

Гравитационные волны могут существовать в связанном состоянии: физики предложили новый механизм их локализации



Дата публикации: 15.08.2026

Гравитационные волны обычно представляют как рябь пространства-времени, которая рождается при движении массивных объектов и затем распространяется по Вселенной со скоростью света. Именно такие возмущения регистрируют современные обсерватории, наблюдая слияния черных дыр и нейтронных звезд. Однако новая теоретическая работа предлагает гораздо более необычную возможность: при определенных условиях гравитационное возмущение может не улетать от источника, а оставаться локализованным в ограниченной области пространства.

Идея возникла благодаря явлению, хорошо известному в современной фотонике, — связанным состояниям в континууме, или ВИС. Сам термин появился еще в квантовой механике почти сто лет назад. Его суть кажется парадоксальной: волновое состояние обладает энергией, при которой оно в принципе должно свободно распространяться, но по определенной причине остается запертым в пространстве.

Обычно локализованное состояние можно представить как частицу, находящуюся в потенциальной яме. Ее энергия недостаточна для выхода наружу, поэтому она остается связанной. У ВИС ситуация иная: энергия находится в диапазоне свободно распространяющихся состояний, однако волна все равно не покидает определенную область.

Позднее оказалось, что подобные эффекты существуют далеко за пределами квантовой механики. Связанные состояния в континууме исследовали для акустических волн, колебаний воды, упругих волн в твердых телах и особенно активно — для электромагнитного излучения в фотонных структурах.

В оптике ВИС стали важным инструментом потому, что позволяют чрезвычайно долго удерживать электромагнитную энергию внутри небольшой области. В идеальной системе такое состояние практически не взаимодействует с внешними распространяющимися волнами. Если же симметрию немного нарушить, возникает так называемое квази-ВИС: энергия начинает медленно утекать наружу, но поле внутри структуры остается сильно усиленным.

Физик Родриго Берте задался вопросом: если подобные состояния возможны для столь разных типов волн, почему аналогичный механизм не может существовать для колебаний самого пространства-времени?

Гравитационные волны описываются общей теорией относительности Эйнштейна. В слабом поле их можно рассматривать как небольшие возмущения метрики пространства-времени. Такая приближенная картина во многом напоминает обычную теорию волн, хотя физическая природа здесь принципиально другая: колеблется не вещество и не электромагнитное поле, а геометрия пространства и времени.

В новой работе рассматривается один из наиболее понятных механизмов появления ВИС — защита симметрией. В фотонике этот эффект можно представить на примере двух одинаковых источников излучения, ориентированных противоположным образом. Их поля способны интерферировать так, что наружу излучение практически не выходит.

Причина заключается в несовместимости симметрий локализованной моды и свободно распространяющейся волны. Если преобразование пространства меняет одну волну определенным образом, а другую — противоположным, взаимодействие между ними может быть запрещено. В результате энергия остается локализованной, несмотря на наличие доступных распространяющихся состояний.

Автор работы попытался перенести эту идею на гравитационные возмущения. Обычная гравитационная волна обладает характерной

квадрупольной структурой: проходя через пространство, она растягивает его в одном направлении и одновременно сжимает в перпендикулярном.

При определенных преобразованиях такая волна сохраняет свою симметрию. Поэтому для создания защищенного связанного состояния необходимо построить другое пространственно-временное возмущение, симметрия которого не совпадает с симметрией свободной гравитационной волны.

В предложенной модели рассматривается периодическая структура возмущений метрики, локализованных около некоторой плоскости. Их амплитуда уменьшается при удалении от этой области, подобно тому как электромагнитные поля фотонных ВИС затухают вне наноструктуры.

Далее исследователь проверил, могут ли такие конфигурации быть совместимы с уравнениями Эйнштейна. Для упрощения использовалась линеаризованная теория гравитации — приближение, применимое тогда, когда возмущения пространства-времени достаточно малы.

Расчеты показали, что соответствующие метрические конфигурации могут существовать как решения уравнений поля при определенном соотношении параметров. В самой плоскости они требуют распределенного источника, тогда как вне нее пространство может описываться вакуумным решением.

Особенно интересно, что найденные структуры обладают рядом свойств, похожих на фотонные связанные состояния. Возмущения остаются пространственно локализованными и одновременно существуют в диапазоне волновых векторов, где обычно находятся свободно распространяющиеся гравитационные волны.

Дополнительный анализ показал, что локализация сохраняется и при учете некоторых нелинейных эффектов второго порядка. Это важно, поскольку общая теория относительности по своей природе нелинейна, а слишком сильная зависимость результата от линейного приближения сделала бы модель менее интересной.

Пока речь идет исключительно о теоретической конструкции. Никаких экспериментальных доказательств существования подобных связанных гравитационных состояний нет, и неизвестно, может ли природа создавать структуры, необходимые для их возникновения.

Тем не менее наибольший интерес вызывает не идеальное ВИС, а его слегка нарушенная версия — квази-ВИС. Именно такие состояния стали особенно полезны в фотонике. Небольшое нарушение симметрии заставляет локализованную волну слабо взаимодействовать с окружающим пространством,

сохраняя при этом большую часть энергии внутри системы.

В оптических устройствах это позволяет значительно усиливать электромагнитное поле. Квази-ВИС используются для создания высокочастотных резонаторов, чувствительных сенсоров и нанопотонных устройств, поскольку энергия света может концентрироваться в очень маленьком объеме.

Если подобный механизм возможен для гравитационных волн, он теоретически мог бы приводить к усилению слабых пространственно-временных возмущений. Автор рассматривает возможность того, что геометрические структуры или распределения плотности с подходящей нарушенной симметрией способны поддерживать гравитационные квази-ВИС.

Одно из потенциальных применений связано с наблюдением двойных систем. Сейчас наземные гравитационно-волновые детекторы лучше всего фиксируют финальные стадии сближения компактных объектов, когда сигнал становится достаточно сильным. Если существовал бы механизм локального усиления некоторых гравитационных возмущений, теоретически можно было бы получить дополнительный инструмент для обнаружения более ранних стадий эволюции систем.

Еще одно направление касается высокочастотных гравитационных волн. Современные интерферометры вроде LIGO работают в ограниченном диапазоне частот и не предназначены для регистрации чрезвычайно быстрых колебаний пространства-времени. Между тем различные модели ранней Вселенной и экзотической физики допускают существование высокочастотных гравитационных сигналов.

Локализованные или резонансно усиленные состояния могли бы дать новый подход к их поиску. Однако между математической возможностью и практическим прибором лежит огромная дистанция: пока неизвестно ни то, какие реальные системы способны поддерживать такие конфигурации, ни то, насколько сильными могут быть возникающие эффекты.

Еще более фундаментальный интерес связан с квантовой физикой. В современной теории остается открытым вопрос о том, каким образом гравитация взаимодействует с квантовыми состояниями и может ли сама гравитация обладать квантовыми свойствами.

Известно, что в определенных условиях электромагнитные и гравитационные волны теоретически способны переходить друг в друга в присутствии сильных магнитных полей. Такие процессы чрезвычайно слабы, но имеют фундаментальное значение для поисков связи между квантовой теорией и гравитацией.

В фотонике квази-BIC помогают усиливать взаимодействие между различными волновыми состояниями. Поэтому возникает интригующая возможность: если научиться локализовать гравитационные возмущения аналогичным образом, это могло бы увеличить время их взаимодействия с квантовыми системами и позволить искать чрезвычайно слабые эффекты.

Пока подобные перспективы остаются гипотетическими. Новая работа не утверждает, что создан гравитационный резонатор или найден способ удерживать реальные гравитационные волны. Она демонстрирует более фундаментальный результат: математические принципы, давно используемые в фотонике, могут иметь аналоги в общей теории относительности.

Это интересно еще и с методологической точки зрения. Современная физика все чаще переносит идеи между разными дисциплинами. Концепции, разработанные для оптических наноструктур, могут неожиданно оказаться полезными при описании пространства-времени, а методы квантовой механики — для классических волн.

Если дальнейшие исследования подтвердят существование устойчивых гравитационных квази-BIC и найдут реалистичные условия их формирования, появится совершенно новый класс явлений. Такие состояния могли бы стать инструментом для изучения гравитационных волн, экстремальных астрофизических процессов и, возможно, самой природы пространства-времени.

Ссылка: «Связанные состояния в континууме гравитационных волн» DOI: [10.1088/1402-4896/ae92db](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ae92db).