# KVANTUMELMÉLET ÉS INTERPRETÁCIÓ

*Szabó Gábor**

## 1. Interpretáció és természettudomány

Ez a dolgozat a kvantumelmélet interpretációiról igyekszik rövid áttekintést nyújtani. Mielőtt munkához látnánk, érdemes egy pillanatra eltöprengeni a címben szereplő két szó viszonyán. Interpretációról olyan kifejezésformák esetében szokás beszélni, amelyek nyitott jelentésű vagy egyenesen jelentés nélküli narrációkkal dolgoznak. Az előbbiekre példa az irodalom vagy a művészetek. Ezekben a diszciplínákban az interpretációnak az a dolga, hogy a lebegő jelentést a kontextus vagy a befogadói helyzet függvényében rögzítse. Az utóbbira a formális nyelvek szolgálnak például; itt az interpretáció a jelentés egészét határozza meg.

A természettudományok esetében azonban más a helyzet. Ez utóbbiak sajátossága éppen az, hogy a bennük szereplő fogalmak jelentése szigorúan rögzített. Pontosabban a természettudományokban a fogalmak jelentését az elmélettel együtt tanuljuk meg. Amikor egy vegyész megtanulja, hogy a hangyasav képlete $CH_2O_2$, egyben azt is megtanulja, hogy mit jelent a *C*, *H* és *O* betű. Vagyis nincs olyan vegyész, aki történetesen mesterien lenne képes manipulálni a szerves kémia képleteit, de közben ne tudná, hogy az *O* betű az oxigént jelöli. Hasonlóan, a klasszikus fizikában is mindvégig világos, hogy az *F=ma* képlet szimbólumai az erőre, a tömegre és a gyorsulásra vonatkoznak.

A kvantumelméletben azonban más a helyzet. Itt az elmélet alkalmazása és interpretációja elválnak egymástól. A kvantumelmélet alkalmazásához ugyanis elegendő az a néhány instrukció, amely az elmélet formalizmusát összekapcsolja a tapasztalattal, ezzel lehetővé téve a kvantumelmélet sikeres alkalmazását a fizikai gyakorlatban. Ezek az instrukciók nagy vonalakban a következők (Marx 1957, Hughes 1989):

Az elmélet formalizmusa először is megadja a fizikai elméletek három alapfogalmának, a *fizikai mennyiségeknek*, az *állapotnak* valamint a *dinamikának* absztrakt matematikai reprezentációját. Az állapotot a kvantumelméletben *kvantumállapotnak* vagy *hullámfüggvénynek* nevezzük, jelölésére pedig hagyományosan a Ψ betűt használjuk. A kvantumállapot időbeli fejlődését a *Schrödinger-egyenlet* írja le. A kvantumelmélet valószínűségi elmélet, vagyis az elmélet a fizikai mennyiségek

* HUN-REN, BTK, Filozófiai Intézet; email: Szabo.Gabor@abtk.hu.
Szeretnék köszönetet mondani Egri Győzőnek, Gömöri Mártonnak és Gyenis Balázsnak a kézirat korábbi változatainak alapos kritikájáért.

méréskor kapott értékeinek csak a valószínűségét adja meg (Born-szabály). A fizikai mennyiségek csak bizonyos kitüntetett állapotokban, a *sajátállapotokban* rendelkeznek határozott értékkel, egyébként meghatározatlanok. Ez a sajátállapotban felvett érték a *sajátérték* (sajátállapot-sajátérték-szabály). Mérés során a rendszer pillanatszerű ugrással és meghatározott valószínűséggel valamelyik sajátállapotába ugrik, a mért mennyiség felveszi a megfelelő sajátértékét, a mérési kimenet pedig ezt az értéket mutatja. A sajátállapotába ugrást *kollapszusnak* nevezzük. A rendszer dinamikája a kollapszus során eltér a Schrödinger-egyenlettől.

Nevezzük ezt a pár instrukciót a kvantumelmélet *tankönyvi interpretációjának*. A tankönyvi interpretáció azonban a szó szigorú értelmében nem interpretáció, mivel a formalizmusban szereplő szimbólumok pontos jelentését illetve viszonyukat tisztázatlanul hagyja. Hogyan értsük ugyanis azt, hogy fizikai mennyiségek értéke meghatározatlan a sajátállapoton kívül? Mi a viszonya a kollapszusnak a Schrödinger-dinamikához? És ami a legfontosabb: mit jelent a rendszer kvantumállapota?

Mivel ez utóbbi kérdésnek jelentős szerepe lesz az interpretációk csoportosításban, így célszerű a kvantumállapot jelentésével külön is foglalkozni. Az állapot szerepe a klasszikus fizikában hagyományosan az, hogy egy adott időpillanatban rögzíti a rendszer fizikai mennyiségeinek értékét – megmondja például, hogy hol van a vizsgált test és milyen sebességgel, illetve merre halad. A kvantumelmélet valószínűségi elmélet, ezért a kvantumállapot a fizikai mennyiségek értékeinek csak a valószínűségét adhatja meg, pontos értéküket nem. De a tankönyvi interpretáció szerint még ez sem igaz: határozott értékkel a fizikai mennyiségek csak a sajátállapotban rendelkeznek, ahová a mérés juttatja a rendszert. Mit is jelent tehát a kvantumállapot?

Amikor a kvantumállapot jelentésére kérdezünk rá, akkor valójában azt kérdezzük, hogy mire is vonatkozik kvantumállapot, más szóval, mi a jelölete és mi a funkciója. A válasz első látásra természetesnek tűnik: a kvantumállapot éppen úgy az egyedi fizikai rendszerre, például egy individuális elektronra vonatkozik, ahogy a klasszikus fizika állapotfogalma is egy egyedi makroszkopikus testre, mondjuk, egy labdára. Mi több, az állapot kimerítően jellemzi az egyedi fizikai rendszert. De aztán elbizonytalanodhatunk látván, hogy a kvantumelmélet valószínűségi elmélet, ahol a valószínűségi kijelentések csak statikusan igazolhatók. Így felvetődik a gondolat: talán a kvantumállapot nem is a szinguláris elektronnak, hanem az elektronok statisztikus sokaságának kollektív tulajdonsága. Tovább gondolkodva azután az is eszünkbe juthat, hogy ezt a statisztikus sokaságot mindig valamilyen makroszkopikus eljárással állítjuk elő. Lehetséges, hogy a kvantumállapot ezekre a preparációkra vonatkozik?

A fenti kérdések rögtön az interpretációk sűrűjébe vezetnek, és egyben utat nyitnak a különféle interpretációs irányokba (E. Szabó 2002). Mielőtt azonban az interpretációk szisztematikus osztályozásába kezdenénk, érdemes lesz megismerkednünk a kvantumelmélet koppenhágai interpretációjával.

## 2. A koppenhágai interpretáció

A *koppenhágai interpretáció* vagy más néven, *ortodox interpretáció* a kvantumelmélet történetileg első, és bizonyos értelemben máig uralkodó interpretációja. Az interpretáció a kvantumelmélet alapító atyáitól, Niels Bohrtól, Werner Heisenbergtől és Max Borntól származik, de kidolgozásában jelentős szerep jutott Wolfgang Paulinak, Paul Diracnak valamint Neumann Jánosnak és Wigner Jenőnek is. A koppenhágai értelmezés a kvantumelmélet alapjainak tisztázására szervezett 1927-es Solvay-konferencia óta az elmélet egyfajta "hivatalos" értelmezésének számít. Ebben nem kis része van annak a céltudatos indoktrinációnak, amellyel Bohr és tanítványai az interpretációt sokszor ellentmondást nem tűrő módon terjesztették a fizikusok körében. Az interpretáció elnevezése Heisenbergtől származik és Koppenhágára utal, arra a városra, ahol Bohr intézete működött.

A koppenhágai interpretáció nem egy egységes értelmezés, inkább heurisztikák laza csoportja. Úgy is mondhatnánk, hogy a koppenhágai interpretáció a tankönyvi interpretáció instrukcióinak egyfajta értelmezése különféle interpretációs szabályok révén. Ez a töredezettség természetesen érthető egy születőfélben lévő elmélet esetében. Az interpretációt az alábbi fő fogalmak jellemzik (Howard, 2004, 2022):

*Komplementaritás.* A koppenhágai interpretáció központi fogalma a komplementaritás, amelyet 1927-ben Bohr vezetett be, ugyanabban az évben, amelyben Heisenberg a határozatlansági relációt. A komplementaritás alapja az "elkülönült megfigyelő ideáljának" feladása, vagyis a mérőeszközök és a megfigyelt objektum elválaszthatatlansága, amely később a kvantumösszefonódás fogalmában nyert matematikai kifejezést. Bohr szerint ugyanis a megfigyelt objektum és a mérőműszer a mérési kölcsönhatás során nem rendelkezik független valósággal, így egy mikrorendszer leírásakor mindig figyelembe kell vennünk a kísérleti kontextust is. A kísérleti kontextusok azonban sokszor kizárják egymást. Ez a helyzet például a mikroobjektumok hullám- illetve részecsketermészetét vizsgáló kísérleti elrendezések esetében. Egy rendszer kimerítő jellemzéséhez azonban az összes ilyen egymást kizáró kontextusra szükség van. A komplementaritás elve ezt a dilemmát fogalmazza meg. A komplementaritást a kvantumelmélet formalizmusa a komplementer szituációkban mért fizikai mennyiségek nem-felcserélhető (nem-kommutatív) reprezentációjával juttatja kifejezésre.

*Klasszicitás.* Mivel a mikrorendszer és a mérőeszköz a mérés során összekapcsolódik, ezért a mikrorendszert mindig csak a mérőeszköz makroszkopikus vonatkozásában tapasztaljuk. A mérőeszköz leírásához azonban klasszikus fogalmakat, hétköznapi nyelvet, valamint a klasszikus fizika eszköztárát kell használnunk. A klasszikus fizika tehát egyfajta tapasztalati előfeltétele a mikrovilágról való értelmes beszédnek.

*Teljesség.* A kvantumelmélet a mikrorendszerek teljeskörű jellemzését adja, nem csupán statisztikus leírást ad róluk.

*Objektív meghatározatlanság.* A mikroobjektumok tulajdonságainak meghatározatlansága a természet objektív ténye, nem pusztán tudatlanságunk tükröződése.

*A mérés zavaró hatása.* A meghatározatlanság és a véletlenszerűség forrása a mérés, amely során a mérőműszer megzavarja a mikrorendszer állapotát.

*Megfigyelés okozta kollapszus.* A megfigyelés vagy mérés során egy fizikai rendszer állapota ugrásszerűen megváltozik. A kollapszus során a rendszer nem követi a Schrödinger-egyenlet diktálta időfejlődést. A kollapszus mindig csak mérés során következik be, mintegy a megfigyelés hatására. Heisenberg arisztetoteliánus kifejezésével: a megfigyelés során a potencialitás aktualizálódik.

*Szubjektivitás.* A kollapszus és a megfigyelés kapcsolatának magyarázatára a koppenhágai tábor egy része a tudat fogalmát hívta segítségül. Wigner úgy gondolta, hogy a kollapszus a mérési eredmény regisztrálásakor a megfigyelő szubjektív tudatában következik be. Neumann is alkalmazta a tudatosságot, amikor a pszicho-fizikai párhuzamosság, azaz a szubjektív tapasztalatok és az anyagi rendszerek fizikai viselkedése közötti párhuzamosság mellett érvelt. Ő vezette be a *Heisenberg-vágás* fogalmát is, amely azt jelenti, hogy a kollapszust tetszőleges ponton ellentmondásmentesen elhelyezhetjük azon a láncon, amely a mérési folyamatban a mikrorendszertől a mérőműszeren és az érzékszerveken keresztül a tudatig nyúlik. Heisenberg számára a szubjektív elem abban állt, hogy a mérés esetén a fizikai helyzet matematikai reprezentációját egyszerűen megváltoztatjuk: a Schrödinger-dinamika helyett a kollapszus formalizmusát használjuk. Bohr azonban kifejezetten elutasította azt a gondolatot, hogy a szubjektív megfigyelő bármilyen szerepet játszana a kvantumelméletben.

*Korrespondencia.* A megfelelő határértékben a kvantumelmélet visszaadja a klasszikus fizika törvényeit és reprodukálja a klasszikus előrejelzéseket.

A koppenhágai interpretáció történeti érdeme legfőképpen abban állt, hogy a fenti heurisztikák leleményes alkalmazásával a fizikusok egyre szélesebb körben voltak képesek használni az elméletet. A heurisztikák mintegy időt adtak ahhoz, hogy az elmélet formalizmusa kellőképpen ki legyen dolgozva, alkalmazási területe pedig bővüljön. Ezek az esetileg használt szabályok azonban el is fedték azokat az tisztázatlanságokat vagy olykor egyenesen ellentmondásokat, amelyeket a formalizmus magába rejtett. Tisztázásra várt többek között a határozatlansági reláció pontos jelentése, a kollapszus és a Schrödinger-egyenlet viszonya, az összefonódás fogalma, vagy éppenséggel az a kérdés, hogy akkor most zavarja-e vagy létrehozza a mérés a rendszer tulajdonságait. Ezek a bizonytalanságok javarészt a koppenhágai interpretáció eldöntetlen filozófiai álláspontjának a következményei. Az interpretáció ugyanis egyfajta középutas felfogást képviselt a pozitivizmus és a kontextuális realizmus között (Muynck, 2010). Az interpretáció bizonytalansága abban a

kérdésben érhető leginkább tetten, hogy vajon a fizikai mennyiségek rendelkeznek-e a kísérleti szituációtól függetlenül határozott értékkel. A sajátállapot-sajátérték-szabály ugyanis, amely a fizikai mennyiségeknek értéket a mérés utáni sajátállapotban tulajdonít, inkább a pozitivizmusra emlékeztet, ugyanakkor az az elgondolás, hogy a mérés megzavarja a rendszer állapotát, feltételezi az értékek előzetes meglétét. Az interpretáció számára további kihívást jelent, amint majd látni fogjuk, a nem-lokalitás illetve a mérés problémája. A kvantumelmélet fogalmi alapjára vonatkozó tisztázó munka az elmélet születésével egy időben meg is kezdődött, sokszor éppen a koppenhágai interpretáció ellenében. Az ellentábor olyan jeles képviselői művelték, mint Albert Einstein, Erwin Schrödinger vagy később John Stewart Bell.

A koppenhágai interpretáció ennek ellenére ma is igen népszerű. Egy 2016-os kutatás szerint, amelyben nyolc egyetem mintegy 1200 fizikusát kérdezték meg kedvenc interpretációjukról, a megkérdezettek 39 százaléka a koppenhágai interpretáció mellett voksolt. Ezt követte az agnosztikusok csoportja 36 százalékkal, amelyet aztán az információ-elméleti interpretáció követett a harmadik helyen jócskán leszakadva 6 százalékkal (Sivasundaram, Nielsen 2016).

### 3. Kimenet, ontikus állapot, episztemikus állapot

De térjünk vissza az interpretáció fogalmához. Mit is értünk interpretáció alatt? Egy elmélet interpretációja azt mondja meg, hogy milyen a világ, ha az elmélet igaz. Milyen tehát a világ, ha a kvantumelmélet igaz? Bármilyen megdöbbentő, erre a kérdésre homlokegyenest ellentétes válaszok adhatók. A sokféle interpretáció osztályozásához érdemes valamilyen sorvezetőt használni. Ebben a tanulmányban a sorvezetőnk a kvantumelmélet mérési problémája lesz: a kvantumelmélet interpretációit a mérési problémára adott válasszuk alapján fogjuk csoportosítani. A mérési probléma ismertetése előtt azonban érdemes lesz néhány fogalmi megkülönböztetést bevezetni.

A kvantumelmélet szóhasználatában gyakran nem válik el világosan egymástól a *fizikai mennyiség* és a fizikai mennyiség *mérésének* fogalma. Mindkettő jelölésére ugyanis az *obszervábilis* kifejezés használatos. A két fogalom elválasztása azonban kulcsfontosságú: a fizikai mennyiség az adott rendszer jellemzője, a mérés pedig egy, a rendszeren végrehajtott operáció. A fizikai mennyiségnek különböző *értékei* lehetnek, amelyeket a mérés *kimenetei* tárnak fel, már amennyiben a mérés hű. A fizikai mennyiségek értékei vagy pontosan meghatározzák a mérési kimeneteket, vagy csak azok valószínűségét, azaz hosszútávú relatív gyakoriságát. Az első esetben ezeket az értékeket *tulajdonságoknak*, a második esetben *propensity*-knek fogjuk hívni. A két fogalomra együttesen *ontikus állapotként* fogunk hivatkozni. Az ontikus állapotok tehát a mérési kimenetek determinisztikus vagy indeterminisztikus okai. Az ontikus állapotok ennélfogva a fizikai rendszer sajátosságai, míg a kimenetek a méréshez kapcsolódnak.

A tulajdonságokat és a *propensity*-ket az alábbi két példával illusztrálhatjuk. Ha egy dobozból kihúzunk egy golyót, és megállapítjuk, hogy fehér a színe, akkor a fehér itt a színmérés *kimenete* lesz, amit a golyónak az az intrinzikus *tulajdonsága* magyaráz kauzálisan, hogy az tényleg fehér. Hasonlóan, ha egy kockával dobálni kezdünk, akkor a dobások értékei lesznek a mérési *kimenetek*. A kockának azonban nincs olyan tulajdonsága, amely determinisztikus magyarázná az egyes kimeneteket. Ugyanakkor a kocka súlypontjának helyzete – tehát az, hogy a kocka fair-e vagy cinkelt – magyarázni fogja a kimenetek valószínűségét, azaz a dobások hosszútávú relatív gyakoriságát. A kocka súlypontjának helyzete tehát egy *propensity*, a dobási kimenetek indeterminisztikus oka.

Egy másik, az előzőtől különböző, de azzal mégis összefüggő terminológiai megkülönböztetés az *ontikus-episztemikus állapot* fogalompár. Ha egy fele-fele arányban fehér és fekete golyókat tartalmazó dobozból véletlenszerűen kihúzunk egy golyót, amelyik történetesen fekete, akkor mind a mérés kimenetele, mind a golyó ontikus állapota meghatározott lesz, tudniillik fekete. Ha azonban eltakarják előlünk a golyót, akkor a színéről csak annyit mondhatunk, hogy a golyó 50 százalék valószínűséggel fekete, 50 százalék valószínűséggel pedig fehér. Ez a golyó *episztemikus állapota*. Az episztemikus állapot nem a golyó valóságos tulajdonságait tükrözi, hanem a golyóról alkotott részleges tudásunkat fejezi ki. Amint meglátjuk a golyót, episztemikus állapotunk megváltozik: a golyó immár 100 százalék valószínűséggel fekete lesz. Mindeközben a golyó *ontikus állapota,* vagyis feketeség mindvégig ugyanaz marad.

A kimenet illetve ontikus állapot valamint az ontikus illetve episztemikus állapot fogalompárok megkülönböztetésével rátérhetünk a kvantumelmélet mérési problémájára.

## 4. A mérési probléma

A mérési probléma többféleképpen megfogalmazható (Muller 2023). Mi itt egy olyan megfogalmazást választunk, amely a problémát három logikailag összeegyeztethetetlen állításra vezeti vissza (Maudlin 2019). A három inkompatibilis állítás a következő:

1. A kvantumállapot az individuális fizikai rendszer ontikus állapota, amely teljeskörűen jellemzi a rendszert.
2. A Schrödinger-egyenlet univerzális, azaz érvényessége kiterjed a mérési folyamatra is.
3. A kvantumelmélet számot ad a mérési kimenetekről.

A három állítás magyarázatot igényel. Nézzük őket sorban.

Az 1. állítás három részállítást foglal magában.

a) A kvantumállapot az egyedi fizikai rendszer leírását adja.

b) A kvantumállapot tárgyáról ontikus (és nem episztemikus) leírást ad.
c) A kvantumállapot tárgyáról teljeskörű leírást ad.

Az 1. állítás tehát az a), b) és c) részállítások konjunkciója. Az a) részállítás azt mondja, hogy a kvantumállapot az individuális rendszerre, nem pedig rendszerek statisztikus sokaságára, vagy – amint majd látjuk – valami másra vonatkozik. A b) részállítás azt rögzíti, hogy kvantumállapot a fizikai rendszer ontikus állapotát adja meg, nem pedig egy ágensnek a rendszerről alkotott tudását jellemzi. Egy mikrorendszer ontikus állapota természetesen csak *propensity* lehet, nem pedig tulajdonság, mivel a kvantumállapot nem rögzíti egyértelműen a mérési kimeneteket, csak a kimenetek valószínűségi eloszlását. A kvantumállapot pontosan abban a kauzális értelemben határozza meg az individuális rendszeren végrehajtott mérések kimeneteleinek eloszlását, ahogyan a kocka súlypontjának elhelyezkedése meghatározza a kockadobások eloszlását. Végül a c) részállítás szerint a kvantumállapot az egyedi rendszer állapotának legfinomabb jellemzése. Egy individuális rendszernek nincs tehát olyan további tulajdonsága, amit a kvantumállapot ne foglalna magában.

A 2. állítás szerint a Schrödinger-egyenlet univerzálisan érvényes, vagyis minden fizikai kölcsönhatásban, többek között a mérési folyamatban is leírja az egyedi rendszer állapotának változását. Itt természetesen feltételezzük, hogy a mérőműszer mint makroszkopikus objektum is leírható a kvantumelmélet segítségével.

A 3. állítás azt jelenti, hogy a mérési folyamat során létrejövő kvantumállapot egyértelműen meghatározza a mérés során kapott kimenetet.

Vegyük észre, hogy a három állítás a kvantumállapot háromfajta aspektusára vonatkozik: az első az ontológiai státusára, a második a dinamikájára, a harmadik pedig a tapasztalattal való kapcsolatára a mérés során.

A kvantumelméleti mérési probléma tehát a fenti három állítás közötti inkompatibilitásban áll. Ez az inkompatibilitás sokféleképpen megmutatható. Mi itt úgy járunk el, hogy az első két állítást elfogadása mellett igazoljuk, hogy a 3. állítás hamis lesz.

Az ellentmondás megmutatásához egy új fogalmat, a *szuperpozíció* fogalmát kell bevezetnünk. A szuperpozíció a kvantumelmélet egyik fontos sajátossága, amely megkülönbözteti azt a klasszikus fizikától. Azt jelenti, hogy amennyiben $\Psi_1$ és $\Psi_2$ egy fizikai rendszer lehetséges állapotai, úgy azok összege, vagyis $\Psi_1 + \Psi_2$ is a rendszer lehetséges állapota. Ha például egy radioaktív atomnak egy lehetséges állapota az, hogy az atom elbomlott, és az is lehetséges, hogy az atom nem bomlott el, akkor a két állapot szuperpozíciója szintén egy lehetséges állapota az individuális atomnak. Az 1. állítás szerint a kvantumállapotot ontikusan és nem episztemikusan értelmezzük. Ennélfogva a szuperpozíció nem pusztán ignoranciát fejez ki, vagyis nem azt, hogy nem tudjuk, hogy az atom elbomlott-e vagy sem, hanem az atomnak egy valóságos, tovább elemezhetetlen ontikus állapotát, egy *propensity*-t.

Tegyük fel, hogy egy ilyen $\Psi_1 + \Psi_2$ részecskén mérést végzünk. A 2. állítás fényében a kvantumelméletet univerzálisan, tehát a mérőműszerre is érvényesnek tekintjük. Jelöljük a mérőműszernek a mérés előtti kvantumállapotát a $\Phi_0$ szimbólummal. A mérés akkor sikeres, ha a mérőműszer állapota a mérés után tükrözi a részecske kvantumállapotát. Ez azt jelenti, hogy a részecske és a mérőműszer közös $\Psi_1 \Phi_0$ kezdeti állapota a közös $\Psi_1 \Phi_1$ végállapotba fejlődik, a közös $\Psi_2 \Phi_0$ kezdeti állapot pedig a közös $\Psi_2 \Phi_2$ végállapotba. A mérőműszer végállapotának 1 illetve 2 alsó indexe éppen ezt a tükrözési követelményt fejezi ki. Itt egyben azt is feltételeztük, hogy a mérés nem változtatja meg a részecske állapotát; a mérőműszer egyszerűen csak leolvassa azt.

Ismét csak a kvantumelmélet univerzalitásából adódóan a mérési folyamat leírására ugyanazt a Schrödinger-egyenletet kell használnunk, amit minden egyéb kvantummechanikai folyamat leírására is. A Schrödinger-egyenlet azt a szerepet tölti be a kvantumelméletben, amit Newton mozgásegyenlete a klasszikus mechanikában: az állapot időbeli fejlődését határozza meg. A Schrödinger-egyenlet linearitásából adódóan azonban egy szuperponált $\Psi_1 + \Psi_2$ kezdőállapotú részecske a mérés során egy, a mérőműszerrel összefont $\Psi_1 \Phi_1 + \Psi_2 \Phi_2$ állapotba fejlődik. Amint látható, az összefonódott állapot is egy szuperponált állapot, csak a szuperpozíció itt már nem csupán a részecskére korlátozódik, hanem kiterjed a makroszkopikus mérőműszerre is.

A makroszkopikusra nőtt szuperpozíció azonban nem írja le azt a tényt, hogy a mérőműszer mutatója mindig egy határozott értéket mutat, vagyis, hogy a mérésnek kimenete van. Ez pedig éppen a 3. állítás. A fenti három állítás tehát inkompatibilis.

Az ellentmondás első megfogalmazása Schrödingertől származik és *Schrödinger macskája* néven vált ismertté. Tegyük fel, hogy egy szobába összezárunk egy macskát és egy berendezést, amelytől a macska élete függ. A berendezést egy radioaktív atom működteti, amely, ha elbomlik, mozgásba hoz egy kalapácsot, amely azután összetör egy ciánkapszulát, kioltva ezzel a macska életét. Ha az atom nem bomlik el, a macska életben marad. A radioaktív atom a felezési idő végén az "elbomlott" + "nem bomlott el" szuperponált állapotba kerül a kvantumelmélet szerint. A példázatban a mérőműszer szerepét a berendezés és a macska játssza, a mérés két kimenetele pedig az élő illetve halott macska. A fenti gondolatmenet alapján a macska állapota a "mérés" során összefonódik a radioaktív atom állapotával, vagyis a teljes rendszer az ("atom elbomlott", "macska halott") + ("atom nem bomlott el", "macska él") szuperponált állapotba kerül. Mivel a kvantumállapotot individuálisan értelmeztük, ezért a szuperpozíció a konkrét macska állapotára vonatkozik. Ilyen szuperponált macskával azonban nem találkozunk. A szuperpozíció tehát nem írja le a macska végső állapotát.

**5. Az interpretációk osztályozása**

Amint említettük, a kvantumelmélet interpretációit a mérési problémára adott válaszuk alapján osztályozhatjuk. Mivel a mérési probléma egy ellentmondást állít fel három állítás között, így az interpretációkat az elfogadott és feladott állítások alapján foglalhatjuk csoportokba.

Mielőtt a szisztematikus osztályozásba kezdenénk, érdemes egy pillantást vetni a tankönyvi illetve koppenhágai interpretációra. Az ellentmondás elkerülése érdekében a koppenhágai interpretáció egyes képviselői az 1. állítást adják fel és a kvantumállapot ontikus jellegét vonják kétségbe. Erre a manőverre az episztemikus interpretációk során még visszatérünk. Ha azonban a kvantumállapotot ontikusan értelmezzük, és a 3. állítás szerint azt is megköveteljük, hogy az elmélet adjon számot a mindenkori mérés határozott kimenetéről, akkor a tankönyv interpretáció alapján ez csak úgy lehetséges, ha a mérés során a rendszer sajátállapotba kerül – hiszen csak ebben az állapotban van a fizikai mennyiségeknek értéke, amelyet a mérés feltár. Éppen erre vezették be ezek az interpretációk kollapszust, amely a rendszert a mérés előtti szuperponált állapotból eljuttatja a sajátállapotba. Így a koppenhágai és a tankönyvi interpretációnak a 2. állítást kellene feladnia a mérési probléma elkerülése érdekében. A Schrödinger-dinamika univerzalitásának feladása azonban túl nagy ár koppenhágai interpretáció számára. Ebből fakad az interpretáció bizonytalankodása a kollapszus természetével kapcsolatban. Ha elfogadja azt valós fizikai törvénynek, két inkompatibilis dinamikája lesz: a Schrödinger-dinamika és a kollapszus. Ha viszont nem fogadja el, nem tudja megoldani a mérési problémát.

Most azonban forduljunk a többi interpretáció felé. A fenti inkompatibilis állítások közül az 1., a 2. illetve a 3. állítást interpretációk következő családjai utasítják el:

1. *Nem Ψ-teljes interpretációk:* azok az interpretációk, amelyek az 1. állítást utasítják el.
2. *Kollapszuselméletek*: azok az elméletek, amelyek a 2. állítást utasítják el.
3. *Sok-világ-interpretáció:* az az interpretáció, amelyik a 3. állítást utasítja el.

Itt megjegyezzük, hogy a *nem Ψ-teljes interpretációk* az 1. állítást elfogadó *Ψ-teljes interpretációknak* komplementer halmaza. Hasonlóan, a *kollapszuselméletek* komplementer halmazát *nem-kollapszuselméletek (no-collapse theories)* nevezik. Megjegyezzük továbbá, hogy a 2. csoportba tartozó interpretációkat azért nevezzük "elméletnek", mivel ezek a kvantumelmélettől eltérő mérési jóslatokat adnak, így nem tekinthetők a kvantumelmélet interpretációjának, hanem alternatív elméleteknek.

Láttuk, hogy az 1. állítás három részállítás konjunkciója. Amint majd látni fogjuk, az a) részállítás feladásával vagy a *statisztikus interpretációhoz* vagy az *operacionalista interpretációhoz* jutunk, a b) részállítás feladásával az *episztemikus interpretációkhoz*, a c) feladásával pedig a *rejtett változós elméletekhez*. Ez utóbbiaknál a hagyományt követve ugyancsak az "elmélet" szót használjuk az "interpretáció" helyett, jóllehet ezek az elméletek nem adnak a kvantumelmélettől eltérő jóslatokat. Az operacionalista, statisztikus, episztemikus interpretációk és rejtett változós elméletek tehát mind az 1.

állítás valamelyik részállítását utasítják el. A 2. állítás feladása vezet majd az *objektív kollapszuselméletekhez*, a 3. állítás feladása pedig a *sok-világ-interpretációhoz*.

## 6. Statisztikus interpretáció

Kezdjük tehát az 1. állítás, azon belül is az a) részállítás feladásával. Ha a kvantumállapot nem egyedi rendszerekre vonatkozik, vonatkozhat egyedi rendszerek sokaságára, vagy, amint majd látjuk, vonatkozhat valami másra is, mint maga a fizikai rendszer. Az első esetben statisztikus interpretációról, a második esetben operacionalista interpretációról beszélünk.

A *statisztikus interpretációt* a kvantumelmélet statisztikus jellege indokolja. Ha egy rögzített kvantumállapotú mikrorendszeren méréseket végzünk, akkor a mérés – a kvantumelmélet valószínűségi jellegének megfelelően – hol ezt, hol azt az kimenetet adja. Kézenfekvőnek tűnik tehát a feltenni, hogy a kvantumállapot nem az egyedi rendszerekre, hanem egyedi rendszerek sokaságára, tehát mondjuk ezer elektronra vonatkozik. A kvantumelméletnek ezt az interpretációját *statisztikus, ensemble* vagy *tulajdonságinterpretációnak* nevezzük (Home, Whitekar 1992).

A statisztikus interpretáció szerint tehát, ha egy sokaságon méréseket végezve különböző kimeneteket kapunk, ezt egyszerűen azzal magyarázhatjuk, hogy a sokaság maga különböző tulajdonságú részecskék keveréke, és a kvantumállapot a sokaságban a tulajdonságoknak épp erre a kevert jellegére mutat rá. A statisztikus interpretáció szerint tehát a mérési kimenetek eloszlása a sokaságban a tulajdonságoknak a mérés előtti, preegzisztens eloszlásával magyarázható. A helyzet ahhoz hasonló, ahogy azt a tényt is, hogy mondjuk egy dobozból kihúzott golyók fele-fele arányban fehérek és feketék, azzal magyarázzuk, hogy maguk a golyók a dobozban fele-fele arányban fehérek és feketék. A statisztikus interpretációt éppen ezért nevezik tulajdonságinterpretációnak is: a kimenetek statisztikus elosztásáért az egyes golyók *tulajdonságai* felelősek, vagyis ezek a tulajdonságok határozzák meg determinisztikusan a kimeneteket, amely összessége az eloszlást adja. A statisztikus interpretáció tehát – a klasszikus statisztikus fizika szelleméhez igazodva – a kvantumelmélet valószínűségi jellegét a tulajdonságok statisztikus eloszlására vezeti vissza.

Végül meg kell jegyeznünk, hogy az irodalomban a statisztikus interpretáció kifejezés használata nem egységes (Home, Whitekar 1992). Az elnevezés használatos egyfelől a miénkhez hasonló ontikus értelemben, ugyanakkor a kifejezés vonatkozhat olyan interpretációra is, ahol a kvantumállapotot a statisztikus sokaságban nem a tulajdonságok, hanem a kimenetek eloszlására referál. Ezt az interpretációt néha *minimalista interpretációnak* is nevezik. Végül megemlítünk egy harmadik értelmezést is, amely szerint a statisztikusság csupán a kvantumállapot extenzióját jelöli, azt tudniillik, hogy az rendszerek sokaságára vonatkozik. Ez az értelmezés függőben hagyja azt a kérdést, hogy a referencia megjelölésén túl milyen szerepet tölt is be a

kvantumállapot a sokaság jellemzésében. A kvantumelmélet statisztikus interpretációjának jelentős képviselői közé tartozott Albert Einstein és Leslie Ballentine (1970). Nem teljesen világos azonban, hogy az interpretációnak pontosan melyik változatát képviselték. A statisztikus interpretáció nem keverendő össze a Born-szabállyal, a kvantumelmélet statisztikus algoritmusával, amely segítségével a valószínűségeket kiszámoljuk.

## 7. Az operacionalista interpretáció

Első látásra nemigen tudjuk, hogy hogyan is lehetne az a) részállítást más módon tagadni, mint a statisztikus interpretációban. Azaz nem nagyon értjük, hogy a kvantumállapotot mi másra is vonatkozhat, mint magára a fizikai rendszerre. Kicsit töprengve azonban eszünkbe juthat egy olyan filozófiai tradíció, amelyet születésétől fogva arra szántak, hogy épp az ilyen helyzeteket kezelje. Ez a filozófiai iskola az *operacionalizmus* (Chang 2019). Az operacionizmus a 20. század elején született a logikai pozivitizmussal szellemi rokonságban azzal a céllal, hogy a filozófiában használt fogalmak jelentését ne mögöttes tartalmakban, hanem konkrét mérési eljárásokban rögzítse. A kvantumelméletre vonatkoztatva az operacionalizmus a következő értelmezési lehetőséget kínálja. A kvantumállapotra ezentúl ne úgy gondoljunk, mint a mikrorendszerek ontikus állapotára, hanem mint a rendszereket előállító *preparációkra*, az obszervábilisekre pedig ne úgy, mint a részecskék fizikai mennyiségeire, hanem mint a rendszereken végrehajtott *mérésekre*. A preparációk és a mérések operációk, vagyis olyan eljárások, amelyeket a fizikai rendszeren végzünk. A kvantumelméletnek ezt az interpretációját *operacionalista interpretációnak* nevezzük (E. Szabó, 2002).

Az operacionalista interpretáció azonban radikálisan újraértelmezi a fizika feladatát. Hagyományosan a fizika azzal az igénnyel lép fel, hogy úgy írja le a világot, ahogy az önmagában van, minden emberi beavatkozástól függetlenül. Az operacionalizmus ezzel szemben a megértésnek egyfajta kibernetikai útját választja: azt állítja, hogy egy rendszert akkor értünk meg, ha a rendszer tetszőleges preparációja mellett jó hatékonysággal meg tudjuk jósolni a rendszeren végzett mérések kimeneteleinek valószínűségét. Ezzel a célkitűzéssel az operacionalizmus azonban lemond arról, hogy kauzálisan megmagyarázza, mi is történik a preparációk és a mérések között. Ezt a következő példa segítségével világíthatjuk meg.

Képzeljük el, hogy két különböző gyárban dobókockák gyártanak, az egyikben fair, a másikban cinkelt kockákat. A kockákat mindkét gyárban dobozokba rakják és leszállítják a megrendelőnek. A megrendelő kinyitja a dobozt és dobálni kezd a kockákkal. Azt tapasztalja, hogy a dobások közül a hatos gyakrabban következik be, így arra következtet, hogy a kockákat a második gyárban gyártották. A következtetés természetesen helyes, a kérdés azonban az, hogy a gyártóhely megállapítása kauzális magyarázatot ad-e arra, hogy a dobások miért nem azonos eloszlásúak. A gyártás ugyanis évekkel ezelőtt is történhetett, a kockákat pedig most dobják el. Valaminek

csak kell közvetítenie a kauzális hatást a két esemény között! És valóban, van is ilyen kauzális mediátor: a kockák súlypontjának helye. A kauzális lánc tehát a következő: a második gyárban olyan kockákat gyártanak, amelyek súlypontja nincs középen, az ilyen kockákkal való dobás pedig, akár egy későbbi időpontban is, egyenetlen eloszlású kimenetekhez vezet.

A kockás példán látható, hogy az operacionalista leírás kauzálisan nem kielégítő: egy rendszeren végzett múltbeli preparációk (kockagyár) és a jövőbeli mérések (dobások) között valaminek közvetítenie kell a kauzális hatást. A rendszer fizikai tulajdonságai (súlypont helye) éppen ezt a kauzális szerepet töltik be. A kvantumelmélet operacionalista interpretációja esetén hasonló a helyzet: ha egy mikrorendszert csak a preparációk és mérések relációjában értelmezzük, akkor a rendszer viselkedéséről nem kapunk kauzális értelemben kielégítő magyarázatot – a preparációk és mérések között ugyanis nem folytonos a kauzális lánc.

Mindezek ellenére a kvantumelmélet operacionalista interpretációja igen népszerű, főleg a kvantuminformatikusok és a kísérleti fizikusok körében. Az interpretáció előnye, hogy a formalizmus jól illeszkedik konkrét kísérleti helyzetekhez, és így az interpretáció fogalmilag tiszta, a gyakorlatban pedig jól használható képet nyújt az elméletről. Továbbá, az interpretáció számára a szuperpozíció nem jelent problémát, mivel itt a $\Psi_1 + \Psi_2$ állapot pusztán egy a $\Psi_1$ és $\Psi_2$ preparációktól különböző új preparációt jelent.

Az operacionalista interpretációt néha szintén *minimalista interpretációnak* nevezik, mivel ez az interpretáció tételezi fel a legkevesebbet ahhoz, hogy a kvantumelmélet empirikus adekvát, vagyis a kísérleti eredményekkel egybevágó legyen. Az interpretáció ontológiájában ugyanis nem szerepel más, mint empirikusan hozzáférhető makroszkopikus események: preparációk, mérések és kimenetek. A különbség az operacionalista-minimalista és a statisztikus-minimalista interpretációban között csupán annyi, hogy az előbbiben a kvantumállapotot a preparációkra, míg az utóbbiban a kimenetek statisztikus sokaságára vonatkoztatjuk (E. Szabó 2002).

Az operacionalista interpretációra gyakran mint antirealista interpretációra szokás hivatkozni. Az *antirealista* jelző itt a fizikai rendszer leírásának hiányára vonatkozik. A preparációk és a mérések felől nézve azonban az operacionalista interpretáció is *realista*, hiszen ezek az operációk a világ objektív eseményei. Ez a realista vagy ontikus jelleg különösen akkor látszik jól, ha az operacionalista interpretációt az episztemikus interpretációval vetjük össze.

## 8. Kvantumbayesianizmus

Azokat az interpretációkat, amelyek tagadják a b) részállítást, tehát a kvantumállapotot a fizikai rendszer egyedi, de nem ontikus leírásának tartják, episztemikus interpretációnak vagy *kvantumbayesianizmusnak*, röviden *QBizmusnak*

nevezzük. Legfőbb képviselői Calton Caves, Christopher Fuchs, Rüdiger Schack és David Mermin (Fuchs 2010). Ebben az interpretációban a kvantumállapot nem a fizikai rendszer valamilyen tulajdonságára referál, hanem az erre a rendszerre vonatkozó tudásunk jellemzője.

A *bayesianizmus* elnevezés a valószínűség szubjektív interpretációjából ered. A szubjektív interpretáció szerint a valószínűség nem az objektív események tulajdonsága, hanem az események bekövetkezési esélyeire vonatkozó jóslat. A hatos dobás 1/6 valószínűsége nem a kocka, a dobás vagy dobások sorozatának tulajdonsága, hanem a hatos dobásba vetett hitünk mértéke. A szubjektív valószínűség tehát egy racionális ágens részleges hite. Ontológiai státusát tekintve nem egy fizikai, hanem egy mentális esemény. Ezt a hitet természetesen számos racionalitási normatív, úgynevezett *Dutch book*-argumentumokkal támogatott kritérium korlátozza, például az a követelmény, hogy a dobás kimeneteinek tulajdonított valószínűségek összege 1 legyen. A normatív kritériumokon felül a hiteket objektív körülmények is befolyásolják, például úgy, hogy az eddigi dobások kimeneti statisztikája korlátozni fogja a következő dobás kimenetére vonatkozó hitünket.

Ehhez hasonlóan a QBista parciális hitét is korlátozza, sőt hosszútávon meghatározza az események kimeneti statisztikája. Ennélfogva az egyedi kimenetre vonatkozó parciális hit korrelálni fog a kimenetek sorozatának kollektív, ontikus, és statisztikus tulajdonságával, magyarán a kimenetek relatív gyakoriságával. Ahogyan egy fele-fele arányban fehér és fekete golyókat tartalmazó dobozból elég sokszor húzva előbb-utóbb arra fogunk jutni, hogy a következő húzás 50 százalékban fekete lesz, úgy a QBista hite is a kvantumállapotban meghatározott valószínűségekhez fog konvergálni. Így viszont a kvantumbayesianizmus nem sokban fog különbözni a minimalista interpretációtól, amely a kvantumállapotot szintén a hosszútávú kimeneti statisztikával azonosítja.

## 9. Bohm-elmélet

Végül az 1. állítás úgy is tagadható, ha a kvantumállapotot egyedi rendszerek ontikus, de nem teljes leírásának tartjuk, tehát tagadjuk az c) részállítást. Ezek a rejtett változós elméletek. A legismertebb rejtett változós elmélet ötletét Luis de Broglie vetette fel először a kvantumelmélet születése körül, azonban az elméletet csak egy negyed évszázaddal később David Bohm dolgozta ki. Az elméletet ez utóbbiról nevezték el *Bohm-elméletnek* (Dürr, Teufel 2009). Ha a kvantumállapot nem jellemzi teljeskörűen az individuális részecskéket, akkor a részecskék jellemzéséhez további, úgynevezett rejtett változók bevezetése is szükséges. A Bohm-elméletben ezek a változók a részecskék pozíciói. Az elméletben a hely tehát kitüntetett változó lesz, így a *kvantumállapot* helyett itt helyesebb a *hullámfüggvény* kifejezést használni. A hullámfüggvény maga a kvantumállapot egy speciális reprezentációban, a helyreprezentációban. A részecskék kimerítő jellemzéséhez tehát mind a

hullámfüggvényt, mind pedig a részecskék helyét meg kell adnunk. A részecskék ontikus állapotát a hullámfüggvény és a pozíció együtt fogja adni.

A hely azért rejtett változó a Bohm-elméletben, mivel a részecskék tartózkodási helyét nem ismerjük pontosan, csupán tartózkodási valószínűségük számolható ki a hullámfüggvényből. Az elmélet ugyanakkor determinisztikus, vagyis minden részecske jól definiált pályán mozog a téridőben. A részecskéket a hullámfüggvény tereli, valahogy úgy, ahogy a víz tetején lebegő parafadugót a hullámok.

A Bohm-elmélet úgy oldja meg a mérési problémát, hogy a rejtett változókat használja arra, hogy a szuperpozíció egyik tagját kiválassza, és így a mérés határozott kimenetét biztosítsa. Az ("atom elbomlott", "macska halott") + ("atom nem bomlott el", "macska él") szuperpozíció két ága közül a macska atomjai ténylegesen csak ez egyikben fognak tartózkodni. A hullámfüggvény "üres" ága továbbra is létezni fog, és a jövőben esetleg kölcsönhatásokba is léphet, de a tényleges macskát a "teli" ág írja le. Vegyük észre, hogy a Bohm-elméletben a rejtett paraméterek játsszák azt a szerepet, amit a koppenhágai interpretációban a kollapszus: kiválasztják a szuperpozíció valamelyik tagját.

Ezzel tehát áttekintettük a mérési probléma feloldásának első csoportjába tartozó interpretációkat. Ezek az interpretációk az 1. állítás három részállítása közül adják fel valamelyiket, miközben a másik két részállítást elfogadják. A statisztikus és operacionalista interpretáció feladja kvantumállapot egyedi referenciáját, a kvantumbayesianizmus az onticitását, a rejtett változós elméletek pedig a teljességét. Ezek az interpretációk tehát a kvantumállapot ontológiájának tekintetében különböznek egymástól.

## 10. Objektív kollapszuselmélet

Most térjünk át arra a csoportra, amelyik a mérés problémáját a 2. állítás feladásával kívánja orvosolni. A 2. állítás jegyében a Schrödinger-egyenlet a kvantumelmélet szerint univerzálisan érvényes természettörvény. Kézenfekvő tehát azt gondolni, hogy amennyiben a Schrödinger-egyenlet univerzalitását feladjuk, elkerülhetjük a makroszkopikus szuperpozíciókat. Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini és Tullio Weber erre az elgondolásra építve dolgozták ki elméletüket a 80-as években. Az elmélet lényege a következő. Mivel a Schrödinger-egyenletet a kölcsönható rendszereket egyre inkább összefonja, vagyis egyre kiterjedtebb makroszkopikus szuperpozíciókhoz vezet, így a szuperpozíciók megszüntetéséhez egy ellentétes dinamikai folyamatot kell bevezetnünk, amely időről-időre megszakítja a Schrödinger-egyenlet diktálta időfejlődést. Az irodalomban ezt a folyamatot *objektív* vagy *spontán kollapszusnak* nevezik, az elméletet pedig *objektív* vagy *spontán kollapszuselméletnek* (Norsen 2017; Maudlin 2019).

A kollapszus fogalma már szerepelt a tankönyvi és a koppenhágai interpretáció szótárában is. A kollapszus alatt ott is és itt is egy olyan pillanatszerű ugrást értünk,

amely a rendszer állapotát a szuperponált állapotból a szuperpozíció egyik tagjába viszi, például a $\Psi_1 + \Psi_2$ állapotból a $\Psi_1$ állapotba. A kollapszus tehát igazzá teszi a 3. állítást, mivel megszünteti a makroszkopikus szuperpozíciót és sajátállapotba juttatja a rendszert, ahol az határozott értékkel fog rendelkezni. A koppenhágai interpretációban a kollapszust éppen ezért vezették be. A koppenhágai interpretációban azonban homályban marad a kollapszus tényleges természete. Nem világos ugyanis, hogy a mérést, amely a kollapszust előidézi, mi különbözteti meg a többi fizikai kölcsönhatástól. A tudat bevezetése mint *differentia specifica* nem túl vonzó megoldás. A koppenhágai interpretációban az sem világos, hogy mi a kollapszus és a Schrödinger-dinamika kapcsolata.

Az objektív kollapszuselmélet szerint azonban a kollapszus ugyanolyan objektív dinamikai folyamat, mint maga a Schrödinger-időfejlődés. Nincs köze a méréshez, hanem tetszőleges fizikai rendszerben fellép spontán és stochasztikus módon. Bekövetkezési valószínűsége a rendszer méretével arányos: mikrorendszereknél kicsi, makrorendszereknél nagy. Ezért tapasztalunk szuperpozíciót kizárólag a mikrovilágban. A Schrödinger-dinamika és a kollapszus nincs ellentmondásban egymással: a mikrorendszerek alapesetben a Schrödinger-időfejlődést követik, amelyet időnként megszakít a kollapszus.

Az objektív kollapszuselméletnek sikerült tehát közös elméleti keretbe foglalni a két fundamentális dinamikai folyamatot, a Schrödinger-időfejlődést valamint a kollapszust, és úgy beállítani az elmélet paramétereit (például a kollapszusok bekövetkezési gyakoriságát és térbeli kiterjedését), hogy az elmélet jóslatai mikroszinten összhangban legyenek a kvantumelmélettel, makroszinten pedig kiiktassák a szuperpozíciót.

Vegyük észre, hogy az objektív kollapszuselmélet esetében nem az "interpretáció", hanem az "elmélet" kifejezést használtuk. A két elmélet dinamikája ugyanis eltér egymástól, így az objektív kollapszuselmélet nem tekinthető a kvantumelmélet interpretációjának, hanem egy alternatív elméletnek. Az objektív kollapszuselmélet a mérési problémát tehát a kvantumelmélet dinamikai alapegyenletének módosításával, ugyanakkor a kvantumállapot ontikusságának és teljességének megőrzése mellett oldotta meg.

Végül szeretnénk megjegyezni, hogy az objektív kollapszuselmélet egy változatát, amely a kollapszust a gravitációs mező fluktuációjával hozza kapcsolatba, a '60-as évektől kezdődően Károlyházy Frigyes, Frenkel Andor, Lukács Béla és Diósi Lajos dolgozták ki (Bassi et al 2013).

## 11. Sok-világ-interpretáció

A mérési probléma megoldása azonban a Ψ-teljesség megőrzése és a Schrödinger-egyenlet módosítása, tehát az 1. és a 2. állítás feladása nélkül is lehetséges a 3. állítás feladásával. Ez az út azonban egy radikális metafizikai állásponthoz vezet. Amint

fentebb láttuk, a mérési probléma arra az ellentmondásra futtatható ki, ami a kvantumelmélet által megjósolt makroszkopikus szuperpozíciók és a határozott mérési kimenetek tapasztalata között fennáll. Az ellentmondás azonban nemcsak úgy oldható fel, ha megszabadulunk a makroszkopikus szuperpozícióktól, hanem úgy is, ha módosítjuk a tapasztalás fogalmát. Erre vállalkozik a *sok-világ-interpretáció* (Wallace 2012).

A sok-világ-interpretáció szerint a kvantumelmélet helyesen és kimerítően írja le a világban zajló folyamatokat, közöttük a mérési folyamatot is. Ennélfogva a makroszkopikus szuperpozíciókra vonatkozó jóslatát is komolyan kell vennünk. Schrödinger macskája valóban az ("atom elbomlott", "macska halott") + ("atom nem bomlott el", "macska él") szuperponált állapotba kerül. A rendszer állapotát a mérés után ez az összefonódott kvantumállapot fogja helyesen leírni. Mi több, az összefonódás kiterjed a megfigyelőre is, és a megfigyelés után az atom, a macska és a megfigyelő közös állapotát az alábbi hármas szuperpozíció fogja leírni: ("atom elbomlott", "macska halott", "megfigyelő halott macskát lát") + ("atom nem bomlott el", "macska él", "megfigyelő élő macskát lát"). Ahhoz, hogy ezt a szuperpozíciót a tapasztalatra vonatkoztassuk, meg kell különböztetnünk a *világ* és az *Univerzum* fogalmát. A szuperponált állapot a teljes Univerzumra vonatkozik, míg a szuperpozíció tagjai az egyes világokra, amelyek az Univerzum részei. Az egyik világban egy elbomlott atomot és egy halott macskát látunk, a másikban egy el nem bomlott atomot és egy élő macskát. A két világ mintegy párhuzamosan létezik a mérés után, és együtt adják ki a teljes Univerzumot. A sok-világ-interpretáció szerint tehát az Univerzum minden mérés során világok sokaságára hasad, a szuperpozíció pedig épp ezt a sokaságot jelöli. A párhuzamos világok egyenlő ontológiai polcon helyezkednek el, vagyis nem szabad úgy gondolni rájuk, mint egy aktuális és sok-sok lehetséges világra. A sok-világ-interpretáció világai mind aktuálisak.

Az sok-világ-interpretáció tehát a tapasztalat fogalmának radikális módosításával úgy oldja meg a mérési problémát, hogy közben a kvantumelmélet egészét (benne a Schrödinger-egyenletet és a kvantumállapotot mint egyedi, ontikus és teljeskörű leírást) érvényben tartja. A kvantumelmélet sok-világ-interpretációját, pontosabban annak elődjét, a *relatív-állapot interpretációt* Hugh Everett dolgozta ki az 50-es években. A sok-világ-elméletnek a dekoherenciát, vagyis a környezeti változók hatásának mechanizmusát is magában foglaló modern változatát *emergens multiverzum-elméletnek* nevezik.

## 12. További interpretációk

Itt az ideje, hogy összegezzük a kvantumelmélet eddig áttekintett interpretációit. Az interpretációkat a mérési problémára adott válaszuk alapján csoportosítottuk. A mérési probléma három állítás inkonzisztenciájaként fogalmaztuk meg, ahol is az első állítás további három részállításra bomlott. Az interpretációk egyes csoportjait az egyes állítások vagy részállítások tagadásával jellemeztük. Az alábbiakban felsoroljuk

a csoportokat és csoportokban elhelyezzük az eddigi interpretációkat. A kvantumelméletnek azonban számos további interpretációja ismeretes (Pykacz 2005, Muynck 2010). Ezek közül azokat, amelyek megoldják a mérési problémát, szintén elhelyezzük az egyes csoportokban; a csoportosítás után pedig felsoroljuk és tömören, egy-egy mondatban ismertetjük a fennmaradó interpretációkat.

Az interpretációk csoportosítása:

1.a) részállítást tagadja: statisztikus interpretáció, operacionalista interpretáció

1.b) részállítást tagadja: kvantumbayesianizmus, információelméleti interpretáció, konzisztens történetek-interpretáció, relácionista interpretáció

1.c) részállítást tagadja: Bohm-elmélet

2. állítást tagadja: objektív kollapszuselmélet, tranzakciós interpretáció

3. állítást tagadja: sok-világ-interpretáció, sok-elme-interpretáció

A tankönyvi és a koppenhágai interpretációt nem soroltuk be egyik csoportba se, mivel ezek az interpretációk csak nagyon bizonytalanul foglalnak állást az első két állításra vonatkozóan.

A *kvantumlogikai interpretáció* (Garrett Birkhoff, Neumann János) a logikai alapokig leásva, a klasszikus logikai konnektívumok, konkrétan a "vagy" és a "nem" újraértelmezésével, valamint a klasszikus eseménystruktúra lecserélésével igyekszik a kvantumelméletet értelmezni. Az interpretáció nem oldja meg a mérési problémát, mivel nem adja meg a nem-klasszikus eseménystruktúra empirikus jelentését.

*Kvantumdarwinizmus* vagy *egzisztencialista interpretáció* (Wojciech Zurek) a klasszikus világ kialakulását a rendszer környezetének dekoheráló, vagyis a szuperpozíciót fokozatosan megszüntető hatásával magyarázza, amely a darwini természetes szelekcióhoz hasonlóan kiválasztja a stabil klasszikus állapotokat. A kvantumdarwinizmus nem oldja meg a mérési problémát, mivel a dekoherencia csak azt írja le, hogy a szuperponált állapot hogyan jut el a kevert állapotba, de nem ad magyarázatot arra, hogy a kevert állapot melyik tagja jut végül érvényre.

Az *információelméleti interpretáció* (Jeffrey Bub) bayesiánus interpretáció, amelynek központi fogalma az információ, és amely a kvantumelmélet axiómáit a megfigyelőnek különféle mérési szituációkban szerzett információjára alapozva információelméleti elvekből kívánja rekonstruálni.

A *konzisztens történetek-interpretáció* (Robert Griffith) egyfajta neokoppenhágai interpretáció, amely a kvantummechanikai folyamatokat alternatív konzisztens történetek segítségével írja le, ahol a konzisztencia biztosítja, hogy a történetekre a klasszikus valószínűségszámítás legyen érvényes.

A *relácionista interpretáció* (Carlo Rovelli) az egyik legfiatalabb interpretáció, amely nem tulajdonít ontológiai jelentőséget a hullámfüggvénynek, helyette a kölcsönhatásban megvalósuló esemény fogalmára épít. Az események során a

kölcsönható rendszerek relációs, tehát a másik részrendszerre vonatkoztatott tulajdonságokra tesznek szert.

Az információelméleti, a konzisztens történetek- és a relációnista interpretáció a mérési problémát az 1/b. részállítást, tehát a kvantumállapot ontológiai státusát tagadva oldják meg.

A *modális interpretáció* (Bas C. van Fraassen, Dennis Dieks) szintén neokoppenhágai interpretáció, amely elutasítja a kollapszust, kiterjeszti a határozott értékkel rendelkező fizikai mennyiségek körét, valamint egy időben változó lehetőség struktúrát posztulál. Az interpretáció a mérési problémát a 1/c. részállítást tagadva oldja meg, mivel a kvantumállapot nem ad teljes leírást az individuális rendszerről.

A *tranzakciós interpretáció* (John Cramer) az időben előrefelé haladó hullámfüggvény és annak időben visszafelé haladó (komplex konjugált) párja közötti tranzakció révén magyarázza a kvantumelméleti jelenségeket. A *tranzakciós interpretáció* kollapszusinterpretáció, vagyis a mérési problémát a 2. állítást tagadva oldja meg.

A *sok-elme-interpretáció* (David Albert, Barry Loewer) a sok-világ-interpretáció egy változata, amelyben nem a világok hasadnak fel, hanem a megfigyelő elméje a mérés kimeneteleinek megfelelő sokaságban. A mérési problémát a sok-világ-interpretációhoz hasonlóan a 3. állítást tagadva oldja meg.

## 13. A nem-lokalitás problémája

A kvantumelmélet interpretációit a mérési problémára adott válaszuk alapján osztályoztuk. Van azonban a kvantumelméletnek egy olyan problémája, amelyre egyik interpretációk sincs válasza. Pontosabban egyik olyan interpretációnak sem, amelyik a kvantumállapotnak ontikus jelleget tulajdonít, tehát azt valamilyen egyedi rendszerre, rendszerek sokaságára vagy makroszkopikus operációkra vonatkoztatja. A nem-lokalitás problémáját egyedül az episztemikus interpretációk kerülik el, és javarészt éppen ez az igény motiválja őket.

A lokalitás vagy közelhatás elve azt jelenti, hogy egy individuális rendszer ontikus állapota csak lokális kauzális hatás révén változhat meg. Lokálisnak akkor nevezzük a kauzális hatást, ha terjedési sebessége nem haladja meg a fénysebességet. Az "ontikus" jelző itt fontos, ugyanis egy episztemikus állapottól nem várjuk el, hogy lokálisan változzon. Egy golyó színe csak úgy változhat, ha odamegyünk és átfestjük. A golyó színére vonatkozó tudásunk azonban úgy is változhat, ha a golyó messze van, vagy ha éppenséggel semmi sem történik vele.

A nem-lokalitás a különböző ontikus interpretációk esetében más-más módon mutatható meg. Az egyedi interpretációknál (pl. Bohm-elmélet) a nem-lokalitás könnyen látható, a statisztikus és operacionalista interpretációknál azonban csak a Bell-egyenlőtlenségek segítségével igazolható.

Kezdjük az egyszerűbb esettel. Képzeljük el, hogy két úgynevezett szinglet összefont kvantumállapotban preparált elektront eltávolítunk egymástól, és rajtuk két tetszőleges de ellentétes irányban spinmérést végzünk. Azt fogjuk tapasztalni – és ez egybevág a kvantumelmélet jóslataival is –, hogy a mérési kimenetek a két oldalon véletlenszerűek, ugyanakkor teljesen antikorrelálnak, vagyis, ha az egyik elektron spinje az adott irányban felfelé mutat, akkor a másik elektron spinje az adott irányban mindig lefelé fog mutatni. Tegyük fel, hogy a baloldali elektronon a mérést egy kis idővel korábban végezzük el, mint a jobboldalin. Ha a baloldali mérést már elvégeztük, akkor az antikorreláció miatt biztosak lehetünk a jobboldali spinmérés kimenetelében még azelőtt, hogy a mérést elvégeztük volna. Ez azonban azt jelenti, hogy a baloldalon végzett mérés megváltoztatta a jobboldali rendszer kvantumállapotát. Ez azért van így, mivel a jobboldali elektron a korábbi, véletlenszerű kimenetet előrejelző állapotból a biztos kimenetet jósló állapotba került – két különböző előrejelzést adó állapot pedig nem lehet azonos. Mivel azonban a két elektron akár nagy távolságban is lehet egymástól, a kauzális hatásnak közöttük pillanatszerűen, *nem-lokális* módon kell terjednie. A fénysebességnél gyorsabban terjedő a kauzális hatás azonban sérti a lokalitás elvét.

Vegyük észre, hogy a fenti gondolatmenetnek fontos eleme az a feltételezés, hogy a kvantumállapot a kétrészecske-rendszer ontikus tulajdonsága. Ahhoz, hogy ennek a feltevésnek a szerepét értékelni tudjuk, vessük össze a fenti gondolatmenetet episztemikus párjával. Tegyük fel, hogy a két elektron helyett két dobozunk van, valamint egy fehér és egy fekete golyónk, amelyeket tetszés szerint elhelyezkedtünk a két dobozban, a fehéret az egyikben, a feketét a másikban. Ezek után az egyik dobozt jobbra, a másik dobozt balra elküldjük egy-egy barátunkhoz, akik a dobozokat kinyitják, és megállapítják a bennük levő golyó színét. Ha a baloldali barátunk már kinyitotta a dobozt és benne fehér golyót látott, biztos lehet abban, hogy a jobboldali dobozban fekete golyó lesz. A baloldali mérés tehát, akárcsak az előbb, megváltoztatta a jobboldali dobozra vonatkozó predikciót. Ez a változás azonban nem sérti a lokalitás elvét, mivel az egyes dobozok tartalmára vonatkozó leírásunk csupán episztemikusan és nem ontikusan jellemzi a dobozokat: a golyók színére vonatkozó bizonytalanság csupán barátunk tudatlanságát tükrözi, nem pedig a golyókat jellemzi. A golyók színe, vagyis ontikus állapota nem változott sem a dobozok szállítása, sem a mérés során. Egy távoli objektumra vonatkozó tudásunk megváltozása pedig, mondani sem kell, nem sérti a lokális kauzalitás elvét. Vagyis az onticitás lényeges szerepet játszik a fenti gondolatmenetben.

Az érv másik fontos hallgatólagos premisszája a *szeparabilitás*, amely azt jelenti, hogy a két távoli elektron ontikus állapotát egymástól logikailag függetlennek tekintjük, vagyis a térben szeparált rendszereket önálló rendszerként írjuk le. Korrelációról értelmesen ugyanis csak két *különböző* esemény között beszélhetünk. Az ontikusság és a szeparabilitás premisszái mellett azonban a fenti példa jól illusztrálja, hogy a kvantumállapotot egy egyedi rendszerre vonatkoztató interpretációja a nem-lokalitás problémájába ütközik.

Most vizsgáljuk meg a statisztikus és operacionalista interpretációkat a nem-lokalitás szempontjából. Ezeknél az interpretációknál a nem-lokalitás nem a kvantumállapot pillanatszerű megváltozásában jelentkezik valamely távoli esemény hatására, hanem áttételesebben, a kvantumelmélet statisztikai jóslatainak és a lokális kauzalitás elvének inkompatibilitásában. Az inkompatibilitás megmutatásához olyan korrelációkra van szükség, amely közös forrásból származó, egymástól távoli de összefonódott állapotú rendszereken végzett mérések kimenetei között áll fenn. A korreláló események az operacionalista interpretációban maguk a kimenetek, a statisztikus interpretációban pedig a kimenetekért felelős preegzisztens tulajdonságok. A '60-as évektől kezdődően fokozatosan kiderült, hogy ezek a korrelációk nem magyarázhatók lokálisan. A nem-lokalitásra feltárásában John Stewart Bell (2004) tételei játszottak kulcsszerepet. A Bell-tételek ereje abban áll, hogy kizárólag makroszkopikus, empirikusan hozzáférhető eseményekkel operálnak, és csupán két igen természetes elvet használnak a bizonyításban. Az egyik a *közös ok elv*, amely a lokális kauzalitás követelményét fogalmazza meg, amennyiben előírja, hogy a korrelációknak legyen lokálisan kauzális, azaz vagy direkt típusú vagy közös ok típusú magyarázata. A másik elv a *konspirációmentesség* követelménye, vagyis a mérésválasztás és a rendszer ontikus állapotának kauzális függetlensége. Ez az elv lényegében azt biztosítja, hogy a mikrorendszer állapotától függetlenül, mintegy szabadon megválaszthatjuk azt, hogy milyen irányban végzünk a rendszeren spinmérést. Erre a két elvre támaszkodva Bell olyan, kizárólag megfigyelhető kimenetekre vonatkozó egyenlőtlenségeket vezetett le, amelyet a fenti korrelációk nem teljesítenek. Ebből viszont az következik, hogy a lokális kauzalitás követelményét fel kell adni. Másképp szólva, a nem-lokalitás problémát jelent a statisztikus és operacionalista interpretációra nézve is, vagyis minden ontikus értelmezés számára.

## 14. EPR-argumentum és PBR-tétel

Legvégül két olyan gondolatmenetet szeretnék ismertetni, amelyek egy-egy interpretáció pozícióját erősítik. Ez a két argumentum az EPR-argumentum és PBR-tétel. Az előbbi a statisztikus interpretáció, az utóbbi pedig az egyedi interpretációk melletti érvként fogható fel.

Az EPR-argumentum Albert Einstein, Boris Podolsky és Nathan Rosen nevéről kapta a nevét, akik 1935-ben megjelentetett híres cikkükben (Einstein et al. 1935) az érvet megfogalmazták, eredetileg a koppenhágai interpretáció ellenében és a statisztikus interpretáció mellett. Meg kell jegyeznünk, hogy Einstein a cikkel nem volt elégedett, így az érvet később más formában többször újrafogalmazta. Az érv bemutatásához idézzük fel a fenti kísérleti szituációt, ahol két összefont állapotú elektronon spinmérést végzünk, véletlenszerű, de antikorreláló kimenetekkel. Ezt a szituációt két sajátosság jellemzi. Egyrészt a baloldali mérés a lokalitás miatt nem zavarhatja a jobboldali kimenetet; másrészt a baloldali kimenet ismeretében teljes bizonyossággal

meg tudjuk jósolni a jobboldali kimenetet. Az EPR-argumentum központi premisszája, az úgynevezett *realitáskritérium,* éppen ezzel a két sajátossággal jellemezhető episztemikus helyzetre épül. A realitáskritérium ugyanis a következőket mondja: "Ha egy fizikai mennyiség értékét teljes bizonyossággal (azaz 1 valószínűséggel) meg tudjuk jósolni, anélkül, hogy a rendszert bármilyen módon is megzavarnánk, akkor létezik a valóságnak egy eleme, amely e fizikai mennyiségnek felel meg" (Einstein et al. 1935, 777) A kritérium tehát azt mondja, hogy a fenti episztemikus helyzetben joggal feltételezhetjük, hogy létezik egy olyan valóságelem – vagy a mi szóhasználatunkban – tulajdonság, amely kauzálisan felel a jobboldali kimenetért. Ez azonban éppen a statisztikus interpretáció. Az EPR-argumentum a lokalitás feltételezése és a realitáskritérium elfogadása mellett tehát egy erős érvet jelent a statisztikus interpretáció mellett. Amint említettük, Einstein nem volt teljesen elégedett az EPR-argumentummal, és a realitáskritériumot későbbi érveiben el is hagyta.

Egy másik argumentum, az előzővel valamilyen értelemben épp ellentétesen, az egyedi interpretációkat támogatja. Ez az argumentum PBR-tétel néven ismeretes, amely a nevét arról a szerzőhármasról (Matthew Pusey, Jonathan Barrett, Terry Rudolph) kapta, amelyik a tételt 2012-ben bebizonyította. A PBR-tétel azt állítja, hogy a kvantumállapot az individuális rendszer jellemzője, még ha nem feltétlen legfinomabb jellemzője is. A szerzők a tétel bizonyításában megmutatták, hogy két különböző kvantumállapotú statisztikus sokaságnak nem lehet egy-egy olyan eleme, amelyek ontikus állapota teljesen megegyezik. A helyzet talán a következő példával szemléltethető. Legyen adva két doboz, az egyikben fekete és barna, a másikban fehér és sárga golyókkal. Az első doboz golyóira kollektívan a "sötét" jelzőt, a másodikéra pedig a "világos" jelzőt használhatjuk. Mivel azonban a két dobozban nincs egy-egy olyan golyó, amelyek színe pontosan megegyezne, ezért a "sötét" nemcsak kollektíven jellemzi az első doboz golyóit, hanem individuálisan is – jóllehet nem a legfinomabb leírást adja róluk, hiszen a sötét golyók még lehetnek feketék vagy barnák. Filozófus zsargonnal szólva, a "sötét-világos" leírás szuperveniál a tényleges színeken: nem lehet valami sötétből világos úgy, hogy közben a színe ne változzon. Ehhez hasonlóan, egy egyedi rendszer kvantumállapota is szuperveniál a rendszer ontikus állapotain. Ez viszont azt jelenti, hogy a kvantumállapot egy durva-szemcsés leírása az egyedi kvantumrendszereknek. A PBR-tétel egy fontos érv az individuális interpretációk mellett.

## 14. Miért van ennyi interpretáció?

Dolgozatunkat az interpretáció kérdésével kezdtük. Miért is van ennyi interpretációja a kvantumelméletnek? Hogyan lehetséges, hogy egy szigorúan zárt formalizmus ennyi egymástól eltérő értelmezést elbír? Olyan értelmezéseket ráadásul, amelyek az ontikus-episztemikus, szinguláris-statisztikus, realista-antirealista tengelyek átellenes oldalán fekszenek.

A kérdésre adható válasznak nyilván van egy erős történeti-szociológiai aspektusa. A kvantumelmélet a 20. század elejéig ismeretlen mikrovilág törvényeinek feltárásáért folytatott küzdelemben született. Ez a küzdelem egy teljes fizikus generáció tudását és odaadó munkáját követelte. Ezek a fizikusok nagyon különböző világképpel rendelkeztek és különböző attitűddel vetették be magukat a kutatásba. A koppenhágai hegemónia azonban némileg egyneműsítette ezt a sokirányú törekvést. A koppenhágai interpretációról ugyanis tudni kell, hogy az a weimari köztársaság intellektuális klímájában született. Az első világháborúban vesztes Németországot az analitikus racionalitásban megrendült hit jellemezte, valamint a neoromanticizmus és holizmus, a neovitalizmus és kulturális relativizmus különféle áramlatai és egyfajta spengleriánus dekadenciaérzet és *Weltschmerz.* Paul Forman (1971), amerikai történész szerint a kvantumelmélet ebben a szellemi öntőformában született, és igencsak magán viseli a weimari köztársaság kulturális légkörének nyomait. Természetes tehát, hogy a fizikusok későbbi generációi, vagy azok, akik más földrészen vagy más kulturális hagyományban nevelkedtek, kényelmetlennek érezték a koppenhágai interpretációt átjáró miszticizmust és más interpretációk után kutattak.

Ez persze még nem magyarázza, hogy miért is találtak ilyen interpretációkat. Annyi mindenesetre bizonyos, hogy a különböző interpretációkat nemcsak valamilyen világnézeti elköteleződés, például a klasszikus lokális realizmus restaurációjának igénye hajtotta. Az interpretációs törekvések mögött legtöbbször kirajzolódott egy-egy konkrét kutatási program is, amely sokszor vezetett fontos tudományos eredményekhez. Elég itt két példát említeni. John Bell makacs ragaszkodása ahhoz, hogy a kvantumelméletet ne megfigyelhető mennyiségek segítségével fogalmazzák meg – amely leírásmód még a logikai pozitivizmus egyfajta öröksége, hanem létező (*beable*) mennyiségekkel, nos ez a ragaszkodás vezetett el a Bell-egyenlőtlenségekhez, a kvantuminformáció-elmélethez, valamint a kvantumösszefonódás mélyebb megértéséhez. A másik példa a dekoherencia jelentőségének megértése. A dekoherencia a szuperpozíció megszűnése a környezeti változók hatására. A dekoherencia kutatása a 80-as években kezdődött és maga is egy új interpretációhoz, Zurek kvantumdarwinizmusához vezetett. A dekoherencia kutatását nyilvánvalóan a kollapszus zavaró fogalmától való megszabadulás igénye, tehát egyfajta interpretációs igény sarkallta. A kvantumelmélet és interpretációinak viszonya tehát egy bonyolult visszacsatolásos viszony. Az interpretációk, amelyek mindig ötvözik az empirikusan hozzáférhetőt és a hipotetikusan posztuláltat, a megfigyelhetőt és a teoretikust, hozzájárulnak az elmélet mélyebb tartalmának kifejtéséhez, lehetőségeinek feltárásához és alkalmazási körének bővítéséhez, miközben olykor ők maguk is – lásd objektív kollapszuselmélet vagy Bohm-elmélet – külön elméletté válnak.

Végül az interpretációk számosságát talán az magyarázza leginkább, hogy – amint láttuk – a kvantumelmélet értelmezései egy nagyon szűk logikai térben kénytelenek mozogni, amely tér határait a különféle problémák és *no-go*-tételek jelölik ki. Ezek a *no-go*-tételek lehetetlenné teszik a visszatérést a klasszikus fizika lokális

realizmusához, ahol a fizikai mennyiségek és az állapot az egyedi rendszert jellemezték, ahol mérésről és preparációról szó sem esett, ahol a kauzális hatások lokálisan terjedtek, és ahol nem kellett viaskodni a szuperpozícióval. A fennmaradó szűk logikai térben azonban a mikrovilág működésére vonatkozó alapvető intuícióink nem kaphatnak maradéktalanul helyet. Egyik vagy másik intuíciónkat szükségszerűen fel kell adnunk. Az egyes interpretációkat az különbözteti meg egymástól, hogy melyik intuíciónkról vagy általános fizikai-metafizikai elvről mondanak le. Az egyes interpretációk számára a legnagyobb kihívást pedig éppen az jelenti, hogy kellő súllyal érveljenek amellett, hogy miért is nyújtanak jó vagy legalábbis elfogadható magyarázatot a világ működéséről a feladott elv hiányában is.

## Irodalom


Ballentine, Leslie E. 1970. The statistical interpretation of quantum mechanics, *Review of Modern Physics*. 42. 358.

Bassi, Angelo – Kinjalk Lochan, Seema Satin, Tejinder P. Singh, Hendrik Ulbricht 2013. Models of wave-function collapse, underlying theories, and experimental tests. *Reviews of Modern Physics*. 85. 471-527.

Bell, John Stewart 2004. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics.* Cambridge. Cambridge University Press.

Chang, Hasok 2019. Operationalism, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. URL=https://plato.stanford.edu/entries/ operationalism.

de Muynck, Willem M. 2010. *Foundations of Quantum Physics. an Empiricist Approach.* Dortrechrt. Springer.

Dürr, Detlef – Stephan Teufel 2009. *Bohmian Mechanics - The Physics and Mathematics of Quantum Theory*. Dortrecht. Springer Verlag.

Einstein, Albert – Boris Podolsky, Nathan Rosen 1935. Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? Physical Review. 47. 777.

E. Szabó, László 2002. *A nyitott jövő problémája*. Budapest. Typotex.

Forman, Paul 1971. Weimar Culture, Causality and Quantum Mechanics, 1918-1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellecual Environment. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 3, 1-115.

Fuchs, Christopher A. 2010. Quantum Bayesianism at the Perimeter. *Physics in Canada.* 66/2. 77– 81.

Harrigan, Nicholas – Rob Spekkens, 2010. Einstein, Incompleteness, and the Epistemic View of Quantum States. *Foundations of Physics*. 40, 125–157.

Home, Dipankar and Andrew Whitekar, 1992. Ensemble interpretation of quantum mechanics. a modern perspective. *Physics Reports*. 210. 223-317.

Howard, Don 2004. Who Invented the "Copenhagen Interpretation"? A study in mythology. *Philosophy of Science*. 71. 669-682.

Howard, Don 2022. Copenhagen Interpretation. In Olival Freire Jr. (szerk.) *The Oxford handbook of the history of quantum interpretations*. Oxford. Oxford University Press. 521-542.

Hughes, Richard 1989. *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Harward University Press.

Marx, György 1957. *Kvantummechanika.* Budapest, Műszaki könyvkiadó.

Maudlin, Tim 2019. *Philosophy of Physics. Quantum theory.* Princeton University Press.

Muller, Fred A. 2023. Six measurement problems of quantum mechanics. In Jonas R. B. Arenhart, Raoni W. Arroyo. *Non-Reflexive Logics, Non-Individuals and the Philosophy of QuantumMechanics: Essays in honor of the philosophy of Décio Krause*, Dortrecht. Springer Verlag.

Norsen, Travis, 2017. *Foundations of Quantum Mechanics*. Dordrecht. Springer.

Pusey, Matthew – Jonathen Barrett, Terry Rudolph, 2012. On the reality of the quantum state. *Nature Physics*. 8. 475-478.

Pykacz, Jan 2005. A Brief Survey of Main Interpretations of Quantum Mechanics. *Quantum Physics, Fuzzy Sets and Logic*. Dortrecht. Springer Brief.

Sivasundaram, Sujeevan – Kristian Hvidtfelt Nielsen. 2016. Surveying the Attitudes of Physicists Concerning Foundational Issues of Quantum Mechanics. *URL = https://arxiv.org/abs/1612.00676.*

Wallace, David 2012. *The Emergent Multiverse. Quantum Theory according to the Everett Interpretation*. Oxford. Oxford University Press.