

Kvantumelmélet, holizmus, redukcionizmus¹

Ma már közhelynek számít, hogy a kvantumelméletnek jelentős filozófiai implikációi vannak. Talán kevésbé ismert, hogy az elmélet 60-70 éves története ebből a szempontból két elég jól elkülönülő korszakra bomlik. Némi egyszerűsítéssel — és mégis az igazsághoz lényegében hűen, — a két korszakot Bell előttiinek és Bell utániinak nevezhetjük. Ha ezt szó szerint vesszük, a Bell utáni korszak alig egy évet ölelne fel, hiszen Bell tavaly ősszel halt meg. A korszakolás határa azonban valahol a 60-s évek közepén van. Ekkor publikálta ugyanis Bell a róla elnevezett egyenlőtlenségeket.

A Bell-előtti szemléletre az volt a jellemző, hogy a jelenségeket *a kvantumelmélet matematikai és fogalmi keretein belül* interpretálta, és azt húzta alá, hogy ez az interpretáció ellentmondásmentes és teljes.

A Bell-utáni szemlélet azt mutatja ki, hogy *az interpretációtól függetlenül* a mikrofizika jelenségeire nem lehet egyidejűleg igaz az indukciós hipotézis, a lokalitás és a realizmus.

Mik ezek? Olyan — ismeretkategóriáknak is tekinthetető — hipotézisek, amelyek evidenciaként épültek bele a szemléletünkbe. A három közül egyedül *az indukciós hipotézis* közismert és a tapasztalati általánosítás alapjául szolgál. Egy sajtósárgos, tudatosan (is) vállalt *petitio principii*, hiszen sohasem zárható ki, hogy a következő, már éppen el nem végzett kísérlet megcáfolhatja az empirikusan megfogalmazott hipotézist.

A *lokalitás* azt a meggyőződésünket fejezi ki, hogy távoli történések nem képesek azonnali befolyást gyakorolni egymásra. Ha a relativitáselmélet érvényes — és minden bizonnyal az —, akkor a lokalitás elve is igaz, hiszen a relativitáselmélet szerint semmilyen hatás sem terjedhet a fénynél gyorsabban. De a lokalitáshoz ennél kevesebb is elég: az, hogy a hatások ne terjedhessenek *végtelen* sebességgel.

A *realizmusnak* az adott kontextusban nincs köze a realizmus-nominalizmus vitához. Első megfogalmazása Einstein Podolsky és Rosen (EPR) 1935-s cikkében található. A cikk címe: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* (Teljes-e a fizikai realitás kvantummechanikai leírása?). A szerzők először azt magyarázzák meg, hogy mit értenek „teljességen”. A következőt:

¹Az Elmoha-kör első összejövételén, 1991 májusában elhangzott előadás. A kört Érdi Péter hozta létre, az elnevezés az Elmélet - modell - hagyomány rövidítése.

Every element of physical reality must have a counterpart in the physical theory.

(A fizikai elméletben a fizikai realitás minden elemének meg kell feleltenni egy hozzá tartozó elemet.)

Ebben a definícióban „a fizikai realitás eleme” fogalom meghatározásra szorul:

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.

(Ha teljes bizonyossággal (azaz egységnyi valószínűséggel) meg tudjuk jósolni egy fizikai mennyiség értékét anélkül, hogy a rendszerbe beleavatkoznánk, akkor a fizikai realitásnak létezik olyan eleme, amely ennek a mennyiségnek megfelel.)

A cikk gondolatmenete ezután a következő: A kvantumelmélettel összhangban megmutatják, hogy van olyan eset, amikor egy rendszer egy meghatározott fizikai paraméteréről bizonyosan igaz kijelentést tudunk tenni anélkül, hogy a legcsekélyebb módon érintkezésbe lépnénk a rendszerrel, és — ennek ellenére — a kvantumelmélet fogalmi és matematikai apparátusa *nem tartalmaz* ennek a paraméternek megfelelő változót. Következésképpen az elmélet nem lehet teljes.

A továbbiakban az lesz a feladatunk, hogy EPR tézisést megvilágítsuk. Előbb azonban röviden vázoljuk a cikk fogadtatását.

A cikkre Bohr válaszolt. A válasz lényege az, hogy EPR definícióját fordított irányban kell érteni. Abból kell *kiindulni*, hogy a kvantumelmélet teljes, és csak ennek alapján dönthető el, mikor perturbálunk egy rendszert. A kvantumelméletben azért nincs az EPR által vizsgált paraméternek megfelelő változó, mert a realitásnak sincs ilyen eleme, és ez azért nem mond ellent az EPR által a realitás elemére adott definíciónak, mert a rendszert igenis perturbáljuk².

A fizikus közvéleményt évtizedekre meggyőzte Bohr érvelése, és a probléma kihullott a fizikus köztudatból³ Jellemző példa D.I.Blohincev *A kvan-*

²Az EPR cikk példájában a szerzők számára evidens volt a perturbáció hiánya. Alább ezt a pontot egy példa segítségével részletesebben is diszkutáljuk.

³Ez azonban inkább tulajdonítható Bohr tekintélyének kvantumelméleti ügyekben, mint magának a válaszcikknek. Mai kommentátorok egybehangzó véleménye szerint ugyanis Bohr cikke rendkívül homályos. A jelen előadásban a saját interpretációmát adom elő a Bohr álláspontjáról.

tummechanika elvi kérdései c. könyve, amely 1966-ban jelent meg oroszul. Blohincev kiváló fizikus volt, aki a fizika filozófiai problémáiról is szuverén módon gondolkozott. Könyvében a kvantumelmélet teljességének a problémájával is foglalkozik. A *Teljes elmélet-e a kvantummechanika* című 15. fejezet így kezdődik:

Ezt kérdezte egyszer Einstein és nemcsak feltette a kérdést, de fel is hozott egy példát, amelyből — neki úgy tűnt — negatív válasz következett erre a kérdésre. Ez a példa, mely Einstein-Podolsky-Rosen „paradoxon” néven ismeretes, a maga idejében magára vonta a kvantumelmélet elvi kérdéseivel foglalkozó összes fizikus figyelmét. Ma, amikor ezeket a sorokat írom, nehezebbnek tűnik magát a „paradoxont” megfogalmazni, mint magyarázatát adni.

1966-ban ez az indítás még éppen nem tekinthető anakronisztikusnak, hiszen Bell pont ebben az időben kezdte publikálni azokat a munkáit, amelyek az EPR cikk újrafelfedezésének is tekinthetők. Az már érthetlenebb, hogy a Blohincev-könyv 1987-s magyar kiadásában a terjedelmes utószó egyetlen mondattal sem utal arra, hogy az egyébként kitűnő könyvnek ez a fejezete tökéletesen elavult.

Térjünk most vissza az einsteini realizmus-fogalomhoz, és egy olyan példa segítségével próbáljuk a tartalmát megvilágítani, amely nem tartozik a fizika körébe, de praktikusán *izomorf* az EPR és a Bell által javasolt fizikai példákkal.

Képzeljük magunkat az 1989-s népszavazás idejébe, amelynek egyik kérdése az volt, hogy a köztársasági elnököt első ízben közvetlenül az állampolgárok vagy pedig a parlament válassza-e meg. A végeredmény praktikusán 50-50% volt és ez a speciális eredmény két egészen eltérő interpretációt enged meg:

1. Miután átgondolták a kérdést a választók egyik fele arra az elhatározásra jutott, hogy a nép, a másik fele pedig arra, hogy a parlament válassza meg a köztársaság elnökét.
2. A választópolgároknak semmi sem volt a fejében, amikor szavazni mentek, és a fülkében véletlenszerűen tettek keresztet az egyik vagy a másik lehetőség mellé.

A példa kedvéért tegyük fel, hogy ez az 50-50% még nem magának a választásnak, hanem a választást megelőző közvéleménykutatásnak az eredménye. A közvéleménykutatást lefolytató szociológus természetesen rögtön realizálja

magában, hogy az eredmény az előbb vázolt két egészen különböző módon interpretálható és azon töpreng, hogyan lehetne eldönteni, melyik interpretáció az igaz. Hamarosan rájön, hogy egy speciális *korrelációs kísérlet* segítségével — szerencsés esetben, — választ kaphat erre kérdésre.

A korrelációs kísérlet: A közvéleménykutatást újra elvégzi házaspárok reprezentatív mintájával⁴ A kérdést külön és egyidejűleg teszi fel a férjnek és a feleségnek, amikor azok szeparálva vannak egymástól. A felmérés a következő eredményt adja: Ha a válaszokat *egyénenként* értékeljük ki, újra megkapjuk az 50-50%-s megoszlást, de *egy házaspáron belül a férj és a feleség kivétel nélkül minden esetben ugyanarra a lehetőségre adja a szavazatát (teljes korreláció)*.

Ez természetesen rendkívül meglepő eredmény és a szociológus újabb és újabb mintákat próbál ki, de minden mintán ugyanilyen teljes korrelációt tapasztal. Egy idő után érzi, hogy nincs értelme tovább kérdezősködni és a következő empirikus hipotézist mondja ki: Az elnökválasztásról a házaspárok mindkét tagja azonos álláspontot képvisel. Itt lép be először gondolatkísérletünkbe az indukciós hipotézis.

A teljes korrelációra sokféle magyarázat képzelhető el. Az egyik iskola szerint társadalmunkban oly mértékben gyökeret vert a demokratikus gyakorlat, hogy a házaspárok addig nem nyilvánítanak véleményt, amíg konszenzusra nem jutnak. A másik felfogás a férj feudális jogait emeli ki, amely szerint az asszony kénytelen magáévá tenni a férj álláspontját. Szerencsére nem kell állást foglalnunk a vitában, mert az az egy dolog, ami bennünket érdekel, enélkül is bizonyos: a teljes korreláció ténye bizonyítja, hogy minden szavazó fejében *már a szavazás előtt* kódolva van „a realitás egy bizonyos eleme” által az az elhatározás, hogy mire fog szavazni és így egyértelműen az 1. interpretáció a helyes.

Most azt látjuk be, hogy a „realitás eleme” kifejezést — amit ma inkább *rejtett paraméternek* neveznek —, pontosan ugyanabban az értelemben használjuk, mint EPR. Valóban, ha a kísérletei elvégzése után szociológusunk összehalálkozik rég nem látott barátjával, és azt hallja tőle, hogy „nem”-el fog szavazni, akkor már ebben a pillanatban *határozottan tudja* — anélkül, hogy a távollévő asszonyt a legcsekélyebb mértékben perturbálná, — hogy a barátja felesége is „nem”-el fog szavazni. De akkor, EPR definíciója szerint, az asszony fejében léteznie kell a realitás egy elemének (rejtett paraméternek), amely ezt az elhatározást kódolja.

⁴Az EPR paradoxon illusztrálása házaspárokkal B. d’Espagnat-tól származik.

Példánk elsősorban a Bell-utáni tézis illusztrálására lett kitalálva. Ahhoz, hogy a Bell-előtti tézist is vizsgálhassuk a segítségével, még egy elemet kell bevezetnünk. Ennek az az oka, hogy a Bell előtti tézis a kvantumelméleten belüli interpretációra vonatkozik, és ezért példánkban szükség van valamire, ami a kvantumelméletet reprezentálja. Legyen ez egy hipotetikus „kvantum agyelmélet” (QAE), amely a tapasztalatnak megfelelően írja le az agy működését és mindenfajta lehetséges tudásnak valamilyen paramétert feleltet meg az agyban.

Az EPR cikk állítása a példánkra lefordítva a következő: A QAE-ben nincs olyan paraméter, amely megfelelné a közvéleménykutatásban tapasztalt teljes korrelációnak, ezért a QAE nem teljes, és bizonyára nem is végleges elmélet.

Bohr válasza: EPR-nek igaza van abban, hogy ez az elmélet a tapasztalt korrelációhoz nem rendel az agyban paramétert, de ez csak akkor lenne baj, ha a férj és a feleség valóban nem perturbálná egymást (valóban függetlenek lennének egymástól), amikor válaszolnak a kutató kérdésére. Mivel azonban a QAE a vizsgált jelenségkörben teljes, a paraméter hiánya azt mutatja, hogy a házaspárak a szeparáltság és az egyidejűség ellenére igenis kölcsönhatnak egymással és ezért nem is kell, hogy bármilyen előzetes tudás reprezentálva legyen az agyukban.

EPR álláspontját redukcionistaának, Bohrt holisztikusnak is nevezhetjük. *A házastársi redukcionizmusnak* — amelyre a gondolatkísérletünk vonatkozik —, hosszú története van. A katolikus teológia házasságfelfogása Szent Pál Efézusi levelén alapul (5,22-33), amely a házasságot Krisztus és az Egyház kapcsolatával állítja párhuzamba. Nyilvánvaló, hogy ez a kapcsolat holisztikus jellegű, de természetesen misztikus értelemben, amit nehéz lenne pontosabban körvonalazni. A házassági intézmény újabb kori felfogása azonban a házastársi redukcionizmusból indul ki, amely szerint a házaspár, mint egész, nem több a részeknél. A példánkra gondolva ezt az általános felfogást úgy specializálhatjuk, hogy a házaspárnak mint egésznek az állapota kimerítően jellemezhető a férj és a feleség állapotával. Ha azonban kitalált kísérletünk valódi lenne, akkor Bohr álláspontja szerint ez nem így volna: a kísérletben tapasztalt teljes korreláció a házaspár olyan viselkedése volna, amely a házaspárakban külön-külön nincs reprezentálva, és ezért a házaspárt kénytelenek lennénk *egyetlen egésznek* tekinteni akkor is, amikor ezer kilométerek választják el egymástól. A holizmus misztikus felfogásával szemben azonban Bohr holizmusa a jelenségek jól meghatározott körében érvényes, és tartalma a hagyományos logika és matematika segítségével pontosan meg-

fogalmazható. A holizmusnak ilyen felfogása esetleg *tertium datur* lehet a redukcionizmus-holizmus kontroverzióban.

Mai ismereteink szerint Bohr álláspontja bizonyult igaznak, Einsteiné termékenynek.

A Bell-utáni felfogás elemzéséhez nincs szükségünk a QAE bevonására és ez jelentős előrelépés. Konklúzióink EPR konklúziójának az élesítése lesz: a kvantumelméletre való hivatkozás nélkül, csupán az indukciós hipotézis és a lokalitás felhasználásával belátható, hogy *a mikrofizikai jelenségek körében általában* nem létezhetnek a realitásnak olyan elemei, amelyek megfelelnek EPR definíciójának. A kvantumelméletből tehát jogosan maradtak ki az EPR által hiányolt paraméterek és Bohrnak igaza lett: ha ragaszkodunk a realitás elemeihez, akkor egyetlen összefüggő egésznek kell tekintenünk olyan rendszereket, amelyek összes érzékszervünk tanúsága szerint egymástól tökéletesen elkülönített részekből állnak.

Ahhoz, hogy erre a következtetésre jussunk, közvéleménykutatásunkat ki kell bővíteni, és egy helyett három kérdést kell feltenni, amelyeket — az egyszerűség kedvéért — *A*, *B*, *C* kérdéseknek fogok nevezni⁵. A bővített korrelációs kísérletben megint házaspárok reprezentatív mintájával dolgozunk és minden házaspárnak csak egyetlen kérdésre kell válaszolnia.

A kísérlet két részből áll. Az első részben a férjtől és a feleségtől *ugyanazt* kérdezzük. A kérdés a három közül bármelyik lehet. Tegyük fel, hogy a válaszok korrelációja megint teljes mindhárom kérdés esetében. Az indukciós hipotézis alapján ebből arra a következtetésre jutunk, hogy a populáció házasságban élő tagjai 8 csoportba oszthatók aszerint, hogy a három kérdésről milyen vélemény — a realitásnak milyen eleme — van az agyukban kódolva. A lehetséges válaszokat \pm -al jelölve mindegyik csoportot három előjel kódol: a $+ - +$ csoport például azokból a házaspárokból áll, akik az *A* és a *C* kérdésre pozitív, a *B* kérdésre negatív választ adnának, ha megkérdeznék őket, s í.t. A teljes korreláció miatt a férj és a feleség mindig ugyanabba a csoportba tartozik.

Az egyes csoportokba eső házaspárok számát *N*-el jelöljük: $N(+ + +)$ pl. abba a csoportba tartozó házaspárok száma, akik mindhárom kérdésre pozitív választ tartogatnak az agyukban. A kísérlet első fázisának a végén a 8 darab *N* számról statisztikailag megbízható becslés áll a rendelkezésünkre.

A kísérlet második fázisa egy konzisztenciateszt. Annak ugyanis, hogy a

⁵Olyan kérdésekre kell gondolni, mint pl. az, hogy szereti-e Ön Brahmsot? A lényeges az, hogy a kérdések egyszerű alternatívák legyenek.

férjek és a feleségek bizonyos kérdésekre előre megmondott válaszokkal rendelkeznek, ellenőrizhető következményei vannak. Gondoljuk meg például, hány olyan házaspár van, akik az A és a B kérdésre pozitív választ adnának. Azok a házaspárok rendelkeznek ezzel a tulajdonsággal, akik a $+++$ vagy a $++-$ csoportba tartoznak. Jelöljük az ilyen házaspárok számát $n(++.)$ -al. Nyilvánvaló, hogy

$$n(++.) = N(+++) + N(++-). \quad (1)$$

Hasonló alapon írhatjuk fel $n(+.-)$ -t — ez azoknak a pároknak a száma, akik A -ra pozitív, C -re negatív választ adnának —, valamint $n(.+-)$ -t:

$$n(+.+) = N(+++) + N(+ - +) \quad (2)$$

$$n(.+-) = N(++-) + N(-+-). \quad (3)$$

A (2)-ből

$$N(+++) = n(+.+) - N(+ - +),$$

a (3)-ból pedig

$$N(++-) = n(.+-) - N(-+-).$$

Ezeket (1)-be írva az

$$n(++.) = n(+.+) + n(.+-) - [N(+ - +) + N(-+-)] \quad (4)$$

egyenlőségre jutunk. A $[]$ -ben lévő szám természetesen nem lehet negatív, ezért (4)-ből leolvasható az

$$n(++.) \leq n(+.+) + n(.+-) \quad (5)$$

egyenlőtlenség, amely a nevezetes Bell-egyenlőtlenségek közé tartozik.

Az (5) Bell-egyenlőtlenség újabb független kísérletben ellenőrizhető. Ehhez ki kell választani a házaspárok egy új reprezentatív mintáját. Azért van szükség új mintára, mert egy korábban elvégzett teszt befolyásolhatja a házaspárok viselkedését például úgy, hogy a már tesztelt házaspároknál a korreláció nem lesz teljes. A reális kísérletekben, ahol a kérdéseket fotonoknak vagy neutronoknak teszik fel, pontosan ez a helyzet, de technikailag nem is lehet kétszer tesztelni ugyanazt a részecskepárt. Ezután a férjet és a feleséget szeparálják, és mindegyiküknek ugyanabban az időpontban felteszik a három

kérdés egyikét, amelyet — mondjuk — kockadobással választanak ki. Ezúttal a férjnek és a feleségnek feltett kérdés különbözhet egymástól. A válaszok alapján statisztikailag megbízható becslés kapható a Bell-egyenlőtlenségben szereplő $n(++\cdot)$, $n(+++)$, $n(\cdot+-)$ számra és ellenőrizhető, hogy teljesül-e az egyenlőtlenség.

Ha a példánkat továbbra is úgy konstruáljuk, hogy a valóságosan is elvégzett kísérletekkel legyen izomorf⁶, akkor azzal kell folytatnunk, hogy *a tapasztalat szerint a Bell-egyenlőtlenség statisztikusan szignifikáns módon sérül*. A következtetés egyértelmű: mivel a Bell-egyenlőtlenség levezetéséhez semmi más nem szükséges azon kívül, hogy a házaspárok *legyenek osztályozhatók a „realitás azon elemei” alapján, amiket hordoznak*, ezért az egyenlőtlenség sérüléséből az következik, hogy ilyen osztályozás nem lehetséges. Egyszerűbben szólva: a teljes korreláció anélkül valósul meg a házasfelekben, hogy az ehhez feltételenül szükségesnek látszó információ tárolva lenne bennük. Ebben áll a paradoxon.

Hol követtük el a hibát, amikor arra a következtetésre jutottunk, hogy a tapasztalt korrelációnak információátárolással *kell* együttjárnia? Gondolatmenetünket végigvizsgálva három olyan feltevést találunk, amelyek tévesek lehetnek: a már említett indukciós hipotézist, lokalitást és realizmust.

Ha az indukciós hipotézis sérül, akkor legfeljebb csak azokról a házaspárokról tudhatjuk, hogy *volt* az agyukban előzetes vélemény a tesztkérdésekről, akik a kísérlet első fázisában tagjai voltak a reprezentatív mintának. A második fázisban résztvevő házaspárokról azonban ezt nem állíthatjuk, és ezért a Bell-egyenlőtlenségnek nem kell szükségképpen rájuk is vonatkoznia.

Ha a lokalitás a valóságban nem teljesül, akkor hiába szeparáljuk a férjet és a feleséget, a válaszaik közvetlenül befolyásolhatják egymást. Teljes korreláció így létrejöhet anélkül, hogy válaszaik az agyukban kódolva lennének és ezért a kódolt információ alapján nem lehet konzisztensen (értelmesen) klasszifikálni a házaspárokat. Ilyen körülmények között természetesen a Bell-egyenlőtlenség nem vezethető le.

Végül, ha az EPR-féle realizmus sérül, akkor *nem igaz az*, hogy minden olyan fizikai mennyiséghez rendelhető a realitásnak egy eleme, amelynek az értéke bizonyosan tudható anélkül, hogy azt a rendszert, amire a szóbanforgó fizikai mennyiség vonatkozik, a legcsekélyebb mértékben is perturbál-

⁶Itt jegyezzük meg, hogy a valóságos kísérletekben teljes korreláció helyett teljes antikorreláció lép fel, de ez a tisztán technikai különbség gondolatmenetünk lényegét egyáltalán nem érinti.

nánk. A teljes korrelációból ebben az esetben sem következik szükségszerűen, hogy a házaspárok értelmesen klasszifikálhatók azon a módon, amit a Bell-egyenlőtlenség levezetésénél használtunk.

A realizmus sérülése más szavakkal úgy is megfogalmazható, hogy egy összetett rendszer látszólag független alrendszerei *a valóságban* nincsenek szükségképpen szeparálva egymástól⁷, ahogy azt Bohr az EPR cikk megjelenése után rögtön állította. Bohrnak azonban még abból az explicit feltevésből kellett kiindulnia, hogy a kvantumelmélet korrekt. Bell után ez a premissza elhagyható: elég az indukciós hipotézist és a lokalitást feltételezni ahhoz, hogy közvetlenül a kísérletek eredményéből levonhassuk *a kvantumrendszerek szeparálhatatlanságának* is nevezhető paradoxális tulajdonságot.

A Bell-egyenlőtlenségek sérülését olyan kísérletekben igazolták, amelyekben elemi részecskék voltak a feltételezett információ (rejtett paraméterek) hordozói. Azok az eseménysorozatok azonban, amelyekből az egyenlőtlenségek sérülése leolvasható, a részecskék észlelésével kapcsolatos *makroszkópikus* eseményekből állnak. Ebben az értelemben a Bell-egyenlőtlenségek sérülésének a következményei egyáltalán nem korlátozódnak a mikrovilágra: az indukció, a lokalitás és a realizmus közül legalább az egyik makroszkópikus értelemben sérül. Ez már abból is sejthető, hogy a példánk, amin keresztül a problémakört bemutattuk, makroszkópikus és ugyanakkor izomorf a valódi fizikai korrelációs kísérletekkel. Az elemi részecskék bevonása a sérülés *mértéke* szempontjából fontos. Az elemi részecskék ugyanis csak kevés, a szó szoros értelmében csupán néhány tulajdonsággal rendelkeznek, és ez a sajátosságuk használható fel olyan speciális körülmények megteremtésére, amelyek között a Bell-egyenlőtlenségek sérülése megfigyelhető mértékű.

⁷A lokalitás és a realizmus sérülése ebben a megfogalmazásban eléggé összemosisodik, pedig lényegesen különböznek egymástól. A lokalitás sérülése távolhatást, a realizmus sérülése a múltbeli érintkezésnek tulajdonítható, de a részrendszerekben mégsem kódolt kölcsönhatást implikál.