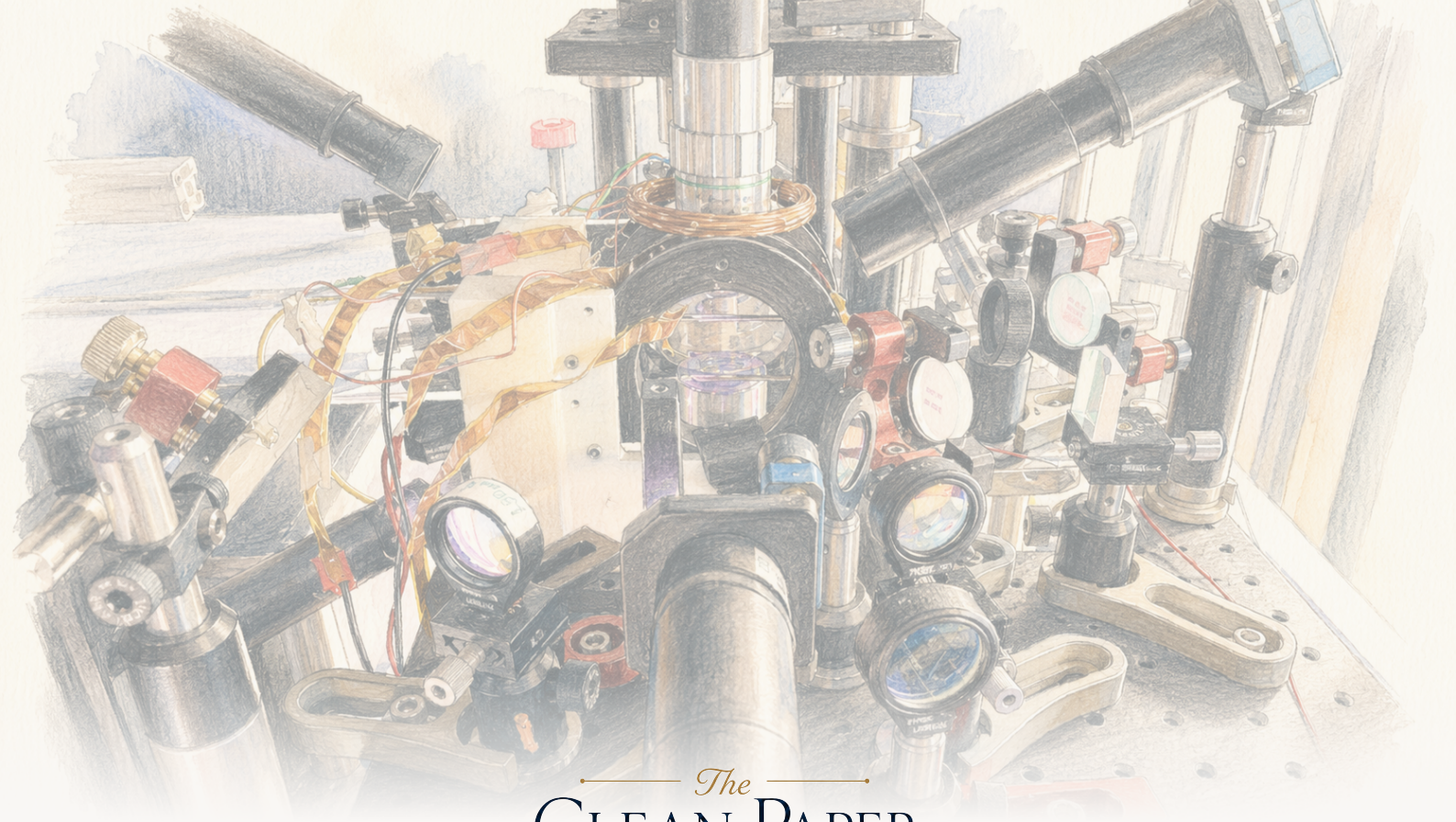

The
CLEAN PAPER

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

Un experimento con átomos fríos pone a prueba el «problema del tiempo» de la gravedad cuántica — como análogo de laboratorio, no como respuesta

En la gravedad cuántica canónica, la ecuación de Wheeler-DeWitt no contiene un reloj externo que ordene los acontecimientos: es el «problema del tiempo». Un experimento de un solo autor aísla un condensado de Bose-Einstein, lo divide con una barrera óptica fina en un sector observado y otro no observado y construye un reloj interno a partir de la entropía que fluye entre ellos. Ese «tiempo entrópico» ordena la expansión y el recolapso del sector observado, y una ecuación efectiva reproduce los datos medidos en el caso de barrera baja examinado. Es un banco de pruebas controlado para ideas de tiempo relacional: «big bang», «big crunch» y «miniuniverso» son etiquetas analógicas para un gas atrapado, no cosmología real, y el trabajo no afirma resolver el problema del tiempo ni la gravedad cuántica.

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

Un reloj construido con entropía, dentro de una trampa

En la gravedad cuántica canónica existe un rompecabezas extraño y persistente: la ecuación central no contiene el tiempo. La ecuación de Wheeler-DeWitt, lo más parecido a una ecuación de Schrödinger para todo el universo, se limita a decir que cierto operador aplicado al estado da cero. No hay un parámetro externo que marque el ritmo, nada que ordene «antes» y «después»; sin embargo, experimentamos con toda claridad el paso del tiempo. Este es el **problema del tiempo**, y lleva más de medio siglo resistiéndose a una solución.

Un artículo de un solo autor publicado en *Physical Review Research* no lo resuelve. Hace algo más discreto y, a su manera, más útil: construye un sistema de laboratorio pequeño y bien controlado en el que una familia de respuestas propuestas puede **ponerse a prueba con datos reales**. Giovanni Barontini, de la Universidad de Birmingham, toma un condensado de Bose-Einstein —una nube de átomos ultrafríos que se comporta como un único objeto cuántico— y lo convierte en un análogo donde la idea de un tiempo «interno» y relacional puede medirse en lugar de discutirse únicamente. El truco consiste en construir un reloj no a partir de un cronómetro externo, sino de la entropía que el sistema redistribuye dentro de sí mismo.

La distancia entre «un análogo controlado del problema del tiempo» y «los físicos han resuelto el tiempo» es toda la historia, y es una distancia muy larga.

Qué hizo el investigador

El aparato es un condensado de unos **24.000 átomos de rubidio-87** confinado en una trampa dipolar óptica conservativa y puesto a oscilar: toda la nube atómica se balancea de un lado a otro de la trampa. Una **barrera óptica fina** —de unos 8 micrómetros de ancho, dibujada con luz de 675 nm mediante un dispositivo digital de microespejos— divide la trampa en dos mitades. Una se observa —el «**sector luminoso**»— y la otra no —el «**sector oscuro**»—. Durante la ventana experimental de aproximadamente 100 milisegundos, el sistema no presenta pérdida medible de partículas ni disipación, por lo que es, con buena aproximación, un sistema cerrado con un hamiltoniano que no depende por sí mismo del tiempo.

[figure_pair pending]

A la izquierda, la trampa magnetoóptica produce la nube fría de átomos de rubidio dentro de la celda de vidrio: una etapa temprana de enfriamiento en la preparación del condensado. A la derecha, Giovanni Barontini junto al aparato óptico. Son fotografías del sistema de laboratorio del experimento, no imágenes de un universo en miniatura literal.

Observado con un reloj de laboratorio ordinario —una imagen de absorción cada 2 ms—, el sector luminoso hace algo sugerente. Los átomos cruzan la barrera y el sector crece desde la nada —Barontini llama a ese momento el «**big bang**»—, alcanza una extensión máxima, después se contrae y se vacía de nuevo hacia el lado oscuro —el «**big crunch**»—. Según la altura de la barrera, el proceso puede repetirse cíclicamente.

Entonces llega el verdadero punto del trabajo. El reloj de laboratorio es *externo* al sistema, exactamente el tipo de elemento que prohíbe el escenario de Wheeler-DeWitt. Barontini pregunta, por tanto, si la historia del sector luminoso puede **ordenarse utilizando únicamente magnitudes internas del sistema**. Su respuesta es un reloj al que llama **tiempo entrópico**, leído directamente de las mismas imágenes en tres pasos sencillos. Primero, de cada imagen de absorción extrae cuatro números del sector luminoso: su número de átomos, el centro de masas de su perfil de densidad —que desempeña el papel de un «campo escalar» análogo—, su anchura y su entropía —la entropía por átomo, obtenida mediante un método estándar, multiplicada por el número de átomos—. Segundo, mientras los átomos cruzan la barrera, esa entropía aumenta y disminuye. Tercero, el reloj sigue el gradiente de entropía a lo largo de la trayectoria medida del centro de masas, contando la magnitud de cada desplazamiento y no su dirección. Cuando la entropía y el centro de masas aumentan o disminuyen a la vez, cada paso hace avanzar el reloj incluso si la nube invierte el movimiento. En los datos, esto proporciona una única ordenación desde el «big bang» hasta el «big crunch» del sector casi en todas partes, con solo unas pocas pequeñas oscilaciones donde el muestreo grueso hace que ambos cambios no coincidan.

Por último, deriva una **«ecuación de Schrödinger en tiempo entrópico»** efectiva —una ecuación de evolución para el sector luminoso escrita en función de este reloj interno, no del externo— y la resuelve numéricamente para comprobar si reproduce lo que realmente registró la cámara.

Qué encontró

Tres resultados, en orden creciente de ambición.

- **El reloj interno funciona como ordenación.** El tiempo entrópico crece de forma monótona casi en todas partes, y su velocidad viene determinada por la rapidez con que la entropía cruza la barrera: avanza más deprisa cuando se intercambia entropía y **se detiene por completo cuando no hay intercambio**. En el régimen reversible de barrera baja, *no transcurre ningún tiempo interno* entre un big crunch y el siguiente big bang, porque allí no se intercambia entropía, aunque el reloj de laboratorio siga avanzando. En todo el conjunto de datos, la entropía total de ambos sectores se mantuvo constante dentro de las barras de error, como exige un sistema cerrado.
- **Los distintos regímenes producen «tiempos» diferentes.** Al elevar la barrera, disminuye el intercambio de entropía y el reloj interno avanza más despacio. Cuando se llega al punto en el que los dos sectores apenas se comunican, el sector luminoso se aproxima a lo que el artículo llama una «**muerte térmica**»: un estado estacionario en el que el tiempo entrópico simplemente se detiene.
- **Una ecuación efectiva reproduce los datos.** La ecuación de Schrödinger en tiempo entrópico, alimentada con los parámetros experimentales, recupera numéricamente la evolución medida de la anchura de la nube. El artículo comunica una concordancia excelente para el caso de barrera baja —donde domina el término impulsado por entropía—; la comparación numérica explícita se realiza para ese caso.

Qué son el «problema del tiempo» y el «tiempo entrópico» en este trabajo

El problema del tiempo consiste en que la ecuación maestra de la gravedad cuántica canónica —Wheeler-DeWitt— no contiene una variable temporal externa. Una respuesta habitual es *relacional*: elevar una magnitud física interna del sistema a la categoría de «reloj» y describir todo lo demás respecto a ella. Una dificultad recurrente es que las elecciones naturales de reloj no siempre son monótonas: en un sistema que vuelve a colapsar, el reloj candidato avanza y después retrocede, por lo que no puede etiquetar limpiamente una única dirección desde el principio hasta el final.

El **tiempo entrópico** es la forma en que Barontini evita ese problema. En lugar de leer una variable parecida a una posición, construye el reloj a partir de la *entropía* intercambiada entre los sectores observado y no observado, de modo que no se invierta. En espíritu está estrechamente relacionado con ideas anteriores de «tiempo térmico», pero aquí se define operacionalmente a partir de un flujo de entropía medible y no de una estructura matemática abstracta; eso es precisamente lo que permite probarlo en un aparato real.

Es esencial recordar que las palabras cosmológicas —«big bang», «big crunch», «factor de escala», «campo escalar», «miniuniverso»— son **etiquetas analógicas**. Nombran características de un gas de átomos atrapado que resultan *estructuralmente similares* a las ecuaciones de modelos cosmológicos simplificados. No son afirmaciones sobre el universo real.

Lo que esto no demuestra

Aquí es donde más cuidado hace falta, porque el vocabulario invita a excederse.

- **No resuelve el problema del tiempo ni afirma hacerlo.** El propio artículo se presenta como el establecimiento de «un entorno experimental controlado en el que las construcciones de tiempo relacional pueden probarse cuantitativamente». Un banco de pruebas no es un teorema. La cuestión de si el tiempo relacional o entrópico es la explicación *correcta* del tiempo en gravedad cuántica queda exactamente tan abierta como antes.
- **Es un análogo, no el universo.** No se está observando cosmología. Se observa un condensado de Bose-Einstein en una trampa, cuya descripción reducida es *matemáticamente parecida* a un modelo cosmológico simplificado —de «minisuperespacio»—. La semejanza es la razón del experimento y también su frontera. Nada aquí demuestra que el universo temprano tuviera un big bang de este tipo, que el espacio-tiempo esté hecho de átomos o que «el tiempo no exista».
- **No demuestra que el tiempo sea «realmente» entropía.** El reloj entrópico es una ordenación construida que funciona bien en este sistema. El artículo señala un parentesco conceptual con la hipótesis del tiempo térmico, pero deja explícitamente abierta incluso la cuestión de si ambos coinciden. «Un reloj interno construido a partir de la entropía puede ordenar este experimento» es una afirmación mucho más estrecha que «el tiempo es entropía».
- **La ecuación efectiva es un resultado de modelización, no una reescritura de la mecánica cuántica.** La ecuación de Schrödinger en tiempo entrópico derivada se reduce a la mecánica cuántica ordinaria cuando el flujo de entropía es lento, y solo coincide estrictamente con la teoría unitaria

habitual cuando no fluye entropía. El artículo la presenta como más general que la ecuación estándar *específicamente cuando un sistema observado está termodinámicamente abierto hacia uno no observado*: una afirmación sobre subsistemas abiertos en montajes de este tipo, no la propuesta de que la física fundamental deba reescribirse así.

- **Es un experimento, un autor y una elección de reloj.** Los resultados tienen aproximadamente un 5% de incertidumbre estadística por punto y se apoyan en aproximaciones de campo medio y densidad promediada. El reloj elegido y la granularidad son decisiones deliberadas de modelización, del tipo que otros grupos querrán examinar antes de extraer conclusiones estructurales.

¿Qué solidez tienen las pruebas?

Para la afirmación modesta que realmente formula, las pruebas son limpias. El sistema está genuinamente bien aislado en la escala temporal relevante, la contabilidad de entropía cierra —la entropía total permanece constante dentro del error—, el reloj interno ordena los datos de forma monótona casi en todas partes y una ecuación efectiva, derivada por el autor a partir del mismo modelo con parámetros inferidos de los datos, reproduce la dinámica medida en el caso de barrera baja al que se aplicó. Los datos están disponibles abiertamente. Es una medición real de un sistema real y controlable, no un experimento mental.

La carga que puede soportar es igual de modesta. Todo descansa en la analogía entre el modelo reducido del condensado y la cosmología de minisuperespacio, y las analogías iluminan sin demostrar. Una sola plataforma, de un único autor, que muestra que una receta de tiempo interno funciona constituye una prueba de principio sólida y una base débil para cualquier afirmación sobre cómo se comporta el tiempo en la naturaleza. La lectura correcta es: ahora el método puede *hacerse* en un laboratorio y comprobarse.

Por qué importa

Los debates sobre el problema del tiempo llevan mucho tiempo atrapados en el formalismo, donde las propuestas competidoras son difíciles de falsar porque realizan pocas predicciones concretas y medibles. Convertir siquiera una esquina de ese debate en un experimento ejecutable —donde un reloj interno ordena los datos o no lo hace, donde una ecuación efectiva ajusta o no— cambia el carácter de la discusión. Proporciona a los teóricos un banco donde probar su maquinaria.

Esa es la contribución genuina: no una respuesta sobre el tiempo, sino un **lugar donde plantear cuantitativamente la pregunta**. Las plataformas de átomos fríos ya han servido como análogos controlables de la radiación de Hawking, universos en expansión y decaimiento del falso vacío; este trabajo añade a la caja de herramientas el tiempo relacional y la flecha del tiempo. El valor reside en los estudios posteriores que permite: otras elecciones de reloj, comportamiento con rebote frente a singularidad y pruebas de reversibilidad, cada una convertida ahora en una medición y no solo en un cálculo.

En pocas palabras

Un físico construyó un condensado de Bose-Einstein, lo dividió mediante una barrera óptica fina en una mitad observada y otra no observada, y utilizó la entropía que fluía entre ambas para construir un «tiempo entrópico» interno. Ese reloj ordena el ciclo de expansión y recolapso de la mitad observada, avanza deprisa cuando se intercambia entropía y se detiene cuando no se intercambia, y una ecuación efectiva escrita en ese tiempo interno reproduce los datos medidos en el caso de barrera baja examinado por el autor. El montaje es un análogo del «problema del tiempo» de la gravedad cuántica canónica: «big bang», «big crunch» y «miniuniverso» son etiquetas para un gas atrapado matemáticamente parecido a un modelo cosmológico simplificado. Es un banco de pruebas controlado para ideas de tiempo relacional, no una solución al problema del tiempo, no una afirmación sobre el universo real y no una prueba de que el tiempo sea «realmente» entropía.

Sin rodeos

Lo que muestra el artículo: en un sistema de átomos fríos bien aislado, un reloj interno definido a partir del intercambio de entropía puede ordenar de forma monótona la dinámica observada, y una ecuación efectiva de «tiempo entrópico» reproduce la evolución medida en el caso de barrera baja examinado.

Lo que es plausible, pero no se muestra: que el tiempo entrópico o relacional sea una buena descripción del tiempo en la gravedad cuántica real. El experimento concuerda con la idea de tomar en serio esas construcciones; no las confirma para la naturaleza.

Lo que no muestra: que el problema del tiempo esté resuelto; que la gravedad cuántica esté resuelta; que el universo comenzara con un big bang de este tipo; que el espacio-tiempo emerja de átomos; ni que «el tiempo no exista».

Limitaciones principales: una única plataforma, un único autor y una única elección de reloj; aproximadamente un 5% de incertidumbre por punto; aproximaciones de campo medio y densidad promediada; y, sobre todo, dependencia de una analogía entre un condensado atrapado y un modelo cosmológico simplificado.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Confianza alta en que el experimento hizo lo que comunica dentro de su propio sistema. Confianza baja en cualquier salto desde este análogo hacia afirmaciones sobre el tiempo en el universo real.

Fuentes

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