

Prantner Csilla, Koczka Ferenc, Biró Csaba

Milyen változásokat hozhatnak a kvantumszámítógépek az oktatás területén?

A magyar törvénykezésben megjelentek azok a rendeletek, amelyek ráerősítenek arra, hogy gyorsan közeledünk a kvantumszámítógépek korszakához. A teljesen újszerű elveken működő kvantumszámítógépek korábban nem megoldható problémákra hatékony és gyors megoldásokat ígérnek. Az új típusú gépek megjelenése várhatóan nem csak az informatika, a gazdaság és a különféle tudományok területén hoz nagy változásokat, hanem valószínűsíthetően a mindennapi életünkre is erősen hatással lesz. Szükségét érezzük, hogy az oktatási szféra is kövesse a kvantumtechnológia megjelenését, hogy ne érje váratlanul a jövő szakembereit. A tanulmányban szóba kerülnek a témával kapcsolatos jogszabályok, az érintett szakterületek és a kvantuminformatikában rejlő lehetőségek és veszélyek. Továbbá írunk arról, hogy milyen tapasztalatok vannak eddig a kvantuminformatika tanításának gyakorlatában.

Bevezetés

Nemcsak a híreket figyelő emberek számára lényeges tájékozódni az újszerű számítógépekről, hanem célszerű elgondolkodnunk azon, hogy miként lenne érdemes behozni a témakört az oktatás meghatározott szintjeire és szakterületeire annak érdekében, hogy a kvantumszámítógépek megjelenésére és az általuk generált változásokra a társadalmunk fel legyen készítve. Legyen elég szakember a kvantumgépek működtetésére, az általuk esetlegesen okozott károk megelőzésére, kezelésére, a kvantum-adatbiztonság megőrzésére, valamint a kvantumgépek támogatásával végezhető kutatások és fejlesztések véghezvitelére. A kvantumszámítógépek építése kapcsán kémikusokra és fizikusokra, míg az adatvédelem, a kutatások és fejlesztések kapcsán pedig programozókra lesz várhatóan nagy szükség, akik rendelkeznek kvantumfizikai és -informatika ismeretekkel, és eleve bírnak az ezzel kapcsolatos speciális gondolkodásmóddal.

A kvantuminformatika előzményei

A klasszikus értelemben vett kvantummechanika gyökerei az 1800-as évek elejére, empirikus fizikai-kémiai kutatásokra vezethetők vissza. A hőmérsékleti sugárzás és színképlelemzés kapcsolatának vizsgálatakor fekete vonalakat találtak a színekben (Beret et al., 1997; Rittre et al., 1986; Ritter et al., 2010). Ez az anomália számos újabb és újabb kérdés elé állította a kutatókat, amelyek megválaszolása közben az 1900-as évek elejére a kérdések már a közben önálló tudománnyá váló kvantummechanika területéről érkeztek.

1900. december 21-ére tehető a kvantumfizika születése, amely napon Max Planck ismertette a sugárzási törvény kvantumhipotézis alapján történő levezetését előadásában (Planck et al., 1887; Planck, 1900). A *quantum*¹ latin eredetű szót szintén Planck vezette be a fizikába, a „létező mennyiség minimális mennyisége”² fogalommeghatározással, amelyet Einstein 1905-ben megerősített. A kvantumelmélet 1912-ből való, míg a kvantummechanika 1922-ből (Etymologie Dictionary, 2022).

Planck 1900-ban tartott előadása igazi paradigmaváltást jelentett, amelyet a tudományos irányvonalat meghatározó vezető fizikusokból álló közösség fenntartásokkal fogadott, és csak évekkel később ratifikált. A kezdeti bizonytalanság azonban nem szabott gátat az új irányzat kibontakozásának, az 1900-as évek első három évtizedében évről évre dőltek meg régi és újonnan született eredmények. A kvantumgépek elméleti kutatásában már az 1980-as években komoly eredményeket értek el, David Deutsch 1985-ben publikálta a logikai kapuk kvantumgépre adaptált változatait (Deutsch, 1985), 1994-ben pedig Peter Shor az egyik leghíresebb kvantumalgoritmust írta le (Shor, 1994), amely a napjainkban alkalmazott rendszerek adatbiztonságát alapjaiban képes megrendíteni.

Az elmúlt évtizedben pedig hatalmas áttörésnek lehettünk szemtanúi, egyre-másra jelentek meg a kvantumszámítógépek fejlődésével kapcsolatos hírek, melyek hatása különböző területeken érzékelhető. A fejlesztésekbe hatalmas összegeket invesztálnak ma (2023) a vezető nagyhatalmak mellett olyan országok is, mint Ausztrália vagy Svájc.

Kvantumszámítógépek lehetőségei és veszélyei

A kvantumszámítógépek építése elsősorban a mai számítási teljesítmény megsokszorozására irányul, amelyre alapozva a mai szuperszámítógépeket a jövőben felválthatják a kvantumgépek (Terhal, 2018). Az új technológiával elérhető számítási teljesítmény

¹ Jelentése: mennyiség. Ez a lehető legkisebb egység a fizikában, amellyel egy mérhető egység értéke növelhető [53]. Általában az atomi vagy a szubatomi részecskék, például az elektronok, a neutrínók vagy a fotonok tulajdonságaira alkalmazzák [44].

² Megfogalmazás angolul az Online etimológia szótárban: „minimum amount of a quantity which can exist”.

számos területen alkalmazható lehet az időjárás-előrejelzés hatékonyságának javításától a tudományos kutatásokig. Az anyag- és a gyógyszerkutatás fokozottan, de általában minden olyan kutatási terület érintett, amelyben a nagy számítási teljesítményt gyakorlati kivitelezés és tesztelési folyamat kiváltására vagy szűkítésére lehet alkalmazni (Sejuti, 2020). A kvantumszámítógépek építésére mint új technológiára amiatt is szükség van, mert a jelenleg használatban lévő, Neumann-elvű számítógépek elérik fejlődési lehetőségük, ezzel a számítási teljesítményük határát, amely tényre Moore és Amdahl törvénye, valamint a Dennard-féle skálázási szabály egyértelműen rámutat (Biró, 2023; Dennard, 1974; Gordon, 1965; Jim, 2016; Robert, 2013; Wikipedia, 2022).

A jogi szabályozás szintjén is megjelenik a kvantuminformatika terén érzékelhető fejlődés hatása. Az Amerikai Nemzeti Szabványügyi Hivatal (NIST) Számítógépbiztonsági Központja által folytatott kutatások kapcsán több kvantumbiztos algoritmus is publikálásra került, melyek megoldást nyújtanak újfajta jelszóvédelemre, hash lenyomatok képzésére vagy az elektronikus aláírásra (The White House, 2020). A problémakör kezelését az Európai Parlament (Európai Parlament [1, 2]) és az Európai Tanács (Európai Tanács, 2022) mellett a magyar jogalkotás is megkezdte, melynek eredményeként a 2013 évi L. törvénybe³ is bekerült a posztkvantum algoritmusok alkalmazására való felkészülés követelménye az állami és önkormányzati szervek számára (Magyarország Kormánya, 2013; Redaktor, 2022). Ezen szervezeteknek a jövőben számolniuk kell a rendszereik esetleges kitettséggel. A kvantumszámítógépek létrejöttével sajnos fokozódhat a kibertűnözés, az informatikai biztonsági rendszerek tömegesen veszélyeztetetté válhatnak.

A jelenleg széles körben elterjedt titkosítási algoritmusok jelentős része a prímtényezős felbontás⁴ matematikai problémáján alapul. A védelmet az eljárás során keletkező hatalmas prímszámok szorzata nyújtja, melynek ismeretében az azt alkotó prímszámok kiszámítása a hagyományos számítástechnikai környezetben gyakorlatilag kilátástalan. Shor kvantumalgoritmus⁵ ezt a problémát oldja meg: egy szám prímtényezős felbontását végzi el rendkívül nagy sebességgel, így alkalmazása a prímtényezős felbontáson alapuló algoritmusokkal védett informatikai rendszerek egy részét védtelenné teszi.⁵ A Shor-algoritmus csak egy példa a kvantumgép paradigmaváltó hatására, olyan algoritmusokat kell találni és a jelenlegi rendszerekbe is beépíteni, amelyek képesek ellenállni a kvantumgépek hatalmas számítási teljesítményének.

³ Ez a törvény az állami és önkormányzati szervek elektronikus információbiztonságát foglalja keretekbe, az ehhez kapcsolódó végrehajtási rendelet a 41/2015 BM Rendelet, mely a törvénnyel kapcsolatos konkrét teendőket definiálja.

⁴ Egy szám prím, amennyiben 1-en és önmagán kívül nincs más osztója. Prímszám pl. a 17. A prímtényezős felbontás egy olyan matematikai művelet, mely egy számot prímszámok szorzatára alakít, pl. a 42 prímtényezős felbontása $2 \times 3 \times 7$.

⁵ Shor algoritmus⁵ már egy hatqubites kvantumgépen működtethető, ilyen gép már évek óta rendelkezésre áll.

Kvantumgépeket különféle fizikai jelenségekre lehet építeni, működésük alapulhat a fény polarizációján (Harrison et al., 2006; Perez-Garcia et al., 2015), egy atommag spinjén (Bauman et al., 2021; Kloeffer, Loss, 2013) vagy az elektronok pozícióján. Mivel a legtöbb gép működése abszolút nulla fok körüli hőmérsékleten legfeljebb néhány másodpercig tartható fenn, jelenleg is számos kutatás irányul további, kedvezőbb tulajdonságú, jobban használható fizikai alap megtalálására. Nehézség a kvantuminformatikában és a gépek építésében az, hogy a kvantumrészcskék folyamatosan változnak, ingadoznak, egészen addig, amíg meg nem mérjük őket.

A qubit (amely e gépek alapja és a klasszikus számítógépeknél lévő bithez hasonlítható, bár más természetű) rendkívül érzékeny, melynek egyik leghátrányosabb következménye, hogy állapotát csupán egyszer lehet kiolvasni, ezt követően az azokban tárolt érték elvész. A kvantumrészcskéknek van néhány speciális tulajdonságuk, amelyek okán különböznek a kvantumgépek a napjainkban használt, Neumann-elvű számítógépektől, legfontosabb jellemzőik a szuperpozíció és az *összefonódás*.

A szuperpozíciónak köszönhetően számos lehetőség és érték figyelembe vehető számításkor, hiszen a hagyományos kétállású bitektől eltérően a qubitek egyidőben többféle értéket/állapotot vehetnek fel különféle valószínűséggel. Amikor a qubitek összefonódnak, akkor egyetlen rendszert alkotnak, és hatással vannak egymásra. Az egyik qubitből származó mérések alapján következtetések vonhatók le egy másikra vonatkozóan és viszont. Ha több qubitet adunk hozzá összefonódással egy rendszerhez, akkor a számítógép hatványozottan több információt tud kiszámítani, és bonyolultabb, többváltozós problémákat is meg tud oldani. Emiatt jó olyan számításokra ez a technológia, ahol sok tényezőt/hatást/összetevőt szükséges egyidejűleg figyelembe venni és ezek egymásra való hatásával is számolni. Az összefonódással korrelálni lehet az egyes kvantumrészcskék mérési eredményeit és a kvantuminformatikában ezt a tulajdonságot kitűnően lehet kamatoztatni.

A kvantuminternet a mai hálózati technológiák területén jelenthet ugrást, melynek alapja szintén az összefonódott kvantumbitek kapcsolatán alapuló kommunikációs lehetőség, amely a szupergyors internetkapcsolat megvalósítását ígéri.

A kvantuminterferencia a qubiteknek a szuperpozíciós tulajdonságuk okán kialakult viselkedése, amellyel az egyik vagy másik értékkel való egybeesés valószínűsége befolyásolható. A kvantumszámítógépek létrehozásának egyik legnagyobb kihívása, hogy az interferenciát a lehető legnagyobb mértékben csökkentsék a pontosabb eredmények érdekében (Microsoft Portal, 2022).

E cél elérésére többféle technológiát is alkalmaznak, mindegyik esetében a cél a kvantumrészcskék stabilizációjának elérése úgy, hogy manipulálják azok állapotát, ez elérhető például hűtéssel vagy azzal, hogy olyan kémiai vegyületekkel veszik körbe a kvantumrészcskéket, amelyek védik őket a külső interferenciától.

A kvantumszámítógépeknél a kvantumfizika speciális viselkedési formáit használják ki, míg az informatikai számításoknál a szuperpozíció, az összefonódás és

a kvantuminterferencia jelenségei biztosítanak új lehetőségeket és hozhatnak új elgondolásokat a hagyományos algoritmusokhoz és programozási módszerekhez képest.

Oktatás

Az informatika ezen új területének fejlődését tekintve az utóbbi 15 évben exponenciális robbanásnak lehettünk szemtanúi. A felgyorsult fejlesztési folyamatok és a megvalósítási lehetőségek tárháza nyilvánvalóvá teszi, hogy a kvantumtechnológia megjelenésére a fizikus, kémikus- és a programozóképzésben igencsak fel kell készülni.

Ismerve a klasszikus oktatási rendszereket, legalább egy évtized, mire az általános iskolától kezdve a felsőoktatásig az életkori sajátosságoknak és a célcsoportnak megfelelő tananyagok – alsóbb évfolyamokon a témával való érintettség, alapozás – megjelennek, illetve beépülnek a tantervekbe.

Ami a tananyagba való beépítést még tovább nehezíti, az az, hogy informatikai ismereteken kívül e terület magas szintű kémiai, kvantumfizikai és matematikai ismereteket, illetve az eddigiektől eltérően egy sokkal komplexebb problémamegoldási képességet igényel (Angara et al., 2020).

Nagy problémának tartjuk, hogy a felsőoktatás utóbbi években végzett informatika-tanárai nem lettek felkészítve ennek az új területnek a fogadására és a jövő nemzedéknek való továbbadására. Fontos volna, hogy a fiatal korosztály tanulói ne legyenek magukra hagyva kérdésekkel a fejükben, hanem a tanárok által előszűrve, rendszerbe szedve és emészthető formába öntve, hiteles forrásból tájékozódhassanak e terület érdemi tartalmáról, és tisztában legyenek az összefüggésekkel.

Hol tart most a kvantum-számítástechnika? Napjainkban számos kvantumszámítógép (IBM Quantum Portal, 2022; Wootton et al., 2021), illetve szimulátor (Dargan, 2022) elérhető, kipróbálható, illetve programozható (IBM Quantum Portal, 2022). A különböző elven működő kvantumszámítógépek szemléltetésére rengeteg online kurzus (Class Central Portal, 2022; Edx Portal, 2022; Udemy Portal, 2022), tutorial (Microsoft Portal, 2022; Qiskit Portal, 2022; Wootton et al., 2021), illetve animáció érhető el. Külföldi gyakorlatok szerint érdemes lehet már az általános oktatásba is bevonni a témát bizonyos formákban.

A digitális átalakulással az informatika az élet szinte minden területét átszövi, a gyerekek egyre gyakrabban találkoznak olyan fogalmakkal, mint a beágyazott rendszerek, a Big Data, az IoT, a mesterséges intelligencia vagy a kvantuminformatika.

A média már napi szinten tesz említést valamilyen színezettel a kvantuminformatikáról. Sajnos elég gyakran negatív aspektusból mutatja be úgy, mint egy, az egész életünket megváltoztató, illetve befolyásoló technológiát, amelynek segítségével a kibertűnözők képesek akár a bankszámlákat védő számítógépes rendszereket feltörni. Az ilyen típusú,

negatív tartalmú hírek belső feszültséget kelthetnek és kérdéseket indukálhatnak a gyerekekben, amelyekre megnyugtató és kimerítő válaszokat várnak. Úgy gondoljuk, fel kell készíteni az informatikatanárokat az ilyen jellegű kérdésekre, fontos, hogy tájékozottak legyenek és szakszerű válaszokat tudjanak adni a gyerekek számára. Nemcsak a negatív érzelmű kérdésekre kell válaszokat adniuk, hanem azt is el kell tudniuk mondani, hogy a kvantumszámítógép új lehetőségeket teremt például a biztonságos adatátvitelre, új utakat nyit a szimulációk területén, forradalmasíthatja a gyógyszerkutatót, új anyagok fejlesztését, vagy akár pontosabbá és hosszabb távon érvényessé teheti a meteorológiai előrejelzéseket stb. A kvantumtechnológia tehát egyszerre lehetőség és kockázat a társadalom számára (Cao, Aspuru-Guzik, 2018; Seegerer, Romeike, 2021).

Az informatikaoktatás elsődleges célja, hogy a digitális világban történő eligazodáshoz a megfelelő alapokat megteremtse. Az informatikaoktatással kapcsolatos kutatásokban egyetértés van abban, hogy a rövid távon használatos technológiák ismertetése helyett nagyobb hangsúlyt kell fektetni az alapfogalmak, az algoritmusok, illetve az alapelvek megismertetésére (Adreas, 1997; Peter, 2004; Tim et al., 2011).

Néhány gondolatébresztő kérdést szeretnénk feltenni az általános iskolás korosztályra vonatkozóan:

- Meg kell-e jelennie az általános iskolában a kvantuminformatikai ismeretek alapozásának?
- Mit jelent ennek a korosztálynak a kvantuminformatika?
- Életszerű, hogy az általános iskolában beszéljünk erről a területről?

Úgy gondoljuk, hogy napjaink informatikatanárainak a kvantuminformatika alapjaival tisztában kell lenniük azért, hogy a közoktatásban tanuló gyerekeket megfelelően tudják tájékoztatni e terület fejlődési irányairól; elkerülhetetlen tehát, hogy az informatikatanárok egyetemi képzésének része legyen.

Azt is elkerülhetetlennek tartjuk, hogy idővel az általános iskolai tananyag része legyen a kvantuminformatika érintőlegesen a felső tagozaton. Ez a korosztály már nap mint nap szembesül a „kvantum” kifejezéssel a médiából, nemcsak a kvantumszámítógéppel, hanem például a kvantummobilokkal, a kvantumtelevíziókkal stb. Számukra el kellene mondani azt, hogy egyáltalán mit takar a kvantum szó, milyen fizikai jelenségekre épülhetnek kvantumszámítógépek, segíteni lehet őket abban, hogy el tudják képzelni a működésüket, megértsék ezek célját, megismerjék a kvantumbit fogalmát, érzékeltetni tudjuk velük ennek mértékét és az adattárolásban, számításokban rejlő lehetőségeit, még akkor is, ha egy szakterület felnőtt tanárának sem feltétlenül könnyű ezek megértése.

Fontosnak érezzük tehát, hogy a tanulók fizika- és kémiaórákon az új területhez kapcsolódó fogalmakkal találkozzanak, és tudják, hogy mire utal a kvantum szó. Sőt, cél volna az is, hogy képesek legyenek felismerni, megszűrni a reklámokban megjelenő

tartalmakat, látni, hogy a reklámozott termékekben sokszor nem valódi kvantumszámítógépek vannak, hanem csupán egyfajta „kvantumos” jellemzővel rendelkező készülékekről beszélhetünk. Mint ahogyan az a porszívó sem rendelkezik mesterséges intelligenciával, amely tanulási folyamaton nem esik át, csak infravörös szenzort használva tud az akadály előtt pár centivel megállni.

Gondolkodni kell tehát megtanítani a gyerekeket ezekről a dolgokról elsősorban, a 21. századi képességek – mint például a kritikus gondolkodás, a kíváncsiság, a kezdeményezőképeség, a kreativitás stb. – fejlesztését az előismeretek bevezetése alapozza meg.

Nemzetközi gyakorlatok a kvantuminformatika oktatására

Míg a 10–14 éves korosztály számára csak az alapfogalmak ismertetésére van lehetőség, addig a középiskolás korosztály számára már egy szinttel mélyebb, elméleti háttérrel megalapozott ismeretkör nyújtható. Az elméleti alapokkal lefedtetett tudás átadásának elengedhetetlen feltétele a megfelelő matematikai, illetve kvantumfizikai háttér. Számos tanulmány megerősíti, hogy a kvantuminformatika bevezetése az általános és középiskolás tananyagba nemcsak lehetséges, de szükséges is (Angera et al., 2020; Fullan, 1993; Gesche, 1999; Hughes et al., 2022; Pashaei et al., 2020; Perry et al., 2019; Satanassi et al., 2021; Seegerer, 2021; Wootton et al., 2021).

Stadermann és munkatársai (Stadermann et al., 2019) különböző nézőpontok szerint elemezték 15 ország kvantumfizikai tantervét és tanmenetét. A középiskolai szintű kvantumfizika tantárgyak nemrég jelentek csak meg a nemzeti tantervekben, beépítésük közel sem volt zökkenőmentes, gyerekcipőben járnak (Angara et al., 2020). A fontosabb tartalmi elemek célja, hogy a tanulók betekintést nyerjenek a modern fizikába és alkalmazásaiba, valamint képessé tegyék őket a tudományág természetének és aspektusainak megvitatására. A vizsgált országok tanterveinek közös elemei: diszkrét atomi energiaszintek, a fény és az anyag közötti kölcsönhatások, hullám-részecske dualitás, de Broglie-elmélet, Planck-hullámhossz, műszaki alkalmazások, Heisenberg-féle határozatlansági elv és a kvantumfizika természete is helyet kapnak (Lobato, Greca, 2005). A kihívást jelentő részeket, mint például a kvantumfizika interpretációit, illetve ismeretelméleti aspektusait csak néhány országban tanítják. Általános tapasztalat, hogy az elkészített tantervek még gyerekcipőben járnak, így nem feltétlenül a legjobb tantervek. A jelenlegiek zöme megegyezik egy egyszerűsített egyetemi kvantummechanikakurzus elemeivel. A tantervi innovációk időigényesek, a nemzeti szabályok kidolgozása és módosítása pedig egy összetett, bonyolult folyamat (Fullan, 1993). Olyan elemek (B. C. Grau, 2004; Nayak, Dash, 2012; Kohnle et al., 2013; Dür Wolfgang, Heusler, 2014), amelyek elősegítenék a megértést, mint pl. a kvantumfizika filozófiai vonatkozásai, a kvantum-összefonódás és alkalmazásai, csak a norvég és a német tantervekben szerepelnek.

Anasztasia Perry és munkatársai (Perry et al., 2019) egy tíz fejezetből álló tananyagot készítettek 15–18 éves középiskolások számára, amelyet egy ötnapos kurzus keretében ismertettek velük. A kurzus célja a középiskola és az egyetem közötti kapcsolatteremtés volt. A tananyagot a kvantuminformatika kulcsfontosságú alapfogalmai köré szervezték, melyben nevezetesen a következőkről volt szó: szuperpozíció, kvantummérés és összefonódás. A tananyagban az alapfogalmaktól kezdve a kvantumkapukon és a kvantumalgoritmusokon (Colless et al., 2018; Daniel, 1997; David Deutsch, Richard, 1992; Ethan Bernstein, Umesh, 1997; Grover, 1996; Harrow et al., 2009) keresztül eljutnak egészen a kvantumalapú teleportálásig. Fontos megjegyezni, hogy nem feltételezik az elektromosság, a mágnesség és a hullámok magas szintű ismeretét, és számítógépes programozási tapasztalat sem szükséges. A kurzus elvégzése előtt és után is kérték a részt vevő diákoktól, hogy soroljanak fel minél több olyan kvantummechanikai, kvantuminformatikai fogalmat, amely eszükbe jut. Azt tapasztalták, hogy a diákok azon túl, hogy jelentősen javítottak a kurzus elején írt felméréshez képest, olyan motivációt kaptak, amely, a visszajelzések alapján, a fizika és az informatika irányába tereli őket (Hughes et al., 2022).

Pashaei és munkatársai egy olyan online elérhető tananyagot készítettek, amely segítségével hatékonyan bevezethetők a kvantuminformatika alapkoncepciói már általános és középiskolai szinten. Azon túl, hogy egy jól használható online tananyagot készítettek, meg is kongatták a vészharangot Kanadában. A kvantummechanika fogalmai nem részei a mindennapi életnek, holott ezek megismerése a tanulókra pozitív hatással lehet motivációs szempontból. Kiemelik, hogy a kvantumfizikának és a kvantuminformatikának az oktatás korai szakaszában történő bevezetése egy olyan társadalom kialakulásához járulhat hozzá, amely megérti a tudomány fontosságát, illetve hozzá tud járulni a fejlődéséhez, és ezzel az élvonalba emeli azt (Pashaei et al., 2020).

A kvantum-számítástechnika területe már kiforrott, és a diákok számára elérhető. Angara és munkatársai kvantuminformatikai workshopok eredményeiről számoltak be. Elsődlegesen olyan diákoknak tartottak rövid workshopokat, akiknek a kvantuminformatikával kapcsolatban semmilyen előismeretük és tapasztalatuk nem volt. A programozásalapú megközelítést választották, a Qiskiten (Qiskit, 2022) keresztül vezették be a diákokat az IBM Q Experience világába. Tapasztalataik alapján megállapították, hogy a kvantuminformatikai fogalmak középiskolás diákok számára is érthetők, feldolgozhatók. Ők is kiemelik, hogy tapasztalataik szerint a kvantuminformatikával történő korai megismerkedés fejleszti a diákok problémamegoldó képességét, bővíti és hozzájárul az egyetemre történő belépés előtt megszerzendő kompetenciákhoz (Angara, 2020).

Konklúzió

Bár óriási a lehetőség a kvantuminformatikában, jelenlegi ismereteink alapján az várható, hogy a kvantumszámítógépek nem fogják leváltani a hagyományos, Neumann-elvű számítógépeket, hiszen a kvantumgépek alkalmazási köre speciális, a hétköznapi és a gazdasági élet szoftvereinek futtatására nem képesek.

Viszont az elmúlt másfél évtized eredményei (Arute et al., 2019; Boixo et al., 2018; Xanadu Portal, 2022; Zurich Instruments Portal, 2022; Dür Wolfgang, Heusler, 2014), illetve a techóriások (Chakraborty, 2021) és a nemzeti kormányok jövőbeli tervei (Európai Parlament, 2022 [1, 2]; Európai Tanács, 2022; Gidney, Ekara, 2021; Gouzien, Sangouard, 2021; The White House, 2022) alapján szinte biztosan állítható, hogy az elkövetkezendő tíz évben ez egy már szabad szemmel is jól látható szegmense lesz az informatikának. Nyilvánvaló, hogy mint minden irányzatnak, ennek is vannak olyan követői, illetve kutatói, akik fenntartásokkal kezelik az eredményeket, és jövőképük közel sem tekinthető bizakodónak a kvantumtechnológia kapcsán (Landauer, 1961).

Megosztó kérdés, hogy kell-e foglalkozni ezzel a területtel az iskolákban, része lehet-e az oktatásnak, akár a fogalmak bevezetésének vagy a szimulációs kvantumgépek használatának a szintjén. Amit biztosan állíthatunk, hogy érezhető és érthető az oktatás területén a kísérletezési kedv, és a nemzetközi irodalomban számos jó gyakorlatról olvashatunk a témában.

Mi úgy látjuk, ha a kvantumszámítógépek megrekednek a jelenlegi szinten, azaz csak jól specifikált részfeladatok és valódi véletlenszámok generálására lesznek alkalmasak, már akkor is bevetethők a problémamegoldó képesség fejlesztésére, a látókör bővítésére, az időkomplexitás fogalmának mélyítésére, a fizika népszerűsítésére vagy a kvantumfizika megértésének elősegítésére (Dyakonov, 2019).

Támogató

A kutatást az Innovációs és Technológiai Minisztérium és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium keretében.

Irodalomjegyzék

Amdahl, G. M.: Validity of the single-processor approach to achieving large scale computing capabilities. In AFIPS Conference Proceedings vol. 30 (Atlantic City, N.J., Apr. 18-20). AFIPS Press, Reston, Va., (1967) 483-485
<https://doi.org/10.1145/1465482.1465560>

- Andreas Schwill. 1997. Computer science education based on fundamental ideas. In *Information Technology*. Springer, 285-291.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-35081-3_36
- Angara, P. P., Stege, U., & MacLean, A. (2020, October). Quantum Computing for High-School Students An Experience Report. In *2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*. IEEE. (2020) 323-329.
<https://doi.org/10.1109/QCE49297.2020.00047>
- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., ... & Martinis, J. M.: Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), (2019) 505-510.
- B. C. Grau, How to teach basic quantum mechanics to computer scientists and electrical engineers, *IEEE Trans. Ed.* 47, 220 (2004).
<https://doi.org/10.1109/TE.2004.825215>
- Bauman NP, Liu H., Bylaska EJ. (et all): Toward quantum computing for high-energy excited states in molecular systems: quantum phase estimations of core-level states In *Journal of Chemical Theory and Computation* (2021) 201-210
<https://doi.org/10.1021/acs.jctc.0c00909>
- Berg, H., Richter K., Ritter J. W.: Entdeckungen zur Elektrochemie, Bioelektrochemie und Photochemie In *Ostwalds Klassiker der Exakten Wissenschaften*, Bd 271. Leipzig, Harri Deutsch; 2., Aufl. edition (1997).
- Biró, Cs., Koczka, F., Prantner Cs.: Milyen kérdéseket vet fel az oktatás területén a kvantumszámítógépek megjelenése? In: Szlávi, Péter; Zsakó, László *Infodidact 2022*, Budapest, Magyarország: Webdidaktika Alapítvány 43-58., 16 p. (2023)
- Boixo, S., Isakov, S. V., Smelyanskiy, V. N., Babbush, R., Ding, N., Jiang, Z., ... & Neven, H.: Characterizing quantum supremacy in near-term devices. In *Nature Physics*, 14(6). (2018) 595-600. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0124-x>
- Cao, Y., Romero, J., & Aspuru-Guzik, A. (2018). Potential of quantum computing for drug discovery. *IBM Journal of Research and Development*, 62(6), 6-1.
<https://doi.org/10.1147/JRD.2018.2888987>
- Chakraborty M.: Top 10 Quantum Computing Companies to Watch Out in 2021 In *Analytics Insight* (2021) <https://www.analyticsinsight.net/top-10-quantum-computing-companies-to-watch-out-in-2021/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Class Central Portal: Quantum Computing Courses. <https://www.classcentral.com/subject/quantum-computing> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Colless, J. I., Ramasesh, V. V., Dahlen, D., Blok, M. S., Kimchi-Schwartz, M. E., McClean, J. R., ... & Siddiqi, I. (2018). Computation of molecular spectra on a quantum processor with an error-resilient algorithm. *Physical Review X*, 8(1), 011021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.011021>

- Dargan J.: Top 63 Quantum Computer Simulators For 2022. The Quantum Insider Portal (2022) <https://thequantuminsider.com/2022/06/14/top-63-quantum-computer-simulators-for-2022/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Daniel R. Simon (1997) „On the Power of Quantum Computation” SIAM Journal on Computing, 26(5), 1474-1483. <https://doi.org/10.1137/S0097539796298637>
- David Deutsch and Richard Jozsa (1992). „Rapid solutions of problems by quantum computation”. Proceedings of the Royal Society of London A. 439: 553-558. <https://doi.org/10.1098/rspa.1992.0167>
- Dennard, Robert H.; Gaensslen, Fritz; Yu, Hwa-Nien; Rideout, Leo; Bassous, Ernest; LeBlanc, Andre: Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions. IEEE Journal of Solid-State Circuits. SC-9 (5) (1974) 256-268 <https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>
- Deutsch, David: Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences 400.1818 (1985) 97-117. <https://doi.org/10.1098/rspa.1985.0070>
- Dyakonov, M.: When will useful quantum computers be constructed? Not in the foreseeable future, this physicist argues. Here's why: The case against: Quantum computing. Ieee Spectrum, 56(3), (2019) 24-29. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2019.8651931>
- Edx Portal: <https://www.edx.org/learn/quantum-computing> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Ethan Bernstein and Umesh Vazirani (1997) „Quantum Complexity Theory” SIAM Journal on Computing, Vol. 26, No. 5: 1411-1473- <https://doi.org/10.1137/S0097539796300921>
- Európai Parlament (1): A digitális évtizedre vonatkozó uniós kiberbiztonsági stratégia (2022/C 67/08) (2022) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=OJ:C:2022:067:FULL&from=HU> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Európai Parlament (2): Az Európai Parlament 2022. május 3-i állásfoglalása a digitális korban a mesterséges intelligenciáról (2022) https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0140_HU.html (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Európai Tanács: A Tanács (EU) 2022/576 Rendelete, I. melléklet (2022) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2022:111:FULL&from=HU> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Fullan Michael: Change Forces: Probing the Depth of Educational Reform (Falmer Press, London, UK, 1993).
- Gidney, C., & Ekerå, M.: How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits. Quantum, 5, 433. (2021) <https://doi.org/10.22331/q-2021-04-15-433>

- Gordon E. Moore: Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, Volume 38, Number 8, April 19 (1965) https://hasler.ece.gatech.edu/Published_papers/Technology_overview/gordon_moore_1965_article.pdf (2013) (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.) <https://doi.org/10.1109/N-SSC.2006.4785860>
- Gesche Pospiech: Teaching the EPR paradox at high school?, *Phys. Educ.* 34, 311 (1999). <https://doi.org/10.1088/0031-9120/34/5/307>
- Gouzien, E., & Sangouard, N.: Factoring 2048-bit rsa integers in 177 days with 13 436 qubits and a multimode memory. *Physical Review Letters*, 127(14), 140503 (2021). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.140503>
- Grover, L. K. (1996, July). A fast quantum mechanical algorithm for database search. In *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing* (pp. 212-219). <https://doi.org/10.1145/237814.237866>
- Harrison J., Sellars MJ., Manson NB.: Measurement of the optically induced spin polarisation of N-V centres in diamond In *Diamond and Related Materials*, Volume 15, Issues 4-8, April-August (2006) 586-588. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.12.027>
- Harrow, A. W., Hassidim, A., & Lloyd, S. (2009). Quantum algorithm for linear systems of equations. *Physical review letters*, 103(15), 150502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.150502>
- Hughes, C., Isaacson, J., Turner, J., Perry, A., & Sun, R. (2022). Teaching quantum computing to high school students. *The Physics Teacher*, 60(3), 187-189. <https://doi.org/10.1119/10.0009686>
- IBM Quantum Portal: Real quantum computers. <https://quantum-computing.ibm.com/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- IBM Quantum Portal: IBM Quantum Composer. <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/irqx/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Jim X. Chen: The Evolution of Computing: AlphaGo. *Computing in Science & Engineering* Volume: 18, Issue: 4, July-Aug. (2016) <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7499782> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.) <https://doi.org/10.1109/MCSE.2016.74>
- Kloeffel C., Loss D.: Prospects for spin-based quantum computing in quantum dots In *Annual Review of Condensed Matter Physics*, Vol. 4:51-81 (Volume publication date April 2013) (2013). <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-030212-184248>
- Kohnle, A., Bozhinova, I., Browne, D., Everitt, M., Fomins, A., Kok, P., ... & Swinbank, E. A new introductory quantum mechanics curriculum. *European Journal of physics*, 35(1), 015001 (2013). <https://doi.org/10.1088/0143-0807/35/1/015001>
- Landauer, R.: Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM journal of research and development*, 5(3), (1961) 183-191. <https://doi.org/10.1147/rd.53.0183>

- Lobato, T., & Greca, I. M. (2005). Quantum Theory contents insertion in High School curricula. *Ciência & Educação* (Bauru), 11, 119-132.
<https://doi.org/10.1590/S1516-73132005000100010>
- Magyarország Kormánya: 2013. évi L. törvény az állami és önkormányzati szervek elektronikus információbiztonságáról <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1300050>. tv (2013) (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Microsoft Portal: Tutorial: Explore quantum entanglement with Q#. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/tutorial-qdk-explore-entanglement?pivot=ide-azure-portal> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Microsoft Portal: Introduction to quantum computing. <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-quantum-computing/#introduction> (utoljára megtekintve: 2022. 12. 20.)
- Nayak, T., & Dash, T. (2012). A comparative study on quantum pushdown automata, turing machine and quantum turing machine. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 3(1), 2932-2935. (angolból idézve: „Quantum is a discrete quantity of energy proportional in magnitude to the frequency of radiation it represents.”)
- Pashaei, P., Amiri, H., Haenel, R., Lopes, P. L., & Chrostowski, L. (2020, October). Educational Resources for Promoting Talent in Quantum Computing. In 2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) (pp. 317-322). IEEE. <https://doi.org/10.1109/QCE49297.2020.00046>
- Perez-Garcia B., Francis J., McLaren M. (et. all): Quantum computation with classical light: The Deutsch Algorithm In *Physics Letters A*, Volume 379, Issues 28-29, 28 August (2015). <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2015.04.034>
- Perry, A., Sun, R., Hughes, C., Isaacson, J., & Turner, J. (2019). Quantum computing as a high school module. arXiv preprint arXiv:1905.00282.
<https://doi.org/10.2172/1527395>
- Peter J Denning. 2004. Great principles in computing curricula. In *Proceedings of the 35th SIGCSE technical symposium on Computer science education*. 336-341.
<https://doi.org/10.1145/971300.971303>
- Planck, M. Über das Prinzip der Vermehrung der Entropie. *Annalen der Physik*, 267(6), (1887) 189-203. <https://doi.org/10.1002/andp.18872670603>
- Planck, M. The theory of heat radiation. *Entropie* 144(190), 164. (1900)
- Qiskit Portal: Tutorials. <https://qiskit.org/documentation/tutorials.html> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Redaktor: Hatályosak az állami és önkormányzati szervek elektronikus információbiztonságáról szóló 2013. évi L. törvény kvantumtitkosításra vonatkozó szakaszai. EGOV Közigazgatás és Informatika (2022) <https://hirlevel.egov.hu/2022/07/10/hatalyosak-az-allami-es-onkormanyzati-szervek-elektronikus-informaciobiztonsagarol>

- szolo-2013-evi-l-torveny-kvantumtitkositasra-vonatkozo-szakaszai/ (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Reddy, P. P. (2020). Quantum Generators: A Formulation of Computational Models of Multiplication. Google Scholar.
- Ritter J. W.: Entdeckungen zur Elektrochemie, Bioelektrochemie und Photochemie Leipzig, 1986, 135 p., figuras. Encuadernacion original. Nuevo.
- Ritter J. W.: Key texts of Johann Wilhelm Ritter on the science and art of nature (Vol. 16). Brill. (2010) 1776-1810.
- Robert X. Cringely: Breaking Moore's Law. BetaNews. <https://betanews.com/2013/10/15/breaking-moores-law/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Satanassi, S., Fantini, P., Spada, R., & Levrini, O. (2021, May). Quantum Computing for high school: an approach to interdisciplinary in STEM for teaching. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1929, No. 1, p. 012053). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012053>
- Seegerer, S., Michaeli, T., & Romeike, R. (2021, October). Quantum computing as a topic in computer science education. In The 16th Workshop in Primary and Secondary Computing Education (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1145/3481312.3481348>
- Sejuti Dast: Top Applications Of Quantum Computing Everyone Should Know About. (2020), <https://analyticsindiamag.com/top-applications-of-quantum-computing-everyone-should-know-about/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Shor, P.W.: Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE Comput. Soc (1994) 124-134.
- Stadermann, H. K. E., van den Berg, E., & Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. Physical Review Physics Education Research, 15(1), 010130. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>
- Terhal, B. M.: Quantum supremacy, here we come Nature Physics, 14(6), (2018) 530-531. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0131-y>
- The White House - National Quantum Coordination Office: Quantum Frontiers Report on Community Input tot he Nation's Strategy for Quantum Inormation Science (2020) <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/QuantumFrontiers.pdf> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)
- Tim Bell, Paul Tymann, and Amiram Yehudai. 2011. The Big Ideas of K-12 Computer Science Education.
- Udemy Portal: The Complete Quantum Computing Course <https://www.udemy.com/course/quantum-computers> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Wikipedia commons: Amdahl's Law. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AmdahlsLaw.svg> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 11.)

- Wootton, J. R., Harkins, F., Bronn, N. T., Vazquez, A. C., Phan, A., & Asfaw, A. T. (2021, October). Teaching quantum computing with an interactive textbook. In 2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) (pp. 385-391). IEEE. <https://doi.org/10.1109/QCE52317.2021.00058>
- Xanadu Portal: Quantum computational advantage on Xanadu Cloud. <https://www.xanadu.ai/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Zurich Instruments Portal: Qubit Control. <https://www.zhinst.com/> (utoljára megtekintve: 2022. 11. 20.)
- Dür Wolfgang, and Heusler Stefan: Visualization of the invisible: The qubit as key to quantum physics, *Phys. Teach.* 52, 489 (2014). <https://doi.org/10.1119/1.4897588>
- Online Etymologie Dictionary: Quantum notion. <https://www.etymonline.com/> (utoljára megtekintve: 2022. 12. 20.)