

Fizioterápia MSc részképzés

Biofizika tárgy

Dr. Voszka István

SE Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

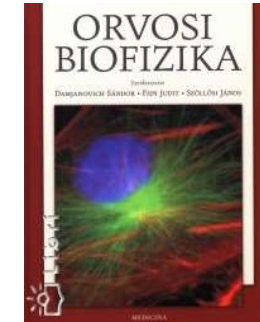
voszka.istvan@semmelweis.hu

<http://biofiz.semmelweis.hu>

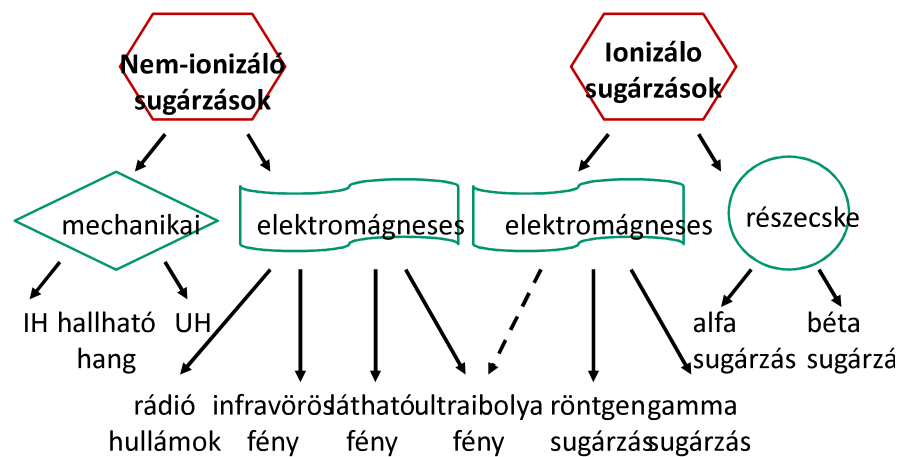
Tankönyv: Damjanovich- Fidy- Szöllösi (szerk.)

Orvosi Biofizika (Medicina, 2007)

II., VIII., IX. fejezetei

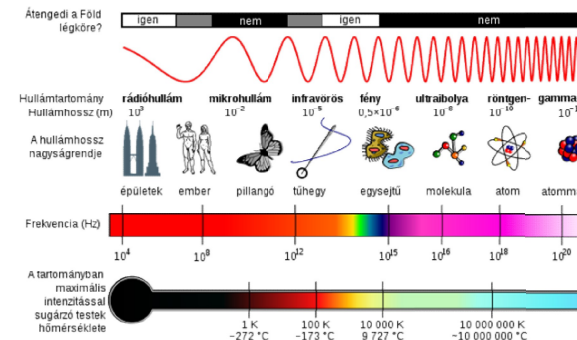


Sugárzások



Elektromágneses sugárzások

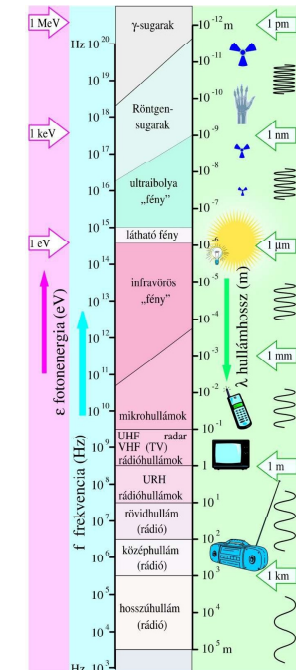
Hullám- és részecsketermészet
(nagyobb hullámhossz – inkább hullám
nagyobb energia – inkább részecske)



$$c = \lambda f$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = hf$$

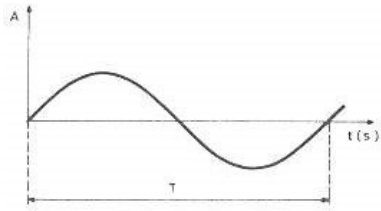
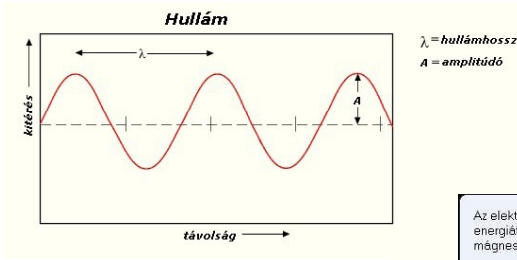




Az ionizáló sugárzások előállítása és alkalmazása

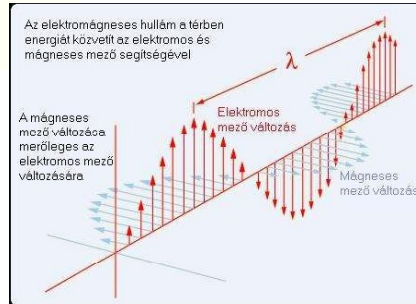
Dr. Voszka István

Semmelweis Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet

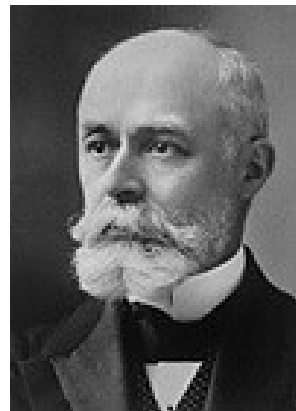


$$c = \lambda f$$

$$E = hf$$



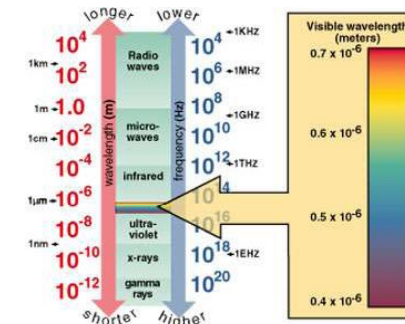
Wilhelm Conrad Röntgen
1845-1923



Antoine Henri Becquerel
1852-1908

Ionizáló sugárzások

- a) **körpuszkuális:** nyugalmi tömeggel rendelkező részecskék alkotják
 Pl: α , β , proton, neutron
- b) **elektromágneses:** nyugalmi tömeggel nem rendelkezik, fotonok alkotják
 γ , röntgen



$$E = hf = hc/\lambda$$

1. Az atom szerkezete; ionizáció, gerjesztés

Atommag: $d = 10^{-15} - 10^{-14}$ m

benne protonok (számuk \rightarrow rendszám-Z)

neutronok (protonok + neutronok

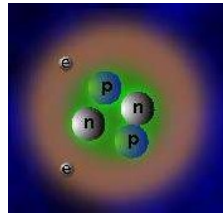
[nukleonok] száma együtt \rightarrow tömegszám-A)

Magsugárzások: α , β , γ

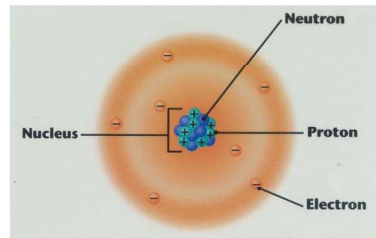
Elektronburok: $d \approx 10^{-10}$ m

elektronok száma = protonok száma

elhelyezkedés meghatározott sugarú és energiájú pályákon (kvantáltan)



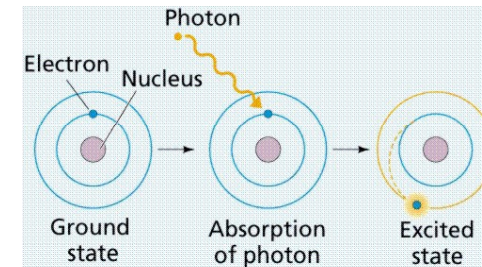
⁵⁶₂₆Fe



Gerjesztés: $\Delta E = h\nu = h c / \lambda$

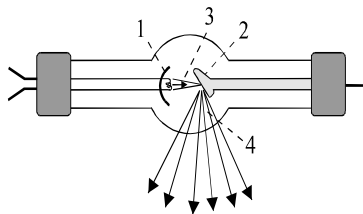
Ionizáció: $h\nu \geq \Delta E$

Elektronburokból származó sugárzás:
röntgen



2. Röntgensugárzás keletkezése

Előállítás leggyakrabban röntgensőben

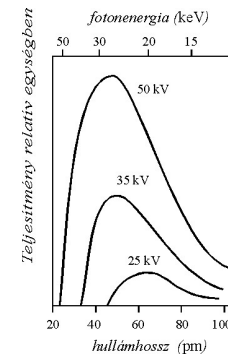


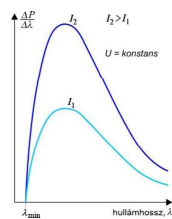
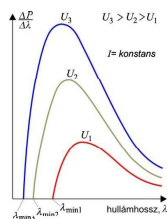
Típusai: **fékezési sugárzás**

- folytonos spektrum, rövidhullámú határral
- U növekedésével a sugárzás keményedik, az összteljesítmény nő (U^2 -tel arányosan)

$$P = c U^2 I Z \quad \eta = c U Z$$

Alkalmazása: röntgen képalkotás





- U növekedésével a spektrum balra tolódik
- I növekedésével a hullámhossz szerinti összetétel nem változik

A határhullámhossz kiszámítása:

$$\varepsilon_{el} = \varepsilon_{kin} = \varepsilon_{foton} + Q = \varepsilon_{foton, max}$$

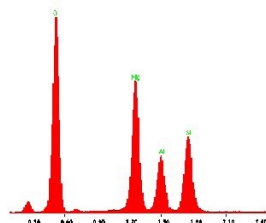
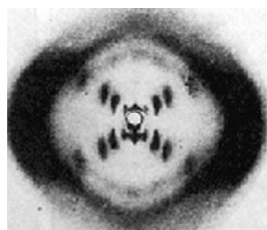
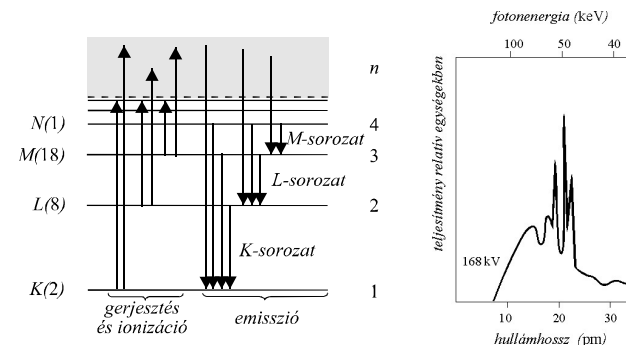
$$eU = h f_{max} = h \frac{c}{\lambda_{min}}$$

$$\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U} = \frac{k}{U}$$

- Duane –Hunt-törvény

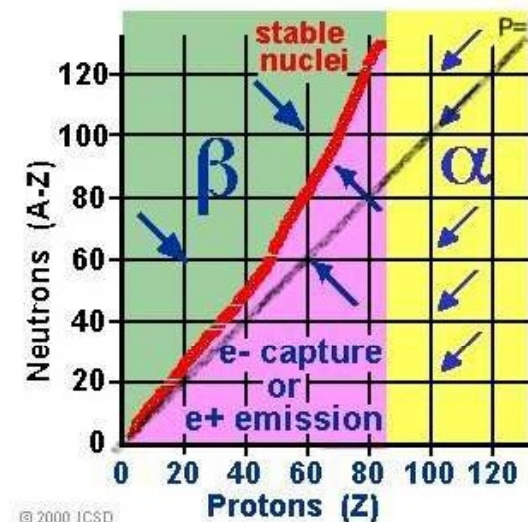
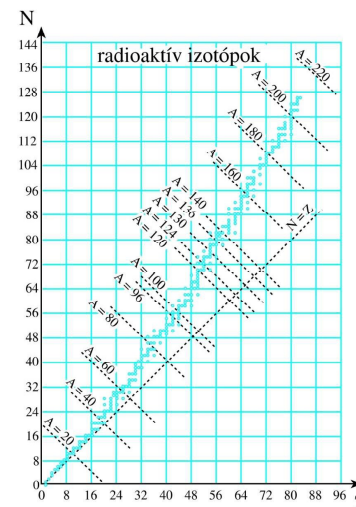
karakterisztikus sugárzás

- nagy gyorsító feszültség esetén
 - vonalas, az anódra jellemző spektrum
- Alkalmazása: csontdenzitometria, anyagazonosítás, molekulaszakért vizsgálat

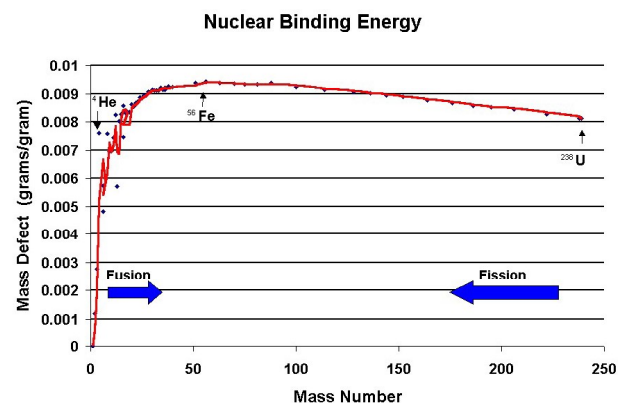


3. Magerők, az atommag stabilitása

A protonok és neutronok között vonzó- és taszítóerők hatnak



Az egy nukleonra jutó kötési energia közepes méretű magok esetén a legnagyobb (legstabilabb magok)

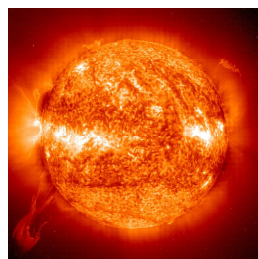
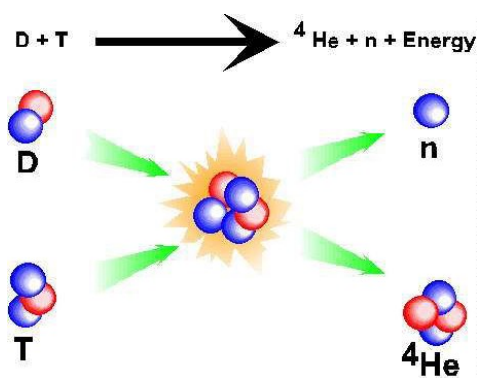


Ezen állapot elérhető:

- nehéz magok hasadásával (atomreaktor, atombomba)



- könnyű magok fúziójával (fúziós reaktor, H-bomba)



Izotópok: azonos rendszám, de eltérő tömegszám
(lehet stabilis vagy radioaktív)

természetes mesterséges

The Nuclei of the Three Isotopes of Hydrogen

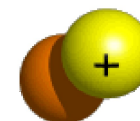
Protium

Deuterium

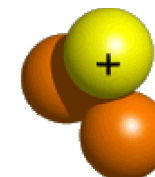
Tritium



1 proton



1 proton
1 neutron



1 proton
2 neutrons

4. Radioaktív bomlás, aktivitás

Bomlási sebesség: $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ $\frac{dN}{dt} = \Lambda$
(aktivitás) [bomlás/s = 1/s = Bq (becquerel)]

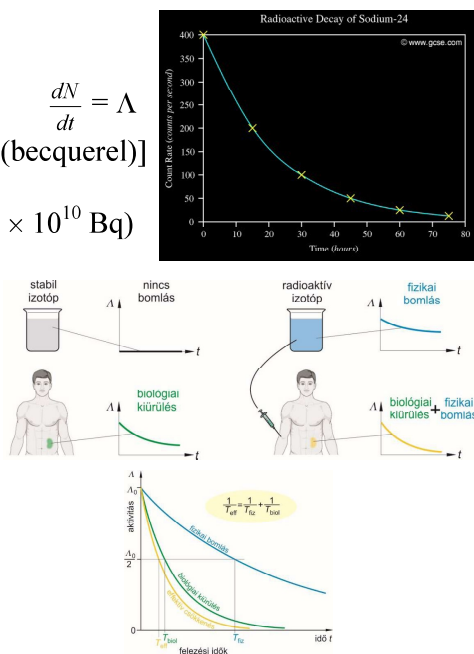
(1 Ci (curie) = $3,7 \times 10^{10}$ Bq)

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \lambda = \frac{0,693}{T}$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \quad \Lambda = \Lambda_0 e^{-\lambda t}$$

Kapcsolat a felezési idők között:

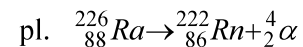
$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{fiz}} + \frac{1}{T_{biol}}$$



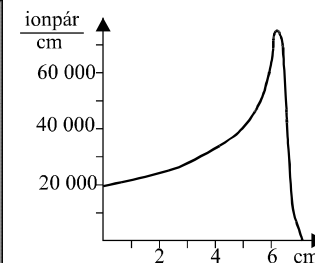
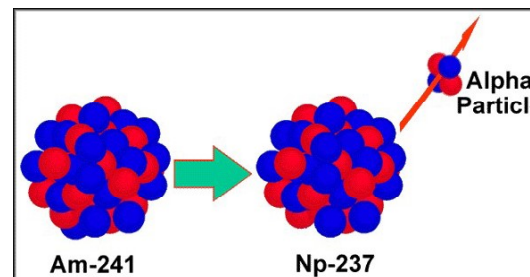
5. Bomlási típusok

Alfa bomlás

Z 2-vel, A 4-gyel csökken

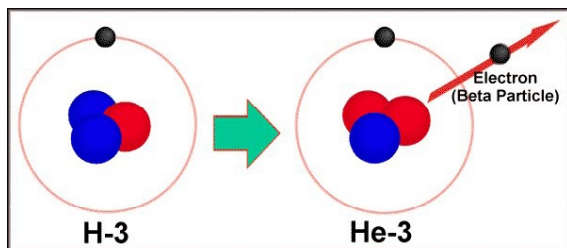
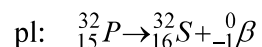


- meghatározott energiájúak (vonalas spektrum)
 - hatótávolságuk rövid (vízben, szövetben néhányszor 10 μm)
- Alkalmazás: csak terápia

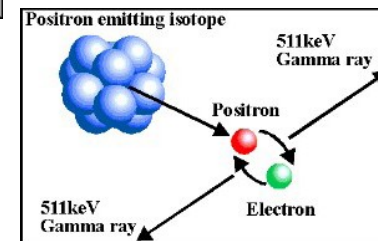
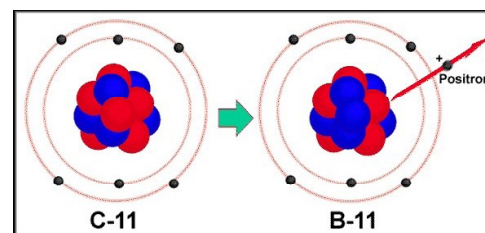
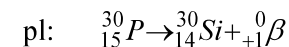


Béta bomlás

- negatív β -bomlás: Z 1-gyel nő

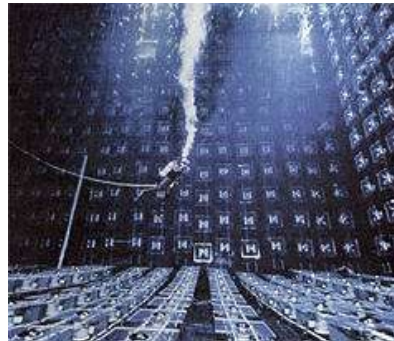
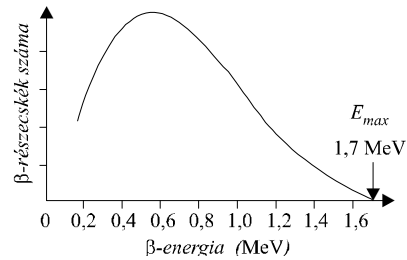


- pozitív β -bomlás: Z 1-gyel csökken

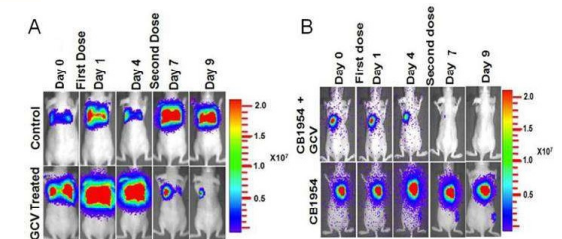
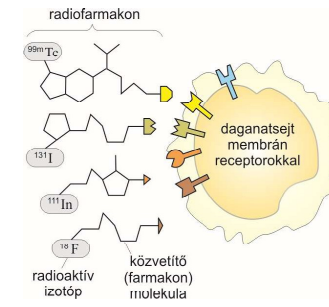


Tumordiagnosztika és terápia (teranosztika)

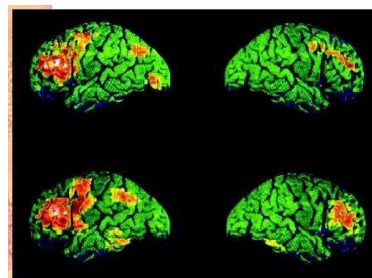
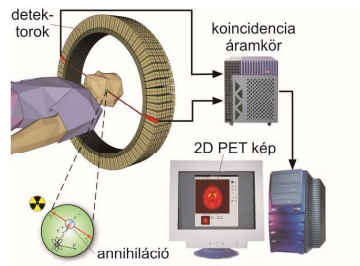
A mag energiavesztése adott értékű, a spektrum mégis folytonos. Oka: neutrínó.



Alkalmazás: β^- : terápia és in vitro
 β^+ : PET



PET vizsgálat



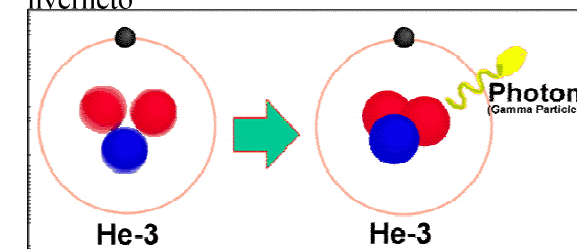
Gamma sugárzás

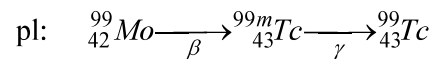
Az α - vagy β -bomlást követően a mag energiafölöslegétől elektromágneses sugárzás formájában szabadul meg.

- prompt γ -sugárzás:
 10^{-13} - 10^{-18} s-on belül követi a részecskesugárzást

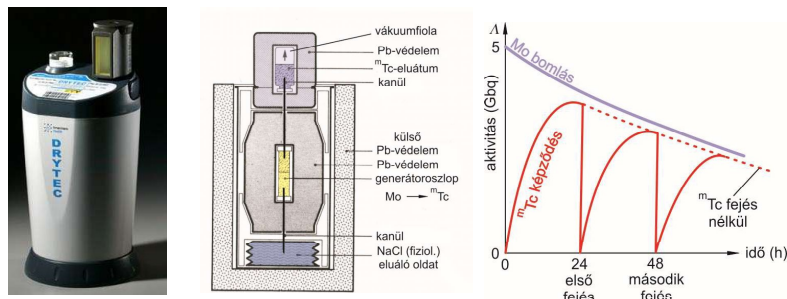
- izomer magátalakulás:
hosszabb, mérhető felezési idővel követi a részecskesugárzást

Előny: a kettő szeparálható, tisztán γ -sugárzó izotóp nyerhető



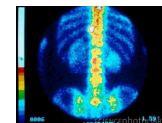


Alkalmazás: in vivo diagnosztika (igen jól használható)



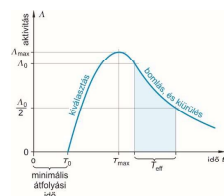
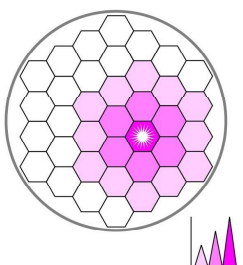
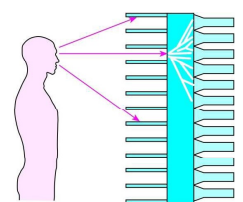
Az „in vivo” alkalmazott izotópok kiválasztásának szempontjai

- gamma-sugárzó
- rövid felezési idő (de ne legyen rövidebb, mint a vizsgált folyamat)
 $\Lambda \sim N/T$
- nem túl kicsi (sugárterhelés csökkentése) és nem túl nagy (jó hatásfokú detektálás) fotonenergia

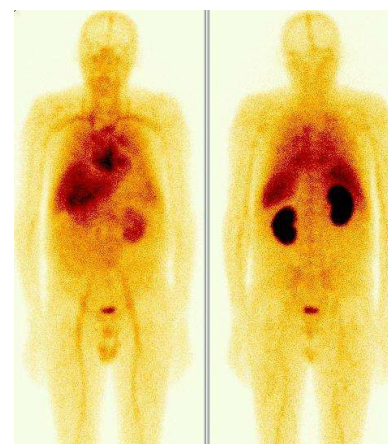


Az „in vitro” alkalmazások során a mérés technikai szempontok a döntőek

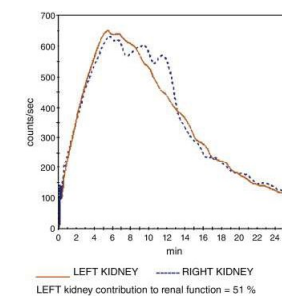
Gamma-kamera (statikus és dinamikus vizsgálat)



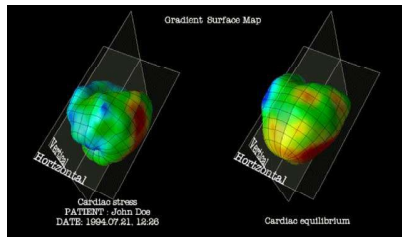
Statikus vizsgálat (szcintigram)



Dinamikus vizsgálat



SPECT



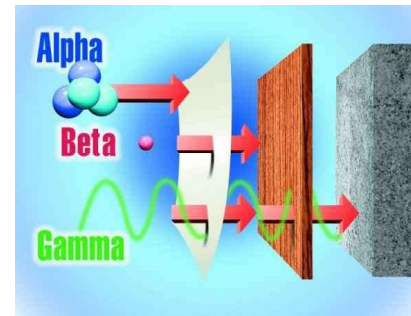
Ionizáló sugárzások és a közeg kölcsönhatása

Jellemző paraméterei:

- hatótávolság
- fajlagos ionizáció (lineáris ionsűrűség)

$$\frac{n}{l}$$

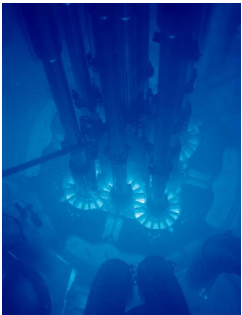
$$\text{- lineáris energiaátadás (LET)} = w \frac{n}{l}$$



a) Direkt ionizáló sugárzások (α , β)

A kölcsönhatás típusai:

- ionizáció
- gerjesztés
- elektromágneses sugárzás keltése (fékezési röntgen v. Cserenkov sugárzás)
- magreakciók keltése (csak nagy energiájú α)



α -sugárzás

igen nagy fajlagos ionizáció
kis hatótávolság (levegő ~ cm, víz ~ 10 μ m)

β -sugárzás

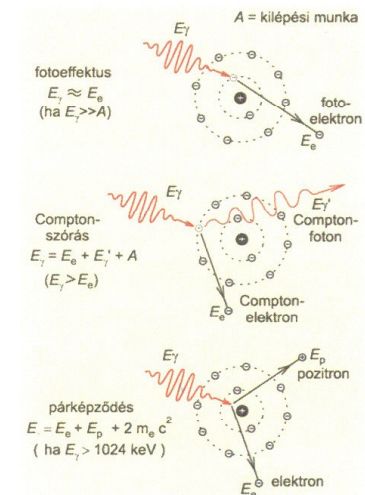
nagyobb hatótávolság (levegő ~ m, víz ~ mm)
kb. 100 \times kisebb fajlagos ionizáció, mint α -nál

b) Indirekt ionizáló sugárzások (γ , rtg)

Elsődleges kölcsönhatás:

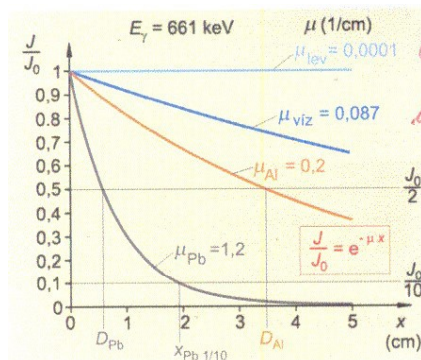
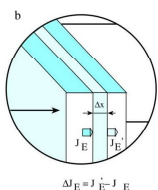
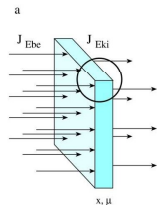
- fotoelektromos effektus
- Compton effektus
- párképződés

Az ezen folyamatokban kiváltott nagy energiájú elektronok ionizálnak.

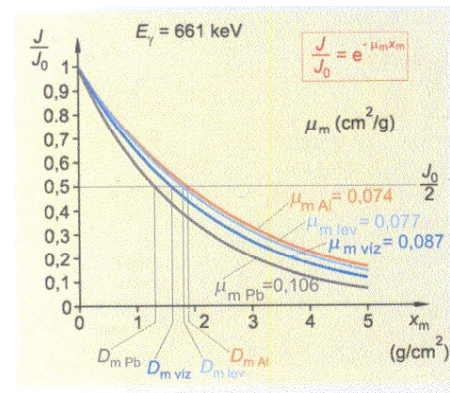
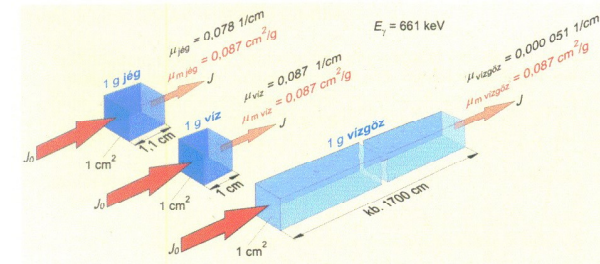


A kölcsönhatások következtében a sugárzás intenzitása gyengül.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \mu = \frac{1}{\delta} \quad \mu = \frac{0,693}{D}$$

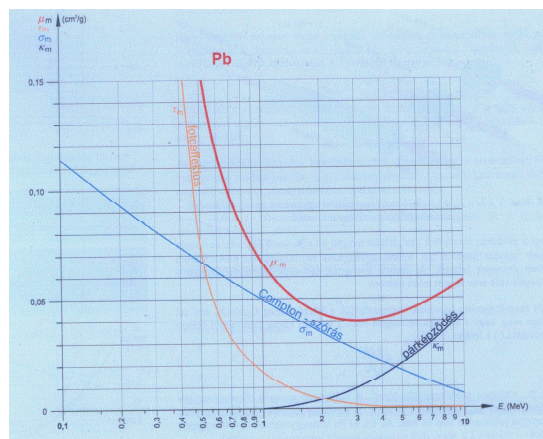


$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$



$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad \text{ill.} \quad \mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$$

A komponensek aránya a fotonenergiától és a gyengítő anyag minőségétől függ.



Kisebb fotonenergiáknál (diagnostikus rtg és γ), nagyobb rendszámú gyengítő anyagoknál (pl. Pb, csont) főleg fotoeffektus.

$$\text{Erre vonatkozóan: } \tau_m = c \lambda^3 Z^3$$

Kisebb effektív rendszámú gyengítő anyagoknál (víz, lágy szövetek)

Főleg Compton-effektus ($Z_{\text{eff,viz}} = 7,69$, $Z_{\text{eff,lev}} = 7,3$)

$$\text{Erre: } \sigma_m \sim Z$$

Gyakorlati következmények:

-sugárvédelem nagy rendszámú anyagokkal Pb)

- szűrők

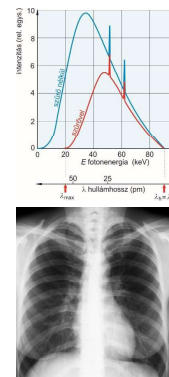
- rtg-diagnostika (kép kontrasztossága, kontrasztanyagok)

- terápia: kis energia - felületi

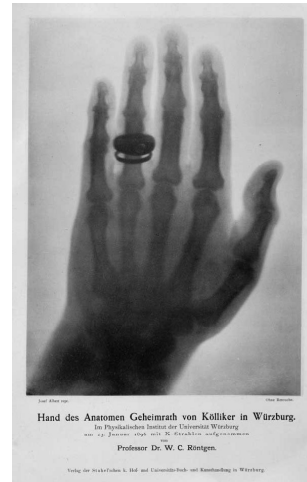
- nagy energia – mély

hatótávolság: energiától függ (levegő ~ 100 m, víz ~ dm)

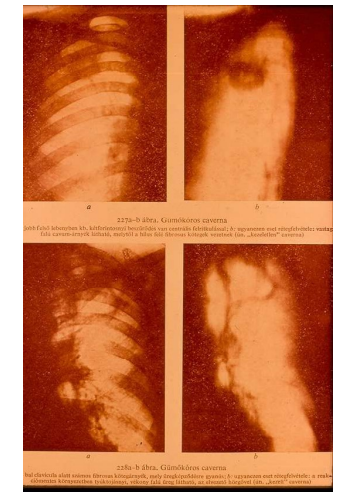
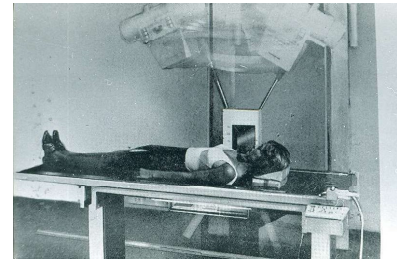
fajlagos ionizáció kisebb, mint β esetén



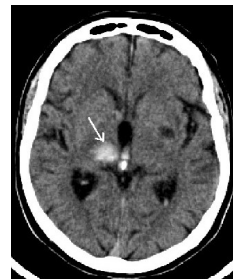
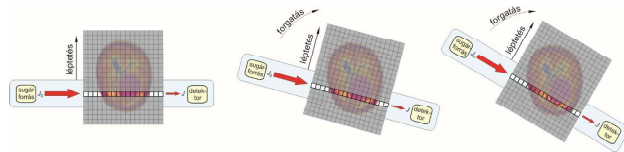
Röntgendiagnosztika - szummációs kép



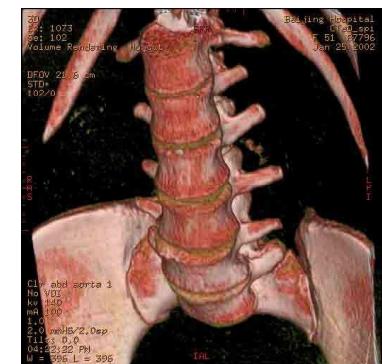
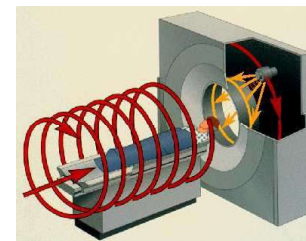
- hagyományos rétegfelvétel



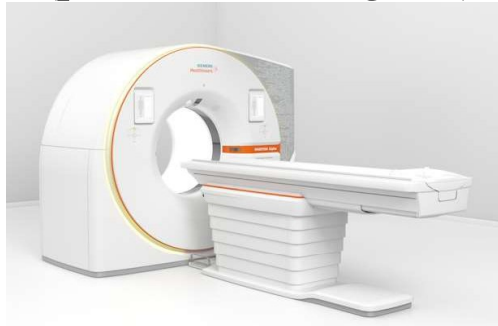
CT



Spirál CT és 3D rekonstrukció



PCCT (photon counting CT)

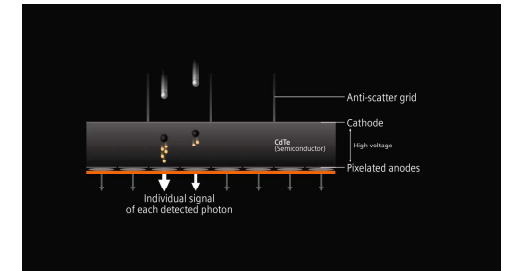


Siemens Naeotom Alpha

Szcintillációs helyett félvezető detektor (CdTe)
(kétlépcsős átalakítás helyett közvetlen átalakítás elektromos jellé)

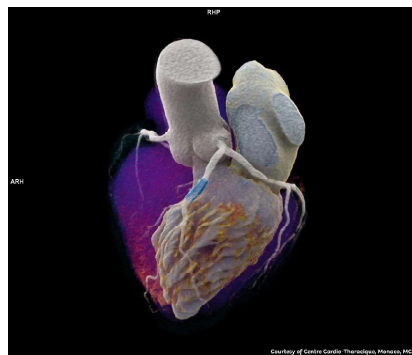
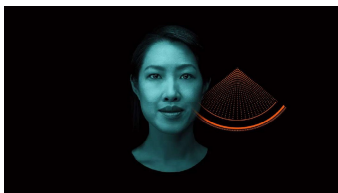
Előnyök:

- jobb térbeli felbontás (~0,25 mm)
- kisebb elektronikus zaj → kisebb sugárdózis és kevesebb kontrasztanyag szükséges
- intrinsic spektrális érzékenység → információ a fotonenergiáról
- gyorsabb vizsgálat



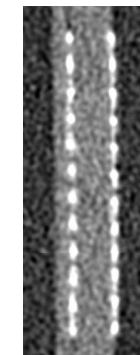
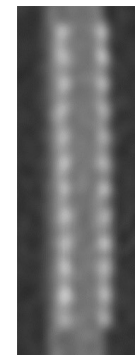
Dual source PCCT
(két sugárforrás egymással 90°-ban) Max. 2 * 144 szelet, z-irányú felbontás 0,4 mm.
Max. sebesség 737 mm/s

Egy szív ciklus alatt felvehető a szív képe

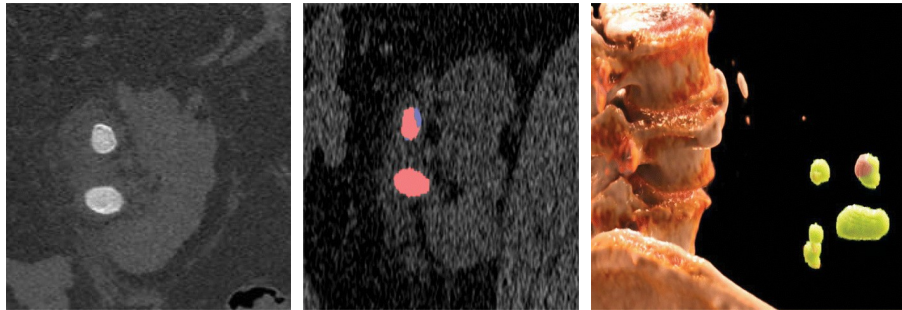


Stent

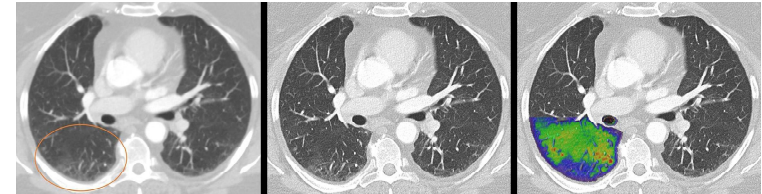
(hagyományos CT – PCCT – PCCT 3D rekonstrukció)



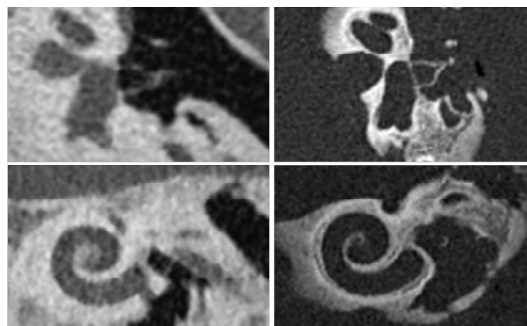
Vesekövek
 hagyományos CT – PCCT - PCCT 3D rekonstrukció



Tüdő COVID
 hagyományos CT – PCCT – funkcionális színezés a spektrális információk alapján

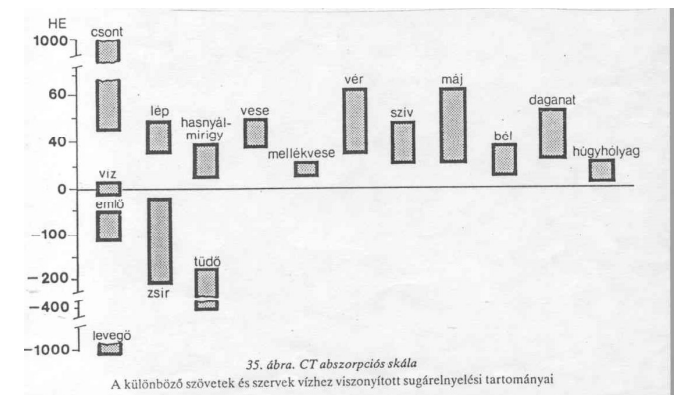


Belső fül
 Hagyományos CT - PCCT

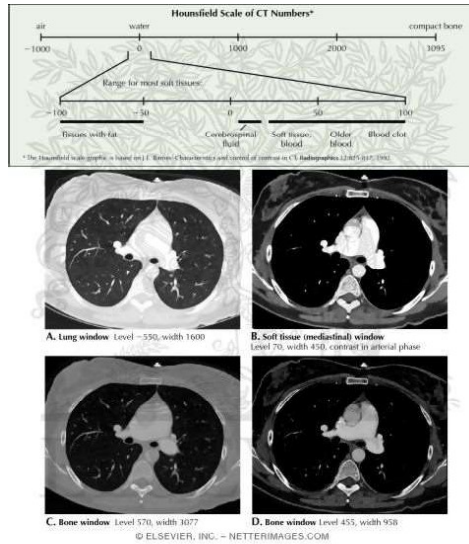


Hounsfield-skála
 A vízhez viszonyított relatív gyengítési skála

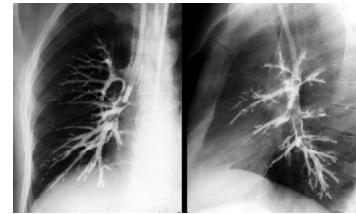
$$HE = \frac{\mu - \mu_{\text{viz}}}{\mu_{\text{viz}}} 1000$$



Ablakozás: a szürkeskálát a Hounsfield-skála egy részéhez rendelik:
(Az ennél kisebb értékek feketével, a nagyobb értékek fehérrel ábrázolódnak.)



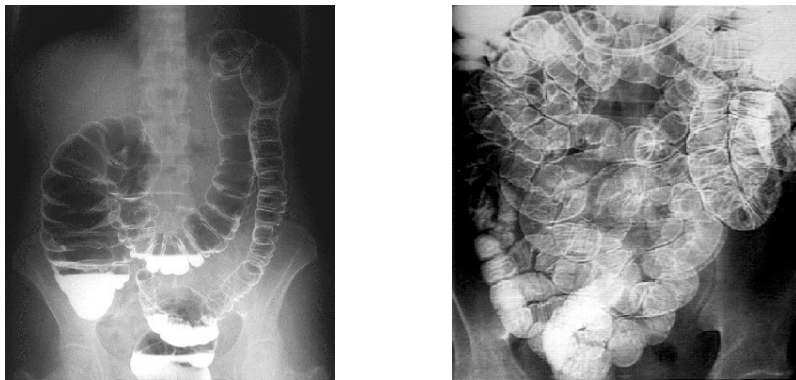
Kontrasztanyagok alkalmazása I.
-pozitív



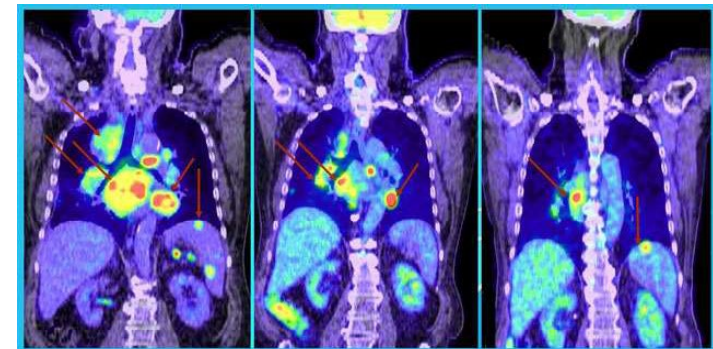
Digitális szubtrakciós angiográfia (DSA)



Kontrasztanyagok alkalmazása I.
-negatív, illetve kettős kontraszt



Hibrid képalkotás (funkcionális és morfológiai információ kombinációja)
PET-CT



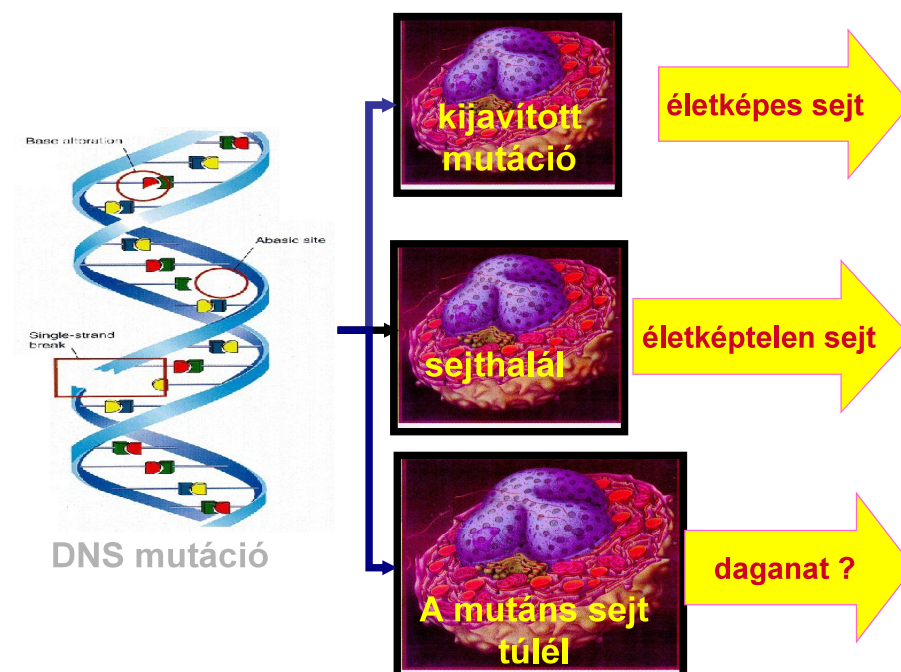
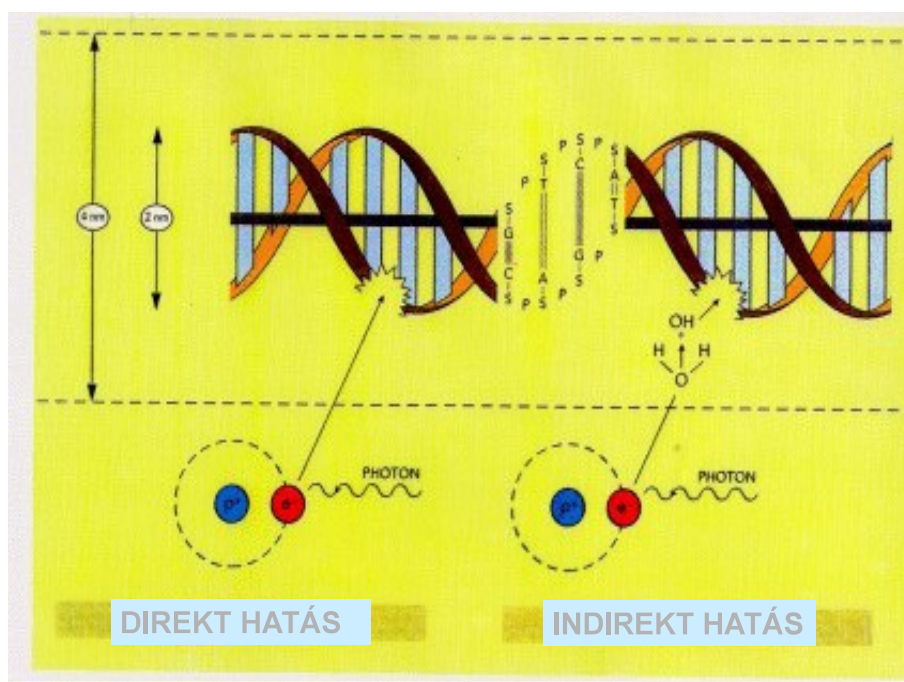
Dozimetria

Célja a sugárzás biológiai hatásának számszerű (kvantitatív) jellemzése.

Biológiai hatást csak a szövetben elnyelődött sugárzás fejt ki.

Elnyelt dózis:
$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \cdot \text{egysége} \cdot \frac{J}{kg} = Gy$$

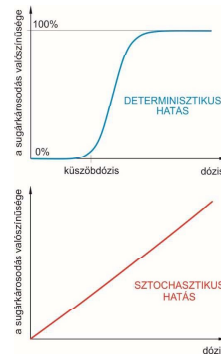
10^{15}	Energia elnyelődés	FIZIKAI KÖLCSÖNHATÁS
	Gerjesztés/ionizáció	
10^{12}	Részecskék kezdeti útja	
10^9	Szabadgyök képződés	FIZIKO-KÉMIAI KÖLCSÖNHATÁS
	Diffúzió, kémiai reakciók	
10^6	Kezdeti DNS károsodás	
10^3	DNS lánctörés, mutáció	BIOLÓGIAI VÁLASZ
10^0	1 ms Hibajavítás	
	1 sec A károsodás rögzülése	
10^3	1 óra Sejtpusztulás	
	1 nap Mutációk/transzformációk/aberrációk	
10^6	1 év Mutáns sejtek proliferációja	EGÉSZSÉGI HATÁSOK
10^9	Teratogenesis	
	Daganatképződés	
100 év	Örökletes defektusok	



A sugárkárosodások fajtái:

Determinisztikus

- Csak küszöbdózis felett
- A károsodás súlyossága arányos a dózissal (pl. bőrpír, sugárbetegség)
- Órákon, napokon belül



Sztokasztikus

- Nincs küszöbdózis
- A valószínűsége arányos a dózissal (pl. daganatkeletkezés)
- Évek, évtizedek alatt

Csak a szervezetben elnyelt sugárzás okoz biológiai hatást.

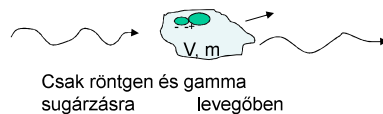
Elnyelt dózis:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \cdot \text{egysége} \cdot \frac{J}{kg} = Gy$$

Az elnyelt dózis minden sugárzásra és minden elnyelő anyagra érvényes, de gyakorlatilag mérhetetlen.

A halálos dózis (6 Gy) $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet emelkedést okoz.

Besugárzási dózis (X)



-
- $X = \Delta Q / \Delta m,$

ahol Q a keltett elektromos töltésmennyiség m tömegű levegőben.

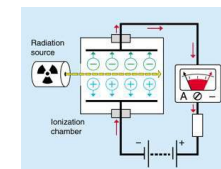
- SI egysége: $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (C: coulomb)

A besugárzási dózis ionizációs kamrával egyszerűen mérhető.

Ebből az elnyelt dózis kiszámítható

$$D_{\text{lev}} = f_0 X \quad f_0 = 34 \text{ J/C}$$

$$D_{\text{szöv}} = D_{\text{lev}} \frac{\mu_{m,\text{szöv}}}{\mu_{m,\text{lev}}}$$

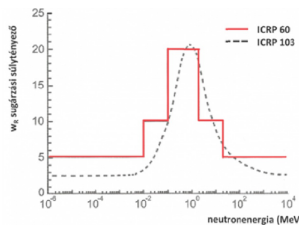


Egyenérték dózis: $H_T = D_{T,R} \cdot w_R$ mértékegysége: $J/kg = Sv$

A sugárvédelemben leggyakrabban előforduló típusú és minőségű sugárzások súlytényezője:

6. táblázat. Sugárzási súlytényezők.

Sugárzás fajtája	Sugárzási súlytényező (w_R)	
	ICRP 60	ICRP 103
foton	1	1
elektron, müon	1	1
proton (nem visszaszórt)	5	
proton és pion		2
α -részecske, nehéz magok	20	20
neutronok	5 (< 10 keV) 10 (10 – 100 keV) 20 (100 keV – 2 MeV) 10 (2 MeV – 20 MeV) 5 (> 20 MeV)	folytonos görbével ábrázolták az energia függvényében (2.1. ábra)



1. ábra. A w_R súlytényező grafikus ábrázolása az ICRP 60 és ICRP 103 alapján.

Effektív dózis: $E = \sum H_T \cdot w_T$ mértékegysége: $J/kg = Sv$

Az egyes szövetek sugárvédelemben használt súlytényezője:

7. táblázat. Az ICRP 60 és ICRP 103 ajánlásában található testszöveti súlytényezők.

Testszövet	Testszöveti súlytényező (w_R)	
	ICRP 60	ICRP 103
tüdő, gyomor, csontvelő, vastagbél	0,12	0,12
emlő	0,05	0,12
ivarmirigyek	0,20	0,08
pajzsmirigy hólyag	0,05	0,04
nyelőcső, máj		
csontfelszín, bőr	0,01	0,01
agy		0,01
nyálmirigy		0,01
maradék	0,05	0,12
összes	1,00	1,00

Kollektív dózis (Jele: S)

Egy kollektíva, vagy akár a népesség egészének a sugárterhelése

$S = a$ sugárterhelést elszenvedett egyedek egyéni dózisának összege.

Mértékegysége: *személy.Sv* .

Folyamatosan kapott kollektív dózisok

Forrás	kollektív dózis (ezer személySv/év)
Világító mutatójú karórák	1
Utazások repülőgépen	10
Orvosi fogröntgenek	17
Többi orvosi röntgenvizsgálat	1600
Orvosi radioizotópos vizsgálatok	160
Orvosi sugárterápia	1500
Orvosi radioizotóp terápia	9
Geotermikus energia hasznosítása	0,005
Földgáztermelés	0,003
Kőolajtermelés	0,1
Foszfát műtrágyagyártás	10
Nukleáris ipartól lakosság	10
Nukleáris Ipari dolgozók	20
Szénipar	110
Salakbeton építkezés	300
Házban lakni (radon összegyűlik)	6000
Természetes radioaktivitástól	7000

Egyes események által okozott sugárdózis Sv-fő egységben.

Esemény	kollektív dózis (ezer személySv)
1945 Hirosimai atombomba	1
1957 Windscale reaktor balesete	2
1957 Kystim hulladéktároló balesete	2,5
1961 Novaja Zemlja légöri kísérleti robbantás	1000
1964 SNAP-9A szonda visszatérése a légkörbe	2,1
1979 Harrisburg atomerőmű baleset	0,04
1986 Csernobil atomerőmű baleset	600
1992 El Chicon tűzhányó kitörése	10
Összes földalatti atombomba-kísérlet	0,2
Összes légköri atombomba-kísérlet	30000

A szövetek sugárérzékenysége

magas	közepes	alacsony
csontvelő lép thymus nyirokcsomók gonádok szemlencse lymphocyták (kivétel a sugárérzékenységi törvény alól)	bőr Mezodermális szervek (máj, szív, tüdő...)	izom csont idegrendszer



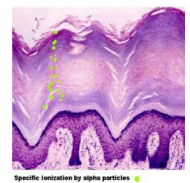
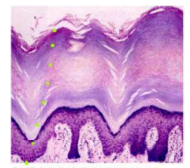
Bergonié-Tribondeau törvény (1906) (sugárérzékenységi törvény)

(Jean A. Bergonié, francia radiológus, 1857-1925;
Louis F.A. Tribondeau, francia orvos, 1872-1918)

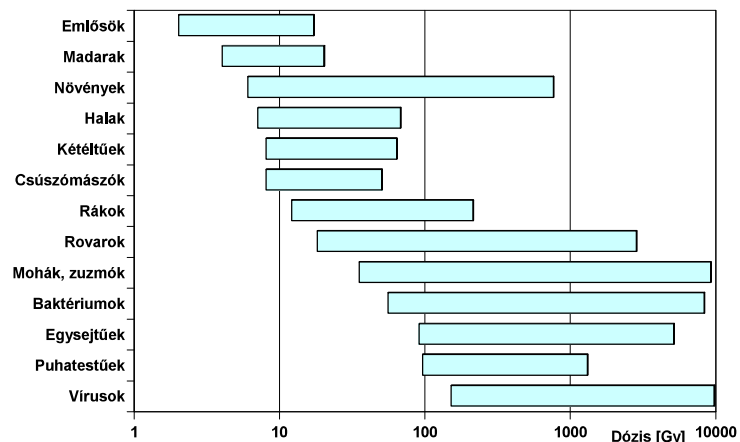
Egy szövet sugárérzékenysége a szövetben található
differenciálatlan sejtek számától, a mitotikus
aktivitásuktól és az aktív proliferáció időtartamától.

A sugárérzékenységet (SÉ) befolyásoló tényezők

- **Fizikai**
 - LET (linear energy transfer): \uparrow SÉ
 - Dózisteljesítmény: \uparrow SÉ
- **Kémiai**
 - Növelik: OXIGÉN, citosztatikumok.
 - Csökkentik: kén (cys, cysteamine, glutation)
- **Biológiai**
 - Sejtciklus státusz:
 - \uparrow SÉ: G2, M
 - \downarrow SÉ: S
 - A károsodás kijavítása (a szubletális károsodás kijavítható pl. fracionált dózis)



Félhalálos dózisok, akut besugárzás esetén



Dóziskorlátok

	Foglalkozási sugárterhelés	Tanulók, gyakornokok (16-18 év között)	Lakosság (orvosi sugárterhelés nélkül)
Egésztet	20 mSv/év	6 mSv/év	1 mSv/év
Szemlencse	20 mSv/év	15 mSv/év	15 mSv/év
Bőr, végtagok	500 mSv/év	150 mSv/év	50 mSv/év

Néhány orvosi beavatkozás során kapott dózis

In vivo izotópvizsgálatok általában: 4 – 5 mSv

Fogászati röntgen vizsgálatok: 2 – 16 μ Sv

Mellkas ernyőképszűrés: 0.1 mSv

Koponya CT: 1,5 – 2 mSv

Hasi, mellkasi CT: 7 -8 mSv

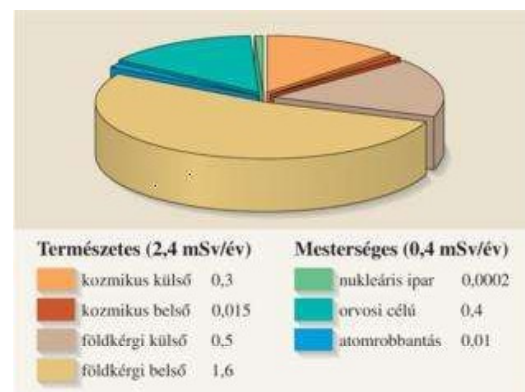
Intervenciós radiológia: több 10 mSv

Átlagos háttérsugárzás Magyarországon: 3,1 mSv/év

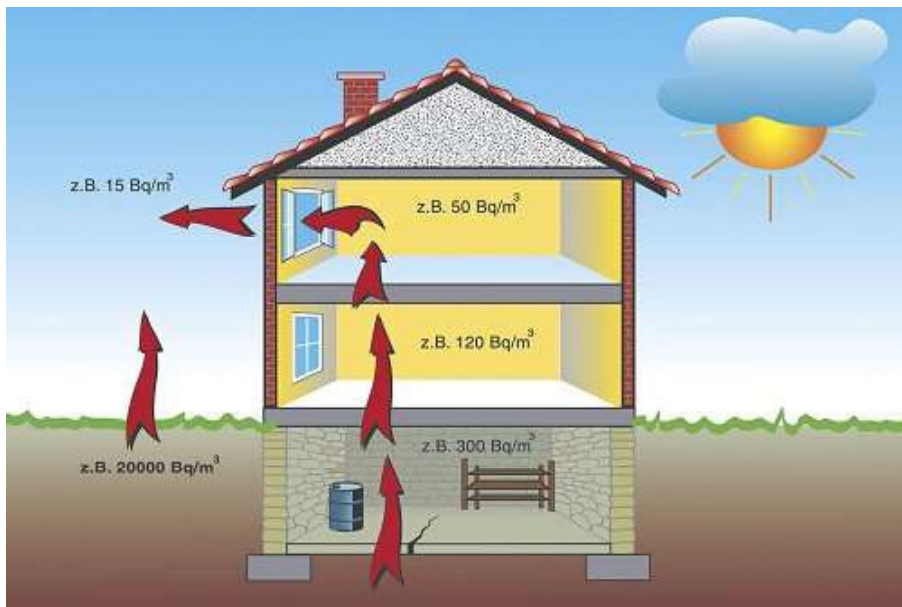
(2.5 μ Gy/nap a Föld felszínén, 180 μ Gy/nap a nemzetközi
űrállomáson)

A kozmikus sugárzásra az átlagos w_R 2.5 $\rightarrow E \approx 450 \mu$ Sv/nap)

A lakossági sugárterhelés forrásai



A radon útja



2013 során a Személyi Dozimetriai Szolgálat átállt a filmdoziméterekről az egészséges termolumineszcens doziméterek használatára.



Egyéni dozimetriai ellenőrzés, monitorozás, orvosi gyakorlatban

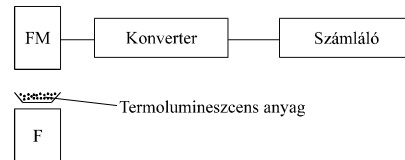
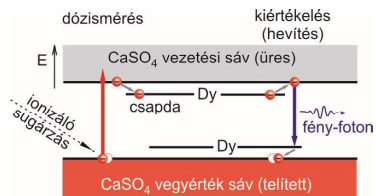
- Egyéni külső dózis követésére személyre szólóan dozimétert használunk, melynek típusa lehet:
 - (- Film kazetta)
 - Termolumineszcens (TL)
 - Elektronikus (operatív) doziméter
- Egyéni dozimétert mell-magasságban, a váll és derék között hordjuk
- A monitorozási időtartam legyen 1 hónap, de semmi esetre sem 3 hónapnál hosszabb.
- Doziméter csere és eredmény közlés ne legyen 3 hónapnál ritkább!

Termolumineszcens dózismérő



Termolumineszcens dózismérő

(1. gyakorlat)



Elektronikus operatív doziméter



Sugárvédelmi szempontok minden ionizáló sugárzással végzett tevékenység során

1. **Indokoltság** – az ionizáló sugárzás alkalmazásának hasznosnak kell lennie: az alkalmazás kockázata kisebb, mint az alkalmazás elhagyásának kockázata (kára) – ezt kell mérlegelni a páciens szempontjából.
2. **Optimálás** – az alkalmazás által okozott dózis az ésszerűen elérhető Legkisebb legyen. (ALARA-elv: **A**s **L**ow **A**s **R**easonably **A**chievable) Mind a páciens, mind a személyzet szempontjából mérlegelni kell.
3. **Korlátozás** – a valószínű dózisok nem léphetik túl a biztonságot adó egyéni dóziskorlátot. A munkavállalók szempontjából kell mérlegelni.

Külső sugárforrás esetén a röntgen, illetve a gamma a legveszélyesebb.

Szervezetbe került izotóp esetén az alfa a legveszélyesebb.

A belső sugárterhelést egésztest számlálóval lehet ellenőrizni.



Lehetőségek a sugárterhelés csökkentésére

- A távolság növelése
- Az expozíciós idő csökkentése
- Sugárelnyelő rétegek alkalmazása

