

Hőhalál

1965-ben volt száz éve annak, hogy egyik népszerűsítő előadásában *Clausius* kifejtette a világegyetem hőhalálára vonatkozó elgondolását. Azóta pro és kontra sokat vitatkoztak a kérdésről, és a vita máig sem jutott nyugvópontra.

A viták során felmerült filozófiai kérdéseket főként a fizikai megalapozás szempontjából kívánjuk röviden körvonalazni, és ilyen szempontból ismertetjük a hőhalálemélet alapjául szolgáló entrópiatétel lényegét és alkalmazásának módját.

A címben felvetett első kérdés tárgyalását azzal a megállapítással kezdjük, hogy az adott vonatkozásban az entrópia-tétel fizikai tartalma maradéktalanul kifejtethető az entrópia-fogalom ismerete és használata nélkül is. E meglepőnek tűnő kijelentés úgy értendő, hogy az entrópia-tétel mint természeti törvény több, egymással egyenértékű formában is megfogalmazható. Egyik formából következik a másik és viszont. Mivel az entrópia fogalmának egzakt értelmezése bizonyos fizikai előismeretek nélkül nem lehetséges, gyakran célszerű a tétel megfogalmazását olyan formában közölni, amely nem igényli az entrópia fogalmának ismeretét és mégis teljes értékű tájékozódást ad.

Kiterjedt anyagi rendszerek kölcsönhatásakor azt tapasztaljuk, hogy az anyag bizonyos tulajdonságai (mint pl. hőmérséklet, mechanikai nyomás, elektromos potenciál stb.) a különbségek kiegyenlítésének irányában változnak. Konkrétan: a különböző hőmérsékletű testek kölcsönhatásakor a magasabb hőmérsékletű energiát ad át a hidegebbnek, ezáltal a melegebb test lehűl, a hidegebb test pedig fölmelegszik. A folyamat addig tart, amíg az egész rendszer azonos hőmérsékletű nem lesz. Ugyanígy mennek végbe a nyomáskülönbségek, elektromos potenciálkülönbségek stb. kiegyenlítődései is. Ebben a vonatkozásban tehát a folyamat és a kiegyenlítődés közé egyenlőségelet tehetünk.

A gyakorlatban bizonyos kívánt folyamat végbemenetele feltételezi a kiegyenlítődést. Mivel pedig a kiegyenlítődést megelőző "egyenetlenség" nem áll mindig a kívánt formában rendelkezésre, mesterségesen kell előállítanunk. Most következik a probléma megértésének lényeges pontja. A fizika törvényei szerint a hőmérsékleti különbség két test közt pusztán hővezetés által nem jöhet létre, de fizikailag lehetséges egyik fajta egyenetlenséget másfajta kiegyenlítődés árán létrehozni. Például szén elégetése során a vízgőz hőmérsékletét emelni tudjuk. Röviden: a különböző fajta egyenetlenségek egymásba átalakíthatók. Ilyen módon értendő tehát a hőtannak az a megállapítása, hogy a folyamatok mindig kiegyenlítődés árán jönnek létre.

Ha most már egy meghatározott zárt rendszert tekintünk, vagyis olyat, amelyik nincs semmilyen kölcsönhatásban a környezetével, az ilyen rendszeren belül végbemenő folyamatok kizárólag a rendszeren belüli egyenetlenségek kiegyenlítődései-
nek következményei. Az egyenetlenségek fokozatosan csökkennek, míg az egész rendszer egyneművé (homogénné) válik: az egyneműség bekövetkeztével viszont megszűnik az a tényező, amelyik változást képes előidézni: beáll az egyensúly. Pontosabban fogalmazva: az energetikai kölcsönhatások mindegyikéhez tartozik egy-egy olyan, a kölcsönhatást jellemző tulajdonság, amelynek a rendszeren belüli egyenetlensége egyértelműen megszabja az energia áramlásának irányát és nagyságát. Ha e tulajdonságok eloszlása szempontjából a rendszer homogén, akkor folyamat csak külső hatásra jöhet létre. Mivel pedig zárt rendszer külső hatásra nem képes reagálni, a homogén zárt rendszer egyensúlyban van.

E megállapítás konkrét szemléletes tartalmát úgy látjuk világosan, ha a már említett hőmérsékleti, mechanikai, nyomásbeli, elektrosztatikus potenciálbeli stb. különbségek (egyenetlenségek) fellépésére és ezek kiegyenlítődési folyamataira gondolunk. A folyamatok kiegyenlítődési jellegének és az egyensúlyi homogenitásnak felismerése valójában ugyanannak a természeti törvénynek a felismerését jelenti, amit más megfogalmazásban entrópiatételnek szoktak nevezni. A hőhalálprobléma megértéséhez (megfogalmazásához és cáfolatához) azonban e másik egyenértékű forma ismeretét egyáltalán nem szükséges. Ha röviden (és természetesen csak hozzávetőlegesen) mégis foglalkozunk az entrópia fogalmával, csupán azért tesszük, mert a problémát rendszerint éppen erre a fogalomra való hivatkozással szokták tárgyalni. Az egyenetlenségek, függetlenül azoktól a tulajdonságoktól, amelyekre vonatkoznak, egységes mértékkel jellemezhetők. Erre szolgál az entrópia. Minél homogénebb a rendszer, annál nagyobb az entrópiája. Ennek alapján érthetővé válik az is, hogy a kiegyenlítődési folyamatok entrópia-növekedéssel járnak.

Azt is megérthetjük, hogy a hőtanban miért használják az entrópia fogalmát, annak ellenére, hogy a folyamatok végbemenetelének és az egyensúlynak a törvényei enélkül is megfogalmazhatók. Nyilvánvaló ugyanis, hogy a hőmérséklet, a nyomás stb. egyenetlenségei külön-külön tekintendők, és mivel e tulajdonságok kiegyenlítődései egymást is képesek befolyásolni, a számszerű adatokkal való jellemzés rendkívül bonyolult volna. Az entrópia viszont csupán egyetlen adat, amelynek ismerete helyettesítheti több más adat ismeretét.

A szakember számára tehát bőségesen megtérül az a szellemi befektetés, ami az entrópia-fogalom értelmezéséhez szükséges, segítségével számításait már lényegesen egyszerűbben tudja elvégezni, mint nélküle. Viszont az, aki nem akar energetikai számításokat végezni, hanem csupán a tételre és filozófiai következményeire kíváncsi, éppen akkor jár el helyesen, ha nem vesződik egy olyan fogalom jelentésének megértésével, amely a tétel szemléletes jelentését csak bonyolítja.

A fentiek a hőhalálprobléma szempontjából azért lényegesek, mert így könnyebb annak megértése. Ha a tétel a nem szakember számára homályos, akkor cáfolatát sem tehetjük világossá. Nyilvánvaló, hogy a hőhalál bekövetkezésének helyességét bizonygató fejtegetések már ösztönösen is igyekeznek fenntartani a bizonytalanságnak azt a légkörét, amely az entrópia-fogalom "titokzatos" voltából árad. A mi célunk világos cáfolatot adni, ezért támaszkodunk a könnyebben érthető megfogalmazásra.

A világegyetemet rajta kívül álló tényezők nem befolyásolhatják, ezért a benne végbemenő energetikai folyamatok csakis a fennálló inhomogenitások kiegyenlítő-dése árán jöhetnek létre. Ha a kiegyenlítő-dés valóban elkerülhetetlenül szükséges folyamat és ha véges időn belül bekövetkezik, akkor a világmindenség végső nyugalmi állapotának bekövetkezése, vagyis a hóhalál ugyancsak elkerülhetetlen. Ez valóban így igaz. Mindaddig tehát, amíg nem volt ismeretes, hogy az anyagi testek kölcsönhatásai nem mechanisztikusan determináltak, és a folyamatok időbeli törvényeit sem tárták fel, a hóhalálról nem lehetett bizonyosat mondani. Az utóbbi 20–25 évben azonban e két alapvető kérdés tisztázódott, mégpedig olyan eredménnyel, amelynek alapján a hóhalál bekövetkezését egyértelműen tagadhatjuk.

A kvantumelmélet alaptörvényeinek tisztázása kapcsán kiderült, hogy a természeti folyamatok nem mechanisztikusan determináltak, hanem valószínűségi jellegűek. Ebből következik (tapasztalatokkal ellenőrzött módon), hogy a fent említett kiegyenlítő-dési folyamatok szintén valószínűségi jellegűek. Más szóval: a kiegyenlítő-dés irányában való haladás statisztikai átlagokra érvényes, az átlagtól való eltérések, kis valószínűséggel ugyan, de szükségszerűen fellépnek.

Ha figyelembe vesszük az anyag molekuláris szerkezetét és a mikroszerkezetre érvényes kvantumelméleti törvények statisztikus jellegét, egyszeriben természetessé válik az, amit fentebb mondtunk. Mivel a kiterjedt testek kölcsönhatásait az őket felépítő molekulák közvetítik, a nagyban tapasztalt kölcsönhatási változás a molekulák egész seregének külön-külön kölcsönhatásaiból tevődik össze. Az egyes molekuláris kölcsönhatások azonban csak összességükben szolgálják a kiegyenlítő-dést. Gondoljunk két embercsoportra, amelyek egyikének tagjai élénken sűrűnek-forgognak, míg a másikon lassan mozgó emberek vannak. Ha két ilyen különböző jellegű embercsoport egymás mellé kerül, akkor – az egyes emberek találomra történő mozgása mellett – fokozatosan összekeverednek, a gyorsabb mozgásúak a lustábbakat eleveőbb mozgásra kényszerítik, és viszont, mindaddig, amíg a nyüzsgés eleveensége az összekeveredett csoportban egységes nem lesz. Könnyen megérthető, hogy az effajta kiegyenlítő-dés nem szükségszerű, csak valószínű. Hasonlóképp a molekuláris kölcsönhatások közvetítésével létrejövő kiegyenlítő-dés sem abszolút szükséges, csupán valószínű.

A kiegyenlítő-dési folyamatok valószínűségű jellege világos választ ad a "hóhalál" kérdésére is. A kiegyenlítő-dés oly nagy mértékben valószínűbb az ellentétes irányú folyamatnál, hogy túlnyomórészt ez jön létre. Akárcsak a rendbeszedett kártya keverésénél: a rendezetlenség növekedése sokkal valószínűbb, mint az, hogy keverés által a kártyák újra szabályos elrendeződésbe kerüljenek. De az utóbbi sem lehetetlen, bár rendkívül ritka. A nagy és kis valószínűségű események mértékének eltérése a molekuláris szerkezetű anyagban még nagyobb, de, rendkívül ritkán, így is létre kell jönnie a kis valószínűségi folyamatnak. Az idők végtelenjében tehát a világegyetem egy-egy részén előfordul regenerálódási folyamat, az egyenetlenség visszaállása. Az egyenetlenség teljes és végleges megszűnése, vagyis a teljes homogenitás – amelynek feltételezésére épül a hóhalál elmélete – lehetetlen.

Ez azonban még mindig nem megnyugtató válasz. Hiába nem lehetséges végleges és megzavarhatatlan nyugalom, ha a nyugalmi állapot lényegesen nagyobb valószínűséggel bír, mint az ellenkezője. A kiegyenlítő-dési folyamatok statisztikus jellege (csupán e jelleget véve figyelembe) még megengedi azt a lehetőséget, hogy a vi-

lágmindenség az idők végtelenjében túlnyomóan egyensúlyi állapotba kerül, és csak kivételesen lép fel dinamizmust előidéző statisztikus kilengés. E kételyt a folyamatok időbeli lefutását szabályozó törvények ismerete oszlatja el. Kiderült ugyanis, hogy a statisztikus átlagban való kiegyenlítődés véges időn belül nem következhet be: az egyensúlyi állapot bekövetkezése tehát csak végtelen távoli időben valószínű, véges időn belüli fellépése viszont teljesen valószínűtlen. A végtelen távoli idejű egyensúly és statisztikus ingadozás együttesen azzal a következménnyel jár, hogy az időnként és egyenként bekövetkező egyensúly a kivételes, és a dinamikus állapot a túlnyomóan szükségszerű. Ezzel a hőhalál lehetetlenségét be is bizonyítottuk, most még néhány gyakori cáfolat helytelenségére kívánunk röviden rámutatni.

Egyik ilyen cáfolat arra hivatkozik, hogy a világegyetem végtelen és mint ilyen, nem zárt (sőt entrópiája a végtelen kiterjedés miatt már eleve végtelen), tehát az entrópia-növekedés tétele sem alkalmazható rá. Akár véges, akár végtelen a világegyetem, a folyamatok valószínű iránya a kiegyenlítődés, de mindkét feltétel mellett csupán a végtelen távoli időben. A világegyetem véges, illetve végtelen volta a hőhalál kérdésében nem perdöntő.

A hőhalál-hipotézisnek egy másfajta cáfolata szerint az entrópia-tétel csupán laboratóriumi tapasztaltok eredménye és így a világmindenségre való extrapolálása indokolatlan. Vita, ill. cáfolat helyett csupán azt kérdezzük, hogy a valószínűség-elmélet és a kvantumelmélet törvényei, amelyek az entrópia-tétel elvi alapjai, valóban csak a laboratóriumban volnának érvényesek?

Végül még egy, a hőhalál elméletét igazolni törekvő érveléssel is számot kell vetnünk. Eszerint: hiába igaz az, hogy az egyensúlyi állapot bekövetkezése a végtelen távoli időbe tolódik ki, ha a világmindenség már végtelen hosszú ideje fennáll. A végtelen távoli kezdet óta a végtelen idő már lejárt, így az egyensúly mégis véges időn belül esedékes. Ez a megfontolás azt az elemi hibát követi el, hogy a végtelennel véges számok módjára számol. Az egyensúly valószínű bekövetkezéseinek végtelen távoli időpontra való eltolódása független attól, hogy a folyamat milyen régóta tart.

A hőelmélet mai álláspontján alapuló kritika mellett azért foglalkoztunk más közkeletű hibás nézetek fogyatékoságaival is, hogy a valóságos tényekre épülő bírálatot megóvjuk olyan "érvek" alkalmazásától, amelyek a kérdés tisztázását minduntalan megzavarják.

Fentiek szerint az anyagi rendszerek változásainak természetét két vonás jellemzi. Egyrészt az – átlagban való – homogenizálódási törekvés, másrészt az időnként és helyenként (statisztikus ingadozás folytán) fellépő regenerálódás. Ebből szükségszerűen következik, hogy töretlen vonalú "végtelen fejlődés" nem lehetséges. A nagy valószínűséggel bekövetkező események azok, amelyekkel terveinkben számolhatunk, a kis valószínűségűek pedig azok, amelyekre szintén számítanunk kell, de rájuk tervet nem alapozhatunk. Az utóbbiak közé tartozik a töretlen fejlődés is.