



#### ЯЦЕНКО

**Леонід Петрович** — академік НАН України, завідувач відділу когерентної та квантової оптики Інституту фізики НАН України

## БОГ ВСЕ Ж ГРАЄ В КОСТІ! ДОВЕДЕНО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО

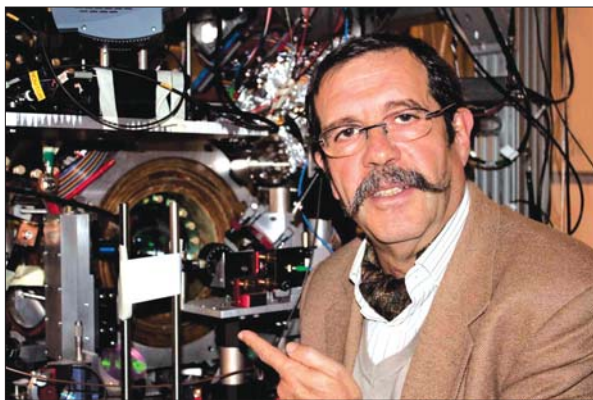
### Нобелівська премія з фізики 2022 року

Цьогорічними лауреатами Нобелівської премії з фізики стали три дослідники: француз Ален Аспе (Alain Aspect), американець Джон Клаузер (John F. Clauser) і австрієць Антон Цайлінгер (Anton Zeilinger) «за експерименти із заплутаними фотонами, встановлення порушення нерівностей Белла та новаторство у квантовій інформатиці». Як зазначено у пресрелізі Нобелівського комітету, ці вчені «провели новаторські експерименти з використанням заплутаних квантових станів, коли дві частинки поводяться, як єдине ціле, навіть якщо вони розділені», і ці результати відкрили нову еру квантових технологій. Дивовижні ефекти квантової механіки вже починають застосовувати в реальних розробках, таких як квантові комп'ютери чи безпечні мережі зв'язку з квантовим шифруванням.

**Ключові слова:** Нобелівська премія з фізики 2022 року, Ален Аспе, Джон Клаузер, Антон Цайлінгер, заплутані фотони, порушення нерівностей Белла, квантова інформатика.

Цьогорічні лауреати Нобелівської премії з фізики — Ален Аспе, Джон Клаузер і Антон Цайлінгер — добре відомі науковій спільноті. Ці три вчені вже давно чекали офіційного визнання. Основоположні роботи Джона Клаузера [1, 2], якому днями виповнилося 80 років, були виконані наприкінці 60-х — на початку 70-х років минулого століття, коли Джону не було ще й тридцяти. Ален Аспе (йому зараз 75 років) виконав свої експерименти [3–5] на початку 1980-х, коли згідно з українським законодавством був ще «молодим вченим», проте саму ідею їх проведення він обґрунтував у статті, опублікованій у Phys. Rev. D [6] в 1976 р., у віці 29 років. І лише 77-річний Антон Цайлінгер, нобелівські експериментальні роботи [7–13] якого було виконано в основному в 1990-ті роки, чекав на їх визнання Нобелівським комітетом менш ніж 30 років.

Те, що заслужене визнання все ж настало, зумовлено, мабуть, тим, що в останні роки практичне використання квантових ефектів, передусім ефектів квантової заплутаності, набуло бурхливого розвитку. Одним із прикладів цього є Quantum Technology Flagship [14] — європейський дослідницький про-



Алан Аспе в лабораторії

ект з розвитку квантових технологій, на фінансування якого Європейська комісія планує виділити 1 млрд євро протягом 10 років. Проект розпочався в жовтні 2018 р. і спрямований на розроблення і впровадження новітніх технологій у галузі квантових обчислень, квантового моделювання, квантових комунікацій, квантової метрології та сенсорики.

Отже, познайомимося ближче з лауреатами Нобелівської премії з фізики 2022 р.

**Ален Аспе (Alain Aspect)** народився 15 червня 1947 р. у м. Ажен в департаменті Лот і Гаронна на півдні Франції в родині вчителів. Як жартує сам Ален Аспе: «Я дуже добре ілюструю французький стереотип про молодого провінціала, який залишає своє маленьке село в Гасконі, щоб поїхати до столиці» [15]. Після середньої школи в Ажені та підготовчого класу в Бордо він вступив до Вищої нормальної школи (École normale supérieure — ENS) у Кашані та Університету Орсе, де у 1971 р. здобув диплом магістра за роботу «Голографічна фур'є-спектроскопія».

Після трирічної перерви на національну службу вчителем фізики в Камеруні у 1974 р. повернувся як викладач до ENS. Тут він уперше прочитав статтю Джона Белла, в якій йшлося про те, що суперечку між Альбертом Ейнштейном і Нільсом Бором щодо інтерпретації загадкової властивості квантового світу — квантової заплутаності можна вирішити за допомогою експериментів. «Прочитати це було як кохання з першого погляду, я знав, що

саме над цією темою хочу працювати», — зізнається дослідник [15].

Паралельно з викладанням в ENS Ален Аспе працював за цією тематикою в Університеті Орсе, де у 1983 р. успішно захистив дисертацію на здобуття ступеня доктора філософії під назвою «Три експериментальні тести нерівностей Белла із заплутаними фотонами». Майже через 40 років цю роботу було відзначено Нобелівською премією!

Пізніше (з 1985 по 1992 р.) Ален Аспе досліджував лазерне охолодження нейтральних атомів (ці роботи він проводив під керівництвом професора Клода Коен-Таннуджі, який у 1997 р. отримав за це Нобелівську премію), конденсати Бозе—Ейнштейна, ультрахолодні атоми, займався атомною оптикою. На сьогодні Ален Аспе є професором Вищої інженерної школи Institut d'Optique Graduate School при Університеті Париж-Сакле.

**Джон Клаузер (John F. Clauser)** народився 1 грудня 1942 р. в Пасадені (Каліфорнія) в сім'ї професора авіонавтики. Ступінь бакалавра з фізики здобув у Каліфорнійському технологічному інституті в 1964 р. Цікаво, що квантова механіка, яка надалі стане справою його життя, давалася йому досить важко — цей курс довелося повторювати тричі. Потім він отримав ступінь магістра в Колумбійському університеті у 1966 р., а згодом, у 1969 р., захистив дисертаційну роботу доктора філософії з фізики «Вимірювання космічного мікрохвильового фону за допомогою оптичних спостережень міжзоряних молекул», яку виконав під керівництвом П. Тадеуса.

У 1969 р. Джон Клаузер, який ще був аспірантом Колумбійського університету, разом із Майклом Горном, Абнером Шімоні та Річардом Холтом перетворили математичну теорему Белла (1964) на дуже конкретне експериментальне передбачення за допомогою того, що зараз називають нерівністю Клаузера—Горна—Шімоні—Холта (CHSH) (за даними Google Scholar, їхню статтю процитовано понад 8 700 разів).

У 1972 р., коли Джон Клаузер був постдоком у Каліфорнійському університеті в Берклі та

Національній лабораторії Лоуренса в Берклі, він разом з аспірантом Стюартом Фрідманом першим експериментально довів, що дві віддалені (приблизно на 3 м одна від одної) частинки можуть бути переплутані. Потім Джон Клаузер виконав ще три експерименти, перевіряючи основи квантової механіки та квантової заплутаності, причому кожен новий експеримент підтверджував і розширював попередні результати.

Слід зазначити, що в той час експерименти з перевірки основ квантової механіки не вважали актуальними, і експеримент Фрідмана—Клаузера став першим тестом нерівності CHSH. У телефонному інтерв'ю після оголошення рішення Нобелівського комітету Джон Клаузер згадував, що багато великих фізиків у Колумбійському університеті не вірили в його експерименти. Річард Фейнман навіть вважав для себе образою розглядати можливість того, що квантова механіка може дати неправильні передбачення. І лише завдяки підтримці Чарльза Таунса (нобелівський лауреат 1964 р. спільно з Басовим і Прохоровим) йому вдалося провести ті самі експерименти, які через пів століття відзначають найвищою науковою нагородою. Але й після цього йому говорили: «Ви отримали результати, яких усі очікували, — тепер почніть займатися справжньою фізикою».

Надалі Джон Клаузер працював у Ліверморській лабораторії, яку покинув у 1986 р. і повернувся до Берклі. Наприкінці 1980-х років він першим запропонував і запатентував атомний інтерферометр як ультраточливий сенсор інерційних сил і гравітації. Наразі у власній приватній лабораторії J.F. Clauser & Assoc., Walnut Creek, CA він працює над розробленням новітніх медичних приладів, зокрема для мамографії.

**Антон Цайлінгер (Anton Zeilinger)** народився 20 травня 1945 р. в містечку Рід-ім-Іннкрайс (Австрія). З 1963 по 1971 р. вивчав фізику і математику у Віденському університеті. У 1971 р. здобув докторський ступінь, захистивши роботу «Деполаризація нейтронів у монокристалах диспрозію», яку виконав під керівництвом Г. Рауха. У 1979 р. габілітував-



Джон Клаузер біля установки для проведення експерименту з квантової заплутаності. UC Berkeley, 1976. Credit: Lawrence Berkeley Laboratory

ся у Віденському технологічному університеті. Далі була успішна кар'єра молодого талановитого вченого: 1979—1983 рр. — асистент професора в Атомному інституті Віденського технологічного університету; 1981—1983 рр. — асоційований професор фізики у Массачусетському технологічному інституті (США); 1988—1989 рр. — професор фізики в Технічному університеті Мюнхена; 1983—1990 рр. — асоційований професор у Віденському технологічному університеті. Нарешті, у 1990 р. Антон Цайлінгер став повним професором Університету Інсбрука та очолив Інститут експериментальної фізики. Від 1999 р. і до виходу на пенсію у 2013 р. був професором експериментальної фізики Віденського університету.

Антон Цайлінгер є дійсним членом Австрійської академії наук, з 2004 р. очолює заснований того самого року Інститут квантової оптики та квантової інформації (IQOQI). З 1 липня 2013 р. по 30 червня 2022 р. був президентом Австрійської академії наук. Сьогодні він продовжує активну наукову діяльність як старший науковий співробітник (Senior Scientist) IQOQI та професор-емерит (Professor Emeritus) Віденського університету.

Своїми найважливішими науковими здобутками сам Антон Цайлінгер вважає інтерферометрію матеріальних хвиль з нейтронами, атомами та фулереноподібними молекулами; відкриття тричастинкової заплутаності (так звані GHZ-стани (Greenberger-Horne-Zeilinger)) як екстремальної демонстрації квантової нело-



Антон Цайлінгер виступає з доповіддю «Квантова заплутаність: від ейнштейнівського привида до квантової інформатики». Інститут фізики НАН України, 24 листопада 2014 р.

кальності, що стало наріжним каменем у розвитку квантової інформатики; першу експериментальну реалізацію квантової телепортації окремого незалежного фотона; теоретичну концепцію свопінгу (обміну) заплутаності та її першу експериментальну перевірку; реалізацію квантового зв'язку на великій відстані та тестування нерівності Белла без «лазівок»; першу експериментальну реалізацію квантової криптографії на основі квантової заплутаності; реалізацію багатьох процедур для оптичного квантового обчислення. Більшість цих результатів є складовими видатного наукового добробку вченого, відзначеного цьогорічною Нобелівською премією.

Як президент Австрійської академії наук Антон Цайлінгер доклав багато зусиль для розвитку дружніх відносин між НАН України та Австрійською академією наук. У 2014 р. він зустрічався в Києві з президентом НАН України академіком Борисом Патоном і під час цього візиту зробив доповідь в Інституті фізики НАН України на тему «Квантова заплутаність: від ейнштейнівського привида до квантової інформатики». У 2021 р. його було нагороджено Зо-

лотою медаллю імені В.І. Вернадського НАН України «за видатні досягнення в галузі квантової електроніки та здійснення телепортації фотонів», а також обрано іноземним членом НАН України по Відділенню фізики і астрономії.

Серед лауреатів цьогорічної Нобелівської премії з фізики, без сумніву, мав би бути Джон Стюарт Белл (John Stewart Bell). Видатний фізик народився 28 червня 1928 р. у Белфасті (Північна Ірландія) в бідній родині. В 11-річному віці він вирішив стати вченим і в 16 років закінчив Белфастську технічну школу. Навчався в Королівському університеті Белфаста за стипендією. У 1948 р. здобув ступінь бакалавра з експериментальної фізики, а роком пізніше — з математичної фізики. Потім він вступив до Бірмінгемського університету, де в 1956 р. отримав ступінь доктора філософії з фізики елементарних частинок і квантової теорії поля за роботу, яку виконав під керівництвом Рудольфа Паєрлза.

Його трудова діяльність розпочалася в 1949 р. в Науково-дослідному інституті з атомної енергії (AERE) у Малверні (Велика Британія) та в лабораторії Харвелла. Через кілька років він перейшов до лабораторії Європейської організації ядерних досліджень (CERN) в Женеві. Там він повністю зосередився на теоретичній фізиці елементарних частинок і проектуванні прискорювачів, отримав кілька вагомих результатів. Вивчення основ квантової теорії було його хобі, якому він приділяв лише вільний від основної роботи час.

У 1964 р., перебуваючи у відпустці, Джон Белл написав статтю «Про парадокс Ейнштейна—Подольського—Розена» і відправив її до редакції маловідомого журналу з дивною назвою «Physics. Physique. Fizika». Журнал проіснував недовго (до 1968 р.), але стаття стала відомою, оскільки в ній було закладено основи сучасної квантової інформатики.

Про цю статтю і запропоновані Джоном Беллом нерівності, які в принципі можливо перевірити в реальному експерименті і тим самим розв'язати суперечку Ейнштейна з Бором щодо фундаментальних основ квантової механіки, ми ще поговоримо нижче.

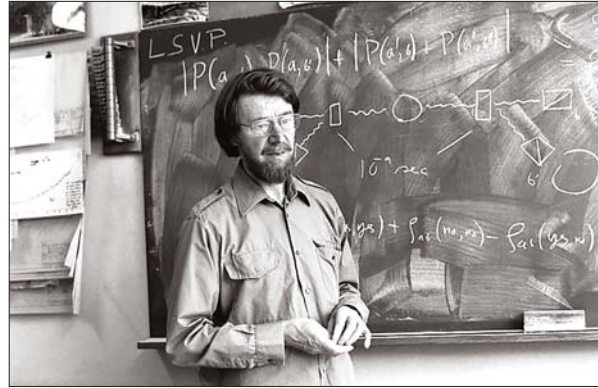
«**Моторошна дія на відстані**». Сучасна квантова теорія розпочинає свою історію з 1925 р., коли Гейзенберг розробив матричне, а Шредінгер хвильове формулювання квантової механіки. Ключовим її поняттям стала хвильова функція, що означало відмову від класичного детермінізму. Альберт Ейнштейн не зміг прийняти цього. У знаменитій дискусії з Нільсом Бором він стверджував, що «Бог не грає у кості», і ми змушені використовувати ймовірності для опису природи лише тому, що не володіємо всією інформацією про неї. Більше того, квантова механіка передбачає, за формулюванням Ейнштейна, «моторошну дію на відстані» (spooky action at a distance) — саме такими словами він охарактеризував ефект квантової заплутаності (quantum entanglement), який природно впливає з базових постулатів квантової механіки.

У найпростішому випадку двох взаємодіючих частинок з координатами  $x_1$  і  $x_2$  хвильова функція системи  $\psi(x_1, x_2)$  не може бути факторизована, тобто представлена у вигляді  $\psi(x_1, x_2) = \psi_1(x_1)\psi_2(x_2)$ . Ця, здавалося б, проста властивість хвильової функції, яку Шредінгер у 1935 р. вперше назвав квантовою заплутаністю [16], приводить до надзвичайно важливих і контрінтуїтивних наслідків.

Щоправда, на початковому етапі розвитку квантової механіки вчені-фізики не особливо вирізняли заплутаність з-поміж інших квантових властивостей. Так, було відомо, що електрони в атомі переплутані через їх взаємну кулонівську взаємодію. Найпростішим прикладом є атом гелію, який має два електрони. Щоб визначити спектр гелію, необхідно враховувати ефект заплутування, що й було зроблено в першому успішному розрахунку, проведеному ще в 1928 р. [17].

Однак у 1935 р. Альберт Ейнштейн, Борис Подольський і Натан Розен\* (EPR) опублікува-

\* Варто сказати кілька слів про Натана Розена. Він народився у 1909 р. в Нью-Йорку (США), помер у 1995 р. в Хайфі (Ізраїль). В 1934—1936 рр. був асистентом Ейнштейна в Інституті перспективних досліджень (Institute for Advanced Study) в Принстоні. Саме в цей час і було написано зазначену вище стат-



Джон Стюарт Белл виступає в CERN з доповіддю про свою теорему. 1982 р.

ли статтю [18], яка описувала, здавалося б, парадоксальні наслідки заплутування між частинками, які настільки віддалені, що будь-яку взаємодію між ними можна повністю ігнорувати.

Наприклад, якщо два електрони мають сумарний спін, рівний нулю, спіни окремого електрона є повністю невизначеними. Припустимо, що ці електрони рознесені на велику відстань (в різні галактики!). Якщо в одному місці Аліса (в квантовій теорії прийнято називати спостерігачів чи вимірювачів Аліса і Боб) проведе вимірювання проекції  $S_z$  і виявить, що спін направлений вгору  $S_z = +1/2$ , вона миттєво дізнається, що електрон у Боба має спіни, направлений вниз  $S_z = -1/2$ . Саме ця «моторошна дія на відстані» непокоїла Ейнштейна, оскільки свідчила про те, що хвильова функція, що описує електрони, колапсує зі швидкістю, більшою за швидкість світла. Крім того, якщо Боб поміряє компоненту  $S_x$  спіну електрона в напрямі  $Ox$ , перпендикулярному до напрямку  $Oz$ , вздовж якого вимірювала спіни Аліса, то будуть одночасно точно відомі значення некомутуючих ве-

ту. У 1936 р. за особистим зверненням А. Ейнштейна до Голови Раднаркому СРСР В. Молотова Натана Розена запросили до Києва в Інститут фізики АН УРСР, де він до 1938 р. завідував відділом теоретичної фізики. У цей період він опублікував три статті з теорії гравітації та квантової фізики. Після термінового від'їзду з Києва, що було спричинено загрозой репресій НКВС, Н. Розен плідно працював у США, а пізніше в Ізраїлі.

личин  $S_z$  та  $S_x$  (у випадку EPR — координати та імпульсу). Це гіпотетичне порушення принципу невизначеності Гейзенберга і є суттю знаменитого парадоксу Ейнштейна—Подольського—Розена.

Ейнштейн вважав, що цей парадокс виникає тому, що квантова механіка є неповною — в ній не враховуються «закодовані» в кожному електроні «приховані змінні», які повністю визначають результати вимірювань. Ця концепція запобігає колапсу, швидшому за світло, оскільки ці змінні, що визначають значення спіну в місці перебування Боба, рухаються **разом** з електроном. Це також узгоджується з уявленнями про те, що вимірювання виявляють певний аспект реальності, який існує незалежно від них (так само, як ми припускаємо, що колір предмета існує ще до того, як ми на нього подивимося).

**Нерівності Белла.** Розв'язання парадоксу EPR, запропоноване Нільсом Бором у рамках його дискусії з Ейнштейном, ґрунтувалося на понятті вимірювання згідно з Копенгагенською трактовкою квантової механіки, яка постулює неконтрольоване збурення квантової системи в результаті вимірювання. Більшість фізиків підтримали Бора, враховуючи те, що в 1932 р. Джон фон Нейман довів, що квантову механіку неможливо доповнити «прихованими змінними», які б визначали результат будь-якого експерименту (теорема неможливості фон Неймана). Проте деякі відомі фізики (Л. де Бройль, Е. Шредінгер, А. Ейнштейн, Д.А. Вілер, Х. Еверетт, Д. Бом) продовжували розмірковувати над проблемами, пов'язаними з основами та інтерпретацією квантової механіки. Втім, проблеми обґрунтування квантової механіки залишалися поза межами експериментальної фізики, допоки в 1964 р. Джон Белл не опублікував свою знамениту статтю «Про парадокс Ейнштейна—Подольського—Розена» [19].

Насамперед Джон Белл зазначив, що доведення теореми фон Неймана було неправильним (він навів доказ цього твердження в пізнішій публікації [20]), і сформулював першу нерівність Белла, яка була вражаючим теоретич-

ним відкриттям. Використовуючи спеціальну версію експерименту EPR, запропоновану Д. Бомом у 1952 р. [21], він математично показав, що жодна теорія, заснована на локальних прихованих змінних, не зможе відтворити всі результати квантової механіки.

Джон Белл уперше запропонував реальний фізичний експеримент, результати якого будуть різними залежно від того, чи справедливим є квантово-механічний опис кожної окремої частинки, чи кожна частинка має визначені всі фізичні характеристики з моменту її народження. Оскільки частинок багато, експериментатор має розглядати їх як класичний ансамбль у статистичній фізиці. Белл запропонував локальну реалістичну модель квантових явищ, у якій слова «локальний» і «реалістичний» означають: 1) неможливість миттєвої передачі сигналів, яка обмежена швидкістю світла; 2) те, що результат будь-якого експерименту повністю визначається значенням «прихованих змінних». Якщо це так, мають виконуватися нерівності (нерівності Белла), які накладають обмеження на значення деяких величин, що визначаються експериментально. Це твердження має назву теорема Белла.

На жаль, експеримент, запропонований Джоном Беллом, потребує ідеальних детекторів, що неможливо реалізувати технічно. Проте в 1969 р. Джон Клаузер, Майкл Хорн, Абнер Шімоні і Річард Холт (CHSH) запропонували цілком реалістичний експеримент із заплутаними фотонами (рис. 1), в якому нерівність Белла можна було перевірити за допомогою наявної на той час техніки [1].

Експеримент CHSH полягає в наступному. Нехай джерело  $S$  виробляє пари заплутаних фотонів, спрямованих у протилежних напрямках, а їх поляризаційні властивості описують хвильовою функцією Белла  $|\Psi^-\rangle$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [ |v_1 h_2\rangle - |h_1 v_2\rangle ], \quad (1)$$

де  $|v_1 h_2\rangle$  — стан, у якому перший фотон поляризований вертикально, а другий — горизонтально і, навпаки,  $|h_1 v_2\rangle$  — стан, у якому перший фотон поляризований горизонтально,

а другий — вертикально. Кожен фотон проходить через двоканальний поляризатор, орієнтація якого може бути встановлена Алісою і Бобом. На відміну від уявного експерименту EPR в експерименті CHSH Аліса може виконувати два різні вимірювання, які ми позначимо  $A_1$  і  $A_2$  (це вимірювання поляризації фотона за двох положень осі поляризатора); так само Боб може виміряти  $B_1$  або  $B_2$ . Сигнали в кожному каналі реєструються однофотонними детекторами  $D_+$  і  $D_-$ . Якщо фотон  $A$  пройшов через поляризатор і «клікнув» детектор  $D_+$ , то величина  $A$  набула значення  $+1$  (вимірювання показало, що фотон поляризований вздовж осі поляризатора). Якщо ж фотон відбився і «клікнув» детектор  $D_-$ , величина  $A$  набула значення  $-1$  (фотон поляризований перпендикулярно осі поляризатора). Аналогічно вимірюється змінна  $B$ .

Експеримент повторюється багато разів, і в кожному окремому вимірюванні Аліса випадковим чином вибирає, робити їй вимірювання  $A_1$  чи  $A_2$ , а Боб незалежно також випадковим чином вибирає вимірювання  $B_1$  або  $B_2$ . Після закінчення великої серії вимірювань результати Аліси і Боба зводять разом і виділяють з них чотири сукупності експериментальних значень, які відповідають усім чотирьом можливим варіантам орієнтації поляризаторів. У кожній сукупності розраховують середні значення відповідних добутків  $\langle A_1 B_1 \rangle$ ,  $\langle A_1 B_2 \rangle$ ,  $\langle A_2 B_1 \rangle$  і  $\langle A_2 B_2 \rangle$ , які характеризують кореляцію між результатами вимірювання.

Тоді нерівність Белла для експерименту CHSH має вигляд

$$S = |\langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle| \leq 2. \quad (2)$$

Нерівність впливає з моделі, в якій поляризація фотонів визначається «прихованими змінними» (реалістичність), а вибір орієнтації поляризаторів повністю незалежний і випадковий (локальність).

Тепер можна порівняти цей результат з тим, який дає квантова теорія. Якщо пара перебуває в стані, заданому рівнянням (1), то можна показати, що  $\langle A_i B_j \rangle = -\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{b}_j$ , де  $\mathbf{a}_i$  і  $\mathbf{b}_j$  — оди-

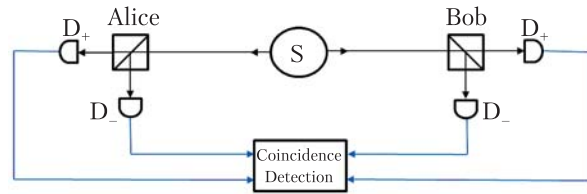


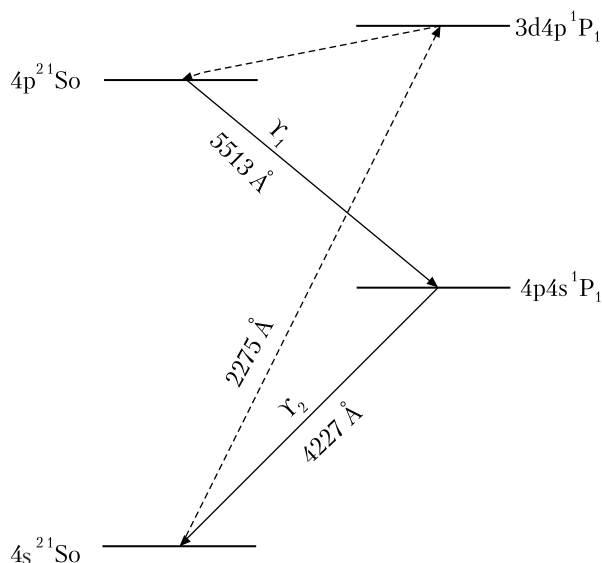
Рис. 1. Схема експерименту Клаузера—Хорна—Шімоні—Холта (CHSH)

ничні вектори у напрямі осі поляризації відповідного поляризатора для вимірювання. Якщо вибрати напрямки так, щоб осі поляризаторів у двох можливих положеннях були спрямовані у перпендикулярних напрямках, а кут між векторами  $\mathbf{a}_1$  і  $\mathbf{b}_1$  становив  $45^\circ$ , то

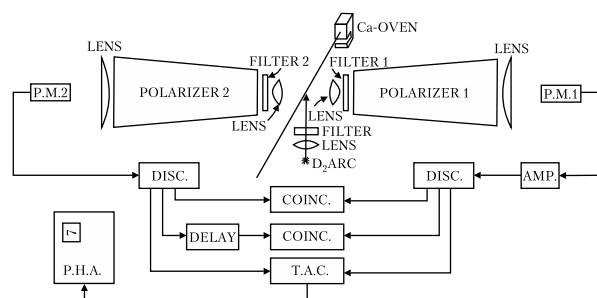
$$\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{b}_1 = \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{b}_2 = \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{b}_1 = -\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{b}_2 = 1/\sqrt{2},$$

тому  $S = 2\sqrt{2}$ , що є явним порушенням нерівності Белла (2).

**Експеримент Фрідмана—Клаузера.** Наприкінці 1960-х років у фізичній спільноті склалася думка, що квантова фізика справді дуже дивна, і хвильову функцію, кота Шредингера, квантові суперпозиції та квантові запутаності неможливо зрозуміти з точки зору здорового глузду. Але квантова фізика працює, тому слід спрямовувати зусилля не на обґрунтування її основ, а на її використання для відкриття нових захопливих ефектів. Як наслідок, мало хто з фізиків звернув увагу на статтю Джона Белла. Серед тих, кого все ж цікавило, чи мав рацію Ейнштейн у своєму несприйнятті квантової механіки, були автори роботи CHSH, ініціатор якої, Джон Клаузер, вирішив продовжити цю діяльність і все-таки реалізувати запропонований експеримент. Коли він у 1970 р. почав працювати як постдок у лабораторії Чарльза Таунса в Каліфорнійському університеті, там залишилося експериментальне обладнання, створене Карлом Кохером у 1967 р. під час роботи над дисертацією доктора філософії для вивчення часової кореляції між парами фотонів, що походять зі спільного джерела [22]. Джон Клаузер вважав, що це експериментальне обладнання можна вдосконалити для експериментальної перевірки нерівності Белла—CHSH. Йому вдалося умовити Ч. Таунса до-



**Рис. 2.** Діаграма енергетичних рівнів кальцію для створення пар заплутаних фотонів, одного з довжиною хвилі 5513 Å і одного з довжиною хвилі 4227 Å



**Рис. 3.** Принципова діаграма апарату та відповідної електроніки, використаної Фрідманом і Клаузером [11]. Відстань між детекторами становила 5 м

зволити йому працювати половину робочого часу над перевіркою нерівностей Белла, а іншу половину — над проблемою пошуку молекул у міжзоряному просторі, якою тоді займався Чарльз Таунс. Більше того, Таунс запропонував своєму аспіранту Стюарту Фрідману (помер у 2012 р.) експериментальну перевірку теореми Белла як тему дисертаційної роботи, яку той захистив у 1972 р.

Ключовим компонентом в експерименті Фрідмана—Клаузера було джерело заплутаних фотонів (біфотонів). Такі джерела кванто-

вого світла відтоді використовували в сотнях експериментальних робіт у квантовій оптиці і квантовій інформатиці. За пів століття вони пройшли шлях від каскадних малоінтенсивних атомних джерел (рис. 2) до більш ефективних, які використовують нелінійно-оптичні процеси типу спонтанного параметричного розсіювання [23]. Останнім часом активно досліджують джерела біфотонів на основі резонансного чотирихвильового змішування. Нещодавно було створено джерело біфотонів за допомогою спонтанного чотирихвильового змішування в оптично щільному ансамблі холодних атомів у волокні з порожнистим сердечником з максимально можливою яскравістю, коли послідовні пари фотонів починають перекриватися в часі [24].

Фрідману і Клаузеру знадобилося два роки, щоб перебудувати експеримент Кохера (рис. 3) так, щоб його можна було використовувати для перевірки нерівності Белла—CHSH, і близько 200 годин, щоб отримати дані. У результаті в опублікованій у 1972 р. статті [2] Фрідман і Клаузер заявили, що дані їхнього експерименту узгоджуються з квантовою механікою, але порушують обмеження Белла з високою статистичною точністю, а отже, дають вагомі докази проти локальних теорій прихованих змінних.

**Експерименти Алена Аспе.** Ключовим при отриманні нерівностей Белла є припущення локальності, яке означає, що Аліса в принципі не може впливати на вибір Боба проводити вимірювання В1 чи В2. Ален Аспе був першим, хто розробив експеримент, який уникав локальної «лазівки» чи «вразливості» (loophole). У 1981–1982 рр. разом зі співробітниками Філіпом Гранж'є, Жераром Роже та Жаном Далібардом він виконав серію експериментів, використовуючи вдосконалені методи та нові інструменти [3–5]. Для збудження верхнього стану каскадного переходу в кальції використовували лазерне випромінювання, що було набагато ефективніше, ніж застосування водневої (дейтерієвої) дугової лампи.

А. Аспе встановив порушення нерівності Белла з дуже високою точністю — десятки

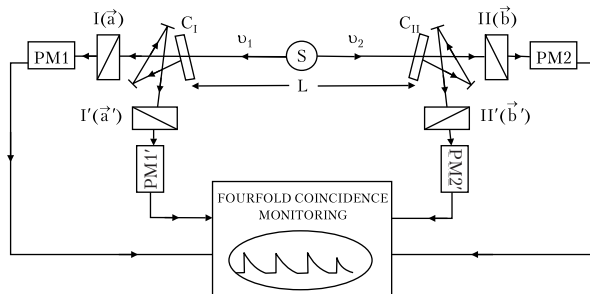


стандартних відхилень [4] порівняно з шістьма стандартними відхиленнями експерименту Фрідмана–Клаузера [2]. І що більш важливо, він забезпечив незалежність Аліси і Боба, використовуючи параметри поляризації, які змінювалися випадковим чином протягом часу прольоту фотонів між детекторами [5]. Змінити орієнтацію поляризаторів неможливо за час прольоту фотона від джерела до поляризатора (на відстані 6 м це 20 нс). У 1976 р. Аспе запропонував експеримент [6], у якому акустооптичні пристрої можна було б використовувати для перемикування фотонів у дві різні гілки апарату за часові шкали, менші за доступні 20 нс (рис. 4).

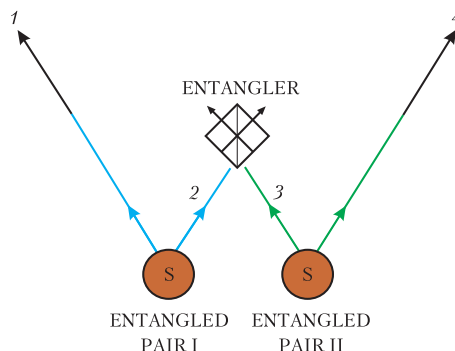
В експерименті [5] нерівність Белла була явно порушена (п'ять стандартних відхилень), але результати добре узгоджувалися з квантово-механічним значенням. Проте експеримент не був ідеальним, оскільки відстань між поляризаторами була все ще надто малою, щоб уможливити справді випадкові налаштування між ними. Знадобилося понад 15 років, перш ніж Антон Цайлінгер з колегами змогли перевірити нерівність Белла за умови строгої локальності [10], зі спостерігачами на відстані 400 м та низкою інших технічних удосконалень.

Отже, закриття ключових «лазівок» в експериментах Алена Аспе, більш як 30 повторень експериментів на новому технічному рівні, проведених А. Цайлінгером та іншими експериментаторами, дозволяють зробити висновок, що базовий постулат квантової механіки про існування заплутаних станів правильний і прихованих параметрів у природі немає.

**Квантова заплутаність як практичний інструмент.** Експерименти Клаузера і Аспе відкрили очі спільноті фізиків на глибоку важливість заплутаності та надали інструменти для використання заплутаних фотонів як квантового ресурсу. Цей ресурс став центральним у галузі квантової інформатики, яка нині настільки бурхливо розвивається, що часто говорять про «другу квантову революцію». Третій лауреат цьогорічної Нобелівської премії з фізики — Антон Цайлінгер, не лише зробив значний внесок у перевірку основ квантової механіки, а й став одним з лідерів цієї революції.



**Рис. 4.** Схема експерименту, запропонованого Аленом Аспе в 1976 р. [6] і виконаного в 1982 р. [5]. Фотони, випромінювані кальцієвим каскадним джерелом, спочатку зустрічаються з оптичними перемикачами  $C_I$  і  $C_{II}$ , де вони можуть або передаватися до поляризаторів і детекторів  $PM1$  і  $PM2$ , або відбиватися до іншого набору поляризаторів і детекторів  $PM1'$  і  $PM2'$ . Перемикування між двома каналами відбувається приблизно кожні 10 нс. Відстань між поляризаторами становила 12 м. Оптичні перемикачі являють собою ультразвукові стоячі хвилі, що утворюються в результаті інтерференції між зустрічними акустичними хвилями, створеними двома електроакустичними перетворювачами



**Рис. 5.** Схематичне налаштування для експерименту з обміном заплутаністю [11]

Відомо, що квантова механіка забороняє клонування квантових станів [25, 26]: не можна створити копію довільного квантового стану, зберігши при цьому оригінал. Однак залишається можливість «телепортувати» довільний квантовий стан з однієї позиції в іншу, якщо при цьому оригінальна копія знищується. Ідею, як це зробити для практичного використання квантових технологій, вперше висловив у 1993 р. Чарльз Беннет [27], і того самого року Марек Жуковські, Антон Цайлінгер, Міхаель

Хорн та Артур Екерт [28] запропонували термін «обмін заплутаністю» (entanglement swapping). Перші експерименти в 1997–1998 рр. провели дослідницькі групи Антона Цайлінгера [11, 29] і Франческо Де Мартіні [30].

В експерименті з обміном заплутаністю, виконаному групою Антона Цайлінгера [30], було використано дві пари заплутаних фотонів (рис. 5). Над фотонами 2 і 3 у заплутувачі (entangler) проводять вимірювання за спеціальним протоколом так, що фотони 1 і 4 (хоча вони ніколи не були близько один до одного) стають переплутаними.

Антон Цайлінгер зробив також значний внесок у розвиток квантових мереж і квантових повторювачів, дослідження заплутаності між багатьма частинками, квантову криптографію, коли безпека передачі даних гарантується за-

конами квантової механіки. Квантову криптографію вже сьогодні досить широко використовують на практиці.

**Висновки.** Цього року Нобелівську премію з фізики присуджено за експериментальну роботу. Двох лауреатів, Джона Клаузера і Алена Аспе, відзначено за роботи, в яких вони показали важливість квантової заплутаності, запропонували методи створення, оброблення та вимірювання пар Белла у дедалі більш складних і приголомшливих сценаріях, започаткувавши тим самим нову еру в науково-технологічному розвитку людства. Експериментальні роботи третього лауреата, Антона Цайлінгера, вирізняються інноваційним використанням заплутаності та пар Белла як у фундаментальних дослідженнях, так і в практичних сферах, таких як квантова криптографія.

## REFERENCES

1. Clauser J.F., Horne M.A., Shimony A., Holt R.A. Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories. *Phys. Rev. Lett.* 1969. **23**(15): 880. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.23.880>
2. Freedman S.J., Clauser J.F. Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. *Phys. Rev. Lett.* 1972. **28**(14): 938. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.938>
3. Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell's Theorem. *Phys. Rev. Lett.* 1981. **47**(7): 460. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.47.460>
4. Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities. *Phys. Rev. Lett.* 1982. **49**(2): 91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91>
5. Aspect A., Dalibard J., Roger G. Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Phys. Rev. Lett.* 1982. **49**(25): 1804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>
6. Aspect A. Proposed experiment to test the nonseparability of quantum mechanics. *Phys. Rev. D.* 1976. **14**(8): 1944. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.14.1944>
7. Greenberger D.M., Horne M.A., Zeilinger A. Going Beyond Bell's Theorem. In: Kafatos M. (ed.) *Bell's Theorem, Quantum Theory and Conceptions of the Universe. Fundamental Theories of Physics*. Vol. 37. Springer, Dordrecht, 1989. P. 69–72. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-0849-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-017-0849-4_10)
8. Greenberger D.M., Horne M.A., Shimony A., Zeilinger A. Bell's theorem without inequalities. *Am. J. Phys.* 1990. **58**(2): 1131. <https://doi.org/10.1119/1.16243>
9. Bouwmeester D., Pan J.-W., Mattle K., Eibl M., Weinfurter H., Zeilinger A. Experimental quantum teleportation. *Nature*. 1997. **390**: 575. <https://doi.org/10.1038/37539>
10. Weihs G., Jennewein T., Simon C., Weinfurter H., Zeilinger A. Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions. *Phys. Rev. Lett.* 1998. **81**(23): 5039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5039>
11. Pan J.-W., Bouwmeester D., Weinfurter H., Zeilinger A. Experimental Entanglement Swapping: Entangling Photons That Never Interacted. *Phys. Rev. Lett.* 1998. **80**(18): 3891. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.3891>
12. Bouwmeester D., Pan J.-W., Daniell M., Weinfurter H., Zeilinger A. Observation of Three-Photon Greenberger-Horne-Zeilinger Entanglement. *Phys. Rev. Lett.* 1999. **82**(7): 1345. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.1345>
13. Pan J.-W., Bouwmeester D., Daniell M., Weinfurter H., Zeilinger A. Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. *Nature*. 2000. **403**: 515. <https://doi.org/10.1038/35000514>
14. European Commission. Quantum Technologies Flagship. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>

15. Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022. <https://lejournal.cnrs.fr/articles/alain-aspect-prix-nobel-de-physique-2022>
16. Schrödinger E. Discussion of Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1935. **31**(4): 555. <https://doi.org/10.1017/S0305004100013554>
17. Hylleraas E.A. Über den Grundzustand des Heliumatoms. *Zeitschrift für Physik*. 1928. **48**: 469. <https://doi.org/10.1007/BF01340013>
18. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.* 1935. **47**: 777. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
19. Bell J.S. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physica. Physique. Fizika*. 1964. **1**(3): 195. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
20. Bell J.S. On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. *Rev. Mod. Phys.* 1966. **38**(3): 447. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.38.447>
21. Bohm D. A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of «Hidden» Variables. *Phys. Rev.* 1952. **85**(2): 166. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.166>
22. Kocher C.A., Commins E.D. Polarization Correlation of Photons Emitted in an Atomic Cascade. *Phys. Rev. Lett.* 1967. **18**: 575. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.18.575>
23. Burnham D.C., Weinberg D.L. Observation of Simultaneity in Parametric Production of Optical Photon Pairs. *Phys. Rev. Lett.* 1970. **25**(2): 84. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.25.84>
24. Bruns A., Hsu C.-Yu., Stryzhenko S., Giese E., Yatsenko L.P., Yu I., Halfmann T., Peters T. Ultrabright and narrowband intra-fiber biphoton source at ultralow pump power. *Quantum Sci. Technol.* 2023. **8**: 015002. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/ac985c>
25. Wootters W.K., Zurek W.H. A single quantum cannot be cloned. *Nature*. 1982. **299**: 802. <https://doi.org/10.1038/299802a0>
26. Dieks D. Communication by EPR Devices. *Phys. Lett. A*. 1982. **92**: 271. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(82\)90084-6](https://doi.org/10.1016/0375-9601(82)90084-6)
27. Bennett C.H., Brassard G., Crépeau C., Jozsa R., Peres A., Wootters W.K. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys. Rev. Lett.* 1993. **70**(13): 1895. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.1895>
28. Zukowski M., Zeilinger A., Horne M.A., Ekert A.K. “Event-ready-detectors” Bell experiment via entanglement swapping. *Phys. Rev. Lett.* 1993. **71**(26): 4287. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.4287>
29. Bouwmeester D., Pan J.-W., Mattle K., Eibl M., Weinfurter H., Zeilinger A. Experimental quantum teleportation. *Nature*. 1997. **390**: 575. <https://doi.org/10.1038/37539>
30. Boschi D., Branca S., De Martini F., Hardy L., Popescu S. Experimental Realization of Teleporting an Unknown Pure Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. *Phys. Rev. Lett.* 1998. **80**(6): 1121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.1121>

*Leonid P. Yatsenko*

Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2896-021X>

GOD DOES PLAY DICE! PROVEN EXPERIMENTALLY

Nobel Prize in Physics 2022

This year the Nobel Prize in Physics was awarded to Alain Aspect, John F. Clauser, Anton Zeilinger “for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science.” Alain Aspect, John Clauser and Anton Zeilinger have each conducted groundbreaking experiments using entangled quantum states, where two particles behave like a single unit even when they are separated. Their results have cleared the way for new technology based upon quantum information. The ineffable effects of quantum mechanics are starting to find applications. There is now a large field of research that includes quantum computers, quantum networks and secure quantum encrypted communication.

**Keywords:** Nobel Prize in Physics 2022, Alain Aspect, John F. Clauser, Anton Zeilinger, entangled photons, violations of Bell inequalities, quantum information science.