

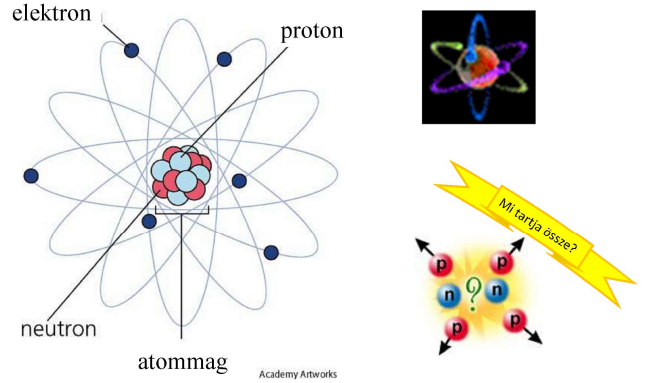
Az atom felépítése, sugárzások. Kölcsönhatás anyaggal, sugárzás detektálása



Varga József
2023

Orvosi Képző Intézet
Nukleáris Medicina Tanszék

Az atom felépítése

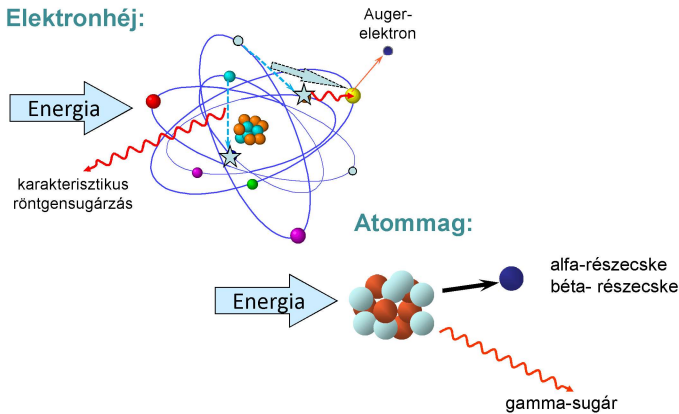


Varga J. 2023

Atomfizika, kölcsönhatások

2

Párhuzamok: energia átadása ... és legerjedés



Varga J. 2023

Atomfizika, kölcsönhatások

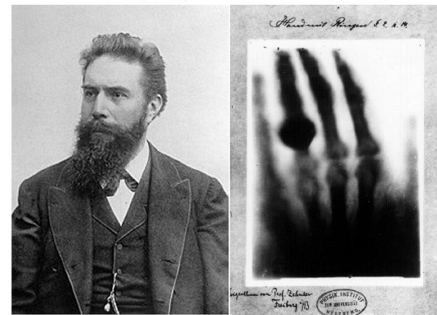
3

Röntgensugárzás (1895)



Fizikai Nobel-díj, 1901

„the discovery of the remarkable rays subsequently named after him”

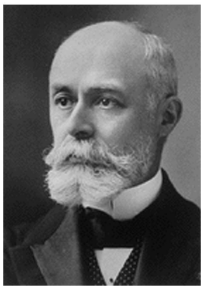


Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)

Varga J. 2023

Atomfizika, kölcsönhatások

4



ANTOINE HENRI BECQUEREL (1852-1908)

1903: Fizikai Nobel-díj

„a spontán radioaktivitás felfedezésével nyújtott rendkívüli teljesítményének elismeréseként”

Radioaktivitás



MARIE CURIE (1867-1934)
PIERRE CURIE (1859-1906)

1903: Fizikai Nobel-díjasok

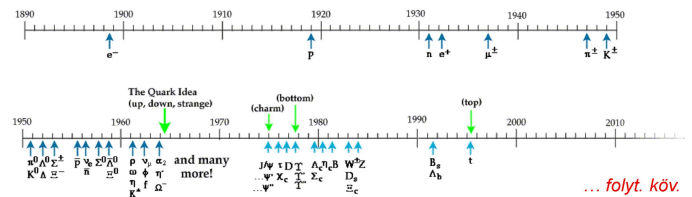
„a Henri Becquerel professzor által felfedezett sugárzási jelenségek kutatása terén nyújtott rendkívüli közös teljesítményükért”

Varga J. 2023

Atomfizika, kölcsönhatások

5

Az atomi részecskék felfedezése



... folyt. köv.

Varga J. 2023

Atomfizika, kölcsönhatások

6

1924: A radioaktív nyomjelzés alkalmazásának elve:

Ha egy molekulában valamelyik atomot annak radioaktív izotópjára cseréljük, ez nem változtatja meg lényegesen a **kémiai és biológiai tulajdonságait**.

Következmény: a molekula mozgása, eloszlása, felhalmozódása sugárzásméréssel kimutatható.



HEVESY György (1885-1966)

1943: Kémiai Nobel-díj
„az izotópok, mint nyomjelzők alkalmazásáért a kémiai folyamatok tanulmányozására”



Varga J. 2023

Atomfizika, kölcsönhatások

7

Atommagok (nuklidok) jelölése

$${}^A_Z X \text{ vagy } X-Z \quad (\text{pl. } {}^{11}_6\text{C} \text{ vagy } C-11)$$

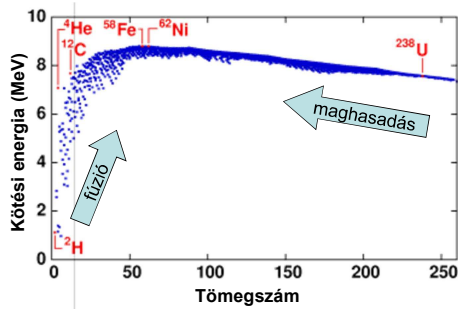
- X: vegyjel
- Z: rendszám protonok száma
- A: tömegszám protonok és neutronok együttes száma

Varga J. 2023

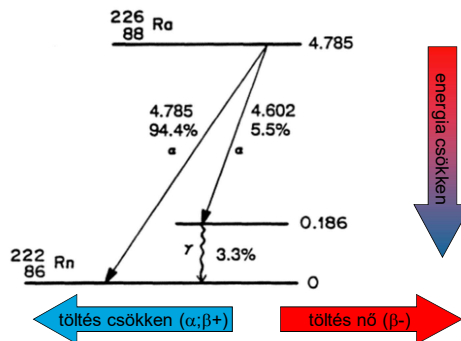
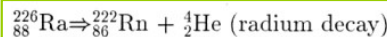
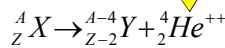
Atomfizika, kölcsönhatások

8

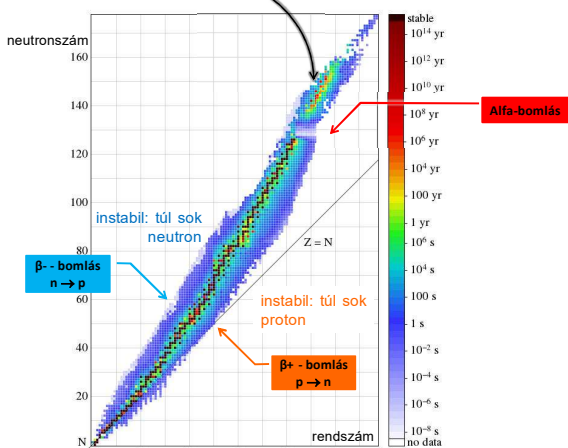
Egy nukleonra jutó kötési energia



Alfa-bomlás



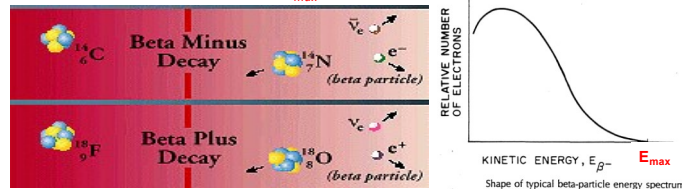
Stabilitási görbe



Béta-bomlás típusai

- (Negatív) béta-bomlás (β^-): $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ (H-3 n-gazdag)
- Pozitív béta-bomlás (β^+): $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ (Be-7 p-gazdag)
- Elektron-befogás (EC) (K-befogás): $p + e^- \rightarrow n + \nu$

Az elektron és antineutrínó ill. pozitron és neutrínó osztozik az energián
 folytonos energia-eloszlás, E_{max} jellemző



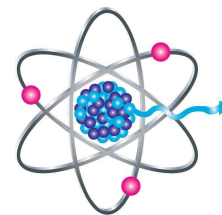
Stabil, proton- és neutrontöbbletű magok - Példa: oxigén

neutron → ↓ proton	6	7	8	9	10	11	12	13
7 = Nitrogén	${}^{13}_7 \text{N}$	${}^{14}_7 \text{N}$	${}^{15}_7 \text{N}$	${}^{16}_7 \text{N}$	${}^{17}_7 \text{N}$	${}^{18}_7 \text{N}$	${}^{19}_7 \text{N}$	${}^{20}_7 \text{N}$
8 = Oxigén	${}^{14}_8 \text{O}$	${}^{15}_8 \text{O}$	${}^{16}_8 \text{O}$	${}^{17}_8 \text{O}$	${}^{18}_8 \text{O}$	${}^{19}_8 \text{O}$	${}^{20}_8 \text{O}$	${}^{21}_8 \text{O}$
9 = Fluor			${}^{17}_9 \text{F}$	${}^{18}_9 \text{F}$	${}^{19}_9 \text{F}$	${}^{20}_9 \text{F}$	${}^{21}_9 \text{F}$	${}^{22}_9 \text{F}$

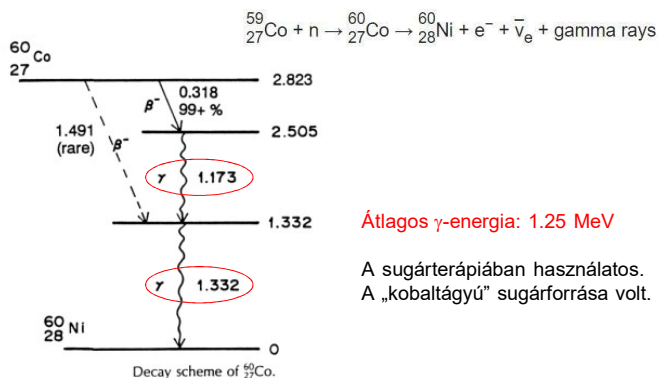
EC: elektron-befogás β^+ : pozitron kibocsátása β^- : elektron kibocsátása

Gamma-sugárzás

- Izomer (=rendszám- és tömegszám-változás nélküli) energia-kibocsátás a magból.
- Mindig valamilyen más magátalakulást (pl. alfa-, béta-bomlást) kísér.



Példa: Co-60 bomlását kísérő γ -kibocsátás



A radioaktív bomlás jellemzői

Egy sugárzó anyag jellemzésekor elsősorban azt kell megadni:

- milyen **fajtájú** a sugárzás (alfa, béta, gamma)
- milyen a keletkezett részecskék **energiája**
- mekkora a minta **radioaktivitása**, azaz átlagosan hány bomlás történik időegységenként (egysége: 1 bomlás/s = 1Bq)
- milyen gyorsan csökken a minta radioaktivitása („**felezési idő**”)

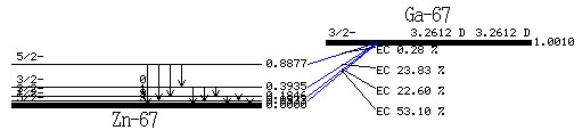
A radioaktivitás egysége

- 1 becquerel = 1 Bq = 1 bomlás/sec
- korábbi egység: 1 curie = 1 Ci = 37 GBq

Nagyságrendek:

„in vitro” méréseknél 1 kémcsőben:	~ kBq	I-125
pajzsmirigy jódfelvétel mérése:	200 kBq	I-131
vese-clearance méréséhez beadva:	3 MBq	Cr-51
nyelőcső szcintigráfia:	20 MBq	Tc-99m
csontszcintigráfia:	600 MBq	Tc-99m
pajzsmirigyterápia:	~ GBq	I-131

A Ga-67 bomlási táblázata

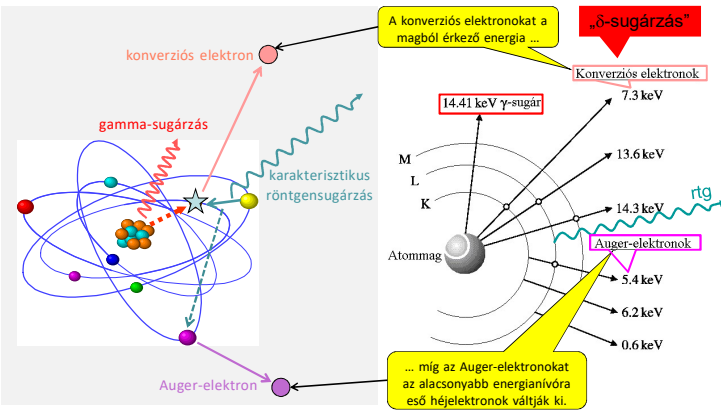


Összesen nem feltétlenül 100%

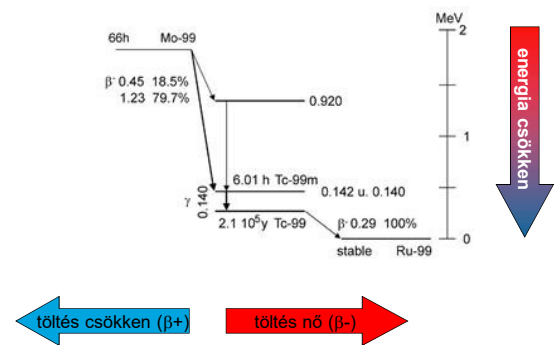
Nuklid	Felezési idő	Bomlási mód	Energia (keV)	P (%)
Ga- 67	78.1 h	EC	91.3	3
			93.3	38
			185	24
			209	2
			394	4

Atomon belüli energiaátadás

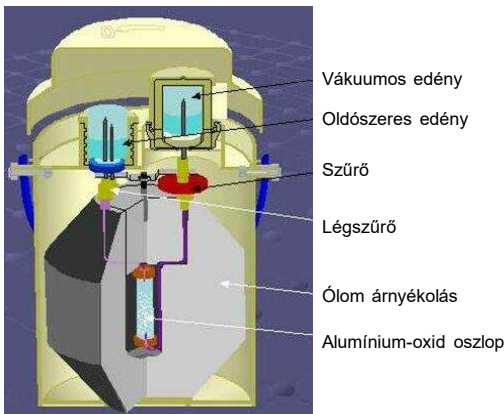
PI: A Fe-57 bomlási sémája 14.41 keV-es gerjesztett állapotból



A Mo-99 bomlási sémája



⁹⁹Mo-^{99m}Tc generátor



A bomlás törvénye

Időegységenként **elbomló magok** száma t idő eltelte után :

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N$$

λ : bomlási állandó (1/s)

$$A = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = \frac{A_0}{2^{t/T}}$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{felezési idő}$$

Instabil, még **bomlásra képes magok** számának változása t idő eltelte után:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = \frac{N_0}{2^{t/T}}$$

Bomlási törvény

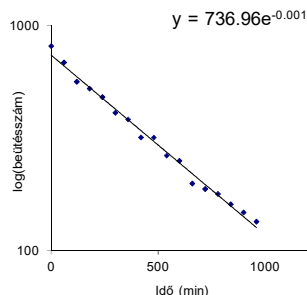
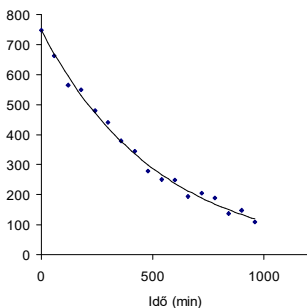
$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = \frac{A_0}{2^{t/T}}$$

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

$$\ln(2)/0.0019 \approx 365 \text{ min}$$

(valódi, Tc-99m: 361 min)

$$y = 736.96e^{-0.0019 \cdot x}$$



Effektív felezési idő

A radioaktív anyag mennyisége két okból csökkenhet egy szervben:

- fizikailag bomlik – fizikai felezési idő, T_{fiz}
- biológiailag ürül (függetlenül a radioaktivitásától) – biológiai felezési idő, T_{biol}
- A kettő együttes hatása – **effektív felezési idő**, T_{eff}

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

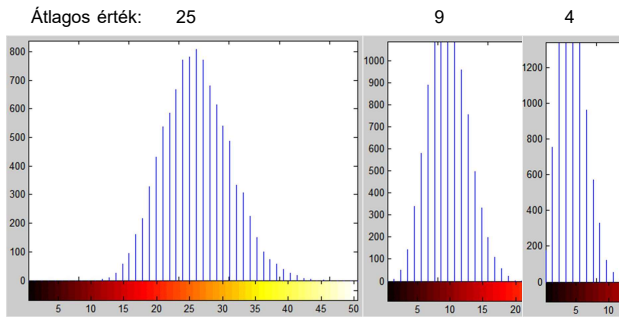
Példa: I-131: T_{fiz} =8 nap

felgyorsult jódforgalom hyperthyreosisban: T_{biol} =24 nap

$$\text{együttesen: } \frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{8} + \frac{1}{24} = \frac{1}{6}$$

$$T_{eff} = 6 \text{ nap}$$

A radioaktivitás statisztikus jelenség



Poisson-eloszlás: $\Delta A = \sqrt{A}$ \Rightarrow pontosabb mérés:
 nagyobb aktivitás
 hosszabb mérési idő

Az orvosi-biológiai gyakorlat számára legfontosabb magátalakulások jellemzői

Bomlási mód:		Távozik	Változás:	
Neve	Jele		Rendszám	Tömegszám
alfa	α	$2p+2n$ (${}^4_2\text{He}^{++}$)	-2	-4
béta	β^-	e^-	+1	0
pozitív béta	β^+	e^+	-1	0
elektronbefogás	EC	(kar. rtg.)	-1	0
izomer magátalakulás	γ	γ	0	0

A gamma-kamerás diagnosztika legfontosabb radionuklidjai

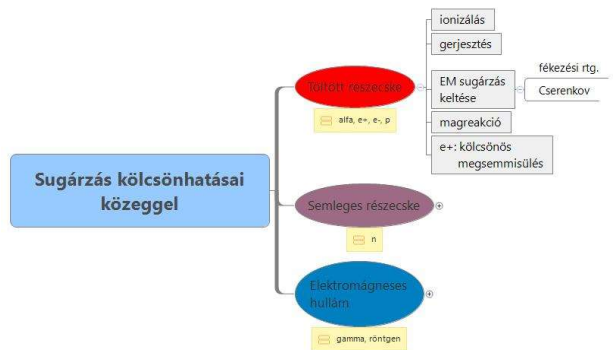
Nuklid	Felezési idő	Bomlási mód	Fotonenergia (keV)	P (%)
Ga-67	78.1 h	EC	93.3	38
			185	24
			300	16
Kr-81m	13.6 s	IM	190	
Tc-99m	6.03 h	IM	141	88
In-111	2.80 nap	EC	171	90
			245	94
I-123	13 h	EC	159	84
			96	7
I-131	8.06 nap	β^-	192	90
		γ	364	82
		X	65-82	
Tl-201	73.1 h	EC	135	2
		γ	167	8

Kutatólaborok leggyakoribb radionuklidjai

Radionuklid	Bomlásmód	Típus	E_{max} (keV)	$E_{\text{át}}$ (keV)	E_{γ} (keV)	E_{rtg} (keV)
H-3	β	12.32 év	18.59	5.68		
C-14	β	5700 év	156.5	49.5		
P-32	β	14.27 nap	1710.7	695.0		
S-35	β	87.37 nap	167.3	48.8		
Ca-45	β	162.61 nap	256	76.9		
I-125	EC	59.40 nap			35.5	27.4
I-131	β, γ	8.02 nap	606	192	364	

Az „in vitro” diagnosztika legfontosabb radionuklidja

Nuklid	Felezési idő	Bomlási mód	Energia (keV)	P (%)
I-125	59.4 nap	EC	186	
		X	27.2	40.6
		X	27.5	75.7
		X	30.9	20.3
		γ	35.5	6.7



Töltött részecskék kölcsönhatása a közeggel

IONIZÁCIÓ:

- Amikor a részecske a közegben levő molekulákkal ütközik, **ionpárokat** kelthet.
- Az ionizációs képesség mértéke a **fajlagos ionizáció** (az egységnyi úthosszon keltett ionpárok száma), amely a részecske és a közeg jellemzőitől egyaránt függ.

GERJESZTÉS:

- Az **ütközés** eredményeként az atom vagy molekula átmenetileg magasabb (gerjesztett) energia-állapotba kerülhet.
- Ennek megszűnése, a **legerjedés** fénykibocsátással is járhat; ezt a lumineszcenciát használjuk, pl. a kristályos detektorokban a sugárzás érzékelésére.

Elektromágneses sugárzás keltése

(a) Fékezési röntgensugárzás:

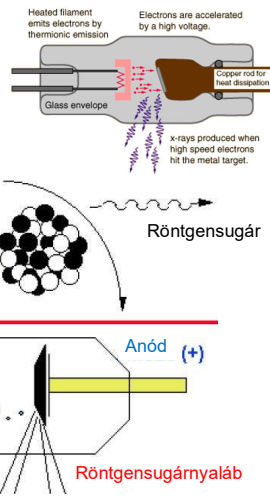
- A mozgási energia átadása következtében **folytanos** spektrumú röntgensugárzás jön létre.



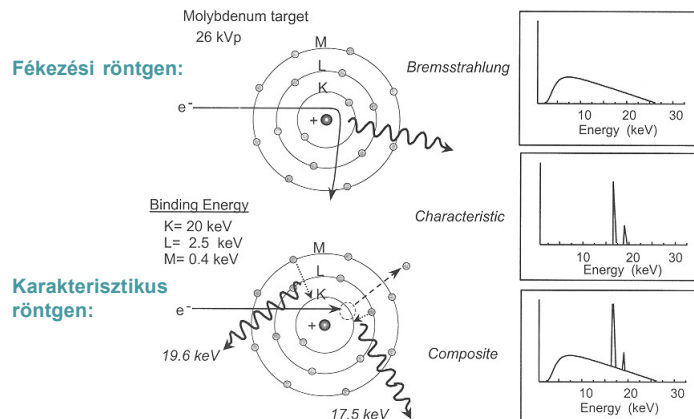
- Főként ezt használjuk a röntgen-diagnosztikában!**

- Ezt figyelembe kell venni pl. béta-sugárzás elleni árnyékolás készítésekor, amikor ólomlemez használva a lemez mögött álló személy nagyobb sugárdózist kaphat az ólomlemezben keletkező fékezési röntgensugárzás miatt, mint amennyit árnyékolás nélkül kapna.
- (Béta-sugárzás árnyékolására pl. plexi-lapot használhatunk.)

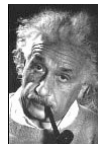
Fékezési röntgensugárzás keltése



Röntgenső kevert spektruma



Elektromágneses hullám



- Planck-állandó ($h=6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s): $E = h \cdot f$
- Tömeg-energia ekvivalencia: $E = m \cdot c^2$

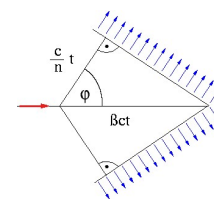
Mi a különbség a röntgen- és gamma-sugárzás között?

- Gamma-sugárzás:** magátalakulás során keletkezik (vagy szubatomi részecskék, pl. pozitron átalakulásakor)
- Röntgen (X):** az elektronhéjból
 - karakterisztikus röntgen: ha egy elektron alacsonyabb energiaszintre kerül (meghatározott energiák)
 - fékezési röntgen: töltött részecske lassulásakor elektromos térben (folytonos energiaspektrum)

Elektromágneses sugárzás keltése – folyt.:

(b) Cserenkov-sugárzás:

Ha a töltött részecske sebessége egy adott közegben nagyobb, mint ugyanott a fény sebessége, akkor elektromágneses (fény-) sugárzás jön létre. (Pl. atomreaktorok hűtővizében, stb.)



Ezt használhatjuk nagy energiájú β -sugárzás méréséhez kémcsőben!

$$\cos \varphi = \frac{1}{n\beta} = \frac{c'}{v}$$



Fizikai Nobel-díj, 1958

„A Cserenkov-hatás felfedezéséért és értelmezéséért”



Pavel Alekszejevics Cserenkov
1904-1990



Ilja Mihailovics Frank
1908-1990



Igor Jevgenyjevics Tamn
1895-1971

Magreakciók kiváltása

Nagy energiájú részecske becsapódása magreakciót is okozhat

- Egy töltött részecske nagy valószínűséggel már az elektronhéjjal kölcsönhatásba lép (a béta-részecske pedig a kis tömeg miatt sem vált ki magreakciót)
- A semleges részecskéknek (pl. neutron) nagyobb esélye van magával a maggal ütközni.
- Az orvosi-biológiai gyakorlatban használatos, béta- és gamma-sugárzást kibocsátó radioaktív készítmények nem váltanak ki magátalakulást, vagyis miattuk nem keletkezik radioaktív anyag.

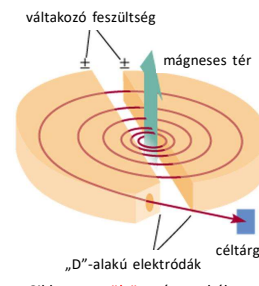
Mesterséges radioaktív anyag előállítása

- atomreaktorban (magas neutron-fluxus)
- gyorsítók felhasználásával (kör-körös: ciklotron) *drága!*

- Csillebérc
- Debrecen: 2
- Budapest: 1
- Kaposvár: 1



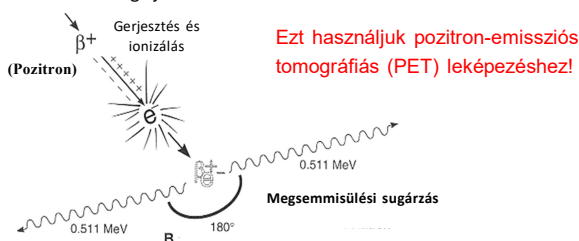
Ernest Lawrence
1901-1958 (Berkeley)
1931: a ciklotron feltalálója
1939: fizikai Nobel-díj



Ciklotron: töltött részecskéket gyorsít

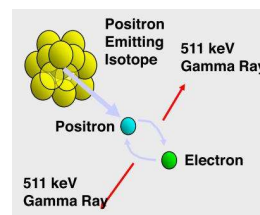
MEGSEMMISÜLÉS

- A (pozitív béta-sugárzásnál keletkezett) pozitronon a közeg egy elektronjával ütközve kölcsönösen megsemmisülhetnek
- Ilyenkor kettőjük teljes (nyugalmi + mozgási) energiáját két, ellentétes irányban elszálló gamma-fotonnak adják át.
- Mivel a két részecske együttes nyugalmi energiája 1022 keV, a gamma-fotonok energiája kb. 511 keV lesz.



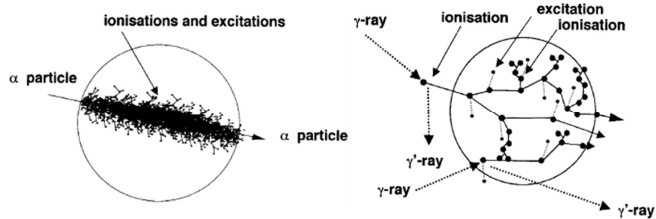
Pozitron-emissziós leképezés legfontosabb radionuklidjai

Nuklid	Felezési idő	β^+ energia (keV)	P_{β^+} (%)
C - 11	20.4 min	385	99.8
N-13	10 min	492	99.8
O-15	122 sec	735	99.9
F - 18	110 min	250	96.7
Ga-68	67.7 min	836	87.7
		352	1.2
Rb-82	75 s	1536	81.8
		1169	13.0
I-124	4.18 nap	687	11.7
		975	10.7



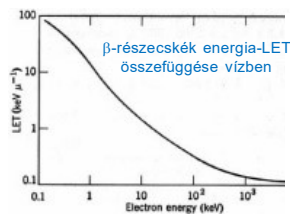
Forrás: NuDat 2.8

α- és β-részecskék kölcsönhatásai közeggel



Vonal menti energia-átadás (Linear energy transfer, LET)

- Definíció: távolságegységenként leadott energia
- Mértékegység pl.: keV/μm
- Nem állandó a részecske pályája mentén!
- A biológiai hatás a LET-értékkel változik

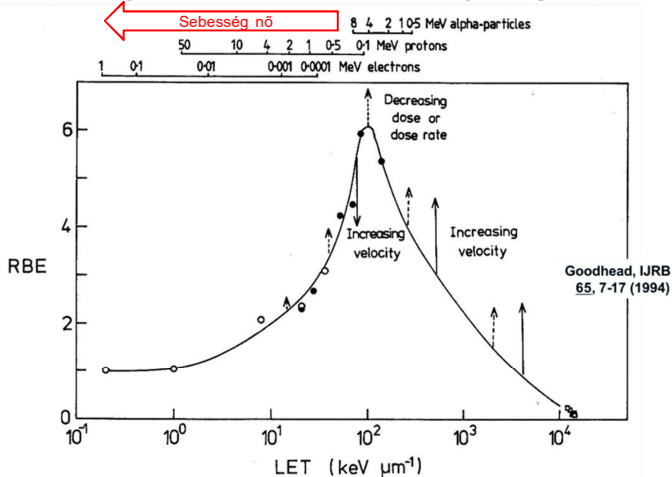


LET-érték vízben és sugárzási súlytényező összefüggése

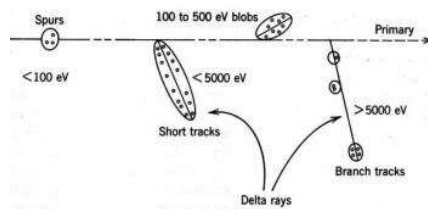
Sugárzástípusok és energia tartományok	Sugárzási súlytényező, W_R	LET-érték ($eV \cdot nm^{-1}$)
Gamma-sugárzás	1	0,2-3,5
Elektronok*, mionok	1	0,2-1,1
Neutronok, energia < 10 keV	5	20
10 keV - 100 keV	10	-
100 keV - 2 MeV	20	50
2 MeV - 20 MeV	10	-
> 20 MeV	5	-
Protonok, energia > 2 MeV	5	-
Alfa-részecskék, nehéz magok, hasadási termékek	20	130

* kivétel a DNS-ben kötött nuklidokból származó Auger-féle elektronok esetén.

Relative Biological Effectiveness for Cell Inactivation by Ionizing Radiations



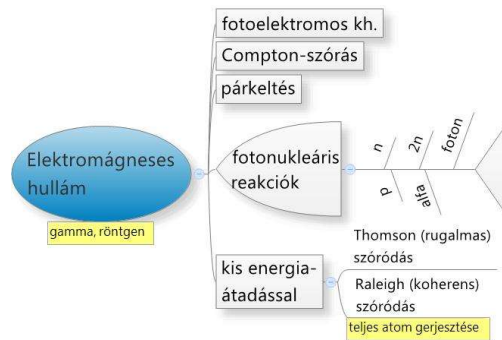
Ionpárok és gerjesztés egy gyors elektron pályája mentén vízben



(Forrás: Spinks and Woods)

Az ionizáló sugárzások forrásai

(a) Elektronok	béta-bomlás belső konverzió Auger-elektronok
(b) Nehéz részecskék (töltött)	alfa-bomlás spontán maghasadás
(c) Elektromágneses (foton) >12 eV energiával	gamma-sugárzás (béta-bomlást követően) megsemmisülési sugárzás fékezési röntgen karakterisztikus röntgen
(d) Neutronok	spontán maghasadás radioizotópok foto-neutronok reakciók gyorsított töltött részecskékkel



Fotoelektromos kölcsönhatás

$E_{\text{photon}} = h\nu$

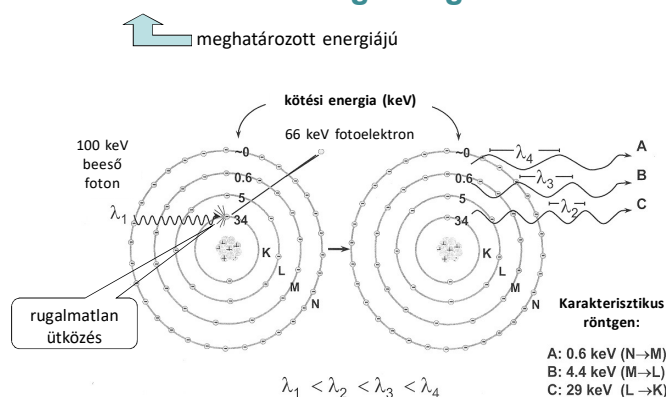
700 nm 1.77 eV
550 nm 2.25 eV
400 nm 3.1 eV

no electrons
 $v_{\text{max}} = 2.96 \times 10^5 \text{ m/s}$
 $v_{\text{max}} = 6.22 \times 10^5 \text{ m/s}$

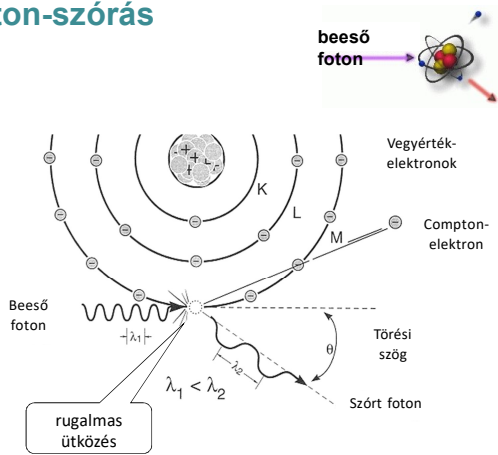
Na: 2.0 eV szükséges az elektron kilövéséhez

Albert Einstein
The Nobel Prize in Physics 1921

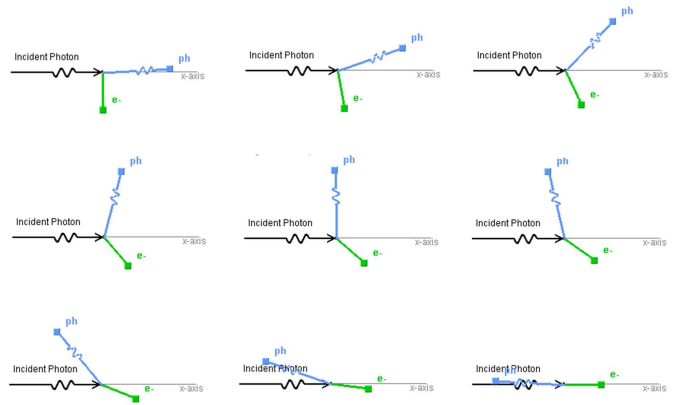
Fotoelektromos kölcsönhatás (I-131) és karakterisztikus röntgensugárzás keltése



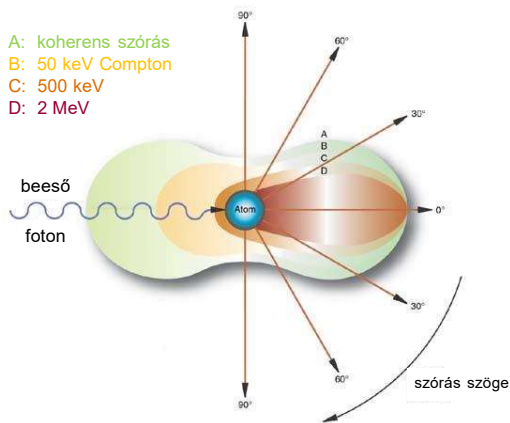
Compton-szórás



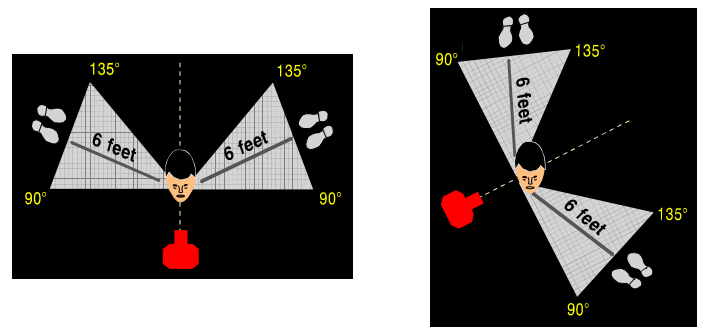
Compton-szórás: irányok



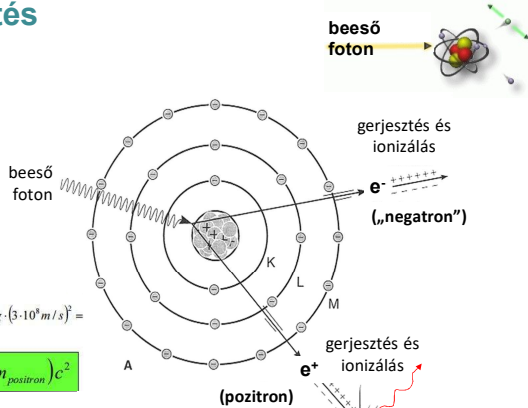
Szögegységre eső szórt fotonok száma különböző energiákon



Következmény: legbiztonságosabb pozíció fogászati röntgennél

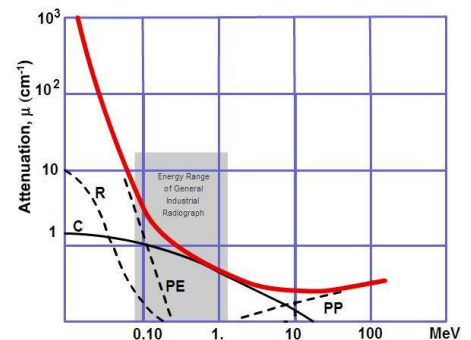


Párkeltés

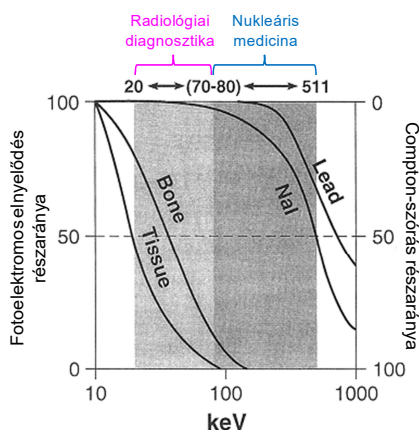


Röntgen- és gamma-foton elnyelődési formái vasban

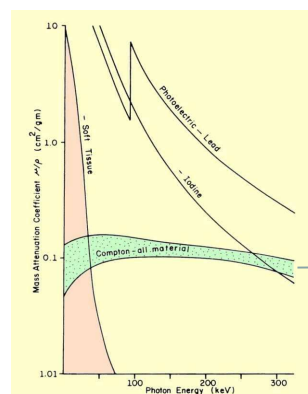
- fotoelektromos kölcsönhatás (PE) (rugalmatlan)
- Compton-szórás (C) (rugalmas; inkoherens)
- párkeltés (PP)
- Thomson- v. Rayleigh-féle (rugalmas; koherens) szórás (R)



Compton-szórás és fotoelektromos kölcsönhatás részaránya



Fotoelektromos és Compton-kölcsönhatás

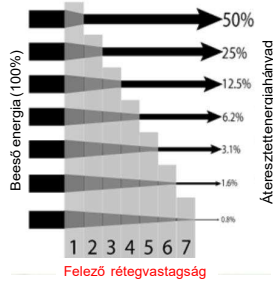


A tömegeségre jutó Compton-szórás:

- független az anyagi minőségtől
- alig függ a fotonenergiától

Elektromágneses sugárzás elnyelődése közegben

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu d} = N_0 \cdot 0.5^{d/d_{1/2}}$$



Részecskesugárzás maximális hatótávolsága

Részecske:	levegőben	vízben (testszövetben)
alfa	~ cm	< 0.1 mm
béta	~ m	1 - 10 mm
10-20 MeV-os elektron	~ 10 m	~ cm

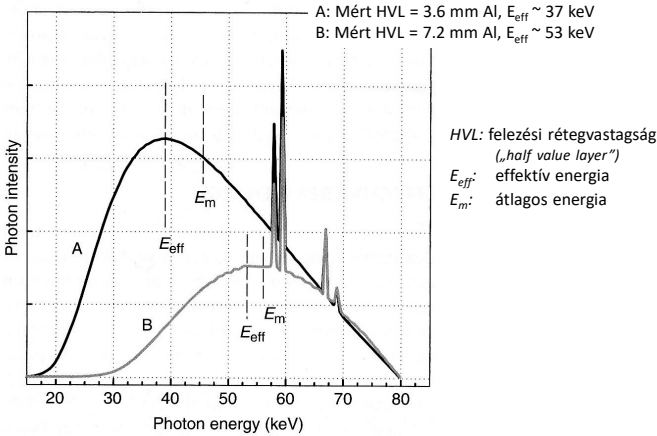
Példa: sugárgyengítés ólomban

	Tc-99m	I-131	Ir-192	Cs-137	Co-60
bomlási mód	IM	β-	β-, EC	β-	β-
gammaenergia (keV)	141	364	317 468	662	1332 1173
felező réteg (mm)	0.27	3	5.5	6.5	11
tizedelő réteg (mm)	0.83	10	19	22	40

<https://www-nds.iaea.org/relmsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

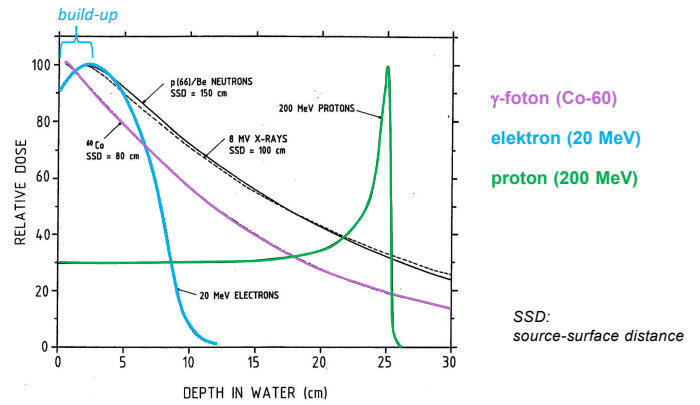
Nyalábkeményedés

Energiaspektrum 80 kVp röntgen szűrése előtt és után



HVL: felezési rétegvastagság („half value layer”)
 E_{eff} : effektív energia
 E_m : átlagos energia

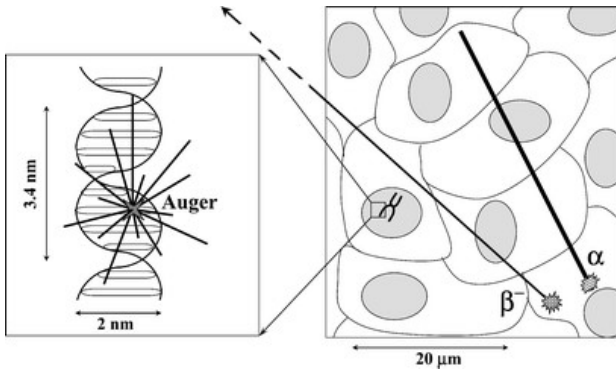
Foton- és elektronnyaláb energialeadása



γ-foton (Co-60)
 elektron (20 MeV)
 proton (200 MeV)

SSD: source-surface distance

Sugárzások hatótávolsága



α, β- és γ-sugárzás: példák Mi meddig jut el?

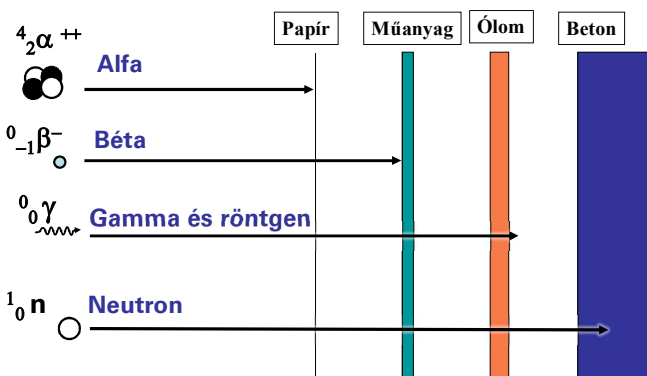
Radioizotóp	Sugárzás	Energia (MeV)	Hatótávolság v. átlagos szabad úthossz vízben és testszövetben (mm)	
Urán-238	alfa	4.2	Hatótávolság: 0.027	
Polónium-210		5.3		0.037
Szén-14	Béta	0.154 max.	Max. úthossz: 0.29	
Foszfor-32		1.71 max.		8
Jód-125	gamma	0.035	Felezési rétegvastagság: 23	
Tc-99m		0.141		46
Kobalt-60		1.33		114

felezési rétegvastagság: $X_{1/2}$
 átlagos távolság: L
 sugárgyengítési együttható: μ

$$X_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$L = \frac{1}{\mu} = \frac{X_{1/2}}{\ln 2}$$

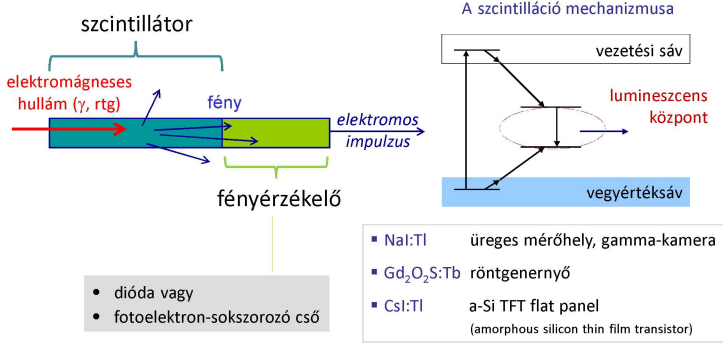
Árnyékolás



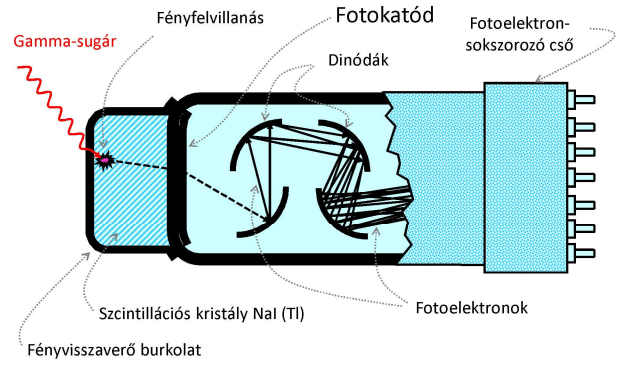
Sugárzásmérés módjai és céljai

- Impulzus-mód:** minden egyes kölcsönhatás különálló feldolgozása pl.: scintillációs számláló
- Áram-mód:** az egyes kölcsönhatások következtében létrejövő elektromos impulzusok átlagolása pl: gázionizációs dózisintenzitás-mérő
- Becsapódások száma a detektorban: **számláló**
- A sugárzás energia szerinti megoszlása: **spektrométer**
- A kölcsönhatások során átadott energia: **doziméter**

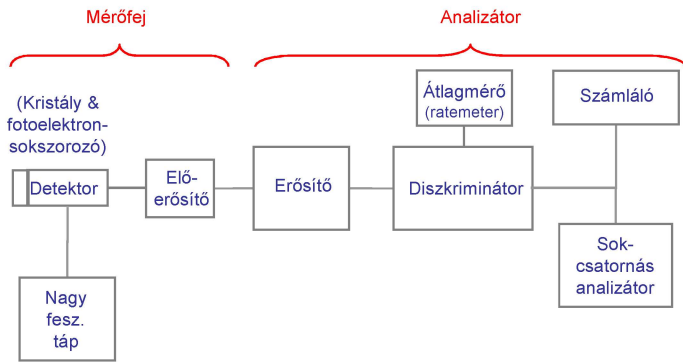
Szintillációs detektor



Szilárd szcintillációs kristályos detektor

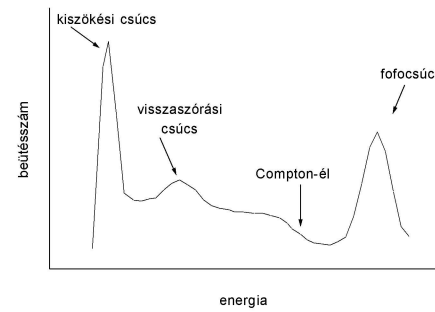


Általános szcintillációs mérőhely részei



Spektrum

az impulzusok gyakorisága a jel nagyság függvényében



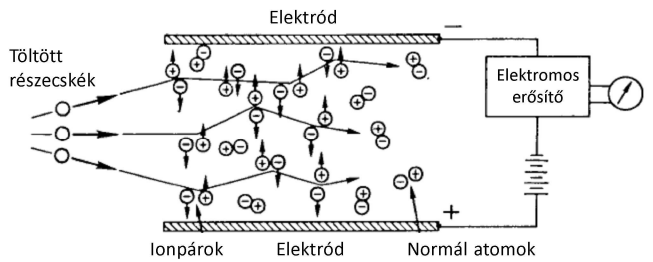
Szcintillációs detektálás

- Radioaktív minta: eseményenként
- Röntgen-nyaláb: gyűjtve

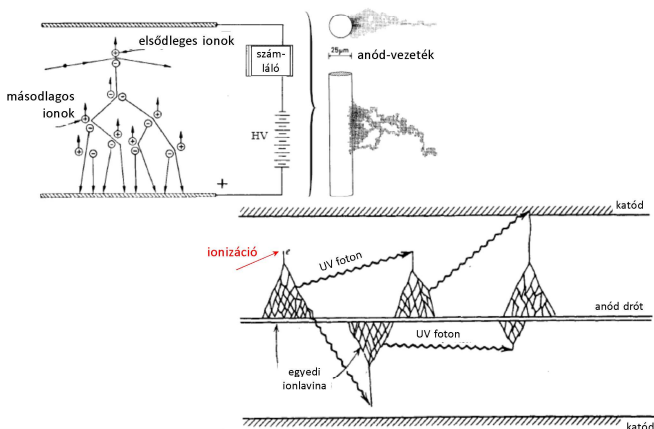
Röntgen-detektorok

- Film
- Képerősítő (IIT)
- Photostimulable phosphor plate (PSP) film helyett lézerrel kiolvasható digitális képképzés!
- Flat panel (FPD) töltésfelhalmozás -> kiolvasás

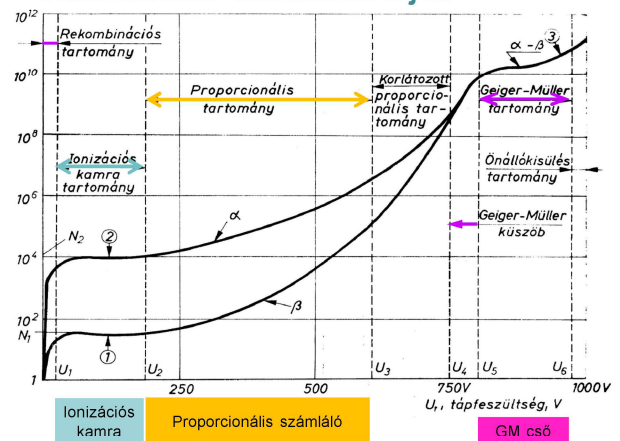
A gázionizációs detektor elve



Gázerősítő



Gázionizációs detektorok fajtái



Gázsokszorozás: nincs, 10⁶, 10⁸ - 10¹⁰

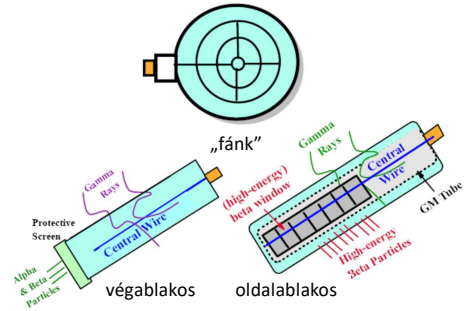
Aktivításkalibrátor („dose calibrator”)

Kalibrációs tényező minden radionuklid – edény - mintatérfogat kombinációra

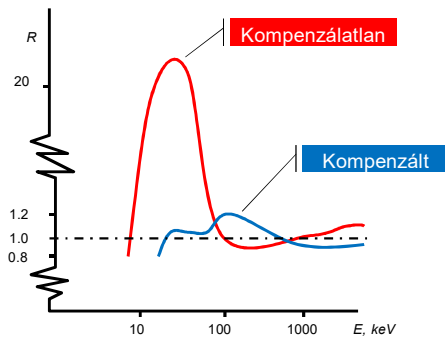
Pl.: Tc-99m vizes oldata
2 ml-es műanyag fecskendőben
1 ml térfogatban



GM-csővek típusai



GM-cső energiafüggése: Kompenzáló árnyékolás szerepe

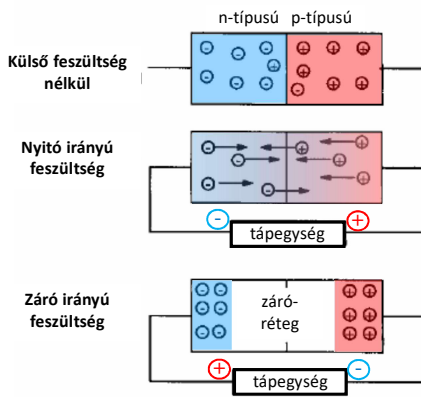


Széles gammaenergia-tartományban 20%-on belüli relatív érzékenység

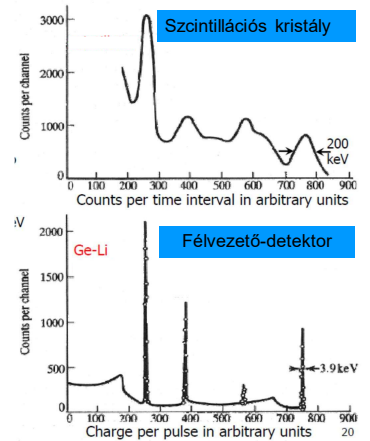
A gáztöltésű detektorok előnyei és hátrányai

- **Ionizációs kamra:**
 - egyszerű, pontos
 - széles energiataromány,
 - az érzékenység a kamra méretétől függ, viszonylag alacsony
 - nincs holtidő
- **Proporcionális számláló:**
 - megkülönbözteti a nagy és kis LET-értékű sugárzást
 - nagyobb érzékenység az ionizációs kamráénál
- **GM cső:**
 - olcsó
 - nem szükséges további erősítés
 - vékony ablak alacsony energiához
 - korlátozott élettartam

Félvezető állapotai



Összehasonlítás: spektrumok



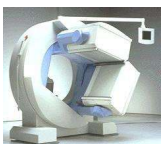
Dózismérők

Személyi

effektív dózis; kéz, szem dózisa
szennyeződés: testfelszín, ruhák

Munkahelyi környezet

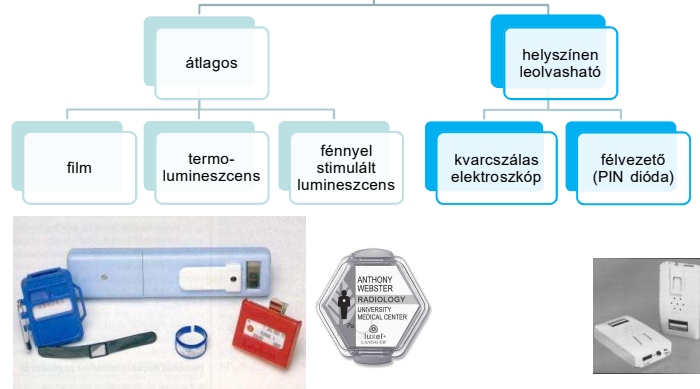
a környezeti sugárzás dózisintenzitása;
felületek szennyeződése

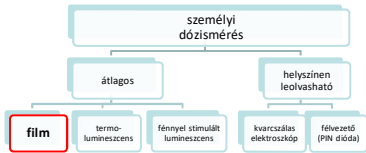


testbe került sugárzó anyag mérése gamma-kamerával

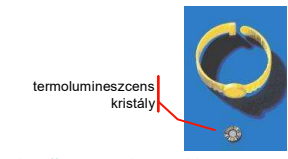
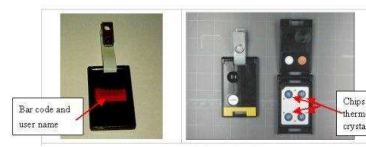
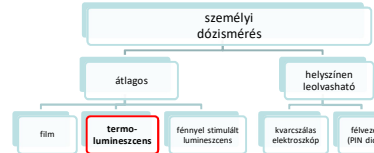


személyi dózismérés



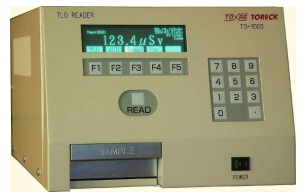


Réteg	Mit nyel el?	Mit mér?
1. nyitott ablak		mindent
2. vékony műanyag	β	minden mást
3. vastag műanyag	lágú foton	többi foton + nagy energiájú β
4. duralumínium	β ; <65 keV foton fokozatosan	többi foton
5. ón/ólom		energiafüggetlen 75 keV - 2 MeV fotonra
6. kadmium-ólom	a Cd neutron-befogása γ -kibocsátással	neutron



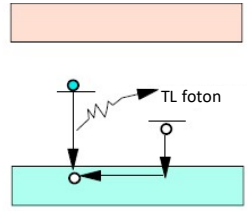
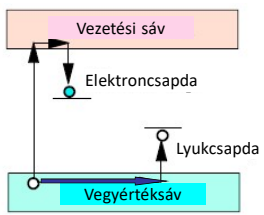
egésztet-dózis méréséhez

kiolvasás: melegítéssel



<http://www.weather.gov.hk>

Termolumineszcens dózismérő

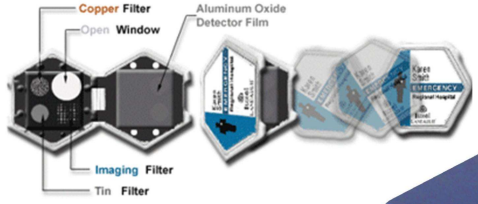
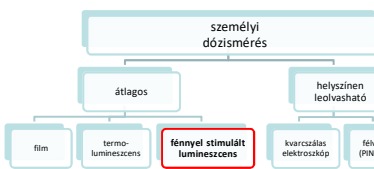
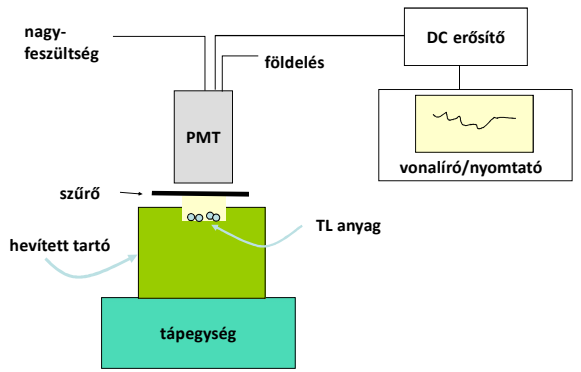


Ionizáló sugárzásnak kitéve

Fűtés hatására a csapda kiürül, egy TL fotont kibocsátva.

A példában az elektroncsapda a kibocsátás központja.

TLD kiolvasó



kiolvasás: lézerrel

https://apps2.campuservices.harvard.edu/ehs/radiation/how_dosimeter.shtml

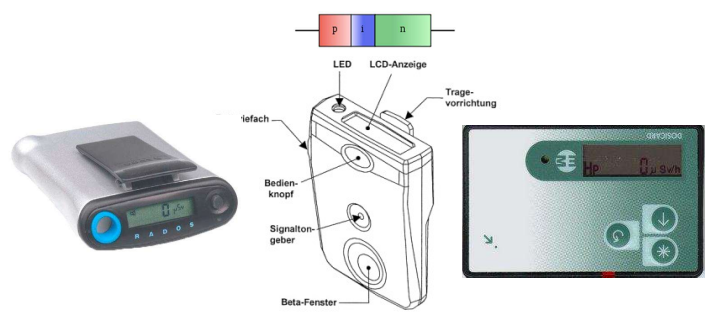
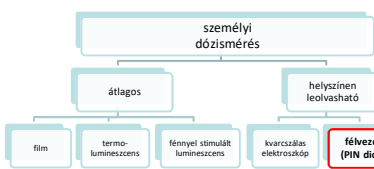
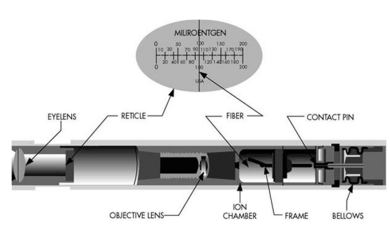
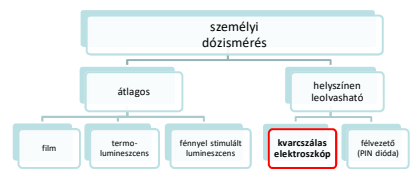


TABLE 9.1. Radiation Effects Used in the Detection and Measurement of Radiation

Effect	Type of Instrument	Detector
Electrical	1. Ionization chamber	1. Gas
	2. Proportional counter	2. Gas
	3. Geiger counter	3. Gas
	4. Solid state detector	4. Semiconductor
Chemical	1. Film	1. Photographic emulsion
	2. Chemical dosimeter	2. Solid or liquid
Light	1. Scintillation counter	1. Crystal or liquid
	2. Cerenkov counter	2. Crystal or liquid
Thermo-luminescence	Thermoluminescent dosimeter (TLD)	Crystal
Heat	Calorimeter	Solid or liquid

Detektortípusok

Detektálás elve	Berendezés típusa	Alkalmazások
Levegő (vagy más gáz) ionizálása, elektron-sokszorozással a detektorban	Ionizációs kamra (IC)	Dózis és dóziszintenzitás közvetlen mérése, minimális energiafüggéssel
	Geiger-Müller (GM)	Egyedi becsapódások érzékelése (alfa, béta, másodlagos elektron) aktivitásmérés céljából (mintákban és felületen)
	Proporcionális számláló (PC)	Alacsony intenzitású röntgen- és gamma-sugárzás detektálása
Félvezető ionizálása	Félvezető dióda	Fotonok és részecskék detektálása és energiájának mérése, főleg laboratóriumban

Detektortípusok – folyt.

Detektálás elve	Berendezés típusa	Alkalmazások
Ionizálást és gerjesztést követő fénykibocsátás	Szcintillátorok	Egyedi becsapódások érzékelése
	- szilárd	- NaI (Tl) - fotonok; energia-spektrometria - ZnS (Ag) – alfa-részecskék; csak detektálás
	- folyadék	- Alacsony energiájú béta-sugárzók mérése, szcintillátor-folyadékkal összekeverve
AgBr ionizálása	Film	Röntgenfilm Személyi dozimetria Autoradiográfia nyomdetektor
Kristály gerjesztése; fénykibocsátás felmelegítés hatására	Termolumineszcens detektor (TLD)	Személyi és környezeti dózismérés.

Elektromágneses hullám élő szövetben

Az élettani hatáshoz a sugárzási energiának el kell nyelődnie a testben. Ehhez olyan energiaszint-párnák kell jelen lennie, amelyek különbsége a foton energiájának megfelelő.

