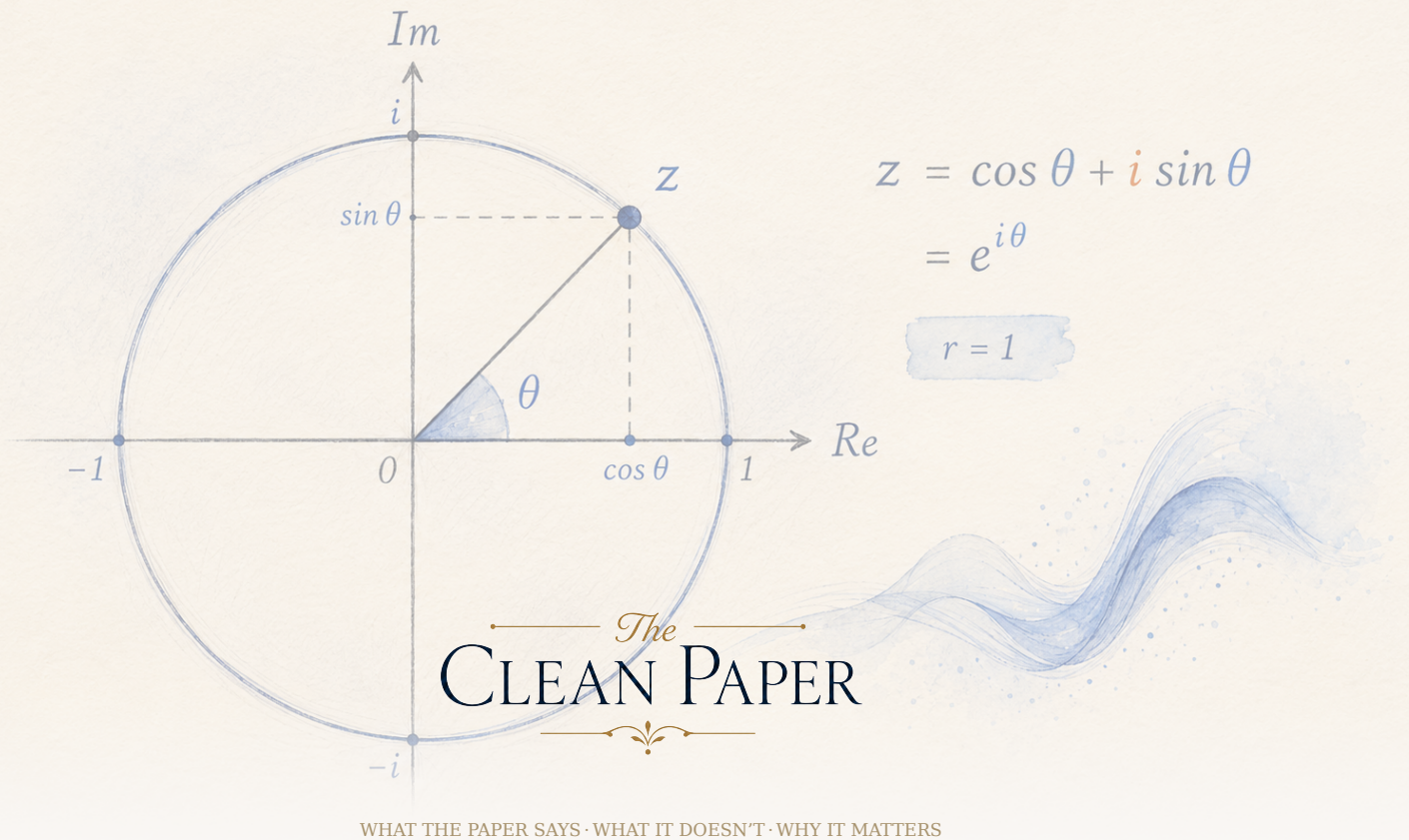




Քվանտային մեխանիկան կարելի է գրել միայն իրական թվերով. նրբությունը համակարգերը միավորելու ձևի մեջ է

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

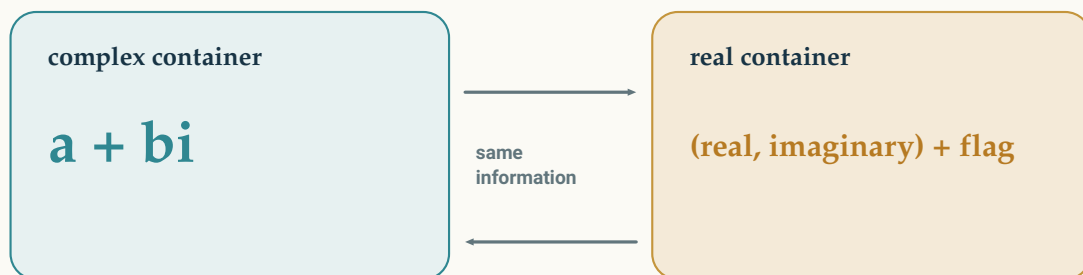
Վերնագիր, որն արժե երկրորդ անգամ կարդալ

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՝ Մարկ Օլիվիե 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:

Պեղրո Բարիոս Իտայի, Անտոն Տրուշեկինի, 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 ենթադրությունն այն մասին, թե ինչպես են առանձին համակարգերը միավորվում: Հեղինակների գուսպ եզրակացությունն այն է, որ կոմպլեքս թվերը քվանտային մեխանիկան նկարագրելու համար խիստ անհրաժեշտ չեն, բայց հաստատ շատ օգտակար են:

Real quantum theory moves the bookkeeping

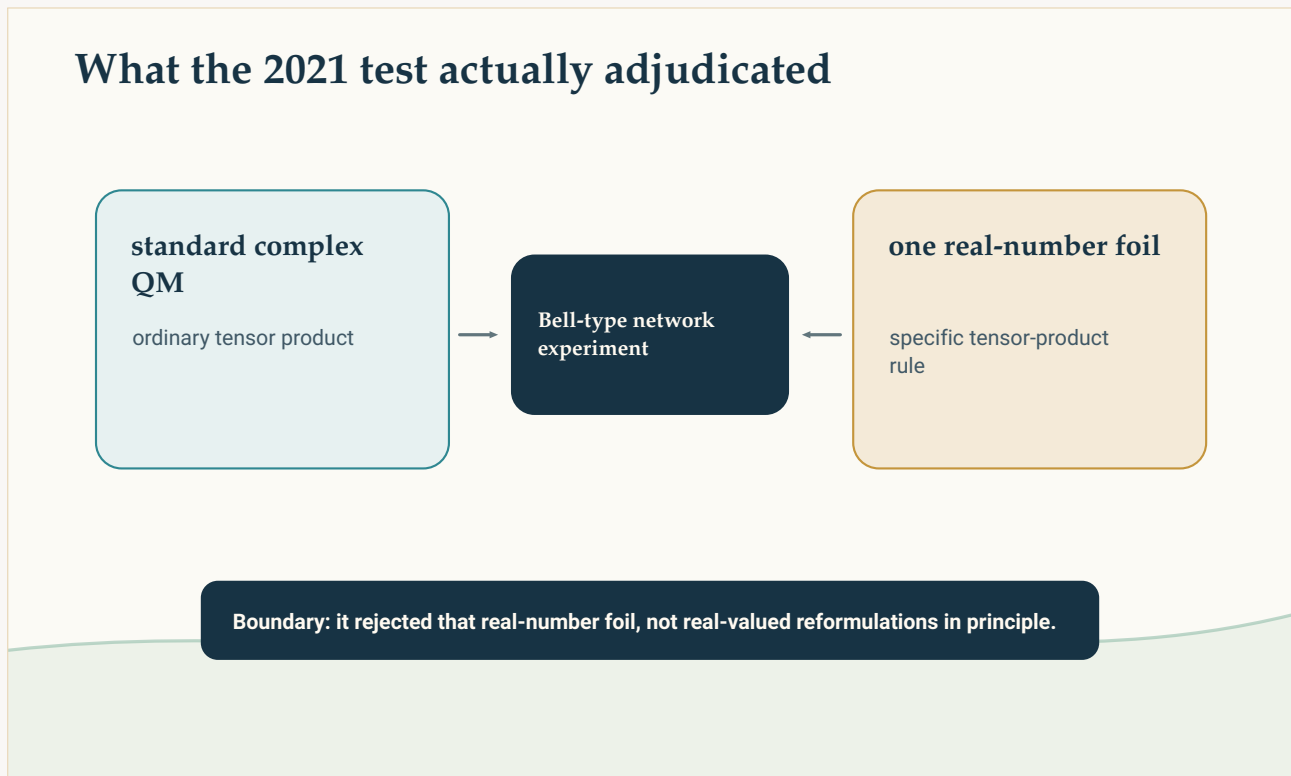
A complex amplitude can be carried as two real components. The cost appears when systems combine.



Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

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 գույգ՝ 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 գույգ 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 գույգի 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: Գիներ 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 ֆիզիկական 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 էությանմբ 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 հակասությունն չէ

Հեշտ կլիներ սա կարդալ որպես «2021-ի փորձերը սխալ էին»: Իրականում հակառակն է: Փորձերը ճիշտ էին, և նոր հողվածը 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» թոփչքը: Այդ թոփչքը անտեսել էր հենց այն ենթադրությունը, որն առաջացնում էր տարբերությունը:

Հողվածը 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 հողվածը 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 պարտադիր 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 մեխանիկական կարող է վերարտադրել ստանդարտ կոմպլեքս տեսության յուրաքանչյուր կանխատեսում, ներառյալ բազմակողմ Bell-type փորձերը, եթե համակարգերը միավորելու տենցորային 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 վերախմաստավորում դրանց սահմանները. դրանք բացառել են մեկ կոնկրետ իրական տեսություն՝ տենցորային արտադրյալ կանոնը պահող տարբերակը, ոչ իրական թվերն սկզբունքորեն:

Ինչ սա չի ցույց տալիս. որ կոմպլեքս թվերը սխալ են, անօգուտ են կամ արժեն 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՝ տենցորային արտադրյալ կանոնը, 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>