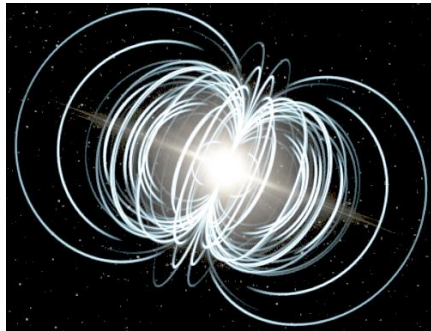




## Pulsary – kosmiczne latarnie wszechświata

### Abstrakt

Pulsary to unikalne obiekty astrofizyczne, będące szybko rotującymi gwiazdami neutronowymi emitującymi wiązki promieniowania elektromagnetycznego. Ich odkrycie w 1967 roku zrewolucjonizowało astrofizykę i dostarczyło narzędzi do badań fundamentalnych praw fizyki. W niniejszym artykule omówiono mechanizm powstawania pulsarów, ich właściwości fizyczne, znaczenie dla nauki oraz przyszłe kierunki badań.



### 1. Wprowadzenie

Pulsary to pozostałości po masywnych gwiazdach, które zakończyły swoje życie w eksplozjach supernowych. Są to gwiazdy neutronowe, których szybka rotacja i silne pola magnetyczne generują promieniowanie elektromagnetyczne w formie charakterystycznych impulsów. Ich regularność sprawia, że są wykorzystywane do precyzyjnych pomiarów czasu oraz testowania ogólnej teorii względności.

### 2. Mechanizm powstawania i właściwości pulsarów

Pulsary powstają w wyniku kolapsu jądra masywnej gwiazdy, której masa przekracza 8 mas Słońca. Proces ten prowadzi do utworzenia gwiazdy neutronowej o ekstremalnej gęstości (rzędu  $10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>), silnym polu magnetycznym (do  $10^{12}$  G) i okresie rotacji od milisekund do kilku sekund. Emisja promieniowania zachodzi wzdłuż osi magnetycznej, a jeśli ta oś nie pokrywa się z osią rotacji, obserwator na Ziemi rejestruje pulsacyjne sygnały radiowe.

### 3. Klasyfikacja pulsarów

Pulsary można podzielić na kilka głównych kategorii:

- **Radiowe pulsary normalne** – o okresach rotacji od 0,1 do kilku sekund, wykrywane głównie w zakresie radiowym.
- **Milisekundowe pulsary** – obracające się z częstotliwością rzędu setek obrotów na sekundę, powstałe w wyniku akrecji materii od towarzyszącej gwiazdy.
- **Pulsary rentgenowskie** – układy podwójne, w których neutronowa gwiazda akreuje materię od towarzysza, emitując promieniowanie rentgenowskie.
- **Magnetary** – gwiazdy neutronowe z ekstremalnie silnym polem magnetycznym ( $10^{15}$  G), charakteryzujące się wybuchową emisją promieniowania wysokoenergetycznego.

**4. Znaczenie pulsarów w badaniach naukowych** Pulsary odgrywają kluczową rolę w astrofizyce, pozwalając na:

- Testowanie ogólnej teorii względności, szczególnie w układach podwójnych, gdzie wpływ grawitacji można badać z niespotykaną precyzją.
- Wyznaczanie właściwości materii w ekstremalnych warunkach, co przyczynia się do lepszego zrozumienia fizyki jądrowej i gęstej materii neutronowej.
- Poszukiwanie fal grawitacyjnych poprzez precyzyjne monitorowanie pulsarów milisekundowych.
- Użycie jako kosmicznych zegarów, co pozwala na testowanie stałości fundamentalnych stałych fizycznych oraz badania struktury Drogi Mlecznej.

**5. Przyszłe kierunki badań** Obecne i przyszłe obserwatoria radiowe, takie jak SKA (Square Kilometre Array), będą w stanie odkryć tysiące nowych pulsarów, co pozwoli na dokładniejsze testowanie modeli grawitacyjnych. Równocześnie badania pulsarów w zakresie promieniowania rentgenowskiego i gamma (np. przez teleskopy NICER, Fermi-LAT) dostarczą informacji o fizyce wnętrza gwiazd neutronowych i ewolucji ich pól magnetycznych.

**6. Podsumowanie** Pulsary stanowią jedno z najważniejszych odkryć astronomicznych XX wieku. Ich wyjątkowe właściwości czynią je nie tylko niezwykłymi obiektami astrofizycznymi, ale także cennymi narzędziami badawczymi. Dzięki nowoczesnym technologiom obserwacyjnym w nadchodzących dekadach możemy spodziewać się dalszych przełomów w ich badaniu, które mogą rzucić nowe światło na fundamentalne prawa fizyki i ewolucję wszechświata.

### Kwantowe aspekty promieniowania synchrotronowego w silnym polu magnetycznym

Promieniowanie synchrotronowe w pulsarach powstaje w wyniku przyspieszania naładowanych cząstek (głównie elektronów i pozytonów) w silnym polu magnetycznym. W warunkach ekstremalnych, takich jak te występujące w pobliżu gwiazd neutronowych, proces ten zachodzi w reżimie kwantowym. Kwantowe efekty obejmują:

**Kwantyzację poziomów energetycznych** – W silnym polu magnetycznym ruch naładowanych cząstek ulega kwantyzacji, a emisja promieniowania synchrotronowego odbywa się poprzez przejścia między dyskretnymi poziomami Landaua.

**Tłumienie klasycznego promieniowania** – W bardzo silnych polach magnetycznych<sup>1</sup> cząstki mogą emitować promieniowanie synchrotronowe jedynie na określonych poziomach energetycznych, co wpływa na spektrum emitowanego promieniowania.

**Efekty zakrzywienia czasoprzestrzeni** – Zakrzywienie czasoprzestrzeni wokół pulsara może prowadzić do zmian w trajektoriach cząstek i modyfikacji obserwowanego widma promieniowania synchrotronowego.

**Tworzenie par elektron-pozyton** – W ekstremalnych polach magnetycznych promieniowanie synchrotronowe może generować wysokoenergetyczne fotony, które ulegają procesowi kreacji par, prowadząc do powstawania kaskad cząsteczkowych w magnetosferze pulsara.

---

<sup>1</sup> ( $B > 10^{12}$  G, 1 gaus (G) to  $10^{-4}$  tesli (T). Dla przykładu, typowe pole magnetyczne pulsara o wartości  $10^{12}$ G odpowiada  $10^8$ T.)