

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Egy új elektron-pozitron párspektrométer
tesztelése az X17 anomália kutatásához**

Sas Nándor József

Témavezető: Dr. Krasznahorkay Attila János



DEBRECENI EGYETEM

Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2026

Készült
a DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Magfizika programja keretében
a HUN-REN Atommagkutató Intézetben

Bevezető

Az axion részecskére vonatkozó elméleti előrejelzések és a sötét anyag szerkezetének megismerése iránti igény évtizedek óta motiválja az új, könnyű részecskék kimutatására vonatkozó kísérleti kutatásokat.

A debreceni HUN-REN Atommagkutató Intézetében (HUN-REN ATOMKI) Krasznahorkay Attila vezetésével végzett kutatások eredményeit először 2016-ban publikálták. A ^8Be atommag 18,15 MeV-es elektromágnes átmenete során keletkező elektron-pozitron párok vizsgálata során a párok szögkorrelációjában szignifikáns anomáliát (csúcsszerű többletet) fedeztek fel 140° -nál. A belső párkeltés elméletétől megfigyelt eltérést, egy új könnyű részecske keletkezésével és elbomlásával magyarázták. Ezt az új hipotetikus részecskét később az irodalomban X17-nek nevezték el, mivel a tömege 17 MeV/c²-nek adódott.

Az ATOMKI-ben elért eredmények jelentős nemzetközi érdeklődést váltottak ki, és azóta számos külföldi kutatócsoport folytattott, és jelenleg is folytat további méréseket és fejlesztéseket e témában. Tekintettel a téma érdekességére, egyetemistaként ezért kapcsolódtam be én is ezekbe a kutatásokba.

Nagy öröm volt számomra, hogy részt vehettem hasonló anomáliák kimutatásában a ^4He és ^{12}C atommagok elektromágneses átmeneteiben, amik szintén az X17 részecske keletkezésével és elbomlásával voltak értelmezhetők.

Időközben az elektron-pozitron spektrométert fokozatosan fej-

lesztették és modernizálták. A spektrométer legújabb verziójával végzett hitelesítő mérésekben én is részt vehettem, és elvégezhettem a kísérleti adatok feldolgozását is.

2024-ben az X17 részecske létét a Hanoi Egyetem (Vietnami Nemzeti Egyetem) egy kutatócsoportja a debreceni ATOMKI kísérleti eredményeit megerősítő mérési eredményekről számolt be. Szintén 2024-ben az oroszországi dubnai Egyesített Atommagkutató Intézetben nagyenergiájú (3-5 GeV-es) proton és deuteron által indukált magreakciókkal dolgoztak, és a keletkezett γ -sugárzások energiájának és szögének mérésével határozták meg az invariáns tömegeloszlást, amiben 17 MeV-nél egy szignifikáns csúcsot találtak. Ezzel megerősítették az X17 részecske létezését. Az olaszországi PADME kísérlet jelenleg is folyó kutatás az anomália kimutatására, ahol ígéretes eltéréseket találtak az adatok elemzése során, azonban az eredményeket még nem publikálták hivatalosan. 2026 augusztusában hosszú, 30 napos kísérletet tervez az n-TOF együttműködés is a CERN-ben. A ${}^3\text{He}(n, e^+e^-){}^4\text{He}$ magreakcióban keletkező X17 részecskék e^+e^- bomlását szeretnék kimutatni egy nagy hatásfokú, a legújabb technikákat felhasználó spektrométerrel. Ezenkívül több, jelenleg is folyamatban lévő kutatásról is beszámolok a disszertációmban.

Nagyenergiás részecskefizikai módszerekkel ezt az X17 részecskét még nem sikerült kimutatni. Ez arra utalhat, hogy annak élettartama a ps tartományba eshet, ami elméletileg megengedett és a magfizikai mérési eredményeinket nem is zavarja. Ha azonban a részecske nagy sebességgel mozog, akkor a nagy mértékű idődilatáció miatt az élettartama annyira megnövekedhet, hogy átmegy

a detektorrendszeren és ezután bomlik el, így számukra láthatatlan részecske marad.

Az X17 részecske kutatása továbbra az érdeklődés középpontjában van, és a cikkeinkre vonatkozó hivatkozások száma folyamatosan növekszik.

Kitűzött célok és vizsgálati módszerek

A ^4He , ^8Be , és ^{12}C gerjesztett állapotaiban tapasztalt anomáliák arra ösztönözték a kutatócsoportot, hogy a detektorrendszert továbbfejlessze, a mérési pontosságot növelje, és az eredmények megbízhatóságát fokozza.

Ezekben a kísérletekben magfizikai környezetben vizsgálunk részecskefizikai elméletet: a folyamat során keletkező e^+e^- párok energia- és pozíciómérésével határozzuk meg a belső párkeltésből származó párok szöghorrelációját. A párok származhatnak belső vagy külső párkeltésből, a feltételezett részecske bomlásából, illetve a kozmikus sugárzás okozta hamis koincidenenciák is e^+e^- párként jelenhetnek meg az adatsorokban.

Az egyrétegű DSSD elrendezésben az in-beam mérés során felvett e^+e^- párok szöghorrelációs spektrumát egy külön, azonos szelekciós feltételekkel rögzített off-beam háttérpektrummal korrigáltuk, amelyet a megfelelő időarány szerint normalizáltunk, majd levontunk az in-beam adatokból, azonban az így eltávolított események eredete nem volt egyértelműen azonosítható. Ennek megfelelően a levont események származhattak külső vagy belső párkeltésből, kozmikus sugárzás okozta fals eseményekből, illetve akár a feltételezett részecske bomlásából is, ami különösen a 140 fok körüli tartományban bizonytalanságot okozott. A kétrétegű DSSD rendszer ezzel szemben már lehetővé tette az események pálya-alapú megkülönböztetését, így a háttér hatékonyabban szűrhetővé vált, miközben több potenciálisan jel-eseményt megőrizhettünk. Ez

azért lényeges, mert így nagyobb eséllyel vizsgálható a feltételezett részecske esetleges, egyedi kinematikai mintázata.

Az adatokat ROOT környezetben dolgoztam fel, ahol elvégeztem a szükséges energia-, idő- és hatásfokkalibrációkat, valamint a pályarekonstrukciót és a háttérszűrést. A spektrométer választ és az akceptanciát GEANT4-alapú szimulációval vizsgáltam, amelyben a mért geometriai elrendezést, a detektorok választ és a fő háttérfolyamatokat is figyelembe vettem. A szimuláció célja a mért adatokkal való összevetés volt, vagyis annak ellenőrzése, hogy a rekonstruált szögkorrelációs eloszlások, valamint a kiválasztási feltételek és korrekciók fizikailag következetesen írják-e le a mérést.

Eredmények

1. tézis pont: Az X17 részecske keresése a ^4He atommag elektromágneses átmeneteiben.

A $^3\text{H}(p, e^+e^-)^4\text{He}$ magreakcióval végzett kísérlet során az e^+e^- párok szögkorrelációjában az elméleti belső párkeltési modellektől eltérő, jelentős anomáliát észleltünk [1, 2]. A mérés célja az volt, hogy megerősítsük ezt az anomáliát, valamint pontosabb információkat szerezzünk annak jellemzőiről és lehetséges fizikai hátteréről. A kísérleti elrendezés során protonnyalábbal sugároztuk be a ^3H célatommagokat, és a keletkező e^+e^- párok szögkorrelációját nagy felbontású, többdetektoros rendszerrel mértük. Az adatfeldol-

gozás során különös figyelmet fordítottunk a kísérleti környezet és a detektorhatások részletes modellezésére, hogy minimalizáljuk a szisztematikus hibák hatását, és megbízhatóan elkülöníthessük az anomáliát a háttér folyamatoktól.

Saját hozzájárulásom a kutatáshoz a mérési környezet, különösen a kísérletben alkalmazott targettartó hatásának részletes Monte Carlo szimulációja volt.

2. tézis pont: Az X17 részecske keresése a ^{12}C atommag 17,2 MeV-es rezonanciájának legerjesztődésekor

A mérés során a ^{11}B atommagokat protonnyalábbal besugároztuk, előidézve a ^{12}C 17,2 MeV-es $1^- \rightarrow 0^+$ átmenetét [3, 6]. Az átmenet során keletkező e^+e^- párok szögkorrelációját nagy felbontású, többdetektoros spektrométerrel detektáltuk, hogy az átmenet belső párkeltési folyamataiban esetlegesen megjelenő anomáliákat kimutathassuk. Az adatokat részletesen elemeztük, különös figyelmet fordítva az eltérésekre a standard belső párkeltési elméleti modellektől. Ezek az eltérések új, feltételezett jelenség lehetséges tulajdonságaira utalhatnak.

Saját hozzájárulásom a kutatáshoz a mérési környezet és detektorrendszer pontos modellezése volt, amelyet GEANT4 szimuláció segítségével végeztem el. Ezek a szimulációk kulcsszerepet játszottak az adatok értelmezésében, mivel lehetővé tették a detektorhatások és háttér folyamatok pontosabb becslését, valamint az anomália megbízhatóbb azonosítását.

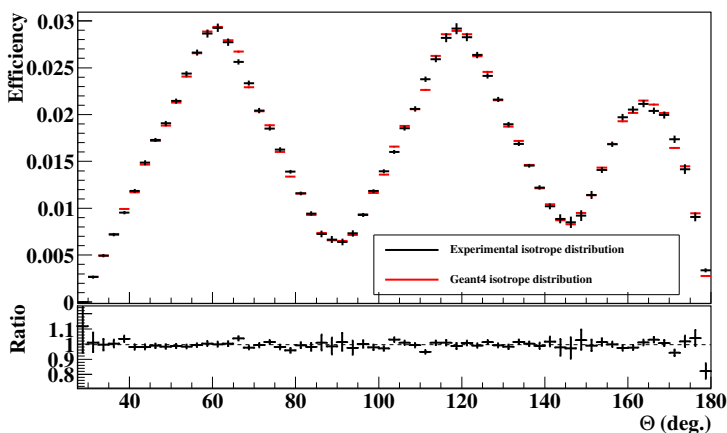
3. tézis pont: A ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ magreakció vizsgálata az új, kétrétegű DSSD detektorokból álló spektrométerrel

(a) A kísérlet adatfeldolgozása

- Kalibráció és felbontás: ${}^{19}\text{F}(p,\alpha){}^{16}\text{O}$ és a ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ magreakciók segítségével végeztem el a spektrométer kalibrálását, amelyek belső párkeltés révén e^+e^- párokat hoznak létre [4, 5, 7]. A belső párkeltés során az elektronok és pozitronok nagy része kis szögben lép ki az atommagból, és nagy valószínűséggel ugyanabban a teleszkópban detektálódik. Ezeket az eseményeket a kettes multiplicitású DSSD-események kiválogatásával határoztam meg. A plastik detektorok relatív felbontása $\sigma/E = 6,68\%$ -nak adódott. A véletlen események csökkentése érdekében meghatároztam minden detektorpár időkülönbségét és erre szigorú feltételt szabtam az e^+e^- párok azonosításához. A spektrométer teleszkóp-párokra vonatkozó időfelbontása átlagosan $0,76\text{ ns}$ -nak adódott.
- Eseményválogatási feltételek: A kalibrált spektrumokhoz tartozó eseményválogatási kritériumokat meghatároztam.
- Pályarekonstrukció: Ezt követően a korábban alkalmazott eseményválogatási feltételek alapján kiválasztott e^+e^- párok tagjainak trajektóriáját a detektorokból nyert pozícióadatok felhasználásával rekonstruáltam, majd meghatároztam, hogy az egyes részecskék által kijelölt egyenesek hol metszik az egyes teleszkópok DSSD-detektorainak a spektrométer középpont-

ján átmenő, a detektorok síkjával párhuzamos síkját. Az így kapott pozícióeloszlás szórása átlagosan $\sigma=6,08$ mm volt.

- Akceptancia: A szelekciós feltételek meghatározása és alkalmazása után meghatároztam a spektrométer e^+e^- párokra vonatkozó akceptanciáját amit a szögfüggvényében a 3. ábrán tüntettem fel.



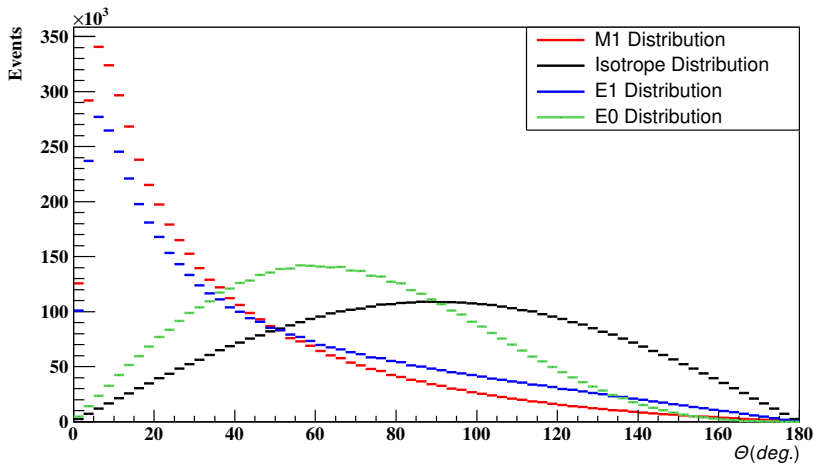
1. ábra. A felső ábrán a szimulált illetve a kísérleti adatokból rekonstruált korrelálatlan e^+e^- párok szögkorrelációs spektrumainak az összehasonlítása a DSSD detektorok pozíciójának korrekcióját követően. Az alsó ábra a két spektrum arányát jelítni meg.

- Háttércsökkentés: A kétrétegű DSSD konfigurációjában a két detektorréteg pozícióinformációja lehetővé teszi a kozmikus háttér eseményenkénti elutasítását. Ennek eléréséhez speciális vágási feltételt alkalmaztam, amely segítségével a kozmikus sugárzásból származó nem kívánt jeleket hatékonyan szűrtem ki. Azonos kiválasztási feltételek mellett az off-beam (kozmos) eseményszám 92,18%-kal csökkent, miközben a

${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reakcióból származó in-beam események száma csak 3,41%-kal csökkent, és az elutasított események többsége a 140° körüli tartományba esett.

(b) A kísérlet szimulációja

- Belső párkeltés szimulációja: A GEANT4-alapú szimulációban a belső párkeltés leírására a Rose által megadott analitikus szögeloszlásokat implementáltam, Born-közelítésben, ahogyan a 4. is látható. Megmutattam, hogy az így kapott beeső párkeltés előrejelzése jól reprodukálja a mért szögkorrelációs eloszlások alapvető szerkezetét. Az eredmények alkalmasak voltak a kísérleti adatokkal való közvetlen összevetésre.
- Külső párkeltés hozzájárulásának becslése: A GEANT4-alapú szimulációban a γ -fotonok által kiváltott külső párkeltés hozzájárulását a Bethe–Heitler-modell alapján becsültem meg. A vizsgált ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ átmenetben a külső párkeltésből származó komponens nem torzította érdemben az belső párkeltésből származó szögkorrelációs eloszlást, míg a tracking bevezetése a γ -sugárzásból származó háttér hozzájárulását hozzávetőleg a felére csökkentette.



2. ábra. Az M1, E0 és E1 dipólusátmenetek, valamint az izotróp eloszlás polárszög szerinti eloszlása a GEANT4 szimulációban.

- Az elektronnyaláb DSSD-detektoron való szóródási tulajdonságainak vizsgálata: Az elektronnyaláb DSSD-detektoron való szóródási tulajdonságainak vizsgálata során meghatároztam a töltött részecskék pályájának elhajlását és a detektorválaszra gyakorolt hatását. A vizsgálatot 1–20 MeV energiaintervallumban, 1 MeV-os energialépésközzel, egyteleszkópos konfigurációban, a karboncső hatásának figyelembevételével és anélkül végeztem.
- Geometriai pozíciókorrekció és annak hatása az akceptanciafüggvényre: A teleszkópokban mért pozícióadatokról rekonstruált egyeneseknek a rendszer origójába felvett, a DSSD detektorok síkjával párhuzamos referencia-síkra vetített eloszlása alapján relatív pozíciókorrekciót határoztam meg. Ezt

követően a feldolgozott adatok DSSD detektorainak pozícióira alkalmaztam korrekciót, majd az így korrigált eseményekből újraszámoltam az akceptanciafüggvényt. A geometriai bizonytalanságot 500 Monte Carlo szimuláció alapján becsültem.

- A hipotetikus részecske kéttest-bomlásának implementálása a szimulációba: A hipotetikus részecske kéttest-bomlására jellemző kinematikai mintázat keresése. A szimulációk során a relativisztikus kéttest-bomlás kinematikáját is beépítettem, majd ezt követően az energia-aszimmetria paraméterrel korrelált szögeloszlást vizsgáltam, amely egy hipotetikus rövid élettartamú részecske e^+e^- -bomlásának karakterisztikus „kinematikai ujjlenyomata” lehet. Az ilyen kétdimenziós mintázat megjelenése erősebb, a puszta csúcyszerű eltérésnél informatívabb bizonyítékot adhatna arra, hogy a megfigyelt anomália valóban részecskebomlásból származik.

Bibliográfia

A DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ KÖZLEMÉNYEK

- [1] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, A. Krasznahorkay, B. M. Nyakó, I. Rajta, J. Timár, I. Vajda, N. J. Sas, *New anomaly observed in ^4He supports the existence of the hypothetical $X17$ particle*, Phys. Rev. C **104**, 044003 (2021).
- [2] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, M. Koszta, B. Szihalmi, J. Timár, D. S. Firak, Á. Nagy, N. J. Sas, A. Krasznahorkay, *A new anomaly observed in ^4He supporting the existence of the hypothetical $X17$ particle*, J. Phys.: Conf. Ser. **1643**, 012001 (2020).
- [3] A. J. Krasznahorkay, A. Krasznahorkay, M. Begala, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, A. Krakó, J. Timár, I. Rajta, I. Vajda, N. J. Sas, *New anomaly observed in ^{12}C supports the existence and the vector character of the hypothetical $X17$ boson*, Physical Review C, **106**(6), L061601 (2022).
- [4] N. J. Sas, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Molnár, Z. Pinte, Gy. Y. Hegyesi, S. Cellár, *Electron–Positron Pair Spectrometers with High Efficiency for Angular Correlation Measurements*, Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, **18**(2), Paper A14 (2025).

- [5] N. J. Sas, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Molnár, Z. Pintye, S. Cellár,
High-efficiency electron-positron pair spectrometer for the study of light bosons, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (2026).

A DOKTORI ÉRTEKEZÉSHEZ KAPCSOLÓDÓ KONFERENCIA ELŐADÁSOK

- [6] Nándor Sas, The ATOMKI spectrometer, Workshop on Shedding light on X17, Sep 6–8, 2021 Centro Ricerche Enrico Fermi, Rome, Italy (<https://agenda.infn.it/event/26303/contributions/>)
- [7] N. J. Sas, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Molnár, Z. Pintye, G. Y. Hegyesi, S. Cellár,
Electron–Positron Pair Spectrometers with High Efficiency for Angular Correlation Measurements, 57th Zakopane Conference on Nuclear Physics, 2024. augusztus 25- szeptember 1., Zakopane, Lengyelország.).

EGYÉB PUBLIKÁCIÓK

- [8] A. J. Krasznahorkay, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, J. Timár, M. Begala, A. Krakó, I. Rajta, I. Vajda, N. J. Sas,
An Update of the Hypothetical X17 Particle, Universe, **10**(11), Paper 409 (2024).
- [9] A. J. Krasznahorkay, M. Begala, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, A. Krakó, A. Krasznahorkay, B. M. Nyakó, I. Rajta, N. J. Sas, J. Timár, I. Vajda,

A new light particle is being born, Journal of Physics: Conference Series **2391**, 012007 (2022).

- [10] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, D. Firak, J. Gulyás, Á. Nagy, N. Sas, J. Timár, T. G. Tornyí, A. Krasznahorkay,
On the X17 Light-particle Candidate Observed in Nuclear Transitions, Acta Phys. Pol. B **50**, 675–684 (2019).
- [11] Á. Nagy, A. J. Krasznahorkay, M. Ciemala, M. Csatlós, L. Csige, Z. Gácsi, M. Hunyadi, T. Klaus, M. Kmiecik, A. Maj, N. Pietralla, Zs. Révay, N. Sas, C. Stieghorst, J. Timár, T. Tornyí, B. Wasilewska,
Searching for the double gamma-decay of the X(17) particle, Nuovo Cim. C **42**, 124 (2019).
- [12] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, Z. Gácsi, J. Gulyás, Á. Nagy, N. Sas, J. Timár, T. G. Tornyí, I. Vajda, A. J. Krasznahorkay,
New results on the ^8Be anomaly, J. Phys.: Conf. Ser. **1056**, 012028 (2018).
- [13] D. S. Firak, A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, M. Koszta, B. Szihalmi, J. Timár, Á. Nagy, N. J. Sas, A. Krasznahorkay,
Confirmation of the existence of the X17 particle, EPJ Web of Conferences **232**, 04005 (2020).



Nyilvántartási szám: DEENK/456/2026.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Sas Nándor József

Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10067856

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (5)

1. **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Molnár, J., Pintye, Z., Czellár, S.: High efficiency electron-positron pair spectrometer for the study of light bosons.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 1084, 1-8, 2026. ISSN: 0168-9002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2025.171232>
IF: 1.4 (2024)
2. **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Molnár, J., Pintye, Z., Hegyesi, G., Czellár, S.: Electron-positron pair spectrometers with high efficiency for angular correlation measurements.
Acta Phys Pol B Proc Suppl. 18 (2), 1-7, 2025. ISSN: 1899-2358.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.18.2-A14>
3. Krasznahorkay, A., Krasznahorkay, A., Begala, M., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Krakó, A., Timár, J., Rajta, I., Vajda, I., **Sas, N. J.**: New anomaly observed in ^{12}C supports the existence and the vector character of the hypothetical X17 boson.
Phys. Rev. C. 106 (6), 1-5, 2022. ISSN: 2469-9985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.106.L061601>
IF: 3.1
4. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Krasznahorkay, A., Nyakó, B. M., Rajta, I., Timár, J., Vajda, I., **Sas, N. J.**: New anomaly observed in ^4He supports the existence of the hypothetical X17 particle.
Phys. Rev. C. 104 (4), 1-8, 2021. ISSN: 2469-9985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.104.044003>
IF: 3.199
5. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Koszta, M., Szihalmi, B., Timár, J., Firak, D., S., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A.: A new anomaly observed in ^4He supporting the existence of the hypothetical X17 particle.
J. Phys. Conf. Ser. 1643 (1), 1-7, 2020. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1643/1/012001>





További közlemények

Idegén nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

6. Krasznahorkay, A., Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Timár, J., Begala, M., Krakó, A., Rajta, I., Vajda, I., **Sas, N. J.**: An Update of the Hypothetical X17 Particle.
Universe. 10 (11), 1-14, 2024. ISSN: 2218-1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/universe10110409>
IF: 2.6
7. Krasznahorkay, A., Begala, M., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Krakó, A., Krasznahorkay, A., Nyakó, B. M., Rajta, I., **Sas, N. J.**, Timár, J., Vajda, I.: A new light particle is being born.
J. Phys. Conf. Ser. 2391 (1), 1-10, 2022. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2391/1/012007>
8. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Firak, D. S., Gulyás, J., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Timár, J., Tornyai, T. G., Krasznahorkay, A.: On the X(17) Light-particle Candidate Observed in Nuclear Transitions.
Acta Phys. Pol. B. 50 (3), 675-684, 2019. ISSN: 0587-4254.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5506/APhysPolB.50.675>
IF: 0.651
9. Nagy, Á., Krasznahorkay, A., Ciemala, M., Csatlós, M., Csige, L., Gácsai, Z., Hunyadi, M., Klaus, T., Kmiecik, M., Maj, A., **Sas, N. J.**, Stieghorst, C., Timár, J., Tornyai, T. G., Wasilewska, B.: Searching for the double gamma-decay of the X(17) particle.
Il Nuovo cimento. 42 C, 1-4, 2019. ISSN: 1826-9885.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1393/ncc/i2019-19124-8>

Idegén nyelvű konferencia közlemények (1)

10. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gácsai, Z., Gulyás, J., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Timár, J., Tornyai, T. G., Vajda, I.: New results on the ^8Be anomaly.
J. Phys. Conf. Ser. 1056, 1-7, 2018. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1056/1/012028>





Idegén nyelvű absztrakt kiadványok (1)

11. Firak, D. S., Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Koszta, M., Szihalmi, B.,
Timár, J., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A.: Confirmation of the existence of the X17
particle.
EPJ Web Conf. 232, 1-5, 2020. ISSN: 2101-6275.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/202023204005>

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 10,95

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
7,699**

A DEENK a Jelölt által a Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudánymetria ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2026.06.18.



Short thesis for the degree of doctoral of philosophy (PhD)

**Testing a New Electron–Positron Pairspectrometer
for the Investigation of the X17 Anomaly**

by Nándor József Sas

Supervisor: Dr. Attila János Krasznahorkay



UNIVERSITY OF DEBRECEN

Doctoral School of Physics

Debrecen, 2026

Prepared within the framework of the
Nuclear Physics Program
of the Doctoral School of Physics
at the UNIVERSITY OF DEBRECEN
at the HUN-REN Institute for Nuclear Research

Introduction

The theoretical predictions related to the axion particle and the need to understand the structure of dark matter have for decades motivated experimental research aimed at the detection of new light particles.

The results of the research carried out at the HUN-REN Institute for Nuclear Research in Debrecen (HUN-REN ATOMKI) under the leadership of Attila Krasznahorkay were first published in 2016. During the investigation of the electron-positron pairs produced in the 18.15 MeV electromagnetic transition of the ^8Be nucleus, a significant anomaly (a peak-like excess) was discovered in the angular correlation of the pairs at 140° . The observed deviation from the theory of internal pair creation was explained by the creation and decay of a new light particle. This new hypothetical particle was later named X17 in the literature, since its mass was found to be $17 \text{ MeV}/c^2$.

The results achieved at ATOMKI attracted significant international interest, and since then several foreign research groups have carried out, and are still carrying out, further measurements and developments in this field. In view of the interest of the topic, I also joined these studies as an undergraduate student.

It was a great pleasure for me to participate in the detection of similar anomalies in the electromagnetic transitions of the ^4He and ^{12}C nuclei, which could also be interpreted by the creation and decay of the X17 particle.

In the meantime, the electron-positron spectrometer was gradually developed and modernized. I was also able to participate in the validation measurements performed with the latest version of the spectrometer, and I also carried out the processing of the experimental data.

In 2024, a research group from Hanoi University (Vietnam National University) reported measurement results confirming the experimental results of ATOMKI in Debrecen concerning the existence of the X17 particle. Also in 2024, at the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, Russia, nuclear reactions induced by high-energy (3–5 GeV) protons and deuterons were studied, and the invariant-mass distribution was determined by measuring the energy and angle of the produced γ radiation, in which a significant peak was found at 17 MeV. This confirmed the existence of the X17 particle. The PADME experiment in Italy is another ongoing study aimed at detecting the anomaly, where promising deviations were found during the analysis of the data, although the results have not yet been officially published. In August 2026, the n-TOF collaboration is also planning a long, 30-day experiment at CERN. They aim to detect the e^+e^- decay of X17 particles produced in the ${}^3\text{He}(n, e^+e^-){}^4\text{He}$ nuclear reaction with a high-efficiency spectrometer using the latest techniques. In addition, I also report on several other studies that are currently in progress in my dissertation.

This X17 particle has not yet been detected by high-energy particle-physics methods. This may indicate that its lifetime falls in the ps range, which is theoretically allowed and does not disturb our nuclear-physics measurement results either. However, if the particle

moves at high velocity, then due to the large time dilation its lifetime may increase so much that it passes through the detector system and decays only afterwards, thus remaining invisible to such experiments.

Research on the X17 particle remains at the center of interest, and the number of citations to our papers is continuously increasing.

Objectives and methods of investigation

The anomalies observed in the excited states of ^4He , ^8Be , and ^{12}C motivated the research group to further develop the detector system, increase the measurement accuracy, and improve the reliability of the results.

In these experiments, we investigate a particle-physics theory in a nuclear-physics environment: during the process, we determine the angular correlation of the pairs originating from internal pair creation by measuring the energy and position of the produced e^+e^- pairs. The pairs may originate from internal or external pair creation, from the decay of the assumed particle, and false coincidences caused by cosmic radiation may also appear in the data sets as e^+e^- pairs.

In the single-layer DSSD arrangement, the angular-correlation spectrum of the e^+e^- pairs recorded during the in-beam measurement was corrected with a separate off-beam background spectrum recorded with identical selection conditions, which was normalized according to the corresponding time ratio and then subtracted from the in-beam data, however, the origin of the events removed in this way could not be identified unambiguously. Accordingly, the subtracted events could originate from external or internal pair creation, from false events caused by cosmic radiation, or even from the decay of the assumed particle, which caused uncertainty especially in the region around 140 degrees. In contrast, the two-layer DSSD system already made it possible to distinguish events on the basis of

their trajectories, thus the background could be filtered more efficiently, while more potentially signal-like events could be preserved. This is important because in this way the possible unique kinematic pattern of the assumed particle can be investigated with greater probability.

I processed the data in the ROOT environment, where I performed the necessary energy, time, and efficiency calibrations, as well as the track reconstruction and background filtering. I investigated the spectrometer response and the acceptance with a GEANT4-based simulation, in which I also took into account the measured geometrical arrangement, the detector response, and the main background processes. The purpose of the simulation was comparison with the measured data, that is, to verify whether the reconstructed angular-correlation distributions, as well as the selection conditions and corrections, describe the measurement in a physically consistent way.

Results

Thesis point 1: Search for the X17 particle in the electromagnetic transitions of the ^4He nucleus.

During the experiment performed with the $^3\text{H}(p, e^+e^-)^4\text{He}$ nuclear reaction, a significant anomaly was observed in the angular correlation of the e^+e^- pairs, differing from the theoretical models of internal pair creation [1, 2]. The aim of the measurement was to

confirm this anomaly and to obtain more precise information about its characteristics and possible physical background. In the experimental arrangement, the ^3H target nuclei were irradiated with a proton beam, and the angular correlation of the produced e^+e^- pairs was measured with a high-resolution multi-detector system. During the data processing, special attention was paid to the detailed modelling of the experimental environment and detector effects in order to minimize the impact of systematic uncertainties and to distinguish the anomaly reliably from the background processes.

My own contribution to the research was the detailed Monte Carlo simulation of the measurement environment, in particular of the effect of the target holder used in the experiment.

Thesis point 2: Search for the X17 particle in the de-excitation of the 17.2 MeV resonance of the ^{12}C nucleus

During the measurement, the ^{11}B nuclei were irradiated with a proton beam, inducing the 17.2 MeV $1^- \rightarrow 0^+$ transition in ^{12}C [3, 6]. The angular correlation of the e^+e^- pairs produced in the transition was detected with a high-resolution multi-detector spectrometer in order to reveal possible anomalies appearing in the internal pair-creation processes of the transition. The data were analysed in detail, with special attention paid to deviations from the standard theoretical models of internal pair creation. These deviations may indicate possible properties of a new, assumed phenomenon.

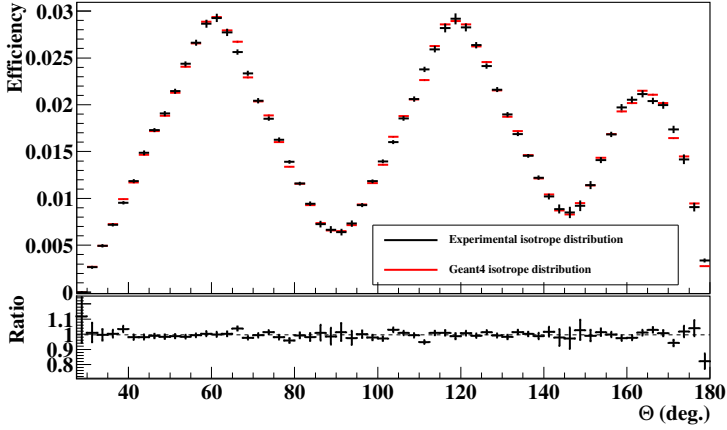
My own contribution to the research was the accurate modelling of the measurement environment and detector system, which I carried out with the help of GEANT4 simulation. These simulations played a key role in the interpretation of the data, since they made it possible to estimate the detector effects and background processes more accurately, as well as to identify the anomaly more reliably.

Thesis point 3: Investigation of the ${}^7\text{Li}(\text{p},\gamma){}^8\text{Be}$ nuclear reaction with the new spectrometer consisting of two-layer DSSD detectors

(a) Data processing of the experiment

- Calibration and resolution: I performed the calibration of the spectrometer using the ${}^{19}\text{F}(\text{p},\alpha){}^{16}\text{O}$ and ${}^7\text{Li}(\text{p},\gamma){}^8\text{Be}$ nuclear reactions, which produce e^+e^- pairs via internal pair creation [4, 5, 7]. During internal pair creation, most of the electrons and positrons emerge from the nucleus at small angles, and with high probability are detected in the same telescope. I determined these events by selecting DSSD events with multiplicity two. The relative resolution of the plastic detectors was found to be $\sigma/E = 6.68\%$. In order to reduce random events, I determined the time differences for all detector pairs and imposed a strict condition on this for the identification of the e^+e^- pairs. The time resolution of the spectrometer for telescope pairs was found to be 0.76 ns on average.

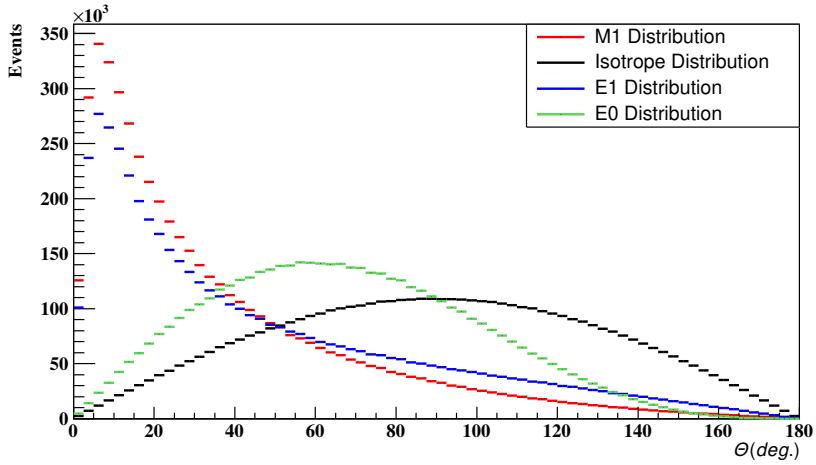
- Event-selection conditions: I determined the event-selection criteria belonging to the calibrated spectra.
- Track reconstruction: After that, on the basis of the event-selection conditions applied earlier, I reconstructed the trajectories of the members of the selected e^+e^- pairs using the position data obtained from the detectors, and then determined where the straight lines defined by the individual particles intersect the plane of the DSSD detectors of the individual telescopes that passes through the center of the spectrometer and is parallel to the detector plane. The width of the position distribution obtained in this way was on average $\sigma = 6.08$ mm.
- Acceptance: After determining and applying the selection conditions, I determined the acceptance of the spectrometer for e^+e^- pairs, which is shown as a function of angle in Fig. 3.
- Background reduction: In the two-layer DSSD configuration, the position information of the two detector layers makes event-by-event rejection of the cosmic background possible. In order to achieve this, I applied a special cut condition, with the help of which I efficiently filtered out the unwanted signals originating from cosmic radiation. Under identical selection conditions, the number of off-beam (cosmic) events decreased by 92.18%, while the number of in-beam events originating from the ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ reaction decreased by only 3.41%, and most of the rejected events fell into the region around 140° .



3. ábra. In the upper panel, the angular-correlation spectra of uncorrelated e^+e^- pairs reconstructed from the simulated and experimental data are compared after the correction of the positions of the DSSD detectors. The lower panel shows the ratio of the two spectra.

(b) Simulation of the experiment

- Simulation of internal pair creation: In the GEANT4-based simulation, for the description of internal pair creation I implemented the analytical angular distributions given by Rose in the Born approximation, as can also be seen in Fig. 4. I showed that the internal pair-creation prediction obtained in this way reproduces well the basic structure of the measured angular-correlation distributions. The results were suitable for direct comparison with the experimental data.



4. ábra. Polar-angle distributions of the M1, E0, and E1 dipole transitions, as well as of the isotropic distribution, in the GEANT4 simulation.

- Estimation of the contribution of external pair creation: In the GEANT4-based simulation, I estimated the contribution of external pair creation induced by γ photons on the basis of the Bethe–Heitler model. In the investigated ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ transition, the component originating from external pair creation did not distort significantly the angular-correlation distribution originating from internal pair creation, while the introduction of tracking reduced the contribution of the background originating from γ radiation by approximately a factor of two.
- Investigation of the scattering properties of the electron beam in the DSSD detector: During the investigation of the scattering properties of the electron beam in the DSSD detector, I determined the deflection of the trajectories of charged particles

and its effect on the detector response. The investigation was carried out in the 1–20 MeV energy interval, with an energy step of 1 MeV, in a single-telescope configuration, with and without taking into account the effect of the carbon tube.

- **Geometrical Position Correction and Its Effect on the Acceptance Function:** A relative position correction was determined from the distribution of straight-line trajectories reconstructed from the position information measured in the telescopes and projected onto a reference plane passing through the origin of the system and parallel to the DSSD detector planes. The obtained correction was then applied to the DSSD detector positions in the processed data, and the acceptance function was recalculated using the corrected events. The geometrical uncertainty was estimated based on 500 Monte Carlo simulations.
- **Implementation of the two-body decay of the hypothetical particle in the simulation:** Search for the kinematic pattern characteristic of the two-body decay of the hypothetical particle. During the simulations, I also implemented the kinematics of relativistic two-body decay, and afterwards I investigated the angular distribution correlated with the energy-asymmetry parameter, which may be a characteristic “kinematic fingerprint” of the e^+e^- decay of a hypothetical short-lived particle. The appearance of such a two-dimensional pat-

tern could provide stronger and more informative evidence than a mere peak-like deviation that the observed anomaly indeed originates from particle decay.

Bibliography

PUBLICATIONS RELATED TO THE PHD THESIS

- [1] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, A. Krasznahorkay, B. M. Nyakó, I. Rajta, J. Timár, I. Vajda, N. J. Sas, *New anomaly observed in ^4He supports the existence of the hypothetical $X17$ particle*, Phys. Rev. C **104**, 044003 (2021).
- [2] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, M. Koszta, B. Szihalmi, J. Timár, D. S. Firak, Á. Nagy, N. J. Sas, A. Krasznahorkay, *A new anomaly observed in ^4He supporting the existence of the hypothetical $X17$ particle*, J. Phys.: Conf. Ser. **1643**, 012001 (2020).
- [3] A. J. Krasznahorkay, A. Krasznahorkay, M. Begala, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, A. Krakó, J. Timár, I. Rajta, I. Vajda, N. J. Sas, *New anomaly observed in ^{12}C supports the existence and the vector character of the hypothetical $X17$ boson*, Physical Review C, **106**(6), L061601 (2022).
- [4] N. J. Sas, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Molnár, Z. Pinye, Gy. Y. Hegyesi, S. Cellár, *Electron–Positron Pair Spectrometers with High Efficiency for Angular Correlation Measurements*, Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement, **18**(2), Paper A14 (2025).
- [5] N. J. Sas, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Molnár, Z. Pinye, S. Cellár,

High-efficiency electron-positron pair spectrometer for the study of light bosons, under review, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (2025).

TALKS RELATED TO THE PHD THESIS

- [6] N. J. Sas, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Molnár, Z. Pinye, G. Y. Hegyesi, S. Cellár,
Electron–Positron Pair Spectrometers with High Efficiency for Angular Correlation Measurements, th57 Zakopane Conference on Nuclear Physics, 2024. augusztus 25- szeptember 1., Zakopane, Lengyelország.).

OTHER PUBLICATIONS

- [7] A. J. Krasznahorkay, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, J. Timár, M. Begala, A. Krakó, I. Rajta, I. Vajda, N. J. Sas,
An Update of the Hypothetical X17 Particle, Universe, **10**(11), Paper 409 (2024).
- [8] A. J. Krasznahorkay, M. Begala, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, A. Krakó, A. Krasznahorkay, B. M. Nyakó, I. Rajta, N. J. Sas, J. Timár, I. Vajda,
A new light particle is being born, Journal of Physics: Conference Series **2391**, 012007 (2022).
- [9] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, D. Firak, J. Gulyás, Á. Nagy, N. Sas, J. Timár, T. G. Tornyai, A. Krasznahorkay,
On the X17 Light-particle Candidate Observed in Nuclear Transitions, Acta Phys. Pol. B **50**, 675–684 (2019).

- [10] Á. Nagy, A. J. Krasznahorkay, M. Ciemala, M. Csatlós, L. Csige, Z. Gácsi, M. Hunyadi, T. Klaus, M. Kmiecik, A. Maj, N. Pietralla, Zs. Révay, N. Sas, C. Stieghorst, J. Timár, T. Tornyí, B. Wasilewska, *Searching for the double gamma-decay of the X(17) particle*, *Nuovo Cim. C* **42**, 124 (2019).
- [11] A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, Z. Gácsi, J. Gulyás, Á. Nagy, N. Sas, J. Timár, T. G. Tornyí, I. Vajda, A. J. Krasznahorkay, *New results on the ^8Be anomaly*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1056**, 012028 (2018).
- [12] D. S. Firak, A. J. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, M. Koszta, B. Szihalmi, J. Timár, Á. Nagy, N. J. Sas, A. Krasznahorkay, *Confirmation of the existence of the X17 particle*, *EPJ Web of Conferences* **232**, 04005 (2020).



Registry number:
Subject:

DEENK/456/2026.PL
PhD Publication List

Candidate: Nándor József Sas

Doctoral School: Doctoral School of Physics

MTMT ID: 10067856

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (5)

1. **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Molnár, J., Pintye, Z., Czellár, S.: High efficiency electron-positron pair spectrometer for the study of light bosons.
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip. 1084, 1-8, 2026. ISSN: 0168-9002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2025.171232>
IF: 1.5 (2025)
2. **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Molnár, J., Pintye, Z., Hegyesi, G., Czellár, S.: Electron-positron pair spectrometers with high efficiency for angular correlation measurements.
Acta Phys Pol B Proc Suppl. 18 (2), 1-7, 2025. ISSN: 1899-2358.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5506/APhysPolBSupp.18.2-A14>
3. Krasznahorkay, A., Krasznahorkay, A., Begala, M., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Krakó, A., Timár, J., Rajta, I., Vajda, I., **Sas, N. J.**: New anomaly observed in ^{12}C supports the existence and the vector character of the hypothetical X17 boson.
Phys. Rev. C. 106 (6), 1-5, 2022. ISSN: 2469-9985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.106.L061601>
IF: 3.1
4. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Krasznahorkay, A., Nyakó, B. M., Rajta, I., Timár, J., Vajda, I., **Sas, N. J.**: New anomaly observed in ^4He supports the existence of the hypothetical X17 particle.
Phys. Rev. C. 104 (4), 1-8, 2021. ISSN: 2469-9985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.104.044003>
IF: 3.199
5. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Koszta, M., Szihalmi, B., Timár, J., Firak, D., S., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A.: A new anomaly observed in ^4He supporting the existence of the hypothetical X17 particle.
J. Phys. Conf. Ser. 1643 (1), 1-7, 2020. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1643/1/012001>





List of other publications

Foreign language scientific articles in international journals (4)

6. Krasznahorkay, A., Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Timár, J., Begala, M., Krakó, A., Rajta, I., Vajda, I., **Sas, N. J.**: An Update of the Hypothetical X17 Particle.
Universe. 10 (11), 1-14, 2024. ISSN: 2218-1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/universe10110409>
IF: 2.6
7. Krasznahorkay, A., Begala, M., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Krakó, A., Krasznahorkay, A., Nyakó, B. M., Rajta, I., **Sas, N. J.**, Timár, J., Vajda, I.: A new light particle is being born.
J. Phys. Conf. Ser. 2391 (1), 1-10, 2022. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2391/1/012007>
8. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Firak, D. S., Gulyás, J., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Timár, J., Tornyai, T. G., Krasznahorkay, A.: On the X(17) Light-particle Candidate Observed in Nuclear Transitions.
Acta Phys. Pol. B. 50 (3), 675-684, 2019. ISSN: 0587-4254.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5506/APhysPolB.50.675>
IF: 0.651
9. Nagy, Á., Krasznahorkay, A., Ciemala, M., Csatlós, M., Csige, L., Gácsi, Z., Hunyadi, M., Klaus, T., Kmiecik, M., Maj, A., **Sas, N. J.**, Stieghorst, C., Timár, J., Tornyai, T. G., Wasilewska, B.: Searching for the double gamma-decay of the X(17) particle.
Il Nuovo cimento. 42 C, 1-4, 2019. ISSN: 1826-9885.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1393/ncc/i2019-19124-8>

Foreign language conference proceedings (1)

10. Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gácsi, Z., Gulyás, J., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Timár, J., Tornyai, T. G., Vajda, I.: New results on the ^8Be anomaly.
J. Phys. Conf. Ser. 1056, 1-7, 2018. ISSN: 1742-6588.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1056/1/012028>





Foreign language abstracts (1)

11. Firak, D. S., Krasznahorkay, A., Csatlós, M., Csige, L., Gulyás, J., Koszta, M., Szihalmi, B.,
Timár, J., Nagy, Á., **Sas, N. J.**, Krasznahorkay, A.: Confirmation of the existence of the X17
particle.

EPJ Web Conf. 232, 1-5, 2020. ISSN: 2101-6275.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/202023204005>

Total IF of journals (all publications): 11,05

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 7,799

The Candidate's publication data submitted to the Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

18 June, 2026

