

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА
АСТРОКОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР

На правах рукописи

Малиновский Александр Михайлович

**Влияние массивных нейтрино
на крупномасштабную структуру
Вселенной**

Специальность 01.03.02 — астрофизика, радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2008

Работа выполнена в Астрокосмическом центре Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
профессор

В.Н. Лукаш

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук С.И. Блинников
кандидат физико-математических наук М.И. Зельников

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится "13" октября 2008 года в 15⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан "12" сентября 2008 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д002.023.01
д.ф.-м.н.

Ю.А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Существование элементарной частицы, спустя небольшое время получившей название "нейтрино", впервые было предположено Паули (Pauli 1930). Основанием для данного предположения послужила необходимость выполнения законов сохранения энергии и момента количества движения в процессах бета-распада. Таким образом, с момента своего теоретического предсказания нейтрино заняло одно из ключевых мест в понимании и анализе механизма слабых взаимодействий.

Теория бета-распада с участием нейтрино была разработана Ферми (Fermi 1933), им же было придумано само название "нейтрино" – как уменьшительное от "нейтрона", в переводе с итальянского это слово означает "маленькая нейтральная частица". На основе данной теории Бете и Пайерлсом (Bethe and Peierls 1934) было рассчитано сечение взаимодействия нейтрино с веществом, оказавшееся крайне малым, что обусловило исключительную сложность экспериментального обнаружения нейтрино. Впервые взаимодействие, вызванное нейтрино, было зарегистрировано только спустя почти четверть века – в 1956 году, в эксперименте Рейнеса и Коуэна (Reines and Cowan 1956).

В 1946 году Понтекорво предложил хлор-аргоновый метод регистрации нейтрино (Pontecorvo 1946). Эксперимент, основанный на данном методе, был проведен в 1968 году и в ходе него были зарегистрированы нейтрино, рожденные в солнечных термоядерных реакциях (Davis et al. 1968). Однако их число оказалось меньше, чем следовало из предсказаний теории, и долгое время данное несоответствие служило плодородной почвой для различных гипотез и предположений.

В 1943 году Саката и Иноуэ выдвинули гипотезу, что число сортов нейтрино может быть больше одного (Sakata and Inoue 1943). Схожее предположение, что нейтрино, излученные в процессе бета-распада нейтрона, отличаются от излученных при распаде мюона, было высказано Понтекорво (Понтекорво 1959). Эти гипотезы получили экспериментальное подтверждение в 1962 году, когда было показано (Danby et al. 1962), что нейтрино, рожденные при распаде мюонов, в ходе вторичных взаимодействий могут порождать только мюоны, но не электроны.

В свою очередь, таонное нейтрино, чье существование позволило предположить открытие тау-лептона (Perl et al. 1975), было обнаружено в ходе эксперимента лишь в 2000 году (DONUT Collaboration 2000).

Из экспериментов по измерению ширины распада невидимого Z^0 -бозо-

на было получено следующее ограничение на число активных (т.е. участвующих в слабом взаимодействии) сортов нейтрино: $N_\nu = 2.994 \pm 0.012$ (Particle Data Group 2004). Таким образом, можно считать установленным, что на настоящий момент времени нам известны все возможные сорта активных нейтрино – электронное (ν_e), мюонное (ν_μ), таонное (ν_τ), соответствующие трем поколениям элементарных частиц. Не исключена, однако, возможность существования стерильных (не участвующих в слабом взаимодействии) сортов нейтрино (Volkas 2002).

В 1957 году Понтекорво, по аналогии с осцилляциями K^0 -мезона и \bar{K}^0 -антимезона, была предположена возможность ($\nu - \bar{\nu}$)-осцилляций (Понтекорво 1957). А, после подтверждения существования мюонного нейтрино, Маки, Накагава и Саката предположили существование $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ осцилляций (Maki et al. 1962).

Однако необходимым условием для существования нейтринных осцилляций является наличие массы у нейтрино, в то время как Стандартная теория элементарных частиц, разработанная трудами Глэшоу, Салама, Вайнберга и других ученых, включает в себя лишь безмассовые нейтрино.

Таким образом, после того, как нейтринные осцилляции были обнаружены в ходе эксперимента Super-Kamiokande (Fukuda et al. 1998), современная физика была поставлена перед фактом существования явления, не укладывающегося в рамки Стандартной Модели. И, на сегодняшний день, поведение нейтрино (в первую очередь, наличие у них массы) – единственный из известных феноменов такого рода, что обуславливает крайнюю его важность для дальнейшего развития физики (González-García and Nir 2003, Altarelli and Feruglio 2004, Hirsh and Valle 2004). Это может помочь как объяснению загадок Стандартной Модели (например, почему существуют несколько поколений фермионов и почему их массы именно такие), так и возможному установлению новой фундаментальной теории, в которой современная Стандартная Модель будет играть роль низкоэнергетического предела.

Как уже было сказано, открытие нейтринных осцилляций позволяет считать факт наличия у нейтрино массы установленным с весьма высокой степенью достоверности. Однако ключевым и до сих пор не решенным остается вопрос о величине этой массы. Эксперименты по нейтринным осцилляциям не могут дать на него определенный ответ, будучи чувствительными лишь к разности квадратов масс различных сортов нейтрино (Fogli et al. 2006). Другие наземные эксперименты, позволяющие определить абсолютную величину массы – например, бета-распад трития

(Lobashev 2003) или безнейтринный двойной бета-распад ($0\nu 2\beta$) (Elliott and Vogel 2002), пока не достигли необходимой степени точности и полученные ими ограничения являются достаточно свободными.

Одним из способов преодоления данной проблемы является использование космологических наблюдательных данных для получения ограничений на массу нейтрино, так как эти данные чувствительны именно к абсолютной величине массы (Герштейн и Зельдович 1966).

Целью работы являлось получение возможно более строгих ограничений на сумму масс активных сортов нейтрино по космологическим данным – анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной структуре Вселенной.

Важным этапом при выполнении данной задачи, результаты которого могут использоваться также и независимым способом, было исследование зависимости нормировки спектра космологических возмущений плотности от расширенного набора космологических параметров. В число рассматриваемых параметров модели Вселенной с общей кривизной входили: относительная доля материи Ω_m , вклад космологической постоянной Ω_Λ , доля барионов Ω_b , нормированная (на $100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$) постоянная Хаббла h , наклон спектра первичных возмущений плотности n , относительное содержание массивных нейтрино $f_\nu \equiv \Omega_\nu / \Omega_m$.

Кроме того, было проведено исследование трех наиболее широко используемых в современной космологии теоретических функций масс гравитационно-связанных массивных гало – Пресса-Шехтера, Шета-Тормена и Дженкинса. Помимо значимой роли в решении основной задачи, результаты данного исследования также могут быть использованы и в широком классе новых работ в области космологии.

Основу исследований составляло изучение поведения теоретических моделей и их сопоставление с наблюдательными данными. Широко использовались методы компьютерного моделирования.

Научная новизна работы. Все основные научные результаты, вынесенные на защиту, являются новыми.

Хотя практически все исследования по получению космологических ограничений на массу нейтрино используют данные по анизотропии реликтового излучения, лишь в очень небольшом количестве работ в качестве данных по крупномасштабной структуре Вселенной использовались функции масс скоплений галактик. И данная работа является первой, где в качестве способа получения полной массы скопления используется пред-

положение об универсальности барионной фракции во Вселенной.

Все ранее выполненные работы по изучению влияния космологических параметров на нормировку спектра космологических возмущений плотности, как правило, исследовали влияние лишь одного (доминирующего) параметра – относительной плотности материи (Ω_m). Столь широкий набор космологических параметров ($\Omega_m, \Omega_\Lambda, \Omega_b, n, h, f_\nu$) в рассмотрение был введен впервые.

Впервые также было проведено изучение влияния выбора теоретической функции масс гравитационно-связанных массивных гало (Пресса-Шехтера, Шета-Тормена, Дженкинса) на конкретный результат (нормировку спектра мощности возмущений плотности), полученный путем сравнения теоретических моделей и наблюдательных данных. Ранее теоретические функциями масс сравнивались лишь непосредственно (относительный "переизбыток" или "недостаток" числа гравитационно-связанных гало в данном диапазоне масс), оценка влияния этих различий на прикладной результат носила неочевидный характер.

Научная и практическая ценность работы. Ограничения на массу нейтрино, полученные в данной диссертационной работе, были найдены с помощью нового метода, свободного от возможных систематических ошибок методик, использованных в исследованиях, выполненных другими авторами. Большую ценность, таким образом, представляет то обстоятельство, что результаты данной работы и предыдущих исследований оказались совместимыми. Это независимым образом подтверждает и усиливает достоверность оценок массы нейтрино по космологическим наблюдениям.

Результаты по нормировке спектра мощности космологических возмущений плотности могут быть использованы не только в дальнейших исследованиях по массе нейтрино, но и в большом количестве самых разнообразных работ в области космологии. Декларируемая в настоящий момент времени погрешность определения космологических величин достигла уровня меньше 10%, и начавшаяся, таким образом, эра прецизионной космологии настоятельно требует корректного учета вклада всех входящих в исследование параметров.

Демонстрация влияния выбора теоретической функции гравитационно-связанных массивных гало на прикладной результат позволит как сделать выбор нужной функции масс в будущих космологических исследованиях, так и оценить уровень систематических эффектов, связанных с подобным выбором.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. По анизотропии реликтового излучения (данные третьего года миссии WMAP) и крупномасштабной структуре Вселенной (функции масс скоплений галактик из каталога ROSAT) получено новое независимое ограничение на сумму масс трех сортов активных нейтрино в расширенной космологической модели Вселенной: $\sum m_\nu < 1.05$ эВ (уровень достоверности 95%). При этом методом определения полной массы скопления галактик служило предположение об универсальности барионной фракции во Вселенной.
2. Исследовано влияние на нормировку спектра мощности космологических возмущений плотности параметров расширенной модели Вселенной. С использованием наблюдательной функции масс оптических скоплений галактик получена аппроксимационная формула, связывающая данные космологические параметры (Ω_m , Ω_Λ , f_ν , n , h) с дисперсией контраста плотности в сфере радиуса $8h^{-1}$ Мпк, σ_8 , являющейся интегральной функцией спектра возмущений плотности.
3. Исследованы три теоретические функции масс гравитационно-связанных гало, наиболее широко используемые в современной космологии (Пресса-Шехтера, Дженкинса, Шета-Тормена). Путем анализа влияния выбора теоретической функции масс на практический результат (нормировку спектра мощности космологических возмущений плотности) показано, что в современных космологических исследованиях предпочтение должно быть отдано функции масс Шета-Тормена. Эта функция масс обеспечивала наилучшее согласие с наблюдательными данными (функциями масс оптических скоплений галактик) и обладала наиболее универсальным характером – при ее использовании зависимость результата от дополнительных (помимо Ω_m) параметров была наименьшей среди рассмотренных теоретических функций масс.

Апробация результатов. Результаты, изложенные в диссертации, докладывались автором на семинарах теоретического отдела АКЦ ФИАН, общих семинарах АКЦ ФИАН, астрофизическом семинаре ОТФ ФИАН, семинаре "Нейтринная и ядерная физика" ФИАН, семинаре им. Зельманова ГАИШ МГУ, на российских и международных конференциях. В число

конференций, на которых докладывались, обсуждались и в чьих трудах были опубликованы результаты диссертации, входили следующие:

1. 15th International Seminar on High Energy Physics "Quarks-2008", Сергиев Посад (2008).
2. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2007 "Космические рубежи XXI века", Казань (2007).
3. Российская школа-семинар по современным проблемам гравитации и космологии "GRACOS-2007", Казань-Яльчик (2007).
4. 24-я конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино (2007).
5. Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике, посвященная 90-летию со дня рождения профессора К.П. Станюковича, Москва (2006).
6. Всесоюзная астрономическая конференция ВАК-2004 "Горизонты Вселенной", Москва (2004).
7. 21-я конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино (2004).
8. Всесоюзная астрономическая конференция ВАК-2001, Санкт-Петербург (2001).
9. Международная конференция по космомикрорфизике "Космион-2001", Москва (2001).
10. XXXVth Rencontres de Moriond "Energy densities in the Universe", Les Arcs, France (2000).
11. Cosmology and Particle Physics "CAPP 2000", Verbier, Switzerland (2000).
12. Joint European and National Astronomy Meeting "JENAM-2000", Moscow (2000).
13. Ежегодные научные сессии АКЦ ФИАН, Пущино (2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008).

Список публикаций. Результаты автора по теме диссертации опубликованы в научных журналах и трудах отечественных и международных конференций. Общее число публикаций: 13, в том числе 5 – в реферируемых российских и международных журналах из списка ВАК, 8 – в сборниках трудов и тезисах конференций.

Статьи

- [1]. **А. М. Малиновский**, А.А. Воеводкин, В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева, А.А. Вихлинин, "Космологические ограничения на массу нейтрино по анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной структуре Вселенной", *Письма в Астрон. Журн.*, **34**, 7, стр. 490-495 (2008).
- [2]. **А.М. Малиновский**, В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева, "Космологические тесты на основе данных по обилию скоплений галактик", *Астрон. Журн.*, **85**, 8, стр. 675-684 (2008).
- [3]. **А.М. Malinovsky**, V.N.Lukash, E.V.Mikheeva, V.Muller, "A Generalized Inflation Model with Cosmic Gravitational Waves", *Gravitation and Cosmology Suppl.*, **8**, pp. 23-26 (2002).
- [4]. Е.В.Михеева, В.Н.Лукаш, Н.А.Архипова, **А.М.Малиновский**, "Современный статус моделей с "горячим" и "холодным" скрытым веществом", *Астрон. Журн.*, **78**, 3, стр. 195-204 (2001).
- [5]. V.N.Lukash, E.V.Mikheeva, V.Muller, **А.М. Malinovsky**, "Generalised inflation with a gravitational wave background", *MNRAS*, **317**, pp. 795-800 (2000).

Сборники трудов и тезисы конференций

1. **Малиновский А.М.**, "Ограничения на массу нейтрино из космологических данных", Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007 "Космические рубежи XXI века", стр. 453-455, Казань: издательство Казанского государственного университета (2007).
2. **Малиновский А.М.**, "Космологические тесты на основе данных по обилию скоплений галактик", Труды Российской школы-семинара по гравитации и космологии "GRACOS-2007", стр. 114-123, Казань: Татарский гуманитарно-педагогический университет, ООО "Фолиант" (2007).

3. **Малиновский А.М.**, Лукаш В.Н., Михеева Е.В., "Определение космологических параметров по наблюдаемому обилию скоплений галактик", Труды Международной конференции по гравитации, космологии и астрофизике, посвященной 90-летию со дня рождения профессора К.П. Станюковича, Москва: издательство РУДН (2006).
4. **Малиновский А.М.**, Михеева Е.В., Лукаш В.Н., "Космологические модели формирования структуры Вселенной на основе данных по обилию скоплений галактик", Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции "Горизонты Вселенной", стр. 193, Москва: Труды государственного астрономического института им. П.К. Штернберга, том LXXV (2004).
5. Mikheeva E.V., Lukash V.N., Arkhipova N.A., **Malinovsky A.M.**, "Current status of cosmological MDM model", *AIP Conference Proceedings*, v. **555**, p. 352 (2001).
6. Mikheeva E.V., Lukash V.N., Arkhipova N.A., **Malinovsky A.M.**, "Current status of cosmological MDM model", Proceedings of XXXVth Rencontres de Moriond "Energy densities in the Universe", Les Arcs, France (2000).
7. Lukash V.N., Mikheeva E.V., Muller V., **Malinovsky A.M.**, "A generalized inflation model with cosmic gravitational waves", Proceedings of XXXVth Rencontres de Moriond "Energy densities in the Universe", Les Arcs, France (2000).
8. Mikheeva E.V., Lukash V.N., Arkhipova N.A., **Malinovsky A.M.**, "Current status of cosmological MDM model", JENAM-2000 Abstracts, p. 46, Moscow, Russia (2000).

Личный вклад автора. Все работы, перечисленные в списке публикаций по теме диссертации, выполнены в соавторстве. Во всех работах, кроме работы [5], автор диссертации участвовал в постановке задачи, и во всех работах он принимал участие в обсуждении полученных результатов. Кроме того, личный вклад автора диссертации заключался в следующем:

Работа [1]. Основной вклад. Разработка программного обеспечения и расчеты по анизотропии реликтового излучения, сведение воедино результатов по анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной струк-

туре Вселенной (функциям масс скоплений галактик) и совместная обработка данных, получение итогового результата по ограничению массы нейтрино, написание текста статьи.

Работа [2]. Основной вклад. Написание всего программного обеспечения, проведение всех расчетов, получение итогового результата (связи между нормировкой спектра космологических возмущений плотности и параметрами космологической модели), написание основной части статьи.

Работы [3] и [5]. Численные расчеты и получение итоговых аппроксимационных формул.

Работа [4]. Написание программного обеспечения и получение результатов, связанных с использованием переходной функции Ху и Эйзенштейна.

Структура диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключения и трех Приложений. Общий объем составляет 121 страницу, включая рисунки, таблицы и библиографию из 172 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, перечисляются цели и задачи проведенного исследования. Уточняются новые элементы, отличающие данное исследование от других работ, обсуждается научная и практическая значимость диссертации. Формулируются положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций, в которых изложены результаты исследования, рассказывается о проведенной апробации результатов. Также описывается структура диссертации и кратко излагается содержание ее основных разделов.

В **Главе 1** (*методологической*) излагаются основные определения и методы анализа космологических моделей. Выписываются базовые уравнения Фридмана для модели Вселенной с учетом вклада космологической постоянной, приводятся несколько частных случаев решения данных уравнений. Подробно рассматривается линейная теория космологических возмущений, особое внимание при этом уделяется проблеме калибровочной свободы возмущенных уравнений Эйнштейна. Вводятся понятия "спектра мощности", "функции окна", "переходной функции" и других характеристик поля контраста плотности. Рассказывается про анизотропию реликтового излучения и приводится способ вычисления данной анизотропии с

помощью эффекта Сакса-Вольфа (Sachs and Wolfe 1967).

Детально описывается один из ключевых в данном исследовании метод Пресса-Шехтера (Press and Schechter 1974), который позволяет по базовым параметрам космологической модели построить соответствующую ей функцию масс гравитационно-связанных массивных гало. Что, в свою очередь, делает возможными попытки решения обратной задачи: восстановления по наблюдательным функциям масс (путем сравнения с теоретическими) исходных базовых параметров.

В **Главе 2** рассмотрены нестандартные (с точки зрения современной парадигмы) модели: модель с нестепенным спектром космологических возмущений плотности, генерируемым Λ -инфляцией (Lukash and Mikheeva 2000), и материально-доминированная модель с "горячей" темной материей. Обе модели предполагают значительный вклад первичных гравитационных волн.

Основанием для данного рассмотрения послужила относительно малая величина космологических эффектов, за которые ответственны массивные нейтрино. Таким образом, их влияние может быть выражено как поправки к базовой космологической модели – что, в свою очередь, настоятельно требует корректного ее определения.

Первой из перечисленных нестандартных моделей посвящен раздел **2.1 Главы 2**. В ней рассмотрен потенциал Λ -инфляции следующего вида:

$$V(\varphi) = V_0 + \frac{\lambda}{4}\varphi^4, \quad (1)$$

где φ – скалярное поле инфлатона, $V_0 > 0$ и λ_4 – константы.

Было показано, что подобная модель инфляции приводит к генерации нестепенных спектров скалярной и тензорной моды возмущений (см. Рис. 1, где c – параметр, задаваемый выражением: $c = \frac{1}{4}\varphi_{cr}^2$, $\varphi_{cr} = \sqrt[4]{\frac{4V_0}{\lambda}}$). Важной особенностью этих спектров является возможность получить большое значение T/S (отношение тензорной и скалярной моды) на диапазоне масштабов, где локальный наклон спектра космологических возмущений плотности близок к масштабно-инвариантному. Тем самым достигается согласие с наблюдательными данными, отдающими предпочтение почти плоскому спектру, а также выполняются требования двойной нормировки – по дисперсии контраста плотности на масштабе $8h^{-1}$ Мпк, σ_8 , и по анизотропии реликтового излучения на угловом масштабе 10° (Bennett et al. 1996).

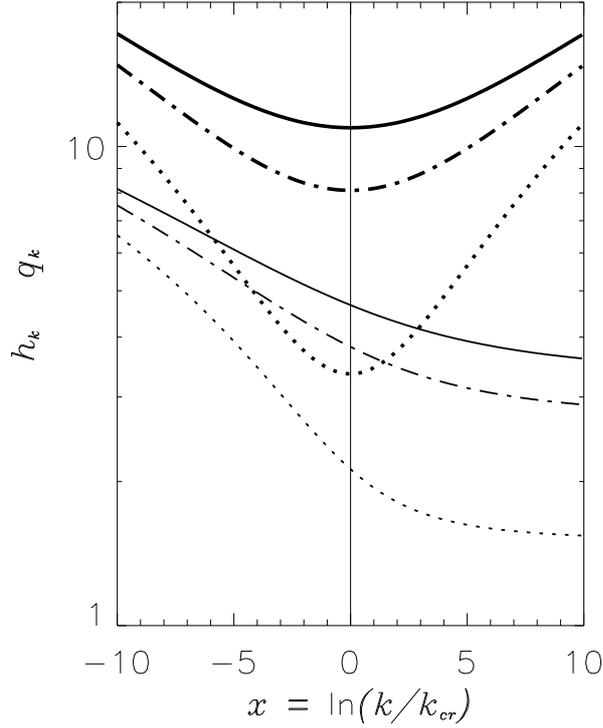


Рис. 1: Спектры скалярной q_k (толстые линии) и тензорной моды h_k (тонкие линии) вблизи характеристического масштаба k_{cr} , для $c = 5, 9, 11$ ("точка", "точка-тире" и сплошная линия, соответственно).

В разделе **2.2 Главы 2** производится рассмотрение второй нестандартной модели – материально-доминированной модели с долей "горячей" темной материи и существенной величиной первичных гравитационных волн.

Для данной модели были заданы следующие свободные параметры:

- Дисперсия контраста плотности в сфере с радиусом $8h^{-1}$ Мпк σ_8 .
- Плотность энергии горячей компоненты темной материи в единицах критической плотности Вселенной Ω_ν .
- Наклон спектра возмущений плотности n .
- Постоянная Хаббла h (в единицах $100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$).
- Доля барионов Ω_b .

Для всех комбинаций параметров методом Пресса-Шехтера рассчитывались теоретические функции масс скоплений галактик, после чего производилось их сравнение с данными наблюдений (Bahcall and Cen 1993). Также для всех комбинаций была рассчитана теоретическая величина анизотропии реликтового излучения на угловом масштабе 10° (масштаб миссии COBE). При этом на основе согласования нормировок спектра возмущений плотности на масштабе COBE ($\sim 1000h^{-1}$ Мпк) и на масштабе скоплений галактик ($\sim 8h^{-1}$ Мпк) была получена требуемая величина вклада первичных гравитационных волн в температурную анизотропию реликтового излучения.

Для обеих моделей вычислена ожидаемая величина первого акустического пика в анизотропии реликтового излучения и показано, что она должна быть сильно подавлена по сравнению с реально наблюдаемой (Hinshaw et al. 2003, Hinshaw et al. 2007). Таким образом, был сделан вывод, что, хотя обе модели удовлетворяют нормировкам по обилию скоплений галактик и анизотропии реликтового излучения, альтернативой общепринятой сегодня Λ CDM модели они стать не могут.

В **Главе 3** исследовано влияние на нормировку спектра космологических возмущений плотности параметров расширенной модели Вселенной и построена функциональная взаимосвязь между данными параметрами и дисперсией контраста плотности в сфере радиуса $8h^{-1}$ Мпк, σ_8 , являющейся интегральной функцией спектра возмущений плотности.

В число рассматриваемых параметров входили:

- Относительная плотность материи Ω_m .
- Величина космологической постоянной Ω_Λ , причем рассматривались модели с общей кривизной (т.е., в общем случае $\Omega_m + \Omega_\Lambda \neq 1$).
- Относительное содержание нейтрино $f_\nu \equiv \frac{\Omega_\nu}{\Omega_m}$.
- Наклон спектра первичных возмущений плотности n .
- Постоянная Хаббла h (в единицах $100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$).
- Доля барионов Ω_b .

Исследование велось путем построения теоретических функций масс (с помощью как стандартного аналитического формализма Пресса-Шехтера,

так и формул Дженкинса (Jenkins et al. 2001) и Шета-Тормена (Sheth and Tormen 1999), представляющих собой аппроксимацию результатов численного моделирования) и сравнения их с наблюдательной функцией масс оптических скоплений галактик (Girardi et al. 1998a, Girardi et al. 1998b). При этом была учтена зависимость порогового контраста плотности δ_c в формализме Пресса-Шехтера и формуле Шета-Тормена от параметров Ω_m и Ω_Λ космологической модели (Lokas and Hoffman 2000).

Особое внимание было уделено корректному переходу между различными способами определения массы скопления галактик – так как эти способы отличаются как для разных теоретических функций масс, так и для наблюдательных данных.

Результатом стало получение следующих аппроксимационных формул:

1) Стандартный формализм Пресса-Шехтера:

$$\begin{aligned} \sigma_8 \Omega_m^{0.32+0.15\Omega_m+0.02\Omega_\Lambda} - 0.2(\Omega_m - 0.9)(1 - 0.3h - 0.35n + 0.8f_\nu) = \\ = 0.61^{+0.059}_{-0.059} \end{aligned}$$

2) Аппроксимация Шета-Тормена:

$$\begin{aligned} \sigma_8 \Omega_m^{0.54+0.15\Omega_m-0.04\Omega_\Lambda} - 0.2(\Omega_m - 0.75)(1 - 0.2h - 0.2n + 0.8f_\nu) = \\ = 0.53^{+0.064}_{-0.066} \end{aligned}$$

3) Аппроксимация Дженкинса:

$$\begin{aligned} \sigma_8 \Omega_m^{0.50+0.12\Omega_m-0.06\Omega_\Lambda} - 0.2(\Omega_m - 0.80)(1 - 0.35h - 0.3n + 0.9f_\nu) = \\ = 0.56^{+0.064}_{-0.063} \end{aligned}$$

На основе анализа полученных результатов был также сделан общий вывод о предпочтительности использования для целей современных космологических исследований теоретической функции масс Шета-Тормена.

Глава 4 посвящена получению ограничений на массу нейтрино по данным по анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной структуре Вселенной.

Источником данных по анизотропии реликтового излучения служили результаты третьего года миссии WMAP (Hinshaw et al. 2007). В качестве данных по крупномасштабной структуре Вселенной выступали функции масс рентгеновских скоплений галактик, полученные путем обработки данных миссии ROSAT (Voevodkin and Vikhlinin 2004), при этом методом

получения полной массы скопления (включая темную материю) служило предположение об универсальности барионной фракции во Вселенной – т.е., что отношение барионной и полной плотности является постоянной величиной для всех областей Вселенной, равной ее космологическому (среднему) значению. Это предположение имеет хорошие теоретические основания (White et al. 1993) и находит подтверждение как в результатах численных моделирований (Bialek et al. 2001), так и в наблюдательных данных (Mohr et al. 1999, Allen et al. 2002, Ettori et al. 2004).

Плотность барионов во Вселенной с высокой степенью точности определяется последними наблюдательными данными по анизотропии реликтового излучения: $\Omega_b h^2 = 0.0223 \pm 0.08$ (Tegmark et al. 2004, Spergel et al. 2007). Таким образом, для заданной космологической модели мы можем простым образом получить полную массу скоплений галактик по их наблюдательным характеристикам:

$$\frac{M_b}{M_{tot}} = f_b \equiv \frac{\Omega_b}{\Omega_m}.$$

Так как современные космологические данные свидетельствуют, что кривизна Вселенной, даже если существует, невелика, при выполнении данной работы использовалась пространственно-плоская ($\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$) модель Вселенной с адиабатическими начальными условиями. Число массивных сортов нейтрино было принято равным трем, с равными массами. В тестируемом диапазоне масс (порядка эВ) эффект от возможного их различия для разных сортов нейтрино имеет крайне малую величину и не мог оказать сколь-нибудь значительного влияния на результаты работы.

Было рассмотрено 37485 моделей, соответствующих следующей сетке космологических параметров:

- Плотность материи: $\Omega_m = 0.2 - 0.36$, с шагом 0.01.
- Масса одного сорта нейтрино: $m_\nu = 0 - 0.7$, с шагом 0.05.
- Наклон спектра первичных возмущений плотности: $n = 0.96 - 1.02$, с шагом 0.01.
- Постоянная Хаббла (в единицах $100 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$): $h = 0.65 - 0.85$, с шагом 0.01.
- Доля барионов: $\Omega_b h^2 = 0.0223$.

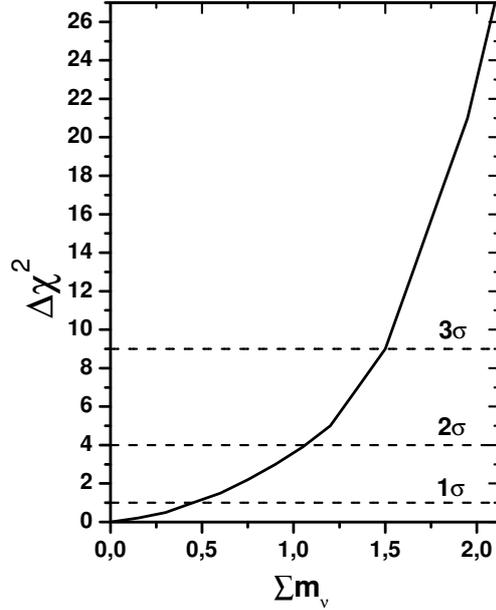


Рис. 2: Величина $\Delta\chi_\nu^2$ для различных значений суммы масс трех сортов нейтрино Σm_ν .

В каждом узле данной сетки рассчитывался теоретический температурный спектр (для гармоник $2 < \ell < 1000$) анизотропии реликтового излучения и сравнивался (методом χ^2) с наблюдательным спектром. Также рассчитывалась и сравнивалась с наблюдательной теоретическая функция скоплений галактик. Итоговая величина χ^2 , соответствующая каждому определенному набору космологических параметров, получалась, таким образом, сложением величин χ^2 , полученных по температурному спектру реликтового излучения и функции масс скоплений галактик, соответственно: $\chi^2 = \chi_{CMB}^2 + \chi_{cluster}^2$.

Хотя использованные наблюдательные данные позволяют получить ограничения и на другие космологические параметры, основной задачей данной диссертационной работы было получение ограничений на массу нейтрино. С этой целью исследовалось поведение величины $\Delta\chi_\nu^2 = \chi_\nu^2 - \chi_{min}^2$. Здесь χ_ν^2 – величина χ^2 для каждого значения массы нейтрино, при условии, что остальные параметры принимают свое наилучшее (минимизирующее χ^2) значение, χ_{min}^2 – глобальный минимум χ^2 -распределения для всего пространства моделей. Величина $\Delta\chi_\nu^2$ имеет такое же распределение, как

и χ^2 с одной степенью свободы, что позволило легко определить диапазон значений исследуемого параметра, соответствующий выбранному уровню достоверности.

Наиболее наглядным образом полученный результат демонстрирует Рис. 2, на котором показано распределение величины $\Delta\chi^2_\nu$ и нанесены требуемые уровни достоверности.

Таким образом, для суммы масс трех активных сортов нейтрино было получено следующее ограничение сверху: $\sum m_\nu < 1.05$ эВ (на уровне достоверности 95%).

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **Приложении 1** детально описана переходная функция для модели смешанной темной материи (Hu and Eisenstein 1998, Eisenstein and Hu 1999), использованная при выполнении исследований, описанных в Главе 2, раздел 2.2, Главе 3 и Главе 4.

В **Приложении 2** подробно изложены детали получения теоретической функции масс гравитационно-связанных массивных гало с помощью формализма Пресса-Шехтера.

Приложение 3 посвящено выводу космологических спектров для скалярной и тензорной моды возмущений путем перехода к каноническому 4-скаляру q (Лукаш 1980) и рассмотрению эффекта параметрического усиления.

Список литературы

- Герштейн и Зельдович* (С.С. Герштейн, Я.Б. Зельдович), Письма в ЖЭТФ, **4**, 174 (1966).
- Лукаш* (В.Н. Лукаш), ЖЭТФ, **79**, 1601 (1980).
- Понтекорво* (Б. Понтекорво), ЖЭТФ, **33**, 549 (1957).
- Понтекорво* (Б. Понтекорво), ЖЭТФ, **37**, 1751 (1959).
- Allen et al.* (S.W. Allen, R.W. Schmidt, A.C. Fabian), MNRAS, **334**, L11 (2002).
- Altarelli and Feruglio* (G. Altarelli, F. Feruglio), New J. Phys., **6**, 106 (2004).
- Bahcall and Cen* (N.A. Bahcall, R. Cen), Astrophys. J., **407**, L49 (1993).
- Bennett et al.* (C.L. Bennett, A.J. Banday, K.M. Górski), Astrophys. J., **464**, L1 (1996).
- Bethe and Peierls* (H.A. Bethe, R. Peierls), Nature, **133**, 532 (1934).
- Bialek et al.* (J.J. Bialek, A.E. Evrard, J.J. Mohr), Astrophys. J., **555**, 597 (2001).
- Danby et al.* (G. Danby, J.M. Gaillard, K. Goulianos *et al.*), Phys. Rev. Lett., **9**, 36 (1962).
- Davis et al.* (R.J. Davis, D.S. Harmer, K.C. Hoffman), Phys. Rev. Lett., **20**, 1205 (1968).
- DONUT Collaboration* (The DONUT Collaboration), Press Release: http://www.fnal.gov/pub/presspass/press_releases/donut.html (2000).
- Eisenstein and Hu* (D.J. Eisenstein, W. Hu), Astrophys. J., **511**, 5 (1999).
- Elliott and Vogel* (S.R. Elliott, P. Vogel), Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., **52**, 115 (2002).
- Ettori et al.* (S. Ettori, S. Borgani, L. Moscardini *et al.*), MNRAS, **354**, 111 (2004).

- Fermi* (E. Fermi), *La Ricerca Scientifica*, **4**(II), 491 (1933).
- Fogli et al.* (G.L. Fogli, E. Lisi, A. Marrone, A. Palazzo), *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **57**, 742 (2006).
- Fukuda et al.* (Y. Fukuda, T. Hayakawa, E. Ichihara *et al.* (The Super-Kamiokande Collaboration)), *Phys. Lett. B*, **81**, 1562 (1998).
- Girardi et al.* (M. Girardi, G. Giuricin, F. Mardirossian *et al.*), *Astrophys. J.*, **505**, 74 (1998a).
- Girardi et al.* (M. Girardi, S. Borgani, G. Giuricin *et al.*), *Astrophys. J.*, **506**, 45 (1998b).
- González-García and Nir* (M.C. González-García, Y. Nir), *Rev. Mod. Phys.*, **75**, 345 (2003).
- Hinshaw et al.* (G. Hinshaw, D.N. Spergel, L. Verde *et al.*), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **148**, 1, 135 (2003).
- Hinshaw et al.* (G. Hinshaw, M.R.olta, C.L. Bennett *et al.*), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **170**, 288 (2007).
- Hirsh and Valle* (M. Hirsch, J.W.F. Valle), *New J. Phys.*, **6**, 76 (2004).
- Hu and Eisenstein* (W. Hu, D.J. Eisenstein), *Astrophys. J.*, **498**, 497 (1998).
- Jenkins et al.* (A. Jenkins, C.S. Frenk, S.D.M. White *et al.*), *MNRAS*, **321**, 372 (2001).
- Lobashev* (V.M. Lobashev), *Nucl. Phys. A.*, **719**, C153 (2003).
- Lokas and Hoffman* (E.L. Lokas, Y. Hoffman), *In: Proc. 3rd International Workshop "The Identification of Dark Matter"*, eds. by N.J.C. Spooner, V. Kudryavtsev, World Scientific, Singapore, 121 (2000).
- Lukash and Mikheeva* (V.N. Lukash, E.V. Mikheeva), *Int. J. Mod. Phys. A*, **15**, 24, 3783 (2000).
- Maki et al.* (Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata), *Prog. Theor. Phys.*, **28**, 870 (1962).

Mohr et al. (J.J. Mohr, B. Mathiesen, A.E. Evrard), *Astrophys. J.*, **517**, 627 (1999).

Particle Data Group (The Particle Data Group), *Phys. Lett. B*, **592**, 1 (2004).

Pauli et al. (W. Pauli), *In letter to participants of the Conference in Tübingen* (1930).

Perl et al. (M.L. Perl, G.S. Abrams, A.M. Boyarski *et al.*), *Phys. Rev. Lett.*, **35**, 1489 (1975).

Pontecorvo (B. Pontecorvo), National Research Council of Canada, Division of Atomic Energy, Chalk River, Report PD-205 (1946).

Press and Schechter (W.H. Press, P. Schechter), *Astrophys. J.*, **187**, 425 (1974).

Reines and Cowan (F. Reines, C.L. Cowan), *Nature*, **178**, 446 (1956).

Sachs and Wolfe (R.K. Sachs, A.M. Wolfe), *Astrophys. J.*, **147**, 73 (1967).

Sakata and Inoue (S. Sakata, T. Inoue), *Symposium on Meson Theory* (1943);

Sakata and Inoue (S. Sakata, T. Inoue), *Prog. Theor. Phys.*, **1**, 143 (1946).

Sheth and Tormen (R.K. Sheth, G. Tormen), *MNRAS*, **308**, 119 (1999).

Spergel et al. (D.N. Spergel, R. Bean, O. Doré *et al.*), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **170**, 377 (2007).

Tegmark et al. (M. Tegmark, M. Strauss, M. Blanton *et al.*), *Phys. Rev. D*, **69**, 103501 (2004).

Voevodkin and Vikhlinin (A. Voevodkin, A. Vikhlinin), *Astrophys. J.*, **601**, 610 (2004).

Volkas (R.R. Volkas), *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **48**, 161 (2002).

White et al. (S.D.M. White, J.F. Navarro, A.E. Evrard, C.S. Frenk), *Nature*, **366**, 429 (1993).