

# Fizikalni fenomeni u romanu Zdravo ljetu, zbogom

---

Krstanović, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:166:188903>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Science](#)



Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno-matematički fakultet

**FIZIKALNI FENOMENI U ROMANU  
ZDRAVO LJETO, ZBOGOM**

Završni rad / Bachelor thesis

Marija Krstanović

Split, rujan 2024.

## Temeljna dokumentacijska kartica

Sveučilište u Splitu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Odjel za fiziku  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Završni rad

### Fizikalni fenomeni u romanu Zdravo ljeto, zbogom

Marija Krstanović

Sveučilišni preddiplomski studij Fizika

#### Sažetak:

Romani znanstvene fantastike nude mnoštvo tema koje se mogu kritički analizirati iz fizikalne perspektive. Radnja znanstvenofantastičnog romana „Zdravo, ljeto, zbogom” (eng. „Hello summer, goodbye”) Michaela Coneyja se odvija na dalekom planetu koji nalikuje Zemlji, ali uz nekoliko bitnih razlika. U ovom završnom radu će se analizirati dva važna fizikalna aspekta u svijetu romana: planetarni sustav u kojem se nalazi daleki planet te fazno ponašanje tekućina na njemu. Analizom podataka iz knjige te korištenjem znanja iz klasične mehanike i termodinamike ćemo doći do zaključka je li izmišljeni svijet M.Coneyja čista fikcija ili ima fizikalni temelj.

- Ključne riječi:** problem tri tijela, fazni dijagram, numerička analiza, viskoznost, eutektik
- Rad sadrži:** 17 stranica, 10 slika, 18 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku
- Mentor:** doc.dr.sc. Martina Požar
- Ocjenjivači:** doc.dr.sc. Martina Požar  
izv.prof.dr.sc. Žarko Kovač  
izv.prof.dr.sc. Bernarda Lovrinčević
- Rad prihvaćen:** 20. rujna 2024.

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

<b>Basic documentation card</b>
---------------------------------

University of Split  
Faculty of Science  
Department of Physics  
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Bachelor thesis

**Physical phenomena in the novel Hello Summer, Goodbye**

Marija Krstanović

University undergraduate study programme Physics

**Abstract:**

Science fiction novels offer a multitude of themes that can be critically analyzed from a physical perspective. The plot of the science fiction novel "Hello summer, goodbye" by Michael Coney takes place on a distant planet that resembles Earth, but with a few important differences. In this Bachelor thesis two important physical aspects in the world of the novel will be analyzed: the planetary system in which a distant planet is located and the phase behavior of liquids on it. By analyzing data from the book and using knowledge from classical mechanics and thermodynamics, we will come to the conclusion whether M. Coney's fictional world is pure fiction or has a physical basis.

**Keywords:** three-body problem, phase diagram, numerical analysis, viscosity, eutectic

**Thesis consists of:** 17 pages, 10 figures, 18 references. Original language: Croatian / English

**Supervisor:** doc.dr.sc. Martina Požar

**Reviewers:** doc.dr.sc. Martina Požar  
izv.prof.dr.sc. Žarko Kovač  
izv.prof.dr.sc. Bernarda Lovrinčević

**Thesis accepted:** Month day, Year.

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>Opis planeta.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Fizikalni fenomeni u romanu .....</b>	<b>5</b>
3.1	Problem triju tijela .....	5
3.1.1	Generalni problem triju tijela .....	5
3.1.2	Problem triju tijela u romanu.....	7
3.2	Fazni dijagram .....	10
3.2.1	Fazni dijagram vode .....	10
3.2.2	Problem viskoznosti?.....	12
3.2.3	Mješavina tekućina-krutina .....	13
<b>4</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>17</b>

## 1 Uvod

Romani znanstvene fantastike nude mnoštvo tema koje se mogu kritički analizirati iz fizikalne perspektive. „Zdravo ljeto, zbogom“<sup>1</sup> je znanstvenofantastični roman autora Michaela G. Coneya. Radnja romana događa se na izmišljenom planetu neobičnih karakteristika. Protagonist romana je Alike-Drove koji je prikazan kao prerano zreli mladić. U priči Drove uči o svom svijetu, o tome što ga pokreće, te naravno prati njegove mladenačke probleme kao što su prijateljstvo, svijet odraslih te ljubav.

Radnja romana započinje u Alici, glavnom gradu Erta, gdje se prati obitelj Alike-Drova kako se sprema na ljetovanje u obalnu zajednicu Pallahaxi. Drovov otac je pripadnik vlade. Oni koji rade za državu imaju nadimak Parls. Lokalno stanovništvo Pallahaxia je neprijateljski nastrojeno prema Parlsima, a upravo Drovova simpatija, Browneyes, je kći krčmara i njezini roditelji ne razumiju što vlada čini za njih. Drovov otac planirao je ostati u Pallahaxiu samo na ljetovanju, ali rat sa Astima i izgradnja nove konzervare mijenjaju plan.

Vrijeme roman započinje ljeti. Tijekom ljeta voda u južnom jezeru mijenja svoj izgled zbog isparavanja i postane čvršća. U romanu naziv za to stanje vode je grum. Osim što doznajemo prirodu vode na planetu otkrivamo i neobičnu prirodu svemira. Planet se kreće oko toplog sunca nazvanog Fu. Ali kako doznajemo planetu se približava drugo sunce Rax koje je hladno i koje donosi četrdeset godina hladnoće na planetu.

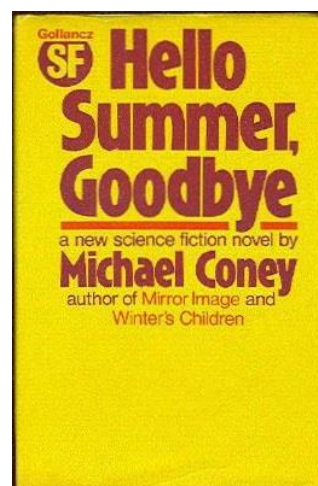
Analizom podataka iz knjige te korištenjem znanja iz klasične mehanike (problem triju tijela) i termodinamike (fazni dijagram) otkrit ćemo je li izmišljeni svijet M.Coneyja čista fikcija ili ima fizikalni temelj.

---

<sup>1</sup> Coney, Michael: *Hello summer, goodbye*, Pan Books Ltd, Cavaye Place, London, 1973.

## 2 Opis planeta

O planetarnom sustavu doznajemo od Alike-Drova. (Slika 1 prikazuje izgled romana<sup>2</sup>). Tijekom putovanja od Alike do Pallahaixia opisuje nam planet na kojem živi.<sup>3</sup> Iz njegovog opisa doznajemo da planet nalikuje na loptu koju netko drži u ruci. Lopta predstavlja svijet, a šaka koja je drži predstavlja kontinent, koji je jedini na planeti. Nadalje, kako je šaka podijeljena na dva dijela zglobovima, tako je kontinent podijeljen na dva dijela velikim centralnim planinskim lancem, koji je ujedno i granica između država Erto i Asta. Jedna polovica šake, nadlanica, je Asta, a druga polovica, prsti, je Erto, čiji pojedini dijelovi duboko zalaze u more. Ova šaka-kontinent obuhvatila je planet gotovo sasvim, ali je ipak tri oceana: dva ogromna polarna oceana i treći dug, a uzak, koji ih spaja, i kroz koji teče grum.



Slika 1 Izgled romana.

Tijekom prolaska pored Žute (Yellow) planine doznajemo da ona razdvaja pustinju od plodnih priobalnih ravnica. Brjegovi koji se nalaze u pustinji bili su goli, mrki i erozivni, već iza njih počinjali su pašnjaci, rijeke i gradovi.

Kad je došao u Palahaixi, Drove nije izlazio iz svoje kuće. Kako su dani prolazili primijetio je da su dan i noć jednako trajali. To se događalo otprilike oko sredine ljeta. Doznajemo da je tada plima prestala i da je zavladao nepromjenjivo toplo i mirno vrijeme. Kako je naznačeno u romanu: „Priroda se spremala za grum.“

Tijekom jednog popodneva u posjet Drovovom ocu došao je Horloks-Mestrel.<sup>4</sup> Bio je jedan od glavnih predstavnika vlade. Drov nije baš volio razgovore s odraslima, ali je Mestler započeo zanimljiv razgovor s njim. Htio ga je zainteresirati za astronomiju pa mu je počeo objašnjavati planetarni sustav. Iz njihova razgovora doznajemo da se planet na kojem se nalaze kreće oko sunca kojeg nazivaju Fu. Fu je toplo sunce. Planet se kreće eliptičnim orbitama oko sunca Fu. Ljeti planet dođe u blizinu sunca, pa ocean isparava, što dovodi do gruma. U jesen voda koja se digla u atmosferu počinje se kondenzirati i tada nastupaju velike kiše. Zima je hladna zato što je sunce skroz daleko. Nadalje, planet rotira oko svoje osi, koja leži položena, dakle pod pravim kutom u odnosu na osu orbitiranja oko sunca Fu.

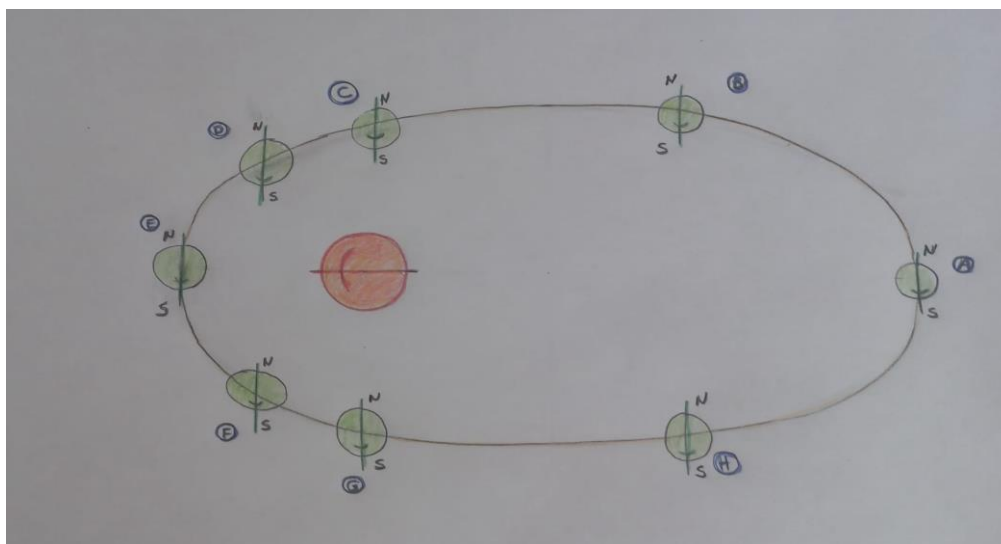
Kako bi predočio Drovu kako izgleda sustav Fu-planet nacrtao je kružić koji je predstavljao sunce Fu. Oko toga nacrtao je elipsu, sa suncem u jednom od žarišta elipse, a na elipsi nekoliko manjih kružića koji su predstavljali planet u raznim godišnjim dobima. Udaljeniji dio elipse predstavljao je zimsko razdoblje.

---

<sup>2</sup> Hello summer, goodbye, DOI: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hello\\_Summer,\\_Goodbye](https://en.wikipedia.org/wiki/Hello_Summer,_Goodbye)

<sup>3</sup> Coney, Michael: *Hello summer, goodbye*, op.cit. str. 17.

<sup>4</sup> Ibid., str. 121.



*Slika 2 Mestlerov prikaz sunca Fu i planete.*

Kako bi Drove lakše pratio Mestler je pozicije planeta označio slovima od A do H. Pozicija A predstavljala je sredinu zime. Tada je planet najudaljeniji od sunca, a noć i dan traju jednako. Planet ne pokazuje suncu uvijek isti svoj pol, nego kako godina proteče, kao da se planet polako okreće. Početak ljeta označio je slovom C i kako doznajemo tada sunce sija pravo u južni pol, a već nekih osamdeset dana nakon sija u sjeverni pol.

Mestler je objasnio Drovu kada i zašto grum teče iz Južnog preko Centralnog prema Sjevernom oceanu. Kako doznajemo na početku ljeta sunce sija vertikalno u sami južni pol, izazivajući ogromno isparavanje vode i snažan tok plime kroz uski Centralni ocean. Sredinom ljeta, označeno s E, dani u Plahaixiju, koji leži na ekvatoru, traju točno koliko i noći. Na južnom polu tada nije neizdržljiva vrućina. Tada zavlada stanje potpune ravnoteže, nazvano ekvilibrijum. Vjetrovi svojim kružnim kretanjem zadržavaju ogromne formacije oblaka nad zonom Južnog oceana i južnog pola u njegovoj sredini. Planet putuje dalje elipsom i dođe dan kad je pravo prema suncu okrenut sjeverni pol. Voda koja se vraća iz Južnog u Sjeverni ocean nije više normalna voda, već je voda koja je pretrpjela ogromno isparavanje. Ona predstavlja gustu vodu grum. Pozicija G predstavlja trenutak kad je grum na vrhuncu. Poslije toga, kako se planet brzo udaljava od sunca i brzo hladi, formacije oblaka se rašire po kontinentu. Kad planet stigne u poziciju H velike kiše su već počele. Kiše traju do početka zime, koja proteče bez padavina.

To je ono što je Mestler objašnjavao Drovu.

Doznajemo i kako su nastali oceani. Centralni ocean opisan je kao uzak i dubok. Nastao je zbog velikog potresa. Prije potresa kontinent je sasvim obuhvaćao planet. Tek nakon potresa uspostavila se veza između Sjevernog i Južnog oceana. Polarni oceani su postojali oduvijek. Kako piše u romanu „Plitki su kao dvije ogromne tepsije“. Ako sunce sija pravo u njih isuši ih do dna i ne ostaje ništa osim gruma.



Pir kraju romana Drov i njegova obitelj, te ostali Parli zatvoreni su u novoj konzervari. Kako doznajemo iz razgovora Drova i Zeldona-Frona dolazi zima koja će trajati 40 godina<sup>5</sup>. Jedini koji će preživjeti su osobe koje sebi osiguraju hranu i dovoljno goriva za ogrjev. Tako su Parli konzervaru pretvorili u „brlog“ za preživljavanje. U konzervaru nije smjelo pristupiti lokalno stanovništvo. Fron je nacrtao nešto slično kao i Mestler. Rekao je Drovo da se pretpostavljalo da je planet prvobitno bio dio Fua, pa se otrgao ili zbog orbitiranja odletio. Kako je naglasio, tada bi os okretanja bila paralelna sa osi okretanja Fua. Osim toga rekao je da postoje neobične perturbacije odnosno poremećaji u orbiti. Rekao je da postoje dvije teorije. Jedna teorija je tvrdila da nije postojala nikakva veza između života na planeti i sunca Fu. Planet je došao odnekud, dolutao je kroz svemir i sunce Fu ga je uhvatilo. Druga teorija kaže da poremećaj u orbiti izaziva sunce Rax.

Rax je hladno sunce. Rotira u istoj ravnini kao planet. Osi rotacije su im paralelne. Rax i planet su bili dio istog sustava. Fu je došao odnekud iz svemira. Planet tako jedno vrijeme kruži oko Fua, a jedno vrijeme oko Raxa. Roman završava u vremenu kada Rax privlači planet k sebi.



*Slika 3 Fronov prikaz Fua, Raxa i planeta.*

---

<sup>5</sup> Coney, Michael: *Hello summer, goodbye*, op.cit. str. 173.

### 3 Fizikalni fenomeni u romanu

#### 3.1 Problem triju tijela

##### 3.1.1 Generalni problem triju tijela

Problem tri tijela<sup>6</sup>, osim što je najjednostavniji neriješeni problem više tijela, je problem od najveće praktične važnosti. Problem tri tijela je najuspješnije rješiv analizom mogućnosti da se smanji na problem dvaju tijela. Apsorbiranjem gravitacijske konstante  $G$  u definiciju mase, za tri tijela jednažbe

$$m_i \ddot{x}_i = -G \sum_{j \neq i} m_i m_j \frac{(x_i - x_j)}{|x_i - x_j|^3} \quad (3.1)$$

se mogu zapisati:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= -m_2 \frac{x_1 - x_2}{|x_1 - x_2|^3} - m_3 \frac{x_1 - x_3}{|x_1 - x_3|^3} \\ \ddot{x}_2 &= -m_3 \frac{x_2 - x_3}{|x_2 - x_3|^3} - m_1 \frac{x_2 - x_1}{|x_2 - x_1|^3} \\ \ddot{x}_3 &= -m_1 \frac{x_3 - x_1}{|x_3 - x_1|^3} - m_2 \frac{x_3 - x_2}{|x_3 - x_2|^3}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Sa središtem mase kao ishodištem, radij-vektori povezani su relacijom:

$$m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 = 0. \quad (3.3)$$

Jednažbe gibanja triju tijela imaju najslabiji oblik kada se izražavaju u terminu relativnih radij-vektora  $s_1, s_2, s_3$  definiranih kao:

$$\begin{aligned} s_1 &= x_3 - x_2 \\ s_2 &= x_1 - x_3 \\ s_3 &= x_2 - x_1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

---

<sup>6</sup> Goldstein H., Poole C., Safko J. Classical Mechanics. Third Edition. New York: Addison Wesley, 2000. str.121.

koji su povezani relacijom:

$$s_1 + s_2 + s_3 = 0. \quad (3.5)$$

Rješavanjem (3.4) i (3.4) za  $x_k$ , dobiva se:

$$\begin{aligned} mx_1 &= m_3s_2 - m_2s_3 \\ mx_2 &= m_1s_3 - m_3s_1 \\ mx_3 &= m_2s_1 - m_1s_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

gdje je

$$m = m_1 + m_2 + m_3. \quad (3.7)$$

Trebamo (3.6) da povežemo rješenja u terminima simetričnih varijabli  $s_k$  do fiksnog centra mase. Supstitucijom (3.4) i (3.2), dobivamo jednadžbe gibanja u simetričnoj formi:

$$\begin{aligned} \ddot{s}_1 &= -m \frac{s_1}{s_1^3} + m_1G \\ \ddot{s}_2 &= -m \frac{s_2}{s_2^3} + m_2G \\ \ddot{s}_3 &= -m \frac{s_3}{s_3^3} + m_3G \end{aligned} \quad (3.8)$$

gdje je  $s_k = |s_k|$ , i

$$G = \frac{s_1}{s_1^3} + \frac{s_2}{s_2^3} + \frac{s_3}{s_3^3}. \quad (3.9)$$

Značajnu jednostavnost ove formulacije najprije su naglasili Broucke i Lass 1973. godine. Ova rješenja samo pružaju izravan put do poznatih točnih rješenja ovoga problema.

### 3.1.2 Problem triju tijela u romanu

Kako doznajemo od Drova Fu stoji u žarištu jedne elipse, planet se okreće oko njega uz napomenu da mu je os vrtnje okomita na os vrtnje Fua. Rax dolazi do tog sustava i svojom gravitacijom privlači planet koji rotira oko njega četrdeset godina te se ponovno vraća u vrtnju oko Fua, a Rax kao da se udalji od njih s tim da ima utjecaj na planet jer kako stoji u romanu zbog Raxa planet ima određene perturbacije.

#### Ideja za numeričko rješavanje triju tijela u romanu

Kako bismo pokušali riješiti ovaj problem trebamo prvo pretpostaviti izgled modela ovog sustava. Za rješavanje koristimo program Python kako bismo vizualizirali rješenje, a rješavamo numeričkom metodom. Za problem triju tijela najjednostavniji način je koristiti metodu Runge-Kutta 4 jer je lako mijenjati uvjete (početne uvjete, masa) i ispostavila se kao najlakša metoda.

Runge-Kutta <sup>7</sup>metoda je metoda za pronalaženje rješenja diferencijalnih jednadžbi. RK4 daje približnu vrijednost  $y$  za danu točku  $x$ . Formula je dana na sljedeći način:

$$y_1 = y_0 + \left(\frac{1}{6}\right)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4). \quad (3.10)$$

U ovoj formuli  $k_1, k_2, k_3$  i  $k_4$  predstavljaju koeficijente koji su definirani kao:

$$\begin{aligned} k_1 &= h * f(x_0, y_0), \\ k_2 &= h * f\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{k_1}{2}\right), \\ k_3 &= h * f\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{k_2}{2}\right), \\ k_4 &= h * f(x_0 + h, y_0 + k_3). \end{aligned} \quad (3.11)$$

S obzirom da nam mase nisu bila poznate postavljeno je da Fu i Rax imaju približno jednaku masu, a planet mnogo manju od njih.

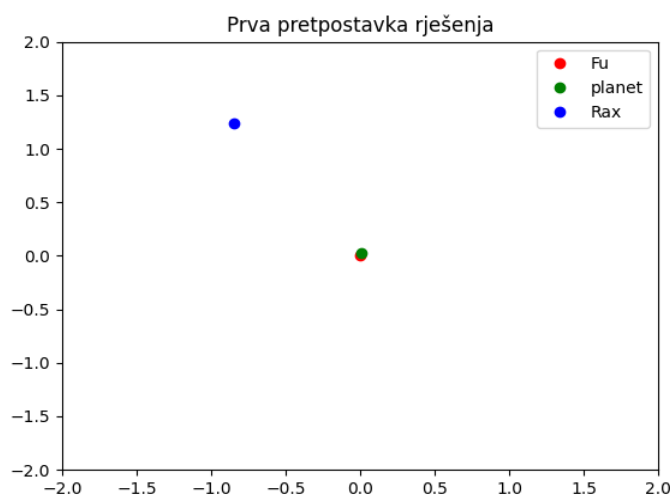
#### Pristup 1

Prvo smo pokušali riješiti ovaj problem ako pretpostavimo da je Fu masa koja miruje. Zatim smo koristeći se nebeskom mehanikom za opis kretanja Zemlje oko Sunca, odnosno Keplerovim zakonima, postavili planet na kruženje oko Fua. Rax smo postavili također na kruženje po elipsi oko planeta i Fua, ali mnogo sporije. Razlog je jednostavan. Ako Rax kruži oko planeta i Fua sporije i ako se približi dovoljno blizu da uhvati planet kako bi on kružio oko njega, postavimo da je četrdeset godina vrijeme koje planet kruži oko Raxa ujedno i vrijeme

---

<sup>7</sup> Runge Kutta RK4 Method (Fourth Order Runge Kutta Method), DOI: <https://byjus.com/maths/runge-kutta-rk4-method/>

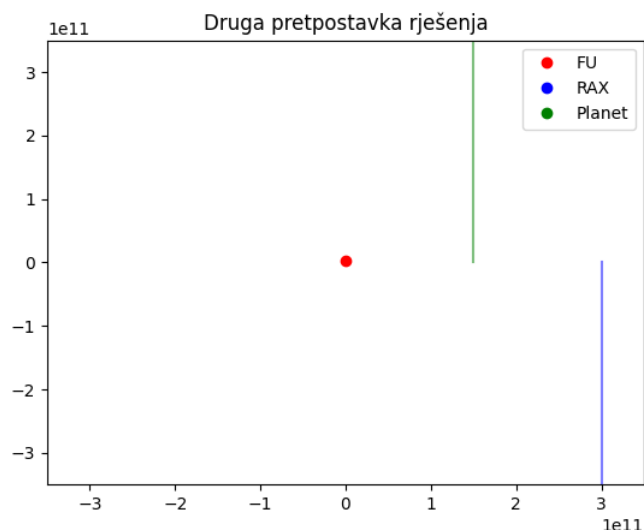
kad je blizu planeta, te kako istječe četrdeset godina planet se polako vraća na kruženje oko Fua, a Rax put svoje orbite. Međutim, rezultat nije bio ni približan. Kako sva tri tijela djeluju jedan na drugi, tako djeluju i na njihove orbite, odnosno Fu ostaje mirovati, ali Rax nije ostao u eliptičnoj orbiti nego je krenuo u kružno gibanje. Planet koji je trebao prijeći iz jedne orbite u drugu pa ponovno se vratiti, kružio je oko Fua te ga je Fu privukao k sebi. Rezultat možemo vidjeti na slici 4.



*Slika 4 Kruženje Raxa oko Fua i planeta po elipsi.*

## **Pristup 2**

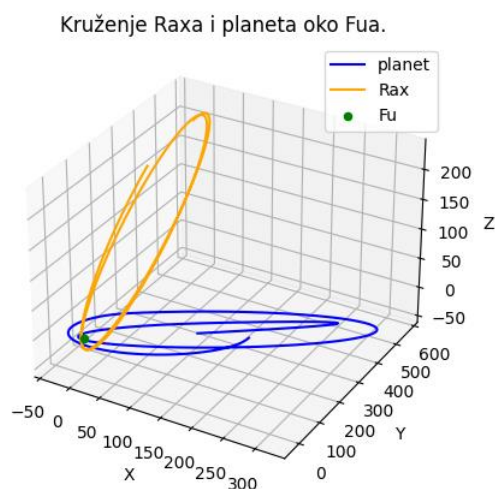
Druga pretpostavka je bila da Fu ponovno miruje, a Rax se kreće po elipsi koja kao da dodiruje elipsu kretanja planeta oko Fua. Ova pretpostavka nije u skladu s Fronovim objašnjenjem. Međutim, ako pretpostavimo ovako nije lako riješiti ni jednačbe gibanja ni napisati kod jer tada ne bismo mogli koristiti glavni problem tri tijela koji postavlja središte centra mase u centar kruženja. Ova pretpostavka bila je samo provjera mogućnosti rješenja ovog problema iz romana. Prvo se trebalo napraviti gibanje Raxa po elipsi. Potom je trebalo postaviti kruženje planeta oko Fua. Kako je ovo problem triju tijela trebala se uključiti interakcija među njima. Do interakcije dolazi u trenutku približavanja Raxa sustavu Fu-planet. Vrijeme kruženja planeta oko Raxa ograničeno je na određeni period (40 godina). No rezultat nije bio očekivan. Kada smo pokrenuli kod opazili smo da je planet išao prema „gori“, a Rax prema „dolje“. Rezultat možemo vidjeti na slici 5.



*Slika 5 Gibanje Raxa po elipsi odvojenoj od elipse planeta oko Fua.*

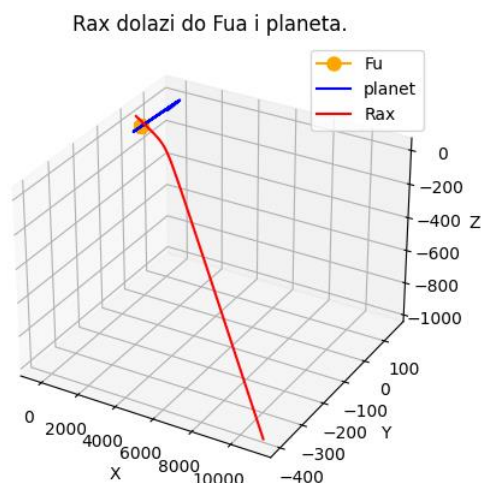
### **Pristup 3**

Treća pretpostavka je bila da Rax kruži oko Fua u yz-ravnini, a planet kruži oko Fua u xy-ravnini. Ova pretpostavka najpribližnija je Fronovom objašnjenju. Kako bismo dobili ovaj sustav koristili smo glavni problem triju tijela te Keplerove zakone nebeske mehanike. Prilikom programiranja glavni problem je bilo napraviti kod koji će biti efikasan za prikaz ovog problema jer trebamo pamtititi tri prostorne komponente x, y, z, te komponentu vremena t. Na ovaj način napravili smo stabilne orbite kruženja (slika 6).



*Slika 6 Stabilne orbite kruženja.*

Međutim, ako pokušamo ostvariti da približavanjem Raxa planet prijeđe na kruženje oko njega ne dobivamo očekivani rezultat. Dobili smo odbijanje Raxa od sustava Fu planet. Rezultat možemo vidjeti na slici 7.



*Slika 7 Odbijanje Raxa od sustava Fu-planet.*

Rezultati ovih pristupa nam ukazuju da je velika vjerojatnost kako je M.Coney dao veliku prednost fikciji u stvaranju svog svijeta.

## 3.2 Fazni dijagram

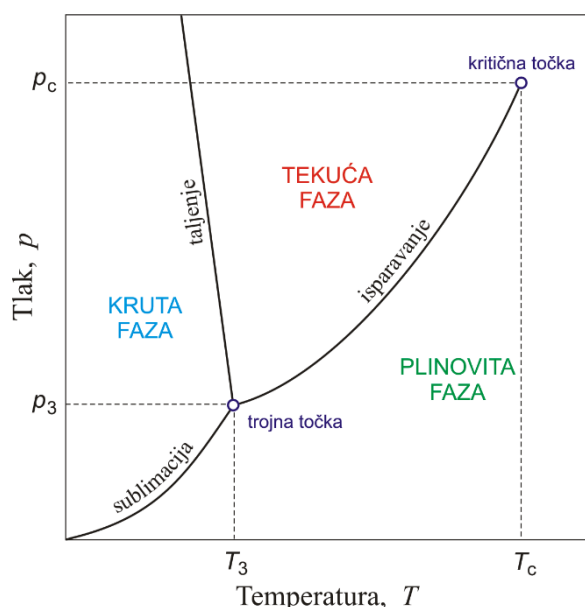
### 3.2.1 Fazni dijagram vode

Fazni dijagram<sup>8</sup> je grafički prikaz empirijski određenih uvjeta pri kojima su različite faze nekog fizikalnog sustava stabilne ili prikaz jednadžbama stanja opisanih veza među parametrima u trodimenzijskom ili dvodimenzijskom koordinatnom sustavu. Pokazuje kako se mijenjaju svojstva sustava pri promjenama neke veličine, npr. tlaka, volumena, temperature, a posebno pri faznim prijelazima termodinamičkih sustava iz jednog agregatnog stanja u drugo. Ravnotežna krivulja u faznom dijagramu povezuje vrijednosti veličina pri kojima sustav postiže ravnoteža stanja između dviju faza. Trojna točka je točka u kojoj se sijeku tri ravnotežne krivulje, tj. pri vrijednostima veličina koje su koordinate trojne točke tri faze sustava nalaze se u stanju ravnoteže.

Na faznom dijagramu vode (Slika 8<sup>9</sup>) možemo uočiti tri linije i dvije točke. Osim trojne točke nalazi se i kritična točka. Kritična točka je točka u kojoj koezistiraju tekuća i plinovita faza. Tri linije predstavljaju ravnotežne krivulje koje imaju svoje nazive: krivulja taljenja ili

<sup>8</sup> Brozović, D., Kovačec, A., Ravlić, S.: Hrvatska opća enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2009.

<sup>9</sup> Generalić, Eni. "Fazni dijagram." *Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar*. 29 June 2022. KTF-Split. DOI: <https://glossary.periodni.com>



smrzavanja, krivulja isparavanja ili kondenzacije, krivulja sublimacije ili taloženja. Krivulja taljenja ili smrzavanja je krivulja prijelaza između tekuće i krute faze. Krivulja isparavanja ili kondenzacije je krivulja prijelaza između tekuće i plinovite faze. Krivulja sublimacije ili taloženja je krivulja prijelaza između krute i plinovite faze.

Pri atmosferskom tlaku i sobnoj temperaturi voda se javlja u tekućoj fazi. Snižavanjem temperature na 273K tekuća voda prelazi u led, a povišenjem temperature na 373K tekuća voda prelazi u vodenu paru. Trojna točka nalazi se na

temperaturi od 273,16K i tlaku od 611Pa. Krivulja isparavanja završava s kritičnom točkom na temperaturi od 647,3K i tlaku od 22,09MPa. Iznad kritične točke tekuća i plinovita faza se ne odvajaju već se te dvije faze izjednačavaju i njihova se fizikalna svojstva značajno mijenjaju.

*Slika 8 Fazni dijagram vode.*

Krivulja taljenja/smrzavanja ima negativan nagib što označava da temperatura taljenja opada porastom tlaka. Razlog je taj što se volumen smanjuje taljenjem zbog čega kruta faza prijeđe u tekuću pri porastu temperature. Ako promotrimo strukturu molekule vode ovo se može jednostavno objasniti. Molekulu vode čine atomi kisika koji su povezani dvjema kovalentnim vezama za dva atoma vodika, a vodikovim vezama su vezani za susjedne atome kisika. Kada se kristaliziraju prosječna udaljenost molekula vode je manja nego u tekućoj fazi. U krutoj fazi molekule vode ostvaruju otvorenu molekularnu strukturu leda.<sup>10</sup> Zagrijavanjem ona se narušava pa u tekućoj imamo gušći raspored molekula. Zbog toga je voda najgušća na 4°C što nazivamo anomalija vode. Pri smanjenju temperature voda postaje gušća sve do 4°C, a daljnjim smanjivanjem postaje sve rjeđa. Voda veće gustoće tone, a voda pri vrhu se smrzava. Na ovaj način postoji život pri dnu jezera.

Fazno pravilo je odnos između varijance  $F$ , broj komponentata  $C$ , i broj faza u ravnoteži  $P$ :

$F=C-P+2$ . Varijanca sustava  $F^{11}$  je broj intenzivnih varijabli koje mogu biti mijenjane neovisno bez narušavanja broja faza u ravnoteži. Voda je jednokomponentni sustav za koji vrijedi  $F=3-P$ . Kad je prisutna samo jedna faza,  $F=2$  i oba  $p$  i  $T$  mogu biti mijenjani bez mijenjanja broja faza.<sup>12</sup> Kada su dvije faze u ravnoteži  $F=1$ , na određenoj temperaturi tekućina ima karakteristike tlaka pare, a tlak nije slobodno promjenjiv. Umjesto temperature mogao se izdvojiti i tlak, ali čineći takvo što, dvije faze bi bile u ravnoteži na određenoj temperaturi. Zbog toga, led ili bilo

<sup>10</sup> Atkins P., de Paula J., *Physical chemistry*, W.H. Freeman and Company, New York, 2006., str. 121.

<sup>11</sup> Ibid., str. 176.

<sup>12</sup> Ibid., str. 177.



koje stanje tranzicije se javlja na određenoj temperaturi pri danom tlaku. Kada su tri faze u ravnoteži  $F=0$  i ovo je predstavljeno na faznom dijagramu kao točka. Tu točku nazivamo trojnom točkom. Četiri faze ne mogu biti u ravnoteži jer  $F$  ne može biti negativan.

### 3.2.2 Problem viskoznosti?

Kako doznajemo iz knjige voda na planetu pri niskim temperaturama pokazuje ista svojstva kao i „naša“ voda. Prilikom zimskog perioda na vrhu se stvara led dok se ispod ledenog pokrivača odvija život. Zbog toga možemo krivulju smrzavanja/taljenja postaviti da ima ista svojstva kao i voda na Zemlji.

Krivulju isparavanja/kondenzacije ne možemo baš postaviti kao što je krivulja u faznom dijagramu vode. U romanu stoji da voda koja je pretrpjela ogromna isparavanja vraća se iz Južnog u Sjeverni ocean u obliku gruma. Kako u romanu nemamo podataka o sastavu vode koja se nalazi na planetu, možemo pretpostaviti da ima oblik čiste vode odnosno da je jednokomponentna tekućina. Možemo pokušati objasniti ovu pojavu ako ju promatramo kao viskoznu tvar.

Viskoznost<sup>13</sup>(premakasolat. *viscosus*: ljepljiv), unutarne trenje pri strujanju fluida (tekućine ili plina) zbog različite brzine gibanja njegovih slojeva. Viskoznost uzrokuje međumolekulske kohezijske sile u fluidu i adhezijske sile između fluida i krutoga tijela kroz koje se ili oko kojeg se strujanje odvija. Slojevi fluida uz stijenke posude (cijevi, korita rijeke itd.) usporavaju brže slojeve. Viskoznost koja djeluje na površinu ploštine  $S$  između dvaju slojeva fluida razmjerna je gradijentu relativne brzine  $v$ , tj. brzini kojom se relativna brzina gibanja mijenja od sloja do sloja ( $dy$ ):

$$F = \eta S \left( \frac{dv}{dy} \right) \quad (3.20)$$

gdje je koeficijent  $\eta$  dinamičke viskoznosti.

Dinamička viskoznost (znak  $\eta$ ) je fizikalna veličina kojom se opisuje svojstvo fluida da se opire različitim brzinama strujanja, tj. unutarne trenje među slojevima fluida. Mjerna jedinica dinamičke viskoznosti je paskalsekunda (Pas). Pokretljiviji fluidi imaju manju viskoznost. Dinamička viskoznost tekućina smanjuje se povećanjem temperature, jer termičko gibanje smanjuje privlačne međumolekulske sile, a dinamička viskoznost plinova povećava se s povećanjem temperature jer temperaturom povećana difuzija uzrokuje izjednačavanje brzina susjednih slojeva, što je ekvivalentno sili trenja među slojevima. Kinematička

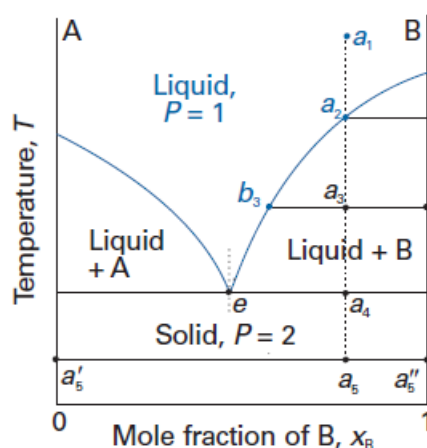
---

<sup>13</sup> Release on Dynamic Viscosity of Water Substance, the Eighth International Conference on the Properties of Steam, Giens, France, September 1975.

viskoznost (znak  $\nu$ ) je fizikalna veličina koja je omjer dinamičke viskoznosti  $\eta$  i gustoće fluida  $\rho$ , dakle:  $\nu = \eta/\rho$ . Mjerna jedinica kinematičke viskoznosti je kvadratni metar po sekundi ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Dinamička viskoznost vode opada s temperaturom, možemo pretpostaviti dinamička viskoznost vode na planetu raste s porastom temperature, odnosno dolazi do gruma. Kako doznajemo voda dolazi u oblik gruma povećanjem temperature tako na faznom dijagramu vode u dijelu gdje imamo krivulju isparavanja/kondenzacije postojat će još jedna krivulja koja će predstavljati viskoznost tvari, odnosno pojavu gruma. Međutim, najpoznatija viskozna tvar, med, nije jednokomponentna tekućina. Stoga treba uzeti u obzir da tekućina opisana na planetu također nije jednokomponentna.

### 3.2.3 Mješavina tekućina-krutina

Grum nastaje u Južnom oceanu. Kako je riječ o oceanu možemo pretpostaviti da je i tekućina na planetu poput tekućine u oceanu, odnosno da je mješavina vode i krute tvari soli. Zbog toga ćemo promotriti što se događa s dvokomponentnom tekućinom.



**Slika 9** Fazni dijagram za dvije gotovo nemiješljive čvrste tvari i njihive potpuno miješljive tekućine.

Promotrimo dvokomponentnu tekućinu sastava  $a_1$  na slici 9<sup>14</sup>. Promjene koje se događaju opisat ćemo na sljedeći način:

1.  $a_1 \rightarrow a_2$ . Sustav ulazi u dvofazno područje označeno s 'Liquid + B'. Čista čvrsta tvar B počinje izlaziti iz otopine, a preostala tekućina postaje bogatija za A.
2.  $a_2 \rightarrow a_3$ . Više krutih oblika i relativne količine krutog i tekućeg (koje su u ravnoteži) dane su pravilom poluge. U ovoj fazi postoje otprilike jednake količine svakog. Tekuća faza je bogatija za A nego prije (njen sastav je dan s  $b_3$ ) jer je B nataloženo.
3.  $a_3 \rightarrow a_4$ . Na kraju ovog koraka ima manje tekućine nego na  $a_3$  i njezin sastav

<sup>14</sup> Atkins, P., de Paula, J.: *Physical chemistry*, op.cit., str.189.

daje e. Ova se tekućina sada smrzava i daje dvofazni sustav čistog B i čistog A.

Na slici 9 slovom e označena je izopleta koja odgovara eutektičkom sastavu<sup>15</sup>, to je smjesa s najnižim talištem. Bez prijašnjeg taloženja čvrstog A ili B, tekućina s eutektičkim sastavom se smrzava na jednoj temperaturi. Kruta tvar eutektičkog sastava se bez promjene topi na najnižoj temperaturi od svih smjesa. Kako se otopine hlade, talože B desno od e, a otopine sustava lijevo talože A: samo eutektička smjesa (osim čistog A i čistog B) skrućuje se na jednoj određenoj temperaturi ( $F=0$  kada je  $C=2$  i  $P=3$ ) bez postupnog izbacivanja jedne ili druge komponente iz tekućine. Lem je tehnološki važan eutektik i ima maseni sastav od oko 67% kositra i 33% olova i tali se na  $183^{\circ}\text{C}$ . Eutektik nastao od 23% NaCl i 77%  $\text{H}_2\text{O}$  po masi tali se na  $-21,1^{\circ}\text{C}$ . Kad se doda sol u izotermnim uvjetima (na primjer, kada se posipa po zaleđenoj cesti), smjesa topi led ako je temperatura iznad  $-21,1^{\circ}\text{C}$  (a eutektički sastav je bio postignut). Kada se sol dodaje u led pod adijabatskim uvjetima (na primjer, kada dodan ledu u vakuumskoj boci), led se topi, ali pritom apsorbira toplinu iz ostatka smjese. Temperatura sustava pada i, ako se doda dovoljno soli, hlađenje se nastavlja do eutektičke temperature.

Toplinska analiza<sup>16</sup> je vrlo koristan praktičan način otkrivanja eutektika. Možemo vidjeti kako se koristi uzimajući u obzir brzinu hlađenja izoplete kroz  $a_1$  na slici 9. Tekućina se ravnomjerno hladi dok ne dosegne  $a_2$ , kada se B počinje taložiti. Hlađenje je sada sporije jer je skrućivanje B egzotermno i usporava hlađenje. Kada preostala tekućina dosegne eutektički sastav, temperatura ostaje konstantna ( $F' = 0$ ) sve dok se cijeli uzorak ne postane kruta tvar: ovo područje konstantne temperature je eutektički zastoj. Ako tekućina ima eutektički sastav e, u početku se tekućina ravnomjerno hladi do temperature smrzavanja eutektike, kada postoji dugi eutektički zastoj dok se cijeli uzorak skrućuje (poput smrzavanja čiste tekućine). Praćenje krivulja hlađenja pri različitim ukupnim sastavima daje jasnu indikaciju strukture faznog dijagrama. Granica kruto-tekuće dana je pomoću točke u kojima se mijenja brzina hlađenja. Najduži eutektički zastoj daje mjesto eutektičkog sastava i njegove temperature taljenja.

U nekim slučajevima spoj C nije stabilan kao tekućina. Primjer je legura  $\text{Na}_2\text{K}$ , koji preživljava samo kao čvrsta tvar (slika 10<sup>17</sup>). Razmotrite što se događa tekućini hlađenjem na  $a_1$ :

1.  $a_1 \rightarrow a_2$ . Taloži se nešto krutog Na, a preostali tekući je bogatiji K.
2.  $a_2 \rightarrow$ odmah ispod  $a_3$ . Uzorak je sada potpuno čvrst i sastoji se od čvrstog Na i krutog  $\text{Na}_2\text{K}$ .

Sada razmotrite izopletu kroz  $b_1$ :

1.  $b_1 \rightarrow b_2$ . Nema očite promjene dok se ne dosegne granica faza na  $b_2$  kada se čvrsti Na počinje taložiti.

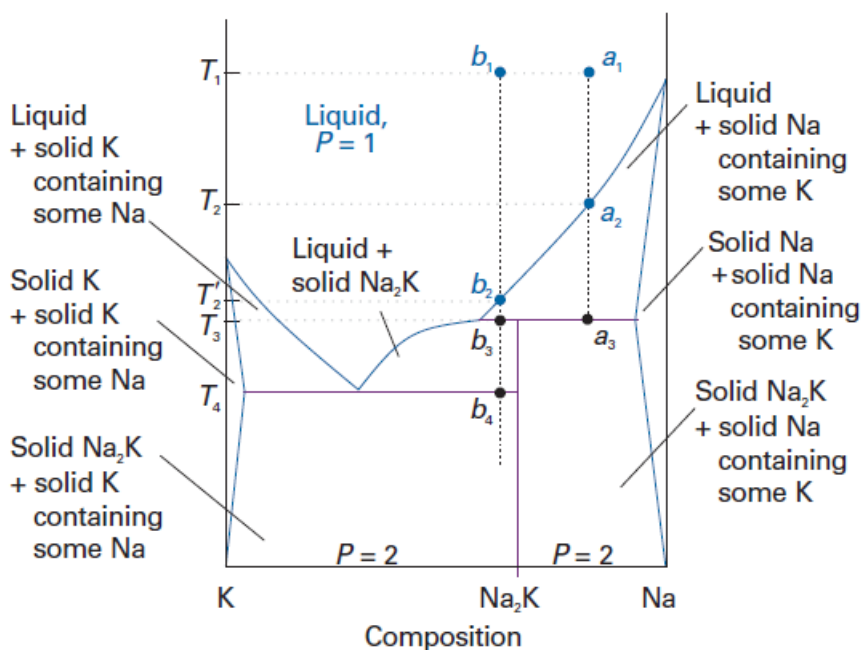
---

<sup>15</sup> Atkins, P., de Paula, J.: *Physical chemistry*, op.cit., str.189

<sup>16</sup> Ibid.

<sup>17</sup> Ibid., str.190.

2.  $a_2 \rightarrow b_3$ . Čvrsti Na se taloži, ali na  $b_3$  dolazi do reakcije u kojoj nastaje  $\text{Na}_2\text{K}$ : ovaj spoj nastaje difuzijom atoma K u kruti Na.



Slika 10 Nekongruentno taljenje.

3.  $b_3$ . Na  $b_3$  tri su faze u međusobnoj ravnoteži: tekućina, spoj  $\text{Na}_2\text{K}$  i čvrsti Na. Horizontalna linija koja predstavlja ovu trofaznu ravnotežu naziva se peritektička linija<sup>18</sup>. U ovoj fazi tekuća smjesa Na/K je u ravnoteži s malo krutog  $\text{Na}_2\text{K}$ , ali još uvijek nema tekućeg spoja.

4.  $b_3 \rightarrow b_4$ . Kako se hlađenje nastavlja, količina krutog spoja raste sve do  $b_4$  kada tekućina postiže svoj eutektički sastav. Zatim se učvrsti dajući dvofaznu krutinu koja se sastoji od krutog K i krutog  $\text{Na}_2\text{K}$ . Ako se krutina ponovno zagrije, slijed događaja je obrnut. Ne stvara se tekući  $\text{Na}_2\text{K}$  u bilo kojoj fazi jer je previše nestabilan da bi postojao kao tekućina. Ovo ponašanje je primjer inkongruentno taljenja, u kojem se spoj topi u svoje komponente, ali ne tvori sama tekuću fazu.

Tekućina u romanu može se opisati eutektičkim sustavom. Kao što je navedeno samo tekućina eutektičkog sastava skrućuje se na jednoj određenoj temperaturi bez izbacivanja jedne ili druge komponente iz tekućine. Tekućina u romanu postaje grum povećanjem temperature. U njoj je zastupljen tekući i kruti dio koji tu tekućinu čini gustom.

<sup>18</sup> Atkins, P., de Paula, J.: *Physical chemistry*, op.cit., str.191.

## 4 Zaključak

Ovaj rad bio je znanstvena analiza znanstvenofantastičnog romana „Zdravo ljeto, zbogom“ koji nije toliko poznat široj javnosti. U radu su analizirana dva fizikalna fenomena koja su ključna za odvijanje radnje u samom romanu. Prvo smo trebali analizirati planetarni sustav romana. Planetarni sustav kojeg, koliko je nama poznato, čine tri tijela: dva sunca i planet. Zanimljivost planetarnog sustava je u tome što planet ne kruži samo oko jednog sunca, nego određeno razdoblje oko jednog, a potom oko drugog. Rješenje za ovaj problem tražili smo numeričkom analizom. Numerička analiza nije davala zadovoljavajuća rješenja. Moguće je da je svijet M. Coneya samo fikcija ili je problem puno složeniji pa jednostavno numeričko rješenje nije valjano. Druga zanimljivost u romanu je tekućina u oceanima. Ona nije kao naša voda. Nakon određenog razdoblja isparavanjem dolazi do gruma. Za opis gruma pretpostavili smo dvije pretpostavke. Jedan da je viskozna tvar jednokomponentna, druga da je dvokomponentna, odnosno da osim vode sadrži i neku krutu tvar. Oba opisa dala su naslutiti rješenje, ali ni jedno nije u potpunosti točno. Što smo mogli i očekivati jer su nam parametri za izračune nepoznati kao i sastavi. Na kraju možemo reći kako je M. Coney stvorio zanimljiv fizikalni svijet.

## 5 Literatura

Atkins P., de Paula J.: *Physical chemistry*, W.H. Freeman and Company, New York, 2006.

Brozović, D., Kovačec, A., Ravlić, S.: *Hrvatska opća enciklopedija*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 2009.

Coney, Michael: *Hello summer, goodbye*, Pan Books Ltd, Cavaye Place, London, 1973.

Generalić, Eni. "Fazni dijagram." *Englesko-hrvatski kemijski rječnik & glosar*. 29 June 2022. KTF-Split. DOI: <https://glossary.periodni.com> (7.kolovoza 2024.)

Goldstein H., Poole C., Safko J. *Classical Mechanics*. Third Edition. New York: Addison Wesley, 2000.

Hello summer, goodbye, DOI: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hello\\_Summer,\\_Goodbye](https://en.wikipedia.org/wiki>Hello_Summer,_Goodbye) (26.kolovoza 2024.)

Marchal, C. *The Three-bodey problem*. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 1990.

Runge Kutta RK4 Method (Fourth Order Runge Kutta Method), DOI: <https://byjus.com/maths/runge-kutta-rk4-method/> (16. rujna 2024.)

Viskoznost, DOI: <https://bs.wikipedia.org/wiki/Viskoznost> (7. kolovoza 2024.)