

A kvantumelmélet modális interpretációja

DOI: <https://doi.org/10.70510/mfsz.18676>

I. BEVEZETÉS

A fizikai vagy nomikus lehetőségek határait a fizika törvényei jelölik ki (Kment 2021). Ezek a törvények vagy az egy időben vagy az egymás után lehetséges események körét korlátozzák (*laws of coexistence vs. laws of succession*, van Fraassen 1970). Az előbbi törvénytípusra az ideális gáztörvény a példa a hőtanban, az utóbbira Newton mozgásegyenletei a mechanikában. Ez utóbbi típus egyfajta diakrón elérhetőségi relációt generál a lehetőségek között. A diakrón elérhetőség elméleteire jó példa Arthur Prior elágazó idő-elmélete (Prior 1967), Nuel Belnap elágazó téridő-elmélete a relativitáselméletben (Belnap–Müller–Placek 2022), vagy Eliott Lieb és Jakob Yngvason adiabatikus elérhetőségi axiomatikája a hőtanban (Lieb–Yngvason 1999).

Ezekkel a meglehetősen bonyolult diakrón elméletekkel szemben a szinkrón lehetőségeket viszonylag egyszerűen tárgyalja a fizika: kijelöli az egy időben lehetséges állapotok halmazát, és a továbbiakban ezen a halmazon dolgozik. Ezt a halmazt *állapottérnek* nevezik, elemeit pedig *tiszta* vagy *ontikus állapotoknak*. A fizikai rendszer dinamikája ezeket az ontikus állapotokat fejleszti az időben, vagyis viszi át az egyik ontikus állapotot a másikba. Mivel az ontikus állapotokhoz nem mindig férünk hozzá közvetlenül, a statisztikus fizikában egy másik állapotfogalmat is bevezetnek, a *kevert* vagy *episztemikus állapot* fogalmát. Az episztemikus állapot egy ágens korlátozott tudását reprezentálja az adott fizikai rendszerre vonatkozóan. Ezt a tudást matematikailag az ontikus állapotok fölött egy valószínűségi eloszlással adjuk meg. Itt a valószínűség egyaránt vonatkozhat az adott rendszer valamely fizikai mennyiségének *értékére* vagy a rendszeren végrehajtott mérés *kimenetelére*. Az episztemikus állapot tehát a szinkrón lehetőségek fölötti bizonytalanságot reprezentálja.

A fizikailag, illetve episztemikusan lehetséges állapotok köre, vagyis az állapottér tipikusan nem változik egy fizikai elméletben. Ha mégis, azt valamilyen külső kényszerfeltétel időbeli változása okozza. Ha egy gáztartályt egy dugattyúval összenyomunk, akkor a gáz állapottere leszűkül, hiszen a részecskék

most már nem lehetnek mindenütt ott, ahol korábban még ott lehettek. Ez az új kényszer természetesen a rendszer episztemikus állapotára is hatással van. Az ágens tudatlansága ilyenkor mintegy leszűkül az új, kényszerekkel lecsökkentett állapottérre, a kisebb gáztartályra. Az ilyen időben változó kényszerfeltételeket leszámítva azonban az állapottér, vagyis a lehetséges események köre a fizikában egyszer s mindenkorra rögzített.

Van azonban egy fizikai elmélet, jobban mondva egy fizikai elméletnek egy bizonyos interpretációja, ahol a szinkrón események köre nem azért változik, mert időről-időre új kényszerek lépnek fel, amelyek azután járulékosan megváltoztatják az episztemikus állapotok értelmezési tartományát; hanem éppen fordítva: azért, mert maguk az episztemikus állapotok változnak, és ez a változás maga után vonja az állapottér változását is. Ez a fizikai elmélet a kvantumelmélet, az interpretáció pedig a kvantumelmélet modális interpretációja. Ebben a tanulmányban ezt az interpretációt igyekszünk bemutatni. Fő tézisünk tehát az lesz, hogy a kvantumelmélet modális interpretációjában *a szinkrón lehetőségek köre a rendszer kvantumállapotának változása folytán időben változik*.¹

II. KÁRTYÁK AZ ASZTALON

Kezdjük egy egyszerű példával. Képzeljük el a következő játékot. Egy játékvezető három kártyát tesz elénk az asztalra színükkel lefelé fordítva. Mindegyik kártya vagy pikk (♠) vagy treff (♣). A három kártyából kettőt felfordíthatunk és megnézhetjük a színüket. A harmadik kártya az asztalon marad. Ezek után a játékvezető összeszedi a három kártyát, újabb három kártyát vesz elő a csomagból, és ezeket is leteszi elénk. A feladatunk az lesz, hogy sok forduló után a birtokunkba jutott információk alapján kitaláljuk, hogy a játékvezető milyen stratégia alapján rakta elénk a kártyákat. Stratégia alatt azt értjük, hogy a három kártya nyolc lehetséges elrendezése milyen valószínűséggel, azaz relatív gyakorisággal került az asztalra.

Tegyük föl először, hogy bármelyik két lapot fordítjuk is fel, mindig vagy két pikket, vagy két treffet kapunk közel azonos gyakorisággal. Ebben az esetben ésszerű következtetés azt mondani, hogy a játékvezető az esetek felében három pikk, másik felében pedig három treff lapot helyezett az asztalra, hiszen csak így kaphatunk mindig két azonos kártyát.

Korábban bevezettünk egy fogalom párt, amelynek hasznát vesszük jelenlegi példánkban is. Egy fizikai rendszer *ontikus állapotának* neveztük a rendszer

¹ A szinkrón lehetőségek változása nem keverendő össze a diakrón lehetőségek változásával. Az elágazó idő elméletében például az adott állapotot követő lehetőségek köre általában változik: egy objektum története néha több, néha kevesebb ágra bomlik szét. A kvantumelmélet modális interpretációjában azonban nem a diakrón, hanem a *szinkrón* lehetőségek köre változik az időben.

objektív és teljeskörű leírását, *episztemikus állapotának* pedig a rendszer ontikus állapotára vonatkozó tudásunkat, amely a rendszeren elvégzett sokszori mérés eredményeként alakul ki. Az ontikus állapot nem függ a rendszeren végrehajtott méréstől, ugyanakkor okságilag meghatározza annak kimenetelét.

Az előző példában a rendszer *ontikus állapota* nyolcféle lehet:

(♠,♠,♠), (♠,♠,♣), (♠,♣,♠), (♠,♣,♣), (♣,♠,♠), (♣,♠,♣), (♣,♣,♠), (♣,♣,♣).

Az ontikus állapotok meghatározzák a kimenetet: ha például a játékvezető az adott körben három pikket tett az asztalra, akkor bármelyik két kártyát megfordítva a „mérés” kimenetele két pikk lesz. Fontos megjegyezni, hogy a lehetséges ontikus állapotok köre a játék folyamán végig azonos. A játékvezető ebből a nyolc ontikus állapotból keverheti ki a játék stratégiáját. A fenti játékban fele-fele arányban választ a (♠,♠,♠) és a (♣,♣,♣) lehetőségek közül. Ez azt jelenti, hogy egy adott futamban a (♠,♠,♠) és a (♣,♣,♣) ontikus állapot episztemikus valószínűsége egyaránt $1/2$ lesz, a többi hat ontikus állapot valószínűsége pedig 0. A valószínűséget p -vel jelölve:

$$p(\spadesuit, \spadesuit, \spadesuit) = p(\clubsuit, \clubsuit, \clubsuit) = 1/2$$

$$p(\spadesuit, \spadesuit, \clubsuit) = p(\spadesuit, \clubsuit, \spadesuit) = p(\spadesuit, \clubsuit, \clubsuit) = p(\clubsuit, \spadesuit, \spadesuit) = p(\clubsuit, \spadesuit, \clubsuit) = p(\clubsuit, \clubsuit, \spadesuit) = 0$$

Ez a valószínűségi eloszlás sok forduló után számunkra is feltárul, vagyis az eloszlás egyben az aktuális forduló ontikus állapotára vonatkozó tudásunkat is kifejezi – röviden a rendszer *episztemikus állapotát*.

Most képzeljük el ugyanezt a játékot azzal a különbséggel, hogy bármely két lapot felfordítva mindig egy pikket és egy treffet kapunk. Hogy a két játékot megkülönböztessük, nevezzük az előző játékot *A* játéknak, a mostanit pedig *B* játéknak. Milyen játékvezetői stratégiára, azaz milyen episztemikus állapotra, illetve ontikus állapotokra tudunk következtetni a *B* játékban? Rövid töprengés után beláthatjuk, hogy a játékban valami furcsaság van. A játékvezető ugyanis nem tudja úgy előkészíteni a kártyákat, hogy a mérési eredmények éppen ezek legyenek. Bármilyen három lapot tesz ugyanis az asztalra, azok között biztosan lesz két egyforma, és ha mi éppen ezt a két lapot választjuk, akkor két egyforma színű kártyánk lesz. Mivel azonban ilyet soha nem tapasztalunk, érthetetlen, hogyan is vannak elrendezve a kártyák.

A *B* játék többféle magyarázata is eszünkbe juthat, ha kellőképpen elengedjük a fantáziánkat. Amint azonban látjuk majd, mindegyik megoldás valamilyen speciális és igencsak erőltetett kauzális mechanizmus feltételezését kívánja. Az egyik ilyen kifundált megoldás az lehet, ha a játékvezető úgy preparálta a kártyákat, hogy minden esetben két azonos és egy különböző kártyát tett az asztalra hatféle elrendezésben egyenlő valószínűséggel:

$$p(\clubsuit, \clubsuit, \clubsuit) = p(\clubsuit, \clubsuit, \spadesuit) = p(\clubsuit, \clubsuit, \heartsuit) = p(\clubsuit, \clubsuit, \diamondsuit) = p(\spadesuit, \clubsuit, \clubsuit) = p(\spadesuit, \clubsuit, \spadesuit) = 1/6$$

$$p(\spadesuit, \spadesuit, \spadesuit) = p(\spadesuit, \spadesuit, \heartsuit) = 0$$

Ebben az esetben azonban sohasem húzhatunk „rosszul”, vagyis a $(\spadesuit, \spadesuit, \clubsuit)$ elrendezés esetén például sohasem fordíthatjuk fel az első két azonos kártyát. Fel kell tehát tételeznünk valamilyen oksági hatást, amely az egyes ontikus állapotokat, vagyis a kártyák leosztását és kártyák kiválasztását köti össze. A kártyák kiválasztása tehát nem szabadon történik, hanem részben az asztalon fekvő kártyák színének hatására.

A B játék egy másik magyarázata ugyancsak erőltetett. Képzeljük el, hogy a játékvezető a korábbi stratégiát használja, vagyis fele-fele részben három pikket illetve három trefft tesz az asztalra. Az első kártyát felfordítva tehát fele-fele arányban vagy pikket vagy trefft kapunk. Az első kártya felfordítása azonban kauzális hatással van a lefordított két másik kártyára, amelynek eredményeképpen azok színe ellentétükre, vagyis pikkről treffre, treffről pedig pikkre változik. Így a második húzásra garantáltan az elsővel ellentétes színű kártyát kapunk.

Egy harmadik, hasonlóan kimódolt magyarázat az lenne, ha a kártyáknak a felfordításukat megelőzően semmilyen határozott színt nem tulajdonítanak, csupán egy diszpozíciót (*propensity*-t), amely hosszútávon fele-fele arányú pikk és treff színekben manifesztálódik. Ennek a megoldásnak természetesen szintén számot kell vetnie azzal a ténnyel, hogy egy adott menetben sohasem kapunk két azonos színű kártyát, vagyis a diszpozíciók között szintén valamilyen oksági hatásnak kell fennállnia.

A B játék és megoldási kísérletei a kvantumelméletet és annak különféle interpretációit hivatottak mintázni (Hughes 1989; Travis 2017; Maudlin 2019). Ezeket az interpretációkat egy másik tanulmányban tekintettük át (Szabó 2024). A megoldási javaslatokban az a közös, hogy az A játék magyarázatával ellentétben itt nem tudunk a rendszernek olyan episztemikus állapotot tulajdonítani, amely (1) a nyolc ontikus állapot valamilyen valószínűségi eloszlása, ahol (2) az ontikus állapotok nem állnak oksági kapcsolatban a kártyaválasztással, hanem (3) mindenfajta változás nélkül egyszerűen feltáruznak a mérés során. Magyarul, a B játékot nem tudjuk a köznap értelemben mint előre rögzített színű kártyák statisztikáját elgondolni.

A bennünket itt érdeklő interpretáció a kvantumelmélet modális interpretációja (Dickson 1998; de Muynck 2002). Ezt az interpretációt a fenti példában az alábbi három episztemikus állapottal illusztrálhatjuk:

1. $p(\spadesuit, \clubsuit,) = p(\clubsuit, \spadesuit,) = 1/2$
2. $p(, \spadesuit, \clubsuit) = p(, \clubsuit, \spadesuit) = 1/2$
3. $p(\spadesuit, , \clubsuit) = p(\clubsuit, , \spadesuit) = 1/2$

Rögtön szembeötlő, hogy ezek az episztemikus állapotok nem a fenti nyolc lehetséges ontikus állapot valószínűségi keverékei. Az ontikus állapotok jelen esetben csak két kártya színét rögzítik, a harmadikét nem. Az 1. esetben csak az első két kártyáét, a 2. esetben a második és harmadik kártyáét, a 3. esetben pedig az első és a harmadik kártyáét. Az 1. episztemikus állapottal akkor rendelkezik a rendszer, ha történetesen az első két kártyát fordítjuk fel – pontosabban, ha már kiválasztottuk és megfogtuk a kártyákat, de még nem fordítottuk fel őket. Ebben az esetben a rendszer vagy a ($\spadesuit, \clubsuit$) vagy a ($\clubsuit, \spadesuit$) ontikus állapotban lesz, vagyis vagy az első kártya lesz pikk, a második treff, vagy fordítva, az első kártya lesz treff, a második pikk. A kártyák felfordítása során pedig eldől, hogy a két eset közül melyik is áll fenn.

A harmadik kártyának azonban nincs rögzített színe. Ennek a meghatározatlan színű kártyának az adott klasszikus fizikai példa keretei között természetesen nehéz értelmet adni. Legjobb talán úgy gondolni rá, mint ami arra az elméleti lehetőségre kívánja felhívni a figyelmet, hogy az, hogy egy rendszer rendelkezik-e egy adott tulajdonsággal, függhet attól a kölcsönhatástól, amely révén éppen ezt a tulajdonságot tárjuk fel. A kártyás példa ezt az összefüggést próbálja érzékeltetni: az első két kártya, amelyeket megfogtunk, rendelkezik színnel, a harmadik kártyának azonban, amelyikhez nem nyúltunk, nincs színe.

A fenti három episztemikus állapot tehát három különböző mérési szituációhoz tartozik. Másképp szólva a rendszeren végrehajtott mérés és a rendszer episztemikus állapota között kauzális (vagy esetleg fogalmi) kapcsolat áll fenn. Ez a kapcsolat azonban elkerülhetetlen, ahogy azt már az előző interpretációknál is láttuk.

A modális interpretációt három sajátosság jellemzi. Egyrészt, az ontikus és episztemikus állapotok viszonyában a modális interpretáció visszaállítja a klasszikus helyzetet, amennyiben az episztemikus állapotok pusztán az ontikus állapotokra vonatkozó tudatlanságunkat fejezik ki. Másképp szólva az 1. episztemikus állapotban az tükröződik, hogy nem tudjuk, hogy a szóban forgó menetben az első és a második kártya közül melyik a pikk és melyik a treff. Amikor a kártyákat felfordítjuk, ez a tudatlanság megszűnik, éppúgy ahogy az *A* játékban.

Másrészt azonban a modális interpretáció radikálisan eltér a korábbi interpretációktól, ugyanis az ontikus állapotok köre nincs egyszer s mindenkorra rögzítve, hanem mérésről mérésre változik. Ha ugyanis az első két kártyát választjuk, akkor az ontikus állapotok a ($\spadesuit, \clubsuit$) és a ($\clubsuit, \spadesuit$) lesznek; ha a második két kártyát, akkor a ($\spadesuit, \heartsuit$) és a ($\heartsuit, \spadesuit$); ha pedig az első és harmadik kártyát, akkor a ($\spadesuit, \diamondsuit$) és a ($\diamondsuit, \spadesuit$). A rendszer ontikus állapotai tehát a mérési szituációtól függenek. Mivel azonban az ontikus állapotok köre egyben a rendszer *szinkrón lehetséges* állapotait is rögzíti, ezért a modális interpretációban a lehetőségek köre a különböző mérési szituációkban más és más lehet.

Harmadrészt a modális interpretációban megváltozik az ontikus állapotok és a valószínűség viszonya. Az *A* játékban a nyolc ontikus állapot valószínűségének

összege 1 volt, ugyanis csak a ($\spadesuit, \spadesuit, \spadesuit$) és a ($\clubsuit, \clubsuit, \clubsuit$) ontikus állapotoknak volt nullától különböző valószínűsége, mindkettőé $1/2$. Ez azt jelenti, hogy az ontikus állapotok tere jól illeszkedett a valószínűség matematikai fogalmához: az ontikus állapotok egy közös valószínűségi térben foglaltak helyet, mindegyik rendelkezett valószínűséggel, és a valószínűségek 1-re összegződtek. Ezzel szemben, ha a modális interpretációban szereplő fenti ontikus állapotok valószínűségét adjuk össze, akkor összegként nem 1-et, hanem 3-at kapunk, hiszen mind a hat ontikus állapot valószínűsége $1/2$. Ez azt mutatja, hogy a modális interpretációban az ontikus állapotok és a valószínűség között feszültség van. A probléma abban áll, hogy a modális interpretációban túl sok ontikus állapotunk van ahhoz, hogy felettük valószínűséget lehessen értelmezni. Ahhoz, hogy a valószínűség fogalmát értelmezni tudjuk, az ontikus állapotok terét szűkíteni kell. És pontosan ez is történik, amikor a fenti három mérési szituáció mindegyike két ontikus állapotot választ ki a hat közül. Ez a két ontikus állapot egy közös valószínűségi térben helyezkedik el, amit az is jól mutat, hogy valószínűségük összege 1.

Ez visszavezet az előző ponthoz. Az egyes mérési szituációkban kiválasztott ontikus állapotok, amelyek valószínűségi összege 1, éppen azok, amelyek az adott szituációban lehetségesek. Másképp szólva, az a matematikai kényszer, hogy a valószínűség értelmezése érdekében az ontikus állapotuk terét szűkíteni kell, metafizikailag azt fejezi ki, hogy az ontikus állapotok nem mind lehetségesek egyszerre. A lehetőségek tere szituációról szituációra változik.

III. A KVANTUMELMÉLET MODÁLIS INTERPRETÁCIÓJA

A kvantumelmélet modális interpretációjának megértéséhez egy kicsit bele kell bonyolódnunk a klasszikus fizika és kvantumelmélet strukturális különbségeibe. Amint a *Bevezető*ben említettük, a fizikában egy rendszer ontikus állapotainak a terét állapottérnek nevezzük. A klasszikus fizika állapottere a vizsgált rendszer fizikai mennyiségeinek lehetséges értékeit adja meg. A klasszikus állapottéren valószínűség értelmezhető. A valószínűség fogalmára az episztemikus állapot bevezetése miatt van szükségünk. A valószínűség mint mérték ugyanis minden ontikus állapothoz, illetve az állapotok adott részhalmazához hozzárendeli azt a valószínűséget, amit egy ágens az adott állapotnak vagy részhalmaznak tulajdonít. Amit itt fontos látni, az a klasszikus állapottér és a valószínűség pontos illeszkedése: a valószínűség a teljes állapottéren van értelmezve, az összes ontikus állapot valószínűségének összege pedig 1. A klasszikus állapottér és a valószínűség viszonyát az előző kártyás példában az *A* játék szemléltette. Itt az állapottér a nyolc ontikus állapot alkotta, minden ontikus állapot rendelkezett valószínűséggel, és ezek 1-re összegződtek.

A kvantumelmélet különlegességét talán úgy lehet legjobban megfogalmazni, hogy a kvantumelméleti állapottér túl nagy ahhoz, hogy rajta valószínűsége-

get lehessen értelmezni. A kvantumelmélet állapottere ugyanis végtelen számú klasszikus állapotteret foglal magában, amelyek mindegyike valamilyen fizikai mennyiséget reprezentál. (A B játékban három ilyen klasszikus állapotterünk volt, a három episztemikus állapotnak megfelelően.) Ezek a klasszikus állapotterek átfednek egymással, vagyis ugyanazt az ontikus állapotot több klasszikus állapottér is tartalmazza. Mivel a kvantumelmélet valószínűségelmélet, így arra gondolhatnánk, hogy a kvantumállapot egyfajta episztemikus állapot, amely a kvantumelmélet állapotterén valószínűséggként viselkedik. Ez a gondolat elsőre plauzibilisnek tűnik, hiszen a kvantumállapot az állapottér elemeihez természetes módon egy 0 és 1 közötti számot rendel. Ha azonban ezeket a számokat a kvantumelméleti állapottér összes ontikus állapotára összeadjuk, eredményül végtelent kapunk. (A B játékban ez az összeg 3 volt.) Ez azt mutatja, hogy túl sok ontikus állapotot szeretnénk ellátni valószínűséggel, vagyis túl sok ontikus állapotot tételezzünk fel egyszerre lehetségesnek. Az ontikus állapotok közül válogatnunk kell.

A probléma megoldása ugyanaz, mint amit a kártyás példánál láttunk. Az állapotteret le kell szűkíteni ahhoz, hogy a kvantumállapotot valószínűséggként értelmezhessek. Ez azt jelenti, hogy a kvantumelméleti állapottérbe beágyazott sok klasszikus állapottérből ki kell választanunk egyet. Ezt a választást annak a fizikai mennyiségnek a kiválasztása jelenti, amelyet megfelelő klasszikus állapottér reprezentál. Ebben az értelmezésben a dolog úgy fest tehát, mintha a kvantumelmélet egyfajta többletstruktúrával rendelkezne, amelyről nyugodtan megfeledezhetünk, mielőtt kiválasztjuk azt a fizikai mennyiséget, amelynek értékére kíváncsiak vagyunk. A kvantumállapot csak azután viselkedik valószínűséggként, miután kiválasztottuk azt a fizikai mennyiséget, amelyet megmérünk a rendszeren.

A mért fizikai mennyiség kiválasztása egyben a lehetőségek körének kiválasztását is jelenti. A modális interpretáció itt tér el a kvantumelmélet többi interpretációjától. Az operacionalista interpretáció ugyanis a kiválasztott klasszikus állapotteret úgy értelmezi, mint az adott mérés *kimeneteleit* reprezentáló lehetőségeket. A valószínűség ezért egyfajta feltételes valószínűség, ahol is a feltételt a kiválasztott mérés szolgáltatja. Az operacionalista interpretáció mindenképpen nem tételezi fel, hogy a rendszer a mérésről függetlenül is rendelkezik ezekkel az értékekkel. A lehetőségek mérési kimeneteket jelentenek, nem pedig az adott fizikai mennyiség értékeit.

A modális interpretáció ezzel szemben a klasszikus fizikához hasonlóan tényleges *értéket* tulajdonít a fizikai mennyiségeknek. Ez az érték ugyanakkor függeni fog attól, hogy milyen fizikai mennyiséget mérünk. Ezt az összefüggést nevezik a fizikában *kontextualitásnak*. Egy pillanatra érdemes itt visszatérni a kártyás példára. A B játékban a kártyák lehetséges színe attól függött, hogy melyik két kártyát választottuk ki. A kártyák színe és a választás közötti összefüggés itt azonban igencsak mesterkéltnek tűnhetett, hiszen nehezen tudunk elkép-

zelni olyan kauzális mechanizmust, amely épp annak a két kártyának kölcsönöz szint, amelyikre a választásunk esett. A kvantumelmélet esetében azonban, ahol a mérés egy klasszikus mérőműszerrel való bonyolult és számunkra átláthatatlan kölcsönhatásban ölt testet, már nem annyira meglepő, hogy a rendszernek miért csak bizonyos tulajdonságai realizálódnak, és más tulajdonságai, amelyek esetleg csak egy másik mérési szituációban realizálhatók, miért nem. A mérés mint fizikai kölcsönhatás tehát magyarázatul szolgálhat az állapottér leszűkítésére.

Történetileg az első modális interpretáció Bas van Fraassentől (1972; 1991) származott. Konstruktív empirizmusának megfelelően van Fraassen egy rendszer valamely fizikai mennyiségének csak az adott fizikai mennyiség *mérése során* tulajdonított értéket. Mivel van Fraassen interpretációja agnosztikus azzal szemben, hogy a rendszer rendelkezik-e ilyen értékekkel a mérések közötti időben, ezért ezt az interpretációt koppenhágai vagy *antirealista* modális interpretációnak is nevezik.

Van Fraassen interpretációját további modális interpretációk követték. Ezeket az interpretációkat *realista* interpretációnak szokás nevezni, mivel együttesen az jellemezte őket, hogy a rendszer egy kitüntetett fizikai mennyiségének a *mérések közötti időben* is rögzített értéket tulajdonítottak. Mivel a fizikai mennyiségeket egy-egy klasszikus állapotér reprezentálja a kvantumelméleti állapottéren, ezért a realista interpretációk úgy is megfogalmazhatók, mint amelyek minden időpillanatban a kvantumelméleti állapottér egy bizonyos klasszikus részét tüntetik ki. A klasszikus állapottér, amint láttuk, ahhoz kellett, hogy a kvantumállapotot valószínűségként vagy episztemikus állapotként tudjuk értelmezni a megfelelő fizikai mennyiségnek az ágens számára ismeretlen értékei fölött. Az interpretációk javarészt abban különböznek, hogy (1) melyik klasszikus állapotteret tüntetik ki, (2) a kiválasztott állapottér valóban klasszikus-e, és (3) a kiválasztott állapottér időben változik-e.²

² A Bohm-elméletben (Norsen 2017; Maudlin 2019) illetve a Lombardi-féle modális interpretációban (Lombardi–Dicks 2021) a klasszikus állapotteret egy-egy fizikai mennyiség határozza meg: az előbbi esetben a hely, az utóbbi esetben a rendszer Hamilton-függvénye. A Bohm-elméletben tehát a részecskék helye az a fizikai mennyiség, amellyel a rendszer a méréstől függetlenül rögzített értékekkel rendelkezik. Mivel ezek az értékek nem ismeretesek, ezért kvantumállapot egy episztemikus állapot ezen értékek fölött. Ebben a két interpretációban a klasszikus állapottér rögzített és nem függ a rendszer kvantumállapotától – így ezek az interpretációk csak határesetben nevezhetők modálisnak.

A Bub-féle modális interpretáció (Bub 1998) annyiban általánosabb az előző kettőnél, hogy a fizikai mennyiség által kiválasztott állapottér nem feltétlenül klasszikus. Pontosabban szólva, épp csak annyira nem-klasszikus, hogy a klasszikus valószínűség még értelmezhető legyen rajta. Ezért a kvantumállapot episztemikus értelmezése itt is lehetséges.

Végül a Kochen–Healey–Dicks-féle modális interpretáció (Lombardi–Dicks 2021) a tulajdonságok struktúrájának meghatározásához nem jelöl ki előre egy klasszikus fizikai mennyiséget, hanem a kiválasztott állapotteret a rendszernek és a mérőműszernek vagy a környezetnek együttes kvantumállapotából származtatja egy dekompozíciós matematikai tétel segítségével. Ez a lépés azzal az előnnyel jár, hogy a leírás tisztán kvantumelméleti marad, és

Ez utóbbi kérdés tanulmányunk szempontjából döntő jelentőségű. A *par excellence* modális interpretációkban ugyanis a klasszikus állapotteret a rendszer (vagy a rendszer és a mérőműszer együttes) kvantumállapota határozza meg. Mivel azonban ez a kvantumállapot időben változhat, így a kiválasztott klasszikus állapottér is változhat időben. Magyarán, *a rendszer szinkrón lehetséges ontikus állapotai időben változhatnak*. A kvantumállapot változásával tehát a rendszernek minden pillanatban más és más ontikus állapotai válnak lehetségessé. Ezek az egy időben lehetséges állapotok egy valószínűségi teret képeznek 1-re összegződő valószínűséggel. A kvantumelméleti állapottér egy adott ontikus állapota tehát a rendszer kvantumállapotának változásával hol belecsekszik ebbe a klasszikus valószínűségi térbe, hol pedig nem – azaz hol lehetségessé válik, hol nem.

Érdekes egy pillanatra összevetni a lehetőségek és az időbeliség viszonyának különbségét a klasszikus fizikában és a kvantumelméletben. A klasszikus fizikában az időbeli változást, vagyis a dinamikát elsősorban az ontikus állapotokon értelmezzük. Mivel az episztemikus állapotok az ontikus állapotok valószínűségi keverékei, ezért a dinamika járulékosan az episztemikus állapotokon is időfejlődést generál. Ha a kapus 50–50 százalékos eséllyel gurítja a jobb- illetve a balhátvédnek a labdát, akkor a labda 50–50 százalékos eséllyel lesz egy pillanattal később az egyik vagy másik védőnél. A tudatlanságunk a labda helyzetére vonatkozóan öröklődik a dinamika révén. Másképp mondva, az ontikus állapotok dinamikája és a jelenlegi episztemikus állapot együttesen meghatározzák a későbbi episztemikus állapotot is.

A modális interpretációban azonban megfordulnak a szerepek. A dinamika itt elsősorban az episztemikus állapotot fejleszti időben. Az episztemikus állapot ugyanis maga a kvantumállapot egy klasszikus állapottérre vetítve. Ezért a modális interpretációban a kvantumállapotot *dinamikus állapotnak* is nevezik. Ezzel szemben az ontikus állapotok, amelyeket itt *tulajdonságállapotoknak* neveznek, csak mintegy járulékosan nyernek dinamikai szerepet. Mindössze annyit tudunk róla, hogy az ontikus állapotok úgy fejlődnek, hogy sztochasztikus fejlődésük kompatibilis legyen az episztemikus állapotok dinamikájával. A modális interpretációban tehát az episztemikus állapot dinamikája van meghatározva először, az ontikus állapoté pedig csak azután.

Ahogy Jeffrey Bub, a modális elmélet egyik változatának kidolgozója fogalmaz: „A klasszikus világ és a kvantumvilág közötti különbség tehát az, hogy a klasszikus dinamika annak időbeli alakulását korlátozza közvetlenül, ami *aktuális*, a tulajdonságállapot dinamikai fejlődésén keresztül; ezzel szemben a kvantum dinamika annak időbeli alakulását korlátozza közvetlenül, ami *lehetséges* (ami *valószínű*), ... [a klasszikus állapottér] dinamikai fejlődésén keresztül, amelyet a kvantumállapot és a kiválasztott fizikai mennyiség definiál.” (Bub 1998. 120.)

egyben azt is megmutatja, hogy hogyan bukkan fel (emergál) a klasszikus világ a kvantumelméletből.

Végül a modális interpretációkban megjelenik egy, a klasszikus fizikától elterő igen érdekes tulajdonság, amelyet *perspektivizmusnak* neveznek. Minthogy ezekben az interpretációkban a szóban forgó fizikai rendszert legtöbbször egy nagyobb rendszer részeként írjuk le, így felvetődik a kérdés, hogy vajon mi is a kapcsolat az összetett rendszer és a részrendszerek tulajdonságai között. Amint az kiderül, általános esetben ez az összefüggés nagyon gyenge: a tulajdonságokra sem a komponálhatóság, sem a dekomponálhatóság nem teljesül. Azaz, a részrendszerek tulajdonságaiból összetett tulajdonság nem feltétlenül tulajdonsága az összetett rendszernek, illetve az összetett rendszer tulajdonságai nem mindig bonthatók fel a részrendszerek tulajdonságaira. A modális interpretációkban a tulajdonságoknak ezt a sajátosságát hívják perspektivitásnak. Ami tehát lehetséges egy összetett rendszer számára, az nem feltétlenül lehetséges a részrendszerekben, és fordítva, ami lehetséges a részrendszerek számára, az nem feltétlenül lehetséges az összetett rendszerben.

IV. ÖSSZEGZÉS

A klasszikus fizikában egy rendszer ontikus állapotainak, azaz egyidejű lehetőségeinek tere általában rögzített. Ha mégis változik, azt mindig valamilyen külső kényszerfeltétel megjelenése okozza. A rendszer episztemikus állapota ezek után ebben a megváltozott állapottérben lesz értelmezve mint valószínűségi eloszlás a megváltozott lehetőségi tér fölött. Ezzel szemben a kvantumelmélet modális interpretációjában maga az episztemikus állapot változása generálja a lehetőségek terének megváltozását. A kvantumállapot ugyanis a kvantumelméleti állapottérbe beágyazott klasszikus (vagy majdnem klasszikus) állapotterekből minden pillanatban kiválaszt egyet. Mivel azonban a kvantumállapot változhat az időben, ezért a kiválasztott klasszikus állapottér minden pillanatban más és más lehet. Ennek a klasszikus állapottérnek az elemei azonban éppen a szinkron lehetőségek, a kvantumállapot pedig az ágensnek ezekre a lehetőségekre vonatkozó korlátozott információját reprezentáló episztemikus állapot. A lehetőségi struktúra változásának klasszikus és modális kvantumelméleti tárgyalása közötti különbséget tehát abban áll, hogy az utóbbiban a lehetőségi struktúra időbeli változását a rendszer belső dinamikai fejlődése okozza, nem pedig a külső kényszerek. A rendszer fejlődése mintegy magával ragadja a lehetséges állapotok holdudvarát.

IRODALOM

- Belnap, Nuel – Thomas Müller – Tomasz Placek 2022. *Branching Space-Times*. Oxford, Oxford University Press. <https://10.1093/oso/9780190884314.001.0001>
- Bub, Jeffrey 1998. *Interpreting the Quantum World*. Cambridge, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1119/1.19016>
- de Muynck, Willem M. 2002. *Foundations of Quantum Physics, an Empiricist Approach*. Dordrecht–Boston–London, Kluwer. <https://doi.org/10.1007/0-306-48047-6>
- Dieks, Dennis – Peter Vermaas (szerk.) 1998. *The Modal Interpretation of Quantum Mechanics*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Dickson, W. Michael 1998. *Quantum Chance and Non-locality*. Cambridge, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524738>
- E. Szabó, László 2002. *A nyitott jövő problémája*. Budapest. Typotex.
- Hughes, Richard 1989. *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge/MA–London, Harvard University Press.
- Kment, Boris 2021. *Varieties of Modality*. Stanford Encyclopedia of Philosophy. <https://plato.stanford.edu/entries/modality-varieties/>
- Lieb, Elliot H. – Jacob Yngvason 1999. The Mathematical Structure of the Second Law of Thermodynamics. *Physics Reports*. 310/1. 1–96. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(98\)00082-9](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00082-9)
- Lombardini, Olimpia – Dennis Dieks 2021. *Modal Interpretations of Quantum Mechanics*. Stanford Encyclopedia of Philosophy. <https://plato.stanford.edu/entries/qm-modal/>
- Maudlin, Tim 2019. *Philosophy of Physics. Quantum theory*. Princeton/NJ, Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvc77hrx>
- Norsen, Travis, 2017. *Foundations of Quantum Mechanics*. Dordrecht, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-65867-4>
- Prior, Arthur 1967. *Past, Present and Future*. Oxford. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198243113.001.0001>
- Szabó Gábor 2024. Kvantumelmélet és interpretáció. *Magyar Filozófiai Szemle*. 68/1. 182–207.
- van Fraassen, Bas C. 1970. On the Extension of Beth's Semantics of Physical Theories. *Philosophy of Science*. 37/3. 325–339. <https://doi.org/10.1086/288311>
- van Fraassen, Bas C. 1972. A formal approach to the philosophy of science. In R. Colodny (szerk.) *Paradigms and Paradoxes. The Philosophical Challenge of the Quantum Domain*. Pittsburgh, University of Pittsburgh Press. 303–366. <https://doi.org/10.2307/jj.9644807.9>
- van Fraassen, Bas C. 1991. *Quantum Mechanics*. Oxford. Clarendon Press.