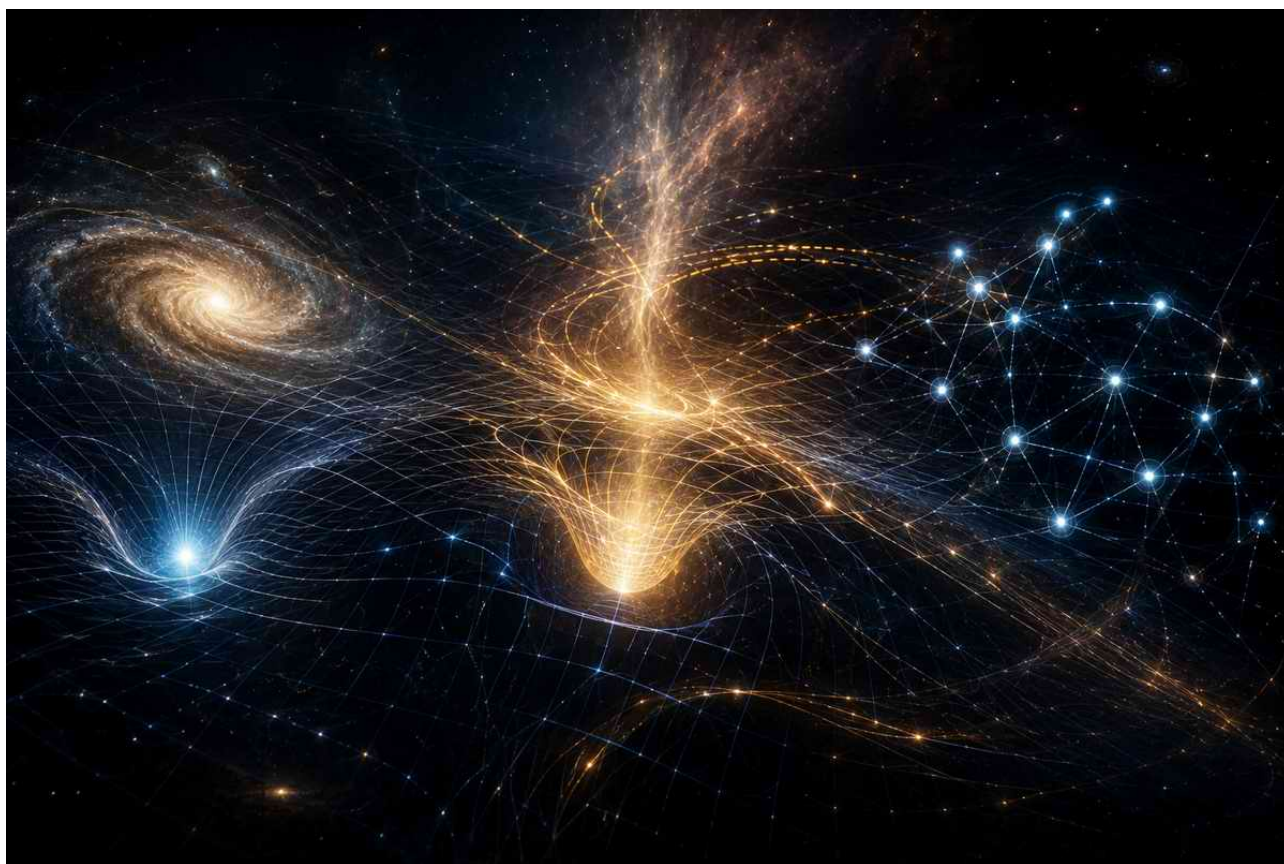


Квантовая гравитация может подчиняться законам квантового эффекта Холла



Дата публикации: 15.05.2026

Объединение квантовой механики и гравитации остается одной из самых сложных задач современной физики. На протяжении десятилетий ученые пытаются создать теорию квантовой гравитации — модель, которая одновременно описывала бы микромир элементарных частиц и крупномасштабную структуру Вселенной. Несмотря на огромные успехи квантовой теории поля и общей теории относительности, совместить эти два фундаментальных подхода по-прежнему крайне трудно.

Одной из главных проблем является поведение квантовых флуктуаций пространства-времени. В обычной квантовой физике взаимодействия частиц можно вычислять с помощью диаграмм Фейнмана — математического метода, учитывающего все возможные пути и взаимодействия частиц. Такой подход прекрасно работает для электромагнетизма, слабого и сильного взаимодействий.

Однако при попытке применить аналогичные методы к гравитации возникает фундаментальная проблема: вычисления начинают стремительно уходить в

бесконечность. В квантовой теории поля подобные расходимости обычно устраняются с помощью процедуры перенормировки — математического метода, позволяющего «вычистить» бесконечный фон и получить конечные физические результаты.

С гравитацией ситуация оказывается гораздо сложнее. В общей теории относительности масса и энергия искривляют пространство-время, а сами квантовые флуктуации создают дополнительные искривления. Эти искривления, в свою очередь, порождают новые виртуальные частицы и новые флуктуации. В результате возникает своеобразная бесконечная петля, делающая стандартные методы перенормировки практически бесполезными.

Именно поэтому физики начали искать альтернативные подходы к квантованию гравитации. Одним из наиболее известных направлений стала петлевая квантовая гравитация — теория, рассматривающая само пространство-время как квантовую структуру. В этой модели пространство не является непрерывным, а состоит из дискретных квантовых «петель» или ячеек на фундаментальном уровне.

Петлевая квантовая гравитация позволяет избежать некоторых математических проблем стандартного подхода, однако и у нее есть собственные трудности. Особенно сложной остается проблема космологической постоянной — величины, связанной с темной энергией и ускоренным расширением Вселенной.

Космологическая постоянная фактически описывает плотность энергии вакуума, равномерно заполняющей пространство. Наблюдения показывают, что именно она, вероятно, отвечает за ускоренное расширение космоса. Но при квантовых расчетах значение этой постоянной получается катастрофически большим — на десятки порядков выше наблюдаемого.

Новое исследование, опубликованное в *Physical Review Letters*, предлагает неожиданную идею, которая может помочь объяснить стабильность космологической постоянной. Авторы обнаружили математическое сходство между поведением космологической постоянной в петлевой квантовой гравитации и квантовым эффектом Холла — одним из самых известных квантовых явлений в физике конденсированного состояния.

Классический эффект Холла возникает, когда электрический ток проходит через проводник в магнитном поле. Магнитное поле отклоняет электроны, создавая поперечное напряжение. В квантовой версии этого эффекта проводимость принимает не произвольные, а строго дискретные значения. Иными словами, физическая величина оказывается «квантованной».

Исследователи показали, что в определенной модели петлевой квантовой гравитации, известной как состояние Черна—Саймонса—Кодамы, космологическая постоянная также может существовать только в дискретных состояниях. Это означает, что она оказывается устойчивой к воздействию вторичных квантовых флуктуаций.

Если эта идея верна, то космологическая постоянная не меняется хаотически под действием квантового вакуума, потому что ее значение фактически «заперто» квантовым эффектом, аналогичным эффекту Холла. Энергии квантовых флуктуаций просто недостаточно, чтобы перевести систему в другое состояние.

Такой подход может объяснить одну из самых загадочных проблем современной космологии: почему темная энергия имеет именно то значение, которое наблюдается во Вселенной. До сих пор физики были вынуждены фактически «подгонять» космологическую постоянную под наблюдения, не имея фундаментального объяснения ее стабильности.

Особый интерес вызывает то, что исследование связывает две, казалось бы, совершенно разные области физики: квантовую космологию и физику конденсированного состояния. Подобные пересечения становятся все более важными в современной теоретической физике, где математические структуры нередко оказываются универсальными для самых разных систем.

Модель Черна—Саймонса—Кодамы давно считается одной из наиболее необычных конструкций в петлевой квантовой гравитации. Она описывает специфическое квантовое состояние пространства-времени и обладает рядом математических свойств, напоминающих топологические квантовые системы.

Топологические эффекты играют ключевую роль и в квантовом эффекте Холла, где устойчивость квантованных состояний определяется не локальными взаимодействиями частиц, а глобальной геометрией системы. Возможно, аналогичный принцип действует и на уровне структуры пространства-времени.

Исследование пока остается теоретическим и требует дальнейшей проверки. Авторы подчеркивают, что основная работа еще впереди, поскольку математические детали модели чрезвычайно сложны. Тем не менее сама идея о квантовании космологической постоянной открывает новое направление в поисках теории квантовой гравитации.

Современная физика все чаще показывает, что пространство, время и даже сама геометрия Вселенной могут обладать глубоко квантовой природой. Если космологическая постоянная действительно подчиняется законам, похожим на квантовый эффект Холла, это может стать важным шагом к пониманию того, как

устроена Вселенная на самом фундаментальном уровне.

Ссылка: «Космологическая постоянная из квантовых гравитационных θ -вакуумов и гравитационного эффекта Холла» DOI: [10.1103/rzz5-p4f4](https://doi.org/10.1103/rzz5-p4f4).