

量子アニーリングによる量子コンピューティング

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

西森 秀稔

量子アニーリングの当初の目的

組合せ最適化問題

離散多変数の1価関数を最小化(最大化)する問題

- イジングモデルの基底状態を探す問題に帰着
- 多くの社会的に重要な課題が組み合わせ最適化問題として定式化できる。
 - 交通流の最適化
 - 仕事のシフト最適化
 - 投資ポートフォリオの設計
 - ペイントショップ問題

組合せ最適化問題のイジング表現

実用的に重要な問題群が最適化問題として表現される。

最適経路探索, ジョブスケジューリング(仕事の割当), ポートフォリオ作成など

離散多変数関数の最小化(最大化)



$$H(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N), \sigma_i = \pm 1$$

イジングモデルの基底状態を求める問題

多体長距離相互作用

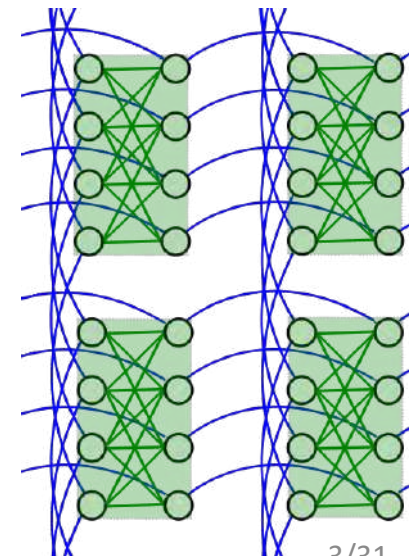


$$H = -\sum h_i \sigma_i - \sum J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum J_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k - \dots$$

ハードの構造に合わせた埋め込み

近接相互作用イジングモデルの基底状態

$$H = -\sum J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum h_i \sigma_i$$



2値ペイントショップ問題

- ベルトコンベヤー上を多種類の車(ABCDEF)が各種類2台ずつ流れて来る。各車種を2つの色(赤と青)に塗り分ける。
- 色の交代はコストがかかるため、交代回数を最小化する。
- 車の数が増えたり、色の種類が増えると大変難しくなるが、実用上重要な問題。

↓ ↓ ↓ ↓

A	D	E	B	A	F	C	B	C	D	E	F	4 回交代
A	D	E	B	A	F	C	B	C	D	E	F	4 回交代
A	D	E	B	A	F	C	B	C	D	E	F	2 回交代

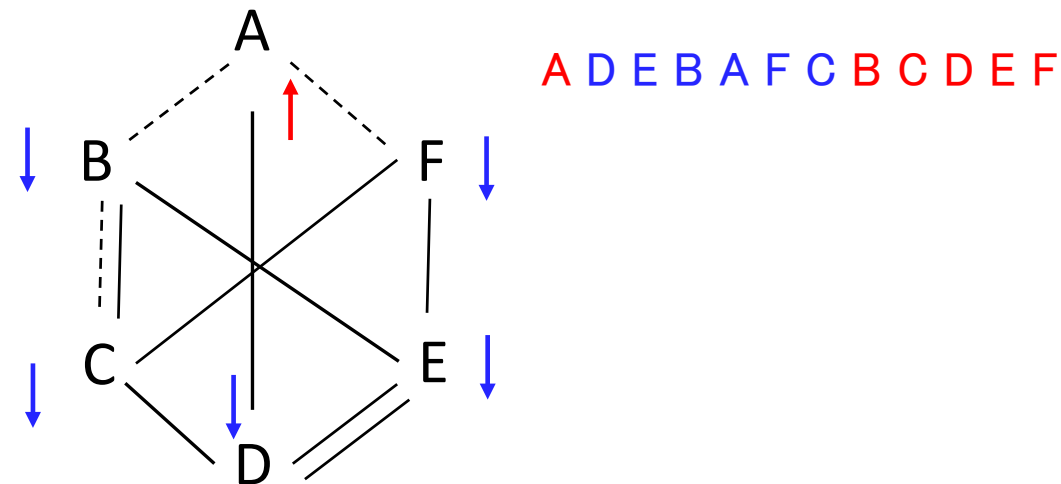
A D E B A F C B C D E F をIsing模型で表現 $H = - \sum J_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad \sigma_i = \pm 1$

隣接する2つの車がともに1回目か、ともに2回目なら同じ色 (↑ ↑ or ↓ ↓) になるように揃える相互作用 (強磁性相互作用、 $J_{ij}=1$ ——) を入れ、1回目と2回目に分かれていれば違う色 (↑ ↓ or ↓ ↑) になるような反強磁性的相互作用 ($J_{ij}=-1$ -----) を入れる。

A₁ D₁ E₁ B₁ A₂ F₁ C₁ B₂ C₂ D₂ E₂ F₂

基底状態で↑なら最初に赤で塗り、↓なら最初に青で塗る。

- VolkswagenがD-Waveの量子アニーリング装置で実証実験。従来法で288回の色変化が57回に。
- ただし、古典コンピュータ(通常のコンピュータ)で出来ない計算かどうかは不明



© Volkswagen

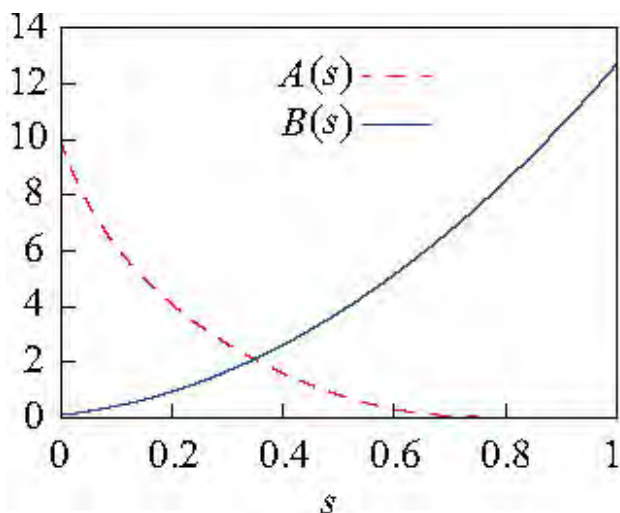
量子アニーリングの定式化

$$H_{\text{classical}} = - \sum J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z \quad \text{最適化問題のイジング表現}$$

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

量子項は古典的な状態の重ね合わせを作る。

量子項の基底状態から始める H_{quantum}



$$\begin{aligned} & |\rightarrow\rangle_1 \otimes |\rightarrow\rangle_2 \otimes \cdots \otimes |\rightarrow\rangle_N \\ &= (|\uparrow\rangle_1 + |\downarrow\rangle_1) \otimes (|\uparrow\rangle_2 + |\downarrow\rangle_2) \otimes \cdots \otimes (|\uparrow\rangle_N + |\downarrow\rangle_N) \\ &= |\uparrow_1 \uparrow_2 \uparrow_3 \cdots \uparrow_N\rangle + |\uparrow_1 \uparrow_2 \uparrow_3 \cdots \downarrow_N\rangle + \cdots + |\downarrow_1 \downarrow_2 \downarrow_3 \cdots \downarrow_N\rangle \end{aligned}$$

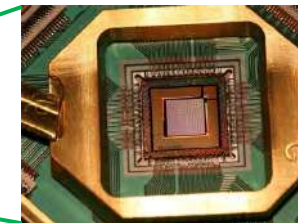
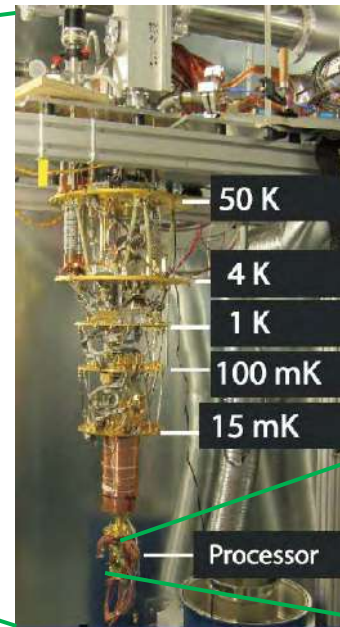


自然な時間発展(Schrödinger)

$$|\uparrow\downarrow\uparrow\uparrow \cdots \uparrow\downarrow\rangle$$

$H_{\text{classical}}$ 古典項の基底状態＝解

実デバイスとしての実現



導入企業や研究機関



(来年導入予定)

他にも米企業、米国家機関、多数のクラウドユーザー

量子アニーリングの提案

スピングラスの基底状態探索の手段として、純粹に学問的な興味だけから考え出した。

PHYSICAL REVIEW E

VOLUME 58, NUMBER 5

NOVEMBER 1998

Quantum annealing in the transverse Ising model

Tadashi Kadowaki and Hidetoshi Nishimori

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan

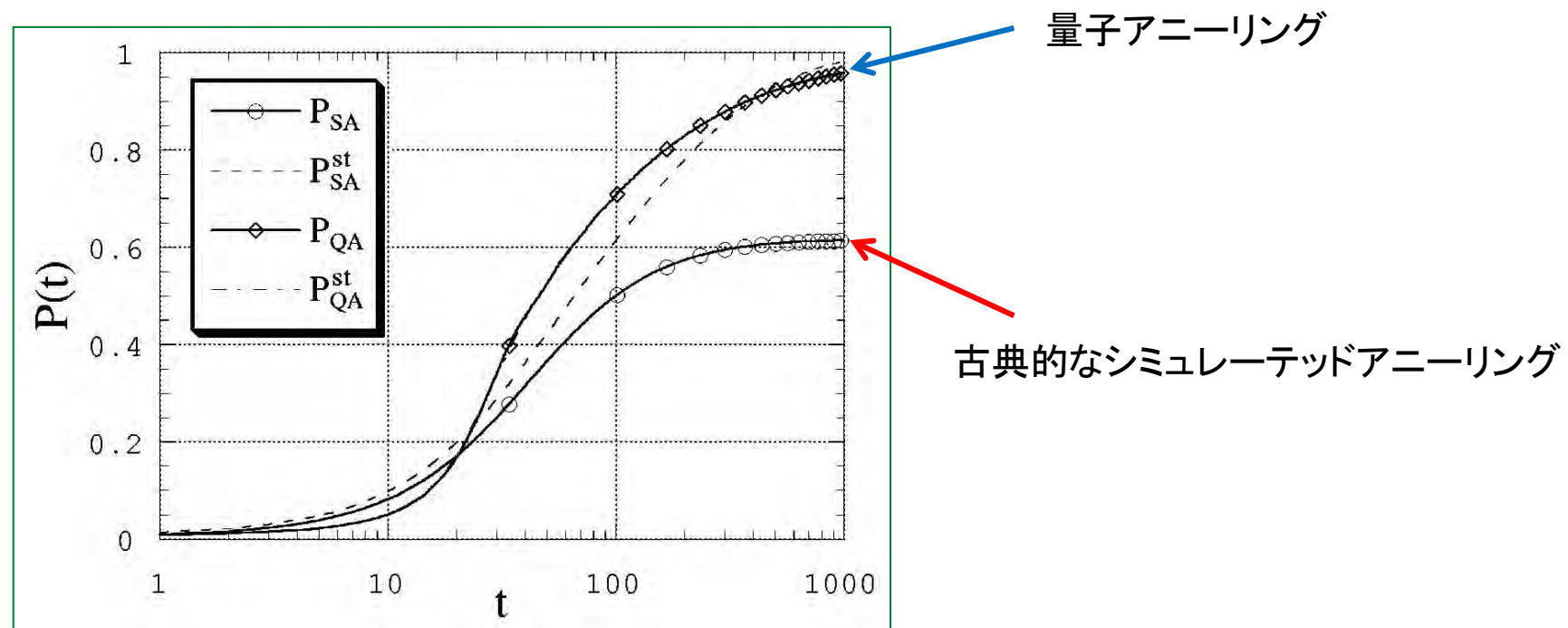
(Received 30 April 1998)

We introduce quantum fluctuations into the simulated annealing process of optimization problems, aiming at faster convergence to the optimal state. Quantum fluctuations cause transitions between states and thus play the same role as thermal fluctuations in the conventional approach. The idea is tested by the transverse Ising model, in which the transverse field is a function of time similar to the temperature in the conventional method. The goal is to find the ground state of the diagonal part of the Hamiltonian with high accuracy as quickly as possible. We have solved the time-dependent Schrödinger equation numerically for small size systems with various exchange interactions. Comparison with the results of the corresponding classical (thermal) method reveals that the quantum annealing leads to the ground state with much larger probability in almost all cases if we use the same annealing schedule. [S1063-651X(98)02910-9]

PAGE 1 OF 10

基底状態の確率の時間変化

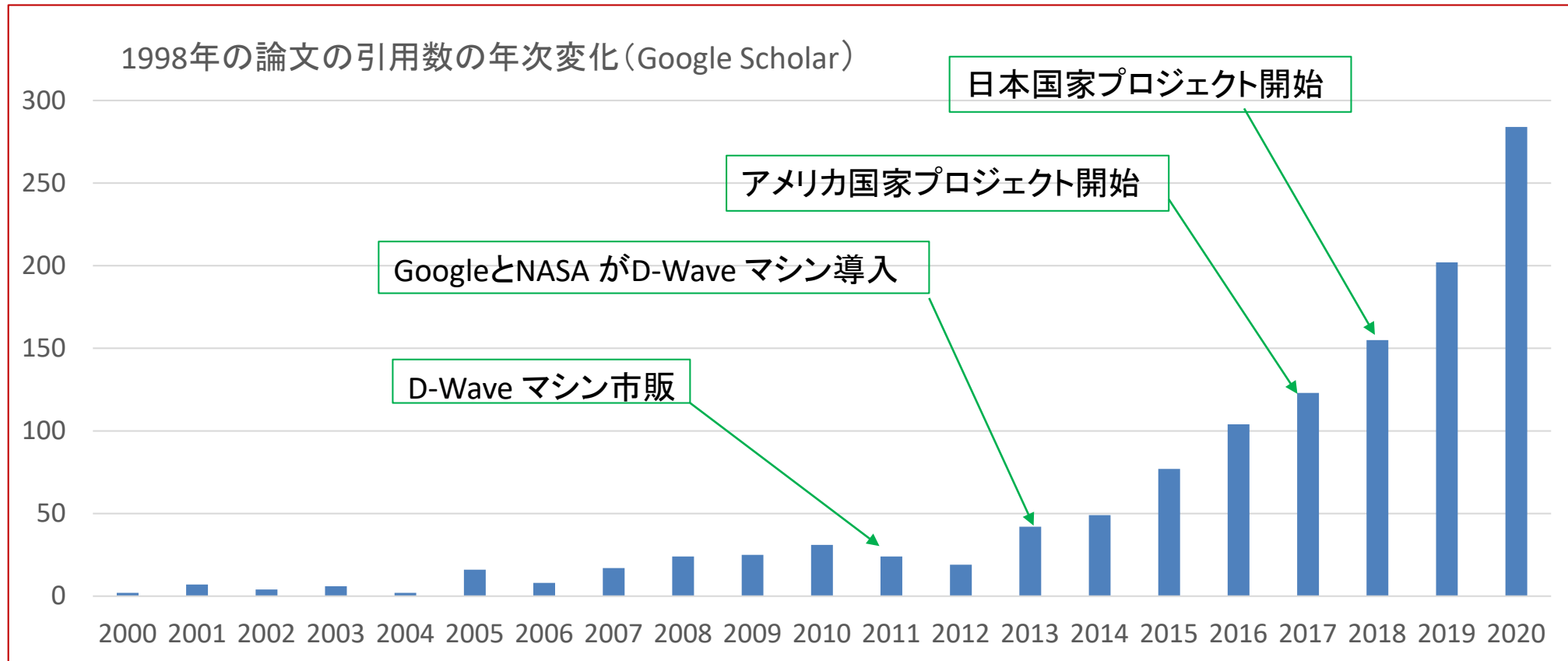
量子アニーリングが古典的な方法(シミュレーテッドアニーリング)より高い確率で正解に到達する。



Kadowaki and Nishimori, PR E 58, 5355 (1998)

量子アニーリング論文の引用数

発表してから約15年間は、ほぼ無視されていた。



私の論文は、発表してから長い間、世間受けしないものが結構ありますほとんどです。

最近の研究の方向性

1. 量子シミュレーション

量子アニーリング装置を物理実験装置として使う。

2. 非断熱量子アニーリング (高速性、汎用性、古典シミュレーション不可能性)

断熱量子計算の枠組みを脱して、積極的に励起状態を使う。

3. 非疑似古典効果 (高速性、汎用性)

古典シミュレーション不可能な効果による量子加速

4. 高度な量子効果 (横磁場) 制御

非一様横磁場、逆 (リバーズ) アニーリング、一時停止による熱平衡化

2, 3, 4 のレビュー [arXiv:2008.09913](https://arxiv.org/abs/2008.09913)

量子シミュレーションへの展開

物理実験装置としての利用、物質科学への応用

量子アニーリングによる量子シミュレーションの例

平衡状態の性質

- 3次元スピングラス
- Kosterlitz-Thouless転移
- スピンアイス
- Shastry-Sutherland模型
- 場の理論
- 量子Griffiths特異性

Harris et al., Science (2018)

King et al., Nature (2018)



King et al., arXiv:2007.10555

Kairys et al., arXiv:2003.01019



Abel et al., arXiv:2003.07374

Nishimura et al., Phys. Rev. A (2020)

非平衡(動的)状態の性質

- Kibble-Zurek機構
- 拡張Kibble-Zurek機構

Gardas et al., Sci. Rep. (2018)

Weinberg et al., Phys. Rev. Lett. (2020)

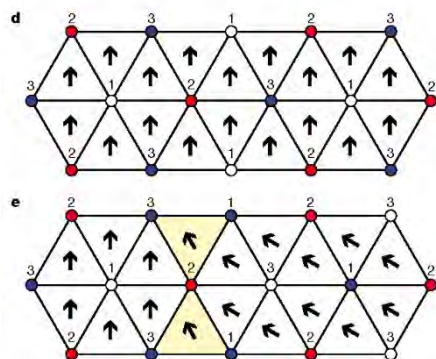
Bando et al., Phys. Rev. Res. (2020)



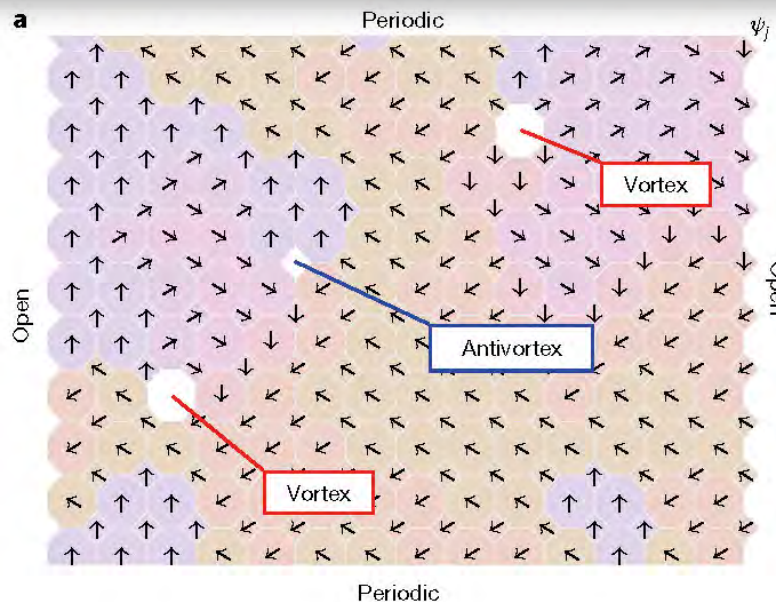
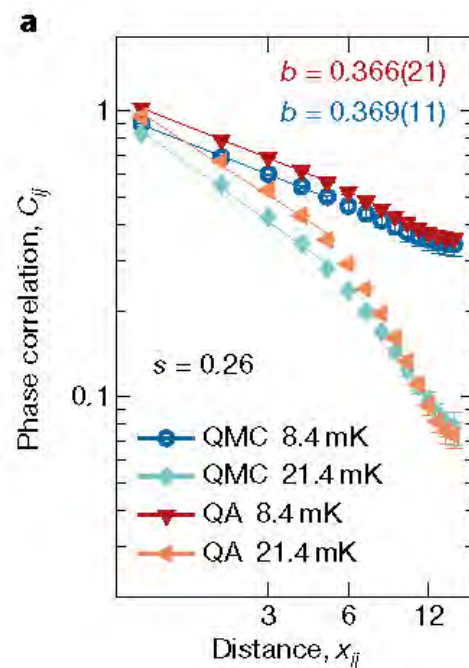
Kosterlitz-Thouless転移の量子シミュレーション

A. D. King et al., *Nature* 560, 456 (2018)

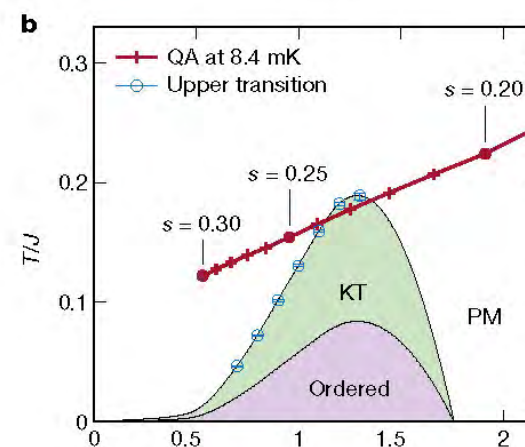
Z_6 模型を、フラストレートしたイジング模型としてD-Wave上のキメラグラフに表現



相関関数のべき減衰を検証(KT転移の特徴)



渦・反渦の対を観測

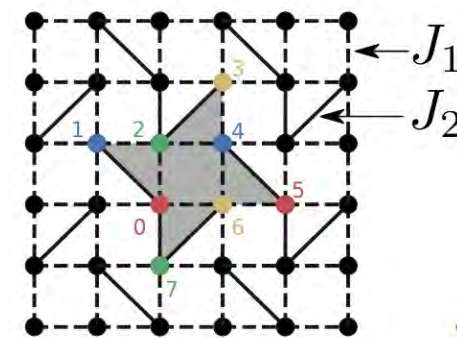
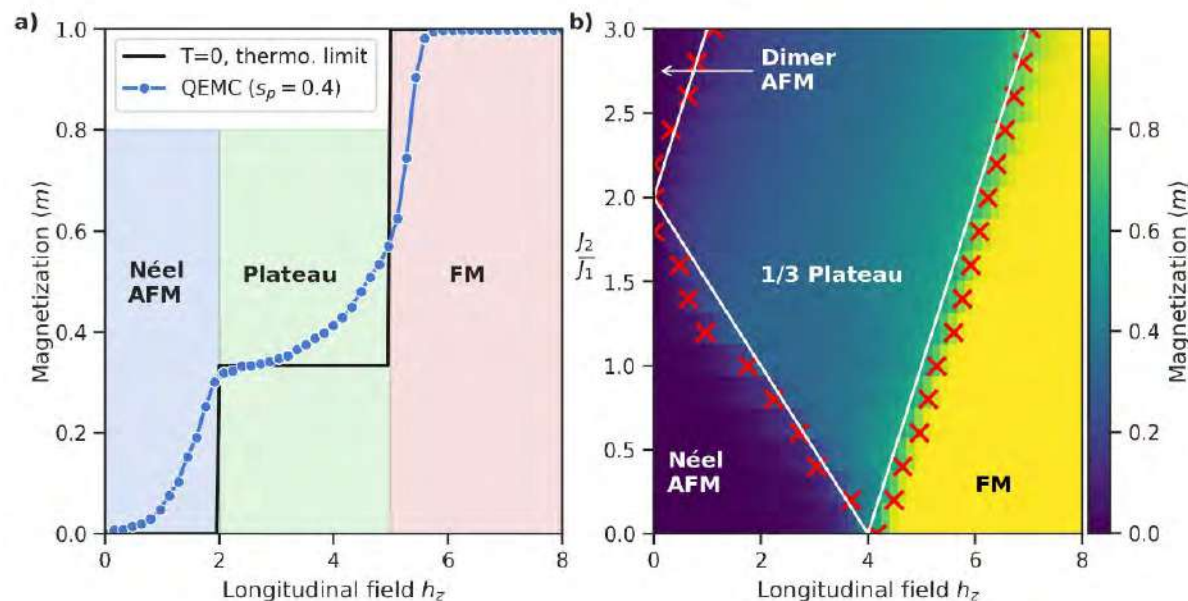


Shastry-Sutherland模型

P. Kairys et al., arXiv:2003.01019

2次元正方格子上的フラストレートしたイジング模型の基底状態の相図

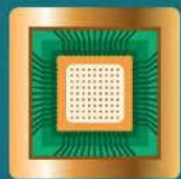
$$H = J_1 \sum_{\langle i,j \rangle} \sigma_i^z \sigma_j^z + J_2 \sum_{\langle\langle i,j \rangle\rangle} \sigma_i^z \sigma_j^z + h_z \sum_i \sigma_i^z$$



- 磁化のプラトーの兆候を観測
- 相図が理論とコンシステント

拡張Kibble-Zurek機構の量子シミュレーション

D-Waveマシンを用いた実験（量子シミュレーション）



1次元量子イジング模型
（横磁場イジング模型）の
量子シミュレーション

Y. Bando, Y. Susa, H. Oshiyama, N. Shibata, M. Ohzeki, F. Gómez-Ruiz,
D. A. Lidar, S. Suzuki, A. del Campo, and H. Nishimori, *Phys. Rev. Res.* **2**, 033369 (2020)

Kibble-Zurek機構の問題意識

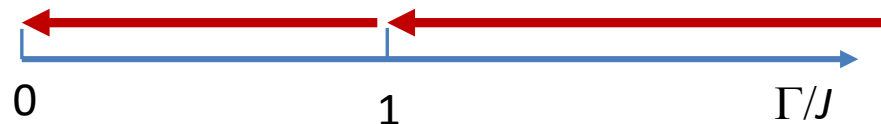
Kibble (1976), Zurek (1985)

1次元横磁場イジング模型の量子相転移

$$H = -J \sum_{i=1}^L \sigma_i^z \sigma_{i+1}^z - \Gamma \sum_{i=1}^L \sigma_i^x \quad (J > 0)$$

$$|\downarrow_1 \downarrow_2 \downarrow_3 \cdots \downarrow_{L-1} \downarrow_L\rangle$$

$$|\uparrow_1 \uparrow_2 \uparrow_3 \cdots \uparrow_{L-1} \uparrow_L\rangle$$



$$|\uparrow_1 \uparrow_2 \uparrow_3 \cdots \uparrow_L\rangle + |\uparrow_1 \uparrow_2 \uparrow_3 \cdots \downarrow_L\rangle + \cdots + |\downarrow_1 \downarrow_2 \downarrow_3 \cdots \downarrow_L\rangle$$

欠陥 (キンク)



横磁場の強さ Γ を有限の速度で変えると、非平衡状態になり、 $\Gamma=0$ の最終状態に欠陥が生じる。

問題

アニーリングの時間(t_a)を変えると、欠陥数(n)はどう変わるか。 n の t_a についての関数形を明らかに。

Kibble-Zurek機構の予言

$$\frac{n}{L} = \rho \propto (t_a)^{-\frac{dv}{1+dv}}$$

d : 系の次元

n : 平均欠陥数

L : 系の大きさ

t_a : 駆動時間 = $1/(\text{パラメータの変化速度})$

$$\xi \sim (\Gamma - \Gamma_c)^{-\nu}$$

$$\tau \sim (\Gamma - \Gamma_c)^{-\nu z}$$

1次元横磁場イジング模型

$$\rho \propto t_a^{-0.5}$$

孤立系(完全な量子ビット) $\nu = z = 1$

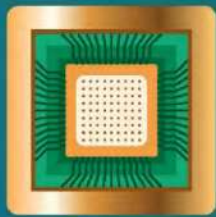
$$\rho \propto t_a^{-0.28}$$

環境の影響を受けた系(不完全な量子ビット) $\nu = 0.63, z = 1.98$ (*Werner et al., 2005*)

$$H = -J \sum_{i=1}^{N_x} \sigma_i^z \sigma_{i+1}^z - \Delta \sum_{i=1}^{N_x} \sigma_i^x + \sum_{i,k} \{C_k(a_{i,k}^\dagger + a_{i,k})\sigma_i^z + \omega_{i,k} a_{i,k}^\dagger a_{i,k}\},$$

1次元鎖上の欠陥数を実験的に数える

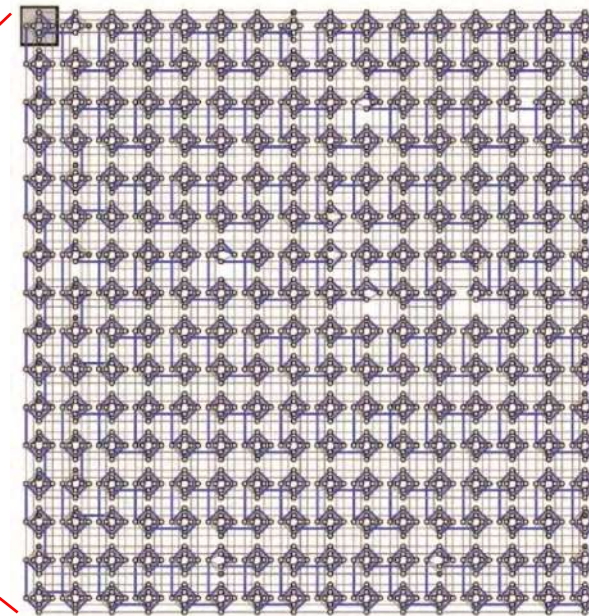
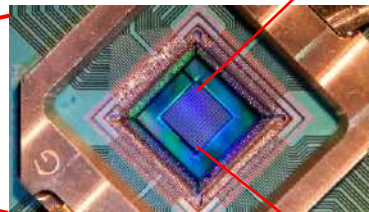
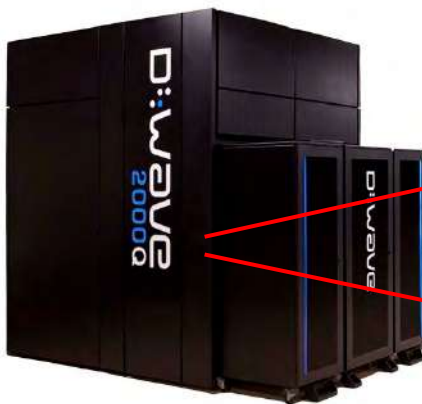
D-Waveマシンを用いた実験（量子シミュレーション）



欠陥の生成

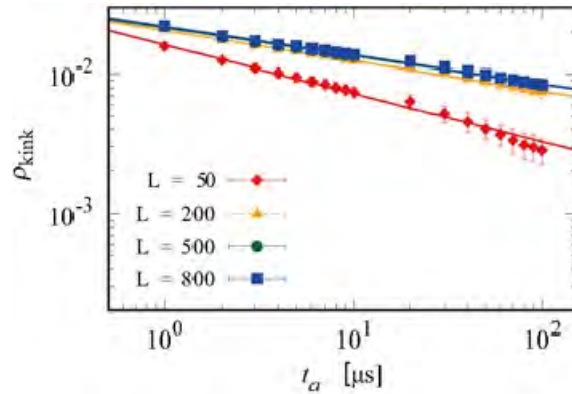


1次元量子イジング模型
（横磁場イジング模型）の
量子シミュレーション

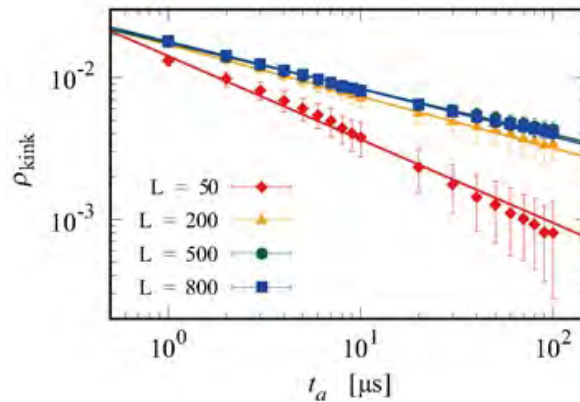


欠陥数(平均値)に関する理論の検証

NASAマシン : 減少率0.20



Burnabyマシン : 減少率0.34



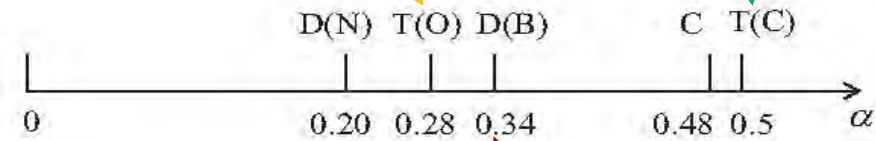
平均欠陥数の減少率

完全でない量子ビット

完全な量子ビット

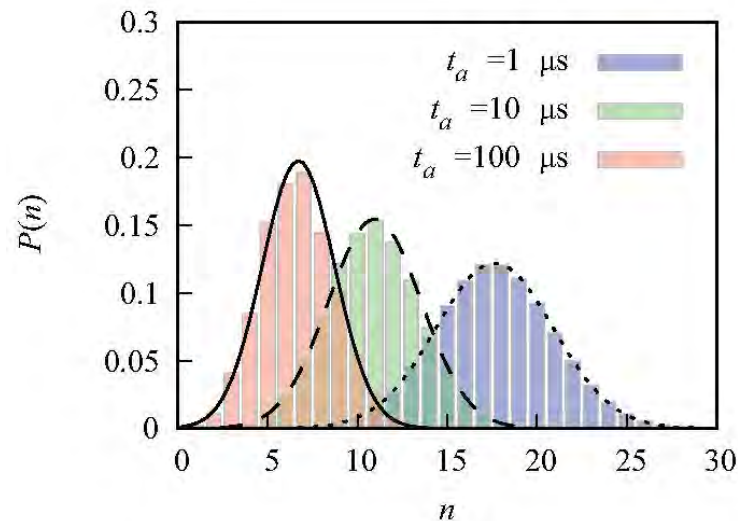
理論値0.28

理論値0.5



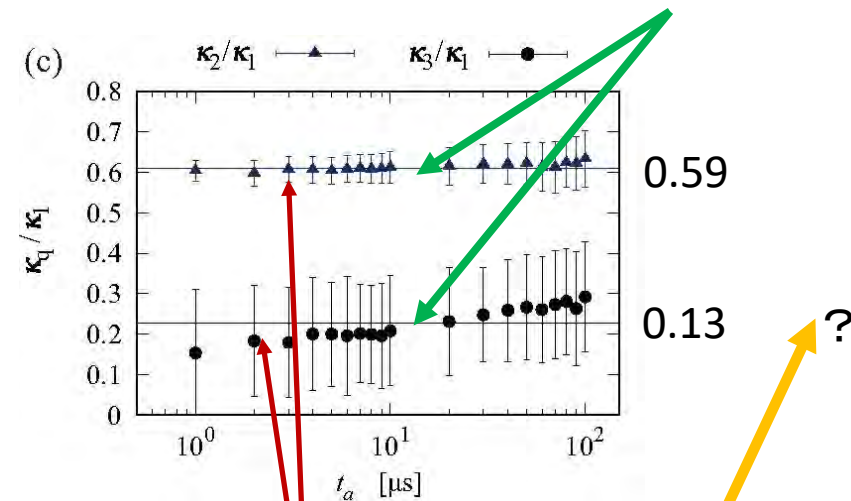
実験値 0.20(NASA), 0.34(Burnaby)

欠陥数の統計に関する理論の検証



分布の広がりや非対称性を検証

完全な量子ビットでの理論値 (横線)



実験値▲, ●

完全でない量子ビットでの理論値はまだない

量子コンピュータが、理論がまだ確立されていない事柄を予測した(おそらく)初めての例。

この成果の意義

- 完全な量子ビットを想定して展開された理論の結果が、完全でない量子ビットを使った実験（量子エミュレーション？）でも（実験誤差の範囲で）成立していることが分かった。
- 完全でない量子ビットを想定した理論はまだない。本研究はその展開を促している。
- 実験で未知の現象が見つかって、それが理論の展開を促すという物理学の王道。
- ごく短い時間の範囲については古典コンピュータでも検証できるが、ほとんどの範囲では非常に困難。古典コンピュータでは大変困難な計算（実験）を量子コンピュータが行った。
- 物質の性質を量子デバイス上で解明する量子シミュレーションが、量子アニーリングマシンについても重要な方向性であることを示した。今後、さらに発展の可能性。

現状と近未来

量子アニーリング

- **(高速性)** D-Waveデバイスで、古典コンピュータでは実行が困難なタスクを実行した例は、(Kibble-Zurek機構の話を除いて) 多分まだない。まだまだ基礎研究が必要。
- **(社会課題の解決)** 社会課題を組合せ最適化問題としてとらえて、イジング模型で表現することにより、その課題固有の伝統的な手法より迅速に解ける可能性に多くの人が(量子アニーリングをきっかけに) 気づき始めている。
- **(システムサイズ)** 実社会の課題をそのまま乗せられるサイズのシステムには現状ではなっていない。量子・古典ハイブリッドが現実的。そのためのユーザーインターフェースがD-Waveから提供されている。
- **(基礎研究)** 量子アニーリングが最適化問題解決の主要な手段として社会的に定着するまでには、基礎理論から実機開発まで幅広い分野での進歩が必要。

(参考) ゲート方式

- **(量子シミュレーション)** NISQデバイスが、古典コンピュータでは扱えない量子化学シミュレーションを実行できるかどうかはまだ分かっていない。そのギャップを埋めるためには大きな飛躍が必要だろう。

Google Quantum AI Laboratory, arXiv:2004.04174 (April, 2020)

まとめ

- 現行のシステムで実証実験が進んでいる。
- 量子シミュレーションにも使われ始めている。
- 大規模な実用化に至るまでには、まだ相当の基礎研究（特に理論）が必要。
- 現行の量子アニーリング装置が古典コンピュータを大幅に上回る計算速度を出せるという一般的な理論的根拠は見つかっていない。基礎的な理論研究が必須。
- 古典コンピュータとの組み合わせ（ハイブリッド）による実用化が当面の目標。
- 本格的な実用化が社会に定着するまでには長い時間がかかる（特にゲート方式）。

社会的な側面について少し

最大の課題は人材と基礎科学の研究

- 日本の最大の弱点は研究者層の薄さ。米国と決定的な開きがある。
- 国内大学で当分野を専門とする研究室は限られている。一部の大学の一部の研究室。
- 大学での組織的な人材育成への財政資源投入が、研究自体への予算配分より中長期的には有効かつ重要。
- この分野は基礎研究、デバイス作成、実証実験などあらゆるレベルの研究開発が同時進行している。
- 基礎研究が終わってから商品開発を進める通常の研究開発と全く異なっている。

量子技術イノベーション戦略 (最終報告)

令和2年1月21日
統合イノベーション戦略推進会議

量子技術によるイノベーション

I. 量子技術を取り巻く状況

- (1) 国内外の諸情勢の変化
- (2) 量子技術をめぐる諸外国の動向
- (3) 量子技術をめぐる我が国の動向
- (4) 国をあげて量子技術に取り組む必要性

II. 基本方針

III. 量子技術イノベーションが拓く社会像

IV. 量子技術イノベーション実現に向けた5つの戦略

1. 技術開発戦略

- (1) 主要技術領域
- (2) 量子融合イノベーション領域
- (3) 量子 inspired 技術・準量子技術
- (4) 基礎基盤的な研究

2. 国際戦略

- (1) 国際協力の戦略的展開
- (2) 安全保障貿易管理の徹底

3. 産業・イノベーション戦略

- (1) 「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）」の形成
- (2) 「量子技術イノベーション協議会（仮称）」の創設
- (3) 創業・投資環境の整備

4. 知的財産・国際標準化戦略

- (1) 知的財産戦略
- (2) 国際標準化戦略

5. 人材戦略

- (1) 優れた人材の育成・確保
- (2) 頭脳循環（ブレインサーキュレーション）の推進
- (3) 量子ネイティブ（Quantum Native）の育成

V. 本戦略の推進体制

米政府(議会)の戦略方針

PUBLIC LAW 115-368—DEC. 21, 2018

米国 国家量子イニシアティブ法

NATIONAL QUANTUM INITIATIVE ACT

「量子情報科学・技術」

量子情報科学・技術

quantum information science and technology

SEC. 3. PURPOSES.

The purpose of this Act is to ensure the continued leadership of the United States in quantum information science and its technology applications by—

(1) supporting research, development, demonstration, and application of quantum information science and technology—

(A) to expand the number of researchers, educators, and students with training in quantum information science and technology to develop a workforce pipeline;

(B) to promote the development and inclusion of multidisciplinary curriculum and research opportunities for quantum information science at the undergraduate, graduate, and postdoctoral level;

(C) to address basic research knowledge gaps, including computational research gaps;

(D) to promote the further development of facilities and centers available for quantum information science and technology research, testing and education; and

(E) to stimulate research on and promote more rapid development of quantum-based technologies;

(2) improving the interagency planning and coordination of Federal research and development of quantum information science and technology;

(3) maximizing the effectiveness of the Federal Government's quantum information science and technology research, development, and demonstration programs;

(4) promoting collaboration among the Federal Government, Federal laboratories, industry, and universities; and

(5) promoting the development of international standards for quantum information science and technology security—

(A) to facilitate technology innovation and private sector commercialization; and

(B) to meet economic and national security goals.

日本政府の戦略

量子技術イノベーション戦略 (最終報告)

令和2年1月21日
統合イノベーション戦略推進会議

人材育成の優先順位は最下位

I. 量子技術を取り巻く状況

- (1) 国内外の諸情勢の変化
- (2) 量子技術をめぐる諸外国の動向
- (3) 量子技術をめぐる我が国の動向
- (4) 国をあげて量子技術に取り組む必要性

II. 基本方針

III. 量子技術イノベーションが拓く社会像

IV. 量子技術イノベーション実現に向けた5つの戦略

1. 技術開発戦略

- (1) 主要技術領域
- (2) 量子融合イノベーション領域
- (3) 量子 inspired 技術・準量子技術
- (4) 基礎基盤的な研究

2. 国際戦略

- (1) 国際協力の戦略的展開
- (2) 安全保障貿易管理の徹底

3. 産業・イノベーション戦略

- (1) 「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）」の形成
- (2) 「量子技術イノベーション協議会（仮称）」の創設
- (3) 創業・投資環境の整備

4. 知的財産・国際標準化戦略

- (1) 知的財産戦略
- (2) 国際標準化戦略

5. 人材戦略

- (1) 優れた人材の育成・確保
- (2) 頭脳循環（ブレインサーキュレーション）の推進
- (3) 量子ネイティブ（Quantum Native）の育成

V. 本戦略の推進体制

米政府(議会)の戦略方針

PUBLIC LAW 115-368—DEC. 21, 2018

人材育成が最優先課題

米国 国家量子イニシアティブ法

NATIONAL QUANTUM INITIATIVE ACT

本法律は、次の施策を実施することにより、量子情報科学とその技術面での応用において、米国がリーダーシップを取り続けられる体制を保証することを目的とする。

- (A) 量子情報科学技術に通じた研究者、教育者、学生の数を増やし、人材の供給体制を確立する。
- (B) 学部、大学院、ポスドクの各レベルにおいて、量子情報科学に関わる学際的なカリキュラムや研究推進の機会の開発を進める。

SEC. 3. PURPOSES.

The purpose of this Act is to ensure the continued leadership of the United States in quantum information science and its technology applications by—

(1) supporting research, development, demonstration, and application of quantum information science and technology—

(A) to expand the number of researchers, educators, and students with training in quantum information science and technology to develop a workforce pipeline;

(B) to promote the development and inclusion of multidisciplinary curriculum and research opportunities for quantum information science at the undergraduate, graduate, and postdoctoral level;

(C) to address basic research knowledge gaps, including computational research gaps;

(D) to promote the further development of facilities and centers available for quantum information science and technology research, testing and education; and

(E) to stimulate research on and promote more rapid development of quantum-based technologies;

(2) improving the interagency planning and coordination of Federal research and development of quantum information science and technology;

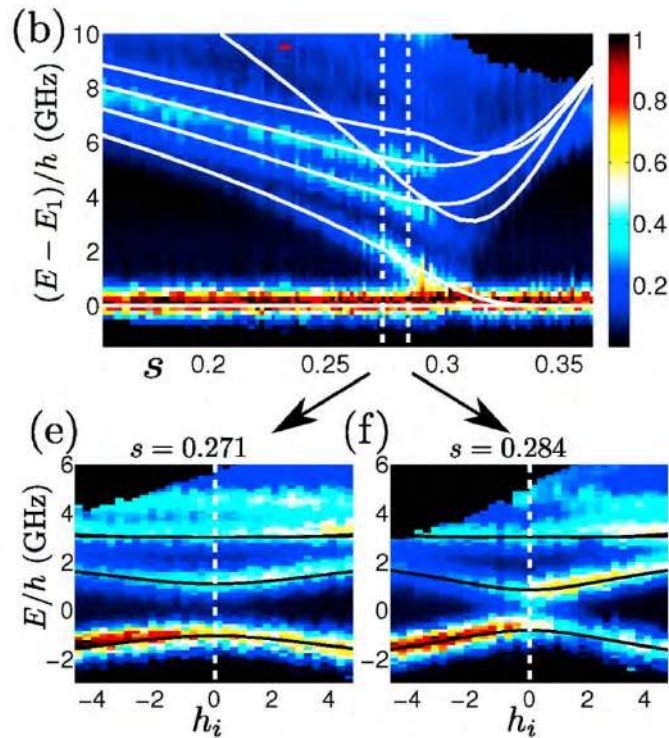
(3) maximizing the effectiveness of the Federal Government's quantum information science and technology research, development, and demonstration programs;

基礎科学と教育への投資を！

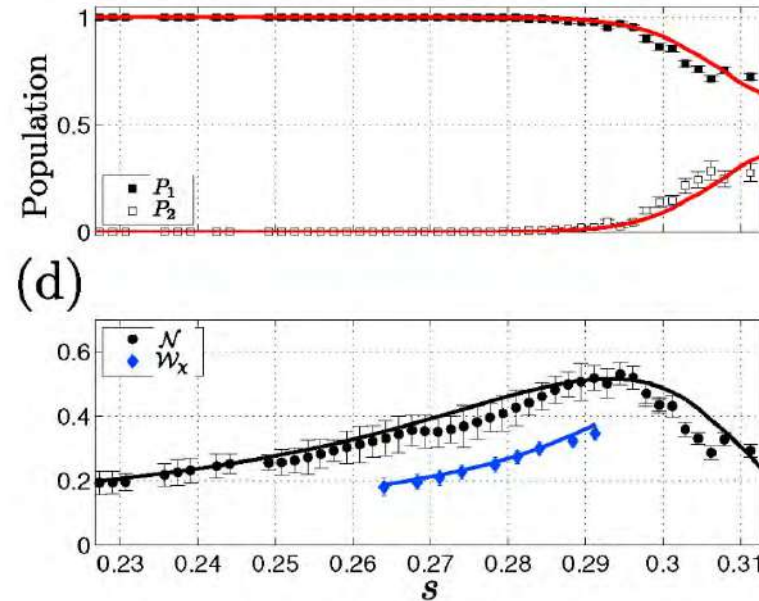
本当に量子力学で動いているのか

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)

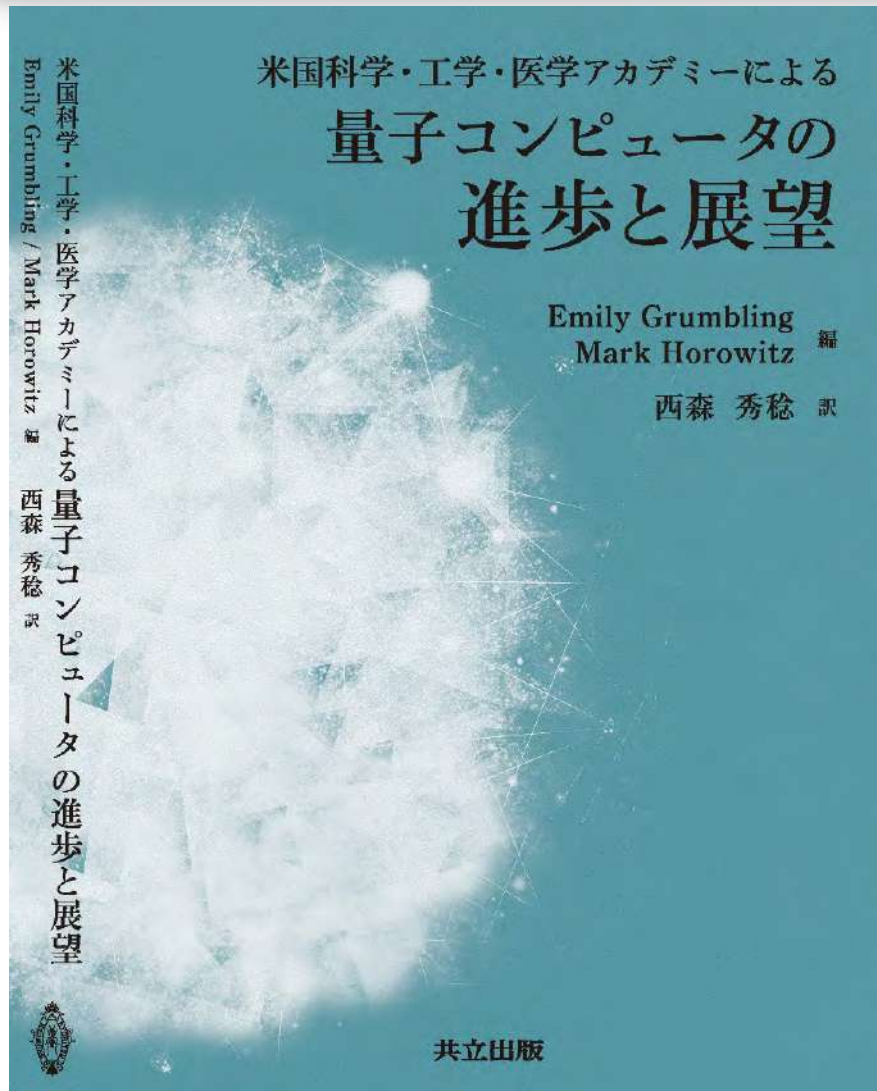


単一量子ビットのコヒーレンス時間: 10-100 ns、計算時間: μs to ms



個々の量子ビットが孤立しているときのデコヒーレンスと、量子アニーリングの動作中に多くの量子ビットが結合して多体系を構成しているときのデコヒーレンスはメカニズムが違う。Energy eigenbasisの間のデコヒーレンス。
Albash and Lidar, Phys. Rev. A 91, 062320 (2015)

量子アニーリングは量子コンピューティングか



量子コンピューティングの現状と展望に関する米国科学・工学・医学アカデミーの膨大な報告書 (2018)

ように設計されている。しかしながら、こうした操作には時間がかかり、量子アルゴリズム全体としての高速化の効果を低下させている。

量子現象独特の性質は量子コンピュータの計算力の源泉になっていると同時に、その使い方に大きな制約を課している。

2.6 実用的な量子コンピュータの可能性

以前に述べたように、古典ではなく量子的な相互作用を利用する計算により新しいタイプの計算装置の可能性が出てくる。それは、今日の最速のスーパーコンピュータや将来開発されるどのような古典コンピュータでも扱えないような計算問題を処理する可能性を持っている。例えば、暗号への応用の可能性に注目が集まっているのに加えて、化学、物質科学、生物学における量子系のシミュレーションへの応用にも関心が向けられている。特に、新しい物質開発への応用の可能性が重要である。

世界中の実験研究者たちが各種の量子ビット技術を使って、有用な計算ができるゲートベースやアナログのコンピュータを開発するべく力を尽くしている。本書では、こうした装置を活用するためのアプリケーションに加えて、ハードウェアおよびソフトウェアプラットフォームの進展を議論する。量子コンピューティング装置はまだ開発の初期段階にあり、その機能は装置のタイプや技術の成熟度に依存しているので、参照や比較が容易になるように量子コンピュータのカテゴリーを以下のように定義しておくといよい。

▶ アナログ量子コンピュータ (量子アニーラ、断熱量子コンピュータ、直接的な量子シミュレーション)

このシステムは、量子ゲートは使わずに、ハミルトニアンのパラメータのアナログ値を変化させて量子ビットをコヒーレントに操作して動作する。例えば、「量子アニーラ」では、量子ビットの組をある初期状態に準備して、システムに影響を与えるエネルギーをゆっくり変化させる。最終ハミルトニアンが解きたい問題を表すようにしておくと、量子ビットの最終状態が高い確率で問題の解になっている。「断熱量子コンピュータ (AQC, adiabatic

quantum computer)」は、量子ビットを初期ハミルトニアン基底状態にしてから、計算の間ずっと基底状態 (最低エネルギー状態) に留まるようなハミルトニアンをゆっくり変化させる。AQC はゲートを用いてはいないが、ゲートベースの量子コンピュータと理論的には同じ計算能力を持つ。ただし、完全な誤り訂正を実現する実用的な方法は開発されていない。

▶ ノイズあり中規模量子 (NISQ) コンピュータ^[18]

このシステムはコヒーレントな量子ビットの組にゲート演算を行うが、誤りをすべて抑制するために必要な量子誤り訂正は伴わない。ノイズがある程度乗った量子系で実行可能のように計算を設計しなければならず、ゲート誤りやデコヒーレンスで結果が不明確にならないよう、少ないステップ数 (浅い論理深度) で完結しなければならない。本書では、こうしたシステムを「デジタル NISQ」コンピュータとも呼ぶ。

▶ 完全な誤り訂正を持つゲートベースの量子コンピュータ

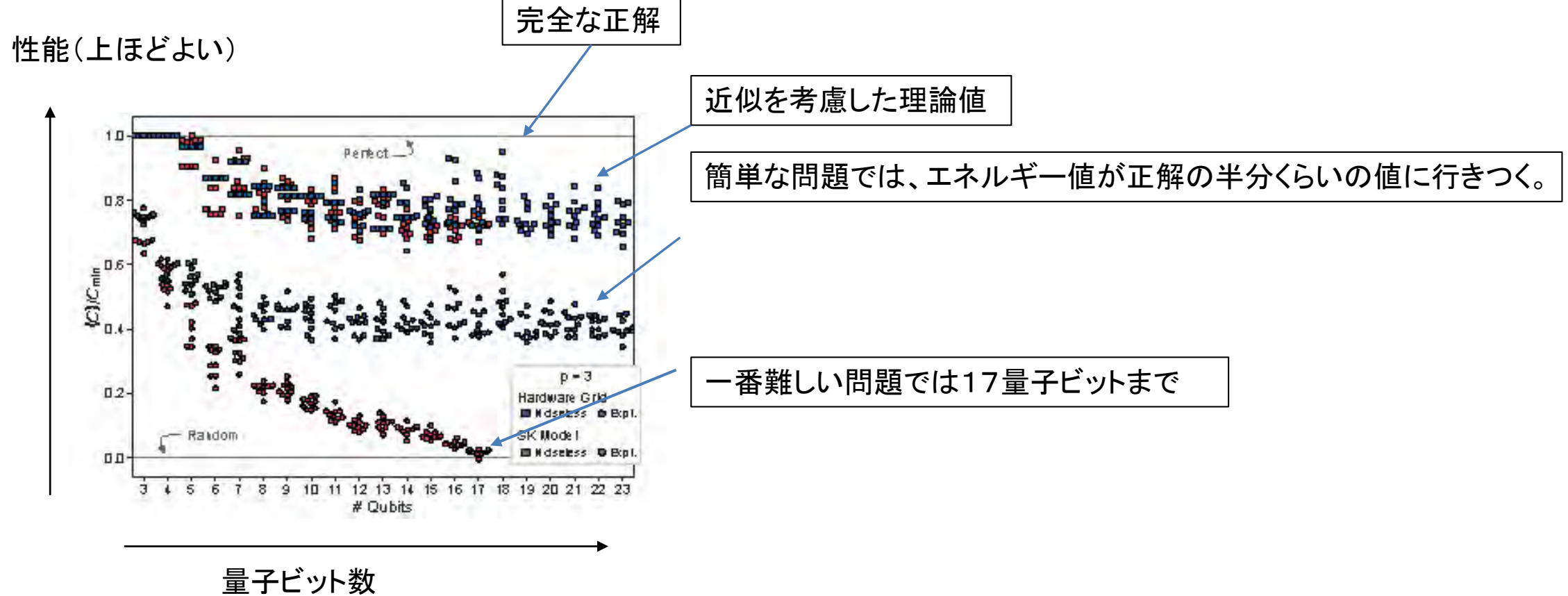
このシステムは量子ビットにゲートベースの演算を施し、計算中に発生するあらゆるノイズ (制御信号やデバイス製造上の不完全さ、量子ビット同士の意図せぬ相互作用や環境の影響など) を訂正する量子誤り訂正を実行する。このシステムでは誤り率が大幅に抑えられているので、すべての計算が信頼性をもって実行されていると見ることができる。この装置を設計するにあたっては、完全に誤りが訂正された論理ビットを何千個も有するまで大規模化できるようにしなければならない。

ゲートベースの量子コンピュータの実現の仕方にはいろいろとある。どの方法であっても有名な DiVincenzo の基準を満たす必要がある^[19]。

1. 性質がよくわかっていて量子ビットとして使える量子 2 準位系の集まりであること。
2. 量子ビットを初期化できること。
3. 計算や誤り訂正に十分な長さのコヒーレンス時間を持つこと。
4. 「量子ゲート」として知られているユニバーサルな量子計算のための量子演算が実行できること。
5. 他の量子ビットの状態を乱さずに量子ビットを 1 つずつ測定できること。

ゲート模型量子チップによる計算例

Google Sycamore chip



実用(大きな社会課題の解決)に至るまでには飛躍的な進歩が必要