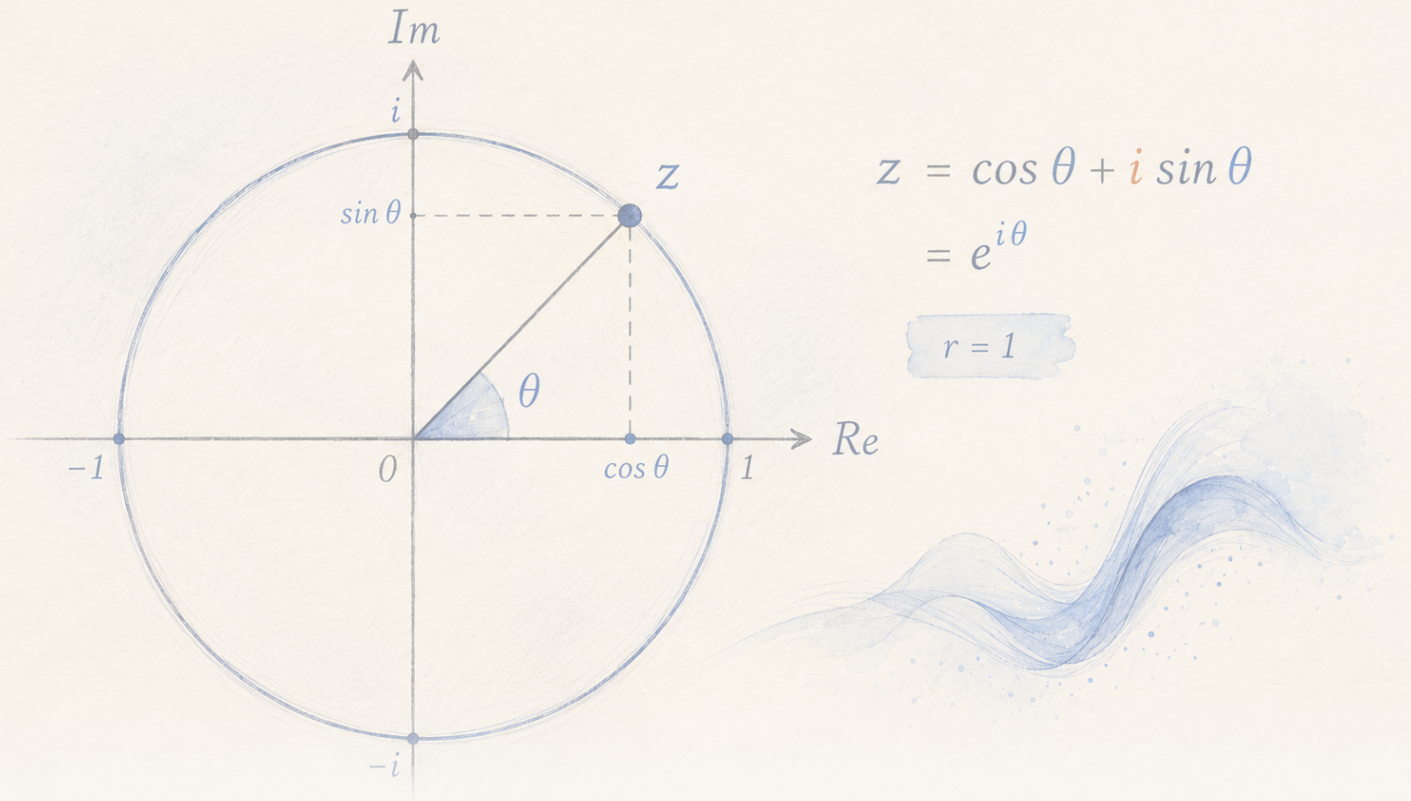




The CLEAN PAPER

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

양자역학은 실수만으로도 쓸 수 있다—문제는 계 를 어떻게 결합하느냐에 있다

2021년에는 표준 텐서곱 규칙을 사용하는 실수 기반 양자역학을 실험으로 반증할 수 있다는 결과가 나왔고, 2022년 후속 실험은 표준 복소수 양자이론과 일치했다. 이는 흔히 허수가 물리적으로 실재한다는 증명으로 보도됐다. 새 *Physical Review Letters* 논문은 범위를 정확히 한다. 별개의 계를 결합하는 방식에 대해 다른, 국소성 기반 가정을 쓰면 실수 형식도 다자간 테스트를 포함한 복소수 양자역학의 모든 예측을 재현한다. 정직한 해석은 복소수가 엄밀히 필수라기보다 매우 편리하다는 것이다. 앞선 실험은 특정 실수 이론을 배제했지 실수 자체를 배제한 것이 아니다.

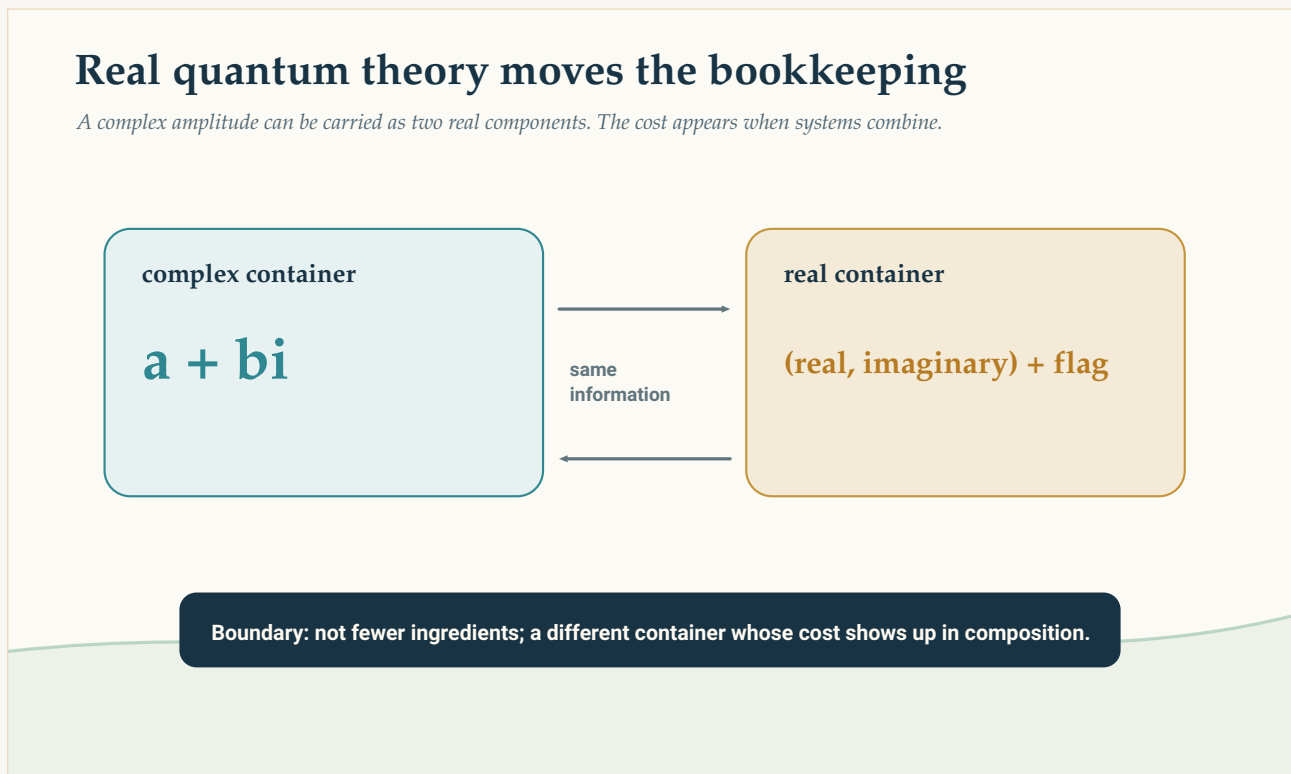
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

다시 읽을 가치가 있는 헤드라인

몇 년 전 눈에 띄는 주장이 널리 퍼졌다. 실험이 허수가 물리적으로 실재하며 양자역학은 허수 없이 쓸 수 없음을 보여줬다는 이야기였다. 그 주장은 실제로 신중한 물리학에서 나왔다. Marc-Olivier Renou 등이 *Nature*에 발표한 2021년 제안과 이를 수행한 2022년 실험들이었다. 하지만 대중적 버전은 정밀한 문장을 구호로 압축했고, 구호는 실제 결과보다 강했다.

Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping, Dagmar Bruß가 *Physical Review Letters*에 발표한 새 논문은 정확한 문장을 되돌려 놓는다. 오직 실수만 사용하는 양자역학을 구성하면서 표준 복소수 이론의 모든 예측, 심지어 실수 이론을 배제한다고 알려졌던 바로 그 다자간 실험까지 재현한다. 허수를 몰래 다시 넣는 속임수는 아니다. 별개의 계를 **어떻게 결합하는가에 관한 한 가지 가정**을 바꾼다. 저자들의 표현대로 정직한 결론은 복소수가 양자역학을 기술하는 데 반드시 필요하지는 않지만, 분명히 매우 유용하다는 것이다.



복소 진폭 $a+bi$ 는 각 계에 함께 붙어 다니는 '플래그'와 두 실수의 쌍으로 표현할 수 있다. 실수 형식이 재료를 줄이는 것은 아니다. 다른 그릇에 담을 뿐이며 비용은 여러 계를 결합하는 규칙에서 나타난다.

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Boundary: it rejected that real-number foil, not real-valued reformulations in principle.

2021~22 년 실험은 표준 복소수 양자역학과 텐서곱 규칙을 유지하는 특정 실수' 대조 이론' 을 비교했고 복소수 이론 쪽 결과를 얻었다. 배제된 것은 그 대조 이론이지 실수 자체의 가능성이 아니다.

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

이론에서 복소수가 하는 일

양자역학에서 계의 상태는 진폭으로 기술되고, 어떤 결과의 확률은 진폭 크기의 제곱에서 얻는다. 표준 이론에서 이 진폭은 복소수다. 각 진폭은 크기와 위상, 즉 각도를 갖는다. 위상은 장식이 아니다. 같은 결과로 가는 두 경로가 합쳐질 때 위상이 서로 강화할지 상쇄할지를 결정한다. 이것이 양자 행동의 대표적 특징인 간섭이다. 반면 계 전체가 공유하는 전역 위상은 어떤 측정으로도 관측할 수 없다.

복소수는 사실 두 실수, 즉 실수부와 허수부를 특정 곱셈 규칙으로 묶은 것이다. 따라서 자연스러운 질문이 생긴다. 그 묶는 방식 자체가 필수인가? 두 실수는 남겨두고 복소수라는 포장을 없애도 양자역학 전체를 유지할 수 있을까? 복소수를 단순히 나란히 놓인 두 실수 이상으로 만드는 것은 바로 곱셈 규칙이므로 답은 자명하지 않고, 미묘함은 여기에 있다.

2021 년 결과가 실제로 확립한 것

Renou 와 동료들은 바로 그 질문을 날카롭고 실험 가능한 형태로 만들었다. 실수가 양자이론 어디에도 들어갈 수 있느냐를 묻지 않았다. 여러 계를 결합하는 특정 규칙을 유지하면서 실수 기반 형식이 복소수 이론의 모든 예측을 재현할 수 있는지를 물었다. 그 규칙, 즉 텐서곱 규칙은 서로 독립적인 여러 부분을 하나의

전체 계로 기술하는 표준 방식이다.

그 규칙 아래에서 연구진은 독립된 두 소스에서 나온 얽힘을 세 참가자가 공유하는 상황을 찾아냈다. 여기서는 실수 이론과 복소수 이론이 서로 다른 측정 가능한 상관관계를 예측한다. 일종의 다자간 벨 테스트다. 2022 년 초전도 회로와 광자를 이용한 실험들이 이런 테스트를 수행했다. 측정된 상관관계는 복소수 양자 역학과 맞았고 해당 실수 대안과는 맞지 않았다.

왜 소스 하나가 아니라 두 개가 필요한가

보통의 벨 테스트는 한 소스가 얽힌 입자쌍 하나를 Alice 와 Bob 에게 보낸다. 그 구성에서는 실수 기반 양자역학도 복소수 이론과 정확히 같은 상관관계를 재현할 수 있다. 두 이론을 구별할 수 없으므로 소스 하나로는 판정할 수 없다.

2021 년 논문은 두 번째 **독립 소스**를 추가하면서 힘을 얻는다. 세 사람을 일렬로 놓자. Alice-Bob 사이에 하나의 소스가 얽힘을 만들고, 공통의 과거를 공유하지 않는 별도 소스가 Bob-Charlie 사이에 얽힘을 만든다. 가운데의 Bob 은 자기 두 입자를 함께 측정해 두 절반을 연결한다. 핵심은 두 소스가 따로 준비됐다는 **독립성**이다. 독립 계를 표준 텐서곱 규칙으로 결합한다고 가정하면 실수 이론은 이 네트워크에서 복소수 양자역학이 예측하는 세 사람의 상관관계를 따라갈 수 없지만, 한 소스 테스트에서는 둘이 동물이다. 실험이 측정한 것이 바로 그 차이이다.

이는 실제로 명확한 결과다. 그러나 비교 대상이 무엇이었는지 정확히 봐야 한다. 표준 복소수 양자이론과 **특정 실수 이론 하나**, 즉 평범한 텐서곱 규칙을 유지하는 이론이었다. 실험이 판정한 것은 이 둘의 ‘짝이지’ 실수 그 자체’가 아니다. 새 논문은 양자기초 분야의 용어를 빌려 그 배제된 대안을 정확히 부른다. *foil theory*, 즉 진짜라고 주장하는 이론이 아니라 받아들여진 이론과 의도적으로 대비되도록 만든 대조 이론이다. 실험으로 구별 가능하도록 만든 것이 가치이며, 그 대조 이론을 배제하면 어떤 가정이 실제 차이를 만들었는지 알 수 있다.

새 논문이 바꾸는 것

새 연구는 거의 모든 것을 유지하고 한 공리만 바꾼다. 여러 계를 결합할 때 텐서곱 규칙을 당연시하는 대신, 저자들이 더 물리적으로 근본적이라고 보는 **국소성 요구조건**에서 출발한다. 한 하위계에만 수행된 연산은 손대지 않은 다른 하위계에 측정 가능한 영향을 주어서는 안 된다는 조건이다.

이 출발점에서 저자들은 실수 기반 양자역학을 명시적으로 구성한다. 평범한 복소 진폭의 실수부와 허수부를 추가적인 실수 *bookkeeping* 으로 함께 운반하며, 논문은 이를 각 계에 붙은 ‘플래그 (flag)’ 라고 부른다. 복소수 이론에서 관측 불가능한 전역 위상은 실수 이론에서는 똑같이 관측 불가능한 회전으로 바뀐다. 비용은 2021 년 결과가 정확히 짚었던 곳, 즉 **계를 결합하는 방법**에서 나타난다. 이 실수 표현을 순진하게 붙이는 방식은 잘 정의된 규칙조차 만들지 못하므로, 새 구성은 같은 물리를 나타내는 표현들을 하나의 동치류로 묶고 그 동치류를 이용한다. 이 결합 규칙 아래 실수 이론은 하나의 계든, 떨어진 참가자들 사이에 얽힌 여러 계든 복소수 이론이 예측하는 모든 기대값을 재현한다. 저자들은 이 구성법이 본질적으로 유일하며 표준 양자역학과 동등함도 보인다.

따라서 다자간 실험은 이 실수 이론과 복소수 이론을 구별할 수 없다. 둘이 모든 예측에서 일치하기 때문이다. 앞선 실험이 실패한 것이 아니라, 단지 **다른, 더 제한적인 실수 이론**을 시험했던 것이다.

왜 모순이 아닌가

이를 '2021 년 실험이 틀렸다' 고 읽기 쉽다. 오히려 반대다. 실험은 옳았고 새 논문은 그 실험이 옳다는 데 의존한다. 측정된 상관관계를 모두 받아들이면서 실수 형식도 같은 결과를 만들 수 있음을 보여준다. 수정되는 것은 해석이다. '이 실수 이론이 반증됐다' 에서 '실수로 양자역학을 쓸 수 없다' 로 건너뛴 해석이 차이를 만드는 가정을 놓친 것이다.

논문은 복소수를 버리라고도 하지 않는다. 자체 요약도 양쪽을 조심스럽게 말한다. 복소수는 엄밀한 의미에서 필수는 아니지만 **매우 유용하다**. 실수 구성은 각 계에 추가 플래그가 필요하고 결합 규칙도 더 섬세하다. 복소수는 이 모든 것을 간결한 계산 체계 하나로 묶어 준다. 편리함은 사소하지 않다. 물리학에서는 형식 하나가 승리하는 이유의 대부분일 때도 있다.

왜 중요한가

밑에 깔린 흥미로운 질문은 물리이론에서 '필수' 라는 말이 무엇을 뜻하는가다. 실험은 두 이론이 다른 것을 예측할 때 둘을 구별할 수 있다. 하지만 특정 수학적 재료가 그 예측들을 담을 수 있는 **유일한 그릇**이라고 실험만으로 말할 수는 없다. 어떤 이론이 가능한가에 대한 질문이고, 측정보다 **구성**으로 해결된다. 이번 논문이 바로 그 구성이다. 실험이 배제한 것으로 널리 해석됐던 대안을 실제로 만들어 보인다.

또 일반적으로 기억할 만한 구분을 날카롭게 한다. '이 이론은 반증됐다' 와 '이 수학 도구는 피할 수 없다' 는 서로 다른 문장이다. 그 사이의 간극에서 명확한 실험 결과가 과장된 주장으로 바뀔 수 있다. 복소수는 여전히 양자역학의 자연스럽고 효율적인 언어다. 그것이 형이상학적으로 반드시 필요한지는 별도의 질문이고, 현재 답은 '아니다' 다.

핵심 요약

2021 년 제안과 2022 년 실험은 여러 계를 결합하는 표준 텐서곱 규칙을 유지한 실수 기반 양자역학이 복소수 양자역학과 다른 시험 가능한 예측을 하고, 실험은 복소수 이론을 지지함을 보여줬다. 이는 널리 '허수가 물리적으로 필수라는 증명' 으로 보도됐다. 새 *Physical Review Letters* 논문은 주장을 더 정확히 만든다. 서로 떨어진 계의 결합에 대해 텐서곱 대신 국소성 기반의 다른 공리에서 실수 형식을 구성하면 다자간 테스트를 포함해 복소수 양자역학의 모든 예측을 재현한다. 복소수는 매우 편리하지만 엄밀히 필수는 아니라는 뜻이다. 이론적 구성이지 새 실험이 아니며, 이전 실험을 뒤집지도 않고 실제 양자역학에서 복소수를 버리자고 요구하지도 않는다.

과장 없이 보면

논문이 보여주는 것: 여러 계를 결합할 때 텐서곱 규칙 대신 국소성 공리에 기반하면 오직 실수만 사용하는 자기일관적 양자역학 형식이 다자간 벨형 실험을 포함한 표준 복소수 이론의 모든 예측을 재현할 수 있다.

그렇듯하지만 핵심은 아닌 것: 이것이 2021~2022 년 결과를 '반박한다' 는 표현. 그렇지 않다. 그 실험을 올바른 결과로 받아들이고 범위를 재해석한다. 배제된 것은 텐서곱 규칙을 유지한 특정 실수 이론이지 실수의 원리적 가능성이 아니다.

보여주지 않는 것: 복소수가 틀렸거나 쓸모없거나 실제 계산에서 버릴 가치가 있다는 것. 논문도 복소수가 매우 유용하다고 명시한다. 새 실험도 아니다. 데이터 측정 없이 수학적 구성과 일관성 증명을 제시한다.

일반 독자에게 중요한 한계: 논증은 텐서곱 규칙과 국소성 공리 중 무엇을 더 물리적으로 근본적인 가정으로 보는가에 달려 있다. 이는 측정으로 확정된 사실이 아니라 계속되는 기초론 논쟁 안의 논리적 선택이며, 실수 구성은 자신이 재현하는 복소수 형식보다 덜 자연스럽다고 볼 수도 있다.

얼마나 신뢰해도 될까? 수학적 구성이 일관된다는 데에는 높은 신뢰가 적절하다. 동료심사를 거쳤고 논리를 직접 검증할 수 있다. 믿을 핵심은 겸손하다. 복소수는 양자역학의 편리한 언어이지 증명된 형이상학적 필수재가 아니다. '허수가 실재함이 증명됐다' 같은 헤드라인은 바로 이 논문이 교정하려는 구호로 읽는 편이 좋다.

출처

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>