The Clean Paper

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

# Експеримент със студени атоми изпитва „проблема на времето“ в квантовата гравитация — като лабораторен аналог, не като отговор

*В каноничната квантова гравитация уравнението на Уилър–Деуит няма външен часовник, който да подрежда събитията: това е „проблемът на времето“. Експеримент с един автор изолира кондензат на Бозе–Айнщайн, разделя го с тънка оптична бариера на ненаблюдаван и наблюдаван сектор и изгражда вътрешен часовник от ентропията, която протича между тях. Това „ентропийно време“ подрежда разширяването и повторното свиване на наблюдавания сектор, а ефективно уравнение възпроизвежда измерените данни в разгледания случай с ниска бариера. Това е контролирана изпитвателна среда за идеи за релационно време: „голям взрив“, „голям срив“ и „минивселена“ са аналогови етикети за уловен газ, не реална космология, и работата не претендира да решава проблема на времето или квантовата гравитация.*

---

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

# Часовник, изграден от ентропия, вътре в капан

В каноничната квантова гравитация има странна и упорита загадка: в централното уравнение няма време. Уравнението на Уилър–Деуит, най-близкото нещо до уравнение на Шрьодингер за цялата Вселена, просто казва, че определен оператор, действащ върху състоянието, дава нула. Няма външен параметър, който да тиктака, нищо, което да подреди „преди“ и „след“ — а ние очевидно преживяваме течението на времето. Това е **проблемът на времето** и той устоява на решение повече от половин век.

Статия с един автор в *Physical Review Research* не го решава. Тя прави нещо по-тихо и по свой начин по-полезно: изгражда малка, добре контролирана лабораторна система, в която едно семейство предложени отговори може да бъде **изпитано спрямо реални данни**. Джовани Баронтини от Университета в Бирмингам взема кондензат на Бозе–Айнщайн — облак от свръхстудени атоми, който се държи като един квантов обект — и го превръща в аналог, върху който идеята за „вътрешно“, релационно време може да бъде измерена, а не само обсъждана. Номерът е да се построи часовник не от външен хронометър, а от ентропията, която системата преразпределя вътре в себе си.

Разстоянието между „контролиран аналог на проблема на времето“ и „физиците решиха времето“ е цялата история тук — и това разстояние е голямо.

# Какво направи изследователят

Апаратурата е кондензат от около **24 000 атома рубидий-87**, задържан в консервативен оптичен диполен капан и приведен в осцилация — целият атомен облак се люлее напред-назад през капана. **Тънка оптична бариера** — широка приблизително 8 микрона, „нарисувана“ със светлина с дължина на вълната 675 nm чрез цифрово микромикрозеркално устройство — разделя капана на две половини. Едната половина се наблюдава („**светлият сектор**“), другата не („**тъмният сектор**“). В приблизително 100-милисекундния прозорец на експеримента системата не показва измерима загуба на частици или дисипация, така че с добро приближение е затворена система с хамилтониан, който сам по себе си не зависи от времето.

[figure_pair pending]

Вляво магнитооптичният капан създава студения облак от рубидиеви атоми в стъклената клетка: ранен етап на охлаждане по пътя към подготовката на кондензата. Вдясно Джовани Баронтини стои до оптичната апаратура. Това са фотографии на лабораторната система зад експеримента, а не изображения на буквална миниатюрна Вселена.

Наблюдаван със стандартен лабораторен часовник — абсорбционно изображение на всеки 2 ms — светлият сектор прави нещо напомнящо космология. Атоми преминават през бариерата и секторът нараства от нищо — Баронтини нарича този момент „**големия взрив**“ — достига максимален размер, след това се свива и се изпразва

обратно в тъмната страна — „**големия срив**“. В зависимост от височината на бариерата това може да се повтаря циклично.

Следва същинската част. Лабораторният часовник е *външен* за системата — точно онова, което постановката на Уилър–Деуит не допуска. Затова Баронтини пита: може ли историята на светлия сектор да бъде **подредена само чрез величини, вътрешни за системата**? Отговорът му е часовник, който нарича **ентропийно време**, прочетен директно от същите изображения в три прости стъпки. Първо, от всяко абсорбционно изображение той извлича четири числа за светлия сектор: броя на атомите, центъра на масата на профила на плътността му — който играе ролята на аналогово „скаларно поле“ — ширината му и ентропията му — ентропията на атом, получена по стандартен метод, умножена по броя атоми. Второ, докато атомите прекосяват бариерата, тази ентропия нараства и намалява. Трето, часовникът следва ентропийния градиент по измерения път на центъра на масата, като брои големината на всяко преместване, а не посоката му. Когато ентропията и центърът на масата се увеличават или намаляват заедно, всяка стъпка придвижва часовника напред дори когато облакът обръща посоката си. В данните това дава единно подреждане от „големия взрив“ до „големия срив“ на сектора почти навсякъде, само с няколко малки колебания, където грубото времево дискретизиране кара двете промени да не съвпадат.

Накрая авторът извежда ефективно **„уравнение на Шрьодингер в ентропийно време“** — уравнение за еволюцията на светлия сектор, написано спрямо този вътрешен часовник, а не външния — и го решава числено, за да види дали възпроизвежда онова, което камерата действително е записала.

## Какво установи

Три резултата с нарастваща амбиция.

- **Вътрешният часовник работи като подреждане.** Ентропийното време нараства монотонно почти навсякъде, а скоростта му се задава от това колко бързо ентропията преминава през бариерата: то тече по-бързо, когато има обмен на ентропия, и **спира напълно, когато такъв няма**. В обратимия режим с ниска бариера *не протича никакво вътрешно време* между един голям срив и следващия голям взрив — защото тогава не се обменя ентропия — въпреки че лабораторният часовник продължава да тиктака. В целия набор данни общата ентропия на двата сектора заедно остава постоянна в рамките на лентите на грешката, както се изисква за затворена система.
- **Различните режими дават различни „времена“.** Повишаването на бариерата намалява обмена на ентропия и вътрешният часовник върви по-бавно. Ако бариерата се повиши до точката, в която двата сектора почти не взаимодействат, светлият сектор се установява към състояние, което статията нарича „**топлинна смърт**“: стационарно състояние, в което ентропийното време просто спира.

- **Ефективно уравнение възпроизвежда данните.** Уравнението на Шрьодингер в ентропийно време, снабдено с експерименталните параметри, числено възстановява измерената еволюция на ширината на облака. Статията съобщава отлично съответствие за случая с ниска бариера, където доминира членът, задвижван от ентропията; изричното числено сравнение е направено именно за този случай.

> **Какво са „проблемът на времето“ и „ентропийното време“ тук**
>
> **Проблемът на времето** е, че основното уравнение на каноничната квантова гравитация — Уилър–Деуит — няма външна времева променлива. Един често предлаган отговор е *релационният*: физична величина вътре в системата се превръща в „часовник“, а всичко останало се описва спрямо нея. Повтаряща се трудност е, че естествените кандидати за часовник невинаги са монотонни — в система, която се свива обратно, кандидатът тръгва напред, после назад — и затова не може чисто да обозначи една посока от началото до края.
> **Ентропийното време** е начинът на Баронтини да заобиколи това. Вместо да отчита променлива, подобна на положение, той изгражда часовника от *ентропията*, обменяна между наблюдавания и ненаблюдавания сектор, така че часовникът да не се обръща. Идеята е близка по дух до по-старите хипотези за „топлинно време“, но тук е дефинирана оперативно чрез измерим поток на ентропия, а не чрез абстрактна математическа структура — точно това я прави изпитима с реална апаратура.
> От решаващо значение е, че космологичните думи — „голям взрив“, „голям срив“, „мащабен фактор“, „скаларно поле“, „минивселена“ — са **аналогови етикети**. Те назовават свойства на уловен газ от атоми, които по структура приличат на уравненията на опростени космологични модели. Не са твърдения за реалната Вселена.

## Какво не доказва това

Тук вниманието е най-важно, защото терминологията лесно подканва към преувеличение.

- **Не решава проблема на времето и не твърди, че го прави.** Собствената формулировка на статията е, че тя „установява контролирана експериментална среда, в която конструкциите на релационното време могат да бъдат изпитани количествено“. Изпитвателна среда не е теорема. Дали релационното или ентропийното време е *правилното* описание на времето в квантовата гравитация остава точно толкова отворен въпрос, колкото е бил преди.
- **Това е аналог, не Вселената.** Не се наблюдава космология. Наблюдава се кондензат на Бозе–Айнщайн в капан, чийто редуциран модел е *математически подобен* на опростен космологичен модел („минисуперпространство“). Подобието е смисълът на експеримента; то е и неговата граница. Нищо тук не показва, че ранната Вселена е имала такъв голям взрив, че пространство-времето е направено от атоми или че

„времето не съществува“.

- **Не показва, че времето „в действителност“ е ентропия.** Ентропийният часовник е едно конструирано подреждане, което работи добре за тази система. Статията отбелязва концептуална близост с хипотезата за топлинното време, но изрично оставя отворено дали двете изобщо съвпадат. „Вътрешен часовник, изграден от ентропия, може да подреди този експеримент“ е много по-тясно твърдение от „времето е ентропия“.
- **Ефективното уравнение е резултат от моделиране, не пренаписване на квантовата механика.** Изведеното уравнение на Шрьодингер в ентропийно време се свежда до обикновената квантова механика, когато потокът на ентропия е бавен, и е строго обичайната унитарна теория само когато изобщо няма поток на ентропия. Статията го поставя като по-общо от стандартното уравнение *конкретно когато наблюдавана система е термодинамично отворена към ненаблюдавана* — твърдение за отворени подсистеми в такъв тип постановка, а не претенция, че фундаменталната физика трябва да бъде пренаписана по този начин.
- **Това е един експеримент, един автор и един избор на часовник.** Резултатите имат приблизително 5% статистическа неопределеност на точка и разчитат на приближения на средното поле и осреднена плътност. Избраният часовник и грубото описание са съзнателни моделни решения, които други групи ще искат да проверят, преди да се правят структурни заключения.

## Колко силни са доказателствата

За скромното твърдение, което действително прави, доказателствата са чисти. Системата е действително добре изолирана на съответния времеви мащаб, балансът на ентропията се затваря — общата ентропия е постоянна в рамките на грешката — вътрешният часовник подрежда данните монотонно почти навсякъде, а ефективно уравнение, изведено от автора от същия модел с параметри, извлечени от данните, възпроизвежда измерената динамика за случая с ниска бариера, към който е приложено. Данните са достъпни открито. Това е реално измерване на реална, контролируема система, а не мисловен експеримент.

Тежестта, която може да понесе, е съответно скромна. Всичко зависи от аналогията между редуцирания модел на кондензата и космологията на минисуперпространството, а аналогиите осветяват, без да доказват. Една платформа, от един автор, показваща, че една рецепта за вътрешно време работи, е силно доказателство за принцип и слаба основа за твърдения как времето се държи в природата. Правилното прочитане е: методът вече е нещо, което може да се *направи* в лаборатория и да се провери.

## Защо е важно

Дебатите за проблема на времето дълго са били заседнали на нивото на формализма, където конкуриращите се предложения трудно се опровергават, защото правят малко конкретни, измерими предсказания. Превръщането дори на малък ъгъл от този дебат в изпълним експеримент — при който вътрешният часовник или подрежда данните, или не, а ефективното уравнение или ги напасва, или не — променя характера на спора. То дава на теоретиците лабораторна пейка, върху която да изпитват инструментите си.

Това е истинският принос: не отговор за времето, а **място, където въпросът може да бъде зададен количествено**. Платформите със студени атоми вече са служили като контролируеми аналози за лъчение на Хокинг, разширяващи се вселени и разпад на фалшив вакуум; това добавя релационното време и стрелата на времето към този набор инструменти. Стойността е в последващите изследвания, които позволява — различни избори на часовник, отскачащо срещу сингулярно поведение, изпитвания на обратимост — всяко вече като измерване, а не само като изчисление.

## Накратко

Физик изгражда кондензат на Бозе–Айнщайн, разделя го с тънка оптична бариера на наблюдавана и ненаблюдавана половина и използва ентропията, протичаща между половините, за да конструира вътрешно „ентропийно време“. Този часовник подрежда цикъла на разширяване и повторно свиване на наблюдаваната половина, върви бързо, когато се обменя ентропия, и спира, когато такава не се обменя; ефективно уравнение, написано в това вътрешно време, възпроизвежда измерените данни в разгледания случай с ниска бариера. Постановката е аналог на „проблема на времето“ от каноничната квантова гравитация: „големият взрив“, „големият срив“ и „минивселената“ са етикети за уловен газ, математически подобен на опростен космологичен модел. Това е контролирана изпитвателна среда за идеи за релационно време — не решение на проблема на времето, не твърдение за реалната Вселена и не доказателство, че времето „в действителност“ е ентропия.

## Проверка без увъртане

**Какво показва статията:** В една добре изолирана система със студени атоми вътрешен часовник, дефиниран чрез обмена на ентропия, може монотонно да подреди наблюдаваната динамика, а ефективно уравнение в „ентропийно време“ възпроизвежда измерената еволюция в разгледания случай с ниска бариера.

**Какво е правдоподобно, но непоказано:** Че ентропийното или релационното време е добро описание на времето в реалната квантова гравитация. Експериментът е

съвместим с идеята такива конструкции да бъдат вземани насериозно; той не ги потвърждава за природата.

**Какво не показва:** Че проблемът на времето е решен; че квантовата гравитация е разрешена; че Вселената е започнала в такъв голям взрив; че пространство-времето възниква от атоми; или че „времето не съществува“.

**Основни ограничения:** Една платформа, един автор и един избор на часовник; приблизително 5% неопределеност на точка; приближения на средното поле и осреднена плътност; и преди всичко зависимост от аналогия между уловен кондензат и опростен космологичен модел.

**Колко доверие трябва да има един неспециалист?** Високо доверие, че експериментът е направил онова, което съобщава, в собствената си система. Ниско доверие във всеки скок от този аналог към твърдения за времето в реалната Вселена.

## Източници

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