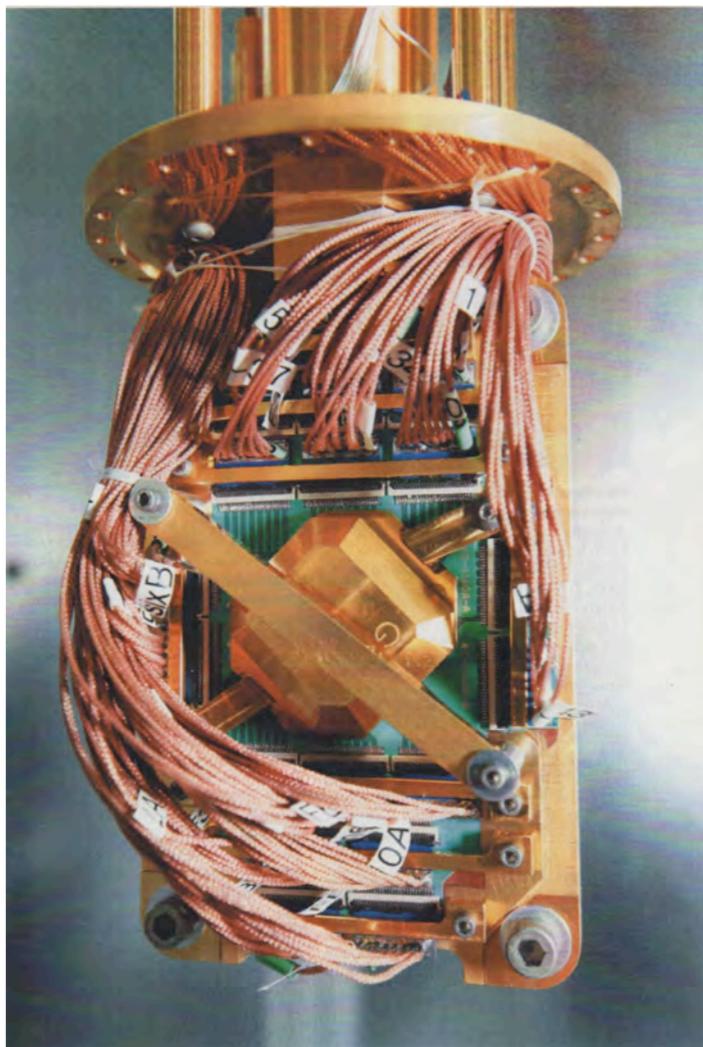
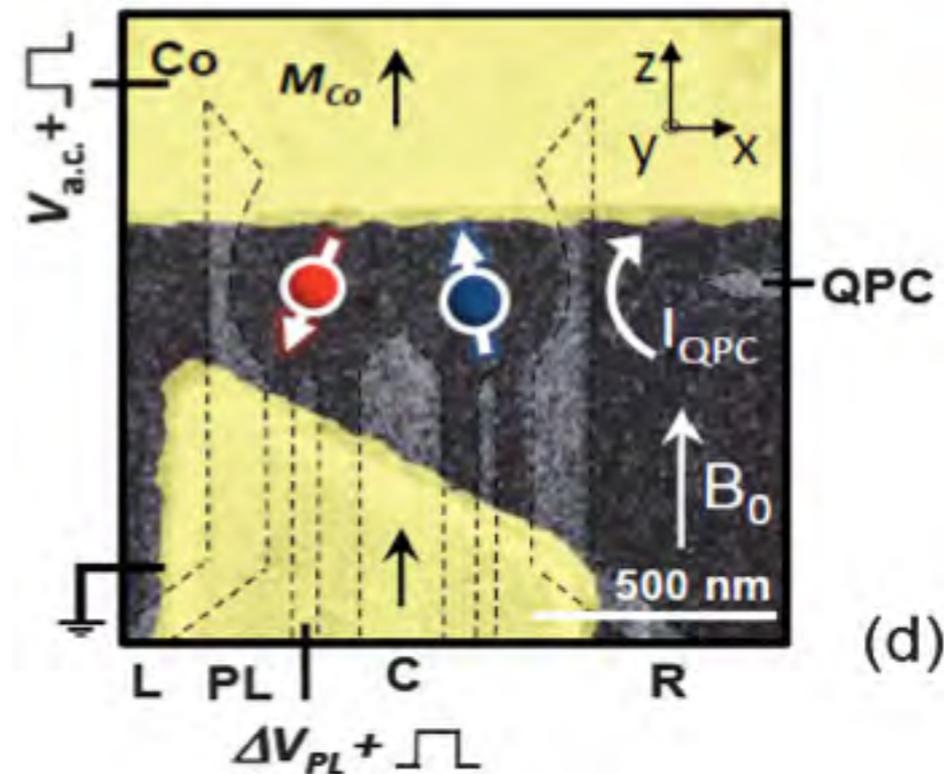


量子力学を活用した情報科学に触れる

物性理論グループ 都倉康弘、吉田恭、上村俊介(M1)



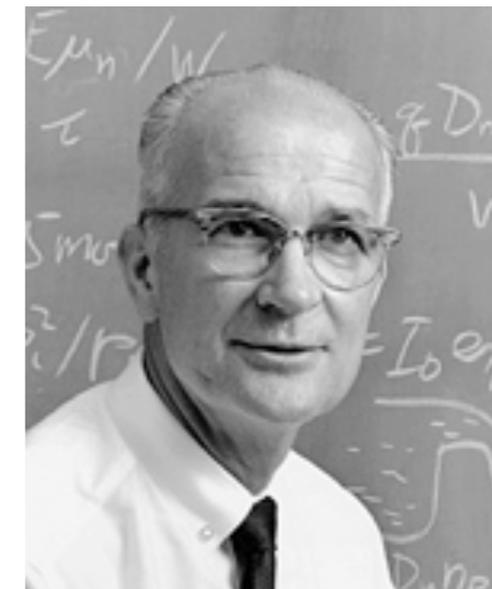
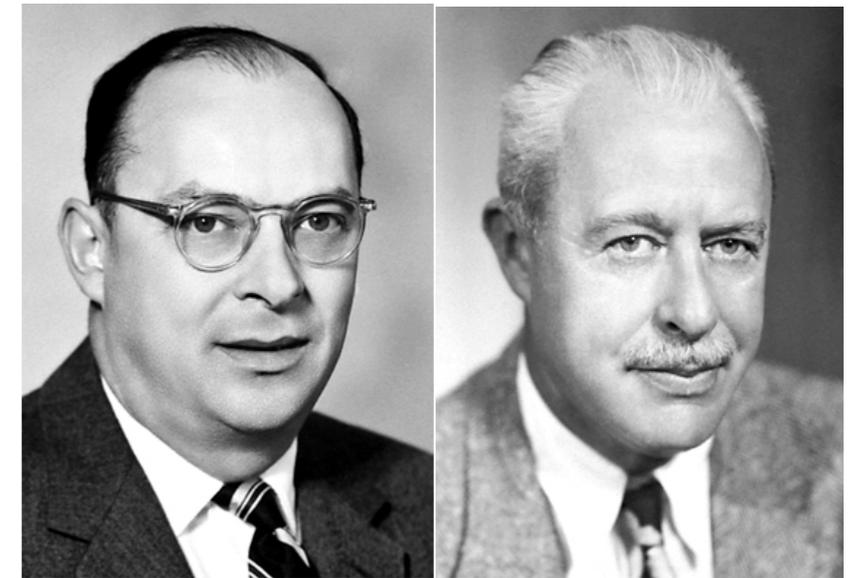
Nature 498, 286 (2013)



Phys. Rev. Lett. 107, 146801 (2011).

トランジスタ

- 電界効果素子 ショックレーの発案と思われたがジュリアス・リエンフェルトが1930年にそれを利用した装置の特許を取得済みであった。
- 点接触型トランジスタ動作 (Ge) 1948 ジョン・バーディーン、ウォルター・ブラッテン 表面準位の物理が鍵であった
- 接合型トランジスタ動作の提案1949 (1951特許発効): ウィリアム・ショックレー



ベル研のルール: 実験室にノートを置き、新しいアイデアやその日の成果をノートに記し、他の技術者がサインをする。ノートは破ってもいけないし、何かを貼付けてもいけない。

情報理論

クロード・エルウッド・シャノン

1937夏 ベル研インターンシップ 電気機械式継電器(リレー)に魅了される

マサチューセッツ工科大学に戻り作成した修士論文 "A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits"において、電気回路(ないし電子回路)が論理演算に対応することを示した。

デジタル回路・論理回路の概念の確立

「たぶん今世紀で最も重要で、かつ最も有名な修士論文」(ハーバード大学教授ハワード・ガードナー)わずかな時間差であるが、中嶋章(NEC,スイッチング理論)による発表の方が先行しており、独立な成果か否かは不明。

1948年ベル研究所在勤中に論文「通信の数学的理論」を発表
それまで曖昧な概念だった「情報」(information)の尺度(ビット)を定義し、情報についての理論(情報理論)という新たな数学的理論を創始した。
シャノンエントロピーを導入。誤り訂正符号、単位通信路あたりの伝送容量の上限。
ワンタイムパッド暗号の安全性証明。



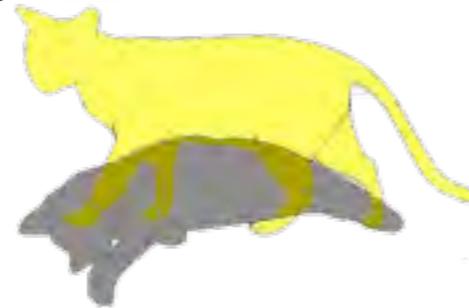
量子力学を使った計算

- 量子力学の不思議な性質

重ね合わせの原理

量子もつれ

波束の収縮



Schrödinger の猫



Y. Aharonov and D. Rohrlich, "Quantum Paradoxes", Wiley-VCH 2nd, 2009

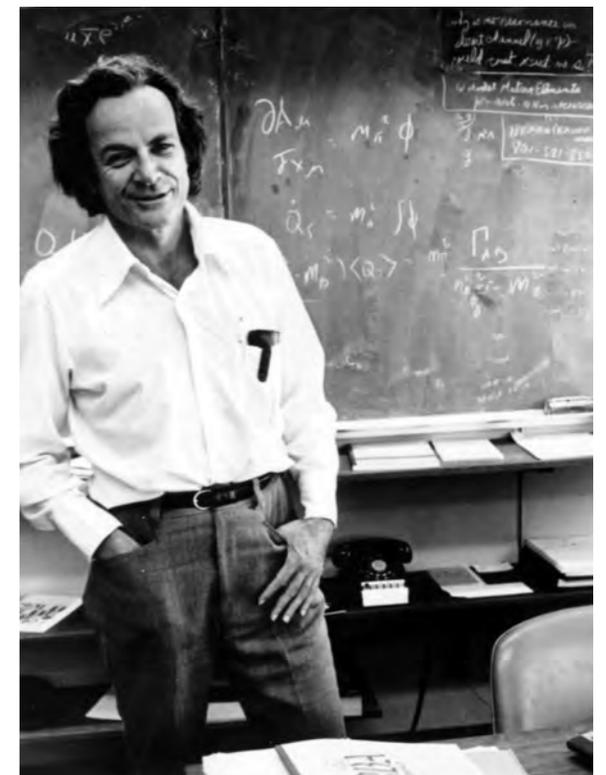
- 「計算」に活用できるのではないか？



量子シミュレーター R. P. Feynman (1982)

量子チューリング機械 D. Deutsch (1985)

- 量子コンピューター



量子ビットとは何だろうか

- 量子コンピューターの構成

量子ビット
(メモリ、演算)

制御装置

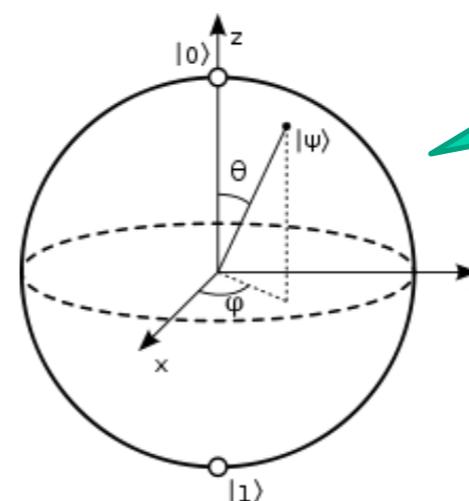
測定装置

- 量子ビットの性質

古典コンピューターの
ビット

1	0	1	0
0	1	0	1

量子ビット



1と0が確率的に重なり合っている

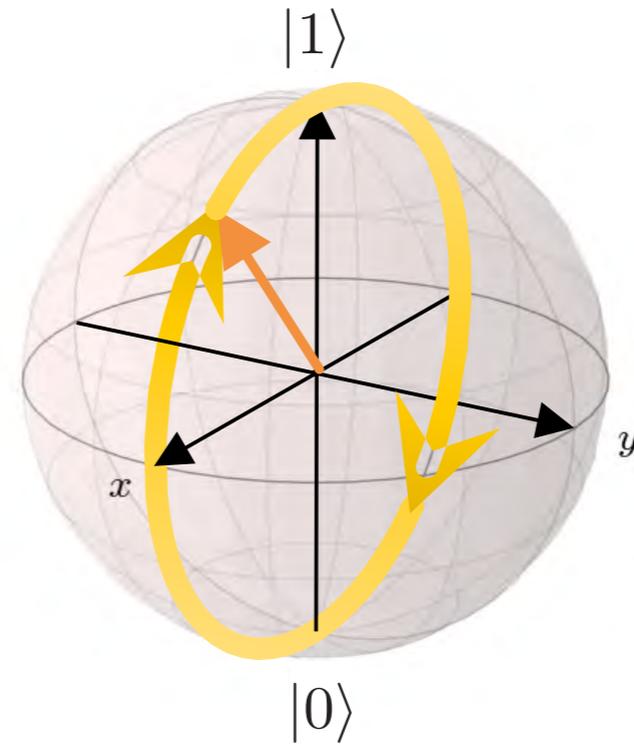


例えば、0が30%, 1が70%

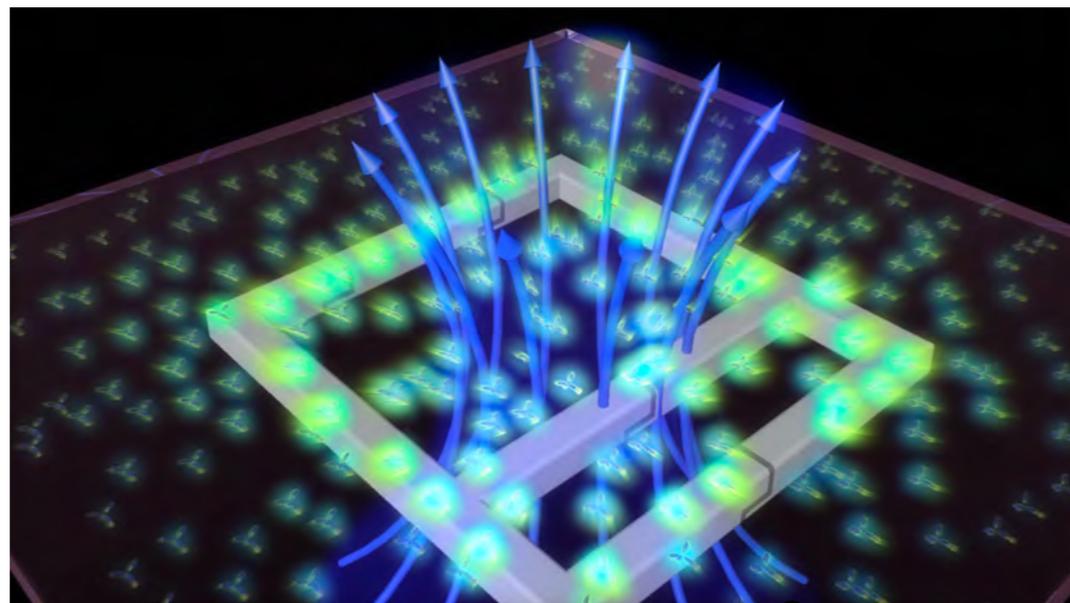
量子ビットを操る

- ・ 単一量子ビット

状態の初期化
状態の制御
状態の読み出し



- ・ 沢山の量子ビット、外部と結合した量子ビット



ダイヤモンド中のスピンと
超伝導量子ビットの結合

Nature 478, 221 (2011).

実習の内容

- 量子情報理論の基礎の演習

 - 量子力学（離散系）の学び

 - 学類の授業で学ぶ量子力学を別の視点から眺めてみる
(量子) 情報理論のエッセンスに触れる

 - 物理的に実現している実験系について学ぶ

 - 量子コンピューターができたなら何がすごいのか？
現在、世界中で研究はどれくらい進んでいるのか？

- 自主課題の選定と実習、結果のポスター発表

 - 課題選定に関わる議論

 - 課題に対してグループでの実習

 - 雙峰祭などでのポスター発表、最終レポートにまとめる

ポスタ一発表

一昨年の例 雙峰祭(11/4)

量子暗号ってなあに？



課題探求実習セミナー2017

筑波大学理工学群物理学類 3年葛西紘人 2年植木雄大



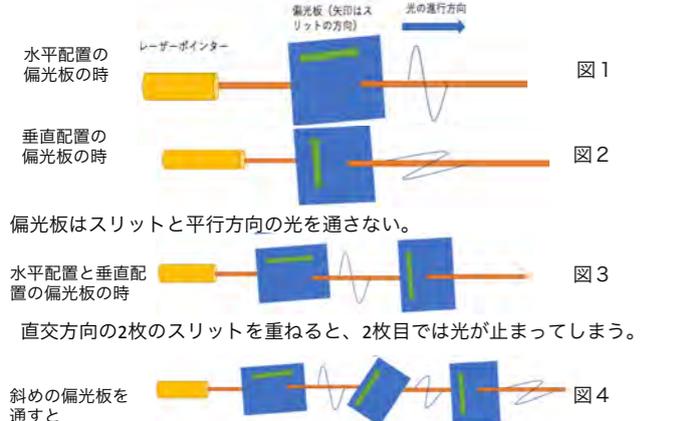
量子暗号

背景

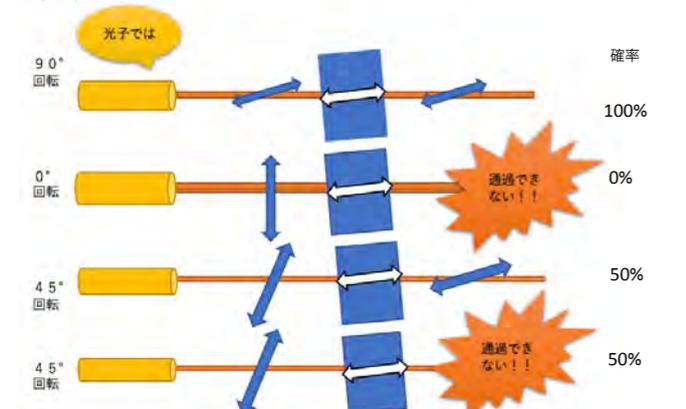
量子暗号とは、量子力学の原理と情報理論を融合させた、誰にも解読することができない暗号のことである。

これを理解するために必要な光の現象について見てみよう。まず、偏光板*に光を当てた時の現象を考える。

偏光板とはフィルターの方向と平行の光を吸収する性質を持つ。



斜めのフィルターを間に入れると光の明るさは半減してしまうが通過する。ここから、量子暗号に用いるための光子との違いを比較する。光とは明るさを弱めていくと一つ一つの粒のような性質もつ。この粒のことを光子と呼ぶ。



斜めに偏極した光子を横のフィルタに通すと図4の場合とは異なり、確率50%で光子は横に偏極して、50%で縦に偏極する。なぜなら、光子は、

必要な量子力学の原理

重ね合わせの原理:

斜めに偏極された光子は、縦の偏極と横の偏極の状態を同時に合わせ持つ、重ね合わせで表すことができる。

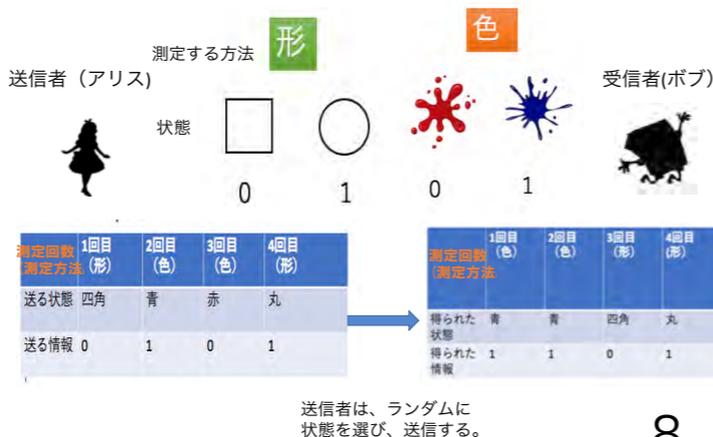
不確定性原理:

横に偏極された光子を掛け算のマークのスリットで観測する。この観測の結果として、横の偏極の状態が破壊される。破壊された後に、足し算マークのスリットで観測しても、横に偏極された光子が観測されず、残りの50%では、縦に偏極された光子が観測される。

量子複製不可能定理:

光子は、観測を行うことで状態が壊れてしまう。よって、観測後の光子は観測前の状態とは限らない。ここで、光子を観測せずに、観測前の状態を得ることを考える。これを実現するために、光子を複製しようとする。しかし、この定理により、光子を観測することなしに、複製をすることができない。よって、観測前の状態を壊さずに得ることは不可能である。

BB84の原理



und

チャー企業のD-Wave社が、**子コンピュータ**を発表した。ュータとは動作原理が根本的背景には量子力学という。発した量子コンピュータで**ーリング**という、東京工受が提案したアルゴリズム。ズムを実際に実装し、具体動作するのが知りたと思テーマとした。

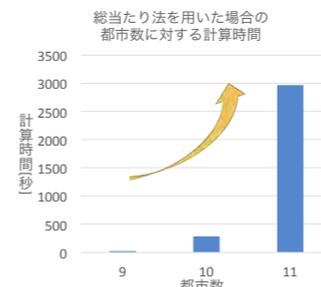


ion

がかる問題の一つと**ルスマン問題**を取りつる方法で解き、計算を比較することを目標

方法 **ッドアニーリング(SA法)** **ング(QA法)** **ッドアニーリング**は、**ング**の元になった**ア**総当たりの方法と比計算できる。

マン問題とは、複数の都市を1回ずつ回る時の最短経路を求める問題であれば、ルートの個数は $5 \times 4 \times \dots \times 1 = 120$ 通りだが、都市が増えていくと、数が増えていく。(10都市なら約363万通り)。このように急激に計算量が「NP困難問題」と言う。



研究方法

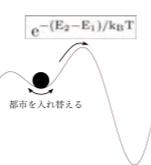
Think Pad (CPU: Core i-5-6200U RAM: 8.00GB)であり、使用言語は

最適解の導出

まし法とも呼ばれる。「焼きなまし」とは、金属材料を適当な徐々に温度を冷やしていくことである。これによって、内部のきを均一にしたり、化学組成を均質にしたりする。この原理を温度 T を徐々に下げ、最適解を求める。

1) 路を一つ決め、総距離 E_{t1} を求める。都市を入れ替えて、総距離 E_{t2} を求める。 E_{t2} を次の E_{t1} として考える。 $e^{-E_{t2}/k_B T}$ の確率で E_{t2} を次の E_{t1} として考える。 T を低くして2~4を繰り返す。 E_{t1} が最適解である。

は右図のように、 $e^{-E_{t2}-E_{t1}/k_B T}$ の確率を用いることで、最適経路を求めることができる。



量子力学を用いた最適化問題

課題探求実習セミナー「量子ビットを体験してみよう」より

筑波大学理工学群物理学類 上村俊介 大滝恒輝

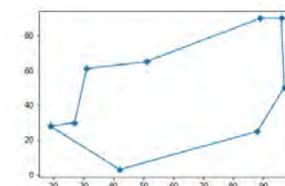


研究の背景・動機

総当たりによるシミュレーション

厳密解の導出結果

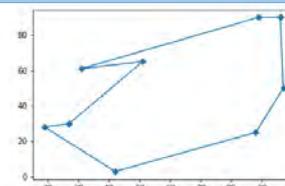
右図のようにに配置された9都市を、最も短い経路で1回ずつ回ることが出来るルート(厳密解)を**総当たり**で求めた。
【総距離】263.9
【計算時間】29.2秒



SA法によるシミュレーション

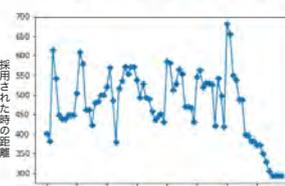
最適解の導出結果

SA法を用いて最適解を求めた。
【総距離】270.7
【計算時間】7.4秒



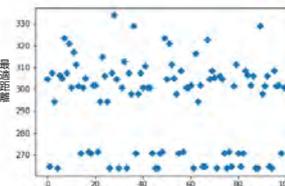
最適解の導出過程

SA法ではどのようにして最適解を見つけ出していくのか、その過程を右の図に示した。試行回数が増えていくに従い、**厳密解に近づいている**。また、あるところでは、 $e^{-E_{t2}-E_{t1}/k_B T}$ の確率で長い距離を採用していることで、より最適解へと近づいていることがわかる。



成功率

SA法を100回繰り返し、計算された最適解を右の図にプロットした。厳密解を求めた割合は**12%**であった。また、右図で最適解に近い距離(270以下)を求めた割合は**18%**であった。



QA法についての研究結果

「QA法のアルゴリズム」の中でも書いたように、QA法を古典コンピュータでシミュレートしようとすると、計算量が急激に増えてしまう。**(総当たり法を用いた場合よりも速く増加する!)**ただし、量子コンピュータでは、最適解に向かって自然に状態が変わっていく。そうなるように、自然法則に組み込まれているのである。量子力学がコンピュータのあり方にどのように影響を与えるのか、QA法を一例として、確かめることができたと思う。

まとめ

SA法では、十分な時間計算させることにより、必ず厳密解に行き着くことがわかった。また、計算時間も、総当たりの方法に比べて短い。また、QA法については、古典コンピュータでシミュレートすることは極めて**非効率**である。量子力学を再現する、D-Waveマシンのようなデバイスがもっと精度をあげて開発されれば、実社会への応用も実現されるだろう。

今後の発展の方向

実習の内容

- ・ 受け入れ可能人数

3名まで 量子力学未履修の場合も対応いたします。

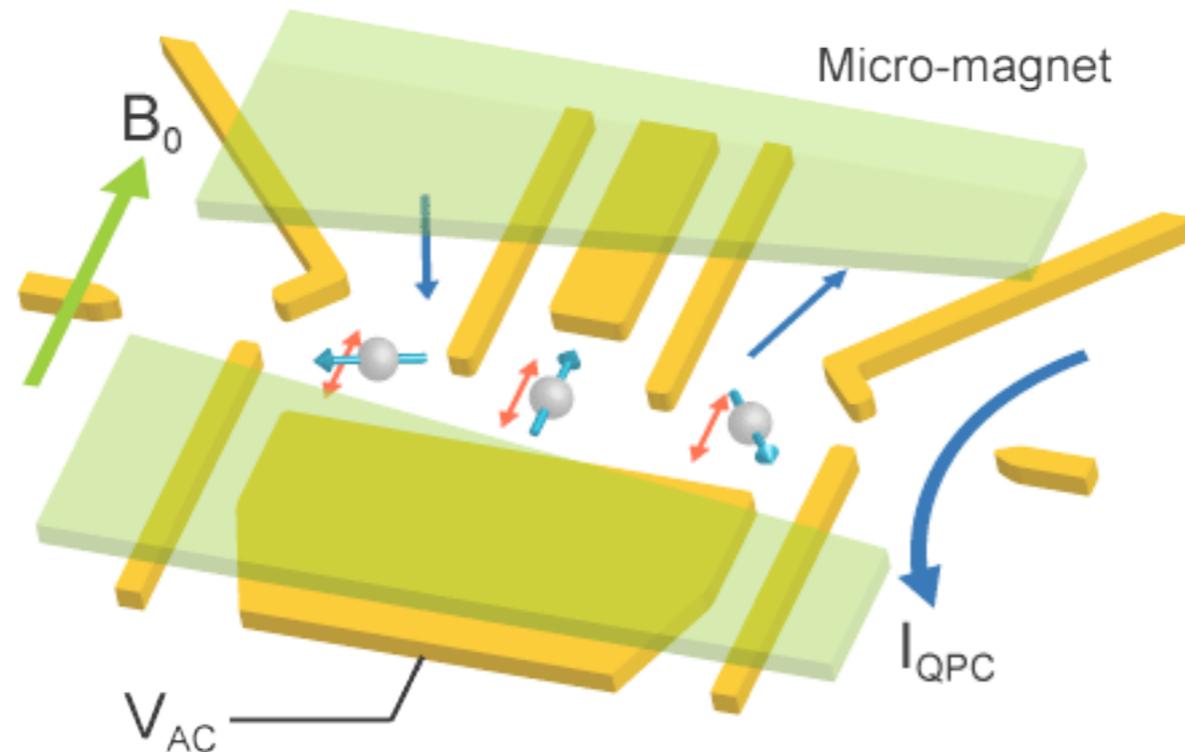
- ・ 頻度、曜日、時間

週1回1限程度を予定
曜日、時間は相談の上決定

- ・ その他

テキストやマニュアルなどを適宜配布
自主課題について必要に応じて教員、TA が指導する

以上です



連絡先：都倉 tokura.yasuhiro.ft@u.tsukuba.ac.jp

講義のweb page:

<http://www.u.tsukuba.ac.jp/~tokura.yasuhiro.ft/Lectures/Katan-2019.html>

内容に関して疑問があれば、いつでも
気楽に連絡してください。