

kú 4 μm végátmérővel. Az összenyomás közben az alkalmazott erőt tudjuk vezérelni. Az összenyomófej alá a CCD-kamerával beállított pillárokkal számos kísérletet kellett elvégeztünk mire hosszan tartó tökéletesítések után az első sikeres összenyomást el tudtuk végezni. Az így kapott görbéken jól definiált lépcsőket sikerült megfigyelni. Tipikus erő-összenyomódás görbék láthatók a 6. *ábrán*.

A 7. *ábra* fölül egy tipikus összenyomott pillárt mutat. Jól látható, hogy a felületen lépcsők jelentek meg. A 7. *ábra* alul az 5. *ábrán* látható pillárok összenyomás utáni képeit mutatja. Annak megfelelően, hogy az erő-deformáció görbék lényegesen különböznek, a pillárok deformáció utáni alakja is nagyon eltér.

Több kísérletet elvégezve, majd kiszámítva az azonos erőhöz tartozó deformációk átlagát már sima görbét kapunk (6. *ábra*). Ez azt mutatja, hogy a lépcsők valóban véletlenszerűen jelennek meg. A szimulációs eredményekhez hasonlóan (3. *ábra*) itt is megfigyelhető egy viszonylag jól definiált töréspont az átlagos görbén, amely a deformációs folyamatot két szakaszra osztja.

Összefoglalás

Megállapítható, hogy mind a számítógépes diszkrét diszlokációdinamikai szimulációk, mind a kísérleti eredmények azt mutatják, hogy statisztikus értelemben a mikronos méretű mintákon is definiálható egy karakterisztikus feszültségérték, amely a makroszkopikus mintákon mérhető folyáshatárral rokon mennyiség. Fontos azonban kiemelni, hogy ez a karakterisztikus feszültség nem azt jelenti, hogy ennél kisebb feszültsé-

nél semmilyen mintán nem jelenhet meg nagy marandó alakváltozás. Ugyanakkor a feszültség értéke az adott mintasorozat „szilárdságát méri”. Ahhoz tehát, hogy a mikron méretű objektumok mechanikai tulajdonságait jellemezni tudjuk egyetlen mérés nem elegendő, mivel csak mintasokaságra érvényes statisztikus tulajdonságok állapíthatók meg. Ez a felismerés paradigmaváltást jelent a kristályos anyagok deformációs tulajdonságainak vizsgálatában. A számítógépek által vizsgált tartomány és a kísérleti méretek egyre nagyobb átfedésével új kutatási terület nyílik a mikro- és nanomechanika, valamint a nanoelektronika felé, amely már a jelen és még inkább a jövő technológiája.

Irodalom

1. <http://dislocation.elte.hu>
2. I. Groma: Link between the microscopic and mesoscopic length-scale description of the collective behavior of dislocations. *Phys. Rev. B* 56 (1997) 5807–5813.
3. I. Groma, F. F. Csikor, M. Zaiser: Spatial correlations and higher-order gradient terms in a continuum description of dislocation dynamics. *Acta Mater.* 51 (2003) 1271–1281.
4. I. Groma, G. Györgyi, B. Kocsis: Debye Screening of dislocations. *Phys. Rev. Lett.* 96 (2006) 165503.
5. P. D. Ispánovity, I. Groma, G. Györgyi, P. Szabó, W. Hoffelner: Criticality of Relaxation in Dislocation Systems. *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 085506.
6. Kovács István, Zsoldos Lehel: *Diszlokációk és képlékeny alakváltozás*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
7. D. M. Dimiduk, C. Woodward, R. LeSar, M. D. Uchic: Scale-free intermittent flow in crystal plasticity. *Science* 312 (2006) 1188–1190.
8. P. D. Ispanovity, I. Groma, G. Györgyi, F. F. Csikor, D. Weygand: Submicron Plasticity: Yield Stress, Dislocation Avalanches, and Velocity Distribution. *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 085503.
9. Havancsák K., Lendvai J.: Nagyfelbontású pásztázó elektronmikroszkóp az Eötvös Egyetemen. *Fizikai Szemle* 61/10 (2011) 339–343.

ÉBREDJ, MERT JÖN A FEKETE ENTRÓPIA!

Martinás Katalin, ELTE TTK Fizikai Intézet
Huller Ágoston festőművész

Fizikus: Műtermedben, az ajtóval szemközti fal bal sarkában található pasztell képnek azt a címet adtad, hogy *Ébredj, mert jön a fekete entrópia!* Nem tartod különösnek, ha művész a természettudományok fogalomtárából kölcsönöz címet valót? Egyáltalán, mi indított az említett kép címadására?

Festő: Beszélgetéseink e témáról. Ahogyan Te bővítetted az ismereteidet a művészeti élményeiddel, hasonlóképp fordulok jómagam a természettudományok felé. Persze nem mint szakember, hanem csak mint érdeklődő. Egy idő elteltével rá kell döbbernem, hogy Te is, Én is ugyanannak a problémának vagyunk rabjai, a világ megismerhetőségének. Amiben különbözünk az a megfogalmazás nyelvezete.

Bevallom, hogy számomra az entrópiatörvény nagyon pesszimista. A természet egyirányúsága a romlás szinonimája. Az entrópia növekedése is azt jelenti, hogy életminőségünk egyre rosszabb lesz?

Fizikus: Nem.

Festő: Lehetne részletesebben?

Fizikus: Kezdjük az elején. Örülök, hogy érdeklődsz az entrópia iránt.

Már mintegy ötven éve, hogy *Snow A két kultúrában* azt írta, hogy a termodinamika II. főtétele legalább annyira az emberi kultúra fontos eleme, mint *Shakespeare*. Ugyanakkor nem tekinthető civilizált embernek az, aki nem ismeri Shakespeare-t. Viszont az entrópiát, a termodinamika II. főtétele csak kevesen ismerik (azóta is). Hogy érezzük a hasonlat mélységét, tudomásul kell vennünk, hogy Shakespeare az örök emberi tapasztalatokat összegzi műveiben. És a második főtétel? Ugyanezt teszi, képlettel elbeszélve. Shakespeare-t sokan ismerik. De azért ma már sokan ismerik – ha csak közvetetten is – az *entrópia* szót is. Generációnk – a hatvannyolcasok – amerikai irodalmában az entrópia a hanyatlás, a romlás szinonimája.

A posztmodern írók, mint *Pynchon*, *Barthelme* vagy *Vonnegut* és mások gondolatvilágának meghatározó eleme.

Festő: Igen, náluk is megfogalmazódik, hogy az entrópia növekedése a rend eltűnése, a rendetlenség növekedése. Az entrópia a hanyatlás, a romlás. Ez valós tapasztalat!

Fizikus: Gondold végig mit is állítottál. A rendetlenség olyan cselekvéssorok következménye amelyeket naponta átélünk és gondolnád-e, hogy a rendetlenség a rend fogalmából következik? A könyveidet a polcon meghatározott rend szerint csoportosítod. Mégis előfordul, hogy egy elővett könyvet a renddel nem törődve rakod vissza más helyre. Több az olyan lehetőség, amely a rendetlenség forrása, de csak egy az olyan, amely a rendé. A mi rend-rendetlenség megkülönböztetésünk a természet számára közömbös.

Festő: Beszéltél a rend fogalmáról és arról, hogy e fogalom mit fed le. Tehát létezik lehetőség a rendnek a szubjektumtól független jellemzésére, ha jól szeretném sejtjem: mérésére. Ez az entrópia?

Fizikus: Nem.

Festő: Ha nem a rendetlenség mértéke, akkor mi az entrópia? Először maga a szó jelentése kell. Entrópia? Megnéztem a görög szótárt, nincs benne.

Fizikus: *Clausius* kreálta a szót. $\epsilon\nu + \tau\rho\pi$, ami annyit jelent, hogy belső és változás. Az entrópiánövekedést *Farkas Gyula*, Kolozsvárott dolgozó fizikus a 19. század végén a változások mértékének nevezte magyarul.

Festő: Az entrópia a megtörtént változásokat méri, ezért mindig nő. Minden változás növeli az entrópiát. Eddig értem, csak azt nem értem, hogy mi az entrópia.

Fizikus: Köszönöm a kérdést! Diák éveid alatt vajon hányszor hallottad ezt a mondatot: *a hő nem megy magától melegebb helyre?*

Festő: Sokszor...

Fizikus: Ez a termodinamika II. főtétele. A jelentése világos?

Festő: Ha a hűtőszekrényemre nézek, akkor arra kell gondolnom, hogy amikor megfogalmazták a II. főtételel ebben a formában, akkor még nem volt hűtőszekrény. *Clausius* még nem ismerhette.

Fizikus: Magától hűt a hűtőszekrény?

Festő: Bekapcsolom, és utána automatikusan. Azaz magától szabályozza a hőmérsékletet.

Fizikus: Csakhogy ott a hő nem magától megy a hidegebb helyről a melegebb felé, hanem az elektromos áram munkavégzése révén. Jegyezzük meg, hogy a II. főtétele csak az olyan hűtőszekrényt tiltja le, amely önmagától működik...

Festő: ...mint a perpetuum mobile. A perpetuum mobile lehetetlensége az áram nélkül üzemelő hűtőszekrény lehetetlensége. Értem, de hogy lesz ebből entrópia?

Fizikus: Hogyan lett, talán ez a helyesebb megfogalmazás. *Galilei* elkészítette az első hőmérőt 1600-ban, ettől kezdve nagyon sok tudós hozzájárulása kellett a törvény matematikai megfogalmazásához. *Newton*, *Black*, *Lavoisier*, *Carnot*, *Joule*, *Helmholtz*, *Kel-*

vin és *Clausius* hogy csak néhány nevet említsek. *Clausius* vezette be az entrópia fogalmát és megmutatta, hogy a II. főtétele és az entrópia növekedése ugyanannak a jelenségnek különböző megfogalmazása. Az entropikus megfogalmazás pedig azért jó, mert segítségével mérhető összefüggésekhez jutunk.

Festő: Ez magyarázat volt?

Fizikus: Részben! De folytatom. *Clausius* eredménye az volt, hogy minden reálisan létező dologhoz (rendszerhez) objektíven hozzárendelhetünk egy számot (amelynek mértékegysége Joule/Kelvin). A fizika megadja azokat a szabályokat, amelyekkel ez a szám konkrét rendszerre kiszámítható.

Festő: Az én entrópiám is meghatározható? Mennyi?

Fizikus: Elvileg pontosan is meghatározható, de hiányoznak hozzá az adatok, és túl sok munka kellene hozzá.

Festő: És ahogy öregszem, úgy nő az entrópiám?

Fizikus: Az entrópiád állandóan nő, de állandóan csökken is. Amikor hőt adsz le, vagy izzadsz, akkor csökkented az entrópiádat.

Festő: Akkor mi a jelentése az entrópiámnak? Hogyan van bennem?

Fizikus: Mint a szépség a képben. Az egészre jellemző.

Festő: Mint a hőmérséklet is. Amelynek mértékegységeit hosszú, kísérleti tapasztalatok alapján állapították meg.

Fizikus: Ami a *hőmérsékletet* illeti, a hőmérsékleti skálát annak figyelembevételével határozták meg, hogy a magasabb hőmérsékletű test ad át hőt az alacsonyabb hőmérsékletű testnek. A *hő* pedig az a mennyiség, amely átmegy a magasabb hőmérsékletű testről az alacsonyabb hőmérsékletű testre.

Festő: Ez a definíció már tartalmazza a II. főtételel és ez tautológia! A II. főtétele triviálisan igaz, ha már a hőmérséklet mérésében benne van.

Fizikus: Igazad van! A posztulátum lényegében azt mondja ki, hogy lehet hőmérőt készíteni. Ha nem lenne igaz, akkor értelmetlen lenne a definíció. Maga a hőmérő létezése és a definíció értelmessége következik a természeti folyamatok egyirányúságából.

Festő: *Hérakleitoszra* gondolsz, aki szerint kétszer nem léphetsz ugyanabba a folyóba? Neki ezt a tapasztalat súgta. Ezért, ahogy most pontosítottad a II. főtételel, az tényleg nagyon igaz. A világ nem mehet vissza ugyanabba az állapotba. Ez a törvény tehát azt jelenti, hogy minden különbség eltűnik...?

Fizikus: Igen!

Festő: De ez csak a fizikában igaz. A képeim folyamatos változásokon mennek át az elkészülésükig. A világunkra is a folyamatos változás a jellemző. A biológiai evolúció, a gazdasági fejlődés azt mutatják, hogy újabb és újabb struktúrák alakulnak ki és eközben a különbségek is nőnek.

Fizikus: A posztulátum nem így igaz a fizikában sem. A különbségek csak izolált (mindentől elzárt) rendszerben tűnnek el. Például, ha a hűtőszekrény működik, a hő a hidegebb helyről (a hűtőszekrényből) megy a melegebb helyre (a konyhába).



Huller Ágoston: Ébredj, mert jön a fekete entrópia!

let-különbség nem nőhet, hiszen például eltűnik a nyomáskülönbség és a feszültségkülönbség is.

Fizikus: Valóban! És ez a II. főtételből következik. Gondolatkísérlettel könnyen igazolhatjuk, hogy a nyomáskülönbség spontán megjelenése esetén szerkeszthetnénk egy olyan gépet, amelynek az lenne a jellemzője, hogy a hő a hidegebb helyről a melegebb helyre megy. De ha a hő nem mehet magától a melegebb helyre, akkor a nyomáskülönbség sem nőhet magától.

Festő: De mégsem tetszik a II. főtétel megfogalmazása. Nem úgy hangzik, mint egy komoly természettörvény! Ezzel az erővel posztulálhatnánk azt is, hogy „Lefelé folyik a Tisza, nem folyik az többé vissza”, vagy hogy a nehéz testek leesnek, pedig a lefelé való mozgás a gravitáció következménye.

A kérdésem pedig arra vonatkozik, hogy két hasonló tapasztalat megfogalmazása közben két teljesen különböző fizikai kép keletkezik? Az egyiket az entrópia növekedésével társítjátok, a másikat pedig a gravitáció törvényével? Ezek szerint minden új jelenséghez új fizika járul!

Fizikus: A kérdés jó, a válasz nem! Ugyanazt a jelenséget többféle fizikai elmélettel is tárgyalhatjuk. Ha csak a mechanikai mozgásra vagyok kíváncsi, akkor azt a gravitációval írom le. Elhanyagoljuk vagy apránként építjük be a súrlódást, a közegellenállást, a felhajtó erőt. Viszont a másik

A posztulátum csak az *izolált* rendszerekre mondja ki a különbség eltűnését. A nyílt rendszerek változása a külső és a belső feltételektől függ. A hetvenes évektől kezdve óriási változáson ment át a struktúrák kialakulásának, önszerveződésének a vizsgálata. *Prigogine* munkássága óta már felismertük, hogy a *II. főtétel a nyílt, egyensúlytól távoli rendszerekben nem tiltja, hanem megköveteli a struktúrák kialakulását, létezését*. Egyszerűbb modellrendszerekben már értjük is a szerveződés megjelenését.

Festő: Jelen beszélgetésünk keretei között kevesnek érezhetem a posztulátumot, ha *csak* a hőmérsék-

leírásban ezeket mindig jelenlevőknek és fontosnak tekintjük. Történelmi (tudománytörténeti) oka van annak, hogy a II. főtétel kimondása a hő tulajdonságaival történt. Talán azért, mert a hőt nem lehetett és nem lehet a mechanikai szemlélettel teljesen értelmezni.

Festő: A II. főtételt nem levezetjük, hanem a korlátozott tapasztalataink alapján mondjuk ki. Soha eddig nem tapasztaltuk azt, hogy hő magától menne alacsonyabb hőmérsékletről magasabb hőmérsékletre, de kimondhatjuk-e, hogy ilyen sohasem történhet meg.

A történelem során gyakran megtörtént, hogy kimondtunk törvényeket amelyekről később kiderült,

hogy nem is azok. Tudásom szerint a francia Akadémia mondta ki a perpetuum mobile lehetetlenségét, a több neves akadémia tagságával rendelkező *Newcomb* állította, hogy a levegőnél nehezebb tárgy nem emelkedhet a levegőbe. Ennek alapján nem jelenthető-e ki, hogy az ember előtt nincs lehetetlen? Ha a repülőgép felemelkedhet a földről akkor egy zseniális felfedező vajon megépítheti majd a perpetuum mobilét is...

Fizikus: ...amely az ember örök vágyálma. Sajnos azt kell mondanom, hogy a perpetuum mobile építők nem túl sokat, hanem túl keveset tudnak. Általában kihagynak valamit a számításból, vagy rosszul tudják az elméletet.

Festő: Igen, ez a konzervatív tudósok véleménye.

Fizikus: Igen, egy számítás csak hibás lehet, ha a végeredmény sérti az alapelvet, amelyen a számítás alapszik. Rengeteg perpetuum mobilével találkoztam, és mindegyik számítási hiba eredménye volt.

De térjünk vissza a II. főtételhez, amely nemcsak egy egyszerű törvény, hanem világunk kormányzó elve. Rendezi a folyamatokat, megadja az irányokat.

Ennél a gondolatnál érdemes megpihenni, elábrándozni egy olyan világról, amelyben nem létezik a II. főtétel. Ahol, ha vacsorát készítenék, nem kellene használnom a gáztűzhelyt, mert magától is megfőhet az étel, de főznöm sem kellene, hisz a szervezetem reverzibilisen működne és emiatt a táplálékban rejlő energiára sem lenne szükségem. Ha pedig nem kellennem, az talán az elképzelhető mennyország, de sajnos... idegen a földi világunktól, amely határokat szab az álmodozásunknak.

Festő: Álmodozni a művész, a költő álmodozhat.

Fizikus: A természettörvények nem az álmok eredményei. A triviálisan igaz megfigyelésből azáltal lesz természettörvény, hogy a meg nem vizsgált esetekre is érvényesnek mondjuk ki. Például az irreverzibilitás posztulálása nem banalitás, hanem egy új, newtoni fizikai elmélet megalkotása. Univerzális elvként lehet és kell a különbségek csökkentését elfogadni. Ez Clausius posztulátumának tartalma, amely ellentétben áll a newtoni fizika reverzibilitásával.

De félreértés ne essék! A termodinamika nincs elmentmondásban a mechanikával, csak a mechanikailag lehetséges folyamatok közül kizárja azokat, amelyekben a különbségek nőnének. A termodinamika ezért a mechanikától eltérően nem normatív, hanem regulatív, nem prediktív vagy deskriptív, hanem restriktív tudomány. Csak a *lehetetlent* tiltja le. A főtételeknek van olyan megfogalmazásuk is, amelyekben mindegyik úgy kezdődik, hogy „lehetetlen”. A posztulátum tartalma az, hogy a mechanikában elképzelhető folyamatok durván két csoportra oszthatók: valóságos (lehetséges vagy más néven természetes) folyamatokra és lehetetlen (természetellenes, nem létező) folyamatokra. A lehetetlen folyamatokat az jellemezné, hogy általuk például a hőmérséklet-különbségek maguktól nőnének. A hétköznapi tapasztalatunk az, hogy ilyen folyamatok nem léteznek. Ezen tapasztalatok összefoglalása a posztulátum, és kimondására a matematikai keretek kidolgozása miatt van szükség.

Festő: Ezt értelmezem úgy, hogy a clausiusi posztulátum egy *pesszimista* posztulátum? Ha a hőmérséklet-különbség egy magára hagyott rendszerben mindig csökken, akkor egy idő múlva minden különbség eltűnik? Hogyan is mondjam... meghal a rendszer?

Fizikus: Valóban! És ezt a végső állapotot nevezik *bőbalálnak*. Csakhogy a Földünk nem magára hagyott rendszer. A Nap és a világűr között helyezkedik el. Tehát a változások állandóak. A Földön, amíg süti a Nap, nem kell tartanunk a hőhaláltól. A hőmérséklet-különbségek pedig állandóan keletkeznek és eltűnnek.

Festő: Miért jó az számunkra, ha elfogadjuk általános természettörvénynek a hőmérséklet-kiegyenlítődést? Származik-e ebből hasznunk? Igaz-e, hogy aki ezt nem tudja, az fontos dolgot nem tud? Ténylegesen értékelni lehet vele a természeti korlátokat?

Fizikus: Ez a legrobusztusabb természettörvényünk, minden cselekedetünket meghatározza, mert megszabja a változások, folyamatok irányát és lehetőségét. Vegyük számításba, hogy *az emberi tevékenységnek mindig van egy termodinamikai aspektusa is. Egy fenntartható társadalomban a jövő generáció számára is biztosítani kell az erőforrások elérhetőségét és az ökoszféra produkciós, valamint asszimilációs kapacitását.* Eközben sem a teljes természeti tőkét, sem annak változását nem tudjuk pontosan meghatározni. A különböző fizikai jellemzők aggregálható mérőszámokat adnak, amelyek a természeti tőkének, illetve változásának csak egy-egy aspektusát jellemezhetik. A posztulátum kimondása teszi lehetővé az irreverzibilis jelenségek megértését és matematikai elméletének kidolgozását, ami egyszerűsíti annak tárgyalását, illetőleg mérhetővé – számszerűsíthetővé – teszi a természeti korlátokat.

Festő: Ez jó, de nem válasz a kérdésemre. Eszembe jutott, egy versrészlet: József Attila-i gyöngyszem 1925-ből, (*Keserű*).

„Kár, kár miértünk is.

de éljenek a köszörűs inasok, akik füttyörésznek és nem tudják, hogy az égbolt fejünk fölül elvitorlázott a pénztárcánkba.”

Régebben számomra ez a vers az eltékozolható vagy a már eltékozott hiányát énekelte meg. Most újraolvastva nem tudok szabadulni az ózonlyuk és a klímaváltozás asszociációtól. Szükséges rossz a környezetünk tönkretétele? Az entrópiatörvény még mindig ezt sugallja nekem. Meg kellene megszabadulni az entrópiától?

Fizikus: Nem az entrópiától kell megszabadulni. Az magától megtörténik. Ahogy te hőként leadod a termelt entrópiát, a Föld is lead állandóan entrópiát. A kisugárzott hő viszi magával.

Az entrópia nem anyag, inkább formai jellemző, a már végbement változásokat méri.

Festő: Most már három kérdésem is van. Miért hívod termodinamikának ezt a fizikai diszciplinát, hiszen nem csak a név által sugallt hővel, hanem tulajdonképpen minden természeti jelenséggel foglalkozik.

A másik, ha az entrópia számértéke nem határozható meg, és nem is jelent semmit önmagában, akkor miért is beszélünk róla?

Az ember számára a változások lehetősége a fontos, miért nem azt méri a fizika?

Fizikus: A termodinamika szónak történelmi magyarázata van. A technikai fejlődés csúcsát a 18. század végén a 19. század elején a gőzgép jelentette. A termodinamika kialakulásában alapvető fontossága volt a termikus jelenségek magyarázatának. Helytelen azonban hőtanak fordítani. A termodinamika nemcsak a termikus folyamatokkal foglalkozik. Helyesebbnek tűnik az irreverzibilis folyamatok megközelítés. Az eltűnő különbségek irreverzibilitást jelentenek, hiszen az ellenkező folyamat, a növekvő különbségek megjelenése magától nem mehet végbe. A valóságos, emberléptékű folyamatok mind irreverzibilisek. Csak a gondolat kísérletek lehetnek reverzibilisek.

A második kérdésre az a válasz, hogy a szaktudományokban (fizika, kémia) nagyon hatékony fogalom, és van, amikor kiszámítható. A kémiai szakkönyvekben megtalálod az egyes anyagok entrópiáját.

A harmadik kérdésre a válaszom: az entrópiafogalom úgy született, hogy Clausius egy matematikai formulának nevet adott. Kérdésed lényegében azt firtatja, hogy ez az egyetlen olyan matematikai formula, ami használható.

Tényleg nincs egy jobban érthető, használható megfogalmazás? Ha Clausius rendelte az entrópiát jellemzőként a rendszerekhez, nem lehet más jellemzőt találni?

Festő: Igen, ez az.

Fizikus: Egy másik 19. századi termodinamikus, Kelvin másik megfogalmazást javasolt.

Festő: A Kelvin-skála névadója?

Fizikus: Igen.

Festő: Mit javasolt?

Fizikus: Nehéz lenne röviden elmondani, mert a termodinamikai fogalmak akkoriban alakultak ki, ezért most más jelentenek a szavak, mint akkor. Részletesebb leírását a honlapomra (martinas.web.elte.hu) is feltettem. A mai nyelven megfogalmazva a lényege az, hogy az entrópia helyett más mennyiség is használható, például az extrópia, amely a lehetséges változások mértéke.

Festő: Mi az extrópia?

Fizikus: Először izolált rendszerre mondom el. Az izolált rendszer entrópiája legyen S , és az egyensúlyi állapotában az entrópia legyen S_0 !

A természet törvénye szerint S nő, egész addig, amíg el nem érjük az egyensúlyi állapotot.

Legyen Π az extrópia, a két entrópia különbsége: $\Pi = S_0 - S$! Ez is egy jól definiált mennyiség, de a jelentése más.

Míg az entrópia az elmúlt, a már végbement változásokat méri, addig az extrópia a jövőbeni változásokat, a lehetőségeket. Ha egy rendszer egyensúlyban van, akkor extrópiája zérus. Minél nagyobb az eltérés, a nem-egyensúlyosság, a lehetőség a változásra, annál nagyobb az extrópia.

Festő: Korábban azt mondtad, hogy az entrópia számértékét nem érdemes meghatározni, mert annyi adat kell hozzá, hogy szinte lehetetlen. Most megkérteszted a nehézséget.

Fizikus: Igazad van és izolált rendszerekre valóban nem érdemes az extrópiát használni, de a nyílt rendszereknek nagy részénél már igen.

Festő: Nyílt rendszer az, ami mással is kölcsönható.

Fizikus: A földi rendszerek mind nyílt rendszerek, izolált rendszerek csak a tankönyvekben léteznek. Most egy trükköt alkalmazunk: a valódi környezetet gondolatban szétosztjuk egy *tartályra* (reservoirra) és *rendszerekre*. Például, ha az asztalon lévő pohár vizet nézem, akkor a szobát egy állandó hőmérsékletű, állandó nyomású tartályként jellemzem, és az eltéréseket pedig rendszerként tekintem. A pohár vizet először úgy írom le, hogy csak a szoba, mint tartály lesz a környezete. Később, természetesen a kölcsönhatások is tárgyalhatók lesznek.

Festő: A pohár víz és a szoba-tartály most viszont egy izolált rendszer.

Fizikus: Erre az izolált rendszerre írjuk fel most az extrópiát.

Festő: Most már négy ismeretlen entrópiánk lesz? Meddig folytatod?

Fizikus: Szerencsére itt megállhatunk, és a számérték meghatározásához nem kell kiszámítani az entrópiákat. Közvetlenül mérhető mennyiségekből meghatározható.

Festő: Mondanál egy példát?

Fizikus: Miért nem érdemes villannyal fűteni?

Festő: Mert drága!

Fizikus: És a fizika alá is támasztja, hogy jogosan drága!

–10 Celsius fokos külső hőmérséklet mellett 263 J villamos energia 1 J/K extrópiát jelent.

Ha –10 fokos külső hőmérséklet mellett 263 J hő adunk a 16 fokos szobának, akkor a szoba extrópiája 0,1 J/K-nel nő. Ugyanannyi energiát adunk a szobának, de más mennyiségű extrópiát.

Festő: Az energia megmarad, amivel gazdálkodni kell, az az extrópia. Tényleg kellemes mennyiség az extrópia.

Fizikus: Ha egy rendszer egyensúlyban van a környezetével, tehát nem különbözik tőle, akkor az extrópiája zérus. Minél nagyobb az eltérés, annál nagyobb az extrópia. A II. főtétel tartalma az is, hogy ha nem a lehetőségeinkkel élünk, akkor az extrópia magától is eltűnik, hisz Gaia csak egy bizonyos mennyiségű extrópiát bocsát rendelkezésünkre. Ha nem használjuk fel mind, akkor szegényebbek leszünk annál, mint amit lehetőségeink biztosítanak, ha pedig többet használunk fel – de ez csak rövid távon lehetséges – akkor a jövőnket fogyasztjuk, tehát a jövőben leszünk majd szegényebbek.

Amiről pedig most, a végén beszélek az nem ördögösség, és ha néhány képlet tartalmát is elsajátítod, nem fogod megbánni, hogy eddigi ismereteidet újabb megvilágítással egészítheted ki.

Egy rendszer extrópiáját csak a bejövő áramokkal növelheti, és ez más – extrópiával rendelkező – rendszerből származhat. A termodinamika II. főtételéből átfogalmazható: *egy rendszer csak befogad, megsemmisít vagy átalakít extrópiát. Egy rendszer nem képes spontán módon extrópiát termelni.* Az extrópiááramot egy másik rendszer biztosítja.

Festő: Azt mondtad, hogy az extrópia a rendszereket jellemzi, és meg tudjuk mondani, hogy például egy pohár víznek mennyi az extrópiája. Nem értem viszont, hogy mi az extrópiááram. Olyan, mint egy anyag, ami átmehet az egyik rendszerből a másikba?

Fizikus: Az első fele jó annak, amit mondtál, de a második nem. Ha a vizet beöntöd a kancsóba, akkor a víz beáramlik és magával viszi az extrópiáját. Hosszadalmas lenne mindig elmondani, hogy egy rendszer extrópiája csak úgy nőhet, hogy az anyag- és energiaáramok hatására a rendszer távolodik az egyensúlytól és így megnő az extrópiája.

Ez lehet „adomány”, amikor az input egy másik rendszer outputja. Például a Föld extrópiááramát a Naptól kapja. Az élőlények jellemzője viszont, hogy „megszerzik” a bemenetet, „megdolgoznak” érte. A farkas megszerzi az enniválóját, extrópiááramát. Az emberi lét feltétele az állandó extrópia-input, és ezért a bemenetért meg kell dolgozni.

Festő: Hogyan változik a Föld extrópiája és ennek milyen következményei vannak? Növekszik vagy csökken a Föld extrópiája az emberi tevékenység hatására?

Fizikus: Hajlamosak vagyunk arra, hogy a pesszimista jövőképünket a Föld entrópiájának növekedésével támasszuk alá. A Föld alatt most természetesen csak a Földnek az ember által hozzáférhető részét tekintjük.

A Föld felszíne másodpercenként és négyzetméterenként $240 (\pm 20)$ W energiát sugároz ki hosszú hullámon, ez az az energia, ami a Földi folyamatokat hajtja, A Nap sugárzási hőmérséklete 5704 K. A légkör sugárzási hőmérséklete 287 K.

Festő: Azt mondtad, hogy az extrópiát egy egyensúlyi környezetben számolod. Hol van a Földnek egy egyensúlyi környezete?

Fizikus: A világűr. Nekünk most csak a hőmérséklete kell, ami $2,7$ K.

A Napból ténylegesen átlagosan 342 W teljesítmény jön négyzetméterenként, ami így

$$\Pi = 342 \left(\frac{1}{2,7} - \frac{1}{5700} \right) = 130 \text{ W/m}^2\text{K}$$

extrópiabehozatalt jelent, de a sugárzás egy részét a Föld reflektálja ($102 \text{ W/m}^2\text{-t}$), így a ténylegesen bejövő extrópiááram

$$\Pi = 240 \left(\frac{1}{2,7} - \frac{1}{5700} \right) = 89 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

Festő: Ennyit kapunk, azaz ennyit fogyaszthatunk el?

Fizikus: Nem, a sugárzással bejövő energiától meg kell szabadulni, ezért a Földnek ki kell sugároznia, és

a kisugárzott energia másodpercenként 240 W/m^2 kell, hogy legyen. Ez a kisugárzás 287 K hőmérsékleten történik, ezért az extrópiája

$$\Pi = 240 \left(\frac{1}{2,7} - \frac{1}{287} \right) = 88 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

A különbséget, ami $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ a Föld kapja.

A Föld a napsugárzás hatására másodpercenként ennyivel távolodna el az egyensúlyi állapottól, ha nem lennének kiegyenlítődési folyamatok. Állandósult állapotban el kell fogyasztani a bejövő extrópiát. Ennek zömét a víz körforgása viszi el. A bioszféra 200 mW/m^2 energiát használ fel, ami $1 \text{ mW/m}^2\text{K}$ extrópiafelhasználást – az ezred részt – jelent.

Festő: Mi történik, ha nem használjuk fel?

Fizikus: Gaia, avagy a természet biztosítja, hogy az extrópiááramlás és -felhasználás megegyezzen. Ha kevesebbet használna fel a Föld, akkor extrópiája nőne, ez viszont az extrópiafelhasználás növekedését jelenti, és fordítva is igaz.

Festő: Térjünk vissza a fizikához. Mi történik, ha a Földön nem termelődik elég entrópia?

Fizikus: Ha $\Sigma < \Pi_{\text{eredő}}$, azaz az entrópiatermelés kisebb, mint az extrópiááram, akkor a teljes földi extrópia nő. Az extrópia növekedéssel együtt jár az entrópiatermelés növekedése. Az extrópia növekedése addig tart, amíg el nem érjük a $\Sigma = \Pi_{\text{eredő}}$ egyenlőséget. Amikor $\Sigma > \Pi_{\text{eredő}}$, akkor az entrópiatermelés nagyobb, mint az extrópiááram. A teljes földi extrópia csökkenni fog. Az extrópiacsökkenéssel együtt jár az entrópiatermelés csökkenése. Az extrópia fogyása addig tart, amíg újra el nem érjük a $\Sigma = \Pi_{\text{eredő}}$ egyenlőséget. Más szavakkal *extrópia nélkül, nem-egyensúlyi szerkezet hiányában nem lehetséges a Föld stacioner állapotban.* Gaia biztosítja az állandó entrópiatermelést, s így egy extrópiáértéket is. (A gondolatmenet természetesen csakis az állandó extrópiááram mellett érvényes!) Gaia azért hozta létre a nem-egyensúlyi rendszereket a Földön, hogy azok termeljék az entrópiát, és mindig biztosítja a megfelelő extrópiát. Ebben a vonatkoztatásban az emberiség feladata az, hogy entrópiát termeljen. De nem mindegy, hogy miből, mennyit és hogyan. Gaia számára nem vagyunk fontosak, emberiség, gazdaság nélkül is kialakul az entrópia termelését biztosító extrópia. Gaia lehetővé tette (és lehetővé teszi), hogy ezen entrópia-termelés-lehetőség egy részével mi gazdálkodjunk. Ki kell lesni Gaia titkát, milyen lehetőséget biztosít számunkra. Meg kell ismernünk, hogy Gaia mennyi extrópiát ad számunkra. Ha kevesebbet használunk fel, akkor szegényebbek leszünk annál, mint amilyenek lehetőségeink alapján lehetnénk. Ha többet, akkor a jövőnket esszük meg. A jövő generáció lehetőségeit csökkentjük.

Festő: De most nem tudod megmondani a számokat.

Fizikus: Az elmúlt évtizedben már nagyon sok adat összegyűlt, de még kevés.

Festő: Az emberi tevékenység hatását nem vetted figyelembe!

Fizikus: Igazad van, az elfogadott becslések alapján ezek 40 mW/m^2 nagyságrendben vannak.

Festő: Megnyugtattál, a zöldenergia még hosszú időre biztosíthatja az energiaigényünket. Továbbá még reménykedhetünk a fúziós energiában is. Növekedhetünk, hiszen a teljes energiának vagy extrópiának csupán körülbelül 2 tized részét használjuk.

Fizikus: Nem ilyen korlátlan a lehetőségünk, az emberi energiafelhasználás végülis a felszínt melegíti, és ha a felszínre jutó energia megnő körülbelül 100 mW/m^2 -rel, akkor ez körülbelül 0,1 fokos globális hőmérséklet-emelkedést okoz.

Festő: A 40 mW/m^2 mennyire megbízható?

Fizikus: Nem tudom, lehet hogy ez is olyan, mint a GDP-számítás, csak a piacképes dolgokat veszi figyelembe.

Festő: A negyven a százhoz képest nem is olyan kicsiny.

Fizikus: Az energiával tényleg takarékoskodni kell, de szerintem a környezetszennyezés nagyobb probléma.

Festő: Mi a veszélyes hulladék? Tudsz-e erre mondani valamit? Igaz, vagy naiv álom, amit az ipari ökológia mond, hogy lehet hulladékmentesen termelni.

Fizikus: A hulladékmentesség nem azt jelenti, hogy nincs kimenő anyag- és energiaáram. Azt jelenti csak, hogy a hulladék extrópiája zérus. Ez akkor történik meg, amikor a kibocsátott anyag a környezettel egyensúlyban van.

Minél nagyobb a szemét extrópiája, annál veszélyesebb. Érdekes, hogy minél nagyobb az extrópia, annál hasznosabb lehet a gazdaságban, ha fel tudjuk használni. A szemét tehát a tudatlanság és a rossz gazdálkodás eredménye.

Festő: Ez nekem nagyon leegyszerűsített gondolatmenet. Ahol gyalulnak, ott hullik a forgács.

Fizikus: Kiskoromban egy faluban laktam, ahol nem volt szemét. A hulladék nem fizikai, hanem gazdasági fogalom. Az extrópia szempontjából a felbontás önkényes, mint ahogy ezt a technikai fejlődés is mutatja. Amikor petróleumot használtak világításra, akkor a benzín egy felesleges melléktermék volt!

Mégis, természettörvénynek érezzük, hogy a termelés mindig hulladéktermeléssel jár együtt. Nem lehet elérni, hogy a bemenet (alapanyagok) összetétele pontosan megegyezzen a hasznos kimenetével (termékkel), így a hulladék mindig megjelenik. A hulladék mennyiségét a gyártási folyamat, a technológia rögzíti. Azonban a hulladék extrópiája tetszőlegesen kicsiny lehet. A minimális érték zérus. Ez akkor következik be, amikor a környezetnek leadott energia és anyag a környezettel egyensúlyi állapotban van. Ekkor a hulladék-output entrópiája maxi-

mális. $\Pi_{sz} = 0$ azt jelenti, hogy a hulladék megkülönböztethetetlen a környezettől. A maximális entrópiájú hulladék egyensúlyban van a környezettel! Ez a hulladék nem szemét! Nem lehet ártalmas, nem változtatja a környezetet. A hulladék-output akkor lesz szemét, akkor lesz veszélyes a környezetre, amikor más lesz, mint a környezet. Nem az a baj a szeméttel, hogy nagy az entrópiája. Ellenkezőleg, minél kisebb az entrópia, annál ártalmasabb a szemét. (Egységnyi anyagmennyiségre vonatkoztatva!) Minél kisebb az entrópia, annál nagyobb az extrópia – annál több változást indukálhat, annál ártalmasabb a szemét. Természetesen a termodinamika értékmentes. A termodinamika elveiből nem következik, hogy a hulladék extrópia-outputja által indukált változások hátrányosak az embernek. Csak annyit mondhatunk, hogy a hulladék a természetben változásokat indukál. Ennek mértéke az extrópia. A hulladék-extrópia méri azokat a fizikai, kémiai változásokat, amelyeket a szemét a környezetben indukálhat. Így a környezetet módosító hatás mérőszámát adja. De tudjuk, hogy ami elromolhat, az el is romlik. A hulladék extrópiája a környezeti hatások termodinamikai mértékének tekinthető.

A környezetet visszavonhatatlanul módosítja a Π nem megújuló felhasználása és a hulladék kibocsátása. Ezek tényleg csökkentik a jövőbeli esélyeinket! A termodinamika azonban nem tiltja, hogy ezek zérus értékűek legyenek. Az élővilág megoldotta, hogy jó közelítéssel zárt ciklusok alakuljanak ki. Az effektív bemenet a napsugárzás Π -je, míg a kimenet a 287 K sugárzás extrópiája. Ezért létezhet az élet ilyen régóta. A termelésnél csak a tudatlanság és a rosszul értelmezett gazdaságosság tiltja. Gazdasági irányító, szabályzó rendszerünk az ipari forradalom terméke. Ekkor a nem megújuló energia korlátlannak tűnt, és hasonlóan nem éreztük a Föld asszimilációs kapacitásának végességét. A hulladék magától eltűnt. Egyetlen korlátos termelési tényező volt, a munkaerő. Természetesen a tőke mellett. Gazdasági irányításunk a munkaerővel takarékoskodik – eredmény a munkanélküliség, a környezetszennyezés és a környezet kizsákmányolása.

Festő: A kukánk tartalma tehát a butaságunkkal arányos.

Fizikus: És persze a kiszolgáltatottságunkkal, hiszen egy jelentős részét kéretlenül dobják be a postaládánkba.

Festő: Ébredj, mert jön a fekete entrópia?

Fizikus: Látod, nem is olyan bonyolult kérdések ezek, ezért hasznos lenne, ha mind többen értenék meg a figyelmeztetést, hogy ébresztő, mert valóban jöhet a *fekete entrópia!*

Szerkesztőség: 1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29–33., 31. épület, II.emelet, 315. szoba, Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: mail.elft@gmail.com

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Szatmáry Zoltán főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szatmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszté az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyezményén.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 800.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)