

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

[530.12:531.51 + 530.145] (063)

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ**(по материалам II Международного семинара по квантовой теории гравитации, Москва, 13—15 октября 1981 г.)**

С 13 по 15 октября 1981 г. в Москве в Доме ученых проходил второй семинар «Квантовая теория гравитации». Как и предыдущий, прошедший в 1978 г., он был организован Отделением ядерной физики АН СССР совместно с Институтом ядерных исследований АН СССР. Этот семинар продолжил серию тематических семинаров, посвященных актуальным проблемам теоретической физики и физики элементарных частиц, организуемых Отделением ядерной физики АН СССР. В рамках этой серии ранее, в частности, были проведены семинары: « μ — e -проблема» и «Кварки и партонь».

На настоящем семинаре основное внимание было сосредоточено на обсуждении следующих проблем: 1. Квантовая гравитация (новые подходы и нерешенные проблемы); 2. Квантовые эффекты в космологии и происхождение Вселенной; 3. Квантовые эффекты в черных дырах; 4. Супергравитация (последние достижения). В его работе наряду с советскими специалистами приняли участие ряд известных зарубежных физиков, в том числе С. Хокинг (Англия), У. Унру (Канада), Дж. Хартль (США) и др.

В течение трех дней было заслушано 30 докладов (длительностью по 30—40 минут), в которых нашли отражение значительная часть новых результатов по тематике семинара, полученных в последние годы. В итоге участники получили довольно полное представление о том, что нового произошло в квантовой теории гравитации за последние два-три года.

Прежде чем перейти к изложению основных научных результатов, представленных на семинаре, уместно сначала несколько слов сказать о современном статусе квантовой гравитации и ее проблемах. Квантовая гравитация — это раздел теоретической физики, изучающий квантовые особенности гравитационного взаимодействия. Хотя теория квантовой гравитации еще далека от завершения, в настоящее время, по-видимому, почти всеми специалистами разделяется уверенность в том, что лишь последовательный учет квантово-гравитационных явлений может позволить завершить процесс построения единой теории всех взаимодействий и устранить основные трудности, присущие квантовой теории поля (в частности, «расправиться» с ее бесконечностями). Хотя такая точка зрения в настоящее время получила широкое распространение, так было далеко не всегда. Перелом в общественном мнении физиков-теоретиков, происшедший в последнее десятилетие, был связан, по-видимому, с построением теорий Великого Объединения (в которых происходит объединение сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий) и бурным развитием супергравитации. (Супергравитация — это теория, построенная на основе теории гравитации Эйнштейна и включающая в себя естественным образом описание наряду с гравитационным целого набора других полей (бозонных и фермионных), объединенных в единую совокупность на основе принципа суперсимметрии (т. е. симметрии, связывающей поля целых и полуцелых спинов).)

Из-за малости константы гравитационного взаимодействия эффекты квантовой гравитации могут оказаться существенными или на крайне малых пространственно-временных расстояниях (порядка 10^{-33} см, что соответствует энергии взаимодействующих частиц порядка 10^{28} эВ), или в сильных гравитационных полях. Подобные сильные гравитационные поля естественным образом возникают на ранних этапах эволюции Вселенной и при образовании черных дыр (т. е. компактных массивных объектов, сильное гравитационное поле которых удерживает вещество и свет и препятствует тем самым выходу наружу любой информации). При изучении в рамках классической (неквантовой) теории гравитации строения пространства-времени при наличии силь-

ного гравитационного поля было показано, что возникновение таких полей неизбежно (при самых широких предположениях) связано с образованием сингулярностей, т. е. неустранимых особенностей в пространстве-времени, в окрестностях которых классическая теория гравитации оказывается недостаточной и перестает работать. В космологии эта сингулярность присутствовала (в рамках классического описания) в начальный момент расширения Вселенной («Большой взрыв»). В черных дырах сингулярность развивается как результат сжатия (коллапса) вещества. Хотя она, будучи спрятана внутри черной дыры, не видна внешнему наблюдателю, само существование этой сингулярности бросает вызов теоретикам. Исследование космологической сингулярности оказывается необходимым, поскольку, как выяснилось, именно характер процессов, происходящих около нее, может существенным образом определять дальнейшую эволюцию Вселенной и объяснить, в частности, образование галактик.

Хотя надежды на то, что квантовая гравитация может излечить эти «хронические недуги» классической теории, высказывались давно, однако достижением последнего десятилетия следует считать начало конкретных исследований, ставящих целью понять характер квантовых явлений в подобных экстремальных условиях.

Именно эти, перечисленные выше, ключевые проблемы квантовой гравитации, определили программу настоящего семинара. Ниже мы кратко остановимся на новых результатах, сообщенных на семинаре по этим основным проблемам.

1. КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ (НОВЫЕ ПОДХОДЫ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ)

В вступительном докладе «Некоторые проблемы общей теории относительности» М. А. Марков дал обзор основных направлений развития квантовой гравитации и сформулировал ряд проблем и вопросов, исследование которых представляется наиболее актуальным и важным для понимания как самой квантовой гравитации, так и ее космологических и астрофизических приложений. К таким вопросам относится, в частности, вопрос о роли гравитации в проблеме собственной энергии элементарных частиц. Известно, что все попытки вычисления массы элементарных частиц приводят к бесконечности, в то время как в классической теории показано, что классические расходимости собственной энергии благополучно устраняются при учете гравитационного взаимодействия. Поэтому представляется важным выяснение вопроса о том, сохраняет ли гравитация роль регуляризатора и в квантовой теории. Другой важной проблемой, обсуждавшейся в докладе, была гипотеза о существовании стабильных элементарных черных дыр планковской массы (10^{-5} г) (максимонов). Этот вопрос стал острым после доказательства С. Хокингом утверждения о том, что при выполнении *CPT*-теоремы из состояния, первоначально не содержащего максимонов, не может возникнуть конечное состояние, содержащее устойчивые максимоны. В докладе было обращено внимание на то, что эта теорема не запрещает возможности существования стабильных максимонов в мире, начальные условия в котором таковы, что максимоны присутствуют изначально. Это замечание особенно важно, поскольку остается открытой заманчивая возможность построения сценария Вселенной, основную роль в котором играет максимонная составляющая. Если стабильные максимоны существуют, то они играют роль элементарных частиц предельно большой массы, определяя масштаб и верхнюю границу спектра масс элементарных частиц. Однако даже если элементарные черные дыры нестабильны, то они тем не менее должны участвовать в промежуточных состояниях в квантовых процессах в качестве виртуальных (короткоживущих) образований.

Вопрос о виртуальных черных дырах тесным образом связан с вопросом о структуре вакуума в квантовой гравитации. Согласно современным представлениям, физический вакуум, т. е. состояние, в котором отсутствуют реальные частицы, представляет собой сложное образование, порожденное квантовыми флуктуациями всех существующих в природе физических полей. Из-за того, что гравитационная постоянная является размерной величиной, квантовая гравитация отличается от остальных взаимодействий тем, что амплитуда квантовых флуктуаций оказывается тем больше, чем меньшую область она занимает. Как отмечал еще американский теоретик Дж. Уилер, это приводит, в частности, к тому, что в масштабах 10^{-33} см флуктуации метрики сравнимы с единицей, и возможны виртуальные изменения топологии и возникновение виртуальных черных дыр. Иными словами, пространство-время в малом напоминает скорее мыльную пену, чем гладь воды. Теорию пенной структуры пространства-времени в последние годы интенсивно развивает один из ведущих английских теоретиков, профессор Кембриджского университета С. Хокинг. В его докладе, представленном на семинаре, обсуждался вопрос, каким образом подобная пенная структура может влиять на физические процессы и, в частности, на распространение физических частиц. Принципиально новым при этом является возможность потери квантовой когерентности в результате взаимодействия частицы с виртуальной черной дырой. Как следствие, любая квантовая система должна описываться матрицей плотности, а не векто-

ром состояния. Соответствующим образом модифицируется система аксиом квантовой теории поля и математический аппарат для описания таких процессов, как распады и рассеяние элементарных частиц. В результате появляется возможность нарушения многих законов сохранения, в том числе законов сохранения барионного и лептонного зарядов. Характерное время жизни протона относительно таких квантово-гравитационных процессов оказывается равным 10^{50} лет, что почти на 20 порядков больше характерного времени, обсуждаемого в настоящее время в рамках теорий «Великого объединения». Несмотря на то, что время жизни частиц в результате таких распадов чрезвычайно велико и неизмеримо в настоящее время, сама принципиальная возможность несохранения барионного и лептонного чисел в гравитационных взаимодействиях представляет несомненный интерес и может оказаться крайне существенной для космологии.

Размерная константа гравитационного взаимодействия, обуславливающая описанные выше особенности строения вакуума, одновременно приводит к тому, что построенная по стандартной схеме квантовая гравитация является перенормируемой теорией, т. е. теорией, в которой не удается исключить расходимости формальным переопределением затраченных величин. Поэтому крайне заманчиво выглядит свойство перенормируемости квантовой теории гравитации, основанной на модификации теории Эйнштейна путем добавления малых квадратичных по кривизне членов, рассмотренной в докладе Е. С. Фрадкина (совместно с А. А. Цейтлиным). Показано, что подобная теория оказывается асимптотически свободной, т. е. константа гравитационного взаимодействия при энергиях выше планковской (10^{28} эВ) стремится к нулю, что позволяет в этой области проводить расчеты, основанные на теории возмущений. Более того, взаимодействие других полей с гравитационным в рамках такой теории приводит к появлению свойства асимптотической свободы в тех случаях, когда ее ранее не было (в том числе и в супергравитации), и не нарушает свойства асимптотической свободы взаимодействий, которые этим свойством обладали сами по себе. Аналогичным образом, при анализе вариантов теорий расширенной супергравитации (т. е. обобщения стандартной супергравитации путем включения дополнительных частиц на основе дополнительной группы внутренних симметрий) было показано, что первоначально отсутствующее свойство асимптотической свободы возникает при переходе к конформному обобщению этой теории. И хотя в рассмотренных в докладе вариантах пока не удалось преодолеть трудности, общие для всех теорий с высшими производными (не доказано, что рассмотренная теория является унитарной), однако представленные результаты выглядят весьма обнадеживающими.

Ряд докладов содержал разработку идеи о том, что гравитационное поле является составным объектом и общая теория относительности возникает как эффективная теория составных полей. В докладе Х. Теразавы (Институт ядерных исследований, Япония) обсуждалась зависимость от температуры гравитационного взаимодействия и возможная неустойчивость гравитонов при сверхвысоких температурах в рамках таких теорий. В качестве проявления соответствующего фазового перехода автор указывает на возможное наличие эры, предшествующей Большому взрыву, и возможное существование объектов нового типа: «прегеометрических дыр», т. е. областей в пространстве-времени, где исчезает метрика. И хотя доклад на семинаре носил предварительный характер, а сама теория не разработана в деталях, изложенная идея вызвала законный интерес.

При построении математического аппарата квантовой теории гравитации, супергравитации и других подобных теорий теоретики сталкиваются с многочисленными трудностями, связанными с калибровочной инвариантностью этих теорий. Эти, на первый взгляд технические, трудности нередко вырастают в принципиальную невозможность использования стандартных, развитых ранее, методов квантования. Общий подход к решению подобных проблем был изложен в докладе И. А. Баталина, Г. А. Вилковского, а также в докладе Б. Л. Воронова, И. В. Тютина.

В докладе Д. М. Волкова и В. И. Ткача новое развитие получил подход к теории гравитации, в котором первоначально число пространственно-временных измерений превышает четыре, однако (например, из-за неустойчивости) происходит компактификация («замыкание») лишних измерений и превращение их во внутренние степени свободы.

2. КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В КОСМОЛОГИИ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Этой проблеме была посвящена почти треть всех докладов.

Хотя в настоящее время не существует сколько-нибудь последовательной теории, объясняющей происхождение Вселенной (и не ясно даже, может ли такая теория быть построена), однако к ней уже предьявляется целый набор требований, которым она должна удовлетворять, чтобы объяснить наблюдаемые факты в эволюции Вселенной. От будущей теории требуют, чтобы она объяснила:

- 1) почему наша Вселенная в больших масштабах (т. е. при усреднении по масштабам порядка 100 Мпс) в высшей степени однородна и изотропна;
- 2) почему начальные условия были таковы, что Вселенная смогла дожить до настоящего времени и плотность вещества в ней близка к критической;
- 3) откуда взялись те возмущения, которые привели к образованию галактик.

Для того чтобы пояснить, почему первый вопрос действительно нетривиален, достаточно напомнить, что в рамках стандартной (классической) теории расширения Вселенной происходит так быстро, что области, откуда к нам приходит реликтовое излучение, не успевают обменяться сигналами, а тем не менее характеристики этого излучения от причинно несвязанных областей строго коррелированы (вариации температуры реликтового излучения, приходящего от достаточно удаленных, причинно несвязанных элементов первичной плазмы, не превосходит величины $\Delta T/T \ll 10^{-4}$). Более того, можно доказать, что эту трудность нельзя преодолеть в рамках стандартной модели Вселенной, если не нарушить условие энергодоминантности (условие положительности плотности энергии и давления вещества). Квантовая теория открывает возможность для нарушения условия энергодоминантности, поскольку плотность энергии и давление, связанные с эффектом поляризации вакуума в гравитационном поле, могут быть отрицательными. Поэтому на стадии, когда доминирующую роль играли эффекты поляризации вакуума, Вселенная могла расширяться медленнее и успевало устанавливаться равновесие между разными областями.

Один из конкретных вариантов теории подобного вида был представлен в докладе А. А. Старобинского. В предложенной им модели на начальной стадии Вселенная представляет собой однородный мир планковских размеров без вещества, описываемый решением де Ситтера, т. е. максимально симметричным решением уравнений Эйнштейна с Λ -членом. Λ -член, или что то же, тензор энергии-импульса вещества с уравнением состояния $p = -\varepsilon$ (p — давление, ε — плотность энергии), формально совпадает с тензором энергии-импульса поляризации вакуума в таком мире. Позднее этот мир из-за наличия неустойчивости начинает расширяться, и, после рождения (из-за перемещения гравитационного поля) в нем вещества, он дает начало обычной (классической) расширяющейся Вселенной Фридмана, при этом автоматически плотность вещества в настоящий момент будет близка к критической.

В докладе Л. П. Грицука и Я. Б. Зельдовича «Полные космологические теории» была развита интересная возможность образования нашей Вселенной из начальных квантовых флуктуаций. Согласно предложенной в докладе гипотезе, в результате подобной флуктуации образуется трехмерная замкнутая геометрия, важную роль в дальнейшей эволюции которой играют эффекты поляризации вакуума, приводящие к неустойчивости и расширению этого замкнутого мира. Дальнейшая эволюция этого мира протекает так же, как и в модели, предложенной в докладе А. А. Старобинского. Авторы подчеркнули важную роль исследований реликтового гравитационно-волнового фона. Хотя современные экспериментальные возможности еще недостаточны для регистрации этого фона, развитие техники гравитационно-волнового эксперимента позволяет надеяться, что в будущем необходимые измерения окажутся возможными. Полученная в таких экспериментах информация об интенсивности и форме спектра реликтовых гравитонов позволит определить характеристики гравитационного поля в очень ранней Вселенной и оказаться, тем самым, чувствительной проверкой правильности изложенных в гипотезе представлений.

Наличие де-ситтеровской (затянутой) стадии расширения Вселенной может помочь также решить проблему образования галактик, поскольку на этом этапе оказывается значительным рост первоначально малых возмущений. В докладе Д. А. Компанейца, В. И. Лукаша, И. Д. Новикова и в докладе В. Ф. Муханова и Г. В. Чибисова была развита квантовая теория малых гидродинамических возмущений во фридмановской Вселенной и показано, что при наличии достаточно длинной де-ситтеровской фазы этих квантовых возмущений уже достаточно для развития неоднородностей и образования галактик.

Обсуждение другой возможности появления де-ситтеровской стадии в эволюции Вселенной и решения упомянутых выше вопросов содержалось в докладе А. Д. Линде. Он обратил внимание на то, что в калибровочных теориях со спонтанным нарушением симметрии при сверхвысоких температурах ($T \gg T_{\text{GUT}} = m_{\text{GUT}} c^2/k$, где $m_{\text{GUT}} c^2 \approx 10^{14}$ ГэВ — характерная масса «Великого объединения»), уравнение состояния может иметь вид $p = -\varepsilon$. Соответствующая де-ситтеровская фаза при этом длится до момента окончания фазового перехода, и поэтому время задержки, определяемое параметрами теорий «Великого объединения», оказывается существенно больше планковского времени. В рамках рассмотренного в докладе варианта сценария расширения Вселенной удается наряду с решением указанных выше космологических проблем ответить также на ряд вопросов, связанных с возможными космологическими следствиями теорий Великого объединения (такие, как проблема реликтовых монополей и доменных стенок).

Если наш мир замкнут, то наступит время, когда он начнет сжиматься, при этом имеется возможность, что и на самых поздних стадиях он снова пройдет через де-ситтеровскую стадию (эта возможность обсуждалась в докладе В. А. Березина).

Настоящий семинар явился, по-видимому, первым международным форумом, на котором было продемонстрировано, что целый ряд проблем теории эволюции Вселенной решается в рамках гипотезы о существовании де-ситтеровской стадии в космологии, и развиты следствия, вытекающие из этой гипотезы.

Среди других направлений, следует еще упомянуть вопрос о влиянии внешнего гравитационного поля на спонтанное нарушение симметрии (обсуждавшийся в докладах А. В. Верякина, В. Г. Лалчинского, В. И. Некрасова, В. А. Рубакова и Л. А. Гриба, С. Г. Мамаева, В. М. Мостепаненко).

3. КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЧЕРНЫХ ДЫРАХ

В рамках этой темы основное внимание в докладах, представленных на семинаре, было уделено следующим вопросам:

- 1) эффекты поляризации вакуума в сильном гравитационном поле черной дыры;
- 2) влияние квантовых эффектов на структуру пространства-времени черной дыры;
- 3) квантовое излучение черных дыр и обобщенный второй закон термодинамики.

Особый интерес к квантовой физике черных дыр возник после работы С. Хокинга 1974 г., в которой он показал, что в гравитационном поле черной дыры вакуум оказывается неустойчивым. Распад вакуума приводит к появлению излучения, имеющего тепловой характер с характерной температурой $T = \hbar c^3 / (8\pi GMk)$, где M — масса черной дыры. Этот эффект оказывается особенно существенным для черных дыр малой массы. Подобные черные дыры могли образовываться только на начальных этапах эволюции Вселенной, и они получили название первичных. Полный обзор современных представлений о первичных черных дырах и анализ ограничений на число и спектр масс первичных черных дыр, основанный на сравнении теоретически предсказываемых следствий их испарения с наблюдательными данными, содержался в докладе английского астрофизика Б. Карра.

После работы С. Хокинга 1974 г. существенно возрос интерес еще к одному направлению, получившему название термодинамики черных дыр. В начале 70-х годов, главным образом благодаря работам Дж. Бекенштейна, было обнаружено, что во многих аспектах черные дыры ведут себя так же, как термодинамические системы, причем роль энтропии в этой аналогии играет величина, пропорциональная площади поверхности черной дыры. Теоретическое открытие Хокингом теплового излучения от черных дыр оказалось решающим шагом, подтвердившим наличие глубокой связи физики черных дыр, термодинамики и теории информации. Термодинамика черных дыр предсказывает, что в явлениях, в которых наряду с обычным веществом участвуют черные дыры, должен выполняться так называемый обобщенный второй закон термодинамики, гласящий, что сумма энтропии обычного вещества и энтропии, связанной с черными дырами, не убывает со временем. Было предпринято несколько попыток доказать это утверждение, но все они основывались на дополнительных предположениях о свойствах вещества. В докладе канадского физика У. Упру на семинаре было обращено внимание на то, что во всех предыдущих доказательствах авторы не учитывали роль дополнительных сил, связанных с квантовой поляризацией вакуума около черной дыры. У. Упру привел новое доказательство (предложенное им совместно с теоретиком из Чикаго Р. Уолдом) обобщенного второго закона термодинамики и продемонстрировал, что учет эффекта поляризации вакуума гравитационным полем не только позволяет отбросить дополнительные предположения о структуре вещества, но и приводит к возможности принципиально новых явлений (например, выталкивание из черной дыры идеально проводящих тел и возможности управления интенсивностью хокинговского излучения).

Я. Б. Зельдович в своем докладе обратил внимание на то, что если бы какие-либо процессы (например, эффекты поляризации вакуума) не препятствовали образованию черных дыр с массой меньше планковской массы (10^{-5} г), то они, возможно, имели бы относительно большое время жизни.

Обсуждению вопроса о влиянии квантовых эффектов на структуру пространства-времени черной дыры был посвящен доклад Г. А. Вилковьского и В. П. Фролова. Ими было доказано, что при коллапсе массы меньше планковской поляризация вакуума препятствует развитию сингулярности и образованию черной дыры. Это означает, в частности, что черных дыр с массой меньше планковской не существует в природе. Приведенные в докладе данные указывают на то, что и при коллапсе больших масс эффекты поляризации вакуума оказываются существенными и могут устранить сингулярность внутри черной дыры. Эти результаты важны, в частности, для выяснения вопроса о возможном конечном состоянии испаряющейся черной дыры, поскольку они исключают возможность возникновения в качестве такого конечного состояния черной дыры с массой меньше планковской и (по-видимому) голой сингулярности.

В докладе развит подход, позволяющий учесть обратное влияние поляризации вакуума и хокинговского излучения на геометрию пространства черной дыры.

Расчету эффектов поляризации вакуума около стационарных (вращающихся и заряженных) черных дыр и исследованию особенностей влияния вращения черной дыры на поляризацию вакуума был посвящен доклад В. П. Фролова.

4. СУПЕРГРАВИТАЦИЯ

На семинаре обсуждались главным образом следующие два вопроса: 1) создание удобного геометрического аппарата и описание структуры вспомогательных полей в супергравитации (доклады А. С. Шварца, В. И. Огивецкого и П. Веста (Англия) и 2) структура расходимостей и возможная перенормируемость в различных моделях супергравитаций (Р. Э. Каллош и М. Дафф (Англия)).

Из приведенного выше перечисления вопросов, рассмотренных на семинаре, и представленных на нем результатов видно, насколько интенсивно развиваются в последние годы исследования по квантовой гравитации в области физики, которая не так давно еще была довольно пустынной. Эти исследования принесли в последние годы ряд необычайно интересных и фундаментально важных результатов, указывающих на то, что самое слабое из всех взаимодействий, гравитационное, может обладать самыми неожиданными свойствами.

Прошедший семинар по «Квантовой теории гравитации», по общему признанию его участников, был «очень актуальным, очень полезным и очень интересным». Профессор С. Хокинг в своем письме отозвался о семинаре по «Квантовой теории гравитации» в Москве как «об одной из лучших конференций, в которых он участвовал за последние годы».

В. П. Фролов