

МАГНЕТАРИ ТА ПУЛЬСАРИ: ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА МЕХАНІЗМИ ВИПРОМІНЮВАННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація:

У цій роботі розглядаються магнетари та пульсари — особливі нейтронні зорі з надзвичайно сильними магнітними полями та швидким обертанням. Описано їхні фізичні властивості, механізми випромінювання та роль у сучасній астрофізиці. Особливу увагу приділено впливу магнітного поля на поведінку цих об'єктів та методам їхнього спостереження. Робота пояснює, чому магнетари та пульсари є цікавими не лише для астрономії, а й для загальної фізики, зокрема вивчення екстремальних станів речовини та квантових ефектів у сильних полях.

Ключові слова: магнетари, пульсари, нейтронні зорі, магнітне поле, випромінювання, астрофізика, екстремальна фізика.

Abstract:

This paper explores magnetars and pulsars—unique neutron stars with extremely strong magnetic fields and rapid rotation. Their physical properties, radiation mechanisms, and role in modern astrophysics are discussed. Special attention is given to the influence of magnetic fields on the behavior of these objects and the methods used to observe them. The paper explains why magnetars and pulsars are interesting not only for astronomy but also for general physics, particularly in studying extreme states of matter and quantum effects in strong fields.

Keywords: magnetars, pulsars, neutron stars, magnetic field, radiation, astrophysics, extreme physics.

Вступ

Нейтронні зорі є одними з найекстремальніших об'єктів у Всесвіті. Вони утворюються після вибуху масивних зір як наднових і мають надзвичайно високу густину, сильні гравітаційні поля та швидке обертання. Серед них особливо виділяються **пульсари [1]**—нейтронні зорі, що випромінюють періодичні радіо-, рентгенівські та гамма-імпульси, і **магнетари [2]** —об'єкти з найсильнішими відомими магнітними полями у природі. Дослідження пульсарів і магнетарів важливе не лише для астрофізики, а й для загальної фізики. Вони є природними лабораторіями, в яких можна вивчати такі явища, як квантова електродинаміка у сильних магнітних полях, поведінка речовини за надвисоких густин, а також механізми прискорення частинок до екстремальних енергій. У цій роботі розглянуто основні фізичні характеристики магнетарів і пульсарів, механізми їхнього випромінювання та еволюцію. Також обговорюються сучасні методи спостереження цих об'єктів і їхня роль у розвитку фізики високих енергій та астрофізики.

Пульсари і магнетари з точки зору загальної фізики

Пульсари є нейтронними зорями, які утворюються після вибуху надрової. Вони характеризуються надзвичайно високою щільністю, швидким обертанням та сильним магнітним полем. Основними фізичними параметрами пульсарів є їх маса, розмір, щільність, період обертання, магнітне поле, випромінювання та гравітація.[3]

Пульсари мають масу в діапазоні 1.4–2.3 М_☉ (мас Сонця), а їх середній радіус знаходиться в межах 10–15 км. Щільність цих об'єктів сягає $\sim 10^{17}$ кг/м³, що наближається до ядерної густини атомного ядра. Періоди обертання пульсарів варіюються від кількох секунд до мілісекунд, при цьому через втрату енергії на випромінювання вони поступово сповільнюють своє обертання. Це сповільнення описується рівнянням [4].

$$\dot{P} = kP^n,$$

де P – період обертання, P' – його зміна, n – спіновий індекс.

Магнітне поле пульсарів може досягати значень $10^8 - 10^{14}$ Гс, що в мільярди разів перевищує магнітне поле Землі [4]. Вони випромінюють електромагнітні хвилі у радіо-, рентгенівському та гамма-діапазонах у вигляді вузьких пучків уздовж магнітних полюсів і якщо вони проходять через Землю, ми спостерігаємо періодичні імпульси. Подвійні пульсари також можуть випромінювати гравітаційні хвилі, що було підтверджено на прикладі PSR B1913+16 (двійкової системи Халса-Тейлора).

Фізичні закони, що описують пульсари, включають вироджений тиск нейтронного газу, що утримує їх від подальшого стиснення, рівняння Толмена-Оппенгеймера-Волкова (TOV equation), яке визначає структуру пульсара, та закон збереження моменту імпульсу, що пояснює їх швидке обертання. Формування магнітного поля пульсарів пов'язане з ефектом динамо при колапсі зірки, а їх радіовипромінювання пояснюється синхротронним випромінюванням заряджених частинок у магнітному полі [5].

$$\dot{E} \propto \frac{(M_1 M_2)^2}{(M_1 + M_2)^{7/3} r^{5/3}},$$

де M_1, M_2 – маси компонентів, r – відстань між ними. Крім того, гравітація на поверхні пульсара настільки сильна, що навіть фотони зазнають значного гравітаційного червоного зміщення.

Пульсари є унікальними астрофізичними об'єктами, що дозволяють перевіряти фундаментальні фізичні закони, включаючи квантову механіку, загальну теорію відносності, електродинаміку та закон збереження моменту імпульсу.

На відміну від класичних пульсарів, магнетари випромінюють не стільки через механізм радіо- та синхротронного випромінювання, скільки за рахунок магнітного розпаду (магнетарних спалахів), що спричиняє інтенсивне рентгенівське та гамма-випромінювання. У результаті магнітні лінії в корі нейтронної зорі можуть викликати потужні збурення, що призводять до так званих "зоретрусів" (stellar quakes) [6].

Періоди обертання магнетарів зазвичай лежать у діапазоні 2–12 секунд, а їхнє сповільнення є значно швидшим, ніж у звичайних пульсарів, через екстремальні втрати енергії на магнітне випромінювання. Це пояснюється рівнянням:

$$\dot{P} \approx \frac{B^2}{10^{15} \text{ Гс}^2},$$

де B – магнітне поле зірки.

Магнетари є джерелами коротких потужних рентгенівських і гамма-спалахів, найяскравіші з яких спостерігалися від об'єктів SGR 1806-20 і SGR 1900+14 [8]. Їхня надзвичайно висока енергія випромінювання робить магнетари одними з найпотужніших об'єктів у Всесвіті з точки зору випромінюваної енергії.

Фізичні процеси в магнетарах, зокрема їхній магнітний розпад, дають змогу вивчати поведінку матерії за умов екстремальних магнітних полів, що є важливим для квантової електродинаміки та астрофізики високих енергій [7].

Висновок

Пульсари і магнетари є природними лабораторіями для перевірки фундаментальних фізичних законів у межах екстремальних умов. Їхні надзвичайно сильні магнітні поля, релятивістські швидкості обертання та екстремальна густина речовини дозволяють досліджувати такі явища, як квантова електродинаміка у сильних магнітних полях, гравітаційне червоне зміщення, випромінювання гравітаційних хвиль та поведінка нейтронного виродженого газу. Спостереження за пульсарами підтверджують загальну теорію відносності, зокрема ефекти викривлення простору-часу, тоді як магнетари демонструють унікальні процеси магнітного розпаду, що є важливими для фізики плазми та високих енергій. Вивчення цих об'єктів сприяє розширенню наших знань про фундаментальні взаємодії та природу матерії в умовах, які неможливо відтворити у земних лабораторіях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вікіпедія Пульсар [Електронний ресурс],-Режим доступу:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%B0%D1%80>
2. Вікіпедія Магнетар [Електронний ресурс],-Режим доступу:
<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B0%D1%80>
3. Lorimer, D. R., & Kramer, M. *Handbook of Pulsar Astronomy* (2004). [Електронний ресурс],-Режим доступу:
<https://books.google.com.ua/books?id=OZ8tdN6qJcsC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>
4. Michel, F. C. *Theory of Neutron Star Magnetospheres* (1991). [Електронний ресурс],-Режим доступу:
<https://books.google.com.ua/books?id=IYTVNXw9xSgC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false>
5. Hulse, R. A., & Taylor, J. H. (1975). *Discovery of a pulsar in a binary system*, Astrophysical Journal. [Електронний ресурс],-Режим доступу: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://fnorio.com/0200binary_pulsar/1975ApJ...195L..pdf
6. Direct measurements of laser light aberration from the ARTEMIS geostationary satellite through strong clouds [Електронний ресурс],-Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/327076215_Direct_measurements_of_laser_light_aberration_from_the_ARTEMIS_geostationary_satellite_through_strong_clouds
7. Найважливіші досягнення і перспективи розвитку сучасної астрономії [Електронний ресурс],-Режим доступу: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.astrosvita.kiev.ua/infoteka/articles/astro_u_spix.pdf

Мількевич Діана Володимирівна — студент групи 4КН-246, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: milkevic31@gmail.com

Янківська Богдана Анатоліївна — студент групи 2КН-246, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bjankivska@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — доцент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Milkevych Diana Volodymyrivna — student of group 4CS-24b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: milkevic31@gmail.com

Yankivska Bohdana Anatoliivna — student of group 2CS-24b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bjankivska@gmail.com

Academic supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriiovych** — Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua