

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Чудайкина Антона Сергеевича “Модели многокомпонентной темной материи в космологии и астрофизике”  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Признак точной космологии — не определение величины описывающих Вселенную параметров или их количества, но улучшение точности их измерения. При этом само понятие “измерение” эволюционирует со временем, и связано с разработкой новых методов регистрации наблюдательных данных и их анализа, а также с новым уровнем понимания физики Вселенной. Эпоха точных космологических измерений наступила с публикаций результатов космической миссии NASA WMAP по измерению уровня анизотропии реликтового излучения, когда параметры Вселенной были определены с точностью лучше 10%. Дальнейшие измерения космического микроволнового фона обсерваторией Planck и их согласие с результатами анализа данных по Сахаровским осцилляциям, полученным в рамках оптической программ BOSS Слоановского обзора, привели к работам с оценками параметров Вселенной с точностью  $\sim 1\%$ . Однако, как и во всякой экспериментальной науке, в наблюдательной космологии среди большого числа проводимых экспериментов, появляются измерения с другими оценками величин измеряемых параметров. Эти данные подогревают интерес астрофизиков и физиков к темам точности измерения современных параметров Вселенной и, вообще, к физике, которая могла бы объяснить расхожимость результатов. В этом плане предлагаемая диссертация Антона Сергеевича Чудайкина, посвященная исследованию свойств Вселенной в различные космологические эпохи особенно в плане потенциально проявления новой физики, связанной с эволюционными свойствами темной материи, несомненно актуальна.

Целью диссертационной работы А.С.Чудайкина явилось изучение механизмов генерации и наблюдательного проявления распадающейся темной материи.

Диссертация содержит пять глав, включая Введение и Заключение, а также список литературы.

Во **Введении** дается описание современного состояния исследований Вселенной и определения ее параметров с помощью наземных и космических наблюдательных экспериментов, обсуждается проблема расхождения значений космологических параметров в различных измерениях, рассматриваются проблемы современной физики нейтрино и вопросы существования стерильного нейтрино как частицы — кандидата в темную материю. Описывается современное состояние дел в экспериментах по регистрации стерильного нейтрино. Во Введении также дан обзор основных исследований представленной диссертации, проведенных в последующих главах.

В **Первой главе** диссертации исследуется модель с распадающейся темной материей (DCDM) на предмет согласования измерений на разных  $z$ . Делается вывод о том, что данные спутника Planck чувствительны к эффекту слабого линзирования фотонов на неоднородностях гравитационного потенциала в поздней Вселенной, который приводит к сильному ограничению пространства параметров модели DCDM. Оценки показали, что доля нестабильной темной материи может принимать значения до  $F \sim 3 - 9\%$ . Благодаря чему удастся значительно ослабить обсуждаемые противоречия между экспериментами на малых красных смещениях и результатами спутника Planck.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния новой физики на осцилляции нейтрино в ранней Вселенной. Предложены две модели, в которых удастся эффективно подавить рождение стерильных нейтрино в ранней Вселенной и сделать область относительно больших углов смешивания доступной для прямого исследования. Это — модель, связанная с производством стерильных нейтрино с фазовым переходом в скрытом секторе, а также модель, использующая теорию свободного массивного скалярного

поля, взаимодействующего исключительно со стерильным нейтрино. Также рассмотрен сценарий многокомпонентной темной материи.

**Третья глава** посвящена изучению двух новых механизмов генерации темной материи в присутствии когерентно осциллирующего скалярного поля, которые позволяют обойти ограничения из структур и составить всю темную материю из стерильных нейтрино. Исследуется двухкомпонентная темная материя, в которой существенную часть составляют стерильные нейтрино, рожденные внешним полем.

**В Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Одним из основных достижений диссертации, на мой взгляд, является развитие теории (Главы 2 и 3), описывающей перспективную потенциальную модель темной материи, основанной на физике стерильного нейтрино. Несомненно это является горячей темой исследований на стыке космологии и физики элементарных частиц. И хотя подтверждения существования этой частицы и вклада в темную материю еще нет, она является одним из основных кандидатов, который может помочь выйти из области нашего непонимания происхождения скрытой массы на масштабах галактик и больших. Очень любопытными и достойными серьезной дискуссии являются идеи и оценки параметров распадающейся темной материи, представленные в Первой главе. Если и существует кризис в несовпадении результатов измерения космологических параметров в разных экспериментах, то предложен очень интересный выход из имеющейся ситуации в наблюдательной космологии на основе новой физики.

**Научная новизна** работы определяется тем, что 1) впервые предложено использовать механизм слабого линизирования реликтового излучения для получения ограничения на параметры модели с распадающейся темной материей; 2) предложен новый механизм производства стерильных нейтрино в осцилляциях с предсказанием одного из самых холодных распределений частиц по импульсам; 3) предложен новый механизм рождения холодных стерильных нейтрино внешним нестационарным полем, позволяющий полностью избежать ограничений из структур, характерных для теплой темной материи.

**Практическая значимость** состоит в том, что 1) предложена проверяемая модель, работающая в пространстве параметров “масса—угол смешивания”, в котором стерильное состояние ответственно за формирование малой массы активных нейтрино; модель может быть проверена в экспериментах на установках “Троицк-ню-масс” (ИЯИ РАН, Москва) и после завершения первой стадии работы – на KATRIN (Технологический институт Карлсруэ, Германия); 2) результаты в области рождения стерильных нейтрино в присутствии внешнего осциллирующего поля стимулируют дальнейшее совершенствование численных моделей нелинейного развития неоднородностей плотности материи на малых масштабах; 3) результаты диссертации применимы при анализе данных космических обсерваторий следующего поколения ATHENA (Европейское космическое агентство) и Lynx (НАСА).

Диссертация нашла полное отражение в трех публикациях в журналах “Physical Review D” и “Journal of Cosmology and Particle Physics” удовлетворяющих списку и требованиям ВАК.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

**Обоснованность и достоверность** полученных в работе результатов не вызывают сомнения, поскольку они основаны на адекватном применении математического аппарата, подтверждаются в ряде случаев результатами численного моделирования, а также результатами исследований других авторов. Результаты апробированы на многих специализированных конференциях.

Диссертация написана хорошим языком с малым числом опечаток и пунктуационных ошибок.

Имеется ряд мелких *замечаний*.

Среди опечаток можно отметить следующие: на странице 4, строки 6-8 снизу, несогласование падежей “источником измеренного с помощью линзирования гравитационного потенциала скоплений галактик является отнюдь не горячий газ, заключенных в их межгалактической среде, а невидимая ТМ”; на странице 38, строка 8 сверху, — “содержать следы новой физикой” и ряд других.

Часто в тексте слово “Однако”, выступающее в роли союза, ошибочно отделяется запятой от предложения (стр.37 3-я строка, стр. 39 10-ая строка, стр.49 сноска и т.д.)

Иногда встречаются жаргонные выражения. Например, “скорелируемость” (стр.36) или “общее количество стерильных нейтрино, произведенных в ранней Вселенной, окажется подавленным” (стр.58), когда речь идет о подавлении процесса, а не числа частиц.

С моей точки зрения, наиболее интересной является обсуждение проблемы и предложения по ее решению в связи с расхождением измеренных в различных экспериментах величины постоянной Хаббла. На самом деле, ситуация не выглядит настолько драматичной, как представлено в диссертации. Применение методики оценки вклада линзирования к данным Planck, ставшей доступной благодаря угловому разрешению космической обсерватории, действительно, сдвинуло значения параметров относительно данных WMAP в другие области на функции правдоподобия. Однако еще до миссии Planck близкие оценки (например,  $\Omega_m = 0.31$ ) получались и по данным гравитационного линзирования (Cooray, 1999). Согласование результатов данных измерений миссии Planck, обсуждаемых в диссертации параметров пика Сахаровских осцилляций по данным BOSS SDSS, данных по сверхновым идущего эксперимента DES (arXiv:1811.02374), поправок полученных по данным GAIA (arXiv:1810.02595) и множество дискуссий говорят, на мой взгляд, в пользу верности измерений спектра мощности СМВ миссий Planck. И здесь можно было бы предложить в плане развития темы диссертации еще обсудить значение полноты обзоров неба при измерении космологических параметров и масштабов, на которых космологический принцип не работает. Пример такого сравнения - результаты экспериментов Planck и SPT, полное небо и небольшая его часть, причем с наблюдения в Южном галактическом полушарии, где много аномального микроволнового сигнала.

Также изменилось за 20 лет и само понятие измерения и понимание того, что нет ни одного эксперимента, где не применялась бы какая-нибудь модель описания Вселенной: Евклидов мир или  $\Lambda$ CDM-модель. Весовые функции для термина “прямые измерения” не очевидны. Измерения же ставшего стандартным тестом углового спектра мощности СМВ в миссии Planck до мультиполей  $\ell \leq 2500$  подкреплены данными свыше миллиарда пикселей в многочастотных наблюдательных каналах обсерватории Planck в температуре и поляризации. Дискуссия, поднятая в диссертации, очень интересна и решение для нее найдено оригинальное.

Было бы также интересно обсудить в рамках диссертационного исследования вопросы формирования наименьших структур (то есть еще меньших, чем обсуждаемые в диссертации карликовые галактики) — шаровых звездных скоплений, формирование которых может оказаться критичным при выборе моделей темной материи.

Перечисленные замечания и пожелания носят, скорее, редакционный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации.

**Заключение.** Считаю, что представленная диссертационная работа является исследованием, имеющим большое научное и практическое значение в задачах изучения

эволюции Вселенной, понимания природы темной материи, возникновения и роста первичных возмущений, а также при интерпретации данных, полученных в современных международных космических экспериментах. Диссертант показал свою высокую квалификацию в решении теоретических задач в области физики Вселенной. Диссертация удовлетворяет всем требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней”, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант Чудайкин Антон Сергеевич *несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук* по специальности 01.04.02 “Теоретическая физика”.

Официальный оппонент

докт.физ.-мат.н., вед.н.с. Верходанов Олег Васильевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН)

пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская респ., 369167

т. 8-87878-46329, адрес эл.почты: vo@sao.ru

Подпись Верходанова О.В. заверяю

Ученый секретарь САО РАН, к.ф.-м.н.

/ Е. И. Кайсина /

29.04.2019 г.

**Список публикаций в.н.с. САО РАН докт.физ.-мат. наук (спец. 'Астрофизика и звездная астрономия' — 01.03.02) Верховданова Олега Васильевича по теме оппонирования за 2014-2019 гг.**

1. Yu.N.Parijskij, P.Thomasson, A.I.Kopylov, O.P.Zhelenkova, T.W.B.Muxlow, R.Beswick, N.S.Soboleva, A.V.Temirova, O.V.Verkhodanov. Observations of the  $z = 4.514$  radio galaxy RC J0311+0507. MNRAS 439, 2314-2322 (2014).
2. O.V.Verkhodanov. Comparison of Low-Harmonics Spectra and Maps According to the WMAP and Planck Space Missions. Astrophys. Bull. V.69, Iss.3, 330-338 (2014)
3. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and V. V. Sokolov. Statistics of the Planck CMB Signal in Direction of Gamma-Ray Bursts from the BATSE and BeppoSAX Catalogs. Astrophys. Bull. V.69, Iss.4, 472-487 (2014), arXiv:1406.6480.
4. Ya.V.Naiden, O. V. Verkhodanov. Two-Dimensional Spectral Estimators of Statistical Anisotropy and Search for the Isolated Directions in Planck Mission Data. Astrophys.Bull.69, 488-496 (2014)
5. O.V.Verkhodanov. Series Anomalies of Low Multipoles of WMAP and Planck Missions: What are They? Physics of Particles and Nuclei, 2015, Vol. 46, No. 2, pp. 237-247.
6. О. В. Верховданов, Е.К.Майорова, О. П. Желенкова, Д.И.Соловьев, М.Л.Хабибуллина. Источники RCR-каталога с крутыми спектрами в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах по данным миссии Planck. Письма в АЖ, Т. 41, No. 9, pp. 499-515 (2015).
7. О.В. Верховданов. Космологические результаты космической миссии "Планк". Сравнение с данными экспериментов WMAP и ВІСЕР2. УФН 186, No1, с.3-46 (2016)
8. O.V. Verkhodanov, D.I. Solovyov, O.S. Ulakhovich, M.L. Khabibullina. A comparison of properties of different population radio galaxies based on the Planck mission microwave data. Astrophys. Bull. 71, No 2, 139-150 (2016).
9. О.В.Верходанов, Е.К.Майорова, О.П.Желенкова,Д.И.Соловьев,М.Л.Хабибуллина. Источники RCR-каталога с нормальными и плоскими спектрами по данным микроволнового обзора Planck. АЖ 93, 616-641 (2016).
10. O.V.Verkhodanov,Ya.V.Naiden. A Comparison of anisotropic statistical properties of CMB maps based on the WMAP and Planck space Mission data. Astrophys. Bull. 71, No.4, p371-383 (2016).
11. O.V.Verkhodanov, D.I.Solovyov, O.S.Ulakhovich, M.L.Khabibullina, E.K.Majorova, Radio galaxies of different populations on the Planck mission maps. Astron. Rep.61, 297-298 (2017).
12. Ю.Н.Парийский, О.В.Верходанов, Обзоры на ПАТАН-600 и космологический ген. Астроном. Ж., т.94, No 4, с.323-327 (2017).
13. Yu.N.Parijskij, O.P.Zhelenkova, A.I.Kopylov, A.V.Temirova, O.V.Verhodanov, V.N.Komarova. Search and study of objects of the early universe. Astrophys. Bull. 72, No 2, 93-99 (2017).
14. O.V. Verkhodanov, N.V. Verkhodanova, O.S. Ulakhovich, D.I. Solovyov, M.L.Khabibullina. Search for Candidate Objects with the Sunyaev-Zeldovich Effect in the Radio Source Vicinities. Astrophys.Bull.73,Iss.1, p.1-21(2018).
15. О.В.Верходанов. Исследования СМВ. Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т.49, Вып.4, с.885-895 (2018).