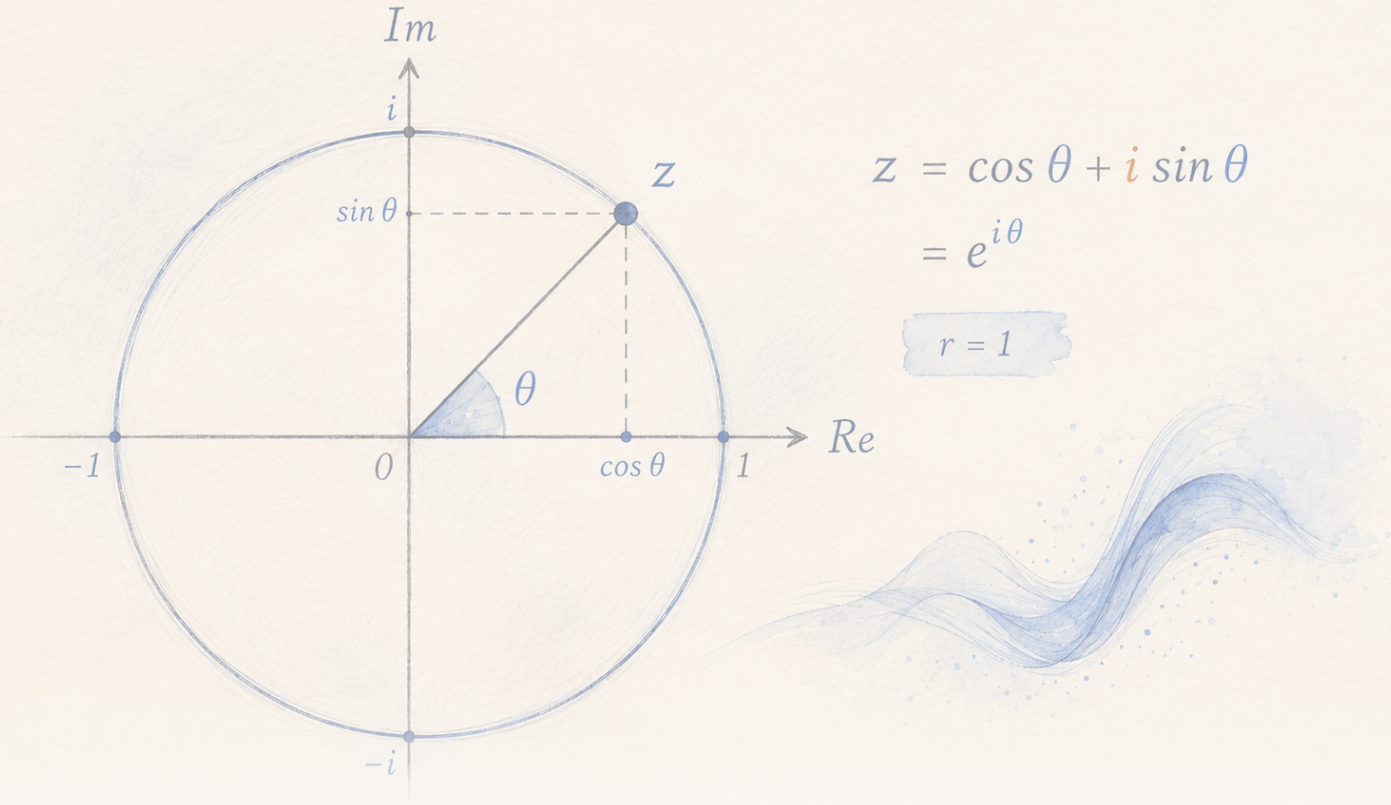


The Clean Paper

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

Kvantinę mechaniką galima užrašyti vien realiaisiais skaičiais — keblumas slypi sistemų jungime

2021 m. plačiai aptartas rezultatas teigė, kad realiųjų skaičių kvantinės mechanikos versiją galima eksperimentiškai paneigti, o 2022 m. eksperimentai sutapo su standartine kompleksine kvantine teorija. Tai dažnai pristatyta kaip įrodymas, kad menamieji skaičiai fiziškai realūs. Naujas „Physical Review Letters“ straipsnis patikslina išvadą: realiųjų skaičių formulavimas, paremtas kita ir, autorių teigimu, fiziškai fundamentalesne sistemų jungimo prielaida, atkuria visas kompleksinės kvantinės mechanikos prognozes, įskaitant daugiadalius bandymus. Santūri išvada: kompleksiniai skaičiai labai patogūs, bet griežtai nebūtini; ankstesni eksperimentai atmetė vieną konkrečią realiąją teoriją, ne realiuosius skaičius iš principo.

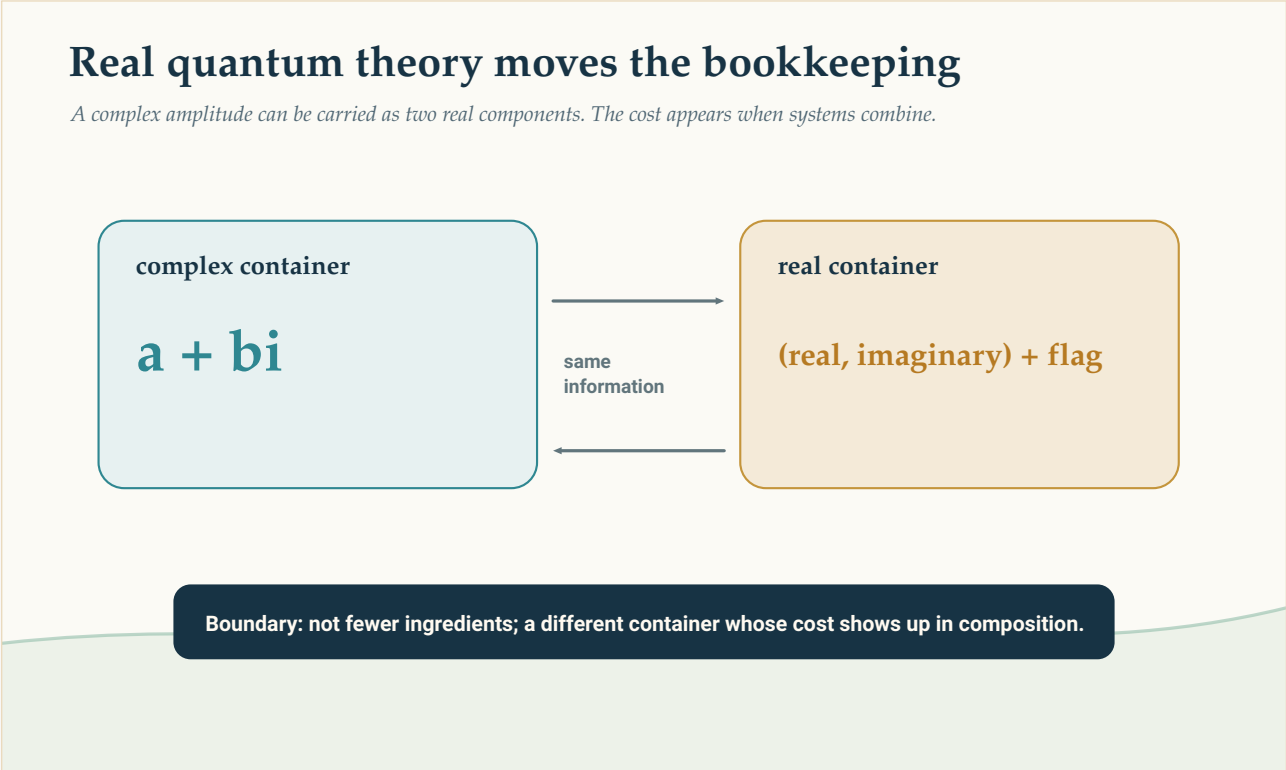
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Antraštė, kurią verta perskaityti dar kartą

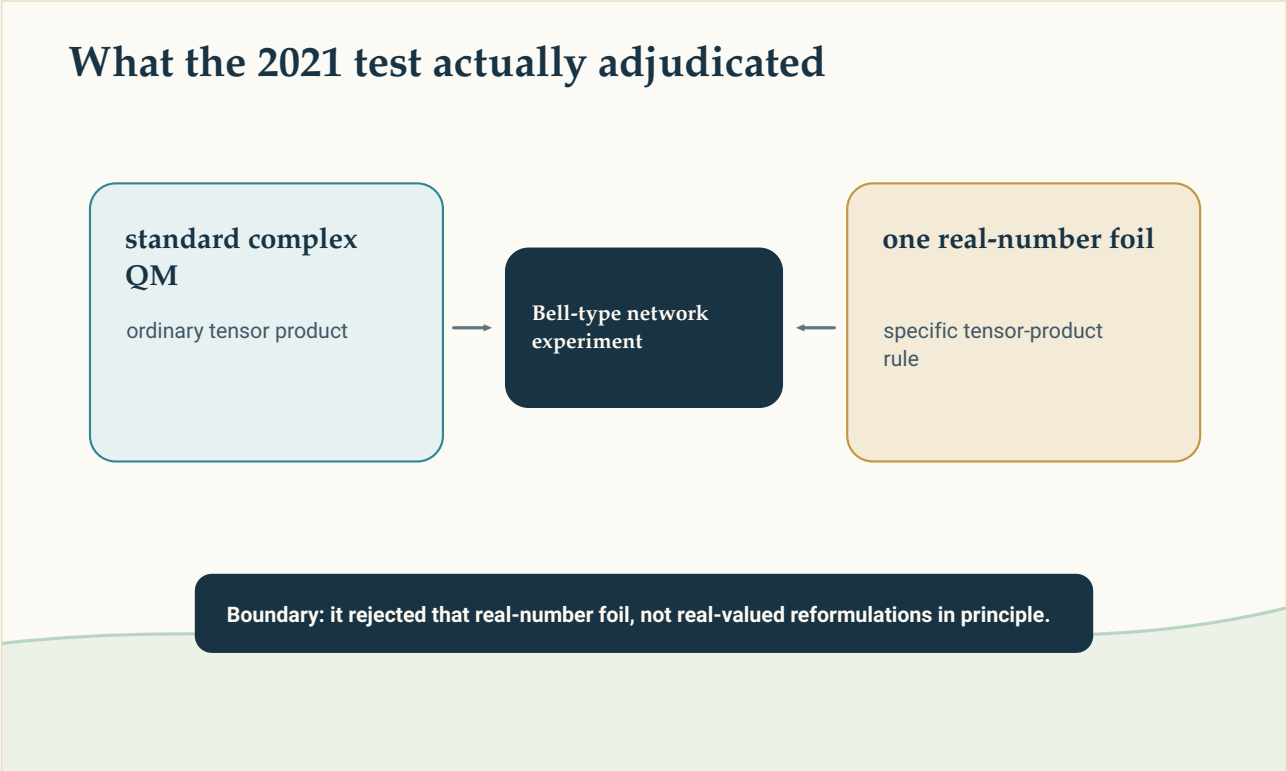
Prieš kelerius metus plačiai pasklido įspūdingas teiginys: eksperimentai parodė, kad menamieji skaičiai yra fiziškai realūs ir kad be jų kvantinės mechanikos užrašyti neįmanoma. Teiginys kilo iš tikros ir kruopščios fizikos – 2021 m. Marc-Olivier Renou ir kolegų „Nature“ pasiūlymo bei 2022 m. jį įgyvendinusių eksperimentų. Tačiau populiarioji versija tikslų teiginį suspaudė iki šūkio, o šūkis tapo stipresnis už rezultatą.

Naujame Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping ir Dagmar Bruß straipsnyje „Physical Review Letters“ tikslumas sugrąžinamas. Autoriai sukonstruoja kvantinės mechanikos formulavimą, naudojantį tik realiuosius skaičius ir atkuriantį visas standartinės kompleksinės teorijos prognozes – įskaitant tuos pačius daugiadalius eksperimentus, kurie buvo pristatomi kaip realiųjų skaičių teorijos paneigimas. Menamieji skaičiai čia nėra slapta grąžinami. Pakeičiama viena prielaida apie tai, kaip jungiamos atskiros sistemos. Santūri autorių išvada: kompleksiniai skaičiai kvantinei mechanikai aprašyti nėra būtini, tačiau jie neabejotinai labai naudingi.



Kompleksinė amplitudė a+bi yra dviejų realiųjų skaičių pora su papildoma „žyme“, perduodama kartu su kiekviena sistema. Realusis formulavimas nenaudoja mažiau informacijos – tik kitaip ją sutvarko, o kaina pasirodo jungiant sistemas.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



2021–2022 m. eksperimentai lygino dvi konkrečias teorijas: standartinę kompleksinę kvantinę mechaniką ir realiųjų skaičių „kontrolinę“ teoriją, išlaikančią įprastą tenzorinės sandaugos taisyklę. Eksperimentai atmetė šią kontrolinę teoriją, o ne kiekvieną realiaisiais skaičiais pagrįstą formulavimą.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ką kompleksiniai skaičiai daro teorijoje

Kvantinėje mechanikoje sistemos būsena aprašoma amplitudėmis, o rezultato tikimybė gaunama paėmus amplitudės modulio kvadratą. Standartinėje teorijoje amplitudės yra kompleksiniai skaičiai: kiekvienas turi dydį ir fazę – kampą. Fazė nėra dekoracija. Kai keli keliai veda į tą patį rezultatą, jų fazės lemia, ar amplitudės sustiprins viena kitą, ar panaikins – tai kvantiniam elgesiui būdinga interferencija. Tuo tarpu bendra visos sistemos fazė negali būti išmatuota.

Kompleksinis skaičius iš esmės yra dviejų realiųjų skaičių – realiosios ir menamosios dalies – pora su konkrečiomis daugybos taisyklėmis. Todėl natūralu klausti, ar būtent toks „supakavimas“ būtinas. Ar galima išlaikyti abu realiuosius skaičius, atsisakyti kompleksinės formos ir vis tiek gauti visą kvantinę mechaniką? Kadangi daugybos taisyklės kompleksinį skaičių paverčia daugiau nei dviem greta esančiais skaičiais, atsakymas nėra savaime aiškus. Čia ir slypi subtilumas.

Ką iš tikrųjų parodė 2021 m. rezultatas

Renou ir kolegos šį klausimą suformulavo tiksliai ir eksperimentiškai patikrinamai. Jie neklausė, ar realieji skaičiai apskritai gali būti naudojami kvantinėje teorijoje. Klausimas buvo, ar realiaisiais skaičiais paremta teorija gali atkurti visas kompleksinės teorijos prognozes, jei sistemoms jungti taikoma konkreti taisyklė – įprasta **tenzorinės sandaugos** taisyklė, naudojama kelioms nepriklausomoms dalims aprašyti kaip vienai sistemai.

Taikydami šią taisyklę jie rado scenarijų, kuriame trys dalyviai gauna susietas būsenas iš dviejų nepriklausomų šaltinių, o realioji ir kompleksinė teorijos prognozuoja skirtingas išmatuojamas koreliacijas – daugiadalią Bell bandymo versiją. 2022 m. tokie eksperimentai atlikti su superlaidžiomis grandinėmis ir fotonais. Išmatuotos koreliacijos atitiko kompleksinę kvantinę mechaniką ir neatitiko tos realiosios alternatyvos.

> **Kodėl bandymui reikia dviejų šaltinių, o ne vieno?**
>
> Įprastame Bell bandyme vienas šaltinis siunčia susietą dalelių porą Alice ir Bob. Tokiai sąrangai realiųjų skaičių kvantinė mechanika gali tiksliai atkurti tas pačias koreliacijas kaip kompleksinė teorija, todėl vienas šaltinis jų atskirti negali.
> 2021 m. argumentas pradeda veikti pridėjus antrą, **nepriklausomą** šaltinį. Įsivaizduokime tris dalyvius eilėje: Alice, Bob ir Charlie. Vienas šaltinis susieja Alice su Bob, kitas, neturintis bendros parengimo istorijos, – Bob su Charlie. Bob viduryje kartu išmatuoja abi savo daleles ir susieja dvi tinklo puses. Esminė yra dviejų šaltinių *nepriklausomybės* prielaida. Jei nepriklausomos sistemos jungiamos įprasta tenzorinės sandaugos taisykle, realiųjų skaičių teorija negali atkurti trijų dalyvių koreliacijų, kurias prognozuoja kompleksinė kvantinė mechanika. Vieno šaltinio bandyme skirtumo nėra. Būtent šį tarpą ir matavo eksperimentai.

Tai tikras ir aiškus rezultatas. Tačiau svarbu, ką jis lygino: standartinę kompleksinę kvantinę teoriją su viena konkrečia realiąja teorija – ta, kuri išlaiko įprastą tenzorinės sandaugos taisyklę. Eksperimentas sprendė būtent šią teorijų porą, o ne realiųjų skaičių galimumą apskritai. Naujame straipsnyje ši atmesta alternatyva vadinama kvantinių pamatų srityje įprastu terminu *foil theory* – specialiai sukurta kontrolinė teorija, kurios niekas nebūtinai laiko teisinga, bet kuri sąmoningai skiriasi nuo priimtos teorijos ir todėl gali būti eksperimentiškai atmesta. Jos vertė ir yra tai, kad ją galima atskirti: paneigus tokią teoriją galima suprasti, kurios jos prielaidos buvo lemiančios.

Ką keičia naujasis straipsnis

Naujasis darbas beveik viską palieka ir pakeičia vieną postulatą. Užuot iš anksto priėmę tenzorinės sandaugos taisyklę sistemoms jungti, autoriai pradeda nuo lokalumo reikalavimo, kurį laiko fiziškai fundamentalesniu: operacija, atlikta tik vienai posistemei, neturėtų sukelti jokio išmatuojamo poveikio kitai, nepaliestai posistemei.

Iš šio principo jie aiškiai sukonstruoja realiųjų skaičių kvantinę mechaniką. Įprastų kompleksinių

amplitudžių realioji ir menamoji dalys išsaugomos kaip papildoma realioji apskaita – straipsnyje ji vadinama prie kiekvienos sistemos pridedama „žyme“. Kompleksinėje teorijoje neišmatuojama bendra fazė realiajame formulavime tampa taip pat neišmatuojamu pasukimu. Kaina atsiranda tiksliai ten, kur ją lokalizavo 2021 m. rezultatas: jungiant sistemas. Naivus realiųjų aprašų sujungimas net nesuteikia vienareikšmės taisyklės, todėl naujoji konstrukcija sugrupuoja fiziškai tą patį reiškiančius aprašus į ekvivalentiškumo klases ir jungia būtent jas. Su šia taisykle realioji teorija atkuria visas kompleksinės teorijos prognozuojamas vidutines reikšmes – ir vienai sistemai, ir daugeliui erdviškai atskirtų susietų sistemų. Autoriai taip pat rodo, kad konstrukcija iš esmės vienintelė ir lygiavertė standartinei kvantinei mechanikai.

Todėl daugiadaliai eksperimentai negali atskirti šios realiosios teorijos nuo kompleksinės: jų prognozės visais atvejais sutampa. Ankstesni eksperimentai nebuvo nesėkmingi; jie tiesiog tikrino kitokią, griežtesnę realiąją teoriją.

Kodėl tai nėra prieštaravimas

Būtų lengva perskaityti rezultatą kaip „2021 m. eksperimentai buvo klaidingi“. Yra priešingai. Eksperimentai buvo teisingi, ir naujasis straipsnis remiasi tuo: jis priima visas išmatuotas koreliacijas ir parodo realųjį formulavimą, kuris jas taip pat atkuria. Pasikeičia interpretacija – šuolis nuo „ši realioji teorija paneigta“ iki „realieji skaičiai kvantinėje mechanikoje neįmanomi“. Tame šuolyje buvo praleista darbą atliekanti prielaida.

Straipsnis taip pat nesiūlo atsisakyti kompleksinių skaičių. Jo santrauka sąmoningai subalansuota: kompleksiniai skaičiai nėra griežtai būtini, tačiau jie labai naudingi. Realiajai konstrukcijai reikia papildomos žymės kiekvienai sistemai ir subtilesnės sistemų jungimo taisyklės; kompleksiniai skaičiai visa tai supakuoja į vieną paprastą aritmetinę struktūrą. Patogumas nėra smulkmena. Fizikoje jis dažnai ir lemia, kuris formalizmas tampa standartiniu.

Kodėl tai svarbu

Po visu tuo slypi įdomus klausimas: ką fizikos teorijoje reiškia žodis „būtina“? Eksperimentas gali atskirti dvi teorijas, jei jos prognozuoja skirtingus rezultatus. Tačiau vien eksperimentas negali parodyti, kad tam tikras matematinis ingredientas yra vienintelis įmanomas būdas toms pačioms prognozėms užrašyti. Tai klausimas apie galimų teorijų egzistavimą, ir jį sprendžia konstrukcija, o ne matavimas. Šis straipsnis būtent tokią alternatyvą ir sukonstruoja.

Rezultatas išryškina ir bendresnį skirtumą. „Ši teorija paneigta“ ir „šis matematinis įrankis neišvengiamas“ yra du skirtingi teiginiai. Tarp jų esanti spraga yra būtent ta vieta, kur švarus eksperimentinis rezultatas gali virsti perdėta interpretacija. Kompleksiniai skaičiai lieka natūralia ir efektyvia kvantinės mechanikos kalba. Ar jie metafiziškai būtini – atskiras klausimas, ir šio darbo atsakymas kol kas yra „ne“.

Trumpa santrauka

2021 m. pasiūlymas ir 2022 m. eksperimentai parodė, kad realiųjų skaičių kvantinė mechanika, išlaikanti standartinę tenzorinės sandaugos taisyklę sistemoms jungti, kai kuriuose bandymuose prognozuoja kitokias koreliacijas nei kompleksinė kvantinė mechanika; eksperimentai palaikė kompleksinę teoriją. Tai buvo plačiai pateikta kaip įrodymas, kad menamieji skaičiai fiziškai būtini. Naujame „Physical Review Letters“ darbe sukonstruota realiųjų skaičių kvantinė mechanika, paremta kitu, lokalumo postulatu, kuri atkuria visas kompleksinės teorijos prognozes, įskaitant daugiadalius bandymus. Taigi kompleksiniai skaičiai yra labai patogūs, bet ne griežtai būtini. Tai teorinė konstrukcija, ji nepaneigia ankstesnių eksperimentų ir nesiūlo praktiškai perrašyti kvantinės mechanikos.

Be pagražinimų

Ką rodo straipsnis: Kad nuoseklus kvantinės mechanikos formulavimas, naudojantis tik realiuosius skaičius, gali atkurti visas standartinės kompleksinės teorijos prognozes, įskaitant daugiadalius Bell tipo eksperimentus, jei teorija paremta lokalumo postulatu, o ne įprasta tenzorinės sandaugos taisykle sistemoms jungti.

Kas tikėtina, bet nėra esmė: Kad tai „paneigia“ 2021–2022 m. rezultatus. Nepaneigia. Naujas darbas priima jų eksperimentus kaip teisingus ir tikslina jų apimtį: jie atmetė vieną konkrečią realiąją teoriją, išlaikančią tenzorinės sandaugos taisyklę, o ne realiuosius skaičius iš principo.

Ko tai nerodo: Kad kompleksiniai skaičiai klaidingi, nenaudingi ar praktiškai jų verta atsisakyti – patys autoriai pabrėžia, kad jie labai naudingi. Tai taip pat nėra naujas eksperimentas: naujų duomenų nematuota; teiginys yra matematinė konstrukcija ir nuoseklumo įrodymas.

Pagrindiniai ribotumai bendrajam skaitytojui: Argumentas priklauso nuo to, kurią prielaidą laikome fiziškai fundamentalesne – tenzorinės sandaugos taisyklę ar lokalumo postulatą. Tai pagrįstas pasirinkimas tebevykstančioje kvantinių pamatų diskusijoje, o ne matavimu nustatytas faktas. Be to, realiųjų skaičių konstrukcija gali atrodyti mažiau natūrali nei jai lygiavertė kompleksinė teorija.

Kiek pasitikėti? Daug – kad konstrukcija matematiškai nuosekli: ji recenzuota ir jos logika patikrinama. Patikimiausia išvada kukli: kompleksiniai skaičiai yra patogi kvantinės mechanikos kalba, o ne eksperimentiškai įrodyta metafizinė būtinybė. Antraštę „menamieji skaičiai yra realūs“ verta laikyti būtent šūkiu, kurį šis darbas padeda pataisyti.

Šaltiniai

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