



NNGYK
NEMZETI NÉPEGÉSZSÉGÜGYI
ÉS GYÓGYSZERÉSZETI KÖZPONT

Külső sugárterhelés

Elek Richárd

elek.richard@nngyk.gov.hu; +36 1 896 0123

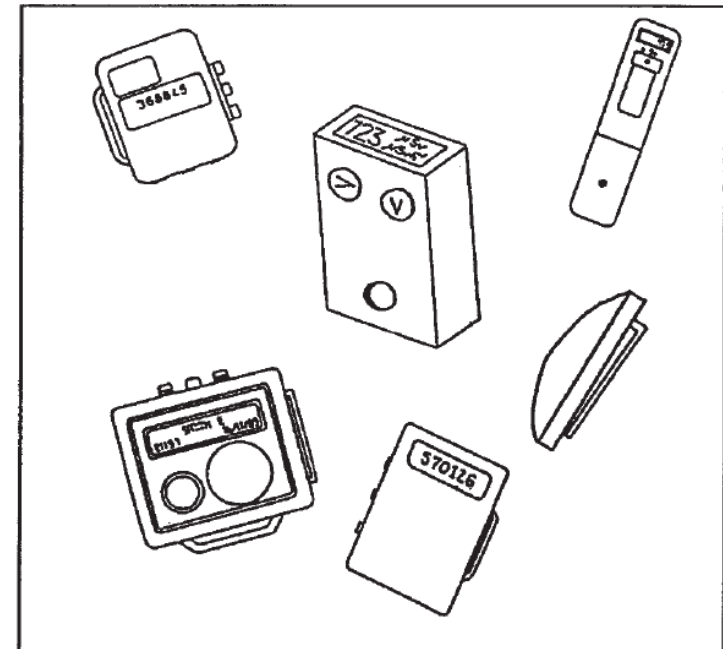
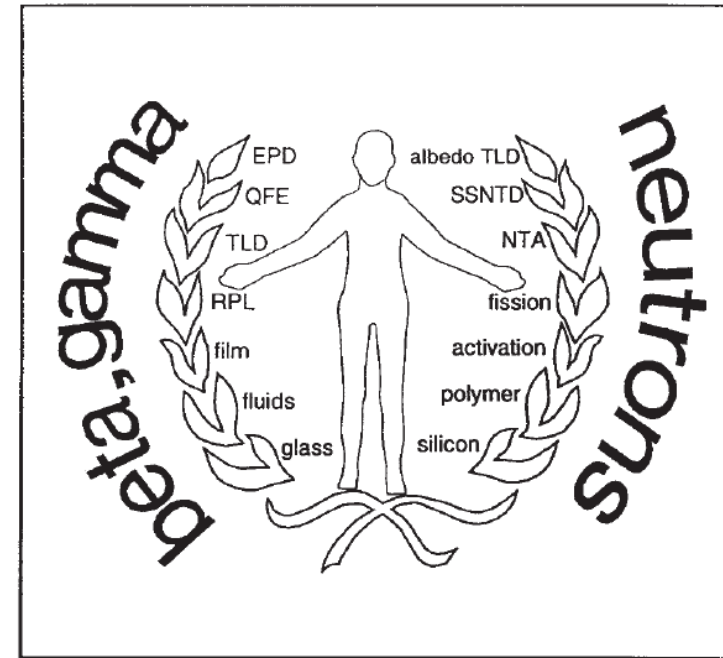
Nemzeti Népegészségügyi és Gyógyszerészeti Központ

Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Főosztály

Országos Személyi Dozimetriai Szolgálat

Tartalom

- Történeti áttekintés
 - A sugárvédelem (és korlátozás) fejlődése
 - A foglalkozási sugárterhelés mérésének célja
- A külső sugárterhelés meghatározásának módszerei
 - A külső sugárterhelés becslése
 - Passzív mérőeszközök
 - Aktív mérőeszközök
- A foglalkozási sugárterhelések nyilvántartása
- Nemzetközi kitekintés, ISO 24426



Történeti áttekintés – a kezdetek

- A röntgensugárzás (1895) és a radioaktivitás (1896) felfedezését követő évek tapasztalatai vezettek a felismeréshez, hogy a sugárzás az egészségre káros hatású
- „Röntgenkéz”; Rádium-lányok



Röntgen rays and electro-therapeutics - with chapters on radium and phototherapy (1910) – CC-BY-SA 3.0



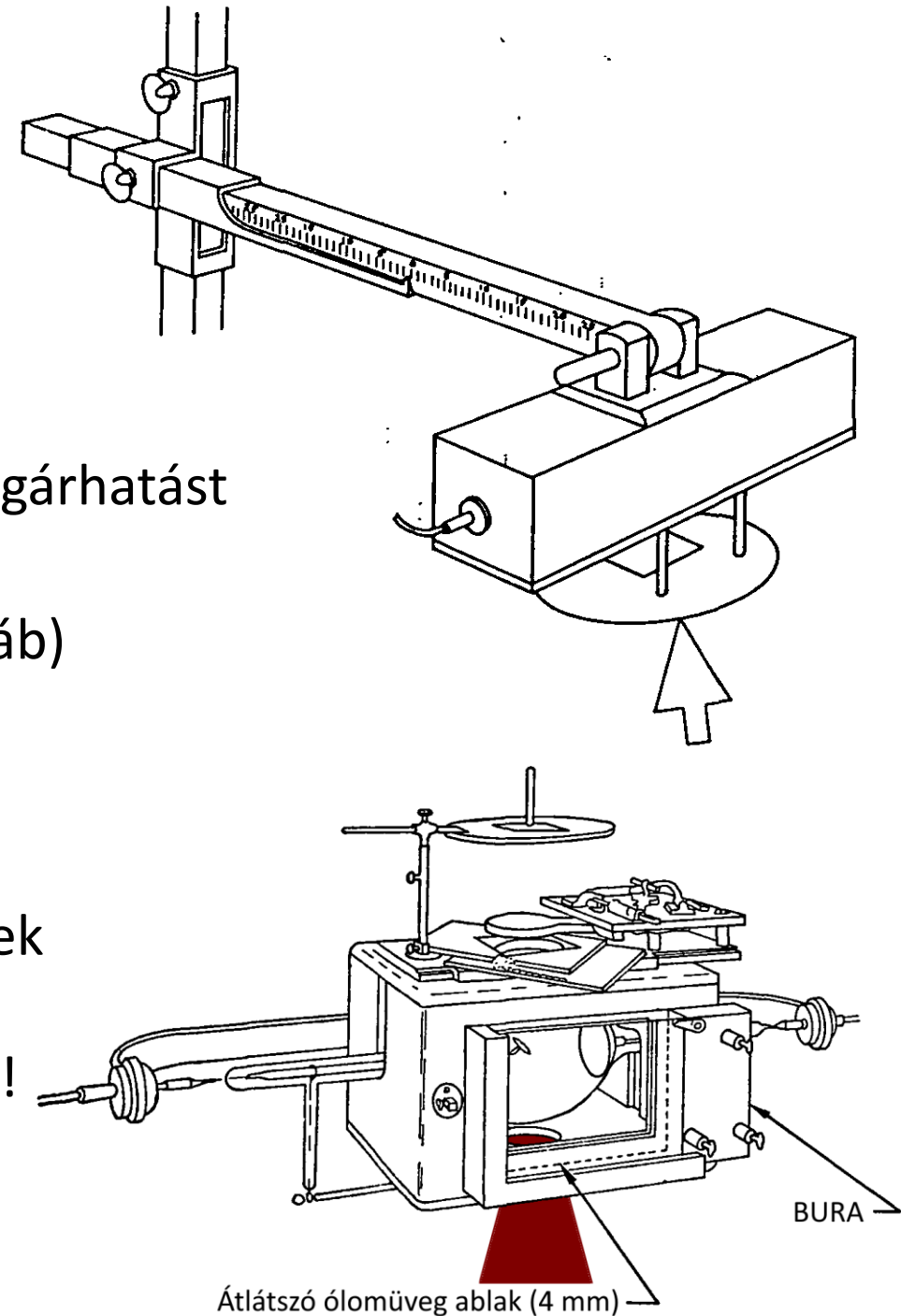
Radium Dial Company, ismeretlen alkotó



Emléktábla a hamburgi Szt. György kórházban. Ajepbah (wikimedia commons) – CC-BY-SA 3.0

Intelmek – William H. Rollins

- “Notes on X-light”;
 - Tengeri malacokon először igazolt kísérletesen sugárhatást
 - A sugármezőt korlátozni kell (1901): kollimátor
 - A röntgenső káros sugárzásai (mezőn kívüli nyaláb) csökkenthető egy megfelelő ólomburával (1904)
 - Ólomüveg szemüveg használata átvilágításhoz
 - Fogászati felhasználások
 - A nyaláb szűrését javasolta, később ezt Pfahler-nek tulajdonította a tudománytörténet – tévesen.
 - NEM ő javasolta a “tolerancia-dózis” bevezetését!



Sugárvédelmi dóziskorlátok I.

- 1925: I. Nemzetközi Radiológiai Kongresszus:
International X-ray Units Committee: a röntgensugárzás (ionizáló sugárzás) mérésének mértékére bevezeti a Röntgen-t, mint mértékegység, a "Interim Report of the Committee on Standardisation of X-ray Dosage" (J. Rontgen Soc. 1915, Vol XI, 102-110) alapján.
- Kvantitatív megfigyelések alapján határozták meg a korlátot
- 1928: II. Nemzetközi Radiológiai Kongresszus. Megszületik:
 - ICRP: Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság
 - ICRU: Radiológiai Egységek és Mérések Nemzetközi Bizottsága
 - ICRE: Sugárvédelmi Képzés Nemzetközi Bizottsága (ma is létezik, inaktív)

Sugárvédelmi dóziskorlátok II.

- Erythema-dózis

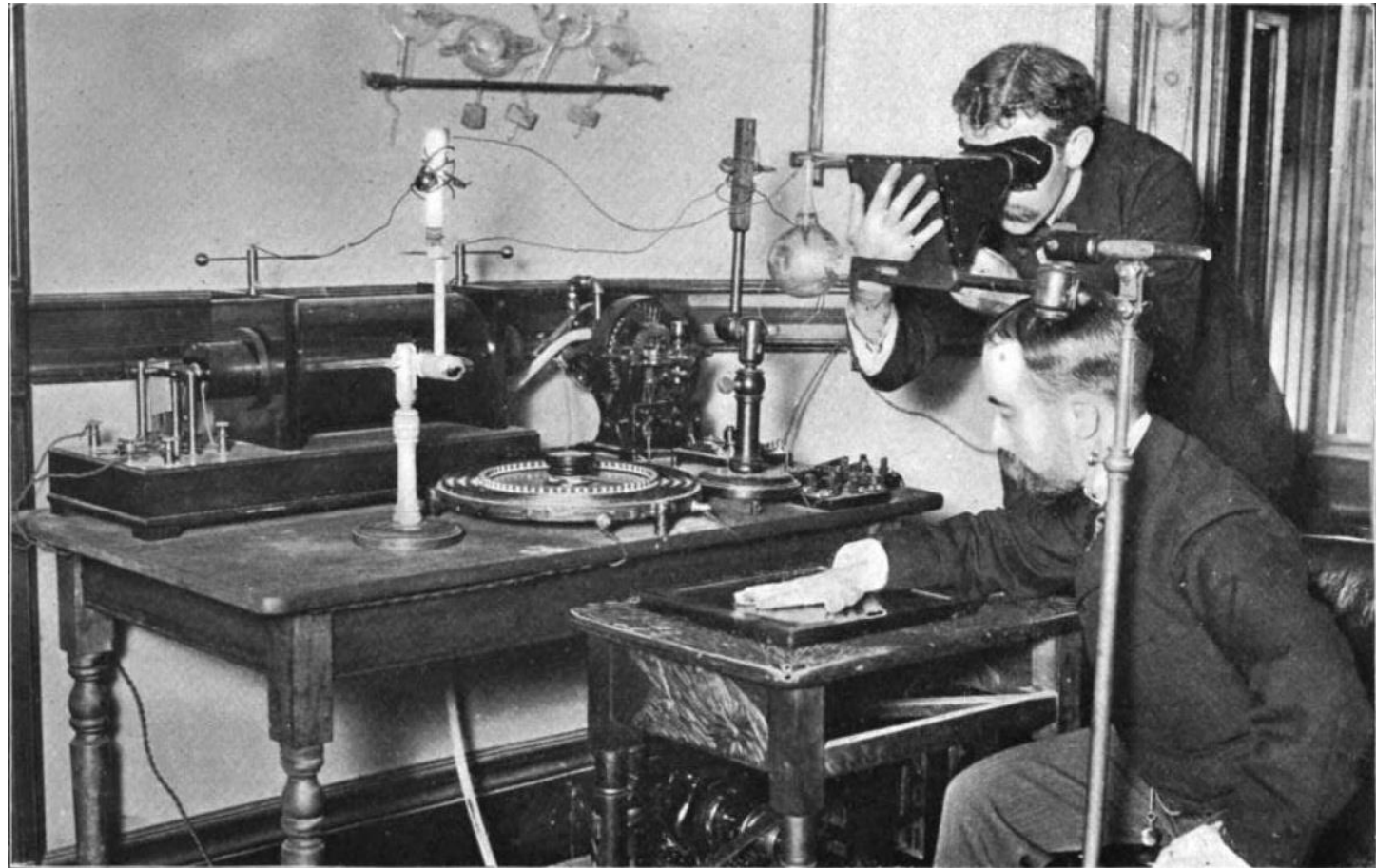
Az a dózis, mely röviddel (kb. 20 perc) a besugárzás után bőrpírt okoz 180...200 kV csőfeszültség, 1mm Al egyenértékű szűrés és 6 x 8 cm² mezőméret mellett a bőr felületén

kb. 600 R $\approx$ 5,76 Gy bőrfelszíni dózis

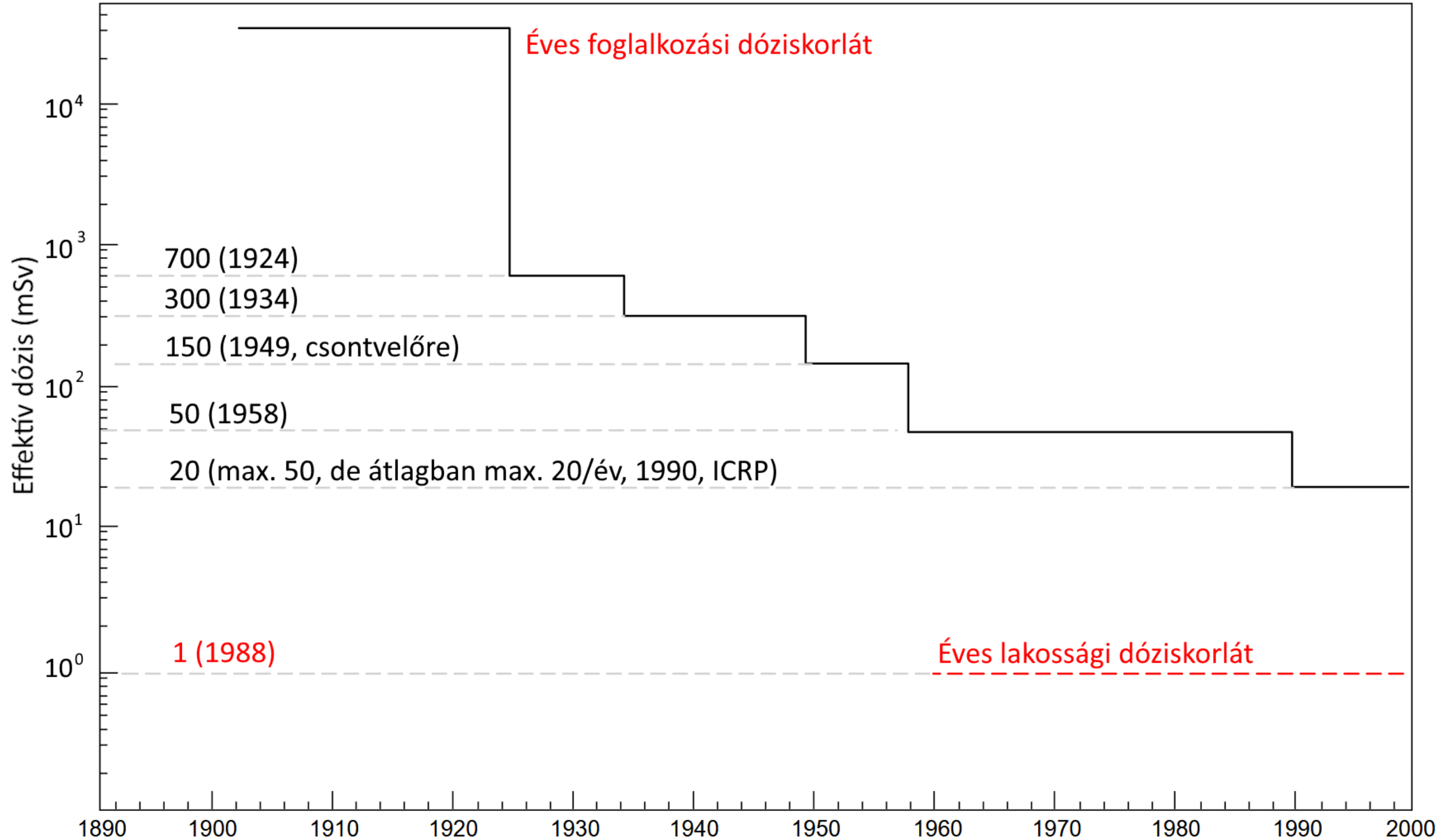
- Javaslat: „Tolerancia dózis = A röntgenorvosok és asszisztensek egyhavi dózisa ne lépje túl az erythema-dózis egy századát”
(„Physical Standards of Protection Against Roentgen Ray Dangers”
A. Mutscheller, 1924)
- 0,1 R/nap (kb. 0,88 mGy/nap): U.S. Advisory Committee on X-ray and Radium Protection (1934)

Dózisteljesítmény védelem nélkül (1920-as évekre, becslés)

- Átvilágító orvos: 6...60 mGy/perc a kezet érő dózis; 60...600 μ Gy/perc egésztest dózis.
- Röntgentechnikus: kb. 60 μ Gy/perc egésztest dózis.
- Rádiumterapeuta: 60...600 μ Gy/perc egésztest dózis.



Fotó: William J. Morton: The X-ray; or, Photography of the Invisible and Its Value in Surgery 1923 előtt nyilvánosságra hozott anyag (USA)



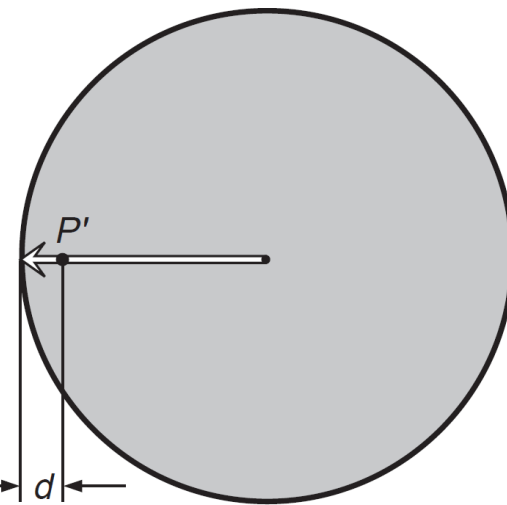
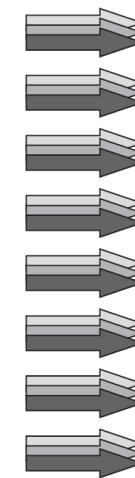
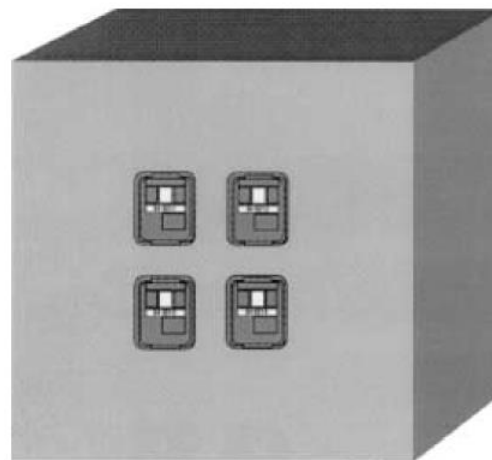
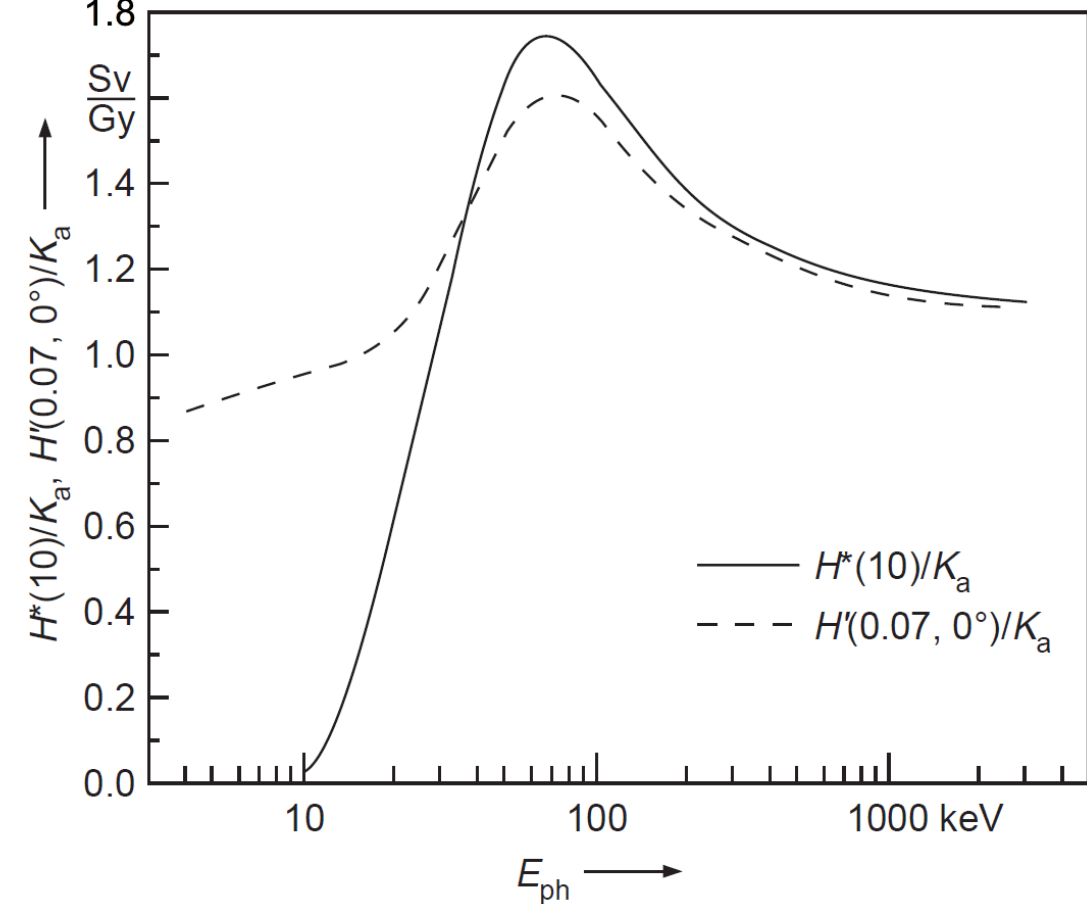
Régi használati fizikai dózismértékek

Mennyiség	Mértékegység	Megfeleltetés	Megjegyzés
Villard (1908)	1 esu/cm ³	1 röntgen (R); 1 esu = 10 ⁻⁷ J.	standard körülmények között kiváltott ionizáció
Röntgen (1928-ig)	2,58×10 ⁻⁴ C/kg, R	8,8 mGy levegőben, 9,6 mGy lágy szövetben	Ekvivalens a Villard-dal.
„Francia” röntgen (1910-30)	0,444 („német”) R	3,9 mGy levegőben, 4,26 mGy lágy szövetben	-
„GOST” (szovjet) röntgen, 1934	83 erg/g	8,77 mGy levegőben, 9,57 mGy lágy szövetben	lágyszövetre, GOST 7623; „fizikai dózis”, nem „keltett ionizáció”
erg per gramm	erg/g	0,1 mGy	-
rad (1953-)	100 erg/g	10 mGy	ma már csak USA!
Gray (1974-)	J/kg	-	SI egység. Mindenre!

Mérendő mennyiség, ma

Operatív dózismennyiségek

- Személyi dózisegyenérték:
 - $H_p(d)$: $H_p(0,07)$; $H_p(3)$, $H_p(10)$;
 - Személyi monitorozásra.
- és környezeti dózisegyenérték:
 - $H^*(d)$: $H^*(0,07)$; $H^*(3)$, $H^*(10)$;
 - Munkahelyi terekre.
- A $H_p(d)$ és $H^*(d)$ értéke a $Q(L)$ tényezőn alapul.



A külső sugárterhelés meghatározása I.

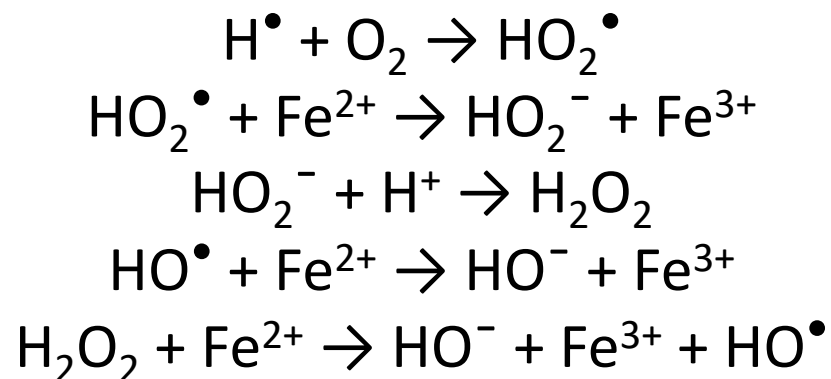
- Becsléssel: „Sztenderd összefüggések” (ICRP 116 alapján); koncepcióként: Monte Carlo módszerekkel, AI-támogatású kamerákkal („online” dozimetria)*.
- Területi monitorozási eredményekből (szórtsugárzás-mérő, TLD, OSL)
- Passzív doziméterrel (területi monitorozóként is):
 - Kémiai-elvű doziméter (pl. Sabouraud);
 - Film (nyomdetektor);
 - Lumineszcencia elvű doziméterek:
 - Termolum. (TL): LiF:Mg, Cu, P; CaF:Dy; CaF₂:Mn; ⁶Li/ ⁷Li:Mg, Ti; CaSO₄:Dy; CaSO₄:Tm; ⁿLi₂B₄O₇;
 - Optikailag stimulált lum. (OSL): Al₂O₃:C; BeO; NaMgF₃:Eu (kísérleti);
 - Radiofotolumineszcencia (RPL): SiO₂:Ag (Chiyoda Tehcnol)

*A Almén, M Andersson, U O'Connor, M Abdelrahman, A Camp, V García, M A Duch, M Ginjaume, F Vanhavere, Personal dosimetry using monte-carlo simulations for occupational dose monitoring in interventional radiology: the results of a proof of concept in a clinical setting, *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 195, Issue 3-4, October 2021, Pages 391–398, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab045>

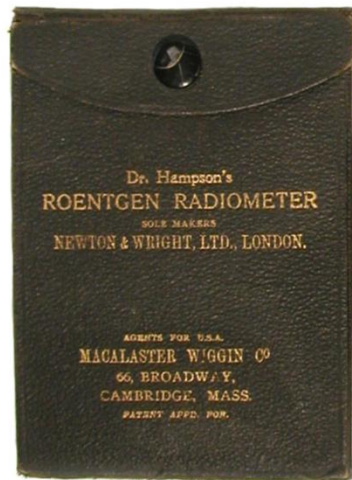
Zhang, S., Tang, K., Fu, L. *et al.* NaMgF₃:Eu with improved OSL properties prepared by a simple solid-state method. *Appl. Phys. A* **131**, 159 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00339-025-08290-8>

Kémiai elvű doziméterek I.

- Korai módszer, a „színváltás” az alapja, pl. kálium-dikromáttal
- Sabouraud és Noire 1904-ben, apró pasztillák formájában: $\text{Ba}[\text{Pt}(\text{CN})_4]$ (bárium-platinocianid) $\rightarrow$ sugárzás hatására zöldről sötét sárgás-narancs
- 1930-tól a vas-szulfát („Fricke-doziméter” = „mindenféle vasvegyület”) terjedt el $\rightarrow$ sugárzás hatására a Fe^{2+} ionból Fe^{3+} keletkezik:



Directions for Using DR. HAMPSON'S Roentgen Radiometer



No. 281. Code Word, Plenty

Price, \$12.00

DR. HAMPSON'S RADIOMETER has been designed to provide a means of measuring the dosage of X-Rays for skin treatment much more accurately than has hitherto been possible.

It consists of a series of twenty-five very carefully graded tints, which represent the color assumed by a pastille of platinum barium cyanide under the action of X-Rays.

The initial or zero tint is the color of the unexposed pastille and the sixteenth change represents the browner shade of color, equivalent to the maximum or B tint of a pastille as employed by Dr. Sabouraud.

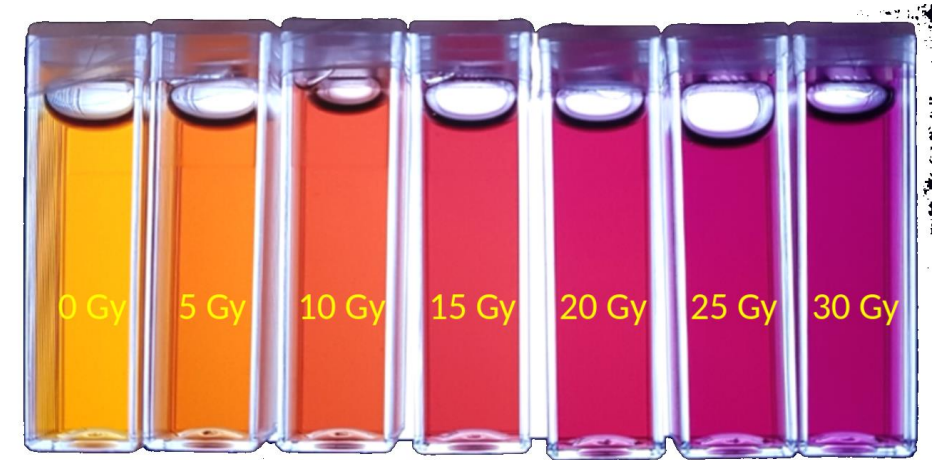
The Radiometer consists of these tints arranged upon a circular card, the latter being enclosed in an outer case. This case has a small aperture cut in it, through which the tints can be successively viewed one at a time, and the aperture is so shaped that the sensitive pastille can be placed in close proximity to the tint; the tint card being rotated by the thumb until an exact match in color has been obtained.

Another small opening exposes to view a series of numbers, ranging from 0 to 24, whereby the tints can be identified. The whole is covered with black cloth in order that there may be no outside factor to detract from very sensitive color perception.

It is well known by those who are familiar with treatment applications that the ordinary Sabouraud pastille shows two different shades, according as it is viewed by artificial light or by daylight. The tints are so arranged

Kémiai elvű doziméterek II.

- Manapság: leukovegyületek: külső hatásra megváltozik a molekula szerkezete a vegyület két lehetséges kémiai formája között. Ezek egyike legtöbbször színtelen. Változást okozhat: hő- vagy fényhatás, sugárzás, pH változás.
- tetrazolium (fehér-vörös átmenettel, patológiára);
- triarilmetánok (ételszínezék).
- Monomer-polimer reakciós doziméterek ide tartozik a radiochromic és a Gafchromic film is!



Fricke-zselé minták 30 Gy besugárzásig
(balról jobbra) 5 Gy lépésekben.

Filmdoziméterek

- 1900-as évektől
- Czunft Vilmos (1936, Eötvös Lóránd Röntgen és Rádium Intézet →)
- OOI 1965-től; OSSKI (OSZDSZ) 1967-től



Eötvös Lóránd rádium- és röntgenintézet.



Filmdozimetria

- AgBr (5-10% AgI)
- Speciális érzékenyítés (ritkaföldfémekkel)
- „gyors és lassú” emulzió
0,1-160 mSv és 1-4000 mSv

Látens kép: $\text{Ag}^+ + \text{Br}^- + h\nu \longrightarrow \text{Ag}^0 + \text{Br}$

Előhívás: $\text{Ag}^+ + \text{R}^- \longrightarrow \text{Ag} + \text{R}$

Stop: $\text{R}^- + \text{H}^+ \longrightarrow \text{X}$

Fixálás: $\text{AgBr} \longrightarrow \text{Ag}^+(\text{aq})$



védőréteg (1-2 μm)

gyorsemulzió (10-20 μm)

Filmalap (0,2 mm)

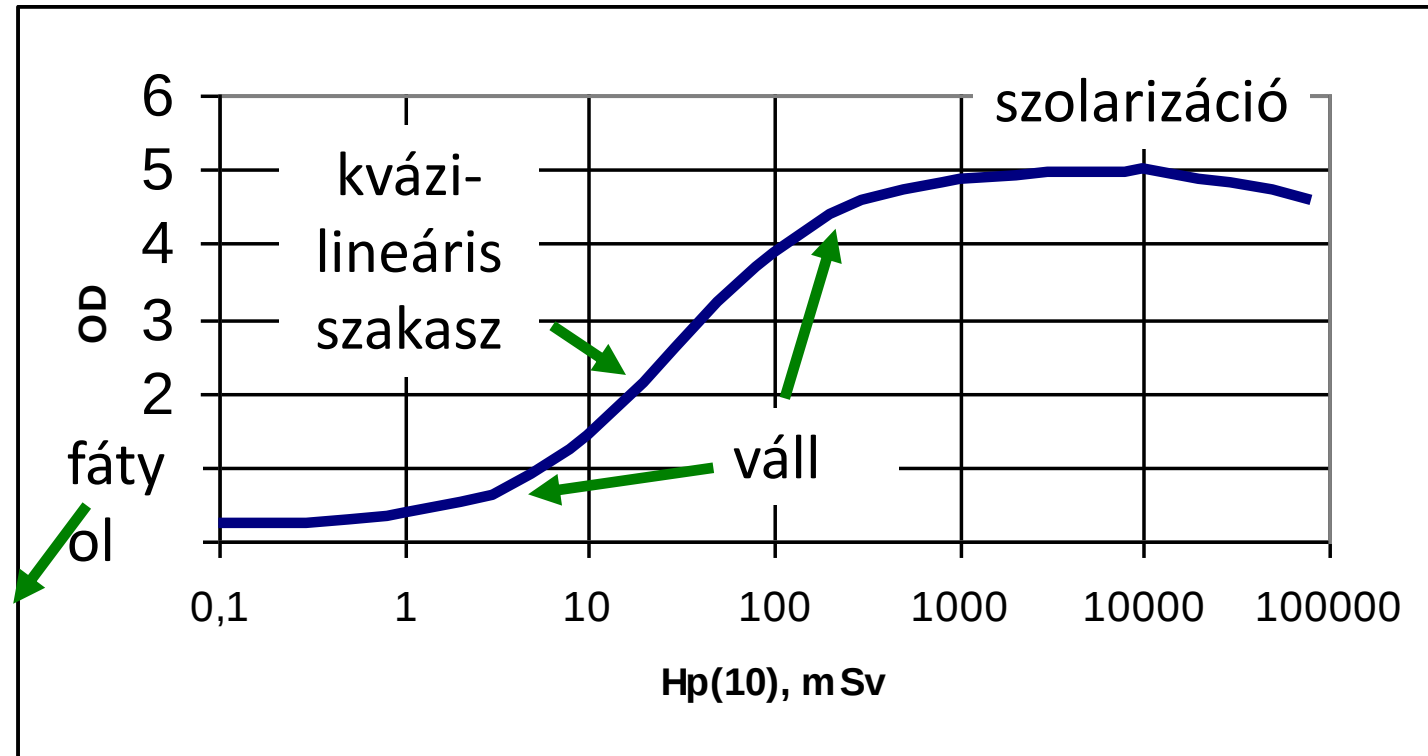
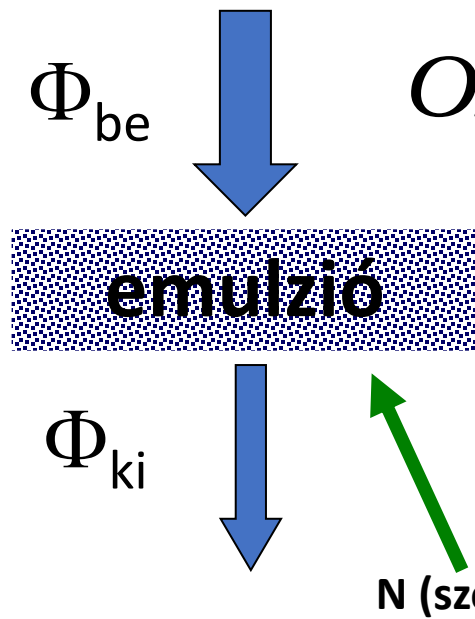
lassú emulzió (10-20 μm)

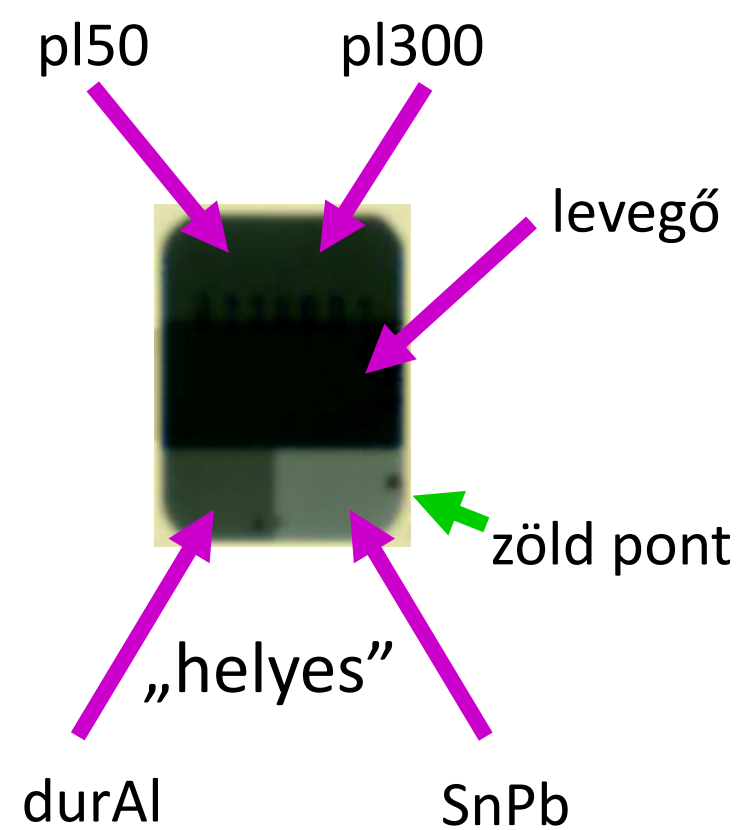
védőréteg (1-2 μm)

A filmek kiértékelése

$$OD = \lg \left(\frac{\Phi_{be}}{\Phi_{ki}} \right)$$

$$OD = k \cdot N$$





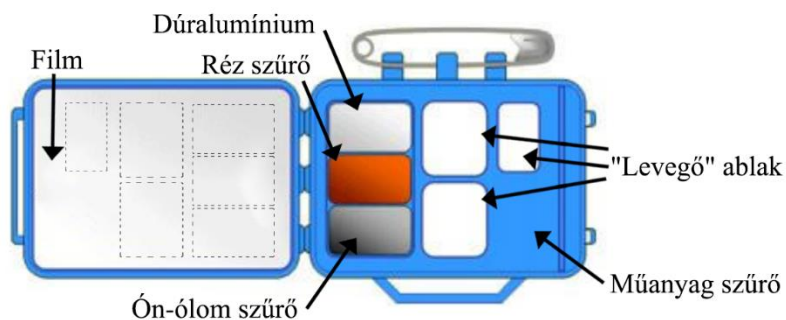
„direkt”



„fátyol”



„magas fátyol”



Szűrések

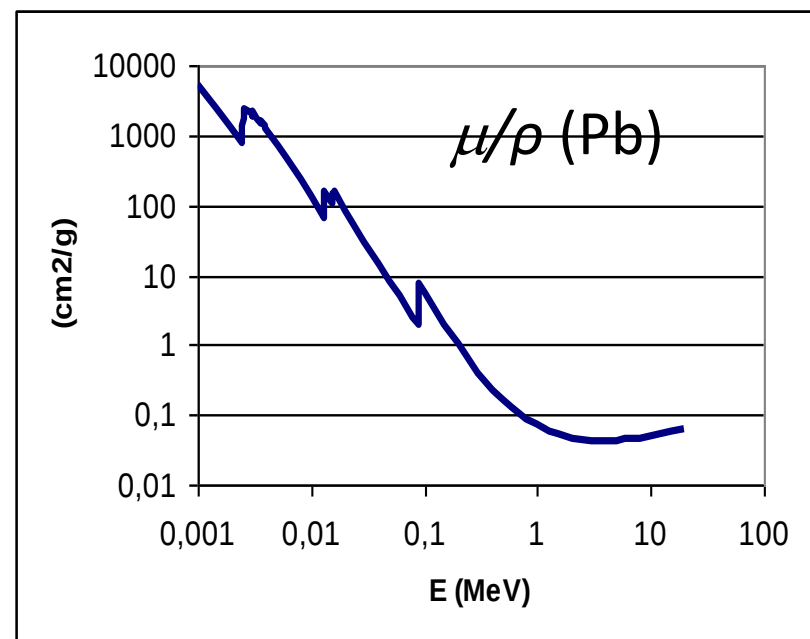
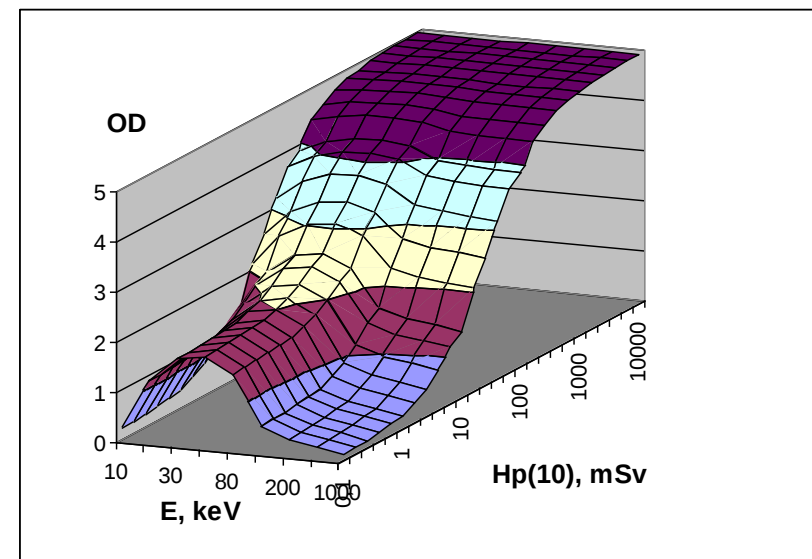


Diagram illustrating the exponential attenuation of radiation:

I_0 (Incident intensity) passes through a material of thickness L with mass attenuation coefficient $\mu(E, Z)$.

The resulting intensity I is given by the equation:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot L}$$

Filmdozimetria

ELŐNYÖK

- Megállapítható a helytelen viselés
- Elrakható “emlékbe”
- Később újra kiértékelhető

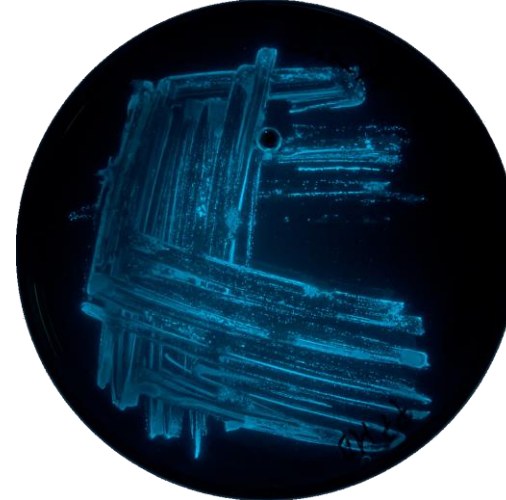
HÁTRÁNYOK

- Erős fotonenergia függés
- Szabályozott és következetes felhasználási, tárolási és feldolgozási eljárást igényel (nehéz az alacsony bizonytalanságot elérni)

Lumineszcencia

- Radiolumineszcencia: Sugárzás hatására gerjesztés/rekombináció egyidőben (prompt hatás)
- Termolumineszcencia (TL): Hő hatására rekombináció (termikus gerjesztés)
- Optikailag stimulált lumineszcencia (OSL): (UV) fény hatására történik rekombináció és legerjesztés
- Radiofotolumineszcencia (RPL): Fény hatására történik legerjesztés

A lumineszcens anyagok többféleképpen gerjeszthetők!



Photobacterium
phosphoreum
(biolumineszcencia)

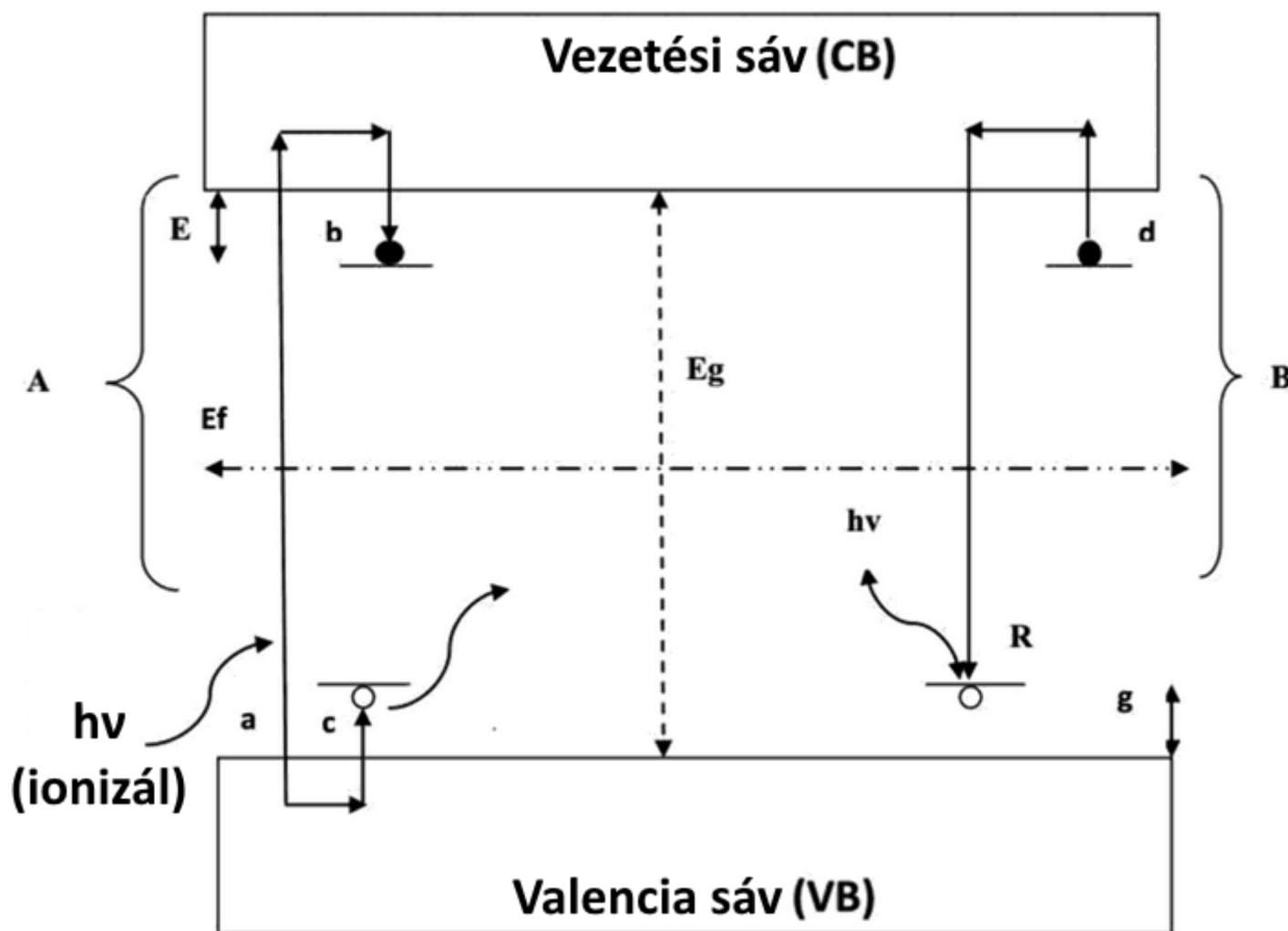
Forrás:

<https://www.flickr.com/photos/arne/15347970367>



Noctiluca scintillans (páncélos ostoros-féle)

Fluoreszcens doziméterek („phosphors”)



a) elektron-lyuk pár keltése

b) elektron csapdázása

c) lyuk csapdázása

d) elektron kibocsátása (pl. fűtéssel)

R) rekombináció

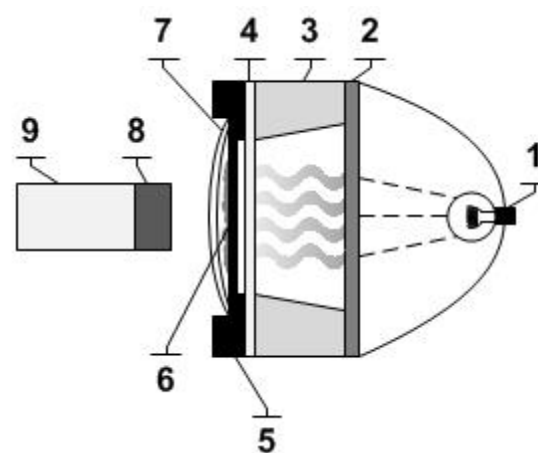
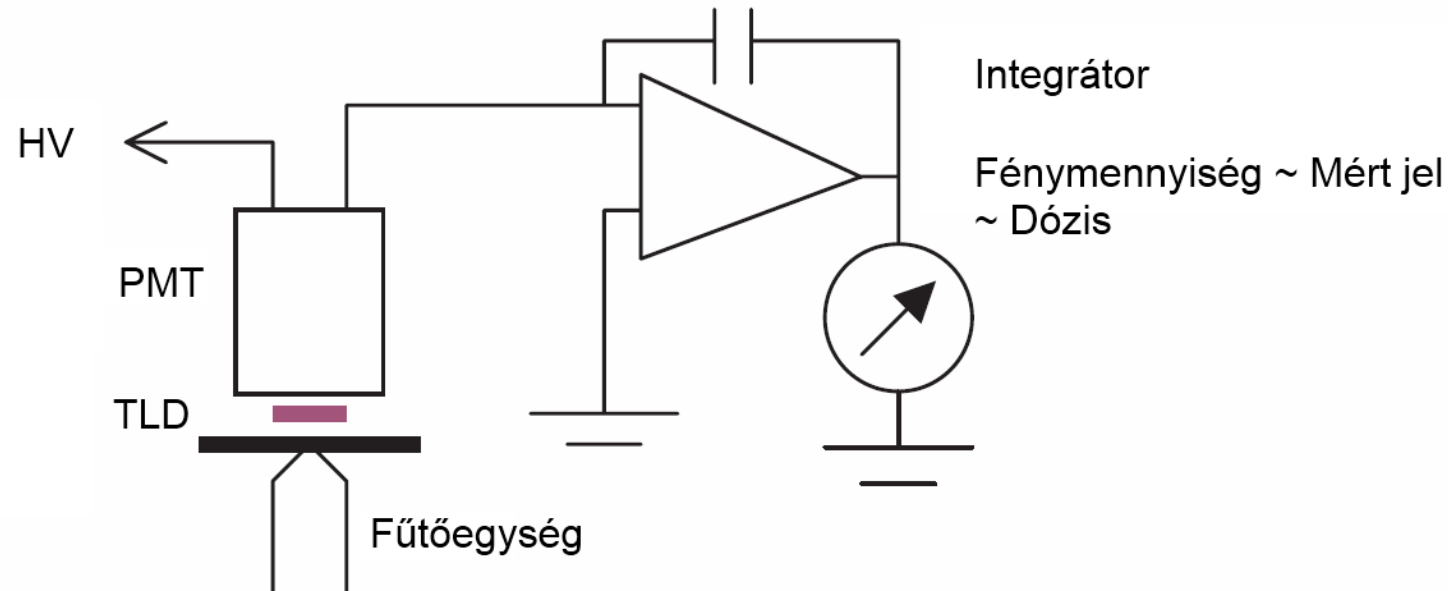
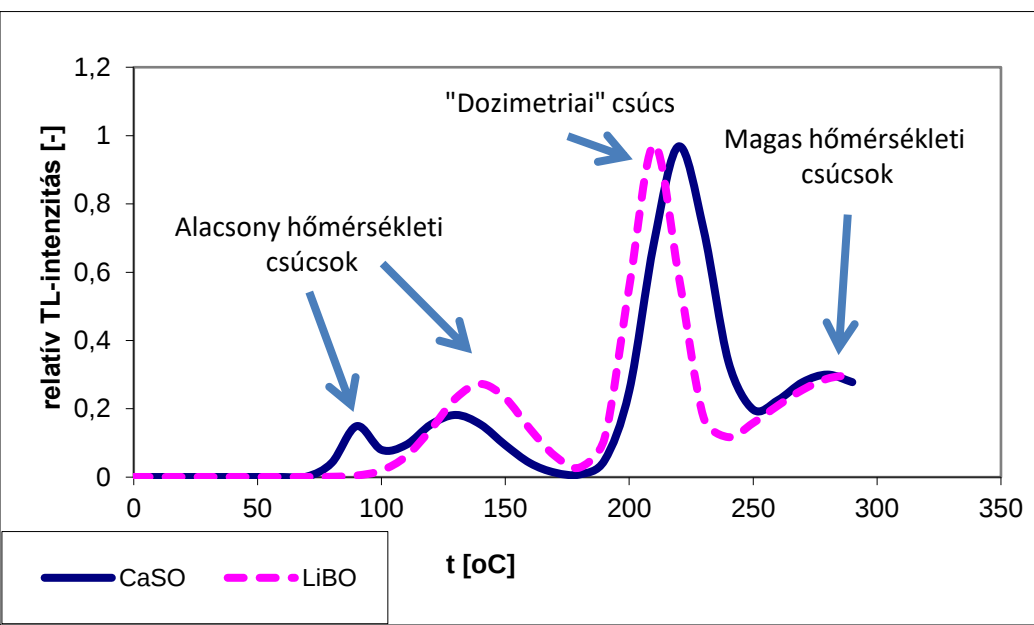
g) lyukcsapda mélysége

E_f) Fermi-szint (üres)

E_g) Tiltott sáv

TL doziméterek

- Kifűtés nitrogen jelenlétében (forró gáz)
- Jól meghatározott recept a kiértékeléshez (1× nullázás szükséges)



- 1 – volfrám-szálas halogén lámpa (infravörös hőforrás)
- 2 – vörös szűrő
- 3 – fókuszáló kónusz + hőmérséklet mérő
- 4 – kvarc ablak
- 5 – TLD tablettákat tartalmazó lapka
- 6 – TL-tabletta ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ v. CaSO_4)
- 7 – teflon védőfólia
- 8 – kék szűrő
- 9 – fotoelektron sokszorozó (PMT)

készítette: Elek Richárd © 2013

Energiakompensáció

4 db szűrő / 4 db TL-detektor:

14 mg/cm² műanyag / Li₂B₄O₇:Cu (β,γ) [≡ UD807ATN]

160 mg/cm² műanyag / Li₂B₄O₇:Cu (β,γ)

160 mg/cm² műanyag / CaSO₄:Tm (β,γ)

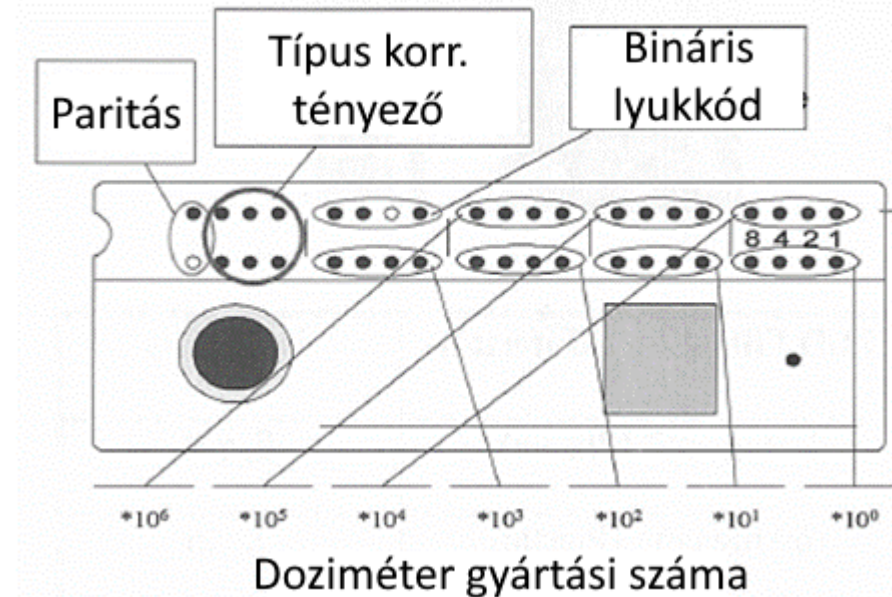
700 mg/cm² ólom / CaSO₄:Tm (γ)

- Nem tökéletes szövetekvivalencia
- Energia ismerete szükséges
- ➔ Kompozit szűrő/árnyékoló betétek

Lehetőségek az energia szerinti korrekcióra:

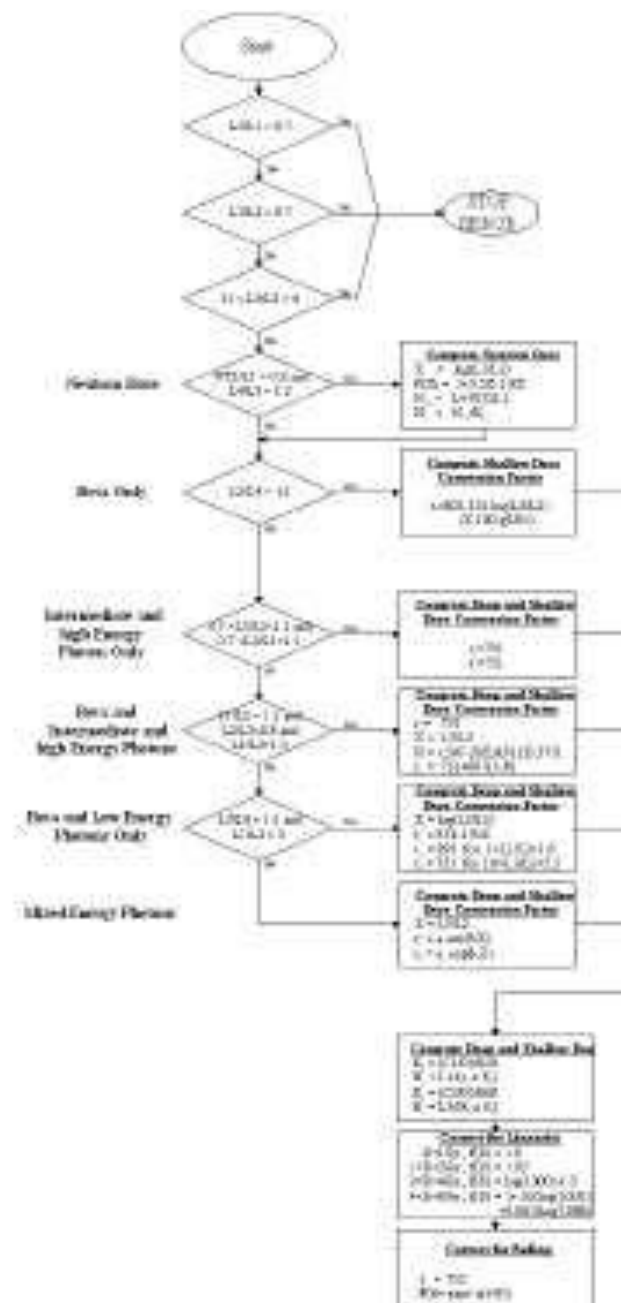
- “Branching”: algoritmikus döntés
- “Function”: energiaválasz görbe alapján
- “Matrix”: matrix-dekonvolúciós eljárás

pl. $H_p(10) = E1(0,711) + E2(0,46) + E3(-0,011) + E4(0,198)$



“Branching” típusú algoritmus

- USA-ban népszerű (Laboratory Accreditation Programme)
- Elemarányok alapján határoz a dózistról
- Sokszáz soros számítógépes kód
- Könnyen finomhangolható
- Nem additív, nem felel meg az IEC 62387 előírásának!



“Function” típusú algoritmus

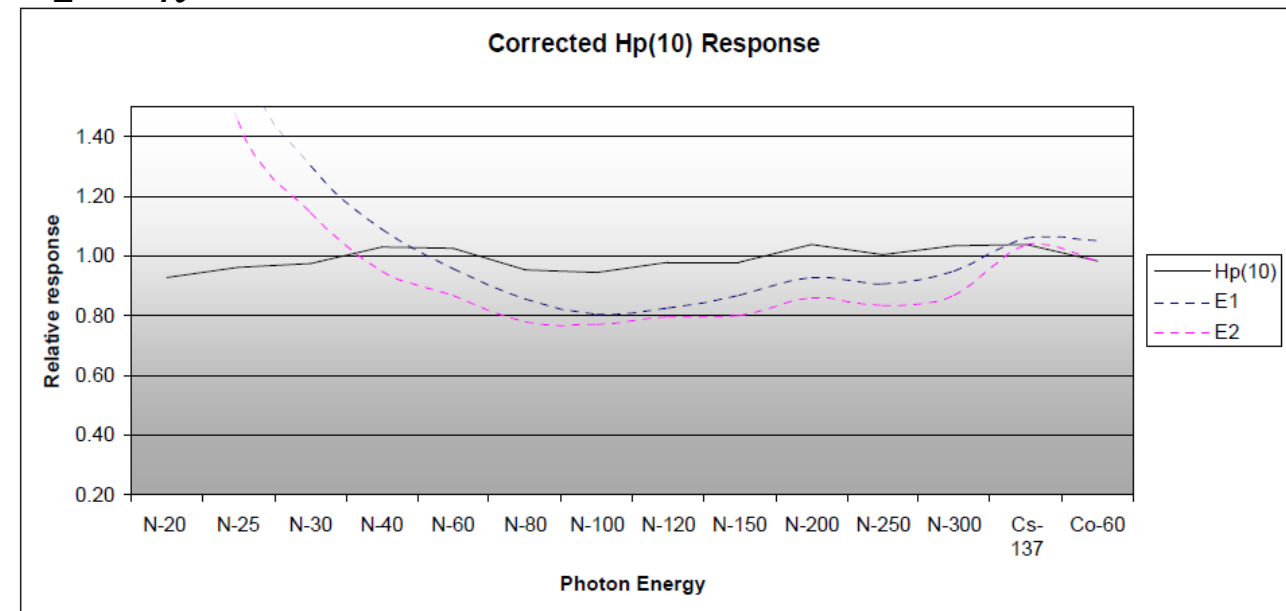
- EU-ban elterjedt
- A független elemek fotonenergia-függéséből korrigálja az adott elem választ.
- Egyszerű polinomiális illesztés
- Jobbára additív

$$H_p(10) = A_1[C_1 + C_2 \times A_2 + C_3 \times A_2^2 + C_3 \times A_2^3]$$

A_1 : Adott elem korrigálatlan fotonszáma

A_2 : E3/E4 elemek aránya

$C_1...C_n$: n-edik konstans



TL doziméterek

ELŐNYÖK

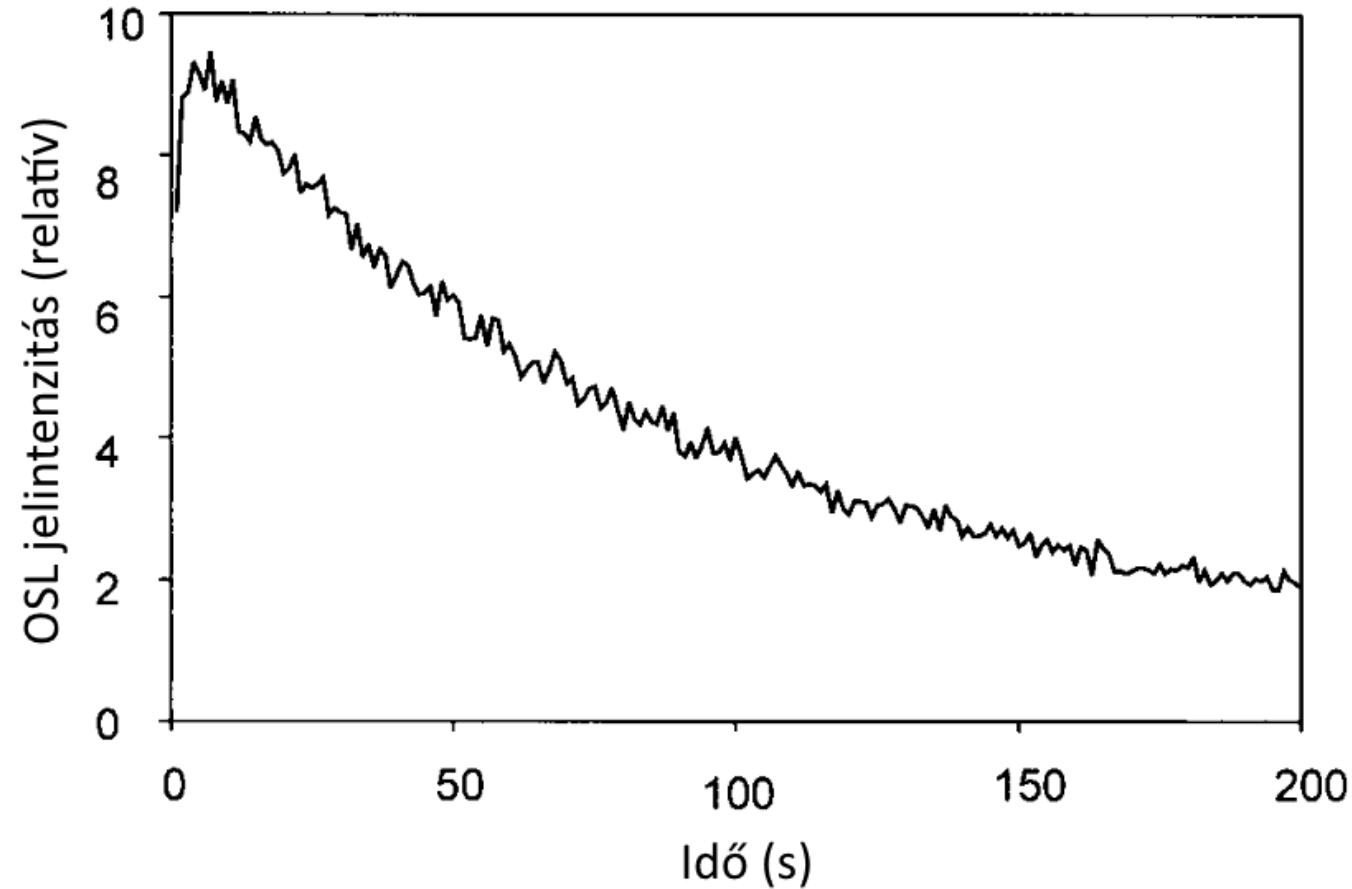
- Nagy érzékenység
- Könnyű kezelés
- Egyszerű folyamat a kiolvasás, jól automatizálható
- Egyszerű(bb) minőségellenőrzés
- „Feled”

HÁTRÁNYOK

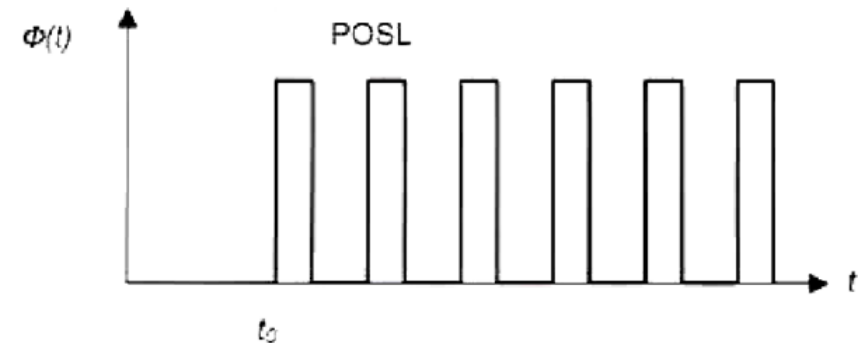
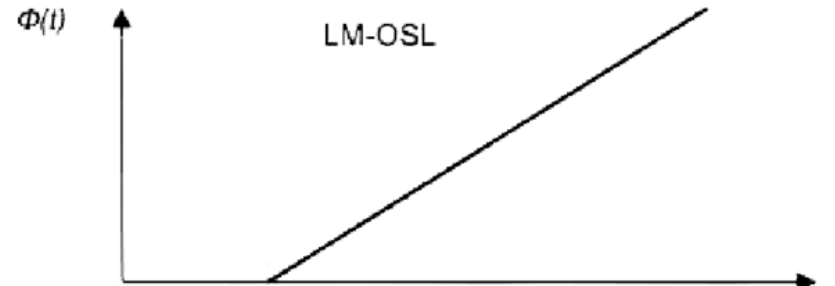
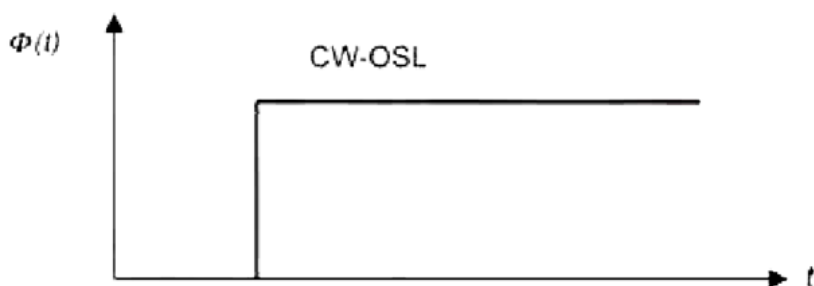
- Komolyabb infrastruktúrát igényelhet (nitrogéngáz-ellátó)
- Költségesebb (filmhez képest)
- „Adatvesztés” kiértékelés után
- „Öregedés”

OSL doziméterek

- Az OSL legerjesztése hasonló a TLD-éhez, de fénnel történik (itt $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ doziméter **532 nm**-es fénnel)
- Rövid gerjesztésre a jelvesztés minimális ($\approx 1\%$) $\rightarrow$ pulzált (P)OSL
- Előnyös a többszöri rövid gerjesztés!



Felül: Kibocsátott OSL jel folytonos (CW) gerjesztés hatására.
Alsó görbék: Használatos gerjesztő jelek OSL kiértékeléshez.

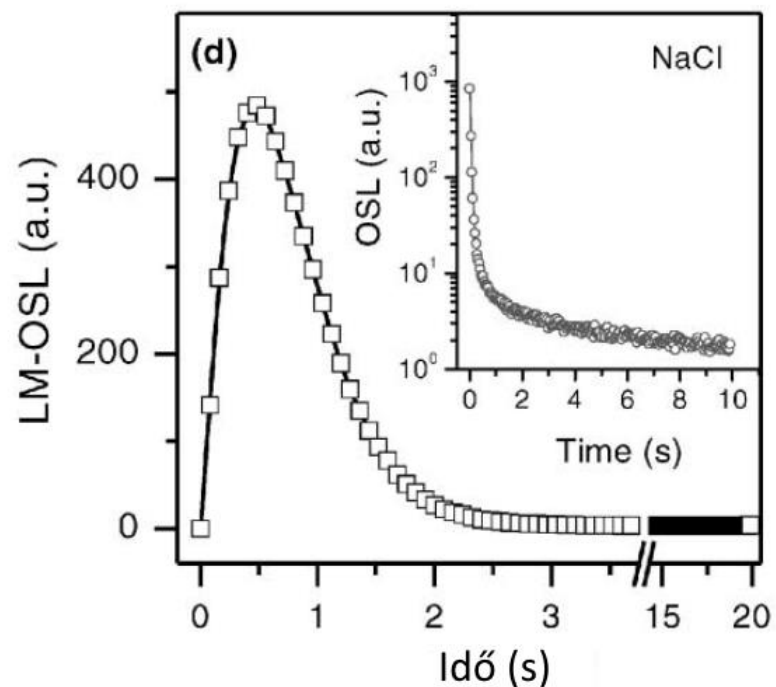
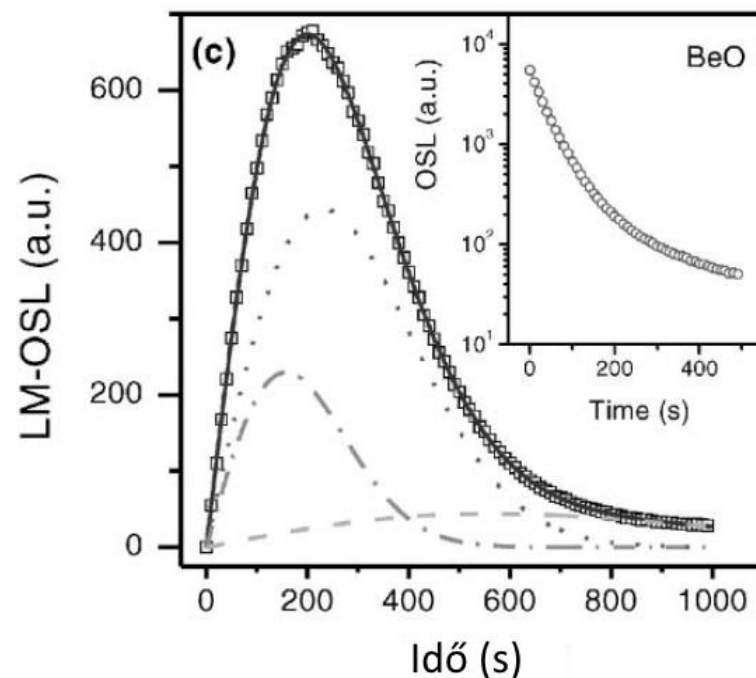
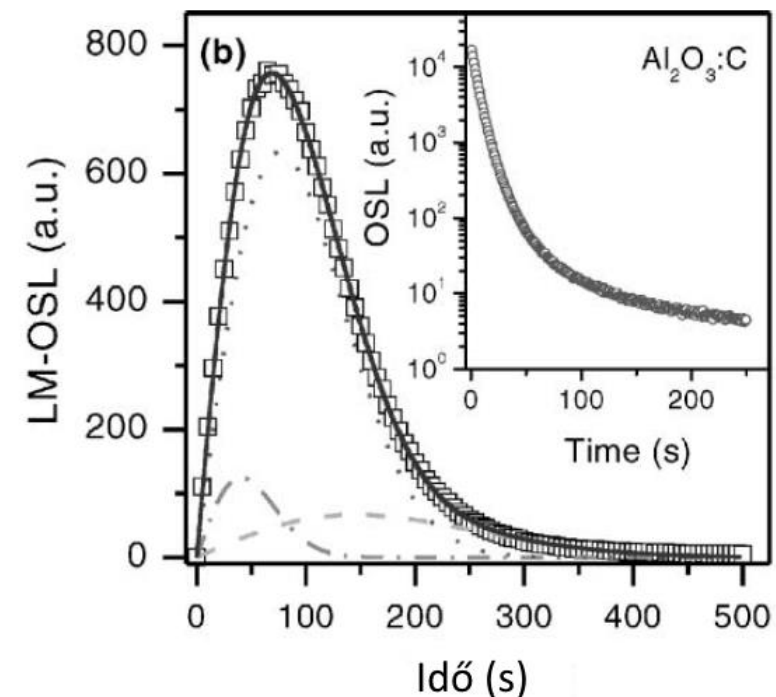
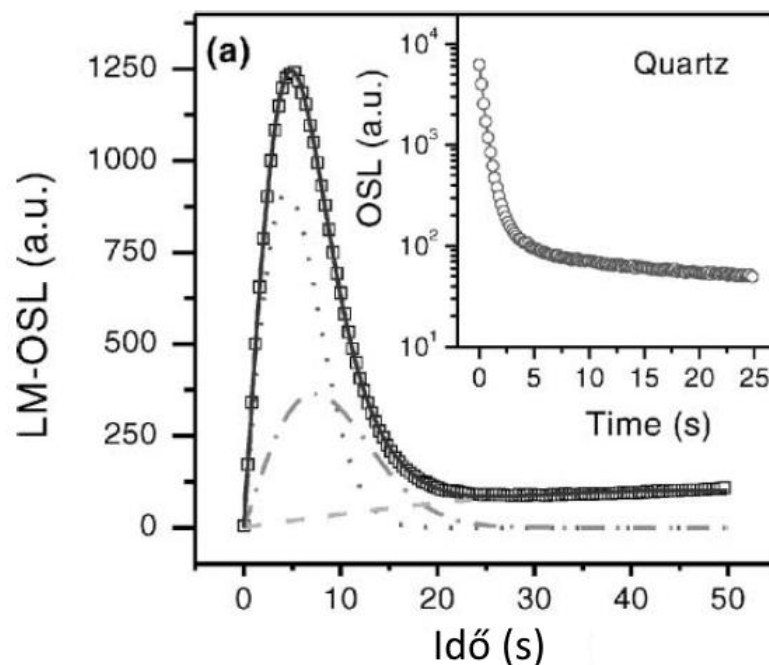


OSL legerjesztései

- Kvarc: 10 Gy;
egyéb: 100 mGy.
- a-d ábrák LM-OSL
legerjesztés, jobb felső
sarokban CW-OSL
legerjesztés

➔ Az anyagi minőség a
feldolgozási sebességet is
megszabja!

E. Bulur, L. Botter-Jensen, A. S. Murray, LM-OSL
signals from some insulators: an analysis of the
dependency of the detrapping probability on
stimulation light intensity, Radiation
Measurements 33 (2001) 715–719 nyomán



OSL doziméterek

ELŐNYÖK

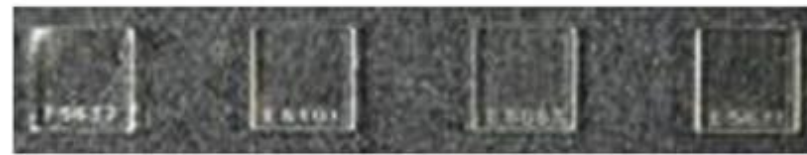
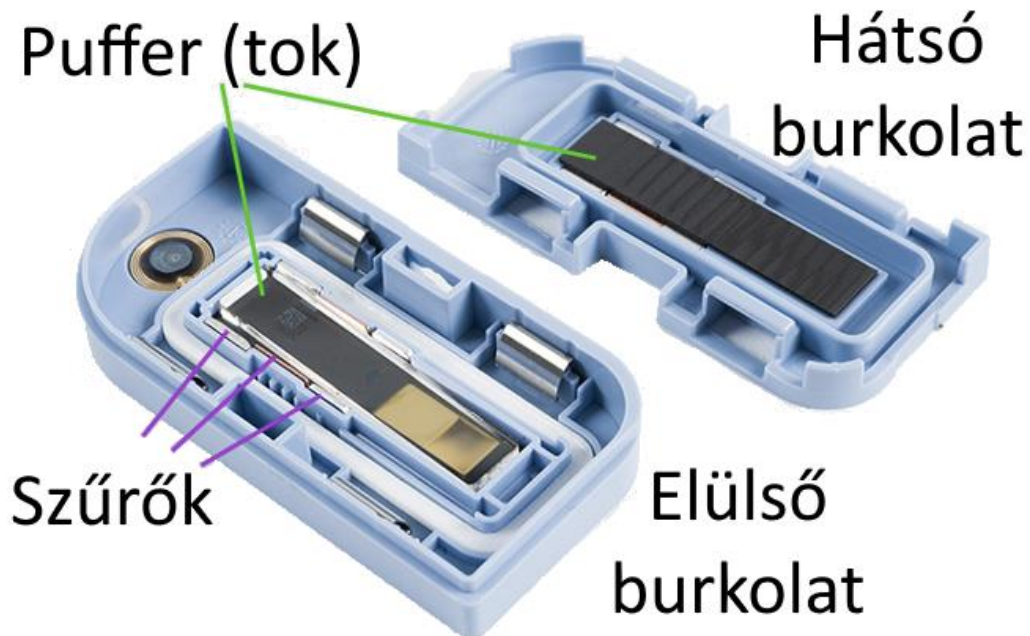
- Nagy érzékenység és hatásfok
- Könnyű kezelés
- Stabil anyagok (BeO , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$)
- Egyszerű folyamat a kiolvasás, jól automatizálható
- Egyszerű(bb) minőség-ellenőrzés
- „Feled”

HÁTRÁNYOK

- Nem igényel bonyolult infrastruktúrát
- Költséges (Kb. TL-lel azonos)

RPL doziméterek

- Pontszerűen gerjeszthető
- A kiolvasása egyszerű és tulajdonképpen „képet alkot”



Látható fényben



UV fényben

0Gy 1Gy 5Gy 20Gy



28 keV röntgen, "direkt"



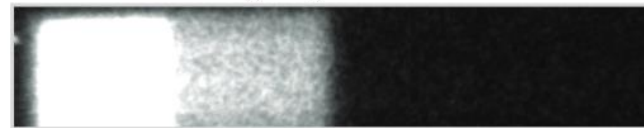
Szennyeződött doziméter



28 keV röntgen, "indirekt"



Statikus besugárzás



Béta-sugárzás (Kr-85)



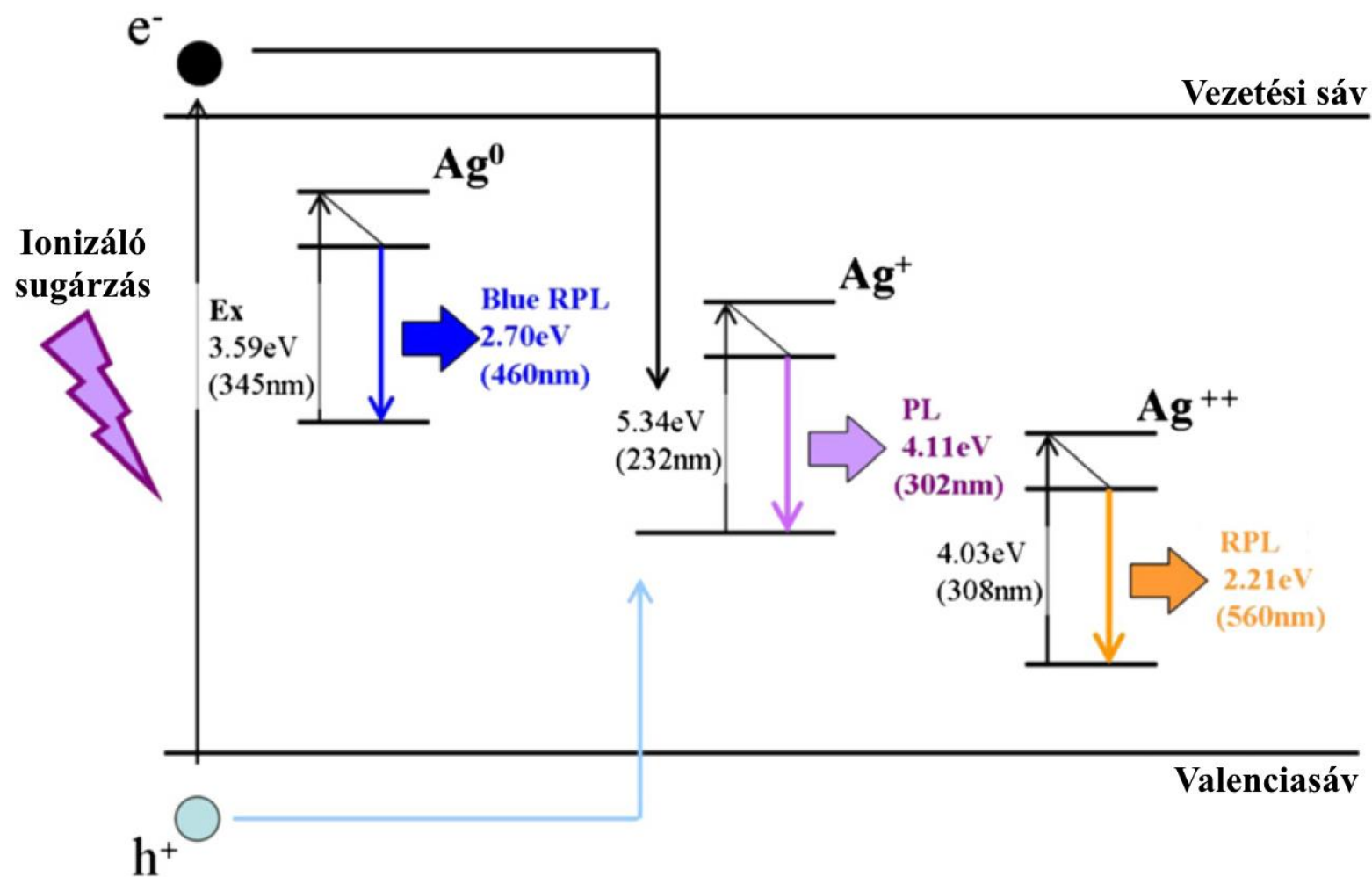
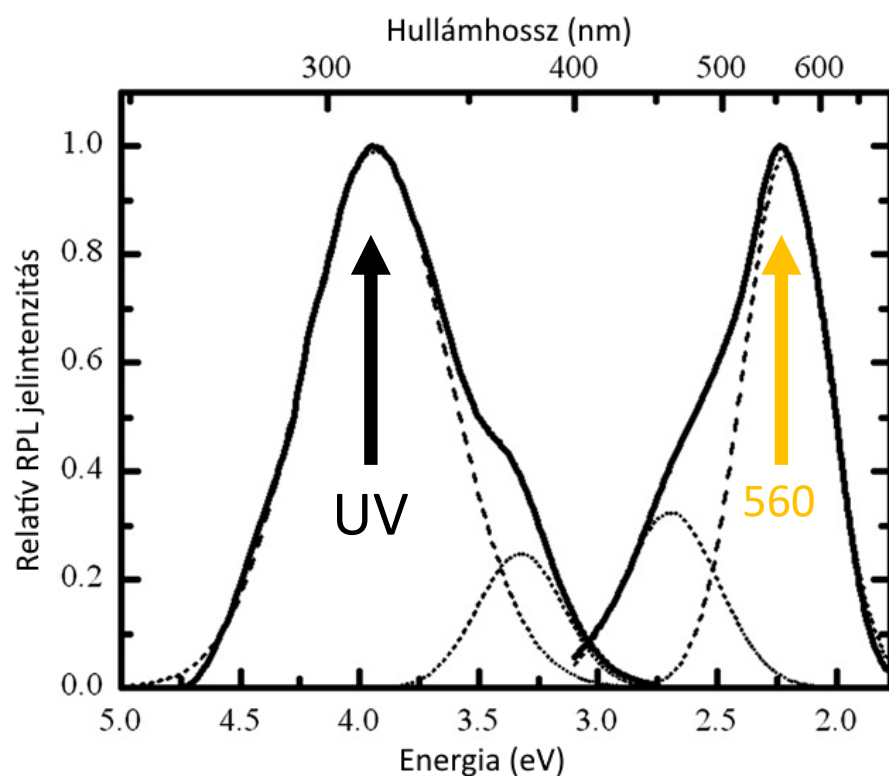
Fém csiptető mögött

A „L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN):

PASSIVE RPL DOSIMETER” kiadvány nyomán:

<https://dosimetrie cea.fr/sites/dosimetrie/files/2024-04/RPL-EN-WEB.pdf>

RPL doziméterek legerjesztése



RPL doziméterek

ELŐNYÖK

- Nagy érzékenység és határfok
- Rendkívül stabil
- Többször kiértékelhető
- Elhanyagolható mértékben öregszik
- Nem jellemzi a „feledés”

HÁTRÁNYOK

- Nem igényel bonyolult infrastruktúrát
- Nagyságrenddel költségesebb (OSL-hez képest)

Passzív doziméterek metrológiája

Vonatkozó szabványok:

- IEC 62387:2020 (Ed. 2.0) Radiation protection instrumentation – Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, work place and environmental monitoring of photon and beta radiation
- ISO 4037 sorozat: foton-sugárzások
- ISO 6980 sorozat: béta-sugárzások
- ISO 8529 sorozat: neutron-sugárzások

Passzív doziméterek minimumkövetelményei

IEC 62387:2020 szerinti követelmények adott mérendő mennyiség esetén ($0^\circ \dots \pm 60^\circ$):

Mérendő mennyiség	Minimumkövetelmény	Maximum vizsgálati tartomány (típusvizsgálaton)	Minimumkövetelmény béta-sugárzásra (0,06 MeV...1,2 MeV tartomány)	Minimumkövetelmény béta-sugárzásra (0,06 MeV...1,2 MeV tartomány)
$H_p(10)$, $H^*(10)$	80 keV...1,25 MeV	12 keV...7 MeV		
$H_p(3)$, $H'(3)$	30 keV...250 keV	8 keV...7 MeV	0,8 MeV	700 keV...1,2 MeV
$H_p(0,07)$, $H'(0,07)$	30 keV...250 keV	8 keV...1,25 MeV	240 keV...0,8 MeV	70 keV...1,2 MeV

Dózismérés tartománya: $Y \text{ mSv} \leq H_p(10) \leq X \text{ Sv}$ ← **TETSZŐLEGES!**

Egyéb fontos (metrológiai) tulajdonságok

- Nem-linearitás
- Telítődés („overload”) jelzése
- Energia- és irányfüggés (mérendő mennyiségenként!)
- Válasz vegyes sugárzási térre
- Érzékenység a környezeti hatásokra (pl. fény)
- Dózishalmozás, öngerjesztés, additivitás
- Vezetett zavarjelekkel szembeni ellenállóképesség (ÚJ!)
- Szoftver: „hitelesség” → Maga a program és minden rekord is digitális aláírással kell rendelkezzen (nem módosítható rekord) (ÚJ!)

A külső sugárterhelés meghatározása II.

- Aktív doziméterekkel:

- (kvázi-aktív) Kvarc-szálas (toll-) dózismérő
- GM-csőves doziméter
- Félvezetős/elektronikus doziméter
 - PIN-dióda
 - APD (lavina-fotodióda)
 - MOSFET (fémoxid félvezető térvezérlésű tranzisztor)
 - szcintillátor + SiPM (szilícium fotoelektron-sokszorozó)
 - Hagyományos szcintillátorok: NaI, NaI(Tl); CsI; CsI(Tl); CsI(Na); CsF; BaF₂; CdWO₄; LaCl; CeF₃; Gd₃Al₂Ga₃O₁₂(Ce) [GAGG(Ce)*], YSO(Ce)**;
 - Szerves szcintillátorok: poliviniltoluén (PVT, „plasztik”) + 3 m% p-terfenil;
 - Energiaszelektív detektorral (Cd-Zn-Te, „CZT”)



*https://www.advatech-uk.co.uk/gagg_ce.html

**Cériummal szennyezett ittrium szilikát

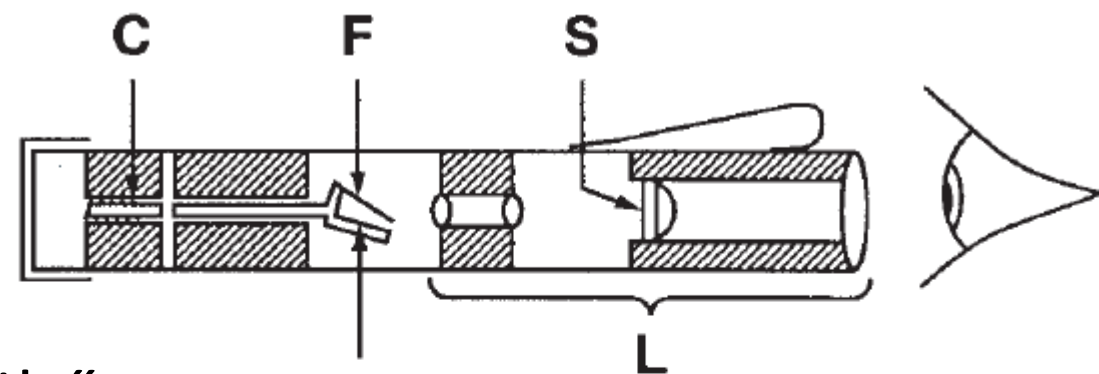
Kvarc-szálas tolldoziméterek – gyors becslésre

• ELŐNY

• HÁTRÁNYOK

- Olcsó

- Bármilyen befolyásolja a töltést az ionizáló sugárzáson túl, arra érzékeny: ütés, vibráció, környezeti hatás, szennyeződés, EM zajok (telefon)



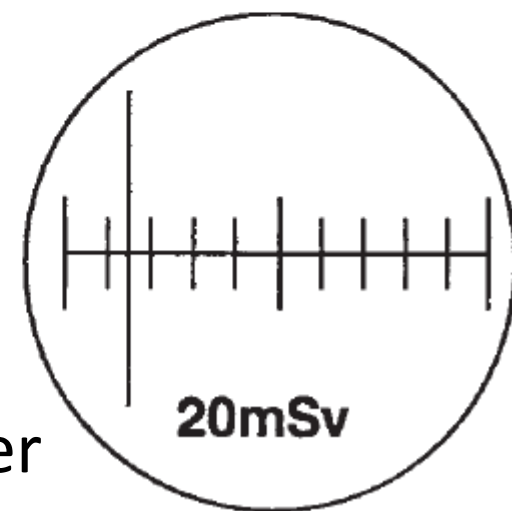
C: töltő

F: kvarc szál

R: villamos előfeszítő (repellor)

S: okulár

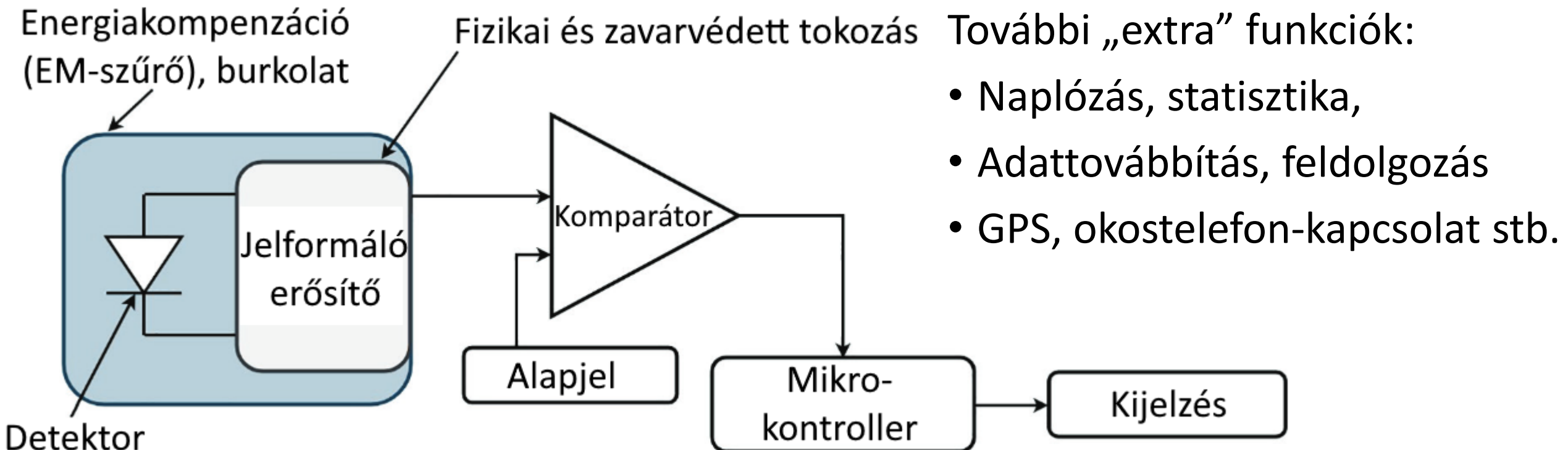
L: optikai lencserendszer



Elektronikus doziméterek

Minimálisan szükséges funkciók: Mérés, visszajelzések

További funkciók: Fény- és hangjelzés, haptikus visszacsatolás (rezgés), váltás a kijelzésben, maximum/átlag kijelzése, pillanatnyi dózisteljesítmény jelzése



GM-csőves doziméterek

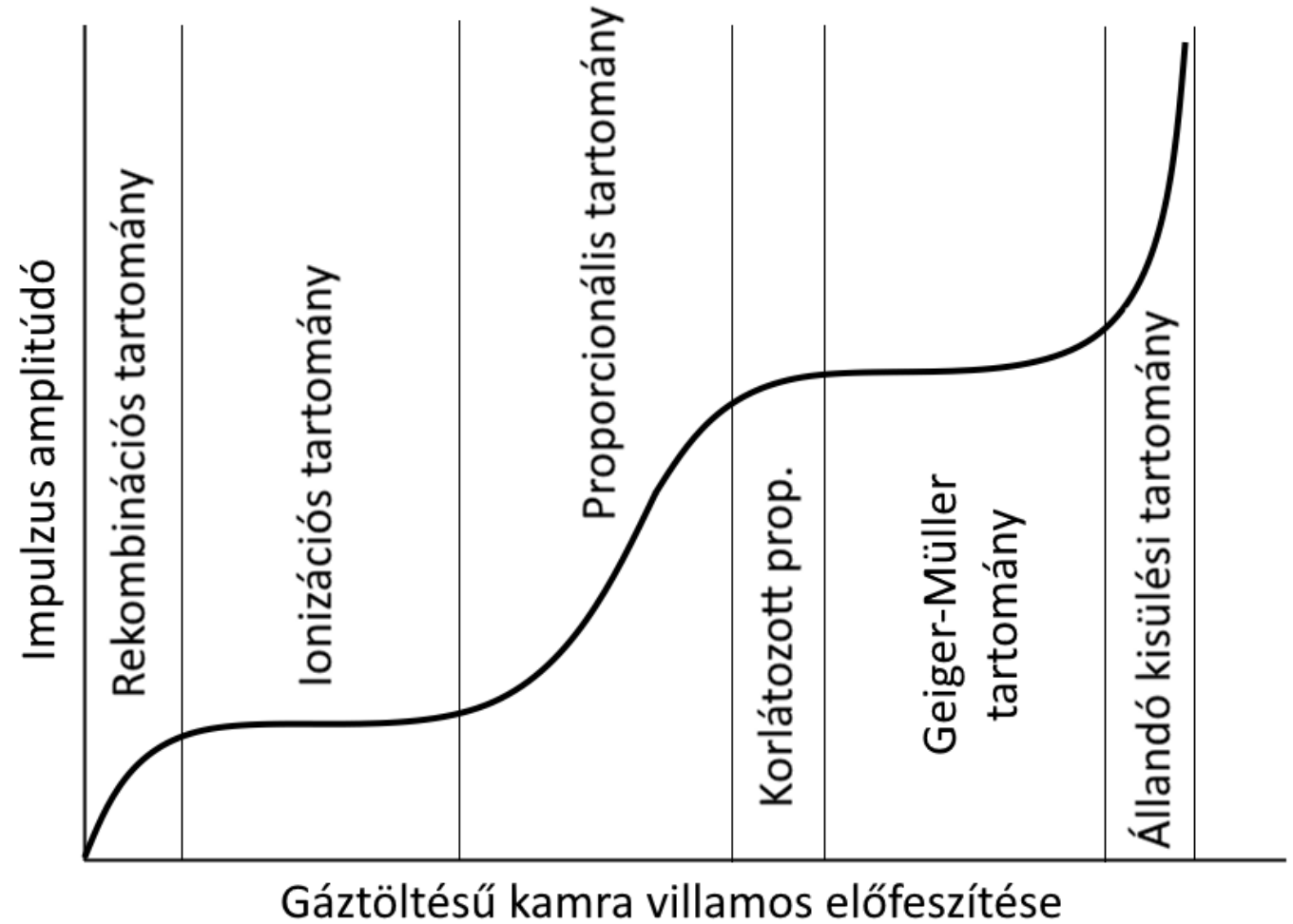


- ELŐNY

- Relatív ár

- HÁTRÁNYOK

- Érzékeny lehet a környezeti tényezőkre
- Pulzált terekben rossz választ adhat (paralizálódik)
- Telítés/kisülés (jelezhető)



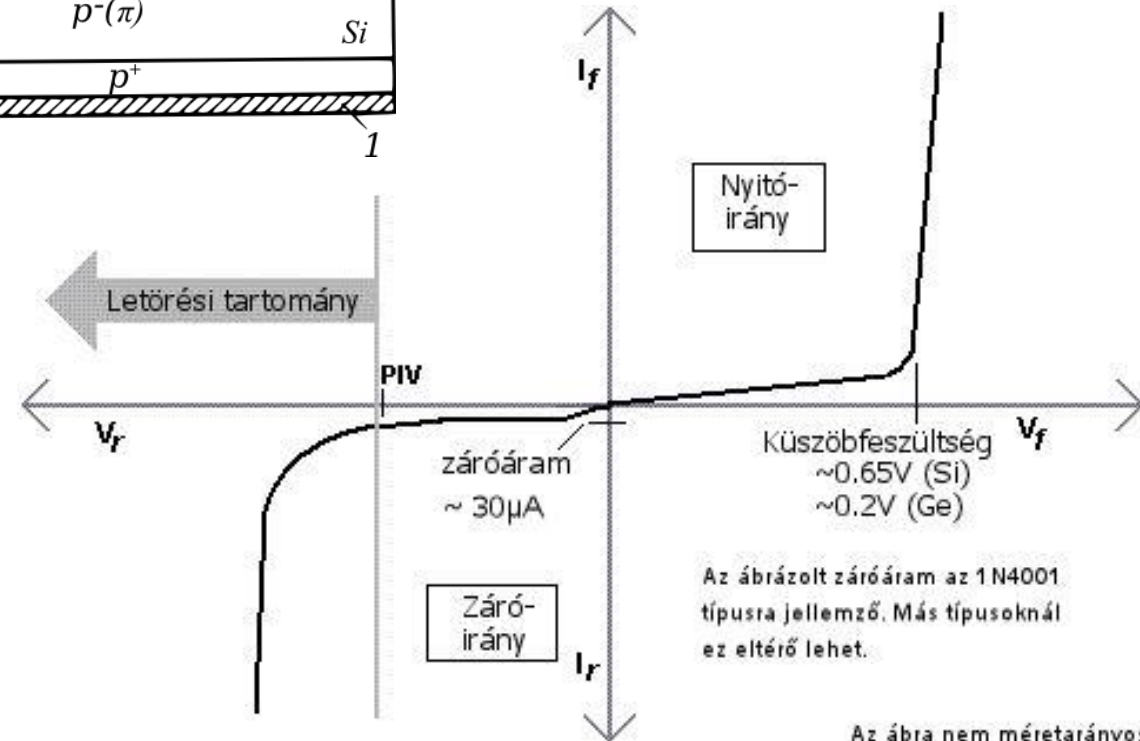
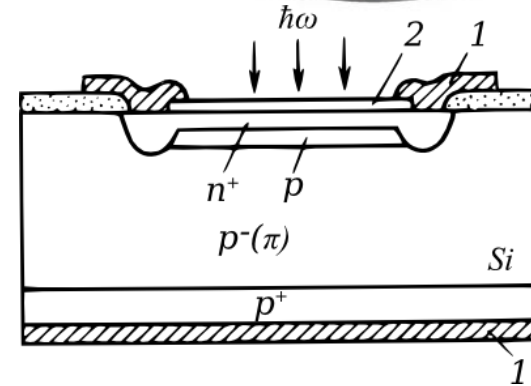
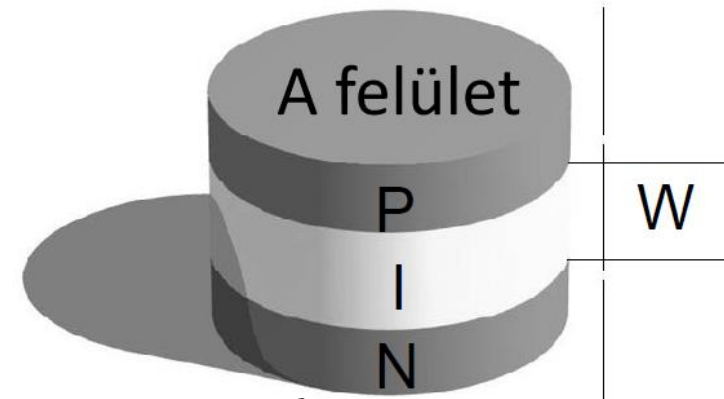
Félvezetők: PIN/APD/MOSFET

PIN-dióda: A sugárzás az „I” rétegben elektron-lyuk párokat kelt; a záróirányú előfeszítés kigyűjti a többlet töltést.

APD: A nagy záróirányú előfeszítés miatt az ionizáló sugárzás nagy erősítést kap, a letörési tartomány alatt;

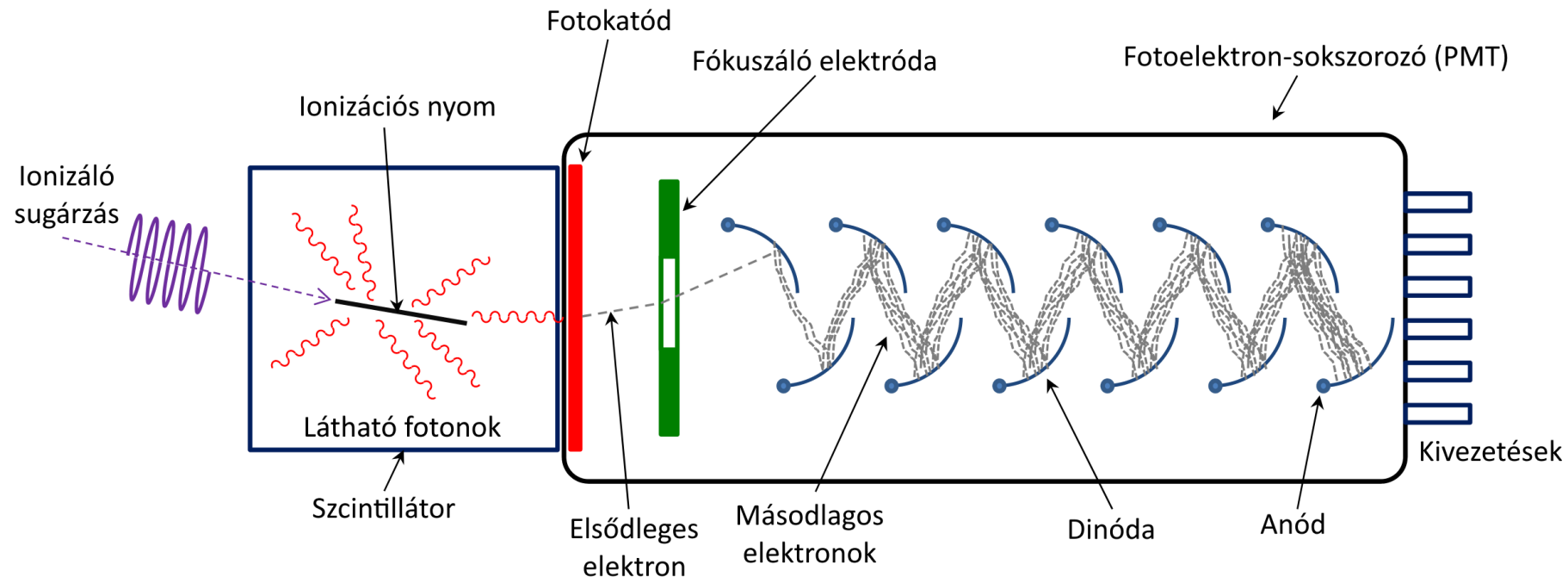
De működhet közel a letöréshez („kapcsoló” vagy GM-mód).

MOSFET: Az elektron-lyuk párok rontják a tértöltést → csökken a drain-source áram;
Nem használatos személyi dozimetriához!



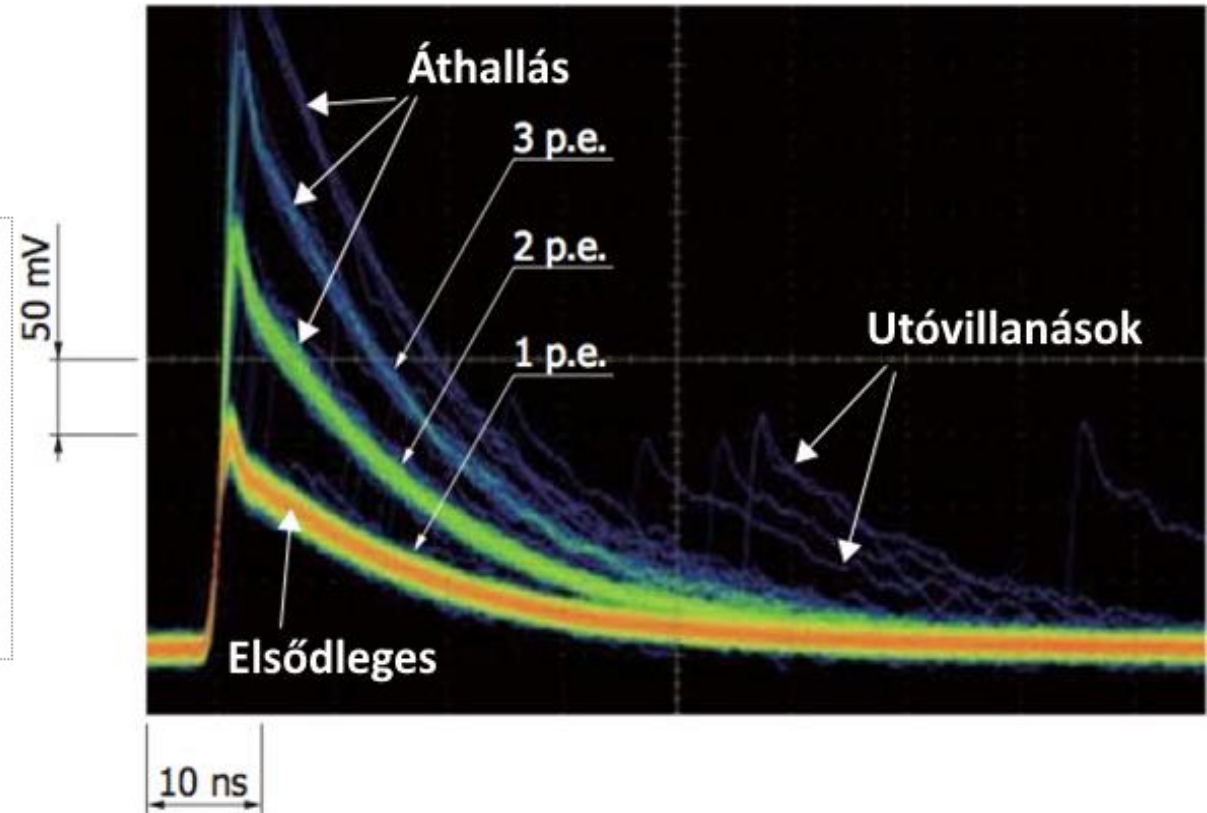
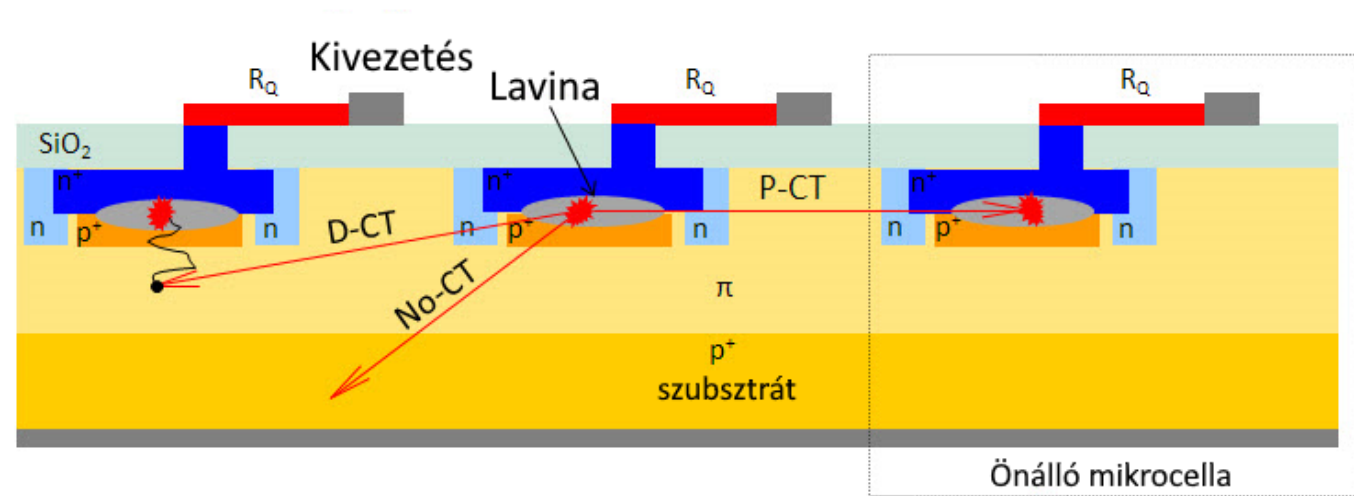
Szcintillációs doziméterek: PMT

A szcintillátorba belépő ionizáló sugárzás látható (vagy elég alacsony energiájú) fotont kelt ami a fotoelektron-sokszorozó fotókatódjára érve elektron(oka)t kelt. Ezeket a későbbi lépésekben sokszorozza az alacsony felületi munkával gerjeszthető dinódák. Az egyes erősítési lépésekben a kilépő elektronok kinetikus energiára tesznek szert.



Szcintillációs doziméterek: SiPM

A szilícium fotoelektron-sokszorozó hasonló az APD-hez, de több ezer apró „mikrocella” építi fel, G-M letörési munkaponton.



Illesztett kristály

Study of the Silicon Photomultipliers and Their Applications in Positron Emission Tomography Chen Xu 2014

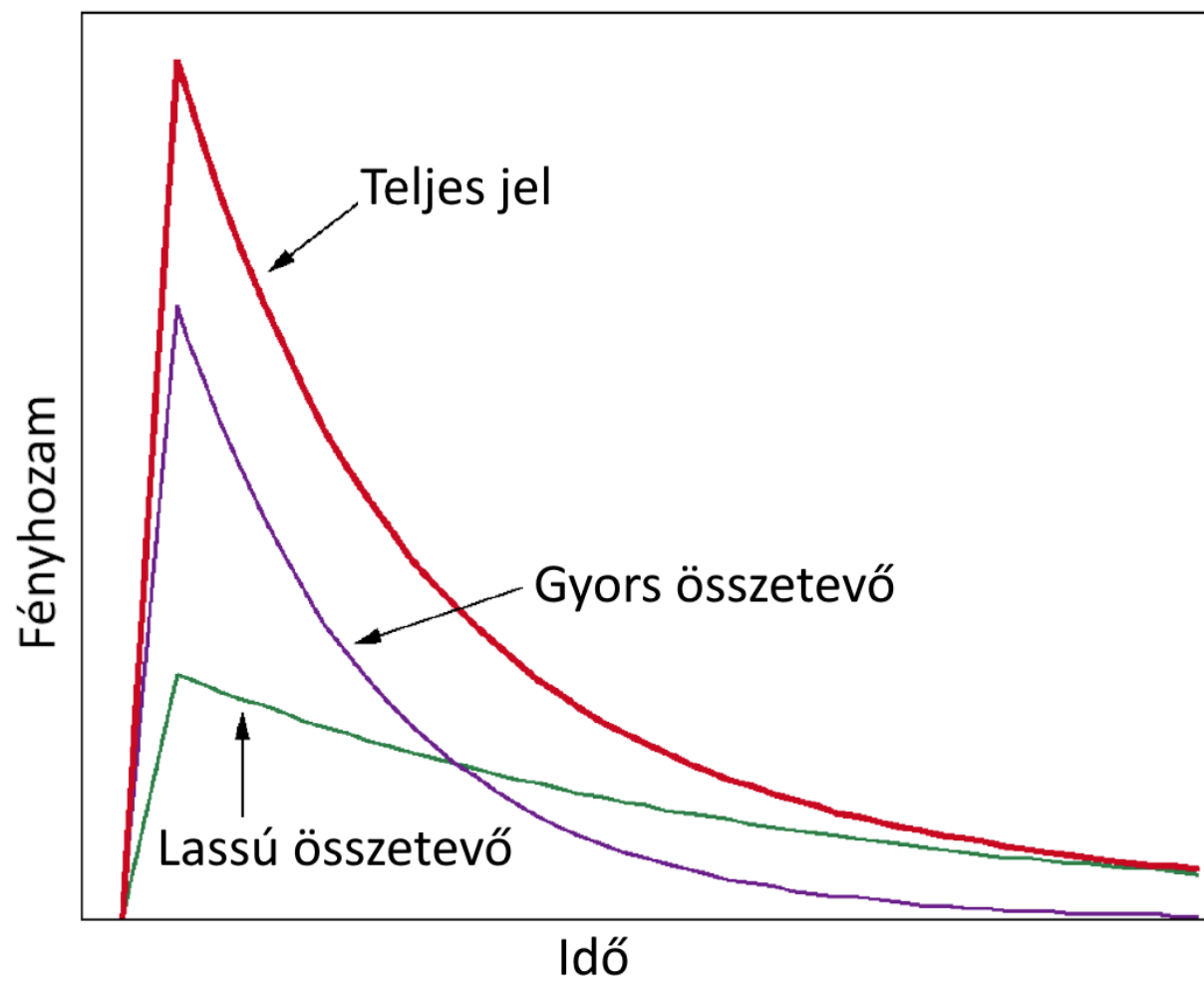
<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html>

Szcintillátorok modellje

Egy foton keltéséhez szükséges energia:

- Antracén ($C_{14}H_{10}$) ~ 60 eV
- NaI:TI ~ 25 eV
- BGO ($Bi_4Ge_3O_{12}$) ~ 300 eV
- Plasztik ~ 100 eV

- Az antracén és a NaI:TI általában referencia-anyag!
- QE (kvantum-hatásfok): Adott fotodetektor átalakítási hatásfoka tipikusan: 30%, tehát pl. NaI:TI-nél: $(100 \text{ keV} \times 0,3) / 25 \text{ eV} = 1200$ (foton)



$$N(t) = A_f e^{-\frac{t}{\tau_f}} + A_s e^{-\frac{t}{\tau_s}}$$

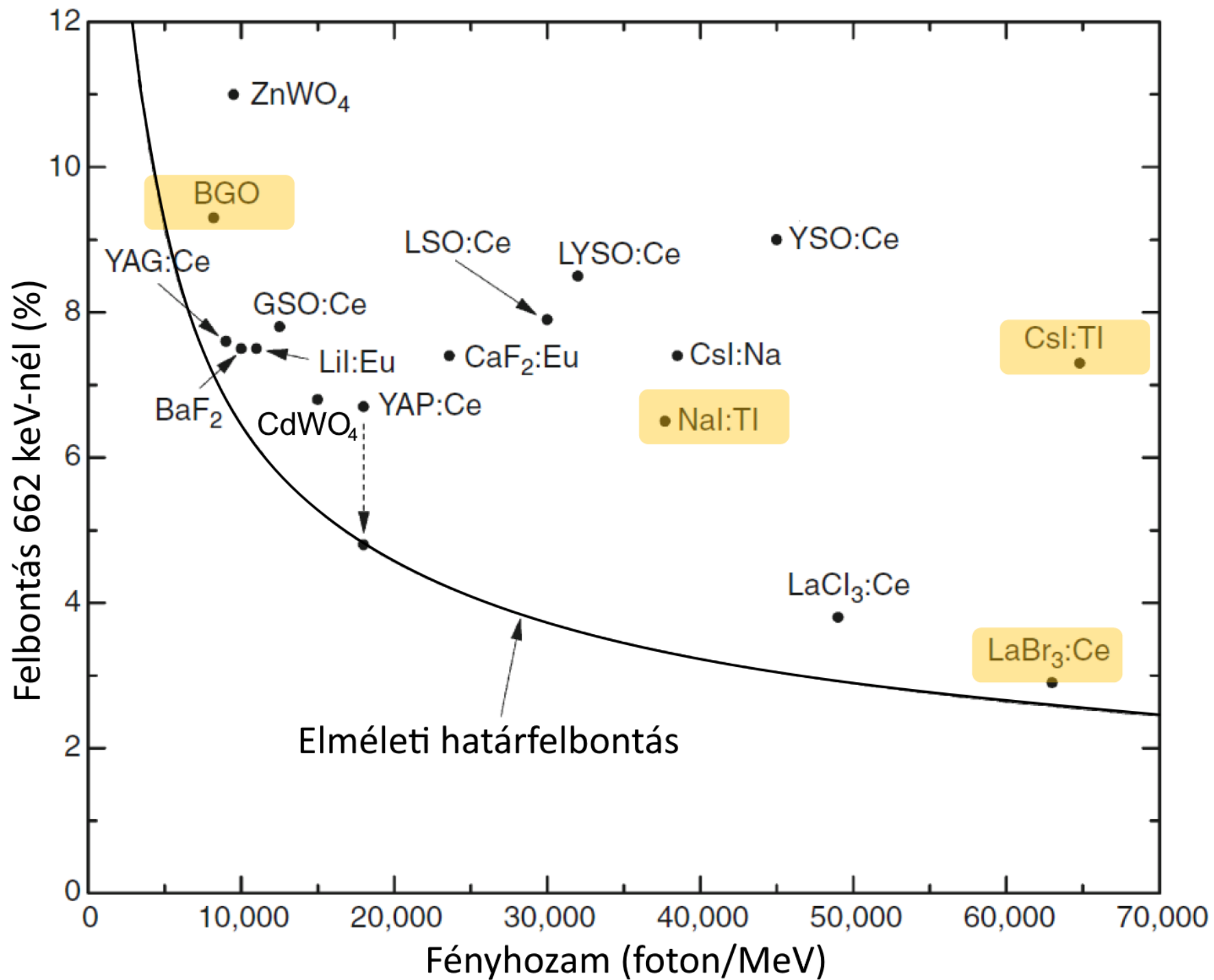
A_f, A_s A gyors (f) és lassú (s) összetevők amplitúdói

τ_f, τ_s A gyors (f) és lassú (s) összetevők időállandói

Anyag	Típus	Sűrűség (g/cm ³)	Emissziós csúcs (nm)	Relatív fényhozam (%)	Lecsengési idő (ns)
Antracén	szerves	1,25	447	100*	30
transz-stilbén	szerves	1,16	410	50	4,5
Nal:Tl	szervetlen	3,67	415	230	230
Csl:Tl	szervetlen	4,51	400	300	600
BGO	szervetlen	7,13	480	35...45	350
PbWO ₄	szervetlen	8,28	440...500	2,5	5...15
p-terfenil	műanyag	1,23	420	58	5
PPO (2,5-difeniloxazol)	műanyag	1,09	355	~ 50	1...5
LaBr ₃ :Ce	szervetlen	5,29	380	350	16

* 17.000...20.000 foton/MeV

<https://scintillator.lbl.gov/> alapján



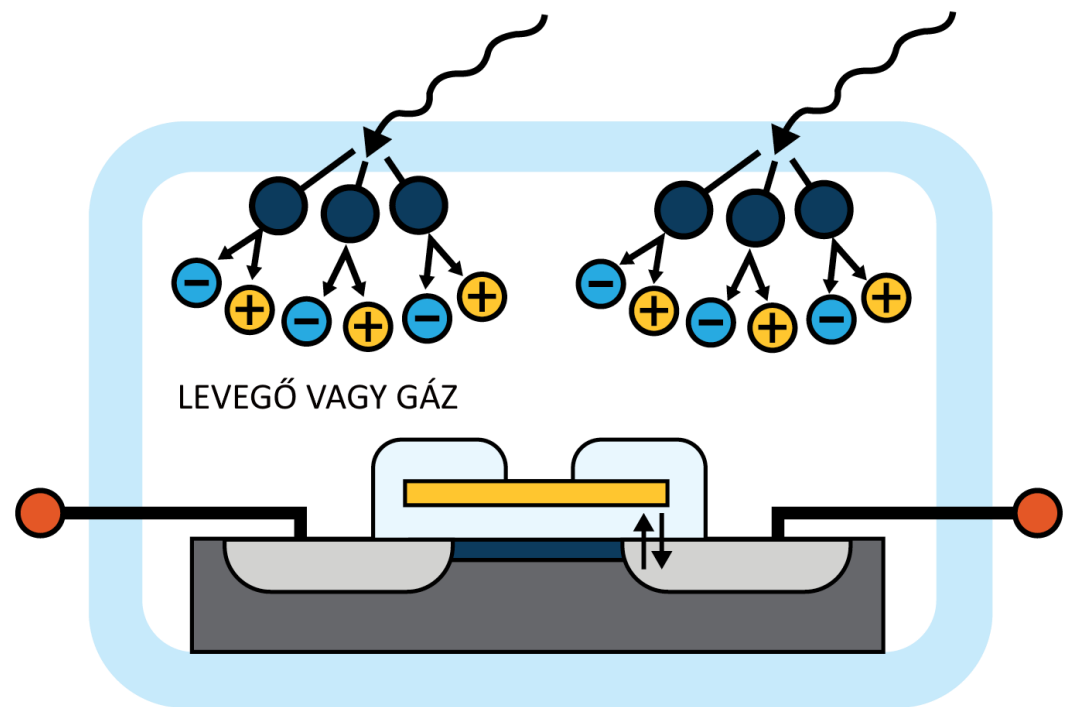
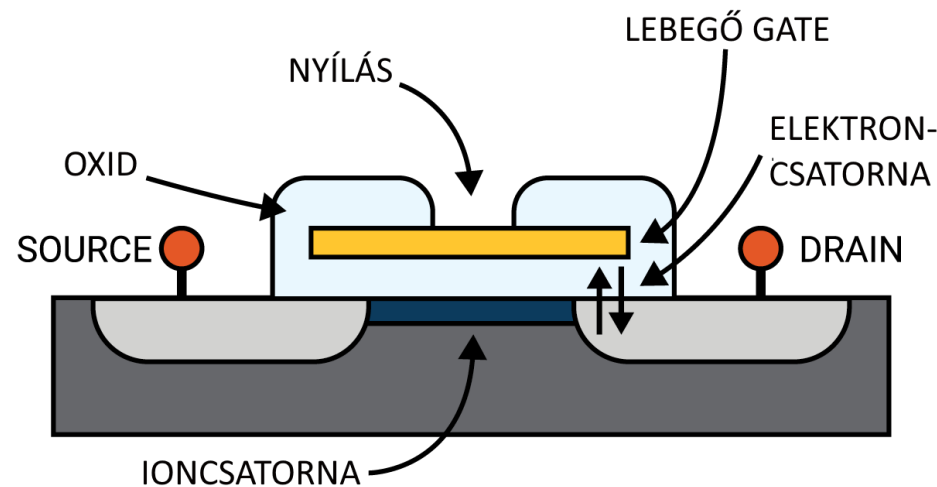
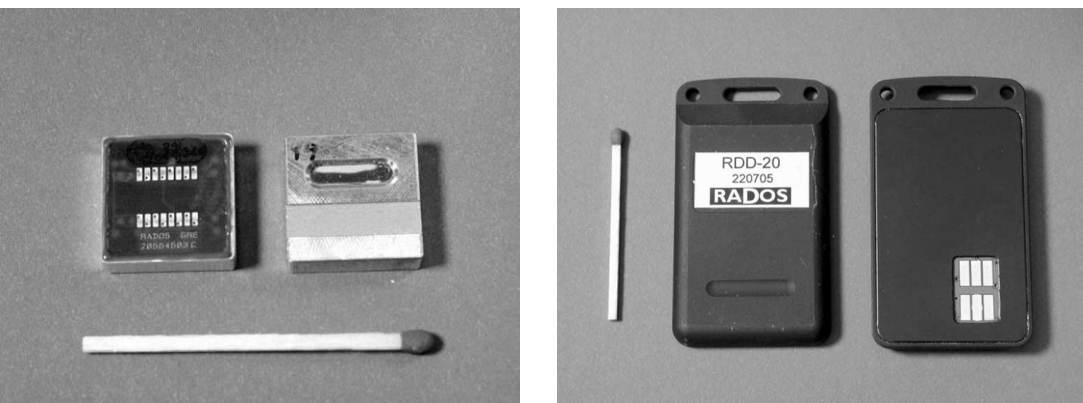
Néhány további tulajdonság

Anyag	Ellenállóság (Gy)	EUR/ cm ³
NaI:Tl	10	6
CsI:Tl	10	4
CsI:Na	10	4
CaF ₂ :Eu	n.a.	20
⁶ LiI:Eu	n.a.	100
⁶ Li üveg	n.a.	1500
BaF ₂	>10 ⁵	15
YAP:Ce	>10 ⁴	100
YAG:Ce	n.a.	90

Anyag	Ellenállóság (Gy)	EUR/ cm ³
LSO:Ce	>10 ⁴	60
LYSO:Ce	>10 ⁴	70
YSO:Ce	>10 ⁴	90
GSO:Ce	>10 ⁶	20
BGO	<10 ³	35
CdWO ₄	<10 ³	60
PbWO ₄	>10 ⁵	6
ZnWO ₄	n.a.	40
LaBr ₃ :Ce	10 ⁵	500
LaCl ₃ :Ce	10 ⁵	500

Direkt-iontárolós doziméterek (DIS)

- A GATE elektróda „lebeg” egy gáztérfogatban.
- A keltett töltéspárok a GATE (-) és a kamrafal (+) felé vándorolnak.
- A SOURCE elektróda egy E²PROM, nem volatilis memóriához csatlakozik.
- Az E²PROM az elektronok hatására nyíló térvezérlés miatt kap töltést.



	PIN	APD	PMT	SiPM	DIS
Üzemi jeltorzítás	Alacsony	Magas	Magas	Alacsony	Alacsony
Hőmérséklet-érzékenység	Alacsony	Magas	Alacsony	Alacsony	Alacsony
Mechanikai védettség	Magas	Közepes	Alacsony	Magas	Közepes
Környezeti fényérzékenység	Nem	Nem	Igen	Nem	Nem
Kiolvasási elektronika	Összetett	Összetett	Egyszerű	Egyszerű	Egyszerű
Kialakítás	Kompakt	Kompakt	Nehézkes	Kompakt	Kompakt
Mágneses térre érzékeny?	Igen*	Igen*	Igen	Nem	Nem
Zaj	Alacsony	Közepes	Alacsony	Magas	Közepes
Beállási idő	Közepes	Hosszú	Rövid	Rövid	Rövid
	* Mivel az elektronika a detektorhoz közel kell elhelyezkedjen.				

Aktív doziméterek metrológiája

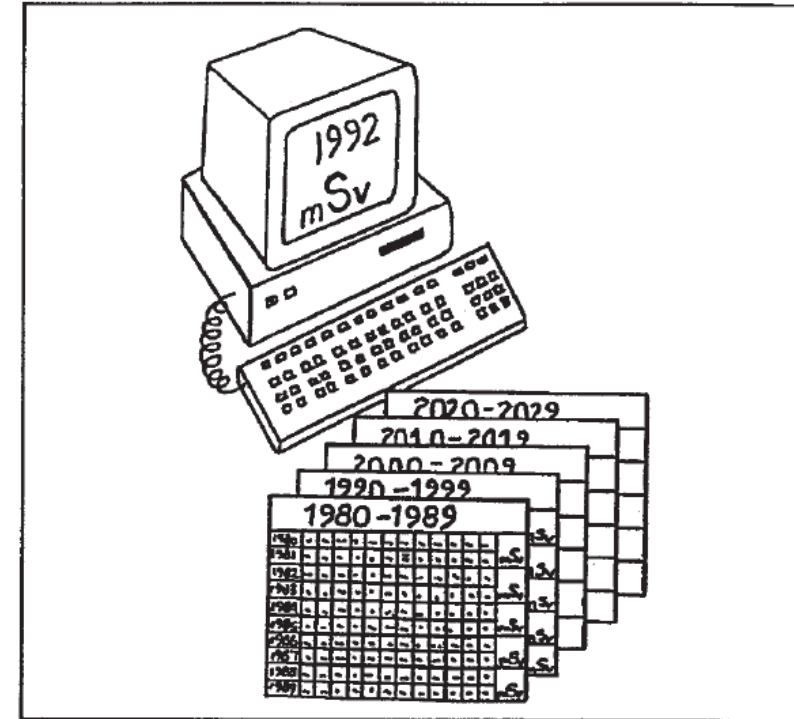
IEC 61526:2024 Radiation protection instrumentation - Measurement of personal dose equivalents for X, gamma, neutron and beta radiations - Active personal dosimeters

Újdonságok a korábbi kiadáshoz képest:

- A $H_p(3)$ szemlencsére vonatkozó kritériumokat is tartalmazza;
- A $H_p(0,07)$ bőrre és végtagokra vonatkozó kritériumokat is tartalmazza;
- Ide tartoznak az aktív-passzív doziméterek közé sorolható eszközök: „hibridek”;
- Előírások a szoftverekre;
- Az IEC 62387 szabvány linearitásra vonatkozó követelményeivel harmonizálták;
- A neutronsugárzás energia szerinti válaszfüggvényére újabb előírások.

A „dózis” nyilvántartásáról

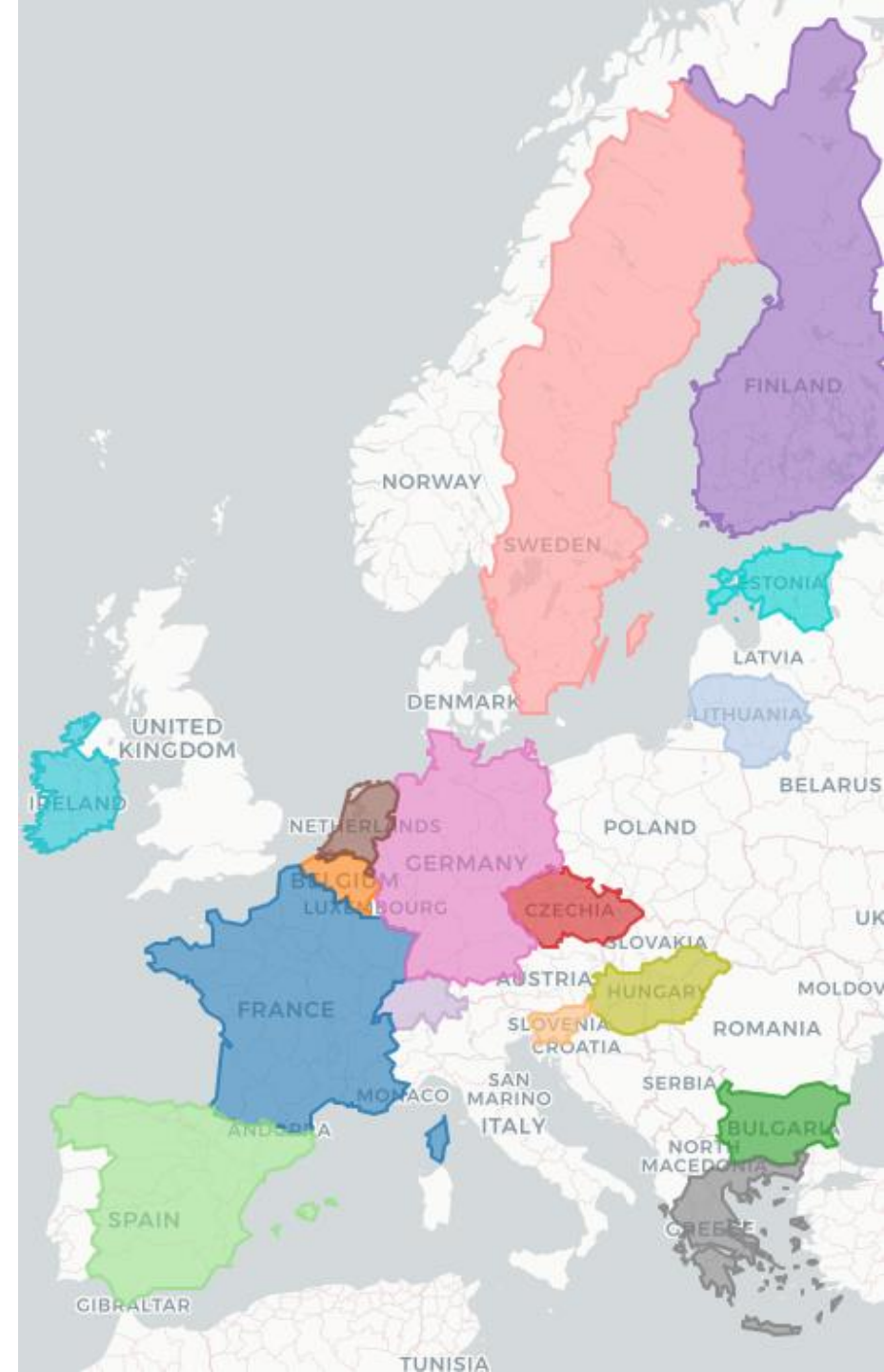
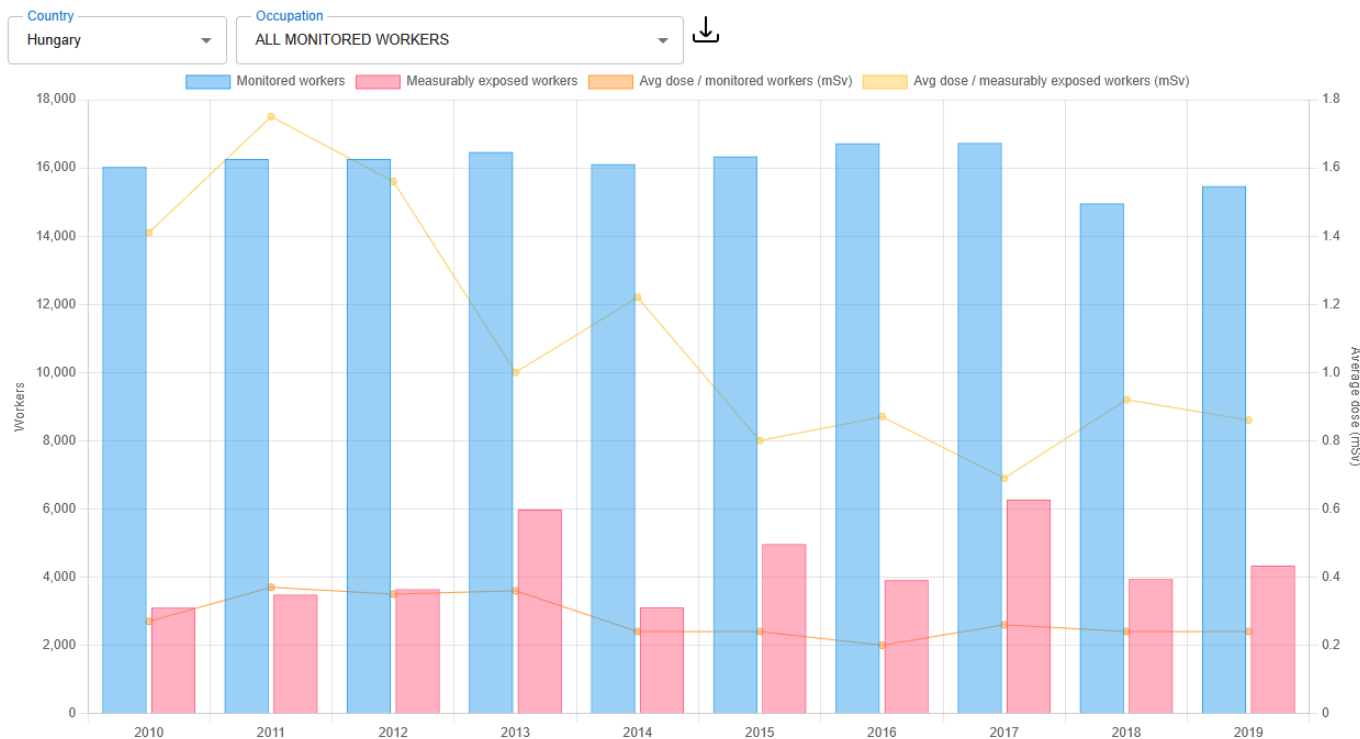
- A hatósági követelményeknek (korlát) való megfelelés igazolására
- Trendelemzésre
- Eljárások és módszerek fejlesztésére
- Foglalkozásegészségügyi célra
- Foglalkozási megbetegedések vizsgálatához
- **Támogatja az epidemiológiai kockázatelemzést**
- OSZDNY: Országos Személyi Dozimetriai Nyilvántartás (1967 óta)



Nemzetközi kitekintés

- ESOREX platform a dózisok elemzésére:
<https://esorex-platform.org/>

Monitored and measurably exposed workers combined with average individual dose



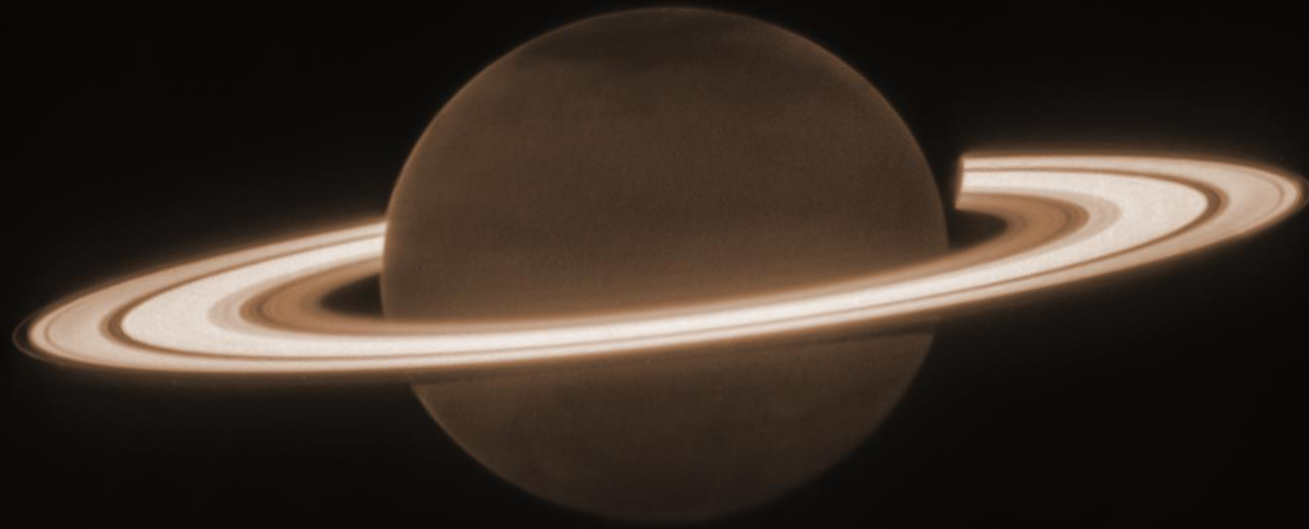
ISO 24426: Radiological protection — Content of input data for the statistical analysis of dose records of individuals monitored for occupational exposure to ionizing radiation

Sugárveszélyes foglalkozások besorolása:

- Orvosi, nukleáris, ipar, természetes, hadászati, egyéb szektorok
- 200+ foglalkozás (pl. hegesztő, kereskedő, navigátor, telepített durvaszerkezet-vizsgáló kezelője stb.)

Radiographer working in a university hospital's Radiology Dept.		
EXPOSITION		CODE
Exposure Situation	Planned exposure situations	E1
Method of determination	Personal dosimetry with passive detector(s)	M1
Dose type	Whole-body personal dose equivalent, $H_p(10)$	D2
Frequency and start of period of wearing dosimeters	2023-03-01 P 1M (=monthly)	F1
Pathway of exposure	External exposure	P1
Radiation type	Photons (X-ray, gamma) radiation	R2
SECTORS		
Sector 1	Medical	S1
SUB-SECTORS S1 [Medical]		
Diagnostic radiology (other than dental practice)		S1-10
OCCUPATIONS [Medical]		
Radiographer		S1-10-008
ANNUAL DOSE (YYYY-01-01 to YYYY-12-31)		mSv
		1,03

Köszönöm a megtisztelő figyelmet!



Forrásjegyzék

- Achievements of BIR (<https://www.bir.org.uk/about-us/history/achievements-of-bir.aspx>); elérés: 2025. 03. 22.
- A Brief History of Radiation; William C. Inkret, Charles B. Meinhold és John C. Taschner, Los Alamos Science, 1995. november 23.
- Encyclopaedia of Historical Metrology, Weights, and Measures Volume 1, Jan Gyllenbok, 2018 ISBN: 978-3-319-57598-8
- Permissible Dose: A History of Radiation Protection in the Twentieth Century, Walker J. S., 2000, ISBN: 9780520223288
- William H. Rollins (1852-1929): X-ray Protection Pioneer, Journal of the History of Medicine and Allied Sciences · July 1964, doi: 10.1093/jhmas/XIX.3.287
- ICRU Report 51, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, Volume os-26 Issue 2, September 1993
- Calibration of radiation protection monitoring instruments, IAEA, Bécs, 2000, STI/PUB/1074
- Chemical dosimeters, John A Adamovics, Robert J Coakley. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1305 (2019) 012028, doi:10.1088/1742-6596/1305/1/012028
- Marrale, M.; d'Errico, F. Hydrogels for Three-Dimensional Ionizing-Radiation Dosimetry. Gels 2021, 7, 74. <https://doi.org/10.3390/gels7020074>
- P. Olko, Advantages and disadvantages of luminescence dosimetry, Radiation Measurements Volume 45, Issues 3–6, March–July 2010, Pages 506-511
- Go Okada, Kazuki Hirasawa, Takayuki Yanagida, Hidehito Nanto; TSL/OSL/RPL Automated and Integrated Measurement System (TORAIMS); Sensors and Materials, Vol. 33, No. 6 (2021) 2117–2128

Forrásjegyzék

- Botter-Jensen, L. Luminescence Techniques: Instrumentation and Methods Radiation Measurements 45 27(5/6):749-768, 1997.
- Botter-Jensen, S.W.S. McKeever, Ann G. Wintle Optically Stimulated Luminescence Dosimetry 2003, Hollandia, ISBN: 0444506845
- E. Bulur, L. Botter-Jensen, A. S. Murray, LM-OSL signals from some insulators: an analysis of the dependency of the detrapping probability on stimulation light intensity, Radiation Measurements 33 (2001) 715–719
- Y. Miyamoto és mtsai. Radiophotoluminescence from silver-doped phosphate glass, Radiation Measurements 46 (2011) 1480-1483
doi:10.1016/j.radmeas.2011.05.048
- PRACTICAL RADIATION TECHNICAL MANUAL, IAEA-PRTM-2 (Rev. 1), Individual monitoring, IAEA 2004, Bécs.
- Bill Doherty, PIN Diode fundamentals MicroNote Series 701, Microsemi Watertown
- M Y Nikiforova and B I Podlepetsky 2019, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 498, 012015
- C. Wernli, J. Kahilainen, Direct ion storage dosimetry systems for photon, beta and neutron radiation with instant readout capabilities, Radiation Protection Dosimetry Vol. 96, Nos 1–3, pp. 255–259 (2001)