The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Эксперимент с холодными атомами проверяет «проблему времени» квантовой гравитации — как лабораторный аналог, а не ответ

В канонической квантовой гравитации уравнение Уилера—Де Витта не содержит внешних часов, располагающих события по порядку: это «проблема времени». Одноавторский эксперимент изолирует конденсат Бозе—Эйнштейна, разделяет его тонким оптическим барьером на наблюдаемый и ненаблюдаемый секторы и строит внутренние часы по энтропии, текущей между ними. Такое «энтропийное время» упорядочивает расширение и повторное сжатие наблюдаемого сектора, а эффективное уравнение воспроизводит измеренные данные в рассмотренном режиме низкого барьера. Это контролируемый стенд для идей реляционного времени: «Большой взрыв», «Большое сжатие» и «мини-Вселенная» — аналоговые названия газа в ловушке, а не настоящая космология; работа не утверждает, что решила проблему времени или квантовую гравитацию.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Testing the problem of time with cold atoms*, Giovanni Barontini, Physical Review Research 8, L022047 (2026) · DOI: 10.1103/1h9j-df4k

Часы из энтропии внутри ловушки

В канонической квантовой гравитации есть странная и упрямая загадка: в её центральном уравнении отсутствует время. Уравнение Уилера—Де Витта, ближайший аналог уравнения Шрёдингера для всей Вселенной, просто говорит, что действие определённого оператора на состояние даёт ноль. Нет внешнего параметра, который тикает и располагает события в порядке «до» и «после», хотя мы явно ощущаем течение времени. Это **проблема времени**, и уже более полувека она не поддаётся окончательному решению.

Одноавторская статья в *Physical Review Research* её не решает. Она делает нечто более скромное и по-своему более полезное: создаёт небольшую, хорошо контролируемую лабораторную систему, в которой одно семейство предлагаемых ответов можно **проверить на реальных данных**. Джованни Баронтини из Бирмингемского университета берёт конденсат Бозе—Эйнштейна — облако ультрахолодных атомов, ведущее себя как единый квантовый объект, — и превращает его в аналог, на котором идею «внутреннего», реляционного времени можно измерить, а не только обсуждать. Хитрость состоит в том, чтобы построить часы не по внешнему секундомеру, а по энтропии, которую система перераспределяет внутри себя.

Расстояние между «контролируемым аналогом проблемы времени» и «физики решили, что такое время» — вся суть этой истории, и расстояние это очень велико.

Что сделал исследователь

Установка содержит конденсат примерно из **24 000 атомов рубидия-87**, удерживаемых в консервативной оптической дипольной ловушке и приведённых в колебательное движение: всё атомное облако ходит туда-сюда по ловушке. **Тонкий оптический барьер** шириной около 8 микрометров, нарисованный светом с длиной волны 675 нм при помощи цифрового микрозеркального устройства, делит ловушку на две половины. За одной половиной наблюдают — это «**светлый сектор**»; за другой нет — это «**тёмный сектор**». В течение примерно 100-миллисекундного экспериментального окна система не демонстрирует измеримой потери частиц или диссипации, поэтому с хорошим приближением является замкнутой системой с гамильтонианом, который сам от времени не зависит.

[figure_pair pending]

Слева магнитооптическая ловушка создаёт холодное облако атомов рубидия внутри стеклянной ячейки — ранний этап охлаждения на пути к подготовке конденсата. Справа Джованни Баронтини стоит рядом с оптической установкой. Это фотографии лабораторной системы эксперимента, а не изображения буквальной миниатюрной Вселенной.

Если смотреть на систему по обычным лабораторным часам — делая поглощательное

изображение каждые 2 мс, — светлый сектор ведёт себя весьма выразительно. Атомы проходят через барьер, и сектор возникает из ничего — Баронтини называет этот момент «**Большим взрывом**», — достигает максимального размера, затем сжимается и опустошается обратно в тёмную сторону — «**Большое сжатие**». В зависимости от высоты барьера цикл может повторяться.

Но затем начинается собственно экспериментальная идея. Лабораторные часы *внешни* по отношению к системе — именно такой объект запрещён в постановке Уилера—Де Витта. Поэтому Баронтини спрашивает: можно ли упорядочить историю светлого сектора, используя **только величины внутри самой системы**? Его ответ — часы, которые он называет **энтропийным временем** и считывает с тех же изображений в три понятных шага. Во-первых, из каждого поглощательного снимка он извлекает четыре числа для светлого сектора: число атомов, центр масс профиля плотности — аналог «скалярного поля», — его ширину и энтропию, то есть энтропию на атом, рассчитанную стандартным методом, умноженную на число атомов. Во-вторых, когда атомы пересекают барьер, эта энтропия растёт и падает. В-третьих, часы следуют за градиентом энтропии вдоль измеренной траектории центра масс, считая величину каждого смещения, а не его направление. Когда энтропия и центр масс растут или падают вместе, каждый шаг переводит часы вперёд, даже если облако разворачивается. В данных это почти везде даёт единственный порядок от «Большого взрыва» сектора до его «Большого сжатия»; есть лишь несколько небольших колебаний там, где грубая дискретизация заставляет два изменения расходиться.

Наконец, автор выводит эффективное **«уравнение Шрёдингера в энтропийном времени»** — уравнение эволюции светлого сектора, записанное через внутренние часы вместо внешних, — и численно решает его, чтобы проверить, воспроизводит ли оно то, что действительно записала камера.

Что было обнаружено

Три результата, от наиболее скромного к наиболее амбициозному.

- **Внутренние часы работают как способ упорядочения.** Энтропийное время почти везде растёт монотонно, а его скорость определяется тем, насколько быстро энтропия проходит через барьер: оно идёт быстрее при обмене энтропией и **полностью останавливается, когда обмена нет**. В обратимом режиме с низким барьером между одним Большим сжатием и следующим Большим взрывом *вообще не проходит внутреннего времени*, потому что в этот промежуток энтропия не обменивается, хотя лабораторные часы продолжают тикать. Во всём наборе данных суммарная энтропия обоих секторов оставалась постоянной в пределах погрешности, как и должно быть для замкнутой системы.
- **Разные режимы дают разное «время».** Если повысить барьер, обмен энтропией уменьшается, поэтому внутренние часы идут медленнее. Когда два сектора почти

перестают взаимодействовать, светлый сектор приближается к состоянию, которое статья называет «**тепловой смертью**»: стационарному состоянию, где энтропийное время просто останавливается.

- **Эффективное уравнение воспроизводит данные.** Численное решение уравнения Шрёдингера в энтропийном времени с экспериментальными параметрами воспроизводит измеренную эволюцию ширины облака. Статья сообщает отличное согласие для случая низкого барьера, где доминирует член, связанный с энтропией; явное численное сравнение выполнено именно для этого режима.

> **Что здесь означают «проблема времени» и «энтропийное время»**
>
> **Проблема времени** состоит в том, что основное уравнение канонической квантовой гравитации — уравнение Уилера—Де Витта — не содержит внешней переменной времени. Один из распространённых ответов является *реляционным*: выбрать физическую величину внутри системы в качестве «часов» и описывать всё остальное относительно неё. Повторяющаяся трудность состоит в том, что естественные кандидаты на роль часов не всегда монотонны: в системе, которая расширяется, а затем сжимается, такие часы идут сначала вперёд, а потом назад, поэтому не могут однозначно нумеровать весь путь от начала до конца.
> **Энтропийное время** — способ Баронтини обойти эту проблему. Вместо считывания координатоподобной переменной он строит часы из *энтропии*, которой обмениваются наблюдаемый и ненаблюдаемый секторы, причём конструкция устроена так, чтобы не обращаться назад. По духу она близка к более старым идеям «теплового времени», но здесь время определяется операционально по измеримому потоку энтропии, а не по абстрактной математической структуре. Именно поэтому его можно проверить на реальной установке.
> Критически важно: космологические слова — «Большой взрыв», «Большое сжатие», «масштабный фактор», «скалярное поле», «мини-Вселенная» — являются **аналоговыми обозначениями**. Они называют особенности газа атомов в ловушке, которые *структурно похожи* на уравнения упрощённых космологических моделей. Это не утверждения о настоящей Вселенной.

Чего это не доказывает

Здесь особенно нужна осторожность, потому что словарь работы легко провоцирует преувеличения.

- **Работа не решает проблему времени и не утверждает обратного.** Автор прямо формулирует результат как создание «контролируемой экспериментальной среды, в которой реляционные конструкции времени можно количественно проверять».

Испытательный стенд — не теорема. Вопрос о том, является ли реляционное или энтропийное время *правильным* описанием времени в квантовой гравитации, остаётся столь же открытым, как и раньше.

- **Это аналог, а не Вселенная.** Никакой космологии здесь не наблюдают. Наблюдают конденсат Бозе—Эйнштейна в ловушке, чьё редуцированное описание *математически похоже* на упрощённую космологическую модель типа минисуперпространства. Сходство — смысл эксперимента и одновременно его граница. Работа не показывает, что ранняя Вселенная пережила Большой взрыв такого рода, что пространство-время состоит из атомов или что «времени не существует».
- **Она не показывает, что время «на самом деле» является энтропией.** Энтропийные часы — один сконструированный способ упорядочения, хорошо работающий в этой системе. Статья отмечает концептуальное родство с гипотезой теплового времени, но прямо оставляет открытым даже вопрос, совпадают ли эти идеи. «Внутренние часы из энтропии могут упорядочить этот эксперимент» — гораздо более узкое утверждение, чем «время есть энтропия».
- **Эффективное уравнение — результат моделирования, а не переписывание квантовой механики.** Выведенное уравнение Шрёдингера в энтропийном времени сводится к обычной квантовой механике при медленном потоке энтропии и строго совпадает с обычной унитарной теорией только при полном отсутствии потока. Автор позиционирует его как более общее, чем стандартное уравнение, *именно когда наблюдаемая система термодинамически открыта относительно ненаблюдаемой.* Это утверждение об открытых подсистемах в установках такого рода, а не требование переписать фундаментальную физику.
- **Это один эксперимент, один автор и один выбор часов.** Статистическая неопределённость составляет примерно 5% для каждой точки; анализ опирается на приближение среднего поля и усреднённой плотности. Выбор часов и способ укрупнения описания — намеренные модельные решения, которые другим группам предстоит проверять, прежде чем делать структурные выводы.

Насколько сильны доказательства

Для скромного утверждения, которое работа действительно делает, доказательства чисты. Система хорошо изолирована на соответствующем временном масштабе; баланс энтропии замыкается — суммарная энтропия постоянна в пределах погрешности; внутренние часы почти везде монотонно упорядочивают данные; а эффективное уравнение, выведенное автором из той же модели с параметрами, оценёнными по данным, воспроизводит измеренную динамику для применённого случая низкого барьера. Данные находятся в открытом доступе. Это реальное измерение реальной управляемой системы, а не мысленный эксперимент.

Соответственно скромен и вес, который результат может выдержать. Всё опирается на аналогию между редуцированной моделью конденсата и космологией минисуперпространства,

а аналогии могут прояснять, но не доказывать. Демонстрация на одной платформе одним автором того, что один рецепт внутреннего времени работает, является сильным доказательством принципа и слабым основанием для утверждений о природе времени вообще. Корректный вывод таков: теперь этот метод можно *реализовать* в лаборатории и проверить.

Почему это важно

Споры о проблеме времени долго оставались на уровне формализма, где конкурирующие предложения трудно опровергать, поскольку они дают мало конкретных измеримых предсказаний. Превращение хотя бы части этого спора в воспроизводимый эксперимент — где внутренние часы либо упорядочивают данные, либо нет, а эффективное уравнение либо соответствует измерениям, либо нет — меняет сам характер дискуссии. Теоретики получают лабораторный стенд для проверки своих конструкций.

Именно это является настоящим вкладом: не ответ о времени, а **место, где вопрос можно задавать количественно**. Платформы холодных атомов уже служили управляемыми аналогами излучения Хокинга, расширяющихся вселенных и распада ложного вакуума; эта работа добавляет к инструментарию реляционное время и стрелу времени. Ценность состоит в последующих опытах, которые она делает возможными: другие варианты часов, отскок вместо сингулярности, проверки обратимости — теперь всё это может быть измерением, а не только расчётом.

Краткий итог

Физик создал конденсат Бозе—Эйнштейна, разделил его тонким оптическим барьером на наблюдаемую и ненаблюдаемую половины и использовал энтропию, текущую между ними, для построения внутренних «энтропийных часов». Эти часы упорядочивают цикл расширения и повторного сжатия наблюдаемой половины: идут быстро при обмене энтропией и останавливаются, когда обмена нет. Эффективное уравнение, записанное в таком внутреннем времени, воспроизводит измеренные данные для исследованного режима низкого барьера. Установка является аналогом «проблемы времени» из канонической квантовой гравитации: «Большой взрыв», «Большое сжатие» и «мини-Вселенная» — обозначения газа в ловушке, математически похожего на упрощённую космологическую модель. Это контролируемый стенд для проверки идей реляционного времени, а не решение проблемы времени, не утверждение о реальной Вселенной и не доказательство того, что время «на самом деле» является энтропией.

Проверка без преувеличений

Что показывает статья: в одной хорошо изолированной системе холодных атомов внутренние часы, определённые через обмен энтропией, могут монотонно упорядочивать наблюдаемую динамику, а эффективное уравнение в «энтропийном времени» воспроизводит измеренную эволюцию в рассмотренном случае низкого барьера.

Что правдоподобно, но не показано: что энтропийное или реляционное время является хорошим описанием времени в настоящей квантовой гравитации. Эксперимент поддерживает серьёзное рассмотрение таких конструкций, но не подтверждает их для природы.

Чего работа не показывает: что проблема времени решена; что квантовая гравитация построена; что Вселенная началась с Большого взрыва такого типа; что пространство-время возникает из атомов; или что «времени не существует».

Главные ограничения: одна платформа, один автор и один выбор часов; примерно 5% неопределённости на точку; приближения среднего поля и усреднённой плотности; и прежде всего зависимость от аналогии между конденсатом в ловушке и упрощённой космологической моделью.

Насколько уверенным может быть обычный читатель? Высокая уверенность, что эксперимент сделал то, что сообщается, в собственной системе. Низкая уверенность в любом переносе этого аналога на утверждения о времени в реальной Вселенной.

Источники

Barontini, Testing the problem of time with cold atoms, Physical Review Research 8, L022047 (2026)
https://doi.org/10.1103/1h9j-df4k