

**Отзыв официального оппонента на диссертацию
Андрея Андреевича Кожберова
«СТРУКТУРА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КУЛОНОВСКИХ
КРИСТАЛЛОВ В НЕДРАХ ВЫРОЖДЕННЫХ ЗВЕЗД»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная
астрономия**

Диссертационная работа А.А. Кожберова посвящена исследованию структуры и свойств кулоновских кристаллов, образующихся в сердцевинах белых карликов и коре нейтронных звезд. Во **введении** даётся краткий экскурс в проблему, описываются основные отличия кулоновских кристаллов от их земных аналогов, а также обосновывается **актуальность** работы. Как основная составляющая структуры белых карликов, кулоновские кристаллы и их свойства могут быть связаны, например, с параметрами сверхновых типа Ia, космологических «стандартных свечей». Тот факт, что именно они образуют кору нейтронных звезд, делает их свойства важными для интерпретации многочисленных явлений, простирающихся от пульсарных глитчей до излучения гравитационных волн и гамма-всплесков. Изучение всех этих явлений находится на переднем крае астрофизики, поэтому **актуальность** диссертационной работы сомнения не вызывает.

Основной задачей диссертационной работы было исследование структуры и свойств кулоновских кристаллов при различных условиях и предположениях: типе кристаллической решётки и её составе, возможных деформациях, наличии примесей, влияния магнитного поля и так далее. Рассмотрим подробнее структуру диссертации. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

В **первой главе** приводится основной формализм, используемый при вычислении свойств кристаллических структур. Рассматриваются различные типы решёток, в частности, деформированных и многокомпонентных, и вычисляются их энергии Маделунга. Чрезвычайно важным является проведённое исследование правила линейного смешивания (ПЛС) – приближения, часто используемого для вычисления свойств многокомпонентных кристаллов. К сожалению, оказывается, что ПЛС имеет ограниченную (хотя в некоторых случаях и высокую) точность и в каждом конкретном случае его применимость должна проверяться сравнением с результатами точных расчётов. В конце первой главы изучается влияние поляризуемости электронного фона на свойства кулоновских кристаллов.

Во **второй главе** рассчитываются фононный спектр и фононные свойства различных кристаллических решёток. Важным применением проведённых расчётов является исследование их (решёток) устойчивости. Проведено также исследование устойчивости коры нейтронной звезды. С учётом того, что многие нейтронные звёзды обладают сверхсильными магнитными полями, важным является также осуществленный учёт влияния магнитного поля на свойства решёток различного типа.

Третья глава посвящена вычислению термодинамических функций кулоновских кристаллов. Рассмотрена термодинамика одно- и многокомпонентных кристаллов с решётками разных типов, влияние поляризации электронного фона и магнитного поля. Отдельный параграф описывает важный случай кристаллов с изотопными примесями. К важнейшим полученным результатам здесь следует отнести вывод о сильном отклонении от ПЛС для теплоёмкости при низких температурах.

Последняя, **четвёртая глава** посвящена приложению полученных результатов к условиям, характерным для недр белых карликов и коры нейтронных звёзд. Для выяснения реализуемого типа решётки рассчитываются и сравниваются полные энергии одно- и многокомпонентных кулоновских кристаллов при различных температурах и величине магнитного поля. Отдельно рассматривается случай космической пылевой плазмы (кристалл Юкавы). Заканчивается глава исследованием процесса остывания белых карликов. Делается вывод о сравнительно слабом влиянии возможных неопределённостей на темп остывания.

Общие итоги по работе представлены в **Заключении**. Они соответствуют заявленным целям и задачам исследования, характеризуют заявленную научную новизну и практическую значимость работы, кратко суммируют основные результаты исследования.

Научное и прикладное значение полученных результатов заключается, в первую очередь в том, что были получены удобные аналитические выражения, позволяющие найти энергию и фононный спектр любой многокомпонентной кристаллической решётки. Эти выражения, безусловно, найдут своё применение в исследованиях структуры и свойств вырожденных звёзд. Другое важное достижение – исследование применимости ПЛС для многокомпонентных кристаллов. К сожалению (это, конечно, не вина диссертанта) здесь результат негативный: широко используемое ПЛС применимо далеко не всегда, в каждом случае его применимость нужно проверять отдельным расчётом. Также к практически важным результатам следует отнести вывод о том, что в условиях, характерных для вырожденных звёзд минимальной энергией всегда обладает ОЦК решётка.

Достоверность результатов, полученных в работе, основывается на корректном применении математического аппарата, опробованных методах моделирования, а также многочисленных сравнениях с результатами других авторов. Материалы диссертации прошли апробацию на международных и российских конференциях и семинарах. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в международных рецензируемых научных журналах. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в университетах и научных организациях, занимающихся исследованиями в области астрофизики и физики компактных звёзд. К таковым, в частности, относятся Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга при МГУ и

НИЦ «Курчатовский Институт» - ИТЭФ. Все основные результаты диссертации являются **новыми** и впервые опубликованы в работах автора.

К недостаткам работы можно отнести:

1. Значительную и важную долю диссертационной работы составляют численные результаты. Многие параметры (например, постоянная Маделунга) рассчитываются с большим количеством значащих цифр. Например, важным результатом автора является найденное отличие безразмерной постоянной ГПУ решётки $h=1.6356394$ от ранее принимаемого значения $h=\sqrt{8/3} \approx 1.63299$. Однако о самом «механизме» расчёта практически никакой информации не приводится. Лишь в единственном месте (стр. 67-68) обсуждается число узлов интегрирования, говорится, что сетка была равномерной и упоминается «ограниченность расчётных мощностей». Остаётся большое число вопросов: насколько расчёты трудоёмки (в компьютерном времени), применялись ли какие-то специальные численные методы при интегрировании, суммировании рядов, вычислении функций? Есть ли тут какие-то трудности численного характера? Что использовалось (скажем, код на FORTRAN, MatLab или что-то ещё?) Как контролировалась точность? Об этом в диссертации не сказано. Лишь при личном общении с диссертантом выяснились подробности расчётов, которые сняли последние сомнения в достоверности полученных результатов. Таким образом, это замечание не к сути результатов, а, скорее, к форме их представления в диссертации.

2. Важным результатом рассматриваемой работы является доказательство того, что ПЛС имеет ограниченную область применения. Например, с его помощью нельзя точно рассчитать модули упругости бинарного кристалла. А вот эффективный модуль сдвига – можно (стр. 37). Однако вопрос «почему?» не обсуждается. А ведь было бы интересно понять причину, по которой некоторые величины хорошо описываются ПЛС, а другие (у того же кристалла) – нет. Пока этого не сделано, придётся следовать автору: «насколько точно оно (ПЛС) выполняется, необходимо проверять при каждом конкретном использовании». Будем надеяться, что к этому вопросу автор вернётся в дальнейшем.

3. После формулы (3.9) утверждается, что «Выражение в квадратных скобках больше 1». Это не всегда так. При $\alpha \sim 1$ существует область по β , в которой это выражение меньше 1. Впрочем, это утверждение в дальнейшем нигде не используется.

4. При обсуждении рисунка 4.12 утверждается, что на нём «отчётливо видны характерные изломы» при возрастах БК 10^7 и 10^{10} лет. Рецензенту при всём старании никаких «изломов» (то есть разрывов производной) на этих кривых разглядеть не удалось. Речь, скорее, должна идти о (сравнительно плавном) изменении темпа падения температуры при указанных временах.

5. В подстрочном комментарии на стр. 145 упоминается, что при расчётах кривых остывания БК не учитывалась теплота плавления, выделяемая в процессе кристаллизации. Это странно, потому что, во-первых, у автора были на руках все данные, чтобы этот эффект учесть, а, во-вторых, сделать это было совсем несложно.

Тем не менее, отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку рассматриваемой диссертации, ее научную ценность, полезность и важность проведенных исследований. Прделана огромная работа и получено большое количество новых результатов. Диссертация буквально испещрена фразами «сделано впервые», «ранее никем не рассматривалось», «это различие никем ранее замечено не было» и т.д. Например, на стр. 69 автор походя доказывает неустойчивость ПК решётки – факт с одной стороны общепризнанный, но полноценное доказательство его в литературе отсутствует. Диссертация содержит большое количество результатов, имеющих практическую ценность. Достаточно сказать, что рецензент сам планирует использовать некоторые из этих результатов в своих исследованиях структуры и свойств маломассивных нейтронных звёзд.

Диссертация Андрея Андреевича Кожберова «Структура и термодинамические свойства кулоновских кристаллов в недрах вырожденных звёзд» выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу. Она удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук

по специальностям 01.04.02 и 01.03.02,

и.о. начальника Лаборатории Физики Плазмы и Астрофизики

НИЦ «Курчатовский Институт» - ИТЭФ

Почтовый адрес: 117218, Россия, г. Москва,

ул. Большая Черёмушkinsкая, д. 25

тел. 8 (499) 789-65-65, e-mail: yudin@itep.ru

Юдин Андрей Викторович

Подпись А.В. Юдина заверяю:

20 ноября 2018 г.

Учёный секретарь

НИЦ «Курчатовский Институт» - ИТЭФ

кандидат физико-математических наук



Васильев Валерий Васильевич