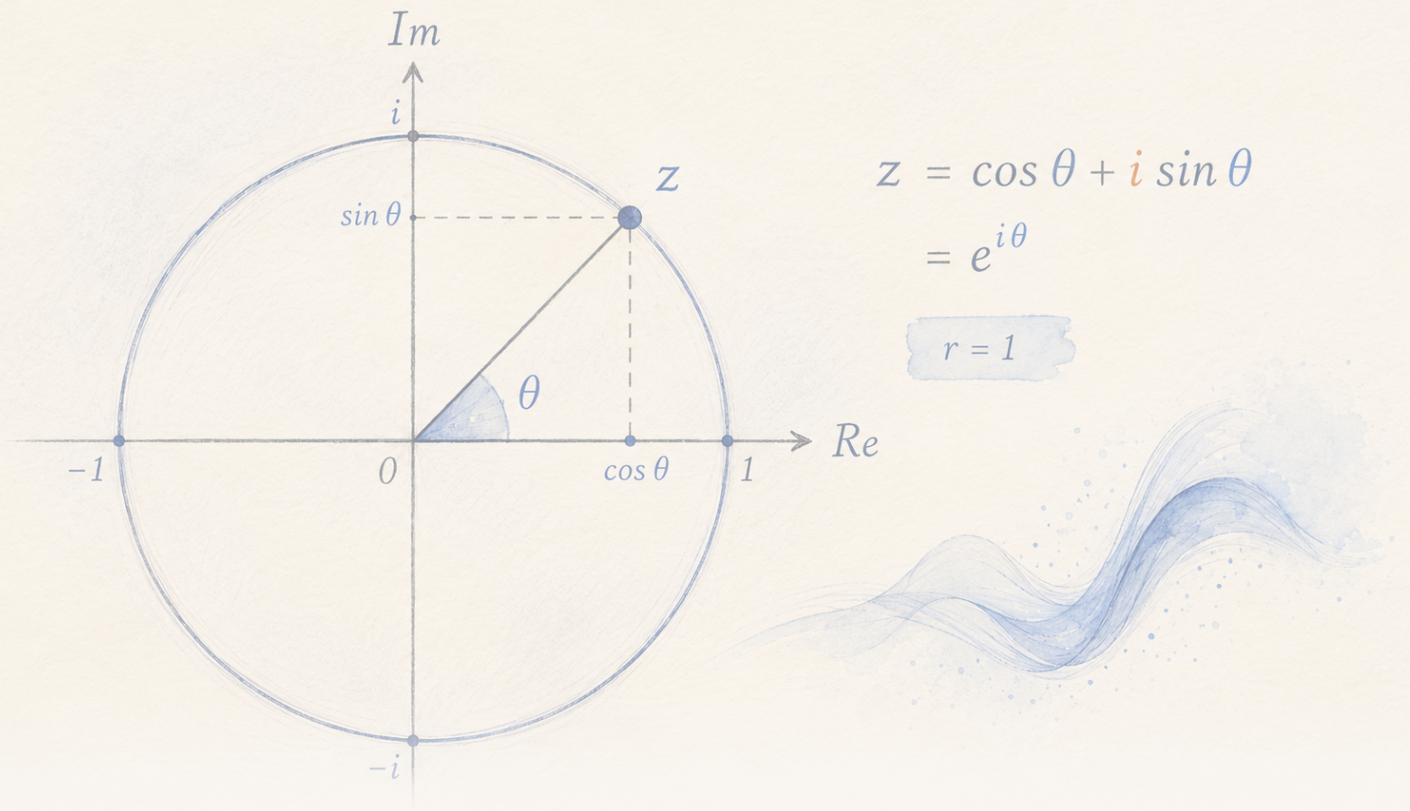




The CLEAN PAPER

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

אפשר לכתוב מכניקת קוונטים במספרים ממשיים בלבד — המלכוד הוא באופן שבו מחברים מערכות

ב-2021 נטען בתוצאה שזכתה לסיקור רב שגרסה ממשית של מכניקת הקוונטים ניתנת להפרכה ניסויית, וניסויי המשך ב-2022 התאימו לתאוריה המרוכבת הסטנדרטית. הדבר כותר לעיתים כהוכחה שמספרים מדומים "אמיתיים פיזיקלית". מאמר חדש ב-*Letters Review Physical* מחדד את הטענה. אם בונים את הניסוח הממשי על הנחה אחרת, ולדברי המחברים פיזיקלית יותר, לגבי חיבור מערכות נפרדות, הוא משחזר כל תחזית של מכניקת הקוונטים המרוכבת, כולל המבחנים הרב-צדדיים. הקריאה הכנה היא שמספרים מרוכבים נוחים מאוד אך אינם הכרחיים לחלוטין — ושהניסויים הקודמים שללו תאוריה ממשית אחת מסוימת, לא מספרים ממשיים באופן עקרוני.

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

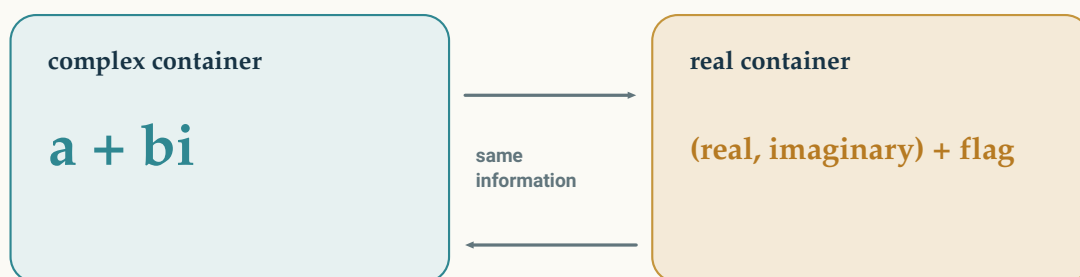
כותרת שכדאי לקרוא שוב

לפני כמה שנים הסתובבה טענה דרמטית: ניסויים הראו שמספרים מדומים הם "אמיתיים פיזיקליים", ושאי-אפשר לנסח מכניקת קוונטים בלעדיהם. הטענה צמחה מפיזיקה אמיתית וזהירה — הצעה מ-2021 ב-*Nature* מאת Marc-Olivier Renou ועמיתים, וניסויים מ-2022 שביצעו אותה. אבל הגרסה הפופולרית דחסה משפט מדויק לסיסמה, והסיסמה הייתה חזקה יותר מהתוצאה.

מאמר חדש ב-*Letters Review Physical* מאת Kampermann, Hermann Trushechkin, Anton Hita, Barrios Pedro ו-Bruß Dagmar Epping Michael מחזיר את המשפט המדויק למקומו. הוא בונה גרסה של מכניקת הקוונטים המשתמשת במספרים ממשיים בלבד ומשחזרת כל תחזית של התאוריה המרוכבת הסטנדרטית — כולל בדיוק את הניסויים הרב-צדדיים שנאמר עליהם כי שללו מספרים ממשיים. הטריק אינו להבריא מספרים מדומים בחזרה פנימה. הוא לשנות הנחה אחת לגבי האופן שבו מערכות נפרדות מתחברות. המסקנה הכנה, במילות המחברים עצמם, היא שמספרים מרוכבים אינם הכרחיים לתיאור מכניקת הקוונטים, אבל הם בהחלט שימושיים מאוד.

Real quantum theory moves the bookkeeping

A complex amplitude can be carried as two real components. The cost appears when systems combine.

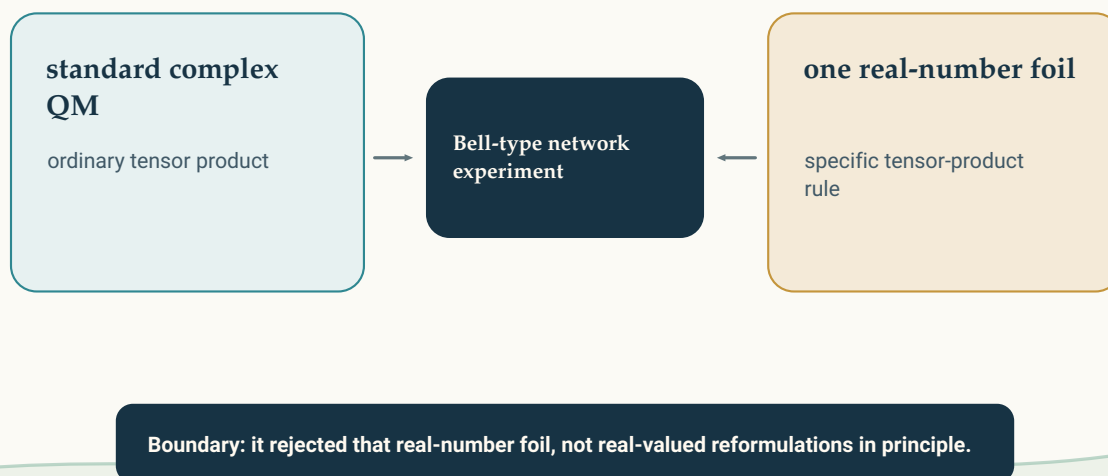


Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

אמפליטודה מרוכבת $a+bi$ היא זוג מספרים ממשיים עם "דגל" שנישא לצד כל מערכת. הניסוח הממשי אינו משתמש בפחות מרכיבים — הוא רק אורז אותם במכל אחר, והמחיר מופיע באופן שבו מערכות מתחברות.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



הניסויים מ-2021–2022 השוו שתי תאוריות ספציפיות — מכניקת קוונטים מרוכבת סטנדרטית מול תאוריית "ניגוד" ממשית ששומרת על כלל המכפלה הטנזורית — והתוצאה התאימה למרוכבת. הם שללו את תאוריית הניגוד הזאת, לא מספרים ממשיים באופן עקרוני.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

מה עושים המספרים המרוכבים בתאוריה

במכניקת הקוונטים מצב של מערכת מתואר באמצעות אמפליטודות, וכדי לקבל הסתברות לתוצאה לוקחים את ריבוע הגודל של האמפליטודה. בתאוריה הסטנדרטית האמפליטודות הן מספרים מרוכבים: לכל אחת גודל ופאזה, כלומר זווית. הפאזה אינה קישוט. כאשר שני מסלולים לאותה תוצאה מתחברים, הפאזות שלהם קובעות אם הם מחזקים זה את זה או מבטלים זה את זה — ההתאבכות שהיא סימן היכר של התנהגות קוונטית. פאזה כוללת המשותפת לכל המערכת, לעומת זאת, אינה ניתנת למדידה.

מספר מרוכב הוא למעשה זוג מספרים ממשיים — חלק ממשי וחלק מדומה — המאוגדים עם כללים מסוימים לכפל. לכן שאלה טבעית היא אם האריזה הזאת הכרחית. האם אפשר לשמור את שני המספרים הממשיים, לוותר על האריזה המרוכבת ועדיין לקבל את כל מכניקת הקוונטים? כללי הכפל הם מה שהופך מספר מרוכב ליותר משני מספרים המונחים זה לצד זה, ולכן התשובה אינה מובנת מאליה — ושם נמצאת הדקוטה.

מה תוצאת 2021 באמת קבעה

Renou ועמיתים שאלו בדיוק את השאלה הזאת ונתנו לה צורה חדשה וניתנת לבדיקה. הם לא שאלו אם מספרים ממשיים יכולים להופיע בכלל בתאוריה קוונטית; הם שאלו אם ניסוח ממשי יכול לשחזר את כל תחזיות התאוריה המרוכבת בהינתן כלל מסוים לחיבור מערכות. הכלל הזה — המכפלה הטנזורית — הוא המרשם הסטנדרטי לתיאור כמה חלקים עצמאיים כמערכת אחת.

תחת הכלל הזה, הם מצאו תרחיש עם שלושה צדדים החולקים שזירה משני מקורות עצמאיים, שבו תאוריה ממשית והתאוריה המרוכבת מנבאות קורלציות שונות וניתנות למדידה — גרסה רב-צדדית של מבחן Bell ב-2022 בוצעו ניסויים כאלה באמצעות מעגלים על-מוליכים ובאמצעות פוטונים. הקורלציות שנמדדו תאמו מכניקת קוונטים מרוכבת ולא תאמו את החלופה הממשית.

למה המבחן צריך שני מקורות ולא אחד

מכניקת הזה, המבנה עבור ו-Bob Alice אנשים, לשני שזור זוג ששולח אחד במקור משתמש רגיל Bell מבחן — המרוכבת התאוריה כמו קורלציות אותן את בדיוק לשחזר יכולה ממשיים מספרים על המבוססת קוונטים להכריע. יכול לא יחיד מקור ולכן ביניהן, להבדיל אי-אפשר

הטיעון מ-2021 מקבל כוח כאשר מוסיפים מקור עצמאי שני. דמיינו שלושה צדדים בשורה: Bob, Alice, Charlie. מקור אחד משזר את Alice עם Bob; מקור נפרד, ללא עבר משותף, משזר את Bob עם Charlie. Bob נמצא באמצע ומוודד יחד את שני החלקיקים שלו, וכך מקשר את שני החצאים. דווקא העצמאות של שני המקורות — ההנחה שהוכנו בנפרד — עושה את העבודה: תחת כלל המכפלה הטנזורית הסטנדרטי לחיבור מערכות עצמאיות, תאוריה ממשית אינה יכולה לשחזר את הקורלציות המשולשות שהתאוריה המרוכבת מנבאת לרשת הזאת, בעוד מבחן עם מקור יחיד משאיר את התאוריות בשוויון. את הפער הזה מדדו הניסויים.

זו תוצאה אמיתית ונקייה. אבל שימו לב בדיוק מה הושווה: התאוריה הקוונטית המרוכבת הסטנדרטית מול תאוריה ממשית ספציפית אחת — זו ששומרת על כלל המכפלה הטנזורית הרגיל. זה הזוג שהניסויים הכריעו ביניהם, לא "מספרים ממשיים" כשלעצמם. המאמר החדש משתמש במונח מתחום יסודות הקוונטים ומכנה את החלופה שנשללה "theory foil" — תאוריית ניגוד שאיש אינו מציע כאמת, אלא בונה ככוונה כניגוד לתאוריה המקובלת כדי שניסוי יוכל להבחין ביניהן. הערך שלה הוא בדיוק בכך שניתן לשלול אותה: השלילה מראה אילו הנחות בתאוריה הממשית היו אלו שעשו את העבודה.

מה משנה המאמר החדש

העבודה החדשה שומרת כמעט הכול ומשנה פוסטולט אחד. במקום להניח את כלל המכפלה הטנזורית לחיבור מערכות, היא מתחילה מדרישת לוקליות שהמחברים טוענים שהיא יסודית יותר מבחינה פיזיקלית: פעולה שמבוצעת על תת-מערכת אחת בלבד לא אמורה ליצור השפעה מדידה על תת-מערכת אחרת שלא נגעו בה.

מהנקודה הזאת הם בונים במפורש מכניקת קוונטים ממשית. החלק הממשי והחלק המדומה של האמפליטודות הרגילות נשמרים כרישום נוסף במספרים ממשיים — המאמר מכנה אותו "דגל" המחובר לכל מערכת — והפאזה הגלובלית הבלתי-נצפית של התאוריה המרוכבת הופכת לסיבוב בלתי-נצפה מקביל בתאוריה הממשית. המחיר מופיע בדיוק במקום שתוצאת 2021 איתרה: בדרך שבה מערכות מתחברות. הדרך הנאיבית לחבר את התיאורים הממשיים אינה נותנת אפילו מרשם מוגדר היטב, ולכן הבנייה מאגדת יחד תיאורים שמייצגים אותה פיזיקה ועובדת עם מחלקות השקילות האלה. עם כלל החיבור הזה, התאוריה הממשית משחזרת כל ערך תוחלת שהתאוריה המרוכבת מנבאת —

למערכת אחת ולרבות, שזורות בין צדדים נפרדים. המחברים גם מראים שהבנייה ייחודית במהותה ושקולה למכניקת הקוונטים הסטנדרטית.

לכן הניסויים הרב-צדדיים אינם יכולים להבחין בין התאוריה הממשית הזאת למרוכבת, משום שהן מסכימות על כל התחזיות. הניסויים הקודמים לא נכשלו; הם פשוט בדקו תאוריה ממשית אחרת ומגבילה יותר.

למה זו אינה סתירה

קל היה לקרוא זאת כ"הניסויים של 2021 היו שגויים". ההפך הוא הנכון. הניסויים היו נכונים, והמאמר החדש תלוי בכך שהם נכונים: הוא מקבל את כל הקורלציות שנמדדו ומראה ניסוח ממשי שגם הוא מפיק אותן. מה שהוא משנה הוא את הפרשנות — הקפיצה מ"התאוריה הממשית הזאת הופרכה" ל"מספרים ממשיים בלתי אפשריים במכניקת הקוונטים". הקפיצה הזאת דילגה מעל ההנחה שעשתה את העבודה.

והמאמר גם אינו טוען שמישהו צריך לנטוש מספרים מרוכבים. הסיכום שלו זהיר משני הצדדים: מספרים מרוכבים אינם הכרחיים באופן מוחלט, והם שימושיים מאוד. הבנייה הממשית דורשת דגל נוסף לכל מערכת וכלל עדין יותר לחיבור ביניהן; המספרים המרוכבים אורזים את כל זה בתוך חשבון נקי אחד. נוחות אינה דבר זניח. בפיזיקה, לעיתים קרובות היא בדיוק הסיבה שפורמליזם אחד מנצח.

למה זה חשוב

השאלה המעניינת מתחת לפני השטח היא מה פירוש המילה "הכרחי" בתאוריה פיזיקלית. ניסוי יכול להבחין בין שתי תאוריות כאשר הן מנבאות דברים שונים. הוא אינו יכול, בפני עצמו, לומר שמרכיב מתמטי מסוים הוא המכל האפשרי היחיד לקבוצת תחזיות — זו שאלה על אילו תאוריות בכלל קיימות, והיא מוכרעת באמצעות בנייה, לא מדידה. המאמר הזה הוא בנייה: הוא מציג את החלופה שהניסויים פורשו כאילו שללו.

התוצאה גם מחדדת הבחנה שכדאי לשמור באופן כללי. "התאוריה הזאת הופרכה" ו"הכלי המתמטי הזה בלתי-נמנע" הם משפטים שונים, והפער ביניהם הוא בדיוק המקום שבו תוצאה ניסויית נקייה יכולה להפוך לטענת-יתר. מספרים מרוכבים נשארים השפה הטבעית והיעילה של מכניקת הקוונטים. השאלה אם הם הכרח מטיפזי היא נפרדת, ועל השאלה הזאת התשובה כרגע היא לא.

בקצרה

הצעה מ-2021 וניסויים מ-2022 הראו שמכניקת קוונטים במספרים ממשיים המבוססת על כלל המכפלה הטנזורית הסטנדרטי לחיבור מערכות נותנת תחזיות שונות וניתנות לבדיקה ממכניקת קוונטים מרוכבת, והניסויים תמכו בתאוריה המרוכבת. הדבר דווח בהרחבה כהוכחה לכך שמספרים מדומים הכרחיים פיזיקלית. המאמר החדש ב-*Physical Letters Review* בונה מכניקת קוונטים במספרים ממשיים על בסיס פוסטולט לוקליות אחר, ומשחזר את כל תחזיות התאוריה המרוכבת, כולל המבחנים הרב-צדדיים — ומראה שמספרים מרוכבים הם נוחים מאוד ולא הכרחיים לחלוטין. זו בנייה תאורטית; היא אינה הופכת את הניסויים הקודמים ואינה קוראת לשנות את הניסוח המעשי של מכניקת הקוונטים.

בדיקה מפוכחת

מה המאמר מראה: שאפשר לבנות ניסוח עקבי של מכניקת הקוונטים המשתמש רק במספרים ממשיים ומשחזר כל תחזית של התאוריה המרוכבת הסטנדרטית, כולל ניסוי Bell רב-צדדיים, אם בונים אותו על פוסטולט לוקליות במקום על כלל המכפלה הטנזורית לחיבור מערכות.

מה סביר אך אינו הנקודה: שזה "מפריך" את תוצאות 2021–2022. זה לא. המאמר מקבל את הניסויים כנכונים ומפרש מחדש את היקפם: הם שללו תאוריה ממשית ספציפית אחת, זו ששמרה על כלל המכפלה הטנזורית, לא מספרים ממשיים באופן עקרוני.

מה הוא אינו מראה: שמספרים מרוכבים שגויים, חסרי תועלת או שכדאי להפסיק להשתמש בהם — המאמר עצמו מכנה אותם שימושיים מאוד. וזה גם אינו ניסוי חדש: לא נמדדו נתונים; הטענה היא בנייה מתמטית והוכחת עקביות.

המגבלות העיקריות לקורא כללי: הטיעון תלוי בשאלה איזו הנחה נחשבת יסודית יותר מבחינה פיזיקלית — כלל המכפלה הטנזורית או פוסטולט הלוקליות. זו בחירה מנומקת בדיון מתמשך ביסודות הפיזיקה, לא עובדה שמדידה קובעת, והבנייה הממשית אולי פחות טבעית מזו המרוכבת שאותה היא משחזרת.

כמה ביטחון צריך להיות לקורא כללי? גבוה בכך שהבנייה עקבית מתמטית — היא עברה ביקורת עמיתים והלוגיקה שלה ניתנת לבדיקה. המסר הצנוע שעליו כדאי לסמוך: מספרים מרוכבים הם השפה הנוחה של מכניקת הקוונטים, לא הכרח מטפיזי שהוכח בניסוי. כותרת בסגנון "מספרים מדומים הם אמיתיים" היא בדיוק הסיסמה שהמאמר הזה נכתב כדי לתקן.

מקורות

240202, 136 Letters Review Physical Bruss, D. and Epping M. Kampermann, H. Trushechkin, A. Hita, Barrios P.
10.1103/4k13-sdjh DOI, (2026)
<https://doi.org/10.1103/4k13-sdjh>