

*Challenges and opportunities of
quantum computing*

Motoya Shinozaki

- Introduction

- History of quantum computer
- Quantum supremacy

- Quantum computing

- Principles
- Grover's algorithm

- Principles of quantum bits

- Nitrogen-Vacancy center in diamond
- Silicon quantum dots
- Superconducting quantum bits

- Introduction

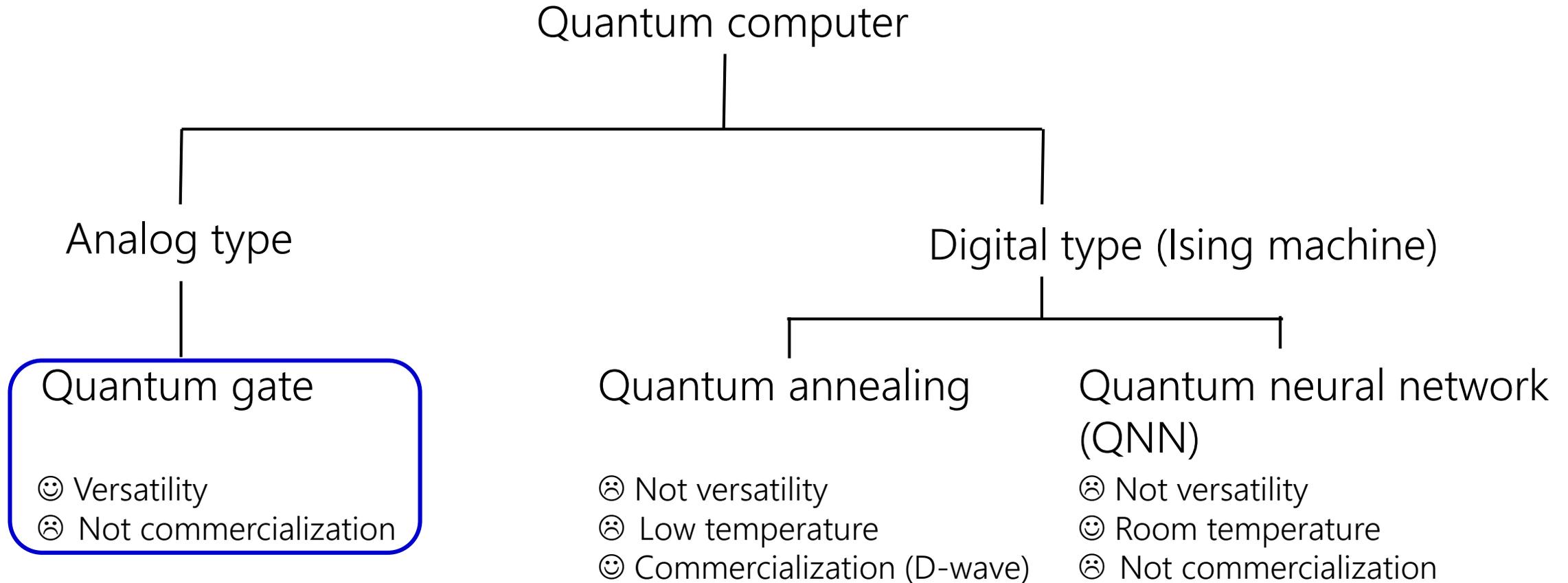
- History of quantum computer
- Scaling of quantum computer

- Quantum computing

- Principles
- Grover's algorithm

- Principles of quantum bits

- Nitrogen-Vacancy center in diamond
- Silicon quantum dots
- Superconducting quantum bits



	Quantum gate	Quantum annealing	QNN
<i>Principle</i>	Unitary rotation of state vector	Adiabatic process of Hamiltonian	Quantum phase transition
<i># of bits</i>	72 bit (Google)	2000 bit (D-wave)	2048 bit (NTT)
<i>Applications</i>	Factorization, Quantum simulation	AI, Factorization	AI

Year	Event	Quantum bit	Algorithm
1980	<p>Benioff (1980) The first quantum mechanical model of a computer.</p> <p>Feynman (1981) Proposed a basic model for a quantum computer</p> <p>Wotters, Wojciech, and Dieks (1982) No-cloning theorem</p>		
1990		<p>Cirac (1995) Proposed an experimental realization of the controlled-NOT gate</p> <p>Cory, Fahmy, and Havel (1996) First report realizing gates for quantum computers based on NMR</p> <p>Kitaev (1997) The principles of topological quantum computation</p>	<p>Deutsch-Jozsa algorithm (1992)</p> <p>Shor's algorithm (1994)</p> <p>Steane (1996) Quantum Error Correction</p> <p>Grover (1996) Database search algorithm</p>
2000	<p>Kadowaki and Nishimori (1998) Quantum annealing in the transverse Ising model</p>	<p>Loss (1998) Quantum computation with quantum dots</p> <p>Kane (1998) Proposed a silicon based nuclear spin quantum computer</p> <p>Nakamura (1998) Invented superconducting qubit</p>	<p>Jones, Chuang (1998) Experimental demonstration of Grover's algorithm by NMR</p> <p>Chung (1998) Experimental demonstration of D-S algorithm by NMR</p> <p>Vandersypen (2001) demonstrated Shor's algorithm to factor 15 using a 7-qubit NMR computer.</p>

In 1998, many new phenomena and algorithms were demonstrated

Phenomena:

quantum teleportation¹

quantum error correction²⁻⁴

“Schrödinger Cat” states⁵

Quantum bit size:

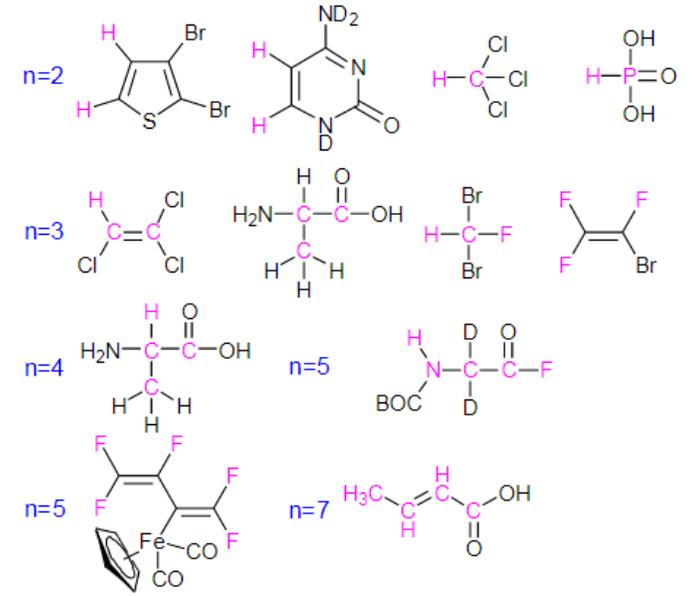
NMR quantum computers have also grown in size, with three⁶, five⁷ and seven⁵ qubits

Algorithms:

Deutsch–Jozsa algorithm^{6,7}

Quantum counting⁸ (an extension of Grover’s quantum search)

Simple example of order finding⁹



1. M. A. Nielsen *et al.*, *Nature* **396**, 52 (1998).
2. D. G. Cory *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2152 (1998).
3. D. Leung *et al.*, *Phys. Rev. A* **60**, 1924 (1999).
4. E. Knill *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5811 (2001).
5. E. Knill *et al.*, *Nature* **404**, 368 (2000)

6. N. Linden *et al.*, *Chem. Phys. Lett.* **296**, 61 (1998).
7. R. Marx *et al.*, *Phys. Rev. A* **62**, 012310 (2000).
8. J. A. Jones *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1050 (1999).
9. L. M. K. Vandersypen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 5452 (2000).

Event:

* Citations

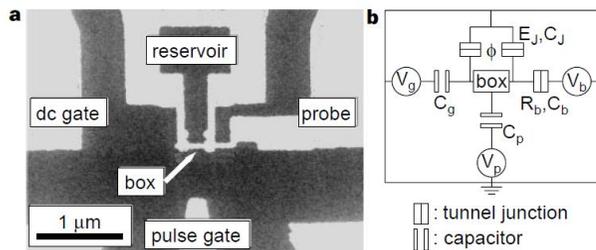
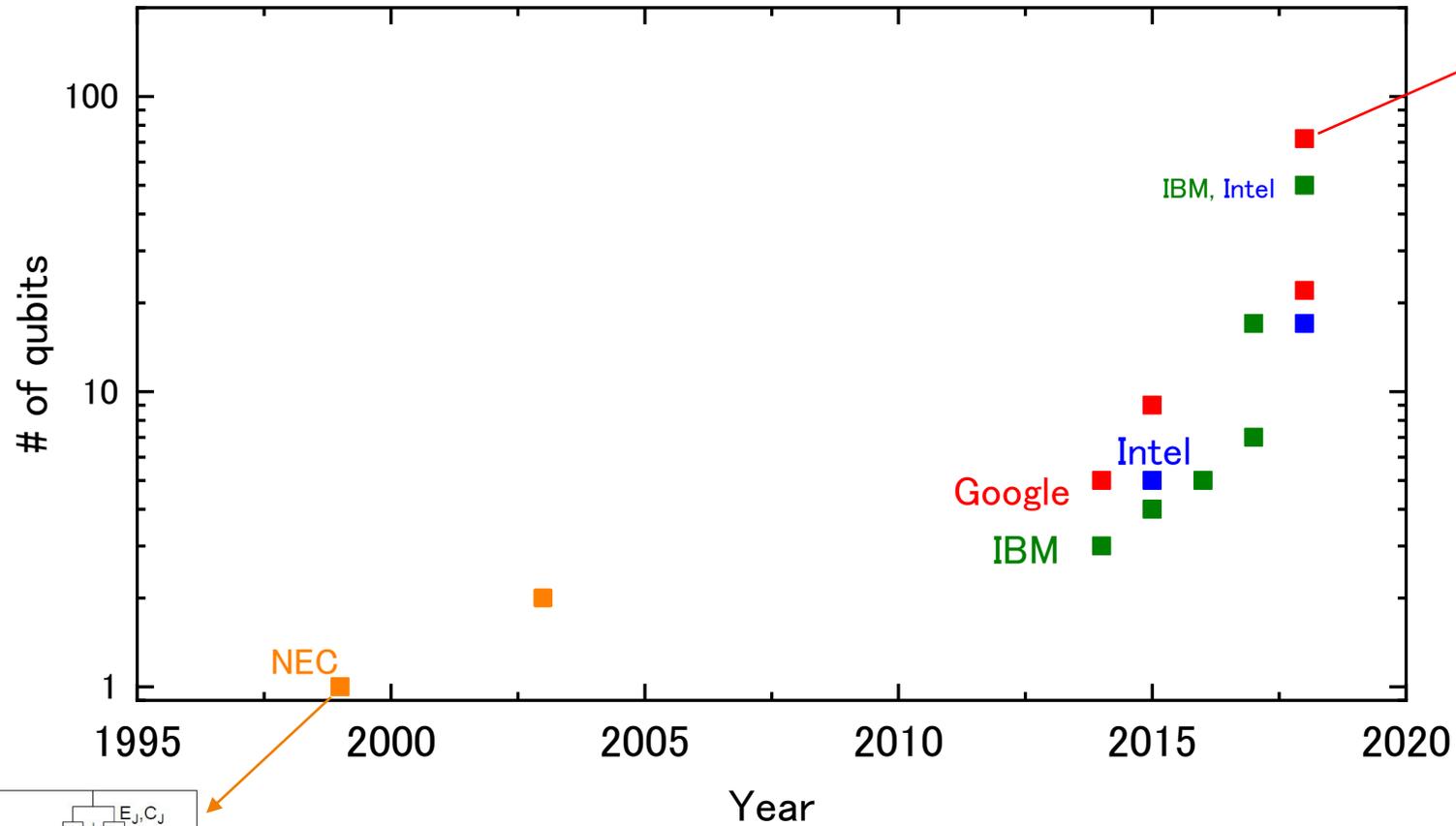
- P. Benioff, *Journal of Statistical Physics* **22** 563 (1980). *934
- R. Feynman, *International Journal of Theoretical Physics* **21** 467 (1982). *7379
- W. K. Wootters and W. H. Zurek, *Nature* **299** 802 (1982). *5034
- D. Dieks, *Physics Letters A* **92** 271 (1982). *1385
- T. Kadowaki and H. Nishimori, *Phys. Rev. E* **58** 5355 (1998). *891

Algorithm:

- D. Detsch and R. Jozsa, *Proc. of the Royal Society A* **439** 1907 (1992). *2634
- P. W. Shor, *Proc. 35th Annual Symp. on Foundations of Computer Sci.* 124 (1994). *5831
- A. Steane, *Proc. of The Royal Society A Mathematical Phys. and Eng. Sci.* **452** 1954 (1996). *1421
- L. K. Grover, *Proc. of the 28th annual ACM symposium on Theory of Computing* 212 (1996) *5027
- I. L. Chuang *et al.*, *Phys. Rev. B* **80** 3408 (1998). *874
- J. A. Jones *et al.*, *Nature* **393** 344 (1998). *665
- I. L. Chuang *et al.*, *Nature* **393** 143 (1998). *830

Quantum bit:

- J. I. Cirac and P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **74** 4091 (1995). *4473
- A. Y. Kitaev, *Annals of Physics* **303** 2 (2003) *4531
- B. E. Kane, *Nature* **393** 113 (1998). *4392



Big news! (2019/10/23)
Article

F. Arute *et al.*, Nature 574, 505 (2019).
<https://arxiv.org/abs/1910.11333>

Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Received: 22 July 2019

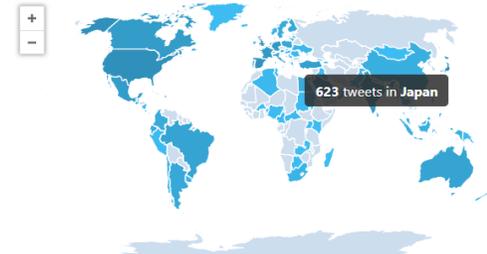
Accepted: 20 September 2019

Published online: 23 October 2019

Frank Arute¹, Kunal Arya¹, Ryan Babbush¹, Dave Bacon¹, Joseph C. Bardin^{1,2}, Rami Barends¹, Rupak Biswas³, Sergio Boixo¹, Fernando G. S. L. Brandao^{1,4}, David A. Buell¹, Brian Burkett¹, Yu Chen¹, Zijun Chen¹, Ben Chiaro⁵, Roberto Collins¹, William Courtney¹, Andrew Dunsworth¹, Edward Farhi¹, Brooks Foxen^{1,5}, Austin Fowler¹, Craig Gidney¹, Marissa Giustina¹, Rob Graff¹, Keith Guerin¹, Steve Habegger¹, Matthew P. Harrigan¹, Michael J. Hartmann^{1,6}, Alan Ho¹, Markus Hoffmann¹, Trent Huang¹, Travis S. Humble⁷, Sergei V. Isakov¹, Evan Jeffrey¹, Zhang Jiang¹, Dvir Kafri¹, Kostyantyn Kechedzhi¹, Julian Kelly¹, Paul V. Klimov¹, Sergey Knysch¹, Alexander Korotkov^{1,8}, Fedor Kostritsa¹, David Landhuis¹, Mike Lindmark¹, Erik Lucero¹, Dmitry Lyakh⁹, Salvatore Mandrà^{3,10}, Jarrod R. McClean¹, Matthew McEwen⁹, Anthony Megrant¹, Xiao Mi¹, Kristel Michielsen^{1,11}, Masoud Mohseni¹, Josh Mutus¹, Ofer Naaman¹, Matthew Neeley¹, Charles Neill¹, Murphy Yuezhen Niu¹, Eric Ostby¹, Andre Petukhov¹, John C. Platt¹, Chris Quintana¹, Eleanor G. Rieffel³, Pedram Roushan¹, Nicholas C. Rubin¹, Daniel Sank¹, Kevin J. Satzinger¹, Vadim Smelyanskiy¹, Kevin J. Sung^{1,12}, Matthew D. Trevithick¹, Amit Vainsencher¹, Benjamin Villalonga^{1,14}, Theodore White¹, Z. Jamie Yao¹, Ping Yeh¹, Adam Zalcman¹, Hartmut Neven¹ & John M. Martinis^{1,5*}

Twitterの反応

Twitter demographics



Country	Tweets	% of Tweets
Japan	623	10.76%
United States	460	7.94%
United Kingdom	125	2.16%
Spain	117	2.02%
Saudi Arabia	110	1.90%

Google検索結果 (in Japanese)

Google 量子超越性

約 7,910,000 件 (0.25 秒)

トップニュース

Google vs. IBM, 「量子超越性」で大混戦? 何が起きているのか: 536th Lap
キーマンズネット · 2日前

「量子超越」で社会変革も、Google成果 専門家に聞く
日本経済新聞 · 2日前

→ 「量子超越性」のその他のニュース

グーグルの「量子超越性」は革命の始まりにすぎない - CNET Japan
<https://japan.cnet.com> > ニュース > 解説

グーグルが主張する「量子超越性の実証」に、IBMが公然と反論...
<https://wired.jp> > 2019/10/24 > ibm-googles-quantum-leap-quantum-flop

Google、量子コンピューターの「量子超越性」を実証と発表...
<https://japanese.engadget.com> > 2019/10/24 > google

量子超越性実証で世界騒然のGoogle量子ラボに行ってきた...
<https://www.gizmodo.jp> > 2019/10 > first-look-at-sycamore-googles-quantum

量子超越性：ある問題の計算実行速度が量子コンピュータ>>古典コンピュータ
→ Sampling random quantum circuits (実用性は特になし)

量子コンピュータの計算結果をどう検証するのか
シミュレーションに必要なメモリ容量：
10 qubits . . . 1~2GB (我々のPCでもOK)
53 qubits . . . ~10PB
Google supercomputer "Jülich" : 250 TB << 10PB
→ 検証方法の改良

今, 量子コンピュータが熱い!!

Googleの検証方法

1 検証したいアルゴリズムと, 一部の計算を簡略化した簡略アルゴリズムを用意

Hybrid Schrödinger-Feynman algorithm

Quantum algorithm

Simplified algorithm

2 **少ないqubit数**で両アルゴリズムを量子コンピュータで実行
両アルゴリズムを古典コンピュータで計算し, 差がないことを確認

Quantum algorithm



Simplified algorithm

3 **簡略したアルゴリズムのみ**スーパーコンピュータで計算可能なくらい
qubit数を増やす(53 qubits)
その結果からスパコン使った際の**検証アルゴリズム**の計算時間を試算

Quantum algorithm

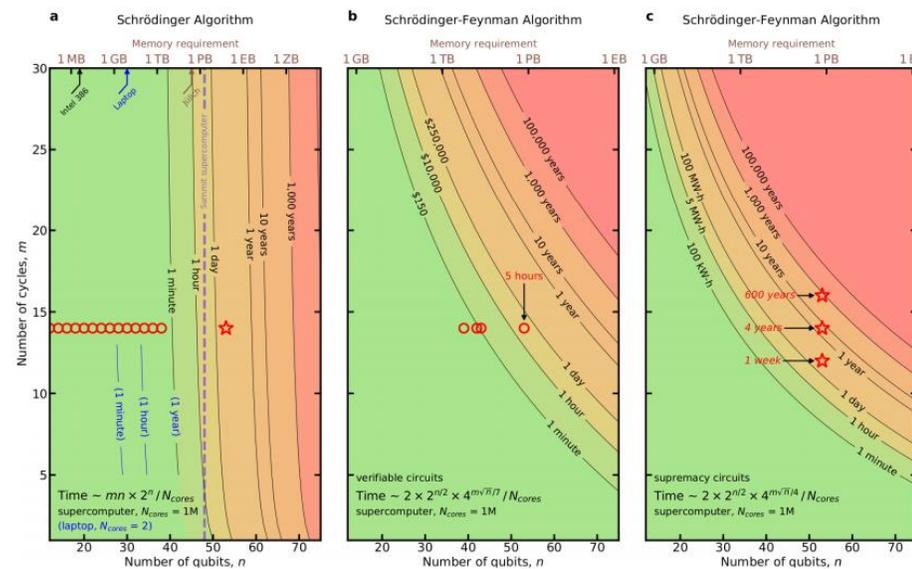
Simplified algorithm

m : 繰り返し回数

10000 years... (試算時間 $m=20$)

5 hours! (実行時間 $m=14$)

4 量子コンピュータによる検証アルゴリズムの実行時間 (200 sec) << スパコンの試算時間なら量子超越性実証

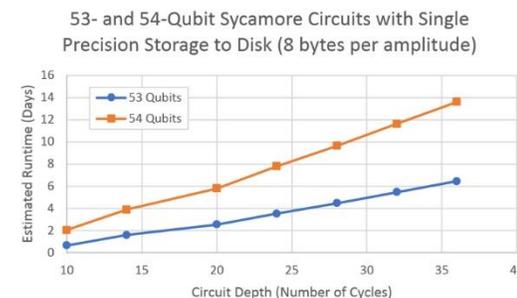


<https://arxiv.org/abs/1910.11333>



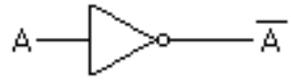
IBM

10000年もかからない、2.5日で計算できる
from IBM Research Blog (<https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/>)

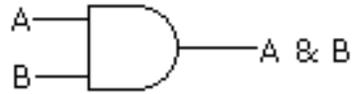


- Introduction
 - History of quantum computer
 - Quantum supremacy
- Quantum computing
 - Principles
 - Grover's algorithm
- Principles of quantum bits
 - Nitrogen-Vacancy center in diamond
 - Silicon quantum dots
 - Superconducting quantum bits

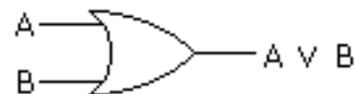
Classical logic gates



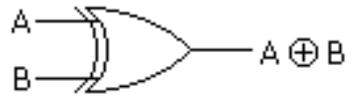
A	NOT A
0	1
1	0



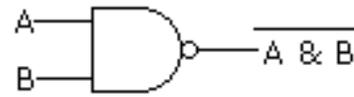
A	B	A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



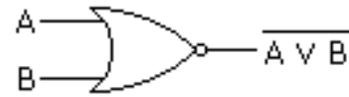
A	B	A OR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



A	B	A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

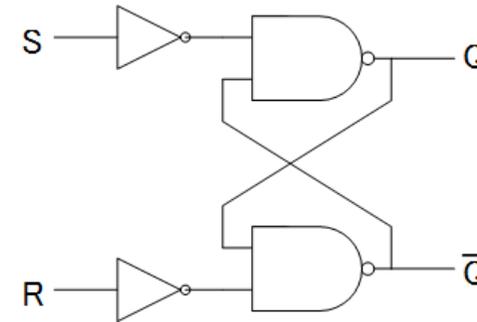


A	B	A NAND B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



A	B	A NOR B
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

RS Flip-Flop

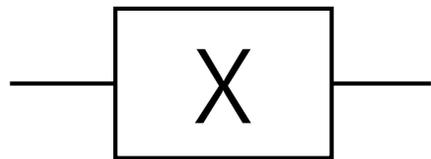


S	R	Q_n
0	0	Q_{n-1}
0	1	0
1	0	1
1	1	Indefinite

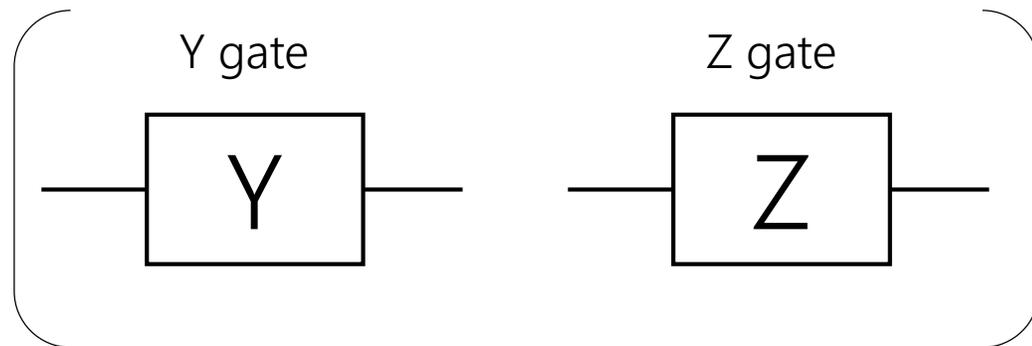
⇒ SRAM

Quantum gates

X gate (NOT gate)



In	Out
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$



Hadamard gate (アダマールゲート)



In	Out
$ 0\rangle$	$(0\rangle + 1\rangle)/\sqrt{2}$
$ 1\rangle$	$(0\rangle - 1\rangle)/\sqrt{2}$

0と1を重ね合わさった状態を作る

Inputの波動関数 $|\psi\rangle$ をどう表示するか？

Bloch sphere

Quantum bit : Superposition of 0 and 1

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \text{ then } |a|^2 + |b|^2 = 1$$

ここで a, b は複素数なので実数 A, B, θ_a, θ_b を用いて量子ビット $|\psi\rangle$ を表示すると

$$|\psi\rangle = Ae^{i\theta_a}|0\rangle + Be^{i\theta_b}|1\rangle \text{ then } |A|^2 + |B|^2 = 1$$

$|A|^2 + |B|^2 = 1$ より $A = \cos \theta, B = \sin \theta$ とおいて $|\psi\rangle$ を整理すると

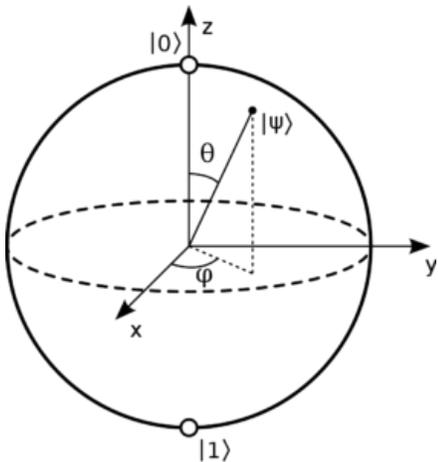
$$|\psi\rangle = e^{i\theta_a} \cos \theta |0\rangle + e^{i\theta_b} \sin \theta |1\rangle = e^{i\theta_a} (\cos \theta |0\rangle + e^{i(\theta_b - \theta_a)} \sin \theta |1\rangle) \equiv e^{i\theta_a} (\cos \theta |0\rangle + e^{i\phi} \sin \theta |1\rangle)$$

$|\psi\rangle = e^{i\theta_a} (\cos \theta |0\rangle + e^{i\phi} \sin \theta |1\rangle)$ は下図の球のように考えられる(?)

球面の各点が $|\psi\rangle$ の状態に対応すると考えると、定義域をそれぞれ $0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$ として

$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$ と書ける！ (グローバル位相 $e^{i\theta_a}$ は測定に影響しないので無視)

これをブロッホ球と呼び、量子ビットの幾何学的表現



* (?) θ, ϕ の各状態を異なる物理状態に 1:1 対応させたい

$\theta = 0, \pi$ のとき $|\psi\rangle = e^{i\theta_a} |0\rangle, e^{i(\theta_a + \pi)} |0\rangle$ となり、位相が違うだけで同じ物理量を示す

定義域を $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ としても、 $\theta = \pi/2$ で赤道上で位相が違うだけの同じ物理上を示す

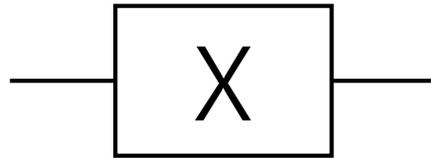
$\theta \Rightarrow \theta/2$ とすることで解決！

Quantum bit : Superposition of 0 and 1

$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ then $|a|^2 + |b|^2 = 1$

ここで $|0\rangle$ と $|1\rangle$ は直交するベクトル $\Rightarrow |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

X gate (NOT gate)



In	Out
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$

量子ゲートを通る際、波動関数に左からゲート行列を作用

\Rightarrow

$$X|0\rangle = X \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle$$

$$X|1\rangle = X \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle$$

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

何だか見覚えのある行列

Hadamard gate (アダマールゲート)



In	Out
$ 0\rangle$	$(0\rangle + 1\rangle)/\sqrt{2}$
$ 1\rangle$	$(0\rangle - 1\rangle)/\sqrt{2}$

\Rightarrow

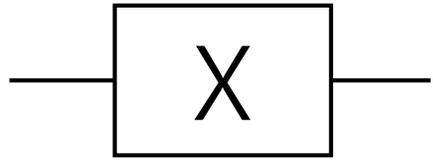
$$H|0\rangle = H \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$H|1\rangle = H \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

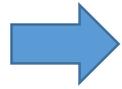
0と1を重ね合わさった状態を作る

量子ビットの状態 $|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + e^{i\phi} \sin\frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$



Xゲートの操作をブロッホ球で眺めると・・・

In	Out
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$
$ \psi\rangle$?

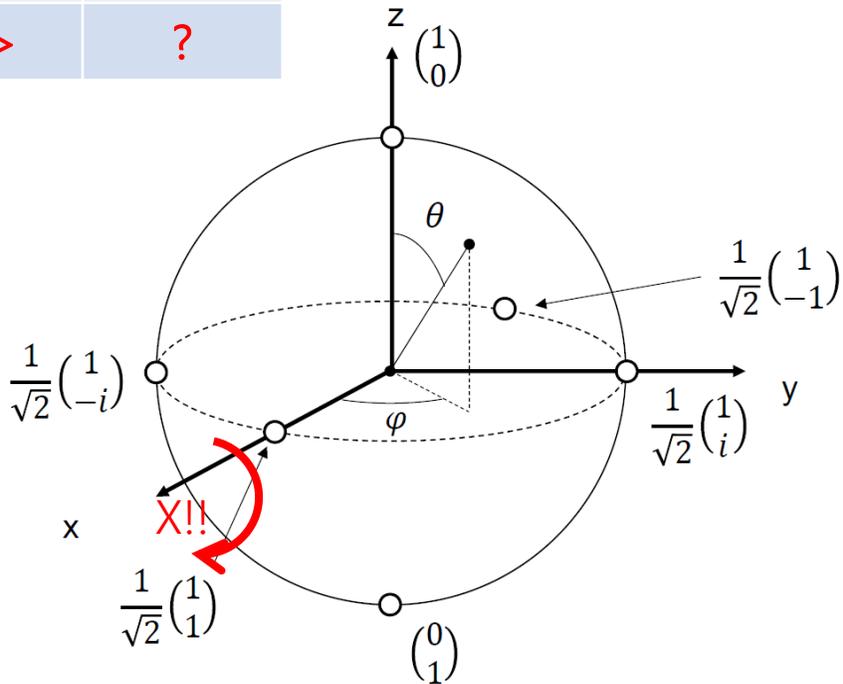


$$X|0\rangle = X \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle$$

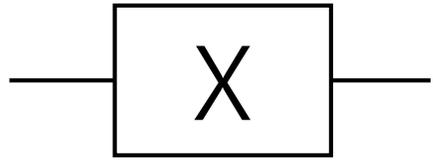
$$X|1\rangle = X \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle$$

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

何だか見覚えのある行列

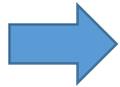


量子ビットの状態 $|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + e^{i\phi} \sin\frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$



Xゲートの操作をブロッホ球で眺めると・・・

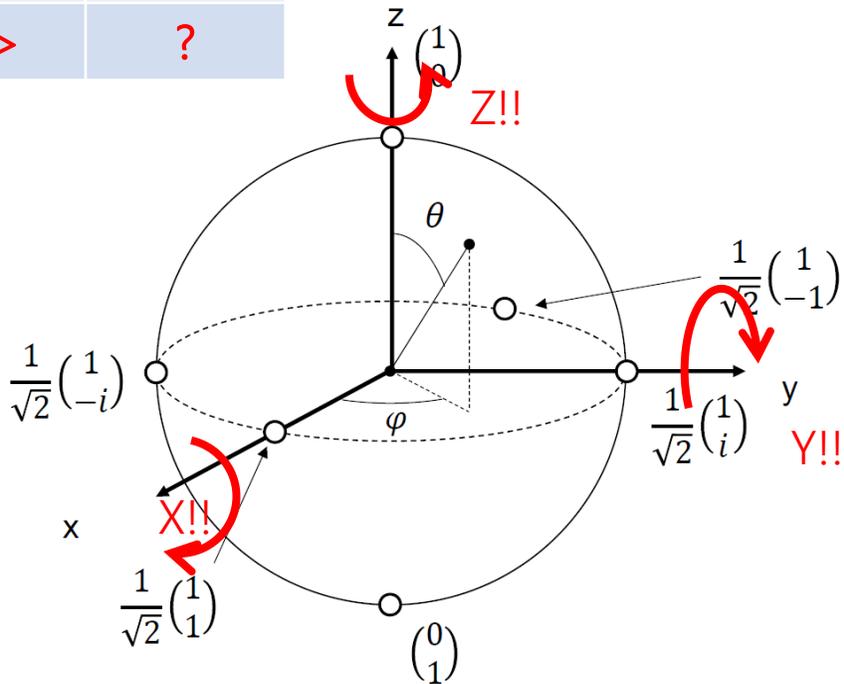
In	Out
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$
$ \psi\rangle$?



$$\begin{aligned} X|0\rangle &= X \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle \\ X|1\rangle &= X \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle \end{aligned}$$

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

パウリ行列！



$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

0,1を反転させるのでNOT

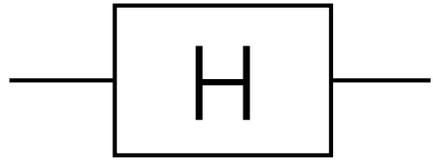


$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

0,1の重みは変わらず
位相のみ変化

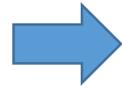
Pauli gates, π gates

量子ビットの状態 $|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + e^{i\phi} \sin\frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$



Xゲートの操作をブロッホ球で眺めると・・・

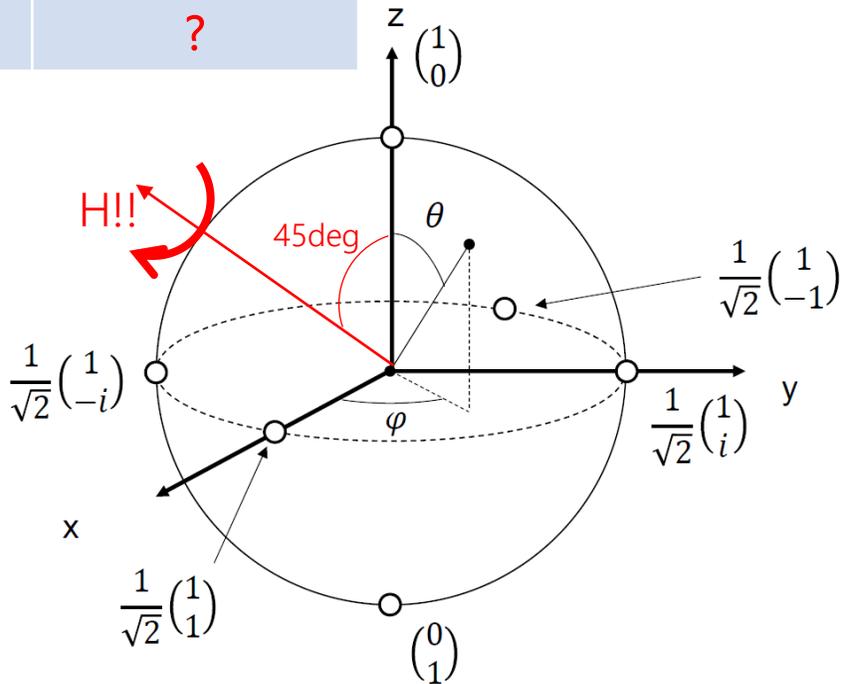
In	Out
$ 0\rangle$	$(0\rangle + 1\rangle)/\sqrt{2}$
$ 1\rangle$	$(0\rangle - 1\rangle)/\sqrt{2}$
$ \psi\rangle$?



$$H|0\rangle = H \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

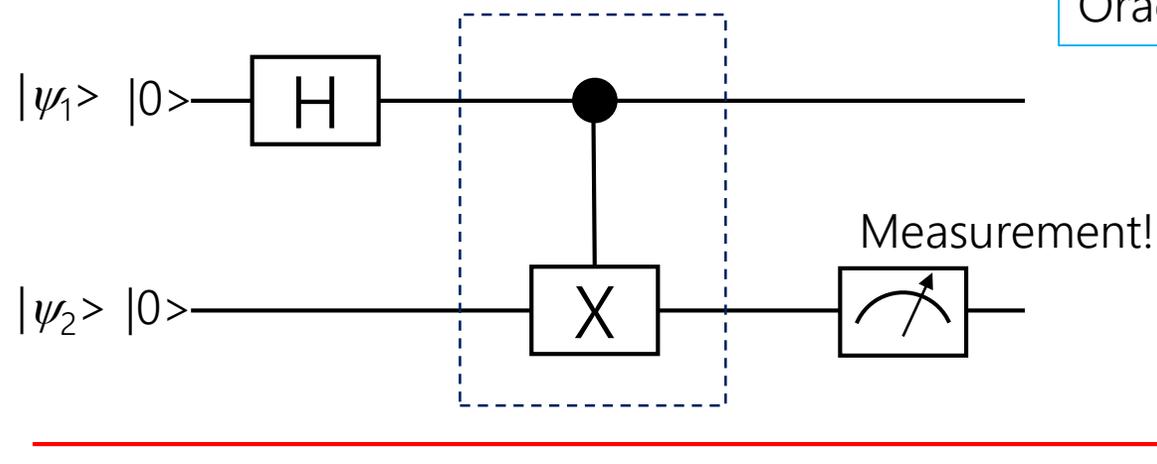
$$H|1\rangle = H \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$



量子ゲートは、量子ビットをブロッホ球上で回転させる

Generating the entanglement state

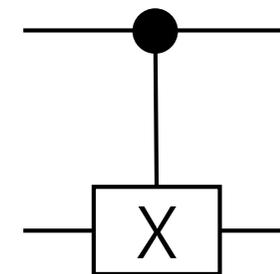


Note:

Oracle (オラクル): どんな量子ゲートも実行可能な神託マシン



Controlled NOT (CNOT)ゲート



$ \psi_1\rangle / 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$	if $ \psi_1\rangle = 0\rangle,$ $ \psi_2\rangle = 0\rangle$
$ \psi_2\rangle / 0\rangle$	$ 0\rangle$	if $ \psi_2\rangle = 1\rangle,$ $ \psi_2\rangle = 1\rangle$

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \text{ Bell state}$$

片方測定して0(or1)ならもう片方も0(or1): 量子もつれ

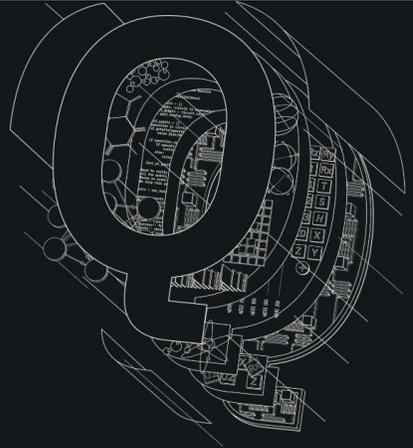
●は|1>なら繋がっているゲートを作用

Bell stateのように、2つのq-bitが独立して記述できない状態： $|00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |01\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |10\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
 新たに直交する基底で表現

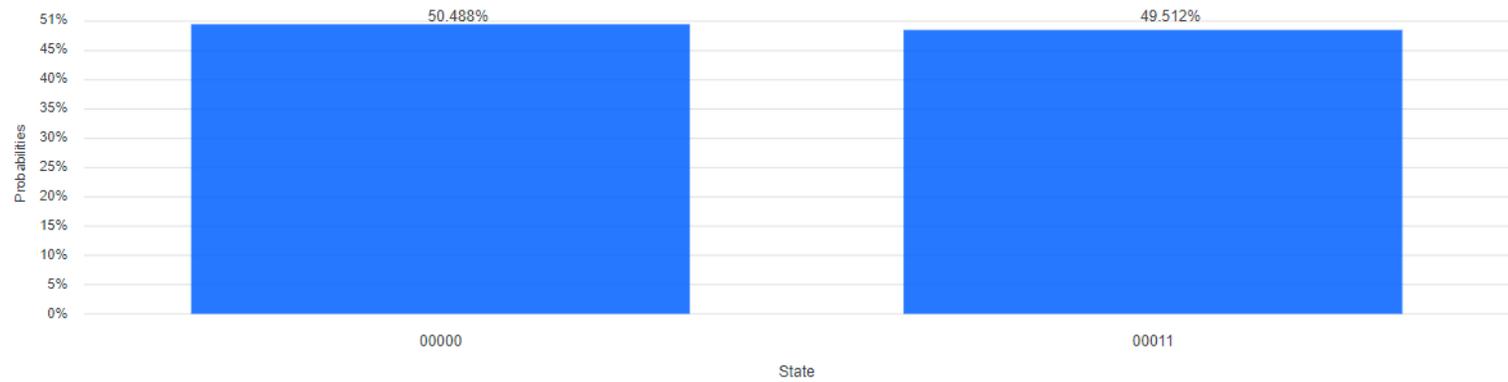
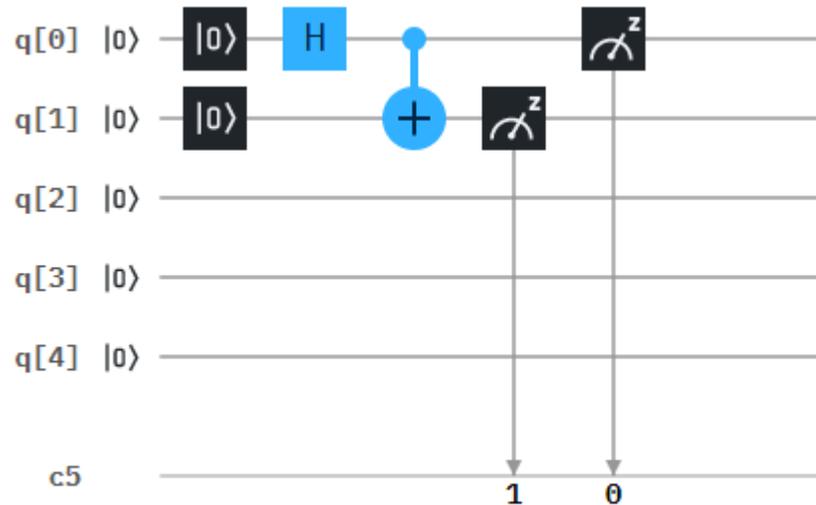
IBM Q Experience is quantum on the cloud

Accelerate your research and applications with the next generation of the leading quantum cloud services and software platform.

[Try it out now](#)



クラウド上でIBMの量子コンピュータで計算できる



古典的な探索アルゴリズム：線形探索

ソートされていない配列に対して、順番に見つけていく



10	5	24	27	9	1	3	13	18	11
----	---	----	----	---	---	---	----	----	----

要素1から順に見つける

計算量は $O(N)$, (N :要素数)

グローバーのアルゴリズム：振幅増幅手法

探している要素の振幅をマーキングして振幅増幅反転させる

$ 00\rangle$	$ 01\rangle$	$ 10\rangle$	$ 11\rangle$
--------------	--------------	--------------	--------------

Target!

N 個の要素配列($\log_2 N$ 量子ビットで表現)

振幅増幅反転 (Amplitude amplification)

$ 00\rangle$	$ 01\rangle$	$ 10\rangle$	$ 11\rangle$
--------------	--------------	--------------	--------------

Targetの状態のみが浮かび上がってくる(確率が高くなる)

考え方：

$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_x |x\rangle$ に対して $|x_0\rangle$ を探したいのでブラベクトル $\langle x_0|$ を作用

$\langle x_0|\psi\rangle = \langle x_0|\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_x |x\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}}$ なので $\frac{1}{N}$ の確率で発見

この確率を大きくして確実に $|x_0\rangle$ を観測する

例：

$|\psi\rangle = \frac{1}{2} (|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)$ から $|10\rangle$ を探す

手順1：マーキング

$$|\psi_m\rangle = \frac{1}{2} (|00\rangle + |01\rangle - |10\rangle + |11\rangle)$$

手順2：振幅の平均値から各振幅を引いて、また平均値を加える(振幅増幅反転)

$$\text{振幅の平均値 } m = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right) / 4 = \frac{1}{4}$$

$$\begin{aligned} |\psi_m'\rangle &= \left(m - \frac{1}{2} + m\right) |00\rangle + \left(m - \frac{1}{2} + m\right) |01\rangle + \left(m + \frac{1}{2} + m\right) |10\rangle + \left(m - \frac{1}{2} + m\right) |11\rangle \\ &= |10\rangle \quad *1 \text{ の確率で } |10\rangle \text{ 観測} \end{aligned}$$

3q-bitだと . . .

$|\psi\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} (|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle + |101\rangle + |110\rangle + |111\rangle)$ から $|101\rangle$ を探す

$|\psi_m\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} (|000\rangle + |001\rangle + |010\rangle + |011\rangle + |100\rangle - |101\rangle + |110\rangle + |111\rangle)$

平均値 $m = \frac{3\sqrt{2}}{16}$ だから

$|\psi_m\rangle' = \left(m - \frac{1}{2\sqrt{2}} + m\right) |000\rangle + \dots + \left(m + \frac{1}{2\sqrt{2}} + m\right) |101\rangle + \left(m - \frac{1}{2\sqrt{2}} + m\right) |111\rangle$
 $= \frac{\sqrt{2}}{8} |000\rangle + \dots + \frac{5\sqrt{2}}{8} |101\rangle + \frac{\sqrt{2}}{8} |111\rangle$ *0.781の確率で $|101\rangle$ 観測

$|\psi_{m_2}\rangle = \frac{\sqrt{2}}{8} |000\rangle + \dots - \frac{5\sqrt{2}}{8} |101\rangle + \frac{\sqrt{2}}{8} |111\rangle$

$|\psi_{m_2}\rangle' = -\frac{\sqrt{2}}{16} |000\rangle + \dots + \frac{11\sqrt{2}}{16} |101\rangle - \frac{\sqrt{2}}{16} |111\rangle$ *0.945の確率で $|101\rangle$ 観測

} 繰り返し部

繰り返し回数について

繰り返し回数 = $\frac{\pi}{4} \sqrt{N}$

成功確率 $\geq 1 - \frac{1}{N}$ で解ける！(繰り返しすぎると解から離れていく)

N=1024の場合

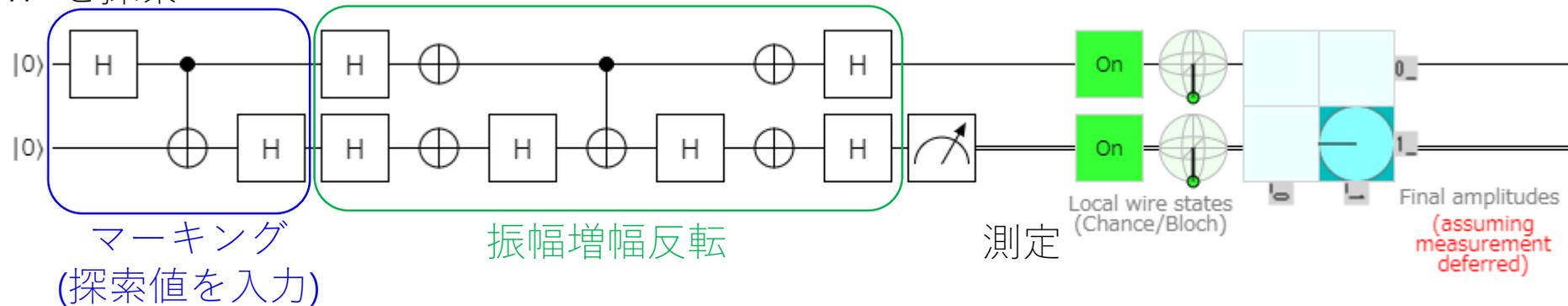
古典アルゴリズム(O(N)) : 最悪で1024回計算

グローバーのアルゴリズム(O(\sqrt{N})) : 25回で0.999以上の確率で探索可能

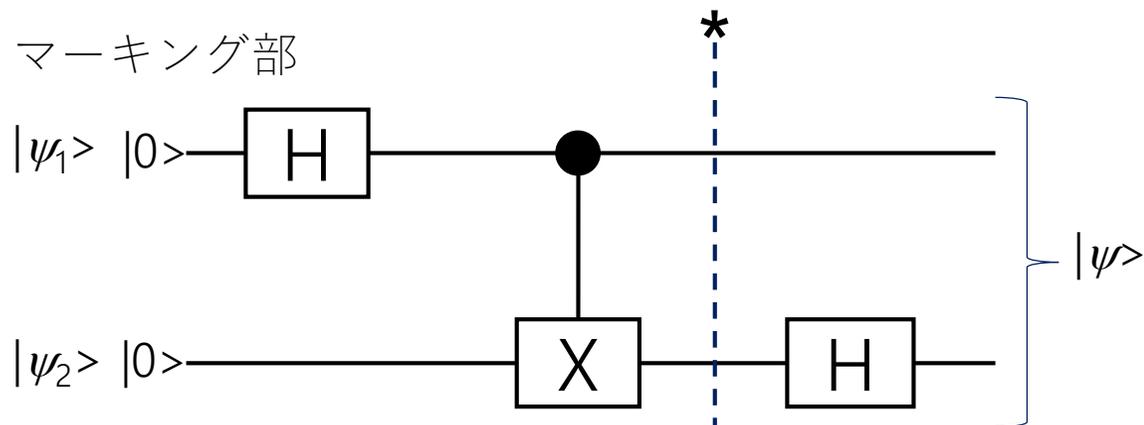
量子回路にグローバーのアルゴリズムを実装

$$\oplus = \boxed{X}$$

$|11\rangle$ を探索



マーキング部



Bell state $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$

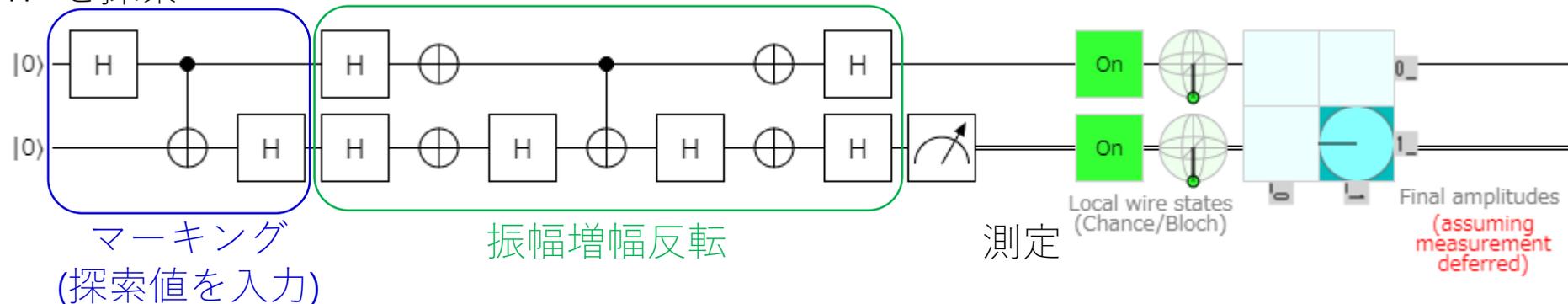
*の段階で $|\psi_1\rangle$ が $|0\rangle$ なら $|\psi_2\rangle$ も $|0\rangle$, $|1\rangle$ なら $|1\rangle$
 その後, $|\psi_2\rangle$ にアダマールゲートが作用するので
 $|\psi_1\rangle = |0\rangle$ なら $|\psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$,
 $|\psi_1\rangle = |1\rangle$ なら $|\psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$
 $\Rightarrow |\psi\rangle = \frac{1}{2}(|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle)$
 Marking!

基本ゲートのみで
 マーキングを実装可能!

量子回路にグローバーのアルゴリズムを実装

$$\oplus = \boxed{X}$$

$|11\rangle$ を探索



振幅増幅反転 = 拡散変換 $D = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$

$$D|\psi\rangle = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1+1+1-1 \\ 1-1+1-1 \\ 1+1-1-1 \\ 1+1+1+1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

マーキング部だけ残る!

Dをどう量子ゲートで表現するか

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} H & H \\ H & -H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & X \\ X & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & X \\ X & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} H & H \\ H & -H \end{pmatrix} = \frac{-1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} = -D$$

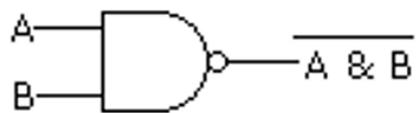
CNOT

基本ゲートのみで
Dを実装可能!

*存在確率は2乗だから
マイナスは無視

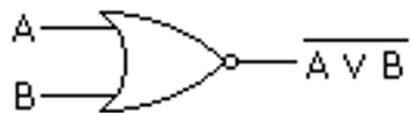
万能古典ゲート

NANDゲート



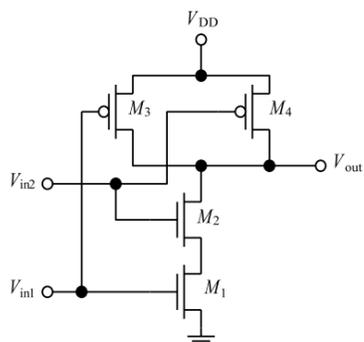
A	B	A NAND B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

NORゲート



A	B	A NOR B
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

NANDだけ、NORだけで全ての論理ゲートを表現可能



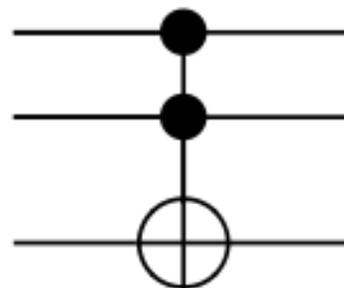
←NANDはCMOSで実装可能
面積が小さく早いので現在の主流

非可逆ゲート→損失あり

情報を失うとき損失を伴う $1\text{bit} = k_B T \log 2 \sim 3 \times 10^{-21} \text{ (J)}$

万能量子ゲート

トフォリ(Toffoli)ゲート
(CCNOTゲート)



C = 1で固定するとNAND

Input			Output		
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	0

トフォリゲートとアダマール(H)ゲートを組み合わせることで任意の古典ゲートを実装可能！(Turing完全)

可逆ゲート→損失ほぼなし

量子アルゴリズムを理解するには量子力学の知識より, 線形代数の知識のほうが大事
→オラクルで代用

量子アルゴリズムが古典アルゴリズムを上回るのは, 限られた問題のみ

ある問題の計算量 $\begin{cases} O(N^2), O(\sqrt{N}), O(\log N) : \text{多項式時間} \rightarrow \text{解ける} \\ O(2^N), O(3^N) : \text{指数時間} \rightarrow \text{解けない} \end{cases}$

古典アルゴリズムにとって指数時間問題でも, 量子アルゴリズムでは多項式時間問題になるような場合に有効

理論的には, 古典ゲートの置き換えも可能 → 夢のゲート式量子コンピュータは古典機の上位互換

- Introduction

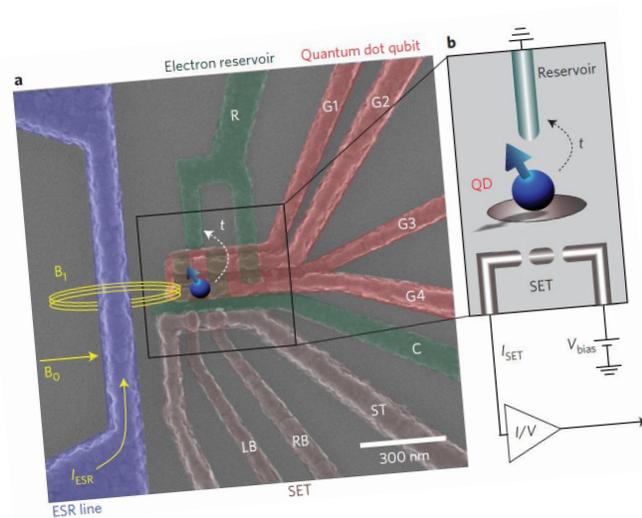
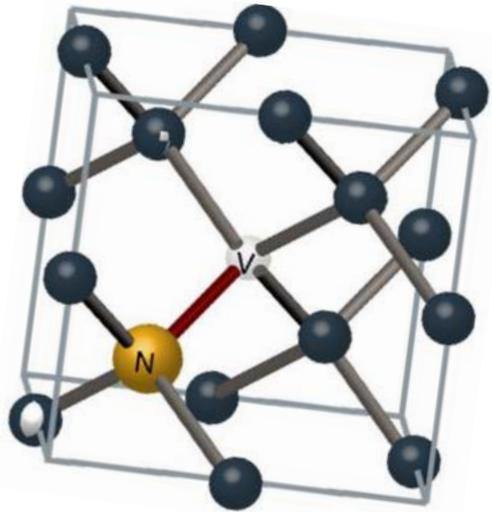
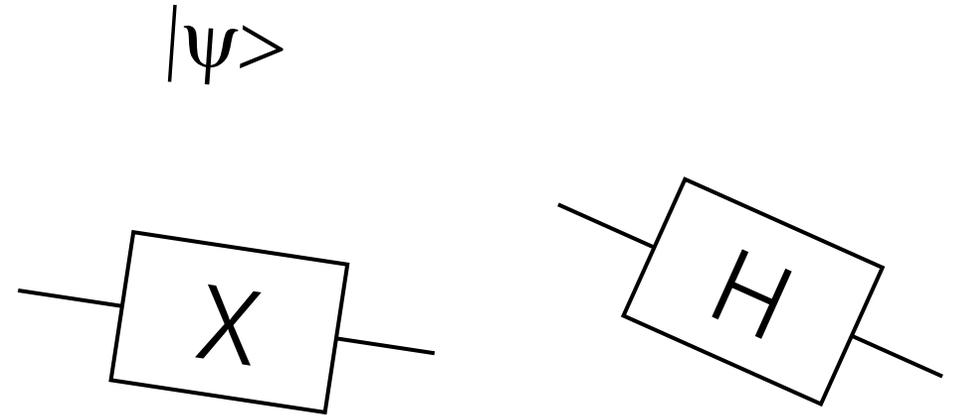
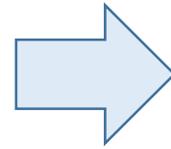
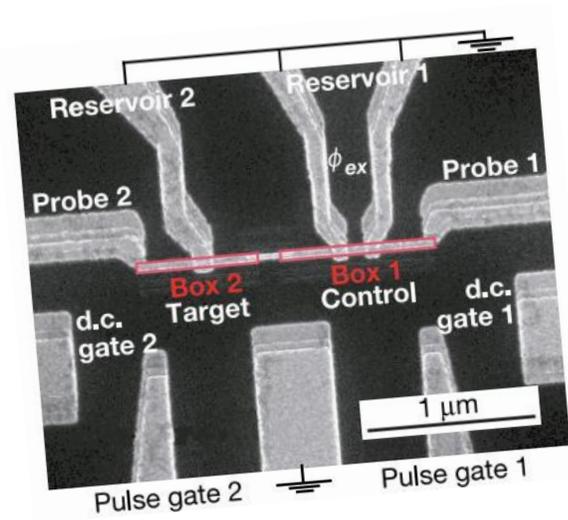
- History of quantum computer
- Quantum supremacy

- Quantum computing

- Principles
- Grover's algorithm

- Principles of quantum bits

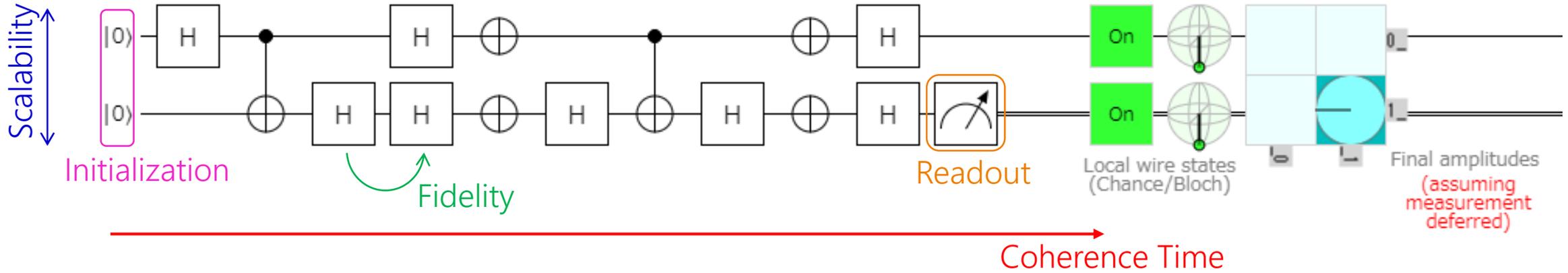
- Nitrogen-Vacancy center in diamond
- Silicon quantum dots
- Superconducting quantum bits



ソフトウェアについては何となくわかったけど
ハードウェアについて沢山の疑問...

- 量子ビットをどう実現するか？
 - 入出力信号は何？
 - ゲート操作はどのように行うのか？
 - もつれはどう作る？
- etc...

Grover's algorithm



Google Natureでは53 qubits, 1,113 single-qubit gates, 430 two-qubit gates

Criteria for qubit :

Initialization

- q-bitの初期化が可能

Readout

- q-bitの読み出しが可能

Coherence time

- 量子コヒーレンス時間が総ゲート操作時間より長い

Fidelity(忠実度)

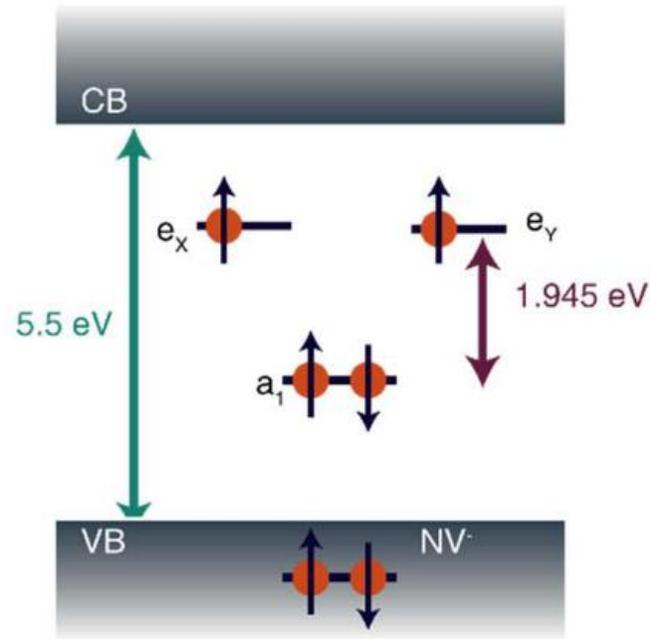
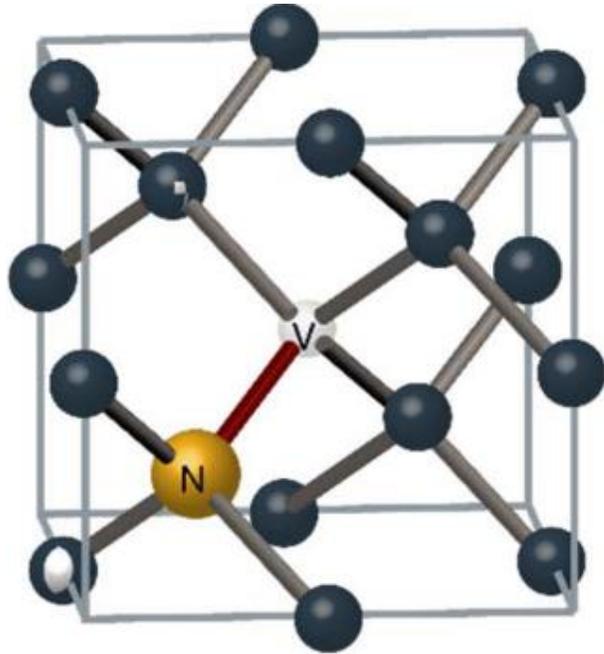
- 高い精度で量子ゲート操作が可能

Scalability

- q-bitの指数的增长に対し、物理的スペースや操作コストが指数的に増大しない

Nitrogen-Vacancy center in diamond

NV center (Nitrogen-Vacancy center in diamond)



Energy level :

Dangling bond of C and N

→ C_{3v} point group (e_x, e_y, a_1, a_1')

6 electrons :

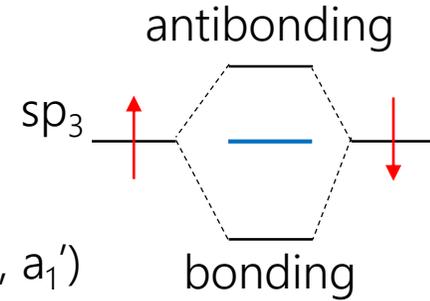
N : 2 unshared electrons (lone pair)

C : 3 electrons

+ 1 trapped electron

Triplet grand state :

$$m_s = \begin{cases} +1 \rightarrow |\uparrow\uparrow\rangle \\ -1 \rightarrow |\downarrow\downarrow\rangle \\ 0 \rightarrow (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2} \end{cases}$$

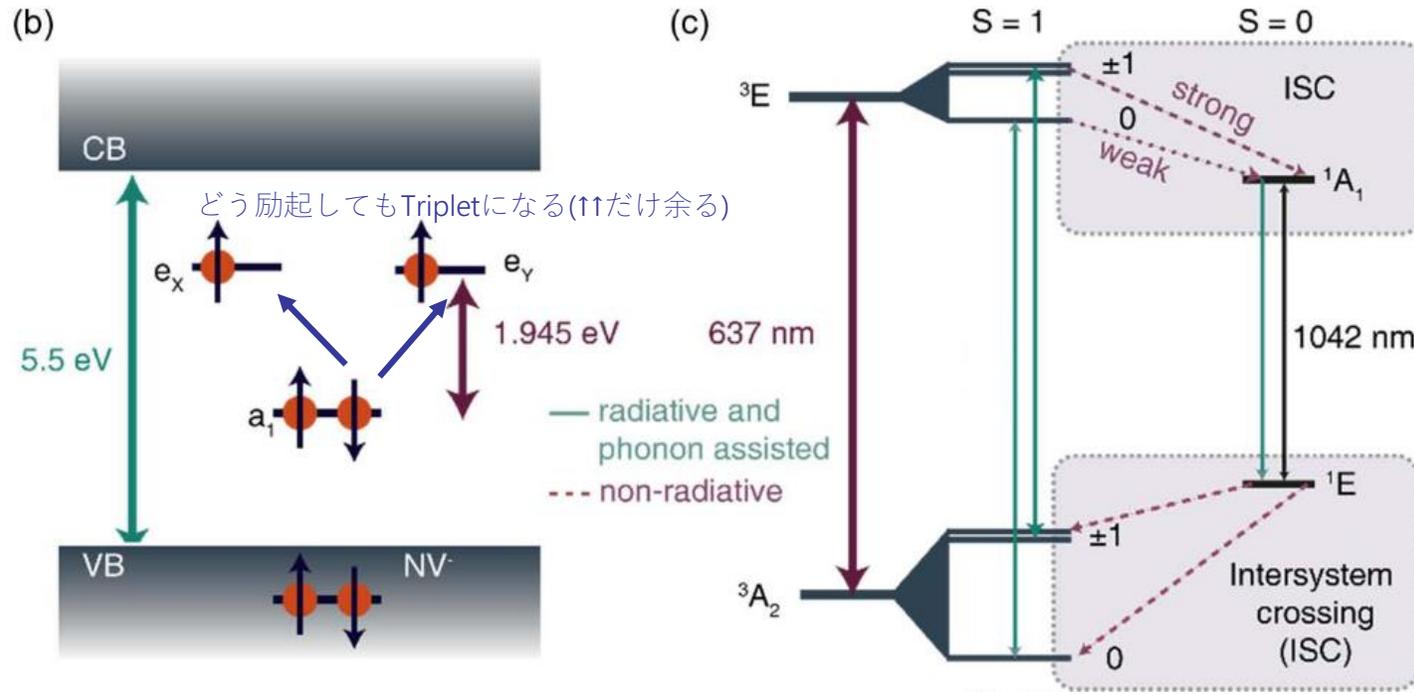


Applications :

Nanoscale sensors of magnetic, electric fields, and temperature

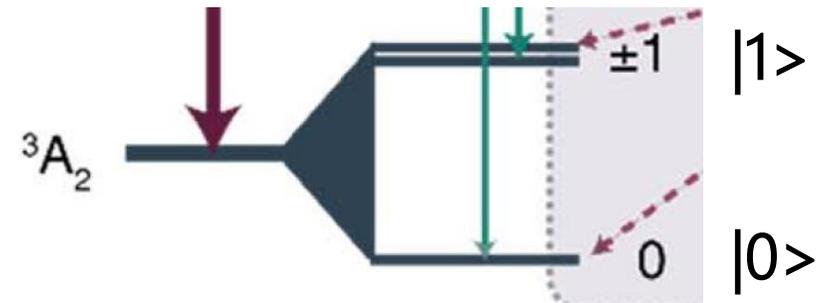
Quantum bit

Nuclear memories and registries

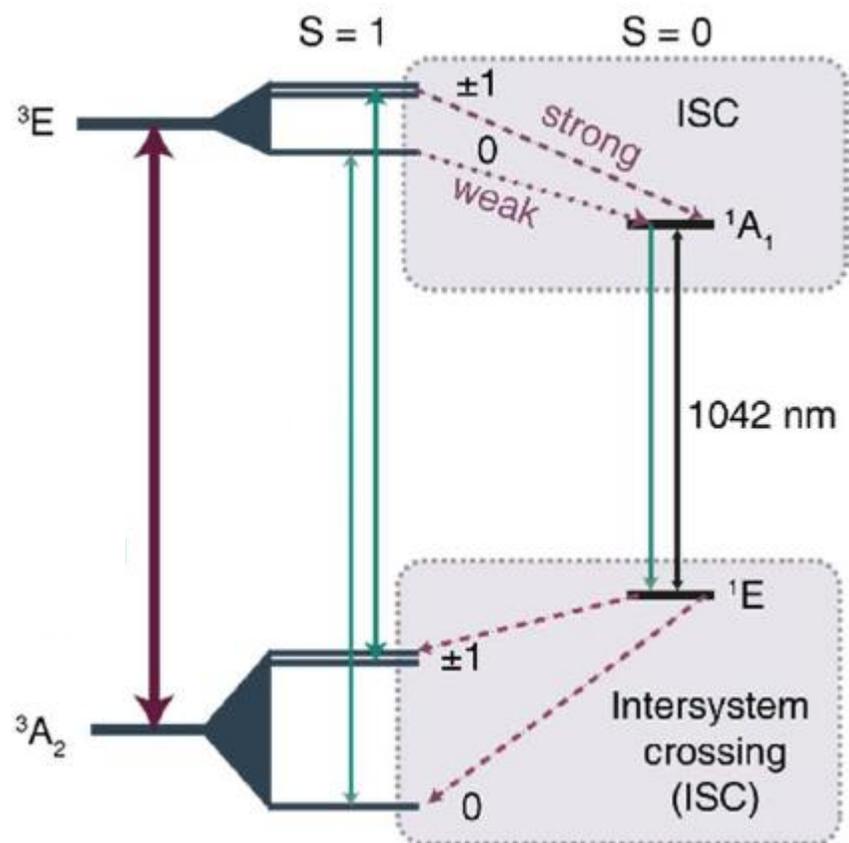


$m_S = \pm 1 \leftrightarrow 0$: crystal field splitting (D)
 $+1 \leftrightarrow -1$: Zeeman split

どこが $|0\rangle$ と $|1\rangle$?
 \rightarrow 基底状態の $m_S=0$ が $|0\rangle$, ± 1 が $|1\rangle$



F. J. Heremans *et al.*, Proceedings of the IEEE, **104**, 2009 (2016).



F. J. Heremans *et al.*, Proceedings of the IEEE, **104**, 2009 (2016).

初期化&読み出し方法：

$|0\rangle$ が最低エネルギーだから放置すれば勝手に $|0\rangle$ に落ちて初期化できる？

→ No!

$|0\rangle$ と $|1\rangle$ の分裂： $D \sim 2.87$ GHz (1.16×10^{-5} eV)

熱エネルギー： $k_B T \sim 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K

→ Same occupancy probability at $|0\rangle$ & $|1\rangle$

(Initial state : Boltzmann distribution)

Intersystem crossing (ISC) *項間相差

Optical cycle :

$m_S = 0$ excitation : **Photoluminescence**

$|0\rangle_{GS} \xrightarrow{\text{Excite}} |0\rangle_{ES} \xrightarrow{\text{PL}} |0\rangle_{GS}$

$m_S = \pm 1$ excitation : **non-radiative**

$|\pm 1\rangle_{GS (S=1)} \xrightarrow{\text{Excite}} |\pm 1\rangle_{ES (S=1)} \xrightarrow{\text{ISC}} |0\rangle_{ES (S=0)} \xrightarrow{\text{ISC}} |0\rangle_{GS (S=0)}$
 $|\pm 1\rangle_{GS (S=1)} \xrightarrow{\text{ISC}} |0\rangle_{GS (S=1)}$

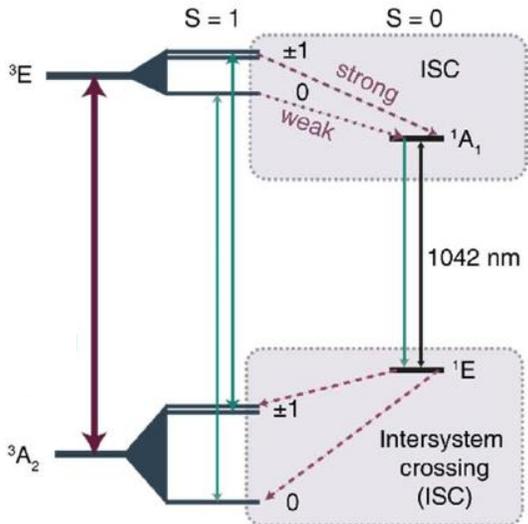
Initialization &

PL contrast acts as a readout of the spin state!

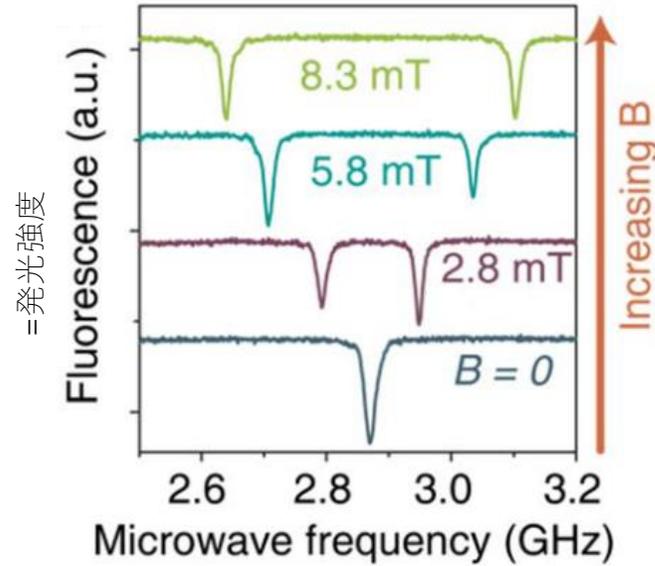
人為的な初期化方法があれば
 $E_g < k_B T$ でもOK

光を照射すると { $|0\rangle$: 励起して落ちる際に発光 ——— 量子状態の読み出し
 $|1\rangle$: 励起してスピン1重項を経由して発光せずに $|0\rangle$ に落ちる
→ 初期化

光を照射すると $\left\{ \begin{array}{l} |0\rangle : \text{励起して落ちる際に発光} \\ |1\rangle : \text{励起してスピン1重項を経由して発光せずに}|0\rangle \text{に落ちる} \end{array} \right.$



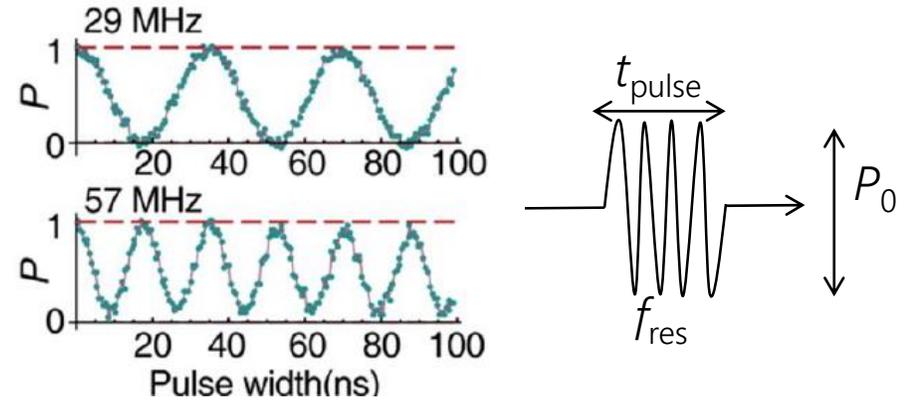
ODMR
(Optically detected magnetic resonance)



$m_s = 0 \leftrightarrow \pm 1$ を満たす周波数でPL強度が低下
磁界印加により $m_s = \pm 1$ の縮退が解ける
→ ピークの分裂

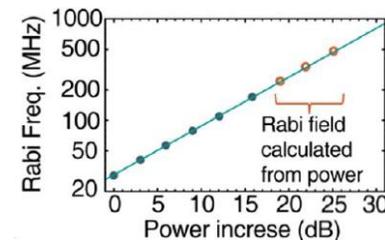
高感度磁場センサ

Rabi oscillation



rfをパルス化して印加
パルス幅に応じてPL強度が変化

$|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせをパルス幅で制御
→ **量子ゲート操作**
 $P=0.5$: Hゲート ($\pi/2$ pulse), $P=0$: Xゲート ($\pi/2$ pulse)

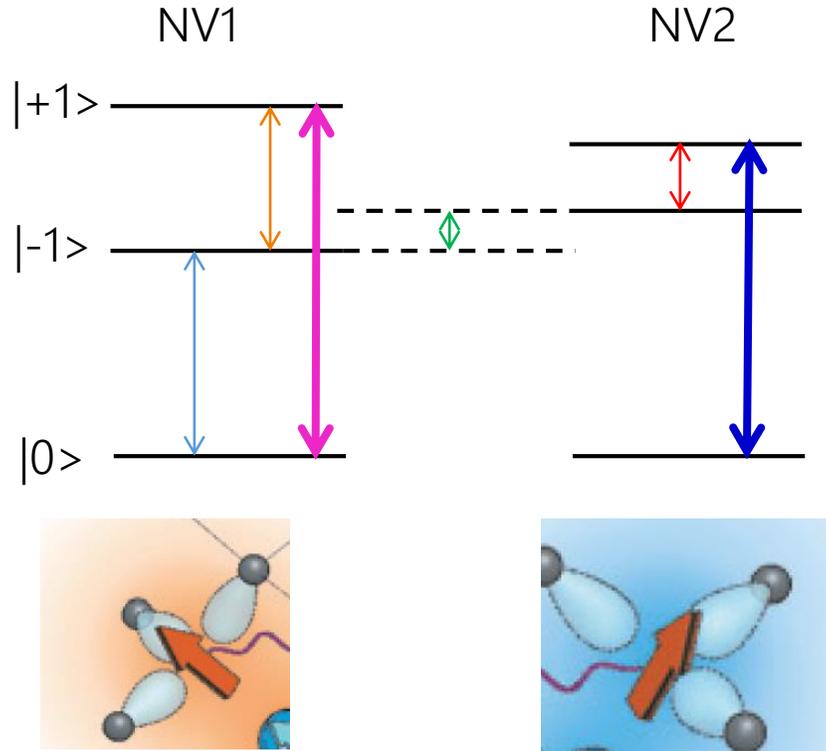


ラビ周波数 \propto rfパルスの振幅
⇒ Gate操作速度 $\sim 1/\text{rf}$ パルス振幅

量子もつれ状態はどう作るの？

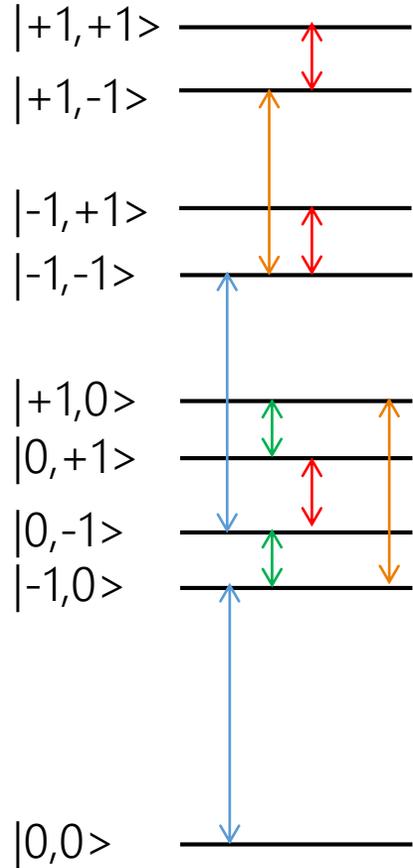
→ 量子ビット同士を相互作用させてゲート操作を満たす共鳴周波数をズラす！

NV間に相互作用なし

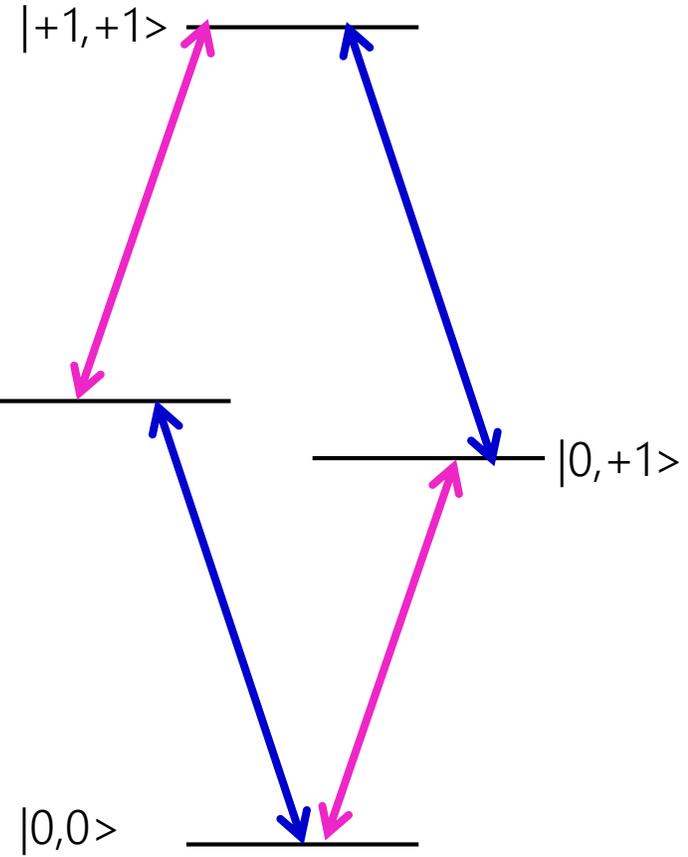
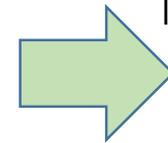


<https://arxiv.org/abs/1212.2804>

系全体のエネルギー

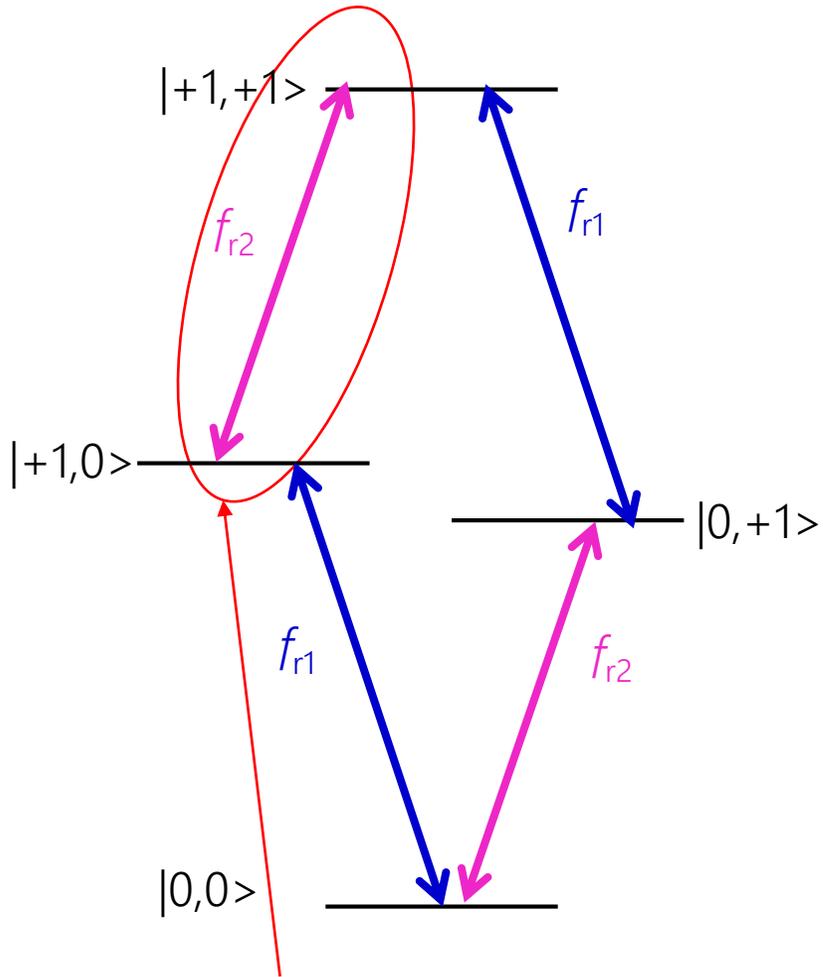


0と+1に関する準位
だけで整理



2つのNVの軸方向が異なるので静磁場の有効値が違う
→ $m_s = \pm 1$ の分裂が異なる

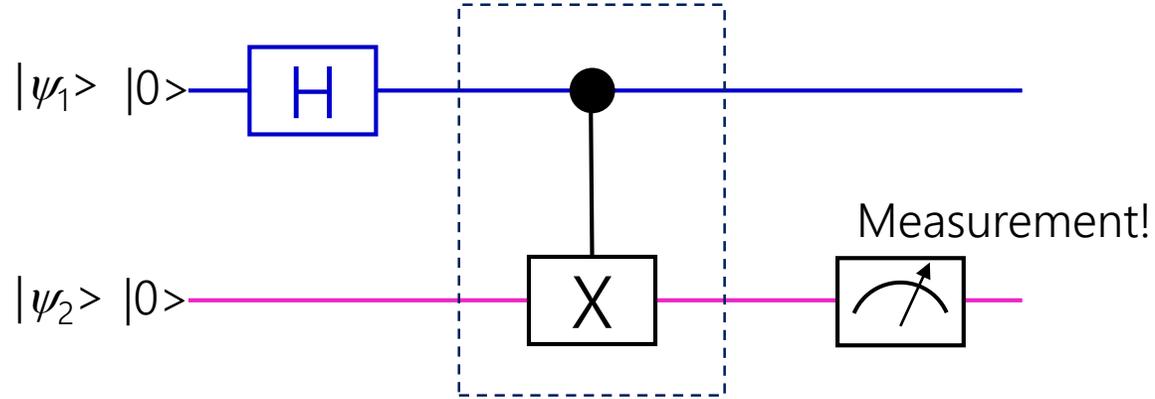
系全体のエネルギー (相互作用なし)



この遷移だけ選択的に使いたい

もつれ生成シーケンス

●は|1>なら繋がっているゲートを作用



$ \psi_1\rangle / 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$	if $ \psi_1\rangle = 0\rangle,$ $ \psi_2\rangle = 0\rangle$ if $ \psi_2\rangle = 1\rangle,$ $ \psi_2\rangle = 1\rangle$	} $ \psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(00\rangle + 11\rangle)$ Bell state
$ \psi_2\rangle / 0\rangle$	$ 0\rangle$		

「 $|\psi_1\rangle = 1$ なら $|\psi_2\rangle$ にXゲートを作用」をどう実行するか？

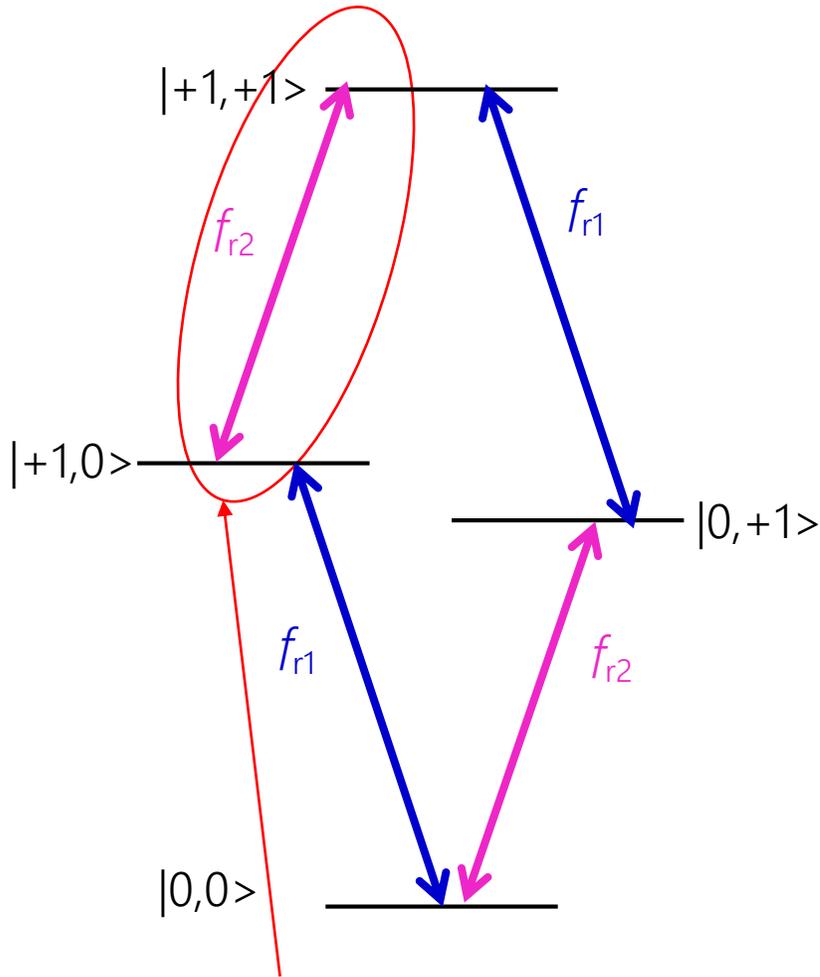
ただし $|\psi_1\rangle$ の量子状態を読み取ってはいけない!

→ $|\psi_1\rangle$ は0か1かわからないけど、「 $|\psi_1\rangle = 1$ なら $|\psi_2\rangle$ にXゲートを作用」するような周波数でXゲートのパルスを加える必要がある

左図のようなエネルギー準位では不可

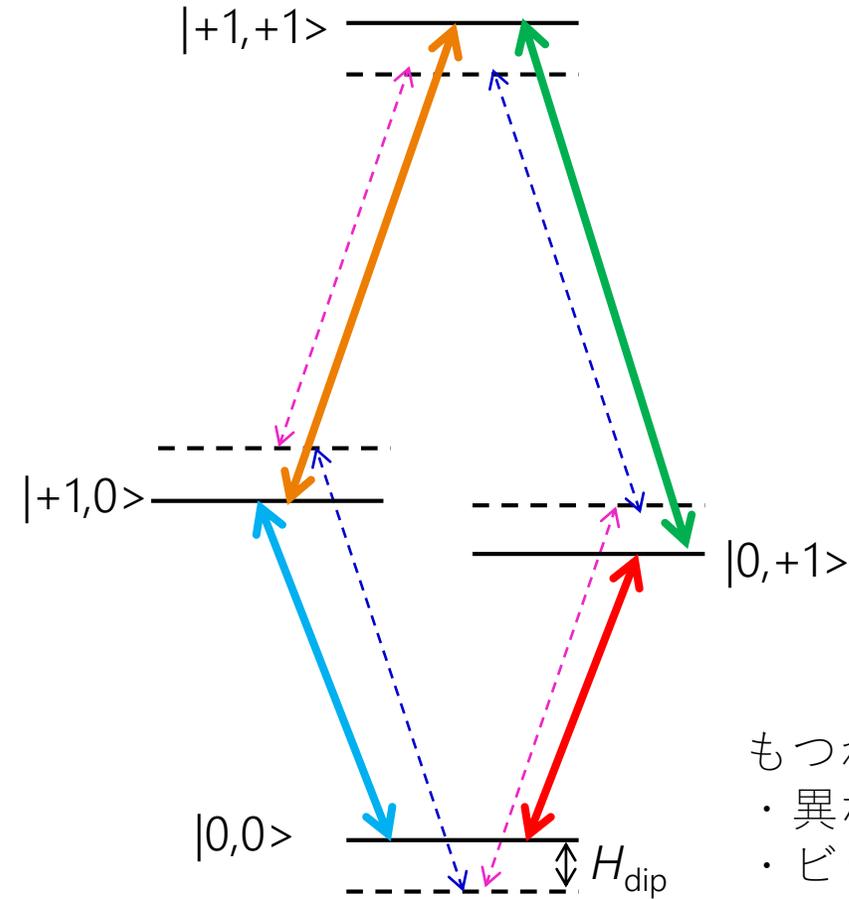
f_{r2} を加えると $|\psi_1\rangle$ が0でも1でも $|\psi_2\rangle$ が1に遷移してしまう

系全体のエネルギー (相互作用なし)



この遷移だけ選択的に使いたい

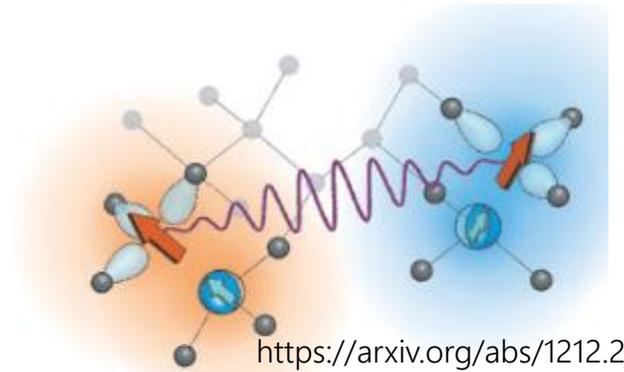
系全体のエネルギー (相互作用あり)



$|10\rangle \leftrightarrow |11\rangle$ を選択的に遷移可能！ → もつれ生成

スピン同士の双極子相互作用

$$\hat{H}_{12} = -\frac{\mu_0}{4\pi} g_1 g_2 \mu_B^2 \left[\frac{3(\hat{\sigma}_1 \cdot \mathbf{r}_{12})(\hat{\sigma}_2 \cdot \mathbf{r}_{12})}{r_{12}^5} - \frac{\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{\sigma}_2}{r_{12}^3} \right]$$



<https://arxiv.org/abs/1212.2804>

もつれ生成に必要なもの

- 異なる有効磁場 ⇒ NV軸の違い
- ビット同士の相互作用 ⇒ 双極子-双極子相互作用

もつれ生成のためにはNVセンター同士の間相互作用が必要
 → どうやって隣接したNVセンターを作るか？ (<20nm)

- ・ 結晶合成中に不純物導入
- ・ **窒素イオン注入** (狙った場所に意図的に導入できる)

NVセンターScaleの進歩

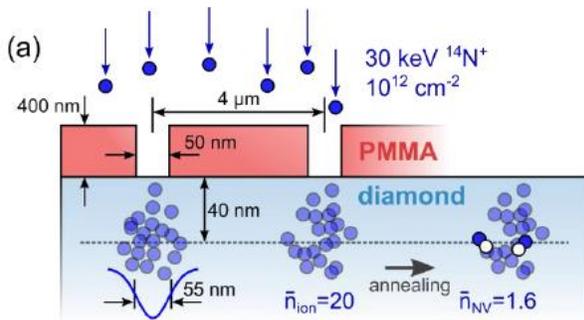
- 1997年 1 NV : A. Gruber *et al.*, Science **276**, 2012 (1997).
- 2010年 2 NV : P. Neumann *et al.*, Nat. Phys. **6**, 249 (2010).
- 2019年 3 NV : M. Haruyama *et al.*, Nat. Commun. **10**, 2664 (2019)

Struggling : 注入したイオンがランダムに分布
 隣接するNVの生成が困難

イオン注入技術の進歩
 ナノホール注入法 :

Jakobi *et al.*, Journal of Physics: Conference Series **752**, 012001 (2016).

<https://arxiv.org/abs/1610.00924>

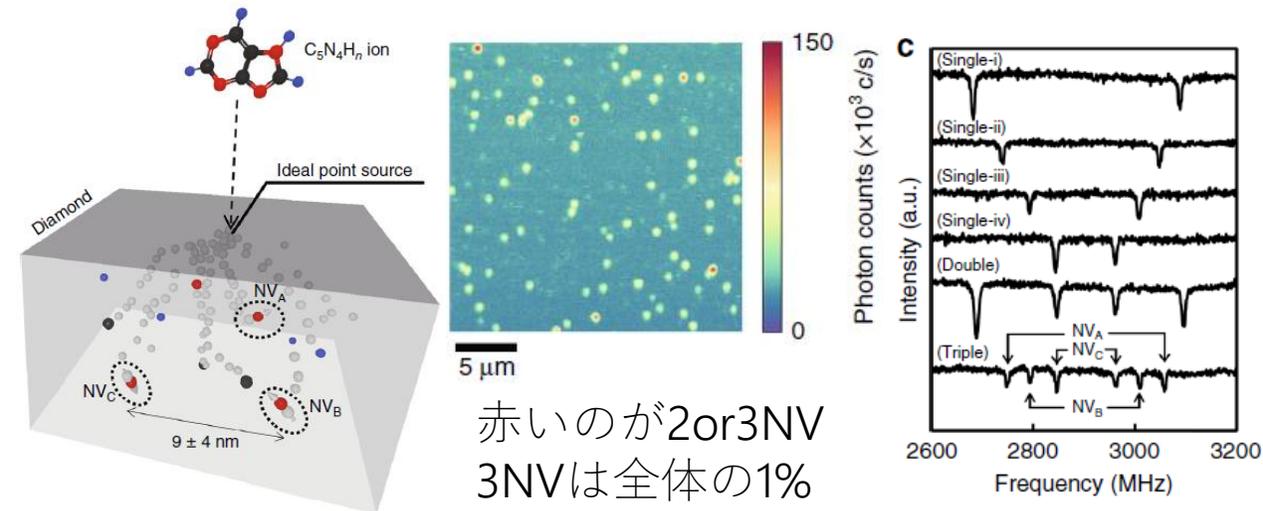


In this paper...
 >The search was conducted over **6,000 implantation sites**, amassing a **total measurement time of about three weeks**. Throughout both samples a total of **six strongly coupled** and **four weakly coupled pairs** were identified.

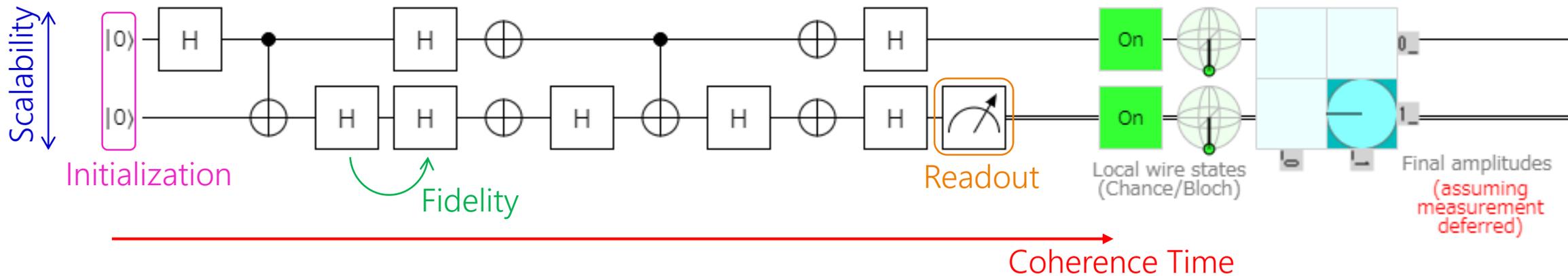
イオン注入で多数NVペアの生成は絶望的

窒素クラスターイオン注入法 :

M. Haruyama *et al.*, Nat. Commun. **10**, 2664 (2019)



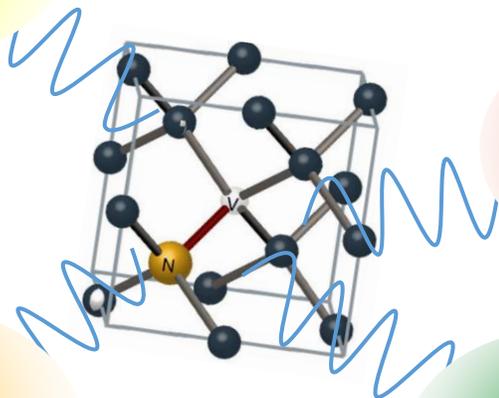
赤いのが2or3NV
 3NVは全体の1%



量子ビットは量子状態をずっと維持できない (量子コヒーレンス時間)

電氣的

量子ビットはノイズの影響を受けている
→ 量子状態の緩和

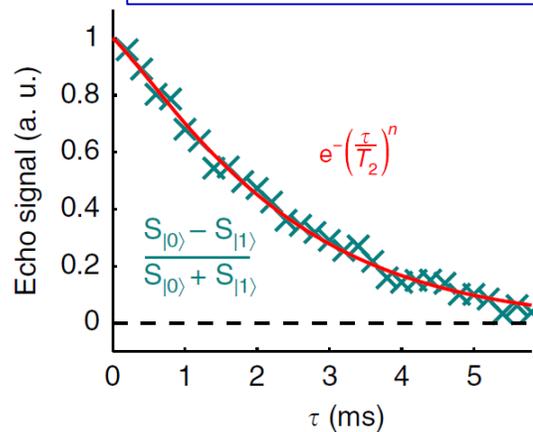


熱的

固体量子ビットの母体材料への要件
 電氣的：低キャリア密度
 磁氣的：低(核)スピン密度
 熱的：高デバイ温度
 測定系：装置の振動等の低減

磁氣的

測定系



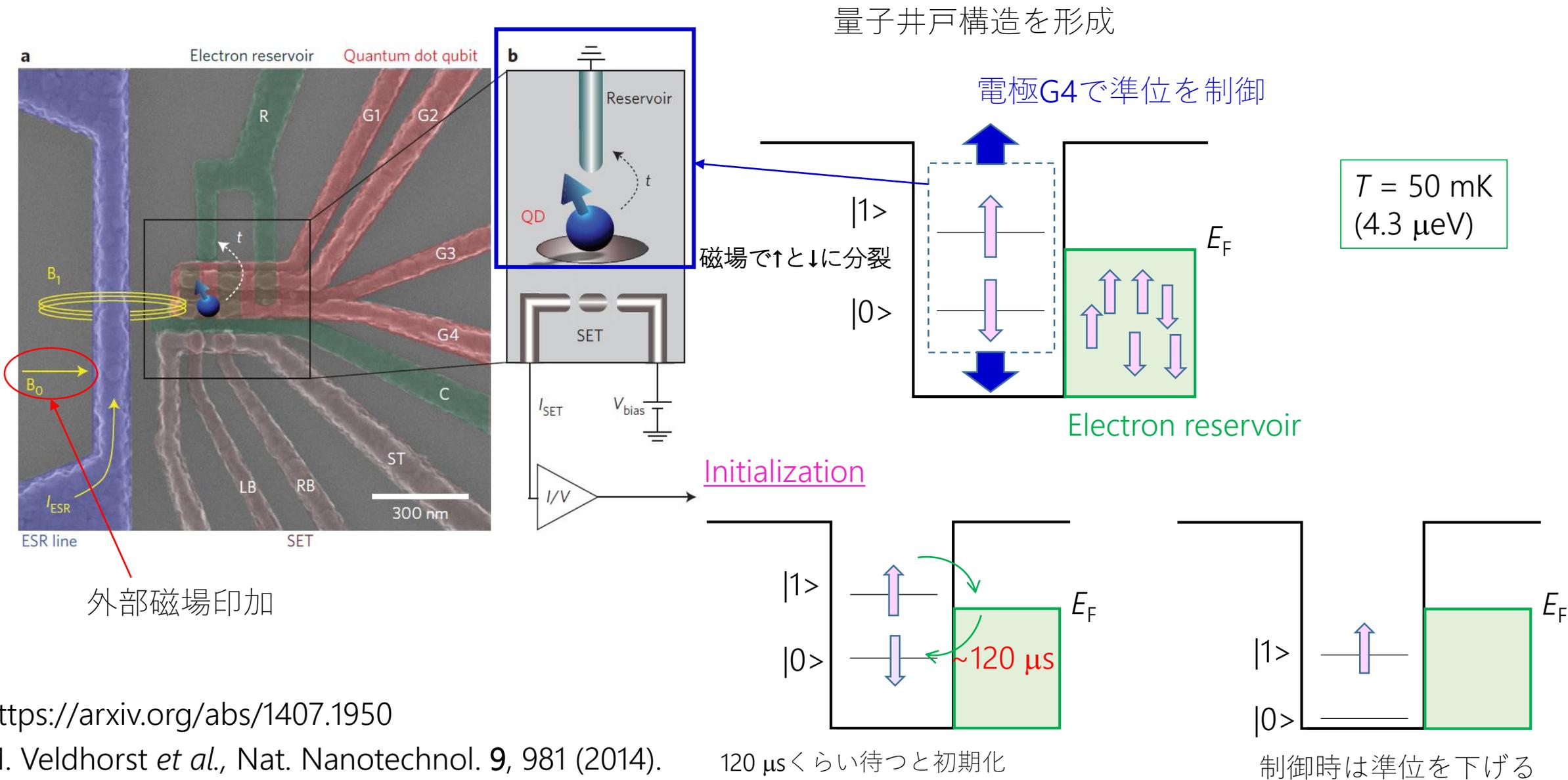
単一NVセンターでの最高記録
 $T_2 \sim 2.4 \text{ ms}$

E.D. Herbschleb *et al.*, Nat. Commun. **10**, 3766 (2019)

ODMR線幅 $\propto 1/T_2$
 → 分解能 $9 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ の磁場センサ
 心磁場：0.1~1 nT, 脳磁場：1p~1f T

Silicon quantum dots

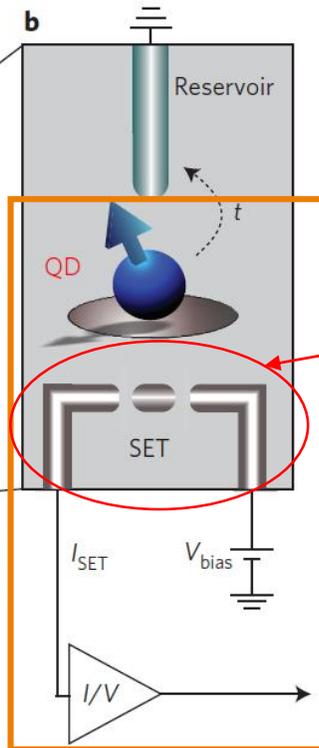
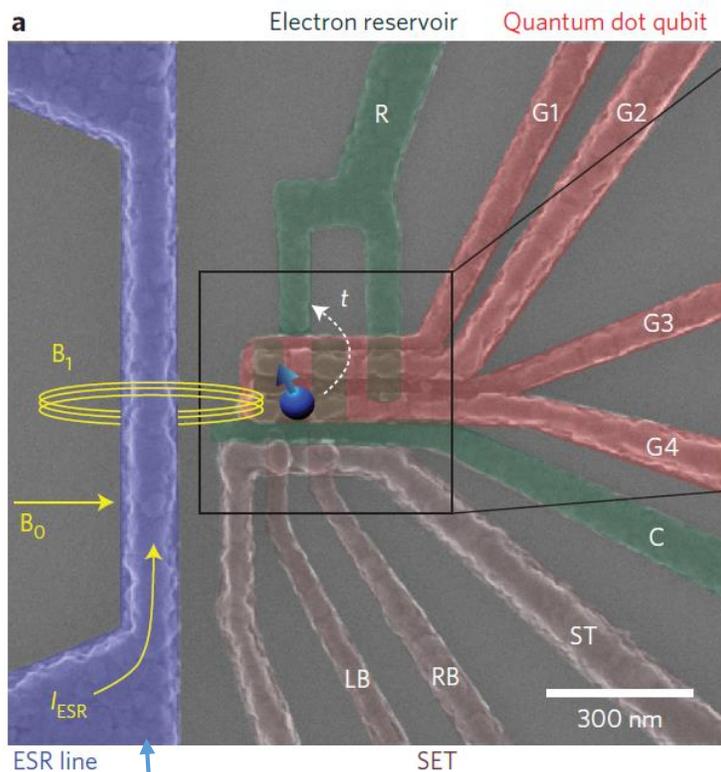
半導体・・・既存の集積回路技術との相性○



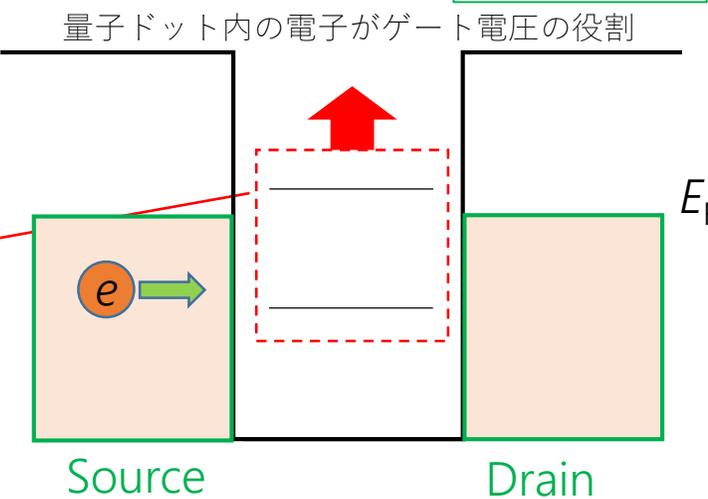
<https://arxiv.org/abs/1407.1950>

M. Veldhorst *et al.*, Nat. Nanotechnol. **9**, 981 (2014).

SET(Single Electron Transistor) : 単一電子トランジスタ

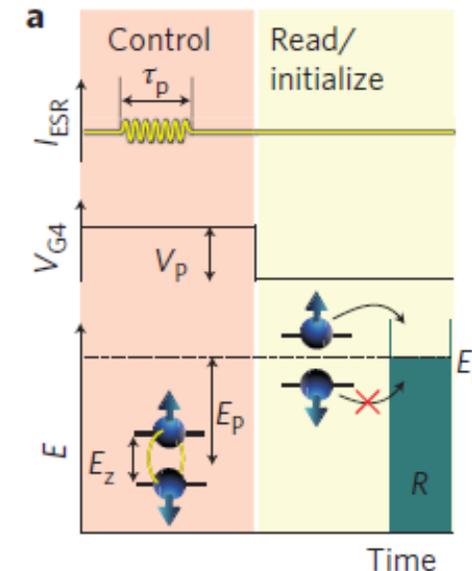


Readout



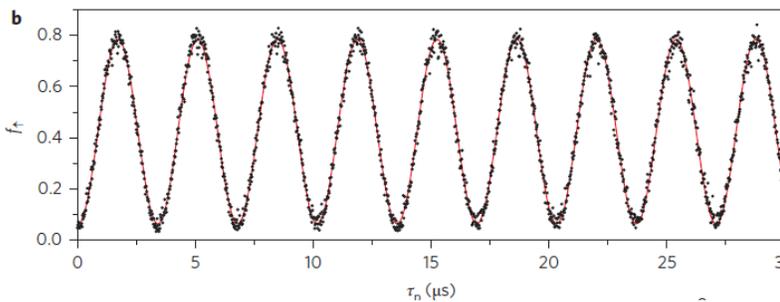
クーロンブロッケード
 電子が存在(|0>) : 電流が流れない
 電子がない(|1>) : 電流が流れる

Readout



共鳴を励起 : 量子ゲート操作

ラビ振動 →

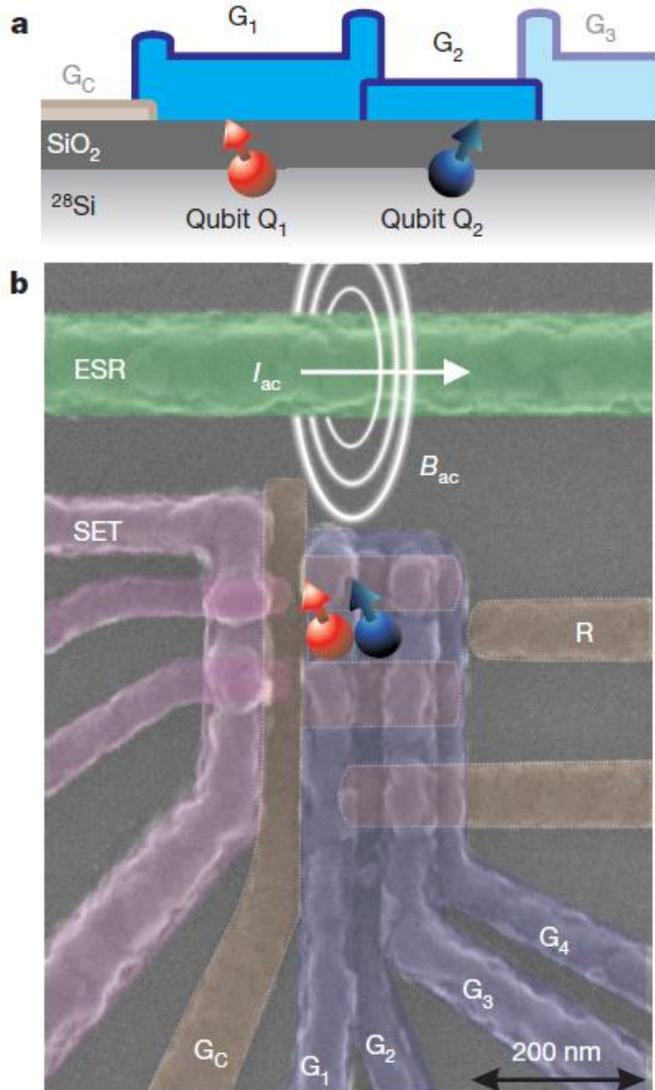


$T_2 \sim 1.2$ ms

<https://arxiv.org/abs/1407.1950>

M. Veldhorst *et al.*, Nat. Nanotechnol. **9**, 981 (2014).

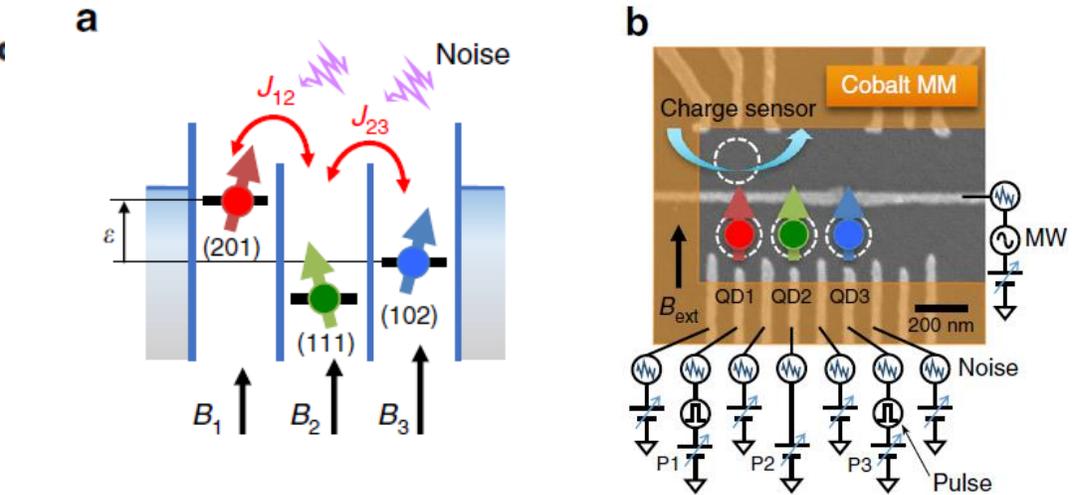
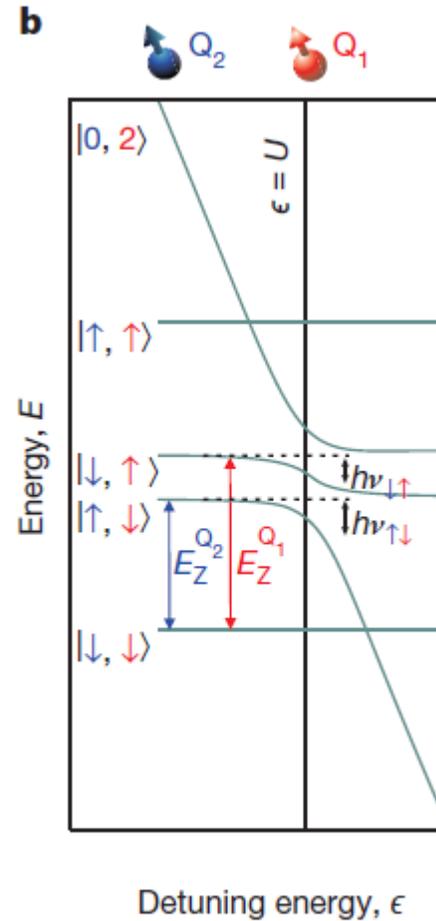
量子ドット同士の交換相互作用でもつれ生成



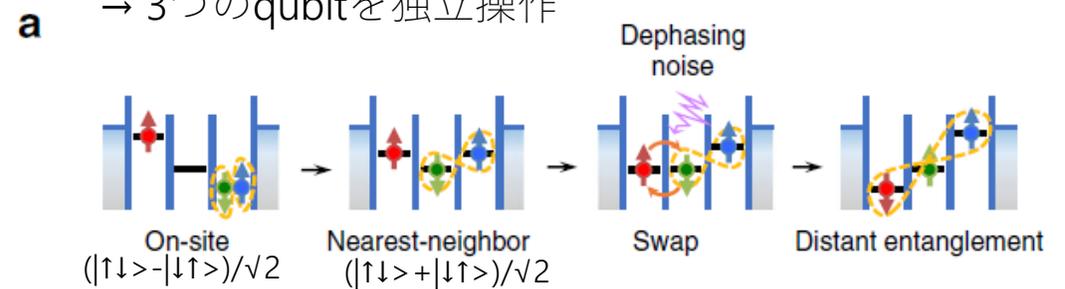
<https://arxiv.org/abs/1411.5760>

M. Veldhorst *et al.*, Nature **526**, 410 (2015).

遠距離もつれの生成



コバルトからの漏れ磁場を各qubitは異なって感じる
→ 3つのqubitを独立操作



スピン1重項の片割れの情報を送って、
3重項で遠距離もつれを実現

T. Nakajima *et al.*, Nat. Commun. **9**, 2133 (2018).

Superconducting quantum bits

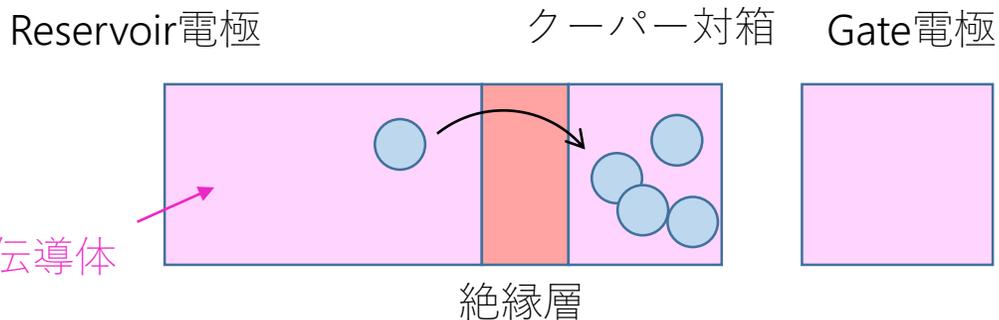
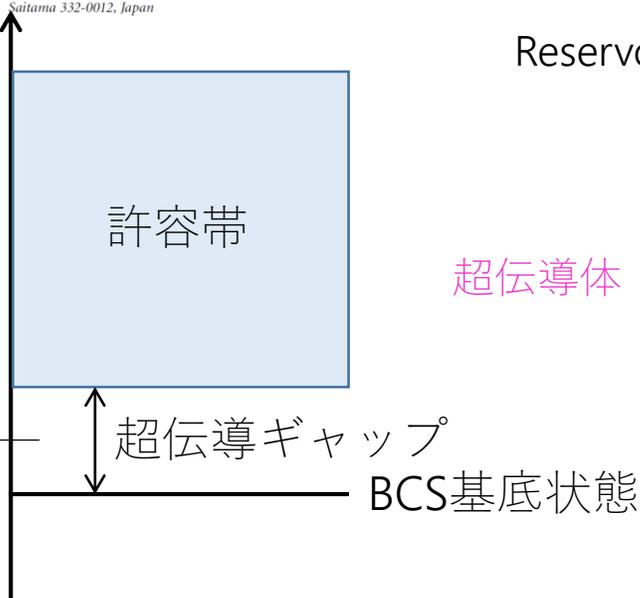
Superconducting quantum bit
letters to nature

Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box

Y. Nakamura*, Yu. A. Pashkin† & J. S. Tsai*

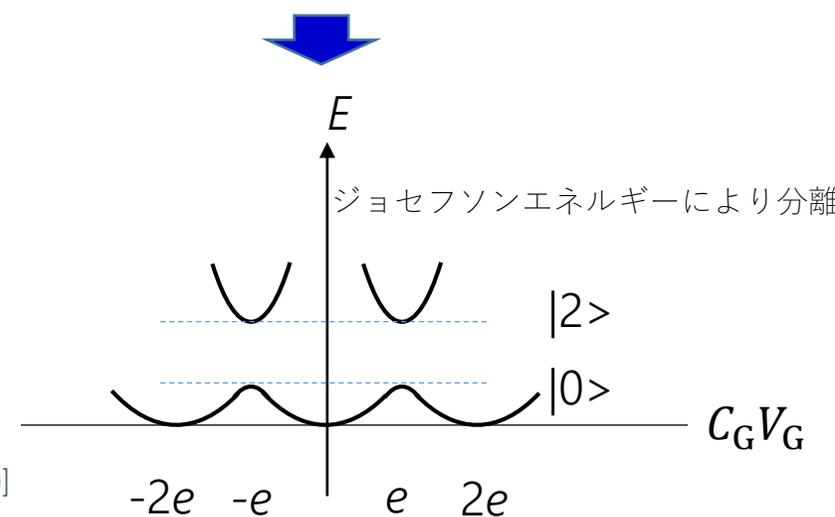
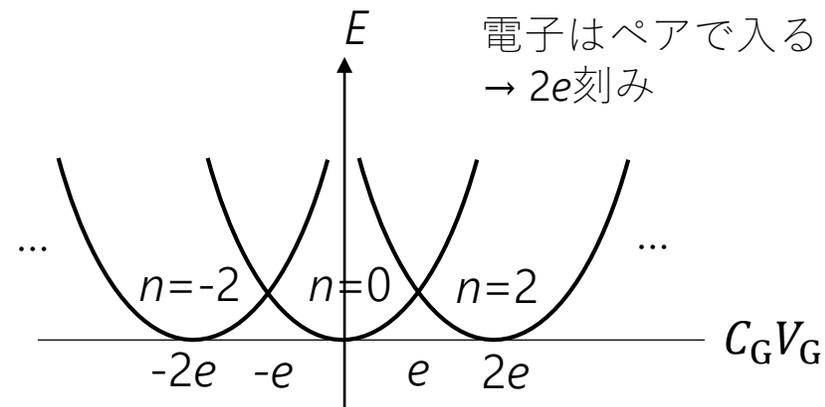
* NEC Fundamental Research Laboratories, Tsukuba, Ibaraki 305-8051, Japan

† CREST, Japan Science and Technology Corporation (JST), Kawaguchi, Saitama 332-0012, Japan



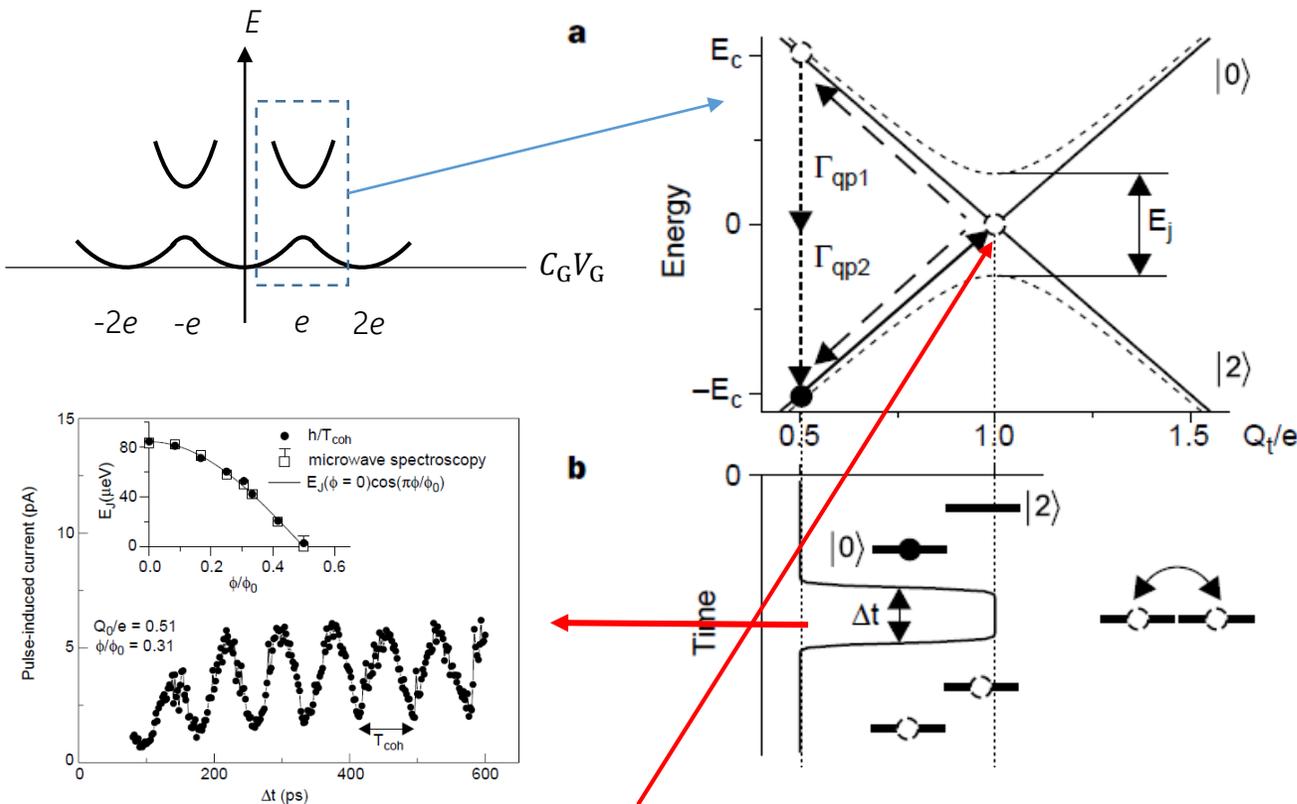
クーパー対箱のエネルギー： $E \sim \frac{Q^2}{2C_\Sigma}$
 $Q = ne - C_G V_G$

- Charge type (電荷型) → ゲート方式量子コンピュータ
- Flux type (磁束型) → アニール方式量子コンピュータ (eg., D-Wave)
- Phase type (位相型)
- Transmon type → ゲート方式量子コンピュータ (eg., IBM-Q)



超伝導状態では電子が対を作り(クーパー対),最低エネルギーに凝縮する
 → どう量子的な2準位を形成するか？

$$H = \sum_{N \in \mathbb{Z}} [E_c (N - N_g)^2 |N\rangle \langle N| - \frac{1}{2} E_j (|N\rangle \langle N+1| + |N+1\rangle \langle N|)]$$



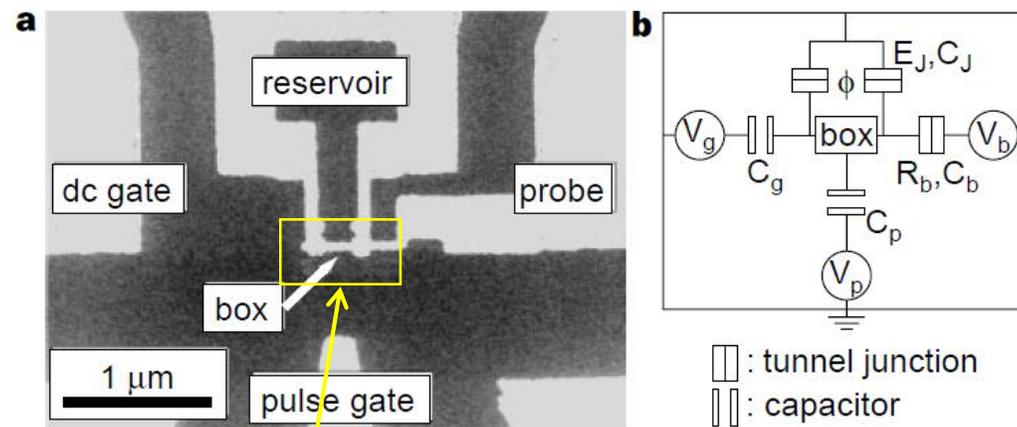
パルス電圧：エネルギー準位に沿わずに移行
 → ギャップを無視して|0>と|2>が縮退



低バイアス：初期化
 放置すれば|0>と|2>の間で確率振動
 → 量子ゲート操作

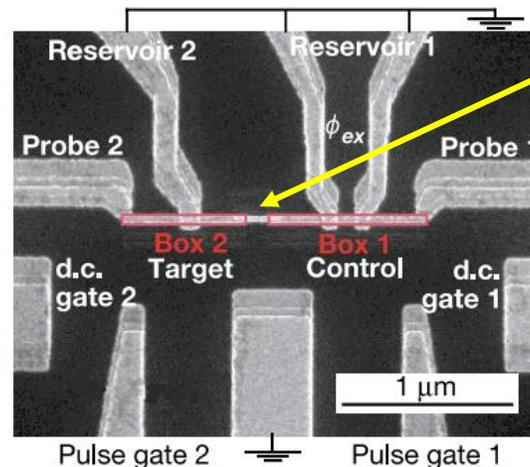
但し低コヒーレンス
 1 ns

素子構造



SET構造：クーパー対の数でProbe電流が変化
 → 読み出し

もつれ生成：キャパシタを介した結合

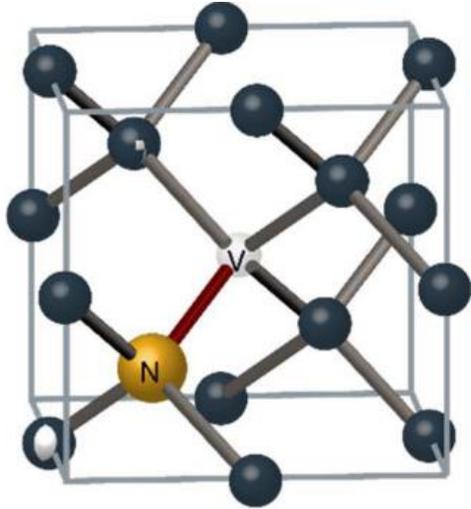


キャパシタ

Box1のクーパー対の有無で
 Box2にクーパー対の出入り
 できるかどうか決まる
 → もつれ生成

理想的な量子ビット：室温動作, 電氣的な操作・検出可能, 長コヒーレンス時間, 高集積化

NVセンター

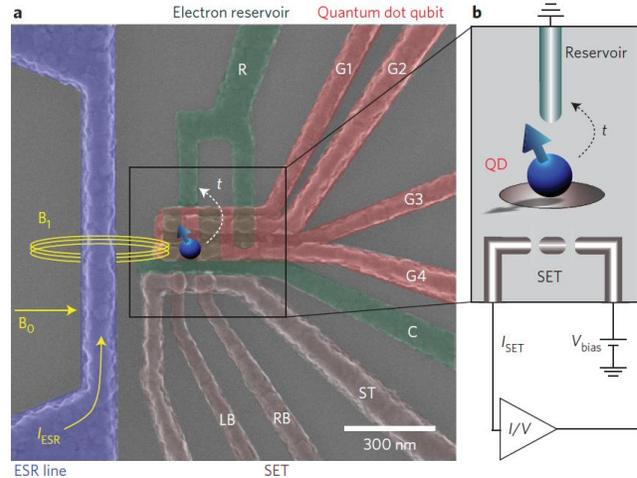


- ☺室温動作 (ISCによる初期化)
- ☺スケールング
- ☹光による読み出し
- ☹もつれ生成難

核スピンとの相互作用
クラスターイオン注入

主に研究・支援している企業
Quantum Diamond Technologies

シリコン量子ビット

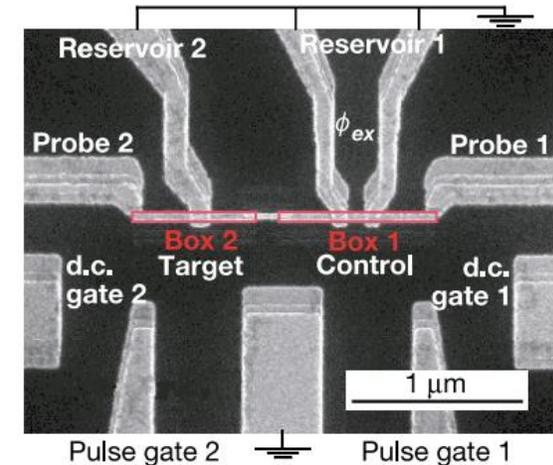


- ☺半導体技術との高い親和性
- ☺スケールング
- ☹低温動作
- ☹もつれ生成難

1/2スピンとSTスピン量子ビットの
ハイブリッド量子ビット
A. Noiri et al., Nat. Commun. 9, 5066 (2018)

Intel

超伝導量子ビット

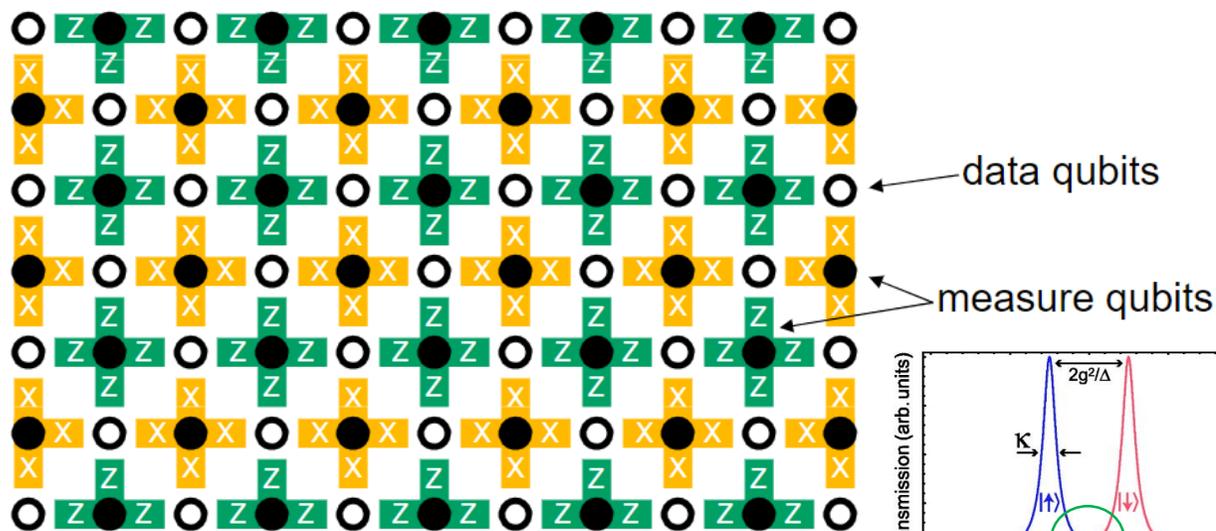


- ☺技術的に成熟
- ☺もつれ生成
- ☹低温動作
- ☹微細化限界(特に磁束型 $\phi = BS$)

共振器との結合
etc...

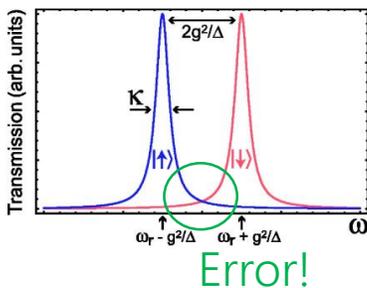
Google
IBM
Quantum Circuits

エラー訂正：表面符号 (Surface Code) ~量子ビットの冗長化~



アルゴリズムの時間が長いとエラーが起きる!

data qubitとX(orZ)qubitでもつれを生成
X(orZ)qubitの状態からdata qubitを読み出し
⇒エラーがあれば訂正 (data qubitは非破壊)



Fault-tolerant quantum computation :

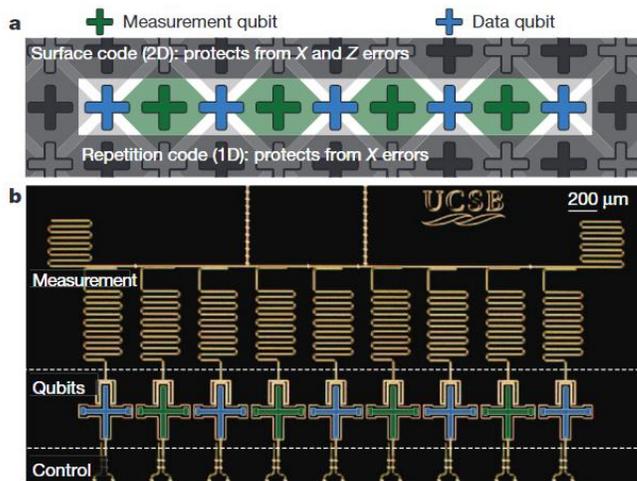
X(orZ)qubitの実行エラー < 1%のとき
1論理量子ビットエラー \propto 1/物理量子ビット数

日刊工業新聞 2018/3/8

2018年03月08日
Google、72量子ビットの量子プロセッサ開発

エラー率低減で、「スパコン超え」実現目指す

≠ 72論理量子ビット
= 72物理量子ビット

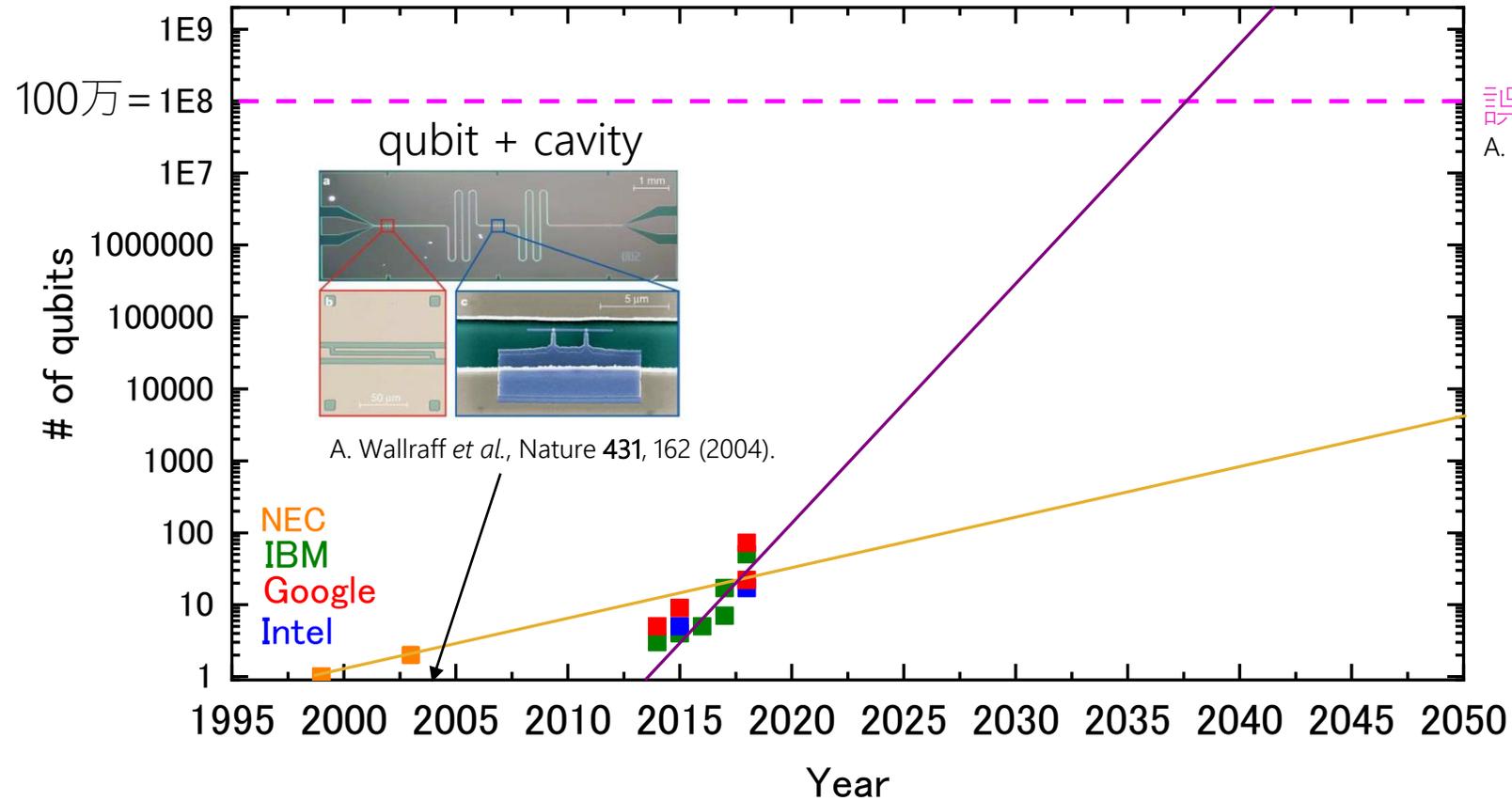


9(物理)量子ビットで十分なエラー耐性が報告 (UCSB&Google) J. Kelly *et al.*, Nature 519, 66 (2015).
<https://arxiv.org/abs/1411.7403>

⇒このまま系をスケールアップすれば
エラー耐性量子コンピュータの実現!

既存の量子アルゴリズムを、隣り合う量子ビットのもつれのみを利用するアルゴリズムに書き直す研究も進んでいる

- Introduction
 - History of quantum computer
 - Quantum supremacy
- Quantum computing
 - Principles
 - Grover's algorithm
- Principles of quantum bits
 - Nitrogen-Vacancy center in diamond
 - Silicon quantum dots
 - Superconducting quantum bits



誤り耐性量子コンピュータ
A. G. Fowler *et al.*, Phys. Rev. A **86**, 032324 (2012).

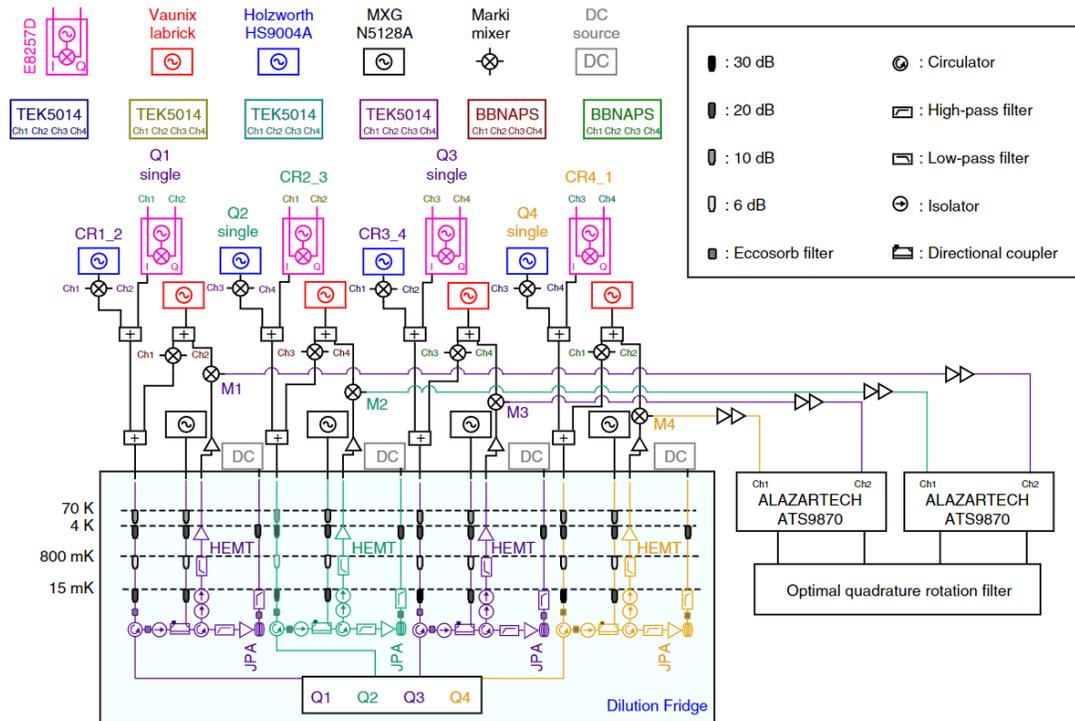
超伝導量子ビットでどこまで集積できるか
この傾きでスケールアップしていくか

色々な問題が解決したとして、現状の量子ビットでコンピュータを実装すると何が起きるか？

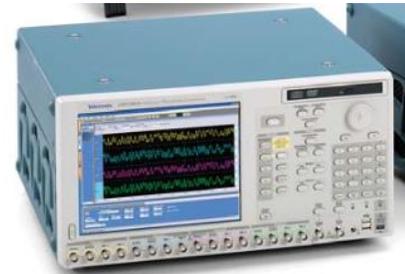
4 qubits の場合



ARTICLE
Received 16 Jan 2015 | Accepted 18 Mar 2015 | Published 29 Apr 2015
DOI: 10.1038/ncomms7979 OPEN
Demonstration of a quantum error detection code using a square lattice of four superconducting qubits
A.D. Córcoles^{1*}, Easwar Magesan^{1*}, Srikanth J. Srinivasan^{1*}, Andrew W. Cross¹, M. Steffen¹, Jay M. Gambetta¹ & Jerry M. Chow¹



TEK5014



× 4

E8257D



× 4



100万qubitsでは？

HS9004A



× 4

N5182A

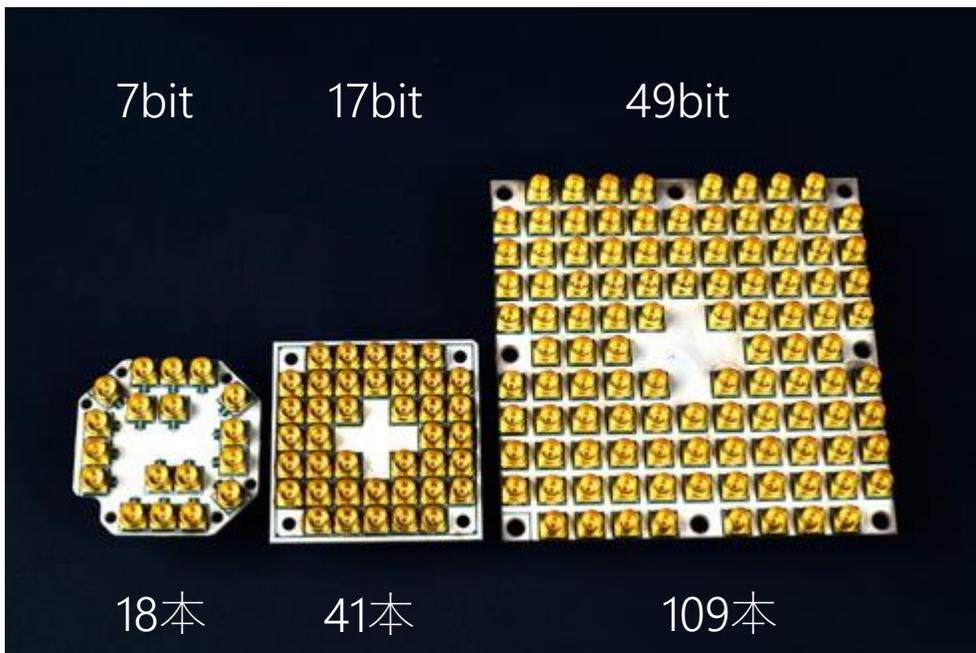


× 4

etc...



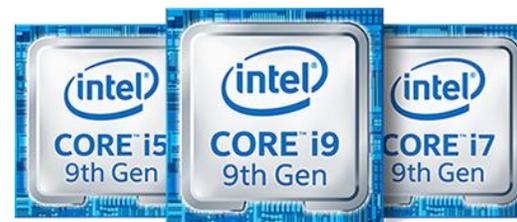
Intel超伝導量子ビット



シリコン量子ビットチップ (1500 qubits)



Intelといえば半導体



シリコン量子ビット：1 mm²内に10⁹量子ビット！（理論上）

量子コンピュータ内でアルゴリズムを全て処理するわけではない
例：ショアのアルゴリズム

素因数分解問題 → 量子アルゴリズム → 周期探索問題 → 周期探索問題の解 → 古典コンピュータ → 素因数分解の解

量子アルゴリズム

古典コンピュータ

➡ シリコン量子ビットは古典コンピュータと相性◎

50 nm角のqubitを1500個集積・・・髪の毛くらいの太さ
従来のシリコン技術で作製
→ 100万~qubitsへ期待

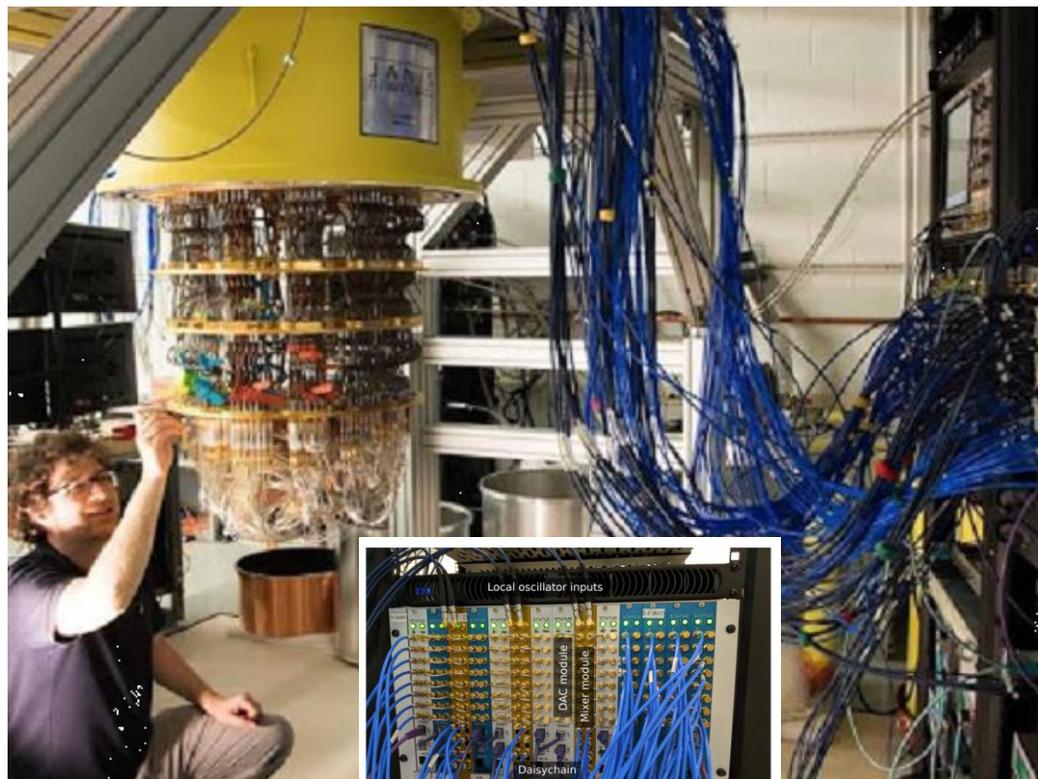
*1超伝導量子ビット：0.1mm角

Intelプレスリリース

<https://newsroom.intel.com/news/intel-starts-testing-smallest-spin-qubit-chip-quantum-computing/#gs.e8jofd>

チップは小さくできそう
制御用高周波配線は？

ゲート方式量子コンピュータ：100万bit以上で誤り訂正付き高性能万能コンピュータ



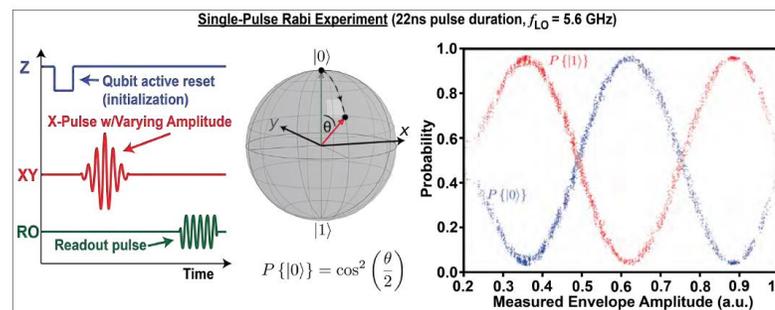
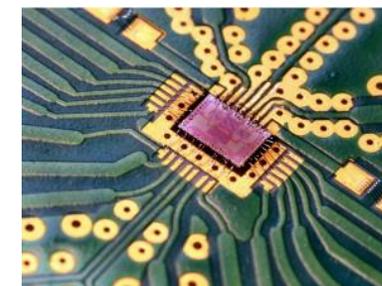
from google AI Blog

Google 72bit : Bristlecone

1量子ビット毎に2本の制御配線 \Rightarrow 膨大な物理スペース

クライオスタット内に低温動作する量子ビット制御チップを作製

**29.1 A 28nm Bulk-CMOS 4-to-8GHz ;2mW
Cryogenic Pulse Modulator for Scalable
Quantum Computing**



3K, <2mW, 1×1.6 mm
単一量子ビット制御実証

ISSCC2019

<https://arxiv.org/abs/1902.10864>

Problem : 量子ビットあたり2本以上の高周波伝送配線 : 放熱による環境温度上昇, 物理スペース

Solution : オンチップ発振器による量子ビットの操作・読み出し

Problem : 初期化・量子コヒーレンス及び超伝導状態の維持 : ~ 10 mK の極低温への冷却

Solution : 高温動作可能な量子ビット, 人為的な初期化手法の確立

Spin-Spin relaxation time T_2 : Coherence time of quantum state

Measurement methods : Hanh-echo, FID

Diamond NV center : ~ 0.63 ms (^{13}C 1.1%, $I_{\text{C}}=1/2$)

donor spins in Si : $0.5\sim 0.8$ ms (^{29}Si 4.7%, $I_{\text{Si}}=1/2$)

Mn:ZnO : 0.8 ms (^{67}Zn 4.1%, $I_{\text{Zn}} = 5/2$)

SiC : **1.3 ms** (^{29}Si , ^{13}C)

→ SiC was able to host qubits with a much longer T_2 time than those of NV center, in spite of having a **higher nuclear spin density than natural diamond**.

スピン自由度を量子ビットとして扱う → 磁場と相互作用してデコヒーレンス

局所磁場を作り出すもの : 核スピン

SiC中の電子スピンのコヒーレンス時間を計算



ARTICLE

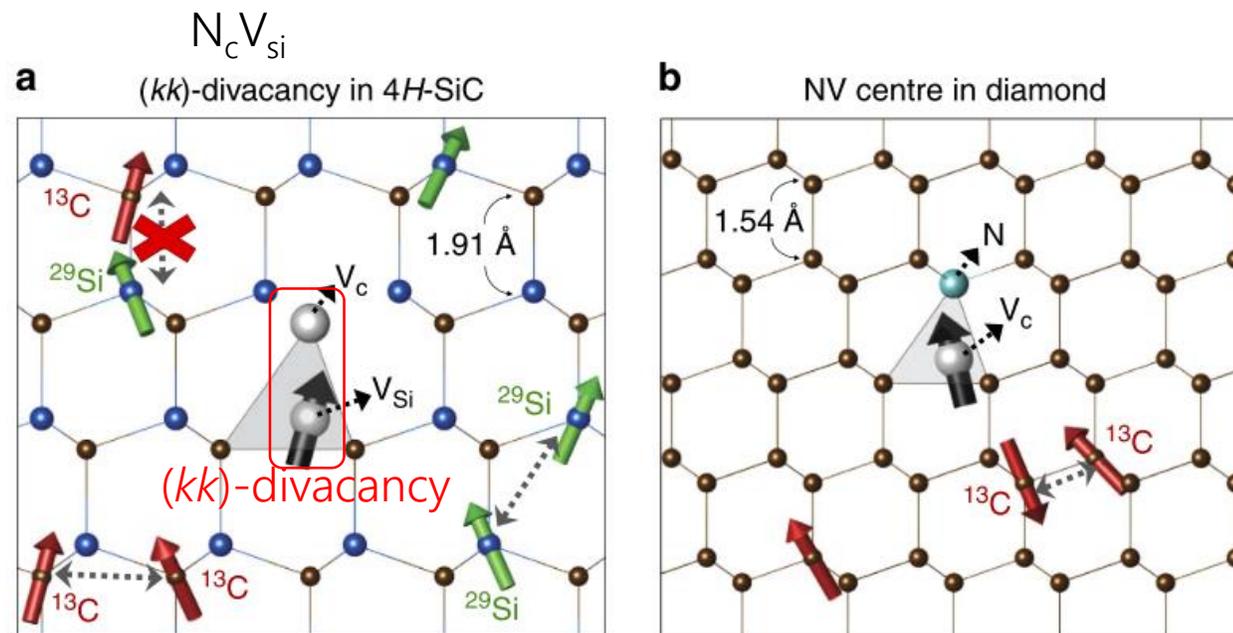
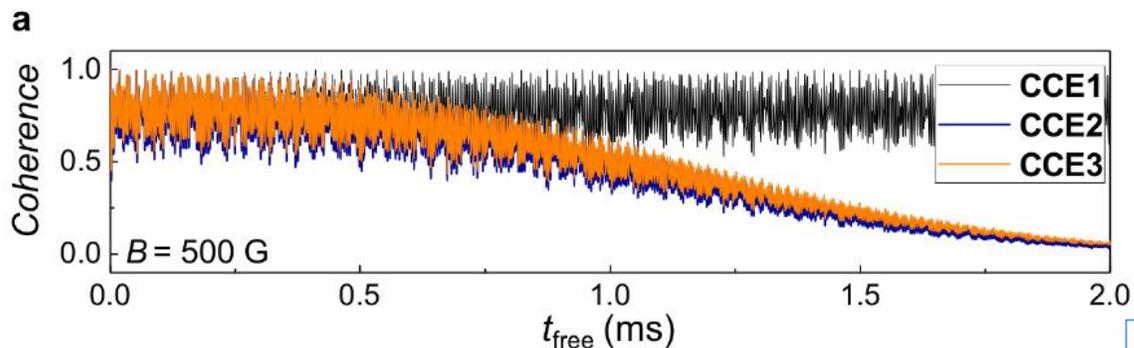
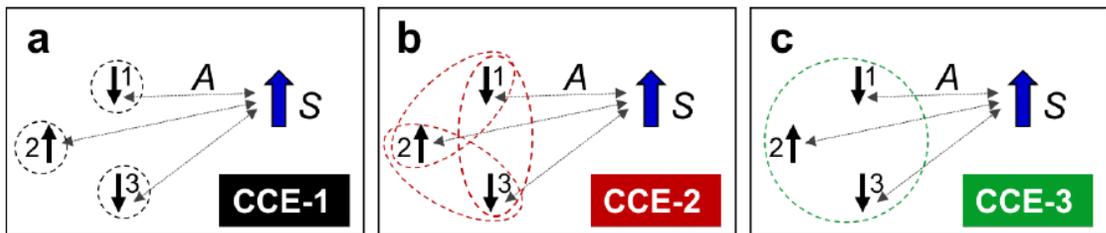
Received 27 May 2016 | Accepted 17 Aug 2016 | Published 29 Sep 2016

DOI: 10.1038/ncomms12935

OPEN

Quantum decoherence dynamics of divacancy spins in silicon carbide

Hosung Seo¹, Abram L. Falk^{1,2}, Paul V. Klimov¹, Kevin C. Miao¹, Giulia Galli^{1,3} & David D. Awschalom¹



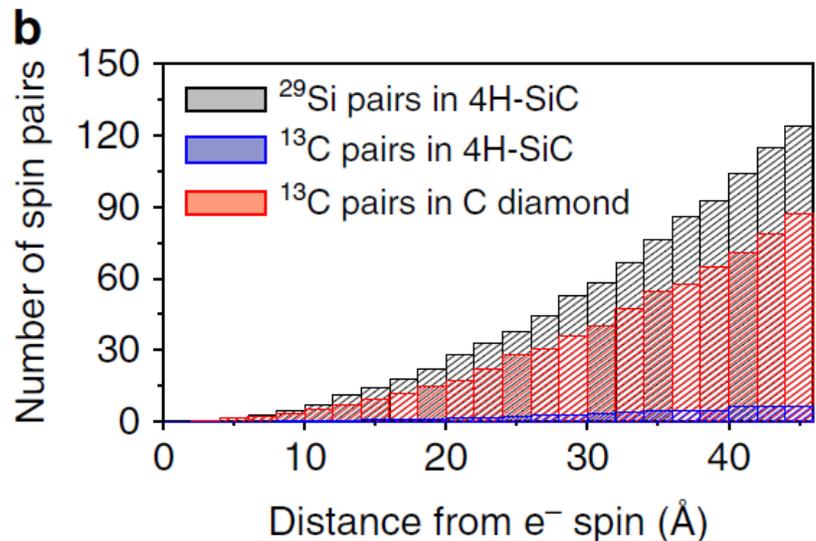
heterogeneous interactions between ¹³C and ²⁹Si
 → No effect on T₂ coherence time (not T₂^{*})

homogeneous interactions between nuclear spins of the same kind
 → Essential interactions for coherence time

同種核スピン同士の相互作用が本質的なデコヒーレンスの原因

Interactions with spin-cluster determine the coherence time

H. Seo *et al.*, Nat Commun 7, 12935 (2016).



Decoherenceの要因

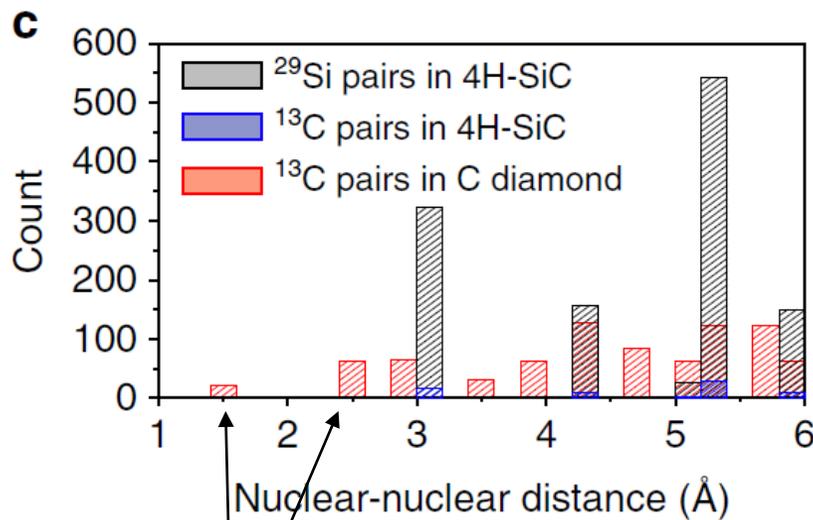
SiC: ^{29}Si が支配的

NV: ^{13}C が支配的

核スピンペアの密度はSiCの方が高いが、核スピン同士の距離はNVの方が近い(相互作用が大きい)

核スピンペアのフリップフロップは、異なる核種があると歳差周波数が異なり伝搬が遮断

→ SiCのほうが長コヒーレンス



^{29}Si 4.7%

^{13}C 1.1%

NVは近くにスピンのいるので相互作用が大きい (0.24~2.06kHz)

SiC中のSi pair or C pairは少し遠いので相互作用が小さい (<0.08kHz)

核スピンの少ない化合物材料系 +

電気的: 低キャリア密度
 磁氣的: 低(核)スピン密度
 熱的: 高デバイ温度



量子ビット材料として有望

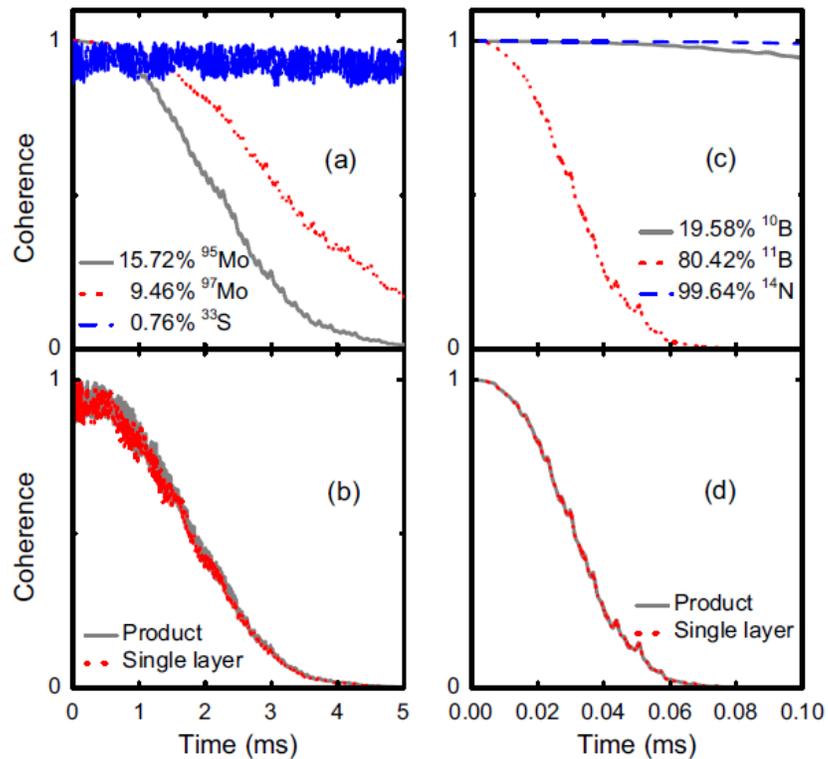
ARTICLE OPEN

Spin coherence in two-dimensional materials

Meng Ye¹, Hosung Seo^{1,2,3,4} and Giulia Galli^{1,2,5,6}

Spin defects in semiconducting solids are promising platforms for the realization of quantum bits. At low temperature and in the presence of a large magnetic field, the central spin decoherence is mainly due to the fluctuating magnetic field induced by nuclear spin flip-flop transitions. Using spin Hamiltonians and a cluster expansion method, we investigate the electron spin coherence of defects in two-dimensional (2D) materials, including delta-doped diamond layers, thin Si films, MoS₂, and h-BN. We show that isotopic purification is much more effective in 2D than in three-dimensional materials, leading to an exceptionally long spin coherence time of more than 30 ms in an isotopically pure monolayer of MoS₂.

npj Computational Materials (2019)5:44 ; <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0182-3>



二次元系材料等も量子ビット材料候補として研究が行われている!

M. Ye *et al.*, *npj Comput Mater* 5, 44 (2019).