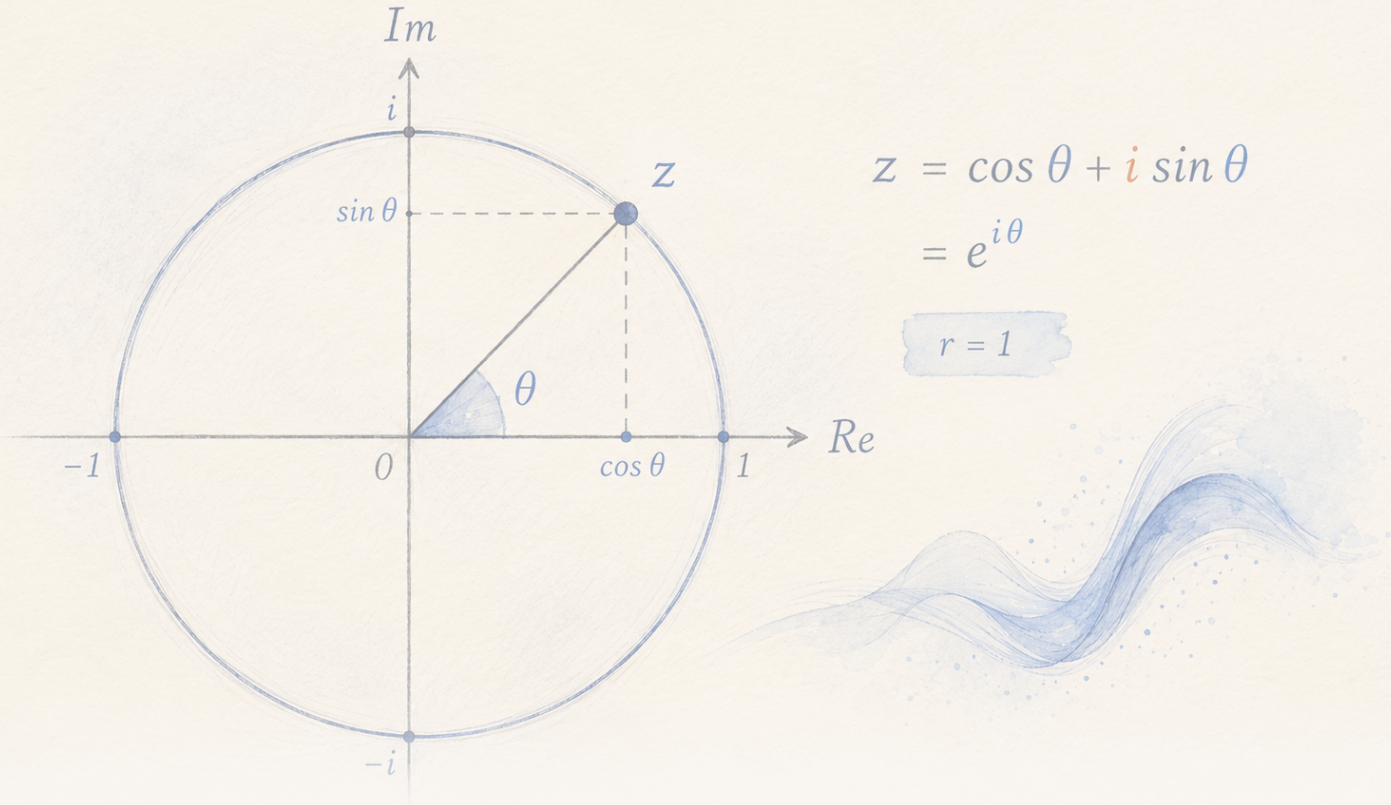


The Clean Paper

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

กลศาสตร์ควอนตัมเขียนด้วยจำนวนจริงล้วนได้ — จุดแลกอยู่ที่วิธีรวมระบบ

ในปี 2021 ผลที่ถูกรายงานกว้างเสนอว่ากลศาสตร์ควอนตัมเวอร์ชันจำนวนจริงสามารถถูก falsify ด้วยการทดลอง และการทดลองติดตามในปี 2022 เห็นตรงกับทฤษฎีเชิงซ้อนมาตรฐาน เรื่องนี้มักถูกพาดหัวว่าเป็นหลักฐานว่าจำนวนจินตภาพมีความจริงทางกายภาพ งานใหม่ใน Physical Review Letters ทำให้ข้ออ้างคมขึ้น: หากสร้าง formulation จำนวนจริงบนสมมติฐานฮีกแบบหนึ่งที่อาจมีพื้นฐานทางกายภาพมากกว่าเกี่ยวกับการรวมระบบที่แยกจากกัน มันให้คำทำนายทุกอย่างเหมือนกลศาสตร์ควอนตัมเชิงซ้อน รวมถึงการทดสอบ multipartite การอ่านที่ซื่อตรงคือ จำนวนเชิงซ้อนสะดวกมากกว่าจะจำเป็นอย่างเคร่งครัด — และการทดลองก่อนหน้าตัดทฤษฎีจำนวนจริงเฉพาะแบบหนึ่ง ไม่ใช่จำนวนจริงโดยหลักการ นี่เป็นผลด้าน foundations บนกระดาษ ไม่ใช่การวัดใหม่ และไม่ได้ขอให้ใครหยุดใช้จำนวนเชิงซ้อน

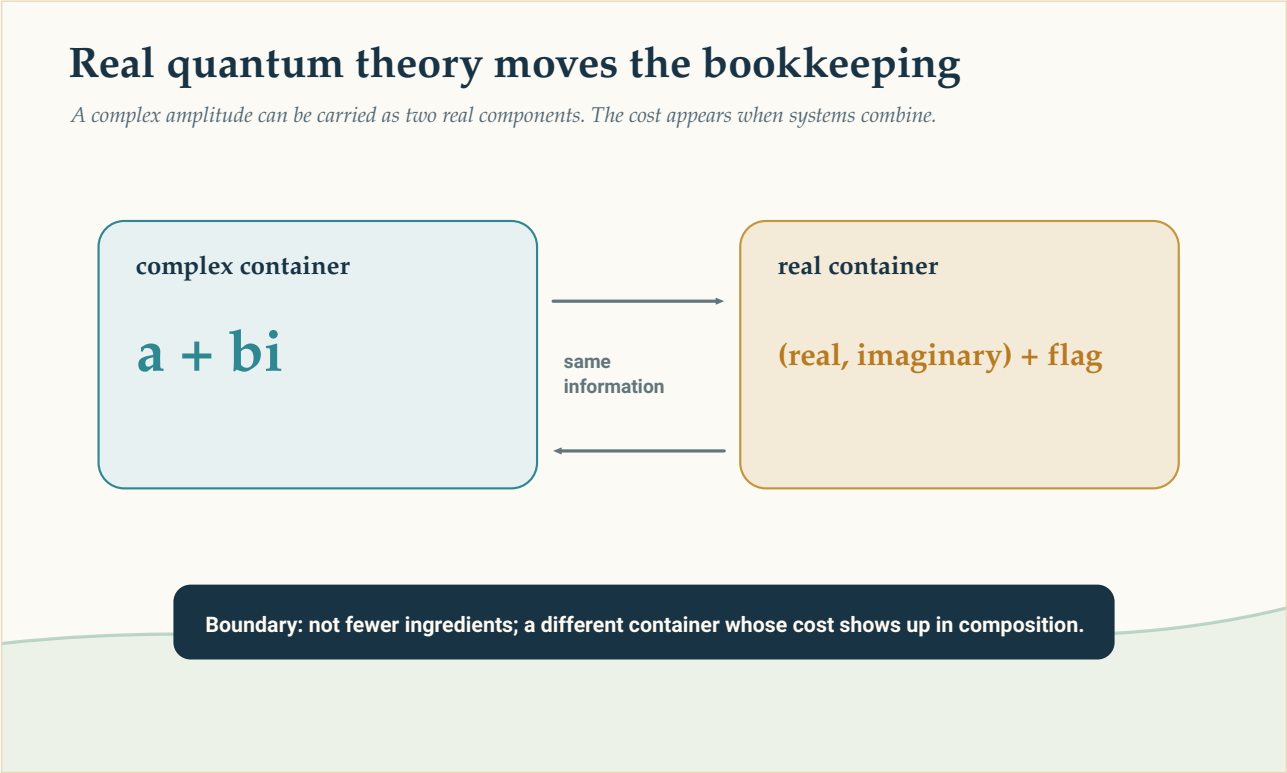
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

พาดหัวที่ควรอ่านซ้ำอีกครั้ง

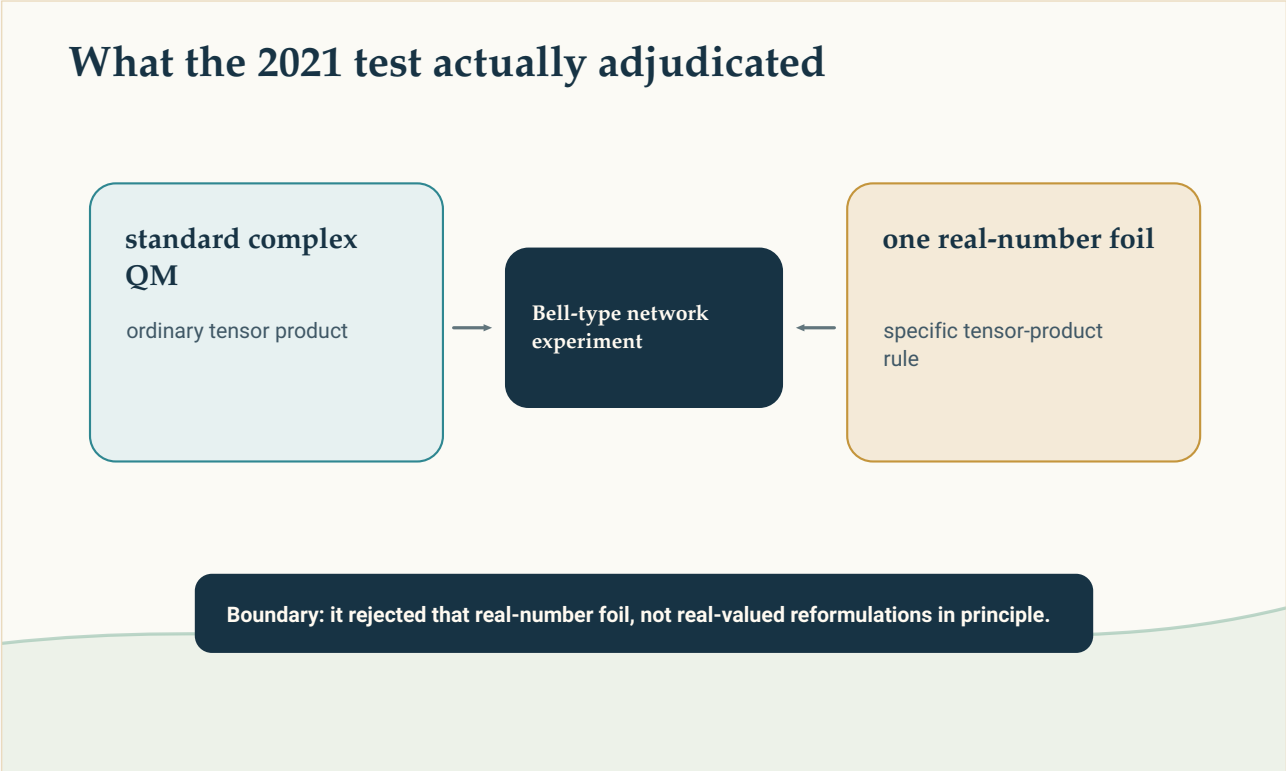
ไม่กี่ปีก่อนมีข้ออ้างสะดุดตาแพร่ไปทั่ว: การทดลองแสดงแล้วว่าจำนวนจินตภาพมีความจริงทางกายภาพ และกลศาสตร์ควอนตัมเขียนโดยไม่มีมันไม่ได้ ข้ออ้างนี้เติบโตจากฟิสิกส์ที่จริงจังและระมัดระวัง — ข้อเสนอปี 2021 ใน *Nature* โดย Marc-Olivier Renou และคณะ และการทดลองในปี 2022 ที่นำข้อเสนอไปทำจริง แต่ฉบับที่แพร่สู่สาธารณะบีบข้อความแม่นยำให้เหลือคำขวัญ และคำขวัญแข็งแรงกว่าผล

งานใหม่ใน *Physical Review Letters* โดย Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping และ Dagmar Bruß นำข้อความที่แม่นยำกลับมา มันสร้างกลศาสตร์ควอนตัมเวอร์ชันที่ใช้เพียงจำนวนจริงและให้คำทำนายทุกอย่างเหมือนทฤษฎีเชิงซ้อนมาตรฐาน — รวมถึงการทดลอง multipartite ชุดเดียวกับที่เคยกล่าวกันว่าตัดจำนวนจริงทิ้ง เคล็ดลับไม่ใช่แอบใส่จำนวนจินตภาพกลับเข้ามา แต่คือเปลี่ยนสมมติฐานข้อหนึ่งว่าเรารวมระบบที่แยกจากกันอย่างไร ข้อสรุปซื่อตรงตามคำของผู้เขียนคือ จำนวนเชิงซ้อนไม่จำเป็นต่อการอธิบายกลศาสตร์ควอนตัมอย่างเคร่งครัด แต่มีประโยชน์มากอย่างแน่นอน



แอมพลิจูดเชิงซ้อน a+bi คือคู่จำนวนจริงที่มี “flag” ติดไปกับแต่ละระบบ การเขียนด้วยจำนวนจริงไม่ได้ใช้ส่วนประกอบน้อยลง — เพียงใช้ภาชนะคนละแบบ และต้นทุนไปปรากฏตรงกฎว่าระบบต่าง ๆ รวมกันอย่างไร

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



การทดลองปี 2021–22 เปรียบเทียบทฤษฎีสองแบบเฉพาะเจาะจง — กลศาสตร์ควอนตัมเชิงซ้อนมาตรฐาน กับทฤษฎีจำนวนจริงแบบ “foil” ที่ยังคงกฎ tensor product — และผลเลือกฝั่งเชิงซ้อน มันตัด foil นั้นออก ไม่ได้ตัดจำนวนจริงโดยหลักการ

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

จำนวนเชิงซ้อนทำหน้าที่อะไรในทฤษฎี

ในกลศาสตร์ควอนตัม สถานะของระบบอธิบายด้วย amplitudes และเพื่อหาความน่าจะเป็นของผลลัพธ์ เรานำขนาดของ amplitude มายกกำลังสอง ในทฤษฎีมาตรฐาน amplitudes เหล่านี้เป็นจำนวนเชิงซ้อน: แต่ละตัวมีขนาดและ phase ซึ่งเป็นมุม Phase ไม่ใช่ของตกแต่ง เมื่อสองเส้นทางไปสู่ผลเดียวกันรวมกัน phases จะกำหนดว่ามันเสริมหรือหักล้างกัน — interference ซึ่งเป็นลายเซ็นของพฤติกรรมควอนตัม ในทางกลับกัน phase รวมที่เหมือนกันทั้งระบบไม่สามารถวัดได้

จำนวนเชิงซ้อน แท้จริงคือคู่ของจำนวนจริง — ส่วนจริงและส่วนจินตภาพ — ที่ถูกมัดเข้าด้วยกันด้วยกฎการคูณเฉพาะ ดังนั้นคำถามตามธรรมชาติคือ การมัดแบบนี้จำเป็นหรือไม่ เราจะเก็บจำนวนจริงสองตัว ทั้งบรรจุภัณฑ์เชิงซ้อน แล้วรักษากลศาสตร์ควอนตัมทั้งหมดไว้ได้หรือไม่? กฎการคูณคือสิ่งที่ทำให้จำนวนเชิงซ้อนเป็นมากกว่าสองจำนวนวางข้างกัน จึงไม่เห็นคำตอบทันที และความละเอียดอ่อนอยู่ตรงนี้

ผลปี 2021 แสดงอะไรจริง ๆ

Renou และคณะถามคำถามนี้ตรง ๆ แล้วทำให้อยู่ในรูปที่ทดสอบได้ พวกเขาไม่ได้ถามว่าจำนวนจริงสามารถปรากฏที่ไหนสักแห่งในทฤษฎีควอนตัมหรือไม่ แต่ถามว่าการเขียนทฤษฎีด้วยจำนวนจริงสามารถให้คำทำนายทั้งหมดเหมือนทฤษฎีเชิงซ้อนได้หรือไม่ เมื่อยึดกฎเฉพาะสำหรับการรวมระบบ กฎนั้น — เรียกว่า tensor-product rule — คือวิธีมาตรฐานในการอธิบายส่วน

อิสระหลายส่วนเป็นระบบเดียว

ภายใต้กฎนั้น พวกเขาพบสถานการณ์ที่มีสามฝ่ายแบ่ง entanglement จากแหล่งอิสระสองแหล่ง ซึ่งทฤษฎีจำนวนจริงและทฤษฎีเชิงซ้อนทำนาย correlation ที่วัดได้แตกต่างกัน — คล้าย Bell test แบบ multipartite ในปี 2022 การทดลองด้วย วงจรตัวนำยิ่งยวด และด้วย โฟตอน ทำการทดสอบดังกล่าว correlation ที่วัดได้ตรงกับกลศาสตร์ควอนตัมเชิงซ้อนและไม่สอดคล้องกับทางเลือกจำนวนจริงนั้น

> **ทำไมการทดสอบต้องใช้สองแหล่ง ไม่ใช่หนึ่งแหล่ง**
>
> Bell test ปกติใช้แหล่งเดียวส่งคู่ entangled หนึ่งคู่ไปยัง Alice และ Bob สำหรับการจัดแบบนั้น กลศาสตร์ควอนตัมจำนวนจริงสามารถสร้าง correlation เหมือนทฤษฎีเชิงซ้อนได้ทุกประการ — แยกสองทฤษฎีไม่ออก ดังนั้นแหล่งเดียวตัดสินระหว่างมันไม่ได้
> ข้อโต้แย้งปี 2021 ได้แรงเมื่อเพิ่มแหล่ง **อิสระ** ตัวที่สอง ลองนึกถึงสามฝ่ายเรียงกัน: Alice, Bob, Charlie แหล่งหนึ่ง entangle Alice กับ Bob; อีกแหล่งหนึ่งซึ่งไม่มีอดีตร่วมกับแหล่งแรก entangle Bob กับ Charlie Bob อยู่ตรงกลางและวัดอนุภาคทั้งสองร่วมกัน เชื่อมสองครึ่งเข้าด้วยกัน สิ่งที่ทำงานคือ *ความเป็นอิสระ* ของสองแหล่ง — สมมติฐานว่าถูกเตรียมแยกกัน — เพราะภายใต้ tensor-product rule มาตรฐานสำหรับรวมระบบอิสระ ทฤษฎีจำนวนจริงไม่สามารถสร้าง correlation สามฝ่ายที่กลศาสตร์ควอนตัมเชิงซ้อนทำนายในเครือข่ายนี้ได้ ขณะที่การทดสอบแหล่งเดียวทำให้สองทฤษฎียังเสมอกัน ช่องว่างนี้คือสิ่งที่การทดลองวัด

นั่นเป็นผลที่จริงและสะอาด แต่ต้องดูอย่างระมัดระวังว่ามันเปรียบเทียบอะไร: ทฤษฎีควอนตัมเชิงซ้อนมาตรฐานกับทฤษฎีจำนวนจริงแบบเฉพาะหนึ่งแบบ — แบบที่ยังใช้ tensor-product rule ปกติ สิ่งที่การทดลองตัดสินคือคู่นั้น ไม่ใช่ "จำนวนจริง" ในตัวมันเอง งานใหม่ยืมศัพท์จาก quantum foundations แล้วเรียกทางเลือกที่ถูกตัดออกตามหน้าที่ของมันว่า *foil theory* — ทฤษฎีที่ไม่มีใครเสนอว่าเป็นความจริง แต่ตั้งขึ้นเป็นคู่เปรียบเทียบโดยตั้งใจเพื่อให้การทดลองแยกจากทฤษฎีที่ยอมรับได้ คุณค่าของมันคือแยกออกได้: การตัด foil ทิ้งช่วยบอกว่าสมมติฐานข้อใดของทฤษฎีจำนวนจริงกำลังทำงาน

งานใหม่เปลี่ยนอะไร

งานใหม่เก็บแทบทุกอย่างไว้และเปลี่ยน postulate หนึ่งข้อ แทนที่จะสมมติ tensor-product rule ในการรวมระบบ มันเริ่มจากข้อกำหนด locality ที่ผู้เขียนให้เหตุผลว่าพื้นฐานทางกายภาพมากกว่า: การกระทำที่ทำเฉพาะบน subsystem หนึ่งไม่ควรสร้างผลที่วัดได้ต่อ subsystem อื่นที่ไม่ได้แตะต้อง

จากจุดเริ่มนั้น พวกเขาสร้างกลศาสตร์ควอนตัมจำนวนจริงอย่างชัดเจน ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ amplitudes ปกติถูกพกไปเป็น bookkeeping จำนวนจริงเพิ่มเติม — งานเรียกมันว่า "flag" ที่ติดกับแต่ละระบบ — และ global phase ที่วัดไม่ได้ของทฤษฎีเชิงซ้อนกลายเป็นการหมุนที่วัดไม่ได้เท่า ๆ กันในทฤษฎีจริง ต้นทุนปรากฏตรงที่ผลปี 2021 ชี้ไว้: ในวิธีรวมระบบ วิธีตรงไปตรงมาในการเอาคำอธิบายจริงเหล่านี้มาต่อกันไม่ให้สูตรที่นิยามได้ดี ดังนั้นโครงสร้างใหม่จึงจัดคำอธิบายที่แทนฟิสิกส์เดียวกันให้อยู่ในกลุ่มเดียว แล้วทำงานกับชั้นเหล่านั้น ด้วยกฎการรวมนี้ ทฤษฎีจำนวนจริงสร้าง expectation value ทุกค่าที่ทฤษฎีเชิงซ้อนทำนาย — ทั้งระบบเดียวและหลายระบบที่ entangle ข้ามฝ่ายแยกกัน ผู้เขียนยังแสดงว่าโครงสร้างนี้โดยสาระเป็นเอกลักษณ์ และสมมูลกับกลศาสตร์ควอนตัมมาตรฐาน

ดังนั้นการทดลอง multipartite แยกทฤษฎีจำนวนจริงนี้ออกจากทฤษฎีเชิงซ้อนไม่ได้ เพราะทั้งคู่เห็นตรงกันในทุกคำทำนาย การทดลองก่อนหน้าไม่ได้ล้มเหลว เพียงแต่ทดสอบกับทฤษฎีจำนวนจริงอีกแบบหนึ่งที่เข้มงวดกว่า

ทำไมนี่ไม่ใช่ความขัดแย้ง

อ่านง่ายมากว่าผลนี้หมายถึง “การทดลองปี 2021 ผิด” แต่จริง ๆ ตรงกันข้าม การทดลองถูกต้อง และงานนี้ต้องอาศัยว่ามันถูกต้อง: ยอมรับ correlation ที่วัดได้ทุกค่า แล้วแสดง formulation จำนวนจริงที่ให้ค่าเหล่านั้นด้วย สิ่งที่แก้คือการตีความ — การกระโดดจาก “ทฤษฎีจำนวนจริงแบบนี้ถูก falsify” ไปเป็น “จำนวนจริงเป็นไปไม่ได้ในกลศาสตร์ควอนตัม” การกระโดดนั้นข้ามสมมติฐานที่กำลังทำงานอยู่

งานก็ไม่ได้เสนอว่าใครควรทิ้งจำนวนเชิงซ้อน บทสรุปของงานระวังทั้งสองด้าน: จำนวนเชิงซ้อนไม่จำเป็นอย่างเคร่งครัด และมันมีประโยชน์มาก โครงสร้างจำนวนจริงต้องมี flag เพิ่มบนทุกระบบและกฎการรวมที่ละเอียดอ่อนกว่า; จำนวนเชิงซ้อนห่อทั้งหมดนั้นไว้ในเลขคณิตชิ้นเดียวอย่างสะอาด ความสะดวกไม่ใช่เรื่องเล็ก ในฟิสิกส์มันมักเป็นเหตุผลทั้งหมดที่ formalism หนึ่งชนะ

ทำไมจึงสำคัญ

คำถามน่าสนใจที่อยู่ข้างใต้คือคำว่า “จำเป็น” หมายถึงอะไรสำหรับทฤษฎีทางกายภาพ การทดลองแยกสองทฤษฎีได้เมื่อมันให้คำทำนายต่างกัน แต่โดยตัวมันเองไม่สามารถบอกว่าองค์ประกอบทางคณิตศาสตร์ชิ้นใดชิ้นหนึ่งเป็นภาชนะ *เพียงแบบเดียว* สำหรับชุดคำทำนาย — นั่นเป็นคำถามว่ามีทฤษฎีทางเลือกอะไรอยู่ และตอบด้วยการสร้างทฤษฎี ไม่ใช่การวัด งานนี้คือ construction: มันแสดงทางเลือกที่หลายคนเคยตีความว่าการทดลองตัดทิ้งแล้ว

ผลยังทำให้ความแตกต่างทั่วไปข้อหนึ่งคมขึ้น “ทฤษฎีนี้ถูก falsify” กับ “เครื่องมือคณิตศาสตร์นี้หลีกเลี่ยงไม่ได้” เป็นข้อความคนละแบบ และช่องว่างระหว่างสองประโยคคือที่ที่ผลทดลองสะอาดอาจกลายเป็นคำกล่าวเกินจริง จำนวนเชิงซ้อนยังคงเป็นภาษาธรรมชาติและมีประสิทธิภาพของกลศาสตร์ควอนตัม ส่วนว่ามันจำเป็นในเชิงอภิปรัชญาหรือไม่นั้นเป็นอีกคำถามหนึ่ง และสำหรับคำถามนั้น ตอนนี้คำตอบคือไม่

สรุป

ข้อเสนอปี 2021 และการทดลองปี 2022 แสดงว่า กลศาสตร์ควอนตัมจำนวนจริงที่สร้างบน tensor-product rule มาตรฐานสำหรับรวมระบบให้คำทำนายที่ต่างและทดสอบได้จากกลศาสตร์ควอนตัมเชิงซ้อน และการทดลองสนับสนุนทฤษฎีเชิงซ้อน เรื่องนี้ถูกนำเสนออย่างกว้างว่าเป็นหลักฐานว่าจำนวนจินตภาพจำเป็นทางกายภาพ งานใหม่ใน *Physical Review Letters* สร้างกลศาสตร์ควอนตัมจำนวนจริงบน postulate ด้าน locality อีกแบบหนึ่งที่ให้คำทำนายเหมือนทฤษฎีเชิงซ้อนทั้งหมด รวมถึงการทดสอบ multipartite — แสดงว่าจำนวนเชิงซ้อนสะดวกมากกว่าจะจำเป็นอย่างเคร่งครัด นี่เป็นการสร้างทางทฤษฎี ไม่ได้ล้มผลการทดลองก่อนหน้า และไม่ได้เรียกร้องให้เปลี่ยนวิธีเขียนกลศาสตร์ควอนตัมในทางปฏิบัติ

ประเมินแบบไม่เกินจริง

งานวิจัยแสดงอะไร: มี formulation ของกลศาสตร์ควอนตัมที่สอดคล้องในตัวเองและใช้เพียงจำนวนจริง ซึ่งให้คำทำนายทุกอย่างเหมือนทฤษฎีเชิงซ้อนมาตรฐาน รวมถึง Bell-type experiments แบบ multipartite หากสร้างบน postulate ด้าน locality แทน tensor-product rule สำหรับการรวมระบบ

อะไรที่เป็นไปได้แต่ไม่ใช่ประเด็น: การกล่าวว่านี่ “หักล้าง” ผลปี 2021–2022 ไม่ถูก งานยอมรับว่าการทดลองเหล่านั้นถูก

ต้องและตีความขอบเขตใหม่: มันตัดทฤษฎีจำนวนจริงเฉพาะแบบที่ยังคง tensor-product rule ออก ไม่ได้ตัดจำนวนจริงโดยหลักการ

งานไม่ได้แสดงอะไร: ไม่ได้แสดงว่าจำนวนเชิงซ้อนผิด ไร้ประโยชน์ หรือควรถูกทิ้งในทางปฏิบัติ — งานเองเรียกมันว่ามีประโยชน์มาก และนี่ไม่ใช่การทดลองใหม่: ไม่มีการวัดข้อมูลใหม่ ข้ออ้างคือ construction ทางคณิตศาสตร์และ proof ความสอดคล้อง

ข้อจำกัดหลักสำหรับผู้อ่านทั่วไป: ข้อโต้แย้งขึ้นกับว่าสมมติฐานใดที่คุณมองว่าเป็นพื้นฐานทางกายภาพมากกว่า — tensor-product rule หรือ locality postulate นี่เป็นการเลือกที่มีเหตุผลภายในการถกเถียงเรื่อง foundations ที่ยังดำเนินอยู่ ไม่ใช่ข้อเท็จจริงที่การวัดตรึงไว้ และ construction จำนวนจริงอาจดูเป็นธรรมชาติน้อยกว่าทฤษฎีเชิงซ้อนที่มันเลียนแบบ

ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน? มั่นใจสูงว่า construction สอดคล้องทางคณิตศาสตร์ — ผ่าน การประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิและตรรกะตรวจสอบได้ ข้อสรุปที่ควรเชื่อคือแบบถ่อมตัว: จำนวนเชิงซ้อนเป็นภาษาที่สะดวกของกลศาสตร์ควอนตัม ไม่ใช่ความจำเป็นเชิงอภิปรัชญาที่พิสูจน์แล้ว พาดหัวแบบ “จำนวนจินตภาพเป็นของจริง” ควรถูกอ่านในฐานะคำขวัญที่งานนี้เขียนขึ้นมาแก้

แหล่งข้อมูล

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