

# Új részecske kísérleti kimutatása az ATOMKI-ben

Krasznahorkay Attila János

## Bevezetés

Az 1954-ben alapított ATOMKI első átütő tudományos eredménye a neutrínó kinematikai kimutatása volt. A  $\beta$ -bomlásban keletkező elektron és a visszalökődött atommag iránya nem mindig esik egy egyenesbe, ezt sikerült megfigyelniük egy expanziós ködkamra segítségével, és ezzel bizonyították a feltételezett új részecske (neutrínó) létét.

A kísérletet gondosan megtervezték. Egy kis tömegszámú atommagot választottak, aminek  $\beta$ -bomlásakor nagy energia szabadult fel, és így a neutrínó is nagy energiával keletkezett, ami a kis tömegű atommagot mérhető módon visszalökte. Gyors expanziós ködkamrát építettek, aminek az indításához szinkronizálták 2 db. modern fényképezőgép exponálását, amik segítségével a részecskék nyomairól 3D fényképeket tudtak készíteni. A kísérlet eredményeit külföldön is olyan nagyra értékelték, hogy Csikai Gyulát és Szalay Sándort Nobel-díjra is felterjesztették.

Korunk fizikájának egyik legnagyobb kihívása az eddig ismert (látható) anyagnál lényegesen nagyobb tömegű, a csillagászok által bevezetett, úgynevezett sötét anyag tulajdonságainak és szerkezetének megismerése [1,2]. Csoportunk 2016-ban az ATOMKI-ben egy eddig ismeretlen anomáliát figyelt meg a  $^8\text{Be}$  atommag 18,15 MeV-es állapotának elektron-pozitron belső párkeltéssel történő lebomlása során, amit egy új,  $\approx 17 \text{ MeV}/c^2$  tömegű, az irodalomban később X17-nek nevezett, részecske keletkezésével és elbomlásával magyaráztunk [3].

Az X17 részecske kapcsolatot teremthet a sötét anyaggal, ezért nagy nemzetközi érdeklődést váltottak ki a kísérleti eredményeink. Publikációnk, a hívatkozottsága alapján, a magfizika élvonalbeli kutatásairól szóló közlemények felső 0.1%-ába került.

## Új motiváció a magfizikai kísérletekhez: sötét anyag és sötét foton

Milyen részecskékből állhat a sötét anyag? Van-e kapcsolat a látható és a „sötét” világunk között? Ezeket a kérdéseket jelenleg egyre több fizikus vizsgálja. A sötét anyag fizikájának megértése napjaink fizikájának egyik legaktívabban tanulmányozott témája lett. A sötét anyag kutatása új kutatási irányvá vált.

1978-ban egy nagy kihívást jelentő magfizikai kísérletet indítottak egy új részecske, az axion kimutatására, amelyet Steven Weinberg Nobel-díjas elméleti fizikus jósolt meg. Az axion az egyik legmeggyőzőbb megoldás volt az erős kölcsönhatás egy rejtélyes szimmetriájára, amit máig sem értünk. Thomas William Donnelly az  $1^+ \rightarrow 0^+$  atommagátmenetekben létrejött  $e^+e^-$  párok szögkorrelációjának tanulmányozását javasolta az axion bomlásának jellemzőjeként. Ezt a részecskét a  $\text{MeV}/c^2$  tömegtartományban azonban gyorsan kizárták, árnyékot vetve ezzel a további kísérletekre.

A nehezebb részecskék, különösen a Fokke de Boer és munkatársai által javasolt  $9 \text{ MeV}/c^2$ -es tömegű részecskék keresését Frankfurtban kezdték el *magfizikai módszerekkel*. Ezeket a kísérleteket azonban a gyorsító bezárása miatt nem lehetett folytatni. 2001-ben a frankfurti  $e^+e^-$  spektrométert Debrecenbe hoztuk, és elkezdtuk a  $9 \text{ MeV}/c^2$ -es részecskét különböző magreakciókban vadászni. A spektrométer alacsony hatásfoka és a vizsgált folyamatokban lévő nagy háttér azonban nem tette lehetővé a hipotetikus részecske kimutatását. Ezért egy új spektrométert építettünk, közel ezerszer nagyobb hatásfokkal, és újra megvizsgáltuk a  $^7\text{Li}(p,\gamma)^8\text{Be}$  magreakciót, amelyet először de Boer vizsgált. A sokkal jobb kísérleti körülmények ellenére sem tudtuk megerősíteni a  $9 \text{ MeV}/c^2$  részecske létezését. Utána több éves szünet következett.

Mind ez ideig azonban sem a CERN-ben, sem a világ más nagy részecskefizikai laboratóriumában nem sikerült olyan új részecskét kimutatni, amik valamilyen módon kapcsolatosak lehetnének a sötét anyaggal.

### **A sötét foton bomlásából származó $e^-e^+$ párok szögkorrelációjának mérése az ATOMKI-ben**

A sötét fotont a sötét anyag mérték-bozonjaként vezették be, ami a látható fényhez hasonló szimmetria tulajdonságokkal rendelkezik, csak nem az elektromos töltések közötti kölcsönhatást, hanem a sötét anyag részecskéi közötti kölcsönhatást lenne hívatott közvetíteni.

Habár a sötét foton tömegére csak nagyon durva becsléssel rendelkezünk,  $1 \text{ MeV} < m_x < 1 \text{ GeV}$ , mégis nagy erővel kezdtek el a kísérleti kimutatását. Ezekbe a kutatásokba kapcsolódtunk be mi is. A részecske élettartama nagyon rövidnek volt várható, és ha a tömege  $m_x < 100 \text{ MeV}$ , akkor a részecske domináns bomlási módja az elektron-pozitron párra történő bomlás.

A vizsgálatainkhoz olyan nagyenergiás, 18 MeV-es  $e^-e^+$  párokat nagy hatásfokkal detektáló spektrométerre volt szükség, amellyel a párok relatív szöge is néhány fok pontossággal meghatározható. A nagyon ritka (a  $\gamma$ -sugárzásokhoz képest 9 nagyságrenddel gyengébb) események detektálására az elektront és a pozitront egy időben észlelő, ún.  $e^-e^+$  koincidencia-spektrométert építettünk. A detektorok és spektrométerek építésének Debrecenben már nagy hagyománya van. Elektron-spektrométerek építésében az intézet különösen jelentős nemzetközi elismertségnek örvend. A spektrométer tervezésében és építésében jelentős segítséget kaptunk nemcsak az intézet tagjaitól, hanem holland és német kollégáinktól is.

A spektrométer 5 db sokszálas proporcionális számlálóból (MWPC), valamint vékony ( $\Delta E$ ) és vastag (E), úgynevezett pasztik szcintillációs detektorokból áll. A gáztöltésű proporcionális számlálók a detektálandó  $e^-$  és  $e^+$  becsapódási helyének meghatározására, a vékony és vastag szcintillátorok pedig a részecskék azonosítására és energiájuk meghatározására szolgálnak. A spektrométer fényképét az 1. ábrán láthatjuk.

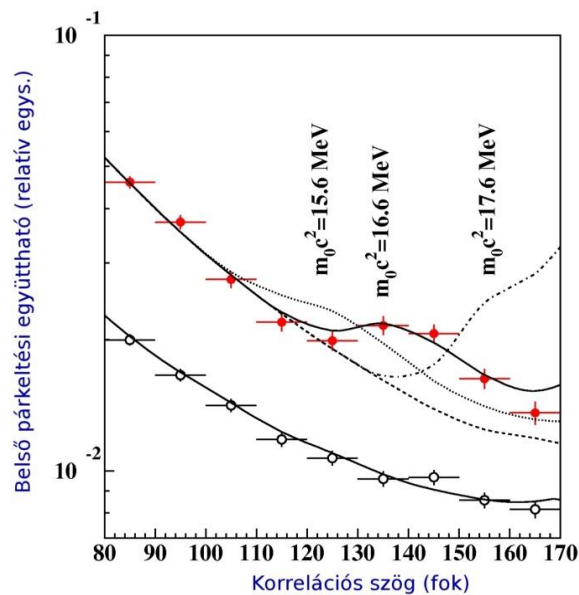
Ezeket a detektorokat a nyalábirányra merőlegesen  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  és  $270^\circ$ -os szögekben helyeztük el. A szögirányokat úgy választottuk ki, hogy a spektrométer hatásfoka az  $e^-e^+$  párkorrelációs szög függvényében körülbelül egyenletes legyen.

A spektrométer minden részét, a céltárgy környezetében az utolsó csavarig, gondosan beépítettük a GEANT Monte Carlo szimulációba, hogy megkaphassuk a spektrométer választ mind az  $e^-e^+$  párokra, mind az intenzív  $\gamma$ -sugárzásokra. A belső párkeltési folyamat mellett a  $\gamma$ -sugárzások okozta háttérrel, a külső párkeltést és az  $e^-$  illetve  $e^+$  sokszoros szóródásokat is figyelembe vettük, hogy minél pontosabban megértsük a detektorok és a spektrométer válaszfüggvényeit.

A spektrométerrel megvizsgáltuk a  $^8\text{Be}$  atommag 18,15 MeV-es állapotának legerjesztődésekor keletkező  $e^-e^+$  párok szögkorrelációját, és abban  $140^\circ$  környékén a belső párkeltés elméleti értékeitől csúcsszerű eltérést találtunk (lásd 2. ábra). Legjobb tudásunk szerint ez jelenleg semmilyen magfizikai effektussal nem magyarázható. A kísérleti és az elméleti értékek eltérése jelentős, és az csak egy új részecske bevezetésével magyarázható, aminek tömege  $16,7 \pm 0,35$  (statisztikus hiba)  $\pm 0,5$  (szisztematikus hiba) MeV.



1. ábra. A spektrométer fényképe a gázrendszerrel, a detektorok jeleit feldolgozó elektronikával és az adatgyűjtő rendszerrel.



2. ábra A  ${}^8\text{Be}$  18,15 MeV-es átmenetéhez tartozó, a rezonancián mért  $e^-e^+$  párok szimmetrikus (sötét pontok hibákkal), illetve aszimmetrikus (üres körök hibákkal) energia-eloszlással kapuzott szögkorrelációja, összehasonlítva a különböző energiájú részecskét feltételező szimulációk eredményeivel.

Meghatároztuk a feltételezett részecske keletkezésének elágazási arányát is a 18,15 MeV-es  $\gamma$ -átmenethez képest és azt  $6.0 \times 10^{-6}$ -nak találtuk. Ezen kísérleti eredményünk alapján hamar kiderült, hogy ez a részecske nem lehet a sötét foton, hanem valami más, talán még érdekesebb részecske. Ezt mutatta az elméleti értelmezésére írt csaknem 500 hivatkozás.

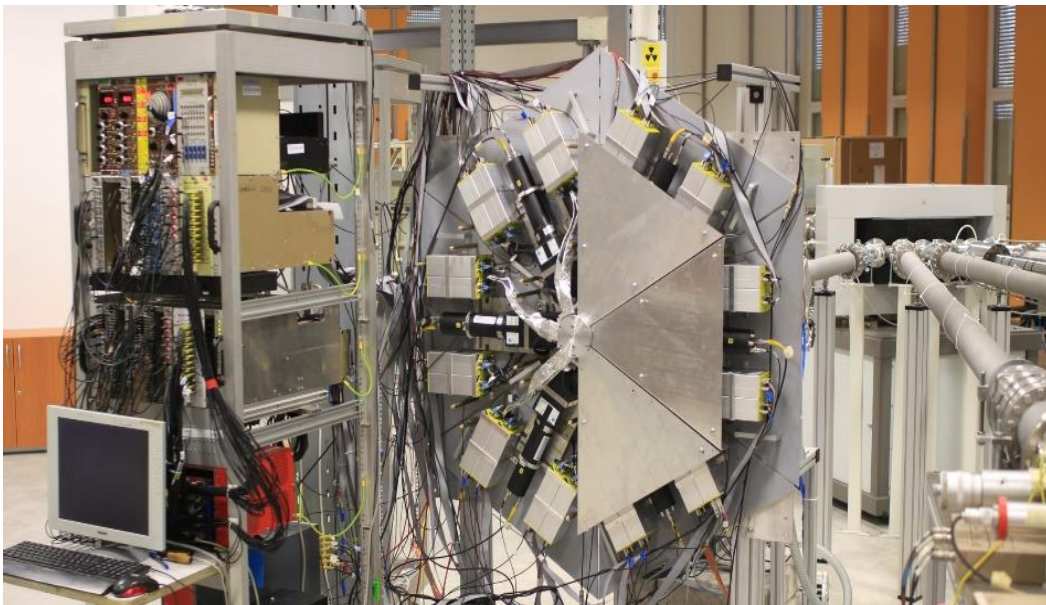
### Az új $e^+e^-$ spektrométerünk

A feltételezett új (az irodalomban X17-nek keresztelt) részecske további tanulmányozására egy olyan nagy hatásfokú  $e^+e^-$  koincidencia spektrométert építettünk, ami képes 4-20 MeV-es magátmenetekből származó, belső párkeltéssel keletkező  $e^+e^-$  párok szelektív, kis háttérrel történő detektálására.

Az  $e^+e^-$  részecskék energiavesztésének és a részecskék áthaladási pontjainak meghatározására modern, szilíciumból készített DSSD (Double sided Silicon Strip Detector) detektorokat használtunk. Ezek 0.5 mm vastag  $50 \times 50$  mm<sup>2</sup> méretű szilícium lapkák. Mindkét oldalukra 1.5 mm széles vezető csíkokat párologtattak annak érdekében, hogy az áthaladó elektronok/pozitronok által keltett töltések pontos helyét meghatározhassuk. A plasztik szcintillátorok méreteit úgy választottuk meg, hogy benne a nagyenergiás részecskék teljesen lefékeződjenek. Annak érdekében, hogy a detektorokat a céltárgyhoz minél közelebb rakhassuk, azok orrait speciálisan alakítottuk ki.

### Kísérletek az új Tandetron gyorsítóval

Az elmúlt években a spektrométerünket áthelyeztük az ATOMKI új Tandetron gyorsítója mellé a 3. ábrán látható módon.



3. ábra Az ATOMKI Tandetron Laboratóriumában az egyik nyalábcsatornára telepített elektron-pozitron pár-spektrométer legújabb verziója.

Először megismételtük és megerősítettük a  $^8\text{Be}$  anomáliára vonatkozó kísérleti eredményeinket. Következő lépésként a  $^3\text{H}(p, e^+e^-)^4\text{He}$  magreakcióból származó  $e^+e^-$  párok szögkorrelációját vizsgálva is sikerült megfigyelnünk az anomáliát. Ebben az esetben, a nagyobb gerjesztési energia miatt, az anomália  $115^\circ$ -nál jelent meg [4]. A  $^4\text{He}$   $e^+e^-$  - bomlásának alapos vizsgálata

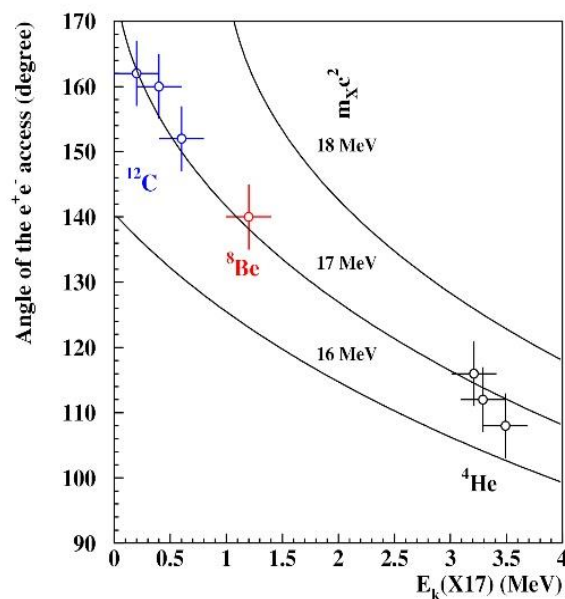
során kiderült az is, hogy az anomália megjelenését a protonok közvetlen befogása által generált E1 multipolaritású sugárzások okozzák.

Legújabb eredményeinket pedig a  $^{11}\text{B}(p,e^+e^-)^{12}\text{C}$  magreakció vizsgálatával kaptuk [5]. A reakciót  $E_p=1,3$  MeV és 2,3 MeV között vizsgáltuk hat különböző bombázási energián, amelyek egy 17,0 és 18,0 MeV közötti gerjesztésienergia-tartományt ( $E_x$ ) fedtek le, ami egy 1,05 MeV széles rezonancia energiaintervalluma. A legkisebb nyalábenergiánál az  $e^+e^-$  szögkorreláció kizárólag az E1 multipolaritású sugárzás belső párkeltési folyamatával volt értelmezhető, mivel a gerjesztési energia kisebb volt, mint az X17 részecske tömege. Magasabb energiáknál viszont figyelembe kellett venni az X17 bomlás hozzájárulását is. Az anomális csúcs helye különböző gerjesztési energiáknál mérve  $170^\circ$ -ról  $150^\circ$ -ra csökkent.

## Összefoglalás

E vizsgálatok eredményeként mára már meggyőző kinematikai bizonyítékokkal rendelkezünk az X17 részecske létére.

Az atommagok vizsgálandó gerjesztett állapotait minden esetben protonbefogással állítottuk elő, aminek során az atommag pontosan meghatározott gerjesztett állapotba került. Ez az energia szolgált az X17 részecske keltésére, a maradék pedig a részecske kinetikus energiáját biztosította. Egy mozgó részecske  $e^+e^-$  részecskére bomlik. A kétrészecskés bomlás kinematikájának kiszámításával az adódik, hogy minél nagyobb a részecske kinetikus energiája, annál kisebb az  $e^+$  és  $e^-$  részecskék által bezárt szög. A kinematikai számítások eredményeit, különböző tömeget feltételezve az X17 részecskére, a 4. ábrán folytonos vonallal tüntettem fel. Az ábrán jól látható, hogy a  $^8\text{Be}$ -ra,  $^4\text{He}$ -ra és  $^{12}\text{C}$ -re kapott kísérleti eredményeink jól illeszkednek a 17 MeV/ $c^2$ -es tömeget feltételező számítás eredményére. Eredményeinkről nemrég a Nuclear Physics News-ban [6] és a legutóbbi NuPECC ülésen, Pozsonyban is beszámoltam.



4. ábra A különböző atommagokban megfigyelt anomáliák szögét az X17 részecske kinetikus energiájának függvényében láthatjuk.

Nagy megtiszteltetés volt számomra, hogy meghívott előadó lehettem a 2022. május 23–26-án a COVID járvány miatt, online megrendezett, a világ legrangosabb konferenciájának tartott, "Frontiers of Fundamental Physics (FFP16)" nemzetközi konferencián [7]. Ezt a találkozót, más néven a Nobel-díjasok találkozóját, először 1987-ben Indiában rendezték meg, 2004 óta pedig számos más országban. A résztvevők között olyan Nobel-díjasok is voltak, mint Gerard 't Hooft, Steven Chu, Charles H. Townes, Klaus von Klitzing, Pierre-Gilles de Gennes, Douglas Osheroff, Sir Harold Walter Kroto, Claude Cohen-Tannoudji, Anthony Leggett és más kiváló fizikusok.

A jövőben tervezzük az X17 részecske  $2\gamma$  kibocsátással történő bomlásának vizsgálatát, illetve az atommagok X17 kibocsátásakor elvitt pálya-impulzusmomentumának a megmérését is, hogy pontosabban meghatározhassuk az X17 részecske spinjét és paritását és ezzel pontosabb képet adjunk annak elméleti értelmezéséhez.

#### Hivatkozások:

1. Németh Judit: A sötét anyag. Fizikai Szemle 56/11 (2006) 362.
2. Fényes Tibor: Az Univerzum uralkodó anyagfajtája a „sötét anyag”. Fizikai Szemle 58/3 (2008) 81
3. Krasznahorkay Attila János, Az 5. kölcsönhatás nyomában, Fizikai Szemle, 2016/7-8, 248. ; A.J. Krasznahorkay et al., Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 042501.
4. A. J. Krasznahorkay et al., Phys. Rev. C **104**, 044003 , (2021)
5. A. J. Krasznahorkay et al., Phys. Rev. C 106, L061601 (2022).
6. Krasznahorkay Attila János, Krasznahorkay Attila, Csatlós Margit, Csige Lóránt, Tímár János, Nuclear Physics News, 32, 10 (2022).
7. A. J. Krasznahorkay, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, and J. Timár, A New Particle is Suggested by Anomalies Observed in Internal  $e^+e^-$  Pair Creation, Springer Proceedings in Physics Volume 392 p. 71 (2024).



Krasznahorkay Attila János fizikus, az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója, a Szegedi Egyetem címzetes egyetemi tanára és az Academia Europaea tagja. Eredményei jelentősek az atommaghasadás és az azt megelőző, erősen deformált állapotok vizsgálatában, a neutrongazdag maganyag állapotegyenletének pontosításában és az alapvető kölcsönhatások vizsgálatában. Hat éven át képviselte hazánkat az Európai Magfizikai Koordinációs Bizottságban.