

За научно-философския спор между Алберт Айнщайн и Нилс Бор и мистериозното квантово заплитане

Стефан Плачков

В квантовата механика обаче нещата са коренно различни. При определени начални условия (две частици, които са взаимодействали в миналото) резултатът се променя напълно. Ако Ангел хвър-

ли ези, Борис хвърля винаги тура или обратно: ако Ангел хвърли тура, Борис винаги получава ези, резултатът на Борис напълно зависи от този на Ангел. Между тях съществува някаква силна, но невидима връзка. Мистерията се задълбочава, ако Ангел хвърля монетата на Земята, а космонавтът Борис прави същото на планетата Марс. Невидимата връзка ос-

Двама приятели, Ангел и Борис, хвърлят ези-тура. Първи хвърля монетата Ангел, после Борис. Ако Ангел хвърли ези, шансовете на Борис да попадне или на ези или на тура остават еднакви. Ако Ангел хвърли тура, шансовете на Борис не се променят, вероятността и в двата варианта е 50% за ези и 50% за тура. Никой не би оспорвал факта, че хвърлянето на монета от Борис е напълно независимо от резултата, получен от Ангел.

тава, независимо от огромното разстояние. Още по-невероятно: хвърлянето на Борис „знае“ за резултата на Ангел мигновено, въпреки че никаква информация не пътува по-бързо от светлината. Двата

резултата са „квантово заплетени“.

Внимателният читател вече е забелязал, че в нашия всекидневен свят играта на Ангел и Борис не е възможна: законите на класическата физика не я позволяват. Квантовата механика, която е на базата на „квантовото заплитане“ остава теория, валидна само за елементарните частици. Но квантовото зап-

литане не е само куриозно последствие от законите на квантовата механика. То е и най-известният резултат от дългогодишния научен и философски спор за интерпретацията на квантовата механика между двамата от най-гениалните физици от XX век, Алберт Айнщайн (Albert Einstein, 1879 – 1955) и Нилс Бор (Niels Bohr, 1885 – 1962). Спорът е и философски, защото странните и противointуитивни постулати на квантовата механика коренно променят представата ни за света и за достъпността на неговата реалност. Самият Бор казва за квантовата теория: *„Погрешно е да се смята, че задачата на физиката е да открие какъв е реалният свят. Физиката се занимава с това, което можем да кажем за реалния свят.“* С други думи: не съществува, както в класическата физика, обективна реалност, независима от наблюдателя. Според квантовата физика, в микроскопичния свят на елементарните частици реалността е обвързана с нейния наблюдател и не е достъпна без него или независимо от него. Какво означава реалността да е недостъпна независимо от наблюдателя? Отговорът на този въпрос, или по-широко казано интерпретацията на квантовата механика, става предмет на дългогодишен спор между двамата от гениите на XX век, Айнщайн и Бор.

Заклеченията на Бор следват от много разликите между класическата физика и квантовата механика. Всекидневният живот ни е научил, че светофарът на ъгъла или луната съществуват даже и когато никой не ги наблюдава. В класическата физика действителността на природата и на всичко в нея са реалности, независими от наблюдателя. Друг пример: ако знаем началните позиция и скорост на един снаряд, по принцип е възможно да се изчисли цялата му тра-



Проф. Стефан Плачков следва „Физика и Математика“ в Париж, където защитава докторска дисертация по ядрена физика. Работи към ускорителя на електрони във Френския център по ядрени изследвания. Участва в експерименти, проведени на ускорителя на частици към Масачузетския технологичен институт, на протонния суперсинхротрон в ЦЕРН и на новопостроения ускорител на електрони към Националната лаборатория Джеферсън в САЩ. В последните 15 години работи по теми, свързани със свойствата на композитните нуклони и интерпретацията им с елементарните кварки. Автор е на 190 научни публикации.

ектория, както и мястото, където той ще падне. Интуитивно всеки разбира, че класическата физика е „детерминистична“, тоест всяко бъдещо събитие или състояние на една система е предопределено от предишна поредица от събития и състояния на тази система. Френският учен и основател на „универсалния детерминизъм“ Пиер Симон дьо Лаплас (Pierre Simon de Laplace, 1749 – 1827) даже твърди, че според законите на физиката за едно дадено състояние

на една система е възможна само една единствена еволюция и че тази еволюция е, поне на теория, предвидима.

Квантовата механика коренно променя тази класическа и механична представа. Според нея една елементарна частица няма точно определена позиция. Един електрон, обикалящ около атомното ядро, се намира отгоре, отдолу, отляво и отдясно едновременно. Не само „или отгоре, или отдолу, или отляво, или отдясно“. Той е едновременно навсякъде, колкото и нереално това да звучи. Това странно свойство на квантовата механика се нарича „*принцип на суперпозицията*“. Друг пример, известен за почти всички интересувачи се е затворената в кутия „*котка на Шрьодингер*“. Според принципа на суперпозиция котката е едновременно мъртва и жива. Хм, за да избегнат трагизма на тази ситуация, любителите на котешката порода предпочитат други две състояния: събудена или заспала. Математически изразено, състоянието на котката (или на електрона) е описано с неговата „*вълнова функция*“. Вълновата функция е математическа функция, обобщаваща всички възможни позиции на електрона, но преди всякакво измерване от външен наблюдател. Тя също позволява да се изчисли вероятността електронът да бъде намерен в точно определена позиция. Само когато физик - наблюдател реши да провери къде се намира електронът, тогава – магически – го намира на едно единствено място. По същия начин, когато любопитен отвори кутията, той става свидетел на само едно от двете възможни състояния на котката на Шрьодингер. Квантовата механика нарича това необичайно свойство „*колапс*“ на вълновата функция. Въпреки две или повече възможности, операцията на измерване определя една един-

ствена от тях. Колапсът на вълновата функция означава, че детерминизмът на Лаплас в класическата физика се заменя с вероятности в квантовата механика.

За да станат по-ясни нещата, ето и друг пример. Електроните се характеризират и с един вид ъглов момент, наречен *квантов спин*, който приема само две възможни стойности. Според вертикална ос например, тези стойности са или $+1/2$ или $-1/2$. Принципом на суперпозицията твърди, че преди спинът да бъде премерен вероятността да го намерим в състояние $+1/2$ (или по аналогия със стрелка - нагоре) е 50% и тази да го намерим в състояние $-1/2$ (или стрелка, сочеща надолу), също 50%. Електронът притежава едновременно и двете стойности!

Следва, разбира се, фундаменталният въпрос: след като вълновата функция гласи, че електронът притежава едновременно две състояния, нагоре и надолу, съществува ли такъв електрон реално? Такъв е смисълът на въпроса, който задава Айнщайн на Бор още през 1927 година, по време на петия конгрес Солве (Solvay, по името на индустриалеца който го финансира, Ернест Солве) в Брюксел.

Айнщайн поставя под въпрос не толкова новородената квантова теория, а по-скоро нейната интерпретация за света, наречена *Копенхагенска интерпретация* (по местоположението на института по теоретична физика в Копенхаген, основан от Бор). Според тази интерпретация, квантовата теория отказва класическия детерминизъм. Тя поставя и друг принцип, наречен „*съотношение за неопределеност*“, открит от Вернер Хайзенберг (Werner Heisenberg, 1901 – 1976), когато той е на само 25 години. Това съотношение гласи, че има фундаментална природна гра-



*Оцветена снимка на участниците в петия конгрес Солве (Solvay) в Брюксел през 1927 г. От 29-те участници в конгреса 17 са вече получили или ще получат по-късно Нобелова награда за физика. Айнщайн е в средата на първия ред, а Бор е първият от дясно на втория ред.
Снимка: Wikimedia Commons*

ница за прецизност, с която могат да се премерят едновременно две допълващи се величини на една елементарна частица, като например нейната позиция x и импулс p . Математически това се изразява с допълнителна квантова особеност: двете величини не са „комутиативни“, тоест обратно на всекидневния ни опит, произведението $x \cdot p$ не е равно на произведението $p \cdot x$.

Но квантовата механика не е само въпрос на принципи. За кратък период от 2 – 3 години, Бор, Хайзенберг и няколко други млади учени, между които Волфганг Паули (Wolfgang Pauli 1900 – 1958, Нобелова награда 1945), Пол Дирак (Paul Dirac, 1902 – 1984, Нобелова награда 1933), Ервин Шрьодингер (Erwin Schrödinger, 1887 – 1961, Нобелова награда 1933), Макс Борн (Max Born, 1882 – 1970, Нобелова награда 1954) и Джон фон Нойман (John von Neumann, 1903 – 1957) създават по-

лен математически апарат за новата теория. Математиката е царицата на точните науки, и разбира се, никога не поставя под съмнение постигнатите с нея резултати.

Спорът между двете светили на физиката бързо надхвърля научните аспекти и навлиза в дълбоки философски въпроси за същността на реалността, за ролята на наблюдението във физиката и за границите на човешкото познание. Дискусиите между тях стигат до широка полемика относно съгласуването на квантовата теория с класическите разбирания за света около нас. Айнщайн е дълбоко убеден, че детерминизмът трябва да остане в основата на всяка теория. Известно е неговото изказване: „Бог не играе със зарове“. По същия начин той вярва, че обратно на квантовата теория, реалният свят е независим от наблюдателя. Въпреки тези



*Спорът между Айнщайн и Бор продължава и по улиците на Брюксел.
Снимка: Wikimedia Commons*

му сериозни възражения, Айнщайн все пак приема квантовата механика като практична и ефикасна теория, с която се правят точни и неопровергани предсказания. Но според него теорията не е пълна, не е изцяло завършена. Докато Бор, от 1927 година нататък твърди, че интерпретацията е точна и квантовата теория напълно завършена. Твърди се, че дори подхвърлил: „Кой сте вие, професор Айнщайн, за да казвате на Бог какво да прави?“

Интуицията на Айнщайн го стимулира да предлага редица мисловни експерименти с цел да намери слабостите на новата за това време теория. Но Бор винаги намира точни и обосновани отговори на всички мисловни задачи и въз-

ражения. Нещата коренно се променят през 1935 година. Заедно с двама колеги от Института за напреднали изследвания (Institute for Advanced Study) в Принстън, Борис Подолски (Boris Podolsky, 1896 – 1966) и Натан Розен (Nathan Rosen, 1909 – 1995), наречени по инициалите им АПР, Айнщайн публикува кратка статия, озаглавена:

„Може ли описанието на физическата реалност от квантовата механика да се счита за пълно?“

Статията на АПР е обоснована на две предположения. Първото е, че квантовата механика дава точни резултати. Развитието на аргументите в статията използва изцяло формализма на квантовата механика. Второто е, че *принципът на локалността* е валиден. Този принцип гласи, че едно събитие на някакво място не може да има незабавен ефект върху събитие на друго място, ако второто се намира далеч от първото. Изразено по друг начин, информация или причинно-следствена връзка не се пренасят със скорост по-висока от тази на светлината. Авторите дават и определение за *независима от наблюдателя реалност*. Това определение гласи, че ако е възможно да се предскаже точната стойност на една физическа величина без да се наруши системата, в която тази величина се намира, тогава тази величина е елемент на реалността. За да бъде една теория смятана за пълна, авторите добавят необходимо условие: *„Всеки елемент от реалността трябва да има аналогичен елемент във физическата теория.“*

Айнщайн и колегите му предлагат мисловен експеримент с не една, а две частици, които се разделят веднага след като са взаимодействали. За квантовата теория двете частици не са разделени: те образуват една и съща система, описана от математическия

формализъм на квантовата механика. Когато наблюдател измери импулс (векторна величина, представляваща масата, умножена по скоростта) или позицията на първата частица, той може точно да предскаже, без да ги измерва, импулса или позицията на втората частица. Тъй като двете частици могат да бъдат на огромно разстояние една от друга, според определението на АПР това означава, че физическите величини на втората частица се определят още веднага след взаимодействието ѝ с първата. Двете величини стават елементи на реалността. Заключение на Айнщайн, Подолски и Розен е, че тези елементи на реалност нямат аналогично описание в квантовата теория. Следва, че отговорът им на въпроса, поставен в заглавието, е отрицателен: квантовата теория е непълна. Новината за силния аргумент на Айнщайн е публикувана даже в ежедневника Ню Йорк Таймс, няколко гена преди самата статия на АПР да излезе от печат.

Два месеца по-късно, с цел да опровергае АПР, Бор изпраща отговор в същото списание и със същия въпрос като заглавие: *„Може ли описанието на физическата реалност от квантовата механика да се счита за пълно?“*. Не намирайки грешка в логиката на АПР, Бор отговаря само принципно, отхвърляйки определението им за обективна реалност. Сложно разбираемата му статия, публикувана през октомври 1935 година, заключава, че квантовата механика е пълна и завършена теория.

Въпреки отговора на Бор, основите на квантовата физика са разклатени. Айнщайн определя като „призрачно действие от разстояние“ (spooky action at a distance) странното и противно на принципа за локалност взаимодействие между двете разделени, но сплетени частици. Поставя се въпроса за евентуални „скрити променливи“, необходими, за да бъде теорията завършена. Но през следващите близо три десетилетия спорът остава най-вече философски, без

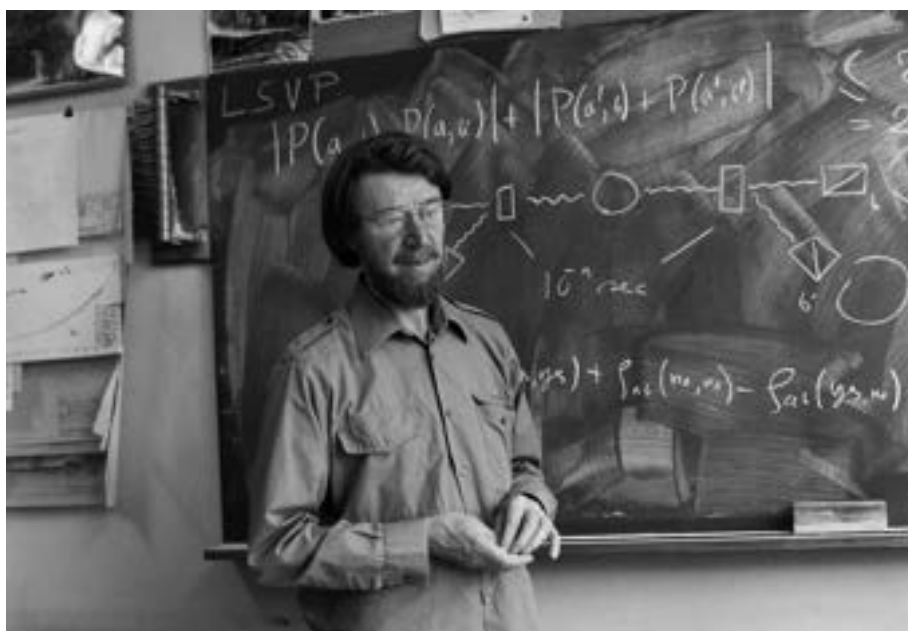


Сензационната статия на вестник Ню Йорк Таймс върху спора около интерпретацията на квантовата механика. Три дена по-късно вестникът публикува сърдито и недоволено писмо от Айнщайн, в което големият учен подчертава че „неговата неизменна практика е да обсъжда научни въпроси само в подходящи форуми.“
Снимка: Wikimedia Commons

ясна възможност за решение. Квантовата механика навлиза напълно в науката и става неразделна част от физиката на три от четирите основни взаимодействия: електромагнитното, ядреното силно и ядреното слабо.

Подходът към проблематиката, поставена от АПР, коренно се променя през 1964 година, благодарение на ирландския физик Джон Стюарт Бел от ЦЕРН (John Stuart Bell, 1928 – 1990). Силно заинтересуван от теорията за скрити променливи, Бел оползотворява едногодишния си отпуск от ЦЕРН в американски университет, за да работи по тази тема. Използва опростена версия за двете заплетени частици, в която импулс и позиция се заменят със само една величина, *квантовия спин*. Както вече се уточни, квантовият спин приема само две възможни стойности: „нагоре“ или „надолу“.

Гениалната идея на Бел е да изчисли заплетените вероятности и за други възможни посоки: наляво и надясно, както и под ъгъл. Математически изразено Бел стига до фундаментална теорема, която носи неговото име. С тази теорема той формално доказва, че всяка теория, даже и със скрити променливи, претендираща за обяснение на реалността на квантово сплетените частици задължително нарушава принципа за локалност. С други думи, такава теория не е съвместима с връзка между две заплетени частици, още повече ако едната от тях се намира на другия край на Вселената. Информацията между тях не може да пътува със скорост, по-висока от скоростта на светлината. Бел формализира своя труд с неравенства, които са удовлетворени ако двете частици са независими една от друга след разделянето им, или нарушени ако следват принципите



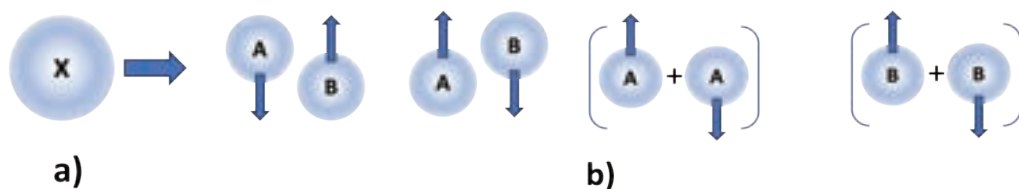
Джон Бел пред черната дъска в ЦЕРН през 1962 г. Снимка ЦЕРН

на квантовата механика. Близко три десетилетия след статията на АПР става възможно да се разреши научно-философският спор между Айнщайн и Бор!

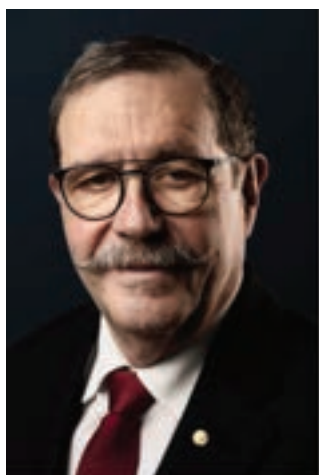
Научна теория, която противоречи на очевидни факти, не е пълна и трябва да бъде променена. Приложено за системата от две частици, неравенството на Бел дава възможност за експеримент, чрез който предсказанията на квантовата механика могат да бъдат проверени и въпросът дали математическият формализъм на тази теория е точен, да бъде окончателно решен. Експериментална проверка на неравенствата на Бел става възможна почти веднага след публикуването на статията му, благодарение на напредъка в технологията и влизането в употреба на първите лазери. Трудът на Бел взема под внимание всички възможни вероятности за квантов спин на две частици, да кажем А и В, които представляват ядрен разпад на друга частица, например Х. След като двете вторични частици се разделят, според принципа за суперпозиция всяка от тях притежава едновременно и двете възможности за спин, нагоре и надолу. Квантовата механика гласи, че вероятностите А да е нагоре или надолу са по 50%. Същото се отнася и за час-

тицата В, която също е суперпозиция от две състояния. Физикът Ангел измерва спина на А и го намира нагоре. За да направи същото измерение колежата му Борис е далече от него, например на луната. Неговият резултат е спин надолу. Принципът на локалност е нарушен, но квантовата теория се оказва вярна. Ако заместим двете възможни посоки на спина с изгра на ези-тура стигаме до аналогията, описана в увода на тази статия.

Предложеният от Джон Бел експеримент е няколко пъти повторен, като всички възможни вратички към алтернативни обяснения са предвидени и преговорени. Джон Клаузер (John Clauser), Алан Аспе (Alain Aspect) и Антон Зайлингер (Anton Zeilinger), лауреати на Нобелова награда през 2022 г. окончателно доказват, че неравенствата на Бел са нарушени и то точно както квантовата механика предсказва. Две частици, взаимодействали в миналото, остават зависими една от друга, даже и разстоянието между тях да е огромно. Между тях има силна и невидима корелация, което обаче не означава, че сигнал или информация пътуват по-бързо от светлината. Принципът за локалност не е спасен, точно както е странното



а) Частицата Х без спин (спин=0) се разпада на две частици, А и В, всяка от които има спин. Ако спинът на частицата А е насочен надолу, този на частицата В е насочен нагоре или пък обратно; б) Двете частици след взаимодействието. Преди всякакво измерване, тоест преди намеса на наблюдател или апарат, спинът както и на А, така и на В е суперпозиция от две възможни стойности. Схема: Стефан Плачков



Лауреатите на Нобелова награда по физика за 2022 г. Ален Аспе, Джон Клаузер и Антон Зейлингер. Снимка: Nobel Prize Outreach

предсказване на квантовата механика. Интерпретацията на Копенхаген, според която квантовият свят не съществува независимо от наблюдателя, остава валидна. Свят, несъществуващ без наблюдател? С типичния си бърлив хумор известният филмов режисьор Уди Алън (Woody Allen) коментира: *„Не се съмнявам, че невидимият свят съществува. Въпросът е дали е близо до центъра и до колко часа е отворен?“*

Благодарение на бързия технически прогрес от последните 50 години квантовото заплитане е в основата на няколко нови научни области, които понякога са квалифицирани като *Нова Квантова Революция*. Между най-известните

от тях са квантовата криптография и квантовите компютри. Квантовата криптография позволява предаване на напълно засекретени данни. Даже евентуално откриване на квантовия ког водни, чрез квантов колапс, до незабавно доказателство за външна намеса. Квантовите компютри са друго много надеждно приложение. Теоретично, един квантов компютър може да бъде хиляди и милиони пъти по-мощен от най-добрите стандартни изчислителни машини днес. И двете нови технологии се развиват с бързи темпове, въпреки че внедряването им във всекидневния живот остава засега само като силно атрактивна перспектива. ■

Човешката главова въшка разкрива древни миграции на човечеството

Известно е, че човешките въшки са безкрили насекоми, отнасящи се към отделно семейство (Pediculidae) от огромния клас на Насекомите (Insecta). Цялото семейство включва около 300 познати вида, паразитиращи по човека и по стотици бозайници и птици в света, но се предполага, че действителният им брой е доста по-голям. От тях само 2 вида са специфични паразити на човека и имат космополитно разпространение. Това са главовата въшка (*Pediculus capitis*), която живее и паразитира само върху главата на човека и грешната въшка (*Pediculus vestimenti*), която паразитира по тялото на човека и се укрива главно в дрехите и постелите. Някои зоолози и ентомолози считат, на основата на сходните морфологични белези на двата вида, че в случая се касае за един вид – *Pediculus hominis*, а посочените главова и грешна въшки са подвидове към този род, но това е проблем на зоологическата класификация. И двата вида въшки са толкова тясно свързани с човека, че никога не го напускат доброволно, а ако бъдат отделени от него скоро умират. Поради големия интерес към човешките въшки главно от медицинско гледище, те са обект на множество разнообразни изследвания.

В последните месеци на 2023 г. в американското списание PLOS ONE се появи интересна генетична статия, която доказва, че човешките въшки могат да бъдат полезни и при изясняване на проблеми, свързани с древните миграции на човека и разселването му на съвременните континенти. Статията е от международен колектив учени, начело с д-р Марина Асунс (Dr Marina Ascunce) и доказва как „Ядреното генетично разнообразие на въшките хвърля светлина върху човешкото разселване по целия свят“. Авторите са анализирали генетичните вариации на 274 човешки въшки от 25 различни географски



Човешка главова въшка (*Pediculus capitis*)

места в света и установяват съществуването на 2 отделни кластера от въшки, които много рядко се кръстосват. Единият кластер, наречен Кластер 1 има световно (космополитно) разпространение, докато Кластер 2 е разпространен само в Европа, Северна и Южна Америка.

На основата на получените резултати авторите на изследването считат, че главовите въшки са дошли някога на американския континент два пъти. Първият път е по време на човешка миграция в древността от Азия през Беринговия проток и вторият път – по време на по-късното европейско откриване и заселване в Америка. Интерес представлява фактът, че смесица от въшки от двата кластера се открива единствено в Северна и Южна Америка. Според проучването това е резултат на кръстосването на въшките, донесени по време на двете прониквания на човека на този континент. А това подкрепя с нови аргументи хипотезата, че някога хора от Източна Азия са мигрирали в Северна Америка и са били първите коренни американци там. По-късно те се разселват и на юг в Централна Америка, където днес се откриват генетичните смесици с европейските им предшественици.

По Science Daily и Science News