ცივი ატომების ექსპერიმენტი კვანტური გრავიტაციის „დროის პრობლემას“ ამოწმებს — როგორც ლაბორატორიულ ანალოგს და არა პასუხს

კანონიკურ კვანტურ გრავიტაციაში Wheeler-DeWitt-ის განტოლებას მოვლენების დასალაგებელი გარე საათი არ აქვს: ესაა „დროის პრობლემა“. ერთი ავტორის ექსპერიმენტი იზოლირებს Bose-Einstein-ის კონდენსატს, თხელი ოპტიკური ბარიერით დაუკვირვებელ და დაკვირვებულ სექტორად ყოფს და მათ შორის გადამავალი ენტროპიიდან შიდა საათს აგებს. ეს „ენტროპიული დრო“ დაკვირვებული სექტორის გაფართოებასა და ხელახლა შეკუმშვას ალაგებს, ხოლო ეფექტური განტოლება დაბალი ბარიერის განხილულ შემთხვევაში გაზომილ მონაცემებს იმეორებს. ეს ურთიერთობითი დროის იდეების კონტროლირებად საცდელი პლატფორმაა: „big bang“, „big crunch“ და „miniuniverse“ ხაფანგში მოთავსებული აირის ანალოგური ეტიკეტებია და არა ნამდვილი კოსმოლოგია; სამუშაო დროის პრობლემის ან კვანტური გრავიტაციის გადაწყვეტას არ აცხადებს.

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

ენტროპიიდან აგებული საათი, ხაფანგის შიგნით

კანონიკურ კვანტურ გრავიტაციაში უცნაური და ჯიუტი თავსატეხია: ცენტრალურ განტოლებაში დრო საერთოდ არ ჩანს. Wheeler-DeWitt-ის განტოლება, რომელიც მთლიანი სამყაროსთვის Schrodinger-ის განტოლების ყველაზე ახლო ანალოგია, უბრალოდ ამბობს, რომ გარკვეული ოპერატორის მდგომარეობაზე მოქმედების შედეგი ნულია. არ არსებობს გარედან მიმდინარე პარამეტრი, არაფერი აწყობს „მანამდე“ და „შემდეგ“ მოვლენებს თანმიმდევრობაში — და მაინც დროის სვლას აშკარად განვიცდით. ეს არის **დროის პრობლემა**, რომელიც ნახევარ საუკუნეზე მეტია გადაწყვეტას ეწინააღმდეგება.

Physical მიმოხილვა Research-ში გამოქვეყნებული ერთი ავტორის ნაშრომი ამას არ წყვეტს. მისი წვლილი უფრო მშვიდი და თავისებურად უფრო პრაქტიკულია: ის ქმნის პატარა, კარგად კონტროლირებულ ლაბორატორიულ სისტემას, სადაც შემოთავაზებული პასუხების ერთი ოჯახის **რეალურ მონაცემებთან გამოცდა** შეიძლება. ბირმინგემის უნივერსიტეტის Giovanni Barontini იღებს Bose-Einstein-ის კონდენსატს — უკიდურესად ცივი ატომების ღრუბელს, რომელიც ერთ კვანტურ ობიექტად იქცევა — და მას ანალოგად იყენებს, რომელზეც „შიდა“, ურთიერთობითი დროის იდეა უკვე შეიძლება გაზომო და არა მხოლოდ იკამათო. ხრიკი არის საათის აგება არა გარედან მოტანილი წამზომით, არამედ იმ ენტროპიით, რომელსაც სისტემა საკუთარ შიგნით გადაანაწილებს.

„დროის პრობლემის კონტროლირებად ანალოგსა“ და „ფიზიკოსებმა დრო ამოხსნეს“-ს შორის მთელი ამბავია — და მანძილი ძალიან დიდია.

რა გააკეთა მკვლევარმა

აპარატურა არის დაახლოებით **24,000 რუბიდიუმ-87-ის ატომის** კონდენსატი, რომელიც კონსერვატიულ ოპტიკურ დიპოლურ ხაფანგშია მოთავსებული და რხევაზეა დაყენებული — ატომების მთელი ღრუბელი ხაფანგში წინ და უკან ირხევა. **თხელი ოპტიკური ბარიერი** — დაახლოებით 8 მიკრომეტრი სიგანის, 675 nm სინათლით და digital micromirror device-ით „დახატული“ — ხაფანგს ორ ნაწილად ყოფს. ერთ ნახევარს აკვირდებიან („**კაშკაშა sector**“), მეორეს — არა („**dark sector**“). ექსპერიმენტის დაახლოებით 100-მილიწამიან ფანჯარაში სისტემა გაზომვად ნაწილაკთა დაკარგვას ან დისიპაციას არ აჩვენებს, ამიტომ კარგი მიახლოებით ის დახურული სისტემაა, რომლის Hamiltonian-იც თვითონ დროზე არ არის დამოკიდებული.

[figure_pair pending]

მარცხნივ magneto-optical trap მინის უჯრედში რუბიდიუმის ცივ ღრუბელს ქმნის — კონდენსატის მოსამზადებელი ადრეული გაგრილების ეტაპი. მარჯვნივ Giovanni Barontini ოპტიკურ აპარატურასთან დგას. ეს ექსპერიმენტის უკან მდგომი ლაბორატორიული სისტემის ფოტოსურათებია და არა სიტყვასიტყვით მინიატურული სამყაროს სურათები.

ჩვეულებრივი ლაბორატორიული საათით დაკვირვებისას — ყოველ 2 ms-ში ერთი absorption image — კაშკაშა sector შთამბეჭდავად იქცევა. ატომები ბარიერს გადადის და სექტორი არაფრიდან იზრდება (Barontini ამ მომენტს „**დიდი აფეთქება**“-ს უწოდებს), მაქსიმალურ ზომას აღწევს, შემდეგ იკუმშება და ისევ dark side-ში იცლება („**big crunch**“). ბარიერის სიმაღლის მიხედვით ეს ციკლურადაც შეიძლება განმეორდეს.

შემდეგ მოდის მთავარი აზრი. ლაბორატორიული საათი სისტემის *გარეა* — ზუსტად ისეთი რამ, რასაც Wheeler-DeWitt-ის გარემო არ უშვებს. ამიტომ Barontini კითხულობს: შეიძლება კაშკაშა sector-ის ისტორია **მხოლოდ სისტემის შიდა სიდიდეებით დალაგდეს**? მისი პასუხია საათი, რომელსაც **ენტროპიულ დროს** უწოდებს და რომელიც იგივე სურათებიდან სამ მარტივ ნაბიჯში იკითხება. პირველი: თითოეული absorption image-იდან კაშკაშა sector-ისთვის ოთხ რიცხვს იღებს — ატომების რაოდენობას, სიმკვრივის პროფილის მასის ცენტრს (რომელიც ანალოგური „scalar ველი“-ის როლს ასრულებს), სიგანეს და ენტროპიას — თითო ატომზე ენტროპიას, სტანდარტული მეთოდით მიღებულს, გამრავლებულს ატომების რაოდენობაზე. მეორე: ბარიერის გადაკვეთისას ეს ენტროპია იზრდება და მცირდება. მესამე: საათი მიჰყვება ენტროპიის გრადიენტს გაზომილი მასის ცენტრის ტრაექტორიის გასწვრივ და ყოველი გადაადგილების მიმართულების ნაცვლად მის მოდულს ითვლის. როცა ენტროპია და მასის ცენტრი ერთად იზრდება ან მცირდება, თითოეული ნაბიჯი საათს წინ სწევს, მაშინაც კი, როცა ღრუბელი მიმართულებას იცვლის. მონაცემებში ეს სექტორის „დიდი აფეთქება“-დან „big crunch“-მდე თითქმის ყველგან ერთმნიშვნელოვან თანმიმდევრობას იძლევა, მხოლოდ რამდენიმე მცირე რხევით, სადაც უხეში sampling ამ ორ ცვლილებას ერთმანეთთან აცდენს.

ბოლოს ავტორი გამოაქვს ეფექტური **„entropic-დრო Schrodinger equation“** — კაშკაშა sector-ის ევოლუციის განტოლება, რომელიც გარე დროის ნაცვლად ამ შიდა საათითაა დაწერილი — და რიცხობრივად ხსნის, რათა შეამოწმოს, იმეორებს თუ არა კამერის რეალურად ჩაწერილს.

რა აღმოაჩინა

სამი შედეგი, მზარდი ამბიციით.

- **შიდა საათი მოვლენების დალაგებად მუშაობს.** Entropic დრო თითქმის ყველგან მონოტონურად იზრდება, ხოლო მისი სიჩქარე დამოკიდებულია იმაზე, რამდენად სწრაფად გადადის ენტროპია ბარიერზე: ის უფრო სწრაფად მიდის, როცა ენტროპია იცვლება, და **სრულად ჩერდება, როცა გაცვლა არ ხდება**. შექცევად, დაბალი ბარიერის რეჟიმში big crunch-სა და შემდეგ დიდი აფეთქება-ს შორის *შიდა დრო საერთოდ არ გადის* — რადგან იქ ენტროპიის გაცვლა არ ხდება — მიუხედავად იმისა, რომ ლაბორატორიული საათი აგრძელებს სვლას. მთელ მონაცემთა ნაკრებში ორივე სექტორის ჯამური ენტროპია შეცდომის ზოლებში მუდმივი დარჩა, როგორც დახურულ სისტემას შეეფერება.

- **სხვადასხვა რეჟიმი სხვადასხვა „დროს“ იძლევა.** ბარიერის აწევა ენტროპიის გაცვლას ამცირებს, ამიტომ შიდა საათი ნელდება. თუ ბარიერი იმდენად მაღალია, რომ ორი სექტორი თითქმის აღარ ურთიერთქმედებს, კაშკაშა sector მიდის იმ მდგომარეობისკენ, რომელსაც ნაშრომი **„სითბო death“**-ს უწოდებს: სტაციონარულ მდგომარეობამდე, სადაც ენტროპიული დრო უბრალოდ ჩერდება.
- **ეფექტური განტოლება მონაცემებს იმეორებს.** ექსპერიმენტული პარამეტრებით გაშვებული entropic-დრო Schrodinger equation რიცხობრივად აღადგენს ღრუბლის სიგანის გაზომილ ევოლუციას; ნაშრომი დაბალი ბარიერის შემთხვევისთვის — სადაც ენტროპიით გამოწვეული წევრი დომინირებს — შესანიშნავ თანხვედრას აღწერს. პირდაპირი რიცხვითი შედარება სწორედ ამ შემთხვევისთვისაა გაკეთებული.

რას ნიშნავს „დროის პრობლემა“ და რა არის აქ „ენტროპიული დრო“

დროის პრობლემა ისაა, რომ კანონიკური კვანტური გრავიტაციის მთავარი განტოლება, Wheeler-DeWitt, გარე დროის ცვლადს არ შეიცავს. ერთ-ერთი გავრცელებული პასუხი *ურთიერთობითია*: სისტემის შიგნით რომელიმე ფიზიკურ სიდიდეს „საათის“ როლი მივცეთ და ყველაფერი დანარჩენი მის მიმართ აღვწეროთ. განმეორებადი სირთულეა, რომ ბუნებრივი საათის კანდიდატები ყოველთვის მონოტონური არ არის — ხელახლა შემკუმშავ სისტემაში კანდიდატი საათი ჯერ წინ მიდის და მერე უკან — ამიტომ დასაწყისიდან ბოლომდე ერთ მიმართულებას სუფთად ვერ აწერს.
ენტროპიული დრო Barontini-ის გზაა ამ პრობლემის ასარიდებლად. პოზიციის მსგავსი ცვლადის წაკითხვის ნაცვლად, საათი აგებულია დაკვირვებულ და დაუკვირვებელ სექტორებს შორის *ენტროპიის* გაცვლიდან ისე, რომ უკან არ ბრუნდება. კონცეფციურად ის ახლოსაა ძველ „thermal დრო“ იდეებთან, მაგრამ აქ ოპერაციულად გაზომვადი ენტროპიის ნაკადიდანაა განსაზღვრული და არა აბსტრაქტული მათემატიკური სტრუქტურიდან — სწორედ ეს ხდის მის რეალურ აპარატზე გამოცდას შესაძლებელს.
განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რომ კოსმოლოგიური სიტყვები — „დიდი აფეთქება“, „big crunch“, „scale factor“, „scalar ველი“, „miniuniverse“ — **ანალოგური ეტიკეტებია**. ისინი ხაფანგში მოთავსებული ატომური აირის მახასიათებლებს უწოდებს, რომლებიც გამარტივებული კოსმოლოგიური მოდელების განტოლებებს *სტრუქტურულად ჰგავს*. ისინი ნამდვილი სამყაროს შესახებ მტკიცებები არ არის.

რას არ ამტკიცებს ეს

სიფრთხილე აქ განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან ლექსიკა გადაჭარბებისკენ გვიბიძგებს.

- **ეს დროის პრობლემას არ წყვეტს და არც ამას აცხადებს.** ნაშრომი საკუთარ წვლილს ასე აყალიბებს: ის „ქმნის კონტროლირებად ექსპერიმენტულ გარემოს,

სადაც ურთიერთობითი დროის კონსტრუქციების რაოდენობრივი გამოცდაა შესაძლებელი“. საცდელი პლატფორმა თეორემა არ არის. ურთიერთობითი ან ენტროპიული დრო ნამდვილად *სწორი* ახსნაა თუ არა კვანტურ გრავიტაციაში, ზუსტად ისეთივე ღია კითხვად რჩება, როგორიც ადრე იყო.

- **ეს ანალოგიაა და არა სამყარო.** არავინ აკვირდება კოსმოლოგიას. აკვირდებიან Bose-Einstein-ის კონდენსატს ხაფანგში, რომლის შემცირებული აღწერა *მათემატიკურად ჰგავს* გამარტივებულ („minisuperspace“) კოსმოლოგიურ მოდელს. ეს მსგავსება ექსპერიმენტის არსია და ამავე დროს მისი საზღვარიც. აქედან არ გამომდინარეობს, რომ ადრეულ სამყაროს ასეთი დიდი აფეთქება ჰქონდა, რომ სივრცე-დრო ატომებისგან შედგება ან რომ „დრო არ არსებობს“.
- **ეს არ აჩვენებს, რომ დრო „სინამდვილეში“ ენტროპიაა.** ენტროპიული საათი ამ სისტემაზე კარგად მომუშავე ერთ-ერთი აგებული თანმიმდევრობაა. ნაშრომი thermal-დრო hypothesis-თან კონცეფციურ ნათესაობას აღნიშნავს, მაგრამ ღიად ტოვებს, საერთოდ ემთხვევა თუ არა ეს ორი იდეა. „ენტროპიით აგებულ შიდა საათს შეუძლია ამ ექსპერიმენტის დალაგება“ ბევრად ვიწრო მტკიცებაა, ვიდრე „დრო არის ენტროპია“.
- **ეფექტური განტოლება მოდელირების შედეგია და არა კვანტური მექანიკის გადაწერა.** გამოყვანილი entropic-დრო Schrodinger equation ჩვეულებრივ კვანტურ მექანიკამდე დადის, როცა ენტროპიის ნაკადი ნელია, და მკაცრად ჩვეულებრივი უნიტარული თეორიაა მხოლოდ მაშინ, როცა ენტროპია საერთოდ არ მიედინება. ნაშრომი მას სტანდარტულ განტოლებაზე უფრო ზოგად ფორმად განიხილავს *კონკრეტულად მაშინ, როცა დაკვირვებული ქვესისტემა თერმოდინამიკურად ღიაა დაუკვირვებელი ქვესისტემის მიმართ* — ეს ამ ტიპის ღია ქვესისტემებზე მტკიცებაა და არა განცხადება, რომ ფუნდამენტური ფიზიკა აუცილებლად ასე უნდა გადაიწეროს.
- **ეს ერთი ექსპერიმენტია, ერთი ავტორით და ერთი საათის არჩევანით.** შედეგებს თითო წერტილზე დაახლოებით 5%-იანი სტატისტიკური გაურკვევლობა აქვს და mean-ველი და საშუალო სიმკვრივის მიახლოებებს ეყრდნობა. არჩეული საათი და coarse-graining განზრახ მოდელირების გადაწყვეტილებებია, რომელთა გამოცდაც სხვა ჯგუფებს აუცილებლად მოუნდებათ უფრო სტრუქტურულ დასკვნებამდე.

რამდენად ძლიერია მტკიცებულება

იმ მოკრძალებული მტკიცებისთვის, რომელსაც ნაშრომი რეალურად აკეთებს, მტკიცებულება სუფთაა. სისტემა შესაბამის დროით მასშტაბზე ნამდვილად კარგად იზოლირებულია, ენტროპიის ბუღალტერია იკეტება — ჯამური ენტროპია შეცდომის ფარგლებში მუდმივია — შიდა საათი მონაცემებს თითქმის ყველგან მონოტონურად ალაგებს, და ეფექტური განტოლება, რომელიც ავტორმა იგივე მოდელიდან, მონაცემებიდან გამოტანილი პარამეტრებით მიიღო, იმ დაბალი ბარიერის შემთხვევისთვის გაზომილ დინამიკას იმეორებს, სადაც ის გამოიყენა. მონაცემები საჯაროდ ხელმისაწვდომია. ეს რეალური, კონტროლირებადი სისტემის რეალური გაზომვაა და არა აზრობრივი ექსპერიმენტი.

იმ სიმძიმის ნაწილი, რომელსაც შედეგი შეიძლება გაუძლოს, შესაბამისად მოკრძალებულია. ყველაფერი ეყრდნობა კონდენსატის შემცირებული მოდელისა და minisuperspace კოსმოლოგიის ანალოგიას, ხოლო ანალოგიები გვანათებს, მაგრამ არ ამტკიცებს. ერთი პლატფორმა, ერთი ავტორი და ერთი შიდა დროის რეცეპტი, რომელიც მუშაობს, ძლიერი დამტკიცება of principle-ია და სუსტი საფუძველი ნებისმიერი მტკიცებისთვის, თუ როგორ იქცევა დრო ბუნებაში. სწორი წაკითხვა ასეთია: მეთოდი ახლა ლაბორატორიაში *შესრულებადი* და შესამოწმებელია.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი

დროის პრობლემაზე დებატები დიდი ხანია ფორმალიზმის დონეზეა გაჩერებული, სადაც კონკურენტული წინადადებების უარყოფა რთულია, რადგან მათ ცოტა კონკრეტული, გაზომვადი პროგნოზი აქვს. ამ დებატის თუნდაც მცირე ნაწილის ისეთ ექსპერიმენტად ქცევა, რომლის გაშვებაც შეგიძლია — სადაც შიდა საათი ან ალაგებს მონაცემებს ან არა, ეფექტური განტოლება ან ერგება ან არა — არგუმენტის ხასიათს ცვლის. ის თეორეტიკოსებს სამუშაო სკამს აძლევს, სადაც მათემატიკური აპარატის გამოცდა შეიძლება.

ესაა რეალური წვლილი: არა პასუხი დროზე, არამედ **ადგილი, სადაც კითხვა რაოდენობრივად შეიძლება დაისვას**. ცივი ატომების პლატფორმები უკვე გამოიყენება Hawking-ის გამოსხივების, გაფართოებადი სამყაროებისა და false-vacuum decay-ის კონტროლირებად ანალოგებად; ეს მათ ურთიერთობით დროსა და დროის ისარსაც უმატებს. ღირებულება შემდგომ კვლევებშია — განსხვავებული საათის არჩევანი, bounce-სა და singular behavior-ს შორის განსხვავება, შექცევადობის ტესტები — რომლებიც ახლა მხოლოდ გამოთვლა კი არა, გაზომვაც შეიძლება იყოს.

სუფთა შეჯამება

ფიზიკოსმა შექმნა Bose-Einstein-ის კონდენსატი, თხელი ოპტიკური ბარიერით დაკვირვებულ და დაუკვირვებელ ნახევრად დაყო და მათ შორის გადამავალი ენტროპია შიდა „ენტროპიული დროის“ ასაგებად გამოიყენა. ეს საათი დაკვირვებული ნახევრის გაფართოებისა და ხელახალი შეკუმშვის ციკლს ალაგებს, სწრაფად მიდის, როცა ენტროპია იცვლება, და ჩერდება, როცა გაცვლა არ ხდება; ამ შიდა დროში დაწერილი ეფექტური განტოლება დაბალი ბარიერის შემთხვევაში გაზომილ მონაცემებს იმეორებს. მოწყობილობა კანონიკური კვანტური გრავიტაციის „დროის პრობლემის“ ანალოგია: „დიდი აფეთქება“, „big crunch“ და „miniuniverse“ არის მათემატიკურად მსგავს გამარტივებულ კოსმოლოგიურ მოდელთან დაკავშირებული ეტიკეტები ხაფანგში მოთავსებული აირისთვის. ეს არის კონტროლირებადი საცდელი პლატფორმა ურთიერთობითი დროის იდეებისთვის — არა დროის პრობლემის გადაწყვეტა, არა ნამდვილი სამყაროს შესახებ მტკიცება და არა მტკიცებულება, რომ დრო „სინამდვილეში“ ენტროპიაა.

შელამაზების გარეშე შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომი: ერთ კარგად იზოლირებულ ცივი ატომების სისტემაში ენტროპიის გაცვლიდან განსაზღვრულ შიდა საათს შეუძლია დაკვირვებული დინამიკის თითქმის მონოტონურად დალაგება, ხოლო ეფექტური „ენტროპიული დროის“ განტოლება დაბალი ბარიერის განხილულ შემთხვევაში გაზომილ ევოლუციას იმეორებს.

რა არის სარწმუნო, მაგრამ არ არის ნაჩვენები: რომ ენტროპიული ან ურთიერთობითი დრო რეალურ კვანტურ გრავიტაციაში დროის კარგი აღწერაა. ექსპერიმენტი ასეთ კონსტრუქციებს სერიოზულად განხილვის საფუძველს აძლევს; ბუნებისთვის მათ არ ადასტურებს.

რას არ აჩვენებს: რომ დროის პრობლემა გადაწყვეტილია; რომ კვანტური გრავიტაცია მოგვარებულია; რომ სამყარო ამ ტიპის დიდი აფეთქება-ით დაიწყო; რომ სივრცე-დრო ატომებიდან წარმოიქმნება; ან რომ „დრო არ არსებობს“.

მთავარი შეზღუდვები: ერთი პლატფორმა, ერთი ავტორი და ერთი საათის არჩევანი; თითო წერტილზე დაახლოებით 5%-იანი გაურკვევლობა; mean-ველი და საშუალო სიმკვრივის მიახლოებები; და უპირველესად დამოკიდებულება ხაფანგში მოთავსებულ კონდენსატსა და გამარტივებულ კოსმოლოგიურ მოდელს შორის ანალოგიაზე.

რამდენად უნდა ენდოს ამას ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა, რომ ექსპერიმენტმა საკუთარ სისტემაზე სწორედ ის გააკეთა, რასაც აღწერს. დაბალი ნდობა ნებისმიერი ნახტომისთვის ამ ანალოგიდან ნამდვილი სამყაროს დროზე მტკიცებამდე.

წყაროები

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