

# Entropija i strijela vremena: osvrt na predavanje „Velika slika: O podrijetlu života, značenju i samom svemiru“ profesora Seana Carrola

---

Begić, Anamarija

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, University of Split, Faculty of science / Sveučilište u Splitu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:166:717762>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-10**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Science](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno – matematički fakultet

## **Entropija i strijela vremena:**

**osvrt na predavanje “Velika slika: O podrijetlu života,  
značenju i samom svemiru” profesora Seana Carrolla**

Završni rad/ Bachelor thesis

Anamarija Begić

Split, rujan 2021.

Zahvaljujem svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Larisi Zoranić, koja me najprije ohrabrila na odabir teme koja se činila kao veliki izazov, pomogla u svakom koraku pisanja ovog rada, te uvijek pokazivala poštovanje i pružala razumijevanje i podršku.

## Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu

Završni rad

Prirodoslovno – matematički fakultet

Odjel za fiziku

Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

### Entropija i strijela vremena:

osvrt na predavanje “Velika slika: O podrijetlu života, značenju i samom svemiru” profesora  
Seana Carrolla

Anamarija Begić

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika

#### Sažetak:

Ovaj rad daje osvrt na predavanje profesora Seana Carrolla pod nazivom „Velika slika: O podrijetlu života, značenju i samom svemiru“. U radu su navedene osnove termodinamike i statističke fizike potrebne za razumijevanje koncepata kojima se predavanje bavi, te je posebno promatran pojam entropije i opis drugog zakona termodinamike pomoću nje. Diskutirana je veza mikroskopskog svijeta, u kojem zakoni fizike invarijantni na vrijeme predstavljaju uzorke za ponašanje čestica, s makroskopskim svijetom u kojem prepoznajemo kauzalnost i poznajemo strijelu vremena, koja je opisana i definirana drugim zakonom termodinamike. Također je diskutiran odnos složenosti sustava i entropije, kroz koji se dolazi do zaključka kako je postojanje kompleksnosti u svemiru, poput samih ljudi, upravo rezultat rasta entropije svemira. Konačno, dano je nekoliko teorija o nastanku i svrsi života koje ne daju konačne odgovore na vječna pitanja, ali su dobra podloga za daljnje istraživanje i promišljanje.

- Ključne riječi:** entropija, strijela vremena, termodinamika, statistička fizika, emergencija, kauzalnost, kompleksnost
- Rad sadrži:** 20 stranica, 7 slika, 0 tablica, 15 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku
- Mentor:** izv. prof. dr. sc. Larisa Zoranić
- Ocjenjivači:** izv. prof. dr. sc. Larisa Zoranić  
dr. rer. nat. Mislav Cvitković, mag. phys.  
doc. dr. sc. Željka Sanader Maršić
- Rad prihvaćen:** 28. rujna 2021.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

## Basic documentation card

University of Split

Bachelor thesis

Faculty of Science

Department of Physics

Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

### Entropy and the arrow of time:

### review of the lecture “The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself” by Professor Sean Carroll

Anamarija Begić

University undergraduate study programme Physics

#### Abstract:

This paper reviews Professor Sean Carroll’s lecture entitled “The Big Picture: On the Origin of Life, Meaning, and the Universe Itself”. The paper presents the basics of thermodynamics and statistical physics needed to understand the concepts described in the lecture, considering especially the concept of entropy and the description of the second law of thermodynamics with respect to it. The connection of the microscopic world, in which the time-invariant laws of physics represent patterns for particle behaviour, to the macroscopic world in which we recognize causality and the arrow of time, described, and defined by the second law of thermodynamics, was discussed. The relationship between system complexity and its entropy is also discussed, which lead to the conclusion that the existence of complexity in the universe, like humans themselves, is precisely the result of the increasing entropy of the universe. Finally, several theories on the origin and purpose of life are given, which, though not providing definitive answers, present a good basis for further research and reflection.

**Keywords:** entropy, the arrow of time, thermodynamics, statistical physics, emergence, causality, complexity

**Thesis consists of:** 20 pages, 7 figures, 0 tables, 15 references. Original language: Croatian

**Supervisor:** Asoc. Prof. Dr. Larisa Zoranić

**Reviewers:** Asoc. Prof. Dr. Larisa Zoranić  
Dr. Mislav Cvitković  
Assist. Prof. Dr. Željka Sanader

**Thesis accepted:** September 28, 2021.

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Osnove termodinamike i statističke fizike .....</b>	<b>3</b>
2.1	Termodinamika.....	3
2.1.1	Termodinamički sustavi, procesi i jednačbe stanja .....	3
2.1.2	Zakoni termodinamike.....	4
2.1.3	Ravnoteža.....	5
2.2	Statistička fizika .....	5
2.2.1	Ansambli .....	6
2.2.2	Statistička entropija .....	6
2.3	Odnos termodinamike i statističke fizike.....	7
<b>3</b>	<b>Osvrt na predavanje .....</b>	<b>8</b>
3.1	Kauzalnost, determinizam i emergencija.....	8
3.2	Strijela vremena.....	10
3.3	Kompleksnost i entropija .....	13
3.4	Nastanak i svrha života .....	15
<b>4</b>	<b>Zaključak.....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>19</b>
<b>A</b>	<b>.....</b>	<b>20</b>

## 1 Uvod

*„If someone points out to you that your pet theory of the universe is in disagreement with Maxwell's equations — then so much the worse for Maxwell's equations. If it is found to be contradicted by observation — well, these experimentalists do bungle things sometimes. But if your theory is found to be against the second law of thermodynamics I can give you no hope; there is nothing for it but to collapse in deepest humiliation.“*

Sir Arthur Stanley Eddington, *The Nature of the Physical World* (1928)

Ovaj citat Arthura Eddingtona na zanimljiv način objašnjava koliko su znanstvenici zapravo sigurni u drugi zakon termodinamike. Ovu sigurnost na najbolji način možda pokazuje Sean Carroll, autor knjige *„The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning and the Universe Itself.“* te istoimenog predavanja na kojeg će ovaj rad dati osvrt. Kako je i zašto nastao život, jedno je od najdugovječnijih pitanja kojima se ljudi bave, a upravo ono je najveći pokretač razvoja svih znanosti, te centralno pitanje Carrollove knjige. Pitanje je to na koje, naravno, još uvijek nemamo odgovor iako ga brojni znanstvenici i mislioci pokušavaju dati kroz svoja razmišljanja, teorije i perspektive. Također, Carroll objašnjava kako njegova knjiga ne daje nikakve stroge odgovore već služi kao poticaj za daljnje istraživanje, daljnju raspravu i ispitivanje.

Kako bi se razumjeli centralni pojmovi Carrollova predavanja, potrebno je najprije poznavati osnove termodinamike i statističke fizike, koje su ukratko dane u prvom poglavlju. Termodinamika i statistička fizika grane su fizike koje se bave sustavima s velikim brojem čestica. Dok termodinamika daje opise makroskopskih stanja sustava, statistička fizika opisuje ta makroskopska stanja preko svih mogućih mikroskopskih stanja kojima se ona mogu realizirati. Osnovne termodinamičke veličine koje opisuju stanje sustava su tlak  $p$ , volumen  $V$ , temperatura  $T$  i broj čestica  $N$ , te su one međusobno zavisne. Termodinamičke sustave promatramo u ravnoteži, a opis sustava u ravnoteži dan je jednadžbom stanja. Termodinamička stanja i procese opisujemo pomoću tri zakona termodinamike, a zakon koji je temelj ovog rada je upravo drugi zakon termodinamike koji govori o stalnom rastu entropije. Entropiju smo definirali na dva načina: termodinamičkim opisom pomoću Clausiusove relacije, te statističkim opisom pomoću Boltzmannove relacije. Boltzmannova relacija daje vezu termodinamičke i statističke entropije te veže entropiju s brojem načina na koji se sustav može realizirati.

Sljedeće poglavlje daje osvrt na predavanje.

Kao prvo pitanje u predavanju postavlja se odnos mikroskopskog i makroskopskog svijeta, koje je razrađeno u prvom potpoglavlju. Promatra se na koji način se može vezati kauzalnost koja vrijedi na „ljudskoj“ skali, s determinizmom koji vrijedi na fundamentalnoj razini, a u tu svrhu se uvodi pojam emergencije i emergentnih svojstava. Ova svojstva nastaju kao rezultat

zajedničkog djelovanja malih dijelova cjeline, koji zasebno ne posjeduju to svojstvo, a primjeri se nalaze svuda oko nas, pa tako i u fizici, gdje je najzanimljiviji primjer upravo entropija.

U drugom potpoglavlju se diskutira vrijeme i zašto imamo na makroskopskom nivou preferirani smjer vremena. Vrijeme pronalazimo kao varijablu u jednadžbama koje opisuju fundamentalne zakone fizike, ali one su invarijantne na njegov smjer. S druge strane, smjer vremena prepoznajemo ne samo pomoću termodinamičke strijele vremena, već i pomoću psihološke i kozmološke strijele vremena, te se pitamo kako možemo povezati ove bitno različite predodžbe vremena. Odgovor je dan ponovno kroz primjenu drugog zakona termodinamike, koji definira strogo strijelu vremena prema rastu entropije, te statističku fiziku koja sustave opisuje preko vjerojatnosti, te uzima da je suprotan smjer vremena dozvoljen, ali malo vjerojatan.

Iduće potpoglavlje razmatra pitanje odnosa kompleksnosti i entropije: zašto i kako u svijetu postoji kompleksnost ako entropija stalno raste i teži ravnotežnom stanju. Objasnjava se razlika tih dvaju pojmova te odnos koji nam govori kako se trenutno nalazimo u najzanimljivijoj fazi razvoja svemira.

Zadnje potpoglavlje razmatra nekoliko teorija o nastanku života te Carrollovo objašnjenje istih kroz drugi zakon termodinamike.

Na kraju je dan osobni zaključak te u dodatku kratka biografija Seana Carrolla.



## 2 Osnove termodinamike i statističke fizike

### 2.1 Termodinamika

Termodinamika je grana fizike koja se bavi opisivanjem makroskopskih toplinskih pojava. Temelji se na opažanjima i kažemo da je fenomenološka znanost, te je jedno od osnovnih opažanja da toplina prelazi s tijela više temperature (toplije) na tijelo niže temperature (hladnije) dok se ne uspostavi termodinamička ravnoteža. Termodinamika se naziva i znanost o toplini, budući da istražuje izmjenu topline i mehaničkog rada, te druge prijenose i pretvorbe energije.

#### 2.1.1 Termodinamički sustavi, procesi i jednadžbe stanja

Termodinamički sustavi su sustavi velikog broja čestica reda veličine Avogadrovog broja  $N_0 = 6,02 \cdot 10^{23}$  te ih promatramo kao jedno makroskopsko stanje, koje nazivamo termodinamičko stanje.

Termodinamički sustavi opisani su osnovnim ulaznim parametrima: tlak  $p$ , volumen  $V$ , temperatura  $T$  i broj čestica  $N$  koji su međusobno ovisni. Često se koristio uvjet da je broj čestica konstantan, te se definira jednadžba stanja koja povezuje tri preostale veličine:

$$f(p, V, T) = 0 \quad (2.1)$$

Jednadžba stanja daje vezu termodinamičkih veličina u ravnotežnom sustavu.

Procesi su prijelazi iz početnog u konačno stanje preko kontinuiranih međustanja. Ukoliko su početno i konačno stanje jednaki govorimo o kružnim procesima. Termodinamički procesi mogu biti povratni (reverzibilni) ili nepovratni (ireverzibilni). Povratni proces bio bi onaj kod kojeg je svako međustanje ujedno i ravnotežno stanje, odnosno ako u svakom međustanju vrijedi jednadžba stanja sustava. Jednadžbu stanja teoretskim razmatranjima možemo odrediti samo za najjednostavnije sustave, a dvije osnovne jednadžbe stanja u termodinamici su jednadžba stanja idealnog plina i Van der Waalsova jednadžba [2].

Plin nazivamo idealnim ako je srednja kinetička energija translacijskog gibanja molekule mnogo veća od srednje potencijalne energije po čestici. U prirodi se, u dobroj aproksimaciji, jako razrijeđeni plinovi ili plinovi na visokim temperaturama, mogu smatrati idealnim plinom. Jednadžba stanja idealnog plina dana je izrazom:

$$pV = nRT \quad (2.2)$$

gdje su apsolutna temperatura  $T$ , volumen spremnika u kojem se plin nalazi  $V$  i tlak plina  $p$  povezani pomoću plinske konstante  $R$  i broja molova  $n$ . Mol je količina materije koja sadrži  $N_0$  čestica, a plinsku konstantu dobijemo množenjem Avogadrova broja s Boltzmannovom konstantom  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K, te ona iznosi  $R = kN_0 = 8,31$  J/K. Van der Waalsova jednadžba opisuje realne plinove, uzimajući u obzir koncentraciju i protežnost molekula, zbog čega se uvode fenomenološki parametri  $a$  [Pa · m<sup>3</sup>], koji predstavlja mjeru za privlačenje

čestica, i  $b$  [ $\text{m}^3/\text{mol}$ ], koji predstavlja volumen kojeg zauzimaju molovi čestica, te jednačba glasi:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (2.3)$$

Ove jednačbe daju nam vezu između makroskopskih veličina, a za njihovo razumijevanje potrebna je kinetička teorija materije, koja će biti obrađena u okviru statističke fizike.

### 2.1.2 Zakoni termodinamike

Temelj termodinamike su termodinamički zakoni iz kojih proizlaze opisi termodinamičkih sustava i procesa.

Prvi zakon termodinamike govori o očuvanju energije u termodinamičkom procesu. Unutarnja energija sustava  $U$  je ukupna energija svih čestica sustava, odnosno zbroj kinetičkih energija svih molekula i energije njihova međudjelovanja. Može se mijenjati procesom rada  $W$ , u kojem se mijenja volumen tijela i izmjenom topline  $Q$ , u kojem je volumen očuvan, a prvi zakon kaže da je ukupna promjena unutarnje energije jednaka zbroju promjene energije u ova dva procesa:

$$dU = dQ - dW. \quad (2.4)$$

Drugi oblik prvog zakona termodinamike bio bi da nije moguće konstruirati *perpetuum mobile* prve vrste, odnosno hipotetički stroj koji bi stvarao energiju.

Drugi zakon termodinamike ima više međusobno ekvivalentnih formulacija:

Kelvinova formulacija glasi: „Ne postoji kružni proces čiji bi jedini rezultat bio rad i izmjena topline s jednim tijelom.“ Ona se eksperimentalno potvrđuje nemogućnošću konstruiranja *perpetuum mobile* druge vrste.

Clausiusova formulacija glasi: „Kružni proces čiji bi jedini rezultat bio prijenos unutarnje energije s hladnijeg na toplije tijelo nije moguć.“

Clausiusova relacija vrijedi za sve kružne procese i dana je kao:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0. \quad (2.5)$$

Znak nejednakosti odgovara nepovratnim procesima, a znak jednakosti povratnom. U slučaju povratnog procesa definira se entropija:

$$dS = \frac{dQ}{T}, \quad (2.6)$$

sa sljedećim svojstvima:

1. Pri kružnom procesu promjena entropije iščezava.

2. Entropija je funkcija stanja sustava, što znači da njezina promjena ne ovisi o procesima kojim sustav prelazi iz jednog u drugo stanje, nego samo o vrijednostima entropije tih dvaju stanja.
3. Entropija zatvorenog sustava raste, što je rezultat Clausiusove relacije:

$$dS \geq 0 \quad (2.7)$$

Ovo zadnje svojstvo nam daje novu formulaciju drugog zakona termodinamike koja se odnosi na stanje sustava i razlikuje se od Kelvinove i Clausiusove koje se odnose na procese. Kako entropija zatvorenog sustava raste, kada sustav postigne stanje najviše entropije više se neće mijenjati, što znači da je stanje maksimalne entropije zapravo ravnotežno stanje sustava. Ova formulacija drugog zakona termodinamike koristi se i diskutira u ovom radu.

Treći zakon termodinamike govori da je entropija bilo kojeg sustava na apsolutnoj nuli konstantna, te se uvijek može uzeti da je ona jednaka nuli [2].

### 2.1.3 Ravnoteža

Termodinamičke sustave promatramo u ravnoteži. Ravnoteža može biti toplinska, mehanička ili kemijska, a možemo ih objasniti na primjeru sustava koji se sastoji od dva nezavisna podsustava različitih temperatura, tlakova i volumena, odijeljena barijerom.

U slučaju kada je barijera nepomična, što znači da se volumeni podsustava ne mogu mijenjati i dozvoljava termički kontakt podsustava, odnosno prijenos energije, ali ne i razmjenu čestica, toplina će prelaziti iz podsustava više temperature na podsustav niže temperature i postići će ravnotežu kada se temperature izjednače. Tada govorimo o toplinskoj ravnoteži.

Ako je barijera pomična, a temperature podsustava jednake, volumeni podsustava se mijenjaju sve dok se tlakovi ne izjednače, na način da se volumen povećava za podsustav s većim tlakom, i tako postizemo mehaničku ravnotežu.

U slučaju kada nema barijere te podsustavi mogu izmjenjivati i broj čestica, uvodi se u opis i kemijski potencijal koji ovisi o broju čestica: sustav s većim kemijskim potencijalom gubi čestice, dok ih sustav s manjim kemijskim potencijalom prima. Stoga se kemijska ravnoteža postiže izjednačavanjem kemijskih potencijala.

## 2.2 Statistička fizika

Statistička fizika je grana fizike koja se bavi promatranjem sustava velikog broja čestica te daje opis sustava preko funkcija raspodjele, odnosno daje vjerojatnosti da se sustav nađe u nekom određenom mikroskopskom stanju. Za razliku od termodinamike, ona je aksiomska teorija jer njezini postulati ne proizlaze iz eksperimenata. Statistička fizika nam daje uvid u mikroskopska stanja danih sustava te preko njih računa određene veličine promatrane u termodinamici poput energije i entropije. Dio klasične statističke fizike je i kinetička teorija koja je prva dala poveznicu između mikroskopskih i makroskopskih veličina [3].

Prema kinetičkoj teoriji apsolutna temperatura je srednja kinetička energija nasumičnog translacijskog gibanja molekula:

$$T = \frac{2\bar{E}}{3k} [\text{K}], \quad (2.8)$$

a tlak je rezultat udaranja molekula o stijenu posude te je za idealni plin jednak  $2/3$  srednje kinetičke energije nasumičnog translacijskog gibanja molekula sadržanih u jediničnom volumenu:

$$p = \frac{2}{3} c \bar{E} [\text{Pa}], \quad (2.9)$$

gdje je  $c = N/V$  koncentracija molekula [2].

Ovaj primjer jasno pokazuje kako na osnovu svojstava pojedinih čestica u sustavu, kao što su masa i brzina molekula, odnosno kinetička translacijska energija, možemo dobiti opis svojstva koje karakterizira cijeli sustav, poput temperature i tlaka.

### 2.2.1 Ansambli

Osnovni pojam u statističkoj fizici je ansambl: skup svih replika sustava odnosno stanja koja su moguće realizacije sustava na mikroskopskom nivou koje zadržavaju ista makroskopska svojstva, odnosno obuhvaćaju jedan ravnotežni termodinamički sustav.

Kanonski ansambl opisuje sustav u termičkoj ravnoteži s okolinom te su za njega volumen, temperatura i broj čestica konstantni. Mikrokanonski ansambl opisuje zatvoreno i izolirano termodinamičko stanje, gdje su konstantni broj čestica, volumen i energija. Velekanonski ansambl opisuje otvoreni sustav, odnosno sustav čiji broj čestica nije konstantan, ali temperatura, volumen i kemijski potencijal jesu.

Ponašanje ansambla definiramo u faznom prostoru  $\Gamma$ . Fazni prostor konstruiran je od prostora kojeg razapinju koordinate i prostora kojeg razapinju količine gibanja, a dimenzija sustava ovisi o stupnjevima slobode  $f$  i jednaka je  $2f$ . Mikroskopsko stanje sustava je skup položaja i količina gibanja svih čestica u sustavu. Na primjer za kanonski ansambl, sa  $N$  jednoatomnih čestica, jedno stanje bit će definirano vektorom  $\vec{X}$  koji sadrži sve vektore količine gibanja  $\{\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_N\}$  i sve vektore položaja  $\{\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N\}$ .

Fazni volumen koji pripada nekom ansamblu predstavlja skup svih faznih točaka od kojih svaka predstavlja jedno mikroskopsko stanje sustava. Ponašanje ansambla u faznom prostoru opisano je putanjama koje su definirane zakonima klasične mehanike. Distribucija faznih točaka u faznom prostoru, kao i putanje, za neki ansambl je određena funkcijom raspodjele [3].

### 2.2.2 Statistička entropija

Entropija je osnovni koncept koji se diskutira u ovom radu. Uz termodinamičku entropiju, definira se i statistička entropija:

$$\sigma = \ln \frac{\Delta\Gamma}{h^f} \quad (2.10)$$

gdje  $\Delta\Gamma$  predstavlja volumen faznog prostora nekog ansambla, a  $h^f$  je volumen kvantne ćelije, odnosno prostor koji zauzima jedno stanje sustava, u kojem  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  predstavlja Planckovu konstantu. Ova definicija nam kaže da je entropija opisana ukupnim brojem mikroskopskih stanja u ansamblu koji opisuje neki ravnotežni makroskopski sustav. Logaritamska funkcija omogućava aditivnost entropije koja je definirana termodinamikom. Također, ravnotežno stanje definira najvjerojatnije stanje pa je u tom slučaju fazni volumen maksimalan, odnosno entropija je maksimalna, što odgovara drugom zakonu termodinamike.

Poveznicu statističke i termodinamičke entropije možemo dobiti promatranjem kako se ostvaruje ravnotežno stanje uz različite kontakte dva podsustava te usporedbom relacije koje daje statistički pristup s termodinamičkim relacijama, čime dobijemo izraz:

$$S = k\sigma \quad (2.11)$$

gdje  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$  predstavlja već spomenutu Boltzmannovu konstantu koja definira potrebne mjerene jedinice [3].

Ova formula poznata je kao Boltzmannova definicija entropije:

$$S = k \ln B \quad (2.12)$$

gdje se  $B$  naziva termodinamička vjerojatnost ili statistička težina koja označava broj mikroskopskih stanja kojima se dano makroskopsko stanje može realizirati.

### 2.3 Odnos termodinamike i statističke fizike

Statistička fizika i termodinamika su usko vezane. Termodinamika opisuje svojstva i procese na makroskopskom nivou te ima vrlo široku primjenu na različite sustave, od npr. čaše vode, plinovitih planeta, crnih rupa, pa i teorija koje opisuju svemir. Termodinamika može objasniti i kako se mijenjanju svojstva materijalu u kontaktu, ali ne može objasniti postojanje različitih svojstava kod različitih materijala. Da bi objasnili prirodu materije potreban nam je mikroskopski uvid, koji daje statistička fizika. Ona daje objašnjenje prema svojstvima atoma i molekula koje grade sustav i definira vezu s termodinamičkim veličinama. Stoga statistička fizika uz mikroskopski pristup i termodinamika uz makroskopski pristup čine snažan alat za znanstveno istraživanje složenih monogočestičnih sustava, procesa i pojava.

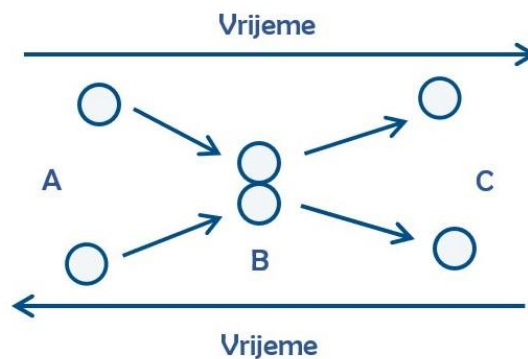
### 3 Osvrt na predavanje

U ovom poglavlju dan je osvrt na predavanje „*The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*“ koje je prof. Sean Carroll održao na „*Talk at Google*“ platformi. Uz poznavanje navedenih osnova termodinamike i statističke fizike, dat će se pregled osnovnih pitanja koja Carroll u svom predavanju raspravlja, te diskutirati i dati osobna razmišljanja o istim.

#### 3.1 Kauzalnost, determinizam i emergencija

Krenimo od uvodnog pitanja: veza mikroskopskog i makroskopskog svijeta. Filozofija kauzalnosti poznata je još od Aristotela, koji je predstavio svijet kao niz uzroka i posljedica. Prema Aristotelu, prirodno stanje svijeta je stanje mirovanja, a kako bi nastalo gibanje mora postojati pokretački uzrok. Gibanje je Aristotel podijelio u dvije klase: prirodno, kod kojeg ne vidimo jasan uzrok i čiji uzrok leži u svojstvima tvari, te nasilno koje je uzrokovano nekim vanjskim pokretačem. Ovaj zakon kauzalnosti se u fizici zadržao sve do Isaaca Newtona, koji je sintetizirao dotadašnje spoznaje o gibanjima, osmislio novi pogled na uzroke gibanja te sve povezo u smislenu cjelinu koju danas nazivamo Newtonovom mehanikom, a koja je potpuno potisnula Aristotelovu fiziku [4]. Uz Newtona kao začetnika klasične mehanike, nove ideje dao je i Pierre Simon Laplace, odbacujući sliku o mirovanju kao prirodnom stanju te prepoznajući gibanje kao novo prirodno stanje i uvodeći deterministički pogled.

Ove pristupe Carroll uspoređuje na primjeru zakona očuvanja količine gibanja, koji vrijedi u svim zatvorenim sustavima. Zamislimo da snimamo sudar dviju kuglica koje se gibaju po savršeno glatkoj površini, shematski prikazan na slici 1.



**Slika 1.** Shema sudara dviju kuglica i invarijantnosti na vrijeme. Položaj A predstavlja približavanje kuglica, položaj B sudar te položaj C ponovno udaljavanje. (prema ideji iz [1])

U jednom trenutku kuglice se gibaju jedna prema drugoj (događaj A), sudare se (događaj B,) i konačno se razdvoje (događaj C). No, ako bismo snimku pogledali unatrag, dobili bismo isti slijed događanja kao i u prvom slučaju. Obje situacije su zakonima fizike dozvoljene i ne govore nam ništa o smjeru vremena, odnosno ne razlikuju prošlost od budućnosti, stoga ne možemo

razlikovati niti uzrok i posljedicu. Štoviše, poznavajući Newtonove zakone možemo iz jednog stanja kuglica odrediti drugo, što nam govori da su stanja ta povezana, ali ne uzročno-posljedičnom vezom, već uzorkom ponašanja, a taj uzorak je upravo zakon očuvanja količine gibanja. Laplace je definirao i pojam Laplaceovog demona – hipotetskog bića koje poznaje u danom trenutku položaje i količine gibanja svih čestica u svemiru i koje na osnovu toga poznaje sve što se dogodilo u prošlosti i sve što će se dogoditi u budućnosti. Svako stanje svake čestice je Laplaceovim demonom određeno i to je upravo razlog da Laplaceov pogled na svijet definira determinizam. Newtonova mehanika, kao i brojne druge fizikalne teorije, u svom matematičkom formalizmu sadrže Laplaceov determinizam. Dakle, na fundamentalnoj razini, odnosno mikroskopskoj skali ne postoji uzročno-posljedična veza, nego događaji prate uzorke koje poznajemo kao zakone fizike.

Carroll sada predstavlja sljedeću tvrdnju: svi zakoni fizike kojima podliježe svakodnevni život su nam već poznati! Tvrdnja je potkrijepljena izrazom kojeg je formulirao Frank Wilczek i nazvao ga „*Core Theory*” koji opisuje sve čestice koje sačinjavaju svijet oko nas i sve zakone fizike koji djeluju na razini koja je bitna za ljudski život. Kako bi se objasnila „*Core Theory*“ potrebna je viša razina poznavanja kvantne fizike, no u ovom radu nas ne zanima njezin opis, ona nam samo daje podlogu za postavljanje novih pitanja. Dakle, teorija govori da, iako možda ne poznajemo sve čestice koje postoje, kao ni sve zakone koji bi nam dali objašnjenja za sve pojave (poput kvantne gravitacije) znamo sve što je potrebno da možemo razumjeti svakodnevni život, i ništa novo što otkrijemo neće promijeniti ovaj opis svijeta oko nas.

Poznavajući ovu teoriju, nameće nam se sljedeće pitanje: Ako je ona točna i ako znamo da sve čestice prate uzorke te da nema uzročno-posljedične veze, zašto se onda makroskopski svijet, svijet na „ljudskoj svakodnevnoj“ skali, ne ponaša poput čestica od kojih je sastavljen? Jasno je da se filozofija kauzalnosti u svakodnevnom životu očuvala te pokazala iskustveno točnom. Znamo da svaki događaj ima svoj uzrok te da svaki uzrok ima svoju posljedicu. Kako je moguće da se naš svakodnevni život i zakoni koji djeluju u njemu toliko razlikuju od onih koji djeluju na mikroskopske čestice od kojih smo svi izgrađeni? Odgovor na ovo pitanje Carroll daje uvođenjem pojma emergencije. Emergencija je u filozofiji definirana kao osobina da cjelina ima svojstva koja dijelovi nje nemaju, a ta svojstva nazivamo emergentnim svojstvima. Emergentna svojstva nastaju tek kada manji dijelovi međusobno djeluju u široj cjelini. Pojam emergencije proširen je u svim granama znanosti, kako prirodnih tako i humanističkih [5]. Dakle, emergenciju promatramo kao svojstvo da skup mikroskopskih čestica i uzoraka po kojima se one ponašaju, kolektivno tvore makroskopske sustave i zakone kojima podliježe makroskopski svijet, iako naizgled nema nikakve veze između jednog i drugog. Primjer emergentnih svojstava u fizici su upravo termodinamičke veličine poput tlaka i temperature. Vidjeli smo kako kinetička teorija veže ova makroskopska svojstva sustava sa svojstvima čestica od kojih se sustav sadrži. Temperaturu i tlak ne možemo definirati samo za jednu česticu, one nastaju upravo zbog gibanja i međudjelovanja velikog broja čestica, i

izražene su kao usrednjeno ponašanje velikog broja čestica. Osnovni pojam koji se diskutira u ovom radu, entropija, je zapravo jedno od najzanimljivijih i najvažnijih emergentnih veličina, a njezino značenje promatramo u sljedećem potpoglavlju. Dakle, pomoću pojma emergencije možemo pokušati razumjeti zašto se mikroskopski svijet i zakoni u njemu toliko razlikuju od našeg svakodnevnog poimanja svijeta.

### 3.2 Strijela vremena

Pogledajmo najprije kako možemo objasniti makroskopsku kauzalnost, koja ne postoji na mikroskopskoj razini. Objašnjenje je dato kroz makroskopsko poimanje smjera vremena.

Psihološka strijela vremena definirana je činjenicom da znamo razlikovati prošlost od budućnosti, imamo sjećanja iz prošlosti, a budućnost još uvijek ne poznajemo. No kako definirati strijelu vremena zakonima fizike?

Fundamentalni zakoni fizike poput Newtonovih zakona ili Schrödingerove jednadžbe su invarijantni na smjer vremena. Smjer vremena možemo u ovim jednadžbama zamijeniti i zakoni će jednako vrijediti, kao što je navedeno i u primjeru sudara čestica. Vrijeme je fizikalni parametar koji definira vremenske promjene, ali ponašanje i putanje čestica nemaju preferirani smjer vremena.

Međutim, na makroskopskoj razini, smjer vremena je određen: znamo što je bilo prije a što poslije, te znamo da je smjer vremena definiran drugim zakonom termodinamike koji kaže da zatvoreni sustav teži stanju više entropije. Kako ovaj zakon definira strijelu vremena, te je li on apsolutan? Odgovor možemo dati na omiljenom primjeru većine fizičara koji se bave ovom temom: primjer spremnika s idealnim plinom, prikazan na slici 2. Zamislimo izolirani spremnik s uklonjivom pregradom u sredini. U početnom trenutku sav plin se nalazi na jednoj strani pregrade, dok je s druge strane vakuum. Uklonimo li pregradu, plin će se spontano širiti i konačno ispuniti cijeli spremnik. Što se dogodilo s entropijom? U termodinamičkom smislu, krenuli smo iz stanja niske entropije te uspostavljanjem ravnoteže dosegli maksimalnu entropiju te ako pogledamo ova dva stanja plina znamo sigurno odrediti što je bilo početno, a što konačno stanje plina.



**Slika 2.** Shematski prikaz molekula idealnog plina unutar spremnika. U početnom trenutku (lijevo) spremnik je odijeljen pregradom na dva dijela te se sav plin nalazi na jednoj strani. Nakon što uklonimo pregradu (desno), plin se raširio cijelim spremnikom. (prema ideji iz [2])



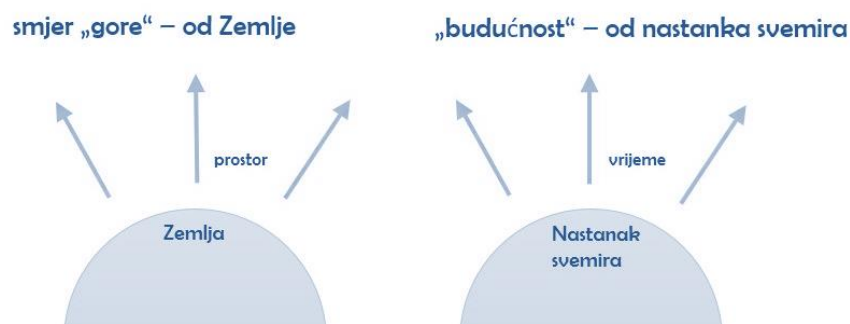
Pogledajmo sada mikroskopsku sliku. U početku sve molekule plina su na desnoj strani, a nijedna molekula plina nije na lijevoj strani. U konačnici molekule plina se rasporede na cijeli spremnik. Spremnik smo izolirali, tako da prostor stanja molekula promatramo preko svih mogućih položaja molekula, te se konačno makroskopsko stanje može ostvariti na puno veći broj načina, ima veći dostupan volumen u kojem se gibaju molekule, što znači da je entropija ovog makroskopskog stanja znatno veća od početne. Dakle, plin iz početnog stanja vrlo brzo prelazi u stanja koja su znatno vjerojatnija, odnosno entropija sustava raste dok ne dosegne maksimalnu vrijednost [6]. Znamo da se molekule mogu gibati u bilo kojem smjeru prostora, ali i smjeru vremena, budući da su putanje molekula definirane zakonima fizike koji su invarijantni na odabir smjera vremena. Dakle, kada plin postigne ravnotežno stanje postoji mogućnost da će gibanje molekula dovesti do stanja s manjom entropijom, čak i do stanja gdje su sve molekule na istoj strani spremnika. Drugim riječima, fizikalni zakoni koji definiraju gibanje molekule u spremniku dozvoljavaju da se sustav vrati u početno stanje, ali makroskopski očekujemo da ravnoteža sustava neće spontano nestati, te se čini se da su mikroskopsko i makroskopsko ponašanje u neskladu. Kako istovremeno možemo imati definirani smjer vremena i putanje na mikroskopskom nivou koje nemaju odabrani smjer vremena? Objašnjenje daje statistička fizika: iako su na mikroskopskoj skali sve konfiguracije još uvijek moguće, da bi se ponovilo stanje gdje su sve čestice na jednoj strani spremnika potrebno bi bilo približno  $10^{3 \cdot 10^{19}}$  godina, a starost svemira procjenjuje se na  $10^{14}$  godina što bi zapravo značilo da se ovakvo stanje neće ponoviti nikada unutar vremenskih intervala karakterističnih za ljudski život [2]. Zbog ovako male vjerojatnosti, mogućnost ostvarenja ovakvih stanja niže entropije zanemarujemo. Ovaj primjer govori nam kako drugi zakon termodinamike nije apsolutan, ali je očuvan u granicama vremenskih intervala svemira.

Dakle, ako znamo da entropija sustava raste, onda jasno znamo da je stanje niže entropije zapravo stanje koje je postojalo prije stanja više entropije, odnosno sada poznajemo strijelu vremena koja očigledno prati smjer rasta entropije. Vratimo li se na prethodni opis statističke fizike koja govori da ipak postoji vjerojatnost da sustavi idu u smjeru niže entropije, to nam zapravo daje i vjerojatnost da strijela vremena ide u suprotnom smjeru od onog kojeg poznajemo, no takvo ponašanje ima vrlo malu vjerojatnost da se ostvari.

Carroll sada postavlja pitanje, ako znamo da entropija raste i teži maksimalnoj vrijednosti, zašto onda ona sada nije maksimalna? Zašto je ikada postojalo stanje niže entropije? Na ova pitanje još nemamo odgovore, ali se kreće od ideje da je u nekom početnom trenutku nastanka, svemir bio u stanju najniže entropije. Spomenimo i Carrollovu nedavno formuliranu teoriju u kojoj govori kako je nemoguće ostvariti potpuno ravnotežno stanje, jer će u svemiru uvijek postojati energija (kako on kaže energija vakuuma ili tamne materije), što vodi do blagih fluktuacija svih polja u svemiru. Nakon dovoljno vremena, pojavit će se negdje u svemiru i velika fluktuacija, upravo takva da potakne inflaciju, odnosno stvaranje novog svemira. Carroll pretpostavlja da takve procese možemo gledati i unatrag, pa bi prema njemu postojali i drugi nastanci svemira

u kojima je strijela vremena imala suprotan smjer od one koju mi poznajemo. Njegova je ideja, stoga, da je cijeli svemir simetričan u kontekstu smjera vremena. [7]

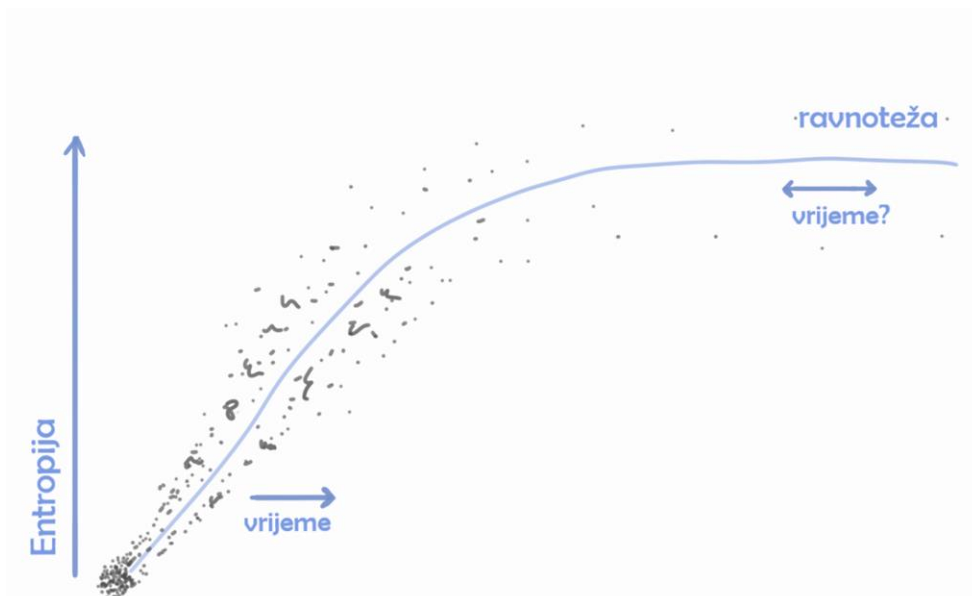
Vratimo se na poznatu strijelu vremena „našeg svemira“. Možemo promotriti usporedbu s prostornim smjerom. U svemiru nema preferiranih smjerova, promotrimo li astronauta koji pluta svemirom, on ne bi mogao razaznati što je dolje a što gore, što lijevo a što desno. Svi smjerovi su isti. No, na Zemlji znamo strijelu prostora: ako pustimo neki predmet on će padati, njegov smjer je prema dolje. Carroll objašnjava kako je razlog prepoznavanja strijele prostora upravo taj što se nalazimo u blizini utjecajnog objekta, odnosno objekta velike mase - Zemlje. Na isti način možemo promotriti i strijelu vremena: smjer poznajemo jer se nalazimo u vremenu nakon velikog utjecajnog događaja, nastanka svemira (slika 3).



**Slika 3.** Usporedba strijele prostora i strijele vremena. (prema ideji iz [1])

Carroll sada daje objašnjenje kauzalnosti na jednostavnom primjeru: promatramo razbijeno jaje. Iskustveno znamo da to jaje u nekom prethodnom trenutku nije bilo razbijeno, ali ne možemo nikako zaključiti što će se s tim jajetom dalje dogoditi. Kao razlog tog iskustvenog razmišljanja Carroll navodi pretpostavku o kojoj u svakodnevnom životu ni ne razmišljamo, a to je da rani svemir odgovara stanju niske entropije, te se razvija na način da se entropija svemira povećava. Dakle, kada ne bismo uključili ovu ideju, već samo temeljne zakone fizike, jednak broj mogućih događaja postojao bi i za budućnost kao i za prošlost, ali zbog postojanja dodatnog faktora, odnosno poznavanja niske entropije ranog svemira, o prošlosti možemo zaključiti puno više nego o budućnosti. Razbijeno jaje koje promatramo u ovom slučaju je dokaz (eng. *record*) nekog prošlog događaja, odnosno dokaz da je jaje u nekom trenutku bilo ispušteno ili bačeno. Na ovaj način djeluju i uzroci i posljedice i ta kauzalnost u makroskopskom svijetu postoji upravo zbog našeg poimanja strijele vremena.

Ova interpretacija strijele vremena vodi sljedećem promišljanju. Ako je svemir nastao iz stanja niske entropije i teži stanju maksimalne entropije, a taj porast definira smjer vremena, u ravnotežnom stanju više ne bi bilo promjena, entropija bi bila maksimalna i ni po čemu ne bismo mogli definirati strijelu vremena (slika 4). Dakle, mogućnost poimanja strijele vremena nam upravo govori da se ne nalazimo u ravnotežnom stanju.



*Slika 4. Shematski prikaz porasta entropije od nastanka svemira do ravnotežnog stanja, uz strijelu vremena. (prema ideji iz [8])*

Uz ovako definiranu termodinamičku strijelu vremena i spomenutu psihološku strijelu vremena, postoje i druge logički nezavisne definicije, a najvažnija od njih je kozmološka. Kozmološka strijela vremena prati smjer širenja svemira. Kozmološka mjerenja pokazala su da se svemir konstantno širi, znamo da entropija s vremenom raste i znamo da je budućnost nešto čega se ne možemo sjetiti, stoga ove tri strijele imaju isti smjer. No, zanimljivo pitanje se postavlja: što ako kozmološka strijela promijeni smjer? Ako bi se svemir počeo skupljati, bi li i termodinamička strijela vremena promijenila svoj smjer u skladu s kozmološkom? Bi li se sada svi procesi počeli odvijati unatrag? Odgovor za sada nemamo, te ga možda pronađemo upravo u Carrollovoj teoriji, no samo pitanje je zanimljivo za promišljanje uz danu temu [6].

### 3.3 Kompleksnost i entropija

Dodatno pitanje koje Carroll postavlja jest: ako je svemir u nekom višem stanju entropije od početnog, kako je onda moguće da postoji kompleksnost koju prepoznajemo svuda u svijetu? Ako svemir teži stanju maksimalnog nereda, zašto onda uz porast entropije od Velikog praska, postoje složeni i uređeni sustavi čestica koji u nekom trenutku nisu postojali, poput nas samih?

Odgovor možemo dati tako da sagledamo pojmove kompleksnosti i „nereda“ s kojim često poistovjećujemo entropiju. Laički se entropija naziva mjerom nereda sustava, no ovakav opis nam daje potpuno krivi dojam da se u tom „neredu“ ne može pronaći nešto uređeno. Prava definicija entropije daje bolji uvid u odgovor na ovo pitanje. Entropija je broj mogućih realizacija makroskopskog stanja, odnosno broj načina na koje se čestice mogu posložiti, a da zadrže isto makroskopsko stanje. Kompleksnost, s druge strane, govori o tome koliko nam je

informacija potrebno za opisati neko stanje. Kao jednostavan primjer Carroll daje šalicu kave s mlijekom (slika 5).

U početnom trenutku sustav ima jednostavan opis stanja: imamo dva sloja sloj kave je ispod, sloj mlijeka iznad. Entropija je recimo tako niska<sup>1</sup>: u svakom od slojeva mogli bismo zamijeniti bilo koje molekule kave međusobno, kao i bilo koje molekule mlijeka, sustav bi makroskopski isto izgledao. No što ako zamijenimo molekulu kave s molekulom mlijeka? To nam jasno daje novo makroskopsko stanje, koje je više entropije ali i kompleksnije stanje jer sada za opis sustava trebamo više informacija budući da položaji molekula kave i mlijeka nisu više jasno odvojeni. Kada se tekućine konačno izmiješaju, dobijemo novo ravnotežno stanje u kojem svim molekulama su dostupni svi dijelovi posude, te zamjena bilo kojih molekula sada ne mijenja makroskopsko stanje. Ovakva smjesa izgleda ponovno jednostavno, homogena je, i za opis nam je potrebno recimo tako manje podataka. Dakle, u ovom procesu pratimo stalan rast entropije, ali kompleksnost u početku raste, dostiže maksimu, te se potom smanjuje (slika 6).

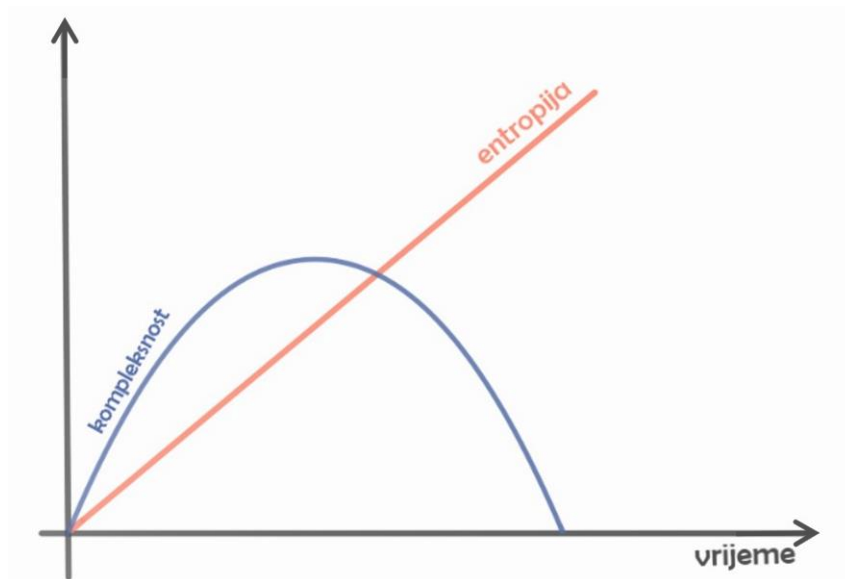


*Slika 5. Prikaz 3 posude s kavom i mlijekom. Prva posuda prikazuje stanje s niskom entropijom gdje su sloj kave i sloj mlijeka jasno razdvojeni. Druga posuda prikazuje stanje u kojem se slojevi miješaju, koje je znatno složenije od prvog i ima višu entropiju. Treća posuda prikazuje homogenu smjesu kao novo ravnotežno stanje koje je ponovno jednostavno ali je entropija maksimalna. (prema ideji iz [1])*

Na sličan način možemo promatrati i svemir: početno stanje odgovara stanju niske entropije, te se pojednostavljeno može promatrati kao vrlo gusta i glatka plazma čestica. Daljnjim rastom entropije čestice se razdvajaju te će konačno stanje najviše entropije biti ponovno homogeno stanje, ali jako male gustoće. Kompleksnost se javlja između ove dvije granice. Prepoznavanje kompleksnosti svuda oko nas nam govori da se nalazimo u razvojnoj fazi svemira. Ovaj pristup nam isto tako definira da je naš svijet osuđen na tzv. termodinamičku smrt. Kako entropija dalje raste, kompleksnost će iščezavati kao i cijeli svijet kakav poznajemo.

---

<sup>1</sup>za potrebe usporedbe koristi se vrlo pojednostavljen opis sustava, entropiju promatramo kao dio koji se odnosi na raspored položaja molekula u posudi, odnosno molekula mlijeka i molekula koje grade sustav kave, te time ne uzimamo u obzir i druge doprinose entropiji kao što su prostor količine gibanja, entropija mješanja i sl.



**Slika 6.** Ovisnost entropije i kompleksnosti o vremenu. Entropija stalno raste, dok kompleksnost najprije raste do nekog maksimuma, a onda opada s daljnjim porastom entropije. Stanje niske entropije i stanje maksimalne entropije odgovaraju najjednostavnijim makroskopskim sustavima. (prema ideji iz [1])

### 3.4 Nastanak i svrha života

Konačno, Carroll postavlja pitanje o nastanku i smislu života. Ne možemo dati odgovor na ovo pitanje, no ono što smo shvatili kroz poimanje vremena i kompleksnosti je da pojavu života možemo promatrati na način da ona nije slučajna ili nešto što nije u skladu sa zakonima fizike. Može se reći da se visoka organiziranost koju opažamo kroz postojanje galaksija, planeta, naše Zemlje i sam život na Zemlji mogu opisati kao posljedice rasta entropije svemira.

Pitanjem o nastanku života bavili su se brojni znanstvenici. Među njima je i Michael Russell, čija se teorija temelji na promatranju dviju jednostavnih molekula, vodika  $H_2$  i ugljikovog dioksida  $CO_2$ . Najjednostavniji organizmi poput bakterija i biljki koriste vodik i ugljikov dioksid za sintezu organskih spojeva, dok svi drugi oblici života u nekom smislu koriste ili konzumiraju ovakve organizme.

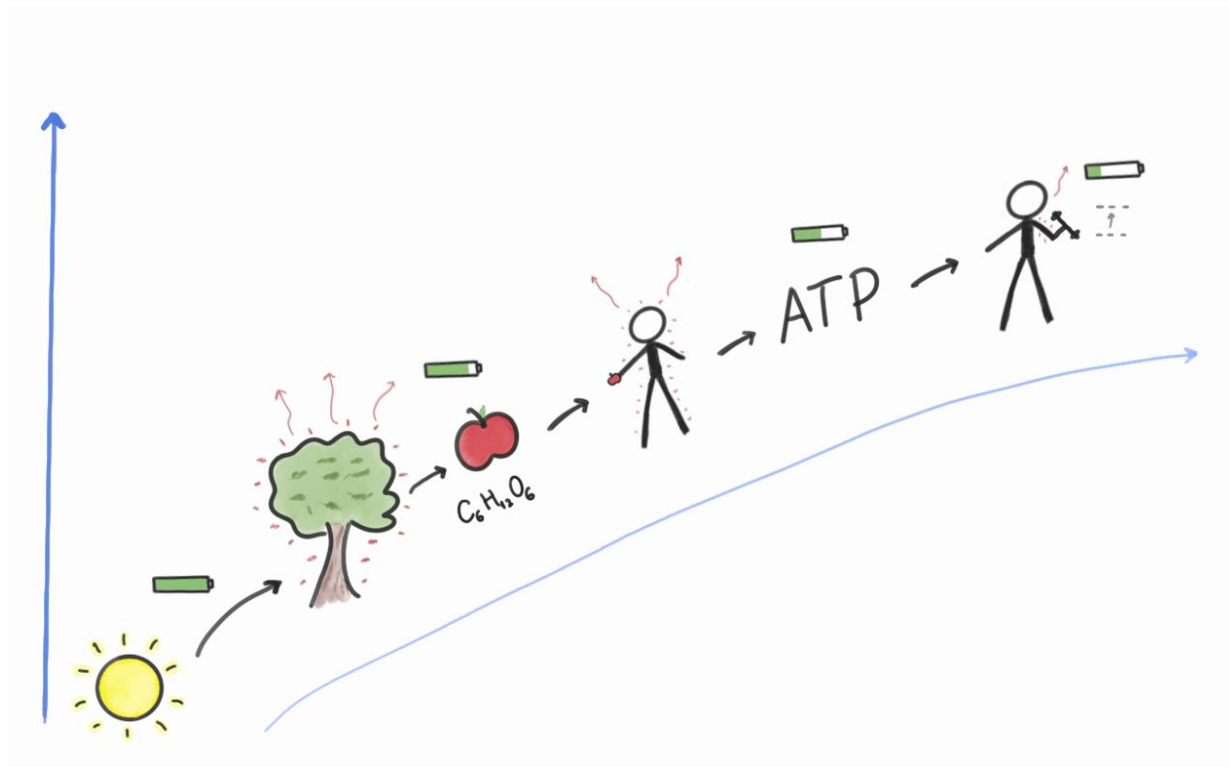
Atmosfera rane Zemlje, ili onog eona koji se često naziva Hadijem, sastojala se uglavnom od  $CO_2$ , vodene pare i dušika. Oceani nastali zbog kiša uzrokovanih kondenzacijom vodene pare sadržavali su otopljeni  $CO_2$  zbog čega su bili mnogo kiseliji nego današnji oceani. U isto vrijeme, molekule  $H_2$  koje su napuštale Zemljinu koru imale su sklonost vezanja u molekule vode, a to bi postigle upravo reakcijom eliminacije kisika iz  $CO_2$  čime bi nastala jednostavna organska molekula, metan. No, usprkos ovoj sklonosti, ove dvije molekule su stabilne u prisutnosti jedna druge. Stoga je za takvu reakciju koja bi kao produkt dala organsku molekulu potreban niz međureakcija i molekula katalizatora. Carroll objašnjava kako je ovakva ideja nastanka u skladu s porastom entropije: entropija rane Zemlje s molekulama  $H_2$  i  $CO_2$  je bila niska, reakcijom dvaju molekula nastaje nova organska molekula, što vodi povećanju entropije.

Novonastale složene molekule dalje stupaju u reakcije dajući kao produkt još složenije, a niz se nastavlja sve do stvaranja biomakromolekula, stanica i višestaničnih organizama. No za ostvarivanje nekih od reakcije potreban je složen mehanizam i molekule katalizatori. Niz međureakcija potrebnih za ostvarenje željene reakcije Russell smatra pretečom metabolizma, a molekule katalizatore prvim oblikom života. Kako Russell kaže, svrha života je hidrogenirati ugljikov dioksid. Uzevši u obzir tadašnje uvjete na Zemlji, Russell je pretpostavio kako se takav oblik života mogao razviti samo u oceanu, te je pretpostavio postojanje toplih lužnatih izvora u kiselim oceanima kakvi su nastali u Hadiju, koji bi omogućili nastanak takvog života. Njegova pretpostavka se potvrdila 2000. godine kada su istraživači otkrili takve strukture 800 m ispod površine oceana. Produkt reakcije, kojeg Russel naziva „otpadom“ je i kisik. Hadijska atmosfera nije sadržavala slobodni kisik, te je prvi kisik nastao upravo kao produkt navedenih reakcija. Znamo da se živi svijet prilagodio kako bi mogao iskorištavati skoro sve moguće oblike energije, no osnovne metabolizma se nisu promijenile, već je prisutnost kisika u atmosferi omogućila razvoj stanicama kako bi mogle obavljati sve funkcije [9].

Kao drugu teoriju razmotrimo neravnotežne sustave. U svojoj knjizi „Što je život?“ fizičar Erwin Schrödinger objašnjava kako se organizmi održavaju na životu pokušavajući odgoditi ravnotežno stanje. Metabolizam je upravo način iskorištavanja energije kako bi organizam preživio, odnosno kako bi ostao u neravnotežnom stanju. Može reći da se većina fenomena i pojava u svijetu oko nas odvija u neravnotežnim uvjetima, odnosno da smo okruženi neravnotežnim sustavima. Nobelovac Ilya Prigogin u svom radu opisuje nastajanje uređenih struktura u neravnotežnim uvjetima, tzv. disipativnih sustava, te daje ideju da je i sam život primjer disipativnog sustava [10]. Sličnu ideju zastupa i fizičar Michael Cross koji kaže da u sustavima dovedenim daleko od ravnotežnog stanja dolazi ne samo do turbulencija, već i novih organiziranih struktura, jedna od kojih je upravo život. Sličnost pronalazimo i u Carrollovoj teoriji prema kojoj svemir nastaje iz jedne velike fluktuacije.

Međutim, strukture koje nastaju u sustavima koji su daleko od ravnotežnog stanja još uvijek ne razumijemo, te su teorije koje opisuju ove sustave u razvoju. Pogledajmo primjer kroz prijenos topline konvekcijom. Za posudu s tekućinom čije je dno zagrijano poznajemo opis strujanja čestica koja prenose toplinu kroz tekućinu te ovaj uzorak može nalikovati horizontalnu prugu koja će se s vremenom raspršiti i uspostaviti će se homogeno stanje u kojem više nema strujanja čestica. No, ako je izvor topline stalno u kontaktu s posudom, tako da se dno posude vječno zagrijava, tada strujanje, pri određenim uvjetima, može dobiti nove uzorke, kao što su heksagonalne stanice u primjeru Rayleigh-Benardove konvekcije, koji nisu jednostavno objašnjivi [11]. Primjere pronalazimo posvuda, a nova istraživanja pokazala su i kako neravnotežni sustavi imaju važnu ulogu u transkripciji gena, difuziji u citoplazmi, prijenosu materijala između stanica i brojnim drugim procesima. Istraživanja su pokazala i zanimljivu činjenicu da postoji zajednički način na koji se ovi neravnotežni sustavi pojavljuju [12].

Promotrimo još što se događa s energijom koja nam je potrebna za život. U neravnotežnom stanju energija je iskoristiva, dok je sva energija u ravnotežnom stanju neiskoristiva. Izvor iskoristive energije, ili kako ju Schrödinger naziva „negativna entropija“ je Sunce. Razlog tome leži u temperaturi Sunca i ostatka svemira: kada bi svemir bio jednake temperature kao i Sunce, Zemlja bi primala još veću energiju, ali sva ta energija bila bi neiskoristiva jer bi se time postigla ravnoteža. Zamislimo sada jednostavan niz prikazan na slici 7: biljka fotosintezom koristi energiju Sunčeva zračenja i „sprema“ ju u obliku šećera. Međutim, šećer je sada izvor manje iskoristive energije od Sunca, jer se određen dio energije ispustio u okolinu u obliku topline. Taj šećer sada konzumira drugo živo biće poput životinje ili čovjeka, od kojeg kemijskim reakcijama nastaju molekule adenozin trifosfata (ATP), ali određen dio dobivene energije uložen je u kemijske reakcije, stoga ATP molekule sadrže manju količinu iskoristive energije od šećera. ATP sada koriste proteini u mišićima koje koristimo primjerice za dizanje utega, ali takva radnja ponovno ima manje iskoristive energije od ATP molekule. Dakle, u ovom nizu iskoristiva energija svakim korakom se smanjuje, a entropija raste. U tom pogledu, iako se preživljavanje organizma svodi na uporno izbjegavanje ravnotežnog stanja, samo postojanje vodi do povećanja entropije i time ubrzavanja ravnotežnog stanja cijelog svemira [13].



**Slika 7.** Niz reakcija čiji je rezultat smanjenje iskoristive energije i porast neiskoristive energije, odnosno porast entropije. (prema ideji iz [13])

## 4 Zaključak

U ovom radu objašnjeni su osnovni pojmovi termodinamike i statističke fizike, termodinamički zakoni, veza između ove dvije discipline, te je dan opis i međusobni odnos termodinamičke i statističke entropije. Uz poznavanje ovih pojmova dan je osvrt na predavanje S. Carrolla. Središnji pojam rada je entropija te drugi zakon termodinamike formuliran pomoću nje, koji govori da entropija zatvorenog sustava raste. Entropija je emergentna veličina: definirati entropiju samo jedne mikroskopske čestice nema smisla, ona nastaje tek na razini makroskopskog sustava koji se sastoji od velikog broja mikroskopskih čestica i definirana je brojem mikroskopskih stanja kojima se taj makroskopski sustav može realizirati. Pored entropije u termodinamici prepoznamo i druge emergentne veličine poput tlaka i temperature. Pojam emergencije označava upravo pojavu da makroskopski sustav ima svojstvo koje ne pronalazimo u mikroskopskim česticama koje ga izgrađuju. Pomoću emergencije objašnjen je i odnos mikroskopskog svijeta, u kojem kao uzorci po kojim se sve čestice ponašaju djeluju zakoni fizike invarijantni na vrijeme, i makroskopskog svijeta u kojem prepoznamo uzroke i posljedice te smjer vremena. Kauzalnost koja vrijedi na „ljudskoj“ skali možemo prepoznati upravo zato što poznajemo smjer vremena, a njega poznajemo jer znamo da je u ranom svemiru entropija bila niska i stalno raste prema ravnotežnom stanju, stoga strijela vremena prati rast entropije. Također, dana je veza između kompleksnosti i entropije. Naizgled se čini kako se postojanje složenih bića, planeta i galaksija protivi drugom zakonu termodinamike, jer ponekad naivno promatramo entropiju kao „nered“ sustava te očekujemo da u tom „neredu“ ne mogu postojati složene stvari. No ako bolje promotrimo pojmove entropije i pojam kompleksnosti, razumjet ćemo kako stanja jako visoke entropije kao i stanja jako niske entropije odgovaraju jednostavnim opisima sustava, a složenost se javlja upravo između ta dva stanja, u procesu rasta entropije. To nam objašnjava kako se i naše postojanje u okviru drugog zakona termodinamike može gledati kao produkt rasta entropije, a ne kao iznimka. Na koncu, dano je nekoliko teorija o nastanku života koje pokazuju kako se jedno složeno pitanje kroz različite perspektive može pojednostaviti. No, svođenje nečeg kompliciranog na jednostavnost ne umanjuje njegovu ljepotu ni čudesnost, tako ni mogući odgovori na pitanja o postanku života ne bi umanjili njegovu vrijednost. Možda nam spoznaja da je cijeli svemir nastao iz jednostavnosti te se sad nalazi u svojoj složenoj fazi, dio koje smo i sami, na neki način daje utjehu da, iako smo u usporedbi sa svemirom samo male nezamjetne točke, ipak za taj isti svemir ipak imamo vrijednost.



## 5 Literatura

- [1] Talks at Google, *The Big Picture*, Sean Carroll, URL: <https://youtu.be/x26a-ztpQs8>
- [2] P. Županović, *Termodinamika s elementima statističke fizike*, ELEMENT d.o.o., Zagreb 2016.
- [3] L. Zoranić, *radna skripta za predavanja iz kolegija Statistička fizika*, Prirodoslovno-matematički fakultet u Splitu
- [4] A. Dulčić, *Mehanika*, Prirodoslovno-matematički fakultet u Zagrebu
- [5] Wikipedija, *Emergence*, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Emergence>
- [6] I. Smolić, *Ako bi vrijeme krenulo unatrag bismo li to primjetili?* URL: <https://ideje.hr/vrijeme-krenulo-unatrag-bismo-li-to-primjetili/>
- [7] S. Carroll, *The Arrow of Time*, URL: <https://www.preposterousuniverse.com/blog/2004/10/27/the-arrow-of-time/>
- [8] Minutephysics, *Why Doesn't Time Flow Backwards?(Big Picture, Ep.1/5)*, URL: <https://youtu.be/yKbJ9leUNDE>
- [9] M.Russell, *First life*, URL: <https://www.americanscientist.org/article/first-life>
- [10] R. Balescu, *Ilya Prigogine (1917–2003)*, Nature **424**, 30 (2003), URL: <https://doi.org/10.1038/424030a>
- [11] A. Davaille, A. Limare, *7.03 - Laboratory Studies of Mantle Convection*, Treatise on Geophysics (Second Edition), Elsevier, 2015, ISBN 9780444538031, URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00128-7>
- [12] S.Ornes, *How nonequilibrium thermodynamics speaks to the mystery of life*, Proc Natl Acad Sci 2017 Jan 17; 114(3): 423–424. doi:[10.1073/pnas.1620001114](https://doi.org/10.1073/pnas.1620001114)
- [13] Minutephysics, *What is the Purpose of life?(Big Picture, Ep.5/5)*, URL: <https://youtu.be/HxTnqKuNygE>
- [14] Wikipedija, *Sean M. Carroll*, URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sean\\_M.\\_Carroll](https://en.wikipedia.org/wiki/Sean_M._Carroll)
- [15] S. Carroll, *Preposterous Universe:Sean Carroll*, URL: <https://www.preposterousuniverse.com/about/>

## A

Sean Michael Carroll (rođen 5.10.1966.) je američki fizičar sa specijalizacijom za kvantnu mehaniku, gravitaciju i kozmologiju. Profesor je na Institutu za teorijsku fiziku Walter Burke na Kalifornijskom institutu za tehnologiju (Caltech) i vanjski profesor na Institutu Santa Fe. Njegovo istraživanje je usmjereno na teorijsku fiziku i astrofiziku, posebice kozmologiju, teoriju polja i gravitaciju. Bavio se temama poput tamne materije i tamne energije, modificirane gravitacije, kršenje Lorentzove invarijantnosti, dodatnih dimenzija, topoloških nedostataka, kozmičke anizotropije mikrovalne pozadine, kršenja uzročnosti, crnih rupa te problema kozmološke konstante. [14]

Trenutno je fokus preusmjerio na temeljnija pitanja, kako u kvantnoj mehanici (podrijetlo vjerojatnosti, nastanak prostora i vremena), tako i u statističkoj mehanici (entropija i strijela vremena, nastanak i uzročno-posljedična veza, dinamika složenosti), što je unijelo filozofsku dimenziju u njegov rad. [15]

Carroll je doktorirao astronomiju 1993. na Sveučilištu Harvard, te ima titulu prvostupnika znanosti u područjima astronomije, astrofizike i filozofije sa Sveučilišta Villanova. Radio je na Tehnološkom institutu u Massachusettsu (MIT), Institutu za teorijsku fiziku Kavli na Kalifornijskom sveučilištu u Santa Barbari, te kao docent na Sveučilištu u Chicagu do 2006. godine kada mu je uskraćen mandat.

2010. godine je izabran za člana Američkog fizičkog društva, a 2014. godine mu je Američki institut za fiziku dodijelio je nagradu Andrew Gemant za "značajan doprinos kulturnoj, umjetničkoj ili humanističkoj dimenziji fizike." Godine 2015. dodijeljena mu je Guggenheimova stipendija.

Napisao je knjige *Something Deeply Hidden*, *The Big Picture*, *The Particle at the End of the Universe*, *From Eternity to Here*, i *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*.

Objavljivao je u znanstvenim časopisima poput Nature, te drugim publikacijama, kao što su The New York Times, Sky & Telescope i New Scientist. Također, redovito objavljuje na blogu Cosmic Variance. Osim toga, sudjeluje u talk-show emisijama The Mindscape i The Biggest Ideas in the Universe, te se pojavljivao u televizijskim emisijama i radio kao savjetnik u filmovima *Avengers: Endgame* i *Thor: The Dark World*. [14]