

超伝導量子コンピュータ

東京大学
先端科学技術研究センター
田淵 豊

田 豊

PC8801-MKII

全国高等専門学校
プログラミングコンテスト

ACM ICPC
プロコン

SuperCon 08
東工大

TK-85

<http://image.itmedia.co.jp/news/0302/20/quantumcom.gif>

特別高圧変圧器
2万2千V

東大阪宇宙開発
協同組合
まいど1号2号
プロジェクト

Σ
基礎工



DOI:
10.1126/science.aaa3
693

(Since 2016)



回路の(量子)物理学

さよなら、ユニタリ
こんにちは、ハミルトニアン

Hello, Circuit

- LC共振器

Fig2 in

DOI: 10.1007/s11128-004-3101-5

共振周波数 ω_0
時定数 τ

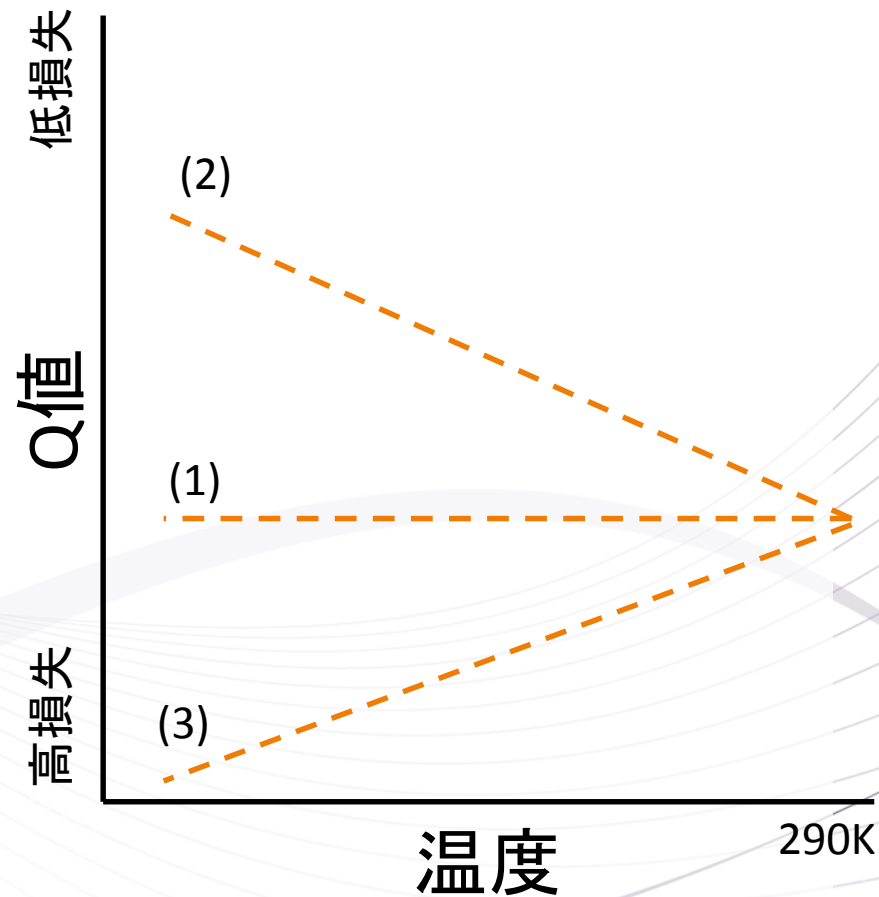
$$Q\text{値} = \omega_0 \tau$$

$$= \frac{\text{蓄えたエネルギー}}{\text{1周期に損失するエネルギー}}$$

Hello, Circuit

- LC共振器

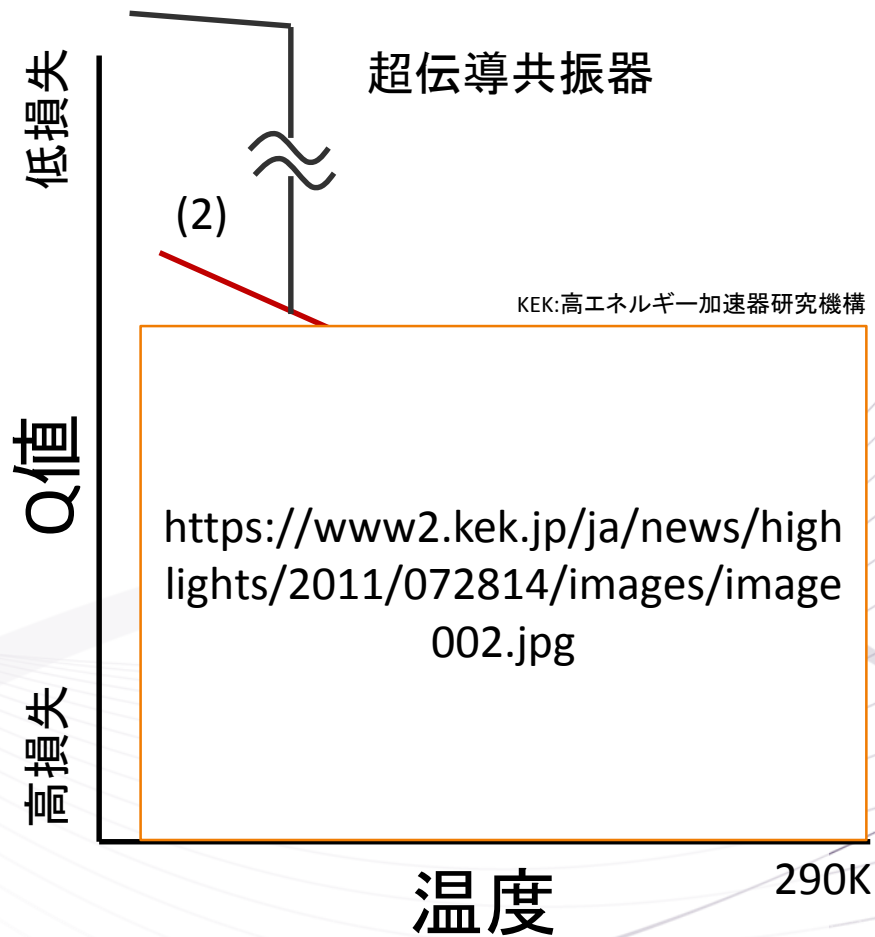
Fig2 in
DOI: 10.1007/s11128-004-3101-5



Hello, Circuit

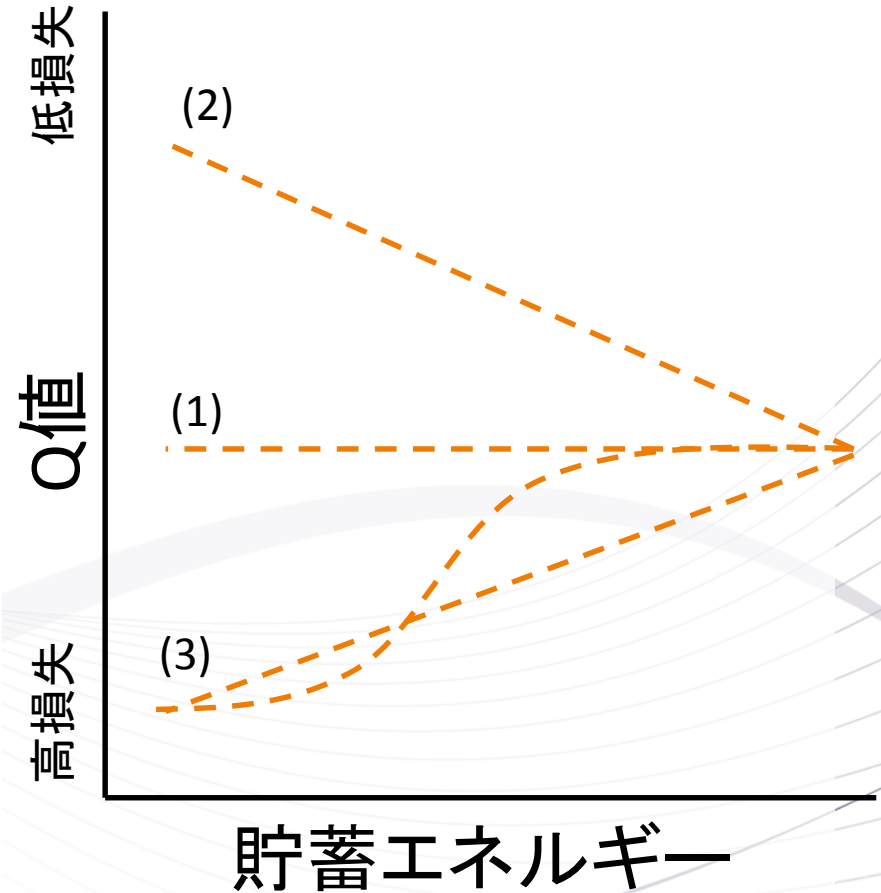
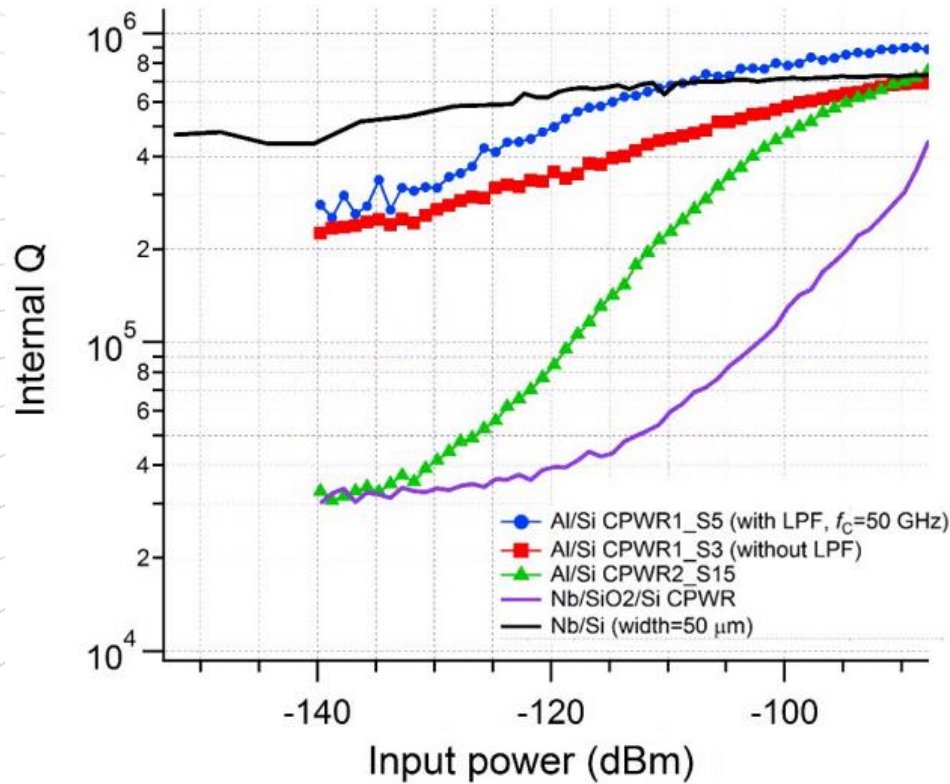
- LC共振器

Fig2 in
DOI: 10.1007/s11128-004-3101-5



Hello, Circuit

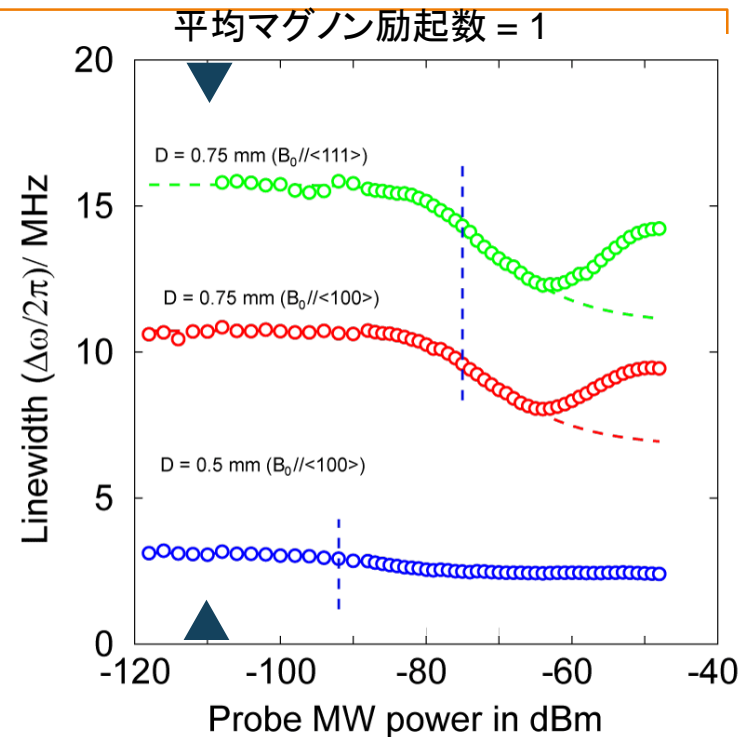
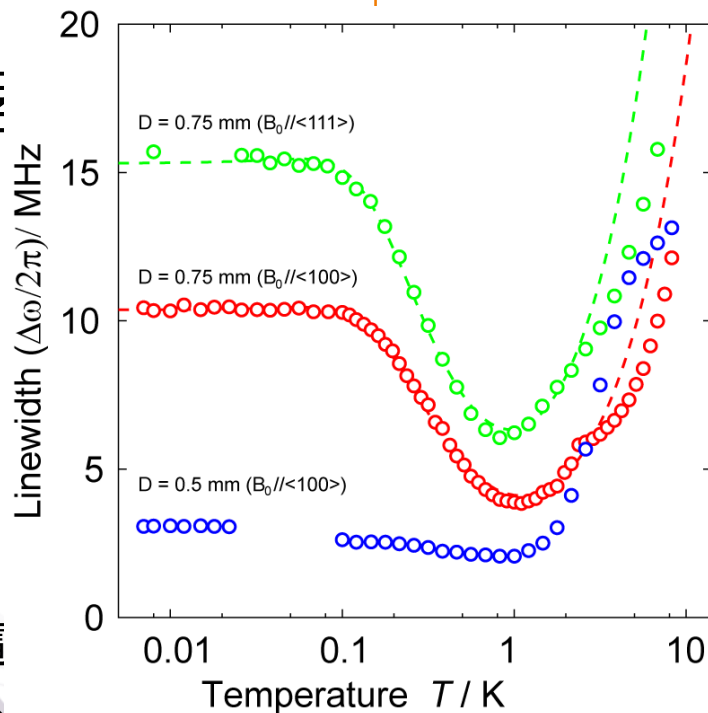
- LC共振器



Hello, Circuit

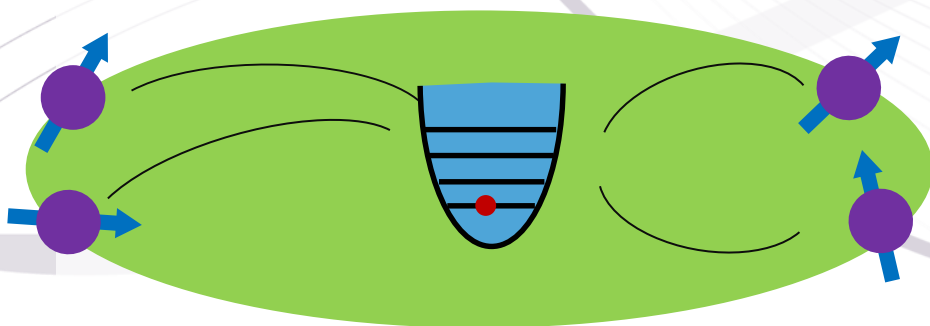
Phys. Rev. Lett. **113**, 083603 (2014)
 APL **105**, 062601 (2014)

• LC共振器



- 超伝導共振器(誘電)
- ガラス(アモルファス)
- 磁性体

未解決問題



$T \sim 0.01$ K $\ll \hbar\omega_r$,
 印加電力 \sim アトワット
 冷凍機内の熱雑音・輻射対策必須

Hello, Circuit

- 電子は遅い??

https://detail.chiebukuro.yahoo.co.jp/qa/question_detail/q1481045149

Hello, Circuit

- 電子は遅い??

Surface plasmon polariton

Fig1 in <http://iramis.cea.fr/spec/Pres/Quantro/static/wp-content/uploads/2010/10/Joyez.pdf>

Hello, Circuit

- 電子は遅い??

https://detail.chiebukuro.yahoo.co.jp/qa/question_detail/q1481045149

Fig1 in <http://iramis.cea.fr/spec/Pres/Quantro/static/wp-content/uploads/2010/10/Joyez.pdf>

超伝導状態



緩和 (散乱)

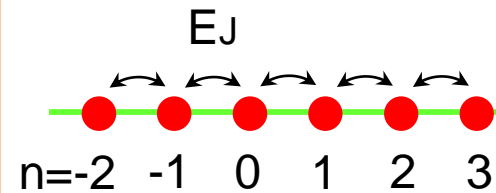
ジョセフソン接合

- 個数 $n \Leftrightarrow$ 位相差 θ $[n, \theta] = -i$

Cooper-pair
tunneling

Alternative image

<https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-246699659739f6bd57842972a52781bd.webp>



$$H = -\frac{E_J}{2} \sum_n \{ |n\rangle\langle n+1| + |n+1\rangle\langle n| \}$$

1次元TBモデル \Rightarrow Bloch band

超伝導電荷量子ビット

$$H = \frac{(2e)^2}{2C} (|n\rangle\langle n| - n_g)^2 - \frac{E_J}{2} \Sigma [|n\rangle\langle n+1| + |n+1\rangle\langle n|]$$

個数が確定する方がいい

個数が揺らぐ方が気持ちいい

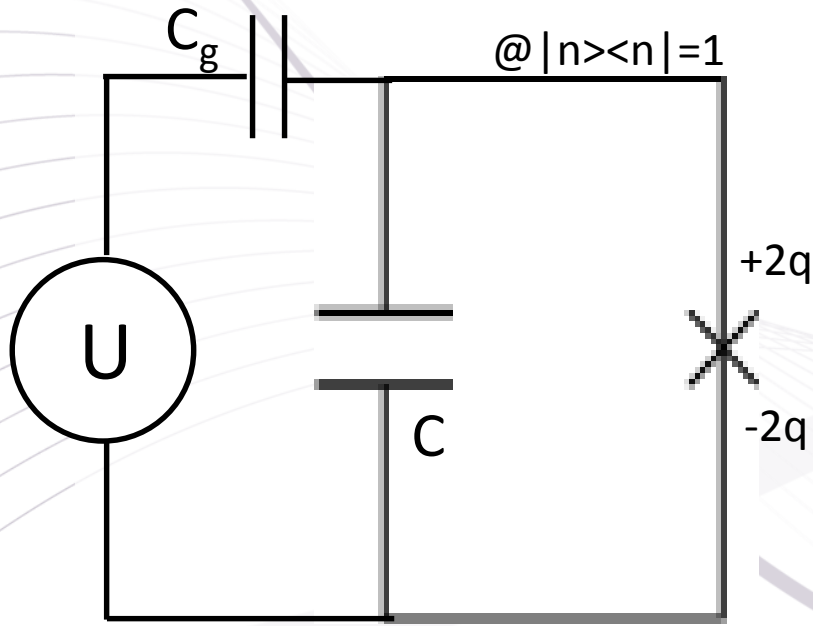


Fig2 in
DOI: 10.1238/Physica.Topical.076a00165

超伝導電荷量子ビット

$$H = \frac{(2e)^2}{2C} (|n\rangle\langle n| - n_g)^2 - \frac{E_J}{2} \Sigma [|n\rangle\langle n+1| + |n+1\rangle\langle n|]$$

個数が確定する方がいい

個数が揺らぐ方が気持ちいい

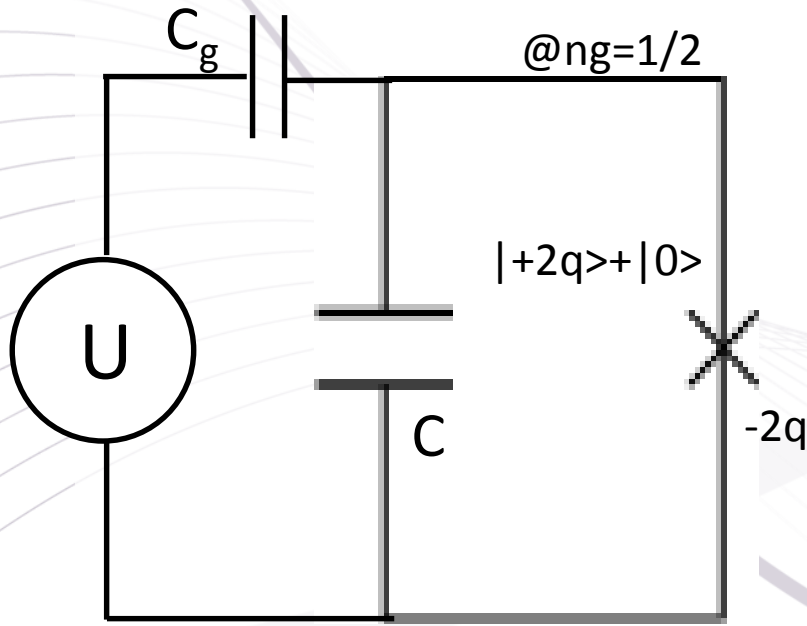


Fig2 in
DOI: 10.1238/Physica.Topical.076a00165

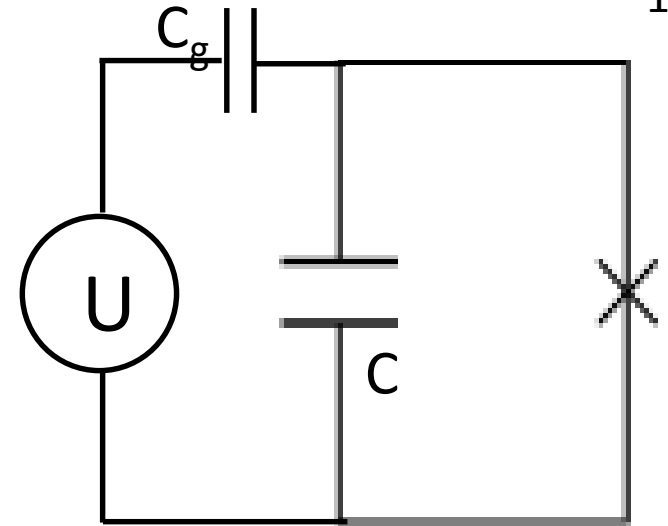
超伝導電荷量子ビット

計算基底と物理量

- $|0\rangle = |n = 0\rangle + |n = 1\rangle,$
- $|1\rangle = |n = 1\rangle - |n = 0\rangle$

- $\sigma^Z = |n = 0\rangle\langle n = 1| + |n = 1\rangle\langle n = 0|$

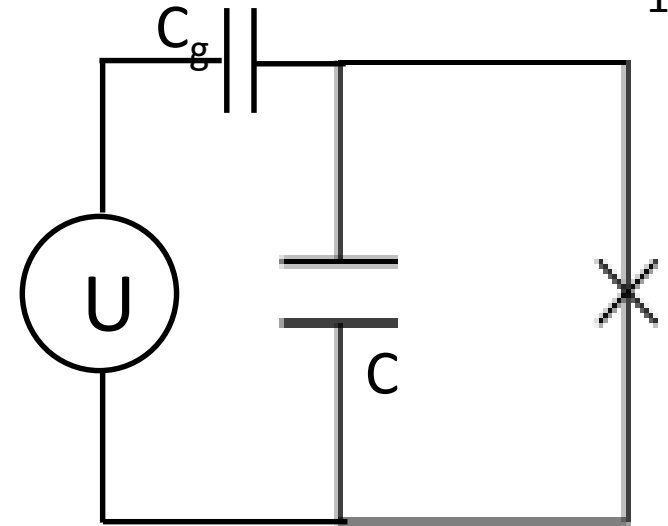
物理的にアクセスできるのか...?



超伝導電荷量子ビット

計算基底と物理量

- $|0\rangle = |n = 0\rangle + |n = 1\rangle,$
- $|1\rangle = |n = 1\rangle - |n = 0\rangle$



- $\sigma^X = |n = 0\rangle\langle n = 0| - |n = 1\rangle\langle n = 1|$

電荷の偏りの度合い

= 電気双極子モーメント / $(2e)d$

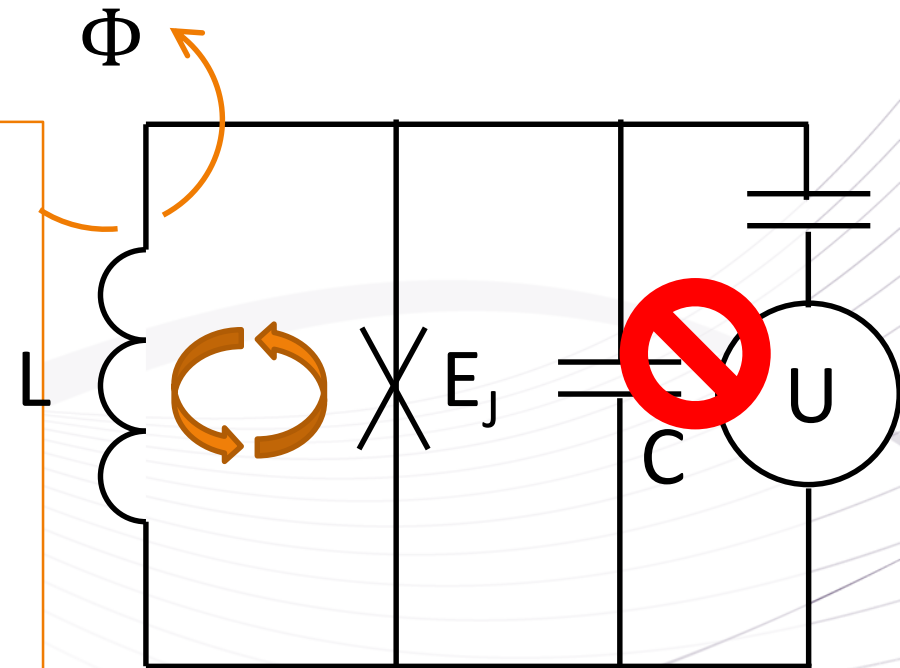
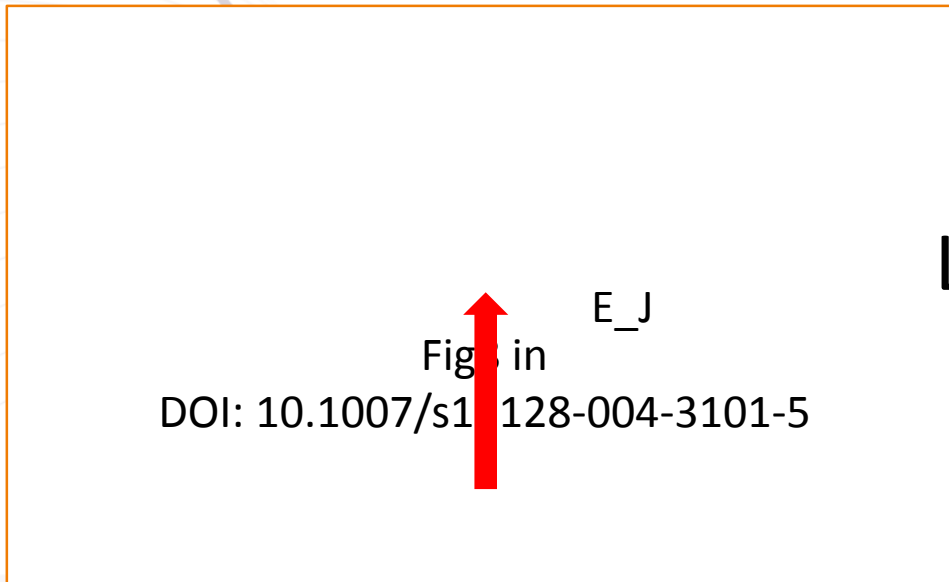
- 接合間へのMW電圧Uの印加により制御可能
- 超高感度電荷センサ → 電圧Uの揺らぎに弱い

超伝導磁束量子ビット

$$[2q \hat{n}, \varphi] = i\hbar$$

$$H = \frac{1}{2C} (\hat{q} - 2e n_g)^2 + \frac{\phi^2}{2L} - E_J \cos(2\pi (\hat{\phi} - \Phi)/\Phi_0)$$

- 磁束 ϕ が整数, q は連続値



超伝導トランズモン量子ビット

$$H = \frac{(2e)^2}{2C} (|n\rangle\langle n| - n_g)^2 - \frac{E_J}{2} \Sigma [|n\rangle\langle n+1| + |n+1\rangle\langle n|]$$

個数が確定する方がいい

個数が揺らぐ方が気持ちいい

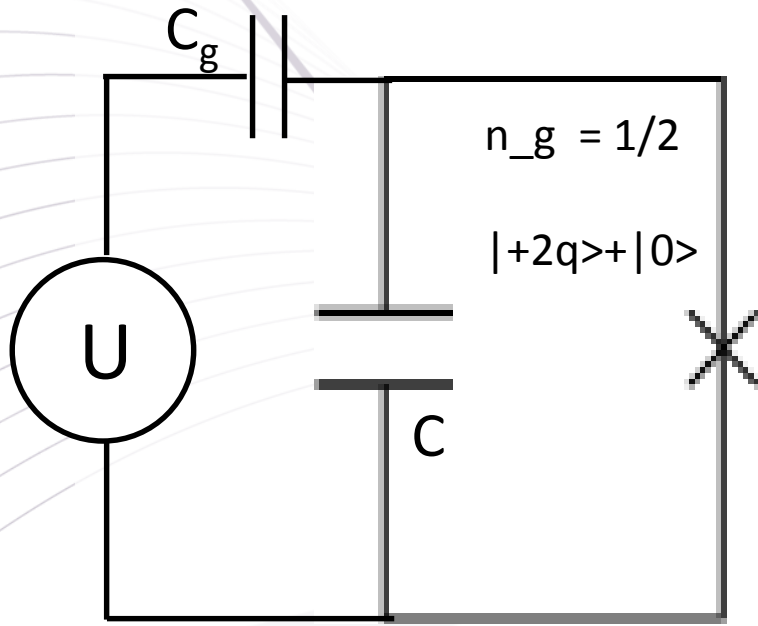


Fig2 in
DOI: 10.1238/Physica.Topical.076a00165

超伝導トランズモン量子ビット

$$H = \frac{(2e)^2}{2C} (|n\rangle\langle n| - n_g)^2 - \frac{E_J}{2} \Sigma [|n\rangle\langle n+1| + |n+1\rangle\langle n|]$$

個数が確定する方がいい

個数が揺らぐ方が気持ちいい

ここで議論していたのは、(古典)揺らぎを(量子)揺らぎの導入で抑え込もうというアイデアです。とてもユニークですね。

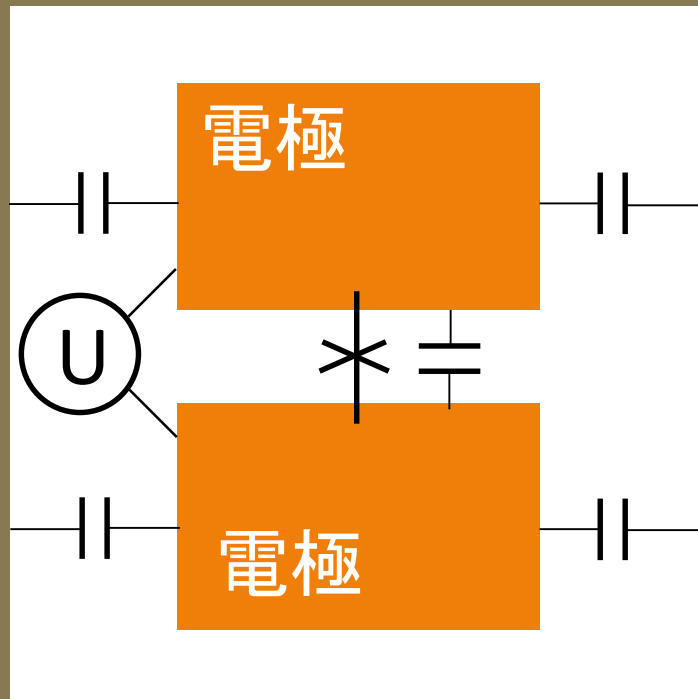
粒子数に広がり(揺らぎ幅)があらわれることにより、粒子数が確定しているパラメータ領域に対して、古典的な電荷揺らぎによるデコヒーレンスを小さくできます。通常は電荷エネルギーを $E_C = (e/2C)^2$ と定義すると E_J/E_C を 50-80 に設定します。

Fig2 in

DOI: /10.1103/PhysRevA.76.042319

超伝導トランズモン量子ビット

接地電極



- 電荷オフセット U の印加量は誰も知らない
= 環境雑音に強い

<https://cdn.technologyreview.com/i/images/34315884280bc0e7393d2o.jpg?sw=1024&cx=0&cy=157&cw=3504&ch=1971>

IBMQ 16Q

回路量子電磁力学による記述

- 調和振動子により近似

$$H/\hbar = \omega_q (\hat{a}^\dagger \hat{a} + 1/2)$$

- 最低準位が量子ビット空間になるように非調和性 Kerr効果を導入

Fig 2(c) in 電子情報通信学会 会誌 Vol. 10, p400- (2018)

- 量子ビットー共振器間/量子ビット

$$H_{int}, \hbar = g (\hat{a}^\dagger + a)(\hat{b}^\dagger + \hat{b}) + h.c.$$

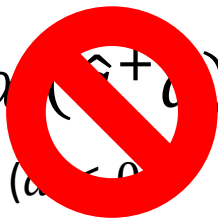
電気双極子相互作用
(キャパシタ相互作用)

他の自由度/共振器・量子ビット等

回路量子電磁力学による記述

- 調和振動子により近似

$$H/\hbar = \omega_q (\hat{a}^+ \hat{a} + 1/2) + \alpha (\hat{a}^+ + \hat{a})^2$$



- 電磁界計算による結合
連成調和振動子の解析

Fig 2(c) in 電子情報通信学
会会誌 Vol. 10, p400-
(2018)

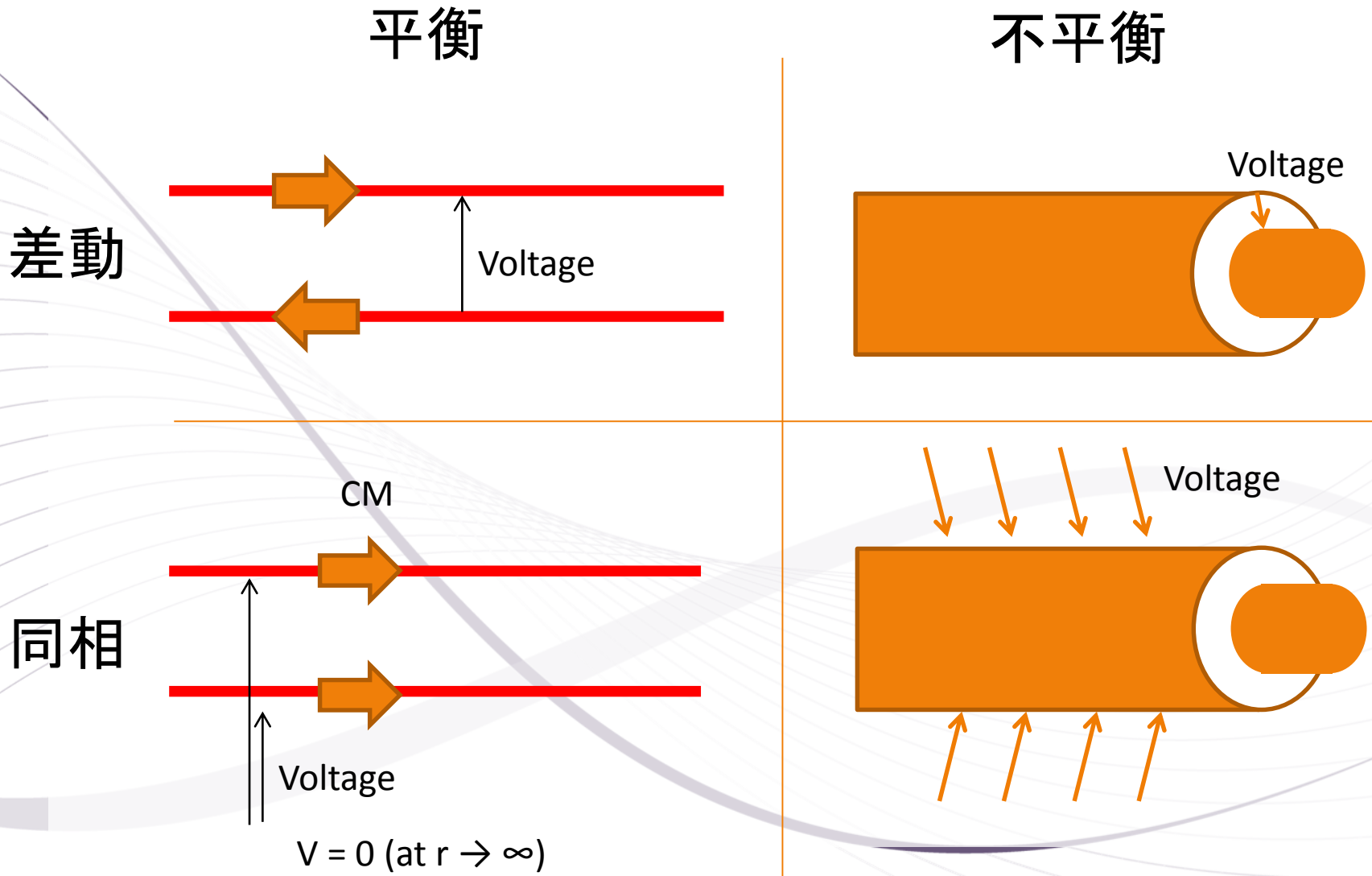
中村研 量子ビット 正面図

玉手修平, 田淵豊, 河野信吾, Akhil Pratap Singh, 部谷謙太郎, Amarsanaa Davaasuren,
中村泰信, 超伝導量子回路を用いた二次元量子ビット配列の基本設計法(II), 日本物理
学会 第73回年次大会, 25aK203-2 (2018)

中村研 量子 ビット 側面 図

- 非調和性を後処理にて導入・動作解析 ⇒ 設計

量子ビットの電磁波工学的分類



量子ビットの電磁波工学的分類

平衡

不平衡

差動

Delft

IBM

Fig8(a) in
DOI:10.1103/PhysRevApplied.8.034021

<https://cdn.technologyreview.com/~/images/34315884280bc0e7393d2o.jpg?sw=1024&cx=0&cy=157&cw=3504&ch=1971>

UCB

<http://qnl.berkeley.edu/wp-content/uploads/2012/06/5-qubit-chip.jpg>

UT

Oxford

Yale

玉手修平, 田淵豊, 河野信吾, Akhil Pratap Singh, 部谷謙太郎, Amarsanaa Davaasuren, 中村泰信, 超伝導量子回路を用いた二次元量子ビット配列の基本設計法(II), 日本物理学会第73回年次大会, 25aK203-2 (2018)

Fig 1(b) in
DOI:10.1063/1.4984299

FigS1(c) in
arXiv:1801.05283 (2018)

UT (3D)

部谷謙太郎, Amarsanaa Davaasuren, Akhil Pratap Singh, 河野信吾, 日塔光一, 補山幸一, 玉手修平, 田淵豊, 中村泰信, 同軸型空洞共振器二次元配列中の超伝導量子ビット, 日本物理学会第73回年次大会, 25aK203-3 (2018)

USTC

Google

Fig1 in
DOI:10.1103/PhysRevLett.119.180511

Device used in
DOI: 10.1038/nature13171

同相

No implementation

(Single-ended)

量子ビットの制御

- NMR/ESR的に行う
2準位に共鳴するマイクロ波を印加

輸入されたNMR/ESR技術

エコー : Hahn, CPMG, Rotary, SpinLocking, XY8

相関測定: COSY, BIRD (by Weitekamp & A.Pines)

多重共鳴: 交差共鳴, ENDOR, ELDOR, DEER

複合パルス等

Fig 2(c) in 電子情報
通信学会 会誌 Vol.
10, p400- (2018)

- 超伝導業界にて開発されたもの [Qiskit-backend-information/IBMQ](https://github.com/Qiskit-backend-information/IBMQ)

相関測定: JAZZ (BIRDの改変)

多重共鳴: Cross Resonance

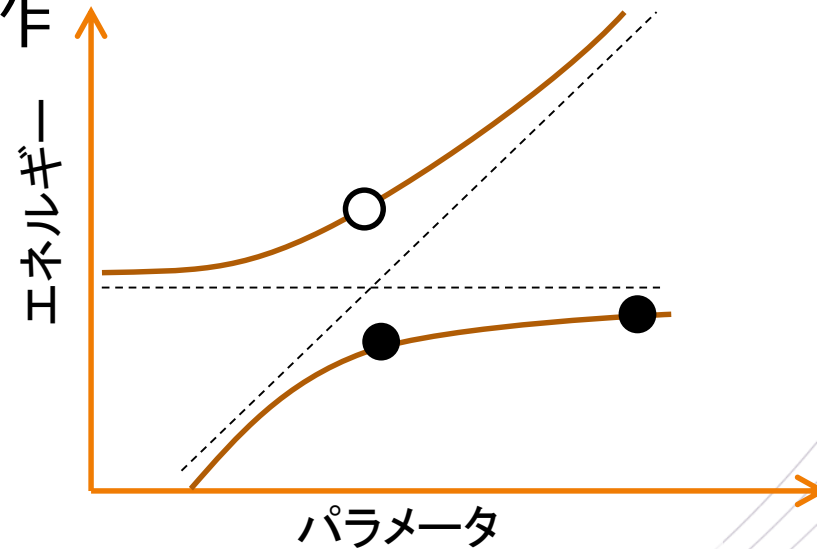
周波数分解: SWIFT (CNOTゲート in 溶液NMRと等価)

Table $\zeta_{ij}/2\pi$ in
<https://github.com/Qiskit-backend-information/tree/master/backends/rueschlikon/V1>

量子ビットの制御

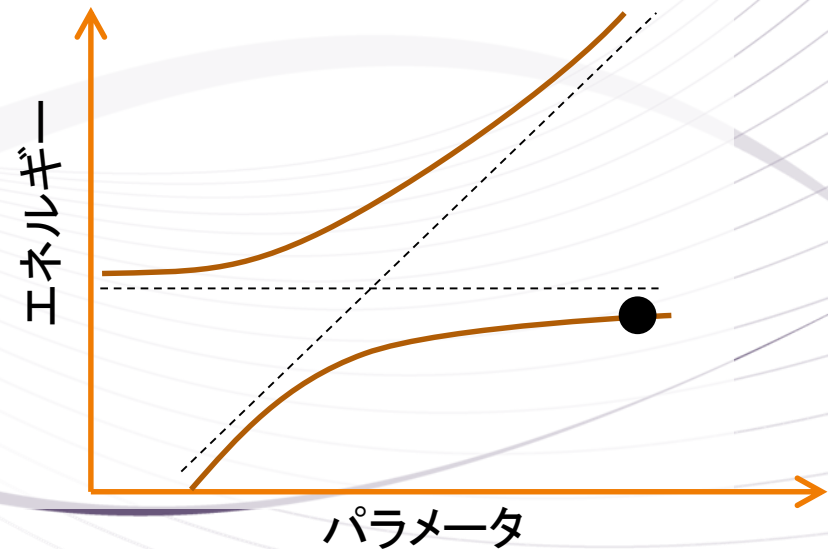
• 電流パルスによる非断熱操作

共振器誘起 iSWAP (USTC)
共振器誘起 Control-Z (Delft)



• 電流パルスによる断熱操作

直接 Control-Z (Google)



量子ビットの観測

- 読み出しパルスエネルギー 0.01-0.05 fW/MHz

Fig3(e),(f) in DOI:
10.1103/PhysRevL
ett.106.110502

Vijay et al.,
PRL **106**, 110502 (2011)
(>240 citation)

10 mK

Fig1(a) in DOI:
10.1063/1.2964182

雑音: 0.01 fW/MHz
山本 (NEC) et al,
APL 93, 042510 (2008)
(> 180 citation)

4K

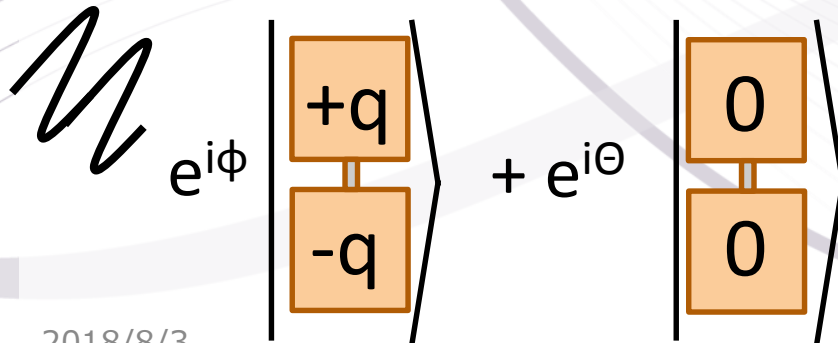
https://www.lownoisefactory.com/files/5414/8906/7868/X-band_transparent_150.png

雑音: 0.1 fW/MHz
¥800,000

https://nardamiteq.com/docs/Amplifier_LNA_Series.PDF

雑音: 1fW/MHz
¥300,000

非共鳴



量子ビットで遊ぶ

2018/8/3

磁性体の模擬実験

- 異方性のある
強磁性相互作用

Eq1 & 2 in DOI:10.1038/nature17658

Fig 2 in DOI:10.1038/nature17658

フェルミ粒子の模擬実験

粒子を量子ビットに割り当て

Fig 1(b) Right, DOI:
10.1038/ncomms8654

符号化された反交換関係を確認する

= 0

= 0

Hermitian

Hermitian

フェルミ粒子の模擬実験

ハバード模型の実装

Fig 1(a) Potential, DOI:
10.1038/ncomms8654

符号空間のハミルトニアンを実
量子ビット空間に実装 $U_{14} \neq U_{23}$

Fig 4(a) Q Circuit, DOI:
10.1038/ncomms8654

絶縁体 \Rightarrow 金属相への遷移 (2サイト)

Fig 5, DOI: 10.1038/ncomms8654

トポロジカル励起の操作実験

$$P(\gamma) = \bigotimes_{j=1}^6 (\cos \gamma Y_j + \sin \gamma X_j)$$

- トーラス符号

e 準粒子の周囲を
m 準粒子が一周するときの
経路依存性を調べる

Fig1(a) in DOI:
10.1103/PhysRevLett.121.0305
02

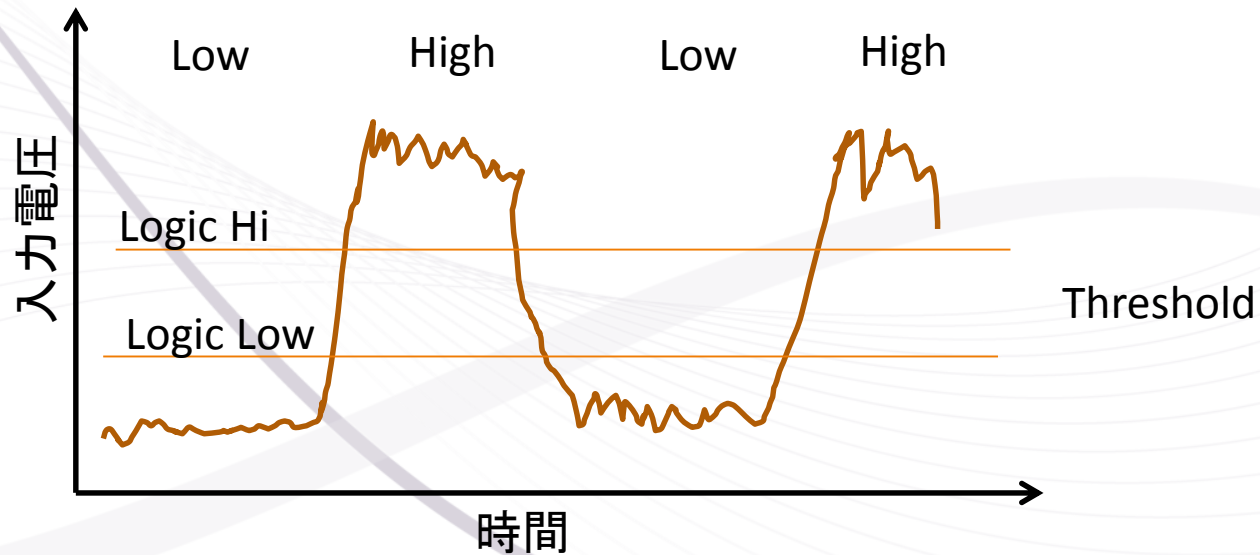
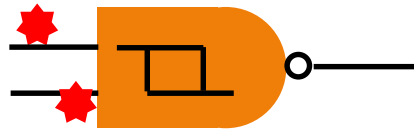
Fig4 in DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.030502

(工学的議論) 誤りのない量子コンピュータ

従来エレクトロニクス制御 (70%) と材料・ファブ改善 (30%)
or 90%の理論 (しきい値) 改善

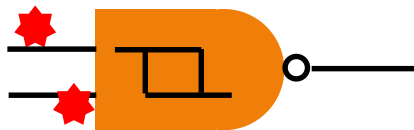
ゲート型量子コンピュータ (論理回路との対比)

- 論理ゲートは「しきい値動作」



ゲート型量子コンピュータ (論理回路との対比)

- 論理ゲートは「しきい値動作」



回路パラメータの誤差

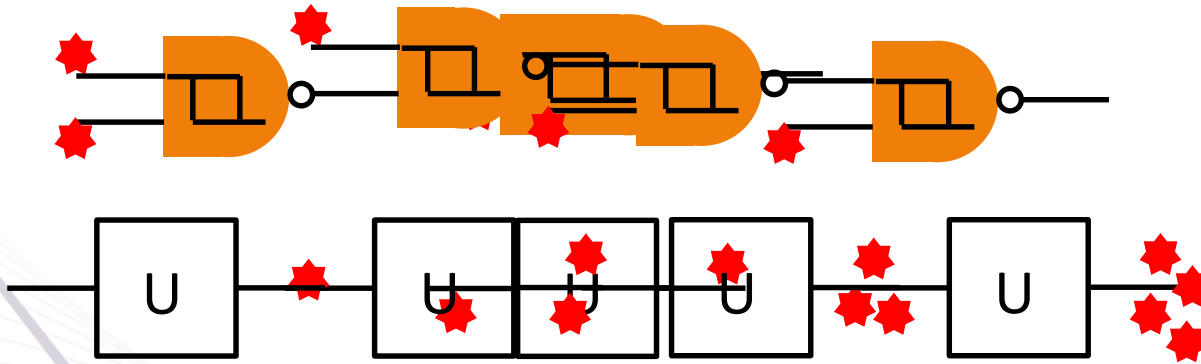
パルスに影響無し
(そうなるように設計)

A circuit diagram on 21 page in
<https://slideplayer.com/slide/7530665/> by CEA Institut
 Nanosciences Et Cryogène

そうなるように?
 ⇒ スイッチング素子の
 しきい値を利用

ゲート型量子コンピュータ

- 量子論理ゲートは「しきい値動作」ではない

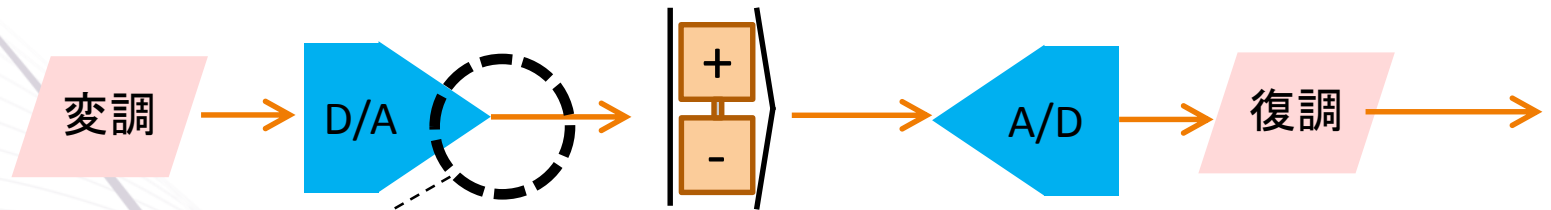


回路パラメータの
誤差は？

Fig1 in
DOI: /10.1103/PhysRevA.76.042319

ゲート型量子コンピュータ

- 量子論理ゲートは「しきい値素子」ではない



制御エレクトロニクスのアナログ精度で吸収

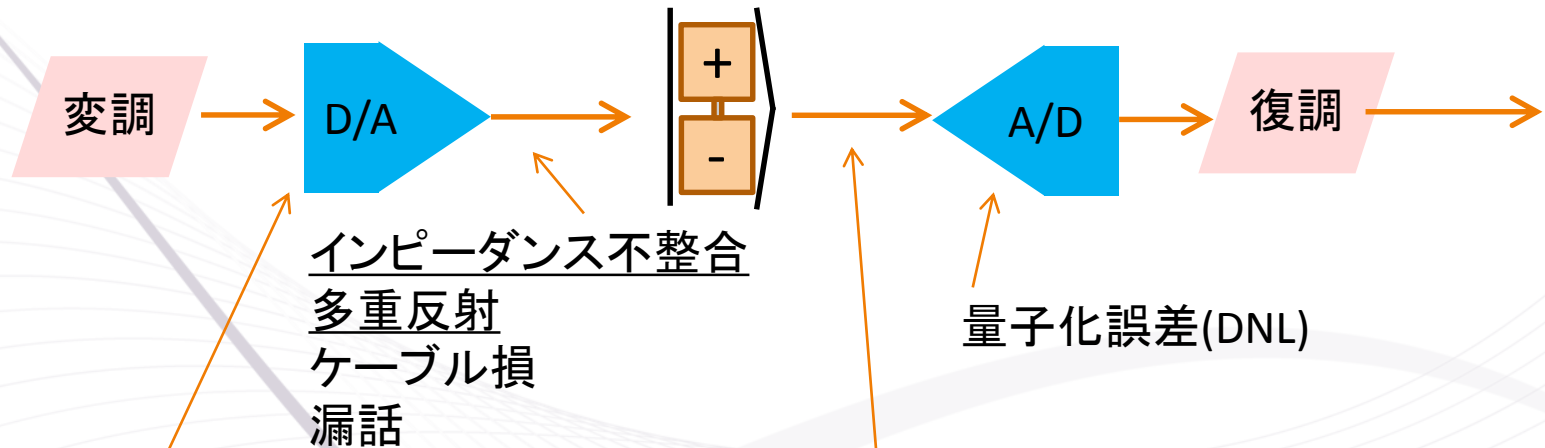
回路パラメータの誤差は？

Fig1 in
DOI: /10.1103/PhysRevA.76.042319

図: Koch *et al.*, PRA (2007)

ゲート型量子コンピュータ = 巨大なアナログ受動回路

- 量子論理ゲートは「しきい値素子」ではない



生成波形誤差(ダイナミックレンジ)
生成波形位相ジッター, ドリフト
増幅器位相揺らぎ
発振器位相安定度

増幅器分散
自己位相変調

現在の記憶媒体：なぜ外乱に強い？

半導体記憶装置(SSD)

<https://www.orbitalstore.mx/media/magpleasure/mpblog/upload/6/a/6a451f878e67b95f14ec1a1aad81a5e95d.jpg>

磁気記憶装置(HDD)

<http://pluspng.com/img-png/hard-drive-png-hd-hard-disc-png-harddisk-hd-png-1200.png>

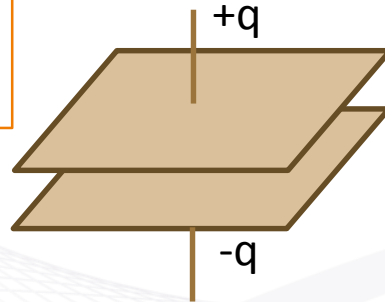
光記憶装置(DVD-RW)

<http://evmhistory.ru/images/safekeeping/dvdrwm1.jpg>

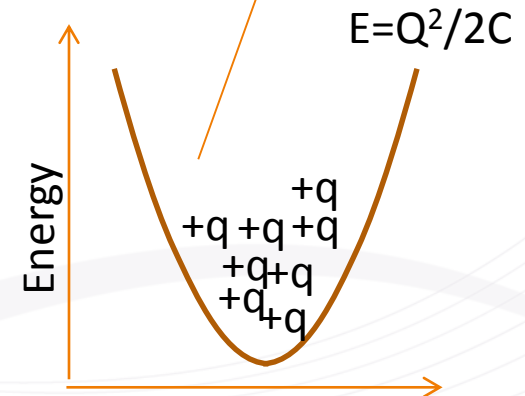
現在の記憶媒体：なぜ外乱に強い？

半導体記憶装置(SSD)

<https://www.orbitalstore.mx/media/magpleasure/mpblog/upload/6/a/6a451f878e67b95f14edd aad81a5e95d.jpg>



Capacitance = 数 fF
 $Q = 10\text{万個} \times \text{素電荷}$



電荷の集団が情報を記憶
 (Since 1972)

現在の記憶媒体：なぜ外乱に強い？

磁気記憶装置(SSD)

<http://pluspng.com/img-png/hard-drive-png-hd-hard-disc-png-harddisk-hd-png-1200.png>

https://17inch.c.blog.sonet.ne.jp/_images/blog/_1b0/17inch/Head3-bc47d.png

磁石が情報を記憶

現在の記憶媒体：なぜ外乱に強い？

磁気記憶装置(SSD)

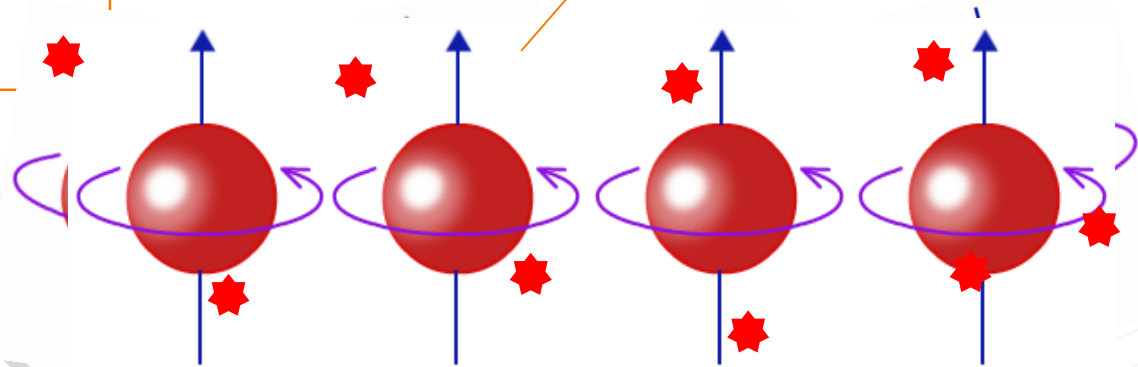
(垂直磁気記録方式)

1bit ~ 1万nm³

~ 1万スピンの

<http://pluspng.com/img-png/hard-drive-png-hd-hard-disc-png-harddisk-hd-png>
1200.png

スピン: 磁化(=磁気モーメント)の最小単位



磁石が情報を記憶=スピンの磁気秩序が情報を記憶

現在の記憶媒体：なぜ外乱に強い？

光記憶装置(DVD-RW)

AgInSbTe

<http://evmhistory.ru/images/safekeeping/dvdrwm1.jpg>

<http://www.tdk-media.jp/dvdkihon/html/img/dvd20311.gif>

非晶質

結晶

Fig 1.1(b)
<http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/12227>

Fig 1.1(a)
<http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/12227>

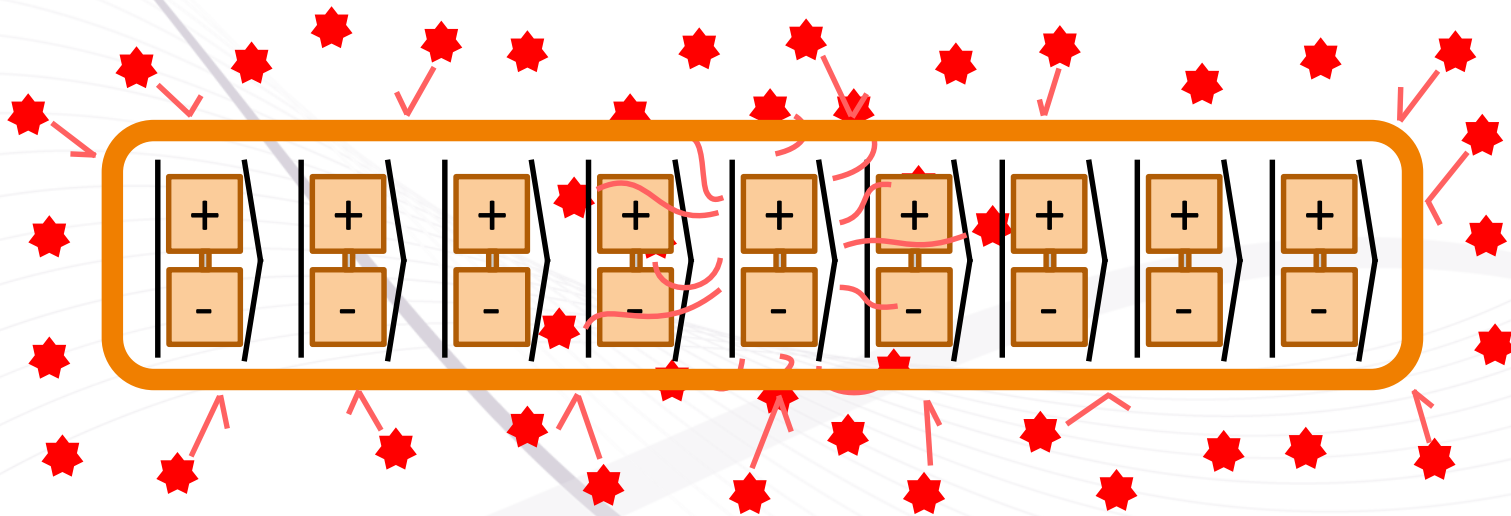
記録層が情報を記憶=結晶の秩序が情報を記憶
201.pdf

量子状態を堅固に守る

量子誤り訂正=符号化/復号化

- Fight **Entanglement** with **Entanglement**
(Preskill, 1997)

*千-1万物理量子ビット/1論理量子ビット



人類が手軽な素子として取り扱える素励起、素粒子の最小量は、常温で1~10万個、低温で千ヶぐらいなのかな、と考えています。

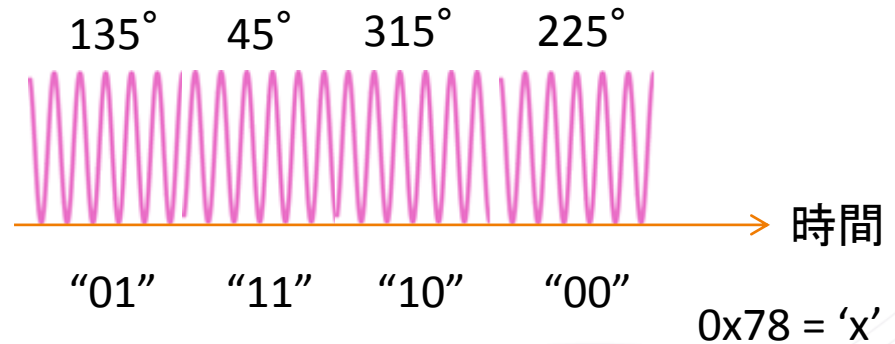
そう思えばオーバーヘッドが大きいというよりもむしろ小さく感じます。

しきい値の発現

要求されるクレイジーなアナログ精度

- QPSK (Quadrature-phase shift keying)

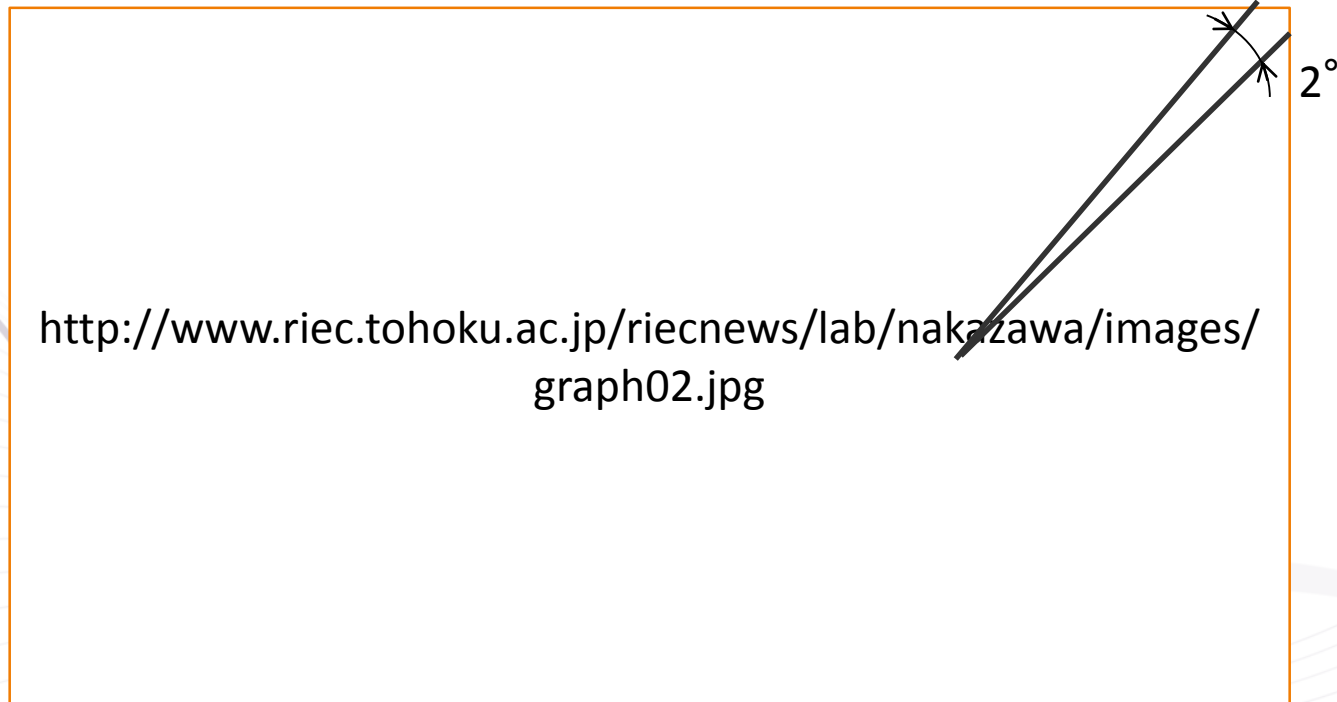
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8f/QPSK_Gray_Coded.svg/220px-QPSK_Gray_Coded.svg.png



https://jp.tek.com/sites/default/files/media/image/A003_4382-L.jpg

要求されるクレイジーなアナログ精度

- 1024QAM (コヒーレントMW/光通信)

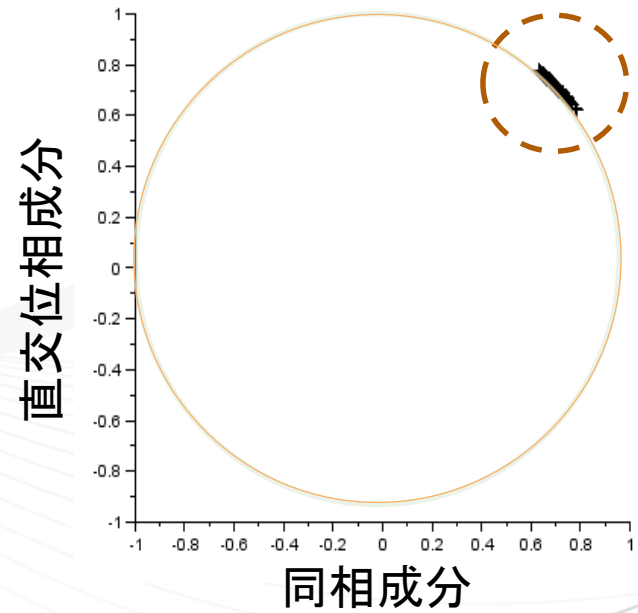
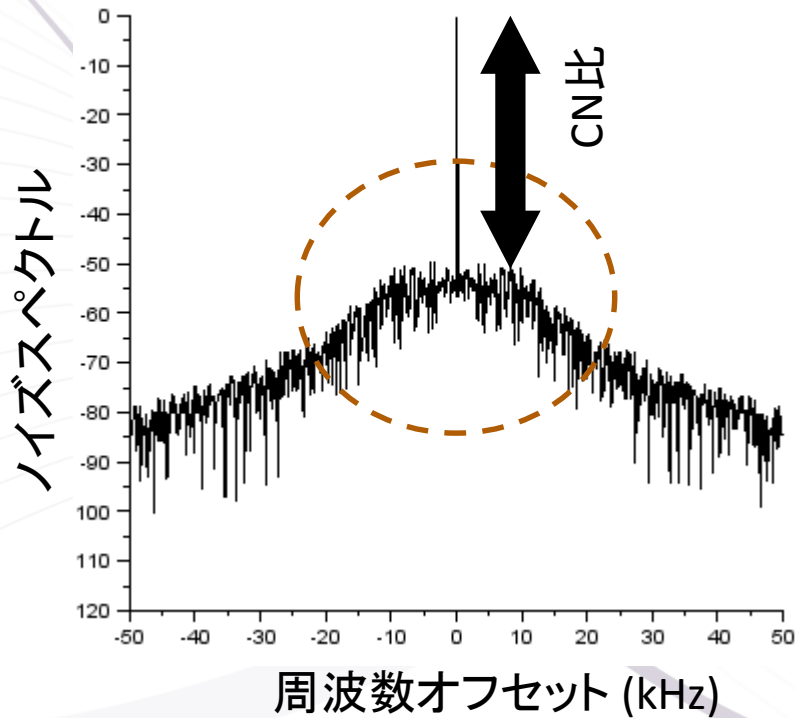


- 量子誤り訂正符号

- 誤り訂正しきい値 **0.5°**
- 実用的な動作 **≪ 0.05°**

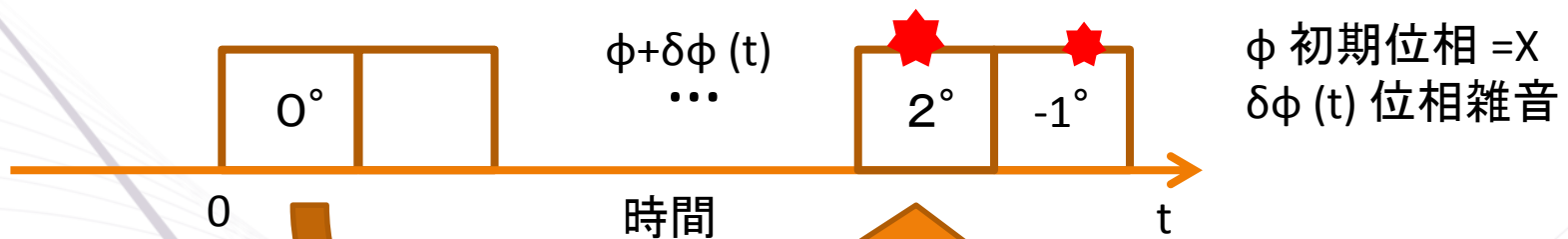
発振器の位相雑音を体感する

- 搬送波周辺の位相揺らぎに起因



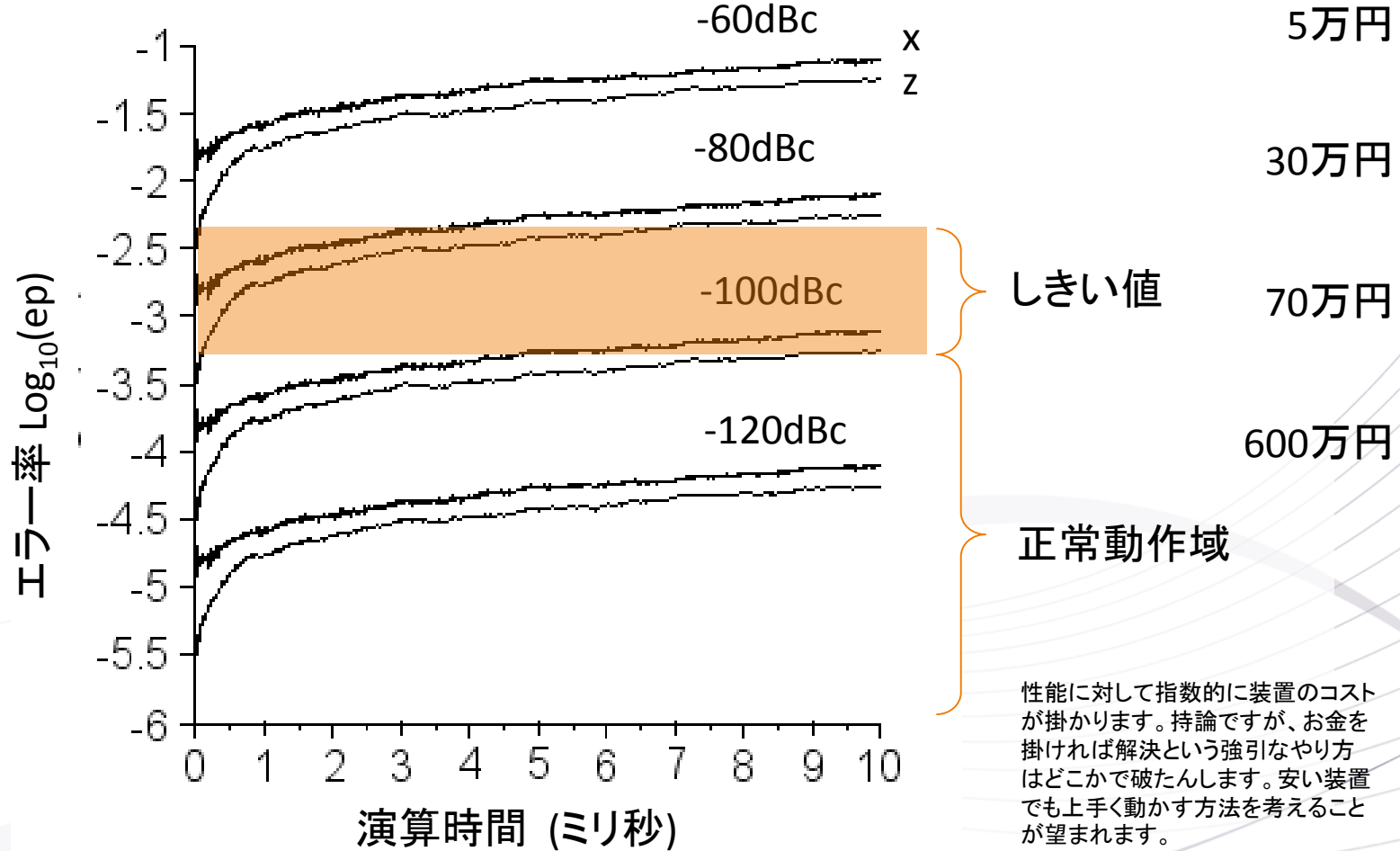
- 制御波形位相の時間変化するゆらぎ

@8-12 GHz



アナログ制御なので、
この位相変化にとっても敏感

発振器の位相雑音を体感する



性能に対して指数的に装置のコストが掛かります。持論ですが、お金を掛ければ解決という強引なやり方はどこかで破たんします。安い装置でも上手く動かす方法を考えてほしいです。
この辺りに大学の工学部がやるべき仕事はまだ沢山あります。

超伝導量子コンピュータの実装

2次元平面実装

大規模超伝導回路

日経新聞、
3月某日 朝刊

(日経新聞社)

制御回路

観測回路

冷凍機
配線

排熱/冷却

符号化/復号化

ソフトウェア
アーキテクチャ

アプリケーション

2次元平面実装

大規模超伝導回路

符号化/復号化

ソフトウェア
アーキテクチャ

アプリケーション

日経新聞、
3月某日 朝刊

(日経新聞社)

排熱/冷却

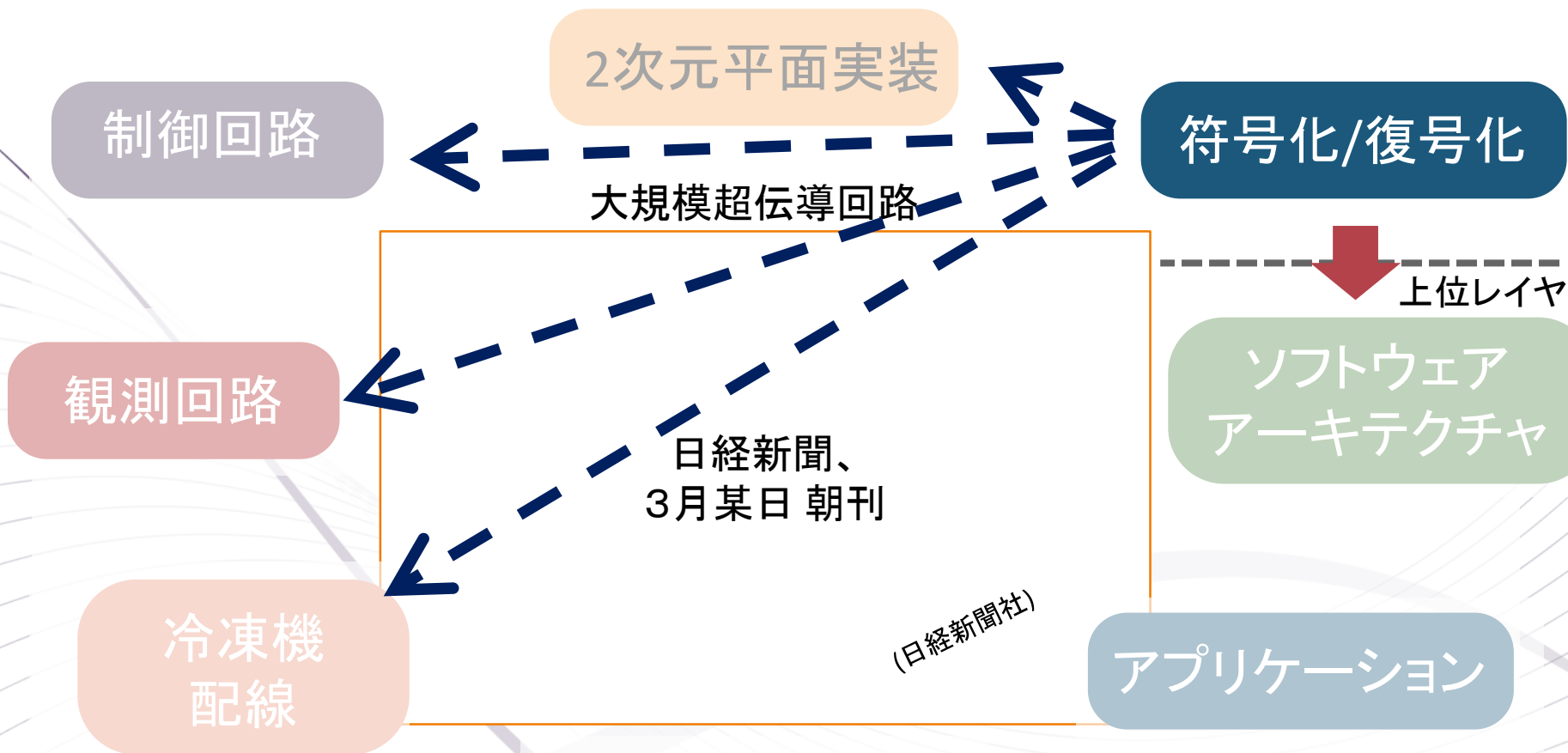
冷凍機
配線

観測回路

制御回路

誤り符号化/復号化手法

=ハードウェアアーキテクチャの決定



- 😊 2次元面1層隣接相互作用 ⇒ 2層(層間相互作用有り)
- 😐 Qubit (Spin=1/2) ⇒ Qudit (Spin>1/2)
- 😞 2次元面1層 ⇒ 3次元隣接相互作用

まとめ

- 回路の量子物理学
- 超伝導量子ビット
- 量子ビットの遊び方
- しきい値とアナログ精度
- 符号化・復号化とHWアーキ

