The Clean Paper

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

Một thí nghiệm nguyên tử lạnh kiểm tra 'bài toán thời gian' của hấp dẫn lượng tử — như mô hình tương tự trong phòng thí nghiệm, không phải câu trả lời

Trong hấp dẫn lượng tử chính tắc, phương trình Wheeler–DeWitt không có đồng hồ bên ngoài để sắp thứ tự sự kiện: đó là 'bài toán thời gian'. Một thí nghiệm một tác giả cô lập ngưng tụ Bose–Einstein, chia nó bằng hàng rào quang học mỏng thành vùng không quan sát và vùng quan sát, rồi xây đồng hồ nội tại từ entropy chảy giữa hai vùng. 'Thời gian entropy' đó sắp thứ tự sự giãn nở và co lại của vùng quan sát, và một phương trình hiệu dụng tái tạo dữ liệu đo trong trường hợp hàng rào thấp được khảo sát. Đây là bệ thử có kiểm soát cho ý tưởng thời gian quan hệ: 'big bang', 'big crunch' và 'miniuniverse' là nhãn tương tự cho khí bị bẫy, không phải vũ trụ học thật, và công trình không tuyên bố giải bài toán thời gian hay hấp dẫn lượng tử.

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

Một chiếc đồng hồ được xây từ entropy, bên trong một cái bẫy

Trong hấp dẫn lượng tử chính tắc có một câu đố kỳ lạ và dai dẳng: phương trình trung tâm không chứa thời gian. Phương trình Wheeler–DeWitt, thứ gần nhất với phương trình Schrödinger cho toàn vũ trụ, đơn giản nói rằng một toán tử nhất định tác dụng lên trạng thái cho kết quả bằng không. Không có tham số bên ngoài nào "tích tắc", không có gì để sắp thứ tự "trước" và "sau" — trong khi rõ ràng chúng ta vẫn trải nghiệm thời gian trôi. Đây là **bài toán thời gian**, và hơn nửa thế kỷ qua vẫn chưa có lời giải dứt điểm.

Một bài báo một tác giả trên *Physical Review Research* không giải quyết bài toán đó. Điều nó làm lặng lẽ hơn nhưng theo một nghĩa nào đó hữu ích hơn: xây dựng một hệ phòng thí nghiệm nhỏ, được kiểm soát tốt, nơi một họ các câu trả lời được đề xuất có thể **đối chiếu với dữ liệu thật**. Giovanni Barontini tại University of Birmingham lấy một ngưng tụ Bose–Einstein — một đám nguyên tử siêu lạnh hành xử như một vật thể lượng tử duy nhất — và biến nó thành một hệ tương tự nơi ý tưởng về thời gian "nội tại", mang tính quan hệ, có thể được đo thay vì chỉ tranh luận. Mẹo là xây đồng hồ không từ chiếc đồng hồ bấm giờ bên ngoài, mà từ entropy mà hệ tự phân phối bên trong chính nó.

Khoảng cách giữa "một mô hình tương tự có kiểm soát của bài toán thời gian" và "các nhà vật lý đã giải quyết thời gian" chính là toàn bộ câu chuyện ở đây — và khoảng cách đó rất xa.

Nhà nghiên cứu đã làm gì

Thiết bị là một ngưng tụ gồm khoảng **24.000 nguyên tử rubidium-87** được giữ trong một bẫy lưỡng cực quang học bảo toàn và cho dao động — toàn bộ đám nguyên tử lắc qua lại trong bẫy. Một **hàng rào quang học mỏng** — rộng khoảng 8 micromet, được "vẽ" bằng ánh sáng 675 nm qua thiết bị vi gương số — chia bẫy làm hai nửa. Một nửa được quan sát ("**vùng sáng**"); nửa kia thì không ("**vùng tối**"). Trong cửa sổ thí nghiệm khoảng 100 mili giây, hệ không cho thấy mất hạt hay tiêu tán có thể đo được, nên với xấp xỉ tốt nó là một hệ kín có Hamiltonian bản thân không phụ thuộc thời gian.

[figure_pair pending]

Bên trái, bẫy quang–từ tạo ra đám nguyên tử rubidium lạnh bên trong buồng thủy tinh: một giai đoạn làm lạnh sớm trên đường chuẩn bị ngưng tụ. Bên phải, Giovanni Barontini đứng cạnh hệ thiết bị quang học. Đây là ảnh của hệ phòng thí nghiệm đứng sau thí nghiệm, không phải ảnh của một vũ trụ thu nhỏ theo nghĩa đen.

Nếu nhìn bằng đồng hồ phòng thí nghiệm thông thường — chụp ảnh hấp thụ mỗi 2 ms — vùng sáng làm một điều khá gợi liên tưởng. Nguyên tử chảy qua hàng rào và vùng này lớn lên từ con số không (Barontini gọi thời điểm đó là "**big bang**"), đạt kích thước tối đa, rồi co lại và rỗng đi về phía vùng tối (gọi là "**big crunch**"). Tùy độ cao hàng rào, chu trình này có thể lặp lại.

Sau đó mới đến điểm cốt lõi. Đồng hồ phòng thí nghiệm là *bên ngoài* hệ — chính là loại thứ mà khung Wheeler–DeWitt không cho phép. Vì vậy Barontini hỏi: có thể **sắp thứ tự lịch sử của vùng sáng chỉ bằng các đại lượng nội tại của hệ** hay không? Câu trả lời của ông là một chiếc đồng hồ gọi là **thời gian entropy**, đọc trực tiếp từ cùng những bức ảnh qua ba bước đơn giản. Thứ nhất, từ mỗi ảnh hấp thụ ông trích bốn con số cho vùng sáng: số nguyên tử, tâm khối của phân bố mật độ (đóng vai trò một "trường vô hướng" tương tự), độ rộng và entropy — entropy trên mỗi nguyên tử theo một phương pháp chuẩn, nhân với số nguyên tử. Thứ hai, khi nguyên tử đi qua hàng rào, entropy đó tăng giảm. Thứ ba, đồng hồ đi theo gradient entropy dọc theo quỹ đạo tâm khối đo được, đếm độ lớn của mỗi dịch chuyển chứ không phải hướng. Khi entropy và tâm khối cùng tăng hoặc cùng giảm, mỗi bước vẫn làm đồng hồ tiến lên ngay cả lúc đám mây đổi chiều. Trong dữ liệu, điều này cho một thứ tự duy nhất từ "big bang" đến "big crunch" của vùng sáng gần như ở mọi điểm, chỉ có vài dao động nhỏ nơi lấy mẫu thưa khiến hai biến thay đổi không hoàn toàn đồng thuận.

Cuối cùng, ông suy ra một **"phương trình Schrödinger theo thời gian entropy"** hiệu dụng — phương trình tiến hóa cho vùng sáng được viết theo chiếc đồng hồ nội tại này thay vì đồng hồ bên ngoài — rồi giải số để xem có tái tạo được những gì camera thực sự ghi hay không.

Kết quả là gì

Ba kết quả, tăng dần về mức độ tham vọng.

- **Đồng hồ nội tại hoạt động như một thứ tự.** Thời gian entropy tăng đơn điệu gần như ở mọi nơi, và tốc độ của nó do tốc độ entropy đi qua hàng rào quyết định: nó chạy nhanh hơn khi entropy được trao đổi và **dừng hoàn toàn khi không có trao đổi**. Trong chế độ thuận nghịch, hàng rào thấp, *không có thời gian nội tại nào trôi* giữa một big crunch và big bang tiếp theo — vì ở đó không có entropy trao đổi — dù đồng hồ phòng thí nghiệm vẫn tiếp tục chạy. Trên toàn bộ dữ liệu, tổng entropy của cả hai vùng cộng lại giữ không đổi trong giới hạn sai số, đúng như yêu cầu với hệ kín.
- **Các chế độ khác nhau cho các "thời gian" khác nhau.** Tăng hàng rào thì trao đổi entropy giảm, vì vậy đồng hồ nội tại chạy chậm hơn. Tăng tới mức hai vùng hầu như không còn tương tác, vùng sáng tiến về trạng thái mà bài báo gọi là "**cái chết nhiệt**": một trạng thái tĩnh nơi thời gian entropy đơn giản ngừng lại.
- **Một phương trình hiệu dụng tái tạo dữ liệu.** Phương trình Schrödinger theo thời gian entropy, với các tham số thực nghiệm đưa vào, tái tạo bằng tính toán số sự tiến hóa đo được của độ rộng đám mây. Bài báo báo cáo mức phù hợp rất tốt trong trường hợp hàng rào thấp (nơi hạng do entropy chi phối); so sánh số tường minh được thực hiện cho trường hợp đó.

> **"Bài toán thời gian" là gì, và "thời gian entropy" ở đây là gì**
>
> **Bài toán thời gian** xuất phát từ việc phương trình chủ đạo của hấp dẫn lượng tử chính tắc (Wheeler–DeWitt) không có biến thời gian bên ngoài. Một cách phản ứng phổ biến

là cách tiếp cận *quan hệ*: chọn một đại lượng vật lý bên trong hệ làm "đồng hồ", rồi mô tả mọi thứ khác tương đối với nó. Khó khăn lặp lại là lựa chọn đồng hồ tự nhiên không phải lúc nào cũng đơn điệu — một hệ co sụp trở lại có thể làm đồng hồ ứng viên chạy tiến rồi chạy lùi — nên nó không gắn được sạch một hướng duy nhất từ đầu tới cuối.
Thời gian entropy là cách Barontini tránh vấn đề đó. Thay vì đọc một biến giống vị trí, ông xây chiếc đồng hồ từ *entropy* trao đổi giữa vùng được quan sát và không được quan sát, theo cách để nó không đảo chiều. Về tinh thần nó gần với các ý tưởng "thời gian nhiệt" cũ hơn, nhưng ở đây được định nghĩa thao tác từ một dòng entropy có thể đo thay vì từ cấu trúc toán học trừu tượng — và chính điều đó khiến nó có thể kiểm tra trên thiết bị thật.
Điểm cực kỳ quan trọng: các từ vũ trụ học — "big bang", "big crunch", "hệ số tỷ lệ", "trường vô hướng", "miniuniverse" — là **nhãn tương tự**. Chúng đặt tên cho các đặc điểm của một khí nguyên tử bị bẫy tình cờ *tương đồng về cấu trúc* với phương trình của các mô hình vũ trụ học đơn giản hóa. Chúng không phải tuyên bố về vũ trụ thật.

Điều nghiên cứu này không chứng minh

Đây là chỗ cần thận trọng nhất, vì từ ngữ rất dễ mời gọi phóng đại.

- **Nó không giải bài toán thời gian, và cũng không tuyên bố như vậy.** Cách chính bài báo mô tả là nó "thiết lập một môi trường thực nghiệm có kiểm soát nơi các cấu trúc thời gian quan hệ có thể được kiểm tra định lượng". Một bệ thử không phải một định lý. Thời gian quan hệ hay thời gian entropy có phải cách mô tả *đúng* về thời gian trong hấp dẫn lượng tử hay không vẫn mở đúng như trước.
- **Đây là hệ tương tự, không phải vũ trụ.** Không có vũ trụ học nào đang được quan sát. Người ta quan sát một ngưng tụ Bose–Einstein trong bẫy, và mô tả rút gọn của nó *tương tự về toán học* với một mô hình vũ trụ học đơn giản hóa ("minisuperspace"). Sự tương đồng là điểm của thí nghiệm; đồng thời cũng là ranh giới của nó. Không có gì ở đây cho thấy vũ trụ sơ khai có một big bang kiểu này, không-thời gian được làm từ nguyên tử hay "thời gian không tồn tại".
- **Nó không cho thấy thời gian 'thực chất' là entropy.** Đồng hồ entropy là một cấu trúc sắp thứ tự được thiết kế và hoạt động tốt trên hệ này. Bài báo ghi nhận quan hệ ý niệm với giả thuyết thời gian nhiệt nhưng nói rõ vẫn chưa biết hai thứ có trùng nhau không. "Một đồng hồ nội tại xây từ entropy có thể sắp thứ tự thí nghiệm này" là tuyên bố hẹp hơn rất nhiều so với "thời gian là entropy".
- **Phương trình hiệu dụng là kết quả mô hình hóa, không phải viết lại cơ học lượng tử.** Phương trình Schrödinger theo thời gian entropy suy ra trở về cơ học lượng tử thông thường khi dòng entropy chậm, và chỉ đúng hoàn toàn với lý thuyết đơn nhất quen thuộc khi không có entropy chảy. Bài báo đặt nó như dạng tổng quát hơn phương trình chuẩn *cụ thể khi một hệ được quan sát mở về nhiệt động lực học với một hệ không được quan sát* — tuyên bố về hệ con mở trong kiểu cấu hình này, không phải lời khẳng định vật lý cơ bản

phải được viết lại theo cách đó.

- **Đây là một thí nghiệm, một tác giả, một lựa chọn đồng hồ.** Kết quả có độ bất định thống kê khoảng 5% cho mỗi điểm và dựa vào các xấp xỉ trường trung bình và mật độ trung bình hóa. Đồng hồ được chọn và cách coarse-graining là quyết định mô hình hóa có chủ ý, thuộc loại các nhóm khác sẽ muốn kiểm tra trước khi rút kết luận cấu trúc sâu hơn.

Bằng chứng mạnh đến đâu

Đối với điều khiêm tốn mà bài báo thực sự tuyên bố, bằng chứng khá sạch. Hệ thật sự được cô lập tốt trên thang thời gian liên quan, sổ sách entropy khép kín (tổng entropy không đổi trong sai số), đồng hồ nội tại sắp thứ tự dữ liệu đơn điệu gần như mọi nơi, và một phương trình hiệu dụng do tác giả suy ra từ cùng mô hình, với tham số suy từ dữ liệu, tái tạo động lực đo được trong trường hợp hàng rào thấp mà nó được áp dụng. Dữ liệu được công khai. Đây là phép đo thật của một hệ thật, có thể kiểm soát, không phải thí nghiệm tưởng tượng.

Khả năng gánh kết luận của nó tương ứng cũng khiêm tốn. Mọi thứ dựa trên phép tương tự giữa mô hình ngưng tụ rút gọn và vũ trụ học minisuperspace, mà phép tương tự có thể làm sáng tỏ nhưng không chứng minh. Một nền tảng duy nhất, từ một tác giả duy nhất, cho thấy một công thức thời gian nội tại hoạt động là bằng chứng nguyên lý mạnh nhưng là nền tảng yếu cho mọi tuyên bố về cách thời gian vận hành trong tự nhiên. Cách đọc đúng là: giờ đây phương pháp này là thứ bạn có thể *làm* trong phòng thí nghiệm và kiểm tra.

Vì sao nó quan trọng

Tranh luận về bài toán thời gian lâu nay bị kẹt ở cấp hình thức toán học, nơi các đề xuất cạnh tranh khó bị bác bỏ vì tạo ra ít dự đoán cụ thể có thể đo. Biến dù chỉ một góc của tranh luận đó thành một thí nghiệm chạy được — nơi đồng hồ nội tại hoặc sắp thứ tự dữ liệu hoặc không, phương trình hiệu dụng hoặc khớp hoặc không — làm thay đổi bản chất cuộc tranh luận. Nó cho các nhà lý thuyết một “bàn thử” để kiểm tra công cụ của mình.

Đó là đóng góp thật: không phải câu trả lời về thời gian, mà là một **nơi để đặt câu hỏi định lượng**. Các nền tảng nguyên tử lạnh đã từng làm hệ tương tự có kiểm soát cho bức xạ Hawking, vũ trụ giãn nở và phân rã chân không giả; công trình này thêm thời gian quan hệ và mũi tên thời gian vào hộp công cụ đó. Giá trị nằm ở các nghiên cứu tiếp theo nó cho phép — lựa chọn đồng hồ khác, hành vi nảy lại so với kỳ dị, kiểm tra tính thuận nghịch — mỗi thứ giờ có thể là phép đo thay vì chỉ là tính toán.

Tóm tắt gọn

Một nhà vật lý tạo ngưng tụ Bose–Einstein, chia nó bằng một hàng rào quang học mỏng thành nửa được quan sát và nửa không quan sát, rồi dùng entropy chảy giữa hai nửa để xây một “thời gian entropy” nội tại. Chiếc đồng hồ này sắp thứ tự chu trình giãn nở–co lại của nửa được quan sát, chạy nhanh khi entropy trao đổi và dừng khi không có trao đổi; một phương trình hiệu dụng viết theo thời gian nội tại đó tái tạo dữ liệu đo trong trường hợp hàng rào thấp mà tác giả kiểm tra. Cấu hình là một mô hình tương tự của “bài toán thời gian” trong hấp dẫn lượng tử chính tắc: “big bang”, “big crunch” và “miniuniverse” chỉ là nhãn cho một khí bị bẫy có toán học tương tự mô hình vũ trụ học đơn giản. Đây là bệ thử có kiểm soát cho ý tưởng thời gian quan hệ — không phải lời giải bài toán thời gian, không phải tuyên bố về vũ trụ thật, và không phải bằng chứng rằng thời gian “thực chất” là entropy.

Đánh giá thẳng thắn

Bài báo cho thấy gì: Trong một hệ nguyên tử lạnh được cô lập tốt, một đồng hồ nội tại định nghĩa từ trao đổi entropy có thể sắp thứ tự đơn điệu động lực quan sát được, và một phương trình hiệu dụng theo “thời gian entropy” tái tạo tiến hóa đo được trong trường hợp hàng rào thấp được khảo sát.

Điều hợp lý nhưng chưa được chứng minh: Thời gian entropy hoặc thời gian quan hệ là cách mô tả tốt về thời gian trong hấp dẫn lượng tử thật. Thí nghiệm phù hợp với việc nghiêm túc xem xét các cấu trúc này; nó không xác nhận chúng cho tự nhiên.

Điều nó không cho thấy: Bài toán thời gian đã được giải; hấp dẫn lượng tử đã được giải quyết; vũ trụ bắt đầu bằng big bang kiểu này; không-thời gian nổi lên từ nguyên tử; hoặc “thời gian không tồn tại”.

Hạn chế chính: Một nền tảng, một tác giả và một lựa chọn đồng hồ; độ bất định khoảng 5% mỗi điểm; xấp xỉ trường trung bình và mật độ trung bình; và trên hết là phụ thuộc vào phép tương tự giữa ngưng tụ bị bẫy với mô hình vũ trụ học đơn giản hóa.

Một độc giả phổ thông nên tin cậy đến mức nào? Tin cao rằng thí nghiệm đã làm được điều nó báo cáo trên chính hệ của nó. Tin thấp đối với mọi bước nhảy từ mô hình tương tự này sang tuyên bố về thời gian trong vũ trụ thật.

Nguồn

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