ALAIN ASPECT

Ha Einstein tudta volna

ALAIN ASPECT

Ha Einstein tudta volna

FORDÍTOTTA
MOLDVAY TAMÁS

TYPOTEX

Cet ouvrage a bénéficié du soutien des programmes d'aide
la traduction d'ouvrages français en langues étrangères de CNL.

Alain Aspect: *Si Einstein avait su*
© Odile Jacob, 2025
Hungarian translation © Moldvay Tamás, 2026
Hungarian edition © Typotex, Budapest, 2026
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

Lektorálta: Asbóth János

ISBN 978 963 493 385 4

Kedves Olvasó!
Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!
Újabb kiadványainkról, akcióinkról a *www.typotex.hu*
és a *facebook.com/typotexkiado* oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó
Alapította Votisky Zsuzsa, 1989
A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.
Felelős kiadó: Németh Kinga
Felelős szerkesztő: Brunner Ákos
Szerkesztette: Mandl Orsolya
Tördelés: Fodor Gábor
Borítóterv: Somogyi Péter
Készült a Multiszolg Bt. nyomdájában
Felelős vezető: Kajtor Bálint

TARTALOM

BEVEZETÉS 9

MIRŐL LESZ SZÓ A KÖNYVBEN? 15

Útmutató az olvasáshoz 19

1 ALBERT EINSTEIN, A KVANTUMFIZIKA ÚTTÖRŐJE 20

1.1. A feketetest-sugárzás 21
1.2. Max Planck és a feketetest-sugárzás (1900) 26
1.3. Einstein, a forradalmár: a fénykvantummal megmagyarázható a fekete test és a fotoelektromos effektus (1905) 30
1.4. Einstein magyarázata a szilárd anyagok hőkapacitásának meglepő viselkedésére (1907) 34
1.5. A fény hullám-részecske kettőssége (1909) 38
1.6. Az első Solvay-konferencia (1911) 40
1.7. Bohr atommodellje (1913): jelentős előrelépés egy „rémes hipotézis” alapján 44
1.8. Einstein elmélete az anyag és sugárzás kölcsönhatásáról (1916): látványos előrelépés 47
1.9. A fénykvantumok diadala.. és Einstein elégedetlensége 51

2 A BOHR–EINSTEIN-VITA, I. FELVONÁS: A SOLVAY-KONFERENCIÁK (1927 ÉS 1930) 55

2.1. A kvantumformalizmus kidolgozása (1925–1926) 57
2.2. Born valószínűségi értelmezése 61

2.3. Dirac formalizmusa 63
2.4. Első összecsapások 64
2.5. Klasszikus véletlen vagy kvantumvéletlen: nem vehetők egy kalap alá 65
2.6. Az 1927-es Solvay-konferencia 67
2.7. Az 1930-as Solvay-konferencia: „fotonok a dobozban” 81
2.8. A mérkőzés vége vagy egy új kezdete? 84

3 A BOHR–EINSTEIN-VITA, II. FELVONÁS: EINSTEIN, PODOLSKY ÉS ROSEN ÉRVEI 87
3.1. A kvantum-összefonódás 88
3.2. Einstein, Podolsky és Rosen (1935) gondolatkísérlete és a lokális realizmus 90
3.3. Niels Bohr válasza 95
3.4. Az első kvantumforradalomtól a másodikig: Eltérő fogalmak, eltérő képek 97

4 JOHN BELL: A KÍSÉRLETI TESZTELÉS LEHETŐSÉGE 103
4.1. John Bell és a kvantummechanika értelmezése 105
4.2. Foton, polarizáció, polarizátor 109
4.3. Az Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm (EPRB)-gondolatkísérlet polarizált fotonokkal 116
4.4. Bell tétele (1964) 122
4.5. A kísérleti tesztelés lehetősége 129
F4.1. A Bell-tétel: a korrelációk kérdése 132

5 A BELL-EGYENLŐTLENSÉGEKTŐL AZ ELSŐ KÍSÉRLETEKIG 140
5.1. Az elmélettől a kísérleti tesztelésekig 141
5.2. Kísérleti elrendezés a realista elv tesztelésére 145
5.3. A BCHSH-egyenlőtlenségek 152
5.4. Tökéletlen detektorok és egyutas polarizátorok: a torzítatlan mintavétel hipotézise 155
5.5. Berkeley kontra Harvard 157

5.6. A lézer megjelenése 163
5.7. Az első forduló vége 164
F5.1. Az üvegréteges polarizátor működési elve 167

6 PÁRIZSI OPTIKAI INTÉZET, I. FELVONÁS: ÍGÉRETES KEZDETEK 170

6.1. Szerelem első látásra egy hosszú távú projekt iránt 172
6.2. A genfi látogatás 175
6.3. Kezdetben volt a semmi 177
6.4. Kiruccanás Ericébe 181
6.5. Két lézer, különben semmi eredmény 183
6.6. Lőn világosság 186
6.7. Fotonpárok, végre-valahára! 191
6.8. Korlátozott erőforrások, de kivételes környezet 193
6.9. A Bell-egyenlőtlenségek első tesztelése: megerősítés 196
6.10. A Bell-egyenlőtlenségek második tesztelése: lenyűgöző eredmény kétutas polarizátorokkal 202
6.11. Felkészülve a változtatható polarizátorokra 211
F6.1. Egy tudományos eredmény megbízhatósága, a szórás 214
F6.2. Fotonpárok megfigyelése: koincidenciadetektálás 217

7 PÁRIZSI OPTIKAI INTÉZET, II. FELVONÁS: A KVANTUM-NEMLOKALITÁS KÍSÉRLETI TESZTELÉSE 220

7.1. A polarizátorok elforgatása 221
7.2. Forgatás helyett kapcsolás 223
7.3. Az akusztooptikai kapcsoló ötlete 224
7.4. Egy zsákutca 227
7.5. Egy „házilag barkácsolt” kapcsoló 229
7.6. Klasszikus optika a kvantumoptikai kísérletek középpontjában 232

7.7. És végül a kvantummechanika győzedelmeskedik 234
7.8. Publikáció és disszertáció, némi óvatossággal 237
7.9. A habilitációs védésem 239
7.10. Két foton után egyetlen foton 240
7.11. Új kalandok felé 245
F7.1. A Melde-húrtól az akusztooptikai kapcsolóig 249

8 A KVANTUM-NEMLOKALITÁS 254
8.1. Kibúvó nélküli kísérleti tesztelések 258
8.2. Einstein indirekt bizonyítása: egy termékeny tévedés 267
8.3. A nemlokalitás által átalakított fizikai világkép 272
8.4. Kvantum-nemlokalitás: Einstein relativisztikus kauzalitáselvének megsértése? 280
8.5. Ha Einstein tudta volna 287
F8.1. Lehetetlen egy rendszer kvantumállapotát méréssel meghatározni 292
F8.2. A kvantumos klónozás tilalmának tétele 294
F8.3. Az összefonódáson, a Bell-egyenlőtlenségek tesztelésén és a kvantum-nemlokalitáson alapuló technológiák 297

EPILÓGUS 308
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS 313
KÉPEK 316
IRODALOM 324

BEVEZETÉS

„Do you have a permanent position?"
Ezek voltak John Stewart Bell első szavai hozzám 1975 tavaszának egy reggelén a genfi CERN elméleti fizikai intézetének irodájában. Épp csak bemutattam neki a tervemet egy újszerű kísérletről, melynek célja az általa felfedezett egyenlőtlenségek tesztelése volt. A tét hatalmasnak ígérkezett: eldönteni, hogy Niels Bohr és Albert Einstein vitájában voltaképpen melyiküknek volt igaza. A projektem keretében azt terveztem, hogy fotonokat – azaz fényrészecskéket – használok annak az elméleti hipotézisnek a teszteléséhez, amelyet Bell az 1964-es alapvető cikkének végén fogalmazott meg. Arra számítottam, hogy Bell-lel tudományos vitát kell majd folytatnom a tervem lényegéről, ám ehelyett ő az adminisztratív helyzetemről kérdezett: „Van már állandó státusza?" Miért?

Elmagyarázta, hogy ezt a témát a legtöbb fizikus érdektelennek, sőt, abszurdnak tartja, és ha egy fiatal fizikus egy ilyen projektbe vág bele, hibbantnak (szó szerint: *crackpot*nak, „törött teáskannának") fogják tartani. Azt válaszoltam neki, hogy szerencsém van, mert köztisztviselő vagyok, kutató tanárként dolgozom az École Normale Supérieure (ENS) cachan-i intézetében. Mivel ellátom a rám bízott oktatási feladatokat, szabadon kutathatok, amit csak akarok, ahol csak akarok. És én Bell felfedezésének a következményein akartam dolgozni. Kísérletileg döntést hozni a fizika két kolosszusa, Einstein és Bohr vitájában – micsoda őrülten izgalmas téma volt ez számomra, egy fizikaőrült számára!

Miről szólt a vita? Einstein nem kételkedett a kvantumformalizmus[1] érvényességében, vagyis abban, hogy képes megjósolni a kísérletek eredményeit. De úgy vélte, ez a formalizmus csupán ideiglenes, és egy részletesebb elmélet fogja felváltani. Ebben a korban a vita tisztán filozófiai jellegű volt: csak a kvantumelmélet *értelmezéséről* szólt, így semmilyen hatással nem volt az elmélet gyakorlati alkalmazására. Ezért a legtöbb fizikus haszontalan spekulációnak tartotta. Nem tudták, hogy Bell 1964-es munkája óta elvileg lehetséges kísérlettel eldönteni Bohr és Einstein vitáját.

Azért akartam megírni ezt a könyvet, hogy megosszam az olvasóval a vita iránti lelkesedésemet, amely 1974-ben arra késztetett, hogy Bell munkáira támaszkodva egy némileg őrült kísérleti kalandba kezdjek, és kiderítsem, vajon Bohrnak vagy Einsteinnek volt-e igaza. Majdnem fél évszázaddal később John Clauserrel és Anton Zeilingerrel együtt megkaptam a 2022-es fizikai Nobel-díjat annak elismeréséül, hogy meggyőző kísérleti bizonyítékot szolgáltattunk arra, hogy Einstein világképét fel kell adni.

Számomra ez a történet 1973-ban kezdődött, nem sokkal azelőtt, hogy megismerkedtem Bell-lel. Akkoriban Kamerunban tartózkodtam, ahol közszolgálati önkéntesként fizikát tanítottam leendő középiskolai tanároknak feleségemmel, Annie-vel együtt, aki ugyanezeknek a diákoknak kémiaórát tartott. Az Orsay-i Egyetemen és a cachan-i ENS-ben kiváló képzést kaptam klasszikus fizikából, de ugyanez már nem mondható el a kvantumfizikáról. Frusztrált a dolog, mert tudtam, hogy ez a modern fizika egyik legfontosabb területe. Amikor megtudtam, hogy megjelent egy új könyv, amely világosan és precízen bemutatja a kvantumfizikát,[2] megvettem, és az elsőtől az utolsó oldalig áttanulmányoztam mindkét kötetét. Így 1974 őszén, Kamerunból visszatérve már elég felkészült voltam ahhoz, hogy megértsem az úgynevezett „összefonódott" állapotú részecskék kvantumszámításait. Az összefonódás egy olyan állapot, amelyet 1935-ben Albert Einstein, Boris Podolsky és Nathan Rosen fedezett fel elméleti úton: két olyan részecske állapota, amelyek a múltban valamikor kölcsönhatásba

1 Rögtön tisztázom is, hogy mit jelent a *kvantumformalizmus* kifejezés, amelyet ebben a könyvben gyakran fogok használni: ez az összes olyan matematikai eszközt jelenti, amellyel a kvantumelmélet alapvető fogalmait kifejezhetjük, és kiszámíthatjuk, hogy mit jósol az elmélet azokban a helyzetekben, amelyekben alkalmazható.

2 *Lásd* Cohen-Tannoudji, Diu és Laloë (2018).

léptek egymással – de jelenleg már el vannak választva egymástól –, ám úgy tűnik, függetlenül attól, hogy milyen távol kerültek azóta, közvetlen kapcsolatban maradtak egymással. Tekintve a kvantumszámításnak erre az állapotra alkalmazott eredményeit – amelyet ebben a könyvben „EPR-állapotnak" nevezek –, Einstein és munkatársai arra a következtetésre jutottak, hogy a két összefonódott részecske a számításokban figyelembe vett tulajdonságokon túl további tulajdonságokkal is rendelkezik, és a kvantumformalizmusnak egy ilyen rendszerről adott leírása nem teljes. Ebből azt a következtetést vonták le, hogy a kvantumelmélet az akkoriban ismert formájában nem végleges elmélet, csupán egy közelítőleges vázlata egy majdani precízebb elméletnek. Bohr nem értett egyet, és azt állította, hogy a kvantumformalizmus leír mindent, amit az összefonódott részecskékről tudni lehet, így nem kell további elmélet után kutatni.

Közel harminc évvel később, 1964-ben Bell publikálta fontos felfedezését.[3] Einstein következtetését komolyan véve, kiegészítette a kvantumformalizmust azzal, hogy a részecskékhez további paramétereket rendelt Einstein világnézetének szellemében, majd megmutatta, hogy ezen új formalizmus szerint az EPR-típusú állapotokban[4] várható mérési eredményeknek ki kell elégíteniük azokat az egyenlőtlenségeket, amelyeket manapság már „Bell-egyenlőtlenségeknek" nevezünk. Ezzel szemben a hagyományos kvantumszámítás azt jósolja, hogy a mérési eredményeink nem fogják kielégíteni ezeket az egyenlőtlenségeket – ezt nevezzük a „Bell-egyenlőtlenségek megsértésének". Tehát elegendő egy laboratóriumi kísérletet végrehajtani, hogy eldöntsük a Bohr és Einstein közötti vitát. Vagy azt találjuk majd, hogy a kísérlet eredménye megsérti a Bell-egyenlőtlenségeket, ahogyan azt a kvantummechanika jósolja, és ez esetben Bohrnak igaza van, amikor elutasítja Einstein nézőpontját. Vagy olyan eredményeket kapunk, amelyek összhangban állnak a Bell-egyenlőtlenségekkel, ez viszont Einstein világnézetét igazolja majd. Ez esetben kiderül, hogy a kvantummechanikai elméletnek komoly hiányosságai vannak, amit Bohr nem tudott elképzelni.

3 *Lásd* Bell (1964).

4 Voltaképpen az EPR-állapot egy változatáról van szó, amelyet David Bohm fedezett fel. Utóbbit a továbbiakban „EPRB-állapotnak" fogom nevezni.

Einstein, Bohr és Bell elméleti fizikusok voltak, akik gondolatkísérletek alapján érveltek az igazuk mellett – azaz olyan kísérletek alapján, amelyeket elvileg a fizika alapvető törvényei lehetővé tesznek, de az aktuálisan ismert kísérleti módszerekkel nem valósíthatók meg. Vajon lehetséges-e egy valódi, laboratóriumban végrehajtható kísérlet a témában? A válasz ott volt abban a dossziéban, amelyet Christian Imbert, a párizsi Optikai Intézet fiatal professzora adott át nekem 1974 októberében. Először Bell 1964-es cikkét találtam meg benne, amelynek tartalma szó szerint megdöbbentett, aztán az EPR-cikkeket és Bohr 1935-ös cikkét. És ott volt a dossziéban egy 1969-es cikk is, amelyben John Clauser és munkatársai, Michael Horne, Abner Shimony és Richard Holt leírnak egy laboratóriumi körülmények között elvben megvalósítható kísérleti összeállítást a Bell-egyenlőtlenségek tesztelésére.[5] Ebben az összeállításban, amelyet „CHSH"-nak neveznek, vesznek egy összefonódott fotonpárt, és a fotonok polarizációját mérik. A polarizáció a kvantumoptikában egy alapvető tulajdonság, amit a könyv közepén fogok bemutatni. Ugyanebben a mappában ott volt még két, 1972-ben megvédett doktori disszertáció kézirata is, az egyik a Berkeley-i, a másik a Harvard Egyetemről, amelyek a CHSH kísérleti konfiguráció alkalmazásával elvégzett két kísérlet eredményeit ismertették. Az első, Clauser által végzett kísérlet a kvantummechanika előrejelzéseinek megfelelően a Bell-egyenlőtlenségek megsértését állapította meg, míg a második szerint nem sérült az egyenlőtlenség. Hát ez izgalmasan hangzott! Két, egymásnak ellentmondó eredmény! Kellett tehát egy új kísérlet, hogy döntsünk a kérdésben.

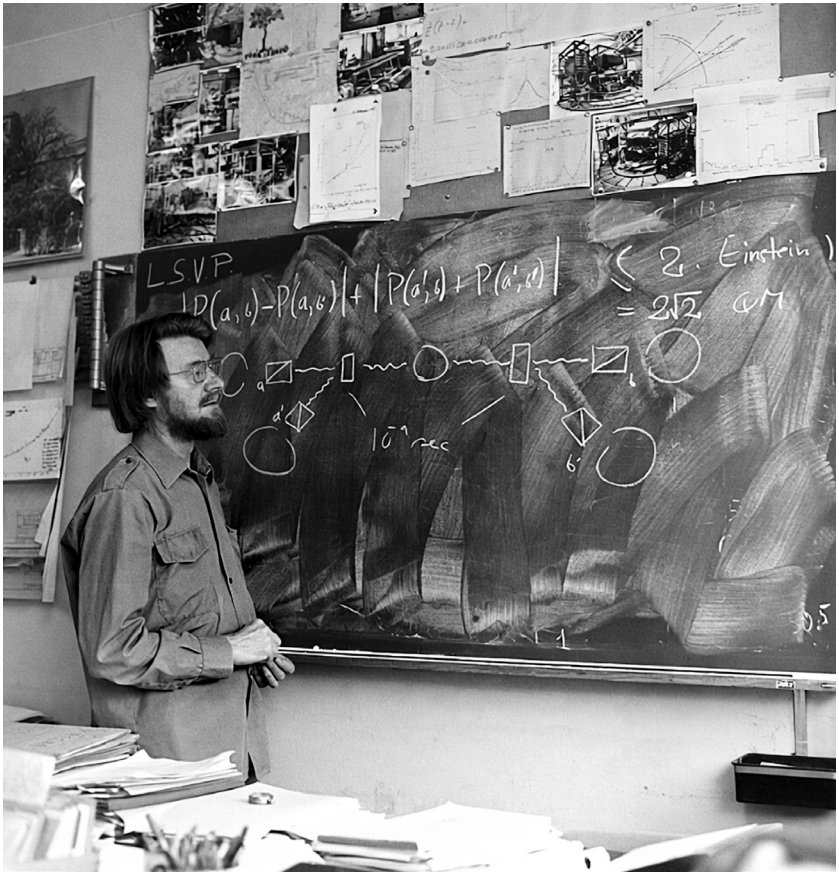
1974-et írtunk, és valószínűnek tűnt, hogy azok a laboratóriumok, amelyek rendelkeznek a szükséges szakértelemmel az ilyen típusú kísérletek elvégzésére, már rég munkához láttak. Mivel én magam nem rendelkeztem kellő szakértelemmel, őrültség lett volna belevágnom ebbe a küzdelembe. Ugyanakkor láttam egy lehetőséget, hogy hozzájáruljak a teszteléshez. Az 1972-es kísérletek ugyanis figyelmen kívül hagytak egy javaslatot, amelyet Bell az 1964-es cikkének következtetésében fontosnak tartott kiemelni: el kell kerülni, hogy bármilyen ismeretlen kölcsönhatás befolyásolhassa az egymástól távol elhelyezkedő mérőműszerek méréseit. Ehhez viszont a mérés során

5 *Lásd* Clauser, Horne, Shimony és Holt (1969).

nagyon gyorsan meg kellene változtatni a polarizációs méréseket végző műszerek – az úgynevezett „polarizátorok" – beállításait. Meg kell akadályozni, hogy bármiféle kölcsönhatás jöhessen létre közöttük, leszámítva persze egy olyan kölcsönhatást, már amennyiben elfogadjuk, hogy létezik ilyen, amelyik gyorsabban terjedne a fénynél – *ez viszont ellentmondana Einstein relativitáselméletének.* Egy ilyen kísérleti elrendezés megvalósítása nagyon érdekesnek tűnt számomra, mert az einsteini valóságkoncepció összes lényegi elemére kiterjedt, a relativitáselméletet is beleértve. Most már csak azt kellett kitalálnom, hogy hogyan lehet villámgyorsan megváltoztatni a polarizátorok beállítását. Néhány hétre volt szükségem, hogy előálljak egy megoldással, összekombinálva egyrészt a fény és az akusztikus hullámok közötti kölcsönhatásról szerzett ismereteimet, másrészt egy olyan kísérletnek a pontos emlékét, amelyet még a középiskolai fizikatanárom mutatott nekünk az agen-i gimnáziumban.

Elmagyaráztam az elgondolásaimat Christian Imbertnek, aki azt javasolta, hogy mutassam meg a tervemet John Bellnek Genfben. „Finanszírozom az utazásodat. Ha John Bell úgy ítéli meg, hogy a kísérleted megvalósításra érdemes, akkor nekiláthatsz a kutatógárdámban, az optikai alapkísérletek csoportjában." Így néhány héttel később már John Bell előtt álltam, aki, miután meggyőződött arról, hogy biztosított a tanári állásom, bátorított és tanácsokkal látott el, valamint megerősített abban, hogy a tervem fontos elemmel járul hozzá a folyamatban lévő kísérletekhez, ha valóban teljeskörűen tesztelni akarjuk Einstein fizikai világnézetét. Így Genfből e lenyűgöző elméleti fizikus áldásával távoztam, acélos eltökéltséggel, de némi aggodalommal is az általa említett rossz hírnévvel kapcsolatban, amely a választott kutatási témámat övezte. Nem lepleztem ezt a nehézséget Christian Imbert előtt sem, de ő nem vonta vissza korábbi ígéretét, és rendelkezésemre bocsátott néhány eszközt a kísérletem megkezdéséhez: biztosított három egymásba nyíló szobát, és szabad hozzáférést adott az Optikai Intézet figyelemre méltó technikai apparátusához.

Így hát eldöntöttem: a habilitációs disszertációm a Bell-egyenlőtlenségek teszteléséről fog szólni az általam kigondolt kísérleti elrendezéssel, amellyel reményeim szerint pontot tehetek a fizika két óriása, Niels Bohr és Albert Einstein között kirobbant vita végére.



John Bell 1982-ben, a párizsi Optikai Intézetben elvégzett kísérletet bemutató vázlat előtt

(Forrás: Wikimedia Commons, https://cds.cern.ch/record/969981/CERN.)

MIRŐL LESZ SZÓ A KÖNYVBEN?

A könyv vezérfonala Albert Einsteint követi. Ő volt az, aki elsőként megértette, hogy a kvantumfizika radikális újdonságot jelent. Niels Bohrral folytatott vitájában ő világított rá a térben elkülönült objektumok közötti kvantum-összefonódás fantasztikus jelenségére. Einstein érvelésére támaszkodva John Stewart Bell fedezte fel a ma már az ő nevét viselő Bell-egyenlőtlenségeket. És én magam is Einstein fizikai világnézetére hivatkozva jutottam el ahhoz a felismeréshez, hogy el kell fogadnom a kvantummechanika egyik legmeghökkentőbb tulajdonságát: a kvantum-nemlokalitást.

Az 1. fejezetben hangsúlyozom, hogy Einstein volt az első fizikus, aki megértette, hogy micsoda forradalmat jelent a kvantálás fogalma, amelyet Max Planck vezetett be 1900-ban. Einstein jelentősen hozzájárult a kvantumfizika kialakulásához, különösen a fénytan területén. Miután 1905-ben előállt a fénykvantum fogalmával, 1909-ben már a hullám-részecske kettősségre hivatkozott, amelyet azután Louis de Broglie 1923-ban minden anyagi részecskére kiterjesztett. Einstein 1916-ban vetette papírra azokat az egyenleteket, amelyeket még ma is használunk a fény abszorpciójának és emissziójának leírására, egyúttal a lézer működésének alapját képezik. Amint az 1922-ben a fotoelektromos effektus értelmezéséért elnyert Nobel-díja is mutatja, Einstein kvantumfizikai elgondolásai akkoriban már teljes diadalt arattak.

Einstein azonban apránként eltávolodott a kvantumfizika fő áramlatától azt követően, hogy 1925-ben megjelentek a Werner Heisenberg és Erwin Schrödinger által kidolgozott kvantumformalizmusok. Ezek az új formalizmusok szilárd alapot adtak a „régi kvantumelmélet" újításainak, amely még többé-kevésbé empirikusan írta le az atomok

tulajdonságait és azok fénnyel való kapcsolatát, ami a klasszikus fizika keretein belül értelmezhetetlen volt. De ezeknek a nagyon elvont leírásoknak a kapcsolata a való világgal, amelyben a kísérletek eredményeit megfigyeljük, valószínűségek használatát teszi szükségessé, ahogyan azt 1926-ban Max Born, Einstein jóbarátja felvetette. És amint azt a 2. fejezetben elmagyarázom, Einstein nem fogadja el a gondolatot, hogy egy alapvető fizikai elmélet a valószínűség fogalmát használja, mivel ez az ő szemében csupán egy eszköz, amely lehetővé teszi komplex helyzetek egyszerűsített leírását. Ezt jelenti Einstein híres mondása: „Isten nem kockajátékos" – a véletlennek nincs helye a valóság legalapvetőbb szintjén. Einstein így összeütközésbe kerül a Bohr és tanítványai által kidolgozott kvantumformalizmus értelmezésével, az úgynevezett „koppenhágai értelmezéssel". A vita az 1927-es és 1930-as Solvay-konferenciákon csúcsosodik ki, ahol Einstein gondolatkísérletekkel igyekszik bizonyítani, hogy a kvantumelmélet hiányos leírást ad a kvantumrészecskék viselkedéséről.

Bohr a maga részéről minden alkalommal meggyőzően cáfolja Einstein érveit. Einstein azonban nem adja fel, és amint azt a 3. fejezetben bemutatom, 1935-ben egy új érveléssel áll elő: ez már nem egyetlen kvantumrészecskéről szól, hanem két összefonódott részecskéről, amely állapotot a kvantumformalizmus megengedi, de a fizikusok addig még soha nem vizsgálták. Podolsky és Rosen fizikustársaival közösen Einstein a *Physical Review* folyóiratban publikálja az EPR-állapotot bemutató cikket,[1] amely két összefonódott részecskéről szól, amelyek még egymástól távol is erősen korrelálnak, így csak a kvantumformalizmust kiegészítve lehet érthető képet adni a viselkedésükről. Bohr válasza, amely néhány hónappal később ugyanebben a folyóiratban jelent meg,[2] ezúttal nem egy cáfolhatatlan tudományos érvelés, ellentétben a Solvay-konferenciákon elhangzott argumentációkkal, hanem inkább egy ismeretelméleti stílusú válasz. Azon az elgondoláson alapul, hogy nem lehet olyan mérésekről beszélni, amelyeket el lehetett volna végezni, de ténylegesen nem végeztek el. Einstein ezzel szemben úgy véli, hogy a kvantumrendszereknek vannak saját tulajdonságaik, amelyek függetlenek a rajtuk végzett mérésektől, és ezt nevezi *fizikai valóság*nak. Ráadásul a relativitáselmélet atyja

1 *Lásd* Einstein, Podolsky és Rosen (1935).
2 *Lásd* Bohr (1935).

szerint a fizikai valóság *lokális* abban az értelemben, hogy nem befolyásolhatják olyan hatások, amelyek a fénynél gyorsabban terjednek. Einstein fizikai világnézete, amit „lokális realizmusnak" szokás nevezni, radikálisan eltér Bohr fizikai világnézetétől. A kettejük közti vita a halálukig folytatódott (Einstein 1955-ben, Bohr 1962-ben halt meg) anélkül, hogy a kvantumfizika rendkívüli sikereitől lenyűgözött fizikusok többsége különösebb figyelmet szentelt volna neki. Úgy tűnik, sokuk meggyőződése az volt, hogy Bohr kielégítő választ adott Einstein ellenvetéseire, anélkül hogy megértették volna, hogy a két összefonódott részecskéről folytatott 1935-ös vita jellegében eltér az 1927-es, egyetlen részecskéről szóló vitától.

A 4. fejezetben az olvasó megtudhatja, hogy az EPR-állapot váratlanul újra felbukkan 1964-ben, John Bell munkásságával. Bell be szerette volna bizonyítani, hogy a kvantumformalizmus kiegészíthető Einstein lokális realizmusának szellemében, de aztán ráeszmélt, hogy a lokális realizmus valójában összeférhetetlen a kvantumformalizmusnak az összefonódott részecskékre vonatkozó bizonyos jóslataival. Ez az összeférhetetlenség a Bell-egyenlőtlenségekben fejeződik ki, amelyek minden lokális realista formalizmusra nézve kényszerítő erejűek, és amelyeket a kvantumpredikciók megsértenek.

A vita tehát a valóság természetével kapcsolatos ismeretelméleti kérdésről áttevődött a kísérleti fizika terepére. Vajon a megfigyelések összhangban vannak a kvantumformalizmus jóslataival, és ez esetben fel kell adnunk Einstein fizikai világképét? Vagy éppenséggel ellentmondanak a kvantumjóslatoknak, ami fél évszázadnyi hatalmas sikerek után alapjaiban megrengetné a kvantumelméletet? A teoretikusok vitáitól azonban még messze lemaradásban vannak a valódi kísérletek, ezért John Clauser, Michael Horne, Richard Holt és Abner Shimony egy laboratóriumban megvalósítható kísérleti tesztelésre tesznek javaslatot, amint azt az 5. fejezetből megtudhatja az olvasó. Az első két kísérlet, amely a javasolt kísérleti elrendezést követi, ellentmondásos eredményeket hozott, de a következő két kísérlet, amelyeket 1976-ban publikáltak, a kvantummechanikának adott előnyt.

A következő két fejezetben a második generációs kísérleteket ismertetem, amelyeket a párizsi Optikai Intézetben készített elő az a csapat, amelyet jómagam két mérnökkel, Gérard Rogerrel és André Villinggel hoztam létre. Két tehetséges posztgraduális hallgatóval, Philippe Grangier-val és Jean Dalibard-ral kiegészülve, akiknek a köz-

reműködése előrevetíti az általuk befutott későbbi kivételes karriereket, a csapatunk sikeres kísérleti teszteredményeket tudott felmutatni.

A 6. fejezetben bemutatom az első két kísérletet, amelyeket az Optikai Intézetben hajtottunk végre. Ezek kidolgozása 1975-ben kezdődött, és 1981-ben koronázta őket siker. Legfőbb előnyük az összefonódott állapotú fotonpárokat kibocsátó forrás, amely sokkal hatékonyabb, mint az elődeinké. E fotonforrás jóvoltából, amelynek a fejlesztése öt évet igényelt, meg tudtuk erősíteni Clauser és tanítványa, Stuart Freedman kvantummechanika mellett szóló eredményeit a korábbiakkal azonos kísérleti elrendezésben. Ezt követően egy új, a teoretikusok által elképzelt ideális konfigurációhoz közelebb álló kísérleti elrendezést tudtunk megvalósítani. Az így kapott rendkívül pontos eredmény azt mutatta, hogy elég hatékony kísérleti apparátussal rendelkezünk ahhoz, hogy megvalósítsuk a kísérletet, amely kezdettől fogva a szemem előtt lebegett: a Bell-egyenlőtlenségek tesztelését a mérőműszerek beállításának gyors megváltoztatásával. A 7. fejezetben részletesen ismertetem ezt a harmadik kísérletet, amelyet 1982-ben végeztünk el és publikáltunk. Ez a kísérlet nyilvánvaló bizonyítékát adta az úgynevezett „kvantum-nemlokalitás" létezésének. Ezzel a kísérlettel érdemeltem ki, hogy 2022-ben nekem ítélték a megosztott fizikai Nobel-díjat.

A 8. fejezet a későbbi munkákról szól. Először bemutatom az úgynevezett „kibúvó nélküli" kísérleteket, amelyek célja a korábbi modellek néhány hiányosságának a kijavítása. Ebből következtetéseket vonok le a kvantumfizika által nyújtott fizikai világképről. Mivel véleményem szerint elkerülhetetlenül fel kell adnunk Einstein lokális realizmusát, megpróbálok választ adni a könyv címében feltett kérdésre: vajon hogyan reagált volna Einstein ezekre a kísérleti eredményekre? Nagyképűség lenne biztosat mondani erről, de én szeretném azt hinni, hogy talán ő is, akárcsak John Bell és jómagam, elfogadta volna a kvantum-nemlokalitás koncepcióját. Arra is rámutatok, hogy ezek a kísérletek, amelyek rávilágítottak a kvantum-összefonódás radikálisan új jellegére, hogyan vezettek a második kvantumforradalom középpontjában álló új kvantumtechnológiák fantasztikus sokaságához. Kitérek azokra a technológiákra is, amelyek intuitív módon érthetőek a kvantum-nemlokalitás alapján.

Végül az epilógusban visszatérek az alapkutatás és a gyakorlati alkalmazások közötti kapcsolatra, amely a tudományok és a technika iránti

szenvedélyem középpontjában áll. A technológia iránti érdeklődés, amely még astaffort-i fiatal diákként, Jules Verne olvasójaként lelkesített, az elmúlt években újra felébredt bennem – miután egy életen át főként az alapkutatásnak szenteltem minden időmet –, és újabban részt vettem néhány kvantumtechnológiai startup vállalkozásban.

ÚTMUTATÓ AZ OLVASÁSHOZ

Ezt a könyvet elsősorban nem a szakmai közönség számára írtam, hanem azoknak az érdeklődőknek, akik szeretnének többet megtudni arról, hogy a kvantumfizika hogyan változtatja meg a világról alkotott elképzelésünket. Mindazonáltal szerettem volna megosztani az avatottabb olvasókkal is néhány olyan mélyebb gondolatot és magyarázatot, amelyekhez minimálisan középiskolai érettségi szintű természettudományos ismeretekre van szükség. Ezeket a keretes magyarázatokban, a fejezet végi függelékekben, illetve a „Haladóknak" feliratú lábjegyzetekben találja meg az erre kíváncsi olvasó.