



Energiatermelés

Nagyon felértékelődött a különböző energiafajták hozzáférhetősége, gazdaságossága, ára, ökológiai lábnyoma stb. Ezekben a kérdésekben szeretnénk eligazodást nyújtani elsősorban a szakmai oldalra koncentrálni. A politikát nem kívánjuk érinteni, hacsak a gazdasági vonatkozások nem feltétlenül indokolják, hogy utaljunk a politikai tényezőkre. Hiszen a döntéseket természetesen mindig és mindenütt a politikának kell meghoznia. Mi segíteni szeretnénk olvasóinkat, hogy tisztábban lássanak a potenciális lehetőségek sokaságában.

Az áprilisi számban Lente Gábor írt arról a tervezett európai uniós rendeletről, amely szerint 2035 elejétől az Európai Unióban nem adható el benzin- vagy dízelüzemű autó, Harmathy Norbert és Szalay Zsuzsa pedig a „BME a fenntarthatóságért” konferencia előadásairól számolt be. Májusi számunk szerzői a lézeres termonukleáris fúzió új fejleményeivel ismertetik meg az olvasókat. Cikküket a Fizikai Szemle 2023. januári számából vesszük át, a szerkesztőség szíves engedélyével.

Kiss Tamás

Földes István – Tóth Zsolt

■ Wigner Fizikai Kutatóközpont

■ SZTE Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézet

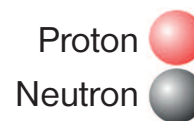
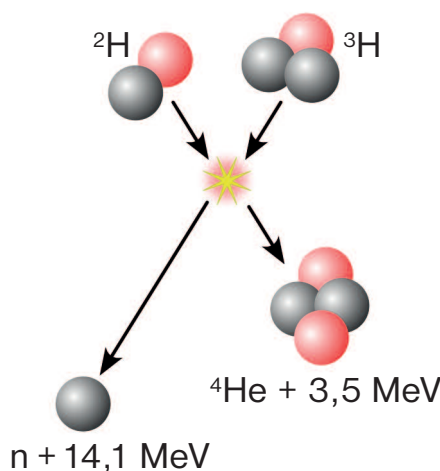
Áttörés a lézeres termonukleáris fúzióban

Az USA Lawrence Livermore Nemzeti Laboratóriumában (LLNL), a National Ignition Facility-nél (NIF) 2022. december 5-én sikeres lézeres inerciális (tehetetlenségi összenyomásos) fúziós kísérletet hajtottak végre. Megvalósult a tudományos „break-even”, ami azt jelenti, hogy magas hőmérsékletű plazmában lejátszódó magfúziós folyamatokkal nagyobb energiamennyiséget 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 fukusimai katasztrófák óta az ilyen erőművek sokat vesztek vonzerejükéből, több országban leállítják ezeket. A hasadásos erőművek legnagyobb problémája azonban a hosszú felezési idejű radioaktív izotópok tárolása több tízezer évig, amely mindmáig megoldatlan. A magenergia előállításának másik módja, a fissionnál hatékonyabb magfúzió viszont békes 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 energiabevitel igényel, hiszen a Coulomb-gát leküzdéséhez sokmillió fok hőmérsékletre van szükség (ezért termonukleáris), és nincs a folyamatot továbbvivő láncreakció. Magfúzió megy végbe a csillagok belsőjében 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 a csernobili, hiszen nincs láncreakció, és nem termelne hosszú felezési idejű radioaktív hulladékot sem. A deutérium-trícium (DT) fúziós magreakció (1. ábra) megy végbe a legalacsonyabb

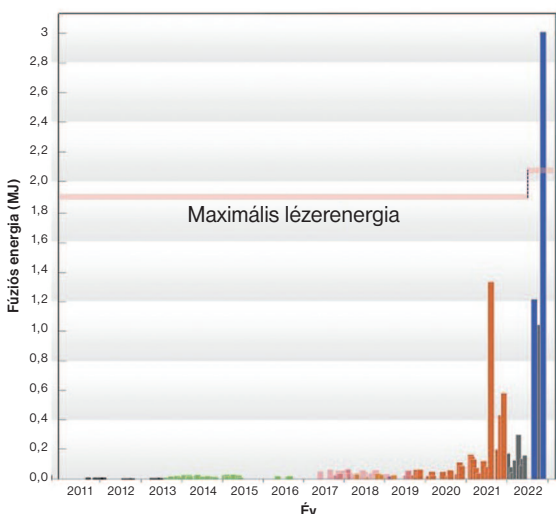


1. ábra. A deutérium-trícium (^2H - ^3H) magreakcióban neutron és alfa-részecske (^4He -atommag) keletkezik

hőmérsékleten, de ehhez is mintegy 100 millió kelvin szükséges. Ha ezt a hőmérsékletet kizárólag külső fűtéssel akarjuk elérni, akkor – akár lézeres, akár mágneses fúzió esetében – nagyon sok energiára lenne szükség. A fúziós reakcióban viszont egy 14,1 MeV energiájú neutron és egy 3,5 MeV energiájú 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.

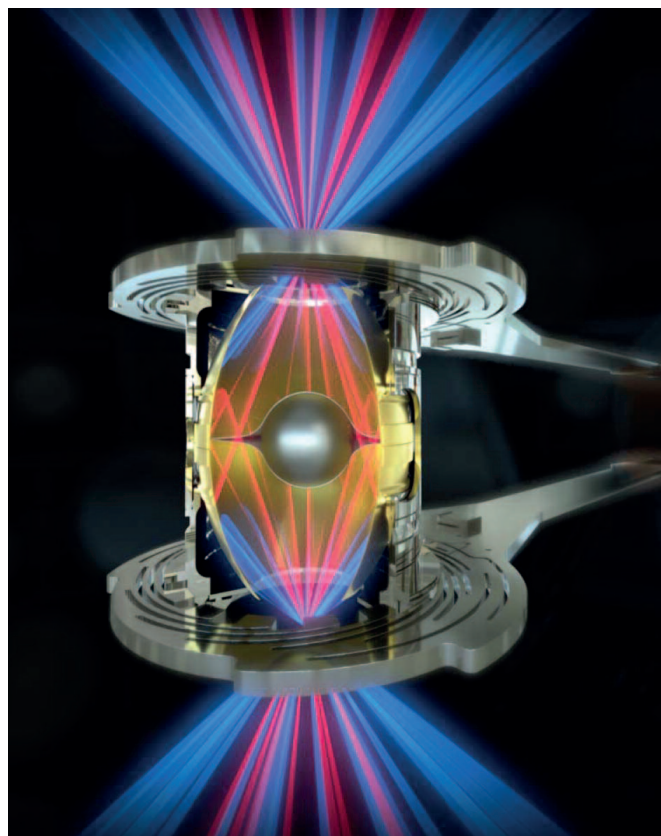


A kutatókat már a hidrogénbomba megalkotása óta foglalkoztatta az a kérdés, hogy lehetséges-e a robbantást kicsiben megcsinálni. Ennek folyományaként született meg egy másik alternatíva, a lézeres fúzió, amelynek lehetőségét először *John Nuckolls* és munkatársai írták le 1972-ben [1]. Lézerimpulzusok 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 közép-pontjában beindul a fúzió. Az itt keletkező alfa-részecskék fűtik fel a környező összenyomott DT-keveréket olyan hőmérsékletre, hogy a külső tartományokban is végbemehessen a magfúzió. 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 órakerült, amikor a 2,05 MJ lézere energiával 3,15 MJ fúziós energiát hoztak létre (2. ábra).



2. ábra. A NIF kutatói sok erőfeszítést tettek az évek során a fúziós hatások növelése érdekében. Az áttörést hozó kísérletben 2,05 MJ-ra növelték a korábbi években elért 1,9 MJ lézere energiát. A grafikon oszlopai különböző technikai megoldásokkal elért fúziós energiát jelölnek. Az utolsó oszlop jelzi az áttörést jelentő kísérlet során elért 3,15 MJ fúziós energiát (<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.6.2.20221213a/full/>)

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 lézernyaláb egy centiméter hosszúságú aranyhenger falára fókuszálják, ahol a keletkező plazma röntgensugárzása szimmetrikusan világítja meg a henger belsejében elhelyezett fúziós kapszulát (3. ábra). A fúziós kapszula kívül gyémántszerű szénél 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 fúzióknak. A fúziós fűtőanyag kriogén deutérium-trícium keverék, amelyet egy vékony, 2 mikrométer átmérőjű (!) csövön töltenek a henger és a szénablátor belsejébe. A szimmetrikus összenyomás a folyadék sűrűségének ezerszeresére nyomja össze a szilárd DT-keveréket. A gömbszimmetria következtében a kapszula közepén található részecskék érik el először a fúziós begyűjtáshoz szükséges hőmérsékletet.



3. ábra. Az aranyüregbe két oldalról, alulról és felülről lövik be a 192 lézernyaláb. 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 „hideg-ujjat” is tartalmaz (<https://lasers.llnl.gov/science/pursuit-of-ignition>)

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.

Mindezeknek a fejlesztéseknek, erőfeszítéseknek tudható, hogy 2021 elején már több mint 100 kJ fúziós energiát sikerült előállítani [3]. Ezekben a 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 lézere energiából 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 lézerenergiát 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 tríciumatommagját. A kísérlet során a DT keverék 4%-át égették el, tehát van még lehetőség az előrelépésre, a hatások további növelésére.

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 lézerenergiából a röntgenkonverzió után csupán 200–300 kJ energia jut el a kapszulába, és a rakéta-effektus 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 csak 4%-át égették el, a reaktorszerű működéshez ezt mintegy 30%-ra kell növelni. A jelenleg alkalmazott indirekt, röntgensugárral végzett összenyomás hatásfoka is alacsony. A direkt, lézerrel történő összenyomás, ha nehezebb is végrehajtani, hatékonyabb lehet, ami csökkentheti a szükséges lézerenergiát.

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 van szükség egy GW teljesítményű energiablokkhoz (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 hatások is ala-

csony. 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 szilárdtest-lézerek frekvenciatöbbszörözött (355 nm hullámhosszú) impulzusait használják. Maga a frekvenciatöbbszörözés is alacsony (körülbelül 30%) hatásfokú. Az excimer lézerek ezzel szemben már eleve ultraibolya hullámhosszon működő impulzusüzemű fényforrások, amelyekkel rövidebb hullámhosszon érhető el a szilárdtest-lézerek 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* (1972) 239/5368, 139; <http://www.nature.com/articles/239139a0>
- [2] Földes István: Termonukleáris fúzió mikrorobbantással. *Fizikai Szemle* (1990) 40/7, 203; <http://fizikaizemle.hu/old/archivum/fsz9007/tart9007.html>
- [3] A. B. Zylstra, et al.: Burning plasma achieved in inertial fusion. *Nature* (2022) 601/7894, 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* (2022) 106/2, 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* (2022) 106/2, 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* (2008) 26, 575–582.
- [7] S. P. Obenshain, 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* (2020) 378/2184, 2020003; <http://royalsocietypublishing.org/toc/rsta/2020/378/2184>

Akkumulátorgyártás Magyarországon

A Debreceni Egyetem korábbi rektora, Fábián István vegyészprofesszor *Magyarország akkumulátor-nagyhatalom lesz! Megéri?* címmel tartott nagy érdeklődéssel kísért szakmai előadást a Debreceni Akadémiai Bizottság Székházában (korábban a TTIK dékánja nem engedélyezte az előadás megtartását a Debreceni Egyetemen). Az előadó leszögezte: az értelmiség felelősségének tartja, hogy megszólaljon a szakterületét érintő kérdésekben. Mint mondta, nagyon sok tévhit, félinformáció és téves információ látott napvilágot a témában, ő ugyanakkor megbízható nemzetközi szakirodalomra és hivatalos megnyilvánulásokra támaszkodott az előadás készítése során. *(Debreciner)* Az előadás felvé-

tele elérhető a YouTube-on: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=B9cCdpXaESE&fbclid=IwAR3m67ZDaPNXBhTvE-APTj2cTcBe6v97s4xCilym2qzTHG5JQLmnb-5sKON8>

*

A Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont főmunkatársa, Éltes Andrea az elérhető információk, elemzések alapján járja körül az akkumulátorgyártás fokozásának kérdését új tanulmányában, amelyből az üzemek mai működése mellett kirajzolódik „a hiteles és rugalmas kormányzati stratégia és a tényalapú tájékoztatás hiánya”. (https://vgi.krtk.hu/wp-content/uploads/2023/03/Elteto_MT_147.pdf)