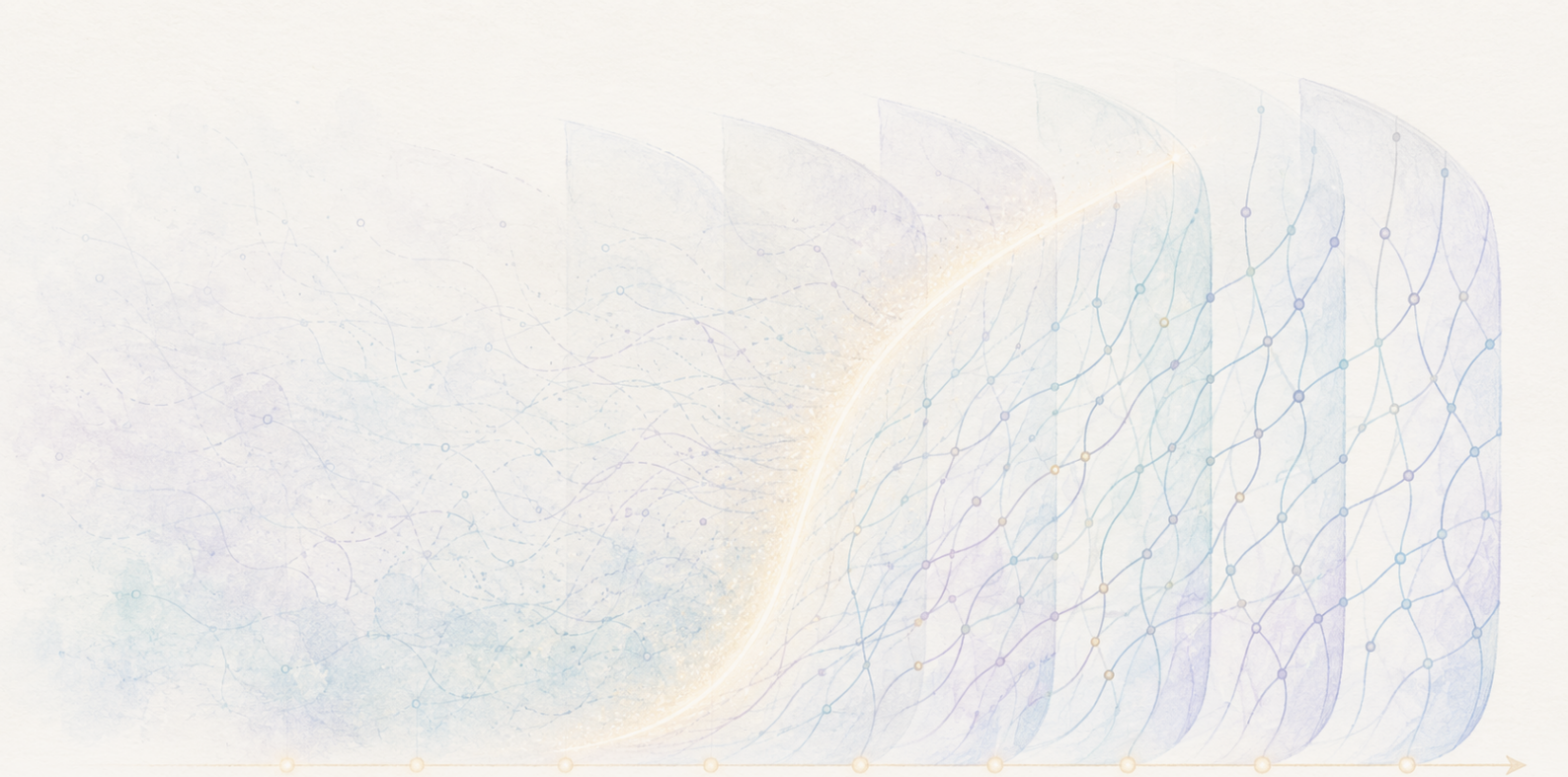




The CLEAN PAPER

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

П'ятивимірна класична модель намагається відновити квантову поведінку без квантування гравітації

Стаття в Scientific Reports пропонує схему $4D + tau$, у якій звичайний простір-час еволюціонує під дією додаткового параметра. У симуляціях і модельних обчисленнях вона відтворює ньютонівську гравітацію в рівновазі, прагне до базової загальнорелятивістської структури й отримує кореляції типу ЕПР та інтерференцію, схожу на подвійну щілину, через динаміку світових ліній. Це провокативна теоретична конструкція, а не експериментальний доказ того, що квантову гравітацію розв'язано або стандартна квантова механіка хибна.

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

Paper: *A five-dimensional classical framework for gravitational and quantum phenomena*, Filip Strubbe, Scientific Reports 16, Article 2965 (2026) · DOI: 10.1038/s41598-025-32860-8

Класичний шлях до квантової гравітації — смілива заява. Поки що це лише модель

Більшість спроб об'єднати квантову механіку з гравітацією починаються з квантування гравітації. Нова стаття Філіпа Струббе в *Scientific Reports* рухається у протилежний бік: зберігає класичні засади, додає додатковий параметр еволюції й запитує, чи можуть звичні ефекти гравітації та деякі квантові явища виникнути з цієї ширшої класичної динаміки.

Це провокативний хід. І його дуже легко перебільшити.

Стаття не розв'язує проблему квантової гравітації. Вона не показує, що квантова механіка хибна. Вона не спростовує теорему Белла і не доводить, що Всесвіт потай є простим годинниковим механізмом. Вона пропонує п'ятивимірну класичну схему, здатну в моделях відтворювати окремі гравітаційні та квантоподібні явища, а також дає деякі передбачення, які можуть відрізнитися від стандартної квантової теорії.

Корисне питання — не «чи перемогла класична фізика квантову?». Ні. Корисне питання вужче: від чого класичній теорії довелося б відмовитися або що їй довелося б додати, щоб імітувати деякі явища, недоступні звичайній чотиривимірній класичній фізиці?

У цій статті доданий компонент — не п'ятий просторовий вимір. Це додатковий параметр, названий тау, відносно якого еволюціонує звичайний чотиривимірний простір-час.

Додатковий час, який не є звичайним часом

Схема починається зі звичайного чотиривимірного простору-часу: однієї часової та трьох просторових координат. Потім до нього додається зовнішній параметр еволюції, тау. Координатний час позначає події всередині простору-часу. Тау керує тим, як уся конфігурація простору-часу релаксує до рівноваги.

Ця відмінність — основа пропозиції. У статті схема називається $4D + \tau$. Формально вона п'ятивимірна, але автор обережно пояснює, що саме це означає: жодна п'ятивимірна метрика не замінює звичну чотиривимірну метрику простору-часу. Натомість тау — параметр, що приводить у рух динаміку чотиривимірної геометрії та розташованих у ній світових ліній частинок.

Картина навмисно незвична. Основні об'єкти тут — не хвильові функції, а світові лінії: траєкторії крізь простір-час, які можуть змінюватися зі зміною тау. У статті простір-час представлено як такий, що поступово «кристалізується» вздовж часового виміру. Позаду фронту кристалізації конфігурації вже релаксували до стійких результатів; попереду нього майбутнє ще не організоване так само.

Спостерігачеві всередині системи доступні лише врівноважені результати. Сам тау він безпосередньо не бачить. Він відновлює звичайну чотиривимірну історію з послідовності вже кристалізованих результатів.

Так стаття намагається отримати одразу дві речі: визначену класичну динаміку в основі й видимість звичайного часу, результатів вимірювання та квантоподібної поведінки для спостерігача всередині системи.

Спочатку гравітація: Ньютон, потім частини Ейнштейна

Гравітаційна частина статті починається в межі слабкого поля. Автор записує рівняння релаксації для гравітаційного потенціалу. Коли система досягає рівноваги за тау, це рівняння зводиться до звичайного ньютонівського рівняння Пуассона для гравітації.

Світовим лініям також задається власне правило релаксації. У рівновазі вони прямують до траєкторій, очікуваних у ньютонівській гравітації. Чисельні приклади навмисно прості: наприклад, статична маса та система з двох мас, що релаксує до ньютонівського простору-часу.

Далі автор поширює ту саму ідею в бік загальної теорії відносності. Замість релаксації лише ньютонівського потенціалу схема релаксує саму метрику простору-часу. У рівновазі світові лінії стають **геодезичними** — траєкторіями вільно падаючих об'єктів, коли на них діє лише гравітація, тобто аналогами прямих ліній у викривленому просторі-часі. Геометрія має відтворювати базові риси загальної теорії відносності.

Застереження важливе. Стаття не дає повного виведення всіх сильнопольових передбачень загальної теорії відносності. Режимми сильного поля, сингулярності, гравітаційне червоне зміщення, гравітаційні хвилі й багатша поведінка світових ліній прямо залишені для майбутньої роботи. Твердження полягає в тому, що схема може відтворити ньютонівську гравітацію в слабкій межі та базову загальнорелятивістську структуру в гладкішій ситуації, а не в тому, що вона замінила весь перевірений апарат гравітації Ейнштейна.

Хід із тестом Белла: змінити припущення про простір-час

Найскладніша частина будь-якого класичного пояснення квантової механіки — нелокальність.

Теорема Белла говорить, що за стандартних припущень жодна локальна модель прихованих змінних не здатна відтворити всі квантові кореляції. Експерименти неодноразово порушували нерівності Белла. Тому звичайні чотиривимірні класичні картини зазнають невдачі.

Нерівності Белла простими словами

Уявіть, що дві частинки залишають одне джерело, несучи приховані аркуші з інструкціями. Далеко одна від одної Аліса й Боб незалежно обирають, як вимірювати свої частинки. Якщо кожен результат наперед заданий локальною інструкцією, жодна сторона не залежить від вибору іншої, а налаштування статистично незалежні від інструкцій, нерівності Белла обмежують силу кореляції між двома наборами результатів. Реальні експерименти перевищують цю межу. Висновок не в тому, що одна конкретна альтернатива автоматично перемагає, а в тому, що реалізм, локальність і статистичну незалежність не можна зберегти одночасно.

Покрокове виведення локальної межі, квантового передбачення й опис експериментальних перевірок див. у нашому посібнику з теореми Белла.

Відповідь статті — не заперечувати теорему Белла. Вона змінює умови, у яких теорема застосовується. У схемі $4D + \text{тау}$ впливи можуть поширюватися вздовж світових ліній у міру еволюції конфігурації за тау . З погляду звичайного простору-часу це може виглядати як нелокальна кореляція. З погляду запропонованої глибинної динаміки взаємодія локальна вздовж відповідних світових ліній у тау .

У статті моделюється експеримент типу ЕПР із двома фотонами, які вимірюють Аліса й Боб. Модель відтворює стандартні квантові кореляції для максимально заплутаного стану поляризації. Формальну ціну названо прямо: модель цілком відмовляється від статистичної незалежності, оскільки вимірювання Аліси через динаміку тау заздалегідь зумовлює стан Боба. Механізм — не стандартний квантовий колапс, а керована тау -релаксація станів поляризації вздовж пов'язаних світових ліній.

Що насправді порівнюють Аліса й Боб

Джерело посилає один фотон Алісі, а його партнера — Бобу. Кожен використовує поляризаційний світлорозділювач, установлений під обраним кутом, і реєструє один із двох результатів: проходження або відхилення. Одна пара не виявляє кореляцію. Перевірка виникає після багаторазового повторення експерименту й порівняння того, як часто результати збігаються зі зміною кута між світлорозділювачами. Квантова теорія передбачає кореляції сильніші, ніж допускають локальні, статистично незалежні приховані інструкції. У моделі Струббе вимірювання Аліси відбувається першим у тау ; потім релаксація поляризації поширюється вздовж пов'язаних світових ліній назад через спільне джерело й далі шляхом Боба, так що його стан уже зумовлений на момент вимірювання. У моделі це відтворює кореляцію, але лише ціною зміни причинної схеми та відмови від статистичної незалежності.

Саме тут потрібна найсуворіша межа. Відтворення однієї моделі типу ЕПР усередині запропонованої схеми — не те саме, що виведення всієї квантової теорії з класичної механіки. У самій статті зазначено, що відхилення від стандартних квантових передбачень

могли б з'явитися, якби перенесення інформації вздовж світових ліній виявилось надто повільним або якби просторові відстані стали достатньо великими, щоб одне вимірювання завершилося до поширення відповідної інформації про результат у тау.

Це напрямок для перевірюваних передбачень, а не привід оголошувати перемогу.

Подвійна щілина, перебудована як рухомі світові лінії

Другий квантовий приклад — інтерференція на двох щілинах.

У статті масивна частинка, конкретно нейтрон, моделюється як пучок світових ліній, а не як одна класична точка або стандартна квантова хвильова функція. У прикладі нейтрон має довжину хвилі де Бройля 2 нм і швидкість 2 000 м/с. Ширина змодельованої щілини становить 10 нм, а відстань між щілинами — 25 нм; ці величини менші за типові для експериментів із нейтронною інтерференцією, щоб картина була візуально зрозумілішою.

Пучок світових ліній еволюціонує за ентропійним правилом. Густина кінцевих точок світових ліній створює інтерференційноподібний розподіл, тоді як одна обрана «імпульсна світова лінія» несе енергію й імпульс і визначає фактичну подію реєстрації. Так стаття відокремлює хвилеподібну поведінку від частинкоподібного результату, не вводячи внутрішню квантову суперпозицію.

Далі стаття запитує, що могла б показати гравітація. Для кожного змодельованого нейтрона безліч світових ліній бере участь у формуванні інтерференційноподібної густини, але лише обрана імпульсна світова лінія несе енергію й імпульс та слугує джерелом гравітації. Модель розміщує один ідеалізований гравітаційний датчик посередині між щілинами й ще два симетрично ліворуч і праворуч. Якщо імпульсна світова лінія проходить крізь праву щілину, а не ліву, крихітний гравітаційний відгук зміщується разом із нею. Вимірювання цієї асиметрії виявило б обрану щілину, тоді як весь пучок світових ліній усе ще формував би інтерференційну картину на екрані. Оцінений сигнал прискорення становить приблизно $2 \times 10^{-23} \text{ m s}^{-2}$, причому стаття прямо залишає практичні обмеження вимірювання осторонь.

Це число важливе, бо втримує твердження в чесних межах. Пропозиція не полягає в тому, що хтось уже виміряв гравітаційну інформацію про шлях, не зруйнувавши інтерференцію. Вона полягає в тому, що в цій моделі така інформація принципово має бути доступною, оскільки гравітаційне поле прив'язане до однієї визначеної світової лінії, а не до суперпозиції обох шляхів.

Це прямо суперечить стандартному квантовому очікуванню, згідно з яким інформація про шлях руйнує інтерференцію. Тим самим схема отримує можливу точку емпіричного тиску.

Чого це не доводить

- Це **не** доводить, що квантову гравітацію розв'язано.
- Це **не** доводить, що гравітація за своєю природою класична.
- Це **не** спростовує теорему Белла; модель змінює причинну структуру простору-часу й відмовляється від статистичної незалежності.
- Це **не** відтворює всю квантову механіку. Стаття моделює окремі явища й залишає повний квантовий формалізм майбутній роботі.
- Це **не** показує, що загальна теорія відносності повністю відновлена в режимах сильного поля.
- Це **не** робить непотрібними хвильові функції, гільбертові простори, комплексні числа або квантову теорію поля.
- Це **не** дає експериментального підтвердження. Робота теоретична й заснована на симуляціях.

Чітка межа така: стаття пропонує класичну схему вищої вимірності, здатну імітувати кілька складних типів поведінки. Вона не показала, що природа справді використовує цю схему.

Що зробило б її перевірюваною?

Найцінніша частина статті в тому, що вона не залишається суто філософською. Вона вказує області, де схема може відрізнитися від стандартної квантової теорії.

Одне передбачення стосується експериментів типу ЕПР. Якщо опосередковане тау перенесення інформації вздовж світових ліній не є фактично миттєвим відносно процесу кристалізації, то установки з достатньо великими відстанями або швидкими вимірюваннями можуть відхилитися від звичайних квантових кореляцій.

Інше передбачення стосується експериментів із подвійною щільною та масивними частинками. Модель говорить, що гравітаційну інформацію про шлях принципово можна добути, не знищуючи інтерференційну картину. Це різко розходиться зі стандартними квантовими міркуваннями, хоча запропонований сигнал надзвичайно малий, а практичну здійсненність не встановлено.

Третє передбачення стосується проєктів, які перевіряють, чи здатна гравітація створювати запутаність між масами. Багато сучасних пропозицій із перевірки квантової гравітації розглядають гравітаційно опосередковану запутаність як свідчення того, що гравітація повинна мати квантові властивості. У схемі Струббе гравітаційне поле приписане одній визначеній світовій лінії, тому гравітаційно індукована запутаність такого типу виникати не повинна.

Це не дрібні відмінності. Саме такі відмінності потрібні спекулятивній схемі, якщо вона хоче бути чимось більшим за інтерпретацію.

Наскільки сильні докази?

Найсильніше докази виглядають як демонстрація внутрішньої узгодженості.

Стаття пропонує рівняння, симуляції та модельні приклади, які показують, як апарат $4D + \tau$ може в рівновазі відтворити ньютонівську гравітацію, наблизитися до загальнорелятивістської структури, відтворити модель кореляції типу ЕПР і породити інтерференційноподібну картину для масивної частинки.

Але як докази про реальний світ вони поки що слабкі.

Демонстрації вибіркові. Схему не розширено до повного квантового формалізму. Випадки сильної гравітації не розв'язані. Запропоновані експериментальні відхилення не спостерігалися. У заяві про доступність даних сказано, що набори даних, створені й проаналізовані в дослідженні, можна отримати в автора-кореспондента за обґрунтованим запитом, але центральне твердження — не нове вимірювання, а теоретична конструкція.

Саме по собі це не недолік. Нові схеми часто починаються як конструкції. Але чисте прочитання має тримати конструкцію, симуляцію, передбачення й підтвердження в окремих шухлядах.

Чому це важливо

Статті про основи фізики можуть звучати грандіозно, бо грандіозний їхній словник: квантова гравітація, нелокальність, час, реалізм, детермінізм. Небезпека в тому, що заголовок стає більшим за результат.

Цю статтю варто читати, бо вона атакує реальну точку напруження. Стандартна квантова теорія й загальна теорія відносності погано поєднуються. Кореляції типу Белла справді спростовують звичайні локальні класичні пояснення у стандартному просторі-часі. Вимірювання й час залишаються концептуально складними. Схема, яка говорить «можливо, хибним є саме вихідне припущення про простір-час», не стає автоматично правильною, але ставить законне питання.

Цікавий хід — не ностальгія за старою класичною фізикою, а ціна працездатності класичної картини: причинність звичайного простору-часу більше не є всією причинною ареною. Схема купує реалізм і детермінізм, додаючи динаміку τ , яку спостерігачі не можуть бачити безпосередньо.

Чи прийнятна ця ціна — питання фізики, а не гасла. Перевіряти його слід за власними передбаченнями статті.

Короткий підсумок

Філіп Струббе пропонує п'ятивимірну класичну схему, у якій звичайний чотиривимірний простір-час еволюціонує під дією додаткового параметра $\tau a u$. У рівновазі схема відтворює ньютонівську гравітацію в межі слабкого поля й прагне відтворити базову загальнорелятивістську структуру за її межами. Вона також моделює два квантові явища: кореляції типу ЕПР через впливи, що поширюються вздовж світових ліній у $\tau a u$, та інтерференцію на двох щілинах через пучок світових ліній, густина якого поводить ся хвилеподібно, тоді як одна імпульсна світова лінія визначає результат. Пропозиція теоретична й заснована на симуляціях. Її важливість не в тому, що вона розв'язує квантову гравітацію, а в тому, що вона формулює конкретну класичну альтернативу з можливими експериментальними відмінностями, включно з гравітаційною інформацією про шлях і негативними очікуваннями для деяких тестів гравітаційно опосередкованої заплутаності.

Твереза оцінка

Що показує стаття: запропонована класична схема $4D + \tau a u$ здатна в моделях відтворювати окремі гравітаційні та квантоподібні явища: ньютонівську гравітацію в рівновазі, базову загальнорелятивістську структуру, кореляції типу ЕПР та інтерференцію, схожу на подвійну щілину.

Що правдоподібно, але не доведено: що ця схема може стати реальним альтернативним шляхом до квантової гравітації. Стаття пропонує маршрут і передбачення; вона не встановлює, що природа йде ним.

Чого вона не показує: вона не розв'язує квантову гравітацію, не спростовує квантову механіку або теорему Белла й не доводить експериментально класичну природу гравітації. Вона також не дає повної заміни всьому квантовому формалізму.

Головне обмеження для звичайного читача: ключовий хід статті — додавання динаміки $\tau a u$ за межами звичайного простору-часу. Це може виявитися фізично плідним, але саме це припущення виконує значну частину роботи. Не слід плутати «класичне всередині ширшої схеми» з твердженням «звичайна класична фізика завжди мала рацію».

Якою має бути впевненість звичайного читача? Помірна впевненість у тому, що стаття представляє серйозну й явно сформульовану теоретичну конструкцію; низька впевненість у тому, що це остаточна відповідь. Правильний висновок — не віра й не відмахування, а точніше питання: чи можна зробити запропоновані відхилення від стандартної квантової теорії експериментально перевірюваними?

Джерела

Strubbe, A five-dimensional classical framework for gravitational and quantum phenomena, Scientific Reports 16, Article 2965 (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41598-025-32860-8>