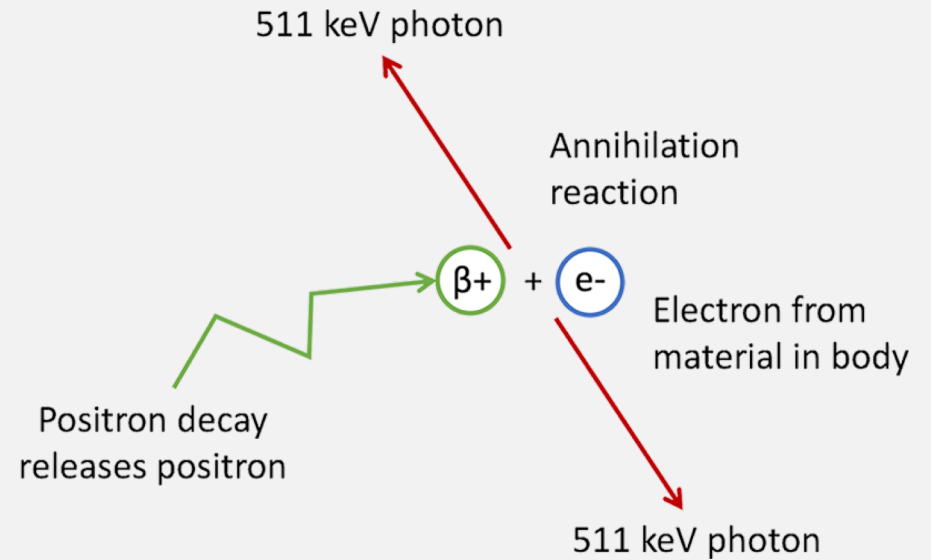
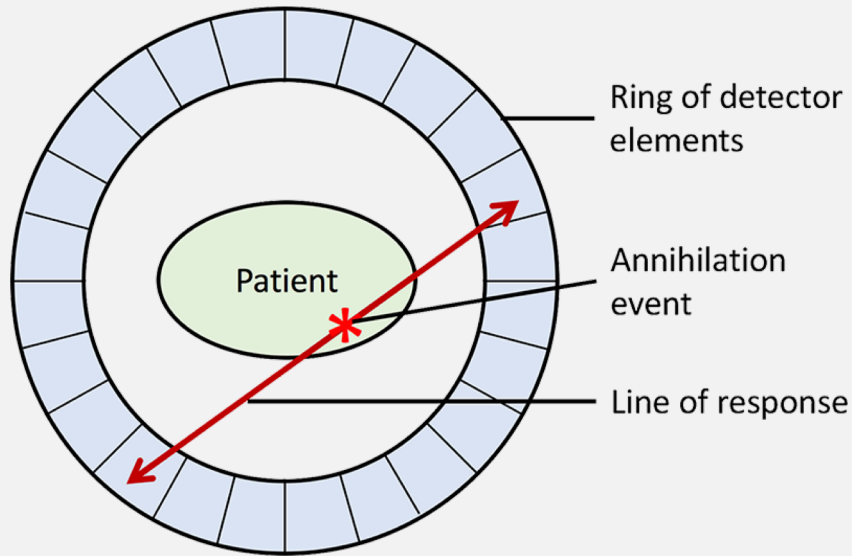
Positron Emission Tomography *PET*



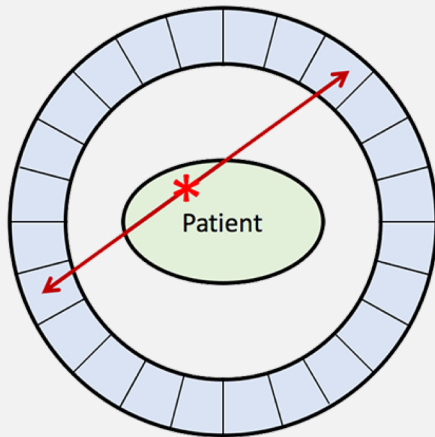
Koincidencia -detektálás



Koincidencia-detektálás

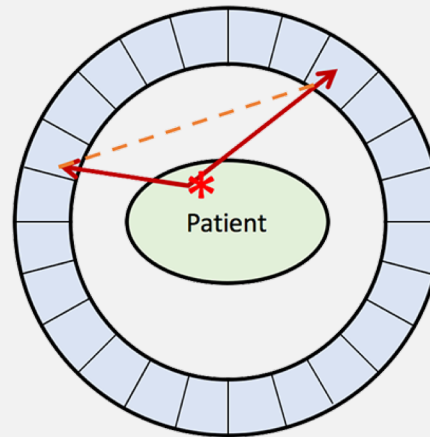


↔ Annihilation path
 - - - - - Calculated line of response



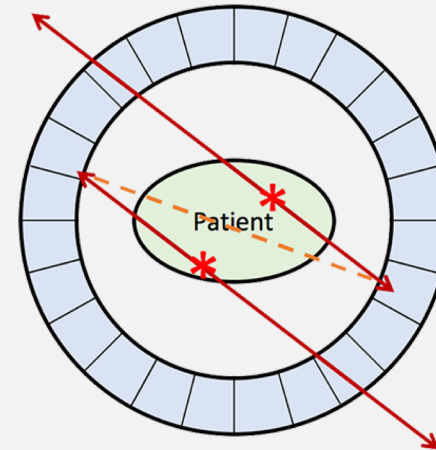
True coincidence

- One annihilation
- Straight path photons in opposite directions



Scatter coincidence

- One annihilation
- Photons scatter
- Measured line of response places annihilation reaction along artefactual projection

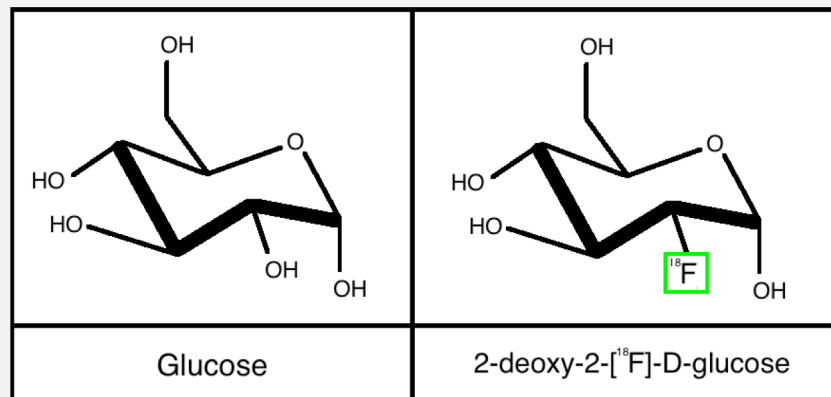


Random coincidence

- More than one annihilation
- Photons from different annihilations are detected simultaneously
- Artefactual line of response calculated

A PET-ben alkalmazott radionuklidok természetes szerves molekulákban is megtalálható elemek izotópjai.

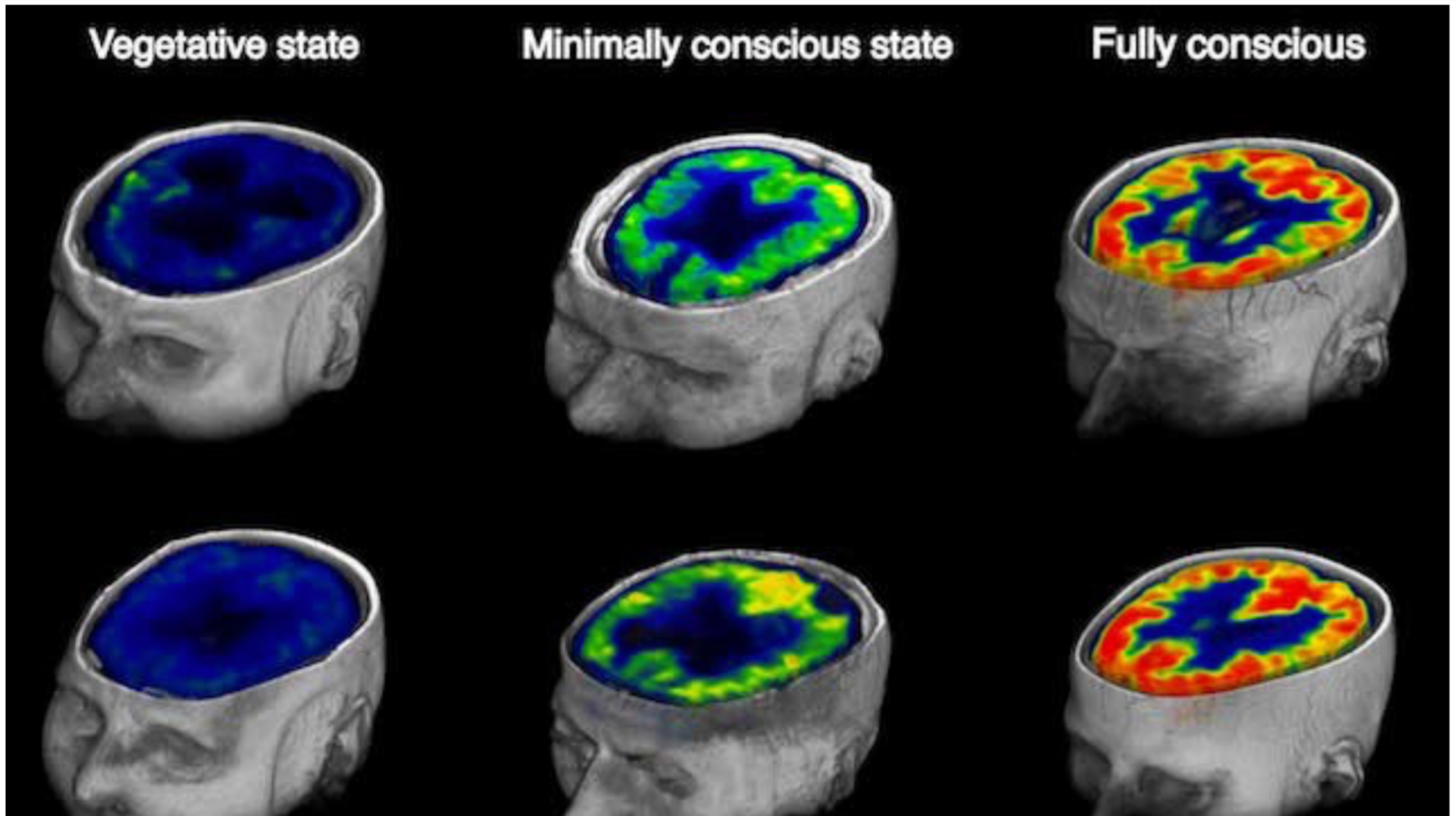
Isotope	β^+ energy (MeV)	β^+ range (mm)	1/2-life	Applications
^{11}C	0.96	1.1	20.3 min	receptor studies
^{15}O	1.70	1.5	2.03 min	stroke/activation
^{18}F	0.64	1.0	109.8 min	oncology/neurology
^{124}I	2.1350/1.5323	1.7/1.4	4.5 days	oncology



A rövid felezési idő miatt a felhasználás közelében kell előállítani a PETben alkalmazott izotópokat.

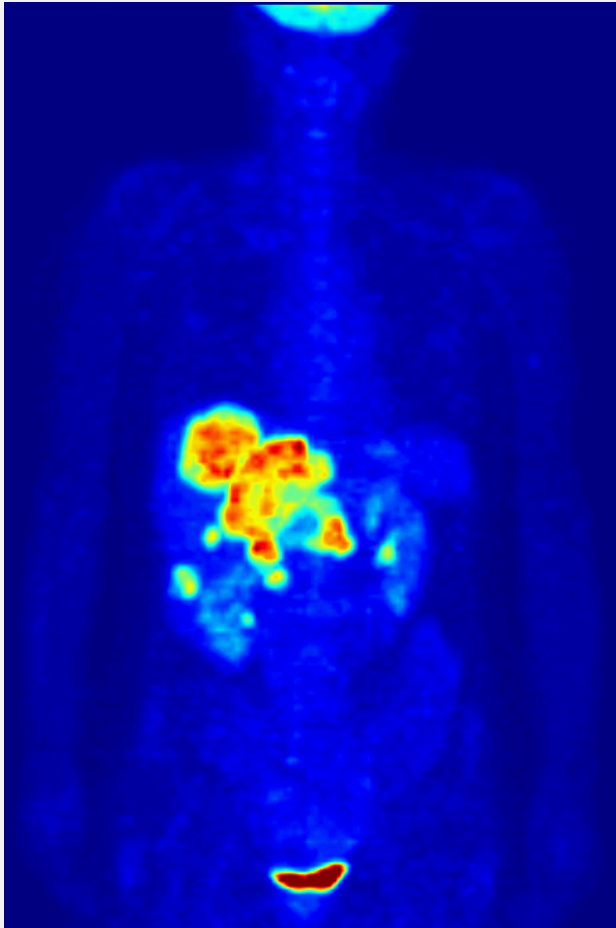


Fluorodeoxyglükóz (FDG) – cukor-metabolizmus ir



Global cerebral metabolic rate of glucose as an indicator of consciousness. 42% of normal cortical activity represents the minimal energetic requirement for the presence of conscious awareness (middle).

Fluorodeoxyglükóz (FDG) – cukor-metabolizmus ir



3D reconstruction of tissue metabolic activity from a [18F]-FDG PET scan. Notably, we see increased activity along the chest walls, indicating carcinoma, as well as the supraclavicular fossa.

Information like this cannot be obtained from a

PET/CT

A PET kombinálható pontosabb morfológiai képet adó módszerrel.

