Alkalmazott Fizikai Módszerek
Laboratórium

Folyadékszcintillációs spektroszkópia

Csörnyei Géza

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Fizikus MSc I

'E' mérőcsoport
Mérés dátuma: 2019.10.25.
Mérés vezetője: Horváth Ákos

1. Mérés célja

A laborgyakorlat során megismerkedtünk a folyadékszcintillációs spektroszkópia módszerével, majd alkalmazásával felvettük és kiértékeltük a trícium bétabomlásának spektrumát.

2. Elméleti összefoglaló

A mérésünk során a tríciumot (^{3}H) vizsgáltuk, mely β^--bomló anyag, azaz

$$^3H \rightarrow ^3He + e^- + \overline{\nu}, \tag{1}$$

vagyis a bomlás során egy elektron keletkezik, miközben a trícium héliummá alakul. A kilépő elektron gerjeszti a szcintillátor anyagát, melyből a legerjesztődés során látható, illetve UV foton keletkezik. Ezen fotonokat egy fotoelektron sokszorozóba vezetjük, mely a felvillanásokban keletkező fotonokat alakítja mérhető nagyságú jellé. A jel nagysága arányos a fotonokat keltő elektron energiájával, így a fotoelektron sokszorozó után egy sokcsatornás analizátort kötve ki tudjuk értékelni az áramimpulzusokat és létrehozhatunk egy energiahisztogramot, vagyis fel tudjuk venni a β bomlás spektrumát. Az egyes eszközök működésének részletes leírása megtalálható a méréshez tartozó laborjegyzetben [1].

A trícium bomlásakor felszabaduló energiát a reakcióban résztvevő részecskék tömegeiből számolhatjuk:

$$Q = m(^3H) - m(^3He) - m(e^-) = 18.6 \text{ keV}. \tag{2}$$

A felszabaduló energiából megadható az elektron által elvitt energia várható értéke is. A várható érték meghatározásához először a β-bomlás energiaeloszlását kell felírnunk, mely a Fermi-aranyszabály segítségével tehető meg. A bomlás során az átmeneti valószínűség a szabály értelmében:

$$W_{\text{fi}} = \frac{2\pi}{\hbar}\rho(E)| < \text{f}|\hat{H}|\text{i} > |^2\delta(E_{\text{f}} - E_{\text{i}})dE., \tag{3}$$

ahol i és f a kezdeti, illetve a végállapotot jelölik, valamint ahol $\hat{H}$ a rendszer Hamilton operátora. A fenti kifejezés segítségével kiszámítható az elektron impulzusának energiától függő alakja:

$$p(E) \sim p^2\frac{\text{d}p}{\text{d}E}q^2\frac{\text{d}q}{\text{d}E_\nu}|_{E_\nu = Q-E}, \tag{4}$$

ahol $E_\nu = qc$. A $p^2 = 2m_eE$ összefüggést behelyettesítve a fenti egyenletbe az állapotsűrűségre kapott képlet:

$$\rho(E)dE \sim \sqrt{E}(Q-E)^2 \tag{5}$$

Az arányossági tényezők számunkra nem relevánsak, mivel a várható érték számolásakor ki fognak esni. A kapott kifejezéssel felírva a várható értéket

$$< E >= \frac{\int_0^Q E\rho(E)dE}{\int_0^Q \rho(E)dE} = \frac{\int_0^Q \sqrt{E}^3(Q-E)^2dE}{\int_0^Q \sqrt{E}(Q-E)^2dE} = \frac{1}{3}Q \tag{6}$$

Az elektronnak átadódó maximális energia a bomlás során keletkező energiával egyezik meg, ezt behelyettesítve Q értékébe azt kapjuk, hogy

$$< E >\approx 6.2 \text{ keV} \tag{7}$$

A méréseink során megvizsgáltuk mennyiben áll elő ez az érték a kapott adatsorokból.

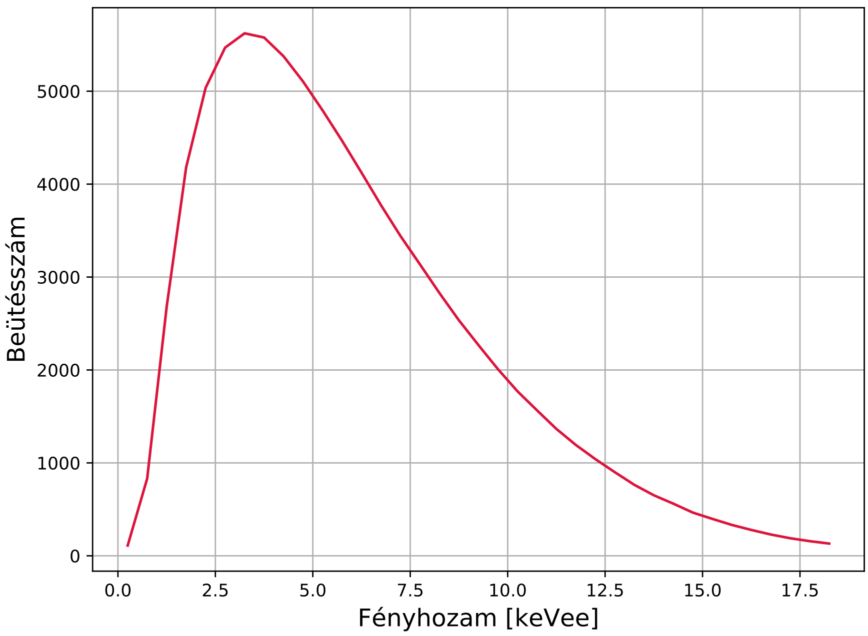
Méréseinkhez előre elkészített, a folyadékszcintillátor anyaggal elkevert trícium mintát használtunk. A mérőműszer egy TriCarb 1050 spektrométer volt.

3. Mérési adatok kiértékelése

3.1. A trícium spektrumok összehasonlítása

A mérésünk során két mérősor állt rendelkezésünkre. Az egyik a laborgyakorlat során kapott spektrumokból állt, ebben 50 különböző mérés volt, a másik pedig egy korábbi méréssorból származott. A kapott adatsorok segítségével el kellett döntenünk, változott-e a mérési beállítás, azaz a rendszer erősítése. Ehhez azt kellett megvizsgálnunk, hogy a két adatsor ugyanolyan karakterisztikákkal rendelkezik-e. Ezt többféleképp is elvégezhettük.

Az egyik mód, hogy kiszámítjuk az egyes spektrumok átlagát. Mivel az egyes spektrumokra hasonló alakú függvény illeszthető, melynek csak a paraméterei változhatnak az erősítés változásával, ezért közel azonos átlagértéket kell kapnunk, amennyiben a mérési beállítások azonosak voltak.

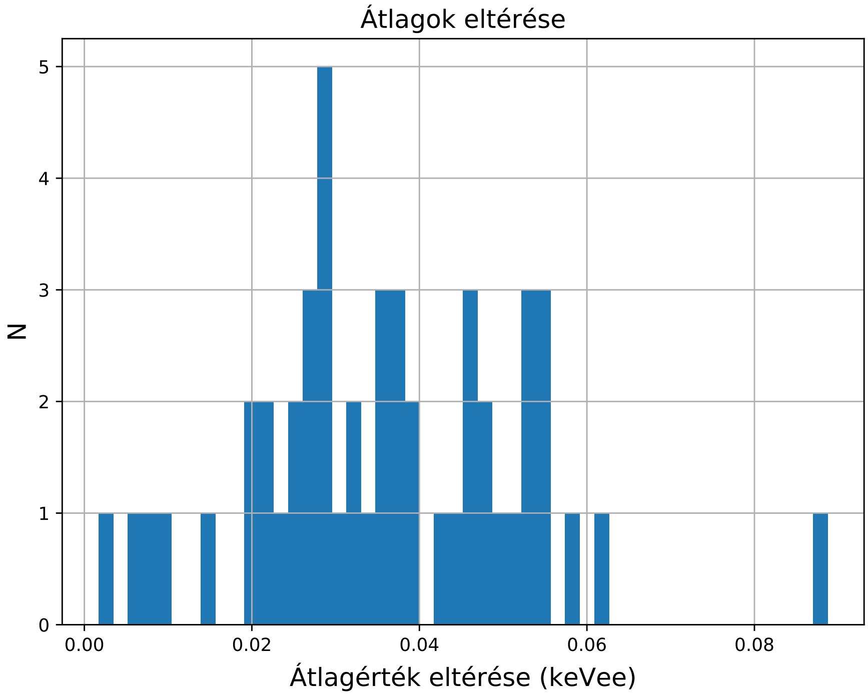


1. ábra. A mért spektrumok átlaga

A másik módszerhez ki kell számolnunk a korábbi mérések átlagát, majd meg kell vizsgálnunk az új mérési sorok ettől vett eltérését. Amennyiben nincs szisztematikus eltérés, az esetben a két mérési sor a zaj erejéig ugyanazon mérésből származónak mondható, szisztematikus eltérés esetén azonban biztosan különbözik a két mérési sorozat.

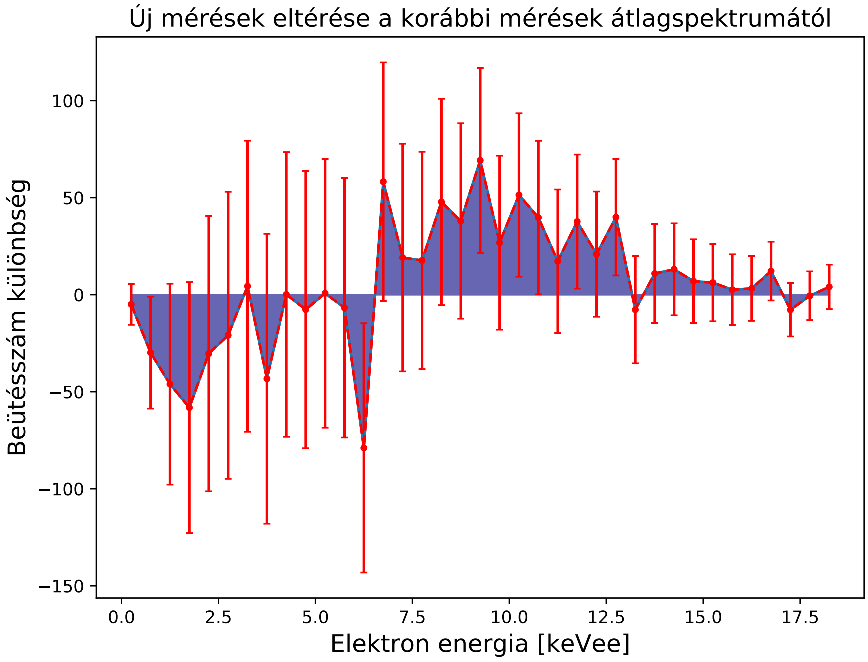
A harmadik vizsgálati módszer a t-próba. Ennek során azt vizsgáljuk meg, hogy a két adatsort mekkora valószínűséggel állíthatta elő ugyanaz a folyamat.

Első lépésként megvizsgáltam mennyiben tér az új adatsorok átlaga a korábban felvett adatsor megfelelő értékétől. A számolások eredménye a 2. ábrán látható. A korábbi mérésből származó adatsorok átlaga $\overline{E} = 5.931$ keV volt. Az ábrán látható, hogy az egyes későbbi mérésekből kapott átlagérték közel megegyezik ezzel, azonban kicsi szisztematikus eltérést mutat.



2. ábra. A későbbi méréssor átlagértékeinek és az összehasonlításhoz használt átlagérték eltérése hisztogram formájában ábrázolva.

Megvizsgáltam az egyes mért spektrumok korábbiaktól vett eltérését is. Ehhez kiszámoltam az átlagos spektrumot a korábbi adatsorokhoz, majd kivontam ezt az újabb adatsorokból. A kapott különbségnek képeztem az átlagát, mivel ha szisztematikus eltérés van, akkor annak fellelhetőnek kell lennie az átlagos spektrumokban is. A újonnan kapott spektrumokból kivontam a korábbi átlagspektrumot, ezzel kapva a 3. ábrát. Az ábrán jól látható, hogy a beütésszám becsült hibáján belül (melyet tisztán Poisson-hibának feltételeztem) az újonnan kapott spektrumok szisztematikus eltérést mutatnak, vagyis a beállítások megváltoztak a korábbi mérések óta, mindazonáltal az eltérések összemérhetők a becsült hibával.



3. ábra. A későbbi méréssor és a későbbi mérések átlagos eltérése.

Az eddigi két vizsgálati módszerből tehát azt kaptuk, hogy bár bizonyos szisztematikus eltérés van a két adatsor között, de ez közel azonos nagyságrendű a becsült hibával. Harmadik vizsgálatként elvégeztem a t-próbát is a két adathalmazon, melyhez a python program *scipy.stats.ttest_ ind* függvényét használtam. Ez egy olyan módszer, mely során azon null-hipotézist vizsgáljuk, hogy két független minta azonos átlaggal rendelkezik. A programnak a korábbi és az új méréssor átlagspektrumát adtam be, melyre kiszámolta, mekkora valószínűséggel származhat a két minta azonos eloszlásból. A futtatás után a valószínűségre p=0.99017-at kaptam, vagyis a két minta nagy valószínűséggel ugyanazon eloszlásból származott.
Összegezve a fentieket, a korábbi, illetve az újabb mérések között az erősítés mérési hibán belül nem változott, ugyanazok voltak a mérés paraméterei.

3.2. A trícium spektrumok átlaga

Következő feladatként az kellett megvizsgálnom, valóban visszakapjuk-e a mérésből az elméleti $\frac{1}{3}Q$ értéket. A számláshoz mind az ötven spektrum esetére kiszámoltam az átlagos fényhozam értékét, majd tekintettem ezek átlagát és szórását. A számolt értékeket az 1. táblázat tartalmazza.

Az átlagos fényhozam érték 5.999 keVee volt. Eszerint a mérésből származó átlagos energia 0.2 keV-vel kisebb, mint amit a számítások alapján várnánk. Annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, nem-e csak statisztikus hibáról van szó, kiszámoltam a kapott átlagértékek szórását is az empirikus szórás képletével:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \overline{x})^2}{N-1}}, \tag{8}$$

$\overline{L}$ [keVee]	$\overline{L}$ [keVee]	$\overline{L}$ [keVee]	$\overline{L}$ [keVee]	$\overline{L}$ [keVee]
5.989	5.997	6.000	5.990	5.965
6.016	5.987	6.009	5.999	5.971
5.978	5.984	5.973	5.992	5.969
5.993	5.992	6.009	5.996	6.022
6.015	5.995	5.990	5.999	6.000
5.984	5.993	5.983	6.019	5.983
5.989	5.990	6.014	6.011	5.998
6.006	6.007	6.018	6.002	6.016
5.992	5.991	6.001	6.025	6.013
6.011	6.009	6.018	6.000	6.052

1. táblázat. Az átlagos fényhozam értékek

ahol N a mérések száma. A képlet használatával kapott szórás értéke:

$$\sigma = 0.016 \text{ keVee}.$$

A kapott érték segítségével kiszámolható, hogy a szórás hányszorosa a mérésből és a számolásból származó energiaérték különbsége:

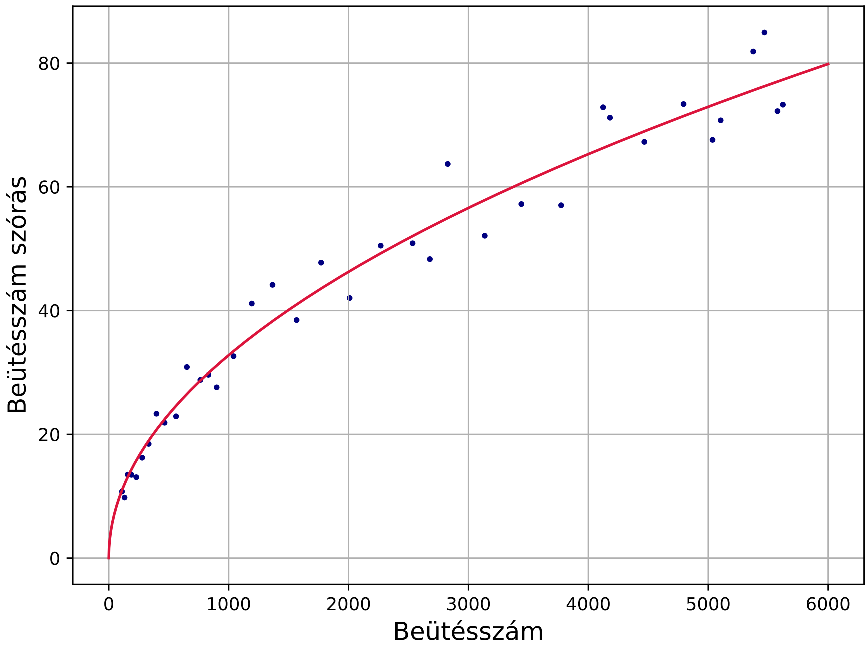
$$\Delta = \frac{\mid < E >_{\text{számolt}} - < E >_{\text{mért}} \mid}{\sigma} = 12.377 \qquad (9)$$

Tehát a szórás több mint 12-szeresénél nagyobb a két érték különbsége, tehát szinte biztosan mondható, hogy a két érték különbsége nem statisztikus eredetű.

Az értékek különbségére magyarázatként szolgálhat a *quenching* (eltolódás) jelensége, melynek köszönhetően kevesebb foton fog jutni a fotoelektron sokszorozóra, mivel a fotonok egy része el fog nyelődni a mintatartó üvegcse falában. Ennek eredményeképpen a teljes spektrum fel fog torlódni a kisebb energiák felé, így kisebb átlag fényhozamot, azaz kisebb átlagenergiát mérhetünk. *Quenching*-et több jelenség is okozhat, például a mintában, vagy a mintatartón található szennyeződések, melyek elnyelik a fotonokat.

3.3. Átlagspektrum szórása

Mérésünk során áramimpulzusokat, azaz áttételesen beütéseket mértünk, melyek időben véletlenszerűen, egymástól függetlenül játszódtak le. Az ilyen események esetén tudjuk, hogy a beütésszámok hibáját Poisson-hibaként, azaz a beütésszám gyökeként írhatjuk le. Ezt az elméletet kellett leellenőriznem a kapott méréssorok alapját. Ehhez kiszámoltam az újabb mérések esetére az átlagspektrumot, majd minden csatorna, azaz fényhozam érték esetére tekintettem az egyes spektrumok átlagtól való eltérését, vagyis kiszámítottam a szórást. Az elmélet vizsgálatához ábrázoltam a számolt szórást a csatornákban mérhető beütésszám függvényében, majd az elméletnek megfelelően hatványfüggvényt próbáltam illeszteni az adatokra. Az illesztés a 4. ábrán látható.



4. ábra. A számolt szórásértékekre történő illesztés

Az illesztett görbe alakja:

$$f(x) = (1.061 \pm 0.179) \cdot x^{0.497 \pm 0.021},$$

mely jó közelítéssel valóban négyzetgyök függvénynek felel meg.

4. Diszkusszió

Mérésünk során megvizsgáltuk a trícium β bomlását, megismerkedtünk a folyadékszcintillációs mérési módszerrel. A kapott spektrumok átlagenergiáját számolva az elméletihez közeli értéket kaptam, melyek közötti nem elhanyagolható eltérést az instrumentális eredetű csillapítással magyaráztam. Az átlagos spektrumtól történő eltérések vizsgálatával bizonyítottam a beütések hibájának Poisson-hibának megfelelő viselkedését is.

Hivatkozások

(1).: http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/FSS.pdf