



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**A pozitron annihiláció jelensége és alkalmazási  
lehetőségei pórusos anyagok vizsgálatára**

*Pórusos anyagok házi feladat*

**Márton Péter  
(EVOGXT)**

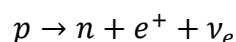
2019/20 I. félév

# 1. A pozitron és a pozitron-annihiláció jelensége

Miután 1895-ben Wilhelm Conrad Röntgen felfedezte a róla elnevezett Röntgen sugárzást és alkalmazási lehetőségeit, a XX. század elején számos nagy kutató figyelme a különféle sugárzások felé fordult. 1905-ben Albert Einstein megmagyarázta a fotoelektromos hatást, 1910-ben Ernest Rutherford elvégezte híres szórási kísérletét. A tudósok ekkorra már tisztában voltak azzal, hogy nem csak elektromágneses természetű sugárzások léteznek, hanem részecskesugárzások is. Az egyik ilyen részecske, melyet a katódsugárzás vizsgálata során fedeztek fel az elektron volt. Később Becquerel kutatásai során azt is felismerte, hogy a ma már  $\beta$ -sugárzásnak nevezett radioaktív sugárzás ugyanazon részecskék árama, melyet korábban a katódsugárzás vizsgálatokor detektáltak. Ez a megfigyelés megerősítette, hogy az elektronok az atomok részei.

A kvantumfizika nagy alakja Paul Dirac számításai alapján megjósolta, hogy minden részecskéhez tartozik egy azzal megegyező tömegű és spinű, de ellentétes töltéssel rendelkező antirészecske is. Elindultak hát a kutatások az elektron antirészecske párjának kimutatására. A részecskesugárzások tanulmányozására ekkor a Wilson-féle ködkamrát használták, melynek telített gőzterében nyomon követhető volt a kamrán áthaladó részecskék útja. A kamrát elektromos mezőbe helyezve a részecskék nyomvonalából kiszámítható az erőtér hatására bekövetkező eltérülés mértéke, ebből pedig a részecske töltése, annak előjele és impulzusa is meghatározható. 1932-ben a kozmikus sugárzás vizsgálata közben Carl David Anderson felfedezett egy részecskét, amelyre illettek az elektron antirészecskéjét meghatározó paraméterek. Később képes volt gamma-sugárzás segítségével párkeltést indukálni, így energiából anyagot, részecske-antirészecske párt létrehozni, ezzel bizonyítva korábbi felfedezésének helyességét. Az újonnan felfedezett „anti-elektront” pozitronnak nevezték el.

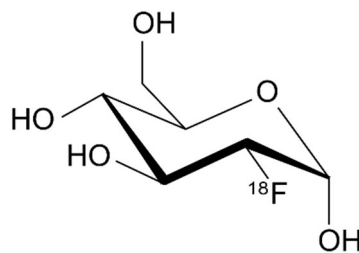
Pozitron nem csak párkeltés során keletkezhet, sokkal gyakoribb a radioaktív bomlás során történő pozitron-emmisszió. A  $\beta^+$ -bomlás során az instabil atomban egy proton neutronná alakul, miközben a magból egy pozitron és egy neutrínó távozik.



A leggyakoribb  $\beta^+$ -bomló izotópok:  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{22}\text{Na}$ . Ezekben az atomokban protonfelesleg van, így a stabilizáció lehetősége a fenti bomlási egyenlet.

Abban az esetben, ha egy részecske megfelelő antirészecske-párjával találkozik, mindkettő megsemmisül, ezalatt energia szabadul fel, melyet a híressé vált  $E=mc^2$  összefüggés ír le. A folyamatot annihilációnak nevezzük. A pozitron – legyen az kozmikus forrásból származó, vagy  $\beta^+$ -bomlás eredménye – elektronnal találkozáskor megsemmisül, és a folyamat eredménye 2 azonos energiájú gamma-foton, melyek egyenlően osztoznak az elektron és a pozitron nyugalmi energiájának és kinetikus energiájának összegén. A két kilépő foton iránya pontosan  $180^\circ$ -os szöget fog bezárni, ami alapján megfelelő detektorral bemérhető az annihiláció helye. Mivel elektronok mindenhol megtalálhatók, a pozitron gyakorlatilag a keletkezési helyén kölcsönhatásba lép egyel és bekövetkezik az annihiláció.

Ezt a jelenséget használják ki a Pozitron Emissziós Tomográfia során, ahol a páciens szervezetébe  $\beta^+$ -bomló kontrasztanyagot juttatnak. A leggyakrabban alkalmazott kontrasztanyag az 1. ábrán is látható 18-fluoro-dezoxi-glükóz.



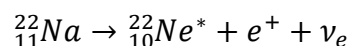
1. ábra: 18-fluoro-dezoxi-glükóz

Az anyag a fokozott glükózfelvételt mutató sejtekben halmozódik fel, ugyanis ezek a sejtek a glükózzal együtt felveszik, de lebontani a fluorozott egység miatt már nem tudják, így feldúsul. Mivel a fokozott glükózfelvétel leginkább az agyra és a daganatos sejtekre jellemző a PET vizsgálatokkal egyszerűen kimutatható az agyi aktivitás változása és a tumorok helyzete a szervezetben. A gamma sugárzást kimutató detektorok gyűrű alakban helyezkednek el a páciens teste körül, egy beütésnek az számít, ha két szemben levő detektor pontosan ugyanabban a pillanatban detektál gamma-fotont. Az így meghatározott egyenesek metszéspontjaiból feltérképezhetők a pozitron-annihiláció lejátszódásának területei, azaz azok a tartományok, ahol a kontrasztanyag nagy koncentrációban van jelen. Azért, hogy a betegeket ne érje nagy sugárterhelés, a PET-vizsgálatok során használt  $\beta^+$ -bomló izotópok felezési ideje igen kicsi (maximum 1-2 óra). Igen megnöveli a technológia költségét, hogy a kontrasztanyagot emiatt közvetlenül a vizsgálat előtt, helyben kell előállítani.

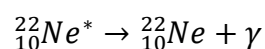
## 2. A pozitron annihilációs élettartam spektroszkópia

A pozitron és elektron kölcsönhatása azonban összetettebb folyamat, mint az előző pontban említett pusztán egyesülés és megsemmisülés. A keletkező pozitron egy elektronnal találkozáskor egy hidrogénatomhoz hasonló részecskét alakít ki, melynek neve pozitronium-atom. Mivel a hidrogénatomtól eltérően ebben az esetben a pozitív és negatív töltésű alkotók tömege összemérhető, a pozitron és az elektron egymás körül keringve fogja kialakítani a pozitronium-atomot. A folyamat következő lépése az annihiláció, amikor a két részecske egyesül a két gamma-foton keletkezése közben. A pozitronium-atom azonban az azt alkotó részecskék spinje alapján kétféle lehet. Abban az esetben, ha az elektron és a pozitron spinje megegyezik (vagyis vagy mindkettő  $+1/2$ , vagy mindkettő  $-1/2$ ) az eredő spin 1 vagy  $-1$  lesz és a részecske neve orto-pozitronium. Amennyiben a spin ellentétes a két alkotó esetében, az eredő spin 0, és para-pozitroniumnak hívjuk a részecskét. A két forma viselkedése jelentősen eltér, hiszen az orto-pozitronium esetében az azonos spin miatt gátolt az egyesülés, míg a para-pozitronium esetében kedvezményezett. Emiatt a két részecske élettartama jelentősen eltér, a para-pozitronium igen hamar, nagyságrendileg 100 ps alatt megsemmisül, ezzel szemben az orto-pozitronium ennél 3 nagyságrenddel tovább létezik, körülbelül 100 ns-ig. Ezen hosszabb élettartamú részecske keletkezése és megszűnése közötti időt méri a pozitron annihilációs élettartam spektroszkópia, vagy röviden PALS.

A mérés lényege, hogy a műszer képes meghatározni a pozitronium-atomok élettartamát a keletkezésükkor és megszűnésükkor kibocsátott gamma-fotonok detektálása közötti időtartam segítségével. A PALS mérés esetében a pozitronforrás a nátrium 22-es tömegszámú izotópja, mely NaCl, vagy  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  formájában alkalmaznak. Az anyag felezési ideje 2,6 év, így könnyen kezelhető, és a PET-forrásokkal ellentétben nem kell közvetlenül a mérés előtt előállítani. Az izotóp bomlásának egyenlete:



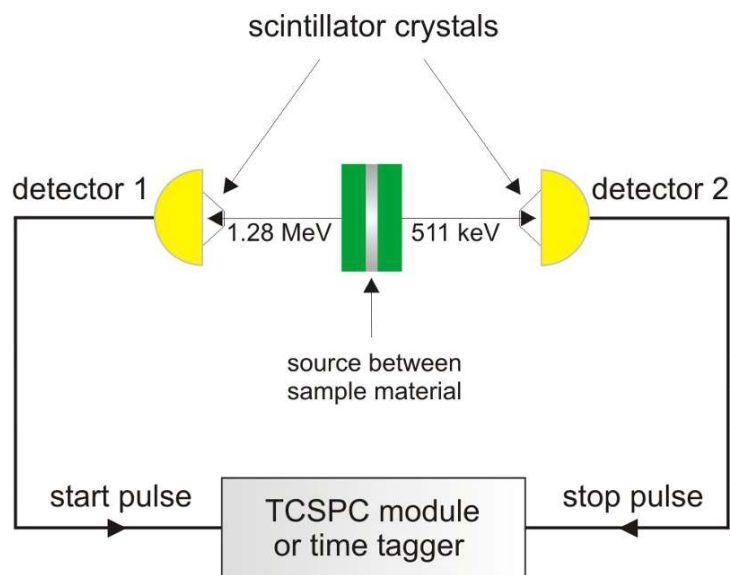
A keletkező gerjesztett neon atom relaxál egy gamma-foton kibocsátása közben:



Az így kibocsátott foton energiája 1280 keV. Mivel a bomlás utáni relaxáció néhány ps alatt bekövetkezik (ami a pozitronium-atom élettartamához viszonyítva elhanyagolható)

az 1280 keV-os gamma-foton detektálása jelzi a számlálás kezdetét, azaz a pozitron keletkezésének időpontját. Az időmérés végét az annihilációból származó 511 keV-os foton detektálása jelzi (ennyi adódik ugyanis a két részecske nyugalmi tömegének energiává alakulásakor).

A mérési elrendezés a 2. ábrán látható. A minta a pozitronforrás körül található, a minta két oldalán pedig egymással szemben a két szcintillációs detektor, melyek a START és a STOP jelet érzékelik. A két jel közötti igen apró időtartamot a számítógép értékeli ki.

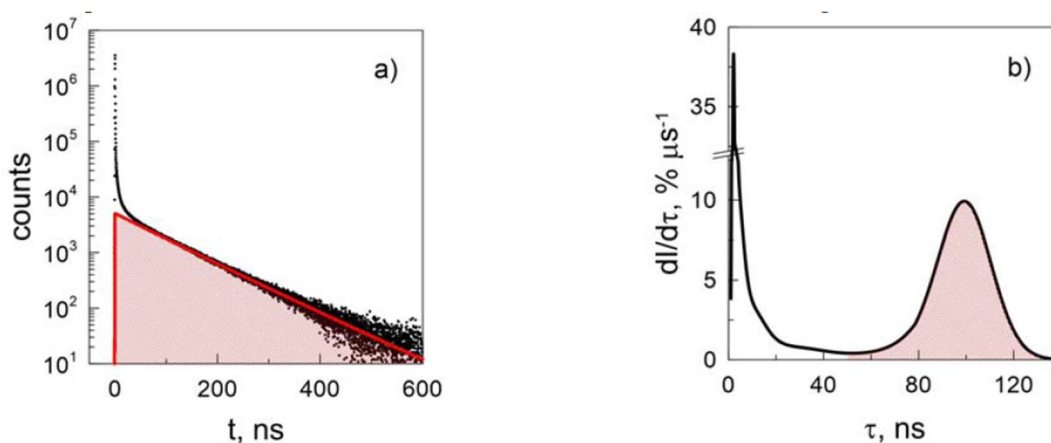


2. ábra: PALS mérési elrendezés

A jó minőségű detektáláshoz szükséges a megfelelő aktivitású sugárforrás használata: amennyiben az aktivitás túl alacsony, az a mérési idő növekedését eredményezi, amikor pedig túl magas, az kiértékelhetlenné teszi az adatokat, hiszen lehetséges, hogy egy START és egy STOP jel között újabb START jel érkezik, így a szoftver nem tudja, melyik két jel tartozik ugyanahhoz a pozitroniumhoz, ezért az élettartamot sem tudja meghatározni.

A zavaró gamma-fotonok hatásának kiküszöbölésére szokták alkalmazni az úgynevezett koincidencia-PALS-t. Ebben az esetben egy detektor értékeli a Neon relaxációjából származó jelet, másik kettő pedig erre merőlegesen az annihilációból származó gamma-fotonokat. A készülék csak akkor fogad el érvényes STOP jelet, ha mindkét STOP detektor egyszerre jelez beütést, azaz a két detektált foton biztosan az annihilációból származik. Bár a mérés így pontosabb, mégis a megnövekedett mérési időtartam miatt csak különleges esetekben használatos.

A 3. a) ábra egy tipikus PALS-spektrumot mutat, azaz az adott  $t$  pozitronium-élettartamhoz tartozó beütések számát. Fontos megjegyezni, hogy a függőleges tengely logaritmikus skálázású, azaz amit a diagramon egyenesként láthatunk, az valójában exponenciálisan lecsengő görbe. Ez jól egyezik azzal a ténnyel, hogy a pozitronium-atomok bomlása követi a radioaktív anyagokra és a bomló részecskékre általánosan érvényes exponenciális bomlási törvényt. A spektrumra illesztett exponenciális görbe paramétereiből meghatározható a 3. b) ábrán szereplő görbe, amely a pozitronumok átlagos élettartamát mutatja, az adott élettartamhoz tartozó intenzitással együtt. Amiatt a jelenség miatt, hogy a lecsengés sosem tökéletesen egy exponenciálissal jellemezhető, hanem több görbe összegével, az élettartam-eloszlás egy szélesebb csúcsot mutat. A jellemző élettartam a csúcsmaximumhoz tartozik. Megfelelő mérési összeállítás esetében az élettartam-eloszlás görbén akár több csúcs is megfigyelhető, melyek az önálló pozitronhoz, illetve az para- és orto-pozitroniumhoz tartoznak egyre növekvő élettartammal.



3. ábra: PALS-spektrum és az abból számított élettartam-eloszlás

Az így kapott spektrumok alakjának és a csúcsok helyzetének megváltozásából következtethetünk például egy anyagkeverékben kialakuló kölcsönhatások természetére: amennyiben az élettartam-eloszlás a keverék esetében nem a két tiszta anyag élettartam eloszlásainak átlaga (azaz az új csúcsmaximum nem a régi csúcsmaximumok átlaga), a pozitronium nem véletlenszerűen nyelődött el egyik vagy másik komponensben, hanem egy új kölcsönhatásokkal jellemezhető új fázis alakult ki.

Mivel az anyagban a pozitroniumok megsemmisülésük során nem mozdulatlan, hanem valamekkora sebességgel haladó elektronokkal találkoznak, a képződő gamma-

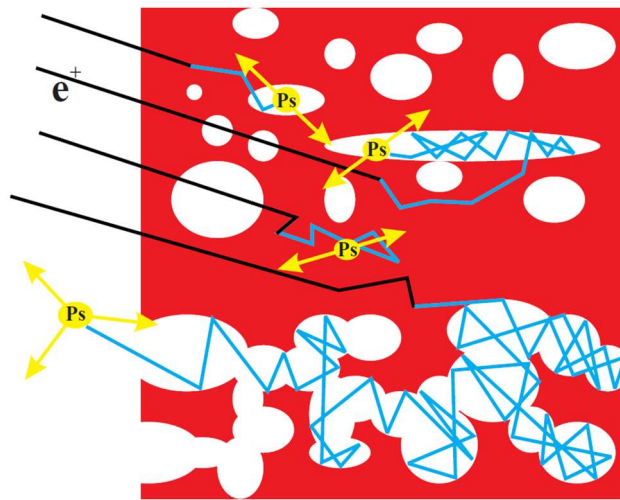
fotonok energiája a Doppler-effektus miatt kicsit eltér az elméleti 511 keV-től. A Doppler-effektus a mozgó sugárforrás által kibocsátott sugárzás hullámhosszának megváltozását jelenti. A hatás ismert azokkal a jelenségekkel kapcsolatban, amikor a távolodó és közeledő vonat vagy autó szirénájának hangmagassága változik, illetve, hogy a tőlünk távolodó égitestek fényének hullámhossza is a nagyobb értékek felé tolódik ( kozmikus vöröseltolódás). A gamma-fotonok esetében tapasztalt Doppler-effektus mértékéből tehát következtethetünk a mintában található elektronok sebességére, amiből meghatározható, hogy kötésben, vagy nemkötő elektronpárban vesznek-e részt, illetve, hogy kialakultak-e elektroneltolódással járó másodlagos kölcsönhatások (például hidrogénkötés) az anyag részecskéi közt.

### **3. A pozitron porozimetria**

A mikropórusos anyagok átlagos pórusméretének meghatározására a legelterjedtebb módszer az adszorpciós izotermák alapján történő meghatározás. Folyékony nitrogénnel végzett kísérletek esetében azonban fennáll a lehetősége, hogy a minta károsodik az alacsony hőmérsékleten, vagy megváltozik a szobahőmérsékleten fennálló, tanulmányozni kívánt pórusszerkezete. Az is akadály lehet az ilyen típusú mérések esetén, hogy segítségükkel csak a nyitott pórusok térfogatát és méreteloszlását tudjuk meghatározni, illetve azokból is csak a megfelelően nagy méretűeket (melyekbe a nitrogénmolekulák képesek beférkőzni és adszorbeálódni a pórus belső falán). Sok esetben tehát nehézkes ez a mérési forma, ám a pozitron annihilációs élettartam spektroszkópia kínál egy alternatívát a mikropórusos anyagok tulajdonságainak felderítésére. Az eljárás neve pozitron porozimetria, röviden PP.

Az orto-pozitronium megsemmisülésének egy alternatív módja, ha a minta anyagából a pozitron befog egy vele ellentétes spinű elektront és azzal lép annihilációs kölcsönhatásba. Az előzőekben ismertetett élettartamok az orto- és para-pozitroniumra, vákuumban mért értékek, amennyiben az orto-pozitronium egy elektron befogásával semmisül meg élettartama 2 nagyságrendet is csökkenhet (de még így is körülbelül tízszerese a para-pozitronium élettartamának). A csökkenés nagysága összefügg a vizsgált anyagban levő pórusok méreteivel, ugyanis a pórus a mérés szempontjából gyakorlatilag „vákuumnak” tekinthető, így, ha egy pozitronium végig a pórusban halad,

akkor élettartama nagy lesz, míg ha behatol a pórus falába, nagy valószínűséggel találkozik egy ellentétes spinű elektronnal és megsemmisül. Emiatt a nagyobb pórusokat tartalmazó anyagokban a pozitronok élettartama nagyobb lesz, míg a kis pórusokat tartalmazó minta esetében kisebb. A folyamatot szemlélteti a 4. ábra, ahol a fekete vonalak a sugárforrásból származó pozitronok, a világoskék vonalak pedig a keletkezett pozitronium-atomok útját jelölik. Jól látható a nagyobb pórusokban bolyongó pozitronium-atomok hosszabb élettartama.



4. ábra: Pozitroniumok keletkezése és annihilációja pórusos anyagban

Az, hogy a hagyományos adszorpciós technikáktól eltérően a PP esetében nem gázmolekulákkal, hanem azoknál nagyságrendekkel kisebb részecskékkel határozzuk meg a pórusok méretét, pontosabb méréseket tesz lehetővé, azaz kisebb pórusokat is képesek vagyunk kimutatni. Mivel a pozitronium az anyagban véletlenszerűen keletkezik, nem csak a nyitott, hanem a zárt pórusokról is nyerhetünk adatot (hiszen a 4. ábrán láthatóan a keletkezett részecske ezekbe is bejut). Ezen felül a pórusokban jelenlevő idegen anyag (adszorbeált molekulák vagy gáz) nem teszi lehetetlenné a mérést, csupán megváltoztatja a kapott pozitron annihilációs élettartam-spektrum alakját, ami lehetővé teszi például a pórusokban végbemenő változások követését, azaz *in situ* mérések végrehajtását. Ilyen változások többek között egyes anyagok adszorpciója, vagy deszorpciója a pórusok falára, olvadás, kristályosodás, vagy a pórusméret és pórusszerkezet megváltozása nagy nyomás hatására. Fontos azonban megjegyezni, hogy vezető anyagok esetében nem alkalmazható ez a módszer, mert a pozitronium-atomok a delokalizált elektronok nagy sűrűsége miatt túl hamar annihilálódnak, így a szivacsos



szerkezetű fémek, vagy pórusos szén minták vizsgálatára a hagyományos módszerekhez kell folyamodnunk.

A pozitronium-atomok élettartama és a pórusméret között elsőként a Tao-Eldrup-modell keresett összefüggést. A modell a pórust egy hengeres végtelen potenciálgödörként írja le, melynek alapállapoti energiáján helyezkedik el a pozitronium. A potenciálgödörön kívül a tömbi anyag található, ahol a pozitronium elektronbefogással megsemmisül. Ugyanez a jelenség lejátszódhat a potenciálgödörben is, de csak a faltól maximum  $\Delta$  távolságra, egyébként a pozitronium csak egyesüléssel annihilálódhat. A  $\Delta$  paraméter meghatározásával lehet a modellt valós, véges potenciálgödörre átültetni, ami a pórust sokkal jobban közelíti fizikailag. A  $\Delta$  érték megfelelő megválasztása esetében a végtelen potenciálgödörben való elektronbefogással történő megszűnés valószínűsége ugyanakkora lesz, mint valós pórusos rendszerek esetében.

A modell ismert pórusméretű anyagokkal történő tesztelése rávilágított, hogy sok esetben a valós élettartam kisebb, mint a modellből számított, így a meghatározott pórusméret a valósnál nagyobb volt. Ezt a hibát küszöbölte ki a Kiterjesztett Tao-Eldrup-modell, melynek kidolgozása során azt is figyelembe vették, hogy a pozitroniumok nem csak alapállapotban lehetnek, hanem a potenciálgödör magasabb energiaszintjein is, ahonnan a kilépés valószínűsége nagyobb, ezért a tartózkodási idő kisebb. A Kiterjesztett Tao-Eldrup-modell eredményei jó egyezést mutattak a valósággal pórusos szilika és üvegminták esetében.

Ahhoz, hogy a minta pórusméret-eloszlását meghatározhassuk, nem csak a pozitroniumok élettartama és az ebből meghatározható pórusméret közötti összefüggést kell ismernünk (melyet a Tao-Eldrup-modell ad meg), hanem az adott élettartamú pozitroniumok intenzitása és a pórustérfogat között fennálló viszonyt is tudunk kell. Az adott átmérőjű pórusban annihilálódott pozitroniumok intenzitása függ a póruszámtól, a pozitronium pórusban történő csapdázódásának valószínűségétől, és a sugárforrás által kibocsátott pozitronok számától. Ebből és a Tao-Eldrup-modellből számolt adatokból meghatározható a pórusméret-eloszlás, mely a fentebb ismertetett tényezők miatt az összes pórus (nyitott és zárt) méreteloszlásáról árulkodik.

A fent említett számítások egyetlen empirikus paramétert tartalmaznak: a Tao-Eldrup-modell által definiált  $\Delta$  értéket. Mivel az az érték a pozitronium elektronbefogásának valószínűségével van kapcsolatban, várható, hogy jelentősen eltér különböző anyagok esetében, hiszen a pórusok falát felépítő atomok elektronsűrűsége

befolyásolni fogja a valószínűségeket és így  $\Delta$ -t is. Szerencsére létezik olyan módszer, amelynek segítségével kiszámítható a paraméter értéke az egyes anyagokra. Ha a pórusok elég nagyok ahhoz, hogy a csapdázódott pozitronium magasabb energiaállapotokat is felvegyen, akkor az ezek közötti betöltöttségi viszonyt Boltzmann-eloszlás írja le. A Boltzmann-eloszlás pedig függ a hőmérséklettől, tehát a pozitroniumok átlagos élettartama is változni fog a hőmérséklettel. A hőmérséklet növelésével csökkenni fog az átlagos élettartam, hiszen a részecskék egyre inkább az alacsonyabb energiaszintekre szorúlnak, ahonnan pedig kisebb a kilépés valószínűsége. A mért hőmérséklet-élettartam adatpárookra a Tao-Eldrup-modellt illesztve meghatározható  $\Delta$  értéke.

## 4. Gyakorlati alkalmazások

A PALS és az pozitronium-élettartam-spektrumok alapján történő mérésekre számos példát találhatunk a szakirodalomban. A következőkben egy közleményt foglalom össze, melyben a fentebb ismertetett mérési technikákat alkalmazták pórusos anyagok tulajdonságainak meghatározására.

Marek Golgol és társai Amberlite® gyanta alapú Stöber-szilika kompozit részecskéket vizsgáltak PALS-mérésekkel. A kompozit részecskék előállításakor az Amberlite-et oldatfázisban diszpergálták, majd így szintetizálták a szilikatartalmú részecskéket, létrehozva a társított rendszert. A szintézist savas és bázikus körülmények között is megismételték, megfigyelve a különbségeket a kialakított részecskék szerkezetében.

Az eredmények tanúsága szerint a tiszta gyantához képest a savas körülmények közt szintetizált kompozit felülete simább volt, míg a bázikus körülmények között szintetizált minták érdekesebb és jobban struktúrált felületet mutattak. A nitrogénadszorpció vizsgálatból kiderül, hogy a savas körülmények között kialakított minta esetében a BET-modellből számított fajlagos felület 25%-al kisebb a tiszta Amberlite-hez képest, illetve a pórusok összterfogata 56%-al csökkent. Mindez azért lehetséges, mert a szintézis során a szilika behatolt a polimer gyanta mikropórusaiba telítve azokat.

A PALS mérések eredményeként az adódott, hogy a PAL-spektrum lecsengő tartományára legalább 6 exponenciális függvény illesztése szükséges, hogy a megfelelő jóságot elérjék. Emiatt 6 jellemző élettartamot szükséges definiálni az élettartam-

intenzitás függvényen. A legrövidebb élettartam a szabad pozitronhoz tartozik, a következő az orto-pozitroniumhoz ami már nehezebben annihilálódik, a 4 leghosszabb időtartam pedig a különböző méretű pórusokban csapdázódott para-pozitroniumok jellemző élettartama. A szabad pozitron élettartama minden mintában közel azonos, ám az intenzitás a savas körülmények között szintetizált kompozit részecskék esetében a legmagasabb, ami azt sugallja, hogy ezekben a mintákban kisebb valószínűséggel keletkezik pozitronium-atom. Ez egybevághat a fentebb ismertetett ténnyel, hogy a szilika behatol a polimer gyanta pórusaiba, lecsökkentve a pórusok térfogatát és fajlagos felületét.

A hosszabb élettartamú komponensek közül a legérdekesebb a legnagyobb időtartammal jellemezhető csoport, ami az anyag mezopórusos szerkezetéről ad képet. Mivel itt az annihiláció második elektron befogásával játszódik le, az élettartam-eloszlás a pórusok falának összetételéről és a pórusméretről egyaránt szolgáltat információt. Az eloszlásokból megfigyelhető, hogy az élettartam a tiszta gyanta esetében a legnagyobb, a bázikus körülmények között szintetizált kompozit esetében kisebb, és a legkisebb a savas körülmények között szintetizált mintákra, ám ez a különbség nem olyan jelentős, hogy a pórusok számottevő telítődéséről beszélhetnénk.

Összességében a fenti vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a savas és bázikus körülmények között szintetizált minták esetében eltérő szerkezetek kialakulása tapasztalható. Míg az eredeti tiszta gyanta adott mikro- és mezopórusos szerkezettel rendelkezik, a kompozitok esetében jelentős változás tapasztalható a pórusok méreteloszlásában. A mezopórusok esetében nincs nagymértékű eltérés a pórus szerkezetben, de a mikropórusok esetében tapasztalható változások azt mutatják, hogy a savas szintézis során a szilika mélyen behatol a polimer mátrix szerkezetébe, a bázikus szintézis esetében azonban inkább a felületen formál réteget vagy apró szigeteket, melyeknek nincs hatása a minta mikropórusainak tulajdonságaira.

## 5. Összefoglalás

A fentieket összefoglalva fontos megemlíteni, hogy a pozitron annihiláció két lépésből áll, először az elektron és a pozitron együtt egy pozitronium-atomot alkot (mely lehet orto- és para-pozitronium is az eredő spin alapján), majd ez a pozitronium semmisül

meg akár úgy, hogy a két résecske egyesül, akár a pozitron és egy másik elektron reakciója során.

A hosszabb élettartamú orto-pozitronium keletkezése és megsemmisülése között mért időt tanulmányozza a pozitron annihilációs élettartam spektroszkópia (PALS), a keletkezésre és a megszűnésre jellemző gamma-fotonok detektálás között eltelt időtartam mérésével. Az időtartam-beütésszám spektrumra történő illesztésből szoftveresen számítható a pozitroniumok élettartam-intenzitás eloszlása, amelyből az anyag számos tulajdonságára következtethetünk.

A PALS felhasználható különböző mikropórusos anyagok pórusméret-eloszlásának meghatározására. Mivel a pozitronium élettartama sokkal hosszabb, ha egy pórusban csapdázódik, mint a tömbi anyagban történő haladás során, az élettartam-eloszlásból a megfelelő összefüggések és modellek ismeretében számítható a pórusok méreteloszlása. Mindez nagyobb hatékonyságú méréseket tesz lehetővé, mint a hagyományos adszorpciós technikák, hiszen a zárt pórusokat is meghatározza, illetve a nagyon apró pórusméretek tartományában is megbízhatóan működik. További előny, hogy PALS segítségével *in situ* mérések válnak lehetségessé, hátrány azonban, hogy a technológia vezető anyagok esetében nem ad értékelhető eredményt.

Látható tehát, hogy a pozitron annihiláció jelenségének kihasználása nem korlátozódik csupán az orvostudományra, ennél sokkal szélesebb körű, és a polimerektől a szilikátokig sokféle anyag tulajdonságainak felderítésében segíti a kutatókat.

## 6. Felhasznált irodalom

B. Kállai-Szabó, R. Zelkó: Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS) and its pharmaceutical applications; *Acta pharmaceutica Hungarica*, **2011** (82), 1-10.

R. Zalesky: Principles of positron porosimetry; *Nukleonika*, **2015**; 60 (4), 795-800.

M. Gorgol, M. Tydda, A. Kierys, R. Zaleski: Composition of pore surface investigated by positron annihilation lifetime spectroscopy; *Microporous and Mesoporous Materials*, **2012** (163), 276-281.