

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**REND ÉS KÁOSZ: AZ ENTRÓPIA
TUDOMÁNYTÖRTÉNETI VONATKOZÁSAI ÉS
AZ ENTRÓPIANÖVEKEDÉS
MEGNYILVÁNULÁSAI**

Szerző: El Badaoui Nimród
Székesfehérvári Vasvári Pál Gimnázium 11. évf.

Konzulens: Csordásné Marton Melinda
középiskolai tanár

Székesfehérvár, 2024

Tartalom

1.	Bevezetés.....	1
2.	Az entrópia tudománytörténete	2
2.1.	A Carnot-ciklus	2
2.2.	A II. főtétel	3
2.3.	Az entrópia statisztikus mechanikai értelmezése	4
3.	Az entrópia fogalma	6
4.	Az entrópiánövekedés szemléltetése Python szimulációval	7
4.1.	Gázok elegyedésének szimulációja	7
4.2.	A modell működése.....	8
4.3.	A modell értékelése	10
5.	Az entrópiánövekedés univerzális viszonylatban.....	12
6.	Az élet létrejötte a Földön	14
6.1.	Lokális entrópiaforrás: A Nap.....	14
6.2.	Fizikai darwinizmus?	14
7.	Az idő folyásának iránya.....	16
8.	Összegzés	17
	Források:.....	18

1. Bevezetés

Mit ad nekünk a Nap? Hogyan, illetve miért alakult ki az élet? Miért keveredik össze magától a kávéba öntött tej? Létezik egyértelmű fizikai különbség a múlt, a jelen és a jövő között? Ezen – igen érdekes és nemmellesleg jogos – kérdések közül van, amelyre egy vagy több válasz is létezik, valamint van köztük olyan is, amelyre – jelenleg – egy sem. Azonban mindegyik megfejtésében rejlik egy közös gondolat: az **entrópia**.

200 évvel ezelőtt *Sadi Carnot* a *Carnot-körfolyamat* elemzése során megállapította, hogy egy hőerőgép hatásfokának felső határa 100% alatti. *Lord Kelvin* és *Planck* később pontosították ezt a tételt, azonban *Clausius* sajátos megközelítése vezetett egy új mennyiség, az entrópia bevezetéséhez. Az ő megfogalmazása, mely szerint az entrópia mindig nő vagy állandó marad, az univerzum fejlődésére is alkalmazható, hiszen megmutatható, hogy a világ rendezetlensége *fekete lyukakban* koncentrálódik. A Napból érkező alacsony entrópiájú energia teszi lehetővé, hogy létezzen *élet a Földön*. Egyes elgondolások szerint maga az élet létrejötte is a második főtétel következménye, és annak létezése szükségszerű, hiszen az élet termodinamikai értelemben vett célja az entrópiánövekedés univerzális folyamatának katalizálása. Az entrópiánövekedés az egyetlen olyan jelenség a fizikában, amely sosem játszódik le időben visszafelé, így alapvetően az *idő folyásának irányát* is ez határozza meg.

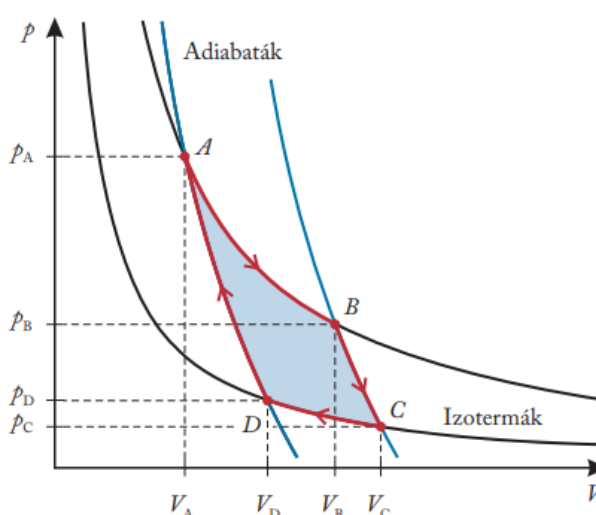
Mindazonáltal elvontságából kifolyólag az entrópia az egyik legnehezebben megérthető fogalom, amelynek tényleges jelentését laikusoknak elmagyarázni mindig kihívást jelent. Dolgozatomban a tudománytörténeti rész leírja, hogy az elmúlt két évszázad fizikusai hogyan tudták értelmezni ezt a mennyiséget. Ezután, a megértést segítő analógiák mellett, sor kerül számos rendkívül érdekes, az entrópiánövekedéssel magyarázható jelenségre. Ezek eltérő nagysága, valamint jelentősen különböző megnyilvánulásai bizonyítják, hogy ez az összefüggés a fizikai valóság egyik legfundamentálisabb axiómája.

2. Az entrópia tudománytörténete

2.1. A Carnot-ciklus

A 18. század egyik legnagyobb fejlesztése a széleskörűen alkalmazható gőzgép (1769), amely többek között az első ipari forradalom fellendülését vonta maga után.^[1] Ennek hatásfoka azonban a korszakban mindössze 1-2,5% volt, így számottevő előrelépést jelentett volna, ha a hőenergia nagyobb részét tudják mechanikai munkává alakítani.^[2] Lazare Carnot (1753-1823) francia fizikus – valamint a forradalom kiemelkedő alakja – *Az egyensúly és a mozgás alapelvei* (1803) c. írásában felvetette, hogy egy gép mozgó részeinek gyorsulásai és lökései a „tevékenységi nyomatek” veszteségeit jelentik.^{[3][4]}

Nem sokkal halála után fia, Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) az *Elmélkedések a tűz mozgató erejéről* (1824) c. munkájában bevezette a róla elnevezett Carnot-körfolyamatot.^[5] Ennek a hőerőgépnek lényege, hogy egy lendkerékhez erősített dugattyúval zárt, súrlódásmentes, hőszigetelt tartályban lévő gáz 4 lépésben munkává alakítja a felvett hőt. Először a gáz kiterjed, nyomása lecsökken, térfogati munkát



A Carnot-ciklus adiabatikus és izotermikus folyamatai

1. ábra^[5]

végez (AB szakasz), miközben egy T_1 hőmérsékletű tartályból Q_{fel} hőmennyiséget vesz fel, a folyamatot izotermikussá téve. Ezután, ha elvesszük a tartályt, a gáz tovább tágul, most már hőcsere hiányában adiabatikusan (BC szakasz), de továbbra is munkát végez, így hőmérséklete csökken. A lendkerék ezt követően tovább fordul (CD szakasz), összenyomva a gázt – vagyis a kerék végez W munkát a gázon. Viszont eközben $Q_{le} = -W$ hőt ad le egy $T_2 < T_1$ hőmérsékletű tartálynak, így a gáz hőmérséklete nem változik. A tartály elvétele után a gáz adiabatikusan összenyomódik (a lendkerék további forgása miatt), ezáltal a kezdeti állapotba kerül (DA szakasz).^[6]

A körfolyamat hatásfoka: $\eta = \frac{Q_{fel} - Q_{le}}{Q_{fel}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$. (T a Kelvinben mért hőmérséklet.)

Működése megfordítható (reverzibilis), ha az AB szakaszban hőt von el a hidegebb (T_2) tartályból, majd a CD szakaszban a befektetett munkát W munkát leadja a melegebbnek (T_1). (Összenyomás során a gáz hidegebb, így azonos térfogat-változás mellett a gáz kisebb nyomást fejt ki a dugattyúra, ezért a leadott hő mindig kisebb a felvett hőnél: $Q_{le} < Q_{fel}$.)

William Thomson (későbbi Lord Kelvin; 1824-1907) az *Egy abszolút termometrikus skáláról* (1848) c. művében a Carnot-ciklusra alapozva alkotta meg a róla elnevezett Kelvin-skálát, melynek nullpontja az abszolút nulla fok ($0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$).^[7] Ezen a hőmérsékleten a gáz részecskéi nem fejtenének ki nyomást a dugattyúra, a gáz munkavégzés nélkül összenyomható lenne ($Q_{le} = 0$). Belátható, hogy a hatásfok növelése a hőleadó tartály hőmérsékletének (T_1) növelésével, és a hőfelvevő tartály hőmérsékletének (T_2) csökkentésével érhető el. Végtelen hőmérsékletről beszélni értelmetlen, ezért csak $T_2 = 0\text{ K}$ esetén lenne a hatásfok 100%-os. Azonban a tapasztalat szerint ez nem megvalósítható, valamint súrlódásmentes és tökéletesen hőszigetelt tartály sem létezik, ami további – ugyan (pl. olajkenéssel) minimalizálható – veszteségeket jelent.^[8] Ebből következik, hogy **egy hőerőgép hatásfokának felső határa 100% alatti**, tehát a befektetett energiának mindig szétszóródik (*disszipálódik*) a környezetbe egy része, amit nem lehet visszaszerezni, vagyis ez a változás irreverzibilis. (Az általános energiamegmaradás értelmében a környezet, a gáz és a tartályok összes energiája nem változik.) Ez a hőtan II. főtétele, amelynek számos megfogalmazása létezik.

2.2. A II. főtétel

William Thomson az *A dinamikus hőelméletről* (1851) c. munkájában azt írta: „*Nincs olyan folyamat, amelyben egy hőtartály által felvett hő teljes egészében munkává alakítható.*”^{[9][10]} Ezt kiegészítve Max Planck (1858-1947) 1879-es disszertációjában a következőt tekintette a második főtétel levezetésének kiindulópontjaként: *Nincs olyan periodikusan működő hőerőgép, amely hőt von el egy hőtartályból, és azt teljes egészében mechanikai munkává alakítja (másodfajú örökmozgó).*^{[11][12][13]} A tételnek számtalan következménye van, például az állóvizek helyzeti energiáját azért nem tudjuk hasznosítani, mert ehhez a vizek alatti üregekre lenne szükség, ahová a víz folyna. Ezek kialakítása azonban több energiát igényelne, mint amennyi a vizek leengedéséből nyerhető.^[14] Ugyanígy hiába van például az óceánoknak látszólag kimeríthetetlen energiája, ennek kinyerése csak akkor lenne

lehetséges, ha lenne egy hidegebb hőmérsékletű tartály ahová a hő áramlik, ennek fenntartása azonban mechanikai energiadeficitet vonna maga után. Ennek megértését segítheti a második főtétel egyik legelső megfogalmazása.

Robert Clausius (1822-1888) *A hő mozgatóerejéről (1850)* c. művében szerepelt az a gondolat, hogy a termikus energia hő alakjában egy hidegebb testről egy melegebb testre nem mehet át önként. 4 évvel később már azt írta: „*Hő nem mehet át hidegebb testről melegebbre, csak ha ugyanakkor más változás is bekövetkezik.*”^[15] Megmutatható, hogy ez az állítás egyenértékű a Kelvin-Planck-félével.^{[16][11]} Clausius azonban a Carnot-ciklus két különböző irányú működésének ekvivalenciáját matematikailag is ki akarta fejezni. Az AB és CD szakaszt vizsgálva megállapíthatjuk, hogy nagyobb hőmérsékleten nagyobb hőátadás megy végbe ($T_2 < T_1$; $Q_{le} < Q_{fel}$), ezért Clausius először $\frac{Q}{T}$ alakban írta fel ezt az „ekvivalencia-értéket”: ha Q hőmennyiség T_1 hőmérsékletű tartályból vagy testről egy T_2 hőmérsékletűbe áramlik, az ekvivalencia-érték megváltozása: $Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$. Ennek értéke nem lehet negatív (hiszen $T_2 < T_1$ az áramlás feltétele), de reverzibilis folyamat esetén pozitív sem, mivel annak megfordítása ismét negatív értéket jelentene. Így a körfolyamat során bekövetkező megváltozások összege: $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$. Későbbi írásaiban (1862, 1865) ezt a mennyiséget az „energia”, illetve a görög *τροπή* („tropé”; megfordulás) szavakból *entrópiának* nevezte és S -sel jelölte. Leírta, hogy valós (irreverzibilis) folyamatoknál az entrópia-változás pozitív, határesetben (reverzibilis folyamatnál) 0.^[17] Így született a második főtétel matematika megfogalmazása: $\Delta S \geq 0$, azaz **egy zárt rendszer entrópiája mindig nő vagy állandó marad**. Definíció szerint az entrópia egy állapotfüggvény, melyre teljesül, hogy $dS = \frac{\delta Q}{T}$. Mivel azonban a rendszer állapotát jellemzi, meghatározható más megközelítéssel is.

2.3. Az entrópia statisztikus mechanikai értelmezése

A statisztikus mechanikában egy *makroállapoton* belül *mikroállapotokat* különböztetünk meg a rendszert alkotó részecskék helyzetei és impulzusai szerint. A tapasztalat azt mutatja, hogy a természeti folyamatok során az energia megoszlása részecskék között egyre egyenletesebbé, rendezetlenebbé válik. Például, ha egy fél pohár hideg vízbe ugyanennyi melegebb vizet öntünk, feltételezhetnénk, hogy (a hőtágulás végett) kisebb sűrűsége miatt kiül a pohár tetejére. Ilyenkor a rendszer rendezett lenne, hiszen a nagy energiájú molekulák csak a

pohár felső, míg a kisebb energiájúak a csak pohár alsó felében mozoghatnak. Ehelyett azt tapasztaljuk, hogy a két „víztest” hőmérséklete termikus kölcsönhatás (hőcsere) során kiegyenlítődik, vagyis mindegyik részecske nagyjából ugyanarra az energiaszintre kerül, ezért a pohárban belül bárhol lehetnek. A lehetséges rendezetlen mikroállapotok száma jóval nagyobb, mint a rendezetteké. Ez azt jelenti, hogy ugyan a rendezetlenből rendezett állapotba történő átalakulás elméletben lehetséges, – és mikro szinten nagyon ritkán be is következik – statisztikailag annyira valószínűtlen, hogy – makro szinten – soha nem történik meg. Az entrópia és a mikroállapotok valószínűsége közötti kapcsolatot először Ludwig Boltzmann (1844-1906) írta le (1877), közvetlen összefüggést (arányossági tényezőt) azonban nem határozott meg. Két rendszer egyesítése során az entrópia additív ($S = S_1 + S_2$), míg a lehetséges mikroállapotok száma multiplikatív ($W = W_1 \cdot W_2$), ezért Max Planck feltételezte, hogy *egy rendszer entrópiája a lehetséges mikroállapotok számának logaritmusától függ* (1900). Az egyenlet ma ismert alakját is ő írta fel 1901-ben: $S = k \ln(W)$. Az ebben szereplő k állandó számos más képletben is megjelent (pl. ideális gáz állapotegyenlete részecskeszámra felírva). Planck írásaiban és előadásain is hangsúlyozta, hogy a logaritmikus kapcsolat megsejtése (1896) Boltzmann érdeme, ez azonban azt eredményezte, hogy az összefüggést Boltzmann-nak tulajdonították (még a sírkövére is felvésték), a benne szereplő együttható pedig Boltzmann-állandóként terjedt el. Később ez az egyenlet vezette rá Planck-ot arra, hogy az energiaszint nem lehet akármekkora, hiszen így végtelen sok eloszlás lenne lehetséges. Így született meg az energiakvantum elmélete, majd belőle a kvantummechanika.^[18]

3. Az entrópia fogalma

Az entrópiát leggyakrabban egy rendszer **rendezetlenségének mértékeként** írják le. Ennek a megközelítésnek a népszerűsége feltehetően abból ered, hogy számos analógia által könnyebbé teheti a második főtétele megértését. Például, ha egy társadalmat rendfenntartás nélkül magára hagyunk, az könnyen anarchiába torkollhat. Gondolhatunk arra is, hogy a rendbe rakott játékokkal teli szobában lévő gyermek mindenképp rendetlenséget fog csinálni, minél tovább van bent, annál nagyobb. ^[19] Azonban ennek a meghatározásnak kritikusai is vannak, akik szerint a „rendezetlenség” nem a legjobb szó az entrópiára, mivel az inkább **a rendszer energiájának szétterjedtségét, szétszóródottságát jellemzi, mintsem kaotikusságát.** ^[20] Egy megkevert kártyapakli és egy elforgatott Rubik-kocka sem a második főtétel miatt válnak rendezetlenné, hanem mert eredeti állapotukhoz képest, a mi szemszögünkből lettek kevésbé rendezettek. ^[21] Az energiát (energiaállapotot) is leírhatnánk „munkavégző képességként”, ez azonban csak alacsony entrópia esetén lenne indokolt. Egy elengedett kő nem azért esik le, mert kisebb energiaállapotra törekszik, hanem azért, mert a becsapódása (rugalmatlan ütközés) során hőt termelne, disszipálva az egykori potenciális (majd kinetikus) energiáját. Lévé, hogy az entrópia alapvető jellemzője a minket körülvevő világnak, *célszerű az energia helyett – vagy mellett – entrópia központú megközelítésből vizsgálni a fizikai valóságot.*

4. Az entrópiánövekedés szemléltetése Python szimulációval

4.1. Gázok elegyedése

Az entrópiánövekedés vizuális szemléltetéséhez tekintsünk egy egyszerű példát. Egy tartályt osszon két részre egy szabadon (és súrlódásmentesen) mozgó dugattyú. Az egyik részben legyen N_A darab A gáz, a másik részben N_B darab, az A gázzal azonos hőmérsékletű B gáz. Legyen a dugattyú (külső erők nélkül) egyensúlyban, a két térrész pedig egyforma nagyságú. Ekkor azonban az Avogadro-törvény értelmében $N_A = N_B$. A két gáz egyenként izotermikusan kitágul, hogy kitöltsék a teljes tartályt, vagyis térfogatuk a kezdeti kétszeresére nő a folyamat (diffúzió) végére. Az első főtétel szerint a gáz belső energiájának változása:

$$\delta U = \delta W + \delta Q,$$

izotermikus folyamat esetén ez azonban zérus, így

$$\delta Q = -\delta W = p dV = \frac{NkT}{V} dV \quad (k = 1,380653 \cdot 10^{-23} \text{ [36]}),$$

felhasználva, hogy $pV = nRT$. Az entrópia matematikai definícióját $(dS = \frac{\delta Q}{T})$ alkalmazva a teljes változás:

$$\Delta S = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\delta Q}{T} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{Nk}{V} dV = Nk \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (4.1)$$

A szimulációt a jobb átláthatóság érdekében két dimenzióra korlátozzuk, és feltételezzük, hogy a harmadik (z) tengely mentén a részecskék eloszlása egyenletes. (Ez átlagosan valóban igaz. Az x -tengely mentén szintén nem változik jelentősen az egyes gázok eloszlása, azonban a számolás akkor sem lesz sokkal nehezebb, ha ezt nem vesszük figyelembe.) Emiatt a folyamat időbeni lefolyásának követése során a gáz által kitöltött térfogat másik két dimenziójával ($A = xy$) számolunk. Az entrópia extenzív állapotváltozó, vagyis rendszerek egyesítésekor az entrópiák összeadódnak. Így az entrópia teljes megváltozása egy adott pillanatban:

$$\Delta S_{\text{össz}}(t) = N_A k \ln \frac{A_A(t)}{A_A(t=0)} + N_B k \ln \frac{A_B(t)}{A_B(t=0)}. \quad (4.2)$$

Lévé, hogy $N_A = N_B$, ill. $A_A(t=0) = A_B(t=0) = \frac{A_{\text{össz}}}{2}$, a legnagyobb lehetséges érték (entrópiamaximum):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta S_{\text{össz}}(t) = 2 \ln(2) Nk \approx 1,386 Nk \approx 1,922 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K} \cdot N. \quad (4.3)$$

4.2. A modell működése

Az entrópiamaximum elérését nézhetjük végig a következő, *Pygame* segítségével működő szimulációban:

```
1 import pygame, sys, random, math, matplotlib as plt
2 #Pygame inicializálása
3 pygame.init()
4 #Kijelző
5 WIDTH, HEIGHT = 400, 400
6 AREA0 = WIDTH*HEIGHT / 2
7 screen = pygame.display.set_mode((WIDTH, HEIGHT))
8 pygame.display.set_caption('ENTRÓPIA - El Badaoui Nimród')
9 #idő
10 t = 50 #mozgások között eltelt idő(ms)
11 f_meres = 40
12 #Színek
13 BLUE, WHITE, RED = (0, 0, 255), (255, 255, 255), (255, 0, 0)
14 #Részecske mérete, lépték (egységnyi elmozdulás)
15 RADIUS = 6
16 GRID_SIZE = RADIUS
17 #Részecskeszámok
18 N_A, N_B = 100, 100
19 #Kezdő koordináták generálása
20 x_A, y_A = [], []
21 for i in range(0, N_A):
22     x_A.append(random.randint(0, WIDTH))
23     y_A.append(random.randint(HEIGHT // 2 + 1, HEIGHT))
24
25 x_B, y_B = [], []
26 for i in range(0, N_B):
27     x_B.append(random.randint(0, WIDTH))
28     y_B.append(random.randint(0, HEIGHT // 2 + 1))
29 #Gyűjtött adatok (felület(ek), entrópia, idő)
30 AREA0_A = (max(x_A)-min(x_A))*(max(y_A)-min(y_A))
31 AREA0_B = (max(x_B)-min(x_B))*(max(y_B)-min(y_B))
32 areas_A, areas_B = [AREA0_A], [AREA0_B]
33 entropies = [0]
34 times = [0]
35 #entrópia ábrázolás
36 def plot_entropy():
37     print(entropies)
38     print(times)
39     plt.plot(times, entropies)
40     plt.title("Az entrópia változása az időben")
41     plt.xlabel("Idő(s)")
42     plt.ylabel("Entrópia(k)")
43     plt.show()
44
45 m = 1 #eddiggi mérések száma
46 #Fő ciklus
47 while True:
48     for event in pygame.event.get():
49         if event.type == pygame.QUIT:
50             plot_entropy()
51             pygame.quit()
52             sys.exit()
```

A program működése:

A részecskék egységnyi elmozdulásának nagysága megegyezik a sugaraik nagyságával.

A tér alsó és felső felén is generál 100-100 részecskét, melyek kezdeti pozíciója (az előbbi megkötésen kívül) véletlenszerű. Folyamatosan tárolja az adott dimenzióban egymástól legmesszebb lévő részecskék legnagyobb távolságát, amelyből a kitöltött teret számítja. (A generált kezdeti értéket is rögzíti.)

50 ms-ként minden részecske elmozdul egy véletlenszerűen választott irányba: fel, le, balra vagy jobbra.

```

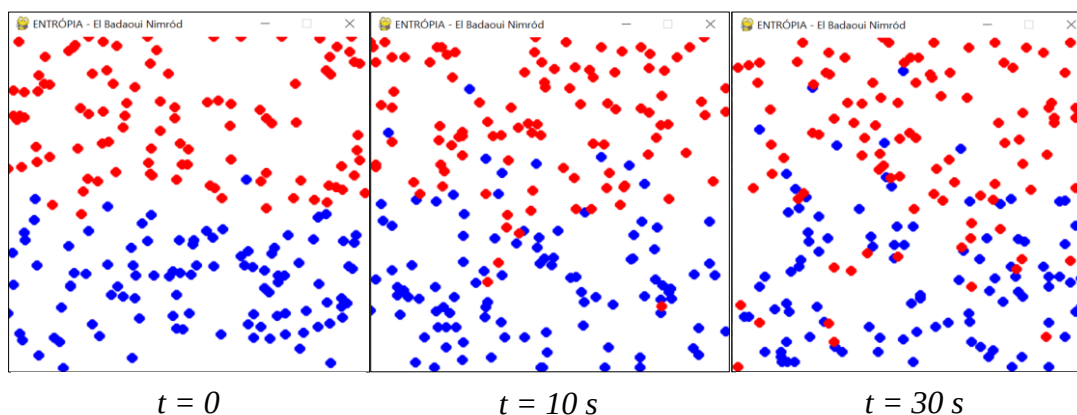
78     #mérés és feljegyzés
79     count += 1
80     if count == f_meres:
81         #pillanatnyilag betöltött feblület
82         AREA_A = (max(x_A)-min(x_A))*(max(y_A)-min(y_A))
83         areas_A.append(AREA_A)
84         AREA_B = (max(x_B)-min(x_B))*(max(y_B)-min(y_B))
85         areas_B.append(AREA_B)
86         #entrópia számítása
87         entropy_k = N_A*math.log(AREA_A/areas_A[0]) + N_B*math.log(AREA_B/areas_B[0])
88         entropies.append(entropy_k)
89         #adat kiírása
90         time = m*t*f_meres/1000
91         times.append(time)
92         print("Idő(s): " + str(time) + " Entrópia(k): " + str(entropy_k))
93         #számláló reset, m+1
94         count = 0
95         m += 1
96     #Részecskék határon belül tartása
97     for i in range(0, N_A):
98         x_A[i] = max(0, min(x_A[i], WIDTH - GRID_SIZE))
99         y_A[i] = max(0, min(y_A[i], HEIGHT - GRID_SIZE))
100     for i in range(0, N_B):
101         x_B[i] = max(0, min(x_B[i], WIDTH - GRID_SIZE))
102         y_B[i] = max(0, min(y_B[i], HEIGHT - GRID_SIZE))
103     #Rajzolás
104     screen.fill(WHITE)
105     for i in range(0, N_A):
106         pygame.draw.circle(screen, BLUE, (x_A[i], y_A[i]), RADIUS)
107     for i in range(0, N_B):
108         pygame.draw.circle(screen, RED, (x_B[i], y_B[i]), RADIUS)
109     pygame.display.flip()
110     pygame.time.Clock().tick(60)

```

Adott f elmozdulás után rögzítésre kerül a pillanatnyi entrópia.

Python kód a Visual Coding Studio programban

A koordinátáknak alsó és felső korlátot adva biztosíthatjuk, hogy egyik részecske sem „szökik el” a tartályból.



A Pygame szimuláció pillanatképei különböző időpillanatokban ($N=100$)

Az átláthatóság érdekében érdemes az entrópia egységének a Boltzmann-állandót választani. A (4.3) összefüggés alapján az entrópiamaximum: $(\Delta S_{\text{össz}})_{\text{max}} \approx 138,6k$. Ha az értékeket 2 másodpercenként felírjuk, látható, hogy az entrópia valóban ehhez tart, és átlagosan kb. 30 másodperc után éri el.

```

Idő(s): 2.0 Entropia(k): 24.31108660705935
Idő(s): 4.0 Entropia(k): 70.38837883732121
Idő(s): 6.0 Entropia(k): 89.85253827551337
Idő(s): 8.0 Entropia(k): 110.25219297512042
Idő(s): 10.0 Entropia(k): 97.68391742422446
Idő(s): 12.0 Entropia(k): 96.8707649530563
Idő(s): 14.0 Entropia(k): 99.85840986734448
Idő(s): 16.0 Entropia(k): 88.75536715428589
Idő(s): 18.0 Entropia(k): 107.83606011011656
Idő(s): 20.0 Entropia(k): 120.41967317375807
Idő(s): 22.0 Entropia(k): 121.2423208367164
Idő(s): 24.0 Entropia(k): 137.55160076130488
Idő(s): 26.0 Entropia(k): 137.55160076130488
Idő(s): 28.0 Entropia(k): 137.55160076130488
Idő(s): 30.0 Entropia(k): 140.1304908803989

```

```

Idő(s): 2.0 Entropia(k): 15.028455407996447
Idő(s): 4.0 Entropia(k): 57.5125270770566
Idő(s): 6.0 Entropia(k): 50.97997414646798
Idő(s): 8.0 Entropia(k): 73.28804720918544
Idő(s): 10.0 Entropia(k): 82.92643169633367
Idő(s): 12.0 Entropia(k): 89.56456752696586
Idő(s): 14.0 Entropia(k): 110.87431010490783
Idő(s): 16.0 Entropia(k): 119.12737314589673
Idő(s): 18.0 Entropia(k): 132.97545120723822
Idő(s): 20.0 Entropia(k): 141.16575600815523
Idő(s): 22.0 Entropia(k): 136.53816897155332
Idő(s): 24.0 Entropia(k): 138.4202755360564
Idő(s): 26.0 Entropia(k): 136.81741663533955
Idő(s): 28.0 Entropia(k): 124.39505474989883
Idő(s): 30.0 Entropia(k): 134.5845008325966

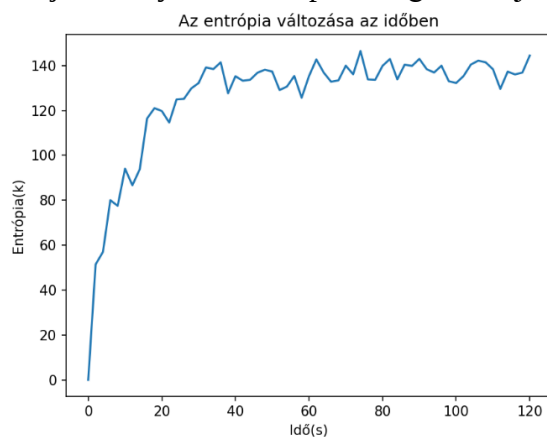
```

Az entrópia értékei adott időpontokban ($N=100$; két független szimuláció)

A szimuláció (manuális) lezárása után megtekinthetjük a folyamat entrópia-idő grafikonját:



30 másodpercig futtatott szimuláció
 $\Delta S(t)$ grafikonja



120 másodpercig futtatott szimuláció
 $\Delta S(t)$ grafikonja

4.3. A modell értékelése

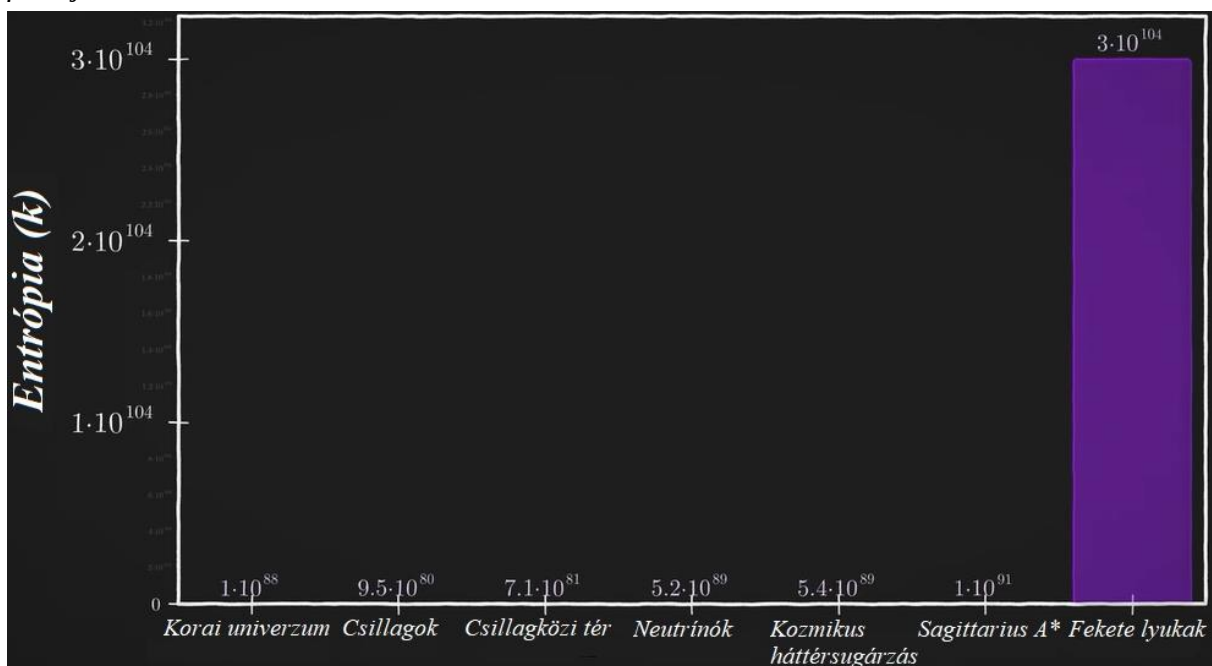
Láthatjuk, hogy az entrópia időnként csökkenhet a véletlenszerű mozgás miatt, akárcsak a valóságban (mikroszkopikus szinten). Adott esetben az érték meghaladja az elméleti maximumot. Ez azért van mivel pár részecske koordinátája a beállított paramétereket (szélesség, magasság) néhány pillanatra átlépheti, vagy (nullához közeli) negatív értéket vehet fel. Ilyenkor nem teljesül, hogy a maximális térfogat az eredeti kétszerese, hanem annál nagyobb, így az entrópia is a vártnál nagyobb lesz.

A modellnek természetesen számos hiányossága van, kezdve azzal, hogy a részecskék csak 4 irányba tudnak elmozdulni. Habár az egyenlő hőmérséklet miatt itt kevésbé jelentős, a kinetikus gázelmélet fundamentális eleme a részecskék feltételezett tökéletesen rugalmas ütközése, míg a modellben azok kölcsönhatás nélkül áthaladnak egymáson. A részecskék mérete a tartályhoz képest jóval nagyobb a valóságnál (6:400; ez ugyan tetszőlegesen állítható, valódi értékek

nem érhetőek el). A tartály falairól sem pattannak vissza, az csupán matematikai korlátként jelenik meg. Emellett a kinetikus elmélet hiányosságait is tartalmazza (pl. elhanyagolt gravitáció, van der Waals-erők stb.). Mindazonáltal a modell teljesíti a célját, a szemléltetést.

5. Az entrópiánövekedés univerzális viszonylatban

Felmerülhet bennünk, hogy ha a rendezetlenség valóban növekszik, hogyan létezhet megannyi naprendszer, galaxis és galaxiscsoport, az életről nem is beszélve. Ezek a rendezett struktúrák az entrópia csökkenésére engednének következtetni. Viszont részletesebb vizsgálat után belátható, hogy a második főtétel fennáll. Az **ősrobbanás utáni alacsony entrópia** elmélete (*múlt hipotézis*) szerint a relatív kis méretű univerzumban (korai korszak) az energia széteszlott és az entrópia elérte lehetséges maximumát. Ahogy az univerzum tágult, a lehetséges entrópiamaximum gyorsabban nőtt, mint, amit az energia széteszlása követni tudna, vagy is a kezdeti entrópia csak viszonylagosan volt alacsony. Azonban a tendencia ugyanúgy fennmaradt. Az egymásba ütköző atomok hőt termeltek, – növelve az entrópiát – megteremtve a magfúzió feltételeit (pl. magas hőmérséklet), létrehozva a csillagokat, majd galaxisokat. Viszont *a csillagok és a köztük lévő tér (közeg) entrópiája a korai korszakénak csak töredéke, hiszen nagyságrendekkel több entrópiája van a neutrínóknak és a kozmikus háttérsugárzás fotonjainak.*



2. ábra^[8] (lefordított)

Mindazonáltal létezik az entrópiának egy további forrása, amely nagyságrendekkel nagyobb értékekkel rendelkezik. 1972-ben Jacob Bekeinstein (1947-2015) megsejtette, hogy a *fekete lyukaknak is lehet entrópiája*. Ez eleinte ellentmondásnak tűnt, mivel azt jelentené, hogy ezek az objektumok hőmérséklettel is rendelkeznek, tehát sugároznak, vagyis nem láthatnánk őket feketének. Azonban 1974-ben Stephen Hawking (1942-2018) megmutatta, hogy a fekete

lyukak is sugároznak (*Hawking-sugárzás*).^{[8][22][23][24][25]} Így bebizonyosodott, hogy rendelkeznek – nem is kevés – entrópiával, amelynek nagysága ráadásul kizárólag a felületük nagyságától függ: $S_{BH} = \frac{k_B}{4l_P^2} A$ (k_B a Boltzmann-állandó, l_P a Planck-hosszúság).^[26]

6. Az élet létrejötte a Földön

6.1. Lokális entrópiaforrás: A Nap

Az entrópiánövekedés jelenségének vizsgálatához azonban nem kell feltétlen ilyen messzire menni. A Föld hősugárzás közben a Naptól kapott szinte összes energiát szétszórja a világűrbe (teljesül az energiamegmaradás). Ez azonban a *napfénynél hússzor kisebb energiájú (hússzor nagyobb hullámhosszú) fotonokkal történik.*^[27] Úgy is megfogalmazhatjuk, hogy egy Napból érkező – nagy energiájú – fotont a Föld hőháztartása húsz darab egyenlő energiájúra „darabol fel”, az ilyen foton pedig már kevésbé használható (nehezebb vele munkát végeztetni). A 2. ábráról leolvasható, hogy a csillagok entrópiája relatív alacsony, ezért a Nap alacsonyabb entrópiájú, „nagyobb kötegekbe *rendezett*” energiát ad, míg a Föld által sugárzott energia szétterjedtebb, nagyobb entrópiájú, mint ami a Napból érkezik. Tehát az *ökoszisztéma fenntartásához* – és létrehozásához – nem elég, hogy az energiát kapjon, *az energiának rendezettnak is kell lennie.* Vagyis a mi csillagunk, a Nap, elsősorban nem hővel, hanem entrópiával lát el minket, és ezzel úgymond „rendre utasítja” a földi atomok sokaságát.

6.2. Fizikai darwinizmus?

Az előzőkből levonhatnánk a következtetést, hogy az univerzum egyszerűen hagyja, hogy egyre rendezetlenebb és rendezetlenebb állapotba kerüljön, így perszonifikálva akár lustának, hanyagnak, tétlenkedőnek is mondhatnánk. A természet azonban nem rest. A föld entrópiacsökkentő folyamatának van egy rendkívül fontos – úgy is mondhatnánk, szerves – része: az **élet**. Az élőlények termodinamikailag nyitott rendszerek, hiszen a táplálkozás által felvett energia egy részét hővé alakítják (ennek nagysága fajtól függően változik). Tehát a saját, igen rendezett felépítésük ellenére összességében növelik a környezetet, és ezáltal a teljes ökoszisztéma entrópiáját. Talán éppen ez a feladat az oka az élő szervezetek létrejöttének. A természet úgymond logikusan tenné, *ha az entrópiánövekedés közben olyan rendszereket hozna létre, amelyek tovább gyorsítják azt.* Így maga **az élet kialakulása is a hőtan második főtételének következménye lehet.** Ezen elmélet atyja, Jeremy England (1982-), úgy fogalmazott: *„Ha egy halomnyi véletlenszerű atomra elég sokáig rávilágítunk, nem kellene meglepőnek lennie, hogy kialakul egy növény.”*^{[8][28][29]} Elsőre meghökkentően hangzik ez a megfontolás, de gondoljunk csak meg néhány másikat, eleinte szintén radikális elméletet. A Charles Darwin (1809-1892) által megfogalmazott evolúcióelmélet szerint az egyes fajokra

jellemző tulajdonságok azért maradnak fent, mert azok a túlélés szempontjából előnyösek az adott organizmusnak.^[30] Ma már tudjuk, hogy ezek genetikai folyamatok során jönnek létre, azonban számos jellemző idővel eltűnik, mert nincs kihasználva. Pontosan ez történik talán ezzel a halomnyi atommal is. Az az elrendeződés marad fent időben tovább, amelyik jobban gyorsítja az entrópia növekedését, így – jó pár véletlenszerű sikertelen elrendeződést követően – egy idő után megjelenik egy *entrópiánövelő szerkezet, az élet*. A külvilág rendezetlenségének növelése a mi belső rendezettségünk záloga, és ha egy élőlény – gyakran, miután életet adott néhány másiknak – elpusztul, és nyom – valamint hosszútávon emlék – nélkül szűnik meg létezni. **Az élet termodinamikai értelemben vett célja az entrópiánövekedés univerzális folyamatának katalizálása.**

7. Az idő folyásának iránya

Belátható tehát, hogy minden természeti folyamat irányát a második főtétele adja, ráadásul csak ez. Az entrópiánövekedés ($\Delta S \geq 0$) az egyetlen jelenség a fizikában, amely időben visszafelé nem játszódhat le (makroszkopikusan), így ez adja magának az **idő múlásának irányát**. *Az entrópia értékének különbsége az (egyetlen), ami megkülönbözteti a múltat a jövőtől.*^[21] De mégis meddig tart ez a folyamat? Egy elképzelés szerint az univerzum entrópiája egy maximális értéket közelít, a teljes egyensúly állapotát. Ilyenkor (a fekete lyukak elpárolgása után) az univerzum nem lesz más, mint a teljesen egyenletesen szétterjedt energia (szinte) végtelen tengere (*hőhalál elmélet*). Ezt az elképzelést is illették kritikával, mivel a második főtétele csak zárt rendszerekre alkalmazható, azonban az, hogy az univerzum is ilyen, nem bizonyított (tágulás miatt). Ezenkívül a világegyetem nincs egyensúlyban, ami még cáfolhatóbbá teszi a hőhalált.^{[31][32][33]}

8. Összegzés

A tudomány állása jelenleg ez. Sok mindent nem tudunk a minket körülvevő világról, de a tapasztalat számos, az entrópiával kapcsolatos elméletet támaszt alá. Talán a rendezetlenség növekedése jelenti létezésünk alapvető okát. Egyelőre úgy tűnik, ez az egyirányú folyamat megtörhetetlen. Többek között emiatt nem mehetünk vissza az időben. Így örökre velünk marad a múlt, a megbánt vagy meg nem hozott döntések, el nem árult érzések és ki nem mondott szavak sanyargató visszhangja. Mélyre tekintve mindenhol csak azt látjuk, hogy világunk egyre rendszertelenebb, egyre kaotikusabb. Indokolatlan lenne azonban megrémülni ettől az eluralkodó káosztól. A kávé és az abba öntött tej gyönyörű mintázatokhoz hoznak létre pár rövid másodpercre (*hidrodinamikai instabilitás*), mielőtt az entrópiamaximumot elérve teljesen eggyé válnának.^[34] A világegyetemnek is meg kell csodálni ezt a rövid korszakát, amelyben élünk, amikor az anyag megjelenése ilyen változatos, és akár kivenni részünket a természet megértésében, az emberiség vég nélküli küldetésében.



3. ábra^[35]

Források:

- 1: Száray Miklós – Történelem 10. (1. kiadás, 2022; Oktatási hivatal)
- 2: https://en.wikipedia.org/wiki/Engine_efficiency
- 3: https://hu.frwiki.wiki/wiki/Lazare_Carnot
- 4: <https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy>
- 5: Dégen Csaba, Póda László, Urbán János – Fizika 10. (Emelt szintű képzéshez) (1. kiadás, 2016; Oktatókutatató és fejlesztő intézet)
- 6: Csajági Sándor, Dégen Csaba, Elblinger Ferenc, Major Balázs, Simon Péter, Urbán János – Gyűjtemény a fizika emelt szintű oktatásához (1. kiadás, 2023; Oktatási hivatal)
- 7: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_temperature
- 8: https://youtu.be/DxL2HoqLbyA?si=KaxLKoJ_2OZjNTC7
- 9: <https://www.puskas.hu/ttk/elet/84.html>
- 10: [https://hu.wikipedia.org/wiki/William_Thomson_\(matematikus\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/William_Thomson_(matematikus))
- 11: https://en.wikipedia.org/wiki/Second_law_of_thermodynamics
- 12: https://hu.wikipedia.org/wiki/Max_Planck
- 13: dr. Halász Tibor, dr. Jurisits József, dr. Szűcs József – FIZIKA Közép-és emelt szintű érettségire készülőknek (14., változatlan kiadás, 2023; Mozaik Kiadó) („A természetről tizenéveseknek” c. sorozat)
- 14: George Gamow, John M. Cleveland – FIZIKA (Svékus Olivér fordítása, eredeti cím: PHYSICS Foundations and Frontiers) (Gondolat Kiadó, 1977)
- 15: Clausius, R. (1854). „Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie”
- 16: https://hu.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Clausius
- 17: <https://www.youtube.com/watch?v=7se7K0mnRaY&list=WL&index=222>
- 18: https://www.youtube.com/watch?v=Tr_gv5CKB1Y
- 19: <https://www.youtube.com/watch?v=L1krPBVZsoc&t=663s>
- 20: [https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy_\(order_and_disorder\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Entropy_(order_and_disorder))
- 21: Carlo Rovelli – Az idő rendje (Balázs István fordítása; Park kiadó, 2022)
- 22: https://en.wikipedia.org/wiki/Jacob_Bekenstein
- 23: https://hu.wikipedia.org/wiki/Stephen_Hawking
- 24: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Hawking-sug%C3%A1rz%C3%A1s>
- 25: Csajági Sándor, Dégen Csaba, Elblinger Ferenc, Póda László, Simon Péter, Urbán János – Gyűjtemény a fizika emelt szintű oktatásához 11-12. (1. kiadás, 2022; Oktatási Hivatal)

- 26: https://en.wikipedia.org/wiki/Black_hole_thermodynamics
- 27: Dégen Csaba, Elblinger Ferenc, Simon Péter – Fizika 12. (Emelt szintű képzéshez) (1. kiadás, 2017; Oktatóskutató és Fejlesztő Intézet)
- 28: England, Jeremy (2009). Theory and Simulation of Explicit Solvent Effects on Protein Folding in Vitro and in Vivo (PhD thesis). ISBN 978-1243607553
- 29: https://en.wikipedia.org/wiki/Jeremy_England
- 30: Száray Miklós – Történelem 11. (1. kiadás, 2023; Oktatási Hivatal)
- 31: https://hu.wikipedia.org/wiki/A_termodinamika_m%C3%A1sodik_f%C5%91t%C3%A9tele
- 32: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_death_of_the_universe
- 33: Neil deGrasse Tyson – Ha felfal egy feketelyuk és egyéb kozmikus komplikációk (Laki Mihály fordítása; Kossuth Kiadó, 2017)
- 34: <https://youtu.be/pYzZ6JAwa3Y?si=RB1EGy840b-yq1ys>
- 35: https://www.simplyrecipes.com/recipes/how_to_make_cold_brew_coffee/
- 35: Négyjegyű függvénytáblázat/fehér/NAT/16129 (EKE-OFI Kiadó, 2014)

Az internetes oldalak letöltésének dátuma: 2024. 01. 18. Az esetlegesen (angol nyelvről) lefordított idézetek szöveghűek.

