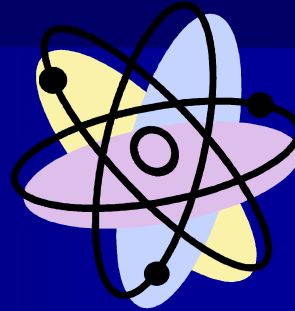


# Kvantové výpočty



I.Kolingerová

Obsah:

1. Hlavní myšlenka
2. Základní vlastnosti kvantové soustavy
3. Použití

## 1. Hlavní myšlenka

- Idea kvantových výpočtů: R.Feynman:
  - Časová náročnost numerické **simulace vývoje kvantového systému** roste **exponenciálně** s počtem stupňů volnosti tohoto systému (např. s počtem vzájemně interagujících částic)
  - **Spontánní dynamika** vhodně sestavené **kvantové soustavy** tedy **může realizovat** a podstatně urychlit určité numerické **výpočty**



## 2. Základní vlastnosti kvantové soustavy

- Superpozice stavů
- Změna stavu objektu kvantovým měřením
- Vzájemná provázanost/propletení

3

## Analogie: nákup kvantového auta

- 3 stavové 1b proměnné f,b,s: počet dveří, barva, sedan a-n
- Auto v obchodě pod plachtou, nikdo neví, jaké je (tj. v jakém z 8 možných stavů je)



- Stav např. dán výrazem  $0.1[000]+0.2[001]+0.3[010]+0.4[011]+0.3[100]+0.6[101]+0.4[110]+0.3[111]$

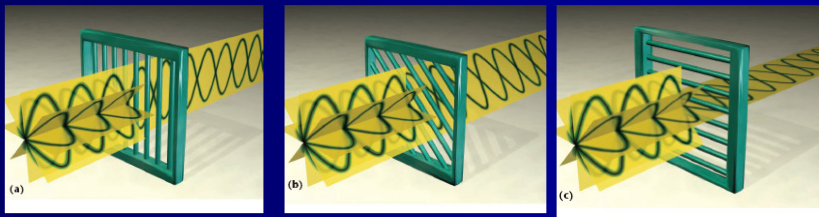
4

- Smíme auto i s plachtou posunout, ale ne se podívat
- Možnost predikce stavu podle pravděpodobností, pravděp. stavu je váha<sup>2</sup>, suma pravd.=1
- **Kvantové auto:** je ve všech stavech najednou, ale když se podíváme pod plachtu, ocitne se jen v jednom stavu, v něm už zůstane - superpozice stavů + kvantové měření

5

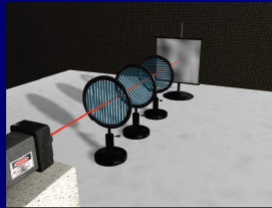
## Kvantové měření

- **Experiment 1:** pošleme fotony s různou polarizací polarizačním filtrem, projdou jen ty souhlasně orientované



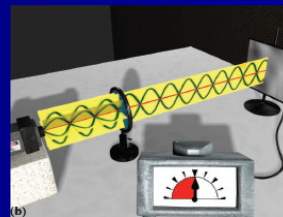
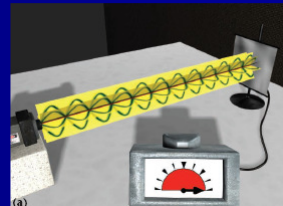
6

- **Experiment 2:** pošleme fotony s náhodnou polarizací (rovnoměrná pravděp.) třemi polarizačními filtry, úhel a množství dopadlých fotonů měříme na stínítku
- 5 kroků



7

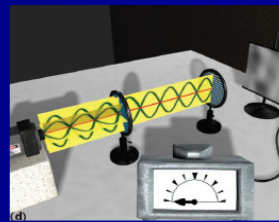
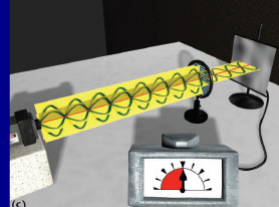
- **Krok 1-** změříme A jednotek
- **Krok 2** - svislý filtr, změříme A/2 jednotek - foton je klasifikován jako svislý s pravděp.  $p \sim (\sin \text{jeho úhlu od svislice})^2$  nebo jako vodorovný s  $1-p$
- Foton je měřením změněn (promítnut do jednoho ze stavů) a v nové konfiguraci zůstane



8

## Kvantové měření

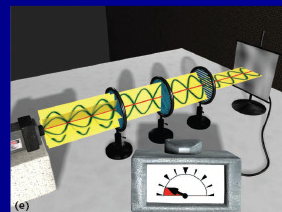
- **Krok 3** - vodorovný filtr, opět  $A/2$  jednotek
- **Krok 4** - svislý, pak vodorovný filtr, 0 jednotek (z 1. filtru jen svislé fotony, neprojdou 2. filtrem)



9

## Kvantové měření

- **Krok 5** - mezi svislý a vodorovný vložíme 3. filtr v úhlu  $-45^\circ$ , změříme  $A/8$  jednotek !!!!!



1. filtr propustí  $A/2$  svislých,  
2.  $A/4$  šikmých, 3.  $A/8$   
vodorovných

10

## Shrnutí experimentů



- **Kvantová částice** existuje zároveň v mnoha nekompatibilních stavech
- Ve stavu **superpozice** je možné působit na všechny stavy najednou
- **Kvantové měření**: když měříme kvant.objekt vzhledem k předem vybrané množině stavů, objekt se promítne do jedné z možností
- Když stejné pozorování **zopakujeme**, aniž jsme na částici nějak jinak působili, zůstane ve stejném stavu
- **Částice a měřicí aparát** určují možné stavy, které jsou výsledkem měření

11

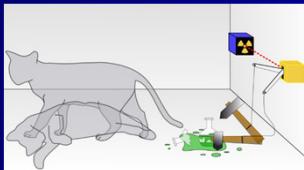
## Schrödingerova kočka - populární paradox

Absurdní uplatnění kvantové fyziky na makrosvět

Kočka uzavřena v neprůhledné krabici se zařízením sestávajícím ze vzorku radioaktivního materiálu a ampulkou s jedem, když se ve vzorku rozpadne atom, zařízení v krabici rozbije ampulku s jedem a kočka zemře

Nevíme, jestli k tomu došlo – z kvantového úhlu pohledu je kočka živá i mrtvá

Po otevření krabice zůstane jen jeden ze stavů



Credit: Dhatfield / Wikimedia Commons

12

## Bra-ketová notace

- **Ket** - sloupcový vektor komplex.čísel  $|abc\rangle$
- **Bra** - řádk.vektor komplexně sdruž.hodnot  $\langle abc|$
- Inner (dot) product:  $\langle abc|def\rangle = \langle abc|def\rangle =$   
 $= \overline{ad} + \overline{be} + \overline{cf}$
- **Outer product:**  $|def\rangle\langle abc| =$   
 $= \begin{matrix} \overline{da} & \overline{db} & \overline{dc} \\ \overline{ea} & \overline{eb} & \overline{ec} \\ \overline{fa} & \overline{fb} & \overline{fc} \end{matrix}$

13

## Qubity

- **Qubit** - základní jednotka kvantových výpočtů, kvantová obdoba bitu, reprezentován ketem
- **Základní stavy:**  $|0\rangle = [1 \ 0]^T$  a  $|1\rangle = [0 \ 1]^T$
- Částice může být v obou stavech najednou,  $q = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$ , kde  $c_0, c_1$  jsou komplex.čísla,  $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$
- Měřením qubit přejde do stavu  $|0\rangle$  s pravd.  $|c_0|^2$  a  $|1\rangle$  s pravd.  $|c_1|^2$
- Realizace: 2 směry polarizace fotonů, 2 orientace spinu elektronů ...

14

## Vícebitové registry

- Klasický registr vytváříme slepením bitů
- Kvantový registr vektorovým součinem bitů (vzniknou všechny kombinace složek v pořadí, v jakém jsou uvedeny)

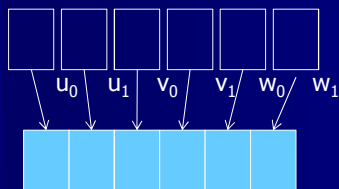
$$\begin{aligned}U \otimes V &= \{u_0, u_1\} \otimes \{v_0, v_1\} \\ &= \{(u_0, v_0), (u_0, v_1), (u_1, v_0), (u_1, v_1)\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U \otimes V \otimes W &= \{u_0, u_1\} \otimes \{v_0, v_1\} \otimes \{w_0, w_1\} \\ &= \{(u_0, v_0, w_0), (u_0, v_0, w_1), (u_0, v_1, w_0), \\ &\quad (u_0, v_1, w_1), (u_1, v_0, w_0), (u_1, v_0, w_1), \\ &\quad (u_1, v_1, w_0), (u_1, v_1, w_1)\}\end{aligned}$$

15

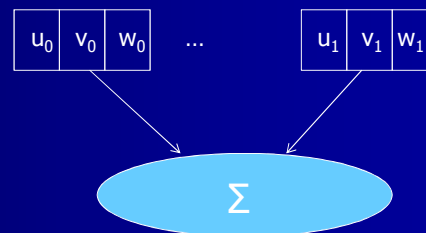
## Vícebitové registry

### Klasický registr



Hodnoty  $u_0 \dots w_1$  mohou mít nezávislé váhy

### 3-qubitový registr



Váhu může mít jen každá kombinace, všechny jsou najednou v jednom 3b registru

16

- **Příprava qubitu:** qubit dán do požad.stavu, pak registr místo vektor.součinu vytvořen jen splením bitů
- Kopie qubitu-částice bez předchozího měření není možná;
- je možná v případě, že původní částice při kopírování zahyne  
=> **klonování ne, teleportace ano**

17

## Propletení (entanglement)



- Př.: 2x2bit.registry  
 $b_0=|00\rangle$ ,  $b_1=|11\rangle$ ,  $\beta=w|00\rangle+w|11\rangle$ ,  $w=1/\sqrt{2}$   
 Změříme jen 2.qubit, asi v 50% je 0, jinak 1  
 Pokud zjistíme  $|0\rangle$ , pak víme jistě, že v 1.qubitu také  $|0\rangle$   
 Vlastně je stav neprohlédnutého bitu také promítnut, i když jsme si ho neprohlédli – tzv. **propletení** 2 qubitů registru  $\beta$

18

## Překvapivé důsledky



- Není časově omezené - částice jednou propletené tak zůstanou navždy
- Propletené bity nemusí ležet fyzicky blízko – klidně ve vzdálenosti celého vesmíru
- Změřením jedné částice změříme i ostatní s ní propletené – zároveň kolabují do příslušného stavu
- **Experiment Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)** –  $q_0$  z  $\beta$  si necháme,  $q_1$  pošleme pryč rychlostí světla, po 10 mil. let se podíváme na  $q_0$  a promítne se tím i  $q_1$

19

## 3. Použití



- **Kvantový paralelismus:** Kvantový stav je vlastně superpozice všech hodnot - výpočet se všemi hodnotami najednou!
- Obecně nelze oddělit dílčí stavy součástí kvantového systému
- **Kvantový počítač** - soustava určitého počtu qubitů, zvolenou posloupností fyzikál.operací se dostávají do superponovaných a provázaných kvantových stavů
- Tato posloupnost operací - hlavní součást **kvantového algoritmu**

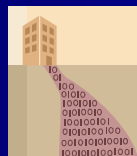
20



- Kvantové algoritmy složeny z elementárních operací, ovlivňují stav 1-2 qubitů
- **Přečtení výsledku:** formou měření, odhalí pouze nepatrnou část kvant. informace a navíc stav nevratně zničí (z qubitu přečte jen Ano nebo Ne)
  - Užití spec. technik na principu kvantové interference – jednotlivé možnosti se v rámci výsledku buď vzájemně posilují nebo oslabují – tj. jejich pravd. se zvýší nebo sníží, správné řešení postupně „zesiluje“ až zůstane
- **Výsledky se nedají přesně předvídat** - kvantová mechanika určuje pouze jejich pravděpodobnosti, nutno výpočet několikrát opakovat, výsledek z celkové statistiky
- I tak kvantové algoritmy někdy výrazně předčí klasické algoritmy

## Vhodné úlohy

- **Faktorizace** (tj. najít prvočísla, jejichž součinem je dané číslo, Shor, Bellovy laboratoře, 1994)
  - užitečné pro šifrování
  - exponenciální problém
  - kvant. výpočet vede k zásadnímu urychlení
- **Kryptografie**
- **Hledání v neseřazeném seznamu** – klasicky průměr  $N/2$  kroků, kvantově řádově  $\sqrt{N}$  kroků – pro symetrickou kryptografii (tj. bez veřejných klíčů) tím teoreticky nutné zdvojnásobení délky klíčů



## Kryptografie – kvantové posílání klíče (QKD)

- Potřebujeme mít jednorázový klíč stejný pro obě strany, kódovanou zprávu pak lze poslat veřejně
- Kódování a dekódování - XOR s klíčem
- QKD – vytvoření jednorázového klíče bezpečným způsobem, např. mějme polarizační filtr fotonů a dekodér
- Stejná polarizace filtru a dekodéru – bezpečně odlišíme → ↑
- Odlišná – náhodně cca 50% → a 50% ↑

23

QKD

- A vygeneruje náhodný klíč (1), chce ho B bezpečně poslat
- Pro každý bit A náhodně vybere S nebo D orientaci polarizátoru (2), tím polarizuje klíč a veřejně pošle (3)
- B pro každý bit klíče náhodně nastaví dekodér (4)
- B s tímto nastavením změří klíč, dostane (5), pošle své nastavení (4) veřejně A
- A srovná s (2) a pošle veřejně info, kde uhlodl (6)
- A a B zahodí bity, kde B neuhodl (7), zbytek bude klíč (8)

24

1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1
2	S	S	D	S	D	D	D	S	D	D	S	S	D	S
3	→	→	↖	→	↖	↖	↗	↑	↗	↗	↑	↑	↗	↑
4	D	S	S	S	D	D	S	D	S	D	S	D	D	D
5	↖	→	→	→	↖	↖	↑	↖	↑	↗	↑	↖	↗	↗
6	x	o	x	o	o	o	x	x	x	o	o	x	o	x
7		→		→	↖	↖				↗	↑		↗	↗
8		0		0	1	1				0	1		0	

- Dá se čekat tak 50% úspěch
- Pak mohou A a B zkusit na krátké zprávě, zda OK a zda někdo neposlouchá (asi 25 % by bylo špatně)
- Špión chce zjistit řádek 3, přečíst a poslat B, aby A a B nic nepoznali
- Klonování nemožné, musí foton chytit, změřit, okopírovat do dalšího a poslat dál
- Špión nezná nastavení detektoru, takže asi 50% přečte a odešle špatně, úspěch B klesne na polovinu a špionáž se prozradí

## Fyzikální realizace kvant. počítače (1)

- **1995** - teoreticky popsána soustava nabitých atomů v silně ochlazeném stavu držená ve vzájemné vzdálenosti několika mikronů silným elmg. polem, řízeno laser. impulsy
- **Problém:** udržet kvant. počítač po celou dobu výpočtu v naprosté izolaci anebo opravovat průběžně škody vzniklé interakcí
- **2001:** Chuang, IBM
  - na bázi magnet. rezonance,
  - 7 qubitů, Shorův algoritmus,
  - velmi pomalé, pro praktické úlohy ještě nepoužitelné

27

## Fyzikální realizace kvant. počítače (2)

- **2007** – 16qb procesor
- **2012-13:** Harvard
  - odstranění nutnosti extrémně nízkých teplot v kombinaci se supravodivými materiály a bez výrazného stínění
  - životnost qbitu rozšířena o několik řádů
  - založeno na diamantu s 2 miniaturními „nečistotami“ o velikosti několika atomů
  - doba uložení informace 2s
- **2013** – Univerzita Simona Frasera – info uloženo 180s
  - křemík plus atomy fosforu
  - 40 min trvání qbitů

28

### Fyzikální realizace kvant. počítače (3)

- **2011** – firma **D-wave**: D-Wave One - 128qb, ale omezené možnosti výpočtů – „kvantový optimalizátor“
  - neuměl běžné výpočty
  - cena 10mil.\$
  - kvantové jevy drahých supervodivých materiálů
  - chlazení tekutým héliem

29

### Fyzikální realizace kvant. počítače (4)

- **2013**: provedeno porovnání kvant. optimalizátoru od D-Wave (442qb, z toho 349 funkčních) a 7 prac. stanic Lenovo D20 s 4jádr. procesory Xeon s 1.6Ghz a 16GB OP, D-Wave má také 2x 4jádr. Xeony starající se o propojení a zprac. dat z kvant. čipu
- U některých úloh klas. počítač (na bázi Linuxu) až 5x rychlejší, ale kvant. našel více dobrých řešení
- V kvadratické neomezené binární optimalizaci kvant. počítač až 3600x rychlejší)
- D-Wave používal např. Google

30

## Fyzikální realizace kvant. počítače (5)

- 2019: D-wave má  $2^{10}$  qb, ale stále vysoce specializované – tzv. adiabatické kvant. počítače – nepracují pomocí logických operací nad qb, ale převodem qb do stavu odpovídajícímu řešenému problému, využití kvantového tunelování
- Omezené užití, neumí kryptografické výpočty
- Přibližná představa: Jako 3D model krajiny se sadou kuliček, co se automaticky skutálejí do „údolí“, někdy se umějí „protunelovat“ kopcem, a ušetřit tak práci. Při příliš vysoké teplotě by příliš „přeskakovaly hory“
- Vlastně kvantové žihání
- Vhodná úloha: např. jak se dostat s minimál. výdejem energie z bodu A do bodu B

31

## Fyzikální realizace kvant. počítače (6)

- 2019 leden : IBM Q System One
  - Kvantová výpočetní síla
  - Futuristický design
  - Stále limity současných technologií kvant. počítače
  - 20qb
  - Komerčně dostupný
  - Kromě hw možnost opensource nástrojů – knihovny pro Python, kvantové simulátory
  - Možnost počítat vzdáleně na cloudu kvant. počítačů, do něj přidán i Q System One
  - Není 100% bezchybnost

32

## Fyzikální realizace kvant. počítače (7)

IBM Q System One



IBM Q System One  
„v nedbalkách“



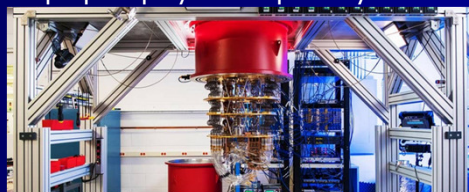
IBM Quantum Computational Center

Credit: IBM

## Fyzikální realizace kvant. počítače (8)

- 2019 říjen : Google oznámil v článku v čas. Nature, že jeho kvantový počítač **Sycamore** za 200s vyřešil problém náhodného vzorkování – počítač ověřuje, zda je množina čísel náhodně distribuována (vlastně hledání vzorců) - žádný počítač by to nevyřešil v rozumném čase => tzv. „kvantová nadřazenost“
- G. tvrdil, že nejvýkonnější superpočítač na světě **IBM Summit** by to řešil 10 tis. let (IBM odpověděl, že jen 2.5 dne – Summit má i velké úložiště, vejdu se všechny možné stavy Sycamore – pozor, jen odhad, IBM ještě nespočítal – plán výpočtů na superpoč. plný - a 55qb už by se do úložiště nevešlo)

Sycamore

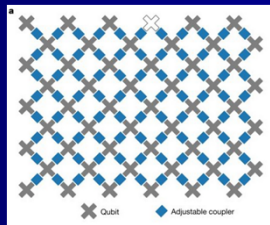


Summit

Credit: IBM

## Fyzikální realizace kvant. počítače (9)

- Sycamore – 54qb, z toho 53 funkčních, Al+In mezi 2 silikon. deskami =>  $2^{53}$  superponovaných stavů => cca 9 biliard informačních položek (15 nul)
- Sycamore založen na dnes řadou týmů preferované technologii vytváření qbitů ve smyčkách supravodivého vodiče (chlazeno tekutým héliem na téměř abs. 0)
  - plochá mřížka s 54 uzly (1 qb vadný)



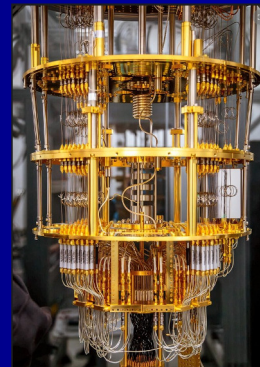
Credit: Google 35

## Fyzikální realizace kvant. počítače (10)

- **2023:** kvantový procesor **IBM Quantum Heron** – 133 qubitů s říditelnými spojkami pro pokročilou konfiguraci interakce i mezi jednotlivými qibity – lepší řízení kvantových stavů, lepší zvládnání chybovosti a šumu, poměr použitelných a nepoužitelných kvantových bitů neznámý, testy výkonnosti různých firem rozdílné, těžké porovnání
- Systém **IBM Quantum System Two** – tři tyto procesory plus klasická elektronika a servery pro spojení s „normálním“ světem a sítí, dostupnost jen jako cloudová služba v datacentrech IBM, specifická údržba i běh
- Sw prostředí Qiskit pro vývoj a kompilaci kvantových projektů, šablony, frameworky, staveb. bloky

## Fyzikální realizace kvant. počítače (11)

- **2024:** IBM Heron se 156 qubity
- **2025:** První kvantový počítač VLQ – Ostrava, centrum IT4 Innovations při VSB
  - 24 supravodivých qubitů napojených na centrální rezonátor
  - hvězdicovitá topologie má minimalizovat počet nutných operací
  - využití ve vědě i v průmyslu pro vývoj aplikací nebo nových léků
  - VLQ stál asi 125 milionů korun, polovinu uhradil společný evropský podnik pro vysoce výkonné počítání EuroHPC JU a druhou evropské konsorcium LUMI-Q, které bude počítač provozovat



## Fyzikální realizace kvant. počítače (12)

- **Současný stav: pořád se něco děje, např. listopad 2025:**
  - Cold Atom Technology, spin-out z čínské akademie věd, představil stroj Hanyuan-1, kvantový počítač na bázi neutrálních atomů, určený ke komerčnímu prodeji
    - Hanyuan-1 má mít schopnost udržet až 200 atomů, na nich až 100 qubitů
    - Již jsou na něj objednávky v hodnotě přes 40 milionů jüanů (~5,6 milionu USD)
    - První dodávka již puťovala ke společnosti China Mobile a byla přijata i objednávka z Pákistánu
  - IBM Quantum vytvořilo dosud největší vícečásticový propletený stav (GHZ) na čipu se 120 supravodivými qubity, s naměřenou věrností  $0,56 \pm 0,03$

## Fyzikální realizace kvant. počítače (13)

- Princeton University: nový supravodivý qubit, který vydrží v koherentním stavu téměř jednu ms – asi desetkrát déle než běžné čipy tohoto typu, delší „životnost“ dosažena zlepšením čistoty materiálů, odstraněním mikroskopických vad na povrchu a pečlivým odstíněním proti elektromagnetickému šumu

39

## Otázky a mýty kolem kvantových počítačů (1)

- Kvantové počítače budou brzy běžně dostupné
  - Problémy: fyzická chybovost včetně tzv. dekoherence – extrémní citlivost na vnější vlivy, nedokončený vývoj kvantové korekce chyb vzniklých během výpočtu (klasické počítače to umějí)
- Kvantové počítače jsou extrémně rychlé
  - Nejsou, ale dokáží pracovat s kvantovým paralelismem
- Kvantové počítače vyřeší všechny problémy
  - Na psaní mailů a úpravu fotek budou stále lepší klasické počítače
  - NP-úplné problémy, modely celého vesmíru ... - stále sci-fi
  - Možné uplatnění v simulacích, optimalizacích ...

40

## Otázky a mýty kolem kvantových počítačů (2)

- IBM, Google, Microsoft atd. už dávno k.p. mají
  - Existující přístroje operují se stovkami qubitů a s velkou chybovostí, pro reálné aplikace by byly třeba desítky miliónů qubitů
- Šifrování už nebude možné
  - Šifry založené na faktorizaci jsou pro k.p. celkem snadné
  - Ale: začínají se používat „kvantově bezpečné šifrovací protokoly“
- Pro kvantové počítače neexistuje rozumné využití
  - Mají potenciál zejména v simulaci a optimalizaci, budoucnost ukáže

41

## Problém chybovosti

- Google významně pokročil v chybovosti (zvládá více qb), ale podstata nevyřešena
- Qb obecně velmi citlivé a snadno ovlivnitelné vnějšími vlivy => chyby vlivem interakce s okolím
- Zdrojem chyb také menší „odstup mezi stavy“ – u klasické 0 a 1 asi 5V
- Chybu v kvantovém výpočtu nutno rychle odstranit – velký vliv na výpočet
- Asi nepůjde zcela odstranit
- Shor: kvant. algoritmus korigovat průběžně ukládáním zálohy – naráží na problém zničení kvant. stavu kopírováním – vyřešeno jen pro malé počty qb
- Na prolomení významnější části dnešních šifer by byly třeba tisíčky qb, ochrana proti chybám by potřebovala další miliony „kontrolních“ qb

42

## Možnosti kvant. výpočtů

- IBM poskytuje simulátor kvant. výpočtů QASM
- IBM také nabízí výpočty na kvant. počítači přes internet (cluster) – 5 nebo 14 qb, program lze napsat v Pythonu, ale podstata algoritmu zcela jiná a výsledek výpočtu specifický
- **Př.:** červenec 2019 - Bc. Miháliková z ÚFM PŘF MU Brno 10 min. počítala řešení problému energie kvant. stavů 3 částicového systému záporného iontu vodíku H<sup>-</sup>, algoritmus byl adaptací existujícího, výsledkem pravděpodobnostní obsazení jednotlivých stavů – 1. výpočet na kvant. počítači z ÚFM

43

## Klasický kontra kvantový počítač (1)

- Obecně kvant. počítač vhodný pro kryptografii (prolamování hesel), prohledávání neseřazených záznamů v databázi
- Další miniaturizace IO naráží na fyzikální zákony - posun na subatomární úroveň se jeví jako nevyhnutelný
- Ovládnutí kvantové mechaniky ale nebude ani rychlé ani snadné
- Qbity nutno chladit na teplotu blízkou abs. nule, aby se vyloučily vibrace → šumy – zdroj chyb
- Spory, zda budoucnost ve specializovaných anebo univerzálních kvantových počítačích
- Jsou i kvant. skeptici – pochyby o možnostech kvantové dominance nebo o možnosti sestrojít funkční kvant. počítač
- Spory o možnosti a budoucnost kvant. počítání stále pokračují, viz např. [Mich25]

44

## Klasický kontra kvantový počítač (2)

- Výzva pro týmy kolem klasických počítačů – snažit se o efektivnější řešení
  - 2017,19 – výhodnější klasický pravděpodobnostní bit (p-bit) – možnost řešit kvant. problémy klasicky
  - Postkvantová kryptografie – užití druhů algoritmů, pro kt. kvant. počítač nepřináší zlepšení

45

Zdroj: IBM

## Literatura

- Andrew S. Glassner: Quantum Computing, Part 1, 2, 3, IEEE Computer Graphics and Applications , 2001
- <https://www.svethardware.cz/ibm-ukazalo-svuj-quantovy-pocitac-q-system-one/48409>, 2019
- [https://www.idnes.cz/technet/veda/kvantova-dominance-nadrazenost-supremacy.A191026\\_090209\\_veda\\_mla](https://www.idnes.cz/technet/veda/kvantova-dominance-nadrazenost-supremacy.A191026_090209_veda_mla), 2019
- <https://www.alza.cz/kvantovy-pocitac-na-obzoru-art8391.htm>, 2019
- <https://sciencemag.cz/google-vs-ibm-quantova-nadrazenost-pod-lupou/>, 2019
- [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kvantov%C3%BD\\_po%C4%8D%C3%ADta%C4%8D](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kvantov%C3%BD_po%C4%8D%C3%ADta%C4%8D), 2019
- <https://sciencemag.cz/kvantovy-pocitac-ibm/>, 2019
- [Mich25] Michal J.: Kvantový duel: Jsou prakticky využitelné kvantové počítače budoucností, nebo utopií? VědaVýzkum.cz, 2025

46