

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМ. Н.Н. БОГОЛЮБОВА

На правах рукописи

ДЖИОЕВ Алан Александрович

**Метод супероператоров в теории нагретых ядер  
и астрофизические приложения**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна – 2021

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова  
Объединённого института ядерных исследований.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на  
официальном сайте Объединённого института ядерных исследований  
в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:  
<https://dissertations.jinr.ru/>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-техни-  
ческой библиотеке Объединённого института ядерных исследований (г. Дуб-  
на Московской области, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

Ю. М. Быстрицкий

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Экспериментальное и теоретическое исследование нагретых ядер является важным источником информации о свойствах атомных ядер и ядерной материи в экстремальных состояниях. Свойства коллективных возбуждений нагретых ядер исследуются с начала 80-х годов. В это время быстрое накопление экспериментальных данных сделало основным объектом изучения теории нагретых ядер поведение гигантского дипольного резонанса (ГДР). Но, несмотря на достигнутые успехи, здесь остались и нерешённые проблемы. Так, пока не удалось количественно описать ширину ГДР в нагретых ядрах. Не вполне ясна также причина её быстрого роста с температурой.

Теоретические подходы к описанию свойств нагретых ядер, как правило, опираются на температурное обобщение методов и приближений, используемых для холодных ядер. Стандартным методом исследований в этой области являются температурные функции Грина. Предлагаемый в диссертации метод супероператоров позволяет обобщить на конечные температуры те ядерные модели, которые основаны на использовании ядерных волновых функций, в частности, квазичастично-фононную модель.

С точки зрения астрофизических приложений, значительный интерес представляет поведение в нагретых ядрах зарядово-обменных и зарядово-нейтральных гамов-теллеровских (ГТ) резонансов. Известно, что ГТ переходы доминируют во многих ядерных реакциях (захват атомными ядрами электронов и нейтрино,  $\beta$ -распад, рассеяние нейтрино и т.д.), обусловленных слабым взаимодействием и играющих важную роль на поздней стадии эволюции массивных звёзд. Температура среды, в которой происходят слабые реакции в звёздах, меняется от сотен кэВ до нескольких МэВ. Тепловое заселение ядерных уровней способно повлиять на протекание слабых ядерных реакций, а также на процесс нуклеосинтеза в звёздах. Так как экспериментальное изучение слабых реакций с нагретыми ядрами вряд ли возможно, то на возникающие вопросы должна ответить теория.

Скорости и сечения различных слабых ядерных реакций используются как входные данные при компьютерном моделировании коллапсирующих сверхновых. Причём результаты моделирования весьма к ним чувствительны. Поэтому не будет большим преувеличением сказать, что чувствительность результатов моделирования сверхновых к данным по слабым ядерным

реакциям в значительной степени означает чувствительность к свойствам нагретых ядер.

Хотя ни одна из существующих ныне моделей коллапса звезды не воспроизводит весь комплекс явлений, связанных со взрывом сверхновой, и содержит упрощения, в последние два десятилетия был достигнут новый уровень точности, связанный с переходом от простых одномерных моделей к многомерным, позволяющим учитывать сложные гидродинамические явления и эффекты асимметрии взрыва. Всё это делает необходимым совершенствование методов расчёта сечений и скоростей слабых реакций с нагретыми ядрами в веществе сверхновых, чтобы по возможности исключить влияние неопределённостей на результаты моделирования.

### **Цели и задачи исследований**

Целью диссертационной работы является создание на основе метода супероператоров термодинамически последовательного подхода к изучению спектральных характеристик нагретых ядер и его применение к расчёту сечений и скоростей слабых ядерных реакций в условиях, реализующихся при взрыве коллапсирующих сверхновых. Для этой цели решались следующие задачи:

- Построение алгебры фермионных супероператоров рождения и уничтожения, сохраняющей антикоммутационные соотношения и обеспечивающей простоту реализации операции тильда-сопряжения. Вывод соотношений между матричными элементами тильда-сопряжённых супероператоров.
- Получение супероператорного представления силовых функций и спектральных плотностей одночастичных операторов в нагретых ядрах. Установление связи между условием теплового состояния и выполнением принципа детального баланса. Обобщение метода уравнения движения на нагретые ядра.
- Применение метода уравнения движения для расчёта силовых функций и спектральных плотностей зарядово-нейтральных и зарядово-обменных мультипольных операторов в однофононном приближении. Расширение метода на случай учёта связи простых и сложных конфигураций.
- Обобщение метода Доннелли-Валечки, описывающего полуплеитонные ядерные реакции, на случай нагретых ядер.

- Анализ механизмов влияния температуры на распределение силы разрешённых переходов и переходов первого порядка запрета в ядрах группы железа и нейтронно-избыточных ядрах с  $N \approx 50$ .
- Расчёт сечений и скоростей  $e^-$ -захвата и различных нейтрино-ядерных процессов с участием нагретых ядер. Сравнение с аналогичными расчётами в других подходах и выявление причин различий между результатами.
- Оценка разброса величин сечений и скоростей, обусловленного неопределённостью параметров ядерных моделей.
- Выяснение влияния температуры ядер на спектр нейтрино, образующихся и распространяющихся в веществе сверхновой.

### **Научная новизна**

Все результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, являются новыми. А именно:

- Усовершенствован математический аппарат метода супероператоров. Впервые получены соотношения, связывающие матричные элементы тильда-сопряжённых супероператоров.
- Впервые метод супероператоров в комбинации с методом уравнения движения применён для расчёта спектральных характеристик нагретых ядер. Построенный таким образом статистический подход позволяет рассчитать силовые функции и спектральные плотности зарядово-обменных и зарядово-нейтральных операторов в нагретых ядрах, не нарушая принцип детального баланса.
- Для гамильтониана с остаточным взаимодействием в форме Ландау-Мигдала, построенным на основе эффективных сил Скирма, впервые получены уравнения теплоквaziчастного приближения случайных фаз (ТКПСФ), описывающие распределение сил экзо- и эндоэнергетических переходов в нагретых ядрах.
- Для гамильтониана квазичастично-фононной модели (КФМ) впервые получены уравнения, описывающие фрагментацию однофононных состояний в нагретых ядрах и учитывающие наличие в тепловом вакууме термически возбуждённых однофононных состояний.

- Впервые продемонстрирован и получен объяснение эффект значительного уменьшения с ростом температуры энергии разрешённых  $p \rightarrow n$  переходов в нейтронно-избыточных ядрах с парными корреляциями.
- На основе метода Доннелли-Валечки и метода супероператоров впервые реализован термодинамически последовательный способ расчёта сечений и скоростей слабых ядерных реакций в астрофизических условиях.
- Впервые скорости и сечения слабых реакций с нагретыми ядрами рассчитаны без привлечения гипотезы Бринка-Акселя и нарушения принципа детального баланса.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Усовершенствованный метод супероператоров может быть применен не только для изучения свойств нагретых ядер, но и других статистических квантовых систем, в том числе неравновесных.

Предложенный способ учёта фрагментации однофононных состояний в нагретых ядрах может быть использован для анализа и интерпретации экспериментальных данных о температурной зависимости ширины ГДР в высоковозбуждённых компаунд-состояниях.

Разработанный в диссертации термодинамически последовательный способ расчёта сечений и скоростей слабых реакций с нагретыми ядрами может быть положен в основу широкомасштабных расчётов ядерных данных, используемых при моделировании финальной стадии эволюции массивных звёзд и взрыва сверхновых.

Созданный в процессе работы над диссертацией комплекс программ позволяет проводить на основе метода энергетического функционала сил Скирма самосогласованные микроскопические расчёты времен жизни ядер относительно  $\beta$ -распада и электронного захвата. Такие расчёты являются актуальными с точки зрения выяснения возможности взрывного нуклеосинтеза тяжёлых и сверхтяжёлых элементов в сверхновых, а также при определении конкуренции различных мод распада сверхтяжёлых элементов, синтезируемых в лабораторных экспериментах.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Сформулирован новый способ определения правых фермионных супероператоров в пространстве Лиувилля. Как следствие этого определения

показано, что условие теплового состояния зависит лишь от того является ли супероператор фермионоподобным, либо бозоноподобным. Получены соотношения, связывающие матричные элементы и вакуумные средние от тильда-сопряжённых супероператоров.

2. Используя формализм супероператоров и метод уравнения движения, построен термодинамически последовательный метод расчёта спектральных плотностей и силовых функций в нагретых ядрах в рамках большого канонического ансамбля. Получены уравнения теплоквазичастичного приближения случайных фаз в модели с сепарабельным взаимодействием Скирма в канале частица-дырка. Доказано выполнение модельно-независимого правила сумм Икеды в этом приближении.
3. На примере квазичастично-фононной модели ядра разработан метод описания фрагментации однофононных состояний в нагретых ядрах. Показано, что принцип детального баланса требует переопределения теплового фононного вакуума при учёте связи одно- и двухфононных конфигураций.
4. Предложен статистический подход для расчёта сечений и скоростей слабых ядерных реакций с нагретыми ядрами в астрофизических условиях, основанный на комбинации формализма супероператоров и метода Доннелли-Валечки, описывающего полуплептонные ядерные процессы.
5. Расчёты температурной эволюции силовой функции  $\Gamma_{T, \pm}$  переходов в ядрах  $^{54,56}\text{Fe}$  и ряде нейтронно-избыточных ядер с  $N \approx 50$  показали, что отказ от использования гипотезы Бринка-Акселя в нагретых ядрах, равно как и последовательное выполнение принципа детального баланса заметно усиливают вклад возбуждённых ядерных состояний в скорости и сечения полуплептонных процессов в сравнении с расчётами в рамках оболочечной модели, использующимися в симуляциях взрыва коллапсирующих сверхновых. В частности, предсказана более существенная роль экзоэнергетических процессов.
6. В нейтронно-избыточных ядрах с развитым спариванием обнаружена и получена объяснение сильная зависимость энергии и силы разблокированных гамов-теллеровских  $p \rightarrow n$  переходов от температуры. Показано,

что тепловые эффекты – главный механизм разблокировки низкоэнергетических переходов. Благодаря этому процесс захвата электронов нагретыми ядрами звёздного вещества не останавливается на нейтронно-избыточных ядрах с  $N = 50$ .

7. Усиление вклада  $\Gamma_{T_0}$  переходов с термически возбуждённых ядерных состояний расширяет энергетический спектр рассеивающихся в звёздном веществе нейтрино в сравнении с результатами расчётов по модели оболочек. Анализ функции тормозной способности показал, что если энергия нейтрино  $\varepsilon_\nu$  превышает энергию  $\Gamma_{T_0}$  резонанса, то при температуре  $T \approx \varepsilon_\nu/4$  происходит смена режима неупругого рассеяния.
8. На основе развитого в диссертации подхода рассчитаны спектры  $\nu\bar{\nu}$ -пар, испускаемых нагретыми ядрами, и сделана оценка скорости потерь энергии. Показано, что при температурах  $T = 1 - 2$  МэВ образуются низкоэнергетические нейтрино, что делает возможным эффект термостата.

### **Апробация диссертации**

Диссертация выполнена при поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-10-2020-117.

Результаты диссертации неоднократно докладывались автором на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, в Московском государственном университете, Институте ядерной физики (Орсе, Франция), Национальном центре GANIL (Кан, Франция), Центре по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца (GSI, Германия), Институте ядерных исследований (г. Дармштадт, Германия), Университете Васэда (Токио, Япония), а также представлялись на различных международных конференциях, совещаниях и школах, среди которых: VII, IX и XII научные конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ (Дубна, Россия), 57-59 Международные совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Россия), XVII International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Application (Varna, Bulgaria, 2007), APCTP–BLTP JINR Joint Workshop "Frontiers in Nuclear Physics at Dubna" (Dubna, Russia, 2009), International Conference "Nuclear Structure and Related Topics" (Dubna, Russia, 2009), XII International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei (Moscow, Russia, 2009), 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos

(Heidelberg, Germany, 2010), 46th Symposium on Theoretical Chemistry (Münster, Germany, 2010), 4th International Conference on Quantum Metrology (Poznan, Poland, 2013), IN2P3–BLTP Workshop "Recent Achievements in Nuclear Theory" (Dubna, Russia, 2013), XX International School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Applications (Varna, Bulgaria, 2013), ATHENA Brussels workshop on Astrophysics (Brussels, Belgium, January 27–28, 2014), Helmholtz International Summer School "Nuclear Theory And Astrophysical Applications" (Dubna, Russia, 2014), XLIII International Workshop on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations (Hirschegg, Austria, 2015), International Conference "Nuclear Structure and Related Topics" (Dubna, Russia, 2015), Numazu Workshop 2015: Challenges of Modeling Supernovae with Nuclear Data (Numazu, Japan, 2015), SKLTP-BLTP Joint Workshop on Physics of Strong Interaction (Guangxi Normal University, China, 2015), BLTP-KLTP Joint Workshop on Physics of Strong interaction (Dubna, Russia, 2016), Zakopane Conference on Nuclear Physics (Zakopane, Poland, 2016), SKLTP-BLTP Joint Workshop on Physics of Strong Interacting Systems (Shenzhen, China, 2017), BLTP-KLFTP Joint Workshop on Physics of Strong Interacting Systems (Saint-Petersburg, Russia, 2018), International Conference "Nuclear Structure and Related Topics" (Burgas, Bulgaria, 2018), 13th APCTP-BLTP JINR Joint Workshop "Modern problems in nuclear and elementary particle physics" (Dubna, Russia, 2019), International Workshop "Infinite and Finite Nuclear Matter" (Dubna, Russia, 2019).

### Публикации

По материалам диссертации опубликовано **35** печатных работ, список которых приводится в конце автореферата. Из них **24** статьи в рецензируемых журналах [1–24] ( Phys. Rev. C – **7**, Ядерная Физика – **4**, Изв. АН. Сер. физ. – **4**, J. Chem. Phys. - **2**, J. Phys. A: Math. Theor. – **2**, J. Phys.: Cond. Matt – **1**, Int. J. Mod. Phys. E - **1**, ЭЧАЯ – **1**, Acta Phys. Pol. – **1**, Письма в ЭЧАЯ – 1 ) и **11** статей в сборниках трудов конференций [25–35].

Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад автора был определяющим.

### Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и трёх приложений. Она содержит 303 страницы, включая 62 рисунка, 5 таблиц и спи-

сок литературы из 393 наименований.

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Там же приводится перечень семинаров, конференций и совещаний, на которых докладывались результаты, включенные в диссертацию. В заключительной части Введения дано краткое описание структуры диссертации.

В разделе 1.1 **первой главы** диссертации изложен формализм метода супероператоров в пространстве Лиувилля и показана его связь с термодинамикой. Формулируются правила определения правых и левых фермионных супероператоров рождения и уничтожения. Вводится операция тильда-сопряжения и устанавливаются соотношения между матричными элементами тильда-сопряжённых супероператоров. Обсуждаются преимущества используемого определения фермионных супероператоров.

В разделах 1.2 и 1.3, основываясь на формализме супероператоров и методе уравнения движения, описана общая процедура исследования спектральных характеристик нагретых систем. Показано, что использование условия теплового состояния при решении уравнения движения позволяет рассчитывать спектральные плотности и силовые функции зарядово-нейтральных и зарядово-обменных операторов термодинамически последовательным образом, т.е. без нарушения принципа детального баланса.

В разделе 1.4 приводится общий вид используемого в расчётах ядерного гамильтониана с сепарабельным остаточным взаимодействием в форме Ландау-Мигдала. Строится соответствующий тепловой гамильтониан. Для сферически симметричного случая определяются приведённые матричные элементы мультипольных операторов между собственными состояниями теплового гамильтониана.

В разделах 1.5 и 1.6 тепловой гамильтониан диагонализуется в рамках приближения независимых тепловых квазичастиц. Получены выражения для энергии и амплитуды переходов с теплового вакуума на зарядово-нейтральные и зарядово-обменные двухтеплоквазичастичные состояния. Показано, что нагретая система фермионов проявляет свойства нагретой фононной системы. Качественно рассмотрен вопрос о температурной эволюции заря-

дово-нейтральных и зарядово-обменных силовых функций.

В разделах 1.7 и 1.9 для зарядово-нейтральных и зарядово-обменных процессов получены уравнения ТКПСФ в модели ядра с сепарабельным остаточным частично-дырочным взаимодействием в форме Ландау-Мигдала. Показано, что методе ТКПСФ возможно рассмотрение как эндоэнергетических, так и экзоэнергетических процессов с нагретыми ядрами. Доказано выполнение модельно-независимого правила сумм Икеды в методе ТКПСФ.

В разделе 1.8 для гамильтониана КФМ изложен термодинамически последовательный способ выхода за рамки приближения случайных фаз, учитывающий взаимодействие тепловых фононов. Обосновывается необходимость переопределения теплового вакуума.

В разделе 1.10 на основе метода Доннелли-Валечки и развитой процедуры расчёта спектральных плотностей мультипольных операторов получены выражения для сечений полулептонных реакций с нагретыми ядрами. Выражения для сечений получены как с учётом ненулевого переданного ядру импульса, так и в длинноволновом приближении, когда в сечении слабых реакций доминируют разрешённые фермиевские и гамов-теллеровские переходы.

Во **второй главе** обосновывается применимость используемых ядерных моделей для расчёта сечений и скоростей слабых реакций с ядрами группы железа и нейтронно-избыточными ядрами с  $N \approx 50$ .

В разделе 2.1 изложена процедура определения параметров гамильтониана КФМ, позволяющая с хорошей точностью описать положение обеих ветвей ( $ГТ_+$  и  $ГТ_-$ ) зарядово-обменного гамов-теллеровского резонанса на основном состоянии сферических ядер.

В разделе 2.2 для нескольких параметризаций сил Скирма в рамках квазичастичного ПСФ (КПСФ) проведены расчёты силовой функции зарядово-обменных и зарядово-нейтральных ГТ переходов в ядре  $^{56}\text{Fe}$ . Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными и результатами крупномасштабных оболочечных расчётов (large-scale shell model или LSSM).

В разделе 2.3 на основе полученных в КПСФ спектральных плотностей для мультипольных операторов слабого нуклонного тока с  $J^\pi \leq 3^\pm$  рассчитаны сечения неупругого рассеяния и захвата электронного (анти)нейтрино на основном состоянии  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{82}\text{Ge}$ . Проанализировано влияние нейтронного избытка и ненулевого переданного импульса на вклад  $1^+$  переходов в сечение.

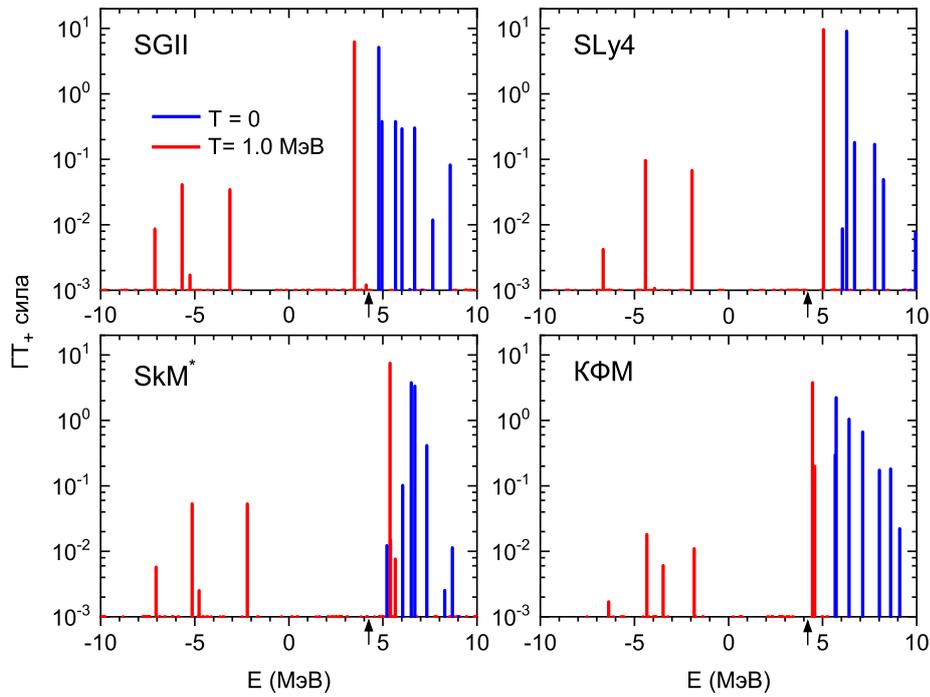


Рис. 1. Силовая функция  $\Gamma_+$  переходов в  $^{56}\text{Fe}$  для двух значений температуры. Результаты самосогласованных ТКПСФ расчётов с силами Скимма сравниваются с результатами, полученными с использованием гамильтониана КФМ. Стрелка указывает положение порога  $e^-$ -захвата при  $T = 0$  ( $Q = 4.21$  МэВ).

В разделе 2.4 для сверхтяжёлого ядра  $^{294}\text{Lv}$  на основе Скимм-КПСФ произведена оценка времени жизни относительно электронного захвата.

В **третьей главе** проведены расчёты и анализ влияния тепловых эффектов на сечения и скорости захвата электронов нагретыми ядрами в астрофизических условиях.

В разделах 3.1 и 3.2 этой главы изложены в общих чертах устоявшиеся представления о финальной стадии эволюции массивных звёзд, а также перечислены обсуждаемые механизмы взрыва коллапсирующих сверхновых и те последствия, которые  $e^-$ -захват оказывает на динамику коллапса.

В разделе 3.3 даётся исторический обзор метода расчёта скоростей ядерного  $e^-$ -захвата на основе оболочечной модели ядра применительно к астрофизическим задачам. Особое внимание уделено обсуждению используемых приближений – гипотезе Бринка-Акселя и методу обратных резонансов. Обсуждаются свойства фазового интеграла при различных параметрах (температура  $T$  и плотность  $\rho Y_e$ ) электронного газа.

В разделе 3.4 приводится общее выражение для скорости  $e^-$ -захвата в рамках статистического подхода и его длинноволновое приближение. Обсуждается отличие метода ТКПСФ от температурного ПСФ.

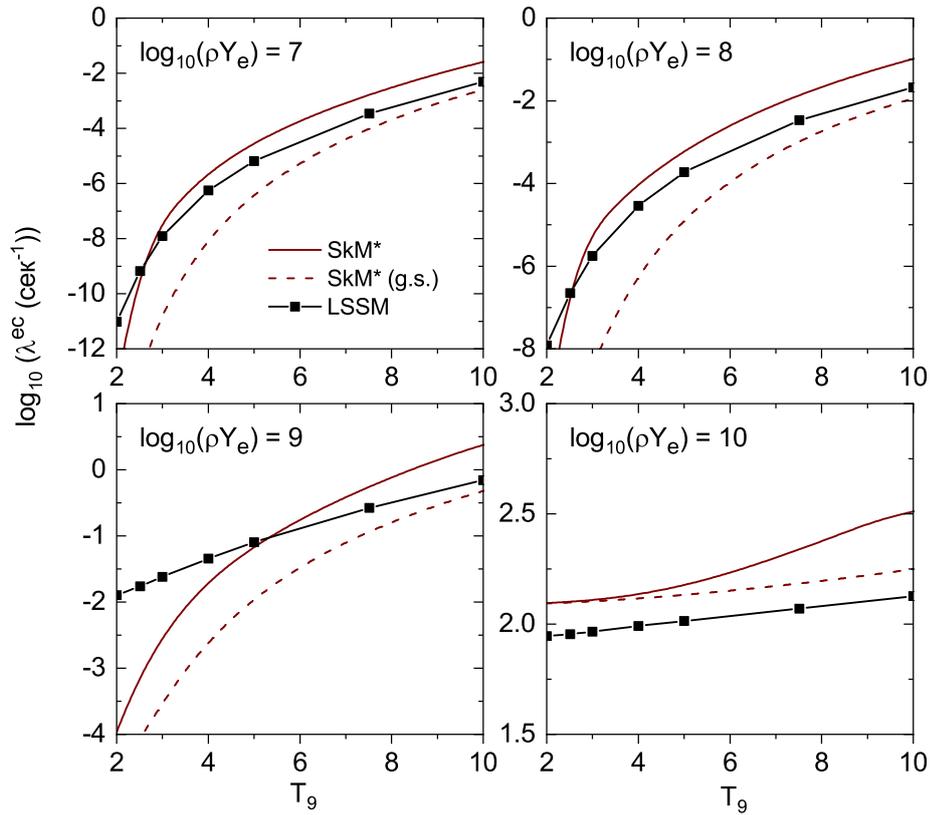


Рис. 2. Скорости  $e^-$ -захвата ядром  $^{56}\text{Fe}$ , рассчитанные с учётом и без учёта (g.s.) влияния тепловых эффектов на силовую функцию  $\text{GT}_+$  переходов. Скорости показаны как функция температуры ( $1 T_9 = 10^9$  К) для нескольких значений плотности  $\rho Y_e$  (в  $\text{г/см}^3$ ). Результаты ТКПСФ вычислений с параметризацией сил Скирма  $\text{SkM}^*$  сравниваются с результатами LSSM.

В разделе 3.5 на примере ядер  $^{54,56}\text{Fe}$  рассмотрена температурная эволюция силовой функции  $\text{GT}_+$  переходов, чей вклад доминирует в процессе  $e^-$ -захвата ядрами группы железа. Показано, что в методе ТКПСФ эволюция  $\text{GT}_+$  силовой функции при увеличении температуры обусловлена тремя различными эффектами:

- при низких температурах благодаря парным корреляциям  $\text{GT}_+$  переходы сопровождаются разрывом протонной куперовской пары, что требует дополнительной энергии. С повышением температуры эта дополнительная энергия уменьшается и полностью исчезает при  $T > T_{\text{cr}}$  ( $T_{\text{cr}} \approx 0.8$  МэВ);
- тепловое размытие нейтронной и протонной поверхностей Ферми в ядре уменьшает абсолютную величину частично-дырочных матричных элементов остаточного взаимодействия. Для отталкивающего протон-нейтронного взаимодействия это приводит к понижению энергии частично-дырочных  $p \rightarrow n$  переходов;

- $GT_+$  переходы, заблокированные в основном состоянии принципом Паули из-за замкнутой нейтронной оболочки, разблокируются с ростом температуры благодаря размытию поверхности Ферми. Аналогично, тепловое возбуждение протонов на вышележащие одночастичные уровни делает возможными  $GT_+$  переходы с них.

В силовой функции  $\uparrow$ -переходов, т.е. переходов с положительной энергией, первые два эффекта приводят к понижению энергии  $GT_+$  резонанса, что свидетельствует о том, что гипотеза Бринка-Акселя (ГБА) не выполняется в методе ТКПСФ. Нарушение ГБА демонстрируется на Рис. 1, где  $GT_+$  силовая функция основного состояния  $^{56}\text{Fe}$ , рассчитанная с гамильтонианом КФМ и с различными силами Скирма, сравнивается с соответствующей силовой функцией при  $T = 1.0 \text{ МэВ}$  ( $T = 1.0 \text{ МэВ} \approx 11.6 \times 10^9 \text{ К}$ ). За счёт третьего из перечисленных выше тепловых эффектов происходит разблокировка низкоэнергетических и  $\downarrow$ -переходов, т.е. переходов с отрицательной энергией, с возбуждённых состояний. Наши расчёты показывают, что из-за вынужденного использования ГБА и метода обратных резонансов в LSSM расчётах вклад этих переходов в  $e^-$ -захват нагретым ядром заметно занижен.

Влияние тепловых эффектов на скорость  $e^-$ -захвата продемонстрировано на Рис. 2 на примере ядра  $^{56}\text{Fe}$ . При низких и средних плотностях температурная разблокировка низкоэнергетических и  $\downarrow$ -переходов повышает скорость  $e^-$ -захвата на порядок по сравнению с захватом на холодном ядре. При высоких плотностях ускорение  $e^-$ -захвата связано с понижением энергии  $GT_+$  резонанса. Сравнение результатов LSSM и ТКПСФ расчётов показывает, что за счёт усиления вклада низкоэнергетических и  $\downarrow$ -переходов с термически возбуждённых ядерных состояний метод ТКПСФ предсказывает более быстрый температурный рост скоростей  $e^-$ -захвата ядрами группы железа.

В разделе 3.6 для нейтронно-избыточных ядер с  $N \approx 50$  проанализированы два механизма разблокировки  $GT_+$  переходов – конфигурационное смешивание, вызванное парными корреляциями, и тепловые эффекты, связанные с возбуждением квазичастичных состояний. Обнаружено, что в таких ядрах с ростом температуры максимум силовой функции сдвигается в область ниже и вблизи пороговой энергии  $e^-$ -захвата (см. Рис. 3). Так как сдвиг максимума составляет около 8-10 МэВ, то он не может быть связан только с исчезновением энергии, необходимой для разрыва протонной куперовской пары, как в случае с ядрами группы железа. Анализ показал, что причиной сдвига яв-

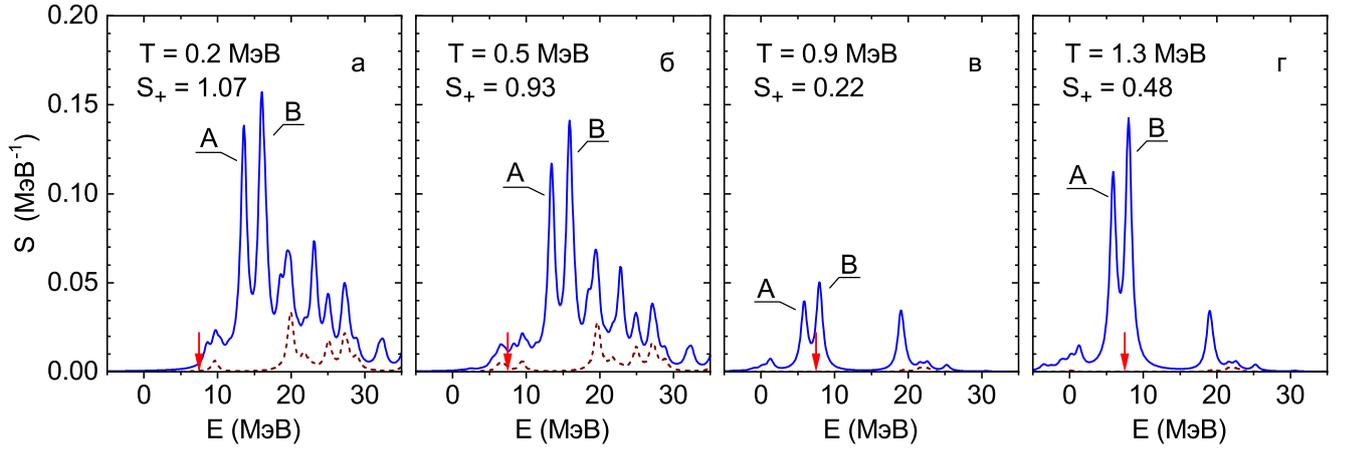


Рис. 3. Распределение силы разрешённых ( $0^+$  и  $1^+$ )  $p \rightarrow n$  переходов в  $^{76}\text{Ge}$  при различных значениях температуры  $T$ . Вклад  $0^+$  переходов показан штриховой линией.  $S_+$  обозначает полную силу переходов. Стрелка указывает на положение порога  $e^-$ -захвата при  $T = 0$  ( $Q = 7.52$  МэВ). Пики, обусловленные одночастичными резонансными  $\text{GT}_+$  переходами  $1f_{7/2}^p \rightarrow 1f_{5/2}^n$ ,  $1g_{9/2}^p \rightarrow 1g_{7/2}^n$ , помечены соответственно символами  $A$  и  $B$ .

ляется вызванное ростом температуры ослабление роли конфигурационного смешивания в разблокировке  $\text{GT}_+$  переходов. Наложение двух механизмов разблокировки приводит к зависимости полной силы  $S_+$  разрешённых переходов от температуры. При  $T \approx T_{\text{cr}}$ , когда парные корреляции ослабли, но тепловые эффекты ещё недостаточно сильны,  $S_+$  минимальна. Объяснено отсутствие подобных эффектов в гибридной  $\text{SMMS/RPA}$  модели.

Обнаруженное значительное уменьшение энергии  $\text{GT}_+$  переходов при прочих равных условиях увеличивает скорость  $e^-$ -захвата. В этом смысле тепловые эффекты являются более эффективным механизмом разблокировки, чем конфигурационное смешивание. Эффективность теплого механизма разблокировки демонстрируется на Рис. 4, где для ряда нейтронно-избыточных ядер приведены рассчитанные в ТКПСФ скорости  $e^-$ -захвата. Скорости, полученные при  $T = 10^{10}$  К, существенно превышают скорости  $e^-$ -захвата на основном состоянии ядер. Превышение наблюдается при всех плотностях, но наиболее значительно оно при  $\rho Y_e \lesssim 10^{10}$  г/см<sup>3</sup>, когда доминируют  $\text{GT}_+$  переходы. С увеличением плотности возрастает роль запрещённых переходов. На основании проведённых нами ТКПСФ расчётов можно утверждать, что в отличие от предсказаний, основанных на экспериментальных  $\text{GT}_+$  распределениях,  $e^-$ -захват не прекращается на ядрах с  $N = 50$  и обеспечивает дальнейшую нейтронизацию вещества кора звезды.

**В четвертой главе** исследуются нейтрино-ядерные реакции в астрофи-

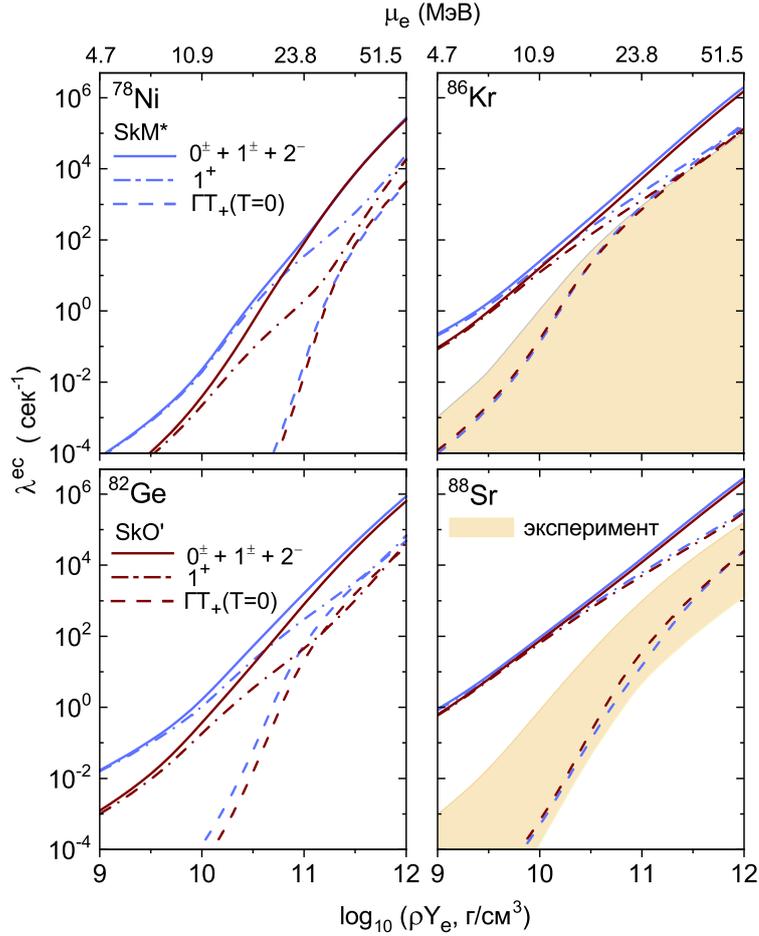


Рис. 4. Скорости  $e^-$ -захвата ядрами с  $N = 50$  при  $T = 10^{10}$  К как функции плотности. Скорости рассчитаны в ТКПСФ с двумя различными параметризациями сил Скимра, SkM\* и SkO'. На верхней оси абсцисс указаны значения химического потенциала  $\mu_e$  электронного газа. В полных скоростях захвата (сплошные линии) учтены вклады разрешённых  $0^+$  и  $1^+$  переходов и переходов первого порядка запрета. Штрих-пунктирные линии, помеченные как  $1^+$ , соответствуют вкладу  $GT_+$  переходов при  $T \neq 0$ . Скорости, показанные штриховыми линиями, соответствуют вкладу  $GT_+$  переходов с основного состояния ядер. Закрашенные области получены на основе данных экспериментов с учётом ошибок измерения  $GT_+$  силы.

зических условиях. Влияние таких реакций на динамику коллапса и взрыв сверхновой, а также методы учёта тепловых эффектов при расчёте сечений обсуждаются в начале главы.

В разделе 4.1.1 на примере ядер  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{82}\text{Ge}$  рассмотрено влияние температуры ядра на силовую функцию зарядово-нейтральных  $GT_0$  переходов. Показано, что, как и в случае зарядово-обменных  $GT_+$  переходов, повышение температуры ядра приводит к понижению энергии резонанса и разблокировке низкоэнергетических и  $\downarrow$ -переходов. Так как части силовой функции, отвечающие  $\uparrow$ - и  $\downarrow$ -переходам, связаны принципом детального баланса  $S_{GT_0}(-E, T) = \exp(-E/T)S_{GT_0}(E, T)$ , то вызванное ростом температуры

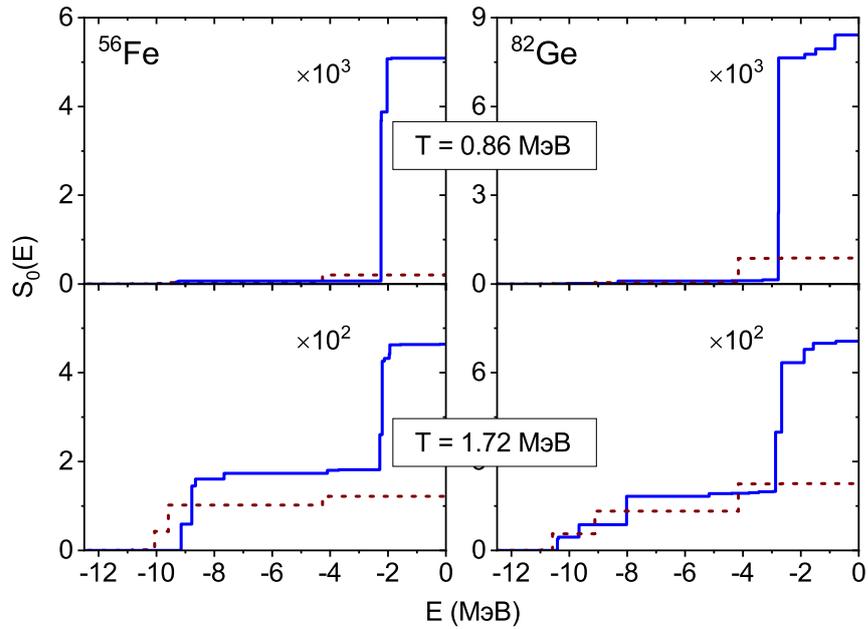


Рис. 5. Бегущие суммы для экзоэнергетической ( $E < 0$ ) компоненты  $GT_0$  силовой функции, рассчитанные с использованием (штриховые линии) и без использования гипотезы Бринка-Акселя. На каждом рисунке приведены масштабирующие множители.

изменение силовой функции  $\uparrow$ -переходов должно влиять на силовую функцию  $\downarrow$ -переходов. Чтобы продемонстрировать этот эффект, бегущие суммы  $S_0(E, T) = \int_{-\infty}^E S_{GT_0}(E', T) dE'$  рассчитывались в области  $E < 0$  без использования и с использованием ГБА. В втором случае экзоэнергетическая компонента силовой функции находилось путём обращения при помощи принципа детального баланса  $GT_0$  распределения основного состояния. Их сравнение показывает (см. Рис. 5), что отказ от использования ГБА приводит к значительному увеличению полной силы  $GT_0$   $\downarrow$ -переходов. Данный эффект наиболее ярко проявляется при температуре  $T = 0.86$  МэВ: тепловая разблокировка низкоэнергетических  $\uparrow$ -переходов более чем на порядок увеличивает полную силу  $\downarrow$ -переходов. При более высокой температуре  $T = 1.72$  МэВ становится возможным тепловое заселение  $GT_0$  резонанса. Вызванное температурой понижение энергии резонанса увеличивает вероятность его возбуждения, что также даёт свой вклад в рост экзоэнергетической компоненты силовой функции.

В разделе 4.1.2 исследовано влияние температуры на сечение неупругого рассеяния нейтрино на ядрах. Анализ вклада различных мультипольных компонент в сечение показал, что наблюдаемое при  $T \neq 0$  на Рис. 6 исчезновение порога реакции и увеличение сечения вызвано ростом вклада  $GT_0$  переходов. Для определения относительного вклада разблокированных  $\downarrow$ - и

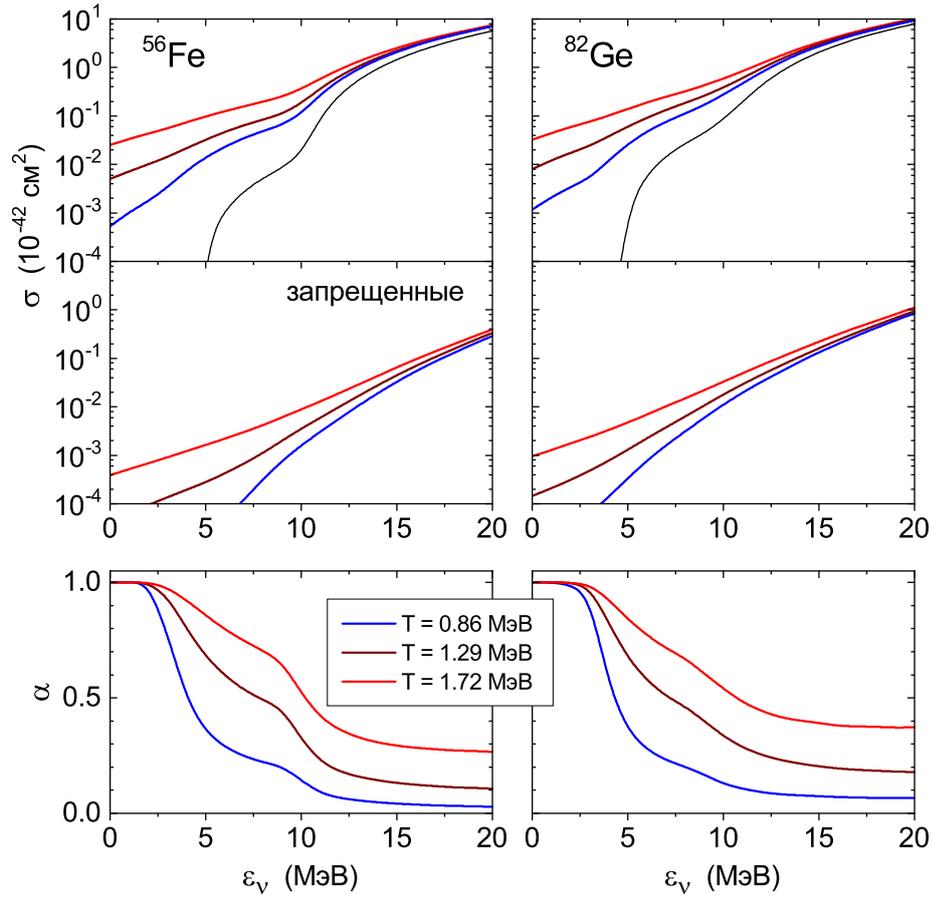


Рис. 6. Влияние температуры на сечения неупругого рассеяния нейтрино на  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{82}\text{Ge}$ . На верхних рисунках показаны полные сечения, содержащие вклады мультипольных компонент  $J^\pi \leq 3^\pm$ . Сечения для основного состояния показаны сплошной линией. Средние рисунки показывают вклад в сечение запрещённых переходов  $J^\pi = 0^-, 1^-, 2^\pm, 3^\pm$ . Нижние рисунки демонстрируют относительный вклад экзоэнергетического рассеяния нейтрино в вызванное температурой увеличение сечения. Расчёты выполнены в рамках КФМ-ТКПСФ.

↑-переходов в тепловой рост сечения рассмотрено отношение

$$\alpha(\varepsilon_\nu, T) = \frac{\sigma_{\text{ex}}(\varepsilon_\nu, T)}{\sigma(\varepsilon_\nu, T) - \sigma_{\text{g.s.}}(\varepsilon_\nu)},$$

где  $\sigma_{\text{ex}}(\varepsilon_\nu, T)$  – экзоэнергетическая компонента сечения, а разность  $\sigma(\varepsilon_\nu, T) - \sigma_{\text{g.s.}}(\varepsilon_\nu)$  соответствует увеличению сечения из-за тепловых эффектов. В отличие от LSSM расчётов, где  $\alpha = 1$ , в методе ТКПСФ отношение  $\alpha$  зависит как от температуры, так и от энергии  $\varepsilon_\nu$  налетающего нейтрино, хотя слабо зависит от конкретного ядра. Уменьшение  $\alpha$  с ростом энергии нейтрино  $\varepsilon_\nu$  свидетельствует об уменьшении относительного вклада экзоэнергетических ↓-переходов в тепловое увеличение сечения и возрастании роли разблокированных низкоэнергетических ↑-переходов. Для нейтрино с энергией

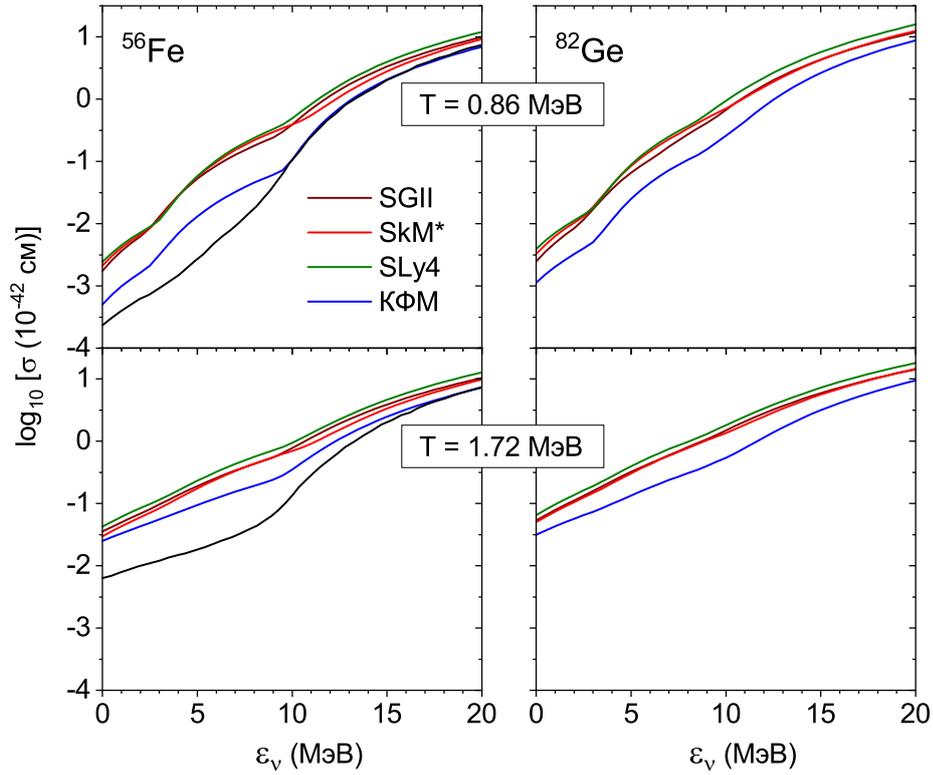


Рис. 7. Сечение неупругого рассеяния нейтрино на  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{82}\text{Ge}$  при  $T = 0.86 \text{ МэВ}$  и  $T = 1.72 \text{ МэВ}$ . Сравняются сечения рассчитанные в ТКПСФ с гамильтонианом КФМ и с различными параметризациями сил Скирма. Для  $^{56}\text{Fe}$  приведены сечения, рассчитанные в LSSM (чёрная линия).

$5 \text{ МэВ} < \varepsilon_\nu < 10 \text{ МэВ}$  оба типа разблокированных переходов способствуют росту сечения, хотя их относительный вклад зависит от температуры: чем выше температура, тем весомее вклад  $\downarrow$ -переходов. В результате, если при  $T = 0.86 \text{ МэВ}$  разблокировка низкоэнергетических  $\uparrow$ -переходов и понижение энергии  $\Gamma T_0$  резонанса являются главными факторами, вызывающими рост сечения для  $\varepsilon_\nu > 5 \text{ МэВ}$ , то при  $T > 1.29 \text{ МэВ}$  доминирующая роль экзоэнергетических процессов (т.е.  $\downarrow$ -переходов) в тепловом росте сечения сохраняется вплоть до энергии нейтрино  $\varepsilon_\nu \approx 10 \text{ МэВ}$ , достаточной для возбуждения  $\Gamma T_0$  резонанса.

Исчезновение порога реакции и быстрый температурный рост сечения при  $\varepsilon_\nu \lesssim 10 \text{ МэВ}$  имеют место в ТКПСФ расчётах как с гамильтонианом КФМ, так и с силами Скирма (см. Рис. 7). Особо следует отметить тот факт, что расчёты с разными силами Скирма приводят к очень близким результатам. Кроме того, рассчитанные при помощи ТКПСФ в рамках одной ядерной модели сечения для  $^{54,56}\text{Fe}$  и  $^{82}\text{Ge}$  оказываются близки. Данный результат согласуется с выводами LSSM расчётов о том, что при  $T \gtrsim 1 \text{ МэВ}$

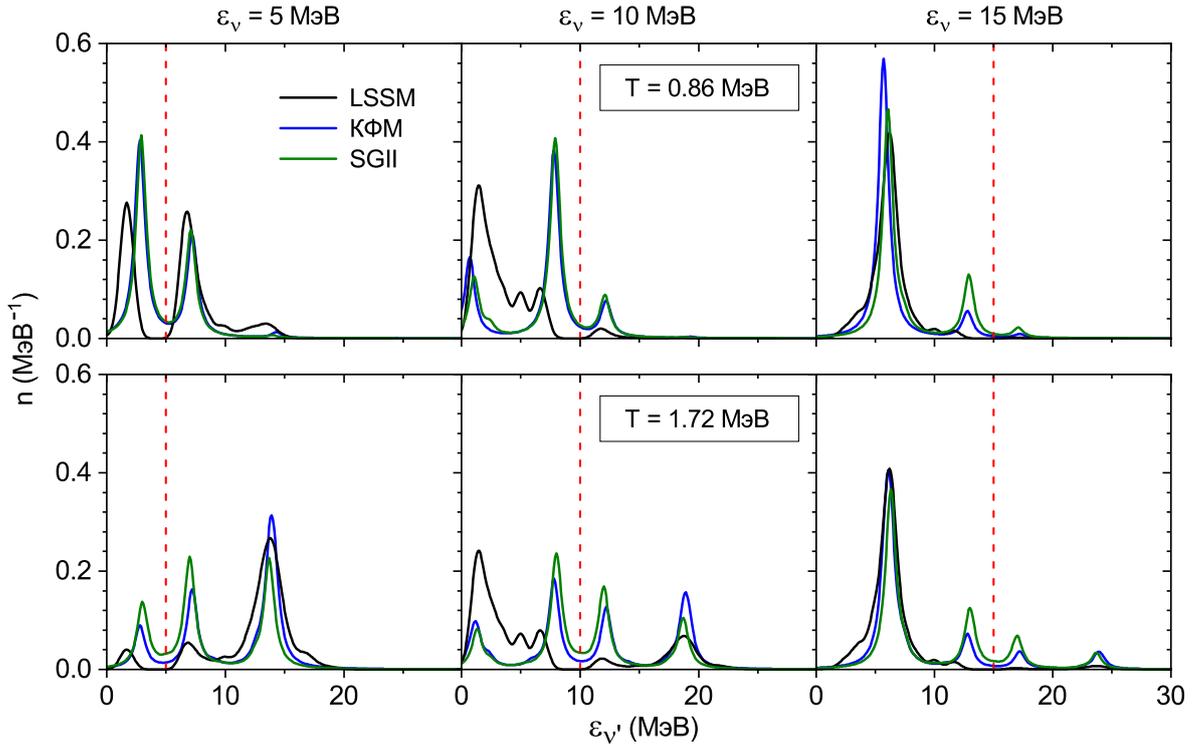


Рис. 8. Нормированный спектр нейтрино, рассеянных на  $^{56}\text{Fe}$  при  $T = 0.86$  МэВ (верхний ряд) и  $T = 1.72$  МэВ (нижний ряд). Результаты ТКПСФ расчётов с гамильтонианом КФМ и взаимодействием SGII сравниваются с результатами LSSM вычислений. Вертикальная штриховая линия соответствует энергии налетающих нейтрино  $\varepsilon_\nu = 5, 10, 15$  МэВ. Часть спектра, расположенная справа (слева) от этой линии, соответствует экзоэнергетическому (эндоэнергетическому) рассеянию.

температурные эффекты сглаживают индивидуальные особенности ядер.

Вызванные ростом температуры эффекты – разблокировка низкоэнергетических  $\text{GT}_0$  переходов, уменьшение энергии  $\text{GT}_0$  резонанса, а также усиление вклада  $\downarrow$ -переходов в силовую функцию – в совокупности приводят к тому, что для нейтрино с энергией  $\varepsilon_\nu \lesssim 10$  МэВ сечения рассеяния, полученные в ТКПСФ, существенно превышают LSSM результаты (см. Рис. 7). Таким образом, ТКПСФ расчёты предсказывают увеличение нейтринной непрозрачности вещества звезды, которое затронет прежде всего низкоэнергетические нейтрино. Так как рост сечения вызван главным образом экзоэнергетическим рассеянием, то более эффективно должен происходить процесс охлаждения вещества звезды.

Тепловые эффекты влияют и на спектр рассеянных нейтрино. Как показано на Рис. 8, при рассеянии на термически возбуждённых ядерных состояниях нейтрино может увеличить энергию за счёт девозбуждения ядра. Усиление роли тепловых эффектов в ТКПСФ приводит к тому, что спектр

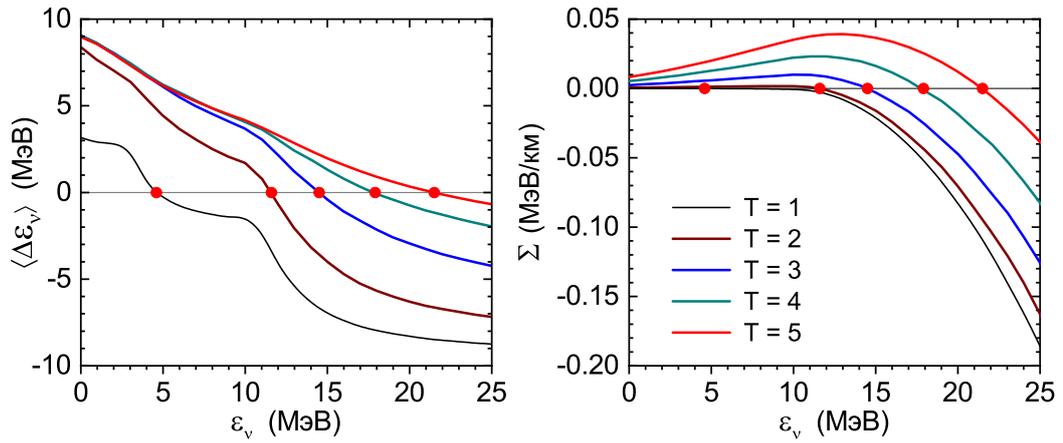


Рис. 9. Слева: среднее изменение энергии нейтрино при неупругом рассеянии на  $^{56}\text{Fe}$  как функция энергии налетающего нейтрино  $\varepsilon_\nu$  для нескольких значений температуры  $T$  (в МэВ). Справа: тормозная способность вещества состоящего из  $^{56}\text{Fe}$  при плотности  $\rho = 10^{12}$  г/см $^3$  как функция энергии нейтрино для нескольких значений температуры. Закрашенные кружки отмечают значения  $(T, \varepsilon_\nu)$ , при которых происходит смена режима рассеяния:  $(T, \varepsilon_\nu) = (1, 4.6), (2, 11.6), (3, 14.5), (4, 17.9), (5, 21.5)$ .

рассеянных нейтрино охватывает более широкий интервал энергий по сравнению с предсказаниями LSSM. Более широкий спектр рассеянных нейтрино увеличивает скорость термализации нейтрино.

В разделе 4.1.3 проанализирован процесс обмена энергией между нейтрино и нагретыми ядрами при неупругом рассеянии. Для этого, полагая, что вещество коллапсирующего кора состоит из ядер  $^{56}\text{Fe}$ , рассчитаны среднее изменение энергии нейтрино в единичном акте рассеяния  $\langle \Delta \varepsilon_\nu \rangle$  и тормозная способность вещества  $\Sigma(\varepsilon_\nu, T, \rho)$ , т.е. среднее изменение энергии нейтрино при прохождении слоя вещества единичной толщины. Как показано на Рис. 9, для нейтрино с энергией  $\varepsilon_\nu > 5$  МэВ величина средней переданной энергии зависит от температуры и при росте  $T$  меняется от отрицательного к положительному значению. При температуре  $T \gtrsim 2$  МэВ и типичной энергии нейтрино  $\varepsilon_\nu = 10 \div 15$  МэВ реализуется именно экзоэнергетический режим рассеяния, то есть спектр нейтрино будет сдвигаться в сторону бóльших энергий.

В отличие от средней переданной энергии,  $\Sigma(\varepsilon_\nu, T, \rho)$  демонстрирует немонотонную зависимость от энергии нейтрино в экзоэнергетическом режиме рассеяния. Энергия нейтрино, при которой  $\Sigma(\varepsilon_\nu, T, \rho)$  принимает максимальное значение, увеличивается с температурой. Таким образом, повышение температуры не только способствует росту передачи энергии от вещества нейтринному излучению, но и увеличивает энергию  $\varepsilon_\nu$ , при которой

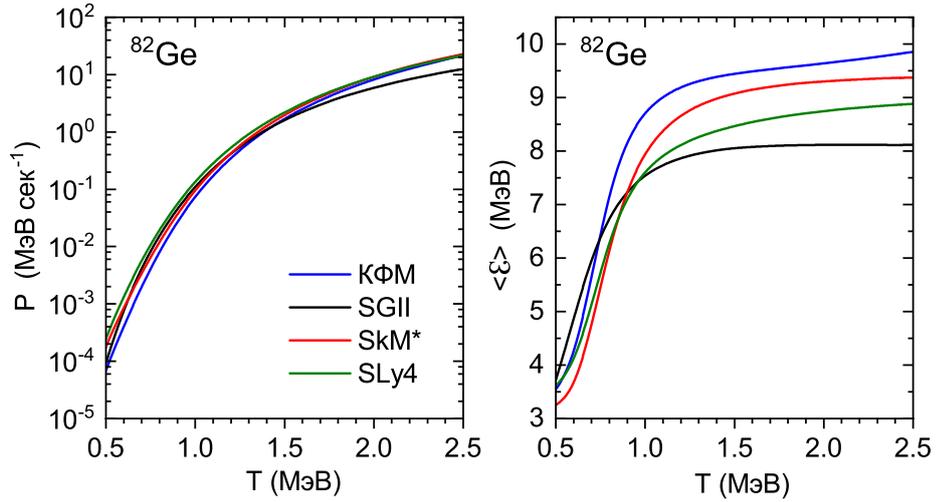


Рис. 10. Скорость потери энергии (слева) и средняя энергия излучённой  $\nu\bar{\nu}$ -пары (справа) ядром  $^{82}\text{Ge}$  как функции температуры.

эта передача происходит наиболее эффективно. Значение температуры  $T_{\text{ch}}$ , при которой происходит смена режима рассеяния для данной энергии нейтрино, в общем случае зависит от деталей распределения  $\Gamma T_0$  силы. Однако можно показать, что при энергии  $\epsilon_\nu$ , превышающей энергию  $\Gamma T_0$  резонанса, данная температура зависит только от энергии  $\Gamma T_0$  резонанса и энергии  $\epsilon_\nu$ . В частности, если  $\epsilon_\nu \gtrsim 15 \text{ МэВ}$ , то с хорошей точностью можно считать, что  $T_{\text{ch}} \approx \epsilon_\nu/4$ .

В разделе 4.2, используя метод ТКПСФ, рассчитаны скорости потери энергии в процессе излучения пары нейтрино-антинейтрино нагретыми ядрами

$$(A, Z)^* \rightarrow (A, Z) + \nu_k + \bar{\nu}_k \quad (k = e, \mu, \tau),$$

а также средние энергии излучённой  $\nu\bar{\nu}$ -пары (см. Рис. 10). Спектр образующихся  $\nu\bar{\nu}$ -пар проанализирован на основе оболочечной модели ядра. Как следует из наших расчётов, благодаря тепловому заселению возбуждённых состояний ядра скорость потери энергии очень быстро растёт с температурой. При этом средняя энергия, уносимая  $\nu\bar{\nu}$ -парой, после температуры 1 МэВ практически остаётся постоянной. Анализ показывает, что данная энергия выделяется при девозбуждении  $\Gamma T_0$  резонанса. Так как низкоэнергетические нейтрино легче покидают звезду, то быстрый рост скорости потери энергии делает возможным так называемый эффект термостата, когда при повышении температуры вещество звезды эффективно охлаждается за счёт испускания  $\nu\bar{\nu}$ -пар нагретыми ядрами.

В разделе 4.3 для реакции захвата (анти)нейтрино ядрами исследовано

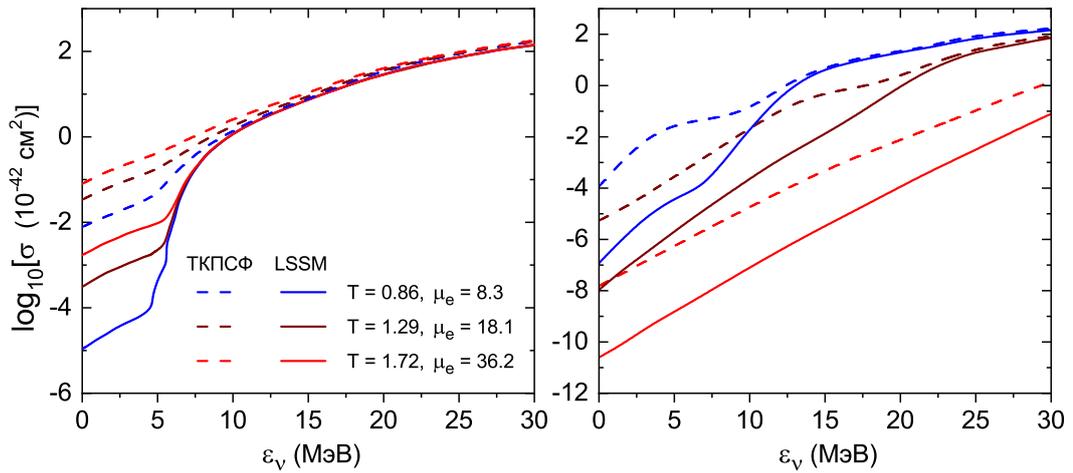


Рис. 11. Сравнение ТКПСФ и LSSM сечений реакции  $^{56}\text{Fe}(\nu_e, e^-)$ . Сечения показаны как без учёта (рисунок слева), так и с учётом (рисунок справа) блокировки вылетающих электронов. Температура  $T$  и химический потенциал  $\mu_e$  указаны в МэВ.

совместное влияние тепловых эффектов и Паули-блокировки фазового пространства электронов на сечение захвата. На примере ядер  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{82}\text{Ge}$  показано, что, как и в случае неупругого рассеяния нейтрино, тепловое заселение ядерных возбуждённых уровней приводит к исчезновению порога реакций  $^{56}\text{Fe}(\nu_e, e^-)$ ,  $^{56}\text{Fe}(\bar{\nu}_e, e^+)$  и  $^{82}\text{Ge}(\bar{\nu}_e, e^+)$  и к росту низкоэнергетической части сечения (см. левую часть Рис. 11). В то же время для реакции  $^{82}\text{Ge}(\nu_e, e^-)$  тепловые эффекты не играют существенной роли, что согласуется с выводами, полученными на основе LSSM о том, что влияние тепловых эффектов на сечение  $\nu_e$ -захвата ядрами ослабевает по мере увеличения нейтронного избытка. Наличие вырожденного электронного газа приводит к значительному подавлению захвата нейтрино (см. правую часть Рис. 11). При этом возрастает роль запрещённых  $\downarrow$ -переходов, способных породить электроны с достаточно большой энергией. Сравнение с результатами LSSM расчётов для  $^{56}\text{Fe}$  показывает, что благодаря термодинамически последовательному учёту тепловых эффектов и запрещённых переходов ТКПСФ сечения более чем на порядок превышают результаты модели оболочек в низкоэнергетической области.

Сравнение сечений захвата и неупругого рассеяния нейтрино показывает, что благодаря эффекту Паули-блокировки именно неупругое рассеяние на нагретых ядрах является основной причиной повышения непрозрачности вещества звезды для низкоэнергетических нейтрино. Что же касается реакций с участием антинейтрино, то захват и неупругое рассеяние на ядрах группы железа имеют близкие по величине сечения и поэтому должны учитываться

совместно.

В **Приложении А** дан вывод некоторых соотношений из **Главы 1**, а в **Приложениях Б и В** приведены вывод и явный вид секулярных уравнений ТКПСФ, использованных в расчётах структуры и энергии зарядово-нейтральных и зарядово-обменных однофононных возбуждений в нагретых ядрах.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, представляемые к защите.

## Список публикаций

1. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Ponomarev V. Yu. et al.* Gamow-Teller strength distributions at finite temperatures and electron capture in stellar environments // *Physical Review C*. 2010. Vol. 81, no. 1. P. 015804.
2. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Wambach J., Ponomarev V. Yu.* Inelastic neutrino scattering off hot nuclei in supernova environments // *Physical Review C*. 2014. Vol. 89, no. 3. P. 035805.
3. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Wambach J.* Neutrino absorption by hot nuclei in supernova environments // *Physical Review C*. 2015. Vol. 92, no. 4. P. 045804.
4. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Martínez-Pinedo G. et al.* Thermal quasiparticle random-phase approximation with Skyrme interactions and supernova neutral-current neutrino-nucleus reactions // *Physical Review C*. 2016. Vol. 94, no. 1. P. 015805.
5. *Kondratyev V. N., Dzhioev A. A., Vdovin A. I. et al.* Energy exchange in neutrino nuclear scattering // *Physical Review C*. 2019. Vol. 100, no. 4. P. 045802.
6. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Stoyanov Ch.* Thermal quasiparticle random-phase approximation calculations of stellar electron capture rates with the Skyrme effective interaction // *Physical Review C*. 2019. Vol. 100, no. 2. P. 025801.
7. *Dzhioev A. A., Langanke K., Martínez-Pinedo G. et al.* Unblocking of stellar electron capture for neutron-rich  $N = 50$  nuclei at finite temperature // *Physical Review C*. 2020. Vol. 101, no. 2. P. 025805.
8. *Джигоев А. А., Вдовин А. И., Пономарёв В. Ю., Вамбах Й.* Зарядово-обменные переходы в нагретых ядрах // *Ядерная физика*. 2009. Т. 72. С. 1373–1384.

9. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Ponomarev V. Yu., Wambach J.* Thermal effects on neutrino–nucleus inelastic scattering in stellar environments // *Ядерная физика*. 2011. Т. 74. С. 1193–1201.
10. *Джиоев А. А., Вдовин А. И.* Испускание пары нейтрино-антинейтрино нагретыми ядрами в коллапсирующей звезде // *Ядерная физика*. 2014. Т. 77. С. 1226–1233.
11. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Stoyanov Ch.* The Skyrme-TQRPA calculations of electron capture on hot nuclei in pre-supernova environment // *Physics of Atomic Nuclei*. 2016. Vol. 79, no. 6. P. 1019–1029.
12. *Джиоев А. А., Вдовин А. И., Пономарёв В. Ю., Вамбах Й.* Резонанс Гамова-Теллера в нагретых ядрах и астрофизические приложения // *Известия РАН. Серия физическая*. 2008. Т. 72. С. 294–298.
13. *Джиоев А. А., Вдовин А. И., Пономарёв В. Ю., Вамбах Й.* Влияние температуры на захват электронов нейтронно-избыточными ядрами // *Известия РАН. Серия физическая*. 2009. Т. 73. С. 236–240.
14. *Джиоев А. А., Вдовин А. И.* Влияние температуры на сечение неупругого рассеяния нейтрино // *Известия РАН. Серия физическая*. 2010. Т. 74. С. 520–524.
15. *Кондратьев В. Н., Джиоев А. А., Вдовин А. И. и др.* Магнитные и тепловые эффекты при рассеянии нейтрино в горячем и плотном ядерном веществе // *Известия РАН. Серия физическая*. 2020. Т. 84. С. 1167–1173.
16. *Dzhioev A. A., Kosov D. S.* Second-order post-Hartree-Fock perturbation theory for the electron current // *Journal of Chemical Physics*. 2011. Vol. 134, no. 15. P. 154107.
17. *Dzhioev A. A., Kosov D. S.* Super-fermion representation of quantum kinetic equations for the electron transport problem // *Journal of Chemical Physics*. 2011. Vol. 134, no. 4. P. 044121.
18. *Dzhioev A. A., Kosov D. S.* Nonequilibrium configuration interaction method for transport in correlated quantum systems // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. 2014. Vol. 47, no. 9. P. 095002.
19. *Dzhioev A. A., Kosov D. S.* Superoperator coupled cluster method for nonequilibrium density matrix // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. 2015. Vol. 48, no. 1. P. 015004.
20. *Dzhioev A. A., Kosov D. S.* Nonequilibrium perturbation theory in Liouville-Fock space for inelastic electron transport // *Journal of Physics Condensed Matter*. 2012. Vol. 24, no. 22. P. 225304.

21. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I.* On the TFD treatment of collective vibrations in hot nuclei // *International Journal of Modern Physics E*. 2009. Vol. 18, no. 7. P. 1535–1560.
22. *Vdovin A. I., Dzhioev A. A.* Thermal Bogoliubov transformation in nuclear structure theory // *Physics of Particles and Nuclei*. 2010. Vol. 41, no. 7. P. 1127–1131.
23. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I.* Neutrino processes with hot nuclei in supernovae // *Acta Physica Polonica B*. 2017. Vol. 48, no. 3. P. 667.
24. *Джиоев А. А., Вдовин А. И.* Термодинамически последовательное описание фрагментации однофононных состояний в нагретых ядрах // *Письма в ЭЧАЯ*. 2021. Т. 18, № 6. С. 513–532.
25. *Vdovin A. I., Dzhioev A. A., Ponomarev V. Yu., Wambach J.* Gamow-Teller Transitions in hot nuclei // *Nuclear Theory*. 2007. Vol. 26. P. 23–33.
26. *Джиоев А. А.* Гамов-теллеровские переходы в нагретых ядрах и астрофизические приложения // Сборник трудов Двенадцатой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна, 2008. С. 114–117.
27. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Ponomarev V. Yu., Wambach J.* Unblocking mechanisms for electron captures on hot neutron-rich nuclei // Proceedings of the International Conference "Nuclear Structure and Related Topics" / Ed. by A. I. Vdovin, V. V. Voronov, R. V. Jolos. Dubna: JINR, 2009. P. 232–249.
28. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Ponomarev V. Yu., Wambach J.* Gamow-Teller transitions in hot nuclei and astrophysical applications // *BgNS Transactions*. 2009. Vol. 13. P. 47–55.
29. *Vdovin A. I., Dzhioev A. A., Ponomarev V. Yu., Wambach J.* Beta-decay and electron capture rates for hot nuclei // The 2nd International Conference on Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv 2008). 2009. P. 87–95.
30. *Vdovin A. I., Dzhioev A. A.* Thermal effects on neutrino-nucleus inelastic scattering in stellar environment // *Nuclear Theory*. 2010. Vol. 29. P. 41–51.
31. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Ponomarev V. Yu. et al.* Gamow-Teller strength distributions at finite temperature and electron capture in stellar environments // Proceedings of 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos – PoS(NIC XI). Vol. 100. 2011. P. 28.
32. *Dzhioev A. A., Vdovin A. I., Tsakstara V., Kosmas T. S.* Supernova neu-

- trino scattering on the  $^{56}\text{Fe}$  nucleus at finite temperatures // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 410, no. 1. P. 012172.
33. Tsakstara V., Kosmas T. S., Dzhioev A. A., Vdovin A. I. Neutral-current neutrino-nucleus reactions and their impact to supernova physics // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 410, no. 1. P. 012147.
34. Dzhioev A. A., Vdovin A. I. Neutrino-nucleus reactions in supernovae // EPJ Web of Conferences. Vol. 107. 2016. P. 10002.
35. Vdovin A. I., Dzhioev A. A., Stoyanov Ch. Thermal quasiparticle random-phase approximation calculations of electron capture on neutron-rich nuclei in pre-supernova environment with the Skyrme effective interaction // *Nuclear Theory*. 2019. Vol. 38. P. 162–171.