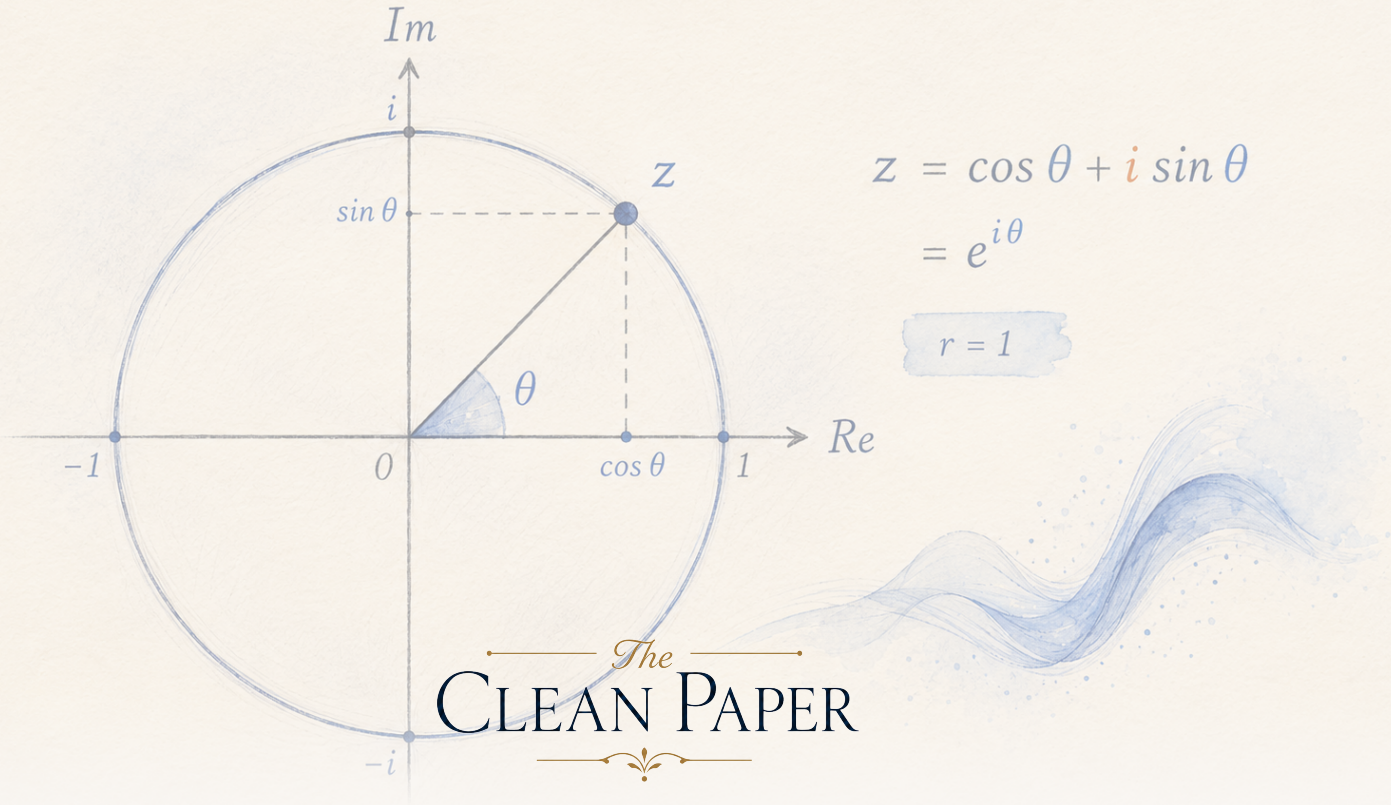


The Clean Paper

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

Квантавую механіку можна запісаць толькі рэчаіснымі лікамі — тонкасць у тым, як аб'ядноўваць сістэмы

У 2021 годзе шырока абмяркоўваны вынік сцвярджаў, што версію квантавай механікі на рэчаісных ліках можна эксперыментальна абвергнуць, а наступныя эксперыменты 2022 года падтрымалі стандартную комплексную квантавую тэорыю. Гэта часта падавалі як доказ таго, што ўяўныя лікі фізічна рэальныя. Новы артыкул у Physical Review Letters удакладняе сцвярджэнне: калі пабудаваць рэчаісную фармулёўку на іншым, магчыма фізічна больш фундаментальным дапушчэнні пра тое, як аб'ядноўваюцца асобныя сістэмы, яна ўзнаўляе кожнае прадказанне комплекснай квантавай механікі, уключаючы шматчасцічныя тэсты. Сумленнае прачытанне: комплексныя лікі зручныя, але не строга неабходныя, а ранейшыя эксперыменты выключылі адну канкрэтную рэчаісную тэорыю, а не рэчаісныя лікі ў прынцыпе. Гэта вынік па асновах тэорыі на паперы, а не новае вымярэнне, і ён не просіць нікога перастаць карыстацца комплекснымі лікамі.

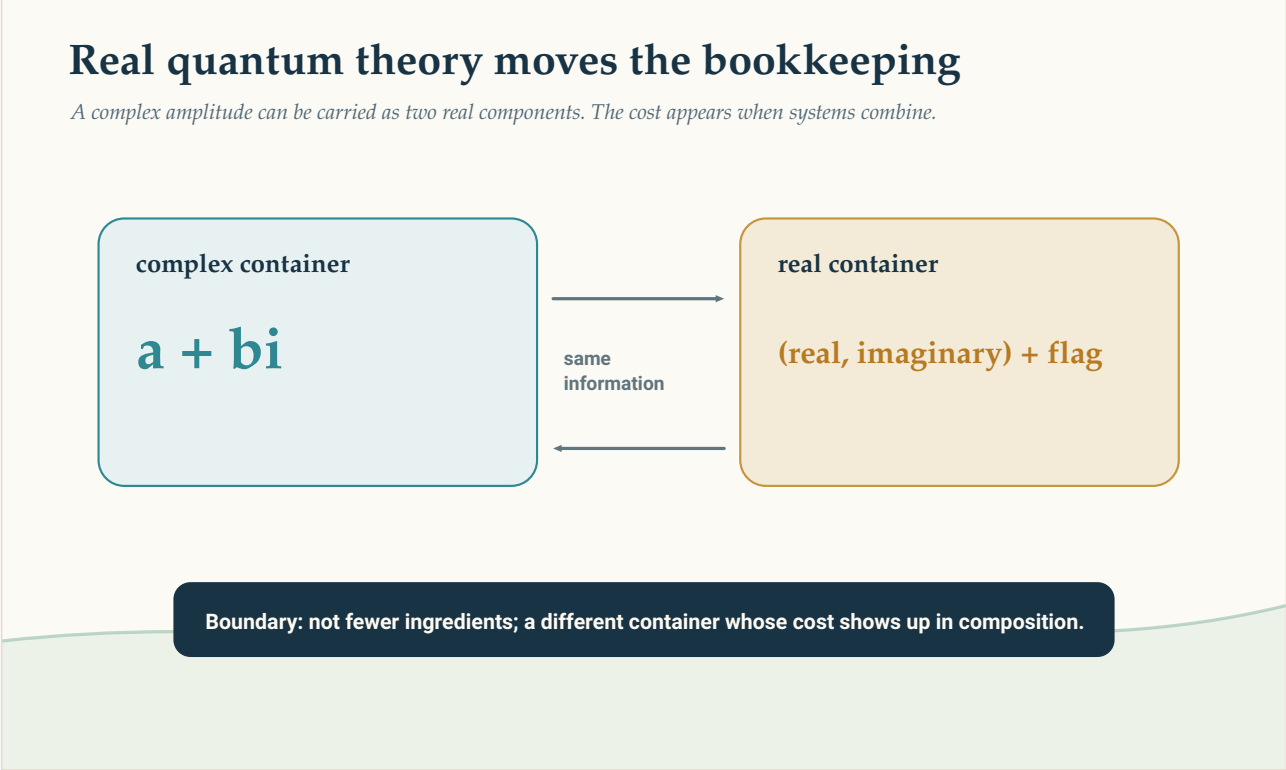
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Загаловак, які варта перачытаць

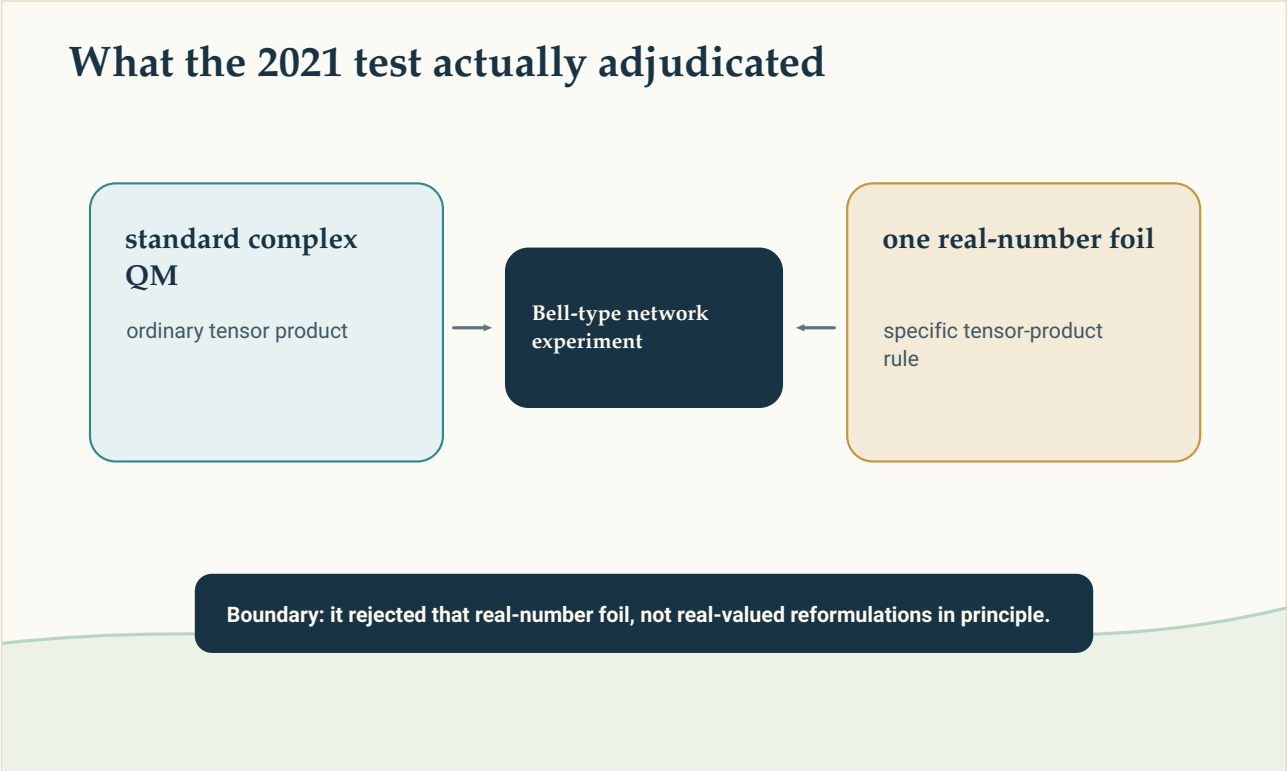
Некалькі гадоў таму шырока разышлося яркае сцвярджэнне: эксперыменты нібыта паказалі, што ўяўныя лікі фізічна рэальныя і што квантавую механіку немагчыма запісаць без іх. Яно вырасла з сапраўднай і стараннай фізікі — прапановы 2021 года Marc-Olivier Renou і калег у *Nature* і эксперыментаў 2022 года, якія яе рэалізавалі. Але папулярная версія сціснула дакладнае сцвярджэнне да лозунга, а лозунг аказаўся мацнейшым за сам вынік.

Новы артыкул у *Physical Review Letters* ад Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping і Dagmar Bruß вяртае дакладнасць. Ён будуе версію квантавай механікі, якая выкарыстоўвае толькі рэчаісныя лікі і ўзнаўляе ўсе прадказанні стандартнай комплекснай тэорыі — уключаючы тыя ж шматчасцічныя эксперыменты, якія нібыта выключылі рэчаісныя лікі. Хітрасць не ў тым, каб употай вярнуць уяўныя лікі. Змяняецца адно дапушчэнне пра тое, як аб'ядноўваюцца асобныя сістэмы. Сумленная выснова, словамі саміх аўтараў: комплексныя лікі не неабходныя для апісання квантавай механікі, але яны, безумоўна, вельмі карысныя.



Комплексная амплітуда a+bi — гэта пара рэчаісных лікаў з дадатковым «сцяжком», які пераносіцца разам з кожнай сістэмай. У рэчаіснай фармулёўцы не менш складнікаў — толькі іншы кантэйнер, а цана праяўляецца ў тым, як сістэмы аб'ядноўваюцца.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Эксперыменты 2021–22 гадоў параўноўвалі дзве канкрэтныя тэорыі — стандартную комплексную квантавую механіку і рэчаісную «кантрастную» тэорыю, якая захоўвае правіла тэнзарнага здабытку, — і вынік быў на карысць комплекснай. Яны выключылі менавіта гэтую кантрастную тэорыю, а не рэчаісныя лікі ў прынцыпе.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Што комплексныя лікі робяць у тэорыі

У квантавай механіцы стан сістэмы апісваецца амплітудамі, а каб атрымаць імавернасць выніку, бяруць квадрат модуля амплітуды. У стандартнай тэорыі гэтыя амплітуды — комплексныя лікі: кожны нясе велічыню і фазу, то-бок вугал. Фаза — не ўпрыгожанне. Калі два шляхі да аднаго выніку аб’ядноўваюцца, менавіта іх фазы вызначаюць, узмоцняць яны адзін аднаго ці пагашаць — гэта інтэрферэнцыя, характэрная прыкмета квантавых паводзін. Пры гэтым агульную фазу, супольную для ўсёй сістэмы, вымераць немагчыма.

Комплексны лік насамрэч — толькі пара рэчаісных лікаў, рэчаісная і ўяўная часткі, упакаваных са спецыяльнымі правіламі множання. Таму натуральна спытаць, ці патрэбная сама ўпакоўка. Ці можна захаваць два рэчаісныя лікі, адкінуць комплексную форму і ўсё роўна атрымаць усю квантавую механіку? Менавіта правілы множання робяць комплексныя лікі чымсьці большым, чым два лікі побач, таму адказ не відавочны — і менавіта тут хаваецца тонкасць.

Што насамрэч усталяваў вынік 2021 года

Renou і калегі паставілі менавіта гэтае пытанне і надалі яму вострую, эксперыментальна правяральную форму. Яны не пыталіся, ці могуць рэчаісныя лікі ўвогуле дзесьці з'яўляцца ў квантавай тэорыі; яны пыталіся, ці здольная фармулёўка на рэчаісных ліках узнавіць усе прадказанні комплекснай тэорыі пры пэўным правіле аб'яднання сістэм. Гэтае правіла — назавём яго правілам тэнзарнага здабытку — з'яўляецца стандартным спосабам апісаць некалькі незалежных частак як адно цэлае.

Пры гэтым правіле яны знайшлі сцэнар з трыма бакамі, якія атрымліваюць заблытанасць ад двух незалежных крыніц, дзе рэчаісная тэорыя і комплексная тэорыя прадказваюць розныя вымерныя карэляцыі — шматчасцічны аналаг тэсту Бэла. У 2022 годзе эксперыменты на звышправодных схемах і на фатонах выканалі такія тэсты. Вымераныя карэляцыі супалі з комплекснай квантавай механікай і супярэчылі рэчаіснай альтэрнатыве.

> **Чаму тэсту патрэбныя дзве крыніцы, а не адна**
>
> Звычайны тэст Бэла выкарыстоўвае адну крыніцу, якая пасылае адну заблытаную пару двум людзям — Alice і Bob. Для такой схемы квантавая механіка на рэчаісных ліках можа ўзнавіць дакладна тыя ж карэляцыі, што і комплексная тэорыя: яны неадрозныя, таму адна крыніца не можа вырашыць спрэчку.
> Аргумент 2021 года набывае сілу пры даданні другой, **незалежнай** крыніцы. Уявіце тры бакі ў шэраг: Alice, Bob, Charlie. Адна крыніца заблытвае Alice з Bob; асобная крыніца, якая не мае з першай агульнага мінулага, заблытвае Bob з Charlie. Bob сядзіць пасярэдзіне і вымярае дзве свае часціцы разам, звязваючы дзве паловы. Менавіта *незалежнасць* дзвюх крыніц — дапушчэнне, што яны падрыхтаваныя асобна, — стварае адрозненне: пры стандартным правіле тэнзарнага здабытку для аб'яднання незалежных сістэм рэчаісная тэорыя не можа ўзнавіць трохбаковыя карэляцыі, якія комплексная квантавая механіка прадказвае для такой сеткі, тады як тэст з адной крыніцай пакідае тэорыі неадрознымі. Менавіта гэты разрыў і вымералі эксперыменты.

Гэта сапраўдны і чысты вынік. Але ўважліва паглядзіце, што менавіта параўноўвалі: стандартную комплексную квантавую тэорыю з адной канкрэтнай рэчаіснай тэорыяй — той, якая захоўвае звычайнае правіла тэнзарнага здабытку. Эксперыменты вырашалі менавіта гэтую пару, а не пытанне пра рэчаісныя лікі ўвогуле. Новы артыкул, выкарыстоўваючы тэрмін з асноў квантавай тэорыі, называе адкінутую альтэрнатыву тым, чым яна ёсць: *foil theory* — кантрастнай тэорыяй, якую ніхто не прапануе як праўдзівую, а наўмысна ставяць побач з прынятай, каб эксперымент мог іх адрозніць. Яе каштоўнасць менавіта ў тым, што яна адрозніваецца: выключэнне foil паказвае, якія дапушчэнні рэчаіснай тэорыі сапраўды неслі нагрузку.

Што змяняе новы артыкул

Новая праца захоўвае амаль усё і змяняе адзін пастулат. Замест правіла тэнзарнага здабытку для аб’яднання сістэм яна пачынае з патрабавання лакальнасці, якое аўтары лічаць фізічна больш фундаментальным: аперацыя, выкананая толькі над адной падсістэмай, не павінна мець вымернага эфекту на іншую, некранутую падсістэму.

Зыходзячы з гэтага, яны відавочна будуюць квантавую механіку на рэчаісных ліках. Рэчаісная і ўяўная часткі звычайных амплітуд пераносяцца як дадатковы рэчаісны ўлік — у артыкуле гэта называецца «сцяжком», прымацаваным да кожнай сістэмы, — а неназіраемая глабальная фаза комплекснай тэорыі ператвараецца ў такое ж неназіраемае кручэнне ў рэчаіснай. Цана праяўляецца менавіта там, дзе яе лакалізаваў вынік 2021 года: у спосабе аб’яднання сістэм. Наіўнае «склейванне» гэтых рэчаісных апісанняў нават не дае добра вызначанага правіла, таму канструкцыя замест гэтага групуе апісанні, якія прадстаўляюць адну і тую ж фізіку, і працуе з такімі класамі. Пры гэтым правіле аб’яднання рэчаісная тэорыя ўзнаўляе кожнае матэматычнае чаканае значэнне комплекснай тэорыі — для адной сістэмы і для многіх, заблытаных паміж аддаленымі бакамі. Аўтары таксама паказваюць, што канструкцыя па сутнасці адзіная і эквівалентная стандартнай квантавай механіцы.

Такім чынам, шматчасцічныя эксперыменты не могуць адрозніць гэтую рэчаісную тэорыю ад комплекснай, бо іх прадказанні паўсюль супадаюць. Ранейшыя эксперыменты не памыліліся; яны проста тэставалі іншую, больш абмежаваную рэчаісную тэорыю.

Чаму гэта не супярэчнасць

Было б лёгка прачытаць гэта як «эксперыменты 2021 года былі няправільнымі». Наадварот. Эксперыменты былі правільнымі, і гэты артыкул залежыць ад таго, што яны правільныя: ён прымае ўсе вымераныя карэляцыі і паказвае рэчаісную фармулёўку, якая таксама іх спараджае. Змяняецца інтэрпрэтацыя — скачок ад «гэтая рэчаісная тэорыя сфальсіфікаваная» да «рэчаісныя лікі немагчымыя ў квантавай механіцы». У гэтым скачку згубілася дапушчэнне, якое насамрэч рабіла ўсю працу.

Артыкул таксама не заклікае адмовіцца ад комплексных лікаў. Яго ўласны вынік асцярожны ў абодва бакі: комплексныя лікі не з’яўляюцца строга неабходнымі, але яны вельмі карысныя. Рэчаісная канструкцыя патрабуе дадатковага «сцяжка» на кожнай сістэме і больш далікатнага правіла іх аб’яднання; комплексныя лікі ўпакоўваюць усё гэта ў адну чыстую арыфметычную структуру. Зручнасць — не дробязь. У фізіцы менавіта таму фармалізм часта і перамагае.

Чаму гэта важна

Больш глыбокае пытанне тут — што азначае слова «неабходны» для фізічнай тэорыі. Эксперымент можа адрозніць дзве тэорыі, калі яны прадказваюць розныя вынікі. Але сам па сабе ён не можа сказаць, што канкрэтны матэматычны складнік з'яўляецца адзіным магчымым кантэйнерам для пэўнага набору прадказанняў — гэта пытанне пра тое, якія тэорыі ўвогуле можна пабудаваць, і вырашаецца яно канструкцыяй, а не вымярэннем. Гэты артыкул і ёсць такой канструкцыяй: ён відавочна паказвае альтэрнатыву, якую эксперыменты нібыта павінны былі выключыць.

Вынік таксама падкрэслівае карыснае агульнае адрозненне. «Гэтая тэорыя сфальсіфікаваная» і «гэты матэматычны інструмент непазбежны» — розныя сцвярджэнні, і менавіта ў разрыве паміж імі чысты эксперыментальны вынік можа ператварыцца ў перабольшанне. Комплексныя лікі застаюцца натуральнай і эфектыўнай мовай квантавай механікі. Ці з'яўляюцца яны метафізічна абавязковымі — асобнае пытанне, і адказ на яго цяпер: не.

Коратка

Прапанова 2021 года і эксперыменты 2022 года паказалі, што квантавая механіка на рэчаісных ліках, пабудаваная са стандартным правілам тэнзарнага здабытку для аб'яднання сістэм, дае адрозныя і правяральныя прадказанні ад комплекснай квантавай механікі, а эксперыменты падтрымалі комплексную тэорыю. Гэта шырока падавалі як доказ таго, што ўяўныя лікі фізічна неабходныя. Новы артыкул у *Physical Review Letters* будуе квантавую механіку на рэчаісных ліках, зыходзячы з іншага, заснаванага на лакальнасці пастулата, і ўзнаўляе ўсе прадказанні комплекснай тэорыі, уключаючы шматчасцічныя тэсты. Такім чынам, комплексныя лікі зручныя, але не строга неабходныя. Гэта тэарэтычная канструкцыя, яна не адмяняе ранейшыя эксперыменты і не заклікае на практыцы перапісваць квантавую механіку.

Праверка без прыкрас

Што паказвае артыкул: самаўзгодненая фармулёўка квантавай механікі, якая выкарыстоўвае толькі рэчаісныя лікі, можа ўзнавіць кожнае прадказанне стандартнай комплекснай тэорыі, уключаючы шматчасцічныя тэсты тыпу Bell, калі яна пабудаваная на пастулаце лакальнасці, а не на правіле тэнзарнага здабытку для аб'яднання сістэм.

Што праўдападобна, але не з'яўляецца сутнасцю: што гэта «абвяргае» вынікі 2021–2022 гадоў. Не. Артыкул прымае тыя эксперыменты як правільныя і ўдакладняе іх маштаб: яны выключылі адну канкрэтную рэчаісную тэорыю — тую, якая захоўвае правіла тэнзарнага здабытку, — а не рэчаісныя лікі ў прынцыпе.

Чаго гэта не паказвае: што комплексныя лікі няправільныя, бескарысныя або што ад іх варта адмовіцца на практыцы — артыкул наўпрост называе іх вельмі карыснымі. Гэта таксама не новы эксперымент: новых даных не вымяралі; сцвярджэнне з'яўляецца матэматычнай канструкцыяй і доказам узгодненасці.

Асноўныя абмежаванні для неспецыяліста: аргумент залежыць ад таго, якое дапушчэнне вы лічыце фізічна больш фундаментальным — правіла тэнзарнага здабытку або пастулат лакальнасці. Гэта абгрунтаваны выбар у цяперашняй дыскусіі пра асновы, а не факт, зафіксаваны вымярэннем; да таго ж рэчаісная канструкцыя, верагодна, менш натуральная, чым комплексная, якой яна эквівалентная.

Наколькі ўпэўненым можа быць звычайны чытач? Высокая ўпэўненасць, што канструкцыя матэматычна ўзгодненая: яна прайшла рэцэнзаванне, а логіку можна праверыць. Варта давяраць сціплай выснове: комплексныя лікі — зручная мова квантавай механікі, а не даказаная метафізічная неабходнасць. Да любога загалоўка кшталту «ўяўныя лікі рэальныя» варта ставіцца як да лозунга, які гэты артыкул якраз закліканы выправіць.

Крыніцы

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