

ОЦЕНКА НА ПАРАМЕТРИТЕ НА МИЛИСЕКУНДНИЯ АКРЕТИРАЩ ПУЛСАР XTEJ 1807-294 ЧРЕЗ МОДЕЛИРАНЕ НА ТРОЙКИТЕ ОТ ЕДНОВРЕМЕННИ КВАЗИПЕРИОДИЧНИ ОСЦИЛАЦИИ

Радостина Ташева и Иван Стефанов

AN ASSESSMENT OF THE PARAMETERS OF THE ACCRETING MILLISECOND PULSAR XTEJ 1807-294 BY MODELLING OF TRIPLETS OF SIMULTANEOUS QUASIPERIODIC OSCILLATIONS

Radostina Tasheva and Ivan Stefanov

Abstract: The availability of triplets of simultaneously observed quasi-periodic oscillations (QPO) in the spectrum of the millisecond pulsar allows an assessment of the mass and the specific angular momentum of the central neutron star to be made. The consistency of the estimates obtained with the different triplets gives us the opportunity to check the viability of the used model, and the error assessment during the parameter calculations is implemented using the error propagation formula.

Keywords: atoll sources, neutron stars, quasi-periodic oscillations

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Милисекундните пулсари са бързо въртящи се неутронни звезди - с честоти от порядъка на хиляди херци. Те съдържат неутронен газ, който се получава от сливането на свободните електрони и протони възникнали при стадия на свръхнова предшестваш стадия на неутронната звезда. Той има плътност от порядъка на 10^{18}kg/m^3 и се формира за много малък период от време като създава, съгласно закона за запазване на импулса обект с много малък радиус и значително по-малка от първоначалната маса, въртяща се с голяма скорост. Наличието на централен обект с голяма плътност създава изключително силно гравитационно поле и падането на частици от създадения около неутронната звезда акреционен диск към повърхността ѝ носи информация за физическите параметри на неутронната звезда – маса и специфичен ъглов момент.

Излъчването носещо информация за характеристиките на звездата е рентгеново и има квазипериодичен характер корелиращ със приблизително спираловидната траектория на материята идваща от звездата компаньон съпътстваща пулсара. Това позволява да се намерят зависимости свързващи честотите на пиковете в рентгеновия спектър с комбинации от честоти даващи позицията на тестова частица в акреционния диск.

В спектъра на милисекундните пулсари се наблюдават както нискочестотни (LF) QPO с честоти под 100Hz така и високочестотни (HF) QPO, с честоти до няколко хиляди херца. Те често възникват по двойки - долна ν_L и горна ν_U .

Според изследванията на Vambi [1] и Mota[2] ако трите наблюдаеми в тези източници честоти възниква едновременно, е възможна оценката на както на масата и ъгловия момент на централната неутронна звезда заедно с абсолютната грешка на това измерване, така и на грешката съпътстваща тази оценка. В настоящата работа ние решаванме система от три нелинейни алгебрични уравнения свързващи честотите на наблюдаваните квазипериодични осцилации с параметрите на централния обект, за да определим масата и специфичния ъглов момент на неутронната звезда. Методът на косвената грешка (на разпространението на грешката) е приложен за на абсолютната грешка, скъято са определени параметрите на милисекундния пулсар XTEJ 1807-294.

2. ДАННИ ЗА МИЛИСЕКУНДНИЯ ПУЛСАР XTE1807-294.

Милисекундния пулсар XTEJ 1807-294 е открит за първи път през 2003г. с помощта на X-ray Timing Explorer. Информация за стойностите на честотите при които се наблюдава максимум в интензитета на рентгеновия спектър за пръв път от Linares et.al [3].

Таблица 1 Данни за милисекундния пулсар XTEJ 1807-294

Group	$\nu_{LF}(\text{Hz})$	$\nu_L(\text{Hz})$	$\nu_U(\text{Hz})$
B	14.45±0.17	163±23.0	354.0±10.0
C	17.4±0.4	191.0±9.0	375.0±2.0
D	20.2±0.4	202.0±11.0	395.0±3.0
E	26.1±1.6	238.0±25.0	449.0±9.0
F	27.6±0.5	259.0±16.0	465.0±2.0
G	32.1±1.5	273.0±19.0	492.0±5.0
H	40.3±1.1	370.0±18.0	565.0±5.0

Данните от тяхната работа показват наличието на нискочестотна компонента заедно с двойки едновременно възникващи високи честоти във всяка от седемте групи, дадени в таблица 1 и обозначени от B до H включително . За да се оценят тези честоти са използвани модели на базата мултилогоренцианни функции.

3. МОДЕЛИ НА ТОТАЛНАТА ПРЕЦЕСИЯ

Моделирането на движението на маса падаща от звездата компаньон се извършва с помощта на три честоти, наречени геодезични - орбитална ν_ϕ , радиална ν_r и вертикална ν_θ . Те или техни линейни комбинации дават връзката между честотите наблюдавани в рентгеновия спектър от една страна и масата и специфичния ъглов момент от друга. Геодезичните честоти според Aliev et.al. [4] имат вида:

$$(1) \quad \begin{aligned} \nu_\phi &= \left(\frac{c^3}{2\pi GM} \right) \frac{1}{r^{3/2} \pm a}, \\ \nu_r^2 &= \nu_\phi^2 \left(1 - \frac{6}{r} - \frac{3a^2}{r^2} \pm \frac{8a}{r^{3/2}} \right), \\ \nu_\theta^2 &= \nu_\phi^2 \left(1 + \frac{3a^2}{r^2} \mp \frac{4a}{r^{3/2}} \right). \end{aligned}$$

Изчисленията са при отчитане на метриката на Кер

Ниската честота ν_{LF} най-често се приема равна на честотата на прецесията на Lense-Thirring т.е. тя описват прецесия на средната ос на орбитата резултат от взаимодействието на моментите на импулса на неутронната звезда и диска т.е. $\nu_{LF} = \nu_{LT} = \nu_\phi - \nu_\theta$.

Моделите на тотална прецесия TP, TP1 предложени от Stuchlik et.al. [5] въвеждат величината период на тотална прецесия. Той се измерва с времето за което една тестова частица въртяща се по квазиелиптична орбита с даден наклон и намираща се възможно най-близо до звездата ще се завърти така че наклона на орбитата ѝ отново да бъде същия и тестовата частица да бъде пак максимално близко до звездата. Долната от двете високи честоти е равна на тази честота $\nu_T - \nu_L = \nu_T = \nu_\phi - \nu_{LT} = \nu_\theta - \nu_r$, а горната висока честота е равна на ν_θ за TP модела и ν_ϕ за TP1 модела.

4. УРАВНЕНИЯ НА ЧЕСТОТИТЕ И МЕТОД НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА ГРЕШКАТА

Нелинейните алгебрични уравнения свързващи наблюдаемите и геодезичните честоти имат три независими един от друг параметъра – специфичния момент на импулса a , масата му M в слънчеви маси безразмерния радиус r на който възникват квазипериодичните осцилации. Ако предположим, че радиусът r е един и същ и за трите възникващи едновременно трептения можем да го заместим в съответните уравнения и да намерим M и a . Решаваните уравнения в най-общ вид са:

$$(2) \quad \nu_{LF}(M, a, r) = \nu_{LF_0}$$

$$v_L(M, a, r) = v_{L_0}$$

$$v_U(M, a, r) = v_{U_0}$$

Тук v_{LF_0}, v_{L_0} и v_{U_0} са наблюдаваните стойности на ниската честота и високите горна и долна честота, а v_U, v_L и v_{LF} – техните теоретично пресметнати стойности.

След получаване на решението трябва да се оцени дали резултатът се подчинява на метриката на Кер т.е. дали $a \leq 0.4$

За оценка абсолютната грешка на измерените величини търсим пълната производна на изразите използвани за определяне на масата и ъгловия момент, които зависят от грешките в измерването на наблюдаемите честоти

$$(3) \quad \sigma_a^2 = \left(\frac{\partial a}{\partial v_{U_0}} \right)^2 \sigma_{v_{U_0}}^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial v_{L_0}} \right)^2 \sigma_{v_{L_0}}^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial v_{LF_0}} \right)^2 \sigma_{v_{LF_0}}^2$$

$$\sigma_M^2 = \left(\frac{\partial M}{\partial v_{U_0}} \right)^2 \sigma_{v_{U_0}}^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial v_{L_0}} \right)^2 \sigma_{v_{L_0}}^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial v_{LF_0}} \right)^2 \sigma_{v_{LF_0}}^2$$

Грешките на наблюдаваните честоти $\sigma_{v_{U_0}}, \sigma_{v_{L_0}}, \sigma_{v_{LF_0}}$ са показани в

Таблица 1. Тъй като a и M са неявни функции на $v_{LF_0}, v_{L_0}, v_{U_0}$ за пресмятането им се използват съответните функционални детерминанти.

След пресмятането на стойностите на масата и специфичния ъглов момент както и на средните им стандартни отклонения може да се пресметнат и по-информативните им средни стойности като и претегленото средно от седемте им стойности. За стойностите на масата M_{cp} , a_{cp} и техните стандартни отклонения σ_{cp}^2 , като използваме формулите:

$$(4) \quad M_{cp} = \frac{\sum M_i / \sigma_i^2}{\sum 1 / \sigma_i^2} \quad a_{cp} = \frac{\sum a_i / \sigma_i^2}{\sum 1 / \sigma_i^2} \quad \sigma_{cp}^2 = \frac{1}{\sum 1 / \sigma_i^2}$$

Тук M_i, a_i са стойностите получени във всеки от случаите, $i = 1, 2, \dots, 7$

5. МАСА И ЪГЛОВ МОМЕНТ НА ПУЛСАРА ХТЕ1807-294

Масата и ъгловия момент се пресмятат отделно за всяка от седемте групи В до Н и са представени в таблици 2 (за ТР модела) и 3 (за ТР1 модела). Масата е в M_0 и специфичния ъглов момент a е безразмерна величина.

Таблица 2 Маса и специфичен ъглов момент за милисекундния пулсар XTEJ 1807-294 според TP модела

Група данни	a, безразмерна	M, слънчеви маси
B	0,37±0,04	4,94±0,60
C	0,38±0,01	5,70±0,19
D	0,40±0,02	5,06±0,20
E	0,43±0,04	4,71±0,37
F	0,42±0,02	4,72±0,18
G	0,45±0,03	4,57±0,22
H	0,43±0,01	4,46±0,13

Таблица 3 Маса и ъглов момент за милисекундния пулсар XTEJ 1807-294 според TP1 модела

Група данни	a, безразмерна	M, слънчеви маси
B	0,37±0,04	5,36±0,64
C	0,38±0,01	6,26±0,21
D	0,40±0,02	5,59±0,22
E	0,43±0,04	5,27±0,41
F	0,43±0,02	5,29±0,20
G	0,45±0,02	5,71±0,24
H	0,44±0,01	5,06±0,14

Въз основа на резултатите представени в Таблица 2 и 3 може да се намерят и претеглените средни стойности на масата и специфичния ъглов момент, като се използват формули (4). Резултатът от тези пресмятания е $M_{cp}=4.81\pm 0.08M_{\odot}$; $a_{cp}=0.41\pm 0.01$ за модела TP и $M_{cp}=5.45\pm 0.08M_{\odot}$; $a_{cp}=0.41\pm 0.01$.

Съгласно таблици 2 и 3, оценките за специфичния ъглов момент ъгловия момент варират в граници $0.37 \leq a \leq 0.45$ и са практически едни и същи независимо кой от двата модела сме използвал. Те, като се вземе и абсолютната грешка на измерването им са на границата на интервала в който е приложима метриката на Кер, чието основно изискване е $a \leq 0.4$.

Масата има стойности, които се променят в интервала - $4.57 \leq a \leq 6.28M_{\odot}$. При използването на TP1 модела се получават по-големи стойности на масата в сравнение с TP модела. И в двата случая обаче получените маса са по-големи от допустимите за неутронни звезди – $3M_{\odot}$

Стефанов и Ташева [6] прилагат същия метод, използвайки RP , RP1, RP2 моделите за atoll източника 4U 1728-34. За този обект те получават резултати за масата и специфичния ъглов момент приемливи за неутронна звезда, описвана с метриката на Кер. По-лошото представяне на TP и TP1моделите тук е възможно да се дължи на неедновременността на

възникналите колебания, това че те не възникват на едни същи орбити или на невъзможността на тези модели да опишат тези колебания. Предстои същите модели да бъдат приложени на други обекти, използвайки същия метод.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предположението за едновременност във възникването, върху едни и същи орбити γ на тройка честоти в спектъра на милисекундния пулсар XTEJ 1807-294 позволява се определят масата и специфичния ъглов момент на неутронната звезда. Съответните системи алгебрични уравнения се решават като се използват моделите на тотална прецесия TP и TP1. Оценките за масите са със средни стойности $M_{cp}=4.81\pm 0.08M_{\odot}$ за TP модела и $M_{cp}=5.45\pm 0.08M_{\odot}$, и в двата случая превишаващи значително горната граница допустима за неутронни звезди - $3 M_{\odot}$. Резултатите за специфичните ъглови моменти се подчиняват на изискванията на за приложимост на метриката на Кер - $a\leq 0.4$, като се има предвид точността на измерването. Подобен тест който да оцени съгласуваността на моделите с теорията може би следвал да се приложи и за моделите на релятивистка прецесия RP , RP1, RP2. Той може да бъде приложен както за този обект, както и за други обекти включващи неутронни звезди и черни дупки. Както показват Стефанов и Ташева [6], той дава добри резултати при приложението на RP , RP1, RP2 моделите за atoll източника 4U 1728-34.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bambi C., 2015, Eur. Phys. J. C 75, 162.
2. Motta, S. E., Belloni, T. M., Stella, L., Muñoz-Darias, T., & Fender, R. 2014, MNRAS, 437, 2554
3. Linares M., van der Klis M., Altamirano D., Markwardt C.B., 2005, in: arXiv astro-ph, 0509011
4. Aliev A. N., Esmer G. D., Talazan P., 2013, Class. Quantum Grav. 30, 045010.
5. Stuchlík, Z , Torok G., Bakala P, 2007, A&A, in : arXiv:0704.2318
6. Стефанов И., Ташева Р., Университетска годишна Конференция на НВУ „Васил Левски“, 2020 том 3, стр.126

Радостина Пенева Ташева, д-р главен асистент, Департамент по Приложна Физика, Технически Университет - София, София 1587, бул. “Климент Охридски” 8 , тел.: (02) 965-31-18, e-mail: rpt@tu-sofia.bg

Иван Живков Стефанов, д-р доцент, Департамент по Приложна Физика, Технически Университет - София, София 1587, бул. “Климент Охридски” 8 , тел.: (02) 965-31-14, e-mail: izivkov@tu-sofia.bg