

A pozitronemissziós tomográfia (PET) elvi alapjai és feldolgozási lehetőségei a középiskolában

II. rész

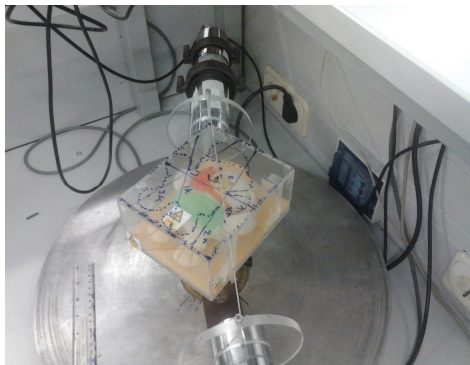
Zsámberger Noémi Kinga, Nagy Mária, Pávó Gyula

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

Írásunk első részében az elektron-pozitron annihiláció elvi alapjait mutattuk be. Jelen második részben egy konkrét mérés leírását adjuk közre a mérési adatokkal és a kiértékeléssel együtt. A mérési összeállítást Veres Gábor egyetemi adjunktus és Csorba Ottó mérnök-oktató készítette.

A mérés elvi alapjai

A PET vizsgálat modellezhető egy viszonylag egyszerű, legalábbis könnyen áttekinthető kísérlet keretében (1. ábra): egy plüssmackót helyezünk egy átlátszó plexi dobozban két detektor közé, amelyekkel majd az elektron-pozitron annihiláció során keletkező adott energiájú gamma-fotonokat észleljük.



1. ábra: A mérési elrendezés

A „páciens” ereibe fecskendezett és daganatában felgyülemlett jelzőanyagot egy, a mérésvezető által előzetesen a mackó ruhájába rejtett pozitív béta-bomló sugárforrással helyettesítjük. Igaz, hogy ezen elrendezésben csak két dimenzióban tudunk vizsgálni, de a hasonló módon felépülő, csak több detektáló egységből álló mérőberendezés működési elve ezáltal könnyen szemléltethető. Az ábrán tőlünk távolabb lévő detektor helyzete nem változik, a közelebbi a mackóból nézve, a másik detektorhoz képest 140 – 220 fokos szögben elmozdítható. A két detektor közötti egyenes így végigpásztázza a mackót. A mozgó detektort öt-öt fokkal el-elforgatva egymás után több, azonos időtartamú mérést végezve feltérképezhetjük a „daganat” elhelyezkedését. Ugyanis a sugárforrásból kiinduló, 180°-os szögben, azaz egymással ellentétes irányban haladó fotonpárokat tudunk velük keresni; ezáltal megállapíthatjuk, hogy milyen

egyenes mentén rejtőzik a fotonok közös kiindulási pontja. Ehhez mérjük mindkét detektorban a beütések számát külön-külön is, de ami a legfontosabb, a koincidenzában történő beütések számát figyeljük. (Koincidenzá alatt azt értjük, hogy a két érzékelt foton „szinte egyszerre” (jelen esetben fél mikroszekundumon belül) érkezik a két detektorba, hiszen egyazon elektron-pozitron pár annihilációja során, egy időben keletkeztek, s a fénysebességgel haladó részecskék számára eltörpülő távolságot kellett csupán megtenniük.)

A koincidenzában adott idő alatt megszámlált eseményeket grafikonon ábrázoljuk a két detektor szögének függvényében, így szemléletessé téve a beütések számának eloszlását. A mozgó detektort végül visszaállítjuk abba a szögbe, amelyben a legtöbb koincidenzában történő beütést mértük, és a plüssállat felett elhelyezett fóliára rajzolt ún. válaszegetes mentén összekötjük a két detektort. Ebből már tudjuk, hogy a daganat vagy daganatok mely vonalban helyezkedik (helyezkednek) el (3. ábra). A pontos helymeghatározáshoz ez azonban még nem elegendő. Ha mérni tudnánk az egyes detektált fotonpárok beérkezése közti időkülönbséget, akkor az annihiláció bekövetkezésének pontos helyét is azonnal megtudnánk – ezt az információt azonban a mi elrendezésünk nem, csupán a legmodernebb PET-berendezések képesek megadni. Nekünk ezért újabb mérésre van szükségünk, mégpedig úgy, hogy a macit tartalmazó plexi dobozt függőleges tengelye körül körülbelül 90°-kal elforgatjuk. A mozgó detektor ismételt pásztázásával és a maximum bejelölését megismételve újabb válaszegetes rajzunkat készítjük a fóliára. Erre az egyenesre is – akár csak az előzőre – igaz, hogy az annihiláció valahol az egyenes mentén következett be. Mivel a két egyenes a mérési pontosságon belül metszi egymást, akkor, ha csak egy darab pontos sugárforrásunk van, a metszéspont ennek helyét már ki is jelöli. A bemutatott mérés során azonban a valószínűség jobban közelítve két, különböző aktivitású és elhelyezkedésű sugárforrást alkalmazunk. Ez megfelel annak a problémának, ha egy daganatot és annak egy áttétjét kell megtalálnunk a beteg szervezetében. Ekkor nem egy, hanem

rögtön két, különböző magasságú csúcs rajzolódik ki a beütésekből. (6. ábra) Ekkor mindkét csúcshoz megfelelő szögű elhelyezett végponttal rajzolunk egy-egy válaszegyenes, így összesen két metszésponthoz jutunk. Hogy tovább pontosítsuk a mérést és mindkét sugárforrás helyzetét pontosan meghatározzuk, egy harmadik mérést is végzünk, a macit ismét úgy elforgatva, hogy a harmadik válaszegyenes – ha nem is megy át a két, előbb keletkezett metszéspont-, hegyesszögű háromszöget (hibaháromszög) alkosson a két előző válaszegyenessel. A beütés-szögállás grafikonon ismét két csúcsot fogunk kapni, és ismét mindkét válaszegyeneset berajzoljuk a fóliára. Így végeredményben két, kis területű háromszöget kapunk, amelyek kijelölik a „daganatok” helyzetét. A valóságban nem pontszerű, hanem kiterjedt daganatokat kell megtalálni, amelyek a szervezetben nem „üres” háttér előtti pontszerű forrásokként, hanem egy izotóp-kontinuumban fellelhető koncentráció-növekedéseként jelennek meg. Ezek keresése során a beteget képzeletbeli cellákra osztják. Rengeteg mérés alapján, a cellákon átmenő válaszegyenesek számából következtetnek a térbeli eloszlásra. A pontosságot költségkímélőbb módon a mérési idő vagy a beadott izotóp mennyiségének növelésével lehet javítani (a detektorok méretének csökkentése, illetve számának növelése erősen megdrágítja a PET-berendezéseket). A speciális szoftver segítségével kiértékelt adatokat korrigálni kell a háttérsugárzásra, a detektorok holtidejére és az esetleg a testen belül kölcsönható fotonokra, amelyek nem érik el a detektorokat. Míg korai PET-berendezések egyetlen detektor-gyűrűből álltak, modern társaik már sok gyűrűből összetett hengerek. Ezekkel kétféle lehetőség adódik a háromdimenziós képalkotásra. Kezelhetik külön-külön az emberi testnek az egyes gyűrűkbe eső képzeletbeli szeleteit, és összerakhatják ebből a térbeli modellt. A másik, érzékenyebb, de egyben számítási-igényesebb alternatíva, hogy eleve a teljes testtel foglalkoznak, és megengedik a különböző gyűrűk detektorai közötti koincidenciákat is. [1]

A plüss figura körvonalait is berajzolva a fóliára, tartósan rögzíthetjük eredményünket, és könnyebben beazonosíthatjuk a „szerveket”, amelyekben a „daganat” és az „áttét” keletkezett. A kísérlet közben szerkesztett grafikonokon kirajzolódó csúcsok területének egymáshoz viszonyított arányából következtethetünk arra is, melyik sugárforrás jelzi az eredeti daganatot (nagyobb csúcs), és melyik a frissebb (kisebb aktivitású) áttétet (kisebb csúcs).

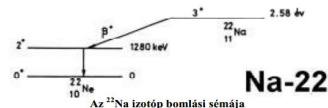
A mérés kiértékelése

Eszközök

A mérés során **szcintillációs detektor(oka)t** használunk. Itt egy szcintillátor kristályban kelt a foton egy energiájával arányos felvillanást. Ez a hozzá csatlakoztatott fotoelektron-szokszorozóban végül is az eredeti foton energiájával arányos feszültségimpulzust bocsát ki. A minket érdeklő impulzusokat egy ablak-komparátorral (differenciál diszkriminátor, DD) választjuk ki. Az egyes detektorokon észlelt beütések számát külön-külön is feljegyezzük, emellett viszont mérni kell a koincidenciában történt beütések számát is. Ezeket, illetve hogy mely szögállásnál mértük azokat, **számítógép** segítségével rögzíthetjük egy táblázatban. Végül a válaszegyenesek behúzásához és a plüssjáték körvonalának megrajzolásához a plexi dobozra helyezett **fóliát, filctollat és vonalzót** használunk.

Mérés menete

A bemutatás alkalmával (de a laborgyakorlaton is) a mérésvezető már előre elhelyezte a sugárforrásokat (a plüssmaci ruházata alá rejtve), és beállította a lezárt plexi dobozt az első mérési pozícióba. A szögmérés megkezdése előtt ellenőrizni kell, hogy a műszerek beállításai alapján a megfelelő energia-tartományban mérjünk. Ugyanis az általunk használt ^{22}Na -izotóp bomlása során többlépcsős folyamat játszódik le (2. ábra), de minket csak a kilépő pozitron és annihilációja érdekel.



2. ábra: A nátrium-izotóp bomlása

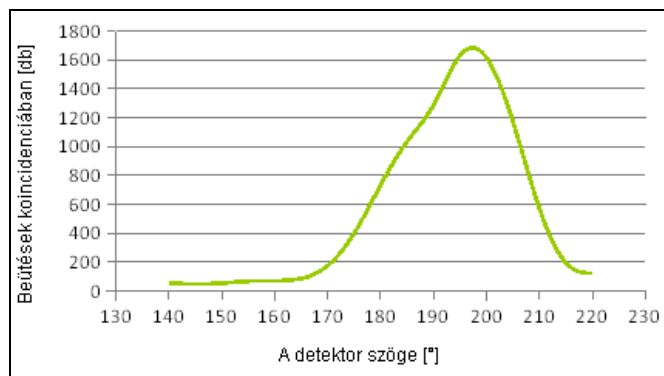
A pozitív béta-bomlás során egyrészt pozitron keletkezik, amely elektronnal találkozva annihilálódik és a bevezetőben ismertetett módon két darab, 511 keV energiájú foton keletkezik. Másrészt bomlásterméként gerjesztett állapotban lévő ^{22}Ne atom marad vissza, amely az alapállapotba jutáshoz egy újabb fotont sugároz ki, ezúttal 1280 keV energiával. Mi csak az elektron-pozitron annihilációs folyamatra jellemző fotonokat szeretnénk detektálni, ezért az 511 keV körüli tartományban kell vizsgálandni (a műszereket az ennek megfelelő feszültség-érték körüli mérésre kell állítani). [1] A tulajdonképpeni mérést megkezdve, öt fokként haladva pásztázunk a mozgatható detektorral és minden szögállás mellett ugyanannyi ideig (a gyakorlaton egy percig) mérjük az egyes detektorokat ért, illetve a koincidenciában történő beütések számát. Ezeket táblázatban (1. táblázat) rögzítjük.

1. táblázat Az első mérés adatai

Detektorszög	Sc1	Sc2	Koincidencia
140	8205	20281	56
145	8350	20646	47
150	8360	20696	54
155	8344	20176	67
160	8527	20323	70
165	8621	20259	86
170	8790	20340	175
175	8886	20390	400
180	8932	20637	734
185	9217	20517	1035
190	9077	20284	1289
195	9488	20328	1631
200	9693	20367	1615
205	9824	20406	1171
210	10264	20187	571
215	10341	20218	195
220	10499	20267	122

Miután a teljes tartományon végigértünk, visszakeressük azt a szöveget, amelyiknél a legtöbb koincidencia-beütést mértük: jelen esetben ez 195°. A mozgatható detektort ide visszaállítva, bejelöljük a fólia szélén a két detektor pozícióját. Az így kapott két pontot egy vonalzó segítségével összekötjük, ezzel megkapjuk az első válaszegyenest. Mivel az annihiláció során keletkező fotonok egymással éppen ellentétes irányban sugárzódnak szét, forrásuknak – a „daganatnak” – valahol ezen egyenes mentén kell elhelyezkednie. (A „páciens” persze nem mozdulhat el a mérés során, amíg a válaszegyenest föl nem rajzoltuk.)

Ábrázoljuk (a számunkra leglényegesebb adatot,) a koincidenciában mért beütések számát a detektorok szögállásának függvényében, és kössük össze a pontokat Gnuplot (egy szabad felhasználású, ingyenesen letölthető, ugyanakkor jól használható) programmal! (3. ábra)



3. ábra: A koincidencia-beütések számának szögfüggése az első mérésnél

Ezen az egyszerű ábrán megfigyelhető, hogy a beütésszám kicsúcsosodása nem tökéletesen töretlenül zajlik. Ebből a kis eltérésből viszont még nem feltétlenül jutna eszünkbe több „daganat” jelenlétére következtetni. Erre igazán az adatok részletesebb vizsgálata, illetve a következő két mérés eredményei adnak lehetőséget.

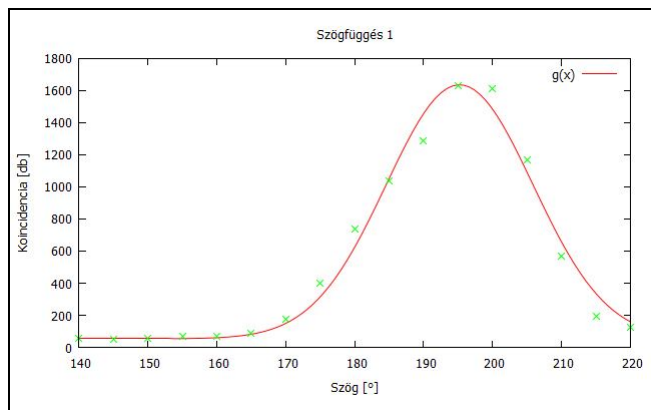
Használjuk ki, hogy a természetben számos mérhető mennyiség normális (Gauss)-eloszlást követ, és illesztünk ezúttal ugyanezekre a pontokra Gauss-görbét!

A Gauss-görbét a következő alakú függvényel írhatjuk le:

$$g(x) = A \cdot e^{\left(\frac{-(x-m)^2}{2s^2}\right)} + x_0$$

Számunkra az A, m, s, x₀ paraméterek közül az m bír majd jelentőséggel, amely a vizsgált mennyiség, jelen esetben a szögállás várható értékét jelzi. A kísérletünket felfoghatjuk úgy is, hogy egy 140-220° közötti felületen detektálunk, és keressük azt a szöveget, aminél a legtöbbször mérünk koincidenciában történő beütést, azaz az egyes beütésekhez tartozó szögállások móduszát. Ez a szimmetrikus Gauss-eloszlás esetén megegyezik a várható értékkel. Azaz az m paraméter értéke megmutatja, a mozgatható detektornak pontosan milyen szögállásánál van a koincidencia beütések maximuma, azaz pontosan hol van a válaszegyenestünk végpontja.

Szemmel láthatóan (4. ábra) a görbénk csupán igen nagy hibával követi a pontokat – a helyzet úgy tűnik, nem felel meg az eredeti, egyszerűbb várákozásnak, ami egyetlen sugárforrást feltételezne.



4. ábra: „Sima” Gauss-görbe illesztése az első mérésnél

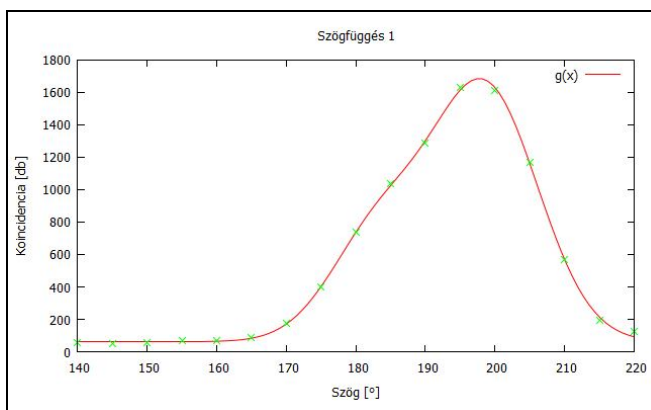
Próbáljunk hát e helyett két Gauss-görbe összegének megfelelő görbét illeszteni adatpontjainkra!

Két Gauss-görbe összegénél a következő alakban illesztünk függvényt:

$$g(x) = A \cdot e^{\left(\frac{-(x-m_1)^2}{2s_1^2}\right)} + B \cdot e^{\left(\frac{-(x-m_2)^2}{2s_2^2}\right)} + x_0$$

Jelen esetben is a várható értékeket jellemző, itt m₁-gyel és m₂-vel jelölt, a várható értékeket megadó paraméterek hordoznak könnyen értelmezhető információt. Külön-külön kezelve a görbe két összetevőjét, A, m₁, s₁, illetve B, m₂, s₂, tekinthetők az egyes csúcsokat jellemző paramétereknek. A csúcsok külön-külön továbbra is szimmetrikus eloszlásokat jellemeznek, így a legtöbb beütés helye (a módusz) egy-egy csúcsra ismét egybeesik az átlaggal. Azaz m₁ és m₂ megadják a két pontos szögállást, amelyek mellett a beütések száma maximális, tehát válaszegyeneseink pontos végpontjait (természetesen az illesztés hibáján belül).

Az eredmény sokkal tetszetősebb: a görbe sokkal jobban illeszkedik (5. ábra), közelebb járunk tehát a fizikai megfigyelés helyes matematikai jellemzéséhez.



5. ábra: Görbeillesztés két Gauss-görbe összegeként az első mérésnél

Bár azok erősen összemosódnak, hiszen egymáshoz közeli szögeknek jelentkeznek, immár felmerülhet két csúcs gondolata. Az illesztés paraméterei megadják a két csúcshoz tartozó két szögértéket is: 183,33+/-0,68°-ot és 198,62+/-0,42°-ot. Nem követtünk el azonban hatalmas hibát azzal, hogy egy válaszegyenest húztunk be, még hozzá 195°-nál. Eljárásunkat kétféle érveléssel is alátámaszthatjuk. Egyrészt az illesztésből kapott két csúcs számtani közepe (súlyozatlan átlaga) 190,5°, ami elég közel esik az öt fokos beosztású mérés alapján

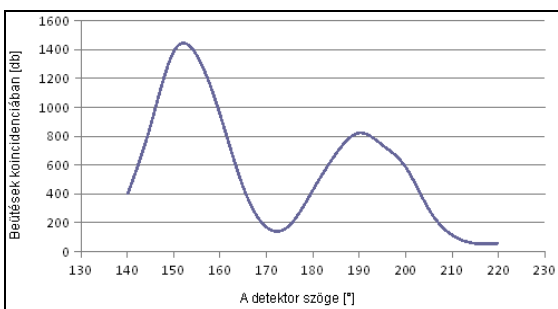
választott értékhez. Másrészt a „sima” Gauss-görbe illesztése is 195,21 +/- 0,43°-ot ad egy feltételezett egyszeres csúcspontjának, ami szintén megfelel az elemzés előtt választott „nyersebb” eljárásunknak.

A „pacienst” a függőleges tengelye körül 90°-kal elforgatjuk, és megismételjük a beütés-méréseket a detektorok minden szögállásánál. Az adatokat ismét táblázatban (2. táblázat) foglaltuk össze.

2. táblázat A második mérés adatai

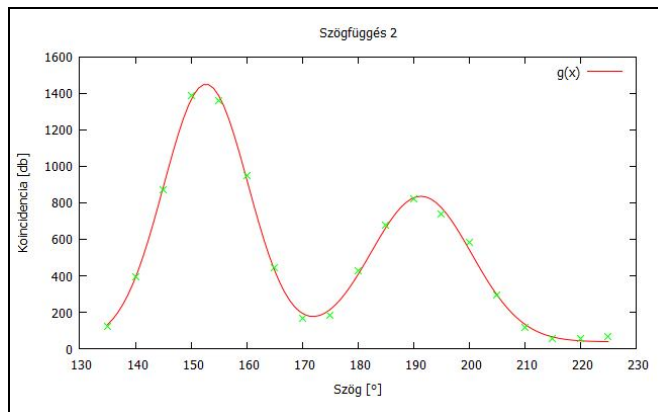
Detektorszög	Sc1	Sc2	Koincidencia
135	10707	17550	122
140	10651	17506	393
145	10439	17286	873
150	10182	17523	1387
155	9941	17381	1359
160	9676	17659	948
165	9506	17506	445
170	9237	17323	168
175	9179	17293	183
180	9096	17381	426
185	9016	17551	679
190	8793	17551	823
195	8746	17490	738
200	8541	17499	585
205	8488	17377	293
210	8340	17544	114
215	8313	17503	56
220	8272	17528	57
225	8295	17437	65

Ennél a mérésnél már a puszta adatsor is egyértelműen két kicsúcsosodást mutat: az egyiket 150°-nál, a másikat 190°-nál. Egymás után mindkét helyzetbe visszaforgatjuk a mozgatható detektort, és bejelöljük a fólián a két új válaszgyenest, és a későbbi azonosíthatóság érdekében megbetűzzük a két külön csúcshoz tartozó vonalakat (2A és 2B). A szemléltetéshez rajzoljuk meg ismét a koincidencia-beütés - szögállás grafikont (6. ábra)!



6. ábra: A koincidencia-beütések számának szögfüggése a második mérésnél

A két csúcspont igen jól elkülönül, magasságuk és szélességük pedig a két jelzett sugárforrás közötti különbségekre utal. A pontosság kedvéért illesztjük ezekre az adatokra is Gauss-görbék összegét (7. ábra)!



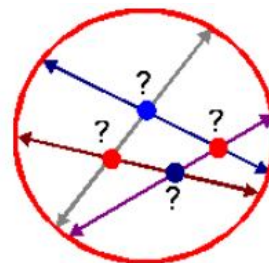
7. ábra: Görbeillesztés a második mérésnél

Az illesztési paraméterek a csúcspontok középpontjaként a 152,70+/-0,12° illetve a 191,34+/-0,24° szögeket jelölik ki. Az illesztés igazolja eljárásunk helyességét: mindkét sugárforráshoz kapcsolódóan a kapott értékekhez legközelebbi, 5-tel osztható egész szögértéket használtuk a válaszegyeneseinket kijelölő pontokként.

Ha csak egyetlen „daganat” lenne „betegünk” szervezetében, ennyivel már meg is elégedhetnénk: egy pontszerű (nek tekintett) sugárforrás helyét két válaszegyenes már kijelöli. Jelen esetben azonban biztosak lehetünk benne, hogy két sugárforrást kell keresnünk a próbababában, ekkor viszont további mérésekre van szükség.

Ebben a fázisban még csak három válaszegyenessel rendelkezünk (1, 2A és 2B), ami azt jelenti, hogy az egyik forrás nulla vagy egy válaszegyenessel produkált csupán, ami kevés helyzetének meghatározásához. (Hiszen az első mérésnél csak egy egyenest jelöltünk be, az illesztés előtt nem látszott még túl jól, hogy két külön daganat hatását vizsgáljuk.)

Egyszerű rajzzal (8. ábra) szemléltethető, hogy négy válaszegyenessel sem elég megrajzolni, mert a négy metszéspontjuk közül a kék vagy a piros pontpárokból is rejtőzhetnek igazából a „daganatok”, mindkét esetben ugyanezeket a vonalakat kapnánk.



8. ábra: Probléma négy válaszegyenesnél [1]

Tehát a két sugárforrás helyének meghatározásához legalább 5 válaszegyenes berajzolása szükséges: ez már egyértelműsíti, melyik pontpárról lehet szó.

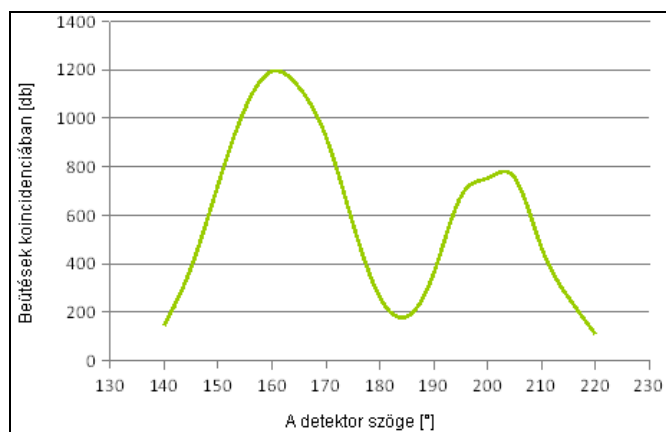
Ha még több sugárforrásunk lenne, a válaszegyenesek számát megfelelően növelve, ezek helyét is meghatározhatnánk a vonalak csomópontjaiból.

Harmadik mérésünk előtt ismét elforgattuk a plüssmackót tartalmazó dobozt a korábbiaknak megfelelően, megismételtük a különböző detektor-állások melletti méréseket, és a következő adatokat táblázatban (3. táblázat) rögzítettük.

3. táblázat A harmadik mérés adatai

Detektorszög	Sc1	Sc2	Koincidencia
140	9170	20028	145
145	8971	20127	385
150	8735	20199	726
155	8753	20353	1040
160	8688	19813	1193
165	8717	20241	1128
170	8445	20082	924
175	8373	19930	567
180	8451	20378	262
185	8249	20398	183
190	8404	20316	361
195	8432	20292	676
200	8367	19963	753
205	8399	20107	755
210	8481	19913	466
215	8683	20045	261
220	8805	20128	110

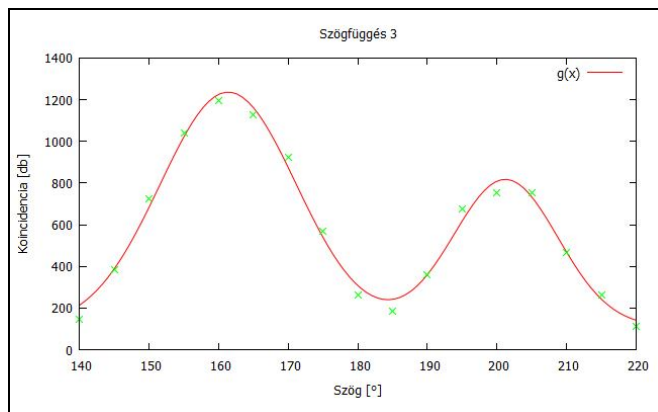
Ismét két csúcst kaptunk, 160°-nál és 205°-nál, és behúztuk az ezekhez tartozó válaszgyeneseket. A csúcsok a koincidencia-beütés-szögállás grafikonon is szépen elkülönülnek (9. ábra), ha ábrázoljuk (és összekötjük) a pontokat.



9. ábra: A koincidencia-beütések számának szögfüggése a harmadik mérésnél

Az ábránkat felhasználva könnyebben tájékozódhatunk és következtetések maradhatunk a válaszgyenesek megbetűzésében. A nagyobb (160°-nál jelentkező) csúcshoz tartozó egyenes kapta a 3A, a kisebb csúcshoz tartozó a 3B jelet.

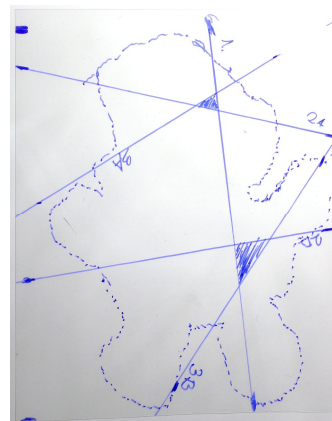
Illesztünk ezúttal is két összegzett Gauss-görbét a pontokra (10. ábra)!



10. ábra: Görbeillesztés a harmadik mérésnél

Az illesztés paramétereit ezúttal a két csúcst 161,35+/-0,32°-hoz illetve 201,20+/-0,45°-hoz tesszük. Ismét elég közel jártunk tehát a mérés közben választott szögértékeinkkel. (Amint az látható, a kisebb csúcst esetében nem az illesztés eredményéhez legközelebbi szögértéket jelöltük be, de ezen a szakaszon a görbe sem illeszkedik olyan tökéletesen – ennek feltételezett okára a hibaforrásoknál visszatérünk.)

Záró lépésként még megrajzoljuk a plüssjáték körvonalát a fóliára, mielőtt eltávolítjuk azt a plexi dobozról (11. ábra).



11. ábra: A sugárforrások helyének bejelölése

Az öt berajzolt válaszgyenesünk segítségével már elég nagy pontossággal háromszögelhetjük a sugárforrások pozícióját: ezeket a fólián be is satíroztuk.

Pusztán elhelyezkedésükön túl még valamit kijelenthetünk a sugárforrásokról. Az A illetve B források irányában az egyes mérések során koincidenciában detektált beütések számának aránya (szemléletesen: a grafikonokon a csúcsok nagysága) arra enged következtetni, hogy az A sugárforrás aktivitása jóval nagyobb a B forrásénál. Ezt valós, orvosi esetre például úgy lehetne lefordítani, hogy a próbababa fejében elhelyezkedő, A forrásként szolgáló daganat az eredeti betegség, míg a B forrás pl. egy vese-áttétet jelez.

Hibaforrások és diszkusszió

A gyakorlat végén, a mérésvezető segítségével ellenőriztük eredményeinket, és a két sugárforrást valóban a bejelölt helyeken találtuk meg. A mérés legfőbb, számszerűsíthető hibaforrása a szögmérés pontatlanságából adódik (a szögmérő beosztásának megfelelően): +/-0,5°. Ennek ellenére egész jól sikerült behatárolni a sugárforrások helyzetét, az

ábrán besatírozott háromszögek mérete kisebb vagy közel egyező a sugárforrások kiterjedésével.

Az, hogy esetünkben nem pontosan egy-egy pontot jelölt ki a 3-3 metsző egyenes, feltételezhetően két tényezőre vezethető vissza. Egyrészt az első mérésnél – gyanútlanul, „áttétellel” még nem számolva – csak egy válaszegyeneset húztunk be a táblázatos adatok alapján. Később a grafikus ábrázolás, de főleg a görbeillesztés rámutatott, hogy bizonyos mértékben már ekkor is érzékelhető volt, hogy két külön sugárforrás található a plüssmackóban, és azok nem tökéletesen egy vonalban helyezkednek el a detektorok között a kezdeti pozícióban.

A behatárolt terület kiterjedtsége másrészt annak is köszönhető, hogy mi kétdimenziós modellként kezeltük a problémát. Am a gyakorlatban a minták nem pontosan a detektorokkal egy vonalban helyezkedtek el (behelyezésük után a maci megbillenhetett), hanem a B jelű „veseáttét” kicsit lejjebb, és ez már befolyásolta az elérhető pontosságot. A harmadik mérésnél ez okozhatja a látható egyenletlenséget (határozatlan kisebb csúcsot) a grafikonon, amire így pontosan illeszteni a görbét szintén nehezebb volt.

(Az eddigi tapasztalatok alapján ez az elrendezés meglehetősen „hibatűrő”. A válaszegyenesek általában egy pontban metszik egymást a filctoll ~0,5 mm-es vonalvastagsága miatt akkor is, ha csak öt fokos pontossággal állunk rá a maximumra – annak ellenére, hogy a tumorok 10x10 mm-es szűrőpapír-négyzetek. Akkor kapunk nagyobb hibaháromszöget, – mint a most bemutatott esetben –, ha a daganat kiemelkedik a két hengeres detektor középvonalát képező síkból.)

Ugyanakkor a daganatok súlyosságára vonatkozóan kétségszövegbevonhatatlan információt szereztünk, hiszen az A és B sugárforrás aktivitása (koincidenzában mért beütésszámai) közötti arány mindhárom mérés alapján jóval nagyobb egynél.

Sugárvédelem

Mint azt a motivációs részben már megjegyeztük, a pozitron emissziós tomográfia előnye, hogy pontos információt szolgáltat a daganatokról műtéti kockázat nélkül. Viszont, mivel a fokozott anyagcseréjű területek kimutatásához radioaktív izotópot juttatnak a testbe, a PET-vizsgálat bizonyos mértékben ionizáló sugárzással terheli a beteg szervezetét (ez vizsgálatonként átlagosan 7 mSv-t jelent). Az orvosi célokra alkalmazott 200-400 MBq aktivitású mintához képest a laborgyakorlaton alkalmazott sugárforrás igen kis aktivitású (< 0,1 MBq). Ez a 3-4 órás mérés során kb. 0,0001 mSv terhelést jelent. Ugyanakkor a természetes háttérsugárzás évenként 2,5 mSv – ez azt jelenti, hogy a természetet 2,5 millijoule/kg sugárterhelést gyakorol ránk. (Sugárvédelemről bővebben itt:

<http://pavogy.web.elte.hu/Fizikus/SUG/sug.html> az 1-2 pontban lehet olvasni.)

Ennek ellenére természetesen e kísérletet végzőknek is szem előtt kell tartaniuk a biztonsági szempontokat. [1] A sugárvédelem egyik alapelve az angol betűszóból alkotott ALARA-elv („As Low As Reasonably Achievable”), amelynek értelmében bármely sugárveszélyes tevékenységet úgy kell elvégezni, hogy a résztvevő személyek a lehető legkisebb dózist kapják [2]. A PET-vizsgálatot modellező mérésnél ezért a résztvevőknek ajánlott megtartani a lehető legnagyobb távolságot a sugárforrásoktól (pl. egy méter), főlegesen nem túl közel hajolni hozzájuk, és szigorúan csak csipesszel megfogni őket, elhelyezésüket és eltávolításukat inkább a mérésvezetőre bízni, pusztán a helyes gyakorlat elsajátításának céljából. [1]

Összefoglalás

Jelen kétrészes írásunkban az elméleti alapok leírásával és egy konkrét mérési jegyzőkönyv bemutatásával ismertettünk egy lehetséges feldolgozási módot a magfizika témakörébe eső elektron-pozitron annihiláció feldolgozására, amelyben külön hangsúlyt kap a jelenség egy fontos orvosi alkalmazása, a pozitronemissziós tomográfia. Ajánljuk fakultációs órán és speciális reátagozatos tanórán a téma feldolgozását.

Irodalomjegyzék

- [1] Pávó Gyula, Veres Gábor: PET – Pozitron annihiláció vizsgálata, Modern Fizika Laboratórium mérési leírás
<http://wigner.elte.hu/koltai/labor/parts/modern10.pdf>
- [2] Környezetfizikai minilexikon
<http://atomfizika.elte.hu/Minilexikon/minilexikon.htm#ALARA>