

LÉZERES NEUTRONFORRÁS FEJLESZTÉSE

DEVELOPMENT OF A LASER-BASED NEUTRON SOURCE

Osvay Károly¹, Szabó Gábor²

¹egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem Nemzeti Lézeres Transzmutációs Laboratórium, Szeged
osvay@physx.u-szeged.hu

²az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,
ügyvezető igazgató, ELI-HU Nonprofit Kft., Szeged
gabor.szabo@eli-alps.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A nagy intenzitású (10^{18} W/cm²), igen rövid (~10 fs) lézerimpulzusokat előállító lézerrendszerek stabilitása és megbízhatósága mára elérte az iparban használatos folytonos lézerekét, átlagteljesítményük pedig közelíti az 1 kW-ot. Az újgenerációs részecskegyorsítók egyik tervezett megvalósítási formája tisztán lézeralapú megoldásokon nyugszik. Mindezek fényében érdemes megvizsgálni a lézeren alapuló neutronforrás kísérleti megvalósításának lehetőségeit is. Dolgozatunkban a nagy ismétlési frekvenciájú, néhány optikai ciklusú lézerrel gyorsított deutériumionok által deutérium- vagy tríciumtartalmú céltárgyfóliában beindított DD- vagy DT-fúzióval (ún. *pitcher-catcher* elrendezés) történő neutronkeltés lehetőségeit járjuk körül. Egy ilyen lézeres neutronforrás – a szimulációk szerint – nagy határfokkal tudna előállítani olyan neutronimpulzusokat, melyek időbeli hossza a jelenlegiekétől több nagyságrenddel rövidebb. A vizsgálatok egyik fő célja annak eldöntése, hogy kísérletileg elérhető-e az a neutronhozam, ami szükséges egy olyan szubkritikus reaktor működtetéséhez, amellyel megvalósítható a kiegészített nukleáris fűtőelemekben található hosszú élettartamú aktinidák (Np, Am, Cm) transzmutációja.

ABSTRACT

Stability and endurance of high intensity, short pulse laser systems have recently reached those of the industrial CW lasers, while their average power is approaching 1 kW. A class of planned new generation particle accelerators are based on lasers only. Hence, it is worth investigating the possibilities and experimental challenges of a laser based neutron source. In this paper we study the neutron generation via DD or DT fusion with deuterium ions accelerated by high repetition rate ultrashort pulse lasers (the so called *pitcher-catcher* scheme). According to the simulations, such arrangement would result in considerable higher efficiency neutron pulses with many orders of magnitude shorter pulse duration than the existing neutron sources. One of the major aims is to investigate whether the achievable neutron yield would be sufficient enough to feed a subcritical reactor for transmutation of minor actinides (Np, Am, Cm) of spent nuclear fuel.

Kulcsszavak: lézeres iongyorsítás, neutronkeltés, nukleáris transzmutáció

Keywords: laser acceleration of ions, neutron generation, nuclear transmutation

BEVEZETÉS

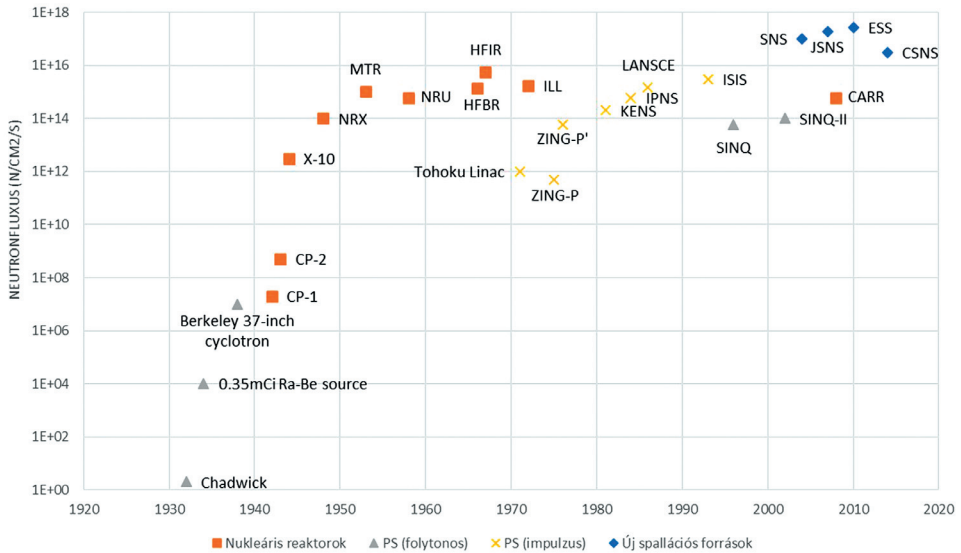
A neutronok és a neutronokon alapuló kutatások olyan szerteágazóak, hogy ezeknek csupán a felsorolása is szétfeszítené jelen dolgozat kereteit. A nukleáris fizikában, anyagtudományokban, biológiai és orvostudományokban a neutronokat elsősorban az anyag (atomi) módosítására, illetve diagnosztikájára használják. A neutron különleges tulajdonságai miatt olyan anyagi jellemzők is vizsgálhatók, melyek más mérési eljárások számára láthatatlanok. A számtalan alkalmazás közül itt csak a nukleáris iparra koncentrálunk. Az emberiség energiagondjai és a CO₂-kibocsátás drasztikus csökkentése egyidejűleg nem oldható meg a nukleáris energia intenzív alkalmazása nélkül. A ma elérhető neutronforrásokban keltett neutronokkal a jelenlegi, illetve jövőbeni fissziós, illetve fúziós reaktorok anyagai vizsgálhatók, különösen, ami az élettartam és (anyag)stabilitási kérdésköröket illeti. Szorosan a nukleáris iparhoz tartozik a nukleáris hulladékkezelés kérdésköre, azon belül is a transzmutáció, mely kapcsolatot Hózer Zoltán jelen összeállításban megjelent tanulmányából (Hózer, 2020) is ismerhetjük.

A transzmutációval kapcsolatos kutatásokról részletesen Szieberth Máté írása szól ugyanitt (Szieberth, 2020). Ehelyütt csak annyit említenénk meg, hogy jelenleg Belgiumban épül egy többcélú, kísérleti reaktor (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications, MYRRHA), amelyet egy 400 méter hosszú lineáris gyorsítóban előállított protonnyalábbal hajtanak majd meg. A MYRRHA-projekt egyik célja – több más mellett –, hogy a gyors neutronokkal történő besugárzáson alapuló transzmutációs eljárás egyes műszaki/tudományos kérdéseire választ adjon. A MYRRHA-projekt költségvetése 1,6 milliárd €, a részleges működést 2033-tól, a teljes működést 2036-tól tervezik. Mivel dolgozatunk fő célja egy nagy átlagfluxust biztosító lézeres neutronforrás fejlesztését célzó projekt bemutatása, célszerű röviden áttekinteni a jelenlegi neutronforrások főbb jellemzőit.

I. NEUTRONFORRÁSOK

A korai neutronforrások reaktorokon alapultak, mely technológia a (civil) kutatások irányában reaktorbiztonsági okok miatt nem skálázható tovább (*1. ábra*). Az ilyen felhasználói kutatóreaktorok csúcsa az ILL (Grenoble) és HFIR (Oak Ridge), illetve kisebb léptékben a Budapesti Kutatóreaktor (BNC – Budapest

Neutron Centre). A neutronfluxus növelését a következő generációs források teszik lehetővé. Ezek a protongyorsítók alapuló spallációs neutronforrások (SNF), mint például Japánban a J-PARC, az SNS Oak Ridge-ben, vagy a lundi European Spallation Source (ESS). A spallációs források beruházási (ESS: ~1,9 milliárd €) és üzemeltetési költsége egyaránt igen magas, aminek csökkenésére a jövőben sem lehet számítani, hiszen elengedhetetlen alkotóelemük egy nagy energiájú (0,5–2 GeV) protongyorsító.



1. ábra. Termikus neutronforrások fluxusának időbeli fejlődése. Az újgenerációs források esetén a megvalósítás kezdetének éve szerepel (PS: particle driven sources)

A transzmutáció szempontjából a forrásnál, még pontosabban a forrás után közvetlenül elhelyezett moderátorból kilépő neutronszámmal hasznosabb mutató a besugározni kívánt mintán létrehozható neutronfluxus. Ez az SNF-ek esetében a forrásnál mérhető fluxushoz képest két alapvető ok miatt jelentősen kisebb. Egyrészt a neutron céltárgy (amelyből a gyorsított protonok kiváltják a neutronokat) erős sugárvédelmi árnyékolása miatt távol kell elhelyezni a mintát. A legkisebb távolság az ESS tekintetében például 25 méter, de nyalábvonaltól függően akár 300 m is lehet, a neutronfluxus pedig – normál esetben – a forrástól vett távolság négyzetével fordítottan arányos. A neutronvesztés a neutron hullámvezetők segítenek, de azok elsősorban a hideg neutronokra működnek megfelelő határfokkal. Másrészt, a minta besugárzásához a neutronspektrum optimális kialakítása mechanikai szagatókkal történik, ami tovább csökkenti a tényleges neutronsza-

mot a mintán. Azaz, a spalláción alapuló újabb generációs neutronforrásoknál a mintát elérő termikus neutronfluxust az eddigi módszerek technikai korlátai (valamint költségei) miatt várhatóan egy nagyságrenddel lehet majd növelni az elkövetkezendő évtizedekben.

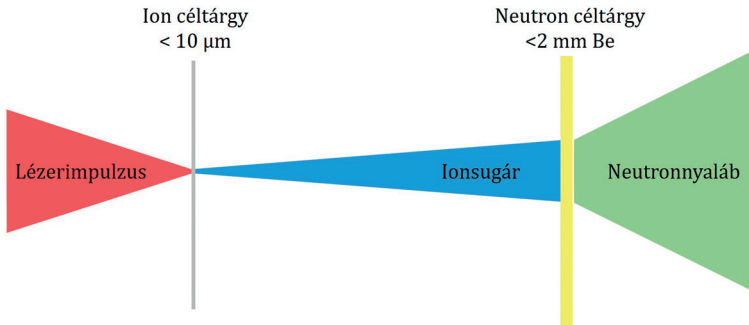
A kis és közepes teljesítményű hideg, illetve termikus neutronforrások mára kereskedelmi forgalomban is kaphatóak. A jellemzően 10^8 – 10^{10} n/sec eszközök iránti, tipikusan ipari szintű igény folyamatosan nő. Ezt Magyarországon is láthatjuk, hiszen az évtizedek óta működő BNC, illetve a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) oktatóreaktora mellett Martonvásáron egy kifejezetten ipari-üzleti célokra használható neutronforrás épül. Egy, az IAEA (International Atomic Energy Agency) által végzett felmérésből az is kiderül, hogy ugyanakkor egyre nagyobb felhasználói igény jelentkezik a fentiekől jelentősen nagyobb fényességű és flexibilisebb neutronforrások iránt, melyek akár kisebb laboratóriumokban is elérhetőek lehetnének (kisebb, mint az ESS vagy az ILL). Megemlítendő, hogy az eddigi (termikus) neutronforrások részben folyamatosan működésűek, azaz kibocsátásuk időben állandó, részben impulzusüzeműek. A neutronimpulzusok időtartama tipikusan néhány mikroszekundum, amely mechanikai szaggatókkal ns környékére csökkenthető.

II. LÉZERES NEUTRONFORRÁSOK

A lézeres iongyorsítás fejlődése napjainkra már oda vezetett, hogy PW-osztályú lézerekkel ma már rutinszerűen állítanak elő 50 MeV és nagyobb energiájú protonokat, ami azonban még elég messze van a spallációs forrásokban használt 0,8–2 GeV tartománytól. Ezért a lézeres forrásokban a neutrongenerálás nem nagy magok fragmentálásán, hanem kis magok magreakcióin – például DD- vagy DT-fúzió, illetve ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ reakció – alapszik (Roth et al., 2013). Bár neutronok kelthetők úgy is, hogy a lézert egy *bulk* céltárgyra fókuszáljuk, mi a továbbiakban, előnyös tulajdonságai miatt, az ún. „pitcher-catcher” elrendezéssel kívánunk részletesebben foglalkozni. Ebben az esetben a nagy intenzitású lézerimpulzus ($>10^{18}$ W/cm²) először egy „ion” céltárgyra (pitcher) esik, amelyből ionnyaláb (általában proton vagy deuteron) lép ki jól meghatározható térszögben (2. ábra). Ezt követően helyezik el a „neutron” céltárgyat (catcher), amely a proton, illetve deuteron kívánt magreakcióján keresztül neutronokat bocsát ki.

A fentebb leírt neutronkeltési mechanizmus – a spallációval ellentétben – kis Z-jű anyagokon alapszik. Ennek folyamánya, hogy hasadási termék nem és általában is kevesebb radioaktív termék keletkezik, továbbá a (neutron)target jóval kisebb hőteljesítménynek van kitéve. Ezek együtt azt eredményezik, hogy a hűtőrendszer is és a sugárzásárnyékoló védművek is jelentősen kisebbek lehetnek, így a minta közelebb kerülhet a neutronforráshoz. Ráadásul a lézerkeltett deutériumok

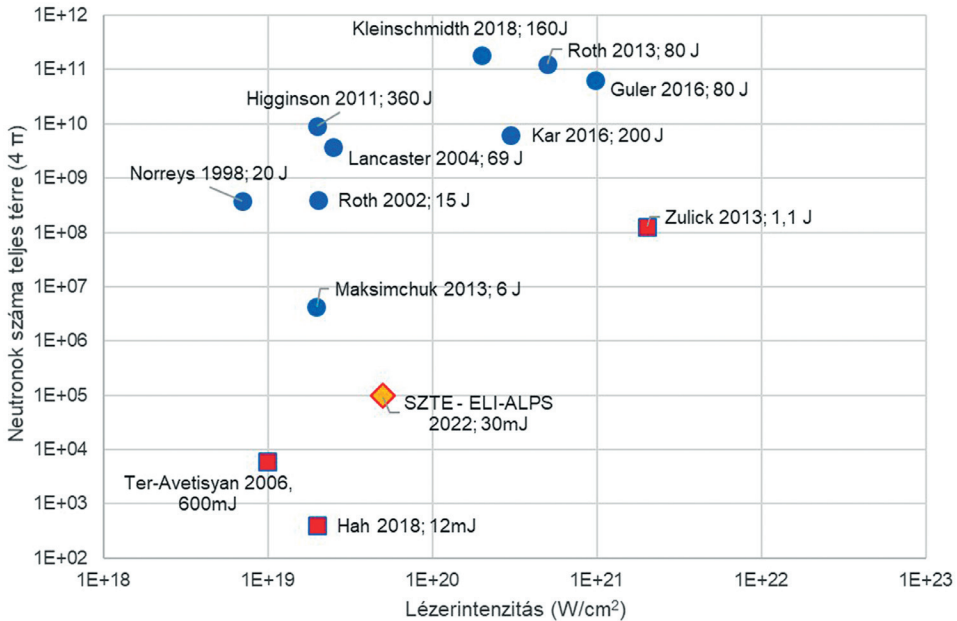
által kiváltott neutronok – az eddigi kísérletek tanúsága szerint – a hagyományos termikus neutronforrások 4π térszögétől eltérően jelentősen kisebb térszögben, kvázi-kollimált nyalábként terjednek, így várható, hogy a besugározni kívánt mintán a neutronforrásból származó összes neutronsám tekintetében nagyságrenddel több neutron jelenhet meg, azaz ugyanazon neutronsámot figyelembe véve nagyobb neutronintenzitást lehet elérni, mint a spallációs vagy reaktoros neutronforrások esetén.



2. ábra. Egy pitch-catcher sémájú lézeres neutronforrás elvi vázlata

A legelső, pitch-catcher elrendezésű lézer alapú neutronkeltési kísérlet az angliai Rutherford Appleton Laboratoryban történt 1998-ban (Norreys et al., 1998). Az akkor és azóta végrehajtott hasonló kísérleteket szinte kizárólag több J, esetenként több 10 J energiájú, viszonylag hosszú, szubpikoszekundumos lézerimpulzusokkal végezték el (3. ábra) (Kar et al., 2016; Higginson et al., 2011; Maksimchuk et al., 2013; Roth et al., 2002). Az eddigi egy lövéssel elért neutronsám csúcsertékét a német GSI intézet PHELIX-lézerével (160 J, 600 fs) érték el 2018-ban (Kleinschmidt et al., 2018). A térszögegységre eső mért neutronsám $1,42 \pm 0,25 \times 10^{10}/\text{str}$ volt, amely a forrástól 1 m távolságban megfelel $430 \pm 50\ \mu\text{Sv}$ dózisanak. A neutronnyaláb nyílásszöge kb. 100° volt. Csak néhány esetben próbálkoztak eddig sikerrel 100 fs-nál rövidebb impulzusokkal (négyzettel jelölt pontok) (Zulick et al., 2013; Hah et al., 2018; Ter-Avetisyan et al., 2005).

A teljesség kedvéért hozzátesszük, hogy a pitch-catcher séma mellett a neutrongenerálás úgy is megvalósítható, hogy egy (deuterizált) céltárgy van, és a céltárgyban önmagában jelen lévő deutériummal lép kölcsönhatásba a céltárgy elülső felületén képződött plazmából származó ion. Ez tipikusan folyadékjetekben (Ter-Avetisyan et al., 2005), gázjetben (Alvarez et al., 2014), illetve vastagabb deuterizált polietilénben (Pretzler et al., 1998) történhet, azonban a folyamat – a pitch-catcher sémához viszonyítva – jóval alacsonyabb hatásfokú és nehezebben optimalizálható.



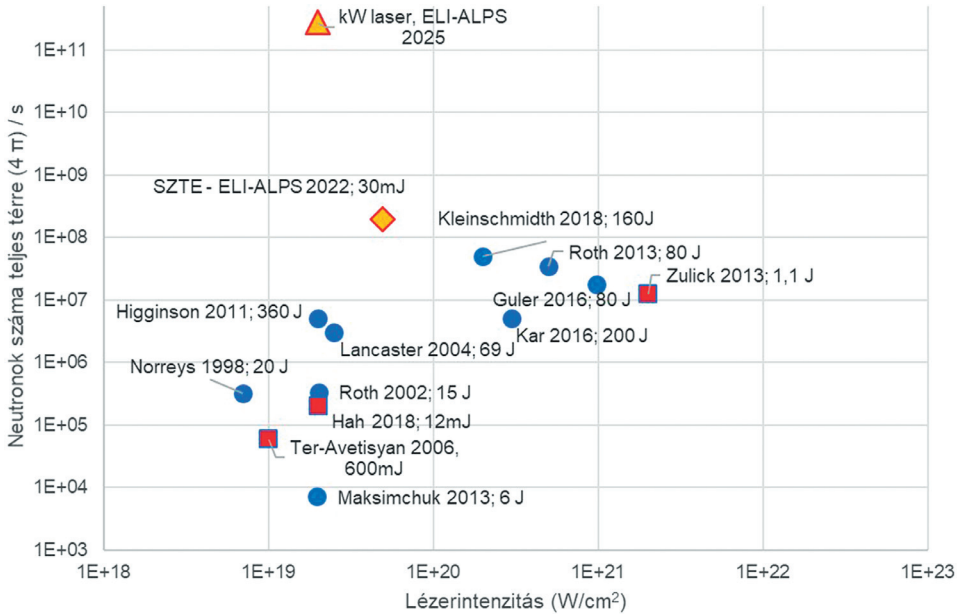
3. ábra. Lézeres neutronforrások. A kör alakú jelölésekkel ps-os lézerekkel elérték, négyzetekkel 100 fs-nál rövidebb lézerimpulzusokkal elért egylövéses eredmények. A keltett neutronszám a hagyományos neutronforrásokhoz való viszonyítás kedvéért a teljes térszögre számítva.

A rombuszsal jelzett neutronszámot a többihez képest jelentősen kisebb impulzusenergiával és rövidebb impulzussal tervezzük elérni

A felhasználás szempontjából azonban a lövésenként előállított neutronszámnál érdekesebb az időegység alatt előállított neutronszám. Jól látható, hogy ebben az esetben a rövid impulzusú, a többi lézerhez képest nagyobb ismétlési frekvenciájú lézerekkel előállítható neutronszám a nagy impulzusenergiájú lézerekkel előállított neutronszámmal hasonló nagyságrendbe esik (4. ábra).

Az általános áttekintés után a továbbiakban a Szegedi Tudományegyetem Nagy Intenzitású Lézerek Magfizikai Alkalmazásai Intézete (NILMAI) által koordinált, nemzetközi együttműködésben megvalósuló projekt bemutatására fókuszálunk. Bár a projekt távlati célja a hosszú felezési idejű aktinidák transzmutációjára *Tadzshima* Tosiki (Toshiki Tajima) és Gerard Mourou által javasolt eljárás (T–M-séma) megvalósíthatóságának vizsgálata, a részletes munkaterv a lézeres neutronforrás koncepcionális kérdéseinek megválaszolására fókuszál. Ezért a T–M-sémának csak azon elemeit kívánjuk felidézni, amelyek a neutronforrással szemben támasztott követelmények megfogalmazásához szükségesek. (Megjegyezzük, hogy a T–M-séma megvalósításához a neutronforrás csak szükséges, de messze nem elégséges feltétel, mivel számos további kriti-

kus elem is megoldásra vár, így jelen dolgozatban nem kívánunk foglalkozni a T–M-tranzmutátor megvalósíthatóságának általános kérdéseivel.)



4. ábra. Lézeres neutronforrásokkal elvileg elérhető másodpercenkénti neutronhozam DD-reakciót feltételezve

A T–M-séma lényege egy sóolvadék-alapú szubkritikus reaktor, amelybe a kezelendő anyag betáplálása kvázi folytonosan történik, és a kimeneti oldalon a megfelelő kémiai szeparáció után a hasadási termékek hasonlóképpen folyamatosan távoznak. A szubkritikus rendszer folyamatos működését a lézeres neutronforrásokból származó gyors neutronok tartják fenn. A többes szám használata itt nem esetleges, mert a vezérlési koncepció lényeges eleme az, hogy több tíz lokális forrás biztosítja a megfelelően homogén neutroneloszlást és a szükséges időfeloldású neutronfluxus kontrollját. (Vegyük észre, hogy a több forrás párhuzamos alkalmazása egyúttal azt a redundanciát is biztosítja, ami egyébként egy kritikus kérdés a gyorsítóval hajtott szubkritikus reaktorok esetében is.) A szimulációk szerint a szükséges minimális neutrons szám néhányszor 10^{14} n/s, így, ha a minimális tíz forrással számolunk, akkor egy forrásnak legalább 5×10^{13} n/s-ot kell biztosítania. A kezelendő magok esetén a fission hatáskeresztmetszete az alacsony neutronenergiák felé nő, így logikus lenne például termikus neutronokkal dolgozni. A probléma azonban az, hogy a ^{241}Am esetében a néhány tized MeV-nél kisebb neutronenergiák esetén a neutronbefogás hatáskeresztmetszete két nagy-

ságrenddel meghaladja a fissionióét, azaz ekkor a neutronok eltűnnek, mielőtt a kezelendő magokban hasadást hoznának létre. A hatáskeresztmetszetek közötti arány MeV környékén megfordul, és kb. 10 MeV-nél már a fissionió hatáskeresztmetszete nagyobb két nagyságrenddel. A ^{243}Cm esetén ez az arány már 1 MeV neutronenergiáknál jelentkezik. Ebből következően a neutronforrással szemben elvárás az 1–2 MeV-nél nagyobb energia. Fontos megjegyezni, hogy a T–M-konceptió gyakorlati alkalmazásának az is feltétele, hogy a neutronforrás létesítési költsége a spallációs források költség szintjének töredéke legyen. Tekintetbe véve, hogy az ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézetben tervezett kísérletekhez használt lézerrendszerek ára jellemzően az 5–10 millió euró tartományba esik, erre nézve jók a kilátások.

A magyar kormány egy kormányhatározatban döntött arról, hogy az ELI-ALPS kihasználtságának növelése mentén elindítja a (lézeres) nukleáris hulladék kezelése projektet. Ennek keretén belül a transzmutációhoz szükséges lézeres neutronforrás kifejlesztését mint nemzeti kutatási programot három évre, összesen 3,5 milliárd forinttal támogatja, és megbízta a Szegedi Tudományegyetemet, hogy a projekt sikeres megvalósítása érdekében egy nemzetközi konzorcium munkáját koordinálja. A három intézmény a párizsi École Polytechnique (EP), amelynek professzora a Nobel-díjas Gerard Mourou; a kaliforniai székhelyű TAE vállalat, amelynek tudományos igazgatója *Tadzsima* Tosiki (Toshiki Tajima) professzor; valamint a Szegedi Tudományegyetem. A felek által 2019. április 5-én aláírt együttműködési szándéknyilatkozat célja, hogy biztosítsa a kereteket ahhoz, hogy a három intézmény – további együttműködő partnereket is bevonva – a projektet sikeresen megvalósítsa. A továbbiakban ennek a projektnek a főbb lépéseit tekintjük át.

II.1. Lézeres iongyorsítás

Amint azt fentebb bemutatottuk, az elvárt neutronenergia minimuma néhány MeV. Ennek a DD- vagy DT-fúzió során keletkező neutronok megfelelnek, így a továbbiakban elsősorban a deutérium ionforrásokkal foglalkozunk.

Ha egy nagy intenzitású ($>10^{18}$ W/cm²) lézerimpulzus néhány mikron vastag céltárgyra esik, akkor a kölcsönhatási területen sűrű plazma keletkezik. Az ebben keletkezett szabad elektronokat a lézerimpulzus nagy ponderomotoros ereje relativisztikus energiára gyorsítja. Ezen forró elektronok elhagyják a céltárgyat mind visszafelé, a lézer irányába, mind pedig előre felé, a céltárgy maradékának irányába (Ledingham–Galster, 2010; Macchi, 2017).

Ha a szilárdtest kellően vastag (tipikusan több mikron), akkor a forró elektronok áthaladnak a céltárgyon, és a hátsó felületen úgynevezett Debye-burkot hoznak létre. A Debye-burok a céltárgyat annak hátsó oldalára merőlegesen hagyja el. Ezen folyamatban a céltárgy hátsó oldalára tapadt, a legújabb kutatások szerint

(Lécz et al., 2020) mindössze néhány nm vastag szennyeződésekben származó molekulák, illetve atomok a nagy elektromos térben (\sim TV/M) ionizálódnak, a keltett ionokat a Debye-elektronok mintegy maguk után húzzák, azaz gyorsítják. Ezt Target Normal Sheath Acceleration (TNSA) mechanizmusnak nevezzük (Ledingham–Galster, 2010; Macchi, 2017). Kísérletekkel kimutatták, hogy ezek a nagy időbeli tisztaságú (azaz előimpulzus-mentes [Ledingham–Galster, 2010; Batani et al., 2010]) lézerimpulzusokkal létrehozott ionok egyedülálló tulajdonságokkal rendelkeznek. Néhány J energiájú lézerimpulzusokkal akár 10^{13} iont lehet előállítani, melyek csúcsergiája elérheti a 80 MeV-ot, az ionok alkotta impulzus időbeli hossza a lézerimpulzus idejével azonos nagyságrendbe esik (azaz tipikusan ps vagy ps alatti), az elérhető áramerősség akár több kA is lehet, és az ionsugár térbeli irányítotttsága meglepően nagy.

Ha a szilárdtest céltárgy elegendően vékony (<1 mikron), akkor a keltett plazmában a forró elektronok töltésszeparációjából adódó TV/m tér a közvetlenül a plazmában létrejött ionokat tudja gyorsítani. Ezt sugárnyomás-gyorsításnak (Radiation Pressure Acceleration, RPA) nevezik (Esirkepov et al., 2004). A céltárgy felületi sűrűsége, illetve az intenzitás növelésével érhető el az ún. *light-sail* (LS) tartomány, ahol az RPA a teljes céltárgyfólia keresztmetszete mentén erősödő hatást ér el, ahogy a céltárgy vastagsága a ponderomotorikus erő evaneszcens hosszához mérhető vagy annál vékonyabb lesz. Az LS-tartományban viszonylag magas fluxusú (10^{12} részecske/MeV/Sr), rendkívül jól kollimált ionok – függetlenül a töltés-tömeg arányától – több tíz MeV energiára gyorsulhatnak. A fő különbség a TNSA és az RPA közt, hogy az előbbinél az ionok gyorsítását végző elektronfelhő már „szabadon”, felgyorsítva mozog, míg az utóbbi esetén az elektronok az ionok gyorsítása után is kölcsönhatnak a lézerimpulzus terével.

Ha az RPA-szerű gyorsítást létrehozó lézerimpulzus időbeli hossza néhány optikai ciklusnyi, azaz tipikusan 15 fs vagy attól rövidebb, akkor az LS-tartományban lejátszódó gyorsítást *Tadzshima* Tosiki javaslatára koherens lézeres iongyorsításnak (Coherent Amplification of Ions by Laser, CAIL) nevezik (Necas et al., 2020). Ebben az esetben a céltárgy vastagsága – az impulzusok időbeli hosszához igazodva – mindössze néhány 10 nm-nyi, azaz a fény hullámhosszának csak huszada. A CAIL-séma szerinti gyorsítás esetén az elméleti számítások igen magas, akár jóval 10% feletti iongyorsítási hatásfokot (a gyorsított ionok és a lézerimpulzus energiájának hányadosa $>10\%$) jósolnak. Érdeemes megemlíteni, hogy a gyorsítási hatásfok a TNSA esetén jelentősen 1% alatt marad.

Ahhoz, hogy a döntő módon lézereken alapuló iongyorsítóról, és így következő generációs neutronforrásokról lehessen beszélni, több tudományos-műszaki kihívást meg kell oldani. Egyrészt a lézeres oldalon olyan nagy átlagteljesítményű, azaz tipikusan nagy ismétlési frekvenciájú (10 Hz–100 kHz) lézereket kell kifej-

leszteni, melyek képesek legalább tíz órán keresztül 1%-on belüli csúcsteljesítmény-ingadozással működni. Azaz, a kibocsátott lézerimpulzusok energiájának és időtartamának hányadosa 1%-on belül kell hogy legyen.

A másik nagy kihívás az ion-céltárgy kérdése (Prencipe et al., 2017). Amikor a lézerimpulzussal egy nagy atomi sűrűségű, tipikusan szilárd ilyen céltárgyra való fókuszálással keltünk plazmát, akkor azon a helyen a céltárgy kilyukad. Azaz, a lézeres iongyorsításhoz feltétlenül szükséges a céltárgy pótlása olyan ütemben, amilyen ütemben a lézerimpulzusok érkeznek. Ha ehhez hozzátesszük, hogy a céltárgy vékony (a CAIL-séma esetében néhány tíz nanométer), valamint a pozícióját is néhány 10 mikronon belül kell tudnunk tartani, látjuk, hogy a megoldás egyáltalán nem triviális.

II.2. Lézeres neutronforrás és az ELI(-ALPS)

A CAIL elmélete (és az eddigi néhány kísérlet [Neely et al., 2006; Steinke et al., 2010; Scullion et al., 2017]) alapján valószínűsíthető, hogy a minél rövidebb a lézerimpulzus és vékonyabb a céltárgy, annál nagyobb a gyorsítási hatások. Az eddig elérhető, 10^{19} W/cm² intenzitást a céltárgyon előállítani képes lézerimpulzusok időtartama 35 fs és annál hosszabb volt, így a gyorsítási hatások csak kevéssel haladta meg az 1%-ot. A szegedi ELI-ALPS Lézeres Kutatóközpontban a jelenlegi csúcstechnológiát képviselő SYLOS-lézer <7 fs lézerimpulzusaival a simulációk szerint a hatások bőven 20% fölé vihető.

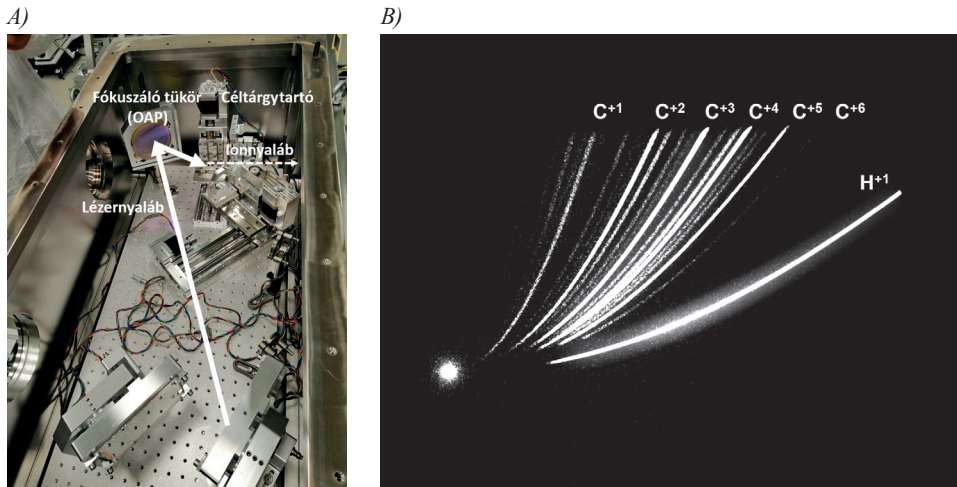
A gyakorlati alkalmazásokhoz, így a transzmutációs folyamat fenntartásához az időegység alatt előállított neutronszám a mérvadó. Azaz, a rövid impulzushossz mellett a másodpercenkénti impulzusszám is egy igen lényeges gyakorlati paraméter. Mindkét feltételnek az ELI-ALPS 1 kHz ismétlési frekvenciájú SYLOS-lézere tesz eleget, melynek jelenleg nemzetközi szinten is unikális a helyzete (Toth et al., 2020).

III. A LÉZERES TRANSZMUTÁCIÓS PROJEKT

A projekt megvalósításának első szakaszában, egyes lövéses üzemmódban a kívánt energiára gyorsított proton hozammaximalizálása történik, azaz alapvetően a CAIL gyorsítási séma részletes kísérleti vizsgálata és optimalizálása. A kísérleteket a NILMAI kutatócsoportja (további tagok: Dr. Sargis Ter-Avetisyan, Dr. Szon Dzsungon [Joon-Gon Son] és Párvin Farmazijar [Parvin Varmazyar]) már megkezdte (5. ábra).

A következő lépésben a protonokon nyert kísérleti tapasztalatok alapján finomított kísérleti tervek szerint a deuteronok CAIL-séma szerinti gyorsításának optimalizálása történik. Ezt követi a DD fúzió optimalizálása, illetve a maximális

neutronhozam elérésén keresztül a neutronok keltése. A célunk az egy lézermimpulzussal létrehozható neutronhozam maximalizálása. A tervek szerint ezt a fázist 2021 végére érjük el (lásd a rombusz jelzést a 3. és 4. ábrákon). A kísérletek túlnyomó részét az ELI-ALPS-ban tervezzük, ugyanakkor egyes rész kísérletekre partnereinknél (a prágai ELI-Beamlines, a Párizs környéki EP és a drezdai HZDR) is sor kerülhet. A kísérleteket támogató elméleti modellezéseket és szimulációkat a partnerekkel közösen végezzük.



5. ábra. Az ELI-ALPS-ban megkezdett első mérési kampány.

A) A kísérleti vákuumkamra belseje;

B) A gyorsított ionok Thomson-spektrométerrel felvett képe (12 fs, 30 mJ impulzus és 5 nm vastag szénfólia)

Külön kihívást jelent az időben rövid neutronsomagok detektálására szolgáló mérőrendszer kifejlesztése, melyen az ATOMKI munkatársaival együttműködve a projekt elejétől kezdve dolgozunk.

Az egylovéses protongyorsítási kísérletekkel párhuzamosan fizikai-műszaki alprojekteket indítottunk nagy ismétlési frekvenciájú céltárgyrendszerek kifejlesztésére, amelyben Magyarországról a BME, külföldről az EP, illetve az Ohio University vesz részt. Jelen tudásunk szerint a megoldást a nagy nyomású (critical density) gázjetek, vékony (<100 nm) folyadéksugár jetek, illetve speciális vékonyfilmek (<100 nm) jelenthetik. Amint a céltárgyfejlesztés megfelelő fázisba ér, úgy a tervek szerint a projekt harmadik évében a proton-/deuteronkeltést folyamatos üzemben, 1 Hz, 10 Hz, és nagyobb ismétlési frekvenciával teszteljük.

A további összehasonlítás kedvéért a projekt eredményeképpen megvalósítható célkitűzést a 4. ábrán tüntettük fel (háromszög). A számítás gondolatmenete

a következő. A szimulációk szerint a CAIL-séma szerinti deutériongyorsítás hatásfoka 6 fs impulzusokra meghaladhatja a 20%-ot is, azaz egy lézerimpulzus energiájának 20%-a a gyorsított ionok összenergiájába konvertálódik. 1 J lézerenergiát, illetve 100 keV D-ionenergiát feltételezve ez $1,25 \times 10^{13}$ D iont jelent. A DD-fúzió hatáskeresztmetszete ezen az energián $3,7 \times 10^{-2}$ barn. A deuteron-tartalmú target sűrűségét 3×10^{22} cm⁻³-nek, vastagságát 0,2 mm-nek véve, a fúzió valószínűsége egy D-ionra vetítve $2,2 \times 10^{-4}$ -nek adódik, azaz egy J impulzusenergiára eső neutronszám $2,75 \times 10^8$ n/J. Az ELI-ALPS-ban a tervek szerint egy éven belül installálják azt a fs-os lézerrendszert, amelynek átlagteljesítménye 500 W, amely teljesítmény egy további év alatt megduplázódhat. Azaz, a projekt eredményeképpen létrejövő *know-how*-n alapulva 2025-re 1 kW lézer (átlagteljesítménnyel számolhatunk, ami a fentiek szerint $2,75 \times 10^{11}$ neutron/s hozamot jelent. Megjegyezzük továbbá, hogy a DT-fúzió hatáskeresztmetszete 75 keV gyorsított D-energián két nagyságrenddel nagyobb, ezért tríciumos catcher targetet feltételezve a várható neutronhozam 3×10^{13} n/s lehet. Azaz, egy lézeren alapuló neutronforrás valóban néhány év karnyújtásra lehet. Természetesen ehhez meg kell oldani a nagy ismétlési frekvenciájú, túlnyomó részben deutériumot tartalmazó vékony céltárgy kérdését, valamint a gyorsított deutériumok 50–100 keV közti közel monoenergiás eloszlását is.

Itt érdemes röviden áttekinteni, hogy mi várható középtávon a lézerek fejlesztésének a területén. A lézerek csúcshintenzitása az elmúlt két évtizedben több mint három nagyságrenddel nőtt, míg az átlagteljesítmény két nagyságrendet növekedett. Jelenleg nem ismeretes olyan fundamentális fizikai, illetve technológiai akadály, amely gátat vethetne a 10 kW átlagteljesítményű, rövid impulzusú lézerek tíz éven belül való megjelenésének. Ezt mind Európában, mind pedig az USA-ban (kBELLA-projekt) felismerték, és jól megtervezett menetrendet alakítottak ki a lézereken alapuló, újgenerációs elektrongyorsítók kifejlesztésére (EUPRAXIA-, KALDERA-, illetve a kBELLA-projekt). Ez azt is jelenti, hogy középtávon akár 3×10^{12} n/s-ot (tríciummal 3×10^{15} n/s-ot) meghaladó hozamú források is elérhetővé válnak.

Bár a neutronforrás főbb elvárt paramétereit a T–M-transzmutátort alapul véve határoztuk meg, de egy megbízható, rugalmas neutronforrás egyéb alkalmazásokat is lehetővé tesz. Ezért további partnerekkel (a francia CEA és IPNO, JRC Karlsruhe, illetve BME, BNC, Energia Kutató Intézet [EK]) együttműködve előzetes vizsgálatokat kívánunk folytatni a lézerrel keltett neutronok radiobiológiai felhasználására, továbbá a lézerrel keltett pontszerű betatronforrás anyagtudományi alkalmazásaira (például nukleáris hulladékokat tartalmazó tárolóedényeinek szerkezeti vizsgálatára), valamint a lézeres transzmutátor egyéb elemeinek vizsgálatára, mint például a megfelelő reaktorfal kiválasztására, illetve a sóolvadékon alapuló nukleáris kémiára.

III.1. A projekt megvalósítása

A projekt megvalósítása kisebb részben a Szegedi Tudományegyetem laborjaiban, nagyobb részben a szegedi ELI-ALPS lézeres kutatóközpontban már működő, illetve a jövőben beindítandó berendezések segítségével történik. Az utóbbi intézményben a Szegedi Tudományegyetem és partnerei mint kiemelt, állandó felhasználók végzik majd a kísérleteket, egyúttal hozzájárulva az ELI megvalósításához és továbbfejlesztéséhez, összhangban annak tudományos stratégiájával.

III.2. A projekt fő mérföldkövei

A projekt lezárultával választ kapunk két, az esetleges további folytatás szempontjából meghatározó kérdésre, nevezetesen:

1. Lehetséges-e néhány ciklusú lézerrimpulzussal, nagy hatásokkal annyi neutron előállítani, amennyi a T–M-transzmutátor megvalósítását – legalábbis a neutronforrás oldaláról – lehetővé teszi?
2. Lehetséges-e néhány ciklusú lézerrimpulzussal olyan neutronimpulzusokat előállítani, melyek egyéb tudományos, illetve ipari felhasználásra alkalmasak lehetnek, netán új távlatokat nyithatnak?

A fenti két kérdésre adott válasz magában foglalja egy fontos tudományos-műszaki dilemma eldöntését:

3. Az optimalizált lézeres neutronforrást milyen lézeres bázison érdemes kifejleszteni: kis energiájú, nagy ismétlési frekvenciájú lézereken (~100 mJ, 100 kHz), vagy nagy energiájú, kisebb lövésgyakoriságú (ún. PW-osztályú) lézereken (~100 J, 10 Hz)?

III.3. A projekt lehetséges hatásai, szinergiák

Hosszú távú gazdasági-társadalmi hatás. Amennyiben a III.2. 1. kérdésre „igen” a válasz, úgy az eljárás továbbfejlesztésével valós út nyílik meg a T–M-transzmutátor kifejlesztése felé. Ez azt jelenti, hogy belátható időn belül – ez néhány évtizedet jelent, mivel a transzmutátor tényleges megvalósításához igen komoly technikai problémákat kell még megoldani – lehetővé válhat az eddig felhalmozott és a jövőben még keletkező, használt fűtőelemekből a hosszú élettartamú aktinidák transzmutációval történő kezelése. Ez fontos hozzájárulást jelentene a radioaktív hulladékok jövő generációk számára is elfogadható tárolásának a megoldásához. Ennek a jelentőségét aligha lehetne túlbecsülni, hiszen a nukleáris energetikával kapcsolatos negatív társadalmi attitűd – ami napjainkra olyan irracionális mértéket öltött, hogy olyan politikai döntések születnek, amelyek a szén-dioxid-kibocsátás révén valóban veszélyeztetik az emberiség jövőjét – főleg a nukleáris hulladékok kezelésével kapcsolatos fenntartásokon alapszik.

Ismét hangsúlyozzuk, hogy a transzmutátor kifejlesztése egy szokásos tudományos projekthez viszonyítva hosszú folyamat lesz. Amennyiben a neutronforrás rendelkezésre áll, úgy az első kísérleti, laboratóriumi lézeres transzmutátor akár tíz év múlva elkészülhetne, az ipari méretekben használható lézeres transzmutátor prototípusa huszonöt-harminc év múlva lehet működőképes.

Rövid távú hatások. A III.2. 2. kérdésre elvárásaink szerint igen lesz a válasz. Ez azt jelentheti, hogy néhány (három–öt) év további fejlesztéssel lézeren alapuló, energiahatékony és kis méretű berendezéseket lehet létrehozni. Ezek használhatóak lehetnének például áruszállításnál a rakományok átvilágítására, de akár hozzájárulhatnak a PET-technika szélesebb körű elterjedéséhez vagy újabb radioterápiás módszerek kifejlesztéséhez is.

Tudományos diszciplína kialakulása. Az ultrarövid lézerimpulzusokon alapuló neutronkeltés egyik alapvető sajátossága, hogy mivel az ionsomag időben igen rövid, továbbá a fúzió során keletkezett neutronspektrum meglehetősen monokromatikus, ezért a neutronok által alkotott „impulzus” is várhatóan időben nagyon rövid, legfeljebb néhány pikoszekundum lehet. Ez a jelenleg elérhető, impulzusüzemű neutronforrásoktól (μs) hat nagyságrenddel rövidebb.

Ez az óriási impulzushossz-csökkenés, egyrészt komoly kihívást jelent a neutrondiagnosztikára, hiszen az ilyen rövid neutronimpulzusokra jelenleg nem létezik mérési eljárás. Másrészt, a rövid impulzushossz miatt, figyelembe véve még azt is, hogy a neutronnyaláb viszonylag kollimált, a forrástól néhány cm-re 10^{23} – 10^{24} neutron/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) nagyságrendű fluxus hozható létre. Ilyen viszonyok ma legfeljebb a csillagokban léteznek, így várható, hogy ezekkel a forrásokkal eddig ismeretlen jelenségek válnak a kísérletek számára hozzáférhetővé. Ha kísérletileg bizonyítható ez a hatás, akkor az tízéves távlatban akár egy új diszciplína kialakulását jelentheti.

ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatunkban röviden áttekintettük a ma működő neutronforrások tulajdonságait. Megfogalmaztuk azokat a paramétereket, amelyek a *Tadzsim*a Tosiki és Gerard Mourou által a használt nukleáris fűtőelemekben jelen lévő hosszú felezési idejű transzurán magok transzmutációjára javasolt rendszerhez szükséges neutronforrásnak teljesítenie kell. Bemutattuk, hogy a szimulációk alapján melyek azok a pontok, ahol a jelenleg ismert eljárásokhoz képest a neutronkeltés hatékonyságát várhatóan javítani lehet. Ezek közül különösen kiemelendő Coherent Amplification of Ions by Lasers (CAIL) séma, ami az iongyorsítás hatáskörében egy-másfél nagyságrendű növekedést hozhat. Ehhez kapcsolódóan felvázoltuk annak a magyar kormány által zászlóshajóprojektnek nyilvánított, és három évre 3,5 milliárd forinttal támogatott projektnek a főbb mérföldköveit, amelynek fő

célja a transzmutáció gyakorlati megvalósítására alkalmas neutronforrás kifejlesztése.

Ezen fejlesztések azt jelentik, hogy a lézeres neutronforrás projektben már most egy nagyságrenddel nagyobb másodpercenkénti neutronfluxust tudunk majd várhatóan előállítani, mint a jelenlegi technológiákkal. A már megvalósulás alatt lévő, kW-os átlagteljesítményű lézerfejlesztésekkel ezt a szintet is egy nagyságrenddel meg lehet néhány éven belül haladni (4. ábra), míg a 10 kW-os lézerekkel egy további bő nagyságrendet lehet lépni. Hangsúlyozzuk, hogy mindezt lézeren alapuló deuterongyorsítást és DD-reakciót tételez fel. Egy célberendezésben azonban a trícium körültkéntő használata is lehetséges lehet, amivel egy lézeres neutronforrás által szolgáltatott fluxus egy évtizeden belül a 10^{13} n/s értéket is bőven meghaladhatja. Egy ilyen lézer költsége – az elmúlt évtized trendjét figyelembe véve – mai áron kb. 100 M€ lenne, amely csak tört része egy hasonló neutronfluxus előállítására képes lineáris gyorsítónak.

A rövid és középtávú fejlesztéseket tekintve ugyanakkor nehéz lenne túlbeszélni egy kvázi hordozható, flexibilis, nagy hozamú és rövid impulzusú neutronforrás fejlesztésének tudományos és gazdasági hatásait.

IRODALOM

- Alvarez, J. – Fernandez-Tobias, J. – Mima, K. et al. (2014): Laser Driven Neutron Sources: Characteristics, Applications and Prospects. *Physics Procedia*, 60, 29–38. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.11.006, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389214005537>
- Batani, D. – Jafer, R. – Veltcheva, M. et al. (2010): Effects of Laser Prepulses on Laser-induced Proton Generation. *New Journal of Physics*, 12, 045018. DOI: 10.1088/1367-2630/12/4/045018, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/12/4/045018/pdf>
- Esirkepov, T. – Borghesi, M. – Bulanov, S. V. et al. (2004): Highly Efficient Relativistic-Ion Generation in the Laser-Piston Regime. *Physical Review Letters*, 92, 175003. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.175003, <https://arxiv.org/pdf/physics/0405083.pdf>
- Hah, J. – Nees, J. A. – Hammig, M. D. et al. (2018): Characterization of a High Repetition-rate Laser-driven Short-pulsed Neutron Source. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 60, 054011. DOI: 10.1088/1361-6587/aab327, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6587/aab327/pdf>
- Higginson, D. P. et al. (2011): Production of Neutrons up to 18 MeV in High-intensity, Short-pulse Laser Matter Interactions. *Physics of Plasmas*, 18, 100703. DOI: 10.1063/1.3654040, https://www1.psf.mit.edu/research/hedp/Home%20Page/Papers/Higginson_PoP_2011.pdf
- Hózer Z. (2020): Az atomerőművekben keletkező radioaktív hulladékok jellemzői és kezelésük, *Magyar Tudomány*, 181, 12, 1603–1608. DOI: 10.1556/2065.181.2020.12.4
- Kar, S. et al. (2016): Beamed Neutron Emission Driven by Laser Accelerated Light Ions. *New Journal of Physics*, 18, 053002. DOI: 10.1088/1367-2630/18/5/053002, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/18/5/053002/pdf>
- Kleinschmidt, A. – Bagnoud, V. – Deppert, O. et al. (2018): Intense, Directed Neutron Beams from a Laser-driven Neutron Source at PHELIX, *Physics of Plasmas*, 25, 053101. DOI:

- 10.1063/1.5006613, https://www.researchgate.net/publication/324937235_Intense_directed_neutron_beams_from_a_laser-driven_neutron_source_at_PHELIX
- Lécz Zs. – Budai J. – Andreev, A. et al. (2020): Thickness of Natural Contaminant Layers on Metal Surfaces and Its Effects on Laser-driven Ion Acceleration. *Physics of Plasmas*, 27, 013105. DOI: 10.1063/1.5123542, https://www.researchgate.net/publication/338519950_Thickness_of_natural_contaminant_layers_on_metal_surfaces_and_its_effects_on_laser-driven_ion_acceleration
- Ledingham, K. W. D. – Galster, W. (2010): Laser-driven Particle and Photon Beams and Some Applications. *New Journal of Physics*, 12, 045005. DOI: 10.1088/1367-2630/12/4/045005, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/12/4/045005/pdf>
- Macchi, A. (2017): A Review of Laser-Plasma Ion Acceleration. https://kopernio.com/viewer?doi=arXiv%3A1712.06443&token=WzIyODkxMjIsImFyWG12OjE3MTIuMDY0NDMiXQ_C_Brr6nQ_RZimxlEFzhzDIYhhto
- Maksimchuk, A. et al. (2013): Dominant Deuteron Acceleration with a High-intensity Laser for Isotope Production and Neutron Generation. *Applied Physics Letters*, 102, 191117. DOI: 10.1063/1.4807143, https://www.researchgate.net/publication/236953853_Dominant_deuteron_acceleration_with_a_high-intensity_laser_for_isotope_production_and_neutron_generation
- Necas, A. – Tajima, T. – Mourou, G. et al. (2020): Unification of the Radiation Pressure Acceleration and the Coherent Acceleration of Ions by Laser. Megjelenés alatt: *Physical Review Accelerators and Beams*
- Neely, D. – Foster, P. – Robinson, A. et al. (2006): Enhanced Proton Beams from Ultrathin Targets Driven by High Contrast Laser Pulses. *Applied Physics Letters*, 89, 021502. DOI: 10.1063/1.2220011, <https://portal.research.lu.se/ws/files/2880205/2425827.pdf>
- Norreys, P. A. et al. (1998): Neutron Production from Picosecond Laser Irradiation of Deuterated Targets at Intensities of 10^{19} W/cm². *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 40, 175–182. DOI: 10.1088/0741-3335/40/2/001, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0741-3335/40/2/001/pdf>
- Prencipe, I. et al. (2017): Targets for High Repetition Rate Laser Facilities: Needs, Challenges and Perspectives. *High Power Laser Science and Engineering*, 5, e17. DOI: 10.1017/hpl.2017.18, <https://bit.ly/2GUUEW4>
- Pretzler, G. – Saemann, A. – Pukhov, A. et al. (1998): Neutron Production by 200 mJ Ultrashort Laser Pulses. *Physical Review E*, 58, 1165. DOI: 10.1103/PhysRevE.58.1165, [https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/neutron-production-by-200-mj-ultrashort-laser-pulses\(6b-23b3cd-7790-4598-816b-0583e6b9a888\).html](https://portal.research.lu.se/portal/en/publications/neutron-production-by-200-mj-ultrashort-laser-pulses(6b-23b3cd-7790-4598-816b-0583e6b9a888).html)
- Roth, M. et al. (2002): Energetic Ions Generated by Laser Pulses: A Detailed Study on Target Properties. *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams*, 5, 061301. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.5.061301, <https://journals.aps.org/prab/pdf/10.1103/PhysRevSTAB.5.061301>
- Roth, M. – Jung, D. – Falk, K. et al. (2013): Bright Laser-Driven Neutron Source Based on the Relativistic Transparency of Solids. *Physical Review Letters*, 110, 044802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.044802, <https://www.semanticscholar.org/paper/Bright-laser-driven-neutron-source-based-on-the-of-Roth-Jung/6124454061aca272ce64528d4229a0a5fc5807ee>
- Scullion, C. – Doria, D. – Romagnani, L. et al. (2017): Polarization Dependence of Bulk Ion Acceleration from Ultrathin Foils Irradiated by High-Intensity Ultrashort Laser Pulses. *Physical Review Letters*, 119, 054801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.054801, <https://bit.ly/3lwQOBe>
- Steinke, S. – Henig, A. – Schnürer, M. et al. (2010): Efficient Ion Acceleration by Collective Laser-driven Electron Dynamics with Ultra-thin Foil Targets. *Laser and Particle Beams*, 28, 215–221. DOI: 10.1017/S0263034610000157, https://kopernio.com/viewer?doi=10.1017%2Fs0263034610000157&token=WzIyODkxMjIsImFyWjEwLjEwMTcvczAyNjMwMzQ2MTAwMDAxNTciXQ_BV_PchXKf4TjIRSRb8ETMmTgDIA

- Szieberth M. (2020): A transzmutáció mint a nukleáris hulladékok kezelésének egy lehetséges útja. *Magyar Tudomány*, 181, 12, 1609–1620. DOI: 10.1556/2065.181.2020.12.5
- Ter-Avetisyan, S. – Schnürer, M. – Hilscher, D. et al. (2005): Fusion Neutron Yield from a Laser-irradiated Heavy-water Spray. *Physics of Plasmas*, 12, 012702. DOI: 10.1063/1.1815001, https://www.researchgate.net/publication/40829077_Fusion_neutron_yield_from_a_laser_irradiated_heavy_water_spray
- Toth, Sz. – Stanislauskas, T. – Balciunas, I. et al. (2020): SYLOS Lasers – The Frontier of Few-cycle, Multi-TW, kHz Lasers for Ultrafast Applications at Extreme Light Infrastructure Attosecond Light Pulse Source. *Journal of Physics Photonics*, 2, 4, 045003. DOI: 10.1088/2515-7647/ab9fe1, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7647/ab9fe1>
- Zulick, C. et al. (2013): Energetic Neutron Beams Generated from Femtosecond Laser Plasma Interactions. *Applied Physics Letters*, 102, 124101. DOI: 10.1063/1.4795723, https://www.researchgate.net/publication/255702191_Energetic_neutron_beams_generated_from_femtosecond_laser_plasma_interactions