

Учреждение Российской академии наук
Институт ядерных исследований РАН

На правах рукописи

Климай Петр Александрович

Ограничения на концентрацию первичных черных дыр и их космологические следствия

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерных исследований РАН.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Э. В. Бугаев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Г. С. Бисноватый-Коган

доктор физико-математических наук

В. И. Докучаев

Ведущая организация:

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН)

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2010 г. в _____ час. на заседании Диссертационного совета Д 002.119.01 Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследований РАН по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследований РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основой нашего понимания пространства, времени и явления гравитации на сегодняшний день является Общая теория относительности (ОТО) А. Эйнштейна. Эта теория имеет ряд важных следствий и, в частности, предсказывает некоторые эффекты, делающие возможной ее опытную проверку (отклонение света в гравитационном поле, замедление хода часов, гравитационное красное смещение, и другие). Некоторые из этих эффектов уже обнаружены экспериментально - в земных условиях или при астрономических наблюдениях. Фридмановская модель расширяющейся Вселенной, основанная на ОТО, является сегодня основой современной Стандартной космологической модели.

Другим важным следствием теории является возможность существования черной дыры - объекта, который, по простому определению, поглощает все, что попадает достаточно близко к нему, и не выпускает ничего во внешний мир. И хотя идея о возможности существования черных дыр высказывалась еще в XVIII веке Д. Мичеллом и П.-С. Лапласом (на основе ньютоновской теории гравитации и классических представлений о свете), важно, что черные дыры в ОТО - объекты, существование которых прямо следует из последовательной теории пространства-времени и гравитации.

Еще одним характерным предсказанием ОТО является существование гравитационных волн (ГВ) - тензорных возмущений космологической метрики, свободно распространяющихся со скоростью света.

Несмотря на многочисленные косвенные указания, ни черные дыры, ни гравитационные волны до сих пор не были обнаружены в прямом эксперименте, т.е. ОТО остается непроверенной в ряде важнейших предельных случаев. Кроме того, современные теории ранней Вселенной утверждают, что в ней возможно было рождение черных дыр (например, в результа-

те эволюции первичных флуктуаций плотности) и фона реликтовых ГВ (например, в результате эволюции квантовых флуктуаций метрики), поэтому поиски таких черных дыр (называемых первичными) и реликтовых ГВ (или хотя бы установление экспериментальных пределов на их концентрацию) существенны для проверки различных моделей развития нашей Вселенной в первые мгновения ее существования (в частности, инфляционной модели).

Идея о возможности существования первичных черных дыр (ПЧД) была высказана в пионерских работах Зельдовича и Новикова [1] и Хокинга [2]. Для рождения ПЧД в результате гравитационного коллапса космологических возмущений плотности, задаваемых величиной $\delta \equiv \delta\rho/\rho$, ранняя Вселенная должна быть неоднородной. Согласно Карру и Хокингу [3], в момент прохождения флуктуации с избыточной плотностью под горизонт (когда $k = aH$, где k - сопутствующее волновое число флуктуации плотности, a - масштабный фактор, H - функция Хаббла), для коллапса флуктуации и появления ПЧД должно быть $1/3 < \delta < 1$. Таким образом, ясно, что для рождения заметного количества ПЧД из флуктуаций плотности их характерная среднеквадратичная амплитуда должна быть достаточно велика, $\bar{\delta} \gtrsim 10^{-2}$. Если верно предположение Гаррисона [4] и Зельдовича [5] о масштабной инвариантности спектра начальных возмущений (в этом случае $\bar{\delta}$ одинакова для начальных флуктуаций, соответствующих любым k), то рождение ПЧД за счет рассматриваемого механизма – крайне маловероятный процесс, т.к. на масштабах сопутствующих волновых чисел $k \sim 10^{-3} \text{ Мпк}^{-1}$ амплитуда первичных скалярных возмущений известна и мала: по данным современных экспериментов, измеряющих анизотропию реликтового излучения, спектр мощности сопутствующих возмущений кривизны $\mathcal{P}_{\mathcal{R}} \cong 2.4 \times 10^{-9}$, и $\bar{\delta} \sim \mathcal{P}_{\mathcal{R}}^{1/2} \sim 10^{-5}$. Однако современные

теоретические модели, как правило, предсказывают отклонения от строгой масштабной инвариантности, и результаты поиска ПЧД могут быть использованы для проверки таких моделей в широкой области k .

Значительное рождение ПЧД из флуктуаций плотности возможно либо если $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$ растет с уменьшением масштаба (увеличением k), либо в случае, когда спектр имеет, в силу каких-либо причин, максимум (или ряд максимумов) в области больших k (например, $k \sim 10^{10} - 10^{20} \text{ Мпк}^{-1}$). Такие максимумы могут возникать как в инфляционных моделях с одним скалярным полем (в этом случае в определенные промежутки времени инфляционный потенциал имеет особенности, приводящие к замедлению темпа инфляции - например, локальный максимум, через который поле в процессе инфляции медленно “переваливается”), так и в более сложных моделях с несколькими полями. В последнем случае имеется, как правило, два этапа инфляции, иногда разделенных периодом медленного расширения.

Величина спектра $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ может достигать больших значений как результат монотонного роста значения спектра, в частности, в моделях с потенциалами класса “hill-top” (“вершина холма”), частным случаем которых является модель с инфляционным потенциалом с “бегущей массой”, предложенная Стюартом [6]. Изучение таких моделей, расчет соответствующих спектров возмущений и концентрации ПЧД является важной задачей. Одной из целей работы является нахождение форм потенциалов, для которых возможно достижение спектром скалярных возмущений достаточно больших значений и изучение вопроса о точности разных методов расчета этого спектра.

На сегодняшний день имеется ряд ограничений на концентрацию ПЧД, полученных из разных соображений. Во многих случаях эти ограничения даются в терминах параметра $\beta(M_{BH})$ - доли плотности энергии Вселен-

ной, заключенной в ПЧД массы M_{BH} на момент их образования, предполагая, при этом, что все ПЧД рождаются с одинаковыми массами, по порядку величины равными массе горизонта M_h в этот момент. Это, как оказывается, является довольно грубым приближением к действительности. Численные расчеты, проведенные в работах Ниёмейера и Джедамзика [7], показали, что гравитационный коллапс с образованием ПЧД может иметь “критическое поведение”, что может привести к образованию в спектре масс ПЧД степенного “хвоста” в области $M_{BH} \ll M_h$, так что учет ненулевой ширины спектра масс в этом случае особенно важен. Расчет спектра масс ПЧД для заданного спектра первичных возмущений плотности может быть проведен на основе формализма Пресса-Шехтера [8]. В диссертации уделяется существенное внимание методу расчета спектра масс ПЧД и получению ограничений на параметры некоторых инфляционных моделей.

Большой интерес представляет вопрос о связи возможной концентрации ПЧД во Вселенной и спектра ГВ, который, возможно, удастся измерить экспериментально существующими или планируемыми в будущем детекторами. Ранее в литературе рассматривалось образование фона ГВ от коллапсов черных дыр (в том числе первичных), но в случае ПЧД оказывается, что этот фон достаточно мал. Коалесценция (слияние) ПЧД с массами $\sim 0.5M_\odot$, находящихся в галактическом гало, могла бы, в принципе, дать сигнал, который смогут измерить наземные интерферометры типа LIGO/Virgo. Испарение ПЧД малых масс в ранней Вселенной также рождает сверхвысокочастотный фон ГВ.

Принципиально новый способ получения ограничений на концентрацию ПЧД из наблюдений гравитационных волн был недавно предложен Сайто и Йокоямой [9]. Оказывается, что большие значения \mathcal{P}_R , необходимые

для рождения ПЧД, во втором порядке космологической теории возмущений приводят к рождению фона ГВ достаточно большой величины. В частности, имеющиеся в области частот $f \sim 10^{-8}$ Гц ограничения на этот фон (полученные из наблюдений пульсаров) позволяют дать очень жесткие пределы на возможную концентрацию ПЧД больших масс (порядка $10^2 - 10^4 M_\odot$). Фон индуцированных гравитационных волн оказывается, таким образом, новым важным свидетельством возможного существования ПЧД и способом измерения как их концентрации, так и величины спектра $\mathcal{P}_\mathcal{R}$. Этот вопрос подробно изучается в настоящей работе.

Другим важным вопросом является проблема экспериментального поиска испаряющихся ПЧД. Как показал Хокинг [10], каждая черная дыра должна испускать в вакуум стационарный поток частиц, то есть “испаряться”. ПЧД с начальными массами $M_* \approx 5 \times 10^{14}$ г сейчас должны находиться на финальной стадии этого испарения, давая потоки высокоэнергичных частиц. Гамма-кванты, излученные таким образом, можно было бы регистрировать, например, наземными ливневыми установками.

Кроме прямого хоккингского потока испаряемых черной дырой фотонов, имеется еще вклад вторичных частиц, образованных в распадах адронов, в свою очередь родившихся в результате фрагментации испаренных кварков (этот вклад доминирует при низких энергиях). В классической работе МакГиббон и Веббера [11] был рассчитан спектр вторичных частиц в предположении, что продукты испарения между собой не взаимодействуют. Хеклер [12] поставил под сомнение это предположение, высказав простые аргументы в пользу того, что за счет сильных (и даже электромагнитных) взаимодействий вокруг черной дыры при высоких температурах может образоваться тепловая фото- или хромосфера. Эта идея была поддержана некоторыми другими исследователями. В недавней работе Мак-

Гиббон, Карра и Пэйджа [13], однако, приводятся доводы в пользу того, что хромосфера не образуется в силу нескольких физических и геометрических причин. Тем не менее, задачу об испарении черной дыры в любом случае нельзя считать до конца решенной. Во всяком случае, процессы формирования спектра хокингского излучения нельзя отделить от процессов взаимодействия испаряемых частиц, происходящих на расстояниях от центра черной дыры, превышающих (в некоторых моделях значительно) ее гравитационный радиус. Одной из задач диссертации является оценка того, насколько прямые экспериментальные пределы на концентрацию ПЧД могут измениться, если вокруг черной дыры в результате некоторого механизма образуется квазихромосфера.

Целью работы является: 1) анализ возможностей реализации сценариев эволюции ранней Вселенной, при которых происходит рождение значительного количества ПЧД, 2) разработка методов вычисления их концентрации в таких случаях, 3) получение космологических ограничений на спектр первичных возмущений кривизны и величину фона индуцированных гравитационных волн из имеющихся экспериментальных данных по поиску астрофизических следствий испарения ПЧД, а также 4) изучение возможностей прямого детектирования испаряющихся ПЧД.

Научная новизна и практическая ценность.

Впервые прямым численным расчетом показана возможность образования высокого пика в спектре первичных возмущений кривизны $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$, генерируемом на инфляционной стадии в модели с двугорбым потенциалом $V(\phi) \sim (\phi^2 - v^2)^2$. Возможность достижения спектром достаточно больших значений также показана для некоторых других моделей, в том числе для инфляционной модели с потенциалом с “бегущей массой”. В последнем случае проведен тщательный анализ и установлено, что для рождения значи-

тельного количества ПЧД требуется очень небольшой положительный бег индекса спектра скалярных возмущений на космологических масштабах: $n'_0 \sim 0.005$. С использованием формализма “крупнозернистого поля” для этой модели изучен вопрос о применимости описания инфляции в терминах классических траекторий в фазовом пространстве. Показано, что для корректности такого описания начальное значение поля должно быть не слишком близко к максимуму потенциала.

Разработан новый метод расчета спектров масс ПЧД, основанный на формализме Пресса-Шехтера и явно учитывающий зависимость гравитационного потенциала от времени (без привлечения передаточных функций). С использованием этого метода проведены расчеты спектров масс ПЧД для нескольких предсказываемых видов $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ в моделях, где возможны его достаточно большие значения.

Из экспериментальных данных по внегалактическим потокам электронных антинейтрино и гамма-квантов, а также из ограничений на энергетическую долю плотности ПЧД во Вселенной получены ограничения на параметры спектра $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ в модели с пиком в спектре первичных возмущений кривизны в области малых масштабов. Для инфляционной модели с потенциалом с “бегущей массой” получены ограничения на ее параметры в терминах наблюдаемых величин n_0 и n'_0 (спектральный индекс и его производная).

Впервые изучена форма спектра индуцированных гравитационных волн в модели с пиком конечной ширины в $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ и в инфляционной модели с потенциалом с “бегущей массой”. Показано, что доля плотности энергии на логарифмический интервал k , заключенная в индуцированных ГВ в сегодняшней Вселенной, $\Omega_{GW}(k)$, может достигать значений $\sim 10^{-7}$ в области частот $10^{-3} - 10^3$ Гц, важной для современных и планируемых в будущем

экспериментов, не входя в противоречие с данными по ПЧД. Впервые существующие ограничения на величину спектра $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ использованы для получения предела на возможную величину фона индуцированных гравитационных волн во Вселенной в интервале частот $10^{-3} - 10^3$ Гц.

Проведены расчеты спектров гамма-квантов и временных параметров вспышки для общепринятой и некоторых нестандартных моделей испарения черной дыры (на последней стадии этого испарения). Показана модельная зависимость прямых экспериментальных пределов и необходимость использования новых методов регистрации ПЧД в случае, если вокруг черной дыры образуется фото- или хромосфера.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1) Показано, что первичные флуктуации плотности с амплитудой, достаточной для рождения в ранней Вселенной первичных черных дыр, могут возникать в ряде инфляционных моделей с одним скалярным полем. Рассмотрены два типа таких моделей: модель с двугорбым инфляционным потенциалом и модель с инфляционным потенциалом с “бегущей массой”.

2) Разработан способ вычисления спектра масс первичных черных дыр в общем случае произвольной зависимости спектра первичных возмущений плотности от сопутствующего размера области возмущения, а также в случае зависимости гравитационного потенциала от времени.

3) Получены ограничения на параметры инфляционных потенциалов в моделях с большими флуктуациями плотности, основанные на сравнении предсказанных в этих моделях диффузных внегалактических потоков фотонов и нейтрино, возникающих при испарении рождающихся первичных черных дыр, с данными экспериментов.

4) Получены ограничения на амплитуды индуцированных гравитационных волн в области больших частот (порядка $10^{-3} - 10^3$ Гц), основанные

на уже имеющихся (из поисков ПЧД) ограничениях на спектр первичных флуктуаций плотности.

5) Изучены временные и энергетические характеристики гамма - всплесков, генерируемых ПЧД на конечной стадии испарения.

Апробация диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, доложены на 30-й и 31-й Международных конференциях по космическим лучам (Мексика, Мерида, 2007 и Польша, Лодзь, 2009), 15-м Международном семинаре QUARKS'08 (Россия, г. Сергиев Посад, 2008), 50-й, 51-й и 52-й Научных конференциях МФТИ (Россия, г. Долгопрудный, 2007-2009), 30-й Всероссийской конференции по космическим лучам (Россия, г. Санкт-Петербург, 2008) и Международной школе по астрофизике элементарных частиц ISAPP (Италия, Сорренто, 2006), а также на семинарах ИЯИ РАН.

Публикации и личный вклад автора. Результаты диссертации опубликованы в 15 работах, их список приведен в конце автореферата. Личный вклад автора в получение результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Автор принимал непосредственное участие, на всех этапах, в работах [1-3, 5, 9-12], сделанных в соавторстве с научным руководителем. Остальные работы опубликованы совместно с научным руководителем и группой экспериментаторов Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ; для них автором делались теоретические расчеты, необходимые для обработки экспериментальных данных и для анализа результатов эксперимента (сами эти результаты на защиту не выносятся).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав основного текста и Заключения. Общий объем диссертации составляет 151 страницу. Диссертация содержит 33 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 170 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы, дается краткий исторический обзор и ставится задача исследования. Отмечается научная новизна и практическая значимость результатов, дается краткое изложение содержания диссертации, перечисляется, где диссертация прошла апробацию.

В **первой главе** рассматриваются теоретические модели ранней Вселенной, предполагающие фазу инфляционного расширения. Рассчитывается спектр возмущений кривизны, генерируемый при разных предположениях о форме потенциала поля инфлатона. Внимание уделяется моделям, в которых спектр может достигать достаточно больших значений, не входя в противоречие с существующими данными эксперимента.

В разделе 1.1 приводятся основные соотношения, позволяющие произвести численное решение уравнений эволюции для скалярного поля - инфлатона и его возмущений, объясняются методы расчета и выбор начальных условий. Выводится известная простая приближенная формула для спектра сопутствующих возмущений кривизны $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$, получаемая в приближении “медленного скатывания”. Приводится также более точная формула Стюарта-Люта [14], учитывающая члены более высокого порядка малости. Отмечается известный факт, что в случаях, когда имеются сильные отклонения от режима “медленного скатывания”, эволюция возмущений на масштабах, больших размера горизонта, может оказаться нетривиальной, и привести к появлению особенностей в спектре $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$ (в этом случае приближенные формулы оказываются ненадежными).

В разделе 1.2 приводится ряд конкретных примеров однополевых инфляционных моделей, в которых достаточно большие значения $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$ (порядка 0.1 - 0.01) достигаются при некотором значении k , при этом значение

спектра на космологических масштабах ($k \sim 10^{-3} \text{ Мпк}^{-1}$) соответствует данным эксперимента ($\mathcal{P}_{\mathcal{R}} \sim 10^{-9}$).

В подразделе 1.2.1 подробно показывается, путем прямого численного расчета, что таким свойством обладает модель с двугорбым инфляционным потенциалом вида

$$V(\phi) = \frac{\lambda}{4}(\phi^2 - v^2)^2, \quad (1)$$

если параметры потенциала надлежащим образом подобраны. Показывается важность использования численного расчета и неприменимость простых формул, получаемых в приближении “медленного скатывания”.

В подразделах 1.2.2 и 1.2.3 то же показывается, соответственно, для потенциалов Коулмена-Вайнберга

$$V(\phi) = \frac{\lambda}{4}\phi^4 \left(\ln \left| \frac{\phi}{v} \right| - \frac{1}{4} \right) + \frac{\lambda}{16}v^4 \quad (2)$$

и потенциала вида

$$V(\phi) = \lambda(1 + A\phi^3 - B\phi), \quad (3)$$

приводится сравнение полученных результатов с результатами других работ и делается вывод о важности численного решения уравнений в рассматриваемых случаях.

В разделе 1.3 подробно изучается инфляционная модель с “бегущей массой”, предложенная Стюартом. В подразделе 1.3.1 приводится описание и обоснование данной модели, показывается, что в линейном приближении потенциал модели записывается в простом виде

$$V(\phi) = V_0 - \frac{3}{2}cH_I^2\phi^2 \left[\ln \left(\frac{\phi}{\phi_*} \right) - \frac{1}{2} \right], \quad (4)$$

обосновывается применимость линейного приближения. Показывается, что значение параметра $c \approx 0.06$ является вполне естественным с точки зре-

ния моделей SUSY-GUT. Для определенного набора параметров в подразделе 1.3.2 проводится численное вычисление спектра возмущений $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ и показывается, что при больших k (соответствующих моментам эволюции системы в конце инфляции, когда нарушаются условия “медленного сжатия”), приближенные формулы оказываются неточны, а спектр $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ может достигать достаточно больших значений в случае, если производная спектрального индекса скалярных возмущений на космологических масштабах, n'_0 , имеет порядок 0.005. В подразделе 1.3.3 для потенциала данной модели изучаются эффекты квантовой диффузии, в том числе вопрос о применимости описания инфляции в терминах классических траекторий в фазовом пространстве. Показывается, что классическое описание корректно, если начальное значение скалярного поля находится не слишком близко к максимуму потенциала.

Во **второй главе** излагается метод расчета спектров масс ПЧД, основанный на формализме Пресса-Шехтера и явно учитывающий зависимость гравитационного потенциала от времени. Проводятся расчеты спектров масс в конкретных случаях, в частности, для случаев спектров первичных возмущений, рассмотренных в главе 1. Получается ряд ограничений на параметры некоторых моделей ранней Вселенной и спектр космологических возмущений кривизны.

В разделе 2.1 приводится вывод формулы для спектра масс ПЧД, обсуждается зависимость спектра масс от модели гравитационного коллапса (рассматриваются модели сферически-симметричного коллапса Карра-Хокинга и критического коллапса), обсуждается роль временной зависимости гравитационного потенциала и приводятся примеры расчетов спектра масс ПЧД в случае спектра $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ с максимумом.

Раздел 2.2 посвящен вычислению диффузных спектров фотонов и ней-

трино, образованных испаряющимися ПЧД с данным спектром масс.

В разделе 2.3 получены ограничения на спектр возмущений кривизны с максимумом из ненаблюдения ПЧД и продуктов их хокинговского испарения (см. рис. 1). При этом спектр параметризуется в простом виде

$$\lg \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = B + (\lg \mathcal{P}_{\mathcal{R}}^0 - B) \exp \left[- \frac{(\lg k/k_0)^2}{2\Sigma^2} \right], \quad (5)$$

где $B \approx -8.6$, значение $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}^0$ задает максимальную величину, достигаемую

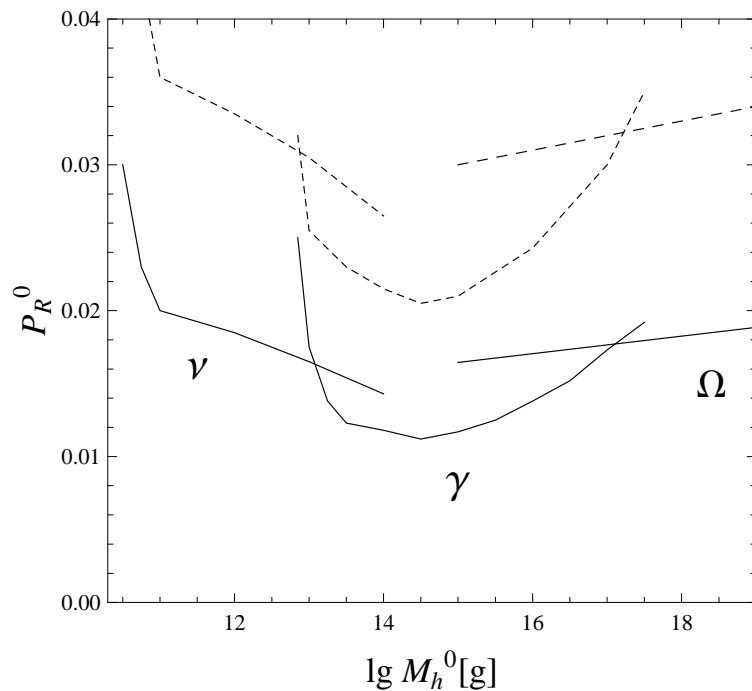


Рис. 1: Ограничения на возможную высоту $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}^0$ пика в спектре скалярных возмущений, предполагая, что он может быть аппроксимирован зависимостью (5), для $\Sigma = 3$ (M_h^0 - масса горизонта, соответствующая масштабу k_0). Показаны ограничения, следующие из наблюдений внегалактических потоков гамма-квантов и нейтрино, а также ограничение по доли плотности энергии Вселенной в ПЧД. Штрихованные кривые соответствуют модели критического коллапса с порогом рождения ПЧД $\delta_c = 0.45$, сплошные - модели коллапса Карра-Хокинга ($\delta_c = 1/3$).

спектром при $k = k_0$, а Σ характеризует ширину распределения.

В разделе 2.4 получены аналогичные ограничения для модели с потенциалом с “бегущей массой”, выраженные в терминах экспериментально наблюдаемых величин n_0 и n'_0 (спектральный индекс и его производная). Оказывается, что значение n'_0 сильно ограничено по данным ПЧД и не может превышать $(3 - 6) \times 10^{-3}$ (точное ограничение при этом зависит от других параметров).

Раздел 2.5 посвящен проверке идеи (появившейся в литературе несколько лет назад) о том, что ПЧД, накопившиеся в центре нашей Галактики в результате гравитационной кластеризации, могут приводить к появлению 511 кэВ-ной фотонной линии в направлении из Галактического Центра за счет аннигиляции позитронов, испаренных этими ПЧД (известно, что такое излучение на самом деле наблюдается). Показано, что это действительно возможно, если ПЧД имеют массу $\sim 10^{17}$ г, а их полная суммарная масса $\approx 10^9 M_\odot$. При этом обеспечивается необходимое количество испаряемых позитронов и нет противоречия как с данными по диффузному внегалактическому потоку фотонов, так и с данными по их потоку из центра Галактики.

Третья глава посвящена вопросу о связи ПЧД и гравитационных волн, индуцированных скалярными возмущениями.

Раздел 3.1 имеет обзорный характер и посвящен теоретическим моделям, в которых возможно рождение принципиально наблюдаемого фона ГВ. Кратко рассматривается генерация ГВ в моделях инфляции, прехинтинга, при фазовых переходах в ранней Вселенной, в моделях с космическими струнами, в теориях бран, в моделях с хокинговским испарением гравитонов из ПЧД.

Раздел 3.2 посвящен вопросу о ГВ, генерируемых скалярными возмуще-

ниями во втором порядке космологической теории возмущений. Выводится связь частоты ГВ с массой горизонта, приводятся формулы для спектров ГВ, излагается метод вычисления доли плотности ГВ во Вселенной Ω_{GW} (на логарифмический интервал k). Такой расчет проводится, в частности, в случае спектра $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$, аппроксимированного δ -функцией.

В разделе 3.3 приводится расчет Ω_{GW} для случая спектра $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$, имеющего пик конечной ширины и проводится сравнение с имеющимися дан-

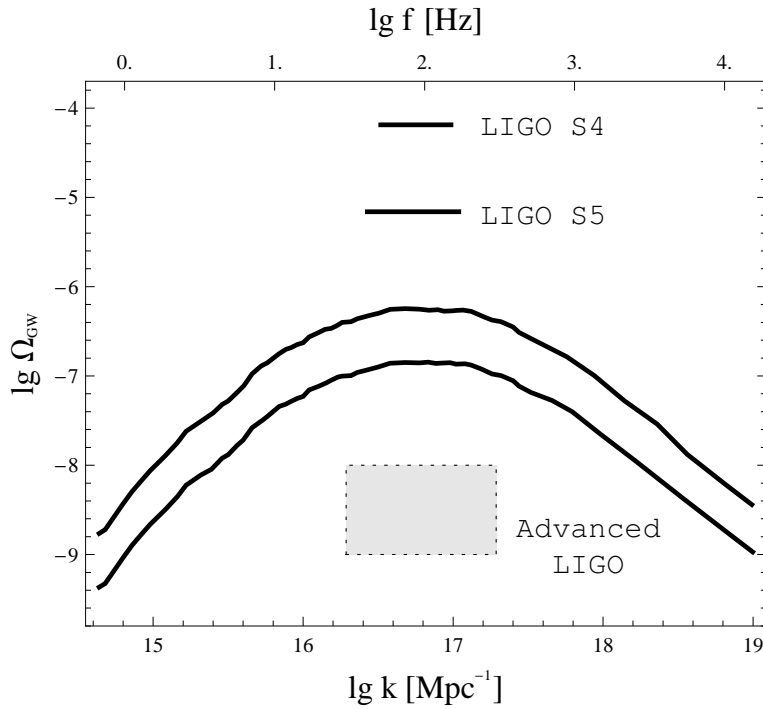


Рис. 2: Расчет фона ГВ второго порядка Ω_{GW} , индуцированных скалярными возмущениями в случае спектра $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ с пиком при $f_0 = 100$ Гц ширины $\Sigma = 3$ и высоты $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}^0 = 0.032$ (верхняя кривая) и $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}^0 = 0.016$ (нижняя кривая). Такие значения $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}^0$ соответствуют максимально допустимым величинам, не запрещенным по данным ПЧД (см. рис. 1). Также показаны существующие пределы эксперимента LIGO и ожидаемая конечная чувствительность Advanced LIGO.

ными эксперимента и возможностями будущих экспериментов (см. рис. 2).

Раздел 3.4 посвящен обсуждению максимально возможного фона индуцированных ГВ и возможности установить на него ограничения из данных по ПЧД. Показано, что такие ограничения существенны для интерпретации результатов экспериментов по регистрации ГВ в интервале частот $10^{-3} - 10^3$ Гц.

В разделе 3.5 фон индуцированных ГВ изучается в модели с потенциалом с “бегущей массой”, и показывается, что Ω_{GW} также может достигать в этом случае достаточно больших значений, принципиально детектируемых в таких экспериментах, как Advanced LIGO или BBO.

Обсуждение результатов третьей главы и сравнение разных методов получения ограничений на спектр $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ приводятся в разделе 3.6. Показывается, что в будущем измерения фона ГВ позволят дать гораздо более сильные ограничения на спектр скалярных возмущений и концентрацию ПЧД, чем имеются сегодня.

В **четвертой главе** рассматривается вопрос о возможности обнаружения ПЧД на последней стадии испарения в экспериментах, регистрирующих гамма-кванты высоких энергий.

В разделе 4.1 делаются оценки того, какой могла бы быть концентрация испаряющихся ПЧД в окрестности Солнечной Системы и обосновывается интерес к прямым экспериментальным пределам на эту величину.

В разделе 4.2 проводится обзор литературы, посвященной испарению ПЧД. Приводятся аргументы в пользу того, что задача об испарении черной дыры еще не решена окончательно, и существующие теоретические неопределенности могут оказать существенное влияние на интерпретацию данных экспериментов.

Примеры расчетов спектров гамма-квантов и временных параметров

вспышки для некоторых моделей испарения (модель с прямой фрагментацией кварков и хромосферные модели) приводятся в разделе 4.3.

Раздел 4.4 посвящен обзору и обсуждению существующих экспериментальных результатов. Отмечается, что, учитывая существующие теоретические неопределенности, представляется необходимым проводить поиск гамма-всплесков от ПЧД на разных установках и при разных энергиях регистрируемых частиц.

В **Заключении** подводятся итоги работы и перечисляются основные полученные в ней результаты.

Цитированная литература:

1. Ya. B. Zeldovich, I. D. Novikov. — Soviet Astronomy. — 1967. — vol. **10**. — p. 602.
2. S. Hawking. — MNRAS. — 1971. — vol. **152**. — p. 75.
3. B. J. Carr, S. W. Hawking. — MNRAS. — 1974. — vol. **168**. — p. 399.
4. E. R. Harrison. — Phys. Rev. D. — 1970. — vol. **1**. — p. 2726.
5. Ya. B. Zeldovich. — 1972. — MNRAS. — vol. **160**. — p. 1.
6. E. D. Stewart. — Phys. Lett. B. — 1997. — vol. **391**. — p. 34; Phys. Rev. D. — 1997. — vol. **56**. — p. 2019.
7. J. C. Niemeyer, K. Jedamzik. — Phys. Rev. Lett. — 1998. — vol. **80**. — p. 5481; Phys. Rev. D. — 1999. — vol. **59**. — p. 124013.
8. W. H. Press, P. Schechter. — Astrophys. J. — 1974. — vol. **187**. — p. 425.
9. R. Saito, J. Yokoyama. — Phys. Rev. Lett. — 2009. — vol. **102**. — p. 161101.
10. S. W. Hawking. — Nature. — 1974. — vol. **248**. — p. 30; Commun. Math. Phys. — 1975. — vol. **43**. — p. 199.

11. J. H. MacGibbon, B. R. Webber. — Phys. Rev. D. — 1990. — vol. **41**. — p. 3052.
12. A. F. Heckler. — Phys. Rev. Lett. — 1997. — vol. **78**. — p. 3430; Phys. Rev. D. — 1997. — vol. **55**. — p. 480.
13. J. H. MacGibbon, B. J. Carr and D. N. Page. — Phys. Rev. D. — 2008. — vol. **78** — p. 064043.
14. E. D. Stewart, D. H. Lyth. — Phys. Lett. B. — 1993. — vol. **302**. — p. 171.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. E. Bugaev and P. Klimai. Large curvature perturbations near horizon crossing in single-field inflation models // Phys. Rev. D. — 2008. — vol. **78**. — p. 063515.
2. E. Bugaev and P. Klimai. Constraints on amplitudes of curvature perturbations from primordial black holes // Phys. Rev. D. — 2009. — vol. **79**. — p. 103511.
3. E. Bugaev and P. Klimai. Induced gravitational wave background and primordial black holes // Phys. Rev. D. — 2010. — vol. **81**. — p. 023517.
4. В. Б. Петков, Э. В. Бугаев, П. А. Климай и Д. В. Смирнов. Ограничения на концентрацию испаряющихся первичных черных дыр для хромосферных моделей испарения // Письма в ЖЭТФ. — 2008. — Т. **87**. — С. 3 - 6.
5. E. Bugaev and P. Klimai. Bound on induced gravitational wave background from primordial black holes // Письма в ЖЭТФ. — 2010. — Т. **91**. — С. 3 - 7.

6. В. Б. Петков, Э. В. Бугаев, П. А. Климай и др. Поиск всплесков гамма-излучения сверхвысокой энергии от испаряющихся первичных черных дыр // Письма в АЖ. — 2008. — Т. **34**. — С. 563 - 569.
7. В. Б. Петков, Э. В. Бугаев, П. А. Климай и др. Экспериментальный поиск всплесков гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр // ЖЭТФ. — 2010. — Т. **137**. — С. 460 - 472.
8. E. Bugaev, P. Klimai and V. Petkov. Photon spectra from final stages of a primordial black hole evaporation in different theoretical models // Proc. of the 30th International Cosmic Ray Conference, edited by R. Caballero et al, Universidad Nacional Autonoma de Mexico. — Mexico City, Mexico, 2008. Vol. 3 (OG part 2), p. 1123-1126.
9. П. А. Климай, Э. В. Бугаев. Спектры масс первичных черных дыр и ограничения на параметры моделей ранней Вселенной // Труды 51-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”: Часть VIII. Проблемы современной физики. — М.: МФТИ, 2008, С. 145-148.
10. E. V. Bugaev and P. A. Klimai. Large curvature perturbations in single-scalar-field models of inflation // Proc. of 15th International Seminar on High Energy Physics QUARKS-2008, Sergiev Posad, Russia, 2008. — Vol. 1, p. 329 - 343.
11. П. А. Климай, Э. В. Бугаев. Взаимосвязь спектра первичных флуктуаций плотности и величины фона гравитационных волн во Вселенной // Труды 52-й научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”: Часть VIII. Проблемы современной физики. — М.: МФТИ, 2009, С. 118-121.
12. E. Bugaev and P. Klimai. Constraints on power spectrum of density

- fluctuations from PBH evaporations // Preprint arXiv:astro-ph/0612659. — 2006.
13. В. Б. Петков, Э. В. Бугаев, П. А. Климай, А. Н. Гапоненко и П. С. Стриганов. О методике поиска всплесков гамма-излучения сверхвысокой энергии от испаряющихся первичных черных дыр на ливневых установках // Препринт ИЯИ РАН - 1209/2008. — 2008.
 14. E. V. Bugaev, V. B. Petkov, A. N. Gaponenko, P. A. Klimai et al. Experimental search of bursts of very high energy gamma rays from primordial black holes // Preprint arXiv:0906.3179 [astro-ph.CO]. — 2009.
 15. E. V. Bugaev, V. B. Petkov, A. N. Gaponenko, P. A. Klimai et al. Experimental search of bursts of gamma rays from primordial black holes using different evaporation models // Preprint arXiv:0906.3182 [astro-ph.CO]. — 2009.