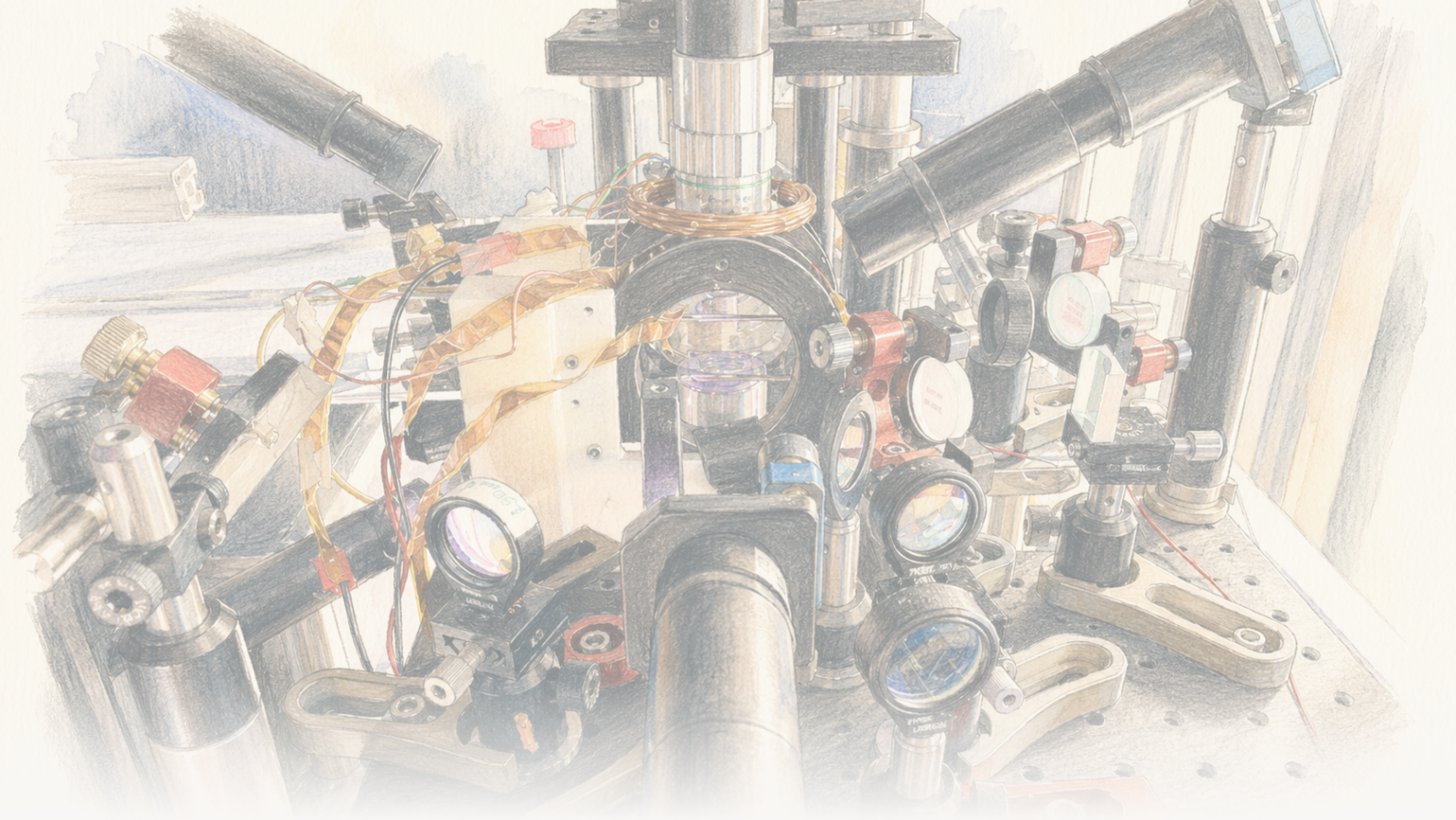

The Clean Paper

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

冷原子實驗檢驗量子重力的「時間問題」——它是實驗室類比，不是答案

在正則量子重力中，惠勒–德威特方程沒有外部時鐘來給事件排序，這就是「時間問題」。一項單作者實驗把玻色–愛因斯坦凝聚體用一道薄光學勢壘分成未觀測和觀測兩個扇區，再用兩者之間流動的熵構造內部時鐘。這個「熵時間」可以為觀測扇區的膨脹和再塌縮排序；在論文明確比較的低勢壘情形中，一條有效方程能夠重現實測資料。這是檢驗關係時間思想的受控平台：所謂「大爆炸」「大塌縮」和「迷你宇宙」只是受限原子氣體的類比標籤，不是真實宇宙學；研究也沒有聲稱解決了時間問題或量子重力。

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

在一個陷阱內部，用熵造出一隻時鐘

正則量子重力中有一個古怪而頑固的難題：它的核心方程裡沒有時間。惠勒–德威特方程大概是最接近「整個宇宙的薛定諤方程」的東西，而它寫出來只是某個算符作用在狀態上等於零。沒有一個外部參數在滴答作響，也沒有東西給「之前」和「之後」排序——但我們顯然又在體驗時間流逝。這就是**時間問題**，半個多世紀以來一直沒有得到公認解決。

Physical Review Research 上一篇單作者論文並沒有解決它。論文採取的是一個更克制、也更實用的方向：搭建一個小型、控制良好的實驗系統，讓一類被提出的答案能夠**直接拿真實資料來檢驗**。伯明翰大學的 Giovanni Barontini 使用玻色–愛因斯坦凝聚體——一團極冷原子，整體表現得像一個量子物體——把「內部的、關係性的時間」變成一個可以測量而不只是爭論的類比系統。關鍵做法是：不用系統外面的秒錶計時，而用系統內部重新分配的熵來造時鐘。

「受控的時間問題類比」與「物理學家解決了時間」之間的距離，就是這篇研究最需要講清楚的地方。這個距離很遠。

研究者做了什麼

實驗裝置是一團約 **24,000 個銣-87 原子**的凝聚體，被困在一個保守光學偶極阱中，並被激發得來回振蕩——整團原子雲在勢阱裡左右晃動。一道**很薄的光學勢壘**把勢阱分成兩半：勢壘寬約 8 微米，由數位微鏡元件用 675 nm 光「畫」出來。其中一半被觀測（「**明亮扇區**」），另一半不被觀測（「**暗扇區**」）。在實驗大約 100 毫秒的時間窗口內，系統沒有可測得的粒子損失或耗散，因此可以很好地近似為一個封閉系統，而且其哈密頓量本身不顯含時間。

[figure_pair pending]

左圖：磁光阱在玻璃腔體中產生冷銣原子雲，這是製備凝聚體過程中的早期冷卻階段。右圖：Giovanni Barontini 站在光學裝置旁。這些都是實驗系統的照片，不是一個字面意義上的「微型宇宙」。

如果用普通實驗室時鐘看——每 2 ms 拍一張吸收造影——明亮扇區會經歷一個很有宇宙學味道的過程。原子穿過勢壘，明亮扇區從無到有（Barontini 把這一刻稱作「**大爆炸**」），隨後擴展到最大範圍，再收縮並重新流回暗扇區（「**大塌縮**」）。根據勢壘高度，這個過程還可以週期性重複。

然後才進入實驗真正要問的問題。實驗室時鐘位於系統外部——而惠勒–德威特方程的設定恰恰不允許依賴這種外部時鐘。因此 Barontini 問：能否**只用系統內部的物理量**，給明亮扇區的歷史排出先後順序？他的答案是一隻稱為**熵時間（entropic time）**的時鐘，而且可以直接從同一組影像中分三步讀出來。第一步，從每張吸收影像提取明亮扇區的四個量：原子數；密度分布的質心（在類比中扮演「純量場」）；寬度；以及熵——先用標準方法得到每原子的熵，再乘以原子數。第二步，隨著原子穿過勢壘，這個熵會升高或降低。第三步，時鐘沿著實測質心軌跡追蹤熵梯度，並累計每一步位移的大小而不是方向。這樣一來，無論熵和質心是一起上升還是一起下降，每一步都會讓時鐘向前，即使原子雲反向運動也不會讓時鐘倒轉。實際資料中，這幾乎處處給出了從「大爆炸」到「大塌縮」的單一排序；只有少數小幅波動，是粗時間採樣導致熵和質心的變化方向短暫不一致。

最後，他推導出一條有效的「**熵時間薛定諤方程**」——用這個內部時鐘而不是外部實驗室時間，描述

明亮扇區如何演化——並進行數值求解，看它能否重現相機真正記錄到的結果。

他們發現了什麼

可以把結果按「主張強度」分成三層。

- **內部時鐘確實可以給演化排序**。熵時間幾乎處處單調增加，其走時速度由熵穿越勢壘的速度決定：熵交換越快，時鐘走得越快；如果**完全沒有熵交換，它就完全停下**。在可逆、低勢壘的區域中，一次「大塌縮」和下一次「大爆炸」之間，內部時間完全不流逝——因為那裡沒有熵交換——儘管實驗室時鐘一直在走。整個資料集中，兩個扇區的總熵在誤差範圍內保持不變，符合封閉系統的要求。
- **不同工作區間會產生不同的「時間」**。提高勢壘，熵交換變少，內部時鐘就變慢。把勢壘提高到兩個扇區幾乎不再交流時，明亮扇區會趨向論文所謂的「**熱寂**」：一個穩定狀態，此時熵時間乾脆停止。
- **一條有效方程可以重現實測資料**。把實驗參數代入熵時間薛定諤方程後，數值解能夠重現原子雲寬度的實測演化。論文對低勢壘情形（熵驅動項佔主導）給出了明確的數值比較，並報告兩者符合得很好。

> **「時間問題」是什麼？這裡的「熵時間」又是什麼？**
>
> **時間問題**指的是：正則量子重力的主方程——惠勒–德威特方程沒有外部時間變數。一種常見回應是採用關係性描述：把系統內部的某個物理量提升為「時鐘」，其他量都相對於它來描述。一個反覆出現的困難是，天然的時鐘候選不一定單調——例如一個先膨脹後再塌縮的系統，會讓某些候選時鐘先向前、再向後，於是不能從頭到尾清楚標出同一個時間方向。
> **熵時間**是 Barontini 繞過這個問題的方法。他不直接把某個位置變數當時鐘，而是用觀測扇區與未觀測扇區之間交換的熵來構造時鐘，並讓它不會反向。這個想法在精神上與更早的「熱時間」假說有關，但這裡的定義來自可測的熵流，而不是抽象數學結構——這正是它能夠在真實實驗裝置上被檢驗的原因。
> 最重要的是，「大爆炸」「大塌縮」「尺度因子」「純量場」「迷你宇宙」這些宇宙學詞彙都只是**類比標籤**。它們描述的是受限原子氣體中某些在數學結構上與簡化宇宙學模型相似的特徵，並不是對真實宇宙的陳述。

這項研究不能證明什麼

這裡最需要小心，因為這套詞彙非常容易讓人越界解讀。

- **它沒有解決時間問題，也沒有聲稱解決了**。論文自己的定位是「建立一個受控實驗環境，可以對關係時間的構造進行定量檢驗」。測試平台不是定理。關係時間或熵時間是否真的是量子重力中描述時間的正確方式，研究之後仍然和之前一樣是開放問題。
- **它是類比，不是宇宙**。實驗沒有觀測任何真實宇宙學過程。被觀測的是勢阱中的玻色–愛因斯坦凝

聚體，而它的約化描述與一個簡化的（「小超空間」）宇宙學模型在數學上相似。這種相似性正是實驗成立的理由，也同時規定了它的邊界。這裡沒有任何結果說明早期宇宙經歷了這種「大爆炸」、時空由原子組成，或「時間不存在」。

- **它沒有證明時間「本質上就是熵」**。熵時鐘只是一個人為構造、而且在這個系統中很好用的排序方式。論文指出它與熱時間假說在概念上有親緣關係，卻明確把「兩者是否甚至相同」留作開放問題。「用熵構造的內部時鐘能給這個實驗排序」，遠比「時間就是熵」窄得多。
- **有效方程是建模結果，不是對量子力學的改寫**。推導出的熵時間薛定諤方程在熵流很慢時會趨近普通量子力學；只有完全沒有熵流時，它才嚴格等同於通常的幺正理論。論文把它定位為：當一個被觀測子系統在熱力學上向未觀測子系統開放時，它在這種特定設定下比標準方程更一般。這是關於這類開放子系統的陳述，不是說基礎物理必須這樣重寫。
- **這只是一個實驗、一個作者、一種時鐘選擇**。結果中單個資料點的統計不確定性約為 5%，並使用平均場和平均密度近似。時鐘如何選、系統如何粗粒化，都是有意做出的建模選擇；在據此得出更深層結構結論之前，其他研究團隊顯然還需要檢驗這些選擇。

證據有多強？

如果只看論文真正提出的那個有限主張，證據相當清楚。系統在相關時間尺度內確實隔離良好；熵的「賬」能對上（總熵在誤差內恆定）；內部時鐘幾乎處處都能單調地給資料排序；而作者從同一模型推導出的有效方程，用從資料估計的參數，在應用到的低勢壘情形中能夠重現實測動力學。資料也公開可得。這是一個真實、可控系統上的真實測量，不是思想實驗。

它能夠承受的結論分量也相應有限。全部工作依賴於凝聚體約化模型與小超空間宇宙學之間的類比，而類比能夠啟發，卻不能證明。一個平台、一位作者、展示一種內部時間方案可以工作，是很好的概念驗證；但要據此斷言自然界中的時間究竟如何運作，依據就很弱。正確的讀法是：現在這種方法已經變成一件可以在實驗室裡真正做出來並檢查的事情。

為什麼重要

關於時間問題的爭論長期停留在形式主義層面。不同方案往往很難證偽，因為它們能給出的具體、可測預言太少。如果能夠把其中哪怕一個角落變成可以實際運行的實驗——內部時鐘要麼能給資料排序，要麼不能；有效方程要麼能擬合，要麼不能——爭論的性質就變了。理論學家第一次多了一張可以拿自己的數學工具上去試驗的工作台。

這才是真正的貢獻：不是給出「時間是什麼」的答案，而是提供一個**可以定量提出這個問題的地方**。冷原子平台此前已經被用作霍金輻射、膨脹宇宙和假真空衰變的可控類比；現在，關係時間和時間箭頭也被加入這個工具箱。它的價值在於由此能夠開展的後續實驗——換一種時鐘選擇、比較反彈與奇點行為、測試可逆性——這些問題現在都可以變成測量，而不只是計算。

重點摘要

一名物理學家製備了玻色–愛因斯坦凝聚體，用一道薄光學勢壘把它分成被觀測和未觀測的兩半，再用兩者之間流動的熵構造一隻內部「熵時間」時鐘。這只時鐘能夠給被觀測一半的膨脹—再塌縮循環排序：有熵交換時走得快，沒有熵交換時就停下；用這種內部時間寫出的有效方程，在作者明確檢驗的低勢壘情形中也能重現實測資料。這個裝置是正則量子重力「時間問題」的類比：所謂「大爆炸」「大塌縮」和「迷你宇宙」都只是一個受限原子氣體的標籤，因為它在數學上類似某種簡化宇宙學模型。這是檢驗關係時間思想的受控平台——不是時間問題的解答，不是對真實宇宙的主張，也不是「時間本質上就是熵」的證據。

務實檢視

論文真正顯示了什麼：在一個隔離良好的冷原子系統中，由熵交換定義的內部時鐘可以近乎單調地給觀測動力學排序，而且一條有效「熵時間」方程能重現論文所檢驗低勢壘情形中的實測演化。

合理但沒有被顯示的部分：熵時間或關係時間可能是現實量子重力中描述時間的好方法。這個實驗說明這些構造值得認真拿來檢驗，卻沒有證實它們就是自然界的答案。

論文沒有顯示什麼：時間問題已經解決；量子重力已經解決；宇宙以這種「大爆炸」方式開始；時空由原子湧現；或「時間不存在」。

主要侷限：單一實驗平台、單一作者和單一時鐘選擇；單點約 5% 的不確定性；平均場與平均密度近似；以及最根本的一點——全部解釋依賴於受限凝聚體與簡化宇宙學模型之間的類比。

普通讀者應該有多大信心？可以高度相信實驗在它自己的系統上做到了論文所報告的事情。對於從這個類比跳到「真實宇宙中的時間究竟是什麼」的任何主張，都應該保持很低信心。

來源

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