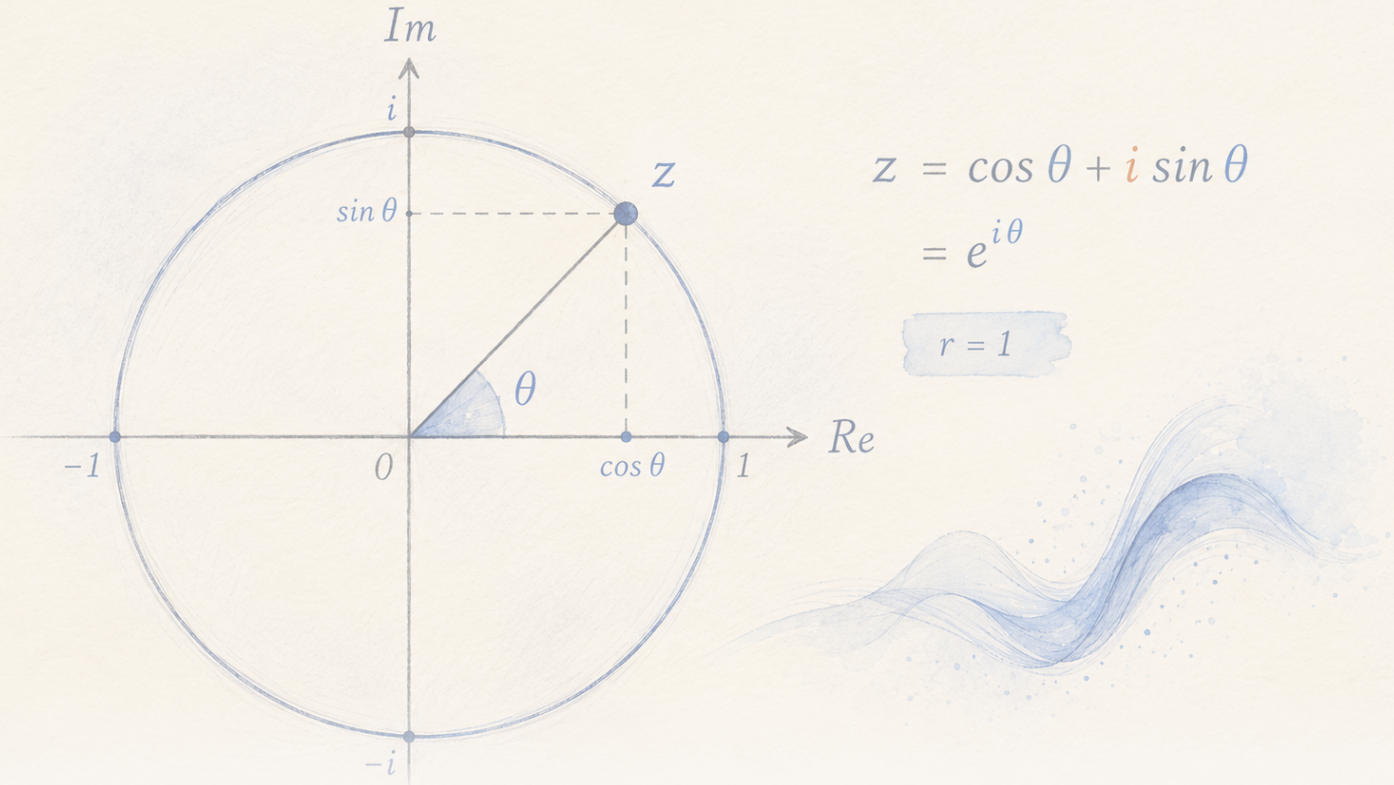


The
CLEAN PAPER

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

Quantum mechanics inaweza kuandikwa kwa real numbers pekee — mtego uko katika jinsi systems zinavyounganishwa

Mwaka 2021 result iliyoripotiwa sana ilisema real-number version ya quantum mechanics inaweza kufalsifyiwa kwa experiment, na follow-up experiments za 2022 zilikubaliana na standard complex quantum theory. Hilo mara nyingi liliwekwa headline kama proof kwamba imaginary numbers ni physically real. Paper mpya katika Physical Review Letters inanoa dai: ukijenga real-number formulation juu ya assumption tofauti, ya locality, kuhusu jinsi systems tofauti zinavyounganishwa, inarudia kila prediction ya complex quantum mechanics, pamoja na multipartite tests. Usomaji wa uaminifu ni kwamba complex numbers ni convenient badala ya strictly necessary — na experiments za awali ziliiondoa real theory moja maalum, si real numbers kwa principle.

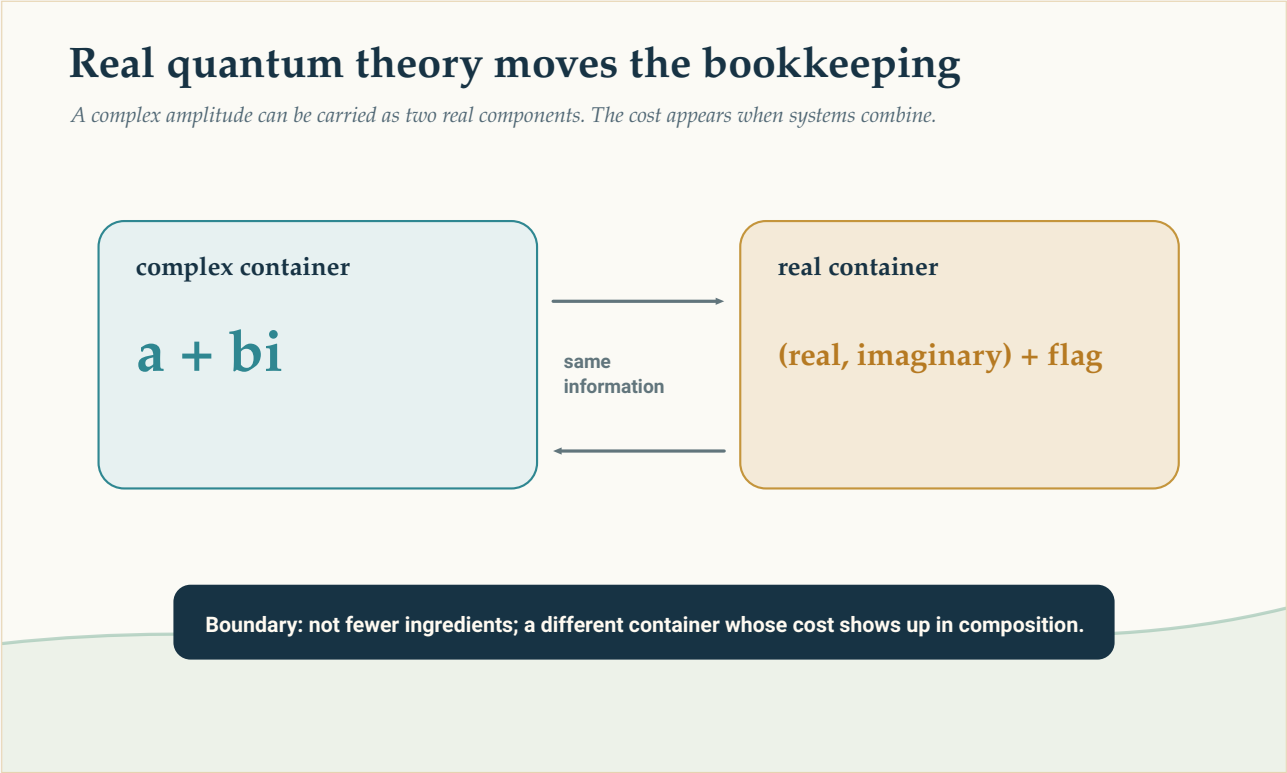
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

kichwa cha habari inayostahili kusomwa tena

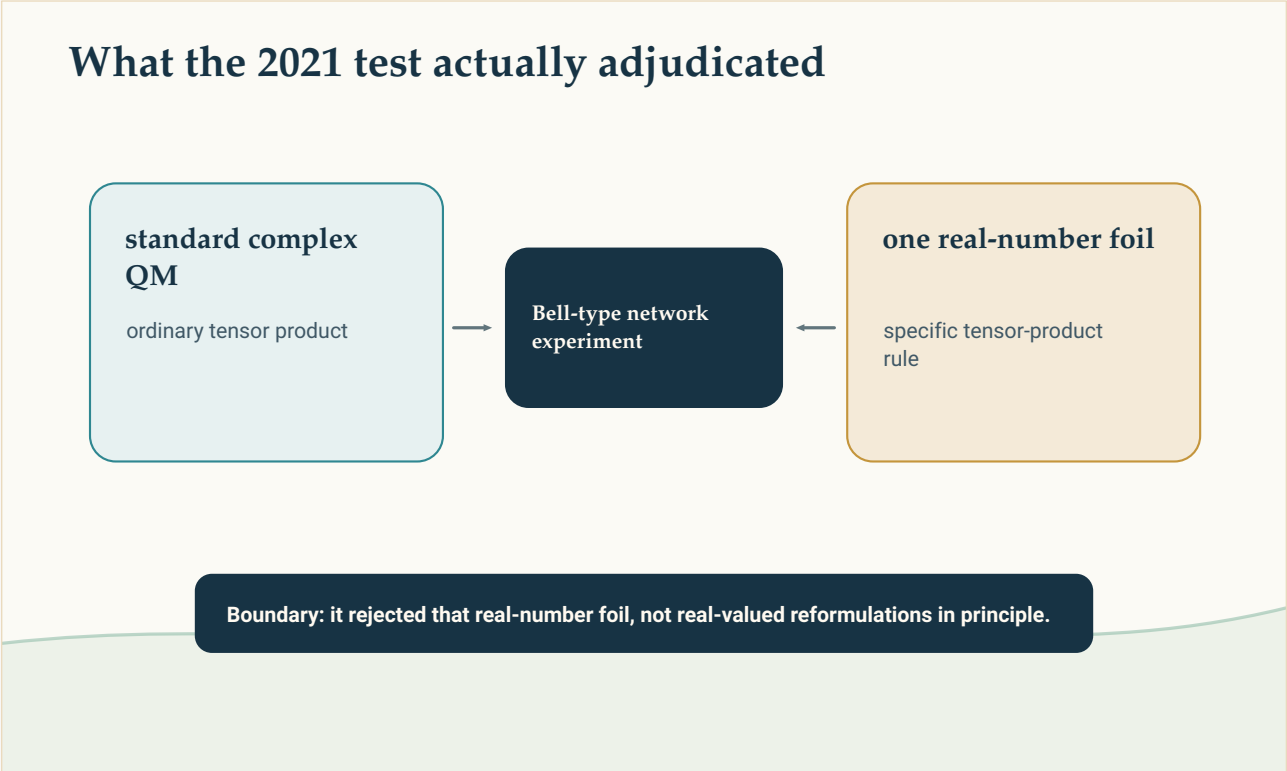
Miaka michache iliyopita dai lenye nguvu lilisambaa: experiments zilikuwa zimeonyesha kwamba imaginary numbers ni “halisi” kimwili, na kwamba quantum mechanics haiwezi kuandikwa bila hizo. Dai hilo lilitokana na physics halisi na makini — proposal ya 2021 katika *Nature* ya Marc-Olivier Renou na wenzake, na experiments za 2022 zilizolitekeleza. Lakini toleo la umma lilibana kauli sahihi kuwa slogan, na slogan ilikuwa kali kuliko matokeo.

Makala mpya katika *Physical mapitio Letters* ya Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping na Dagmar Bruß inarudisha dai hilo katika umbo lake sahihi. Waandishi wanajenga mekanika ya kwanta inayotumia namba halisi pekee na bado kutoa utabiri wote wa nadharia ya kawaida yenye namba changamano, pamoja na majaribio ya mifumo yenye sehemu nyingi ambayo yalikuwa yametumiwa kudai kuwa namba halisi hazitoshi. Ujanja si kuingiza namba za kufikirika kwa njia ya nyuma, bali kubadilisha dhana moja kuhusu jinsi mifumo tofauti inavyounganishwa. Hitimisho lao la tahadhari ni kwamba namba changamano si lazima kabisa ili kueleza mekanika ya kwanta, ingawa zinafanya nadharia iwe rahisi sana kuandika na kutumia.



Complex amplitude a+bi ni jozi ya real numbers ikiwa na “flag” inayobebwa pamoja na kila mfumo. Real formulation si viungo vichache — ni container tofauti, huku gharama ikionekana katika jinsi mifumo zinavyounganishwa.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Experiments za 2021–22 zililinganisha theories mbili maalum — standard complex quantum mechanics dhidi ya real “foil” inayohifadhi tensor-product rule — na matokeo yakalingana na complex theory. Ziliiondoa foil hiyo, si real numbers kwa principle.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Complex numbers zinafanya nini katika theory

Katika mekanika ya kwanta, hali ya mfumo huelezwa kwa amplitudo, na uwezekano wa matokeo hutokana na ukubwa wa amplitudo hiyo ukiinuliwa mraba. Katika nadharia ya kawaida amplitudo ni namba changamano: kila moja ina ukubwa na awamu, yaani pembe. Awamu hiyo si mapambo. Njia mbili za kufikia matokeo yaleyale zinapoungana, tofauti ya awamu huamua kama zitaimarishana au kufutana — huo ndio mwingiliano wa kwanta. Awamu ya pamoja ya mfumo mzima, kwa upande mwingine, haiwezi kupimwa.

Namba changamano kwa kweli inaweza kuwakilishwa na jozi ya namba halisi — sehemu halisi na sehemu ya kufikirika — zikiwa na sheria maalum za kuzidishana. Hivyo swali la msingi ni kama muundo huo ni lazima. Je, unaweza kuhifadhi namba mbili halisi, kuacha uandishi wa namba changamano, na bado kupata mekanika yote ya kwanta? Sheria za kuzidisha ndizo zinazofanya namba changamano kuwa zaidi ya namba mbili zilizowekwa pembeni kwa pembeni, kwa hiyo jibu si rahisi.

Matokeo ya 2021 yalithibitisha nini hasa

Renou na wenzake waliuliza swali hilo, na kulifanya kuwa sharp na testable. Hawakuuliza kama real numbers zinaweza kuonekana popote katika quantum theory; waliuliza kama real-number formulation inaweza kulingana na predictions zote za complex theory ikiwa inatumia rule maalum ya kuunganisha mifumo. Rule hiyo — tuiite tensor-product rule — ndiyo prescription ya kawaida ya kueleza parts huru kadhaa kama whole moja.

Chini ya rule hiyo, walipata scenario yenye parties tatu zinazoshiriki entanglement kutoka vyanzo mbili huru ambapo real-number theory na complex theory hutabiri correlations tofauti zinazoweza kupimwa — multipartite version ya Bell test. Mwaka 2022, experiments za superconducting circuits na photons zilifanya tests hizo. Correlations zilizopimwa zilikubaliana na complex quantum mechanics na hazikukubaliana na real alternative hiyo.

> **Kwa nini test inahitaji vyanzo mbili, si moja**
>
> Bell test ya kawaida hutumia chanzo moja inayotuma entangled pair kwa watu wawili, Alice na Bob. Kwa setup hiyo real-number quantum mechanics inaweza kurudia correlations zilezile kabisa kama complex theory — theories haziwezi kutofautishwa, hivyo chanzo moja haiwezi kuamua kati yao.
> Argument ya 2021 inapata nguvu kwa kuongeza chanzo ya pili, **huru**. Fikiria parties tatu katika mstari: Alice, Bob, Charlie. chanzo moja inaentangle Alice na Bob; chanzo tofauti, isiyoshiriki common past, inaentangle Bob na Charlie. Bob yuko katikati na hupima particles zake mbili pamoja, akiunganisha halves mbili. Ni *independence* ya vyanzo mbili — dhana kwamba ziliandaliwa tofauti — inayofanya kazi: chini ya standard tensor-product rule ya kuunganisha huru mifumo, real-number theory haiwezi kulingana na three-way correlations ambazo complex quantum mechanics inatabiri kwa network hii, wakati single-chanzo test inaacha theories zimefungana. pengo hilo ndilo experiments zilipima.

Hayo ni matokeo halisi na safi. Lakini angalia kwa uangalifu kilicholinganishwa: standard complex quantum theory dhidi ya real theory moja maalum — ile inayohifadhi ordinary tensor-product rule. Ni pairing hiyo, si real numbers zenyewe, ambayo experiments ziliamua. makala mpya, ikitumia neno la quantum foundations, inaita alternative hiyo kwa jina lake: *foil theory* — theory ambayo hakuna anayependekeza kuwa true, iliyowekwa kwa makusudi kama contrast dhidi ya accepted one ili experiment iweze kutenganisha. Thamani yake ni kuwa distinguishable: kuiondoa foil kunaonyesha ni dhana zipi za real theory zilizokuwa zikifanya kazi.

makala mpya inabadilisha nini

Kazi mpya huhifadhi karibu kila kitu na kubadilisha postulate moja. Badala ya kudhani tensor-product rule ya kuunganisha mifumo, inaanza kutoka locality requirement ambayo waandishi wanasema ni fundamental zaidi kimwili: operation inayofanywa kwenye subsystem moja peke yake

haipaswi kuwa na measurable athari kwenye nyingine ambayo haijaguswa.

Kutoka hapo waandishi wanajenga wazi mekanika ya kwanta ya namba halisi. Sehemu halisi na ya kufikirika ya amplitudo za kawaida huhifadhiwa kama taarifa mbili za namba halisi, na awamu ya pamoja isiyoonekana katika nadharia changamano huwa mzunguko usioonekana katika uwakilishi wa namba halisi. Gharama kuu inaonekana mahali ambapo kazi ya 2021 iliitambua: namna mifumo tofauti inavyounganishwa. Kuunganisha maelezo haya kwa njia ya moja kwa moja hakutoi hata kanuni iliyoainishwa vizuri, hivyo ujenzi mpya huweka pamoja maelezo yanayowakilisha fizikia ileile na kufanya kazi na makundi hayo. Kwa kanuni hiyo ya kuunganisha, nadharia ya namba halisi huzalisha thamani zote zinazotarajiwa na nadharia changamano, kwa mfumo mmoja na kwa mifumo mingi iliyofungamana. Waandishi pia wanaonyesha kwamba ujenzi huu, kwa maana muhimu, ni wa pekee na ni sawa kimatokeo na mekanika ya kawaida ya kwanta.

Kwa hiyo multipartite experiments haziwezi kutenganisha real theory hii na complex one, kwa sababu zinakubaliana kwenye kila prediction. Experiments za awali hazikushindwa; zilikuwa tu zinatest real theory nyingine, yenye restriction kubwa zaidi.

Kwa nini hii si contradiction

Ni rahisi kusoma hii kama “experiments za 2021 zilikuwa wrong.” Ni kinyume chake. Experiments zilikuwa sahihi, na makala hii inategemea kuwa sahihi: inakubali kila measured correlation na kuonyesha real formulation inayozalisha hizo pia. Kinachorekebishwa ni interpretation — leap kutoka “real theory hii imefalsifyiwa” hadi “real numbers haziwezekani katika quantum mechanics.” Leap hiyo iliruka dhana iliyokuwa ikifanya kazi.

Wala makala haisemi watu waache complex numbers. Summary yake yenyewe ni makini pande zote mbili: complex numbers si strictly necessary, na ni muhimu sana. Real construction inahitaji extra flag kwa kila mfumo na rule ngumu zaidi ya kuziunganisha; complex numbers hufunga hayo yote ndani ya arithmetic moja safi. Convenience si jambo dogo. Katika physics mara nyingi ndilo sababu formalism moja inashinda.

Kwa nini ni muhimu

Swali la kuvutia chini yake ni maana ya neno “necessary” katika physical theory. Experiment inaweza kutenganisha theories mbili kama zinatabiri vitu tofauti. Haiwezi yenyewe kukuambia kwamba mathematical ingredient fulani ndiyo container pekee inayowezekana kwa seti ya predictions — hilo ni swali la theories zipi zinaweza kujengwa, na linatatuliwa kwa construction, si kipimo. makala hii ni construction: inaonyesha alternative ambayo experiments zilitafsiriwa kana kwamba zimeiondoa.

Matokeo pia yananoa distinction yenye thamani kwa ujumla. “Theory hii imefalsifyiwa” na “mathematical zana hii haiwezi kuepukwa” ni kauli tofauti, na pengo kati yake ndipo clean experimental matokeo inaweza kubadilika kuwa overclaim. Complex numbers bado ni lugha ya asili na yenye

ufanisi ya quantum mechanics. Kama zinahitajika kwa metaphysical sense ni swali tofauti, na kwa hilo jibu kwa sasa ni hapana.

Muhtasari safi

Pendekezo la 2021 na majaribio ya 2022 yalionyesha kwamba mekanika ya kwanta ya namba halisi, ikiwa inatumia kanuni ya kawaida ya tensor product kuunganisha mifumo, hutoa utabiri unaoweza kupimwa ambao unatofautiana na mekanika ya kwanta ya namba changamano; majaribio yaliunga mkono nadharia changamano. Hilo liliripotiwa sana kama uthibitisho kwamba namba za kufikirika ni lazima kimwili. Makala mpya ya *Physical mapitio Letters* inajenga mekanika ya kwanta ya namba halisi kwa kutumia dhana tofauti ya locality na kuzalisha utabiri wote wa nadharia changamano, pamoja na majaribio ya sehemu nyingi. Hivyo inaonyesha kwamba namba changamano zinaweza kuwa njia rahisi sana ya kuandika nadharia badala ya hitaji la lazima kabisa. Huu ni ujenzi wa kinadharia; haupindui majaribio ya awali wala hauhitaji mekanika ya kwanta iandikwe upya kwa matumizi ya kawaida.

Ukaguzi bila kupamba ukweli

Kile makala inaonyesha: Self-consistent formulation ya quantum mechanics inayotumia real numbers pekee inaweza kurudia kila prediction ya standard complex theory, pamoja na multipartite Bell-type experiments, ikiwa imejengwa juu ya locality postulate badala ya tensor-product rule ya kuunganisha mifumo.

Kile kinachowezekana lakini si hoja: Kwamba hii "inakanusha" matokeo ya 2021–2022. Haifanyi hivyo. Inakubali experiments hizo kuwa sahihi na kureinterpret scope yake: ziliiondoa real theory moja maalum inayohifadhi tensor-product rule, si real numbers kwa principle.

Kile haionyeshi: Kwamba complex numbers ni wrong, useless, au zinafaa kuachwa katika practice — makala inaziita wazi muhimu sana. Pia si experiment mpya: hakuna data mpya iliyopimwa; dai ni mathematical construction na consistency uthibitisho.

Mipaka mikuu kwa msomaji wa kawaida: Argument inategemea dhana ipi unaiona fundamental zaidi kimwili — tensor-product rule au locality postulate. Huo ni uchaguzi wenye hoja katika foundations debate inayoendelea, si fact iliyofungwa na kipimo, na real-number construction huenda inaonekana less natural kuliko complex one inayolingana nayo.

Msomaji wa kawaida anapaswa kuwa na uhakika kiasi gani? Uhakika mkubwa kwamba construction ni mathematically consistent — ni peer-reviewed na logic yake inaweza kukaguliwa. Takeaway ya kuamini ni ile modest: complex numbers ni lugha convenient ya quantum mechanics, si metaphysical necessity iliyothibitishwa. kichwa cha habari yoyote ya "imaginary numbers are real" ichukulie kama slogan ambayo makala hii ilikuja kurekebisha.

Vyanzo

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