A kvantum-számítástechnika magyarországi helyzete

Szatmáry Kornélia Sára

Absztrakt:Kvantum elven működő számítógépekből jelenleg már több fajta is létezik, mint például a D-Wave, a Google, az IBM. Nem csupán nemzetközi szinten, de Magyarországon is több magyar kvantum kutatócsoport dolgozik kvantum számítási témákkal, ezzel együtt, a kvantum számítástechnika percepciója a kutatók és vállalati szakemberek körében nem egyhangú. Jelen dolgozatban arra kívántam választ keresni, hogy a magyar kvantum közösség tagjai hogyan vélekednek a kvantumszámítástechnika jelenlegi állapotáról, kihívásairól, és hogyan látják annak jövőjét. Kutatásomat a releváns szakirodalom feldolgozásával kezdem. Bemutatom a kvantum iparág és közösség főbb szereplőit, valamint a kvantum számítógépek működésének jellegzetes jelenségeit, problémáit. Ismertetem a kvantumfölény jelenséget, majd annak vizsgálatára definiálok egy interjúkon és kérdőíven alapuló kutatást, melynek eredményeit feldolgozva megvizsgálom, hogy a magyar kutatócsoportok tagjai mennyire értenek egyet, illetve cáfolják meg a szakirodalom által több alkalommal kihirdetett kvantumfölény létét, miben látják a kvantumszámítógépek hátrányait, és milyen problémák megoldását várják tőlük. Kutatásom során kényelmi mintavételi eljárást alkalmazok, ismeretségi alapon keresek meg kutatókat a különböző kutatóközpontokból. A célzott segítségével megismerhetjük a szakmabeliek tapasztalatait, feltárom a kvantum programozásról, és kvantum számítógépek fejlődési korlátairól alkotott véleményüket és ez által mélyebb betekintést nyerünk a kvantumszámítástechnika magyarországi helyzetébe.

Bevezetés

Bár a kvantumfizika már több mint százéves terület – ami a természettudományok esetén igazából fiatal tudománynak tekinthető – a kvantumszámítógépek még csak napjainkban kerülnek kialakításra, ugyanis mostanra jutott el oda a tudomány, hogy egy elméleti konstruktumnak, a qubiteknek, és azok szuperpozíciójából fakadó lehetőségeknek fizikai megvalósítást találjon, és gyakorlati alkalmazási területeken próbálja ki az elméleti modelleket.

A kvantum számítógépek megjelenéséig a kvantum csupán a fizika egy speciális területét jelentette, amelyen leginkább elméleti modellek segítésével lehetett újabb és újabb felfedezéseket tenni. Azonban a technológiai fejlődés a 90-es évekre lehetővé tette, hogy ne csupán az elméletben, de a gyakorlatban is vizsgálhatóak legyenek a kvantumfizikai jelenségek. A kvantum számítógép sokféle módon lehet létre hozni a különböző, saját spinnel rendelkező részek segítésével. A saját spin fontossága a kvantumfizikai alapokból levezethető. Azonban az, hogy milyen részecskét használunk fel egy kvantum elven működő számítógép kialakításához már leginkább a működési feltételek és a szabályozási folyamat (logikai kapuk)

kialakításán múlik. Egyes részecskék csak szélsőséges környezetben mutatják a kvantumszámításokhoz szükséges tulajdonságokat, míg mások lényegesen könnyebben kezelhetőek.

A kvantumszámítógépeknek három fő típusa létezik, a kvantumizzítás, az analóg kvantumszimulációk, valamint az univerzális kvantum. A kvantum izzítás egy a metallurgiában használatos folyamatot, a temperálást modellezi, melynek keretében a rendszer képes a legalacsonyabb energia állapotot, a globális minimumot megtalálni (adiabatikus számítási módszer). Olyan problémák megoldására hatékony, amelyekre a kutatók még mindig keresik a módot, hogy feltárják a leghatékonyabb konfigurációkat a változók többféle kombinációja közül. A kvantumizzítás azonban a kvantumszámítástechnika legkevésbé hatékony és legszűkebb felhasználási módja, leginkább optimalizációs számításokra alkalmas.

Az analóg kvantumszimulátorok ezzel szemben segíthetnek olyan fizikai problémák megoldásában, amelyek messze túlmutatnak a klasszikus rendszerek képességein. Az analóg kvantumszimulátorok tehát a folytonos változós számítástudomány kiterjesztésének is tekinthetőek, amelyek magukban foglalják a sztochasztikus, nem egységes áramköri elemeket is, ezzel lehetővé téve a technológiai fejlődéssel együtt járó mérnöki feladatok szélesebb körének támogatását, mint például a sztochasztikus térképek approximációja, valamint a neurális hálózatok és intelligens vezérlés új formái. A kvantumszimulátorok képesek a legnehezebb biokémiai problémákat is lemodellezni, például a fehérje hajtogatás szimulálását. Segítségükkel a kutatók tesztelhetik majd, hogy mely gyógyszerek alkalmazhatók kezelésre. Ahhoz azonban, hogy mindezek lehetővé váljanak, az analóg kvantumszimulátorokat még három területen kell fejleszteni: (1) rendszerszintű információtechnológia, algoritmusok és architektúrák; (2) a dekoherencia, a szétválasztás és a disszipáció kezelésének módszerei; és (3) a nagy kvantumrendszerek építéséhez szükséges alapvető eszköztervezés, beleértve a modellezést is (Werbos, Domatova, 2016).

Az általánosabban használható kvantum számítógépeket a legnehezebb megépíteni. Az univerzális számítástechnika mögött meghúzódó cél az, hogy a gépet bármilyen bonyolult számítási probléma megoldására rávehesse, és mégis a legjobb megoldást gyorsan megkapja. A hátulütője a technikának, hogy egy ilyen rendszer közel egymillió qubitet kellene tudjon kezelni, szemben a legfeljebb párszázas jelenlegi rendszerekkel (Brainstormingbox, 2020).

A kvantum számítógépeket a qubitek fizikai megvalósítása szempontjából is csoportosítjuk; mely szerint léteznek egyedi fotonokat, befogott ionokat, szupravezető áramköröket, félvezető kvantumpontokat, gyémántban található egyedi hibákat, szilíciumban található egyedi atomokat, fémként viselkedő szén nano-gömböket, valamint ritkaföldfém-ionokkal szennyezett szervetlen kristályokat befolyásoló rendszerek (Ohlsson, Mohan, Kröll, 2002). Emellett léteznek speciálisan kialakított rendszerek (logikai kapuk), mint például az izotóposan dúsított szilíciumot használó rendszer (Veldhorst et al, 2015).

Az MTA WIGNER Fizikai Kutatóközpont kvantumtechnológiai idővonala alapján, a jelen kor kihívásai már túlmutatnak a kvantumtechnológia megalkotásán, a rendszerek létrehozásán. A jelen, és a jövő feladata olyan rendszerek és alkalmazások kialakítása, amelyek a mindennapi emberek életét és életkörülményeit is javítani tudják.

A kvantum számítástechnika előtt álló kihívásoknak tehát csupán egyik szegmensét teszik ki a minél megbízhatóbb kvantumszámítógépek. Ezen a területen az elkövetkező néhány évben szükséges nem csupán új kvantumszámítógépes algoritmusok megalkotása, de olyan kisméretű kvantumprocesszor létrehozása is, amely képes technológiailag releváns problémák megoldására. Mindezeken túl elengedhetetlen a topologikus kvantumos hibajavítással védett logikai kvantumbit megalkotása. A WIGNER előrejelzése szerint csupán a középtávú (5-10 éves) tervek részét képezik olyan kvantumszámszámítógépek kialakítása, amelyek képesek kémiai vagy anyagtudományi problémák megoldására, és csak távlati célként tűzhető ki olyan általános célú kvantumszámítógépek kialakítása, amelyek meghaladják a klasszikus számítógépek számítási kapacitását. Szintén csak távlati cél a kvantumos áramkörök és a hűtésüket vezérlő elektronika integrálása is.

A kvantumfizikai kutatások a számítógépeken túl a szenzorok, a szimulátorok és kommunikáció területén is képesek lesznek újat hozni. Mag jelenleg a kutatások a kvantumos érzékeléshez szükséges minél pontosabb céleszközök kialakítására, esetleg atomórák kidolgozására koncentrálnak, addig a jövőben várható a kvantumos érzékelés ennél sokkal szélesebb körű elterjedése, a kvantumos hordozható navigációs eszközök elterjedése, vagy akár a föld mágneses mezőjének pontosabb feltérképezése kvantumos érzékeléssel, vagy fogyasztói célú eszközökbe integrált kvantumos érzékelőrendszerek létrehozása.(Szikora, 2022)

A szimulátorok jelenlegi fejlettségi szintjük mellett az elektronok szilárdtestben való mozgásának modellezésére tehetők képessé, de a cél új, sokoldalú szimulátorok kialakítása, amelyek a mágnesesség, elektromosság és más elemi jelenségek vizsgálatára egyaránt alkalmasak, illetve olyan kvantumszimulátorok alkotása, amelyek lehetővé teszik kémiai reakciók hatásmechanizmusának, dinamikájának vizsgálatát.

A kommunikáció területén az átjátszóállomások (kvantumos jelismétlő alaptechnológia) létrehozása foglalkoztatja leginkább a szakembereket, valamint a kvantumos titkosított kommunikáció megvalósításának lehetséges módjai. A jövőbeni alkalmazási lehetőségek között található azonban a kvantumosan védett hitelkártya, a kvantumos an titkosított jelismétlő, illetve annak lehallgatását érzékelő rendszer, valamint a távoli városokat összekötő kvantumosan titkosított kommunikáció, vagy éppen egy kvantumos összeurópai hálózat.

A kvantum közösség

Mára már nagyon sok egyetem, kutatóközpont, vállalat és közösség foglalkozik a kvantum témával. Van amelyik a hardver kialakításra, van amelyik szimulációk megalkotására, van, aki a programozási környezet, vagy éppen a titkosítási problémák irányából közelíti azt meg. Ennek megfelelően számos féle csoportosítás és kapcsolódó ranglista létezik. A The Quantum Insider (Swayne,2022) a legjobb egyetemeket rangsorolta áprilisi cikkében, amely szerint a legjobb 12-be sorrendbe az alábbi intézmények (egyetemi kutatóközpontok) kerültek be:

1. The Institute For Quantum Computing — University Of Waterloo
2. University Of Oxford
3. Harvard University — Harvard Quantum Initiative
4. Mit — Center For Theoretical Physics
5. National University Of Singapore And Nanyang Technological University — Centre For Quantum Technologies
6. University Of California Berkeley
7. University Of Maryland — Joint Quantum Institute
8. University Of Science And Technology Of China (USTC) – Division Of Quantum Physics And Quantum Information
9. University Of Chicago — Chicago Quantum Exchange (CQE)
10. University Of Sydney — Australia
11. Quantum Applications And Research Laboratory at LMU Munich (QAR-Lab)
12. University Of Innsbruck – Quantum Information Computation

Sajnos a rangsorolás szempontjai nem kerültek megadásra, így a lista némiképp tetszőlegesnek tekinthető.

A CEOWorld (Miller, 2019) ezzel szemben világos kritérium mentén – kvantumkutatásba fektetett összeg – nem az egyes szervezeteket, hanem az országokat állította 2019-ben sorba. A lista vezető országai ekkor az alábbiak voltak:

1. USA
2. Kanada
3. Németország
4. Franciaország
5. Egyesült Királyság
6. Hollandia
7. Oroszország
8. Kína
9. Dél-Korea

10. Japán

A lista kialakítása óta nem csupán eltelt 3 év, de a pandémia és az orosz-ukrán háború is jelentősen átrajzolhatta az erőviszonyokat.

A Business Magazine 2021-es listája szerint az alábbi 10 vállalat áll ma a kvantum világranglista élén. Nem csupán nagyobb múltra visszatekintő, hagyományos IKT eszközökkel is foglalkozó számítástechnikai vállalatok szerepelnek tehát a listában, de vannak olyan szereplők is, mint például a D-Wave, vagy a Rigetti, amelyek a kvantum számítástechnikával egy időben jelentek csak meg a piacon, bizonyítva azt, hogy bár a kvantum számítógépek kialakítása és kutatása erőforrás és persze időigényes feladat, a folyamatból a kisebb szereplőknek sem kell feltétlenül kimaradniuk (Hassija et al., 2020).

1. Microsoft Quantum Computing (Cusumano, 2018)
2. Google AI (Tung, 2015)
3. IBM Quantum Computing (Orhan, 2021; IBM, 2019)
4. D-Wave Systems (Businesswire, 2022)
5. Intel Quantum Computing (Gomes, 2018)
6. Hewlett Packard: Quantum Information Processing
7. Toshiba Quantum Information Group
8. Alibaba Quantum Computing Laboratory
9. 1QB Information Technologies
10. Rigetti: Quantum Computing

A magyar kvantum közösség

Bár a CEOWorld korábi listájára Magyarország nem tudott felkerülni, ez nem jelenti azt, hogy hazánkban nem folynak releváns kutatások. Jelen fejezet célja bemutatni a legnagyobb magyar szereplőket.

A magyar kvantum közösség ugyan méretében még nem meghatározó, azonban már most is számos kutató helyet és kisebb-nagyobb gyártó vállalatot foglal magába. Ezek közül legjelentősebb a HunQuTech kvantumtechnológiai konzorcium.

A HunQuTech konzorcium kiemelkedő hazai kutatócsoportok ernyőszervezete, amely lehetővé teszi a hazai kutató-fejlesztő közösségek számára, hogy részt vegyenek a kvantumtechnológiák fejlesztésében. A konzorcium célja kvantumbitek előállítása, megosztása és kvantuminformációs hálózat létrehozása (MTA, 2018)

A HunQuTech konzorcium tagjai a következők:

A konzorcium vezetője az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont

Egyetemi tagok:

- BME TTK Fizikai Intézet
- BME VIK Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék
- BME VIK Egyesült Innovációs és Tudásközpont
- ELTE TTK Fizikai Intézet Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék
- MTA EK Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet Mikrotechnológiai Osztály

Vállalati tagok:

- BHE Bonn Hungary Kft.
- Ericsson Magyarország Kft.
- Femtonics Kft.
- Nokia Bell Labs Kft.

A tagok közös célja a technológiai potenciál realizálása. A kutatócsoport ennek keretében kísérletet tesz egy olyan egyfoton-forrás, valamint egy összefonódott fotonpár-forrás létrehozásra, amely elengedhetetlen a kvantummechanika elvei által garantált biztonságos kommunikációhoz. A kvantumfizikai vizsgáltokhoz ezen túl szükséges egy- és kétbites kvantumlogikai kapuk létrehozása, valamint egy olyan mérőeszközre, amely képes az mágneses rezonancia optikai detektálására. A tervek között szerepel továbbá egy kvantumkommunikációs rendszer, valamint különböző fizikai elveken alapuló kvantummemóriák megalkotása. A rendszerek célja új algoritmusok fejlesztése, valamint kvantumfizikai rendszerek hatékony szimulációja.

A konzorcium a 2016-os Quantum Manifesto-ban (QUROPE, 2016) foglaltakkal egyetértésben törekszik arra, hogy Európát, és természetesen ezen belül Magyarországot a világszerte kibontakozó második kvantumforradalom aktív szereplőjévé tegye, versenyképes kvantumipart és kvantumkutatási potenciált alakítson ki; tudásalapú ipari ökoszisztémát hozzon létre. Mindez azonban nem csupán öncélú folyamat. A kritikus infrastruktúrák és alapfolyamatok – energia, egészségügy, biztonság és környezetvédelem – hatékonyságának a növelése a cél, amelyek lehetővé teszik az átalakuló világ új problémainak hatékony kezelését. Emellett, nem csupán az akadémiai, de az ipari tagok is erősen érdekeltek abban, hogy Magyarországot az innovatív vállalkozások és a kvantumbefektetések számára vonzó célponttá tegyék, ez által gyorsítva az ipar és társadalom számára kedvező folyamatokat Magyarországon.

A konzorcium felel többek között a 2018-ban indult Nemzeti Kvantumtechnológiai Programért is, amelyet az állam 3,5 milliárdos támogatással indított útjára.

A hazai kvantumfejlesztését tűzte ki célul a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium is, amely az ITM és az NKFIH közreműködésével hazai fizikusok, mérnökök, matematikusok és informatikusok támogatásával jött létre. A kutatási területek (mint ahogyan a tagok is) átfednek a HunQuTech kapcsán

korábban bemutatottokkal. A Nemzeti Laboratórium célja elemi építőköveket alkotni a kvantuminformatika számára, majd ezek segítségével kvantumkommunikációs hálózatot létrehozni, amely alkalmas kvantumszámításokra és kvantumrendszerek szimulációjára. A konzorcium vezetője a Wigner Fizikai Kutatóközpont, további tagjai a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetem. A Labor számos elméleti és gyakorlati projektnek ad otthont. Eddigi projektjei a honlap alapján (qi.nemzetilabor.hu/hu/projektek):

- A kvantumszámítás és a klasszikus informatika kölcsönhatása
- Atom-foton interfész
- Egyfoton-forrás fejlesztése telekommunikációs hullámhosszon
- Félvezető-szupravezető hibrid kvantumbit
- Kvantumalgoritmusok és kvantumszámítási architektúrák fejlesztése, tesztelése és kvantuminformatikai erőforrások minősítése
- Kvantumkommunikációs feladatok elméleti analízise
- Kvantumos véletlenszámgenerátor
- Kvantumszámítógép emulátor laboratórium
- Kvantumtartományban működő intelligens memóriahálózatok fejlesztése
- Mágneses adattárolókban alkalmazható topologikus spinstruktúrák
- Optikai kvantuminformatikai laboratórium kiépítése
- Optikai szálas kvantumhálózat kialakítása
- Optimalizálási algoritmusok, kvantumos gépi tanulás és a mesterséges intelligencia alkalmazása a kvantumszámításban
- Összefonódott fotonpárok telekommunikációs hullámhosszon
- Posztkvantum-kriptográfia
- Spin-foton interfész
- Szabadlégköri kvantumhálózat kialakítása
- Szoftvertechnológia kvantumszámítógépek programozásához
- Telekommunikációs hullámhossz-kompatibilis kvantumbit-tárolók létrehozása és manipulációja
- Tenzorfaktorizációra épülő numerikus szimulációk összetett kvantumrendszerekre

A projektekből, az elmúlt rövid idő alatt is számos nemzetközi publikáció született, csak 2021-ben 18 darab.

Természetesen a kvantum számítástechnika és a kapcsolódó kutatások nem csupán konzorciumokba szerveződve zajlik. Számos kisebb vállalat és csoport dolgozik kapcsolódó témákon, technológiákon. A doktori.hu adatai alapján ma Magyarországon 4 egyetem 7 doktori iskolája foglalkozik kvantum témákkal, amelyből csupán egy tagja a fenti ernyőszervezeteknek. Az alábbi táblázat a doktori.hu-n talált témakiírásokat mutatja be a témák szerinti összesítésben.

BME	Informatikai Tudományok Doktori Iskola	kvantumkommunikáció
BME	Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola	kriogén technikák

DE	Kémia Doktori Iskola	kvantumkémia
DE	Fizikai Tudományok Doktori Iskola	kvantummechanika, kvantum- fázisátmenetek, kvantum korrelációk, kvantum hitelesítés, kvantum gázok, kvantum kontroll, kvantumos fény, kvantum kémia, relativisztikus kvantum térelmélet, Hamilton-operátor, QCD, kvantum-elektrodinamika,
PTE	Kémia Doktori Iskola	fotokémia
SzTE	Matematika Doktori Iskola	megőrzési transzformációk
SzTE	Elméleti Orvostudományok Doktori Iskola	kvantumkémia

Amint a listában is jól látszik, a legtöbb kvantumhoz kapcsolódó témát a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskola kínálja, azonban a HunQuTech-ben is szerepet vállaló BME két doktori iskolával, és a Szegedi Tudományegyetem szintén két doktori iskolával is képviselteti magát. Természetesen a fenti lista nem azt jelenti, hogy más felsőoktatási intézményekben nem zajlanak kvantumos kutatások, csupán azt, hogy ezek nem jelennek meg a doktori.hu adatbázisban.

Primer kutatás a magyar kvantumközösség tagjai körében

Miután igyekeztem szekunder adatok segítségével feltárni a magyar közösség tagjait, primer kutatást is végeztem annak érdekében, hogy ne csupán a szereplőket tudjam azonosítani, de megértsük motivációikat, illetve a kvantumszámítógépekkel kapcsolatos attitűdjeiket is.

A kutatási módszer feltáró jellegű, interpretatív szemléletű. Megpróbáltam a kvantum közösség minél több tagját, minél több résztvevőjét megkérni arra, hogy segítsenek bemutatni a magyar kvantumközösséget és ismertessék meg velem látásmódjukat.

Ennek megfelelően két szignifikánsan eltérő látásmód jelenik meg ebben a dolgozatban, az egyik a gyártó oldali észlelése a helyzetnek, a másik az, hogy milyen a kutató oldali megközelítés. A kutató oldali szemlélet – talán azért, mert a kvantumot, mint témát nem csupán egy módon, irányból lehet kutatni, vizsgálni – fragmentáltabb. Vannak olyanok, akik a fizikai megvalósításra koncentrálnak, és olyanok is, akik az elméleti modellekre, vagy éppen az algoritmusokra, programozásra koncentrálnak.

Kutatásommal sikerült a magyar kvantum világ két fő szegmensét, és három alszegmensét elérnem, bár a válaszadók számát tekintve a kutatásom messze nem tekinthető reprezentatívnak.

Mivel a kvantum közösség egy jól körülhatárolható közösségnek tűnik Magyarországon, ezért a minta vételi eljárásom célzott mintavétel volt. Az első körös megkeresésben egyrészt a Hunqutech másrészt a Magyar Nemzeti Labor irányában indítottam kapcsolatfelvételt, de mivel ez a kettő összefonódik, ezért valójában mind a két esetben a Wigner Laboratórium lett a megkeresés fogadója, ami a legfőbb szereplője a magyar kvantumközösségnek. Ez a kutatóközpont tölti be a koordinátori szerepet mindkét ernyőszervezetben, és jelentős kvantumfizikai és informatikai kutatások színtere is. Ezen indokok alapján a Wignerben folytattam le személyesen a legtöbb interjút. A személyes interjúk mellett sikerült online módon is interjút szervezni, válaszokat szerezni.

A kutatásban részt vevő személyek

Az elméleti részben bemutatottakból már tudtam, hogy a doktori iskolák közül: a BME, Informatikai Tudományok Doktori iskola és Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti tudományok Doktori Iskola, a PTE Kémiai Doktori Iskola, az SzTE Matematika Doktori Iskola és Elméleti Orvostudományok Doktori Iskola, de leginkább a Debreceni Egyetem Informatikai Karának Fizikai Tudományok Doktori Iskolája az, ami kvantumos témákban mozog. Ezért megkerestem a Debreceni Egyetem Doktori Iskolájának a tagját Kruppa Andrást, Dr. Bazsa György javaslatára, ami egy célzott mintavételi eljárás. Továbbá hólabda eljárást alkalmaztam, - melynek kiindulópontja a két fő ernyőszervezet, és a Debreceni Egyetem volt, - és minden kutatásban résztvevőnket megkértem, hogy ossza meg a kérdőívet, illetve küldje el az általa javasolt emberek email címét. A vizsgálati eszköz alapvetően egy strukturált interjú volt, de pont emiatt a strukturáltsága miatt a fizikai távolság Debrecen esetében, azzal volt áthidalva, hogy a potenciális embereknek felajánlottam az online interjú lehetőségét, illetve az online Google Form kitöltését.

Interjúnkban összességében 14 embert tudtam elérni. Alanyaim közül mindenki vállalta, hogy nevével együtt használjuk az adatait egy ember kivételével, ezért erre az emberre Anonymus-ként fogok hivatkozni, a többiekre meg a saját nevükkel.

Érdekessége, és talán a témának a jellegzetessége is hogy az összes válaszadó férfi, és csak egyetlen egy női válaszadó van a mintában, ezt a jelenséget akkor is megfigyelhettem amikor a Wigner Laboratóriumnál jártam, hogy ezen a területen nagyon kevés nő dolgozik. Az életkora az interjú alanyoknak változó, tehát a lefiatalabb válaszadó az 27 éves volt, a legidősebb az 72 éves, és van egy válaszadó, aki nem kívánta megadni életkorát, de összességében elmondható, hogy a kvantumfizika, kvantumelmélet nem csak a

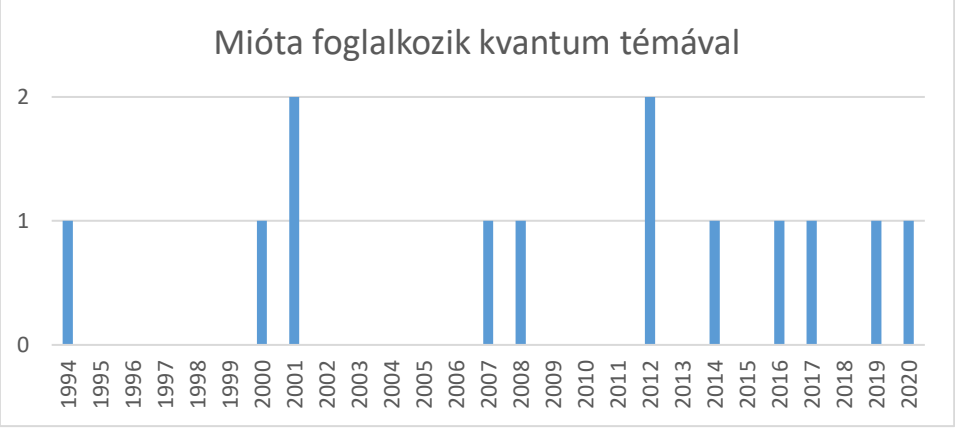
fiatalokat érdekli, hanem egy széles korosztály érdeklődésének tartanak számot. Emellett a válaszadók között magyar interjúalanyok mellett két külföldi interjúalanyom is volt.

A következő kérdésem, az volt, hogy milyen végzettsége van a válaszadónak. Összességében elmondható, hogy a 13 válaszadóból egynek van informatikai végzettsége, és dominánsan majdnem mindenki fizikus, vagy fizikai képzettséggel rendelkezik. Ezen belül két válaszadó is van, mindketten külföldiek, akik vagy kvantum fizika PhD-val, vagy atomfizika-optika PhD-val rendelkeznek, tehát nem általános fizikai PhD-juk van.

Kutatási eredmények

Annak érdekében, hogy minél átfogóbb képet kapjak a kvantum közösség tagjainak véleményéről, fontos volt számomra az is, hogy megismerjem a kvantum számítástechnikával való kapcsolatukat is.

Az interjúalanyokat megkérdeztem, hogy mióta foglalkoznak kvantum témákkal. Egyetlen egy ember volt, aki azt nyilatkozta már 1994 óta, a többiek dominánsan 2000 után kezdtek el foglalkozni vele.



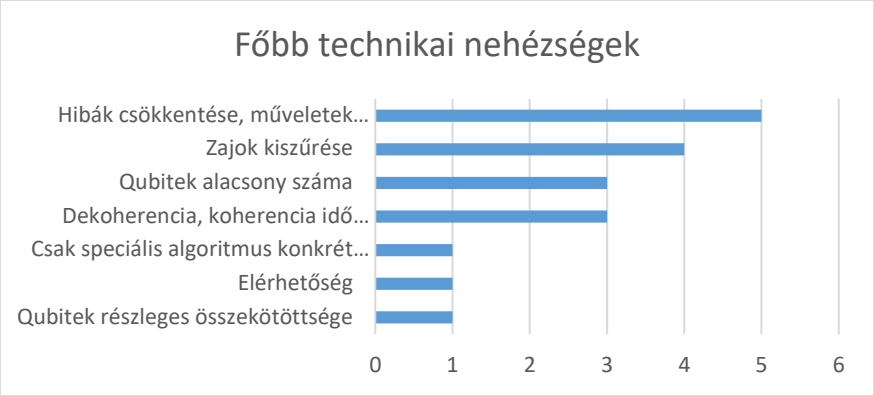
Ami számomra érdekes volt, amellett, hogy mióta érdeklődnek a téma iránt az, hogy a kutatók miért kezdtek el a témával foglalkozni. Nagyon sokak számára eleinte ez egy hobbi volt, illetve még az egyetemen, tanulmányaik során ismerkedtek meg vele, kaptak hozzá kedvet. Mint például Gábor Bence is – „a Szegedi Egyetemen nagyon jó volt az elméleti fizikai képzés, és a legjobb tanárok kvantumfizikával foglalkoztak”.

Következő kérdésem az volt, hogy van-e hozzáférésük az interjúalanyoknak kvantumszámítógépekhez. Mint ahogyan a dolgozat is kvantumfizikai alapokkal kezdődik, aztán rátér a kvantumszámítógépekre, ugyanez a jellemzője a magyar kvantumközösségnek is. Nagyon sokan inkább a kvantumfizikai kutatási

irányban helyezkednek el, tehát nem magukkal a kvantum számítógépekkel foglalkoznak, hanem a kvantum fizikával, vagy a kvantum témához kapcsolódó területekkel. Ennek megfelelően a válaszadók több, mint felének (7 fő) van hozzáférése kvantumszámítógéphez, de számos interjúalany nyilatkozott úgy, hogy neki kutatásaihoz ez nem is feltétlenül szükséges. Ez a kérdés tehát megosztja a közösséget, és alátámasztja a korábbi állításomat, mely szerint, ha valaki a kvantumhoz kapcsolódik, akkor nem feltétlen a gépeket programozza, még hogyha van hozzáférése is.

Válaszadóinknak viszonylag széles spektrumon vannak hozzáférései különböző kvantum számítógépekhez. Ez a széles spektrum dominánsan IBM gépeket foglal magába. Sokak számára nem is a gyártó volt a lényeges, hanem az a részecske amilyen alapon a kvantum számítógép működik, amely a dolgozatban leírt logikai modellre vezethető vissza. A kutatók egy része inkább az adiabatikus, míg mások az univerzális gépek irányában folytat kutatásokat. A válaszok függvényében megállapíthatjuk, hogy egyes kutatók számára a részecske milyensége a meghatározó, mások számára meg az is fontos, hogy melyik cég a gyártó. Az alanyok által felsorolt listában nem szerepelt olyan cég, amelyet ne mutattam volna be a dolgozatban, ez szerencsére alátámasztja, hogy valóban a négy legfontosabb gyártóvállalatot tudtam megragadni, és ezek a szereplők akkor is a legrelevánsabbak, ha magyar kvantumközösséget tekintjük.

Ezek után megkérdeztem a válaszadók mit gondolnak, a kvantum számítógépeknek mik a főbb technikai nehézségeik. Bóbics András szerint – „bármilyen jó fizikai rendszer, csak közelítőleg qubit, mert annál bonyolultabb, és ez fog a számítástechnikai alkalmazásban problémát okozni. A szuperpozíciós állapot érzékeny a külső behatásra (dekoherencia) és ezt nehéz kontrollálni, az univerzális műveleteket nem lehet elég gyorsan (rövidebb, mint a dekoherencia idő) alatt végrehajtani.”.



Ezek után megvizsgáltam, hogy a kutatócsoportok tagjai szerint milyen problémák megoldására használhatók a kvantumszámítógépek. Itt alapvetően kettő fő csoportot képezhettem a válaszadókból. Egyesek szerint a kvantum számítógépek még nem alkalmasak valós problémák megoldására, csak kísérleti

problémák megoldására. Mások azonban említették a tipikus problémákat, amik alapvetően az adiabatikus számítógépekre jellemzők, az optimum számítások, és az univerzális típusú számítógépekre a kriptográfiai problémák. De amiben a két csoport válaszai megegyeztek, hogy amire a kvantum számítógép igazán jó az a kvantumfizika és az önmaga működésének a modellezése.

Megkérdeztem továbbá az interjú alanyoktól, hogy milyen programozási nyelvet használnak a programok megalkotására. A válaszok alapján, dominánsan mindenki Qiskitet, Pythont vagy, C++-t használ, de egyetlen egy esetben előfordult, hogy valaki a Java programozási nyelvet használja, szimulációs feladatok megoldására.

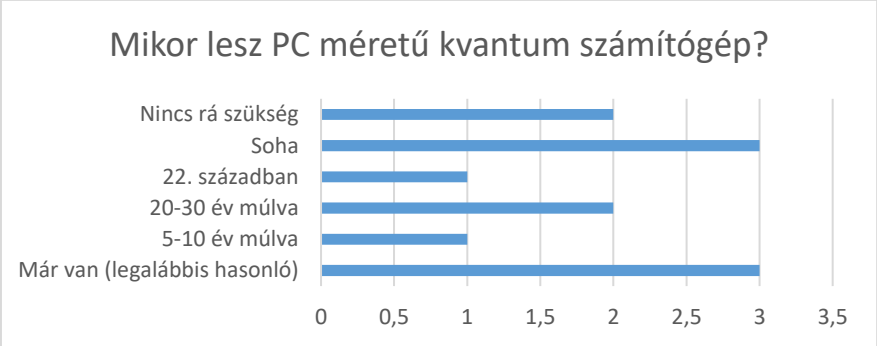
Következő kérdésem úgy szólt, hogy „Milyen problémák megoldásában hatékonyabb a kvantum számítógép, mint a Neumann elvű számítógépek." Jelenleg mire használja és tisztában van-e azzal, hogy mire lehetne még használni. Itt már lényegesen tisztább volt a kép, sokan tisztában vannak azzal, hogy a kvantum számítógépeknek igen is van egy nagyon széles alkalmazási területe, ha nem is a jelenben, a jövőben. De itt is vannak többen, - akik felhívták arra a figyelmet, - akik szerint a kvantum számítógép jelenleg nagyon limitált felhasználási területtel rendelkezik. Ennek a kérdésnek a tovább gondolása volt a következő kérdés.

Még hogyha most limitált is, mi lesz ezzel később „milyen problémák megoldásában hatékonyabb a kvantum számítógép már most is?". A válaszok majdnem egyöntetűek abban a tekintetében, hogy hiába gyártunk univerzális kvantum komputereket, ezek nem fogják tudni a mindennapi számítástechnikai feladatokat ellátni, hanem speciális céleszközök lesznek, egyetlen egy olyan válaszadó volt, aki azt mondta, hogy majd mindenre jó lesz csak sokkal később, mondjuk 50 év múlva. Ezzel összhangban van a következő kérdés.

Nagyon sokan a szakirodalomban azt mondják, hogy a kvantum számítógép az inkább céleszköz a jövőben is és nem fogja átvenni a klasszikus, tradicionális számítógépeknek a helyét, ezért megkérdeztem, hogy „mi az, amire később sem lesz jó egy kvantum számítógép?". A válaszok túlnyomó többsége egyetértett az szakirodalomban leírtiakkal, és egyöntetűen azt mondták, mint amit Kálmán Orsolya is mondott, hogy: „a klasszikusan is hatékonyan megoldható problémákhoz később sem fogunk kvantumszámítógépeket használni.".

A következő kérdés egy inkább technológiai jellegű kérdés volt, melynek kiindulási alapja, hogy jelenleg a zajcsökkentés miatt kriogenetikus hőmérsékleten működik, és ez méretbeli korlátokat szab a gépnek. A kérdés az, hogy mikor lesz személyi számítógép méretű a kvantumszámítógép, mikor lesz az, hogy nem teljes szabványi hűtőberendezések kellenek ahhoz, hogy működhessenek. Itt nagyon megoszló a közösség.

Van, aki azt mondja, hogy majd a 22.században, van, aki azt mondja ezek már léteznek, vagy legalábbis nagyon közel van a megoldás, és vannak, akik azt mondják sosem érjük el azt a méretet, és azt nem feltétlen a korlátok miatt nem, hanem mert nincsen rá szükség. Domokos Péter így fogalmazott: „Fontos látni, hogy erre nincs is szükség. A hagyományos számítógépek esetében is egyre kevesebb embernek van otthon vagy a munkahelyén saját pc-je, hanem egy távoli nagy infrastruktúrán (felhő) végzik el a numerikusszámításainkat.”



A szakirodalom által többszörösen vitatott, illetve emlegetett tény a kvantum fölény. A kvantum fölény definíció szerint azt jelentené, hogy a kvantumszámítógépek, teljesítményüket tekintve már jobbak, mint a klasszikus számítógépek. olyan feladatokat tudnak megoldani, amelyeket a klasszikus számítógépek nem tudnak, vagy csak extrém hosszú futási idő mellett. Bár a szakirodalomban is főleg a Google az, ami nagyon sokszor kihirdette (Arute et al., 2019; Reddy et al., 2021), de kínai kutatócsoportoknak is vannak hasonló cikkei (Pan, Zhang, 2021).

Erre a kérdésemre ketten nem adtak választ, viszont a közösség többségében azt mondta, hogy nem, -ide idézném Bóbics András válaszát, miszerint „nem, csak speciális problémáknál van bizonyos előny” – és összesen kettő darab válaszadó mondta azt, hogy igen, de ők is hozzáteszik, hogy konkrét feladatok kapcsán érték még csak el. Tehát a közösség alapvetően gondolja azt, hogy a kvantum fölény, attól függően, hogy hogy definiáljuk, még nem lett elérve, nagyon céleszközök a számítógépek, és csak nagyon teoretikus pontosan meghatározott matematikai probléma, vagy algoritmikus problémák esetére tudtak jobb teljesítményt nyújtani, mint a klasszikus számítógépek.



Miután a jelenlegi kvantum számítógépek problémai, ahogy a korábbiakban leírtam, technológiai jellegűek, ezért feltettem egy olyan kérdést is, hogy hogyan lehet a rendszer stabilitását növelni, azaz hogyan lehet minél pontosabb, minél hasznosabb kvantumszámítógépeket építeni. Itt valójában tényleg a fizikai megvalósításra, gondoltam, és ezzel kapcsolatban kértem visszajelzéseket a válaszadóktól. A válaszadókból többen is mondták a zajmentesítést, izolálást, hibajavítást, hűtésmegvalósítást. Emellett még meg lett említve a technológia fejlődése is.

A konzulensem a biotechnológia területén javasolta a kvantumszámítógépek alkalmazását, ezért a következő kérdésem kifejezetten arra kérdez rá, hogy a szakirodalomban (Weerd, Lassche, 2021) a penicillin, mint legegyszerűbb antibiotikum élettani hatásának modellezéséhez is minimum 128 qubitre van szükség, és hogy szerintük ez mikor lesz lehetséges. Érdekes válaszokat kaptam, mert míg egyesek azt mondták, hogy a 128qubit az valójában itt van, nem állunk nagyon távol tőle, optimista becslés szerint a többiek 10 év múlva jósolták, de vannak olyanok is, akik ezt teljesen beláthatatlan idő múlva, évtizedek múlva, teszik valószínűvé. Tehát nagyon megosztja a közösséget. Mint ahogy Thomas Clark is felidézte Einsteint „persze Einstein is 100 évet jósolt, és nem volt felkészülve arra, hogy halála után a 2. világháborúnak milyen gyorsító hatásása lesz a technológiai fejlődésre”. Így ki tudja, hogy amit mi most 100 évre jósolunk pontosan mikor következik be.

Megkérdeztem továbbá, hogy van e gátja a kvantum számítógépek fejlődésének, mert voltak olyanok, akik akár 10, 100 évre rakták a 128 qubites számítógép kialakítását is. Erre a kérdésemre a többség azt mondta, hogy nincsen ennek semmilyen elméleti gátja, tehát amennyiben az elméletek helyesek, akkor különböző válaszokat is kapunk, valaki azt mondja, hogy nincs gátja, csak idő és pénz kell a magvalósításához, ami egy nem korlátozott növekedés. Másik azt mondják, hogy a technológiai megoldások valós korlátot jelentenek.

Ezeken a kérdéseken kívül meg megkérdeztem, hogy hozzáfűznének még valamit az interjúkhoz. Többen javasolták, hogy az IBM platformját érdemes használni, mivel ahogy a dolgozatban is le van írva, Cloud

szolgáltatóként működik, tehát ha valakinek nincs követlen hozzáférése fizikai számítógéphez ezekkel el tudja kezdeni a kvantum modellezést és a kvantum algoritmusok futtatását.

Kérdéseim kapcsán, illetve, főleg az interjúkban még felvetődött az is, hogy mennyire ismerik egymást a kvantum közösség tagjai Magyarországon. Ahogy a dolgozatban is bemutattam, itt alapvetően a HunQutech meg a Nemzeti Kvantum Labor az, ami két nagy ilyen ernyőszervezet, emellett van 7 darab Doktori Iskola, ami ezzel foglalkozik, és hát a gyártó vállalatok, vagy vállalati szféra arra limitált ami a HunQutech-ben van: a BHE Bonn Hungary, az Eicsson Magyarország, a Femtonics és a Nokia Bell Labs. Ezt tükrözik alapvetően a válaszok is. Többen csak arról tudtak beszélni, aminek ő maguk is tagjai, A Wignerről, vagy a Bme-ről, a közvetlen környezetükben megjelenő embereknek a hovatartozásáról. De voltak olyanok is akik elég széles listát tudtak adni, például Hanyecz Ottó: „ELTE Informatikai Kara, ELTE Természettudományi Kara, BME", vagy Dombi András: „szinte minden egyetemen, ahol a fizika tárgy van. Például: Szeged, Debrecen, BME, ELTE, de különböző kutató központokban, ahol matematika vagy az informatika is megjelenik"

A válaszadók, szinte teljesen egyöntetűek voltak annak tekintetében, hogy ismernek-e olyan vállalatokat, vagy gyártókat, akik kvantum hardvereket gyártanak. Volt, aki megfogalmazta, hogy „nincsennek olyan cégek, Magyarországon, amelyek komolyan gondolják", valamint azt is megfogalmazta Bóbics András, hogy miért nincsenek: „nincsen, mert a magyar kísérleti kutatásban is csak a kvantumbitek előállításáig jutottak".

Ipari szereplő véleménye a kvantumszámítógépekkel kapcsolatban

Ahogy a világranglistákban sem csupán országokat, és kutatóközpontokat rangsoroltak, hanem vállaltokat is, amelyek a hardver és/vagy szoftver tervezés, fejlesztés, gyártás területén dolgoznak, jelen kutatásban én is igyekeztem ezt a szempontot is szerepeltetni. Sajnos a HunQuTech vállalati tagjait nem sikerült bevonni a kutatásba, de egy kis magyar vállalat ügyvezető igazgatója vállalata a kutatásban való részvételt.

Ezért is fontos, hogy a 14. interjúnk egy olyan vállalatnak a vezetőjével történt, amelyik kvantum számítógépeket gyárt, vagy legalábbis annak a központi vezérlő egységét. Lazányi János, akinek villamosmérnöki képzetsége van, két éve egy megbízás folytán kezdett el foglalkozni vállalatával a PCB Design-nal együtt a kvantum számítógépek hardverének (egy részének) megtervezésével és megépítésével. Kérdéseink ugyanazok voltak felé is, mint a kutatócsoportok tagjai felé. Ő univerzális vezérlő készítésével

foglalkozik, ami mindenféle elemet tud vezérelni – „mi a gerjesztés folyamatával, meg a leolvasással, impulzusok szabályozásával foglalkozunk”.

Megkérdeztem tőle milyen problémák megoldásában hatékonyabb a kvantum számítógépek és melyek azok a dolgok, amelyekbe sosem lesznek jók. Azt mondta, hogy az optimalizációs feladatokban, és a szekvenciális kereséssel nem megoldható feladatokban jobbak a kvantum számítógépek és a komplex algoritmusok, humán interakciót igénylő feladatok, összetettebb feladatok megoldásában később sem lesz jó egy kvantum számítógép.

Továbbá megkérdeztem, hogy mikor lesz PC méretű kvantum számítógép, amely kérdésemre végre egy szakmabeli véleményét is megkapjam. János azt nyilatkozta, hogy ennek több fizikai korlátja is van, és az első és legfontosabb nehézség „a kvantum elementek számának és fajtájának növekedése”. Viszont mivel nem mindenütt szükséges a kriogenikus hőmérséklet, ezért valószínűleg a mostani méreteknél lehet majd a jövőben kisebb méretben is kvantum számítógépet gyártani.

Mint ahogy a kutatók nagy többsége is, János is azt mondta, hogy még nem értük el a kvantum fölényt. Állítását azzal támasztotta alá, hogy nagyon limitált, hogy milyen problémák megoldására használhatók a kvantum számítógépek. „Az nem fölény, hogy a matematikusok találnak egy-egy algoritmust, amit gyorsabban meg lehet valósítani kvantum számítógéppel, mint tradicionális számítógéppel”. Szerinte akkor mondhatjuk majd, hogy elértük, az lenne az „elértük”, „amikor a kvantumszámítógép hatékonyabb egy hétköznapi probléma megoldásban, mint egy klasszikus számítógép klaszter – és ezt egy független harmadik szereplő validálni is tudja.”

Következő kérdésem volt, hogy hogyan lehet a rendszer stabilitását növelni, melyre a válasza az annihilációs idő meghosszabbítása volt. Hozzátette, hogy ebben az elmúlt években is hatalmas fejlődés volt, és most már – egyes rendszerek esetén – akár eléri a 10 szekundumot is. Azon kívül a QEC – kvantum error correction – segítségével, a kísérlet megismétlésével lehet a zajt csökkenteni statisztikai módon.

Összefoglalás

A dolgozatban a kvantumtechnológiára irányítottam a figyelmemet, és megvizsgáltam, hogy milyen típusú kvantumszámítógépek léteznek napjainkban, és működésük során milyen fizikai qubitek segítségével szimulálják a kvantumfizikai összefüggéseket.

Ezután adatokat gyűjtöttem a kvantumtudomány országok, vállalatok és kutatóközpontok közötti versenyéről és rangsorairól, valamint megismerkedtem a terület magyar képviselőivel is. Megállapítottam,

hogy több nemzeti szintű kezdeményezés is létezik, valamint, hogy ezek résztvevői szignifikáns átfedést mutatni; valamint azt is, hogy vannak olyan egyetemek, ahol jelentős kvantumtudományos kutatás zajlik, mégsem tagjai ezeknek az ernyőszervezeteknek, kezdeményezéseknek.

Primer kutatásomban megvizsgálom, hogy a magyar kutatócsoportok tagjai, valamint egy kvantumtechnológiai vállalat vezetője hogyan vélekedik a kvantumszámítógépek alkalmazásának lehetőségeiéről és korlátairól, miben látják a terület fejlődésének gátját, és hogy mikorra jósolják akár egy biotechnológiában sikerrel használható, akár egy PC méretű kvantumszámítógép megjelenését.

Az interjúk kapcsán kiderült, hogy bár a közösség közel sem képvisel azonos véleményt, mégis dominánsan úgy látják, hogy a kvantum számítástudomány még csupán a kezdeti stádiumában van, és a gépek inkább saját működésük szimulálására, mint univerzális problémák megoldására alkalmasak. A fejlődési, fejlesztési lehetőségeket új fizikai qubitek felfedezésében, zajszűrésben, hatékonyabb hibakorrekciós eljárásokban és a dekoherencia probléma megoldásában látják. A vállalati szakember véleménye a korábbiakkal megfogalmazottakkal szemben funkcionalista látásmódot tükrözött. A problémákban a megoldandó feladatokat látta, és válaszai azt tükrözik, hogy a kvantumtechnológia – bár szerinte sosem lesz univerzálisan alkalmazható, a jelenlegi PC-ket leváltó kvantumszámítógép – szerinte rohamtempóban fejlődik, és az újabb „elementek" (fizikai qubitek) felfedezésével számos korábbi kemény korlát, mint például a kriogenetikus hőmérséklet szükségessége megszűnik.

Összességében megfogalmazhatjuk, hogy a kvantumtudományos kutatások jelentős része Magyarországon még alapkutatás, a fizikai qubitek megalkotására, a kvantumjelenségek vizsgálatára koncentrál, és csupán ritkább esetben fókuszál a kvantumalgoritmusok gyakorlati használatára. Ezzel együtt, bár Magyarország nagyon kis ország, számos, és sokszínű kutatási kezdeményezés létezik, és nem csupán elméleti, de gyakorlati fejlesztések is történnek – mint ahogy az a vállalati interjúnkból kiderült.

Bár számos esetben történt már bejelentés, hogy elértük már a kvantumfölényt, valójában még nagyon hosszú út áll a terület kutatói, fejlesztő előtt, és hatalmas tere van a fejlődésnek, amelybe reményeink szerint Magyarország nem csupán sikerrel fog tudni bekapcsolódni, és aktív részesévé válni, de jelentősen hozzá is tud járulni a kvantumszámítógépek kutatásához.

Irodalomjegyzék

1. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature 574, 505–510.
2. Brainstormingbox (2020). The 3 Essential Typaes of Quantum Computers and Their Application. http://brainstormingbox.org/the-3-essential-types-of-quantum-computing-and-their-applications/

3. Business Magazine (2021). 10 Best Quantum Computing Companies. https://www.businessmagazine.org/10-best-quantum-computing-companies-17940/
4. Businesswire (2022). Ahead of the Game: D-Wave Delivers Prototype of Next-Generation Advantage2 Annealing Quantum Computer. https://www.businesswire.com/news/home/20220616005361/en/Ahead-of-the-Game-D-Wave-Delivers-Prototype-of-Next-Generation-Advantage2-Annealing-Quantum-Computer
5. Cusumano, M. A. (2018). The business of quantum computing. *Communications of the ACM*, *61*(10), 20-22.
6. Gomes, L. (2018). Quantum computing: Both here and not here. *IEEE Spectrum*, *55*(4), 42-47.
7. Hassija, V., Chamola, V., Saxena, V., Chanana, V., Parashari, P., Mumtaz, S., & Guizani, M. (2020). Present landscape of quantum computing. *IET Quantum Communication*, *1*(2), 42-48.
8. IBM (2019). IBM Unveils World's First Integrated Quantum Computing System for Commercial Use. https://newsroom.ibm.com/2019-01-08-IBM-Unveils-Worlds-First-Integrated-Quantum-Computing-System-for-Commercial-Use
9. Miller, R. (2019). Revealed: Top 10 countries leading the race of quantum computing technology. CEOWorld, https://ceoworld.biz/2019/12/14/revealed-top-10-countries-leading-the-race-of-quantum-computing-technology/
10. MTA (2018). Elindult a 3,5 milliárdos magyar kvantumtechnológiai program. https://mta.hu/tudomany_hirei/az-akademian-indult-utjara-a-35-milliardos-magyar-kvantumtechnologiai-program-108436
11. Ohlsson, N., Mohan, R. K., & Kröll, S. (2002). Quantum computer hardware based on rare-earth-ion-doped inorganic crystals. *Optics communications*, *201*(1-3), 71-77.
12. Orhan, I. (2021). IBM's plan to dominate the quantum computer industry comes into focus. https://www.linkedin.com/pulse/ibms-plan-dominate-quantum-computer-industry-comes-ismail#:~:text=IBM%20announced%20Tuesday%20that%20it%20plans%20to%20build,pave%20the%20way%20for%20a%20revolution%20in%20computing.
13. Pan, F., Zhang, P. (2021). Simulating the Sycamore quantum supremacy circuits. arXiv preprint arXiv:2103.03074.
14. QUROPE (2016). Quantum Manifesto – A New Era of Technology. http://qurope.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf
15. Reddy, A., Perez-Garcia, B., da Silva, A. J., Konrad, T. (2021). Comment on the Quantum Supremacy Claim by Google. arXiv preprint arXiv:2108.13862.
16. Swayne, M. (2022). 12 Top Quantum Computing Universities in 2022. The Quantum Insider, https://thequantuminsider.com/2022/04/18/the-worlds-top-12-quantum-computing-research-universities/

17. Szikora, P., Lazányi, K. (2022). The End of Encryption?–The Era of Quantum Computers. In Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection (pp. 61-72). Springer, Dordrecht.

18. The Quantum Insider (2022). The Quantum Insider's 2022 Annual Report. https://thequantuminsider.com/2023/01/05/the-quantum-insiders-2022-annual-report/

19. Tung, L. (2015). Google's quantum computer can blitz a normal PC – but it's not ready for production just yet. https://www.zdnet.com/article/google-sees-light-at-end-of-quantum-computing-tunnel/

20. van Weerd, C., Lassche, D. (2021). National Security Implications of Quantum Technology and Biotechnology. TNO Innovation for life. The Hague Centre for Strategic Studies.

21. Veldhorst, M., Yang, C. H., Hwang, J. C. C., Huang, W., Dehollain, J. P., Muhonen, J. T., ... & Dzurak, A. S. (2015). A two-qubit logic gate in silicon. *Nature*, *526*(7573), 410-414.

22. Werbos, P. J., & Dolmatova, L. (2016). Analog quantum computing (AQC) and the need for time-symmetric physics. *Quantum Information Processing*, *15*, 1273-1287.

Köszönetnyilvánítás

Jele kutatás az Új Nemzeti Kiválósági Program támogatásával valósulhatott meg, amelynek ez úton is köszönetetet szeretnék mondani.

Új Nemzeti Kiválóság Program

Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal