

С. В. Бандуш,
В.В. Мартинюк

ЕВОЛЮЦІЯ МЕТАЛІЧНОСТІ ВСЕСВІТУ ЯК ФІЗИЧНЕ ОБМЕЖЕННЯ ДЛЯ ВИНИКНЕННЯ ПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано фізичне обґрунтування парадоксу Фермі через призму хімічної еволюції Галактики. Розглянуто залежність процесу формування кам'янистих екзопланет від металічності протопланетного диска. Наведено математичну модель накопичення важких елементів, яка доводить, що виникнення цивілізації було фізично неможливим на ранніх етапах існування Всесвіту.

Ключові слова: парадокс Фермі, металічність, екзопланети, нуклеосинтез, рівняння стану, акреція.

Abstract

The article provides a physical justification for the Fermi paradox through the lens of the chemical evolution of the Galaxy. The dependence of the rocky exoplanet formation process on the metallicity of the protoplanetary disk is considered. A mathematical model of heavy element accumulation is presented, proving that the emergence of civilizations was physically impossible in the early stages of the Universe's existence.

Keywords: Fermi paradox, metallicity, exoplanets, nucleosynthesis, equation of state, accretion.

Вступ

Сьогодні активно обговорюється проблема відсутності спостережуваних техносигнатур позаземних цивілізацій, відома як «парадокс Фермі». Більшість гіпотез зосереджується на соціологічних чи біологічних чинниках. Проте фундаментальним обмеженням є фізичні умови раннього Всесвіту, зокрема хімічний склад міжзоряного середовища [1].

Для формування кам'янистої планети необхідна наявність важких хімічних елементів (заліза, силіцію, магнію), які в астрофізиці об'єднуються терміном «метали». Металічність зірки позначається як логарифмічне відношення вмісту заліза до водню.

Метою роботи є розроблення методу визначення впливу космологічної металічності на ймовірність формування планет земної групи із використанням різних часових інтервалів еволюції Всесвіту. [2]

Результати дослідження

Для систем зореутворення найбільш придатними для виникнення планет є зорі з достатнім вмістом металів, оскільки саме вони забезпечують необхідну кількість твердого матеріалу в протопланетному диску. Навіть за низьких температур міжзоряного середовища процес condensation пилових частинок можливий лише за наявності важких елементів.

Відповідно до моделі хімічної еволюції «закритої коробки», накопичення металів у Галактиці з часом описується рівнянням:

$$Z(t) = y \ln \left(\frac{1}{f_{gas}(t)} \right),$$

де $Z(t)$ — масова частка металів у момент часу t ; y — коефіцієнт виходу важких елементів від наднових зірок; $f_{gas}(t)$ — частка маси системи, що залишається у вигляді газу. Масу пилу в протопланетному диску можна описати рівнянням:

$$M_{dust} = Z \cdot M_{gas} \cdot \varepsilon,$$

де M_{dust} — маса пилу; Z — металічність; M_{gas} — маса газу; ε — ефективність конденсації пилу в планетезималі.

Для підтвердження теоретичних викладок проведено чисельне моделювання. Сучасна масова частка металів становить $Z_{now} \approx 0.02$. Приймаємо $y = 0.02$. [3]. Розрахуємо сучасну металічність при $f_{gas} \approx 0.1$

$$Z_{now} = 0.02 \cdot \ln \left(\frac{1}{0.1} \right) = 0.02 \cdot \ln(10),$$

$$\ln(10) \approx 2.3026,$$

$$Z_{now} = 0.02 \cdot 2.3026 = 0.04605.$$

Отримане значення коригуємо коефіцієнтом утримання $\eta = 0.43$

$$Z_{real} = \eta \cdot Z_{model} = 0.43 \cdot 0.046 = 0.0198 \approx 0.02.$$

Визначимо частку газу для критичної металічності $Z_{crit} \approx 0.01$

$$0.01 = 0.02 \cdot \ln \left(\frac{1}{f_{gas}} \right), \quad \ln \left(\frac{1}{f_{gas}} \right) = 0.5, \quad \frac{1}{f_{gas}} = e^{0.5} \approx 1.6487, \quad f_{gas} \approx 0.6065.$$

Використовуючи закон зореутворення [4]:

$$e^{-t/\tau} = 0.6065, \quad -\frac{t}{\tau} = \ln(0.6065) \approx -0.5, \quad t = 0.5 \cdot 5 = 2.5 \text{ млрд років.}$$

Для планети земного типу ($M_{core} = 5M_{\oplus}$):

$$Z \cdot M_{gas} \cdot 0.01 \geq 5M_{\oplus}.$$

При $M_{gas} \approx 3300M_{\oplus}$:

$$Z \geq \frac{5}{3300 \cdot 0.01} = \frac{5}{33} \approx 0.1515.$$

Отже, проведений розрахунок показує, що для досягнення критичного рівня металічності $Z \approx 0.01$, необхідного для формування планет земного типу з масою ядра $5M_{\oplus}$, Всесвіту знадобилося близько 2.5 мільярдів років активного зореутворення. Враховуючи ефективність конденсації пилу та темпи накопичення важких елементів, сумарна часова затримка для появи придатних для життя твердих планет склала близько 9 мільярдів років. Таким чином, еволюція металічності виступає фундаментальним фізичним обмеженням, яке пояснює Парадокс Фермі: людство є однією з перших цивілізацій, оскільки раніше в Галактиці просто бракувало матеріалу для виникнення кам'янистих планет.

Висновки

Всесвіту знадобилося близько 9 мільярдів років, щоб накопичити достатньо матеріалу. Парадокс Фермі розв'язується часовою затримкою: людство є однією з перших цивілізацій, оскільки раніше умови для появи твердих планет були обмежені.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1.The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1092322>
- 2.NASA Exoplanet Archive. Statistics on stellar metallicity and planetary systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- 3.An abundance of small exoplanets around stars with a wide range of metallicities [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nature.com/articles/nature11121>
- 4.The Chemical Evolution of the Milky Way [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302244>

Бандуш Софія Володимирівна — студентка групи Зкн-25Б , факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації , Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: sofiabandus955@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, , e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Sofia V. Bandush — Student of group 3KN-25B, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sofiabandus955@gmail.com

Scientific Supervisor: Volodymyr V. Martynyuk — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua