

Казахский национальный педагогический университет имени Абая

УДК 524.354

На правах рукописи

НАСИРОВА ДИАНА МАХМУТОВНА

Трехчастичные эффекты в излучении сверхплотных звезд

6D060400 - Физика

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD) в области физики

Научные консультанты
доктор физ.-мат.наук,
академик Н.Ж. Такибаев,
доктор PhD, профессор
Университета Вупперталь
Г. Боос

Республика Казахстан
Алматы, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	3
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОБРАЗОВАНИЕ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВЕРХПЛОТНЫХ ОБЪЕКТОВ	11
1.1 Эволюция Вселенной и образование звезд.....	11
1.2 Образование и характеристики сверхплотных звезд.....	22
1.3 Строение нейтронных звезд и белых карликов.....	33
1.4 Способы регистрации и особенности излучения сверхплотных звезд.....	41
2 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА	48
2.1 Свойства вырожденного электронного газа.....	48
2.2 Уравнение состояния вещества в термодинамике.....	51
2.3 Уравнение состояния компактных объектов на примере белых карликов.....	54
2.4 Кристаллическая оболочка нейтронных звезд.....	57
2.5 Реакции электронного захвата	60
3 РЕЗОНАНСЫ В РАССЕЯНИИ НЕЙТРОНОВ НА СИСТЕМАХ ДВУХ И БОЛЕЕ ЯДЕР	64
3.1 Резонансы Брейта-Вигнера.....	64
3.2 Приближение Борна-Оппенгеймера.....	65
3.3 Модельные задачи квантовой механики трех тел, допускающих точные решения.....	68
3.4 Метод эффективного потенциала в задаче рассеяния легкой частицы на двух тяжелых.....	70
3.5 Решение задачи рассеяния на двух фиксированных центрах.....	73
4 РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ В СВЕРХПЛОТНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ	77
4.1 Характеристики кристаллических структур в оболочках нейтронных звезд.....	77
4.2 Трехчастичные нейтронные резонансы в оболочках сверхплотных звезд.....	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
БЛАГОДАРНОСТИ	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	109
ПРИЛОЖЕНИЯ	115

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие астрофизики уделяют много внимания изучению компактных объектов. Их изучение превратилось в одну из самых увлекательных и богатых открытиями областей астрофизики [1]. Потому что это самые интересные астрономические объекты, т.к. им присущи и сильное гравитационное поле, и сверхсильные магнитные поля, и сверхтекучесть, и сверхпроводимость, и сверхвысокие плотности, присущие лишь экзотическим формам вещества [2].

Такой интерес обусловлен загадочностью их строения, колоссальной плотностью и сильнейшими магнитными и гравитационными полями. Материя, из которой состоят нейтронные звезды находится в особом состоянии, которое можно сравнить с огромным атомным ядром, причем эти условия нельзя создать в земных лабораториях [2, с. 65].

Компактными звездами называют астрономические объекты, которые образуются в результате эволюции нормальной звезды и, приобретают аномально высокую плотность и небольшие размеры. Т.е. компактные объекты образуются, когда массивная звезда израсходует запасы своего водородного топлива, и развиваются другие реакции, например, с участием гелия, которые являются более быстрыми и энергопродуктивными. В результате целого ряда событий звезда взрывается ослепительной вспышкой сверхновой, после которой остаётся плотное центральное ядро, окруженное огромной по размерам газовой туманностью. К компактным объектам относятся: нейтронные звезды, белые карлики и черные дыры [3].

Существенным отличием сверхплотных звезд от нормальной звезды является их высокая плотность и, при этом малые размеры. Они имеют намного меньший размер, чем нормальные звезды сравнимой массы.

Интерес к нейтронным звездам обусловлен тем, что их можно рассматривать как природные лаборатории для изучения вещества в экстремальных физических условиях. Они являются самыми компактными звездами во Вселенной: при массе порядка массы Солнца их радиус составляет лишь 10-15 км. В следствие этого плотность вещества в ядрах нейтронных звезд в несколько раз превосходит плотность атомных ядер. На поверхности нейтронной звезды гравитационное ускорение $g \sim 10^{14} \text{ cm s}^{-2}$; гравитационная энергия $U \sim 10^{53} - 10^{54} \text{ erg}$ составляет $\sim 20\%$ от энергии покоя Mc^2 , что делает весьма заметными эффекты общей теории относительности, поэтому наиболее впечатляющие проверки теории относительности в последнее время связаны именно с наблюдениями нейтронных звезд [4].

Но наибольший интерес с точки зрения фундаментальной физики вызывает возможность проверки теоретических моделей сверхплотной материи путем сравнения результатов наблюдений нейронных звезд с предсказаниями, сделанными на основе тех или иных теоретических моделей взаимодействий элементарных частиц [4, с.1].

В 1967 г. открытие радиопульсаров стало крупнейшей вехой в развитии физики и астрономии наряду с открытыми за несколько лет до этого квазарами и реликтовым излучением. В отличие от последних, которые целенаправленно исследовались, прежде чем были обнаружены, пульсары были открыты совершенно случайно, при исследовании межпланетных мерцаний в радиодиапазоне, неожиданно оказавшихся строго периодическими, с сохранением периода [5].

С тех пор наука и техника не стоят на месте. В результате переживаемой человечеством в последние три десятилетия научно-технической революции в астрономии наступила новая эра. Астрономия прежде всего стала "всеволновой", что в огромной степени увеличило ее возможности [6].

Не малое значение имеет исследование взаимосвязи между звездами и межзвездной средой, включающее проблему непрерывного образования звезд из конденсирующейся межзвездной среды. Наличие звезд подчеркивает необратимость процессов эволюции вещества во Вселенной. Ведь звезды в основном излучают за счет необратимого процесса превращения водорода в более тяжелые элементы, прежде всего в гелий. Постоянно накапливающиеся во Вселенной "инертные", т.е. "мертвые" конечные продукты эволюции звезд - белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры также подчеркивают необратимый характер эволюции Вселенной [6, с.10].

В астрономии встречаются огромное разнообразие явлений, проявляющих себя на всех диапазонах длин волн. Рентгеновские звезды, космические мазеры, пульсары, вспыхивающиеся карликовые звезды, планетарные туманности с их удивительными ядрами. Нужно иметь в виду, что на многие вопросы исчерпывающих ответов пока нет. В этой области наука находится в постоянном движении [6, с.10]. И каждое новое открытие в области физики нейтронных звезд имеет очень большой интерес для ученых.

В настоящей диссертационной работе теоретически описаны структурные нейтронные резонансы, происходящие в сверхплотной кристаллической структуре нейтронных звезд. Также проведен анализ по характеристикам кристаллических структур в оболочках нейтронных звезд.

В первой главе приведены общая характеристика, структура и свойства сверхплотных звезд, а также эволюция Вселенной и образование сверхплотных звезд.

Во второй главе обсуждено уравнение состояния вещества, т.к. в недрах сверхплотных звезд вещество находится в экстремальных условиях. Также описаны свойства вырожденного электронного газа из которого состоят белые карлики и нейтронные звезды. Здесь же дается описание кристаллической оболочки нейтронных звезд. Даны оценки реакций захвата электронов протонами с образованием нейтронов.

В третьей главе дается обзор по нейтронным резонансам. Описаны двухчастичные и трехчастичные взаимодействия.

В четвертой главе даны характеристики кристаллической структуры оболочки нейтронных звезд в случаях когда в узлах решетки находятся ядра

^{13}C , ^{14}N , ^{21}Ne , ^{28}Si , ^{31}P , ^{32}S . Также были рассчитаны трехчастичные нейтронные резонансы с ядрами ^{13}C , ^{14}N , ^{21}Ne , ^{28}Si , ^{31}P , ^{32}S .

Актуальность темы

Интерес к нейтронным звездам непрерывно растет, так как строение нейтронных звезд дает огромную и ценную информацию для изучения и дает возможность проверки теоретических моделей сверхплотной материи путем сравнения результатов наблюдений нейтронных звезд с предсказаниями, сделанными на основе тех или иных теоретических моделей взаимодействий элементарных частиц. Их изучение в последние десятилетия превратилось в одну из самых увлекательных и богатых открытиями областей астрофизики. Интерес к нейтронным звездам обусловлен не только загадочностью их строения, но и колоссальной плотностью, и сильнейшими магнитными и гравитационными полями. Материя там находится в особом состоянии, напоминающем огромное атомное ядро, и эти условия невозможно воспроизвести в земных лабораториях.

Внутреннее устройство таких звезд для учёных до сих пор представляется не полностью разгаданной загадкой. Одни схемы предполагают простую структуру содержащую тонкую оболочку с нейтронной жидкостью. Другие теории считают строение звезды гораздо сложнее. Согласно их гипотезам, внешняя кора состоит из трех оболочек, отличающихся друг от друга величиной плотности и структурой ядерного вещества. Далее в недрах расположено составное ядро. Внешняя граница ядра состоит из кристаллического слоя железа, под которым простирается область вырожденного вещества. Сама сердцевина предположительно содержит экзотические формы материи: кварк-глюонный конгломерат или пионный конденсат.

Нейтронные звезды хоть и интенсивно изучаются уже около трех десятилетий, их внутренняя структура доподлинно неизвестна. Более того, нет твердой уверенности и в том, что они действительно состоят в основном из нейтронов. С продвижением вглубь звезды давление и плотность увеличиваются и материя может быть настолько сжата, что она распадется на кварки - строительные блоки протонов и нейтронов [10].

Для того, чтобы глубже понять природу нейтронной звезды и экзотической кварковой материи, астрономам необходимо определить соотношение между массой звезды и ее радиусом (средняя плотность). Исследуя нейтронные звезды со спутниками, можно достаточно точно измерить их массу, но определить диаметр - намного труднее. Совсем недавно ученые, используя возможности рентгеновского спутника «ХММ-Ньютон», нашли способ оценки плотности нейтронных звезд, основанный на гравитационном красном смещении.

Необычность нейтронных звезд состоит еще и в том, что при уменьшении массы звезды ее радиус возрастает - в результате наименьший размер имеют наиболее массивные нейтронные звезды [10].

Пульсары считаются одной из ранних стадий жизни нейтронной звезды. Благодаря их изучению ученые узнали и о магнитных полях, и о скорости

вращения, и о дальнейшей судьбе нейтронных звезд. Постоянно наблюдая за поведением пульсара, можно точно установить: сколько энергии он теряет, насколько замедляется, и даже то, когда он прекратит свое существование, замедлившись настолько, что не сможет излучать мощные радиоволны. Эти исследования подтвердили многие теоретические предсказания относительно нейтронных звезд [10].

На сегодняшний день астрономы обнаружили около 2000 нейтронных звезд. Из них более 1 000 являются радиопульсарами, а остальные - просто рентгеновскими источниками. За годы исследований ученые пришли к выводу, что нейтронные звезды - настоящие оригиналы. Одни - очень яркие и спокойные, другие - периодически вспыхивающие и видоизменяющиеся звездотрясениями, третьи - существующие в двойных системах. Эти звезды относятся к самым загадочным и неуловимым астрономическим объектам, соединяющим в себе сильнейшие гравитационные и магнитные поля и экстремальные плотности и энергии. И каждое новое открытие из их жизни дает ученым уникальные сведения, необходимые для понимания природы Материи и эволюции Вселенной [10].

Целью диссертации является анализ явлений происходящих в сверхплотных звездах, способствующих их излучению; описание процессов электронного захвата происходящих в оболочках нейтронных звезд; теоретическое описание трехчастичных взаимодействий, происходящие в оболочках нейтронных звезд.

Задачи исследования. Исследовать резонансные состояния в сверхплотных кристаллических оболочках нейтронных звезд. Анализ и численные оценки кристаллической структуры оболочки нейтронных звезд. Исследовать физические явления во внешней оболочке нейтронных звезд, где работают законы квантовой физики.

Объектами исследования являются нейтронные звезды или как их иначе называют пульсары и их кристаллические структурные особенности, и явления, которые связаны с ними: характеристики излучений, химический состав. Объектами исследования также являются наблюдательные и экспериментальные данные по нейтронным звездам.

Предметом исследования являются процессы и реакции, происходящие в оболочках нейтронных звезд, спектры, интенсивности, сдвиги энергетических порогов реакций и характеристические свойства излучений нейтронных звезд.

Методы исследования. Широко известные методы квантовой теории рассеяния и квантовой физики для теоретического анализа и построения расчетных схем.

Новизна исследования

1. Проведен анализ и дано описание процессов, протекающих в оболочках нейтронных звезд.

2. Исследованы особенности протекания реакций электронного захвата, которые приводят к нейтронизации вещества.

3. Даны характеристики кристаллической структуры оболочки нейтронной звезды в зависимости от элементного состава звезд при различных значениях плотности.

4. Исследованы трехчастичные нейтронные резонансы в оболочках сверхплотных звезд.

Положения, выносимые на защиту

- анализ и оценка процессов, приводящих к образованию сверхплотных объектов, а также анализ явлений, протекающих в оболочках нейтронных звезд.

- особенности протекания реакций электронного захвата в оболочках нейтронных звезд, которые приводят к образованию свободных нейтронов.

- анализ и оценка структуры кристаллической решетки корки нейтронной звезды.

- оценка и анализ результатов по нейтронным резонансным рассеяниям на системах, состоящих из двух тяжелых ядер ^{13}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{21}Ne , ^{28}Si , ^{31}P , ^{32}S , фиксированных в узлах кристаллической решетки в сверхплотной оболочке нейтронной звезды.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Исследования имеют фундаментальное значение для ядерной астрофизики и физики нейтронных звезд и весьма актуальны в связи с освоением космического пространства. С практической точки зрения результаты применимы для исследования и анализа излучения нейтронных звезд и создания базы данных по этому явлению.

Личный вклад автора. Весь объем диссертационной работы, выбор методов исследования, аналитические расчеты, а также подбор соответствующей литературы были выполнены автором самостоятельно. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научными руководителями.

Апробация практических результатов. Все результаты, полученные в диссертационной работе представлялись, докладывались и обсуждались на:

– 5-й Международной школе молодых физиков "Космос, наука, нанотехнологии", (2011г., Алматы);

– 8-ой Международной научной конференции "Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов", (2011 г., Алматы);

– II Международной научной конференции «Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов» (Сарсембиновские чтения), (2012 г., Алматы);

– International Conference of Nuclear Physics, (2012 г., Samarkand, Uzbekistan)

– 20 International Conference on Few-Body Systems in Physics, (2012 г., Japan);

– Международной научной конференции "Актуальные проблемы современной физики", (2013 г., Алматы).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, из которых 1 - в журнале, входящем в базу данных Scopus, 1 - в журнале, входящем в базу данных Thomson Reuters, 1 статья в ведущем журнале, входящий в базу данных РИНЦ, 5 - в журналах, входящих в перечень, рекомендуемый ККСОН МОН РК, 1 – в International Journal of Mathematics and Physics, 7 - в материалах международных конференций в РК и зарубежом.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Настоящая диссертационная работа выполнялась в соответствии с координационным планом научно-исследовательских работ по следующим программам фундаментальных исследований Министерства образования и науки Республики Казахстан в области естественных наук: "Изучение микроструктуры импульсов излучения нейтронных звезд" (ИПС 15/2012).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Работа изложена на 121 страницах компьютерного набора, иллюстрируется 58 рисунками, 10 таблицами, 2 приложениями и содержит список использованных источников.