

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Ващилко Е.С., студентка гр.418302 Дингилевская А.А., студентка гр.418301

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Чаевский В.В. - кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики

Аннотация. В данной работе исследуются ключевые элементы квантовой гравитации: гипотетический гравитон, чёрные дыры с их сингулярностями и квантовая пена. Анализируются экспериментальные данные (LIGO, БАК) и теоретические модели (петлевая квантовая гравитация, теория струн), подтверждающие эти концепции. Цель — показать перспективы создания единой теории, объединяющей гравитацию и квантовые законы.

Квантовой гравитацией называется раздел в теоретической физике, который объединяет сразу две теории: общую теорию относительности Эйнштейна (ОТО) и квантовую механику. ОТО представлена как классическая теория гравитации, описывающая её как искривление пространства-времени под действием массы и энергии. В свою очередь основополагающий принцип квантовой механики заключается в том, что энергия и материя существуют в виде дискретных единиц (квантов), обладающих волно-частичным дуализмом, примером чего служит фотон. Следствием этого является представление о том, что фундаментальные взаимодействия опосредованы квантами-переносчиками. Для трех негравитационных сил наличие таких переносчиков и подчинение законам квантовой механики установлено. Гравитация же описывается классической общей теорией относительности, что потребовало введения гипотетического кванта гравитационного поля — гравитона — для ее потенциального включения в квантовую картину мира. Ключевые проблемы квантовой гравитации включают изучение чёрных дыр и их сингулярностей, где бесконечные величины в ОТО требуют квантовой коррекции, а также концепцию квантовой пены — хаотической микроструктуры пространства-времени на планковских масштабах, где рождаются и исчезают виртуальные чёрные дыры и червоточины. Эти объекты и явления становятся «полигоном» для проверки гипотез, объединяющих гравитацию и квантовые законы.

Гравитон — гипотетическая элементарная частица, предложенная как квантовый переносчик гравитационного взаимодействия. Идея квантового переносчика гравитации возникла в 1930-х годах при попытках объединить гравитацию с квантовой теорией поля. Термин «гравитон» впервые был использован в 1934 году советскими физиками Д. Блохинцевым и Ф. Гальпериним в работе по квантованию гравитационных волн. Согласно теориям, это безмассовый бозон со спином 2, движущийся со скоростью света, который должен обеспечивать передачу гравитационных сил аналогично тому, как фотоны переносят электромагнетизм. Его существование стало ключевой идеей в попытках объединить ОТО с квантовой механикой. Современные исследования гравитона фокусируются на косвенных подтверждениях: например, обнаружение гравитационных волн обсерваторией LIGO в 2015 году интерпретируется как макроскопическое проявление коллективных эффектов, которые на квантовом уровне могли бы описываться гравитонами [1]. Другое направление — эксперименты с конденсированными средами, где в 2024 году учёные обнаружили коллективные возбуждения со спином 2 («киральные гравитонные моды»), имитирующие свойства гравитонов в лабораторных условиях. Теории с дополнительными измерениями, такие как M-теория, предсказывают, что гравитоны могут «утекать» в скрытые пространственные измерения, что пытаются проверить на Большом адронном коллайдере, анализируя потери энергии в столкновениях частиц [2]. Астрофизики исследуют реликтовые гравитоны, которые могли образоваться в ранней Вселенной, а наблюдения за гравитационным линзированием и движением галактик устанавливают верхние пределы массы гравитона, подтверждая его безмассовость. Несмотря на прогресс, прямое обнаружение гравитона остаётся недостижимым из-за исключительной слабости гравитационного взаимодействия, однако развитие технологий в астрофизике и квантовой физике открывает пути для новых косвенных тестов, которые могут приблизить создание единой теории фундаментальных взаимодействий.

Чёрная дыра — это область пространства-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что вторая космическая скорость (скорость, которая нужна для того, чтобы преодолеть гравитацию) превышает скорость света. Концепция объектов с гравитацией, удерживающей свет, появилась ещё в XVIII веке (работы Дж. Мичелла и П. Лапласа), но математическое описание чёрных дыр стало возможным только после ОТО Эйнштейна. Термин «чёрная дыра» популяризовал Дж. Уилер в 1967 году, хотя само решение Шварцшильда для невращающейся чёрной дыры было найдено ещё в 1916 году. Современное понимание чёрных дыр основывается на ОТО Эйнштейна. Она гласит, что при достаточном сжатии вещества его гравитация может стать настолько сильной, что создает область

пространства, ограниченную горизонтом событий, из которой невозможно вырваться. Наиболее известный механизм образования черных дыр – это гравитационный коллапс массивных звезд (обычно в десятки раз массивнее Солнца) в конце их жизненного цикла. Когда у звезды заканчивается ядерное топливо, внутреннее давление больше не может противостоять силе гравитации, и звезда катастрофически сжимается под собственным весом. Если масса оставшегося ядра слишком большая, то коллапс становится неуправляемым и образуется черная дыра. Однако ОТО – это теория гравитации макромира, в которой не учитываются эффекты квантовой механики, которые должны быть существенны на малых масштабах и при высоких энергиях, характерных для центра черной дыры. Классическое описание черных дыр наталкивается на фундаментальные проблемы при попытке учесть квантовые эффекты. Такая попытка приводит нас к концепции квантовых черных дыр (мини-черных дыр), которые могут иметь массу от планковской ($\sim 10^{-8}$ кг) до уровня астероидов и существовать только доли секунды из-за испарения Хокинга.

Сингулярность – это, пожалуй, самая проблемная особенность классических черных дыр. Проблема сингулярностей в ОТО была осознана в 1930-х годах, когда Д. Оппенгеймер и Х. Снайдер описали гравитационный коллапс звезды. Однако ключевой прорыв произошёл в 1965 году, когда Р. Пенроуз доказал теорему о неизбежности сингулярностей в чёрных дырах при выполнении условий энергодоминирования. В рамках ОТО, сингулярность – это не просто точка с огромной плотностью, а область, где само пространство-время "ломается". Геодезические линии – это пути, по которым движутся свободно свет и падающие частицы. Данные линии обрываются, кривизна пространства-времени становится бесконечной, а физические законы в их нормальном виде перестают работать. В свою очередь квантовая гравитация предлагает альтернативы: например, в петлевой квантовой гравитации сингулярность заменяется своеобразным "отскоком", а в теории струн – гладкими "структурами", в которых идёт сохранение информации. Для простейшей невращающейся и незаряженной черной дыры сингулярность представляет собой точку. Для вращающейся черной дыры сингулярность имеет форму кольца.

Квантовые (мини) черные дыры теоретически могли образоваться в экстремальных условиях ранней Вселенной или в столкновениях частиц при энергиях $\sim 10^{19}$ ГэВ. Гипотеза мини-чёрных дыр возникла в 1970-х годах благодаря работам С. Хокинга, предсказавшего их квантовое испарение. Позже, в 2000-х годах, теория струн и модели с дополнительными измерениями (например, «бранная космология») возродили интерес к их поиску в экспериментах на коллайдерах. Благодаря их изучению можно протестировать многомерные модели и решить информационный парадокс.

Квантовая пена — гипотетическая структура пространства-времени на планковских масштабах (10^{-35} м), предложенная Джоном Уилером в 1955 году. Она возникает из-за квантовых флуктуаций и принципа неопределённости Гейзенберга, создавая хаотичную сеть микроскопических чёрных дыр, червоточин и топологических дефектов. Эта концепция пытается объединить квантовую механику с общей теорией относительности, объясняя, как пространство-время теряет гладкость на экстремально малых расстояниях. Современные исследования фокусируются на косвенных методах изучения пены: например, гравитационные обсерватории LIGO и VIRGO ищут искажения в гравитационных волнах, а астрофизики анализируют задержки света от далёких объектов с помощью телескопов MAGIC и Fermi [3]. Теория струн и петлевая квантовая гравитация предлагают разные интерпретации пены — от динамики многомерных бран до дискретных спиновых сетей. Учёные также связывают квантовую пену с загадкой космологической постоянной, предполагая, что флуктуации энергии вакуума на микроуровне компенсируются в макромасштабах. Несмотря на отсутствие прямых подтверждений, будущие проекты, такие как космический интерферометр LISA или квантовые сенсоры, могут приблизить нас к проверке этой гипотезы, открыв путь к пониманию сингулярностей и объединению фундаментальных взаимодействий [4].

Таким образом, изучение гравитона, сингулярностей и квантовой пены демонстрирует, как квантовая гравитация преодолевает ограничения классической ОТО, предлагая новые подходы к описанию пространства-времени и фундаментальных взаимодействий.

Список использованных источников:

1. Гравитационные волны – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гравитационные_волны. – Дата доступа: 01.04.2025.
2. Открытие «частицы, похожей на гравитон» — что это значит? Объясняет Алексей Семихатов // Рамблер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://news.rambler.ru/tech/52524392-otkrytie-chastitsy-pohozhey-na-graviton-cto-eto-znachit-obyasnyat-aleksey-semihatov/>. – Дата доступа: 01.04.2025.
3. Детектор гравитационных волн LIGO возобновил работу после 3 лет модернизации // Habr [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/744354/>. – Дата доступа: 01.04.2025.
4. Laser Interferometer Space Antenna – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna. – Дата доступа: 01.04.2025.