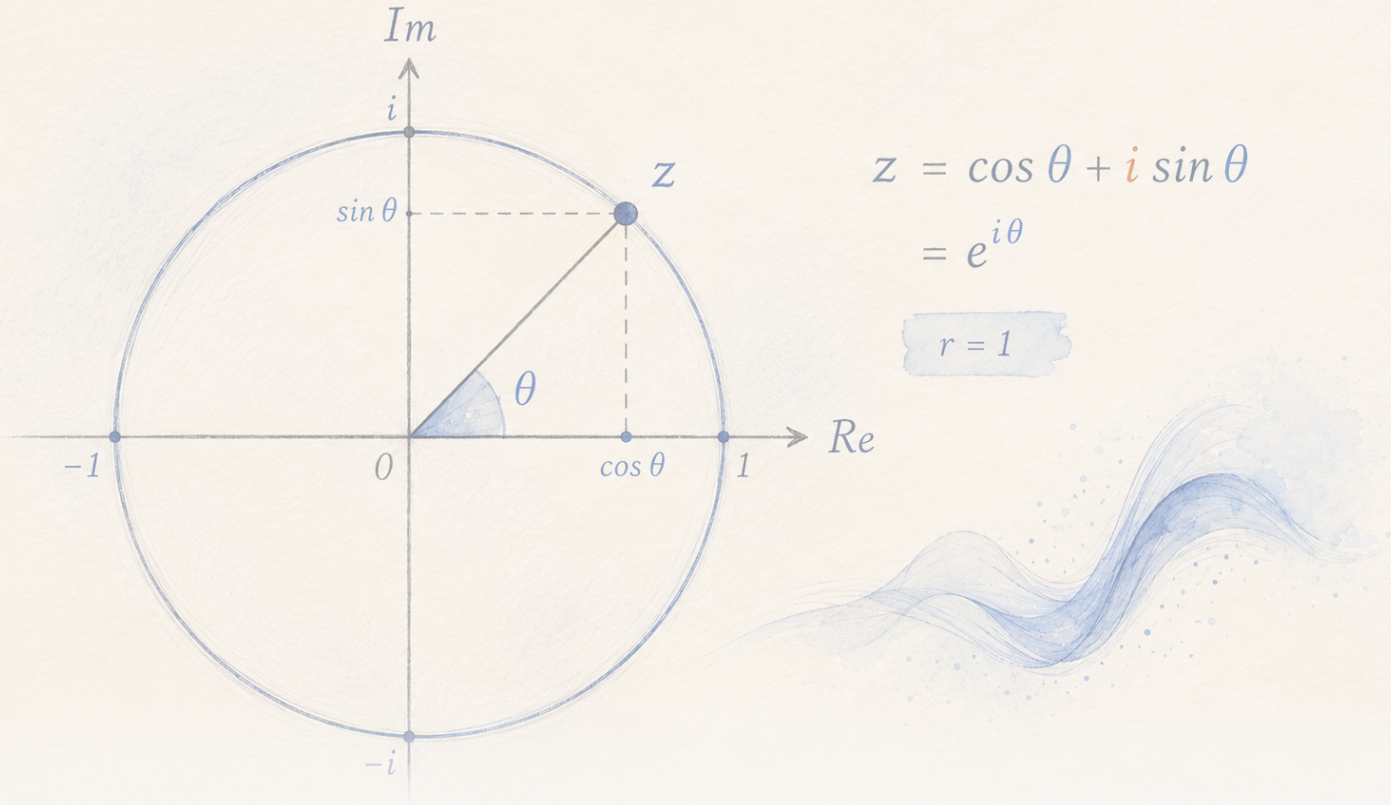



The Clean Paper

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

# Cơ học lượng tử có thể chỉ viết bằng số thực — cái giá nằm ở cách ghép các hệ

*Năm 2021, một kết quả được đưa tin rộng cho rằng phiên bản cơ học lượng tử dùng số thực có thể bị bác bỏ bằng thí nghiệm, và các thí nghiệm năm 2022 phù hợp với lý thuyết lượng tử phức chuẩn. Điều này thường được kể thành bằng chứng số ảo là có thật về vật lý. Một bài mới trên Physical Review Letters làm sắc tuyên bố: xây công thức số thực trên một giả định khác, có thể mang tính vật lý hơn, về cách các hệ riêng biệt kết hợp, và nó tái tạo mọi dự đoán của cơ học lượng tử phức, kể cả các phép thử đa bên. Cách đọc trung thực là số phức thuận tiện chứ không hoàn toàn bắt buộc — và các thí nghiệm trước loại một lý thuyết số thực cụ thể, không phải số thực về nguyên tắc. Đây là kết quả nền tảng trên giấy, không phải phép đo mới và không yêu cầu ai ngừng dùng số phức.*

---

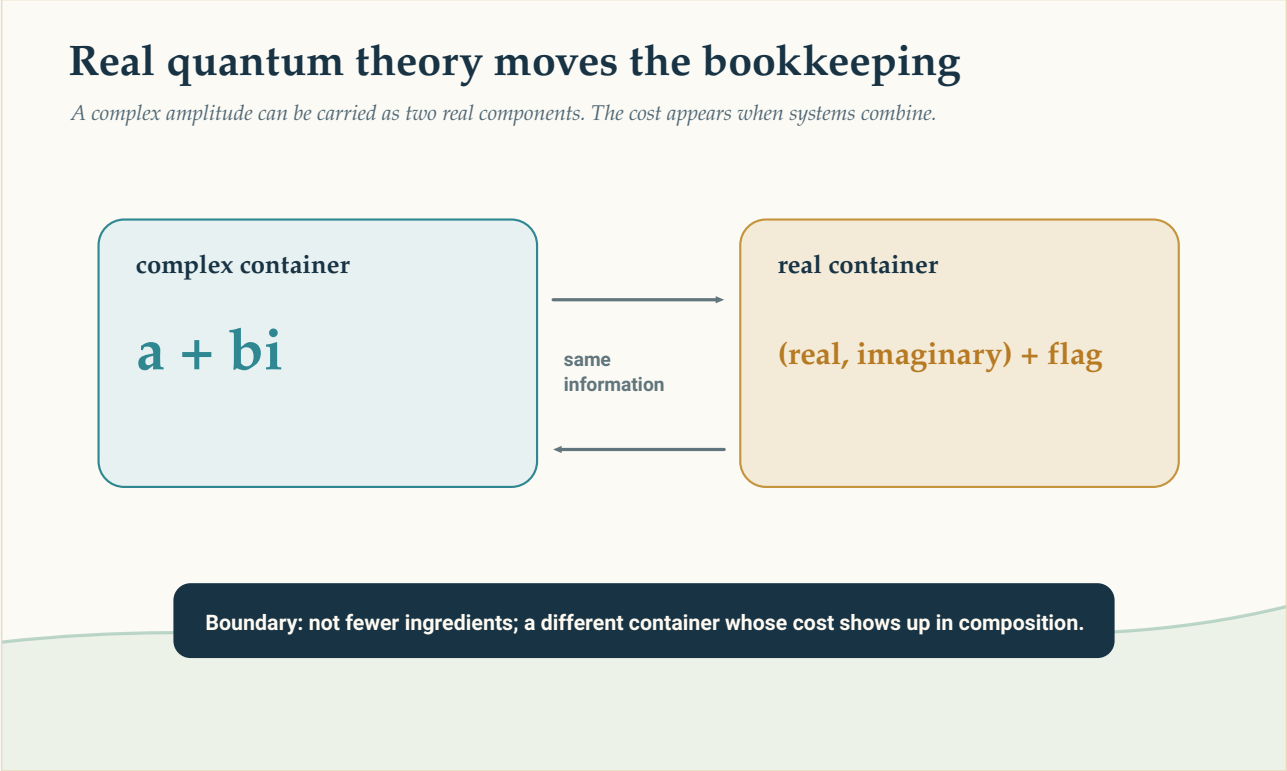
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

# Một tiêu đề đáng đọc lại

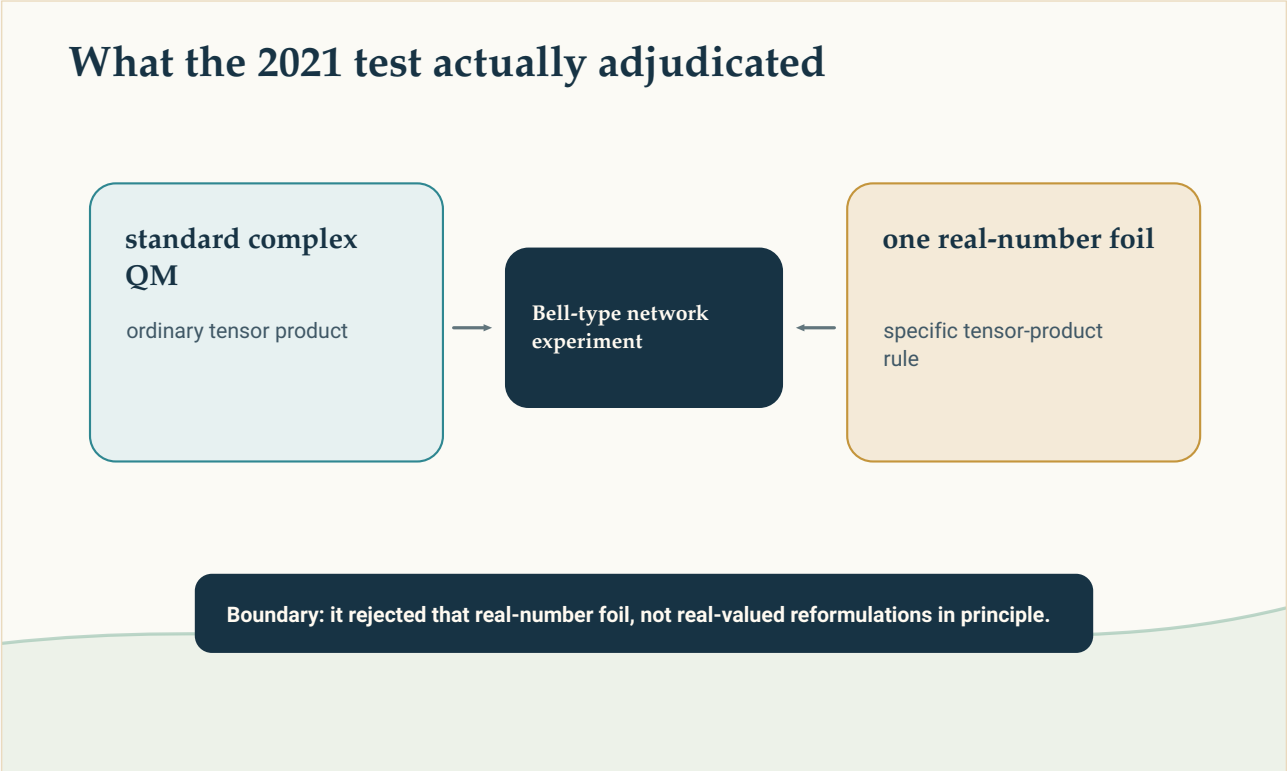
Vài năm trước, một tuyên bố gây chú ý lan rộng: thí nghiệm đã cho thấy số ảo là “thật” về mặt vật lý, rằng cơ học lượng tử không thể viết nếu thiếu chúng. Tuyên bố bắt nguồn từ vật lý thật và cẩn thận — một đề xuất năm 2021 trên *Nature* của Marc-Olivier Renou và cộng sự, cùng các thí nghiệm năm 2022 thực hiện đề xuất ấy. Nhưng phiên bản đại chúng đã nén một phát biểu chính xác thành khẩu hiệu, và khẩu hiệu mạnh hơn kết quả.

Một bài mới trên *Physical Review Letters* của Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping và Dagmar Bruß đưa phát biểu chính xác trở lại. Nó xây một phiên bản cơ học lượng tử chỉ dùng số thực và tái tạo mọi dự đoán của lý thuyết phức chuẩn — kể cả chính các thí nghiệm đa bên từng được nói là loại số thực ra ngoài. Mẹo không phải lén đưa số ảo trở lại. Nó là thay đổi một giả định về cách các hệ riêng biệt được kết hợp. Kết luận trung thực, theo lời chính tác giả, là số phức không cần thiết để mô tả cơ học lượng tử, nhưng chắc chắn rất hữu ích.




Một biên độ phức a+bi là một cặp số thực đi cùng một “cờ” cho mỗi hệ. Công thức số thực không có ít thành phần hơn — chỉ là một cách đóng gói khác, và cái giá xuất hiện ở cách các hệ được ghép lại.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0




Các thí nghiệm 2021–22 so sánh hai lý thuyết cụ thể — cơ học lượng tử phức chuẩn với một lý thuyết số thực đối chứng giữ quy tắc tích tensor — và kết quả nghiêng về lý thuyết phức. Chúng loại lý thuyết đối chứng ấy, không loại mọi cách xây lượng tử bằng số thực.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

# Số phức đang làm gì trong lý thuyết

Trong cơ học lượng tử, trạng thái của hệ được mô tả bằng các biên độ, và xác suất một kết quả được lấy từ bình phương độ lớn của biên độ. Trong lý thuyết chuẩn, các biên độ này là số phức: mỗi biên độ có độ lớn và một pha, tức một góc. Pha không phải trang trí. Khi hai đường dẫn đến cùng một kết quả kết hợp, các pha quyết định chúng tăng cường hay triệt tiêu nhau — giao thoa, dấu hiệu đặc trưng của hành vi lượng tử. Ngược lại, một pha tổng thể dùng chung cho toàn hệ không bao giờ đo được.

Một số phức thực ra chỉ là một cặp số thực — phần thực và phần ảo — được gói cùng những quy tắc cụ thể về cách chúng nhân. Vì vậy câu hỏi tự nhiên là liệu cách gói ấy có thiết yếu không. Có thể giữ hai số thực, bỏ lớp đóng gói phức, mà vẫn giữ toàn bộ cơ học lượng tử không? Chính quy tắc nhân làm số phức trở thành hơn hai con số đặt cạnh nhau, nên câu trả lời không hiển nhiên; sự tinh tế nằm ở đó.

# Kết quả năm 2021 thực sự đã chứng minh gì

Renou và cộng sự hỏi đúng câu đó và biến nó thành dạng sắc, có thể kiểm nghiệm. Họ không hỏi liệu số thực có thể xuất hiện ở đâu đó trong lý thuyết lượng tử; họ hỏi liệu một công thức dùng số thực có thể khớp mọi dự đoán của lý thuyết phức nếu dùng một quy tắc cụ thể để ghép các hệ. Quy tắc đó — gọi là quy tắc tích tensor — là cách chuẩn để mô tả nhiều phần độc lập như một toàn thể.

Dưới quy tắc ấy, họ tìm ra một kịch bản ba bên nhận vướng víu từ hai nguồn độc lập, trong đó lý thuyết số thực và lý thuyết phức dự đoán các tương quan đo được khác nhau — một phiên bản đa bên của phép thử Bell. Năm 2022, các thí nghiệm dùng mạch siêu dẫn và photon thực hiện các phép thử này. Tương quan đo được phù hợp với cơ học lượng tử phức và không phù hợp với phương án số thực đó.

> **Vì sao phép thử cần hai nguồn, không phải một**
>
> Một phép thử Bell thông thường dùng một nguồn gửi một cặp vướng víu cho hai người, Alice và Bob. Với cấu hình ấy, cơ học lượng tử dùng số thực có thể tái tạo chính xác các tương quan giống lý thuyết phức — hai lý thuyết không phân biệt được, nên một nguồn không thể quyết định giữa chúng.
> Lập luận năm 2021 có đòn bẩy bằng cách thêm một nguồn **độc lập** thứ hai. Hãy hình dung ba người xếp thành hàng: Alice, Bob, Charlie. Một nguồn làm Alice vướng víu với Bob; một nguồn riêng, không có quá khứ chung, làm Bob vướng víu với Charlie. Bob ở giữa và đo hai hạt của mình cùng nhau, nối hai nửa. Chính *tính độc lập* của hai nguồn — giả định chúng được chuẩn bị riêng — làm công việc: dưới quy tắc tích tensor chuẩn để ghép các hệ độc lập, lý thuyết số thực không thể khớp tương quan ba bên mà cơ học lượng tử phức dự đoán cho mạng này, trong khi phép thử một nguồn để hai lý thuyết hòa nhau. Khoảng cách ấy là điều các thí nghiệm đo.

Đó là một kết quả thật và sạch. Nhưng hãy chú ý chính xác thứ được so sánh: lý thuyết lượng tử phức chuẩn với *một* lý thuyết số thực cụ thể — lý thuyết vẫn giữ quy tắc tích tensor thông thường. Chính cặp so sánh này, không phải số thực tự thân, là điều thí nghiệm phân xử. Bài mới, mượn thuật ngữ từ nền tảng lượng tử, gọi phương án bị loại đúng bản chất: một *foil theory* — lý thuyết không ai đưa ra như chân lý, được dựng có chủ ý làm đối chứng với lý thuyết chấp nhận để thí nghiệm phân biệt hai bên. Giá trị của nó chính là có thể phân biệt được: loại bỏ foil cho thấy giả định nào trong lý thuyết số thực đang thực sự gánh kết quả.

# Bài báo mới thay đổi điều gì

Công trình mới giữ gần như tất cả và chỉ đổi một tiên đề. Thay vì giả định quy tắc tích tensor để ghép hệ, nó bắt đầu từ một yêu cầu cục bộ mà các tác giả cho là cơ bản hơn về vật lý: một thao tác chỉ thực hiện trên một phân hệ không nên gây ảnh hưởng đo được lên một phân hệ

khác không bị đụng tới.

Từ điểm xuất phát đó, họ xây tường minh một cơ học lượng tử dùng số thực. Phần thực và phần ảo của các biên độ quen thuộc được mang theo dưới dạng sổ sách bằng số thực bổ sung — bài báo gọi là một "cờ" gắn với mỗi hệ — và pha toàn cục không quan sát được của lý thuyết phức trở thành một phép quay không quan sát được tương tự trong lý thuyết thực. Cái giá xuất hiện đúng nơi kết quả năm 2021 đã chỉ ra: cách các hệ kết hợp. Cách ngây thơ để ghép các mô tả thực với nhau thậm chí không tạo ra một quy tắc xác định tốt, nên cấu trúc mới gom các mô tả biểu diễn cùng vật lý thành các lớp và làm việc với các lớp ấy. Với quy tắc kết hợp đó, lý thuyết số thực tái tạo mọi giá trị kỳ vọng mà lý thuyết phức dự đoán — cho một hệ và cho nhiều hệ, kể cả vướng víu giữa các bên tách rời. Các tác giả cũng cho thấy cấu trúc về cơ bản là duy nhất và tương đương với cơ học lượng tử chuẩn.

Vì vậy các thí nghiệm đa bên không thể phân biệt lý thuyết số thực này với lý thuyết phức, vì hai bên đồng ý ở mọi dự đoán. Các thí nghiệm trước không thất bại; chúng chỉ đang thử một lý thuyết số thực khác, hạn chế hơn.

# Vì sao đây không phải mâu thuẫn

Rất dễ đọc điều này thành "các thí nghiệm năm 2021 sai". Thực tế ngược lại. Các thí nghiệm đúng, và bài báo mới phụ thuộc vào việc chúng đúng: nó chấp nhận mọi tương quan đã đo và cho thấy một công thức số thực cũng tạo ra chúng. Thứ được sửa là diễn giải — bước nhảy từ "lý thuyết số thực này bị bác bỏ" sang "số thực là không thể trong cơ học lượng tử". Bước nhảy đó bỏ qua giả định thực sự làm công việc.

Bài báo cũng không nói nên bỏ số phức. Phần tóm tắt của chính nó cẩn thận ở cả hai phía: số phức không hoàn toàn cần thiết, nhưng rất hữu ích. Cấu trúc số thực cần thêm một cờ cho mỗi hệ và một quy tắc kết hợp tinh tế hơn; số phức gói tất cả điều đó vào một phép tính gọn. Sự tiện lợi không phải chuyện nhỏ. Trong vật lý, nhiều khi đó là toàn bộ lý do một hình thức thắng thế.

# Vì sao nó quan trọng

Câu hỏi thú vị bên dưới là từ "cần thiết" có nghĩa gì đối với một lý thuyết vật lý. Thí nghiệm có thể phân biệt hai lý thuyết khi chúng dự đoán khác nhau. Nhưng chỉ bằng thí nghiệm, ta không thể chứng minh một thành phần toán học cụ thể là chiếc hộp duy nhất có thể chứa một tập dự đoán — đó là câu hỏi về những lý thuyết nào có thể tồn tại, và được giải bằng cấu trúc chứ không phải phép đo. Bài báo này là một cấu trúc: nó trưng ra phương án thay thế mà trước đây các thí nghiệm thường được diễn giải như đã loại bỏ.

Kết quả cũng làm sắc một phân biệt đáng giữ nói chung. "Lý thuyết này bị bác bỏ" và "công cụ toán học này không thể tránh được" là hai câu khác nhau, và chính khoảng trống giữa chúng

là nơi một kết quả thực nghiệm sạch có thể bị kể quá tay. Số phức vẫn là ngôn ngữ tự nhiên và hiệu quả của cơ học lượng tử. Liệu chúng có bắt buộc về mặt siêu hình hay không là câu hỏi riêng, và với câu hỏi ấy, hiện tại câu trả lời là không.

# Tóm tắt gọn

Một đề xuất năm 2021 và các thí nghiệm năm 2022 cho thấy cơ học lượng tử dùng số thực được xây trên quy tắc tích tensor chuẩn để ghép các hệ đưa ra dự đoán khác, có thể kiểm nghiệm so với cơ học lượng tử phức, và thí nghiệm ủng hộ lý thuyết phức. Điều này thường được đưa tin như bằng chứng số ảo cần thiết về mặt vật lý. Bài mới trên *Physical Review Letters* xây một cơ học lượng tử số thực dựa trên một tiên đề cục bộ khác và tái tạo mọi dự đoán của lý thuyết phức, kể cả các phép thử đa bên — cho thấy số phức thuận tiện chứ không hoàn toàn bắt buộc. Đây là một cấu trúc lý thuyết, không lật đổ các thí nghiệm trước và cũng không kêu gọi viết lại cơ học lượng tử trong thực hành.

# Đánh giá thẳng thắn

**Bài báo cho thấy gì:** Một công thức tự nhất quán của cơ học lượng tử chỉ dùng số thực có thể tái tạo mọi dự đoán của lý thuyết phức chuẩn, kể cả các thí nghiệm kiểu Bell đa bên, nếu nó được xây từ tiên đề cục bộ thay vì quy tắc tích tensor để ghép hệ.

**Điều hợp lý nhưng không phải trọng tâm:** Nói rằng nó "bác bỏ" các kết quả 2021–2022. Không. Nó chấp nhận các thí nghiệm ấy là đúng và diễn giải lại phạm vi: chúng loại một lý thuyết số thực cụ thể vẫn giữ quy tắc tích tensor, không loại số thực về nguyên tắc.

**Bài báo không cho thấy gì:** Số phức sai, vô dụng hoặc đáng bỏ trong thực hành — chính bài báo gọi chúng rất hữu ích. Đây cũng không phải thí nghiệm mới: không có dữ liệu mới được đo; tuyên bố là cấu trúc toán học và chứng minh tính nhất quán.

**Hạn chế chính với độc giả phổ thông:** Lập luận phụ thuộc vào giả định nào được xem là cơ bản hơn về vật lý — quy tắc tích tensor hay tiên đề cục bộ. Đó là một lựa chọn có lý lẽ trong cuộc tranh luận nền tảng đang tiếp diễn, không phải sự thật do phép đo cố định; và cấu trúc số thực có thể kém tự nhiên hơn lý thuyết phức mà nó bắt chước.

**Độc giả phổ thông nên tin tưởng đến mức nào?** Cao rằng cấu trúc nhất quán về toán học — nó đã qua bình duyệt và logic có thể kiểm tra. Kết luận nên tin là kết luận khiêm tốn: số phức là ngôn ngữ tiện lợi của cơ học lượng tử, không phải một tất yếu siêu hình đã được chứng minh. Hãy xem mọi tiêu đề kiểu "số ảo là có thật" như khẩu hiệu mà chính bài báo này được viết để chỉnh lại.

# Nguồn

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