

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

Диссертация Михеева С.А. посвящена исследованию влияния свойств взаимодействий Λ -гиперонов с нуклонами и между собой на характеристики нейтронных звезд. С этой целью автором были написаны и применены компьютерные программы для расчета уравнения состояния материи, состоящей из нуклонов, лептонов и Λ -гиперонов, в формализме сил Скирма и в формализме релятивистской теории среднего поля (РТСП), а также программы для расчета механической структуры нейтронной звезды. На этой основе в диссертации изучены корреляции между характеристиками взаимодействий в исследуемой ядерной материи и макроскопическими характеристиками – плотностью, при которой в веществе нейтронной звезды появляются Λ -гипероны, соотношением «масса – радиус» нейтронной звезды, а также параметром ее приливной деформации. При этом рассмотрены как двухчастичные нуклон-нуклонные (NN) и гиперон-нуклонные (ΛN) силы, так и трехчастичные (NNN и ΛNN соответственно). Проведено сравнение двух способов описания ΛNN -сил, один из которых состоит в добавлении трехчастичного слагаемого в потенциал Скирма, а другой – в использовании эффективного двухчастичного потенциала с коэффициентами, зависящими от плотности, причём обнаружено качественное различие результатов применения этих двух способов. Исследование дополнено построением потенциала гиперон-гиперонного ($\Lambda\Lambda$) взаимодействия в форме сил Скирма и изучением его влияния на характеристики нейтронных звезд.

Актуальность данной работы обусловлена появлением в последние годы большого количества качественно новых экспериментальных результатов по изучению барионных взаимодействий на коллайдерах тяжелых ионов и наблюдательных результатов по изучению нейтронных звезд. Это способ-

ствуется значительному прогрессу знаний о фундаментальных физических свойствах материи, особенно благодаря исследованиям взаимосвязи результатов лабораторных и астрофизических исследований через выяснение зависимостей характеристик нейтронных звезд от характеристик ядерной материи, чему и посвящена данная диссертация. Актуальность усиливается тем, что представленные исследования призваны способствовать решению так называемой «гиперонной загадки» (“hyperon puzzle”), которая состоит в противоречии между предсказаниями теоретических моделей о появлении гиперонов в ядре нейтронных звезд и сравнительно недавно обнаруженным наличием нейтронных звезд с большими массами, гидростатическая устойчивость которых несовместима с прежними версиями этих моделей.

Научная новизна представленных в диссертации результатов состоит в том, что в ней **впервые**:

(а) обнаружена сильная корреляция плотности, при которой в веществе появляются Λ -гипероны, со сжимающей способностью ΛN -взаимодействий;

(б) обнаружено качественное различие состава вещества в ядре нейтронной звезды, получаемого при разных способах учета ΛNN -взаимодействий в потенциале Скирма – путем введения контактного трехчастичного слагаемого или путем введения зависимости коэффициентов этого потенциала от плотности;

(в) показана и объяснена возможность полной делептонизации вещества нейтронной звезды при больших плотностях за счет действия ΛNN -сил (этот результат может иметь важные последствия для теоретических моделей тепловой эволюции нейтронных звезд, содержащих гипероны);

(г) показано, что ослабление зависимости ΛN -взаимодействия от плотности может не только смягчать уравнение состояния, но и делать его более жестким;

(д) изучено влияние зависимости потенциала $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия от плотности на рассчитанные массы и радиусы нейтронных звезд.

Положения, выносимые на защиту, хорошо **обоснованы**. **Достоверность** научных результатов и выводов диссертации подтверждается использованием корректного математического аппарата и апробированных методов теоретической ядерной физики, применением и сопоставлением разных способов описания, подробным анализом результатов и их сопоставлением с известными данными.

Диссертационная работа имеет ясную и логичную **структуру**. Она изложена на 101 странице машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во **введении** обсуждается актуальность, научная новизна и практическая значимость задач, решаемых в диссертации, приводятся положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и публикациях.

В **первой главе** приведен краткий обзор исторического развития и современного состояния теоретических и наблюдательных исследований масс и радиусов нейтронных звезд, а также оценок их приливной деформируемости.

Во **второй главе** приведены источники экспериментальной информации о гиперонных взаимодействиях и описаны способы учета сильных взаимодействий при расчетах свойств вещества, используемые в работе: эффективный потенциал Скирма и РТСП.

В **третьей главе** описана модель нейтронной звезды, приведены уравнения, используемые для определения состава и уравнения состояния ее ядра, обсуждается зависимость «масса – радиус» нейтронной звезды, приведены результаты расчетов характеристик нейтронных звезд и их корреляции с параметрами используемых взаимодействий.

Четвертая глава посвящена изучению влияния свойств и параметров ΛN - и ΛNN -взаимодействий на состав ядра нейтронной звезды (в частности, на плотность, при которой в ядре нейтронной звезды появляются Λ -гипероны), а также на массы, радиусы и приливную деформируемость нейтронных звезд.

Пятая глава посвящена включению Λ -сил в формализм Скирма и исследованию влияния этих сил на массы и радиусы нейтронных звезд.

В **заключении** суммированы основные результаты работы.

В **приложениях** приведены параметры взаимодействий Скирма (Приложение А) и РТСП (Приложение Б), которые были использованы в представленных исследованиях.

К диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**.

1. Используются довольно старые (опубликованные между 1981 и 2010 годами) теоретические модели межнуклонных взаимодействий, многие из которых приводят к предсказаниям характеристик нейтронных звезд (в частности, их масс и темпов остывания), несовместным с современными наблюдениями, и весьма неточно, по современным меркам, воспроизводят экспериментально измеренные характеристики атомных ядер. Например, проигнорированы современные модели брюссельско-монреальской группы (семейство моделей BSk), которые наилучшим образом согласуются как с известными энергиями связи тяжелых ядер (например, Goriely et al., Phys. Rev. C 88, 061302 (2015)), так и со свойствами нейтронных звезд (например, Pearson et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. 481, 2994 (2018)). Судя по тексту, на выбор моделей излишнее влияние оказал их отбор, произведенный в статье 2012 года [56], которому нельзя безоговорочно доверять (см. обсуждение в разделе 2 статьи Potekhin et al., Astron. Astrophys. 560, A48 (2013)).
2. Для описания коры нейтронной звезды использована устаревшая модель 1971 года [95] (современное описание коры дано, например, в вышеупомянутой работе Pearson et al. (2018)).
3. Определения химических потенциалов μ в главе 3 и в главе 4 не согласованы между собой: в формулах (3.1) – (3.4) и (3.7) – (3.9) энергия покоя включена в μ , а в формулах (4.1) – (4.2) не включена,

причем переход от одного определения к другому в тексте не оговорен.

4. Система соотношений (3.1) в диссертации или (3) в автореферате, названная системой уравнений для химических потенциалов, состоит из одного равенства и двух неравенств, которые не позволяют однозначно определить неизвестные μ . В тексте диссертации далее поясняется, что вместо неравенств, когда требуется, применяются равенства, однако это пояснение ускользнуло из автореферата, что может озадачить читателя последнего.
5. Первая (обзорная) глава и обзорная часть введения содержат ряд неточностей. Перечислю самые заметные из них.

(1) На с.4-5 сказано, что при высоких плотностях «наиболее вероятным считается появление наиболее легких Λ -гиперонов». Однако это в общем случае не так. Обычно считается, что при увеличении плотности первыми должны появиться Σ^- -гипероны. Как заметил Солпитер (Salpeter, *Ann. Phys. (N.Y.)* 11, 393 (1960)), появление Σ^- -гиперонов энергетически более выгодно, потому что оно сопровождается уменьшением числа лептонов и, соответственно, уменьшением их химического потенциала. Такая последовательность появления разных типов гиперонов, начиная с Σ^- , рассматривалась в большинстве работ, начиная с Амбарцумяна и Саакяна (1960, ссылка [13]). Только в моделях с очень сильным отталкиванием Σ^- -гиперонов от нуклонов Λ -гипероны появляются первыми – см., например, обсуждение в разделе 5.14 монографии Haensel et al. *Neutron Stars 1. Equation of State and Structure* (N.Y.: Springer, 2007; доступна по ссылке <https://www.ioffe.ru/astro/NSG/nsb1b.pdf>).

(2) Ошибочно утверждение на с.18, что существование кваркового ядра внутри нейтронной звезды является «достаточно популярной идеей для решения “hyperon puzzle”». Из трех ссылок,

приведенных к этому утверждению, первая статья [16] написана за 45 лет до появления гиперонной загадки, авторы второй [57] оговаривают, что деконфайнмент они не рассматривают, а в третьей [58] говорится, что появление кварковой фазы смягчает уравнение состояния наравне с появлением гиперонов (тем усугубляя загадку): “appearance of $\langle \dots \rangle$ hyperons and quarks $\langle \dots \rangle$ reduces the maximum NS mass”.

- (3) На с.14 масса пульсара J0348+0432 указана как 2.01 ± 0.04 , но по современным данным она составляет 1.806 ± 0.037 (Saffer et al., *Astrophys. J.* 983, L20 (2025)).
- (4) Указанная на с.14 необычно низкая масса компактного объекта в остатке сверхновой HESS 1731–347 получена в работе [33] в результате некорректного анализа наблюдений, как убедительно показано в статье Alford & Halpern, *Astrophys. J.* 944, 36 (2023).
- (5) На с.15 написано: «Ввиду малых размеров нейтронных звезд невозможно точно определить расстояние до них». Но размеры звезд не имеют отношения к определению расстояний до них. Кроме того, расстояния до некоторых нейтронных звезд измерены с хорошей точностью – например, по параллаксам достаточно близких нейтронных звезд или благодаря известным расстояниям до шаровых скоплений, содержащих нейтронные звезды.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. 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.

Таким образом, соискатель Михеев Семен Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент:

доктор физ.-мат. наук,
главный научный сотрудник
сектора теоретической астрофизики
ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук» (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)
ПОТЕХИН Александр Юрьевич

29.05.2026 г.

Контактные данные:

тел.: e-mail: palex@astro.ioffe.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.03.02 – Астрофизика и радиоастрономия

Адрес места работы:

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26,
ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Тел.: +7(812)2972245; e-mail: post@mail.ioffe.ru

Подпись сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Потехина Александра Юрьевича
удостоверяю: