

გრავიტაციას შეუძლია დიდი კვანტური სისტემების დეკოჰერენციის გამოწვევა

ჟურნალ Nature Physics-ში გამოქვეყნდა თეორიული სტატია კვანტური მექანიკის და გრავიტაციის ურთიერთქმედების შესახებ. სტატიაში ნაჩვენებია, რომ მრავალნაწილაკოვანი კვანტური სისტემები გრავიტაციულ ველში, თუნდაც მაქსიმალურად იზოლირებული, მაინც განიცდის დეკოჰერენციას, დროის შენელების გრავიტაციული ეფექტის გამო. თუმცა ეს მექანიზმი არ ეხება მაკრო-ობიექტებს, მაგრამ სამომავლოდ, მაინც ხსნის ახალ ფანჯარას მაკრო-ობიექტების შესასწავლად კვანტური მექანიკის თვალსაზრისით.

კვანტური მექანიკიდან კლასიკურზე გადასვლა არის ფუნდამენტური ფიზიკის ერთ-ერთი გადაუჭრელი პრობლემა. ერთის მხრივ მიკროსამყარო ცხოვრობს კვანტური მექანიკის კანონებით, მთელი თავისი არა ინტუიტიური გამოვლინებებით. მეორეს მხრივ, მაკროსკოპულ ფიზიკაში ასეთ მოვლენებს ვერ ვაკვირდებით, რის გამოც გვეჩვენება არაბუნებრივად. მაგრამ ყველაზე მნიშვნელოვანი ისაა, რომ არ არსებობს არანაირი მინიშნება კვანტურ მექანიკაში მისი გამოყენების მაკროსკოპული საზღვრების შესახებ. ის არ ამბობს, რომ რაიმე კონკრეტულ საზღვრებამდე მუშაობს კვანტური მექანიკის კანონები, ხოლო იმის იქით საჭიროა კლასიკური მექანიკა. ამიტომ კლასიკურ მექანიკაზე გადასვლა უნდა გამოვიდეს ან უშუალოდ კვანტური მექანიკის კანონებიდან, ან თუ ეს არ გამოდის მოგვიჩვენოს ვალდაროთ, რომ კვანტური მექანიკა არ მოიცავს ყველაფერს. სინამდვილეში როგორ არის საქმე დღემდე გაურკვეველია.

ბაზური კვანტური ეფექტი, რომლის დახმარებითაც მოსახერხებელია ამ პრობლემის ილუსტრირება და ექსპერიმენტული შესწავლა არის სუპერპოზიცია. თუ კვანტურ ობიექტს შეუძლია ყოფნა ორ სხვადასხვა მდგომარეობაში, მაშინ მას შეუძლია ყოფნა ამ ორი მდგომარეობის სუპერპოზიციაშიც, ანუ ორივე მდგომარეობაში ერთდროულად. მაგალითად ატომს შეუძლია იყოს ან აქ, ან იქ, ანდა ერთდროულად ორივეგან გარკვეული ალბათობით. ასეთი არალოკალურობა იწვევს ნაწილაკთა ინტერფერენციას თავის თავთან, რის გამოც კარდინალურად განსხვავდება კლასიკური მდგომარეობისგან, სადაც ნაწილაკის მდებარეობა ცნობილია. ამ მოვლენის ნათელი დადასტურებაა, შრედინგერის კატის ცნობილი ექსპერიმენტი.

სინამდვილეში კვანტური და კლასიკური მექანიკების შედარებისას არსებობს სხვადასხვა დონის ორი ფუნდამენტური პრობლემა:

სად იკარგება მაკრო სხეულის საკუთარ თავთან ინტერფერენციის შესაძლებლობა. ამ პრობლემას პრინციპში კვანტურმა მექანიკამ უპასუხა დეკოჰერენციის შემოტანით. ამოცანა დავიდა დეკოჰერენციის ფიზიკური მექანიზმის სხვადასხვა სიტუაციაში შესწავლამდე.

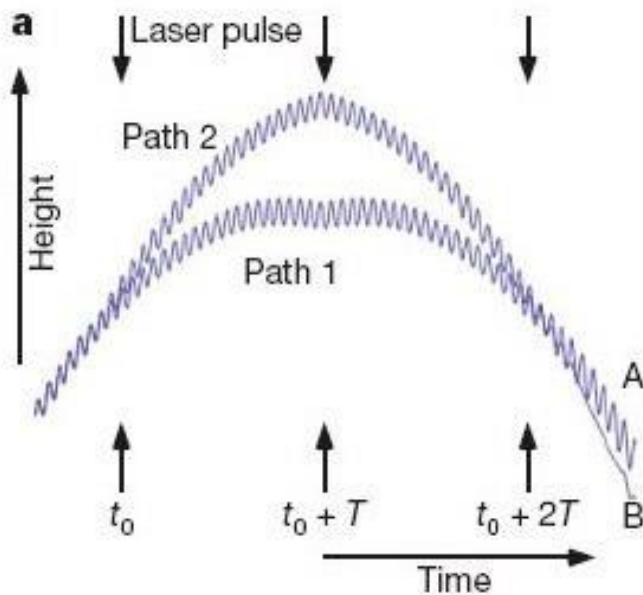
მეორე პრობლემაა თუ რატომ ხდება გაზომვისას ფიზიკური მდგომარეობის კოლაფსი. ეს ამოცანა გადის ჩვეულებრივი კვანტური მექანიკის საზღვრებიდან. მის ასახსნელად საჭიროა ან მთელი თეორიის მოდიფიცირება, ან გარკვეული ინტერპრეტაცია. ამ მიმართულებით არ კი ჯერ არ არსებობს არანაირი კონსენსუსი.

ჟურნალ *Nature Physics*-ში ახლახან გამოსული სტატია ეხება სწორედ პირველ პრობლემას. სტატიაში განხილულია კვანტური დეკოჰერენციის ახალი წყარო, რომელზეც პასუხისმგებელია გრავიტაცია. ამასთანავე არ განიხილება არც კვანტური მექანიკის მოდიფიკაცია, არც კვანტური გრავიტაციის და არც რაიმე სხვა ეგზოტიკური თეორია. ეფექტი არსებობს კვანტური მექანიკის დონეზე და ამასთანავე დედამიწის გრავიტაციულ ველში.

ავხსნათ დეკოჰერენციის მოვლენა ორკესტრის მაგალითზე. თუ ორკესტრი უკრავს თვითშეთანხმებულად, ეს ნიშნავს, რომ ყოველი ინსტრუმენტი უკრავს დირიჟორის ჯოხის მოძრაობის ტაქტში და ამიტომაც საერთო ჟღერადობა კოჰერენტულია. მაგრამ თუ თითოეულ მუსიკოსს აქვს თავისი საკუთარი ხელის შემშლელი ფაქტორი, რომელიც იწვევს არაკონტროლირებად შეფერხებებს, მივიღებთ კაკაფონიას, დეკოჰერენციას. ამასთან თუ ორკესტრი იქნებოდა მრავალ მილიონიანი, მივიღებდით ყველანაირი სიხშირის გუგუნს.

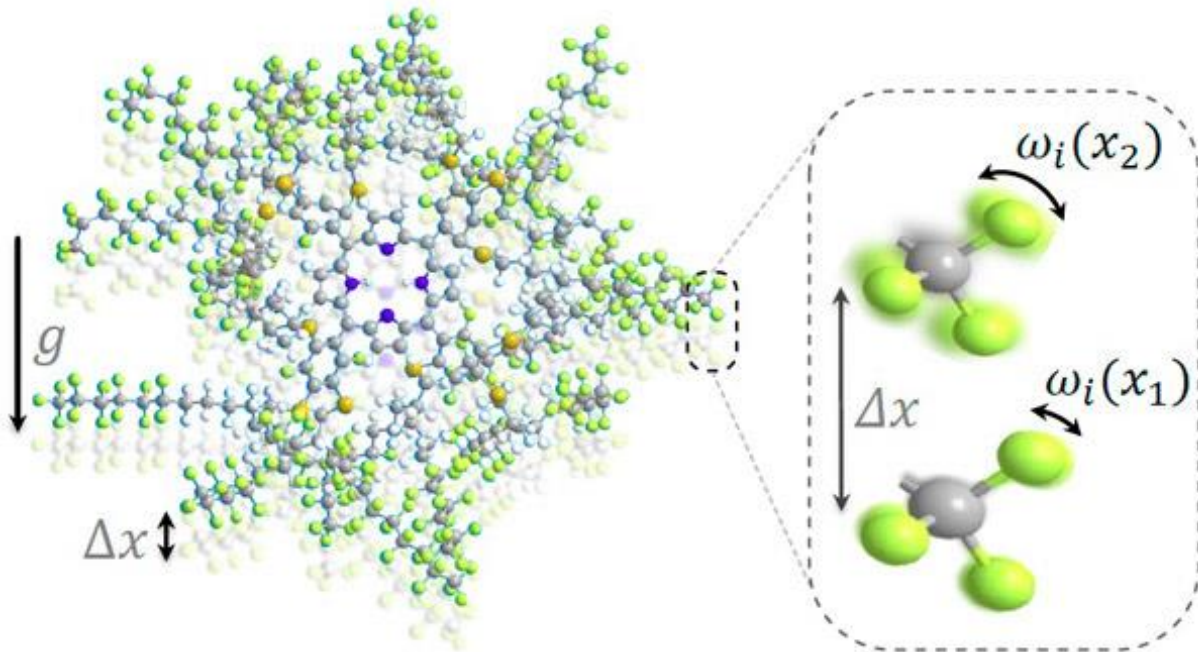
დაახლოებით მსგავსი ახსნა აქვს კვანტური პროცესის კოჰერენტულობის დაკარგვას. მაკრო სხეულის საკუთარ თავთან ინტერფერენციას, ანუ კონკრეტულ მდგომარეობაში არსებობის ალბათობის გრადაციას ადგილი ექნებოდა იმ შემთხვევაში, თუ ყველა ნაწილაკი იქნებოდა კოჰერენტული, ანუ ყველა კვანტური თავისუფლების ხარისხები დაიწყებდნენ რხევას სინქრონულად. ასეთ მომენტებს ადგილი აქვს ფოტო სინთეზში. გარემოსთან ურთიერთქმედება ამ სინქრონიზაციას ურევს, რის გამოც ქრება მაკრო სხეულების ინტერფერენცია. სინქრონიზაციას დაარღვევს მაგალითია მოლეკულების ერთმანეთთან დაჯახება, ან ვაკუუმში ფოტონების მიმოცვლა. სხეულის იზოლირებისთვის იყენებენ აბსოლუტურ ნოლთან ახლო ტემპერატურებს და გარეშე ველების ეკრანებს, რაც ურთულესია, მაგრამ ცალკეული მოლეკულებისთვის სრულებით მიღწევადია. ამის შედეგად მეცნიერებმა შემლეს დიდი მოლეკულების ინტერფერენციის დაკვირვება, თუმცა მიკრონის რიგის ობიექტის ინტერფერენციული სურათის მიღება ჯერ ვერ მოხერხდა.

ითვლებოდა, რომ თუ კვანტურ სისტემას მოვაქცევთ კარგ იზოლატორში, მაშინ ეს სისტემა თავისთავად წავა კოჰერენციისკენ და წონასწორობის მიღწევის შემდეგ დარჩება უსასრულოდ დიდხანს. ახალ შრომებში გამოირკვა, რომ ეს ასე არ არის. იდეალურად იზოლირებულ კვანტურ სისტემებშიც კი ხდება დეკოჰერენცია, რომელიც გამოწვეულია ზოგადი ფარდობითობის თეორიის მიხედვით, სიმძიმის ველში დროის სხვადასხვა დინებით.



ეფექტი მდგომარეობს შემდეგში: დაუშვათ გვაქვს რთული მოლეკულა ბევრი თავისუფლების ხარისხებით (რხევების ბევრი მიმართულება). თუ მოვახდენთ ამ მოლეკულის იზოლირებას, მაშინ ის გახდება კოჰერენტული და რაღაც მომენტში გადავა დელოკალიზებულ მდგომარეობაში. ანუ ის იმყოფება არა რაიმე კონკრეტულ დონეზე, არამედ ორ სხვადასხვა სიმაღლეზე ერთდროულად. ეფექტი ისეთია თითქოს ჩვენი მოლეკულა მიფრინავს სიმძიმის ველში ერთდროულად ორ ტრაექტორიაზე, როცა ეს ორი ტრაექტორია იკვეთება,

მოლეკულა უბრუნდება ლოკალიზებულ მდგომარეობას და ამ მომენტში დაიკვირვება ინტერფერენცია. იდეაში მიიღება სტანდარტული ატომური ინტერფერომეტრი, მაგრამ ორიენტირებული ვერტიკალურად. ეს ექსპერიმენტი ჟღერს ფანტასტიკურად, მაგრამ სინამდვილეში მსგავსი ეფექტები დიდი ხნის წინ იყო მიღწეული ცალკეული ატომებისთვის და ბოზე კონდენსატისთვის. ამ ეფექტს იყენებენ გრავიტაციის ზუსტი გაზომვისთვისაც.



რთული მოლეკულა, რომელიც იმყოფება კვანტურ დელოკალიზებულ მდგომარეობაში ორ სხვადასხვა სიმაღლეზე, განსხვავდება ΔX -ით. იმის გამო, რომ სიმძიმის ველში დრო გადის სხვადასხვანაირად სხვადასხვა სიმაღლეზე, შინაგანი რხევების სიხშირეები არის განსხვავებული და ეს არის კვანტური მდგომარეობის დეკოჰერენციის მიზეზი.

თუ მოლეკულა კარგად არის ეკრანირებული, მოსალოდნელია, რომ ინტერფერენციის პრობლემა არ უნდა იყოს. ანუ ზედა და ქვედა ტრაექტორიებზე ცალკეული რხევები უნდა ერთნაირად მიდიოდეს. მაგრამ ეს ასე არ არის, როცა ვითვალისწინებთ ფარდობითობის თეორიას. როგორც აღვნიშნეთ გრავიტაციული ველის ცვლილება ცვლის დროის მსვლელობას, რაც უფრო დიდია გრავიტაცია მით ნელა გადის დრო. ეს ეფექტი მუშაობს GPS სისტემებშიც კი. ამის გამო როცა მოლეკულა იმყოფება სხვადასხვა სიმაღლეზე სიმძიმის ველში, მისთვის ადგილი აქვს სხვადასხვა დროის მსვლელობას. როდესაც ხდება ლოკალიზება და მოლეკულის მდგომარეობები ერთდება, ადგილი აქვს სინქრონიზაციის დარღვევას შიდა რხევებს შორის. თუ ეს დარღვევა ძლიერია, მაშინ კოჰერენტულობა იკარგება და ინტერფერენცია ქრება. ანუ მოლეკულა განიცდის დეკოჰერენტულობას იმის გამო რომ მოხდა დროითი შეშფოთება.

ასეთ ფუნდამენტურ ფაქტს აქამდე არ აქცევდნენ ყურადღებას რადგან ეფექტი ძალიან სუსტია. დროის მსვლელობის ფარდობითი განსხვავება დედამიწაზე h სიმაღლეზე არის:

$$x = \frac{mgh}{mc^2} = \frac{r_g h}{2R^2}$$

სადაც r_g არის დედამიწის გრავიტაციული რადიუსი, დაახლოებით 1 სმ, ხოლო R არის დედამიწის რეალური რადიუსი დაახლოებით 6400 კმ. როცა h არის მიკრონის რიგის x გამოდის 10^{-22} რიგის, რაც ძალიან მცირეა. ამის გარჩევა აღემატება ადამიანის ამჟამინდელ შესაძლებლობებს, მაგრამ თუ სინქრონული ნაწილაკების რიცხვი და მათი თავისუფლების ხარისხები დიდია, ცხადია სინქრონიზაციის დაკარგვაც ძლიერია. სწორედ ამის დამზერა მოხერხდა ექსპერიმენტში.

შევაჯამოთ. გვაძლევს კი ეს შრომა რაიმე ახალ ცოდნას? რატომ ცხოვრობენ ჩვენს გარშემო საგნები კლასიკური და არა კვანტური გაგებით? პასუხი ცალსახაა, მაკრო სისტემებში კოჰერენტულობის განხორციელების ალბათობა ნოლის მიდამოშია, რადგანაც მაკრო სისტემებში ხდება ძალიან ძლიერი ურთიერთქმედება, რომელიც ძალიან სწრაფად არღვევს კოჰერენტულობას. ასევე ამ ექსპერიმენტიდან გამოჩნდა კვანტური დეკოჰერენტულობის გამომწვევი მოვლენა, გრავიტაცია, რომელსაც პრინციპში ვერსად ვერ დავემალებით.

წყარო:

Igor Pikovski, Magdalena Zych, Fabio Costa & Caslav Brukner,

Universal decoherence due to gravitational time dilation

Nature Physics. 2015. DOI:10.1038/nphys3366. [arXiv: 1311.1095 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/1311.1095).