

# Biofizika I

## 14. Magsugárzások klinikai alkalmazásai

Liliom Károly

2021. 12. 09.

[liliom.karoly@med.semmelweis-univ.hu](mailto:liliom.karoly@med.semmelweis-univ.hu)  
[karoly.liliom.mta@gmail.com](mailto:karoly.liliom.mta@gmail.com)

# Izotópdiagnosztikai eljárás lépései

- a megfelelő radioaktív molekula bejuttatása
- az aktivitás eloszlásának, változásának követése
- a fiziológiás v. patológias folyamatok felismerése, lokalizálása a mért eloszlás alapján

# Képalkotó eljárásokkal nyerhető információk

<b>Szerkezet</b>	X-ray	<i>a szövetek eltérő fizikai tulajdonságai alapján differenciálnak</i>
	Ultrahang	
	MRI	
<b>Funkció</b>	Izotópdiagnosztika	<i>a szövetek eltérő biokémiai/élettani jellemzői alapján differenciálnak</i>
	MRI	



Röntgenfelvétel

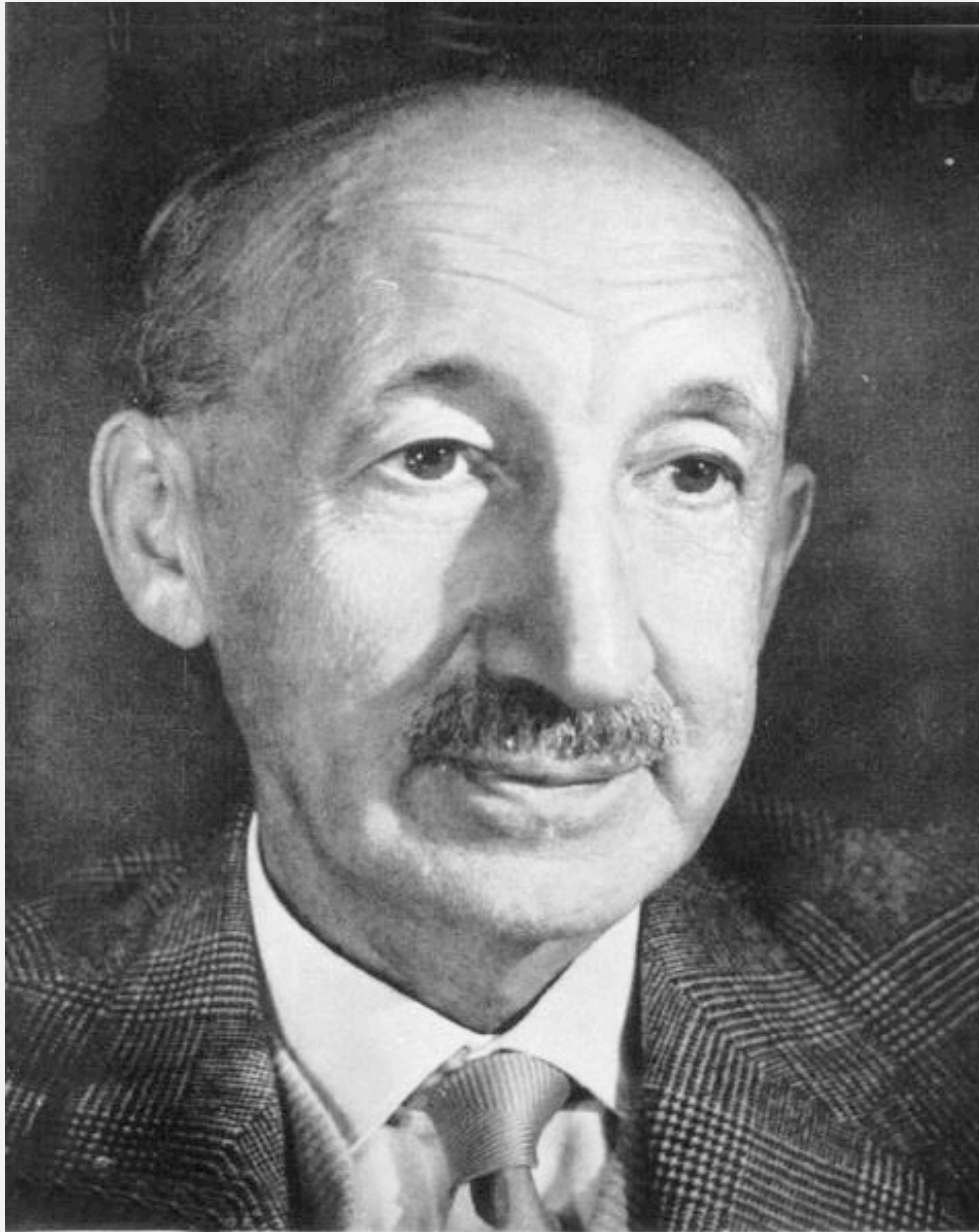
*szerkezeti információ*



Izotópdiagnosztikai felvétel

*metabolikus aktivitás*





*GeorgedeHevesy*

*a nukleáris medicina atyja*

***Hevesy György***  
(1885 - 1966)

kémiai Nobel-díj  
1943

**az izotójelzéses technika  
megalapozásáért**

# Az izotóp kiválasztásának szempontjai

Maximáljuk a nyerhető információt.

Minimalizáljuk a kockázatot.

Ennek megfelelően optimalizálandó

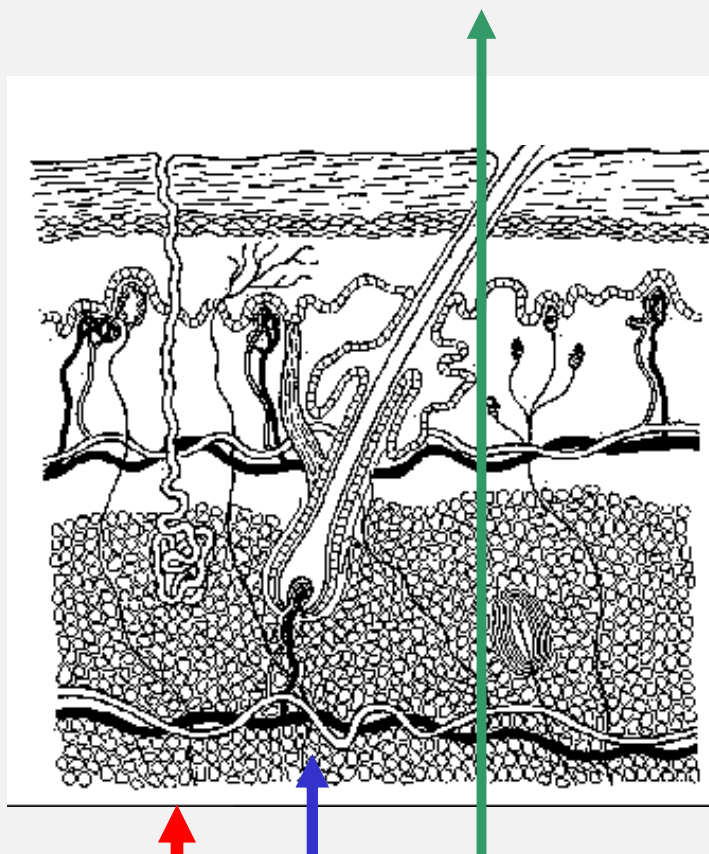
- a sugárzás fajtája

- a sugárzás fotonenergiája

- az izotóp felezési ideje

- radiofarmakon előállíthatósága és tulajdonságai

## a sugárzás fajtája

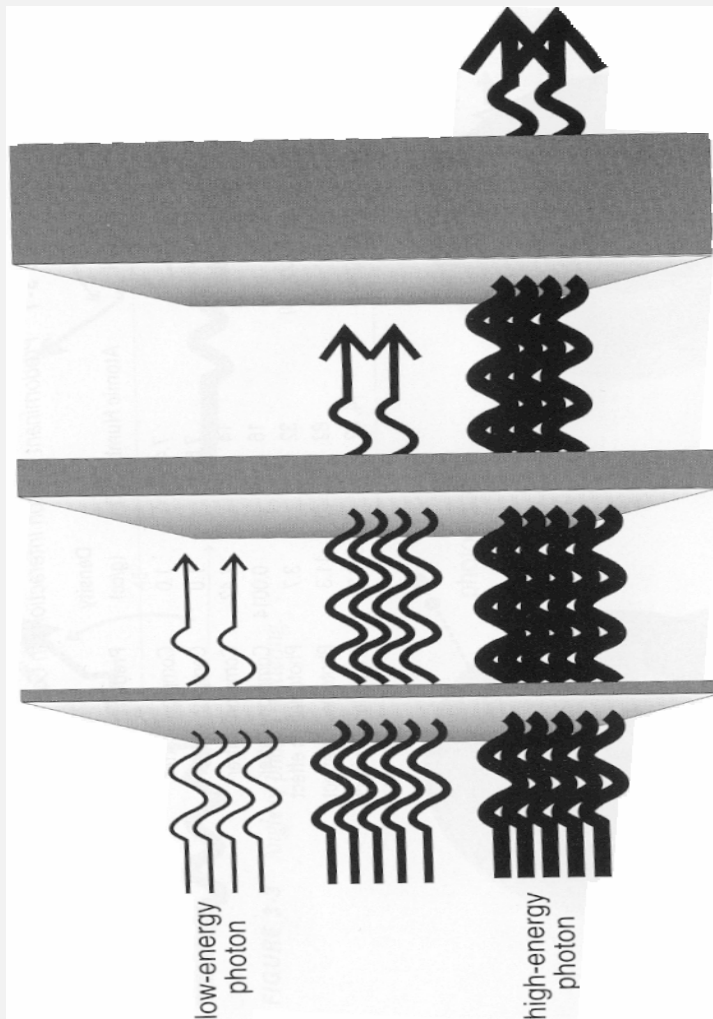


csak a gamma-sugárzás  
áthatolóképesége elég  
nagy diagnosztikai célra

$\alpha$     $\beta$     $\gamma$

*Optimális a tisztán  $\gamma$ -sugárzó mag*

## fotonenergia hatása



Legyen elég nagy az áthatolóképesége a testszövetekben!

Legyen jó hatásfokkal detektálható!

$$hf > 50 \text{ keV}$$

az izotóp felezési ideje

$$\Lambda = \lambda N = \frac{0,693}{T} N$$

↗  
Csökkentésének határt  
szabnak a vizsgálat  
körülményei.

↖  
A páciens védelmében  
minimalizáljuk!

↑  
**Legyen minél  
rövidebb**

DE csökkentésének határt szab a vizsgálandó  
biológia folyamat időbeli lefolyása.

**radiofarmakon** – radioaktív atomot hordozó molekula

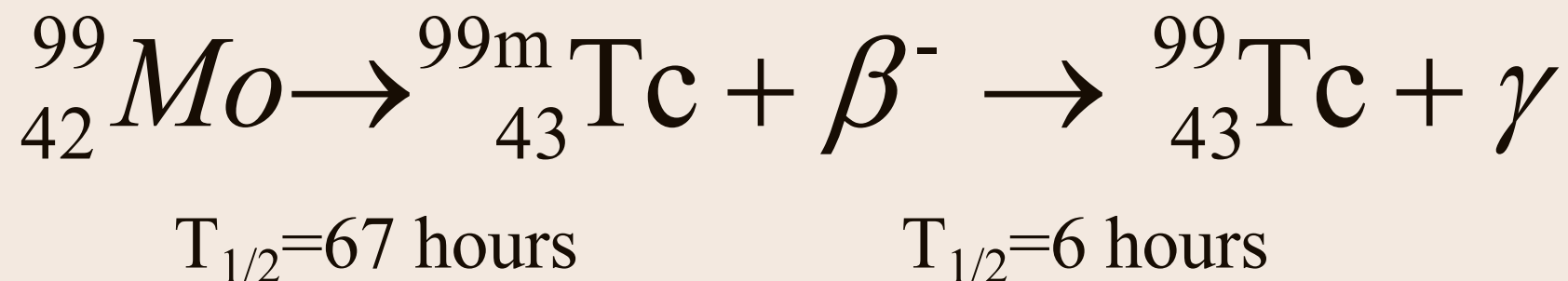
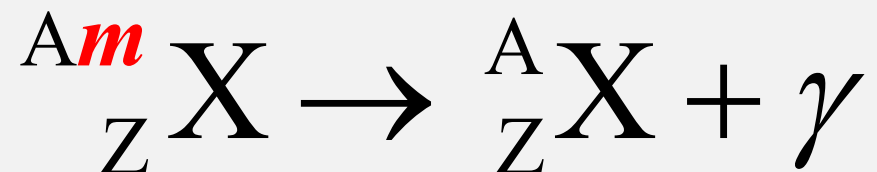
Vegyen rész a vizsgálni kívánt biokémiai/élettani folyamatban.

Ne módosítsa a vizsgálni kívánt folyamatot és ne legyen toxikus.

# A radiofarmakon eloszlását befolyásoló biológiai tényezők

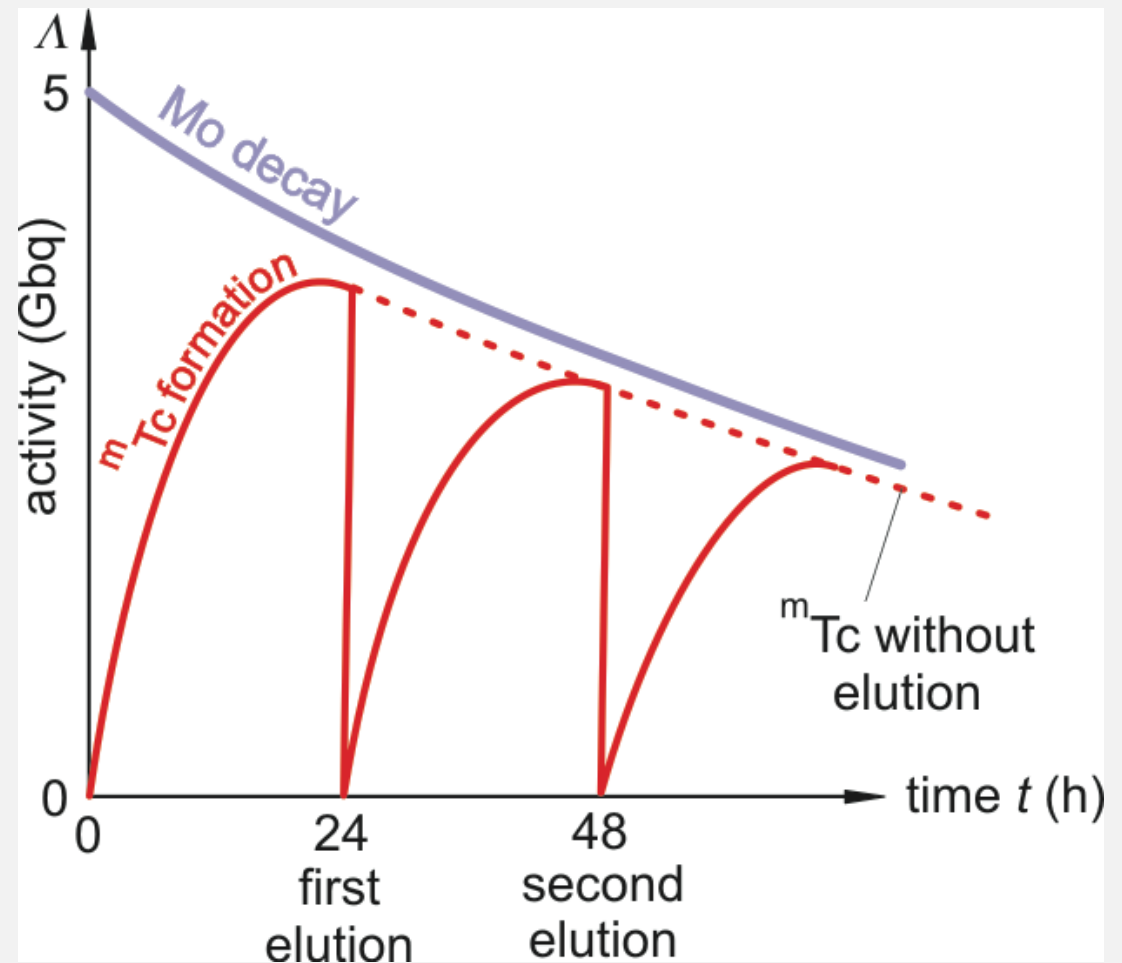
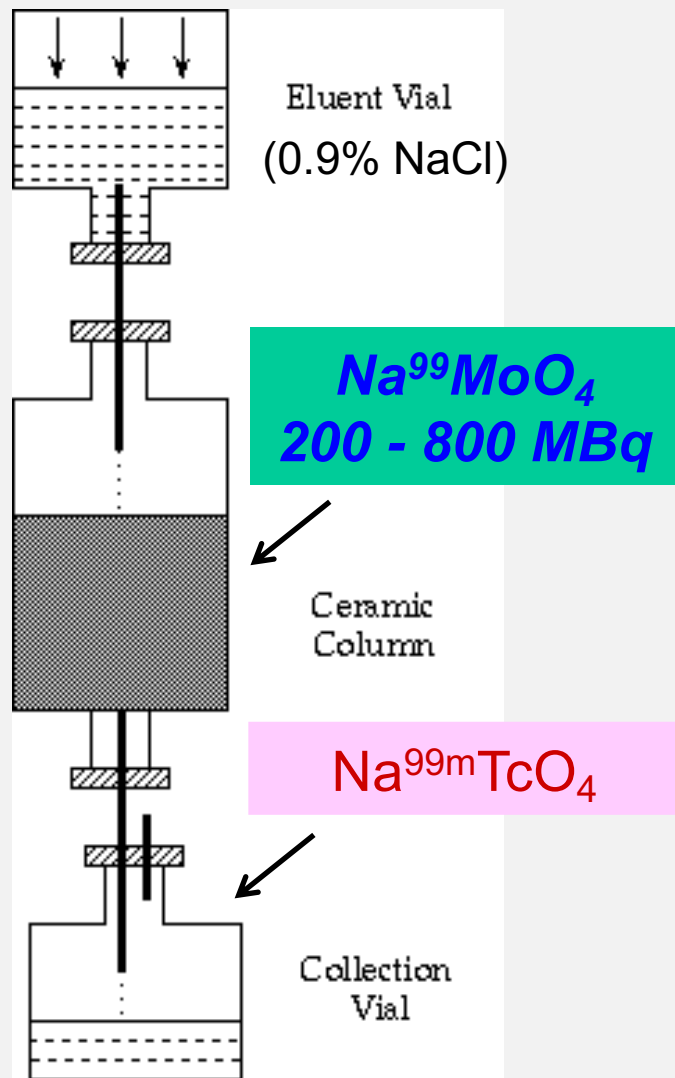
- véráramlás (szöveti függés)
- felszívódás, szállítás, metabolikus átalakítás, kiürülés
- fizikai-kémiai tulajdonságok (oldhatóság, méret, töltés, hidrofóbicitás, stb)

# Gamma-sugárzó izotópok





# Technécium-99m generátor



## példák

farmakon	izotóp	aktivitás (MBq)	alkalmazási terület
Pertechnetát	$^{99m}\text{Tc}$	550 - 1200	agy
Pirofoszfát	$^{99m}\text{Tc}$	400 - 600	szív
Dietilén-triamin pentaecetsav (DTPA)	$^{99m}\text{Tc}$	20 - 40	tüdő
Benzoilmercapto-acetiltri- glicerín (MAG3)	$^{99m}\text{Tc}$	50 - 400	vese
Metilén difoszfónát (MDP)	$^{99m}\text{Tc}$	350 - 750	csont

# Mekkora aktivitást használjunk?

Maximáljuk a nyerhető információt.

Minimalizáljuk a kockázatot.

$$\Lambda \sim 100 \text{ MBq}$$

# A kép típusai

Statikus kép – az izotóp/aktivitás eloszlása egy adott pillanatban

Dinamikus kép – az izotóp/aktivitás mennyiségének  
változása egy adott helyen

Statikus és dinamikus együttese – statikus felvételek  
egymásutánja

Emissziós CT

SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)

PET (Positron Emission Tomography)

# A kép típusai

Statikus kép – az aktivitás eloszlása egy adott pillanatban



pajzsmirigyben

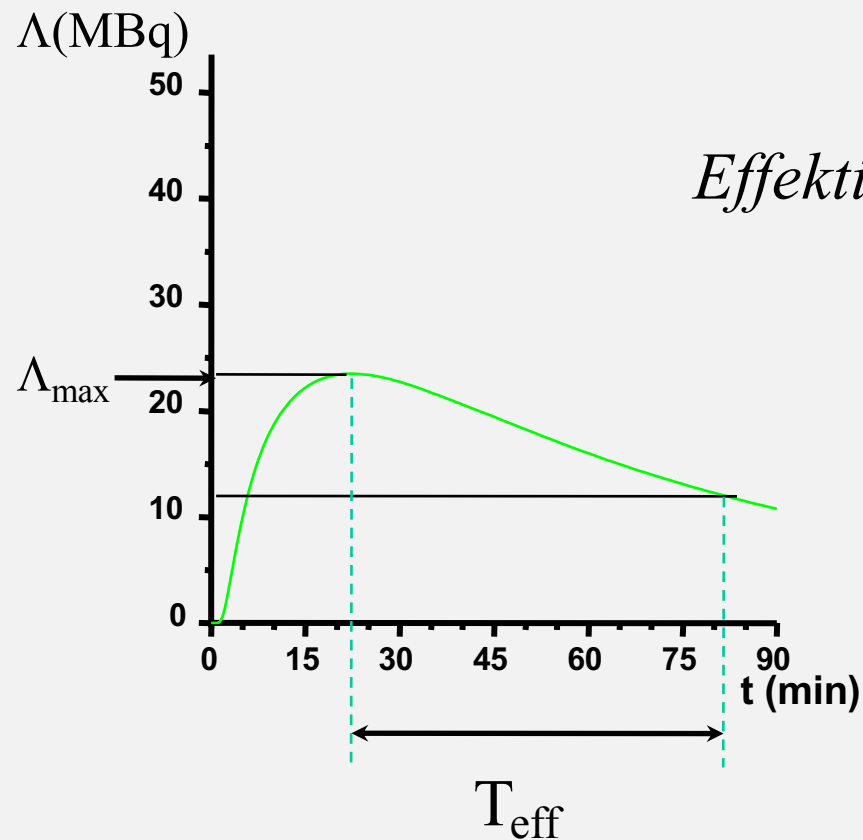


vesében

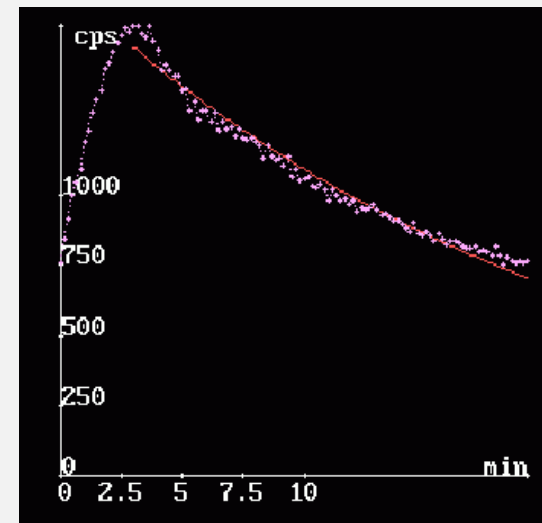
Izotóp felhalmozódása

# A kép típusai

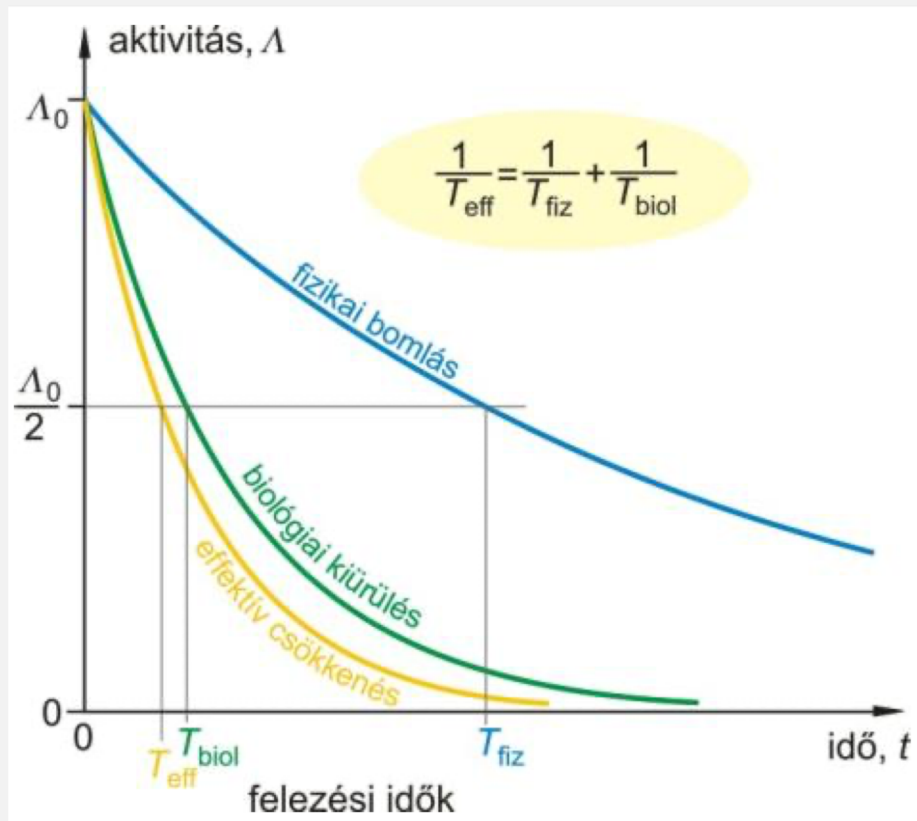
Dinamikus kép – az izotóp/aktivitás mennyiségének változása egy adott helyen



*Effektív felezési idő* – az aktivitás a felére csökken a célszervben



*Effektív felezési idő* – az aktivitás a felére csökken a célszervben

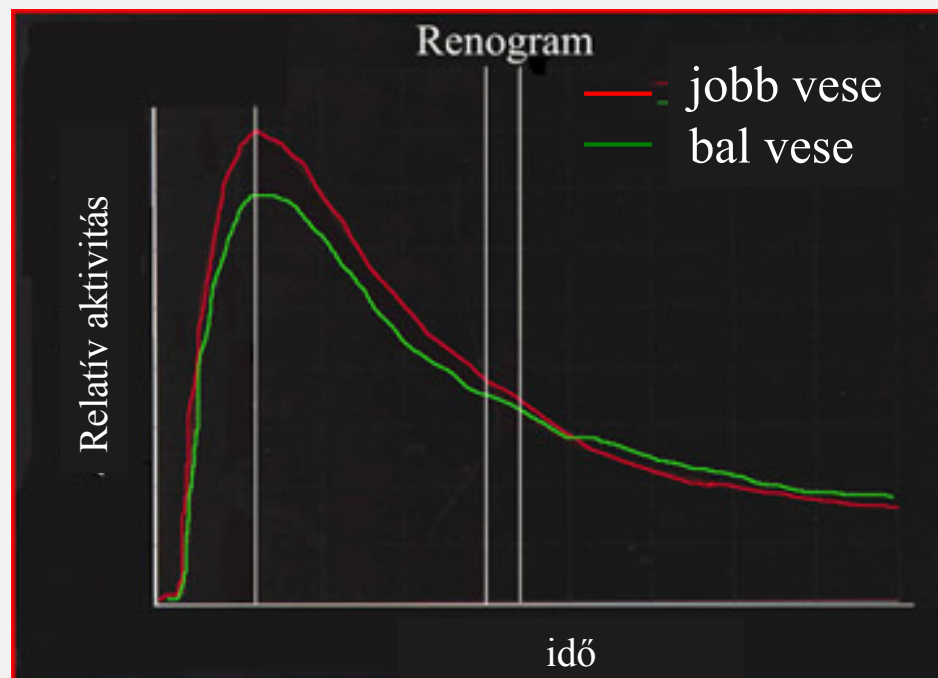


$$\Lambda = \Lambda_0 e^{-(\lambda_{fiz} + \lambda_{biol})t}$$

$$\lambda_{effektiv} = \lambda_{fiz} + \lambda_{biol}$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{fiz}} + \frac{1}{T_{biol}}$$

példa

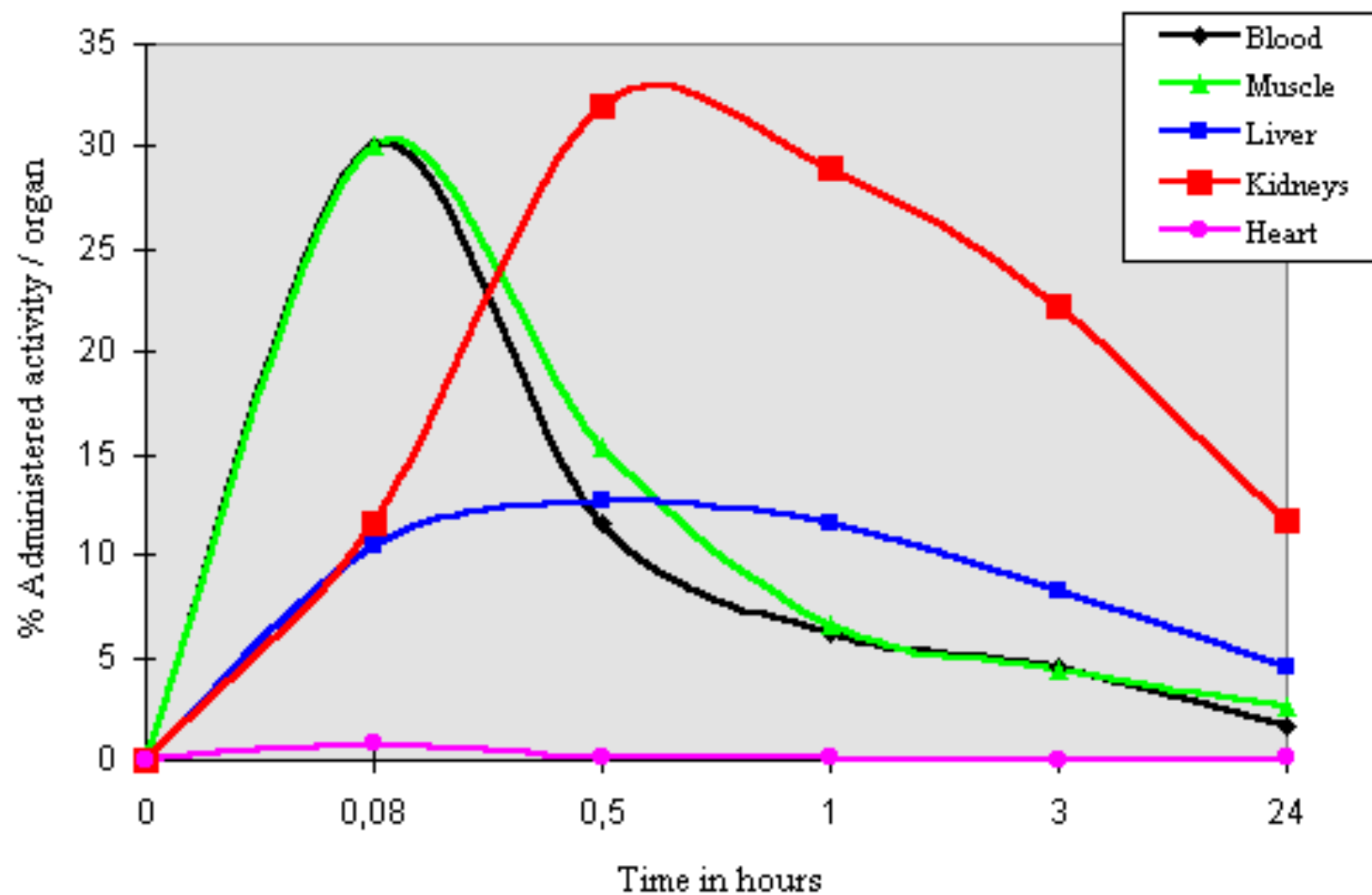


vese izotóptárolási görbéje

A biológiai felezési idő értékeléséhez a felvétel körülményeit (milyen radiofarmakon, milyen formában stb) is figyelembe kell venni.



Time-activity curve of Tc-99m scorpion venom in rats

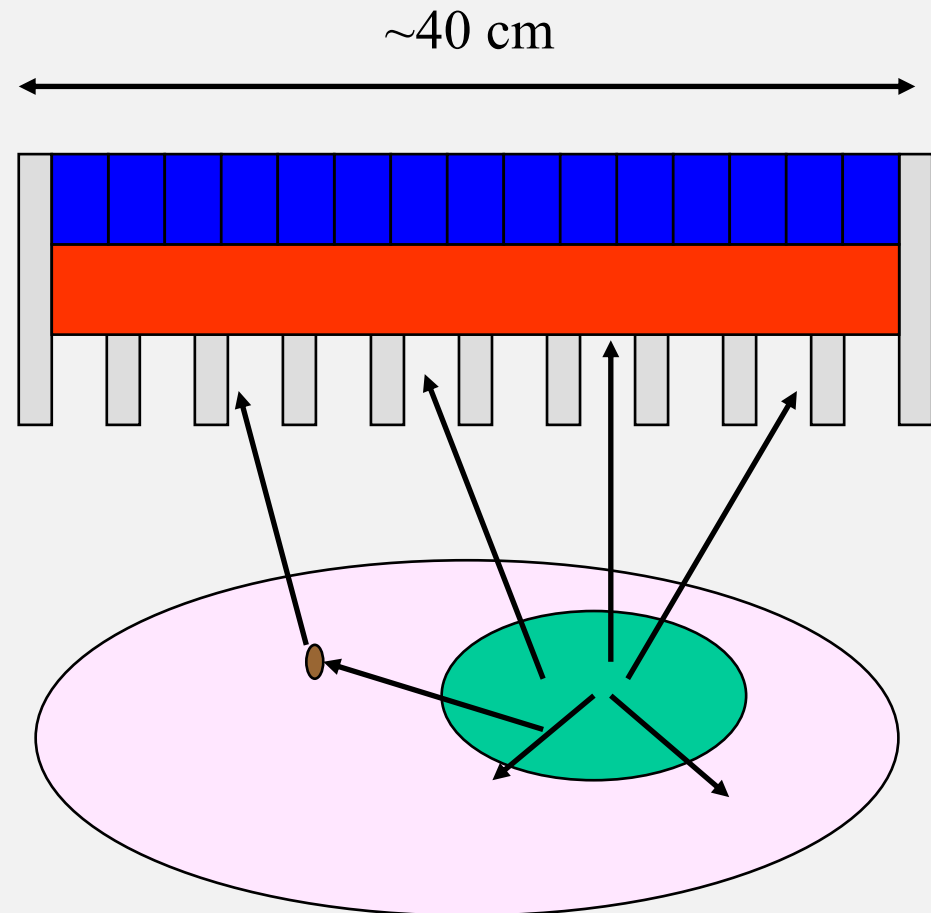




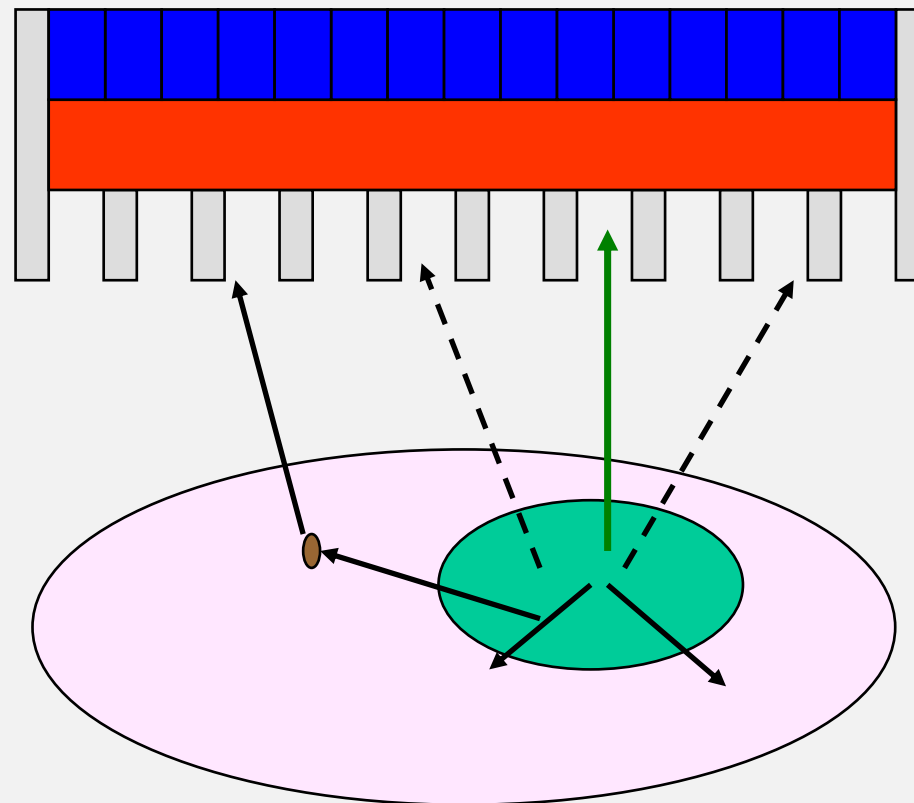
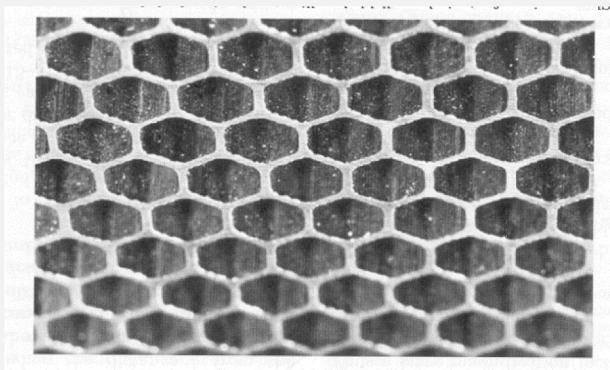
Hal Anger  
1920-2005

# Gamma kamera

PM cső →  
Szczintillációs kristály →  
Kollimátor →



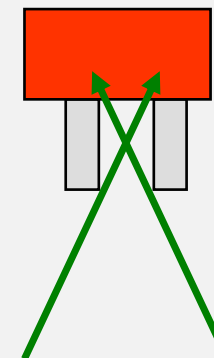
# Kollimátor



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

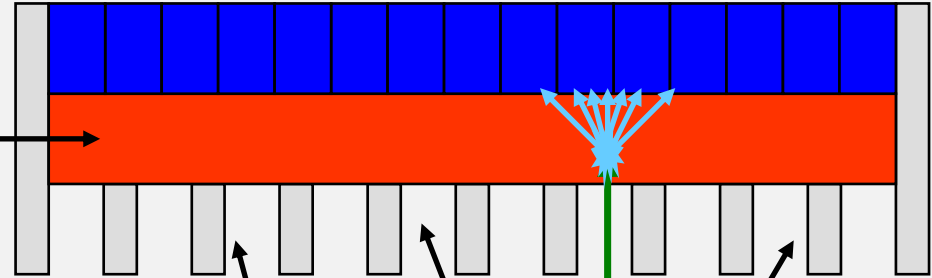
Csak bizonyos szög alatt érkező fotonokat enged át.

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



# detektorkristály

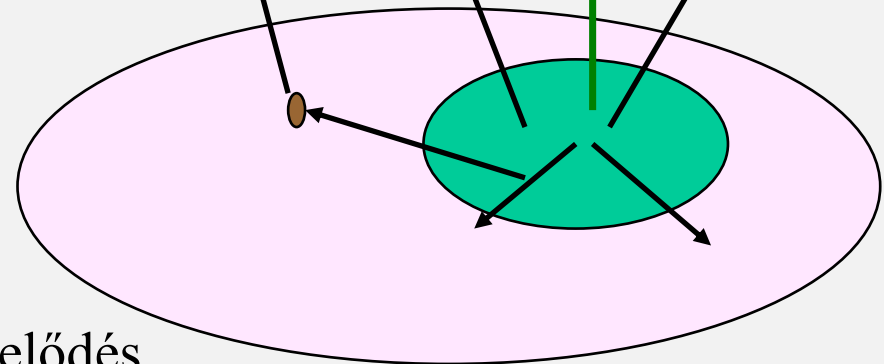
NaI(Tl) szcintillációs kristály



Megfelelő detektálási hatásfok

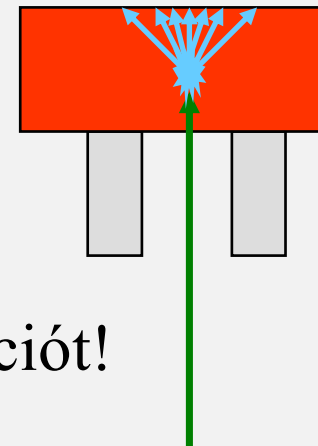
150 keV-os fotonra  $\mu \sim 2.2 \text{ cm}^{-1}$

10 mm rétegvastagságban  $\sim 90\%$ -os elnyelődés

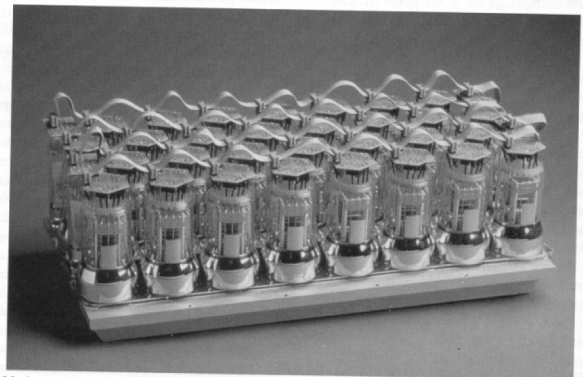


Az emittált fény hullámhossza – 415 nm –  
megfelel a PMT követelményeinek.

Sajnos törékeny, hőmérsékletérzékeny, higroszkópos.

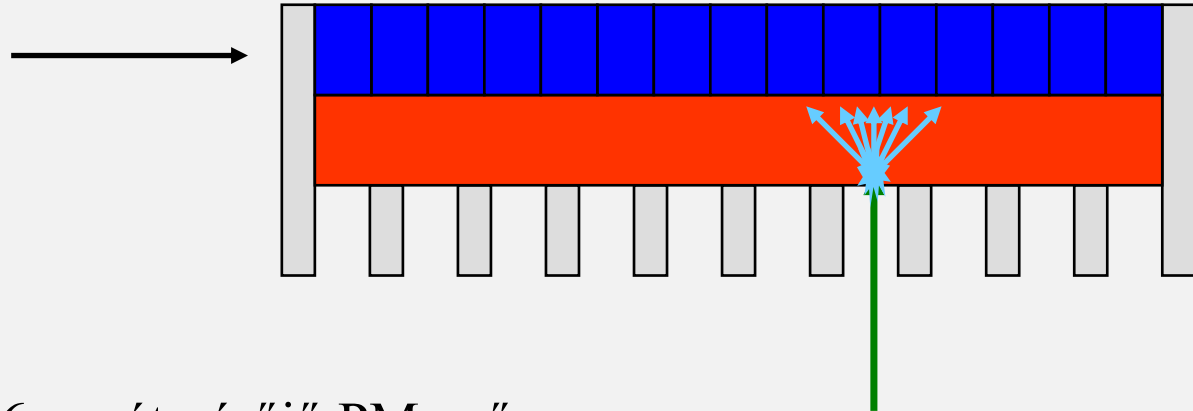


A szcintilláció befolyásolja a lokalizációt!



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

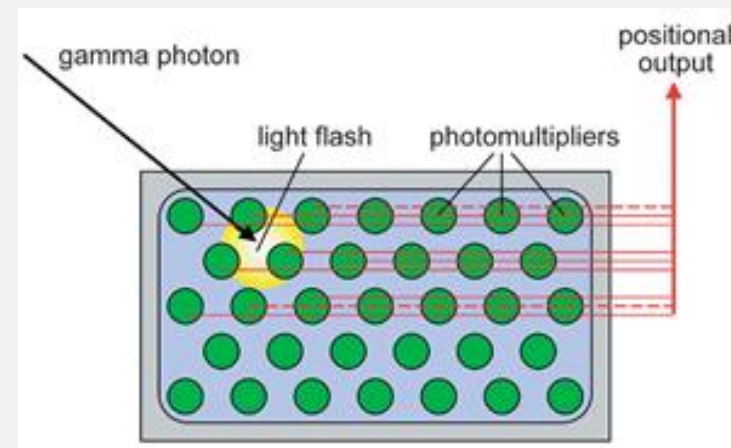
# fotoelektroncszorzók



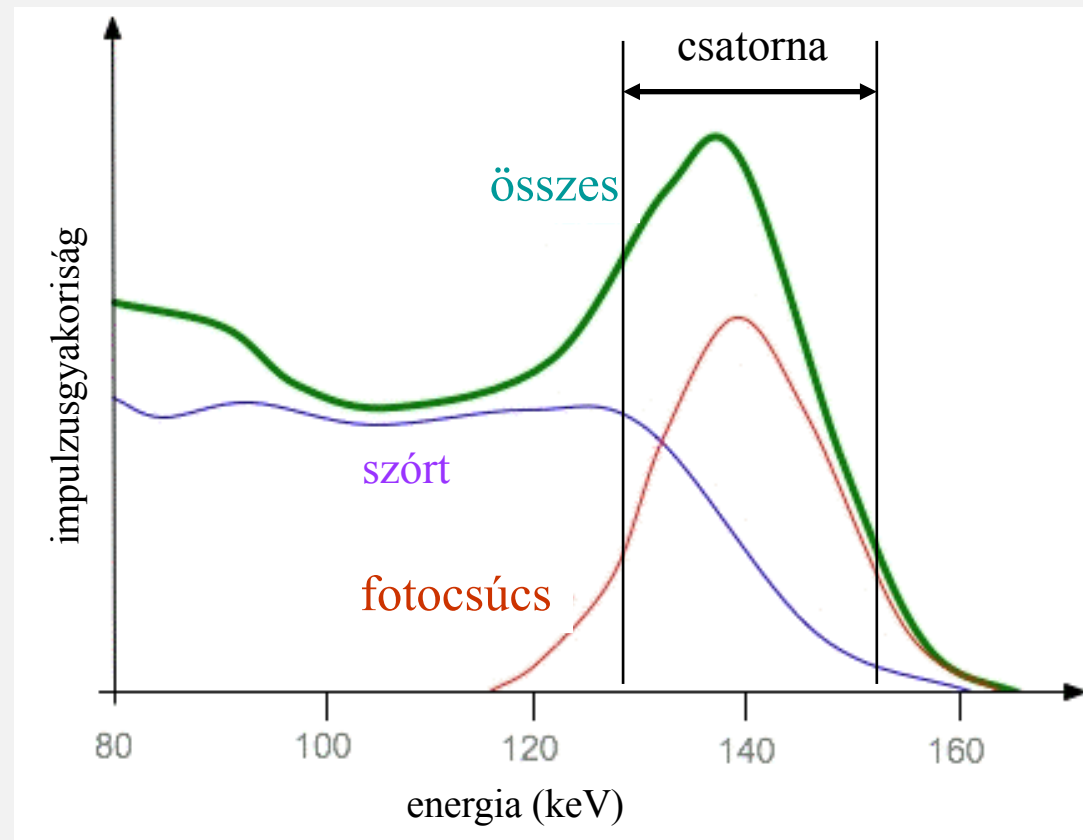
Tipikusan 37-91 db, 5.1-7.6 cm átmérőjű PM-cső

A keletkező feszültségimpulzusok nagysága változatos, mert

- egy  $\gamma$ -foton elnyelődése nemcsak egy fotoelektroncszorzóban indukál elektromos jelet
- nem csak fotoeffektus történik

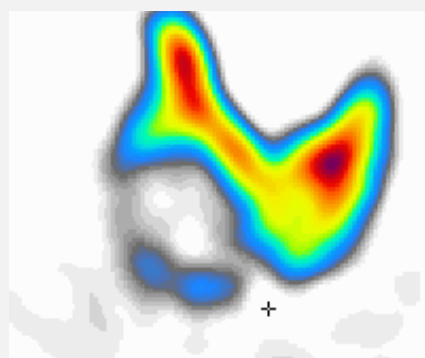
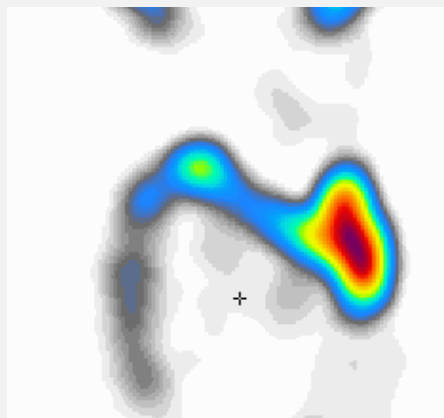
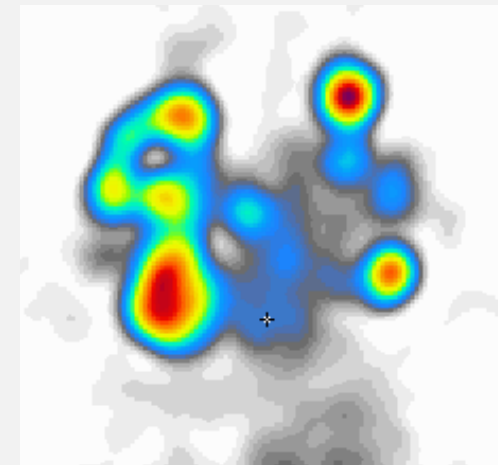
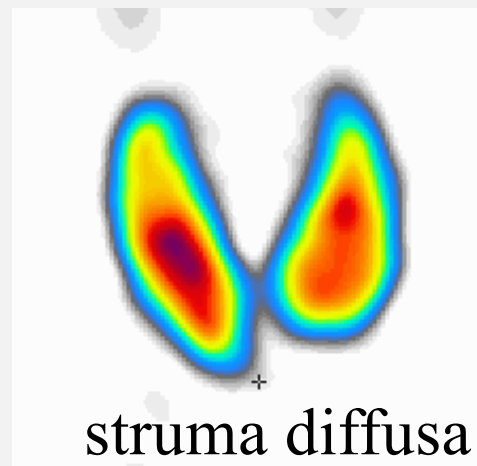
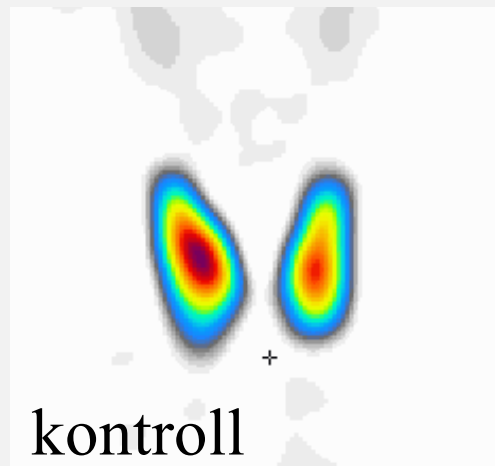


Impulzus amplitúdó spektrum – a fotoeffektus révén elnyelődő  $\gamma$ -foton energiájával arányos nagyságú feszültségimpulzust generál.



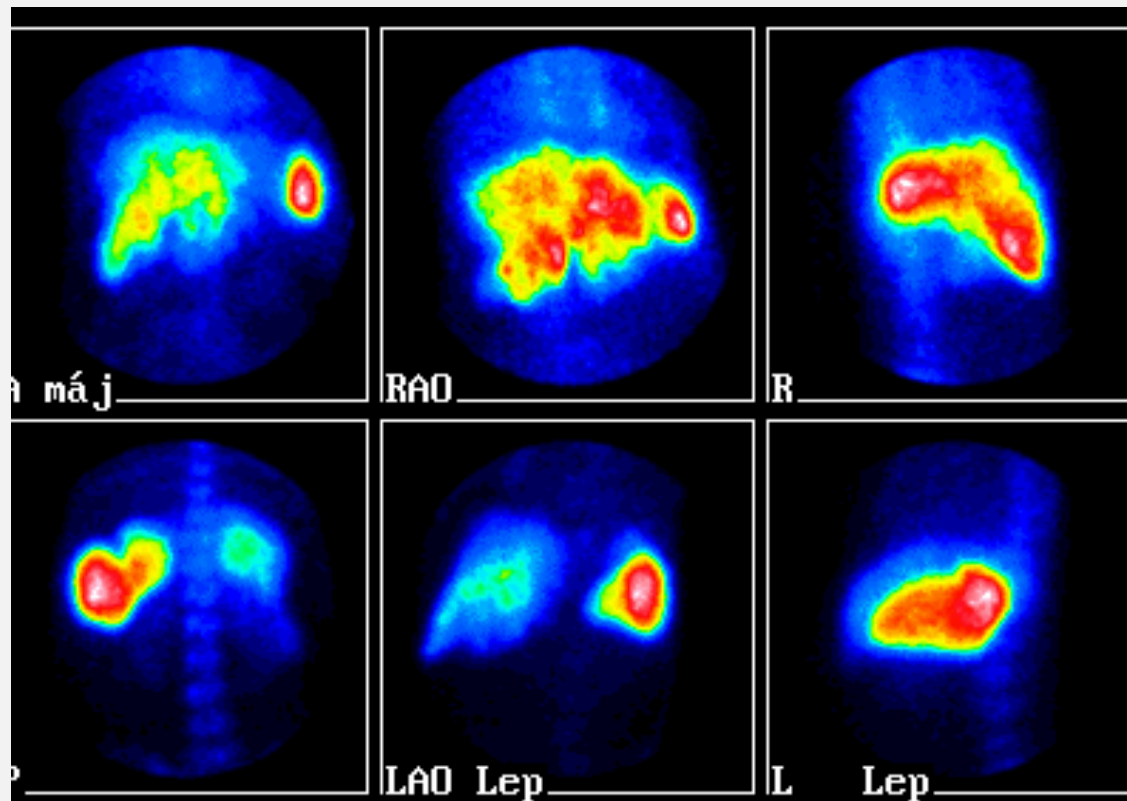
Compton-szórás révén keletkező, vagy nem a térbeli lokalizációnak megfelelően becsapódó fotonok által kiváltott feszültségimpulzusok diszkriminálással (DD) megkülönböztethetők.

## Pajzsmirigy pertechnetátos (intravénásan 80 MBq) felvételek



hideg göbök

## Durva göbös májlézió

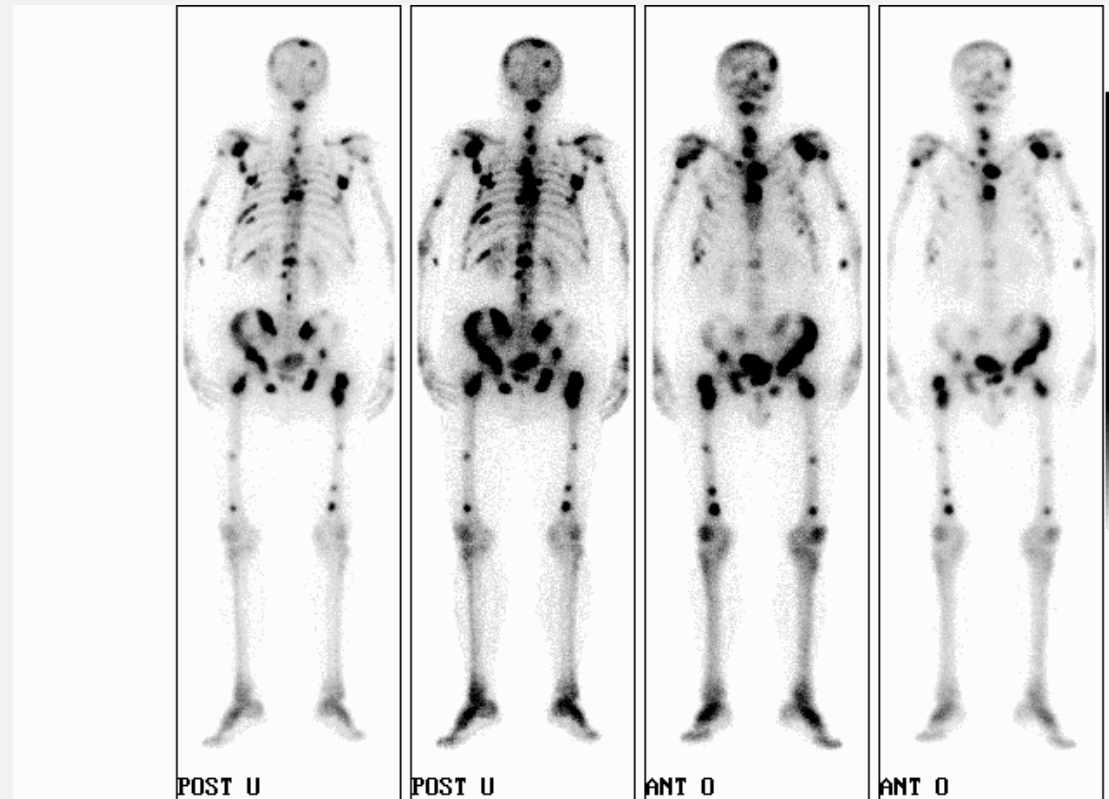


$^{99m}\text{Tc}$ - fytion



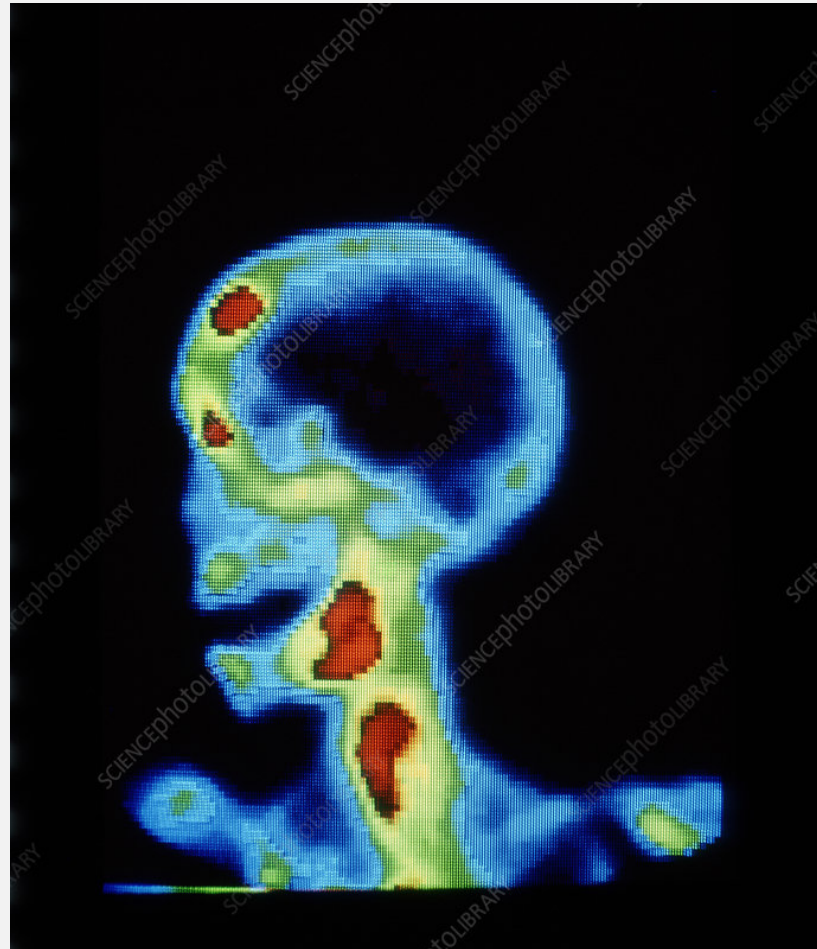
# Csont -szcintigráfia

$^{99m}\text{Tc}$ -MDP: 600 MBq



csont metastasis

# Gamma kamera: szummációs kép (2D)



3D (mélységi) felbontás: tomográfiás eljárások

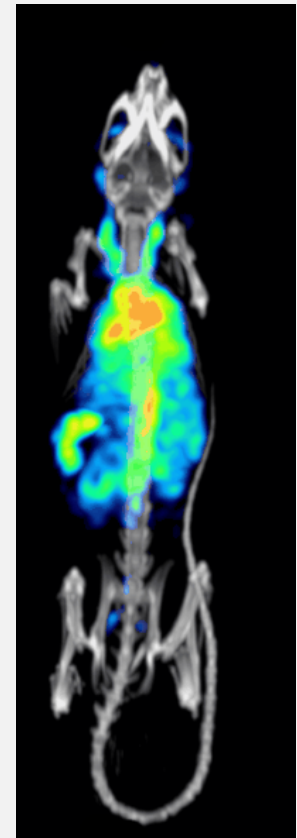
# SPECT – Single Photon Emission Computed Tomography

Több gamma kamera szkennel egy réteget – adatgyűjtés  $360^\circ$  -ban.

Az egyes szeletekben az aktivitás eloszlását a számítógép rekonstruálja.

Szinkódolt képrekonstrukció.

Egymást követő rétegek felvétele az x-tengely mentén.

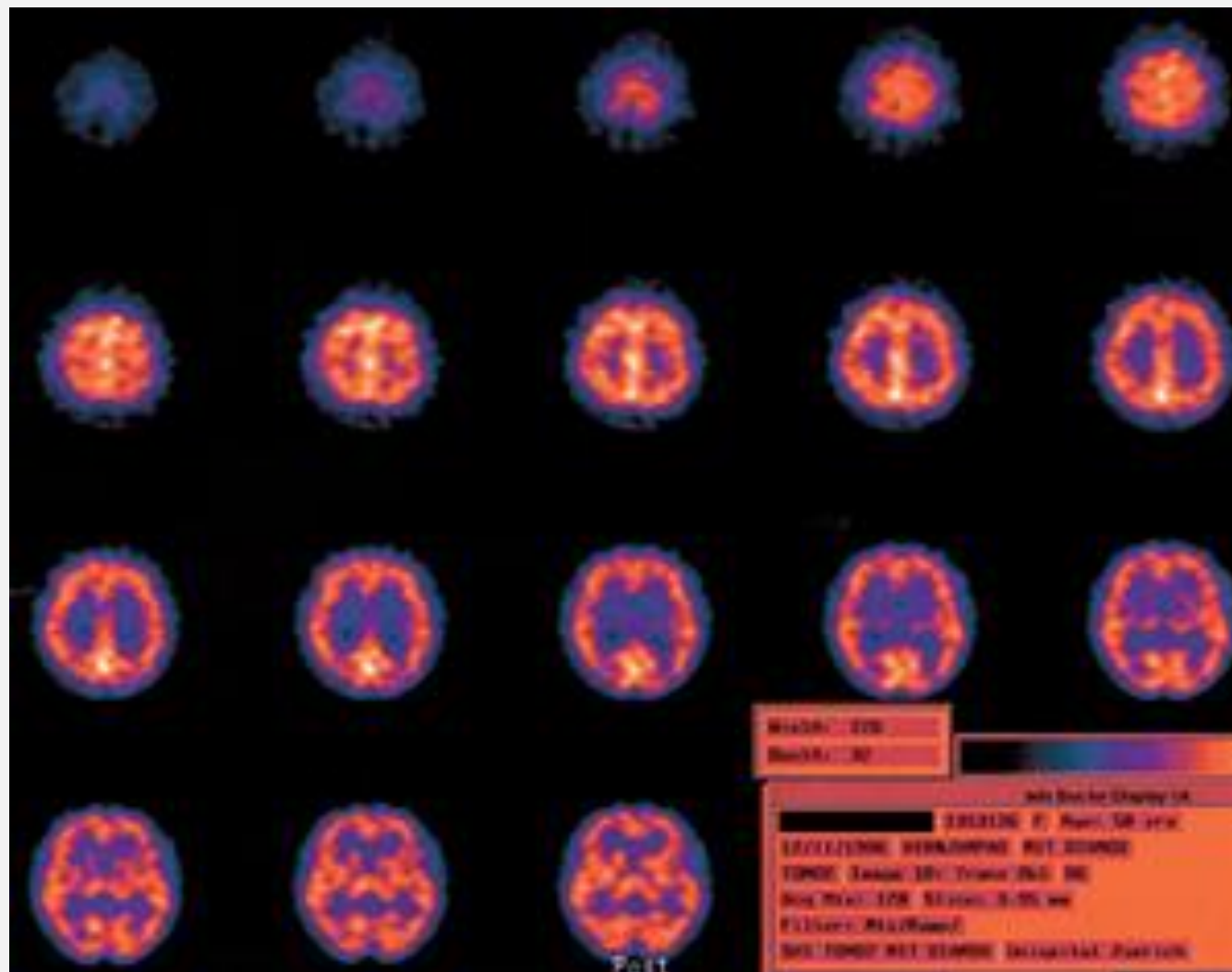




# SPECT



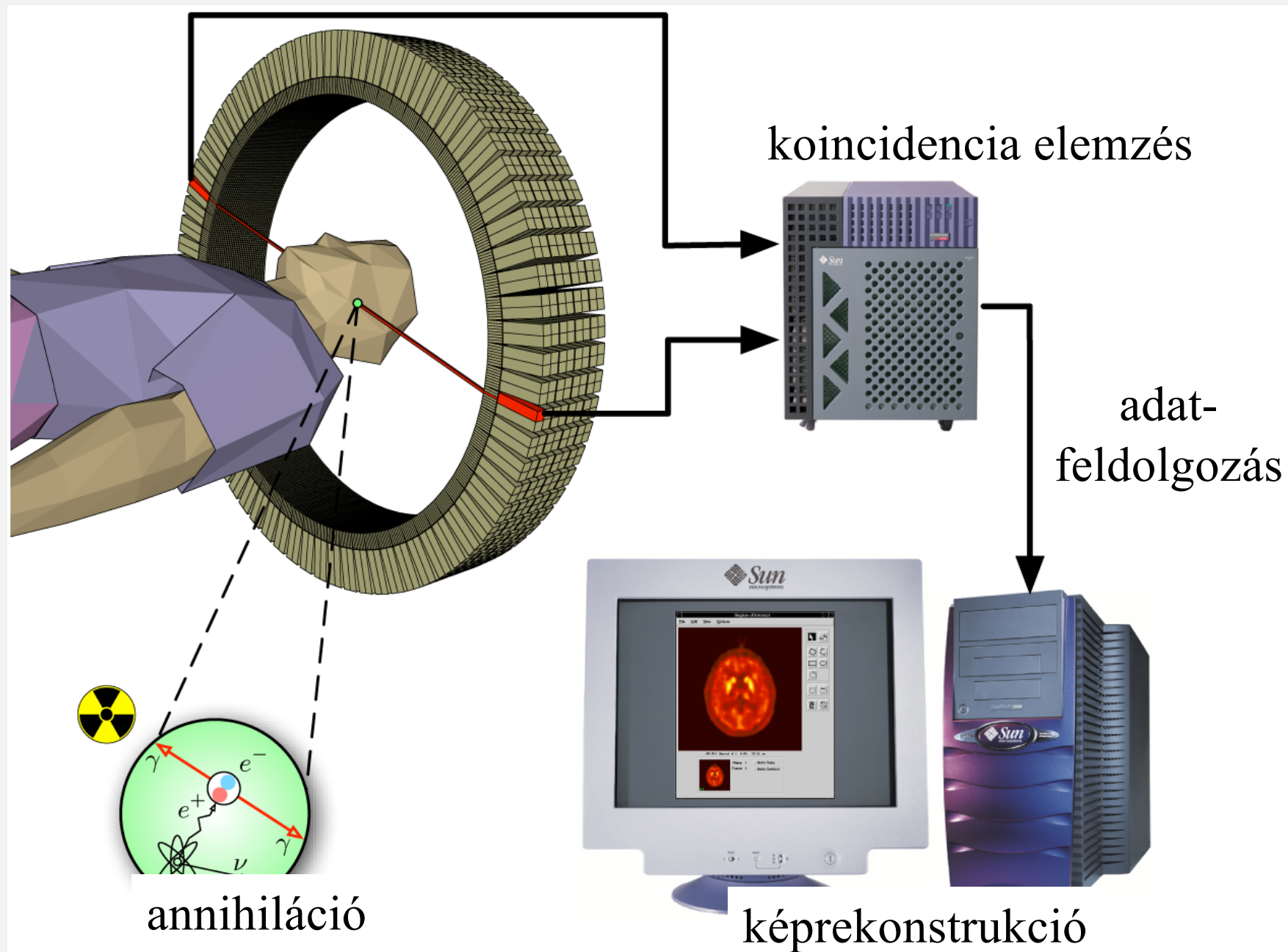
# SPECT – fej rétegfelvételek

 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ - HMPAO

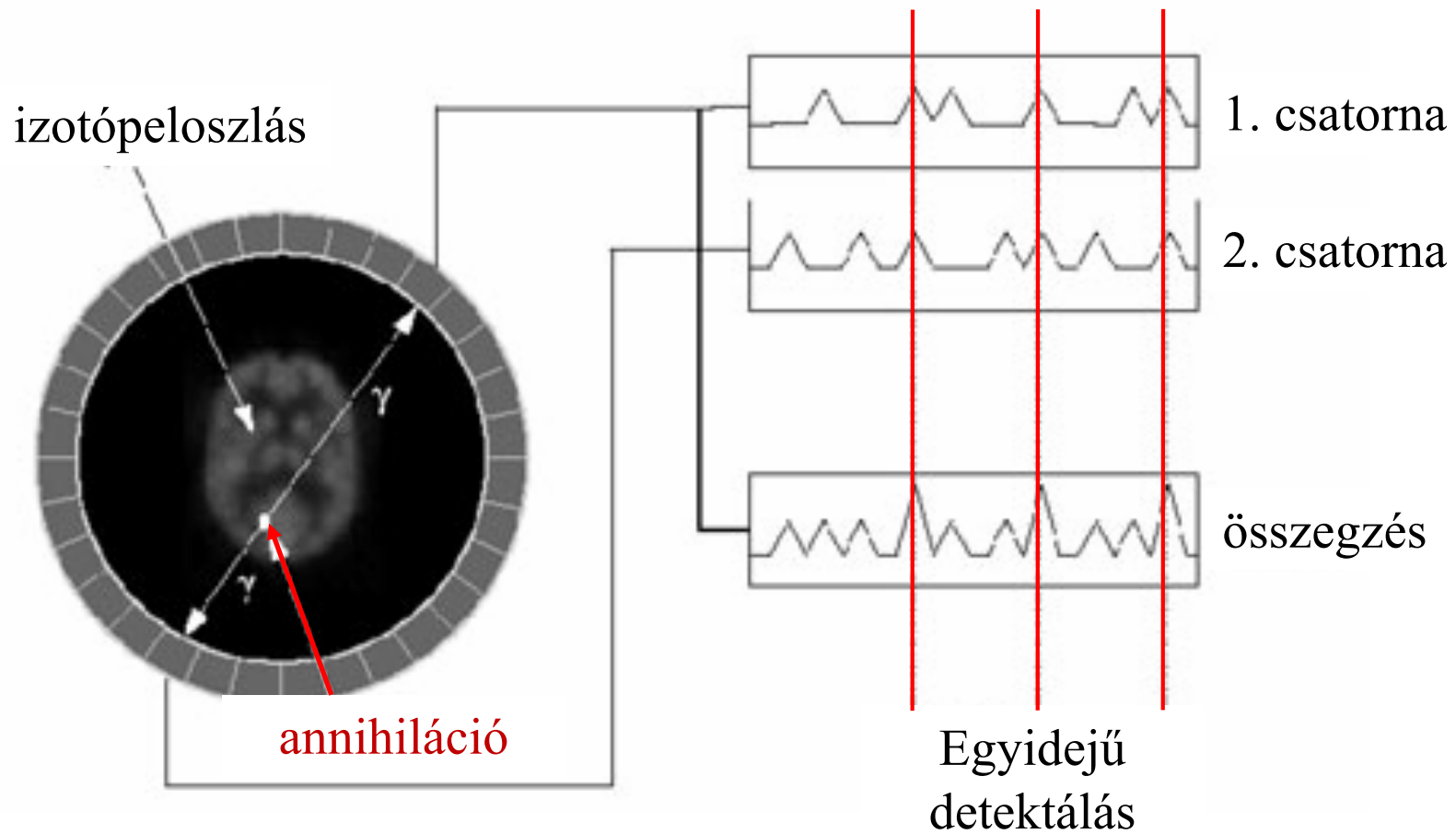


# Positron Emission Tomography

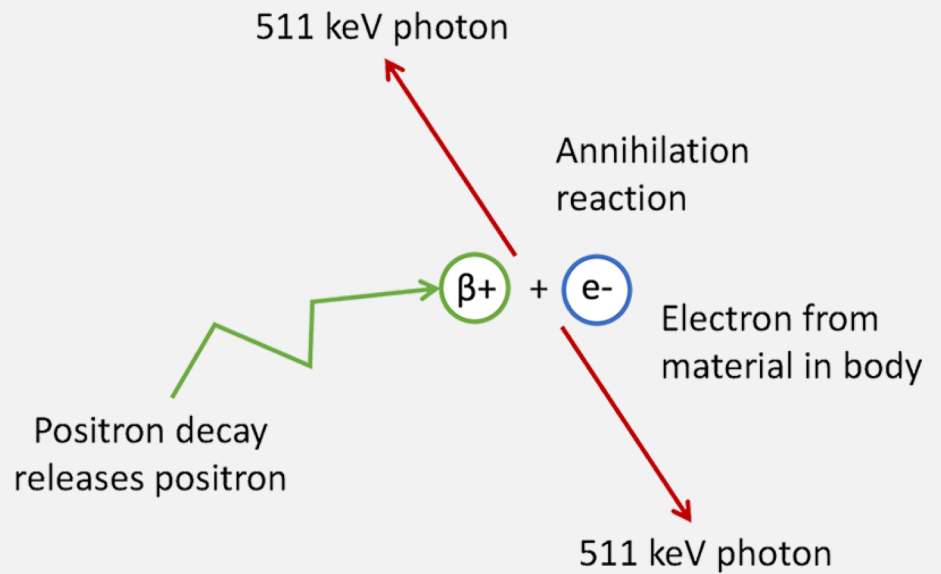
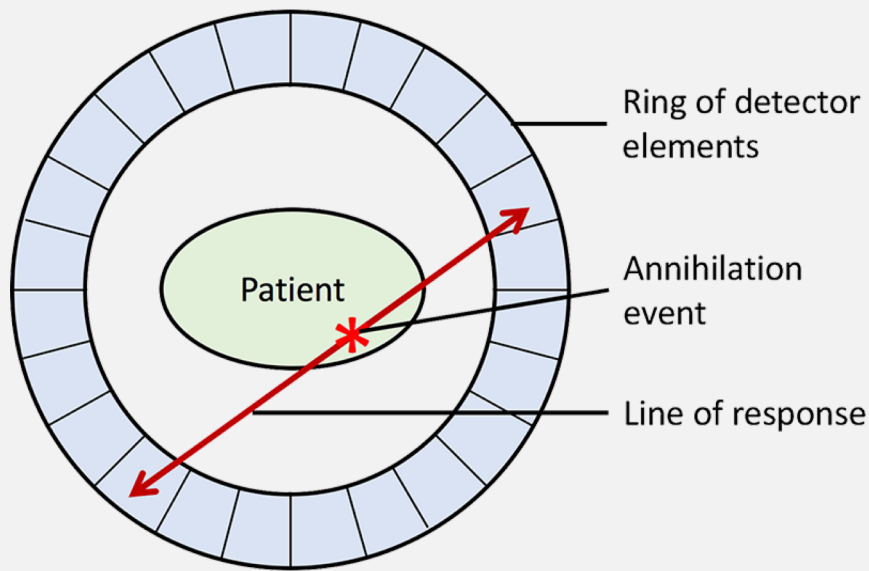
# PET



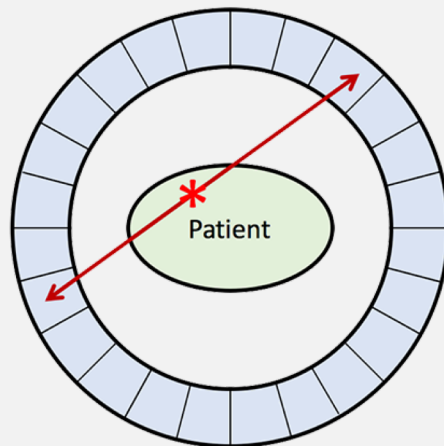
# Koincidencia -detektálás



# Koincidencia-detektálás

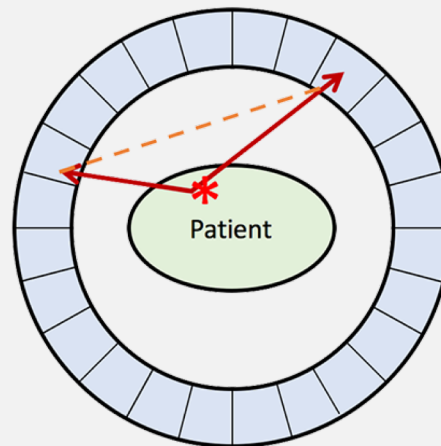


↔ Annihilation path  
 - - - - - Calculated line of response



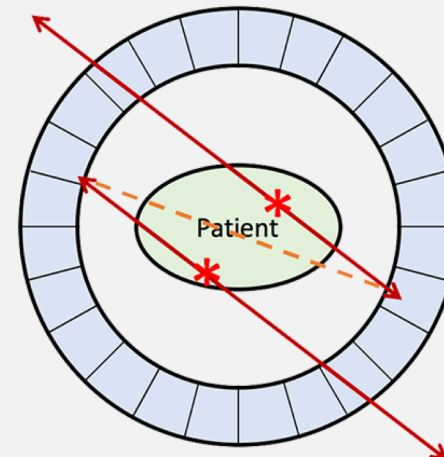
True coincidence

- One annihilation
- Straight path photons in opposite directions



Scatter coincidence

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



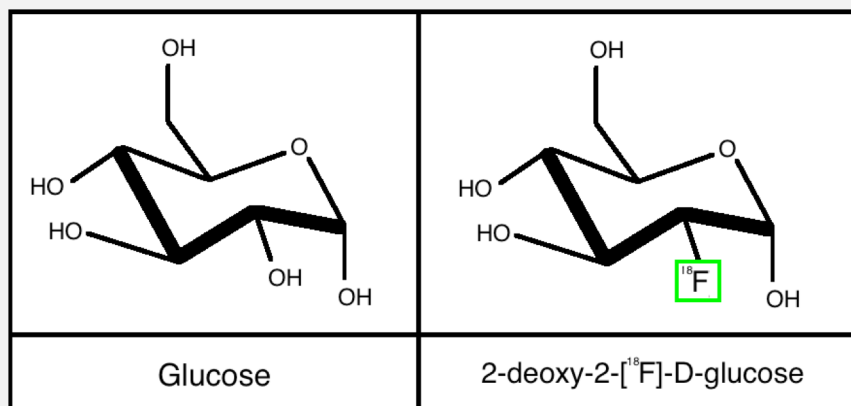
Random coincidence

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



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

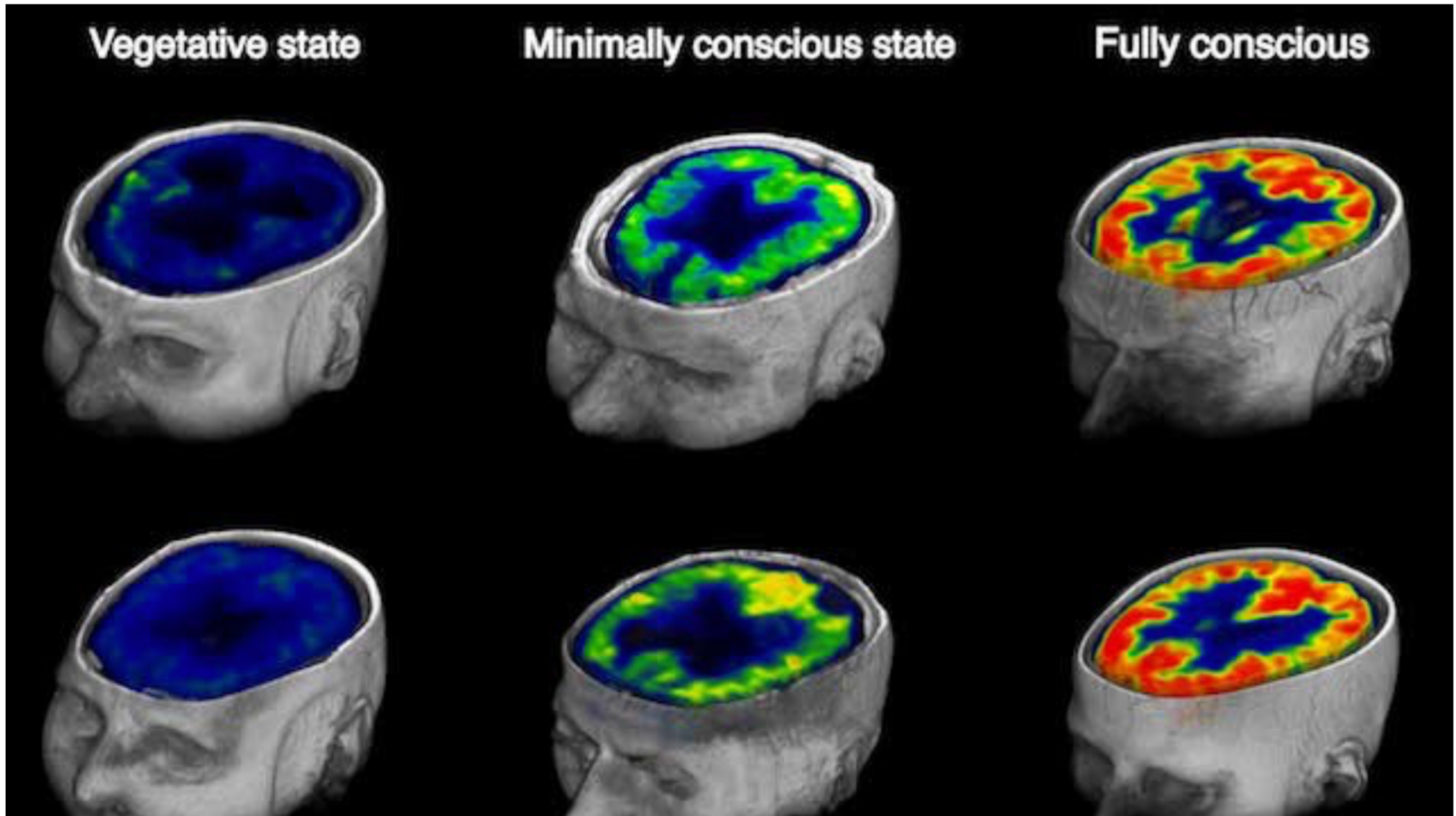
Isotope	$\beta^+$ energy (MeV)	$\beta^+$ range (mm)	1/2-life	Applications
$^{11}\text{C}$	0.96	1.1	20.3 min	receptor studies
$^{15}\text{O}$	1.70	1.5	2.03 min	stroke/activation
$^{18}\text{F}$	0.64	1.0	109.8 min	oncology/neurology
$^{124}\text{I}$	2.1350/1.5323	1.7/1.4	4.5 days	oncology



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

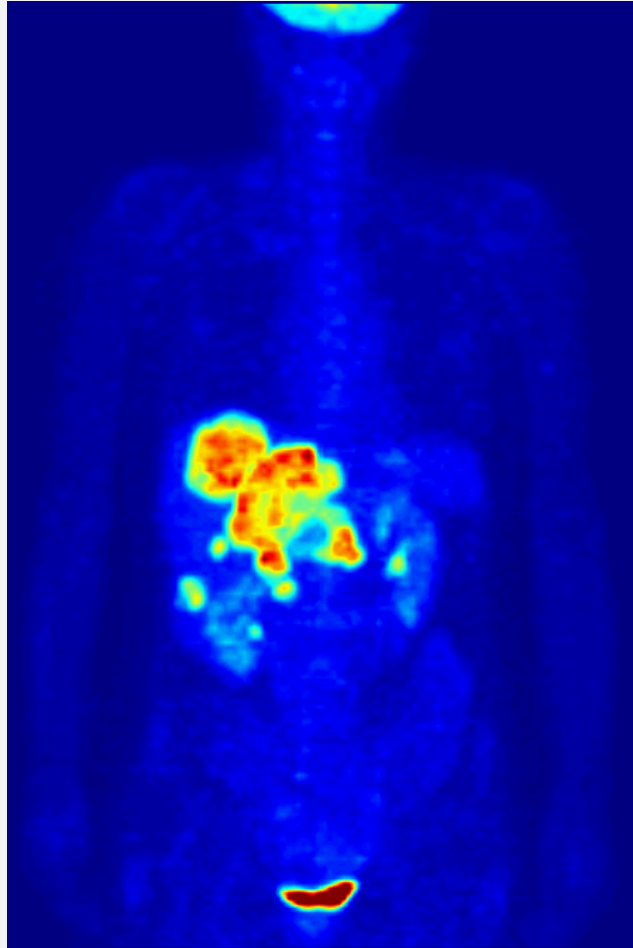


# $[^{18}\text{F}]$ -fluorodeoxiglükóz (FDG) – cukor-metabolizmus indikátor



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).

## [<sup>18</sup>F]-fluorodeoxiglükóz (FDG) – cukor-metabolizmus indikátor



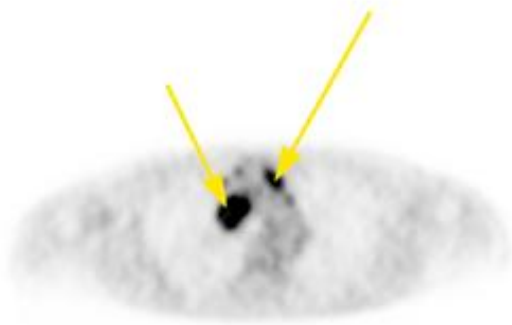
3D reconstruction of tissue metabolic activity from a [<sup>18</sup>F]-FDG PET scan. Notably, we see increased activity along the chest walls, indicating carcinoma, as well as the supraclavicular fossa.

Information like this cannot be obtained from a regular CT scan, and is thus invaluable to many specialties, particularly oncology and neurology.

# PET/CT

A PET kombinálható pontosabb morfológiai képet adó módszerrel.

A.



B.



C.





# Radioterápia

- sugárzás típusa
- optimális dózis
- sugárforrások
- sugárvédelem



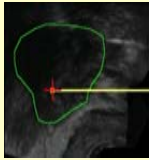
gamma-kés



lineáris gyorsító (elektronágyú)

# Radioterápia

$\alpha$



Internally deposited radioactivity

$\beta^-$

*Linear ion density:*

$e^-$

the amount of ion pairs in a line generated in a unit distance ( $n/l$ )

$\gamma$

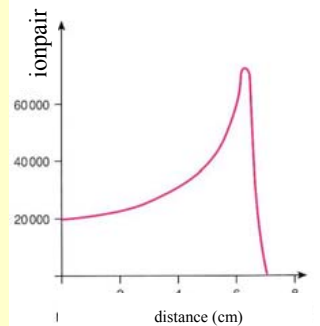
*LET (Linear Energy Transfer* : the energy transferred to the material surrounding the particle track, by means of secondary electrons. ( $nE_{ionpair}/l$ )

Rtg,

p

n

In the air:  $E_{ionpair} = 34 \text{ eV}$



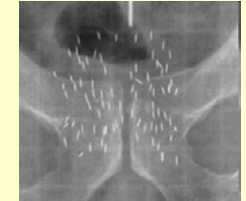
$\alpha$

Particle energy is not optimal

$\beta^-$ :

continuous energy spectrum

typical energy: few MeV



Internally seeded radioactivity

$e^-$ :

accelerated electron - 10-20 MeV

$\gamma$

production: linear accelerator

Rtg,

Efficient distance!  $\approx 1 \text{ cm}/3 \text{ MeV}$

p

In the practice 6-21 MeV  $\Rightarrow$  2-7 cm

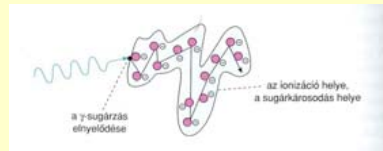
n

treatment of superficial tumours

$\gamma$  : external radiation source

Site of absorption  $\neq$  sites of ionization = site of radiation damages

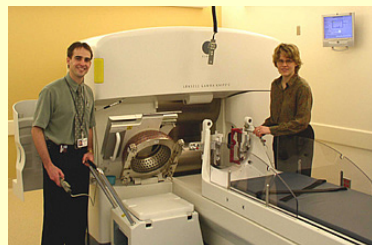
Penetration distance  
is energy dependent



$\gamma$ -knife: focused dose of radiation

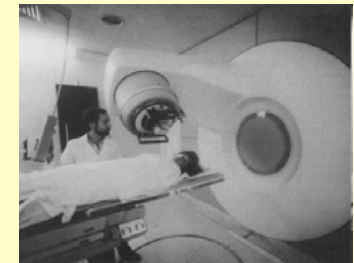
about 200 portals in a specifically  
designed helmet

e.g.,  $^{60}\text{Co}$   $E_\gamma \approx \text{MeV}$ ,  
about TBq activity



Treat tumours and lesions in the brain

**X-ray:**



The X-rays are generated by a linear accelerator .

Few MeV photon energy.

# Radioterápia



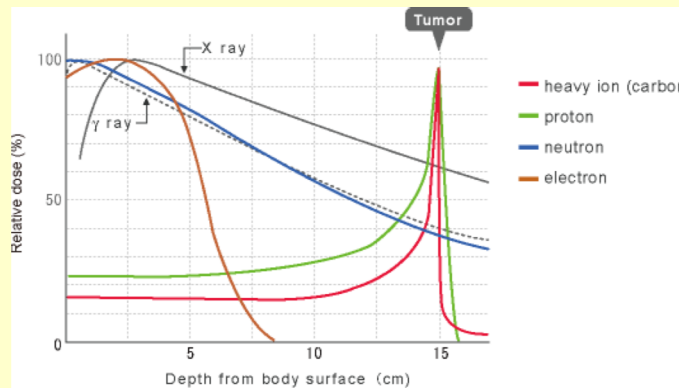
protonsugárzás: ideális,  
de nagyon drága!

$\gamma$ ,

Rtg,

p :

n



LET	Radiation	Energy(MeV):	LET(keV/μm):
high	$\alpha$ – particles	5.0	90
	fast neutrons	6.2	21
	protons	2.0	17
low	X-rays	0.2	2.5
	$^{60}\text{Co}$ $\gamma$ –radiation	1.25	0.3
	$\beta$ – particles	2.0	0.3
	accelerated electrons	10.0	

# Ellenőrző kérdések

## Izotópok kiválasztási szempontjai

- fizikai jellemzők
- biológiai és farmakológiai jellemzők

## Izotópdiagnosztika, sztatikus és dinamikus vizsgálatok

- sztatikus kép
- dinamikus kép

## Gamma-kamera, SPECT, PET

PET szkennerek – koincidencia detektálás

## Radioterápia, gamma-kés, LET (lineáris energia átadás)



Kapcsolódó fejezetek:

*Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika*

II. 3.2.3

3.2.4

3.2.5

VIII. 3.2

VIII. 4.4

IX.3