

Нобелова награда за физику 2022. године

Мирољуб Дугић

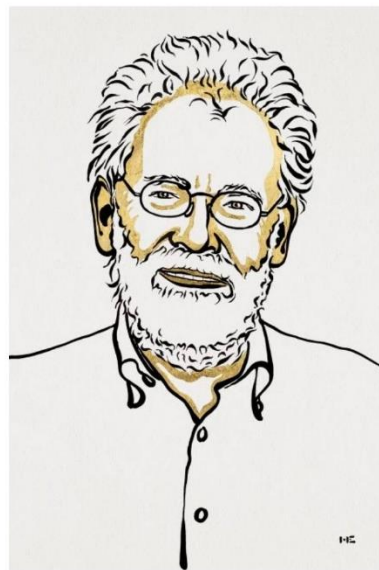
Нобелову награду за физику за 2022. годину поделила су тројица експерименталних физичара за област *заснивања квантне механике*, Алан Аспе (Alain Aspect) из Француске, Џон Клаузер (John Clauser) из САД и Антон Цајлингер (Anton Zeilinger) из Аустрије¹.



Алан Аспе



Џон Клаузер



Антон Цајлингер

У образложењу Нобеловог комитета стоји да је награда додељена за *„експерименте са квантно сплетеним фотонима и утврђивање нарушења Белове неједнакости, као и пионирски развој области квантне информације“*.

Мање формално, могло би се рећи да су поменути физичари учествовали, и одлучујуће допринели рушењу једне необичне предрасуде која је деценијама владала у вези са истраживањима у области *заснивања квантне механике* па отуда и формирању неких, до тада непостојећих, *физичких наука*, као и развоју нове врсте технологије – *квантне технологије*.

У кратком интервјуу, уобичајеном после објављивања одлуке Нобеловог комитета за дату научну област, Џон Клаузер каже следеће (слободан превод са енглеског²):

„У то време мени је било јасно да се ради о научно важном истраживању. Зато сам одлучио да се тиме бавим, упркос могућности да то може угрозити моју каријеру; у неком смислу то се и десило, јер ја никада нисам био професор!“

Само је по себи јасно да овај цитат подразумева нешто необично. *Како се може десити да неко угрози своју каријеру бавећи се истраживањем које може довести до Нобелове награде?!* Одговор на ово питање захтева посебан историјски осврт.

Област заснивања квантне механике: једна невероватна предрасуда

Заснивачи основа савремене науке (квантне механике и теорије релативности) упорно су указивали на проблеме у самим основама квантне механике која је била формулисана почетком 30. година 20. века. У то спадају и славни ЕПР (Einstein, Podolsky, Rosen) „парадокс“ као и, можда још славнија, „Шредингерова мачка“. Ипак је физику развијану између 1935. и 1980. године одликовала једна широко раширена предрасуда, упркос савета које су нудили, између осталих, и Ајнштајн, Шредингер, Хајзенберг, Бор, Де Броји, па и Дирак, а посебно фон Нојман.

Та предрасуда имала је и своје психолошко оправдање. Наиме, ако би се пратили савети заснивача квантне механике и користио пуни квантномеханички формализам, изучавање вишечестичних система би врло брзо водило математички превише сложеним задацима. Чини се да је зато било најлакше такве проблеме „гурнути под тепих“ и оправдавати се „општим мишљењем“, то јест, предрасудом да истраживања у области заснивања квантне механике не могу довести до било каквих важних научних достигнућа, а још мање до технолошки корисних резултата. Стога се, по мишљењу већине у то доба, о поменутих истраживањима говорило као о „филозофији“, а не о „правом“ научном истраживању.

Другим речима, квантна механика је сматрана завршеном науком, стерилном када су у питању прави и пожељни нови научни продори, а посебно када су у питању корисни технички, или технолошки напреси. У светлу горе изнетог описа доприноса Нобеловаца, овако нешто звучи просто невероватно. Како је могуће да се није могло чак ни наслутити појављивање нових физичких наука, као и развој квантне технологије? Одговор на ово питање би требало да понуде историчари науке у изучавању својеврсног преседана у укупном развоју науке, не само физике.

Општу атмосферу тога доба, проистеклу из поменуто предрасуде, на свој начин илуструју следећи цитати од стране учесника у научном истраживању у физици.

„Какво губљење времена [је то бављење заснивањем квантне механике], хајде да се бавимо правом физиком.“ (Џон Клаузер се сећа реакције неких физичара када им је саопштио чиме надаље жели да се бави, <https://www.youtube.com/watch?v=ZYzILX2uibM>)

„Међутим, у то време је било апсолутно немогуће о тим идејама дискутовати са колегама, или чак објављивати резултате. Један утицајни хајделбершки нобеловац ме је пријатељски обавестио да би било какве даље активности на ту тему могле водити завршетку моје академске каријере!“ (Хајнц-Дитер Це (Heinz-Dieter Zeh) о истраживањима на тему проблема мерења у квантној механици, [arXiv:quant-ph/0512078](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0512078))

Можда најпрецизнији опис тадашње атмосфере везане за „филозофију квантне механике“ дао је Дејвид Мермин (N. David Mermin) следећим речима³:

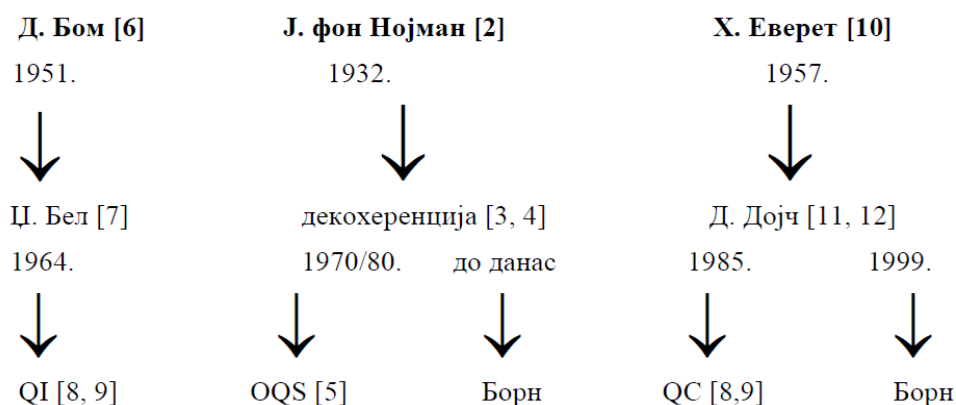
„[То доба одликовало је својеврсно] држање главе у песку и пропис 'ућути и рачунај' ⁴.“

Слични ставови су се могли чути и у необавезним разговорима на тему фундаменталних проблема у физици чак и од неких истакнутих српских физичара; једна занимљива фраза је гласила „[бављење основама квантне механике је нека врста] пошумљавања васионе“.

Нове физичке науке и нова технологија

На сву срећу, неколицина физичара-мислилаца, у које спадају и добитници овогодишње Нобелове награде, није поверовала у научну стерилност изучавања дубљих основа квантне механике. Развој области заснивања квантне механике текао је споро, полако, тек ту и тамо, и сводио се на увођење интерпретација квантне механике као и развој пратећег математичког апарата. Али је зато, корак по корак, ширен фронт нових сазнања и отворен простор за настанак нових физичких наука, као и постављени темељи за развој квантне технологије. *Само захваљујући тим истраживањима формулисана су нове физичке науке и отворена врата за развој технологије без преседана*⁵ – квантне технологије⁶. На слици испод дати су само неки примери у овом смислу⁷.

ПРОБЛЕМ МЕРЕЊА И ИНТЕРПРЕТАЦИЈЕ КМ



СЛИКА 1. Легенда: QI/C-Квантна информатика/рачунање; OQS-Отворени квантни системи; Борн-Постулат о вероватноћама (Борново правило).

На слици изнад, на врху су истакнута имена заснивача одређених интерпретација квантне механике, а стрелице наниже указују на (скраћени) пут настанка нових, до тада и ненаслућених, научних области физике као што су области квантне теорије информације и квантног рачунања (QI, QC), теорија отворених квантних система (OQS) као и доприноси неаксиоматском увођењу „Борновог правила“, што је уобичајено формулисано Постулатом о вероватноћама у стандардној квантној механици. Од непосредног интереса за овогодишњу Нобелову награду је лева „грana“ која полази од Дејвида Бома (David Bohm) и његовог предлога за увођење, такозваних, скривених варијабли у квантној механици.

Пратећи савете заснивача квантне механике, посебно ЕПР „парадокс“, Дејвид Бом поставља следеће питање: „*Да ли је могуће претпоставити да је формализам квантне механике заснован на неком скупу класичних променљивих (варијабли) које су нама експериментално недоступне?*“. Идући тим трагом, Џон Бел (John S. Bell) појмовно разрађује аргументе ЕПР-а и уводи неједнакост која мора важити ако такве, класичне варијабле („скривене варијабле“), заиста физички постоје. Данас је Белова неједнакост један од основних *квантитативних мерила* квантне нелокалности – познате и као „квантни холизам“, „квантна несепарабилност“, а у формалном облику као „квантна сплетеност“ (quantum entanglement).

Експерименте у сврху провере важења Белове неједнакости започео је Клаузер крајем 60. година прошлог века, а Аспе наставио тек 1982. године. Цајлингерови доприноси у овом смислу падају тек на почетак 21. века. Сва је прилика да, да није било горе представљене предрасуде, много пре бисмо имали зреле резултате настале из области заснивања квантне механике; тешко је одолети питању како би ти резултати, нове теорије и нова технологија, у том случају, изгледале...

Серије експеримената везане за Белову неједнакост, чему су наши Нобеловци одлучујуће допринели, указале су на оно што се дало наслутити још из лекција које су нудили Ајнштајн, Шредингер и остали и донело недвосмислен закључак:

Квантна сплетеност није никакав математички куриозитет, као ни патологија квантне теорије, још мање „филозофија“. Иако јесте математичка компликација, квантна сплетеност није мање физички, лабораторијски, реална од квантних система попут електрона и протона у атому водоника. Штавише, квантна сплетеност се може квантификовати па отуда се њоме донекле може манипулисати и контролисати – што су поступци који су у самом корену квантне технологије која је у великом развоју и замаху.

Овај закључак носи изузетно важну лекцију за будућност физике као основне науке: тамо где су проблеми наизглед наивни, а мисаоно сложени, баш ту би требало „копати“ за новим научним „благом“ и може се очекивати нови научни развој. Ову лекцију на свој начин даје и Влатко Ведрал следећим речима⁸:

„Ако је у питању настанак неке нове научне теорије, ја верујем да се то не може очекивати у области физике чврстог стања којом се бави већина физичара. Рад у ужим оквирима не може довести до нових примена квантне теорије. Али зато различити погледи на квантну теорију могу бити катализатори нових идеја. Ако решавате различите проблеме, врло је упутно да свој рад пропустите кроз сито које нуде бројне интерпретације квантне механике.“

Квантна физика

Почетком 80. година прошлог века нарасла је свест о значају достигнућа у области заснивања квантне механике. Даљем истраживању допринео је и повратак квантној механици неких истраживача од великог ауторитета, међу којима су нобеловци Мари Гел-Ман, Герард т'Хофт, Роџер Пенроуз, Ентони Легет, а посебно Џон Вилер. Већ почетком 90. година двадесетог века указали су се обриси нове, велике научне области која је обухватала напред поменуто нове физичке науке и квантну технологију, али и неке касније науке као област квантне термодинамике и квантне метрологије. Та нова област је позната под називом *квантна физика* (quantum physics)⁹. Међусобна повезаност области које обухвата квантна физика учинила је да се неке границе међу квантним наукама донекле обришу, а истраживање у уским оквирима једне области од другоразредног значаја. Баш у духу изнад наведеног става Влатка Ведрала, савремено истраживање блиско области квантне физике одликује упућеност, макар у основним цртама, у широк спектар, како неких савремених дисциплина, тако и основних методских физичких наука попут класичне теоријске механике, феноменолошке термодинамике, статистичке физике, као и неких области математичке физике. У том смислу се може рећи да се одиграва својеврсно обједињавање значајног броја физичких наука које имају и повратни утицај на образовање, не само у области физике, већ и неких делова примењене математике, као и када је у питању образовање у неким техничким наукама.

Стога се слободно може рећи да је данас област заснивања квантне механике ушла у моду и добила поштовање на многим странама научног и технолошког истраживања - у потпуном контрасту са некада присутном предрасудом.

Област квантне физике је већ донела три нобелове награде за физику. Кратко речено, те награде су додељене 1986. године, 2012. и ове, 2022., године. Сасвим је извесно да ће уследити и нове Нобелове награде за ову област. У том смислу за очекивати је да би награду требало да добију, макар, Дејвид Дојч (David Deutsch)¹⁰ и Чарлс Бенет (Charles H. Bennett)¹¹. А награде за технолошки напредак је практично немогуће предвидети^{12,13}. Свеукупно, област квантне физике би се могла испоставити једном од најплоднијих области физике у њеном досадашњем развоју.

Основни проблеми у заснивању квантне механике

Предрасуду, изнад представљену, која је некада важила за област заснивања квантне механике пратила је, у неким круговима, посебно у раним данима формулисања ове теорије, и предрасуда да квантна механика и није толико различита од класичне физике. Ово становиште речито износи Војцех Журек (Wojciech H. Zurek)¹⁴:

„До данас, квантна механика се увелико представља у маниру... да квантна теорија није заиста различита од класичне физике – посебно када системи од интереса постану макроскопски и једино о чему би требало бринути су очекиване вредности опсервабли“.

Поменутом предрасудом се ствара утисак да макроскопски (класични) системи не могу испољити никакво квантно понашање – у супротности са, сада већ одавно постојећим теоријским и експерименталним, резултатима који овде неће бити представљени. Поента је у томе да је квантна механика у својој основи потпуно различита од класичне механике, али да и неки „макроскопски“ системи могу испољити нека типична квантна понашања, с тим да је њихово уочавање сложен експериментални задатак. Другим речима, квантна механика, сва је прилика, је фундаментална теорија за читаву физику (у нерелативистичким оквирима). Опис границе квантног и класичног, опет, захтева зарањање у област заснивања квантне механике; за почетак, препознавање где и како квантна механика суштински одступа од класичне. Тек онда се може размишљати о томе како из квантне следи класична физика – што је посебан правац истраживања који овде неће бити представљен¹⁵.

Дакле, где леже основни проблеми у области заснивања квантне механике?

За дивно чудо, одговор на ово питање се може лако саопштити: проблеми потичу из основних постулата које *уознају и студенти физике при првом сусрету са квантном механиком*. Табела дата испод обухвата само неке аспекте основних проблема у области заснивања квантне механике.

	Класично	Квантно	Питање
Квантна неодређеност	Познавање стања система је довољно за познавање вредности свих физичких величина.	Познавање стања система увек носи неједнозначну вредност неке физичке величине.	Шта <i>физички</i> представља квантно стање?
Квантна сплетеност	Ако постоји, повезаност (корелације) система који интерагују потиче од недовољног познавања стања система у интеракцији (класична, статистичка, неодређеност).	Свако стање целине, то јест система који интерагују, увек носи, поред класичних, и не класичне корелације. При томе, стања подсистема нису добро дефинисана.	Каква је <i>физичка природа</i> не класичних корелација? Имају ли квантни подсистеми (системи у интеракцији) икакву <i>индивидуалност</i> ?
Процес мерења	Мерење није неопходно за опис физичких система.	Квантно мерење се не може описати законом кретања представљеног Шредингеровом једначином.	Да ли постоји <i>општи динамички закон</i> који би обухватио и Шредингерову једначину и истовремено давао опис процеса квантног мерења?

Свака интерпретација квантне механике даје своје одговоре на изнад постављена питања. На пример, Бомова теорија¹⁶ уводи класичне положаје и импулсе честица као експериментално недосезиве величине („скривене варијабле“) док квантно стање уноси спољашње поље за честице, попут гравитационог, или електричног поља. Стога сва квантна чудност потиче од квантних особина спољашњег поља, описаног Шредингеровом једначином, у којем се честице крећу. У оквиру ове теорије проблем мерења се не појављује.

Потрага за скривеним варијаблама, започета од стране Бома, довела је до Белове неједнакости; после Беловог рада успостављен је већи број сличних неједнакости које се све, збирно, називају Беловим неједнакостима. Белов резултат успоставља да, ако скривене варијабле физички постоје, Белова неједнакост мора бити задовољена. Експерименти које је започео Клаузер, а затим Аспе, а посебно Цајлингер, убедљиво су показали да за нека стања (сплетена стања која носе квантне корелације), *Белова неједнакост је нарушена*. По себи, то још није доказ да скривене варијабле не постоје, јер физичке претпоставке¹⁷ које стоје у основи Белове неједнакости остављају могућност постојања неконтролабилних корелација између подсистема и остављају питање постојања скривених варијабли отвореним.

У сваком случају, експериментално нарушење Белове неједнакости недвосмислено води закључку да у сложеним квантним системима постоје не класичне корелације, које се стога називају квантним корелацијама и као такве, не само да се *не могу експериментално заобићи*, већ се могу сматрати и особиним сложених квантних система која се може, и квантификовати, и њоме донекле манипулисати – контролисати. Стога су квантне корелације један од *ресурса* за технолошка процесирања којих нема у свету класичних физичких система¹⁸.

Аспе, Клаузер и Цајлингер су са више страна и аспеката експериментално изучили квантну сплетеност и подигли је на ниво физичке реалности - експерименталне досезивости и могућности манипулације - у једнакој мери као што се реалним сматрају, на пример, електрон и протон у атому водоника. Ту лежи главни допринос научника награђених Нобеловом наградом за физику за 2022. годину.

¹ Антон Цајлингер је почасни члан САНУ.

² "I thought it was important at the time, even though I was going to ruin my career by doing it, and in some sense I did: I've never been a professor!" <https://www.youtube.com/watch?v=ZYZiLX2uibM> .

³ [The Universe Is Not Locally Real, and the Physics Nobel Prize Winners Proved It - Scientific American.](#)

⁴ 'Shut up and calculate'.

⁵ У једном интервјуу, Цајлингер каже: „Ово поље [квантна информатика и рачунање] не би ни постојало да се људи нису бавили заснивањем квантне механике.“; [“This field wouldn't even exist if people hadn't worried about the foundations of quantum physics”](#) .

⁶ <https://qt.eu>.

⁷ Преузето, овде без детаља, из М. Дугић, у „Републички семинар о настави физике 2011“, стр. 37.

⁸ New Scientist, 26 June 2010, p 34.

⁹ [Quantum Physics \(arxiv.org\)](#).

¹⁰ Појам квантног рачунања којег је 1985. увео Дојч је у корену читаве области квантног рачунања.

¹¹ Чарлс Бенет је учествовао у увођењу квантне телепортације, квантне криптографије, као и квантног супергустог кодирања.

¹² Највећи број Нобелових награда за физику је до сада додељен за техничко-технолошка достигнућа.

¹³ У свом карактеристичном тону, Нилс Бор каже: „Предвиђања су обично тешка, посебно ако се тичу будућности.“

¹⁴ Rev. Mod. Phys., Vol. 75, No. 3, July 2003.

¹⁵ И у овом смислу допринос Цајлингера је кључан – познати експерименти са просторном интерференцијом и декохеренцијом неких макромолекула (фулерена и неких протеина).

¹⁶ Као и неке друге, Бомова интерпретација је постала самостална физичка *теорија*.

¹⁷ Локалност подсистема, реалност њиховог постојања и „слободна воља“ експериментатора да самостално одлучује о опсерваблама које ће мерити у експерименту.

¹⁸ По угледу на квантне корелације у сплетеним квантним стањима, уведене су и друге врсте неklasичних, квантних, корелација које се збирно називају квантни дискорд (quantum discord), што је, наравно, препознато као нови технолошки ресурс.