

KVANTUMMECHANIKA: A LÁTHATATLAN FORRADALOM

– 1. RÉSZ

Polónyi János
Strasbourg Egyetem, Strasbourg Franciaország

Jelenlegi ismereteink alapján – a kvantummechanikát, pontosabban az annak természetes általánosítását, a relativisztikus kvantumtérelméletet leszámítva – minden fizikai elmélet alkalmazhatósági tartománya behatárolt. Ugyanakkor a kvantummechanika megalkotásával a fizika elvesztette legfontosabb alapelvét, amelyet a newtoni mechanikából örökölt: a determinizmust. Ezzel az objektív realitás és az alkalmazott matematikai fogalmak közti kapcsolat is odaveszett, bizonytalanná vált az egyenletekben előforduló mennyiségek és a megfigyelt jelenségek közti összefüggés. 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 fizikatanuszékek könyvtárában. Már a második évben kialakult a kép, hogy a számomra izgalmas, provokatív kérdéseket leginkább a kvantummechanikában találom meg. Viszont túl azon, hogy érdekesek voltak, egy mondatot sem értettem a lényegből. Türelmetlenül vártam a harmadik évet az akkor esedékes kvantummechanika-előadásokkal. 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 volt így, amíg egy jó évtized múlva el nem kezdtem tanítani a kvantummechanikát. Egy előadásra készülve hasított belém a felismerés, hogy ez a furcsa, ködös formalizmus a gondolataimról is szól, azok kialakulásáról az agyamban.

Készült a Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Gimnáziumban 2020. március 2-án tartott előadás alapján.

A szerző köszönettel tartozik *Kondákor Márknak* és *Simonovits Andrásnak* a kézirat elolvasásáért és gördülékenyebbé tételéért. Külön hála illeti a *Fizikai Szemle* bírálóit, *Csanád Mátét* és *Takács Gábort* rendkívül hasznos és elgondolkodtató megjegyzéseikért.



Polónyi János 1978-ban fizikus diplomát, majd 1979-ben PhD fokozatot kapott az ELTE-n. Ezután a KFKI-ban kezdett dolgozni, majd a darmstadti GSI-ben és a University of Illinois-n volt post. doc. Ezt követően az MIT-n, később az ELTE-n és végül Strasbourgban egyetemi tanár. Érdeklődési területe a kvantummechanika, a kvantumtérelmélet és a renormalizációs csoport.

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 tulajdonképpen miről is szól a kvantummechanika. Örömmel vettem észre, hogy a múlt század elején egy igazi, mély forradalom indult el a tudományos gondolkodásban a kvantumjelenségek körül, amelyet sajnos a későbbi generációk anélkül próbáltak kanonizálni, hogy azok jelentőségét kellő mértékben 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 megértenem 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.

Szintek

Kezdjük azzal a kérdéssel, hogy világunkat milyen stratégiával próbáljuk megérteni? A mindennapokban – mondhatni – ebben elég sikeresek vagyunk, hiszen a világ zavarba ejtő gazdagsága ellenére meglehetősen biztonsággal éljük életünket. Hogy ezt a sikert megértsük, ugorjunk vissza körülbelül 1,8 millió évvel az időben, és kíséreljünk utján egy Homo habilist, amikor megpillant egy különleges alakú kavicsot. Egy pillanatra megáll, megjelenik képzeletében előző napi próbálkozása az alig sült hús felvágására 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 környezetéből, majd indította kalandos útjára, amelyen azóta mi is haladunk. Megjelent a reprezentáció képessége, amellyel 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 hagymához hasonló: rétegekből áll, amelyek segítenek benne eligazodni. Vegyük példának az élő szervezetet, amelynek 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, amelyek egyedül létünkben, családtagjaink, barátaink körében, a munkahelyen, vagy éppen a világot járva merülnek fel. Méreteket tekintve is találunk szinteket, például

az emberi kapcsolatok típusai erősen függenek a résztvevők számától. 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 észrevevessük, hogy az utolsó kétezzer év hőmérsékletét tekintve rendszertelen fluktuációk után az utolsó ötven év egy riasztóan meredek felmelegedést mutat. Nehéz másra gyanakodni, mint az általunk okozott üvegházhatás következményére. A paleoklimatikus viszonyok újabban megint másról szólnak, 50-70 ezer évente megjelenő hőmérsékletcsúcsokról, amelyek jégkorszakokat választanak el egymástól, az utóbbi pár ezer év alatt pedig épp egy ilyen csúcshoz érkeztünk. Ez a struktúra a Föld belsejében vagy a Naprendszerben zajló folyamatokról ad hírt.

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

A valóság egy szintjét úgy lehetne definiálni, mint adott alkotóelemek halmazát, amelyeknek adott viszonyok van egymáshoz. Ez a viszony kifejezhető jelentést, szerepet vagy kölcsönhatást. A mérétekben 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, amelyek 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: a 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 össze-

hasonlítva értelmezhető. A megfigyelt mennyiségek skálafüggése alapjaiban felforgatja, ugyanakkor – véleményem szerint – egyben érthetőbbé is teszi a fizikát. Ezen a ponton kezdjük a kvantummechanika felfoghatatlanságának megértését.

Fizikai állandók és törvények

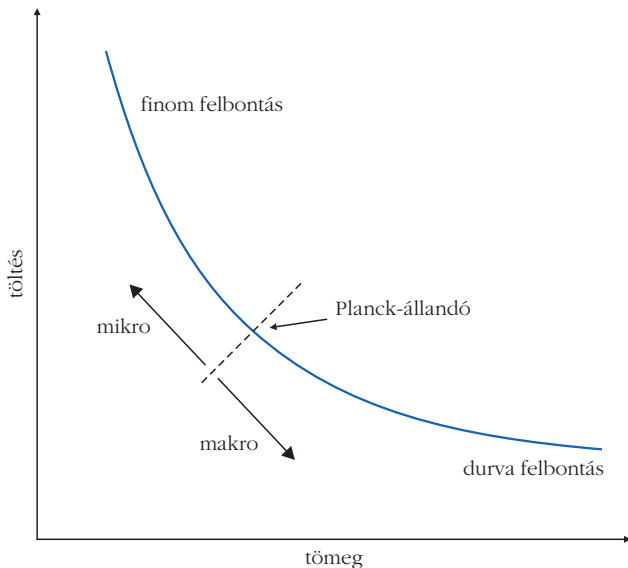
Megfigyeléseinket az ehhez használt berendezés skálaparaméterei, például méret, tömeg, megfigyelési idő jellemzi és amennyiben ezeket megváltoztatjuk, akkor a tapasztalt jelenség is megváltozik. Megváltozik a mért mennyiség numerikus értéke, illetve az általa kielégített törvényszerűségek is mások lesznek. Más szóval nincsenek sem univerzális, minden skálán érvényesülő fizikai törvények, sem pedig fizikai állandók. Itt persze a mérésekkel meghatározott „állandókról” van szó, nem pedig a különböző mértékegységek közti, általunk definiált, szorzófaktorokról.

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, amelyet sűrűlódó 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 sűrűlódó 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, amely köztudottan eltér a vákuumban mért értéktől, ha a fény anyagon halad át. 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 kvantum-elektrodinamika esetével lehet egyszerűen megvilágítani egy olyan képzeletbeli világban, ahol csak elektronok léteznek, amelyek elektromágneses kölcsönhatásban állnak egymással. A térelméletek dinamikáját a mechanikai rendszerekhez hasonlóan a Lagrange-függvénnyel definiáljuk. E világ elektrodinamikájának Lagrange-függvénye két szabad paramétert tartalmaz, az elektron m tömegét és e töl-



1. ábra. A kvantum-elektrodinamika renormalizált trajektóriája.

tését, tehát két mérés eredményét kell felhasználnunk, hogy az elméletet rögzítsük. Egy váratlan problémával kerülünk szembe ezen a ponton, amely nevezetesen az, hogy eddig nem sikerült a kvantummechanika sokrészeskerendszerre való általánosítását, a kvantumtérelméletet, tetszőleges pontossággal lokalizálható, azaz folytonos négydimenziós téridőben megvalósítani. Mivel az ilyen korlátozással megalkotott kvantumtérelmélet állításait minden eddigi mikroszkopikus megfigyelés alátámasztja, kénytelenek vagyunk a téridőnk klasszikus fizikából ismert szokásos folytonosságát feladni. Ugyanakkor a téridő kis távolságon megfigyelhető deformációjának vagy diszkrét mivoltának eddig semmi jelét nem találjuk a legjobb felbontású kísérletekben sem, azaz feltételeznünk kell, hogy csak egy bizonyos felbontásig alkalmazhatók a hiányos ismereteinken alapuló téridőkontinuumra épülő elméletek. Azt a minimális ℓ távolságot, ameddig elméleteink érvényesek, levágásnak nevezik, mert attól a távolságtól már nem alkalmazzuk a szokványos, folytonosságon alapuló leírás módját. Ugyan eddig semmilyen felső határt nem találunk ℓ értékére a megfigyelések során, de a létezését még a $\ell \rightarrow 0$ határeset elvégzése után is látjuk az úgynevezett anomáliajelenségekben, 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 úgynevezett renormalizációs feltételek a

$$P_1 = F_1(e, m, \ell),$$

$$P_2 = F_2(e, m, \ell)$$

alakban írhatók fel, amely egyenletek bal oldalán a mért fizikai mennyiség áll, jobb oldalán pedig az annak megfelelő kvantum-elektrodinamikai képlet. Az egyenleteknek az adott fizikai eredmények, P_1 és P_2 , alapján talált megoldása a szabad paraméterekre,

m -re és e -re, ℓ -függő eredményre vezet. 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, ennek ellenére a Lagrange-függvény paramétereinek alkalmas megválasztásával a renormalizált trajektórián lévő elméletek ugyanazt a fizikát írják le különböző felbontással. Az $m(\ell)$ és $e(\ell)$ függvények az ℓ felbontású megfigyelésekben megjelenő elektrontömeget és elektrontöltést jelentik.

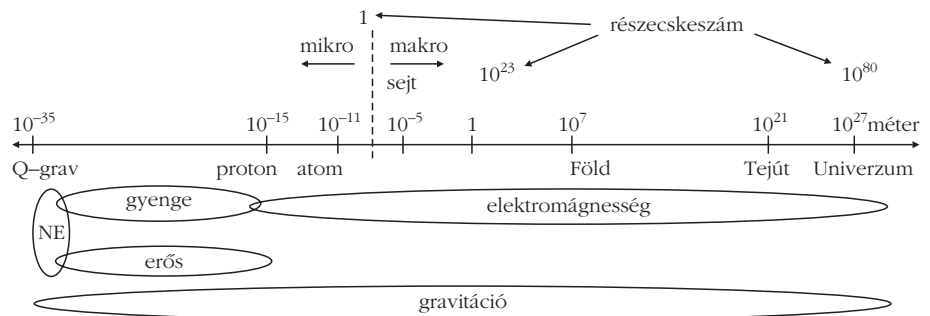
Ha egy elmélet működik egy felbontásnál, akkor annál durvább hosszúságskálán is alkalmazható, tehát a renormalizált trajektória folytatódik a hosszú távolságú határesetben. Persze előfordulnak komplikációk, hiszen például az erős kölcsönhatás esetében más szabadságfokokat találunk a protonon belül és kívül, de ez „csak” technikai bonyodalmakhoz vezet. Azonban nincsen garancia arra, hogy renormalizációs feltételek a Lagrange-függvény paramétereire tetszőlegesen kicsiny minimális hosszra is megoldhatók. Azokat az elméleteket, amelyekre létezik megoldás tetszőlegesen kicsiny ℓ -re, renormalizálható elméleteknek hívjuk. Ezen négydimenziós téridőben értelmezett elméletek struktúrája akármilyen rövid távolságokon is alkalmazható, 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, amikor sikerül jobb felbontással követni a részecskefizikai folyamatokat. Egy paradigmaváltozásnak vagyunk tanúi, amennyiben a renormalizálható elméletek helyett, amelyek tetszőlegesen kis távolságokon is matematikailag jól definiáltak maradnak, olyan nyitott elméletek felé fordul az érdeklődés, amelyek csak a már mérésekkel alátámasztott skálatartományban alkalmazandók. Ugyan a renormalizálható elméletek bármilyen távolságon matematikailag jól definiáltak mennyiségeket adnak, a megfigyelések számára még elérhetetlen skálájú eredmények félrevezetőek lehetnek. A renormalizálhatóság csupán egy matematikai egyszerűség, az elmélet törvényszerűségeiben nem jelenik meg a fizikai jelenségek jellemző skálájától teljesen idegen levágási skála és ezáltal az elmélet esetleg teljesen félrevezető módon, ami a fizikai jelenségek teljességét illeti, tetszőlegesen rövid távolságokra kiterjeszhető.

Visszatérve a kvantum-elektrodinamikára, 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-állan-

dó. 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 habilis ennek felismerése különböztette meg a környezetétől.)

A mi Univerzumunk nem csak az elektromágneses kölcsönhatásból áll. A fizikai jelenségek rendkívüli összetettséget mutatnak a felbontás függvényében, ahogy azt a 2. ábrán jelezzük. A legnagyobb távolság, amely 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^{-35} m. Az elemi részecskék ennél jobb felbontású megfigyelésekor fekete lyukaknak tűnnek, romba döntve fizikai elképzeléseinket. A kvantumelmélet és az általános relativitáselmélet ennyire éles ellentmondása alapján gondoljuk úgy, hogy a kvantumtérelméletben bevezetett minimális hossz nem lehet a Planck-sugárnál kisebb. A két skála között meghúzódó mintegy 62 nagyságrend tartalmazza az általunk megismerhető fizikát. Jelenleg csak a 10^{-17} m-nél 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 egyetlen elméletről sem tudjuk eldönteni, hogy igaz-e és ebben a kérdésben csupán a józan ész számára kellően meggyőző érveket hozhatunk fel. A kérdés azonban élesebben vetődik fel a mindenség elméletével kapcsolatban: reménykedhetünk egyáltalán egy mindent magába foglaló, végső mikroszkopikus elmélet létezésében, amelyből az összes kölcsönhatás levezethető?

A fizika négy alapvető kölcsönhatásának erőssége távolságfüggő. Az elemi részecskék világából ismert gyenge kölcsönhatás 10^{-17} m-nél, az erős kölcsönhatás, amely a magfizikát is felöleli 10^{-15} m-nél rövidebb távolságokra fejt ki hatását. Az elektromágneses kölcsönhatás 10^{-17} m-nél hosszabb távolságokon 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 nem gravitációs kölcsönhatás



2. ábra. A fizika világa a felbontás függvényében.

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 hosszabb, illetve rövidebb 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 távolságskálán 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 egyik legmeglepőbb jelensége. Miért válnak a klasszikus fizika folytonosan változó mennyiségei diszkrété, amikor nagy felbontással mérjük őket? A kvantummechanika matematikai struktúrájából, nevezetesen a tér-idő-szimmetriák irreducibilis reprezentációiból fakad az, hogy a mikroszkopikus világban minden folyamat, gerjesztés elemi csomagokban, kvantumokban történik. A megfigyelések felbontásának növelésével akkor jelennek meg a kvantumjelenségek a maguk teljességében, amikor az elemi gerjesztéseket egyenként sikerül észlelni. Ugyan van egy pár, ennek a szabálynak ellentmondó, látványos makroszkopikus kvantumjelenség, mint például a Gibbs-entrópia paradoxon megoldása, a Bose–Einstein-kondenzáció, a szupravezetés, a szuperfolyékonyság és a kvantum Hall-effektus, azonban ezek rendkívül ritkák és megérthető, hogy megjelenési formájuk makroszkopikus.

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 határat-

menet fogalma, a matematika egyik gyöngyszeme, hasznos egyszerűsítés annak érdekében, hogy a megfigyelési skálától távol eső minimális hosszút kiküszöböljük elméleteinkből, amelyek valójában diszkrét matematikára alapulnak. Azonban megfigyeléseink – amelyeket véges pontossággal, véges idő alatt hajtunk végre – nem igénylik feltétlenül a határátmenet vagy a folytonosság fogalmát.

A mi otthonunk, a bennünket alkotó molekulák és egy ember mérete között meghúzódó 10^{-10} – 10^0 m skálaintervallum. Mondandónk szempontjából ennek kulcsfontossága van. Ugyanis azok a fogalmak, amelyekkel 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 felnőtünk, agyunk elveszti kezdeti plaszticitását és már nem vagyunk képesek radikálisan új fogalmakat alkotni. Így „hideg zuhanyként” éri a fizikushallgatókat a kvantummechanika-előadás, amelyben 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, amelyet a Boole-algebra és a megszokott halmazelmélet 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 tulajdonságai egy fontos ponton különböznek a Boole-algebrától, a logikai disztributivitás sérül, amelynek 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, nehezebbé esik azt elsajátítania, miközben a fejében továbbra is eme természetes logika alapján történnek meg azon folya-

matok, amelyek következményképpen megszületik az emberi gondolat. Így egy erről mit sem tudó gyereknek azt mondhatnánk: „a világod valóban a Te világod, a távolság e legkapzsisabb és legmegtévesztőbb besurranó tolvaj még nem csente el tőled” [2]. A kvantummechanika forradalma láthatatlan, érzékeinken túl történik és csak a távoli csatazaj hangjaira figyelünk fel.

Hozzá kell tennem, hogy a kvantumlogika használata és a klasszikus logikához való viszonya még nyitott és ellentmondásos kérdéskör. Nem arról van szó, hogy az egyik „igaz” a másik pedig „hamis”. Nehéz, talán nem is ajánlatos kisgyerekkorunk óta sikeresen használt gondolatmeneteinket teljesen feladni csak azért, hogy más összefüggésben másként próbáljunk meg gondolkodni, hiszen azok fizikai és mentális integritásunkat őrzik. Azonban a két logikai struktúra különbsége nagy kihívás marad számunkra, különös tekintettel a később említendő kontextualitással kapcsolatban.

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 diszkrétiségéből adódó különbségeket elhanyagolva. A lokalitás azért döntő fontosságú, mert a nemlokális elméletek megoldása általában 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 figyelembe vételével. Az ilyen elméletek nagy hátránya, hogy nem lokálisak. Ez annak következménye, hogy egy dinamikai szabadságfok kiküszöbölése elkerülhetetlenül nemlokális jelenségeket vezet be. Gondoljunk például két kölcsönható részecskére: az egyiket kiküszöbölve a másikra kapott nyitott elmélet azért nemlokális, 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 nyitott elméletek közelítő megoldásaival próbálkozunk a megfigyelt jelenségek leírásában.

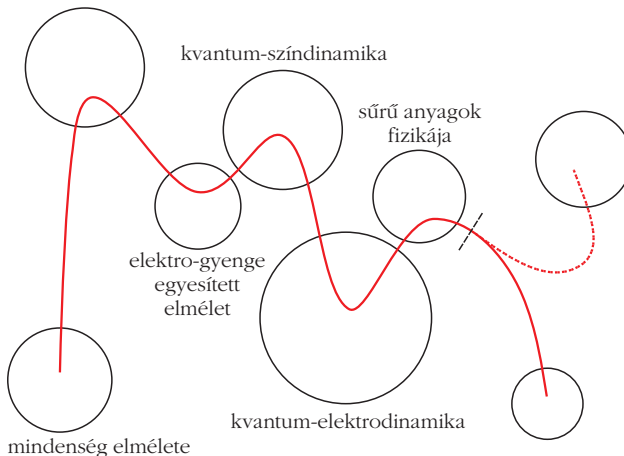
Képzelnünk el egy olyan paraméterteret, amelynek tengelyeit a fizikusok és a mérnökök által használt mennyiségek és állandók alkotják. Ez egy meglehető-

sen magas dimenziójú tér. Tekintsük ebben a Világmindenség renormalizált trajektóriáját. Ez egy olyan görbe, amely pontjainak vetülete a koordinátatengelyekre a fizikai és mérnöki állandók értékét szolgáltatja a megfigyelés felbontása függvényében. E trajektória egy síkvetületét mutatja a 3. ábra, ahol az egyszerűség kedvéért feltételeztük, hogy van egy mindenség elmélete [3]. Ne felejtjük azonban el, hogy ezen elmélet létezését nyilvánvalóan lehetetlen kísérletileg alá támasztani.

Nagyon jó felbontással a feltételezett mindenség elmélete körén 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 jelenlegi legjobb felbontású kísérleti eredmények alapján megismert elektrogyenge egyesített elméletig, ahol 10^{-17} m körül szétválik a gyenge, valamint az elektromágneses kölcsönhatás is. Megközelítően ennél a felbontásnál érünk be a kvantum-színdinamika elméletébe is, amely az erős kölcsönhatást írja le. Az elektrogyenge egyesített elmélet felbontása alatt egy másik elmélet is megnyílik, a kvantum-elektrodinamika. A felbontás további durvításával jutunk el 10^{-11} m környékén az atom és a sűrű anyagok fizikájához. E tartományban több tucat nyitott elmélet ismeretes kvantumkémiaiából és szilárdtest-fizikából. Ezután kelünk át a mikro-makro átmeneten, elérve a makroszkopikus fizika tartományát. Azon belül már más-más renormalizált trajektóriát találunk különböző mérésekben, amelyek a megfigyelt rendszer környezetét megszabhatják.

Ebben a 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 a szilárdtest-fizikusok a nem jól ismert, közelítő elméleteket használják. Erre az a válasz érkezett, hogy egy-egy nagyenergiás mérésen mérnökök és fizikusok százai, esetleg ezrei dolgoznak éveken át. Ez a körülmény

nagy egyesítés elmélete



3. ábra. A mindenség elméletének renormalizált trajektóriája. A szaggatott vonal választja el a mikro és a makro szintet, az utóbbit módosítani tudjuk laboratóriumi körülmények között, ezért a trajektória különböző irányokban fut különböző környezetben végrehajtott megfigyelések során.

viszont pont azt jelzi, hogy a mérés nem lényeges a megfigyelt jelenségek szempontjából. Más szóval a kezdeti feltétel, amely rendkívül rövid skálához tartozik – és amely a nagyenergiájú fizika művelőinek figyelmét felkelti – nem sok segítséget nyújt az annál sokkal nagyobb távolságon lezajló jelenségek megértésében. 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, és a „szomszédos” elméletek egymáshoz való viszonyát megértsük.

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

Virtuális valóság

Az egyik leglényegesebb változás, amelyet a makroszkopikus világból a mikroszkopikusba érkezőkor találunk: 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, késő este sétáltak haza Princetonban. Einstein felnevezte 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.

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

Hogyan definiálható egy elemi pont részecske állapota, ha az nem kinyerhető információt is tartalmaz? Makroszinten a koordináta és az impulzus ismerete is szükséges 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. Tekintsünk úgy egy részecske állapotára, mint lehetséges helyeinek együttesére, amelyben minden virtuális valóság-hoz egy esély tartozik,

$$\psi = \left(\begin{array}{l} \text{állapot} = \mathbf{x}_1, \text{ esélye} = \psi(\mathbf{x}_1) \\ \text{állapot} = \mathbf{x}_2, \text{ esélye} = \psi(\mathbf{x}_2) \\ \vdots \end{array} \right).$$

Kvantummechanikában az esélyt egy komplex szám, a valószínűségi amplitúdó fejezi ki, amelynek abszolútérték-négyzete a kérdéses lehetőségnek, mint egyértelmű valóság megjelenésének 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. Egy komplex számban el lehet bújtatni az idő irányát azzal, hogy megfordítását komplex konjugációval ábrázoljuk. 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 kvantumállapot is egy telefonkönyv, csupán soraiban a virtuális valóságok és hozzájuk tar-

tozó valószínűségi amplitúdó állnak. A részecske megtalálásának a valószínűsége sűrűségét egy sorban, mondjuk az \mathbf{x} pontban, a $\psi(\mathbf{x})$ hullámfüggvény alapján a

$$p(\mathbf{x}) = |\psi(\mathbf{x})|^2$$

kifejezés adja meg. Az állapotok matematikai reprezentációja komplex vektorokkal történik:

$$\psi \rightarrow (\psi(\mathbf{x}_1), \psi(\mathbf{x}_2), \dots).$$

Ezek egy olyan lineáris tér elemeit alkotják, amelynek bázisvektorait a különböző virtuális valósághoz tartozó állapotok adják,

$$\psi = \psi(\mathbf{x}_1) e_1 + \psi(\mathbf{x}_2) e_2 + \dots$$

Egy mikroállapot telefonkönyvszerű leírásában fellépő állapotok azért úgy mondhatjuk 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 nem lehet képességeink, módszereink javításával teljesen kiküszöbölni a fizikai mennyiségek statisztikus leírását. A mérés a Természet csapdába ejtése, ahol nincs választása: a keresett fizikai mennyiségre meg kell alkotnia egy értéket, ami nem létezett a mérés előtt. A már létező és a még nem létező információ különbségére jó példa a később tárgyalandó, úgynevezett késleltetett válasz kísérlet.

Mihelyst a létezés kérdése bekeveredik gondolatinkba, filozófiai problémákkal kerülünk szembe. Most is így történik, a kvantummechanika matematikai struktúrájának és jelenségeinek interpretációja nehéz filozófiai kérdések, problémák elé állítanak. Ezek fellazítása vagy megoldása szerintem csak „kívülről”, döntő fontosságú, új kísérletek, megfigyelések eredményeképpen történhet. Az objektív realitás a klasszikus fizika szintjén kétséget kizáró módon létezik, mikroszkopikus szinten azonban elvész minden arra utaló jelzés. Ennek megfelelően a kvantummechanika különböző interpretációi abban különböznek, hogy hol húzzák meg a választóvonalat az objek-

tív realitás és elképzeléseink között, és hogyan kezelik a matematikai formalizmus és az Univerzum viszonyát a számunkra ismeretlen virtuális oldalon. E rövid szövegben el szeretném kerülni a különböző interpretációk által adott képek ismertetését és a sokszor nagyon komplikált összehasonlítását. A továbbiakban ezért az objektíven nem eldönthető, interpretatív vagy filozófiai kérdésekben csupán a saját véleményemet említem. Az pedig a kvantumtérelmélettel való foglalatosságaimon alapszik és nem pontosan egyezik meg egyik mára már többé-kevésbé kialakult és megmerevedett interpretációval sem. Ez a különbség onnan ered, hogy úgy vélem, a kvantumtérelmélet a jelenleg ismert interpretációk egyes nyílt kérdéseit helyre tudja tenni, meg tudja oldani.

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 $\psi(\mathbf{x})$ hullámfüggvény írja le, amely megadja annak a virtuális valóság valószínűségi amplitúdóját, hogy a részecske az \mathbf{x} pontban található. A mérés folyamata három lépésre bontható.

1. A részecske kölcsönhat a mérőberendezéssel. A mérőberendezés úgy van kiképezve, hogy a kölcsönhatás következtében a részecske különböző elhelyezkedése a makroszkopikus mérőberendezést makroszkopikusan különböző állapotba hozza. E lépés végére a részecske helyére vonatkozó információ a mérőberendezés állapotára másolódott át, és mindkét résztvevő, a részecske és a berendezésünk állapotát korrelált, úgynevezett összefonódott virtuális állapotok sokasága jellemzi.

2. A mérőberendezés makroszkopikus méretéből kifolyólag a részecske-mérőberendezés kölcsönhatás

olyan erőssé válik, hogy az feltöri a virtuális állapotok sokaságát és átalakítja őket lehetséges makroszkopikus állapotokká.

3. A mérés utolsó állomásán a több lehetséges makroszkopikus állapotból kiválasztódik a végeredmény, az „igazi” valóság, amely a részecske-mérőberendezés kettős rendszer végállapotának felel meg.

A virtuális állapotsereg feltörését dekoherenciának hívjuk, az a disszipatív erőkhöz hasonlóan jelenik meg, és elég könnyen nyomon követhető. Az „igazi” valóság kiválasztása azonban a mikroszint legmélyebb, legjobban védett rejtélye. Ugyanis a gyerekkorunk óta megrögződött meggyőződéssel ellentétben még abban sem lehetünk egészen biztosak, hogy a valóság tényleg létezik. Ha nem létezik, akkor milyen mentális erőfeszítések nyomán jutottunk arra a meggyőződésre, van? Ha pedig engedünk abbéli meggyőződésünknek, hogy az bizony csak azért is létezik, akkor annak a dekoherencia által feltört virtuális lehetőségek halmazából való kiválasztása okoz bonyodalmakat. Mert a valóság kiválasztása, ha tényleg megtörténik, nem determinisztikus, jelenlegi matematikai módszereinkkel nem követhető. Úgy vélem, hogy a makroszkopikus mérőberendezés kvantum-térelméleti leírása egy teljesen szokványos fizikai lépésekből álló választási mechanizmushoz vezet. Azonban ahhoz, hogy annak végeredményét kiszámoljuk, olyan mikroszkopikus kezdeti értékekre van szükség, amelyek makroszkopikus megfigyelésekkel nem érhetők el. Ezzel bezárul a klasszikus fizika csapdája.

Irodalom

1. Jean Piaget: *Az értelem pszichológiája*. Gondolat Könyvkiadó, Budapest (1978).
2. Douglas Harding: *Fej nélkül*. Kvintesszencia Kiadó (2018).
3. J. Alexandre, V. Branchina, J. Polonyi: Global Renormalization Group. *Phys. Rev. D* 58 (1998) 16002.