



Bacsárdi László

■ BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék | bacsardi@hit.bme.hu

A kvantum-összefonódás nyomában

A 2022-es fizikai Nobel-díj apropóján

A 2022-es fizikai Nobel-díjat a kvantumfizika területén kifejlesztett munkásságáért ítéltek oda három világhírű kutatónak. 2022. december 10-én a francia Alain Aspect, az amerikai John F. Clauser és az osztrák Anton Zeilinger vehette át a megtisztelő elismerést az összefonódott fotonokkal folytatott kísérleteikért, a Bell-egyenlőtlenségek megsértésének megállapításáért és úttörő kvantuminformatikai munkásságukért.

Az összefonódás (angolul entanglement) működése nemcsak Einsteinet döbbenettette meg, hanem a mai napig rácsodálkoznak a kvantumvilággal újonnan ismerkedők. Ebben a cikkben röviden bemutatom, hogyan működik az összefonódás, miért volt korszakalkotó a három díjazott tevékenysége, és milyen hatással van jelenünkre. Utóbbiból számos dolgot lehetne felsorolni, nem véletlenül kaptak Nobel-díjat. Kvantuminformatikusként önkényesen kiválasztottam párat, amely a kvantumszámítógépek és a kvantumkommunikáció területéhez tartozik. A három díjazott fizikus munkásságával részletesen magyar nyelven többek között a *Magyar Tudomány* 2023. februári számának egyik írása foglalkozik, amelyben jelen sorok szerzője is közreműködött.

Válasz Einstein paradoxonára

Egyetemi tanóráimon az alábbi példával szoktam bevezetni hallgatóimat az összefonódás világába, miután megbeszéltük, hogy egy foton polarizációs állapotát meg tudjuk mérni ortogonális mérőbázis segítségével (például ilyen mérőbázis a vízszintes-függőleges mérőbázis, amely a vízszintesen polarizált fotonról azt mondja, vízszintes, a függőlegesen polarizáltról azt, hogy függőleges, egy tetszőlegesen polarizált fotonról pedig a kvantummechanikai egyenlettel leírt állapota alapján vízszintes vagy függőleges értéket jelez). Vegyünk egy 405 nanométeres hullámhosszú lézertényit, irányítsuk rá egy nemlineáris optikai tulajdonságokkal rendelkező béta-bárium-

borát (BBO) kristályra, amelyből két, egyenként 810 nm-es hullámhosszú foton fog kilépni, összefonódott fotonpárt alkotva. Ezek azzal a különleges tulajdonsággal rendelkeznek, hogy ha a fotonpár egyik tagjának a polarizációját megmértem a vízszintes-függőleges mérőbázisban, és a mérőberendezésem vízszintes állapotot mutat, akkor a fotonpár másik tagja is vízszintes állapotba kerül. Ha azonban a mérőberendezésem függőleges állapotba billen be, akkor a fotonpár másik tagja is függőleges állapotot mutat. Vagyis a fotonpár egyik tagján elvégzett mérés hatással van a fotonpár másik tagjára – akkor is, ha az nincs már ott a közelben, hanem nagyon nagy távolságra tartózkodik. De nemcsak ez a különleges az összefonódásban, hanem az is, hogy ha úgy döntök, a mérést nem a rektilineáris, hanem mondjuk a diagonális bázisban végzem el, akkor ebben is ugyanazon állapotokat veszik fel az összefonódott fotonpár tagjai a két oldalon. Azaz miután létrehoztunk egy összefonódott fotonpárt, a mérés pillanatában általunk kiválasztott mérőbázis határozza meg, milyen bázis szerint fogja az összefonódás tulajdonságait mutatni a rendszerünk. A mostani Nobel-díjasok munkásságának köszönhetően tudjuk, hogy ez valóban így van, de az az 1900-es évek első felében még nem mindenki gondolta így.

Albert Einstein 1935-ben fogalmazta meg szerzőtársaival (Boris Podolsky és Nathan Rosen) a később róluk elnevezett EPR-paradoxont, amelyben a rejtett paraméterek szükségességére hívta fel a figyelmet [1]. Szerintük az összefonódás nem a fentiek szerint működik, hanem amikor létrehozunk egy összefonódott párt, akkor a létrehozás pillanatában eldől, milyen mérőbázisban fogjuk majd elvégezni a mérést. Ugyan mi azt hisszük, hogy a szabad akaratunk szerint választunk a mérés pillanatában, valójában egy eleve elrendelt úton járunk, csak a leírásunk a világról nem teljes, mert vannak olyan rejtett paraméterek, amelyeket még nem ismerünk.

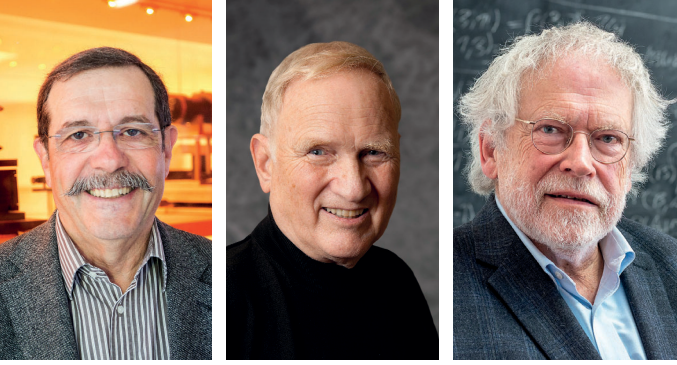
Közel 30 évet kellett várni, mire 1964-ben John Bell megfogalmazta azokat az egyen-

lőtlenségeket, amelyek lehetővé teszik, hogy teszteljük az összefonódást, és eldöntsük, vannak-e rejtett paraméterek [2]. John Clauser 1969-ben publikálta szerzőtársaival (Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt) a Bell-egyenlőtlenségek egy módosított változatát, amelyet a szerzők tiszteletére CHSH-egyenlőtlenségeknek nevezünk [3]. Míg Bell feles spinű részecskék spinjének mérésére dolgozta ki az egyenletrendszerét, addig Clauserék polarizációban összefonódott fotonpárokra fogalmazták meg azt. Három évvel később, 1972-ben ugyan Stuart Freedmannal közösen Clauser elvégezte a javasolt kísérletet, de a mérésük hatékonysága rettentő alacsony volt. Még tíz évet kellett várni, mire 1982-ben Alan Aspect és munkatársai végrehajtották a Bell-egyenlőtlenségek első sikeres mérését, kísérletileg is bizonyítva, hogy Einstein-féle rejtettparaméter-elmélet nem igaz [4].

Sikeres teleportáció

Bár az összefonódás jelensége a fénysebességnél gyorsabban lejátsszódik, sajnos információátvitelre önmagában nem használható, mert az összefonódott állapotainkat kvantummechanikai egyenletekkel írjuk le, és egy-egy mérés végrehajtásakor a mérés eredménye függ a fotonpár komplex valószínűségi amplitúdókkal megadott állapotától. A fentiekben ismertetett példánál maradva abban biztosak lehetünk, hogy ha megosztozunk egy összefonódott fotonpáron valakivel, akkor ő mindig ugyanazt a mérési eredményt fogja kapni, mint én, de azt már nem tudjuk befolyásolni, hogy mi vízszintes vagy függőleges értéket mérünk. 50% lesz annak a valószínűsége, hogy az összefonódott fotonpár egyik tagját megmérve vízszintes értéket kapunk, és 50% annak, hogy függőleges értéket. Azaz az összefonódást önmagában információátvitelre nem tudjuk használni, de számos olyan kvantuminformatikai alkalmazás van, amelyben nagyon fontos erőforrás szerepét tölti be.

Az egyik ilyen a kvantumteleportáció, amely alapötletét a következőként tudjuk



A három Nobel-díjas.
Balról jobbra: Alain Aspect,
John F. Clauser,
Anton Zeilinger

(fotók: Ecole polytechnique
Université Paris-Saclay,
Peter Lyons, Jaqueline
Godany, CC BY-SA 4.0)

összefoglalni (a teljes protokoll ennél egy kicsit összetettebb). Két fél – nevezzük őket Alice-nek és Bobnak – megosztózik egy összefonódott fotonpáron. Alice előállít a laborjában egy fotont, amelyet szeretne eljuttatni Bobhoz. A probléma csupán az, hogy Bob messze van tőle, és ha a fotont akár optikai szálon, akár szabad légkörön keresztül Alice elküldené neki, akkor a foton olyan csillapításokat szenvedne, hogy Bob nem tudná már megkapni. A kvantumteleportáció protokollja azonban lehetővé teszi azt, hogy az összefonódott párt felhasználva ezt a fotont úgy juttassuk el Alicetől Bobhoz, hogy a fotont nem küldjük sehova. Alice beleteszi a nála lévő teleportációs berendezésbe, a gép mutat két értéket, ezt a két számot átküldjük Bobnak egy hagyományos távközlési csatornán keresztül, Bob beüti a saját gépébe, és kiveszi belőle azt a fotont, amely korábban még Alicenél volt.

A kvantumteleportáció elméletét 1993-ban publikálták. Négy évvel később Anton Zeilinger kutatócsoportjával sikeresen demonstrálta a gyakorlatban is a működését [5]. Nem ez volt az osztrák fizikus egyedüli összefonódással kapcsolatos kísérlete, demonstrálta például az összefonódás cseréjét (angolul entanglement swapping) is, amely lehetővé teszi, többek között, a teleportáció távolságának kiterjesztését, és a jövő kvantuminternetjének lesz alapvető építőeleme lesz.

Informatikai alkalmazási területek

A kvantumfizikai elveken működő kvantumszámítógép lehetővé teszi, hogy nagyon komplex rendszereket modellezzünk – akár a fizika, akár a kémia, akár a biológia területén. A Google kvantumszámítógépével már sikeresen szimuláltak kémiai reakciót, az IBM felhőben elérhető kvantumszámítógépe is támogatja a kvantumkémiai kapcsolatos számításokat. Jelenleg is zajlanak kutatások mind molekuláris reakciók szimulálása, mind új orvosságok felfedezése területén. Ahhoz azonban,

hogy komplex kvantumszámítógépeket tudjunk létrehozni és a különböző helyszíneken lévő kvantumszámítógépeket össze tudjuk kapcsolni egymással, kvantummemóriára, valamint kvantum-jelisméltőkre lesz szükségünk. Mindkettőnek nagyon fontos alkotóeleme az összefonódás, ahogy a kvantumkommunikációban is fontos szerepet tölt be.

Korábban említettük, hogy önmagában az összefonódott fotonpár segítségével nem tudunk információt továbbítani, mert amikor elvégezzük a mérést, akkor véletlenszerűen kapunk vízszintes vagy függőleges értéket. De ezt fel tudjuk használni ahhoz, hogy a két kommunikáló fél között létrehozzunk egy véletlen, de egyforma értékekből álló sorozatot. A kvantumalapú kulcsszétosztás (angolul quantum key distribution, QKD) során pont az a célunk, hogy megosztózzunk egy titkos bitsorozaton két távoli fél között, amelyet utána kulcsként lehet használni a két fél közötti kommunikáció titkosítására. Mindez kompatibilis a jelenlegi informatikai rendszereinkkel, ugyanis a két fél közötti hagyományos kommunikációt titkosítjuk, hagyományos algoritmusok és protokollok segítségével, egyedül a titkosítási kulcsok cseréje történik kvantumosan. Ráadásul amíg a legtöbb kvantumszámítógép – architektúrájuk miatt – szuperalacsony hőmérsékleten működik (emiatt jelentős hűtést igényel), addig a QKD-berendezések többsége szobahőmérsékleten is működőképes.

Többféle kvantumkulcsszétosztó megoldást ismerünk, az egyik nagy protokollcsalád az összefonódáson alapul. Zeilinger csoportja volt az első a világon, amely az összefonódáson alapuló kulcsszétosztást megvalósította 1998-ban.

A Földön túl

A 80-as és 90-es évek sikeres kísérletei után többekben felmerült a kérdés: van-e fizikai határa a Bell-egyenlőtlenségek megsértésének? Tényleg működik az összefonódás nagyon nagy távolságokban is, ak-

kor is, ha elhagyjuk a Földet? 2016-ig kellett várni, hogy választ kapjunk a kérdésre, ebben az évben ugyanis Kína Föld körüli pályára állította a Miciust, a világ első kvantumkommunikációs műholdját. A mintegy 500 kilométeres pályamagasságban keringő műhold fedélzetén egy összefonódott fotonforrás működik, amelynek segítségével sikeresen tesztelték a kvantumteleportáció működését több mint ezer kilométeres távolságban, valamint összefonódáson alapuló kvantumkulcs-cserét hajtottak végre. A kínai kvantumkommunikációs kutatás vezetője Jianwei Pan, aki Anton Zeilinger témavezetésével szerezte meg doktori fokozatát Bécsben.

Míg azonban a kínai műhold több mint 600 kilométeres, addig egy szingapúri kutatócsoport 2019-ben egy 30×10×10 centiméteres méretű, kicsivel több mint 3 kg súlyú kisműhold fedélzetén állított elő sikeresen összefonódott fotonokat a világűrben. Mindez azt mutatja, hogy az az összetett kísérleti elrendezés, amellyel az előző évszázad végén a most Nobel-díjjal jutalmazott fizikusok dolgoztak, már meglehetősen kis méretben, újtechnológiai szabványoknak megfelelően is működik.

Összefonódáson alapuló szabadtéri kulcsszétosztással hazánkban a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karán foglalkoznak. A jelenleg laboratóriumi körülmények között sikeres demonstrációt végrehajtó kutatócsoport egy Duna két oldala közötti kísérletet tűzött ki célul maga elé a következő időszakra. A Műegyetemen fejlesztett szabadtéri QKD-berendezés mind hardverét, mind szoftverét tekintve teljesen hazai fejlesztés – a rendszer alapjául szolgáló összefonódott fotonforrást a BME Természettudományi Karán működő Atomfizika Tanszékén fejlesztették. Az MTA Bolyai János Kutatói Ösztöndíjának és az Új Nemzeti Kiválóság Program ÚNKP 22-5 Bolyai+ ösztöndíjának támogatásával a cikk szerzője is aktívan kutatja, hogyan jelenhet meg az összefonódás erőforrásként a különböző szabadlégköri és űrbeli kvantumkommunikációs rendszerekben. ●●●

IRODALOM

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* (1935) 47, 777.
- [2] J. S. Bell, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, *Physics* (1964) 1, 195.
- [3] J. F. Clauser et al., Proposed experiment to test local hidden-variable theories, *Phys. Rev. Lett.* (1969) 23, 880.
- [4] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities, *Phys. Rev. Lett.* (1982) 49, 91.
- [5] D. Bouwmeester et al., Experimental quantum teleportation, *Nature* (1997) 390, 575.