

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 720.001.01  
НА БАЗЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21.06.2017 №100

О присуждении Баушеву Антону Николаевичу ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Тёмная материя: проблемы и решения» по специальности 01.04.02 – теоретическая физика принята к защите 01.03.2017 (протокол № 96) диссертационным советом Д 720.001.01 на базе Объединенного института ядерных исследований, международной межправительственной организации, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, приказ Рособнадзора о создании совета № 1484-1047 от 11.07.2008; полномочия совета подтверждены приказом Минобрнауки РФ № 105/НК от 11.04.2012.

Соискатель **Баушев Антон Николаевич** 1977 года рождения.

В 1999 году соискатель окончил факультет проблем физики и энергетики Московского физико-технического института (государственного университета) с присуждением квалификации «инженер-физик» по специальности «Прикладные математика и физика». Диссертационную работу на соискание ученой степени кандидата наук соискатель защитил в 2003 г., в диссертационном совете, созданном на базе Московского физико-технического института (государственного университета). В настоящее время соискатель работает в должности старшего научного сотрудника в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, международной межправительственной организации. Диссертация выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, Объединенном институте ядерных исследований, международной межправительственной организации.

Диссертационная работа выполнена без научных консультантов.

Официальные оппоненты

**Алексеев Станислав Олегович**, доктор физико-математических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), ведущий научный сотрудник отдела релятивистской астрофизики,

**Лукаш Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Физический институт Российской академии наук, Астрокосмический центр, заведующий отделом теоретической астрофизики,

**Рубин Сергей Георгиевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», главный научный сотрудник, профессор кафедры физики элементарных частиц Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт», дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном **Докучаевым Вячеславом Ивановичем** (доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики), **Сергеем Владимировичем Демидовым** (кандидат физико-математических наук, секретарь ученого совета отдела теоретической физики Института ядерных исследований Российской академии наук), **Селидовкиным Андреем Дмитриевичем** (кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Института ядерных исследований Российской академии наук) и утвержденном **Рубцовым Григорием Игоревичем** (доктор физико-математических наук, заместитель директора Института ядерных исследований Российской академии наук по научной работе) указала, что *«Диссертационная работа А. Н. Баушева посвящена различным аспектам физики темной материи и особенно внимание уделяет рассмотрению способов экспериментального исследования физической природы этого важнейшего*

космологического феномена. <...> Тема, выбранная автором, весьма актуальна <...> Безусловно, самые важные и ценные результаты диссертации изложены в ее первой главе. Здесь существенно развита теория образования структур во Вселенной. <...> Большой практический интерес представляют результаты предпринятых А. Н. Баушевым исследований распределения частиц темной материи по скоростям в окрестностях Земли (вторая глава диссертации). <...> Оценивая диссертацию в целом, нужно подчеркнуть, что она представляет собой теоретическое исследование высокого уровня, вносящее существенный вклад в наиболее популярные разделы физики скрытой массы. В ней рассмотрены все основные методики, применяемые в настоящее время для поисков темной материи, проведен анализ чрезвычайно широкого круга наблюдательных данных и обоснованы предложения по наиболее перспективным направлениям выяснения физической природы скрытой массы. Автором также предложены новые методы исследования сходимости компьютерных симуляций, широко применяемых для моделирования структур во Вселенной. Таким образом, представленная работа обладает всеми атрибутами нового научного направления. Исследования автора проведены на уровне лучших работ, посвященных обсуждаемым проблемам, и в значительном числе аспектов превосходят их. Результаты исследований опубликованы в ведущих мировых научных изданиях и доложены на наиболее авторитетных международных конференциях, посвященных проблемам скрытой массы. Представленные выше замечания, касающиеся существа работы, не умаляют ее научной ценности, и их следует рассматривать не как указания на неустранимые недостатки, а как демонстрацию проблем, ожидающих своего решения с использованием в том числе и методов, развитых в обсуждаемой диссертации. Поэтому они не влияют на основной вывод настоящего отзыва.

В итоге можно с уверенностью утверждать, что представленная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - А. Н. Баушев - безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 (теоретическая физика). Автореферат правильно отражает содержание

диссертации. Результаты диссертации могут найти применение в МГУ, ОИЯИ, ИКИ РАН, АКЦ ФИАН, ИЯИ РАН и других научных учреждениях Российской Федерации.».

Соискатель имеет 35 публикаций, в том числе 23 работы по теме диссертации, из которых 19 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Основные работы:

- 1) А.Н. Баушев «Зависимость спектральных свойств двойного рентгеновского источника 4U0115+63 от фазы: результаты наблюдений спутника *Верро-Sax*» // *Астрономический Журнал*. 2009. Том 86, 76
- 2) Baushev, A. «*Dark Matter Annihilation in the Gravitational Field of a Black Hole*» // *International Journal of Modern Physics D*. 2009. Vol. 18, 1195
- 3) Baushev, A. N. «*Dark matter annihilation at cosmological redshifts: possible relic signal from annihilation of weakly interacting massive particles*» // *MNRAS*. 2009. Vol. 398, 783
- 4) Baushev, A. N. «*Principal properties of the velocity distribution of dark matter particles on the outskirts of the Solar system*» // *MNRAS*. 2011. Vol. 417, L83
- 5) Baushev, A. N., Federici, S., Pohl, M. «*Spectral analysis of the gamma-ray background near the dwarf Milky Way satellite Segue 1: Improved limits on the cross section of neutralino dark matter annihilation*» // *Phys. Rev. D*. 2012. Vol. 86, 063521
- 6) Baushev, A. N. «*The real and apparent convergence of N-body simulations of the dark matter structures: Is the Navarro-Frenk-White profile real?*» // *Astroparticle Physics*. 2015. Vol. 62, 47
- 7) Baushev, A. N. «*Extragalactic Dark Matter and Direct Detection Experiments*» // *ApJ*. 2013. Vol. 771, 117
- 8) Baushev, A. N. «*Galaxy Halo Formation in the Absence of Violent Relaxation and a Universal Density Profile of the Halo Center*» // *ApJ*. 2014. Vol. 786, 65
- 9) Baushev, A. N. «*Relaxation of dark matter halos: how to match observational data?*» // *A&A*. 2014. Vol. 569, A114
- 10) Baushev, A. N. «*Can the dark matter annihilation signal be significantly boosted by substructures?*» // *JCAP*. 2016. Vol. 1, 018

Общий объем опубликованных работ по материалам диссертации составляет 166 печатных страниц. Все работы по результатам диссертации опубликованы в журналах, которые включены в международные системы цитирования Scopus и хорошо известны научному сообществу. Все журналы рецензируемые, опубликованные работы прошли серьезную всестороннюю проверку рецензентами — ведущими специалистами в области теоретической физики и физики высоких энергий.

Отзывы официальных оппонентов и ведущей организации положительные, но содержат следующие основные замечания, не снижающие общей высокой оценки научного уровня диссертации.

Ведущая организация отметила: *«В качестве критического замечания к первой главе можно отметить, что автор правильно выявил недостаточность применяемых в настоящее время критериев сходимости компьютерных симуляций и возникающие в симуляциях существенные численные эффекты, влияние которых в настоящее время совершенно не учитывается при интерпретации их результатов. В работе предложены более надежные критерии оценки сходимости симуляций, но не дается никаких указаний по улучшению самих симуляций. Можно ли вообще моделировать крупномасштабную структуру Вселенной методом многих тел? Если да, то как выбрать наилучшим образом параметры алгоритма вычисления гравитационного потенциала и других алгоритмов, применяемых при моделировании? Безусловно, ответ на эти вопросы важен для теории формирования крупномасштабной структуры Вселенной. <...>*

*В качестве замечания можно отметить, что расчеты формирования толстого диска скрытой массы в нашей Галактике, выполненные автором в конце второй главы, носят довольно оценочный и нестрогий характер. Вопрос о существовании и параметрах коротящего толстого диска скрытой массы в нашей Галактике важен для прямого детектирования темной материи, поэтому эта задача требует серьезного количественного изучения. <...>*

*К сожалению, автор ограничился рассмотрением только одного значения массы частицы скрытой массы, 100 ГэВ. Более массивные частицы (с массой  $> 1$*

*ТЭВ) должны давать более жесткий фотонный спектр аннигиляции. Т.к. астрофизический фон быстро падает с ростом энергии, этот сигнал, возможно, будет легче обнаружить, а его отсутствие позволит поставить более жесткие ограничения на сечение аннигиляции частиц темной материи данной массы.*

*Общей претензией к диссертации является обилие опечаток.»*

В отзыве С.О. Алексеева содержится список из 26 замечаний и вопросов по диссертации. Основные из них следующие: «

*1) Критика модифицированной ньютоновской динамики (MOND) на стр. 8 представляется несколько поверхностной. Стоило бы добавить про астрономические данные о несовпадении оптического и гравитационного центров галактик. В тоже время, контраргументом против требуемой в диссертации универсальности MOND служит подход, при котором теории гравитации на разных масштабах (в частности, общая теория относительности на масштабе Солнечной системы) являются асимптотиками какой-то общей, неизвестной в данный момент теории гравитации.*

*2) Пассаж про роль первичных черных дыр как части темной материи требует уточнения. Модели инфляции допускают рождение первичных черных дыр малых масс (а во многих расширенных моделях гравитации показана возможность существования реликтовых остатков первичных черных дыр, см, например, Phys.Rev. D55 (1997) 2110), но слишком большое их количество вызовет противоречия с первичным нуклеосинтезом (Class.Quant.Grav. 19 (2002) 4431).*

*10) На стр. 44 содержится утверждение о том, что величина  $r_{GV}$  постоянна во всем диапазоне масс галактик и меняется «всего лишь» на три порядка. Да, эти изменения укладывается в  $3\sigma$ , но называть постоянной величину, меняющуюся на несколько порядков, наверное, не очень удачно.*

*11) В выводах идут постоянные предположения. То есть, все сложнейшие выкладки и расчеты автора диссертации позволяют лишь сделать предположение? Даже не утверждение, а предположение?*

*12) На стр. 48 при исследовании «нефизического» способа релаксации не совсем*

понятно, почему автор к нему прибегает. Это какая-то аналогия с реальным физическим процессом или некий трюк, позволяющий обойти математические ограничения?

14) На стр.54 содержатся сплошные предположения. При этом, надо понимать, что с каждым шагом с новыми допущениями вероятность реализации предложенного в диссертации сценария становится все меньше и меньше. Хотелось бы услышать комментарий Антона Николаевича по этому поводу.

24) В главе 4.1 весь процесс аннигиляции обсуждается только для метрики Шварцшильда. Да, математически это проще. Но насколько корректны будут эти результаты в применении к реальным черным дырам? Как изменится результат при учете вращения (метрика Керра)? И насколько корректно находить ставить астрономические ограничения на основании простейшей модели (стр.139)?

25) На стр. 216 содержится утверждение: «гармоника абсурдно глубока». Хотелось бы понять, что автор диссертации хотел сказать этим красивым оборотом.

Несмотря на сделанные замечания, считаю, что работа А.Н. Баушева отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени «доктор физико-математических наук» по специальности «01.04.02 – теоретическая физика».

В своем отзыве В.Н. Лукаш отметил: «К замечаниям по диссертации можно отнести следующие: 1. Выдвинутая автором гипотеза об умеренной релаксации бесстолкновительных частиц тёмной материи в ходе гравитационного формирования галактик исключает важнейшие эффекты истории образования гало — бурную релаксацию и взаимодействие нескольких гало, их вращение, столкновение и иерархическое слияние гало малых масс в массивные объекты ("мерджеринг"), а также другие подобные процессы хорошо исследованные при численном решении задачи N-тел. Рассмотренные автором диссертации простейшие сферические модели распределения частиц, содержащие только один параметр — отношение конечной и начальной энергий частиц (см. условие (2.3) на

стр. 28), — не описывают общую эволюцию галактики и некорректны в вопросах сравнения аналитических модельных аппроксимаций с данными наблюдений. 2) После формирования гало частицы тёмной материи "живут" в центре, а не приходят туда с периферии. Число частиц, приходящих с периферии и приобретающих большие скорости в центре гало, ничтожно мало, и они не дают вклада в светимость аннигиляции.

Отмеченные выше недостатки не умаляют научной ценности диссертации А. Н. Баушева, которая является цельной научной работой, а совокупность полученных новых результатов представляет достижение в области теории тёмной материи и физики элементарных частиц, и, в частности, для планирования экспериментов по поиску темной материи.»

С.Г. Рубин в своем отзыве высказал следующие замечания: «К замечаниям по диссертации можно отнести следующее:

1. Автор стремился создать общую картину поведения частиц темной материи в гравитационно связанных областях. В целом, ему это удалось, но ценой отказа от точных предсказаний. Практически во всех главах делаются правдоподобные оценки, которые трудно подтвердить точными численными вычислениями. В качестве иллюстрации, можно указать на вычисление интеграла в формуле (2.20). Тем не менее, физически мотивированные результаты указывают на правильность развиваемых идей. Так, идея об умеренной релаксации хорошо объясняет наблюдательные данные и может быть использована при построении последующих моделей темной материи в качестве критерия правильности конкретной модели.

2. На стр. 94 утверждение автора о связи Максвелловского распределения частиц темной материи по скоростям и формы орбиты, по которым они движутся, не является обоснованным.

3. Использование формулы Брейта-Вигнера (4.18) для описания сечения аннигиляции частиц темной материи, является слишком общим. Выбор параметров может кардинально повлиять на выводы, описанные в диссертации.



*Хотелось бы видеть в диссертации анализ подобного влияния.*

*Отмеченные выше недостатки не снижают научного значения диссертации А.Н. Баушева, которая является завершённой научной работой, а совокупность полученных новых результатов представляет существенное достижение в области теории, имеющее значение для разрешения одной из основных загадок физики – сущности темной материи. »*

Соискатель ответил на все замечания.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации основан на соответствии их профессиональной деятельности содержанию диссертационной работы.

**Диссертационный совет отмечает,** что в рамках проведённых соискателем исследований:

Разработан энергетический подход к формированию структур темной материи. Доказано, что гораздо лучшее согласие с результатами наблюдений может быть получено, если сделать единственное предположение, что релаксация в ходе формирования гало была умеренной. При этом естественное объяснение получает целый ряд особенностей, наблюдаемых в центрах галактических гало темной материи.

Раскрыты противоречия критериев сходимости космологических компьютерных симуляций, повсеместно применяемых в настоящее время. Использован метод Фоккера-Планка в центре гало. Предложены несколько существенно более надежных и научно обоснованных методов независимой проверки сходимости космологических компьютерных симуляций, которые могут быть применены даже в реальном времени в процессе моделирования.

Использован предложенный в диссертации энергетический подход к образованию подструктур темной материи для выяснения их распределения в различных астрономических объектах в настоящий момент.

Изучены физические явления, влияющие на распределение частиц темной материи по скоростям. Раскрыта значительная доля внегалактической темной материи в окрестностях Солнечной Системы, доказано ее изотропное распределение по скоростям.

Определены наиболее перспективные источники для наблюдательного поиска аннигиляции темной материи. Изучены особенности аннигиляционного сигнала для трех перспективных видов источников: черных дыр, карликовых сфероидов и аннигиляции темной материи, происходящей в ранней Вселенной. Изучены некоторые источники космического излучения высоких энергий, сходного с образующимся при аннигиляции темной материи. Исходя из этого, представлены рекомендации по выбору наиболее перспективных источников для непрямого поиска темной материи.

**Теоретическая значимость:** основные результаты диссертации, выносимые на защиту, являются новыми и важными для развития современной физики темной материи. Приоритет автора в получении решения основных задач диссертации признается мировым сообществом, что подтверждается цитированием и использованием его результатов в дальнейших исследованиях другими учеными как в нашей стране, так и за рубежом.

В диссертации существенно развита теория образования структур во Вселенной. С помощью предположения об умеренной энергетической релаксации соискателю удалось объяснить четыре особенности галактических гало темной материи, которые были давно известны, но не находили убедительного объяснения в рамках стандартной теории образования структур: наличие плато, а не пика, в центре гало; поведение профиля плотности в области плато как профиля Эйнасто с малым индексом ( $n \sim 0.5$ ); обширная область с  $\rho \sim r^{-2}$ ; постоянство произведения центральной плотности гало на радиус плато. Более того, с помощью анализа сходимости компьютерных симуляций, применяемых для моделирования формирования структур во Вселенной, соискатель сумел указать на уязвимость общепринятых критериев сходимости и предложить решение широко известного противоречия между предсказываемыми симуляциями пиками и наблюдаемыми плато профилей плотности темной материи в центрах галактических гало. До этого в литературе доминировала точка зрения, что противоречие указывает на физические свойства темной материи, т.е. что она либо не была холодной, либо

10

вступает в какие-то негравитационные взаимодействия сама с собой или с барионным веществом. Будь это так - мы бы получили ценнейшую информацию о природе темной материи. Большое внимание, уделяемое этому вопросу в международной научной литературе, неудивительно. В настоящее время существование темной материи является, по сути, единственным прямым экспериментальным аргументом в пользу существования физики, выходящей за пределы Стандартной Модели: поиск на Большом адронном коллайдере и других установках пока положительных результатов, не дал. Ничего не дали и прямые и непрямые поиски темной материи. В таких условиях любая достоверная информация о физической природе темной материи чрезвычайно ценна. К сожалению, соискателю удалось показать, что острые пики плотности в центре гало, наблюдаемые при моделировании и рассматриваемые в настоящее время как сильный аргумент против модели холодной темной материи, наиболее вероятно, являются не более чем вычислительным артефактом.

Большой практический интерес представляют и результаты предпринятых А.Н. Баушевым исследований распределения частиц темной материи по скоростям в окрестностях Земли (вторая глава диссертации). В настоящее время в мире одновременно работают порядка десяти экспериментов по прямому поиску темной материи, и их результаты противоречивы. Например, DAMA уже давно наблюдает сигнал, который можно интерпретировать как частицы темной материи с массой  $\sim 10$  ГэВ, а наблюдения других установок, в частности, XENON, исключают существование такой частицы. Т.к. результаты прямого детектирования очень чувствительны к распределению частиц темной материи по скоростям, реалистичные модели этого распределения имеют большую практическую значимость.

Обсуждение наиболее перспективных источников для непрямого поиска, и потенциальных трудностей при интерпретации полученного сигнала, вызванных наличием астрофизических источников жесткого излучения, по своим свойствам похожего на сигнал аннигиляции темной материи (третья и четвертая главы

диссертации), также весьма актуально.

**Значение полученных соискателем результатов для практики** заключается как в лучшем осмыслении результатов уже проведенных наблюдений, так и в возможности использования полученных в диссертации результатов для планирования будущих экспериментов по прямому и непрямоу поиску темной материи. Результаты диссертации могут найти применение в Московском государственном университете, Объединенном институте ядерных исследований, Институте космических исследований Российской академии наук, Астрокосмического центра Физического института Российской академии наук, Института ядерных исследований Российской академии наук и других научных учреждениях Российской Федерации.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила: вычисления, проделанные в диссертации, основываются на использовании стандартных методов теоретической механики, динамики звездных систем и теоретической физики. Все новые результаты проверялись на предмет соответствия известным классическим достижениям в данной области теоретической физики. Применение при получении результатов, главным образом, аналитических преобразований давало возможность сравнительно легкой их проверки, что далеко не всегда просто сделать при использовании численного моделирования. Во многих случаях оригинальные результаты диссертации в дальнейшем проверялись и воспроизводились другими исследователями. Кроме того, работы, положенные в основу этой диссертации, прошли весьма строгое рецензирование в первоклассных научных журналах, что тоже в некоторой степени удостоверяет их достоверность.

**Личный вклад** соискателя в решение рассматриваемых в диссертации задач является определяющим. Аналитические результаты и численные расчеты получены автором.

На заседании 21 июня 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Баушеву Антону Николаевичу ученую степень доктора физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный

совет в количестве 18 человек, из них 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 15, против 1, недействительных бюллетеней 2.

Председатель  
диссертационного совета

Воронов Виктор Васильевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Быстрицкий Юрий Михайлович

21.06.2017 г.

