量子アニーリングの現状と展望

東京工業大学
科学技術創成研究院　量子コンピューティング研究ユニット
東北大学
大学院情報科学研究科

西森 秀稔

	ゲート模型（回路方式）	量子アニーリング
出来ること	原理的には任意の計算	組み合わせ最適化問題，サンプリング，量子シミュレーション
強み	指数的な高速化が保証されているアルゴリズムがいくつかある。素因数分解，量子シミュレーション，機械学習など	ノイズに強い。最適化問題は，機械学習（人工知能）など社会的影響が大きい問題を含む。
弱み	ノイズに弱く、ノイズに強くするには膨大な規模が必要で大規模化が困難。	高速化が保証されている重要なアルゴリズムがまだない。
現状	数十量子ビット	2000量子ビット
見通し	小規模なら5，6年で実現か。「ハイブリッド」モデル	「ハイブリッド」モデルでの試用が始まっている。

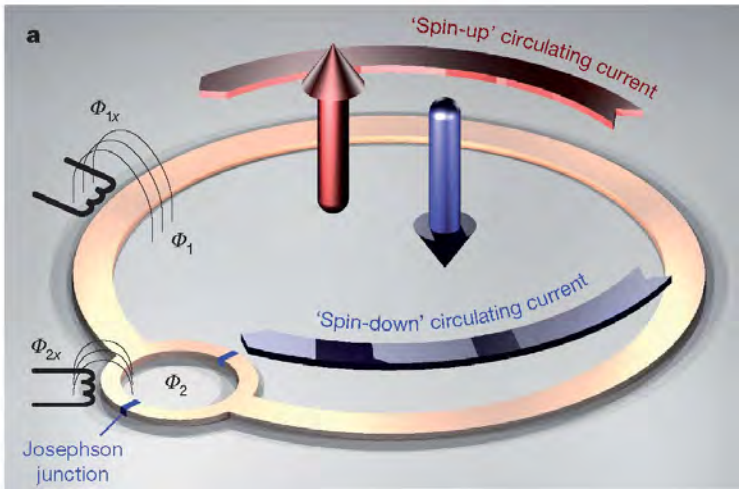
量子コンピュータの主な使い道

- 最適化（主にアニーリング）
  配送，ポートフォリオ，仕事の割り当て，機器の配置，故障診断など
  流通，運輸，自動車，金融，鉄鋼，電機，通信，IT，
- 量子シミュレーション（主にゲート）
  創薬，肥料合成，燃料電池設計など
- 機械学習（ゲート，アニーリング）
  量子ボルツマン（サンプリング），量子機械学習など

- 量子アニーリングによりこれらのタスクが高速に実行できるかどうかは、厳密には保証（証明）されていない。
- ゲート方式は「汎用」ゆえこれら以外にも使えるが，一般の用途には速くない。実質的には専用機。

量子ビットの基礎

-- 超伝導リング --

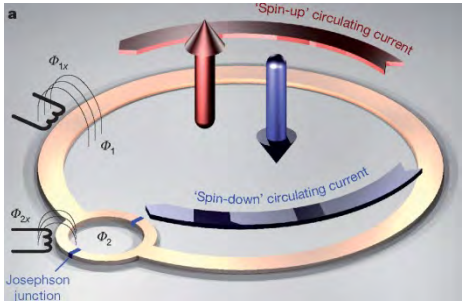


1と0が同時に存在

Johnson *et al.*
(Nature 2011)

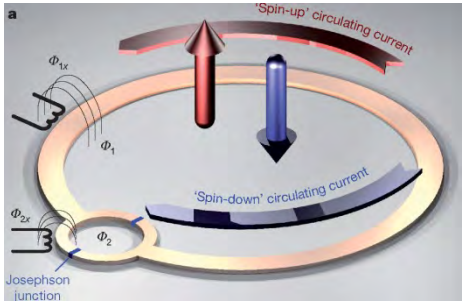
2つの数

0,1



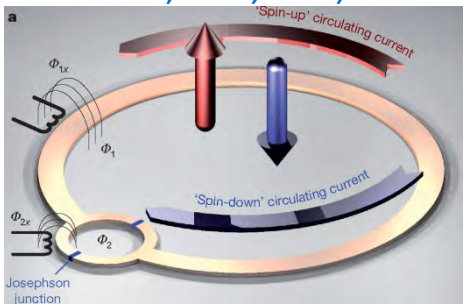
4=2x2つの数

00, 01, 10, 11

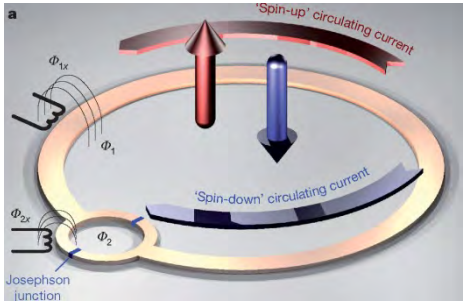


8=2x2x2つの数

000, 001, 010, 011
100, 101, 110, 111

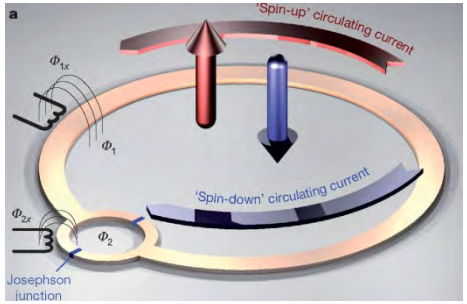


0000, 0001, 0010, 0011
0100, 0101, 0110, 0111
1000, 1001, 1010, 1011
1100, 1101, 1110, 1111



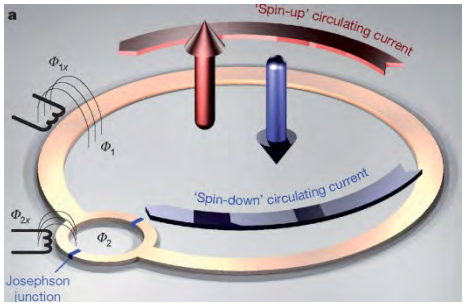
16=2^4個の数

00000, 00001, 00010, 00011
00100, 00101, 00110, 00111
01000, 01001, 01010, 01011
01100, 01101, 01110, 01111
10000, 10001, 10010, 10011
10100, 10101, 10110, 10111
11000, 11001, 11010, 11011
11100, 11101, 11110, 11111



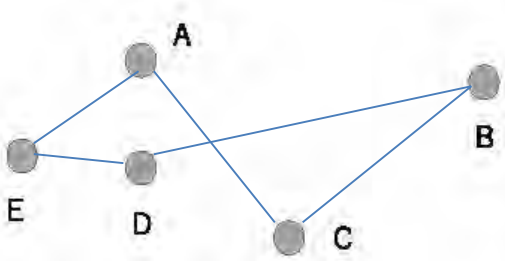
32=2^5個の数

000000, 000001, 000010, 000011
000100, 000101, 000110, 000111
001000, 001001, 001010, 001011
001100, 001101, 001110, 001111
010000, 010001, 010010, 010011
010100, 010101, 010110, 010111
011000, 011001, 011010, 011011
011100, 011101, 011110, 011111
100000, 100001, 100010, 100011
100100, 100101, 100110, 100111
101000, 101001, 101010, 101011
101100, 101101, 101110, 101111
110000, 110001, 110010, 110011
110100, 110101, 110110, 110111
111000, 111001, 111010, 111011
111100, 111101, 111110, 111111



64=2^6個の数

巡回セールスマン問題



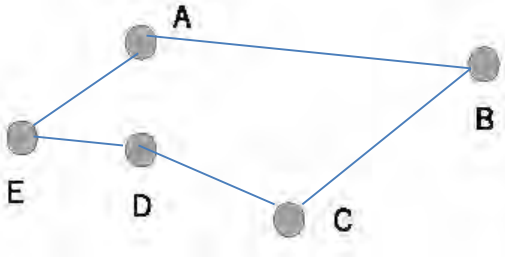
	A	B	C	D	E
1番目	1	0	0	0	0
2番目	0	0	1	0	0
3番目	0	1	0	0	0
4番目	0	0	0	1	0
5番目	0	0	0	0	1
1番目	1	0	0	0	0

経路をビット列で表現

1000000100010000001000001

↓

この数に応じた長さd



	A	B	C	D	E
1番目	1	0	0	0	0
2番目	0	1	0	0	0
3番目	0	0	1	0	0
4番目	0	0	0	1	0
5番目	0	0	0	0	1
1番目	1	0	0	0	0

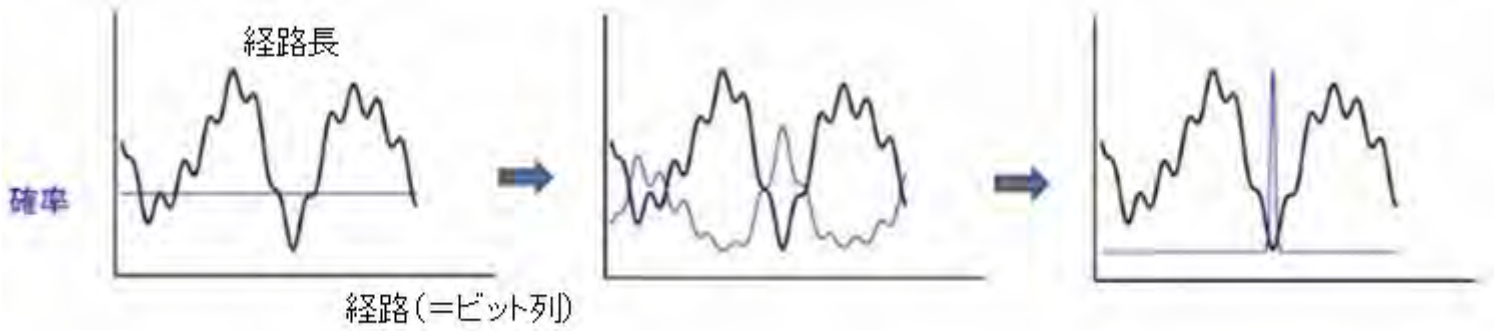
経路をビット列で表現

1000001000001000001000001

↓

この数に応じた長さd

量子アニーリングによる最適解探索



- ビット列が決まると経路長が決まる。
- 最初は量子力学的な重ね合わせですべての経路が同じ確率で同時に存在。
- 次第に量子力学効果を弱めていくと，経路長が短い経路の確率が大きくなる。

Qubit by superconducting circuit

$$-h(\Phi_1)\sigma_z - \Gamma(\Phi_2)\sigma_x$$

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

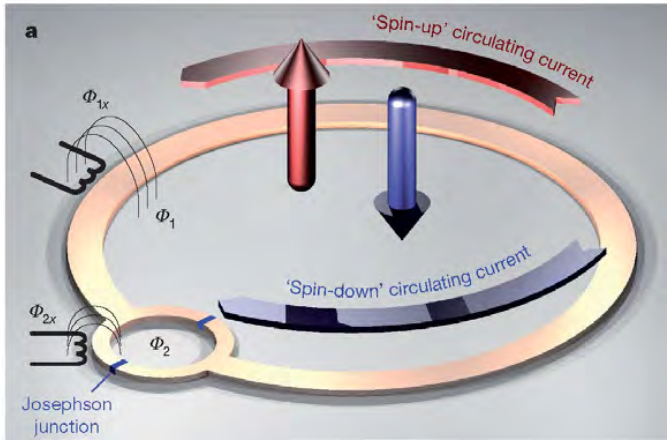
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = +1\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \Uparrow$$

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

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = a\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + b\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$\Uparrow$ $\Downarrow$

Superposition of two states



Johnson et al.
(Nature **473**, 194, 2011)

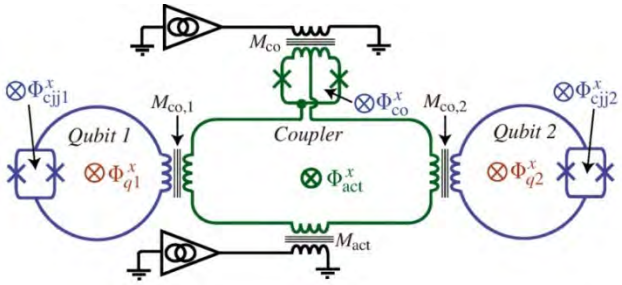
$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \Uparrow \text{ to } \Downarrow$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \Downarrow \text{ to } \Uparrow$$

Interaction

$$-\sigma_i^z J_{ij} \sigma_j^z$$



Harris et al.
Phys. Rev. B **80**, 052506 (2009)

量子アニーリングの定式化

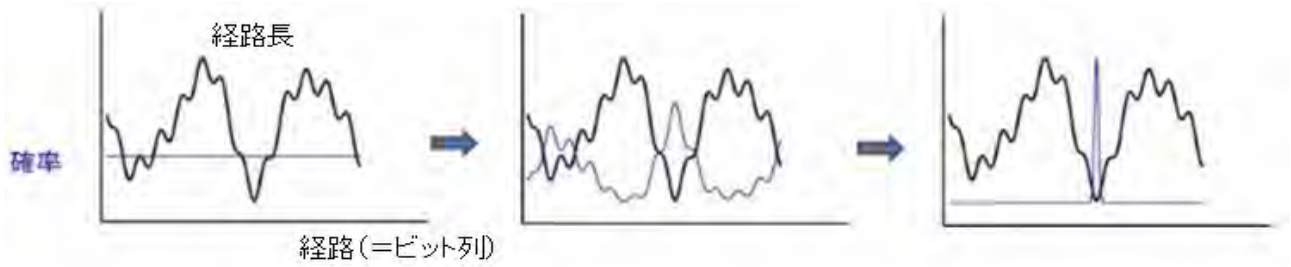
目的：組み合わせ最適化問題 ⟹ イジング模型の基底状態

相互作用$\{J_{ij}\}$ (と局所磁場 $\{h_i\}$)が与えられたとき $H_{\text{classical}}$を最小にする $\{\sigma_i^z\}$ を探す

$$H_{\text{classical}} = -\sum J_{ij}\sigma_i^z\sigma_j^z$$

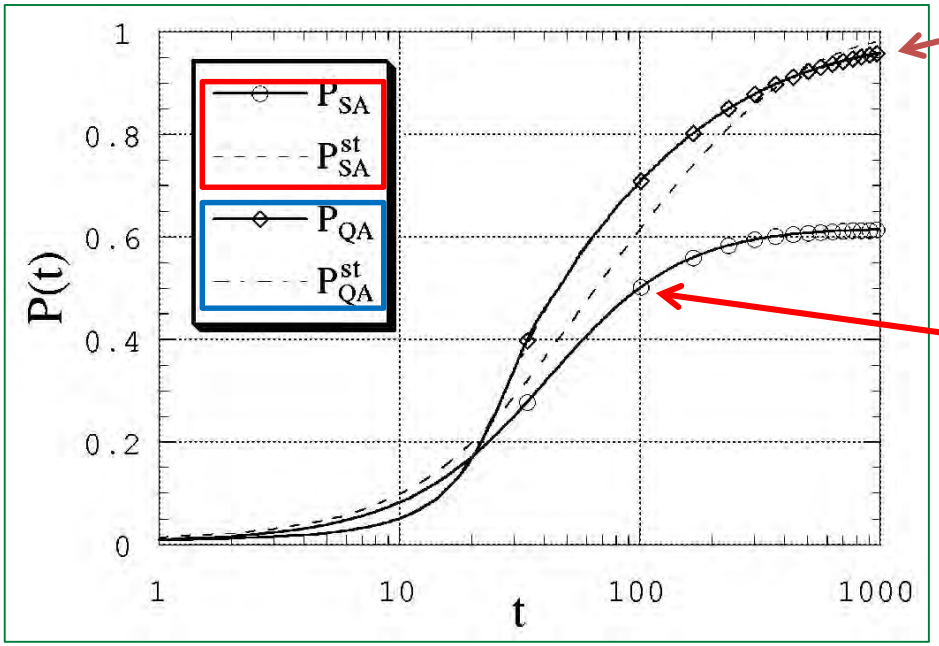
状態探索に量子ゆらぎを使う

$$H(t) = H_{\text{classical}} + H_{\text{quantum}} = -\sum J_{ij}\sigma_i^z\sigma_j^z - \Gamma(t)\sum \sigma_i^x$$



最初の例
シミュレーテッド・アニーリングとの比較

小規模なスピングラス問題 (8 spins)



$$\Gamma(t) = \frac{3}{\sqrt{t}}$$

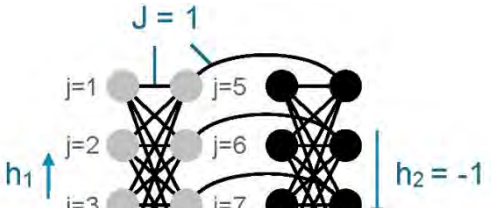
量子アニーリング

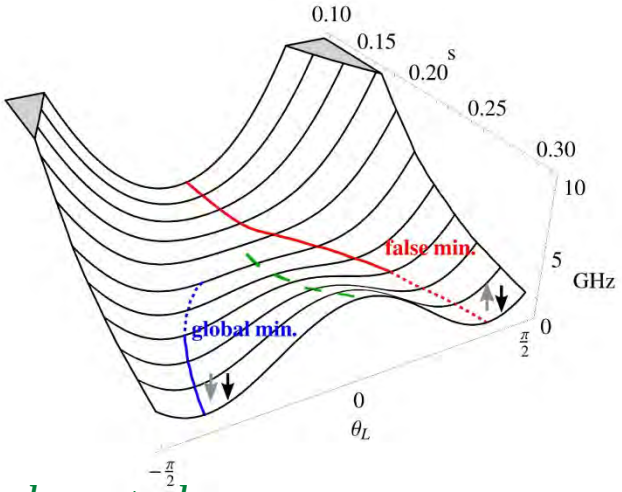
$$T(t) = \frac{3}{\sqrt{t}}$$

シミュレーテッド（古典）アニーリング

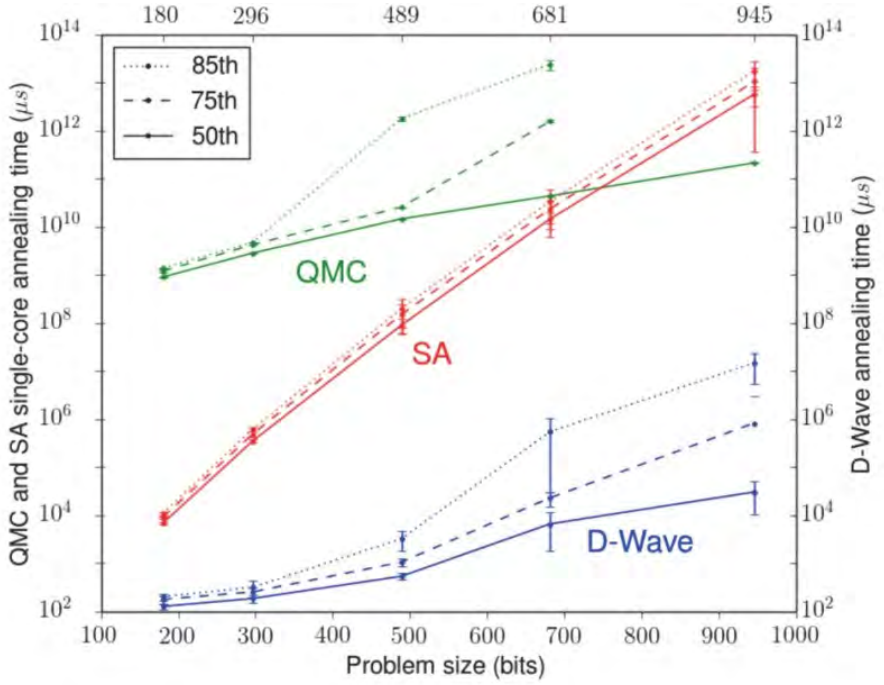
*Kadowaki and Nishimori, Phys. Rev. E **58**, 5355 (1998)*

1億倍速いというのは本当か





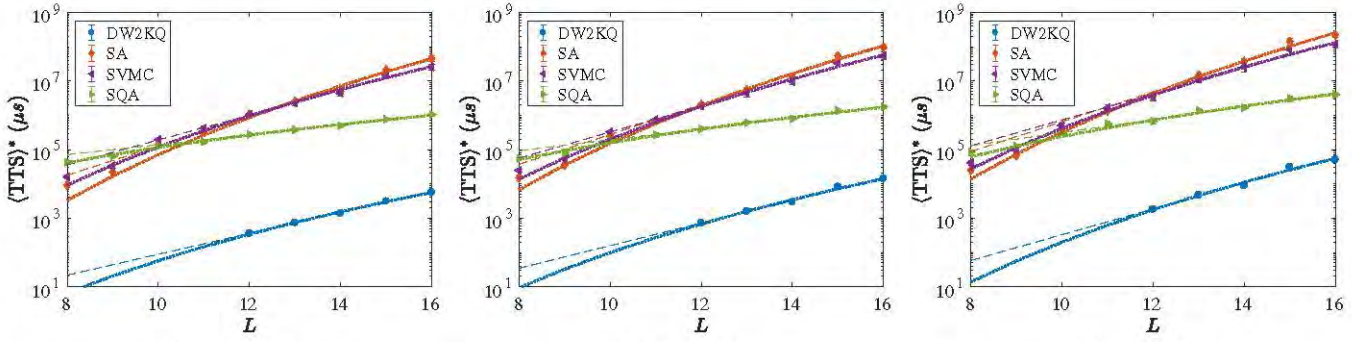
Denchev et al,
Phys Rev. X ***6****, 031015 (2016)*

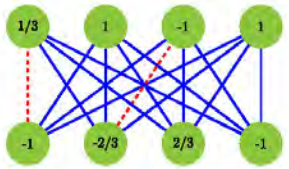


DW2X is 100 million times faster than SA and QMC on single core.

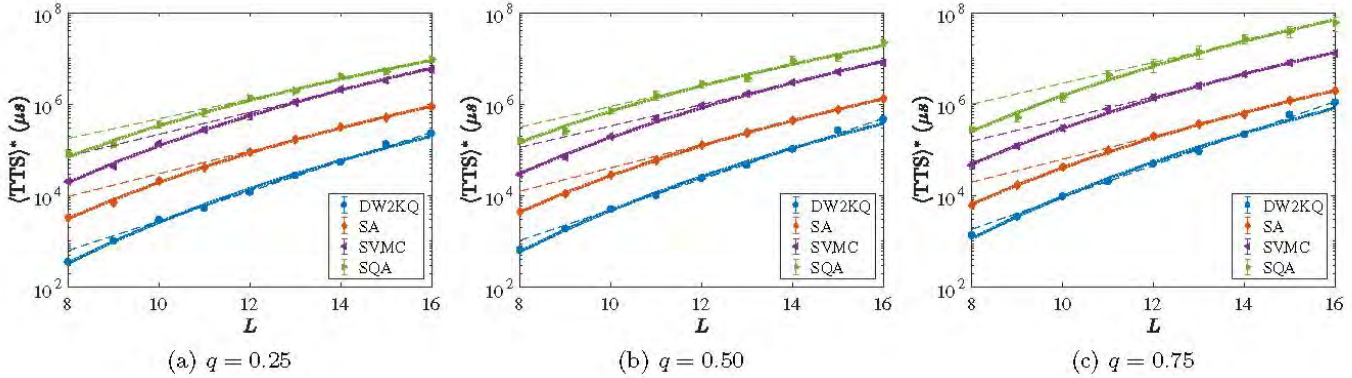
最近のベンチマークテスト
16x16のスピングラス問題

キメラをユニットとする埋め込み (8 physical qubits = single logical qubit)





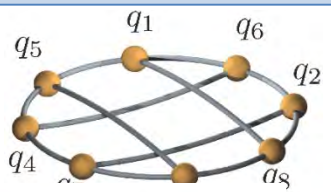
直接表現 (a physical qubit = a logical qubit)



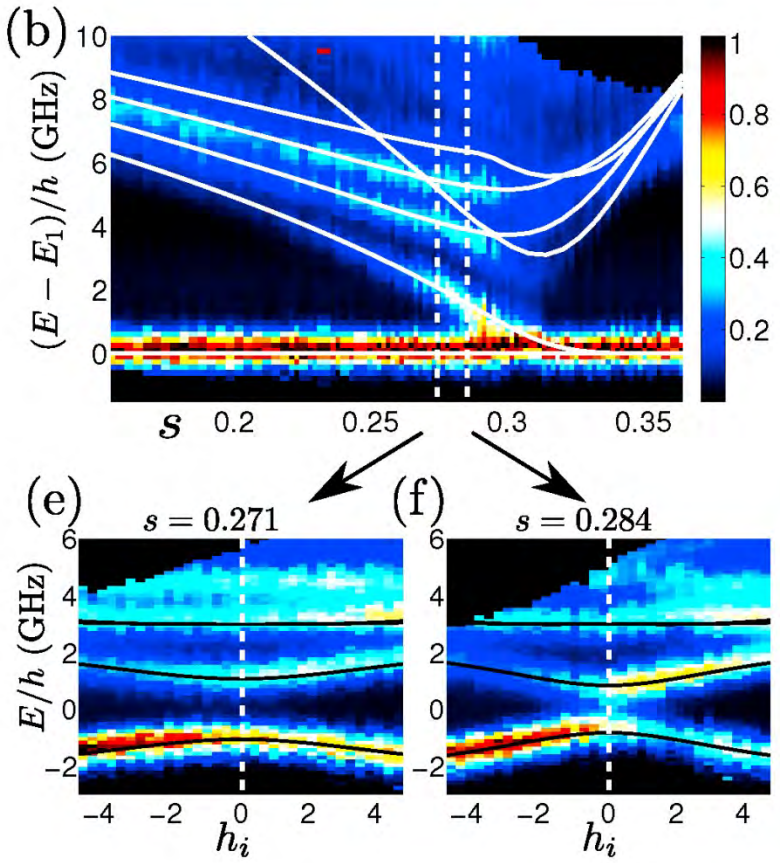
Albash and Lidar, "Demonstration of a Scaling Advantage for a Quantum Annealer over Simulated Annealing" Phys. Rev. X8, 031016 (2018)

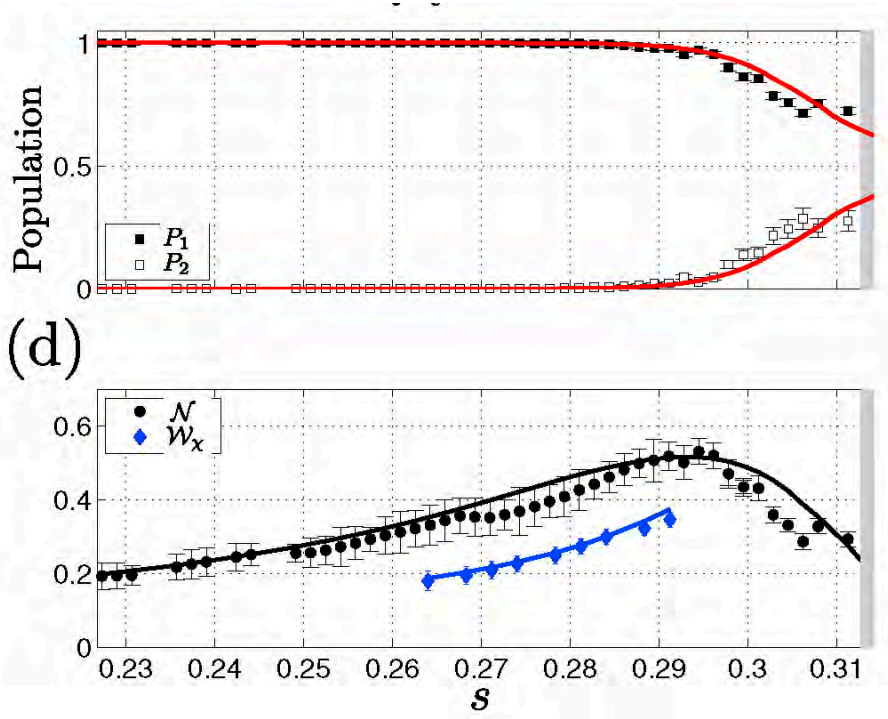
本当に量子力学で動いているのか
エネルギースペクトルと量子もつれ

Lanting et al,
Phys. Rev. X **4**, *021041 (2014)*



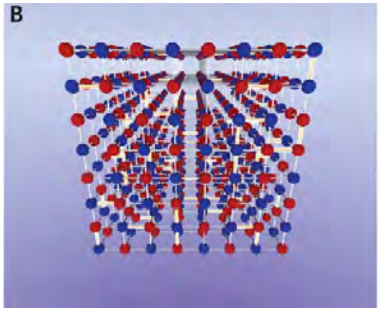
単一量子ビットのコヒーレンス時間: 10-100 ns
計算時間 : μs to ms

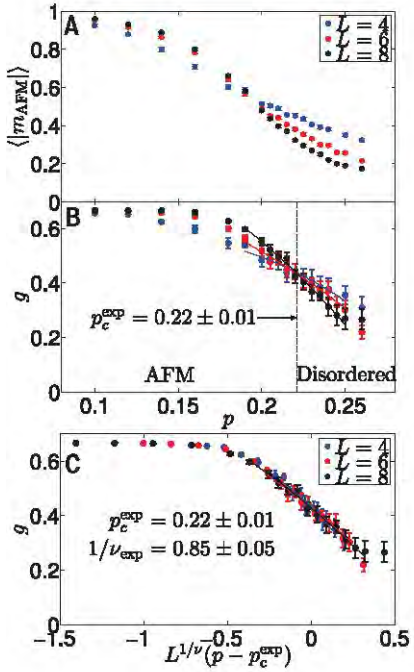


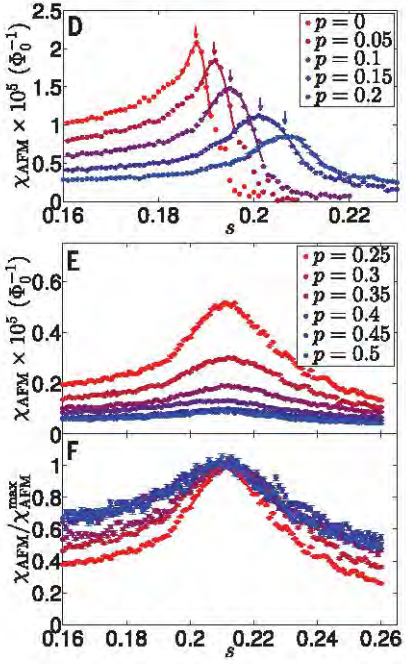


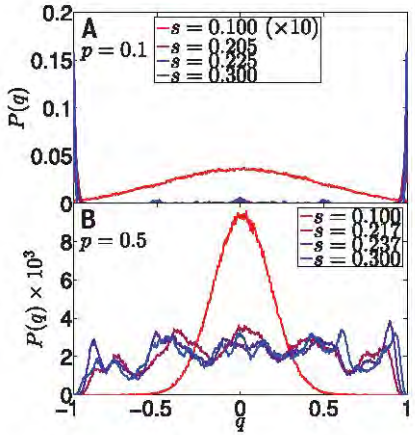
3次元量子スピングラスのシミュレーション

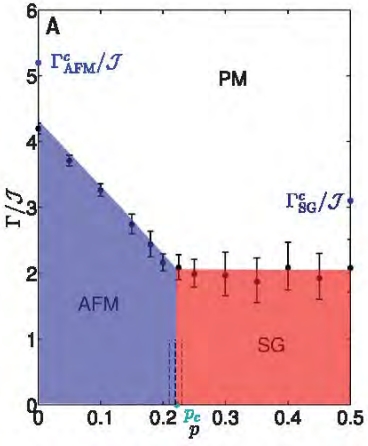
*Harris et al, Science **361**, 162 (2018)*

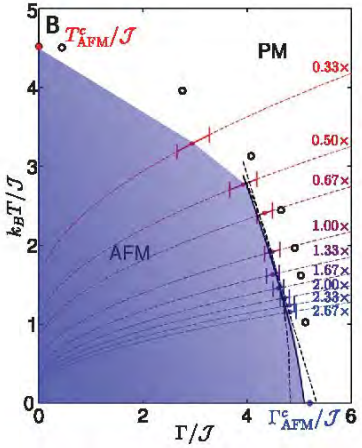




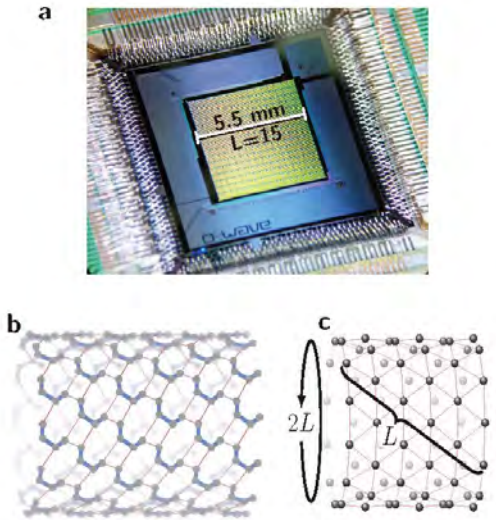


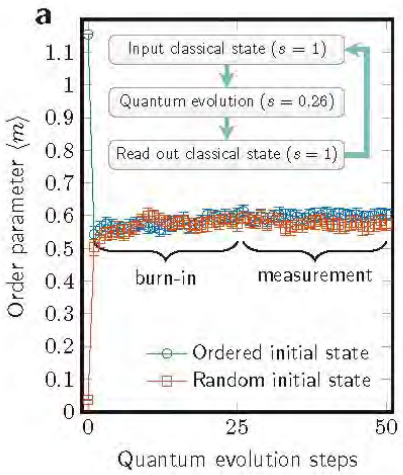


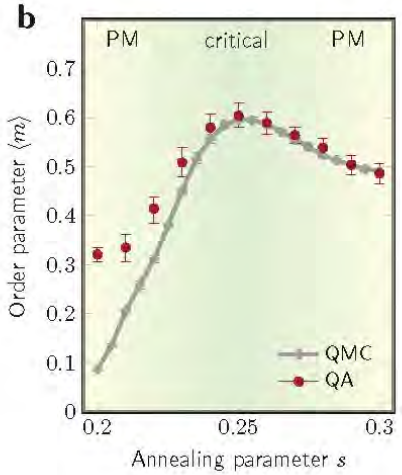


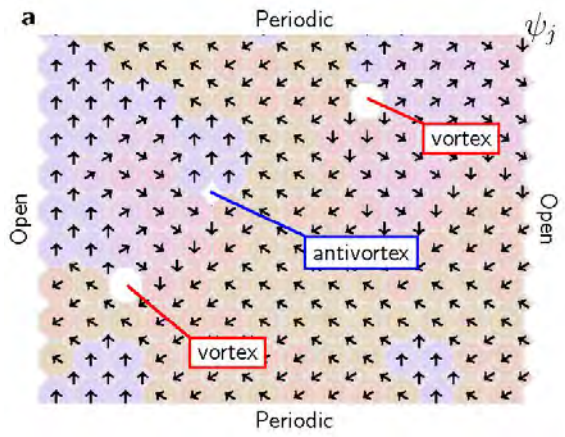


トポロジカル相転移（Kosterlitz-Thouless転移）のシミュレーション









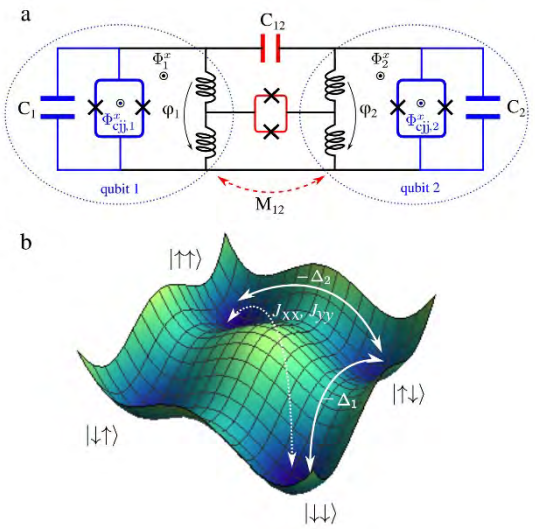
*King et al, Nature **560**, 456 (2018)*

最近の理論の進展
新しい量子効果制御方式

- 非疑似古典 (non-stoquastic) ハミルトニアン
- 非一様 inhomogeneous な横磁場制御
- リバース・アニーリング(reverse annealing)
- 計算途中での一時停止 pausing

Non-stoquasticハミルトニアン

- 負符号問題のために古典的にシミュレート困難な（強い量子効果の）項を入れる。
- これにより，従来の量子アニーリングより指数関数的に計算が高速化される例が見つかっている。



- 高速化されるだけでなく，汎用になることも分かっている。
- D-WaveやIARPA QEO（米国国家プロジェクト）で，この効果を取り入れる回路の研究が急速に進んでいる。

*Frontiers in ICT, **4**, 2 (2017), PRE **85**, 051112 (2012), J. Phys. A **48**, 335301 (2015)*

Non-stoquastic ハミルトニアン

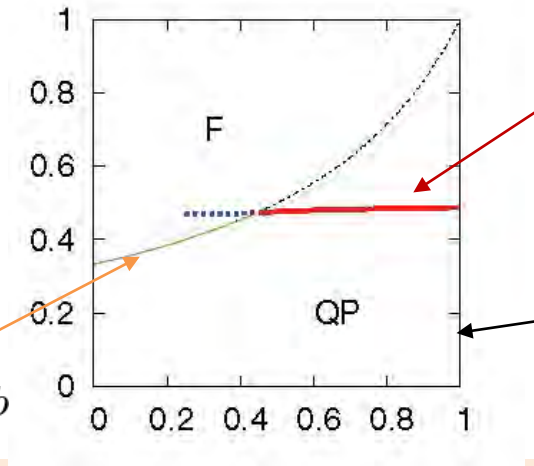
$$H = (1-s)\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^x + s(1-\lambda N)\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^x\right)^2$$

$s: 0 \to 1$

$\exp(-\beta H)$

Impossible to simulate classically (sign problem). “Strong” quantum effects.

$$H_0 = -N\left(\frac{1}{N}\sum_i \sigma_i^z\right)^p$$



1st order transition
(Exponential time) $\tau \propto e^{aN}$

2nd order transition
Polynomial time
$\tau \propto N^b$

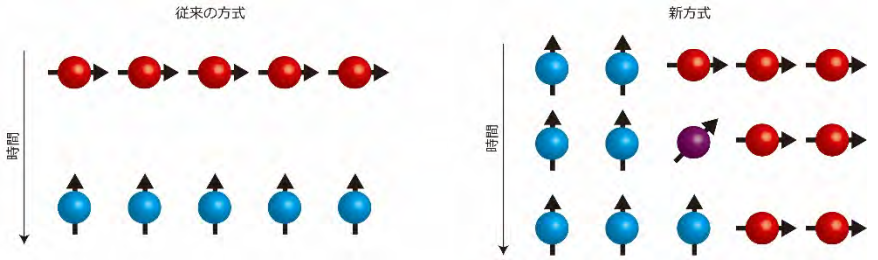
Conventional method

Non-stoquasticity leads to an exponential speedup (not just impossibility of simulation).

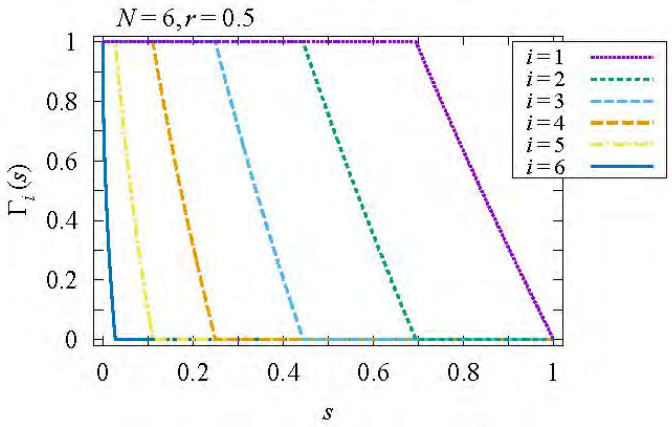
*Frontiers in ICT, **4**, 2 (2017), PRE **85**, 051112 (2012), J. Phys. A **48**, 335301 (2015)*

横磁場の非一様制御

$$H = sH_0 - (1-s)\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^x$$



$$H = sH_0 - (1-s)\sum_{i=1}^{N(1-\tau)}\sigma_i^x - 0\sum_{i=N(1-\tau)+1}^{N}\sigma_i^x$$



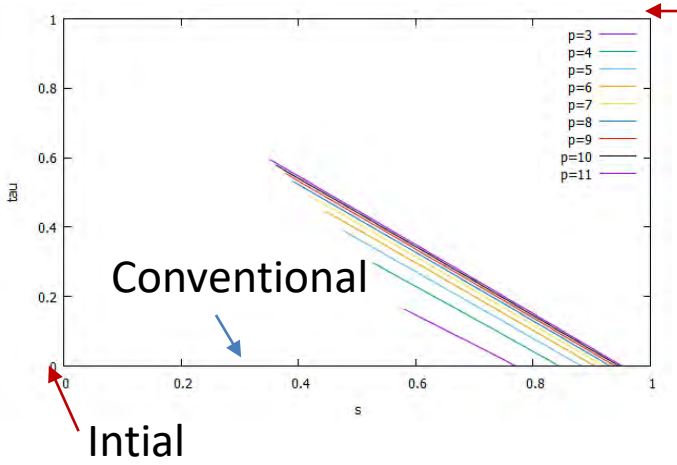
$$H_0 = -N\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^z\right)^p - \sum_{i=1}^{N}h_i\sigma_i^z$$

Random-longitudinal-field Ising model, for which non-stoquastic method doesn't work

解析結果

$$H = sH_0 - (1-s)\sum_{i=1}^{N(1-\tau)} \sigma_i^x - 0 \sum_{i=N(1-\tau)+1}^{N} \sigma_i^x$$

$$H_0 = -N\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^z\right)^p - \sum_{i=1}^{N} h_i\sigma_i^z$$



Conventional

Intial

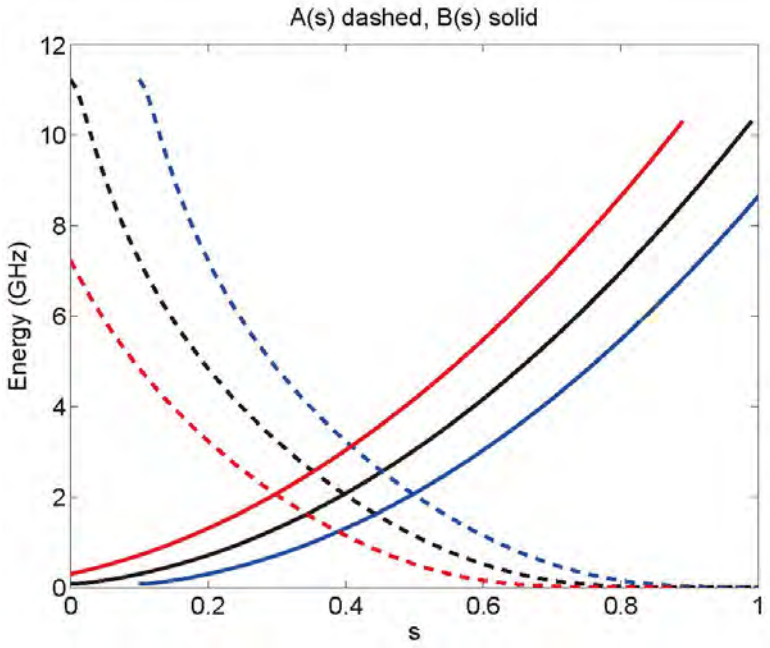
Final

1次相転移の消失

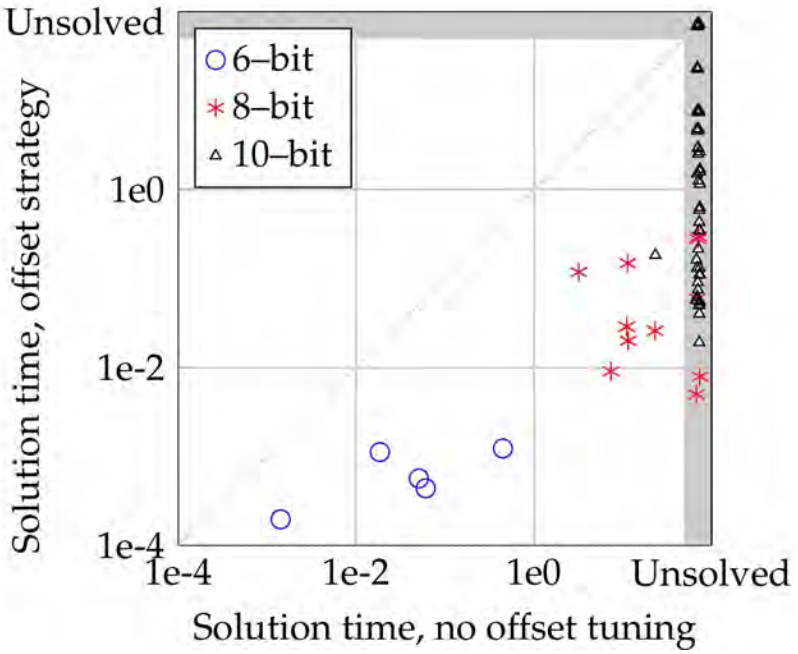
指数的な高速化（一様制御との比較）

J. Phys. Soc. Jpn. ***87***, *023002 (2018), arXiv:1808.01582*

有効性の実機での検証



量子ビットごとに横磁場を弱める
タイミングをずらせる。

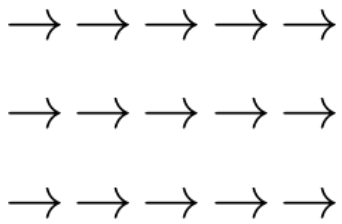


因数分解に要する時間が短縮

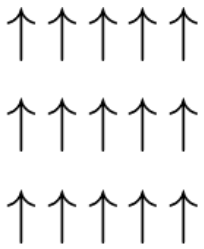
リバース・アニーリング

他の方法で解の候補が分かっている場合，そこから出発してより良い解を見つける。

通常の量子アニーリング



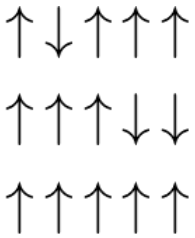
量子性を弱める



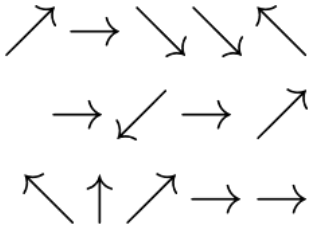
量子性が強い状態から始める

解

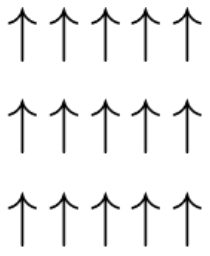
リバース アニーリング



一度量子性を強める



量子性を弱める



解候補から始める

混じった状態

より良い解

解析結果

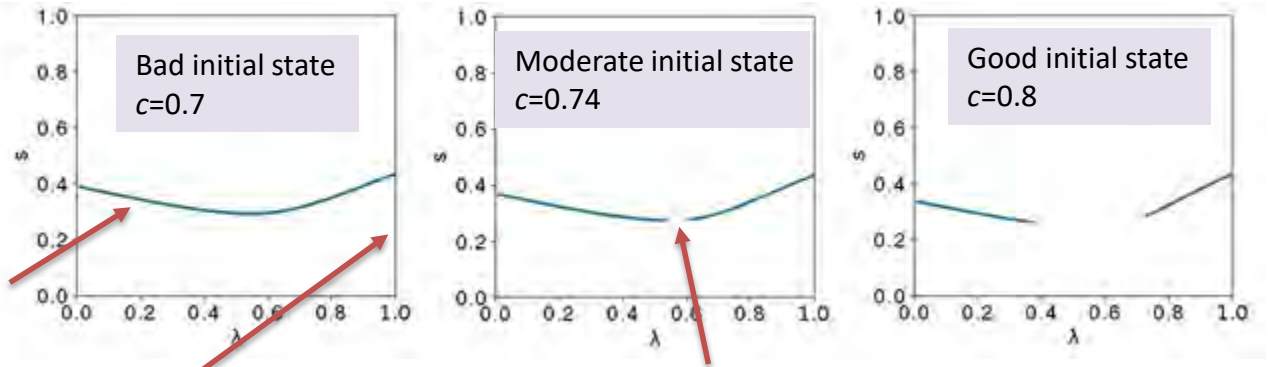
$$H = sH_0 + (1-\lambda)(1-s)H_{\text{init}} + (1-s)\lambda H_{\text{TF}}$$

$$H_{\text{int}} = -\sum_{i=1}^{N} \epsilon_i \sigma_i^z \quad (\epsilon_i = 1 \text{ (prob } c), \text{or} -1 \text{ (prob } 1-c))$$

$$H_0 = -N\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i^z\right)^p - \sum_{i=1}^{N} h_i \sigma_i^z$$

Start from the classical state ε_i and then increase quantum fluctuations by H_{TF}

$$s = \lambda = 0 \longrightarrow s = \lambda = 1$$



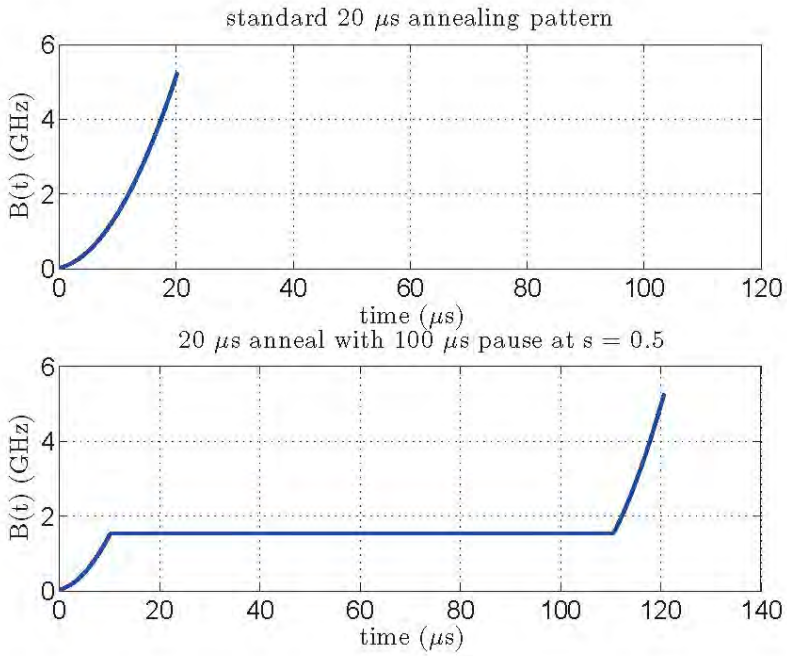
1st order

Conventional method

1st order disappears

Phys. Rev. A 98, 022314 (2018)

計算途中での一時停止 Pausing



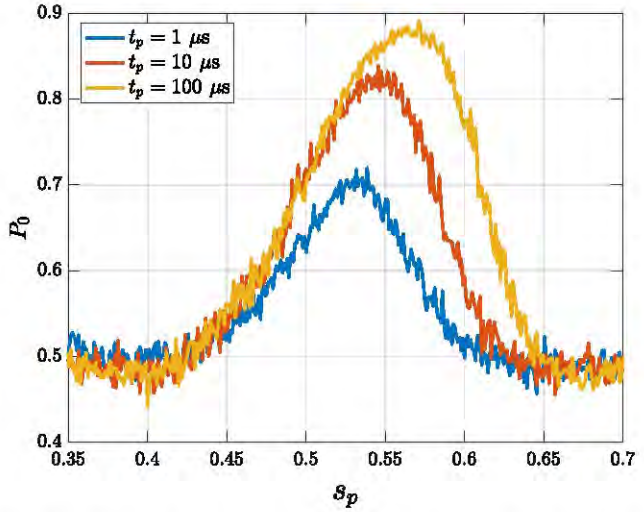


FIG. 7. Effect of changing the pause length for a 12-qubit problem instance ($\mathcal{I}_{12}^0$). Each data point is from 10 000 annealing runs using five different gauges. The anneal time $t_a = 1$ μs for all data sets is shown.

通常は、上の図のように古典項の係数を単純に上げるが、下の図のように途中で一度止めてみる。

一時停止のタイミングを適切に選ぶと、正解率が大きく上がる。

Marshall et al, Phys. Rev. Appl. 11, 044083 (2019)

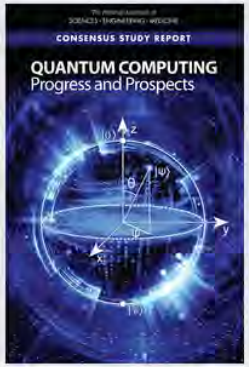
Topics of Qubits Europe 2019

- 空港でのゲート割り当て DLR
- 多モード交通流における最適化: DENSO
- 資産運用: GE Research
- スケジューリング最適化: BAE Systems
- 工場ロボットの動きの最適化: BMW
- 生産現場の最適化のハイブリッドアルゴリズム: Volkswagen
- 量子化学計算: OTI Lumionics

The National Academies of SCIENCES ENGINEERING MEDICINE THE NATIONAL ACADEMIES PRESS

This PDF is available at http://nap.edu/25196

SHARE



GET THIS BOOK

FIND RELATED TITLES

Quantum Computing: Progress and Prospects (2019)

DETAILS

272 pages | 6 x 9 | PAPERBACK
ISBN 978-0-309-47969-1 | DOI 10.17226/25196

CONTRIBUTORS

Emily Grumbling and Mark Horowitz, Editors; Committee on Technical Assessment of the Feasibility and Implications of Quantum Computing; Computer Science and Telecommunications Board; Intelligence Community Studies Board; Division on Engineering and Physical Sciences; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine

SUGGESTED CITATION

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2019. *Quantum Computing: Progress and Prospects*. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25196.

Visit the National Academies Press at NAP.edu and login or register to get:

要約部分の日本語訳

る前にポスト量子暗号技術を導入したいという企業からの関心が高まっている。企業や政府は、現在秘匿されている通信内容をたとえ30年後の将来であっても解読されるわけにはいかない。既存のWeb標準を更新するには10年以上かかるので、できるだけ早くポスト量子暗号技術への移行を開始する必要がある（4.4項を参照）。

検討結果 1：量子コンピューティングの現状と最近の進展度を考えると、RSA 2048や同等の離散対数ベースの公開鍵暗号システムを脅かす可能性のある量子コンピュータが今後10年以内に作られる可能性は極めて低い。（第7章）

検討結果 10：現在の暗号を解読できる量子コンピュータの開発に10年以上かかるとしても、そのようなマシンの危険性は十分に高く、かつ、新しいセキュリティプロトコルに移行する時間は長く不確実である。セキュリティやプライバシーが甚大な被害をこうむる可能性を最小限に抑えるためには、ポスト量子暗号技術の開発、標準化および展開が不可欠である。（第7章）

量子コンピュータが現在のプロトコルに与える大きなリスクを考慮して、量子コンピュータが解読できないポスト量子暗号、非対称暗号を開発するための努力が鋭意なされている。これらは2020年代に標準化されるだろう。暗号解読に対するShorのアルゴリズムの潜在的有用性は、初期には量子コンピューティング研究の主要な動機だったが、量子耐性を有すると考えられる暗号アルゴリズムの存在は、暗号解読における量子コンピュータの有用性を減少させるため、Shorのアルゴリズムが長期的に量子コンピューティングの研究開発の推進要因となる度合いは減少するだろう（4.3項を参照）。

量子コンピューティングを推進するリスクと利点

課題と展望

理論

- 量子アニーリングが高速であることの理論的根拠を確立
- 高速化のための拡張機能 非疑似古典効果，非一様横磁場制御，リバース・アニーリング，Pausing,…
- 誤り訂正方式

実機開発

- 高度な制御方式の実装
- 集積化・大規模化への技術的な課題克服（コヒーレンス，素子の均一性，ノイズ，）
- 超伝導以外の素子（イオン，中性原子など）

展望

- 当面は古典とのハイブリッドで比較的小規模の問題解決に適用されるだろう。
- 大規模な実用問題を解くには理論・実験両面でさらなる研究が必要
- 大規模ハード開発には大きなブレークスルーが必要、特にゲート模型では。