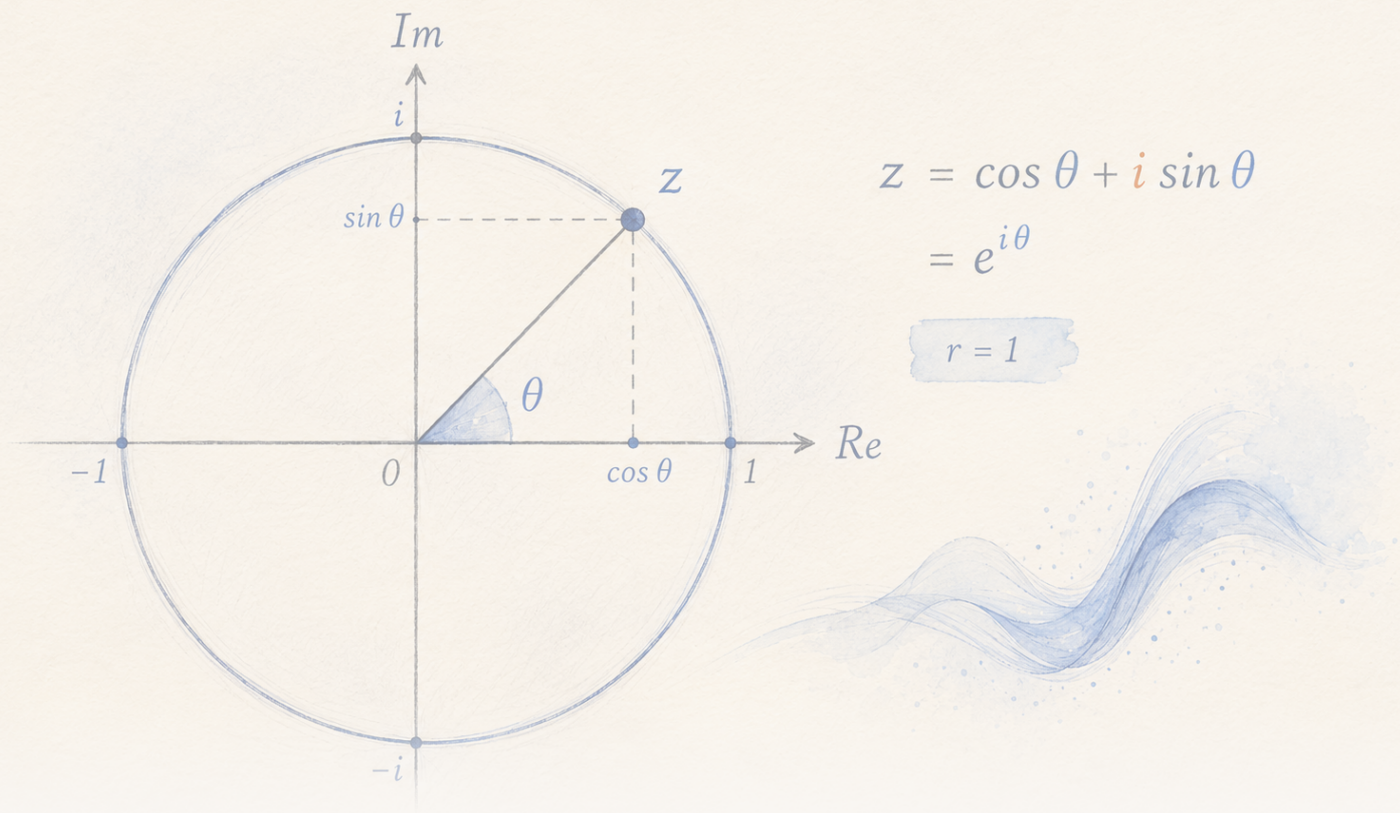




The CLEAN PAPER

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

Kvantovou mechaniku lze zapsat jen reálnými čísly — háček je ve skládání systémů

Široce citovaný výsledek z roku 2021 tvrdil, že verzi kvantové mechaniky založenou na reálných číslech lze experimentálně vyvrátit, a experimenty z roku 2022 se shodly se standardní komplexní teorií. Titulky to často lícily jako důkaz fyzikální skutečnosti imaginárních čísel. Nová práce v *Physical Review Letters* tvrzení zpřesňuje: pokud reálná formulace vyjde z jiného, možná fyzikálně přirozenějšího předpokladu o skládání oddělených systémů, reprodukuje každou předpověď komplexní kvantové mechaniky, včetně vícestranných testů. Poctivý závěr zní, že komplexní čísla jsou pohodlná, ale nikoli striktně nezbytná, a dřívější experimenty vyloučily jednu konkrétní reálnou teorii, ne reálná čísla jako taková. Jde o výsledek ze základů teorie, nikoli o nové měření, a nikoho nevyzývá, aby komplexní čísla opustil.

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

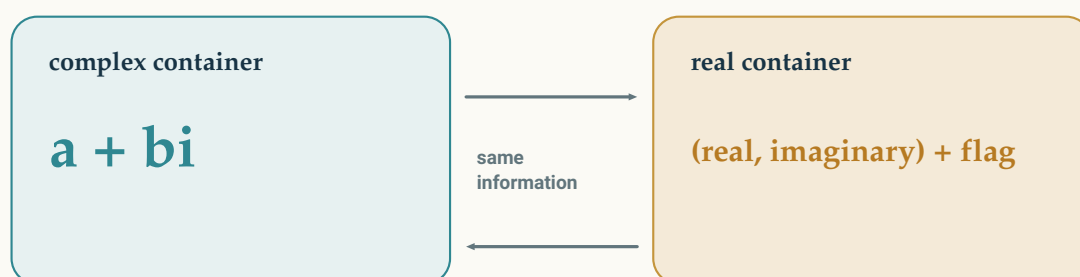
Titulek, který stojí za druhé přečtení

Před několika lety se rozšířilo pozoruhodné tvrzení: experimenty prý ukázaly, že imaginární čísla jsou fyzikálně skutečná a kvantovou mechaniku bez nich nelze zapsat. Tvrzení vyrostlo ze skutečné, pečlivě provedené fyziky — z návrhu Marca-Oliviera Renoua a jeho spolupracovníků, zveřejněného v roce 2021 v časopise *Nature*, a z experimentů z roku 2022, které jej uskutečnily. Populární podání však přesné tvrzení stlačilo do sloganu a slogan byl silnější než samotný výsledek.

Nová práce Pedra Barriosy Hity, Antona Trushechkina, Hermanna Kampermanna, Michaela Eppinga a Dagmar Bruß v *Physical Review Letters* vrací tvrzení jeho přesný význam. Konstruuje verzi kvantové mechaniky založenou výhradně na reálných číslech, která reprodukuje každou předpověď standardní komplexní teorie — včetně právě těch vícestranných experimentů, které měly reálná čísla vylučovat. Trik nespočívá v tajném propašování čísel imaginárních. Mění se jediný předpoklad o tom, jak skládat oddělené systémy. Poctivý závěr zní slovy autorů takto: komplexní čísla nejsou pro popis kvantové mechaniky nezbytná, ale rozhodně jsou velmi užitečná.

Real quantum theory moves the bookkeeping

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

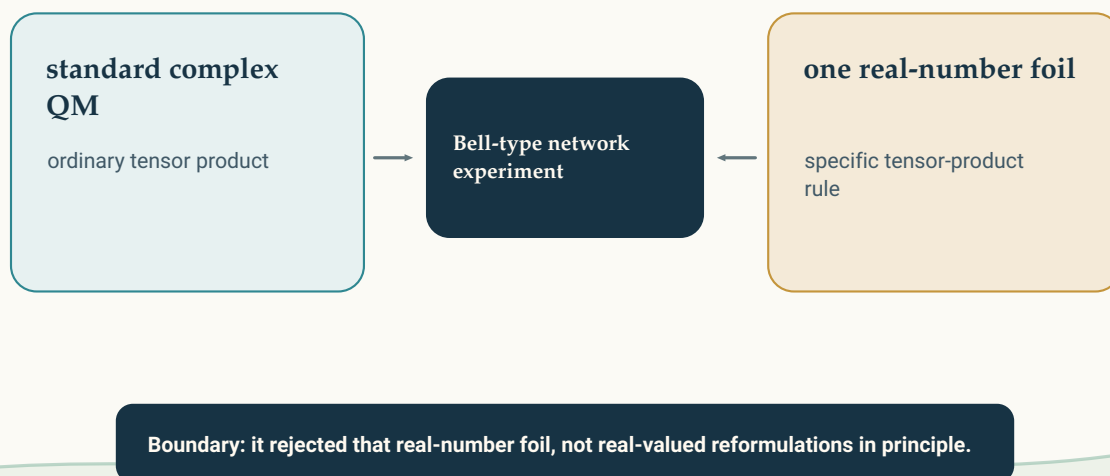


Boundary: not fewer ingredients; a different container whose cost shows up in composition.

Komplexní amplituda $a+bi$ jako dvojice reálných čísel s „příznakem“, který se přenáší s každým systémem. Reálná formulace nemá méně složek — používá jen jiný obal a jeho cena se projeví při skládání systémů.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Experimenty z let 2021–2022 porovnaly dvě konkrétní teorie — standardní komplexní kvantovou mechaniku a reálnou „kontrastní teorii“, která zachovává pravidlo tenzorového součinu — a podpořily první z nich. Vyloučily tuto kontrastní teorii, nikoli reálná čísla jako taková.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Co v teorii dělají komplexní čísla

V kvantové mechanice popisují stav systému amplitudy a pravděpodobnost výsledku získáme umocněním absolutní hodnoty amplitudy na druhou. Ve standardní teorii jsou amplitudy komplexní čísla: každá má velikost a fázi, tedy úhel. Fáze není ozdoba. Když se spojí dvě cesty vedoucí ke stejnému výsledku, jejich fáze určují, zda se navzájem zesílí, nebo vyruší — to je interference, charakteristický znak kvantového chování. Společnou globální fázi celého systému naproti tomu změřit nelze.

Komplexní číslo je ve své podstatě dvojice reálných čísel — reálná a imaginární část — spojená zvláštními pravidly násobení. Přirozená otázka tedy zní, zda je toto spojení nepostradatelné. Lze si ponechat dvě reálná čísla, zahodit komplexní obal a stále získat celou kvantovou mechaniku? Pravidla násobení dělají z komplexních čísel něco víc než pouhá dvě čísla položená vedle sebe, takže odpověď není zřejmá; právě zde se skrývá ona jemnost.

Co výsledek z roku 2021 skutečně prokázal

Renou a jeho spolupracovníci položili přesně tuto otázku a dali jí ostrou, experimentálně ověřitelnou podobu. Neptali se, zda se reálná čísla mohou vůbec objevit v kvantové teorii; ptali se, zda může reálná formulace reprodukovat všechny předpovědi komplexní teorie při určitém pravidle skládání systémů. Toto pravidlo — říkejme mu pravidlo tenzorového součinu — je standardním způsobem, jak popsat několik nezávislých částí jako jeden celek.

S tímto pravidlem našli scénář tří stran sdílejících provázání ze dvou nezávislých zdrojů, v němž reálná a komplexní teorie předpovídají odlišné, měřitelné korelace — vícestrannou variantu Bellova testu. V roce 2022 byly takové testy provedeny pomocí supravodivých obvodů a fotonů. Naměřené korelace odpovídaly komplexní kvantové mechanice a byly neslučitelné s reálnou alternativou.

Proč test potřebuje dva zdroje, nikoli jeden

Běžný Bellův test používá jediný zdroj, který posílá provázanou dvojici dvěma lidem, Alici a Bobovi. Pro takové uspořádání dokáže kvantová mechanika založená na reálných číslech přesně reprodukovat stejné korelace jako komplexní teorie — obě jsou nerozlišitelné, takže jediný zdroj mezi nimi nemůže rozhodnout.

Argument z roku 2021 začne fungovat po přidání druhého, **nezávislého** zdroje. Představte si tři strany v řadě: Alici, Boba a Charlieho. Jeden zdroj prováže Alici s Bobem; oddělený zdroj, který s prvním nemá společnou minulost, prováže Boba s Charliem. Bob stojí uprostřed a společně změří své dvě částice, čímž obě poloviny propojí. Rozhodující je *nezávislost* zdrojů — předpoklad, že byly připraveny odděleně: při standardním pravidle tenzorového součinu pro nezávislé systémy nedokáže reálná teorie reprodukovat třístranné korelace předpovězené komplexní kvantovou mechanikou, přestože test s jediným zdrojem nechává obě teorie nerozlišené. Experimenty měřily právě tento rozdíl.

Je to skutečný a přehledný výsledek. Je však třeba přesně si všimnout, co porovnával: standardní komplexní kvantovou teorii s jednou konkrétní reálnou teorií — takovou, která zachovává obvyklé pravidlo tenzorového součinu. Experimenty rozhodovaly mezi touto dvojicí, nikoli proti reálným číslům jako takovým. Nová práce si vypůjčuje pojem ze základů kvantové teorie a nazývá vyloučenou alternativu podle její úlohy: *kontrastní teorii* — teorií, kterou nikdo nepředkládá jako pravdivou, ale která je záměrně vytvořena jako protějšek přijímané teorie, aby je experiment mohl rozlišit. Její hodnota spočívá právě v této rozlišitelnosti: vyloučení kontrastní teorie ukazuje, které předpoklady reálné teorie nesly hlavní důkazní zátěž.

Co nová práce mění

Nová práce zachovává téměř vše a mění jediný postulát. Místo pravidla tenzorového součinu při skládání systémů vychází z požadavku lokálnosti, který autoři považují za fyzikálně základnější: operace provedená pouze na jednom podsystému by neměla mít měřitelný vliv na jiný, nedotčený

podsystem.

Na tomto základě výslovně konstruuji kvantovou mechaniku založenou na reálných číslech. Reálná a imaginární část běžných amplitud se nesou jako dodatečný reálný záznam — práce mu říká „příznak“ připojený ke každému systému — a nepozorovatelná globální fáze komplexní teorie se v reálné teorii mění na stejně nepozorovatelnou rotaci. Cena se projeví přesně tam, kam ukázal výsledek z roku 2021: při skládání systémů. Naivní slepení těchto reálných popisů neposkytuje ani dobře definovaný postup, a konstrukce proto sdružuje popisy představující tutěž fyziku a pracuje s jejich třídami. S tímto pravidlem skládání reprodukuje reálná teorie každou očekávanou hodnotu předpovězenou komplexní teorií — pro jediný systém i pro mnoho provázaných systémů u oddělených stran. Autoři také ukazují, že konstrukce je v podstatě jediná a je ekvivalentní standardní kvantové mechanice.

Vícestranné experimenty tedy tuto reálnou teorii od komplexní nerozliší, protože se shodují ve všech předpovědích. Dřívější experimenty neselhal; pouze testovaly jinou, restriktivnější reálnou teorii.

Proč to není rozpor

Výsledek by bylo snadné vyložit jako tvrzení, že „experimenty z roku 2021 byly chybné“. Opak je pravdou. Experimenty byly správné a práce na jejich správnosti staví: přijímá všechny naměřené korelace a ukazuje reálnou formulaci, která je rovněž vytváří. Revizi vyžaduje interpretace — skok od výroku „tato reálná teorie byla vyvrácena“ k výroku „reálná čísla jsou v kvantové mechanice nemožná“. Při tomto skoku se ztratil předpoklad, který ve skutečnosti rozhodoval.

Práce také netvrdí, že by měl kdokoli komplexní čísla opustit. Její vlastní shrnutí je opatrné v obou směrech: komplexní čísla nejsou striktně nutná a jsou velmi užitečná. Reálná konstrukce potřebuje v každém systému další příznak a jemnější pravidlo pro jejich skládání; komplexní čísla vše balí do jediného přehledného aritmetického aparátu. Pohodlnost není malichernost. Ve fyzice bývá celým důvodem, proč jeden formalismus zvítězí.

Proč na tom záleží

Pod výsledkem se skrývá zajímavá otázka, co v rámci fyzikální teorie znamená „nezbytný“. Experiment dokáže rozlišit dvě teorie, pokud předpovídají jiné výsledky. Sám však nemůže ukázat, že určitá matematická složka je jediným možným nositelem daného souboru předpovědí — to je otázka existence teorie, o níž rozhoduje konstrukce, nikoli měření. Tato práce je právě takovou konstrukcí: předkládá alternativu, kterou měly experimenty údajně vyloučit.

Výsledek také zostřuje rozlišení užitečné daleko za tímto případem. „Tato teorie byla vyvrácena“ a „tento matematický nástroj je nevyhnutelný“ jsou dva různé výroky a v mezeře mezi nimi se může jednoznačný experimentální výsledek změnit v nadsázku. Komplexní čísla zůstávají přirozeným a účinným jazykem kvantové mechaniky. Zda jsou vyžadována metafyzicky, je jiná otázka a současná odpověď zní: ne.

Stručné shrnutí

Návrh z roku 2021 a experimenty z roku 2022 ukázaly, že kvantová mechanika založená na reálných číslech a standardním pravidle tenzorového součinu pro skládání systémů poskytuje jiné, testovatelné předpovědi než komplexní kvantová mechanika, přičemž experimenty podpořily komplexní teorii. Často se to podávalo jako důkaz, že imaginární čísla jsou fyzikálně nezbytná. Nová práce v *Physical Review Letters* konstruuje kvantovou mechaniku založenou na reálných číslech a jiném postulátu lokálnosti, která reprodukuje všechny předpovědi komplexní teorie, včetně vícestranných testů — a ukazuje tak, že komplexní čísla jsou pohodlná, nikoli však striktně nezbytná. Jde o teoretickou konstrukci, nevyvrací dřívější experimenty a nevyzývá k praktickému přeformulování kvantové mechaniky.

Kontrola bez příkras

Co práce ukazuje: Konzistentní formulace kvantové mechaniky založená výhradně na reálných číslech může reprodukovat každou předpověď standardní komplexní teorie, včetně vícestranných experimentů Bellova typu, pokud při skládání systémů vychází z postulátu lokálnosti namísto pravidla tenzorového součinu.

Co je možné, ale není podstatou výsledku: Že výsledek „vyvrací“ výsledky z let 2021–2022. Nevyvrací. Přijímá experimenty jako správné a nově vymezuje jejich dosah: vyloučily jednu konkrétní reálnou teorii se zachovaným pravidlem tenzorového součinu, nikoli reálná čísla jako taková.

Co práce neukazuje: Že jsou komplexní čísla chybná či neužitečná nebo že by je měla praxe opustit — autoři je výslovně označují za velmi užitečná. Nejde ani o nový experiment: nebyla naměřena žádná nová data; tvrzení má podobu matematické konstrukce a důkazu konzistence.

Hlavní omezení pro běžného čtenáře: Argument závisí na tom, který předpoklad považujeme za fyzikálně základnější — pravidlo tenzorového součinu, nebo postulát lokálnosti. Jde o obhajitelnou volbu v probíhající debatě o základech teorie, nikoli o skutečnost stanovenou měřením, a reálná konstrukce je zřejmě méně přirozená než její komplexní protějšek.

Jak velkou důvěru by měl běžný čtenář mít? Vysokou v matematickou konzistenci konstrukce — práce prošla recenzním řízením a její logiku lze ověřit. Důvěru si zaslouží skromný závěr: komplexní čísla jsou pohodlným jazykem kvantové mechaniky, nikoli prokázanou metafyzickou nutností. Titulky typu „imaginární čísla jsou skutečná“ je vhodné chápat jako slogan, který tato práce opravuje.

Zdroje

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>