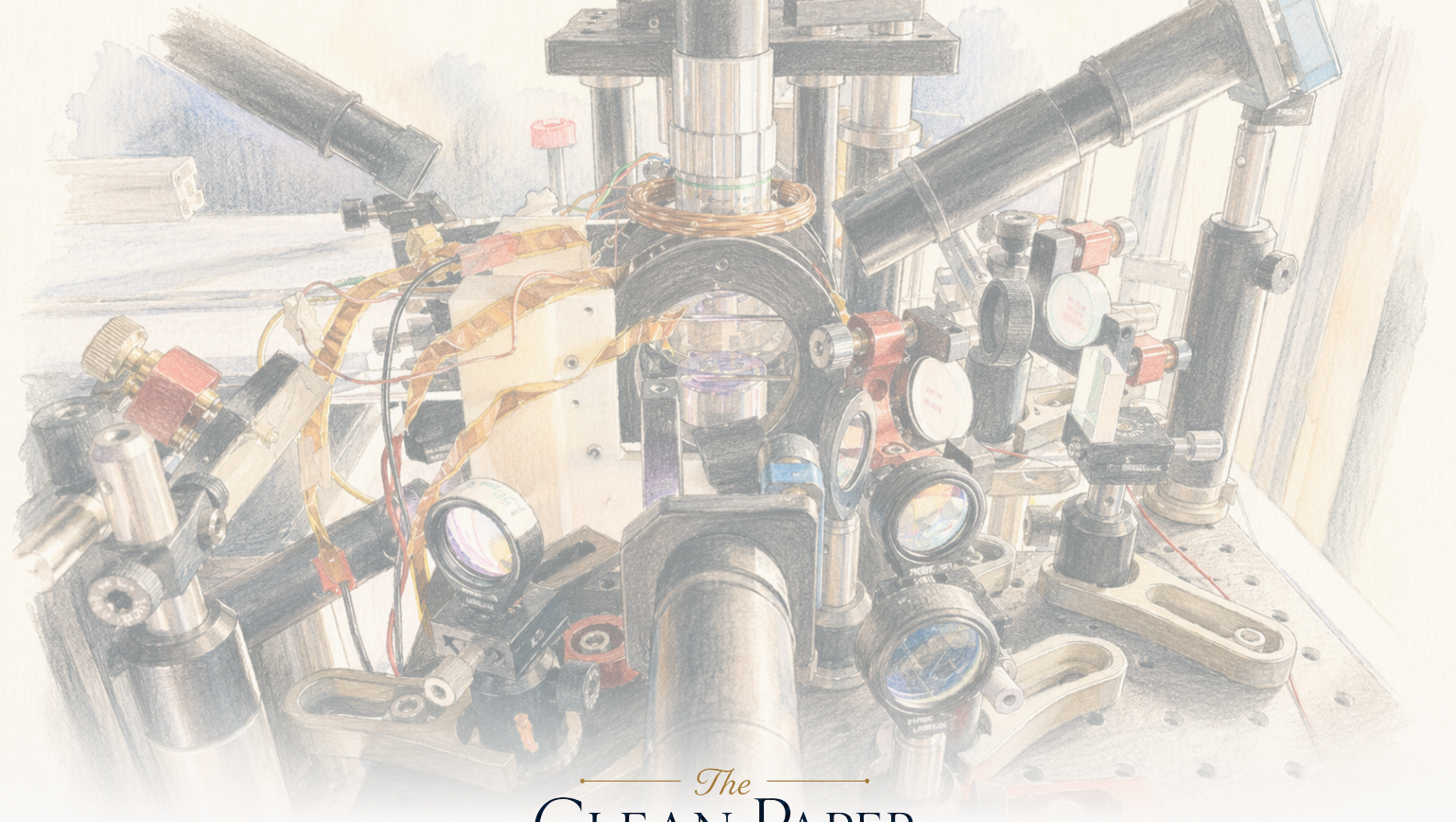

The
CLEAN PAPER

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

Une expérience d'atomes froids teste le « problème du temps » de la gravité quantique — comme analogie de laboratoire, pas comme réponse

Dans la gravité quantique canonique, l'équation de Wheeler-DeWitt ne comporte aucune horloge externe pour ordonner les événements : c'est le « problème du temps ». Une expérience menée par un seul auteur isole un condensat de Bose-Einstein, le divise au moyen d'une fine barrière optique en un secteur non observé et un secteur observé, puis construit une horloge interne à partir de l'entropie qui circule entre les deux. Ce « temps entropique » ordonne l'expansion puis le ré-effondrement du secteur observé, et une équation effective reproduit les données mesurées dans le cas de faible barrière étudié. Il s'agit d'un banc d'essai contrôlé pour les idées de temps relationnel : le « big bang », le « big crunch » et le « mini-univers » sont des étiquettes analogiques appliquées à un gaz piégé, pas de la cosmologie réelle, et l'étude ne prétend résoudre ni le problème du temps ni la gravité quantique.

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

Une horloge construite avec de l'entropie, à l'intérieur d'un piège

La gravité quantique canonique contient une énigme étrange et tenace : son équation centrale ne comporte pas de temps. L'équation de Wheeler-DeWitt, ce qui se rapproche le plus d'une équation de Schrödinger pour l'Univers entier, dit simplement qu'un certain opérateur appliqué à l'état donne zéro. Aucun paramètre externe ne s'écoule, rien n'ordonne un « avant » et un « après » — alors que nous faisons manifestement l'expérience du passage du temps. C'est le **problème du temps**, qui résiste depuis plus d'un demi-siècle.

Un article à auteur unique publié dans *Physical Review Research* ne le résout pas. Il fait quelque chose de plus discret et, à sa manière, de plus utile : il construit un petit système de laboratoire bien contrôlé dans lequel une famille de réponses proposées peut être **confrontée à de vraies données**. Giovanni Barontini, de l'université de Birmingham, prend un condensat de Bose-Einstein — un nuage d'atomes ultrafroids se comportant comme un seul objet quantique — et le transforme en analogie expérimentale permettant de mesurer, plutôt que de seulement discuter, l'idée d'un temps « interne » et relationnel. L'astuce consiste à construire une horloge non pas avec un chronomètre extérieur, mais avec l'entropie que le système redistribue en son propre sein.

Toute l'histoire tient dans la distance entre « une analogie contrôlée du problème du temps » et « les physiciens ont résolu le temps ». Cette distance est immense.

Ce qu'a fait le chercheur

L'appareil contient un condensat d'environ **24 000 atomes de rubidium-87**, maintenu dans un piège dipolaire optique conservatif et mis en oscillation — le nuage atomique entier va et vient dans le piège. Une **fine barrière optique**, large d'environ 8 micromètres et dessinée avec une lumière de 675 nm à l'aide d'un dispositif numérique à micromiroirs, divise le piège en deux moitiés. L'une est observée — le « **secteur lumineux** » — et l'autre ne l'est pas — le « **secteur sombre** ». Pendant la fenêtre expérimentale d'environ 100 millisecondes, le système ne présente aucune perte de particules ni dissipation mesurable. Il constitue donc, avec une bonne approximation, un système fermé dont le hamiltonien ne dépend pas lui-même du temps.

[figure_pair pending]

À gauche, le piège magnéto-optique produit le nuage froid d'atomes de rubidium dans la cellule de verre : une étape précoce du refroidissement menant à la préparation du condensat. À droite, Giovanni Barontini se tient à côté de l'appareillage optique. Il s'agit de photographies du système de laboratoire utilisé pour l'expérience, pas d'images d'un véritable univers miniature.

Observé avec une horloge de laboratoire ordinaire — une image par absorption toutes les 2 ms — le secteur lumineux produit un comportement évocateur. Des atomes traversent la barrière, et le secteur naît de rien — Barontini nomme ce moment le « **big bang** » —, atteint une extension maxi-

male, puis se contracte et se vide de nouveau dans le côté sombre — le « **big crunch** ». Selon la hauteur de la barrière, le cycle peut se répéter.

Vient alors le véritable point de l'expérience. L'horloge de laboratoire est *extérieure* au système — exactement le type de chose que le cadre de Wheeler-DeWitt interdit. Barontini demande donc si l'histoire du secteur lumineux peut être **ordonnée uniquement au moyen de grandeurs internes au système**. Sa réponse est une horloge qu'il appelle **temps entropique**, lue directement dans les mêmes images en trois étapes simples. Premièrement, il extrait de chaque image par absorption quatre nombres pour le secteur lumineux : le nombre d'atomes, le centre de masse du profil de densité — qui joue le rôle d'un « champ scalaire » analogique —, sa largeur et son entropie, c'est-à-dire l'entropie par atome obtenue par une méthode standard, multipliée par le nombre d'atomes. Deuxièmement, lorsque les atomes traversent la barrière, cette entropie augmente et diminue. Troisièmement, l'horloge suit le gradient d'entropie le long de la trajectoire mesurée du centre de masse, en comptant la valeur absolue de chaque déplacement plutôt que sa direction. Lorsque l'entropie et le centre de masse augmentent ou diminuent ensemble, chaque étape fait avancer l'horloge, même lorsque le nuage inverse son mouvement. Dans les données, cela produit presque partout un ordre unique allant du « big bang » au « big crunch » du secteur, avec seulement quelques petites oscillations lorsque l'échantillonnage grossier fait diverger les deux changements.

Enfin, le chercheur dérive une **« équation de Schrödinger en temps entropique »** effective — une équation d'évolution du secteur lumineux écrite en fonction de cette horloge interne plutôt que du temps externe — puis la résout numériquement pour vérifier si elle reproduit ce que la caméra a effectivement enregistré.

Ce qu'il a trouvé

Trois résultats, par ordre d'ambition croissante.

- **L'horloge interne fonctionne comme principe d'ordonnancement.** Le temps entropique augmente presque partout de façon monotone, et sa vitesse dépend de la rapidité avec laquelle l'entropie traverse la barrière : il s'écoule plus vite lorsque de l'entropie est échangée et **s'arrête entièrement lorsqu'il n'y en a pas**. Dans le régime réversible à faible barrière, *aucun temps interne ne passe* entre un big crunch et le big bang suivant — parce qu'aucune entropie n'est échangée pendant cet intervalle — alors même que l'horloge du laboratoire continue de tourner. Sur l'ensemble des données, l'entropie totale des deux secteurs réunis est restée constante dans les barres d'erreur, comme l'exige un système fermé.
- **Des régimes différents produisent des « temps » différents.** Lorsque l'on augmente la barrière, l'échange d'entropie diminue et l'horloge interne ralentit. Lorsqu'on atteint le point où les deux secteurs communiquent à peine, le secteur lumineux tend vers ce que l'article appelle une « **mort thermique** » : un état stationnaire dans lequel le temps entropique s'arrête simplement.
- **Une équation effective reproduit les données.** Alimentée avec les paramètres expérimentaux, l'équation de Schrödinger en temps entropique reproduit numériquement l'évolution mesurée de la largeur du nuage. L'article rapporte un excellent accord pour le cas de faible barrière — celui

où le terme entraîné par l'entropie domine — et la comparaison numérique explicite porte sur ce cas.

Ce que sont ici le « problème du temps » et le « temps entropique »

Le **problème du temps** vient du fait que l'équation maîtresse de la gravité quantique canonique — Wheeler-DeWitt — ne contient aucune variable de temps externe. Une réponse fréquente est *relationnelle* : on élève une grandeur physique située à l'intérieur du système au rang d'« horloge », puis on décrit tout le reste relativement à elle. Une difficulté récurrente est que les candidats naturels ne sont pas toujours monotones : dans un système qui se ré-effondre, l'horloge candidate avance puis recule, et ne peut donc pas étiqueter proprement une direction unique du début à la fin.

Le **temps entropique** est la manière dont Barontini contourne cette difficulté. Au lieu de lire une variable de type position, il construit l'horloge à partir de l'*entropie* échangée entre le secteur observé et le secteur non observé, de façon à ce qu'elle ne s'inverse pas. L'idée est proche, dans son esprit, d'anciennes propositions de « temps thermique », mais elle est ici définie opérationnellement à partir d'un flux d'entropie mesurable plutôt que d'une structure mathématique abstraite — précisément ce qui la rend testable sur un appareil réel.

Point crucial : les mots cosmologiques — « big bang », « big crunch », « facteur d'échelle », « champ scalaire », « mini-univers » — sont des **étiquettes analogiques**. Ils désignent des caractéristiques d'un gaz d'atomes piégé dont les équations présentent une *similarité structurelle* avec celles de modèles cosmologiques simplifiés. Ils ne constituent pas des affirmations sur l'Univers réel.

Ce que cela ne démontre pas

C'est ici que la prudence compte le plus, car le vocabulaire invite à l'exagération.

- **Cela ne résout pas le problème du temps et ne prétend pas le faire.** Selon la formulation de l'article, le travail « établit un cadre expérimental contrôlé dans lequel des constructions de temps relationnel peuvent être testées quantitativement ». Un banc d'essai n'est pas un théorème. La question de savoir si le temps relationnel ou entropique constitue la *bonne* description du temps en gravité quantique reste exactement aussi ouverte qu'auparavant.
- **C'est une analogie, pas l'Univers.** Aucune cosmologie n'est observée. Ce qui est observé est un condensat de Bose-Einstein dans un piège, dont la description réduite est *mathématiquement semblable* à un modèle cosmologique simplifié, dit de minisuperspace. Cette similitude est la raison d'être de l'expérience ; elle en est aussi la limite. Rien ici ne montre que l'Univers primordial a connu un big bang de ce type, que l'espace-temps est constitué d'atomes ou que « le temps n'existe pas ».
- **Cela ne montre pas que le temps est « réellement » de l'entropie.** L'horloge entropique est un ordre construit qui fonctionne bien dans ce système. L'article relève une parenté conceptuelle avec l'hypothèse du temps thermique, mais laisse explicitement ouverte la question de savoir si les deux coïncident même. « Une horloge interne construite à partir de l'entropie peut ordonner

cette expérience » est une affirmation bien plus étroite que « le temps est l'entropie ».

- **L'équation effective est un résultat de modélisation, pas une réécriture de la mécanique quantique.** L'équation de Schrödinger en temps entropique dérivée se réduit à la mécanique quantique ordinaire lorsque le flux d'entropie est lent, et n'est strictement la théorie unitaire habituelle que lorsqu'aucune entropie ne circule. L'article la présente comme plus générale que l'équation standard *précisément lorsqu'un système observé est thermodynamiquement ouvert sur un système non observé* — une affirmation sur des sous-systèmes ouverts de ce type, pas une déclaration selon laquelle la physique fondamentale doit être réécrite ainsi.
- **Il s'agit d'une expérience, d'un auteur et d'un choix d'horloge.** Les résultats comportent environ 5 % d'incertitude statistique par point et reposent sur des approximations de champ moyen et de densité moyennée. Le choix de l'horloge et la description à gros grains sont des décisions de modélisation délibérées, que d'autres groupes devront éprouver avant d'en tirer des conclusions structurelles.

Quelle est la solidité des preuves ?

Pour l'affirmation modeste réellement avancée, les preuves sont nettes. Le système est effectivement bien isolé sur l'échelle de temps pertinente ; la comptabilité de l'entropie se ferme — l'entropie totale reste constante dans les barres d'erreur ; l'horloge interne ordonne les données de façon monotone presque partout ; et une équation effective, dérivée par l'auteur à partir du même modèle avec des paramètres inférés des données, reproduit la dynamique mesurée dans le cas de faible barrière auquel elle a été appliquée. Les données sont librement accessibles. Il s'agit d'une mesure réelle d'un système réel et contrôlable, pas d'une expérience de pensée.

La charge que ce résultat peut porter est tout aussi modeste. Tout repose sur l'analogie entre le modèle réduit du condensat et la cosmologie de minisuperspace ; les analogies éclairent sans démontrer. Qu'une seule plateforme, étudiée par un seul auteur, montre qu'une recette de temps interne fonctionne constitue une preuve de principe solide, mais une base faible pour toute affirmation sur le comportement du temps dans la nature. La bonne lecture est la suivante : la méthode est désormais quelque chose que l'on peut *faire* en laboratoire, puis vérifier.

Pourquoi c'est important

Les débats sur le problème du temps sont longtemps restés bloqués au niveau du formalisme, où les propositions concurrentes sont difficiles à réfuter parce qu'elles produisent peu de prédictions concrètes et mesurables. Transformer ne serait-ce qu'un coin de ce débat en une expérience réalisable — où une horloge interne ordonne les données ou ne les ordonne pas, où une équation effective s'ajuste ou non — change la nature de la discussion. Cela donne aux théoriciens un banc sur lequel tester leurs outils.

Voilà la véritable contribution : non pas une réponse sur le temps, mais un **lieu où poser quantita-**

tivement la question. Les plateformes d'atomes froids ont déjà servi d'analogies contrôlables pour le rayonnement de Hawking, les univers en expansion et la désintégration du faux vide ; cette étude ajoute le temps relationnel et la flèche du temps à cette boîte à outils. Sa valeur réside dans les prolongements qu'elle permet — autres choix d'horloge, comportements avec rebond ou singularité, tests de réversibilité — désormais sous forme de mesures et non plus seulement de calculs.

Résumé clair

Un physicien a construit un condensat de Bose-Einstein, l'a divisé au moyen d'une fine barrière optique en une moitié observée et une moitié non observée, puis a utilisé l'entropie circulant entre les deux pour construire un « temps entropique » interne. Cette horloge ordonne le cycle d'expansion et de ré-effondrement de la moitié observée : elle avance vite lorsque de l'entropie est échangée et s'arrête lorsqu'il n'y en a pas. Une équation effective écrite dans ce temps interne reproduit les données mesurées dans le cas de faible barrière étudié par l'auteur. Le montage est une analogie du « problème du temps » en gravité quantique canonique : le « big bang », le « big crunch » et le « mini-univers » sont des noms donnés à un gaz piégé mathématiquement semblable à un modèle cosmologique simplifié. Il s'agit d'un banc d'essai contrôlé pour les idées de temps relationnel — pas d'une solution au problème du temps, pas d'une affirmation sur l'Univers réel et pas d'une preuve que le temps est « réellement » de l'entropie.

Mise au point

Ce que montre l'article : Dans un système d'atomes froids bien isolé, une horloge interne définie à partir de l'échange d'entropie peut ordonner de façon monotone la dynamique observée, et une équation effective en « temps entropique » reproduit l'évolution mesurée dans le cas de faible barrière étudié.

Ce qui est plausible mais non démontré : Que le temps entropique ou relationnel fournisse une bonne description du temps dans la gravité quantique réelle. L'expérience justifie de prendre ces constructions au sérieux ; elle ne les confirme pas comme description de la nature.

Ce que l'étude ne montre pas : Que le problème du temps est résolu ; que la gravité quantique est comprise ; que l'Univers a commencé par un big bang de ce type ; que l'espace-temps émerge d'atomes ; ou que « le temps n'existe pas ».

Principales limites : Une seule plateforme, un seul auteur et un seul choix d'horloge ; environ 5 % d'incertitude par point ; approximations de champ moyen et de densité moyennée ; et, surtout, dépendance à une analogie entre un condensat piégé et un modèle cosmologique simplifié.

Quel niveau de confiance un lecteur non spécialiste devrait-il avoir ? Une forte confiance dans le fait que l'expérience a produit ce qu'elle rapporte dans son propre système. Une faible confiance dans tout saut de cette analogie vers des affirmations sur le temps dans l'Univers réel.

Sources

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