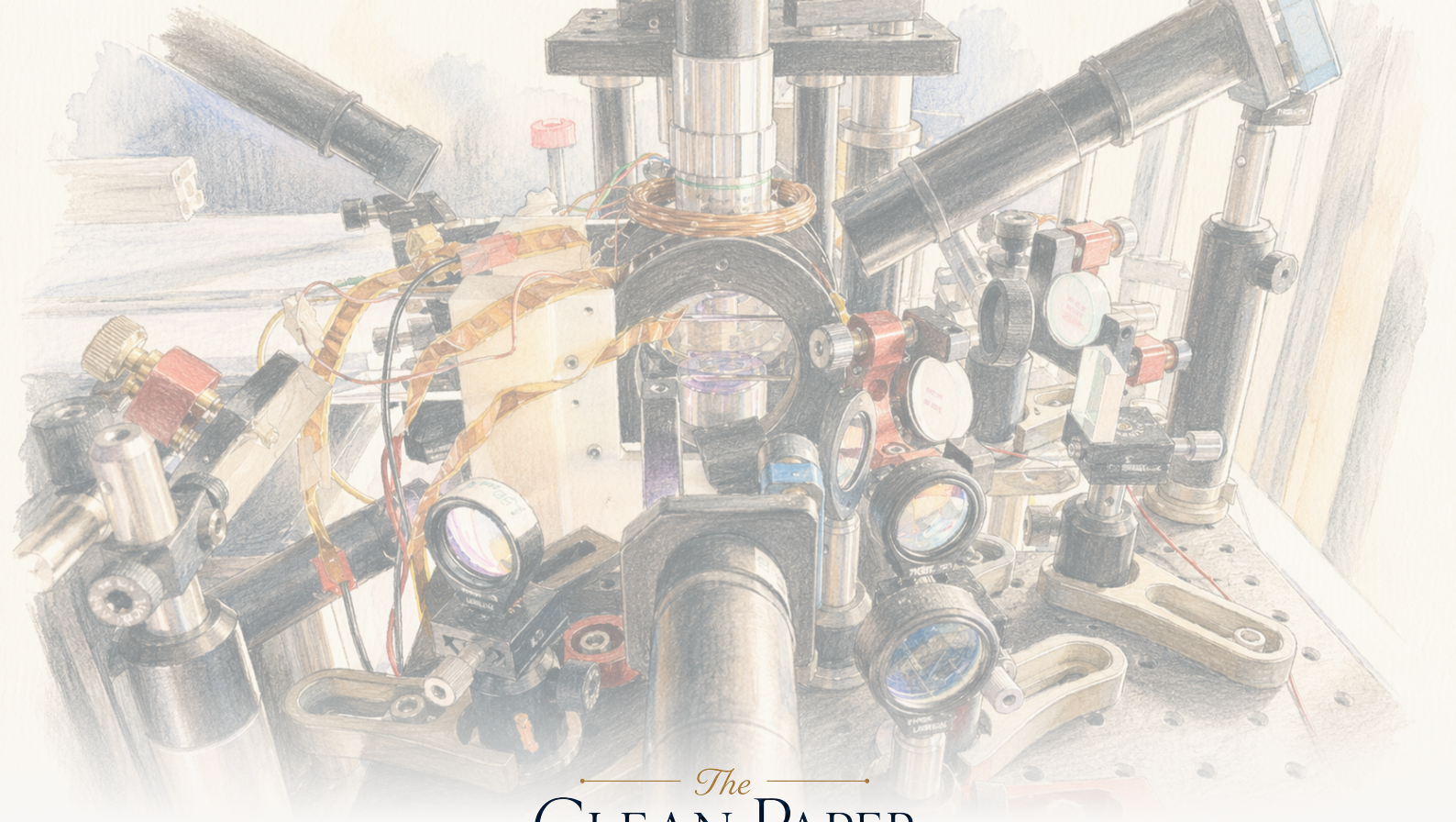

The Clean Paper

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

Um experimento com átomos frios testa o 'problema do tempo' da gravidade quântica — como análogo de laboratório, não como resposta

Na gravidade quântica canônica, a equação de Wheeler-DeWitt não contém um relógio externo para ordenar os eventos: o 'problema do tempo'. Um experimento de autoria individual isola um condensado de Bose-Einstein, divide-o com uma fina barreira óptica em um setor não observado e outro observado e constrói um relógio interno a partir da entropia que flui entre eles. Esse 'tempo entrópico' ordena a expansão e o recolapso do setor observado, e uma equação efetiva reproduz os dados medidos no caso de barreira baixa examinado. É um banco de testes controlado para ideias de tempo relacional: 'big bang', 'big crunch' e 'miniuniverso' são rótulos analógicos para um gás confinado, não cosmologia real, e o trabalho não afirma resolver o problema do tempo nem a gravidade quântica.

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

Um relógio construído com entropia, dentro de uma armadilha

Na gravidade quântica canônica há um quebra-cabeça estranho e persistente: a equação central não contém o tempo. A equação de Wheeler-DeWitt, o equivalente mais próximo de uma equação de Schrödinger para o universo inteiro, limita-se a dizer que determinado operador aplicado ao estado resulta em zero. Não existe um parâmetro externo marcando o ritmo, nada que ordene "antes" e "depois"; ainda assim, sentimos claramente a passagem do tempo. Esse é o **problema do tempo**, e ele resiste a uma solução há mais de meio século.

Um artigo de autoria individual publicado na *Physical Review Research* não o resolve. Faz algo mais modesto e, à sua maneira, mais útil: constrói um sistema de laboratório pequeno e bem controlado no qual uma família de respostas propostas pode **ser testada com dados reais**. Giovanni Barontini, da Universidade de Birmingham, pega um condensado de Bose-Einstein — uma nuvem de átomos ultrafrios que se comporta como um único objeto quântico — e o transforma em um análogo no qual a ideia de um tempo "interno" e relacional pode ser medida, em vez de apenas debatida. O truque é construir um relógio não a partir de um cronômetro externo, mas da entropia que o sistema redistribui dentro de si.

A distância entre "um análogo controlado do problema do tempo" e "físicos resolveram o tempo" é toda a história — e é uma distância enorme.

O que o pesquisador fez

O aparelho é um condensado de cerca de **24.000 átomos de rubídio-87**, confinado em uma armadilha dipolar óptica conservativa e colocado para oscilar: a nuvem atômica inteira balança de um lado para outro da armadilha. Uma **barreira óptica fina** — com cerca de 8 micrômetros de largura, desenhada com luz de 675 nm por um dispositivo digital de microespelhos — divide a armadilha em duas metades. Uma é observada — o "**setor claro**" — e a outra não — o "**setor escuro**". Durante a janela experimental de aproximadamente 100 milissegundos, o sistema não apresenta perda mensurável de partículas nem dissipação, portanto é, em boa aproximação, um sistema fechado com um hamiltoniano que não depende por si mesmo do tempo.

[figure_pair pending]

À esquerda, a armadilha magneto-óptica produz a nuvem fria de átomos de rubídio dentro da célula de vidro: uma etapa inicial de resfriamento na preparação do condensado. À direita, Giovanni Barontini ao lado do aparato óptico. São fotografias do sistema de laboratório do experimento, não imagens de um miniuniverso literal.

Observado com um relógio comum de laboratório — uma imagem de absorção a cada 2 ms —, o setor claro faz algo sugestivo. Os átomos atravessam a barreira e o setor cresce a partir do nada — Barontini chama esse momento de "**big bang**" —, alcança uma extensão máxima, depois se contrai e volta a se

esvaziar para o lado escuro — o "**big crunch**". Dependendo da altura da barreira, o processo pode se repetir em ciclos.

Então vem o verdadeiro ponto do trabalho. O relógio de laboratório é *externo* ao sistema, exatamente o tipo de elemento proibido no cenário de Wheeler-DeWitt. Barontini pergunta, portanto, se a história do setor claro pode **ser ordenada usando apenas grandezas internas do sistema**. Sua resposta é um relógio que chama de **tempo entrópico**, lido diretamente das mesmas imagens em três passos simples. Primeiro, de cada imagem de absorção ele extrai quatro números do setor claro: seu número de átomos, o centro de massa do perfil de densidade — que desempenha o papel de um "campo escalar" análogo —, sua largura e sua entropia — a entropia por átomo, obtida por um método padrão, multiplicada pelo número de átomos. Segundo, enquanto os átomos atravessam a barreira, essa entropia aumenta e diminui. Terceiro, o relógio acompanha o gradiente de entropia ao longo da trajetória medida do centro de massa, contando a magnitude de cada deslocamento, não sua direção. Quando a entropia e o centro de massa aumentam ou diminuem juntos, cada passo faz o relógio avançar mesmo que a nuvem inverta o movimento. Nos dados, isso produz uma ordenação única do "big bang" até o "big crunch" do setor em quase todos os pontos, com apenas algumas pequenas oscilações onde a amostragem grosseira faz os dois movimentos não coincidirem.

Por fim, ele deriva uma **"equação de Schrödinger em tempo entrópico"** efetiva — uma equação de evolução para o setor claro escrita em função desse relógio interno, não do externo — e a resolve numericamente para verificar se reproduz o que a câmera de fato registrou.

O que ele encontrou

Três resultados, em ordem crescente de ambição.

- **O relógio interno funciona como uma ordenação.** O tempo entrópico cresce de forma monotônica em quase todos os pontos, e sua velocidade é determinada pela rapidez com que a entropia atravessa a barreira: ele avança mais depressa quando há troca de entropia e **para completamente quando não há troca**. No regime reversível de barreira baixa, *nenhum tempo interno transcorre* entre um big crunch e o big bang seguinte, porque ali não há troca de entropia, embora o relógio do laboratório continue avançando. Em todo o conjunto de dados, a entropia total dos dois setores permaneceu constante dentro das barras de erro, como deve ocorrer em um sistema fechado.
- **Regimes diferentes produzem "tempos" diferentes.** Ao elevar a barreira, a troca de entropia diminui e o relógio interno avança mais devagar. Quando se chega ao ponto em que os dois setores quase não se comunicam, o setor claro se aproxima do que o artigo chama de "**morte térmica**": um estado estacionário no qual o tempo entrópico simplesmente para.
- **Uma equação efetiva reproduz os dados.** A equação de Schrödinger em tempo entrópico, alimentada com os parâmetros experimentais, recupera numericamente a evolução medida da largura da nuvem. O artigo relata uma concordância excelente para o caso de barreira baixa — no qual domina o termo impulsionado pela entropia —; a comparação numérica explícita é feita para esse caso.

O que são o "problema do tempo" e o "tempo entrópico" neste trabalho

O problema do tempo é que a equação-mestra da gravidade quântica canônica — Wheeler-DeWitt — não contém uma variável temporal externa. Uma resposta comum é *relacional*: promover alguma grandeza física interna do sistema à condição de "relógio" e descrever todo o restante em relação a ela. Uma dificuldade recorrente é que escolhas naturais de relógio nem sempre são monotônicas: em um sistema que volta a colapsar, o relógio candidato avança e depois recua, portanto não consegue rotular de forma limpa uma única direção do começo ao fim.

O **tempo entrópico** é a forma usada por Barontini para evitar esse problema. Em vez de ler uma variável semelhante à posição, ele constrói o relógio a partir da *entropia* trocada entre os setores observado e não observado, de modo que ele não se inverta. Em espírito, isso é estreitamente relacionado a ideias anteriores de "tempo térmico", mas aqui é definido operacionalmente a partir de um fluxo de entropia mensurável, e não de uma estrutura matemática abstrata; é justamente isso que permite testá-lo em um aparelho real.

É essencial lembrar que as palavras cosmológicas — "big bang", "big crunch", "fator de escala", "campo escalar", "miniuniverso" — são **rótulos analógicos**. Elas nomeiam características de um gás de átomos confinado que são *estruturalmente semelhantes* às equações de modelos cosmológicos simplificados. Não são afirmações sobre o universo real.

O que isso não demonstra

Aqui é preciso ter mais cuidado, porque o vocabulário convida ao exagero.

- **Não resolve o problema do tempo e não afirma resolvê-lo.** O próprio artigo se apresenta como o estabelecimento de "um ambiente experimental controlado no qual construções de tempo relacional podem ser testadas quantitativamente". Um banco de testes não é um teorema. A questão de saber se o tempo relacional ou entrópico é a explicação *correta* do tempo na gravidade quântica permanece exatamente tão aberta quanto antes.
- **É um análogo, não o universo.** Não se está observando cosmologia. Observa-se um condensado de Bose-Einstein em uma armadilha, cuja descrição reduzida é *matematicamente semelhante* a um modelo cosmológico simplificado — de "minisuperespaço". A semelhança é a razão do experimento e também sua fronteira. Nada aqui demonstra que o universo primitivo teve um big bang desse tipo, que o espaço-tempo é feito de átomos ou que "o tempo não existe".
- **Não demonstra que o tempo seja "na verdade" entropia.** O relógio entrópico é uma ordenação construída que funciona bem neste sistema. O artigo observa uma proximidade conceitual com a hipótese do tempo térmico, mas deixa explicitamente em aberto até mesmo se os dois coincidem. "Um relógio interno construído a partir da entropia pode ordenar este experimento" é uma afirmação muito mais estreita do que "tempo é entropia".
- **A equação efetiva é um resultado de modelagem, não uma reescrita da mecânica quântica.** A equação de Schrödinger em tempo entrópico derivada reduz-se à mecânica quântica comum quando o fluxo de entropia é lento e só coincide estritamente com a teoria unitária habitual

quando não há fluxo de entropia. O artigo a apresenta como mais geral do que a equação padrão *especificamente quando um sistema observado está termodinamicamente aberto para um sistema não observado*: uma afirmação sobre subsistemas abertos em arranjos desse tipo, não uma proposta de que a física fundamental deva ser reescrita assim.

- **É um experimento, um autor e uma escolha de relógio.** Os resultados têm aproximadamente 5% de incerteza estatística por ponto e dependem de aproximações de campo médio e densidade promediada. O relógio escolhido e a granularidade são decisões deliberadas de modelagem, do tipo que outros grupos desejarão examinar antes de extrair conclusões estruturais.

Quão sólidas são as evidências?

Para a afirmação modesta que o artigo realmente faz, as evidências são sólidas. O sistema é genuinamente bem isolado na escala de tempo relevante, o balanço de entropia fecha — a entropia total permanece constante dentro do erro —, o relógio interno ordena os dados de forma monotônica em quase todos os pontos e uma equação efetiva, derivada pelo autor a partir do mesmo modelo com parâmetros inferidos dos dados, reproduz a dinâmica medida no caso de barreira baixa ao qual foi aplicada. Os dados estão abertamente disponíveis. É uma medição real de um sistema real e controlável, não um experimento mental.

O peso que ela pode suportar é igualmente modesto. Tudo depende da analogia entre o modelo reduzido do condensado e a cosmologia de minisuperespaço, e analogias esclarecem sem demonstrar. Uma única plataforma, de um único autor, mostrando que uma receita de tempo interno funciona é uma prova de princípio sólida e uma base fraca para qualquer afirmação sobre como o tempo se comporta na natureza. A leitura correta é: agora o método pode *ser feito* em laboratório e verificado.

Por que isso importa

Os debates sobre o problema do tempo estão há muito presos ao formalismo, no qual propostas concorrentes são difíceis de falsear porque fazem poucas previsões concretas e mensuráveis. Transformar sequer um canto desse debate em um experimento executável — no qual um relógio interno ordena os dados ou não, no qual uma equação efetiva se ajusta ou não — muda o caráter da discussão. Dá aos teóricos uma bancada para testar sua maquinaria.

Essa é a contribuição genuína: não uma resposta sobre o tempo, mas um **lugar onde a pergunta pode ser feita quantitativamente**. Plataformas de átomos frios já serviram como análogos controláveis da radiação de Hawking, de universos em expansão e do decaimento do falso vácuo; este trabalho acrescenta à caixa de ferramentas o tempo relacional e a seta do tempo. O valor está nos estudos posteriores que ele permite: outras escolhas de relógio, comportamento com ricochete versus singularidade e testes de reversibilidade, cada qual agora transformado em uma medição, não apenas em um cálculo.

Em resumo

Um físico construiu um condensado de Bose-Einstein, dividiu-o com uma fina barreira óptica em uma metade observada e outra não observada e usou a entropia que fluía entre elas para construir um "tempo entrópico" interno. Esse relógio ordena o ciclo de expansão e recolapso da metade observada, avança rapidamente quando há troca de entropia e para quando não há, e uma equação efetiva escrita nesse tempo interno reproduz os dados medidos no caso de barreira baixa examinado pelo autor. O arranjo é um análogo do "problema do tempo" da gravidade quântica canônica: "big bang", "big crunch" e "miniuniverso" são rótulos para um gás confinado matematicamente semelhante a um modelo cosmológico simplificado. É um banco de testes controlado para ideias de tempo relacional, não uma solução para o problema do tempo, não uma afirmação sobre o universo real e não uma prova de que o tempo seja "na verdade" entropia.

Leitura crítica

O que o artigo mostra: em um sistema de átomos frios bem isolado, um relógio interno definido a partir da troca de entropia pode ordenar de forma monotônica a dinâmica observada, e uma equação efetiva de "tempo entrópico" reproduz a evolução medida no caso de barreira baixa examinado.

O que é plausível, mas não foi mostrado: que o tempo entrópico ou relacional seja uma boa descrição do tempo na gravidade quântica real. O experimento é compatível com a ideia de levar essas construções a sério; ele não as confirma para a natureza.

O que ele não mostra: que o problema do tempo foi resolvido; que a gravidade quântica foi resolvida; que o universo começou com um big bang desse tipo; que o espaço-tempo emerge de átomos; ou que "o tempo não existe".

Principais limitações: uma única plataforma, um único autor e uma única escolha de relógio; cerca de 5% de incerteza por ponto; aproximações de campo médio e densidade promediada; e, acima de tudo, dependência de uma analogia entre um condensado confinado e um modelo cosmológico simplificado.

Quanta confiança um leitor geral deve ter? Alta confiança de que o experimento fez o que relata dentro de seu próprio sistema. Baixa confiança em qualquer salto desse análogo para afirmações sobre o tempo no universo real.

Fontes

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