

Száz éves az általános relativitás-elmélet

BEVEZETÉS

Idén ünnepeljük A. Einstein grandiózus szellemi alkotása, az *általános relativitás-elmélet* születésének századik évfordulóját. A mű egy évszázad multán is ugyanolyan megkerülhetetlen és bevezetetlen szirtfokként mered ki a fizikai elméletek tengeréből mint születésének idején. Ennélfogva a XX-XXI. sz-i elméleti fizika legjellemzőbb tulajdonsága elvárt egységessége helyett inkább zavaró kettőssége: az általános relativitás-elmélet és a kvantumelmélet közt jelentkező fogalmi feszültség. E helyütt megkíséreljük kimutatni, hogy a fizika newtoni elméletéről az einsteinire való áttérés filozófiai háttere legalábbis részben a cartesiánus ontológia fogalmi rendszerének heideggerire való kicserélése. Amellett érvelünk, hogy egy hasonló „ontológiai vonatkoztatási rendszer-váltás” a kvantumelméletben szintén elkerülhetetlen a fizika két tartópillére közti mély koncepcionális szakadék áthidalásához.

A KÖLCSÖNHATÁS PROBLÉMÁJA

Korábbi írásunkban¹ gondolkodásunk egyik eleddig nem kellő alapossgal vizsgált sajátosságára: a *kölcsönhatás* jelenségének nem értettségére, végesen el nem gondolhatóságára hívtuk fel a figyelmet. Álláspontunk szerint ez az első hallásra akadémikusnak csengő problémafelvetés a mai elméleti fizika koncepcionális problémáinak gyökerénél helyezkedik el, ezért is foglalkozunk vele itt egy kissé részletesebben.

Érdekes, hogy a heideggeri filozófia és a modern elméleti fizika nagyrészt egy kultúrkörben és időben jött létre és sok problémájuk közös. Mégis, a két tudományterület közti közvetlen kapcsolatról mindmáig nem beszélhetünk.² M. Heidegger mutatja ki, hogy a R. Descartes-tól származó dualista felfogás, mely a külvilágot objektumként az énnel mint szubjektummal állítja szembe, prekoncepciót tartalmaz: fenomenológiailag helyesebb lenne „világban-benne-lét”-ről mint elsődleges világhoz való viszonyulásról beszélni.³ Ismeretelméleti szempontból a világban-benne-lét egyik szükségszerű tulajdonsága a *megismerés* vagyis *megfigyelve-felismerés* mint a világban-benne-lét következtében a világgal való elkerülhetetlen kölcsönhatásban-levés velejárója; viszont a polarizált descartes-i felfogásban ennek megfelelője egy sajátos lelki állapot: a *szemlélődés* mint a világgal való akaratlagos kölcsönhatásba-lépés.⁴ Tehát míg Heideggernél a kölcsönhatásban-levés mint *állapot* elkerülhetetlenül a világban-benne-lét velejárója, addig Descartes-nál a kölcsönhatás már csak mint összetett *folyamat*: csak mint egy önmagában elszigetelt szubjektum és egy elszigetelt objektum külön-külön egyirányú egymásra-hatásainak egymásutánja gondolható el.⁵ E „külön-külön egyirányú egymásra-hatások” végtelen sorozatának konvergenciája eredményezi a kölcsönhatást mint állapotot. Lételméleti szempontból, ha a

¹Etesi G.: *Miért érthető nehezen a modern fizika?*, Világosság, **2004/5**, 71-74, 2004.

²C.F. v. Weizsäcker: *A modern elméleti fizika és Heidegger filozófiája*, in: *Válogatott tanulmányok*, Gondolat, Budapest, 1980.

³M. Heidegger: *Lét és idő*, 19.§., 20.§., 21.§., Gondolat, Budapest, 1989.

⁴Uo. 13.§.

⁵Vagyis inkább nem gondolható el. Ui. amit I. Kant a „filozófia botrányának” nevez éppen az, hogy még mindig nem értjük a megismerésnek e descartes-i keretekben jelentkező mechanizmusát. Heidegger szerint viszont valójában az a filozófia botránya, hogy ezt a descartes-i fogalomkörben fellépő problémát az ismeretelmélet még mindig problémának tekinti.

heideggeri ontológia szerint tekintünk szét, akkor tehát a kölcsönhatást mint elemi tényt kellene megragadnunk s nem mint egy bonyolult folyamat eredményét; ill. általában sok helyen egyszerű heideggeri állapotokat kellene látnunk összetett descartes-i folyamatok helyett.

Ez lehet az egyik magyarázata a heideggeri nyelv különösségének, ami a kifejezések főnevesítésében nyilvánul meg (az igék használatával szemben). Itt jegyezzük meg azt is, hogy szinte minden ismertebb élő vagy holt nyelvben, legyen az a mediterrán kultúrkörhöz tartozó vagy távol-keleti nyelv, a „kölcsönhatás” a „kölcsönös” és „hatás” szavakból képzett összetett szó. Ennélfogva minden biztonnal nem csupán egy „cartesiánus tévedésről” rántottuk le a leplet, hanem egy sokkal mélyebb ontológiai, sőt pszichofiziológiai kérdéstről lehet szó.

Heideggeri értelemben létezni pontosan annyit (is) jelent, mint kölcsönhatni; ezzel ellentétben a descartes-i már eleve adott létezőnek csupán (egyik) tulajdonsága a kölcsönhatásra való képesség, mely a már eleve adott létező saját létezését jellemző tulajdonságaihoz képest másodlagos. Úgy is fogalmazhatnánk ezt fizikai nyelven, hogy a descartes-i ontológia a heideggerinek „gyenge kölcsönhatási limesze”-ként áll elő. Ebben az *ontológiai gyenge kölcsönhatási limeszben* az izolált létező más izolált létezőkkel való kölcsönhatása a létezésükhöz képest mint „kis perturbáció” jelenik meg. Lehetetlen nem észrevenni, hogy az *I. Newton* után kibontakozó klasszikus fizika összes jól működő elmélete legalábbis a kölcsönhatás problémájának kezelése tekintetében e descartes-i talajon áll, vagyis a fizikai objektum létezésének mint primer adottságnak és ugyanezen objektum másokkal való kölcsönhatásának mint szekunder ki-be kapcsolható „hajlandóságnak” a teljes szétválasztásán. Nyilván e szétválasztásnak sok esetben megvan a maga létjogosultsága. Legismertebb példa a csillagászat, pontosabban az égi mechanika; ez az a terep, amelyen a klasszikus fizika első sikereit is elérte. További két példa a klasszikus elektromágneses tér ill. az ideális gázok elmélete. Viszont ez az alapállás egyre nehezebben fenntartható akkor, ha olyan fizikai entitások leírásával próbálkozunk, melyek létezése teljes egészében csupán mint kölcsönhatás jelenik meg számunkra. Két ilyen fizikai entitás a *gravitáció* ill. a *kvantummező* (elemi részecske).

GRAVITÁCIÓ-ELMÉLET

Amellett érveltünk, hogy a heideggeri ontológia használata elkerülhetetlen a gravitáció esetében. Ezt bizonyítandó kimutatjuk, hogy Newton törvényének heideggeri olvasata és az egyenes fogalmának modern geometriai értelmezése az általános relativitás-elmélet alap gondolatához vezet el.

Idézzük föl először Newton törvényét az alábbi (valójában *Galileitől* származó) megfogalmazásban:

Egy magára hagyott test a térben egyenes vonalú, egyenletes mozgást végez.

Ez egy igen meglepő kijelentés, hiszen két, látszólag teljesen különböző, a fizikai „magára hagyott testnek lenni a térben” és a matematikai-geometriai „egy egyenes mentén egyenletesen haladni a térben” kijelentéseket kapcsolja össze. Emiatt is ebben a formában Newton törvénye értelmezést kíván. A mondat két értelmezendő részre bontható.

Először is, mit jelent az, hogy „egy magára hagyott test van a térben”? Nyilvánvalóan ez egy fizikai kijelentés. Az is nyilvánvaló, hogy már maga a nyelvi megfogalmazás is descartes-i szóhasználatot tükröz, ami tudománytörténeti nézőpontból teljesen érthető. Tényleg úgy tűnik, hogy legalábbis elvben lehetséges egy testet eltávolítani más testektől annyira, hogy mechanikailag ne zavarják egymást. Elektromosan is semleges állapotba hozhatjuk, lemágnesezhetjük annak érdekében, hogy elektromágneses

úton sem legyen befolyásolható, stb. Ezért úgy véljük, hogy legalábbis elvben lehetséges a fentebbi kijelentést hétköznapien, vagyis cartesiánusan értelmezni. Ez tehát azt jelentené, hogy egy fizikai testről leválaszthatjuk a más testekkel való kölcsönhatásából származó tulajdonságait anélkül, hogy ezzel a fizikai test létezését megszüntetnénk. Jelenlegi elgondolásaink alapján egy fizikai test szubsztanciális, tehát magával a fizikai létezésével szükségszerűen velejáró tulajdonsága az, hogy valamilyen formában energiát tartalmaz. A gravitációt illetően pedig a fizika egyik legalapvetőbb empirikus ténye, az ún. *ekvivalencia-elv* azt mondja ki, hogy bármely anyagi test részt vesz gravitációs kölcsönhatásban és e részvétel módját csupán a vizsgált anyagi test energiataralma határozza meg. Ennélfogva egy fizikai létező szubsztanciális tulajdonsága kell legyen az, hogy a gravitációs térrel kölcsönhat. Így jutunk el a fentebbi kijelentés körültekintőbb értelmezéséhez:

Egy csakis gravitációs mezőnek kitett test van a térben.

Úgy is fogalmazhatunk, hogy egy fizikai test izolációját elvben mindaddig fokozhatjuk, amíg már csak a gravitációs térrel hat kölcsön; e kölcsönhatás megszüntetése viszont a fizikai test létezésének megszüntetését is magával vonja. Ezt pedig szeretnénk elkerülni.

Másodszor pedig, mit jelent az, hogy „egyenes vonalú, egyenletes mozgást végez a térben”? Ez pedig nyilvánvalóan egy matematikai kijelentés. Úgy vélekedhetünk, hogy az egyenes fogalmát mindentől eltekintve az euklideszi geometria segítségével rögzíthetjük. De mit is nevezünk „egyenes”-nek? Kis töprengés után azt válaszoljuk, hogy a két pont közti legrövidebb szakaszt nevezzük egyenesnek. Előttünk terül el egy kisimított asztalterítő, melyen megjelölünk két pontot. A köztük lévő legrövidebb szakasz a szokásos „egyenes” lesz. Az asztalterítőnek nem lényeges tulajdonsága az, hogy „sík”, pl. ujjunkkal fölnyomhatjuk a terítőt éppen a két megjelölt pont között. Az előbbi „egyenes” képe nem tekinthető többé egyenesnek, mert túl hosszúvá torzult; viszont egy a kitüremkedést elkerülő másik görbe lett most a legrövidebb, tehát ez az új „egyenes”. Mindez azt sugallja, hogy amit egyenesnek nevezünk, azt nem a tér maga, hanem annak görbületi viszonyai határozzák meg. *C.F. Gauß* ezen egyszerű és lényeglátó észrevételét végül *B. Riemann* öntötte matematikai formába teljes általánosságban a XIX. sz. végén. Az ún. *Riemann-féle geometriában* az iskolában is megismert euklideszi geometria csupán a lehetséges görbült geometriák elképesztő méretű tárházának speciális, semmilyen szempontból nem kitüntetett szerény lakója. Így a második kijelentés értelmezése ekképpen hangzik:

A legrövidebb úton egyenletes mozgást végezni a térben.

Pusztán matematikai-technikai jellegű észrevétel, hogy a mozgás térbeli pályáját és időbeli lefolyását együttesen tekinthetjük egy absztrakt négydimenziós kontinuumban, a *téridőben* elhelyezkedő görbének is. Az ilyen tárgyalás egyetlen, de fontos előnye az, hogy a második kijelentés értelmezése mind matematikai, mind nyelvi szinten tömörebb formát ölt:

A legrövidebb út a téridőben.

De azt is megállapítottuk, hogy egy absztrakt geometriai térben a legrövidebb utak annak görbületi viszonyait jelenítik meg. Mindezeket egybevetve arra jutunk, hogy Newton törvénye értelmezve ekképpen szól:

(*) Egy csakis gravitációs mezőnek kitett test a téridő görbületi viszonyait jeleníti meg.

Kézenfekvő ötlet tehát, hogy a gravitációt azonosítsuk a matematikai téridő geometriájával. Ez az

általános relativitás-elmélet, másnéven az Einstein-féle gravitáció-elmélet legfontosabb fölismerése. Már csak egy dolog hiányzik: annak rögzítése, hogy ebben az elméletben pontosan mi is legyen a kapcsolat a gravitációs mező szerkezete és a téridő görbülete között. Ezt adja meg az *Einstein-egyenlet*, amelyet itt nem részletezünk: ui. az imént ismertetett egyszerű észrevétel matematikai formába öntése és ezen belül az Einstein-egyenlet megfogalmazása meglehetősen nehéz és terjedelmes matematikai apparátus kiépítését igényli ezért nagy türelem és elszántság kell hozzá.⁶ Ennek ellenére—vagy éppen ezért—bátran állítjuk, hogy az általános relativitás-elmélet legalábbis elvi szintű megértése a legnagyobb szellemi és esztétikai élmények közé tartozik, megéri a fáradságot.⁷

Oka ennek az erőteljes élménynek—az elmélet magvát képező fentebb ismertetett alapgondolat egyszerűségén túl—egyrészt az a szerencsés tudománytörténeti helyzet, hogy az elmélet matematikai formába öntéséhez szükséges fogalmak a matematikában 1915 körül már nagyrészt rendelkezésre állottak így az általános relativitás-elmélet legelsőre is már igen vonzó matematikai köntösben jelent meg. Másrészt pedig az einsteini észrevétel rendkívüli jósló ereje: az elmélet megjósolta a *fény elhajlását* nagy tömegű testek (pl. a Nap) közelében elhaladva, melyet aztán A. Eddington brit csillagász és fizikus a híres 1919-es dél-atlanti óceáni Napfogyatkozás során igazolt; megkerülhetetlenül előre jelezte az általunk belátható csillagászati tér tágulását bő tíz évvel azelőtt, hogy azt E. Hubble amerikai csillagász 1929-ben kísérletileg kimutatta, megvetve ezzel a modern *ősrobbanás-elmélet* alapjait,⁸ szintén megjelenik benne—és azóta is a fizikai és csillagászati kutatások homlokterében helyezkedik el—a *fekete lyuk* fogalma, ami magának a térnek és az időnek egyfajta szakadásszerű megszűnése. Viszont azt is meg kell említenünk itt, hogy az általános relativitás-elmélet egyik legfontosabb jóslatát, a *gravitációs hullámok* létezését—melyek a gravitációs mező elektromágneses sugárzáshoz hasonló megnyilvánulásai lennének—mindmáig nem sikerült kísérletileg közvetlenül igazolni.

Mint említettük, az általános relativitás-elmélet megértése jelentős szellemi erőfeszítést kíván és ennél fogva sosem lesz mindenki által elérhető szellemi közkinccs. Akkor mégis hogyan lehetséges, hogy *Einstein* a XX. sz. talán legismertebb és legjellegzetesebb alakjává vált? Hadd idézzük e helyütt L. Infeld lengyel fizikust, aki *Einstein* utolsó éveiben közeli munkatársa és barátja volt Princetonban:

Ezzel kezdődött Einstein nagy hírneve, mely egész életén át kitartott és halála után csak növekedett. Maga a tény, hogy a relativitáselmélet mindennapi életünktől annyira távoli jelenségeket, mint bizonyos csillagászati jelenségeket előre láthatott, sőt ezeket a jelenségeket hosszú, elvont érvelési láncolaton fokról fokra előbbre jutva meghatározott—talán egymagában még nem szolgáltatna elegendő okot a tömegek lelkesedésére. Pedig így történt. Az a benyomásom, hogy ennek okát az első világháború utáni pszichózisban kell keresnünk.

A háború véget ért. Az emberek megelégtették a gyűlölködést, a gyilkolást és a nemzetközi csel-szövéseket. A lövészárkok, a bombák és a hullahegyek után keserű szájíz maradt az emberiségben. A háborús könyveket nem olvasták, nem vásárolták. Mindenki a béke korszakának beköszöntését várta, feledni akarta a háborút. Ez a jelenség igen alkalmas volt az emberi képzelőerő felkeltésére. Az emberek felemelték szemüket a sírhalmokkal borított földről a csillagokkal telehintett égboltra. Az elvont gondolat magasba emelte az embereket, lehetőséget nyitott, hogy eltávolodjanak a mindennapi élet szomorú gondjaitól. A napfogyatkozás misztériuma az emberi értelem erejével került szembe. Roman-tikus színpadi háttér: néhány percig tartó sötétség, egymást keresztező fénysugarak képe, csupa olyan

⁶L. pl. R.M. Wald: *General relativity*, Chicago Univ. Press, Chicago, 1984.

⁷A. Einstein: *A speciális és általános relativitás elmélete*, Gondolat, Budapest, 1963.

⁸Ettől a jóslattól először még *Einstein* is megrettent és igyekezett elméletéből kiiktatni az ún. *kozmológiai állandó* bevezetésével —sikertelenül. Később *Einstein* a kozmológiai állandót élete legnagyobb tévedésének nevezte. Végül aztán 1998-ban S. Perlmutter, A. Riess és B. Schmidt távoli szupernóvák színképeinek vizsgálatával kísérletileg is igazolták a kozmológiai állandó vagy másnéven „sötét energia” létezését. Felfedezésüket a fizikai Nobel-díjjal jutalmazták 2011-ben.

*tényező ez, ami merőben más, mint a nyomasztó valóság. És ide kell számítanunk a legnyomatékosabbat: az új jelenséget német tudós jósolta meg, ellenőrzését angol tudósok hajtották végre. Fizikusok és csillagászok, akik nemrég még ellenséges táborhoz tartoztak, most újra együttműködnek! Mi más ez, ha nem az új korszak, a béke korszakának kezdete? Az emberek békevágyában rejlett—legalábbis azt hiszem—Einstein növekvő hírnevének legfőbb oka.*⁹

KÖZJÁTÉK: INVERZIÓ MINT HEIDEGGERI SZIMMETRIA

Mielőtt tovább lépnénk, a (*) Newton-törvényt általánosítjuk és invertáljuk. Nyilván az általunk művelt fizika azért érdekes számunkra, mert éppen az általunk tapasztalt fizikai világot írja le. De akkor hol rejtőzöm „én”, vagy általánosabban, fizikus szóhasználatlaltal egy—nem feltétlenül öntudattal rendelkező—*megfigyelő* a (*) Newton-törvényben? Gyorsan adódik a válasz, hogy ez az ágens csakis a Newton-törvényben szereplő „test” lehet, aminek megfigyelői tevékenysége pontosan abból áll, hogy létezésével „a téridő görbületi viszonyait jeleníti meg” vagyis megfigyeli a gravitációs mezőt. Heideggeri fejtegetéseink alapján ez a megfigyelési aktus a megfigyelő létezéséből fakadó világban-benne-létének, tehát a környezetével való kölcsönhatásának elkerülhetetlen velejárója. Hangsúlyozzuk, hogy a *megfigyelt-kölcsönhatás-megfigyelő* hármasság ily módon történő egységként kezelése semmiféle szubjektívizmus veszélyét nem rejti magában. Hanem inkább az emberi gondolkodás régi és univerzális problémájának, a *hármasság-egység* dichotómiának egyik megnyilvánulásáról van szó.¹⁰

Mindezek fényében a (*) értelmezett Newton-törvény az alábbi általános formula speciális esete:

Egy világbeli létező világban-benne-léte következtében megfigyeli a világot.

Most hajtsunk végre egy inverziót ezen a formulán. Ez a transzformáció érintetlenül hagyja központi elvünket, a kölcsönhatást, viszont fölcseréli egymással annak két résztvevőjét, tehát megengedettnek gondoljuk:

Egy világbeli létező világban-benne-léte következtében a világ által meg van figyelve.

Erre az inverzióra a következők miatt van szükség. Minden fizikai elmélet a világ és a megfigyelő kapcsolatának sajátos leegyszerűsítésén alapul: a leegyszerűsítés célja minden esetben a kölcsönhatás cartesiánus kiiktatása, vagy legalábbis az elmélet által leírt létezők létezéséhez mint primér jelenséghez képest szekunder jelenségként való kezelése. Pl. az általános relativitás-elméletben a „jó” megfigyelő tömege *végtelenül kicsi* az általa megfigyelt világhoz képest, így saját létezésével csak „elhanyagolható mértékben” torzítja el az általa megfigyelt geometriát. A kvantumelméletben viszont a helyzet ennek éppen az ellenkezője: ebben az elméletben a „jó” megfigyelő tömege *végtelenül nagy* egy megfigyelt elemi részecskéhez képest. Véleményünk szerint ez egy nagyon lényeges különbség a két elmélet között és (részleges) magyarázta lehet a gravitáció-elmélet és a kvantumelmélet elvi különbözőségének.

⁹in: L. Infeld: *Einstein*, 191-192 pp., Gondolat, Budapest, 1959.

¹⁰L. pl. C.G. Jung: *Kísérlet a Szentháromság dogmájának pszichológiai értelmezésére*, in: *A nyugati és a keleti vallások lélektanáról* (Jung Összegyűjtött Munkái 11. kötet), Sclolar, Budapest, 2005.

Fentebb amellet érveltünk, hogy a heideggeri ontológia használata a kvantummező esetében is elkerülhetetlen. Ezt bizonyítandó most megkíséreljük elismételni az előző gondolatmenetet gravitáció helyett kvantummezőkkel.

Emlékezzünk, hogy egy fizikai test Newton-törvényben megkövetelt fizikai elszigetelését nem tudtuk minden határon túl fokozni a test létezése megszüntetésének veszélye nélkül. Az atomi és szubatomi fizikai entitások csupán közvetve tapasztalhatóak számunkra. Egy elektromosan töltött elemi részecskét, pl. egy elektront csakis sajátos elektromos töltése révén ismerünk föl és nem másként. Hasonló a helyzet más, pl. elektromosan semleges részecskék esetében is mint amilyen pl. a neutrínó: ennek elektromos töltés helyett csakis rá jellemző sajátos ún. gyenge töltése van. A kvarkoknak nevezett elemi részecskék mindezekén túl még szintén sajátos ún. erős töltéssel is rendelkeznek. A modern részecskefizikában az elemi részek e sajátos töltéseit együttesen *Yang–Mills töltéseknek* nevezik. Az ismert elemi részecskék másik fontos tulajdonsága az, hogy mely *generációhoz* tartoznak.¹¹ A Yang–Mills töltések és a generáció ismeretében a részecske azonosítható. Ez azt is jelenti, hogy ezek révén az elemi részecskék elkerülhetetlenül kölcsönhatnak környezetükkel. A Yang–Mills töltések és a generációs jelleg „elvételeivel” viszont magát a részecskét mint fizikai entitást szüntetjük meg. Pl. értelmetlenség elektromos töltés nélküli elektronnal beszélni; viszont az elektrorra a környezetében elhelyezkedő más elektromos töltések elkerülhetetlenül vonzólag, ill. taszítólag hatnak: az elektron elektromos töltése révén szüntelenül kölcsönhatásban áll környezetével. A helyzet tehát hasonló, mint a gravitáció esetében.

Hogyha tehát egy elemi részecskére, pl. egy elektrorra, neutrínóra, vagy általánosabban és bevalottabb nemtudással szólva egy tetszőleges *kvantummezőre* alkalmazzuk az eddig elhangzottakat, akkor arra jutunk, hogy:

Egy kvantummező a környezete által elkerülhetetlenül meg van figyelve.

Ez a mondat megint csak annak az alapelvünknek invertált és partikuláris megfogalmazása, miszerint egy létező világban-benne-léte következtében a világgal kölcsönhat. A lényeges következménye mindennek az, hogy a kvantummező létezése nem választható el attól, hogy ez egy „megfigyelt”, vagyis kölcsönható kvantummező.

Viszont a mai elméleti részecskefizika nem így gondolja el a kvantummezőt. Először is tekinti magát a pusztán létező (fizikusan szólva „szabad”) kvantummezőt mint primér létezőt és aztán ehhez szekunder tulajdonságként hozzáveszi annak kölcsönhatását környezetével. A hipotetikus szabad és a megfigyelt kölcsönható kvantummező tulajdonságai között azonban óriási szakadék tátong; áthidalása, vagyis a kölcsönhatás „bekapcsolása”, egy matematikailag értelmetlen eljárás, az ún. *perturbációs számítás* fizikai leírásba való bevonását igényli. Kissé pontosabban fogalmazva a nem megtapasztalt szabad—tehát pusztán feltevésként létező—mezőből kiindulva *R. Feynman* amerikai fizikus nyomán egy minden tagjában végtelen nagy számokat tartalmazó végtelen sorként állítjuk elő a kölcsönható—tehát jelenségként megtapasztalható—kvantummezőt.¹²

¹¹A kísérleti fizikusok a közönséges elemi részecskék (az elektron, a neutrínó és a protont, neutronot alkotó kétféle kvark) ún. *generációján* túl fölfedeztek nagyon hasonló részecskékből álló két másik részecske-generációt is. Hogy mivégre létezik elemi részecskék e két másik, látszólag használaton kívüli „biztonsági másolata” is a természetben, rejtély. Egy anekdota szerint *I. Rabi* amerikai fizikus az első ilyen részecske, a *mion* felfedezése után kifakadt: „Hát ez meg kinek kellett?”

¹²Az ún. *renormálással* e perturbációs sor tagjaiból a végtelenek szisztematikusan eltávolíthatók. De az így kapott renormált—tehát immár véges számokból álló—végtelen sor összege továbbra is végtelen. Ennek oka, hogy a Feynman-féle sor kombinatorikai szempontból is rendkívül bonyolult sőt úgy tűnik, mintha „főlöleslegesen sok” tagot tartalmazna.

Mindez azt sugallja, hogy a kvantumelméletben a bevezetőben említett „ontológiai vonatkoztatási rendszer-váltás” azt jelentené, hogy a mikroszkopikus világ szereplőit elméleti fizikai leírásuk során eleve csakis mint kölcsönható entitásokat tekintenénk és a hipotetikus szabad megfelelőjük létezését egyszerűen elvetnénk. Vagyis olyan elmélet fölállításán kell munkálkodnunk, mely a kvantummezőről mint önálló, vagyis „szabad” fizikai entitásról nem tesz kijelentéseket, hanem csakis mint kölcsönható, tehát „megfigyelt” fizikai entitásról. Másképpen fogalmazva a kvantummező csakis fenomenologikusan, az általa okozott fizikai események tükrében jelenne meg a fizikai leírás során.¹³ Ez összhangban van a *N. Bohr* által megfogalmazott *korrespondencia-elvvel*.

Végül megemlíjtük az általános relativitás-elmélet és a kvantumelmélet közt jelentkező összetett—minden bizonnyal még nem is teljesen jól áttekinthető—fogalmi ellentmondás egyik fontos elemét. Ez a valóság alapvetően különböző két felfogásával kapcsolatos. Mint fentebb említettük, az általános relativitás-elmélet matematikai megfogalmazása során bevezetjük a téridőt, melynek geometriáját azonosítjuk a gravitációs mezővel. Az elmélet szintaktikai, vagyis matematikai szintjén a téridő jóldefiniált: egy ún. négydimenziós pszeudo-Riemann-sokaságként vezetjük be az elméletbe annak kiépítése során. Az elmélet szemantikai szintjén viszont ezt a struktúrát a fizika fogalmai segítségével interpretálnunk kell. A szokásos interpretáció az, hogy a téridő egy pontját egy *fizikai eseménynek*, magát a teljes négydimenziós kontinuumot pedig az összes fizikai események szövetének, minden eseményt magába foglaló tárházának tekintjük. Ez a felfogás nehézségekbe ütközik. Legegyszerűbb ezek közül, hogy egy ún. vákuum-téridő, vagyis anyagot nem, csakis gravitációt tartalmazó téridő pontjait nehéz anyagi folyamatok kiváltotta fizikai eseményekként értelmezni. Lényegesebb gond, hogy a kvantumelmélet *koppenhágai értelmezése* szerint viszont a fizikai világ elemi építőkövei nem a fizikai események, hanem a *fizikai lehetőségek*. Melyik a helyes álláspont?¹⁴ Hogyha egy kvantumelmélettel összeegyeztetett hipotetikus elméletben a gravitációt kvantummezővel íránk le, akkor fentebbi érvelésünk alapján ez az elmélet a gravitációs mezőről csakis mint megfigyelt, kölcsönható kvantummezőről tehetne kijelentéseket. Ennélfogva e kvantumelméleti leírásban az önálló gravitáció matematikai alakját, a téridőt annak pontjaival, a fizikai eseményekkel együtt mint önálló fizikai entitást el kellene vetnünk.

E szemantikai szinten jelentkező lényeges különbözőség—sőt fogalmazzunk így: a fizikai realitás drámaian különböző két felfogása—szintaktikai szinten úgy nyilvánul meg, hogy a fizikai lehetőségek összességét a fizikai eseményekével ellentétben nem egy négydimenziós geometriai térrel, hanem egészen másfajta matematikai struktúrával: a kvantummező állapotainak összességéből álló *állapot-térrel* (Hilbert-tér) és ennek a térnek saját magára való bizonyos *lineáris leképezéseinek a terével* (operátor-algebrák) modellezzük a kvantumelmélet matematikai felépítésekor. Érdekes, hogy pontosan négydimenziós téridőben a lehetséges gravitációs mezőkhöz rendelt görbületi tenzorok mint lineáris operátorok egy, a kvantumelméletben szokásosan használt operátor-algebrává állnak össze. Ily módon az általános relativitás-, vagyis a gravitáció-elmélet olyan, legalábbis matematikai megfogalmazását nyerjük, mely a kvantumelméletéhez nagyon hasonló.¹⁵

Etesi Gábor
fizikus

¹³Úgy véljük, hogy a fentebbi probléma—vagyis hogy igazából csakis kölcsönható kvantummezőről lehet beszélni—a jelenleg megfogalmazott kvantumelméletekben saját farkába harapó kígyóként van jelen a következőképpen: a kvantummező mint lineáris operátor hat saját magán mint a megfigyelhető állapotai alkotta Hilbert-téren.

¹⁴Pl. *C.F. v. Weizsäcker* szerint a problémát az idő sajátos időszerű struktúrájának elfelejtésével, az idő geometriai kiterjedésre redukálásával vezetjük be fizikai leírásunkba (l. pl. *C.F. v. Weizsäcker: Klasszikus és kvantumelméleti leírások*, in: *Válogatott tanulmányok*, Gondolat, Budapest, 1980). Megjegyezzük, hogy ezt a *Newton* által megtett lépést retrospektíve igencsak motiválja a *Descartes* által akkortájt fölfedezett koordináta-geometria.

¹⁵G. Etesi: *Gravity as a four dimensional algebraic quantum field theory*, *Adv. Theor. Math. Phys.* **20**, 1049-1082 (2016), arXiv: 1402.5658 [hep-th].