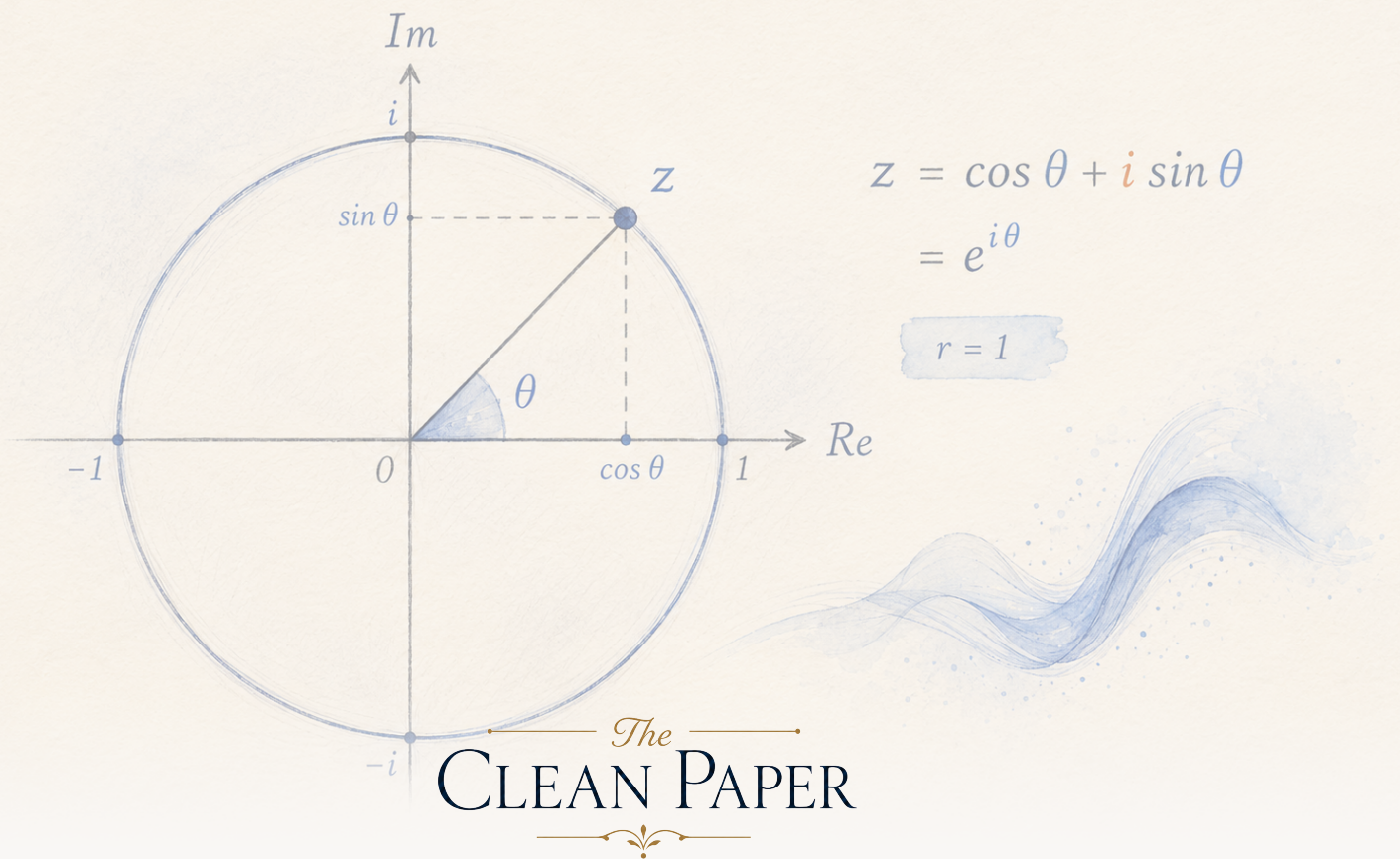




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

## La mécanique quantique peut s'écrire avec les seuls nombres réels — le piège est dans la manière de combiner les systèmes

*En 2021, un résultat largement repris affirmait qu'une version réelle de la mécanique quantique pouvait être falsifiée expérimentalement, et des expériences de 2022 ont donné raison à la théorie quantique complexe standard. Cela a souvent été titré comme une preuve que les nombres imaginaires sont physiquement réels. Un nouvel article de Physical Review Letters précise la portée de l'affirmation : si l'on construit la formulation réelle sur une autre hypothèse, sans doute plus physique, concernant la combinaison de systèmes séparés, elle reproduit toutes les prédictions de la mécanique quantique complexe, y compris les tests multipartites. La lecture honnête est que les nombres complexes sont commodes plutôt que strictement nécessaires — et que les expériences précédentes ont exclu une théorie réelle particulière, pas les nombres réels en principe. C'est un résultat de fondements sur papier, pas une nouvelle mesure, et il ne demande à personne d'arrêter d'utiliser les nombres complexes.*

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

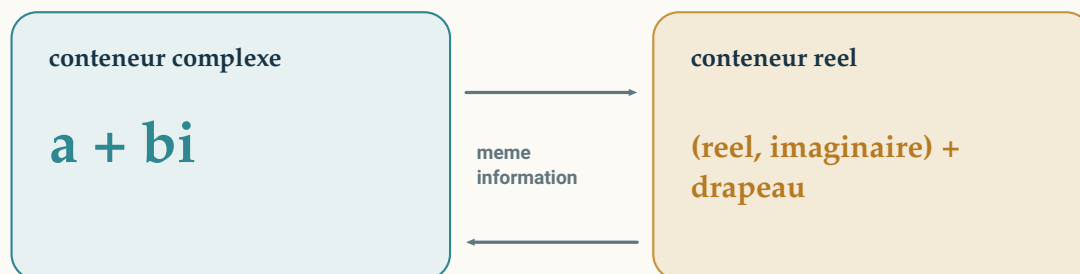
## Un titre qui mérite d'être relu

Il y a quelques années, une affirmation frappante a circulé : des expériences auraient montré que les nombres imaginaires sont physiquement réels, et que la mécanique quantique ne peut pas être écrite sans eux. Cette affirmation venait d'une vraie physique, prudente — une proposition publiée en 2021 dans *Nature* par Marc-Olivier Renou et ses collègues, puis des expériences menées en 2022 pour la tester. Mais la version populaire a comprimé un énoncé précis en slogan, et le slogan était plus fort que le résultat.

Un nouvel article de *Physical Review Letters*, signé Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping et Dagmar Bruß, remet l'énoncé précis à sa place. Il construit une version de la mécanique quantique qui n'utilise que des nombres réels et qui reproduit toutes les prédictions de la théorie complexe standard — y compris les expériences multipartites mêmes qui étaient censées exclure les nombres réels. L'astuce n'est pas de faire rentrer en douce les nombres imaginaires. Elle consiste à changer une hypothèse sur la façon dont des systèmes séparés se combinent. La conclusion honnête, dans les mots des auteurs, est que les nombres complexes ne sont pas nécessaires pour décrire la mécanique quantique, mais qu'ils sont certainement très utiles.

### La theorie quantique reelle deplace la comptabilite

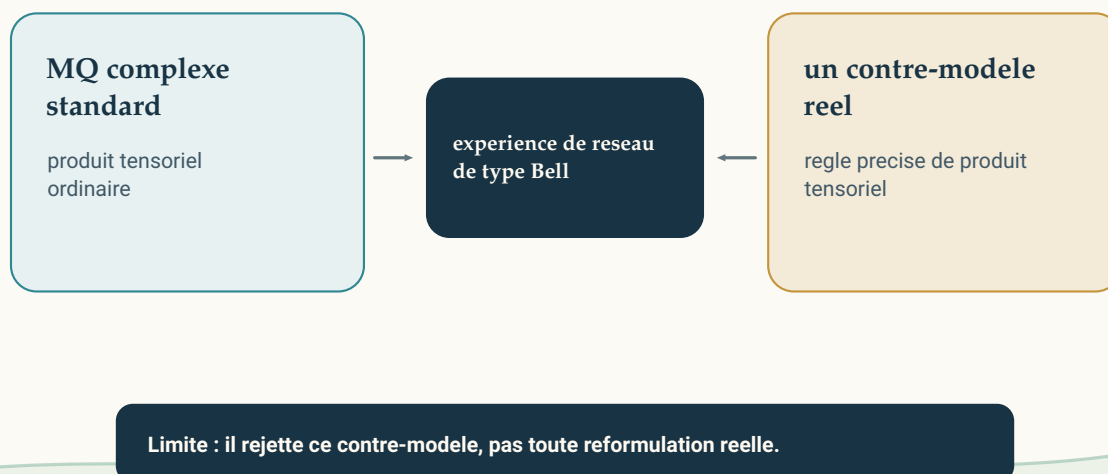
*Une amplitude complexe peut être portée par deux composantes réelles. Le coût apparaît quand les systèmes se combinent.*



**Limite : pas moins d'ingrédients ; un autre conteneur dont le coût apparaît dans la composition.**

Une amplitude complexe  $a+bi$  est une paire de nombres réels avec un « drapeau » porté avec chaque système. La formulation réelle n'a pas moins d'ingrédients — seulement un autre contenant, dont le coût apparaît dans la façon dont les systèmes se combinent.

## Ce que le test de 2021 a vraiment tranché



Les expériences de 2021–2022 ont comparé deux théories précises — la mécanique quantique complexe standard face à un « repoussoir » réel qui conserve la règle du produit tensoriel — et ont favorisé la théorie complexe. Elles ont exclu ce repoussoir, pas les nombres réels en principe.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

## Ce que les nombres complexes font dans la théorie

En mécanique quantique, l'état d'un système est décrit par des amplitudes, et pour obtenir la probabilité d'un résultat on prend la taille au carré d'une amplitude. Dans la théorie standard, ces amplitudes sont des nombres complexes : chacune porte une taille et une phase, c'est-à-dire un angle. Cette phase n'est pas une décoration. Quand deux chemins vers le même résultat se combinent, leurs phases décident s'ils se renforcent ou s'annulent — l'interférence qui signe le comportement quantique. Une phase globale partagée par tout le système, en revanche, ne peut jamais être mesurée.

Un nombre complexe n'est au fond qu'une paire de nombres réels — une partie réelle et une partie imaginaire — regroupée avec des règles précises pour les multiplier. La question naturelle est donc de savoir si ce regroupement est essentiel. Peut-on garder les deux nombres réels, abandonner l'emballage complexe, et conserver toute la mécanique quantique ? Les règles de multiplication sont ce qui rend les nombres complexes plus que deux nombres côte à côte ; la réponse n'est donc pas évidente, et c'est là que se trouve la subtilité.

## Ce que le résultat de 2021 établissait vraiment

Renou et ses collègues ont posé exactement cette question, sous une forme nette et testable. Ils n'ont pas demandé si les nombres réels peuvent apparaître quelque part en théorie quantique ; ils ont demandé si une formulation à nombres réels pouvait égaler toutes les prédictions de la théorie complexe, étant donnée une règle particulière pour combiner les systèmes. Cette règle — appelons-la la règle du produit tensoriel — est la prescription standard pour décrire plusieurs parties indépendantes comme un tout.

Avec cette règle, ils ont trouvé un scénario où trois parties partagent de l'intrication issue de deux sources indépendantes et où une théorie réelle et la théorie complexe prédisent des corrélations différentes et mesurables — une version multipartite d'un test de Bell. En 2022, des expériences utilisant des circuits supraconducteurs et des photons ont réalisé de tels tests. Les corrélations mesurées correspondaient à la mécanique quantique complexe et étaient incompatibles avec l'alternative réelle.

### Pourquoi le test a besoin de deux sources, et pas d'une seule

Un test de Bell ordinaire utilise une source unique qui envoie une paire intriquée à deux personnes, Alice et Bob. Dans cette configuration, une mécanique quantique à nombres réels peut reproduire exactement les mêmes corrélations que la théorie complexe : les deux sont indistinguables, donc une source unique ne peut pas les départager.

L'argument de 2021 devient contraignant en ajoutant une deuxième source, **indépendante**. Imaginez trois parties alignées : Alice, Bob, Charlie. Une source intrique Alice avec Bob ; une source séparée, sans passé commun partagé, intrique Bob avec Charlie. Bob se trouve au milieu et mesure ensemble ses deux particules, reliant les deux moitiés. C'est l'*indépendance* des deux sources — l'hypothèse qu'elles ont été préparées séparément — qui fait le travail : avec la règle standard du produit tensoriel pour combiner des systèmes indépendants, une théorie à nombres réels ne peut pas reproduire les corrélations à trois parties que la mécanique quantique complexe prédit pour ce réseau, alors qu'un test à source unique laisse les deux théories à égalité. Cet écart est ce que les expériences ont mesuré.

C'est un résultat réel et propre. Mais il faut noter précisément ce qu'il comparait : la théorie quantique complexe standard face à une théorie réelle particulière — celle qui conserve la règle ordinaire du produit tensoriel. C'est ce couple-là, et non les nombres réels en tant que tels, que les expériences ont tranché. Le nouvel article, en reprenant un terme des fondements de la mécanique quantique, nomme l'alternative exclue pour ce qu'elle est : une *théorie repoussoir* — une théorie que personne ne propose comme vraie, construite comme contraste délibéré avec la théorie acceptée afin que l'expérience puisse les départager. Toute sa valeur est d'être distinguable : exclure le repoussoir montre quelles hypothèses de la théorie réelle faisaient le travail.

## Ce que change le nouvel article

Le nouveau travail garde presque tout et change un postulat. Au lieu de supposer la règle du produit tensoriel pour combiner les systèmes, il part d'une exigence de localité que les auteurs jugent physiquement plus fondamentale : une opération effectuée sur un seul sous-système ne doit avoir aucun effet mesurable sur un autre sous-système laissé intact.

À partir de là, ils construisent explicitement une mécanique quantique à nombres réels. Les parties réelle et imaginaire des amplitudes usuelles sont conservées comme comptabilité réelle supplémentaire — l'article parle d'un "drapeau" attaché à chaque système — et la phase globale inobservable de la théorie complexe devient une rotation tout aussi inobservable dans la théorie réelle. Le prix apparaît exactement là où le résultat de 2021 l'avait situé : dans la façon dont les systèmes se combinent. La manière naïve de coller ces descriptions réelles ne donne même pas une recette bien définie ; la construction regroupe donc les descriptions qui représentent la même physique et travaille avec ces classes. Avec cette règle de combinaison, la théorie réelle reproduit toutes les valeurs d'espérance que prédit la théorie complexe — pour un système comme pour plusieurs, intriqués entre parties séparées. Les auteurs montrent aussi que la construction est essentiellement unique et équivalente à la mécanique quantique standard.

Les expériences multipartites ne peuvent donc pas distinguer cette théorie réelle de la théorie complexe, car les deux sont d'accord sur toutes les prédictions. Les expériences précédentes n'ont pas échoué ; elles testaient simplement une autre théorie réelle, plus restrictive.

## Pourquoi ce n'est pas une contradiction

Il serait facile de lire cela comme "les expériences de 2021 étaient fausses". C'est l'inverse. Les expériences étaient justes, et cet article dépend du fait qu'elles le soient : il accepte toutes les corrélations mesurées et montre une formulation réelle qui les produit aussi. Ce qu'il révisé, c'est l'interprétation — le saut de "cette théorie réelle est falsifiée" à "les nombres réels sont impossibles en mécanique quantique". Ce saut passait par-dessus l'hypothèse qui faisait le travail.

L'article ne dit pas non plus qu'il faudrait abandonner les nombres complexes. Son propre résumé est prudent des deux côtés : les nombres complexes ne sont pas strictement nécessaires, et ils sont très utiles. La construction réelle a besoin d'un drapeau supplémentaire sur chaque système et d'une règle plus délicate pour les combiner ; les nombres complexes empaquettent tout cela dans une arithmétique propre. La commodité n'est pas rien. En physique, c'est souvent toute la raison pour laquelle un formalisme gagne.

## Pourquoi c'est important

La question intéressante en dessous est ce que signifie “nécessaire” pour une théorie physique. Une expérience peut départager deux théories lorsqu'elles prédisent des choses différentes. Elle ne peut pas, à elle seule, vous dire qu'un ingrédient mathématique particulier est le seul contenant possible pour un ensemble de prédictions — c'est une question sur les théories qui existent, et elle se tranche par construction, pas par mesuré. Cet article est une construction : il exhibe l'alternative que les expériences étaient censées avoir exclue.

Le résultat affine aussi une distinction qu'il vaut la peine de garder en général. “Cette théorie est falsifiée” et “cet outil mathématique est inévitable” sont deux énoncés différents, et l'écart entre les deux est précisément l'endroit où un résultat expérimental propre peut se transformer en suraffirmation. Les nombres complexes restent le langage naturel et efficace de la mécanique quantique. Savoir s'ils sont métaphysiquement requis est une autre question, et sur cette question la réponse, pour l'instant, est non.

## Résumé net

Une proposition de 2021 et des expériences de 2022 ont montré qu'une mécanique quantique à nombres réels construite avec la règle standard du produit tensoriel pour combiner les systèmes fait des prédictions différentes et testables de celles de la mécanique quantique complexe, et les expériences ont favorisé la théorie complexe. Cela a été largement présenté comme une preuve que les nombres imaginaires sont physiquement nécessaires. Le nouvel article de *Physical Review Letters* construit une mécanique quantique à nombres réels sur un autre postulat, fondé sur la localité, qui reproduit toutes les prédictions de la théorie complexe, y compris les tests multipartites — montrant que les nombres complexes sont commodes plutôt que strictement nécessaires. C'est une construction théorique, elle ne renverse pas les expériences précédentes, et elle ne demande pas de reformuler la mécanique quantique en pratique.

## Mise au point

**Ce que l'article montre :** qu'une formulation cohérente de la mécanique quantique utilisant seulement des nombres réels peut reproduire toutes les prédictions de la théorie complexe standard, y compris les expériences multipartites de type Bell, si elle est construite sur un postulat de localité plutôt que sur la règle du produit tensoriel pour combiner les systèmes.

**Ce qui est plausible mais n'est pas le point :** que cela “réfute” les résultats de 2021-2022. Ce n'est pas le cas. L'article accepte ces expériences comme correctes et réinterprète leur portée : elles ont exclu une théorie réelle particulière, celle qui conservait la règle du produit tensoriel, pas les nombres réels en principe.

**Ce que cela ne montre pas :** que les nombres complexes sont faux, inutiles, ou qu'il vaudrait la peine de les abandonner en pratique — l'article les qualifie explicitement de très utiles. Ce n'est pas non plus une nouvelle expérience : aucune donnée n'a été mesurée ; l'affirmation est une construction mathématique et une preuve de cohérence.

**Principales limites pour un lecteur généraliste :** l'argument dépend de l'hypothèse que l'on juge physiquement plus fondamentale — la règle du produit tensoriel ou le postulat de localité. C'est un choix raisonné dans un débat de fondements encore ouvert, pas un fait fixé par la mesure, et la construction réelle est sans doute moins naturelle que la construction complexe qu'elle reproduit.

**Quel degré de confiance un lecteur généraliste doit-il avoir ?** Élevé sur le fait que la construction est mathématiquement cohérente — elle est évaluée par les pairs et sa logique est vérifiable. La conclusion à retenir est la plus modeste : les nombres complexes sont le langage commode de la mécanique quantique, pas une nécessité métaphysique démontrée. Traitez tout titre du type "les nombres imaginaires sont réels" comme le slogan que cet article a été écrit pour corriger.

---

## Sources

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>