

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVII. évfolyam

4. szám

2007. április

A RENORMCSOPORTRÓL, A KVANTUMTÉRELMÉLETI VÉGTELENEKRŐL ÉS A KVANTUMMECHANIKA ÉRTELMEZÉSÉRŐL

Két beszélgetés Polónyi Jánossal, az MTA külső tagjával

– *Kolléga úr, Ön 1992 óta a strasbourgi egyetemen tanít elméleti fizikát. Kutatási területe a kvantumfizika, a kvantumtérelmélet. Alkotó munkásságát számos, többek között a nagybecsű Physical Review-ban megjelent tanulmánya dokumentálja. Milyen témákon dolgozik mostanában?*

– Az utóbbi években a renormcsoport módszer alkalmazásának határait igyekeztem tágítani. A renormcsoport alapgondolata az a paradoxnak tűnő állítás, hogy nincsenek valódi állandók a fizikában. Minden állandónak hívott mennyiség, általában bármely mérési eredmény, függ a mérést jellemző idő-, hosszúság- vagy tömegskálától. Vegyük példának egy folyadékba mártott test tömegét. A tömeg meghatározásának a problémája az, hogy a testtel együtt mozog a folyadék egy része, és nem világos, hogy hol kell meghúznunk a határvonalat a test és a környezete között. A tömeg egy lehetséges definíciója a mozgási energia alapján képzelhető el: a testet állandó sebességgel mozgatjuk, és valahogyan megmérjük az egész rendszer energiáját. A tömeg a kapott energia kétszeresének és a sebesség négyzetének hányadosaként adódik. Ez az eredmény természetesen nem egyértelmű, de ami most fontosabb, hogy függ az alkalmazott sebességtől. Folyadék helyett gondolhatunk levegőre, a probléma ugyanúgy megmarad, csupán a test tömegének numerikus értéke függ kevésbé a sebességtől. Ehhez hasonló gondolatmenettel bármely mérési eredményről belátható, hogy az általában elég komplikált módon függ a mérési protokolltól. A renormcsoport a fizikai törvény-

szerűségeket parametrizáló „állandók” megfigyelési skálától való függését térképezi fel.

Miért tartom ezt a módszert fontosnak? Hallani arról, hogy a fizika egyensúlyzavarba került, mert ugyan a technológiára alapuló korunkban egyre több alkalmazott fizikát igénylő problémával kerülünk szembe, az alapkérdések tisztázása lelassult a nagyenergiájú fizika struktúraváltozása miatt. Az egyre kisebb távolságokon lezajló fizikai folyamatok tanulmányozását eddig a részecskegyorsítók egyre nagyobb energiákra való hangolásával oldották meg. De ez a – közgazdaságtanból kölcsönzött hasonlattal élve – „extenzív” fejlődési folyamat a végéhez közeledik amiatt, hogy a jelenlegi technológia és erőforrásaink határára értünk. Az energia további jelentős növelése már sem technikailag, sem pedig tudománypolitikailag nem lehetséges. Ehelyett „intenzív” fejlődést kell követni, új kísérleti elvek kidolgozása segítségével kell tovább növelnünk a mérések felbontását. Példának a kozmikus sugárzás kis intenzitású, de gyorsítóinkkal elérhetetlenül nagy energiájú részecskéinek tanulmányozását lehetne említeni.

A renormcsoport módszere, amely a fizika törvényeinek a felbontóképességtől való függését követi nyomon, annyiban kapcsolódik a fizika általános problémájához, hogy egy alternatívát sugall. Ezt a módszert eddig olyan idő-, hosszúság- vagy tömegskála-tartományokban használtuk, amelyeket egy adott típusú kölcsönhatás jellemez. Azzal a céllal, hogy az adott kölcsönhatás erősségének változását kövessük a megfigyelés skálájának függvényében. De

bármely realiztikus modellnek számot kell adnia a fizikában megfigyelt különféle kölcsönhatásokról, és azoknak adott rendszerekben megjelenő eléggé komplikált, együttes megjelenési formájáról. Tehát egy realiztikus modellben nem elégedhetünk meg olyan módszerrel, amely csak egy fajta kölcsönhatást képes kezelni. Ezért a renormcsoportot olyan globális módszerre igyekeztem általánosítani, amellyel különböző típusú kölcsönhatások egymás utáni fellépését lehet tárgyalni, amikor a megfigyelés felbontását változtatjuk. A részleteket illetően utalok a Fazekas Gyakorló Gimnázium által kiadott *FA Fazekasban kezdődött...* kiadványra, annak a (<http://fizika.fazekas.hu/fazekasban.html>) *Renormalizációs csoport és metaelmélet* fejezetére.

Gondoljunk a Mindenség Elméletére, amely a Természet összes kölcsönhatását tartalmazza. Az elméletnek a renormcsoport által követhető paramétereit a fizikában és a mérnöki tudományokban előforduló összes fizikai és anyagtudományi állandók, mint például a részecskefizikából ismert elemi részecske paraméterek, atom- és szilárdtestfizikai konstansok, hidrodinamikai, makroszkopikus és asztrofizikai paraméterek együttese alkotja. A fénysebesség és a Planck-állandó egységnyinek választása után csak egy dimenzióval rendelkező paraméter marad, és ennek – mondjuk a hosszúságnak – függvényében a fizikai „állandók” egy görbét, az úgynevezett renormalizált trajektóriát, írnak le ebben a meglehetősen sokdimenziós térben. A rövid távolságú végpont egy általunk nem ismert elmülethez tartozik, melyről azt gondoljuk, hogy kevés független paramétere van. A renormalizált trajektória innen indulva olyan tartományokon halad át, amelyek egy-egy sajátos kölcsönhatáshoz tartoznak. Ez azért történik így, mert minden elemi kölcsönhatásnak van egy olyan skálatartománya, ahol a fizikai „állandók” skálafüggését jó közelítésben az adott kölcsönhatás szabja meg. Az összes többi kölcsönhatás elhanyagolhatóan tűnik egy ilyen skálatartományban a kölcsönhatások egymásba olvadásának követése szempontjából. A megfigyelési távolság növelésekor, további ismeretlen kölcsönhatások érintésével, elképzeléseink szerint 10^{-29} cm környékén a Nagy Egysítés Modell következik, amely az erős, gyenge és az elektromágneses kölcsönhatásokat egységesen írja le. A megfigyelési távolság további növelése az erős kölcsönhatás leválásához vezet, és ezután a renormalizált trajektória a gyenge-elektromágneses egyesített elmülethez érkezik 10^{-16} cm-nél, melytől az erős kölcsönhatás kvantumszindinamikának nevezett elmülethez vezet tovább az út. A részecske- és magfizika tartományát 10^{-12} cm-nél elhagyva az atomfizikához érkeünk, ahol már csak az elektromágneses kölcsönhatás aktív. Az angström távolság felé a szilárdtestfizika gazdag jelenségköréhez érünk, amelyben az elméletek gyors egymás utánban követik egymást. Itt a számos, egymással versengő kölcsönhatási mechanizmus jelenlétében nem lehet csupán egyetlen skálafüggést követni, mint ahogy ezt a magas hőmérsékletű szup-

ravezetés példáján is látjuk. Ezután jutunk el a fizika igazi „vízválasztójához”, a kvantum- és klasszikus fizikát elválasztó távolságskálahoz. Eközben más fontos jelenségek is előfordulhatnak. A környezet módosításával, mint például hő- és részecske-tartályok csatlakoztatásával, a trajektória további fejlődését mesterségesen is befolyásolhatjuk. Végezetül az Univerzum különböző tartományaiban egymástól különböző infravörös, nagytávolságú végpontokba fut be a renormalizált trajektória.

Az említett alternatíva a különböző tartományokban talált paraméterértékek közti összefüggések meghatározása, azaz egy adott távolságskálán megjelenő fizikai folyamat rövidebb távolságon végbemennő jelenségek alapján való, részletesebb „levezetése”. Ez nem egyszerű feladat. Például a nagyenergiás fizika célja a trajektória rövid távolságokhoz tartozó részének megismerése annak reményében, hogy ezután „a többi már csak” modellszámolás. Azonban az anyagtudományokban használt fizikai paraméterek szempontjából a nagyenergiájú fizika elemi paraméterei nem tűnnek fontosnak, annak ellenére, hogy például egy nehéz kvark tömegének kísérleti meghatározása kutatók százainak több éves erőfeszítését igényli.

A renormcsoport által sugallt alternatíva tehát az, hogy a Természet megismerése, megértése érdekében a felbontóképesség minden határon túl történő növelése helyett próbáljuk egymásból leszarmaztatni a már elért skálákon talált különböző törvényszerűségeket. Nevezetesen, próbáljuk megérteni, hogyan épül fel a proton átmérőjénél jóval kisebb távolságokon megismert kölcsönhatásokból a magfizika, az atomfizika, a szilárdtestfizika és végezetül a klasszikus, makroszkopikus fizika. Feltéve, hogy a megértés sorrendje a mikroszkopikus fizikától a makroszkopikus irányban halad. A kvantumánomáliák és hasonló, a renormcsoport módszerével tárgyalható jelenségek még ezt a sorrendet is megkérdőjelezzik.

Hogy végre a kérdésre is konkrét választ adjak: a renormcsoport módszer alkalmazásával a szilárdtestfizikában észlelt úgynevezett Anderson-lokalizációt próbáltam leírni. Bebizonyosodott, hogy a módszer a fázisátmenet mindkét oldalán jól működik, és ezzel lehetővé vált a rendezetlen rendszerek egységes tárgyalása. Jelenleg pedig az elektrodinamika kvantumklasszikus átmenetének leírására általánosítom a renormcsoport módszert.

– *A perturbációszámítás a kvantummechanika egy bevált módszere, termennyiségekre alkalmazva magasabb rendben általában végtelen kifejezésekhez vezet. Az esetek egy részében ezek a divergenciák ügyes matematikai fogásokkal kiküszöbölhetők ugyan, de, dacára a sikereknek, alkalmasint némi szorongást keltenek. Indokolt-e ezért kételkedni a térelmélet mai formájának általános érvényességében?*

– Ez valóban ijesztő probléma, emiatt Dirac, Landau és más mértékadó fizikusok tévesnek ítélték a kvantumtérelméletet. Azóta felismerték, hogy a kvantumtérelmélet a kvantummechanika alapelveinek kö-

vetkezetes alkalmazásával, nevezetesen a kinematikai szimmetriák ábrázolásainak megalkotásával egyértelműen levezethető. Ha a kvantummechanikát elfogadjuk, akkor nem vehetjük el a kvantumtérelméletet sem. Továbbá egyes térelméletek numerikus tanulmányozása azzal a tanulsággal zárult, hogy az említett divergenciák nem csupán a perturbációs számítás délibábjai, hanem valóban jellemzőek a kvantumtérelméletekre, ha az elemi részecskék egymástól tetszőlegesen kis távolságban is előfordulhatnak. A problémát úgy összegezzük, hogy a pontszerű, struktúra nélküli elemi részecskék kvantummechanikai leírása összeférhetetlen a téridő folytonos struktúrájával. Nem beszélhetünk pontszerű részecskékről anélkül, hogy egy minimális távolságot ne kellene feltételezni, amelynél jobban a részecskék nem közelíthetik meg egymást. Ezt a lépést hívják az elmélet regularizálásának.

A probléma gyökerei már a nemrelativisztikus kvantummechanikában is felismerhetőek. A pontszerű részecskék kvantum propagálása sehol sem differenciálható, fraktáltrajektóriák mentén történik. A cikk-cakkos trajektóriák divergenciákhoz vezetnek inhomogén mágneses térben, és megnehezítik a szokásos Schrödinger-egyenlet levezetését a relativisztikus kvantumtérelméletből. A kvantummechanika sehol sem differenciálható, azonban még folytonos trajektóriái a térelméletben sehol sem folytonos és divergáló ugrásokat tartalmazó térmennyiségeknek felelnek meg. Mindezek a divergenciák a Planck-állandóval arányosak, és így a kvantummechanika alapstruktúrájához tartoznak. Belátható, hogy formális kiküszöbölésük a kvantummechanika Heisenberg-féle felcserélési relációinak elvesztéséhez vezet.

A minimális távolság bevezetése nem jelent valódi problémát, hiszen nincs semmi, kísérletileg megalapozott okunk azt hinni, hogy a jelenleg ismert fizikai folyamatok tetszőlegesen kis távolságokon is ugyanúgy megtörténhetnek. A legjobb felbontású mérések is csupán körülbelül 10^{-16} cm-re érnek le és elméleti úton sohasem tudhatjuk meg, hogy mi várja a kíváncsi érdeklődőt ennél kisebb távolságokon. Még a renormalizálható modellekben is, ahol a minimális távolsággal zérushoz lehet tartani, találunk kvantum-anomáliákat, mint például az erős kölcsönhatás úgynevezett királis anomáliája, melyek jelenléte annak bizonyítéka, hogy az előbb említett divergenciastruktúra valóban jelen van a fizikai folyamatokban, és a belőle fakadó minimális távolság ugyan tetszőlegesen kicsi lehet, de véges. A matematikai végtelen és limesz fogalma a klasszikus fizika alapján sugallt egyszerűsített modell olyan rendszerekre, melyek az adott megfigyelés felbontásában nem mutatnak mikroszkopikus struktúrát. A kvantumfizika nem ilyen világról tanúskodik.

Itt talán érdemes elgondolkodni a matematikai számfogalom zavarba ejtő sikerességén. A természetes számokat az ókorban állatok, objektumok mennyiségének jellemzésére találták ki, de azok által-

nosítását, a valós és komplex számokat a mikroszkopikus fizikában is használjuk. Miért vagyunk biztosak abban, hogy a klasszikus fizikára alapozott számfogalom általánosításai helyesek maradnak a kvantumfizikában is? A geometriai pontokat jellemző számmennyiségek szorzásának nem-kommutatív általánosítása elegáns és a kvantummechanikában természetes lépésnek tűnik a kontinuumba ágyazott pontnak reálisabb fogalomra való lecserélésére, azonban még nem sikerült ezt a számstruktúrát két dimenzióról a világunk három dimenziójára általánosítani. Jobb megoldás hiányában egyelőre tehát megtartjuk a kiterjedés nélküli pontokat jellemző valós számokat a háromdimenziós tér jellemzésére, csak éppen a pontszerűnek feltételezett elemi részecskéket nem engedjük egy bizonyos minimális távolságnál közelebb egymáshoz. A megfigyelések felbontóképességének további, feltehetően nagymértékű növelése során természetesen vagy a kvantumfizika jelenlegi törvényei cáfolódnak majd meg, vagy pedig a tér valamilyen granulátumos, diszkrét struktúráját találjuk meg.

– *Ön hogy ítéli meg a húrelmélet jelentőségét ebben az összefüggésben?*

– A húrelmélet alap gondolatát a gravitáció problémaköre sugallta. A szokványos, pont részecskékre alapuló kvantumtérelmélet keretein belül a gravitáció kvantumváltozata nem renormalizálható, a minimális távolsággal nem tarthatunk nullához. A megoldás a húrelmélet szerint a részecskék pontszerű mivoltának hűrszerű általánosítása. Az eredmény egy rendkívül bizarr világ, mely bizonyos határesetben esetleg hasonlónak tűnik a mienkhez. Úgy érzem, hogy ebben az elméletben a matematikai komplexitás nem áll arányban a fizikai problémával. Nincs semmilyen kísérleti jelzés arra, hogy a gravitációs kölcsönhatás kvantum általánosítására szükségünk lenne, hogy a Természet a gravitációt nem csupán a klasszikus tartományban használja. Nincs semmilyen matematikai vagy fizikai indok arra, hogy a minimális távolsággal nullához tartunk a kvantumfizikában. A fizikai alapfogalmak húrelmélet által megkívánt alapvető általánosítását szerintem számos súlyos és pontosan körülhatárolt kísérleti tény ismerete után lehetne csak elfogadni. A húrelmélet a kvantumtérelmélet egy olyan regularizációja, melynek részleteit fizikailag interpretáljuk. A kvantumtérelmélet szokásos használata során a minimális távolság körül lezajló dinamikai folyamatokat azért nem azonosítjuk megfigyelhető jelenségekkel, mert a regularizáció szükségessége éppen az ismereteink hiányosságát tanúsítja.

– *A kvantumtérelmélet egyik legnagyobb sikere az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítése, a W és a Z bozonok létezésének megjelölése, és a tömegük magyarázata a Higgs-mechanizmus alapján. Úgy tűnik azonban, hogy az erős kölcsönhatás bevonása, a Nagy Egyesítés komolyabb nehézségekbe ütközik a vártnál. Hogyan ítéli meg ezt a problémát?*

– Ez a probléma a húrelmélet által felvetett kétely ellenkezőjének tűnik. Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás egyesítése az alacsony hőmérsékletű szupravezetés, a spontán szimmetriasértés mértékemléteketben megvalósított mechanizmusán alapul. A Nagy Egyesítés Modelljében feltételezzük, hogy az energiának tizenhét nagyságrenden keresztül való növelése közben nem találkozunk új kölcsönhatással, továbbá egy hasonló spontán szimmetriasértés jellemzi az elemi részecskék dinamikáját ezen a skálán is. Számomra ez az elképzelés az elektroyenge kölcsönhatás leírására használt matematikai formalizmus túlságosan „konzervatív” használatát és kiterjesztését jelenti. Az utóbbi száz év alatt a fizika fejlődésében a mérések felbontásának körülbelül tíz nagyságrendű növelése közben felfedezett új kölcsönhatások és részecskék több új fejezetet nyitottak. Miből gondoljuk, hogy ez a tendencia megváltozik, és a felbontás további tizenhét nagyságrenden keresztül való növelése közben a matematikai struktúra semmilyen lényeges módosítására nem lesz szükség?

– *Hogy áll napjainkban a gravitációs tér kvantálásának problémája?*

– Ez egy rendkívül izgalmas, de sajnálatosan csupán matematikai és nem fizikai probléma. A gravitáció szokványos kvantumtérelméleti formájában nem tűnik renormalizálhatónak, és a renormalizálható változat keresése teljesen új matematikához vezet. Már említettem a húrelméletet, mint egy matematikai lehetőséget, de ennél sokkal természetesebbnek tűnő változat a 80-as években megjelent hurokgravitáció. A név szörnyen technikai és semmi intuitív jelentéssel nem bír. A lényegét úgy lehetne összefoglalni, hogy „kutyaharapást szőrivel gyógyítsunk”. Konkrétabban, a gravitáció klasszikus Einstein-egyenlete megjósolja, hogy egy pontszerű tömeg körül az úgynevezett Schwarzschild-horizont alakul ki, amely meggátolja, hogy a részecske környezetének a horizonton belül eső részéből bármilyen információ kijusson. A hurokgravitáció a Schwarzschild-sugarat használja minimális távolságnak, ami azért természetes, mert végtelen időbe telik, hogy ennél jobban megközelítse egymást két tömegpont. Ez a vonzó elképzelés, sajnos – az ismereteink jelenlegi állása alapján – teljesen ellenőrizhetetlen, mert mintegy húsz nagyságrend választja el a kísérleti berendezéseinket és a keresett jelenségeket. Megint ahhoz a kérdéshez jutottunk vissza, hogy miért szükséges feltétlenül zérushoz tartani a minimális távolsággal?

Fontosabbnak tartom az ennél kevésbé ambiciózus, de több relevanciával bíró kérdéseket. Arra a problémára gondolok, hogy van-e a jelenleg elérhető felbontásban észlelhető effektusa a gravitáció kvantumformájának? E kérdés tisztázása érdekében elegendő egy kicsi, de véges minimális távolságot bevezetni a kvantumgravitáció elméletében. Az utóbbi években arra utaló jeleket találtunk, hogy a gravitonok, a gravitációs tér kvantumai bezáró kölcsönhatással állnak egymással kapcsolatban. Ez azt jelenti, hogy a hadronokat alkotó kvarkokhoz hasonlóan a gravito-

nok is csak több graviton együttes kötött állapotai-ként fordulnak elő a Természetben. Úgy gondoljuk, hogy a gravitációs kölcsönhatásnak csupán a nem-propagáló része figyelhető meg nagy távolságban. Ez a jelenség megmagyarázhatja a gravitonok megfigyelésére irányuló kísérleti próbálkozások több évtizede negatív eredményét.

II.

– *Az utóbbi években ismét megélnék az eszmecsere a kvantummechanika megalapozásáról. Mintba növekvő lenne azok tábora, akik a koppenhágai interpretációt nem tartják kielégítőnek. Ön hogy vélekedik erről a kérdésről?*

– Szerintem az erre a kérdésre adandó válasszal a fizikusok az egyetemes kultúrának tartoznak. De a koppenhágai interpretáción való túllépést annak kell megelőznie, hogy egyáltalán tisztában legyünk azzal, mi is ez az interpretáció.

Kezdjük ott, hogy a kvantummechanikát minden egyes eddigi megfigyelés igazolja, sőt, ez az egyetlen fizikai elmélet, amelynek alkalmazhatósági határait száz év intenzív munkával sem sikerült elérni. Ugyanakkor az alkalmazott matematikai formalizmus és fogalmi rendszer teljes ellentmondásban van a klasszikus fizikára alapuló világképpel. Ez utóbbit képviselte markánsan *Einstein*, és javasolt *Podolsky*-val és *Rosennel* együtt 1935-ban egy gondolatkísérletet, mely kihangsúlyozza az említett ellentétet. A kísérletet csupán 1982-ben sikerült megvalósítani, és az a kvantummechanikával teljes mértékben megegyező eredményhez vezetett, miszerint a kvantummechanikai állapotot leíró hullámfüggvény egy bizonyos, nagyon speciális változása a fénysebességnél gyorsabban terjed. A kísérlet további finomításával sem sikerült semmilyen késleltetést találni, a terjedési sebesség alsó határa jelenleg tízmilliószorosa a fénysebességnek. A helyzet abszurditását az is mutatja, hogy ugyanakkor a fénysebességet tíz számjegy pontossággal ismerjük a klasszikus fizikából. *Einstein–Podolsky–Rosen* gondolatmenete arra alapult, hogy nem vonatkozhat a fizikai valóságra az az elmélet, amely ilyen durván megsérti a speciális relativitáselméletet. De ha nem a valóságról van szó a kvantummechanikában, akkor miről szól a fizika? Szeretném megemlíteni, hogy a probléma függetlennek tűnik a kvantummechanikában uralkodó indeterminizmustól, és az elmélet fogalmi megalapozását kérdőjelezi meg.

A koppenhágai interpretáció, amely történelmileg *Bohr* nevéhez fűződik, több éves kollektív munka eredményeképpen kialakuló kompromisszum volt a mikroszkopikus fizikát jellemző bizarr eredményeket és gondolatmeneteket illetően. Szigorúan elválasztja a makroszkopikus és a mikroszkopikus világot, és nem enged semmilyen, a makroszkopikus fizikából származó előzetes elképzelést a fizikai valóságra alkalmazni. A kvantummechanikát egy szótárként

lehet elképzelni, amely a mikroszkopikus fizika jelenségeit próbálja úgy-ahogy lefordítani a makroszkopikus fizika nyelvére anélkül, hogy a mikroszkopikus világ megkülönböztető és lényegi kérdéseire rákérdezhetnénk. Nem mintha Dirac, Einstein, *Heisenberg*, *Kramers*, *Lorentz*, *Pauli*, *Planck*, *Schrödinger*; hogy csak pár nevet említsünk Bohron kívül a kvantummechanika kidolgozói közül, nem javasoltak volna konstruktívabb interpretációkat. Csak ezek sorban ellentmondásba kerültek kísérletekkel vagy éppen gondolatkísérletekkel. A koppenhágai interpretáció az 1927-es, Brüsszelben megtartott Solvay Konferencián alakult ki végleges formájában, melyet Dirac úgy fogalmazott meg tömören, hogy a kvantummechanikai hullámfüggvény csupán ismereteinket tükrözi a mikroszkopikus rendszert illetően, és az elmélet a létező objektumok mibenlétéről semmit sem tud mondani.

Az elmélet megalapozói számára a felhasznált fogalmak szokatlan és ellentmondásos jellege arra utalt, hogy ezek ideiglenes eredmények, amelyeket hamarosan jobban megértett, végleges alakban fogunk ismerni. Ez nemcsak hogy nem történt meg, hanem ez az ideiglenes jelleg is egyszerűen lekopott, miután a következő generációk a kvantummechanikával, mint kísérletileg bizonyított, zárt elmélettel találkoztak tanulmányaik során. Hozzászoktunk egy ellentmondáshoz mielőtt megértettük volna az okát.

Szerintem egy másik üzenet is elveszett. Bohr és kollégái a mentális folyamatok akkoriban használatos fogalmait építették be a kvantummechanika szerkezetébe, és az 1926–27-es években a kvantummechanika több analogonjára is rámutattak a biológia és a pszichológia területén.

Az azóta kísérletileg alátámasztott kvantummechanika egy világnézeti krízishez is el kellett volna, hogy vezessen. Mert a 19. századi pozitivista, materialista világnép teljes kudarca, hogy a fizika alapjait kutatván kénytelenek voltunk az anyaggal kapcsolatos felfogásunkat teljes egészében feladni anélkül, hogy új harmóniát találtunk volna. Amit 1926 óta materializmusnak tekintünk a fizikában, az még közösítő viszonyban sincs a fizikai világot determináló kauzalizásra épülő képpel. Sajnos a 20. század ideológiai, politikai, gazdasági és igazi, véres konfliktusai elterelték a figyelmet erről az előttünk megnyíló filozófiai szakadékról. Vagy feladjuk, hogy egy összetett rendszert alkotó elemekre bontva értsünk meg, vagy pedig egy új világnézetet kell kialakítanunk. Az ilyen irányú helykeresésben látom a mai fizika kultúrtörténeti szerepét.

Schwinger mérésalgebrai megközelítése a koppenhágai interpretáció továbbfejlesztésének olyan irányát sugallja, amelyet az utóbbi évek során egyre többen felvetnek, hogy a kvantummechanika tulajdonképpen a részleges információval való tudományos, azaz konzisztens és ellentmondásmentes bánásmód elmélete. Ennek az elképzelésnek szerintem a kvantum-teleportáció kísérleti megvalósítása, amelyben a fizikai állapot egy időre csupán információ formájában létezik,

további alapot szolgáltat. A kvantummechanika hullámfüggvénye a mikroszkopikus valóság és a makroszkopikus skálájú megfigyelések viszonyáról szól. A hullámfüggvény Einstein által felismert és elfogadhatatlanul gyorsnak ítélt változását úgy értelmezhetjük, hogy bármely újabb ismeret azonnal átírja információs-készletünket, azaz a hullámfüggvényt. Ez alapján a fizika célja nem annak a kérdésnek a tisztázása, hogy miből áll az anyag, a körülöttünk levő világ, hanem inkább e világ érzékeinktől távol eső és ezért számunkra intuitíve megfoghatatlan elemeinek a mi makroszkopikus skálánkon megjelenő szabályszerűségeinek feltérképezése. (Zárójelben meg szeretném említeni, hogy szerintem ezzel a következtetéssel már azóta adósak vagyunk, amióta tudjuk, hogy az azonos kvantumszámú elemi részecskék egymástól szigorúan megkülönböztethetetlenek.)

Ennek a képnek az indoklásául a valószínűség fogalmát említeném. A valószínűség a matematikában *Kolmogorov* nyomán bizonyos halmazokon jól meghatározott tulajdonságokkal bíró mértékként definiálható. Ez a definíció nem konstruktív, és semmiféle kapcsolatot nem garantál a valósággal. Ez a határozatlanság, amely a valószínűségi számítás az információ hiányának elméletévé teszi, a valószínűség objektív és szubjektív interpretációjához vezet. Az előbbi, sokszor ortodoxnak hívott interpretációban a valószínűség a nagy számok törvénye alapján az empirikusan meghatározott előfordulási gyakoriságnak felel meg, míg a utóbbiban, melyet főleg *Pólya*, *Cox* és *Jaynes* dolgozott ki a múlt század közepén, egy szubjektív, jobban nem azonosítható esély fogalmából származik. A kvantummechanika az egyetlen elmélet, amely a valószínűséget definíció szintjén konstruktív módon tartalmazza. Melyik interpretáció alkalmazandó a kvantummechanikai valószínűségekre? Hasonlíthat-e a valószínűség a valóság olyan objektív mérőszámához, mint például a tömeg vagy a töltés? Az objektív valóság egy feltétele a megfigyelhetőség, a mérhetőség. A nagy számok törvénye alapján definiált valószínűség kísérleti meghatározása végtelen sok megfigyelést, mérést igényel, ezért a kvantummechanikai valószínűséget a klasszikus statisztikus fizika valószínűségével ellentétben nem lehet objektív módon értelmezni.

Ezzel a problémával kapcsolatban érdemes visszaemlékezni egy, a kvantummechanika valószínűségi értelmezését megalapozó szokásos fordulatra, miszerint „végtelen sok, független, egymással azonos módon elkészített mikroszkopikus rendszeren” végezzünk kísérletet. A valószínűség fogalmának előbb említett sajátossága erősen megnyírbálja az ilyen rendszerek azonosságába vetett bizalmunkat. Továbbá, ha a mikroszkopikus rendszer állapota, akár csak megközelítően is, degenerált, akkor a környezettel való elhanyagolható erősségű kölcsönhatás is erősen összefonódott állapothoz vezet, ami pedig a függetlenséget kérdőjelezi meg.

Véleményem szerint azzal a tudománytörténeti jelenséggel állunk szemben, hogy a huszadik század

második felében nem volt olyan kutatócsoport, amely professzionális súlyát illetően hasonlíthatna az 1920-as években a kvantummechanika kidolgozásán együttműködő kutatókhoz, mert korunkban nincs olyan jól definiált természettudományi probléma, amely a kortársak legjavát együttes munkára bírná. Ezért a kvantumfizika gondosan, de ugyanakkor drasztikus módon redukált céljait és alkalmazási területét nem vállalta fel a későbbi generáció. Az általuk tanított kvantummechanika egy szelídített, az interpretációs problémát inkább a háttérbe szorító elméletté vált. Ezt a folyamatot a kvantummechanikára alapuló technológia fejlődésének viharos üteme még tovább is bátorította. Az ismeretek továbbadása törekvésének illusztrálására megemlítem a dekoherencia jelenségét, amely valószínűleg a kulcs a kvantum–klasszikus átmenet megértése szempontjából. Először *Neumann* gondolt erre a lehetőségre és megemlítette kollégájának, *Wheeler*nek. Csak ez utóbbi doktorandusza, *Zurek* dolgozta ki részletesen a dekoherencia jelenségét, mintegy negyven évvel annak felbukkanása után.

A kvantummechanika interpretációjának jobb megértésével egy sereg függetlennek látszó probléma kerülhet új megvilágításba. Elegendő lesz a gondolkodásunk egyes hírhedt kérdéseire utalni, mint például a memória, a szabad akarat, az egymással ellentétes érzelmek együttes fellépése, a szubjektum–objektum dualizmus ismeretelméleti problémái. Úgy vélem, hogy agyunk működésében meg kell különböztetni két szintet. A tudatos, verbális réteg alatt, amit egy digitális számítógéppel modellezhetünk, egy analóg számítógéphez hasonlító réteg létezését kell feltételeznünk, mely az érzelemnek nevezett, szubjektív valószínűséget megalapozó esélyre alapul. Kialakulását darwinisztikus alapon azzal lehetne alátámasztani, hogy a biztos információ luxus a túlélésért való harcban. Az esély fogalmának konzisztens használata rendkívül előnyös komplikált helyzetekben, mint például abban a döntésben, hogy mikor meneküljünk egy vélhetően közeledő vadállat elől a dzsungelben. Mihelyt a szubjektív esély megközelíti alsó vagy felső határát, a hozzá tartozó információ egyszerűsített, bináris módon processzálódik tovább. A fizika kvantum–klasszikus átmenete szerintem belső világunk tudattalan–tudatos határának felel meg. Figyelemreméltónak találom, hogy a kvantummechanika és a pszichoanalízis egy időben jelent meg kulturális horizontunkon, amikor a megfigyelések érzékenysége, finomsága egy bizonyos kritikus határt elért. A kvantummechanikában az Avogadro-szám által meghatározott információs kazalban kellett egy adott jelet megtalálni, a lélektan esetében pedig a tudatos gondolatok dzsungelében találtunk a tudattalan alig észrevehető nyomára.

Szerintem lehetőség nyílik arra, hogy áthidaljuk a természet- és a humán tudományok közti hagyományos ellentétet, felismerve, hogy az a pozitivistá, newtoni mechanikára alapuló, a kvantummechanika által már megdöntött világképen alapult. A naiv materialis-

ta világszemléletből tradicionálisan kilógó és „isteni szikra”-ként értelmezett életjelenségek esetleg beilleszthetők egy tudományos, kvantummechanikán nyugvó világképbe. Kvantumeffektusok valószínűleg nem fordulnak elő a sejtek közti kommunikáció során, olyan életjelenségekben, amelyekben sok sejt együttesen vesz részt. De ezeknek a makroszkopikus jelenségeknek a kezdete szükségképpen mikroszkopikus eredetű, és mint ilyen, a kvantummechanika hatáskörébe tartozik. Például, amikor hirtelen eszünkbe jut, hogy becsukjuk a szemünk, akkor ez a makroszkopikus mozgás egy mikroszkopikus folyamattal indul. Tehát az említett ellentétet esetleg úgy lehet feloldani, hogy elfogadjuk, hogy az idegsejtek membránnal védett belső, kisebb egységeiben lezajló döntési folyamatok kezdetén ugyanaz a világ jelenik meg, mint amit a kvantummechanikából valamennyire már ismerünk, csak épp a Boole-algebrára és klasszikus logikára alapuló intuíciónkkal fel nem fogható. Az a kép, miszerint az öntudat, vagy általában az életjelenség a sejtek belsejében fennáll, klasszikus módon kommunikálható stabil kvantumállapot nem nyírbálja meg a filozófia, pszichológia és biológia finom gondolatrendszerét, ugyanakkor tudományos vizsgálatok kiindulópontjaként szolgálhat.

– *Kolléga úr, Ön 1985-től 1993-ig a bostoni MIT-n tevékenykedett, mint kutató és tanár. Ha összehasonlíttja az amerikai, a francia és a magyar felsőoktatási és egyetemi rendszert, milyen előnyöket és hátrányokat lát az egyes rendszerekben és milyen következtetésekre jut?*

– Ez az egyik kedvenc kérdésem volt, hogy mi a jó, az átvenni való itt vagy ott? Míg meg nem győződtem arról, hogy egy közösségben megnyilvánuló előnyös és hátrányos vonások általában egymás szükségszerű megnyilvánulásai, pontosabban közös társadalmi-történelmi töről fakadnak. De a közös eredetek komplikált kérdését félretéve úgy gondolom, hogy a kontinentális és az angolszász oktatási rendszer fő különbsége az, hogy míg az előbbi az átlagos diákra optimalizál, az utóbbi az átlagtól való eltérést jobban tudja kezelni. Rövid távon az angolszász rendszer hatékonyabb, hiszen kevesebb ígéretes diákot veszít el. Azonban történelmi távlatban az általános műveltség gondozása döntő lehet annak a művelt középosztálynak a fenntartása szempontjából, amely eddig a kulturális fejlődés motorja volt Európában. Az egyetemi rendszer kevésbé változékony a kontinentális Európán belül. Azonban a francia felsőoktatásra jellemző a Napkirályok öröksége, az erősen központosított hatalom, amely egy, az állami bürokráciát újratermelő külön oktatási hálózatot is létrehozott. Nem kell sokat magyarázni, hogy ez miért nem segít a felsőoktatás általános szintjét és hatékonyságát illetően. A tradicionális rendszer viszont napjainkban, sajnálatos módon, szinte előnyösen hat a kulturális értékek fenntartása szempontjából. Ennek megfelelően a francia felsőoktatás kevésbé van kitéve a gazdaság törvényszerűségeinek. Kivételes szerencsének érzem, hogy gimnazistaként és

egyetemi hallgatóként a hatvanas-hetvenes évek Magyarországon tanulhattam. Matematikában és elméleti fizikában világszínvonalon álló oktatásban volt részem, amely differenciáltan kezelte a diákokat, és gazdagon jutalmazta tudással az érdeklődőt. Ez a hagyomány, ha viharverten is, de még mindig fellelhető. Talán a Kelet-Európára jellemző határmezsgye-effektusról van itt szó, hogy a kulturális áramlatok kereszteződésében pezsgőbb az élet.

– *A politikusok között eléggé elterjedt nézet szerint az egyetemek feladata a képzés, míg a kutatás a kutatóintézetek dolga, amelyek irányítása bazánkban az Akadémia hatáskörébe tartozik. Ön hogyan ítéli meg a kutatás és a képzés szétválasztására irányuló törekvéseket?*

– Először is válasszuk le a kérdésről a financiális hátteret, mely egyes döntések mögött áll. Ezután a probléma már egyszerűbb: természetes módon elválaszthatatlan a kettő. Persze vannak különbségek oktatás és kutatás között. Közismert jelenség, hogy az oktatástól elzárt kutatóintézet húsz-harminc év alatt menthetetlenül elöregedik. Ha valaki aktív élete során a világ zajától mesterségesen elválasztva „kutat”, az általában nem tudja szellemi horizontját széles tartani, és a kollégák következő generációja kezdettől fogva fokozottabban van kitéve az elszigetelődés veszélyének. Tehát az oktatásnak fokozatosan növekvő szerepet kellene játszania egy kutató élete során. Így sikeresebben megőrizhető a szellemi frissesség, és a társadalom is többet kap vissza értelmiségétől. Persze vigyázni kell, hogy a korosodást elkerülhetetlenül kísérő konzervativizmus lehetőség szerint ne hasson negatívan az oktatásra. A pedagógus munkája erősen antidemokratikus, arisztokratikus, és ezek a jegyek a konzervativizmus túlhajtásához vezethetnek. Ugyanakkor a konzervativizmus alapvető egy kultúra továbbadása során.

A politika horizontján túlmutató kérdés is rejtezik itt. Nevezetesen, hogyan kezeljük az oktatás és kutatás antidemokratikus vonásait? Hogyan dönthető el valakiről, hogy jó oktató vagy kutató? Szerintem ez a kérdés triviális egy szűk közösségen belül, ahol az emberek nyomon követik és értik egymás munkáját, és ugyanakkor eldönthetetlen társadalmi szinten. A demokrácia is hasonló. Jól működik kisebb közösségekben, ahol az emberek, ha nem is ismerik jól egymást, de jelentenek valamit egymásnak, és működésképtelen a görög városállamok méretein túl. Engedtessék meg egy további analógia is, hogy a fizika törvényszerűségei a megfigyelési skálától függenek. A renormcsoport minden olyan rendszerre alkalmazható stratégia, melyben alrendszereket lehet elkülöníteni.

– *A közelmúltban alkalmam volt szétnézni egy bázeli egyetemi könyvesboltban. A fizikai részleg polcain vagy kétszáz német és angol nyelvű tankönyvet és monográfiát találtam. Ezzel összehasonlítva a hazai kínálat lesújtóan sovány; messze elmarad az 1970–80 évek színvonalától. Öntől, mint a Sugárzás és Részecskék című, Patkós András akadé-*

mikussal közösen írt tankönyv egyik szerzőjétől kérem, mi a teendő a nyomasztó hiányállapot orvoslására?

– Vegyük tudomásul mint realitást azt a politikai-gazdasági környezetet, melynek módosítása messze túlmutat e beszélgetés keretein. Ami ezután marad mint lehetőség, az szerintem annak a közhelynek a tudatosítása, hogy világunk felgyorsult, az 1950-es évektől napjainkig terjedő időszakra koncentráldott a földtörténet során élt népesség fele. Arra hívnám fel a figyelmet, hogy ez az örült tempó rettentően megnöveli társadalmi felelősségünket, hiszen mire felfigyelünk egy hátrányos vagy veszélyes fejleményre, már késő is lehet a mi szintünkön való reagálásra. Mi egyetemi hallgatóként Magyarországon olyan tudományos világban nőttünk fel, amely stabil alapokon és jó hagyományokon nyugodott a fizikát illetően. Nem hiányzott a jövőbe vetett hit sem, elég csupán a Landau–Lifsitz sorozat magyar nyelvű kiadására gondolni. Fel kell fognunk, hogy ez már a múlté. Rajtunk áll, hogy a következő generáció mit kap Kultúrából, Tudományból, Fizikából, mert nekünk kell újratemetni a szükséges intellektuális és technikai környezetet, amely egyre gyorsabban avul el és kényszerül megújításra. Sajnálatos módon nem számíthatunk a fiatal korunkban meglevő, örökké jelenvalónak hitt alapokra. Hassunk oda, hogy kollégáink felismerjék a vállukon láthatatlanul is nyugvó felelősséget, és érezzék fontosnak, hogy hozzájáruljanak egy stimulálóbb környezet kialakításához. Nem a politikusoktól kell várni a megoldást, ők nem arra hivatottak. Túl kell őket élni, és akár ellenükben is fenn kell tartani egy bizonyos szintet a professzionális és személyes érdekekben. Magyarország viharos utolsó évtizede nem kedvezett a spontán kezdeményezőképessegre alapuló mozgalmaknak, melyek Nyugat-Európában, de főleg Észak-Amerikában az ipari társadalomra adott válaszként fejlődtek ki.

– *Ön rendszeresen, általában évente többször is bazalátogat. Milyen témakörökben tart fenn kapcsolatot a hazai kutatással és oktatással?*

– Sajnos nem tudok elegendően hosszú időt egyhuzamban itthon tölteni ahhoz, hogy tanítsak, ahogy azt régebben nagyon szerettem, mert az itthoni diákok érdeklődése és színvonala párját ritkítja. A kutatást illetően könnyebb a helyzet. Hosszú ideje együtt dolgozom kvantumtérelméleti problémákon Sailer Kornéllal és Nagy Sándorral, a Debreceni Egyetem Elméleti Fizika Tanszékének dolgozóival. A kvantumgravitáció témájában pedig Regős Enikővel, az ELTE Fizikai Intézetének munkatársával van munkakapcsolatom. Persze nagy örömet okoznak a kimerítő és részletes beszélgetések az ELTE és a BME Fizika Intézeteinek, valamint a KFKI RMKI Elméleti Fizikai Főosztályának dolgozóival is. A hagyományos magyar elméleti fizika iskola hatásának tartom azt, hogy sokszor gyorsabban és egyszerűbben értjük meg egymást egy itthoni, mint hasonló esetben külföldi kollégával.

– *Köszönöm a beszélgetést.*

Hajdú János