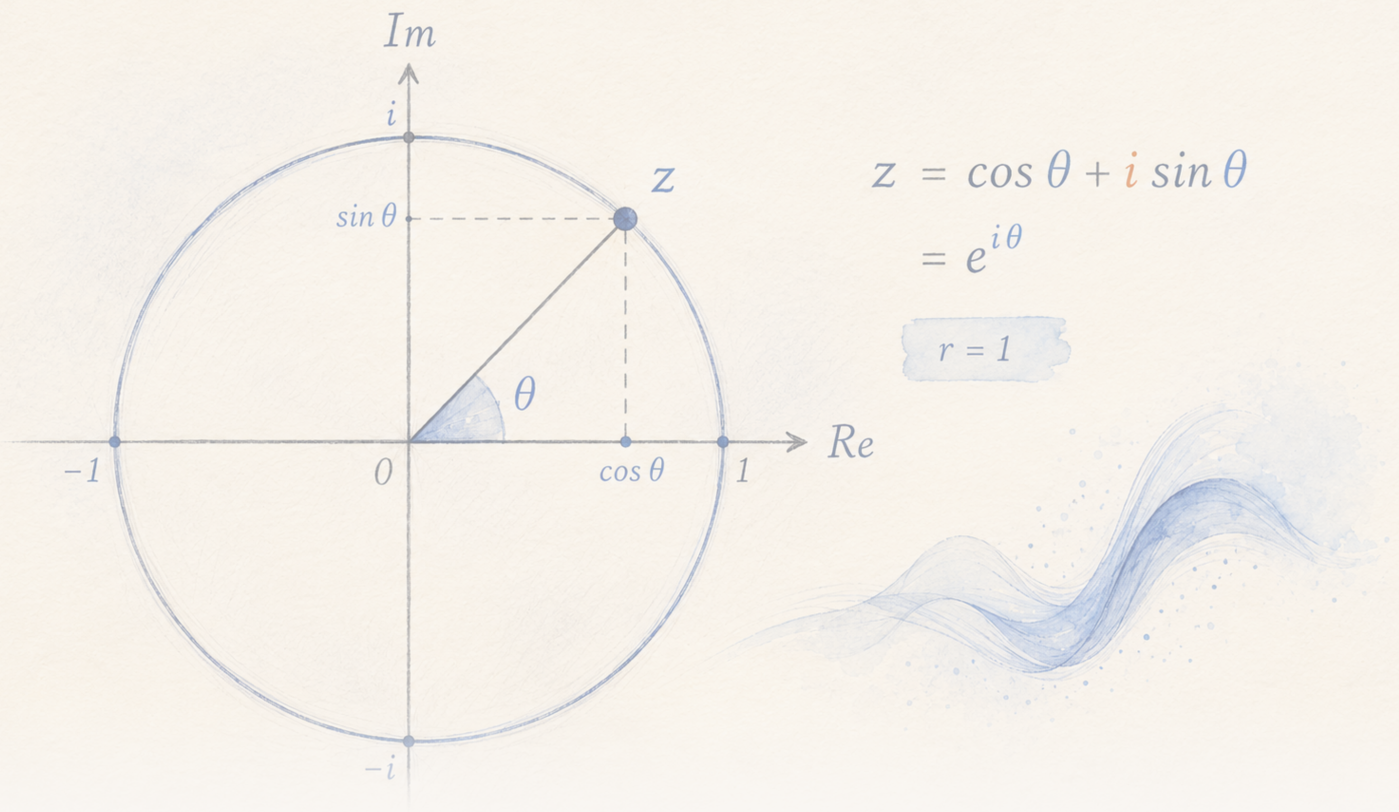


The Clean Paper

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

Quantum mechanics በreal numbers ብቻ ሊጻፍ ይችላል — ነገሩ systemsን እንዴት እንደምናዋሃድ ላይ ነው

በ2021 በሰፊው የተዘገበ ውጤት real-number quantum mechanics በexperiment ሊሳሳት እንደሚችል አመለከተ፤ በ2022 የተከተሉት ሙከራዎችም standard complex quantum theory-ን ደገፉ። ይህ imaginary numbers በphysical sense ግዴታ ናቸው ተብሎ ብዙ ጊዜ ተጻፈ። አዲስ Physical Review Letters ወረቀት claim-ውን ያጠራል፦ real-number formulation-ውን systems እንዴት እንደሚዋሃዱ በተለየ፣ locality-based assumption ላይ ከገነቡት፣ multipartite testsን ጨምሮ የcomplex quantum mechanics ሁሉንም predictions ያደግማል። ትክክለኛው ንባብ complex numbers በጣም ጠቃሚና ቀልጣፋ ናቸው እንጂ በጥብቅ አስፈላጊ ናቸው ተብሎ አልተረጋገጠም፤ ቀድሞዎቹ ሙከራዎች አንድ የተወሰነ real theory ነው ያስወገዱት፣ real numbersን በመሠረቱ አይደለም።

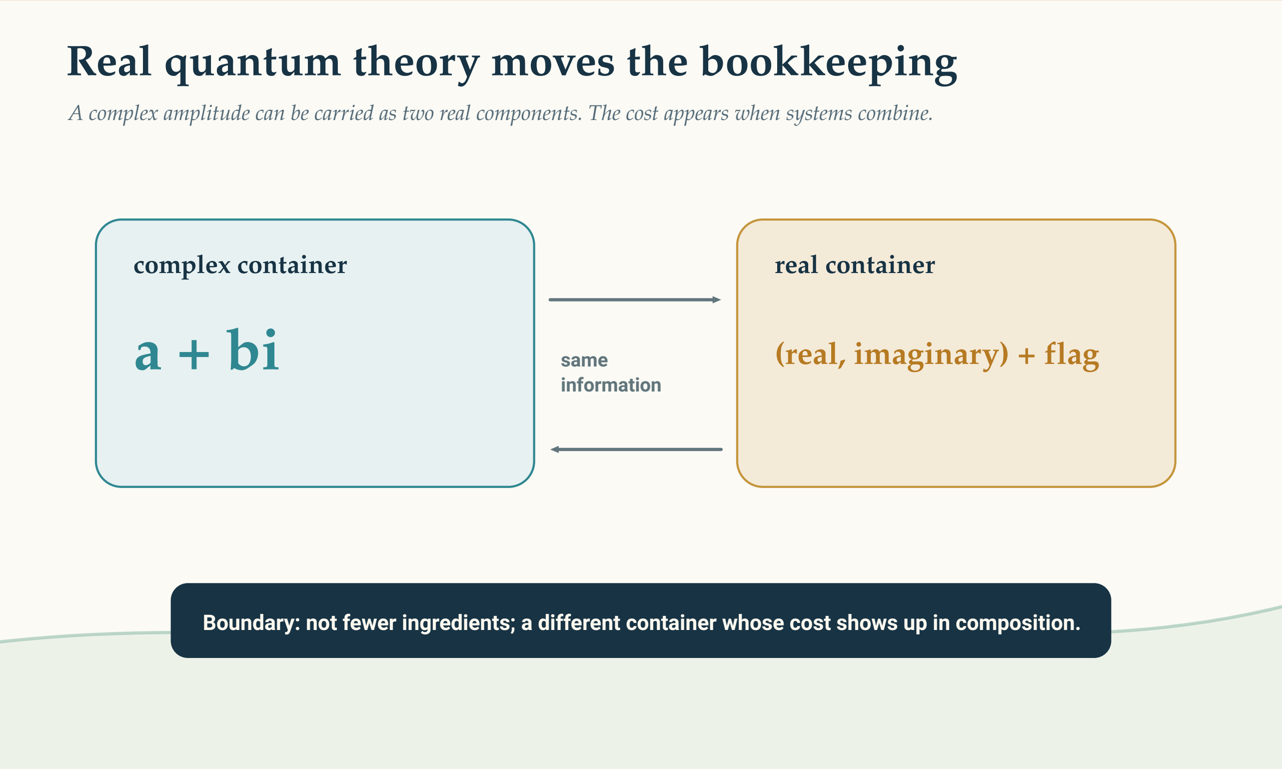
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

እንደገና ማንበብ የሚገባው ርዕስ

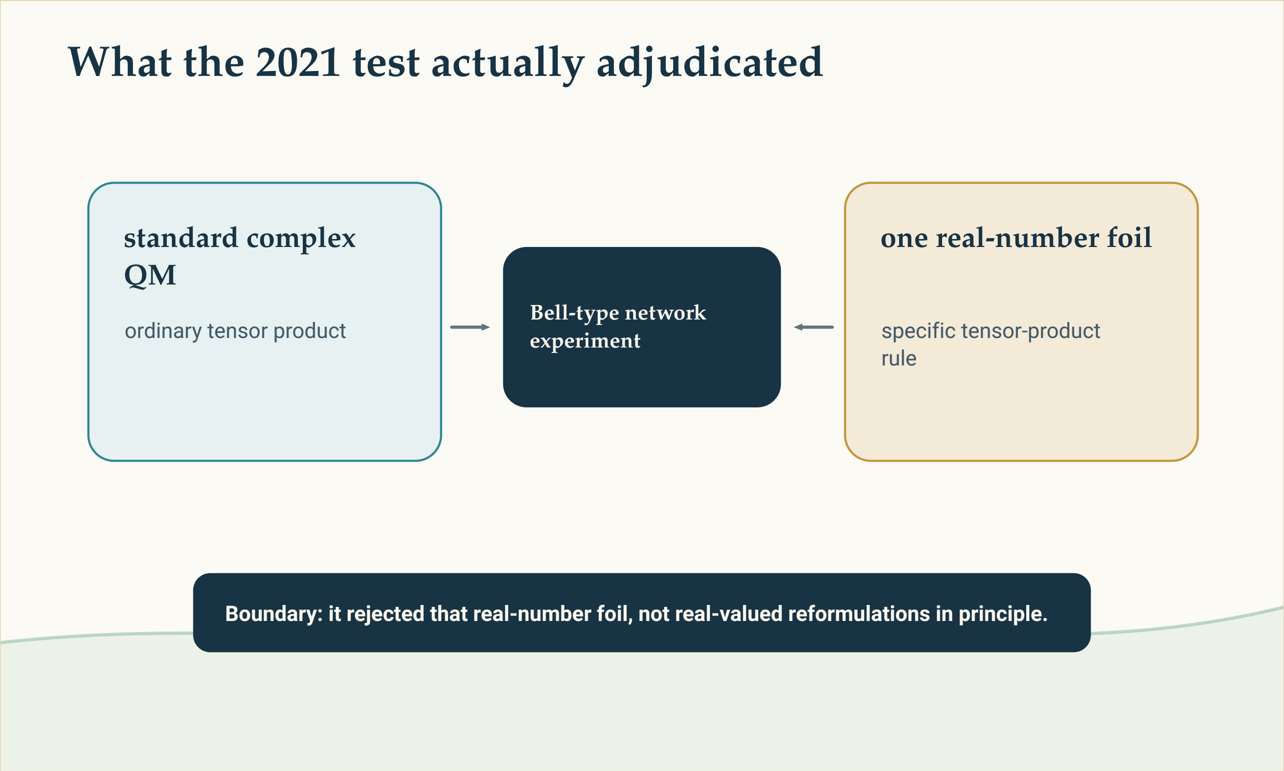
ከጥቂት ዓመታት በፊት አንድ አስደናቂ አባባል በሰፊው ተሰራጨ፦ ሙከራዎች imaginary ቁጥሮች በአካላዊ sense “እውነተኛ” መሆናቸውን አሳይተዋል፣ ኳንተም ሜካኒክስ ያለእነሱ ሊጻፍ አይችልም። ይህ አባባል ከእውነተኛና ጥንቃቄ ከተደረገበት ፊዚክስ የመጣ ነበር — በ2021 በMarc-Olivier Renou እና ባልደረቦቹ በ*Nature* የታተመ proposal፣ እና በ2022 ያንን የፈተኑ ሙከራዎች። ግን በሕዝብ የተሰራጨው ቅጂ ትክክለኛውን አባባል ወደ slogan ጨመቀው፣ እና slogan-ው ከውጤቱ የበለጠ ጠንካራ ሆነ።

በPedro Barrios Hita፣ Anton Trushechkin፣ Hermann Kampermann፣ Michael Epping እና Dagmar Bruß በአካላዊ ግምገማ *Letters* የታተመ አዲስ ወረቀት ትክክለኛውን አባባል ወደ ቦታው ይመልሳል። ሙሉ በሙሉ እውነተኛ ቁጥሮች ብቻ የሚጠቀም እና የመደበኛው ውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ሁሉንም ትንበያዎች የሚያደግም ኳንተም ሜካኒክስ ስሪት ይገነባል — እውነተኛ ቁጥሮችን እንደማያስችሉ ተብለው የተጠቀሱትን multipartite ሙከራዎች ጨምሮ። ዘዴው imaginary ቁጥሮችን በስውር ወደ ውስጥ መመለስ አይደለም። የተለያዩ ሥርዓቶች እንዴት እንደሚዋሃዱ የሚመለከት አንድ ግምት መቀየር ነው። የደራሲዎቹ የጥንቃቄ መደምደሚያ፦ ውስብስብ ቁጥሮች ኳንተም ሜካኒክስን ለመግለጽ ግዴታ አይደሉም፣ ግን በእርግጥ በጣም ጠቃሚ ናቸው።



ውስብስብ amplitude a+bi ከእያንዳንዱ ሥርዓት ጋር የሚጓዝ “flag” ያለው የሁለት እውነተኛ ቁጥሮች ጥንድ እንደሆነ የሚያሳይ ንጽጽር። እውነተኛ formulation ንጥረ ነገሮችን አያሳንስም — container-ውን ብቻ ይቀይራል፣ ዋጋውም ሥርዓቶች እንዴት እንደሚዋሃዱ ላይ ይታያል።

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



የ2021–22 ሙከራዎች ሁለት የተወሰኑ ንድፈ ሐሳቦችን አነጻጸሩ — መደበኛ ውስብስብ ኳንተም ሜካኒክስ እና tensor-product ደንቡን የሚጠብቅ አንድ እውነተኛ “foil” — እና ውጤቱ ውስብስብ ንድፈ ሐሳብ-ን ደገፈ። ያ foil-ን አስወገዱ፣ እውነተኛ ቁጥሮችን በመሠረቱ አይደለም።

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

ውስብስብ ቁጥሮች በንድፈ ሐሳብ-ው ውስጥ ምን እየሠሩ ነው?

በኳንተም ሜካኒክስ፣ የሥርዓት ሁኔታ amplitudes በሚባሉ መጠኖች ይገለጻል፣ እና የአንድ ውጤት probability ለማግኘት amplitude-ውን መጠን squared ያደርጋሉ። በመደበኛ ንድፈ ሐሳብ እነዚህ amplitudes ውስብስብ ቁጥሮች ናቸው፤ እያንዳንዳቸው size እና phase — አንድ angle — ይይዛሉ። Phase የማስዋብ ነገር አይደለም። ወደ አንድ ውጤት የሚወስዱ ሁለት paths ሲዋሃዱ፣ phases-አቸው እርስ በርስ እንዲጠናከሩ ወይስ እንዲሰረዙ ይወስናሉ — ይህም ኳንተም behaviour የሚለየው ጣልቃ-ገብነት ነው። በሙሉ ሥርዓት ላይ የጋራ የሆነ overall phase ግን በምንም መለካት አይቻልም።

ውስብስብ ቁጥር በእውነቱ የሁለት እውነተኛ ቁጥሮች — እውነተኛ part እና imaginary part — ጥንድ ነው፣ ግን እንዴት እንደሚባዙ ልዩ rules አሉት። ስለዚህ ተፈጥሯዊ ጥያቄ ይነሳል፦ ይህ packaging አስፈላጊ ነው? ሁለቱን እውነተኛ ቁጥሮች ብቻ ተጠቅመን ውስብስብ packaging-ውን ብናስወግድ፣ ኳንተም ሜካኒክስ ሁሉንም ማቆየት እንችላለን? ውስብስብ ቁጥሮች ከሁለት ቁጥሮች ጎን ለጎን ከመቀመጥ በላይ የሚያደርጋቸው የmultiplication rules ናቸው፤ ስለዚህ መልሱ ግልጽ አይደለም፤ ትክክለኛው ስውርነት እዚያ ነው።

የ2021 ውጤት በእውነት ምን አረጋገጠ?

Renou እና ባልደረቦቹ ትክክለኛውን ይህን ጥያቄ ጠየቁ፣ እና ለመፈተን የሚቻል ግልጽ ቅርጽ ሰጡት። እውነተኛ ቁጥሮች በኳንተም ንድፈ ሐሳብ ውስጥ በምንም ቦታ ሊታዩ ይችላሉ ወይ? ብለው አልጠየቁም። ጥያቄያቸው፡- የሥርዓቶች ውህደት አንድ የተወሰነ ደንብ ተጠቅሞ የእውነተኛ-ቁጥር formulation የውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ሁሉንም ትንበያዎች ሊዛመድ ይችላል ወይ? ነበር። ያ ደንብ — tensor-product ደንብ ብለን እንጠራው — ብዙ ነጻ partsን እንደ አንድ whole ለመግለጽ የሚጠቀሙበት መደበኛ prescription ነው።

በዚያ ደንብ ስር፣ ከሁለት ነጻ sources የመጣ entanglement የሚጋሩ ሶስት parties ያሉበት scenario አገኙ፣ በዚያም እውነተኛ-ቁጥር ንድፈ ሐሳብ እና ውስብስብ ንድፈ ሐሳብ የተለያዩ፣ ሊለኩ የሚችሉ ተዛማጅነቶች ይተነብያሉ — multipartite የቤል ሙከራ ቅጂ። በ2022፣ superconducting circuits የተጠቀሙ ሙከራዎች እና photons የተጠቀሙ ሙከራዎች ይህን ፈተኑ። የተለኩት ተዛማጅነቶች ከውስብስብ ኳንተም ሜካኒክስ ጋር ተዛመዱ፣ ከእውነተኛ alternative ጋር ግን አልተዛመዱም።

> **ፈተናው ለምን አንድ ምንጭ ሳይሆን ሁለት ይፈልጋል?**
>
> መደበኛ ቤል ሙከራ አንድ ምንጭ ተጠቅሞ entangled ጥንድ ለሁለት ሰዎች፣ አሊስ እና ቦብ፣ ይልካል። በዚያ ቅድመ-ዝግጅት እውነተኛ-ቁጥር ኳንተም ሜካኒክስ ከውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ጋር ትክክለኛ ተመሳሳይ ተዛማጅነቶች ሊፈጥር ይችላል፤ ሁለቱ ንድፈ ሐሳቦች ሊለዩ አይችሉም፣ ስለዚህ single ምንጭ መካከላቸው ሊወስን አይችልም።
> የ2021 ክርክር ሁለተኛ፣ ነጻ ምንጭ በመጨመር ልዩነት ያገኛል። ሶስት partiesን በመስመር ላይ ያስቡ፡- አሊስ፣ ቦብ፣ Charlie። አንድ ምንጭ አሊስን ከቦብ ጋር entangle ያደርጋል፤ ሌላ በተለየ የተዘጋጀ፣ የጋራ ያለፈ ታሪክ የሌለው ምንጭ ቦብን ከCharlie ጋር entangle ያደርጋል። ቦብ መሃል ላይ ተቀምጦ ሁለቱን particles አብሮ ይለካል፣ የሁለቱን ጎኖች ያገናኛል። ሥራውን የሚያደርገው የሁለቱ sources *independence* — በተለየ ተዘጋጅተዋል የሚለው ግምት — ነው። ነጻ ሥርዓቶቹን ለማዋሃድ መደበኛ tensor-product ደንብ በሚጠቀም ጊዜ፣ እውነተኛ-ቁጥር ንድፈ ሐሳብ ውስብስብ ኳንተም ሜካኒክስ ለዚህ network የሚተነብያቸውን three-way ተዛማጅነቶች ማዛመድ አይችልም፤ single-ምንጭ ሙከራ ግን ሁለቱን ንድፈ ሐሳቦች እኩል ያደርጋቸዋል። ሙከራዎቹ የለኩት ያንን gap ነው።

ይህ እውነተኛና ንጹህ ውጤት ነው። ግን በጥንቃቄ የተነጻጸሩትን ያስተውሉ፡- መደበኛ ውስብስብ ኳንተም ንድፈ ሐሳብ ከአንድ ብቻ የተወሰነ እውነተኛ ንድፈ ሐሳብ ጋር — ordinary tensor-product ደንቡን የሚያቆይ እውነተኛ ንድፈ ሐሳብ። ሙከራዎቹ የፈረዱት ያንን pairing ነው፤ እውነተኛ ቁጥሮችን እንደ እነሱ አይደለም። አዲሱ ወረቀት ከኳንተም foundations ቃል በመዋስ የተወገደውን alternative *foil* ንድፈ ሐሳብ ብሎ ይጠራዋል — ማንም እውነት ነው ብሎ የማያቀርበው፣ ከተቀባው ንድፈ ሐሳብ ጋር ለመለየት በዓላማ የተዘጋጀ እና ሙከራ ሁለቱን እንዲለይ የሚያስችል ንድፈ ሐሳብ። ዋጋውም ሊለይ መቻሉ ነው፤ foil-ውን ማስወገድ በእውነተኛ ንድፈ ሐሳብ ውስጥ የትኞቹ ግምቶች ውጤቱን እንደሚያመጡ ያሳያል።

አዲሱ ወረቀት ምን ይቀይራል?

አዲሱ ሥራ ሁሉንም ነገር በግምት ያቆያል፣ አንድ postulate ብቻ ይቀይራል። ሥርዓቶችን ለማዋሃድ tensor-product ደንብ እንደ መሠረታዊ ግምት ከመውሰድ ይልቅ፣ ደራሲዎቹ በአካባቢ sense የበለጠ መሠረታዊ ነው ብለው ከሚከራከሩበት locality requirement ይጀምራሉ፡- በአንድ subsystem ላይ ብቻ የተደረገ operation ባልተነካው ሌላ subsystem

ላይ ሊለካ የሚችል ተጽዕኖ ሊኖረው አይገባም።

ከዚህ መነሻ በግልጽ እውነተኛ-ቁጥር ኳንተም ሜካኒክስ ይገነባሉ። የመደበኛ amplitudes እውነተኛ እና imaginary parts እንደ ተጨማሪ እውነተኛ bookkeeping አብረው ይጓዛሉ — ወረቀቱ ለእያንዳንዱ ሥርዓት የተያያዘ “flag” ይለዋል — እና በውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ውስጥ ሊለካ የማይችለው global phase በእውነተኛ ንድፈ ሐሳብ ውስጥ እኩል ሊለካ የማይችል rotation ይሆናል። ዋጋው በ2021 ውጤት የተጠቆመበት ቦታ ላይ በትክክል ይታያል፦ ሥርዓቶች እንዴት እንደሚዋሃዱ። እነዚህን እውነተኛ descriptions በቀላሉ አንድ ላይ ማጣበቅ እንኳን በደንብ የተገለጸ recipe አይሰጥም፤ ስለዚህ ግንባታው አንድ ዓይነት ፊዚክስ የሚወክሉ descriptionsን አንድ ላይ በclasses ያደርጋል እና በእነዚያ classes ላይ ይሠራል። በዚህ combining ደንብ፣ እውነተኛ ንድፈ ሐሳብ የውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ሁሉንም expectation values ያደግማል — ለአንድ ሥርዓት እና ብዙ፣ በርቀት ባሉ parties መካከል entangled ላሉ ሥርዓቶች። ደራሲዎቹ ግንባታው በመሠረቱ unique እና መደበኛ ኳንተም ሜካኒክስ ጋር equivalent እንደሆነም ያሳያሉ።

ስለዚህ multipartite ሙከራዎች ይህን እውነተኛ ንድፈ ሐሳብ ከውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ሊለዩ አይችሉም፣ ምክንያቱም ሁለቱ በሁሉም ትንበያዎች ይስማማሉ። የቀድሞዎቹ ሙከራዎች አልተሳሳቱም፤ በቀላሉ የተለየ፣ ይበልጥ ገደብ ያለው እውነተኛ ንድፈ ሐሳብ እየፈተኑ ነበር።

ይህ ለምን ተቃርኖ አይደለም?

ይህን “የ2021 ሙከራዎች ተሳስተው ነበር” ብሎ ማንበብ ቀላል ነው። ተቃራኒው ነው። ሙከራዎቹ ትክክል ነበሩ፣ እና ይህ ወረቀት እነሱ ትክክል መሆናቸውን ይፈልጋል፤ ሁሉንም የተለኩ ተዛማጅነቶች ይቀበላል እና እነሱን የሚፈጥር እውነተኛ formulation ያሳያል። የሚያስተካክለው interpretation-ውን ነው — “ይህ እውነተኛ ንድፈ ሐሳብ ተሳስቷል” ከሚለው ወደ “እውነተኛ ቁጥሮች በኳንተም ሜካኒክስ ውስጥ ፈጽሞ አይቻሉም” የተደረገውን ዝላይ። ያ ዝላይ ውጤቱን የሚያመጣውን ግምት አልፎታል።

ወረቀቱ ውስብስብ ቁጥሮችን መተው አለብን አይልም። የራሱ ማጠቃለያ በሁለቱም አቅጣጫ ጥንቃቄ አለው፦ ውስብስብ ቁጥሮች በጥብቅ አስፈላጊ አይደሉም፣ ግን በጣም ጠቃሚ ናቸው። እውነተኛ ግንባታው በእያንዳንዱ ሥርዓት ላይ ተጨማሪ flag እና ለማዋሃድ ይበልጥ ጥንቃቄ የሚፈልግ ደንብ ይፈልጋል፤ ውስብስብ ቁጥሮች ይህን ሁሉ ወደ አንድ ንጹህ የarithmetic ክፍል ያጠቃልላሉ። Convenience ቀላል ነገር አይደለም። በፊዚክስ ውስጥ formalism የሚያሸንፈው ብዙ ጊዜ በዚህ ምክንያት ነው።

ለምን አስፈላጊ ነው?

ከዚህ በታች ያለው አስደሳች ጥያቄ በአካላዊ ንድፈ ሐሳብ ውስጥ “necessary” የሚለው ምን ማለት እንደሆነ ነው። አንድ ሙከራ ሁለት ንድፈ ሐሳቦች የተለያዩ ትንበያዎች ሲሰጡ ሊለያቸው ይችላል። ግን አንድ የሂሳብ ንጥረ ነገር የትንበያዎች ስብስብን ለመያዝ ብቸኛው የሚቻል container ነው ብሎ በራሱ ሊነግርዎ አይችልም — ይህ የትኞቹ ንድፈ ሐሳቦች ሊገነቡ ይችላሉ የሚለው ጥያቄ ነው፣ እና መለኪያ ሳይሆን ግንባታ ይፈታዋል። ይህ ወረቀት ግንባታ ነው፤ ሙከራዎቹ አስወግደውታል ተብሎ የተወሰደውን alternative ያሳያል።

ውጤቱ በአጠቃላይ ማስታወስ የሚገባውን ልዩነት ያሳልፋል። “ይህ ንድፈ ሐሳብ ተሳስቷል” እና “ይህ mathematical መሣሪያ የማይቀር ነው” የተለያዩ አባባሎች ናቸው፣ እና በመካከላቸው ያለው gap ንጹህ experimental ውጤት ወደ overclaim የሚቀየርበት ቦታ ነው። ውስብስብ ቁጥሮች የኳንተም ሜካኒክስ ተፈጥሯዊና ቀልጣፋ ቋንቋ ሆነው ይቀጥላሉ።

በmetaphysical sense ግዴታ ናቸው ወይ? የሚለው ግን ሌላ ጥያቄ ነው፣ እና አሁን ያለው መልስ “አይደለም” ነው።

ንጹህ ማጠቃለያ

የ2021 proposal እና የ2022 ሙከራዎች ሥርዓቶቹን ለማዋሃድ በመደበኛ tensor-product ደንብ ላይ የተገነባ እውነተኛ-ቁጥር ኳንተም ሜካኒክስ ከውስብስብ ኳንተም ሜካኒክስ የተለያዩ፣ ሊፈተኑ የሚችሉ ትንበያዎች እንደሚሰጥ አሳዩ፣ ሙከራዎቹም ውስብስብ ንድፈ ሐሳብ-ን ደገፉ። ይህ ብዙ ጊዜ imaginary ቁጥሮች በአካላዊ sense ግዴታ ናቸው ተብሎ ተዘግቧል። አዲሱ አካላዊ ግምገማ *Letters* ወረቀት በተለየ፣ locality-based postulate ላይ እውነተኛ-ቁጥር ኳንተም ሜካኒክስ ይገነባል፣ እና multipartite ሙከራዎችን ጨምሮ የውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ሁሉንም ትንበያዎች ያደግማል። ይህ ውስብስብ ቁጥሮች በጣም ጠቃሚና ቀልጣፋ ቋንቋ እንጂ በጥብቅ አስፈላጊ እንዳልሆኑ ያሳያል። ይህ ንድፈ-ሐሳባዊ ግንባታ ነው፣ የቀድሞዎቹን ሙከራዎች አይሽርም፣ እና በተግባር ኳንተም ሜካኒክስን በእውነተኛ ቁጥሮች እንድንጽፍ አይጠይቅም።

ያለ ማጋነን ፍተሻ

ወረቀቱ የሚያሳየው፡- ሥርዓቶቹን ለማዋሃድ tensor-product ደንብ ሳይሆን locality postulate ላይ ከተገነባ፣ እውነተኛ ቁጥሮች ብቻ የሚጠቀም self-consistent ኳንተም ሜካኒክስ formulation የመደበኛ ውስብስብ ንድፈ ሐሳብ ሁሉንም ትንበያዎች፣ multipartite ቤል-type ሙከራዎችን ጨምሮ፣ ማደግም ይችላል።

ምክንያታዊ ሊመስል የሚችል ግን ዋናው ነገር ያልሆነው፡- ይህ የ2021–2022 ውጤቶችን “ያስተባብላል” የሚለው። አያስተባብላቸውም። ሙከራዎቹ ትክክል ናቸው ብሎ ይቀበላል እና scope-አቸውን እንደገና ይተረጉማል፡- tensor-product ደንቡን ያቆየ አንድ የተወሰነ እውነተኛ ንድፈ ሐሳብ ነው ያስወገዱት፣ እውነተኛ ቁጥሮችን በመሠረቱ አይደለም።

የማያሳየው፡- ውስብስብ ቁጥሮች ስህተት፣ አላስፈላጊ ወይም በተግባር መተው ያለብን ናቸው የሚለው፤ ወረቀቱ በግልጽ በጣም ጠቃሚ ናቸው ይላል። እንዲሁም አዲስ ሙከራ አይደለም፤ አዲስ መረጃ አልተለካም፣ አባባል-ው mathematical ግንባታ እና consistency ማረጋገጫ ነው።

ለአጠቃላይ አንባቢ ዋና ገደብ፡- ክርክሩ የትኛው ግምት በአካላዊ sense ይበልጥ መሠረታዊ ነው ብለው በሚመለከቱት ላይ ይመሰረታል — tensor-product ደንብ ወይስ locality postulate። ይህ በቀጥታ መለኪያ የተወሰነ እውነታ ሳይሆን በኳንተም foundations ውስጥ የሚቀጥል ክርክር ውስጥ ያለ reasoned choice ነው፣ እና እውነተኛ-ቁጥር ግንባታው ከሚዛመደው ውስብስብ formulation ይልቅ ተፈጥሯዊ ያነሰ ሊመስል ይችላል።

አጠቃላይ አንባቢ ምን ያህል እምነት ሊኖረው ይገባል? ግንባታው mathematically consistent መሆኑ ላይ ከፍተኛ እምነት — በባለሙያዎች የተገመገመ ነው፣ እና logic-ው ሊመረመር ይችላል። የሚታመነው መጠነኛ መደምደሚያ ይህ ነው፡- ውስብስብ ቁጥሮች የኳንተም ሜካኒክስ ቀልጣፋና ጠቃሚ ቋንቋ ናቸው፣ ግን በmetaphysical sense ግዴታ መሆናቸው አልተረጋገጠም። “Imaginary ቁጥሮች are እውነተኛ” የሚል ርዕስ ይህ ወረቀት ሊያስተካክለው የተጻፈ slogan እንደሆነ ይዩት።

ምንጮች

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