

**Б.А. Искаков** Физико-техникалық институты ЖШС, Сәтбаев университеті, Қазақстан, Алматы  
e-mail: leodel@mail.ru

## КВАНТТЫҚ ТҮЙІСУ – БЕЛГІСІЗГЕ ЖОЛ

Шын мәнінде, кванттық түйісу (КТ) идеясы шамамен 90 жыл бұрын пайда болды, бірақ 1920 жылдардың екінші жартысында жанама түрде енгізілді. Алайда, КТ 1970 жылдардың ортасында ғана теориялық физикада маңызды құрал болды және оның жұмыс құралына айналу процесі біршама баяу болды. КС шындығын растайтын алғашқы эксперименттер 1970 жылдары жүргізілді, бірақ шешуші эксперименттер тек 1980 жылдары жүргізілді. Сол кезде КТ кванттық механиканың физикалық шындық туралы түсінігімізді қалай өзгерткенін жақсырақ түсінуге тырысқан тар шеңбердегі ғалымдардың назарын аударды. Кванттық физикада бөлшектер бір уақытта әртүрлі нүктелерде орналасып қана қоймайды, сонымен бірге олардың болуы ықтимал кеңістік бөлшектің мінез-құлқына әсер етеді. Соңғы уақытта КТ-ге қызығушылық айтарлықтай өсті, өйткені ол кванттық компьютерлер мен кванттық байланыс желілерін дамыту үшін іргелі негіз болды. Енді эксперименттік физиктердің әртүрлі бөлшектер конфигурациясының шиеленіскен күйлерін жасайтыны туралы хабарламалар көбінесе ғылыми журналдарда ғана емес, сонымен қатар бұқаралық ақпарат құралдарында да аяқталады. Қазіргі уақытта бұл жорамалдар мен гипотезаларды тексеруге мүмкіндік жоқ, өйткені біздің технологияларымыз бұл үшін жеткілікті түрде дамымаған. Мүмкін жақын болашақта ғалымдар міндетті түрде анықтайтын шығар. Әзірге мұндай мүмкіндік бар деп болжау керек.

**Түйін сөздер:** кванттық физика, кванттық түйісу, физикалық шындық, парадокс, ЭПР эксперименті, Белл теңсіздігі.

B.A. Iskakov

LLP Physical-Technical Institute, Satbayev University, Kazakhstan, Almaty  
e-mail: leodel@mail.ru

### Quantum spontaneity – the path to the unknown

The idea of quantum entanglement (QE) actually emerged about 90 years ago, but was implicitly presented in the late 1920s. However, QE became a significant tool in theoretical physics only in the mid-1970s, and the process of its transformation into a working tool occurred quite slowly. The first experiments confirming the reality of QE were conducted in the 1970s, but decisive experiments were performed only in the 1980s. At that time, QE attracted the attention of only a narrow circle of scientists who tried to better understand how quantum mechanics changed our ideas about physical reality. Recently, interest in QE has significantly increased because it has become the fundamental basis for the development of quantum computers and quantum communication networks. Now, reports that experimental physicists create entangled states of different particle configurations often appear not only in scientific journals but also in the media. Currently, there is no way to test these assumptions and hypotheses, because our technologies are not sufficiently developed for this. Perhaps in the near future, scientists will definitely find out. For now, we must assume that there is such a possibility.

**Key words:** quantum physics, quantum spontaneity, physical reality, paradox, EPR experiment, Bell's inequality.

Б.А. Искаков

ТОО «Физико-технический институт», Сатпаев Университет, Казахстан, г. Алматы  
e-mail: leodel@mail.ru

### Квантовая спонтанность – путь в неизвестность

Фактически, идея о квантовой спутанности (КС) возникла около 90 лет назад, но неявно была представлена во второй половине 1920-х годов. Однако, КС стала значимым инструментом теоретической физики только в середине 1970-х годов, и процесс ее превращения в рабочий инструмент происходил довольно медленно. Первые эксперименты, подтверждающие реальность КС, были проведены в 1970-х годах, но решающие эксперименты были выполнены только в 1980-х. В то время КС привлекала внимание лишь узкого круга ученых, которые старались

лучше понять, как квантовая механика изменила наши представления о физической реальности. Недавно интерес к КС значительно возрос, потому что она стала фундаментальной основой для разработки квантовых компьютеров и сетей квантовых коммуникаций. Сейчас сообщения о том, что физики-экспериментаторы создают спутанные состояния различных конфигураций частиц, часто попадают не только в научные журналы, но и в СМИ. В настоящее время нет возможности проверить эти предположения и гипотезы, поскольку наши технологии недостаточно развиты для этого. Возможно, в ближайшем будущем ученые обязательно выяснят. Пока надо предположить, что такая возможность есть.

**Ключевые слова:** квантовая физика, квантовая спонтанность, физическая реальность, парадокс, ЭПР-эксперимент, неравенство Белла.

## Кіріспе

Кванттық механика 1925-1926 жылдардағы Вернер Гейзенберг пен Эрвин Шредингердің жарияланымдарынан кейін өте тез жетілді. Келесі он жыл ішінде жаңа теория микроәлемдегі де, макрокосмдағы да құбылыстарды түсіну үшін жалпы қабылданған негіз болды, ядролық физикадан қатты дене теориясына дейінгі кең ауқымды қамтиды. Осы кезде кванттық механика математикалық түрде, негізінен Пол Дирактың жұмысы арқылы ресімделді және тәжірибе жүзінде бірнеше рет тексерілді. Теория табыстан табысқа көшті және физиктердің барлығы дерлік оны түпкілікті ақиқат деп мойындады [1].

Алайда бұған дейін кванттық механиканы, әсіресе Альберт Эйнштейнді сынаушылар болған. Оған оның ықтималдық табиғаты, Гейзенбергтің белгісіздік қатынасы және осының нәтижесінде бөлшектердің координаталары мен жылдамдықтарын бір уақытта анықтау мүмкін еместігі, сонымен қатар кванттық механикалық өлшемдер мәселесін шешуде анық болмауы ұнамады. Бордың пікірінше, кез келген кванттық жүйенің күйін оның мінез-құлқы туралы ақпарат алынатын аппаратсыз қарастыруға болмайды. Теория кванттық механикалық объектілерді өлшеудің белгілі бір нәтижелерінің ықтималдығын болжай алады, бірақ өлшенген шамалардың «шын мәнінде» мәндері қандай екендігі туралы ештеңе айта алмайды. Дәлірек айтқанда, бұл сұрақтың өзі мағынасыз.

## Әдістеме

Эйнштейн бұл логиканы құптамады және оны теріске шығаруға белсенді түрде тырысты. Ол Бор өз пайдасына сәтті түсіндірілген ойдан шығарылған тәжірибелер жасады. 1935 жылы шын мәнінде Подольский жазған және үш ғалымның қолы қойылған мақала жарияланды. ЭПР деп қысқартылған бұл жұмыс

кванттық түйісу тұжырымдамасын дамытудың бастапқы нүктесі болды. Ол өз уақытында үлкен қызығушылық тудырмаса да, бүгінгі күні ол 20 ғасырдағы теориялық физиканың маңызды зерттеулерінің бірі болып саналады [2].

Эйнштейн, Подольский және Розен екі негізгі сенімді басшылыққа алды, олар айқын деп санады. Біріншіден, өлшеу кезінде жүйеге әсер етпей дәл болжауға болатын физикалық жүйенің кез келген қасиеті анықтамасы бойынша физикалық шындықтың элементі болып табылады. Екіншіден, жүйенің толық сипаттамасы осы нақты жүйеге қатысты барлық осындай элементтерді қамтуы керек. Содан кейін олар ойлау тәжірибесін ұсынды: біз бірдей моменттері мен жылдамдықтары бар қарама-қарсы бағытта қозғала бастайтын А және В бірдей бөлшектер жұбын жасай аламыз. Белгісіздік принципі кез келген сәтте әрбір бөлшектің орнын және импульсін дәл өлшеуге мүмкіндік бермейді, бірақ бұл маңызды емес. Кванттық «егіздер» бір-бірінен айтарлықтай қашықтықта қозғалады деп алайық және біз нөлдік қателікпен орындауға болатын А бөлшектің орнын дәл өлшейміз. Осылайша, біз бір уақытта В бөлшектің орналасуы туралы нақты ақпарат аламыз. Біздің жабдық тек А бөлшектерімен әрекеттесетінін, ал В бөлшектерінің күйі бұзылмағанын атап өту маңызды. Демек, В бөлшектің орны физикалық шындықтың элементі ретінде қарастырылуы керек.

В бөлшектің координаталарын табудың орнына біз оның импульсін тағы да тамаша дәлдікпен өлшей аламыз. Жұптың толық импульсі нөлге тең болғандықтан, біз А бөлшектің импульсін оған ешқандай түрде тигізбей-ақ автоматты түрде анықтаймыз. Демек, бұл шама да физикалық шындықтың элементі болып табылады.

Алайда кванттық механиканың теңдеулеріне сәйкес бөлшектің орны мен импульсін нақты есептеу белгісіздік қатынасына байланысты мүмкін емес және тек жуық мәндерді алуға болады. Бұл жағдайда Эйнштейн, Подольский

және Розен дәлелдейді, шындықтың кванттық механикалық сипаттамасы толық емес. Эрвин Шредингер ЭПР-парадоксын талдай отырып, терең қорытынды жасады: егер екі жүйе уақытша өзара әрекеттесіп, содан кейін бөлек болса, онда оларды өз күйінде бола отырып, тәуелсіз деп сипаттауға болмайды. Бұл кванттық механиканың классикалық ғылымнан ерекшеленетін басты ерекшелігі, өйткені уақытша өзара әрекеттесу нәтижесінде бұрын тәуелсіз жүйелер немесе олардың – функциялары шиеленісіп қалады.

Осылайша, кванттық механиканың ұлы негізін салушылардың бірі жазған сегіз беттік мақаласында кванттық «шұбарлану» алғаш рет сипатталған. Шредингер бірінші болып EPR парадоксының логикалық талдауы маңызды қорытындыға әкелетінін түсінді: кванттық механика олардың элементтері арасындағы корреляция классикалық физика рұқсат еткен кез келген корреляциядан асатын физикалық жүйелердің болуына мүмкіндік береді! Бұл күйлерді ол «шатастырылған» деп атады. Бұдан шығатыны, мұндай әрбір жүйе дербес бөліктерге бөлінбейтін біртұтас бүтін. Кванттық жүйелердің бұл қасиеті локальды емес деп аталады. Шредингер бұл ойды дүр сілкіндірмей айтқанын және басылымның сегіз беттік форматта жасалғанын айта кеткен жөн. ЭПР тәжірибесінде екі электронның спиндері өлшенеді. Егер өлшеу бір бағытта жүргізілсе, бір электронның спині жоғары, ал екіншісі төмен бағытталған. Егер өлшеу басқа бағытта жүргізілсе, мысалы, солдан оңға қарай, онда электрон спиндері қарама-қарсы бағытта бағытталады. Бұл әсер кванттық механикамен түсіндіріледі. Ол екі электрон бар «ажырамайтын» күймен байланысты. Бұл электрондар бір-бірінен үлкен қашықтықта болса да, бір электронның спинінің өзгеруі екіншісінің спиніне бірден әсер ететінін білдіреді. Бұл құбылыс кванттық корреляция деп аталады. Дегенмен, бұл электрондар арасындағы физикалық әрекеттесусіз қалай болатыны анық емес. Сондықтан бұл құбылысты түсіндіруде қандай да бір парадокс бар және оны шешуде әлі күнге дейін біртұтас көзқарас жоқ [3].

Бастапқыда бұл мәселені Ирландиядан келген дарынды физик шешті, оның есімі, өкінішке орай, қалың жұртшылыққа онша танымал емес. Джон Стюарт Еуропалық ядролық зерттеулер орталығында жұмыс істеді, онда элементар бөлшектер теориясын дамытуға және үдеткіштерді жасауға үлкен үлес қосты. 1964 жылы Белл кванттық механиканың негіздерін,

соның ішінде ЭПР парадоксын зерттей бастады және нәтиже эксперименттерде түйіскен күйлердің бар екендігі туралы гипотезаны сынау мүмкіндігінің математикалық дәлелі болды. Бұл дәлелді кейде Белл теоремасы деп атайды, дегенмен Беллдің өзі бұл терминді өз мақаласында қолданбаған.

## Нәтижелер

Оның алғашқы жұмысының математикасы өте қиын болмаса да, ол әлі де танымал мәтіндерге сәйкес келмейді. Алайда оның тұжырымдарын техникалық мәліметтерсіз жеткізуге болады. Белл ЭПР ойлау экспериментінің негізінде шиеленіскен күйлердің шындығын қалай растауға немесе жоққа шығаруға болатындығын көрсетті. Бұл үшін ерікті бұрыштарда орналасқан кем дегенде үш, жақсырақ төрт магниттік детекторды пайдалану қажет. Эксперимент жалпы спині нөлге тең электрон жұптарының көзін пайдаланудан, бөлшектерді қарама-қарсы бағытта жіберуден және сигналдарды тіркеу үшін детекторларды орналастырудан тұрады. Көзді әрбір «қосудан» кейін бір сол және бір оң детектор іске қосылады, бірақ қандай детекторлардың іске қосылғаны алдын ала белгісіз [4,5].

Белл теоремасын тексеруге арналған алғашқы тәжірибелер поляризацияланған фотондармен жүргізілді. Ортақ спині нөлге тең шатасқан электрон жұптарының орнына альтернативті поляризация режимдері бар жарық кванттарының жұптары (мысалы, тік және көлденең), ал магниттік детекторлардың орнына поляризация сүзгілері қолданылды. Осыған ұқсас эксперименттер 1970 жылдары бірнеше рет жасалды. Ең қызықты нәтижелерді 1972 жылы Джон Клаузер және оның он жыл бұрын қайтыс болған аспирант Стюарт Фридман алған. Олар екі жыл бойы өзгертілген нұсқада болса да, [6] мақаласында сипатталған схеманы іс жүзінде жүзеге асыратын оптикалық жүйені құруға жұмсады. Олардың тәжірибесінде қоздырылған кальций атомдары шығаратын жарық кванттары қолданылды. Жарық көзі оптикалық орындыққа орнатылған эксперименттік қондырғының ортасында орналасқан. Фотондар орындықтың қарама-қарсы ұштарына бағытталды және бір-біріне әртүрлі бұрыштарда бағытталған жұп поляризаторлар арқылы өтті [7, 8].

Келесі қадамды 1981-82 жылдары Ален Аспек пен оның үш серіктесі жасады. Олардың лазерлік оптикамен тәжірибелік қондырғысы алдыңғы зерттеушілердің жабдығынан

әлдеқайда тиімді және жылдам шатастырылған фотондарды жасады. Сонымен қатар, ол фотондарды әр 10 наносекунд сайын әртүрлі поляризаторлар мен детекторларға бағыттауға мүмкіндік беретін жоғары жиілікті оптоакустикалық қосқыштармен жабдықталған. Нәтижесінде, Aspect және оның серіктестері бұрынғыларға қарағанда Белл теңсіздігінің бұзылуын әлдеқайда сенімді көрсете алды. Атап айтқанда, олардың бұл теңсіздік нұсқасында, егер  $S$  функциясының мәндері нөлден минус бірге дейінгі аралықта болса, кванттық механиканың постулаттарына күмән келтіруге болады [9-12].

КТ құбылысы классикалық есептеуіш құрылғыларға қол жетімді емес сандардың үлкен санымен жұмыс істей алатын кванттық компьютерлерді құру мүмкіндігін ашады. Мұның бір себебі – кванттық компьютерлерде түйіскен күйлерді пайдалану. Екі логикалық күйдің біреуінде ғана болатын классикалық компьютерлердің элементар ұяшықтарынан айырмашылығы, кванттық компьютердегі кубит күйі екі негізгі күйдің суперпозициясы болып табылады: нөл және бір. Кубиттер бір-бірімен қосылып, көптеген түйіскен күйлерді жасай алады. Кубиттердің саны артқан сайын компьютердің мүмкін күйлерінің саны экспоненциалды түрде артады. Кванттық компьютердің есептеу жылдамдығы қандай да бір арнайы логикаға тәуелді емес, кубиттер саны мен өзара байланысқан күйлер санына байланысты [13-15].

### Қорытынды

Кванттық физикада бөлшектер бір уақытта әртүрлі нүктелерде орналасып қана қоймайды, сонымен бірге олардың болуы ықтимал кеңістік бөлшектің мінез-құлқына әсер етеді. Бұл ықтималдық нөлге тең болуы мүмкін болса да. Сонымен қатар, бөлшектер үлкен қашықтықта бір-біріне әсер ете алады. Кейбір жағдайларда ол жергілікті болуы мүмкін, басқаларында жергілікті емес болуы мүмкін. Мұның бәрі мидың жарылысы. Мұның бәрі қондырғыларда, мысалы, мюонды, электронды немесе мезонды дәл тіркейтінімізге әкеледі. Біз зерттегендердің барлығы осы уақытқа дейін 100% сенімді түрде зерттелгеніне кепілдік қайда? Біз тіркейтін және зерттейтін нәрсе оның шын

мәнінде қандай екенін анықтау нұсқаларының бірі болуы мүмкін (жүйенің ықтимал күйі). Өйткені, кванттық физика бір бөлшектің әртүрлі күйде болуы мүмкін екенін мойындайды. Мүмкін, біз туралы ештеңе білмейтін белгілі бір жағдайларда бөлшек өзін басқаша ұстауы мүмкін немесе бізге белгілі бір бөлшек түрінде «көрінуі», ал басқа жағдайларда басқа бөлшекке айналуы мүмкін. Кванттық физикада бұл мүмкін емес деп ешкім 100% сенімділікпен айта алмайды.

Енді, мысалы, электронды алайық. Атомда электрон бір уақытта атомның белгілі бір орбитасының әртүрлі нүктелерінде болады. Ал егер бос күйде электрон басқаша әрекет етсе ше? Біз бөлшекті электрон ретінде білеміз. Бірақ электронның өзі басқа белгісіз бөлшектің ықтимал күйі болып шығуы мүмкін. Ал бұл бөлшектің электрон болуы ықтималдығы ең жоғары. Үлкен ықтималдығы бар электрон сияқты әрекет ететін бөлшек бар делік. Бұл ықтималдық 1-ге жақын, бірақ 1 емес делік. Басқа жағдайларда бұл бөлшек, мысалы, позитрон болуы мүмкін. Әлемде позитрондарға қарағанда электрондар көп екенін ескерсек, бұл опция бәсекеге қабілетті болуы мүмкін.

Екінші мысал – мюондар. Мюонның өзі бірдей электрон, бірақ массасы үлкен. Кванттық әлемде жергілікті жерде белгілі бір жағдайларда электронның осы аймақтағы барлық мүмкін күйлерінің жалпы массасы сақталған кезде «кемшілік» немесе «әсер» болады деп болжауға болады. Анау. электрон бір уақытта әртүрлі нүктелерде болады және бұл нүктелердің массасы сақталады. Бұл жергілікті жерде бөлшектер бір болғанымен, массасы бірнеше электрондардың массасына ұқсайды. Ал біз бұл аймақты нысандарға мюон ретінде тіркейміз. Егер жағдайды одан да күрделендіретін болсақ, онда бұл аймақта электрон тек электрон түрінде ғана емес, сонымен қатар позитрон ретінде де болуы мүмкін. Ал массасын ғана емес, зарядын да сақтауға мүмкіндік бар. Тек енді заряд  $-e$ ,  $0$  және  $+e$  болуы мүмкін.

Қазіргі уақытта бұл жорамалдар мен гипотезаларды тексеруге мүмкіндік жоқ, өйткені біздің технологияларымыз бұл үшін жеткілікті түрде дамымаған. Мүмкін жақын болашақта ғалымдар міндетті түрде анықтайтын шығар. Әзірге мұндай мүмкіндік бар деп болжау керек.

Әдебиеттер

1. Christopher Gordon Timpson (2004) *Quantum Information Theory and the Foundations of Quantum Mechanics*. Oxford, GB: Oxford University Press.
2. Albert Einstein, Boris Podolsky, Nathan Rosen (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Physical Review* (47):777-780.
3. Watrous John. (2018) *The Theory of Quantum Information*. University of Waterloo, Ontario Cambridge University Press. ISBN:9781316848142 <https://doi.org/10.1017/9781316848142>
4. Bell J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox // *Physics*, 1(3), 195-200. <https://journals.aps.org/physics/pdf/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
5. Aspect A. (1999) Bell's inequality test: more ideal than ever // *Nature*, 398(6724), 189-190. <https://www.nature.com/articles/18318>
6. Clauser J. F., Horne M. A., Shimony A., Holt, R. A. (1969) Proposed experiment to test local hidden-variable theories // *Physical Review Letters*, 23(15), 880-884
7. <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.23.880>
8. S. J. Freedman, J. F. Clauser (1972) Experimental test of local hidden-variable theories // *Physical Review Letters* 28.14: 938.
9. N. Gisin and R. Thew (2007) Quantum communication // *Nature Photonics* 1.3: 165-171.
10. A. Aspect et al. (1982) Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, vol. 49, no. 25, pp. 1804-1807.
11. A. Aspect et al. (1982) Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities // *Physical Review Letters*, vol. 49, no. 2, pp. 91-94.
12. A. Zeilinger et al. (1998) An Experimental Test of Nonlocal Realistic Theories // *Physical Review Letters*, vol. 81, no. 23, pp. 5035-5038.
13. Weihs Gregor, Jennewein Thomas, Simon Christoph, Weinfurter Harald, Zeilinger Anton. (1998) Violation of Bell's Inequality under Strict Einstein Locality Conditions // *Physical Review Letters*. 81. 10.1103/PhysRevLett.81.5039.
14. Ladd T. D., Jelezko F., Laflamme R., Nakamura Y., Monroe C., O'Brien J. L. (2010) Quantum computers // *Nature*, 464(7285), 45-53.
15. Biamonte J. D., Love P. J. (2017) *Quantum information theory: an introduction*. Springer.
16. Harrow A. W., Hassidim A., Lloyd S. (2009) Quantum algorithm for linear systems of equations // *Physical Review Letters*, 103(15), 150502.