

Karen Lewis és munkatársai 2008-ban pulzárok jelének periodikus késését vizsgálták, és arra keresték a választ, hogy egy rendszerben keringő exohold milyen mértékben módosítja a vizsgált pulzárjelek periódusát. Eredményeik szerint a hold jelének detektálására akkor van a legnagyobb esély, ha mind a bolygó, mind a hold nagy tömegű és nagy távolságra keringenek egymás körül [10].

A radiális sebesség-mérés a Rossiter–McLaughlin-effektus révén jelentős szerepet játszik a fedési exobolygók kutatásában, az egyre pontosabb adatok eléggé biztatóak egy exohold felfedezésére. Simon Attila és munkatársai megmutatták, hogy lehetőség van egy exohold torzító jelét megfigyelni a Rossiter–McLaughlin-görbén [11]. A módszer a hold sugarára a legérzékenyebb, és csak olyan csillagok körül érdemes exoholdak után kutatni, amelyek alacsony aktivitást mutatnak.

2010-ben Christine Liebig és Joachim Wambsgans kísérletezett olyan szimulációkkal, amelyekben Föld-méretű holdak mikrolencsézését vizsgálták. A korábbi eredményekkel ellentétben azt találták, hogy olyan esetben figyelhetünk meg a holdtól származó, nem elhanyagolható nagyságú jelet, amikor a bolygó-hold távolság hasonló vagy nagyobb, mint a bolygóhoz tartozó Einstein-gyűrű sugara. Elsősorban törpecsillagok közül kerülhetnek ki a potenciális jelöltek, mivel az óriáscsillagok esetében a holdtól származó minden jel kisimul. Emellett az is feltétel, hogy a források Ein-

stein-gyűrűjének szögátmérője kisebb legyen, mint 0,001 radián. Ezek a 8 kpc távolságban lévő, Nap-méretű vagy annál kisebb csillagok [13].

Az irodalomban eddig csak az exoholdak kimutatására vonatkozó módszerek születtek meg. Arra még nincs példa, hogy egy exohold Naprendszeren kívüli létét sikeresen bizonyították volna, de a technika fejlődését, az egyre pontosabb adatokat és a jövőbeli űrtávcsöves küldetések terveit látva a Naprendszeren kívüli első hold detektálása remélhetőleg a 2010-es évek második felében vagy a 2020-as évek elején megtörténik.

## Irodalom

1. Wolszczan, A., Frail, D., *Nature* 355 (1992) 145.
2. Mayor, M., Queloz D., *Nature* 378 (1995) 355.
3. Simon, A. E., Szatmáry, K., Szabó, Gy. M., *A&A* 470 (2007) 727.
4. Sartoretti, P., Schneider, J., *A&AS* 134 (1999) 553.
5. Barnes, J. W., O'Brien, D. P., *ApJ* 575 (2002) 1087.
6. Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Dívéki, Zs., Simon, A., *A&A* 450 (2006) 395.
7. Kipping, D. M., *MNRAS* 392 (2009) 181.
8. Alonso, R., Barbieri, M., Rabus, M., Deeg, H. J., Belmonte, J. A., Almenara, J. M., *A&A* 363 (2008) 81.
9. Simon, A. E., Szabó, Gy. M., Kiss, L. L., Szatmáry, K., *MNRAS* 419 (2012) 164.
10. Lewis, K. M., Sackett, P. D., Mardling, R. A., *ApJ* 685 (2008) L153.
11. Szabó, Gy. M., Simon, A., Szalai, T., *Fizikai Szemle* 61/7–8 (2011) 217.
12. Simon, A. E., Szabó, Gy. M., Szatmáry, K., Kiss, L. L., *MNRAS* 406 (2010) 2038.
13. Liebig, C., Wambsgans, J., *A&A* 520 (2010) A68.

## VÉLEMÉNYEK

# AZ ENTRÓPIAPROBLÉMA – I. RÉSZ

Oláh Károly  
BME, Fizikai Kémia Tanszék

Egy fogalomnak sincs olyan kalandos története, mint az entrópiának.

1999 decemberében jelent meg Harvey S. Leff figyelemreméltó cikke az *American Journal of Physics*-ben *What if entropy were dimensionless?* címmel [1]. Ebben az entrópia rejtélyes („puzzling”) energia/hőmérséklet jellegét elemzi és von le hat következtetést. Ezek között van a javaslat a dimenziómentes entrópiavariáns használatára. Egy másik javaslat a hőmér-

séklet-fogalmat illeti: javasolja a hőmérséklet ( $T$ ) helyett az  $RT$  energiajellegű mennyiség használatát. Nevet is ad: *tempergia* („tempergy”).

## Clausius, a hőhatás entrópiája

Másfél évszázada már, hogy az entrópia fogalma megszületett (Clausius, 1865) [2]. Ez időben a természettudomány egyik fő témája az energiakérdés volt. Mi történik a gőzgépben? Hogyan lehet kazánban termelt „hőt” hasznos munkára fogni?

Megszületett a hét alappennyiség rendszere.

A három extenzitás ( $E_i$ ): az energia ( $U$ ), a térfogat ( $V$ ), az anyagmennyiség ( $N$ ).

A három potenciál ( $F_i$ ): a hőmérséklet ( $RT$ ), a nyomás ( $P$ ), a kémiai potenciál ( $\mu$ ).

És a hetedik: az entrópia.

A *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottsága az 1972-ben meghirdetett VÉLEMÉNYEK sorozatát az olvasók kérésére tovább folytatja ez évben is. A szerkesztőbizottság állásfoglalása alapján „a Fizikai Szemle feladatául vállalja el, hogy teret nyit a fizikai kutatásra és fizika oktatására vonatkozó véleményeknek, ha azok értékes gondolatokat tartalmaznak és építő szándékúak, függetlenül attól, hogy egyeznek-e a lap szerkesztőinek nézetével, vagy sem”. Ennek szellemében várjuk továbbra is olvasóink, várjuk a magyar fizikusok leveleit.

Ismert volt már öt mennyiség ( $U$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $V$ ,  $N$ ), de kellett még két új fogalom: az anyagmennyiség mellett egy potenciál, ez lett a kémiai potenciál ( $\mu$ ) és kellett a hőmérséklet mellé egy extenzív mennyiség, ez lett az entrópia ( $S_{cl}$ )<sup>1</sup>. Végülis megszületett az energiamérleg (*Gibbs*) [3]:

$$dU = TdS_{cl} - PdV + \mu dN. \quad (1)$$

Olvasata: az anyag (belső) energiájának  $dU$  változása történhet  $dS_{cl}$  („hő”),  $dV$  (térfogati munkavégzés), vagy  $dN$  anyagmennyiség-változás hatására. Érdekes megfigyelés: az entrópia, ha nincs egyensúly és valamennyi konzervatív mennyiség (energia, térfogat, anyagmennyiségek) rögzítettek – tehát a rendszer teljesen zárt –, anélkül, hogy külső hatás táplálná, növekszik.

Az entrópia a természetes folyamat során, az egyensúly felé tartva növekszik. Ez a viselkedés Clausius óta foglalkoztatja a laikusokat és a szakembereket. Sok szó esett a „hőhalál”-hipotézisről: ha az entrópia a „hő” valamilyen mértéke és nő a hőmérséklettel, és ha az Univerzum entrópiája folyton nő, a világ hőmérséklete is növekszik a végső egyensúly, egy halálos hőmérséklet felé. Az egyirányú változást ma is sokan az entrópia kizárólagos tulajdonságának tartják. A kérdés: „mi az entrópia?” azóta foglalkoztat fizikusokat, matematikusokat, vegyészeket, csillagászokat és másokat.

Az IUPAC-terminológia<sup>2</sup> szerint [4]:<sup>3</sup> „Ha reverzibilis folyamat során a rendszerbe hő adódik át állandó hőmérsékleten, az okozott változás, osztva a hőmérséklettel: az entrópiaváltozás.”

*P. W. Atkins Physical Chemistry* [5] című könyvében (1990. Clausius után 125 évvel), a 87. oldalon a jól ismert „definíció” látható:

$$dS = \frac{\delta q_{rev}}{T}. \quad (2)$$

Egy fizikai kémia tankönyv (2004): „A  $TdS$  mennyiség a belső energia csak hőhatással előidézt változása.” *Clifford Truesdell* ehhez hozzáfűzi (*Rational Thermodynamics*, 1971) [6]: „...az olvasó ... eljut a termodinamika fejezethez, ahol ... azt várják el tőle, hogy elhiggye, hogy egyik differenciál lehet nagyobb, mint egy másik, sőt még azt is, hogy egy differenciál lehet nagyobb, mint valami, ami nem differenciál”. *Clifford Truesdell* egy másik írásában (*Tragicomedy of the Classical Thermodynamics*, 1971) [7] – amikor a 19. század termodinamikájának a kritikai elemzésében eljut az

1865 évhez és Clausius-hoz – ezzel fejezi be a történetet:<sup>4</sup> „E naptól kezdve vibrál folyamatosan, csillapítatlanul és disszipáció nélkül a kérdés: »mi az entrópia?»”

*Harvey S. Leff* (1996) szerint [8]:<sup>5</sup> „Miért keressük az entrópia új megközelítését? Az idézett  $dS = \delta Q/T$  egyenletnek nincs nyilvánvaló jelentése.” Leírja, hogy tanítványai értetlenül hallják, ha  $\delta Q = 0$ , de a rendszer nincs egyensúlyban, az entrópia mégis nő. Súlyosbítja a megértést, hogy ezek után azt hallják, hogy<sup>6</sup> „azt tételizzük fel, hogy az entrópia a rendezetlenség mértéke ... ez az értelmezés teljesen misztikus az (1) egyenlet értelmében”.

*Több mint száz év óta kavarnak a kérdések:* Van-e entrópiája egy testnek, ha az nincs egyensúlyban? Mindig mindennek van entrópiája, vagy van, aminek nincs? Reális fizikai mennyiség az entrópia? Van entrópiaváltozás, ha nincs hőfelvétel? Beszélhetünk entrópiaváltozásról, ha a hőfelvétel nem reverzibilis? Miért nő és meddig nő az entrópia és mi fedezi a növekedést? Hogyan értendő a rendezetlenség? Valóban a legrendezetlenebb állapotban a legnagyobb az entrópia? Mértéke az entrópia az irreverzibilitásnak? Van entrópiája egy olyan testnek, aminek nincs hőmérséklete? Van entrópiája egy negatív hőmérsékletű testnek és negatív vagy pozitív? Véges vagy végtelen az entrópia, ha a hőmérséklet végtelen? Van entrópiáám? Világmindenség, hőhalál, fekete lyuk: ezek mögött a jelenségek mögött is az entrópia van? Folytathatnánk.

Az entrópiával egy újfajta mennyiség, a „redukált” energia, az energia/hőmérséklet (J/K) jelent meg. Ez a fajta mennyiség újabb és újabb elvi problémát szült. Egyik probléma: a clausiusi entrópia dimenziójában ott van a kelvini (celsiusi) hőmérséklet. Számértéke tehát függ a hőmérséklet-skála (Celsius vagy Fahrenheit) megválasztásától!

Ez a kérdés sokakat foglalkoztatott. Idézzük *Fényes Imre* egy előadásából (1955) [9]: „A megértés nehézségének okai: ... Az entrópiafogalom formális értelmezése nem egyszerű osztás, hanem az úgynevezett integráló osztó fogalmával kapcsolatos. ... Midőn a sűrűséget két mennyiség hányadosaként értelmezzük, a hallgató mindjárt konkretizálja, mert megfelelő konkrét képekkel már rendelkezik és a konkrétum kapcsán alkot magának az absztraktról fogalmat. Sajnos, az integráló osztóval kapcsolatban ez nem mondható el, a konkrétum nem jelenik meg magától, csak jól átgondolt és keresztülvitt didaktikai ténykedés után. A termodinamikai entrópia tehát különleges forma és különleges tartalom együttese.”

Tehát, a  $\delta Q/T$  nem egyszerűen hányados. A hőmérséklettel történő formális osztás nem egyszerű osztás, hanem speciális művelet. Ez a művelet itt, erre a jelenségre történik, erre a jelenségre érvényes. Az a tény, hogy e mennyiség fizikai dimenziója J/K, nem

<sup>1</sup> A  $Cl$  indexszel azt jeleztük, hogy ez az úgynevezett „clausiusi entrópia”.

<sup>2</sup> International Union of Pure and Applied Chemistry – Tiszta és Alkalmazott Kémia Nemzetközi Uniója. Legfőbb feladata az egységes nemzetközi nomenklatúra kialakítása. A kémiában, a fizikai kémiában és a termodinamikában az IUPAC által meghatározott jelöléseket használjuk. (Wikipédia)

<sup>3</sup> „Entropy is the change in which is equal to the heat brought to the system in a reversible process at constant temperature divided by that temperature.”

<sup>4</sup> „From this day to this the question 'What is entropy?' has vibrated ceaselessly without damping or dissipation.”

<sup>5</sup> „Why seek a new approach to entropy? Eq. (1) has no evident meaning.”

<sup>6</sup> „entropy is supposed to represent a measure of disorder ... an interpretation that is entirely mysterious within the context of Eq (1)”

jelenti azt, hogy bármilyen energiát osztva a hőmérséklettel, entrópiát kapunk.

Példa:  $x$  irányú  $p_x$  impulzust szorozhatunk  $x$  irányú vagy  $y$  irányú sebességgel is. Fizikai dimenziójuk:  $\text{kg m}^2/\text{s}^2$ . De míg  $p_x v_x$  energia,  $p_x v_y$  már nem energia.

Mindez óvatosságra int. A matematika szabályai megengednek akármilyen szorzást vagy osztást. De az ezek mögött álló fizikai jelenség nem lehet akármilyen. Megtörténhet, hogy matematikailag szabályos művelet értelmezhetetlen eredményre vezet. Elgondolkodtató például ezek után az energiaméreg „hőhatás”-tagja:

$$TS_{Cl}$$

Fölvetődhetnek kérdések: ez a szorzás olyan, mint a többi szorzás? Vagy egy speciális művelet, az integráló osztás ellentéte? És egyáltalán, értelmes-e a hőmérsékletet bármi mással szorozni, mint az  $R$  gázállandóval? Mi indokolja a szorzást az entrópiával?

Ezzel a „redukált energia” jellegű entrópiával, mint láthatjuk, napjainkig lebeg a bizonytalanság.

## Boltzmann: a struktúra kinetikája

A clausiusi, a Gibbs-egyenleten alapuló entrópiafogalom fenomenológiai fogalom, a nem-redukcionista szemlélet fogalma. E szemléletnek azonban megvannak a korlátai. A fenomenológia ugyanis a felszín. Hogy mi történik a felszín alatt, a belső dinamika megismerése nélkül nem érthető meg teljesen. Ami történik, végülis valahol a Törvényekben van megírva. A Törvények vezérlik, működtetik a Kinetikát. A Kinetika alakítja a Struktúrát, az egyensúlyi struktúra pedig olyan lesz, amilyené a Kinetika formálta. És a felszín olyan és úgy viselkedik, ahogyan a Struktúra formálta. Ha nem fordítunk figyelmet a részletekre – ha a víz tulajdonságait úgy tárgyaljuk, hogy közben nem gondolkunk arra, hogy a víz  $\text{H}_2\text{O}$  molekulák halmaza és semmi más –, akkor sok makroszkopikus, fontos ismeretet is kizárunk. Ezt tapasztalhattuk az irreverzibilis termodinamika esetében is, amelyik sokáig elzárkózott a molekulár-kinetikai struktúra figyelembevételétől.

Fontos fejlemény nem sokkal Clausius után: elkezdődött a makroszkopikus rendszerek – ez időben elsősorban a gázok – molekuláris-dinamikai (redukcionista) feldolgozása. Nem kisebb nevekhez fűződik, mint *James Clerk Maxwell*, *Ludwig Boltzmann* és *Paul Dirac*. Ez a viselkedés azonban nem ismeretlen és nem is misztikus. Abból a tényből származik, hogy ellentétben a megmaradó alapmennyiségekkel (energia, impulzus, anyagmennyiség) a globális entrópia szorzat vagy szorzatok összege, egy additív mennyiség ( $x_i$ ) és egy minőség ( $\ln x_i$ ) szorzata. És  $\ln x_i$  monoton függvénye  $x_i$ -nek.

A növekedési tendencia mechanizmusa hasonlít a kereskedeleméhez. A kereskedő árut vásárol (alacsonyabb áron) és azt magasabb áron adja el. Az áru mennyisége nem változik, csak gazdát cserél. Az áru értéke azonban, az árumennyiség és egységárának szorzata már nem megmaradó mennyiség. A kereske-

dő vagyona a vételi és az eladási ár különbsége arányában növekszik. (Ahogyan nő az entrópia, ha energia egy térfogatelembe magasabb hőmérsékletből lép be és alacsonyabb hőmérsékletre lép ki.)

A növekedés *a folyamat természetes iránya*. A törvény nem tiltja az ellenkezőjét: vásárolni drágán és eladni olcsón, ekkor azonban a kereskedő tönkremegy, tevékenysége előbb-utóbb megszűnik.

## Az entrópia növekedése, az entrópiamaximum

Ez a jelenség már dinamika, változás az időben. A második főtétel nem az egyensúlyokról, hanem az irreverzibilis állapotokról szól. Ezzel a fenomenológiai szemlélet – azon túl, hogy leírja a megfigyelhető történeteket – nem sokat tud kezdeni. Ebben az időben már tudott volt, hogy a gáz mozgó molekulák sokasága. Maxwell ismerte fel, hogy azok sebessége, kinetikus energiája nem mind ugyanakkora, és nem is teljesen rendezetlen, hanem szabályos, exponenciális eloszlású. Majd Boltzmann [10] fogalmazta meg az energiasztruktúra evolúciójának kinetikáját. Modellje szerint, ha két molekula ütközik, energiacsere történhet: vagy a nagyobb energiájú ad át energiát a kisebb energiájúnak – ezáltal csökken a különbség –, vagy fordítva, a kisebb energiájú ad át energiát a nagyobb energiájúnak, növelve a különbséget. Az ütközések gyakorisága arányos a két részecskefajta koncentrációjának (számsűrűségének,  $x_i$  részarányainak) szorzatával:<sup>7</sup>

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{dx_j}{dt} = -\vec{k} x_i x_j. \quad (3)$$

És minden, időben lejátszódó (és egyenletében az idő első hatványát tartalmazó) eseménynek van időtükrözött változata is (ha filmre vennénk és fordított irányban vetítenénk le):

$$\frac{dx_k}{dt} = \frac{dx_l}{dt} = -\overleftarrow{k} x_k x_l. \quad (4)$$

Ami pedig lehetséges, előbb vagy utóbb meg is történik. Egy gázban ezen eseményeknek és fordítottjainak is nagy a gyakorisága, sőt összemérhető lehet. Egyensúly akkor áll be, amikor valamennyi ellentétes energia-átadás ugyanakkora gyakorisággal történik meg: ez Dirac *Részletes Egyensúly*<sup>8</sup> elve [11]. Joggal állítható, hogy ez minden termodinamikai egyensúly alapjelensége. Ahol ez nem történik meg, az egyensúly csak látszólagos lehet. Egyensúlyban

$$x_i x_j = x_k x_l. \quad (5)$$

Már csak azt kellett megfogalmazni, hogy amikor (még) nincs egyensúly, a természetes folyamat az egyensúly irányában változtatja az eloszlást, és pedig mindkét irányból: ha túl lapos az eloszlás, azt szétfe-

<sup>7</sup> Ezt nevezzük tömeghatásnak.

<sup>8</sup> Detailed Balance

szíti, ha túl széles, akkor összehúzza. Kiderült, hogy definiálható egy negatív  $H$ -függvény ( $H_B$ ):

$$H_B = \sum_i x_i \ln x_i. \quad (6)$$

Az  $x$  eloszlási arányok időbeli változásait ezzel a  $H$ -függvénnyel összekapcsolva adódott, ha nincs egyensúly:

$$\frac{dH_B}{dt} = -k(x_i x_j - x_k x_l) (\ln x_i x_j - \ln x_k x_l) \leq 0. \quad (7)$$

Ugyanis, mivel  $\ln x$  monoton függvénye  $x$ -nek, akkor vagy mindkét különbség pozitív, vagy mindkettő negatív, a szorzatuk mindig pozitív. És mivel a  $k$  tömeghatás-kinetikai sebességi állandó mindig pozitív,  $H_B$  értéke mindig csökken, tehát  $-H_B$  mindig nő.<sup>9</sup> De itt már azt is láthatjuk, hogyan és miért növekszik. Egyensúlyban pedig valamennyi különbség zérus, a  $H_B$  függvény nem csökken tovább, eléri minimumát, ezzel a  $-H_B$  a maximumot.  $-H_B$  tehát úgy viselkedik, mint a clausiusi entrópia. És azzal arányos. Még egy érdekes eredmény: amikor egyensúly áll be, az energiaeloszlás logaritmusjellegűvé alakul. Valamennyi energia előfordulási részaránya

$$\ln x_i = -\frac{E_i}{RT} + M, \quad (8)$$

tehát az  $\ln x$  mennyiségek az energia lineáris függvényei. Az egyik arányossági szorzó az egész rendszerre közös hőmérséklet, az  $RT$  mennyiség (a tempergia), a másik ( $M$ ) az „állapotösszeg” logaritmus, szintén közös mennyiség. Érdekes dolgokat tudtunk meg:

a) Az összenergia is és az egyes  $E_i$  energiaértékek az egyensúlyon kívül is létező, de rögzített mennyiségek.

b) Az  $x_i$  részarányok egyensúlyon kívül is léteznek, de amíg a rendszer az egyensúlyt nem érte el, változnak, nem rögzített mennyiségek.

c) A hőmérséklet egyensúlyban minden elemi részecskepárra ( $i, j, k, l$ ) ugyanakkora, az egész rendszernek van közös hőmérséklete.

d) Ha nincs egyensúly, ezek a hőmérsékletelemek nem mind ugyanakkorák, tehát ha nincs egyensúly, a teljes rendszernek *nincs hőmérséklete*.

e)  $M$ , a dimenziómentes kémiai potenciál ( $\mu/RT$ ), szintén csak egyensúlyban közös mennyiség.

A test teljes energiája a részenergiák  $x_i$  részarányokkal súlyozott összege (a közös  $M$  mennyiségnél  $\sum x_i M = 1M$ ):

$$\sum_i x_i \ln x_i = -\sum_i x_i \frac{E_i}{RT} + M. \quad (9)$$

Az energiaösszeg a teljes energia, a  $H$  entalpia:

$$\sum_i x_i E_i = H = U + PV. \quad (10)$$

<sup>9</sup> A csökkenés, a csillapodás jelensége gyakori, „nem érdekes”. De  $-1$ -gyel szorozva már pozitív és nő, ezért „érdekes”.

És az  $\ln x_i$  részarány-logaritmusok átlaga Boltzmann  $H_B$  függvénye:

$$\sum_i x_i \ln x_i = H_B. \quad (11)$$

Vessük össze Gibbs energiamérlegével (egy mól anyagmennyiségre):

$$\frac{U}{RT} = \frac{S_{Cl}}{R} - \frac{PV}{RT} + M, \quad (12)$$

$$\frac{U}{RT} = -H_B - \frac{PV}{RT} + M. \quad (13)$$

A dimenziómentes  $-H_B$  nem más, mint Leff dimenziómentes  $S$  entrópiája:

$$S = \frac{S_{Cl}}{R}. \quad (14)$$

Tehát az entrópia szerepében megjelent egy új mennyiség. Eltérően a „misztikus” értelmű clausiusi  $S_{Cl}$  entrópiától, egyszerű, világos, érthető és egyértelmű mennyiség. Ha a „részarányról” van fogalmunk, már megérthető ez az entrópia is. A dimenziómentes  $S$  entrópia már nem tartalmaz sem „hőt”, sem hőmérsékletet, kizárólag részarányok függvénye. Minden elemző egyetértett abban, hogy a valós, korrekt entrópia a boltzmanni  $H_B$  függvény, és ez az entrópia valódi struktúráját mutatja meg. Minden konkrét esetben tapasztaljuk, hogy sok előnnyel jár a dimenziómentes  $S$  entrópiával számolni.

A célszerűség gyakran követelte meg a dimenziómentes entrópiát. Kísérleti eredmények kiértékeléseinek is mindig előnyös az  $S_{Cl}/R$  ( $= S$ ) mennyiséget használni. Ezek az entrópia-számértékek világos jelentésűek, összehasonlíthatók más dimenziómentes mennyiségekkel, például a kitevőkben gyakori  $H/RT$  energiahányadással. Amikor pedig kitevőben fordul elő, kötelező a dimenziómentes változat. Sok érv szól amellett, hogy ezt a  $-H_B$  mennyiséget használjuk entrópiaként. Merjük ezt a döntést vállalni?

Már két entrópiaváltozatunk van:

$S_{Cl}$ : a clausiusi, „hőhatás” entrópia (Az energia és  $T$  hányadosa), és

$S$ : a struktúra, az összetétel dimenziómentes entrópiája.

A két entrópia csak egy konstans szorzófaktorban különbözik, de fizikai jellegük lényegesen eltér. A történet egy sajnálatos fejleménye következett.

## A kettős identitású entrópia

Az entrópia nevet és fogalmat már Clausius lefoglalta a  $J/K$  hőhatás entrópia számára.<sup>10</sup> *Max Planck* a két fajta entrópia összekapcsolására azt javasolta, hogy a  $H_B$  függvényt szorozzuk a  $k_B$  „Boltzmann-állandó”

<sup>10</sup> *Neumann Jánost* ez nem gátolta abban, hogy *Shannonnak* az „entrópia” szót egy információelméleti fogalomra javasolja.

arányossági szorzóval ( $k_B$  az egy részecskére számított  $R$  gázállandó) [12]. Egy mólrá

$$S_{Cl} = -RH_B = RS. \quad (15)$$

Dimenziója ennek ismét J/K, ez megnyugtató megoldásnak látszott. Hanem a megértés problémája ezáltal nem lett kisebb. Az entrópia értelmezése újabb tételekkel bővült: struktúra, eloszlás, valószínűség, információ, fázistér. Amikor a szakirodalomban előkerül a kérdés: „Mi az entrópia?” ilyeneket olvashatunk:

- Az entrópia mértéke az elérhetetlen munkának.
- Az entrópia mértéke az energia szétszóródásának.
- Az entrópia mértéke az irreverzibilitásnak.

És ugyanakkor (szorozva a Boltzmann-állandóval):

- Az entrópia mértéke a rendezetlenségnek.
- Az entrópia méri az elérhető mikroállapotok számát.

- Az entrópia egy állapotvalószínűség logaritmus.

Bár mindegyik állításnak megvan a valószínűsége, nem világos, hogy ez mind hogyan lehet ugyanazon entrópia? Most már mindkét fajta entrópia fizikai dimenziója ugyanaz: energia/hőmérséklet (J/K). Ez a fajta mennyiség azonban ugyanannyira misztikus, mint maga az entrópia.

Az entrópiának ettől kezdve különös kettős értelme volt. Ha energiáról, hőről, gőzgépről volt szó, akkor hőhatás-entrópiaként, ha pedig eloszlásról, összetételről, akkor struktúra-entrópiaként jelent meg.<sup>11</sup> Ennek forrása az a tény, hogy immár az  $S_{Cl}$  entrópia két tényező szorzatának tekinthető: az egyik tényező ( $R$ ) tartalmazza a („redukált”) energia tulajdonságot, a másik ( $S$ ) a struktúrát ( $\lambda \ln \lambda$ ). Ez a helyzet azonban nem mindenkit nyugtatott meg. A kérdés hol erősebben, hol gyengébben rendszeresen fölvetődött: melyiket használjuk, melyiket nevezük entrópiának? Lehet a két hatást szétválasztani? A kérdésfeltevés látszólag lényegtelen, hiszen csak egy konstans szorzótényező az eltérés.

Úgy látszik azonban, még egy kérdést tisztázni kell.

## A „hőmérséklet-probléma”

$R$  és  $T$  vagy  $RT$ , az 1990-es években többen felvetették, hogy a probléma megoldásra vár. *B. H. Lavenda* (1991) és mások azt javasolják [13–16]: hagyjuk el a gázállandót (valamint a Boltzmann-állandót), és a hőmérsékletet energiaegységekben ( $RT$ ) mérjük. (Ez így már nem függ a Celsius-skálától). Így a formulák is szimmetrikusabbak lesznek:

$$S_{Cl} = RS \text{ és } TS_{Cl} \rightarrow RTS.$$

Azonban van egy elvi probléma is, újra érdemes azon gondolkodni, mi végülis a gázállandó? A gázállandó ( $R$ ) a gázhőmérséklet, a Kelvin-skála szülötte. A gáz mért  $PV$  szorzata (a moláris kinetikus energia) a Cel-

sius hőmérsékletskálával jó közelítéssel párhuzamosnak bizonyult, így a Celsius-skála módosításával született a Kelvin-skála ( $T$ ). Ez a hőmérséklet arányos a gáz  $PV$  energiájával, az arányossági szorzó az  $R$  gázállandó (J/Kmol) lett. És semmi több.

$$PV = RT. \quad (16)$$

Mint sok hasonló arányossági szorzó,  $R$  nem önálló fizikai mennyiség, a hőmérséklet nélkül nincs értelmes funkciója, és más fajta kapcsolatait semmi sem indokolja. Nincs értelme például az  $R \ln x$  mennyiségben. Semmi sem indokolja a szorzást a  $H_B$  függvénnyel ( $RS$ ).<sup>12</sup> Merész következtetés: az  $R$  mennyiséget csak  $T$  hőmérséklettel együtt használjuk! Amikor Planck a dimenziómentes  $S$  entrópiát szorozta a gázállandóval, azt energiaszorzattá „öltöztette” az energiamérleg kedvéért. Még súlyosabb a probléma a Boltzmann-állandóval. Ma már tudjuk, hogy a hőmérséklet ( $RT$ ) az exponenciális energiaeloszlás meredeksége, és egyetlen részecskének, egyetlen tömegpontnak nincs hőmérséklete(!). A sűrűn előforduló  $k_B T$  szorzat ( $1/\beta$  helyett), ilyen formában „problémás”. Ez valójában egyetlen részecske kinetikus energiája (Leff: tempergia,  $\tau$ ), hőmérsékletnek itt nincs keresnivalója.

Az elmondottakból kiderül, hogy a termikus rendszerek, a termodinamika megértését egy csoport „problémás” mennyiség gátolja, immár több, mint száz év óta:  $TS_{Cl}$ ,  $RS$ ,  $k_B H_B$ ,  $U/T$ ,  $\delta Q/T$ ,  $R \ln x$ ,  $\mu/T$ ,  $PV/T$ .

„Nem problémás” ezzel szemben:  $RT$ ,  $RTS$ ,  $U/RT$ ,  $RT \ln x$ ,  $PV/RT$ ,  $\mu/RT$ .

A probléma abból származik, hogy egyes fizikai mennyiségek, így a hőmérséklet („Kelvin”), vagy a gázállandó (J/K) egy adott kapcsolatban születtek, ezt a kapcsolatot szétbontani, más kapcsolatokba bevinni „problémás” lehet, annak ellenére, hogy azt a matematikai szabályok engedik.  $R$  és  $T$  kapcsolata büntetlenül nem bontható. Akár  $R$ , akár  $T$  másfajta kapcsolata nehezen vagy egyáltalán nem értelmezhető fogalmakat, állításokat eredményez.

Bár az alapegyenlet, Gibbs energiamérlege kiállta a tapasztalat kontrolljait, eredeti változata a két új mennyiség, az entrópia és a kémiai potenciál definíciója a megértést nem tette könnyűvé. (Az utóbbi egy külön történet lehetne.) Bár a problémák újra és újra felmerültek, a mérlegegyenlet eredeti formája és az eredeti értelmezések mindmáig érintetlenséget, védettséget élveztek. Ez kötötte meg Max Planck kezét is. A merev hagyománytisztelet nem minden tudományterületre jellemző. Idézzük ismét Clifford Truesdell [6]:<sup>13</sup> „A tizenhetedik és tizennyolcadik század-

<sup>12</sup> A  $h_p$  Planck-állandó a fotonenergiát kapcsolja össze a fény frekvenciájával. Dimenziója nem egyszerűen energia szorozva idővel, helyesebb: fotonenergia per fényfrekvencia. Nincs értelme más frekvenciákra, például szívdobogásra alkalmazni és más fajta energiákat sem értelmes a Planck-állandóval osztani.

<sup>13</sup> „In the seventeenth and eighteenth centuries, mathematical theories of mechanics were created, studied, applied, and reformulated again and again. As a result, mechanics became more precise, briefer, easier to learn, and more widely applicable.”

<sup>11</sup> Hasonló problémával másutt is találkozunk már, gondoljunk a részecske-hullám dualizmusra.

ban a mechanika matematikai elméleteit újra és újra alkották, vizsgálták, alkalmazták, átalakították. Ennek eredményeként a mechanika precízebb, rövidebb, könnyebben megtanulható és tágabban alkalmazható lett.” Nem úgy a termodinamika.

Ennek a termodinamikában is elérkezett az ideje. Erről szól majd a második rész.

#### Irodalom

1. Harvey S. Leff: What if entropy were dimensionless? *Am. J. Phys.* 67(1999) 1114–1121.
2. Clausius, R., *Annalen der Physik und Chemie* CXXV(1965) 390.
3. Gibbs, J. W.: *The scientific papers of Willard Gibbs*. Dover, New York, 1961.
4. IUPAC-IFCC Terminology PAC. 68 (1996) Recommendations. 972.
5. Atkins, P. W.: *Physical Chemistry*. Oxford Univ. Press, 1990.
6. Truesdell, C.: *Rational Thermodynamics*. McGraw, 1969.
7. Truesdell, C.: *Tragicomedy of the Classical Thermodynamics*. Springer, 1971.
8. Leff, H. S.: Thermodynamic entropy: the spreading and sharing of energy. *Am. J. Phys.* 64(1996) 1261–1271.
9. Fényes Imre: A termodinamika fejlődésének áttekintése. – előadás, 1955. dec. 9. Szakosztályi füzetek (TTTT), Fizikai kémia.
10. Boltzmann, L.: *Lectures on Gas Theory*. Barth, Leipzig, 1896.
11. Dirac, P. A. M., *Proc. Roy. Soc.: 106 A* (1924) 581–596.
12. Planck M.: *The Theory of Heat Radiation*. Dover, New York (1991) 172–173, eredeti: (1901) 216.
13. Lavenda, B. H.: *Statistical Physics: „A probabilistic Approach”*. Wiley (1991) 14–15.
14. Lavenda, B. H.: What is entropy? *Il Nuovo Cimento B* 110(1995) 433–439.
15. Harvey S. L.: Thermodynamic entropy: The spreading and sharing of energy. *Am. J. Phys.* 64(1996) 1261–1271.
16. Baierlein, R.: Entropy and the second law. *Am. J. Phys.* 62 (1994) 15–26.

## NEUTRÍNÓ – ÁLTUDOMÁNY?

A *Fizikai Szemle* 2012/5 számában (két további szerzőtársunkkal) [1] bemutattuk a neutrínó sebességének mérésére vonatkozó OPERA-kísérletet, amely előbb fénynél gyorsabb neutrínókról számolt be, majd néhány hónap múlva visszavonta eredményeit, mert hibát találtak az időmérésben. Cikkünk befejezéseként amellet érveltünk, hogy bár a mérés hibásnak bizonyult, mégis előremutató hatással volt a fizika fejlődésére. Cikkünket követően *Patkós András* megírta véleményét *Neutrínó – Áltudomány* címmel [2]. Kifejtette, hogy a kísérlet vezetői helytelenül jártak el amikor olyan kísérleti eredményt tettek közzé, amely nyilvánvalóan hibás volt, hiszen alapvető elméleti megfontolásoknak mond ellen. Jelen írásunkban szeretnénk vitába szállni e véleménnyel, és megerősíteni, hogy nem volt szó volt áltudományról, annak ellenére, hogy az események utólagos ismeretében valóban felmerülhet a gyanú, hogy a kísérlet résztvevői nem végeztek el minden ellenőrzést az esetleges hibák kiszűréséhez.

Az OPERA-kísérlet előtt már történtek próbálkozások a neutrínó sebességének mérésére. Cikkünkben is beszámoltunk a MINOS-kísérletről, amely ugyan fénynél gyorsabb neutrínósebességet mért, de a mérés szisztematikus bizonytalansága olyan nagy volt, hogy fénysebességnél gyorsabb neutrínókra vonatkozó állításuk nem lehetett szignifikáns. Az OPERA-kísérletben gondosan végigelemezték, hogyan lehet a MINOS-kísérletet úgy megismételni, hogy a szisztematikus hibát minden lehetséges módon csökkentsék. Valóban sikerült is szellemes megoldásokkal jelentősen (közel tizedére!) csökkenteni a szisztematikus hibát, és így a mérés pontosságát jelentősen javítani. Minthogy a tudományos felfedezéseket a méréseink pontosságát célzó technikai fejlesztések teszik lehetővé, az OPERA mérését semmiképpen nem nevezhetjük áltudománynak.

Az OPERA-kísérlet kiértékelése vakon történt. A korszerű részecskefizikai kísérletek e nagyon lényeges feltevése azt jelenti, hogy a szisztematikus bizonytalanságokat – igazi mérési adatok nélkül – a legapróbb részletekig kidolgozzák. A OPERA-kísérletben részt vevők – bizonyosok lévén szisztematikájukban – az adatok gyűjtése után rögtön közölték az eredményt, még ha az ellent is mondott az elméleteknek. Gondoljunk bele: ha nem így tennénk, akkor nem tehetnénk olyan új felfedezést, amely a már ismert elméletek érvényességének határait feszegeti. A kísérletező feladata éppen az, hogy eddigi ismereteinket megkérdőjelezve, saját mérésének pontosságát tárgyilagosan, a lehető legjobban meghatározva adjon új mérési eredményeket. Az OPERA ezt tette, de sajnálatos módon elcsúsztak egy banánhéjon. Talán elfogadhatjuk azt a kritikát, hogy igazán nagyszabású eredmények különlegesen gondos ellenőrzést kívánnak. Ugyanakkor az is tény, hogy a bejelentés készítette az ICARUS-kísérletet a mérés megismétlésére, és az ő negatív eredményük után az OPERA gyorsan megtalálta a hibát, amit nyilvánosan el is ismertek. Ez utóbbi mozzanat nem jellemző az áltudomány terjesztőire.

Vajon veszített-e a tudomány bármit az OPERA-bejelentést követő gondolatviharban? Bizonyosan állíthatjuk, hogy nem. Születtek ugyan kétes értékű munkák nagy számban, azonban ezek szinte nyomtalanul tűntek el, a hivatalos bírálatot követően többségük nem jelent meg szakmai folyóiratokban. Ugyanakkor születtek érdekes gondolatok, amelyek kiállták a kételkedő kérdezők próbáját, megjelentek nyomtatásban, és gazdagították a fizikát.

A Standard Modellen (SM) túlmutató elméleti elképzelések nagy része úgy próbált magyarázatot adni a fénynél gyorsabb neutrínókra, hogy közben ne sértse a Lorentz-szimmetriát – legalábbis ne a Coleman–Glashow-cikkben [3] megfogalmazott közvetlen módon –, és ezzel kerülje meg a Cohen–Glashow-közle-