Székely László

Interpretációk a fizikában*

I. BEVEZETÉS

Az *interpretáció* – más szóval *értelmezés* – fogalma magában foglalja azt a feltételezést, hogy tárgya üzenetet vagy mondanivalót hordoz, mely valakik számára megfejthető és megérthető, vagy legalábbis ilyen értelmű üzenet vagy értelem tulajdonítható neki. Persze a bolygók – például a Mars és a Vénusz – együttállása mint csillagászati esemény ilyen feltevés nélkül is „megérthető", ha „megértés" alatt az együttállás okának megfejtését és a természet általános oksági rendjébe történő beillesztését értjük, ám itt mindaddig nem beszélhetünk értelmezésről, amíg fel nem tételezzük, hogy a kozmosz értelmet hordoz, és ennek részeként az a tény, hogy az ilyen együttállások időnként újra és újra jelentkeznek, a puszta fizikán túlmutató jelentéssel bír. Így – amiként erre Patrick Heelan megvilágító erejű tanulmányában rámutat – Galilei nevezetes tézise, mely szerint a természet könyvét Isten a matematika nyelvén írta, a mai közhelyszerű felfogással szemben több volt, mint metafora: Galilei e kijelentésével – érvel Heelan – valójában hermeneutikai tételt fogalmazott meg, melyben a természetet mint Isten alkotását a másik nagy isteni alkotás, a Biblia kinyilatkoztatott szövege mellé állította, és ezáltal – nem taktikailag, nem az egyházzal szemben, hanem őszinte keresztény meggyőződéssel – megalapozta a természettudományok szuverenitását.[1] Hasonló igaz Albert Einsteinre is, aki a kozmosz rendjében ugyancsak egy anyagi világon túli, transzcendens – Galilei személyes istenével szemben személytelen – értelem megnyilvánulását vélte felfedezni.[2] Ha Galileitől és Einsteintől eltérően tagadjuk azt, hogy a természet értelmet hordoz,[3] az ugyan „megérthető" lesz abban az értelemben, hogy jelenségeit általános természeti törvények által meghatározott kalkulatív-oksági rendszerbe illesztjük és kiszámíthatóvá tesszük, de – mivel tagadjuk, hogy ez a rend bármiféle önma-

* A szerző ezúton mond köszönetet az OTKA-nak, mely a K 79194 szám alatt támogatta a jelen tanulmány megszületését.

[1] Vö. Heelan 1991, Heelan 1994, Heelan 1997. 274–278.

[2] Lásd pl. Einstein 2005a., Einstein 2005b.

[3] Mint amiképpen ez a fölvilágosodás óta az európai civilizációban az uralkodó tudományos és filozófiai álláspont. Vö. pl. Kolakowski 1994. 146.

gán túlmutató jelentéssel bírna – ez esetben értelmezésről nem beszélhetünk. A megértés tehát – legalábbis ha ezt az előbb leírt tevékenységet megértésnek tekintjük – tágabb kategória, mint az értelmezés. De a „megértés" és az „értelmezés" fogalma akkor is elválik egymástól, ha az előbbi alatt kifejezetten üzenetnek, szövegnek vagy a kimondott szavak értelmének felfogását értjük. Az értelmezés ugyanis – szemben az egyszerű megértéssel – mindig tudatos, reflektív aktus, mely mérlegeli a tárgy által közvetített vagy hordozott értelem kiolvasásának lehetséges alternatíváit és a félreértés lehetőségét, s mint ilyen, többet jelent, mint a megértés egyszerű, reflexió nélküli változata.

A természettudósnak mint szaktudományos kutatónak nem feladata, hogy a természet általa feltárt és leírt szegmensének metafizikai értelme felett töprengjen. Ő is „filozofálhat", de e tevékenysége már a természettudományokon kívülre fog esni. Ha nem tudatosítjuk a természettudomány és a metafizika, a természettudomány és a teológia e különbözőségét, olyan következményekkel kell számolnunk, mint amivel Stephen Hawkingnál találkozhatunk, aki komolyan azt véli, hogy a fizika mint természettudomány képes megcáfolni a teremtő istenről szóló keresztény teológiát;[4] vagy a Hawkingra hivatkozó népszerű ismeretterjesztő íróval, Gribinnel abba a tévhitbe eshetünk, hogy a fizikus átveheti a teológusok és metafizikusok szerepét.[5] Nyilvánvaló, hogy ez a radikálisan szcientista álláspont már nem a szaktudományos fizikára hivatkozik, hanem annak egyfajta metafizikává és teológiává tupírozott, zavaros és dilettáns változatára, amely egyik oldalról a fizika mint szaktudomány, másik oldalról a teológia és a metafizika természetének és hatókörének félreértéséből fakad.

Ám ha ez így van, akkor vajon következik-e belőle, hogy az értelemkeresés és az értelmezés problémája kívül marad a természettudományokon? Másképpen fogalmazva: igaz-e az az állítás, hogy a természettudósok – köztük a fizikusok – csupán kutatnak, majd leírják és rendszerbe illesztik kutatásuk eredményeit, de az értelmezést már meg kell hagyniuk a filozófiának és a teológiának? Korunk természettudósainak többsége hajlamos igenlően válaszolni e kérdésre, mivel meg van győződve arról, hogy a természettudományos eredmények egyértelműek, és ezért mint ilyenek tudományosan (tehát nem metafizikailag vagy teológiailag) minden értelmezési lehetőségen felül állnak. Ám még azoknak is, akik hajlamosak volnának elfogadni ezt a nézetet, szembe kell nézniük egy számukra zavaró tényezővel: azzal, hogy a kvantummechanikában – tehát egy kifejezetten egzakt, „kemény" fizikai diszciplínában – nemcsak elfogadott, hanem megkerülhetetlen az „értelmezés" kifejezés használata. Bár a fizikusok túlnyomó többsége a Bohr és Heisenberg nevéhez kapcsolódó úgynevezett „koppenhágai interpretációt" követi, és az általunk később ismertetésre kerülő alternatív értelmezésekre mint zavaros, hiteltelen próbálkozásokra tekint, az alternatív in-

[4] Vö. Hawking 1989.
[5] Gribbin 1986. 392.

terpretációkat követő kisebbség között éppen elég jelentős fizikus van ahhoz, hogy ne lehessen figyelmen kívül hagyni őket. S némileg hasonló a helyzet a relativitás elméletével is: bár itt az „ortodox", einsteiniánus értelmezés gyakorlatilag egyeduralkodó, a Lorentz-féle elmélet formájában ugyancsak adva van egy alternatív interpretáció, melynek vannak fizikus követői.

Nincs-e ellentmondás az értelmezés problematikájának e fizikán belüli jelenléte és a szaktudományok elhatárolásával kapcsolatos korábbi fejtegetéseink között? A válasz viszonylag egyszerű: az értelmezés azon típusai, amelyeket az előbbiekben kizártunk a természettudományokból, a teológiához és metafizikához tartoztak, míg a modern fizika esetében az interpretációnak egy igen *speciális* típusáról van szó, amely egyrészt emberi alkotásra (az elméletek bizonyos részeire) vonatkozik, és ennyiben a szövegértelmező hermeneutikával állítható párhuzamba, másrészt mégsem az alkotók vélt vagy valós üzenetének vagy mondanivalójának megértésére, hanem a természet ontológiájára irányul. *A következőkben a modern fizikában jelen lévő ezen speciális értelmezési problémát fogjuk körüljárni.*

II. A MATEMATIKAI APPARÁTUS FIZIKAI ÉRTELMEZÉSÉNEK PROBLÉMÁJA A KVANTUMMECHANIKÁBAN

Közismert, hogy az atomok belső struktúráját leíró és az atomi jelenségeknek – így különösen a hidrogén színképének – kiszámíthatóságában részleges sikereket elérő, 1913-ban megszületett Bohr-féle atommodell (az atomok „naprendszermodellje") nem volt kielégítő, mivel számos kérdést nyitva hagyott, és a megfigyelésekkel sem volt teljesen összhangban.[6] Az egymástól függetlenül megszületett, de egymással ekvivalens Heisenberg-féle mátrixmechanika és Schrödinger-féle hullámmechanika viszont pontosan kiszámíthatóvá tette e jelenségeket, beleérve ebbe azokat is, amelyeket a Bohr-féle modell képtelen volt kezelni. Bár Heisenberg és Schrödinger elmélete azok számára, akik sem a matematikában, sem a fizikában nem járatosak, talányos lehet, ám szerencsére tárgyunk szempontjából elég annyit tudni róluk, hogy olyan, egymással ekvivalens matematikai eszközökről van szó, amelyek segítségével a fizikai jelenségek széles osztályára a jelenlegi mérési pontosság határán belül pontos előrejelzés nyújtható. Továbbá – ami ugyancsak igen fontos – mindmáig nem sikerült velük kapcsolatban olyan fogyatékosságokat felmutatni, amelyek az addig leghatékonyabbnak bizonyult Bohr-féle atommodell és a rá épülő matematika esetében nyilvánvalóak voltak.

A hatékonyságon túl ugyanakkor a heisenbergi-schrödingeri kvantummechanikának van még egy mozzanata, amelyben alapvetően különbözik Bohr elmé-

[6] Vö. Heisenberg 1967a. 77–78; Lakatos 1970. 140–154; Simonyi 1986. 410–413.

letétől. Bohrnál ugyanis még adva van egy olyan fizikai ontológia, amelyre az elmélet matematikája ráépül: az atom belső szerkezetének előbbiekben említett naprendszermodellje. Így ha elvetjük az instrumentalista értelmezést, mely e modellt puszta eszköznek tekinti, Bohr elmélete esetében természetesen és automatikusan adódik a matematikához kapcsolódó fizikai ontológia: az atomok azon naprendszerszerű, szemléletes fizikai képe, amelyet a középiskolákban és a bevezető egyetemi kurzusokon még ma is tanítanak.

A kvantummechanikában a helyzet ettől gyökeresen különbözik. A Heisenberg és Schrödinger által megalkotott új elmélet meglepően hatékony matematikája ugyanis híján volt minden előzetes, a realista értelmezést segítő leírásnak. Heisenberg így jellemzi a koppenhágai interpretáció megszületése előtti állapotot: „Schrödinger eljárása lényegesen leegyszerűsítette sok olyan eljárás menetét, ami a kvantummechanikában rendkívül bonyolult volt. A *matematikai* rendszer *fizikai* értelmezése viszont komoly nehézségekbe ütközött" (Heisenberg 1978. 102–103. Kiem.: Sz. L.).

Néhány oldallal később pedig ezt olvashatjuk:

„A következő néhány hónap során jóformán másról sem beszéltünk Bohrral, mint *a kvantummechanika lehetséges fizikai értelmezéséről*" (Heisenberg 1978. 109. Kiem.: Sz. L.).

Persze Heisenberg visszaemlékezésében nem arról van szó, hogy adva volt egy absztrakt matematikai elmélet, amelyről a fizikusok nem tudták, hogy mit is jelent. (Hogyan is jöhetett volna létre egy ilyen elmélet?) A „matematikai rendszer" egyenleteinek változói már ekkor is hozzá voltak rendelve megfigyelhető és mérhető fizikai mennyiségekhez (azaz rendelkeztek *fenomenológiai fizikai interpretációval*), és – mint minden matematikai fizikai elmélet – jól operacionalizálható eljárásokkal definiálható mennyiségek közötti összefüggésekre vonatkoztak. Ám a Bohr-féle naprendszer-atommodellhez hasonló ontológiai képzetek egyáltalában nem társultak hozzájuk: ez esetben a fizika matematikája mint a fizikai jelenségek előrejelzésére szolgáló technika annak ellenére is a fizikai világra vonatkozó konkrét ontológiai elképzelés nélkül született meg, hogy paraméterei fizikailag interpretálva voltak, és maga a matematika jól meghatározott fizikai mennyiségekre vonatkozott.

Nyilvánvaló, hogy azok számára, akik a „fogd be a szád és számolj"[7] attitűddel jellemzett instrumentalista beállítódást követik, a történet itt le is zárható: van egy teoretikus eszközünk, amelynek segítségével meglepően pontos előrejelzések nyújthatóak a jelenségek meglepően széles körére, s ennél többre egy instrumentalistának nincs szüksége. Sőt, az instrumentumhoz (azaz a paramétereiben fizikai mennyiségekhez rendelt, és ebben a *korlátozott* értelemben már fizikailag értelmezett matematikához) rendelt ontológia hiánya még előny is e szempontból, hiszen így nincs olyan része az elméletnek, amelyet az instrumen-

[7] „Shut-up-and-calculate interpretation": vö. Tegmark 1998. 855.

talistának az előrejelzéseket segítő puszta hipotézissé lefokozva „dekonstruálnia" kellene. Mármost ha Bohr és Heisenberg hónapokat töltött azzal, hogy a Schrödinger-egyenlethez „fizikai értelmet" rendeljen – azaz azt ontológiailag is interpretálja –, akkor ez csupán azért volt lehetséges, mert egyrészt meg voltak győződve arról, hogy a sikeres matematikai fizika nem csupán eszköz, hanem benne valamiképpen a fizikai világ ontológiája jelenik meg, másrészt a fizikának mint tudománynak célját, értelmét nem csupán a sikeres előrejelzéseket adó rendszerben, illetve a mérhető mennyiségek közötti összefüggések megállapításában, hanem a fizikai világ ontológiai összefüggéseinek feltárásában-megismerésében látták.

III. A HEISENBERG-FÉLE HATÁROZATLANSÁGI RELÁCIÓK ÉS A KVANTUMMECHANIKAI INDETERMINIMZUS

A kvantummechanika koppenhágai interpretációja tehát egy olyan különleges szituációban született meg, amikor adva volt egy kifejezetten hatékony matematikai fizika, de az, hogy lehetséges-e annak valamiféle, az elmélet operacionalista értelmezésén túlmutató ontológiai fizikai értelmet tulajdonítani, és ha igen, milyet, homályos volt. E jellemzés azonban még nem elegendő a kvantummechanikában jelen lévő interpretációs probléma megvilágításához. Ugyanis tudjuk, hogy a koppenhágai interpretáció *indeterminista*, és éppen emiatt fogalmazódtak meg vele szemben *alternatív* értelmezések. Így a kvantummechanikán belüli értelmezési vita megértése érdekében meg kell világítanunk a koppenhágai interpretáció indeterminista jellegének eredetét. Ezen eredet feltárása ráadásul nem csupán az interpretáció filozófiai tematikája vagy a modern fizika filozófiája szempontjából érdekes, hanem *a filozófia egészét* érinti. Mai kultúránkban ugyanis általánosan elterjedt az a nézet, amely szerint a determinista fizikai világkép megbukott: azt a kvantummechanika megcáfolta. Ám ha ez valóban így volna – azaz *ha Bohrnak, Heisenbergnek és e nézet más képviselőinek igaza lenne –, akkor ez azt jelentené, hogy a fizika képes eldönteni egyes klasszikus filozófiai kérdéseket, és ezt a determinizmus–indeterminizmus kérdésében meg is tette az indeterminizmus javára, aminek nyomán a filozófia történetét, szerepét, mibenlétét gyökeresen át kellene értékelnünk.*

A determinizmus–indeterminizmus probléma kvantummechanikán belüli megjelenése abból fakad, hogy az a kvantummechanikai matematikai apparátus, amely oly sikeresnek és meggyőzőnek bizonyult az atomfizikai jelenségek – s így az atomok által kibocsátott színképekben elhelyezkedő színképvonalak – előrejelzésében, további, meglepő és egyáltalában nem várt előrejelzéseket adott. Ezek az úgynevezett Heisenberg-féle határozatlansági relációk. A makroszkopikus világban azt tapasztaljuk, hogy *ha egy jól meghatározott időpontban adott és ismert egy test sebessége, tömege és energiája, valamint térbeli helyezte, akkor előre*

meghatározható jövőbeni mozgása, azaz mozgása determinált. Ezt Newton fizikája tudományosan is leírja. Ám e determinizmus megértéséhez nem kell ismernünk a fizikát: a labdajátékok és a biliárd ezen alapulnak, és a jó sportoló nap mint nap előre „kiszámítja", „látja" a labda vagy a biliárdgolyók jövőbeni viselkedését. De a közlekedési eszközöktől a mindennapi szerszámokon át mi magunk is tanúi vagyunk ennek, és használjuk e determináltságot és az ebből adódó kiszámíthatóságot, még akkor is, ha a fizikáról semmit sem tudunk.

Fontos, hogy a makroszkopikus világban nyert fenti tapasztalatra vonatokozó leírásunk két különböző determináltságot foglal magában: az egyértelmű jövőbeli meghatározottságot, és ennek előfeltételét, a jelenbeli állapot teljes meghatározottságát. Mármost a Heisenberg-féle határozatlansági relációk arról szólnak, hogy bizonyos fizikai mennyiségpárok esetében nem lehetséges azok egyidejű pontos meghatározása, azaz a jövőbeli meghatározottság előfeltétele. Így pl. *Heisenberg értelmezésében* az egyik nevezetes reláció szerint ugyanúgy lehet egy elemi részecske vagy „az elektron helyéről és sebességéről beszélni, mint a newtoni mechanikában, mindkettőt megfigyelhetjük vagy mérhetjük. De nem lehet mindkét mennyiséget egyidejűleg tetszőleges pontossággal meghatározni" (Heisenberg 1967. 86).

Megjegyzendő, hogy a kvantummechanikai interpretációk között létezik egy olyan irányzat, mely a Heisenberg-féle relációkat Heisenberggel ellentétben az egyedi részecskékre alkalmazhatatlan statisztikai összefüggésnek tekinti, és ezen interpretáció esetében e relációk nem szükségképpen implikálnak indeterminizmust, hanem szigorúan determinisztikus folyamatok eredményei is lehetnek. Ez a felfogás a kvantummechanika későbbiekben említésre kerülő determinisztikus statisztikai értelmezéseinek osztályához tartozik, és részletesebben nem térhetünk itt ki rá. Mi mindenesetre – az alábbi 2. és 3. pontban – ennél erősebb állítást fogunk megfogalmazni, és amellett érvelünk, hogy az indeterminizmus akkor sem következik a határozatlansági relációkból, ha az utóbbiakat egyedi részecskékre alkalmazzuk.

Visszatérve Heisenberg előbb idézett állításához, az egy részecske jelenbeli állapotának teljes meghatározhatóságát zárja ki. S bár elvben elképzelhető olyan elmélet, amely a jelenbeli meghatározatlanság ellenére biztosítja a jövőbeli determinizmust, a kvantummechanika nem ilyen. Ezért ha elfogadjuk az ő felfogását, már csupán a helyre és a sebességre vonatkozó, általa említett relációból is az következik, hogy az atomok és elemi részecskék világában még akkor sem lehetne biliárdozni vagy labdajátékot játszani, ha egyébként ettől eltekintve azok a makroszkopikus testekhez volnának hasonlatosak, hiszen jelenbeli állapotuk meghatározhatatlansága miatt jövőbeli mozgásuk nem volna megállapítható, sem számítással, sem a sportolókat jellemző mesteri előrelátással.

Persze egyből felvetődik a kérdés, hogy ha ez így van – azaz ha a mikrovilág számunkra valóban indeterminálttként adódik –, akkor miért jelenik meg determinálttként a makroszkopikus világ? A válasz erre egyszerű. Egyrészt a mikro-

szinten jelentkező határozatlanság a mikrorészecskékből álló makroszkopikus testek világában statisztikailag kiegyenlítődhet és eltűnhet. Másrészt a határozatlanság mértéke a makroszkopikus méretekhez viszonyítva oly kis mértékű, hogy – valószínűtlen, extrém, feltehetőleg mindeddig soha meg nem valósult esetektől eltekintve – gyakorlatilag észrevehetetlen volna akkor is, ha nem egyenlítődne ki.

Foglaljuk össze röviden az eddigieket! Heisenberg és Schrödinger a fizika történetének talán leghatékonyabb matematikai apparátusát hozta létre, melynek segítségével az atomfizikai-mikrofizikai jelenségek meglepően széles osztályai a ma már elképzelhetetlenül pontos mérési határokon belül tökéletes pontossággal kiszámíthatóvá és előrejelezhetővé váltak. Ez a rendszer azonban adott egy további, *nem várt, meglepő* előrejelzést: azok a fizikai értékek, illetve mennyiségek, amelyeken a makroszkopikus testek determinisztikus viselkedése alapul, egyidejűleg pontosan nem határozhatóak meg.

Korábban úgy fogalmaztunk, hogy az előre történő meghatározáshoz *adottnak* és *ismertnek* kell lennie a szükséges értékeknek (sebesség, hely stb.), s ez nem volt véletlen: az ontológiai értelemben vett *adottság* és a fizikus általi *meghatározás* (vagy a sportoló általi intuitív belátás) nem azonos. Ezt figyelembe véve a kvantummechanika matematikájából következő határozatlanság három módon értelmezhető:

1. A matematika helyesen írja le a fizikai valóságot, azaz a kérdéses mennyiségek nem azért nem határozhatóak meg egyidejűleg, mert valamiféle korlátba ütközünk, hanem mert ezek a mennyiségek nem is léteznek pontosan a fizikai valóságon belül – azaz ontológiailag is bizonytalanok. Így például egy elektronnak nincs egyszerre pontos sebessége és pontos térbeli helyzete, azaz nem arról van szó, hogy ezek mint az elektron helyzetének, mozgásának jellemzői ontológiailag egyidejűleg és pontosan *adottak*, csak mi képtelenek vagyunk *megismerni* őket, hanem maga az elektron van híján e pontos értékeknek. Más szavakkal: ezen értelmezésben a matematikából következő indetermináltság a mikroszkopikus világ tényleges, fizikai-ontológiai indetermináltságát írja le. Következményképpen ezen értelmezésben a kvantummechanika a maga matematikájával *teljes:* a fizikai világ általa vizsgált jelenségeit *teljesen és helyesen* írja le. Ezt a felfogást *a határozatlansági relációk ontológiai értelmezésének* nevezhetjük.
2. Előbbi példánkkal: az elektronnak és minden mikroszkopikus jelenségnek van pontos helye és sebessége, azaz ezek pontosan *adottak*, de azokat a kvantummechanika nem képes megragadni. Vannak olyan, számunkra még nem ismert, még hozzáférhetetlen tényezők, sajátosságok, mennyiségek, amelyeket megismerve a határozatlansági relációk meghaladhatóak, és az elmélet újra determinisztikussá tehető. Egzaktabban fogalmazva: a fizikai világ olyan „rejtett" paramétereket tartalmaz, amelyeket talán egyszer megismerhetünk, s akkor majd a kvantummechanika ezekkel kiegé-

szített-továbbfejlesztett matematikája determinált fizikát fog adni. E felfogást nevezhetjük *a határozatlansági relációk ismeretelméleti értelmezésé*nek: eszerint a határozatlanság csak ismereteinkben lép fel, de a fizikai világ determinált.

3. A határozatlansági relációk az emberi megismerés átléphetetlen, végső korlátjait jelentik a fizikában. A mikrofizika világa ugyan determinált, de e determináltság sohasem válik számunkra hozzáférhetővé. Ebben az értelemben *a kvantummechanika teljes*, mindent leír, amit a fizikai megismerés feltárhat, indeterminizmusából azonban nem következik a fizikai világ indeterminált volta: a determináló folyamatok és struktúrák mélyebben húzódnak meg annál, hogy a fizika, illetve bármiféle emberi megismerés hozzáférhetne, azaz e determináltság mintegy „magában való". A Heisenberg-féle határozatlansági relációk a jelenségek determinisztikus voltát meghatározó tényezők számunkra való elérhetetlenségének, „magábanvalóságának" következményei, mintegy erről „üzennek" a számunkra. Ezt a felfogást *a határozatlansági relációk agnosztikus értelmezésé*nek nevezhetjük.

Megjegyezzük, hogy a határozatlansági relációk értelmezésének e fenti, az *ontológiai, ismeretelméleti* és *agnosztikus* jelzők szerinti kategorizálása nem a kvantummechanika ténylegesen létező interpretációit követi, hanem a jelen tanulmány szerzőjének kategóriái, melyek a logikailag adódó értelmezési alternatívákat vázolják fel absztrakt formában. Ez az absztrakt felsorolás azonban megkönnyítheti az alábbiakban ismertetésre kerülő konkrét interpretációk megértését.

IV. A KVANTUMMECHANIKA HÁROM LEGJELENTŐSEBB INTERPRETÁCIÓJA

Bohr és Heisenberg közismerten az indeterminista fizikai ontológiát eredményező 1. pont alatti lehetőséget választotta, és ezt dolgozták ki komplett fizikai interpretáció formájában.[8] Az alternatív interpretációk megjelenése, valamint az interpretációs viták kialakulása éppen ebből adódott: motivációjuk az indeterminizmus elutasítása és annak demonstrálása, hogy a fizikai determinizmus az új elmélet fényében is védhető. Ami a 3. értelmezési lehetőséget illeti, ez a kvantummechanikával kapcsolatos irodalomban nem szokott szerepelni, hiszen a koppenhágai interpretáció teljes fizikai elméletként történő elfogadásán alapul, s így értelemszerűleg nem igényli annak lecserélését új fizikai interpretációval. Funkciója, hogy rámutat: *még a koppenhágai interpretáció elfogadásából sem következik a fizikai világ indeterminizmusa, a determinizmus–indeterminizmus kérdése még ebben az esetben is megmarad filozófiai kérdésnek*. Ami a második lehetőséget illeti,

[8] Vö. Heisenberg 1967b, Jammer 1974, Beller 1999.

idetartoznak a kvantummechanika Einstein, De Broglie és Schrödinger által is támogatott, a determinizmus mellett a fizikai hatások lokális jellegét is megőrző értelmezésének különböző variánsai,[9] valamint a David Bohm által kidolgozott „holista" értelmezés, mely visszahozza a fizikába a távolbahatást.[10]

A most említettek közül az utóbbi, a Bohm-féle értelmezésben a távoli testek közötti kapcsolat képezi azt a rejtett, a kvantummechanikából kimaradt tényezőt, amelynek hiánya miatt annak matematikája indeterminisztikusként jelenik meg. Konkrét ontológiájában ez a tényező lehet tényleges távolbahatás, vagy egy olyan, a fizikai világ mélystruktúrájában működő fizikai mező, mely a távoli jelenségek között kapcsolatot teremt, de akár egyfajta, a fizikai világ egészét átfogó, a leibnizi eleve elrendelt harmóniára emlékeztetető fizikai világrend is. A távolbahatás visszahozását elutasító determinista értelmezés képviselői – szemben Bohmmal – arra törekednek, hogy egyidejűleg őrizzék meg a determinizmust és a távolbahatás tiltását, azaz ez az interpretáció azon a feltételezésen alapul, hogy a „lokalitás" – a távolbahatás kizárása – és a determináló rejtett tényezők – a „rejtett paraméterek" – bevezetése egyidejűleg érvényesíthetők.

A lokalitás és a rejtett paraméterek egyidejű lehetőségének cáfolatára a kvantummechanikával kapcsolatos metateoretikus irodalom Neumann Jánostól kezdődően számtalan érvet és egzakt bizonyítást fogalmazott meg (ezek az úgynevezett „no go" – „nem megy" – tételek),[11] ám ezek mindegyike konkrét, meghatározott előfeltevéseken nyugszik, és bár szűkítik a lokális determinista interpretációk lehetőségét, azt teljesen még annak ellenére sem zárhatják ki, hogy sokan e kizárásra már eldöntött tényként tekintenek. Legújabban pedig a magyar tudományfilozófus, E. Szabó László és neves amerikai kollégája, Arthur Fine közös cikkben mutattak rá arra, hogy lehetséges rejtett paraméteres elméletet alkotni a lokalitás egyidejű megőrzésével.[12] Így

> nem igaz, hogy a kvantummechanikában lenne elég empirikusan alátámasztott okunk azt állítani, hogy sérül a lokális realizmus, hogy más elvek – mint például a lokalitás – feladása nélkül nem lehet a világ rejtetten determinisztikus, hogy a kvantumjelenségekben megnyilvánuló valószínűségi jelleg ne lenne episztemikusan értelmezhető, hogy a kvantumjelenségek általában ne lennének beágyazhatóak egy lokális, determinisztikus és markovi világba (E. Szabó 2004. 197).

Ami a Bohm-féle interpretációt és annak különböző változatait illeti, vele szemben még a koppenhágai interpretáció legelkötelezettebb hívei is csupán metateoretikus érvet tudnak felhozni: arra hivatkoznak, hogy a távolbahatás megen-

[9] Einstein 2005c, Szegedi 1981, Szegedi 1987a, Szegedi 1989, Jammer 1974.
[10] Bohm 1952, Bohm–Hiley 1993, illetve Cushing 1994.
[11] Vö. E. Szabó 2004. 130–166.
[12] Lásd E. Szabó 2004. 179–198., illetve E. Szabó – Fine 2002.

gedése túl nagy ár a determinizmus megmentése érdekében, mivel metafizikai elemet épít be a fizikába és sérti az Ockham-borotva elvét.[13]

A *koppenhágai*, a *lokális determinista* és a *Bohm-féle* értelmezés tehát a kvantummechanika matematikájának három nagy, fizikailag legitim értelmezési ága, amelyek közül az utóbbi kettő determinista. Létrejöttük, együttlétezésük – a kvantummechanika további, filozófiai szempontból kétségtelenül extrém, de ezzel együtt logikus értelmezéseivel együtt[14] – azon alapul, hogy a sikeres és hatékony matematikai fizikai leírás a paraméterek mérhető fizikai mennyiségekhez történő operacionális hozzárendeltsége ellenére nyitva hagyja a teret az ontológiai értelmezés számára. Mindez pedig azt is jelenti, hogy *kifejezetten hamis az általánosan elterjedt vulgárfilozófiai nézet, mely szerint a modern fizika megcáfolta volna a determinista fizikai világképet*.

V. EINSTEIN VERSUS LORENTZ

Amint már jeleztük, a fenti jelenség nem egyedi a modern fizikában. Így a relativitáselmélet matematikája esetében is két legitim értelmezés adott: a lorentziánus és az einsteiniánus, melyek ugyanazon fizikai tapasztalatra adnak két nem csupán eltérő, hanem ontológiai tartalmában gyökeresen ellentétes magyarázatot. Amíg Einstein elmélete a kitüntetett vonatkoztatási rendszer fizikai lehetőségének *tagadására* épül, addig Lorentz elmélete éppen egy ilyen rendszer *feltevésén* alapul, s annak segítségével magyarázza meg a relativisztikus jelenségeket. S a modern fizika más területein – így a fizikai kozmológiában – is hasonló interpretációs kérdésekkel szembesülhetünk.

A legstílusosabb talán, ha e tekintetben Einstein első fizikus híveinek egyikét, a relativitáselmélet gyors recepciójában kulcsszerepet játszó Max von Laue-t idézzük, aki az einsteini elmélet méltatásával együtt is fontosnak tartotta hangsúlyozni a két elmélet ekvivalenciáját. Eszerint:

> A Lorentz-féle kibővített elmélet és a relativitáselmélet között kísérletileg dönteni tulajdonképpen egyáltalában nem lehet, és ha az előbbi ennek ellenére a háttérbe szorult, ez főként annak tulajdonítható, hogy bármely közel is áll a relativitáselmélethez, hiányzik belőle a nagy, az egyszerű, az általános elv, amely a relativitáselméletet már eleve bizonyos nagyszerűséggel ruházza föl. (Laue 1919. 34).

[13] Lásd például Heisenberg 1967c. 141–144., illetve Beller 1999. 171–210.

[14] A legismertebb ilyen Hugh Everettnek a fizikusok között ma a koppenhágai interpretáció mellett ugyancsak népszerű sokvilág – Many Worlds – hipotézise. Vö. Everett 1957, illetve Tegmark 1998.

Laue e sorai az empirikus ekvivalencia hangsúlyozása mellett világossá teszik azt is, hogy Einstein elméletének felülkerekedése elsősorban metateoretikus jellegű értékítéleten – „a nagy, az egyszerű, az általános" elven és az ebből fakadó „nagyszerűségen" – alapult. Laue mint Einstein lelkes híve csupán azt hallgatta el elegánsan, hogy miközben Lorentz elmélete (amely persze ugyancsak magas szintű, matematizált tudományos elmélet, és mint ilyen, a mindennapi gondolkodás számára nem érthető közvetlenül) összhangban van mind a *józan ész* képzeteivel, mind a *hagyományos tudományos racionalizmus*sal, addig Einstein elmélete – különösen a tér és az idő tekintetében – mindkettő számára abszurd mozzanatokat tartalmaz. S figyelembe véve a Laue által hangsúlyozott empirikus ekvivalenciát, az az állítás, mely szerint a fizikai kutatás eredményei, illetve a tudományos haladás volna az, ami kikényszerítette hagyományos fogalmaink feladását, üres frázis: *a józan ésszel való konfliktus valójában* a fenti szövegrészben szereplő *metateoretikus értékek választásának következménye*.

A fizika haladása nem azzal teremtett új szituációt, hogy szükségszerűvé tette a mindennapi képzeteinkkel és a hagyományos racionalizmussal való szakítást, hanem azzal, hogy konfliktust teremtett ezen utóbbiak és a Max von Laue által hangsúlyozott, az elmélet formai jegyeihez tartozó egyszerűség és gondolati szépség között. A fizikus valóban objektív választási szituáció elé került, de ez nem a józan ész és az új fizika közötti választás kényszere volt, hiszen a relativisztikus jelenségek lorentziánus[15] magyarázata konform a józan ész képzeteivel. Az elkerülhetetlen választás egyik oldalról az elmélet *formai szépsége, egyszerűsége*, másik oldalról *a hagyományos racionalizmussal és a józan ésszel konform tudományos magyarázat*, azaz éppen a matematikai apparátus fizikai interpretációját szabályozó *metateoretikus értékek és normák* között áll fenn, melyek közül a formai szépség preferenciája az einsteiniánus, a tradicionális racionalizmussal és a józan ész képzeteivel összhangban lévő tudományos elmélet követelményének előnybe részesítése a lorentziánus interpretáció felé mutat.[16]

[15] A lorentziánus felfogást követő interpretáció ma leggyakrabban idézett képviselője H. Ives, aki ugyan Lorentz-től eltérően nem az éter, hanem a fizikai tér segítségével vezeti be a kitüntetett rendszert, de akinek elmélete egyébként a lorentzi elmélet logikáját követi. Vö. Ives 1945, illetve Hazalett –Turner 1979. A fogalmilag és matematikailag leginkább kidolgozott lorentziánus elméletet a magyar Jánossy Lajos alkotta meg: Jánossy 1971. Vö. még Székely 2012.

[16] Vö. például Székely 2007.

VI. A MATEMATIKAI FIZIKA FIZIKAI-ONTOLÓGIAI ÉRTELMEZÉSÉNEK HERMENEUTIKÁJA

A fentiekben mind a kvantummechanika, mind a relativitáselmélet esetében a fizika matematikai apparátusának a fenomenológiai-operacionális értelmezésen túlmutató fizikai-ontológiai értelmezéséről volt szó, és ez az értelmezés két tényezőn alapult.

1. Az egyik ezek közül az, hogy a jelenségeket, a megfigyeléseket kiszámíthatóvá tévő és azokra hatékony előrejelzéseket adó matematikai eszközökhöz (képletekhez, egyenletrendszerekhez) nem kötődött közvetlenül, illetve azokról leválaszthatatlanul ontológiai értelem. A matematikai fizika persze nem absztrakt matematika, mivel a benne szereplő változók fizikai jelentéssel bírnak: azok olyan fizikai mennyiségekhez vannak hozzárendelve, amelyek – legalábbis elvben – megfigyelhetők és mérhetők. Az egyszerűség kedvéért tekintsük például a mindenki által jól ismert newtoni $G = N \times m_1 \times m_2 / r^2$ képletet! E képletben N a newtoni gravitációs állandó, m_1 és m_2 a szóban forgó testek tömege, r e testek távolsága, G pedig a közöttük fellépő erő – azaz a benne szereplő valamennyi változónak van *fenomenológiai* és (egyúttal a kérdéses mennyiségek mérési eljárására vonatkozó *operacionális*) fizikai interpretációja. Ugyanakkor ez a képlet valamennyi változójának fizikai-operacionális meghatározottsága ellenére sem rögzíti egyértelműen saját *fizikai-ontológiai* értelmét: már Newton is tudta, hogy ugyanúgy leírhatja a testek vonzóerejét, mint amiképpen kifejezheti a gravitációs éter hatására fellépő, a testeket egymás felé mozdító nyomást.[17] A modern fizikában persze ennél matematikailag és fizikailag jóval összetettebb összefüggésekről és egyenletekről van szó, de e tekintetben a helyzet nem változott. Így bár Bohr és Heisenberg úgy vélte, hogy a kvantummechanika sikeres matematikai fizikájával csak az ő saját, koppenhágai interpretációjuk fér össze, ezen álláspontjuk nemcsak filozófiailag tarthatatlan, hanem tényszerűen is, hiszen léteznek alternatív interpretációk.

Ismeretelméletileg tekintve mindez azt jelenti, hogy a tudományfilozófiában jól ismert és szokásosan *Duhem–Quine-féle empirikus aluldeterminináltsági tételnek* nevezett (de helyesebben Duhem–Quine–Lakatos-féle) tétel[18] kiterjeszthető a matematikai fizika apparátusára is. Konkrétan: amíg az előbbi tétel azt állítja, hogy a megfigyelési adatok, illetve a tudományos tapasztalat sohasem határozhatják meg egyértelműen tudományos magyarázatukat, hanem ugyanazon adatokra, illetve tapasztalatra mindig többféle elmélet adható, addig *fenti elemzésünk arra mutat rá, hogy az aluldeterminináltság nem csupán a tapasztalat vonatkozásában áll fenn, hanem – legalábbis a fizika esetében – a jelenségek előrejelzésére sikeresen alkal-*

[17] Vö. Newton 1679, Newton 1730. 350–351; Newton 1977. 327–328; Ducheyne 2011.

[18] Vö. Lakatos 1970. 180–189. Appendix: *Popper, Falsificationism and the Duhem-Quine Thesis*. A tételről magáról pedig 184–189.

mazott matematika esetében is, mivel e matematika a természet ontológiája tekintetében nyitva hagyja a lehetőséget az alternatív, egymástól eltérő értelmezések számára.

2. A másik sajátosság ebből az előbbiből adódik. Mivel sem a tapasztalat, sem a kidolgozott és sikeres természettudományos matematikai elmélet nem determinálja egyértelműen a fizikai ontológiát, az így adódó szabadságfokot egyéb tényezők – így különösen a társadalmi-kulturális tényezők, a világnézeti elkötelezettségek, a kutatók csoportos vagy egyéni értékorientációja stb. – határozzák meg. Így tudjuk, hogy amíg Newton elutasította a gravitációnak mint távolbaható erőnek a fogalmát,[19] az őt követő korszak fizikusainak többsége az elmélet sikerére tekintettel feladta ezt a fenntartást, és legegyszerűbb, legkényelmesebb magyarázatként a testekben rejlő, távolbaható vonzerő fogalmát immáron mint racionálisat – ráadásul a francia materialisták esetében mint materialistát! – fogadta el. Ugyanakkor az is ismert, hogy e fordulat nem volt teljes körű: például Riemann, Lord Kelvin vagy H. Lorentz továbbra is a távolbahatás kiküszöbölésével kísérletezett,[20] hogy azután a 20. századi fizika Einstein révén ténylegesen is kiiktassa e képzetet. Most a fentiekben azt is láthattuk, hogy hasonló értékítéletek befolyásolják a kvantummechanika mai interpretációit: a determinista interpretációk a determinizmusnak mint értéknek tudatos vállalásán alapulnak, míg a determinista interpretációk közötti törésvonal a távolbahatás természetontológiai megengedhetőségével kapcsolatos filozófiai jellegű értékítélet mentén bontakozik ki.

S ezen a ponton megjelenik a kulturális kontextus. A természettudósok nem elszigetelt, légüres térben tevékenykednek, hanem a fizika matematikai apparátusának interpretációját meghatározó értékítéleteiket részben vagy teljesen életük, neveltetésük, tevékenységük kulturális-szociális kontextusa határozza meg. Ez természetesen nem azt jelenti, hogy a marxizáló vagy más radikális tudásszociológiák helyesen értelmezik a természettudományokat. Nem mutatható ki ugyanis sem a newtoni gravitációs képlet értelmezésében, sem a modern fizikán belüli interpretációs vitákban az, hogy a kérdéses értékítéletek kifejezett és egyértelmű összefüggésben lennének a réteg- vagy osztálymeghatározottsággal, a politikai irányultsággal vagy más, hasonló tényezőkkel. Így a vallásos Newton a gravitáció éteralapú értelmezésével kísérletezett, míg a francia ateisták többnyire problémamentesként fogadták el a vonzóerő fogalmát. Hasonlóképpen, a relativitáselmélet éteralapú értelmezésének egyformán voltak hívei mind a német szélsőjobboldali, mind a marxista, mind pedig a nyugati demokráciák mellett elkötelezett tudósok között. A „dialektikus marxista" szovjet fizikusok között pedig ugyanúgy voltak követői a koppenhágai interpretációnak, mint a determi-

[19] Newton 1693. 327–328.

[20] Vö. Thomson 1867, Thomson 1872, Riemann 1892, Lorentz 1900, illetve Isenkrahe 1879.

nista felfogásnak, míg a marxizmussal egyáltalában nem vádolható Einstein vagy Schrödinger a determinista interpretáció mellett állt ki.[21]

Ugyanakkor Bohrra mint dán tudósra hatással volt nemzetének nagy gondolkodója, Kierkegaard,[22] akinek filozófiája – talán némileg paradox módon, a dán fizikus ismeretelméleti pozitivizmusa mellett – szerepet játszott a koppenhágai interpretáció kiformálódásában. Továbbá Mara Beller szerint az a mód, ahogyan a német kultúrában nevelkedett német Heisenberg a fizikai méréseket elemzi a határozatlansági relációval foglalkozó tanulmányában, a klasszikus német filozófia nagy egyénisége, Fichte filozófiájának hatását mutatja.[23] S végül – mint amiképpen erre Forman rámutat[24] – komoly érvek hozhatóak fel amellett, hogy a Weimari Köztársaság I. világháború utáni kulturális-szellemi légköre, a korszak német értelmiségét jellemző elbizonytalanodás, a racionalista világfelfogásban megingott hit és az indeterminizmushoz való ebből adódó vonzódás szerepet játszott a koppenhágai interpretáció megszületésében és karrierjében.

VII. ÖSSZEGZÉS

Mindennek pedig hangsúlyos filozófiai-világnézeti jelentősége van. Ugyanis – a gyakran hangoztatott, ezzel ellentétes állításokkal szemben – a modern fizika egyáltalában nem követeli meg a természettel kapcsolatos hagyományos fogalmaink újragondolását. Így nem igaz az, hogy Einstein annak idején a fizikai determinizmus mellett kiállva tévedett volna, vagy intellektuális hanyatlása miatt már nem értette volna meg kellően a kvantummechanikát, és ezért követelte annak determinista értelmezését. Ő a racionális világkép és az általa e világkép elengedhetetlen elemének tekintett determinizmus mint érték mellett állt ki, és ennek nyomán *egy fizikailag lehetséges interpretáció* mellett érvelt.[25] Nem ő nem értette a kvantummechanikát, hanem valójában a koppenhágai interpretáció képviselői voltak azok, akik nem értették meg az ő filozófiai érvelését. De nem igaz az sem, hogy a térrel és az idővel kapcsolatos hagyományos képzeteinket fel kell adni, mint amikképpen ezt Einstein hirdette relativitáselméletére hivatkozva, hiszen adva van a relativitáselmélet Lorentz-féle interpretációja, és legalább annyira megalapozott a hagyományos racionalitást védelmezve ezen interpretációt követni, mint amennyire filozófiai szempontból indokolt volt a determinizmus mint érték megőrzésére hivatkozva Einstein kiállása a lokális

[21] Graham 1972.
[22] Lásd például Jammer 1964. 166–172., illetve Folse 1985.
[23] Beller 1999. 5. és 58–67.
[24] Vö. Forman 1984, illetve Szegedi 1987. Ugyancsak a koppenhágai interpretáció dominanciájának történeti kontingenciája mellett érvel Cushing 1994.
[25] Vö. Einstein 2005c.

determinista, rejtett paraméteres interpretáció mellett. Ugyanígy nem kell elfogadnunk azt sem, hogy a modern fizikai kozmológia „big bang" („ősrobbanás") elmélete szükségképpen a világegyetem 15-20 milliárd évvel ezelőtti keletkezéséről szól, mivel a big bang abszolút kezdetként történő tárgyalása már erősen értékterhelt, és vele szemben lehetségesek alternatív értelmezések. Következményképpen a modern fizikai elméletek elemzése során elkerülhetetlenül figyelembe kell vennünk a *hermeneutikai dimenzió*t: azt, hogy a sikeres, az érintett jelenségek széles osztályait hatékonyan kiszámíthatóvá tévő matematikai apparátushoz kapcsolódó konkrét fizikai értelmezés mennyiben közvetlen folyománya ennek az apparátusnak, s mennyiben az elméletalkotók *értékpreferenciái* által meghatározott, *értékterhelt* interpretáció.

Ennek az interpretációs pluralizmusnak ugyanakkor semmi köze sincs a ma divatos tudományos relativizmushoz, vagy azokhoz a törekvésekhez, amelyek a modern fizikát inegzakt, ambivalens tudományként szeretnék „leleplezni", „dekonstruálni": a fizikai elméletek belső magja, az interpretálandó matematika tekintetében nincs helye ambivalenciának vagy bizonytalanságnak. Ezeknek, bár emberi alkotások, megvannak a maguk önálló, belső, az alkotók törekvéseitől, akaratától független – és ennyiben „objektív" – összefüggései és törvényei. Így sem Heisenberg, sem Schrödinger nem törekedett arra, hogy egyenleteiből a Heisenberg-féle határozatlansági relációk következzenek: ez egyszerűen szándékaiktól, a tevékenységüket, gondolkodásukat, habitusukat meghatározó szellemi és kulturális-társadalmi környezettől független, nem várt, a kvantummechanika matematikájából elkerülhetetlen következő objektív adottság. Mara Beller szavaival:

> Nem a metafizikai, „paradigmatikus" kérdések, hanem a matematikai eszközök hatékonysága volt az, amiben a kvantumfizikusok közössége egyetértett. S e ponton az ortodox irányzat és ellenzéke egységes volt; az egyetértés az eszközök erejében megakadályozta a tudományos tevékenység felbomlását, bármily nagyok is voltak a filozófiai ellentétek. A teoretikus eszközöknek (az egyenleteknek, a megoldás módszereinek, a közelítési eljárásoknak) megvolt a maguk hajtóereje, míg a filozófiai eszmék *a posteriori* kerültek elfogadásra (Beller 1999. 4).

De a kulturális-társadalmi környezettől és az alkotók akaratától független az az adottság is, hogy éppen ezek a modern fizikában szereplő matematikai-fizikai elméletek azok, amelyek minden korábbi elméletnél hatékonyabban és pontosabban teszik kiszámíthatóvá és előrejelezhetővé a fizikai jelenségek minden korábbinál szélesebb osztályát. Az, hogy vajon újabb elméletek meg fogják-e majd haladni őket, nyitott kérdés, de amiként a modern fizika sem relativizálta azt a tényt, hogy a newtoni elmélet minden megelőző elméletnél hatékonyabb és egzaktabb volt, úgy a mai fizika elméleteit esetleg majd leváltó új elméletek sem fogják relativizálni a modern fizikát.

Így az előbbiekben jelzett hermeneutikai feladathoz nem elegendő a fizikai világ ontológiájára vonatkozó, interpretációfüggő állítások értékmeghatározottságának tudatosítása. Szükség van az interpretációk tárgyát képező matematikai-fizikai elméletek legfontosabb mozzanatainak ismeretére is, és különösképpen annak belátására, hogy ezek az interpretálandó elméletek függetlenek saját interpretációiktól és alkotóik értékorientáltságától. Ha az interpretációs probléma jellegzetesen jelen van a modern fizikában, és ennek nyomán a modern fizikai elméletek ontológiai tartalma nem egyértelmű, akkor – éppen az elméletek interpretálandó, egzakt matematikai magjára gondolva – ez legalább annyira cáfolata a parttalan tudományos relativizmus posztmodern meséinek, mint amennyire ellentmond a minden vonatkozásban értékmentes tudomány mítoszát hirdető, egyoldalúan objektivista szcientizmusnak.

IRODALOM

Beller, M. 1999. *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. Chicago, University of Chicago Press.

Bohm, David 1952. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables I-II. *Physical Review* 85. 166–179, 180–193.

Bohm, David – Hiley, B. J. 1993. *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*. London, Routledge.

Cushing, J. 1994. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago,University of Chicago Press.

Ducheyne, Steffen 2011. Newton on action at a distance and the cause of gravity. *Studies in History and Philosophy of Science*, Part A, vol. 42(1). 154–159.

E. Szabó László 2004. A *nyitott* jövő *problémája*. Véletlen, kauzalitás és determinizmus a fizikában. Budapest, Typotex.

E. Szabó László – Fine, A. 2002. A local hidden variable theory for the GHZ experiment. *Physics Letters* A295. 229.

Einstein, Albert 2005. *Albert Einstein válogatott írásai*. Szerk. Székely László. Budapest, Typotex.

Einstein, Albert 2005a. A kutatás vallásossága. In *Einstein* 2005. 280–281.

Einstein, Albert 2005b. Vallás és tudomány. In *Einstein* 2005. 274–279.

Einstein, Albert 2005c. A kvantummechanikai indeterminizmusról. (Részlet Einsteinnek a P. A: Schilpp által szerkesztett *Albert Einstein als Philosopher und Naturforscher* című kötetben található „Bemerkungen zu den in diesem Bande vereingingten Arbeiten" című írásából.) In *Einstein* 2005. 213–225.

Everett Hugh 1957. 'Relative state' formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics* 29 /3. 454–462.

Folse, H. 1985. *The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity*. Amsterdam, North Holland.

Forman, Paul 1971. Weimar culture, causality, and quantum mechanics: Adaptation by German physicists and matematicians to a hostile environment. *Historical Studies in the Philosohy of Sciences* 3. kötet. 1–115.

Graham, L.R. 1972. *Science and Philosophy in the Soviet Union*. New York, Knopf.

Gribbin, J. 1986. *In Search of Big Bang: Quatumphysics and Cosmology*. New York, Bantam.

Hazalett, Richard – Turner, Dean 1979. *The Einstein Myth and the Ives Papers. A Counter-Revolution in Physics*. Pasadena (California), Hope.

Hawking, Stephen W. 1989. *Az idő rövid története*. Ford. Molnár István. Budapest, Maecenas.

Heelan, Patrick A. 1991. Hermeneutical philosophy and the history of science. In D. Dahlstrom (szerk.) *Nature and Scientific Method. William Wallace Festschrift*. Catholic Washington, University of America Press. 23–36.

Heelan, Patrick A. 1994. Hermeneutical philosophy and the history of science. In T. J. Stapleton (szerk.) *The Questions of Hermeneutics*. Kluwer. 363–375.

Heelan, Patrick A. 1997. Why a hermeneutical philosophy of natural sciences? *Man and World* 30/3. 271–298.

Heisenberg, Werner 1967. *Válogatott tanulmányok*. Ford. Morlin Zoltán, Kis István, Graff György és Simonffy Géza. Budapest, Gondolat.

Heisenberg, Werner 1967a. A kvantumelmélet története. In *Heisenberg* 1967. 73–87.

Heisenberg, Werner 1967b. A kvantummechnika koppenhágai értelmezése. In *Heisenberg* 1967. 88–102.

Heisenberg, Werner 1967c. A kvantummechnika koppenhágai értelmezésének kritikája és az ellenjavaslatok. In *Heisenberg* 1967. 139–152.

Heisenberg, Werner 1978. *A rész és az egész*. Ford. Falvay Mihály. Budapest, Gondolat.

Isenkrahe, Caspar 1879. *Das Räthsel von der Schwerkraft*. Braunschweig, F. Vieweg.

Ives, H. E. 1945. Derivation of the Lorentz transformations. *Philosophical Magazine* 7 (39). 392–403.

Jammer, M. 1966. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York, McGraw-Hill.

Jammer, M. 1974. *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective*. New York, Wiley & Sons.

Jánossy Lajos 1971. *Relativity Based on Physical Reality*. Budapest, Akadémiai.

Kolakowski, Leszek 1994. *Metafizikai horror*. Ford. Orosz István, Tarnóczi Gabriella. Budapest, Osiris–Századvég.

Lakatos Imre 1970. Falsification and the methodology of scientific research programmes. In Lakatos Imre – Alan Musgrave szerk. *Criticism and the Growth of the Knowledge*. Proceedings *of the International Colloquium in the Philosophy of Science, London, 1965*. 4. kötet. Cambridge, Cambridge University Press. 91–195.

Laue, Max von 1919. *Die Relativitätstheorie*. 1. kötet: *Die spezielle Relativitätstheorie*. 3. kiadás. Braunschweig, Vieweg.

Lorentz, Hendrik 1900. Considerations on gravitation. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences 2* . 559–574.

Newton, Isaac 1693/1977. Levél Bentley-hez 1683. február 25-én. In Newton: *A világ rendszeréről és egyéb írások*. (Válogatta, fordította és az utószót írta Fehér Márta.) Budapest, Magyar Helikon.

Newton, Isaac 1730. *Opticks or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. Negyedik, javított kiadás. London, William Innys. < URL: http://www.gutenberg.org/files/33504/33504-h/33504-h.htm >, utolsó hozzáférés: 2013. szeptember 26.

Newton Isaac 1679. *Letter to Boyle*. < URL: http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00275 >, utolsó hozzáférés: 2013. szeptember 26.

Riemann, Bernhard 1892. Fragmente über Naturphilosophie. In Riemann: *Gesammelten matematischen Werken*. Második kiadás, Leipzig. 526–538.

Simonyi Károly 1986. *A fizika kultúrtörténete*. (3. átdolgozott kiadás.) Budapest, Gondolat.

Szegedi Péter 1981. Determinisztikus törekvések a kvantummechanikában. De Broglie. In Horváth József (szerk.) *Filozófia és szaktudományok*. Budapest, Kossuth. 1981. 143–161.

Szegedi Péter 1987. Tudományfejlődés és kulturális légkör. *Világosság* 1987/10. 647–655.

Szegedi Péter 1987a. Utószó. In Dmitrij Ivanovics Blohincev: *A kvantummechanika elvi kérdései – Kvantummechanikai méréselmélet*. Ford. Barta Gábor, Abonyi István. Budapest, Gondolat. 274–299.

Szegedi Péter 1988. Determinisztikus törekvések a kvantummechanikában. Történeti-filozófiai elemzés. *Filozófiai Figyelő* 1988/1–2. 147–153.

Szegedi Péter 1989. Indeterminism in Quantum Mechanics. *Doxa – Philosophical Studies 15*. 183–198.

Székely László 2007. Albert Einstein és a XX. századi fizika mitológiája. *Világosság* 2007/11–12. 127–144.

Székely László 2012. Lajos Jánossy's reformulation of relativity theory. In Breidbach – Poggi (szerk.) *Jahrbuch für Europäische Wissenschaftskultur – Yearbook for European Culture of Science*. 6. kötet. Stuttgart, Franz Steiner Verlag. 253–270.

Tegmark, Max 1998. The interpretation of quantum mechanics: Many words or many worlds? *Fortschritte der Physik / Progress in Physics* 46. 855–862.

Thomson, Sir William 1872. On the ultramundane corpuscules of Le Sage. *Proceedings of the Royal Society of Edingburgh*. 7. kötet. 577–582. (Másodkiadás: *Philosophical Magazine. Fourth Series* XLV. 321–332.)

Thomson, Sir William 1867. On vortex atoms. *The London, Edingburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. London, 34. 15–24.