

半導体量子デバイスの開発

樽茶清悟（理化学研究所）

誤り耐性量子コンピュータ

量子化学計算

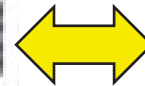
分子の電子状態、構造・反応過程、物性の予測

線形1次方程式 $Ax=b$ を解く量子アルゴリズム

流体・航空工学、制御工学などに応用

量子-HPCハイブリッド（理研）

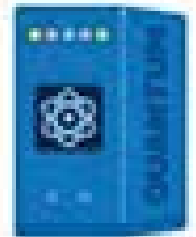
連携により古典計算機だけでは到達できない計算領域を開拓



IBM



Quantinuum

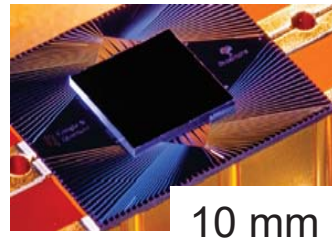


商用 100ビット 20ビット

ゲート型量子コンピュータの開発

超伝導回路

Google
70 bits

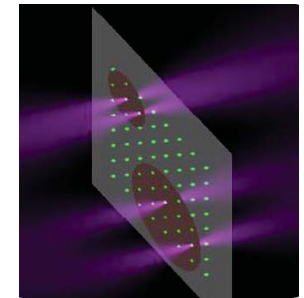


IBM
“Condor” 1121 bits
“Osprey” 433 bits



中性原子

Atomic computing
/Harvard 1180 bits



束縛イオン

IonQ 32 bits
Quantinuum 56 bits

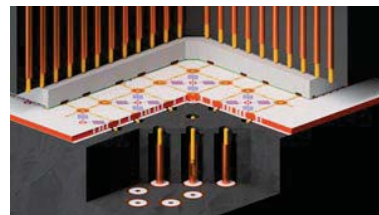


Rigetti 80 bits

China USTC 176 bits

RIKEN/FUJITSU

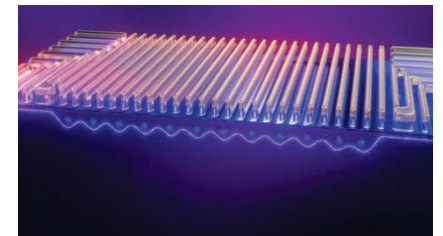
“叡” 64 bits



半導体(シリコン)

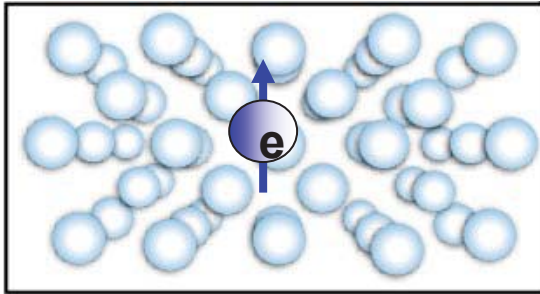
RIKEN, Intel, LETI, IBM,
TuDelft, UNSW,...

Intel 12 qubits



なぜシリコン?

^{28}Si

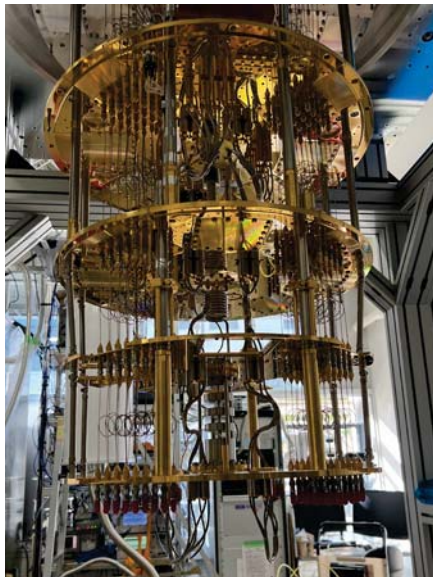


同位体制御 ^{28}Si では、核スピンの量がごく微量であり、スピンの内在的コヒーレンス時間が長い。

量子ビットデバイスの製造は、CMOSの半導体製造と互換性がある。(Intel, Imec, CEA-Leti の参入)

超伝導に比べ、 $>1\text{ K}$ の高温で動作可能である。

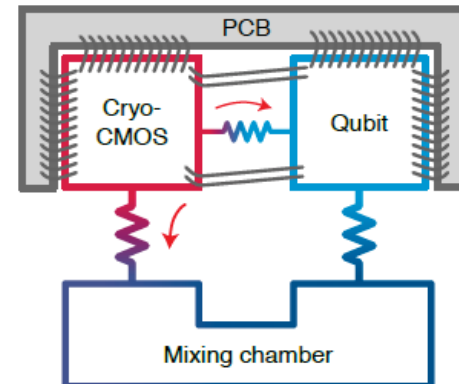
- 冷凍機の冷却能力が2桁以上大きく、より多くの量子ビットを駆動できる。
- CMOS低温電子回路と集積化可能である。



← $> 1\text{ K}$

← $< 0.1\text{ K}$

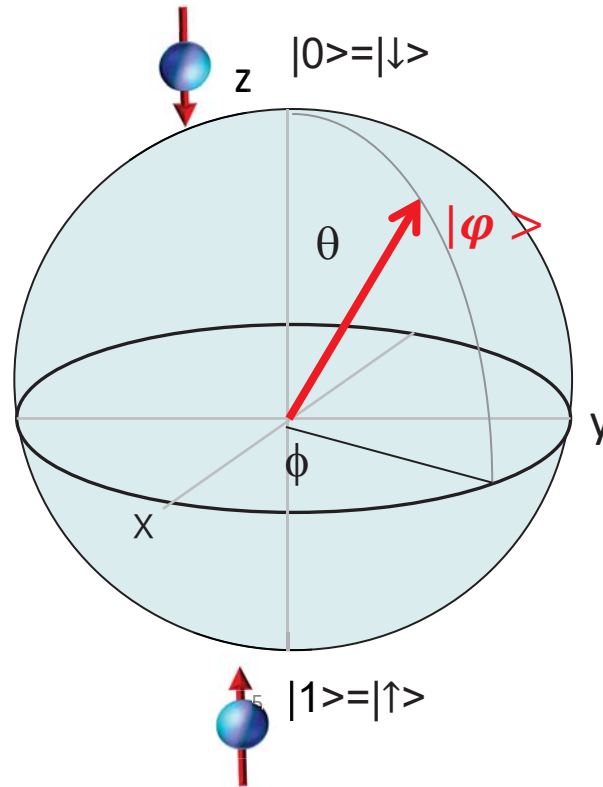
Quantum processor



S.J.Pauka et al.
Nat. Electron. 4, 64 (2021)

量子ビット

重ね合わせ状態 $|\varphi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ 基底 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$



ブロッホ球上の状態ベクトル

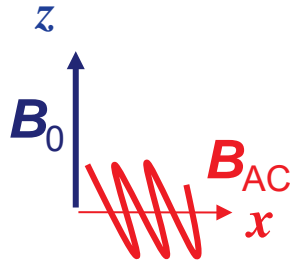
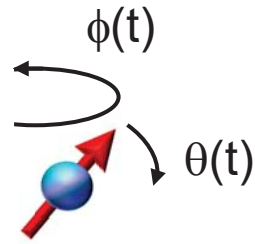
$$|\varphi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

量子ビット操作

= 基底 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ の確率振幅
の操作

スピン共鳴を原理とする量子ビット

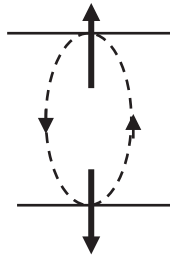
基底 $\{|0\rangle, |1\rangle\} = \{|\downarrow\rangle, |\uparrow\rangle\}$



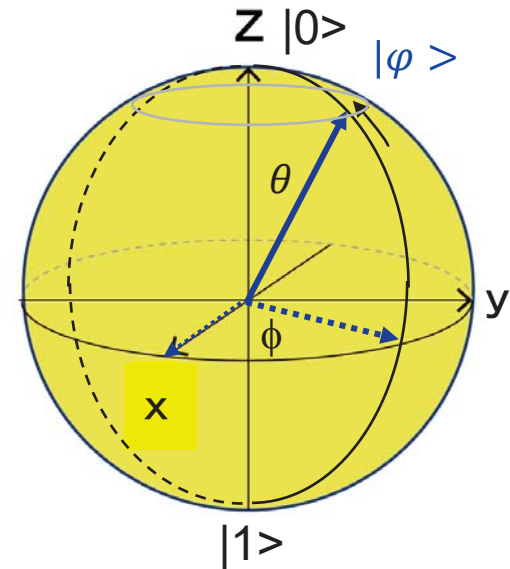
マイクロ波



B_{AC} freq. ω
 $= E_{Zeeman}$

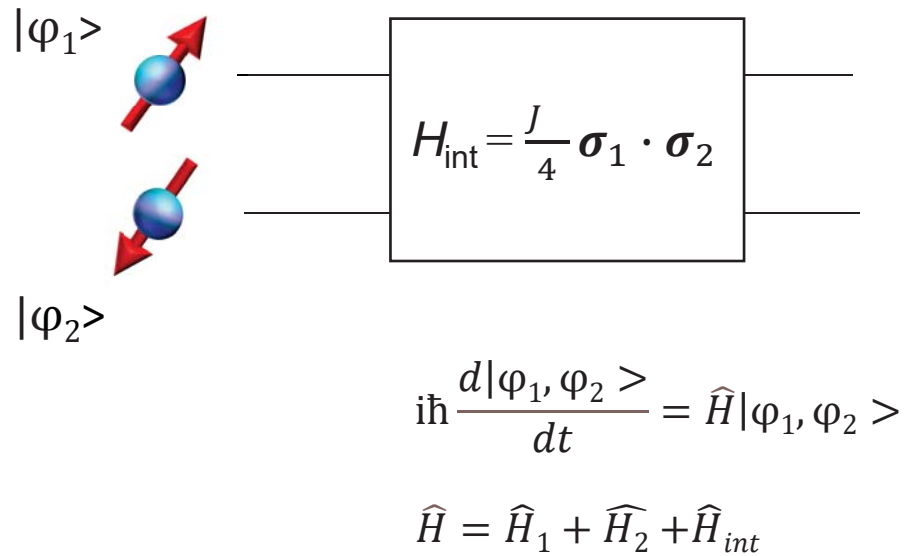
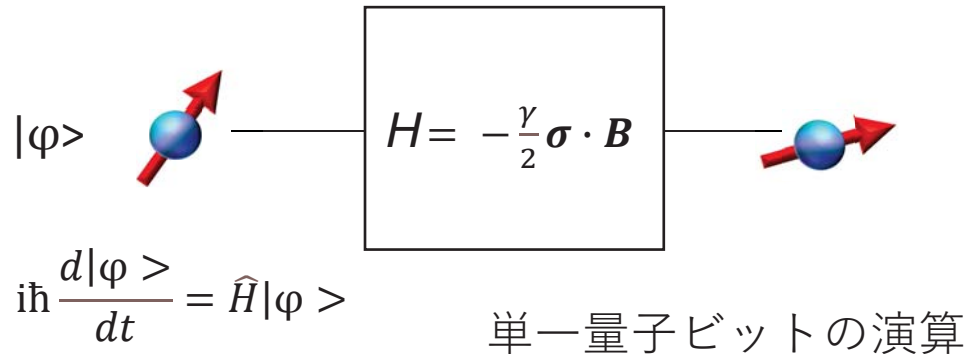


$$E_{Zeeman} = \gamma B_0$$



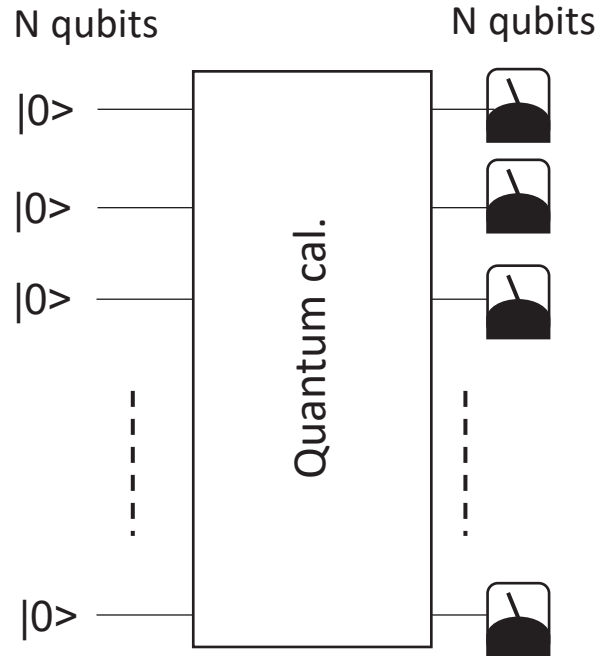
マイクロ波により、2つの回転角度 θ 、 ϕ を制御(交流磁場 B_{AC} の周波数で回転する座標系)

2 量子ビットの論理演算



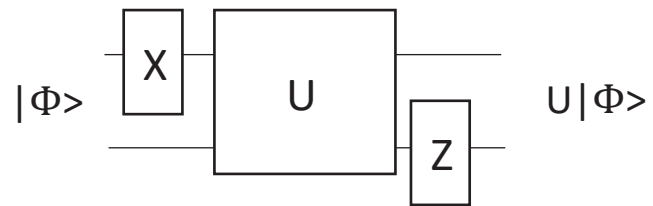
量子論理演算

初期化



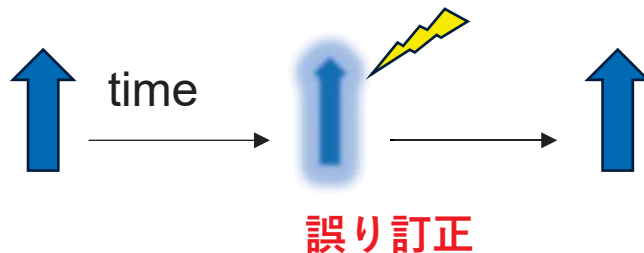
読み出し

Multi-qubit gates consisting of single qubit gates and two-qubit gates



単一量子ビット操作
2量子ビット操作

Scale-up of qubit devices required for large scale calculation but all operations must complete within dephasing.



Quantum operations suffer from errors.

誤り耐性量子計算

Challenges in Si:

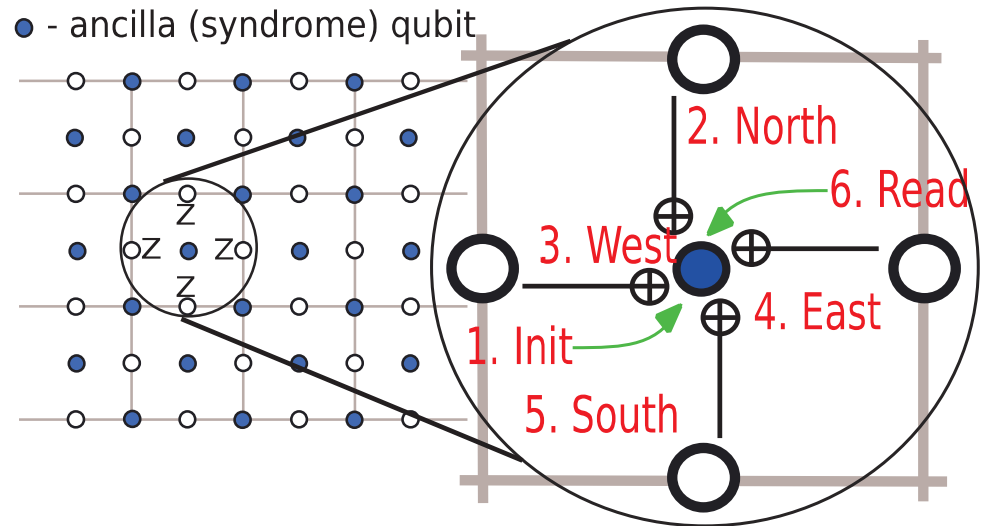
High fidelity in qubit gates

Error correction (QEC)

Scale-up

○ - data qubit

● - ancilla (syndrome) qubit



Fidelity thresholds

Fidelity (1 qubit) > 99.9%

Fidelity (2 qubit) > 99%

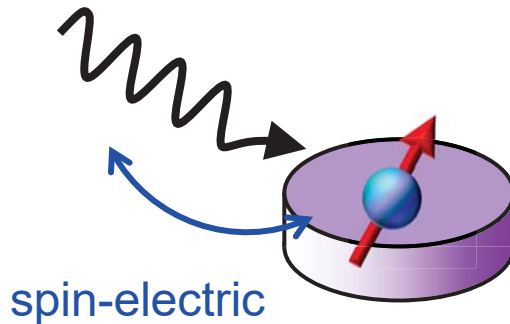
Initialization F > 99%

Readout F > 99%

A. G. Fowler *et al.*, *Phys. Rev. A* (2009)

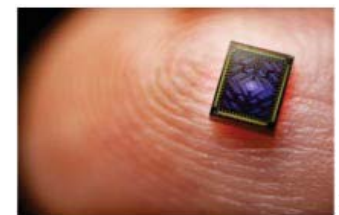
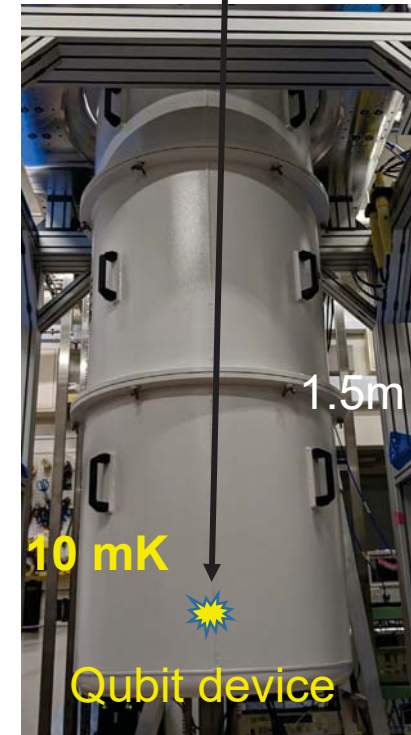
量子ドット中の単一スピンをを用いた量子ビットの実装

ESR using Microwave
induced ac E-field



a.c. electric field of μ -wave is converted to a.c. magnetic field through spin-electric coupling mechanism of spin-orbit coupling, on-chip coil, μ -magnet,....

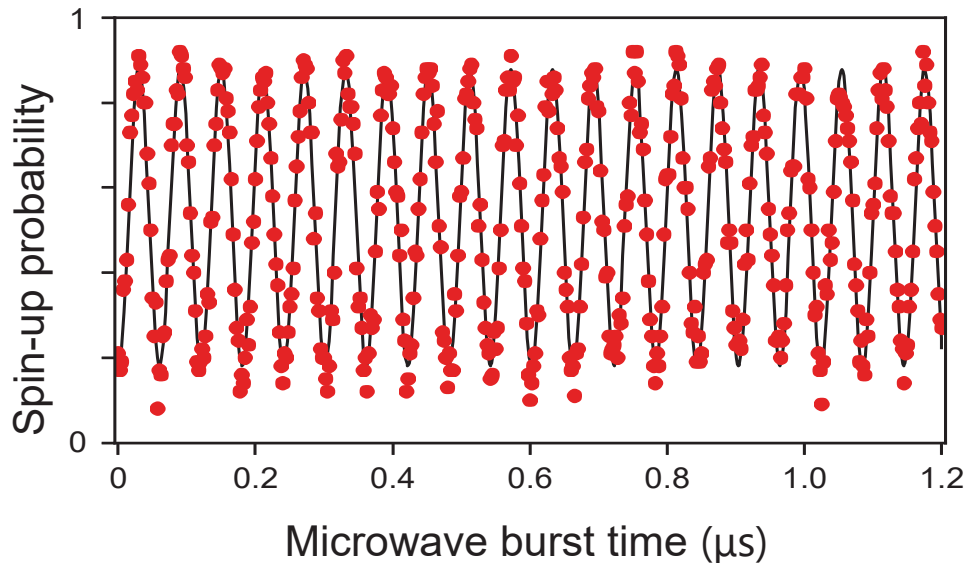
Microwave



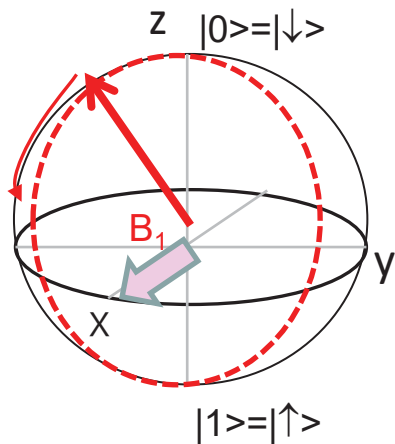
微小磁石を用いたスピン量子ビット

J. Yoneda et al., Nat. Nanotechnol. 2018

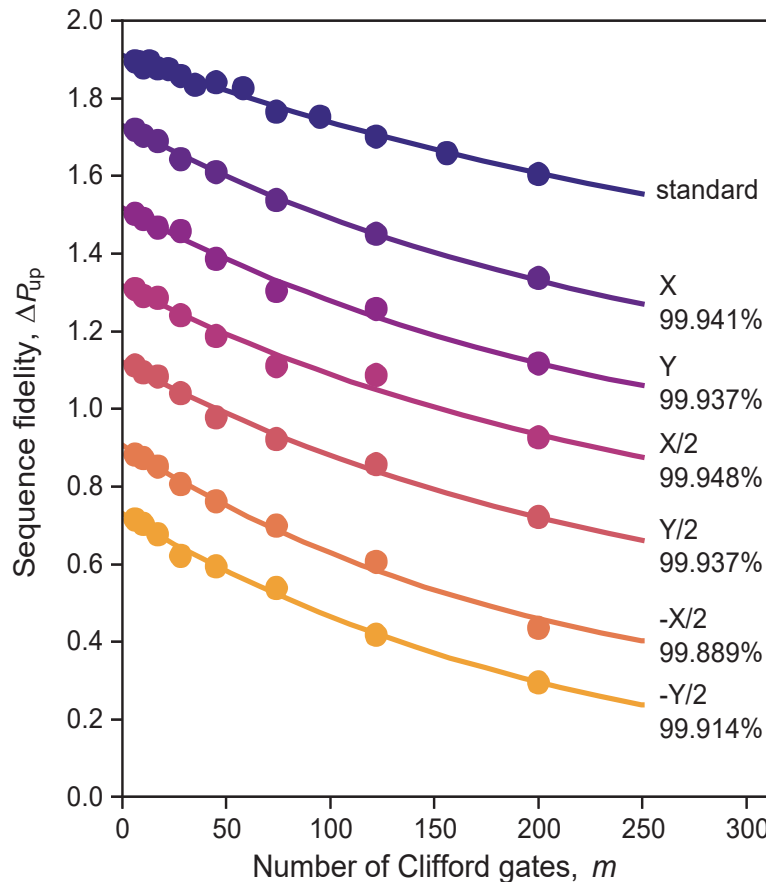
28Si/SiGe Rabi oscillation



$T_2^* = 20 \mu\text{sec}$



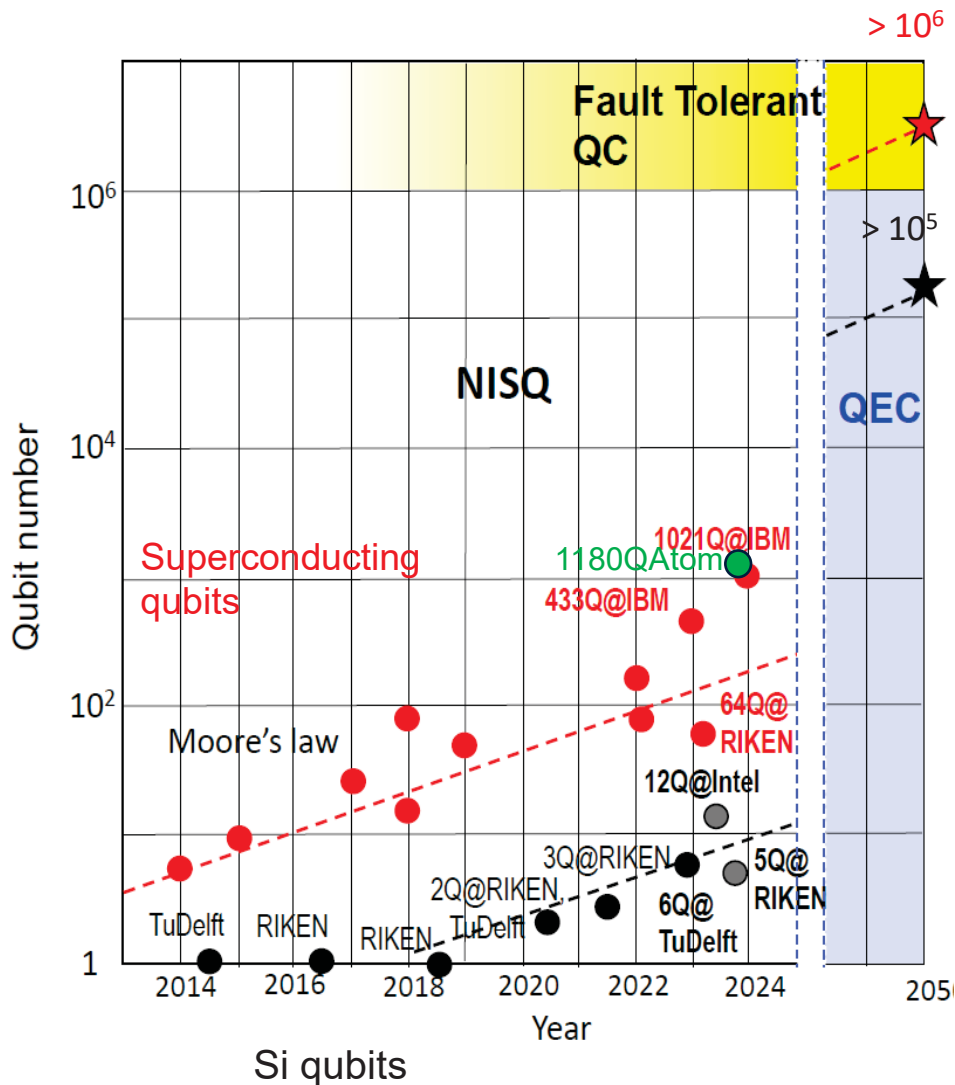
Average fidelity 99.93 %



$$C = \{I, \pm X, \pm Y, \pm \frac{X}{2}, \pm \frac{Y}{2}\}$$

年ごとに増加する量子ビットの規模拡大

Si qubit development following that of super-conducting qubit development approx. 6 to 8 years behind. Both seem to follow the Moore's law. It may take about 20 years to the goal.

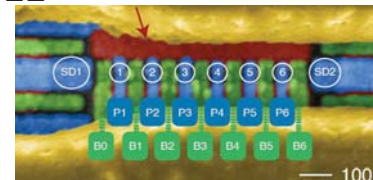


2021



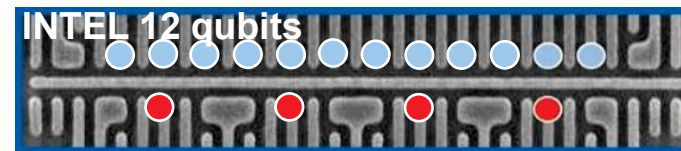
T. Kenta et al.
Nat. Nanotechnol.
2021

2022



S.G.J. Philips et al.
Nature 2022

2023



S. Neyens et al.
Nature 2024

今後の課題

誤り耐性量子コンピュータ (FTQC) へ向けて

高忠実度 > 99.999 %

誤り訂正 論理量子ビットの誤り率低減
(> Break even point)

大規模化 > 10^6
(論理量子ビット > 1000)

技術課題

低温環境、配線技術、低温電子回路、...