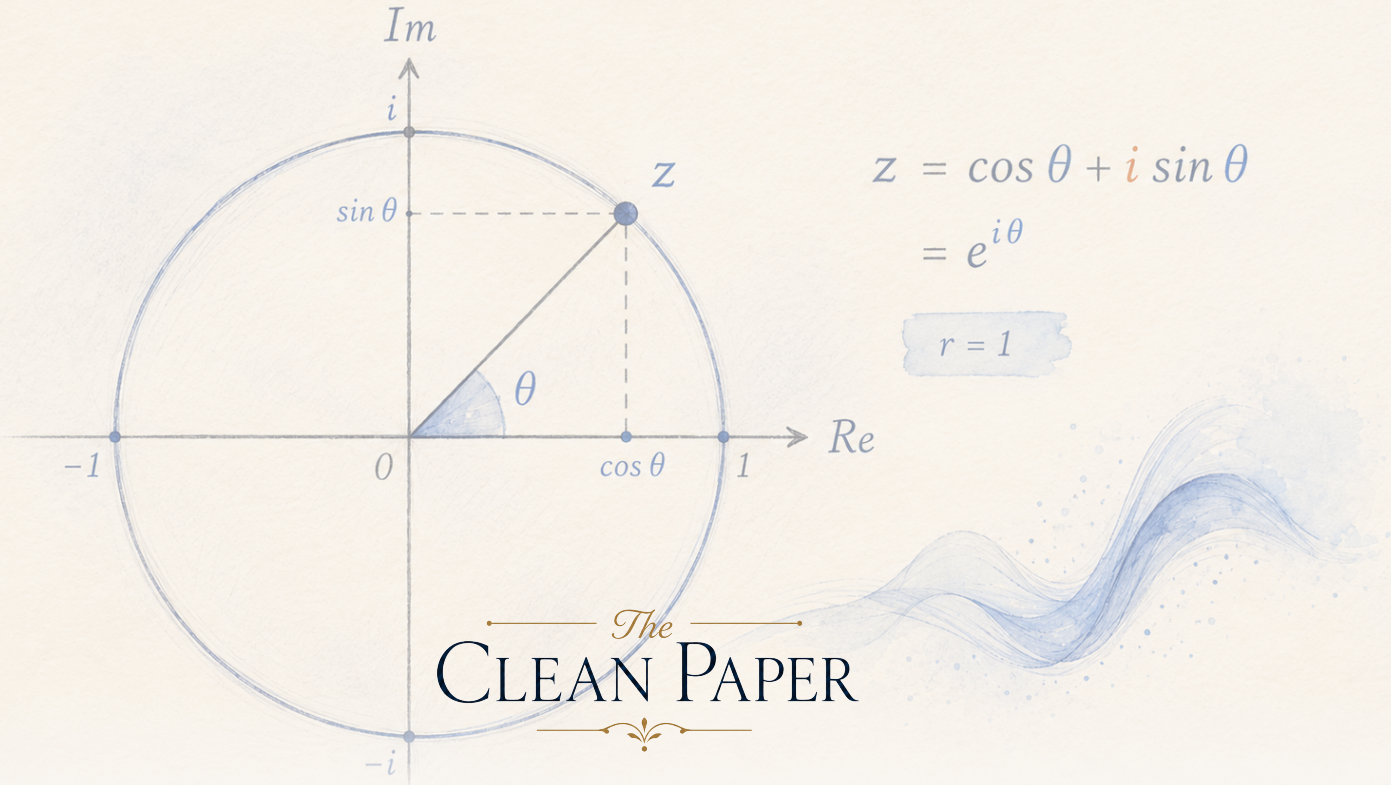


The Clean Paper

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

Քվանտային մեխանիկան կարելի է գրել միայն իրական թվերով. նրբությունը համակարգերը միավորելու ձևի մեջ է

2021-ին լայնորեն տարածված մի արդյունք պնդում էր, որ իրական թվերով քվանտային մեխանիկան կարելի է փորձով հերքել, իսկ 2022-ի փորձերը համապատասխանեցին ստանդարտ կոմպլեքս տեսությանը: Դա հաճախ ներկայացվում էր որպես ապացույց, որ imaginary թվերը ֆիզիկապես իրական են: Physical Review Letters-ի նոր հոդվածը ճշտում է scope-ը. եթե իրական թվերով ձևակերպումը կառուցվում է առանձին համակարգերի միավորման այլ, locality-ի վրա հիմնված ենթադրությամբ, այն վերարտադրում է կոմպլեքս քվանտային մեխանիկայի բոլոր կանխատեսումները՝ ներառյալ բազմակողմ թեստերը: Ազնիվ ընթերցումը սա է. կոմպլեքս թվերը հարմար են, բայց խիստ անհրաժեշտ չեն, իսկ ավելի վաղ փորձերը բացառել են մեկ կոնկրետ իրական տեսություն, ոչ իրական թվերն ընդհանրապես: Սա foundations-ի տեսական արդյունք է, ոչ նոր չափում, և չի առաջարկում հրաժարվել կոմպլեքս թվերից:

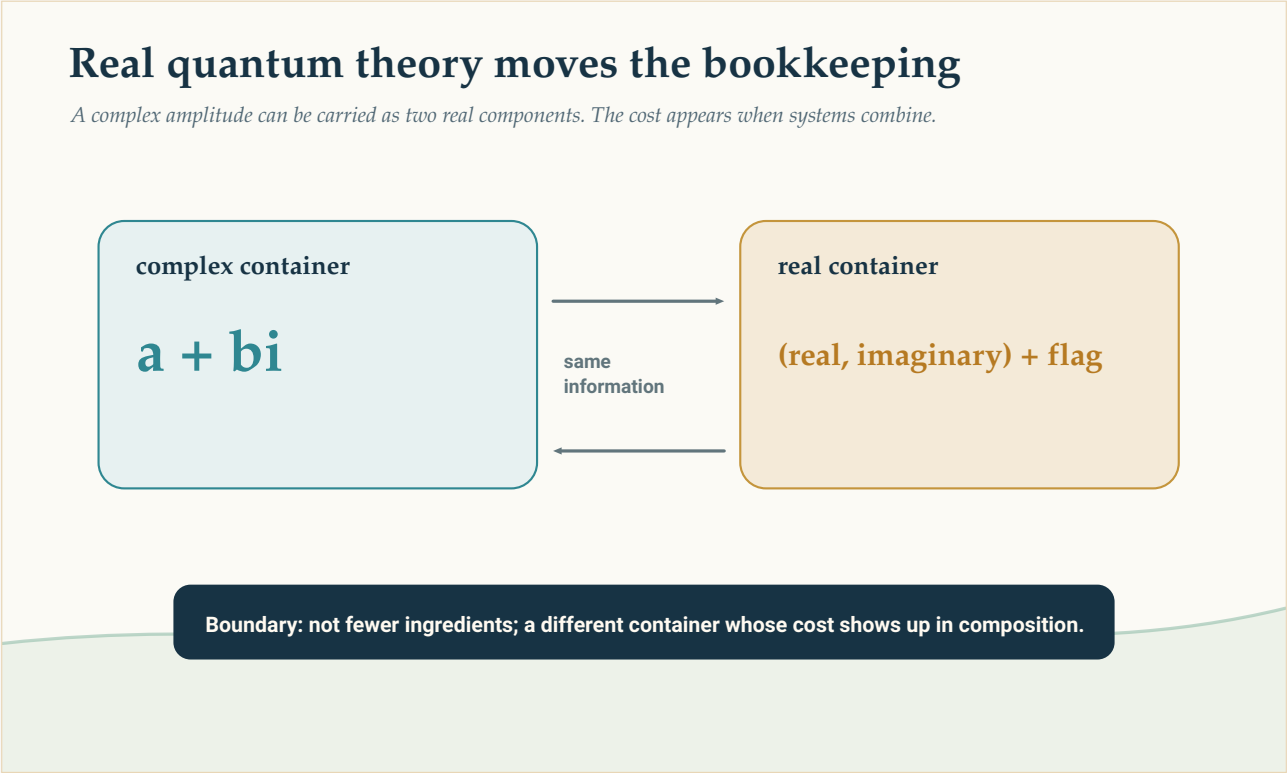
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Վերնագիր, որն արժե երկրորդ անգամ կարդալ

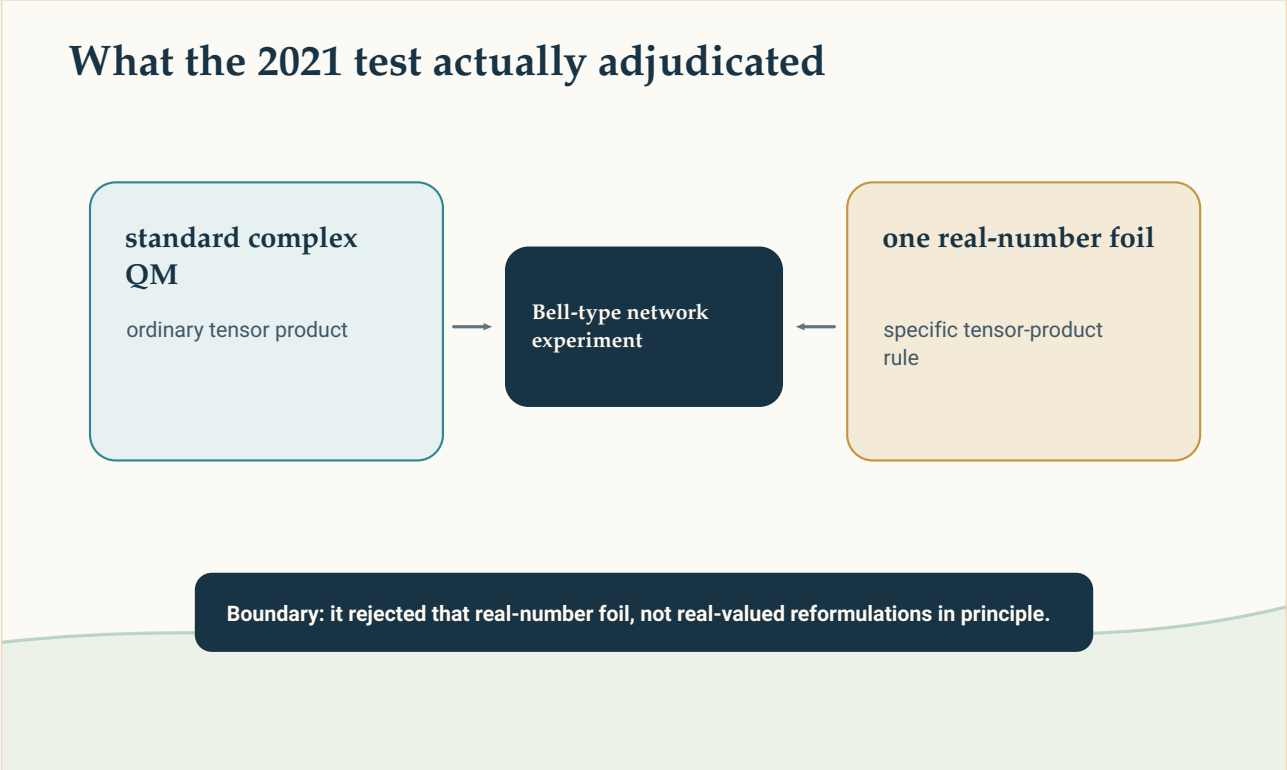
Մի քանի տարի առաջ տպավորիչ պնդում էր շրջանառվում. իբր փորձերը ցույց են տվել, որ երևակայական թվերը ֆիզիկապես «իրական» են և քվանտային մեխանիկան առանց դրանց գրել հնարավոր չէ: Պնդումը ծնվել էր իրական և զգուշորեն արված ֆիզիկայից՝ ՄարկՕլիվիե Ռենուի և գործընկերների 2021 թվականի Nature առաջարկից և այն իրականացրած 2022 թվականի փորձերից: Բայց հանրամատչելի տարբերակը ճշգրիտ պնդումը սեղմեց մեկ կարգախոսի, իսկ կարգախոսը արդյունքից ավելի ուժեղ էր:

Պեդրո Բարիոս Իտայի, Անտոն Տրուշեչկինի, Հերման Կամպերմանի, Միքայել Էփինգի և Դագմար Բրյուսի նոր հոդվածը *ֆիզիկական գրախոսություն Letters*-ում վերադարձնում է ճշգրիտ ձևակերպումը: Այն կառուցում է քվանտային մեխանիկայի տարբերակ, որը օգտագործում է միայն իրական թվեր և վերարտադրում է ստանդարտ կոմպլեքս տեսության **բոլոր** կանխատեսումները, ներառյալ հենց այն բազմակողմ փորձերը, որոնք հաճախ ներկայացվում էին որպես իրական թվերը բացառող: Հնարքը երևակայական թվերը գաղտնի հետ բերելը չէ: Փոխվում է մեկ ենթադրություն այն մասին, թե ինչպես են առանձին համակարգերը միավորվում: Հեղինակների զուսպ եզրակացությունն այն է, որ կոմպլեքս թվերը քվանտային մեխանիկան նկարագրելու համար խիստ անհրաժեշտ չեն, բայց հաստատ շատ օգտակար են:



Կոմպլեքս ամպլիտուդը՝ a+bi, կարելի է ներկայացնել որպես երկու իրական թիվ՝ յուրաքանչյուր համակարգի հետ պահվող լրացուցիչ «flag»-ով: Իրական թվերով ձևակերպումը ավելի քիչ բաղադրիչներ չի օգտագործում. պարզապես նույն ինֆորմացիայի ուրիշ տարա է, իսկ գինը երևում է համակարգերը միացնելիս:

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



2021–22 փորձերը համեմատել էին երկու կոնկրետ տեսություն՝ ստանդարտ կոմպլեքս քվանտային մեխանիկան և տենզորային արտադրյալ կանոնը պահող իրական թվերով «foil» տեսությունը, ու տվյալները ընտրել էին կոմպլեքս տարբերակը: Դրանք բացառել են այդ foil-ը, ոչ իրական թվերն ընդհանրապես:

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ինչ են անում կոմպլեքս թվերը տեսության մեջ

Քվանտային մեխանիկայում համակարգի վիճակը նկարագրվում է ամպլիտուդներով, իսկ արդյունքի հավանականությունը ստանալու համար վերցվում է ամպլիտուդի մեծության քառակուսին: Ստանդարտ տեսությունում այդ ամպլիտուդները կոմպլեքս թվեր են. յուրաքանչյուրն ունի մեծություն և փուլ՝ անկյուն: Այդ փուլը ձևական զարդարանք չէ: Երբ նույն արդյունքին տանող երկու ուղի միանում են, դրանց փուլերը որոշում են՝ դրանք իրար ուժեղացնո՞ւմ, թե՞ չեղարկում են: Սա interference-ն է՝ քվանտային վարքի բնորոշ նշանը: Իսկ ամբողջ համակարգի համար ընդհանուր փուլը, հակառակը, երբեք չի չափվում:

Կոմպլեքս թիվը կարելի է դիտել որպես երկու իրական թվերի զույգ՝ իրական և երևակայական մաս, որոնք փաթեթավորված են բազմապատկման որոշակի կանոններով: Բնական հարցն այն է, թե արդյոք հենց այս «փաթեթավորումը»

էական է: Կարելի՞ է պահել այդ երկու իրական թվերը, հրաժարվել կոմպլեքս notation-ից և միևնույն է ունենալ ամբողջ քվանտային մեխանիկան: Բազմապատկման կանոններն են, որ կոմպլեքս թվերը դարձնում են ավելին, քան կողքկողքի երկու թիվ, ու հենց այստեղ է նրբությունը:

Ինչ իրականում հաստատեց 2021 թվականի արդյունքը

Ռենուն և գործընկերները հենց այդ հարցն են տվել և այն դարձրել հստակ ու փորձարկելի: Նրանք չեն հարցրել՝ իրական թվերը կարո՞ղ են որևէ տեղ հայտնվել քվանտային տեսությունում: Հարցրել են՝ իրական թվերով ձևակերպումը կարո՞ղ է վերարտադրել կոմպլեքս տեսության բոլոր կանխատեսումները, եթե համակարգերը միավորելու համար ընդունվի որոշակի կանոն: Այդ կանոնը՝ տենզորային արտադրյալ կանոնը, անկախ մասերը մեկ ամբողջ համակարգի վերածելու ստանդարտ prescription-ն է:

Այդ կանոնի ներքո նրանք գտել են երեք կողմով և երկու անկախ աղբյուրից entanglement-ով սցենար, որտեղ իրական թվերով և կոմպլեքս տեսությունները տարբեր, չափելի կորելացիաներ են կանխատեսում՝ Bell թեստի բազմակողմ տարբերակ: 2022 թվականին superconducting circuit-ներով և ֆոտոններով փորձերը կատարել են այդ թեստերը: Չափված կորելացիաները համապատասխանել են կոմպլեքս քվանտային մեխանիկային և անհամատեղելի են եղել այդ իրական alternative-ի հետ:

> **Ինչու է թեստին պետք երկու աղբյուր, ոչ մեկը**
>
> Սովորական Bell թեստում մեկ աղբյուր entangled զույգ է ուղարկում երկու կողմի՝ Alice-ին և Bob-ին: Այդ կարգավորումում իրական թվերով քվանտային մեխանիկան կարող է վերարտադրել ճիշտ նույն կորելացիաները, ինչ կոմպլեքս տեսությունը: Այսինքն՝ երկու տեսություններն անտարբերելի են, և մեկ աղբյուրը չի կարող ընտրել դրանց միջև:
> 2021-ի փաստարկը ուժ է ստանում, երբ ավելացվում է երկրորդ, **անկախ** աղբյուրը: Պատկերացրեք երեք կողմ մեկ գծի վրա՝ Alice, Bob, Charlie: Մի աղբյուրը entangle է անում Alice-ին Bob-ի հետ, իսկ առանձին աղբյուրը, որը առաջինի հետ ընդհանուր անցյալ չի կիսում, Bob-ին entangle է անում Charlie-ի հետ: Bob-ը մեջտեղում է և իր երկու մասնիկները միասին չափում է՝ կապելով երկու կեսերը: Աշխատող ենթադրությունը հենց երկու աղբյուրների *անկախությունն* է՝ այն, որ դրանք առանձին են պատրաստվել: Անկախ համակարգերը ստանդարտ տենզորային արտադրյալ կանոնով միավորելու դեպքում իրական թվերով տեսությունը չի կարող վերարտադրել այն եռակողմ կորելացիաները, որոնք կոմպլեքս քվանտային մեխանիկան կանխատեսում է այս ցանցի համար, մինչդեռ մեկ աղբյուրով թեստում տեսությունները

> հավասար են մնում։ Փորձերը չափել են հենց այս բացը։

Սա իրական և մաքուր արդյունք է։ Բայց պետք է շատ ճշգրիտ նկատել՝ ինչ էր համեմատվում. ստանդարտ կոմպլեքս քվանտային տեսությունը **մեկ կոնկրետ** իրական թվերով տեսության հետ՝ այն տարբերակի, որը պահում է սովորական տենզորային արտադրյալ կանոնը։ Փորձերը որոշել են հենց այդ զույգի միջև, ոչ իրական թվերի «հնարավորության» մասին ընդհանրապես։ Նոր հոդվածը, օգտագործելով քվանտային foundations-ում ընդունված տերմինը, այդ բացառված տարբերակը անվանում է *foil տեսություն*՝ տեսություն, որը ոչ ոք լուրջ չի ներկայացնում որպես ճիշտ, այլ դիտավորյալ կառուցված հակադրություն է ընդունված տեսությանը, որպեսզի փորձը կարողանա տարբերել երկուսը։ Նրա արժեքը հենց տարբերելի լինելն է. foil-ը բացառելով կարելի է հասկանալ, թե դրա ո՞ր ենթադրություններն էին պատասխանատու տարբեր կանխատեսումների համար։

Ինչ է փոխում նոր հոդվածը

Նոր աշխատանքը գրեթե ամեն ինչ պահում է և փոխում մեկ postulate։ Համակարգերը միավորելու տենզորային արտադրյալ կանոնը նախապես ընդունելու փոխարեն այն սկսում է տեղանքի պահանջից, որը հեղինակները ավելի ֆիզիկապես հիմնարար են համարում. միայն մի ենթահամակարգի վրա կատարված գործողությունը չպետք է չափելի ազդեցություն ունենա մյուս, չդիպչած ենթահամակարգի վրա։

Այս ելակետից նրանք բացահայտ կառուցում են իրական թվերով քվանտային մեխանիկա։ Սովորական ամպլիտուդների իրական և երևակայական մասերը պահվում են լրացուցիչ իրական bookkeeping-ի ձևով՝ հոդվածը դա անվանում է յուրաքանչյուր համակարգին կցված «flag»։ Կոմպլեքս տեսության չչափվող global փուլը իրական տարբերակում դառնում է նույնքան չչափվող պտույտ։ Գինը հայտնվում է հենց այնտեղ, որտեղ 2021-ի արդյունքն էր տեղակայել խնդիրը՝ համակարգերը միավորելու կանոնում։ Իրական նկարագրությունները միացնելու «պարզամիտ» ձևը նույնիսկ լավ սահմանված prescription չի տալիս, ուստի կառուցումը փոխարենը խմբավորում է նույն ֆիզիկան ներկայացնող նկարագրությունները և աշխատում այդ equivalence class-ների հետ։ Այդ միավորման կանոնով իրական տեսությունը վերարտադրում է կոմպլեքս տեսության կանխատեսած **յուրաքանչյուր expectation արժեք**՝ մեկ համակարգի և բազմաթիվ, հեռու կողմերի միջև entangled համակարգերի համար։ Հեղինակները նաև ցույց են տալիս, որ կառուցումը էությամբ միակն է և համարժեք է ստանդարտ քվանտային մեխանիկային։

Ուրեմն բազմակողմ փորձերը չեն կարող այս իրական տեսությունը տարբերել կոմպլեքսից, որովհետև երկուսն էլ բոլոր կանխատեսումներով համընկնում են։ Ավելի վաղ փորձերը չեն ձախողվել։ Դրանք պարզապես փորձարկել են ուրիշ՝ ավելի սահմանափակ իրական տեսություն։

Ինչու սա հակասություն չէ

Հեշտ կլիներ սա կարդալ որպես «2021-ի փորձերը սխալ էին»։ Իրականում հակառակն է։ Փորձերը ճիշտ էին, և նոր հոդվածը հենց դրա վրա է հիմնվում. այն ընդունում է բոլոր չափված կորելացիաները և ցույց տալիս իրական թվերով ձևակերպում, որը նույնպես տալիս է դրանք։ Փոխվում է մեկնաբանությունը՝ «այս իրական տեսությունը falsified է» պնդումից դեպի «իրական թվերը քվանտային մեխանիկայում անհնար են» թռիչքը։ Այդ թռիչքը անտեսել էր հենց այն ենթադրությունը, որն առաջացնում էր տարբերությունը։

Հոդվածը նաև չի պնդում, որ պետք է հրաժարվել կոմպլեքս թվերից։ Իր ամփոփման մեջ երկու կողմն էլ զգուշորեն է ձևակերպված. կոմպլեքս թվերը խիստ անհրաժեշտ չեն, բայց շատ օգտակար են։ Իրական թվերով կառուցումը յուրաքանչյուր համակարգի համար լրացուցիչ flag է պահանջում և ավելի նուրբ կանոն՝ համակարգերը միավորելու համար։ Կոմպլեքս թվերը այդ ամենը փաթեթավորում են մեկ մաքուր թվաբանական կառուցվածքում։ Հարմարությունը աննշան բան չէ։ Ֆիզիկայում հաճախ հենց դա է պատճառը, որ մի formalism հաղթում է մյուսին։

Ինչու է սա կարևոր

Խորքային հետաքրքիր հարցն այն է, թե ֆիզիկական տեսության մեջ «անհրաժեշտ» բառը ինչ է նշանակում։ Փորձը կարող է տարբերել երկու տեսություն, երբ դրանք տարբեր բաներ են կանխատեսում։ Բայց միայն փորձը չի կարող ասել, որ կոնկրետ մաթեմատիկական բաղադրիչը կանխատեսումների տվյալ հավաքածուի **միակ հնարավոր տարան** է։ Դա հարց է այն մասին, թե ինչ տեսություններ կարելի է կառուցել, և լուծվում է կառուցումով, ոչ չափումով։ Այս հոդվածը հենց կառուցում է. այն ցույց է տալիս alternative-ը, որը կարծել էին, թե փորձերն արդեն բացառել են։

Արդյունքը նաև սրում է ընդհանուր առմամբ կարևոր տարբերությունը։ «Այս տեսությունը falsified է» և «այս մաթեմատիկական գործիքն անխուսափելի է» տարբեր պնդումներ են։ Հենց այդ բացում է, որ մաքուր փորձարարական արդյունքը կարող է վերածվել չափազանցված վերնագրի։ Կոմպլեքս թվերը մնում են քվանտային մեխանիկայի բնական և արդյունավետ լեզուն։ Արդյոք դրանք metaphysically պարտադի՞ր են՝ առանձին հարց է։ Առայժմ այդ հարցի պատասխանը՝ ոչ։

Կարճ ամփոփում

2021-ի առաջարկը և 2022-ի փորձերը ցույց էին տվել, որ համակարգերը միավորելու ստանդարտ տենզորային արտադրյալ կանոնի վրա կառուցված իրական թվերով քվանտային մեխանիկան տալիս է կոմպլեքս քվանտային մեխանիկայից տարբեր և փորձարկելի կանխատեսումներ, իսկ փորձերը համապատասխանել էին կոմպլեքս

տեսությանը։ Սա լայնորեն ներկայացվեց որպես ապացույց, որ երևակայական թվերը ֆիզիկապես անհրաժեշտ են։ Նոր *Ֆիզիկական գրախոսություն Letters* հոդվածը տեղանքի վրա հիմնված ուրիշ postulate-ով կառուցում է իրական թվերով քվանտային մեխանիկա, որը վերարտադրում է կոմպլեքս տեսության բոլոր կանխատեսումները, ներառյալ բազմակողմ թեստերը։ Այսինքն՝ կոմպլեքս թվերը շատ հարմար են, բայց խիստ անհրաժեշտ չեն։ Սա տեսական կառուցում է, չի շրջում ավելի վաղ փորձերը և չի առաջարկում գործնականում վերաձևակերպել քվանտային մեխանիկան։

Առանց չափազանցության

Ինչ է ցույց տալիս հոդվածը. որ միայն իրական թվեր օգտագործող ինքնահամահունչ քվանտային մեխանիկան կարող է վերարտադրել ստանդարտ կոմպլեքս տեսության յուրաքանչյուր կանխատեսում, ներառյալ բազմակողմ Bell-type փորձերը, եթե համակարգերը միավորելու տենզորային արտադրյալ կանոնի փոխարեն այն կառուցված է տեղանք postulate-ի վրա։

Ինչն է հնարավոր մեկնաբանություն, բայց ոչ հոդվածի իմաստը. որ սա «հերքում է» 2021–2022 արդյունքները։ Չի հերքում։ Այն ընդունում է այդ փորձերը որպես ճիշտ և վերաիմաստավորում դրանց սահմանները. դրանք բացառել են մեկ կոնկրետ իրական տեսություն՝ տենզորային արտադրյալ կանոնը պահող տարբերակը, ոչ իրական թվերն սկզբունքորեն։

Ինչ սա չի ցույց տալիս. որ կոմպլեքս թվերը սխալ են, անօգուտ են կամ արժե հրաժարվել դրանցից գործնականում. հոդվածն ինքն է դրանք շատ օգտակար անվանում։ Սա նաև նոր փորձ չէ. նոր տվյալներ չեն չափվել։ Պնդումը մաթեմատիկական կառուցում և consistency ապացույց է։

Հիմնական սահմանափակումները ընդհանուր ընթերցողի համար. փաստարկը կախված է նրանից, թե որ ենթադրությունն եք ավելի ֆիզիկապես հիմնարար համարում՝ տենզորային արտադրյալ կանո՞նը, թե տեղանք postulate-ը։ Սա foundations-ի շարունակվող բանավեճում փաստարկված ընտրություն է, ոչ չափումով ամրագրված փաստ, իսկ իրական թվերով կառուցումը կարելի է համարել ավելի քիչ բնական, քան այն կոմպլեքս տեսությունը, որի կանխատեսումները կրկնում է։

Որքա՞ն վստահություն պետք է ունենա ընդհանուր ընթերցողը։ Բարձր՝ որ կառուցումը մաթեմատիկապես համահունչ է. այն գրախոսված է, իսկ տրամաբանությունը ստուգելի։ Վստահելի takeaway-ը համեստն է. կոմպլեքս թվերը քվանտային մեխանիկայի շատ հարմար լեզուն են, ոչ ապացուցված metaphysical անհրաժեշտություն։ «Երևակայական թվերը իրական են» տիպի վերնագիրը պետք է ընդունել հենց որպես այն կարգախոսը, որը այս հոդվածը փորձել է ուղղել։

Աղբյուրներ

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