

## A kvantumelmélet nehéz öröksége

### Filozófiai tudatosság és extravagancia

A kvantumelmélet fogalomkészletét és szóhasználatát a klasszikus fizika többi ágához mérten jóval nagyobb filozófiai tudatosság, ugyanakkor jóval nagyobb, hogy úgy mondjam, filozófiai extravagancia is jellemzi. Ami a tudatosságot illeti, elég egy pillantást vetni arra, hogy mennyire általánosan és reflektáltan használja az elmélet a klasszikus fizikától örökölt fogalmakat: amíg ott konkrétan sebességről vagy térerősségről beszélnek, addig itt általánosan fizikai mennyiségekről, sőt megfigyelhető mennyiségekről; amíg ott az olyan fogalmak, mint a fizikai rendszer állapota vagy maga a fizikai rendszer csupán implicit módon, de legtöbbször úgy sem kerülnek elő, addig itt ezek a fogalmak az elmélet alapfogalmai. Egy fizikus hallgató már az első kvantumelmélet-órákon olyan fogalmakkal kénytelen szembesülni, mint a megfigyelés, mérés, komplementaritás, határozatlansági reláció, részecske-hullám dualitás, olyan fogalmakkal, amelyekről korábbi tanulmányai során még sohasem hallott. De a magasabb kvantumelméleti stúdiumokban sincsen ez másképp: lokális realizmusról, modális interpretációról és kontextualitásról hallunk.

A fizikai leírásban szereplő fogalmak azonban nemcsak tudatosabbá és reflektáltabbá válnak a kvantumelméletben, hanem egyfajta jellegzetes filozófiai attitűd jegyeit is magukon viselik. Ha kezünkbe veszünk egy, a kvantumelmélet alapjaival foglalkozó kézikönyvet, rögtön szemünkbe ötlük a tárgyalásmódnak az a radikalitása és imperatív hangneme, amellyel a szerző elhatárolja tárgyát a hagyományos fizikai elméletektől, és felkészíti az olvasót egyfajta határátlépésre: ki itt belépsz, hagyj fel minden reménnyel. A legtöbb szerző jó időben figyelmezteti olvasóját, hogy a kvantumelméletben érvényüket veszítik a klasszikus fizika alapfogalmai, a boole-i logika, a bivalencia vagy a klasszikus valószínűségszámítás; a merészebbek pedig egyenesen párhuzamos világok vagy elmék bevezetését sürgetik. De még a legkonzervatívabb szerzők is egyetértenek abban, hogy a kvantumelmélet megértése egy új fogalmi apparátust igényel, gyökeres szakítást a hagyományokkal, a fizikai elméletekről alkotott képünk radikális újragondolását.

A szakma művelői számára talán nem tűnik fel ez a kvantumelméletet övező sajátos filozófiai hangnem. Ez részint azért van, mivel ezt a beszédmódot egyszerre sajátítják el magával az elmélettel, részint mivel gyakorló fizikusként hozzászoktak ahhoz, hogy az alapító atyáktól rájuk hagyományozott nagy szavakat ne vegyék névértéken, hanem pusztán valamilyen formális struktúra megnevezéseként tartásák őket számon: – Lokális realizmus? – Ja, hogy a Bell-egyenlőtlenségek teljesülnek.

E tekintetben érdemes összevetni a kvantumelméletet a relativitáselmélettel. A két elmélet születését alig egy évtized választja el egymástól, mégis reprezentációjuk a szakmán belül erősen eltérő. A relativitáselméletet a régi, hagyományos fizika utolsó nagy elméleteként tartják számon, míg a kvantummechanikát az új paradigma

első jelentős alkotásaként. Az egyetemi kurrikulumban (legalábbis az ELTE-n a 90-es évek közepén) a relativitáselmélet a klasszikus fizika szigorlat részeként szerepelt, míg a kvantumelmélet a modern fizika szigorlatban. A formalizmus különbsége nem ad magyarázatot a két elmélet eltérő értékeléséhez: az általános relativitáselmélet (ha tanítanak) legalább olyan magasszintű matematikai ismereteket igényelne, mint a kvantumelmélet. Jóllehet a relativitáselmélet tartalmi magja jobban lokalizálható, mint a kvantumelméleté, az előbbi a benne szereplő fogalmakat legalább olyan radikálisan újraértelmezte, mint az utóbbi. Mindez azonban nem ad magyarázatot arra, hogy a fizika önképében miért is szerepel egészen más fényben a két elmélet.

Vagy egy másik összehasonlítást véve, az is felettébb különös, hogy mondjuk a klasszikus statisztikus fizika, amely a 19. század második felének monumentális alkotása, miért vonzza sokkal kevésbé a filozófusok érdeklődését, mint a szintén statisztikus jellegű kvantumelmélet. Meggyőződésem, hogy a statisztikus fizika igazi aranybánya a tudományfilozófia számára: a valószínűség, a redukció, a fizikai magyarázat fizikailag igen termékenyen, de filozófiailag felettébb kusza módon szerepelnek az elméletben. Mégis a statisztikus fizika filozófiájának szentelt kézikönyvek száma nemzetközi szinten is alig haladja meg az egy tucatot.

Honnan is jön tehát ez a hagyományokkal dacosan szakítani kívánó forradalmi retorika, amely a kvantumelmélet beszédmódját jellemzi? Vajon az új tapasztalati anyag tette szükségessé a fizikai leírásnak ezt az új formáját, vagy a sajátos kifejezőmód mögött egyéb kulturális tényezők is munkálkodtak?

## A Forman-tézis

Paul Forman (1971), német származású amerikai tudománytörténész egy 1971-ben keletkezett és azóta mértékadónak számító írásában ez utóbbi lehetőség mellett érvel. Tézise röviden a következő: az első világháború utáni weimari Németország sajátos kulturális klímája gyökeresen hozzájárult a kvantumelmélet arculatának, ezen belül a kvantumelmélet *akauzális* jellegének kialakulásához.

Forman tézisének alátámasztó lépések a következőképpen rekonstruálhatók. Az első világháború elvesztése Németországban a szilárd és racionális világrendbe vetett hit megrendüléséhez és egyúttal számos rációellenes kulturális tendencia megerősödéséhez vezetett. A háborús vereség utáni domináns intellektuális légkört, beleértve ebbe az akadémiai világban uralkodó légkört is, egyfajta neoromanticizmus és egzisztencialista életfilozófia jellemezte, holizmus és neovitalizmus, amely rosszállóan tekintett mindenfajta analitikus racionalitásra. Ebben az egzakt tudományokkal szemben ellenséges intellektuális klímában a szaktudósok nem nagyon tehettek mást, minthogy megpróbáltak alkalmazkodni az őket körülvevő művelt nagyközönség gondolkodásmódjához. Az egyetemi és akadémiai testületi és ünnepi beszédek alkalmával, ahol a szaktudósoknak egy szélesebb közönség számára érthető nyelven kellett számot adniuk kutatásaikról, a tudósok mondanivalójukat a kor gondolkodásmódjának megfelelően kezdték frazírozni. Mivel azonban az általános kulturális klímát egy olyan szellemi irányultság határozta meg, amely ferde szemmel nézett a mechanisztikus, materialista és pozitivisták tanokra, ezért a tudósok, ezen belül a leginkább közmegegyezés tárgyának örvendő matematikusok és fizikusok, mondanivalójukat igyekeztek fedésbe hozni a

weimari korszak antiracionális intellektuális miliójével. Forman szerint mind a kvantumelmélet, mind az intuicionista matematikafilozófia ennek a tudósok vállára nehezedő társadalmi nyomásnak a terméke. Ha egy fizikus adott valamit nyilvános megítélésére, akkor tudományos eredményei bemutatásakor jobban tette, ha szakított azokkal a fogalmakkal, amelyeket a kulturális környezet a német hanyatlást előidéző legfőbb intellektuális okokkal hozott vonatkozásba. A kauzalitás és a determinizmus ezen okok között volt számon tartva.

De hasonlóan magáévá kellett tennie az akadémiai kötelékébe tartozó német tudósok a német középosztály köreiben elterjedt életérzés egyik központi motivumát is, tudniillik a válságét, amely természetesen megkövetelte a szakítást a tradicionális módszerekkel és doktrínákkal. Spengler alapművének, *A nyugat alkonyának* kulturális relativizmusa közvetlen kihívást jelentett az egzakt tudományok ideológiájával szemben. Spengler számára a kauzalitás nem volt egyéb, mint mesterséges konstrukció, amelyet a fausti, nyugati kultúra emelt védőbástyaként a végzet irracionálisával szemben. A halott és merev kauzalitás az áramló élet antitéziseként nyert meghatározást.

Forman számos akadémia székfoglaló, rektori beszéd, tudománynépszerűsítő esszé ragyogó és lebilincselően szarkasztikus elemzésén keresztül mutatja ki, hogy 1918-tól kezdve hogyan változik meg a természettudományok önreprezentációja, hogyan nyer teret a spengleriánus *Weltschmerz*, és hogyan szaporodnak el és értékelődnek fel az olyan „élet-metaforák” a tudósok beszédeiben, mint organizmus, spontaneitás, ösztön és intuíció. Jó példa erre Wilhelm Wien, Planck mellett a német tudomány vezéralakja a korban, aki egy 1918-as beszédében még Mach pozitívista eszméi valamint a fizika autonómiája mellett száll síkra a filozófiával szemben; 1919-ben már egyenlőségjelent tesz a tudomány, a túlzott specializáció és az utilitarizmus között és Mach neve eltűnik a beszédéből; 1925-ben pedig már a filozófiának mint „egyesítő diszciplínának” a doktori szigorlatból való eltörlése fölött kesereg. De nem maradtak érintetlenek Spengler hatásától olyan szellemek sem, mint von Mises, Reichenbach, Sommerfeld, Weyl vagy éppen Born és Schrödinger. (Talán csak Planck és Einstein tartoztak azon kevesek közé, akik szilárdan kitartottak egy racionális világrendbe vetett hitük mellett.) Így mire a kvantumelméletet 1925/26-ban megszületett, a szakma legnagyobbjai már széles körben és több rendben is nyilvánosan hitet tettek egy akauzális és sok tekintetben misztikus világkép mellett. A kvantummechanika máig uralkodó koppenhágai értelmezése ebben a szellemi milióban született – állítja Forman.

## **Nehéz örökség**

A Forman-tézis a hetvenes évek tudománytörténeti és tudományfilozófiai paradigmájának jellegzetes jegyeit viseli magán, így az azóta eltelt időben számos kritika érte (ld. Stöltzner, 2011). Ennek a rövid esszének nem célja, hogy Forman állításait védelmébe vegye, vagy hogy érvényességüket kétségbe vonja. A Forman-tézis gyenge változata mindenképpen érvényes: a kvantummechanika egy olyan sajátos filozófiai öntőformában született, amelyet erősen alakított a kor szociális-kulturális környezete.

Azt állítom, hogy ez a filozófiai örökség még ma is velünk van, és számos esetben gátolja, hogy elfogulatlanul tekintsünk az elméletre. Nem azt mondom tehát, hogy a kvantumelmélet ne hozott volna újat, vagy hogy ne állította volna igencsak próba elé a fizikai elméletalkotást és fogalmi elemzést. Éppen ellenkezőleg, a filozófiai előítéletektől mentes higgadt gondolkodás éppen azért volna elengedhetetlen, mivel az elmélet megértése önmagában is rendkívül bonyolult. Felesleges tehát a problémákat azzal szaporítani, hogy a megértést azzal a fogalmi eszköztárral próbáljuk elvégezni, amelyet az elmélet alkotói első lendületből, jobb híján, és, amint a Forman-tézis állítja, erős kulturális-szociológiai nyomás hatására kialakítottak.

A továbbiakban csupán egyetlen példát szeretnék hozni arra, hogy ezek az alapító atyáktól örökölt fogalmak hogyan vezethetik félre a megértést. Példámat szándékosan nem a szélsőséges interpretációk köréből merítem. Épeszű fizikus, miként egy épeszű filozófus is csupán legyint, amikor sokvilág-elmületről hall.<sup>1</sup> A példa, amelyet példának hozok fel, a híres szuperpozíció elve.

A szuperpozíció elve matematikailag annyit jelent, hogy a kvantummechanikai állapotér lineáris: egy fizikai rendszer két lehetséges állapotának lineáris kombinációja is a rendszer egy lehetséges állapota. Másrészt, a fizikai rendszerek időbeli viselkedését szabályozó dinamikai egyenletek lineárisak. A dinamikai egyenletek megoldásainak lineáris kombinálhatósága természetesen nem a kvantumelméletben jelenik meg először: a vákuumban terjedő elektromágneses hullámokat leíró Maxwell-egyenletek ugyancsak lineárisak. A klasszikus fizikától eltérően azonban a szuperpozíció elve a kvantummechanikai állapotfogalom sajátos értelmezése révén olyan többletjelentésre tesz szert, amely aztán problémák további sorát generálja.

Egy mikrofizikai rendszer kvantumállapota ugyanis definíciójánál fogva azokkal a valószínűségi eloszlásokkal adható meg, amelyeket a rendszeren végezhető mérések kimeneteleinek relatív gyakoriságai határoznak meg. Amíg a kvantumelméletet leszámítva soha senki nem vonja kétségbe, hogy a valószínűség fizikai fogalma egy statisztikus sokaságot feltételez, addig a kvantumelméletben a fent említett koppenhágai interpretáció hatására a „fizikai rendszer” kifejezést különös módon egyszer csak *szinguláris részecskékre* kezdik értelmezni. Ennélfogva kvantumállapota nem egy adott forrásból érkező részecskék sokaságának lesz, hanem minden egyes részecskének külön-külön. Ez viszont rögtön maga után vonja, hogy a szuperponált állapot is, azaz a mérési kimenetekhez tartozó állapotok lineáris kombinációja is individuális részecskékre fog vonatkozni. Mit jelent azonban az, hogy egy individuális részecske szuperpozícióban van? Vagy konkrétan, mit jelent, hogy egy individuális atom az „elbomlott” és „nem elbomlott” állapot szuperpozíciójában van? Ez a kérdés rengeteg fejtörést okozott az ezen töprengőknek, és olyan nevezetes fogalmakhoz illetve paradoxonokhoz vezetett, mint a hullámegyenlet ún. kollapszusa illetve a Schrödinger macskája-, a Wigner barátja-paradoxon vagy a kvantummechanikai méréselméleti problémák jelentős része. A szuperpozíció elve vulgáris szinten néha olyan misztikus megfogalmazást nyer, amely akár alá is támaszthatná a kvantumelmélet spengleri eredetének. A tudományos lexikonnak éppenséggel nem nevezhető, de a fogalmak köznapi használatát jól tükröző Wikipédia a szuperpozícióra például a következő

---

1 Bár Everett sokvilág-elméletének, bármilyen meglepő, ismét reneszánsza van: a 2015. évi Lakatos-díjat David Wallace *Emerging Multiverse* (Oxford: Oxford University Press, 2012) című könyvének ítelték.

meghatározást adja: „A kvantum-szuperpozíció a kvantummechanikai rendszerek azon állapota, mikor egyidejűleg két (vagy több) helyzetben is (például van-nincs állapotban) létezhetnek egyszerre.”

Megítélésem szerint azonban a felsorolt problémák nem fundamentális problémák, hanem a koppenhágai interpretáció sajátos filozófiai elkötelezettségeiből adódnak. Nincs is itt egyéb dolgunk, mint nyugodtan hátradőlni, és higgadtan ellenállni a csábításnak, hogy egy alapvetően statisztikus fogalmat egy individuális objektumra értelmezzünk.

Végül szeretném hangsúlyozni, hogy a szuperpozíció elve, amelyet példának választottam, hogy illusztráljam, hogyan is állhat a megértés útjába egy öröklött metafora vagy egy reflektálatlanul használt fogalom, nem egyedülálló. Munkám során egyre-másra ütközöm olyan konszenzuálisan fundamentálisnak tartott problémákba, amelyek, ha az ember képes megtartóztatni magát bizonyos filozófia klisék azonnali és automatikus alkalmazásától, egyáltalán nem tűnnek többé problémának, vagy megoldásuk nem az alapító atyák intencióinak irányába keresendő. Meggyőződésem, hogy ha az olyan emelkedett kifejezéseket, mint a „kontextualitás,” „inkompatibilitás,” „nem-kommutativitás,” stb. némi rezervációval, de mindenképpen a fizikai jelentés gondos rögzítése mellett, nem pedig az öröklött laza konnotációk alapján használjuk, azzal jelentős lépést teszünk a kvantumelmélet fogalmi tisztázásának útján. Az a rengeteg matematikai-formális tudás és filozófia-konceptuális ismeret, amely a kvantumelmélet születése óta eltelt csaknem egy évszázad alatt felhalmozódott, erőt és bátorságot kell, hogy adjon ahhoz, hogy a kvantumelméletet, akár az alapító atyák ellenében is, megértsük.

## Irodalom

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

M. Stöltzner, „The Causality Debates of the Interwar Years and their Preconditions: Revisiting the Forman Thesis from a Broader Perspective,” in: C. Carson, A. Kojevnikov and H. Trischler (eds.), *Weimar Culture and Quantum Mechanics, Selected Papers of Paul Forman and Contemporary Perspectives on the Forman Thesis*, World Scientific Publishing Co., 2011.