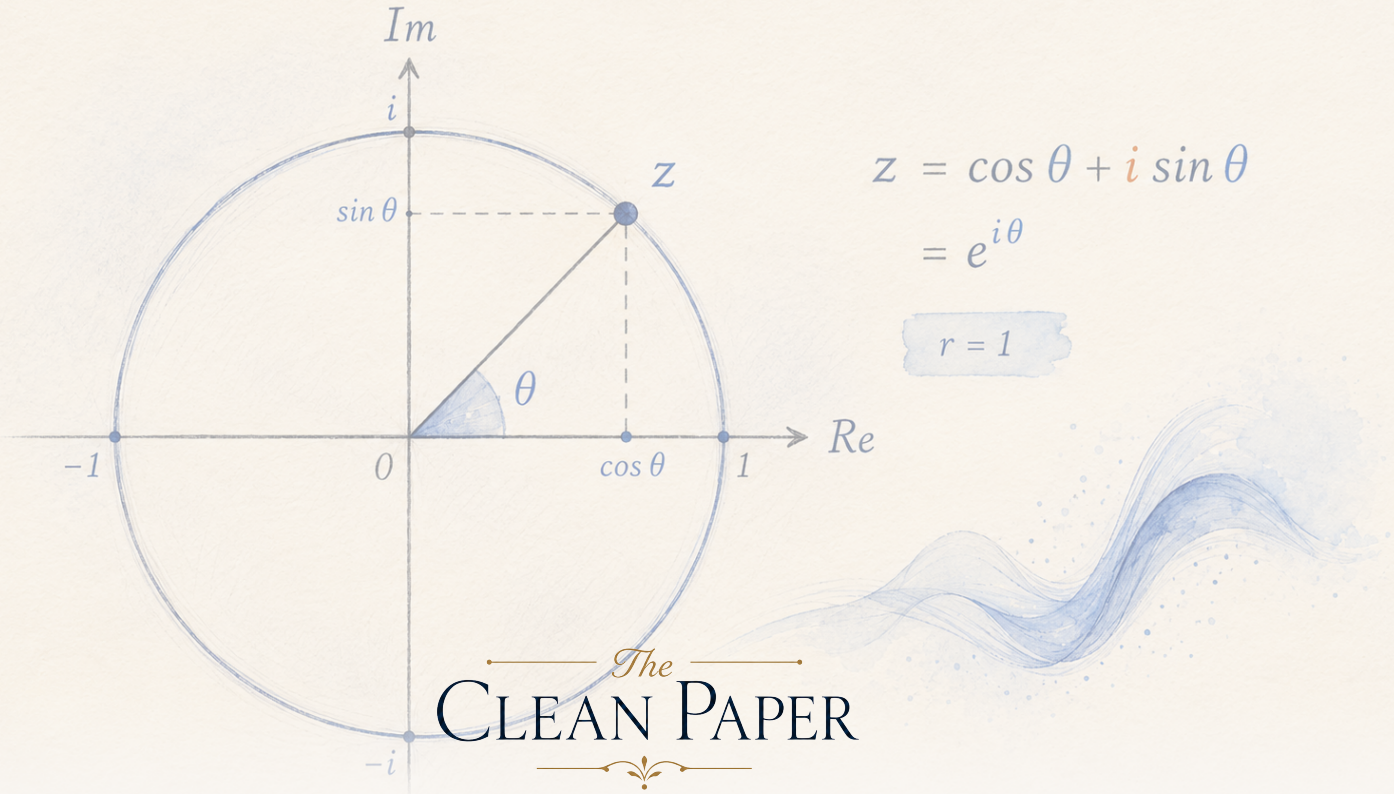


WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

კვანტური მექანიკის დაწერა მხოლოდ რეალური რიცხვებითაც შეიძლება — სირთულე სისტემების გაერთიანებაშია

2021 წელს ფართოდ გაშუქებულმა შედეგმა აჩვენა, რომ კვანტური მექანიკის კონკრეტული რეალურ რიცხვიანი ვერსია ექსპერიმენტულად შეიძლება გამოირიცხოს, ხოლო 2022 წლის ტესტები სტანდარტულ კომპლექსურ თეორიას დაემთხვა. ეს ხშირად წარმოსახვითი რიცხვების ფიზიკურ აუცილებლობად გაშუქდა. ახალი Physical Review Letters-ის ნაშრომი მტკიცებას აზუსტებს: თუ რეალურ რიცხვიან ფორმულირებას ცალკეული სისტემების გაერთიანების სხვა, ლოკალურობაზე დაფუძნებულ დაშვებაზე ააგებთ, ის კომპლექსური კვანტური მექანიკის ყველა პროგნოზს, მათ შორის მრავალმხრივ ტესტებს, იმეორებს. ზუსტი დასკვნაა, რომ კომპლექსური რიცხვები ძალიან მოხერხებულია, მაგრამ მკაცრად აუცილებელი არა — ხოლო წინა ექსპერიმენტებმა ერთი კონკრეტული რეალური თეორია გამორიცხა და არა რეალური რიცხვები პრინციპში. ეს ფუნდამენტური თეორიის შედეგია და არა ახალი გაზომვა.

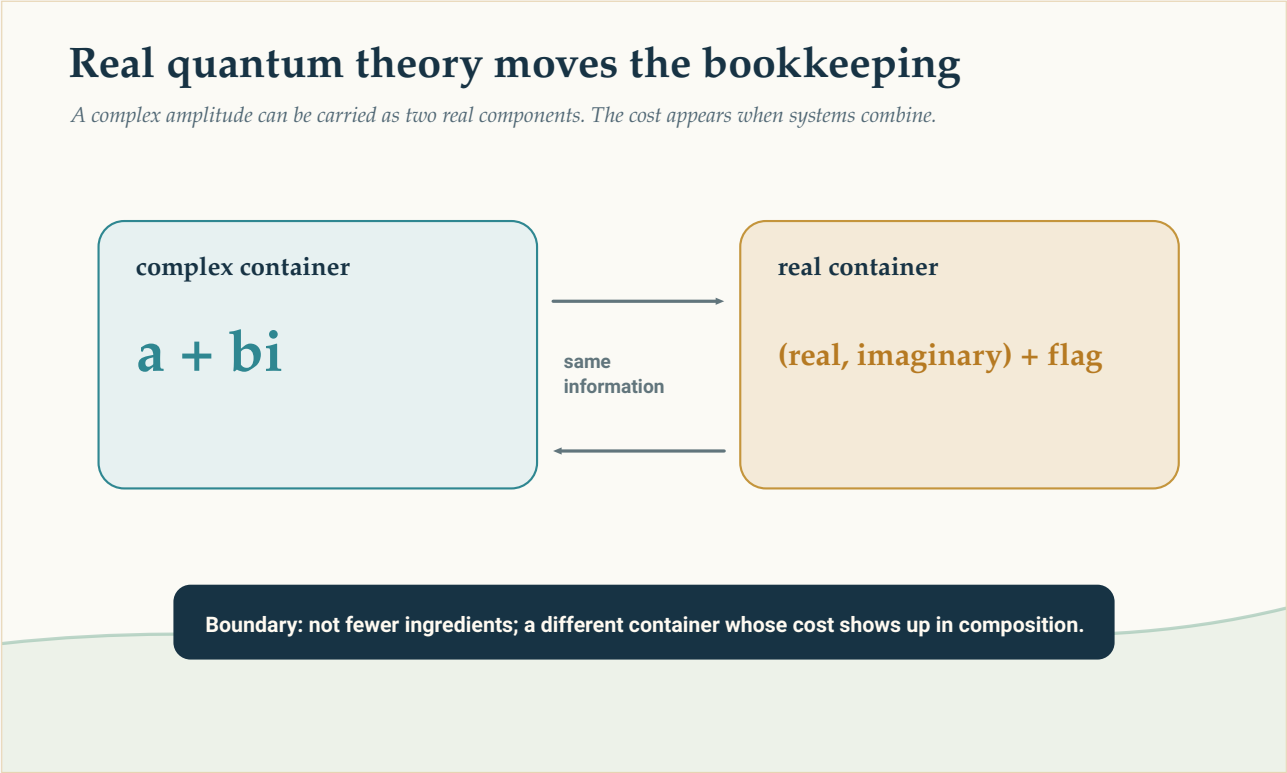
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum Mechanics Based on Real Numbers: A Consistent Description*, Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping, Dagmar Bruss, Physical Review Letters · DOI: 10.1103/4k13-sdjh

სათაური, რომლის ხელახლა წაკითხვაც ღირს

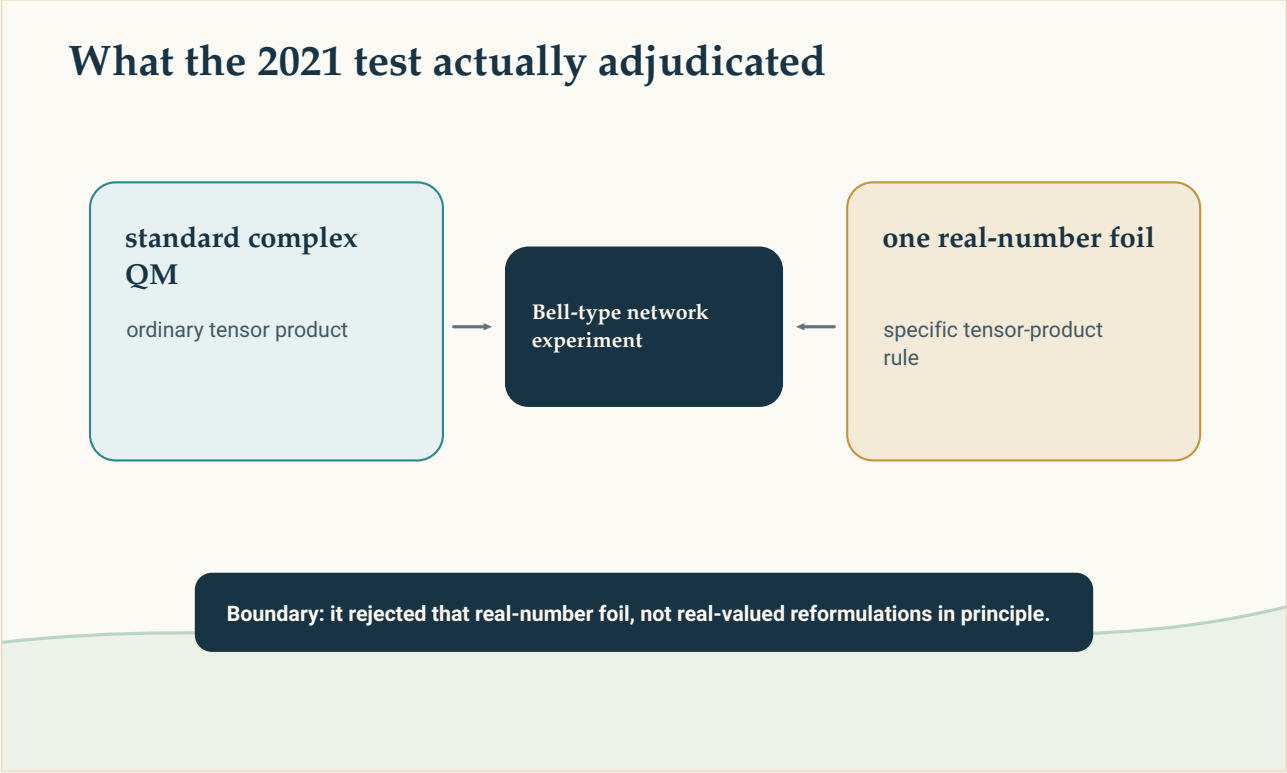
რამდენიმე წლის წინ ერთმა თვალშისაცემმა მტკიცებამ ფართოდ გაიჟღერა: თითქოს ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ წარმოსახვითი რიცხვები ფიზიკურად „რეალურია“ და კვანტური მექანიკის დაწერა მათ გარეშე შეუძლებელია. ეს ამბავი ნამდვილ და ფრთხილ ფიზიკას ეფუძნებოდა — Marc-Olivier Renou-სა და კოლეგების 2021 წლის Nature-ის წინადადებას და 2022 წლის ექსპერიმენტებს, რომლებმაც ის შეამოწმეს. მაგრამ პოპულარულმა ვერსიამ ზუსტი მტკიცება სლოგანამდე შეკუმშა და სლოგანი შედეგზე ძლიერი გამოვიდა.

Pedro Barrios Hita-ს, Anton Trushechkin-ის, Hermann Kampermann-ის, Michael Epping-ისა და Dagmar Bruß-ის ახალი *Physical მიმოხილვა Letters*-ის ნაშრომი ზუსტ ფორმულირებას აბრუნებს. ავტორები აგებენ კვანტური მექანიკის ვერსიას, რომელიც მხოლოდ რეალურ რიცხვებს იყენებს და სტანდარტული კომპლექსური თეორიის **ყველა** პროგნოზს იმეორებს — მათ შორის სწორედ იმ მრავალმხრივ ექსპერიმენტებს, რომლებიც თითქოს რეალურ რიცხვებს გამორიცხავდა. ხრიკი იმაში არ არის, რომ წარმოსახვითი რიცხვები ფარულად დააბრუნონ. იცვლება ერთი დაშვება იმის შესახებ, როგორ ერთიანდება ცალკეული სისტემები. ავტორების საკუთარი სიტყვებით, ზუსტი დასკვნაა: კომპლექსური რიცხვები კვანტური მექანიკის აღსაწერად აუცილებელი არ არის, თუმცა ნამდვილად ძალიან სასარგებლოა.



კომპლექსური ამპლიტუდა a+bi არის რეალური რიცხვების წყვილი, რომელსაც თითოეულ სისტემასთან ერთად დამატებითი „flag“ ახლავს. რეალური ფორმულირება ნაკლებ ინგრედიენტს არ იყენებს — უბრალოდ სხვა კონტეინერია, რომლის ფასი სისტემების გაერთიანების წესში ჩნდება.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



2021–22 წლების ექსპერიმენტები ორ კონკრეტულ თეორიას ადარებდა — სტანდარტულ კომპლექსურ კვანტურ მექანიკას და რეალურ „foil“ თეორიას, რომელიც ჩვეულ ტენზორული ნამრავლის წესს ინარჩუნებს — და შედეგი კომპლექსურ თეორიას დაემთხვა. ექსპერიმენტებმა ეს კონკრეტული foil გამორიცხა და არა რეალური რიცხვები პრინციპში.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

რას აკეთებს კომპლექსური რიცხვი თეორიაში

კვანტურ მექანიკაში სისტემის მდგომარეობა ამპლიტუდებით აღიწერება, ხოლო შედეგის ალბათობის მისაღებად ამპლიტუდის მოდულის კვადრატს იღებთ. სტანდარტულ თეორიაში ეს ამპლიტუდები კომპლექსური რიცხვებია: თითოეულს აქვს ზომა და ფაზა — კუთხე. ფაზა დეკორაცია არ არის. როცა ერთი შედეგისკენ მიმავალი ორი გზა ერთმანეთს ერთვის, მათი ფაზები წყვეტს, გაძლიერდება თუ გაუქმდება ისინი — ეს არის კვანტური ქცევის დამახასიათებელი ინტერფერენცია. სამაგიეროდ, მთელი სისტემისთვის საერთო გლობალური ფაზა ვერასოდეს იზომება.

კომპლექსური რიცხვი სინამდვილეში რეალური რიცხვების წყვილია — რეალური და წარმოსახვითი ნაწილი — კონკრეტული გამრავლების წესებით შეკრული. ამიტომ ბუნებრივია კითხვა: აუცილებელია თუ არა ეს შეფუთვა? შეიძლება ორივე რეალური რიცხვი შევინარჩუნოთ, კომპლექსური ფორმა მოვაშოროთ და მაინც მთელი კვანტური მექანიკა მივიღოთ? სწორედ გამრავლების წესები აქცევს კომპლექსურ რიცხვს ორ

გვერდიგვერდ დაწერილ რიცხვზე მეტ რამედ, ამიტომ პასუხი აშკარა არაა — მთელი სირთულეც აქაა.

რას ადგენდა 2021 წლის შედეგი სინამდვილეში

Renou-მ და კოლეგებმა სწორედ ეს კითხვა მკაფიო, ექსპერიმენტულად შესამოწმებელ ფორმად აქციეს. მათ არ უკითხავთ, შეიძლება თუ არა რეალური რიცხვები საერთოდ გამოიყენებოდეს კვანტურ თეორიაში; კითხვა იყო, შეძლებდა თუ არა რეალურ რიცხვებზე აგებული ფორმულირება კომპლექსური თეორიის ყველა პროგნოზის გამეორებას **სისტემების გაერთიანების ერთი კონკრეტული წესის** პირობებში. ეს წესი — ტენზორული ნამრავლის წესი — რამდენიმე დამოუკიდებელი ნაწილის ერთ მთლიან სისტემად აღწერის სტანდარტული გზაა.

ამ წესის ქვეშ მათ იპოვეს სცენარი, სადაც სამი მონაწილე ორ დამოუკიდებელ წყაროსგან მიღებულ გადახლართულობას იყენებს და რეალურ რიცხვებზე აგებული თეორია და კომპლექსური თეორია განსხვავებულ, გაზომვად კორელაციებს წინასწარმეტყველებ — Bell-ის ტესტის მრავალმხრივი ვერსია. 2022 წელს ასეთი ტესტები ჩატარდა ზეგამტარი წრედებით და ფოტონებით. გაზომილი კორელაციები კომპლექსურ კვანტურ მექანიკას დაემთხვა და რეალურ ალტერნატივას არ დაეთანხმა.

> **რატომ სჭირდება ტესტს ორი წყარო და არა ერთი**
>
> ჩვეულებრივი Bell-ის ტესტი ერთ წყაროს იყენებს, რომელიც Alice-სა და Bob-ს ერთ გადახლართულ წყვილს უგზავნის. ასეთ მოწყობაში რეალურ რიცხვებზე აგებულ კვანტურ მექანიკას ზუსტად იგივე კორელაციების გამეორება შეუძლია, რასაც კომპლექსურ თეორიას — ისინი განურჩეველია და ერთი წყარო არჩევანს ვერ გააკეთებს.
> 2021 წლის არგუმენტი ძალას მეორე, **დამოუკიდებელი** წყაროს დამატებით იღებს. წარმოიდგინეთ სამი მონაწილე ხაზში: Alice, Bob და Charlie. ერთი წყარო Alice-ს Bob-თან გადახლართავს; მეორე, სრულიად დამოუკიდებელი წყარო, რომელსაც პირველთან საერთო წარსული არ აქვს, Bob-ს Charlie-სთან გადახლართავს. Bob შუაში ზის და თავის ორ ნაწილაკს ერთად ზომავს, რითაც ორი ნახევარი ერთმანეთს უკავშირდება. სწორედ ორი წყაროს *დამოუკიდებლობა* — დაშვება, რომ ისინი ცალ-ცალკე მომზადდა — აკეთებს საქმეს: დამოუკიდებელი სისტემების გაერთიანების სტანდარტული ტენზორული ნამრავლის წესის პირობებში რეალური თეორია ამ ქსელისთვის კომპლექსური კვანტური მექანიკის სამმხრივ კორელაციებს ვერ იმეორებს, მაშინ როცა ერთწყაროიან ტესტში ორივე თეორია თანაბარია. ექსპერიმენტებმა სწორედ ეს სხვაობა გაზომეს.

ეს ნამდვილი და სუფთა შედეგია. მაგრამ ყურადღება მიაქციეთ, რას ადარებდა: სტანდარტულ კომპლექსურ კვანტურ თეორიას **ერთ კონკრეტულ რეალურ თეორიასთან** — იმასთან, რომელიც ჩვეულ ტენზორული ნამრავლის წესს ინარჩუნებს. ექსპერიმენტებმა

სწორედ ეს წყვილი განასხვავა და არა „რეალური რიცხვები საერთოდ“. კვანტური საფუძვლების ტერმინოლოგიის გამოყენებით, ახალი ნაშრომი გამორიცხულ ალტერნატივას სწორად **foil theory**-ს უწოდებს — თეორიას, რომელსაც არავინ გვთავაზობს როგორც სინამდვილეს, არამედ სპეციალურად აწყობენ მიღებული თეორიის კონტრასტად, რათა ექსპერიმენტმა ისინი გაარჩიოს. მისი ღირებულება სწორედ განსხვავებადობაშია: foil-ის გამორიცხვა გვაჩვენებს, რომელი დაშვებები იყო მნიშვნელოვანი.

რას ცვლის ახალი ნაშრომი

ახალი სამუშაო თითქმის ყველაფერს ინარჩუნებს და ერთ პოსტულატს ცვლის. სისტემების გაერთიანებისთვის ტენზორული ნამრავლის წესის დაშვების ნაცვლად ის იწყებს ლოკალურობის მოთხოვნიდან, რომელსაც ავტორები ფიზიკურად უფრო ფუნდამენტურად მიიჩნევენ: მხოლოდ ერთ ქვესისტემაზე შესრულებულ ოპერაციას სხვა, ხელუხლებელ ქვესისტემაზე გაზომვადი ეფექტი არ უნდა ჰქონდეს.

ამ საწყისი მოთხოვნიდან ისინი რეალურ რიცხვებზე აგებულ კვანტურ მექანიკას აშკარად კონსტრუირებენ. ჩვეულებრივი ამპლიტუდების რეალური და წარმოსახვითი ნაწილები დამატებითი რეალური აღრიცხვის სახით მიჰყვება სისტემას — ნაშრომი ამას თითოეულ სისტემაზე მიმაგრებულ „flag“-ს უწოდებს — ხოლო კომპლექსური თეორიის არაგაზომვადი გლობალური ფაზა რეალურ თეორიაში ისეთივე არაგაზომვად ბრუნვად იქცევა. ფასი ზუსტად იმ ადგილზე ჩნდება, რომელსაც 2021 წლის შედეგი გამოყოფდა: **სისტემების გაერთიანებაში**. ამ რეალური აღწერების ერთმანეთზე უბრალოდ „მიწებება“ კარგად განსაზღვრულ რეცეპტს არც კი იძლევა, ამიტომ კონსტრუქცია ერთად აერთიანებს იმ აღწერებს, რომლებიც ერთსა და იმავე ფიზიკას წარმოადგენს, და ამ კლასებთან მუშაობს. ამ გაერთიანების წესით რეალური თეორია იმეორებს კომპლექსური თეორიის ყველა მოლოდინის მნიშვნელობას — როგორც ერთი სისტემისთვის, ისე მრავალ სისტემაში, მათ შორის დაშორებულ მონაწილეებს შორის გადახლართულობისას. ავტორები ასევე აჩვენებენ, რომ კონსტრუქცია არსებითად უნიკალური და სტანდარტული კვანტური მექანიკის ეკვივალენტურია.

ამიტომ მრავალმხრივი ექსპერიმენტები ამ რეალურ თეორიას კომპლექსურისგან ვერ განასხვავებს: ისინი ყველა პროგნოზზე თანხმდება. ადრინდელი ექსპერიმენტები არ შეცდა; ისინი უბრალოდ უფრო შეზღუდულ, სხვა რეალურ თეორიას ამოწმებდა.

რატომ არ არის ეს წინააღმდეგობა

ამის წაკითხვა როგორც „2021 წლის ექსპერიმენტები შეცდა“ ადვილი იქნებოდა. სინამდვილეში პირიქითაა. ექსპერიმენტები სწორია და ახალი ნაშრომი სწორედ მათ სისწორეს ეყრდნობა: ყველა გაზომილ კორელაციას იღებს და აჩვენებს რეალურ ფორმულირებას, რომელიც იმავე შედეგებს იძლევა. რაც იცვლება, **ინტერპრეტაციაა** — ნახტომი „ეს რეალური თეორია უარყოფილია“-დან „რეალური რიცხვები კვანტურ

მექანიკაში შეუძლებელია“-მდე. ამ ნახტომმა ის დაშვება გამოტოვა, რომელიც რეალურად აკეთებდა საქმეს.

ნაშრომი არც იმას ამბობს, რომ კომპლექსური რიცხვები უნდა დავტოვოთ. მისი საკუთარი შეჯამება ორივე მხარეს ფრთხილია: კომპლექსური რიცხვები მკაცრად აუცილებელი არ არის, მაგრამ ძალიან სასარგებლოა. რეალურ კონსტრუქციას თითოეულ სისტემაზე დამატებითი flag და უფრო ნატიფი გაერთიანების წესი სჭირდება; კომპლექსური რიცხვები ამ ყველაფერს ერთ სუფთა არითმეტიკაში შეფუთავს. მოხერხებულობა მცირე რამ არაა. ფიზიკაში ხშირად სწორედ ამიტომ იმარჯვებს ერთი ფორმალიზმი მეორეზე.

რატომ არის ეს მნიშვნელოვანი

ქვემოთ უფრო საინტერესო კითხვაა: რას ნიშნავს ფიზიკური თეორიისთვის სიტყვა „აუცილებელი“? ექსპერიმენტს შეუძლია ორი თეორიის გარჩევა, თუ ისინი განსხვავებულ პროგნოზს იძლევა. მაგრამ ექსპერიმენტი თავისთავად ვერ გვეტყვის, რომ კონკრეტული მათემატიკური ინგრედიენტი პროგნოზების ერთადერთი შესაძლო მატარებელია — ეს კითხვა შესაძლო თეორიების არსებობას ეხება და მას კონსტრუქცია წყვეტს, არა გაზომვა. ეს ნაშრომი სწორედ ასეთი კონსტრუქციაა: გვიჩვენებს ალტერნატივას, რომელსაც ხშირად მიიჩნევდნენ ექსპერიმენტულად გამორიცხულად.

შედეგი ზოგად განსხვავებასაც ამკვეთრებს, რომლის შენარჩუნებაც ღირს. „ეს თეორია უარყოფილია“ და „ეს მათემატიკური ინსტრუმენტი გარდაუვალია“ განსხვავებული წინადადებებია. მათ შორის სივრცეში სწორედ იქ შეიძლება სუფთა ექსპერიმენტული შედეგი გადაჭარბებულ მტკიცებად გადაიქცეს. კომპლექსური რიცხვები კვანტური მექანიკის ბუნებრივ და ეფექტიან ენად რჩება. მეტაფიზიკურად აუცილებელია თუ არა ისინი — ცალკე კითხვაა, და ამ კითხვაზე პასუხი ამჟამად „არაა“.

სუფთა შეჯამება

2021 წლის წინადადებამ და 2022 წლის ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ სისტემების გაერთიანების სტანდარტულ ტენზორული ნამრავლის წესზე აგებული რეალურ რიცხვიანი კვანტური მექანიკა კომპლექსური კვანტური მექანიკისგან განსხვავებულ, შესამოწმებელ პროგნოზებს იძლევა, ხოლო ექსპერიმენტები კომპლექსურ თეორიას ემთხვეოდა. ეს ფართოდ გაშუქდა როგორც მტკიცებულება, რომ წარმოსახვითი რიცხვები ფიზიკურად აუცილებელია. ახალი *Physical მიმოხილვა Letters*-ის ნაშრომი სხვა, ლოკალურობაზე დაფუძნებულ პოსტულატზე აგებს რეალურ რიცხვებიან კვანტურ მექანიკას, რომელიც კომპლექსური თეორიის **ყველა** პროგნოზს, მათ შორის მრავალმხრივ ტესტებს, იმეორებს. ამიტომ კომპლექსური რიცხვები მოხერხებულია და არა მკაცრად აუცილებელი. ეს თეორიული კონსტრუქციაა; წინა ექსპერიმენტებს არ აუქმებს და პრაქტიკაში კვანტური მექანიკის რეალურ რიცხვებზე გადაწერას არ

გვთავაზობს.

პირდაპირი შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომი: მხოლოდ რეალური რიცხვებით კვანტური მექანიკის თვითშეთანხმებული ფორმულირება შეიძლება სტანდარტული კომპლექსური თეორიის ყველა პროგნოზს, მათ შორის მრავალმხრივ Bell-ის ტიპის ექსპერიმენტებს, იმეორებდეს, თუ სისტემების გაერთიანებისთვის ტენზორული ნამრავლის წესის ნაცვლად ლოკალურობის პოსტულატზეა აგებული.

რა არის სარწმუნო, მაგრამ მთავარი საკითხი არაა: რომ ეს 2021–2022 წლების შედეგებს „უარყოფს“. არა. ახალი სამუშაო მათ სწორად იღებს და მხოლოდ ფარგლებს ხელახლა განმარტავს: მათ გამორიცხეს ერთი კონკრეტული რეალური თეორია, რომელიც ტენზორული ნამრავლის წესს ინარჩუნებდა, არა რეალური რიცხვები პრინციპში.

რას არ აჩვენებს: რომ კომპლექსური რიცხვები არასწორი, უსარგებლო ან პრაქტიკაში დასატოვებელია — ნაშრომი პირდაპირ უწოდებს მათ ძალიან სასარგებლოს. ეს არც ახალი ექსპერიმენტია: ახალი მონაცემები არ გაზომილა; მტკიცება მათემატიკური კონსტრუქცია და თანმიმდევრულობის დასაბუთებაა.

მთავარი შეზღუდვა ზოგადი მკითხველისთვის: არგუმენტი დამოკიდებულია იმაზე, რომელ დაშვებას მიიჩნევთ ფიზიკურად უფრო ფუნდამენტურად — ტენზორული ნამრავლის წესს თუ ლოკალურობის პოსტულატს. ეს მიმდინარე ფუნდამენტურ დებატში დასაბუთებული არჩევანია და არა გაზომვით ერთხელ და სამუდამოდ დადგენილი ფაქტი; რეალური რიცხვების კონსტრუქცია შეიძლება კომპლექსურ თეორიაზე ნაკლებად ბუნებრივადაც ჩანდეს.

რამდენად უნდა ენდოს ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა, რომ კონსტრუქცია მათემატიკურად თანმიმდევრულია — ნაშრომი peer-reviewed-ია და მისი ლოგიკა შემოწმებადია. სანდო დასკვნა მოკრძალებულია: კომპლექსური რიცხვები კვანტური მექანიკის მოხერხებული ენაა და არა დამტკიცებული მეტაფიზიკური აუცილებლობა. სათაურს „წარმოსახვითი რიცხვები რეალურია“ მოექეცით როგორც სლოგანს, რომლის გასწორებაც ამ ნაშრომს სურს.

წყაროები

P. Barrios Hita, A. Trushechkin, H. Kampermann, M. Epping and D. Bruss, Physical Review Letters 136, 240202 (2026), DOI 10.1103/4k13-sdjh
https://doi.org/10.1103/4k13-sdjh