



Ένα πείραμα με ψυχρά άτομα δοκιμάζει το «πρόβλημα του χρόνου» της κβαντικής βαρύτητας — ως εργαστηριακό ανάλογο, όχι ως απάντηση

Στην κανονική κβαντική βαρύτητα, η εξίσωση Wheeler-DeWitt δεν διαθέτει εξωτερικό ρολόι για να βάλει τα γεγονότα σε σειρά: αυτό είναι το «πρόβλημα του χρόνου». Ένα πείραμα ενός μόνο συγγραφέα απομονώνει ένα συμπύκνωμα Bose-Einstein, το χωρίζει με ένα λεπτό οπτικό φράγμα σε έναν μη παρατηρούμενο και έναν παρατηρούμενο τομέα και κατασκευάζει ένα εσωτερικό ρολόι από την εντροπία που ρέει ανάμεσά τους. Αυτός ο «εντροπικός χρόνος» βάζει σε σειρά τη διαστολή και την επανασυστολή του παρατηρούμενου τομέα, ενώ μια αποτελεσματική εξίσωση αναπαράγει τα μετρούμενα δεδομένα στην εξετασθείσα περίπτωση χαμηλού φράγματος. Πρόκειται για ένα ελεγχόμενο πεδίο δοκιμών για ιδέες σχεσιακού χρόνου: τα «big bang», «big crunch» και «μικροσύμπαν» είναι αναλογικές ετικέτες για ένα παγιδευμένο αέριο, όχι πραγματική κοσμολογία, και η εργασία δεν ισχυρίζεται ότι λύνει το πρόβλημα του χρόνου ή την κβαντική βαρύτητα.

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

Ένα ρολόι χτισμένο από εντροπία, μέσα σε μια παγίδα

Στην κανονική κβαντική βαρύτητα υπάρχει ένα παράξενο και επίμονο αίνιγμα: η κεντρική εξίσωση δεν περιέχει χρόνο. Η εξίσωση Wheeler-DeWitt, το πλησιέστερο ανάλογο μιας εξίσωσης Schrödinger για ολόκληρο το σύμπαν, λέει απλώς ότι ένας συγκεκριμένος τελεστής, όταν δρα πάνω στην κατάσταση, δίνει μηδέν. Δεν υπάρχει εξωτερική παράμετρος που να «χτυπά» σαν ρολόι, τίποτα που να βάζει σε σειρά το «πριν» και το «μετά» — κι όμως εμείς βιώνουμε ολοφάνερα το πέρασμα του χρόνου. Αυτό είναι το **πρόβλημα του χρόνου**, και αντιστέκεται σε οριστική λύση εδώ και περισσότερο από μισό αιώνα.

Μια εργασία ενός μόνο συγγραφέα στο *Physical Review Research* δεν το λύνει. Κάνει κάτι πιο περιορισμένο και, με τον δικό του τρόπο, πιο χρήσιμο: κατασκευάζει ένα μικρό, καλά ελεγχόμενο εργαστηριακό σύστημα στο οποίο μια οικογένεια προτεινόμενων απαντήσεων μπορεί να **ελεγχθεί με πραγματικά δεδομένα**. Ο Giovanni Barontini, στο University of Birmingham, παίρνει ένα συμπύκνωμα Bose-Einstein — ένα νέφος υπέρψυχρων ατόμων που συμπεριφέρεται ως ενιαίο κβαντικό αντικείμενο — και το μετατρέπει σε ένα ανάλογο σύστημα πάνω στο οποίο η ιδέα ενός «εσωτερικού», σχεσιακού χρόνου μπορεί να μετρηθεί αντί απλώς να συζητηθεί θεωρητικά. Το τέχνασμα είναι να φτιαχτεί ένα ρολόι όχι από ένα εξωτερικό χρονόμετρο, αλλά από την εντροπία που το ίδιο το σύστημα ανακατανέμει στο εσωτερικό του.

Η απόσταση ανάμεσα σε «ένα ελεγχόμενο ανάλογο του προβλήματος του χρόνου» και «οι φυσικοί έλυσαν τον χρόνο» είναι ολόκληρη η ουσία αυτής της ιστορίας — και η απόσταση είναι μεγάλη.

Τι έκανε ο ερευνητής

Η διάταξη αποτελείται από ένα συμπύκνωμα περίπου **24.000 ατόμων ρουβιδίου-87**, συγκρατημένων σε μια συντηρητική οπτική παγίδα διπόλου και εξαναγκασμένων να ταλαντώνονται — ολόκληρο το νέφος ατόμων κινείται μπρος-πίσω μέσα στην παγίδα. Ένα **λεπτό οπτικό φράγμα** — πλάτους περίπου 8 μικρομέτρων, «ζωγραφισμένο» με φως 675 nm μέσω μιας συσκευής ψηφιακών μικροκατόπτρων — χωρίζει την παγίδα σε δύο μισά. Το ένα μισό παρακολουθείται (ο «**φωτεινός τομέας**»), ενώ το άλλο όχι (ο «**σκοτεινός τομέας**»). Στο παράθυρο των περίπου 100 χιλιοστών του δευτερολέπτου του πειράματος, το σύστημα δεν παρουσιάζει μετρήσιμη απώλεια σωματιδίων ή διάχυση ενέργειας, οπότε αποτελεί, σε καλή προσέγγιση, ένα κλειστό σύστημα με Χαμιλτονιανή που δεν εξαρτάται η ίδια από τον χρόνο.

[figure_pair pending]

Αριστερά, η μαγνητο-οπτική παγίδα παράγει το ψυχρό νέφος ατόμων ρουβιδίου μέσα στη γυάλινη κυψελίδα: ένα πρώιμο στάδιο ψύξης στην πορεία προς την παρασκευή του συμπυκνώματος. Δεξιά, ο

Giovanni Barontini στέκεται δίπλα στην οπτική διάταξη. Πρόκειται για φωτογραφίες του εργαστηριακού συστήματος πίσω από το πείραμα, όχι για εικόνες ενός κυριολεκτικού μικροσκοπικού σύμπαντος.

Αν το παρακολουθήσουμε με ένα συνηθισμένο εργαστηριακό ρολόι — μία εικόνα απορρόφησης κάθε 2 ms — ο φωτεινός τομέας κάνει κάτι που θυμίζει κοσμολογία. Άτομα περνούν το φράγμα και ο τομέας μεγαλώνει από το μηδέν (ο Barontini ονομάζει αυτή τη στιγμή «**big bang**»), φτάνει σε μέγιστη έκταση, ύστερα συστέλλεται και αδειάζει ξανά προς τη σκοτεινή πλευρά (το «**big crunch**»). Ανάλογα με το ύψος του φράγματος, αυτό μπορεί να επαναλαμβάνεται κυκλικά.

Και εδώ βρίσκεται το ουσιαστικό σημείο. Το εργαστηριακό ρολόι είναι εξωτερικό ως προς το σύστημα — ακριβώς το είδος πράγματος που δεν επιτρέπεται στο πλαίσιο της Wheeler-DeWitt. Έτσι ο Barontini ρωτά: μπορεί η ιστορία του φωτεινού τομέα να **μπει σε σειρά χρησιμοποιώντας μόνο μεγέθη εσωτερικά στο σύστημα**; Η απάντησή του είναι ένα ρολόι που ονομάζει **εντροπικό χρόνο**, το οποίο διαβάζεται απευθείας από τις ίδιες εικόνες σε τρία απλά βήματα. Πρώτα, από κάθε εικόνα απορρόφησης εξάγει τέσσερις αριθμούς για τον φωτεινό τομέα: τον αριθμό ατόμων, το κέντρο μάζας του προφίλ πυκνότητάς του (που παίζει τον ρόλο ενός ανάλογου «βαθμωτού πεδίου»), το πλάτος του και την εντροπία του — την εντροπία ανά άτομο, υπολογισμένη με μια καθιερωμένη μέθοδο, πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό ατόμων. Δεύτερον, καθώς τα άτομα περνούν το φράγμα, αυτή η εντροπία αυξάνεται και μειώνεται. Τρίτον, το ρολόι ακολουθεί τη βαθμίδα της εντροπίας κατά μήκος της μετρούμενης διαδρομής του κέντρου μάζας, μετρώντας το μέτρο κάθε μετατόπισης και όχι την κατεύθυνσή της. Όταν η εντροπία και το κέντρο μάζας αυξάνονται ή μειώνονται μαζί, κάθε βήμα προχωρά το ρολόι ακόμη κι όταν το νέφος αντιστρέφει την κίνησή του. Στα δεδομένα αυτό δίνει σχεδόν παντού μία μοναδική διάταξη από το «big bang» μέχρι το «big crunch» του τομέα, με μόνο μερικές μικρές ανωμαλίες εκεί όπου η αραιή χρονική δειγματοληψία κάνει τις δύο μεταβολές να μη συμφωνούν.

Τέλος, ο Barontini εξάγει μια αποτελεσματική «**εξίσωση Schrödinger σε εντροπικό χρόνο**» — μια εξίσωση εξέλιξης για τον φωτεινό τομέα γραμμένη ως προς αυτό το εσωτερικό ρολόι αντί για το εξωτερικό — και τη λύνει αριθμητικά για να δει αν αναπαράγει όσα κατέγραψε πραγματικά η κάμερα.

Τι βρήκαν

Τρία αποτελέσματα, με αυξανόμενο βαθμό φιλοδοξίας.

- **Το εσωτερικό ρολόι λειτουργεί ως διάταξη των γεγονότων.** Ο εντροπικός χρόνος αυξάνεται μονότονα σχεδόν παντού και η ταχύτητά του καθορίζεται από το πόσο γρήγορα περνά εντροπία μέσα από το φράγμα: τρέχει γρηγορότερα όταν ανταλλάσσεται εντροπία και σταματά εντελώς όταν δεν ανταλλάσσεται καθόλου. Στο αντιστρεπτό καθεστώς χαμηλού φράγματος, δεν περνά καθόλου εσωτερικός χρόνος ανάμεσα σε ένα big crunch και το επόμενο big bang — επειδή εκεί δεν ανταλλάσσεται εντροπία — παρότι το εργαστηριακό ρολόι συνεχίζει να μετρά. Σε ολόκληρο το σύνολο δεδομένων, η συνολική

εντροπία των δύο τομέων μαζί παρέμεινε σταθερή μέσα στα όρια αβεβαιότητας, όπως απαιτείται για ένα κλειστό σύστημα.

- **Διαφορετικά καθεστώτα δίνουν διαφορετικούς «χρόνους».** Αν αυξηθεί το φράγμα, η ανταλλαγή εντροπίας μειώνεται και έτσι το εσωτερικό ρολόι τρέχει πιο αργά. Αν το φράγμα αυξηθεί μέχρι το σημείο όπου οι δύο τομείς σχεδόν δεν αλληλεπιδρούν, ο φωτεινός τομέας τείνει προς αυτό που η εργασία ονομάζει «**θερμικό θάνατο**»: μια στάσιμη κατάσταση στην οποία ο εντροπικός χρόνος απλώς σταματά.
- **Μια αποτελεσματική εξίσωση αναπαράγει τα δεδομένα.** Η εξίσωση Schrödinger σε εντροπικό χρόνο, όταν τροφοδοτηθεί με τις πειραματικές παραμέτρους, αναπαράγει αριθμητικά τη μετρούμενη εξέλιξη του πλάτους του νέφους. Η εργασία αναφέρει εξαιρετική συμφωνία για την περίπτωση χαμηλού φράγματος (όπου κυριαρχεί ο όρος που οδηγείται από την εντροπία)· η ρητή αριθμητική σύγκριση γίνεται για αυτή την περίπτωση.

Τι είναι το «πρόβλημα του χρόνου» και τι είναι εδώ ο «εντροπικός χρόνος»

Το **πρόβλημα του χρόνου** είναι ότι η κύρια εξίσωση της κανονικής κβαντικής βαρύτητας (Wheeler-DeWitt) δεν έχει εξωτερική μεταβλητή χρόνου. Μια συνηθισμένη απάντηση είναι σχεσιακή: επιλέγουμε ένα φυσικό μέγεθος μέσα στο σύστημα ως «ρολόι» και περιγράφουμε όλα τα υπόλοιπα σε σχέση με αυτό. Ένα επαναλαμβανόμενο πρόβλημα είναι ότι οι φυσικές επιλογές για ρολόι δεν είναι πάντοτε μονότονες — σε ένα σύστημα που επανασυστέλλεται, το υποψήφιο ρολόι προχωρά και ύστερα γυρίζει προς τα πίσω — οπότε δεν μπορεί να χαρακτηρίσει καθαρά μία μόνο κατεύθυνση από την αρχή ως το τέλος.

Ο **εντροπικός χρόνος** είναι ο τρόπος του Barontini να παρακάμψει αυτό το πρόβλημα. Αντί να διαβάξει μια μεταβλητή τύπου θέσης, κατασκευάζει το ρολόι από την εντροπία που ανταλλάσσεται ανάμεσα στον παρατηρούμενο και τον μη παρατηρούμενο τομέα, με τρόπο σχεδιασμένο ώστε να μην αντιστρέφεται. Στο πνεύμα του συγγενεύει στενά με παλαιότερες ιδέες περί «θερμικού χρόνου», αλλά εδώ ορίζεται επιχειρησιακά από μια μετρήσιμη ροή εντροπίας αντί από αφηρημένη μαθηματική δομή — και αυτό ακριβώς τον καθιστά ελέγχσιμο σε πραγματική πειραματική διάταξη.

Το κρίσιμο είναι ότι οι κοσμολογικοί όροι — «big bang», «big crunch», «παράγοντας κλίμακας», «βαθμωτό πεδίο», «μικροσύμπαν» — είναι **αναλογικές εκθέτες**. Ονομάζουν χαρακτηριστικά ενός παγιδευμένου αερίου ατόμων που τυχάνει να είναι δομικά παρόμοια με τις εξισώσεις απλουστευμένων κοσμολογικών μοντέλων. Δεν είναι ισχυρισμοί για το πραγματικό σύμπαν.

Τι δεν αποδεικνύει

Εδώ χρειάζεται η μεγαλύτερη προσοχή, επειδή η ορολογία προσφέρεται για υπερβολές.

- **Δεν λύνει το πρόβλημα του χρόνου και δεν ισχυρίζεται ότι το λύνει.** Η ίδια η εργασία παρουσιάζει το αποτέλεσμα ως «ένα ελεγχόμενο πειραματικό πλαίσιο στο οποίο

κατασκευές σχεσιακού χρόνου μπορούν να ελεγχθούν ποσοτικά». Ένα πεδίο δοκιμών δεν είναι θεώρημα. Το αν ο σχεσιακός ή εντροπικός χρόνος είναι η σωστή περιγραφή του χρόνου στην κβαντική βαρύτητα παραμένει ακριβώς τόσο ανοιχτό όσο ήταν και πριν.

- **Είναι ανάλογο σύστημα, όχι το σύμπαν.** Δεν παρατηρείται καμία κοσμολογία. Παρατηρείται ένα συμπύκνωμα Bose-Einstein σε παγίδα, και η μειωμένη περιγραφή του είναι μαθηματικά παρόμοια με ένα απλουστευμένο κοσμολογικό μοντέλο («minisuperspace»). Η ομοιότητα είναι το νόημα του πειράματος· είναι και το όριό του. Τίποτα εδώ δεν δείχνει ότι το πρώιμο σύμπαν είχε ένα big bang αυτού του είδους, ότι ο χωροχρόνος αποτελείται από άτομα ή ότι «ο χρόνος δεν υπάρχει».
- **Δεν δείχνει ότι ο χρόνος είναι «στην πραγματικότητα» εντροπία.** Το εντροπικό ρολόι είναι μία κατασκευασμένη διάταξη γεγονότων που λειτουργεί καλά σε αυτό το σύστημα. Η εργασία επισημαίνει εννοιολογική συγγένεια με την υπόθεση του θερμικού χρόνου, αλλά αφήνει ρητά ανοιχτό ακόμη και το αν τα δύο συμπίπτουν. Το «ένα εσωτερικό ρολόι βασισμένο στην εντροπία μπορεί να βάλει σε σειρά αυτό το πείραμα» είναι πολύ στενότερος ισχυρισμός από το «ο χρόνος είναι εντροπία».
- **Η αποτελεσματική εξίσωση είναι αποτέλεσμα μοντελοποίησης, όχι επανεγγραφή της κβαντομηχανικής.** Η εξίσωση Schrödinger σε εντροπικό χρόνο που προκύπτει ανάγεται στη συνηθισμένη κβαντομηχανική όταν η ροή εντροπίας είναι αργή, και είναι αυστηρά η συνηθής μοναδιαία θεωρία μόνο όταν δεν υπάρχει καθόλου ροή εντροπίας. Η εργασία την παρουσιάζει ως γενικότερη από τη στάνταρ εξίσωση ειδικά όταν ένα παρατηρούμενο σύστημα είναι θερμοδυναμικά ανοιχτό προς ένα μη παρατηρούμενο — μια δήλωση για ανοιχτά υποσυστήματα σε τέτοιου είδους διατάξεις, όχι ισχυρισμός ότι η θεμελιώδης φυσική πρέπει να ξαναγραφτεί έτσι.
- **Είναι ένα πείραμα, ένας συγγραφέας, μία επιλογή ρολογιού.** Τα αποτελέσματα έχουν περίπου 5% στατιστική αβεβαιότητα ανά σημείο και βασίζονται σε προσεγγίσεις μέσου πεδίου και μέσης πυκνότητας. Το επιλεγμένο ρολόι και η χονδροποίηση είναι συνειδητές επιλογές μοντελοποίησης, του είδους που άλλες ομάδες θα θελήσουν να διερευνήσουν πριν εξαχθούν δομικά συμπεράσματα.

Πόσο ισχυρά είναι τα στοιχεία

Για τον περιορισμένο ισχυρισμό που πράγματι διατυπώνει, τα στοιχεία είναι καθαρά. Το σύστημα είναι όντως καλά απομονωμένο στη σχετική χρονική κλίμακα, ο ισολογισμός εντροπίας κλείνει (η συνολική εντροπία παραμένει σταθερή μέσα στα σφάλματα), το εσωτερικό ρολόι βάζει τα δεδομένα σε μονότονη σειρά σχεδόν παντού και μια αποτελεσματική εξίσωση, που εξήγαγε ο συγγραφέας από το ίδιο μοντέλο με παραμέτρους συναγόμενες από τα δεδομένα, αναπαράγει τη μετρούμενη δυναμική για την περίπτωση χαμηλού φράγματος στην οποία εφαρμόστηκε. Τα δεδομένα είναι ανοικτά διαθέσιμα. Πρόκειται για πραγματική μέτρηση ενός πραγματικού, ελεγχόμενου συστήματος, όχι για νοητικό πείραμα.

Αντίστοιχα περιορισμένο είναι και το βάρος που μπορούν να σηκώσουν αυτά τα στοιχεία. Όλα στηρίζονται στην αναλογία ανάμεσα στο μειωμένο μοντέλο του συμπυκνώματος και την

κοσμολογία minisuperspace, και οι αναλογίες μπορούν να φωτίσουν χωρίς να αποδεικνύουν. Μία μόνο πλατφόρμα, από έναν μόνο συγγραφέα, που δείχνει ότι μία συνταγή εσωτερικού χρόνου λειτουργεί, αποτελεί ισχυρή απόδειξη αρχής και αδύναμη βάση για οποιονδήποτε ισχυρισμό σχετικά με το πώς συμπεριφέρεται ο χρόνος στη φύση. Η σωστή ανάγνωση είναι: η μέθοδος είναι πλέον κάτι που μπορείς να κάνεις στο εργαστήριο και να ελέγξεις.

Γιατί έχει σημασία

Οι συζητήσεις για το πρόβλημα του χρόνου έχουν παραμείνει επί δεκαετίες εγκλωβισμένες στο επίπεδο του φορμαλισμού, όπου ανταγωνιστικές προτάσεις είναι δύσκολο να διαψευστούν επειδή παράγουν λίγες συγκεκριμένες, μετρήσιμες προβλέψεις. Το να μετατραπεί έστω και ένα τμήμα αυτής της συζήτησης σε πείραμα που μπορεί πράγματι να εκτελεστεί — όπου ένα εσωτερικό ρολόι είτε βάζει τα δεδομένα σε σειρά είτε όχι, όπου μια αποτελεσματική εξίσωση είτε ταιριάζει είτε όχι — αλλάζει τον χαρακτήρα της αντιπαράθεσης. Δίνει στους θεωρητικούς έναν πάγκο πάνω στον οποίο μπορούν να δοκιμάσουν τα εργαλεία τους.

Αυτή είναι η πραγματική συνεισφορά: όχι μια απάντηση για τον χρόνο, αλλά ένα μέρος όπου η ερώτηση μπορεί να τεθεί ποσοτικά. Οι πλατφόρμες ψυχρών ατόμων έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ως ελεγχόμενα ανάλογα για ακτινοβολία Hawking, διαστελλόμενα σύμπαντα και διάσπαση ψευδοκενού· τώρα προστίθενται στη φαρέτρα ο σχεσιακός χρόνος και το βέλος του χρόνου. Η αξία βρίσκεται στα επόμενα πειράματα που καθιστά δυνατά — διαφορετικές επιλογές ρολογιού, αναπηδητική έναντι ιδιάζουσας συμπεριφοράς, έλεγχοι αντιστρεπτότητας — καθένα από τα οποία μπορεί πλέον να είναι μέτρηση και όχι μόνο υπολογισμός.

Καθαρή σύνοψη

Ένας φυσικός κατασκεύασε ένα συμπύκνωμα Bose-Einstein, το χώρισε με ένα λεπτό οπτικό φράγμα σε ένα παρατηρούμενο και ένα μη παρατηρούμενο μισό και χρησιμοποίησε την εντροπία που ρέει ανάμεσα στα δύο μισά για να κατασκευάσει έναν εσωτερικό «εντροπικό χρόνο». Αυτό το ρολόι βάζει σε σειρά τον κύκλο διαστολής και επανασυστολής του παρατηρούμενου μισού, τρέχει γρήγορα όταν ανταλλάσσεται εντροπία και σταματά όταν δεν ανταλλάσσεται, ενώ μια αποτελεσματική εξίσωση γραμμένη ως προς αυτόν τον εσωτερικό χρόνο αναπαράγει τα μετρούμενα δεδομένα στην περίπτωση χαμηλού φράγματος που εξέτασε ο συγγραφέας. Η διάταξη είναι ένα ανάλογο του «προβλήματος του χρόνου» από την κανονική κβαντική βαρύτητα: τα «big bang», «big crunch» και «μικροσύμπαν» είναι ονομασίες για ένα παγιδευμένο αέριο που είναι μαθηματικά παρόμοιο με ένα απλουστευμένο κοσμολογικό μοντέλο. Είναι ένα ελεγχόμενο πεδίο δοκιμών για ιδέες σχεσιακού χρόνου — όχι λύση στο πρόβλημα του χρόνου, όχι ισχυρισμός για το πραγματικό σύμπαν και όχι ένδειξη ότι ο χρόνος είναι «στην πραγματικότητα» εντροπία.

Έλεγχος χωρίς υπερβολές

Τι δείχνει η εργασία: Σε ένα καλά απομονωμένο σύστημα ψυχρών ατόμων, ένα εσωτερικό ρολόι ορισμένο από την ανταλλαγή εντροπίας μπορεί να βάλει μονότονα σε σειρά την παρατηρούμενη δυναμική, και μια αποτελεσματική εξίσωση «εντροπικού χρόνου» αναπαράγει τη μετρούμενη εξέλιξη στην εξετασθείσα περίπτωση χαμηλού φράγματος.

Τι είναι εύλογο αλλά δεν έχει αποδειχθεί: Ότι ο εντροπικός ή σχεσιακός χρόνος αποτελεί καλή περιγραφή του χρόνου στην πραγματική κβαντική βαρύτητα. Το πείραμα είναι συμβατό με το να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τέτοιες κατασκευές· δεν τις επιβεβαιώνει ως περιγραφή της φύσης.

Τι δεν δείχνει: Ότι το πρόβλημα του χρόνου λύθηκε· ότι λύθηκε η κβαντική βαρύτητα· ότι το σύμπαν ξεκίνησε με ένα big bang αυτού του είδους· ότι ο χωροχρόνος αναδύεται από άτομα· ή ότι «ο χρόνος δεν υπάρχει».

Κύριοι περιορισμοί: Μία μόνο πλατφόρμα, ένας μόνο συγγραφέας και μία μόνο επιλογή ρολογιού· περίπου 5% αβεβαιότητα ανά σημείο· προσεγγίσεις μέσου πεδίου και μέσης πυκνότητας· και, πάνω απ' όλα, εξάρτηση από μια αναλογία ανάμεσα σε ένα παγιδευμένο συμπύκνωμα και ένα απλουστευμένο κοσμολογικό μοντέλο.

Πόση εμπιστοσύνη πρέπει να έχει ένας γενικός αναγνώστης; Υψηλή ότι το πείραμα έκανε όσα αναφέρει στο δικό του σύστημα. Χαμηλή για οποιοδήποτε άλμα από αυτό το ανάλογο σε ισχυρισμούς για τον χρόνο στο πραγματικό σύμπαν.

Πηγές

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