

A 2022. ÉVI NOBEL-DÍJ: A KVANTUMOS ÖSSZEFONÓDÁS, A »KÍSÉRTETIES TÁVOLHATÁS« KÍSÉRLETI IGAZOLÁSA

Asbóth János

BME, Elméleti Fizika Tanszék és
Wigner FK, Kvantumoptika és Kvantuminformatika Osztály

A 2022-es fizikai Nobel-díjat a francia *Alain Aspect*, az amerikai *John F. Clauser* és az osztrák *Anton Zeilinger* kapták 1/3-1/3-1/3 arányban – jelentette be a Nobel-bizottság október 4-én Stockholmban. A három kutató úttörő kísérletei (Clauser az 1970-es, Aspect az 1980-as, majd Zeilinger az 1990-es években) egyre pontosabban mutatták meg, hogy a kvantumoz összefonódás, a kvantummechanika által jószolt „kísérteties távolhatás” részecskék között valóban létezik: a Bell-egyenlőtlenségek sérülnek. A kísérletek és a kutatók későbbi munkája lefektették a kvantuminformatica technológiai alapjait. Tekintsük át a kvantumoz összefonódás fejlődését az 1935-ös gondolatkísérletektől – a most Nobel-díjjal jutalmazott kísérleteken át – a ma már lehetséges technológiai és tudományos használatáig!



A 2022. évi fizikai Nobel-díjasok: Alain Aspect, John F. Clauser és Anton Zeilinger.

Előzmény: a természet lokális

A természetben nincsenek távolhatások. Amikor például két mágnes látszólag távolról vonzza-taszítja egymást, valójában az egyik mágnes által felépített mágneses tér hat kölcsön a másik mágnessel. A mágneses és elektromos tér úgy mond „lokális rejtett változók”, amelyek magyarázzák a látszólagos távolhatást. A fizika célja, hogy megtalálja ezeket a lokális, rejtett változókat, és tárja fel dinamikájukat, ami teljesen új jelenségek felfedezéséhez is segíthet, ahogy az a mágneses és elektromos térrel az elektromágneses sugárzás esetében történt. Tulajdonképp úgy is mondhatnánk, hogy távolhatások a fizikában definíció szerint nincsenek: a tér *definiáló* tulajdonsága az,



Asbóth János fizikus, tanulmányait az ELTE-n és az Innsbrucki Egyetemen végezte, a BME Elméleti Fizika Tanszékének docense és a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. Kutatásaiban a kvantuminformaticához érdekes kvantumoptikai és szilárdtest-fizikai rendszereket, topologikus fázisokat vizsgálja.

hogy két fizikai objektum egy helyen kell legyen ahhoz, hogy hassanak egymásra.

A távolhatások kizárását az einsteini relativitáselmélet még mélyebben indokolja. A relativitáselmélet által leírt világ események láncolata, minden eseménynek tér- és időkoordinátái vannak. Egy *A* és *B* esemény között akkor van távolhatás, ha egyikük okozza a másikat, pedig mindketten kívül esnek egymás múltbeli fénykúpjain – szakszóval *A* és *B* térszerűen szeparáltak. Ilyenkor *A* és *B* sorrendje nem abszolút, az egymáshoz képest eltérően mozgó megfigyelők közül van, aki szerint a kettő egyidejű, de van, aki szerint *A*, illetve van, aki szerint *B* volt előbb. Abban, hogy *A* az ok és *B* az okozat vagy fordítva, ezek a megfigyelők nem fognak egyetérteni, ezért az oksági viszony relatív lenne.

A kvantumoz összefonódás születése: *Einstein, Podolsky, Rosen, 1935.*

Arra, hogy a kvantummechanica és relativitáselmélethez szükséges lokális realizmus között feszültség van, 1935-ben, a gondolatkísérletek nagy évében (lásd *Schrödinger macskája*) mutatott rá Einstein, Podolsky és Rosen. Az EPR néven elhíresült, *Physical Review*-ben publikált gondolatkísérletük [1] konklúziója, hogy a fizikai valóság kvantummechanikai leírása „nem tekinthető teljesnek”: kell legyen a kvantummechanica mögött valamilyen még ismeretlen elmélet, amelynek rejtett változói egyszerre tudják megjósolni egy részecske kanonikusan konjugált mennyiségeit. A konklúzióhoz arra van szükség, hogy egy részecskén végzendő mérések eredményeit egy másik részecske megmérésével tudjuk megjósolni. A cikk általános keretben fogalmazza meg az eredményeket, de egy

konkrétabb példát is tekint, ahol a változók a hely és az impulzus, nézzük ezt meg!

Az EPR-kísérlet (1. ábra) előkészületéhez két részecskét (A és B) preparálunk egy különleges szuperponált – mai szóval összefonódott – állapotban. Az állapothoz egyenletesen szuperponáljuk az összes olyan állapotot, ahol A és B impulzusának y komponense egymás ellentettje. A szuperpozícióban a komplex amplitúdók fázisait jól választjuk meg, így az együttes hullámfüggvény helybázisban kifejtve is teljesen korrelált: csupa olyan állapot egyenletes szuperpozíciója, ahol A és B y koordinátája megegyezik. Ilyen állapotot könnyű felírni, lásd az 1. ábrát. Az előkészület része, hogy A -t és B -t nagyon távolra küldjük egymástól, például az x koordináta mentén – A a Földön, Alíznál, míg B a Marson, Bobnál.

Az EPR-kísérlet egy előre egyeztetett pillanatban történik: Alíz a Földön és Bob a Marson is véletlenszerűen választ, hogy a nála lévő részecske helyét vagy impulzusát méri meg (úgymond bázist választ), és azonnal végre is hajtja a mérést, regisztrálja az eredményt. Fontos, hogy a döntéstől a mérési eredmény regisztrálásáig olyan rövid idő teljen el, hogy a bázisválasztás + mérési folyamatok egymás fénykúpjain kívül legyenek – így kizárhatjuk, hogy Alíz bázisválasztása bárhogy befolyásolja Bob mérésének eredményét. Alíz szabadon választhat, hogy az A helyét vagy impulzusát méri meg, és mindkét esetben nem csak A , hanem a B helyét, illetve impulzusát is megtudja, azaz pontosan képes megjósolni Bob mérésének eredményét. Ezért a B részecske olyan tulajdonsággal (rejtett változóval) kell rendelkezzen, amely mind a hely-, mind az impulzuseredményét már előre tartalmazza. Márpedig a kvantummechanika szerint ez ellentmondana a Heisenberg-féle határozatlansági relációnak.

Az EPR-kísérlet kulcseleme a két részecske közötti „kísérteties távolhatás” volt, amit még 1935-ben Schrödinger nevezett el németül „Verschränkung”-nak, angolul „entanglement”-nek – magyarul ezt *kvantumösszefonódásnak* (vagy egyszerűen csak *összefonódásnak*) hívjuk. Bár a gondolatkísérlet alapján az összefonódás valamilyen távolhatást okoz, ez azonban érdekes módon nem használható fel a fénysebességnél gyorsabb információ küldésére. Alíz nem

tud távirót működtetni például úgy, hogy a 0-át és 1-et a hely, illetve impulzus mérésével küldi, mert Bob a saját mérési eredményéből nem tud következtetni arra, hogy Alíz melyik mennyiséget mérte. Einstein ezért nevezte kísértetiesnek a távolhatást.

A pragmatikus fizikusok: 1935–1964.

Bár az EPR-gondolatkísérlet jelezte, hogy feszültség van a kvantummechanika és a lokális realizmus között, a fizikusoknak nem sikerült ezt a feszültséget feloldaniuk. Nem találták meg az Einstein által vár rejtett változókat, amelyek miatt a kvantummechanikát új alapokra kellene helyezni. A kvantummechanika sikeresen magyarázta az új kísérleti eredményeket, és – a matematikát kellően lazán kezelve – kiterjeszhetőnek bizonyult a részecske-antirészecske párok keltésével járó folyamatokra is, kvantumtérelméletek formájában, ráadásul segített megvetni az információtechnológia alapjait (például a félvezetők kvantumos sávmélete a tranzisztort). Ezért 1935 és 1964 között a fizikusok többsége pragmatikus álláspontra helyezkedett, amit *David Mermin* utólag tömören így fejezett ki: „Shut up and calculate”! Azaz: „számolj, ne filozofálj”, vagy „a fizikával, ne a metafizikával törődj”.

A következő lépés az EPR-gondolatkísérlet életében *David Bohm*¹ 1951-es verziója volt, de ezzel is maradt a rejtett változók „metafizika, nem fizika” státusza. Bohm-nál A és B egy-egy feles spinű részecske (például elektron), amelyek spinje (saját perdülete, avagy forgástengelyének iránya) olyan kvantumtulajdonság, ami két megkülönböztethető értéket vehet csak fel, ezek a *bázisállapotai*. Már régóta – az 1922-es Stern–Gerlach-kísérlet magyarázata óta – tudhatóan közvetlenül lehetetlen megmérni, merre mutat egy feles spinű részecske forgástengelye: csak azt, hogy mérőberendezésünk tengelye mentén vagy azzal ellentétesen áll. A mérés előtti, általános állapot Dirac-féle „ket” jelöléssel a tér valamilyen θ , φ szöggel jellemzett irányába mutató spin, ami felírható például a z tengely mentén „fel”, illetve „le” állapotok szuperpozíciójaként,

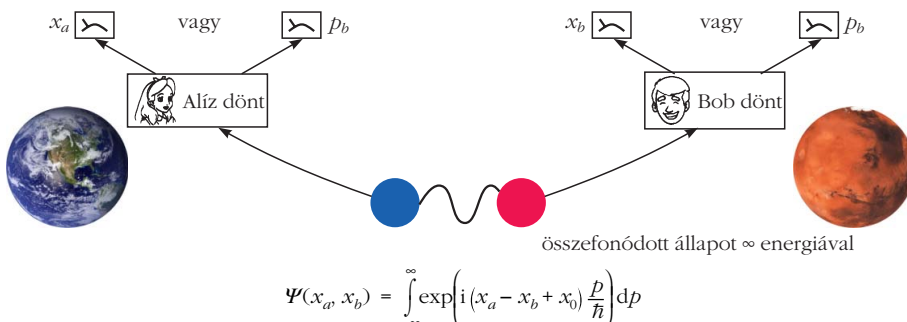
$$|\uparrow_{\theta, \varphi}\rangle = \cos(\theta/2) |\uparrow_z\rangle + e^{i\varphi} \sin(\theta/2) |\downarrow_z\rangle.$$

Ez az összefüggés ugyanaz, mint ami a kvantumbit egy állapotát adja a Bloch-gömbön. Az EPR-hez szükséges összefonódott állapot egyszerűen az A és B részecske 0 perdületű, szingulett kvantumállapota,

$$|\psi_{-}\rangle = |\uparrow\rangle |\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle |\uparrow\rangle,$$

¹A magyar származású Bohmról Radnai Gyula írt részletes cikket a *Fizikai Szemle*ben (2017/12, 429–434. oldal).

1. ábra. Az EPR-kísérlet vázlata. Két részecskét, amelyek össze vannak fonódva, szétküldünk az egymástól távol található Alízhoz és Bobhoz. Ők egymástól térszerűen szeparálva döntenek, hogy helyet vagy impulzust mérnek a náluk lévő részecskén. A kvantummechanika szerint, ha azonos mennyiséget mérnek, eredményeik teljesen korrelált véletlen eredményt kell adjanak.



$$\Psi(x_a, x_b) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(i(x_a - x_b + x_0) \frac{p}{\hbar}\right) dp$$

ahol a két „ket” tenzorszorzatában az első A , a második B állapota, és az egyszerűség kedvéért a normálási tényezőt elhagytam. Itt (amint az a fenti egyenlet alapján könnyen belátható) tetszőleges tengely mentén mérve a spineket ellentétes eredményt kapunk:

$$|\psi_{-}\rangle = |\uparrow_{\theta, \varphi}\rangle |\downarrow_{\theta, \varphi}\rangle - |\downarrow_{\theta, \varphi}\rangle |\uparrow_{\theta, \varphi}\rangle.$$

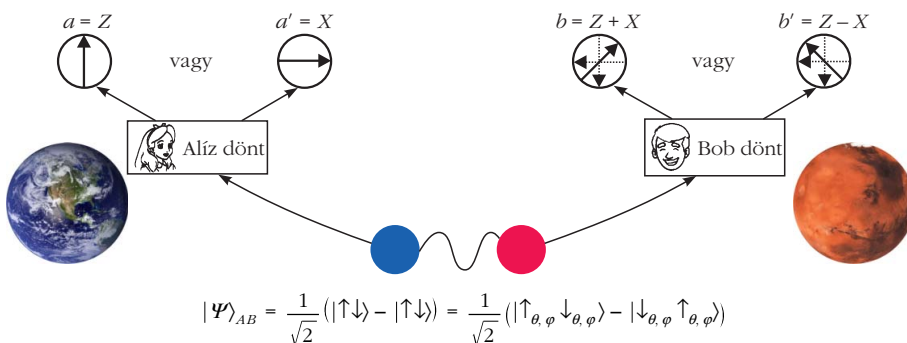
A Bohm-féle EPR-gondolat kísérletben a két kanonikusan konjugált mennyiség a hely és impulzus helyett a spin az X , illetve a Z tengely mentén. Alíz és Bob is tengelyt választ: részecskéjének spinjét az X vagy a Z tengely mentén méri meg. Ha a döntéstől a mérési eredmény regisztrálásáig Alíz és Bob tevékenységei térszerűen szeparáltak, az EPR-logika szerint B spinjének értéke az X és Z tengely mentén is rejtett változók által előre meghatározott kell legyen. A legtöbb fizikust meglepetésszerűen érte, amikor *John Stewart Bell* 1964-ben megmutatta, hogy a Bohm-féle EPR-kísérlet egy variációjával ki lehet zárni az Einstein-féle rejtett változós magyarázatot. Bell egy apró változást elemzett ki: mi van, ha Alíz és Bob nem két-, hanem háromféle mérést végezhet? Bell eredeti gondolatát most nem elemezzük végig, az érdeklődőket egy friss áttekintő cikkhez [2] és egy rövid, könnyen emészthető leírásért egy tankönyvhöz [3] irányítjuk. Ehelyett inkább lépünk tovább 5 évet az időben, és a Bell-egyenlőtlenség egy praktikusabb verzióját nézzük meg, ami már az ideai Nobel-díj egyik kitüntetettjéhez fűződik.

Az első ideai Nobel-díjas:

1969–1974, Clauser, CHSH és az első kísérletek

Az ideai Nobel-díjasok közül az amerikai John F. Clauser nem sokkal Bell cikke után, még doktoranduszként kapcsolódott be a kvantum os nemlokális kutatásába. Fő témája a mikrohullámú asztrofizika volt, de emellett lenyűgözte a kvantummechanika alapjainak megértése is. Bell munkájának olvasása után levélben kérdezte meg Bell Bohmot és *de Broglie*-t [4], hogy áll az egyenlőtlenség kísérleti vizsgálata. Miután megtudta, hogy ez még nyitott terület, gyorsan átgondolta, hogyan kellene módosítani Bell egyenlőtlenségét, hogy kísérletileg közvetlenül mérni lehessen, és ebből egy absztraktot

2. ábra. A Bell-egyenlőtlenséget mérő kísérletek alapja, az EPR-kísérlet Bell-CHSH variációja. A két részecske spinjeikben vannak összefonódva, a távoli állomásokon Alíz és Bob pedig véletlenszerűen választja, hogy milyen tengely mentén méri a spint.



beküldött az Amerikai Fizikai Társulat konferenciájára. Az absztrakt alapján hívta őt *Abner Shimony* fizikus-filozófus professzor, hogy diákjával, *Horne*-nal szintén ilyesmin gondolkodnak, sőt, a Harvardon doktorandusz *Holt* már kísérletet is kezdett előkészíteni. Végül ők négyen, Clauser, Horne, Shimony és Holt (CHSH) közösen publikálták a cikket, ami a legtöbb Bell-egyenlőtlenséget mérő kísérlet alapjául szolgált [5].

Az EPR-gondolat kísérlet CHSH-féle változata nagyon hasonlít a Bohm-változathoz, csak egy dologban tér el: Bob tengelyei el vannak forgatva Alízéihoz képest (2. ábra). Tehát továbbra is két feles spinű részecskét tekintünk, szingulett állapotban, Alíz továbbra is az X vagy a Z tengely mentén mér (Alíz mérés-tengelyeit szokták a , illetve a' betűvel jelölni), Bob viszont átlós tengelyeket használ: $X+Z$ (b), illetve $X-Z$ (b') irányút. Sok ismételt kísérletben, Alíz és Bob is véletlenszerűen választ bázist, méréseik rendre +1-et vagy -1-et adhatnak. Mindegyik báziskombinációra előre meghatározhatjuk a mérési eredmények szorzatának E várható értékét, amit azután a mérési statisztikából relatív gyakorisággal közelíthetünk – például $E(a, b)$ jelöli az Alíz a és Bob b választása mellett kapott eredmények szorzatainak várható értékét (illetve átlagát). Ha kizárjuk a fénysebességnél gyorsabb kommunikációt, az eredményeket rejtett változóknak tulajdonítjuk, akármilyen fizikai összefüggés is lenne a részecskék spinje és a mérési eredmények között, a következő összefüggés adódik:

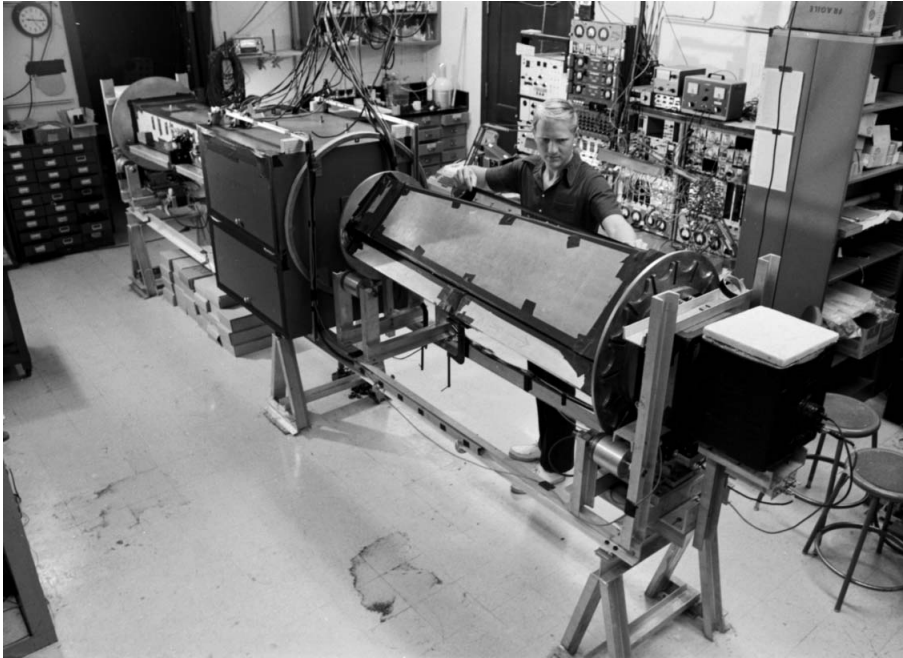
$$S = E(a, b) + E(a, b') + E(a', b) - E(a', b') \leq 2.$$

Ezzel szemben a tökéletes szingulett párokra egyszerű számolással adódik:

$$S = 2\sqrt{2}.$$

Az összefüggés rövid bizonyítását a *Fizikai Szemlében* is megtalálhatjuk [6], de érdemes utánaolvasni (például a Wikipédián vagy egy jegyzetben [3]) az úgynevezett CHSH-játéknak, ami szemléletesen mutat rá az egyenlőtlenség jelentésére.

Clauser 1969-ben megvédte doktoriját, és a University of California Berkeley-n kezdett posztdoktori állása alatt nekilátott a Bell- (CHSH-) egyenlőtlenségek kimérésének, versenyben a Harvardon dolgozó *Holt*-tal. Az akkor még doktorandusz *Freedmann*l közösen építettek kísérletet (3. ábra). Itt az összefonódott részecskék feles spinű elektronok helyett fotonok, amelyek polarizációs állapota összefonódott. A fotonok forrása ultrabolya sugárzással gerjesztett kalciumgőz volt, ahol az atomok vegyértékelektronjai egy legerjesztődési kaszkád útján kerülnek vissza az alapállá-



3. ábra. John Clauser az 1970-es években, a Bell-egyenlőtlenségek kísérleti ellenőrzésére Stuart Freedmannal közösen épített kísérleti berendezésével (fotó: Steve Gerber/Berkeley Lab) [https://newscenter.lbl.gov/2022/10/04/john-clauser-awarded-2022-nobel-physics/].

potba, a kibocsájtott fotonok között vannak szingulett állapotban összefonódott párok, amelyeket koincidenciaméréssel válogattak le. Clauser és Freedman 1972-ben sikeresen mérte ki a Bell-egyenlőtlenségek sérülését (ez volt Freedman doktorija), mintegy 5 szórányival, $S = 2,388 \pm 0,072$. Holt és témavezetője, *Pip-kin* eközben ennek ellenkezőjét, a Bell-egyenlőtlenségek teljesülését találták, $S = 1,728 \pm 0,104$. Eredményeiket azonban végül nem publikálták, mert látva Clauserék munkáját, felmerült bennük, hogy talán nem szűrtek ki minden szisztematikus hibát. Valóban, Clauser és mások is megismételték Holték kísérletét, és az egyenlőtlenség sérülését találták, például Clauser $S = 2,308 \pm 0,0744$ eredményt kapott. Tehát a természetben kell legyen „kísérteties távolhatás”!

Clauser úttörő kísérlete nem zárt ki minden lokálisan reális elméletet: maradtak kibúvók (loophole). Legfontosabb a *lokálitáskibúvó* (locality loophole): mivel Alíz és Bob nem változtatott véletlenszerűen a mérési bázisok között, hanem Clauserék egy mérési sorozatban mértek sokat a és b beállításokkal, azután a és b' , azután a' és b , majd a' és b' beállítások mellett, nem lehet kizárni, hogy Bob méréseinek eredményét befolyásolta Alíz bázisválasztása. Inkább kukacoskodásnak hat (de egy ilyen nagy filozófiai jelentőségű kísérletnél a kukacoskodás indokolt) az úgynevezett *detektálási kibúvó*: mivel a fotonok detektálási hatásfoka nagyon alacsony

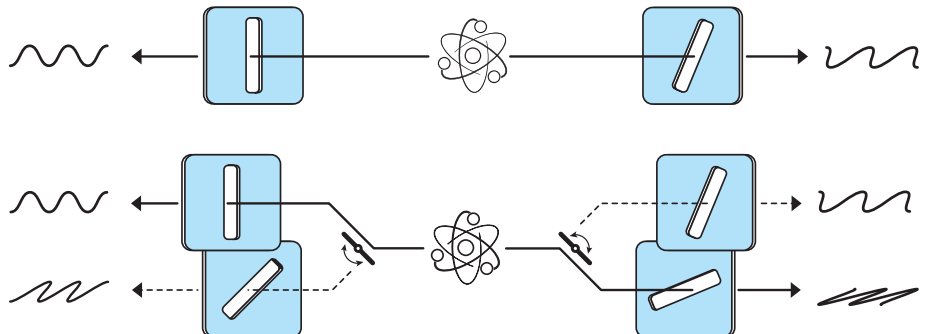
volt, ezért nem lehet kizárni, hogy a Bell-egyenlőtlenségek csak a detektált fotonokra sérültek – ha az összes kibocsájtott foton elcsúsztatva volna, az egyenlőtlenségek nem sérültek volna. A Bell-egyenlőtlenségek sérülésének kimérése tehát nem Clauserék kísérletével végződött, hanem azzal kezdődött.

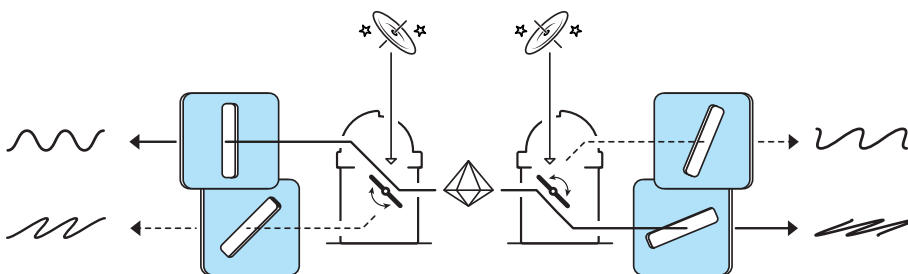
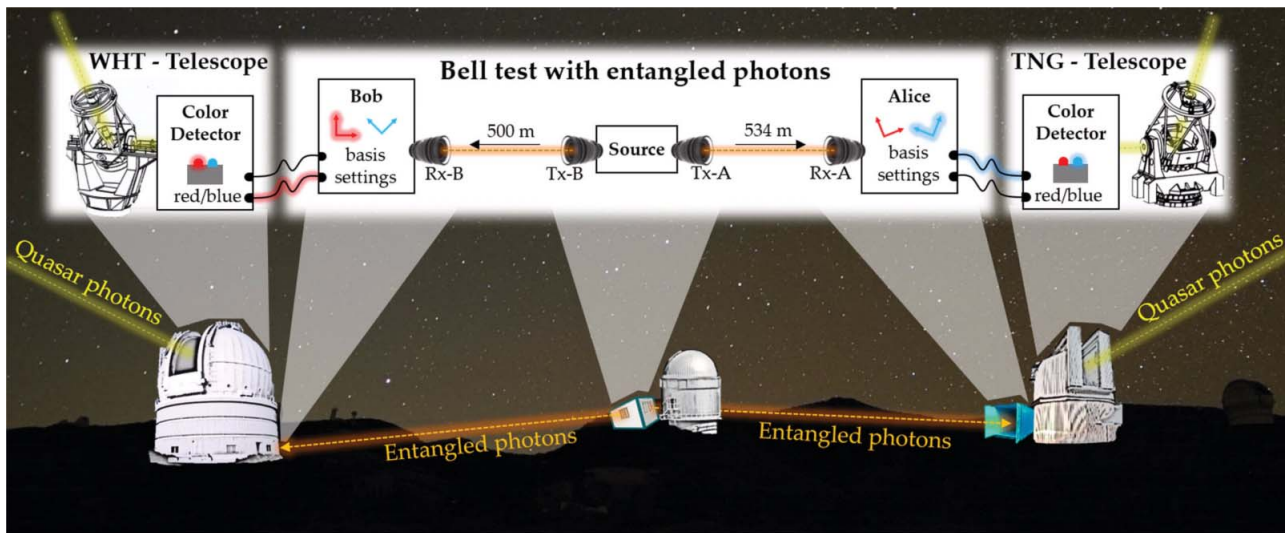
A második Nobel-díjas: 1982, Aspect és a lokálitás

Az idei Nobel-díjasok közül a francia Alain Aspect 1982-ben zárta be a lokálitáskibúvót, a fizikus közvéleményt meggyőzve arról, hogy van „kísérteties távolhatás”, a kvantummechanika nem magyarázható lokális rejtett változókkal. Aspect és francia kollégái

1980 és 1982 között több lépésben javítottak Clauserék kísérletén – ezeket mutatja a Nobel-bizottság ábrája is (4. ábra). Egyrészt szintén Ca-atomok legerjesztéséből származó fotonokkal kísérleteztek, de az atomokat ultraibolya sugárzás helyett két lézerral gerjesztették (kétfotonos átmenettel), ezzel sokkal hatékonyabb forrást kaptak. A kísérlet egy verziójában a Clauserék által is használt polarizátor helyett polarizáló nyalábosztót használtak, hogy mérésük mindkét kimenetelét detektálni tudják. A leglényesebb változás azonban, hogy bár Alíz és Bob állomáσαι Aspect-éknél is közel, egymástól 13 méterre (43 fény-nanoszekundumra), a laboratórium két sarkában voltak, mégis egyik kísérletükben bezárták a lokálitáskibúvót: Alíz és Bob változtatták a méréshez használt bázist, 43 ns-nál jóval rövidebb idő alatt (7, illetve 13 ns). A gyors változtatást úgy érték el, hogy a beérkező fotonokat két fix polarizátor közül felváltva az egyikre vagy a másikra irányították egy akusztó-optikai köl-

4. ábra. Aspect Bell-egyenlőtlenséges kísérletének újításai Clauserékéhoz képest, a Nobel-bizottság sematikus ábráján. Fent: Clauserék rögzített polarizátorokkal mértek fotonokat, amelyek atomok legerjesztéséből származtak. Lent: Aspect kísérletének fő újítása, hogy nála Alíz és Bob kétféle polarizátorbeállítás mellett mért, amelyek között gyorsan, véletlenszerűen változtatott.





5. ábra. Zeilinger csoportjának 2018-as kísérlete a Kanári-szigeteken, ahol több milliárd fényévre lévő kvazárok szolgálnak véletlenszám-generátorként. Az összefonódott fotonokat pedig nem atomok legerjesztődésével, hanem hatékonyabb módon, nemlineáris optikai kristályon parametrikus legerjesztéssel nyerték Alíz és Bob számára [9, illetve a Nobel-bizottság sematikus ábrája].

csönhatást használó eszközzel (piezoelektromos kristállyal ultrahang-állóhullámokat kelte vízben). Bár maga a változtatás nem véletlenszerűen történt, figyelembe véve a kibocsátott fotonok érkezési idejének fluktuációját, Aspect-ék úgy érveltek, hogy kísérletük elég jól modellezi a véletlenszerű váltásokat. Aspect kísérletei is a Bell- (CHSH-) egyenlőtlenség sérülését találták 5 szórásnyival.

Aspect kísérleteiben is maradtak még kibúvók. Egyrészt a lokalitáskibúvó bezárása nem volt igazán alapos, mert bár Alíz és Bob váltogatta a bázisokat, de periodikusan: valójában az adott pillanatban kibocsátott fotonpár méréséhez választott bázis már jóval korábban eldőlt. Másrészt a detektálási kibúvó továbbra is megmaradt, a fotonok detektálási hatásfoka továbbra is túl alacsony volt.

A harmadik Nobel-díjas:

1990–, Zeilinger, összefonódás sok kísérletben

A harmadik idej Nobel-díjas, az osztrák Anton Zeilinger a lokalitáskibúvót 1997-ben zárta be [8]. Zeilinger az összefonódott fotonokat már nem atomok legerjesztődésével, hanem egy hatékonyabb, az 1980-as évek végén kifejlesztett módon nyerte: parametrikus legerjesztéssel nemlineáris optikai kristályon, amelyekből sokkal több összefonódott foton lép ki, ráadásul jól meghatározott irányokban, így ezeket jól lehet optikai száliba csatolni. Zeilinger ezt kihasználva, alacsony veszteségű optikai szálakon vitte a fotonokat, Alízhoz és Bobhoz, az innsbrucki kampusz két, egy-

mástól 800 m-re lévő mérőállomására. Lényeges, hogy a két állomáson egy-egy fizikai véletlenszám-generátor volt, ami fotonok féligáteresztő tükrön való eltérülését mérve ki-bekapcsolt egy elektro-optikai modulátort – ez elforgathatta a fotonok polarizációját 45 fokkal, mielőtt azok a fix polarizáló nyalábosztóra estek. Zeilingerék így megvalósították Alíz és Bob véletlenszerű bázisválasztását. Egy-egy 10 másodperces mérési sorozatban $S = 2,73 \pm 0,02$ értéket mértek, azaz több mint 30 szórásnyival sérült a Bell-egyenlőtlenség!

A Bell-kísérleteket folytatni kellett még Zeilinger 1997-es eredménye után is, hiszen a detektálási kibúvó még nem volt bezárva. Ez elsőként nem Zeilingernek, hanem 2001-ben *Wineland* csoportjának sikerült [2]. Náluk a két összefonódott részecske kettő, ugyanabban a vákuumkamrában elektródák között lebegtetett Be-ion volt, amelyek vegyértékelektronjának gerjesztései játszották a „spin” szerepét. Az ionok távolsága a mérés pillanatában nanométerekben és nem méterekben mérhető, így a lokalitáskibúvó bezárása fel sem merült. Viszont az ilyen lebegtetett ionos rendszerek jó kvantumszámítógép-prototípusok, részben emiatt is kaphatta Wineland ezért és kapcsolódó munkájáért 2012-ben a fizikai Nobel-díjat.

Zeilingeré volt az egyik első kísérlet, ami a detektálási és a lokalitáskibúvót egy kísérletben zárta be, 2015-ben [2]. Itt a nagy detektálási hatásfokhoz szupravezető száldetektorokat használtak. Ezekben a szupravezető drót mintegy biztosítékként működik: közel a kritikus állapothoz (hőmérsékletben, mágneses térben), így egy arra haladó foton mágneses tere már épp elég ahhoz, hogy a drótot normál állapotba

billentse, lényegesen megnövelve az ellenállását. Hozzá kell tenni, hogy itt Zeilingeréket 2015-ben néhány hónappal megelőzték *Hansonék* Delftben [2], akik egy kísérletben elsőként zárták be ezt a két Bell-kibúvót. Hanson csoportja teljesen más fizikai rendszeren kísérletezett, gyémántbeli NV-centrumokkal, amelyeket az összefonódás kicserélése (entanglement swapping) révén fontak össze.

Az utolsó fejezet a Bell-egyenlőtlenség mérésében viszont újra Zeilingerhez kapcsolódik [2]. A lokalitáskibúvó teljes bezárásához 1997-től 2016-ig a kísérletek Alíz és Bob mérőállomásainál egymástól függetlenül működő fizikai véletlenszám-generátorokat használtak. Csakhogy honnan tudhatjuk, hogy ezek tényleg egymástól függetlenek? Nem lehet, hogy valamilyen eddig nem ismert fizikai kölcsönhatás összehangolta működésüket úgy, hogy pont olyan ütemben diktálják Alíznek és Bobnak a bázisválasztást, hogy kijöjjön a Bell-egyenlőtlenségek sérülése? Ezt kizárandó, Zeilinger és munkatársai úgynevezett kozmikus Bell-teszteket végeztek, ahol Alíz és Bob bázisát egy-egy távcső segítségével váltogatta. A távcsöveket a 2016-os bécsi kísérletben átellenben lévő távoli csillagokra irányították, Alíz és Bob pedig az onnan beérkező fotonok hullámhossza szerint döntöttek arról, mi legyen a mérésnél használt bázis. 2018-ban a kísérletet megismételték a Kanári-szigeteken is [9], ahol nagy távcsöveket használtak, átellenben lévő távoli kvazárokra irányítva (5. ábra). Persze valamilyen kölcsönhatás a kvazárok között így is előre eldönthette, hogy Zeilingerék a Bell-egyenlőtlenségek sérülését mérik majd, de ez az összeesküvés-szerű összehangolás mintegy 8 milliárd évvel ezelőtt kellett, hogy történjen.

Az összefonódás és a kvantumtechnológia

Bár e cikkben a Bell-egyenlőtlenségek sérülésének megmérésére fókuszáltunk, a Nobel-bizottság kiemelte, hogy a kísérletek jelentőségét a kvantuminformatica kísérleti megalapozása is adta. Erről várhatóan a *Fizikai Szemle* valamelyik jövő évi számában hosszabban is be fogunk számolni, de a teljesség kedvéért említsük meg itt Zeilinger néhány munkáját – a

kapcsolódó kvantuminformaticai fogalmakat alaposan, de könnyen érthetően tárgyalja a korábban hivatkozott jegyzet [3]. A Bell-egyenlőtlenségeshez hasonló kísérletekkel Zeilinger valósította meg elsőként 1996-ban az úgynevezett sűrű kódolást, illetve 1997-ben a kvantumteleportációt, 1998-ban az összefonódást is használó titkos kulcsszétosztást, és az összefonódás kicserélését is (entanglement swapping). Ráadásul elméleti munkája is olyan jelentős, hogy a többrésű összefonódás egyik típusa is őrzi a nevét: a Greenberger–Horne–Zeilinger-állapot (közkeletűen GHZ – a második név a CHSH-beli második H tulajdonosa).

A 2022-es fizikai Nobel-díjasok munkájára nem túlzás azt mondani, hogy megrengette fizikai világgépünket. Megmutatták, hogy a józan észnek (és bizonyos mértékig a speciális relativitáselméletnek) ellentmondva a természetben van egyfajta kísérteties távolhatás, ami a kvantumos összefonódás révén állhat elő. Az általuk kifejlesztett kísérletek segítettek a kvantumos összefonódást elméleti érdekességből valódi technológiai eszközzé fejleszteni, amit ma már a kvantumszámítógépekben, kvantumos titkosításban, vagy az ultrapontos (úgynevezett Heisenberg-határt meghaladó) mérésekben használunk ki.

Irodalom

1. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.* 47(1935) 777.
2. D. I. Kaiser: Tackling Loopholes in Experimental Tests of Bell's Inequality. In: *Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*. (Olivier Freire, Jr. szerk.) Oxford University Press (2022) 331.
3. J. Preskill: *Lecture Notes for Ph219/CS219* (2001), Chapter 4 – online elérhető <http://theory.caltech.edu/~preskill/ph229/>
4. J. F. Clauser: Early History of Bell's Theorem Theory and Experiment. *Foundations of quantum mechanics* (1992) 168.
5. J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, R. A. Holt: Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 880.
6. Patkós A.: A Lovász-szám kvantumkarrierje. *Fizikai Szemle* 67/11 (2017) 367–371.
7. A. Aspect: Bell's Theorem: The Naive View of an Experimentalist. arXiv:quant-ph/0402001 (2004)
8. G. Weihs, T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter, A. Zeilinger: Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions. *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 5039.
9. D. Rauch et al.: Cosmic Bell Test Using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars. *Phys. Rev. Lett.* 121 (2018) 080403.

