

На правах рукописи

Собьянин Денис Николаевич

**К теории кинетических и магнитных процессов
в задачах динамики неравновесной астрофизической
и твердотельной плазмы**

1.3.3. Теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Официальные оппоненты:

Докучаев Вячеслав Иванович — доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики, лаборатория нейтринной астрофизики, ведущий научный сотрудник;
Кочаровский Владимир Владиленович — доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), отделение физики плазмы и электроники больших мощностей, отдел астрофизики и физики космической плазмы, заведующий отделом;
Петросян Аракел Саркисович — доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), отдел физики планет, сектор теоретических исследований «Динамика атмосфер и климат», заведующий сектором.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ).

Защита состоится 11 марта 2024 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 53. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФИАН, адрес сайта: lebedev.ru. Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Чернышов Дмитрий Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень её разработанности. Множество сложных релятивистских и нерелятивистских плазменных систем проявляют динамику, неоднородную по пространству и времени. В последнее время изучение таких неравновесных систем, их свойств и поведения вызывает большой фундаментальный интерес, а подчас просто является необходимым и с прикладной точки зрения, но полное исследование и понимание их свойств является чрезвычайно сложной задачей. Дело в том, что все равновесные системы в определённом смысле слова схожи, но каждая неравновесная система неравновесна по-своему. Так, для описания состояния равновесной системы с постоянным числом частиц достаточно знать её гамильтониан и температуру окружения, тогда как в неравновесном случае, как минимум, важно знать потоки энергии, протекающие через систему, а то и предысторию процесса прихода в данное состояние, то есть в общем случае имеет значение динамика системы. Простейшей иллюстрацией этого может выступать любой источник излучения: он по существу неравновесен, так как в процессе излучения происходит потеря квантов, то есть или в системе изменяется число частиц и она нестационарна, или это число флуктуирует около некоторого среднего значения, но через систему течёт энергия, что поддерживает её в неравновесном стационарном состоянии. Особенности динамики могут отражаться и на уровне эволюции индивидуальных частиц и их функций распределения, и на уровне эволюции средних значений плотностей, скоростей, зарядов, токов и электромагнитных полей, выражаясь в различных кинетических и магнитогидродинамических явлениях. Такие системы встречаются в самых разных областях физики, включая статистическую физику и кинетику, обычную и магнитную гидродинамику, физику твёрдого тела и квантовую оптику, физику плазмы и астрофизику. Их теоретическое изучение весьма актуально ввиду появления новых теоретических подходов и обилия неожиданных фактов, обнаруживаемых в эксперименте и наблюдениях.

Часто неравновесные системы характеризуются иерархической структурой динамики. Иерархия может формироваться в результате разложения динамики системы на различные типы динамики, имеющие место на разных пространственно-временных масштабах, которые сильно между собой разделены. В этом случае статистические свойства системы можно эффективно описать суперпозицией нескольких статистик. Такая «суперстатистика» была сформулирована в работе¹ для рассмотрения систем со стационарным состоянием и флуктуациями интенсивного параметра, происходящими на временном масштабе, превышающем характерное время релаксации локальной динамики. Если изучаемая система может рассматриваться как множество малых пространственных ячеек, то чаще всего в качестве интенсивного параметра выступает обратная температура в ячейке, однако возможны и более общие его интерпретации. В силу значительного разделения временных масштабов в сложной системе можно рассматривать описанный подход как форму медленной модуляции², и он нашёл своё приложение в различных задачах³. Изучение кинетических и магнитных процессов в неравновесных плазменных системах, в частности, важно для задач спиновой электроники (спинтроники), нацеленной на создание информационных твердотельных устройств на основе манипулирования спиновой степенью свободы⁴. В практических приложениях требуются большие времена жизни спиновой поляризации электронной плазмы, поэтому важное значение имеет исследование способов создания неравновесной поляризации системы и механизмов резонансных, транспортных и релаксационных явлений⁵. Кроме спиновых систем, для перспективных

¹Beck C., Cohen E. G. D. Phys. A. 2003. 322. 267.

²Allegrini P., Barbi F., Grigolini P., et al. Phys. Rev. E. 2006. 73. 046136.

³Beck C. Phys. A. 2004. 331. 173 ; Beck C., Cohen E. G. D., Swinney H. L. Phys. Rev. E. 2005. 72. 056133 ; Duarte Queirós S. M. Braz. J. Phys. 2008. 38. 203 ; Van der Straeten E., Beck C. Phys. Rev. E. 2009. 80. 036108 ; Jizba P., Kleinert H. Phys. Rev. D. 2010. 82. 085016 ; Abe S. Phys. Rev. E. 2010. 82. 011131.

⁴Fabian J., Matos-Abiague A., Ertler C., et al. Acta Phys. Slovaca. 2007. 57. 565 ; Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., et al. J. Magn. Magn. Mater. 2020. 509. 166711.

⁵Kikkawa J. M., Awschalom D. D. Phys. Rev. Lett. 1998. 80. 4313 ; Glazov M. M.,

информационных приложений также предлагаются оптические логические элементы, основанные на поляритонных системах⁶, в связи с чем важно понимание кинетики и излучения таких систем⁷.

Кроме лабораторий на Земле, неравновесные плазменные явления, которые оказываются связанными и с кинетикой и с магнито-гидродинамикой, происходят в «космических лабораториях» — нейтронных звёздах и релятивистских джетах, и судить об их характере и природе можно по наблюдательным проявлениям. Как хорошо известно, классическим наблюдательным проявлением нейтронной звезды является радиопульсар⁸. В последние годы активно изучаются и другие интересные проявления, например, магнитары⁹, гамма-пульсары¹⁰, вращающиеся радиотранзиенты (RRAT)¹¹, экстремальные нуллеры¹² и даже гибриды вышеназванных объектов¹³. Такое разнообразие проявлений связано с переменной активностью внешних областей нейтронной звезды — её магнитосферы — и говорит о том, что магнитосфера может быть не только чисто вакуумной или полностью заполненной плазмой, но и существенно нестационарной, когда состояние некоторых её областей постоянно меняется от вакуумного к плазмозаполненному и наоборот, при этом интересны характеристики рождаемой плазмы и её отличие от плазмы радиопульсаров. Возможность генерации и излучения нейтронными

Ivchenko E. L. JETP Lett. 2002. 75. 403 ; Cadiz F., Paget D., Rowe A. C. H., et al. Phys. Rev. B. 2015. 91. 165203 ; Cummings A. W., Dubois S. M.-M., Charlier J.-C., et al. Nano Lett. 2019. 19. 7418.

⁶Amo A., Liew T. C. H., Adrados C., et al. Nat. Photonics. 2010. 4. 361 ; Ballarini D., de Giorgi M., Cancellieri E., et al. Nat. Commun. 2013. 4. 1778 ; Zasedatelev A. V., Baranikov A. V., Urbonas D., et al. Nat. Photonics. 2019. 13. 378.

⁷Kavokin A. V., Vladimirova M., Jouault B., et al. Phys. Rev. B. 2013. 88. 195309 ; Whittaker C. E., Dzurnak B., Egorov O. A., et al. Phys. Rev. X. 2017. 7. 031033 ; Comaron P., Dagvadorj G., Zamora A., et al. Phys. Rev. Lett. 2018. 121. 095302.

⁸Beskin V. S. Phys.-Usp. 1999. 42. 1071.

⁹Mereghetti S. Astron. Astrophys. Rev. 2008. 15. 225.

¹⁰Caraveo P. A. Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2014. 52. 211.

¹¹McLaughlin M. A., Lyne A. G., Lorimer D. R., et al. Nature. 2006. 439. 817.

¹²Wang N., Manchester R. N., Johnston S. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2007. 377. 1383.

¹³Burke-Spolaor S., Bailes M. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2010. 402. 855.

звёздами лептонов изучается не только теоретически¹⁴, но и подтверждается наблюдениями гамма-гало вокруг пульсаров Геминга и B0656+14¹⁵, то есть нейтронная звезда может выступать как космический источник заряженных частиц. В этой связи важной является задача о происхождении позитронов, отвечающих за Галактическое аннигиляционное излучение: ранее выдвигалось предположение, что источником таких позитронов могут быть обычные и миллисекундные пульсары, но возникли проблемы с объяснением величины энергии частиц, оказавшейся слишком высокой¹⁶.

Другим проявлением нестационарных неравновесных процессов в космосе являются быстрые радиовсплески (FRB) — одиночные вспышки миллисекундной длительности, детектируемые в радиодиапазоне на частотах ~ 1 ГГц с чрезвычайно высоким общим энерговыделением в предположении изотропии $\sim 10^{40}$ эрг¹⁷. Что отвечает за такие вспышки, неизвестно, и была предложена их связь с нейтронными звёздами, чёрными дырами или более экзотическими объектами¹⁸, а после обнаружения периодической активности FRB проблема только усложнилась¹⁹. Релятивистские джеты, то есть космические струйные выбросы плазмы высокой энергии, движущейся со скоростью, близкой к скорости света, также привлекались для объяснения FRB²⁰, но их изучение очень важно и само по себе, так как природа джетов и механизм их запуска, коллимации, стабили-

¹⁴Istomin Ya. N., Sobyenin D. N. *Astron. Lett.* 2007. 33. 660 ; Timokhin A. N., Harding A. K. *Astrophys. J.* 2019. 871. 12.

¹⁵Abdo A. A., Allen B. T., Aune T., et al. *Astrophys. J.* 2006. 700. L127 ; Abeysekara A. U., Albert A., Alfaro R., et al. *Science.* 2017. 358. 911.

¹⁶Wang W., Pun C. S. J., Cheng K. S. *Astron. Astrophys.* 2006. 446. 943 ; Prantzos N., Boehm C., Bykov A. M., et al. *Rev. Mod. Phys.* 2011. 83. 1001.

¹⁷Petroff E., Hessels J. W. T., Lorimer D. R. *Astron. Astrophys. Rev.* 2019. 27. 4 ; Cordes J. M., Chatterjee S. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2019. 57. 417.

¹⁸Popov S. B., Postnov K. A. arXiv:1307.4924 ; Liebling S. L., Palenzuela C. *Phys. Rev. D.* 2016. 94. 064046 ; Istomin Ya. N. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2018. 478. 4348 ; Chernoff D. F., Li S. Y., Tye S.-H. H. arXiv:2003.07275 ; Yang H., Zou Y.-C. *Astrophys. J. Lett.* 2020. 893. L31.

¹⁹CHIME/FRB Collaboration. *Nature.* 2020. 582. 351 ; Rajwade K. M., Mickaliger M. B., Stappers B. W., et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2020. 495. 3551.

²⁰Katz J. I. *Mon. Not. R. Astron. Soc.: Lett.* 2020. 494. L64.

зации и распространения во внешней среде до сих пор до конца не установлены²¹ несмотря на то, что их теоретическое исследование началось очень давно²². Особый интерес здесь представляет исследование джета в галактике М87, которое благодаря многообразию наблюдаемого излучения, близости и яркости джета, большой массе центральной сверхмассивной чёрной дыры и, как следствие, наблюдательным данным высокого качества наиболее перспективно в плане прояснения физических процессов, происходящих в джетах в активных ядрах галактик.

Цели и задачи. Целью диссертации является развитие теории кинетических и магнитных процессов в сложных релятивистских и нерелятивистских плазменных системах, связанных с рядом актуальных направлений современной физики и астрофизики, и объяснение обнаруживаемого в лабораторном эксперименте и астрофизических наблюдениях необычного поведения таких систем. В диссертации решены три большие группы задач, первая из которых связана с релятивистской плазмой нейтронных звёзд, вторая — с релятивистской плазмой астрофизических джетов, и третья — с нерелятивистской плазмой твёрдых тел:

1. Рассмотреть нелокальное нестационарное рождение релятивистской электрон-позитронной плазмы в магнитосфере нейтронной звезды и вычислить энергетическое распределение частиц при экспоненциальном росте их числа. Изучить возможность работы старых нейтронных звёзд под воздействием внешнего космического гаммафона и рассчитать характеристики генерируемых плазменных потоков. Исследовать внутреннюю электродинамику нейтронной звезды, твердотельно вращающейся вокруг неподвижной точки, и возникновение самодействия из-за вращения. Обсудить возможные наблюдательные астрофизические проявления исследованных процессов.

²¹ Chiueh T., Li Z.-Y., Begelman M. C. *Astrophys. J.* 1991. 377. 462 ; Istomin Ya. N., Pariev V. I. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1996. 281. 1 ; Fendt C. *Astron. Astrophys.* 1997. 323. 999 ; Lynden-Bell D. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2003. 341. 1360 ; Colgate S. A., Fowler T. K., Li H., et al. *Astrophys. J.* 2015. 813. 136.

²² Penrose R. *Riv. Nuovo Cim.* 1969. 1. 252 ; Blandford R. D. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1976. 176. 465 ; Lovelace R. V. E. *Nature.* 1976. 262. 649.

2. В свете появления новых данных астрофизических наблюдений высокого разрешения определить возможную структуру релятивистского струйного плазменного выброса в галактике M87 и распределение различных физических параметров, а также дать конкретные оценки величин. Изучить механизм возникновения обнаруженного квазипериодического поперечного смещения джета, связать его параметры с параметрами центральной машины и обсудить характеристики аккреционного потока. Исследовать вопрос об уравнении состояния плазмы и сделать выводы о термодинамике, электродинамике и механизме запуска джета. Сопоставить полученные теоретические результаты с наблюдательными данными.

3. Исследовать задачу о кинетике поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе и спектре излучения. Изучить динамику спина в двумерном электронном газе высокой подвижности в слабом и сильном магнитном поле при различных температурах. Найти связь времени релаксации спина с кинетическими процессами в системе и сделать выводы о характере процессов. Рассмотреть магнитные и оптические резонансные явления в объёмной спиновой системе и вычислить наблюдаемые спектры спиновой поляризации. Сопоставить полученные теоретические результаты с результатами лабораторных экспериментов.

Научная новизна.

1. Построено обобщение суперстатистики Бека — Коэна, учитывающее флуктуации векторного управляющего параметра неравновесной системы. Рассчитана функция распределения электронов и позитронов по энергиям в магнитосфере нейтронной звезды для нестационарного нелокального случая экспоненциального умножения плазмы. Данная функция, несмотря на нестационарность умножения, оказывается стационарной, но, в отличие от случая стационарной генерации плазмы в магнитосфере обыкновенных пульсаров и магнитаров, не является степенной. Показано, что нейтронные звёзды, которые пересекли линию смерти на диаграмме «период — магнитное поле», могут являться источником субрелятивистских позитронов в Галактике, объясняющим данные по аннигиляционной линии 511 кэВ, при этом генерация позитронов носит существенно

нелокальный характер. Найдено, что вращение нейтронной звезды за счёт возникновения некоротационных электрических токов вызывает её вынужденную прецессию, которая может быть связана с наблюдаемой периодичностью быстрых радиовсплесков. На основе этого получены оценки магнитного поля их прогениторов.

2. Построена магнитогидродинамическая модель «джет в джете», в рамках которой вычислены распределения и предсказаны значения различных физических параметров релятивистского джета в галактике M87, таких как электромагнитные поля, заряды, токи, давление, плотность, множественность, потоки масс и температура. В частности, магнитное поле на основании джета порядка 80 Гс оказывается достаточным для обеспечения наблюдаемой светимости джета, то есть часто теоретически обсуждаемых больших величин магнитного поля порядка 10^3 – 10^4 Гс не требуется. Постоянное электрическое напряжение между внешним и внутренним джетами обеспечивает одинаковые наблюдаемые законы их расширения. Из анализа выведенных значений параметра чёрной дыры по вращению и качанию джета предсказано, что аккреционный диск является магнитно-арестованным. Показано, что изменение показателя политропы от первоначального значения $4/3$ на субпарсековских масштабах до значения $5/3$ при охлаждении плазмы без промежуточной задержки на значении 1.44 может быть признаком существования чистой электрон-позитронной компоненты в джете.

3. В рамках исследования динамики поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе выведена форма поляритонной линии и получено общее соотношение для её ширины. Обнаруженные осцилляции времени релаксации спина в квантовой яме в зависимости от магнитного поля связаны с осцилляциями плотности состояний на уровне Ферми и соответствуют переходу в режим эффекта Шубникова — де-Гааза и квантового эффекта Холла при сильных магнитных полях и низких температурах, а возникновение аномального магнитного подавления релаксации связано с изменением характера диффузии электронной плазмы. Для объёмного случая исследован новый тип резонанса, возникающий при совместном воздействии на систему электронного спинового резонанса (ЭСР) в магнитном поле

и резонансного спинового усиления (РСУ) периодическим импульсным оптическим излучением. Показано согласие теории и эксперимента.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты по обобщению суперстатистики Бека — Коэна позволяют рассматривать неравновесные системы с флуктуирующими управляющими параметрами и допускают обобщение на большее количество динамических уровней и более общие статистики. Результаты по динамике поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе могут применяться для экспериментального определения неравновесной температуры экситонного резервуара. Результаты по нестационарной генерации плазмы в магнитосфере нейтронной звезды дают представление о доле ускоренных частиц в системе, а результаты по потухшим радиопульсарам позволяют объяснить существующий поток позитронов в Галактике требуемых энергий. Результаты по внутренней электродинамике нейтронной звезды объясняют механизм вынужденной прецессии и позволяют оценить магнитное поле источников повторяющихся быстрых радиовсплесков и судить об их природе. Результаты по исследованию релятивистского джета в галактике M87 раскрывают его структуру, физические параметры и их связь с параметрами центральной машины и позволяют делать выводы о механизме запуска джета и природе аккреционного диска. Эти результаты могут прилагаться и к другим астрофизическим источникам, тем самым внося вклад в расширение представлений о природе джетов в активных ядрах галактик. Кроме того, они могут использоваться для проверки сложных численных магнитогидродинамических расчётов и расчётов методом частиц в ячейках. Результаты по спиновой динамике в магнитном поле могут быть использованы для управления условиями резонансного спинового усиления и тонкой настройки средней спиновой поляризации без изменения параметров оптической накачки.

Методология и методы исследования. Результаты диссертации получены путём теоретических вычислений. При решении поставленных научных задач используются методы теоретической и математической физики, проводится изучение имеющихся экспери-

ментальных и наблюдательных данных. Применяются кинетический и магнитогидродинамический подходы, используются общие законы сохранения вещества, энергии и импульса, записанные в релятивистском виде, при этом учитывается энергия и импульс как собственно вещества, так и содержащегося в нём электромагнитного поля. В адиабатическом случае используется закон сохранения энтропии и степенная связь между давлением и плотностью вещества, в идеальном случае — условие бесконечной проводимости плазмы, а эволюция электромагнитного поля, зарядов и токов определяется самосогласованным образом из уравнений Максвелла. В осесимметричном стационарном случае используются магнитогидродинамические интегралы движения, сохраняющие свою величину при движении вдоль магнитных трубок. Они дают некоторые алгебраические соотношения между различными характеристиками потоков и заменяют собой более сложные общие дифференциальные соотношения, так что рассмотрение системы упрощается. При описании вращений используются кватернионы, при рассмотрении спиновой динамики учитывается возникновение спин-орбитального взаимодействия из-за специфики структуры вещества и влияние магнитного поля. Проводится сравнение результатов теории и лабораторного эксперимента, численного моделирования или астрофизических наблюдений.

Положения, выносимые на защиту.

1. Каскад умножения плазмы в магнитосфере нейтронной звезды при экспоненциальном нарастании числа частиц характеризуется формированием стационарного энергетического распределения электронов и позитронов. Малая доля полностью ускоренных частиц в системе физически связана с конечностью длины свободного пробега фотонов, излучаемых частицами.

2. Наблюдаемый избыток позитронов в Галактике можно объяснить работой потухших радиопульсаров. Механизм работы этих старых нейтронных звёзд связан с генерацией в их магнитосфере субрелятивистской плазмы за счёт поглощения в магнитном поле космических гамма-квантов и их превращения в электрон-позитронные пары.

3. Периодические быстрые радиовсплески можно связать с вра-

щающимися нейтронными звёздами, совершающими вынужденную прецессию. Механизм возникновения такой прецессии заключается в обратном влиянии электромагнитных сил, индуцируемых вращением замагниченного вещества, на само вращение и имеет место даже при отсутствии деформации звезды.

4. Релятивистский джет в галактике M87 может обладать структурой «джет в джете». Эта структура может отражать одновременную работу двух различных механизмов запуска джета, один из которых связан с центральной сверхмассивной чёрной дырой, а другой — с окружающим аккреционным диском.

5. Наблюдаемое качание джета в галактике M87 можно связать с общерелятивистской прецессией Лензе — Тирринга наклонённого аккреционного диска. По периоду качания можно дать новые оценки параметра вращения центральной сверхмассивной чёрной дыры в зависимости от её массы и характеристик диска.

6. Джет в галактике M87 на субпарсековых масштабах является горячим и характеризуется релятивистским политропным уравнением состояния, при этом имеет место точное сохранение продольного электрического тока. Наблюдаемое изменение профиля ускорения на более далёких расстояниях может быть связано с охлаждением плазмы и отражать работу механизма Блэндфорда — Знаека.

7. Ширина поляритонной линии излучения полупроводникового микрорезонатора определяется скоростью ухода поляритонов из рассматриваемого поляритонного состояния и его средним числом заполнения. Эту зависимость можно использовать для экспериментального определения временной динамики неравновесной температуры экситонного резервуара.

8. Скорость продольной релаксации спина электронов в квантовой яме связана со скоростью их пространственной диффузии в магнитном поле. Обнаруженное аномальное магнитное подавление спиновой релаксации может являться проявлением диффузии Бома в двумерном электронном газе.

9. Увеличение амплитуды радиочастотного магнитного поля при совместном влиянии на объёмную спиновую систему магнитного и оптического резонанса приводит к расщеплению резонансного

спектра. С помощью этого поля можно точно управлять средней спиновой поляризацией системы.

Личный вклад автора заключается в непосредственном проведении научных исследований, построении теории исследуемых процессов и выполнении аналитических расчётов, получении результатов и их сравнении с имеющимися экспериментальными и наблюдательными данными, формулировке выводов и их апробации на научных конференциях и семинарах, подготовке и публикации научных статей по теме диссертации. Изложенное в разд. 2.2 исследование излучения позитронов старыми нейтронными звёздами выполнено совместно с Я. Н. Истоминым, остальные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором. Результаты из работ, опубликованных с соавторами, отражают личный вклад автора в эти работы. В изложенной в разд. 5.1 задаче по поляритонам автору, кроме представленных теоретических результатов, принадлежит экспериментальное предложение по проведению пространственного фурье-преобразования с помощью линзы для получения спектров высокого качества, реализованное В. В. Белых. Графики с экспериментальными результатами по динамике плазмы твёрдых тел, представленные в гл. 5, построены В. В. Белых.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается тем, что теория основана на известных фундаментальных физических законах и дополнительных соотношениях, выполняющихся в исследуемых системах. При построении теории использовались строгие аналитические методы и физически обоснованные приближения. Показано согласие полученных результатов и предсказаний с современными экспериментальными и наблюдательными данными и результатами численного моделирования, а также сводимость результатов в частных случаях к ранее установленным теоретическим результатам. Некоторые полученные результаты стали использоваться и получили дальнейшее развитие в работах других учёных.

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период с 2011 по 2020 год и опубликованы в 36 работах, в том числе в 15 статьях в ведущих международных научных рецензируемых

журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией и индексируемых в международной базе данных Web of Science. Результаты диссертационной работы были представлены на 8, 11, 15 и 16 конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвящённой Дню космонавтики (ИКИ РАН, Москва, 2011, 2014, 2018, 2019), конференции, посвящённой 50-летию кафедры проблем физики и астрофизики МФТИ (ФИАН, Москва, 2018), 5 Всероссийской молодёжной конференции «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» (ФИАН, Москва, 2013), Международной конференции по физике нейтронных звёзд (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 2011), 25 Международной научной конференции «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2018), 28 Международном симпозиуме «Наноструктуры: физика и технология» (Минск, 2020) и на 1 и 2 Международной Гинзбургской конференции по физике (ФИАН, Москва, 2012, 2017), а также докладывались на астрофизическом семинаре, общем семинаре и семинаре по теории твёрдого тела Отделения теоретической физики им. И. Е. Тамма ФИАН, семинаре Отделения твёрдого тела ФИАН и семинаре Отдела теоретической астрофизики Астрокосмического центра ФИАН. Результаты диссертации неоднократно входили в сборник основных результатов научной деятельности ФИАН и направлялись в Российскую академию наук. Автор за циклы работ по развитым новым направлениям исследований трижды удостоен научных премий: «Теоретическое исследование нестационарных процессов в магнитосферах нейтронных звёзд» (премия им. П. Н. Лебедева ФИАН, 2013), «Теория коллапса антипузырька» (премия им. П. Н. Лебедева ФИАН, 2016), «Бозе-Эйнштейновская конденсация света» (премия им. И. Е. Тамма ФИАН, 2017). В 2016 г. автор выступал в качестве приглашённого эксперта Европейского исследовательского совета (European Research Council).

Основное содержание работы

Диссертационное исследование изложено на 242 с. и включает 6 глав, список сокращений и условных обозначений, список лите-

ратуры из 376 наименований, список иллюстративного материала, список работ, опубликованных по теме диссертации, и 14 иллюстраций.

Гл. 1 является вводной. В ней показана актуальность темы исследования и степень её разработанности, сформулированы цели и задачи работы, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В гл. 2, основанной на работах [1–5, 15–23], представлены результаты по кинетике и умножению релятивистской электрон-позитронной плазмы в сильном электромагнитном поле нейтронных звёзд.

В разд. 2.1 рассмотрена генерация электрон-позитронной плазмы в магнитосфере нейтронной звезды. В подразд. 2.1.1 построено обобщение подхода Бека — Коэна на случай флуктуаций управляющих параметров, в подразд. 2.1.2 рассмотрены системы с ветвящимися процессами, в подразд. 2.1.3 вычислено энергетическое распределение ультрарелятивистских электронов и позитронов в нестационарном случае. В системе происходит взаимопревращение частиц нескольких типов T_i :

$$T_i \rightarrow \sum_{j=1}^n \omega_j T_j,$$

где ω_j — числа рождающихся частиц, при этом само превращение зависит от возраста распадающейся частицы. Энергетическое распределение для подсистемы частиц типа i имеет вид

$$\rho_i(E) = \int_0^\infty w_i(E|\tau) dL_i(\tau),$$

где $w_i(E|\tau)$ — плотность условной вероятности для энергии частицы при заданном возрасте,

$$L_i(\tau) = \frac{\int_0^\tau e^{-\alpha u} (1 - G_i(u)) du}{\int_0^\infty e^{-\alpha u} (1 - G_i(u)) du}$$

— предельное распределение по возрасту, α — скорость экспоненциального нарастания числа частиц и $G_i(\tau)$ — вероятность того, что

время жизни выбранной частицы типа i не превышает τ . Энергетическое распределение ультррелятивистских электронов и позитронов в безразмерных единицах имеет вид

$$\sigma(\gamma) = \frac{\alpha}{2Q} \delta(\gamma - \gamma_0) + (1 - \theta(\gamma - \gamma_0)) \frac{\alpha}{E_{\parallel}} e^{-\alpha\gamma/E_{\parallel}},$$

где γ — лоренц-фактор частицы, γ_0 — лоренц-фактор, определяемый эффектом электродинамического самодействия, E_{\parallel} — продольное электрическое поле и Q — источник электрон-позитронных пар.

В разд. 2.2 теоретически исследовано излучение субрелятивистских электронов и позитронов старыми нейтронными звёздами. В подразд. 2.2.1 описаны особенности генерации электрон-позитронной плазмы в окрестности таких звёзд, в подразд. 2.2.2 рассмотрен поток энергии, уносимый истекающей из магнитосферы плазмой, в подразд. 2.2.3 найдены лоренц-фактор плазмы и множественность, то есть отношение плотности плазмы к минимальной плотности числа частиц, необходимой для равновесной магнитосферной плотности заряда, в подразд. 2.2.4 вычислены поток и энергия позитронов, в подразд. 2.2.5 изучены наблюдательные проявления старых нейтронных звёзд в радиодиапазоне. На диаграмме «период — магнитное поле» эти звёзды попадают в область за «линией смерти» (рис. 1), а заряженные частицы рождаются в сильно нелокальном режиме за счёт освещения магнитосферы внешним космическим гамма-фоном (рис. 2). Лоренц-фактор и множественность зависят от замагниченности частиц ω_c^L/Ω на световой поверхности $r = c/\Omega$, где Ω — частота вращения нейтронной звезды, $\omega_c^L = eB_L/m_e c$ — циклотронная частота и B_L — магнитное поле на световой поверхности, и имеют вид

$$\gamma \simeq \left(\frac{\omega_c^L}{\Omega} \right)^{1/3}, \quad \lambda \simeq \left(\frac{\omega_c^L}{\Omega} \right)^{2/3}.$$

Создаваемый поток позитронов равен

$$L_{\text{tot}} \simeq 3.4 \times 10^{43} N_9 B_{12}^{5/3} R_6^5 \text{ с}^{-1},$$

где $N_9 = N/10^9$, $B_{12} = B_0/10^{12}$ Гс и $R_6 = R/10^6$ см — нормированные число старых нейтронных звёзд, магнитное поле на поверхности и радиус звезды.

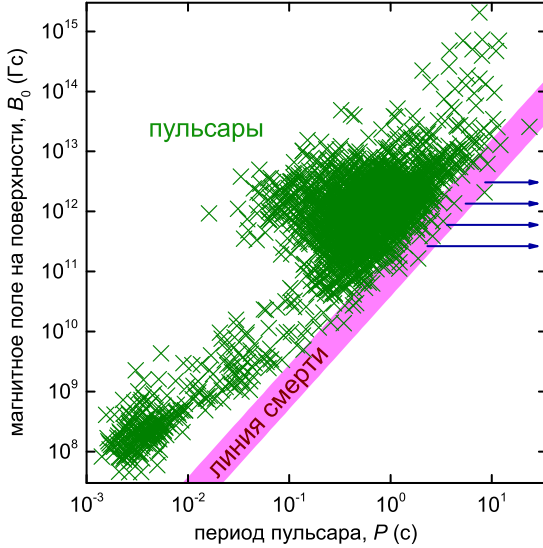


Рис. 1. Магнитное поле на поверхности звезды B_0 как функция периода вращения P для наблюдаемых пульсаров (диаграмма P — B в двойном логарифмическом масштабе). Стрелками схематично показаны траектории движения старых нейтронных звёзд, потухших радиопульсаров [15].

В гл. 3, основанной на работах [7, 14, 24, 25, 34], представлены результаты по динамике полей, зарядов и токов нейтронной звезды, их генерации вращательным движением замагниченного вещества и обратному влиянию поля на это движение.

В разд. 3.1 изучена внутренняя электродинамика идеально проводящей замагниченной нейтронной звезды, которая твёрдотельно вращается вокруг неподвижной точки. В подразд. 3.1.1 даны уравнения поля, в подразд. 3.1.2 приведены необходимые факты из теории кватернионов — некоммутативных гиперкомплексных чисел, используемых для эффективного и компактного описания вращений, в подразд. 3.1.3 исследовано вращение электромагнитного поля, в подразд. 3.1.4 вычислены объёмные плотности заряда и тока, в подразд. 3.1.5 обсуждаются возможные наблюдательные проявления перестройки внутреннего магнитного поля нейтронных звёзд. Положе-

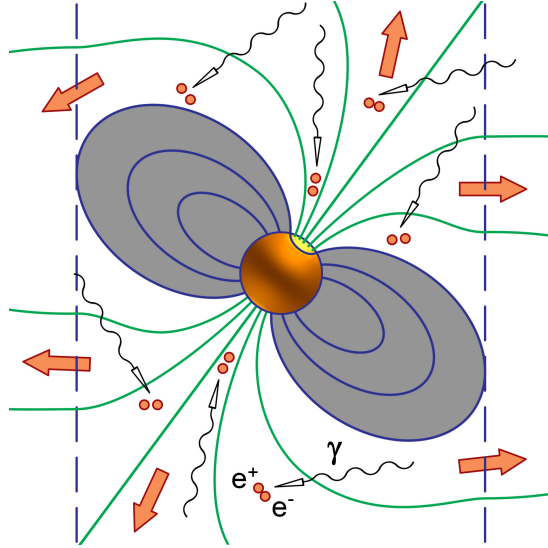


Рис. 2. Рождение электронов и позитронов в открытой магнитосфере нейтронной звезды фотонами высоких энергий космического гамма-фона [15].

ние нейтронной звезды задаётся кватернионом

$$\Lambda = \cos \frac{\alpha}{2} + \zeta \sin \frac{\alpha}{2} = e^{\zeta \alpha / 2}$$

и получается из начального положения в нулевой момент времени посредством поворота вокруг некоторой оси $\zeta = \zeta(t)$, где $|\zeta| = 1$, на некоторый угол $\alpha = \alpha(t)$. Электрическое поле коротирует при постоянной угловой скорости Ω , а магнитное поле коротирует всегда:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \Lambda \circ \mathbf{B}(\bar{\Lambda} \circ \mathbf{r} \circ \Lambda, 0) \circ \bar{\Lambda},$$

где $\bar{\Lambda} = e^{-\zeta \alpha / 2}$ — сопряжённый кватернион и \circ — кватернионное произведение, определяемое формулой $(\mu_0 + \boldsymbol{\mu}) \circ (\nu_0 + \boldsymbol{\nu}) = \mu_0 \nu_0 - \boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{\nu} + \mu_0 \boldsymbol{\nu} + \nu_0 \boldsymbol{\mu} + \boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{\nu}$. Динамика полей описывается уравнениями

$$\frac{d\mathbf{E}}{dt} = \Omega \times \mathbf{E} - \mathbf{w} \times \mathbf{B}, \quad \frac{d\mathbf{B}}{dt} = \Omega \times \mathbf{B},$$

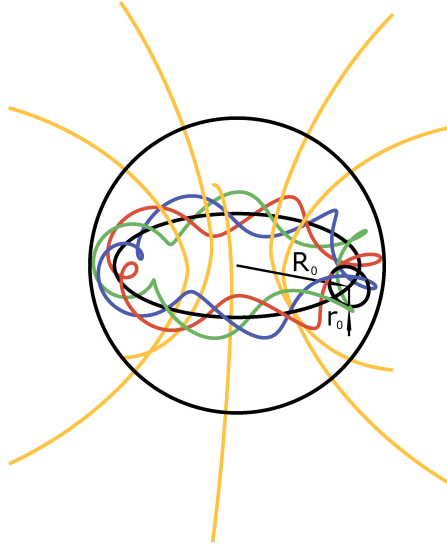


Рис. 3. Витой тор [7].

где $d/dt = \partial/\partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla$ — субстанциальная производная, $\mathbf{v} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}$ — скорость вещества, $\mathbf{w} = \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r}$ — вращательное ускорение ($c = 1$). Вычислены объёмные плотности заряда и тока, которые генерируют внутреннее поле, и изучена их взаимосвязь. Большие плотности заряда достигаются в магнитных структурах типа «витой тор» (рис. 3).

В разд. 3.2 изучена связь недавно обнаруженных периодических FRB-повторителей с замагниченными нейтронными звёздами, совершающими вынужденную прецессию. В подразд. 3.2.1 исследована возможность прецессии нейтронной звезды при отсутствии её деформации, в подразд. 3.2.2 построен пример гладкого внутреннего магнитного поля, в подразд. 3.2.3 вычислен момент электромагнитных сил, действующий на звезду, в подразд. 3.2.4 даны оценки магнитного поля для периодических FRB. Вынужденная прецессия вызывается аномальным электромагнитным моментом, возникающим из-за некоротационных электрических токов (здесь восстановлена c):

$$\mathbf{M} = \frac{2R^5}{15c^2} \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{B} \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{B}.$$

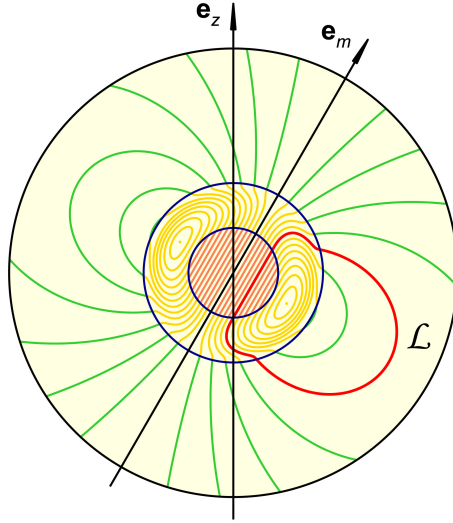


Рис. 4. Иллюстративное гладкое распределение магнитного поля во вращающемся проводящем шаре [14].

Плотность таких токов в общем виде представляется в виде суммы

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_m + \mathbf{j}_\Omega + \mathbf{j}_{\dot{\Omega}},$$

где $\mathbf{j}_m = \text{rot } \mathbf{B}/4\pi$ — ток намагничения, существующий независимо от значений Ω и $\dot{\Omega}$, $\mathbf{j}_\Omega = \mathbf{v} \times \text{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})/4\pi$ — ток вращения, существующий при $\Omega \neq 0$, и $\mathbf{j}_{\dot{\Omega}} = \mathbf{w} \times \mathbf{B}/4\pi$ — ток ускорения, существующий при $\dot{\Omega} \neq 0$. Иллюстративное гладкое магнитное поле имеет вид (рис. 4)

$$\mathbf{B} = \left[B_m(r) + \frac{1}{2} r B'_m(r) \right] \mathbf{e}_m - \frac{1}{2} r B'_m(r) \mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \cdot \mathbf{e}_m,$$

где штрихом обозначена производная по радиальной координате r ,

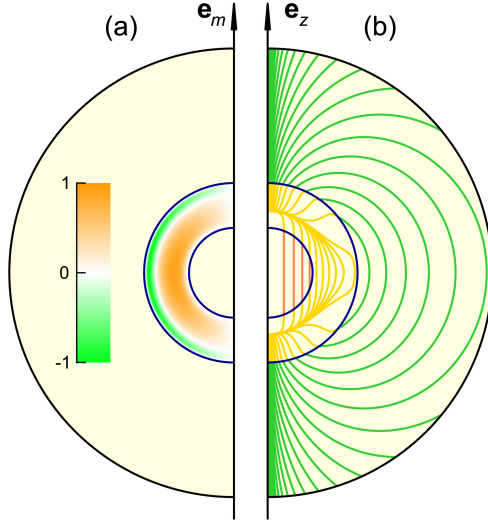


Рис. 5. Иллюстративное распределение тока намагничивания (а) и тока вращения (b) во вращающемся проводящем шаре [14].

$\mathbf{e}_r = \mathbf{r}/r$, \mathbf{e}_m — магнитная ось,

$$B_m(r) = \begin{cases} B_0, & 0 \leq r < R_1, \\ B_0 \int_{r-R_0}^{\varepsilon} \omega_{\varepsilon}(x) dx + B_0 \left(\frac{R_1}{r}\right)^3 \int_{-\varepsilon}^{r-R_0} \omega_{\varepsilon}(x) dx, & R_1 \leq r < R_2, \\ B_0 \left(\frac{R_1}{r}\right)^3, & R_2 \leq r < R, \end{cases}$$

$\omega_{\varepsilon}(x) = (C_0/\varepsilon) \exp[-\varepsilon^2/(\varepsilon^2 - x^2)]$ при $-\varepsilon < x < \varepsilon$ и $\omega_{\varepsilon}(x) = 0$ при $x \leq -\varepsilon$ или $x \geq \varepsilon$, $C_0 \approx 2.25$, $\varepsilon = (R_2 - R_1)/2$, $R_0 = (R_1 + R_2)/2$, а R_1 и R_2 определяют область перехода от однородного к дипольному магнитному полю. Ненулевое значение интеграла $\oint [(1 - v^2)\mathbf{B} + \mathbf{v}\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}] \cdot d\mathbf{l}$ по замкнутой магнитной силовой линии \mathcal{L} говорит о нарушении соотношения коротации, что даёт ненулевой момент \mathbf{M} . Токи равны (рис. 5)

$$\mathbf{j}_m = [4B'_m(r) + rB''_m(r)] \frac{\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_m}{8\pi},$$

$$\mathbf{j}_\Omega = \frac{\mathbf{e}_m \cdot \mathbf{v}}{4\pi} \left[B_m(r) \boldsymbol{\Omega} + \frac{1}{2} r B'_m(r) \mathbf{e}_r \mathbf{e}_r \cdot \boldsymbol{\Omega} \right].$$

С помощью основной формулы гироскопии

$$\mathbf{M} = \boldsymbol{\omega}_2 \times \boldsymbol{\omega}_1 \left[C + (C - A) \frac{\omega_2}{\omega_1} \cos \theta_0 \right],$$

где A и C — главные моменты инерции, второй из которых соответствует оси динамической симметрии, $\boldsymbol{\omega}_1$ и $\boldsymbol{\omega}_2$ — угловые скорости собственного вращения и прецессии и θ_0 — угол нутации, учтена роль в возникновении прецессии как момента сил, так и деформации звезды. Оценено внутреннее магнитное поле прогениторов периодических FRB:

$$B = 7.45 \times 10^{17} \text{ Гс} \sqrt{\frac{P}{P_{\text{прец}}}},$$

где P — период вращения и $P_{\text{прец}}$ — период прецессии.

В гл. 4, основанной на работах [8–11, 26–33], представлены результаты по структуре и динамике релятивистского астрофизического струйного выброса в галактике M87, распределению гидродинамических и электромагнитных параметров, связи с центральной машиной, а также термодинамике, плазменному составу и механизму запуска.

В разд. 4.1 рассмотрен вопрос о структуре и характеристиках джета в галактике M87 в свете новых наблюдений с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) высокого разрешения. В подразд. 4.1.1 представлены основные уравнения, определяющие динамику джета, в подразд. 4.1.2 разработана модель «джет в джете» (рис. 6), в подразд. 4.1.3 рассмотрены механизмы запуска, устойчивость и замыкание токов, в подразд. 4.1.4 рассчитаны характеристики джета. Джет описывается уравнениями Максвелла

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi \rho_e, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{B} = 4\pi \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t},$$

условием бесконечной проводимости

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

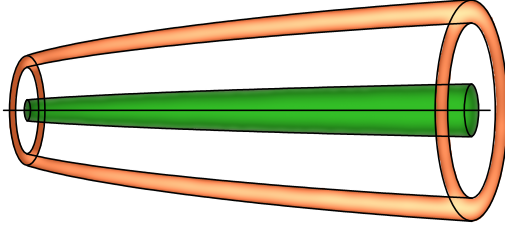


Рис. 6. Джет в джете [29].

и законами сохранения вещества

$$\frac{\partial \gamma \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \gamma \rho \mathbf{v} = 0,$$

энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\gamma^2 \rho h - p + \frac{E^2 + B^2}{8\pi} \right) + \operatorname{div} \left(\gamma^2 \rho h \mathbf{v} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{4\pi} \right) = 0$$

и импульса

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\gamma^2 \rho h \mathbf{v} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{4\pi} \right) + \operatorname{div} \left[\left(p + \frac{E^2 + B^2}{8\pi} \right) \mathbf{I} + \gamma^2 \rho h \mathbf{v} \mathbf{v} - \frac{\mathbf{E} \mathbf{E} + \mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right] = 0,$$

где ρ_e и \mathbf{j} — объёмные плотности заряда и тока, \mathbf{v} — скорость плазмы в джете в некоторой выбранной точке, γ — соответствующий лоренц-фактор, $h = 1 + \varepsilon + p/\rho$ — удельная релятивистская энтальпия, ε — удельная внутренняя энергия, p — давление, ρ — массовая плотность в сопутствующей системе отсчёта, \mathbf{ab} — диада и \mathbf{I} — единичный тензор. В стационарном осесимметричном случае равновесие джета в цилиндрических координатах задаётся соотношением

$$\left(p + \frac{B_z^2 + B_\phi^2 - E_r^2}{8\pi} \right)' + \frac{B_\phi^2 - E_r^2}{4\pi r} - \gamma^2 \rho h \frac{v_\phi^2}{r} = 0.$$

При движении вдоль магнитных трубок сохраняются магнитный поток и четыре интеграла

$$\Omega_F = \frac{v_\phi - v_p B_\phi / B_p}{r}, \quad \eta = \frac{\gamma \rho v_p}{B_p}, \quad \mathcal{E} = \gamma h \eta - \frac{\Omega_F I}{2\pi}, \quad \mathcal{L} = \gamma h \eta r v_\phi - \frac{I}{2\pi},$$

где v_ϕ , v_r и B_ϕ , B_r — тороидальные и полоидальные компоненты скорости и магнитного поля, I — электрический ток и r — радиус трубки на рассматриваемом уровне над основанием джета.

В разд. 4.2 рассмотрены длительные наблюдения джета в галактике M87 на частоте 43 ГГц, которые показывают новое явление квазипериодического покачивания джета, и исследован вопрос о возможности определения параметра вращения чёрной дыры. В подразд. 4.2.1 приведены данные по вращению и качанию джета, в подразд. 4.2.2 рассмотрена прецессия Лензе — Тирринга и выведены оценки на параметр вращения чёрной дыры, в подразд. 4.2.3 проведено сравнение полученных результатов с независимыми оценками, в подразд. 4.2.4 и 4.2.5 обсуждается связь со структурой «джет в джете» и роль магнитного поля в остановке аккрецирующего вещества. В случае твердотельной прецессии параметр вращения определяется из уравнения

$$a = \frac{\pi M}{5T_{\text{wob}}} \frac{(M\Omega_{\text{F}})^{-5/3} - (r_{\text{ISCO}}/M)^{5/2}}{(r_{\text{ISCO}}/M)^{-1/2} - (M\Omega_{\text{F}})^{1/3}},$$

где r_{ISCO}/M — радиус последней устойчивой круговой орбиты в единицах гравитационного радиуса ($G = 1$), M — масса чёрной дыры, Ω_{F} — частота изоротации Ферраро и T_{wob} — период качания джета.

В разд. 4.3 изучен вопрос об уравнении состояния в джете. В подразд. 4.3.1 рассмотрено сохранение энтропии

$$\frac{\partial \gamma \rho S}{\partial t} + \text{div } \gamma \rho S \mathbf{v} = 0,$$

где $S = p/\rho^\Gamma$, в подразд. 4.3.2—4.3.4 последовательно исследован баланс термодинамического давления и соответственно продольного магнитного, поперечного электромагнитного и центробежного давления, в подразд. 4.3.5 приведены результаты по показателю политропы Γ и сохранению тока, в подразд. 4.3.6 обсуждается охлаждение и состав плазмы, а также механизм запуска джета. Из наблюдаемой зависимости лоренц-фактора от радиуса джета и анализа магнитогидродинамических интегралов движения получено политропное

уравнение состояния с показателем $4/3$. Резкое изменение показателя с $4/3$ до $5/3$ при охлаждении говорит о существовании в джете электрон-позитронной плазмы.

В гл. 5, основанной на работах [6, 12, 13, 35, 36], представлены результаты по кинетике плазмы твёрдого тела в лабораторных оптических и магнитных системах, в которых происходит взаимодействие квазичастиц с окружением и внешним полем.

В разд. 5.1 в свете обсуждения корреляционных свойств излучения представлены результаты по связи спектра и кинетики системы. На примере системы поляритонов в квантовой яме, помещённой в микрополость, вычисляются временные корреляционные функции и выводится спектр излучения. Квантовое кинетическое уравнение имеет вид

$$\dot{\rho} = -iE'_0[a^+a, \rho] - \frac{w}{2}(aa^+\rho - 2a^+\rho a + \rho aa^+) - \frac{\gamma}{2}(a^+a\rho - 2a\rho a^+ + \rho a^+a),$$

где ρ — приведённый оператор плотности, a^+ и a — операторы рождения и уничтожения, w и γ — скорости излучения и поглощения поляритона окружением и E'_0 — центр спектральной линии ($\hbar = 1$). Ширина линии оказывается зависящей от скорости поглощения поляритона окружением и от среднего числа заполнения $\langle n \rangle$:

$$\Gamma = \frac{\gamma}{\langle n \rangle + 1}.$$

С помощью этой зависимости удаётся определять в эксперименте временную динамику неравновесной температуры резервуара после оптического возбуждения микрополости (рис. 7).

В разд. 5.2 изучена спиновая динамика в высокоподвижном двумерном электронном газе, заключённом в квантовую яму GaAs/AlGaAs. В подразд. 5.2.1 рассмотрена прецессия и нутация спина, в подразд. 5.2.2 изучена его релаксация, в подразд. 5.2.3 выявлена связь спиновой релаксации и пространственной диффузии, в подразд. 5.2.4 проведено сравнение теории с экспериментом. Была обнаружена необычная зависимость спиновой релаксации от приложенного магнитного поля: при усилении магнитного поля время спиновой релаксации возрастает сперва квадратично, но затем рост ста-

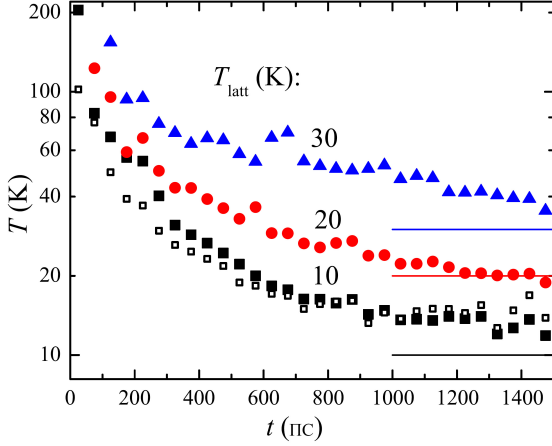


Рис. 7. Динамика температуры резервуара при различной решёточной температуре T_{latt} [6].

новится линейным, а далее дополнительно появляются осцилляции (рис. 8). Время релаксации имеет вид

$$T_1 \sim \tau_0 \frac{\hbar\omega_c}{k_B T} \frac{\rho_0}{\rho(\varepsilon_F)},$$

где τ_0 — эффективное время, ω_c — циклотронная частота, T — температура, $\rho(\varepsilon_F)$ и ρ_0 — плотность состояний на уровне Ферми и при малых магнитных полях. Подавление спиновой релаксации происходит из-за влияния на спин-орбитальное поле вращения электрона, а осцилляции соответствуют осцилляциям плотности состояний, возникающим при низких температурах и в сильных магнитных полях. Переход от квадратичной к линейной зависимости можно связать с переходом от классической к боровской диффузии.

В разд. 5.3 изложены результаты по исследованию совместного РСУ-ЭСР резонанса в n -GaAs, когда производится накачка и одновременное зондирование электронной спиновой поляризации периодическими лазерными импульсами и накладывается дополнительное переменное радиочастотное магнитное поле. В подразд. 5.3.1 построена теория резонанса, в подразд. 5.3.2 проведено сравнение теории с

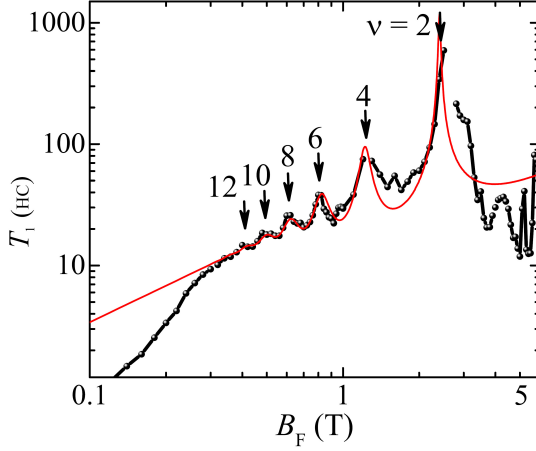


Рис. 8. Зависимость времени спиновой релаксации T_1 от магнитного поля при $T = 2$ К — экспериментальные данные (шары) и теоретическая кривая (сплошная линия) [12].

экспериментом. В теории одновременно учитывается вращение, затухание и усиление спина, при этом удаётся объяснить весь набор экспериментальных данных (рис. 9). Спин в момент измерения равен

$$\mathbf{S}_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{Q}_n \circ \Delta \mathbf{S}_0 \circ \bar{\mathbf{Q}}_n e^{-nT_0/\tau_s},$$

где кватернион $\mathbf{Q}_n = \mathbf{N}_0^n \circ \mathbf{M}_0^n$ определяется через кватернионы $\mathbf{M}_0 = e^{\omega_{\text{rf}} T_0/2}$ и $\mathbf{N}_0 = e^{\Omega_0 T_0/2}$, а наблюдаемый спектр ЭСР при РСУ имеет вид

$$\langle \Delta S_z \rangle = \frac{\Delta S_0}{8} \operatorname{sh} \frac{T_0}{\tau_s} \left(\frac{4}{\operatorname{ch} T_0/\tau_s - \cos \omega_L T_0} - \frac{2\Omega_R^2/\Omega^2}{\operatorname{ch} T_0/\tau_s - \cos \omega_{\text{rf}} T_0} - \frac{(1 - \Delta \omega_{\text{rf}}/\Omega)^2}{\operatorname{ch} T_0/\tau_s - \cos(\omega_{\text{rf}} + \Omega) T_0} - \frac{(1 + \Delta \omega_{\text{rf}}/\Omega)^2}{\operatorname{ch} T_0/\tau_s - \cos(\omega_{\text{rf}} - \Omega) T_0} \right),$$

где τ_s — время спиновой релаксации, ΔS_0 и $T_0 = f_0^{-1}$ — величина и период оптического возбуждения, $\omega_{\text{rf}} = 2\pi f_{\text{rf}}$ — частота переменного радиочастотного поля, $\omega_L = 2\pi f_L$ — ларморовская частота,

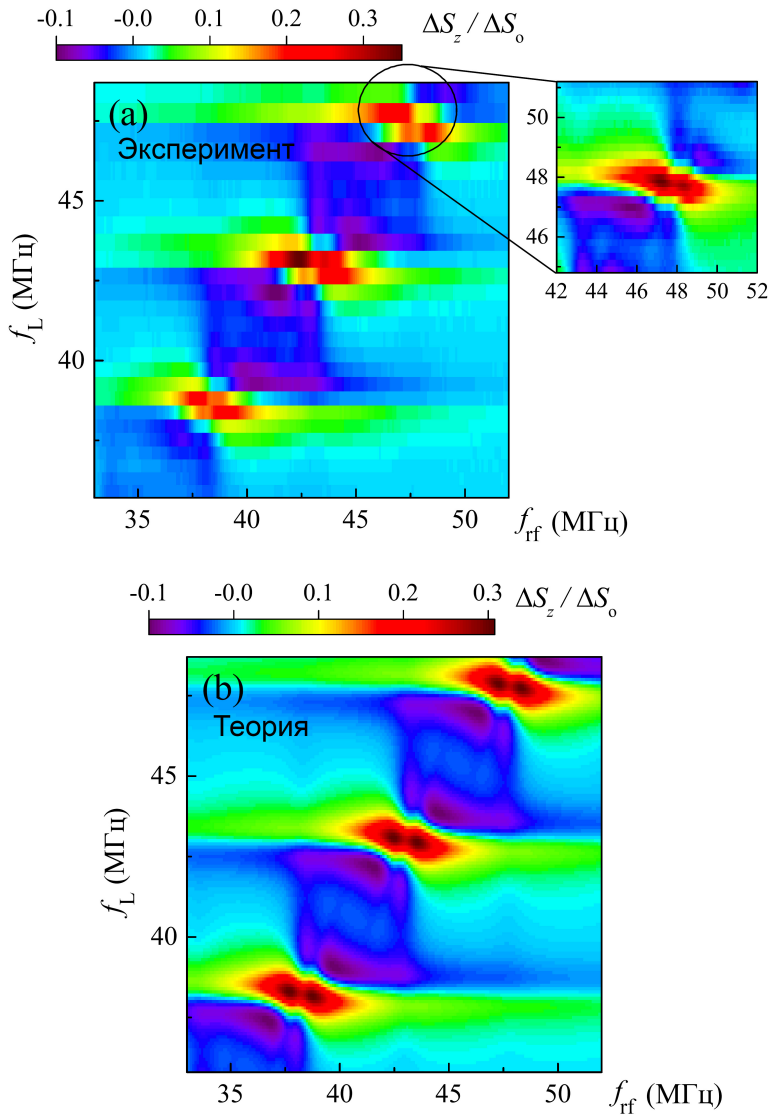


Рис. 9. Двумерная карта сигнала фарадеевского вращения как функция частоты радиочастотного поля f_{rf} и ларморовской частоты f_L . Рис. (a) — эксперимент, рис. (b) — теория [13].

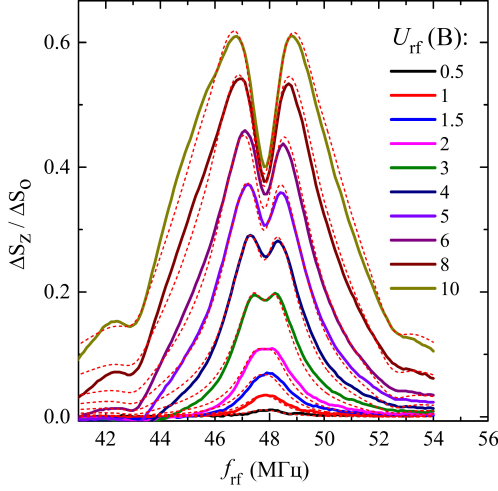


Рис. 10. Спектры ЭСР для различных амплитуд радиочастотного поля, параметризованной амплитудой U_{rf} переменного напряжения на катушке, при $f_L = 10f_0 = 47.8$ МГц и $T = 6$ К — экспериментальные данные (сплошные линии) и теоретические кривые (штриховые линии) [13].

$\Delta\omega_{\text{rf}} = \omega_{\text{rf}} - \omega_L$ — отстройка угловой частоты, Ω_R — частота Раби, $\Omega = (\Delta\omega_{\text{rf}}^2 + \Omega_R^2)^{1/2}$, $\Delta\mathbf{S}_0 = \mathbf{e}_z \Delta S_0$, $\boldsymbol{\omega}_{\text{rf}} = \omega_{\text{rf}} \mathbf{e}_x$, $\boldsymbol{\Omega}_0 = -\Delta\omega_{\text{rf}} \mathbf{e}_x + \Omega_R \cos \phi_0 \mathbf{e}_y + \Omega_R \sin \phi_0 \mathbf{e}_z$ и ϕ_0 — начальная фаза. Радиочастотное поле значительно модифицирует оптически создаваемую и усиливаемую поляризацию спина и может как подавлять РСУ, так и создавать новые условия для резонанса. При малой амплитуде радиочастотного поля модификация максимальна при выполнении условия ЭСР и квадратична по его амплитуде, а при повышении амплитуды появляется двойной пик спиновой поляризации (рис. 10). Таким образом, использование радиочастотного поля позволяет контролировать условия РСУ и достигать тонкой настройки средней поляризации спина без изменения параметров оптической накачки.

Гл. 6 является заключительной. В ней сформулированы основные результаты диссертации, отмечено их развитие в работах других

учёных, а также согласие с результатами новейших астрофизических наблюдений.

Заключение

1. Построено обобщение суперстатистики Бека — Коэна на случай формирования третьего уровня динамики системы в результате флуктуаций управляющего параметра, определяющего плотность энергетических состояний и распределение интенсивного параметра в суперстатистических подсистемах. В качестве систем, описываемых таким подходом, рассмотрены многочастичные системы с ветвящимися процессами. Каждая частица обладает случайным временем жизни и распадается на случайное число частиц нескольких типов, при этом учитывается зависимость характеристик происходящего распада от типа и возраста распадающейся частицы. Рассмотрено приложение теории к задаче о нестационарном рождении электрон-позитронных пар в магнитосфере нейтронной звезды, вычислено распределение частиц по энергиям и найдена доля полностью ускоренных частиц.

2. Показано, что источником позитронов в Галактике, отвечающим за аннигиляционную линию 511 кэВ и удовлетворяющим современным наблюдательным ограничениям, могут быть потухшие радиопульсары — старые нейтронные звёзды, которые когда-то были обыкновенными радиопульсарами. Энергия электронов и позитронов, возникающих в магнитосфере таких звёзд, значительно ниже, чем в магнитосфере действующих радиопульсаров. Сами звёзды могут обладать значительно большим периодом вращения по сравнению с действующими радиопульсарами, но их магнитное поле должно быть такого же порядка, потому что в меньших магнитных полях однофотонное рождение пар становится неэффективным. Генерация позитронов происходит благодаря поглощению фотонов Галактического и внегалактического гамма-фона в магнитосфере потухшего радиопульсара.

3. Изучена внутренняя электродинамика нейтронной звезды. В случае вращающейся звезды скрутка магнитных силовых линий

вызывает накопление зарядов и протекание токов, что говорит о возможной связи между изменением топологии внутреннего магнитного поля и наблюдаемой активностью нейтронных звёзд. Исследовано возникновение вынужденной прецессии нейтронной звезды за счёт индукцирования момента электромагнитных сил её собственным вращением. Рассмотрены эффекты момента сил и деформации и получены оценки на внутреннее магнитное поле через периоды вращения и прецессии, причём последний период соответствует наблюдаемой периодической модуляции повторяющейся активности FRB. Тем самым преодолены ранее существовавшие проблемы, возникающие при связывании радиовсплесков с магнитарами в свете ограничений, следующих из наблюдательных данных по излучению высоких энергий.

4. Исследована структура релятивистского джета в галактике M87. Наблюдения джета на частотах 1.6, 5 и 15 ГГц демонстрируют существование устойчивой трёхгорбой структуры поперечного профиля с не наблюдавшимся ранее сверхузким центральным пиком. Эта радиоструктура может отражать действительную структуру джета, на самом деле состоящего из двух вложенных соосных джетов. Разработана релятивистская магнитогидродинамическая модель, в которой внутренний джет помещён в полый внешний джет, и рассчитаны термодинамические, гидродинамические и электромагнитные параметры плазменного течения. Структура «джет в джете» может свидетельствовать об одновременной работе механизмов Блэндфорда — Знаека и Блэндфорда — Пейна.

5. Предложен новый способ определения параметра вращения центральной сверхмассивной чёрной дыры в галактике M87. Длительные наблюдения джета на частоте 43 ГГц свидетельствуют о том, что он испытывает поперечное квазипериодическое смещение с периодом от 8 до 10 лет. Описанное явление может отражать прецессию наклонённого аккреционного диска вокруг чёрной дыры, возникающую благодаря общерелятивистскому эффекту увлечения систем отсчёта. Исследован как случай прецессии пробных частиц, так и случай твердотельной прецессии аккреционного диска, рассмотрены различные значения массы центрального источника.

6. Изучены данные радионаблюдений M87 на частоте 43 ГГц,

демонстрирующие постепенное релятивистское ускорение плазмы с линейной зависимостью лоренц-фактора от радиуса джета на субпарсековских масштабах. Проведён общий анализ интегралов движения и показано, что в джете имеется политропное уравнение состояния с показателем $4/3$. Данный результат не зависит от точной природы сил, поддерживающих поперечное равновесие джета, и является признаком существования на субпарсековских масштабах горячего потока вещества, когда имеется не только релятивистское объёмное движение плазмы как целого, но и релятивистское внутреннее термодинамическое движение частиц, составляющих плазму. Протекающий в джете продольный электрический ток, в общем случае не обязанный сохраняться при движении вдоль магнитной силовой трубки, оказывается точным интегралом движения, что говорит о существовании устойчивой электромагнитной структуры на рассматриваемых масштабах.

7. Исследована связь между кинетикой системы экситонных поляритонов в полупроводниковом микрорезонаторе и свойствами наблюдаемого излучения. С помощью квантового кинетического уравнения вычислены степени временной когерентности первого и второго порядка и рассчитан спектр излучения системы. Продемонстрирована аналогия между подсистемой невзаимодействующих поляритонов и хаотическим светом. Полученное соотношение для однородной ширины линии нижних поляритонных состояний верно для общего случая неравновесного экситонного резервуара и легло в основу нового метода определения временной динамики его температуры после возбуждения системы коротким лазерным импульсом.

8. Рассмотрено явление продольной спиновой релаксации двумерного электронного газа в квантовой яме во внешнем магнитном поле. При описании прецессии и нутации спина электрона учтено расщепление Зеемана и спин-орбитальное взаимодействие Дрессельхауса в полупроводниках типа цинковой обманки. Для осуществления релаксации спина необходимы столкновения, которые вызывают изменение фазы вращения электрона и смещение в пространстве его ведущего центра. Найдена зависимость времени спиновой релаксации от коэффициента пространственной диффузии электрона

и характеристик образца. Исследование зависимости этого времени от магнитного поля обнаружило аномальное поведение двумерного электронного газа, аналогичное наблюдаемому в замагниченной плазме.

9. Построена теория совместного оптического и магнитного резонанса в объёмной спиновой системе. Эта система находится в постоянном внешнем магнитном поле и подвержена действию переменного радиочастотного магнитного поля и периодического импульсного оптического излучения. Двойной резонанс возникает, когда частота переменного поля совпадает с ларморовской частотой, в свою очередь кратной частоте оптического возбуждения системы. Такое комплексное воздействие даёт новый метод управления средней спиновой поляризацией системы. Вычислены резонансные и нерезонансные спектры спиновой поляризации и показано согласие теории и эксперимента.

В заключение отметим, что новые направления исследований, представленные в диссертации, получают своё дальнейшее развитие в работах других учёных. Так, направление по обобщённой суперстатистике и иерархическому принципу максимума энтропии разрабатывается далее в работах²³, где рассматривается случай иерархической системы с большим количеством разделённых пространственно-временных масштабов — так называемая *H*-теория. В работе²⁴ идеи обобщённой суперстатистики использовались при анализе финансовых временных рядов. Что касается результатов по нейтронным звёздам, то возможная причастность физических процессов, вызывающих радиовспышки вращающихся радиотранзиентов, к нагреву полярной шапки подтверждается совместными рентгеновскими и радионаблюдениями RRAT J1819-1458²⁵. Для объяснения быстрых радиовсплесков идея о молниях в магнитосфере нейтронной звезды использовалась в работе²⁶, о прецессии Лензе — Тирринга аккреци-

²³ Salazar D. S. P., Vasconcelos G. L. Phys. Rev. E. 2012. 86. 050103(R) ; Vasconcelos G. L., Salazar D. S. P., Macêdo A. M. S. Phys. Rev. E. 2018. 97. 022104.

²⁴ Vamoş C., Crăciun M. Eur. Phys. J. B. 2014. 87. 301.

²⁵ Miller J. J., McLaughlin M. A., Rea N., et al. Astrophys. J. 2013. 776. 104.

²⁶ Katz J. I. Mon. Not. R. Astron. Soc.: Lett. 2017. 469. L39.

онного диска и джета — в работе²⁷, а тестирование модели происхождения FRB от нейтронных звёзд, совершающих вынужденную прецессию, проведено в работе²⁸. Наконец, в направлении по исследованиям чёрной дыры и релятивистского джета в галактике M87 идея о коаксиальной структуре джета использовалась в работе²⁹, а в дополнение к ранним наблюдениям, дающим магнитное поле $\sim (50\text{—}124)$ Гс на основании джета³⁰, в 2021 г. появились результаты наблюдений поляризованного излучения Телескопа горизонта событий (ЕНТ) на частоте 230 ГГц³¹, подтверждающие теоретические предсказания характеристик джета, изложенные в диссертации и предложенные в 2017 г. [9]. Выведенные из наблюдений магнитное поле $\sim (1\text{—}30)$ Гс, плотность электронов $\sim 10^{4-7}$ см⁻³ и их температура $\sim (1\text{—}12) \times 10^{10}$ К согласуются со значениями поля ~ 80 Гс, плотности протонов в диске $\sim 2 \times 10^6$ см⁻³ (соответствующей плотности электронов в силу электронейтральности) и температуры электронов $\sim 10^{11}$ К. Кроме того, как оказалось, новым наблюдательным ограничениям удовлетворяют только магнитно-арестованные модели течений, что подтверждает предсказание автора 2018 г. о существовании вокруг чёрной дыры в галактике M87 магнитно-арестованного диска [10]. Из работ, не вошедших в диссертацию, можно упомянуть работы по бозе-эйнштейновской конденсации света³² и микрогидродинамике антипузырей³³. Важность полученных результатов по флуктуациям конденсата фотонов в оптической микрополости отмечается в различных теоретических и экспериментальных работах³⁴, а на основе построенной теории коллапса антипузырька

²⁷Katz J. I. Mon. Not. R. Astron. Soc.: Lett. 2020. 494. L64.

²⁸Katz J. I. Mon. Not. R. Astron. Soc. 2021. 502. 4664.

²⁹Gabuzda D. C., Nagle M., Roche N. Astron. Astrophys. 2018. 612. A67.

³⁰Kino M., Takahara F., Hada K., et al. Astrophys. J. 2015. 803. 30.

³¹ЕНТ Collaboration. Astrophys. J. Lett. 2021. 910. L13.

³²Sob'yanin D. N. Bull. Lebedev Phys. Inst. 2013. 40. 91 ; Sob'yanin D. N. Phys. Rev. E. 2013. 88. 022132.

³³Sob'yanin D. N. Phys. Rev. Lett. 2015. 114. 104501.

³⁴Marelic J., Nyman R. A. Phys. Rev. A. 2015. 91. 033813 ; Kruchkov A. J. Phys. Rev. A. 2016. 93. 043817 ; Schmitt J., Damm T., Dung D., et al. Phys. Rev. Lett. 2016. 116. 033604 ; Nyman R. A., Walker B. T. J. Mod. Opt. 2018. 65. 754 ; Morawetz K. Phys. Rev. B. 2019. 99. 205124.

в дальнейшем было изучено стягивание воздушного слоя и воздушной нити в жидкости и с помощью численного моделирования подтверждено предсказанное автором в 2014 г. возникновение вихревой дорожки за ободком³⁵.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в научных журналах, индексируемых в международной базе данных Web of Science

1. Istomin Ya. N., Sob'yanin D. N. Absorption of gamma-ray photons in a vacuum neutron star magnetosphere: I. Electron-positron pair production // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2011. — Vol. 113, No. 4. — P. 592–604.
Истомин Я. Н., Собьянин Д. Н. Поглощение гамма-квантов в вакуумной магнитосфере нейтронной звезды. I. Рождение электрон-позитронных пар // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2011. — Т. 140, вып. 4 (10). — С. 681–695.
2. Istomin Ya. N., Sob'yanin D. N. Absorption of gamma-ray photons in a vacuum neutron star magnetosphere: II. The formation of “lightnings” // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2011. — Vol. 113, No. 4. — P. 605–618.
Истомин Я. Н., Собьянин Д. Н. Поглощение гамма-квантов в вакуумной магнитосфере нейтронной звезды. II. Формирование «молний» // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2011. — Т. 140, вып. 4 (10). — С. 696–711.
3. Istomin Ya. N., Sobyayanin D. N. Formation of “lightnings” in a neutron star magnetosphere and the nature of RRATs // *Astronomy Letters*. — 2011. — Vol. 37, No. 7. — P. 468–479.
Истомин Я. Н., Собьянин Д. Н. Образование «молний» в магнитосфере нейтронной звезды и природа RRAT // *Письма в Астрономический журнал*. — 2011. — Т. 37, № 7. — С. 512–524.

³⁵ Jian Z., Deng P., Thoraval M.-J. *J. Fluid Mech.* 2020. 899. A7 ; Deng P., Jian Z., Thoraval M.-J. *Phys. Fluids*. 2021. 33. 051702.

4. Sob'yanin D. N. Generalization of the Beck-Cohen superstatistics // *Physical Review E*. — 2011. — Vol. 84, Iss. 5. — Art. 051128.
5. Sob'yanin D. N. Hierarchical maximum entropy principle for generalized superstatistical systems and Bose-Einstein condensation of light // *Physical Review E*. — 2012. — Vol. 85, Iss. 6. — Art. 061120.
6. Belykh V. V., Sob'yanin D. N. Polariton linewidth and the reservoir temperature dynamics in a semiconductor microcavity // *Physical Review B*. — 2014. — Vol. 89, Iss. 24. — Art. 245312.
7. Sob'yanin D. N. Breakdown of the Goldreich-Julian relation in a neutron star // *Astronomy Letters*. — 2016. — Vol. 42, No. 11. — P. 745–751.
Собьянин Д. Н. Нарушение соотношения Гольдрайха-Джулиана в нейтронной звезде // *Письма в Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 42, № 11. — С. 818–825.
8. Beskin V. S., Istomin Ya. N., Kiselev A. M., Krauz V. I., Mitrofanov K. N., Myalton V. V., Nokhrina E. E., Sob'yanin D. N., Kharrasov A. M. Simulation of nonrelativistic jet ejections during the laboratory studies // *Radiophysics and Quantum Electronics*. — 2017. — Vol. 59, No. 11. — P. 900–910.
Бескин В. С., Истомин Я. Н., Киселёв А. М., Крауз В. И., Митрофанов К. Н., Мьялтон В. В., Нохрина Е. Е., Собьянин Д. Н., Харрасов А. М. Моделирование нерелятивистских струйных выбросов в лабораторных исследованиях // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2016. — Т. 59, № 11. — С. 1004–1016.
9. Sob'yanin D. N. Jet in jet in M87 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — Vol. 471, Iss. 4. — P. 4121–4127.
10. Sob'yanin D. N. Black hole spin from wobbling and rotation of the M87 jet and a sign of a magnetically arrested disc // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. — 2018. — Vol. 479, Iss. 1. — P. L65–L69.
11. Sob'yanin D. N. Relativistic polytrope from the collimation and acceleration profiles of the M87 jet at subparsec scales and thermodynamic evidence for the Blandford-Znajek mechanism // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. — 2019.

- Vol. 489, Iss. 1. — P. L7–L11.
12. Belykh V. V., Kochiev M. V., Sob'yanin D. N., Yakovlev D. R., Bayer M. Anomalous magnetic suppression of spin relaxation in a two-dimensional electron gas in a GaAs/AlGaAs quantum well // *Physical Review B*. — 2020. — Vol. 101, Iss. 23. — Art. 235307.
 13. Belykh V. V., Sob'yanin D. N., Korotneva A. R. Resonant spin amplification meets electron spin resonance in *n*-GaAs // *Physical Review B*. — 2020. — Vol. 102, Iss. 7. — Art. 075201.
 14. Sob'yanin D. N. Periodic fast radio bursts from forcedly precessing neutron stars, anomalous torque, and internal magnetic field for FRB 180916.J0158+65 and FRB 121102 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 497, Iss. 1. — P. 1001–1007.
 15. Istomin Ya. N., Chernyshov D. O., Sob'yanin D. N. Extinct radio pulsars as a source of subrelativistic positrons // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Vol. 498, Iss. 2. — P. 2089–2094.

Другие работы

16. Собьянин Д. Н. О радиовспышках RRAT // *Фундаментальные и прикладные космические исследования : VIII конференция молодых учёных, посвящённая Дню космонавтики и 50-летию полёта Юрия Гагарина, Москва, ИКИ РАН, 14–15 апреля 2011 : программа, тезисы докладов / Российская академия наук, Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Научно-образовательный центр ИКИ РАН. — Москва : ИКИ РАН, 2011. — С. 74–75.*
17. Sobyenin D. N. Formation of “lightnings” in an RRAT magnetosphere // *International Conference on the Physics of Neutron Stars, Saint-Petersburg, Russia, July 11–15, 2011 : Book of Abstracts / Editors: D. A. Baiko, Yu. A. Uvarov and D. G. Yakovlev. — Saint-Petersburg, 2011. — P. 117.*
18. Истомин Я., Собьянин Д. Формирование «молний» в магнитосфере нейтронной звезды // *Агентство научной информации «ФИАН-информ» : сайт. — 2011. — URL:*

- <https://fian-inform.ru/astrofizika/item/404-formirovanie-molnij-v-magnitosfere-nejtronnoj-zvezdy> (дата обращения: 19.04.2022).
19. Истомин Я. Н., Собьянин Д. Н. Формирование «молний» в магнитосфере нейтронной звезды // Информационный бюллетень / Российская академия наук, Физический институт имени П.Н.Лебедева, Агентство научной информации ФИАН-Информ. — Москва : ФИАН, 2011. — Вып. №8 (июль — сентябрь 2011 года). — С. 57—58.
Istomin Ya. N., Sob'yanin D. N. Formation of “lightnings” in the neutron-star magnetosphere // Там же. — С. 59—60.
 20. Sob'yanin D. Generalized superstatistics, branching processes, and pair production in a neutron star magnetosphere // Ginzburg Conference on Physics, Lebedev Institute, Moscow, May 28 — June 2, 2012 : Abstracts. — Moscow : Lebedev Physical Institute, 2012. — P. 67—68.
 21. Собьянин Д. Н. Теоретическое исследование нестационарных процессов в магнитосферах нейтронных звёзд // Сборник трудов V Всероссийской молодёжной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, 10—15 ноября 2013 года, Москва, ФИАН : программа и тезисы докладов. — Москва : ФИАН, 2013. — С. 202.
 22. Собьянин Д. Н. Генерация плазмы в магнитосфере RRAT и обобщённая суперстатистика // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XI конференция молодых учёных, посвящённая Дню космонавтики, Москва, ИКИ РАН, 9—11 апреля 2014 / Российская академия наук, Научно-образовательный центр ИКИ РАН. — Москва : ИКИ РАН, 2014. — С. [92].
 23. Собьянин Д. Н. Генерация плазмы в магнитосфере вращающихся радиотранзиентов (RRAT) и обобщённая суперстатистика // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XI конференция молодых учёных, 9—11 апреля 2014 года, ИКИ РАН, Москва : сборник трудов / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии

- наук ; под. ред. А. М. Садовского. — Москва : ИКИ РАН, 2014. — (Серия «Механика, управление и информатика», ISSN 2075-6836). — С. 114—119.
24. Собьянин Д. Н. Нарушение соотношения Гольдрайха-Джулиана в нейтронной звезде // Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук : Основные результаты научной деятельности, 2016. — Москва : ФИАН, 2016. — С. 64—65.
25. Sob'yanin D. Violation of the Goldreich-Julian relation in a neutron star // Ginzburg Centennial Conference on Physics : GC100, Lebedev Institute / Moscow, May 29 — June 3, 2017 : Abstracts. — Moscow : Lebedev Physical Institute, 2017. — P. 53.
26. Собьянин Д. Н. Джет в джете в М87 // ФИАН : Основные результаты научной деятельности, 2017. — Москва : ФИАН, 2017. — С. 80—81.
27. Собьянин Д. Н. Теоретическое моделирование космических струйных выбросов // Материалы Международного молодёжного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018» : XXV Международная научная конференция, МГУ имени М.В.Ломоносова, 9 — 13 апреля 2018 года, г. Москва / Отв. ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов. — Москва : МАКС Пресс, 2018. — 1 DVD-ROM. — ISBN 978-5-317-05800-5.
28. Собьянин Д. Н. Джет в джете в галактике М87 // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XV конференция молодых учёных, посвящённая Дню космонавтики, Москва, 11—13 апреля 2018 : тезисы / Научно-образовательный центр ИКИ РАН. — Москва : Институт космических исследований РАН, 2018. — С. 109.
29. Собьянин Д. Н. Джет в джете в галактике М87 // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XV конференция молодых учёных, 11—13 апреля 2018 года, ИКИ РАН, Москва : сборник трудов / Институт космических исследований РАН ; под. ред. А. М. Садовского. — Москва : ИКИ РАН, 2018. — (Серия «Механика, управление и информатика», ISSN 2075-6836). — ISBN 978-5-00015-051-1. — С. 128—132.

30. Собьянин Д. Н. Определение скорости вращения чёрной дыры по качанию и вращению джета в галактике M87 // ФИАН : Основные результаты научной деятельности, 2018. — Москва : ФИАН, 2018. — С. 64—65.
31. Собьянин Д. Н. Определение скорости вращения чёрной дыры по качанию и вращению джета в галактике M87 // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XVI конференция молодых учёных, посвящённая Дню космонавтики, Москва, 15—17 апреля 2019 г. : сборник тезисов докладов / Научно-образовательный центр ИКИ РАН ; под. ред. А. М. Садовского. — Москва : Институт космических исследований РАН, 2019. — (Серия «Механика, управление и информатика», ISSN 2075-6836). — ISBN 978-5-00015-047-4. — С. 165.
32. Собьянин Д. Н. Определение скорости вращения чёрной дыры по качанию и вращению джета в галактике M87 // Фундаментальные и прикладные космические исследования : XVI конференция молодых учёных, 15—17 апреля 2019 года, ИКИ РАН, Москва : сборник трудов / Институт космических исследований РАН ; под. ред. А. М. Садовского. — Москва : ИКИ РАН, 2019. — (Серия «Механика, управление и информатика», ISSN 2075-6836). — ISBN 978-5-00015-032-0. — С. 158—162.
33. Собьянин Д. Н. Уравнение состояния, состав и механизм запуска релятивистского джета в галактике M87 // ФИАН : Основные результаты научной деятельности, 2019. — Москва : ФИАН, 2019. — С. 78—79.
34. Собьянин Д. Н. Периодические быстрые радиовсплески как проявление вынужденной прецессии нейтронных звёзд // ФИАН : Основные результаты научной деятельности, 2020. — Москва : ФИАН, 2020. — С. 98—99.
35. Белых В. В., Собьянин Д. Н., Коротнёва А. Р. Гигантское оптическое усиление электронного парамагнитного резонанса // ФИАН : Основные результаты научной деятельности, 2020. — Москва : ФИАН, 2020. — С. 121—122.
36. Belykh V. V., Kochiev M. V., Sob'yanin D. N., Yakovlev D. R.,

Bayer M. Longitudinal spin dynamics of high-mobility two-dimensional electron gas // Nanostructures: Physics and Technology : 28th International Symposium, Minsk, Republic of Belarus, September, 2020 : Proceedings. — St Petersburg : Ioffe Institute, RAS, 2020 (Printed in the Republic of Belarus). — ISBN 978-5-93634-066-6. — P. 174—175.

Подписано в печать 27.11.2023. Формат 60 × 84/16.
Усл. печ. л. 2,56. Авт. л. 1,99. Тираж 100 экз. Заказ 3452.
Отпечатано в ООО «ВНИПР». 127644, Москва, Клязьминская ул., 15,
тел. (495) 486-80-76, vnipr.ru, info@vnipr.ru.