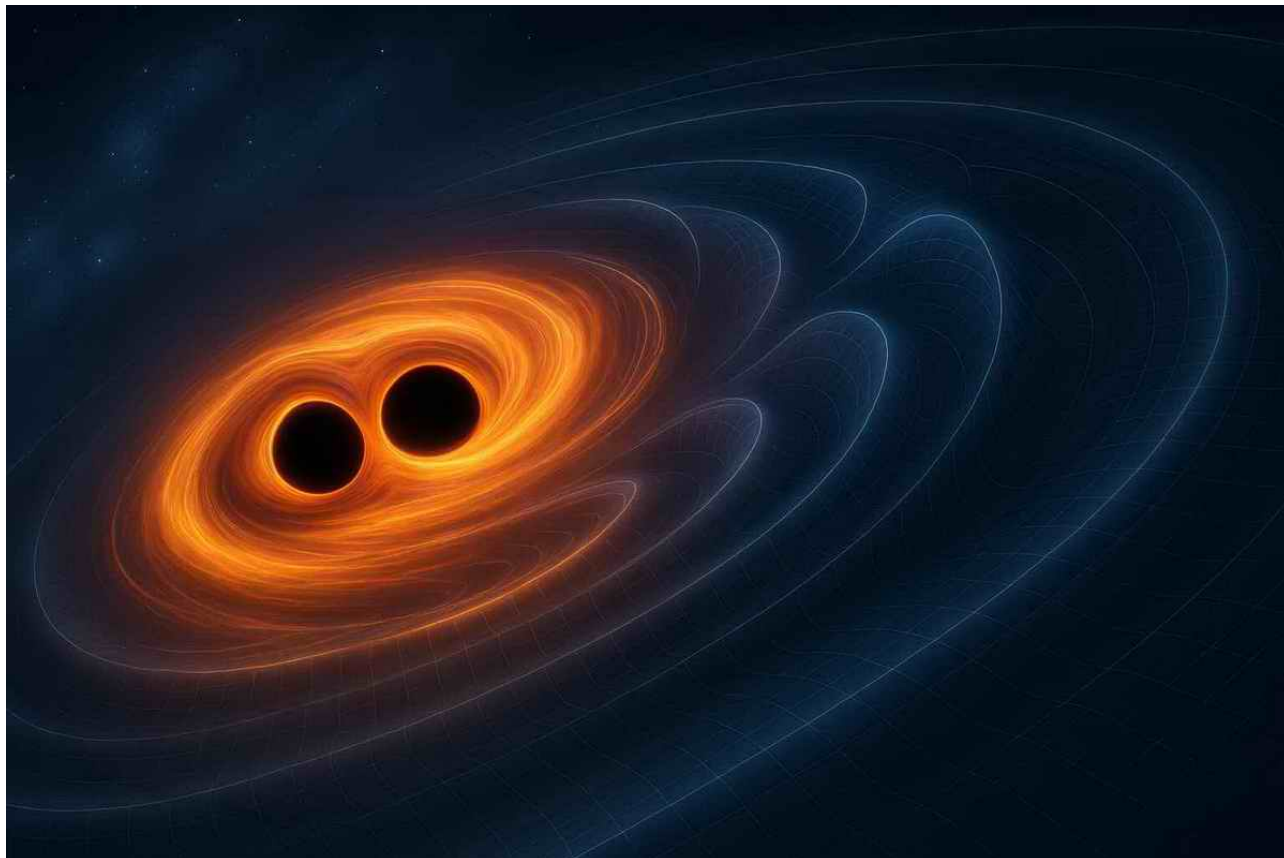


## Нелинейный звон черных дыр: как новая теория раскрывает скрытую архитектуру гравитационных волн



Дата публикации: 25.06.2025

После слияния двух черных дыр образовавшийся объект не сразу приходит в покой — он колеблется, создавая характерные гравитационные волны. Эти волны образуют так называемую фазу звона, напоминающую отголоски удара по космическому колоколу. До недавнего времени считалось, что эти колебания можно описать исключительно с помощью линейных квазинормальных мод (КНМ), представляющих собой собственные частоты новой черной дыры. Однако свежая теоретическая работа предлагает гораздо более сложную картину.

Исследователи из Китая, основываясь на уравнениях общей теории относительности, разработали новую теоретическую структуру, описывающую нелинейные взаимодействия между квазинормальными модами. Эти взаимодействия приводят к появлению вторичных колебаний — так называемых квадратичных мод, вызванных самовоздействием гравитационных волн. Явление ранее предсказывалось, но никогда не было описано так детально и математически обоснованно.

Авторы использовали два аналитических метода — сложный контурный анализ и гиперболоидальный временной срез — для точного анализа динамики этих взаимодействий. Их задача заключалась в классификации всех возможных каналов связи между первичными модами. Было выделено четыре типа таких каналов, при этом один из них оказался полностью подавленным в любой конфигурации черной дыры — результат, вытекающий из структуры уравнений Эйнштейна.

Это открытие не только объясняет ранее зафиксированные расхождения между численным моделированием и теоретическими расчетами, но и подтверждает важность учета второго порядка возмущений в астрофизических сценариях. Расчетный анализ совпал с существующими данными моделирования, укрепляя достоверность новой теории.

Ключевые наблюдательные перспективы открываются благодаря детекторам гравитационных волн нового поколения. Аппараты вроде LIGO и Virgo уже сегодня работают на грани чувствительности, позволяющей уловить квадратичные сигналы. Однако именно будущее оборудование, например Cosmic Explorer и космическая миссия LISA, обладают потенциалом для фиксации этих сложных нелинейных эффектов с высоким отношением сигнал/шум.

Наиболее вероятные кандидаты для успешного наблюдения — двойные черные дыры с умеренными отношениями масс и высокими спинами. При этом наилучшие параметры сигналов ожидаются от систем общей массой в 60–80 солнечных масс. Эти условия максимизируют амплитуду квадратичных мод, делая их потенциально доступными для регистрации.

В теоретической перспективе понимание таких сигналов значительно расширит поле экспериментальной проверки общей теории относительности. Возможные расхождения между предсказанными и наблюдаемыми эффектами могут указывать на новую физику, выходящую за рамки постулатов Эйнштейна.

Кроме того, исследование открывает путь к более полной реконструкции фазового профиля звона черной дыры. В будущем учёные надеются включить не только квадратичные, но и более сложные (например, кубические) взаимодействия, чтобы описать весь процесс звона — от пикового момента слияния до окончательного затухания колебаний.

**Ключевые выводы исследования в одной строке:** Квазинормальные моды — не единственный источник звона | Квадратичные моды возникают из-за самовоздействия гравитационных волн | Один из каналов связи между модами полностью подавлен | Современные и будущие детекторы смогут фиксировать нелинейные эффекты | Работа укрепляет роль теории возмущений второго

порядка в астрофизике

**Ссылка:** «Квадратичные связи мод во вращающихся черных дырах и их обнаруживаемость» DOI: [10.1103/PhysRevLett.134.211404](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.211404).