

Így véd meg a kvantumbitjeidet! A topologikus kvantumszámítógép

Asbóth János

BME TTK, Elméleti Fizika Tanszék
Wigner FK, Kvantumoptikai és Kvantuminformatikai Osztály



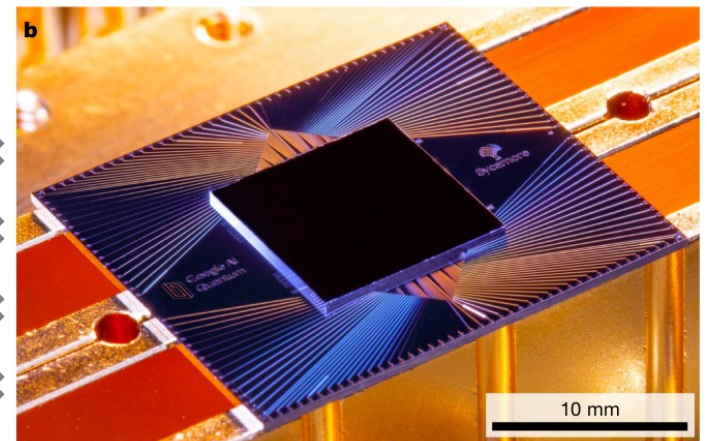
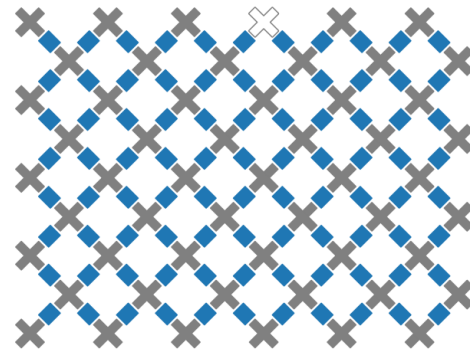
Budapest, 2020. november 12. – Atomoktól a csillagokig


NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL
AZ INNOVÁCIÓ LENDÜLETE

AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ
PROJEKT

Hogyan védjük meg az információt az enyészettől?

Oh, a szárnyas idő hirtelen elrepül,
S minden míve tűnő szárnya körül lebeg!
Minden csak jelenés; minden az ég alatt,
Mint a kis nefelejcs, enyész.



Az információt az enyészettől redundanciával védhetjük meg = sokszorosán biztosított kódolás

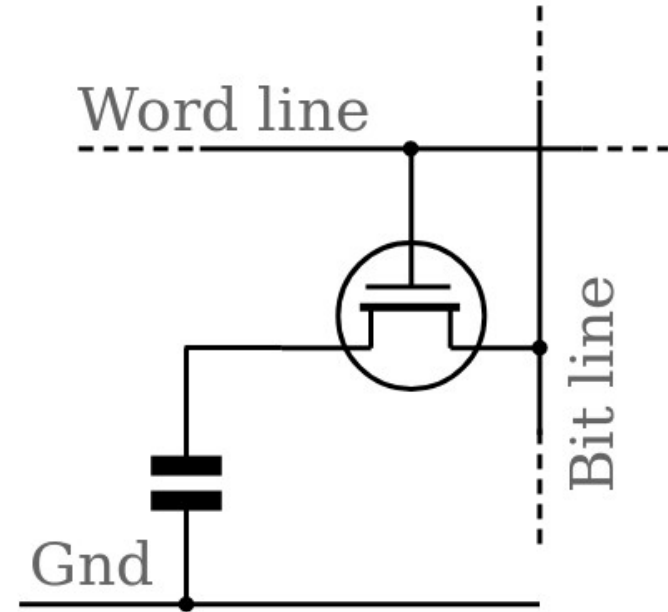


Bár hiányos a feje, bagoly (nem keselyű,
kéz, víz, ...)

www.afrostyly.com/english & www.youtube.com/egyptdecoded

A	A	B	D	E	E	F	G	H	
3	c	b	d	i	y	f	g	h	
(G1)	(D36)	(D58)	(D46)	(M17)	(M17a)	(I9)	(w11)	(V28)	
Vulture	Arm	Leg	Hand	Reed	Reed	Snake	Jar std	Wick	
H	J (dj)	K	M	N	P	Q	R	S	S
h	d	k	m	n	p	q	r	s	s
(O4)	(I10)	(V31)	(G17)	(N35)	(Q3)	(N29)	(D21)	(S29)	(O34)
Reed shelter	Cobra	Basket	Owl	Water ripple	Stool	Hill	Mouth	Folded cloth (or)	Lock Bolt
T	U	U	TJ	KH	SH	H	N	M	
t	w	w	t	h	š	h	n	m	
(X1)	(G43)	(V1)	(V13)	(Aa1)	(N38)	(F32)	(S3)	(Aa15)	
Bread	Chick	Rope	Cord	Sieve	Pool	Belly	Crown	Rib	

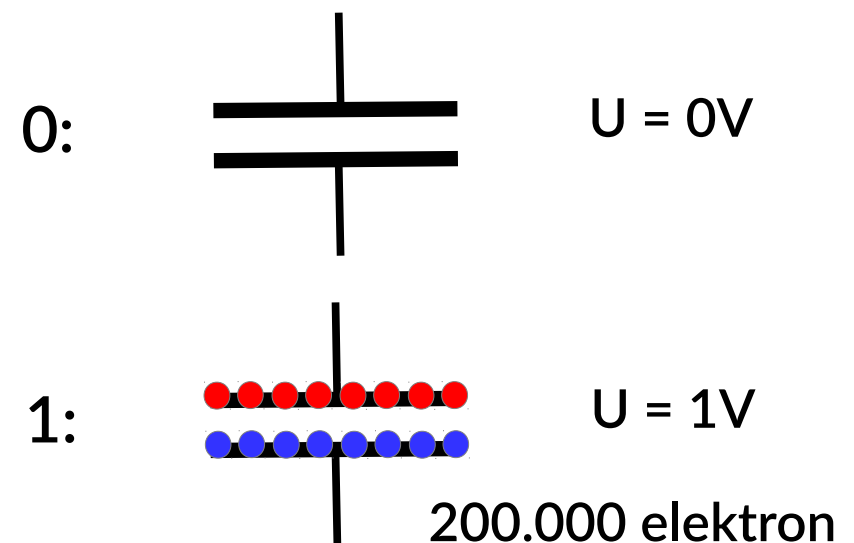
A redundancia védi az enyészettől a biteket a számítógép memóriájában: 200.000 elektron 1 helyett



Dynamic RAM: $C = 30 \text{ nF}$

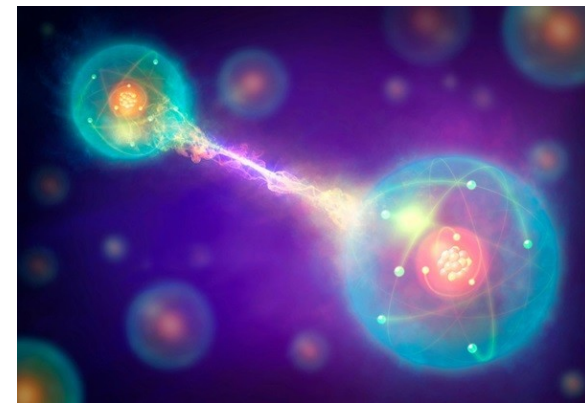
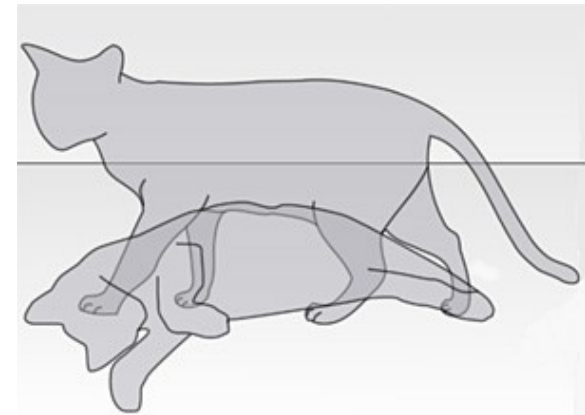
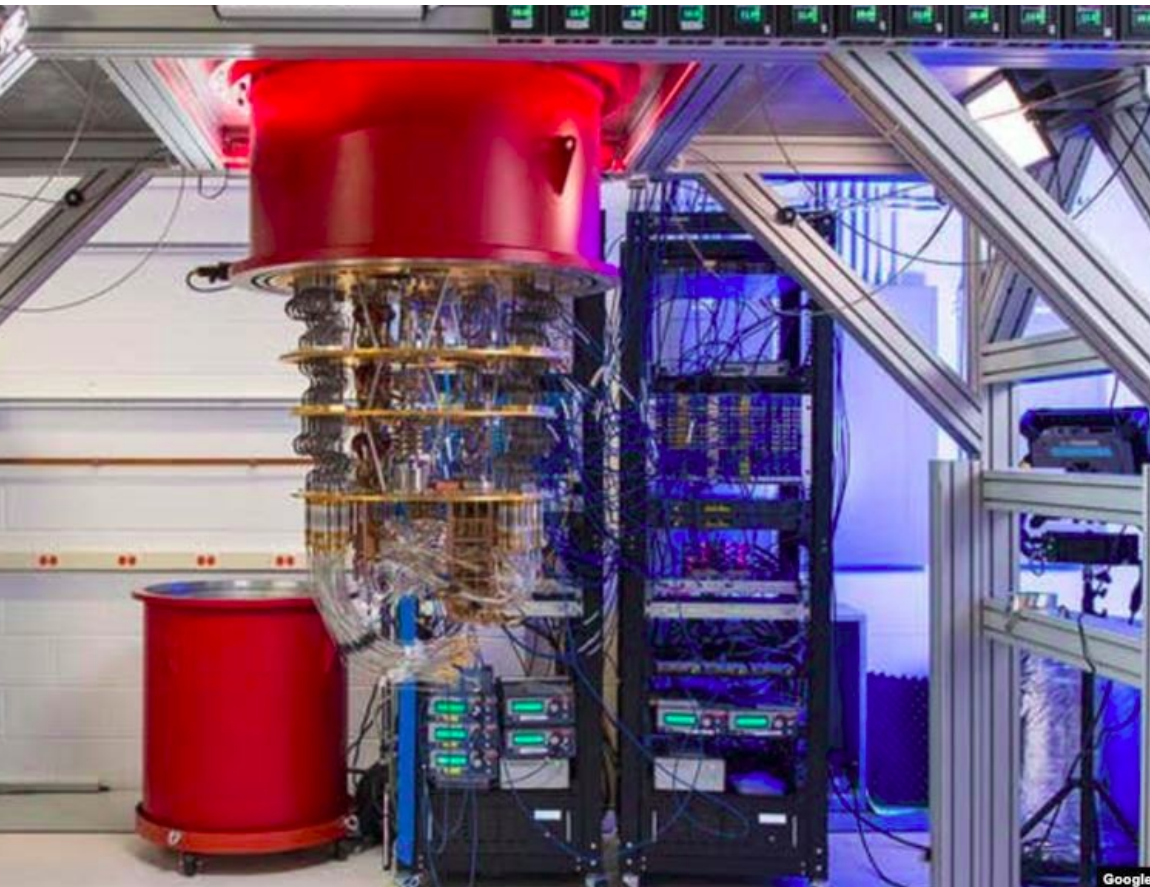
0.1 Gb / mm²

Töltés elfolyik → hibajavítás:
frissítés 64 ms-onként (20 ns)



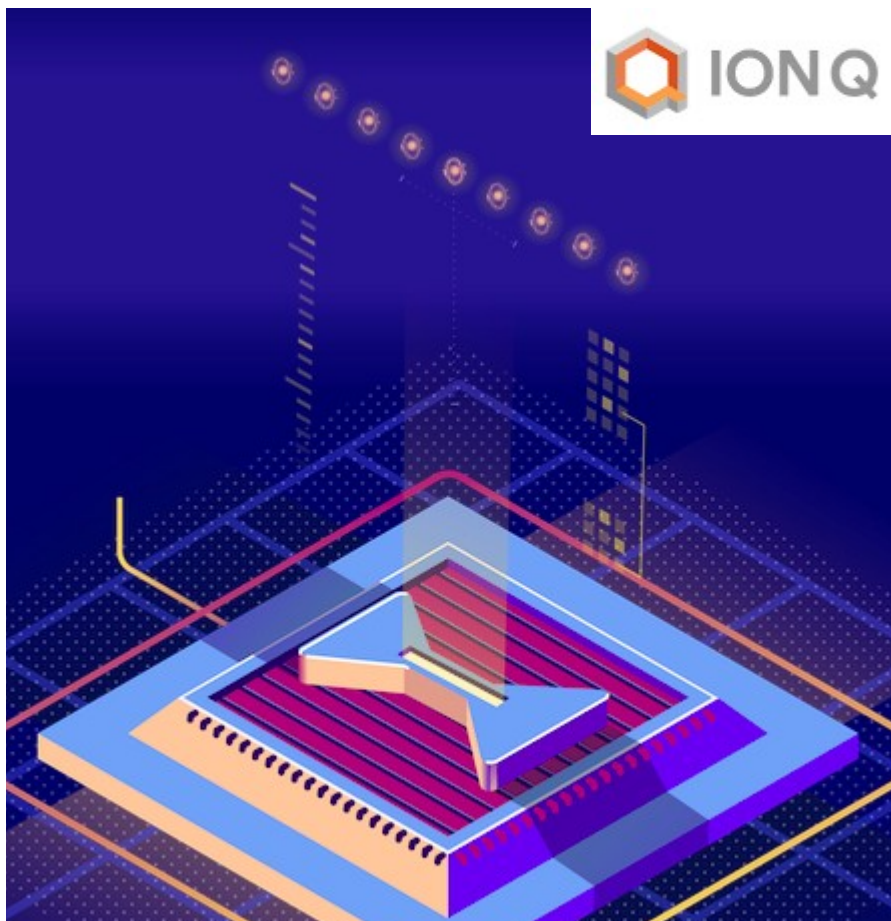
Kvantumszámítógépben hogyan védjük meg az információt redundanciával?

Probléma: Kiolvasásnál elrontjuk a szuperpozíciót és az összefonódást



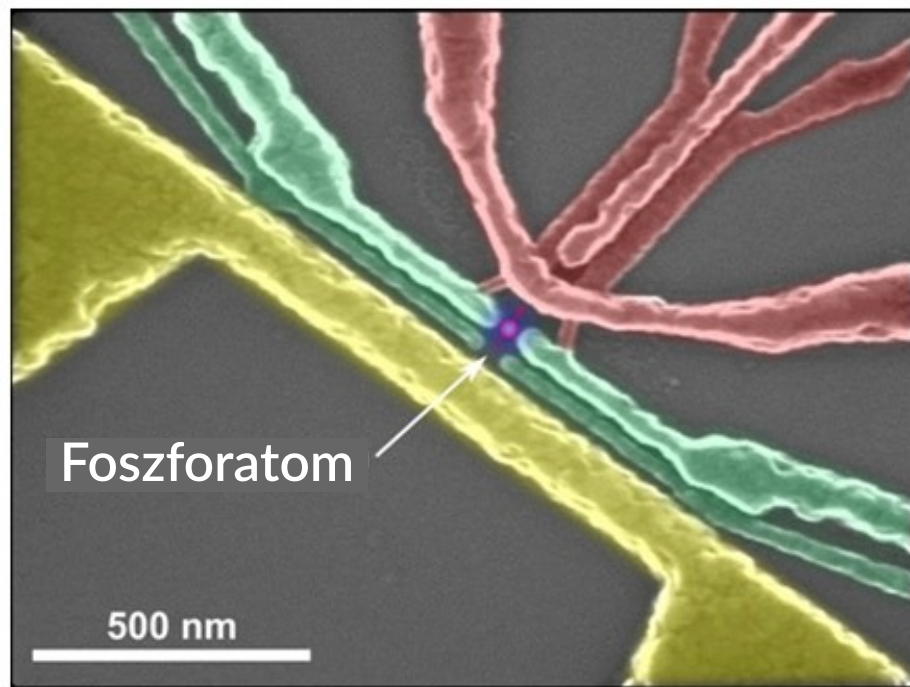
Kvantumszámítógépben kvantumbitek. Ezek a környezettől jól elszigetelt, egyedi kvantumrendszerek, amiken műveleteket tudunk végezni.

Chris Monroe, USA,
Joint Quantum Inst.:
vákuumban lebegtetett ionok



már most 32 qubit? <https://ionq.com/>

Michelle Simmons, Ausztrália
(UNSW): szilíciumba ültetett
foszforatom magspinje

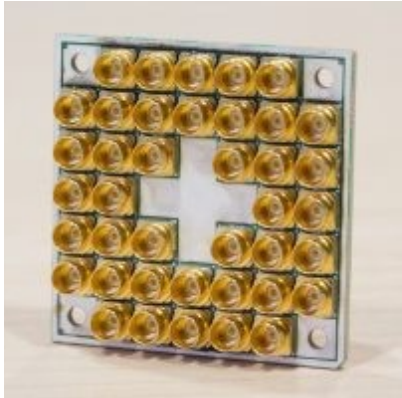


Silicon
Quantum
Computing

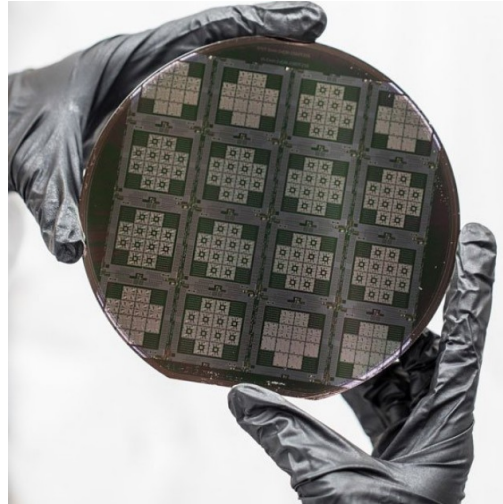
2020. szeptember:
John Martinisszal!

2023-ra 10 qubit - <http://sqc.com.au/>

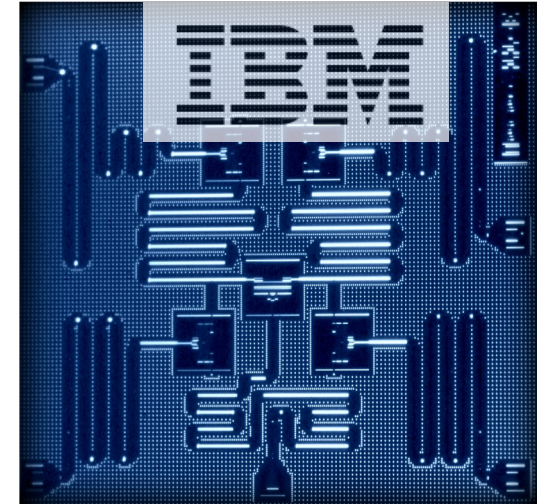
Pillanatnyilag legígéretesebbek a szupravezető áramkörökből fabrikált kvantumbitek



TU Delft + Intel:
17 kvantumbit
de nem működik

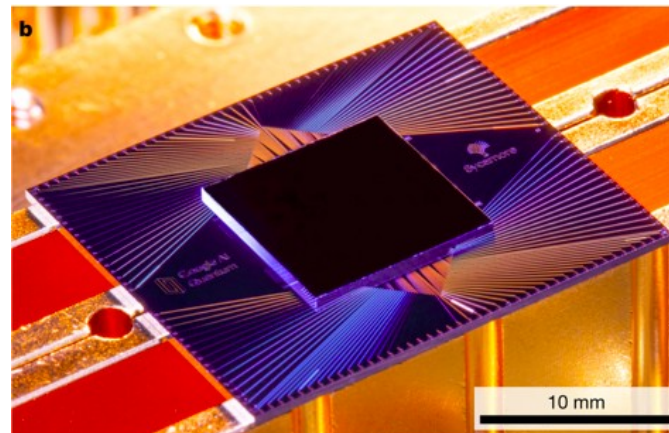


Rigetti: 28 kvantumbit
online programozható?

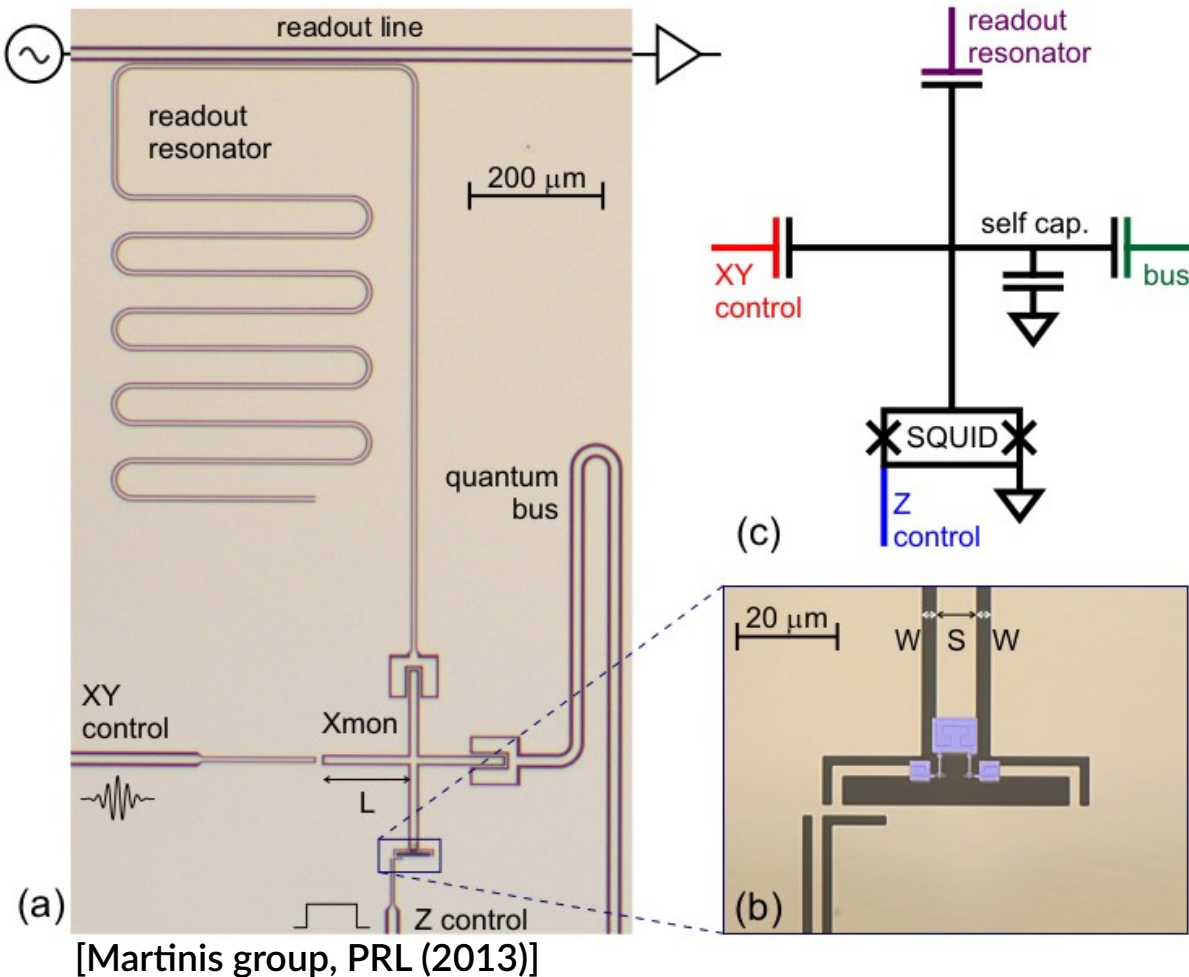


IBM: 53 kvantumbit
online programozható,
15 kvantumbitig ingyen

UCSB+Google:
53 kvantumbit,
2019: kvantumfölény



A szupravezető áramkörökből jó kvantumbitekhez: 15 mK-re le kell hűteni



- He3/He4 keverékkel működő hűtő (1 millió \$)
→ 15 mK (200x hidegebb a csillagközi térségénél).
Magyarországon: BME Kvantumelektronika Csoport

A kvantumszámítógépben kvantumbitek vannak.
 Lehet 0 és 1 állapot szuperpozíciójában,
 kvantummos “zizegés”, méréskor beugrik 0-ba vagy 1-be.

abstract

spin

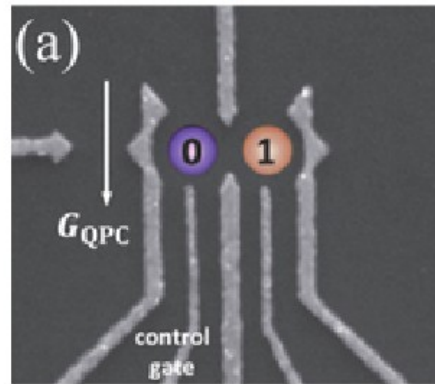
charge

$|0\rangle$

$|\uparrow\rangle$

$|1\rangle$

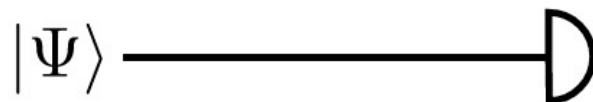
$|\downarrow\rangle$



Superposition:

$$|\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

Measurement produces 1 or 0, probabilistically



$$|\alpha|^2 \rightarrow 0$$

$$|\beta|^2 \rightarrow 1$$

A szuperpozíció több részecske között összefonódást is adhat: egymástól függő szuperpozíciók



Bohr 1913

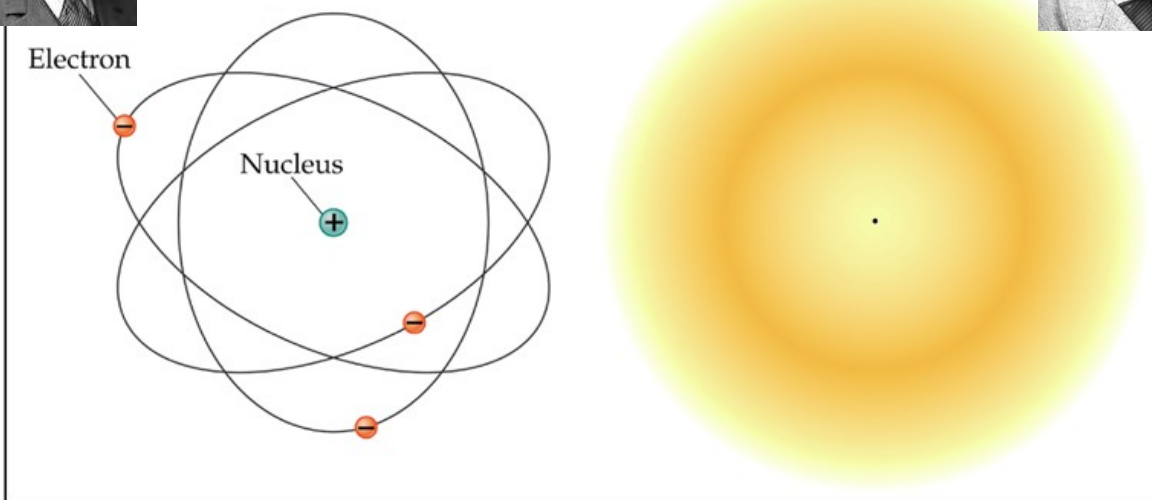


Schrödinger 1925

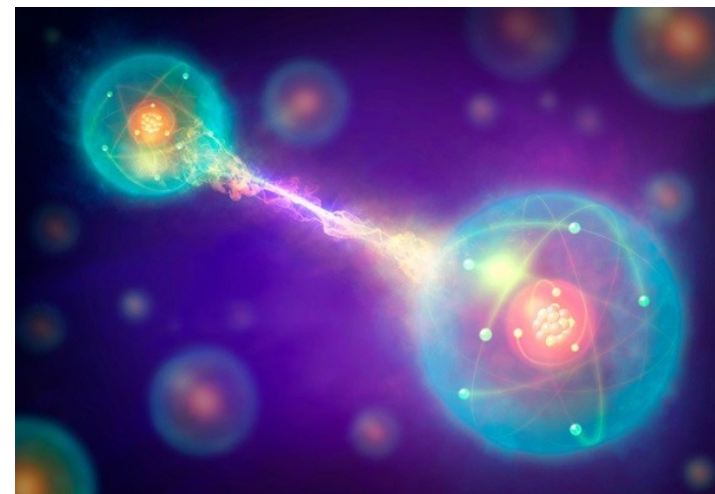


What An Electron Isn't

What An Electron Is



elektron “egyszerre több helyen” lehet
- szuperpozíció.



Több elektron
→ egymástól függő szuperpozíciók
= összefonódás

exponenciálisan bonyolult,
néha ettől hatékony kémiai reakció

“Kísérteties távolhatás, ami a kvantumtechnológia alapja” - Atomcsill, 2017.09.28

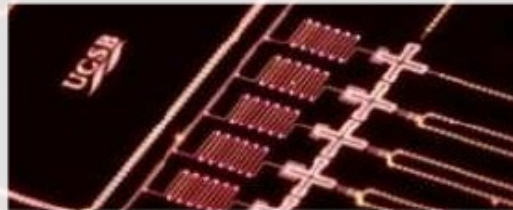
A környezeti zavarok is képesek a kvantumbiteket spontán megmérni. Ez elrontja a szuperpozíciót, összefonódást

entangle
measure
project

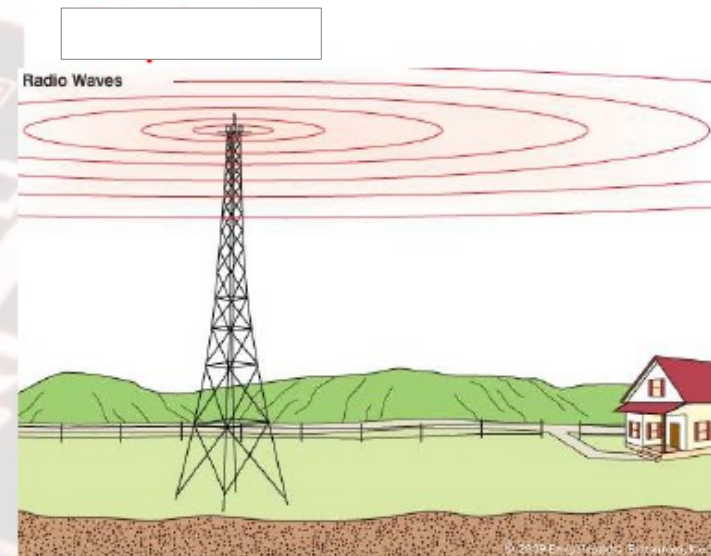


superpositions
are fragile

$$|\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$



disturb
spin flip



mérés (Z)

$$p_0 = |\alpha|^2 : |\Psi\rangle \rightarrow |0\rangle$$
$$p_1 = |\beta|^2 : |\Psi\rangle \rightarrow |1\rangle$$

átbillentés (X)

$$|\Psi\rangle \rightarrow \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$$

Megoldás:

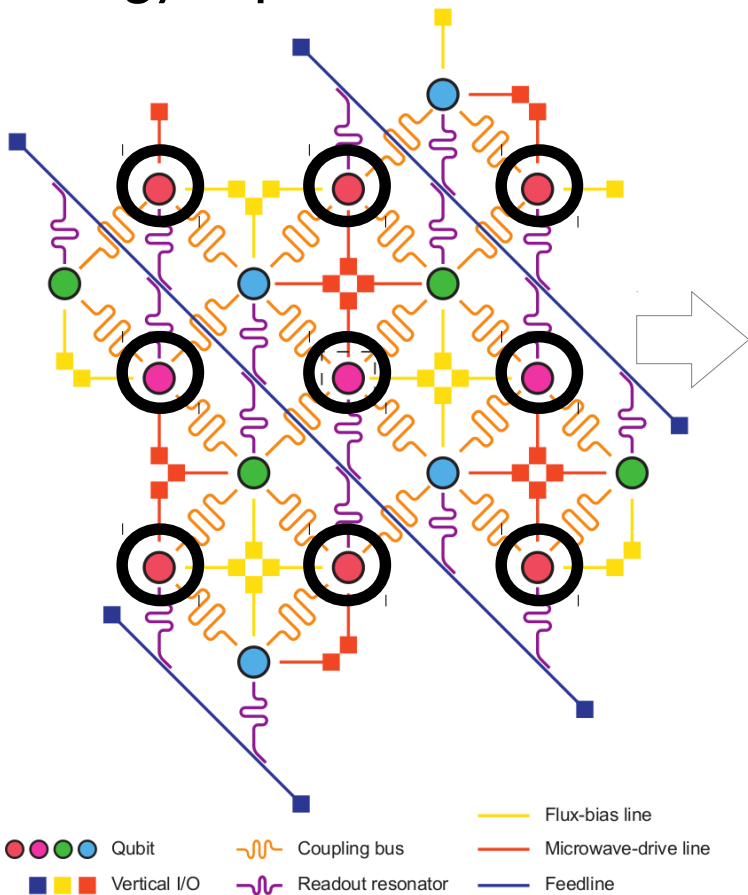
Felszíni kód = Kvantumos Redundancia

Úgy osztjuk szét a kvantuminformációt sok kvantumbit között, hogy közben az összefonódás segítségével elrejtjük a környezet elől

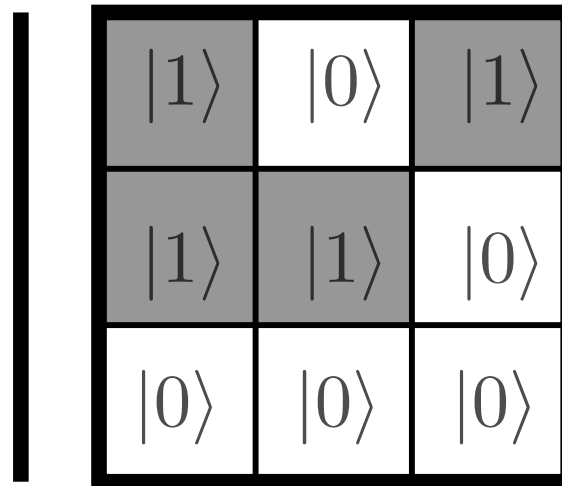
Ehhez robusztus összefonódás kell

Felszíni kód: szükségünk van egy csipre, sok kvantumbittel. Pl: 9 kvantumbittel

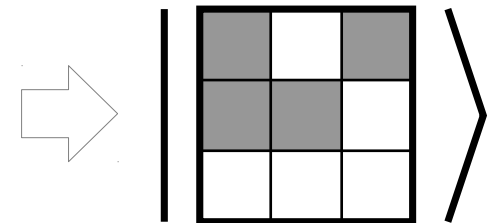
9 fizikai kvantumbittel egy csipen



Ha minden kvantumbittel 0 vagy 1...



... azt egyszerűsítve ábrázoljuk



A 9 fizikai kvantumbitben 1 logikai kvantumbitet rejtünk el

9 kvantumbit \rightarrow 512 bázisállapot. Ebből 32 kódállapot (megengedett):

0 = 16 szuperpozíciója

1 = másik 16 szuperpozíciója

$$|0\rangle = \begin{array}{l} |\text{000000000}\rangle + |\text{000000010}\rangle + |\text{000000011}\rangle + |\text{000000100}\rangle + |\text{000000101}\rangle + |\text{000000110}\rangle + |\text{000000111}\rangle + |\text{000001000}\rangle \\ + |\text{000001001}\rangle + |\text{000001010}\rangle + |\text{000001011}\rangle + |\text{000001100}\rangle + |\text{000001101}\rangle + |\text{000001110}\rangle + |\text{000001111}\rangle + |\text{000010000}\rangle \end{array}$$

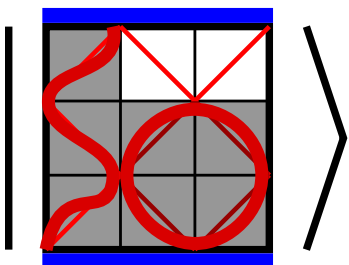
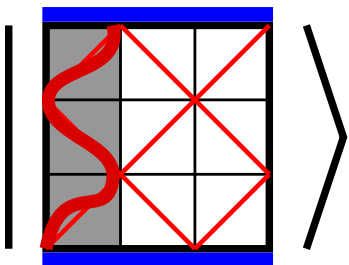
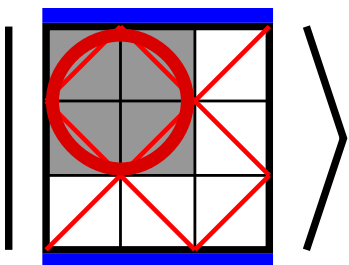
$$|1\rangle = \begin{array}{l} |\text{000000001}\rangle + |\text{000000011}\rangle + |\text{000000101}\rangle + |\text{000000111}\rangle + |\text{000001001}\rangle + |\text{000001011}\rangle + |\text{000001101}\rangle + |\text{000001111}\rangle \\ + |\text{000010001}\rangle + |\text{000010011}\rangle + |\text{000010101}\rangle + |\text{000010111}\rangle + |\text{000011001}\rangle + |\text{000011011}\rangle + |\text{000011101}\rangle + |\text{000011111}\rangle \end{array}$$

Minden bit 1 vagy 0 egyenlő valószínűséggel

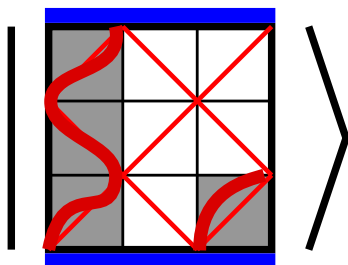
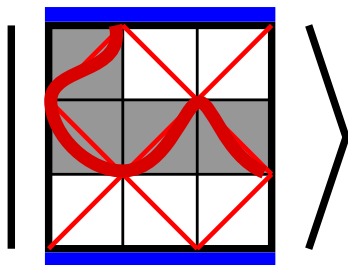
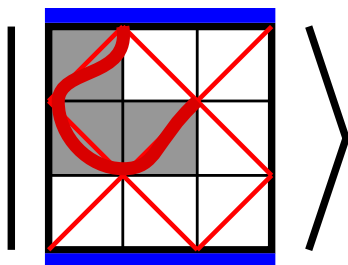
Kvantumcsip = spagettileves

Szabad térszavég csak az alsó v felső szélen lehet!

jó



nem jó



Kódoláshoz használt bázisállapotok:
 hány tésztavég lóg le a felső végen?
 0: páros (0 v 2). 1: páratlan (1).

$$|0\rangle = \begin{array}{l} |\text{diagram 1}\rangle + |\text{diagram 2}\rangle + |\text{diagram 3}\rangle + |\text{diagram 4}\rangle + |\text{diagram 5}\rangle + |\text{diagram 6}\rangle + |\text{diagram 7}\rangle + |\text{diagram 8}\rangle \\ + |\text{diagram 9}\rangle + |\text{diagram 10}\rangle + |\text{diagram 11}\rangle + |\text{diagram 12}\rangle + |\text{diagram 13}\rangle + |\text{diagram 14}\rangle + |\text{diagram 15}\rangle + |\text{diagram 16}\rangle \end{array}$$

$$|1\rangle = \begin{array}{l} |\text{diagram 17}\rangle + |\text{diagram 18}\rangle + |\text{diagram 19}\rangle + |\text{diagram 20}\rangle + |\text{diagram 21}\rangle + |\text{diagram 22}\rangle + |\text{diagram 23}\rangle + |\text{diagram 24}\rangle \\ + |\text{diagram 25}\rangle + |\text{diagram 26}\rangle + |\text{diagram 27}\rangle + |\text{diagram 28}\rangle + |\text{diagram 29}\rangle + |\text{diagram 30}\rangle + |\text{diagram 31}\rangle + |\text{diagram 32}\rangle \end{array}$$

hány tésztát metszek át baltól jobb szélég vízszintes haladás közben?
 0: páros sok. 1 páratlan sok.

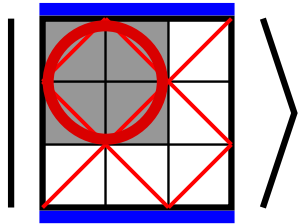
A kódállapotok az összes megengedett állapot egyenlő súlyú szuperpozíciói

$$|0\rangle = \begin{array}{l} |\text{grid 1}\rangle + |\text{grid 2}\rangle + |\text{grid 3}\rangle + |\text{grid 4}\rangle + |\text{grid 5}\rangle + |\text{grid 6}\rangle + |\text{grid 7}\rangle + |\text{grid 8}\rangle \\ + |\text{grid 9}\rangle + |\text{grid 10}\rangle + |\text{grid 11}\rangle + |\text{grid 12}\rangle + |\text{grid 13}\rangle + |\text{grid 14}\rangle + |\text{grid 15}\rangle + |\text{grid 16}\rangle \end{array}$$

$$|1\rangle = \begin{array}{l} |\text{grid 17}\rangle + |\text{grid 18}\rangle + |\text{grid 19}\rangle + |\text{grid 20}\rangle + |\text{grid 21}\rangle + |\text{grid 22}\rangle + |\text{grid 23}\rangle + |\text{grid 24}\rangle \\ + |\text{grid 25}\rangle + |\text{grid 26}\rangle + |\text{grid 27}\rangle + |\text{grid 28}\rangle + |\text{grid 29}\rangle + |\text{grid 30}\rangle + |\text{grid 31}\rangle + |\text{grid 32}\rangle \end{array}$$

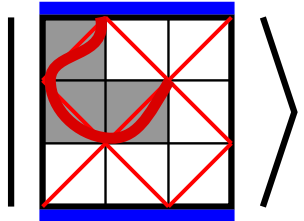
Sokat bugyogó spagettileves, spagettihurkok keletkeznek/megszűnnek, spagettik átkapcsolódnak egymásba. Szabad spagettivég nem keletkezhet!

A környezet káros hatásai a fizikai biteken: I) átbillentés (X-hiba), II) mérés (Z-hiba)



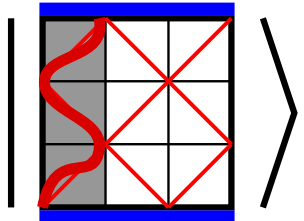
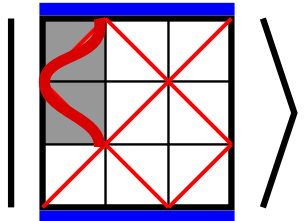
I) átbillentés (X):

0 kódállapotból 1-be csak 3 bit
billentésével vezet út, tiltott
konfigurációkon

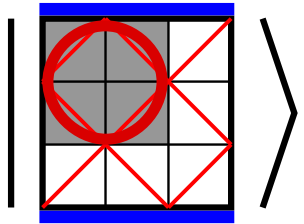


II) mérés (Z):

0 kódállapot vagy 1?
csak 3 bit mérésével derül ki



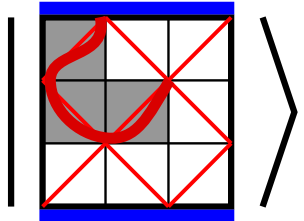
A környezet káros hatásait rendszeresen végzett hibajavító ciklussal, kvantumműveletekkel gátoljuk.



I) átbillentés (X):

0 kódállapotból 1-be csak 3 bit billentésével vezet út, tiltott konfigurációkon

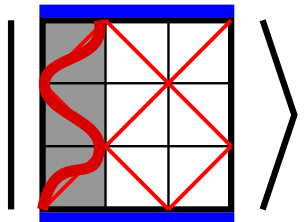
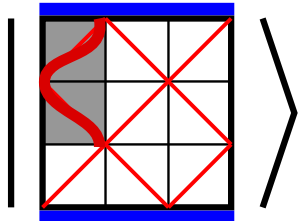
Vannak szabad végek?
(Z-paritásmérés)
Ha igen, párosítsuk össze!



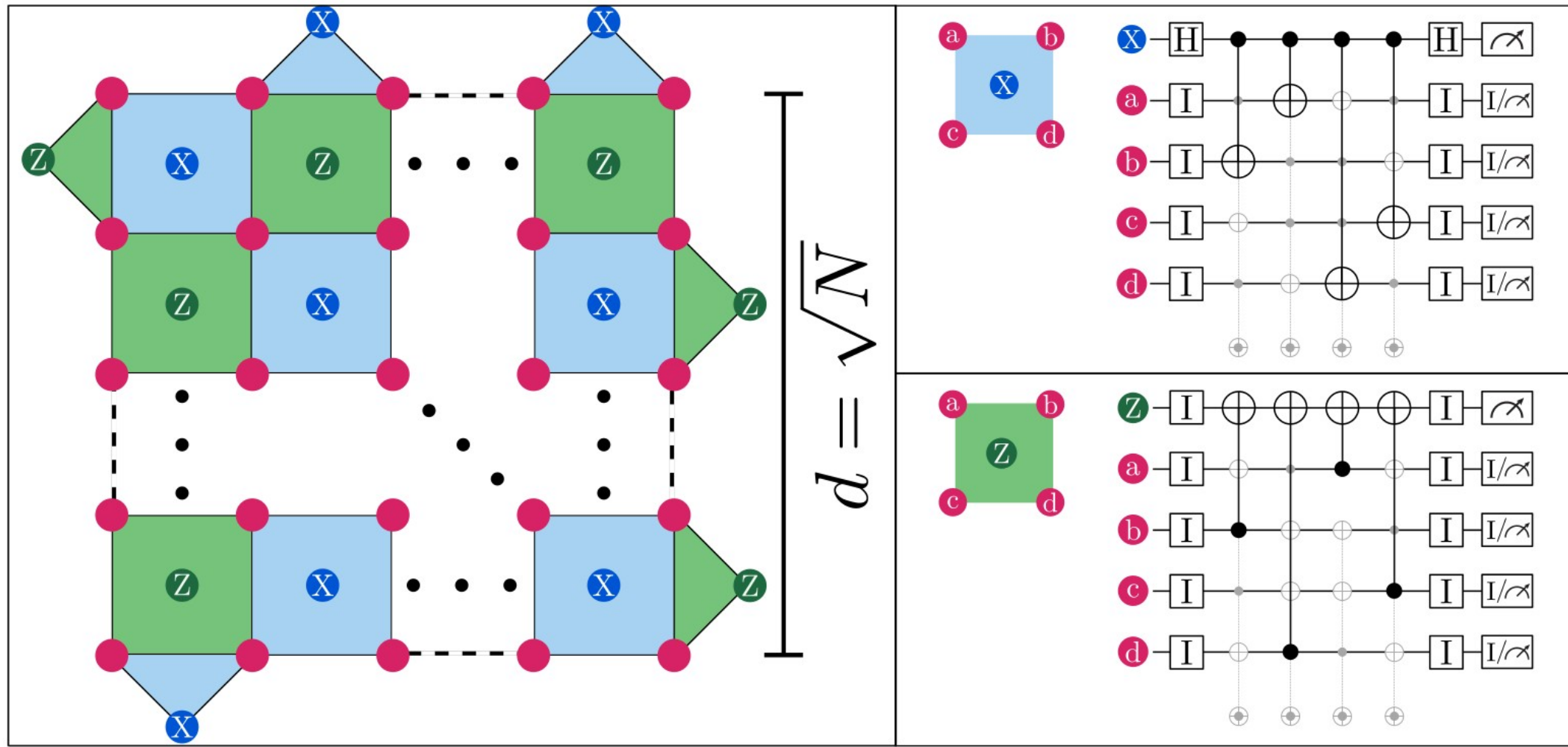
II) mérés (Z):

0 kódállapot vagy 1?
csak 3 bit mérésével derül ki

Kavargassuk a levest!
Fluktuáltassuk be a megengedett bázisállapotokat!
(X-paritásmérés)

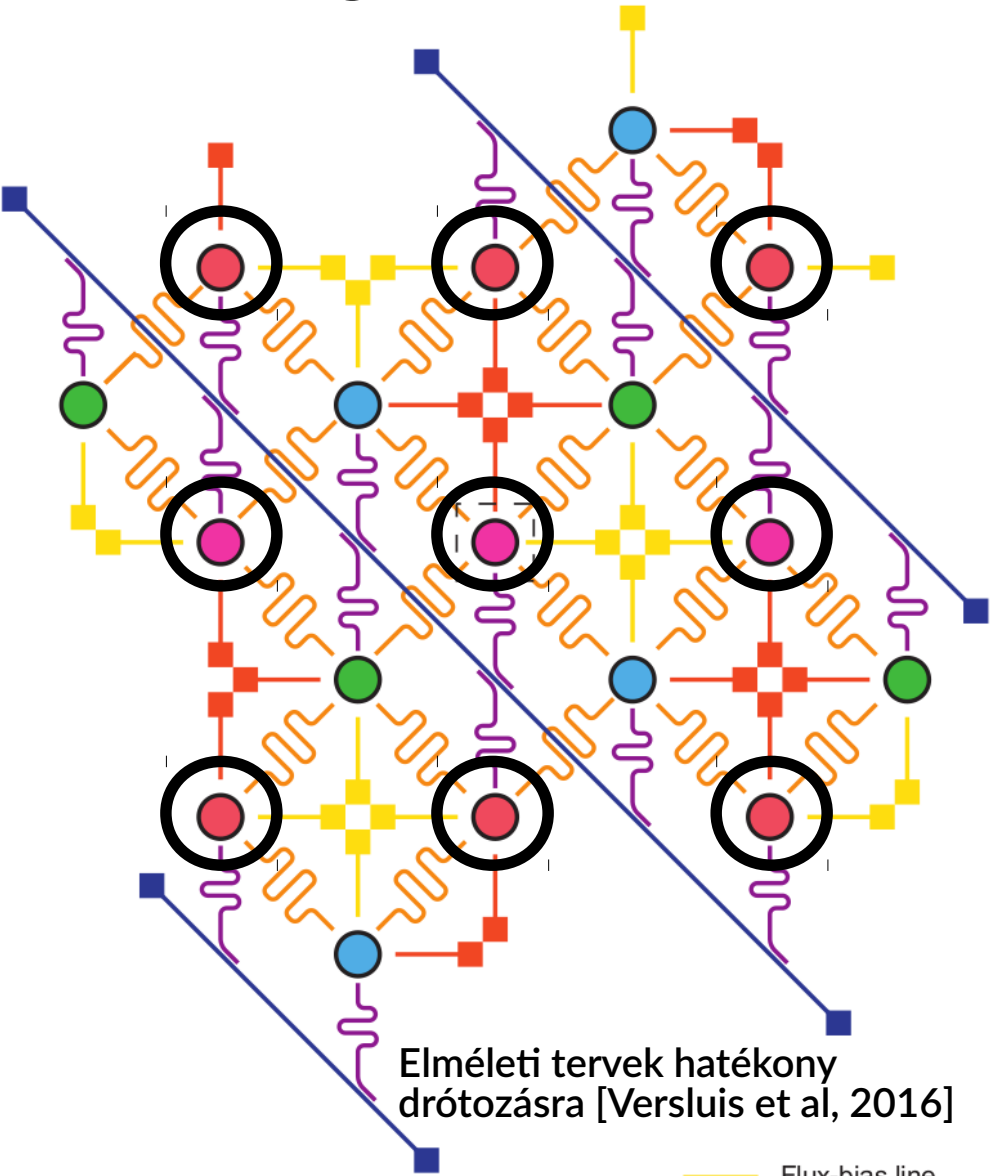


Hibajavító ciklus: mindkét művelet végrehajtható szomszédok közötti mérésekkel - segédkvantumbitekkel

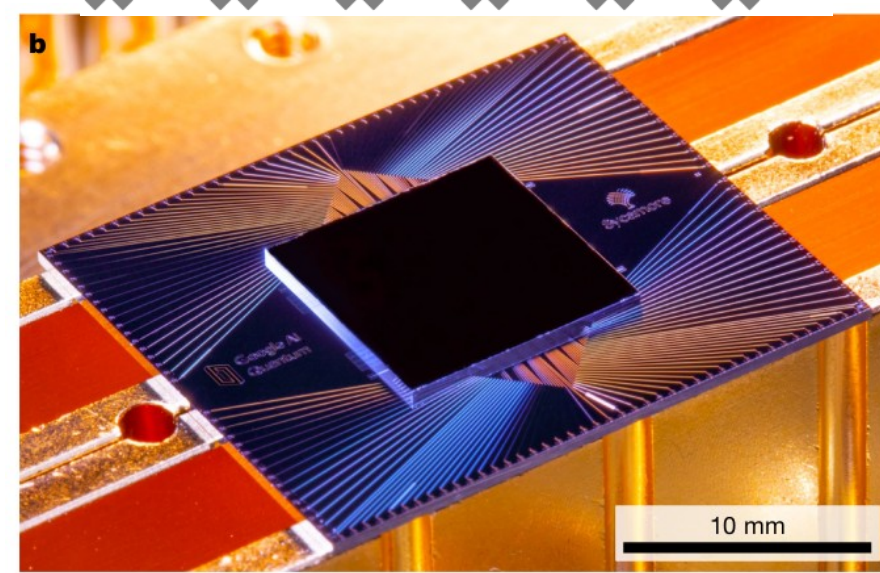
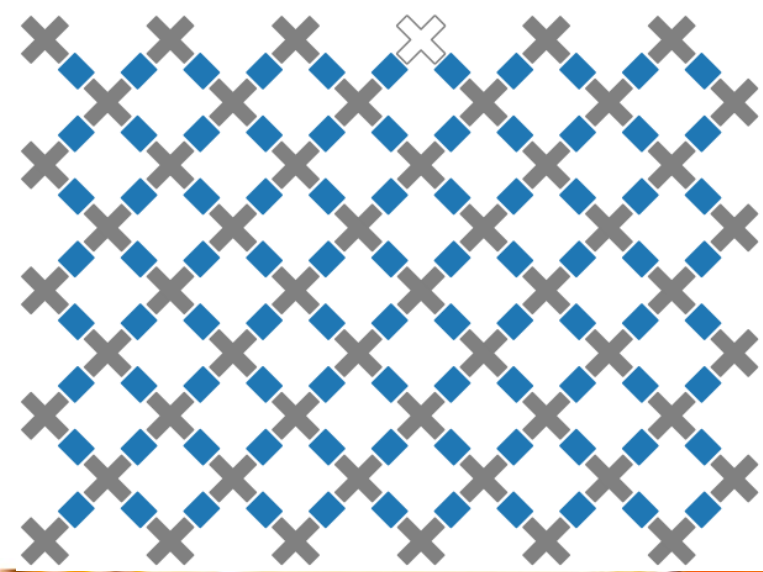


[Baireuther et al, Quantum, 2018:
Machine-learning-assisted correction of correlated qubit errors in a topological code]

A szupravezető kvantumszámítógépek (Google, IBM, Rigetti) a felszíni kódot próbálják megvalósítani

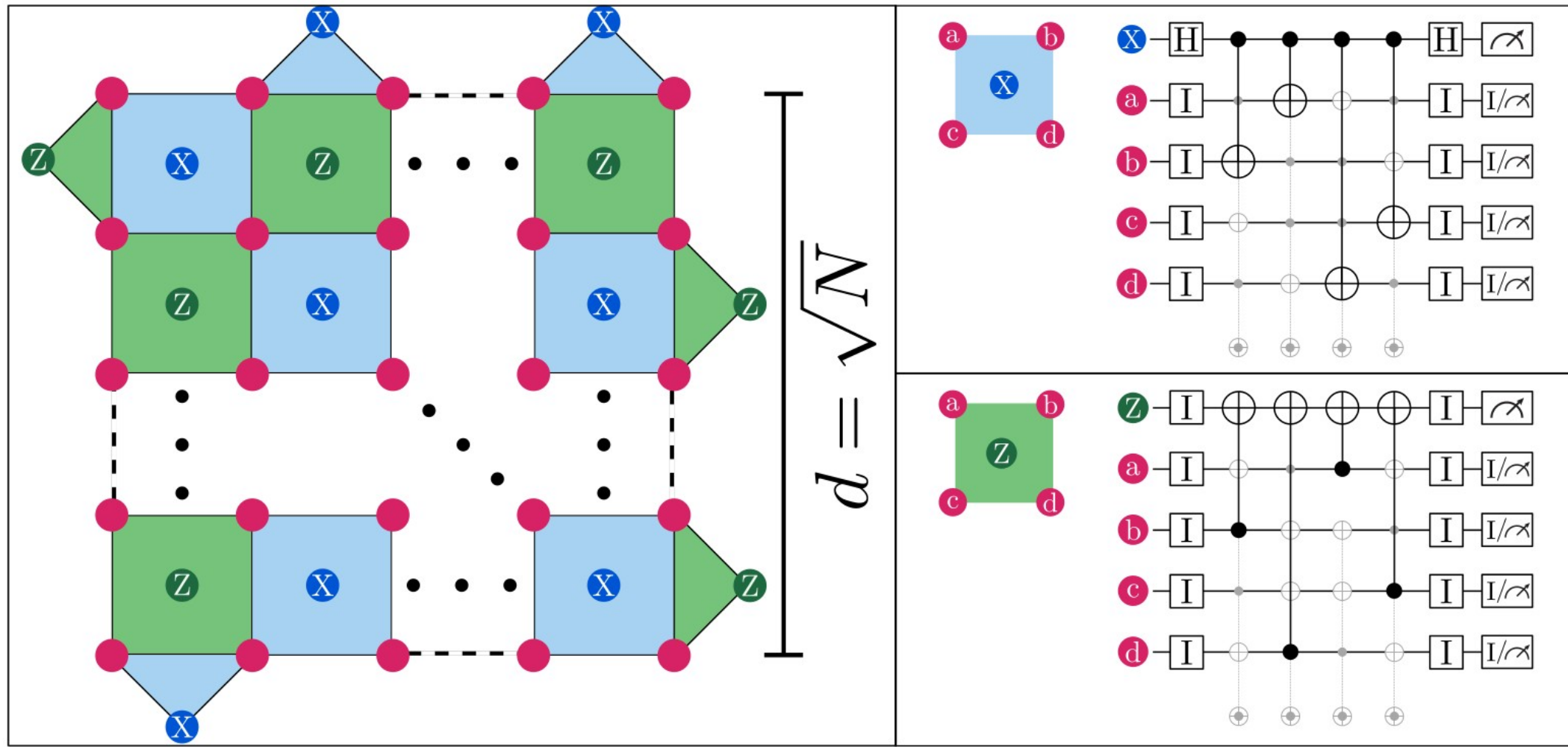


- ● ● Qubit
- Coupling bus
- Microwave-drive line
- Readout resonator
- Feedline
- Flux-bias line
- ■ ■ Vertical I/O



Google "Sycamore" kvantumcsip, kvantumfölény-kísérlet, 2019

Miközben a környezet okozta hibákat javítjuk, mi újabbakat okozhatunk. Mérési hibák, kapuhibák miatt...

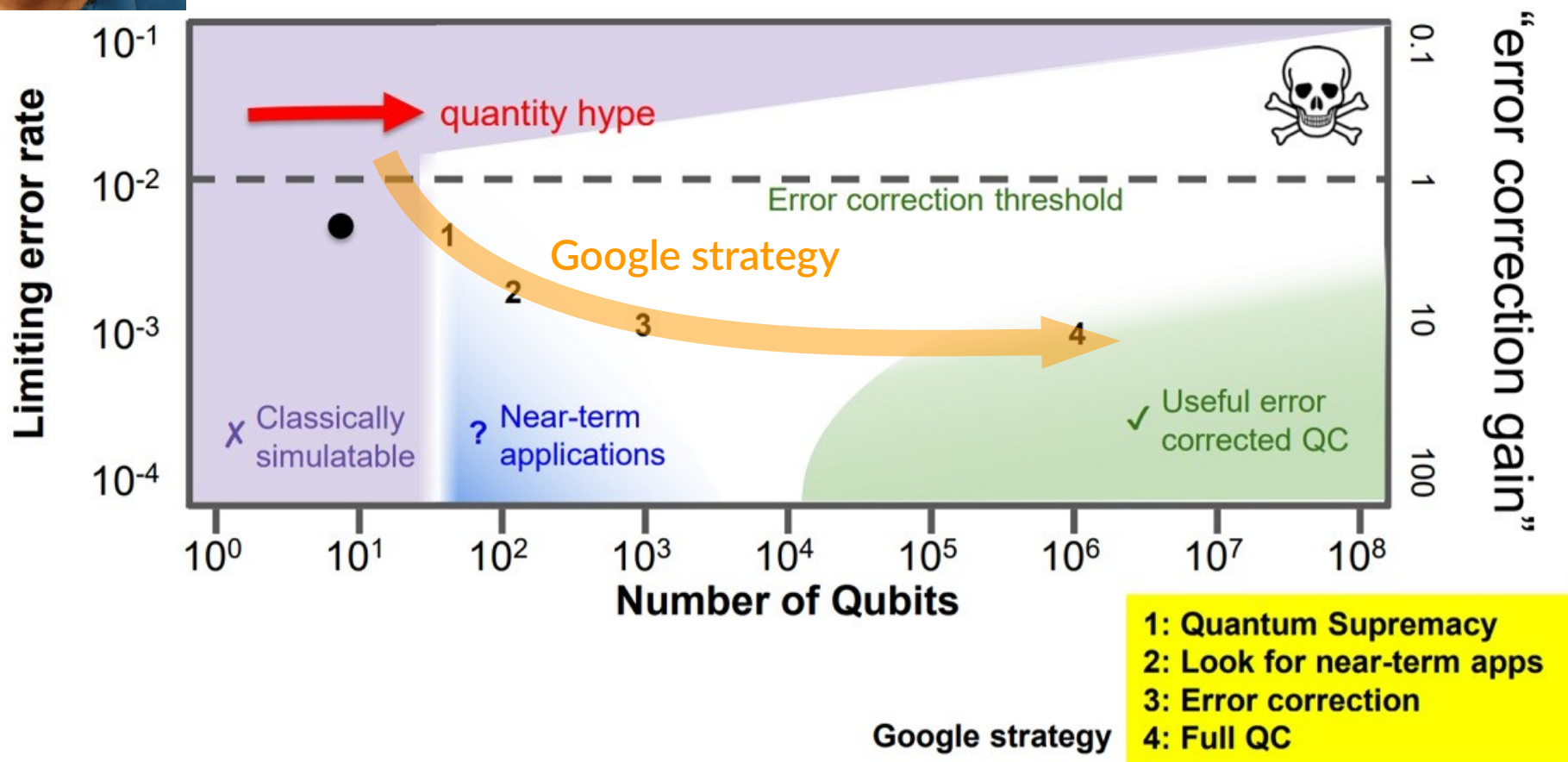


[Baireuther et al, Quantum, 2018:
Machine-learning-assisted correction of correlated qubit errors in a topological code]

... a kvantum hibajavításhoz nemcsak sok kvantumbit kell, de jó minőség is: max. 1% hiba tolerálható

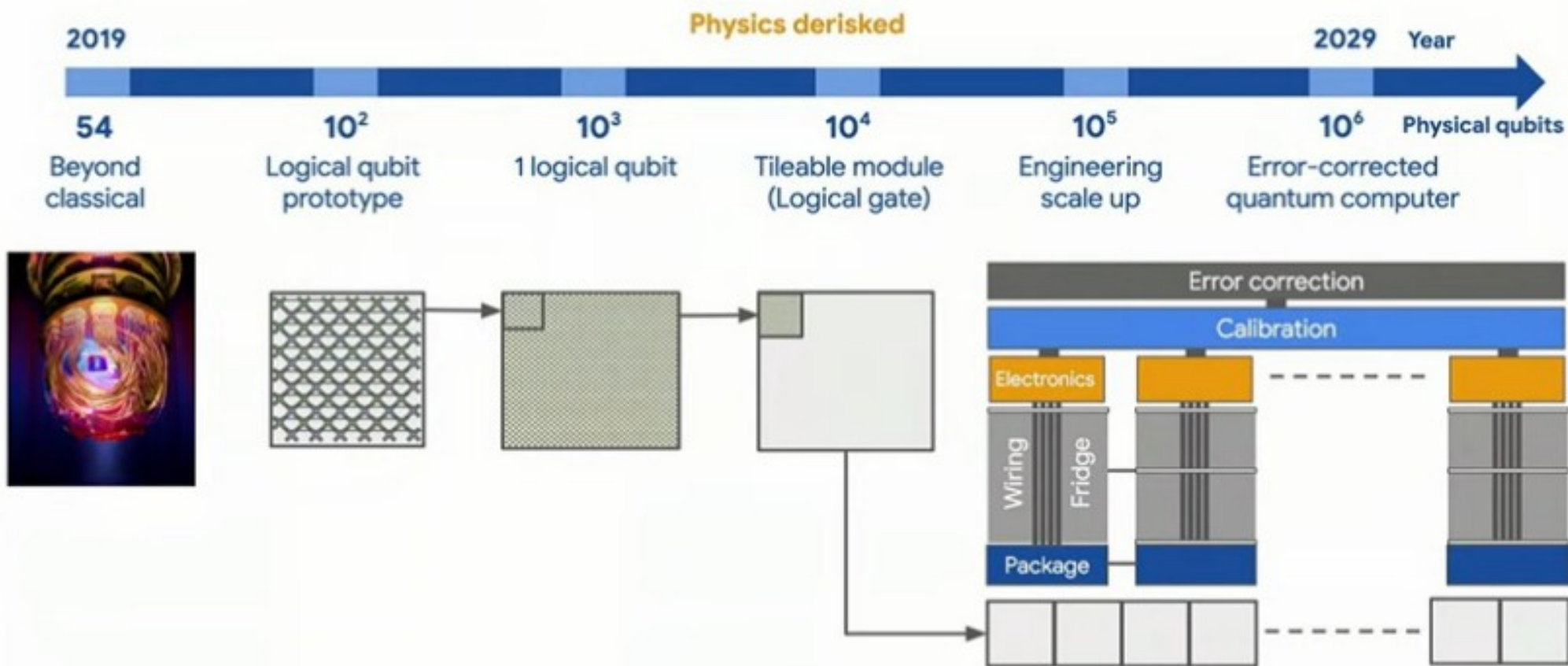


Need Both Quality and Quantity



Google és IBM: szupravezető kvantumbitekkel 10 éven belül kvantumosan hibajavított kvantumszámítógép!

Google AI Quantum hardware roadmap



[Hartmut Neven előadása, Google Summer Symposium 2020, <https://www.youtube.com/playlist?list=PLQY2H8rRoyvx4VttfJOPRslw8XWT7yaBJ>]

Felszíni kód: Rendszeres mérésekkel (órajel) a kvantumbiteket kódállapotban tartjuk

Milyen ez a sok-quantumbites állapot?

→ Hosszútávú, robusztus összefonódást tartalmazó, topologikusan rendezett állapot (Toric Code)

Hogy van kódolva a kvantumbit?

→ A felszíneket összekötő láncokban

Hogyan lehet bekódolni, kikódolni az információt?

→ Kvantumállapot-injektálással

Hogyan tudunk számításokat végezni a bekódolt állapoton?

→ X,Z,H: transzverzális (külön-külön)

→ CNOT: fonással vagy rács-szabázzal

→ T,S: kaputeleportálás, bűvös állapotok

Topologikus kvantumszámítás megvalósítható hardverszinten is – ez a Microsoft terve



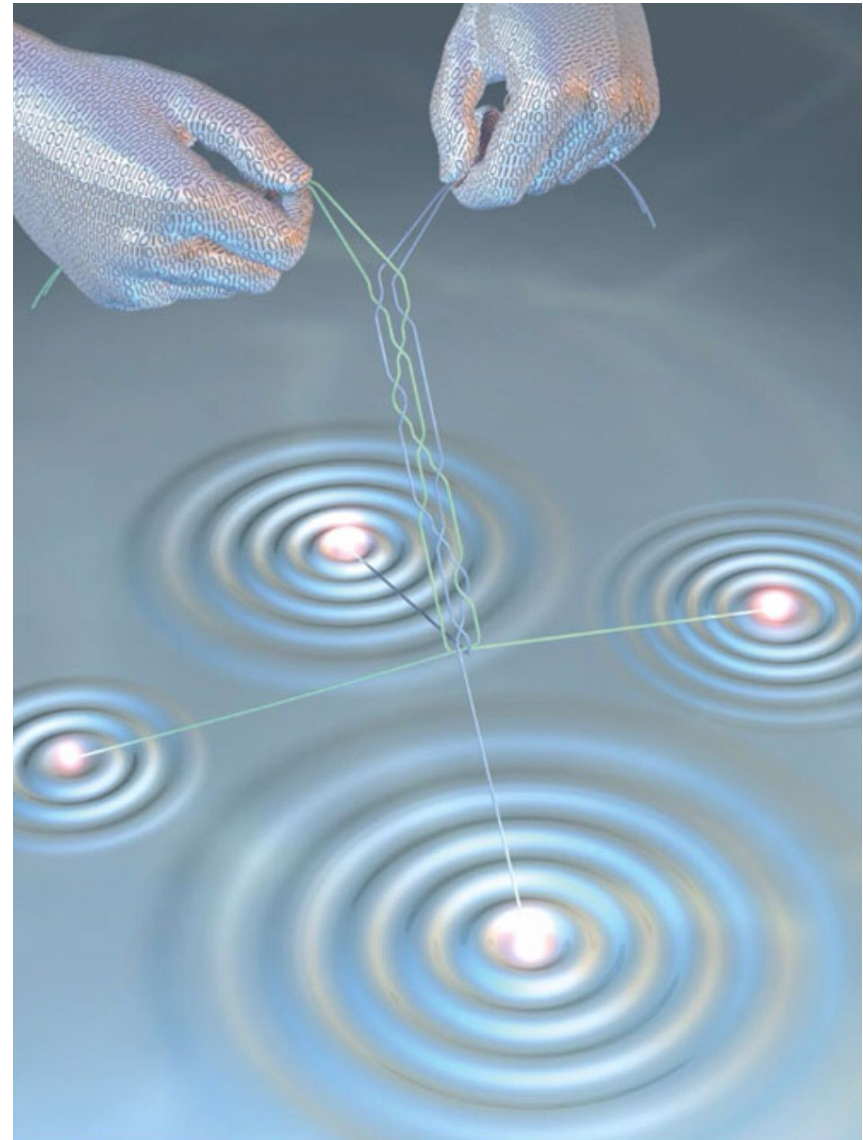
STATION Q

~1990, matematikusok: “bármionok” fonásával kvantumszámítás?

- Kvantumos Hall-effektussal?
- 2012: Majorana Zéró-módusokkal félvezető-szupravezető dróthálózatban!

AtomCsill december 10: Széchenyi Gábor
(Wigner Fizikai Kutatóközpont, SzFI):

[A rejtélyes Majorana-részecske nyomában](#)

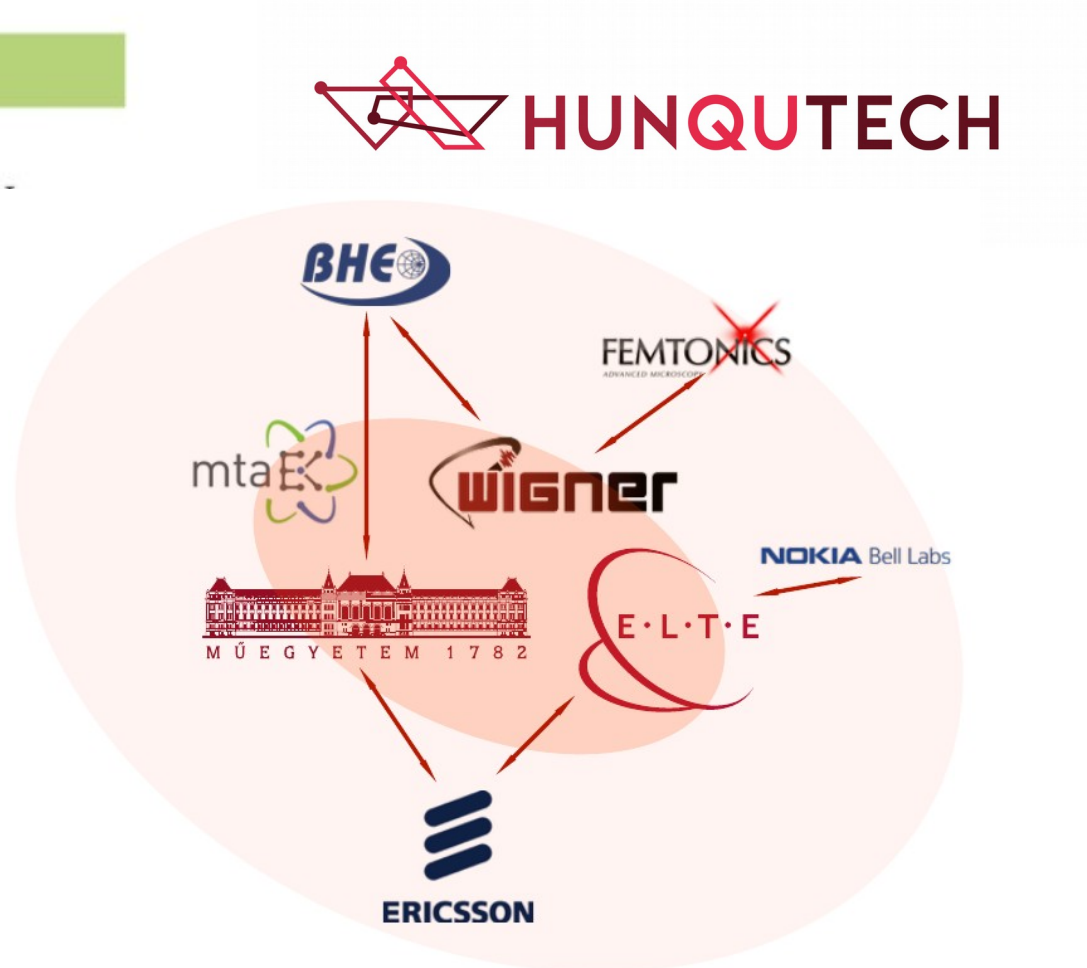


A magyar állam a kvantumtechnológiai kutatást Kiválósági Programmal támogatja 2017-2021

Kvantumbitek előállítása, megosztása és kvantuminformációs hálózatok fejlesztése



Nemzeti Kiválósági Program 2017,
B. Kvantumtechnológia Alprogram



Összefoglalás: Nagy kvantumszámítógép építéséhez szükség van a topologikus hibajavításra!

- Hibák ellen a redundancia + ismételt hibajavítás véd
- Kvantumos redundancia + hibajavítás:
Felületi Kód
- 1 logikai kvantumbit
= sok (400) fizikai kvantumbit,
"bugyogó spagettileves"
- A szükséges műveleti pontosság
majdnem megvan, de...
- 1 millió kvantumbit kéne egy csipen!
- 10 éven belül?
- Magyarországon is részt veszünk a fejlesztésben!

