

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 524.3+535.3+537.6+539.171

СЕРЫЙ
Алексей Игоревич

ЭФФЕКТЫ СПИНОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
В ИНТЕНСИВНЫХ ПОЛЯХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Минск, 2015

Работа выполнена на кафедре теоретической физики учреждения образования «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»

Научный руководитель:

Тихомиров Виктор Васильевич

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ядерной оптики и космомикрофизики, НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты:

Левчук Михаил Иванович

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Центра теоретической физики Института физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси

Поплавский Александр Леонидович

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация:

ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований - Сосны» НАН Беларуси

Защита состоится 20 ноября 2015 г. в 16.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 в Институте физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68, тел. 284-15-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Автореферат разослан 2 октября 2015 г.

Учёный секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат физико-математических наук

Ю.П. Выблый

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей особенностью астрофизических условий является возможность прямого или косвенного наблюдения в них эффектов, которые в земных лабораториях либо недостижимы, либо наблюдаются с совершенно иными количественными и качественными характеристиками. Это может быть обусловлено тем, что в астрофизических условиях возможно наличие высоких плотностей и интенсивных полей различной природы. Важными примерами эффектов, которые рассматриваются в данной диссертационной работе, являются: 1) гамма-оптический эффект поворота плоскости поляризации фотона на поляризованных электронах; 2) ядерный ферромагнетизм (псевдомагнетизм); 3) обычный (обменный) ферромагнетизм.

Первый эффект был теоретически предсказан в 1965 г. В.Г. Барышевским и В.Л. Любошицем, экспериментально обнаружен в 1970-е гг (поэтому далее будем называть его эффектом Барышевского-Любошица). В земных условиях наблюдается в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах. В космических условиях на его характеристики должны существенно влиять интенсивные магнитные поля.

Второй эффект был теоретически предсказан в 1964 г. В.Г. Барышевским и М.И. Подгорецким, экспериментально обнаружен в 1970-е гг. В земных условиях наблюдается при рассеянии нейтронов на поляризованных по спину атомных ядрах. В астрофизических условиях возможен при концентрациях рассеивателей, намного превосходящих лабораторные значения, по порядку величины равные 10^{22} - 10^{23} см⁻³.

Магнитные явления, связанные с третьим эффектом, известны с древних времен, эффект был теоретически объяснен в 1892 г. Б.Л. Розингом, в 1907 г. П. Вейссом. В земных условиях возможен для электронного газа. В астрофизических условиях при концентрациях вещества, по порядку величины превышающих земные значения 10^{22} - 10^{23} см⁻³, должен быть возможным для протонного газа.

Актуальность выбранных направлений исследования связана с астрофизическими приложениями указанных эффектов. В настоящее время идет быстрое развитие экспериментальной базы средств наблюдения астрофизических объектов. К ним относятся, в частности, звездные спектрополяриметры, позволяющие определять величину индукции магнитного поля в кило- и мега-гауссовом диапазоне по эффекту Зеемана. Это дает широкие возможности для сопоставления численных характеристик моделей астрофизических объектов с данными наблюдений.

Первый эффект связан с изучением характеристик околосредной среды, источников рентгеновского и γ -излучения. Математические формулы, полученные ранее для описания данного эффекта, применимы лишь в случае, когда магнитным полем можно пренебречь. При наличии интенсивного магнитного

поля все расчеты необходимо проделать заново, причем меняется и сам алгоритм расчета.

Второй эффект связан с проблемой происхождения магнитных полей нейтронных звезд и Сверхновых II типа, а также с влиянием спиновой поляризации нуклонов на сечение взаимодействия нейтрино с веществом. При этом вопрос о спиновой поляризации нуклонов ранее исследовался преимущественно при плотностях порядка плотности ядерного насыщения и выше, а результаты, полученные различными методами и с использованием различных межнуклонных потенциалов, носят противоречивый характер.

Третий эффект связан с проблемой происхождения магнитных полей Сверхновых II типа (как и второй эффект) и водородных белых карликов (у которых значение индукции магнитного поля может по порядку величины достигать 10^9 Гс). До сих пор происхождение магнитных полей белых карликов и Сверхновых II типа объяснялось другими способами, без учета ферромагнетизма.

Первый эффект имеет аналогию с оптической гиротропией, исследованием которой занимался Ф.И. Фёдоров. При этом, в отличие от гиротропии, эффект не связан со структурой молекул вещества или их пространственным расположением.

Проблема спонтанной спиновой поляризации нуклонов, связанная со вторым и третьим эффектами, до настоящего времени при плотностях, заметно уступающих ядерным, в литературе детально не исследовалась. Известны лишь немногие работы, где затрагивается вопрос о существовании нейтронно-протонной смеси и ее агрегатном состоянии при плотностях ниже ядерных. Большое количество работ посвящено проблеме жидкого металлического водорода, в т.ч. попыткам (пока неудачным) его получения в лабораториях.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию вышеуказанных трех эффектов в астрофизических условиях. Исследуемыми структурами являются релятивистская плазма в квантующем магнитном поле с поляризованными по спину электронами, верхние слои Сверхновых II типа и верхние слои белых карликов, содержащих водород, т.е. принадлежащих к спектральным классам DAH и DAP.

Идея возможности астрофизического приложения первых двух эффектов принадлежит В.Г. Барышевскому и В.В. Тихомирову. Соответствующая идея применительно к 3-му эффекту сформулирована автором диссертации самостоятельно.

В диссертации предложены: способ определения концентрации вырожденных электронов в звездных атмосферах при известных значениях индукции магнитного поля звезд, а также углов поворота плоскости поляризации рентгеновского излучения на различных частотах; метод, позволяющий оценить величину индукции магнитного поля, которое может возникать при взрывах Сверхновых II типа; механизм, объясняющий возникновение магнитных полей с индукцией до 10^4 Гс в одиночных водородосодержащих белых карликах и с ин-

дукцией до 10^9 Гс в таких же белых карликах в тесных двойных системах с аккрецией водорода на поверхность белых карликов со стороны более массивного компаньона.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Исследования, составившие содержание диссертации, выполнялись в 2000-2014 годах. Тема диссертации соответствует следующему направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь:

- физика фундаментальных взаимодействий, ядерных реакций, квантовых систем и топологически нетривиальных объектов.

Изложенные в диссертации результаты были получены при участии соискателя в выполнении следующих заданий программ и проектов:

- Тема: «Свойства поляризованных ферми-газов и их приложения для описания сверхплотного замагниченного вещества» (2001, № ГР 2001543).

- ГПФИ «Микромир и вещество» (2001-2005). Тема: «Физические свойства сверхплотных систем микрочастиц, поляризованных магнитным полем» (2001-2005, № ГР 2001512).

- ГПФИ «Физика взаимодействий» (2001-2005). Тема: «Системы взаимодействующих фермионов в магнитном поле» (2001-2005, № ГР 2001534).

- МВПФИ «Ядерная оптика» (2000). Тема: «Влияние ядерного псевдомагнитного поля на микропроцессы в сверхплотном веществе» (2000, № ГР 2000684).

- «Поля и частицы» (2006-2010; не фин.). Тема: «Поля и частицы: квантовые свойства и физические приложения» (2006-2010, № ГР 20061181).

- ГПНИ «Конвергенция» (2011-2015). Тема: «Релятивистская плазма в магнитном поле» (2011, № ГР 20110649).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является исследование спонтанной спиновой поляризации нуклонов в ядерном веществе в плотных астрофизических объектах с возникновением намагниченности; проявления оптической активности плазмы при достаточно большой энергии фотонов, высокой степени ионизации плазмы, и при наличии квантующего магнитного поля; структуры атмосфер и магнитных полей нейтронных звезд и белых карликов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) найти обобщенное выражение для индукции ядерного псевдомагнитного поля в системе нейтронов и протонов в приближении, когда амплитуды нуклон-нуклонного рассеяния заменяются соответствующими длинами рассеяния;

2) получить формулу критерия ферромагнетизма Стонера для крайне вырожденных электронно-протонного газа и смеси электронного, нейтронного и протонного газов и найти условия понижения энергии этих систем при конечных значениях спиновой поляризации нуклонов;

3) вывести формулу критерия Стонера для невырожденных электронно-протонного газа и смеси электронного, нейтронного и протонного газов и найти условия понижения энергии рассматриваемых систем при конечных значениях спиновой поляризации нуклонов;

4) для эффекта Барышевского-Любошица получить формулу для зависимости угла вращения плоскости поляризации рентгеновского или гамма-фотона на единицу длины пробега в поляризованном по спину электронном газе от индукции внешнего квантующего магнитного поля, от импульса электрона, от угла между волновым вектором фотона и вектором индукции внешнего магнитного поля с учетом усреднения по импульсам вырожденных электронов, приводящего к появлению зависимости от концентрации электронов.

Объектами исследования в диссертационной работе являются:

- электронно-нейтронно-протонная и электронно-протонная плазма в вырожденном и невырожденном состояниях;
- линейно поляризованный рентгеновский фотон, движущийся в поляризованном по спину релятивистском электронном газе в квантующем магнитном поле.

Предметами исследования являются:

- ферромагнетизм электронно-протонной и электронно-нейтронно-протонной плазм в вырожденном и невырожденном состояниях;
- эффект Барышевского-Любошица в условиях квантующего магнитного поля.

Выбор предметов и объектов исследования связан с наличием в настоящее время большого объема наблюдательных астрономических данных, требующих уточнения моделей взрывов Сверхновых II типа, объяснения происхождения магнитных полей белых карликов, разработки методов исследования структуры атмосфер и магнитных полей нейтронных звезд и белых карликов.

Реализация поставленных задач осуществлялась на основе использования методов статистической термодинамики и квантовой электродинамики.

Научная новизна

Научная новизна диссертационных исследований заключается в следующем.

1. Впервые обобщено аналитическое выражение для индукции ядерного псевдомагнитного поля на случай рассеяния любых нуклонов на любых нуклонах (нейтронов на протонах, нейтронов на нейтронах, протонов на протонах, протонов на нейтронах).

2. Изучен вопрос о возможности возникновения ферромагнетизма нуклонной среды в области более низких плотностей по сравнению с рассматривавшимися ранее.

3. Впервые в рамках представления о ядерном псевдомагнетизме рассмотрен вопрос о возникновении ферромагнетизма в нейтронно-протонной системе.

4. Обобщен критерий Стонера на нейтронно-протонную систему (в т.ч. с учетом обменной и корреляционной кулоновской энергии), ранее полученный в литературе лишь для 1-компонентного Ферми-газа с контактным взаимодействием.

5. Впервые в рамках механизма, основанного на ферромагнетизме нуклонов, рассмотрен вопрос о происхождении магнитных полей Сверхновых II типа, а также белых карликов спектральных классов DAH и DAP.

6. Для эффекта Барышевского-Любошица получена формула для угла вращения плоскости поляризации на единицу длины пробега в поляризованном по спину электронном газе в присутствии внешнего квантующего магнитного поля; ранее аналогичная формула была получена лишь для случая, когда магнитное поле не оказывает заметного влияния на структуру атомов, а частота фотона значительно больше циклотронной.

Положения, выносимые на защиту

1. Общее выражение для расчета ядерного псевдомагнитного поля, действующего на медленный протон или нейтрон, а также соотношение для направлений обычного магнитного поля и ядерного псевдомагнитного поля, которые могут быть использованы при разработке моделей Сверхновых II типа и нейтронных звезд и описания создаваемых ими магнитных полей.

2. Доказательство выполнения условия возникновения ферромагнетизма для вырожденной электронно-нуклонной плазмы в двух областях концентраций протонов n_p и нейтронов n_n : $n_p \sim 10^{30}-10^{31} \text{ см}^{-3}$ (значения n_n – любые) и $n_p \sim n_n \sim 10^{35}-10^{36} \text{ см}^{-3}$, что дает возможность предложить новый механизм возникновения магнитных полей в верхних слоях белых карликов и Сверхновых II типа при моделировании их в приближении вырожденной водородной и электронно-нуклонной плазмы.

3. Предсказание возможности возникновения ферромагнетизма в невырожденных водородной и электронно-нуклонной плазме с концентрациями до значений порядка $n_p \sim 10^{26} \text{ см}^{-3}$, $n_n \sim 10^{26} \text{ см}^{-3}$ и температурами до значений порядка 10^4 К , что дает возможность предложить новый механизм возникновения магнитных полей с индукцией $B \sim 10^4 \text{ Гс}$ в верхних слоях белых карликов и в верхних остывших слоях Сверхновых II типа.

4. Аналитическая зависимость угла гамма-оптического вращения плоскости поляризации фотона на поляризованных электронах от индукции магнитного поля B , концентрации электронов n_e , частоты фотона ω , угла θ между волновым вектором фотона и вектором индукции магнитного поля и ее численное моделирование, что дает возможность оценивать степень ионизации космической плазмы, находящейся в интенсивных магнитных полях, через сравнение

углов вращения плоскости поляризации фотонов на различных частотах по формулам для эффектов Фарадея и Барышевского–Любошица, а также исследовать структуры атмосфер и магнитных полей нейтронных звезд и белых карликов.

Личный вклад соискателя

В постановке задач, выборе объектов и предметов исследования, обсуждении результатов и выводов помимо научного руководителя д.ф.-м.н. проф. В.В. Тихомирова и д.ф.-м.н. проф. В.Г. Барышевского (НИИЯП БГУ) активно участвовал и соискатель. В обсуждении результатов и выводов также участвовали научные сотрудники НИИ ЯП БГУ к. ф.-м.н. С.Л. Черкас, к. ф.-м.н. Ю.А. Целков, к. ф.-м.н. С.Э. Сягло. Изложенные в диссертации расчеты и результаты проделаны и получены соискателем лично.

Результаты, вошедшие в опубликованные совместные работы и полученные другими соавторами, не включены в диссертацию.

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертационной работы докладывались на VII межвузовской научно-методической конференции молодых ученых (Брест, 2005 г.), на IV, V республиканских научно-методических конференциях «Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии» (Брест, 2012, 2013 гг.), на республиканской научно-методической конференции «Проблемы совершенствования подготовки будущих учителей физики и астрономии в университете», посвященной 100-летию со дня рождения С.М. Жемчужного (Брест, 2008 г.), на межвузовской научно-методической конференции «Актуальные научные проблемы теоретической и экспериментальной физики, астрономии и космонавтики», посвященной 50-летию первого полета человека в космос (Брест, 2011 г.), на межвузовской научно-методической конференции «Научно-методические проблемы современной физики», посвященной 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова (Брест, 2011 г.), на X, XI, XII Международных Гомельских Школах-семинарах «Actual Problems of Microworld Physics» (Гомель, 2009, 2011, 2013 гг.), Международной Летней Школе «Nuclear Theory And Astrophysical Applications» (Дубна, 2011 г.), XII и XIII Всеукраинских школах-семинарах по статистической физике и теории конденсированного вещества (Львов, 2012, 2013 гг.), III и IV Международных конференциях молодых ученых «Modern Problems of Theoretical Physics» (Киев, 2011, 2012 гг.), Международной конференции молодых ученых «Problems of Theoretical Physics» (Киев, 2013 г.), Международной конференции в честь 100-летия со дня рождения Я.Б. Зельдовича «Subatomic particles, Nucleons, Atoms, Universe: Processes

and Structure» (Минск, 2014 г.), LXIV Международной конференции «Nucleus 2014» (Минск, 2014 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 24 научных работах, включающих 10 статей в рецензируемых журналах в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 4,1 авторского листа), 4 статьи в сборниках материалов и трудов международных, республиканских, межвузовских научных конференций, 7 тезисов, 3 препринта.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, в которых изложены результаты исследования, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 137 страниц, в том числе 12 рисунков на 9 страницах и 30 таблиц на 27 страницах. Библиографический список включает 135 наименований (111 использованных источников, 24 публикации соискателя).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обосновывается актуальность и сформулированы цели исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** проводится обзор современного состояния исследований по двум проблемам: 1) проблеме спонтанной спиновой поляризации нуклонов и ее астрофизическому приложению – формированию магнитных полей у Сверхновых II типа и объяснению существования магнитных полей до 10^9 Гс у белых карликов; 2) проблеме эффекта Барышевского–Любошица в квантующем магнитном поле и ее астрофизическому приложению – возможности оценки концентрации плазмы в магнитных полях порядка 10^{10} Гс и выше. Обобщение термина «ферромагнетизм» вынесено в приложение [12].

В **Главе 2** рассматривается проблема спонтанной спиновой поляризации вырожденных нуклонов.

В **разделе 2.1** данная проблема изучается в рамках концепции ядерного псевдомагнитного поля.

В *подразделе 2.1.1* на основе выражения для ядерного псевдомагнитного поля, действующего на нейтрон со стороны поляризованных протонов [2], получено соотношение между направлениями обычного магнитного и ядерного псевдомагнитного полей, действующих на заданный нуклон со стороны нуклонов определенного вида [22], а также обобщенное аналитическое выражение

для ядерного псевдомагнитного поля, действующего на нуклон сорта « j » со стороны поляризованных нуклонов сорта « i »:

$$\vec{B}_{\varphi}^{ij} = -\text{sign}(T_{3i}T_{3j}) \frac{\pi\hbar^2}{m_{ij}^*|\mu_j|} n_i |\beta_{ij}| \vec{q}_{0i}, \quad (1)$$

где T_{3i} , T_{3j} – проекции изоспинов нуклонов, m_{ij}^* – приведенная масса 2 нуклонов, μ_j – собственный магнитный момент нуклона (в единицах ядерного магнетона), n_i – концентрация нуклонов, \vec{q}_{0i} – вектор поляризации собственных магнитных моментов, β_{ij} зависит от разности амплитуд рассеяния нуклона сорта « j » на нуклоне сорта « i » в синглетном и триплетном состояниях.

В *подразделе 2.1.2* показано, что в результате спиновых флуктуаций в нейтронно-протонном веществе при определенных условиях становится энергетически выгодным лишь один тип поляризации, который можно назвать либо ферромагнитным, либо антиферроспиновым, что соответствует сонаправленности векторов поляризации собственных магнитных моментов протонов и нейтронов и противоположной направленности векторов их спиновой поляризации [2, 11]. При этом одновременная полная поляризация протонов и нейтронов предсказывается при концентрациях $n_p \sim n_n \sim 10^{36} \text{ см}^{-3}$.

В **разделе 2.2** проблема спонтанной спиновой поляризации нуклонов исследуется в рамках критерия Стонера и через минимум энергии системы при конечных значениях спиновой поляризации нуклонов. При этом, как и в разделе 2.1, показано, что поляризация нейтронно-протонной системы может иметь лишь ферромагнитный (антиферроспиновый) тип.

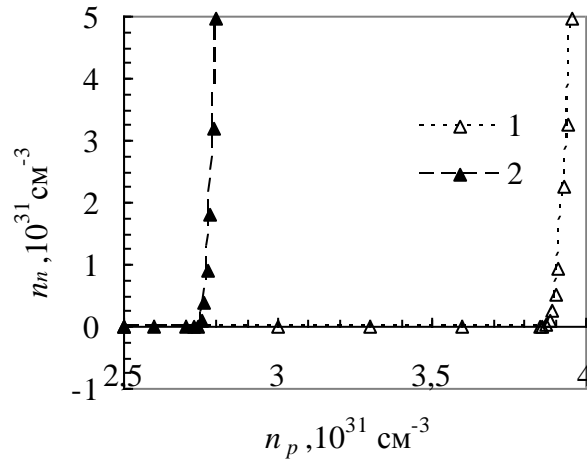
В *подразделе 2.2.1* показана эквивалентность подходов к рассматриваемой проблеме в рамках критерия Стонера и в рамках представления о ядерном псевдомагнетизме при учете лишь ядерного взаимодействия между нуклонами, которое считается контактным [4].

В *подразделах 2.2.2 и 2.2.3* критерий Стонера с учетом лишь контактного ядерного взаимодействия между нуклонами находится, соответственно, через условие возникновения полюсов у магнитной восприимчивости и через условие отрицательности флуктуаций энергии при спиновых флуктуациях [1]. В разделе 2.2.4 находятся поправки к полученному критерию Стонера, обусловленные учетом обменной и корреляционной кулоновской энергии протонов. В результате получено выражение для критерия ферромагнетизма Стонера [10]:

$$v_{0n}v_{0p} \left(\left(g_{np}^{\uparrow\downarrow} - g_{np}^{\uparrow\uparrow} \right)^2 - \tilde{g}_{pp}g_{nn} \right) + g_{nn}v_{0n} + \tilde{g}_{pp}v_{0p} - 1 \geq 0,$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{pp} &= g_{pp} + \frac{2\pi e^2}{(3\pi^2 n_p)^{2/3}} - \frac{2c\alpha\hbar}{(3\pi^2)^{2/3} n_p^{2/3}} \int_0^{+\infty} P(s) ds + \frac{\pi\hbar^2 G}{4m_p n_p^{1/3} (3\pi^2)^{1/3}}, \\ G &= \int_0^{+\infty} \left(\ln\left(1 + \frac{P(s)}{X}\right) + \frac{P(s)}{P(s)+X} \right) ds, \quad X = \frac{\pi(3\pi^2 n_p)^{1/3} \hbar}{4m_p c \alpha}, \quad \alpha = \frac{e^2}{\hbar c}, \\ v_{0i} &= \frac{m_i (3\pi^2 n_i)^{1/3} \hbar}{2\pi^2 \hbar^3}, \quad i = p, n; \quad P(s) = 1 - s \cdot \text{arctg}\left(\frac{1}{s}\right), \\ J_{ij} &= \frac{\pi\hbar^2}{m_{ij}^*}, \quad g_{np}^{\uparrow\uparrow} = 2J_{np} a_t, \quad g_{np}^{\uparrow\downarrow} = J_{np} (a_t + a_s), \quad g_{ii} = J_{ii} a_i, \quad i = n, p, \end{aligned} \quad (2)$$

где a_t , a_s – триплетная и синглетная длина нейтронно-протонного рассеяния, a_p , a_n – синглетные длины протонно-протонного и нейтронно-нейтронного рассеяния.

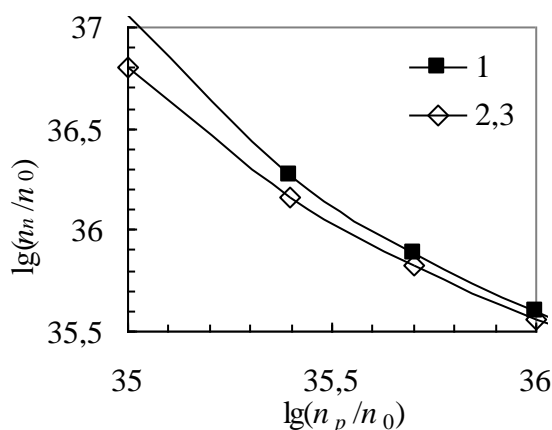


Области выше соответствующих кривых соответствуют поляризованным состояниям. Горизонтальные линии соответствуют $n_n = 0$. 1 – помимо ядерного взаимодействия дополнительно учтена обменная кулоновская протонная поправка, 2 – помимо обменной поправки учтена еще и корреляционная

Рисунок 1. – Область ферромагнитной (антиферроспиновой) поляризации для низких плотностей

Решения системы (2) представлены на рисунках 1 и 2 [7]. Результаты показывают, что: а) в случае учета лишь ядерного взаимодействия имеется только область ферромагнетизма на рисунке 2, при концентрациях $\sim 10^{35} - 10^{36} \text{ см}^{-3}$; б) при учете ядерной и обменной кулоновской энергии область ферромагнетизма на рисунке 2 несколько расширяется, а также появляется область на рисунке 1, при концентрациях $\sim 10^{31} \text{ см}^{-3}$; в) при учете ядерной, а также обменной и кор-

реляционной кулоновской энергии область на рисунке 2 практически не меняется по сравнению со случаем учета ядерной и обменной кулоновской энергии, а область на рисунке 1 несколько уменьшается по сравнению со случаем учета ядерной и обменной кулоновской энергии. Таким образом, обменная кулоновская энергия благоприятствует образованию поляризованных состояний, а корреляционная энергия несколько ослабляет поляризацию, хотя в целом ситуация остается более благоприятной по сравнению с учетом только контактного ядерного взаимодействия [16, 21].



Области выше соответствующих кривых соответствуют поляризованным состояниям. 1 – модель, в которой учтено только контактное ядерное межнуклонное взаимодействие, 2 – дополнительно учтена обменная кулоновская протонная поправка, 3 – помимо обменной поправки учтена еще и корреляционная.

Рисунок 2. – Область ферромагнитной (антиферроспиновой) поляризации для высоких плотностей ($n_0 = 1 \text{ см}^{-3}$)

В *подразделе 2.2.5* показано, что при конечных степенях поляризации протонов и нейтронов с преимущественной сонаправленностью собственных магнитных моментов происходит понижение энергии нейтронно-протонной системы по сравнению с неполяризованным состоянием. При этом исследовались концентрации нуклонов, соответствующие рисунку 1. Показано, что индукция магнитных полей, возникающих в результате поляризации, по порядку величины может достигать 10^9 Гс, что согласуется с данными наблюдений для некоторых белых карликов [8].

В *подразделе 2.2.6* обосновано пренебрежение учетом ферромагнетизма электронов. Показано, что при рассматриваемых плотностях он не должен проявляться, если к электронам применить формулы (2), исключив из них ядерное взаимодействие и заменить массу протона на массу электрона [6].

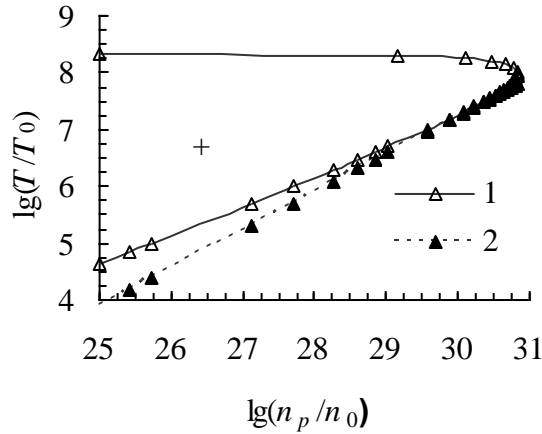
В **Главе 3** рассматривается проблема спонтанной спиновой поляризации невырожденных нуклонов.

В **разделе 3.1** рассматривается критерий Стонера для невырожденного водорода.

В подразделе 3.1.1 выясняется, в каких диапазонах температур и плотностей водород можно считать одновременно невырожденным, металлическим и жидким. Показано, что водород во внешних слоях (с концентрацией $\sim 10^{25} \text{ см}^{-3}$) горячих ($T = 7 \cdot 10^4 \text{ К}$) белых карликов удовлетворяет этим условиям. При аккреции водорода на поверхность белого карлика с более массивного компаньона в тесных двойных системах температура повышается, поэтому требуемые условия существования водорода в указанном состоянии должны выполняться при более высоких плотностях [6].

В подразделе 3.1.2 получен критерий Стонера для невырожденного жидкого металлического водорода через условие отрицательности флуктуаций плотности полной энергии вследствие спиновых флуктуаций [18]:

$$\frac{3\sqrt{\pi}\hbar c(kT)^{3/2}}{4(m_p c^2)^{1/2}} - \alpha\hbar ckT + \frac{3\pi\alpha^{3/2}(\hbar c)^{5/2}n_p^{1/2}}{2(m_p c^2)^{1/2}} + (kT)^2 \left(\frac{1}{|a_n|} + \frac{3r_{0p}m_p kT}{\hbar^2} \right)^{-1} < 0, \quad (3)$$



Область ферромагнетизма ограничена кривой 1 и помечена знаком «+»; кривая 2 соответствует $kT = 7.5\mathcal{E}_{Fp}$

Рисунок 3. – Критерий Стонера для невырожденного протонного газа, согласно (3) ($n_0 = 1 \text{ см}^{-3}$, $T_0 = 1 \text{ К}$)

где r_{0p} – эффективный радиус протонно-протонного взаимодействия (остальные обозначения см. в (2)). Численно (3) выполняется вплоть до $T \sim 10^8 \text{ К}$ и $n_p \sim 10^{30} \text{ см}^{-3}$. Результаты представлены на рисунке 3 [24].

В разделе 3.2 рассмотрена проблема ферромагнетизма невырожденного нейтронно-протонного вещества.

В *подразделе* 3.2.1 получено выражение для критерия Стонера для невырожденного нейтронно-протонного вещества через условие отрицательности флуктуаций плотности полной энергии вследствие спиновых флуктуаций [10]:

$$\begin{aligned}
& \nu_{0n}^T \nu_{0p}^T \left(\left(g_{np}^{T\uparrow\downarrow} - g_{np}^{T\uparrow\uparrow} \right)^2 - \tilde{g}_{pp}^T \tilde{g}_{nn}^T \right) + \tilde{g}_{nn}^T \nu_{0n}^T + \tilde{g}_{pp}^T \nu_{0p}^T - 1 > 0, \\
& \nu_{0i}^T = \frac{2m_i^{3/2} \sqrt{kT}}{3\pi^{3/2} \hbar^3}, \quad g_{np}^{T\uparrow\downarrow} = -\frac{\pi \hbar^2}{m_{np}^*} (f_s(q_{np}) + f_t(q_{np})), \quad g_{np}^{T\uparrow\uparrow} = -\frac{2\pi \hbar^2}{m_{np}^*} f_t(q_{np}), \\
& \frac{1}{f_i(q_{np})} = -\frac{1}{a_i} + \frac{1}{2} r_{0i} \left(\frac{q_{np}}{\hbar} \right)^2, \quad i = t, s; \quad q_{np} \approx \sqrt{3(m_n + m_p)kT}, \\
& \tilde{g}_{nn}^T = g_{nn}^T, \quad \tilde{g}_{pp}^T = g_{pp}^T + \frac{2\alpha \pi (\hbar c)^3}{m_p c^2 kT} - \frac{3\pi^2 \alpha^{3/2} (\hbar c)^{9/2} n_p^{1/2}}{(m_p c^2)^{3/2} (kT)^2}, \quad g_{ii}^T = -\frac{2\pi \hbar^2}{m_i} f_i(q_i), \\
& \frac{1}{f_i(q_i)} = -\frac{1}{a_i} + \frac{1}{2} r_{0i} \left(\frac{q_i}{\hbar} \right)^2, \quad i = n, p; \quad q_i \approx \sqrt{6m_i kT}, \tag{4}
\end{aligned}$$

где r_{0i} – эффективные радиусы соответствующего нуклон-нуклонного рассеяния. В данном приближении отсутствует зависимость от n_n , а результаты по порядку величины не отличаются от полученных в подразделе 3.1.2. Тип поляризации, как и в случае вырождения, относится к ферромагнитному (антиферроспиновому) типу.

В *подразделе* 3.2.2 рассмотрен вопрос о понижении энергии невырожденной нейтронно-протонной системы при конечной спиновой поляризации ферромагнитного (антиферроспинового) типа. Показано, что при $T \sim 10^4$ К и $n_p \sim 10^{25} - 10^{26}$ см⁻³ получается $p_{0p} \sim 0.1 - 1$, $p_{0n} < 0$, при этом $|p_{0n}| \sim 10^{-4} p_{0p}$, и данный результат слабо зависит от n_n в диапазоне значений n_n от 0 до 10^{26} см⁻³. Индукция возникающего поляризованного магнитного поля по порядку величины не превосходит 10^4 Гс [8].

В **разделе** 3.3 обсуждается вопрос о значении индукции магнитных полей в белых карликах и Сверхновых II типа за счет спиновой поляризации нуклонов.

В *подразделе* 3.3.1 показано, что в одиночных водородных белых карликах магнитное поле, возникающее только за счет спиновой поляризации во внешних слоях, находящихся в жидком или газообразном состоянии, не может превышать 10^4 Гс. Предложен механизм, согласно которому магнитное поле в остывшем водородном белом карлике, попавшем в тесную двойную систему, может быть усилено до значений 10^9 Гс. Для этого со звезды-компаньона должна иметь место аккреция водорода, приводящая к разогреву и расплавлению внешних слоев белого карлика, а также спиновая поляризация протонов в кри-

сталлической решетке более глубоких слоев, достаточно холодных для того, чтобы тепловые колебания не могли привести к деполяризации [10]. В подразделе 3.3.2 показано, что аналогичный механизм усиления магнитных полей в Сверхновых II типа невозможен, поэтому при наличии значительных магнитных полей у Сверхновых II типа в их формировании, помимо спиновой поляризации, должны играть важную роль другие механизмы.

В главе 4 рассмотрен эффект Барышевского–Любошица в сильном магнитном поле, которое существует вблизи поверхностей белых карликов и нейтронных звезд, в т.ч. магнитаров.

В разделе 4.2 на основе разности амплитуд комптоновского рассеяния вперед фотона с правой и левой круговой поляризацией на электроне получена формула для угла поворота $d\phi$ плоскости линейной поляризации фотона с частотой ω на единицу пробега dl в полностью поляризованном вырожденном электронном газе с концентрацией n_e в квантующем магнитом поле с индукцией B (с суммированием по зонам Ландау промежуточного виртуального электрона), причем фотон движется под углом θ к силовым линиям магнитного поля, p_z – импульс электрона [3, 5, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dl} &= \frac{(\pi\hbar c)^2 \alpha c n_e}{\hbar\omega(\varepsilon_0 + \hbar\omega)} \exp\left(-\frac{\phi^2}{2}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \phi^{2n-2} (J_n(g)\tilde{g} - J_n(f)\tilde{f}), \quad \phi = \frac{\hbar\omega \sin\theta}{\sqrt{\hbar c B e}}, \\ J_n(\lambda) &= (c^2 \lambda_0^2 - m_e^2 c^4 - 2nBe\hbar c - \lambda_3^2 c^2 - i \cdot 0)^{-1}, \quad \varepsilon_0 = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_z^2 c^2}, \\ cg_0 &= \varepsilon_0 + \hbar\omega, cg_3 = p_z c + \hbar\omega \cos\theta, cf_0 = \varepsilon_0 - \hbar\omega, cf_3 = p_z c - \hbar\omega \cos\theta, \\ \tilde{g} &= (g_0 \varepsilon_0 - m_e^2 c^3) \cos\theta - p_z (cg_3 \cos\theta + \sqrt{2n\hbar\omega} \sin^2\theta), \\ \tilde{f} &= (f_0 \varepsilon_0 - m_e^2 c^3) \cos\theta - p_z (cf_3 \cos\theta - \sqrt{2n\hbar\omega} \sin^2\theta). \end{aligned} \quad (5)$$

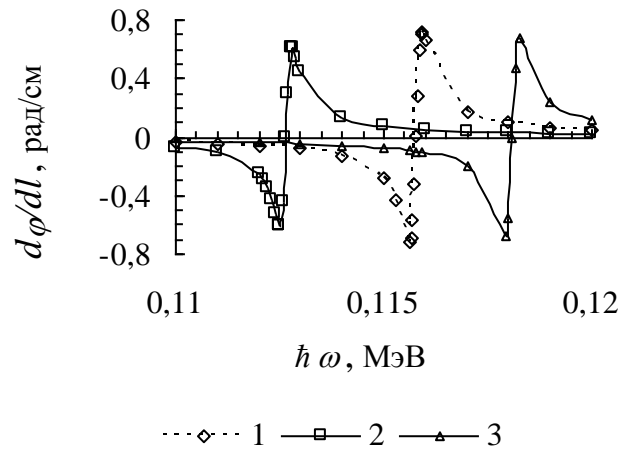
В разделе 4.3 учтены конечные ширины резонансов на промежуточном уровне Ландау виртуального электрона в формуле (5).

В подразделе 4.3.1 рассмотрены преобразования энергии электрона в R - и S -диаграммах с учетом ширины резонансов [9]. В подразделе 4.3.2 проведены оценочные расчеты по формуле (5) с учетом ширин резонансов в случае нулевого импульса электрона.

Показано, что при прочих равных условиях: а) с ростом θ частота фотона $\omega_{рез}$, при которой происходит резонансное вращение, уменьшается; б) с ростом B частота фотона $\omega_{рез}$, при которой происходит резонансное вращение, увеличивается; в) с ростом θ и B максимальная величина вращение вблизи резонанса по модулю уменьшается [8].

В подразделе 4.3.3 осуществлено усреднение формулы (5) по импульсам электронов при нулевой температуре с учетом ширин резонансов [8]:

Графические результаты представлены на рисунке 4.



1. $\theta = 0$, $B = 10^{13}$ Гс. 2. $\theta = 30^\circ$, $B = 10^{13}$ Гс. 3. $\theta = 0$, $B = 1,02 \cdot 10^{13}$ Гс.

Рисунок 4. – Угол поворота плоскости поляризации фотона в эффекте Барышевского–Любошица на единицу длины пробега при $n_e = 10^{19}$ см $^{-3}$.

В разделе 4.4 рассмотрены вопросы об экспериментальной проверке полученных формул, а также об использовании их в астрофизике при исследовании структуры атмосфер и магнитных полей звезд (в частности, белых карликов и нейтронных звезд) [5, 23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Наиболее важные новые научные результаты диссертационного исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. Найдено обобщенное выражение для ядерного псевдомагнитного поля. Показано, что ядерное псевдомагнитное поле и обычное магнитное поле, действующие на заданный нуклон сорта « a » со стороны медленных поляризованных нуклонов сорта « b », противоположны по направлению, если $a = b$, и сонаправлены, если $a \neq b$ [4].

2. Получен критерий Стонера для возникновения ферромагнетизма в случае вырожденной электронно-нуклонной плазмы. Показано, что он выполняется в двух областях концентраций протонов n_p и нейтронов n_n : 1) $n_p \sim 10^{30}$ - 10^{31} см $^{-3}$, $n_n > 0$; 2) $n_p \sim n_n \sim 10^{35}$ - 10^{36} см $^{-3}$. Проанализировано влияние обменной и корреляционной энергии на области возникновения ферромагнетизма [4, 7, 10].

3. Найден критерий Стонера для невырожденной электронно-протонной и электронно-нейтронно-протонной плазмы. Показано, что вплоть до концентраций $\sim 10^{30}$ см $^{-3}$ и температур $\sim 10^7$ К возможен ферромагнетизм невырожденной водородной плазмы, что может приводить к возникновению магнитных полей $\sim 10^4$ Гс в верхних слоях белых карликов; если белые карлики остыли и находятся

в тесной двойной системе, а на них началась аккреция водорода, разогревшая верхние слои в большей степени, чем внутренние, то возникающее магнитное поле может поляризовать протоны в кристаллической решетке внутренних слоев белых карликов и приводить к возникновению магнитных полей $\sim 10^9$ Гс [6, 7, 10].

4. Для эффекта Барышевского–Любошица выведена формула, выражающая зависимость угла вращения плоскости поляризации рентгеновского фотона от индукции магнитного поля B , концентрации электронов n_e , частоты фотона ω , угла θ между волновым вектором фотона и вектором индукции магнитного поля; показано, что в случае $B > 10^9$ Гс при заданных B , n_e , θ существует частота ω_0 , при которой вращение меняет знак, а по обе стороны от ω_0 находятся резонансные пики вращения; показано, что при прочих равных условиях с ростом B величина вращения в пиках по модулю уменьшается, ω_0 возрастает, а с ростом θ величина вращения в пиках по модулю уменьшается, ω_0 убывает [3, 5, 8, 9].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Развитые в диссертации модели и полученные результаты могут быть использованы для построения теорий замагниченных водородных белых карликов и численного моделирования процессов, связанных со взрывами Сверхновых II типа, а также при исследовании структуры атмосфер и магнитных полей нейтронных звезд и белых карликов при условиях, когда фарадеевское вращение уже практически отсутствует.

Полученные результаты также используются в учебном процессе кафедры теоретической физики БрГУ им. А.С. Пушкина при выполнении курсовых и дипломных работ и при чтении спецкурсов «Избранные вопросы астрофизики». Некоторые результаты могут быть использованы при преподавании аналогичных спецкурсов по ядерной физике и астрофизике в высших учебных заведениях, а также при преподавании общего курса астрономии в высших и средних специальных учебных заведениях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1. Серый, А. И. К вопросу о ферромагнетизме вырожденного нейтронно-протонного газа / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя прыродазнаучых навук.* – 2006. – № 1(25). – С. 31–38.
2. Серый, А. И. Об эффектах ядерного псевдомагнетизма в вырожденной нуклонной среде / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя прыродазнаучых навук.* – 2006. – № 2(26). – С. 33–43.
3. Серый, А. И. О комптоновском вращении при движении фотонов под произвольным углом к линиям индукции магнитного поля. / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка».* – 2011. – № 2. – С. 43–48.
4. Серый, А. И. О ферромагнетизме вырожденной нейтронно-протонной системы. / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка».* – 2012. – № 1. – С. 30–37.
5. Серый, А. И. О комптоновском вращении в магнитном поле с учетом ширины резонанса. / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка».* – 2012. – № 2. – С. 30–36.
6. Серый, А. И. К вопросу о магнитных полях белых карликов и Сверхновых II типа. / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка».* – 2013. – № 1. – С. 50–58.
7. Серый, А. И. О поправках к критерию Стонера для ядерной материи. / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка».* – 2013. – № 2. – С. 48–60.
8. Серый, А. И. О некоторых поляризационных эффектах в астрофизической плазме. / А. И. Серый // *Вестник Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка».* – 2014. – № 1. – С. 30–43.
9. Sery, A. I. To the Problem of Compton Rotation of Photons in a Strong Magnetic Field: Limit of Total Spin Polarization of Electrons / A. I. Sery // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems.* – 2014. – Vol. 17, № 4. – P. 420–422.
10. Серый, А. И. Спиновая поляризация нуклонов. Пределы низких и высоких температур / А. И. Серый // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2015. – Т. 79, № 4. – С. 549–555; Sery, A. I. Spin Polarization of Nucleons: Limits of Low and High Temperatures / A. I. Sery // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics.* – 2015. – Vol. 79, No 4. – P. 506–512.

Материалы конференций и сборники трудов

11. Серый, А. И. К вопросу о спиновых флуктуациях в холодной нуклонной среде. / А. И. Серый // VII межвузовская науч.-метод. конф. молодых ученых, Брест, БрГУ, 20 мая 2005 г.: сб. материалов. – Брест, 2005. – С. 87–89.

12. Серый, А. И. К вопросу о термине «ферромагнетизм». / А. И. Серый // Проблемы совершенствования подготовки будущих учителей физики и астрономии в университете: сб. материалов респ. науч.-метод. конф., посвященной 100-летию со дня рождения С. М. Жемчужного, Брест, 25–26 сент. 2008 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; редкол.: В. А. Плетухов, А. С. Ивкович, В. С. Секержицкий. – Брест, 2008. – С. 84–87.
13. Sery, A. I. To the Problem of Compton Rotation of the Plane of Polarization of X-photons in Magnetic Field / A. I. Sery // Actual Problems of Microworld Physics: Proceedings of International School-Seminar, Gomel, Belarus, August 1–12, 2011 – Dubna, 2013. – P. 230–237.
14. Серый, А. И. О корреляционной поправке к критерию Стонера для вырожденной нуклонной среды / А. И. Серый // Научные проблемы современной физики : сб. матер. докл. Республ. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рожд. академика Н. А. Борисевича, Брест, 26–27 сент. 2013 г. / Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина ; под общ. ред. В. С. Секержицкого. – Брест, 2013. – С. 178–182.

Тезисы докладов

15. Sery, A. I. Compton rotation in quantizing magnetic field / A. I. Sery // III Young Scientists Conference “Modern Problems of Theoretical Physics” December 21–23, 2011, Kyiv, Ukraine: Program & Abstracts / National Academy of Sciences of Ukraine, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Young Scientists Council. – Kyiv, 2011. – P. 36.
16. Sery, A. I. Stoner criterion for degenerate neutron-proton system in astrophysics / A. I. Sery // XII Всеукраїнська школа-семинар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, Львів, 30 травня–1 червня 2012: Збірка тез / Інститут фізики конденсованих систем НАН України. – Львів, 2012. – С. 51.
17. Sery, A. I. Compton rotation in strong magnetic field in tree approximation / A. I. Sery // IV Young Scientists Conference “Modern Problems of Theoretical Physics” October 23–26, 2012, Kyiv, Ukraine: Program & Abstracts / National Academy of Sciences of Ukraine, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Young Scientists Council. – Kyiv, 2012. – P. 71.
18. Sery, A. I. Stoner criterion for non-degenerate hydrogen in astrophysics / A. I. Sery // XIII Всеукраїнська школа-семинар та Конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, Львів, 5–7 червня 2013: Збірка тез / Інститут фізики конденсованих систем НАН України. – Львів, 2013. – С. 45.
19. Sery, A. I. About the possibility of proton ferromagnetism in DA white dwarfs / A. I. Sery // Young Scientists Conference “Modern Problems of Theoretical Physics” December 24–27, 2013, Kyiv, Ukraine: Program & Abstracts / National

Academy of Sciences of Ukraine, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Young Scientists Council. – Kyiv, 2013. – P. 49.

20. Sery, A. I. The possibility of nuclear ferromagnetism at Supernovae II explosions / A. I. Sery // Young Scientists Conference “Modern Problems of Theoretical Physics” December 24–27, 2013, Kyiv, Ukraine: Program & Abstracts / National Academy of Sciences of Ukraine, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, Young Scientists Council. – Kyiv, 2013. – P. 98.
21. Sery, A. I. Spin polarization of nucleons. Limits of low and high temperatures / A. I. Sery // Fundamental problems of nuclear physics, atomic-power engineering and nuclear technologies: LXIV international conference «Nucleus 2014», July 1–4, 2014, Minsk, Belarus (LXIV meeting on nuclear spectroscopy and nuclear structure): Book of abstracts. / Russian Academy of Sciences, Joint Institute for Nuclear Research, Saint-Petersburg State University, Belarussian State University, Research Institute for Nuclear Problems of Belarussian State University, National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, Publishing center of BSU, 2014. – P. 145.

Препринты

22. Плетюхов, В. А. Поля и частицы: квантовые свойства и физические приложения / В. А. Плетюхов, В. С. Секержицкий, А. И. Серый. – Брест : БрГУ, 2011. – 114 с. – (Препринт / Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина ; № 2)
23. Секержицкий, В. С. Физические свойства релятивистской плазмы в магнитном поле / В. С. Секержицкий, А. И. Серый, Е. А. Саванчук. – Брест: БрГУ, 2014. – 86 с. – (Препринт / Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина ; № 1)
24. Секержицкий, В. С. Физические свойства электронно-нуклонного вещества в магнитном поле и астрофизические оценки / В. С. Секержицкий, А. И. Серый, Е. А. Саванчук. – Брест: БрГУ, 2014. – 53 с. – (Препринт / Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина ; № 3)

РЕЗЮМЕ

Серый Алексей Игоревич

Эффекты спиновой поляризации

в интенсивных полях астрофизических объектов

Ключевые слова: ядерное псевдомагнитное поле, критерий Стонера, спиновая поляризация, Ферми-газ, вращение плоскости поляризации

Объекты исследования: электронно-нейтронно-протонная и электронно-протонная плазма в вырожденном и невырожденном состоянии; линейно поляризованный рентгеновский фотон, движущийся в поляризованном по спину релятивистском электронном газе в квантующем магнитном поле.

Обоснована возможность спиновой поляризации нейтронно-протонного вещества с учетом контактного ядерного взаимодействия, а также обменной и корреляционной кулоновской энергии протонов через нахождение условия понижения энергии системы при конечных значениях спиновой поляризации нуклонов, а также путем нахождения критерия Стонера через флуктуации спиновой плотности и через полюсы магнитной восприимчивости. Продемонстрировано, что при концентрациях порядка 10^{31} см⁻³ в приближениях крайнего вырождения и крайнего невырождения решающее влияние на ферромагнетизм должна оказывать обменная кулоновская энергия, а при концентрациях $\sim 10^{36}$ см⁻³ в приближении крайнего вырождения – ядерная энергия. Доказано, что учет корреляционной кулоновской энергии сужает диапазоны температур и плотностей, при которых возможен ферромагнетизм.

Показана возможность возникновения намагниченности при взрывах Сверхновых II типа на основе спиновой поляризации нуклонов во внешних слоях. Дано объяснение происхождения магнитных полей до 10^4 Гс в одиночных водородных белых карликах и до 10^9 Гс в водородных белых карликах в тесных двойных системах на основе протонного ферромагнетизма в оболочках.

Для эффекта Барышевского–Любошица в рамках квантовой электродинамики получена формула для вычисления угла вращения плоскости поляризации фотонов на единицу длины пробега в полностью поляризованном по спину электронном газе в квантующем магнитном поле. Произведено усреднение полученной формулы по импульсам электронов при нулевой температуре.

Результаты могут быть использованы для построения теорий замагниченных водородных белых карликов и для численного моделирования процессов, связанных со взрывами Сверхновых II типа, а также при исследовании структуры атмосфер и магнитных полей нейтронных звезд и белых карликов при условиях, когда фарадеевское вращение уже практически отсутствует.

РЭЗІЮМЭ
Серы Аляксей Ігаравіч
Эфекты спінавай палярызацыі
у інтэнсіўных палях астрафізічных аб'ектаў

Ключавыя словы: ядзернае псеўдамагнітнае поле, крытэрыі Стонэра, спінавая палярызацыя, Фярмі-газ, комптанаўскае вярчэнне плоскасці палярызацыі

Аб'екты даследавання: электронна-нейтронна-пратонная і электронна-пратонная плазма ў выражданым і невыражданым станах; лінейна палярызаваны рэнтгенаўскі фатон, які рухаецца ў палярызаваным по спіну рэлятывісцкім электронным газе ў квантуючым магнітным полі.

Абгрунтавана магчымасць спінавай палярызацыі нейтронна-пратоннага рэчыва з улікам кантактнага ядзернага ўзаемадзеяння, а таксама абменнай і карэляцыйнай кулонаўскай энергіі пратонаў праз знаходжанне умовы паніжэння энергіі сістэмы пры канечных значэннях спінавай палярызацыі нуклонаў, а таксама шляхам знаходжання крытэрыя Стонэра праз флуктуацыі спінавай шчыльнасці і праз полюсы магнітнай успрымальнасці. Прадэманстравана, што пры канцэнтрацыях парадку 10^{31} см⁻³ у набліжэннях крайняга выраджэння і крайняга невыраджэння вырашальны ўплыў на ферамагнетызм павінна рабіць абменная кулонаўская энергія, а пры канцэнтрацыях $\sim 10^{36}$ см⁻³ у набліжэнні крайняга выраджэння – ядзерная энергія. Даказана, што ўлік карэляцыйнай кулонаўскай энергіі звужае дыяпазоны тэмператур і шчыльнасцей, пры якіх магчымы ферамагнетызм.

Паказана магчымасць узнікнення намагнічанасці пры выбухах Звышновых II тыпу на аснове спінавай палярызацыі нуклонаў у знешніх сляях. Дадзена тлумачэнне паходжання магнітных палёў да 10^4 Гс у адзіночных вадародных белых карліках і да 10^9 Гс у вадародных белых карліках у цесных двайных сістэмах на аснове пратоннага ферамагнетызму ў абалонках.

Для эфекта Барышэўскага–Любошыца ў рамках квантавай электрадынамікі атрымана формула для вылічэння вугла вярчэння плоскасці палярызацыі фатонаў на адзінку даўжыні прабегу ў цалкам палярызаваным па спіну электронным газе ў квантуючым магнітным полі. Зроблена ўсярэдніванне атрыманай формулы па імпульсах электронаў пры нулявой тэмпературы.

Рэзультаты могуць быць выкарыстаны для пабудовы тэорыі замагнічаных вадародных белых карлікаў і для лікавага мадэлявання процэсаў, звязаных з выбухамі Звышновых II тыпу, а таксама пры даследаванні структуры атмасфер і магнітных палёў нейтронных зорак і белых карлікаў пры ўмовах, калі фарадэўскае вярчэнне ўжо практычна адсутнічае.

SUMMARY
Sery Alexey
Spin polarization effects
in intensive fields of astrophysical objects

Key words: nuclear pseudomagnetic field, Stoner criterion, spin polarization, Fermi-gas, Compton rotation of the plane of polarization

The objects of investigation are: electron-neutron-proton and electron-proton plasma in degenerate and non-degenerate state; a linearly polarized X-ray photon moving in spin-polarized relativistic electron gas at quantizing magnetic field.

A possibility of spin polarization of neutron-proton matter is justified regarding contact nuclear interaction, as well as exchange and correlation Coulomb energy of protons through the finding of the condition of the energy lowering of the system at finite values of spin polarization of nucleons as well as through the finding of Stoner criterion through spin density fluctuations and through the poles of magnetic susceptibility. It is demonstrated, that exchange Coulomb energy must have decisive influence on ferromagnetism at densities of the order of 10^{31} cm^{-3} in extreme degeneracy and extreme non-degeneracy approximations, and nuclear energy at densities of the order of 10^{36} cm^{-3} in extreme degeneracy approximation. It is proved, that correlation Coulomb energy consideration narrows the ranges of temperatures and densities, at which ferromagnetism is possible.

The possibility of magnetization initiation at type II Supernovae explosions is shown on the basis of spin polarization of nucleons in outer layers. The explanation of the origin of magnetic fields up to 10^4 Gs in single hydrogen white dwarfs and up to 10^9 Gs in hydrogen white dwarfs in close binary systems is given on the basis of proton ferromagnetism in envelopes.

For Baryshevsky–Luboshitz effect in the framework of quantum electrodynamics a formula is obtained for the calculation of rotation angle of the plane of polarization of photons per unit path in totally spin-polarized electron gas in quantizing magnetic field. Averaging of the obtained formula on the momenta of electrons is performed at zero temperature.

The results can be used for the construction of theories of magnetized hydrogen white dwarfs and for numeric simulation of processes, connected with type II Supernovae explosions, as well as at the investigation of the structure of the atmospheres and magnetic fields of neutron stars and white dwarfs at the conditions when Faraday rotation is practically absent.

СЕРЫЙ
Алексей Игоревич

ЭФФЕКТЫ СПИНОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
В ИНТЕНСИВНЫХ ПОЛЯХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Подписано в печать «25» сентября 2015 г. Формат 60 × 90 1/16.
Бумага офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.6
Учет. изд. л. 1.3 Тираж 60 экз. Заказ № 18

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе Института физики им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси