

Д.1. Јунгов експеримент

Фишер је Фишер, а коњ је коњ.

Михаил Таљ, коментаришући изјаву Бобија Фишера да би (он, Боби) свјетској првакињи Нони Гаприндашвили могао дати скакача (енгл. *knight* = витез; руски *коњ*) „форе“.

Ако мене питате, онда се 90 посто чуда квантне механике може разумјети анализом једног *мисаоног* (обично названог Јунговим) *експеримента*. Прво да вам објасним шта је „мисаони експеримент“ (њемачки: *Gedankenexperiment*). То је експеримент који се не може (бар у одређеној фази развоја науке, првенствено због технички и/или технолошки нерјешивих проблема) *практично* извести, али се, на основу других, непобитно доказаних чињеница, *поуздано зна* какав би резултат дао када би га било могуће реализовати. Навешћу тривијалан примјер: замислите да баците 1.000.000.000.000.000.000 новчића (динара) у ваздух и установите колико пута сте добили писмо, а колико пута главу. Сигурно је да би резултат био 500.000.000.000.000.000 писама и 500.000.000.000.000.000 глава (не хватајте ме за ријеч, било би вјероватно *релативно* малих одступања од тих округлих бројева – али ако први број напишем као $1,000.000 \cdot 10^{18}$, онда вам гарантујем да ће други бити $0,500.000 \cdot 10^{18}$). Ово је очигледно мисаони експеримент (могао се реализовати можда само у вријеме инфлације из 1993), јер толико динара (срећом) нема (више) на свијету. Како знамо да је резултат тачан? Тако што ћемо направити експеримент са 1.000 динара и добити (врло приближно) 500 пута писмо и 500 пута главу. Ако то урадимо са 10.000 динара, добићемо (још приближније, тј. са још мањом релативном грешком) по 5.000 пута писмо и главу. Потребно је још само имати елементарно повјерење у законе великих бројева, па да закључимо да је наш мисаони експеримент коректно замишљен. У квантној механици мисаони експерименти су одиграли посебно значајну улогу, управо због тешкоћа везаних за извођење реалних експеримената. На чувеној Солвејевској (*Solvay*) конференцији, која се почевши од 1927. одржавала у Бриселу (*Bruxelles*) сваке треће године, гдје се скупљао „крем“ науке тог доба, Ајнштајн с једне, и Бор (+ Хајзенберг) с друге стране полупали су небројено много мисаоних апаратура, први „нападајући“, други „бранећи“ квантну механику (зашто знаци навода, објаснићу касније). За разлику од претходног примјера с динарима, квантномеханички мисаони експерименти су по правилу представљали *поједностављења*

одговарајућих реалних експеримената – из посљедњих је (мисаоно) искључивано све што није апсолутно битно, да би се ефект редуковао на оно што је стварно есенцијално.

Вратимо се Јунговом експерименту. Извео га је за класичне таласе Јунг, а одговарајући мисаони експеримент наћи ћете описаног у сваком уџбенику квантне механике. Када бих се ја питао, звао би се Фејнмановим мисаоним експериментом. Јер, оно што је о њему написао Фејнман у својим *Lectures on Physics* (то су оних 11 страница које сам већ споменуо) представља за мене врхунац науке, филозофије, литературе и, *last but not least*, поштења. Да није кажњиво, најрадије бих превео сваку његову ријеч, јер ту се не може ништа ни додати ни одузети. Умјесто тога урадићу оно што је радио Брајен де Палма (*Brian de Palma*) с Хичкоковим (*Alfred Hitchcock*) филмовима (а ви слободно реците, видјела жаба како се коњ поткива ...): преузећу све идеје, а промијенићу само форму. Зашто сам споменуо „поштење“? Јер сам увјерен да Фејнман (као ни ја – тј. жаба) није био убијеђен да је на тим солвејевским конференцијама Бор заиста побиједио Ајнштајна (већина је Бору дала за право, али већина у већини случајева није у праву), нити био срећан што се, у недостатку прихватљивије, морао приклонити „Копенхашкој интерпретацији“.

„Експеримент“ служи да покаже разлике у понашању класичних честица (χ) (нпр. пушчаних метака), класичних таласа (m) и електрона (e). „Апаратура“ се састоји из три дијела. а) Извора χ , m или e . б) Зид у којем су на одређеном хоризонталном растојању (изаберимо тај хоризонтални правац за x -осу) једна до друге избушене *двје рупе* – лијеву ћу звати рупа 1, десну рупа 2 – размак између рупа и њихов пречник „подешавају“ се зависно од варијанте експеримента тако да ефекти који нас интересују буду максимално уочљиви. Када је ријеч о мецима, онда су димензија рупа реда cm , за таласе могу бити и метарске, а у варијанти с електронима, реда величине \AA . Уз сваку од рупа постоји поклопац којим се она, по потреби, може затворити и тиме учинити непропустљивом. в) На одређеном растојању иза зида налази се *заклон* на којем се *детектују* честице/таласи/електрони након што прођу кроз рупе у зиду. Природа детектора поново зависи од врсте објеката који се региструју.

Д.1.1. Експеримент са честицама

Замислите да на мјесту a стоји стријелац с пушком. Претпоставимо, прво, да смо поклопили рупу 2, а да је рупа 1 отворена. Стријелац гађа кроз ту рупу и меци који прођу кроз њу падају на заклон. Заклон може бити даска у коју ће се забијати приспјели меци. Претпоставимо, даље,

да није ријеч о богзна како добром стријелцу, тако да сви меци не пролазе кроз средину рупе, да неки од њих чак и окрзну њене ивице и тако промијени правац кретања ка заклону. Послије два сата пошаљемо стријелца на ручак и анализирамо његово дјело. Уочавамо да на дасци постоји одређена расподјела метака (број метака по нпр. *ст* даске), почевши од њеног лијевог краја (нека он одговара вриједности координате $x = -x_0$) до десног краја ($x = x_0$). Означимо функцију ове расподјеле са $P_1(x)$ – то је, прецизно, фреквенција регистрованих метака на дијелу даске између тачака x и $x + \Delta x$ (број метака на том дијелу даске подијељен са укупним бројем метака приспјелих на даску). Она има мање-више гаусовски облик, као на слици Д.1. Једна ствар је, међутим, веома битна: меци су испаливани један по један и стизали у *цјелини*, ни на једном мјесту нећете наћи нпр. 0,67 метака, већ или један, или ниједан (говорим о квалитетним мецима, не неком бофлу од робе!). У међувремену, стријелац се врати с ручка и сада затворимо рупу 1, а отворимо рупу 2 на зиду. Пустимо га да поново гађа два сата. Резултат ће бити аналоган пријеподневном, само ће максимум расподјеле бити помјерен удесно, одговараће мјесту гдје права која спаја цијев пушке са средином отворене рупе сијече заклон са детектором. Ову расподјелу назваћу $P_2(x)$.

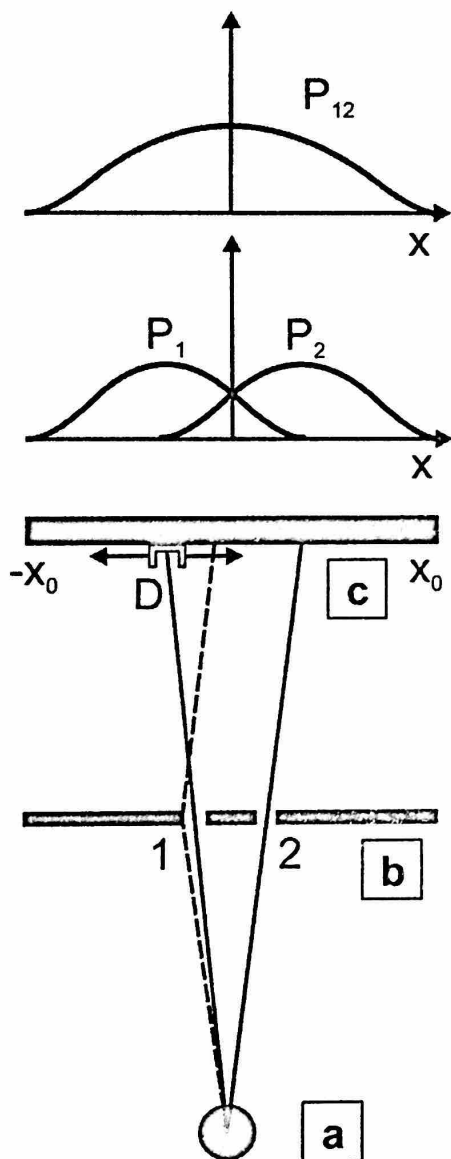
Сљедећег дана изведемо трећу варијанту експеримента. Отворимо обје рупе и пустимо нашег стријелца да пуца. Како су рупе релативно близу једна другој, а он, то нисте заборавили, није баш спреман за олимпијаду, меци ће мање-више насумце пролазити кроз обје рупе. Пустимо га да се тако забавља четири сата. Послије тога га можемо послати кући, а ми приступити анализи резултата. Установићемо, наравно, да је укупна функција расподјеле, означимо је са P_{12} , једнака збиру расподјела P_1 и P_2 , дакле,

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x). \quad (\text{Д.1})$$

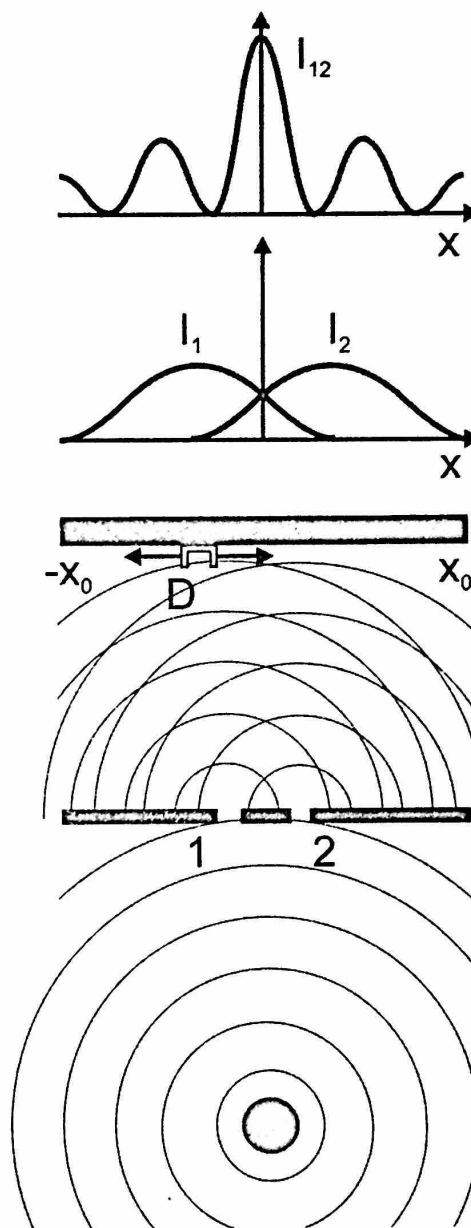
Ако су рупе близу једна другој, ова крива ће имати максимум при вриједности $x = 0$.

Још једна финеса, која вам у овом тренутку изгледа сувишна. Знамо да меци из пушке излазе један по један (ријеч је о класичној М52, не некој коју користи Терминатор), и да један по један стижу на заклон. То вам је довољно да закључите да *један по један* лете и кроз ваздух од цијеви до заклона, зар не? Али, хајде ипак да провјеримо да ли је тако. Узмимо брзу камеру, то је она справа која тако брзо снима да се помоћу ње може пратити путања метка. Она ће вам заиста потврдити оно што сте

већ знали: метак не само што полази и стиже, већ и путује у комаду. И при томе, наравно, пролази или кроз једну или кроз другу рупу (и када су обје отворене).



Слика Д.1



Слика Д.2

Д.1.2. Експеримент с таласима

Смјестимо сада и зид и заклон у базен с водом (слика Д.2). Нека вода досеже до мало испод нивоа рупа у зиду, тако да када је сасвим мирна не пролази кроз њих. Отворимо рупу 1, затворимо 2. Бацимо повелик

камен у воду на мјесто a гдје се у експерименту Д.1.1 налазио стријелац. Настаће таласи који ће се у концентричним круговима кретати од мјеста гдје је камен пао у воду. Тако ће стићи до рупе 1. Шта ће се ту догодити? Већ Хајгенс је знао да таква рупа постаје извор нових концентричних таласа. Посматрајмо само први од њих. Он ће стићи до заклона који сада може бити нпр. нека тканина на којој се јасно уочава да ли је влажна или сува. Расподјела интензитета влажности на њој биће врло слична расподјели вјероватноће P_1 у првој варијанти експеримента Д.1.1 (са мецима). Да би та сличност граничила с идентичношћу, замислимо да смо успјели „калибрисати“ тканину тако да мјери не висину, већ *квадрат висине* таласа. Затворимо сада рупу 1, а отворимо рупу 2, сачекајмо да се вода умири, замијенимо тканину новом, сувом (наравно само изнад површине воде) и затим поново бацимо камен на исто мјесто као раније. Сада ћемо добити расподјелу влажности сличну P_2 из експеримента са мецима. Изведимо и трећу варијанту експеримента: бонаца, тј. вода мирна као уље, обје рупе отворене, трећа тканина сува изнад површине воде. Бацимо камен у воду. Шта се сада догађа? До зида ништа ново. Поново исти концентрични таласи. Али сада они пролазе кроз *обје* рупе. Свака од њих постаје извор нових концентричних таласа који путују ка заклону. Таласи, међутим, имају својство *интерференције*. Њихове амплитуде се сабирају или поништавају, зависно од разлике у *фази* таласа насталих на двије рупе. Резултат ће бити појава *интерференционе слике* (слика Д.2). Расподјела интензитета таласа одликоваће се једним централним максимумом и низом монотono опадајућих максимума и минимума с његове обје стране. Укупни интензитет, $P_{12} (\equiv I_{12})$ сада *неће* бити једнак збиру интензитета расподјела $P_1 (\equiv I_1)$ (отворена рупа 1) и $P_2 (\equiv I_2)$ (отворена рупа 2), као што је то био случај код експеримента с мецима:

$$P_{12}(x) \neq P_1(x) + P_2(x). \quad (\text{Д.2})$$

Шта још разликује таласе од метака (честица)? Таласи се крећу у *цјелини*, не *појединачно* као меци. Не можете исјећи 1 cm^3 таласа. То би био 1 cm^3 воде, али не би био талас.

Д.1.3. Експеримент с електронима

Изведимо сада *аналоган експеримент с електронима*. Важно је да схватите да већина ствари о којој ћу овдје писати важи, уз обично не-битне модификације, и за остале микрочестице, нпр. фотоне, протоне,

неутроне. Поново ћемо морати модификовати „апаратуру“. Базен са водом нам више не треба, не треба нам ни стријелац, на његово мјесто стављамо мали уређај који се састоји од металне жице коју помоћу електричне струје можемо усијати тако да зрачи електроне. Те електроне ћемо усмјерити електричним пољем у правцу зида са рупама. Можемо замислити да је детектор сада нека плоча на којој су дуж хоризонталне (x) осе поређани један уз другог велики број минијатурних Гајгер Милерових (*Geiger, Müller*) (G-M) бројача (слика Д.3). Ево, ово је једно од мјеста гдје реални експеримент морамо замијенити мисаоним! G-M бројачи довољно мали (нека им је димензија Δx) да би могли да служе за овај експеримент не могу се (још) конструисати (можда мој син Иван може?).

У првој варијанти (рупа 1 отворена, 2 затворена) добијамо расподјелу $P_1(x)$, идентичну оној када смо радили с мецима. Она се мјери бројем електрона који су стигли у G-M бројач лоциран између координата x и $x + \Delta x$. Још нешто је идентично: у одређени бројач стиже у неком тренутку или цијели електрон или не стиже уопште ништа – или чујемо да бројач гласно кликне, или не чујемо ништа. Не може стићи ни половина ни седмина електрона (може се, наравно догодити да их одједном стигне неколико, али не у грозду већ један по један; у то се можемо увјерити ако жицу која емитује електроне загријемо сасвим слабо; тада ће њихов број бити мали и моћи ћемо сасвим лијепо регистровати *појединачни* долазак сваког од њих). И у другој варијанти (рупа 1 затворена, 2 отворена) добијамо исти резултат као у одговарајућем експерименту с мецима [расподјела $P_2(x)$]. Дакле, електрони се у обје варијанте експеримента понашају идентично као меци, тј. честице.³

Шта се догађа, међутим, у трећој варијанти експеримента (обје рупе отворене, дужина трајања експеримента удвостручена)? Очекујете, наравно, да ће расподјела P_{12} бити једнака збиру $P_1 + P_2$, као што се догађало са мецима. Али не! Када су обје рупе отворене, електрони на заклону праве *интерференционе шаре* (слика Д.3.а), баш као класични таласи и експерименту Д.1.2.

Ово није нимало лако разумјети. Обратићу вам пажњу на само два парадоксална резултата. На мјесту x_1 на слици Д.3.а (варијанта 1, рупа 1 отворена, 2 затворена) измјерен је одређени релативно велики број електрона. У варијанти 3 (обје рупе отворене) том мјесту одговара минимум

³ А расподјела електрона на заклону аналогна је и оној када су у питању били таласи у прве двије варијанте експеримента (једна рупа отворена, друга затворена).

функције расподеле, дакле, скоро ниједан регистрован електрон. Како је могуће да отварање друге рупе (2) драстично *смањи* број електрона који пристигну на то мјесто? Очекивало би се, напротив, да ће се њихов број тиме повећати, јер неки електрони могу нпр. окрзнувши зидове рупе 2 да стигну на мјесто x_1 .⁴ Друга неразумљива ствар је да је интензитет највећег (централног) пика (при $x = 0$) у варијанти 3 (обје рупе отворене, P_{12}) знатно већи од збира P_1 (варијанта 1, рупа 1 отворена, 2 затворена) и P_2 (варијанта 2, рупа 1 затворена, 2 отворена).

Како ово објаснити? Имамо један адут: по Де Брољијевој хипотези (верификованој Девисон–Цермеровим огледом) слиједи да електрони имају и *таласна својства*. Ако то прихватимо, онда појаву интерференције можемо објаснити овако: када су обје рупе отворене, свака од њих постаје извор нових (електронских) таласа који након проласка кроз рупе интерферирају као што то раде и сви други таласи.

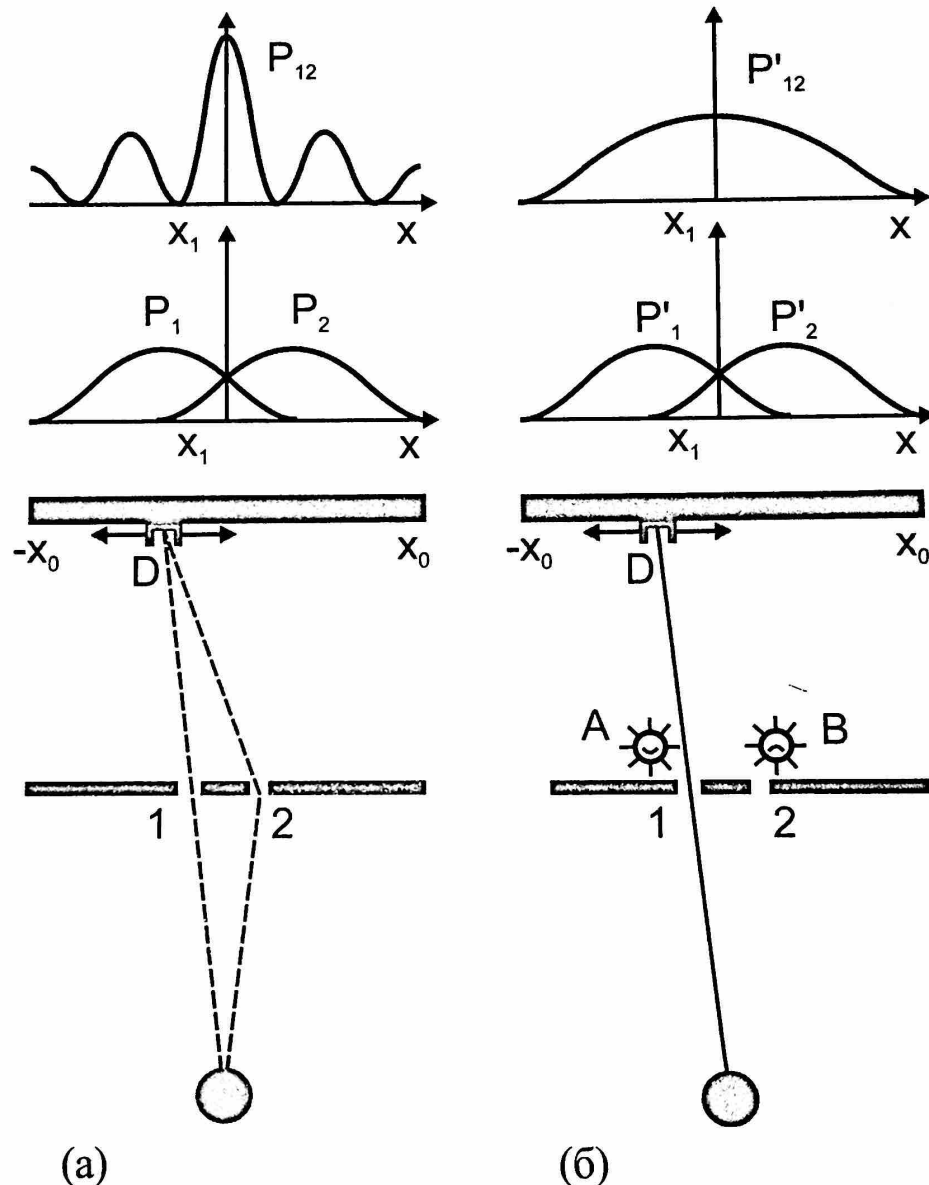
Нажалост, овај механизам је лако оспорити. Загријмо жицу која зрачи електроне екстремно слабо. Толико слабо да између израчивања два електрона прођу два сата. Тада се не може догодити да *истовремено* кроз обје рупе прође по један електрон, па да њима одговарајући таласи послије проласка кроз рупе међусобно интерферирају. Електрон који је управо прошао кроз једну од рупа неће сигурно чекати два сата да пристигне следећи, да би с њим интерферирао. Па ипак ћемо, ако експеримент изводимо довољно дуго (у овом случају данима, или мјесецима) на закљону добити интерференционе шаре. Као да електронски талас интерферира *сам са собом*.⁵ Једини могући закључак изгледа да електронски талас *истовремено пролази кроз обје рупе*, када су обје отворене.

Једна „рупа“ у овој логици одмах је очигледна: ако један електрон пролази истовремено кроз двије рупе, како онда стиже у комаду у G-M бројач? Механизам би морао бити овакав: електрон се у комаду емитује са усијане жице, затим се расцијепи у два дијела, тако прође кроз рупе

⁴ Када сам био у ЈНА, стекао сам (краткотрајну) славу на првом гађању из оне M52; од пет хитаца имао сам шест погодака! Ствар је била у томе да смо нас десетак истовремено гађали, сваки, наравно, покушавајући да погоди *своју мету*. У другој серији у мојој мети се, нажалост, није зауставио ни један метак.

⁵ Додуше, интерференционе шаре неће настати тренутно – њих не праве *појединачни* електрони. У почетку ће чим изгледати да електрони насумце стижу у разне G-M бројаче (у ствари, они не стижу насумце, већ са одређеном *вјероватноћом*). Али, ако довољно дуго изводимо експеримент, шаре ће постати исто онако правилне као код обичних таласа.

у зиду, па се онда опет на вријеме споји у један, да би у комаду стигао у G-M бројач. Изгледа фантастично, али покушајте наћи мање фантастично објашњење!



Слика Д.3.

Да покушамо да све ово експериментално провјеримо. Кључно питање је, дакле, да ли индивидуални електрон пролази кроз једну или обје рупе, ако му обје стоје на располагању. На њега може одговорити само експеримент! (И овај ће, наравно, бити мисаони.) Урадимо, дакле, следеће: ставимо крај рупе 1 посматрача A , поред рупе 2 посматрача B (оба са очима соколовим!), дајмо сваком од њих по батеријску лампицу којом ће обасјати своју рупу и наложимо им да нас извјесте када виде да је електрон прошао кроз њихову рупу. Поново се морамо сакрити иза „мисаоног експеримента“. Посматраче величине A и одговарајуће батеријске

лампице није измислио ни Свифт (*Jonathan Swift*, 1667–1745). Почнимо дакле, с новим експериментом: жица која исијава електроне тек тиња, електрони долазе двосатном фреквенцијом, посматрачи су отворили (буквално!) четворо очију. И ево, у један G-M бројач стигао је први електрон. Питам посматрача *A*: „Је ли прошао кроз твоју рупу?“. „Не знам“, каже он „нешто је као блеснуло, али нисам сигуран да је било код мене“. „А кроз твоју?“, питам *B*. „Може да буде, а не мора да значи“, одговара он. „И ја сам примијетио да се нешто догодило, али не знам да ли код мене или код *A*.“ И тако сваки пут. Добијам дивне интерференционе шаре на екрану, али неспособни посматрачи не знају да ми одговоре на то којим су путем електрони дошли до екрана.

Онда се досјетим у чему је виц! Таласна дужина (растојање између два бријега или двије доље таласа) видљиве свјетлости је неколико хиљада \AA , а димензије рупа и размак између њих су реда једног \AA . То је као када бих покушао да пијачним кантаром измјерим масу зрнаца брашна. Јасно је шта треба да урадим: умјесто батеријским лампицама, снабдјећу посматраче минијатурним рендгенским апаратима – „освијетлим“ x -зрацима рупу, ако кроз њу прође електрон, посматрач га региструје својим апаратићем. Дакле, све испочетка. Први нови електрон кликне у једном од бројача. Питам *B*: „Јеси ли га видио?“ „Нисам ништа видио“, каже он снуждено. Брзо провјерим код *A*. „Јесам!“, узвикне поносно он. Одлично, сада је све јасно! Електрон пролази кроз само једну рупу, не кроз обје истовремено. Поновимо то још једном и још једном, и увијек – исто. Електрон је виђен или при проласку кроз рупу 1, или кроз 2, никада кроз обје. Па како онда објаснити интерференцију? *Никако!* Нема ни потребе да се било шта објашњава. Погледам на закљон и видим да *интерференционих шара сада уопште нема*. Расподјела P_{12} ($\equiv P'_{12}$) сада је збир P_1 и P_2 , баш као када се радило о пушчаним мецима.

Шта се догодило? Зашто смо имали интерференционе шаре док нисмо контролисали (или могли контролисати) како путују електрони, а сада их више немамо? Па експерименти су били идентични, у оба случаја жица је тињала, имали смо електроне, обје рупе су биле отворене, G-M бројачи су били исти. Не, експерименти нису били идентични, већ само *скоро* идентични! У посљедњем експерименту „гледали“ (знаци навода, јер x -зраке не можемо видјети очима, али их можемо регистровати рендгенским апаратом) смо шта раде електрони. А електроне, у принципу, не можемо недужно гледати, то, по правилу, кошта! У чему се уопште састоји процес виђења? Објект који хоћемо да видимо морамо обасјати „свјетлошћу“ (под „свјетлошћу“ подразумејем електромагнетне таласе; према тој дефиницији, видљива свјетлост и x -зраци разликују се само

по таласној дужини) и дио те свјетлости се мора одбити у наше око (или неки други одговарајући детектор), ту изазвати нервни надражај (или нпр. неки електрични сигнал) који се преноси до мозга (или мултипликатора). Дакле, процес „виђења“ представља *интеракцију* између објекта који гледамо (у нашем случају електрона) и онога (средство = фотон) чиме гледамо (тј. гађамо) тај објект. Послије те интеракције, ни објект ни средство нису више оно што су били; прецизно, електрон ће остати електрон, фотон ће и даље бити фотон, али њихови положаји и импулси (брзине) биће, у принципу, промијењени. Та промјена изазвана на електрону у тренутку интеракције са фотоном утицаће на његово понашање послје „судара“ и, у општем случају, промијенити резултате експеримента.

Зашто ово противрјечи нашем свакодневном искуству? Јесте ли гледали неку утакмицу на којој лопта прође голману кроз ноге? Јесте ли видјели како је он очајнички *гледа* док се котрља ка празном голу? Јесте ли доживјели да лопта због тога скрене у корнер? Нисте, наравно. Разлог за то је што (фотон) свјетлост(и) коју(и) људско око може регистровати има „масу“ реда величине 10^{-35} kg . То је апсолутно безначајно у односу на све масе у макросвијету. Па и на масу фудбалске лопте. Њена путања се неће промијенити, обасјали је ви свим фотонима љетњег поподнева. Слично је и са електронима које гледате сопственим очима. Они су, наравно, много, много, мање масе (око 10^{-30} kg) од фудбалске лопте, али за њих су фотони видљиве свјетлости (по маси!) као комарци за слона. Другачије је са x -зрацима! Њима придружена маса (знате, ваљда, да се и електромагнетни таласи могу сматрати „честицама“ одређене масе) упоредива је са масом електрона. На курсу Атомистике требало би да сте научили да се интеракција електрона и фотона x -зрачења може третирати као еластични судар двију честица; након судара и електрон и фотон промијене импулсе. Не треба, дакле, да вас чуди то што ће шаре на екрану бити сасвим другачије ако су електрони, након проласка кроз рупе у зиду, интераговали са x -зрацима.

Па шта на крају да закључимо? Пролазе ли електрони кроз једну или кроз обје рупе истовремено? *Апсолутне истине* (у овом случају) *нема*. Можемо рећи само следеће:

i) Ако их не контролишемо (односно, не провјеравамо кроз коју рупу пролазе), они *истовремено* пролазе кроз обје (или, бар не можемо тврдити да су прошли кроз једну одређену), и на заклону праве *интерференционе шаре*. Понашају се *дакле, као класични таласи*.

ii) Ако пратимо њихову путању (односно, провјеравамо кроз коју рупу пролазе), установићемо да пролазе *или* кроз једну *или* кроз другу,

никада кроз обје истовремено. Али тада на заклону *не добијамо интерференционе слике*. Електрони се тада по свему понашају као класичне честице.

Шта је онда електрон, честица или талас? *Ни једно, ни друго. Електрон је просто електрон*. Он се под одређеним (експерименталним) условима понаша као честица, под другим условима као талас. (Он се израчује као честица, ако га не дирамо, тј. не посматрамо, простире се као талас, а на заклон стиже као честица.) Штавише, ми га можемо избором тих експерименталних услова „присилити“ да манифестује једну или другу страну свог карактера. Нема у томе никакве мистике, нити има потребе да ствари *дубље* разумијете. Није проблем у електрону, већ у нама, ако од њега очекујемо да ће се понашати онако како би се нама свиђало, наиме, као обична честица или обичан талас, какве смо упознали нашим биједним чулима. Ви можете научити пса да вам доноси новине и папагаја да псује, али би претенциозно било очекивати од њих да науче постулате квантне механике. Пас се, дакле, може под одређеним околностима понашати као разносач новина, а папагај као кочијаш, али пас је ипак пас, папагај ипак папагај, а студент ипак студент.

Код Хербута ћете под насловом: *Нераздвојност објекта и мерног апарата* (страна 10) наћи сљедеће објашњење (незнатно сам га парафразирао, али ипак ставио под знаке навода):

„Поставимо питање: шта се заправо догађа с електроном – иде ли једном од путања, као што би урадила права, класична честица) или се цијепа, па иде истовремено објема путањама као што би урадио прави, тј. класични талас? Захваљујући пионирским напорима Бора и Хајзенберга данас знамо да овакво питање нема смисла. Наиме, оно претпоставља да се у природи нешто дешава независно од посматрача (ова претпоставка је прећутно увијек присутна у класичној механици), тј. да се процеси у домену квантних појава могу одвојити од улоге посматрача. Међутим, у квантној механици ова премиса не стоји. *Посматрач и квантни објект чине нераздвојиву цјелину*: оно што се дешава, зависи не само од микро-објекта, већ у пресудној мјери и од експерименталног уређаја. Фигуративно говорећи, у квантном домену појава не можемо просто слушати шта природа говори, а да она говори једнако слушали ми или не. Морамо постављати питања, а природа даје одговоре. При томе је питање већ пола одговора.

У варијанти *i*) (не посматрамо електроне при проласку кроз рупе) експериментални уређај је такав да мјеримо таласни аспект (заправо могућности да путање 1 и 2 интерферирају); честични аспект, који се састоји у одлуци да ли ће ићи путањом 1 или 2 онда остаје *неодређен*, или,

боље речено, неостварен. Насупрот овоме, у варијанти *ii*) (региструјемо пролазак електрона кроз рупе) мјеримо управо честични аспект, тј. одлуку по којој путањи ће се електрон кретати, а таласни аспект је неодређен.“

Ако још увијек нисте довољно збуњени понашањем електрона, додаћу нешто о чему Фејнман није писао на оних фамозних 11 страница. Замислите да смо у трећој варијанти експеримента с електронима (обје рупе отворене). Изгледа, дакле, да електрон „доноси одлуку“ да ли ће проћи кроз обје рупе истовремено, или кроз једну од њих, зависно од тога да ли га иза њих чекају рендгенски апаратићи који контролишу његов пут. Покушајмо да га преваримо. Сачекајмо да се упути од извора ка зиду с рупама, а сакријмо рендгенске апарате негдје у близини. Не слутећи ништа, електрон се упути истовремено ка обје рупе. У посљедњем тренутку, *непосредно прије* његовог приближавања зиду (тај тренутак можемо израчунати на основу момента исијавања електрона и величине убрзавајућег потенцијала који одређује брзину кретања електрона), примакнимо рендгенске апарате рупама. Установићемо, међутим, да је електрон лукавији од нас; у том тренутку он „мијења одлуку“ (односно путању) и пролази само кроз једну од рупа. Резултат се може интерпретирати и овако: промјеном експерименталних услова на неком сасвим *другом мјесту* (код зида) у неком *каснијем тренутку* мотивисали смо електрон да од почетног мјеста пође ка *једној* одређеној рупи. Свјестан сам да Јунгов експеримент није оптималан (лако ћете пронаћи танка мјеста у резоновању) за објашњење овог *парадокса дистантних корелација* (код Хербута ћете наћи много бољи примјер), али идеја је исправна: по квантној механици се на понашање једног објекта може утицати и без директне интеракције другим објектом који је и *просторно и временски* произвољно далеко од посматраног. У квантним феноменима има нечег *цјеловитог* у простору и времену, што је у појмовној колизији с локалношћу на коју смо навикли нарочито у специјалној теорији релативности. *Локалност* захтијева да сваки догађај у некој тачки простора-времена утиче *само* на околне тачке и да се овај утицај шири коначном брзином. Неускладивост локалности са дистантним корелацијама била је (пored проблема у вези са пробабилистичким карактером исказа квантне механике, о којима ће бити ријечи у поглављу Д.5) један од основних разлога за неслагање Ајнштајна с Бором и Хајзенбергом у вези с интерпретацијом квантне механике. И поред чињенице да се већина научника приклонила тзв. копенхашкој (Бор, Хајзенберг) школи, Ајнштајн је до краја живота остао убијеђен да се „добри Бог не коцка“.

Срећом, квантну механику је много лакше примијенити него „разумјети“. У слjedeћим поглављима видјећете да је необично понашање електрона у Јунговом експерименту сасвим лако предвидјети/објаснити ако се прихвате постулати да се његово стање може описати једним вектором стања (односно таласном функцијом) са особином суперпозиције, и да се процес регистравања кроз који је прорез стварно прошао своди на математички једноставну конструкцију „редукованог таласног пакета“. При томе се морамо одвићи од тога да (по сваку цијену) говоримо о стварима које се не могу експериментално верификовати (мјерити). Прецизније, о њима се може говорити, али то није неопходно, а у сваком случају им се не смије придавати превише важности, јер за њих нема чврстог мјеста у теорији квантне механике.

Allegro con brio

Arturo Toscanini о *Ероизи*: „Неки кажу, то је Наполеон, неки Хитлер, неки Мусолини. За мене је то једноставно *allegro con brio*.“