

A JELEN ÉS A JÖVŐ LEGJOBB KILÁTÁSA A NUKLEÁRIS ENERGIA

# Fejlődni, de hogyan?

A Föld tömege nem változik, így a fejlődés nyilvánvalóan csak a komplexitás irányába történhet. Ebben mind ez idáig nem látunk határokat – mondta a Demokratának Csernai László, az MTA külső, a Norvég Tudományos Akadémia rendes tagja, a Bergeni Egyetem professzor emeritusa, akivel energetikai cikksorozatunk következő részében a fenntarthatóságról, a víz szerepéről és hazánk energiaellátásának jövőjéről beszélgettünk.



SZÖVEG HERNÁDI ZSUZSA

– Magfúziós és lézeres kutatással foglalkozik, és itthoni szálai is vannak. Tagja a Professzorok Batthyány Körének, azon belül a most felálló energia-munkacsoportnak. Az Academia Europaea keretében Energia és Fenntarthatóság munkacsoportot működtet. Kérjük, avassa be a Demokrata olvasóit, mi az az entrópia és negentrópia?

– Az entrópia egy pozitív fizikai mérőszám, ami egy adott mennyiségű anyag tulajdonsága. Minél rendezetlenebb az anyag, annál nagyobb, és minél komplexebb, annál kisebb. Az entrópia úgynevezett extenzív mennyiség, azaz ha két anyagdarabot összeadunk, akkor az entrópiájuk is összeadódik. Például ilyen a térfogat vagy a tömeg is. (Viszont az intenzív mennyiségek nem adódnak össze, mint a hőmérséklet vagy a nyomás.) Ha egy rendszernek entrópiát adunk, akkor az entrópiája növekszik, például a fényes, kékes-sárgás 6000 Kelvin-fokos napsugárzás növeli a Föld entrópiáját. Viszont a Föld infravörös 300 Kelvin-fokos kisugárzása csökkenti. Eredőjük negatív, és ezt a negatív irányú entrópiaváltozást hívjuk negentrópiának.

– **Próbáljuk megérteni...**

– Egyensúlyi rendszerekben, mint a Nap és a Föld, az entrópiaváltozás az átadott hőenergia és a sugárzás jellemző hőmérsékletének hányadosa. Így a forró, Napból eredő sugárzás entrópiája viszonylag alacsony, mert a hőenergiát 6000-rel osztjuk. Mivel a Föld sok ezer éves átlagban alig vagy nem melegszik, a bejövő és kimenő hőenergia nagyjából azonos. Viszont a Nap sugárzása és a Földről az infravörös kisugárzás hőmér-



- ▶ Csernai László Újpesten született. A középiskolai matematikaversenyen elért eredményéért felvételi nélkül bekerült az ELTE fizika szakára. Itt és részben a leningrádi Zsdanov Egyetemen végezte tanulmányait kitüntetéses oklevéllel.
- ▶ 1973-tól egy évig a Paksi Atomerőmű tervezésén dolgozott, majd a KFKI-ban elméleti magfizikai kutatásokat folytatott. Megszerezte az egyetemi doktori, a kandidátusi, illetve az MTA Tudományos Doktora címet.
- ▶ 1978-ban az NDK-ban, a drezdai Zentralinstitut für Kernforschungban dolgozott.
- ▶ 1980 és '83 közt a Frankfurti Egyetem, majd 1984 és '88 közt a Minnesotai és Michigani Egyetem Los Alamos-i Nemzeti Kutatóintézet kutatója.
- ▶ 1988-ban norvég királyi kinevezéssel a Bergeni Egyetem egyetemi tanára lett. Kutatási eredményeiért 1997-ben megkapta a Humboldt-díjat.
- ▶ 1999-ben megválasztották az Academia Europaea rendes tagjának.
- ▶ 2004-ben a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemtől doctor honoris causa címet kapott, és megválasztották az MTA külső tagjának. 2008-tól a Norvég Tudományos Akadémia rendes tagja.
- ▶ 2019-től a Bergeni Egyetem professzor emeritusa. ■

séklete nagyon különbözik, 6000, illetve 300 K. Így a Földről az infravörös kisugárzás entrópiája sokkal nagyobb. Következésképp a Föld entrópiaváltozása, a bejövő és a kimenő sugárzás entrópiájának különbsége negatív, azaz a sugárzási tér negentrópiát ad a Földnek.

– **Mintha már kezdenénk érteni...**

– Ezek a kedvező körülmények mindaddig fennmaradnak, amíg a Föld alacsony hőmérsékletű kisugárzása, ehhez pedig a víz három fázisban való jelenléte szükséges (jég, víz, gőz), amely mint egy termosztát, biztosítja az alacsony kisugárzási hőmérsékletet.

– **És ha elolvadnak a gleccserek vagy a sarkvidéki jégtáblák?**

– Ha elolvadnak a gleccserek, a víz elkezd melegedni, mint egy fazékban a tűzhelyen, majd egy idő után a víz is gőzzé válik és elpárolog, a legvégül a vízgőz kidiffundál a világűrbe. Ezzel a víz hőmérséklet-fenntartó hatása megszűnik, és a Föld, mint egy tükör, ugyanolyan hőmérsékletű sugárzást bocsát majd ki, mint amilyen bejön. Ezáltal a sugárzás negentrópiája megszűnik, az entrópia nem csökken, sőt elkezd növekedni, és az élet is megszűnik a Földön. Körülbelül ez történt a Marson.

– **Megérkeztünk korunk fő kérdéséhez: mi okozza a felmelegedést?**

– A Föld klímáját egyértelműen a napsugárzás határozza meg, ezt senki nem vitatja. Az lehet kérdés, hogy van-e más befolyásoló tényező is, és az mekkora. A napsugárzás valamivel több mint 1000 watt per négyzetméter ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), a szén-dioxid üvegház jellegű visszatükröző hatása pedig 1 watt per négyzetméter körüli. Ez viszonylag csekély például

a felhőzet árnyékoló hatásához képest, amit egyebek közt a légkörbe kibocsátott aeroszolok befolyásolnak. Mindazonáltal az emberi tevékenység energetikai hatása a napsugárzáshoz képest elenyésző. Ezt a melegedés mértéke mutatja a legjobban. Én ugyan nem foglalkozom a klímadománnyal, de a melegedést szerintem a legmegbízhatóbban a világtengerek szintjének emelkedése mutatja, amit a NASA műholdas mérései jeleznek a legpontosabban. Ez úgy évi 1-2 milliméter körül van, ami 1-2 métert jelent ezerévenként. Tudjuk, hogy a 2-3 ezer évvel ezelőtti görög és római kikötők ma a jelenlegi tengerszint alatt vannak 2-3 méterrel. Ebből látható, hogy melegedés kétségtelenül van, de katasztrofális, az emberi aktivitásból eredő változása mindmáig nem látható.

– **Engedjen meg egy személyes kérdést. Évek óta tart előadást a fenntartható fejlődéssel foglalkozó magyarországi konferenciákon is, miért nem hallani önről itthon többet?**

– Az utóbbi 35 évben a Bergeni Egyetem elméletfizika-tanára vagyok, most már emeritus. Elsősorban nagy energiájú magfizikával foglalkoztam, de az energiával kapcsolatos problémák mindig érdekeltek. Az 1970-es években részt vettem a Paksi Atomerőmű tervezésében, az utóbbi néhány évben Kroó Norbert professzor úrral sokat beszélgettünk az Academia Europaea-beli aktivitásunk kapcsán, és így a lézerfúzióról is.

– **Mit tart eddigi legnagyobb sikerének?**

– Korábban is sikeres kutatómunkát végeztem, nagy energiájú magfizikai eredményeimért 1997-ben elnyertem a

Humboldt kutatási díjat. Nemrég sikerült a nagy energiájú magfizika és a lézeres nanoplazmonika új eredményeit összekombinálni, amivel elkerülhetjük a lézerfúziót akadályozó két alapvető nehézséget, az úgynevezett Rayleigh-Taylor-instabilitást és a fúziós céltárgy égésének lassú terjedését. Az erre vonatkozó szabadalmunkat 2017-ben Kroó Norberttel és Papp Istvánnal benyújtottuk, amit azután eladtunk a Wigner Fizikai Kutatóközpontnak. Ezzel elnyertük az ELKH, illetve az NKFIH támogatását mint Nemzeti Laboratórium. Így aztán most elég sűrűn vagyok ugyan Magyarországon, de a lézeres nanofúzióra koncentrálok, és inkább abban a témában publikálok és adok elő.

– **Mennyiben más az ön fenntarthatóság-meghatározása, mint az ENSZ-é?**

– Először is, a fenntartható fejlődés pontos és kvantitatív definíciója nem tőlem származik, hanem E. Schrödinger-től, aki 1944-ben megírta a *Mi az élet?* című könyvét (Institute of Trinity College, Dublin), ami a negentrópiát tárgyalja, és egy összetett molekula fogalmát, ami az élő szervezetek genetikai kódját hordozza. Ez egy alapvető számszerű fizikai definíció, ahol a fejlettség az anyag entrópiájával van definiálva, a fejlődés az entrópia csökkenésével. Amint az interjú elején láttuk, a Föld energetikai határfeltételei meghatározzák az entrópia csökkenését, azaz a komplexitás növekedését.

– **Vagyis a fejlődés az összetettebb rendszerek felé halad?**

– Igen, ezt már Schrödinger is megírta. Viszont Schrödinger idejében a DNS szerkezete még ismeretlen volt, mint ahogy az idegrendszer anatómiáját és

**„A lézeres nanofúzióra koncentrálok, és inkább abban a témában publikálok és adok elő”**



## „A Földre érkező napsugárzás energiája sok nagyságrenddel nagyobb, mint a jelenlegi emberi energiatermelés”

működését sem ismertük. Így fontos volt, hogy egy 2017-es Physica A-ban megjelent cikkben megmutassuk, hogyan lehet a matematikai entrópiadefiníciókat a fizikai definícióknak megfeleltetni, adott egy kilogramm anyagra. Számszerűen kiszámoltuk az emberi test anyagának és az emberi agy anyagának entrópiáját. Ugyanilyen alapon a modern nanotechnológia és számítástechnika komponenseinek entrópiája is számolható. Ugyanakkor a Gro Harlem Brundtlandtól származó közismert definíció problematikus.

### – Az hogy hangzik?

– „A fenntartható fejlődés olyan, ami megfelel a mai szükségleteinknek, de anélkül, hogy a jövő generációk szükségleteinek kielégítését akadályozná.” Angolul: „Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” [Brundtland Commission, 1987].

### – Mi a gond vele?

– A fejlettség foka nem definiált, és így alkalmas politikai félremagyarázásokra. Továbbá a fejlődés iránya sem definiált, így lehetőséget ad alapvető félrevezetésekre, amelyek a visszafejlődést jelölik meg célként.

### – Ezt hogy érti?

– Politikus aktivisták leginkább csak a korábbi, fejletlenebb állapotokhoz való visszatérést tűzik ki célul. Nem veszik figyelembe ezek összes következményét.

### – Mire gondol?

– Többek között a szélenergia kihasználásának több káros hatása van, mint előnye, nagyon kis energiatermelési határfok mellett. Példa erre ma Németország.

– **Napjaink egyik legégetőbb kérdése az energia. A Föld népessége és energiaigénye nő, a természeti erőforrások eloszlása egyenetlen. Lesz elég energia a jövőben? Mennyire támaszkodhatunk a megújulókra?**

– A Földön rendelkezésre álló energia nem végtelen, de nagyon nagy. A Földre érkező napsugárzás energiája sok nagyságrenddel nagyobb, mint a jelenlegi emberi energiatermelés. A növényi energiakonverzió biokémiai energiahordozókká közel százszázalékos hatásfokú. A PV-napelemek hatásfoka viszont csak 10-20 százalékos. Így fontos, hogy PV-napelemeket ne telepítsünk termő- vagy benőtt területre. A szélturbinák energiatermelési hatásfoka még ennél is sokkal kisebb, és területigényük óriási. Tengeri telepítés esetén élettartamuk csak tíz év körüli. A jelen és jövő legjobb kilátása a nukleáris energia, amely minimális üzemanyag-mennyiséggel és területigénnyel a legtöbb energiát termeli. Itt a víz jelentőségéről feltétlenül szólni kell. A Földön három fázisban megtalálható víz kiegyensúlyozó, termosztátszerepét korábban már említettem. A tiszta víz az emberi élet legfontosabb alapanyaga, azonkívül az egyetlen energiátárolási forma, ami nagy mennyiségű, jó hatásfokú energiátárolásra képes a csak időnként működő megújulók kiegyensúlyozására.

– **Egyáltalán van-e a fenntartható fejlődés? Ha igen, hol húzódnak a határai?**

– A Föld tömege nem változik, így a fejlődés nyilvánvalóan csak a komplexitás irányába történhet. Ebben mind ez idáig nem látunk határokat.

– **Mi a kapcsolat a klímapolitika és az energiapolitika között?**

– A klímapolitika hatalomra törő politikai irányzat, kevés természettudományos alappal és megalapozatlan klíma modellekkel, amelyek nem állják ki a tudományos viták próbáját. Aktivistái így elzárkóznak a tudományos vitáktól. A CO<sub>2</sub> és más „klímagázok” szerepének kiemelése teljesen ad hoc és jogosulatlan.

– **Képesek vagyunk-e Európa energiaigényét kielégíteni?**

– Igen, különösen ha a politikai és „klímapolitikai” szempontokat nem vesszük figyelembe, hanem jó hatásfokú, kis területigényű és flexibilis energiatermelésre koncentrálnunk. Ezek a feltételek a földrajzi körülményektől függő megoldást igényelnek.

### – Például?

– Ez elég egyértelmű. Déli, sivatagos, száraz területeken a napenergia előnyös. Magashegyes, esős területeken vízerőművek hasznosak. Például a norvégiai Bergenben évi 5 méter feletti csapadék esik. A geotermikus energia ott előnyös, ahol természetes forrásban hosszú ideje jelen van. Mint Izlandon. Magyarországon kevésbé, itt a meleg vízű fürdők létesítése hasznosabb.

### – Mit tanácsol Magyarországnak?

– Itthon a nukleáris energiatermelés további növelése szükséges. A független energiaellátás biztosítása. Fontos továbbá a Dunán három, azaz három duzzasztógát létesítése, egyrészt az árvízvédelem, másrészt a hajózhatóság érdekében, harmadrészt a víz, végül az energia tárolása céljából. Mindezek turisztikai és környezetvédelmi előnyökkel is járnak, lásd a Tisza-tavat.

– **Milyen irányba érdemes kutatni az emberiség jövője szempontjából?**

– A hagyományos atomerőművek ma már a legbiztonságosabbak. A nukleáris energiatermelés a legelőremutatóbb, különösen a lézerindukált fúzió.

### – Az hogyan működik?

– A mágneses bezárású, ITER típusú fúziós reaktorok túl nagy hely- és anyagigényűek. A lézerek energiájának jelenlegi rohamos növekedésével a lézerindukált fúzió kedvezőbb, mivel ebben a típusban a reaktor teljesítménye lefelé is skálázható. ■