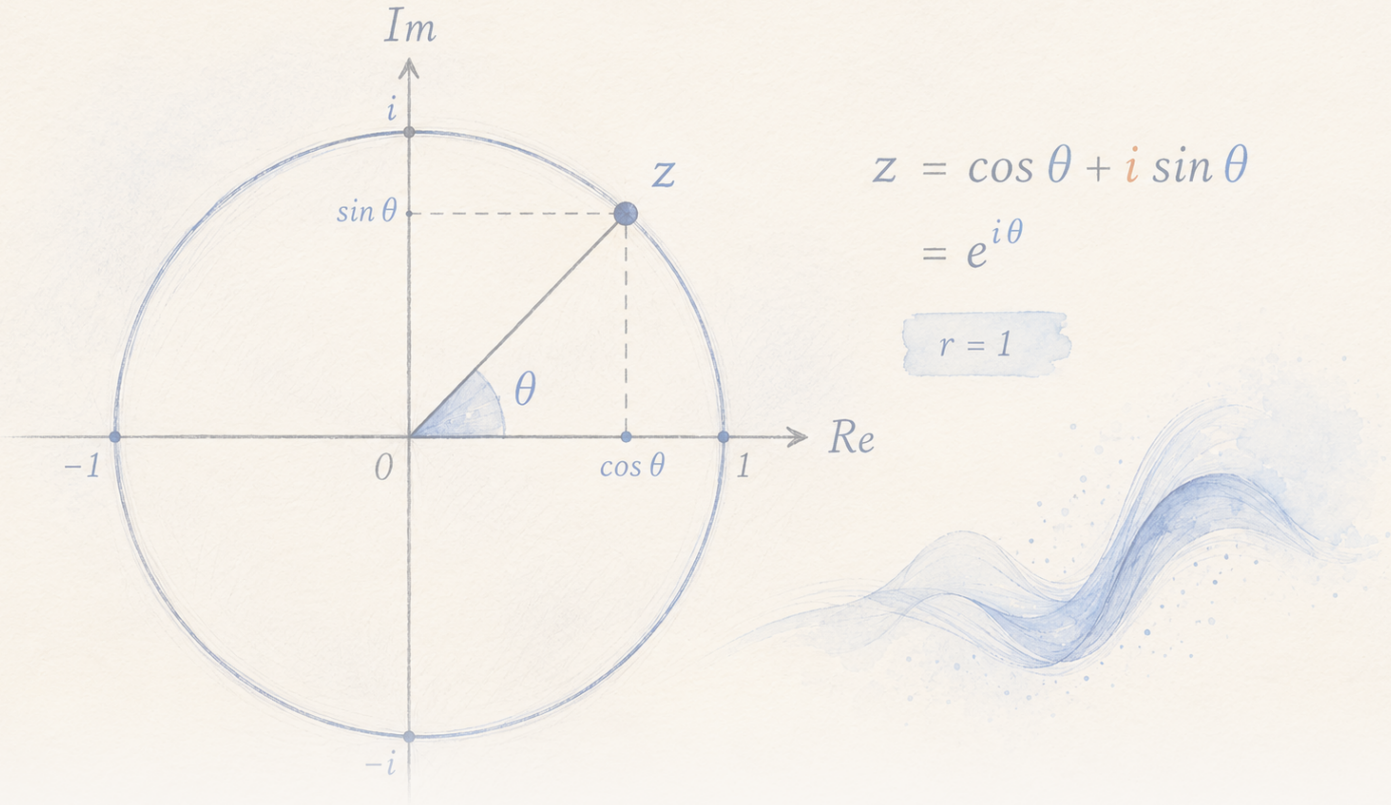


The Clean Paper

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

Kvantu mehāniku var uzrakstīt tikai ar reāliem skaitļiem — āķis ir tajā, kā apvieno sistēmas

2021. gadā plaši apspriests rezultāts parādīja, ka vienu reālo skaitļu kvantu mehānikas versiju var eksperimentāli falsificēt, un 2022. gada eksperimenti piekrita standarta kompleksajai kvantu teorijai. To bieži pasniedza kā pierādījumu, ka imaginārie skaitļi ir fiziski "īsti". Jauns Physical Review Letters raksts precizē apgalvojumu: ja reālo formulējumu būvē uz cita, iespējams fiziski pamatīgāka pieņēmuma par to, kā apvienojas atsevišķas sistēmas, tas atkārto visus kompleksās kvantu mehānikas paredzējumus, arī daudzdaļiņu testus. Godīgais secinājums ir, ka kompleksie skaitļi ir ērti, nevis strikti nepieciešami — un agrākie eksperimenti izslēdza vienu konkrētu reālu teoriju, nevis reālus skaitļus principā. Tas ir teorētisks pamatu rezultāts, nevis jauns mērījums, un tas neprasa pārstāt lietot kompleksos skaitļus.

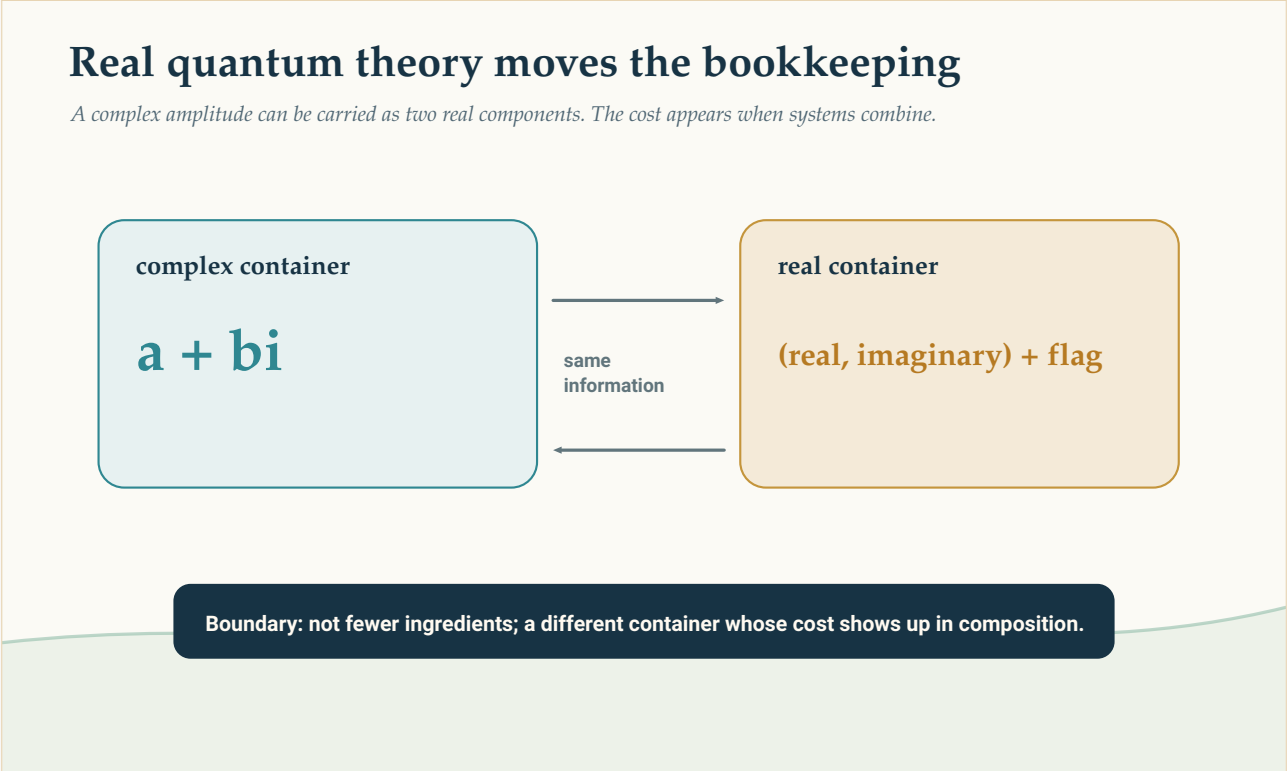
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Virsraksts, kuru vērts izlasīt vēlreiz

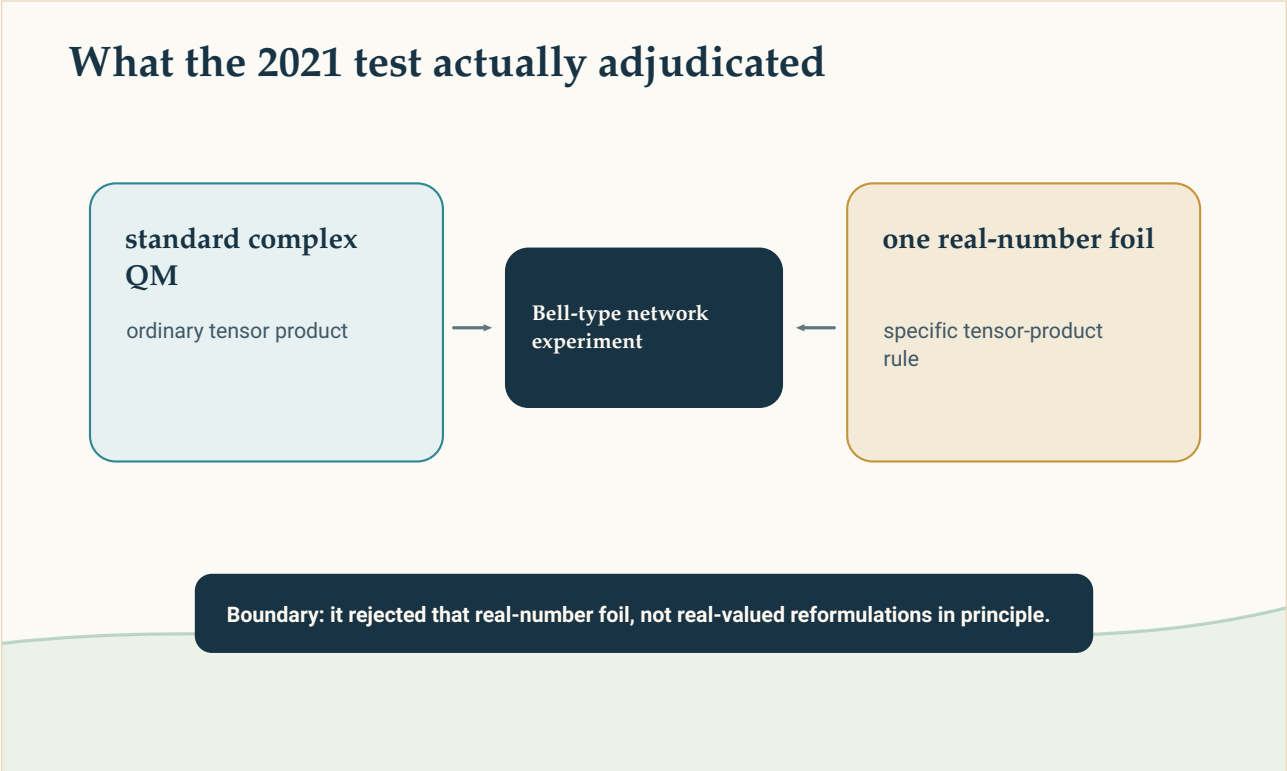
Pirms dažiem gadiem plaši izplatījās iespaidīgs apgalvojums: eksperimenti esot parādījuši, ka imagināri skaitļi ir fiziski „īsti" un ka kvantu mehāniku bez tiem uzrakstīt nevar. Šis stāsts radās no rūpīgas, īstas fizikas — Marc-Olivier Renou un kolēģu 2021. gada *Nature* priekšlikuma un 2022. gada eksperimentiem, kas to īstenoja. Taču populārā versija precīzu apgalvojumu saspieda sauklī, un sauklis bija stiprāks par rezultātu.

Jauns Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping un Dagmar Bruß raksts *Physical Review Letters* atjauno precīzo formulējumu. Tas uzbūvē kvantu mehānikas versiju, kas izmanto tikai reālus skaitļus un atkārto visus standarta kompleksās teorijas paredzējumus — arī tos daudzdaļiņu eksperimentus, par kuriem tika teikts, ka tie reālos skaitļus izslēdz. Paņēmiens nav slepus ievest imagināros skaitļus atpakaļ. Tiek mainīts viens pieņēmums par to, kā atsevišķas sistēmas apvienojas. Godīgais secinājums, pašu autoru vārdiem, ir: kompleksie skaitļi kvantu mehānikas aprakstam nav nepieciešami, bet tie noteikti ir ļoti noderīgi.



Kompleksa amplitūda a+bi ir reālu skaitļu pāris; reālajā formulējumā tam katrai sistēmai pievieno arī papildu „karodziņu". Sastāvdaļu nav mazāk — tās vienkārši iepakotas citādi, un cena parādās noteikumā, kā sistēmas savieno.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



2021.–2022. gada eksperimenti salīdzināja divas konkrētas teorijas — standarta komplekso kvantu mehāniku un reālu „kontroles teoriju", kas saglabā parasto tenzorreizinājuma noteikumu — un rezultāts atbalstīja komplekso teoriju. Eksperimenti izslēdza šo konkrēto reālo teoriju, nevis reālus skaitļus principā.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ko kompleksie skaitļi dara teorijā

Kvantu mehānikā sistēmas stāvokli apraksta amplitūdas, un iznākuma varbūtību iegūst no amplitūdas moduļa kvadrāta. Standarta teorijā amplitūdas ir kompleksi skaitļi: katram ir lielums un fāze — leņķis. Fāze nav dekorācija. Kad divi ceļi ved uz vienu iznākumu, to fāzes nosaka, vai amplitūdas pastiprina vai dzēš viena otru — tieši tā rodas kvantu uzvedībai raksturīgā interference. Toties kopīga globāla fāze visai sistēmai nav izmērāma.

Komplekss skaitlis būtībā ir divi reāli skaitļi — reālā un imaginārā daļa —, kas apvienoti ar īpašiem reizināšanas noteikumiem. Tāpēc dabisks jautājums ir, vai šis iepakojums ir būtisks. Vai var saglabāt abus reālos skaitļus, atteikties no kompleksā formālisma un tomēr iegūt visu kvantu mehāniku? Tieši reizināšanas noteikumi padara kompleksus skaitļus par kaut ko vairāk nekā diviem skaitļiem blakus, tāpēc atbilde nav pašsaprotama.

Ko patiesībā parādīja 2021. gada rezultāts

Renou un kolēģi šo jautājumu uzdeva ļoti precīzi un pārbaudāmi. Viņi nejautāja, vai reāli skaitļi kaut kur kvantu teorijā vispār var parādīties. Viņi jautāja, vai reālos skaitļos formulēta teorija var atkārtot visus kompleksās teorijas paredzējumus, ja saglabā vienu konkrētu noteikumu sistēmu apvienošanai — standarta **tenzorreizinājuma noteikumu**, ar kuru vairākas neatkarīgas daļas apraksta kā vienu kopumu.

Pie šī pieņēmuma viņi atrada scenāriju ar trim pusēm un diviem neatkarīgiem savstarpējās sapīšanās avotiem, kur reālā un kompleksā teorija prognozē atšķirīgas, izmērāmas korelācijas — daudzdaļiņu Bela testa paveidu. 2022. gadā šādi testi tika veikti gan ar supravadošām shēmām, gan fotoniem. Mērījumi sakrita ar komplekso kvantu mehāniku un nesakrita ar šo reālo alternatīvu.

> **Kāpēc vajadzīgi divi avoti, nevis viens**
>
> Parasts Bela tests izmanto vienu avotu, kas nosūta sapītu daļiņu pāri divām pusēm — Alisei un Bobam. Šādā situācijā reālo skaitļu kvantu mehānika var precīzi atkārtot tās pašas korelācijas kā kompleksā teorija. Abas teorijas nav atšķiramas, tāpēc viens avots starp tām neizšķir.
>
> 2021. gada argumentā pievieno otru, **neatkarīgu** avotu. Iedomājieties trīs puses rindā: Alise, Bobs, Čārlijs. Viens avots sapin Alisi ar Bobu; otrs, kam nav kopīgas pagātnes ar pirmo, sapin Bobu ar Čārliju. Bobs pa vidu kopīgi mēra abas savas daļiņas un savieno abas puses. Tieši abu avotu *neatkarība* — pieņēmums, ka tie sagatavoti atsevišķi — rada atšķirību: pie standarta tenzorreizinājuma noteikuma reāla teorija nespēj atkārtot trīspusējās korelācijas, ko prognozē kompleksā kvantu mehānika, kamēr viena avota tests abas teorijas neatšķir. Eksperimenti izmērīja tieši šo plaisu.

Tas ir īsts un skaidrs rezultāts. Taču jāievēro, ko tieši tas salīdzināja: standarta komplekso kvantu teoriju ar vienu konkrētu reālu teoriju — tādu, kas saglabā parasto tenzorreizinājuma noteikumu. Eksperiments izšķīra tieši šo pāri, nevis „reālus skaitļus" kā tādus. Jaunais raksts, aizņemoties terminu no kvantu pamatu pētījumiem, šo izslēgto alternatīvu sauc par **kontroles jeb foil teoriju** — teoriju, ko neviens nepiedāvā kā patiesu, bet izmanto kā apzinātu kontrastu, lai eksperimentāli noskaidrotu, kuri pieņēmumi ir būtiski.

Ko maina jaunais raksts

Jaunais darbs gandrīz visu saglabā, bet maina vienu postulātu. Tā vietā, lai sistēmu apvienošanai pieņemtu tenzorreizinājuma noteikumu, autori sāk no lokalitātes prasības, ko uzskata par fiziski pamatīgāku: operācijai, kas veikta tikai vienā apakšsistēmā, nevajadzētu radīt izmērāmu efektu citā, neaiztiktā apakšsistēmā.

No šīs prasības viņi tieši uzbūvē reālo skaitļu kvantu mehāniku. Parasto amplitūdu reālās un imagināras daļas tiek glabātas kā papildu reāla informācija — rakstā to sauc par katrai sistēmai pievienotu

„karodziņu” —, bet kompleksajā teorijā nenovērojamā globālā fāze reālajā teorijā kļūst par tikpat nenovērojamu rotāciju. Cena parādās tieši tur, kur to iezīmēja 2021. gada darbs: sistēmu apvienošanā. Naivi savienojot reālos aprakstus, pat neiegūst viennozīmīgi definētu recepti, tāpēc jaunā konstrukcija apvieno aprakstus, kas pārstāv vienu un to pašu fiziku, ekvivalences klasēs un strādā ar tām. Ar šo apvienošanas noteikumu reālā teorija atkārto katru kompleksās teorijas paredzēto vidējo vērtību — gan vienai sistēmai, gan vairākām savstarpēji sapītām, telpiski atdalītām sistēmām. Autori arī parāda, ka konstrukcija būtībā ir unikāla un ekvivalenta standarta kvantu mehānikai.

Tāpēc daudzdaļiņu eksperimenti šo reālo teoriju no kompleksās atšķirt nevar: abas dod vienādus paredzējumus. Agrākie eksperimenti nebija neveiksmīgi — tie vienkārši pārbaudīja citu, ierobežojošāku reālo teoriju.

Kāpēc tā nav pretruna

Būtu viegli šo nolasīt kā „2021. gada eksperimenti bija nepareizi”. Ir pretēji. Eksperimenti bija pareizi, un jaunais raksts to pieņem: tas akceptē visas izmērītās korelācijas un parāda reālu formulējumu, kas dod tās pašas. Mainās interpretācija — lēciens no „šī reālā teorija ir falsificēta” uz „reāli skaitļi kvantu mehānikā nav iespējami”. Šajā lēcienā tika izlaists pieņēmums, kas faktiski radīja atšķirību.

Raksts arī neaicina atteikties no kompleksiem skaitļiem. Tā paša kopsavilkums ir piesardzīgs abos virzienos: kompleksie skaitļi nav strikti nepieciešami, bet tie ir ļoti noderīgi. Reālajai konstrukcijai vajag papildu karodziņu katrai sistēmai un smalkāku apvienošanas noteikumu; kompleksie skaitļi visu šo informāciju iepako vienā elegantā aritmētikā. Ērtība nav mazsvarīga. Fizikā tā bieži ir galvenais iemesls, kāpēc viens formālisms uzvar.

Kāpēc tas ir svarīgi

Apakšā ir interesants jautājums: ko fizikas teorijā nozīmē vārds „nepieciešams”? Eksperiments var atšķirt divas teorijas, ja tās prognozē dažādus rezultātus. Tas pats par sevi nevar parādīt, ka konkrēts matemātisks objekts ir vienīgais iespējamais iepakojums noteiktam paredzējumu kopumam. Tas ir jautājums par to, kādas teorijas vispār var uzbūvēt, un to izšķir konstrukcija, nevis mērījums. Šis raksts ir tieši šāda konstrukcija: tas parāda alternatīvu, kuru agrāko eksperimentu populārā interpretācija bija uzskatījusi par izslēgtu.

Rezultāts arī izceļ vispārīgāku atšķirību. „Šī teorija ir falsificēta” un „šis matemātiskais rīks ir neizbēgams” nav viens un tas pats apgalvojums. Tieši šajā spraugā tīrs eksperimentāls rezultāts var pārvērsties pārspīlētā virsrakstā. Kompleksie skaitļi joprojām ir dabiska un efektīva kvantu mehānikas valoda. Tas, vai tie ir metafiziski obligāti, ir cits jautājums — un pašreizējā atbilde uz to ir „nē”.

Īss kopsavilkums

2021. gada priekšlikums un 2022. gada eksperimenti parādīja, ka reālo skaitļu kvantu mehānika, kas sistēmu apvienošanai saglabā standarta tenzorreizinājuma noteikumu, dod citus pārbaudāmus paredzējumus nekā kompleksā kvantu mehānika, un eksperimenti atbalstīja komplekso teoriju. Tas bieži tika pasniegts kā pierādījums, ka imaginārie skaitļi ir fiziski nepieciešami. Jaunais *Physical Review Letters* raksts uzbūvē reālo skaitļu kvantu mehāniku ar citu, uz lokalitāti balstītu postulātu, un tā atkārto visus kompleksās teorijas paredzējumus, arī daudzdaļiņu testus. Tādējādi kompleksie skaitļi ir ļoti ērti, bet ne strikti nepieciešami. Tā ir teorētiska konstrukcija, kas neatceļ agrākos eksperimentus un neprasa praksē pārrakstīt kvantu mehāniku.

Bez pārspīlējumiem

Ko raksts parāda: pašsaskanīgu kvantu mehānikas formulējumu, kas izmanto tikai reālus skaitļus un atkārto visus standarta kompleksās teorijas paredzējumus, arī daudzdaļiņu Bela tipa eksperimentus, ja sistēmu apvienošanas noteikums tiek balstīts lokalitātes postulātā, nevis standarta tenzorreizinājumā.

Kas ir ticams, bet nav galvenais secinājums: ka tas „atspēko” 2021.–2022. gada rezultātus. Tas tos neatspēko. Jaunais darbs pieņem eksperimentus kā pareizus un precizē to tvērumu: tie izslēdza vienu konkrētu reālu teoriju, kas saglabā tenzorreizinājuma noteikumu, nevis reālus skaitļus principā.

Ko tas neparāda: ka kompleksie skaitļi ir nepareizi, nevajadzīgi vai praksē būtu jāatmet — autori paši tos sauc par ļoti noderīgiem. Tas nav arī jauns eksperiments: jauni dati netika mērīti; apgalvojums balstās matemātiskā konstrukcijā un saskanības pierādījumā.

Galvenais ierobežojums plašam lasītājam: arguments ir atkarīgs no tā, kuru pieņēmumu uzskata par fiziski fundamentālāku — tenzorreizinājuma noteikumu vai lokalitātes postulātu. Tā ir argumentēta izvēle turpinātā pamatu diskusijā, nevis mērījuma viennozīmīgi noteikts fakts, un reālais formulējums, iespējams, ir mazāk dabisks nekā kompleksais, kuru tas atkārto.

Cik lielai jābūt lasītāja pārliecībai? Augstai, ka konstrukcija ir matemātiski saskanīga — raksts ir recenzēts un loģika ir pārbaudāma. Uzticamais secinājums ir pieticīgais: kompleksie skaitļi ir ērta kvantu mehānikas valoda, nevis pierādīta metafiziska nepieciešamība. Virsrakstus „imaginārie skaitļi ir īsti” labāk uztvert kā saukli, kuru šis raksts precizē.

Avoti

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