

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Михеева Семёна Алексеевича на тему: «Свойства  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий и характеристики нейтронных звёзд» по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Диссертация С.А.Михеева посвящена теоретическому изучению влияния  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий на свойства нейтронных звезд. Наличие гиперонов в составе нейтронных звёзд связано с экстремально высокой плотностью их материи, при которой образование гиперонов становится энергетически выгодным. Нейтронные звёзды фактически представляют собой уникальные лаборатории для исследования ядерной материи при условиях, недостижимых на Земле.

В рамках диссертационной работы автором выполнен большой объем расчетов многочисленных характеристик нейтронных звёзд (таких как радиус, масса, плотность, сжимающая способность, заселенность нейтронов, протонов и гиперонов и др.) с использованием различных  $\Lambda N$ -,  $\Lambda\Lambda$ - и  $NN$ -потенциалов. Получены важные данные о максимально возможной массе нейтронной звезды в зависимости от вида  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий. Согласно современным наблюдательным данным массы нейтронных звезд лежат в узком диапазоне от 1.1 до 2.3  $M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  – масса Солнца), а их радиусы меняются в интервале 10 – 15 км.

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена двумя основными факторами. Во первых, информация о  $\Lambda N$ - и, особенно, о  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействии, получаемая из данных по гиперядрам, носит весьма ограниченный характер, и использование этих взаимодействий для описания характеристик нейтронных звёзд может дать важную новую информацию об их параметрах. К тому же исследование гиперонных взаимодействий при более высокой плотности материи, чем в атомных ядрах, важно для изучения

столкновений релятивистских тяжелых ионов, в частности, на коллайдере NICA в Дубне. Во вторых, детальное исследование роли  $\Lambda$ -гиперонов в нейтронных звёздах несомненно актуально ввиду существования так называемой "hyperon puzzle" – проблемы, которая состоит в том, что, с одной стороны, теория предсказывает наличие  $\Lambda$ -гиперонов в ядрах нейтронных звёзд, а, с другой стороны, учет, наряду с  $NN$ -взаимодействием,  $\Lambda N$ -взаимодействия приводит к ограничению массы нейтронных звёзд, противоречащему наблюдательным данным.

Диссертация С.А.Михеева представляет собой завершённое исследование и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Тема диссертации и её содержание соответствуют научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Во введении обозначены цели диссертационной работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения о публикациях соискателя по теме диссертации и апробации работы.

В первой главе излагается современное состояние физики нейтронных звёзд. Дается краткий, но содержательный обзор исторического развития этой области науки, начиная с 1934 г., когда, вскоре после открытия нейтрона в 1932 г., было впервые высказано предположение о возможном существовании плотных объектов, состоящих преимущественно из нейтронов. Рассматриваются как теоретические, так и экспериментальные аспекты физики нейтронных звёзд. Описывается многослойная структура нейтронной звезды, обсуждаются массы и радиусы нейтронных звёзд. Излагаются имеющиеся в литературе различные способы решения упомянутой выше проблемы "hyperon puzzle".

Вторая глава посвящена обсуждению гиперонных взаимодействий. В разделе 2.1 указывается, что, в отличие от нуклон-нуклонного взаимодействия, возможности получения информации о гиперон-нуклонном взаимодействии из данных по рассеянию гиперонов весьма ограничены ввиду мало-

го времени жизни гиперонов. Поэтому экспериментальная информация такого рода весьма скудна, и основным источником информации о  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействии являются гиперядра. Что же касается  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия, то единственным источником экспериментальной информации о нем являются весьма скромные сведения о характеристиках единственного надежно установленного двойного гиперядра  ${}_{\Lambda\Lambda}{}^6\text{He}$ . В диссертации обсуждаются основные измеряемые характеристики  $\Lambda$ -гиперядер, такие как энергии связи и энергетические спектры.

Раздел 2.2 посвящён описанию барионных взаимодействий в форме сил Скирма, которые являются основным инструментом для получения изложенных в дальнейших разделах диссертации результатов. Силы Скирма фактически отвечают потенциалам нулевого радиуса действия (дельта-силы); они широко применяются при описании свойств ядер и ядерной материи. В этом разделе обсуждаются также два альтернативных способа учета многочастичных эффектов в барионных взаимодействиях в формализме сил Скирма: трёхчастичные силы и силы, пропорциональные нуклонной плотности в некоторой степени, которая может варьироваться. В рамках чисто микроскопического подхода трёхчастичные силы выглядят предпочтительнее, однако использование сил, зависящих от плотности среды, является более гибким методом, представляющим больше возможностей для аккуратного описания свойств ядерной материи и нейтронных звёзд.

В разделе 2.3 излагается формализм релятивистской теории среднего поля, который, наряду с формализмом сил Скирма, используется в диссертационной работе для расчёта характеристик ядерной материи и нейтронных звёзд. В этом формализме сильное взаимодействие между барионами определяется обменом мезонами, причем массы мезонов и константы их связи с барионами рассматриваются как подгоночные параметры.

В третьей главе приведены формулы для расчёта необходимых характеристик барионной материи – давления, энергетической и массовой плотности, химических потенциалов. Зная эти характеристики, можно

рассчитать уравнение состояния материи, которое описывает зависимость давления от плотности и играет ключевую роль в определении массы, радиуса и устойчивости нейтронной звезды. Обсуждаются общие свойства зависимости между массой нейтронной звезды и ее радиусом. Следует подчеркнуть, что вследствие экстремально большой плотности материи нейтронной звезды и сильного гравитационного сжатия эта зависимость носит несколько непривычный для земных условий характер: с увеличением массы звезды ее радиус не увеличивается, а уменьшается.

Центральное место в диссертационной работе занимает четвертая глава, посвященная изучению влияния различных свойств  $\Lambda N$ -взаимодействия на характеристики нейтронных звезд. В рамках формализма сил Скирма диссертантом рассчитана зависимость массы нейтронной звезды от радиуса для различных параметризаций  $NN$ -,  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия. Подробно исследована корреляция между плотностью, при которой в материи нейтронных звезд появляются гипероны, и характеристиками гиперонных взаимодействий (раздел 4.1). Показано, что плотность материи в точке появления гиперонов плавно зависит от сжимающей способности  $\Lambda N$ -взаимодействия, которая характеризует способность гиперона поляризовать нуклонный остов гиперядра. Важным моментом является то, что этот вывод получен независимо в двух различных подходах: в формализме сил Скирма и в релятивистской теории среднего поля. В разделе 4.2 убедительно продемонстрировано существенное влияние учета  $\Lambda N$ -взаимодействия на вид кривых зависимости радиус-масса.

В разделе 4.3 проводится сравнение результатов расчетов характеристик нейтронных звезд, проведенных в двух альтернативных подходах: с трёхчастичными  $\Lambda NN$ -силами и с  $\Lambda N$ -силами, зависящими от нуклонной плотности. Показано, что эти два подхода практически одинаково описывают гиперядерные данные, но в нейтронных звездах приводят к заметно различным результатам. В частности, трёхчастичные силы в нейтронных звездах

всегда приводят к меньшей максимальной массе звезды, чем зависящие от плотности силы той же амплитуды.

Глава 5 посвящена исследованию влияния свойств  $\Lambda$ -взаимодействия на характеристики нейтронных звёзд. Сведения об этом взаимодействии крайне скудные, а существующие в литературе  $\Lambda$ -потенциалы в форме сил Скирма весьма упрощенные. В диссертационной работе использован один из подобных потенциалов, корректно описывающий современные гиперядерные данные и предсказывающий относительно большую массу звезды. Рассмотрен также  $\Lambda$ -потенциал, построенный исходно в форме суммы гауссовских потенциалов на основе Неймегенской модели одномезонного обмена и аппроксимированный силами Скирма. Из результатов расчетов следует, что  $\Lambda$ -взаимодействие может вносить ощутимый вклад в характеристики нейтронных звёзд. Величина этого вклада зависит от варианта используемого  $\Lambda$ -потенциала.

Переходя к общей оценке диссертационной работы С.А.Михеева, отметим, в первую очередь, что положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы являются безусловно новыми и обоснованными. Их достоверность определяется использованием корректного аппарата современной теоретической ядерной физики и сравнением там, где возможно, с результатами других авторов. Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в 6-и статьях в научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова, и представлены в 17-и докладах на всероссийских и международных конференциях и семинарах. Проведенные в диссертации исследования безусловно полезны для дальнейшего развития теории нейтронных звёзд. В качестве вариантов такого развития можно указать учет возможного присутствия в материи звёзд помимо  $\Lambda$ -гиперонов еще и других типов гиперонов, а также использование, наряду с силами Скирма, потенциалов конечного радиуса действия.

В то же время, к диссертационной работе имеется ряд замечаний. Главным замечанием является излишняя краткость изложения материала. Например, когда говорится о предельной массе нейтронной звезды, следовало бы хотя бы одной фразой пояснить, что при превышении этого предела происходит коллапс и звезда превращается в черную дыру. Можно было бы также кратко пояснить, почему более мягкое уравнение состояния приводит к меньшей максимальной массе нейтронной звезды.

Имеется также ряд мелких технических замечаний:

1. На стр. 32 наряду с разрешенными процессами, вызванными слабым взаимодействием, указан запрещенный сохранением энергии распад нейтрона на протон, мюон и мюонное антинейтрино.

2. Не очень понятна структура таблицы 2 на стр. 39.

3. Происхождение некоторых формул (а также рисунков) требует пояснения. Это относится, например, к формулам (2.12) – (2.24), (3.3), (3.4), рисункам (3.1) – (3.3), (3.7), (3.8). Следовало бы или пояснить, как выводятся указанные формулы, или дать ссылки на соответствующие источники, откуда эти формулы и рисунки были взяты.

Указанные выше замечания относятся фактически лишь к тексту диссертационной работы. Они не затрагивают реальное содержание проведенных диссертантом исследований. и не умаляют их значимость. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского

государственного университета имени М.В. Ломоносова. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Можно с определенностью сделать вывод, что соискатель Михеев Семен Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор;  
главный научный сотрудник отдела физики атомного ядра Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

БЛОХИНЦЕВ Леонид Дмитриевич

01.06.2026

Контактные данные:

тел.: , e-mail: blokh@srd.sinp.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, отдел физики атомного ядра.  
Тел.: 7-495-939-20-48; e-mail: blokh@srd.sinp.msu.ru

Подпись сотрудника Блохинцева Леонида Дмитриевича удостоверяю:  
Ученый секретарь Ученого Совета Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В.Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова,  
канд. физ.-мат. наук Е.А.Сигаева