

Kvantummechanika: a láthatatlan forradalom*

Polónyi János

Strasbourg Egyetem, Strasbourg Franciaország

I. BEVEZETŐ GONDOLATOK

Jelenlegi ismereteink alapján minden fizikai elméletnek behatárolt az alkalmazhatósági tartománya a kvantummechanikát leszámítva. Ugyanakkor a kvantummechanika megalkotásával a fizika elvesztette legfontosabb alapelvét, melyet a newtoni mechanikából örökölt: a determinizmust. Ezzel az objektív realitás és az alkalmazott matematikai fogalmak közti kapcsolat is odaveszett. Eközben a mindennapi életünk alapját jelentő világkép semmit sem változott, sőt, az anyagtudományok soha nem látott biztonsággal és pontossággal haladnak előre a maguk útján. Minderről pedig csak keveset hallhatunk a szakemberek szűk körén kívül. E helyzet kialakulásáról és tanulságairól lesz szó a következőkben.

Egyetemista koromban sok időt töltöttem a fizika tanszékek könyvtárában. Már a második évben kialakult a kép, hogy a számomra izgalmas, provokatív kérdéseket leginkább a kvantummechanikában találom meg. Viszont azontúl, hogy érdekesek voltak, egy mondatot sem értettem a lényegből. Türelmetlenül vártam a harmadik évet az akkor esedékes előadásokkal kvantummechanikából. Elérkezett, és kiábrándító volt. Felismertem, hogy ami engem érdekelt, arról szó sincs benne, és amiről szó volt, azzal nem tudtam mit kezdeni. Ezután ugyan rátaláltam a részecskefizika egy kérdésére, amelyben valamennyire elmélyültem, azonban a kvantummechanikához fűződő viszonyom hűvös maradt.

Ez egészen addig így is volt, amíg egy jó évtized múlva elkezdtem tanítani a kvantummechanikát. Egy előadásra készülve hasított belém a felismerés, hogy ez a furcsa, ködös formalizmus a gondolataimról is szól, azok kialakulásáról az agyamban. Emellett rájöttem, hogy nincsen még egy olyan téma az egyetemi oktatásban, ahol a tanulmányok felénél arra kell kérni a hallgatókat, hogy építsék fel újra a világképüket, mert amit eddig tanultak, az a továbbiakban félrevezető. Akkor elkezdtem lassan, tapogatódzva felderíteni, hogy miről is szól tulajdonképpen a kvantummechanika. Örömmel vettem észre, hogy a múlt század elején

* A Fazekas Mihály Gimnáziumban 2020 március 2-án tartott előadás alapján

egy igazi, mély forradalom indult el a tudományos gondolkodásmódban a kvantumjelenségek körül, amelyet sajnos a későbbi generációk megpróbáltak kanonizálni anélkül, hogy jelentőségét felismerték volna. Az anyag egyik formájából a másikba való átalakításának gyakorlati haszna elfedte, hogy az előrehaladás itt nem segít az alapkérdések megértésében. Némi szomorúsággal kell bevallanom, hogy nekem sem sikerült megérteni a kvantummechanikát, és ebben csupán mérsékelt elégtételt ad, hogy kollégáimnak sem. Azonban kezdem érteni, hogy miért nem értem, és hogy miért olyan fontos ez a kérdéskör.

II. SZINTEK

Kezdjük azzal a kérdéssel, hogy milyen stratégiával próbáljuk világunkat megérteni? A mindennapokban mondhatni ebben elég sikeresek vagyunk, hiszen a világ zavarbaejtő gazdagsága ellenére meglehetősen biztonsággal éljük az életünket. Hogy ezt a sikert megértsük, ugorjunk vissza körülbelül 1,8 millió évvel az időben és kíséreljünk útján egy Homo Habilist, amikor megpillant egy különleges alakú kavicsot. Egy pillanatra megáll, megjelenik képzeletében előző napi próbálkozása az alig sült hús felvágásra és észreveszi, hogy az előtte fekvő kővel ez könnyebb lehet. Ekkor életének két szintjét kötötte össze, a főzést és a természetben való keresgélést. Felismert egy közös elemet, a kő alakját. Az antropológusok szerint ez a képessége emelte ki a környezetéből, majd indította kalandos útjára, amelyen azóta mi is haladunk. Megjelent a reprezentáció képessége, mellyel egy fogalmat, személyt vagy tárgyat más környezetben is el tudunk képzelni. Idővel ezt az emberi kreativitásunkba beépítve megtanultuk a saját hasznunkra fordítani.

A világunk egy félbevágott hagymához hasonló: rétegekből áll, melyek segítenek benne eligazodni. Vegyük példának az élő szervezetet, melynek elképesztően összetett, gazdag felépítését fehérjék, sejtek, szövetek, szervek, az idegrendszer adják, és ezen szinteket követve próbáljuk megérteni. Belső világunk is szintekre oszlik, gondoljunk például érzéseinkre, melyek egyedüllétünkben, családtagjaink, barátaink körében, a munkahelyen, vagy éppen a világot járva merülnek fel. Méreteket tekintve is találunk szinteket, például az emberi kapcsolatok típusai a résztvevők számától erősen függenek. Más kapcsolatok alakulnak ki a partnerek között, a családban, a barátok között, a faluban, a városban, az országban vagy a kontinensen.

Időbeli szintekre jó példa a történelem korszakokra bontása, hiszen az emberek élete

jelentősen eltért az ókorban, a középkorban vagy pedig az újkorban. A fizikához közelebb lépve a Föld felszíni hőmérsékletének változásában szintén egy időbeli szintstruktúra jelenik meg. Az utóbbi fél évszázad alatt az átlaghőmérséklet megközelítően lineárisan emelkedik. Azonban ez már drámaibb módon jelenik meg történelmi léptékekben, ha észrevesszük, hogy az utolsó kétezer év hőmérsékletét tekintve rendszertelen fluktuációk után az utolsó ötven év egy riasztóan meredek felmelegedést mutat. Nehéz másra gyanakodni, mint az általunk okozott környezetszennyezés következményére. A paleoklimatikus viszonyok újabban megint másról szólnak, 50-70 ezer évente megjelenő hőmérséklet csúcsokról, amelyek jégkorszakokat választanak el egymástól, az utóbbi pár ezer év alatt pedig épp egy ilyen csúcshoz érteztünk. Ez a struktúra a Föld belsejében, vagy a Naprendszerben zajló folyamatokról ad hírt.

Az, hogy az itt bemutatott példák között milyen párhuzam húzható, melyeket ez a különleges szerkezet sugall, azzal óvatosan kell bánnunk, hiszen különböző tudományterületekről beszélünk - azonban a felismerés zavarba ejtő. A fizikán belül a Természet különböző szintjeit módszeresen lehet tanulmányozni, ez lesz a központi témánk a következőkben. Azt a kérdést pedig, hogy ez a réteges szerkezet valóban a világunké, vagy pedig csak a mi mentális képességeinkből fakad, sajnos nyitva kell hagynunk, és csupán egy rövid megjegyzés erejéig térünk vissza ehhez az írás legvégén.

A valóság egy szintjét úgy lehetne definiálni, mint adott alkotóelemek halmazát, amelyeknek adott viszonyuk van egymáshoz. Ez a viszony kifejezhet jelentést, szerepet vagy kölcsönhatást. A méreteken megnyilvánuló szintek lesznek kísérőink a fizika világában. Ezelőtt azonban még egy tanács: ha valami kicsi, attól még nem elhanyagolható! Vegyünk példának egy kíváncsi marslakót, aki távcsövét Földünkre irányítja. Először felhőket, tengereket lát, melyek a légkör fizikáját tükrözik. Jobb felbontással meglepve vesz tudomást a sok apró mozgó pontról, sürgő-forgó emberekről. Így már a humán szférát is látja, teljes aktivitásában. De képzeljük el, hogy olyan távcsöve van, amellyel még a gondolatainkat is olvashatja. Ekkor egy további világ nyílik meg számára, amely még meg sem valósult az eddigi felbontás alapján. Az apróbb jelenségek együtt fontosabbá válhatnak, mint nagyobb társaik.

Csak az utolsó évtizedekben tudatosult a fizikai törvényszerűségek egy érdekes vonása: skálától, a skálaparamétereiktől való függés. A dimenziós mennyiségeket hívjuk skálaparamétereknek. Ezek dimenziója hívja fel arra a figyelmet, hogy a kérdéses mennyiség csupán egy másik fizikai mennyiséggel összehasonlítva értelmezhető. A megfigyelt men-

nyiségek skálafüggése alapjaiban felforgatja, ugyanakkor véleményem szerint egyben érthetőbbé is teszi a fizikát. Ezen a ponton kezdjük a kvantummechanika felfoghatatlanságának megértését.

III. FIZIKAI ÁLLANDÓK ÉS TÖRVÉNYEK

Megfigyeléseinket az ehhez használt berendezés skálaparaméterei, pl. méret, tömeg, megfigyelési idő jellemzi, és amennyiben ezeket megváltoztatjuk, akkor a tapasztalt jelenség is megváltozik. Megváltozik a mért mennyiség numerikus értéke, illetve az általa kielégített törvényszerűségek is mások lesznek. Más szóval nincsenek sem univerzális, minden skálán érvényesülő fizikai törvények, sem pedig fizikai állandók.

Amiket állandóknak hittünk, azok valójában a megfigyelési skálán lassan változó mennyiségek. A Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal (BIPM) feladata abban áll, hogy gondosan rögzítse azokat a körülményeket és skálaparamétereket, amelyek között egy adott fizikai mennyiség a hagyományosan elfogadott értékét veszi fel. Tekintsünk példaként egy labdát, melyet sűrű folyadékban v sebességgel mozgatunk. Mekkora a labda tömege? Nincs egyértelmű válasz! Egy lehetséges definíció a teljes rendszer

$$E(v) = \frac{M(v)}{2}v^2 + E_0$$

energiájának méréséből olvasható ki, mint az $M(v)$ paraméter. Mivel a sűrű folyadék egy része a mozgó labdához tapad, nem világos, hogy hol végződik a labda, illetve hol kezdődik a folyadék. Az energia nem egyszerűen négyzetesen függ a sebességtől, így az értelmezett tömeg bonyolultabban függ a mozgás sebességétől. A labda tömege azért skálafüggő, mert a labda nincs egyedül az Univerzumban, kölcsönhat környezetével. A környezet lehet akár levegő is, hiszen ekkor csupán a skálafüggés mondható gyengébbnek. Egy másik példa a fénysebesség, mely köztudottan függ attól, hogy mely az az anyag, amin a fény éppen áthalad. Bármely más fizikai vagy mérnöki „állandó” esetére is található hasonló érvelés. Az „állandók” skálafüggését a renormalizációs csoportok módszerével lehet módszeresen feltérképezni.

Ha a mért mennyiség értéke függ a megfigyelés skálájától, akkor az általa kielégített törvények is skálafüggővé válnak. Az általános fizikai törvények hiányát az kvantumelektrodinamika esetével lehet egyszerűen megvilágítani, egy olyan képzeletbeli világban, ahol

csak elektronok léteznek, melyek elektromágneses kölcsönhatásban állnak egymással. E világ elektrodinamikájának Lagrange-függvénye két paramétert tartalmaz, az elektron m tömegét és e töltését, tehát két mérés eredményét kell felhasználnunk, hogy az elméletet rögzítsük. Egy váratlan problémával kerülünk szembe ezen a ponton, mely nevezetesen az, hogy a kvantummechanika sokrészeskerendszerre való általánosítása, a kvantumtérelmélet és a téridő folytonossága kizárja egymást. Mivel a kvantumtérelmélet állításait minden eddigi mikroszkopikus megfigyelés alátámasztja, kénytelenek vagyunk a téridő folytonosságát feladni. Ugyanakkor a téridő diszkrét mivoltjának eddig semmi jelét nem találjuk a legjobb felbontású kísérletekben sem, azaz feltételeznünk kell, hogy csak egy bizonyos felbontásig alkalmazhatók a hiányos ismereteinken alapuló téridő-kontinuumra épülő elméletek. Azt a minimális ℓ távolságot, ameddig elméleteink érvényesek, levágásnak nevezik, mert attól a távolságtól már nem alkalmazzuk a szokványos, folytonosságon alapuló leírási módot. Ugyan nem ismerjük ℓ értékét, de annak véges mivoltját tisztán ki tudjuk mutatni egyes, ún. anomália-jelenségekben, mint például egy semleges pion két fotonra bomlása esetén.

Tehát ott tartunk, hogy a két kiválasztott mérés eredményére vonatkozó egyenleteink ℓ -től is függenek. Az elméletet rögzítő ún. renormalizációs feltételek a

$$P_1 = F_1(e, m, \ell), \quad P_2 = F_2(e, m, \ell)$$

alakban írhatók fel, mely egyenletek baloldalán a mért fizikai mennyiség áll, jobboldalán pedig az annak megfelelő kvantumelektrodinamikai képlet. Az új paraméter megjelenése egyenleteinkben ahhoz vezet, hogy a megoldás ℓ -től függő lesz. Ilyen módon a kvantumelektrodinamikát az 1. ábrán felvázolt $(m(\ell), e(\ell))$ görbe, a renormalizált trajektória jellemzi a tömeg-töltés síkban. Ez a görbe olyan elméletekhez tartozik, amelyek ugyan más minimális távolsággal definiálódnak, azonban ezt a különbséget ellensúlyozza a Lagrange-függvény paramétereinek alkalmas megválasztása. A renormalizált trajektórián lévő elméletek ugyanazt a fizikát írják le különböző felbontással. A $m(\ell)$ és $e(\ell)$ függvények a ℓ felbontású megfigyelésekben megjelenő elektrontömeget és elektrontöltést jelentik.

Ha egy elmélet működik egy felbontásnál, akkor annál durvább hosszúságskálánál is alkalmazható, tehát a renormalizált trajektória folytatódik az infravörös, hosszú távolságú határesetben. Persze előfordulnak komplikációk, hiszen például az erős kölcsönhatás esetében más szabadságfokokat találunk a protonon belül és kívül, de ez „csak” technikai bonyodalmakhoz vezet. Azonban nincsen garancia arra, hogy renormalizációs feltételek

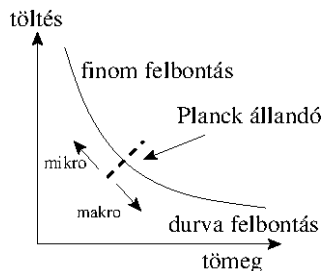


FIG. 1: A kvantumelektrodinamika renormalizált trajektóriája

megoldhatók a Lagrange-függvény paramétereire tetszőlegesen kicsiny minimális hosszra is. Azokat az elméleteket, amelyekre létezik megoldás tetszőlegesen kicsiny ℓ -ra, renormalizálható elméleteknek hívjuk. Ezen elméletek struktúrája akármilyen rövid távolságokon is alkalmazható, valamint a hiányos ismereteinkből fakadó komplikációkat a szőnyeg alá söpörhetjük a $\ell \rightarrow 0$ szokásos határámenet alkalmazásával. Ezért a részecskefizika történetének nagy részében ilyen elméletek megalkotása volt a fő cél. Azonban a gyenge és az elektromágneses kölcsönhatás tartalmaz zérus spinű Higgs-bozont és ábeli mértékbozont, ezért nem renormalizálhatók. Ez valójában jó hír, ugyanis ez a biztosíték arra, hogy előbb-utóbb új fizikát találunk, mikor sikerül jobb felbontással követni a részecskefizikai folyamatokat.

Visszatérve a kvantumelektrodinamikára, a fizikai jelenségeket a felbontás függvényében végigpásztázva még egy meglepő jelenséggel találkozunk. Ugyan elég durva felbontásnál megtaláljuk a jól ismert makroszkopikus elektromágnesesség törvényszerűségeit, azonban jobb felbontásnál egy furcsa korrekciót találunk, amelyet egy az elektromágnesességtől idegen, dimenzióval rendelkező paraméter jellemez, a Planck-állandó. Ráadásul amikor a makroszkopikus hosszúságskálánál egyre rövidebb távolságokban uralkodó törvényeket térképezzük fel, akkor ez az állandó egyre fontosabbá válik. Miközben kisebb távolságokra fókuszálunk a Planck-állandó egyre jobban felülírja a klasszikus fizikát, egy új világot nyitva a mikroszkopikus skálán. Ez a kvantummechanika világa. Úgy is fogalmazhatunk, hogy a Planck-állandó egy transzcendencia-paraméter, amely a mikro- és a makrovilágot köti össze. (Transzcendencia az egyik szintről a másikra való pillantást jelent, a Homo Habilit ennek felismerése különböztette meg környezetétől.)

A mi Univerzumunk nem csak az elektromágneses kölcsönhatásból áll. A fizikai jelenségek rendkívül összetettséget mutatnak a felbontás függvényében, ahogy azt a 2. ábrán

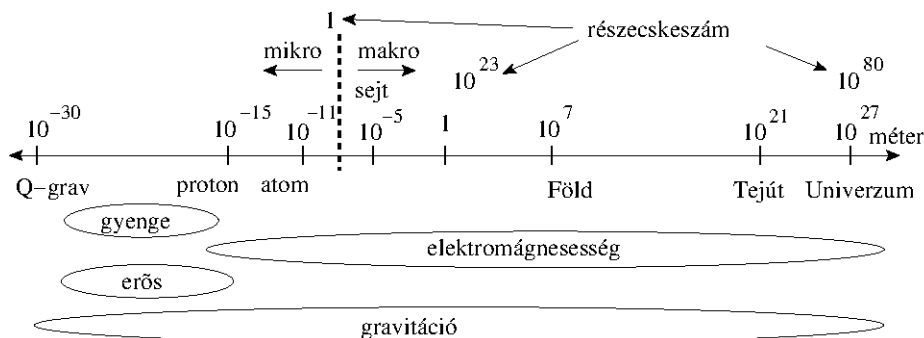


FIG. 2: A fizika világa a felbontás függvényében

jelezzük. A legnagyobb távolság, mely számunkra elérhető, az Univerzum általunk belátható része. Ez egy körülbelül 10^{27} m sugarú gömb, amelynek felülete fénysebességgel távolodik tőlünk az Univerzum tágulása következtében. A legkisebb távolság, amelyen optimista becslések alapján még esetleg az általunk ismert fizikai törvények alkalmazhatók lehetnek, a Planck sugár, 10^{-30} m. Az elemi részecskék ennél jobb felbontású megfigyelésekor fekete lyukaknak tűnnek, romba döntve fizikai elképzeléseinket. Ezért gondoljuk úgy, hogy a kvantumtérelméletben bevezetett minimális hossz nem lehet a Planck-sugárnál kisebb. A két skála között meghúzódó mintegy 57 nagyságrend tartalmazza az általunk megismerhető fizikát. Jelenleg csak a 10^{-17} m-től nagyobb jelenségeket tudjuk megfigyelni és a $10^{-30} - 10^{-17}$ m tartományban csupán az eddig megismert törvények extrapolációját használhatjuk. Véges idő alatt végrehajtott megfigyelésekkel nyilvánvalóan nem tudjuk eldönteni, hogy létezik-e a Mindenség Elmélete, egy mindent magába foglaló, végső mikroszkopikus elmélet, amelyből az összes kölcsönhatás levezethető.

A fizika négy alapvető kölcsönhatásának erőssége távolságfüggő. Az elemi részecskék világából ismert gyenge kölcsönhatás 10^{-17} m-től, az erős kölcsönhatás, amely a magfizikát is felöleli 10^{-15} m-től lefelé fejt ki hatását. Az elektromágneses kölcsönhatás 10^{-17} m-től felfelé jelenik meg, és teleszkópjaink szerint az általunk elérhető Univerzumot teljesen átfogja. A gravitációs kölcsönhatás jelen van minden távolságon, azonban csak a fizikai skálatartomány két végében jelenik meg domináns erőként. A három nemgravitációs kölcsönhatás átalakulása azért esik a $10^{-15} - 10^{-17}$ m intervallumba, mert az erős kölcsönhatás gyorsan tűnik el a proton átmérőjénél, 10^{-15} m-nél nagyobb távolságokon. Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítése a Higgs-bozon tömege alapján pedig 10^{-17} m körül történik.

A határvonal, amely a fizikát két teljesen különböző részre osztja fel, megközelítőleg 10^{-10} m-nél húzódik meg, annál rövidebb, illetve hosszabb távolságokon a klasszikus (makro), illetve a kvantum (mikro) fizika törvényei uralkodnak. Hogy mi történik ezen a mikro-makro átmeneten, az számomra a fizika legizgalmasabb, legprovokatívabb fejezete. Kezdjük például azzal a kérdéssel, hogy miért éppen annál a távolságnál történik meg az átmenet? Kiderül, hogy nincsen általános szabály, az adott körülményektől függően ez más és más távolságkálán történik. Annyit azért már tudunk, hogy ez az átmenet általában ott található, ahol felbonthatóvá válik az elemi részecskék világa.

Az elemi részecskék megjelenése a kvantumfizika rejtélyeinek egyik legsötétebb pontja. Miért válnak a klasszikus fizika folytonosan változó mennyiségei diszkrété, amikor nagy felbontással mérjük őket? A kvantummechanika matematikai struktúrájából, nevezetesen a téridő szimmetriák irreducibilis reprezentációiból fakad az, hogy a mikroszkopikus világban minden folyamat, gerjesztés elemi csomagokban, kvantumokban történik. A megfigyelések felbontásának növelésekor akkor jelennek meg a kvantum jelenségeket, amikor sikerül egyenként észlelni az elemi gerjesztéseket. Tehát a követett elemi gerjesztések száma egy körül van a klasszikus-kvantum átmenet skálájánál. Bennünk, mondjuk 60 kg vízben hozzávetőlegesen 10^{27} darab vízmolekula található. A belátható Univerzum óvatos becslések szerint 10^{80} elemi részecskéből áll. Ez utóbbi szám nagy, de végessége elgondolkodtató: a téridő diszkrétisége miatt nincs szükségünk ennél nagyobb számra a matematikában, amennyiben azt csak a fizikai világunk leírására használjuk. A határátmenet fogalma, a matematika egyik gyöngyszeme, hasznos egyszerűsítés annak érdekében, hogy a megfigyelési skálától távol eső minimális hosszt kiküszöböljük elméleteinkből, melyek valójában diszkrét matematikára alapulnak.

A mi otthonunk, a bennünket alkotó molekulák és egy ember mérete között meghúzódó $10^{-10} - 10^0$ m skálaintervallum. Ennek kulcsfontossága van mondandónk szempontjából. Ugyanis azok a fogalmak, amikkel a fizikai valóságot próbáljuk megérteni, kisgyerekkorunkban alakulnak ki, [1]. Agyunk egy rendkívül hatékony problémamegoldó szerv, amely az érzékeink által közvetített jelenségeket próbálja érthető rendszerbe szervezni. Gyerekként makroszkopikus játékokkal játszva kialakuló fogalmaink a makroszkopikus világ $10^{-3} - 10^3$ m tartományában fellelhető jelenségeinek felelnek meg.

Miután felnőttünk, agyunk elveszti kezdeti plaszticitását és már nem vagyunk képesek radikálisan új fogalmakat alkotni. Így „hidegzuhanyként” éri a fizikus hallgatókat a kvan-

tummechanika előadás, melyben egy számukra váratlan, felfoghatatlan világ nyílik meg. Ez a világ érthetetlen marad, később is csupán elfogadhatóbbá válik, amikor már ők maguk tartják a következő generáció kvantummechanika előadásait. Ebben a világban csupán a matematika formális és univerzális módszereivel tájékozódhatunk úgy, ahogy, intuitív segítség nélkül.

A mikro-makro konfliktus még ennél is élesebben jelenik meg gondolatainkban. Utóbbiakat ugyanis az arisztotelészi logika jellemzi, melyet a Boole-algebra és a megszokott halmazelmélet ún. matematikai logikájára alapozva formalizálhatunk. A halmazelmélet pedig az a matematikai rendszer, amely tulajdonságokkal felruházott objektumokról szól. Ilyen objektumok a makroszkopikus fizikában jelennek csak meg, ahol a tulajdonságok objektívek és a megfigyelőtől függetlenül léteznek. Gondolataink, tudatállapotunk saját neuronjaink tüzelésének időben kódolt eredménye. Egy neuron tüzelésének időpontja kémiai folyamatok eredményeképpen alakul ki. A kémia pedig már a kvantummechanika világához tartozik. Tehát agyunk elemi eseményei mikroszkopikus szintről fakadnak, és a központi idegrendszer, mint „detektor” által lesznek makroszkopikus szintre felnagyítva. A kvantummechanika logikája viszont egy lineáris tér altereire alapul adott tulajdonságú objektumok helyett. Ezen alterek tulajdonágai egy fontos ponton különböznek a Boole-algebrától, a disztributivitás sérül, melynek következtében a kvantum- és a klasszikus matematikai logika különbözik.

Egy kisgyerek agya tulajdonképpen ezt a folyamatot sajátítja el, és teszi magáévá a klasszikus logikát. Így mire a gyerek felnő és találkozik a kvantummechanika sajátos logikai rendszerével, nehezebbre esik azt elsajátítani, miközben a fejében továbbra is eme természetes logika alapján történnek meg azon folyamatok, melyek következményeképpen megszületik az emberi gondolat. Így egy erről mit sem tudó gyereknek azt mondhatnánk: „A világod valóban a Te világod, a távolság e legkapzsisbb és legmegettévesztőbb besurranó tolvaj még nem csente el tőled” [3]. A kvantummechanika forradalma láthatatlan, érzékeinken túl történik és csak a távoli csatazaj hangjaira figyelünk fel.

IV. ZÁRT ÉS NYITOTT ELMÉLETEK

Zárt elméletekben gondolkodunk, amikor az egyetemi tanulmányok elején próbáljuk elképzelni a fizika alaptörvényeit. Ezek az elméletek az elemi kölcsönhatások szintjén kezelik az összes általuk leírt elemi részecskét, röviden szabadságfokot. Fontos tulajdonságuk,

hogy lokálisak, vagyis egyenleteik ugyanabban a téridőpontban vett mennyiségeket kötnek össze, a téridő diszkrétségéből adódik különbségeket elhanyagolva. A lokalitás azért döntő fontosságú, mert a nem-lokális elméletek megoldása messze túl van analitikai és numerikus lehetőségeinken.

Mivel mindig csak a Világmindenség egy részét tudjuk megfigyelni, ezek a zárt elméletek nem nagyon hasznosak. Amire szükségünk van, az egy nyitott elmélet, amit úgy kaphatunk meg, hogy a nem megfigyelt szabadságfokokat a mozgásegyenletük felhasználásával kiküszöböljük egy teljesebb zárt elméletből. Így a megfigyelt rendszerre kapunk egy elméletet a környezet figyelembevételével. Az ilyen elméletek nagy hátránya, hogy nem-lokálisak. Ez annak következménye, hogy egy dinamikai szabadságfok kiküszöbölése elkerülhetetlenül nem-lokális jelenségeket vezet be. Gondoljunk például két kölcsönható részecskére: az egyiket kiküszöbölve a másikra kapott nyitott elmélet azért nem-lokális, mert a megfigyelt részecske mozgásállapotának, azaz koordinátájának és impulzusának megváltoztatása minden későbbi időpontban módosítja a másik részecske mozgásállapotát, ami pedig még további, még későbbi időpontokban visszahat a megfigyelt részecskére. Ennek ellenére ilyen nyílt elméletek közelítő megoldásaival próbálkozunk a megfigyelt jelenségek leírásában.

Képzeljünk el egy olyan paraméterteret, amelynek tengelyeit a fizikusok és a mérnökök által használt mennyiségek és állandók alkotnak. Ez egy meglehetősen magas dimenziójú tér. Tekintsük ebben a Világmindenség renormalizált trajektóriáját. Ez egy olyan görbe, amely pontjainak vetülete a koordináta-tengelyekre a fizikai és mérnöki állandók értékét szolgáltatja a megfigyelés felbontása függvényében. E trajektóriának egy síkvetületét mutatja a 3. ábra ahol az egyszerűség kedvéért feltételeztük, hogy van egy Mindenség Elmélete, [2].

Nagyon jó felbontással az ME körön belül vagyunk, itt figyelhetők meg a Világmindenség elemi alkotórészei, amennyiben léteznek és mind a négy elemi kölcsönhatás egyesített formában jelentkezik. A felbontás durvításával egy sor nyílt elmélet közelébe érünk, azonban ezek eltaszítják a trajektóriát a felbontás további durvítása során. Az eddig megfigyelt jelenségek extrapolációja alapján, amikor a Mindenség Elméletének közeléből egyre jobban távolodunk, először a gravitáció válik le a három másik kölcsönhatásról. Ez azt jelenti, hogy a gravitációs kölcsönhatás erőssége és formája különbözik a többitől. Egy-két nagyságrenddel rosszabb felbontásnál az erős kölcsönhatás válik le a Nagy Egyesítés elmélete alapján. Ezután az extrapoláció által megjelentetett nagyenergiás sivatagon átkelve, amely az extrapoláció következtében semmi új, eddig nem ismert jelenséget nem tartalmaz, elérünk a

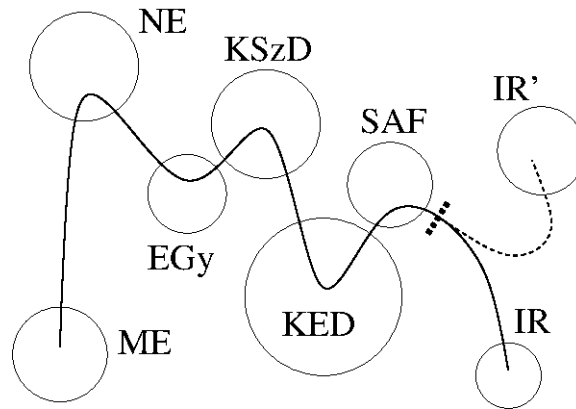


FIG. 3: A Mindenség Elmélete

jelenlegi legjobb felbontású kísérleti eredmények alapján megismert elektro-gyenge egyesített elméletig, ahol 10^{-17} m körül szétválik a gyenge, valamint az elektromágneses kölcsönhatás is. Megközelítően ennél a felbontásnál érünk be a kvantumszíndinamika elméletébe is, amely az erős kölcsönhatást írja le. Az elektro-gyenge egyesített elmélet felbontása alatt egy másik elmélet is megnyílik, a kvantumelektrodinamika. A felbontás további durvításával jutunk el 10^{-11} m környékén az atom és a sűrű anyagok fizikájához. Ebben a tartományban több tucat nyitott elmélet ismeretes kvantumkémiából és szilárdtestfizikából. Ezután kelünk át a mikro-makro átmeneten, elérve a makroszkopikus fizika tartományát. Azon belül már más-más renormalizált trajektóriát találunk különböző mérésekben, melyek a megfigyelt rendszer környezetét megszabhatják.

Ebben nyílt elméletrendszer sorozatban mindegyik elmélet a fizika egy szintjét jelenti, ahol adott szabadságfokok adott módon hatnak kölcsön. Minden egyes nyitott elmélet megalapozása egy kísérleti és elméleti siker, valamint ezek sorozatát véleményem szerint teljesen reménytelen vállalkozás lenne egy elmélettel, a Mindenség Elméletével helyettesíteni. Ezt egy múlt századi polémiával lehetne a legegyszerűbben bemutatni. A nagyenergiás fizikusok büszkélkedtek azzal, hogy ők kísérleteikben az Univerzum alapvető paramétereit próbálják kimérni, amíg az szilárdtestfizikusok nem jól ismert, közelítő elméleteket használnak. Erre az a válasz érkezett, hogy egy-egy nagyenergiás mérésen mérnökök és fizikusok százai, esetleg ezrei dolgoznak éveken át, és a körülmény jelzi, hogy a mérés célja nem lényeges. Ezt a nézetkülönbséget úgy lehet pontosabban érzékeltetni, hogy feltételezzük, hogy a 3 ábra trajektóriája, amely egy rendkívül komplikált nemlineáris differenciálegyenlet megoldása, kaotikus. Ebben az esetben a kezdeti feltétel, amely rendkívül rövid skálához tartozik, és

amely a nagyenergiájú fizika érdeklődésének homlokterében van, elérhetetlen pontosságú ismerete szükséges a mindennapokban megfigyelt jelenségek, a nyílt elméletek jellemzésére. Egy kísérleti tudománynak nem lehet célja a Mindenség Elméletének megkeresése, mivel annak használata messze túlmutat kísérleti és analitikus lehetőségeinken. Azt viszont reális célul tűzhetjük ki, hogy minél több nyílt elméletet azonosítsunk be, és a „szomszédos” elméleteket egymáshoz való viszonyát megértsük.

A szaggatott vonallal jelzett határ két lényegesen eltérő fizikai világot választ el. A mikroszkopikus szinten a létezés alapvető tulajdonságainak meglepő tulajdonságaival találkozunk, ezek közül a virtuális valóságok megjelenését, illetve az egység egységének fontosságát mutatjuk be a következő fejezetekben.

V. VIRTUÁLIS VALÓSÁG

Az egyik leglényegesebb változás, amelyet a makroszkopikus világból a mikroszkopikusba érkezéskor találunk, az az egyértelmű valóság hiánya. A makroszkopikus szint valóságát a tőlünk függetlenül létező, megfigyelhető jelenségek, tulajdonságok alkotják. Albert Einstein és Abraham Pais egy hosszú beszélgetés után sétáltak haza már késő este Princetonban. Einstein felnézett a Holdra, és elgondolkodva kérdezte beszélgetőpartnerétől: „Tényleg nem létezik a hold mikor nem nézünk rá?” Tudniillik, arról folyt a beszélgetésük, hogy ha a Hold egy elemi részecske lenne, akkor a helye nem létezne, mielőtt azt megmérjük. Az azóta eltelt nyolcvan év alatt lassan, sok-sok kitérővel alakult ki fokozatosan az elképzelésünk arról, hogyan jelenik meg egy egyértelmű, objektív valóság a megfigyelés felbontásának durvításával.

A. Határozatlansági elv

Werner Heisenberg egy gondolatkísérlettel magyarázta egy részecske koordinátája és impulzusa közti határozatlansági relációt, hogy minél pontosabban mértük meg az egyiket, annál nagyobb hibával ismerhetjük meg a másikat. A kísérlet abból állt, hogy a részecskéről szóródó foton alapján következtetünk a részecske helyére, a szórás közben azonban részecske impulzusa megváltozik, a mérés (részlegesen) lerombolja megfigyelés előtti állapotot. A határozatlansági reláció fontossága messze túlmutat ezen az egyszerű gondolatkísér-

leten, mivel ez azt jelzi, hogy a mikroszkopikus szinten nem nyerhető ki az összes információ a fizikai rendszerekből, mert minden megfigyelés kontrollálhatatlan módon zavaró. Ez az agnoszticizmus álláspontja, a világ sohasem ismerhető meg teljesen.

Hogyan definiálható egy elemi pontrészesecske állapota, ha az nem kinyerhető információt is tartalmaz? A makroszinten a koordináta és az impulzus ismerete elegendő a mozgás(állapot) meghatározásához, mert a Newton egyenlet második időderiváltat tartalmaz. A kvantummechanika mozgásegyenlete, a Schrödinger-egyenlet ezzel szemben csak elsőrendű időderiváltat „igényel”, így megoldásának jellemzésére csak egy szabadon választott adat szükséges, amely lehet mondjuk vagy a koordináta, vagy az impulzus, sőt, lehet mindkettő részleges ismerete.

Ahhoz, hogy a határozatlansági elv által megkövetelt bizonytalanság megmaradjon, a mikroszint még ennél is bizonytalanabb kontúrokkal rendelkezik, még ezt az egyetlen adatot sem definiálja a makroszkopikus fizikában megszokott módon. A mikroszkopikus állapot csupán több egymással versengő virtuális lehetőség együtteseként képzelhető el. Tekintsük úgy egy részecske állapotára, mint lehetséges helyeinek együttesét, melyben minden virtuális valósághoz egy esély tartozik,

$$\psi = \begin{pmatrix} \text{állapot} = \vec{x}_1, & \text{esélye} = \psi(\vec{x}_1) \\ \text{állapot} = \vec{x}_2, & \text{esélye} = \psi(\vec{x}_2) \\ & \vdots \end{pmatrix}.$$

Az esélyt egy komplex szám, a valószínűségi amplitúdó fejezi ki, melynek abszolút érték négyzete a kérdéses lehetőségnek, mint egyértelmű valóság megjelenésének a valószínűségét adja. A mozgásállapot valójában a mozgás időfejlődésének ismeretéhez szükséges információ együttese, és feltehetően azért találunk komplex számot ezen a ponton, mert egy valós számmal nem lehetne az idő irányultságát kódolni. A klasszikus mechanikában ez a probléma nem jelenik meg, hiszen ott a koordináta és az impulzus egyidejűleg ismert.

Egy telefonkönyv egy-egy sorában egy név és egy szám található. A kvantum állapot is egy telefonkönyv, csupán soraiban a virtuális valóságok és hozzájuk tartozó valószínűségi amplitúdó állnak. A részecske megtalálásának a valószínűségi sűrűségét egy sorban, mondjuk az \vec{x} pontban, a $\psi(\vec{x})$ hullámfüggvény alapján az $p(\vec{x}) = |\psi(\vec{x})|^2$ kifejezés adja meg. Az állapotok matematikai reprezentációja komplex vektorokkal történik: $\psi \rightarrow (\psi(\vec{x}_1), \psi(\vec{x}_2), \dots)$. Ezek egy olyan lineáris tér elemeit alkotják, melynek bázisvektorait a különböző virtuális valósághoz tartozó állapotok adják, $\psi = \psi(\vec{x}_1)e_1 + \psi(\vec{x}_2)e_2 + \dots$

Egy mikroállapot telefonkönyvszerű leírásában fellépő állapotok azért ún. virtuálisak, mert ezek egymással versengenek a makroszint jól ismert egyértelmű valóságának kialakításában. Mielőtt megmérnénk egy fizikai mennyiség értékét ebben a mikroállapotban, a mennyiség értéke nem ismert. Ha nem ismerünk valamilyen mennyiséget, akkor nyilvánvalóan hiányzik valamilyen információ, és statisztikus módszerekkel kell meghatároznunk az ismeretlen mennyiség valószínűségi eloszlását.

A determinisztikus klasszikus fizikában, ahol a világ teljesen megismerhető, a hiányzó információ megvan, csak mi nem ismerjük korlátolt képességeink, lehetőségeink miatt. Az általunk nem ismert információ egy részének megszerzése után újraszámolt valószínűségeloszlás fluktuációja csökken. Az indeterminisztikus kvantummechanika valószínűsége is hiányzó információra utal, ez az információ azonban egyszerűen nem létezik, mivel nem lehet kinyerni a teljes információt a mikroszinten lévő rendszerekből. A mérés során részleges információt nyerünk, de mindig marad kinyeretlen információ, és így a fizikai mennyiségek statisztikus leírását nem lehet képességeink, módszereink javításával teljesen kiküszöbölni. A mérés a Természet csapdába ejtése, ahol nincs választása: a keresett fizikai mennyiségre teremtenie kell egy értéket. Minden mérés ilyen értelemben egy teremtés, és ez utóbbi szó jelentése az, hogy most van valami, amiről nem csak, hogy nem tudtunk, de ez egyszerűen ezelőtt még nem is létezett. A megismerhető és a nem kinyerhető információ különbségére jó példa a később tárgyalandó, ún. késleltetett válasz kísérlet.

A virtuális és az „igazi”, egyértelmű valóság különbözősége a mérési folyamat kvantummechanikai leírásában tűnik fel drámai módon. Tegyük fel, hogy egy szobában lévő részecske koordinátáját akarjuk megmérni. A részecske állapotát egy $\psi(\vec{x})$ hullámfüggvény írja le, amely megadja annak a virtuális valóság valószínűségi amplitúdóját, hogy a részecske az \vec{x} pontban található. A mérés folyamata két lépésre bontható. (i) A részecske kölcsönhat a mérőberendezéssel. A mérőberendezés úgy van kiképezve, hogy ez a kölcsönhatás következtében a részecske különböző elhelyezkedése a makroszkopikus mérőberendezést makroszkopikusan különböző állapotába hozza. Ennek a lépésnek a végére a részecske helyére vonatkozó információ a mérőberendezés állapotára másolódott át, és mindkét résztvevő, a részecske és a berendezésünk állapotát korrelált, ún. összefonódott virtuális állapotok sokasága jellemzi. (ii) A mérőberendezés makroszkopikus méretéből kifolyólag a részecske-mérőberendezés kölcsönhatás olyan erőssé válik, hogy az feltöri a virtuális állapotok sokaságát és kiválaszt azok közül egyet, melybe belehelyezi a részecske-

mérőberendezős kettős rendszert. A virtuális állapotsereg feltörését dekoherenciának hívjuk, az a disszipatív erőkhöz hasonlóan jelenik meg. Ez elég könnyen nyomon követhető. Azonban az „igazi” valóság kiválasztása nem determinisztikus, jelenlegi matematikai módszereinkkel nem követhető. Ez a választás a mikroszint legmélyebb, legjobban védett rejtélye.

B. Indeterminisztikus matematika

A fizika a megfigyelt tulajdonságok közti összefüggésekkel foglalkozik. Ha egy mikroszinten lévő rendszer tulajdonságai nincsenek egyértelműen, determinisztikus módon definiálva, akkor hogy tudunk kvantitatív összefüggéseket találni közöttük? A matematikai egyenletek determinisztikus láncot alkotnak, melynek struktúráját a Boole-algebra matematikai logikája jellemzi.

A valóság virtualitása azt jelenti, hogy különböző megfigyelők különböző valóságot találnak ugyanabban a mikroállapotban, így a fizikai jelenségek nem determinisztikusak. Hogyan lehet az ilyen jelenségeket a matematika módszereivel reprezentálni? Jelenlegi elképzeléseink alapján ennek az első pillanatra megoldhatatlannak tűnő problémának a megoldása a számfogalom radikális kiterjesztésén alapul.

A számokat még az írott történelem időszaka előtt vezették be. A pozitív egész számok 60-as számrendszerbeli ábrázolása Mezopotámiában i. e. 3400 körüli időre vezethetők vissza. Azóta a szám fogalma fokozatos bővül. A nullát valószínűleg India matematikusai vezették be, az első írott nyom a 628 évből származik. A legkorábbi negatív számokat Kínában találták, i. e. 100 idejéből. A racionális számok az egyiptomi és az indiai kultúra együttes terméke, és Euklidesznél érte el mai formáját. Az irracionális számok i. e. 800 körül jelentek meg Indiában, majd Püthagorasz ismeri fel igazi jelentőségüket. A komplex számok a XVI.-XVIII. században jelennek meg Európában. A számfogalom utolsó általánosítása az általánosított számok, az ún. ferdetestek, melyek lineáris egyenletek megoldásával kaphatók meg. Négy általánosított számról tud a matematika, és ezek egy egészen váratlan módon fontos szerepet játszanak a fizikában. A négy alapvető kölcsönhatás mindegyike a mértékelméletek osztályához tartozik, melyeket szimmetriacsoporthoz jellemez. Az derül ki, hogy a négy kölcsönhatáshoz tartozó négy szimmetriacsoporthoz pontosan a négy különböző általánosított számra alapul, lásd az I. táblázatot. Nem világos, hogy van-e, illetve ha igen, mi az üzenete ennek az egybeesésnek.

Dimenzió	Név	Szimmetria	Kölcsönhatás
1	valós	eltolások	gravitáció
2	komplex	U(1)	elektromágnesesség
4	kvaternió	SU(2)	gyenge
8	októnió	SU(3)	erős

TABLE I: Általánosított számok és az alapvető kölcsönhatásokat leíró mértékelméletek szimmetriacsopotjai

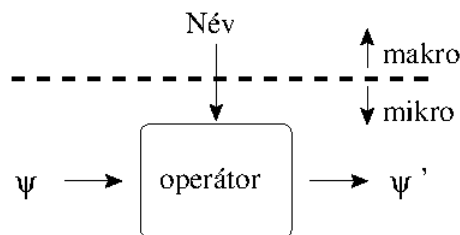


FIG. 4: Egy fizikai mennyiséget reprezentáló operátor.

A matematikai nyelv érthetetlen sikere abban áll, hogy az a fogalom, melyet feltehetően az állatok, tárgyak mennyiségének, valamint az idő múlásának jellemzésére vezettek be, a mai napig hasznosnak bizonyul a Természet jelenségeinek egyre részletesebb leírására. Erre a problémára Wigner Jenő hívta fel először a figyelmet [4]. A kvantummechanika szempontjából a számfogalom problémája az, hogy nemdeterminisztikus összefüggéseket kell reprezentálnia a mikroállapotok virtuális tulajdonságai között. Ez az általánosított számokon jóval túlmutató, további általánosítással oldható meg, ahol a számok szerepét operátorok veszik át.

Egy fizikai rendszer megfigyelése kölcsönhatás segítségével történik, amely beavatkozik a rendszer dinamikájába, például eltoljuk vagy megökljük a rendszert. Ezek a beavatkozások fizikai mennyiségekkel jellemezhetők melyek a rendszert egyik állapotából egy másikba viszik át. Ezt a lépést operátorokkal írjuk le, melyek fekete dobozokhoz hasonlíthatók. Mindegyik doboznak van egy neve, amely a makroszkopikus fizikából származik, mint koordináta, impulzus stb., és egy mikroállapotot egy másikba visz át, ahogy a 4. ábrán látható. A mikroállapotok terének lineáris struktúráját megőrizendően az operátorok az állapotternek lineáris transzformációját hajtják végre. Ezek mátrixokkal jellemezhetők.

Előfordulhat, hogy egy O lineáris transzformáció egy vektort önmagával párhuzamos vektorba visz át: $O\psi = a\psi$. Ekkor a ψ vektort az O operátor a sajátértékű sajátvektorának hívjuk. Egy operátor sajátértékeinek halmazát az operátor spektrumának nevezzük. Vegyük észre, hogy a sajátvektor egyenlet alapján az operátort a sajátértéke reprezentálja, ha egy sajátvektorára hat, és az operátor spektrumának minden egyes elemét reprezentálhatja. A $O \rightarrow S$ általánosítás a számfogalom olyan radikális kiszélesítése, amelyre itt szükségünk van.

A kvantummechanikában a fizikai mennyiségeket operátorokkal képviseljük, melyek az adott rendszer fizikai állapotainak terében hatnak. Mivel a fizikai mennyiségek valós számokkal írhatók le, olyan operátorokat használunk ábrázolásukra, melyek spektruma valós. Ezeket a matematikában önadjungált, a fizikában gyakran hermitikus operátoroknak hívják. Ezek sajátvektorai az állapottérben egy bázist adnak, mely szerint bármely állapot kifejezhető a következőképpen: $\psi = \sum_a c_a \psi_a$. A ψ állapotban az O mennyiség mérése az O spektrum valamely elemét eredményezi és Born szabálya alapján az a sajátérték $p(a) = |c_a|^2$ valószínűséggel adódik. Ez a szabály azt is jelenti, hogy a rendszer ψ_a állapotában végrehajtott mérés determinisztikus módon, mindig az a sajátértéket adja eredményül. Egy azonos állapotú, független rendszerek sokaságán egy-egy mérést elvégezve az eredmény átlaga $\bar{O} = \sum_a |c_a|^2 a = (\psi, O\psi)$, ahol (ψ, χ) a lineáris tér skalárszorzatát jelöli, és az a -ra való összegzést az indeterminisztikus kvantumfluktuációkra való összegzésnek tekintjük.

Az eddig említett szabályok a fizikai mennyiségek egy a mikroszintet jellemző struktúrát vezetnek be. Két fizikai mennyiséget kompatibilisnek nevezünk, ha a hozzájuk tartozó operátorok közös sajátvektor rendszert alkotnak. Az inkompatibilis mennyiségeket leíró operátorok pedig értelemszerűen különböző sajátvektorokkal rendelkeznek. Tegyük fel, hogy az O_1 és az O_2 kompatibilis mennyiséget egy közös, ψ sajátvektorral jellemzett állapotban mérjük meg. Eredményül az a_1 és az a_2 mennyiséget kapjuk, ahol $O_1\psi = a_1\psi$ és $O_2\psi = a_2\psi$. Tehát kompatibilis fizikai mennyiségek determinisztikus összefüggéseket elégítenek ki a közös sajátvektorokkal jellemzett állapotokban.

Az inkompatibilis mennyiségek mérése során egy új köntösben mutatkozik meg a számfogalom általánosításának újdonsága, miszerint olyan operátoregyenletek merülhetnek fel, melyeknek nincsen megoldásuk a számok körében. Példaképp tekintsünk az $A + B + C = 0$ operátoregyenlet egy ψ állapotra alkalmazva, $(A + B + C)\psi = 0$, ahol $A\psi = a\psi$. Először tegyük fel, hogy az operátorok közül bármely kettő kompatibilis párt alkot, emellett $B\psi = b\psi$ és $C\psi = c\psi$. Ekkor $(a + b + c)\psi = 0$ és $a + b + c = 0$, tehát az operátoregyenlet „átváltott”

számokra vonatkozó megoldható determinisztikus egyenletté, és az A , a B és a C mennyiségeket a ψ állapotban együttesen megmérve mindig ezt az egyenletet kielégítő eredményt ad. Ezután tegyük fel, hogy B és C inkompatibilis. Ekkor az (A, B) vagy pedig a (A, C) párokat megmérve determinisztikus eredményt kapunk, azonban ez nem így van a (B, C) pár mérésekor. Ekkor az operátoregyenlet nem fordítható le a sajátértékekre vonatkozó egyenletté, bármelyik állapotra is hat. Ilyenkor a B és C mért értékei fluktuálnak és a fluktuációk nagyságára egy határozatlansági reláció jelenik meg, mely a virtuális valóságból az „igazi”, egyértelmű valóság kiválasztása körüli fluktuációkra vonatkozik.

Röviden, a kvantummechanika csak egy bizonyos értelemben vett átlagokat tud megjósolni, egyedi mikroszkopikus jelenségekre nincs matematikai leírásunk. Egy lehetséges kiút ebből a szokatlan helyzetből a rejtett paraméterek elméleté, melyre később térünk ki. Azonban már most megjegyezzük, hogy az egyedi jelenségek leírásának ilyen megmentése még mélyebb krízishez vezet, mint az indeterminizmus. Az egyedi folyamatok a természettudomány jelenlegi határain túlmutatnak, ez maga a forradalmi helyzet.

C. Interferencia

Az inkompatibilis fizikai mennyiségek szerepét jól szemlélteti az interferencia jelensége. A fény interferenciája ismerős a klasszikus fizikából. Az oszcilláló elektromágneses tér átlagos hatása általában az intenzitásával jellemezhető, mely a térerősség négyzetével arányos. Ezért ha egy monokromatikus fényhullám két résen át haladva jut el egy pontba, akkor az intenzitás kiszámolásakor a különböző terjedési pályán a megfigyelési pontba érkező sugárzási térerősség értékeket összeadjuk és az összeget emeljük négyzetre. Az $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$ algebrai szabály alapján könnyedén belátható, hogy az intenzitás nem additív a különböző pályákra, hiszen az utolsó tag az interferencia képletében megváltoztatja az eredményt attól függően, hogy mennyire különbözik a két pálya hossza a fény hullámhosszában kifejezve. Mivel a hullámhossz rövid a makroszkopikus skálákhoz képest, a megfigyelési pont megváltoztatását követő gyors intenzitás-oszcilláció a fényterjedés hullámtermészetének elteveszthetetlen bizonyítéka.

Hasonló kísérletet anyaghullámokkal is el lehet végezni, ahol egy ernyő két pontján áthaladó részecske hullámfüggvényének interferenciáját figyelik meg. Az ilyen jellegű mérések fontos eredménye, hogy tetszőlegesen kis intenzitású részecskeforrás esetén is találnak in-

terferenciát, még akkor is, amikor biztosak lehetünk abban, hogy minden pillanatban csak egyetlen részecske tartózkodik az mérőeszközben. Tehát a részecske ún. önmagával interferál. A részecske, mely lehet akár foton, akár elektron vagy akár egy radioaktív atommag, sokkal kisebb méretű, mint a két rés közti távolság, ami miatt ezek az adott kísérletben eleminek tekinthető, így igaz, hogy mindkét résen egyidejűleg halad át - ez mutatja hullámtermészetét. Ugyanakkor ezzel ellentmondó helyzet is felmerül, amikor a részecske képben gondolkodva, pontosabban egy részecskét egy jól definiált pontnak elképzelve azt a rést próbáljuk beazonosítani, amelyen keresztül a részecskének kellett haladnia. Ezt a réshöz rakott részecskedetektorral lehet kimérni. Eredményül az adódik, hogy minden alkalommal, amikor a részecske nyomot hagy maga után a detektorban, az interferencia elvész. Ilyenkor az elemi részecske lokalizált módon csak az egyik résen halad át, vagyis részecske természetet mutat.

A hullám és a részecske viselkedés két egymással inkompatibilis fizikai mennyiséggel, a részecske impulzusával és a koordinátájával írható le, hiszen a részecskét a hely-, a hullámot pedig a hullámvektorral lehet jellemezni – ez utóbbit az impulzus Planck-állandó egységében felvett értékével tudjuk kifejezni. A két mennyiség közt fennálló határozatlansági reláció arra kényszerít bennünket, hogy vagy az egyik, vagy pedig a másik kép alapján képzeljük el a részecske mozgását. A két kép közül a mérőberendezés elrendezésével döntünk, vagyis nincs lehetőségünk a két leírás együttes használatára. A részecske egyidejűleg virtuálisan hullám és lokalizált részecske állapotában van minden ellentmondás nélkül, mielőtt belép az interferométerbe. A makroszkopikus kísérleti berendezéssel való kölcsönhatása kényszeríti a virtuális lehetőségek közti választásra, és a makroszkopikus szint egyértelmű valóságának megjelenítésére. Ezt a kényszert neveztem a virtuális valóság bevezetésekor a Természet csapdába ejtésének.

Láttuk, hogy ez a csapda két összetevőből, a dekoherenciából és a választásból áll. A dekoherencia akkor jelenik meg, amikor a részecske beérkezik az interferométerbe, a virtuális valóságok közti választás pedig a részecske-interferométer kölcsönhatással egyidejűleg történik meg. Jó közelítéssel azt mondhatjuk, hogy a részecske hullámtermészetét mutatja, ha szabadon mozog, és lokalizált természetét a környezetével való kölcsönhatás hívja elő.

A most említett interferencia kísérletben még egy új, fontos jelenséget is találhatunk, ha jobban figyelünk az idő szerepére: ez a késleltetett választás kísérlete. Az alapötlet eredetileg Niels Bohr és Albert Einstein vitájából származik, de igazi jelentőségét Archibald

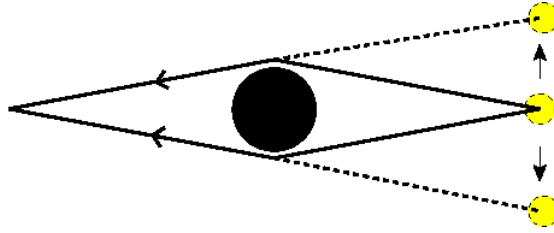


FIG. 5: A gravitációs lencse hatása a galaxisok mögötti fényforrások képét megsokszorozza.

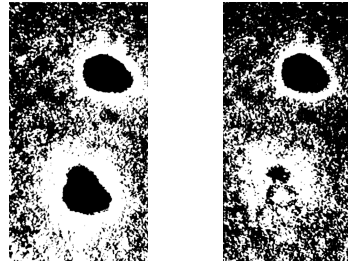


FIG. 6: A késleltett válasz kísérlet asztrofizikai „megvalósítása”.

Wheeler ismerte fel [5], aki a gravitációs lencse gondolatából inspirációt merítve fogalmazta meg ötletét. Egy galaxis közelében haladó a fény iránya elgömbösül, így a galaxis mögött lévő fényforrások képe látszólagosan megkettőződik a teleszkópokban, ahogy az 5. ábra mutatja. A gondolkísérlet abból áll, hogy a teleszkópban két képet vesznek fel, az egyiket megengedik a látszólag különböző forrásból érkező hullámok interferenciáját, a másikban csak egy forrásból eredő sugárzást használnak fel. Az első módszerrel készített felvételen interferálnak a különböző úton érkező nyalábok, a másodikban pedig nem. A felvétel módjától függően a foton vajon a galaxis mindkét oldalán halad, vagy pedig csak az egyikén? A foton mérésével kapcsolatos „döntés” a megfigyelés pillanatában történik, miután a foton esetleg már évmilliárdok óta haladt a galaxis elhagyása után, míg a teleszkópunkba ért. Ezt az utazást írja át a megfigyelés módjának megválasztása.

A 6. baloldali ábrán öt egyperces infravörös digitális felvétel összege a tőlünk 5000 fényév távolságban található $0957 + 561A, B$ quazár megkettőzött képét mutatja. A jobboldali kép úgy készült, hogy a felvételekről eltávolítottak egy, az alsó képnek megfelelő helyen lévő csillag átlagos sugárzását. A két kép közti különbség több ezer év propagálását írja át, a foton ennyi késéssel dönti el, hogy mindkettő, avagy csak az egyik nyalábban haladt-e.

Wheeler érve valahol a gondolat és az igazi kísérlet között van. A késleltetett választás módszerét azóta sikerült laboratóriumi körülmények között is végrehajtani [6]. A 7. ábrán

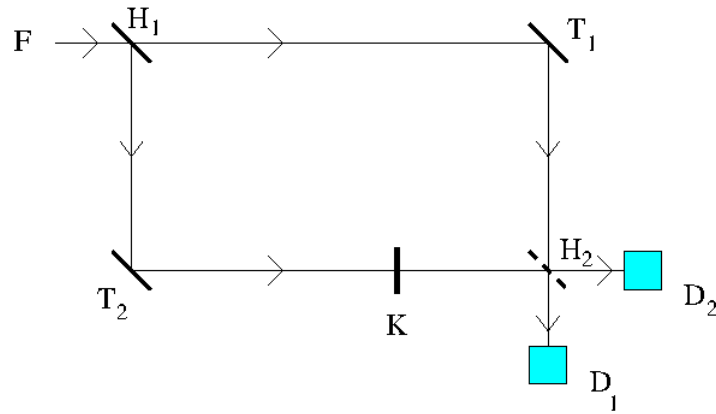


FIG. 7: Laboratóriumi körülmények között elvégzett késleltett választás kísérlete.

felvázolt kísérletben egy részecskét küldünk az F forrásból a H_1 féligáteresztő felületre, amely a beeső hullámot két részre osztja: az egyiket átengedi, a másikat visszaveri. Innen egymástól függetlenül halad tovább az interferométer két karjában a két hullámcsomag a T_1 és a T_2 tükörről visszaverődve. Az egyik karban elhelyezzünk egy K fáziskésleltetőt, amely egy általunk szabadon megválasztható fáziskésést okoz a rajta áthaladó nyalábon. Szabadon dönthetünk arról, hogy a két nyaláb találkozási pontjában elhelyezünk-e egy második féligáteresztő lemezt, H_2 -t, vagy sem. Ha H_2 ott van, akkor rajta interferencia jön létre, és a megfelelő valószínűséggel megszólalnak a detektorok. A megszólalási valószínűségek függenek az általunk beállított fáziskésés nagyságától. Ha nem rakjuk be H_2 -t, akkor a két nyaláb nem interferál egymással, így a részecske csak az egyik, véletlenszerűen kiválasztott detektorba ér a hozzá tartozó útvonalon. Ekkor csak az egyik detektor jelez, és az ezek közti gyakoriság független a fáziskéséstől.

Mindkét kar megközelítően 48 m hosszú volt a kísérletben. Ez lehetővé tette, hogy egy radioaktív bomlással vezérelt kvantum véletlenszám-generátor által meghozott döntés kellően későn történjen meg, amikor az út jó részét a részecske már megtette. Ha akkor is döntésünknek megfelelő különbséget találunk a detektorok megszólalásában, akkor a részecske kénytelen volt utólag átírnia mozgásának módját úgy, hogy a H_2 jelenlétében mindkét karban, a H_2 távollétében pedig csak az egyik karban halad. A 8. ábrán tanúsága szerint az interferencia a Wheeler által elképzelt módon alakul ki a kísérleti eredmények szerint.

A kísérlet eredményét úgy lehet röviden összefoglalni, hogy a virtuális valóságok közül a „valódi”, a makroszkopikus fizikából ismert egyértelmű valóság csak a mérés, illetve a makroszkopikus mérőberendezéssel való kölcsönhatás után történik. Még rövidebben úgy is

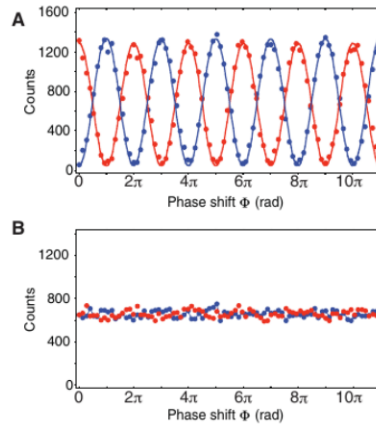


FIG. 8: A detektorok megszólalási statisztikája a fáziskésés függvényében. A: H_2 -t beillesztve, a két detektor megszólalási valószínűségének oszcilláló fáziskésés függése a két kar interferenciáját bizonyítja. B: H_2 -t kivéve, a detektorok megszólalási valószínűsége független a fáziskésleltetéstől, ami az interferencia hiányát mutatja.

fogalmazhatunk, hogy egy tulajdonság csak akkor létezik, amikor megfigyelik. Talán ez a gondolat járt Einstein fejében az esti princetoni sétán.

A makroszint valóságának megjelenését Wheeler a barkochba játék kvantum változatával próbálja számunkra elfoghatóbbá tenni [5]. Mint ismeretes a barkochba játékban először egy embert kiküldünk a szobából, és megállapodunk valamiben, akár tárgyban, akár személyben vagy akár fogalomban, majd miután az illető visszatért, eldöntendő kérdéseket tesz fel a többi résztvevőnek, hogy kitalálja, hogy miben állapodtak azok meg. Ennek a játéknak a kvantum változata abból áll, hogy miután kiküldtük a kérdezőt, abban állapodunk meg, hogy nem állapodunk meg semmiben. Pontosabban az első kérdésre tetszőleges lesz a válasz és a továbbiakban is csak arra figyelünk, hogy ellentmondásmentesen válaszoljunk. Ezek után bejön a kérdező, felteszi az első kérdést, meghallgatja a véletlenszerű választ, majd jön a második kérdés. Akit megkérdezett, az bármire gondolva válaszolhat, az egyetlen szabály, hogy a válasz ne legyen ellentmondásban az előző válasszal. És így tovább, mindenki tetszőleges valamire gondolhat válaszában kialakításában, amennyiben az illik az összes előző válaszhoz. Ahogy ez a játék egy nem egyértelműen meghatározott gondolatok körül forog, úgy a mikroszinten is minden mérés egy olyan makroszintű választ provokál, amely beillik a makrovilág determinisztikus láncolatába. Einstein a kvantummechanika világával való ellenérzését egyszer úgy foglalta össze Bohrnak, hogy nem hiszi, hogy Isten dobókocka

játékként kormányozná véletlenek sorával a világot. A késleltetett választás kísérlet alapján azt is hozzátehetné volna, hogy ráadásul Isten dobókockáján még csak számok sincsenek.

VI. A LÉTEZÉS EGYSÉGE

A klasszikus fizika makroszkopikus objektumai egymástól jól szétválaszthatók, elkülöníthetők. Ezzel szemben az alapvetőbb kvantum szint törvényi szorosabb, szinte elválaszthatatlan kapcsolatba hozza az elemi részecskéket, a létezés elemi egységeit. Ezt két példával érzékeltetjük, az elemi részecskék megkülönböztethetlenségével, valamint az összefonódással.

A. Elemi részecskék megkülönböztethetlensége

Vegyünk gondolatban két pontszerű részecskét, melyeket indítsuk útjukra két különböző pontból. Mozgásuk minden pillanatában fennmarad különbségük a klasszikus fizikában, hiszen a trajektóriájuk alapján beazonosítható, hogy melyik részecske honnan indult. Ezért a részecskék itt megkülönböztethetők.

Ezt a helyzetet alapjában megváltoztatja a határozatlansági elv, hiszen kizárja a részecske koordinátájának és impulzusának egyidejű megismerését. Ugyanis ennek következtében nem lehet a kvantumvilágban a részecske térbeli mozgását egy trajektóriával jellemezni, mert annak deriváltjának ismerete megsértené a határozatlansági elvet. Tehát ha egy ideig hagyjuk a két kvantum részecskét szabadon haladni, utána már nem tudjuk kideríteni, melyik honnan indult. Általában nem lehet fizikai méréssel egymástól megkülönböztetni azokat az elemi részecskéket, melyeknek azonos tömeggel, töltéssel és egyéb saját jellemző mennyiséggel rendelkeznek.

A megkülönböztethetlenségtől egy kis ugrás az azonosság. Wheeler 1940 őszének egyik szombat estéjén felhívta posztgraduális diákját, Richard Feynmant [7]:

- „Feynman, tudom, hogy miért van különböző elektronoknak ugyanolyan tömege és töltése.

- ?

- Mert mind ugyanaz az elektron.”

Ennek a képnek a részletes kidolgozása Feynman pályaintegrál formalizmusával a legter-

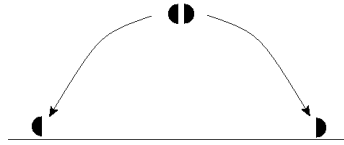


FIG. 9: Egy bomba két egyenlő részre esik szét, mely egymástól egyenlő távolságban éri el a vízszintes talajt.

mészetesebb. Eredményül kapjuk például, hogy a részecskefizika Nagy Egyesített modelljének az Univerzumunkban való megvalósulását egyetlen részecskével le lehet írni. Ennek a részecskének egy rendkívül komplikált, időben előre-hátra haladó mozgása a részecskefizika teljes leírásához vezet.

Két makroszkopikus test egymástól vagy megkülönböztethetetlen, vagy éppenséggel ugyanabból a részecskéből áll – a durva felbontású megfigyelések alapján kialakuló függetlenségük elvész a finomabb, jobb felbontású mérések során. A makroszkopikus testek különbsége nem az őket alkotó elemi részecskék különbségéből, hanem azok kombinációjának különbségéből áll. Világunk gazdagsága tehát nem a benne foglalt részecskék számából, hanem azok elrendezésének nagy számából fakad.

B. Összefonódás

Az elemi részecskék megkülönböztethetlenségének általánosítása vezethet el az összefonódáshoz. Ez utóbbi lehetőségét már Erwin Schrödinger is felismerte, de csak Einstein vette később észre ennek fontosságát. Tekintsünk először egy gondolatkísérletet, mely az Einstein-Podolsky-Rosen jelenség makroszkopikus hasonmása. Ebben egy bombát két egyenlő tömegű részből rakunk össze. Ezután a bombát egy mozdulatlanul lebegő helikopterről kiejtjük, majd felrobbantjuk úgy, ahogy ez a 9. ábrán látható. Még azt is tegyük fel, hogy a bomba darabok vízszintes irányban távolodnak el egymástól, illetve a talaj vízszintes, azaz a két darab egymással ellenkező irányban, ideális körülmények közt a robbanás helyétől ugyanakkora távolságban, ugyanakkor csapódik be a talajba. Ugyan nem tudjuk, hogy a robbanás után milyen irányban kezdenek el repülni a darabok, azonban abban a pillanatban, amikor az egyik darab földet ért, annak helyéből pontosan tudjuk, hol van a másik darab. Nincsen semmi meglepő abban, hogy ekkor az egyik test mozgásából ismerjük a tőle távol lévő másik test mozgását, hiszen mozgásuk kezdetétől fogva korrelált.

Az 1935-ben megfogalmazott Einstein-Podolsky-Rosen jelenség az 1951-es, Bohm által módosított változatában két foton képezi kísérletünk tárgyát, melyek olyan állapotból indulnak ki, melyben a két foton spinje, illetve belső impulzusmomentuma, egymással ellentétes. A fotonok spinjét egy adott irányba eső vetületével azonosíthatjuk. Használjunk e célból a függőleges irányt, tehát egy lehetséges két foton állapotát $(\uparrow\downarrow)$ -vel jelölhetünk. Mivel a fotonok megkülönböztethetetlenek, ugyanakkora eséllyel jöhet szóba a két, két nyíl felcserélésével kapott állapot, így két foton kezdeti állapota

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow) + \frac{1}{\sqrt{2}}(\downarrow\uparrow).$$

Ezután a két fotont eltávolítjuk egymástól anélkül, hogy azok a környezetükkel kölcsönhatnának és ennek következtében spinjük megváltozna. Végül megmérjük az egyik foton spinjének irányát. Nyilvánvaló, hogy egyidejűleg megtudjuk a másik foton spinjét is, hiszen az a mért iránnyal ellentétes kell legyen. A mérés előtt a foton spinje a két irányba mutató virtuális valóságok kombinációja, a spin egyértelmű iránya pedig még nem is létezett egyik foton esetén sem. A mérés pillanatában megteremtődött a megfigyelt foton spinjének iránya, illetve így ugyanebben a pillanatban a másik foton spinjének is kiválasztódott az iránya. Ez már ellentmondásban van a speciális relativitáselmélet kauzalitás feltételezésével, amely szerint a jelenségek hatásai legfeljebb fénysebességgel terjedhetnek.

A két foton spinje nem független egymástól, egymással ellentétesek, ugyanakkor az egyik spin sem mutat valamilyen meghatározott irányba. Ezt a helyzetet úgy nevezzük, hogy a két foton összefonódott állapotban van. Az összefonódás tehát determinisztikus korreláció virtuális valóságok között. Ennek analógiája a bomba esetében az lenne, hogy a bombáknak nincs „igazi”, egyértelmű állapotuk, amíg a levegőben vannak. Addig bármely virtuális irányba mozoghat az egyik darab, a másik mindig az ellentétes irányban mozog. Csak akkor alakul ki egyidejűleg mindkét darab helye, amikor becsapódnak a földre. (Ez így mondván azonban nem igaz valódi bombákra, mert azok makroszkopikusak, így a környezetükkel végbemenő intenzív és folyamatos kölcsönhatás azonnal a klasszikus fizika egyenleteinek eleget tevő pályára állítja őket.) Az Einstein-Podolsky-Rosen jelenség úgy foglалható össze, hogy a „valódi”, egyértelmű spin választásához szükséges információ az összefonódás által akauzális módon terjed. Alain Aspect és munkatársai 1982-ben kísérletileg bebizonyították, hogy ez így is történik. Azért kellett a kísérletre a 80-as évekig várni, mert rendkívüli technológiai problémákat okoz többek között az a feltétel, hogy a két spin irányát ugyanakkor

mérjék meg. Ez az első kísérlet, amelyben két, akauzális jelenséget hasonlítottak össze, és eredményül rögtön a speciális relativitáselmélet mikroszkopikus szintű sérülését találták. Azóta már azt is tudjuk, hogy összefonódással közvetített információ terjedési sebessége nem lehet kisebb, mint a fénysebesség 10^6 -a.

Jelenti-e Aspect és kollégái eredménye azt, hogy a speciális relativitáselmélet hibás? Einstein 1905-ben javasolt elmélete méterrudak és órák segítségével fogalmazódik meg, azaz a klasszikus fizika makroszkopikus szintjére vonatkozik. Ennek a szintnek fontos jellemzője, hogy az egyedi eseményeket kontrollálni tudjuk, oda helyezünk egy tárgyat, ahova akarjuk, és akkor olvassuk le az óra által mutatott időt, amikor nekünk tetszik. A makroszkopikus törvényszerűségek két alkotóelemből állnak: a kezdeti feltételekből és a mozgásegyenletekből. Az elsőt tetszőlegesen kiválaszthatjuk, a második képviseli magát a törvényt. A speciális relativitáselméletben az általunk kibocsájtott jeleket azért tudjuk a megfigyelőhöz érkezésükkor beazonosítani, valamint azzal a kauzalitást ellenőrizni, mert kibocsájtásuk időpontját és helyét szabadon megválaszthatjuk. 1982-es kísérletben a virtuális valóságok listájáról az „igazi” valóság kiválasztásának terjedési sebessége jelenik meg, azonban a spin mérésével talált valóságot nem mi választjuk meg. Mérőeszközeink túl nagyok, túl durvák ahhoz, hogy egy tetszőleges valóságot válasszunk ki kezdeti feltételként, melynek terjedésére ellenőrizzük a kauzalitást.

Az Einstein-Podolsky-Rosen jelenséget úgy is megfogalmazhatjuk, hogy az egyik részecske spinjének mérése után azonnal kialakul a másik részecske spinje, mintha a két összefonódott részecske összebeszélt volna. Ennek makroszkopikus analógja egy úgymond Kvantum Cirkusz lenne, mely egyszerre két városban lép fel, és mutatványa abban áll, hogy két különböző helyen ugyanabban a pillanatban két bűvész ugyanazt a kártyát mutatja be anélkül, hogy előre megállapodtak volna a mutatványban.

Két független részecske összefonódik, amikor kölcsönhat. De az összefonódás energiacsere nélkül is kialakulhat – ez a kölcsönhatás mikroszkopikus szintű általánosítása. Két részecske összefonódott állapotának fontos jellemzője a nem-lokalitás. Ez abban áll, hogy amikor az egyik részecske kölcsönhatásba lép környezetével, annak hatása azonnal megmutatkozik a vele összefonódott részecskén is. Ez az, ami a speciális relativitáselmélet számára veszélyes, mert aláássa a fizikai jel terjedési sebességének egyértelműségét. Az összefonódás során a részecskék elveszítik egyedi tulajdonságukat. Egy két-foton-állapot nem két egy-foton-állapot. Ezen a ponton a makroszkopikus világ segítségével kialakított nyelvünk elveszti

értelmét.

Az összefonódás nem gyengül a távolsággal, csupán szétterül az összefonódott részecske környezetére. Nem lehet kétségünk afelől, hogy a minket felépítő elemi részecskék össze vannak fonódva embertársainkkal, az Univerzum távoli galaxisában található anyaggal. Az összefonódások által érkező információ zuhatagában élünk anélkül, hogy annak információ-tartalmát felfognánk. Ez egy fontos különbség összefonódás és telepátia között. A kvantummechanika jó időfelbontású kísérletei és a sumér béljósok módszerei látszólag veszélyes közelségbe kerültek.

VII. MEGMENTHETŐ-E A KLASSZIKUS FIZIKA?

Mielőtt egy nagy sóhajjal elfogadnánk a kvantum világ furcsaságait, végig kell gondolni, nem lehet-e mégis valahogy megmenteni a régi, jól ismert klasszikus fizikát? Mivel az csak a finomabb, jobb felbontású megfigyelések esetén válik használhatatlanná, természetesenek tűnik az a kiút, hogy a klasszikus fizika ezekben a jelenségekben is érvényben marad, csupán itt olyan szabadságfokok hatásait is látjuk, melyeket megfigyeléseink még nem tudnak közvetlenül felbontani. Ez a klasszikus fizika kísérletileg mindig is cáfolhatatlanul maradó mentsvára.

Nem is nehéz ilyen rejtett paramétereket tartalmazó klasszikus elméleteket találni. Azonban az a feltétel, hogy a rejtett paraméterek elmélete a kvantummechanikával megegyező valószínűségi törvényeket adjon, elegendő annak bizonyítására, hogy bármely rejtett paraméter elmélet kontextuális kell, hogy legyen [8]. Ezt a tulajdonságot egy olyan A , B és C fizikai mennyiséggel lehet érzékeltetni, melyek közül (A, B) és (A, C) pár kompatibilis azonban (B, C) inkompatibilis. Tehát egyszerre A és B , vagy A és C megmérhető azonban B és C nem. Kontextualitás azt jelenti, hogy A értéke a kontextustól függ, attól hogy mérésekor még B -t vagy C -t figyeltük meg. Ez olyan, mintha egy ember testsúlya attól függne, hogy mérés közben a kezére vagy a lábára nézünk.

Ez elfogadható ár a klasszikus fizika determinisztikusságának megmentésére? Elképzelhető, hogy később talán jobban meg tudjuk indokolni a kontextualitás felléptét. Számomra azonban természetesebbnek tűnik az a következtetés, hogy szemléletes fogalmaink csak a makroszkopikus világhoz illeszkednek, amíg a mikroszkopikus szint törvényei más fogalmakra alapulnak. Ekkor azonban el kell fogadnunk a kvantummechanika misztikusnak tűnő

törvényszerűségeit.

VIII. FILOZÓFIA

Az a kép, hogy a makroszkopikus szint a mikroszkopikusból származik, filozófiai kérdéseket vet fel. A határozatlansági elv miatt fel kell adnunk azt a reményt, hogy kinyerjük akár egy elemi részecske állapotának teljes információtartalmát. Ha a kvantummechanika nem tudja megmondani, hogy mi is egy elemi részecske, akkor miről szól? A kvantummechanika legtermészetesebbnek tűnő interpretációja az, hogy az a részleges információk módszeres és optimalizált használatának törvényeit gyűjti össze. Míg a klasszikus fizika ontológiai szinten jelenik meg és azonosítja a létezőket a róluk alkotott elképzeléseinkkel, a kvantummechanika csupán az ismeretelmélet szintjén fogalmazódik meg, és azzal foglalkozik, hogy mit tudhatunk meg a világról anélkül, hogy ontológiai kérdésekre választ adna. Talán ez az oka, hogy a kvantummechanika az egyetlen fizikai (keret)elmélet, melynek alkalmazhatósági határát még nem értük el, eddig minden körülmények közt igaznak találtuk. Ennek a sikernek az ára az ontológiáról való lemondás. A kvantummechanika egyenletei egy vershez hasonlíthatók, mely szavak helyett matematikai szimbólumokból áll (legalábbis az általunk használt formalizmusig), és a rímeket a szimbólumok fizikai jelentése váltja fel.

Természetesnek tűnik, hogy a fizikai törvények réteges szerkezete filozófiai kérdésekben is új szempontokat nyújt. Vegyük például az idealizmus és a materializmus történelmi versengését. Az idealizmus az érzékeket másodrendűeknek tartja, amivel szemben a materializmus csak az érzékek által közvetített világot fogadja el létezőnek. A két elképzelés vetélkedésének története dióhéjban összefoglalva a következő. A zsidó-keresztény kultúránk az egységet a monoteizmussal hangsúlyozta, melynek fontosságát a Szókratész előtti filozófusok is megerősítették. Azonban Platónnál az ideák a tárgyaknál nagyobb fontosságra tettek szert, mely sorrend már tanítványánál, Arisztotelésznél megfordult. A keresztény teológia ideák helyett a hitet helyezte a tárgyak elé. Ez a sorrend megint fordul a felvilágosodás és az azt követő ipari forradalom idején. Eközben Immanuel Kant szerint a priori fogalmaink már a tapasztalat előtt kialakulnak. Ugyan az idea és a matéria versengése a technológiára alapuló társadalmat nem nagyon érinti, a tudomány pragmatizmusa egyértelműen jelzi a fontossági sorrendet.

Ez az eldönthetetlennek látszó probléma nagyon leegyszerűsödik a kvantummechanika

ismeretében. A materializmus a klasszikus fizika világképét tükrözi. Azonban érzékeink a fizikai világnak egy kis részét fedik csak le, naivitás azt képzelni hogy azon túl nincs semmi. Az, amit a fizika anyagnak hív és minden kétséget kizáró kutatása tárgyává tett, az utóbbi száz évben már nem szorítkozik az érzékeink tartományára. Itt érdemes visszaemlékezni a fizika céljáról mondottakra a Mindenség Elméletével kapcsolatban – a sohasem elérhető mindent átfogó elmélet helyett érdekesebb célul kitűzni a már megismert jelenségek közti rend tisztázását, és abban érzékeink szerepét tisztázni. A mikroszkopikus szint csak annyiban alapvetőbb a makroszkopikusnál, hogy az összetett rendszereket az alkotóelemeik egymáshoz való viszonya alapján értjük meg. Mindkét szint egyforma fontosságú a létezés szintjén, elképzelt viszonyuk csupán gondolkodásunk struktúráját tükrözi. Ennek filozófiai megfelelője a külvilág és gondolkodásunk között fennálló viszony kiegyensúlyozása, a közös létezésbe való beágyazódásuk észrevétele anélkül, hogy létezők spektrumát széthasítanánk gondolatokra és tárgyakra.

Még egy utolsó gondolat, a távol-keleti filozófia és az európai fizika furcsa párhuzamáról. A fizika különböző szintjei és a kvantummechanika törvényszerűségei a több ezer éves távol-keleti világképre emlékeztetnek. Az indiai védák szerint a világ a megnyilvánult (makro) és a nem megnyilvánult (mikro) szintre oszlik, érzékeink a megnyilvánultat fedik le, pedig a „lényeg” a nem megnyilvánult. Az utóbbit nem lehet szavakkal leírni (gondoljunk a virtuális valóságok komplikált leírására). A védanta filozófia szerint az univerzális létező (Univerzum) és a személyes létezés (az agytudomány szerint tudatállapotunk a központi idegrendszer neuronjainak eredménye, melyeket kémiai folyamatok formálnak) megegyezik (mindkettő a kvantummechanika tárgya). Az univerzális létező nem osztható részekre (egy két-foton-állapot nem két egy-foton-állapot), és nem tudjuk tulajdonságait megfogalmazni (a megfigyelt részecskének nincs egyedi tulajdonsága ha összefonódott).

Nehéz elképzelni bármilyen elfogadható választ arra kérdésre, hogy ezek a párhuzamok a véletlen eredményei-e? Azt azonban tudjuk, hogy az antik görög gondolkodók kíváncsisága és lelkesedése az érzékeinkkel elérhető jelenségek iránt Európában olyan lavinát indított el, melynek nincs keleti párja. Ennek eredményeképp kifejlődő természettudományok pedig a megfigyelések, tapasztalatok olyan gazdagságát fedték fel, mely életünket egészségesebbé és érdekesebbé tette. Ugyanakkor a Szókratész előtti képet megtörte, és egy színes, a részletekben gazdag leírásmozaikkal helyettesítette. Azonban a mikroszkopikus szint megdöbbentő tulajdonságainak felfedezése megingatta az addigi naiv bizalmunkat az érzékeink által

közvetített világban, és egy olyan új világkép kialakítását sürgeti, amely meglepő módon a fenntartásosabban haladó keleti gondolkodók intuíciójára emlékeztet. Ezen a ponton fontos annak elismerése, hogy „egzakt” tudományaink nem csak a fizikai világról szólnak, ugyanúgy az emberi gondolkodást is tükrözik, mint ahogy egy másik civilizáció világképe.

Köszönetnyilvánítás: Köszönettel tartozom Kondákor Márknak és Simonovits Andrásnak a kézirat gondos olvasásáért és gördülékenyebbé tételéért.

-
- [1] Jean Piaget, *Az értelem pszichológiája*, Gondolat Könyvkiadó (1978).
 - [2] J. Alexandre, V. Branchina, J. Polonyi, *Global Renormalization Group*, Phys. Rev. D 58, 16002 (1998).
 - [3] Douglas Harding, *Fej nélkül*, Kvintesszencia Kiadó (2018).
 - [4] E. P. Wigner, *The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in Natural Sciences*, Communication on Pure and Applied Mathematics vol. XIII. 1 (1960).
 - [5] J. A. Wheeler, *Law without law*, in *Quantum Theory and Measurement* Princeton Univ. Press, Princeton, NJ (1983).
 - [6] V. Jacques et al., *Experimental Realization of Wheeler's Delayed Choice Experiment*, Science 315 966 (2007).
 - [7] S. S. Schweber, *Feynman's visualization of space-time processes*, Rev. Mod. Phys. 58 449 (1986).
 - [8] N. David Mermin, *Hidden variables and the two theorems of John Bell*, Rev. Mod. Phys. 65 803 (1993).