DOI: 10.26565/2226-0994-2023-68-7
УДК 11: 530.145.1

Олександр Тягло

ДО МЕТАФІЗИКИ КВАНТОВОЇ ЗАПЛУТАНОСТІ

У статті досліджено поняття квантової заплутаності, його роль у фізиці, філософії, у оновленні світогляду. Відзначено, що до опису фізичної реальності його і низку похідних від нього увів Шредінгер у статті 1935 року в контексті обговорення мисленого експерименту Ейнштейна-Подольського-Розена, але вже у дотичній публікації 1936 року теоретик жодного разу їх не використав. З'ясовано, що з огляду на уведені фон Нейманом і запозичені Шредінгером поняття суміші й статистичного оператора поняття заплутаності не є безумовно необхідним. У певний момент розвитку теорії складних квантових систем воно і похідні від нього слугували не дуже вдалими замінниками понять суміші, ситуації суміші.

Порівняльний аналіз студій Шредінгера, фон Неймана і Ландау приводить до висновку про поступове долання уявлення складної квантової системи як квазімеханічного агрегату, натомість обґрунтування знаходить її цілісність. Тож цілісність притаманна не тільки квантовим явищам, а й квантовим системам самим по собі, об'єктивно. По суті саме намагання якось помислити цю обставину і викликало до життя поняття квантової заплутаності. Як поняття суміші, так і його замінники – поняття заплутаного стану, заплутаності і т. п. – мають не тільки наукове, а й метафізичне значення: вони доводять можливість раціонального мислення цілісності, обґрунтованість і результативність раціонального холізму. Тож метафізика квантової заплутаності у прийнятному сенсі є виявом метафізики раціонального холізму.

Повне роз'яснення мисленого ЕПР-експерименту вимагає врахування обох відзначених виявів квантової цілісності. Можна сказати, що істотний результат довготривалого обговорення ЕПР-експерименту полягає у вичерпному визнанні цілісності квантово-фізичної реальності.

Розглянуто низку узагальнень О. Александрова, І. Цехмістра і Д. Бома. Разом з виконаним дослідженням поняття квантової заплутаності чи обґрунтуванням Бором поняття неподільного квантового явища вони підтверджують незвідність фізичної реальності, Універсуму загалом до множини демокрітових атомів та їх незчисленних сполучень, агрегатів. Усе це збагачує і вдосконалює осмислення Всесвіту як дійсної цілісності, що видається новітньою заміною дотепер популярного світогляду в дусі Демокріта.

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

Вступ

Нобелівська премія з фізики за 2022 рік була присуджена Алену Аспе, Джону Ф. Клаузеру та Антону Цайлінгеру за експерименти з заплутаними фотонами, встановлення порушення нерівностей Белла і новаторство у квантовій інформатиці. У прес-релізі Шведської королівської академії наук з цього приводу вказано, що кожен з відзначених фізиків виконав новаторські експерименти із заплутаними квантовими станами (entangled quantum states), коли дві частинки, навіть будучи відділеними, поводять себе як одна одиниця (a single unit) [Press Releas, 2022]. А в розлогішому обґрунтуванні свого вибору Академія, серед іншого, вказала таке.

> Батьки-фундатори квантової механіки добре розуміли революційній 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,

© Тягло О. В., 2023.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

> 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 остаточне верифікують квантову механіку в режимі, дуже далекому од класичних законів та міркувань [Scientific Background, 2022, p. 15].

Вже побіжний аналіз дозволяє зрозуміти, що у фокусі описуваної ситуації знаходяться виведені Джоном С. Беллом нерівності й експериментальне підтвердження їх порушення, для пояснення чого посилаються на заплутаність станів мікрооб'єктів, зокрема фотонів. Також цілком зрозуміло, що хоча безпосередньо дана ситуація виникла у фізиці, але вона суттєво виходить за межі цієї науки у, якщо згадати доречний тут термін Арістотеля, метафізику[1]. Це не виглядає сюрпризом, оскільки в історії людства революційні події у фізичній науці регулярно взаємодіяли з фундаментальними змінами у філософії, у світогляді загалом[2].

Глибший аналіз породжує принципове питання: чи є ключове поняття *квантової заплутаності* й 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. Але чи доречно це просто переносити на системи, утворені з фотонів або електронів, що хоч нібито і «відділені», проте «поводять себе як одна одиниця»? А коли не все тут просто і ясно, то з чим вчені люди мають справу насправді?

Хоча ще батьки-фундатори квантової механіки усвідомили наявність у неї революційного потенціалу для фізики і філософії, його розуміння та реалізація дотепер викликають принципові суперечки. Осягнення того, що саме думка схоплює у понятті квантової заплутаності, доказова його експлікація видається однією з необхідних умов загальноприйнятного вирішення даної проблеми. Доречно очікувати, що це стимулюватиме і якісне оновлення загального світогляду. Спроба наблизитись до розв'язання цих задач представлена у моїй розвідці.

Контекст уведення поняття заплутаності: дискусія щодо мисленого експерименту Ейнштейна-Подольського-Розена

У квантовій фізиці історія поняття заплутаності і низки похідних від нього починається зі статті Ервіна Шредінгера «Обговорення ймовірнісних відношень між відділеними системами», опублікованої 28 жовтня 1935 року. [Schrödinger, 1935]. Це нововведення з'явилося під прямим впливом публікації Альберта Ейнштейна, Бориса Подольського і Натана Розена (ЕПР) «Чи можна вважати квантово-механічний опис реальності повним?» від 15 травня 1935 року [Einstein, Podolsky, Rosen, 1935]. Тому ґрунтовна експлікація поняття заплутаності та відповідного терміна передбачає аналіз контексту їх уведення, найближчим чином створюваного вказаною статтею ЕПР, а також

[1] Аспе, Клаузер і Цайлінгер ще у 2010 році були відмічені престижною премію Вольфа за «фундаментальний концептуальний і експериментальний внесок в основи квантової фізики, зокрема за серію дедалі складніших перевірок нерівностей Белла (або розширених версій цих нерівностей) з використанням заплутаних квантових станів» [Wolf Prize, 2023]. Таким чином, по-перше, значущість одержаних ними результатів апробована вже десятиліттями. По-друге, і тут привертає увагу визнання не тільки нових конкретних знань, інструментів чи методів експериментування, а й, можливо насамперед, *фундаментального концептуального* внеску в *основи* квантової фізики, що не може не бути пов'язаним з метафізикою.

[2] Вивченню цієї взаємодії присвячені, зокрема, класичні дослідження Олександра Койре і Томаса Куна (див., напр.: [Kuhn, 1970, pp. 87-88, 91]).

критичною реакцією на неї Нільса Бора, перша спроба якої була опублікована 15 жовтня того ж року [Bohr, 1935].

Ейнштейн, Шредінгер і низка інших видатних фізиків, котрі безпосередньо і 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 од моменту часу $t = 0$ до $t = T$, після чого між обома частинами вже не відбувається більше жодної взаємодії» [Einstein, Podolsky, Rosen, 1935, p. 779]. Оскільки вказані системи впливали одна на одну, вони утворили складну систему I + II, стан і хід 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 і 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 у модальності лише можливого підбили підсумок своєї аргументації ЕПР [Einstein, Podolsky, Rosen, 1935, p. 780].

Публікації ЕПР присвячений величезний корпус літератури з фізики, історії фізики, філософії фізики тощо. Тут обґрунтовано утвердилась думка, що одним з необхідних засновків міркувань ЕПР був *критерій фізичної] реальності*[1]. Саме його без вагань і затримок піддав критиці Бор: він зауважив, що у разі застосування до квантових явищ цей критерій містить суттєву неясність (an essential ambiguity) [Bohr, 1935: p. 696], [Jammer, 1974: p. 184-185].

Протягом десятиліть Бор вдосконалював свою критику як по суті, так і термінологічно. Принципові моменти цього вдосконалення викладені у статті 1958 року «Квантова фізика і філософія. Каузальність і доповняльність».

> 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 позбавлений неясності звіт (the unambiguous account) щодо справжнього квантового явища мусить, в принципі, включати усі відповідні характеристики експериментальної установки [Bohr, 1963, pp. 2, 4].

Аналіз позиції Бора дозволяє зрозуміти наступне. Елементами квантово-фізичної реальності, яким можна приписати достовірні значення фізичних величин, наприклад просторових координат або імпульсу, виявляються не окремі самодостатні об'єкти, а відповідні складові неподільних, цілісних – з урахуванням використовуваної у кожному випадку особливої експериментальної установки – *явищ*. Перехід од вимірювання однієї

[1] ЕПР тримався 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» [Einstein, Podolsky, Rosen, 1935, p. 777].

фізичної величини до вимірювання іншої вимагає, в загальному випадку, істотної зміни установки і породжує інше, суттєво відмінне явище. Тому «позбавлені неясності» значення фізичних величин належатимуть не одному і тому самому самодостатньому 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. Тому прийнятий ЕПР критерій реальності має обмежену область дії: він справедливий у класичній фізиці, але не у квантовій. А 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 *неподільного*, *цілісного явища*. Це нововведення претендувало на суттєве доповнення картини фізичної реальності, світогляду загалом. Разом з тим, було б неприпустимим перебільшенням стверджувати, що його сприйняли одразу й усі. Так, вже у 1954 році Вольфганг Паулі у 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» [The Born-Einstein Letters, 1971, p. 219]. Вочевидь, один з батьків-фундаторів квантової механіки до кінця свого життя сприймав поняття цілісного явища і пов'язану з ним зміну уявлень про квантову реальність лише як «утруднення», яке підлягає усуненню подальшим поступом фізики. Так чи інакше незмінний класичний реалізм Ейнштейна впливав на теоретичні розвідки Шредінгера. А з часом його перевірка виявилась одним зі стимулів виведення нерівностей Белла [Bell, 2001: pp. 130-133, 143-144].

Уведення поняття заплутаності: Шредінгер, 1935 рік

Шредінгер не належав до кола однодумців Бора, натомість влітку 1935 року він листувався з Ейнштейном з приводу статті ЕПР[1]. 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 *єдиною*, а радше *характерною* особливістю квантової механіки, яка примушує повністю відійти від класичного способу мислення. Через вказану взаємодію два представлення (або ψ-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*) [Schrödinger, 1935, p. 555].

Наведений фрагмент демонструє, як Шредінгер уявив послідовні ситуації з двома вихідними системами. Спочатку I і II існують окремо і незалежно одна від одної, їх стани відомі й описуються хвильовими функціями ψ_1 та ψ_2. Потім вони вступають у тимчасову

[1] На характер цього листування і позицію 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, 1985, p. 175]).

силову взаємодію і утворюють складну систему I + II. Внаслідок цього їх ψ-функції не просто змінюються або стають невідомими, а втрачається сама можливість опису через хвильові функції – навіть після того, як нібито відбувся саморозпад складної системи I + II на ті самі I та II й вони знову відділилися. Таке аж ніяк не відповідає класичним уявленням, тому Шредінгер цілком виправдано визнав ситуацію характерною саме для квантової механіки, назвавши її заплутуванням[1].

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. В такому зв'язку Шредінгер, прямо 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 (a system to be steered or piloted) у стан того чи іншого типу за волінням експериментатора всупереч тому, що доступу до неї він не має [Schrödinger, 1935, pp. 555-556].

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 Ψ не є добутком функції x та функції y (What constitutes the entanglement is that Ψ is not a product of a function of x and a function of y) [Schrödinger, 1935: p. 556].

В 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 вихідних компонентів з функціями $\psi_1(x)$ і $\psi_2(y)$, що має вигляд $\Psi_0(x,y) = \psi_1(x) \times \psi_2(y)$.

Можна бачити, що за статтею Шредінгера 1935 року термін «заплутаність» і відповідне поняття безпосередньо пов'язуються 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.

Опис складних квантових систем примусив не тільки повністю відійти від класичного способу мислення, а й суттєво поповнити понятійний апарат, відповідну термінологію. Так для теоретичного схоплення відзначених особливостей квантової реальності були залучені звичні слова повсякденних міркувань і спілкування – «заплутування» і «розплутування», «заплутаність», «заплутаний стан», але з повною зміною їх значення і 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

[1] 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 [Schrödinger, 1935, p. 555].

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 у такому відношенні й будучи залежними, об'єкти залишаються однаково незалежними (in this relation and dependence the objects remain equally independent) [Hegel, 1991, p. 274]. Таке уявлення про механізм, або агрегат, становило, вочевидь, суттєвий елемент парадигми фізики Ньютона, класичні приклади його утілення – механічний годинник чи Сонячна система. Та, якщо зануритись в історію філософсько-наукової думки глибше, дане уявлення агрегату виявляється одним з модерних продуктів давнього атомістичного світогляду. Дійсно, ще Демокріт 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 [Diogenes Laërtius, 2018, p. 395].

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

Вже з другої половини XVIII століття фізична наука зіштовхнулась з 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 [Hegel, 1991, p. 275].

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[1].

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 пояснив, що за наведеним ще

[1] За свідченням Ейнштейна, фізики XIX століття вбачали у класичній механіці непорушну підставу для усієї фізики і навіть усього природознавства; вони невтомно намагалися ґрунтувати на механіці і максвелівську теорію електромагнетизму, яка повільно торувала собі шлях. До цього додам, що вже у другому десятилітті XX століття у становленні квантової механіки важливу роль відіграла по суті класична планетарна модель атома Ернеста Резерфорда. Дотепер фізики не облишили пошуків остаточних *елементарних частинок*, якихось новітніх аналогів демокрітових атомів, у різні способи структуровані множини яких дають усе в світі, складають Універсум.

Арістотелем прикладом, рука, коли її відтяти од людського тіла, залишається рукою лише за назвою, а не дійсно [Hegel, 1991, p. 291].

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 даної 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 од 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 чужорідну заплутаність, заплутування станів і їх представлень. Таке пояснення не є послідовним[1]. Важко позбутися відчуття потреби у дійсно послідовному, внутрішньо узгодженому уявленні чи мисленні складної квантової системи.

Відмова від поняття заплутаності: Шредінгер, 1936 рік

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 даній публікації жодного разу не були використані. Як таке могло статися?

Паралельно вилученню терміну «заплутаність», австрійський теоретик залучив два для нього нових – «суміш» і «статистичний оператор»[2].

> 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 [Schrödinger, 1936, p. 452].

Легко бачити, по-перше, що в статті 1936 року ключовий пункт мисленого ЕПР-експерименту – «бентежний факт» миттєвого впливу довільного вимірювання частини

[1] 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 од вільних частинок, і вони за законами класичної фізики по певним орбітам рухаються навколо ядра, але – тут додається чужорідна класиці умова – під час такого руху електрони не випромінюють, їх енергія залишається незмінною [Jammer, 1966, pp. 75-77, 86].

[2] 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, 1936, p. 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 [Landau, 1927], [Jammer, 1966, p. 368].

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 од вихідних її компонентів-частинок або від складових класичного агрегату, які зберігають ідентичність частинок; підтвердив квантово-механічні засоби мислення і опису цих частин. Попередня спроба зведення квантової системи до, знову згадуючи Гегеля, агрегату тут почасти долається[1]. По-третє, перетворення вихідних компонентів на складові частини утворюваної з них системи, для відображення чого у статті 1935 року Шредінгер увів поняття заплутування ψ-функцій, за публікацією вже наступного року слід розуміти як перехід зі станів з певними ψ-функціями у «ситуації суміші», характеризовані певними 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. Цим головно і пояснюється їх відсутність у публікації самого їх автора вже у 1936 році. Можна сказати і так: у певний момент розвитку теорії складних квантових систем вони слугували не дуже вдалими замінниками понять суміші, ситуації суміші.

Підґрунтя відмови від поняття заплутаності: фон Нейман і Ландау

Можливо, висновок щодо непотрібності поняття заплутаності та похідних від нього у сукупності засобів мислення квантово-фізичної реальності занадто поспішний? Щось суттєве у мисленому ЕПР-експерименті, у складних квантових системах загалом, що схоплюється поняттям заплутаності, поняття суміші схопити не в змозі? Аби відповісти на це принципове 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 φ існує тільки певна статистика, статистичний характер може загостритися ще й через те, наголосив він, що невідомо, який саме стан має місце насправді – наприклад, коли у описі слід враховувати множину можливих станів φ_1, φ_2… з ймовірностями w_1, w_2… відповідно. Статистичний оператор цілком характеризує статистичні властивості цієї особливої множини, або суміші станів [Von Neumann, 2018, pp. 193-194, 293-295]. Не заглиблюючись у ретельні фізико-математичні студії фон Неймана, обмежусь констатацією того, що уведене в такому зв'язку поняття суміші та інструмент її опису – статистичний оператор – теоретик використав і у дослідженні складних систем.

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

> Коли система I знаходиться у стані φ(q), а система II – у стані ς(r), то I + II знаходитиметься у стані Φ(q,r) = φ(q)ς(r). Натомість, коли I + II знаходиться у стані Φ(q,r), який не має форми добутку φ(q)ς(r), то I і II будуть сумішами, а Φ

[1] 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 інші 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 у єдину систему. Одна відділена, або відокремлена, частинка – вже не те, що є у системі. У єдиній системи вплив на одну її складову природно діє й на іншу.

> встановлюватиме взаємно однозначну відповідність визначених у I і II величин [Von Neumann, 2018, pp. 283-284].

Тут теоретик відзначив існування двох різних квантових реалій: окремої незалежної системи, стан якої описується тією чи іншою хвильовою функцією, і чогось якісно іншого – суміші, якій хвильова функція аж ніяк не може бути приписана. В даному випадку суміш, характеризована певним статистичним оператором, виявляється частиною складної системи. А хвильова функція Ф(q,r) цієї системи в загальному випадку не буде добутком співмножників, залежних тільки від q або r, тобто не факторизуватиметься. Тож фон Нейман за кілька років до Шредінгера фактично передбачив ті його знахідки, які у 1935 році викликали до життя поняття заплутаності і т. п. Більше того, його результати підготували 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 у 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 у парадоксально артикульованому перевідкритті вже в основному знайдених результатів, у стимулюванні процесу осмислення їх принципових засад та у привернені до загадкових властивостей квантової реальності уваги 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 XX століття дозволяє глибше осягнути особливості складних квантових систем, їх послідовного опису.

Вже у 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 [Landau, 1927, s. 430].

Тож Ландау одразу і свідомо зафіксував суттєву відмінність окремої незалежної системи од 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 даної обставини Ландау увів певні «величини α_{nm}», визначивши їх лише математично, не запропонувавши якогось особливого терміна. Але цього достатньо, аби складну квантову систему не ототожнювати з квазікласичним агрегатом.

Разом з тим 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. Все це нагадує термінологію статті Шредінгера 1936 року чи навіть роз'яснення Гегеля щодо «просто механізму», або агрегату.

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

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

Кілька десятиліть потому у курсі теоретичної фізики, створеному Ландау і його учнями, поряд з 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, котра є частиною якоїсь більшої замкнутої системи, вже досить ясно вказали Ландау і Ліфшиц [Landau, Lifshitz, 1981, p. 38]. Стан цієї частини не має хвильової функції, але може бути описаний матрицею густини. Його називають *змішаним* – на відміну від *чистого стану* з тією чи іншою хвильовою функцією. Можна зрозуміти, що поняття змішаного стану і матриці густини споріднені членам пари суміш – статистичний оператор, яку використовували фон Нейман та Шредінгер[1].

> 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… [Landau, Lifshitz, 1981, p. 39].

У такий спосіб на рівні широко апробованої навчальної книги – атрибута усталення квантово-фізичної парадигми – набуло ясності визнання якісної відмінності окремої незалежної системи, яка виступає вихідним компонентом квантового утворення, від його частини, зафіксовані належні інструменти мислення і опису цих суттєво різних реалій. Більше того, артикульована залежність матриці густини частини складної системи од стану цієї системи в цілому, а, отже, і відображувана у 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 Шредінгера 1935 року остаточно подолане. Разом з ним по суті подолана і неодмінна потреба у поняттях заплутаності, заплутування – розплутування тощо.

По-друге, відзначений доробок, а ширше – порівняльний аналіз результатів теоретичних студій Шредінгера, 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. У цьому випадку вона схоплюється, серед іншого, через поняття суміші, або змішаного стану. Поняття заплутаності, заплутаного стану як наочні, хоча і не необхідні замінники поняття суміші і т. п., зрештою теж слід розглядати як засоби мислення квантової цілісності[2].

[1] В сучасних термінах зазвичай кажуть, що фон Нейман увів матрицю густини з метою розвинути квантову статистичну механіку і квантову теорію вимірювання. Натомість Ландау був вмотивований неможливістю опису складової системи за допомогою вектору стану, тобто хвильової функції [Density matrix, 2023]. 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 Ліфшиця, є виноска: «Величини α_{nm} складають матрицю густини у енергетичному представленні. Опис стану системи за допомогою такої матриці був уведений незалежно Л. Ландау і Ф. Блохом у 1927 році» [Landau, Lifshitz, 1981, p. 41]. Впадає в око, що тут згаданий не фон Нейман, а американський фізик швейцарського походження Фелікс Блох, який справді незалежно від Ландау і фон Неймана увів матрицю густини (density matrix), але тільки у 1946 році. Ця неузгодженість відтворюється у низці видань.

[2] Поняття квантової заплутаності і похідні від нього використовуються у науковій і науково-популярної активності дотепер. Наприклад, ось як його нещодавно роз'яснив допитливим читачам «Нью-Йорк Таймс» професор фізики Даніель Кабат із Леман коледжу в Нью-Йорку. Ми звикли думати, констатував він, 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, наголосив цей професор (цит за [Overbye, 2022]).

Обидва ці сукупності понять мають ще й ширше – метафізичне – значення: вони доводять можливість раціонального мислення цілісності, обґрунтованість і результативність *раціонального холізму* (див. також [Тягло, 2019]). Тож метафізика квантової заплутаності у прийнятному сенсі є виявом метафізики раціонального холізму.

По-третє, повне роз'яснення мисленого ЕПР-експерименту вимагає врахування обох з'ясованих виявів квантової цілісності. Або, можна сказати, істотний результат майже дев'яностолітнього обговорення цього мисленого експерименту полягає у вичерпному визнанні цілісності квантово-фізичної реальності.

Цілісність Універсуму: Александров, Цехмістро, Бом

Чи існують подальші узагальнення висновку про цілісність квантової реальності?

Академік Александров близько п'ятдесяти років тому стверджував, що у атомі гелію немає двох електронів, а є «двоелектрон», який утворюється з двох електронів і з якого один або два електрони можуть бути виділені, але який не складається з двох електронів. Пояснення властивостей атомів, молекул й інших систем, які містять у собі багато електронів, ґрунтується на такому їх зв'язку, що вони зливаються у певну єдність, де немає окремих електронів. Вони просто не існують як індивідуальні, хоча б і тісно взаємодіючі об'єкти, наголошував вчений.

Тож складові частини атома і подібних до нього систем не ідентичні вихідним компонентам, зокрема вільним електронам. Вони не є не тільки незалежними, а й віддільними, тобто, точно кажучи, утворюють не множину окремих взаємозалежних об'єктів, а особливу квантову єдність. Даний висновок стосується систем, створених не тільки із електронів, а й із фотонів, будь-яких мікрочастинок. Навіть будучи розподіленими у просторі-часі, вони не втрачають свою єдність, являють собою неподільну квантову цілісність, одне ціле. З огляду на це висловлювання на кшталт «*відділені частинки* поводять себе як одне ціле» насамперед виглядають не бентежними, а не зовсім коректними.

«Існування світу не як множини, а як у кінцевому підсумку неподільної *цілісності*, є найбільш значущим, найбільш реальним і достовірним об'єктивним фактом»: цю тезу з другої половини 60-х років минулого століття різнобічно обґрунтовував знаний український філософ науки Іван Захарович Цехмістро [Цехмистро, 2019, с. 29]. У такому зв'язку він наголошував необхідність обмеження застосовності найзагальнішого поняття множини так само найзагальнішим і доповняльним по відношенню до нього поняттям єдиного як *не-множини*. А ширше, ефективне осягнення цілісного Універсуму має спиратися на релевантне тій чи іншій проблемній ситуації застосування усієї сукупності філософських та наукових понятійних засобів, двоєдиним осердям якої виступає ця фундаментальна пара (див. також [Тягло, 2019, сс. 47-48, 51-52]).

Американський теоретик Девід Бом відомий, серед іншого, тим, що на початку 60-х років минулого століття вдало модифікував мислений ЕПР-експеримент і тим посприяв виводу нерівностей Белла. У виданій вже у 1980 році книзі «Цілісність і прихований порядок» він показав, що «сама наука вимагає нового не-фрагментарного світогляду». Традиційний підхід, ґрунтований на розкладанні світу на незалежно існуючі складові, у сучасній фізиці працює не дуже успішно. Як у теорії відносності, так і у квантовій теорії ті поняття, що схоплюють неподільну цілісність Універсуму (undivided wholeness of the universe), забезпечили б набагато впорядкованіший шлях осмислення природи реальності [Bohm, 2002, p. xiii].

Універсум не є суцільним і позбавленим будь-якого руху *єдиним* – завдяки чисельним критичним студіям вчення Елеатів дане твердження давно не викликає навіть теоретичного сумніву. Разом з тим, Універсум не зводиться до *множини* окремих

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

демокрітових атомів та їх незчисленних комбінацій, агрегатів, створюваних за допомогою «мотузок і сил». Перевірка даного твердження триває дотепер: експерименти Аспе, Клаузера і Цайлінгера лежать саме у цьому річищі. В такому зв'язку виконане дослідження «зльоту і падіння» поняття квантової заплутаності, як і обґрунтування Бором поняття цілісного явища чи досягнуті Александровим, Цехмістром і Бомом узагальнення, підтверджують його істинність. Більше того, усе це конкретно збагачує картину Всесвіту як дійсної цілісності, що виглядає новітньою революційною заміною й сьогодні популярного світогляду у дусі Демокрита.

Основні висновки

Експлікація поняття квантової заплутаності видається однією з необхідних умов розкриття і реалізації революційного потенціалу квантової механіки для фізики та філософії, для якісного осучаснення світогляду.

До опису фізичної реальності поняття заплутаності і низку похідних від нього увів Шредінгер у статті 1935 року, присвяченій мисленому ЕПР-експерименту. За цією статтею термін «заплутаність» і відповідне поняття безпосередньо пов'язувалося 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 од 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 чужорідна заплутаність, заплутування станів чи їх представлень. Вказана сукупність врешті-решт сходить до моделі Універсуму за Демокритом – як безкінечної множини окремих незмінних атомів, різні сполучення яких породжують усе розмаїття світу.

Вже 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 дані терміни (і поняття), фон Неймана за кілька років до Шредінгера фактично передбачив ті його знахідки, які у 1935 році викликали до життя поняття заплутаності і т. п. Більше того, його результати підготували і відмову від нововведень австрійського теоретика: у поняттях заплутування – розплутування, заплутаності тощо в мисленні складних квантових систем у фон Неймана жодної потреби не виникало. Тож у понятійному апараті фізичної науки вони не є безумовно 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. У цьому випадку вона схоплюється, серед іншого, через поняття суміші, або змішаного стану. Поняття заплутаності, заплутаного стану як наочні, хоча і не необхідні замінники поняття суміші і т. п., зрештою теж слід розглядати як наукові засоби мислення квантової цілісності. Обидва ці сукупності понять мають ще й ширше – метафізичне – значення: вони доводять можливість раціонального мислення цілісності, обґрунтованість і результативність раціонального холізму. Тож метафізика квантової заплутаності у прийнятному сенсі є виявом метафізики раціонального холізму.

З огляду на це, по-третє, повне роз'яснення мисленого ЕПР-експерименту вимагає врахування обох виявів квантової цілісності. Можна сказати, що істотний результат майже дев'яностолітнього обговорення цього мисленого експерименту полягає у вичерпному визнанні цілісності квантової реальності.

Виконане дослідження поняття квантової заплутаності, як і обґрунтування Бором поняття цілісного явища чи досягнуті Александровим, Цехмістром і Бомом узагальнення, підтверджують незвідність Універсуму до множини окремих демокрітових атомів та їх комбінацій, агрегатів, створюваних за допомогою «мотузок і сил». Більше того, усе це конкретно збагачує картину Всесвіту як дійсної цілісності, що видається новітньою заміною й сьогодні популярного світогляду у дусі Демокрита.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Тягло А. О рациональном холизме. *Від філософії науки до постмодерних студій культури: кафедра теорії культури і філософії науки в новому тисячоліттi*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. С. 42-54.

Цехмистро И. Современный холизм. *Від філософії науки до постмодерних студій культури: кафедра теорії культури і філософії науки в новому тисячоліттi*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. С. 20-41.

Bell, J. S. *John S. Bell on the Foundations of Quantum Mechanics*. Singapore e. a.: World Scientific, 2001. P. 126-147.

Bohm, D. *Wholeness and the Implicate Order*. London and New York: Routledge, 2002. 284 p.

Bohr, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev*. 1935. Vol. 48. P. 696–702. https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696

Bohr, N. *Essays 1958 – 1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. New York, London: Interscience Publishers, 1963. 101 p.

Density Matrix. *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. 2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Density_matrix

Diogenes Laërtius. *The Lives and Opinions of Eminent Philosophers* / translated by C. D. Yonge. The Project Gutenberg EBook #57342. 2018. 488 p. https://www.gutenberg.org/files/57342/57342-h/57342-h.htm#Page_390

Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.* 1935. Vol. 47. P. 777-780. https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777

Jammer, Max. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York e. a. McGraw-Hill, Inc., 1966. 399 p.

Jammer, Max. *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York: Wiley and Sons, 1974. 536 p.

Hegel, G. W. F. The Encyclopaedia Logic, with the Zusatze: Part I of the Encyclopaedia of Philosophical Sciences with the Zusatze / a new translation with introduction and notes by T. F. Geraets, W. A. Suchting, H. S. Harris. Indianapolis: Hackett Publishing Company, Inc., 1991. 432 p.

Howard, Don. Einstein on Locality and Separability. *Studies in History and Philosophy of Science*. 1985. Vol. 16. P. 171-201.

Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolution*. Second edition, enlarged. Chicago: The University of Chicago Press, 1970. 210 p.

Landau, L. Das Dämpfungsproblem in der Wellenmechanik. *Z. Physik*. 1927. Vol. 45. S. 430–441. https://doi.org/10.1007/BF01343064

Landau, L. D., Lifshitz, E.M. *Quantum Mechanics. Non-relativistic Theory*. Third edition, revised and enlarged. Course of Theoretical Physics. Vol. 3. Oxford e. a.: Pergamon Press, 1981. 677 p.

Overbye, Dennis. Black Holes May Hide a Mind-Bending Secret about Our Universe. *The New York Times*. October 10, 2022. https://www.nytimes.com/2022/10/10/science/black-holes-cosmology-hologram.html

Press Release. The Nobel Prize in Physics 2022. 2022. https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/press-physicsprize2022-2.pdf

Schrödinger E. Discussion of Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1935. Vol. 31 (4). P. 555–563. https://doi.org/10.1017/S0305004100013554

Schrödinger E. Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1936. Vol. 32 (3). P. 446–452. https://doi.org/10.1017/S0305004100019137

Scientific Background on the Nobel Prize in Physics. 2022. https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-physicsprize2022-3.pdf

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. 240 p.

Von Neumann, John. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: New Edition* / translated from the German by Robert T. Beyer. Princeton e.a.: Princeton University Press, 2018. 328 p.

Wolf Prize in Physics. *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. 2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Wolf_Prize_in_Physics#cite_note-gongs_away-2

Тягло Олександр Володимирович
доктор філософських наук, професор,
професор кафедри соціально-гуманітарних дисциплін
Харківський національний університет внутрішніх справ
61080, Харків, проспект Льва Ландау, 27
E-mail: olexti@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0721-1153

Стаття надійшла до редакції: 25.02.2023 Схвалено до друку: 16.04.2023

ON THE METAPHYSICS OF QUANTUM ENTANGLEMENT

Tiaglo, Oleksandr V.
Doctor of Philosophy, Professor,
Professor of the Department of Social Sciences and Humanities
Kharkiv National University of Internal Affairs
27 Lev Landau Avenue, Kharkiv, 61080
E-mail: olexti@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0721-1153

ABSTRACT

Concept of quantum entanglement, its role in physics, philosophy, and in updating general worldview are studied in this article. It is pointed out that Schrodinger introduced this concept and some derivatives from it into description of physical reality in the 1935 article in the context of discussion around the Einstein-Podolsky-Rosen thought experiment, but in the related 1936 publication he did not use them. Taking into account the concepts of a mixture and statistical operator, which were introduced by von Neumann and borrowed by Schrödinger, it is shown that the concept of entanglement is not necessary in quantum mechanics unconditionally. At a certain moment of development of the complex quantum systems theory, this concept and its derivatives served as not very successful substitutes for the concepts of a mixture, situation of a mixture.

Comparative analysis of some Schrödinger's, von Neumann's, and Landau's theoretical works concludes that imagination of a complex quantum system as a quasi-mechanical aggregate was gradually being overcome; its objective wholeness was being substantiated instead. Therefore, wholeness is inherent not only to quantum phenomena, but also to quantum systems by itself, objectively. By the essence, just the attempt to think this circumstance had brought into life the concept of quantum entanglement. The concept of a mixture and its substitutes – the concepts of entangled state, entanglement, etc. – have not only the scientific but some metaphysical meaning as well: they prove the possibility of rational thinking of wholeness, the reasonableness and effectiveness of rational holism. Therefore, the metaphysics of quantum entanglement in its correct understanding is a manifestation of the rational holism metaphysics.

Complete explanation of the Einstein-Podolsky-Rosen thought experiment requires consideration of both these appearances of the quantum wholeness. One can say the essential result of long-term discussion of the EPR experiment is the exhaustive recognition of the quantum reality wholeness.

A row of generalizations achieved by A. Alexandrov, I. Tsekhmistro, and D.Bohm are considered. Together with the completed study of the concept of quantum entanglement or Bohr's substantiation of the concept of undivided quantum phenomenon, they support irreducibility of physical reality, the Universe in general to any set of Democritian atoms and their countless combinations, aggregates. All this enriches and improves the understanding of the Universe as a real wholeness. Perhaps, this understanding will be newest substitution for the hitherto popular worldview in the spirit of Democritus.

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

REFERENCES

Bell, J. S. (2001). *John S. Bell on the Foundations of Quantum Mechanics*. Singapore e. a.: World Scientific, 126-147.

Bohm, D. (2002). *Wholeness and the Implicate Order*. London and New York: Routledge.

Bohr, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.*, 48, 696–702. https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696

Bohr, N. (1963). *Essays 1958 – 1962 on Atomic Physics and Human Knowledge*. New York, London: Interscience Publishers.

Density Matrix. (2023). *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Density_matrix

Diogenes Laërtius. (2018). *The Lives and Opinions of Eminent Philosophers* / translated by C. D. Yonge. The Project Gutenberg EBook #57342. https://www.gutenberg.org/files/57342/57342-h/57342-h.htm#Page_390

Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.*, 47, 777-780. https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777

Jammer, Max. (1966). *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York e. a. McGraw-Hill, Inc.

Jammer, Max. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York: Wiley and Sons.

Hegel, G. W. F. (1991). The *Encyclopaedia Logic, with the Zusatze: Part I of the Encyclopaedia of Philosophical Sciences with the Zusatze* / a new translation with introduction and notes by T. F. Geraets, W. A. Suchting, H. S. Harris. Indianapolis: Hackett Publishing Company, Inc.

Howard, Don. (1985). Einstein on Locality and Separability. *Studies in History and Philosophy of Science*, 16, 171-201.

Kuhn, Thomas S. (1970). *The Structure of Scientific Revolution*. Second edition, enlarged. Chicago: The University of Chicago Press.

Landau, L. (1927). Das Dämpfungsproblem in der Wellenmechanik. *Z. Physik,* 45, 430–441. https://doi.org/10.1007/BF01343064

Landau, L. D., Lifshitz, E.M. (1981). *Quantum Mechanics. Non-relativistic Theory*. Third edition revised and enlarged. Course of Theoretical Physics. Vol. 3. Oxford e. a.: Pergamon Press.

Overbye, Dennis. (2022). Black Holes May Hide a Mind-Bending Secret about Our Universe. *The New York Times*. October 10. https://www.nytimes.com/2022/10/10/science/black-holes-cosmology-hologram.html

Press Release. (2022). The Nobel Prize in Physics, 4 October. https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/press-physicsprize2022-2.pdf

Schrödinger E. (1935). Discussion of Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31 (4), 555–563. https://doi.org/10.1017/S0305004100013554

Schrödinger E. (1936). Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 32 (3), 446–452. https://doi.org/10.1017/S0305004100019137

Scientific Background on the Nobel Prize in Physics. (2022). https://www.nobelprize.org/uploads/2022/10/advanced-physicsprize2022-3.pdf

The Born-Einstein Letters. (1971). Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955 with Commentaries by Max Born. London: Macmillan.

Tiaglo, A. (2019). About Rational Holism. *From the Philosophy of Science to Postmodern Studies of Culture: the Department of Cultural Theory and Philosophy of Science in the New Millennium*. Kharkiv: V. N. Karazin KhNU, 42-54. (In Russian).

Tsekhmistro, I. (2019). The Contemporary Holism. *From the Philosophy of Science to Postmodern Studies of Culture: the Department of Cultural Theory and Philosophy of Science in the New Millennium*. Kharkiv: V. N. Karazin KhNU, 20-41. (In Russian).

Von Neumann, John. (2018). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: New Edition* / translated from the German by Robert T. Beyer. Princeton e.a.: Princeton University Press.

Wolf Prize in Physics. (2023). *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Wolf_Prize_in_Physics#cite_note-gongs_away-2

Article arrived: 25.02.2023 Accepted: 16.04.2023