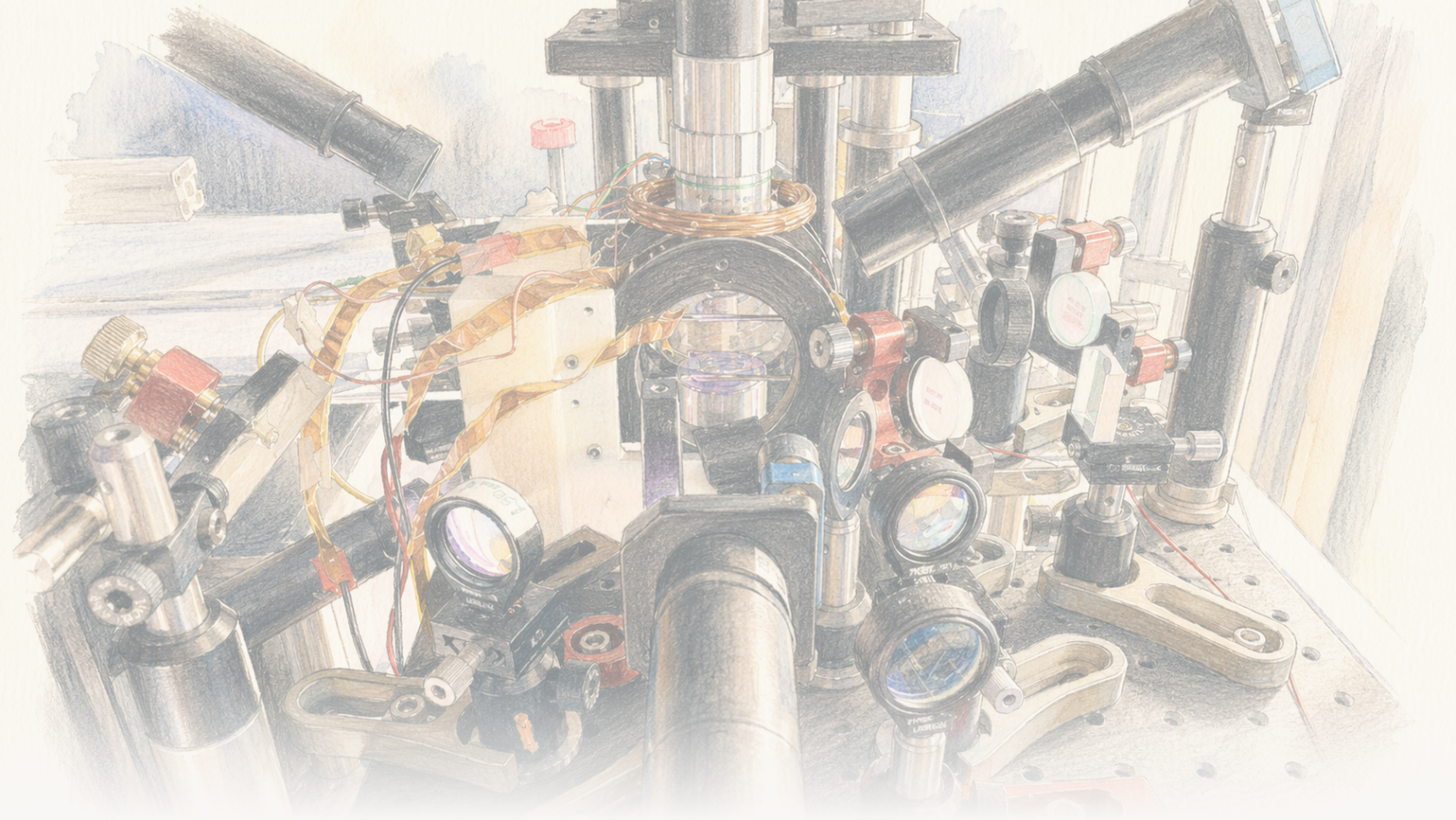

The Clean Paper

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

冷原子实验检验量子引力的“时间问题”——它是实验室类比，不是答案

在正则量子引力中，惠勒–德威特方程没有外部时钟来给事件排序，这就是“时间问题”。一项单作者实验把玻色-爱因斯坦凝聚体用一道薄光学势垒分成未观测和观测两个扇区，再用两者之间流动的熵构造内部时钟。这个“熵时间”可以为观测扇区的膨胀和再坍缩排序；在论文明确比较的低势垒情形中，一条有效方程能够重现实测数据。这是检验关系时间思想的受控平台：所谓“大爆炸”“大坍缩”和“迷你宇宙”只是受限原子气体的类比标签，不是真实宇宙学；研究也没有声称解决了时间问题或量子引力。

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

在一个陷阱内部，用熵造出一只时钟

正则量子引力中有一个古怪而顽固的难题：它的核心方程里没有时间。惠勒–德威特方程大概是最接近 “整个宇宙的薛定谔方程” 的东西，而它写出来只是某个算符作用在状态上等于零。没有一个外部参数在滴答作响，也没有东西给 “之前” 和 “之后” 排序——但我们显然又在体验时间流逝。这就是**时间问题**，半个多世纪以来一直没有得到公认解决。

Physical Review Research 上一篇单作者论文并没有解决它。论文采取的是一个更克制、也更实用的方向：搭建一个小型、控制良好的实验系统，让一类被提出的答案能够**直接拿真实数据来检验**。伯明翰大学的 Giovanni Barontini 使用玻色-爱因斯坦凝聚体——一团极冷原子，整体表现得像一个量子物体——把 “内部的、关系性的时间” 变成一个可以测量而不只是争论的类比系统。关键做法是：不用系统外面的秒表计时，而用系统内部重新分配的熵来造时钟。

“受控的时间问题类比” 与 “物理学家解决了时间” 之间的距离，就是这篇研究最需要讲清楚的地方。这个距离很远。

研究者做了什么

实验装置是一团约 **24,000 个铷-87 原子**的凝聚体，被困在一个保守光学偶极阱中，并被激发得来回振荡——整团原子云在势阱里左右晃动。一道**很薄的光学势垒**把势阱分成两半：势垒宽约 8 微米，由数字微镜器件用 675 nm 光 “画” 出来。其中一半被观测（“**明亮扇区**”），另一半不被观测（“**暗扇区**”）。在实验大约 100 毫秒的时间窗口内，系统没有可测得的粒子损失或耗散，因此可以很好地近似为一个封闭系统，而且其哈密顿量本身不显含时间。

[figure_pair pending]

左图：磁光阱在玻璃腔体中产生冷铷原子云，这是制备凝聚体过程中的早期冷却阶段。右图：Giovanni Barontini 站在光学装置旁。这些都是实验系统的照片，不是一个字面意义上的 “微型宇宙”。

如果用普通实验室时钟看——每 2 ms 拍一张吸收成像——明亮扇区会经历一个很有宇宙学味道的过程。原子穿过势垒，明亮扇区从无到有（Barontini 把这一刻称作 “**大爆炸**”），随后扩展到最大范围，再收缩并重新流回暗扇区（“**大坍缩**”）。根据势垒高度，这个过程还可以周期性重复。

然后才进入实验真正要问的问题。实验室时钟位于系统外部——而惠勒–德威特方程的设定恰恰不允许依赖这种外部时钟。因此 Barontini 问：能否**只用系统内部的物理量**，给明亮扇区的历史排出先后顺序？他的答案是一只称为**熵时间（entropic time）**的时钟，而且可以直接从同一组图像中分三步读出来。第一步，从每张吸收图像提取明亮扇区的四个量：原子数；密度分布的质心（在类比中扮演 “标量场”）；宽度；以及熵——先用标准方法得到每原子的熵，再乘以原子数。第二步，随着原子穿过势垒，这个熵会升高或降低。第三步，时钟沿着实测质心轨迹追踪熵梯度，并累计每一步位移的大小而不是方向。这样一来，无论熵和质心是一起上升还是一起下降，每一步都会让时钟向前，即使原子云反向运动也不会让时钟倒转。实际数据中，这几乎处处给出了从 “ 大爆炸” 到 “大坍缩” 的单一排序；只有少数小幅波动，是粗时间采样导致熵和质心的变化方向短暂不一致。

最后，他推导出一条有效的 **“熵时间薛定谔方程”**——用这个内部时钟而不是外部实验室时间，描述明

亮扇区如何演化——并进行数值求解，看它能否重现相机真正记录到的结果。

他们发现了什么

可以把结果按 “主张强度” 分成三层。

- **内部时钟确实可以给演化排序**。熵时间几乎处处单调增加，其走时速度由熵穿越势垒的速度决定：熵交换越快，时钟走得越快；如果**完全没有熵交换，它就完全停下**。在可逆、低势垒的区域中，一次 “大坍缩” 和下一次 “大爆炸” 之间，内部时间完全不流逝——因为那里没有熵交换——尽管实验室时钟一直在走。整个数据集中，两个扇区的总熵在误差范围内保持不变，符合封闭系统的要求。
- **不同工作区间会产生不同的 “时间”**。提高势垒，熵交换变少，内部时钟就变慢。把势垒提高到两个扇区几乎不再交流时，明亮扇区会趋向论文所谓的 “**热寂**”：一个稳定状态，此时熵时间干脆停止。
- **一条有效方程可以重现实测数据**。把实验参数代入熵时间薛定谔方程后，数值解能够重现原子云宽度的实测演化。论文对低势垒情形（熵驱动项占主导）给出了明确的数值比较，并报告两者符合得很好。

> **“时间问题” 是什么？这里的 “熵时间” 又是什么？**
>
> **时间问题**指的是：正则量子引力的主方程——惠勒–德威特方程没有外部时间变量。一种常见回应是采用关系性描述：把系统内部的某个物理量提升为 “时钟”，其他量都相对于它来描述。一个反复出现的困难是，天然的时钟候选不一定单调——例如一个先膨胀后再坍缩的系统，会让某些候选时钟先向前、再向后，于是不能从头到尾清楚标出同一个时间方向。
> **熵时间**是 Barontini 绕过这个问题的方法。他不直接把某个位置变量当时钟，而是用观测扇区与未观测扇区之间交换的熵来构造时钟，并让它不会反向。这个想法在精神上与更早的 “热时间” 假说有关，但这里的定义来自可测的熵流，而不是抽象数学结构——这正是它能够在真实实验装置上被检验的原因。
> 最重要的是，“大爆炸”“大坍缩”“尺度因子”“标量场”“迷你宇宙” 这些宇宙学词汇都只是**类比标签**。它们描述的是受限原子气体中某些在数学结构上与简化宇宙学模型相似的特征，并不是对真实宇宙的陈述。

这项研究不能证明什么

这里最需要小心，因为这套词汇非常容易让人越界解读。

- **它没有解决时间问题，也没有声称解决了**。论文自己的定位是 “建立一个受控实验环境，可以对关系时间的构造进行定量检验”。测试平台不是定理。关系时间或熵时间是否真的是量子引力中描述时间的正确方式，研究之后仍然和之前一样是开放问题。
- **它是类比，不是宇宙**。实验没有观测任何真实宇宙学过程。被观测的是势阱中的玻色-爱因斯坦凝聚体，而它的约化描述与一个简化的（“小超空间”）宇宙学模型在数学上相似。这种相似性正是实验成立的理由，也同时规定了它的边界。这里没有任何结果说明早期宇宙经历了这种 “大爆炸”、时

空由原子组成，或 “时间不存在”。

- **它没有证明时间 “本质上就是熵”**。熵时钟只是一个人为构造、而且在这个系统中很好用的排序方式。论文指出它与热时间假说在概念上有亲缘关系，却明确把 “两者是否甚至相同” 留作开放问题。“用熵构造的内部时钟能给这个实验排序”，远比 “时间就是熵” 窄得多。
- **有效方程是建模结果，不是对量子力学的改写**。推导出的熵时间薛定谔方程在熵流很慢时会趋近普通量子力学；只有完全没有熵流时，它才严格等同于通常的幺正理论。论文把它定位为：当一个被观测子系统在热力学上向未观测子系统开放时，它在这种特定设置下比标准方程更一般。这是关于这类开放子系统的陈述，不是说基础物理必须这样重写。
- **这只是一个实验、一个作者、一种时钟选择**。结果中单个数据点的统计不确定性约为 5%，并使用平均场和平均密度近似。时钟如何选、系统如何粗粒化，都是有意做出的建模选择；在据此得出更深层结构结论之前，其他研究团队显然还需要检验这些选择。

证据有多强?

如果只看论文真正提出的那个有限主张，证据相当清晰。系统在相关时间尺度内确实隔离良好；熵的 “账” 能对上（总熵在误差内恒定）；内部时钟几乎处处都能单调地给数据排序；而作者从同一模型推导出的有效方程，用从数据估计的参数，在应用到的低势垒情形中能够重现实测动力学。数据也公开可得。这是一个真实、可控系统上的真实测量，不是思想实验。

它能够承受的结论分量也相应有限。全部工作依赖于凝聚体约化模型与小超空间宇宙学之间的类比，而类比能够启发，却不能证明。一个平台、一位作者、展示一种内部时间方案可以工作，是很好的概念验证；但要据此断言自然界中的时间究竟如何运作，依据就很弱。正确的读法是：现在这种方法已经变成一件可以在实验室里真正做出来并检查的事情。

为什么重要

关于时间问题的争论长期停留在形式主义层面。不同方案往往很难证伪，因为它们能给出的具体、可测预言太少。如果能够把其中哪怕一个角落变成可以实际运行的实验——内部时钟要么能给数据排序，要么不能；有效方程要么能拟合，要么不能——争论的性质就变了。理论学家第一次多了一张可以拿自己的数学工具上去试验的工作台。

这才是真正的贡献：不是给出 “时间是什么” 的答案，而是提供一个**可以定量提出这个问题的地方**。冷原子平台此前已经被用作霍金辐射、膨胀宇宙和假真空衰变的可控类比；现在，关系时间和时间箭头也被加入这个工具箱。它的价值在于由此能够开展的后续实验——换一种时钟选择、比较反弹与奇点行为、测试可逆性——这些问题现在都可以变成测量，而不只是计算。

简明总结

一名物理学家制备了玻色-爱因斯坦凝聚体，用一道薄光学势垒把它分成被观测和未观测的两半，再用两者之间流动的熵构造一只内部 “熵时间” 时钟。这只时钟能够给被观测一半的膨胀—再坍缩循环排序：有熵交换时走得快，没有熵交换时就停下；用这种内部时间写出的有效方程，在作者明确检验的低势垒情形中也能重现实测数据。这个装置是正则量子引力 “时间问题” 的类比：所谓 “大爆炸”“大坍缩” 和 “迷你宇宙” 都只是一个受限原子气体的标签，因为它在数学上类似某种简化宇宙学模型。这是检验关系时间思想的受控平台——不是时间问题的解答，不是对真实宇宙的主张，也不是 “时间本质上就是熵” 的证据。

不绕弯检查

论文真正显示了什么：在一个隔离良好的冷原子系统中，由熵交换定义的内部时钟可以近乎单调地给观测动力学排序，而且一条有效 “熵时间” 方程能重现论文所检验低势垒情形中的实测演化。

合理但没有被显示的部分：熵时间或关系时间可能是现实量子引力中描述时间的好方法。这个实验说明这些构造值得认真拿来检验，却没有证实它们就是自然界的答案。

论文没有显示什么：时间问题已经解决；量子引力已经解决；宇宙以这种 “大爆炸” 方式开始；时空由原子涌现；或 “时间不存在”。

主要局限：单一实验平台、单一作者和单一时钟选择；单点约 5% 的不确定性；平均场与平均密度近似；以及最根本的一点——全部解释依赖于受限凝聚体与简化宇宙学模型之间的类比。

普通读者应该有多大信心？可以高度相信实验在它自己的系统上做到了论文所报告的事情。对于从这个类比跳到 “真实宇宙中的时间究竟是什么” 的任何主张，都应该保持很低信心。

来源

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