

## Секция 2

---

### Физико-математические науки

---

УДК 524.3  
ББК 22.66  
ГРНТИ 41.23.02  
ВАК 01.03.02

#### Современные тенденции развития астрофизики нейтронных звёзд

Е. С. Кузьмина <sup>1</sup>

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия*

Поступила в редакцию 15 октября 2020 года

После переработки 29 октября 2020 года

Опубликована 12 декабря 2020 года

---

**Аннотация.** Рассмотрены основные характеристики нейтронной звезды, такие как строение, свойства. Приведены физические характеристики нейтронных звёзд. Произведен анализ физических характеристик нейтронных звёзд. Выявлены основные направления развития астрофизики нейтронных звёзд.

**Ключевые слова:** нейтронная звезда, компактные звездные объекты, классы нейтронных звёзд, пульсары, магнитарый радиопульсар, магнитное поле, вращающиеся нейтронные звёзды, рентгеновские пульсары

---

### Введение

Астрофизика компактных звёздных объектов является стремительно развивающейся областью современной науки. В режиме реального времени обнаруживаются новые экспериментальные данные, новые астрофизические наблюдения, открываются новые, ранее не изученные астрофизические объекты. Особый интерес в современной астрофизике представляют компактные звёздные объекты [1–3]. Кроме того, изучение компактных звёздных объектов оказывает влияние и на другие области современной физики. В нейтронных звёздах происходят все четыре типа фундаментальных взаимодействий.

---

<sup>1</sup>E-mail: nelizavetakuzm@gmail.com

Нейтронная звезда представляет собой космическое тело, являющееся одним из результатов эволюции звёзд, состоящее в основном из нейтронов.

Целью работы является описание астрофизических явлений в нейтронных звёздах.

Задачей работы является описание основных характеристик нейтронных звёзд.

Объектом исследования являются нейтронные звёзды.

Предметом исследования являются астрофизические характеристики нейтронных звёзд.

## Обзор исследований нейтронных звёзд

Идея существования нейтронных звезд была предложена ещё в 1934 году Вальтером Бааде и Фрицом Цвикки. Они предположили, что существуют объекты с очень высокой плотностью и малыми радиусами, у которых гравитационная связь выражена сильнее, чем у обычных звезд. Также учёные высказали мысль, что нейтронные звезды образуются в результате взрыва сверхновых. Первые вычисления моделей нейтронных звезд были сделаны Оппенгеймером и Волковым, которые предположили, что вещество должно состоять из идеального газа свободных нейтронов с высокой плотностью. Большинство работ основывалось на той идее, что нейтронные ядра нормальных массивных звезд являются источниками звездной энергии. Но от этой мысли пришлось отказаться, когда стали понятны процессы термоядерного синтеза. Интерес к нейтронным звездам увеличился после Второй Мировой войны, когда начала развиваться рентгеновская астрономия. Однако они были открыты в радиоастрономических наблюдениях. Аспирантка Джослин Белл, под научным руководством Энтони Хьюиша, изучая радиоимпульсы, обнаружила, что есть строго периодический источник с очень маленьким периодом в доли секунды. Затем учёными были также выявлены периодические импульсы. Стало ясно, что существует источник со строго малой периодичностью. Астрофизики пришли к выводу, что это нейтронные звезды. До этого так же были открыты нейтронные звезды, но они не были распознаны, так как объект не пульсировал. Открытие в 1968 году пульсаров в Крабовидной туманности и в созвездии Парусов, которые расположены в остатках сверхновых, послужило свидетельством того, что нейтронные звезды образуются в результате взрыва сверхновых. Оптические и рентгеновские наблюдения за рентгеновскими источниками, входящих в двойные системы, позволили определить массы нейтронных звезд с высокой точностью.

## Теоретические материалы по нейтронным звёздам

В большинстве случаев нейтронные звезды образуются в результате коллапса ядер массивных звезд с массой больше 8–10 массы Солнца. Коллапс ядра массивной звезды сопровождается вспышкой сверхновой. Энергия, освобождаемая при этом по порядку величины, совпадает с гравитационной энергией связи нейтронной звезды:

$$\Delta E_g \approx \frac{GM_{NS}^2}{R_{NS}} \sim 0.1M_{NS}c^2 \approx a_1 \frac{M_{NS}}{M_{\odot}}, \quad (1)$$

где  $a_1 = 10^{53}$  эрг. Особенное свойство нейтронных звезд — сверхвысокая плотность, порядка ядерной ( $\rho_0 \approx 2.8 \cdot 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>). Однако, в отличие от атомного ядра, в котором нуклоны удерживаются благодаря сильному взаимодействию между кварками, в нейтронной звезде удерживаются гравитационными силами. Внутри нейтронных звезд вырожденные нейтроны не распадаются: из-за высокой плотности  $\beta$ -распад нейтрона запрещён принципом Паули, так как образующемуся электрону нет места в фазовом пространстве координат и импульсов из-за сильного вырождения вещества.

Из наблюдений следует, что нейтронные звезды обладают сверхсильным магнитным полем. Из-за «вмороженности» магнитного поля в плазму, при сжатии вещества

сохраняется поток магнитного поля, а его плотность, соответственно увеличится. Поток магнитного поля при сжатии вещества вычисляется по формуле:

$$\Phi \approx BR^2 = const . \quad (2)$$

Так при сжатии звезды типа Солнца со средней напряженностью  $B_0 \sim 1$  Гс, до размеров нейтронной звезды с радиусом в 10 км, получаем  $B_{NS} \sim 5 \cdot 10^{11}$  Гс. Такие значения подтверждаются наблюдениями за радиопульсарами.

Многие нейтронные звезды входят в состав двойных систем. В тесных двойных системах наблюдаются аномальные явления: при перетекании вещества с сильным магнитным полем наблюдается феномен рентгеновского пульсара. Если магнитное поле не такое большое, меньше  $10^{10}$  Гс, то вещество на поверхности накапливается и может произойти термоядерный взрыв. Эти взрывы наблюдаются в виде регулярных рентгеновских барстеров. В отличие от белых карликов, продукты вспышек образуют расширяющуюся атмосферу, которая не отделяется от звезды в виде оболочки, а вновь сжимается. Причина – в тысячу раз больший гравитационный потенциал, который на порядок больше удельной энергии, выделяемой при термоядерном синтезе.

Для пульсара Халса-Тейлора (PSR 1913+16), входящего в двойную систему, из радиоизмерений получена лишь одна функция масс. Другой компонент представляет собой какой-то компактный объект и непосредственно не наблюдается. Однако высокая точность наблюдений за пульсаром в сочетании с относительно высокой орбитальной скоростью позволили выполнить измерения релятивистского смещения периастра и доплеровского сдвига второго порядка. Они дали ещё два соотношения. Наилучшие значения масс пульсара и его компаньона таковы:

$$M_{pulsar} = 1.41 \pm 0.06 M_{\odot} . \quad (3)$$

Рассмотренные определения масс приводят к некоторым важным заключениям. Во-первых, современные результаты наблюдений совместимы со стандартными теориями гравитации и адронного вещества. Хотя данные ещё недостаточно точны, но уже позволяют исключить из рассмотрения некоторые мягкие модели уравнений. Во-вторых, все современные определения масс нейтронных звезд совместимы с предположениями теории звездной эволюции (вырожденные ядра всех проэволюционировавших звезд должны иметь массы порядка Чандрасекара –  $1.4M_{\odot}$ ).

Прямых измерений радиусов нейронных звезд не существует. Его можно оценить по максимальной рентгеновской совместимости рентгеновских барстеров, предполагая её равной эддингтоновскому пределу и наблюдаемой эффективной температуре ( $L_x = 4\pi R^2 \sigma_B T_{\text{eff}}^4$ ); неопределённость в расстоянии до источника не позволяет непосредственно оценить  $L_x$  из наблюдений. В принципе её можно вычислить, зная массу нейтронной звезды, но в маломассивных рентгеновских системах с барстерами массы нейтронных звезд определяются не очень точно.

Другой способ определения радиуса – по наблюдению гравитационного красного смещения  $z_g$  линий излучения вблизи поверхности нейтронной звезды:

$$z_g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R_g}{R}}} , \quad (4)$$

$$R_g = 2 \frac{GM}{c^2} . \quad (5)$$

где  $R_g$  – гравитационный радиус нейтронной звезды с массой  $M$ . Поэтому радиусы, выводимые из современных наблюдений недостаточно точны и лежат в пределах 10–15 км.

В отличие от масс, которые в двойных пульсарах измеряются по релятивистским эффектам с рекордной точностью, внутреннее строение нейтронных звезд, особенно их центральная часть, известно с большой неопределенностью из-за отсутствия данных о свойствах вещества в сверхплотном состоянии.

Наиболее хорошо изученным классом нейтронных звезд являются пульсары. Это вращающиеся нейтронные звезды с сильным магнитным полем.

Перечислим основные свойства пульсаров. Во-первых, для пульсаров характерны короткие периоды пульсаций: 0.0015-8 с. Из этого значения можно сразу оценить нижний предел плотности вещества нейтронных звезд. Предельный период вращения может быть найден из условия равенства центробежной силы на экваторе силе притяжения.

$$P_{im} = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}. \quad (6)$$

Тогда оценка плотности по наблюдаемому периоду вращения по формуле

$$\rho < \frac{12\pi}{P^2G}. \quad (7)$$

даст значение  $\rho < 6 \cdot 10^{12}$ .

Предельно короткие наблюдаемые периоды вращения радиопульсаров (около 1.5 мс) соответствует ядерной плотности вещества  $\sim 10^{14}$  г/см<sup>3</sup>.

Во-вторых, для пульсаров характерно замедление пульсаций. Замедление пульсаров происходит с темпом:

$$\frac{dP}{dt} \sim 10^{-15}. \quad (8)$$

Это свойство интерпретируется как торможение вращения нейтронной звезды.

Вращательная энергия нейтронной звезды уносится главным образом потоком релятивистских частиц, вырываемых с поверхности сильнейшим электрическим полем в области полярных шапок.

Во-третьих, для пульсаров характерна задержка времени прихода импульсов на разных частотах. Этот эффект связан с распространением радиоизлучения в ионизированной космической плазме (мера дисперсии). Измеряя задержку времени прихода импульсов пульсара на разных частотах и оценивая из других наблюдений электронную концентрацию межзвездной среды (в среднем по галактике  $n_e = 0.03$  см<sup>-3</sup>), по величине меры дисперсии оценивают расстояния до пульсаров. Это наиболее распространенный способ определения расстояния до нейтронной звезды. Точность данной оценки невелика, так как плохо известно распределение концентрации ионизированной плазмы вдоль луча зрения.

Во-четвертых, для пульсаров характерна огромная яркостная температура и поляризация радиоизлучения. Если источник виден под телесным углом  $\Omega$ , а принимаемый от него поток излучения на частоте  $\nu$  есть  $F_\nu$  [эрг/(см<sup>2</sup>·с)], то яркостная температура  $T_b$  в рэлей-джинсовском пределе определяется из соотношения:

$$2kT_b \left(\frac{\nu}{c}\right)^2 = F_\nu \Omega, \quad (9)$$

$$\Omega \approx \pi \frac{R_*}{r}, \quad (10)$$

$r$  – расстояние до источника,  $R_*$  – его радиус.

Например, для пульсара в Крабовидной туманности с радиусом в 10 км, расстоянием 2 кпс, радиопотоке 1 Янский на частоте порядка 1 ГГц яркостная температура получается  $10^{26}$  К. Очевидно, что ни одно тело не может иметь такую температуру. Для

объяснения радиоизлучения пульсаров привлекаются нетепловые механизмы. Наиболее вероятен плазменный механизм излучения релятивистских электронов в магнитном поле нейтронных звезд, который также объясняет сильную поляризацию радиоизлучения пульсаров.

У пульсаров так же большая напряжённость магнитного поля. Оценить напряжённость можно измеряя только период пульсара и его первую производную:

$$P\dot{P} = (2\pi)^2 \frac{B_s^2 R^6}{Ic^3} . \quad (11)$$

где  $P$  – период пульсара,  $\dot{P}$  – первая производная периода,  $B_s$  – напряжённость магнитного поля вблизи нейтронной звезды. В таком сверхсильном магнитном поле изменяются свойства вещества и становятся существенными квантовые эффекты, например – рождение электрон-позитронных пар, которые важны для описания физических процессов вблизи поверхности нейтронной звезды. Для пульсаров удобно использовать диаграмму  $P - \dot{P}$  [4, 5]. Местоположение радиопулсаров в плоскости период – производная периода ( $P - \dot{P}$ ) было ключевым диагностическим инструментом с первых дней пульсарной астрономии. Особенно важно то, как пульсары со временем эволюционируют по диаграмме  $P - \dot{P}$  [4]. Оценки магнитных полей пульсаров лежат в широких пределах от  $\sim 10^8$  до  $\sim 10^{13}$  Гс. Зная период и его первую производную можно также оценить возраст пульсара:

$$\tau_d = \frac{1}{2} \left( \frac{P}{\dot{P}} \right) . \quad (12)$$

Это время называют динамическим возрастом пульсара. Типичные значения динамических возрастов – сотни тысяч лет. Пульсар считается старым, если его возраст  $\approx 10^6$  лет. Как полагают, на больших временных интервалах (порядка десятка миллионов лет) существенным может оказаться омическое затухание магнитного поля (переход энергии магнитного поля в тепло). Электродинамическое рассмотрение вращающейся нейтронной звезды с дипольным магнитным полем приводит к выводу, что в области полярных шапок возникает компонента электрического поля, параллельная силовым линиям магнитного поля. Напряжённость электрического поля пропорциональна произведению индукции магнитного поля и частоты вращения и достигает значений, на два порядка выше напряжённости поля в атоме водорода. Такое электрическое поле ионизирует атомы и вырывает заряженные частицы с поверхности нейтронной звезды. Максимальная энергия, до которой заряд может ускориться в магнитосфере огромна:

$$E_{max} \sim eER_{NS} , \quad (13)$$

и численная оценка даёт значение порядка  $10^{19}$  эВ и соответствует энергии самых энергичных космических лучей. В действительности, процесс более сложен: заряд начинает ускоряться под действием электрического поля вдоль силовых линий магнитного поля. Вследствие кривизны силовой линии появляется ускорение, приводящее к излучению энергичных гамма-квантов. Фотон рождает электрон-позитронную пару. В свою очередь, вторичные электроны вновь рождают фотоны изгибного излучения. Так возникает электрон-позитронная лавина. Генерируемая таким образом плазма экранирует электрическое поле и заполняет пространство внутри замкнутых силовых линий, а та часть, которая течёт вдоль незамкнутых, то есть открытых линий, уходит в бесконечность. Именно в кинетическую энергию рождаемых релятивистских частиц и перерабатывается почти вся энергия вращения нейтронной звезды.

Неустойчивости в плазменном потоке частиц внутри или вблизи светового цилиндра, движущихся вдоль открытых силовых линий рождают радиоволны в узком направленном пучке. Именно это нетепловое явление и наблюдается от пульсаров.

При наличии очень сильного магнитного поля нейтронной звезды ( $10^{12} - 10^{14}$  Гс) в тесной двойной системе возможен такой тип аккреции, при которой газ звезды падает вдоль линий магнитного поля в область магнитных полюсов нейтронной звезды. Избыток магнитного поля передаётся звезде через магнитное поле. Скорости падения порядка сотен тысяч километров в секунду, поэтому выделяется очень много энергии, которая выделяется в форме жестких квантов на поверхности в районе магнитных полюсов образуются два горячих «рентгеновских пятна». Сильное магнитное поле делает это излучение неизотропным. Такие импульсные источники получили название рентгеновские пульсары. На месте рентгеновских источников в оптическом диапазоне наблюдается нормальная звезда, как правило, так же переменная, причём механизм переменности необычен: он связан с интенсивным прогревом одной стороны звезды её горячим спутником. Если в своём орбитальном движении нейтронная звезда заходит за диск звезды, рентгеновские импульсы прекращаются до тех пор, пока нейтронная звезда не выйдет из затмения. Продолжительность этой фазы даёт дополнительную информацию об орбитах звезд и их массах.

Обычные радиопулсары также излучают рентгеновские импульсы, но намного слабее и механизм их образования другой. Радиопулсары излучают свет за счёт энергии вращения, со временем медленно тормозят, период увеличивается. А рентгеновские пульсары излучают энергию за счёт падающего вещества, передача момента импульса приводит к ускорению вращения, следовательно, период уменьшается.

В астрономии источники видны потому, что они излучают энергию. В звёздах идут термоядерные реакции, радиопулсары излучают энергию, потому что быстро вращаются, то есть источником является энергия вращения (радиопулсары). Существует другой способ — выделение гравитационной энергии при «падении» объектов на нейтронную звезду, то есть аккреция (рентгеновские пульсары). Нейтронная звезда рождается горячей, то есть у неё есть большой запас тепловой энергии. Тепловая энергия излучается, и мы видим такие источники. У магнитаров источником энергии является магнитное поле. В них постоянно текут сильные токи, греют кору звезды, а иногда появляются «короткие замыкания» и выделяется очень быстро и очень много энергии (магнитные поля в магнетарах  $10^{14} - 10^{15}$  Гс). Такие вспышки наблюдаются. Впервые была замечена 5 марта 1979 года в направлении Магелланова облака.

## Заключение

К концу 90-ых существовало около семи классов нейтронных звезд, которые проявляли себя как астрофизические объекты разного типа. Казалось, что они обречены родиться магнитаром, пульсаром, центральным компактным объектом в остатке сверхновой. Но затем появились новые наблюдения, например, радиопулсар начинал выдавать вспышки как магнитар, то есть объект из одного класса перешёл в другой класс астрофизических объектов. Стали открывать транзиентные магнитары, то есть проявляющий бурную активность в одно время и спокойные в другое. Возникла потребность создать единую концепцию нейтронных звёзд. В 2010-ых начала складываться картина объединения, основанная на эволюционировании такого параметра, как магнитное поле. Это позволило объяснить, например, существование транзиентных звезд – у них изменяется магнитное поле, одна из компонент усиливается, происходит «короткое замыкание», вспыхивает выделяется энергия, а затем поле в среднем становится меньше и объект становится виден как, например, радиопулсар. Существует предположение ещё одного механизма: после взрыва часть остатков сверхновой не удалась на бесконечность, а обратно притянулась к нейтронной звезде, образуя своеобразный «кокон», прижимая магнитное поле. То есть внутри нейтронная звезда с высоким магнитным полем, а на удалении видим объект с маленьким полем, который кажется спокойным.

Но через несколько десятков тысяч лет поле всё-таки выберется наружу. Если эта гипотеза реализуется, то будет объяснение, связывающее все известные на данный момент классы нейтронных звезд.

Однако за последние двадцать лет был значительно расширен «зоопарк» нейтронных звезд, поэтому, вполне возможно откроют новые виды, не вписывающиеся в данную теорию и нужно будет продолжать искать дальше новые эволюционные связи.

#### Список использованных источников

1. Попов С. Б. Суперобъекты: звёзды размером с город. — Москва : Альпина Нон-фикшн, 2016. — 238 с.
2. Шапиро С. Л., Тьюколски С. А. Чёрные дыры, белые карлики и нейтронные звезды / Пер. с англ. Под ред. Я. А. Смородинского. — Москва : Мир, 1985. — 656 с.
3. Хокинг С. В. От большого взрыва до чёрных дыр (краткая история времени). — Москва : Мир, 1990. — 232 с.
4. Johnston Simon, Karastergiou A. Pulsar braking and the  $P - \dot{P}$  diagram // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — feb. — Vol. 467, no. 3. — P. 3493–3499. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx377>.
5. Detection of X-ray emission from the very old pulsar J0108-1431 / G. G. Pavlov [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2009. — jan. — Vol. 691, no. 1. — P. 458–464. — URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/691/1/458>.

#### Сведения об авторах:

**Елизавета Сергеевна Кузьмина** — магистрант факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Россия.

E-mail: nelizavetakuzm@gmail.com

ORCID iD  0000-0001-6157-9501

Web of Science ResearcherID  AAZ-8178-2020

# Modern trends in the development of astrophysics of neutron stars

E. S. Kuzmina 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted October 15, 2020

Resubmitted October 29, 2020

Published December 12, 2020

---

**Abstract.** The main characteristics of a neutron star, such as structure and properties, are considered. Physical characteristics of neutron stars are given. The analysis of the physical characteristics of neutron stars is carried out. The main directions of development of astrophysics of neutron stars are revealed.

**Keywords:** neutron star, compact stellar objects, classes of neutron stars, pulsars, magnetic radio pulsar, magnetic field, rotating neutron stars, X-ray pulsars

PACS: 04.40.Dg

---

## References

1. Popov S. B. Superobjects: city-sized stars. — Moscow : Alpina Non-fiction, 2016. — 238 p.
2. Shapiro S. L., Tjukolski S. A. Black holes, white dwarfs and neutron stars / Translation from English. Ed. Ya. A. Smorodinsky. — Moscow : Mir, 1985. — 656 p.
3. Hawking S. W. From Big Bang to Black Holes (A Brief History of Time). — Moscow : Mir, 1990. — 232 p.
4. Johnston Simon, Karastergiou A. Pulsar braking and the  $P - \dot{P}$  diagram // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2017. — feb. — Vol. 467, no. 3. — P. 3493–3499. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stx377>.
5. Detection of X-ray emission from the very old pulsar J0108-1431 / G. G. Pavlov [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2009. — jan. — Vol. 691, no. 1. — P. 458–464. — URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/691/1/458>.

## Information about authors:

**Elizaveta Sergeevna Kuzmina** — Master's student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: nelizavetakuzm@gmail.com

ORCID iD  0000-0001-6157-9501

Web of Science ResearcherID  AAZ-8178-2020