

# POSZUKIWANIA FAŁ GRAWITACYJNYCH Z OSCYLACJI GWIAZDY NEUTRONOWEJ PSR J0537-6910

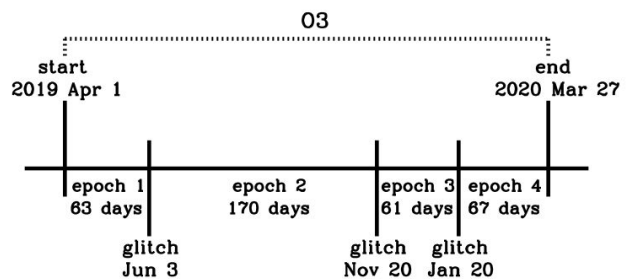
PSR J0537-6910, znany również jako „The Big Glitch”, to bardzo szczególny pulsar, który mocno przyciąga uwagę astronomów. Pulsary to szybko rotujące gwiazdy neutronowe, powstające podczas kolapsu (czyli zapadnięcia się) masywnych gwiazd. Są one obiektami pod wieloma względami ekstremalnymi. Nie tylko kryją w sobie najsilniejsze pola magnetyczne znane w przyrodzie (ponad miliard razy silniejsze niż pole magnetyczne Ziemi), ale także należą do najbardziej zwartych obiektów we Wszechświecie: „upakowują” one masę większą od masy Słońca w obszarze wielkości dużego miasta, a gęstość materii w ich wnętrzach przekracza gęstość jądra atomowego.

Nazwa „pulsar” wywodzi się z faktu, że obserwujemy je poprzez rejestrację impulsów promieniowania elektromagnetycznego. Impulsy te związane są z falami elektromagnetycznymi emitowanymi z okolic biegunów magnetycznych gwiazdy neutronowej. Jeśli oś magnetyczna gwiazdy nie pokrywa się z jej osią obrotu, to wiązka promieniowania periodycznie omiata przestrzeń, podobnie jak latarnia morska, a impuls dociera do nas, gdy wiązka przecina się z Ziemią (co pokazują te animacje).

Tempo rotacji gwiazdy i jego zmiany w czasie możemy zmierzyć starannie rejestrując momenty nadejścia impulsów docierających z gwiazdy. Ewolucję tempa rotacji w czasie można następnie porównać z modelami teoretycznymi, co pozwala zbadać główny fizyczny mechanizm, który odprowadza energię rotacji pulsara i go spowalnia. W ilościowy sposób astronomowie określają to za pomocą parametru znanego jako wskaźnik hamowania (*braking index*). Jeśli fale elektromagnetyczne zapewniają główny mechanizm spowalniania, to wskaźnik hamowania powinien być równy około 3, natomiast wyższe wartości tego indeksu są spodziewane, jeśli to emisja fal grawitacyjnych powoduje spowolnienie rotacji gwiazdy. PSR J0537-6910 to młody pulsar znajdujący się w Wielkim Obłoku Magellana i wirujący z częstotliwością 62 Hz (czyli 62 razy na sekundę).

Okazuje się, że pulsar ten regularnie doświadcza nagłego wzrostu tempa rotacji, czyli tzw. „gliczy pulsarowych” (*pulsar glitches*, stąd nieformalny przydomek „The Big Glitch”). W przeciwieństwie do większości innych pulsarów, PSR J0537-6910 nie jest obserwowany za pomocą fal radiowych, lecz za pomocą promieniowania rentgenowskiego. Ponieważ promieniowanie rentgenowskie nie przenika przez atmosferę ziemską, jego obserwacja możliwa jest z przestrzeni kosmicznej. PSR J0537-6910 został po raz pierwszy odkryty za pomocą satelitarne teleskopu rentgenowskiego *Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)*, który działał w latach 1996-2012. W roku 2017 na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej zainstalowano teleskop rentgenowski *Neutron star Interior Composition Explorer (NICER)*, który jest używany do obserwacji PSR J0537-6910.

Wieloletnie obserwacje ujawniły niezwykłą aktywność pulsara, a także umożliwiły pomiary wskaźnika hamowania między kolejnymi gliczami. W szczególności zarówno obserwacje RXTE jak i NICER sugerują, że w okresach między gliczami wskaźnik hamowania wynosi około 7, co jest wartością nietypową dla przeciętnego pulsara, ale można się jej spodziewać, jeśli gwiazda spowalnia swoją rotację przez emisję fal grawitacyjnych spowodowanych oscylacjami w tzw. *modach r*. Mod *r* jest rodzajem fali, która istnieje w obracających się gwiazdach zawierających płynny komponent. Jest spowodowana siłą Coriolisa, podobnie jak fale Rossby'ego na Ziemi, i może być przyczyną emisji fal grawitacyjnych. Niektóre teorie sugerują, że emisja fal grawitacyjnych spowodowana modami *r* jest aktywna we wszystkich młodych pulsarach, zmniejszając szybkie tempo ich rotacji, jakie mają w momencie narodzin, do dużo wolniejszego tempa obserwowanego w standardowej populacji pulsarów. Pomiar wskaźnika hamowania równego 7 sugeruje zatem, że PSR J0537-6910 może wciąż spowalniać pod wpływem modów *r*, choć inne efekty, np. zanik pola magnetycznego, mogą też być za to odpowiedzialne. W celu sprawdzenia tej hipotezy, zespoły LIGO, Virgo i KAGRA, a także zespół NICER, przeprowadziły poszukiwania ciągłego sygnału fal grawitacyjnych spowodowanego przez mody *r* pochodzące od pulsara J0537-6910. Wcześniej próbowano poszukiwać modów *r* tego pulsara wykorzystując publicznie dostępne dane z pierwszej i drugiej kampanii obserwacyjnej LIGO (O1 i O2), ale podczas tych obserwacji nie były dostępne pomiary promieniowania rentgenowskiego. W naszych poszukiwaniach wykorzystujemy najnowsze dane z trzeciej kampanii obserwacyjnej LIGO i Virgo (oznaczonej symbolem O3).



Rysunek 1. Oś czasu kampanii obserwacyjnej O3 detektorów LIGO-Virgo, na której zaznaczono również glicze J0537-6910 oraz epoki pomiędzy gliczami obserwowanymi przez teleskop rentgenowski NICER (znajdujący się na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej).

Odwiedź nas w internecie:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en)

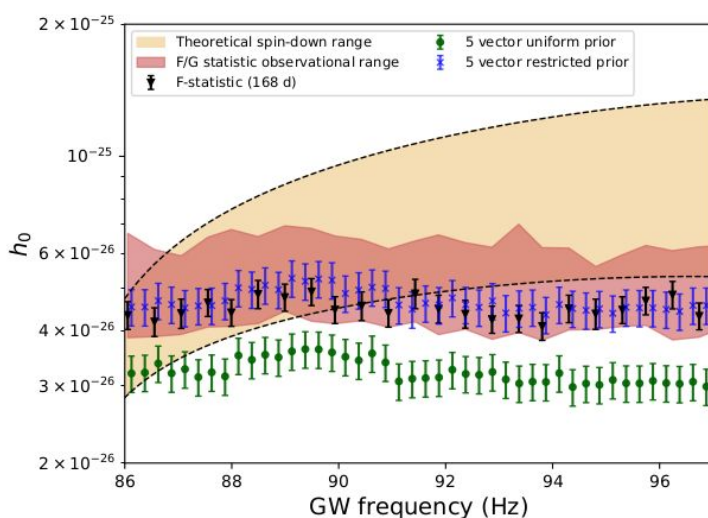
[www.nasa.gov/nicer](http://www.nasa.gov/nicer)



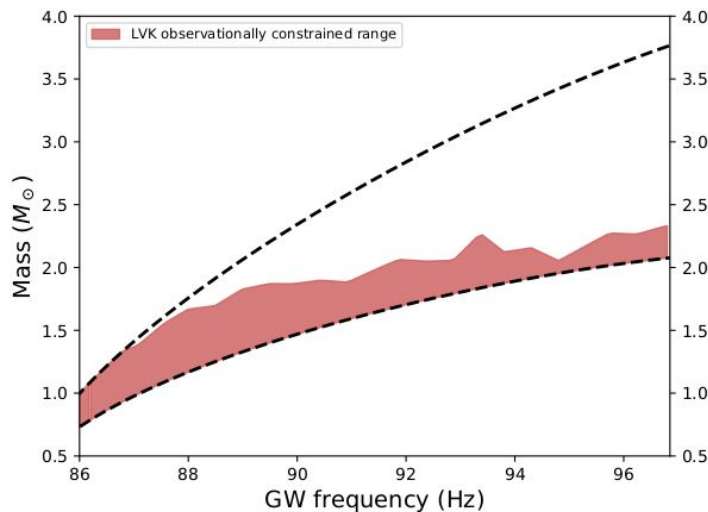
DOWIEDZ SIĘ WIĘCEJ:

Przeczytaj preprint artykułu naukowego [tu](https://arxiv.org) albo na serwerze [arXiv.org](https://arxiv.org).

Dane O3 mają znacznie niższy poziom szumu i znacznie lepszą jakość niż dane O1 i O2 oraz, co najważniejsze, pokrywają się z obserwacjami *NICER* dla PSR J0537-6910 od 2017 roku. Dane *NICER* precyzyjnie śledzą tempo rotacji pulsara dostarczając dokładnej informacji o tym, kiedy występują glicze. Pozwala to dokładnie analizować dane o falach grawitacyjnych w okresach między gliczami, co pokazano na Rys. 1, i umożliwia przeprowadzenie analizy najbardziej wyczulonej na poszukiwanie słabego sygnału. Zależność pomiędzy częstotliwością fal grawitacyjnych a prędkością rotacji pulsara nie jest dokładnie znana, ponieważ zależy ona od nieznannej masy i promienia gwiazdy. Dlatego konieczne jest poszukiwanie sygnałów fal grawitacyjnych w pewnym zakresie częstotliwości (od około 86 do 97 Hz; poszukiwania dla różnych częstotliwościach są też opisane [tutaj](#)). Do analizy użyto dwóch niezależnych metod. Obie polegają na dopasowaniu danych między gliczami do zestawu modeli opisujących sygnał fal grawitacyjnych wywołanych emisją w modzie  $r$ . Modele zależą od dwóch nieznanymi parametrów sygnału - częstotliwości i szybkości zmian częstotliwości, które są związane ze wskaźnikiem hamowania. Nie znaleźliśmy przekonujących dowodów na istnienie sygnału fal grawitacyjnych, ale ten „negatywny” wynik pozwala na nałożenie silnych ograniczeń na teoretyczne modele spowalniania rotacji PSR J0537-6910 poprzez emisję w modzie  $r$ . W szczególności otrzymaliśmy szereg górnych ograniczeń na amplitudę fal grawitacyjnych emitowanych przez gwiazdę, tj. wartości, powyżej których nasze poszukiwania byłyby wystarczająco czułe, aby wykryć emisję. Rys. 2 porównuje nasze górne ograniczenie amplitudy fal grawitacyjnych z przewidywaniami modeli teoretycznych dla spowalniania rotacji PSR J0537-6910 zdominowanego emisją z modu  $r$ . Przewidywania te są reprezentowane przez pasmo, ponieważ dokładna amplituda zależy od nieznanymi masy i promienia gwiazdy. Nasze wyniki wskazują, że badamy ciekawy naukowo przedział parametrów, a dla niektórych z używanych przez nas metod poszukiwawczych, szczególnie przy wysokich częstotliwościach, górne granice są znacznie poniżej amplitudy fal grawitacyjnych sugerowanej przez modele teoretyczne. Na Rys. 3 przedstawiamy nasze wyniki w kategorii ograniczeń na wartość masy gwiazdy neutronowej. Nasze poszukiwania wykluczają możliwość, że PSR J0537-6910 jest gwiazdą neutronową o dużej masie emitującą fale grawitacyjne dzięki modowi  $r$ , ale taki scenariusz może być nadal możliwy dla gwiazd neutronowych o mniejszej masie.



**Rysunek 2.** Wybrane górne ograniczenia amplitudy fali grawitacyjnej  $h_0$  (oś pionowa) w funkcji częstotliwości  $f$  fali grawitacyjnej (oś pozioma), otrzymane w wyniku poszukiwań metodami tzw. statystyk F/G i 5-wektorów. Krzywe przerywane oznaczają teoretyczny zakres spowalniania, podczas gdy ciemniejszy obszar wyznacza granice ustalone w wyniku poszukiwań; więcej szczegółów w artykule.



**Rysunek 3:** Ograniczenia na masę pulsara J0537-6910 (oś pionowa) w funkcji częstotliwości fal grawitacyjnych (oś pozioma), przy założeniu, że emisja fal grawitacyjnych z modu  $r$  powoduje spowolnienie obrotu gwiazdy neutronowej. Zaciemniony obszar oznacza wartości wciąż dopuszczalne.

Wraz z rozpoczęciem kolejnej kampanii obserwacyjnej (O4) w drugiej połowie 2022 roku, będziemy mieli kolejną okazję do poszukiwania fal grawitacyjnych z pulsara J0537-6910, dysponując bardziej czułymi danymi z sieci detektorów LIGO, Virgo i KAGRA oraz, miejmy nadzieję, precyzyjnymi pomiarami czasu kolejnych gliczy dokonanymi przez teleskop rentgenowski *NICER*.

## SŁOWNICZEK

**Gwiazda neutronowa:** Pozostałość po supernowej, zapadnięciu się i eksplozji gwiazdy o masie między 10 a 25 masami naszego Słońca. Typowe gwiazdy neutronowe mają masę około 1-2 mas Słońca i promień 10-15 kilometrów, co oznacza, że są jednymi z najbardziej zwartych obiektów znanych we Wszechświecie.

**Ciągła fala grawitacyjna:** Długotrwały sygnał fal grawitacyjnych, który ma prawie stałą częstotliwość, w przeciwieństwie do fal z układów podwójnych czarnych dziur, dla których sygnał jest obecny w detektorze tylko przez krótki czas i ma szybko rosnącą częstotliwość (kliknij [tu](#) po więcej szczegółów).

**Spowalnianie:** Tempo, z jakim rotująca gwiazda neutronowa zwalnia częstotliwość obrotu w wyniku emisji energii.

**Wielki Obłok Magellana:** Galaktyka karłowata towarzysząca Drodze Mlecznej, znajdująca się w odległości 50 000 parseków. Zarówno Wielki, jak i Mały Obłok Magellana są dobrze widoczne gołym okiem na półkuli południowej.

**Mod  $r$ :** Fala wzbudzona w płynnej materii gwiazdy, napędzana przez siłę Coriolisa wynikającą z rotacji.