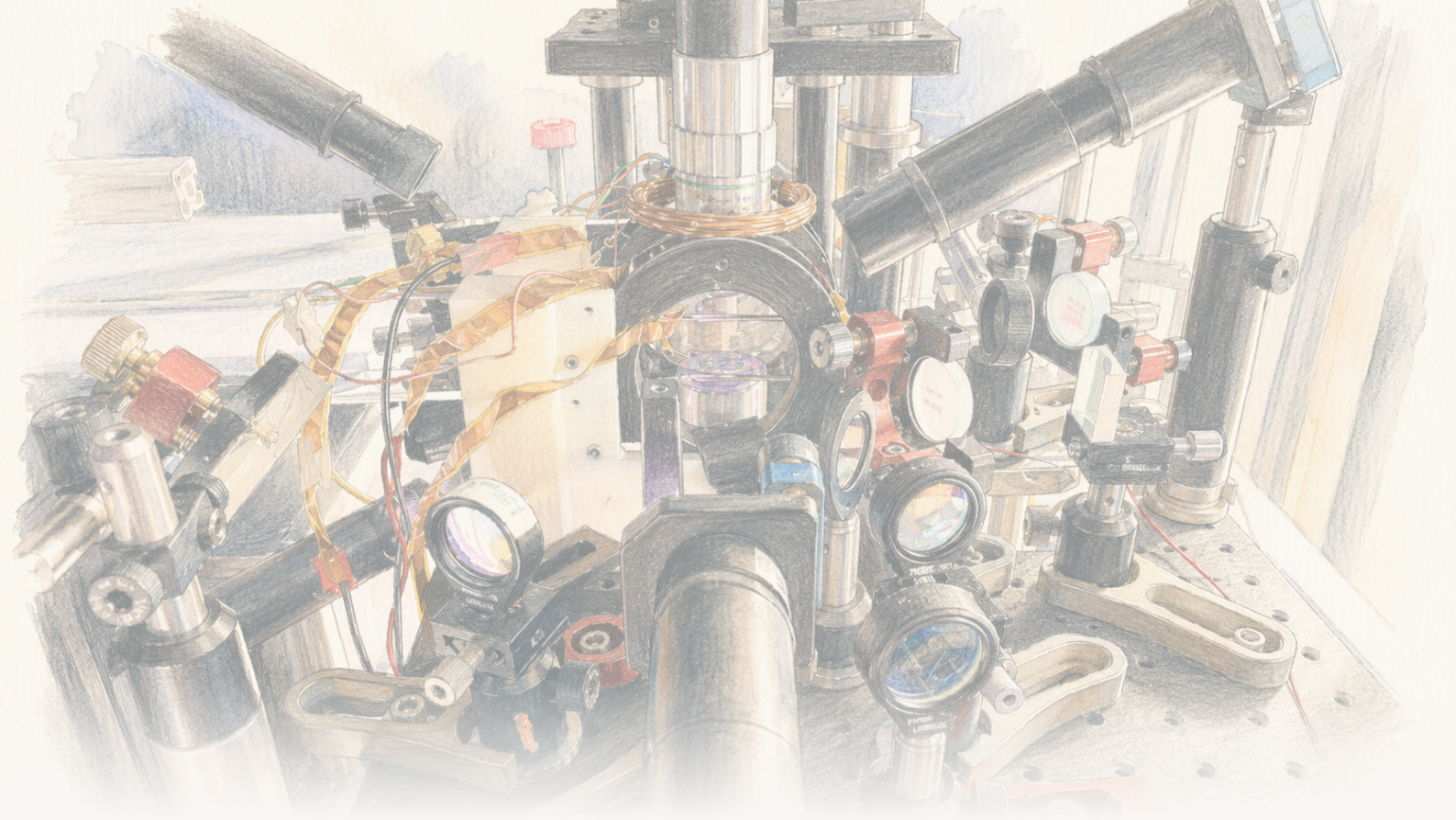

The CLEAN PAPER

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

تجربة بذرات باردة تختبر «مشكلة الزمن» في الجاذبية الكمومية — كنظير مخبري، لا كإجابة

في الجاذبية الكمومية القانونية، لا تحتوي معادلة ويلر-ديويت على ساعة خارجية لترتيب الأحداث: وهذه هي «مشكلة الزمن». تعزل تجربة بمؤلف واحد مكثف بوز-أينشتاين، وتقسمه بحاجز بصري رقيق إلى قطاع غير مرصود وآخر مرصود، ثم تبني ساعة داخلية من الإنتروبيا المتدفقة بينهما. يرتب ذلك «الزمن الإنتروبي» تمدد القطاع المرصود وانكماشه، وتعيد معادلة فعالة إنتاج البيانات المقاسة في حالة الحاجز المنخفض التي فُحصت. إنها منصة مضبوطة لاختبار أفكار الزمن العلاقي: «الانفجار العظيم» و«الانسحاق العظيم» و«الكون المصغر» تسميات نظيرية لغاز محبوس، لا علم كون حقيقياً، ولا يدعي العمل حل مشكلة الزمن أو الجاذبية الكمومية.

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: -1103/1h9j.10 df4k

ساعة مبنية من الإنتروبيا، داخل مصيدة

في الجاذبية الكمومية القانونية توجد معضلة غريبة وعنيدة: المعادلة المركزية لا تحتوي على الزمن. فمعادلة ويلر-ديويت، وهي أقرب ما يكون إلى معادلة شرودنغر للكون كله، تقول ببساطة إن مؤثراً معيناً يعمل على الحالة فيعطي صفراً. لا توجد معلمة خارجية «تدق»، ولا شيء يرتب «قبل» و«بعد» — ومع ذلك نحن نختبر بوضوح مرور الزمن. هذه هي **مشكلة الزمن**، وقد قاومت الحل أكثر من نصف قرن.

لا تحل ورقة بمؤلف واحد في *Research Review Physical* هذه المشكلة. ما تفعله أكثر هدوءاً، وربما أكثر فائدة بطريقتها: تبني نظاماً مخبرياً صغيراً ومحكوماً جيداً يمكن فيه **اختبار** إحدى عائلات الإجابات المقترحة مقابل بيانات حقيقية. يأخذ Barontini Giovanni من جامعة برمنغهام مكثف بوز-أينشتاين — سحابة من ذرات فائقة البرودة تتصرف كجسم كمومي واحد — ويحوّله إلى نظير تجريبي يمكن عليه قياس فكرة الزمن «الداخلي» العلاقي بدلاً من الاكتفاء بالجدال النظري حولها. والحيلة هي بناء ساعة لا من مؤقت خارجي، بل من الإنتروبيا التي يعيد النظام توزيعها داخله.

المسافة بين «نظير مضبوط لمشكلة الزمن» و«الفيزيائيون حلوا الزمن» هي القصة كلها هنا، وهي مسافة كبيرة.

ماذا فعل الباحث؟

يتكون الجهاز من مكثف يضم نحو **24,000 ذرة روبيديوم-87** محتجزة في مصيدة ثنائية القطب ضوئية محافظة، وجُعلت تتذبذب بحيث تهتز سحابة الذرات كلها ذهاباً وإياباً عبر المصيدة. يقسم **حاجز بصري رقيق** — بعرض يقارب 8 ميكرومترات، رُسم بضوء بطول موجي 675 نانومتراً باستخدام جهاز مرايا دقيقة رقمي — المصيدة إلى نصفين. يُراقب أحد النصفين («**القطاع المضيء**»)، بينما لا يُراقب الآخر («**القطاع المظلم**»). وخلال نافذة التجربة البالغة نحو 100 ميلي ثانية، لا يُظهر النظام فقداناً قابلاً للقياس في الجسيمات أو تبديداً للطاقة، لذلك يمكن اعتباره، تقريباً جيداً، نظاماً مغلقاً بهاملتوني لا يعتمد بنفسه على الزمن.

[figure_pair pending]

في اليسار، تنتج مصيدة مغناطيسية-ضوئية سحابة روبيديوم الباردة داخل الخلية الزجاجية: مرحلة تبريد مبكرة في الطريق إلى تحضير المكثف. وفي اليمين يقف Barontini Giovanni بجانب الجهاز البصري. هاتان صورتان للنظام المخبري المستخدم في التجربة، لا صورتين لكون مصغر حقيقي.

عند مراقبة القطاع المضيء بساعة مختبرية عادية — صورة امتصاص كل 2 ميلي ثانية — يحدث شيء ذو طابع موجٍ. تتدفق الذرات عبر الحاجز وينمو القطاع من لا شيء (يسمي Barontini هذه اللحظة «**الانفجار العظيم**»)، ثم يبلغ أقصى امتداد له، ثم ينكمش ويفرغ من جديد إلى الجانب المظلم («**الانسحاق العظيم**»). وبحسب ارتفاع الحاجز، يمكن لهذه الدورة أن تتكرر.

ثم تأتي النقطة الفعلية. الساعة المخبرية خارجية بالنسبة إلى النظام — بالضبط من النوع الذي لا تسمح به صياغة ويلر-ديويت. لذلك يسأل Barontini: هل يمكن **ترتيب تاريخ القطاع المضيء باستخدام كميات داخلية للنظام فقط؟** إجابته ساعة يسميها **الزمن الإنتروبي**، تُقرأ مباشرة من الصور نفسها في ثلاث خطوات بسيطة. أولاً، يستخرج من كل صورة امتصاص أربعة أرقام تخص القطاع المضيء: عدد ذراته، ومركز كتلة ملف كثافته (الذي يؤدي دور «حقل قياسي» نظير)، وعرضه، وإنتروبيته — أي الإنتروبيا لكل ذرة، المحسوبة بطريقة معيارية، مضروبة في عدد الذرات. ثانياً، عندما تعبر الذرات الحاجز ترتفع هذه الإنتروبيا وتنخفض. ثالثاً، تتبع الساعة تدرج الإنتروبيا على طول مسار مركز الكتلة المقاس، وتحسب مقدار كل إزاحة بدلاً من اتجاهها. عندما ترتفع أو تنخفض الإنتروبيا ومركز الكتلة معاً، تتقدم الساعة في كل خطوة حتى عندما تعكس السحابة اتجاهها. وفي البيانات يعطي هذا ترتيباً واحداً من «الانفجار العظيم» للقطاع إلى «الانسحاق العظيم» في كل مكان تقريباً، مع بعض التموجات الصغيرة فقط حين تجعل دقة أخذ العينات الخشنة التغيرين غير متوافقين.

وأخيراً، يشتق معادلة فعالة سماها «**معادلة شرودنغر بالزمن الإنتروبي**» — معادلة تطور للقطاع المضيء مكتوبة بدلالة هذه الساعة الداخلية بدلاً من الساعة الخارجية — ثم يحلها عددياً ليرى ما إذا كانت تعيد إنتاج ما سجلته الكاميرا فعلياً.

ماذا وجد؟

ثلاث نتائج، بترتيب تصاعدي في مستوى الطموح.

- **الساعة الداخلية تعمل كوسيلة ترتيب.** ينمو الزمن الإنتروبي رتيباً تقريباً في كل مكان، وتتحدد سرعته بمدى سرعة انتقال الإنتروبيا عبر الحاجز: فهو يجري أسرع عندما يجري تبادل الإنتروبيا، **ويتوقف تماماً عندما لا يحدث أي تبادل.** وفي النظام القابل للعكس ذي الحاجز المنخفض، لا يمر أي زمن داخلي على الإطلاق بين انسحاق عظيم والانفجار العظيم التالي — لأنه لا يحدث تبادل للإنتروبيا خلال تلك الفترة — رغم أن الساعة المخبرية تستمر في التقدم. وعبر مجموعة البيانات كلها ظلت الإنتروبيا الكلية للقطاعين معاً ثابتة ضمن أشرطة الخطأ، كما ينبغي لنظام مغلق.
- **الأنظمة المختلفة تعطي «أزمنة» مختلفة.** ارفع الحاجز فتقل مبادلة الإنتروبيا، ومن ثم تسير الساعة الداخلية أبطأ. وإذا وصل الحاجز إلى حد لا يكاد فيه القطاعان يتواصلان، يستقر القطاع المضيء نحو ما تسميه الورقة «**الموت الحراري**»: حالة ساكنة يتوقف فيها الزمن الإنتروبي ببساطة.
- **معادلة فعالة تعيد إنتاج البيانات.** عندما تُعطى معادلة شرودنغر بالزمن الإنتروبي المعلمات التجريبية، فإنها تستعيد عددياً تطور عرض السحابة المقاس، وتبلغ الورقة عن توافق ممتاز في حالة الحاجز المنخفض (حيث يهيمن الحد المدفوع بالإنتروبيا)؛ والمقارنة العددية الصريحة أُجريت لهذه الحالة.

ما «مشكلة الزمن»، وما «الزمن الإنتروبي» هنا؟

إحدى خارجي. زمن متغير على تحتوي لا (ويلر-ديويت) القانونية الكمومية الجاذبية في الرئيسية المعادلة أن هي **الزمن مشكلة** الصعوبات ومن إليها. بالنسبة آخر شيء كل ووصف «ساعة» إلى النظام داخل فيزيائية كمية تحويل :علاقية الشائعة الاستجابات إلى ثم الأمام إلى المرشحة الساعة تسير قد التمدد بعد ينكمش نظام ففي — رتيبة دائماً ليست للساعة الطبيعية الاختيارات أن المتكررة النهاية. إلى البداية من بوضوح واحد اتجاه وسم تستطيع فلا — الخلف

الزمن الإنتروبي هو طريقة Barontini لتجاوز ذلك. فبدلاً من قراءة متغير يشبه الموضع، يبني الساعة من الإنتروبيا المتبادلة بين القطاعين المرصود وغير المرصود، بطريقة مصممة كي لا تعكس اتجاهها. وهي قريبة في الروح من أفكار أقدم عن «الزمن الحراري»، لكنها هنا معرّفة إجرائياً من تدفق إنتروبي قابل للقياس، لا من بنية رياضية مجردة — وهذا بالضبط ما يجعلها قابلة للاختبار على جهاز حقيقي.

والأهم أن الكلمات الكونية — «الانفجار العظيم»، «الانسحاق العظيم»، «عامل المقياس»، «الحقل القياسي»، «الكون المصغر» — هي **تسميات لنظير تجريبي.** إنها تسمي خصائص غاز من الذرات محبوس في مصيدة تصادف أنها متشابهة بنيوياً مع معادلات نماذج كونية مبسطة. وليست عبارات عن الكون الحقيقي.

ما الذي لا تثبته هذه الدراسة؟

هنا تصبح الدقة أهم ما يكون، لأن المفردات تشجع على المبالغة.

- **إنها لا تحل مشكلة الزمن، ولا تدعي ذلك.** صياغة الورقة نفسها تقول إنها «تؤسس إطاراً تجريبياً مضبوطاً يمكن فيه اختبار بناءات الزمن العلاقي كمياً». منصة الاختبار ليست مبرهنة. وما إذا كان الزمن العلاقي أو الإنتروبي هو الوصف الصحيح للزمن في الجاذبية الكمومية يبقى مفتوحاً تماماً كما كان من قبل.
- **إنها نظير تجريبي، لا الكون.** لا تجري هنا ملاحظة علم كون. ما يجري رصده هو مكثف بوز-أينشتاين في مصيدة، ووصفه المختزل متشابه رياضياً مع نموذج كوني مبسط («فضاء مصغر»). التشابه هو غرض التجربة؛ وهو أيضاً حدها. لا شيء هنا يثبت أن الكون المبكر شهد انفجاراً عظيماً من هذا النوع، أو أن الزمكان مكوّن من ذرات، أو أن «الزمن غير موجود».
- **ولا تثبت أن الزمن هو «في الحقيقة» إنتروبيا.** الساعة الإنتروبية أحد أنظمة الترتيب المصممة التي تعمل جيداً في هذا النظام. وتشير الورقة إلى صلة مفاهيمية بفرضية الزمن الحراري لكنها تترك صراحةً مفتوحاً حتى ما إذا كان الاثنان يتطابقان. عبارة «ساعة داخلية مبنية من الإنتروبيا تستطيع ترتيب هذه التجربة» أضيق بكثير من «الزمن هو الإنتروبيا».
- **المعادلة الفعالة نتيجة نمذجة، لا إعادة كتابة لميكانيكا الكم.** تختزل معادلة شرودنغر بالزمن الإنتروبي المشتقة إلى ميكانيكا الكم العادية عندما يكون تدفق الإنتروبيا بطيئاً، ولا تكون تماماً النظرية الوحدوية المعتادة إلا عندما لا تتدفق الإنتروبيا إطلاقاً. وتعرضها الورقة باعتبارها أعم من المعادلة القياسية تحديداً عندما يكون النظام المرصود مفتوحاً ترموديناميكياً على نظام غير مرصود — وهذا قول عن الأنظمة الفرعية المفتوحة في إعدادات من هذا النوع، لا ادعاء بأن الفيزياء الأساسية يجب أن تُعاد كتابتها بهذه الطريقة.
- **إنها تجربة واحدة، ومؤلف واحد، واختيار واحد للساعة.** تحمل النتائج عدم يقين إحصائياً يقارب 5% لكل نقطة وتعتمد على تقريبات المجال المتوسط والكثافة المتوسطة. الساعة المختارة وطريقة التجميع الخشن قرارات نمذجة مقصودة، ومن النوع الذي سترغب مجموعات أخرى في اختباره قبل استخلاص استنتاجات بنيوية.

ما مدى قوة الأدلة؟

بالنسبة إلى الادعاء المتواضع الذي تقدمه الورقة فعلاً، الأدلة نظيفة. النظام معزول جيداً بالفعل على المقياس الزمني المعني، وحساب الإنتروبيا يغلق الميزانية (الإنتروبيا الكلية ثابتة ضمن الخطأ)، والساعة الداخلية ترتب البيانات رتيباً تقريباً في كل مكان، ومعادلة فعالة اشتقها المؤلف من النموذج نفسه بمعلمات مستنتجة من البيانات تعيد إنتاج الديناميكيات المقاسة في حالة الحاجز المنخفض التي طُبقت عليها. والبيانات متاحة علناً. هذا قياس حقيقي لنظام حقيقي يمكن التحكم فيه، لا تجربة فكرية.

أما الحمل الذي يستطيع هذا الدليل تحمله فمتواضع بالقدر نفسه. فكل شيء يعتمد على التشابه بين النموذج المختزل للمكثف وعلم الكون في الفضاء المصغر، والتشبيهات تنير لكنها لا تثبت. أن تُظهر منصة واحدة، من مؤلف واحد، أن وصفة واحدة للزمن الداخلي تعمل هو برهان مبدأ قوي وأساس ضعيف لأي قول عن كيفية سلوك الزمن في الطبيعة. القراءة الصحيحة هي: أصبحت هذه الطريقة شيئاً تستطيع فعله في المختبر وفحصه.

لماذا يهم هذا؟

ظلت مناقشات مشكلة الزمن طويلاً عالقة في مستوى الصياغة الرياضية، حيث يصعب تكذيب المقترحات المتنافسة لأنها تقدم تنبؤات قليلة ملموسة قابلة للقياس. تحويل حتى زاوية صغيرة من هذا النقاش إلى تجربة يمكن تشغيلها — بحيث إما ترتب ساعة داخلية بياناتك أو لا، وإما تلائم معادلة فعالة القياسات أو لا — يغير طبيعة النقاش. إنه يعطي المنظرين منضدة اختبار لأدواتهم.

وهذه هي المساهمة الحقيقية: ليست إجابة عن الزمن، بل **مكاناً لطرح السؤال كمياً.** فقد استُخدمت منصات الذرات الباردة بالفعل كنظائر

يمكن التحكم بها لإشعاع هوكينغ، والأكوان المتمددة، واضمحلال الفراغ الكاذب؛ وهذه الدراسة تضيف الزمن العلاقي وسهم الزمن إلى صندوق الأدوات. والقيمة تكمن في الدراسات اللاحقة التي تتيحها — خيارات ساعات مختلفة، سلوك ارتدادي مقابل سلوك مفرد، واختبارات للعكسية — بحيث يصبح كل منها قياساً لا مجرد حساب.

الخلاصة الواضحة

بنى فيزيائي مكثف بوز-أينشتاين، وقسمه بحاجز بصري رقيق إلى نصف مرصود وآخر غير مرصود، واستخدم الإنتروبيا المتدفقة بين النصفين لبناء «زمن إنتروبي» داخلي. ترتب هذه الساعة دورة تمدد النصف المرصود ثم انكماشه، فتجري بسرعة حين تتبادل الإنتروبيا وتتوقف حين لا يحدث تبادل، كما تعيد معادلة فعالة مكتوبة بهذا الزمن الداخلي إنتاج البيانات المقاسة في حالة الحاجز المنخفض التي فحصها المؤلف. الإعداد نظير لـ«مشكلة الزمن» في الجاذبية الكمومية القانونية: «الانفجار العظيم» و«الانسحاق العظيم» و«الكون المصغر» تسميات لغاز محبوس يشبه رياضياً نموذجاً كونياً مبسطاً. إنها منصة مضبوطة لاختبار أفكار الزمن العلاقي — لا حلاً لمشكلة الزمن، ولا ادعاء عن الكون الحقيقي، ولا دليلاً على أن الزمن «في الحقيقة» إنتروبيا.

مراجعة بلا تهويل

ما الذي تُظهره الورقة: في نظام واحد معزول جيداً من الذرات الباردة، تستطيع ساعة داخلية معرّفة من تبادل الإنتروبيا أن ترتب الديناميكيات المرصودة ترتيباً رتيباً، كما تعيد معادلة فعالة «بالزمن الإنتروبي» إنتاج التطور المقاس في حالة الحاجز المنخفض التي دُرست.

ما هو معقول لكنه غير مُظهر: أن يكون الزمن الإنتروبي أو العلاقي وصفاً جيداً للزمن في الجاذبية الكمومية الحقيقية. التجربة متوافقة مع أخذ هذه البنى بجدية، لكنها لا تؤكدها بوصفها وصفاً للطبيعة.

ما الذي لا تُظهره: أن مشكلة الزمن قد حُلت، أو أن الجاذبية الكمومية حُسمت، أو أن الكون بدأ بانفجار عظيم من هذا النوع، أو أن الزمكان ناشئ من الذرات، أو أن «الزمن غير موجود».

القيود الرئيسية: منصة واحدة، ومؤلف واحد، واختيار واحد للساعة، عدم يقين يقارب 5% لكل نقطة، تقريبات المجال المتوسط والكثافة المتوسطة، وفوق كل شيء الاعتماد على تشابه بين مكثف محبوس ونموذج كوني مبسط.

ما مقدار الثقة المناسبة للقارئ العام؟ ثقة عالية بأن التجربة فعلت ما تبلغ عنه داخل نظامها نفسه. وثقة منخفضة في أي قفزة من هذا النظير إلى ادعاءات عن الزمن في الكون الحقيقي.

المصادر

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