

# До ЕКСПЛІКАЦІ ПОНЯТТЯ КВАНТОВОЇ ЗАПЛУТАНОСТІ

Олександр Тягло

**Анотація.** Генеза поняття квантової заплутаності досліджується в контексті суперечок навколо мисленого експерименту Ейнштейна-Подольського-Розена, а ширше — дискусії щодо повноти квантової механіки. З огляду на введені фон Нейманом і запозичені Шредінгером поняття суміші та статистичного оператора аргументовано, що поняття заплутаності у квантовій фізиці не є необхідним.

Поглиблений порівняльний аналіз теоретичних студій Шредінгера, фон Неймана і Ландау приводить до висновку про поступове додання уявлення складної квантової системи як квазімеханічного агрегату. Знаходить обґрунтування її об'єктивна цілісність. Тож цілісність притаманна не тільки квантовим явищам, а й квантовим системам самим собою. Повне роз'яснення мисленого ЕПР-експерименту вимагає врахування обох цих виявів квантової цілісності. Стверджується, що суттєвий результат довготривалого обговорення ЕПР-експерименту полягає у вичерпному визнанні цілісності квантової реальності.

Дослідження «зльоту і падіння» поняття квантової заплутаності, як і обґрунтування Бором поняття цілісного явища, підтверджують незвідність Універсуму до множини демокрітових атомів та їх незчисленних сполучень, агрегатів. Більше того, усе це збагачує картину Всесвіту як зрештою неподільної цілісності, що є революційною заміною досі популярного світогляду в душі Демокрита.

Аналіз сучасного використання поняття заплутаності виявляє, що, з одного боку, воно схоплює неподільність, цілісність складних квантових систем різного роду і у такий спосіб є інструментом раціонального холізму. Однак, з іншого боку, поняття заплутаності було викликане до життя ще в межах уявлення квантових систем як квазікласичних агрегатів. Це дотепер дається взнаки через неглибоке наочно-повсякденне його розуміння, через принципово обмежені спроби змодельовати чи помислити цілісні системи як множини окремих об'єктів, хоч і в заплутаних станах.

**Ключові слова:** квантова заплутаність, мислений експеримент Ейнштейна-Подольського-Розена, цілісність квантового явища, цілісність квантової системи самої собі, цілісність Універсуму, раціональний холізм.

## I

У 2022 році Нобелівська премія з фізики була присуджена Алену Аспе, Джошу Ф. Клаузеру й Антону Цайлінгеру за експерименти із запутаними фотонами, встановлення порушення нерівностей Белла та новаторство у квантовій інформатиці. У прес-релізі Шведської королівської академії наук вказано, що кожен із відзначених фізиків виконав новаторські експерименти із запутаними квантовими станами, коли дві частинки, навіть будучи відділеними, поводять себе як «одна одиниця» (a single unit).<sup>1</sup> А у обґрунтуванні свого вибору Академія, з-поміж іншого, зазначила таке.

Батьки-фундатори квантової механіки добре розуміли революційний потенціал її висновків для фізики і філософії, хоча трималися щодо цього дуже різних, інколи навіть прямо суперечних поглядів. Довівши, що квантова механіка доходить передбачень, які не можуть бути відтворені жодною мислимою теорією, ґрунтованою на локальних прихованих змінних, Джон Белл перетворив філософію на емпіричну науку, назавжди трансформувавши це поле досліджень.

Та вказана трансформація не позбавлена суперечності. Справді, для більшості науковців-практиків переконливі емпіричні докази атомної фізики й оптики виявились підтвердженням значної прогностичної сили квантової механіки. Тож для них експерименти Клаузера і Аспе не стали сюрпризом. Інші ж вбачають у них фундаментальні відкриття, що стосуються фізичної реальності й остаточно верифікують квантову механіку в режимі, дуже далекому од класичних законів та міркувань.<sup>2</sup>

Уже побіжний аналіз дозволяє зрозуміти, що у фокусі описуваної ситуації знаходяться нерівності, виведені Джоном С. Беллом у 60-х роках ХХ століття, а також експериментальне підтвердження їх порушення. У поясненні цього порушення посилаються на запутаність станів мікрооб'єктів, зокрема фотонів. Окрім того, запутаність надає підстави для інновацій у квантовій інформатиці та у її прикладному застосуванні.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Press Release.* The Nobel Prize in Physics 2022. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/press-physicsprize2022-2.pdf>

<sup>2</sup> *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2022.* URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-physicsprize2022-3.pdf>

<sup>3</sup> Ще у 2010 році Аспе, Клаузер і Цайлінгер були відмічені престижною премією Вольфа за фундаментальний концептуальний і експериментальний внесок в основи квантової фізики, зокрема за серію дедалі складніших перевірок нерівностей Белла чи розширених версій цих нерівностей із використанням запутаних квантових станів (*Wolf Prize in Physics. Wikipedia. The Free Encyclopedia.* 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wolf\\_Prize\\_in\\_Physics#cite\\_note-gongs\\_away-](https://en.wikipedia.org/wiki/Wolf_Prize_in_Physics#cite_note-gongs_away-)

Але глибше дослідження породжує принципове питання: чи є ключове поняття *квантової заплутаності* і похідні від нього цілком й остаточно зрозумілими? У звичному для людини світі заплутаність легко унаочнюється, наприклад, як безладно змотані нитки і схоплюється вже на рівні повсякденних міркувань. Та чи доречно просто переносити це на системи, утворені з фотонів або електронів, що нібито і «відділені», проте поводять себе як «одна одиниця», тобто неподільне ціле? А коли не все тут просто і ясно, то з чим вчені люди мають справу насправді?

Експлікація поняття квантової заплутаності видається однією з необхідних умов розкриття революційного потенціалу квантової механіки для фізики та філософії, яке й сьогодні не довершене, хоча триває вже майже століття, для якісного осучаснення картини Всесвіту чи розвитку техніко-технологічного підґрунтя інформаційного суспільства. Спроба наблизитись до розв'язання цих взаємопов'язаних задач представлена в моїй розвідці.

## II

У квантовій фізиці історія поняття заплутаності та низки похідних від нього починається зі статті Ервіна Шредингера «Обговорення ймовірнісних відношень між відділеними системами», опублікованої 28 жовтня 1935 року.<sup>4</sup> Це нововведення з'явилося під прямим впливом публікації Альберта Ейнштейна, Бориса Подольського та Натана Розена (ЕПР) «Чи можна вважати квантово-механічний опис реальності повним?» від 15 травня 1935 року.<sup>5</sup> Тому ґрунтовна експлікація поняття заплутаності та відповідного терміна передбачає аналіз контексту їх уведення, найближчим чином створюваного вказаною статтею ЕПР, а також критичною реакцією на неї Нільса Бора, перша спроба якої була опублікована 15 жовтня того ж року.<sup>6</sup>

---

2). Тож, по-перше, значущість одержаних ними результатів апробована вже десятиліттями. По-друге, тут привертає увагу визнання не тільки нових конкретних знань, інструментів чи методів експериментування, а й, можливо насамперед, фундаментального концептуального внеску в основи квантової фізики, зрештою — у новітню картину світу загалом.

<sup>4</sup> *Schrödinger E.* Discussion of probability relations between separated systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* 1935. 31 (4). С. 555–563.

<sup>5</sup> *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 1935. 47. С. 777–780.

<sup>6</sup> *Bohr N.* Can quantum-mechanical description of physical reality be considered

Ейнштейн, Шредингер та інші видатні фізики, які безпосередньо та суттєво доклалися до створення квантової механіки, мали сумнів у її повноті, на чому наполягали прихильники копенгагенської інтерпретації, яких очолював Бор. Згадана публікація ЕПР і критика її Бором представляють один із визначальних моментів довготривалої дискусії з цього приводу.

Безпосередньо суперечка точилась навколо запропонованого ЕПР мисленого експерименту, коли «є дві системи  $I$  і  $II$ , яким ми даємо взаємодіяти від моменту часу  $t = 0$  до  $t = T$ , після чого між обома частинами вже не відбувається більше жодної взаємодії».<sup>7</sup> Оскільки вказані системи впливали одна на одну, вони утворили складну систему  $I+II$ , стан і перебіг еволюції якої відомі. З огляду на це, вимірюючи за своїм вибором одну зі складових систем, дослідник має змогу знаходити стан й іншої складової «без будь-якого її збурення». Через такі довільні непрямі вимірювання, на думку ЕПР, відкривається можливість передбачити достовірні значення будь-яких фізичних величин другої системи, навіть представлених некомутуючими операторами, наприклад, імпульсу та координати. Оскільки вони піддаються такому передбаченню, остільки реально існують. Але квантова механіка цієї ситуації не описує, що й означає її неповноту. «Хоч ми і показали, що хвильова функція не дає повного опису фізичної реальності, ми залишаємо відкритим питання стосовно того, існує такий опис або ні. Ми вважаємо, однак, що така теорія можлива», — загалом недвозначно, хоча почасти в модальності лише можливого підбили підсумок своєї аргументації ЕПР.<sup>8</sup>

Публікації ЕПР присвячений величезний корпус літератури з фізики, історії фізики, філософії фізики тощо. Тут обґрунтовано утвердилась думка, що одним із необхідних засновків міркувань ЕПР був критерій реальності.<sup>9</sup> Саме його без затримки та вагань піддав критиці Бор: у статті 1935 року він стверджував наступне.

З нашої теперішньої точки зору ми бачимо, що формулювання вже згаданого критерія фізичної реальності, запропонованого Ейнштейн-

complete? *Phys. Rev.* 1935. 48. С. 696–702.

<sup>7</sup> *Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Op. cit. С. 779.*

<sup>8</sup> *Ibid. С. 780.*

<sup>9</sup> ЕПР трималися по суті класичного критерію реальності: «Якщо ми можемо без жодного збурення системи передбачити з достовірністю (тобто з ймовірністю, що дорівнює одиниці) значення якоїсь фізичної величини, то існує елемент фізичної реальності, що відповідає цій фізичній величині» (*Ibid. С. 777*). Див. також: *Jammer M. The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective. New York: Wiley and Sons, 1974. С. 184–185.*

ном, Подольським і Розеном, містить неоднозначність у виразі «без жодного збурення системи». Зрозуміло, у випадку, подібному до розглянутого зараз, не йдеться, що протягом останнього критичного етапу вимірювання досліджувана система піддається якомусь механічному збуренню. Але і на цьому етапі по суті мова йде *про вплив на самі умови, які визначають можливі типи передбачення майбутньої поведінки системи*. Оскільки ці умови становлять суттєвий елемент опису усякого явища, до якого можна застосувати термін «фізична реальність», то ми бачимо, що аргументація згаданих авторів не виправдовує їх висновку про суттєву неповноту квантово-механічного опису.<sup>10</sup>

У статті «Дискусії з Ейнштейном з епістемологічних проблем у атомній фізиці», опублікованій у 1949 році, теоретик із Копенгагена так оцінив свою початкову критичну реакцію.

Перечитуючи тепер ці рядки, я глибоко усвідомлюю незадовільність і незграбність вираження моїх думок та почуттів й відчуваю, що ці вади викладу мали сильно ускладнити розуміння ходу моїх міркувань. Моя аргументація мала на меті виявити неоднозначність, притаманну усякій спробі приписати певні фізичні атрибути об'єктам, маючи справу з явищами, в яких не можна точно відмежувати поведінку самих об'єктів од їх взаємодії з вимірювальними приладами (no sharp distinction can be made between the behaviour of the objects themselves and their interaction with the measuring instruments).<sup>11</sup>

Ще приблизно через десятиліття у статті «Квантова фізика і філософія. Причинність і доповняльність» Бор резюмував підставу та сутність своїх поглядів так.

Нова епоха у фізичних науках була започаткована відкриттям Планком *елементарного кванта дії*. Це виявило невід'ємну рису *цілісності (wholeness)* атомних процесів, що набагато перевершує давню ідею обмеженої подільності матерії [...]. Якщо з точки зору класичної фізики взаємодією між об'єктом і вимірювальним приладом можна знехтувати або, за потребою, компенсувати її, то у квантовій фізиці ця взаємодія становить невіддільну частину явища (an inseparable part of the phenomenon). Тож однозначний опис справжнього квантового явища повинен, в принципі, включати усі відповідні характеристики експериментальної установки.<sup>12</sup>

<sup>10</sup> Bohr N. Op. cit. С. 700.

<sup>11</sup> Bohr N. Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* / ed. by Paul A. Schilpp. Evanston: The Library of Living Philosophers, 1949. С. 233.

<sup>12</sup> Bohr N. Quantum physics and philosophy. Causality and complementarity. *Essays 1958-62 on Quantum Physics and Human Knowledge*. John Wiley and Sons: London, New York. 1963. С. 2, 4.

Аналіз еволюції поглядів Бора дозволяє зрозуміти наступне. Елементами квантово-фізичної реальності, яким можна приписати достовірні значення фізичних величин, наприклад, просторових координат або імпульсу, виявляються не об'єкти, що існують самі по собі, а відповідні складові неподільних, цілісних — з урахуванням використуваної в кожному випадку особливої експериментальної установки — *явищ*. Перехід від вимірювання однієї фізичної величини до вимірювання іншої вимагає, в загальному випадку, істотної зміни установки та породжує інше, суттєво відмінне явище. Тому знайдені значення фізичних величин належатимуть не одному і тому самому об'єкту, а хоч і спорідненим через однакові вихідні об'єкти, але відмінним одна від одної складовим різних явищ. Ця суттєва обставина не була врахована у ґрунтованих на особливому критерії реальності міркуваннях ЕПР, що дозволило представити за несумісні й тому одночасно квантовою механікою не передбачувані результати вимірювань нібито одного і того самого об'єкта насправді сумісні результати вимірювань складових різних явищ. Коротко кажучи, сформульований ЕПР критерій реальності має обмежену область дії: він справедливий у класичній фізиці, але не у квантовій. Тому ґрунтований на ньому висновок про неповноту саме квантово-механічного опису не має достатньої підстави.

В основу критики Бором аргументації ЕПР щодо неповноти квантово-механічного опису було покладене поняття *цілісного* явища. Це нововведення претендувало на суттєве доповнення картини квантово-фізичної реальності, світу загалом. Разом з тим, було б неприпустимим перебільшенням стверджувати, що його сприйняли одразу і всі. Так, уже на початку 1954 року Вольфганг Паулі в листі до Макса Борна повідомив: Ейнштейн вважає за характерне для квантової механіки і суттєве утруднення ту обставину, що стан певної системи визначається тільки через умови експерименту, які його характеризують. І додав суттєву ремарку: «Нічого більше про це Ейнштейн знати не хоче».<sup>13</sup>

Вочевидь, один з батьків-фундаторів квантової механіки до кінця свого життя сприймав поняття цілісного явища та пов'язану з ним зміну уявлень про квантову реальність лише як «утруднення», яке підлягає усуненню подальшим поступом фізики. Так чи так незмінний класичний реалізм Ейнштейна впливав на теоретичні розвідки

<sup>13</sup> Див.: *The Born-Einstein Letters. Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955 with Commentaries by Max Born*. 1971. London: Macmillan. С. 219.

Шредінгера. А з часом його перевірка виявилась одним зі стимулів виведення нерівностей Белла.<sup>14</sup>

### III

Шредінгер не належав до кола однодумців Бора, натомість влітку 1935 року він листувався з Ейнштейном щодо статті ЕПР.<sup>15</sup> Явно не без впливу цього листування з'явилась розвідка «Обговорення ймовірнісних відношень між відділеними системами».

Коли дві системи, стани яких ми знаємо завдяки їх представленням, вступають у тимчасову фізичну взаємодію через відомі сили, а потім знову відділяються, далі вони не можуть бути описані у той самий спосіб, як і раніше, тобто через приписування кожній з них власного представлення. Я б назвав це не *единою*, а радше *характерною* особливістю квантової механіки, яка примушує повністю відійти від класичного способу мислення. Через вказану взаємодію два представлення (або  $\psi$ -функції) заплуталися (have become entangled). Аби їх розплутати ми повинні експериментально одержати подальшу інформацію попри те, що знали усе, що сталося настільки, наскільки це будь-хто може знати. Для кожної окремо взятої системи усі попередні дані можуть бути повністю втрачені, залишаючи нам привілей обмежити експерименти тільки однією із цих двох систем. Після встановлення через спостереження одного нового представлення, друге може бути виведене миттєво. Надалі усю цю процедуру називатимемо *розплутуванням* (disentanglement).<sup>16</sup>

Наведений фрагмент демонструє, як Шредінгер уявив послідовні ситуації з двома визначеними вихідними системами. Спочатку *I* і *II* існують окремо і незалежно одна від одної, їх стани відомі й описуються хвильовими функціями  $\psi_1$  та  $\psi_2$ . Потім вони вступають у тимчасову силову взаємодію і утворюють складну систему *I + II*. Внаслідок цього їх  $\psi$ -функції не просто змінюються або стають невідомими, а втрачається сама можливість опису через хвильові функції — навіть після того, як нібито відбувся саморозпад складної системи

<sup>14</sup> Див., напр.: Bell J.S. Bertlmann's socks and the nature of reality. *Bell on the Foundations of Quantum Mechanics*. Singapore: World Scientific, 2001. С. 130–133, 143–144.

<sup>15</sup> На характер цього листування і позиції Шредінгера загалом ясно вказує вже перше речення його першого листа від 7 червня: «Я дуже радий, що у роботі, яка щойно з'явилась у Phys. Rev., ви відкрито взяли догматичну квантову механіку за горлянку, про що ми почасти вже багато дискутували у Берліні» (цит. за: Howard, Don. Einstein on locality and separability. *Studies in History and Philosophy of Science*. 1985. 16. С. 175).

<sup>16</sup> Schrödinger E. Op. cit. С. 555.

$I + II$  на ті самі  $I$  та  $II$  і вони знову відділилися. Таке аж ніяк не відповідає класичним уявленням, тому Шредінгер цілком виправдано визнав ситуацію характерною саме для квантової механіки, назвавши її заплутуванням.<sup>17</sup>

Зворотна заплутуванню процедура розплутування вимагає додаткового прямого вимірювання однієї з систем, що не тільки дає її нову хвильову функцію, а й миттєво визначає хвильову функцію іншої. У такому зв'язку Шредінгер, безпосередньо посилаючись на статтю ЕПР, констатував наступне.

Нещодавно увагу було привернуто до явного, але бентежного факту: навіть коли ми обмежуємо вимірювання розплутування *однією* системою, представлення, одержане для *іншої* системи, аж ніяк не є незалежним від особливого добору спостережуваних величин, котрі ми обираємо *цілком* довільно. Це викликає ще більший дискомфорт, оскільки таким чином теорія має дозволити, щоб система скеровувалася чи пілотувалася у стан того чи іншого типу за волінням експериментатора всупереч тому, що доступу до неї він не має.<sup>18</sup>

Вгледівши тут парадокс, теоретик розвинув далі його опис засобами математичного апарату квантової механіки. При цьому він знову залучив термін «заплутаність».

Позначимо через  $x$  і  $y$  усі координати, відповідно, першої і другої системи, а через  $\Psi(x, y)$  нормалізоване представлення стану утвореної системи тоді, коли після певної взаємодії перша і друга системи знову відділились. Заплутаність конституюється тим, що  $\Psi$  не є добутком функції  $x$  та функції  $y$  (What constitutes the entanglement is that  $\Psi$  is not a product of a function of  $x$  and a function of  $y$ ).<sup>19</sup>

У цьому фрагменті заплутаність визначається тим, що хвильова функція складної квантової системи не піддається факторизації з огляду на окремі функції аргументів  $x$  або  $y$ . Цим вона суттєво відрізняється від хвильової функції множини незалежних вихідних компонентів з функціями  $\psi_1(x)$  і  $\psi_2(y)$ , що має вигляд  $\Psi_0(x, y) = \psi_1(x) \times \psi_2(y)$ .

<sup>17</sup> Існує й інший спосіб вираження цієї своєрідної ситуації: найкраще відоме знання *цілого* не включає з необхідністю найкращого можливого знання усіх його *частин* попри те, що вони можуть бути повністю відділені й тому справді «найкраще пізнані», тобто такими, що кожна з них матиме своє власне представлення, додатково описав ситуацію Шредінгер (*Ibid.*).

<sup>18</sup> Schrödinger E. Op. cit. С. 555–556.

<sup>19</sup> Schrödinger E. Op. cit. С. 556.



Можна бачити, що за статтею Шредінгера 1935 року термін «заплутаність» і відповідне поняття безпосередньо пов'язується з двома особливостями математичного опису квантової реальності: по-перше, складовим квантової системи чи продуктам її саморозпаду не можна приписати жодних хвильових функцій і, по-друге, хвильова функція складної системи не піддається факторизації з огляду на функції координат її складових.

#### IV

Дослідження складних квантових систем примусило Шредінгера не тільки відійти від класичного способу мислення, а й суттєво поповнити понятійний апарат, відповідну термінологію. Так для теоретичного охоплення відзначених особливостей квантової реальності були залучені звичні слова повсякденних міркувань і спілкування — «заплутування» і «розплутування», «заплутаність» тощо, але з повною зміною їх смислу. Та чи є ці термінологічні і, відповідно, понятійні нововведення безумовно необхідними й остаточними?

Шукаючи відповідь на поставлене питання, доречно згадати, що лише у порівняно простих системах, насамперед класично-механічних, їх елементи зазвичай тотожні вихідним компонентам чи компонентам розпаду. Інакше кажучи, входячи до складу механізму, вихідні компоненти не зазнають якісних змін; так само, виходячи із механічної системи, її елементи фактично зберігають свою ідентичність. Загалом це роз'яснив, наприклад, Георг Вільгельм Фрідріх Гегель.

Як єдність різних об'єкт є *щось складене*, якийсь агрегат, де вплив на інше залишається зовнішнім відношенням: це — *формальний механізм*, вказав уславлений діалектик. І діалектично додав, що, перебуваючи в такому відношенні й будучи залежними, об'єкти залишаються однаково незалежними (in this relation and dependence the objects remain equally independent).<sup>20</sup> Таке уявлення про механізм, або агрегат, становило, вочевидь, суттєвий елемент парадигми фізики Ньютона, класичні приклади його втілення — механічний годинник чи Сонячна система. Та, якщо зануритись в історію філософсько-наукової думки глибше, це уявлення агрегату виявляється одним із модерних

---

<sup>20</sup> Hegel G.W.F. The Encyclopaedia Logic, with the Zusätze: Part I of the Encyclopaedia of Philosophical Sciences with the Zusätze: A new translation with introduction and notes by T. F. Geraets, W. A. Suchting, H. S. Harris. Indianapolis: Hackett Publishing Company, Inc. 1991. С. 274.

продуктів давнього атомістичного світогляду. Дійсно, ще Демокрит вчив так.

Началами Всесвіту були атоми і порожнеча [...] Атоми нескінченні за розміром і кількістю, їх колові рухи у Всесвіті не мали кінця. Так вони породили усі існуючі сполуки: вогонь, воду, повітря, землю; тож усе це сполучення якихось атомів; вони не піддаються зовнішнім впливам та незмінні через свою твердість.<sup>21</sup>

Із часів Френсіса Бекона й Ісаака Ньютона уявлення не тільки стихій, а й об'єктів фізичної реальності як множин певних незмінних складових, з'єднаних у різноманітні комбінації зовнішніми, так би мовити, «мотузками і силами», набуло значення суттєвої складової панівної парадигми, часто-густо навіть явно не проголошеної.

Уже з другої половини XVIII століття фізична наука зіптовхнулася із природними явищами, пояснення яких у межах ньютонівської парадигми викликало принципові проблеми (електрика, магнетизм тощо). Проте вона залишалась домінуючою, а з нею — і мислена модель механічного агрегату. Гегель досить проникливо піддав критиці абсолютизацію цієї ситуації в сучасному йому природознавстві.

У будь-якому разі слід визнати вельми суттєвим і навіть головним недоліком новітнього дослідження природи те, що навіть там, де йдеться про зовсім інші й вищі категорії, ніж категорії просто механізму (*mere mechanism*), воно усе ще вперто їх тримається. Вчиняючи так, воно вступає в суперечність з тим, що відкривається неупередженому чуттю (*unprejudiced intuition*), та створює собі перепони на шляху адекватного пізнання природи.<sup>22</sup>

Розкритикований видатним діалектиком потяг до залучення моделей і понять «просто механізму» за межами їх придатності зберігся протягом усього XIX століття. Він дотепер підживлюється не тільки застосуванням як початкових робочих засобів деяких фізичних досліджень, а й своєю наочністю, сумірністю повсякденному буттю та природній мові людської істоти.<sup>23</sup>

<sup>21</sup> *Diogenes Laërtius. The Lives and Opinions of Eminent Philosophers / translated by C. D. Yonge. The Project Gutenberg EBook #57342. 2018. С. 395. URL: [https://www.gutenberg.org/files/57342/57342-h/57342-h.htm#Page\\_390](https://www.gutenberg.org/files/57342/57342-h/57342-h.htm#Page_390)*

<sup>22</sup> *Hegel G. W. F. Op. cit. С. 275.*

<sup>23</sup> За відомим свідченням Ейнштейна, фізики XIX століття вбачали у класичній механіці непорушну підставу для всієї фізики і навіть усього природознавства, вони невтомно намагалися ґрунтувати на механіці й максвелівську теорію електромагнетизму, що повільно торувала собі шлях. Додам, що вже у другому десятилітті XX століття у становленні квантової механіки важливу роль відіграла

Вищими за механізми, агрегати є живі органічні утворення, ширше — цілісні системи різної природи. «Окремі члени організму є тим, чим вони є лише через їх єдність та у відношенні до цієї єдності», — вчив Гегель. І наочно пояснював, що за наведеним ще Аристотелем прикладом, рука, коли її відтяти од людського тіла, залишається рукою лише за назвою, а не дійсно.<sup>24</sup>

З огляду на роз'яснення Гегеля можна зрозуміти, що Шредінгер спочатку уявив складну квантову систему в мисленому ЕПР-експерименті саме як квазікласичний агрегат. Цей агрегат утворюється із двох самих по собі визначених компонентів; він існує завдяки взаємодії «через відомі сили» цієї множини якісно незмінних складових; він мусив би після закінчення цієї взаємодії сам собою розпастися на множину тих самих компонентів у певних станах. Але в реальності щось іде суттєво не так: на це вказує насамперед втрата можливості описувати складові квантового утворення і, за думкою Шредінгера, продукти його саморозпаду через хвильові функції, тобто як справді незалежні й самі по собі визначені, самодостатні системи. Усвідомивши цю обставину, австрійський теоретик зробив спробу якось пояснити суттєве відхилення опису квантового утворення від усталеного в парадигмі класичної фізики уявлення про агрегат, однак із залученням понять, пов'язаних з агрегатом: сама по собі визначена система, певний стан системи, множина систем і, відповідно, їх станів, а вже до цього він додав чужорідне заплутування станів чи їх представлень. Таке пояснення не є послідовним.<sup>25</sup> Важко позбутися відчуття потреби в дійсно послідовному, внутрішньо несуперечливому уявленні чи описі складної квантової системи.

---

по суті класична планетарна модель атома Ернеста Резерфорда. Дотепер фізики не облишили пошуків кінцевих елементарних частинок, якихось новітніх аналогів демокрітових атомів, у різні способи структуровані множини яких дають усе у світі, складають Універсум.

<sup>24</sup> *Hegel G.W.F.* Op. cit. С. 291.

<sup>25</sup> Тут видається слушною аналогія з уявленням атомної системи, розвинутим Бором на основі планетарної моделі Резерфорда: в атомі наявна множина електронів, які якісно нічим не відрізняються від вільних частинок, і вони за законами класичної фізики за певними орбітами рухаються навколо ядра, але — тут додається чужорідна класиці умова — під час такого руху електрони не випромінюють, їх енергія залишається незмінною (див., напр.: *Jammer M.* The Conceptual Development of Quantum Mechanics. New York: McGraw-Hill, Inc. 1966. С. 75–77, 86).

## V

Принципово важливу інформацію для з'ясування послідовного опису складних квантових утворень, глибшого розуміння поняття квантової заплутаності і, зрештою, повнішого осмислення контексту його уведення — обговорення мисленого ЕПР-експерименту — надає стаття «Ймовірнісні відношення між відділеними системами», опублікована Шредінгером 26 жовтня 1936 року. Спочатку це може здатися сюрпризом, але термін «заплутаність» і похідні від нього у цій публікації жодного разу не були використані. Як таке могло статися?

Паралельно вилученню терміна «заплутаність», австрійський теоретик залучив два для нього нових — «суміш» і «статистичний оператор».<sup>26</sup>

Добре відомий приклад сумішей виникає тоді, коли якась система складається з двох відділених частин. Якщо хвильова функція усієї цієї системи відома, будь-яка її частина перебуває у ситуації суміші, з якої *визначені* конституенти виділяються через *визначену* програму вимірювання, здійснювану з *іншою* частиною (If the wave function of the whole system is known, either part is in the situation of a mixture, which is decomposed into *definite* constituents by a *definite* measuring programme to be carried out on the *other* part). Усі мислимі декомпозиції [...] першої системи цілком реалізуються через усі можливі програми вимірювання, котрі можуть бути виконані з другою.<sup>27</sup>

Легко бачити, по-перше, що у статті 1936 року ключовий пункт мисленого ЕПР-експерименту — «бентежний факт» миттєвого впливу довільного вимірювання частини складної системи на визначення ситуації з іншою відділеною частиною — жодним чином не заперечується. По-друге, для відображення саме *частин* системи Шредінгер і залучив поняття *суміші*; конкретна суміш описується відповідним математичним інструментом — статистичним оператором. У такий спосіб теоретик фактично зафіксував якісну відмінність частин квантової системи від вихідних її компонентів-частинок або від

<sup>26</sup> Шредінгер вказав, що «цінне поняття суміші» й відповідний засіб її опису — статистичний оператор — він запозичив із книги Йоганна фон Неймана «Математичні основи квантової механіки», опублікованої у 1932 році (*Schrödinger E. Probability relations between separated systems. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* 1936. 32 (3). С. 446.). Сьогодні визнається, що математичний інструмент, споріднений тому, який фон Нейман і Шредінгер називали статистичним оператором, ще у 1927 році на кілька місяців раніше за фон Неймана для опису зв'язаних систем застосував Лев Давидович Ландау (*Jammer M. Op. cit.* С. 368).

<sup>27</sup> *Schrödinger E. Op. cit.* С. 452.

складових класичного агрегату, які зберігають ідентичність частинок; підтвердив квантово-механічні засоби мислення й опису цих частин. Попередня спроба зведення квантової системи до, знову згадуючи Гегеля, агрегату тут почасти долається.<sup>28</sup> По-третє, перетворення вихідних компонентів на складові частини утвореної з них системи, для відображення чого у статті 1935 року Шредінгер увів поняття заплутування  $\psi$ -функцій, за публікацією вже наступного року слід розуміти як перехід зі станів з певними  $\psi$ -функціями у «ситуації суміші», характеризовані статистичними операторами. Тож нововведення Шредінгера 1935 року — поняття заплутування, заплутаності тощо — з огляду на запропоновані раніше фон Нейманом поняття суміші і статистичного оператора виявились по суті зайвими. Досить швидко ці інновації вичерпали роль тимчасово корисних інструментів пізнання і тому мали б залишитися хіба що в анналах історії фізики: саме цим і можна пояснити їх відсутність у публікації їх автора вже у 1936 році.

## VI

Та, можливо, знайдений висновок щодо непотрібності поняття заплутаності в описі квантово-фізичної реальності занадто поспішний? Щось суттєве в мисленому ЕПР-експерименті, у складних квантових системах загалом, що схоплюється поняттям заплутаності, поняття суміші схопити не в змозі? Аби відповісти на це важливе запитання, розширю поле дослідження. Спочатку звернусь до результатів фон Неймана, на які посилався Шредінгер.

Уведення поняття суміші фон Нейман обґрунтував принципово статистичним характером опису квантової реальності, виділивши два різні його джерела. Хоча вже в індивідуальному стані з хвильовою функцією  $\varphi$  існує тільки певна статистика, статистичний характер може загостритися ще й через те, наголосив він, що невідомо, який

---

<sup>28</sup> Шредінгер веде мову вже не про «системи», що відділилися одна від одної і мали б повернутися до вільного стану, а про «відділені частини» складної системи: тож уявлення про складну квантову систему як таку, що зводиться до певного агрегату долається не до кінця. Такого роду поглядів тримався не тільки Шредінгер, а й Ейнштейн чи почасти навіть Бор, деякі сучасні теоретики. Це підкреслив, наприклад, знаний фізик і математик минулого століття Олександр Данилович Александров, зауваживши наступне: неможливість факторизації хвильової функції складного утворення відображає той факт, що його складові не віддільні, вони зв'язані в єдину систему. Одна відділена, або відокремлена, частинка — уже не те, що є в системі. У єдиній системі вплив на одну її складову природно діє й на іншу.

само стан має місце насправді — наприклад, коли у описі слід врахувати множину можливих станів  $\varphi_1, \varphi_2 \dots$  з ймовірностями  $\omega_1, \omega_2 \dots$  відповідно. Статистичний оператор цілком характеризує статистичні властивості цієї особливої множини, або суміші станів.<sup>29</sup> Не заглиблюючись у ретельні фізико-математичні студії фон Неймана, обмежусь констатацією того, що введене в такому зв'язку поняття суміші та інструмент її опису — статистичний оператор — теоретик використав і в дослідженні складних систем.

Розглянувши квантову систему, складену з вихідних компонентів  $I$  і  $II$ , фон Нейман дійшов такого висновку.

Коли система  $I$  знаходиться у стані  $\varphi(q)$ , а система  $II$  — у стані  $\zeta(r)$ , то  $I + II$  знаходиться у стані  $\Phi(q, r) = \varphi(q)\zeta(r)$ . Натомість, коли  $I + II$  знаходиться у стані  $\Phi(q, r)$ , який не має форми добутку  $\varphi(q)\zeta(r)$ , то  $I$  і  $II$  будуть сумішами, а  $\Phi$  встановлюватиме взаємно однозначну відповідність визначених у  $I$  і  $II$  величин.<sup>30</sup>

Тут теоретик зафіксував існування двох різних квантових реалій: окремої незалежної системи, стан якої описується тією чи тією хвильовою функцією, і чогось якісно іншого — суміші, якій хвильова функція аж ніяк не може бути приписана. В цьому випадку суміш, характеризувана певним статистичним оператором, виявляється частиною складної системи. А хвильова функція  $\Phi(q, r)$  цієї системи в загальному випадку не є добутком співмножників, залежних тільки від  $q$  або  $r$ , тобто не факторизується. Тож фон Нейман за кілька років до Шредінгера фактично передбачив ті його знахідки, які у 1935 році викликали до життя поняття заплутаності та похідні від нього. Окрім того, його результати підготували і відмову від нововведень австрійського теоретика: у поняттях заплутування — розплутування, заплутаності тощо в описі складних квантових систем у фон Неймана жодної потреби не виникало. Нарешті, він фактично передбачив взаємно однозначну відповідність даних довільних вимірювань складових  $I$  і  $II$  у випадках на кшталт мисленого ЕПР-експерименту. У цій ретроспекції основна роль публікацій 1935 року спочатку Ейнштейна і його молодших співробітників, а потім і Шредінгера радше полягала в парадоксально артикульованому перевідкритті вже в основному знайдених результатів, у стимулюванні процесу осмислення їх принципових засад та у приверненні уваги до загадкових властивостей квантової

<sup>29</sup> Von Neumann J. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: New Edition* / translated from the German by Robert T. Beyer. Princeton: Princeton University Press. 2018. С. 193–194, 293–295.

<sup>30</sup> Von Neumann J. *Op. cit.* С. 283–284.

реальності не тільки поодиноких знавців математичних основ квантової механіки, а й ширших кіл фізиків чи філософів, вченої спільноти загалом.

У статті 1936 року Шредінгер безпосередньо спирався на результати фон Неймана, а нововведення опублікованої майже за десятиліття до цього роботи юного Ландау «Проблема затухання у хвильовій механіці» було, мабуть, йому невідоме. Однак врахування доробку одного зі знаних теоретиків ХХ століття дозволяє глибше осягнути особливості складних квантових систем, їх послідовного опису.

Уже в першому абзаці першого параграфу «Зв'язані системи у хвильовій механіці» дев'ятнадцятирічний фізик-теоретик відзначив наступне.

Стан системи у хвильовій механіці не може бути визначений однозначно; у ньому завжди приходиться мати справу з сукупністю ймовірностей (статистичне тлумачення). Коли ж система взаємодіє з якоюсь іншою системою, то невизначеність у її поведінці подвоюється.<sup>31</sup>

Тож Ландау одразу та свідомо звернув увагу на суттєву відмінність окремої незалежної системи від системи, зв'язаної з іншою якоюсь силовою взаємодією. Саме перетворення на складову більшого квантового новоутворення «подвоює» невизначеність буття цієї квантової реалії, статистичний характер її опису. Для схоплення цієї обставини Ландау увів певні «величини  $\alpha_{nm}$ », визначивши їх лише математично, не запропонувавши якогось особливого терміна. Але цього вже достатньо, аби складну квантову систему не ототожнювати з квазікласичним агрегатом.

Водночас не можна не зауважити, що термін «система» Ландау застосовував без належного поділу, подвійно — для опису і вихідного компонента, і частини квантового утворення. А вирази «зв'язані системи», «система взаємодіє з якоюсь іншою системою» легко узгоджуються з уявленням про складне утворення як множину окремих складових, зв'язаних силовою взаємодією. Усе це нагадує термінологію статті Шредінгера 1936 року чи навіть роз'яснення Гегеля щодо «просто механізму», або агрегату.

Відзначена термінологічна чи понятійна неузгодженість статті Ландау 1927 року не завадила одержанню фізико-математичних результатів. Її можна почасти зрозуміти як продукт становлення квантової механіки, що не позбавлений суперечностей переходу від

<sup>31</sup> Landau L. Das Dämpfungsproblem in der Wellenmechanik. *Z. Physik.* 1927. 45. С. 430.

старої до нової фізичної парадигми: «нове вино ще вливалось у старі міхи» через відсутність відповідних нових, які потрібно було виробити чи впорядкувати.

Кілька десятиліть потому в курсі теоретичної фізики, створеному Ландау і його учнями, поряд із хвильовою функцією систематично використовується ще один інструмент опису квантових систем — *матриця густини* (матрица плотности).

Зі станом, що не допускає опису з допомогою хвильової функції, зіштовхуємося тоді, коли розглядаємо систему, яка є частиною якоїсь більшої замкнутої системи, вже цілком ясно вказали Ландау і Ліфшиц.<sup>32</sup> Стан цієї частини не має хвильової функції, але може бути описаний матрицею густини. Його називають *змішаним* на відміну від *чистого стану* з тією чи тією хвильовою функцією. Можна зрозуміти, що поняття змішаного стану і матриці густини споріднені членам пари суміш — статистичний оператор, яку використовували фон Нейман та Шредінгер.<sup>33</sup>

Матриця густини не містить у собі координат  $q$ , які не відносяться до даної системи, хоча, ясна річ, по суті залежить від стану замкнутої системи у цілому [...] Опис з допомогою матриці густини є найбільш загальною формою квантовомеханічного опису систем. А опис з допомогою хвильової функції виявляється окремим випадком.<sup>34</sup>

У такий спосіб на рівні широко апробованої навчальної книги — атрибута усталення квантово-фізичної парадигми — набуло ясності

<sup>32</sup> Landau L.D., Lifshitz E.M. Quantum Mechanics. Non-relativistic Theory. Third edition revised and enlarged. *Course of Theoretical Physics*. Oxford: Pergamon Press. 1981. Vol. 3. С. 38.

<sup>33</sup> У сучасних термінах зазвичай кажуть, що фон Нейман увів матрицю густини з метою розвинути квантову статистичну механіку та квантову теорію вимірювання. Натомість Ландау був вмотивований неможливістю опису складової системи за допомогою вектору стану, тобто хвильової функції (див., напр: *Density Matrix*. *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Density\\_matrix](https://en.wikipedia.org/wiki/Density_matrix)). Тож мотивація уведення цих споріднених пар була різна, а області їх визначення чи застосування не тотожними. У третьому томі курсу теоретичної фізики «Квантова механіка. Нерелятивістська теорія», написаному Ландау за участі Євгена Михайловича Ліфшица, є виноска: «Величини  $\alpha_{nm}$  формують матрицю густини у енергетичному представленні. Опис стану системи за допомогою такої матриці був уведений незалежно Л. Ландау і Ф. Блохом у 1927 році» (Landau L.D., Lifshitz E.M. Op. cit. С. 41). Впадає в око, що тут згаданий не фон Нейман, а американський фізик швейцарського походження Фелікс Блох, який увів матрицю густини (density matrix) незалежно від Ландау і фон Неймана, але тільки у 1946 році. Ця неузгодженість відтворюється в низці видань.

<sup>34</sup> Landau L.D., Lifshitz E.M. Op. cit. С. 39.



визнання якісної відмінності окремої незалежної системи, яка виступає вихідним компонентом квантового утворення, від його частини, зафіксовані належні інструменти мислення й опису цих суттєво різних реалій. Окрім того, артикульована залежність матриці густини частини складної системи від хвильової функції цієї системи загалом, а, отже, і відображувана в такий спосіб суттєва залежність існування частини від цілого, до складу якого вона входить, від інших частин. Завдяки цьому, по-перше, уявлення складної квантової системи як квазімеханічного агрегату в дусі статті Шредингера 1935 року остаточно подолане по суті; разом з ним подолана і потреба в поняттях заплутаності, заплутування — розплутування тощо. По-друге, відзначений доробок, а ширше — порівняльний аналіз результатів теоретичних студій Шредингера, фон Неймана і Ландау — приводить не тільки до розуміння незвідності складної квантової системи до агрегату, а ще і до визнання її *об'єктивної цілісності*. Тож цілісність притаманна не тільки квантовим явищам, на чому наголошував Бор, а й квантовим системам самим по собі, поза вимірюванням. З огляду на це, по-третє, повне роз'яснення мисленого ЕПР-експерименту вимагає врахування обох виявів квантової цілісності. Або, можна сказати, суттєвий результат майже дев'яностолітнього обговорення цього мисленого експерименту полягає у вичерпному визнанні цілісності квантової реальності.

## VII

Як ставитися до поширених сьогодні випадків використання поняття заплутаності чи похідних від нього в науковій і науково-популярній активності, включно з рішенням Шведської королівської академії наук про присудження Нобелівської премії з фізики, деякими університетськими підручниками або повідомленнями в засобах масової інформації?

Ми звикли думати, що інформація про об'єкт — скажімо, склянка наполовину повна — так чи інакше міститься в об'єкті. Заплутаність означає, що це неправильно. Заплутані об'єкти не мають незалежного існування з певними властивостями. Натомість вони існують лише у зв'язку з іншими об'єктами.<sup>35</sup>

Так професор фізики Даніель Кабат із Леман коледжу в Нью-Йорку нещодавно пояснив допитливим читачам «Нью-Йорк Таймс»

---

<sup>35</sup> Цит. за: *Overybye D.* Black holes may hide a mind-bending secret about our universe. *The New York Times*. October 10, 2022. URL: <https://www.nytimes.com/2022/10/10/science/black-holes-cosmology-hologram.html>.

поняття квантової заплутаності. Згадуючи хоча би наведені раніше міркування Гегеля, легко зрозуміти, що через поняття заплутаності тут схоплюються не множини незалежних реалій з іманентними їм властивостями і не самодостатні елементи класичних агрегатів, а невіддільні частини цілісних систем.

Квантова заплутаність — явище, що виникає, коли група частинок генерується, взаємодіє або співіснує у спільному просторі так, що квантовий стан кожної частинки групи не може бути описаний незалежно від стану інших, у тому числі й коли частинки відділені великою відстанню.<sup>36</sup>

А так Вікіпедія вчить, що термін «квантова заплутаність» стосується створених у різні способи «груп частинок» із наголосом на суттєвій для їх опису взаємній залежності, зокрема й тоді, коли вони «відділені великою відстанню». Та чи не маємо ми тут спробу уявлення квантових систем як квазікласичних агрегатів у дусі статті Шредінгера 1935 року, що *ad hoc* тягне за собою потребу залучити посилання на заплутаність?

Навіть наведені приклади використання поняття заплутаності чи похідних від нього дозволяють констатувати суперечливу ситуацію. З одного боку, сьогодні розглядувані поняття зазвичай схоплюють не загадкову «особливість квантової механіки, котра примушує відійти від класичного способу мислення», як у статті Шредінгера 1935 року, а вже доволі надійно з'ясовану причину цієї особливості — справді чужу класиці неподільність, цілісність складних квантових систем різного роду, представляючи, таким чином, раціональний холізм.<sup>37</sup> У цьому конструктивному сенсі посилання на квантову заплутаність слід тільки вітати. Однак, з іншого боку, не варто забувати, що фон Нейман чи Ландау і гадки не мали про заплутування — розплутування і т. п., натомість використовували в описі складних квантових систем поняття суміші або змішаного стану, статистичного оператора або матриці густини. Інакше кажучи, у понятійному апараті фізичної науки поняття заплутаності й похідні від нього не є необхідними. До того ж вони були викликані до життя ще в межах уявлення квантових систем як квазікласичних агрегатів. Така обтяжуюча спадковість дотепер

<sup>36</sup> *Quantum Entanglement. Wikipedia. The Free Encyclopedia. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_entanglement](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_entanglement).*

<sup>37</sup> Див., напр.: *Tyaglo A.V. Rational Holism — a Cultural Innovation? XIX World Congress of Philosophy, 22–28 August 1993, Moscow. Materials to “Round Table”. Philosophy of Natural Science: A Source of Culture Innovations. Kharkov: Kharkov State University. С. 10–13.*

дається взнаки через наочно-повсякденне сприйняття поняття квантової заплутаності, через принципово обмежені спроби змоделювати чи помислити цілісні системи як множини окремих об'єктів, хоч і у якось заплутаних станах. Із цим, точно кажучи, погоджуватися не слід: це актуалізує висловлене Гегелем більше двох століть тому застереження щодо залучення понять і моделей «просто механізму» за межами їх придатності.

## VIII

Основні висновки виконаної розвідки полягають у наступному.

До опису фізичної реальності поняття заплутаності й низку похідних від нього ввів Шредінгер у статті 1935 року, присвяченій мисленому ЕПР-експерименту, сформульованому в загальному контексті дискусії щодо повноти квантової механіки. За вихідною статтею Шредінгера термін «заплутаність» і відповідне поняття безпосередньо пов'язувалися з двома характерними особливостями математичного опису квантової реальності: по-перше, складовим квантової системи не можна приписати жодних хвильових функцій і, по-друге, хвильова функція складної системи не піддається факторизації.

Поняття заплутаності викликане до життя необхідністю якось пояснити суттєве відхилення опису квантового утворення від усталеного в парадигмі класичної фізики уявлення про агрегат, однак із залученням сукупності понять, пов'язаних з агрегатом: сама по собі визначена система, певний стан системи, множина систем і, відповідно, їх станів, а вже до цього додається чужорідне заплутування станів чи їх представлень. Вказана сукупність врешті-решт сходиться до моделі Універсуму за Демокритом — як безкінечної множини окремих незмінних атомів, різні сполучення яких породжують усе розмаїття світу.

Уже в опублікованій у 1936 році статті «Ймовірнісні відношення між відділеними системами» Шредінгер жодного разу не використав термін «заплутаність» і похідні від нього. Паралельно вилученню терміна «заплутаність», австрійський теоретик залучив два для нього нових — «суміш» і «статистичний оператор», прямо запозичивши їх у фон Неймана. Використовуючи ці терміни (і поняття), фон Нейман за кілька років до Шредінгера фактично передбачив ті його знахідки, які у 1935 році викликали до життя поняття заплутаності і т.ін. Окрім того, його результати підготували і відмову від нововведень австрійського теоретика: у поняттях заплутування — розплутування,

заплутаності тощо в описі складних квантових систем у фон Неймана жодної потреби не виникало. Тож у понятійному апараті фізичної науки вони не є необхідними.

Порівняльний аналіз результатів теоретичних студій Шредінгера, фон Неймана і Ландау зрештою веде, по-перше, до подолання уявлення складної квантової системи як квазімеханічного агрегату в дусі статті Шредінгера 1935 року. По-друге, переконливе обґрунтування знаходить не тільки незвідність складної квантової системи до агрегату, а й її об'єктивна цілісність. Тож цілісність притаманна не тільки квантовим явищам, на чому наголошував Бор, а й квантовим системам самим по собі, поза вимірюванням. З огляду на це, по-третє, повне роз'яснення мисленого ЕПР-експерименту вимагає врахування обох виявів квантової цілісності. Або, можна сказати, суттєвий результат майже дев'яностолітнього обговорення цього мисленого експерименту полягає у вичерпному визнанні цілісності квантової реальності.

Дослідження «зльоту і падіння» поняття квантової заплутаності, як і обґрунтування Бором поняття цілісного явища, підтверджують незвідність Універсуму до множини окремих демокрітових атомів та їх комбінацій, агрегатів, створюваних за допомогою «мотузок і сил». Окрім того, усе це конкретно збагачує картину Всесвіту як цілісності, що виглядає революційною заміною й сьогодні популярного світогляду в дусі Демокрита.

Аналіз сучасного використання поняття заплутаності чи похідних від нього виявляє суперечливу ситуацію. З одного боку, сьогодні розглядувані поняття зазвичай схоплюють не загадкову «особливість квантової механіки, котра примушує повністю відійти від класичного способу мислення», як у 1935 році, а вже доволі надійно з'ясовану причину цієї особливості — справді чужу класиці неподільність, цілісність складних квантових систем різного роду, представляючи у такий спосіб раціональний холізм. У цьому конструктивному сенсі посилення на квантову заплутаність слід тільки вітати. Однак, з іншого боку, поняття заплутаності й похідні від нього були викликані до життя ще в межах уявлення квантових систем як квазікласичних агрегатів, що дотепер дається взнаки через неглибоке наочно-повсякденне їх сприйняття, через принципово обмежені спроби змоделювати чи помислити цілісні системи як множини окремих об'єктів, хоч і у якомось заплутаних станах. Із цим, точно кажучи, погоджуватися не слід: це актуалізує висловлене Гегелем застереження щодо залучення понять і моделей «просто механізму» за межами їх придатності.

## References

1. *Bell J.S.* Bertlmann's socks and the nature of reality. *Bell on the Foundations of Quantum Mechanics*. Singapore: World Scientific. 2001. P. 126–147.
2. *Bohr N.* Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 1935. 48. P. 696–702.
3. *Bohr N.* Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Evanston: The Library of Living Philosophers. 1949. P. 200–241.
4. *Bohr N.* Quantum physics and philosophy. *Essays 1958–1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. New York, London: Interscience Publishers, 1963. P. 1–7.
5. *Density Matrix*. *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Density\\_matrix](https://en.wikipedia.org/wiki/Density_matrix).
6. *Diogenes Laërtius*. The lives and opinions of eminent Philosophers. The Project Gutenberg EBook. 2018. #57342. URL: [https://www.gutenberg.org/files/57342/57342-h/57342-h.htm#Page\\_390](https://www.gutenberg.org/files/57342/57342-h/57342-h.htm#Page_390).
7. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 1935. 47. P. 777–780.
8. *Hegel G.W.F.* The Encyclopaedia Logic, with the Zusätze: Part I of the Encyclopaedia of Philosophical Sciences with the Zusätze. Indianapolis: Hackett Publishing Company, Inc. 1991.
9. *Howard Don.* Einstein on locality and separability. *Studies in History and Philosophy of Science*. 1985. 16. P. 171–201.
10. *Jammer M.* The Conceptual Development of Quantum Mechanics. New York: McGraw-Hill, Inc. 1966.
11. *Jammer M.* The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective. New York: Wiley and Sons. 1974.
12. *Landau L.* Das Dämpfungsproblem in der Wellenmechanik. *Z. Physik*. 1927. 45. P. 430–441.
13. *Landau L.D., Lifshitz E.M.* Quantum Mechanics. Non-relativistic Theory. *Course of Theoretical Physics*. Oxford: Pergamon Press. 1981. Vol. 3.

14. *Overbye D.* Black holes may hide a mind-bending secret about our universe. *The New York Times*. October 10, 2022. URL: <https://www.nytimes.com/2022/10/10/science/black-holes-cosmology-hologram.html>.
15. *Press Release.* The Nobel Prize in Physics 2022. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/press-physicsprize2022-2.pdf>
16. *Quantum Entanglement.* *Wikipedia. The Free Encyclopedia.* 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_entanglement](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_entanglement).
17. *Schrödinger E.* Discussion of probability relations between separated systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1935. 31 (4). P. 555–563.
18. *Schrödinger E.* Probability relations between separated systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1936. 32 (3). P. 446–452.
19. *Scientific Background on the Nobel Prize in Physics.* 2022. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-physicsprize2022-3.pdf>.
20. *The Born-Einstein Letters.* Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955 with commentaries by Max Born. London : Macmillan. 1971.
21. *Tyaglo A.V.* Rational holism — a cultural innovation? *XIX World Congress of Philosophy, 22-28 August 1993. Materials to “Round Table”.* *Philosophy of Natural Science: A Source of Culture Innovations.* Kharkov : Kharkov State University. 1993. P. 10–13.
22. *Von Neumann John.* *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: New Edition.* Princeton : Princeton University Press. 2018.
23. *Wolf Prize in Physics.* *Wikipedia. The Free Encyclopedia.* 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wolf\\_Prize\\_in\\_Physics#cite\\_note-gongs\\_away-2](https://en.wikipedia.org/wiki/Wolf_Prize_in_Physics#cite_note-gongs_away-2).

## ON EXPLICATION OF CONCEPT OF QUANTUM ENTANGLEMENT

Oleksandr Tiaglo

**Abstract.** Genesis of concept of quantum entanglement is explored in context of the controversy regarding the Einstein-Podolsky-Rosen thought experiment and, more broadly, the debate about completeness of quantum mechanics. Taking into account the concepts of mixture and statistical operator, which were introduced by von Neumann and borrowed by Schrödinger, it is argued that the concept of entanglement is not necessary in quantum physics.

The in-depth comparative analysis of some Schrödinger's, von Neumann's, and Landau's theoretical works concludes that presentation of a complex quantum system as a quasi-mechanical aggregate was gradually being overcome. Its objective wholeness was being substantiated. Therefore, wholeness is inherent not only to quantum phenomena, but also to quantum systems themselves. Complete explanation of the Einstein-Podolsky-Rosen thought experiment requires consideration of both these appearances of the quantum wholeness. Therefore, an essential result of the long-term discussion of the EPR thought experiment is the exhaustive recognition of wholeness of quantum reality.

Study of «the rise and fall» of the quantum entanglement concept, as well as Bohr's substantiation of the concept of wholeness of phenomenon, confirm irreducibility of the Universe to a set of Democritus atoms and their combinations, aggregates. Moreover, all these enrich picture of the Universe as an undivided wholeness, which is revolutionary replacement for the still popular worldview in the spirit of Democritus.

Analysis of contemporary use of the concept of entanglement finds out that, on the one hand, it grasps undividedness, wholeness of complex quantum systems of various kinds and, thus, is an instrument of rational holism. However, on the other hand, the concept of entanglement was called into life within the framework of imagining quantum systems as quasi-classical aggregates. Until now, this results in a shallow everyday-descriptive understanding of it, in principally limited attempts to model or think holistic systems as a set of separate objects, albeit in any entangled states.

**Keywords:** quantum entanglement, Einstein-Podolsky-Rosen thought experiment, wholeness of quantum phenomenon, wholeness of quantum system itself, wholeness of the Universe, rational holism.

---

**Тягло Олександр Володимирович**

Кафедра соціально-гуманітарних дисциплін  
Харківський національний університет внутрішніх справ  
просп. Льва Ландау, 27  
м. Харків  
61080

**Tiaglo Oleksandr**

Department of Social Sciences and Humanities  
Kharkiv National University of Internal Affairs  
Lev Landau Ave., 27  
Kharkiv  
61080



<https://orcid.org/0000-0003-0721-1153>



[olexti@gmail.com](mailto:olexti@gmail.com)



<https://doi.org/10.31812/apm.7687>