

ÚJ RÉSZECSCKE KÍSÉRLETI KIMUTATÁSA AZ ATOMKI-BAN

Krasznahorkay Attila
HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Bevezetés

Az 1954-ben alapított ATOMKI első átütő tudományos eredménye a neutrínó kinematikai kimutatása volt. A β -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 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-ban egy eddig ismeretlen anomáliát figyelt meg a ^8Be 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 a kísérleti eredményeink nagy nemzetközi érdeklődést váltottak ki. Publikációnk a hivatkozottsága 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 problémája lett. A sötét anyag kutatása új kutatási irányná 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 szimmetria-problémájára, amit maig 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 MeV/c^2 tömegtartományban azonban gyorsan kizárták, árnyékot vetve ezzel a további kísérletekre.

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

A sötét foton bomlásából származó e^-e^+ párok szögkorrelációjának mérése az ATOMKI-ban

A sötét foton a sötét anyag mértékbozonjaként vették be, ami a látható fényhez hasonló szimmetria-tulajdonságokkal rendelkezik, csak nem az elektromos töltések közötti kölcsönhatást, hanem a sötét anyag részecskéi közötti kölcsönhatást lenne hivatott közvetíteni.

Habár a sötét foton tömegére csak nagyon durva becsléssel rendelkezünk, $1 \text{ MeV} < m_x < 1 \text{ GeV}$, mégis nagy erővel kezdtek el annak 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 határfokkal detektáló spektrométerre volt szükség, amellyel a párok relatív szöge is néhány fok pontossággal meghatározható. A nagyon ritka események detektálására az elektront és a pozitront egy időben észlelő, ún. e^-e^+ -koincidenciaspektrométert 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 proporcionalis számlálóból (MWPC), valamint vékony (ΔE) és vastag (E), úgynevezett plasztik szcintillációs detektorokból áll. A gáztöltésű proporcionalis számlálók a detektálandó e^- és e^+ becsapódási helyének meghatározására, a vékony



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

és vastag szcintillátorok pedig a részecskék azonosítására és energiájuk meghatározására szolgálnak.

Ezeket a detektorokat a nyalábirányra merőlegesen 0° , 60° , 120° , 180° és 270° -os szögekben helyeztük el. A szögirányokat úgy választottuk ki, hogy a spektrométer határfoka 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 választát mind az e^-e^+ párokra, mind az intenzív γ -sugárzásokra. A belső párkeltési folyamat mellett a γ -sugárzások okozta háttérrel, a külső párkeltést és a sokszoros e^- , illetve e^+ -szóródásokat is figyelembe vettük, hogy minél pontosabban megértsük a detektorok és a spektrométer válaszfüggvényeit.

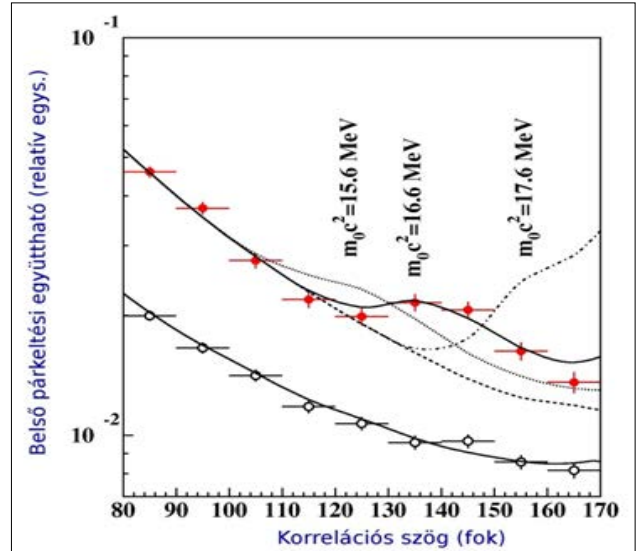
A spektrométerrel megvizsgáltuk a ^8Be atommag $18,15$ MeV-es állapotának legerjesztődésekor keletkező e^-e^+ párok szögkorrelációját, és abban 140° környékén a belső párkeltés elméleti értékeitől csúcshzerű eltérést találtunk (lásd 1. ábra). Legjobb tudásunk szerint ez jelenleg semmilyen magfizikai effektussal nem magyarázható. A kísérleti és az elméleti értékek eltérése jelentős, és az csak egy új részecske bevezetésével magyarázható, aminek tömege $16,7 \pm 0,35$ (statistikus hiba) $\pm 0,5$ (szisztematikus hiba) MeV.

Meghatároztuk a feltételezett részecske keletkezésének elágazási arányát is a $18,15$ MeV-es gamma-átmenethez képest, és azt $6,0 \cdot 10^{-6}$ -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 eredmények 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^- -koincidenciaspektrométert építettünk, ami képes a 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 50×50 mm² méretű szilíciumlapkák. Mindkét oldalukra $1,5$ mm széles vezető csíkokat párologtattak annak érdekében, hogy az áthaladó elektronok és pozitronok által keltett töltések pontos helyét meghatározhatjuk. A plasztik szcintillátorok méreteit úgy választottuk meg, hogy bennük a nagyenergiás részecskék teljesen lefékeződjenek. Ahhoz, hogy a detektorokat a céltárgyhoz minél közelebb rakhassuk, azok orrait speciálisan alakítottuk ki.



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

Kísérletek az új Tandetron gyorsítóval

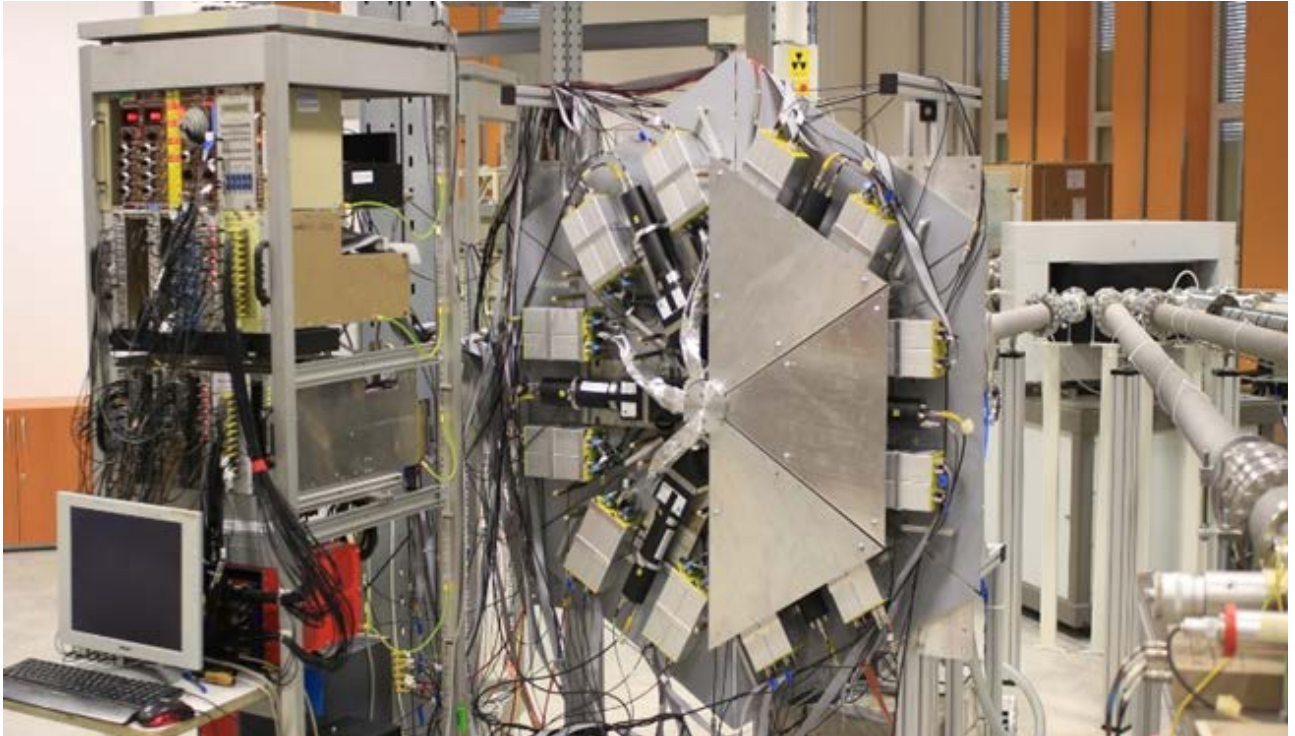
Az elmúlt években a spektrométerünket áthelyeztük az ATOMKI új Tandetron gyorsítója mellé a 2. ábrán látható módon.

Először megismételtük és megerősítettük a ^8Be -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° -nál jelent meg [4]. A ^4He e^+e^- -bomlásának alapos vizsgálata során az is kiderült, 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 nyalábergiánál 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 csúcshelye különböző gerjesztési energiáknál mérve 170° -ról 150° -ra csökkent.

Összefoglalás

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



2. ábra. Az ATOMKI Tandemron Laboratóriumában az egyik nyalábcatornára telepített elektron-pozitron párokat regisztráló spektrométer legújabb verziója

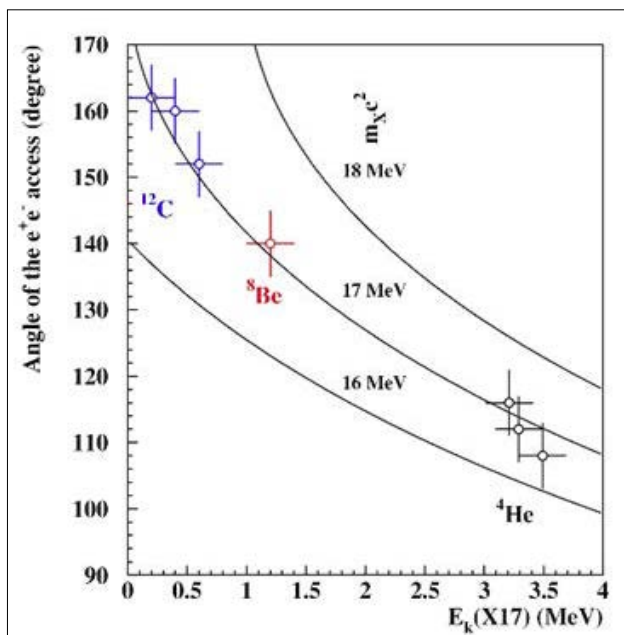
Az atommagok vizsgálendő gerjesztett állapotait minden esetben protonbefogással állítottuk elő, aminek során az atommag pontosan meghatározott gerjesztett állapotba került. Ez az energia szolgált az X17 részecske keltésére, a maradék pedig a részecske kinetikus energiáját biztosította. Egy mozgó részecske e^+e^- részecskére bomlik. A kétrészecskés bomlás kinematikájának kiszá-

mításával 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 3. 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 (Magfizikai Európai Együttműködési Bizottság), Pozsonyban is beszámoltam.

A jövőben tervezzük az X17 részecske 2 γ -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 (2021) 044003.
5. A. J. Krasznahorkay, et al.: *Phys. Rev. C* 106 (2022) L061601.
6. Krasznahorkay Attila János, Krasznahorkay Attila, Csatlós Margit, Csige Lóránt, Tímár János: *Nuclear Physics News*, 32 (2022) 10.



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