

基礎から学ぶ量子コンピュータ

東京大学 大学院工学系研究科

附属光量子科学研究センター

小芦研究室 助教 藤井啓祐



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



UT-PSC
Photon Science Center of the University of Tokyo

自己紹介:藤井啓祐

- ・ 1999-2002 大阪府立天王寺高校
- ・ 2002-2006 京都大学 工学部 物理工学科
- ・ 2006-2011 京都大学 工学研究科 原子核工学専攻
- ・ 2011-2013 大阪大学 基礎工学研究科 特任研究員(井元研)
- ・ 2013-2015 京都大学白眉センター/情報学研究科 特定助教(岩間研)
- ・ 2015-2016 京都大学白眉センター/理学研究科 特定助教(高橋研)
- ・ 2016- 東京大学 工学系研究科 光量子科学研究センター 助教(小芦研)

自己紹介:藤井啓祐

- ・ 1999-2002 大阪府立天王寺高校
- ・ 2002-2006 京都大学 工学部 物理工学科
- ・ 2006-2011 京都大学 工学研究科 原子核工学専攻
- ・ 2011-2013 大阪大学 基礎工学研究科 特任研究員(井元研)
- ・ 2013-2015 京都大学白眉センター/情報学研究科 特定助教(岩間研)
- ・ 2015-2016 京都大学白眉センター/理学研究科 特定助教(高橋研)
- ・ 2016- 東京大学 工学系研究科 光量子科学研究センター 助教(小芦研)

自己紹介:藤井啓祐

- ・ 1999-2002 大阪府立天王寺高校
- ・ 2002-2006 京都大学 工学部 物理工学科
- ・ 2006-2011 京都大学 工学研究科 原子核工学専攻
- ・ 2011-2013 大阪大学 基礎工学研究科 特任研究員(井元研)
- ・ 2013-2015 京都大学白眉センター/情報学研究科 特定助教(岩間研)
- ・ 2015-2016 京都大学白眉センター/理学研究科 特定助教(高橋研)
- ・ 2016- 東京大学 工学系研究科 光量子科学研究センター 助教(小芦研)

自己紹介:藤井啓祐

<http://www.toei-anim.co.jp/lineup/tv/mazingerz/>



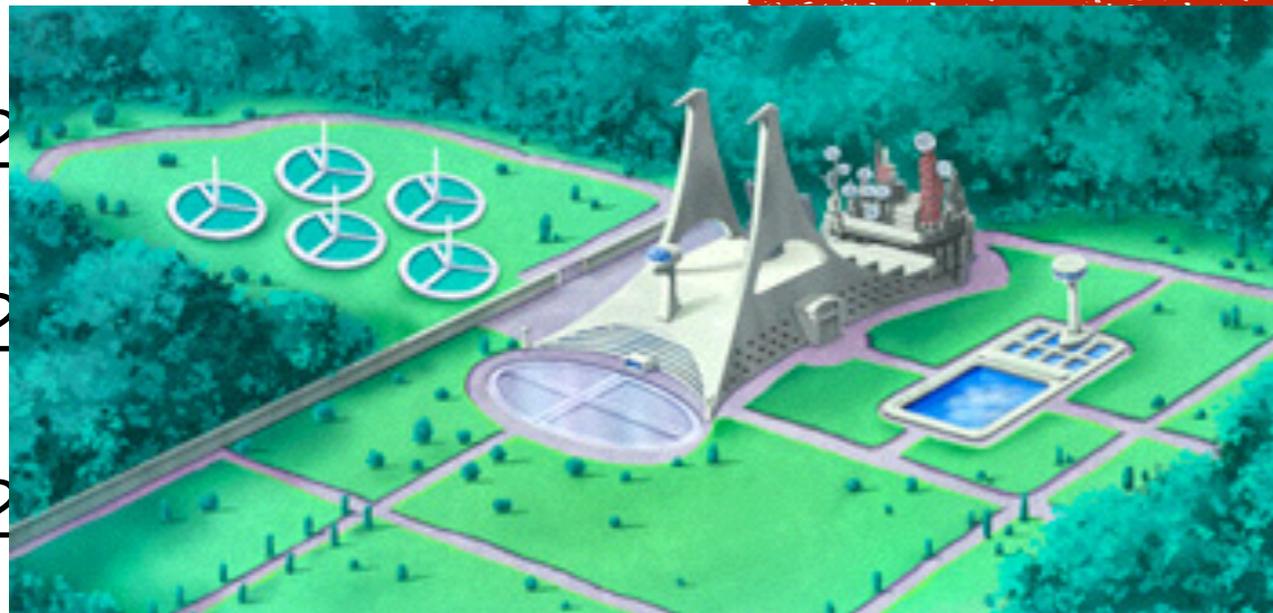
天王寺高校

工学部 物理工学科

工学研究科 原子核工学専攻

基礎工学研究科 特任研究員(井元研)

2011-2013 大阪大学



情報学研究科 特定助教(岩間研)

工学研究科 特定助教(高橋研)

光子量子科学研究センター 助教(小芦研)

光子力研究所

http://www.shin-mazinger.com/character/chara_02.html

自己紹介:藤井啓祐

<http://www.toei-anim.co.jp/lineup/tv/mazingerz/>

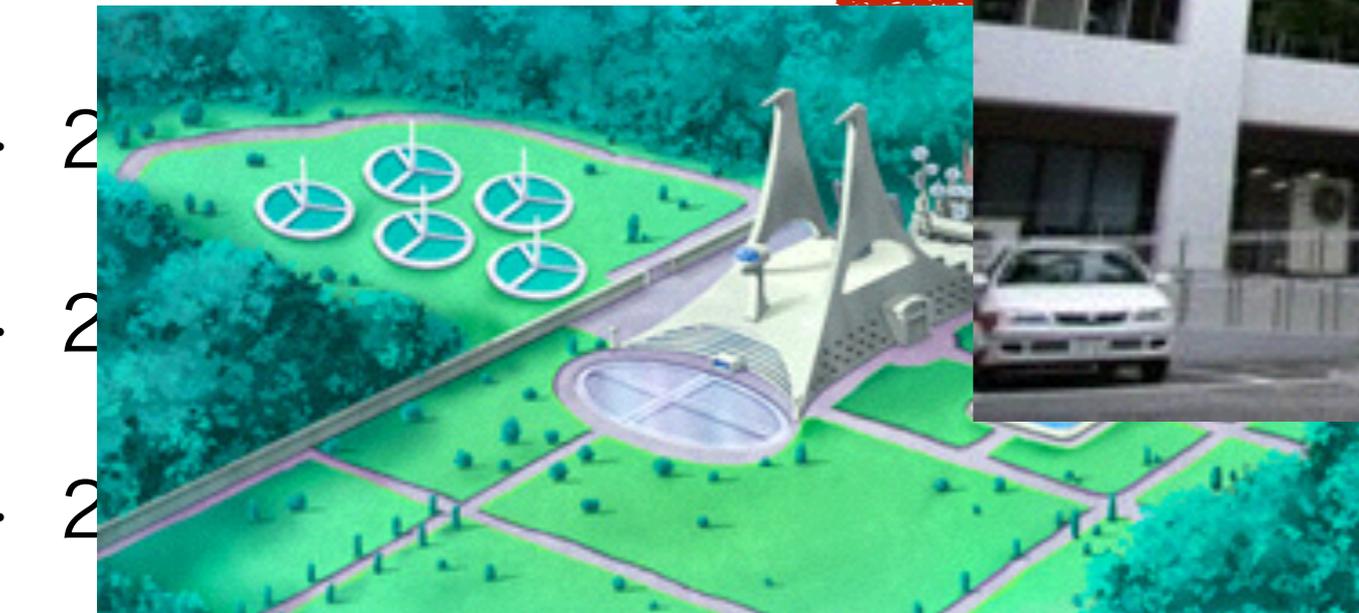


天王

工学

工学

基礎



光子力科学研究所 助教(小芦研)

光子力研究所

http://www.shin-mazinger.com/character/chara_02.html

基礎から学ぶ量子コンピュータ

- ①量子力学・量子情報の基礎
- ②量子計算の基礎
- ③量子誤り訂正

講義情報：

<http://quantphys.org/wp/keisukefujii/?p=433>

今回の講義ノートもホームページに既にアップロードしました。板書をせずにひたすら集中して聞くもよし、板書しながら理解を進めるのもよし。

メールアドレス

fujii@qi.t.u-tokyo.ac.jp

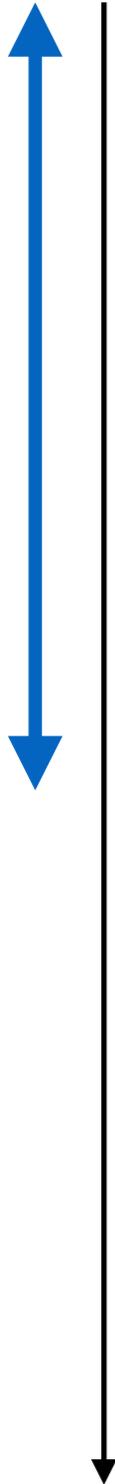
Twitter

Keisuke Fujii@fgksk

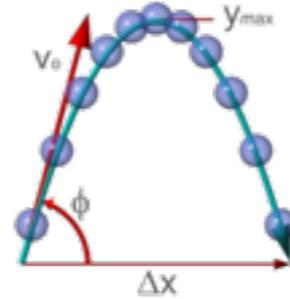
はじめに

量子力学とは？

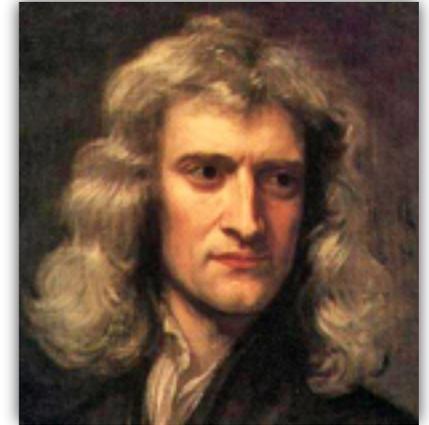
古典物理



1687: ニュートン力学
(粒子)



Isaac Newton
(1642-1727)

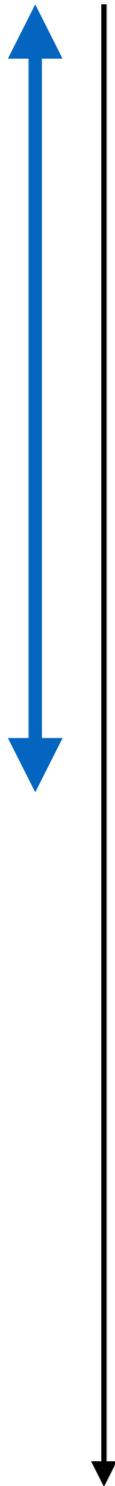


<http://www.newton.cam.ac.uk/art/portrait.html>

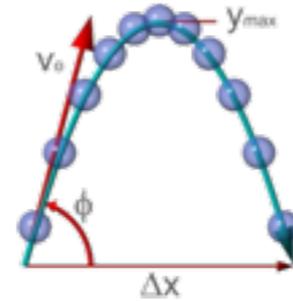
“Equation of motion”

量子力学とは？

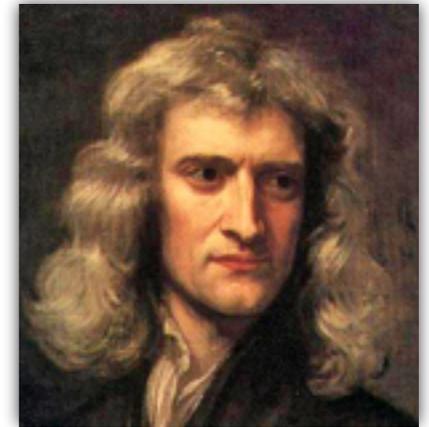
古典物理



1687: ニュートン力学
(粒子)



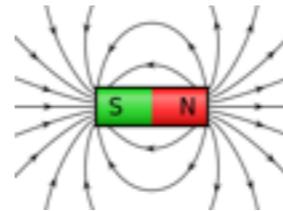
Isaac Newton
(1642-1727)



<http://www.newton.cam.ac.uk/art/portrait.html>

“Equation of motion”

1873: 電磁気学
(波)



James C. Maxwell
(1831-1879)

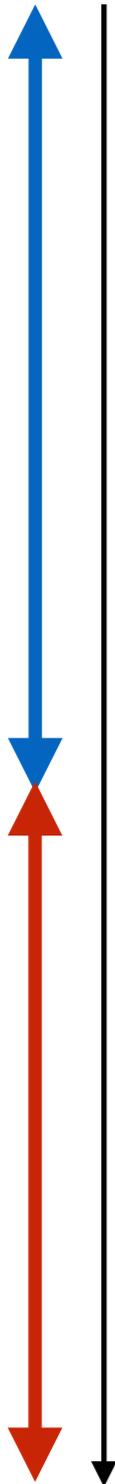


http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

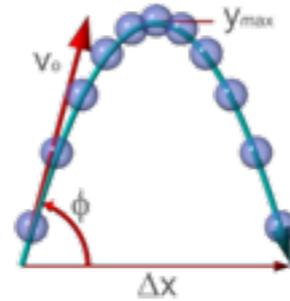
“Maxwell equation”

量子力学とは？

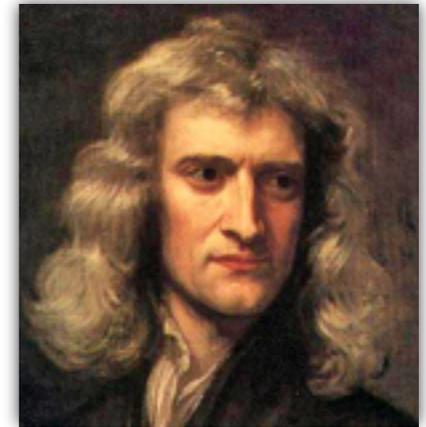
古典物理



1687: ニュートン力学
(粒子)



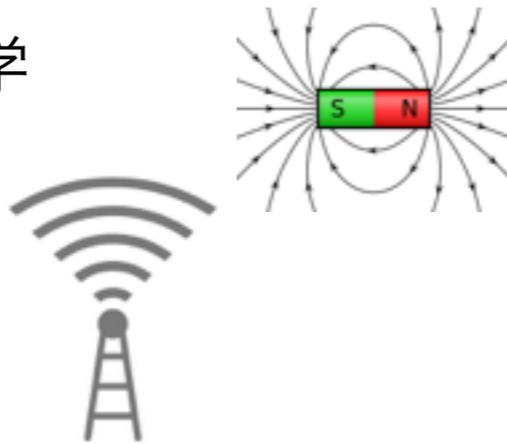
Isaac Newton
(1642-1727)



<http://www.newton.cam.ac.uk/art/portrait.html>

“Equation of motion”

1873: 電磁気学
(波)



James C. Maxwell
(1831-1879)



http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

“Maxwell equation”

量子物理



1900~
原子、電子、分子などのミクロの世界にお
ける古典物理学の破綻

→ 量子力学
量子 = 波 & 粒子

Werner K Heisenberg
(1887-1961)



http://en.wikipedia.org/wiki/Werner_Heisenberg

行列力学(1925)

Erwin Schrödinger
(1887-1961)

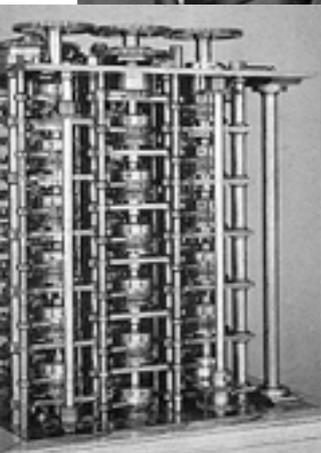
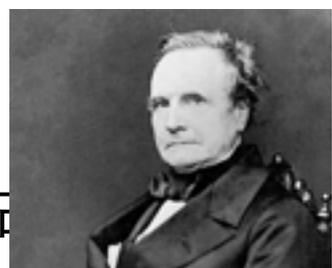


<http://www.owlnet.rice.edu/~mishat/1933-5.html>

波動力学(1926)

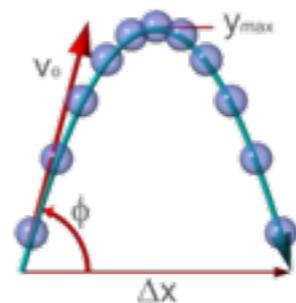
量子力学とは？

チャールズ
・バベッジ(1791-1871)

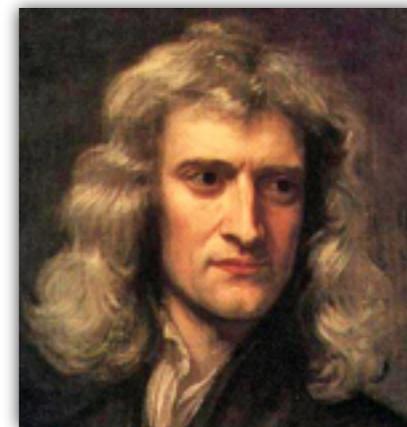


バベッジ

1687: ニュートン力学
(粒子)



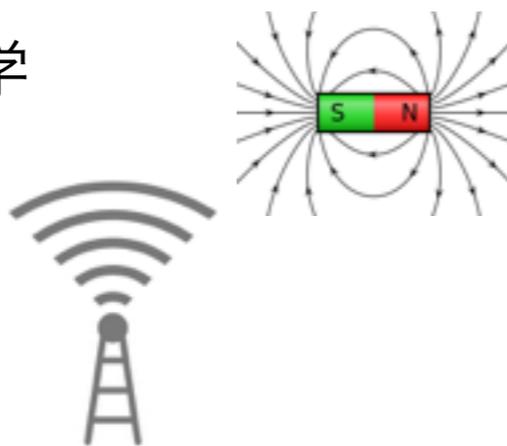
Isaac Newton
(1642-1727)



<http://www.newton.cam.ac.uk/art/portrait.html>

“Equation of motion”

1873: 電磁気学
(波)



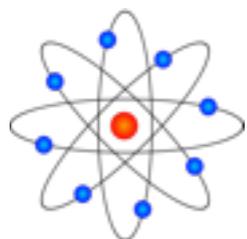
James C. Maxwell
(1831-1879)



http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

“Maxwell equation”

量子物理



1900~
原子、電子、分子などのミクロの世界にお
ける古典物理学の破綻
→ **量子力学**
量子 = 波 & 粒子

1936: チューリング機械 (計算を定式化)

1948: シヤノン理論 (情報量を定式化)

情報を物理から切り離すことによって定式化

Erwin Schrödinger
(1887-1961)



<http://www.owlnet.rice.edu/~mishat/1933-5.html>

波動力学(1926)

Werner K Heisenberg
(1887-1961)



http://en.wikipedia.org/wiki/Werner_Heisenberg

行列力学(1925)

そして、量子力学と情報科学は
それぞれ独自に進化した

量子コンピュータ前史

量子コンピュータ前史

Rolf Landauer
(1927-1999)



[http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/
File:Rolf_Landauer_2474.jpg](http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/File:Rolf_Landauer_2474.jpg)

'80s~ “*Information is physical*”

ランダウアの情報消去の原理：

1ビットの情報の消去に必要なエネルギー→ $kT \log 2$



量子コンピュータ前史

Rolf Landauer
(1927-1999)



[http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/
File:Rolf_Landauer_2474.jpg](http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/File:Rolf_Landauer_2474.jpg)

‘80s~ “Information is physical”

ランダウアの情報消去の原理：

1ビットの情報の消去に必要なエネルギー→ $kT \log 2$



Richard P Feynman
(1918-1988)



[http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/
physics/laureates/1965/feynman-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html)

1981(MIT) “1st Symposium on Physics and Computation”

*“I’m not happy with all the analyses that go with just the classical theory, **because nature isn’t classical**. If you want to make a **simulation of nature** you’d better make it quantum mechanical”*

量子コンピュータ前史

Rolf Landauer
(1927-1999)



[http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/
File:Rolf_Landauer_2474.jpg](http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/File:Rolf_Landauer_2474.jpg)

‘80s~ “Information is physical”

ランダウアの情報消去の原理：

1ビットの情報の消去に必要なエネルギー→ $kT \log 2$



Richard P Feynman
(1918-1988)



[http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/
physics/laureates/1965/feynman-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-bio.html)

1981(MIT) “1st Symposium on Physics and Computation”

*“I’m not happy with all the analyses that go with just the classical theory, **because nature isn’t classical**. If you want to make a **simulation of nature** you’d better make it quantum mechanical”*

1981(Texas) “Physics and Computation”

Then you guys are using wrong physics....

→**1985 量子コンピュータ
(量子チューリング機械)**



<http://www.daviddeutsch.org.uk>
David Deutsch (1953-)

詳しくは. . .

YouTube JP



量子コンピュータ授業 #8 量子コンピュータの歴史

「量子コンピュータの歴史」

by 古田彩(日経サイエンス)

二人の悪魔と多数の宇宙：量子コンピュータの起源

by 古田彩（日経サイエンス）日本物理学会誌

なぜ量子コンピュータに惹かれるのか？

なぜ量子コンピュータに惹かれるか？

- ・ 現在もっとも根本的な物理法則

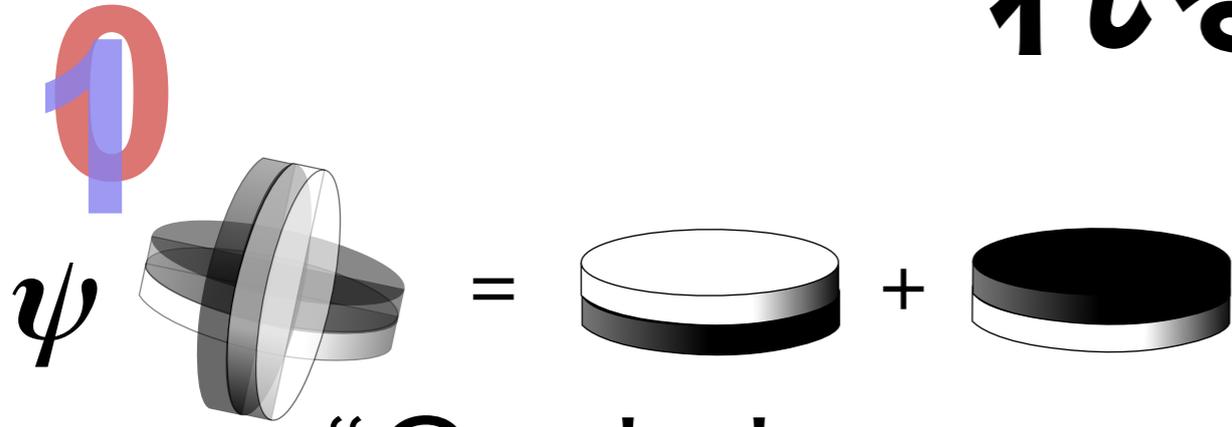
なぜ量子コンピュータに惹かれるか？

- ・ 現在もっとも根本的な物理法則
- ・ 工学的興味：法則を知ることとマシンの挙動を理解し尽くすことは別

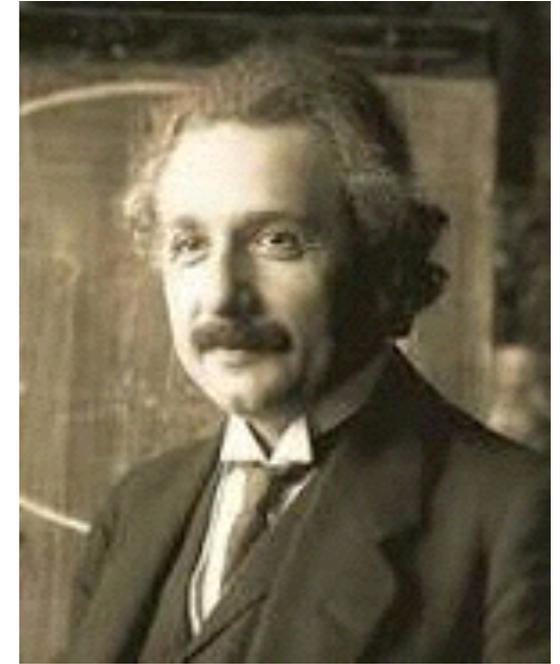
なぜ量子コンピュータに惹かれるか？

- ・ 現在もっとも根本的な物理法則
- ・ 工学的興味：法則を知ることとマシンの挙動を理解し尽くすことは別
- ・ 量子で動くもっとも複雑なマシン
(そして古典マシンでは模倣できない)
= 量子コンピュータ

なぜ量子コンピュータに惹かれるか？

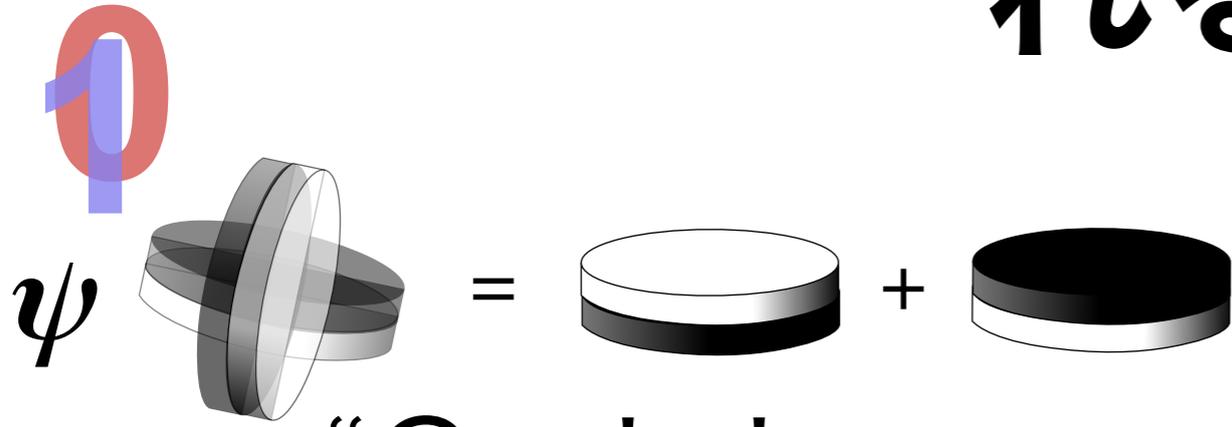


“God does not play dice”
by Einstein

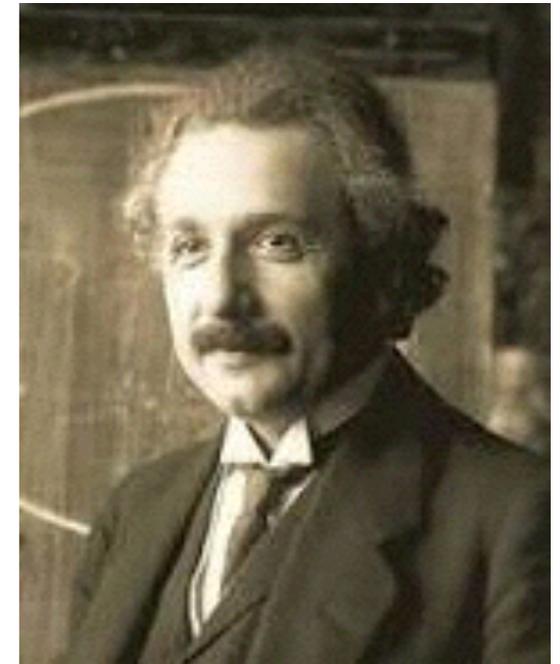


<https://ja.wikipedia.org/wiki/アルベルト・アインシュタイン>

なぜ量子コンピュータに惹かれるか？



“God does not play dice”
by Einstein



<https://ja.wikipedia.org/wiki/アルベルト・アインシュタイン>

「不思議は古い理論への執着」

「技術とは不思議を制御すること」

第24回量子情報技術研究会

by 佐藤文隆



<http://book.asahi.com/reviews/column/2012082200067.html>

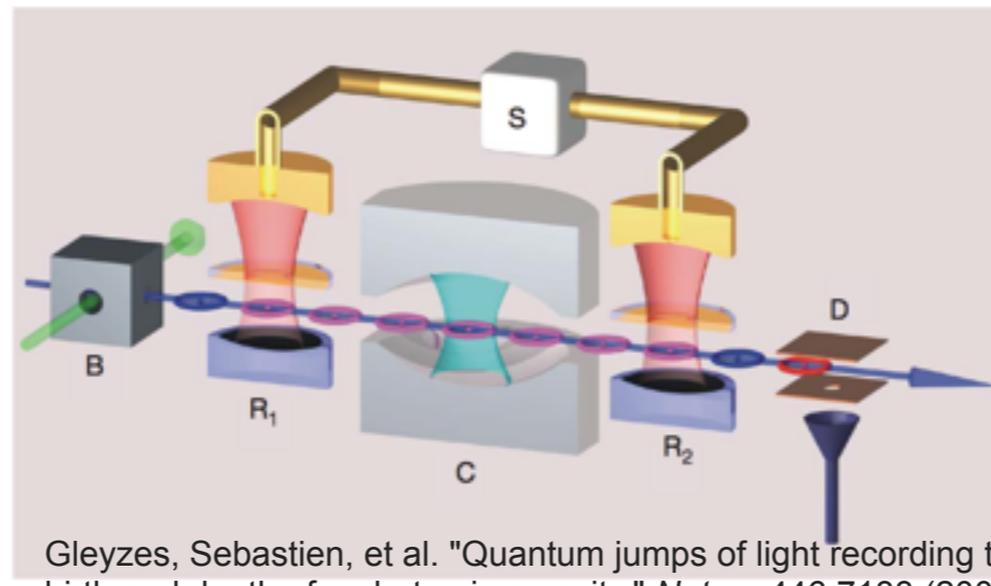
量子エレクトロニクス

Nobel Prize 2012: Controlling individual quantum systems



http://en.wikipedia.org/wiki/Serge_Haroche

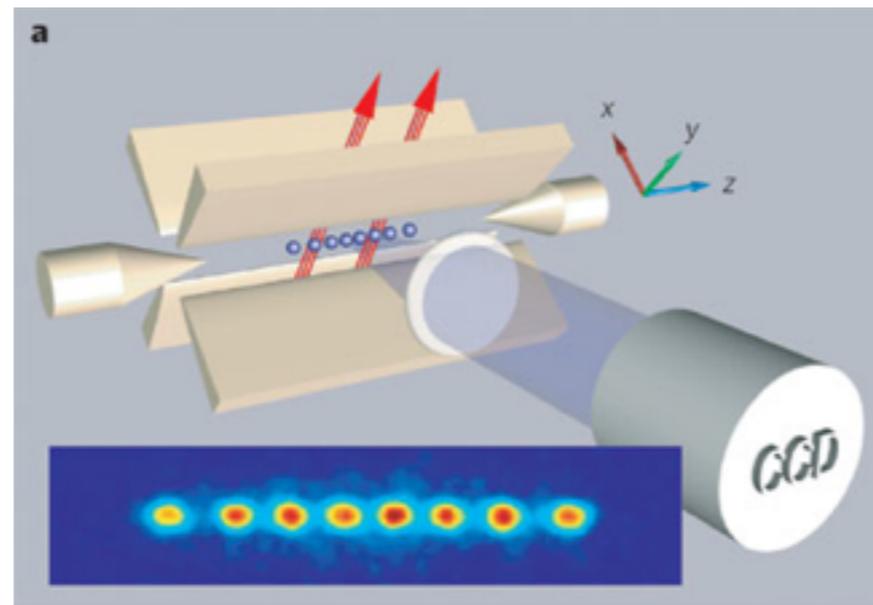
S. Haroche



Gleyzes, Sebastien, et al. "Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity." *Nature* 446.7133 (2007)

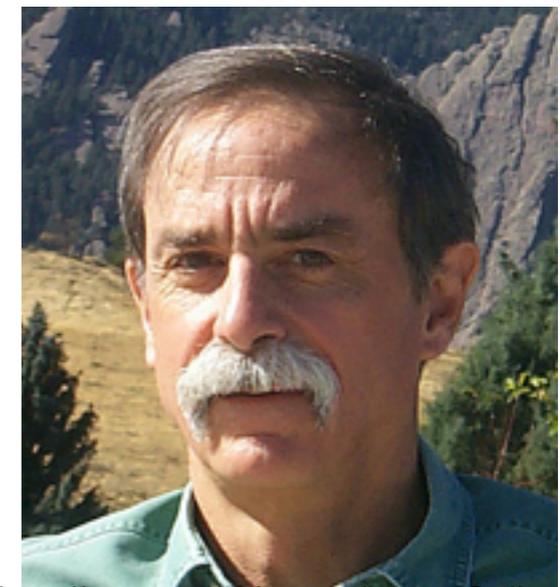
cavity-QED

光子の状態操作・非破壊測定



trapped ions

イオンの状態操作・量子演算

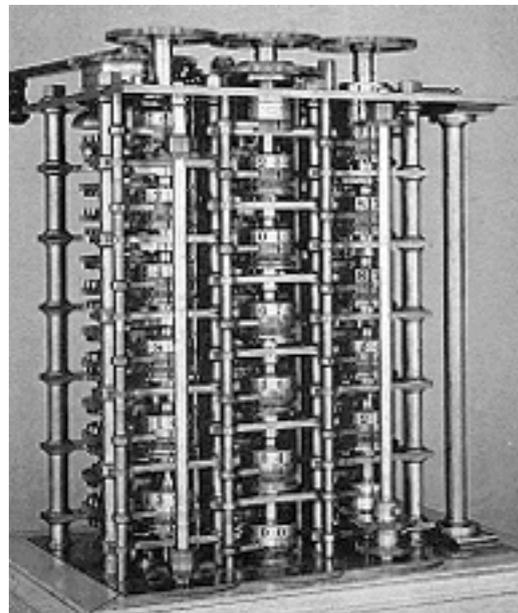


<http://patapsco.nist.gov/ImageGallery/details.cfm?imageid=576>

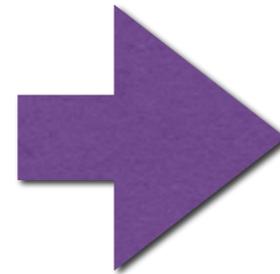
D. Winland

なぜ量子コンピュータに惹かれるか？

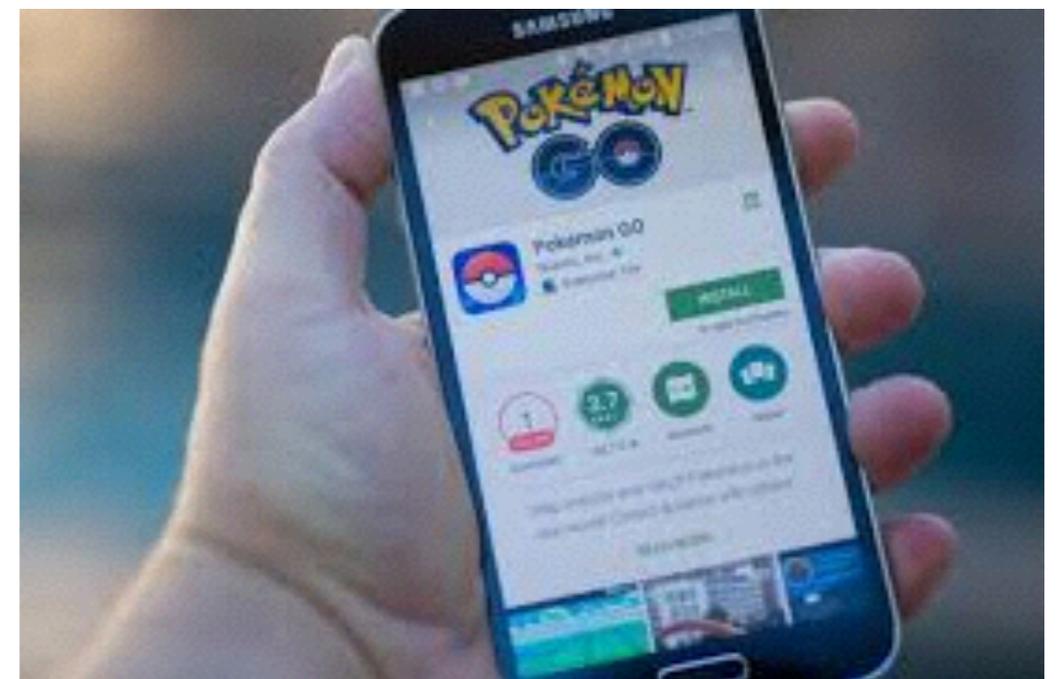
量子コンピュータは新たな情報処理
パラダイムをたらす



19世紀



21世紀



<http://www.wizforest.com/OldGood/engine/>

<https://ja.wikipedia.org/wiki/チャールズ・バベッジ>

<http://pokemongo-master.com/archives/1497>

なぜ量子コンピュータに惹かれるか？

量子コンピュータの挙動を知ることが
我々の世界の理解に繋がる
→ ブラックホール、新機能物質



なぜ量子コンピュータに惹かれるか？

量子コンピュータの挙動を知ることが
我々の世界の理解に繋がる

→ブラックホール、新機能物質

時に、**古典の世界をも教**
えてくれる。

→quantum proof



量子コンピュータを取り巻く 現状

量子コンピュータはアナログ？

デジタル？



理想的なアナログ計算機があればNP困難

(PSPACE) の問題が効率よく解ける.

A Schönhage “*On the power of random access machines.*” ICALP, 520 (1979).

minimal surface calculation by soap bubble

Museum of Science of Alcobendas (Madrid).

量子コンピュータはアナログ？

デジタル？

理想的なアナログ計算機があればNP困難



All papers on quantum computing should carry a footnote: *“This proposal, like all proposals for quantum computation, relies on **speculative technology**, does not in its current form take into account all possible sources of noise, unreliability and manufacturing error, and **probably will not work.**”* (S. Lloyd Nature 400 720 (1999))

Rolf Landauer @IBM

量子コンピュータはアナログ？

デジタル？



理想的なアナログ計算機があればNP困難

(PSPACE) の問題が効率よく解ける.

A Schönhage “*On the power of random access machines.*” ICALP, 520 (1979).

minimal surface calculation by soap bubble

Museum of Science of Alcobendas (Madrid).

量子コンピュータはアナログ？

デジタル？

理想的なアナログ計算機があればNP困難

(PSPACE) の問題が効率よく解ける。

A Schönhage “*On the power of random access machines.*” ICALP, 520 (1979).



minimal surface calculation by soap bubble

Museum of Science of Alcobendas (Madrid).

量子誤り訂正符号 [Shor95]

“fight entanglement with entanglement”

[Preskill97]

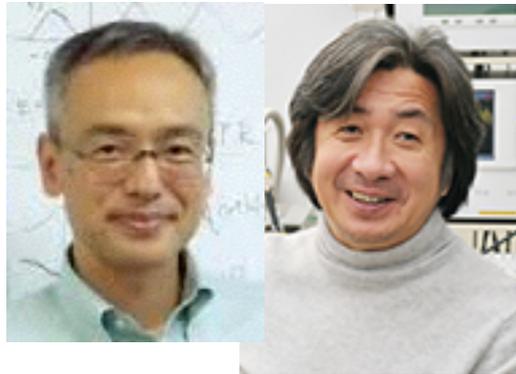
量子コンピュータ

を雑音から守ることが出来る → デジタル



<http://www-math.mit.edu/~shor/>

超伝導量子コンピュータ

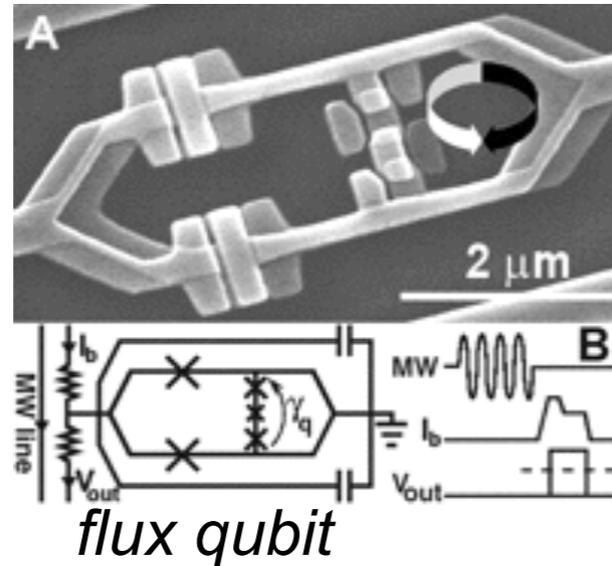


中村・蔡先生

(NEC, RIKEN)

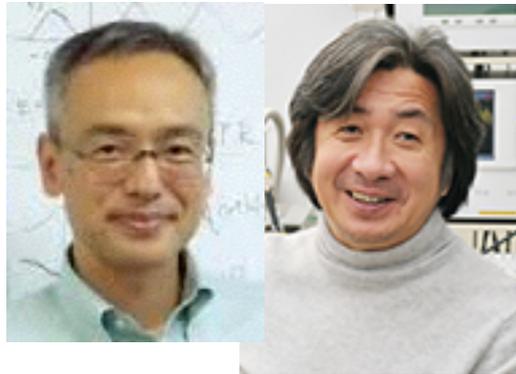
超伝導量子ビット

Y. Nakamura et al (NEC), Nature 1999



I. Chiorescu et al (Delft), Science 2003

超伝導量子コンピュータ

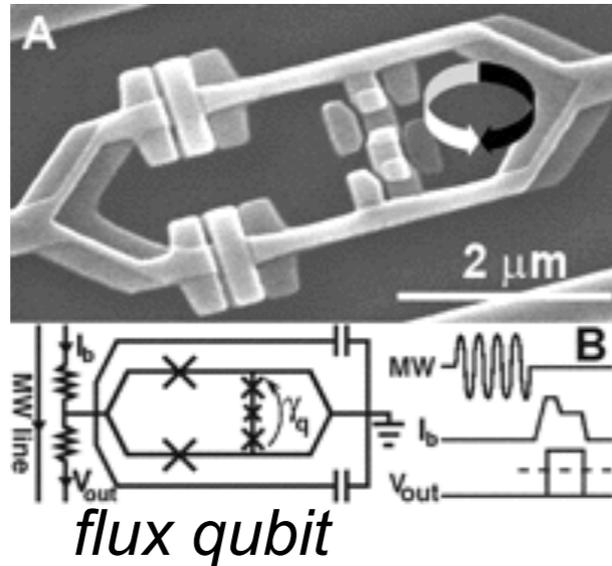


中村・蔡先生

(NEC, RIKEN)

超伝導量子ビット

Y. Nakamura et al (NEC), Nature 1999



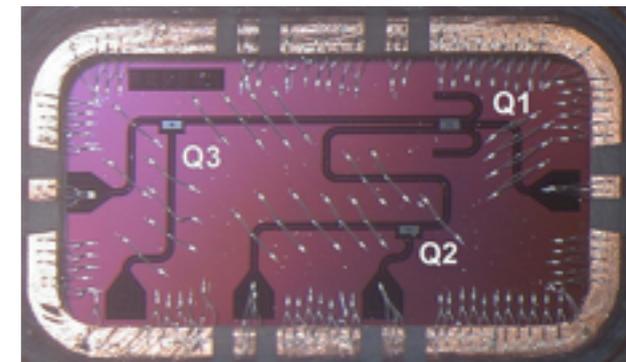
I. Chiorescu et al (Delft), Science 2003

IBM (Watson Research Center) group:

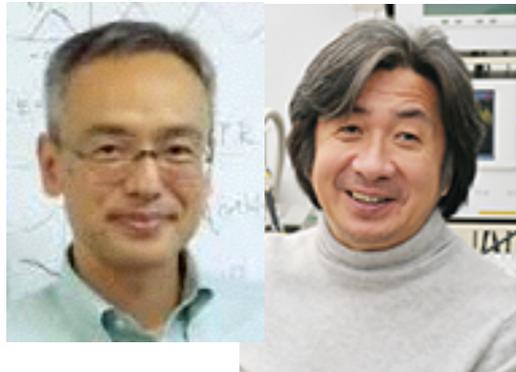
“Universal Quantum Gate Set Approaching Fault-Tolerant Thresholds with Superconducting Qubits”

J. M. Chow et al., Phys. Rev. Lett. 2012

gate fidelity: 95-98%

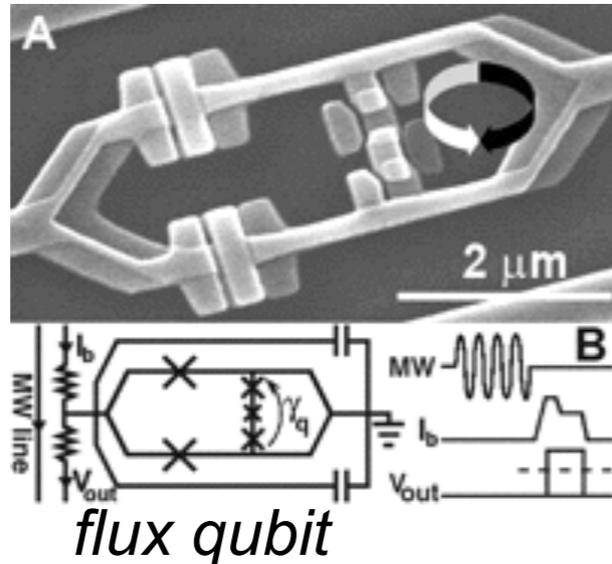


超伝導量子コンピュータ



中村・蔡先生
(NEC, RIKEN)
超伝導量子ビット

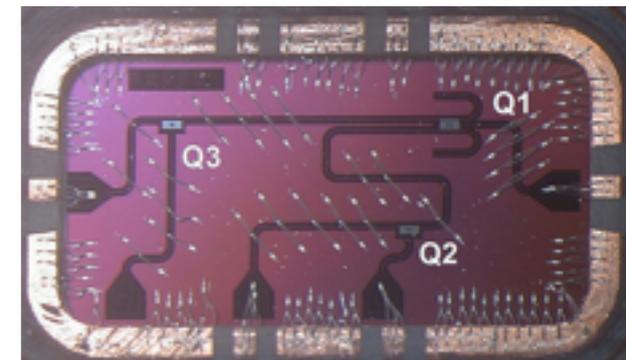
Y. Nakamura et al (NEC), Nature 1999



I. Chiorescu et al (Delft), Science 2003

IBM (Watson Research Center) group:
“Universal Quantum Gate Set Approaching Fault-Tolerant Thresholds with Superconducting Qubits”
J. M. Chow et al., Phys. Rev. Lett. 2012

gate fidelity: 95-98%



UCSB J. Martinis’s group:

“Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance”

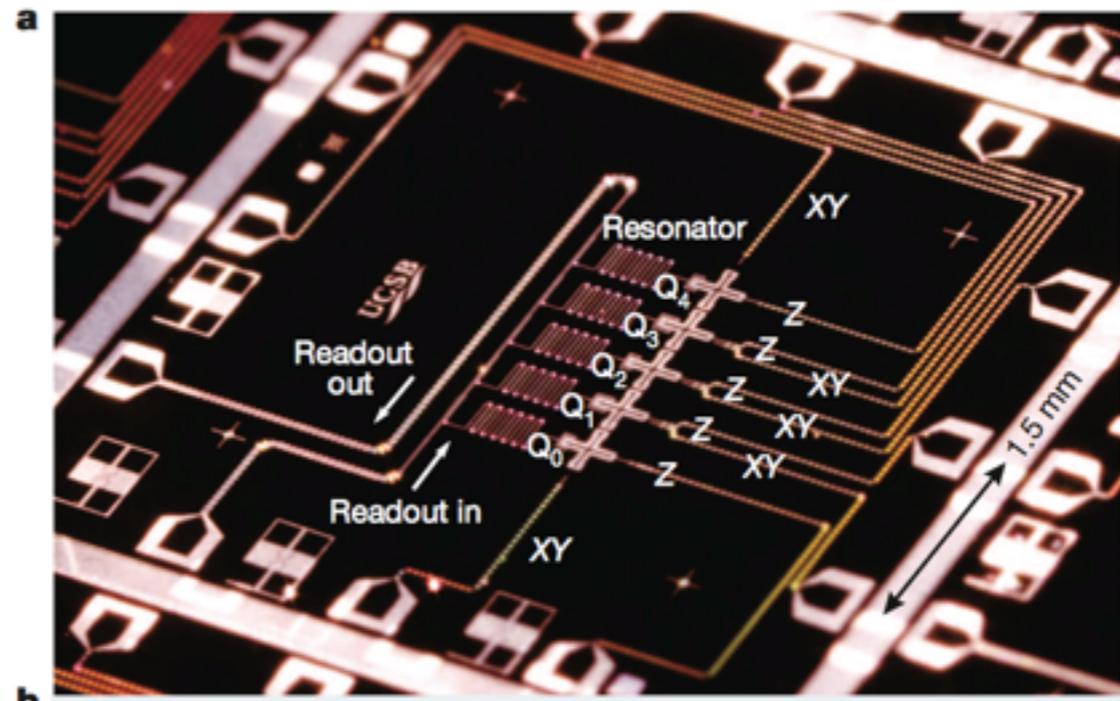
R. Barends et al., Nature 2014

[fidelities]

single-qubit gate: 99.92%

two-qubit gate: 99.4%

measurement: 99%



Googleが^がついに. . .

Googleがついに. . .



Googleがついに. . .



Google Hires Quantum Computing Expert John Martinis to Build New Hardware

By Jeremy Hsu

Posted 8 Sep 2014 | 21:00 GMT

Share | Email | Print



Google

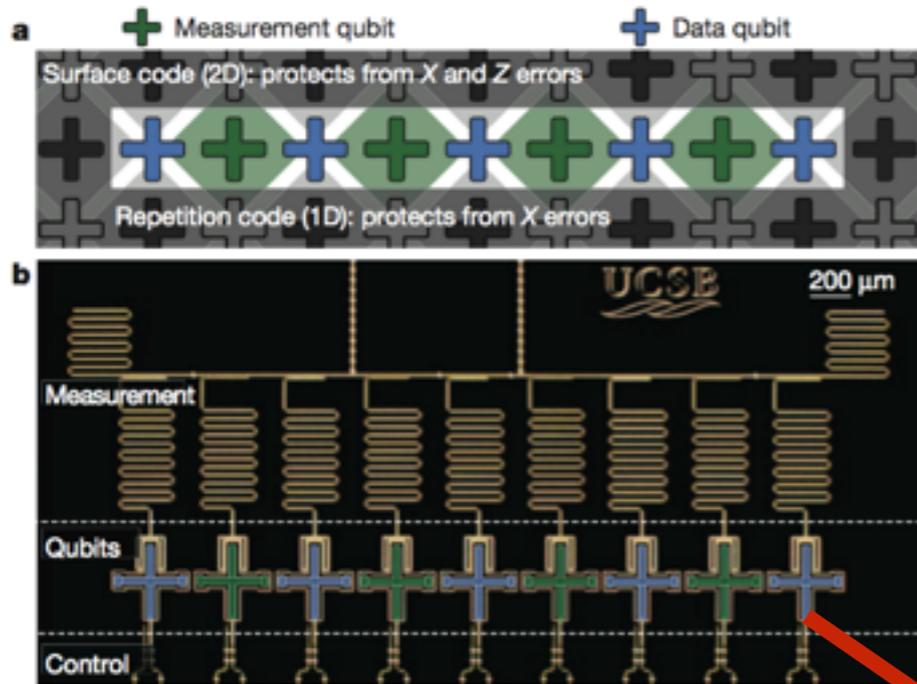
翌週

<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/google-hires-quantum-computing-expert-john-martinis-to-build-new-hardware>

Solving a wonderful problem

Superconducting qubits are used to demonstrate features of quantum fault tolerance, making an important step towards the realization of a practical quantum machine.

Simon Benjamin and Julian Kelly



UCSB(Martinis)+Google:



Kelly et al., Nature 519, 66 (2015)

Barends et al., Nature 508, 500 (2014)

[fidelities]

single-qubit gate: 99.92%

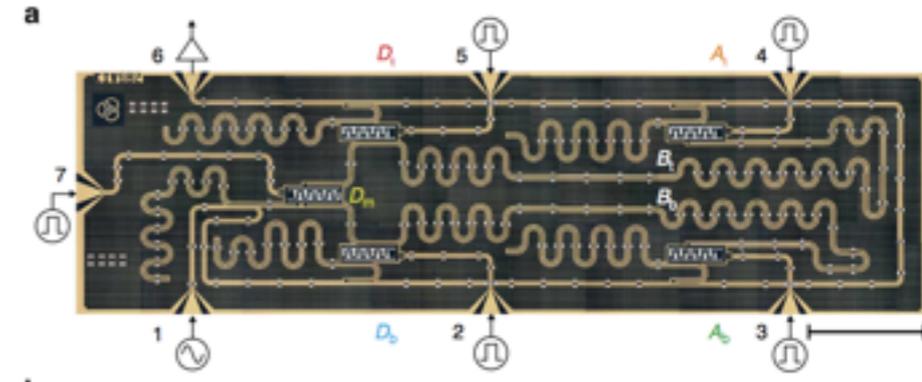
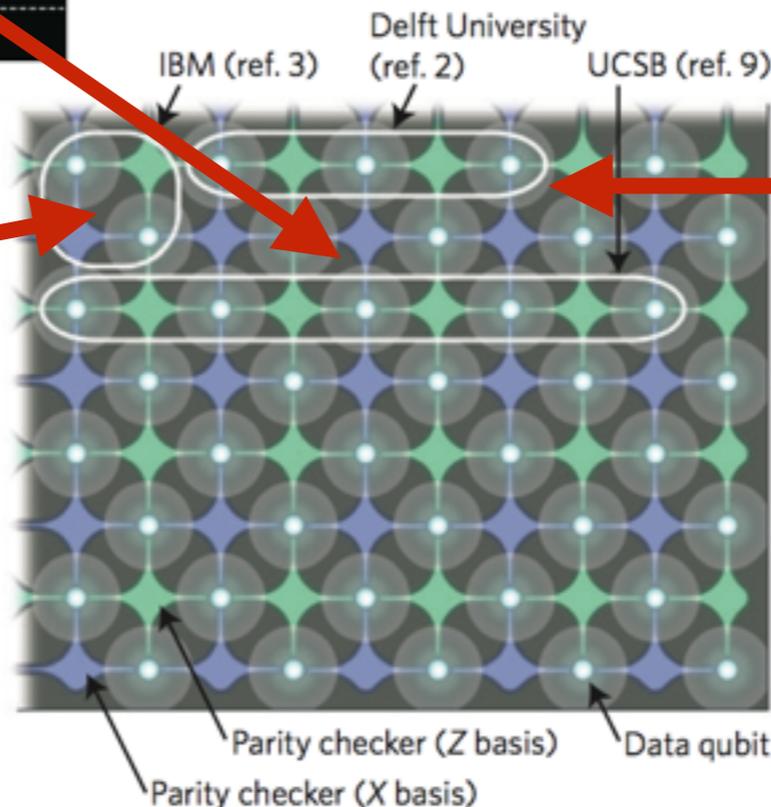
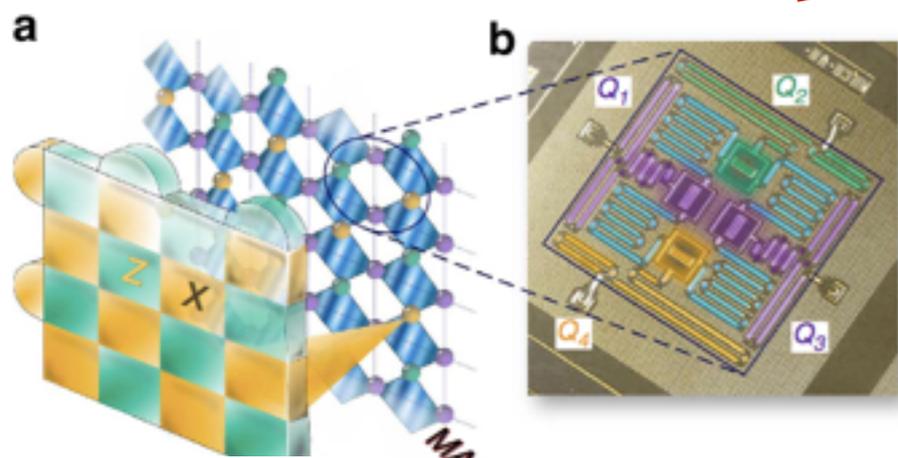
two-qubit gate: 99.4%

measurement: 99%



Delft(QuTech)+Intel:

Riste et al., Nat. Comm. 6 6983 (2015)



IBM:

Chow et al., Nat. Comm. 5 4015 (2015)

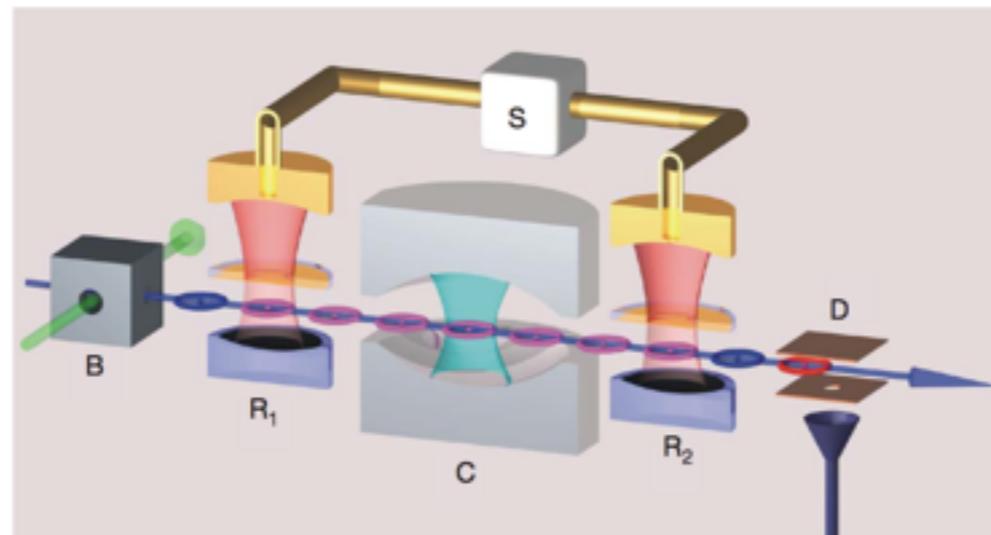
最後に

Nobel Prize 2012: Controlling individual quantum systems



http://en.wikipedia.org/wiki/Serge_Haroche

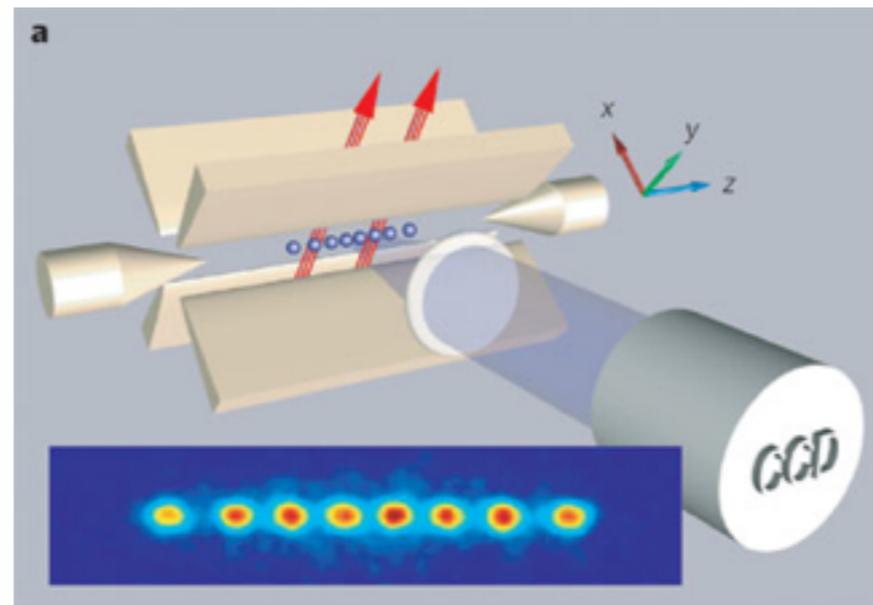
S. Haroche



Gleyzes, Sebastien, et al. "Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity." *Nature* 446.7133 (2007)

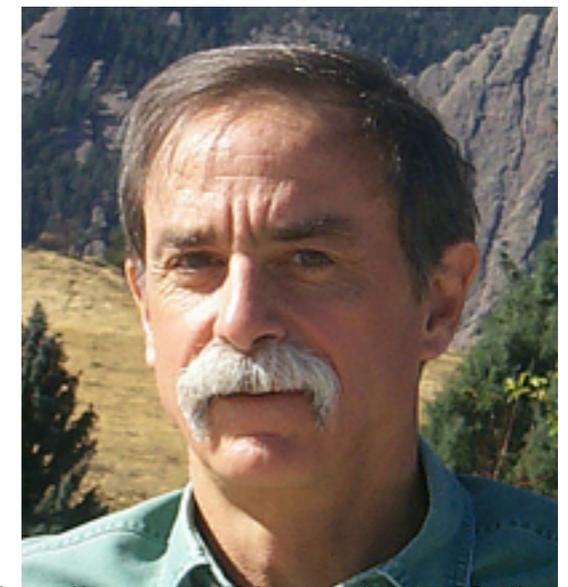
cavity-QED

光子の状態操作・非破壊測定



trapped ions

イオンの状態操作・量子演算



<http://patapsco.nist.gov/ImageGallery/details.cfm?imageid=576>

D. Winland

最後に

Nobel Prize 2012: Controlling individual quantum systems



Dream or Nightmare
the theorist's dream of a quantum
computer would be
an **experimentalist's nightmare**

birth and death of a photon in a cavity." *Nature* 446.7133 (2007)

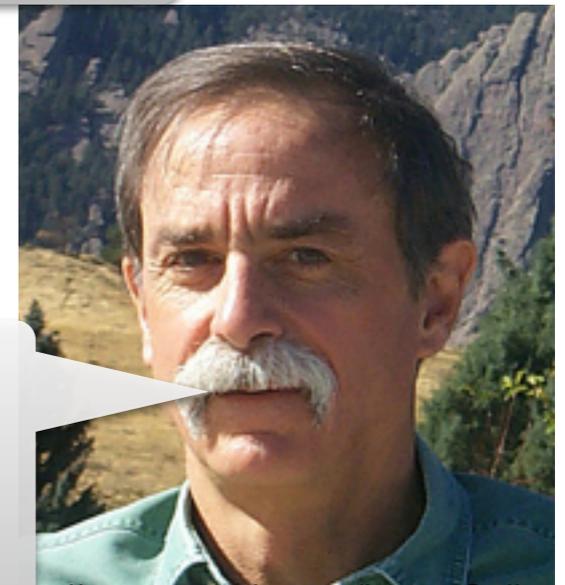
http://en.wikipedia.org/wiki/Serge_Haroche

S. Haroche



It will eventually happen using quantum
principles to make a quantum computer
that will actually have applications.

イオンの状態操作・量子演算



<http://patapsco.nist.gov/ImageGallery/details.cfm?imageid=576>

D. Winland

操作・非破壊測定