

# Magsugárzások



Dr Smeller László Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

- tulajdonságai
- mérése
- dozimetriája
- orvosi alkalmazása

# Alapfogalmak

- Magsugárzás:
  - Az atommag átalakulásakor keletkezik.
  - $\alpha$  ( $\text{He}^{2+}$ ),  $\beta$  ( $e^-$ ,  $e^+$ ),  $\gamma$  (em.),  $n$  ... sugárzás
- Izotóp (azonos protonszám eltérő neutronszám)
- Radioaktív izotóp (instabil, bomlik, sugároz)
- Aktivitás ( $\text{Bq} = \text{bomlás/s}$ )
- Exponenciális bomlástörvény

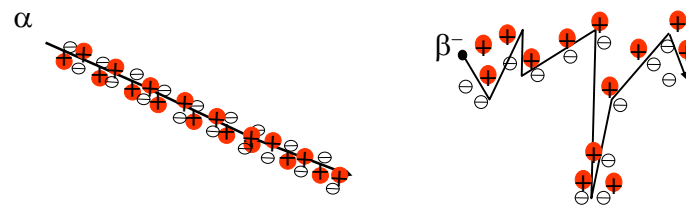
bővebben ld. középiskolás tananyag, ill. az orvosi fizika alapjai c. tárgy előadásanyagai:  
[www.sote.hu](http://www.sote.hu) ill. [biofiz.sote.hu/index.php?p=oktatas&mid=2&a=tantargy&id=5](http://biofiz.sote.hu/index.php?p=oktatas&mid=2&a=tantargy&id=5)

## A magsugárzások kölcsönhatása az anyaggal

magsugárzások  $\begin{cases} \text{elnyelődése} \\ \text{mérése} \end{cases}$   
 kölcsönhatás  $\Rightarrow$  energiaátadás

$\alpha$	} töltött részecske $\rightarrow$ direkt ionizáció
$\beta$	
$\gamma$	} töltéssel nem rendelkezik $\rightarrow$ indirekt ionizáció
$n$	

## Töltött részecskék ionizáló hatása



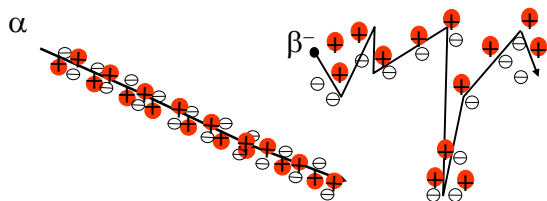
Az ionizációhoz szükséges energia a részecske (kinetikus) energiáját csökkenti.

Az energia egy bizonyos úton elfogy.

Hatótávolság.

## Az $\alpha$ és $\beta$ sugárzás hatótávolsága

	$\alpha$	$\beta$
levegőben	cm	m
szövetben	$\mu\text{m}$	cm
ionizáció- képesség	nagy	kisebb



## A $\gamma$ -sugárzás elnyelődése

$\gamma$ -sugárzás és anyag kh.:

Fotoeffektus

Compton effektus

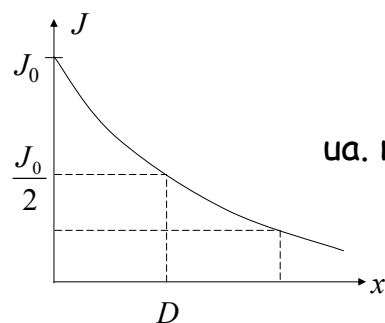
Párképződés

Id. gyakorlat  
nukl. alapm.  
 $\gamma$ -abszorpció

Töltött részecskének (általában  $e^-$ -nak) adódik  
át az energia  $\rightarrow$  ionizál

Bekövetkezésük véletlenszerű  $\rightarrow$  exponenciális  
sugárgyengülési törvény (u.a. mint a rtg. sug.)

## A $\gamma$ -sugárzás gyengülése



$$J = J_0 e^{-\mu x}$$

ua. mint a röntgensugárzás

## A magsugárzások detektálása

szcintillációs

ionizációs

termolumineszcens

fotográfiai (film)

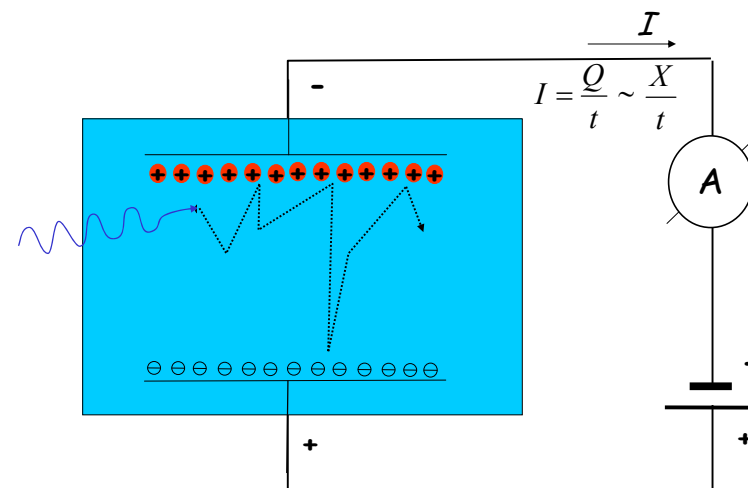
félvezető

## Szcintillációs detektor

ld. gyakorlat

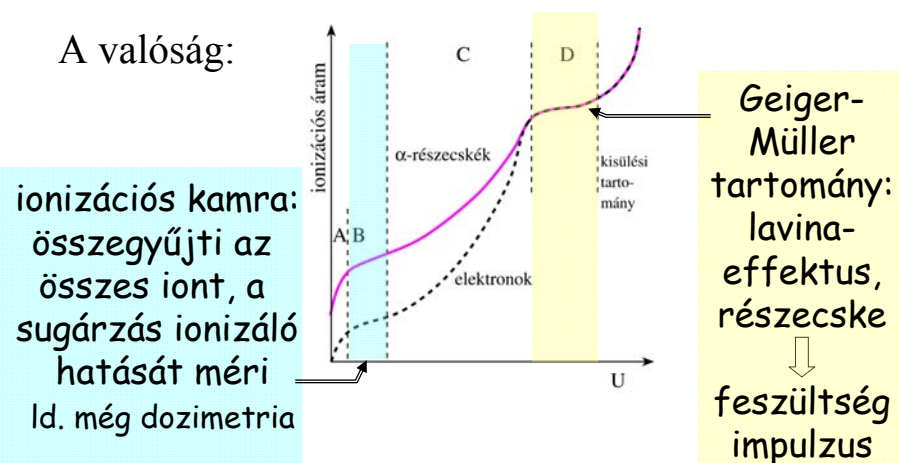


## Ionizáción alapuló detektálás

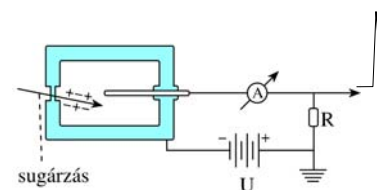


## Ionizáción alapuló detektálás

A valóság:



## G-M cső



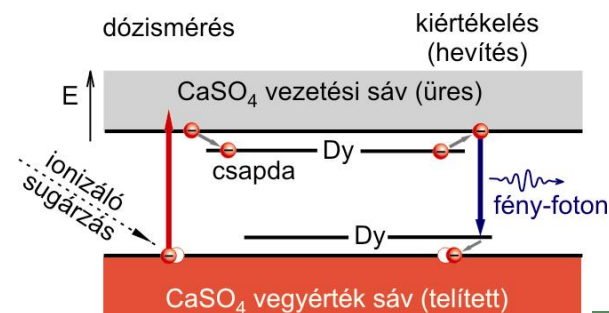
hátránya: kis érzékenység  $\gamma$  sugárzásra  
energiaszelektivitás hiánya

előnye: egyszerű felépítés

alkalmazása: főleg dozimetriában



## Termolumineszcencia

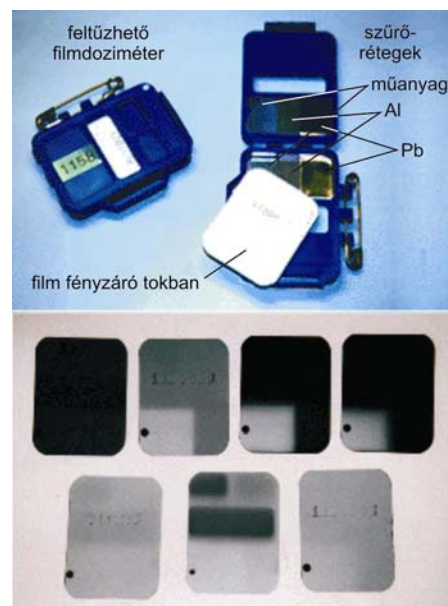


Id. gyakorlat



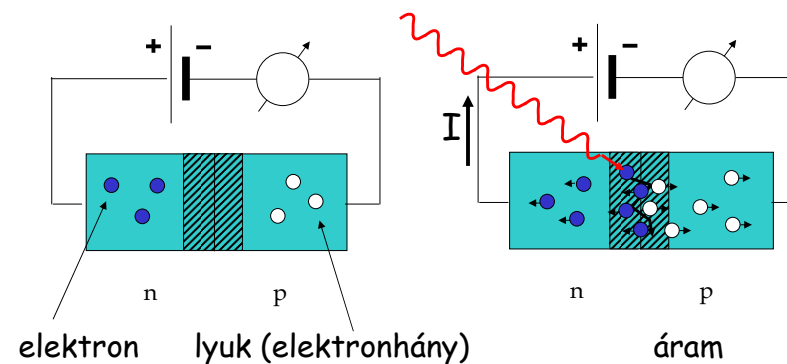
## Fotokémiai detektálás

Ld. gyakorlat



## Félvezető detektor

Elv: félvezető dióda záróirányban a sugárzás szabad töltéshordozókat kelt



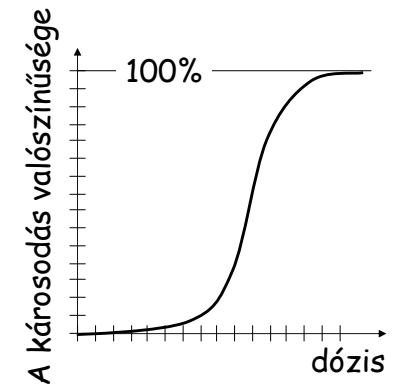
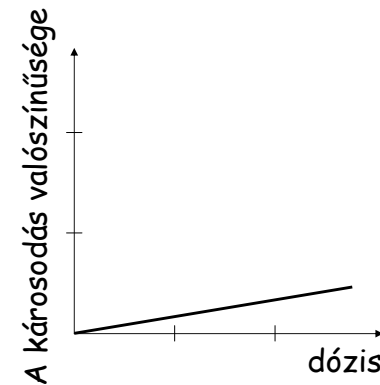
## Az ionizáló sugárzások biológiai hatása



## A sugárhatás osztályozása

Sztokasztikus

Determinisztikus



## A sugárhatás osztályozása

Sztokasztikus

Determinisztikus

Kis dózisok esetén  
Kevés számú találat  
Véletlenszerűen kialakuló  
Nincs küszöbdózis  
Súlyosság f. len a dózistól

Nagy dózisok esetén  
Sok találat  
Törvényszerűen kialakuló  
Van küszöbdózis  
Súlyosság nő a dózissal



Sugárveszélyes  
munkahelyen dolgozók,  
rtg. ill.  
izotópdiagnosztikai  
vizsgálatok páciensei



sugárbalesetek  
*Sugárterápia*

## Sugárvédelem és dozimetria

A sugárvédelem feladata:  
dózisteljesítmény mérés  
szennyezettség mérés  
személyi dózismérés

# Dózisfogalmak

Elnyelt dózis:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

A  $dm$  tömegű anyagban a sugárzásból elnyelt energia

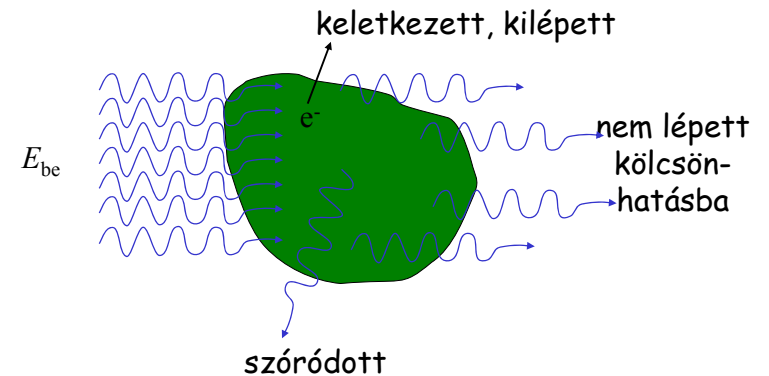
Mértékegysége  $J/kg = Gy$

➡ Egységnyi tömegnek átadott energia

Elnyelt dózis:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

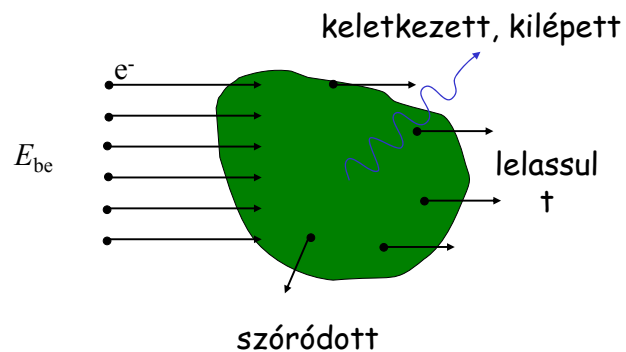
A  $dm$  tömegű anyagban a sugárzásból elnyelt energia



Elnyelt dózis:

$$D = \frac{dE}{dm}$$

A  $dm$  tömegű anyagban a sugárzásból elnyelt energia



Elnyelt dózis:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad [Gy]$$

Mérése:

- direkt módon nehéz (minimális hőmérséklet-emelkedés  $\Delta T = 0,003 \text{ } ^\circ\text{C} / 2 \text{ Gy}$ )
- indirekt módon
  - ionizációs kamra
  - félvezető detektor
  - termolumineszcens dózismérő
  - ...



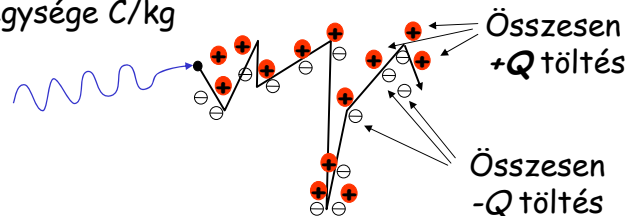
Besugárzási dózis:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

$dm$  tömegben keltett + ill. - töltés

Csak  $\gamma$  és röntgensugárzásra, levegőben!

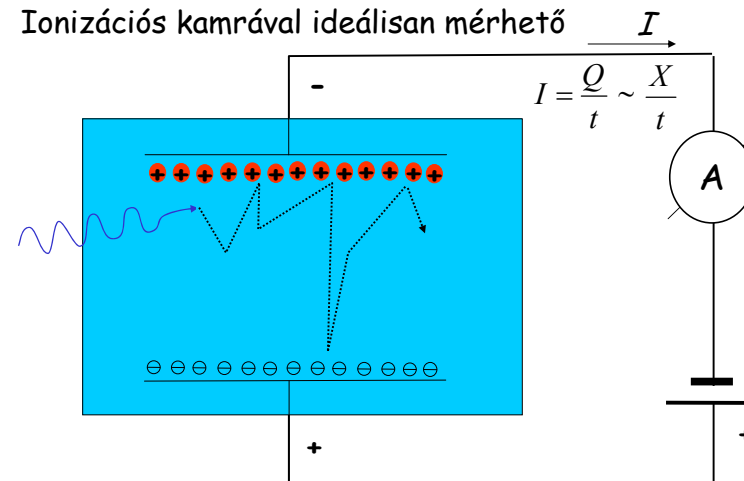
Mértékegysége C/kg



Besugárzási dózis:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Ionizációs kamrával ideálisan mérhető



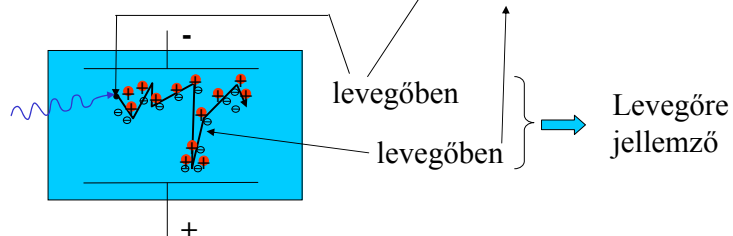
Besugárzási dózis:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Mire jellemző?

Hogyan számolhatjuk át elnyelt dózissra?

→ Lényeges, hogy hol történt az elnyelés (foton esetén), hol keletkeznek a töltések



Besugárzási dózis:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Levegőben mért besugárzási dózis átszámolása:

Levegőben 1 ionpár keltéséhez 34 eV energia szükséges\*

$$\begin{array}{ll} 34 \text{ eV} = 34 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} & \longrightarrow 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ 34 \text{ J} & \longrightarrow 1 \text{ C} \end{array}$$

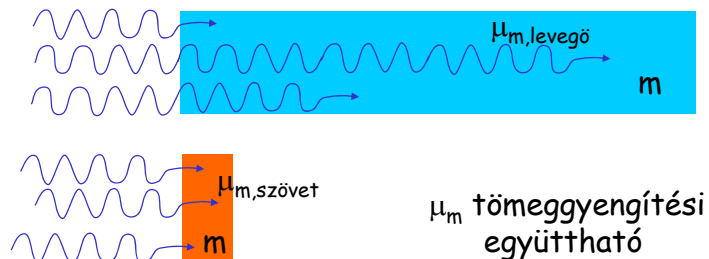
$$1 \frac{\text{C}}{\text{kg}} \Rightarrow 34 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 34 \text{ Gy}_{\text{lev}}$$

\* Elektronok esetén. Protonok,  $\alpha$  részecskék esetén  $\approx 35$  eV

## Levegőben mért dózis átszámolása:

A szövetekben mért dózis érdekelt bennünket !!

Ugyanaz a sugárzási tér szövetekben nagyobb dózist eredményez, mert a szövetek elnyelőképessége nagyobb.



## Levegőben mért dózis átszámolása:

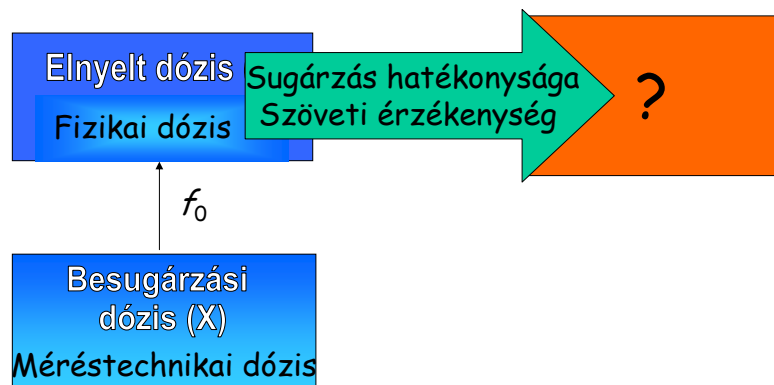
$$\frac{D_{szövet}}{D_{levegő}} = \frac{\mu_{m,szövet}}{\mu_{m,levegő}}$$

$$D_{szövet} = \frac{\mu_{m,szövet}}{\mu_{m,levegő}} f_0 X \quad f_0 = 34 \frac{J}{C}$$

## Eddigi dóziszfogalmak:

A sugárzást jellemző fizikai mennyiségek

Biológiai hatás



## Sugárterápia (Determinisztikus hatás)

Általában

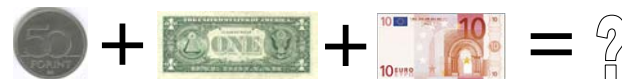
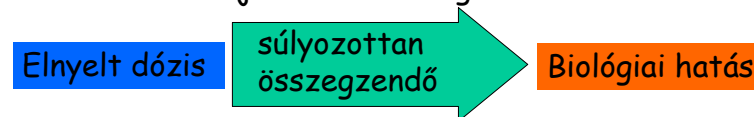
- egyfajta sugárzással
- egyfajta szövetet sugározunk be



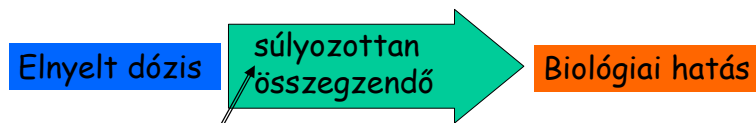
## Sugárvédelem (Sztocasztikus hatás)

Általában

- többfajta sugárzással
- többfajta szövetet sugározunk be







Súlyzófaktor: Sugárzás hatékonysága  
Szöveti érzékenység

Egyenérték dózis:  $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$  [Sv]

Súlyozottan összeadja a különböző sugárzásokból (R) az adott szövetben (T) elnyelt dózisokat.

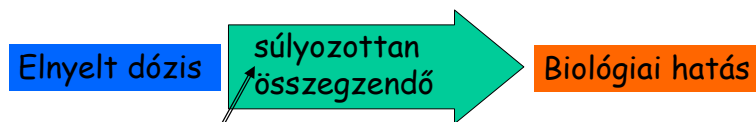
Például:

$$H_{\text{bőr}} = w_{\text{alfa}} D_{\text{bőr,alfa}} + w_{\text{beta}} D_{\text{bőr,beta}} + w_{\text{gamma}} D_{\text{bőr,gamma}}$$

## $w_R$ súlytényező

Az adott sugárzás hatékonysága (sztochasztikus hatás kiváltásában) hányszor nagyobb, a röntgen- ill.  $\gamma$ -sugárzáshoz képest.

Részecske	Energia	$w_R$
Foton		1
Elektron		1
Neutron	<10 keV	5
	10 keV-100 keV	10
	100 keV- 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonok	> 2 MeV	5
Alfa részecskék		20



Súlyzófaktor: Sugárzás hatékonysága  
Szöveti érzékenység

Effektív dózis:  $E = \sum_T w_T H_T$  [Sv]

Súlyozottan adja össze a különböző szöveteket (T) ért egyenérték dózisokat.

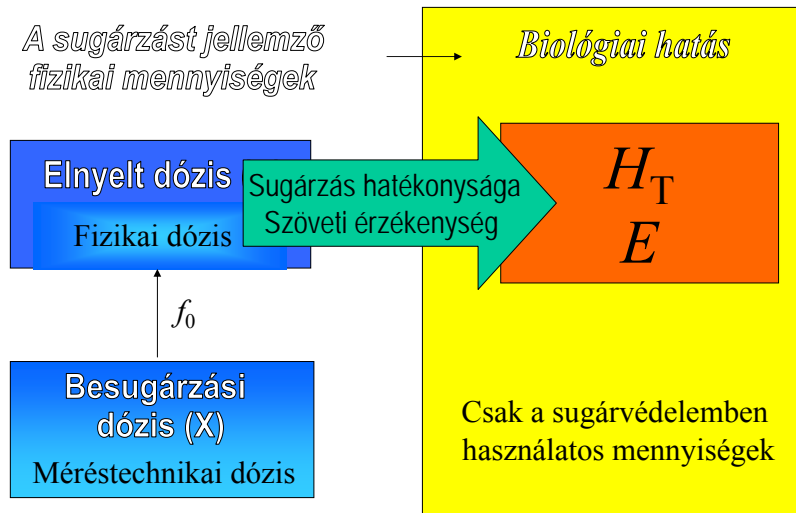
$w_T H_T$  jelenti a  $H_T$  dózisnak az egész test sugárkárosodásához való hozzájárulását.  $\sum_T w_T = 1$

## $w_T$ súlytényező

Megmutatja, hogy az illető szövet-szerv milyen hányadban vesz részt a teljes károsodásban akkor, ha homogén sugárzás érte a az egész testet.

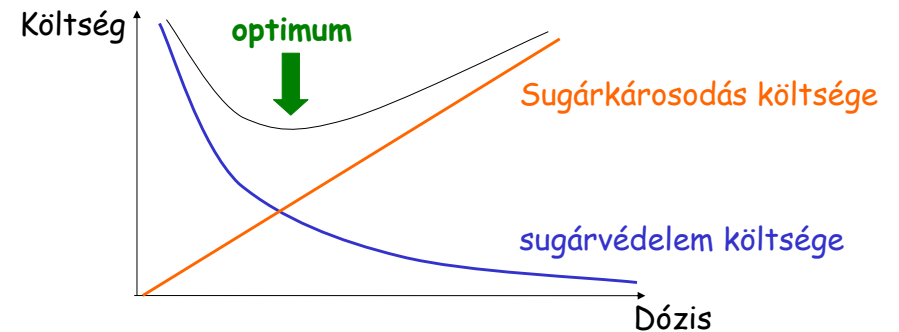
Szövet/szerv	$w_T$	Szövet/szerv	$w_T$
gonádok	0,2	máj	0,05
vörös csontvelő	0,12	nyelöcső	0,05
vastagbél	0,12	pajzsmirigy	0,05
tüdő	0,12	bőr	0,01
gyomor	0,12	csontfelszín	0,01
húgyhólyag	0,05	egyéb	0,05

## Dózisfogalmak összefoglalása



## ALARA elv

- As Low As **Reasonably** Achievable
- Olyan kevés, ami **ésszerűen** elérhető



## Dóziskorlátok

Foglalkozási dóziskorlát munkavállalókra

- egész testre 100 mSv/5 év
- 50 mSv/év (kb. 10 μSv/h)

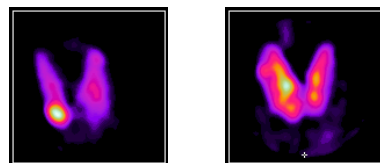
- szemlencsére 150 mSv/év
- bőrre 500 mSv/év
- végtagokra 500 mSv/év

## Dóziskorlátok-veszélyek

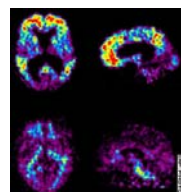
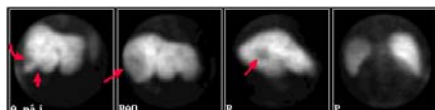
Elfogadható kockázattal járó sugárterhelés  
Ez alatt sem biztonságos a sugárzással végzett munka!  
(a sztochasztikus károsodás arányos a dózissal!)

Minden veszélyes!





## Az izotópdiagnosztika fizikai alapjai



### • Bevezetés

### • Az izotóp kiválasztásának szempontjai

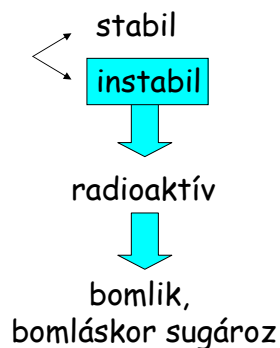
### • Izotópdiagnosztikai vizsgálati technikák

## Bevezetés

Izotóp: azonos **Z** különböző **N** különböző **A**  
rendszer **neutronszer** **tömegszer**

Egy elem különböző izotópjai

A kémiai tulajdonságokat az elektronburok határozza meg.  
**Z** = elektronok száma  
⇒ a stabil és instabil izotópok kémiai és biológiai viselkedése (anyagcsere!) megegyezik.  
De a **radioaktív** izotóp sugároz és **detektálható!**



Izotóp ⇒ radioaktív izotóp

Izotópdiagnosztika: olyan módszer, amely során a radioaktív **izotópok** által kibocsátott **sugárzás mennyiségének**, térbeli és időbeli **eloszlásának** detektálásával nyerünk **diagnosztikai információt**.

Milyen információt kaphatunk?

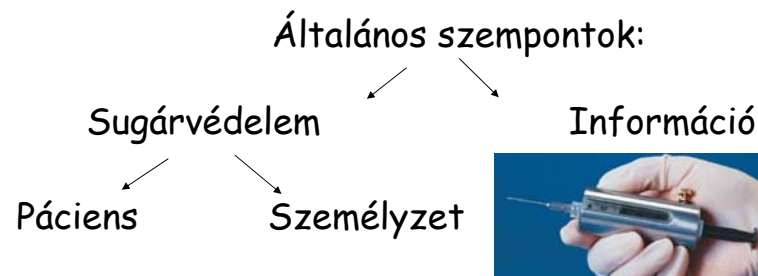
A vizsgált szerv mérete, működőképessége, a funkció sebessége (pl. pajzsmirigy jódfelhasználása)



Hevesy György  
1885-1966  
1943 Nobel díj



Többletinformáció: Funkció! Morfológiai információ mellett a működés sebességét is megmérhetjük: hipofunkció - hiperfunkció  
megj: ne keverjük össze a kontrasztanyaggal!!!



Alapvető sugárvédelmi szabály: Az izotóp akkor a legveszélyesebb, ha inkorporálódik.  
Most mégis ezt tesszük! Miért?

Cost-benefit elv:  
Megéri-e a sugárkárosodás kockázata az így kapható információt? (Minden tevékenység veszélyes!)

## Az izotóp kiválasztásának szempontjai

1. Melyik **elem** izotópját használjuk?
2. Mekkora **aktivitást** használunk?
3. Milyen hosszú legyen az izotóp **felezési ideje**?
4. Milyen **sugárzást** emittáljon az izotóp?
5. Mekkora legyen a sugárzás **energiája**?

## 1. Melyik elem izotópját használjuk?

Amelyik felhalmozódik a vizsgált szervben (kritikus szerv)

Tipikus pl.  $^{131}\text{I}$  pajzsmirigy  
 $^{59}\text{Fe}$  vörösvértest

De! Nincs minden szervben  
=> hordozómolekulát

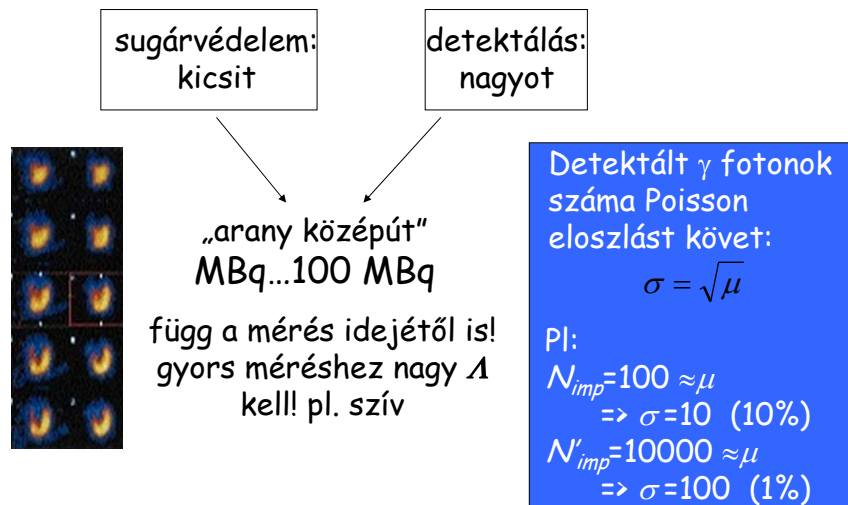
előny: (majdnem) szabadon választható az izotóp, az izotóp tulajdonságai **optimalizálhatóak** a sugárvédelem és a mérés szempontjából

Megj:nagyon **kis mennyiség!** pmol (ld. jegyzet 34-36 feladatok)  
ilyen kis mennyiségben nem mérgező!

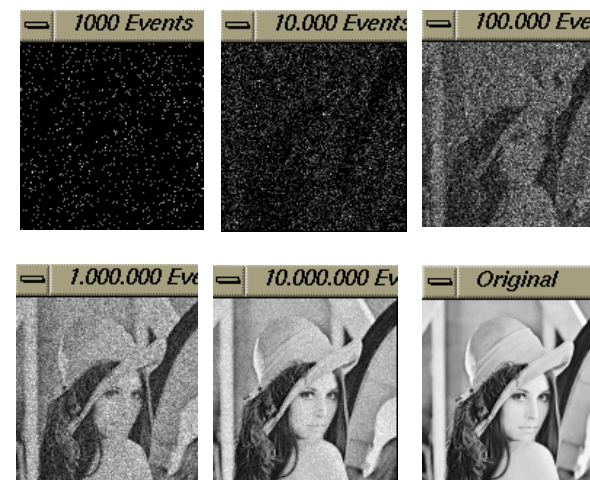
Az elemek periódusos rendszere

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

## 2. Mekkora aktivitást használjunk?



Képmínőség  $\leftrightarrow$  Dózis



## 3. Felezési idő

$$\lambda = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| \quad \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

$$\lambda = \lambda N = \frac{\ln 2}{T} N$$

A bevitt radioaktív atomok száma:  $N = \frac{\lambda T}{\ln 2}$

Mivel (majdnem) az összes radioaktív atom a testben bomlik el:  $N \sim$  sugárterhelés

Ugyanakkora  $\lambda$  mellett a sugárterhelés kisebb felezési idejű izotóp választásával csökkenthető!  
 $\Rightarrow T$  legyen minél rövidebb

De!

- $T$  nem lehet rövidebb, mint a vizsgálandó folyamat karakterisztikus ideje.

Pl. vvt élettartam  $\approx$  hónap

~~$^{99m}\text{Tc}$   $T = 6\text{h}$  (túl rövid!)~~  
 $^{51}\text{Cr}$   $T = 28$  nap OK  
 ~~$^{60}\text{Co}$   $T = 5$  év (túl hosszú!)~~

- Szállítás problémája:

10  $T$  alatt  $\lambda \rightarrow \lambda/1000$

Pl.: ha  $T = 2$  perc 20 perc múlva 1MBq  $\rightarrow$  1kBq

$\Rightarrow$  a nagyon rövid felezési idejű izotópokat helyben kell előállítani! (ciklotron, Tc-generátor)

pl.  $^{18}\text{F}$  110 perc  $^{15}\text{O}$  2 perc (PET)

#### 4. Milyen sugárzást emittáljon az izotóp?

lehetőségek:

$\alpha$   
 $\beta^+, \beta^-$  } bomlás  $\Rightarrow \alpha, \beta^+, \beta^-, \gamma$  sugárzás

Elnyelődésük eltérő

$\alpha, \beta^+, \beta^-$  hatótávolság  
 $\gamma$  exponenciális gyengülés

$\alpha, -$   
 $\beta^+, \beta$  } hatótáv }  $\begin{cases} < \text{mm} \\ \text{mm-cm} \end{cases}$  } nem lép ki a testből

információt nem ad,  
csak károsít

$\gamma$ : csak részben nyelődik el, detektálható

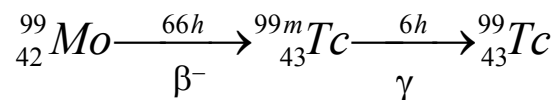
**Az optimális izotóp csak  $\gamma$  sugárzást emittál!**

kivétel PET, ahol  $\beta^+$  izotópot használunk. (ld. később)

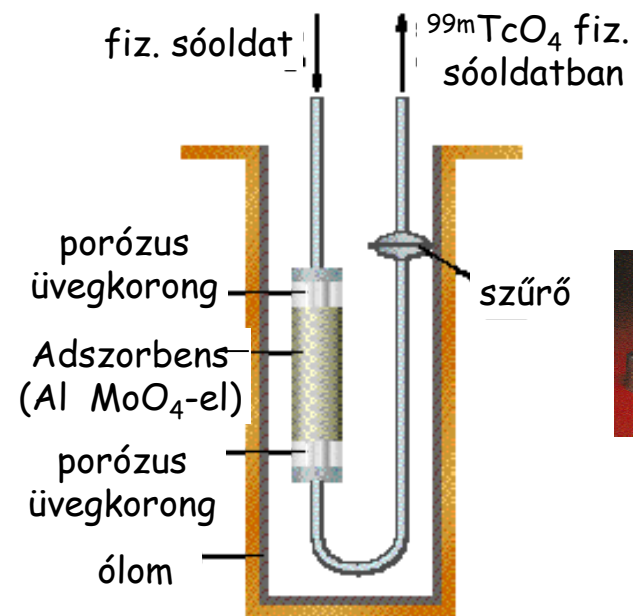
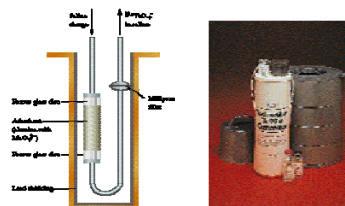
A tisztán  $\gamma$ -sugárzó izotóp:

- ritka
- izomer magátalakulás pl.  $^{99m}\text{Tc}$

#### Tc generátor



Időben szétválik a  $\beta^-$  és a  $\gamma$  kibocsátás.  
Elkülöníthető a  $^{99m}\text{Tc}$  ami tisztán  $\gamma$ -sugárzó.





## 5. Mekkora energiájú legyen a $\gamma$ -foton?

nagy energia:

kevésbé nyelődik el a szövetekben (sugárkárosodás)  
de nehéz detektálni

kis energia:

nagyrészt elnyelődik a szövetekben  $\Rightarrow$  károsít

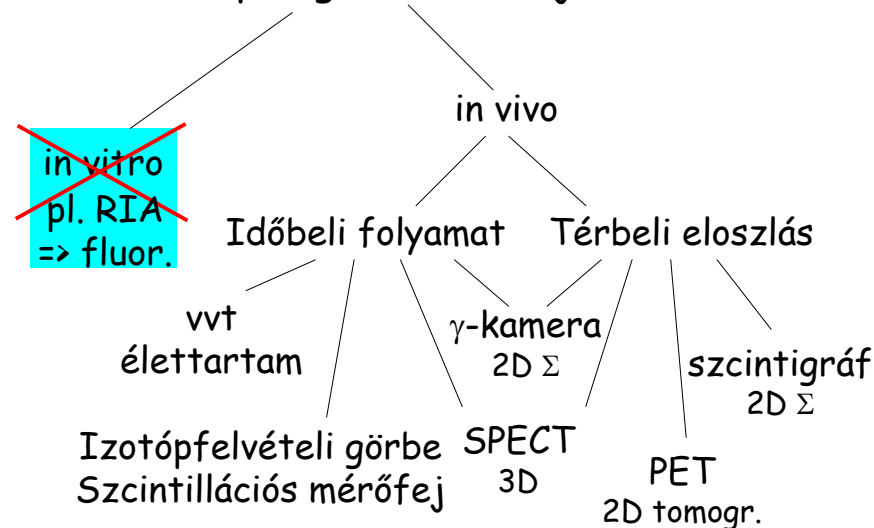
arany középút: néhány 100 keV optimális

$^{99m}\text{Tc}$  : 140 keV OK

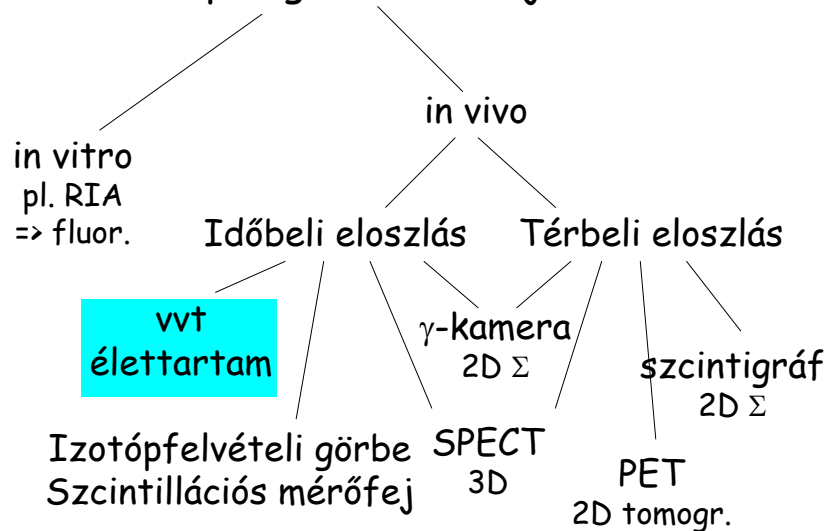
Optimális izotóp:  $^{99m}\text{Tc}$

nagyon sok vizsgálathoz használják  
megfelelő hordozó molekulához kötve

## Izotópdiagnosztikai eljárások

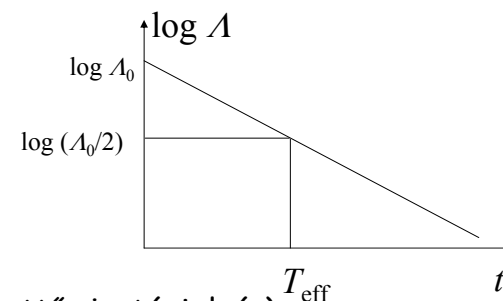


## Izotópdiagnosztikai eljárások



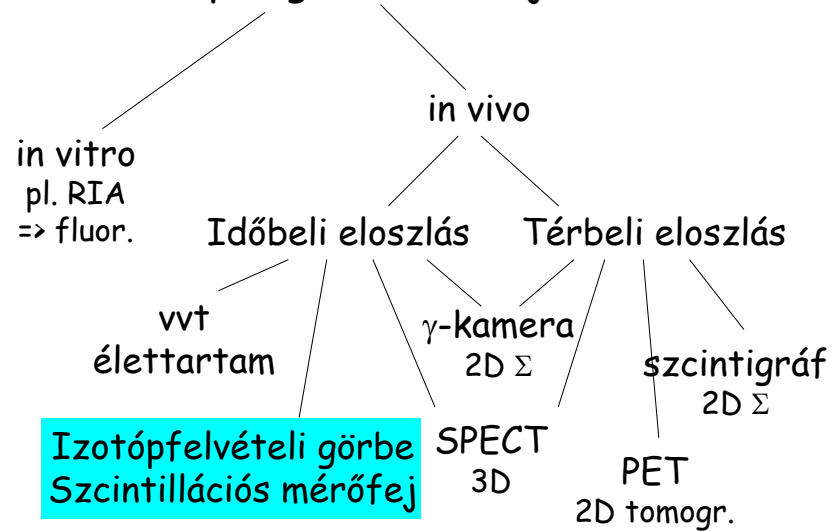
In vivo > dinamikus vizsgálat > vörösvértest élettartam

vér +  $^{51}\text{Cr}$ -al jelzett szérumalbumin  $\Rightarrow$   
visszaadják  
vérvétel  
időközönként,  
aktivitásmérés



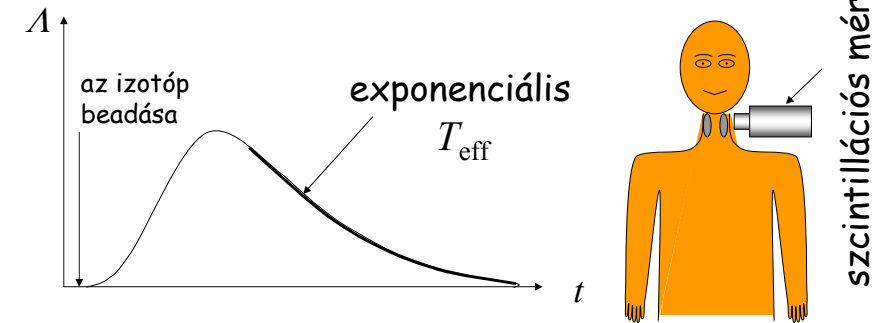
(ld. gyak. jegyzet: kettős izotópjelzés)  
A mérés in vitro, de az izotópot in vivo használjuk

## Izotópdiagnosztikai eljárások



In vivo > dinamikus vizsgálat > izotópfelvételi görbe

pl: pajzsmirigy  $^{131}\text{I}$  (jódfelvételi görbe)  
 $^{131}\text{I}$   $\beta$ -t is sugároz ezért manapság inkább  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  pertechnetát  $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$



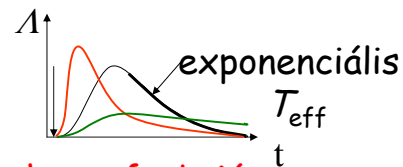
Biológiai kiürülés  
+ fizikai bomlás

A bomlási  
valószínűségek adódnak

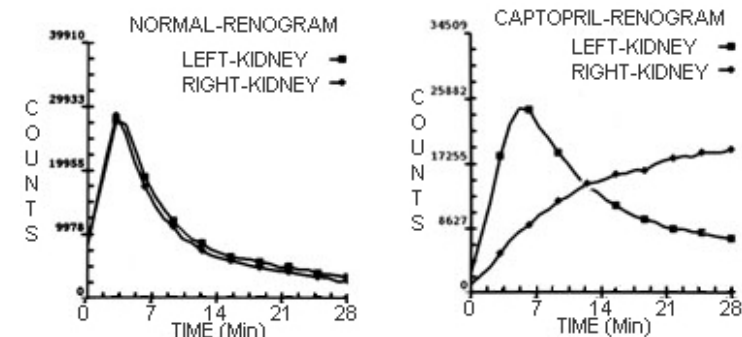
össze:  $\lambda_{\text{fiz}} + \lambda_{\text{biol}} = \lambda_{\text{eff}}$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \rightarrow \frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{\text{fiz}}} + \frac{1}{T_{\text{biol}}}$$

↑ mérjük   
 ↑ tudjuk   
 ↑ számoljuk  
 (táblázat)

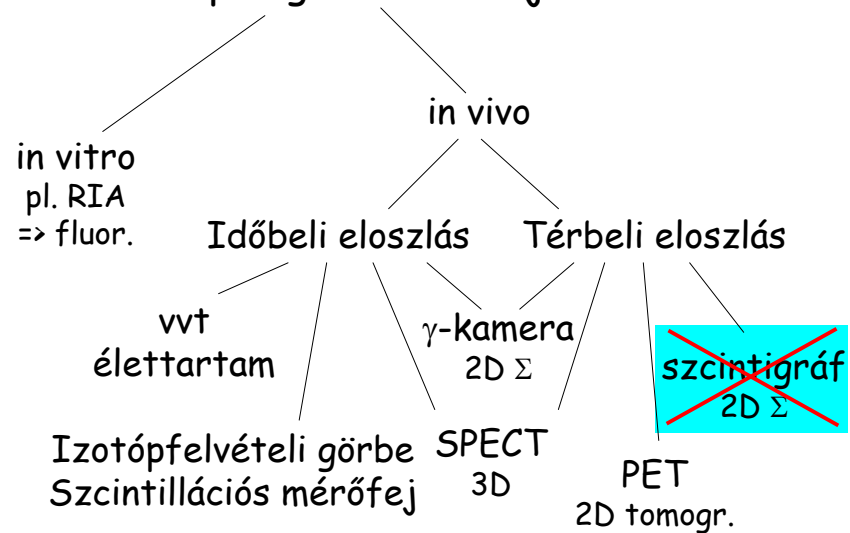


## Vesefunkció vizsgálat (renogram)



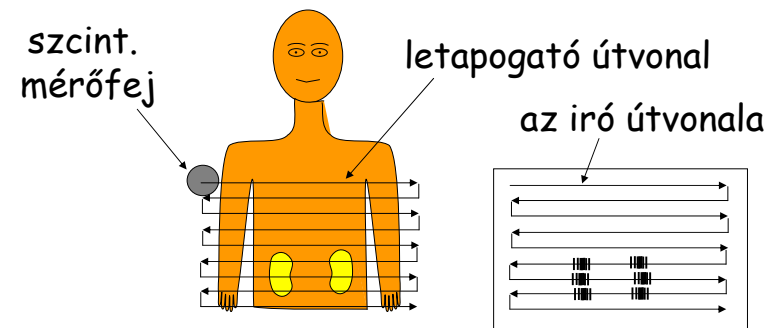
Ue. vesefunkció vizsgálatára (renográfia)

## Izotópdiagnosztikai eljárások

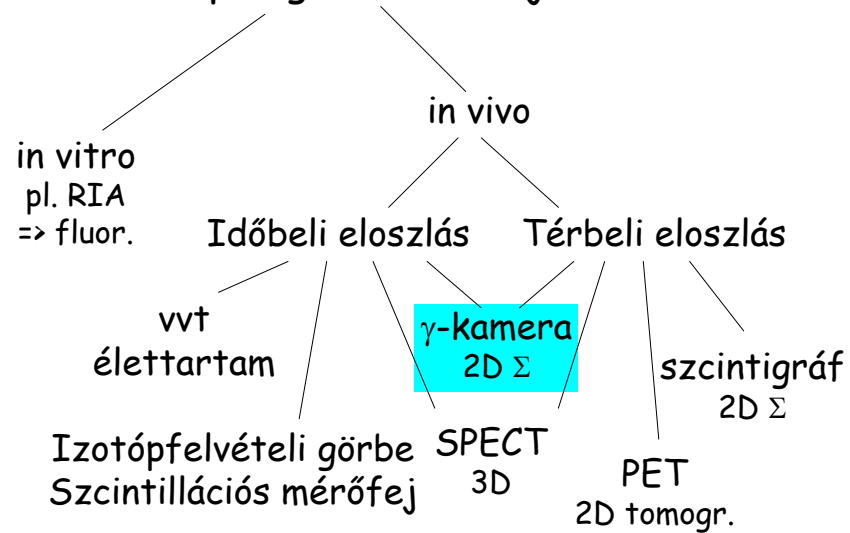


In vivo > Statikus vizsgálat, térbeli eloszlás > szcintigráf

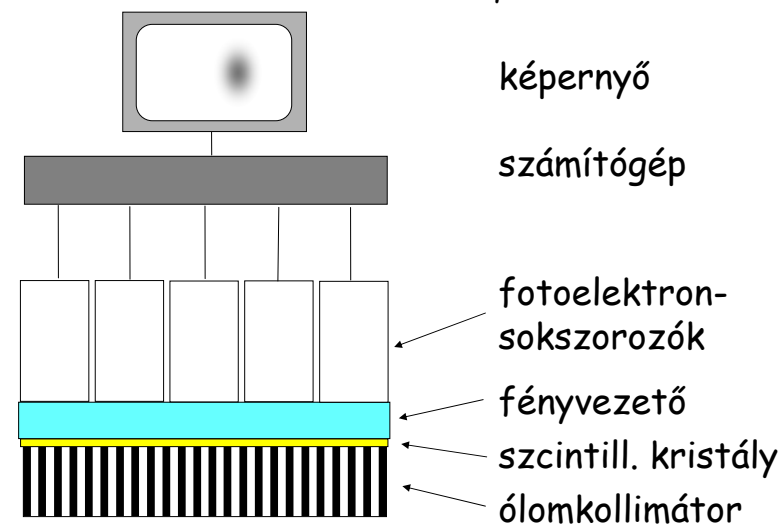
Egyszerű elv, lassú, elavult



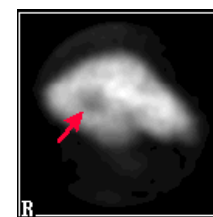
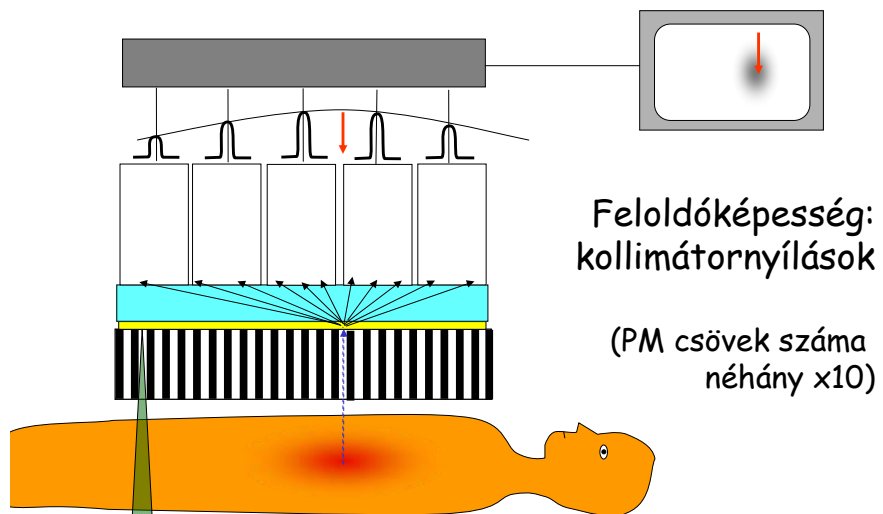
## Izotópdiagnosztikai eljárások



In vivo > Térbeli eloszlás >  $\gamma$ -kamera

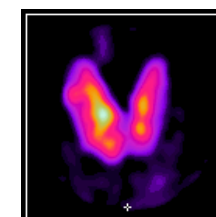


In vivo > Térbeli eloszlás >  $\gamma$ -kamera



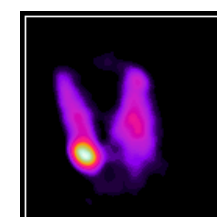
Máj metasztázis

$^{99m}\text{Tc}$  fitát



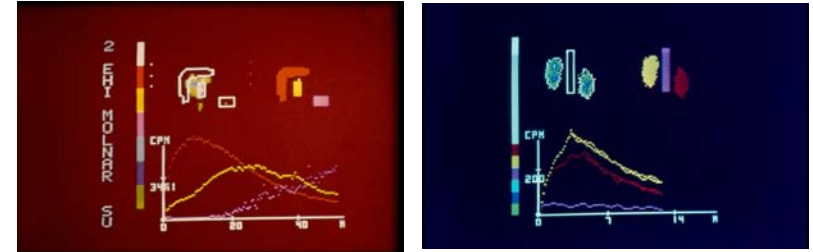
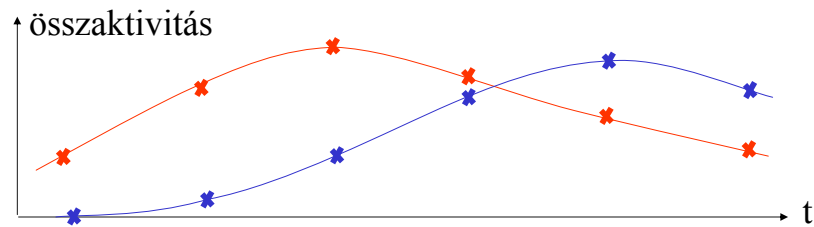
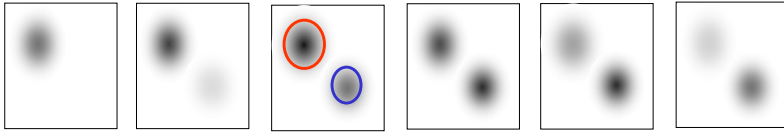
pajzsmirigy  
hideggöb meleggöb

$^{99m}\text{Tc}$  pertechnetát

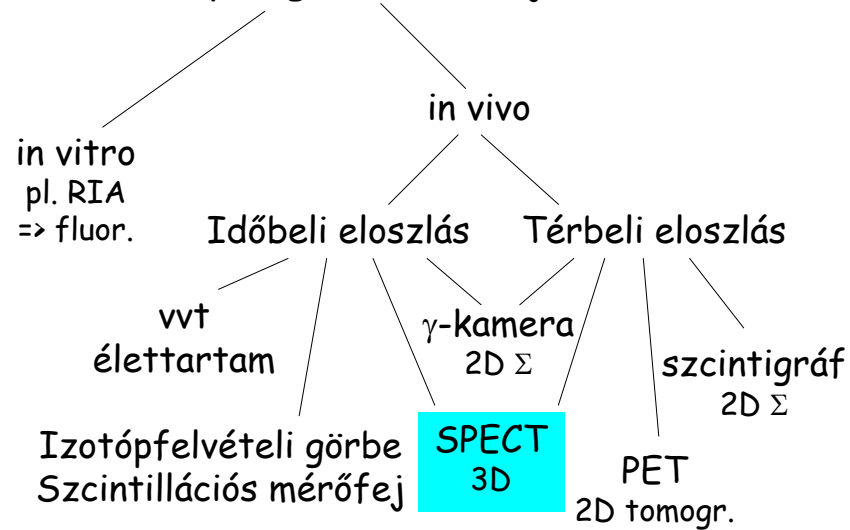


Időbeli és térbeli felvétel kombinálása:

Egymás utáni felvételek  $\gamma$ -kamerával

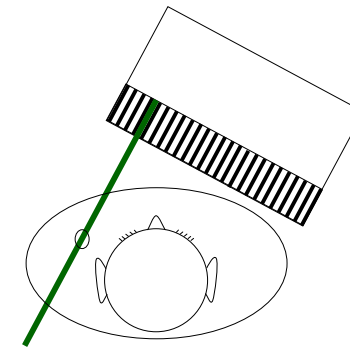


## Izotópdiagnosztikai eljárások



## SPECT

(Single Photon Emission Computed Tomography)



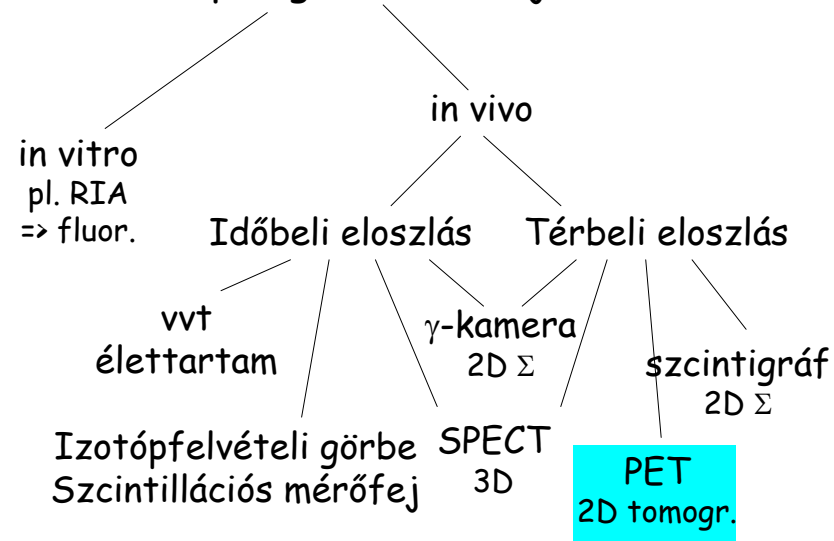
$\gamma$ -kamera  
forog

3 dimenzós kép  
izotópeloszlás

## SPECT



## Izotópdiagnosztikai eljárások



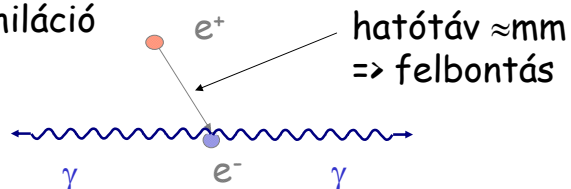
## PET (Positron Emission Tomography)

Pozitron bomló izotóp!

Természetben nem fordul elő

Mesterséges előállítás (pl. ciklotron) helyben!

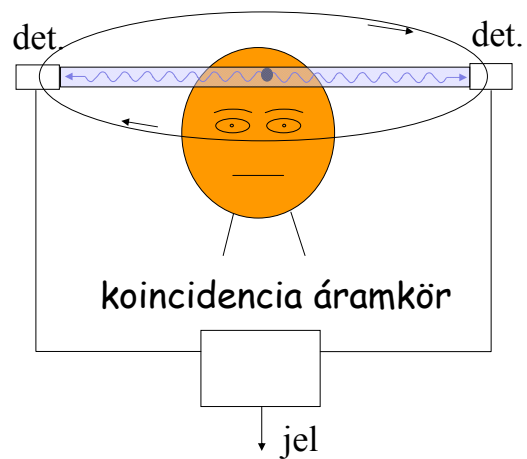
Pozitron annihiláció



izotóp	T (perc)	$E_{\max}$ (MeV)	átl. hatótáv (mm)
$^{11}\text{C}$	20,4	0,96	0,3
$^{13}\text{N}$	9,9	1,19	0,4
$^{15}\text{O}$	2,9	1,72	1,5
$^{18}\text{F}$	110	0,64	0,2
$^{68}\text{Ga}$	68	1,89	1,9
$^{82}\text{Rb}$	1,3	3,35	2,6

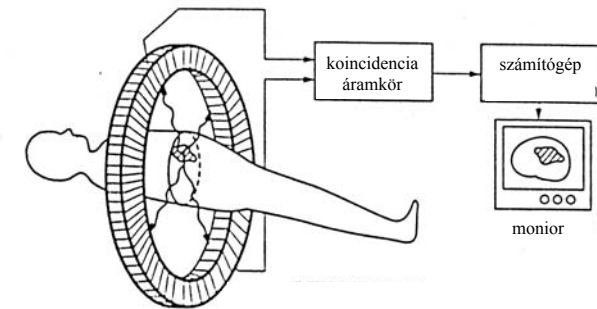


## PET (Positron Emission Tomography) elv:

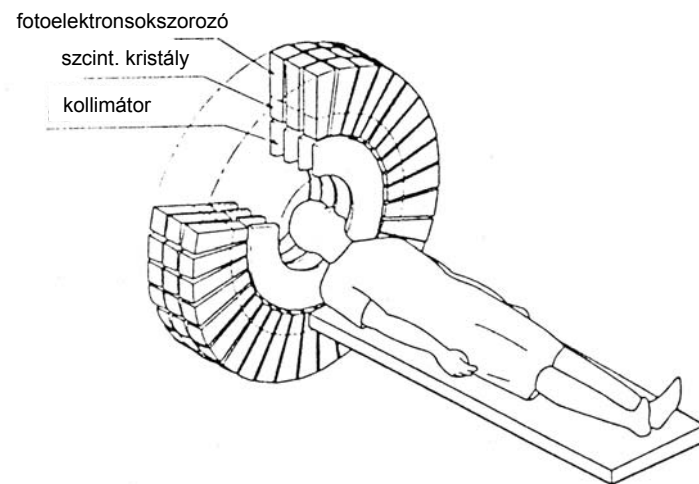


## A PET gyakorlati megvalósítása:

### Körkörös detektorgyűrűrendszer



## Többszörös detektorgyűrűrendszer => 3D kép



## Tipikus vizsgálati szerv az agy Radiofarmakonok:

$^{11}\text{C}$   $^{18}\text{N}$   $^{15}\text{O}$   $^{18}\text{F}$

FDG  $^{18}\text{F}$ deoxiglükóz

