



## La teoria quantica necessita nombres complexos

**Un equip internacional d'investigadors de l'ICFO, la Universitat de Ginebra i l'Institut de Tecnologia de Schaffhausen, la Universitat de Tecnologia de Viena i l'IQOQI de l'Academia de Ciencies d'Austria, mostra mitjancant un experiment teoric que la prediccio de la teoria quantica complexa estandard no es pot expressar per la seva contrapart real, i ratifica la seva necessitat de nombres complexos.**

December 15, 2021

---

La fisica elabora teories per descriure la naturalesa. Per entendre-ho millor, ho expliquem mitjancant una analogia amb una activitat molt mes propera com, per exemple, anar d'excursio a la muntanya. Per no perdre'ns, podem utilitzar un mapa. El mapa es una representacio de la muntanya, amb cases, rius, camins i senders, etc. En fer-lo servir, es mes facil trobar el camí cap al cim. Pero el mapa no es pas la muntanya. Constitueix la teoria que fem servir per representar la realitat de la muntanya.

Les teories sobre la física s'expressen en termes d'objectes matemàtics, com ara equacions, integrals o derivades. Al llarg de la història, les teories sobre la física han anat evolucionant fent ús de conceptes matemàtics més elaborats per descriure fenòmens físics més complicats. Introduïda a principis del segle XX per representar el món microscòpic, el sorgiment de la teoria quàntica va ser un punt d'inflexió. Entre tots els canvis dràstics que va comportar, va ser la primera teoria formulada amb nombres complexos.

Els nombres complexos van ser creats pels matemàtics fa segles i estan constituïts per una part real i una imaginària. Va ser Descartes, el celeberrim filòsof considerat pare de les ciències racionals, qui va encunyar el terme  $i$  imaginari, per poder-lo contrastar de manera rotunda amb allò que ell va anomenar nombres reals. Tot i el seu paper fonamental dins les matemàtiques, no s'esperava que els nombres complexos tinguessin un paper similar a la física a causa d'aquesta part imaginària. De fet, abans de la teoria quàntica, la mecànica de Newton o l'electromagnetisme de Maxwell utilitzaven nombres reals per descriure fenòmens com el moviment d'objectes, o com es propaguen els camps electromagnètics. En aquest cas, les teories ocasionalment utilitzen nombres complexos per simplificar alguns càlculs, però els seus axiomes només fan servir nombres

### El desconcert de Schrodinger

La teoria quàntica va plantejar un desafiament pel fet que els seus postulats estaven construïts amb nombres complexos. La nova teoria, encara que molt útil per predir els resultats dels experiments com, per exemple, una explicació perfecta dels nivells d'energia de l'àtom d'hidrogen, anava en contra de la intuïció que afavoria els nombres reals. Buscant una descripció per als electrons, Schrodinger va ser el primer a introduir nombres complexos en la teoria quàntica a través de la seva famosa equació. No obstant això, no podia concebre que els nombres complexos poguessin ser realment necessaris en física a aquest nivell fonamental. Era com si hagués trobat un mapa per representar les muntanyes, però aquest mapa en realitat estava fet amb dibuixos abstractes i totalment antiintuïtius. El seu desconcert va ser tal que va escriure una carta a Lorentz el 6 de juny de 1926, on deia:  $i$  El que és desagradable aquí, i que de fet cal objectar de manera directa, és l'ús de nombres complexos. És, sens dubte, fonamentalment una funció real. Decades després, l'any 1960, el professor E.C.G. Stueckelberg, de la Universitat de Ginebra, va demostrar que tots les prediccions de la teoria quàntica per a experiments de partícules individuals podrien derivar-se igualment utilitzant només nombres reals. Des de llavors, el consens va ser que els nombres complexos en la teoria quàntica eren només una eina convenient

Tot i això, en un estudi recentment publicat a [Nature](#), els investigadors de l'[ICFO](#) Marc-Olivier Renou i el Prof. ICREA Antonio Acín, en col·laboració amb el Prof. Nicolas Gisin de la

[Universitat de Ginebra](#) i [l'Institut de Tecnologia Schaffhausen](#), **Armin Tavakoli** de la [Universitat de Tecnologia de Viena](#), i **David Trillo**, **Mirjam Weilenmann** i **Thinh P. Le**, dirigits pel professor **Miguel Navascues**, de [l'Institut d'Optica Quantica i Informacio Quantica \(IQOQI\)](#) de [l'Academia Austriaca de Ciencies a Viena](#), han demostrat que, si els postulats quantics s'expressen amb nombres reals en lloc de nombres complexos, algunes prediccions sobre les xarxes quantiques difereixen necessariamente. De fet, l'equip d'investigadors presenta una proposta experimental concreta, on s'inclouen tres parts o nodes connectats entre si i dues fonts de partícules, on la predicció de la teoria quantica complexa estandard no pot ser expressada per la seva contrapart real.

### Dues fonts i tres nodes

Per poder duu a terme l'experiment, van idear un escenari molt especific d'una xarxa quantica elemental, que incloia dues fonts independents (S i R) col·locades entre tres nodes detectors (A, B i C). La font S emet dues partícules, diguem-ne fotons, un al node A i l'altre a B. Els dos fotons es preparen en un estat entrellacat, com per exemple en polaritzacio. Es dir, es va correlacionar o preparar la polaritzacio de les partícules d'una manera que e permesa per la teoria quantica (tan complexa com real), pero no per la teoria classica. La font R fa exactament el mateix, emet dos fotons mes preparats en un estat entrellacat i els envia B i C, respectivament. El punt clau d'aquest estudi va ser trobar la manera adequada d mesurar aquests quatre fotons als nodes A, B i C per obtenir prediccions que no es pode explicar quan la teoria quantica es restringeix unicament als nombres reals

Com comenta l'investigador de l'ICFO **Marc-Olivier Renou**, i<sup>1</sup>/<sub>2</sub>Quan vam trobar aquest resultat, el desafiament era veure si l'experiment que havíem ideat es podia fer amb les tecnologies actuals. Despres de discutir amb col·legues de Shenzhen -Xina-, vam trobar un manera d'adaptar el nostre protocol per fer-ho factible amb els seus dispositius d'ultim generacio. I, com calia esperar, els resultats experimentals han coincidit amb les prediccions! i<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Aquest important experiment, realitzat en col·laboracio amb Zheng-Da Li, Ya-Li Mao, Hu Chen, Lixin Feng, Sheng-Jun Yang, Jingyun Fan de la Universitat de Ciencia i Tecnologia el Sud (Xina), i Zizhu Wang de la Universitat de Ciencia i Tecnologia Electronica (Xina) s ha publicat a la revista Physical Review Letters, en paral·lel amb l'article de Nat

e. Els resultats publicats a Nature es poden veure com una generalitzacio del teorema de Bell, que proporciona un experiment quantic que no pot ser explicat per cap formalisme local quantic. L'experiment de Bell involucra una font quantica S que emet dos fotons entrellacats, un que va al node A i l'altre al B, preparats en un estat entrellacat. Aquí, per contra es necessiten dues fonts independents i aquesta independencia assumida es crucial i, per t

nt, es va establir acuradament a l'experim

t. L'estudi també mostra quant de bones poden ser les prediccions en combinar el concepte d'una xarxa quàntica amb les idees de Bell. Sens dubte, les eines desenvolupades i utilitzades per obtenir aquest primer resultat permetran als físics aconseguir una millor comprensió de la teoria quàntica i, un dia, poden ser la base per a la realització i la materialització d'aplicacions fins ara impensables per a l'Internet quàntica.

c.

## Referència: [Quantum theory based on real numbers can be experimentally falsified](#), Marc-Olivier Renou, David Trillo, Mirjam Weilenmann, Le Phuc Thinh, Armin Tavakoli, Nicolas Gisin, Antonio Acin, and Miguel Navascues, 2021, Nature, doi: [10.1038/s41586-021-04160-4](https://doi.org/10.1038/s41586-021-04160-4)



Artistic illustration of the study published in Nature. Image credit: Georgy Ermakov and Sergey Lebedyanskiy, SIT.