The CLEAN PAPER

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

冷却原子実験が量子重力の「時間の問題」を検証する —— 答えではなく、実験室アナログとして

正準量子重力では、*Wheeler-DeWitt* 方程式に出来事を並べる外部時計がなく、これが「時間の問題」と呼ばれる。単著の実験研究は *Bose-Einstein* 凝縮体を隔離し、薄い光学障壁で観測されない領域と観測領域に分け、その間を流れるエントロピーから内部時計を作った。この「エントロピー時間」は観測領域の膨張と再収縮を順序付け、検討した低障壁条件では有効方程式が測定データを再現した。これは関係的時間の考えを定量的に試す制御された試験台であり、「ビッグバン」「ビッグクランチ」「ミニ宇宙」は閉じ込めた気体に付けたアナログ名で、実在の宇宙論ではない。時間の問題や量子重力を解決したという主張でもない。

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

トラップの中で、エントロピーから作った時計

正準量子重力には、奇妙でしぶとい難問がある。中心となる方程式に時間が入っていないのだ。Wheeler-DeWitt 方程式は、宇宙全体に対するSchrödinger 方程式に最も近いものとされるが、ある演算子を状態に作用させるとゼロになる、とだけ書かれる。「前」と「後」を並べる外部パラメータも、刻む時計もない。ところが私たちは明らかに時間が過ぎることを経験する。これが**時間の問題**で、半世紀以上にわたり解決を拒み続けている。

Physical Review Research に掲載された単著論文は、この問題を解決してはいない。しているのはもっと静かで、別の意味で有用なことだ。提案されてきた答えの一系統を**実データに照らして検証できる**、小さくよく制御された実験系を作った。University of Birmingham の Giovanni Barontini は、Bose-Einstein 凝縮体—— 超低温原子の雲が一つの量子物体のように振る舞う状態 —— を使い、「内部的」「関係的」な時間という考えを、議論するだけでなく測定できるアナログへ変えた。仕掛けは、外部のストップウォッチではなく、系が内部でやり取りするエントロピーから時計を作ることにある。

「時間の問題を制御下で模した実験」と「物理学者が時間を解決した」の間には大きな距離がある。この距離こそ、この記事の要点だ。

研究者が行ったこと

装置の中心は、保存的な光双極子トラップに閉じ込めた約 **24,000 個のルビジウム 87 原子**の凝縮体で、原子雲全体をトラップ内で左右に往復振動させた。幅およそ 8 μm、675 nm 光をデジタルマイクロミラーデバイスで描いた**薄い光学障壁**がトラップを 2 つに分ける。一方は観測する「**bright sector**」、もう一方は観測しない「**dark sector**」だ。実験の約 100 ms の時間窓では、測定可能な粒子損失や散逸は見られず、時間そのものに依存しないハミルトニアンをもつ閉鎖系としてよい近似になる。

[figure_pair pending]

左はガラスセル内で磁気光学トラップが冷たいルビジウム原子雲を作る様子で、凝縮体準備へ向かう初期冷却段階。右は光学装置のそばに立つ Giovanni Barontini。これは実験を支える研究室の写真であり、文字どおりの「小型宇宙」の画像ではない。

普通の実験室時計 ——2 ms ごとの吸収画像 —— で見ると、bright sector は宇宙論を思わせる動きをする。原子が障壁を越えて流れ込み、何もない状態から領域が成長する（Barontini はこの瞬間を「**ビッグバン**」と呼ぶ）。最大まで広がったあと収縮し、dark 側へ戻って空になる（「**ビッグクランチ**」）。障壁の高さによっては、これが周期的に繰り返される。

ここからが本題だ。実験室時計は系の外部にある。Wheeler-DeWitt の設定でまさに禁じられている種類の時計だ。そこで Barontini は問う。bright sector の履歴を、**系内部の量だけを使って順序付けられるか**。彼の答えが**エントロピー時間**と呼ぶ時計で、同じ画像から 3 段階で読み出せる。まず各吸収画像から bright sector について 4 つの量を取り出す。原子数、密度分布の重心（アナログな「スカラー場」の役割）、幅、そしてエントロピー —— 標準手法で得る原子当たりエントロピーに原

子数を掛けたもの —— である。次に原子が障壁を越えると、そのエントロピーが増減する。最後に時計は、測定された重心経路に沿うエントロピー勾配を追い、変位の方向ではなく大きさを数える。エントロピーと重心が一緒に上がっても下がっても、雲が反転しても各ステップで時計は前へ進む。データでは「ビッグバン」から「ビッグクランチ」までほぼ全域を一方向に並べられ、粗いサンプリングで 2 つの変化が食い違う少数の小さな揺れだけが残った。

最後に彼は、この外部時計ではなく内部時計で bright sector の発展を書く有効な「**エントロピー時間 Schrödinger 方程式**」を導き、カメラが実際に記録したものを再現するか数値的に解いた。

分かったこと

野心の度合いが増す順に、結果は 3 つある。

- **内部時計は順序付けとして機能する**。エントロピー時間はほぼ全域で単調に増え、その速度は障壁を越えてエントロピーがどれほど速く交換されるかで決まる。交換が速ければ時計も速く進み、**交換がなければ完全に止まる**。可逆的な低障壁領域では、ビッグクランチから次のビッグバンまで内部時間はまったく進まない。その間エントロピー交換がないからだ。実験室時計は進み続ける。全データセットを通じて両 sector を合わせた総エントロピーは誤差範囲内で一定で、閉鎖系に期待される通りだった。
- **異なる領域では異なる「時間」になる**。障壁を高くするとエントロピー交換が減り、内部時計は遅くなる。2 つの sector がほとんど相互作用しないところまで押し上げると、bright sector は論文が「**熱的死**」と呼ぶ状態へ近づく。定常状態になり、エントロピー時間は単純に止まる。
- **有効方程式がデータを再現する**。実験パラメータを入力したエントロピー時間 Schrödinger 方程式は、雲の幅の測定された発展を数値的に再現した。論文が明示的な数値比較を行った低障壁ケースでは、エントロピー駆動項が支配的で、非常によい一致が報告された。

> **「時間の問題」と、ここでの「エントロピー時間」とは**
>
> **時間の問題**とは、正準量子重力の基本方程式 Wheeler-DeWitt に外部時間変数がないことだ。よくある応答の一つが関係的な考えで、系内部のある物理量を「時計」に昇格させ、ほかのすべてをそれとの関係で記述する。しかし自然な時計候補が必ずしも単調ではないという難点が繰り返し現れる。再収縮する系では候補時計が進んだあと逆向きに戻ってしまい、始まりから終わりまでを一方向にラベル付けできない。
> **エントロピー時間**は Barontini がその問題を避けるために使う方法だ。位置のような変数を読む代わりに、観測 sector と非観測 sector の間で交換されるエントロピーから、逆向きにならないよう時計を構成する。精神的には古い「thermal time」の考えに近いが、ここでは抽象的数学構造ではなく、測定可能なエントロピー流から操作的に定義される。だから実際の装置で試験できる。
> 重要なのは、「ビッグバン」「ビッグクランチ」「スケール因子」「スカラー場」「ミニ宇宙」といった宇宙論用語は**アナログ上のラベル**だということだ。単純化された宇宙論モデルの方程式と構造的に似ている閉じ込め原子気体の特徴に名前を付けているのであって、実在宇宙について述べているのではない。

この研究からは言えないこと

用語が大きな主張を誘いやすいので、ここは特に慎重さが必要だ。

- **時間の問題を解決していないし、その主張もしていない**。論文自身の位置づけは、「関係的時間の構成を定量的に試せる制御実験環境を確立する」ことだ。試験台は定理ではない。関係的時間やエントロピー時間が量子重力における正しい時間の説明なのかは、以前と同じく未解決である。
- **これはアナログであって宇宙そのものではない**。宇宙論を観測しているわけではない。トラップ内の Bose-Einstein 凝縮体を観測し、その縮約記述が単純化された「minisuperspace」宇宙論モデルと数学的に似ている。類似性こそ実験の意味であり、同時に境界でもある。初期宇宙がこの種のビッグバンを経験したこと、時空が原子でできていること、「時間は存在しない」ことのどれも示さない。
- **時間が「本当は」エントロピーだとは示していない**。エントロピー時計は、この系でうまく働く一つの構成された順序付けだ。論文は thermal-time 仮説との概念的近さに触れるが、両者が一致するかどうかすら明示的に未解決としている。「エントロピーから作った内部時計でこの実験を順序付けられる」は、「時間はエントロピーである」よりはるかに狭い主張だ。
- **有効方程式はモデリング結果であって、量子力学を書き換えたわけではない**。導出されたエントロピー時間 Schrödinger 方程式は、エントロピー流が遅いと通常の量子力学へ近づき、エントロピーがまったく流れないときにのみ厳密に通常のユニタリ理論になる。論文は、観測される系が観測されない系へ熱力学的に開いている場合に標準方程式より一般的と位置づける。これはこの種の開放部分系についての主張であり、基礎物理を必ずこの形に書き換えるという主張ではない。
- **一つの実験、一人の著者、一つの時計選択**。結果には 1 点当たり約 5% の統計的不確かさがあり、平均場近似と平均密度近似にも依存する。選んだ時計と粗視化は意図的なモデリング判断であり、構造的な結論を出す前に他グループが検証したくなる種類の選択だ。

証拠をどう評価するか

実際に主張している控えめな内容については、証拠はきれいだ。関連時間スケールで系は本当に良く隔離され、エントロピー収支は閉じている（総エントロピーは誤差内で一定）。内部時計はほぼ全域でデータを単調に順序付け、著者が同じモデルから導き、データから推定したパラメータを用いた有効方程式は、適用した低障壁ケースで測定ダイナミクスを再現する。データも公開されている。思考実験ではなく、実在し制御可能な系の実測だ。

背負える主張の重さも、それに応じて控えめである。すべては縮約した凝縮体モデルと minisuperspace 宇宙論とのアナロジーに依存する。アナロジーは理解を助けるが証明はしない。一つのプラットフォーム、一人の著者、一つの内部時間レシピが機能したということは、強い原理実証だが、自然界の時間がどう振る舞うかを語る根拠としては弱い。正しい読み方は、こうだ —— この方法は今や実験室で実際に行え、検証できるようになった。

なぜ重要なのか

時間の問題をめぐる議論は長いあいだ形式論の水準にとどまり、競合する提案は具体的で測定可能な予測が少ないため反証しにくかった。その議論の一角でも、実際に走らせられる実験へ変える —— 内部時計がデータを順序付けるか否か、有効方程式がフィットするか否かを測れる —— ことは、議論の性格を変える。理論家が道具を試せる実験台を与える。

本当の貢献は、時間についての答えではなく、**問いを定量的に投げられる場所**を作ったことだ。冷却原子プラットフォームはすでに Hawking 放射、膨張宇宙、偽真空崩壊の制御アナログとして使われてきた。ここに関係的時間と時間の矢が加わる。価値は、異なる時計選択、バウンスと特異性の比較、可逆性試験など、次の研究を可能にすることにある。それぞれが計算だけでなく測定になる。

要点

一人の物理学者が Bose-Einstein 凝縮体を作り、薄い光学障壁で観測される半分と観測されない半分に分け、両者の間を流れるエントロピーから内部の「エントロピー時間」を構成した。この時計は観測半分の膨張・再収縮サイクルを順序付け、エントロピー交換が速いと速く進み、交換がなければ止まる。著者が検討した低障壁ケースでは、この内部時間で書いた有効方程式が測定データを再現した。装置は正準量子重力の「時間の問題」のアナログであり、「ビッグバン」「ビッグクランチ」「ミニ宇宙」は単純化宇宙論モデルと数学的に似た閉じ込め気体へのラベルである。これは関係的時間の考えを制御下で試す試験台であって、時間の問題の解決でも、実在宇宙についての主張でも、時間が「本当は」エントロピーだという証拠でもない。

冷静に見ると

論文が示していること：よく隔離された一つの冷却原子系で、エントロピー交換から定義した内部時計が観測ダイナミクスをほぼ単調に順序付けられ、検討した低障壁ケースでは有効な「エントロピー時間」方程式が測定された発展を再現する。

もっともらしいが示されていないこと：エントロピー時間や関係的時間が、実際の量子重力における時間のよい説明であること。この実験はそうした構成を真剣に検討する理由にはなるが、自然界について確認したわけではない。

示していないこと：時間の問題が解決したこと。量子重力が解決したこと。宇宙がこの種のビッグバンで始まったこと。時空が原子から創発すること。「時間は存在しない」こと。

主な限界：一つのプラットフォーム、一人の著者、一つの時計選択。1 点当たり約 5% の不確かさ。平均場・平均密度近似。そして何より、閉じ込め凝縮体と単純化宇宙論モデルのアナロジーに依存すること。

一般の読者はどの程度信頼すべきか？この実験系で報告どおりのことが起きた点には高い信頼を置いてよい。このアナログから実在宇宙の時間について飛躍する主張には低い信頼しか置けない。

出典

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