

Az ELI-ALPS lézeralapú d+D neutronforrásánál folyó sugárbiológiai kísérleteket támogató tevékenységek a HUN-REN ATOMKI-ban

Fenyvesi András

*HUN-REN Atommagkutató Intézet (HUN-REN ATOMKI)
4026 Debrecen, Bem tér 18/c.*

Részvevők

- **HUN-REN Atommagkutató Intézet**
 - **Fenyvesi András**, Biró Barna, Fülöp Zsolt, Molnár József és a Ciklotron Laboratórium munkatársai
- **Szegedi Tudományegyetem, Nemzeti Lézertranszmutációs Laboratórium (SZTE NLTL)**
 - **Osvay Károly**, Búzás Előd, Saba Hussain, Parvin Varmazyar
- **ELI-ALPS, ELI-HU Nonprofit Kft., Orvosbiológiai Alkalmazási Csoport**
 - **Hideghéty Katalin**, Dudás Júlia Rita, Ébert Attila, Molnár Réka, Polanek Róbert, Szabó Emília Rita, Tőkés Tünde

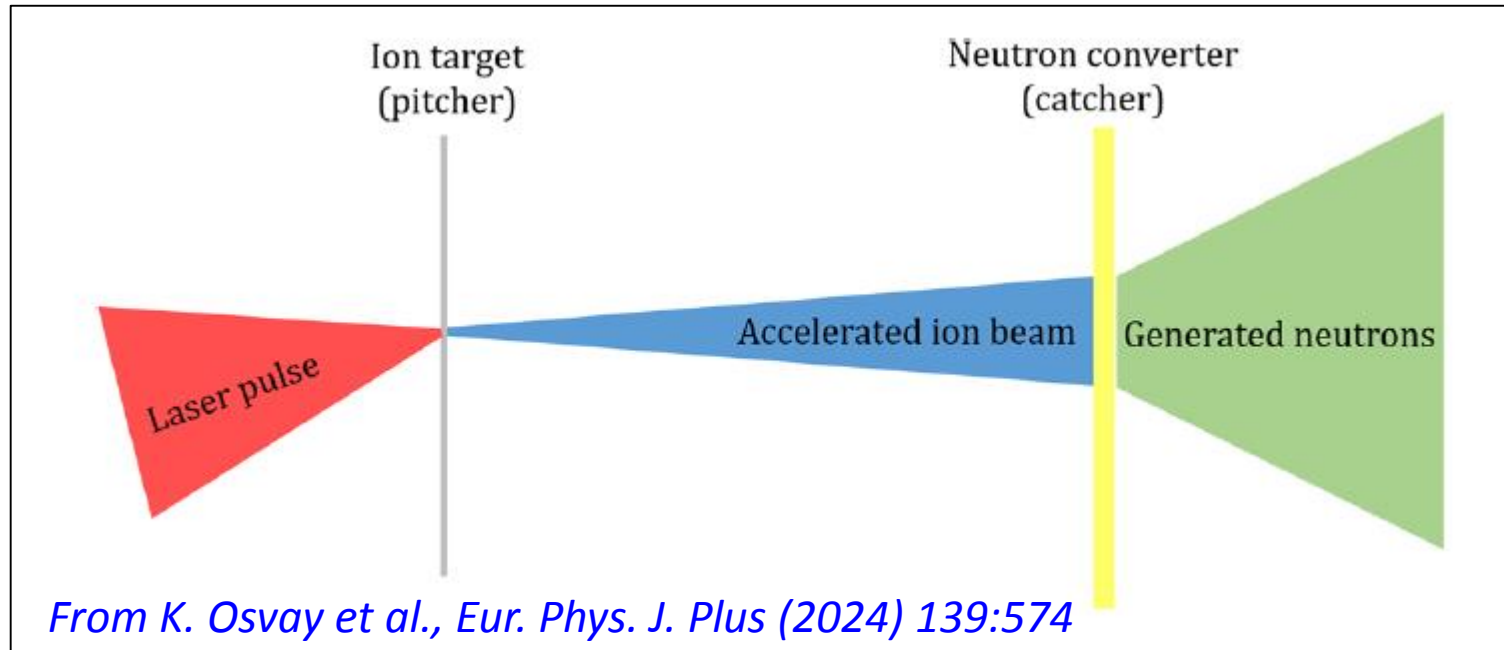
Az SZTE NLTL lézeralapú neutronforrásának elve

ELI-ALPS, Szeged

Ultrathin $(D_4C_2)_n$ dPE film emitting *X-photons, electrons, D-ions, C-ions* Stopping dPE target emitting *neutrons* and *γ -photons*

Laser pulse:

12 fs
 $\approx 4 \times 10^{18}$ W/cm²
inside
3.0 × 2.7 μm^2 (FWHM)
size focal spot



Pulsed mixed radiation field
d+D neutrons accompanied with *γ -photons* from the catcher and *very high intensity X-photons* from the pitcher

Flash sugárterápiák lézeralapú részecskeforrásokkal ?

FLASH-RT*

- 1966 –ban felfedezett sugárbiológiai effektusok
- **Intenzív nemzetközi kutatások tárgya a lézeralapú részecskesugár-források alkalmazhatósága FLASH-RT célokra!**
- $t_{\text{besugárzás}} \ll 1 \text{ sec}$ kezelési idők
- $dD/dt > 40 \text{ Gy/s}$ dózisteljesítmény a tumor térfogatában a számos irányból végzett besugárzások miatt
- Kis elmozdulások a besugárzás rövid ideje alatt
- Az egészséges szövetek kevésbé károsodnak, mint a hagyományos sugárterápiák (CONV-RT) esetén

*Ld. pl. Jiyuan Liu, Guangming Zhou, Hailong Pei, Review - The clinical prospect of FLASH radiotherapy
Radiation Medicine and Protection 4 (2023) 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.radmp.2023.10.005>.

A HUN-REN ATOMKI szerepe

Egy sok felhasználós lézerre alapozott neutronforrás esetén különösen fontos a kísérleti idő hatékony felhasználása és az alapos felkészülés

- Megvalósítható, jól kidolgozott validált módszerek
- Más helyeken alaposan begyakorolt eljárások
- Rutinszerűen tevékenykedő kutatócsoport

A felkészülés szempontjából releváns HUN-REN ATOMKI kompetenciák

- Besugárzási lehetőségek az MGC-20E ciklotronnál
 - **d+D és d+Be neutronforrások**
- Detektorok a besugárzások monitorozására
- Kevert n- γ mezők dozimetriájára vonatkozó tapasztalatok
- Számítógépes programok (NeuSDesc, MCNP, MCNPX, Geant, FLUKA)
- Külső partnerek sugárbiológiai kutatásai támogatására vonatkozó több évtizedes tapasztalatok
- **Tréning lehetőségek (pl. a Pu-Be neutronforrásnál)**

Besugárzások módszerek fejlesztése céljából

Sugárbiológia

- Sugárzásindukált változások vizsgálata modell élő szervezetekben
 - Sejtek
 - Zebradánió halembriók (gerinces faj !)
- A besugárzások során keletkező biokémiai markerek fluoreszcens jelölési módszereinek fejlesztése

Dozimetria passzív detektorokkal

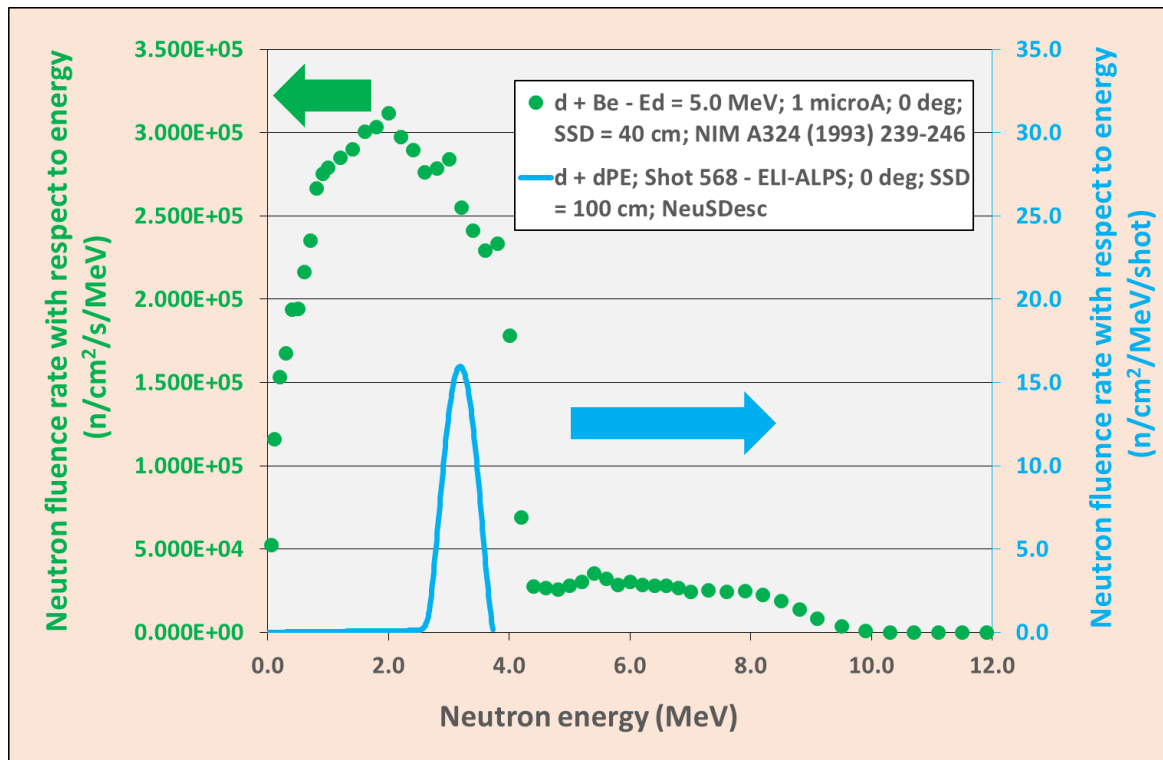
- Kémiai doziméterek (oldatok)
- Dozimetriai filmek
- Buborékdetektorok (érzéketlenek az X- és γ -fotonokra!)

Terv:

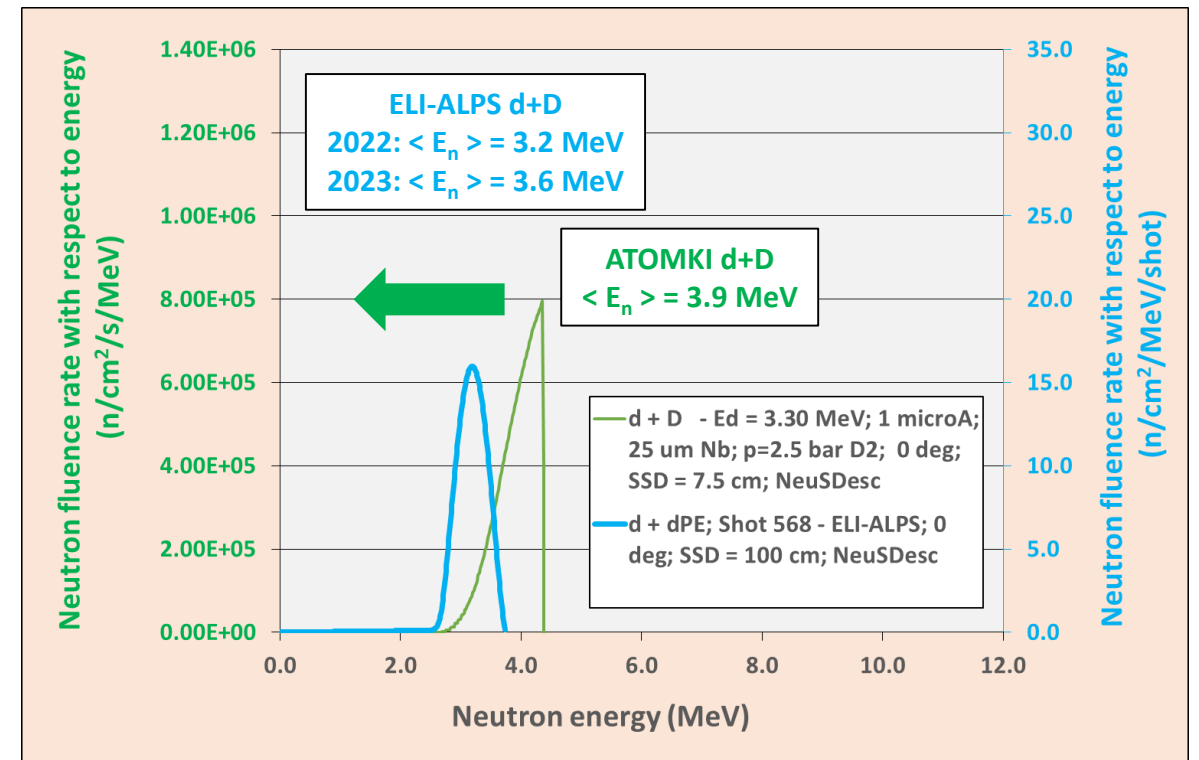
- Termolumineszcens vitrokerámiák ?

Az ATOMKI-ban és az ELI-ALPS –ban végzett besugárzásokhoz használt neutronforrások energiaspektrumai (a $\vartheta = 0^\circ$ irányban)

Széles spektrumú d+Be neutronforrás



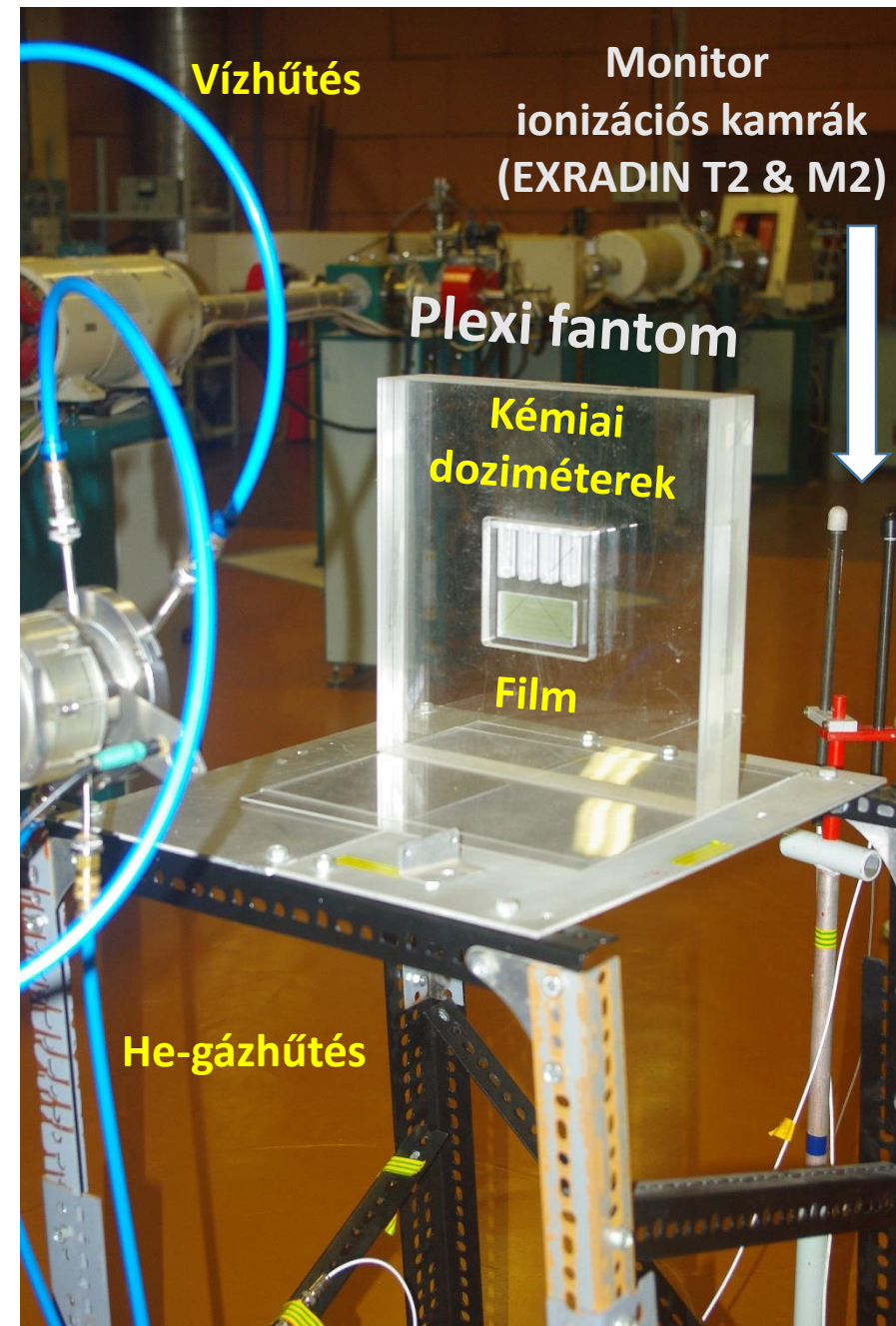
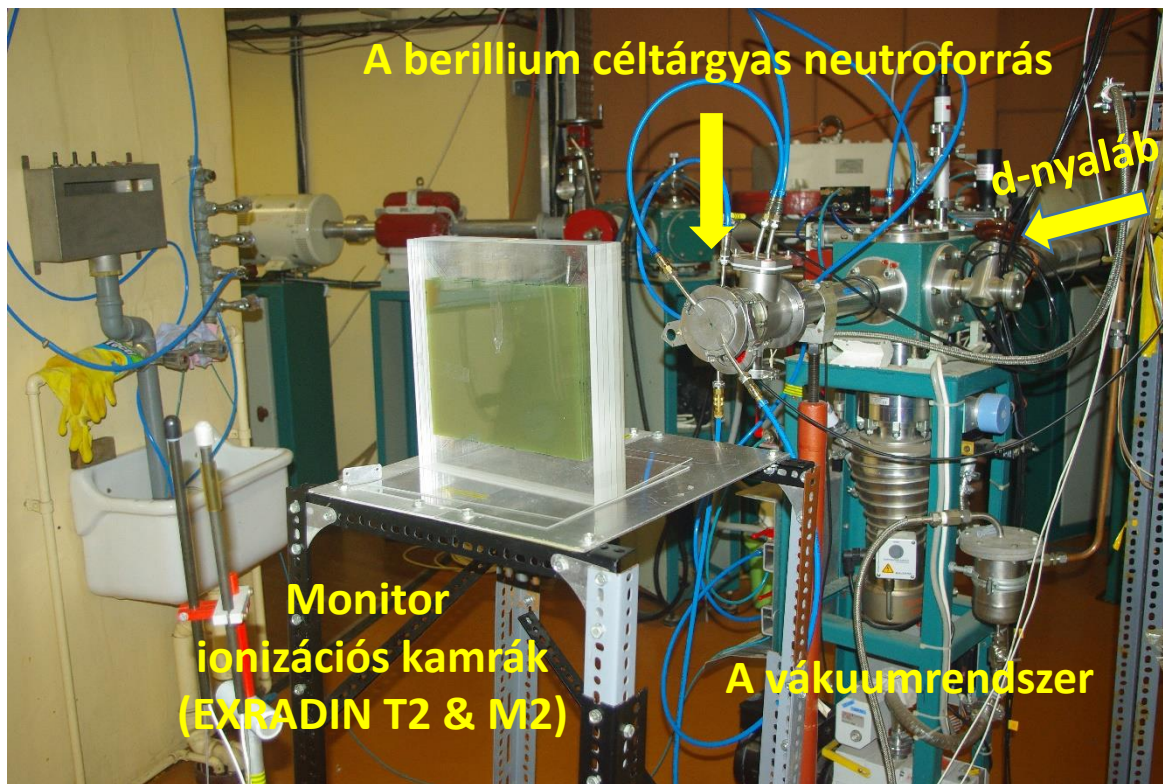
Kvázi-monoenergiás d+D neutronforrás



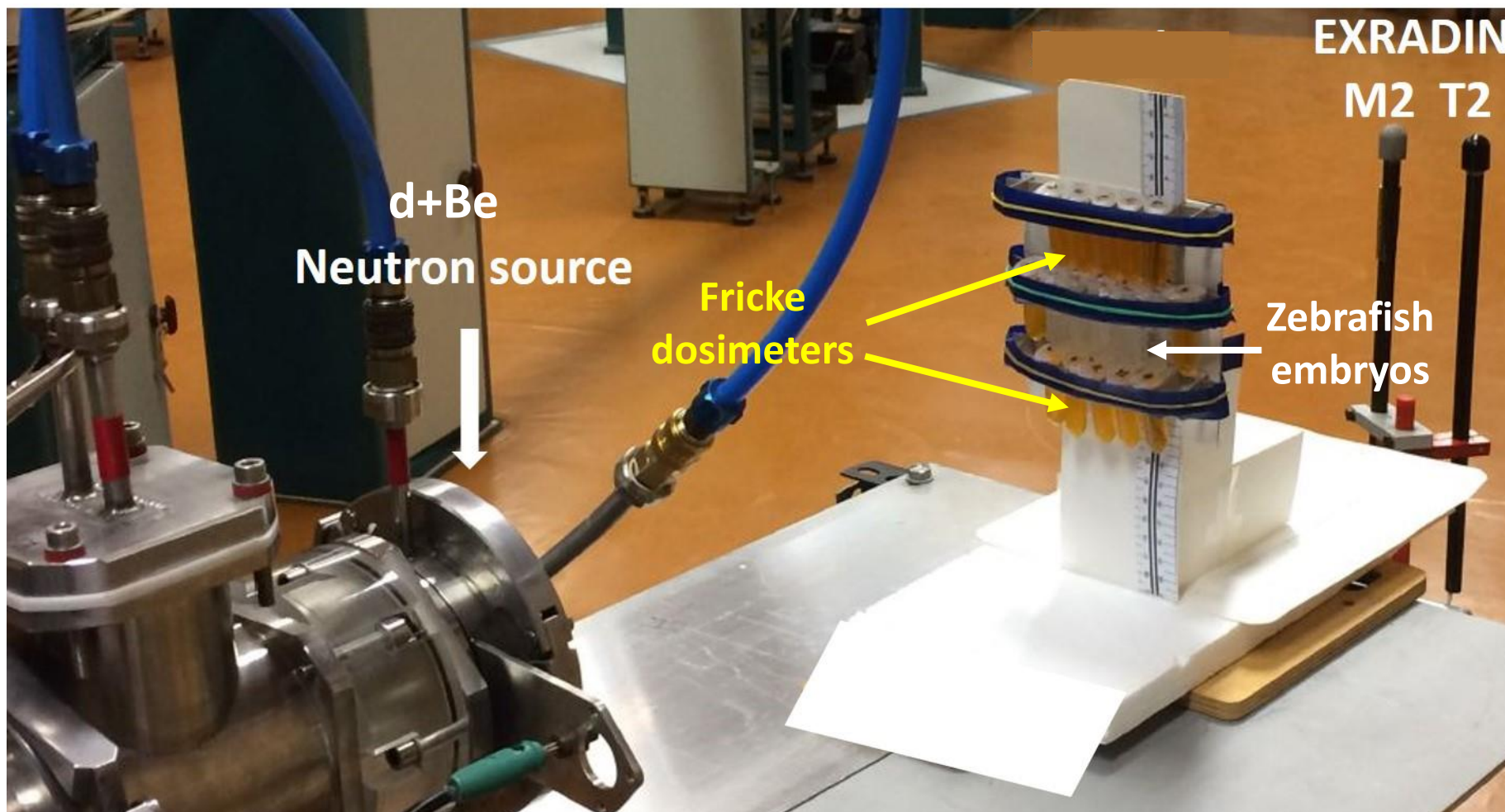
Kísérletek a HUN-REN ATOMKI-ban

Neutron- és foton-érzékenységek vizsgálata széles energiaspektrumú d+Be neutronok és fotonok kevert mezőiben

- Kémiai doziméterek
 - az oldószer (H_2O , D_2O) és a koncentráció szerepe
- Dozimetriai filmek

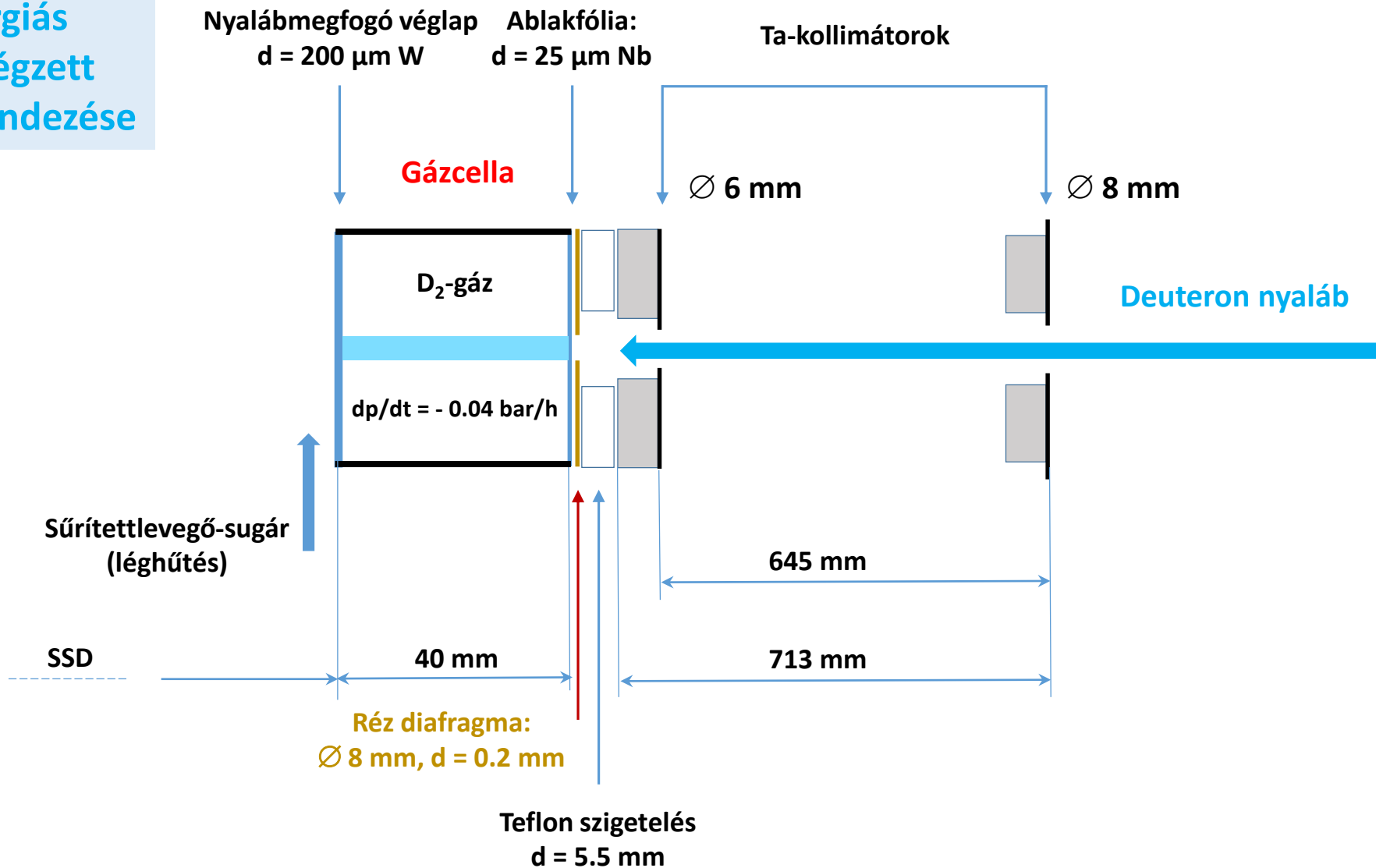
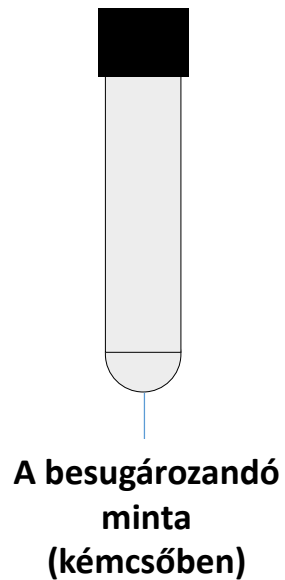


Zebradánió halembriók és Fricke dozimetriai oldatok besugárzása széles spektrumú d+Be neutronokkal

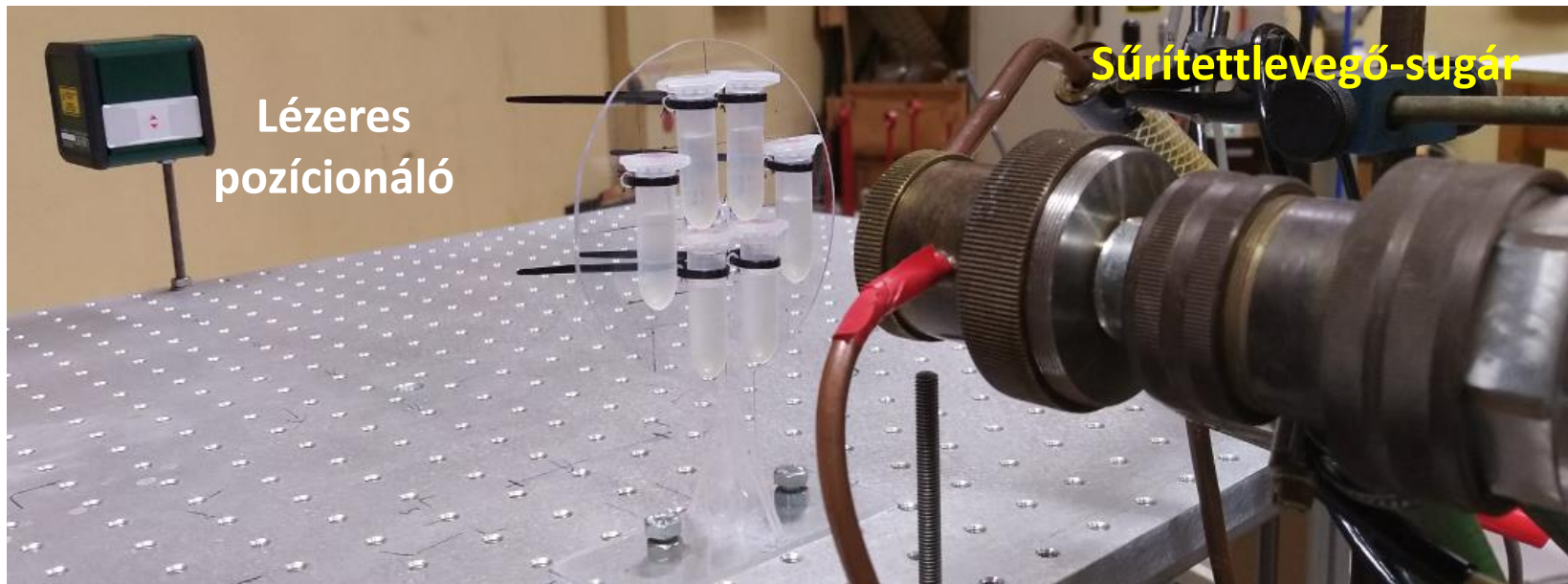


E. R. Szabó et al., **A novel vertebrate system for the examination and direct comparison of the relative biological effectiveness for different radiation qualities and sources**, *International Journal of Radiation Biology*, DOI: 10.1080/09553002.2018.1511928

A kvázi-monoenergiás d+D neutronokkal végzett besugárzások elvi elrendezése



Sejtek és Zebradánió halembriók besugárzása kvázi-monoenergiás d+D neutronokkal



Emília Rita Szabó et al., **Radiobiology investigation on low intensity neutron beam with zebrafish embryo model**,
12th RAD Conference of Radiation, Natural Sciences, Medicine, Engineering, Technology and Ecology
June 17-21, 2024, Herceg Novi, Montenegro
https://www.rad-conference.org//RAD_2024-Book_of_Abstracts.pdf#page=246

Buborékdetektorokkal kapcsolatos vizsgálatok

Fontosság:

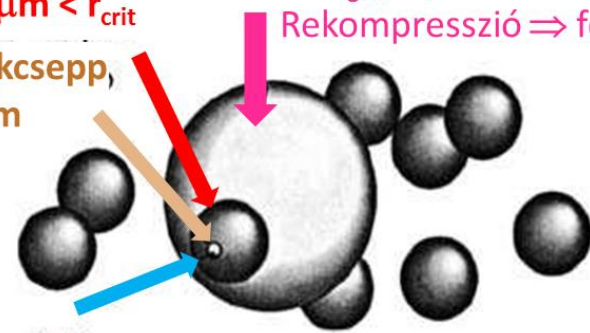
Nem érzékenyek az X- és a γ -fotonokra

A buborékdetektorok működési elve

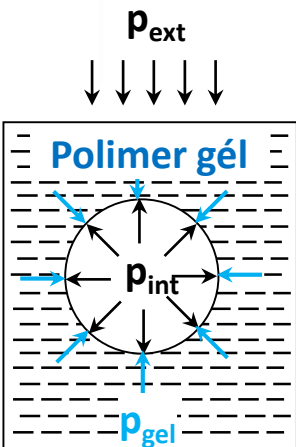
Instabil gáz + túlhevült folyadék (pára), ha
 $r_{\text{vapour}} \approx (20 - 100) \mu\text{m} < r_{\text{crit}}$

Túlhevült folyadékcsepp,
 $r_{\text{fluid}} < 100 \text{ nm}$

Stabil expandált gázbuborék, ha
 $r_{\text{gas}} \approx (100 - 600) \mu\text{m} > r_{\text{crit}}$
 Rekompreszió \Rightarrow folyadékcsepp



$$T_{\text{fluid}} - T_{\text{boil}} > 0$$



Meglökött atommag

$$r_{\text{crit}} = \frac{2 * \alpha(T)}{\Delta p}$$

$$\Delta p = p_{\text{int}} - p_{\text{ext}}$$

$$T = T_{\text{fluid}} - T_{\text{boil}}$$

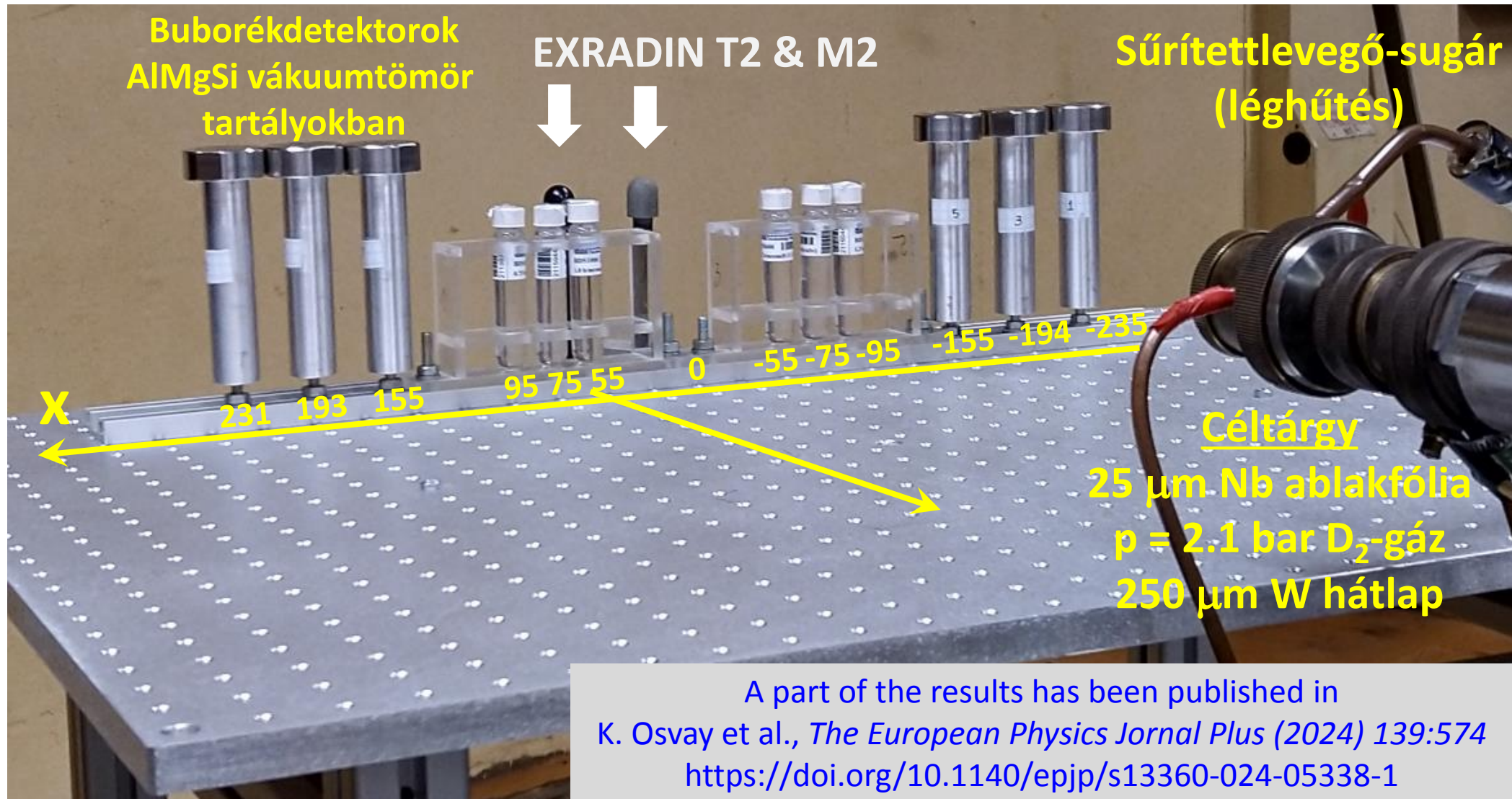
$$p_{\text{int}} = p_{\text{ext}} + p_{\text{gel}} = p_{\text{ext}} + \frac{2 * \alpha(T)}{r_{\text{crit}}}$$

Stabil gázbuborék keltéséhez szükséges minimális elnyelt energia

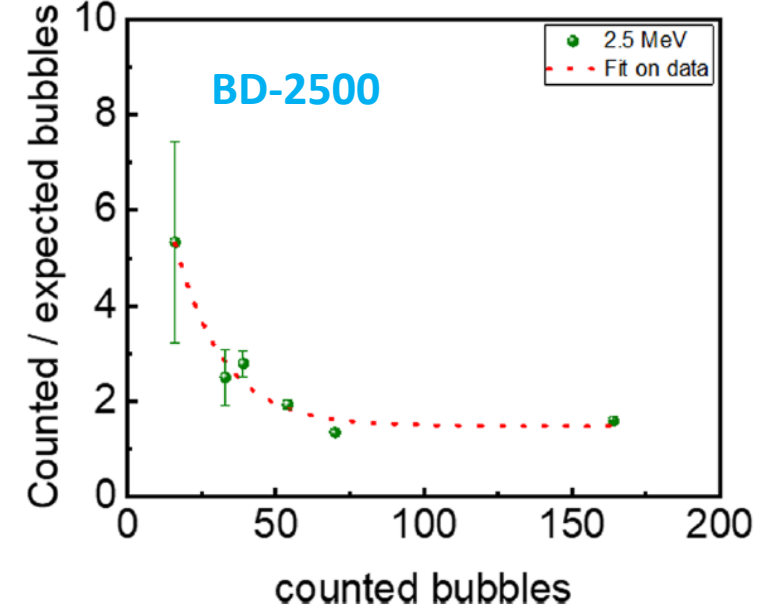
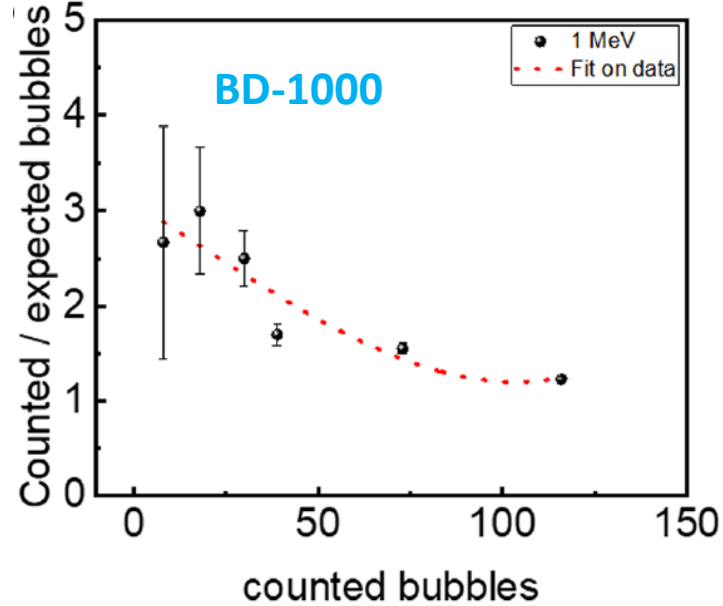
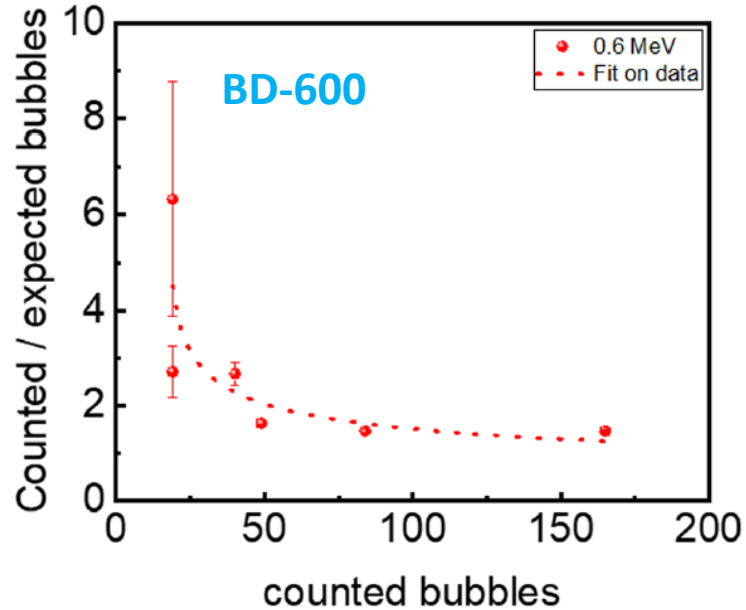
$$E_{\text{min}} = 16\pi * \alpha^3 (T) * (\Delta p)^2 + \left(1 + \frac{2}{3} \rho_v * \frac{H}{M * \Delta p} \right)$$

- r_{crit} - kritikus sugár
- α - felületi feszültségi együttható
- T_{fluid} - a túlhevült folyadék hőmérséklete
- T_{boil} - a folyadék forráspontja
- ρ_v - a pára sűrűsége
- H - a folyadék moláris párolgási hő
- M - a folyadék móltömege

Különböző $E_{neutron;th}$ detektálási küszöbenergiájú buborékdetektorok besugárzási tesztelése és kalibrációja kvázi-monoenergiás d+D neutronokkal



A BTI buborékdetektorainak érzékenysége függ a buborékok térbeli sűrűségétől is $N_{\text{bubble}} < 80$ esetén

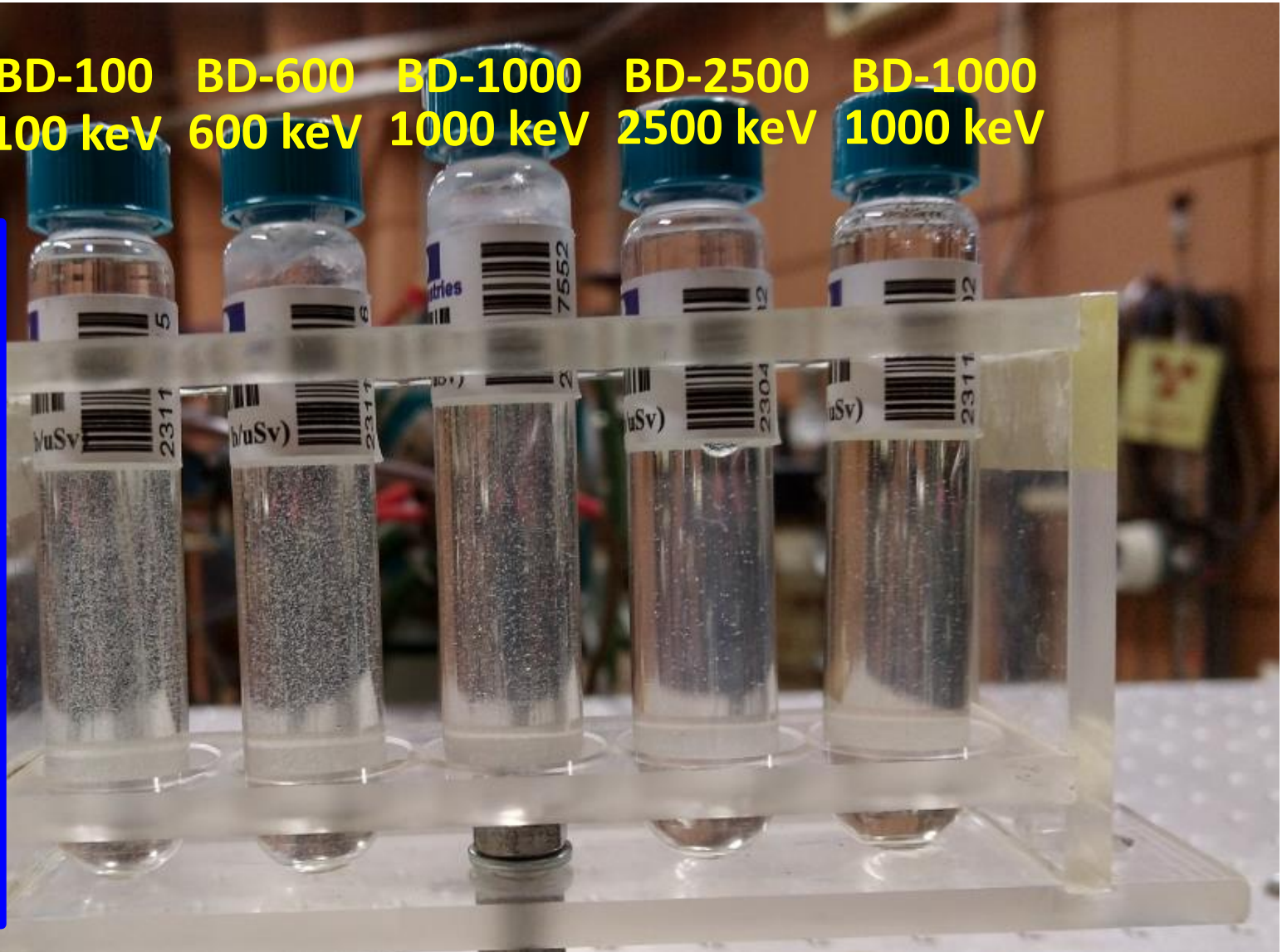
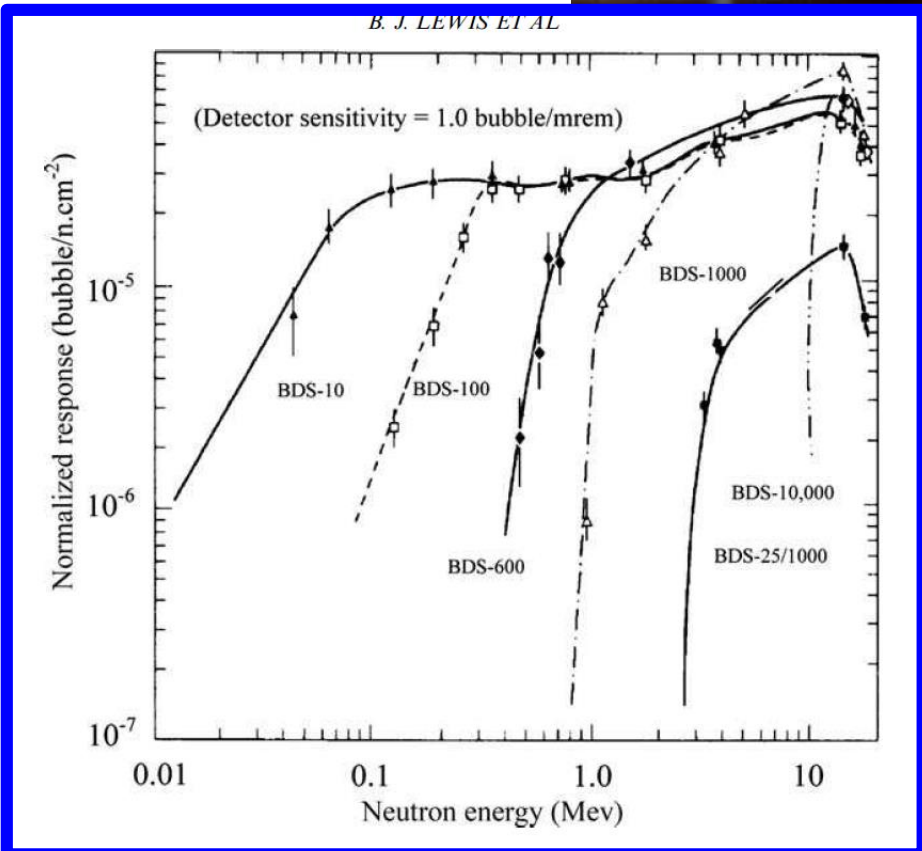


K. Osvay et al., Towards a 10^{10} n/s neutron source with kHz repetition rate, few-cycle laser pulses,
The European Physics Journal Plus (2024) 139:574
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05338-1>

A neutronok energia szerinti eloszlására is kapható információ

n-fluence responses

BD-100 **BD-600** **BD-1000** **BD-2500** **BD-1000**
 $E_{\text{küszöb}}$: 100 keV 600 keV 1000 keV 2500 keV 1000 keV



Összefoglalás

A HUN-REN ATOMKI d+D, d+Be és Pu-Be neutronforrásai

- **Jól alkalmazhatóak a lézerlapú részecskesugár-források orvosi-biológiai alkalmazásait előkészítő kutatási programok során**
 - Fizikai dozimetriai módszerek fejlesztése
 - Sugárbiológiai dozimetriai módszerek fejlesztése
 - Tréningek

Új tudományos publikációk is születtek

Köszönöm a figyelmet!