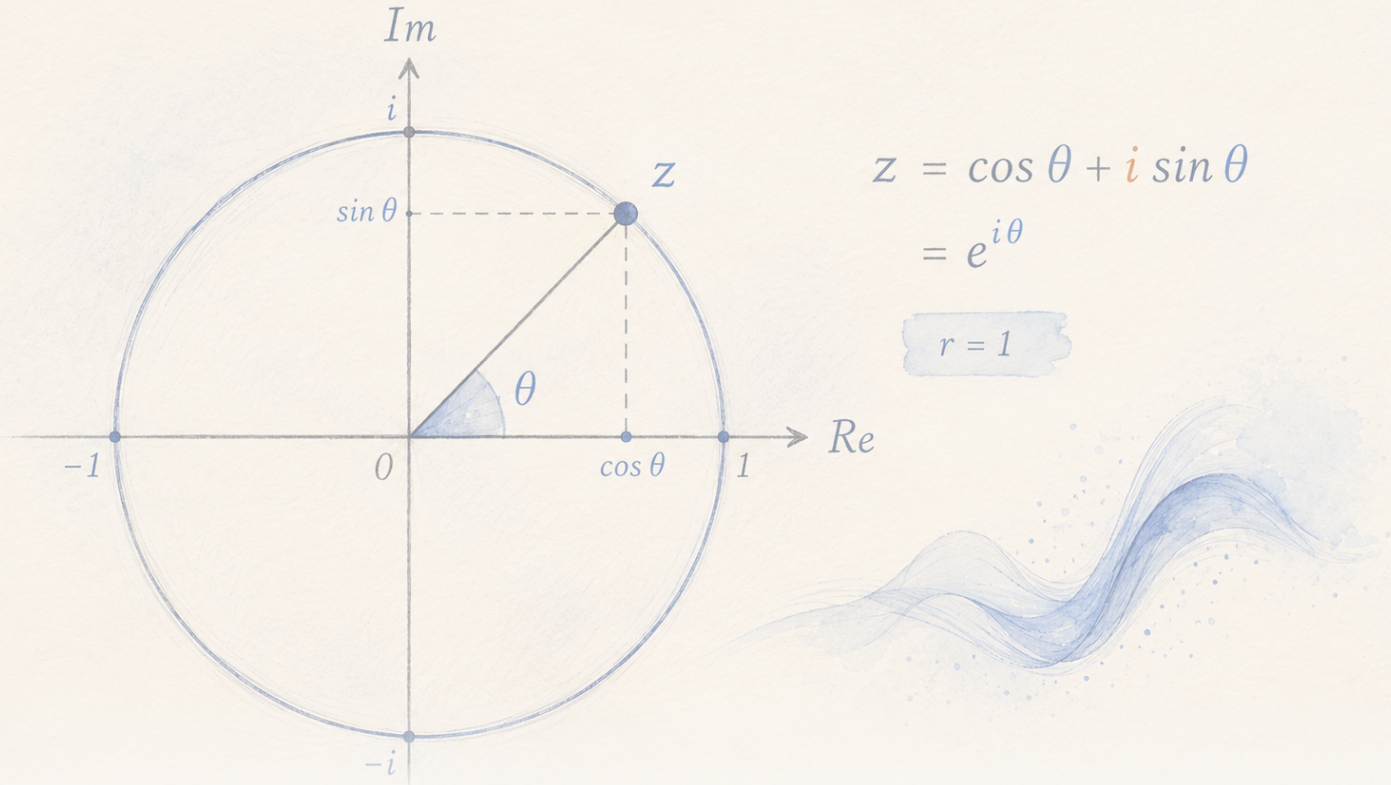


The Clean Paper

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

Kvant mexanikası yalnız həqiqi ədədlərlə yazıla bilər — incəlik sistemləri necə birləşdirməyinizdədir

2021-ci ildə geniş işıqlandırılan nəticə kvant mexanikasının həqiqi-ədədlə versiyasının eksperimental olaraq təkzib edilə biləcəyini irəli sürdü və 2022-ci il təcrübələri standart kompleks kvant nəzəriyyəsi ilə uyğun gəldi. Bu, çox vaxt xəyali ədədlərin fiziki olaraq real olduğunun sübutu kimi başlıqlara çıxdı. Physical Review Letters-də yeni məqalə iddianı dəqiqləşdirir: həqiqi-ədədlə formulasiyanı ayrı sistemlərin necə birləşməsinə dair fərqli, mübahisəyə görə daha fiziki bir fərziyyə üzərində qurduqda, o, çox-tərəfli testlər də daxil olmaqla kompleks kvant mexanikasının bütün proqnozlarını təkrarlayır. Dürüst oxunuş budur ki, kompleks ədədlər ciddi mənada zəruri deyil, rahatdır — əvvəlki təcrübələr prinsipcə həqiqi ədədləri yox, bir konkret həqiqi nəzəriyyəni istisna etmişdi. Bu, yeni ölçmə deyil, kvant əsaslarına dair nəzəri nəticədir və heç kimdən kompleks ədədlərdən istifadəni dayandırmağı istəmir.

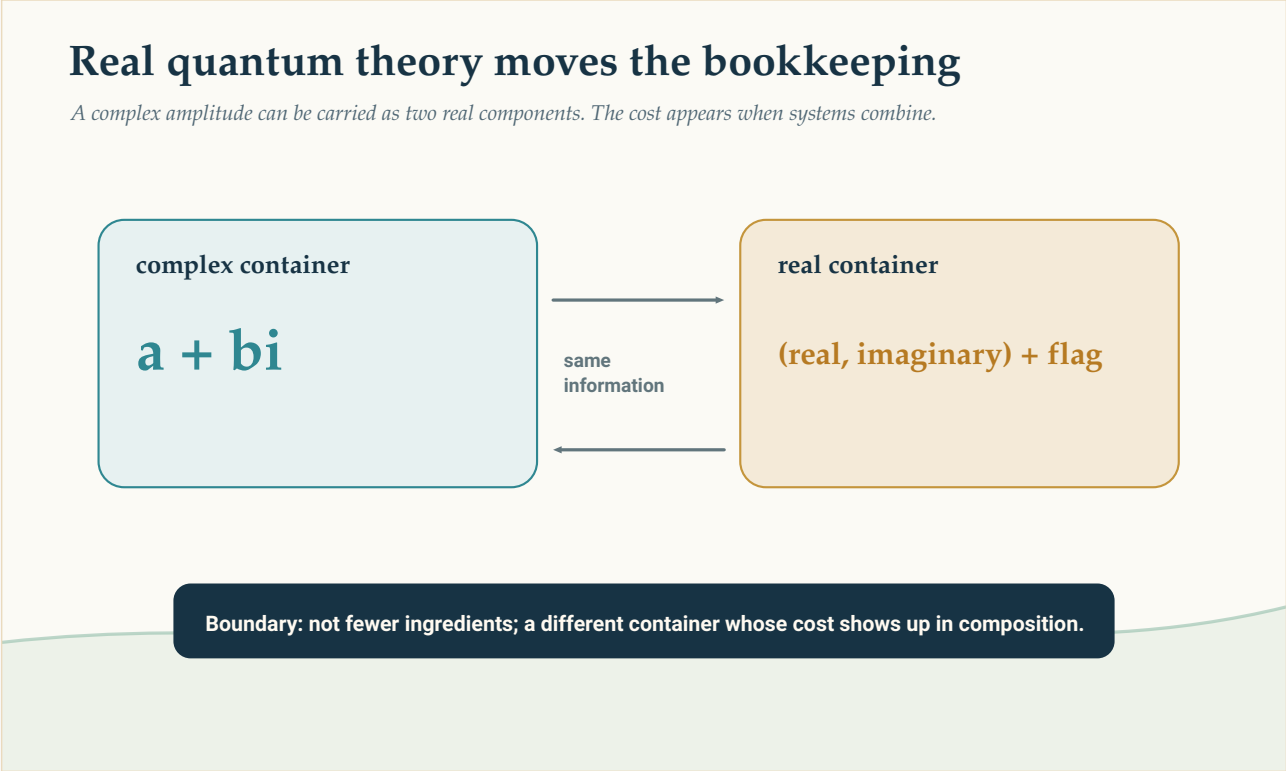
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Yenidən oxumağa dəyən başlıq

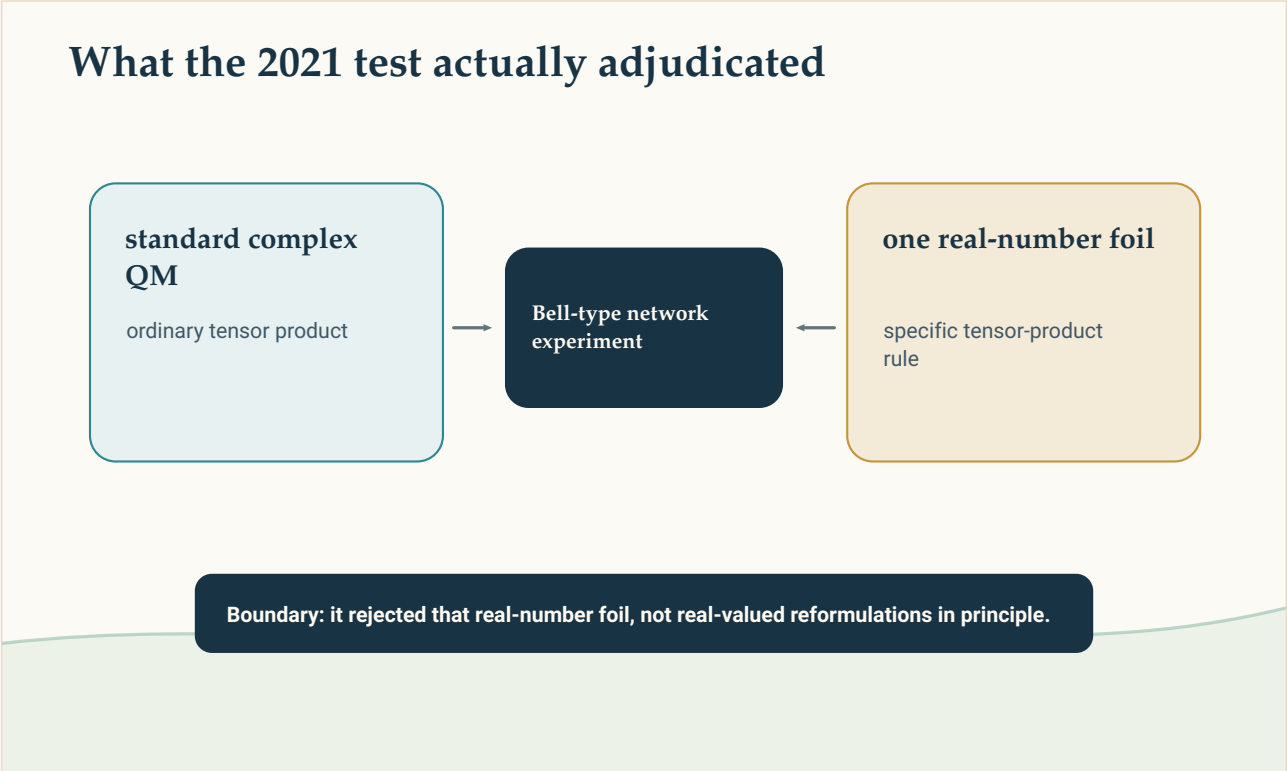
Bir neçə il əvvəl diqqətçəkən bir iddia geniş yayıldı: guya təcrübələr xəyali ədədlərin fiziki olaraq real olduğunu və kvant mexanikasının onlarsız yazıla bilməyəcəyini göstərmişdi. İddia həqiqi və diqqətli fizikadan doğmuşdu — Marc-Olivier Renou və həmkarlarının 2021-ci ildə *Nature*-da dərc etdiyi təklifdən və 2022-ci ildə onu həyata keçirən təcrübələrdən. Amma populyar versiya dəqiq bir fikri şüara sıxışdırdı və şüar nəticədən daha güclü idi.

Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping və Dagmar Bruß-un *Physical Review Letters*-də yeni məqaləsi dəqiq fikri yenidən yerinə qoyur. Məqalə yalnız həqiqi ədədlərdən istifadə edən və standart kompleks nəzəriyyənin bütün proqnozlarını — o cümlədən həqiqi ədədləri guya istisna etdiyi deyilən çox-tərəfli təcrübələri — təkrarlayan kvant mexanikası qurur. Hiylə xəyali ədədləri gizlicə geri salmaq deyil. Ayrı sistemlərin necə birləşdirilməsi barədə bir fərziyyəni dəyişməkdir. Müəlliflərin öz ifadəsi ilə dürüst nəticə budur: kompleks ədədlər kvant mexanikasını təsvir etmək üçün zəruri deyil, amma şübhəsiz ki, çox faydalıdır.



Kompleks amplituda a+bi iki həqiqi ədəddən ibarətdir və hər sistemlə birlikdə əlavə bir “bayraq” daşınır. Həqiqi-ədədlə formulasiya daha az tərkib hissəsi demək deyil — sadəcə başqa qablaşdırmadır; xərc sistemlərin necə birləşdirilməsində ortaya çıxır.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



2021–22 təcrübələri iki konkret nəzəriyyəni müqayisə etdi — standart kompleks kvant mexanikasını tensor-hasil qaydasını saxlayan həqiqi-ədədlə “foil” nəzəriyyəyə qarşı — və nəticə kompleks nəzəriyyənin xeyrinə oldu. Təcrübələr həmin foil nəzəriyyəni istisna etdi, prinsipcə həqiqi ədədləri yox.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Kompleks ədədlər nəzəriyyədə nə edir

Kvant mexanikasında sistemin vəziyyəti amplitudalarla təsvir olunur və nəticənin ehtimalını almaq üçün amplitudanın modulunun kvadratını götürürsünüz. Standart nəzəriyyədə bu amplitudalar kompleks ədədlərdir: hər biri bir böyüklük və bir faza, yəni bucaq daşıyır. Faza bəzək deyil. Eyni nəticəyə aparan iki yol birləşəndə onların fazaları bir-birini gücləndirib-gücləndirməyəcəyini və ya söndürəcəyini müəyyən edir — bu interferensiya kvant davranışının əsas əlamətidir. Bütün sistemin paylaşdığı ümumi faza isə ölçülə bilməz.

Kompleks ədəd əslində xüsusi vurma qaydaları ilə birləşdirilmiş iki həqiqi ədəddir — həqiqi hissə və xəyali hissə. Buna görə təbii sual budur: bu qablaşdırma vacibdirmi? İki həqiqi ədədi saxlayıb kompleks qablaşdırmadan imtina edərək yenə bütün kvant mexanikasını əldə etmək olarmı? Kompleks ədədləri yan-yana duran iki ədəddən artıq edən məhz vurma qaydalarıdır; buna görə cavab aşkar deyil və incəlik də burada yerləşir.

2021 nəticəsi əslində nəyi müəyyənləşdirdi

Renou və həmkarları məhz bu sualı verib onu kəskin, yoxlana bilən formaya saldılar. Onlar həqiqi ədədlərin kvant nəzəriyyəsinin haradasa istifadə olunub-olunmayacağını soruşmadılar; sistemlərin birləşdirilməsi üçün müəyyən bir qayda qəbul ediləndə həqiqi-ədədlə formulasiya kompleks nəzəriyyənin bütün proqnozlarını təkrarlaya bilərmi, bunu soruşdular. Həmin qayda — tensor-hasil qaydası deyək — bir neçə müstəqil hissəni vahid bütöv sistem kimi təsvir etməyin standart üsuludur.

Bu qayda altında onlar iki müstəqil mənbədən dolaşıqlıq paylaşan üç tərəfin olduğu bir ssenari tapdılar; burada həqiqi-ədədlə nəzəriyyə və kompleks nəzəriyyə fərqli, ölçülə bilən korrelyasiyalar proqnozlaşdırırdı — Bell testinin çox-tərəfli versiyası. 2022-ci ildə ifratkeçirici dövrələrdən və fotonlardan istifadə edən təcrübələr belə testləri həyata keçirdi. Ölçülən korrelyasiyalar kompleks kvant mexanikasına uyğun gəldi və həqiqi alternativlə uyğunlaşmadı.

> **Testə niyə bir yox, iki mənbə lazımdır**
>
> Adi Bell testində bir mənbə dolaşıq hissəcik cütünü iki nəfərə — Alice və Bob-a — göndərir. Bu quruluşda həqiqi-ədədlə kvant mexanikası kompleks nəzəriyyə ilə tam eyni korrelyasiyaları təkrarlaya bilər. İkisi fərqləndirilə bilmədiyinə görə tək mənbə aralarında seçim edə bilməz.
> 2021 arqumenti ikinci, **müstəqil** mənbə əlavə etməklə fərqi üzə çıxarır. Bir xətt boyunca üç tərəf təsəvvür edin: Alice, Bob, Charlie. Bir mənbə Alice ilə Bob-u dolaşdırır; ortaq keçmişi olmayan ayrıca mənbə isə Bob ilə Charlie-ni dolaşdırır. Bob ortada oturub iki hissəciyini birlikdə ölçür və iki tərəfi əlaqələndirir. İşləyən məhz iki mənbənin *müstəqilliyidir* — onların ayrı hazırlanması fərziyyəsi. Müstəqil sistemləri birləşdirmək üçün standart tensor-hasil qaydası altında həqiqi-ədədlə nəzəriyyə kompleks kvant mexanikasının bu şəbəkə üçün proqnozlaşdırdığı üçtərəfli korrelyasiyaları təkrarlaya bilmir, halbuki tək-mənbəli testdə iki nəzəriyyə bərabər qalır. Təcrübələrin ölçdüyü boşluq məhz budur.

Bu, həqiqi və təmiz nəticədir. Amma nəyin müqayisə edildiyinə diqqət edin: standart kompleks kvant nəzəriyyəsi konkret bir həqiqi nəzəriyyəyə — adi tensor-hasil qaydasını saxlayan nəzəriyyəyə — qarşı. Təcrübələrin hökm verdiyi həqiqi ədədlərin özü deyil, bu konkret cütlük idi. Yeni məqalə kvant əsasları terminini götürərək istisna edilmiş alternativi olduğu kimi adlandırır: *foil theory* — heç kimin həqiqət kimi irəli sürmədiyi, qəbul edilmiş nəzəriyyə ilə qəsdən müqayisə üçün qurulan və təcrübənin ikisini ayırmasına imkan verən nəzəriyyə. Onun dəyəri məhz fərqləndirilə bilməsindədir: foil nəzəriyyəni istisna etmək həqiqi nəzəriyyənin hansı fərziyyələrinin nəticəni yaratdığını göstərir.

Yeni məqalə nəyi dəyişir

Yeni iş demək olar hər şeyi saxlayıb bir postulatı dəyişir. Sistemləri birləşdirmək üçün tensor-hasil qaydasını əvvəlcədən qəbul etmək əvəzinə, müəlliflərin fiziki baxımdan daha fundamental hesab etdiyi lokallıq tələbindən başlayır: yalnız bir alt sistemdə edilən əməliyyat toxunulmamış başqa alt sistemdə ölçülə bilən təsir yaratmamalıdır.

Bu başlanğıcdan onlar həqiqi-ədədlə kvant mexanikasını açıq şəkildə qururlar. Adi amplitudaların həqiqi və xəyali hissələri əlavə həqiqi "mühasibat" kimi daşınır — məqalə bunu hər sistemə qoşulan "bayraq" adlandırır — və kompleks nəzəriyyədə müşahidə olunmayan qlobal faza həqiqi nəzəriyyədə eyni dərəcədə müşahidə olunmayan fırlanmaya çevrilir. Qiymət məhz 2021 nəticəsinin göstərdiyi yerdə — sistemlərin necə birləşdirilməsində — ortaya çıxır. Bu həqiqi təsvirləri sadəlövh şəkildə bir-birinə yapışdırmaq hətta yaxşı müəyyən edilmiş resept vermir; buna görə konstruksiya eyni fizikanı təmsil edən təsvirləri qruplaşdırır və həmin siniflərlə işləyir. Bu birləşdirmə qaydası ilə həqiqi nəzəriyyə kompleks nəzəriyyənin proqnozlaşdırdığı bütün gözləmə qiymətlərini — həm tək sistem üçün, həm də ayrı tərəflər arasında dolaşıq çoxsaylı sistemlər üçün — təkrarlayır. Müəlliflər həmçinin konstruksiyanın mahiyyətcə yeganə olduğunu və standart kvant mexanikasına ekvivalent olduğunu göstərirlər.

Beləliklə, çox-tərəfli təcrübələr bu həqiqi nəzəriyyəni kompleks nəzəriyyədən ayıra bilməz, çünki ikisi bütün proqnozlarda razılaşır. Əvvəlki təcrübələr uğursuz olmayıb; sadəcə başqa, daha məhdud həqiqi nəzəriyyəni sınaqdan keçirirdi.

Niyə bu ziddiyyət deyil

Bunu "2021 təcrübələri səhv idi" kimi oxumaq asan olardı. Əksinədir. Təcrübələr doğru idi və bu məqalə onların doğru olmasına əsaslanır: ölçülmüş bütün korrelyasiyaları qəbul edir və onları da verən həqiqi formulasiya göstərir. Dəyişdirdiyi şərhdir — "bu həqiqi nəzəriyyə təkzib edildi" fikrindən "həqiqi ədədlər kvant mexanikasında mümkün deyil" fikrinə sıçrayış. Bu sıçrayış nəticəni yaradan fərziyyəni atlamışdı.

Məqalə heç kimin kompleks ədədlərdən imtina etməli olduğunu da demir. Öz xülasəsi hər iki tərəfdə ehtiyatlıdır: kompleks ədədlər ciddi mənada zəruri deyil və çox faydalıdır. Həqiqi konstruksiya hər sistemə əlavə "bayraq" və sistemləri birləşdirmək üçün daha incə qayda tələb edir; kompleks ədədlər bütün bunları bir səliqəli arifmetik obyektə yığır. Rahatlıq əhəmiyyətsiz deyil. Fizikada çox vaxt bir formalizmin qalib gəlməsinin əsas səbəbi məhz budur.

Niyə vacibdir

Altındakı maraqlı sual fiziki nəzəriyyə üçün “zəruri” sözünün nə deməsidir. Təcrübə fərqli proqnozlar verən iki nəzəriyyəni ayıra bilər. Amma təkbaşına müəyyən bir riyazi tərkib hissəsinin həmin proqnozlar dəstini ifadə etməyin yeganə mümkün yolu olduğunu göstərə bilməz — bu, hansı nəzəriyyələrin mövcud olduğu barədə sualdır və ölçmə ilə yox, konstruksiya ilə həll olunur. Bu məqalə konstruksiyadır: təcrübələrin guya istisna etdiyi alternativi açıq şəkildə təqdim edir.

Nəticə ümumən qorumağa dəyər bir fərqi də kəskinləşdirir. “Bu nəzəriyyə təkzib edilib” və “bu riyazi alət qaçılmazdır” eyni ifadə deyil; təmiz eksperimental nəticənin həddindən artıq iddiaya çevrilə bildiyi boşluq məhz aralarındadır. Kompleks ədədlər kvant mexanikasının təbii və səmərəli dili olaraq qalır. Onların metafizik olaraq zəruri olub-olmaması ayrı sualdır və bu sualın indiki cavabı xeyrdir.

Təmiz xülasə

2021-ci il təklifi və 2022-ci il təcrübələri sistemləri birləşdirmək üçün standart tensor-hasil qaydası üzərində qurulan həqiqi-ədədlə kvant mexanikasının kompleks kvant mexanikasından fərqli və yoxlana bilən proqnozlar verdiyini göstərdi; təcrübələr kompleks nəzəriyyəni dəstəklədi. Bu, geniş şəkildə xəyali ədədlərin fiziki baxımdan zəruri olduğunun sübutu kimi təqdim edildi. Yeni *Physical Review Letters* məqaləsi fərqli, lokallığa əsaslanan postulat üzərində bütün kompleks nəzəriyyə proqnozlarını, o cümlədən çox-tərəfli testləri təkrarlayan həqiqi-ədədlə kvant mexanikası qurur — kompleks ədədlərin ciddi mənada zəruri deyil, rahat olduğunu göstərir. Bu, nəzəri konstruksiyadır, əvvəlki təcrübələri ləğv etmir və praktikada kvant mexanikasının yenidən formulasiya edilməsini tələb etmir.

No-BS yoxlaması

Məqalə nəyi göstərir: Sistemləri birləşdirmək üçün tensor-hasil qaydası əvəzinə lokallıq postulatı əsasında qurulduqda, yalnız həqiqi ədədlərdən istifadə edən öz-özünə ziddiyyətsiz kvant mexanikası formulasiyasının standart kompleks nəzəriyyənin bütün proqnozlarını, o cümlədən çox-tərəfli Bell-tipli təcrübələri təkrarlaya bildiyini.

Mümkündür, amma əsas məqam deyil: Bunun 2021–2022 nəticələrini “təkzib etməsi”. Etmir. Həmin təcrübələrin düzgünlüyünü qəbul edir və onların əhatəsini yenidən şərh edir: prinsipcə həqiqi ədədləri deyil, tensor-hasil qaydasını saxlayan bir konkret həqiqi nəzəriyyəni istisna etdilər.

Nəyi göstərmir: Kompleks ədədlərin səhv, faydasız və ya praktikada atılmağa dəyər olduğunu — məqalə onları açıq şəkildə çox faydalı adlandırır. Bu, yeni təcrübə də deyil:

yeni məlumat ölçülməyib; iddia riyazi konstruksiya və ardıcıllıq sübutudur.

Ümumi oxucu üçün əsas məhdudiyyətlər: Arqument hansı fərziyyəni fiziki baxımdan daha fundamental saydığınızdan — tensor-hasil qaydasını, yoxsa lokallıq postulatını — asılıdır. Bu, davam edən kvant əsasları mübahisəsində əsaslandırılmış seçimdir, ölçmə ilə sabitlənmiş fakt deyil; həqiqi-ədədlə konstruksiya uyğun gəldiyi kompleks nəzəriyyədən daha az təbii görünə bilər.

Ümumi oxucu nə qədər əmin ola bilər? Konstruksiyanın riyazi baxımdan ardıcıl olduğuna yüksək — iş peer review-dan keçib və məntiqi yoxlana bilir. Etibar edilməli nəticə tə-vazökardır: kompleks ədədlər kvant mexanikasının rahat dilidir, sübut olunmuş metafizik zərurət deyil. “Xəyali ədədlər realdır” tipli başlıqlara bu məqalənin düzəltmək üçün yazıldığı şüar kimi yanaşın.

Mənbələr

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