BACSÁRDI LÁSZLÓ

Az igazi kvantum csendje

Kvantumeszközök a hatékony kommunikáció szolgálatában

A Quantum csendje, Skyfall, A fantom visszatér – három cím az utóbbi évek James Bond filmjeiből. Az Ian Fleming által kitalált karakter egy igazán különleges titkosügynök. Finom koktélokat fogyasztva izgalmas kalandokba keveredik a világ megmentésen ügyködve, miközben különleges autók és még különlegesebb eszközök segítik őt küldetésében. Munkáját pedig számos ember befolyásolja, mint például M, aki a főnökeként újabb és újabb kihívások elé állítja. Vagy ott van Q, aki egy vagy több érdekes eszközzel (mai közkedvelt szóhasználattal élve: kütyüvel) látja el. Robbanó toll, speciális mandzsettagomb, láthatatlanná váló autó – csupán néhány tétel a különleges eszközök listájáról, amelyekkel a 007-es rendelkezik. Apropó, M és Q. Az M rövidítés adja magát az MI6-ből, de vajon miből ered a Q rövidítés? Tekintettel arra, hogy Q általában olyan eszközöket ad a titkosügynöknek, amelyeket hétköznapi világunkban sokszor elképzelhetetlennek tartunk, jelen cikk szerzője azt az elképzelést osztja, hogy a Q-nak a neve nem másból származik, mint a kvantum szó angol megfelelőjéből, a quantum kifejezésből. (Bár James Bond legelszántabb rajongói persze úgy tudják, hogy a Q az angol quartermaster, azaz raktáros őrmester megfelelője.) Ugyanis a kvantummechanika is egy olyan eszköztárt kínál számunkra, amelyet a hétköznapi világban elsőre elképzelhetetlennek tartanánk. A kvantummechanikán alapuló informatika világában létezik a teleportáció, fel tudjuk törni a felhasználók Facebook és Gmail belépési jelszavát, ugyanakkor biztonságos és lehallgathatatlan módon tudunk egymással kommunikálni.

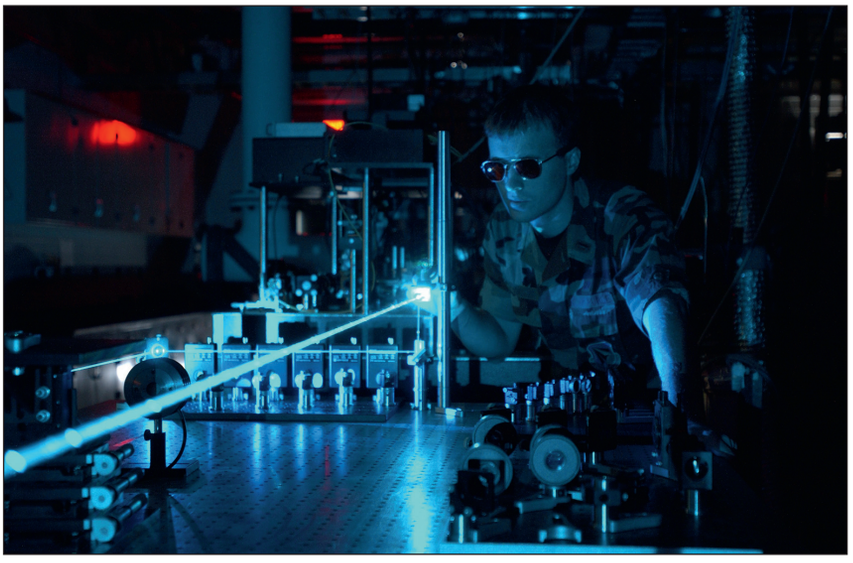
Kvantuminformatika

Richard Fenyman amerikai fizikus már 1981-ben kvantummechanikai keretrendszeren alapuló kvantum számítástechnikáról beszélt, 1985-ben pedig egy brit-izraeli fizikus, David Deutsch megalkotta az univerzális kvantumszámítógép fogalmát. A magyar szakkifejezéssel kvantuminformatikának nevezett területen azóta számos kutató dolgozik. Az eddigi eredmények igen biztatóak, bár általános célú kvantumszámítógépet még nem sikerült építeni. A kanadai D-Wave cég ugyan már három kvantumszámítógépet is létrehozott (a D-Wave One gépet 2011-ben, a D-Wave Two gépet 2013-ban és a D-Wave 2x rendszert idén), de ezek a kvantumszámítógépek csak bizonyos problémák megoldására alkalmasak, azaz nem univerzálisak. Úgy kell elképzelni ezeket, mint a sakkozógépeket – azok alkalmasak arra, hogy a világ legjobb sakkozóit legyőzzék, de sok más tekintetben a zsebünkben hordott okostelefonunk nyeri a játszmát. Ugyan működő univerzális kvantumszámítógépünk még nincs, mégis számos olyan eszköz van, amelyek már elkezdték a térhódítást a tudományos és üzleti életben, valamint a Természet Világa hasábjain. Kvantummechanikai posztulátumokról és különböző egyéb érdekes jelenségekről részletesen a Természet Világa 2013 januári számában a Bacsárdi–Imre szerzőpárostól megjelent „Kommunikáció mélyben és magasban” című cikkben lehet olvasni [1], míg különböző biztonsági kérdésekről a Természet Világa 2015-ben megjelent Hálózatkutatás-hálózatelmélet különszámában szereplő „Biztonságos kommunikáció kvantumalapú hálózatokban” című cikkben [2].

Alapegységünk a kvantumbit

A kapcsolódó gyakorlatot követve ebben a cikkben is „klasszikus” jelzővel illetünk minden olyan informatikai megoldást, ami nem kvantummechanikai alapokon nyugszik – azaz a napjainkban használt (hagyományos) informatika a klasszikus informatika. A kvantuminformatika alapvető információs egysége a kvantumbit (angolul quantum bit vagy qubit). Míg egy klasszikus bit két lehetséges értéket vehet fel (0 és 1), addig a kvantumbit a két alapállapot tetszőleges kombinációjában (szakszóval szuperpozíciójában) lehet, azaz végtelen sok állapotban létezhet [3].

A szuperpozíció bemutatására sokféle lehetőség kínálkozik, a szerző egyik kedvenc példája az ételekhez kapcsolódik. Napjaink rohanós ebédszünetében sokszor előfordul, hogy hagyományos ebéd helyett valami egyszerűbb ételhez fordulunk, mint például a gyros vagy a pizza. Több helyen kínálnak egy különleges kombinációt, amelyet gyrosos pizzának neveznek. Bár a receptje némileg mást tükröz, de egy absztrakt módú megközelítésben mi más lenne ez, mint egy olyan étel, ami egyszerre gyros, illetve pizza is.



Bár James Bond alapvetően nem kvantuminformatikai eszközöket használ, az optikai terület számos kutató számára érdekes *(Forrás: Wikipedia)*

Ha sok húst szórtak rá, akkor inkább gyros mintsem pizza, ha pedig spóroltak a feltéttel, akkor inkább pizza, mintsem gyros. Valami hasonló dolog a kvantumbit is, amely egyszerre található meg a két bázisállapot valamilyen szuperpozíciójában. A kvantumbitnek azonban van még egy érdekessége: amikor ránézünk, és egy méréssel kiolvassuk az értéket, a kvantumbit megszűnik szuperpozícióban lenni, és a két alapállapot valamelyikét veszi fel. Mintha egy lezárt pizzás doboz lenne előttünk, aminek az illatáról érezzük, hogy gyrosos pizza van benne, de amikor éhesen felnyitjuk a dobozt, vagy egy teljesen hagyományos gyrost vagy egy teljesen normális – feltét nélküli – pizzát találunk benne.

A svájci ID Quantique cég kvantumos alapokon működő véletlenszám-generátorát akár a képen látható módon kártyaként helyezhetjük egy számítógép belsejébe, akár egy USB-porton keresztül csatlakoztathatjuk laptopunkhoz *(Forrás: ID Quantique)*

Mielőtt bárki abba a tévhitbe esne, hogy a kvantuminformatikusok pizzériákat üzemeltetnek, definiáljuk a kvantumbitet matematikailag is. Egy kvantumbitet a bázisállapotaival és komplex valószínűségi amplitúdóival adunk meg, az alábbi módon:

$$|\varphi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle,$$

ahol az *a* és *b* olyan komplex számok, amelyek abszolútérték-négyzete egyet ad. Ez a furcsa zárójeles megadás egyébként a Dirac-féle jelölésrendszert követi, a fenti kvantumbitet „ket fi”-nek nevezzük. Az *a* és *b* valószínűségi amplitúdó abszolútértékének négyzete azt mutatja meg, mekkora valószínűséggel kapunk 0-t illetve 1-et, ha mérést hajtunk végre (azaz kiolvassuk a kvantumbit értékét). Például a

$$|\varphi\rangle = 0{,}6|0\rangle + 0{,}8|1\rangle$$

kvantumbitet megmérve 0,36 valószínűséggel 0-t, 0,64 valószínűséggel pedig 1-et kapunk a mérés végén.

Bemutatkozik Alice és Bob

A gyakorlati megvalósítást tekintve a kvantumbit lehet bármilyen két jól megkülönböztethető állapottal rendelkező kvantumrendszer (pl. atomi hiperfinom állapotok, elektron spinállapotai, elektron töltése stb.). Kommunikációban lézert használunk, így foton különböző polarizációs állapotait (tipikusan vízszintes illetve függőleges) feleltetjük meg a bázisállapotoknak [4]. Ezekre építkezve számos olyan eszközt tudunk elkészíteni, ami segíteni tudja a hatékony kommunikációt. A kommunikáció mérnöki világban kevésbé szeretünk csupasz A és B betűket írogatni, ezért két kommunikáló felet Alice-nak és Bobnak szoktuk nevezni. Napjainkban számos külföldi hangzású női név kerül át a magyar utónévszótárba, de szerencsére Alicenak már van magyar megfelelője, így a Természet Világa olvasói előtt Alizként fog szerepelni, miközben bemutatunk három érdekes kvantuminformatikai területet: a teleportációt, a véletlenszám-generálását és a kvantum alapú kulcsszétosztást.

Teleportáció

Az amerikai *Charles H. Bennett* szerzőtársaival 1993-ban jelentette meg a kvantum alapú teleportációt elméletét. A kapcsolódó publikáció címe nagyon jól összefoglalja, miről is szól ez a kommunikációs protokoll: *„Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels”* (Ismeretlen kvantumállapot teleportálása két klasszikus és egy összefonódott csatornán keresztül) [5].

Aliz előállít egy olyan kvantumbitet, amelyet nagyon szívesen megosztana Bobbal. Anélkül, hogy megismerné a nála lévő kvantumbit értékét, képes arra, hogy két klasszikus információ elküldésével átjuttassa Bobhoz. Ahhoz, hogy ezt megtehesse, még a kvantumbit előállítása előtt találkozik Bobbal, és megosztoznak egy speciális kvantumbit-páron, amelyet összefonódott párnak nevezünk. Az összefonódás jelensége még Einsteint is megdöbbentette, mert az összefonódott pár tagja meghatározott módon viselkednek, még akkor is, ha azokat nagyon nagy távolságra visszük egymástól. Ha fogjuk az egyik legegyszerűbb összefonódott párt, amelyet Bell-párnak vagy Einstein–Podolsky–Rosen-párnak azaz EPR-párnak is nevezünk, és megmérjük a pár egyik tagját, akkor, ha 0 értéket kaptunk, biztosak lehetünk abban, hogy a pár másik tagja is 0 értéket vett fel. Ha azonban 1 lesz a mérés eredménye, akkor a pár másik tagja is 1 értéket vesz fel. Mindez ráadásul akkor is működik, ha az összefonódott pár tagjait messze visszük egymástól. (A rend kedvéért érdemes megjegyezni, hogy igazából Bell-párokról beszélünk, mert technikailag négy különböző Bell-párt tudunk előállítani. Van olyan is közöttük, amelyre az igaz, hogy a pár egyik tagját megmérve a pár másik tagja pont ellentétes értéket vesz fel, azaz az egyiken 0 értéket mérve a másik biztosan 1 lesz.)

Még nem tartunk ott, mint egy Star Trek filmben (ahol átsugározzák az embereket az Enterprise csillaghajóról), hiszen nem embereket teleportálunk, hanem „csak” fotonokat juttatunk el egyik pontból a másikra anélkül, hogy az adott foton valaha is megtette volna a két pont közötti távolságot. De az eddigi eredmények igen látványosak: a kapcsolódó elméletet 1993-ban publikálták, 1997-ben kísérletileg is igazolták, a jelenlegi távolsági rekordot pedig osztrák kutatók tartják a 2012-ben felállított 143 kilométeres távolsággal.

Véletlenek a spájzban

Számos informatikai alkalmazásban lehet szükségünk úgynevezett véletlenszámokra, amelyeket véletlenszerű módon állítunk elő. Minél véletlenebb a számok előállítása, annál inkább biztosabbak lehetünk abban, hogy az ezekre épülő alkalmazások (lottósorsolástól kezdve modellezéseken át biztonsági eljárásokig bezárólag) valóban ki nem számítható módon fognak működni. Bár az informatikusok előszeretettel használják a programok írása során a legtöbb programozási környezet által automatikusan felkínált rand() eljárást (az angol random, azaz véletlen szónak a rövidítéséből alkotott elnevezés) véletlenszám előállítására, ez az eljárás csak egy álvéletlen számot állít elő. Ugyanis a valóságban egyáltalán nem egyszerű feladat olyan számot előállítani, amely értéke tényleg véletlenszerű. Általában nemcsak egyszerű matematikai számítások szükségesek hozzá, hanem fizikai interakciók is. Ez utóbbi jegyében például megkérik a felhasználót, hogy a kurzort a képernyőn tologatva végezzen véletlenszerű mozgást az egérrel, és ezt a felhasználói véletlenszerűséget kombinálják a matematikai számításokkal a véletlenszám előállításához. Ugyanis, ha egy véletlenszám nem is annyira véletlen, akkor egy potenciális támadó képes lehet

arra, hogy kikövetkeztesse az adott számot, és ezt felhasználva feltörje az alkalmazást/rendszert/kommunikációt. Ezért a piacon igazán nagy értéke van azoknak az eszközöknek, amelyek valóban véletlenszámokat állítanak elő.

Kanyarodjunk vissza egy pillanatra a korábban megismert kvantumbitünkhöz! Mi történik akkor, ha az *a* és *b* komplex valószínűségi amplitúdók értékéül $1/\sqrt{2}$ értéket adunk meg? Mivel ezek abszolútérték-négyzete mondja meg a mérés valószínűségét, ezért az így előállított

$$|\varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle$$

kvantumbitet megmérve 0,5 valószínűséggel 0-t, 0,5 valószínűséggel pedig 1-et kapunk a mérés végén. Másként megfogalmazva teljesen véletlenszerű lesz a mérésünk. Nem véletlen, hogy számos ipari cég kínál olyan kvantum alapú véletlenszám-generátort, amelyet USB-porton keresztül a számítógépünkre csatlakoztatva máris valóban véletlenszerű számok áramlanak az alkalmazásaink felé, köszönhetően a kvantummechanika törvényeinek. megfelelő számítógép mellett azonban egy vastag pénztárcára is szükségünk lesz, ha ilyet szeretnénk használni, egy svájci cég termékeinek az árazása ugyanis 1000 eurótól indul. Az ipari alkalmazások a fentiekben ismertetett egyszerű példánál jóval tökéletesített megoldásokat használnak, amelyek különböző bonyolultságú eszközöket igényelnek. De néha érdemes az egyszerűségre törekedni: 2014-ben például svájci kutatók azzal foglalkoztak, hogyan lehet egy okostelefon meglévő funkcióit felhasználva kvantum alapú véletlenszámokat előállítani.

Biztonságos kulcsok

A biztonságos adatküldéshez titkosításra van szükségünk. Napjaink titkosítási megoldásait két nagy csoportba oszthatjuk: szimmetrikus, illetve aszimmetrikus kulcsú titkosításra. Az első esetében ugyanazt a kulcsot használjuk a titkosítandó szöveg kódoláshoz, mint a dekódoláshoz, a másodiknál a kódoláshoz során használt kulcsnak van egy párja, amivel dekódolni tudjuk az üzenetet. Ennek nagyon jó példája a nyilvános kulcsú titkosítás, amelyben egy nyilvánosan, bárki számára elérhető kulccsal lehet kódolni az üzenetet, de visszafejteni csak az üzenet címzettje tudja, aki rendelkezik a nyilvános kulcshoz tartozó úgynevezett titkos kulccsal. Jelenleg ezt használjuk nagyon sok helyen az internet világában, ezen alapul például a https protokoll – amikor a biztonságos böngészés jegyében egy lakat jelenik meg a böngészőnkben. A háttérben egy prímszámokról és prímtényezős felbontástól szóló matematikai elmélet áll. Elméletileg tudjuk, hogy törhető, azaz egy támadó rájöhet a dekódoláshoz szükséges kulcsra. De ha a gyakorlati megvalósításban elegendően nagy kulcsot választunk (amely sok-sok bitből áll), akkor ez a támadási folyamat viszonylag időigényes, napokig, hónapokig, sőt akár évekig is eltarthat a jelenlegi számítógépekkel. Ha megépül az első univerzális kvantumszámítógép, akkor azonban ez a titkosítás nagyon gyorsan törhetővé válik: az 1994-ben *Peter Shor* által publikált **Shor-algoritmus** használatával a töréshez szükséges idő másodpercekre csökken.

A kvantum alapú algoritmusok gyakorlati megvalósítása (a kapcsolódó berendezések építésének nehézsége miatt) azonban lassan halad, a Shor-algoritmussal 2001-ben a 15-ös számot sikerült prímtényezőkre bontani, és csak 2012-ben tudtak kicsivel előrébb lépni, a 21-es szám felbontásával. Ugyanebben az évben egy másik algoritmus használatával kínai kutatóknak sikerült a 143-at prímtényezőkre bontaniuk, sőt, 2014 végén egy angol-japán szerzőpáros azt bizonyította be, hogy a kínai kísérletben igazából az 56153-as szám prímtényezős felbontása is előállt.

Ugyanakkor a szimmetrikus kulcsú titkosítók családjában vannak olyan algoritmusok, amelyek matematikailag bizonyított biztonságot és lehallgatatlanságot nyújtanak. A kritikus kérdés csupán az, hogyan osztoznak meg a kommunikáló felek a titkosításhoz használt kulcson – hiszen mind a kódoláshoz, mind a dekódoláshoz ugyanazt a kulcsot kell használniuk, ezt pedig ismerniük kell. De a kulcsot nem tudják átküldeni a kommunikációs csatornán, hiszen pont azért akarnak majd titkosítást használni, hogy ne lehessen lehallgatni a kommunikációjukat. A kulcscserére egy jó megoldás, ha megbízható futárt használnak, de igen lassú dolog mindenhova mindig embert küldeni. A kvantum alapú kulcsszétosztás (angol szakkifejezéssel *quantum key distribution*, QKD) pont erre a kulcscserére kínál egy hatékony és biztonságos megoldást. Mivel ismeretlen állapotú kvantumbiteket a kvantummechanika törvényei értelmében nem tudunk másolni, ezért a támadónak nincsen arra lehetősége, hogy lemásolja Aliz és Bob között áramló információt (nem lehetséges a passzív

Hazai vonalon

Magyarországon több helyen is foglalkoznak kvantuminformatikához kapcsolódó matematikai, fizikai és mérnöki kutatással, többek között az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban, a Szegedi Tudományegyetemen, a Pécsi Tudományegyetemen, a Nyugat-magyarországi Egyetemen és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Utóbbin a Természettudományi Karon a kvantumszámítógép fizikai leírásával, **valamint kvantumoptikai kutatásokkal, a Villamosmérnöki és Informatikai Karon** pedig Számítástudományi és Információelméleti Tanszéken kvantumalgoritmusokkal foglalkoznak. A kommunikáció terén a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékén működő Mobil Kommunikáció és Kvantumtechnológiák Laboratórium munkatársai folytatnak kutatást kvantumcsatorna szuperaktiválása, kvantum-jelismétlők, kvantumhálózat tervezése, kvantum alapú kulcsszétosztás területén. A BME és a Nyugat-magyarországi Egyetem kutatói műholdas kommunikáció modellezésével és szimulációjával is foglalkoznak. Az ipari területet tekintve 2015 tavaszán alakult meg az első magyar kvantuminformatikai cég, amely kvantum alapú kulcsszétosztással foglalkozik.

2008-ban Ausztriában, a gyakorlatban is demonstrálták egy kvantum alapú kulcsszétosztó hálózat működését, összekötve négy bécsi és egy St. Pölten-i csomópontot. Az ábrán látható két doboz a két kommunikáló fél (Aliz és Bob), amelyet optikai szállal kapcsolnak egymáshoz *(Forrás: SECOQC projekt)*

támadás), hanem aktívan közbe kell lépnie. A kulcsszétosztó protokollok azonban úgy működnek, hogy egy támadó aktív megjelenése elrontja a kommunikációt, zajt visz a kvantumcsatornába. Aliz és Bob pedig értesül arról, hogy a megszokottnál zajosabb lett a csatorna, így tudomást szereznek a támadó jelenlétéről.

A BB84-et, az első kvantum alapú kulcsszétosztó protokollt 1984-ben publikálták, és pár évvel később kísérletileg is igazolták a működését. Azóta számos eljárást fejlesztettek ki, amelyeket két nagy generációba osztunk. Az első generációs QKD protokollok egyfoton forrásokon alapulnak, azaz egyszerre egy fotont küld Aliz Bobnak, és ebbe az egy fotonba kódolja be a kulcs előállításához szükséges információt. Azonban pontosan egyetlen egy foton előállítása mérnökileg nem könnyen megvalósítható feladat, a detektálása pedig még nehezebb, ezért az elmúlt években megjelentek a második generációs kulcsszétosztó eljárások. Ezek során gyengített lézerjelekkel olyan fotoncsomagokat küldenek, amelyek néhány tíz (maximum pár száz) fotont tartalmaznak, a vevőoldalon pedig egy speciális mérést végeznek el. Az eljárások mögött lévő matematikai elméletek azt mutatják, hogy ha egy lehallgató megpróbál megszerezni néhány fotont a fotoncsomagból, akkor abból semmilyen információra nem tud következtetni az előállított kulccsal kapcsolatban. Ha pedig néhány tíz fotont rabol egy támadó, az akkora zajt visz a rendszerbe, hogy észlelni fogják, és leállítják a kulcscserét.

Amíg a teleportáció még csak kísérleti fázisban működik, addig a kvantum alapú véletlenszámok és a kvantum alapú kulcsszétosztás területén számos termékkel lehet találkozni a piacon. Az ismertebb cégek: a svájci ID Quantique, az amerikai MagiQ Technologies, az ausztrál QuintessenceLabs és a francia SeQureNet.

Az ég felé haladva

A kvantum alapú kulcsszétosztást először vezetékes környezetben tesztelték, azonban optikai szálon nem tudunk erősítést végrehajtani a kvantuminformatikában. Emiatt egy kvantumjel nagyságrendileg 100 km-es távot tud megtenni egy átlagos optikai szálon, ami nem olyan nagy távolság. Ezért a kutatók érdeklődése már az 1990-es évek elején a szabadtéri csatornák felé fordult. Míg 1991-ben még csak 30 centiméteres távolságosan tudták demonstrálni a szabadtéri kvantum alapú kulcsszétosztást, addig 2006-ban egy nemzetközi kutatócsoport a Kanári-szigeteken 144 kilométeres távolsági rekordot ért el. A távolsági határ pedig szó szerint a csillagos ég, ugyanis számos kutatás irányul arra, hogyan lehetne ezt a technikát akár Föld-műhold, akár műhold-műhold közötti kommunikációban alkalmazni [6]. A műholdas kommunikáció azért is érdekes, mert az űrben a veszteségek sokkal kisebbek, mint akár a legjobb minőségű optikai kábelben.

Jelen cikk szerzője az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) támogatásával a 2015–2017 közötti időszakban a kvantum alapú műholdas kommunikáció megoldatlan kérdéseire fókuszál a Nyugat-magyarországi Egyetemen zajló kutatásában, arra koncentrálva, hogy a kvantumkommunikáció alkalmazásával a műholdas kommunikációt hatékonyabbá tegyék. A hároméves projekt az alábbi területeket érinti: kvantum alapú műholdas kommunikáció számára fontos csatornák modellezése; egy komplex hálózati modell készítése, amely lehetővé teszi a globális kulcsszétosztást műholdakon keresztül; klasszikus és kvantum alapú hibajavítás a globális kulcscserélési eljárásban. A kutatás során olyan komplex modellt fejlesztenek ki, amely lehetővé teszi műholdas kommunikációs folyamatok szimulálását klasszikus és kvantum alapú eljárások felhasználásával (pl. klasszikus hibajavítás, kvantum alapú kulcsszétosztás stb.) A kutatási időszak végére olyan elemzések és vizsgálatok állnak majd rendelkezésre a kvantum alapú műholdas kommunikáció gyakorlati megvalósíthatóságával kapcsolatban, amelyek felhasználhatóak lesznek mind a tudományos élet, mind az űripar számára.

Lézerjel az Európai Űrügynökség (ESA) optikai földi állomásán, Tenerife szigetén. Osztrák kutatóknak 2012-ben La Palma és Tenerife között 143 kilométeres távolságban sikerült teleportációt létrehozniuk *(Forrás: IQOQI Vienna, Austrian Academy of Sciences)*

A következő film elé

A fentiekben bemutatott eszközökön túlmenően még számtalan érdekességet tartogat a kvantuminformatika világa a jövő hálózatai és alkalmazásai számára. A kutatások során keletkező publikációk, a folyamatosan megdőlő kísérleti rekordok és az üzleti piacra belépő újabb és újabb cégek mind azt jelzik, James Bond számára elég sok eszközt kínálhat majd Q a közeljövőben.

A szerző kutatását az OTKA PD-112529 pályázat támogatta.

A szerző 2015 decemberében a Magyar Tudományos Akadémia Veszprémi Területi Bizottságától a „VEAB Kiemelkedő Ifjú Kutatója" díjat vehette át kvantumkommunikációs kutatásáért (a szerk.).

Irodalom

[1] Bacsárdi László, Imre Sándor, „Kommunikáció mélyben és magasban", Természet Világa, 2013. január

[2] Bacsárdi László,„Biztonságos kommunikáció kvantumalapú hálózatokban", Természet Világa Hálózatkutatás – hálózatelmélet különszám, 2015

[3] L. Hanzo, H. Haas, S. Imre, D. O'Brien, M. Rupp, L. Gyongyosi, „Wireless Myths, Realities, and Futures: From 3G/4G to Optical and Quantum Wireless", Proceedings of the IEEE, Volume: 100 , Issue: Special Centennial Issue, pp. 1853-1888

[4] Bacsárdi László, Galambos Máté, Imre Sándor, „Kvantumalapú algoritmusok", Informatikai Algoritmusok 3., Vác: MondAt Kiadó, 2013, pp. 1785-1827.

[5] S. Imre, B. Ferenc, „Quantum Computing and Communications: An Engineering Approach", Wiley, 2005.

[6] Bacsárdi László, Kiss András, „Kvantum-kommunikáción alapuló műholdas hálózat vizsgálata", Űrtan Évkönyv 2014.