

**Отзыв официального оппонента Иосилевского Игоря Львовича
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 различных свойств кулоновских кристаллов, образующихся в недрах белых карликов и нейтронных звезд. В частности, изучаются электростатические, упругие, фоновые и термодинамические свойства различных кристаллов, рассматривается влияние поляризации электронного фона, примесей и магнитного поля на эти свойства. Представленные исследования несомненно важны и **актуальны**. Реалистические модели вещества в недрах вырожденных звезд необходимы для правильной интерпретации многих их наблюдательных проявлений от сбоев периодов пульсаров до излучения гравитационных волн. Результаты также важны для исследования упорядоченных структур в пылевой плазме.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 160 страниц и включает 104 рисунка, 20 таблиц, а список литературы — 131 наименование.

Во **введении** обоснована актуальность и научная новизна, проведенного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится краткий исторический обзор истории исследований упорядоченных структур в неидеальной плазме, примером которых являются кулоновские кристаллы. Рассчитана электростатическая энергия различных кристаллических структур: однокомпонентных и многокомпонентных; деформированных и недеформированных; с однородным электронным фоном и с поляризованным. Найдены модули упругости кулоновских кристаллов (данные расчеты необходимы для исследования поведения нейтронных звезд и белых карликов в тесных двойных системах). Проверена точность выполнения правила линейного смешивания. Показано, что модель кулоновского кристалла может быть успешно использована для описания упорядоченных структур в пылевой плазме.

Вторая глава посвящена расчету и анализу фононного спектра различных кулоновских кристаллов. Основным результатом этой главы является определение границ устойчивости коры нейтронной звезды.

В **третьей главе** рассчитаны термодинамические свойства кулоновских кристаллов. Исследовано влияние поляризации электронного фона, магнитного поля и изотопных примесей. Впервые рассмотрен случай двухкомпонентных кристаллов и проверена точность выполнения правила линейного смешивания для теплоемкости таких кристаллов.

Последняя, **четвёртая глава** посвящена приложению полученных результатов к условиям, характерным для недр белых карликов и коры нейтронных звёзд. Проведено исследование типа кристаллической решетки, который наиболее характерен для

вырожденных звезд при характерных для этих условий внешних параметрах. Кроме этого исследовано влияние неопределенностей в типе кристаллической решетки на тепловую эволюцию белых карликов. Также показано, что в зоне кристаллического состояния результаты молекулярно-динамических симуляций упорядоченной плазмы могут быть с хорошей точностью подтверждены с помощью модели кулоновского кристалла со слабо поляризованным электронным фоном.

Основные результаты, полученные в диссертации представлены в **Заключении**. Они полностью соответствуют поставленным целям и задачам исследования.

Научное и прикладное значение полученных результатов заключается, в том, что были получены аналитические выражение, позволяющие найти электростатическую энергию любого упорядоченного многокомпонентного кристалла и его фоновый спектр. Также впервые аналитически рассчитаны модули упругости двухкомпонентного кристалла и проверена точность выполнения правила линейного смешивания для различных физических величин.

Достоверность результатов, полученных в работе, не вызывает сомнений. Она основывается на сравнении с предельными случаями и результатами других авторов, полученными другими методами.

Материалы диссертации были апробированы на многих международных и российских конференциях и семинарах. Результаты диссертации опубликованы в международных рецензируемых научных журналах. Автореферат диссертации полно и правильно отражает содержание диссертации. Все основные результаты диссертации являются новыми и впервые опубликованы в работах автора.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в университетах и научных организациях, занимающихся исследованиями в области астрофизики, физики компактных звёзд, а также комплексной плазмы. К таковым последним, в частности, относятся т. наз. пылевая газоразрядная плазма («пылевой кристалл»), коллоидная плазма, КДФ-плазма продуктов сгорания и др.

Замечания к диссертационной работе А.А. Кожберова:

1) При описании свойств плотного кристалла ядер на слабо поляризованном «фоне» вырожденных электронов автор активно использует фазовую диаграмму жидкого и кристаллического состояний системы с самосогласованным («экранированным») дебаевским потенциалом (т. наз. диаграмма Хамагучи [28]), совпадающем по форме с т. наз. потенциалом Юкавы, но существенно зависящим от термодинамических параметров – плотности и температуры. Имея дело со «звездными» приложениями, автор использует идеологически родственный эффективный потенциал с экранированием Томаса-Ферми. По мнению оппонента у этого подхода два недостатка. Во-первых, диаграмма Хамагучи, вопреки декларации [28], построена не для *двухкомпонентной* системы с *притяжением* и с дебаевским или Томас-Фермиевским эффективным ион-ионным потенциалом, а для *чисто отталкивательной* системы с потенциалом Юкавы, причем с *фиксированным радиусом экранирования* в последнем. И даже для этой системы межфазные границы в работе [28]

получены некорректно – из равенства свободных энергий *Гельмгольца*, в то время как истинные условия фазового равновесия требуют равенства свободных энергий *Гиббса* (т.е. равенства *давлений* и *химических потенциалов*). По этой причине межфазные границы на диаграмме Хамагучи – это *одномерные кривые* в то время как обязаны быть *двумерными зонами* (зонами двухфазных состояний) из-за скачка плотности на границе. Каковы параметры этой полосы и каков знак этого скачка – автор не исследует, как впрочем и сам автор [28] и цитирующие его последователи.

2) Во-вторых, диаграмма Хамагучи игнорирует *притяжение* между макро- и микроионами (в «обычной» плазме) и ионами и фоном в плазме компактных звезд. Тем самым полностью исключается возможность самопроизвольного расслоения на фазы различной плотности. В «обычной» плазме показано (см. напр. [О-1]) наличие обширной области на диаграмме Хамагучи [28] с *отрицательной изотермической сжимаемостью*, означающей невозможность существования в этой области однородного кристаллического и флюидного состояний и принудительный распад системы на фазы разной плотности.

3) Вторая традиционная ошибка – это некритичное использование, пусть и *отталкивательного*, эффективного потенциала, включающего явную зависимость от термодинамических параметров, прежде всего – от плотности, что принципиально важно для анализа термодинамической устойчивости системы, а также и от температуры, что существенно для правильного описания теплоемкости. В частности, для «обычной» плазмы с *дебаевским потенциалом* прямым численным МС-моделированием показано [О-2] появление обширного фазового расслоения флюид-флюид с верхней критической точкой. Проведенный недавно анализ границ этого перехода показал [О-3], что большая часть области кристаллического состояния на диаграмме Хамагучи [28] не может реализоваться, поскольку находится в *двухфазной зоне* указанного выше перехода флюид-флюид, обязанного своим происхождением исключительно наличию явной зависимости дебаевского потенциала от плотности. Можно предположить, что в приложении к плазме компактных звезд параметры обсуждаемого фазового перехода флюид-флюид будут гораздо скромнее из-за жесткости фона вырожденных электронов. Но сам факт его появления кажется более чем вероятным.

4) При анализе свойств бинарных смесей кулоновских кристаллов автор, следуя устоявшейся традиции, активно использует так называемое Правило Линейного Смешивания (LMR). Следует заметить, что приближение LMR в сочетании с принятым автором приближением несжимаемого фона электронов полностью исключает возможность реализации так называемого *неконгруэнтного сценария* [О-4] для всех без исключения фазовых расслоений в системе, прежде всего для плавления, а также для появления специфических зон т. наз. несмесимости (immiscibility) в бинарной ионной смеси, в том числе и смеси кристаллов.

5) Круг рассмотренных тем и полученных в работе А. Кожберова результатов более чем достаточен для кандидатской диссертации, и поэтому данное последнее замечание следует рассматривать скорее как пожелание на будущее, чем как упрек в упущенных возможностях. В работе А. Кожберова осталась не исследованной принципиальная проблема возможности *стеклования* переохлажденного кулоновского флюида. Согласно гипотезе Хью де-Витта [О-5] кулоновский потенциал *слишком «мягкий»*, вследствие чего кулоновская система зарядов одного знака на фоне в принципе не способна стекловаться.

Также за пределами исследования в работе А. Кожберова остались не только параметры, но сама принципиальная возможность реализации двух экзотических полукристаллических структур: Первая – это т. наз. *квазикристаллическая трехмерная* фаза кулоновской системы ионов на фоне [О-6], в которой (фазе) отсутствует трансляционный порядок, но все еще сохраняется дальний *ориентационный* порядок. Такая квазикристаллическость определенно известна в двумерных системах, но вопрос о возможности ее реализации в трехмерных системах все еще остается открытым.

Вторая – это возможность т. наз. *двухстадийного* плавления (и замерзания) бинарного кристалла ионов на фоне, представляющего собой две подрешетки, «вдвинутые» друг в друга. В этом сценарии вначале плавится более «слабая» подрешетка, а лишь затем - более «сильная». При этом появляется промежуточная *«полукристаллическая»* фаза, когда один сорт ионов (с меньшим зарядом) уже «течет», как жидкость, в то время как второй сорт (с большим зарядом) еще «стоит», как кристалл. В «обычной» химически реагирующей плазме такое полукристаллическое состояние известно как *суперионная* фаза. Она известна, например, в плотной высокотемпературной системе уран-кислород [О-7], а также она активно изучается в термодинамике планет-гигантов для плотной высокотемпературной системы водород-кислород (H_2O) мегабарного диапазона давлений (напр. [О-8]).

Сделанные замечания не умаляют ценности диссертация А. Кожберова и её высокой научной значимости.

Подводя итог, можно заключить, что диссертация А.А. Кожберова «Структура и термодинамические свойства кулоновских кристаллов в недрах вырожденных звезд» 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 ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук

по специальности «Физика и химия плазмы», лаборатория экстремальных энергетических

Главный научный сотрудник ОИВТ РАН /Профессор МФТИ

Объединенный Институт Высоких Температур РАН,

Почтовый адрес: Ижорская ул. 13/2, 125412, Москва

тел. +7(910) 4069314 // e-mail: ilios@ihed.ras.ru

Иосилевский Игорь Львович

воздействий

Подпись д.ф.-м.н. И.Л. Иосилевского заверяю:

Ученый секретарь ОИВТ РАН

Д.ф.-м.н.

26 ноября 2018 г.

=====



Р.Х. Амиров

Приложение. Список цитированных в отзыве публикаций:

- [O-1] Martynova I.A., Iosilevskiy I.L., *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 432 (2016)
- [O-2] Dijkstra M., Ren'e van Roij, *J. Phys. Condens. Matter* **10**, 1219 (1998)
- [O-3] Мартынова И.А., Иосилевский И.Л., Научно-координционная Сессия РАН "Исследования неидеальной плазмы". Тезисы, Москва. 19-20 ноября 2018 г, / <http://www.ihed.ras.ru/npp2018/>
- [O-4] Iosilevskiy I., *Acta Physica Polonica B*, **3**, 589 (2010) / [arXiv:1005.4186](https://arxiv.org/abs/1005.4186)
- [O-5] Hugh DeWitt, (private communication)
- [O-6] Беданов В.М., Гадияк Г.В., Лозовик Ю.Е., Сб.: «Уравнение состояния в экстремальных условиях», Ред. Гадияк Г.В.; Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1981, с. 39.
- [O-7] Ronchi C., Iosilevskiy I., Yakub E. // *Equation of State of Uranium Dioxide* / Springer, Berlin, 2004, 366 pp.
- [O-8] French M., Desjarlais M. and Redmer R., *Phys. Rev. E* **93**, 022140 (2016)