

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Михеев Семен Алексеевич

**Свойства  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий и  
характеристики нейтронных звёзд**

Специальность 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных  
частиц, физика высоких энергий

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Москва — 2026

Работа подготовлена на кафедре общей ядерной физики физического факультета и в отделе электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Третьякова Татьяна Юрьевна**,  
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Блохинцев Леонид Дмитриевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Московский государственный университет имени  
М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский ин-  
ститут ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,  
отдел физики атомного ядра, главный научный со-  
трудник

**Потехин Александр Юрьевич**,  
доктор физико-математических наук, старший на-  
учный сотрудник, Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, сек-  
тор теоретической астрофизики, главный науч-  
ный сотрудник

**Светличный Александр Олегович**,  
кандидат физико-математических наук, Институт  
ядерных исследований Российской академии на-  
ук, отдел экспериментальной физики, лаборато-  
рия релятивистской ядерной физики, научный со-  
трудник

Защита состоится «19» июня 2026 года в 15:00 на заседании диссертацион-  
ного совета МГУ.013.2 Московского государственного университета имени  
М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1,  
строение 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

Email: galan\_lidiya@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГУ имени  
М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале:  
<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3917>.

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета МГУ.013.2,  
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

## Общая характеристика работы

Исследование свойств барион-барионных взаимодействий занимает важное место в ядерной физике. На сегодняшний день существует большое количество информации о нуклон-нуклонном взаимодействии, основанной на данных о ядрах и ядерной материи, а также о рассеянии нуклонов. Данных о гиперонных взаимодействиях существенно меньше ввиду меньшего количества экспериментальной информации. Наиболее изученным среди гиперонных взаимодействий является взаимодействие  $\Lambda$ -гиперонов. Это связано со значительным (хоть и гораздо меньшим, чем в случае  $NN$ -взаимодействия) объёмом экспериментальной информации о  $\Lambda$ -гиперядрах, на которой основывается большинство существующих потенциалов  $\Lambda N$ -взаимодействия. Данные о  $\Lambda\Lambda$ -гиперядрах и, соответственно, о  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействии весьма скудны. Такая информация о гиперонных взаимодействиях относится к свойствам этих взаимодействий при плотности, характерной для атомных ядер. При этом для построения общей теории барионных взаимодействий важны свойства гиперонных взаимодействий при более высоких плотностях. Например, в столкновениях тяжёлых ионов могут достигаться плотности, в несколько раз превышающие нормальную ядерную плотность. Экспериментальное изучение барионной материи при высоких плотностях является важной частью программы исследований релятивистских столкновений тяжёлых ионов на таких коллайдерах, как LHC, RHIC и NICA. Особое внимание уделяется появлению при столкновении ионов странных частиц, в частности  $\Lambda$ -гиперонов и гиперядер. Таким образом, исследование свойств гиперонных взаимодействий в экстремальных условиях не только необходимо для лучшего понимания природы этих взаимодействий, но и важно для физики тяжёлых ионов.

Другим примером ядерной материи при экстремальных плотностях являются компактные космические объекты, такие как нейтронные звёзды. Нейтронные звёзды представляют собой объекты с массами порядка  $1-2 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  – масса Солнца) и радиусом  $10-15$  км. Материя нейтронных звёзд существует при экстремально высоких плотностях, которые невозможно воспроизвести в лабораторных условиях. При таких плотностях становится энергетически выгодным появление в материи гиперонов, среди которых наиболее вероятным считается появление наиболее лёгких  $\Lambda$ -гиперонов. При этом для описания материи нейтронных звёзд применимы методы, характерные для

ядерной физики. Различные  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия могут одинаково хорошо описывать характеристики гиперядер, но при высоких плотностях приводят к существенно различным результатам. Важными становятся не просто отдельные характеристики взаимодействий, но и зависимость этих характеристик от барионной плотности. Соответственно, тестирование гиперонных взаимодействий в рамках описания материи нейтронных звёзд может быть крайне полезно для понимания свойств этих взаимодействий при высоких плотностях.

За последние годы появилось большое количество наблюдательной информации о нейтронных звёздах – для большого количества объектов были измерены массы и радиусы [1–5], а также впервые были зарегистрированы гравитационные волны от слияния двух нейтронных звёзд [6, 7]. При этом в последнее время на фоне развития экспериментов по релятивистским столкновениям тяжёлых ионов также возрос интерес к изучению странной материи. Таким образом актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью получения информации о свойствах гиперонных взаимодействий при высоких плотностях и возможностью применения существующих параметризаций  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий для описания современных экспериментальных данных о сверхплотной материи нейтронных звёзд.

Целью настоящей работы является использование современных  $\Lambda N$ -взаимодействий, основанных на данных по гиперядрам, для исследования влияния свойств гиперонных взаимодействий на характеристики нейтронных звёзд, а именно:

- определение зависимости между значением нуклонной плотности, при которой в материи нейтронных звёзд появляются  $\Lambda$ -гипероны, и характеристиками  $\Lambda N$ -взаимодействия;
- исследование роли зависимости от плотности гиперон-нуклонных  $\Lambda N$ -сил и гиперон-гиперонных  $\Lambda\Lambda$ -сил при описании нейтронных звёзд;
- изучение различий между описанием многочастичных эффектов с помощью трёхчастичных  $\Lambda NN$ -сил и  $\Lambda N$ -сил, зависящих от нуклонной плотности, применительно к материи нейтронных звёзд.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Создано программное обеспечение для расчёта характеристик ядерной материи и уравнения состояния материи нейтронных звёзд в формализме сил Скирма и релятивистской теории среднего поля, а также для расчёта масс, радиусов и приливных деформируемостей звёзд на основе полученных уравнений состояния.
2. Проведён расчёт плотностей, при которых в материи нейтронных звёзд появляются  $\Lambda$ -гипероны, в подходе с использованием сил Скирма и в релятивистской модели среднего поля. Рассчитаны коэффициенты корреляций между этой величиной и характеристиками  $\Lambda N$ -взаимодействия.
3. Рассчитаны массы и радиусы нейтронных звёзд в подходе, основанном на взаимодействии Скирма, с использованием различных потенциалов  $\Lambda N$ -взаимодействия. Исследована роль отдельных членов этого потенциала при описании нейтронных звёзд. Созданы модифицированные версии потенциалов  $\Lambda N$ -взаимодействия с различными значениями показателя степени  $\gamma$  в зависимости от нуклонной плотности, и проведены расчёты характеристик нейтронных звёзд с использованием этих потенциалов.
4. Проведены расчёты характеристик нейтронных звёзд с  $\Lambda N$ -силами, зависящими от нуклонной плотности, и с трёхчастичными  $\Lambda NN$  силами, проведено сравнение полученных результатов. Описаны различные варианты нарушения зарядовой симметрии в материи нейтронных звёзд.
5. Получен потенциал  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия с зависимостью от нуклонной плотности в виде сил Скирма на основе существующего потенциала, записанного в форме сил Гаусса. Выполнены расчёты характеристик нейтронных звёзд с использованием этого потенциала.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Плотность, при которой в нейтронных звёздах появляются гипероны, сильно коррелирует (линейный коэффициент корреляции Пирсона  $r \geq 0.9$ ) со сжимающей способностью  $\Lambda N$ -взаимодействия  $K_\Lambda$ , характеризующей влияние гиперона на нуклонный остов гиперядра, вне зависимости от модельного подхода.

2. В формализме сил Скирма поведение уравнения состояния материи нейтронных звёзд при высоких плотностях зависит не столько от величин сил, зависящих от плотности, сколько от сложного сочетания различных слагаемых потенциала  $\Lambda N$ -взаимодействия. Выбор методики построения потенциала позволяет с уменьшением показателя степени  $\gamma$  в зависимости от плотности получать как более мягкие, так и более жесткие уравнения состояния.
3. При использовании трёхчастичных  $\Lambda NN$ -сил вместо пропорциональных нуклонной плотности  $\Lambda N$ -сил той же амплитуды уравнение состояния материи нейтронных звёзд всегда смягчается, что приводит к уменьшению максимальной массы в диапазоне от 0.01 до 0.15 масс Солнца. При определённом выборе потенциалов  $\Lambda N$ - и  $NN$ -взаимодействия трёхчастичные силы при высоких плотностях приводят к полному исчезновению лептонов и протонов.
4. Включение зависимости от нуклонной плотности в  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействие в подходе с использованием сил Скирма не оказывает значительного влияния на максимальные массы нейтронных звёзд по сравнению с существующими потенциалами  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия без зависимости от плотности.

### **Научная новизна:**

1. Найдена характеристика  $\Lambda N$ -взаимодействия (сжимающая способность  $K_\Lambda$ ), демонстрирующая сильную корреляцию со значением плотности, при которой в материи нейтронных звёзд появляются гипероны, и с максимальной массой нейтронных звёзд. Результат подтверждён в двух независимых моделях.
2. Впервые предложено семейство потенциалов Скирма, для которых меньшее значение показателя степени в зависимости  $\Lambda N$ -взаимодействия от плотности соответствует более жёсткому уравнению состояния.
3. Обнаружено, что выбор между зависимостью от плотности и трёхчастичными силами той же амплитуды в  $\Lambda N$ -взаимодействии может оказывать качественное влияние на состав материи нейтронных звёзд.

4. Впервые в формализме Скирма использованы потенциалы  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия, включающие зависимость от нуклонной плотности, и показано влияние учёта этой зависимости на массы и радиусы нейтронных звёзд.

**Предмет и объект исследования.** Объектом исследования являются нейтронные звёзды и материя нейтронных звёзд. Предметом исследования является влияние различных аспектов  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий на характеристики нейтронных звёзд.

**Методология и методы исследования.** Для описания характеристик материи нейтронных звёзд использовалась модель, основанная на силах Скирма, и релятивистская теория среднего поля. Расчёт характеристик нейтронных звёзд производился с помощью численного решения уравнения Толмана-Оппенгеймера-Волкова.

**Практическая значимость.** Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы для дальнейшего развития представлений об особенностях гиперонных взаимодействий при высоких плотностях. Также выводы, полученные в работе, могут быть полезны при поиске путей решения проблемы «hyperon puzzle», актуальной для физики нейтронных звёзд.

**Достоверность** полученных результатов обеспечена использованием апробированных методов современной теоретической ядерной физики и достигается подробным анализом полученных результатов и их сравнением с имеющимися в различных работах теоретическими оценками.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на 17 международных и российских конференциях и семинарах:

- Международная конференция по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра ЯДРО (2020, 2022, 2023, 2024, 2025),
- International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists, JINR, Dubna (AYSS-2022),
- International Workshop «Infinite and Finite Nuclear Matter» (INFINUM) JINR, Dubna (2023, 2025),
- Научный семинар ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ и кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ (2024, 2026),
- Научная конференция «Ломоносовские чтения», НИИЯФ МГУ, Москва (2023, 2024),

- Межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», НИИЯФ МГУ, Москва (2019, 2021, 2025),
- Физика нейтронных звёзд, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург (2023),
- International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, ОИ-ЯИ, Дубна (2023).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

**Личный вклад.** В написанных в соавторстве работах основные результаты, представленные в диссертации, получены автором лично. В ходе работы им были написаны программы для расчёта характеристик ядерной материи и нейтронных звёзд на основе формализма сил Скирма и релятивистской теории среднего поля. Автором были проведены все расчёты, результаты которых представлены в диссертации. Автор принимал ключевое участие в подготовке и решении задач и существенное участие в подготовке всех публикаций.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы.

## Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложена научная новизна и практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, приведён список конференций и публикаций, и отмечен личный вклад автора.

**Первая глава** посвящена обсуждению современного состояния физики нейтронных звёзд. Приведён краткий обзор исторического развития этой области науки как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения. Обсуждаются массы и радиусы нейтронных звёзд, способы их измерения и со-

временные результаты этих измерений. Актуальные экспериментальные данные указывают на существование нейтронных звёзд с массами, превышающими  $2 M_{\odot}$ . Рассматривается событие GW170817, в котором были зарегистрированы гравитационные волны от слияния нейтронных звёзд, и его значение для физики нейтронных звёзд. Это событие позволило оценить значение приливной деформируемости – величины, характеризующей реакцию нейтронной звезды на внешнее гравитационное воздействие. Описывается структура нейтронной звезды. Наконец, обсуждается важная для теоретического изучения нейтронных звёзд проблема «hyperon puzzle» и различные способы её решения, предложенные в литературе. «Hyperon puzzle» заключается в том, что добавление гиперонов в состав материи нейтронных звёзд существенно смягчает уравнение состояния и делает задачу достижения двух солнечных масс в теоретических моделях весьма нетривиальной.

Во второй главе обсуждаются гиперонные взаимодействия, источники получения экспериментальной информации о них и теоретические модели для их описания. Раздел 2.1 посвящён обсуждению экспериментальных источников информации о гиперонных взаимодействиях. Некоторые данные о свободном взаимодействии гиперонов с нуклонами могут быть получены из экспериментов по рассеянию гиперонов, однако, ввиду малого времени жизни гиперонов, такие эксперименты труднореализуемы, и экспериментальная информация такого рода весьма скудна. Основная масса данных о гиперонном взаимодействии получена из исследований гиперядер. При этом наибольшее количество информации касается  $\Lambda$ -гиперядер. В работе обсуждаются свойства  $\Lambda$ -гиперядер, особенности их изучения и основные измеряемые характеристики, такие как энергия связи  $\Lambda$ -гиперона  $B_{\Lambda}$  в гиперядре и энергия связи  $\Lambda$ -гиперона в бесконечной ядерной материи  $D_{\Lambda}$ . Информация о  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействии может быть получена из исследования  $\Lambda\Lambda$ -гиперядер, но её явно недостаточно.

Раздел 2.2 посвящён описанию модели, основанной на силах Скирма [8, 9], которая далее используется для описания барионных взаимодействий. Приведены потенциалы  $NN$ -,  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия. Модель Скирма позволяет изучать роль не только отдельных взаимодействий ( $NN$ ,  $\Lambda N$ ,  $\Lambda\Lambda$ ), но и роль отдельных слагаемых конкретного потенциала. По-

тенциал  $\Lambda N$ -взаимодействия, который наиболее подробно обсуждается в работе, выглядит следующим образом [10]:

$$\begin{aligned}
V_{\Lambda N}(\mathbf{r}_\Lambda, \mathbf{r}_N) = & u_0(1 + \xi_0 P_\sigma) \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_N) \\
& + \frac{1}{2} u_1 [\mathbf{P}'^2 \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_N) + \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_N) \mathbf{P}^2] \\
& + u_2 \mathbf{P}' \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_N) \mathbf{P} \\
& + \frac{3}{8} u_3 (1 + \xi_3 P_\sigma) \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_N) \rho_N^\gamma \left( \frac{\mathbf{r}_\Lambda + \mathbf{r}_N}{2} \right) \\
& + i W_0^\Lambda \mathbf{P}' \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_N) [\boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{P}],
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $u_i, \xi_i, W_0^\Lambda$  – параметры взаимодействия,  $\mathbf{P} = \frac{1}{2i}(\nabla_\Lambda - \nabla_N)$  – оператор импульса относительного движения, действующий на правую обкладку матричного элемента, а  $\mathbf{P}'$  – на левую,  $P_\sigma$  – оператор спинового обмена.

Обсуждается разница между альтернативными способами описания многочастичных эффектов в  $NN$ - и  $\Lambda N$ -взаимодействии – трёхчастичными силами и силами, пропорциональными нуклонной плотности в некоторой степени. В случае  $NN$ -взаимодействия эти два варианта эквивалентны (при условии, что показатель степени равен единице), тогда как в  $\Lambda N$ -взаимодействии они дают практически одинаковые результаты для гиперядер, но существенно различаются для нейтронных звёзд. Приведены выражения для расчёта некоторых характеристик ядерной материи в формализме сил Скирма, таких как энергия симметрии и её производные, энергия связи  $\Lambda$ -гиперона в нуклонной материи  $D_\Lambda$  и сжимающая способность гиперон-нуклонного взаимодействия  $K_\Lambda$ .

Раздел 2.3 посвящён описанию формализма релятивистской теории среднего поля, в рамках которой в диссертационной работе также проводились расчёты характеристик материи и нейтронных звёзд. Обсуждаются общие детали модели и приводится лагранжиан взаимодействия, используемый в работе. Приводятся выражения для расчёта некоторых характеристик материи.

**Третья глава** посвящена описанию модели нейтронной звезды. Приведены формулы для расчёта необходимых характеристик ядерной материи – давления, энергетической и массовой плотности, химических потенциалов.

Поскольку материя нейтронной звезды находится в состоянии химического равновесия, приводится также система уравнений для химических потенциалов  $\mu_i$  ( $i$  – тип частицы), обеспечивающая выполнение этого условия:

$$\begin{cases} \mu_p + \mu_e = \mu_n \\ \mu_e \leq \mu_\mu \\ \mu_n \leq \mu_\Lambda. \end{cases} \quad (2)$$

Решение этой системы уравнений позволяет получить значения заселённости различных компонент материи нейтронных звёзд при определённой плотности, где под заселённостью понимается отношение плотности определённого типа частиц к общей плотности всех барионов  $Y_i = \rho_i/\rho$ . Зная это, можно рассчитать уравнение состояния материи (зависимость давления от плотности) и другие необходимые характеристики. Уравнение состояния материи состоит из уравнения состояния для ядра нейтронной звезды, состоящего из барионной материи, и уравнения состояния для коры, в качестве которого используется зависимость из работы [11]. На основе уравнения состояния рассчитываются масса и радиус нейтронной звезды с помощью уравнения Толмана-Оппенгеймера-Волкова [12,13], а также коэффициент приливной деформируемости с помощью уравнений из работ [14–16].

Далее обсуждается типичный вид кривой масса-радиус и объясняется выбор параметризаций, используемых для расчётов в дальнейшей работе. Для нуклон-нуклонного взаимодействия критерии выбора взаимодействия подробно изучались в работах [17, 18]. В диссертационной работе было рассчитано, что для материи без гиперонов характеристики нейтронных звёзд наилучшим образом коррелируют с характеристиками ядерной материи, связанными с изоспиновой симметрией [19]. В частности, наибольшая корреляция наблюдается с первой  $L$  и второй  $K_{sym}$  производными энергии симметрии по плотности, которые определяют поведение энергии симметрии при высоких плотностях.

Далее в диссертационной работе рассматривается материя нейтронных звёзд, состоящая из нуклонов, лептонов и  $\Lambda$ -гиперонов. При больших плотностях возможно появление и других типов гиперонов. В настоящей работе

акцент делается на изучении  $\Lambda$ -гиперонного взаимодействия. С одной стороны,  $\Lambda N$ -взаимодействие располагает наибольшим количеством экспериментальной информации, полученной в изучении гиперядер. С другой стороны,  $\Lambda$ -гипероны, как наиболее лёгкие частицы в этом классе, предположительно должны появляться в материи нейтронных звёзд при более низких плотностях, нежели другие типы гиперонов. Подчёркивается важность корректного учёта  $\Lambda N$ -взаимодействия при описании нейтронных звёзд и иллюстрируется проблема «hyperon puzzle».

**Четвертая глава** посвящена изучению влияния различных свойств  $\Lambda N$ -взаимодействия на характеристики нейтронных звёзд. В подходе Скирма рассчитаны зависимости массы нейтронной звезды от радиуса для различных параметризаций  $NN$ -,  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия. На рисунке 1 изображена такая зависимость для двух параметризаций  $NN$ -взаимодействия, для которых в случае чисто нуклонной материи  $M_{max} > 2 M_{\odot}$  [20].

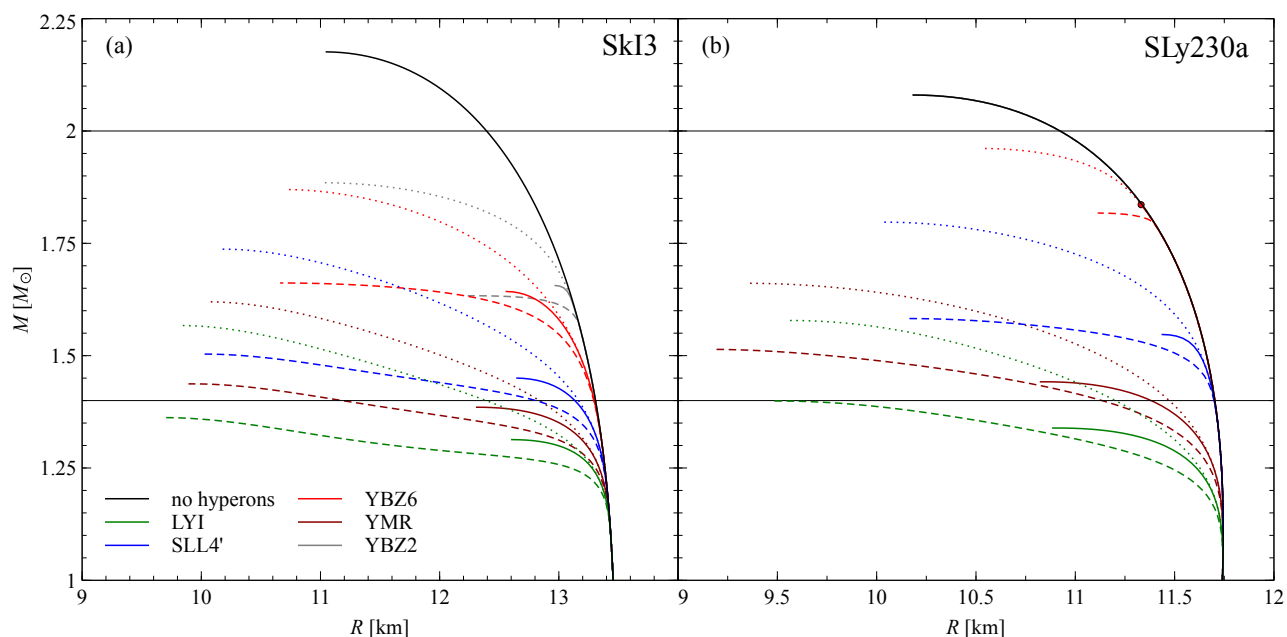


Рисунок 1 — Зависимость массы нейтронных звёзд от радиуса для различных комбинаций потенциалов  $\Lambda N$ - и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия. Параметризации  $NN$ -взаимодействия – SkI3 [21] (слева) и SLy230a [22] (справа). Параметризации  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия – SLL1' (штриховые линии), SLL2 (сплошные линии), SLL3' (пунктирные линии) [23, 24]. Точка на правом рисунке соответствует максимальной массе для комбинации SLy230a+YBZ6+SLL2. Цвета линий обозначают различные  $\Lambda N$ -взаимодействия

В отсутствие гиперонов максимальная масса для параметризации SkI3 больше, чем для SLy230a. Однако для материи с гиперонами, напротив, SLy230a приводит к более жёстким уравнениям состояния и большей максимальной массе. Это связано с тем, что в случае параметризации SLy230a гипероны появляются в материи при более высоких плотностях, и эффект смягчения уравнения состояния оказывается меньше. Показано также, что параметризация SLy230a лучше удовлетворяет ограничениям на коэффициент приливной деформируемости, полученный из анализа события GW170817.

В этой связи **раздел 4.1** посвящён исследованию корреляций между плотностью, при которой в материи нейтронных звёзд появляются гипероны, и характеристиками гиперонных взаимодействий. Основные результаты исследования отражены в [25]. Показано, что плотность материи в точке появления гиперонов  $\rho_N^{(\Lambda)}$  плавно зависит от сжимающей способности  $\Lambda N$ -взаимодействия  $K_\Lambda$ . Сжимающая способность характеризует способность гиперона поляризовать нуклонный остов гиперядра и рассчитывается следующим образом [26]:

$$K_\Lambda = 3\rho_N \frac{dD_\Lambda(\rho_N)}{d\rho_N}, \quad (3)$$

где  $D_\Lambda$  – энергия связи  $\Lambda$ -гиперона в чисто нуклонной материи.

Корреляции между  $K_\Lambda$  и  $\rho_N^{(\Lambda)}$  наблюдаются в двух различных подходах, в подходе сил Скирма и в релятивистской теории среднего поля, что говорит о модельной независимости полученного результата. Зависимость  $\rho_N^{(\Lambda)}$  от  $K_\Lambda$  изображена на рисунке 2.

Стоит отметить, что на рисунке изображена зависимость  $\rho_N^{(\Lambda)}$  от значения  $K_\Lambda$  при плотности  $3\rho_0$ . Корреляция между  $K_\Lambda(3\rho_0)$  и  $\rho_N^{(\Lambda)}$  сильнее, чем между  $K_\Lambda(\rho_0)$  и  $\rho_N^{(\Lambda)}$ . Это связано с тем, что гипероны в материи нейтронных звёзд появляются при плотностях около  $3\rho_0$ , и, соответственно, значение  $K_\Lambda(3\rho_0)$  лучше отражает влияние гиперон-нуклонного взаимодействия. Цветные окружности на рисунке указывают точки, в которых результаты расчётов  $K_\Lambda(3\rho_0)$  и  $\rho_N^{(\Lambda)}$  в двух подходах практически совпадают. При этом значения масс и радиусов для соответствующих параметризаций могут значительно различаться ввиду особенностей моделей.

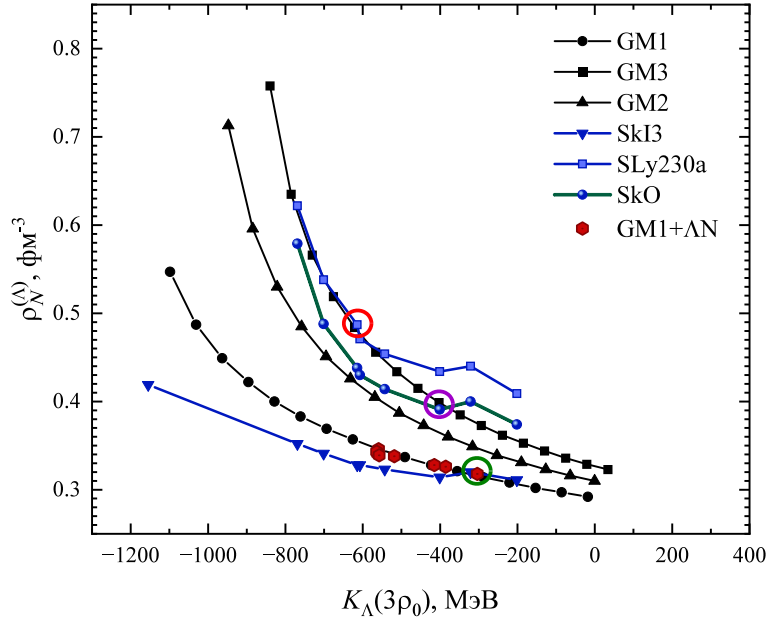


Рисунок 2 — Зависимость плотности появления  $\Lambda$ -гиперонов от  $K_\Lambda(3\rho_0)$ . В подходе Скирма (синие точки и линии) использованы нуклон-нуклонные взаимодействия SkI3, SLy230a, SkO из работ [21, 22, 27], в релятивистской модели среднего поля (чёрные точки и линии) – взаимодействия GM1, GM2, GM3 из работы [28]. Красные точки соответствуют расчётам с нуклонным взаимодействием GM1 и параметрами гиперонного взаимодействия, подогнанными под гиперядерные данные [29–34]. Цветные окружности указывают точки, в которых результаты расчётов в двух подходах практически совпадают

**Раздел 4.2** посвящён исследованию влияния  $\Lambda N$ -сил, зависящих от нуклонной плотности, на характеристики нейтронных звёзд. Основные результаты исследования отражены в работах [35, 36]. В формализме Скирма многочастичные эффекты в  $\Lambda N$ -взаимодействии могут быть описаны с помощью сил, зависящих от плотности в некоторой степени  $\gamma$ :

$$V_{\Lambda N}(\mathbf{r}_\Lambda, \mathbf{r}_N, \rho_N) = \frac{3}{8} u_3 (1 + \xi_3 P_\sigma) \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_N) \rho_N^\gamma \left( \frac{\mathbf{r}_\Lambda + \mathbf{r}_N}{2} \right). \quad (4)$$

В литературе существуют как параметризации с  $\gamma = 1$  (YBZ2, YBZ6 [37], SLL4' [38]), так и параметризации с  $\gamma < 1$  (YMR [39], LYI [40]), которые

одинаково хорошо описывают гиперядерные данные. Из рисунка 1 видно, что вторые приводят к заметно более мягким уравнениям состояния и меньшей максимальной массе. В диссертационной работе показано, что такой эффект достигается не за счёт величины сил, зависящих от плотности, но из-за сложного сочетания разных членов потенциала  $\Lambda N$ -взаимодействия (1). Наибольшие по абсолютной величине вклады слагаемых с  $u_0$  и  $u_3$  компенсируют друг друга, и становятся важными вклады от слагаемых с  $u_1$  и  $u_2$ . Более того, показано, что можно построить такие наборы параметризаций, которые дают более жёсткие уравнения состояния при меньшем значении  $\gamma$ . На основе потенциала SLL4\* [41] было построено два семейства потенциалов с различными значениями  $\gamma$ . Помимо значения  $\gamma$  также менялись значения параметра  $u_3$ , отвечающего за силы (4), и  $u_0$ , отвечающего за притягивающие силы. Поскольку полученные параметризации должны по-прежнему удовлетворительно описывать гиперядерные данные, на значения модифицированных параметров накладывается два ограничения. Во-первых, модифицированный набор параметров должен описывать хорошо известное из ядерной физики значение  $D_\Lambda \approx 28$  МэВ. В качестве второго ограничения используется значение ранее упоминавшейся сжимающей способности  $\Lambda N$ -взаимодействия  $K_\Lambda$ . Было построено два семейства потенциалов, для одного из которых используется требование постоянства (при изменении параметров)  $K_\Lambda$  при плотности  $\rho_0$ , а для другого – при плотности  $3\rho_0$ . Оба варианта дают приемлемое описание гиперядерных спектров. Результаты расчётов зависимости массы от радиуса с полученными параметризациями представлены на рисунке 3.

В случае параметризаций, полученных при фиксировании  $K_\Lambda(\rho_0)$ , расположение кривых соответствует закономерностям, наблюдаемым для существующих в литературе потенциалов: меньшее значение  $\gamma$  соответствует большей максимальной массе. Однако кривые, полученные при фиксировании  $K_\Lambda(3\rho_0)$ , демонстрируют обратное поведение, и потенциалы с меньшим значением  $\gamma$  соответствуют большему значению максимальной массы.

В **разделе 4.3** обсуждаются трёхчастичные  $\Lambda NN$ -силы и их сравнение с  $\Lambda N$ -силами, зависящими от нуклонной плотности. Учёт  $\Lambda NN$ -сил является альтернативным по сравнению с учётом сил (4) способом описания многочастичных эффектов в  $\Lambda N$ -взаимодействии и записываются следующим

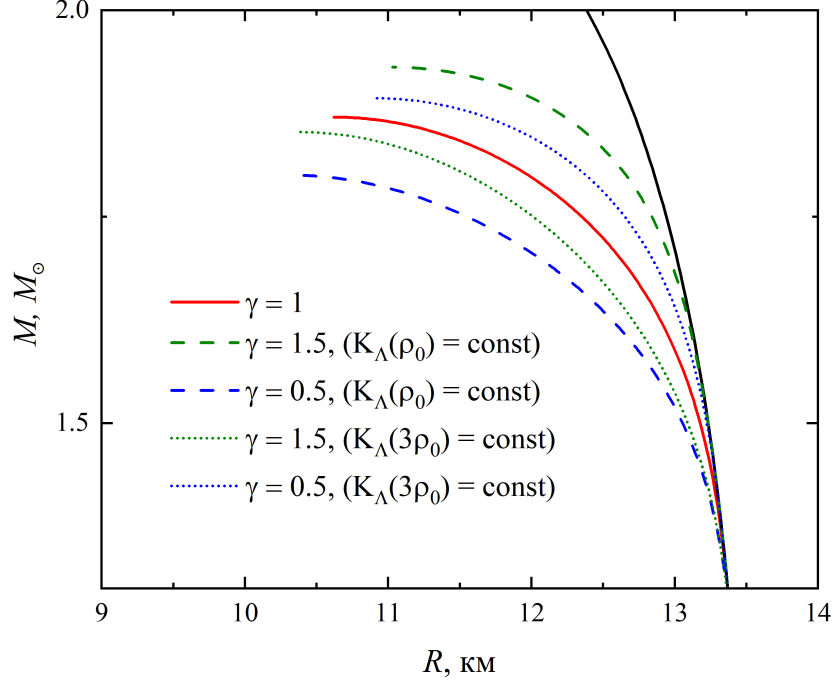


Рисунок 3 — Зависимость массы нейтронной звезды от радиуса, рассчитанная для наборов параметров с разными значениями  $\gamma$ : 1 (красным), 0.5 (синим), 1.5 (зелёным). Штриховые кривые соответствуют расчётам, с параметрами, полученными при фиксировании  $K_\Lambda(\rho_0)$ , пунктирные кривые - при фиксировании  $K_\Lambda(3\rho_0)$ . Параметризации  $NN$ - и  $\Lambda N$ -взаимодействия - SkI3 и S $\Lambda$ \Lambda3' соответственно

образом:

$$V_{\Lambda NN}(\mathbf{r}_\Lambda, \mathbf{r}_{N1}, \mathbf{r}_{N2}) = u_3 \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_{N1}) \delta(\mathbf{r}_\Lambda - \mathbf{r}_{N2}) \quad (5)$$

Силы (4) и (5) практически одинаково описывают гиперядерные данные при условии, что  $\gamma = 1$ . В нейтронных звёздах силы (4) и (5) приводят к заметно различным результатам, что обусловлено влиянием принципа Паули. Пары нейтрон-нейтрон и протон-протон могут возникать только в синглетном состоянии, в то время как пары протон-нейтрон могут существовать как в синглетном, так и в триплетном состоянии. Этот эффект проявляется для  $\Lambda NN$ -сил, но не проявляется для  $\Lambda N$ -сил, пропорциональных  $\rho_N$ . Таким образом, трёхчастичные силы в нейтронных звёздах всегда приводят к меньшей максимальной массе, чем зависящие от плотности силы той же амплитуды. Также было показано, что иногда выбор между трёхчастичными

силами и силами, зависящими от плотности, может приводить не только к количественным, но и к качественным различиям в составе материи нейтронных звёзд. Иллюстрация такого случая представлена на рисунке 4.

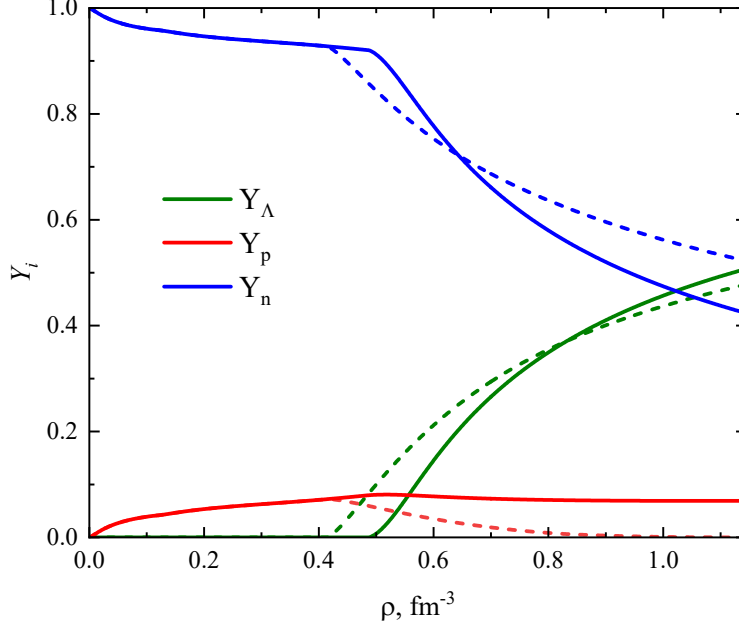


Рисунок 4 — Зависимость заселённостей нейтронов (синим), протонов (красным) и  $\Lambda$ -гиперонов (зелёным) от плотности, рассчитанная для трёхчастичных  $\Lambda NN$ -сил (штриховые линии) и  $\Lambda N$ -сил, пропорциональных нуклонной плотности (сплошные линии). Параметризации  $NN$ -,  $\Lambda N$  и  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействий – SLy230a, SLL4' и S $\Lambda\Lambda$ 3' соответственно

Для комбинации параметризаций, изображённой на рисунке 4, в случае, когда используются трёхчастичные силы, при высокой плотности исчезают протоны и лептоны, и материя в центре нейтронной звезды состоит исключительно из нейтронов и  $\Lambda$ -гиперонов. Объяснить такое поведение можно, рассмотрев трёхчастичные силы как проявление многочастичного эффекта нарушения зарядовой симметрии. Потенциал (5) вносит следующий вклад в энергию:

$$\varepsilon = \frac{1}{4}u_3Y_\Lambda(\rho_N^2 + 2\rho_p\rho_n) = \frac{1}{8}u_3Y_\Lambda(3\rho_N^2 - \rho_-^2). \quad (6)$$

В это выражение входит квадратичная зависимость от  $\rho_- = \rho_p - \rho_n$ , которая отсутствует в случае сил, зависящих от плотности. Из выражения (6)

видно, что наиболее выгодным по энергии является состояние с максимальной асимметрией между протонами и нейтронами, что объясняет поведение кривых для трёхчастичных сил на рисунке 4.

Мы также исследовали классический эффект нарушения зарядовой симметрии в  $\Lambda N$ -взаимодействии, под которым понимается различие во взаимодействии  $\Lambda$ -гиперона с протонами и с нейтронами. В работе [42] изучается влияние эффекта нарушения зарядовой симметрии на характеристики нейтронных звёзд. Показано, что, несмотря на то, что материя нейтронных звёзд является сильно нейтронизбыточной, эффект нарушения зарядовой симметрии не оказывает значительного влияния на максимальную массу нейтронной звезды (величина эффекта не превышает  $0.05M_{\odot}$  в целом и  $0.01M_{\odot}$  в сторону увеличения массы). При этом примечательно, что ввиду того, что при высоких плотностях химические потенциалы частиц могут вести себя иначе, чем при ядерной плотности, знак эффекта в нейтронных звёздах зачастую отличается от знака в гиперядрах.

**Глава 5** посвящена исследованию влияния свойств  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия на характеристики нейтронных звёзд. Основные результаты этого исследования отражены в [43]. В связи с очень малым количеством экспериментальных данных о  $\Lambda\Lambda$ -гиперядрах (на сегодняшний день известно только одно событие, в котором было однозначно идентифицировано конкретное  $\Lambda\Lambda$ -гиперядро [44]) свойства  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия малоизучены. Существующие в литературе потенциалы  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия в форме сил Скирма не содержат ни членов, описывающих взаимодействие в  $p$ -волне, ни членов с зависимостью от плотности. Среди этих параметризаций наиболее предпочтительной для описания нейтронных звёзд выглядит параметризация  $S\Lambda\Lambda'$ , поскольку она предсказывает сравнительно большую массу звезды и при этом корректно описывает современные гиперядерные данные. В диссертационной работе также рассматривается построенный на основе Неймегенской модели одномезонного обмена потенциал NS [40], записанный в форме сил Гаусса:

$$V_{\Lambda\Lambda} = \sum_{i=1}^3 a_i e^{-\frac{r^2}{\beta_i^2}} + k_F \sum_{i=1}^3 b_i e^{-\frac{r^2}{\beta_i^2}} + k_F^2 \sum_{i=1}^3 c_i e^{-\frac{r^2}{\beta_i^2}}, \quad (7)$$

где  $a_i, b_i, c_i, \beta_i$  – параметры взаимодействия, а  $k_F = (3\pi^2/2)^{1/3} \rho_N^{1/3}$  – импульс Ферми нуклона. Аппроксимируя такой потенциал силами Скирма можно получить потенциал  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия с зависимостью от плотности в скирмовском формализме. В работе было проведено сравнение с потенциалами  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия без зависимости от плотности и показано, что, несмотря на учёт важного для нейтронных звёзд аспекта в виде зависимости от плотности, этот потенциал не обнаруживает заметных преимуществ по сравнению с потенциалами без зависимости от плотности. Это можно аргументировать тем, что для  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия зависимость от барионной плотности может играть гораздо большую роль, чем зависимость от нуклонной плотности, которая есть в выражении (7), поскольку плотность гиперонов в нейтронных звёздах может быть сравнима и даже превосходить плотность нуклонов. Результаты расчётов масс и радиусов нейтронных звёзд с различными потенциалами  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия представлены на рисунке 5.

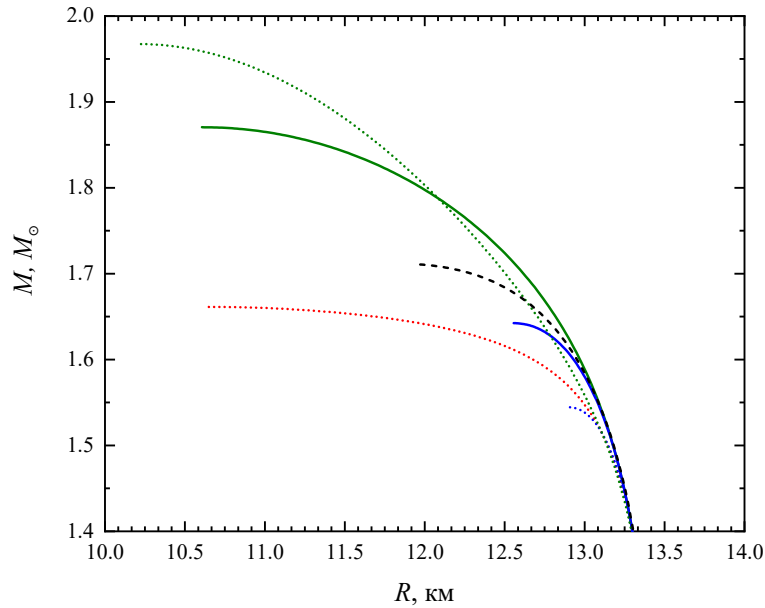


Рисунок 5 — Зависимость массы нейтронной звезды от радиуса для различных параметризаций  $\Lambda\Lambda$ -взаимодействия:  $S\Lambda\Lambda 1$  (синяя пунктирная),  $S\Lambda\Lambda 1'$  (синяя сплошная),  $S\Lambda\Lambda 2$  (красная пунктирная),  $S\Lambda\Lambda 3$  (зелёная пунктирная),  $S\Lambda\Lambda 3'$  (зелёная сплошная), NS (штриховая линия). Параметризации  $NN$ - и  $\Lambda N$ -взаимодействий — SkI3 и YBZ6 соответственно

## Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Получено, что плотность, при которой в материи нейтронных звёзд появляются  $\Lambda$ -гипероны, плавно зависит от сжимающей способности  $\Lambda N$ -взаимодействия – величины, характеризующей способность гиперона модифицировать нуклонный остов  $\Lambda$ -гиперядра. Эта зависимость получена в двух различных подходах: формализме сил Скирма и релятивистской теории среднего поля, и носит универсальный характер. Количественно зависимость определяется также свойствами нуклон-нуклонного взаимодействия.
2. Проанализирован вклад различных слагаемых скирмовского гиперон-нуклонного потенциала в уравнение состояния материи нейтронных звёзд. Показано, что даже при высоких плотностях уравнение состояния определяется не только членом, зависящим от нуклонной плотности, но и зависит от сложного сочетания вкладов различных слагаемых. Для сил, пропорциональных нуклонной плотности в некоторой степени  $\gamma$ , получены семейства потенциалов, которые дают более жёсткое уравнение состояния при большем либо при меньшем значении  $\gamma$ .
3. Показано, что при использовании в скирмовском формализме трёхчастичных  $\Lambda NN$ -сил уравнение состояния материи нейтронных звёзд всегда мягче, чем для  $\Lambda N$ -сил, пропорциональных нуклонной плотности с той же амплитудой. При некоторых условиях трёхчастичные силы приводят к тому, что при высоких плотностях материя звезды состоит только из нейтронов и  $\Lambda$ -гиперонов, тогда как для сил, пропорциональных плотности, в материи присутствуют также протоны и лептоны.
4. Построен скирмовский  $\Lambda\Lambda$ -потенциал, зависящий от нуклонной плотности. Получено, что такой потенциал не приводит к качественным различиям по сравнению с ранее известными потенциалами без зависимости от плотности для уравнения состояния и зависимости массы нейтронной звезды от радиуса.

## Публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защит в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

1. С.А. Михеев, Д.Е. Ланской, Т.Ю. Третьякова. Корреляции между свойствами ядерной материи и характеристиками нейтронных звёзд // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2022. Т. 53, №2. С. 369–378. EDN: JFEUBH. Импакт-фактор 0.936 (ядро РИНЦ). 0.54 п.л.  
[перевод: S.A. Mikheev, D.E. Lanskoj, T.Yu. Tretyakova. Correlations between properties of nuclear matter and characteristics of neutron stars // Physics of Particles and Nuclei. 2022. Vol. 53, №2. Pp. 409–414. EDN: СТТНОЗ. Импакт-фактор 0.5 (JIF). 0.55 п.л.]
2. S. Mikheev, D. Lanskoj, A. Nasakin, T. Tretyakova. Hyperonic interactions in neutron stars // Particles. 2023. Vol. 6., №3. Pp. 847–863. DOI: 10.3390/particles6030054. Импакт-фактор 2.3 (JIF). 1.6 п.л.
3. А.И. Насакин, Д.Е. Ланской, С.А. Михеев, Т.Ю. Третьякова. Условия появления гиперонов в материи нейтронных звёзд // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2025. Т. 56, №3. С. 1583–1595. EDN: NAAVQM. Импакт-фактор 0.936 (ядро РИНЦ). 0.79 п.л.  
[перевод: A.I. Nasakin, D.E. Lanskoj, S.A. Mikheev, T.Yu. Tretyakova. Conditions of hyperon appearance in neutron star // Physics of Particles and Nuclei. 2025. Vol. 56, №3. Pp. 943–949. EDN: UOVKZC. Импакт-фактор 0.5 (JIF). 0.77 п.л.]
4. S.A. Mikheev, D.E. Lanskoj, A.I. Nasakin, T.Yu. Tretyakova. Medium effects in hyperonic interactions at neutron stars densities // International Journal of Modern Physics E. 2026. Vol. 35, №1. 2550059. EDN: ANVWXM. Импакт-фактор 0.9 (JIF). 1.38 п.л.
5. S.A. Mikheev, D.E. Lanskoj, A.I. Nasakin, S.V. Sidorov, T.Yu. Tretyakova. Density dependent hyperonic interactions in neutron stars // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025. Vol. 89, suppl. №3. Pp. S460–S465. DOI: 10.1134/S1062873825714801. Импакт-фактор 0.25 (SJR). 0.71 п.л.

6. С.А. Михеев, Д.Е. Ланской, А.И. Насакин, Т.Ю. Третьякова. Об особенностях гиперонных взаимодействий в нейтронных звёздах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2025. Т. 89, №5. С. 826–831. EDN: ZMKKBD. Импакт-фактор 0.661 (ядро РИНЦ). 0.63 п.л. [перевод: S.A. Mikheev, D.E. Lanskoу, A.I. Nasakin, T.Yu. Tretyakova. Features of hyperonic interactions in neutron stars // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025. Vol. 89, №5. Pp. 792–797. EDN: LMMPLP. Импакт-фактор 0.25 (SJR). 0.6 п.л.]

## Список литературы

1. *Cromartie H. T., Fonseca E., Ransom S. M. et al.* Relativistic Shapiro delay measurements of an extremely massive millisecond pulsar // *Nature Astronomy*. — 2019. — Vol. 4, № 1. — Pp. 72–76.
2. *Fonseca E., Cromartie H. T., Pennucci T. T. et al.* Refined Mass and Geometric Measurements of the High-mass PSR J0740+6620 // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2021. — Vol. 915, № 1. — L12.
3. *Miller M. C., Lamb F. K., Dittmann A. J. et al.* The Radius of PSR J0740+6620 from NICER and XMM-Newton Data // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2021. — Vol. 918, № 2. — L28.
4. *Romani R. W., Kandel D., Filippenko A. V. et al.* PSR J09520607: The Fastest and Heaviest Known Galactic Neutron Star // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2022. — Vol. 934, № 2. — L17.
5. *Wolff M., Guillot S., Bogdanov S. et al.* NICER Detection of Thermal X-Ray Pulsations from the Massive Millisecond Pulsars PSR J07406620 and PSR J1614–2230 // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2021. — Vol. 918, № 2. — L26.
6. *Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al.* GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral // *Physical Review Letters*. — 2017. — Vol. 119. — 161101.

7. *Abbott B. P., Abbott R., Abbott T. D. et al.* GW170817: Measurements of Neutron Star Radii and Equation of State // *Physical Review Letters*. — 2018. — Vol. 121. — 161101.
8. *Skyrme T.* The effective nuclear potential // *Nuclear Physics*. — 1958. — Vol. 9, N° 4. — Pp. 615–634.
9. *Vautherin D., Brink D. M.* Hartree-Fock Calculations with Skyrme’s Interaction. I. Spherical Nuclei // *Physical Review C*. — 1972. — Vol. 5. — Pp. 626–647.
10. *Rayet M.* Skyrme parametrization of an effective  $\Lambda$ -nucleon interaction // *Nuclear Physics A*. — 1981. — Vol. 367, N° 3. — Pp. 381–397.
11. *Baym G., Pethick C., Sutherland P.* The Ground State of Matter at High Densities: Equation of State and Stellar Models // *The Astrophysical Journal*. — 1971. — Vol. 170. — Pp. 299–317.
12. *Tolman R. C.* Static Solutions of Einstein’s Field Equations for Spheres of Fluid // *Physical Review*. — 1939. — Vol. 55. — Pp. 364–373.
13. *Oppenheimer J. R., Volkoff G. M.* On Massive Neutron Cores // *Physical Review*. — 1939. — Vol. 55. — Pp. 374–381.
14. *Hinderer T.* Tidal Love Numbers of Neutron Stars // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Vol. 677, N° 2. — Pp. 1216–1220.
15. *Krastev P. G., Li, B.-A.* Imprints of the nuclear symmetry energy on the tidal deformability of neutron stars // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2019. — Vol. 46, N° 7. — 074001.
16. *Malik T., Alam N., Fortin M. et al.* GW170817: Constraining the nuclear matter equation of state from the neutron star tidal deformability // *Physical Review C*. — 2018. — Vol. 98. — 035804.
17. *Rikowska Stone J., Miller J. C., Koncewicz R. et al.* Nuclear matter and neutron-star properties calculated with the Skyrme interaction // *Physical Review C*. — 2003. — Vol. 68. — 034324.

18. *Dutra M., Lourenço O., Martins S. et al.* Skyrme interaction and nuclear matter constraints // *Physical Review C*. — 2012. — Vol. 85, N° 3. — 035201.
19. *Mikheev S. A., Lanskoj D. E., Tretyakova, T. Yu.* Correlations between Properties of Nuclear Matter and Characteristics of Neutron Stars // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2022. — Vol. 53. — Pp. 409—414.
20. *Mikheev S., Lanskoj D., Nasakin A., Tretyakova T.* Hyperonic Interactions in Neutron Stars // *Particles*. — 2023. — Vol. 6, N° 3. — Pp. 847–863.
21. *Reinhard, P.-G., Flocard H.* Nuclear effective forces and isotope shifts // *Nuclear Physics A*. — 1995. — Vol. 584, N° 3. — Pp. 467–488.
22. *Chabanat E., Bonche P., Haensel P. et al.* A Skyrme parametrization from subnuclear to neutron star densities // *Nuclear Physics A*. — 1997. — Vol. 627, N° 4. — Pp. 710–746.
23. *Minato F., Chiba S.* Fission barrier of actinide nuclei with double- $\Lambda$  particles within the Skyrme–Hartree–Fock method // *Nuclear Physics A*. — 2011. — Vol. 856, N° 1. — Pp. 55–67.
24. *Lanskoj D. E.* Double- $\Lambda$  hypernuclei in the Skyrme–Hartree–Fock approach and nuclear core polarization // *Physical Review C*. — 1998. — Vol. 58. — Pp. 3351–3358.
25. *Nasakin A. I., Lanskoj D. E., Mikheev S. A., Tretyakova T. Y.* Conditions of Hyperon Appearance in Neutron Star Matter // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2025. — Vol. 56, N° 3. — Pp. 943–949.
26. *Ланској Д. Е., Третьякова Т. Ю.* Полярзация остова гиперядра: модельное описание // *Ядерная физика*. — 1989. — Т. 49. — С. 401–407.
27. *Reinhard, P.-G., Dean D. J., Nazarewicz W. et al.* Shape coexistence and the effective nucleon-nucleon interaction // *Physical Review C*. — 1999. — Vol. 60, N° 1. — 014316.
28. *Glendenning N. K., Moszkowski S. A.* Reconciliation of neutron-star masses and binding of the  $\Lambda$  in hypernuclei // *Physical Review Letters*. — 1991. — Vol. 67. — Pp. 2414–2417.

29. *Cohen J., Furnstahl R. J.* Hypernuclear currents in a relativistic mean-field theory // *Physical Review C*. — 1987. — Vol. 35. — Pp. 2231–2235.
30. *Glendenning N. K., Von-Eiff D., Haft M. et al.* Relativistic mean-field calculations of  $\Lambda$  and  $\Sigma$  hypernuclei // *Physical Review C*. — 1993. — Vol. 48. — Pp. 889–895.
31. *Mareš J., Jennings B. K.* Relativistic description of  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ , and  $\Xi$  hypernuclei // *Physical Review C*. — 1994. — Vol. 49. — Pp. 2472–2478.
32. *Keil C. M., Hofmann F., Lenske H.* Density dependent hadron field theory for hypernuclei // *Physical Review C*. — 2000. — Vol. 61. — 064309.
33. *Lu B.-N., Hiyama E., Sagawa H., Zhou S.-G.* Superdeformed  $\Lambda$  hypernuclei within relativistic mean field models // *Physical Review C*. — 2014. — Vol. 89. — 044307.
34. *Tanimura Y.* Clusterization and deformation of multi- $\Lambda$  hypernuclei within a relativistic mean-field model // *Physical Review C*. — 2019. — Vol. 99. — 034324.
35. *Mikheev S. A., Lanskoj D. E., Nasakin A. I. et al.* Density Dependent Hyperonic Interactions in Neutron Stars // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2025. — Vol. 89(Suppl 3). — Pp. S460—S465.
36. *Mikheev S. A., Lanskoj D. E., Nasakin A. I., Tretyakova T. Y.* Medium effects in hyperonic interactions at neutron stars densities // *International Journal of Modern Physics E*. — 2026. — Vol. 35, N<sup>o</sup> 01. — 2550059.
37. *Yamamoto Y., Bandō H., Žofka J.* On the  $\Lambda$ -Hypernuclear Single Particle Energies // *Progress of Theoretical Physics*. — 1988. — Vol. 80, N<sup>o</sup> 5. — Pp. 757–761.
38. *Schulze, H.-J., Hiyama E.* Skyrme force for light and heavy hypernuclei // *Physical Review C*. — 2014. — Vol. 90. — 047301.
39. *Yamamoto Y., Motoba T., Rijken T. A.* G-Matrix Approach to Hyperon-Nucleus Systems // *Progress of Theoretical Physics Supplement*. — 2010. — Vol. 185. — Pp. 72–105.

40. *Lanskoy D. E., Yamamoto Y.* Skyrme-Hartree-Fock treatment of  $\Lambda$  and  $\Lambda\Lambda$  hypernuclei with G-matrix motivated interactions // *Physical Review C*. — 1997. — Vol. 55. — Pp. 2330–2339.
41. *Schulze H.-J.* Skyrme forces for lambda and cascade hypernuclei // *AIP Conference Proceedings*. — 2019. — Vol. 2130, N° 1. — 020009.
42. *Lanskoy D. E., Mikheev S. A., Sidorov S. V., Tretyakova T. Y.* Hypernuclei and Neutron Stars with Charge Symmetry Breaking Hyperonic Potential // *Moscow University Physics Bulletin*. — 2023. — Vol. 78, N° 5. — Pp. 623–633.
43. *Mikheev S. A., Lanskoy D. E., Nasakin A. I., Tretyakova T. Y.* Features of Hyperonic Interactions in Neutron Stars // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics*. — 2025. — Vol. 89, N° 5. — Pp. 792–797.
44. *Takahashi H., Ahn J. K., Akikawa H. et al.* Observation of a  ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  Double Hypernucleus // *Physical Review Letters*. — 2001. — Vol. 87. — 212502.