

Sorozatmérések a ^{137}Cs radioizotóp bomlási sebessége állandóságának vizsgálata céljából

Fenyvesi Edit^{1,2}, Kiss Gábor Gyula², Molnár Dénes¹, Lévai Péter¹,
Barnaföldi Gergely Gábor¹

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

²HUN-REN Atommagkutató Intézet, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c

fenyvesi.edit@wigner.hun-ren.hu

Magyar Magfizikus Találkozó 2024

2024.09.03.-05.

ATOMKI, Debrecen

Bevezetés

- A W^+ vagy W^- bozonok kibocsátására képes elemi részecskék (pl. neutrínók) indukálhatják a d és u kvarkok alábbi átmeneteit: $d + W^+ \rightarrow u$, $u + W^- \rightarrow d$
- A kémiai elemek atommagjai u és d kvarkot tartalmaznak
- A W^+ vagy W^- bozonok kibocsátására képes elemi részecskék intenzitásának változásai a radioaktív atommagok bomlási sebességének változásait okozhatják
- A neutrínók számos geológiai, légköri, asztrofizikai és kozmológiai, folyamat során, emberi tevékenység által, továbbá a Naptevékenység folytán keletkeznek
- Becslések alapján (e.g. Athar, 2022) az Ősrobbanástól származó neutrínók fluxusa a Földön $\approx 10^{22} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{MeV}^{-1}$ a $10^{-8} - 10^{-6} \text{ eV}$ energiatartományban
- A Nap magjában termelődő neutrínók fluxusa $\approx 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{MeV}^{-1}$ a $10^{10} - 10^{12} \text{ eV}$ energiatartományban
- A napneutrínók fluxusa a Föld keringésének excentricitásától és a Nap aktivitásától függően változhat
- Világszerte több hosszú távú mérés zajlott a radioaktív bomlás jól ismert exponenciális törvényétől való eltérések vizsgálatára és értelmezésére (ld. „Status report on long-time decay measurements of ^{137}Cs radioisotope” c. manuscriptünk „Introduction” fejezete)

- A 2022 október - 2024 április időszakban végzett sorozatméréseink során egy ^{137}Cs forrás bomlási sebességét mértük egy nagytisztaságú germánium (HPGe) detektorral a Vesztergombi Nagyenergiás Fizikai Laboratórium (VLAB) Jánossy Földalatti Kutatólaboratóriumában (HUN-REN Wigner FK, Csillebérc, Budapest), 30 méterrel a földfelszín alatt.
- A mostani előadás a kísérleti összeállítást, az adatfeldolgozási módszert és a mérés eddigi eredményeit ismerteti.
- Manuscript megjelenésének dátuma az arXiv-on: 2024.09.06

Status report on long-time decay measurements of ^{137}Cs radioisotope

Edit Fenyvesi^{a,b,*}, Gábor Gyula Kiss^b, Dénes Molnár^a, Péter Lévai^a and Gergely Gábor Barnaföldi^a

^aHUN-REN Wigner Research Centre for Physics, Konkoly-Thege Miklós út 29-33., Budapest, 1121, Hungary

^bHUN-REN Institute for Nuclear Research, Bem tér 18/c, Debrecen, 4026, Hungary

ARTICLE INFO

Keywords:

underground laboratory
nuclear decay rate measurement
HPGe detector
 ^{137}Cs source
modulation of the nuclear decay rate

ABSTRACT

The constancy of nuclear decay rates can be investigated via long-duration precision measurements. It is still an open question whether any (annual) modulation can be observed. Long-lasting nuclear decay rate measurements have been the subject of considerable research effort. A decay rate measurement with a ^{137}Cs source is currently being conducted 30 meters below the ground at the Jánossy Underground Research Laboratory (JURLab, Csillebérc, Hungary) utilizing a High-purity Germanium (HPGe) detector. The laboratory is the low-radiation-background part of the Vesztergombi High Energy Laboratory (VLAB) on the KFKI campus, Csillebérc, Hungary. From October 2022 to April 2024, data of 18 months' worth have been collected, providing a new opportunity to look for variations in decay rates. The experimental setup, data processing method, and the first results of this measurement are presented here.

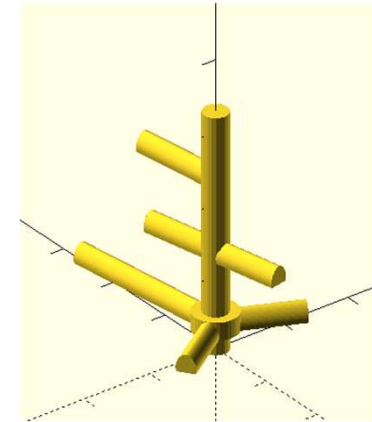
1. Introduction

One of the most elementary phenomena in nuclear physics is the law of nuclear decays, namely, the number of yet-undecayed nuclei drops exponentially with time as $\sim \exp(-\lambda t)$, where the decay constant, λ is characteristic to the specific nucleus. Tantalizing observations [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] suggest that the value of the *decay constant* might be modified by certain effects, therefore it is non-stationary. Such effects may be tiny but, nevertheless, might be observed by high-accuracy, long-lasting measurements in a monitored and controlled environment.

corresponding neutral atoms. For example, a fully stripped $^{187}\text{Re}^{75+}$ ion decays nine orders of magnitude faster than the neutral atom [10]. Another example is ^{163}Dy , which is stable as a neutral atom but becomes radioactive, with $t_{1/2} \approx 47$ days, when fully ionised to $^{163}\text{Dy}^{66+}$. The later case has a strong impact on the path of the astrophysical *s*-process synthesizing about 50% of the isotopes heavier than iron [11]. The physical basis of this effect is that the emitted β -particle (electron) is unable to access a bound final state and, therefore, it needs to be emitted with high kinetic energy, which is sometimes not possible because of energy conservation. A review of β -decay rate experiments carried

Jánossy Földalatti Kutatólaboratórium

- Legalsó szint 30 m-rel a földfelszín alatt, Dachsteini mészkőben
- A laboratórium hasznos területe 150 m², 3 szinten:
 - -1. szint: 20 m²,
 - -2. szint: 2 x 20 m²
 - -3. szint: 2 x 20 m² + 50 m²
- 40 cm vastag külső falak reaktorbetonból
- Légkondicionáló, UPS, internet, telefon, laboratóriumi gázrendszer
- A laboratórium ideális olyan mérésekhez, amelyek alacsony kozmikus háttérrel igényelnek
- Alkalmas egyéb olyan mérésekhez is, amelyek stabil hőmérsékletet és alacsony környezeti és szeizmikus zajszintet igényelnek
- A fizikai környezetet hőmérséklet-, nyomás- és páratartalom-érzékelőkkel, szeizmométerrel és ATOMKI infrahang mikrofonnal monitorozzuk
- Teljes CAD modell és sűrűségterkép elérhető

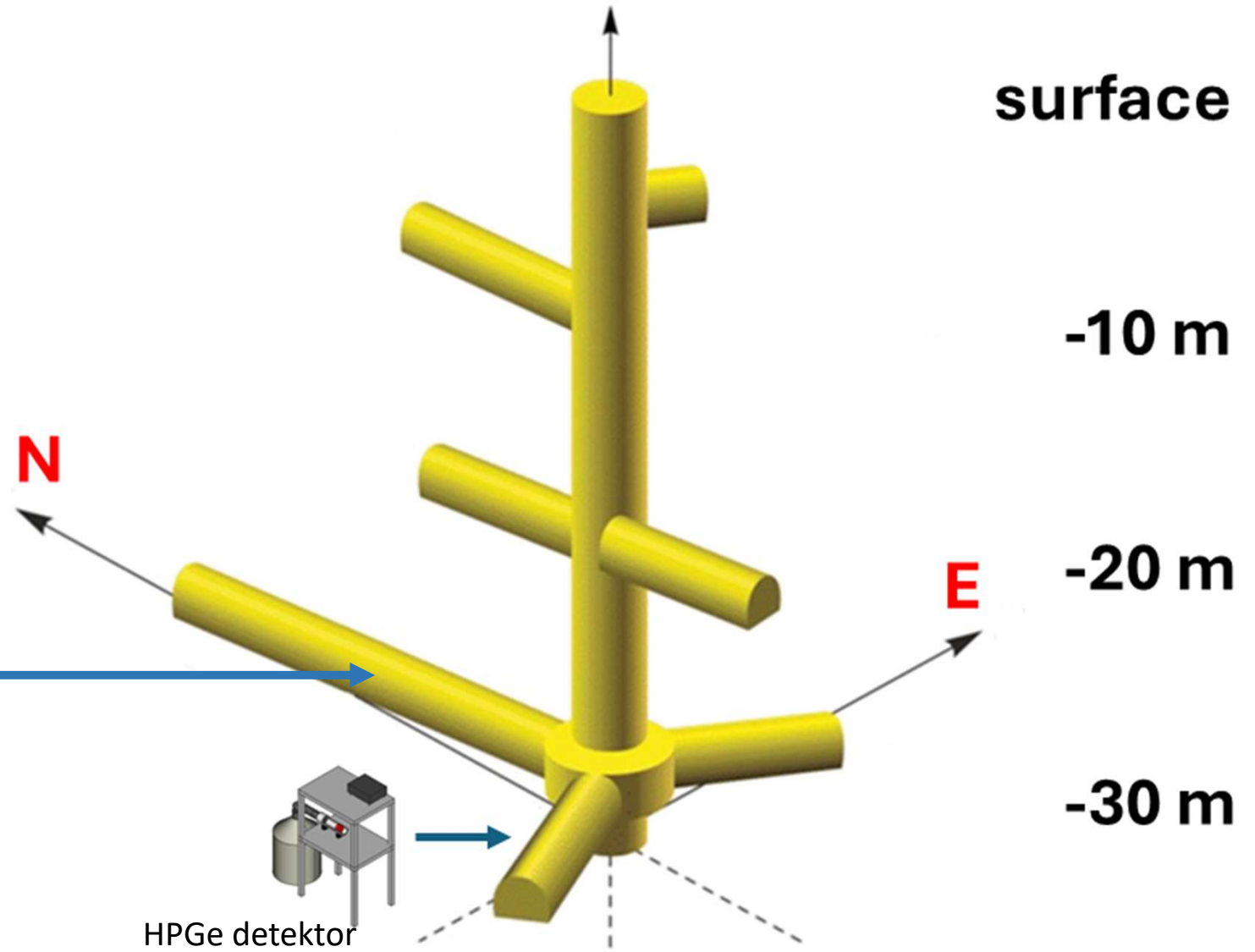




Müontomográfia
(több szinten)



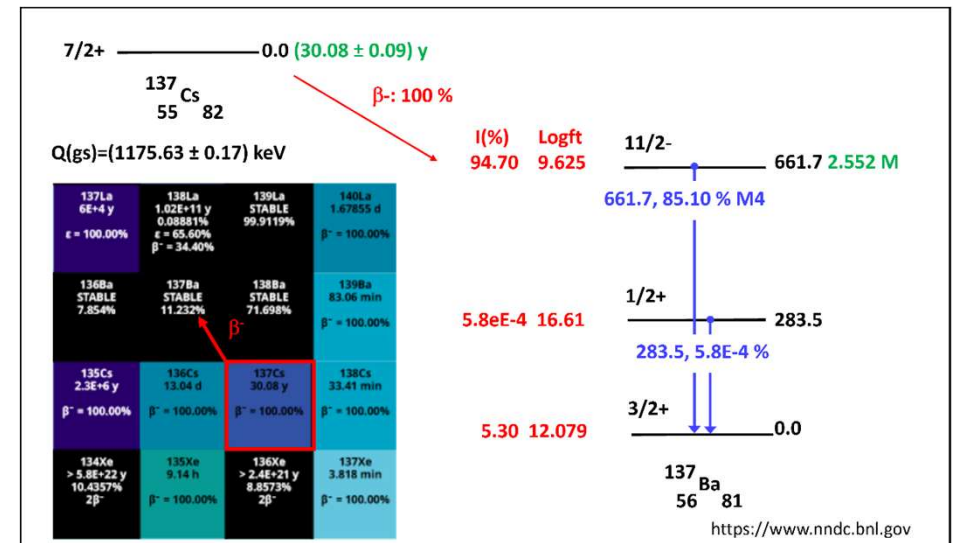
Az Eötvös-kísérlet
megismétlése,
infrahang- és
szeizmikus
zajmérések



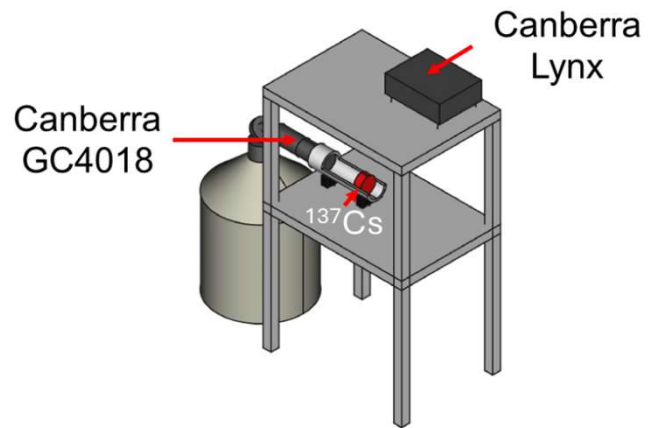
A ^{137}Cs Nap-elektronneutrínók által kiváltott bomlása

A ^{137}Cs magok száma kétféleképpen csökkenhet:

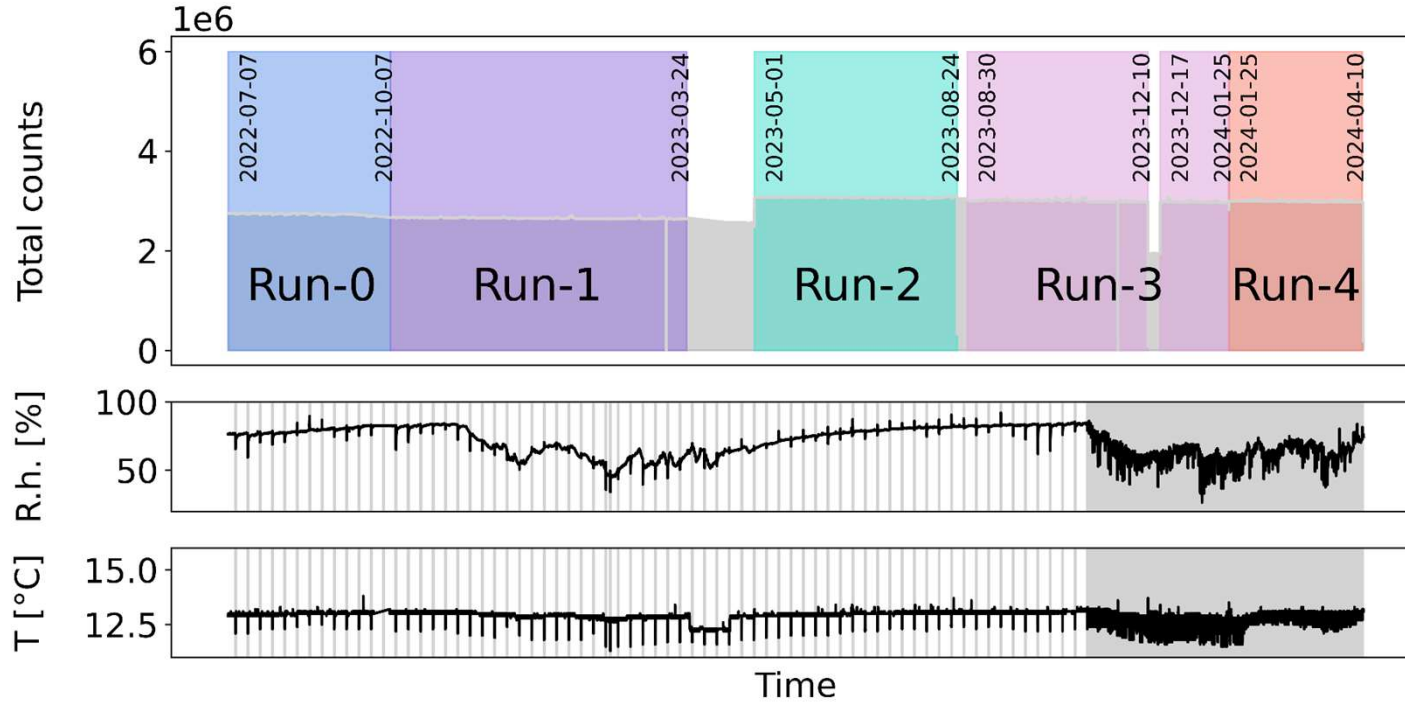
- **Spontán bomlás során:** $^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba} + e^- + \bar{\nu}_e$
- Főleg a **Nap-elektronneutrínók által kiváltott bomlás során:**
 - az elektronneutrínók kölcsönhatásba lépnek a ^{137}Cs neutronjaival: $\nu_e + n^0 \rightarrow e^- + p^+$
 - csökkenthetik a ^{137}Cs magok számát a $\nu_e + ^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba} + e^-$ reakció révén



^{137}Cs mérés

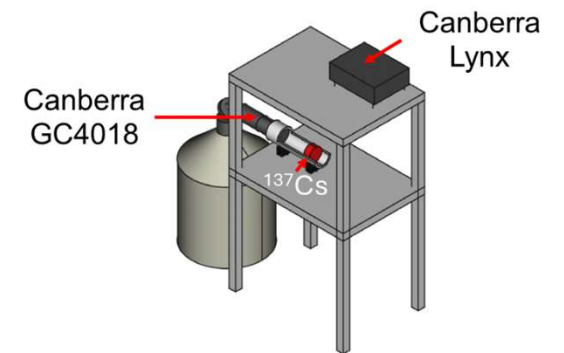
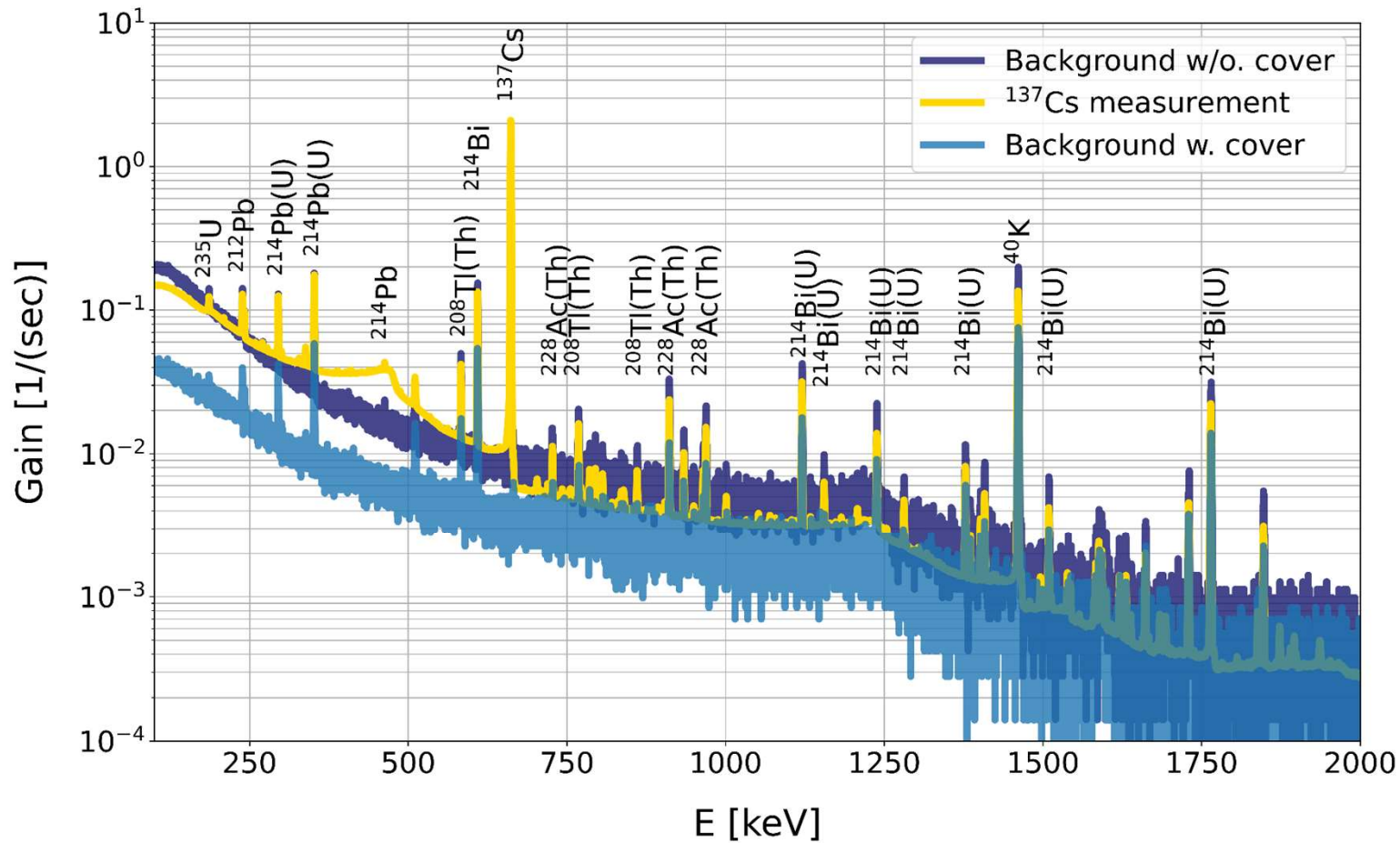


^{137}Cs mérés szakaszai



Run #	Eleje	Vége	Megjegyzés
Run-0	2022.07.07.	2022.10.07.	Tesztelés, izotóp megfelelő elhelyezésének megkeresése
Run-1	2022.10.07.	2023.03.24.	Kiértékelt szakasz (egy rövid megszakítás volt a DAQ rendszerben)
Run-2	2023.05.01.	2023.08.24.	A Run-1 és Run-2 között egy jelgenerátor kalibrálása zajlott
Run-3	2023.08.30.	2024.01.25.	A mérés rövid ideig szünetelt, mivel az izotópot ellenőrzés céljából eltávolítottuk.
Run-4	2024.01.25.	2024.04.10.	Miután a kísérletet leállítottuk, az izotópot eltávolítottuk.

Mért gamma spektrumok összehasonlítása



Adatfeldolgozás

Kalibráció

- A gamma-spektrumokat 32768 bin-ből álló hisztogramokba gyűjtöttük
- Lineáris energia kalibráció: $E = A + Bk$, ahol k a k -adik csatorna ($0 \leq k \leq 32767$)
- Kalibrációhoz kiválasztott csúcsok: ^{214}Pb (351.93 keV) és ^{40}K (1460.80 keV)
- Együtthatók: $A = 0.0676$ keV, $B = 0.1765$ keV
- A kalibrálást csak egyszer, 2022 márciusában végeztük el. Ezt követően A és B fixen maradt, azaz nem történt újrakalibrálás a mérés közben

Holtidő korrekció

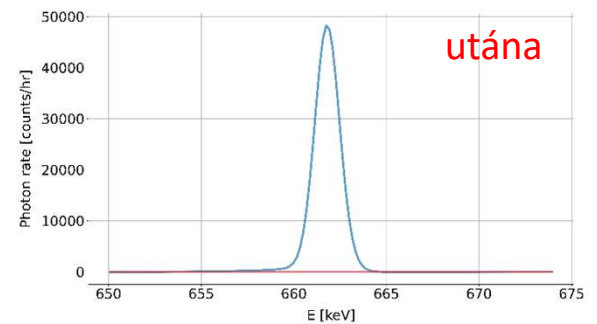
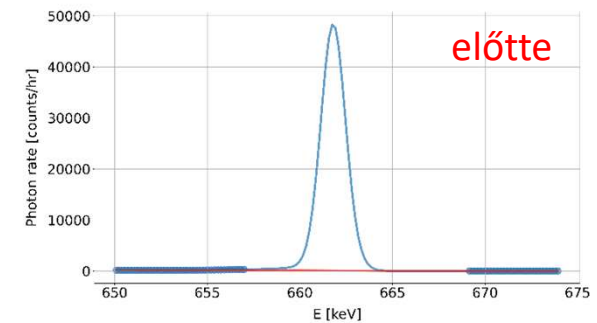
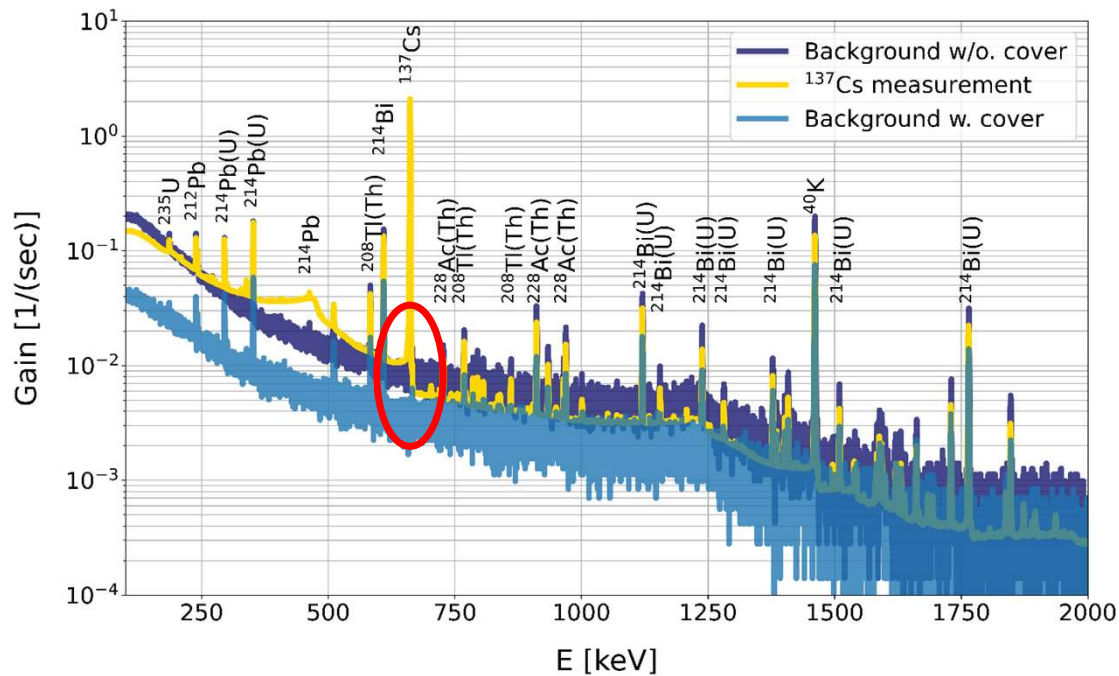
- Nem volt dedikált eszköz a holtidő mérésére, így a LYNX által tárolt élőidő-bebecslésekre hagytuk:

$$\Delta t_{live} = \Delta t_{nominal} - \Delta t_{dead}$$

- Az egyórás mérési intervallumokból nyert csúcsokat az alábbi faktorial korrigáltuk: $\Delta t_{nominal} / \Delta t_{dead}$

Háttérlevonás

- Egy mért nyers spektrum háttérét úgy becsültük meg, hogy egy másodfokú polinomot illesztettünk a csúcs két oldalára ([650, 657] keV, [669, 674] keV)
- A háttér kivonása után a csúcs alatti területet a teljes [650, 674] keV tartományon történő Gauss-illesztéssel határoztuk meg



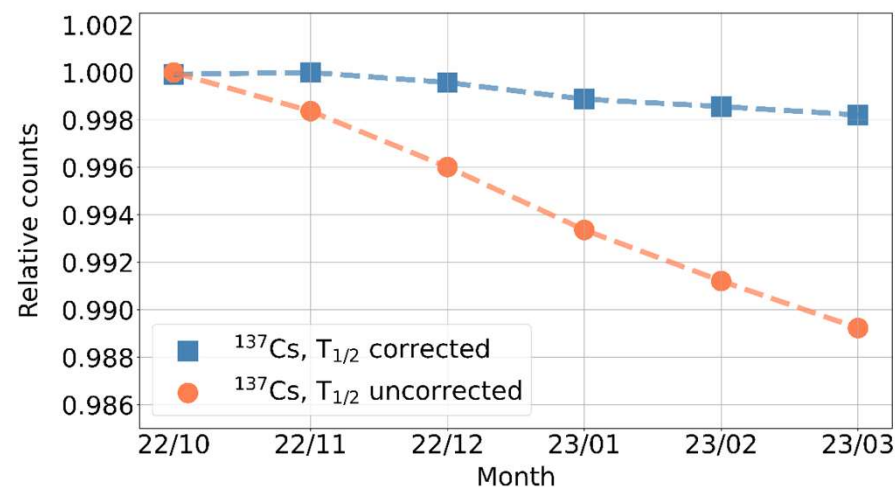
1. elemzési módszer

- Mindegyik egyórás adatsort külön elemeztünk: háttérlevonás, holtidő korrekció
- A Run-1 egyórás adatszakaiból havi átlagokat számoltunk
- A ^{137}Cs felezési ideje alapján ($T_{1/2} = 30.05 \pm 0.08$ év) várt csökkenés kb. $\approx 1.1\%$
- Egy adott $[t, t + \Delta t]$ időintervallumra vonatkoztatva a forrás t_0 -hoz képesti aktivitása:

$$R(t, \Delta t | t_0) = \frac{1}{e^{-\lambda t_0}} \left(\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} dt' e^{-\lambda t'} \right) = e^{-\lambda(t-t_0)} \frac{1-e^{-\lambda\Delta t}}{\lambda\Delta t},$$

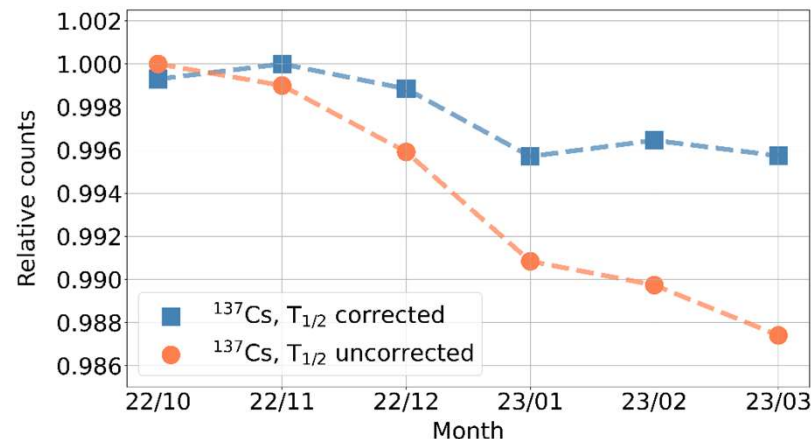
ahol a $\lambda \equiv \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ a ^{137}Cs bomlási állandója, $t_0 = 2022.10.01. 00:00$

- Az egyórás mérési szakaszok során kapott csúcsokat $R(t_{\text{nominal}}, \Delta t | t_0)$ -lal való osztással visszaskáláztuk a közös t_0 referencia időpontba
- Az exponenciális bomlásra történő korrigálás után még marad $\sim 0.2\%$ mértékű csökkenés
- Ez azt jelzi, hogy a háttérkivonás és/vagy a csúcsok Gauss-illesztése nem elég pontos



2. elemzési módszer

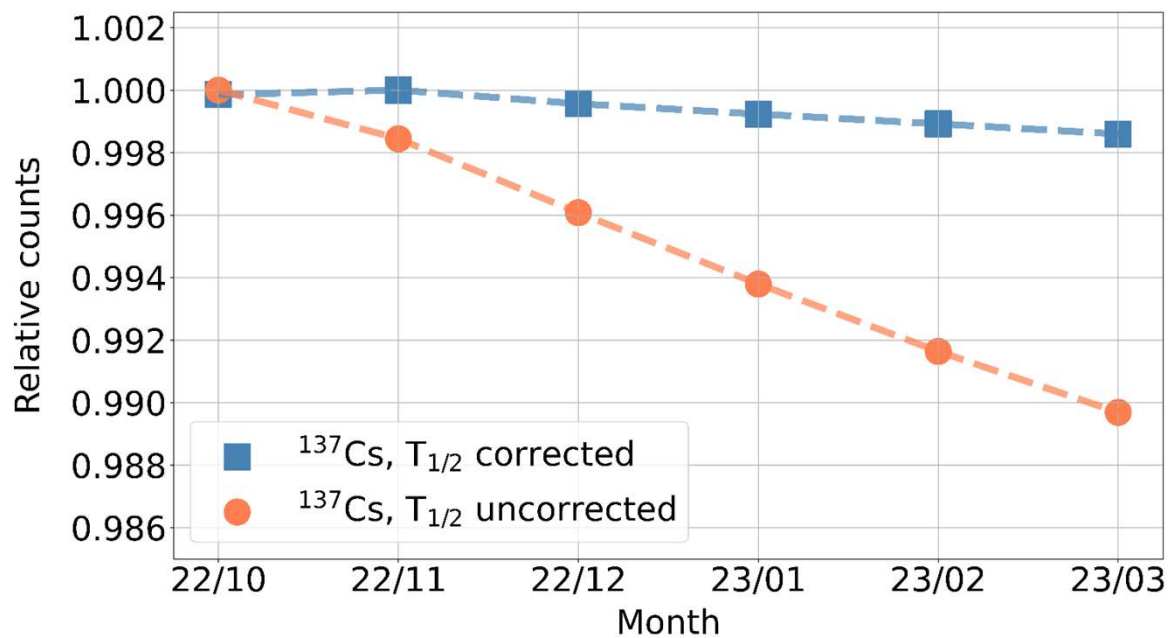
- Minden hónap nyers spektrumának összegzése, majd háttérkivonás és területkivonás a havi kombinált hisztogramokon
- Ha nem kompenzáljuk a forrás exponenciális gyengülését, akkor egyértelműen csökkenő tendencia mutatkozik, amely nagyságrendileg hasonló az 1. módszer esetén megfigyelthez, bár nem tűnik olyan egyenletesnek
- A korrekciót az alábbi szorzófaktorral hajtjuk végre: $\frac{t_{live}^{TOT}}{t_{live}^{TOT,comp}}$, ahol $t_{live}^{TOT} = \sum_i \Delta t_{live,i}$ egy egyórás futás teljes nem kompenzált élő ideje és $t_{live}^{TOT,comp} = \sum_i R(t_i, \Delta t_{nominal} | t_0) \Delta t_{live,i}$ a bomláskompenzált teljes élettartam.



A korigált görbén kb. $\sim 0.4\%$ csökkenés látszik

3. elemzési módszer

- Hasonló a 2. módszerhez, de a csúcs alatti terület kiszámítása most a [650, 674] keV tartományra eső hisztogramok összegzésével történik
- Ebben az esetben is megfigyelhető ~ 0.15% csökkenés az exponenciális bomlásra történő korrigálás után



Mérések és analízis pontosság növelése

A jövőben alábbiaktól várjuk az eredményeink pontosságának növekedését:

1. Továbbfejlesztett módszer a háttér kivonására és a rögzített adatok utókalibrálására (minden Run-ra vonatkozóan)
2. Jobb árnyékolás a háttér további csökkentése érdekében
3. További hosszú távú mérések végrehajtása