

ÁTTÖRÉS A LÉZERES TERMONUKLEÁRIS FÚZIÓBAN

Földes István – Wigner Fizikai Kutatóközpont

Tóth Zsolt – SZTE Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézet

Az USA Lawrence Livermore Nemzeti Laboratóriumában (LLNL) a National Ignition Facility-nél (NIF) 2022. december 5-én sikeres lézeres inerciális (tehetetlenségi összenyomós) fúziós kísérletet hajtottak végre. Megvalósult a tudományos „break-even”, ami azt jelenti, hogy magas hőmérsékletű plazmában lejátszódó magfúziós folyamatokkal nagyobb energiámmennyiséget tudtak termelni, mint a gerjesztésre felhasznált energia.

Magenergia előállítható a nehéz atomok hasadásából, a fissionból, ahogy a hagyományos atomerőművek – mint a paksi is – működnek. Viszont a csernobili és fukushimai katasztrófák óta az ilyen erőművek sokat vesztek vonzerejükből, több országban leál-

lítják ezeket. A hasadásos erőművek legnagyobb problémája azonban a hosszú felezésű radioaktív izotópok tárolása több tízezer évig, amely mindmáig megoldatlan. A magenergia előállításának másik módja, a fissionnál hatékonyabb magfúzió viszont békés alkalmazásokban még nem működik.

Magfúzió könnyű atommagok egyesülésekor megy végbe, és ez a reakció a fissionnál hatékonyabban termelne energiát. Az atommagok Coulomb-taszítása miatt azonban ennek véghezvitele nehezebb, és az atommaghasadással ellentétben energiabevitelt igényel, hiszen a Coulomb-gát leküzdéséhez sokmillió fok hőmérsékletre van szükség (ezért termonukleáris), és a folyamatot továbbvivő láncreakció sincs. Magfúzió megy végbe a csillagok belsejében és a hidrogénbomba robbanásakor, amint azt az 50-es évek óta tudjuk.

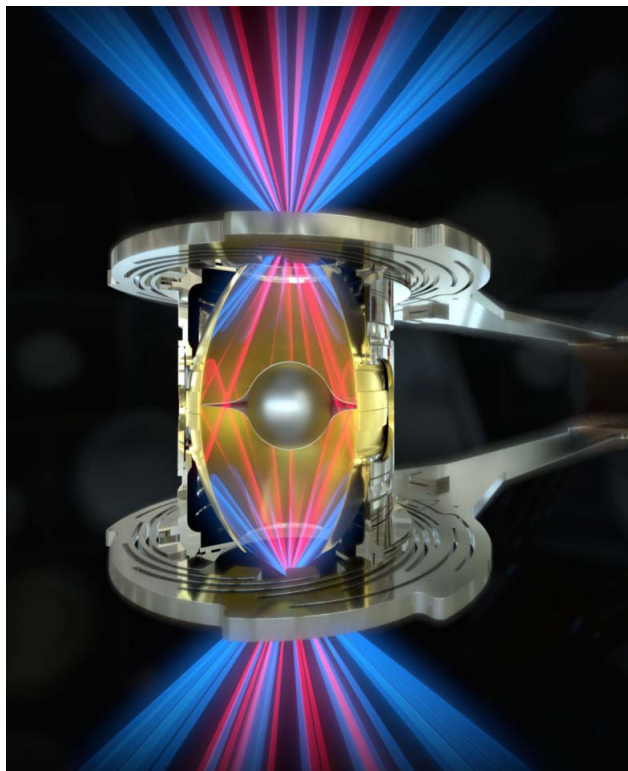
A békés termonukleáris fúzió egyik lehetséges módszere, hogy a viszonylag kis sűrűségű plazmaállapotú fűtőanyagot mágneses tér tartja össze. Ez az alapja a készülő európai nagyberendezésnek, az évtized közepére elkészülő ITER tokamaknak is. Az ITER már tartalmazza a majdani reaktor működéséhez szükséges mérnöki tervezés alapjait is. Egy fúziós erőmű nem tud megszabadni, mint csernobili, hiszen nincs láncreakció, és nem termelne hosszú felezési idejű radioaktív hulladékot sem. A deutérium-trícium (DT) fúziós magreakció az, ami a legalacsonyabb hőmérsékleten megy végbe, de ehhez is mintegy 100 millió kelvin szükséges. Ha ezt a hőmérsékletet kizárólag külső fűtéssel akarjuk elérni, akkor – akár lézeres, akár mágneses fúzió esetében is – nagyon sok energiára lenne szükség. A fúziós reakcióban viszont egy 14,1 MeV energiájú neutron és egy 3,5 MeV ener-



Földes István 1977-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE-n, 2003 óta az MTA doktora, az SZTE címzetes egyetemi tanára. A Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos tanácsadója. Kutatási területe a lézer-anyag kölcsönhatások, lézeres termonukleáris fúzió és ultrarövid lézerpulzusok kölcsönhatásai. Hosszabb időket töltött Németországban, főleg a garchingi Max-Planck Kvantumoptikai Intézetben.



Tóth Zsolt az SZTE Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézetének tudományos főmunkatársa. 1988-ban szerzett fizikusdiplomát a jogelőd JATE-n, ahol lézeres anyagmegmunkálás témakörben szerezte meg az egyetemi doktori (1992) és a PhD-fokozatát (1998). Érdeklődési köréhez tartozik a spektroszkópiai ellipszometria és a pásztázó elektronmikroszkópia is. A lézeres fúzió témához az anyagok rövid és ultrarövid excimer lézerpulzusokkal történő abláció kísérleti vizsgálatával csatlakozik.



1. ábra. Az arany üregbe két oldalról, alulról és felülről lövik be a 192 lézernyalábot. Az egyes lézernyalábok hullámhossza különböző lehet, hogy elkerüljék a nemlineáris kölcsönhatásokat. Az üreg falán keltett röntgensugárzás nyomja össze a kriogén fúziós kapszulát. Az elrendezés fényt árnyékoló ernyőket és hidegűjrat is tartalmaz. (<https://lasers.llnl.gov/science/pursuit-of-ignition>)

giájú alfa-részecske keletkezik. A majdani reaktorban a vákuumkamra falát lítiummal veszik körül, és a neutron energiája ott változik termikus energiává. A plazma effektív felfűtéséhez viszont az alfa-részecskék energiáját lehet kihasználni. Azért nagyon nagy méretű berendezés az ITER, hogy a keletkező alfa-részecskék még a fűtőtérben, a plazmát továbbfűtve veszítsék el energiájukat.

A kutatókat már a hidrogénbomba megalkotása óta foglalkoztatta az a kérdés, hogy lehetséges-e a robbantást kicsiben megcsinálni. Ennek folyamánként született meg egy másik alternatíva, a lézeres fúzió, amelynek lehetőségét először *John Nuckolls* és munkatársai írták le 1972-ben [1]. Lézerimpulzusok segítségével mikrorobbanást hoznak létre, amely során egy DT fűtőanyagot tartalmazó kis, pár milliméter átmérőjű céltárgyat a másodperc milliárdod része alatt magas hőmérsékletre fűtenek fel. A DT üzemanyag egyúttal nagy sűrűségűre nyomódik össze, és középontjában beindul a fúzió. Az itt keletkező alfa-részecskék fűtik fel a környező összenyomott DT keveréket olyan hőmérsékletre, hogy a külső tartományokban is végbemehessen a fúzió. A folyamatot egy 1990-es, *Fizikai Szemlében* közölt cikk részletesen tárgyalta [2]. E módszerrel értek el tudományos áttörést az LLNL-ben a NIF lézerral. Tudományos áttörésnek tekintjük azt, ha a fűtőtérbe befektetett fűtési

energiánál több fúziós energiát nyerünk. Az emberiség történelmében ez először 2022. december 5-én 1 óra-
kor sikerült, amikor a 2,05 MJ lézerenergiával 3,15 MJ fúziós energiát hoztak létre.

A NIF lézer 2009 óta működik, de eleinte nem váltotta be a reményeket. Az eredmény több mint 10 év intenzív tudományos és technológiai fejlesztésnek köszönhető. A fúziós kísérletben a 192 lézernyalábot egy centiméter hosszúságú aranyhenger falára fókuszálják, ahol a keletkező plazma röntgensugárzása szimmetrikusan világítja meg a henger belsejében elhelyezett fúziós kapszulát (1. ábra). A fúziós kapszula kívül gyémántszerű szénnel van borítva, ez az úgynevezett ablátor. A lerepülő ablátor, mint egy rakéta, visszarúg és összenyomja a fúziós fűtőanyagot. Ezért hívják a lézerfúziót tehetetlenségi összetartású vagy inerciális fúziónak. A fúziós fűtőanyag kriogén deutérium–trícium keverék, amelyet egy vékony, 2 mikrométer átmérőjű (!) csövön töltenek a henger és a szén ablátor belsejébe. A szimmetrikus összenyomás a folyadék sűrűségének ezerszeresére nyomja össze a szilárd DT-keveréket. A gömbszimmetria következtében a kapszula közepén találkozó részecskék érik el először a fúziós begyűjtáshoz szükséges hőmérsékletet.

A NIF lézer azért keltett csalódást 2010 és 2012 között, mert a gyenge szimmetria miatt nem sikerült elérni az alfa-részecskével való fűtést. A szimmetriát ronthatja az aranyüreg faláról és az ablátorról lepárolgó plazma, ezért az üreg He-gázzal van töltve, a lézernyalábok az üregbe egy vékony ablakon keresztül lépnek be. Jelentős előrelépés volt, amikor gyémántból sikerült előállítani az ablátort a korábbi plasztik helyett, mert az kevésbé párolog, így a gáznyomás alacsonyabb lehet, nem lépnek fel lézer–plazma instabilitások. Az üreg alakja is sokat változott, nem egyszerű henger, hanem olyan alakú, ami lehetővé teszi a kapszula szimmetrikusabb megvilágítását. Az egyes lézernyalábok frekvenciáját is úgy hangolták, hogy a lézer–plazma instabilitások következtében visszaszóródó fényt redukálják. Alapvető fontosságú a kapszula szimmetriája. Kiderült – ha el akarjuk kerülni az aszimmetriát –, hogy a kriogén fűtőanyagot csak a fent említett, rendkívül vékony töltőcsövön lehet betölteni. Az elmúlt években nagyságrenddel sikerült csökkenteni a kapszula felszínén levő mikrométernél is kisebb hibák számát.

Mindezen fejlesztéseknek, erőfeszítéseknek tudható, hogy 2021 elején már több mint 100 kJ fúziós energiát sikerült előállítani [3]. Ezen kísérletekben már jelentős alfa-részecske-fűtés is megfigyelhető volt, de a forró anyag sugárzási vesztesége meghaladta azt. A nagy ugrást a 2021. augusztus 8-i kísérlet jelentette, ahol 1,9 MJ lézerenergiából 1,35 MJ fúziós energiát sikerült kinyerni [4, 5]. Ekkor már egyértelmű volt az erős alfa-részecske-fűtés, amelynek mértéke meghaladta a sugárzási veszteségeket. A sikeres kísérletet

majdnem egy éven át nem tudták megismételni, de 2022 őszére sikerült megoldani a problémákat és a lézere energiát is 2,05 MJ-ra tudták növelni. Ennek következménye a mostani tudományos áttörés, azaz a kinyert 3,15 MJ fúziós energia, amit a céltárgyat körbevevő neutrondetektorokkal – hiszen a fúziós neutronok energiája ismert – mértek. Az eredmények azt mutatták, hogy az intenzív alfa-részecske-fűtés 150 millió kelvinre fűtötte fel a kapszula deutérium- és trícium-atommagjait. A kísérlet során a DT keverék 4%-át égették el, tehát van még lehetőség az előrelépésre, a határfok további növelésére.

A decemberi kísérlet szakmai részleteit most még nem ismerjük, csak a vezető kutatók sajtótájékoztatóját tudtuk meghallgatni. Mégis úgy gondoljuk, hogy érdemes elgondolkodni, mit jelent ez a nagyszerű eredmény, és hogyan lehet továbbhaladni. A lézer még egy régi technológiával, azaz nem száloptikával vagy diódapumpálással működik, ezért több, mint 300 MJ energia kell egy lövéshez. A mintegy 2 MJ lézere energiából a röntgenkonverzió után csupán 200-300 kJ energia jut el a kapszulába, és a rakétaeffektus alacsony hatásfoka miatt az összenyomó és fűtő kinetikus energia kevesebb, mint 20 kJ. Ebből keletkezett a 3,15 MJ fúziós energia.

A tudományos áttörés valós, de mi kell ahhoz, hogy a lézeres fúzió energiát termeljen? A lézerek hatásfoka sokat nőtt az elmúlt évtizedekben, ma már a 10% feletti hatásfok érhető el. Ennek ellenére a fúziós céltárgyból a jelenlegi másfélszeres helyett legalább százszoros energiahozamra van szükség. Várhatóan 2023 nyarára sikerül a lézer energiáját újabb 8%-kal megnövelni (az energia növelhetőségét a jobb minőségű, nagyobb roncsolási küszöbvel rendelkező optikák teszik lehetővé), amivel a jelenlegi hatásfok növelhető. Említettük, hogy a jelenlegi kísérletben a fúziós fűtőanyag csupán 4%-át égették el, a reaktor-szerű működéshez ezt mintegy 30%-ra kell növelni. A jelenleg alkalmazott indirekt, röntgensugárzással végzett összenyomás hatásfoka is alacsony. A direkt, lézerekkel történő összenyomás, ha nehezebb is végrehajtani, hatékonyabb lehet, ami csökkentheti a szükséges lézere energiát.

A reaktorműködés nehezen képzelhető el a jelenlegi rendkívül bonyolult, összetett céltárgyakkal. Hiszen, ha egy lövésből sikerülne is 100 MJ fúziós energiát előállítani, akkor is másodpercenként legalább 10 ilyen céltárgyra van szükség (a lézer 10 Hz-es működése ma már nem jelent problémát). Egy sima, a direkt összenyomáshoz tervezett kriogén gömb 10 Hz-es beinjektálása a vákuumtérbe talán még megoldható. A direkt összenyomás azért problémás, mert nincs meg a röntgensugárzás szimmetrizáló hatása. Szimmetrikus megvilágítás csak a sok nyaláb egymással való kölcsönhatásakor fellépő nemlinearitások kiküszöbölésével valósulhat meg. Továbbá a lézerek – hosszabb hullámhosszuk miatt – nem elég

mélyen hatolnak az ablátorba, így a hidrodinamikai határfok is alacsony. E problémák megoldása a következő évek intenzív kutatását igénylik. Ebbe az irányba illeszkednek a Szegedi Tudományegyetem Fizikai Intézet Nagyintenzitású Lézerlaboratóriumának (HILL) kutatásai, alternatív hullámhosszakon (193 nm és 248 nm) működő ArF és KrF excimer lézerforrások vizsgálatával. A fúziós kísérletekhez jelenleg az infravörös tartományban működő szilárdtestlézerek frekvenciatöbbszörözött (355 nm hullámhosszú) impulzusait használják. Maga a frekvenciatöbbszörözés is alacsony (körülbelül 30%) hatásfokú. Az excimer lézerek ezzel szemben már eleve ultravioleta-hullámhosszon működő impulzusüzemű fényforrások, amelyekkel rövidebb hullámhosszon érhető el a szilárdtestlézerek frekvenciatöbbszörözés utáni hatásfoka [6]. Az excimer lézerek alkalmazása azért is lehet ígéretes, mert szimulációk azt mutatják, hogy a 193 nm hullámhosszúságú impulzusokat kibocsátó ArF lézer esetében a fúziós céltárgy összenyomása során kevésbé lépnek fel instabilitások, mint hosszabb hullámhosszak esetén [7].

Az európai kutatók nem akarnak a probléma megoldásával az Egyesült Államokra várni. Próbálják újraéleszteni a HiPER+ programot, egy közös európai, direkt összenyomású módon megvalósítandó, kizárólag békés lézerfúziós berendezést. A HiPER lézer korábban benne volt az Európai Unió kutatási-fejlesztési tervében (roadmap), de a NIF lézer korai balsikere miatt nem kapott anyagi támogatást. Most újra lehet, sőt újra kell éleszteni egy módosított, új projekttel, amiben remélhetőleg Magyarország is érdemben részt fog venni.

Irodalom

1. J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen, G. Zimmerman: Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications. *Nature*, 239/5368 (1972) 139; <http://www.nature.com/articles/239139a0>
2. Földes István: Termonukleáris fúzió mikrorobbantással. *Fizikai Szemle* 40/7 (1990) 203; <http://fizikaiszemle.hu/old/archivum/fsz9007/tart9007.html>
3. A. B. Zylstra, et al.: Burning plasma achieved in inertial fusion. *Nature* 601/7894 (2022) 542; <http://www.nature.com/articles/s41586-021-04281-w>
4. A. L. Kritcher, et al.: Design of an inertial fusion experiment exceeding the Lawson criterion for ignition. *Physical Review E* 106/2 (2022) 025201; <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.106.025201>
5. A. B. Zylstra, et al.: Experimental achievement and signatures of ignition at the National Ignition Facility. *Physical Review E* 106/2 (2022) 025202; <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.106.025202>
6. I. B. Földes, S. Szatmári: On the use of KrF lasers for fast ignition. *Laser and Particle Beams* 26 (2008) 575–582.
7. S. P. Obenschain, A. J. Schmitt, J. W. Bates, M. F. Wolford, M. C. Myers, M. W. McGeoch, M. Karasik, J. L. Weaver: Direct drive with the argon fluoride laser as a path to high fusion gain with sub-megajoule laser energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 378/2184 (2020) 20200031; <http://royalsocietypublishing.org/toc/rsta/2020/378/2184>