

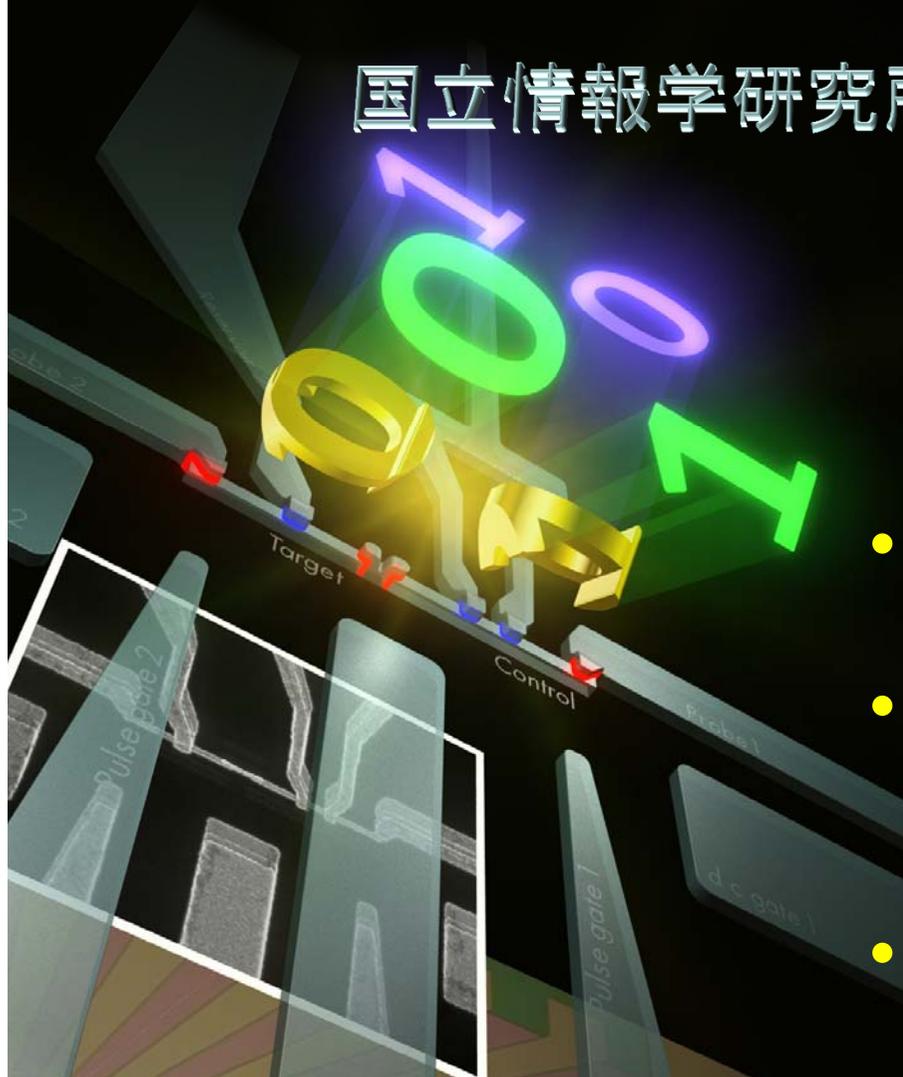
# 超伝導人工原子のインパクト

より日常的スケールでの量子世界の実現

国立情報学研究所 9月19日、2013

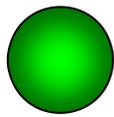
蔡 兆申  
理化学研究所/NEC

- 量子力学の「超常性」(80年前の発見)
- 超伝導状態を使い、量子の世界を日常のスケールに近づける
- 量子情報処理への応用



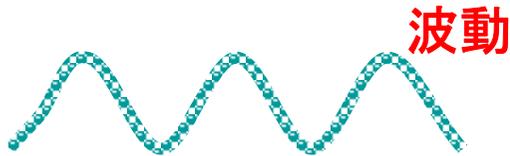
# 量子性： 粒子性と波動性を兼ね備えた性質

古典力学



粒子

ニュートンの法則(1):  
静止する物は永遠に静止続ける

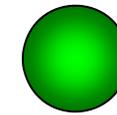
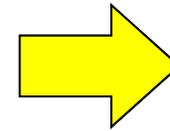


波動

量子力学



波長 $\lambda$



コヒーレント状態  
(可干渉状態)

## 軽くて遅い粒子ほど波動的に振舞う

物質波(ドブロイ波)波長 $\lambda$ :

$h$ : プランク定数

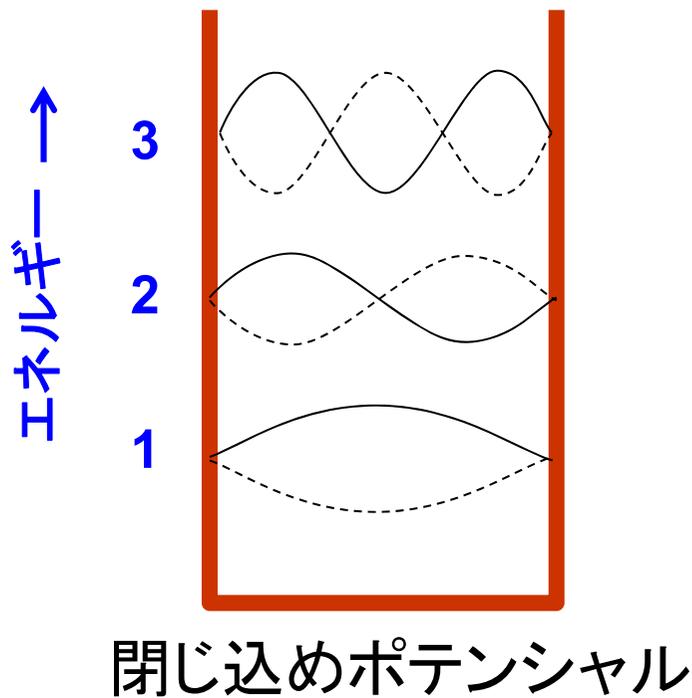
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$h \cong 6.62 \times 10^{-34} \text{ ジュール・秒}$$

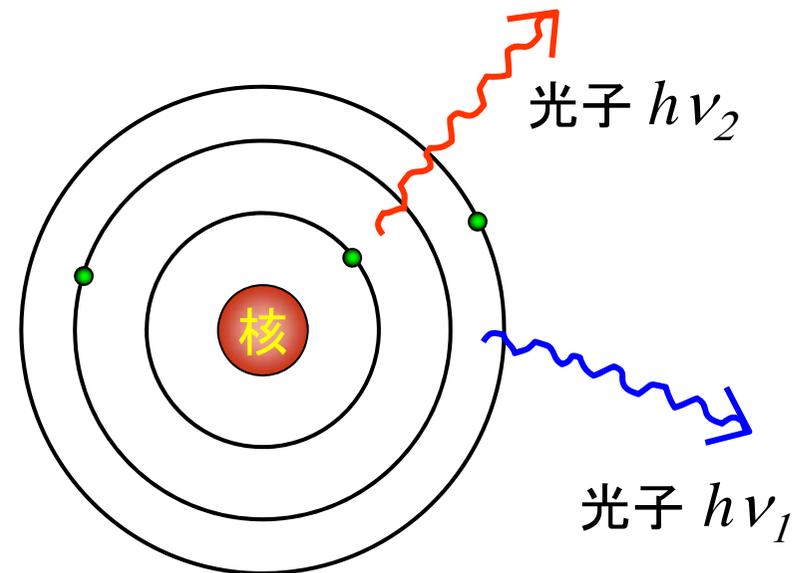
# エネルギーの量子化

エネルギー:  $E = h\nu$  ← 周波数

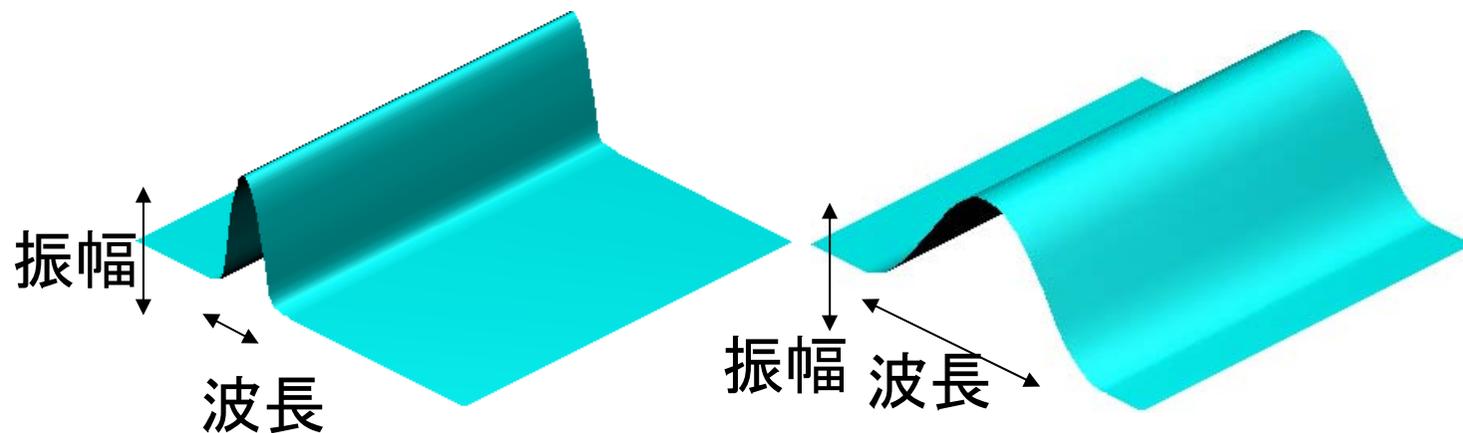
波:  
定常波



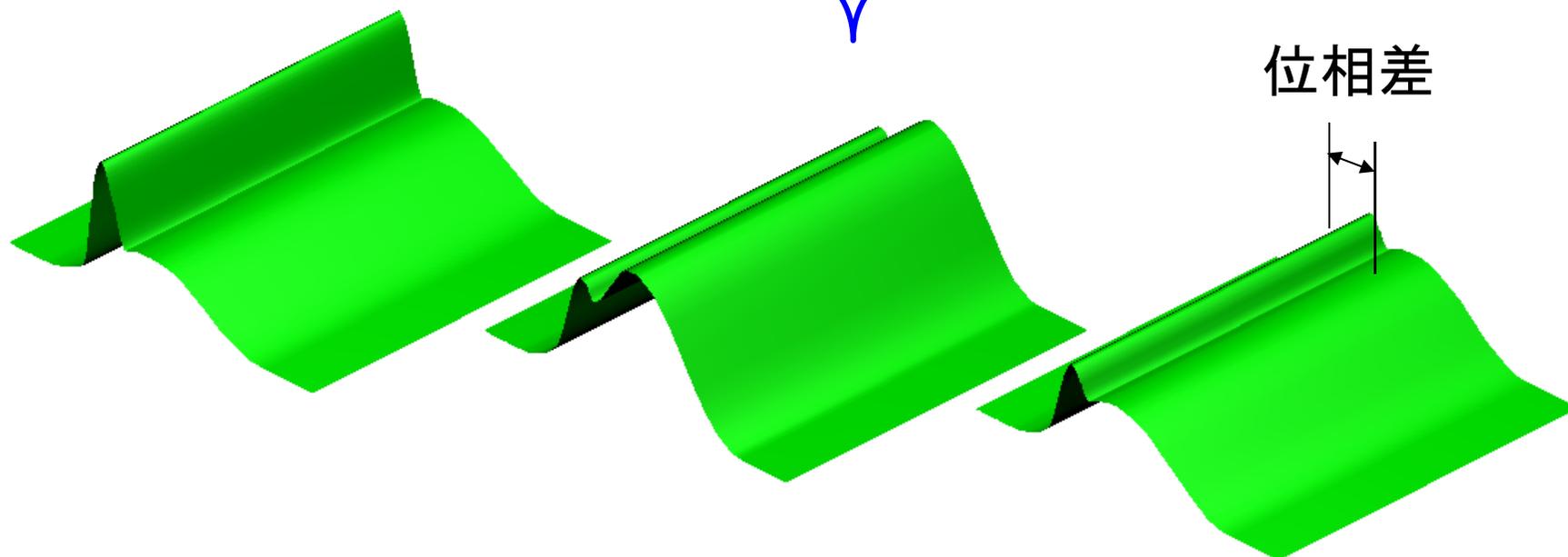
電子:  
原子軌道



# 量子重ね合わせ： 波(イメージ)



重ね合わせ



# 量子波動関数

振幅      運動量      周波数

$$\psi(x, t) = A \exp i(kx - \omega t)$$

$$= A[\cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t)]$$

不確定性原理

(共役関係)

$$\Delta k \Delta x > 1$$

$$\Delta \omega \Delta t > 1$$

$$\Delta \Phi \Delta q > h$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(x, t)$$

シュレディンガー波動方程式 (1926)

解釈:  $|A|^2$  は存在確率 = 1

量子重ね合わせ

$$\psi(x, t) = A \exp i(k_a x - \omega_a t) + B \exp i(k_b x - \omega_b t)$$

$$|A|^2 + |B|^2 = 1$$

# 量子論の不可思議性

## 原子の世界の法則が 日常世界に現れると



量子  
コヒーレンス

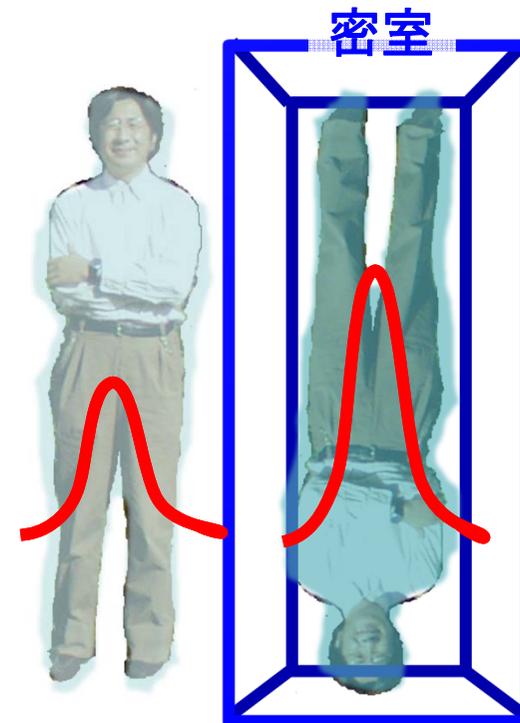
トンネル効果



2箇所に同時に存在

量子重ね合わせ

存在  
確立



固有  
状態A

固有  
状態B

限定された自由度

# 2つの量子状態の重ね合わせ (量子系)

オセロモデル

波の振幅

量子重ね合わせ

量子状態

$$\alpha |0\rangle + \beta e^{i\phi} |1\rangle$$

振幅の2乗 = 確率

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

「確立的解釈」  
が常識では理  
解しにくい

位相:  $\phi$

振幅:  $\alpha, \beta$

同時に0,1を表現

古典状態

0

1



または

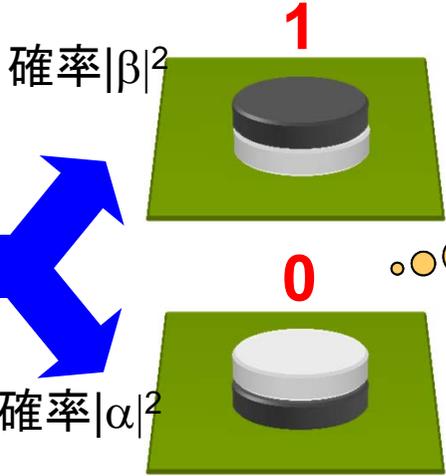
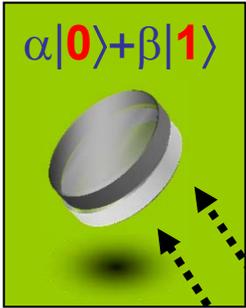
# 観測

コヒーレント状態

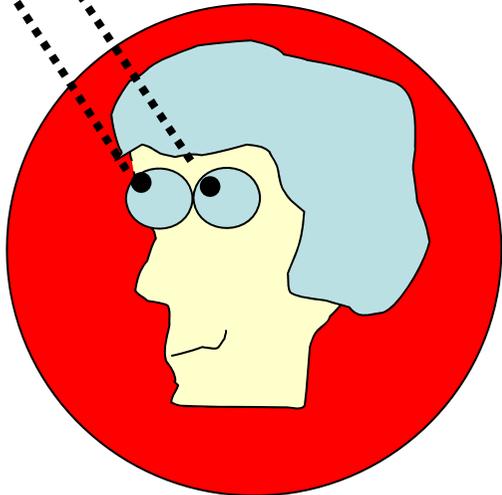
古典状態

「確立的解釈」  
が常識では理  
解しにくい

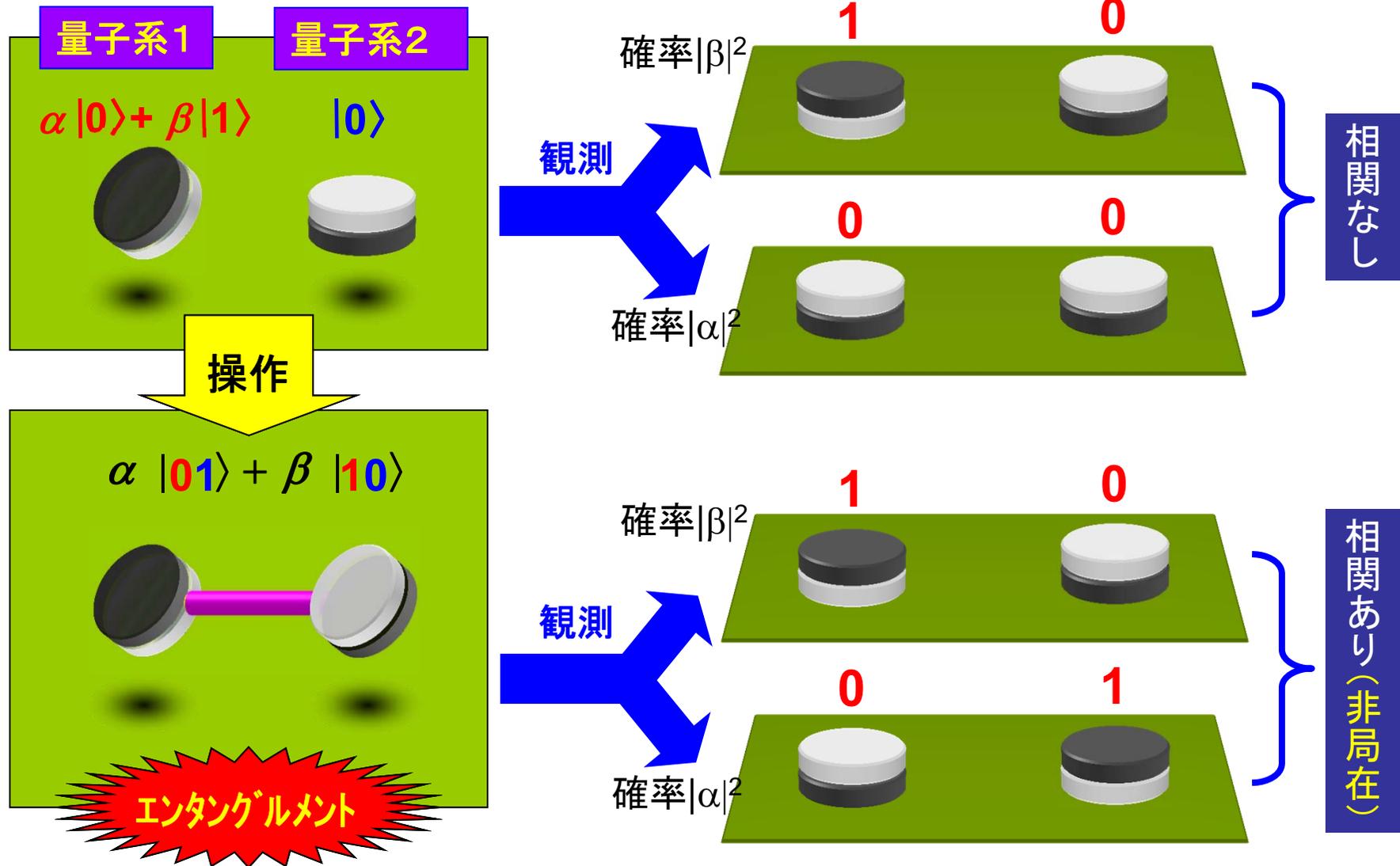
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$



平行宇宙  
に分裂!?



# 2つの量子系間の不思議な相関性 エンタングルメント



# エンタングルメント状態での不思議な相関性

アインシュタインの抗議: 量子状態の非局在性

$$\alpha |01\rangle + \beta |10\rangle$$

宇宙の果てから果てまでの距離

古典的实在論  
の否定

観測

確率 $|\beta|^2$

1

0

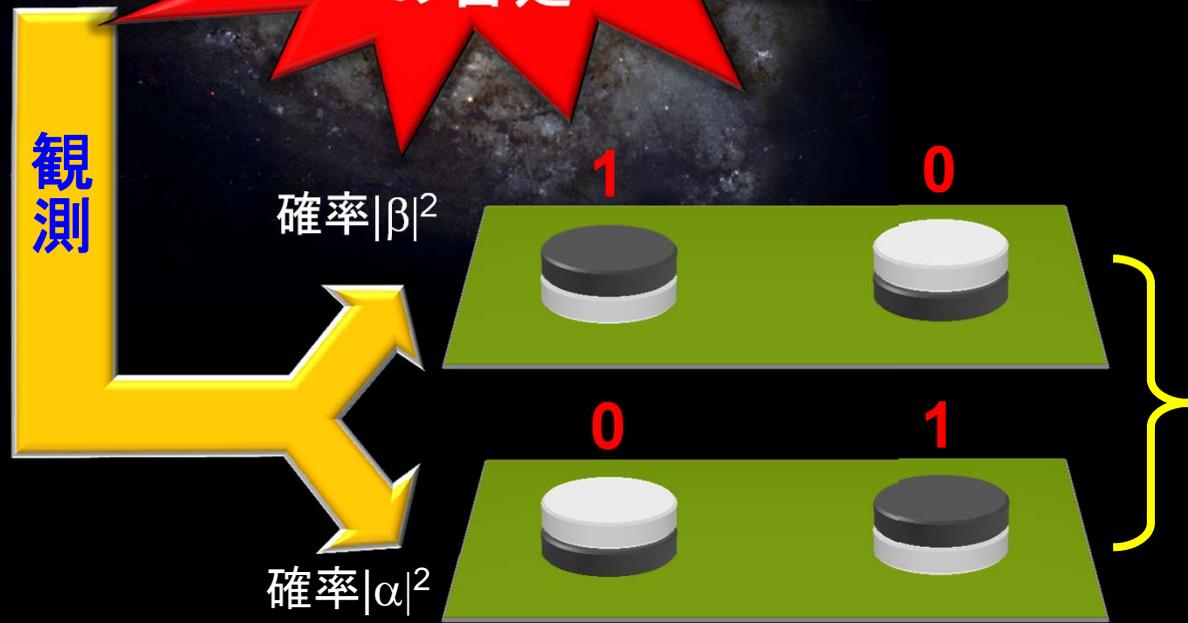
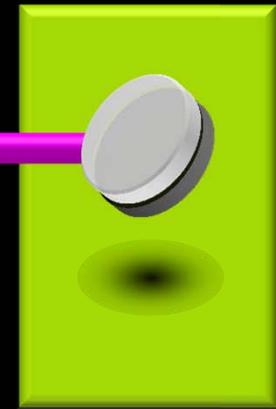
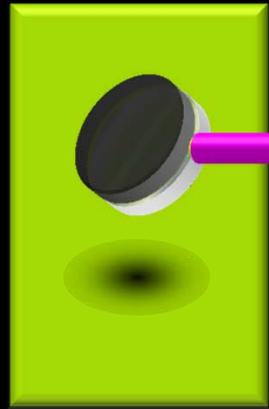
0

1

確率 $|\alpha|^2$

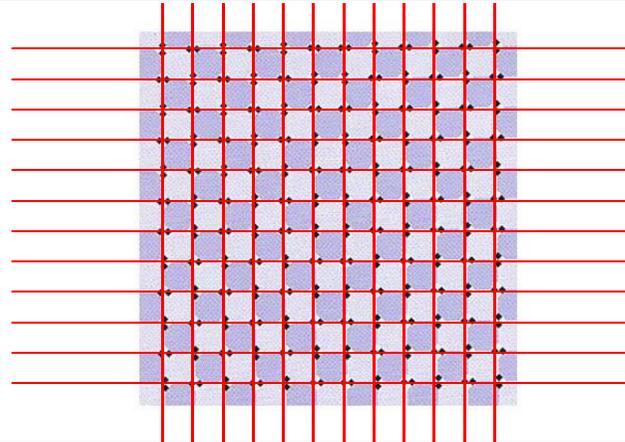
相関あり(非局在)

常識とは...  
時代とともに変革するもの



← テクノロジー・芸術 **世界観** : 政治・経済 →

- 先天的知識： 遺伝的進化した直感・生存本能



時・空間認識  
パターン認識など

欺かれる場合がしばしばある。

例：目の錯覚  
⇒ 幽霊など

- 後天的知識： 科学・工学、迷信など

- ◆ 知識の創造 (研究など)
- ◆ 常識としての普及 (教育)

常識は時代により**変化**する

例：科学の常識革命

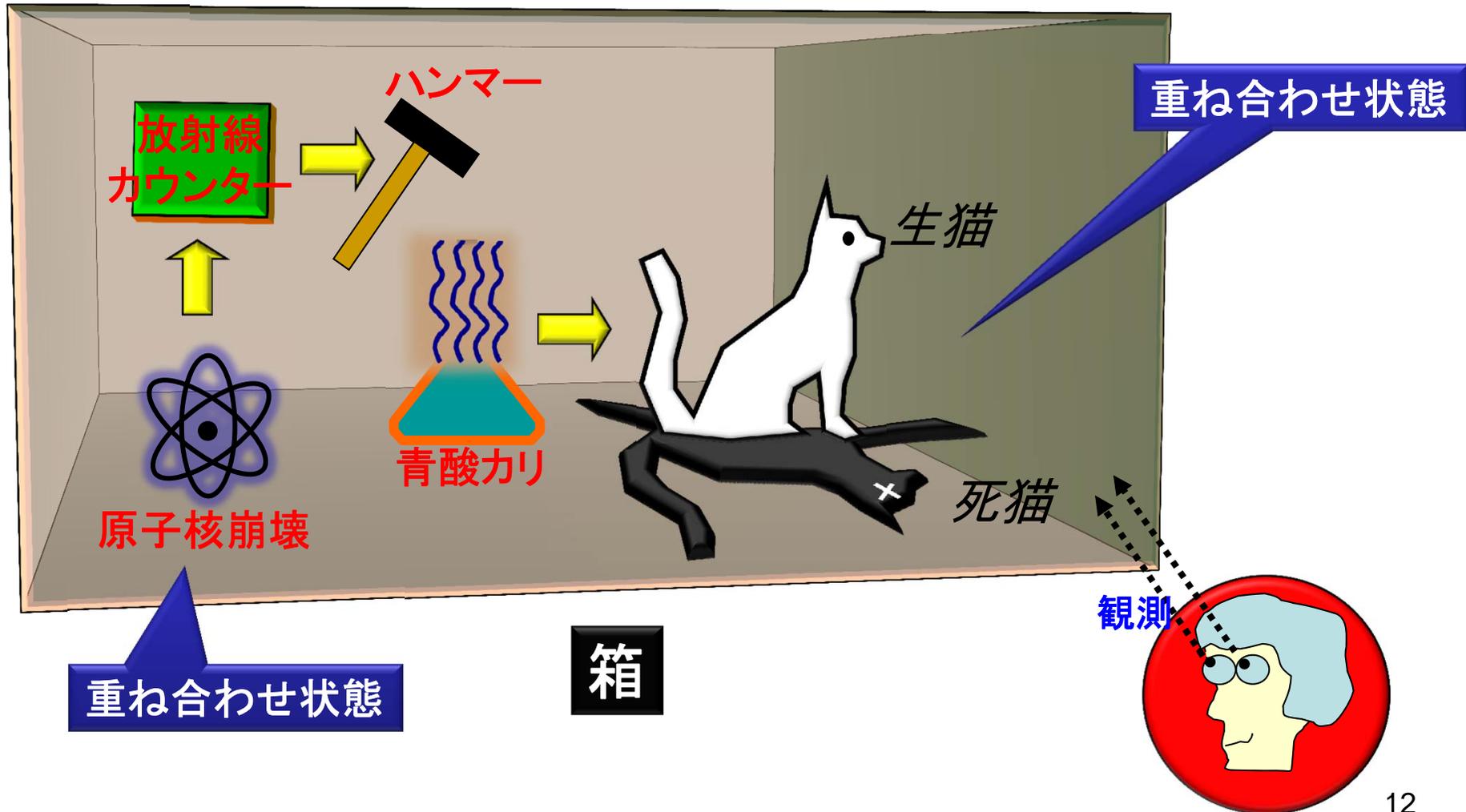
- ⇒ 地動説 (1543)
- ⇒ 万有引力 (1665)
- ⇒ 生物進化 (1857)
- ⇒ 相対論的時空間 (1905, 1915)
- ⇒ 量子力学 (~1930)
- (巨視的量子コヒーレンス、1999)

今日の話題

# シュレデンガーの猫の仮想実験

大きなもの(巨視的物体)は重ね合わせることができるか？

量子の世界と古典の世界境目はどこか？

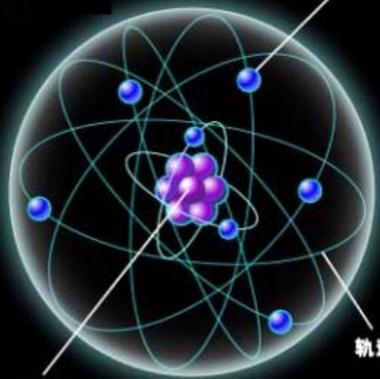


# 「量子物体」の大きさ

メートル

$10^{-10}$     $10^{-9}$     $10^{-8}$     $10^{-7}$     $10^{-6}$     $10^{-5}$     $10^{-4}$     $10^{-3}$

原子内部



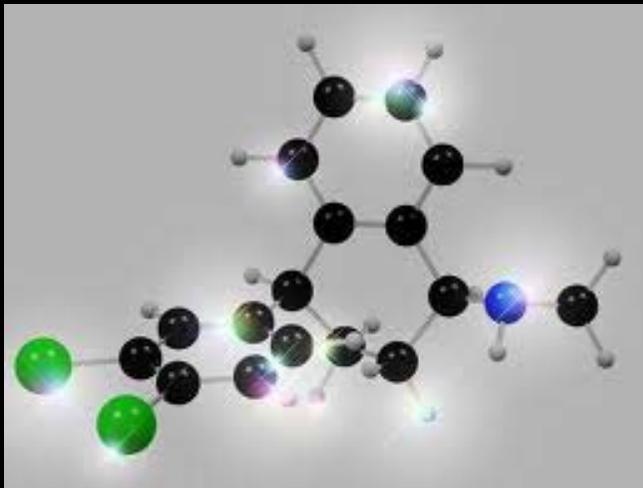
原子

原子核

軌道

©2003 HowStuffWorks

分子



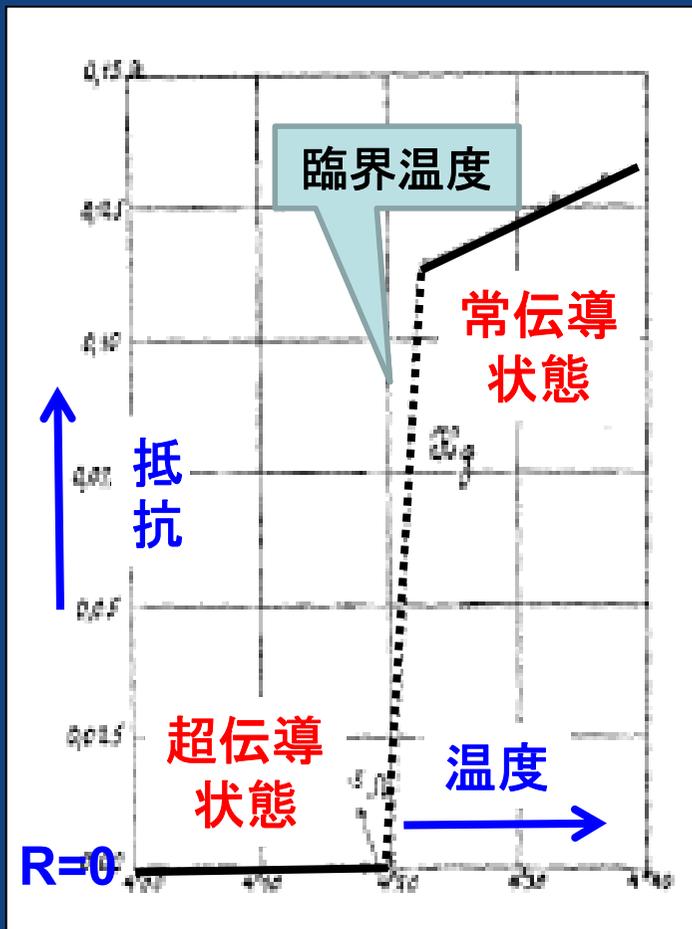
集積化  
に有利

固体素子  
(超伝導人工原子)

# 超伝導

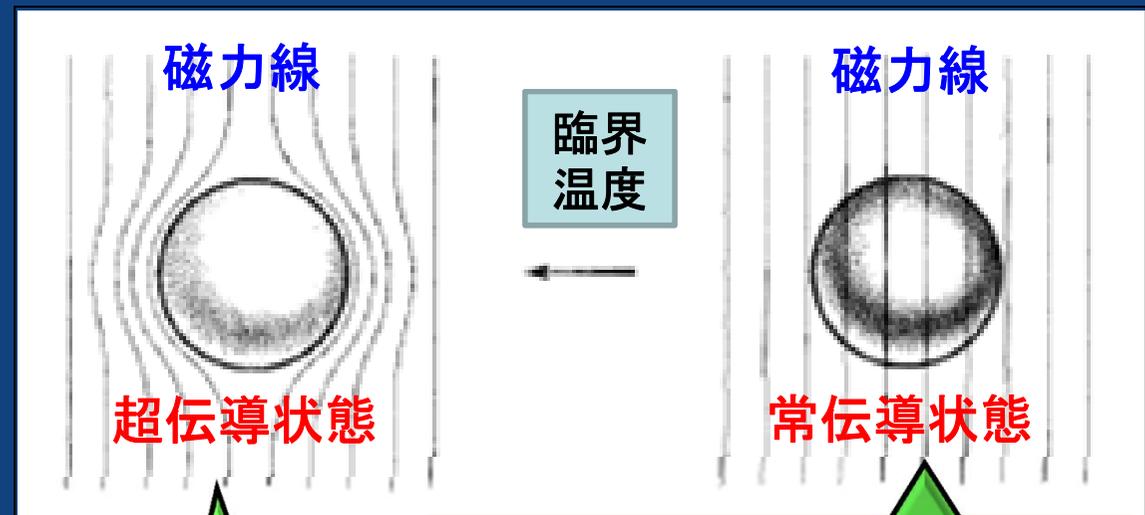
## 完全伝導

K. オンネス、1911  
(ノーベル賞1913年)



## 完全反磁性 (マイスナー効果)

F. マイスナー、1933



無数の電子軌道

全ての伝導電子が、  
単一の量子状態



# イワシトルネード

超伝導現象の原理のたとえ

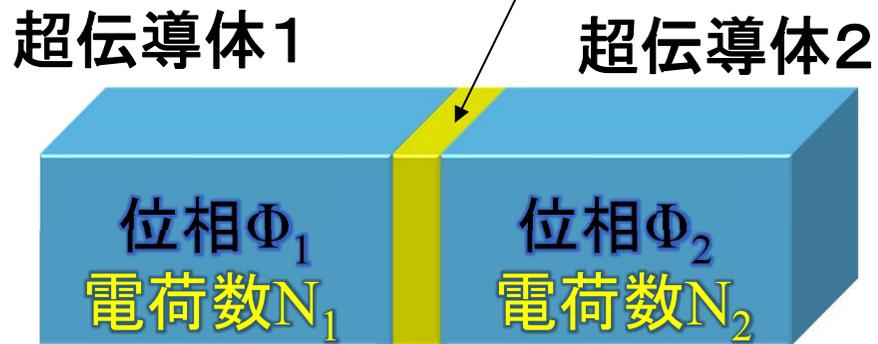
創発現象:

単純なルールが予期せぬ新規な世界を作る

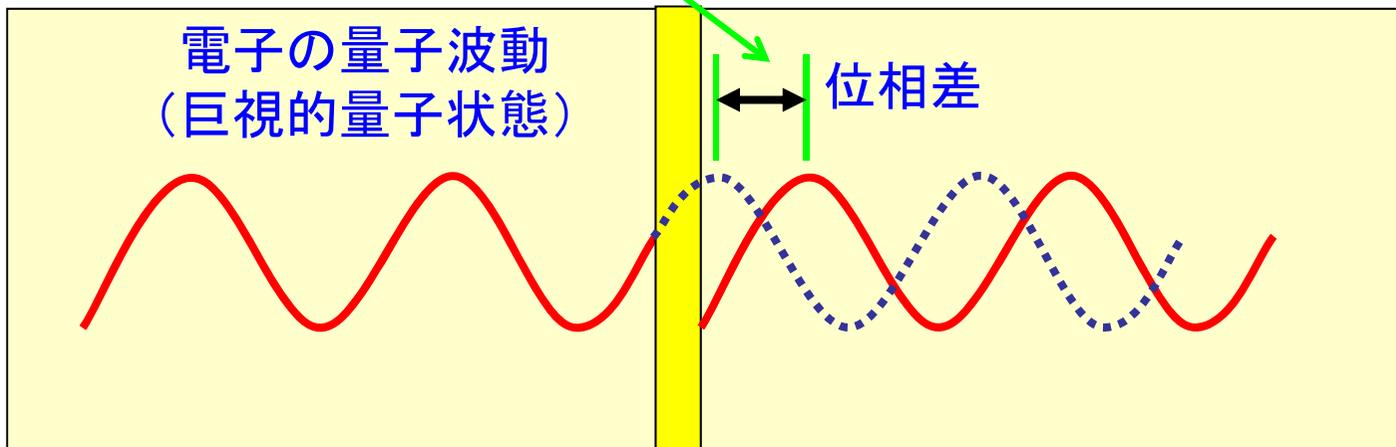
**ジョセフソン効果**  
B. ジョセフソン、1962  
(1973年ノーベル賞)

# ジョセフソン接合

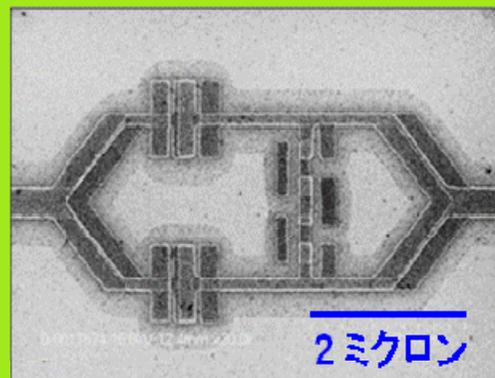
**共役関係**  
単電子対トンネル



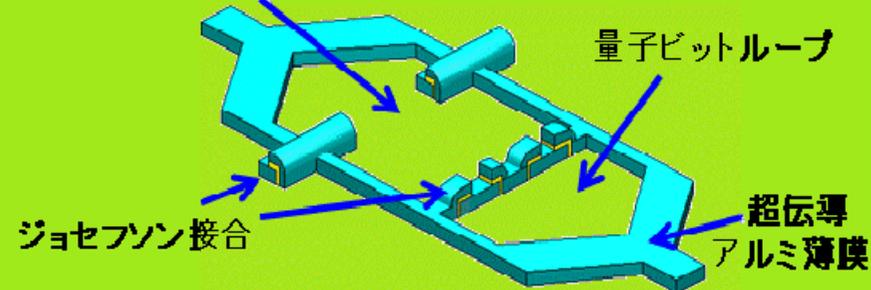
超伝導電流  $\propto \Phi_1 - \Phi_2$



# 超伝導 磁束型 人工原子



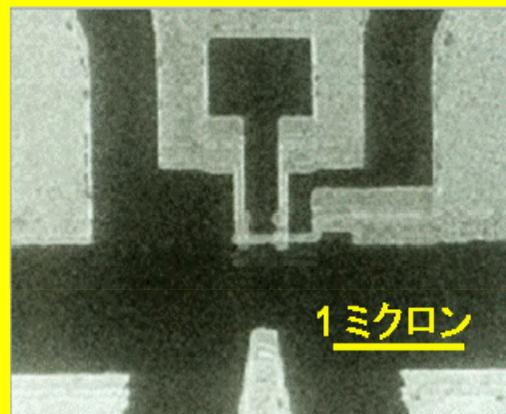
読み出しデバイスループ



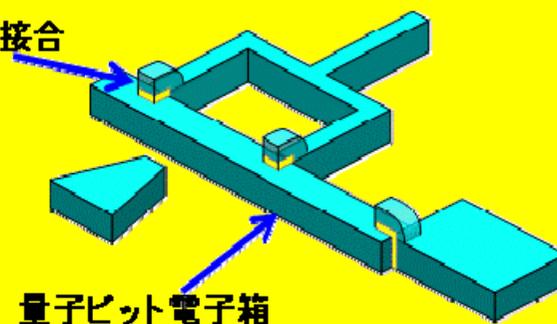
量子状態(例):

- 「0」状態: 量子ビットループに時計回りの永久電流
- 「1」状態: 量子ビットループに反時計回りの永久電流

# 超伝導 電荷型 人工原子

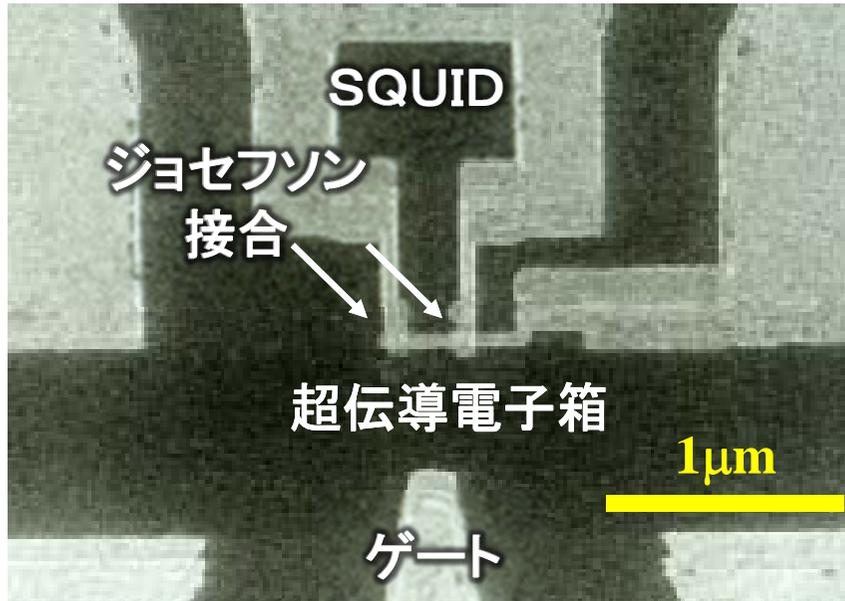


ジョセフソン接合



量子状態(例):

- 「0」状態: 量子ビット電子箱に余剰電子がない
- 「1」状態: 量子ビット電子箱に余剰な電子対が一つある

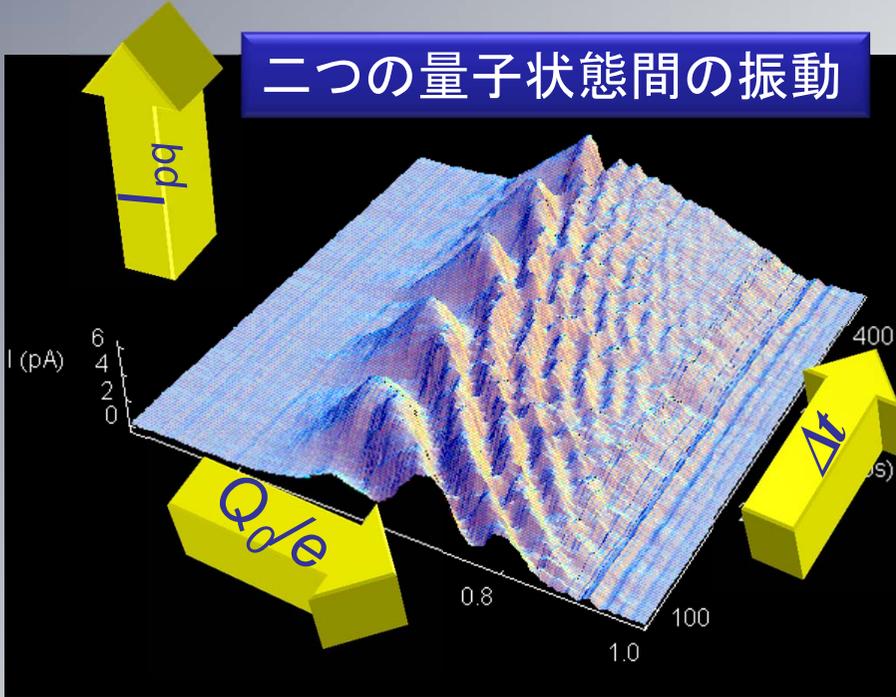


# 電荷型人工原子

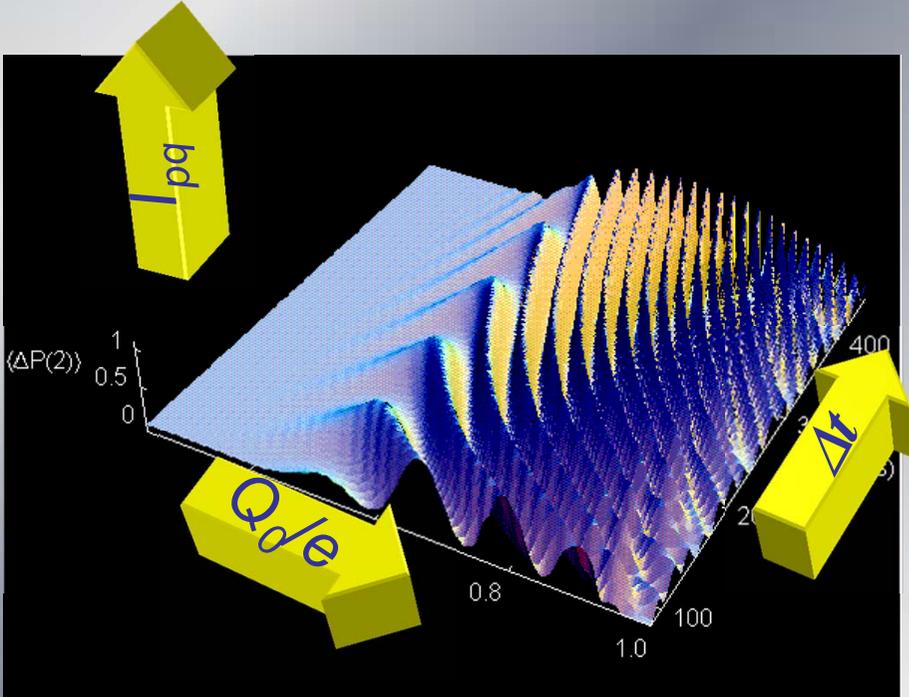
Nature, 398, 786, 1999

世界初の  
巨視的量子状態の重ね合わせ

二つの量子状態間の振動

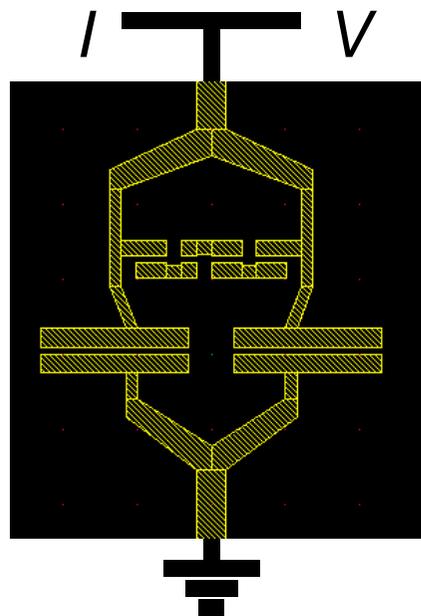


Experiment

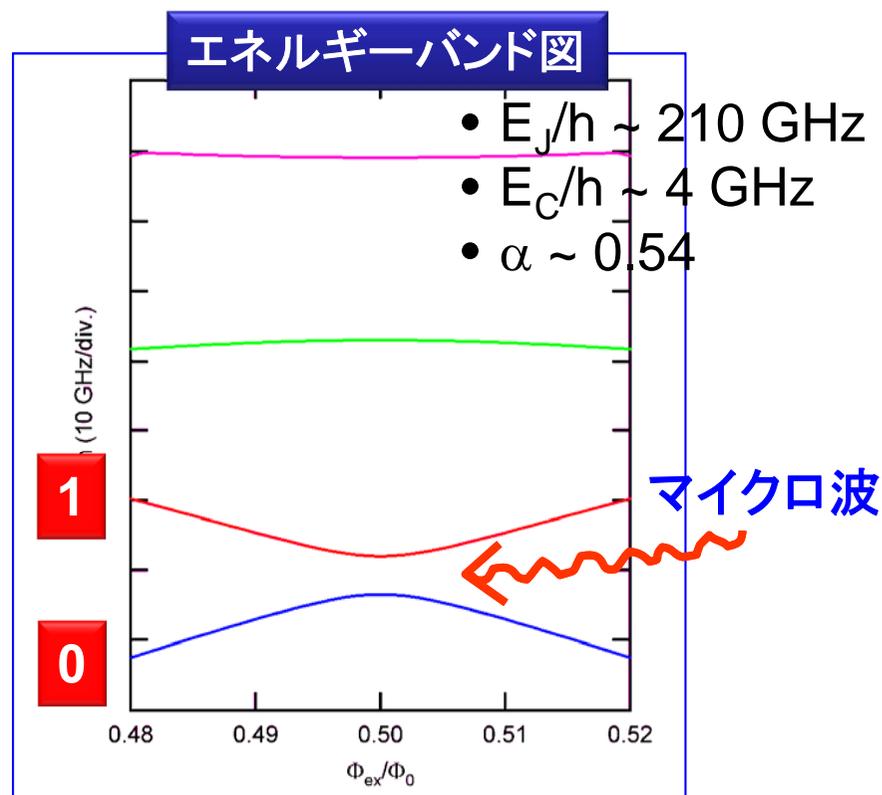


Simulation

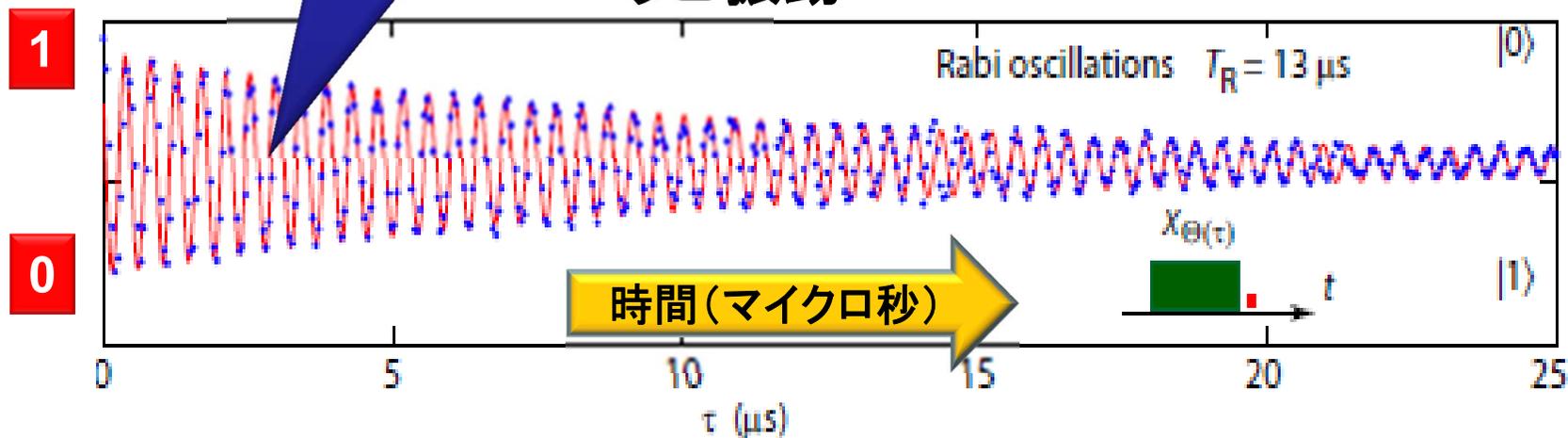
# 磁束型人工原子の状態制御



0と1の重ね合わせ状態



ラビ振動



# 電子機器の歴史



1900

1920

1940

1960

1980

2000

電子の発見  
プランク乗数

超伝導

量子力学

トランジスタ  
半導体コンピュータ  
ジョセフソン効果

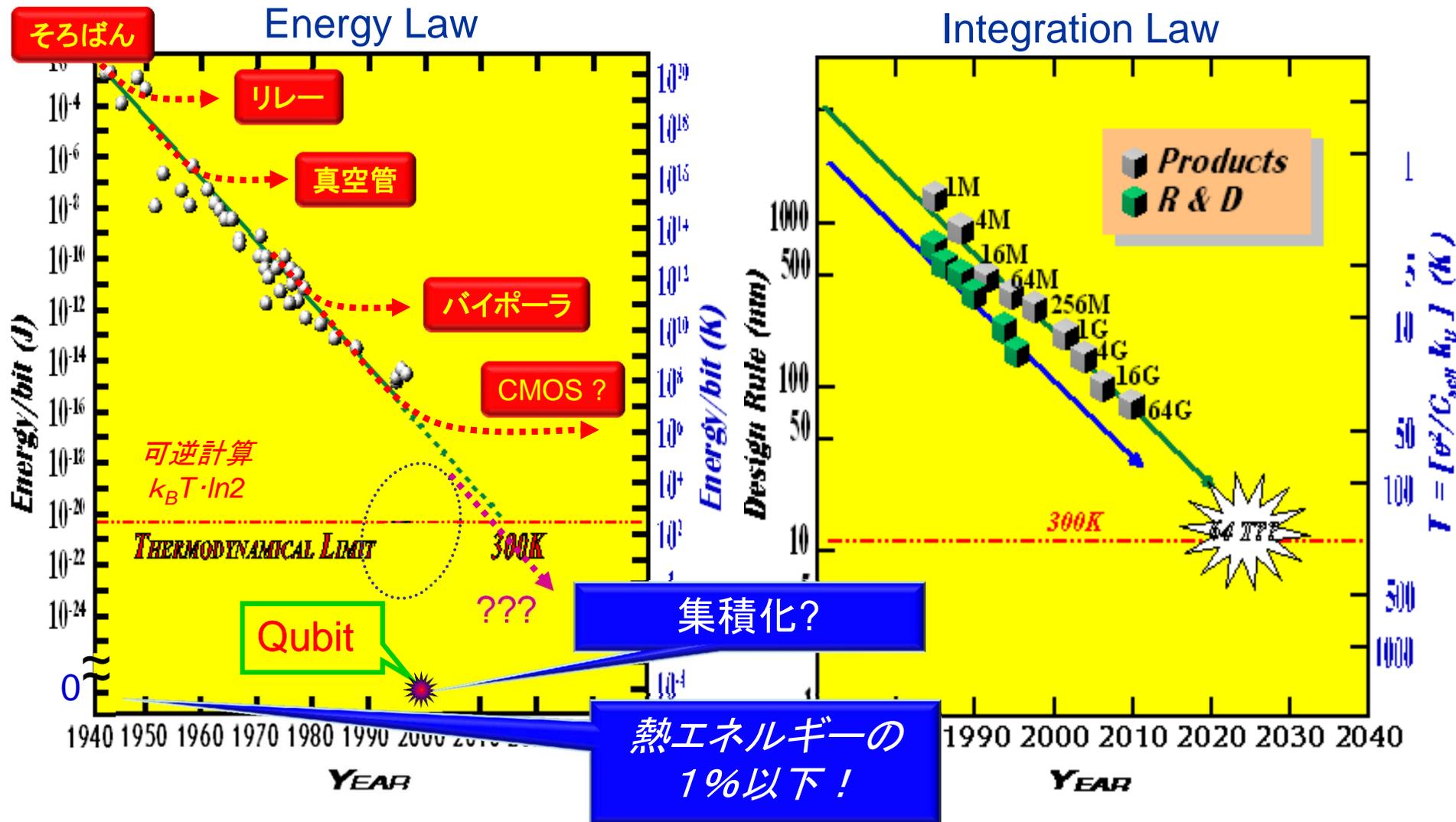
超伝導量子ビット  
原子量子ビット

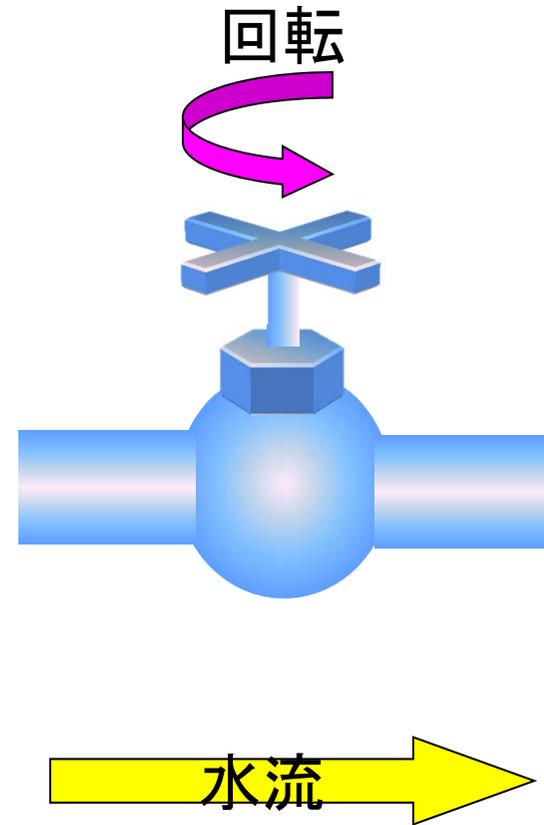
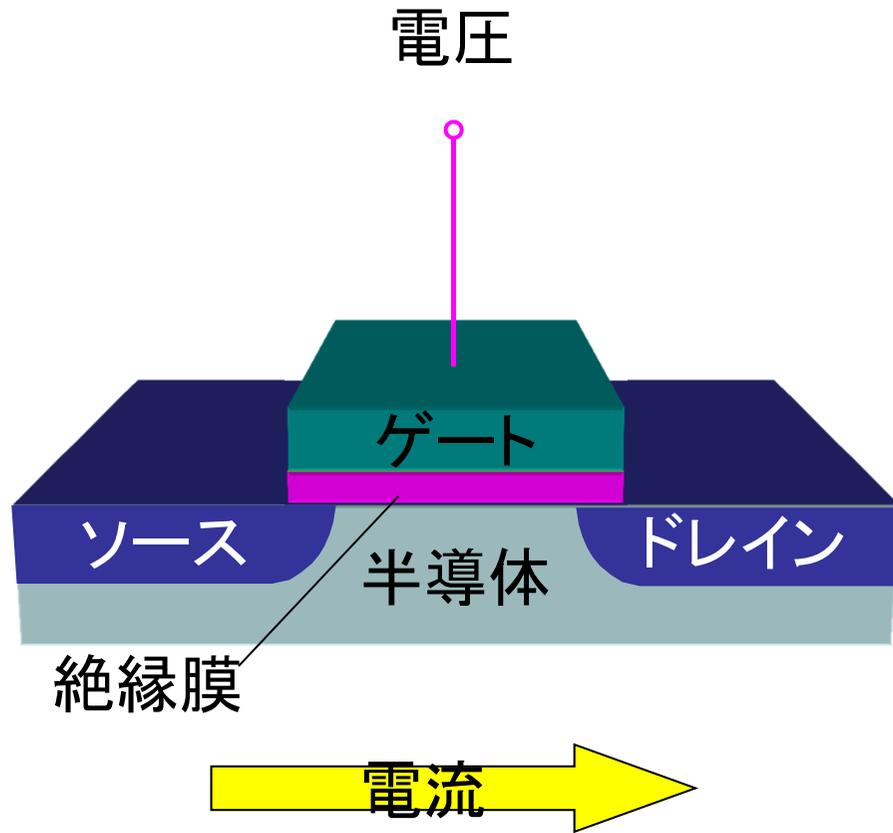
非コヒーレントビット

コヒーレントビット

# エレクトロニクスのトレンド (ムーアの法則)

ビット当たりのエネルギー **減少** ⇒ より早く、低パワー  
 集積度 **増加** ⇒ より多くの情報量



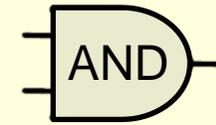
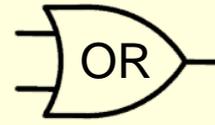


## 電界効果トランジスタ(FET)

# 古典演算回路

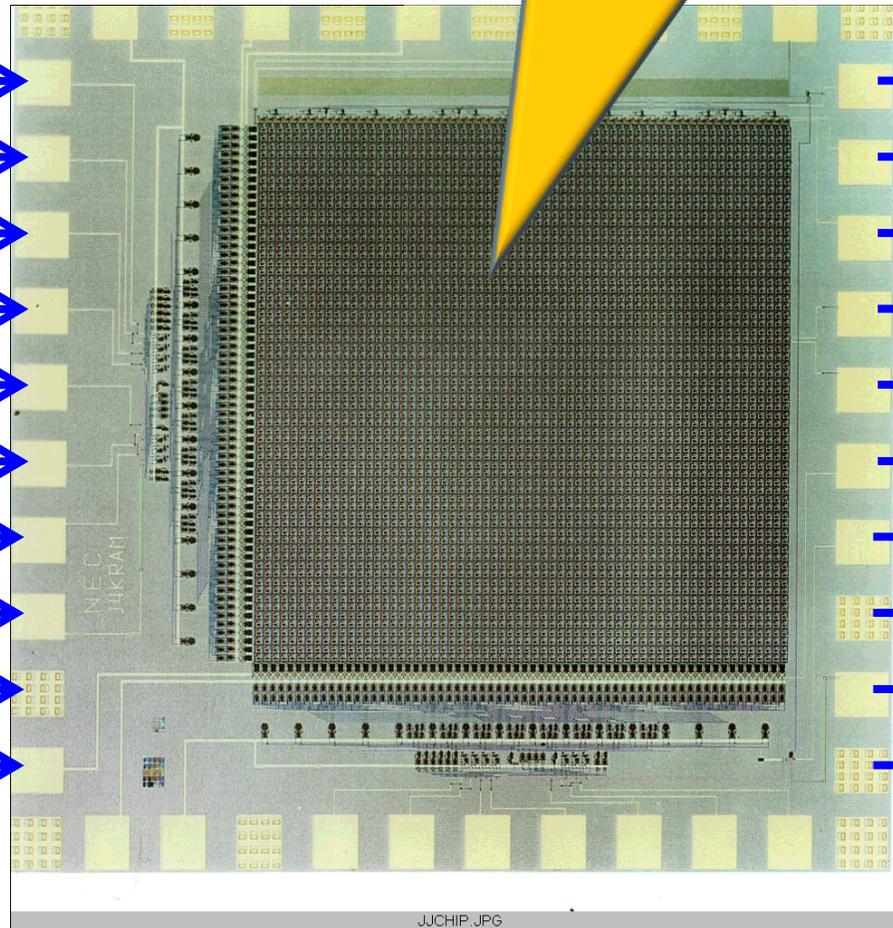
入力(質問) ⇒ 出力(答え)

全ての演算は「万能ゲート」  
で組み立てられる



入力

0  
0  
1  
0  
1  
1  
1  
0  
1  
0



出力

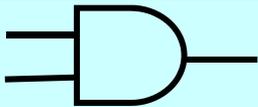
1  
1  
1  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0



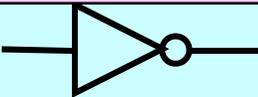
# 万能ゲート

## 古典万能ゲート

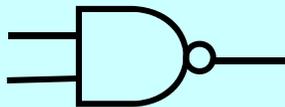
・AND ゲート



・NOT ゲート

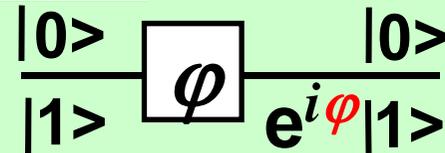


NAND ゲート

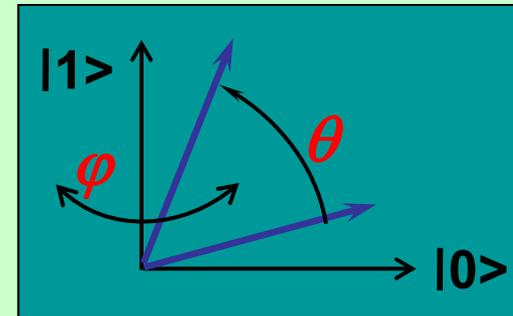
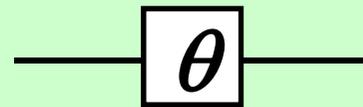


## 量子万能ゲート

・位相ゲート



・回転ゲート



・2ビット論理ゲート(C-NOT)

A	Control bit	A'
B	Target bit	B'

A	B	A'	B'
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

# コンピューターの新たなパラダイム

## 量子計算機特徴:

- 指数的計算速度加速
- 消費エネルギーゼロ

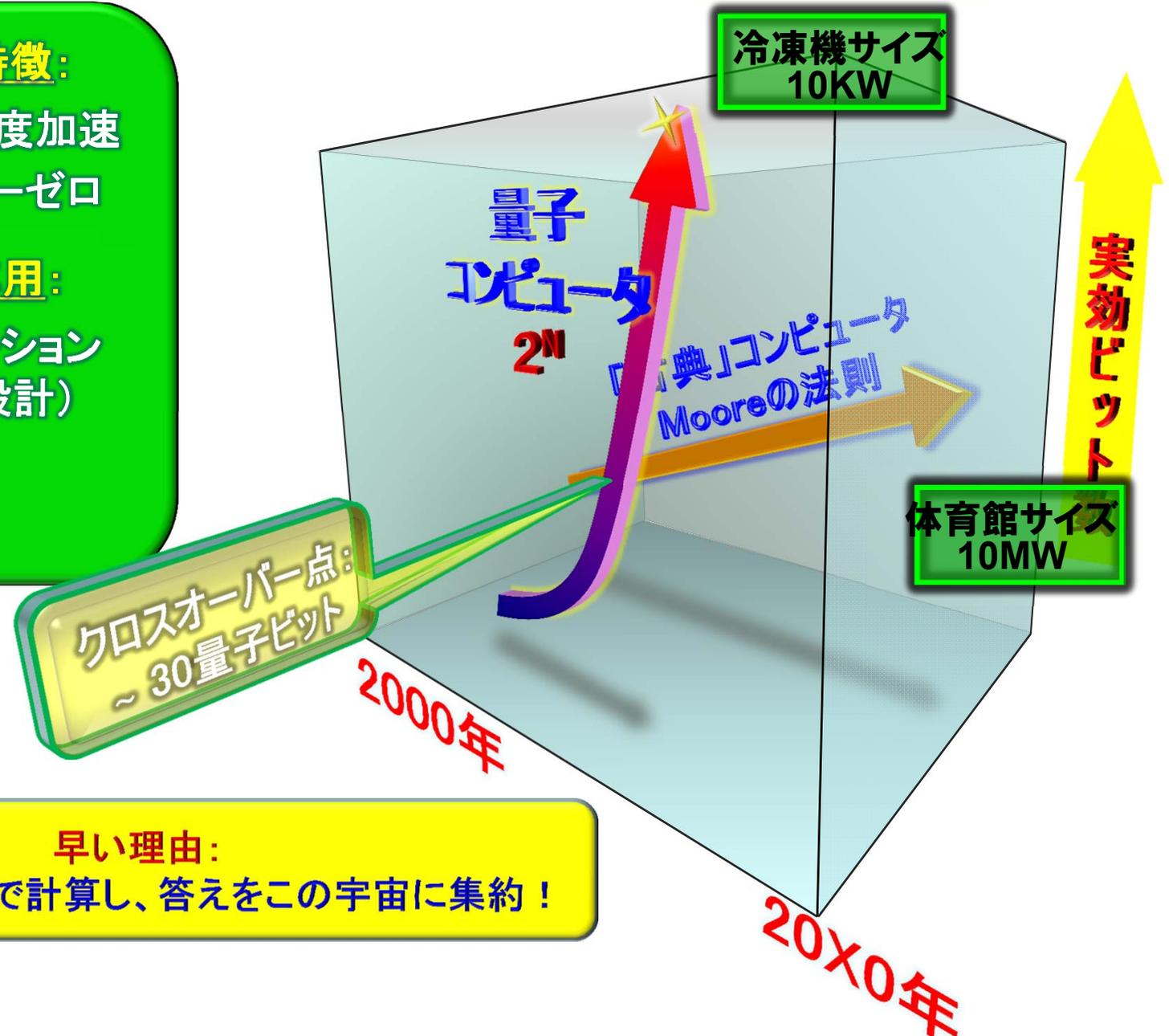
## 期待される応用:

- 量子シミュレーション  
(材料設計)
- 最適化問題
- データ検索
- 暗号

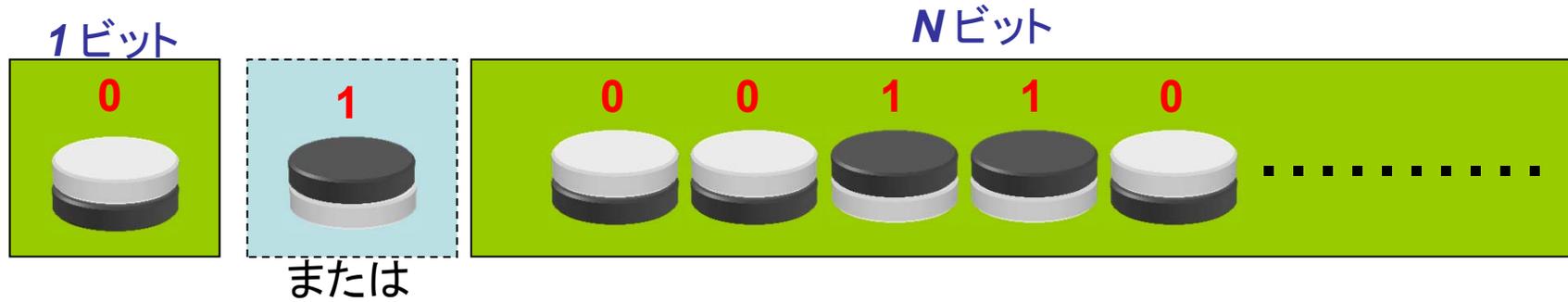
クロスオーバー点:  
~ 30量子ビット

早い理由:

$2^N$ 個の平行宇宙で計算し、答えをこの宇宙に集約!



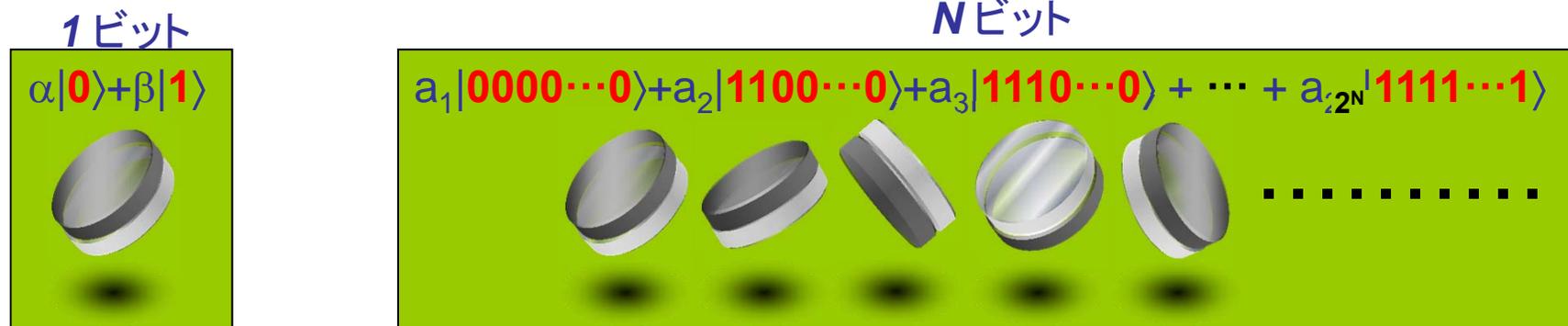
## 古典ビット



0または1の一つ

$2^N$ 個の可能な組み合わせの中の一組

## 量子ビット



同時に0,1を表現

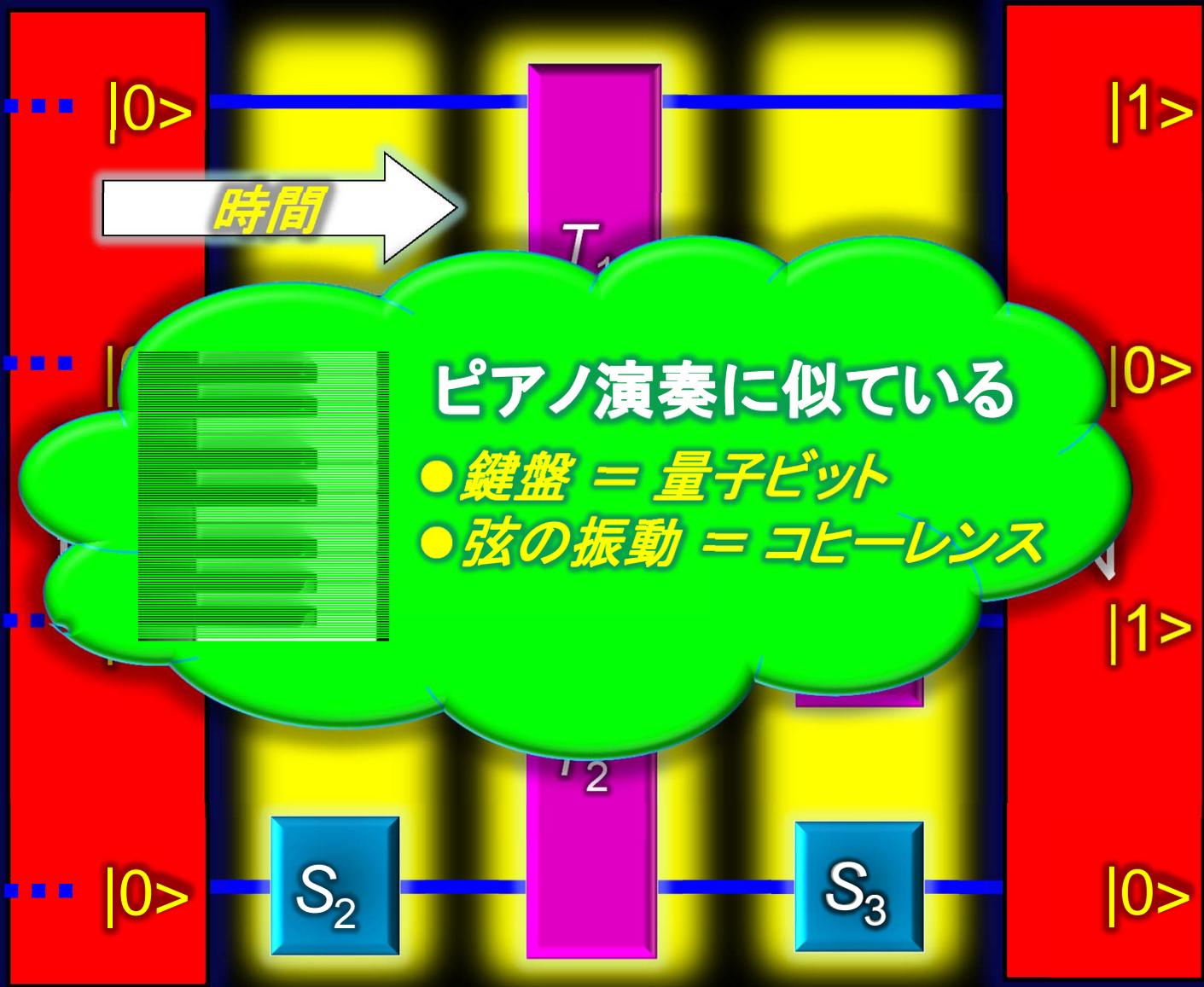
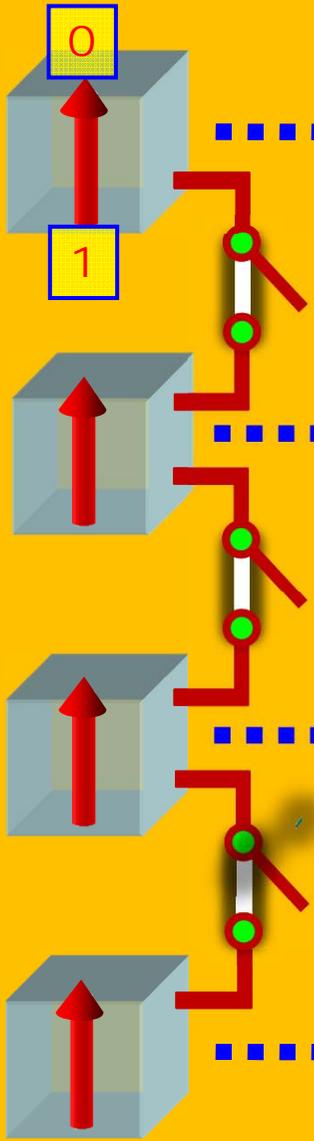
同時に全ての $2^N$ 個の組み合わせを表現

# 量子コンピュータの万能ゲート操作

S: 1-ビットゲート

T: 2-ビットゲート

量子ビット 1  
量子ビット 2  
量子ビット 3  
量子ビット 4



ピアノ演奏に似ている

- 鍵盤 = 量子ビット
- 弦の振動 = コヒーレンス

## 編鐘：

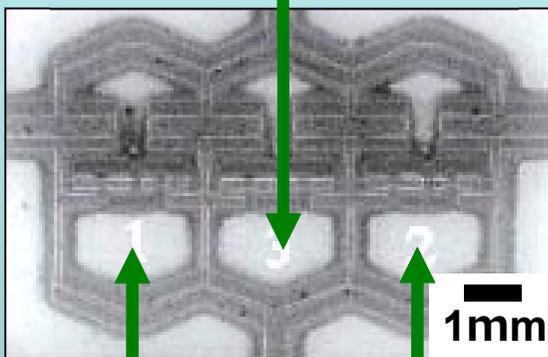
2つの基本トーンを持つ紀元前の打楽器  
(古典ビット)



# 超伝導量子ビットの集積化に向けた歩み

## 非線形結合器

### 結合スイッチ



Flux Qubit 1

Flux Qubit 2

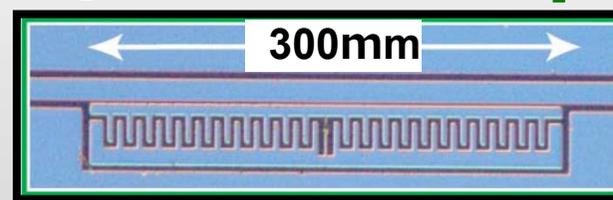
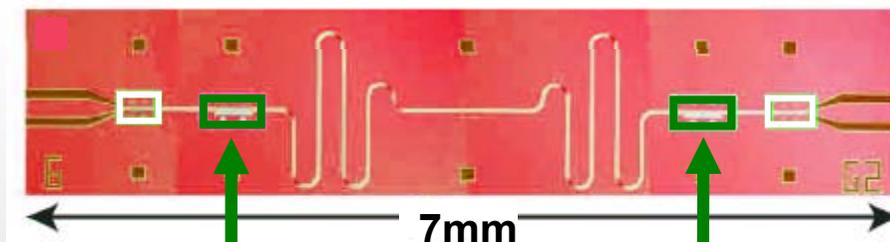
Optimal point operation

Flux qubit:  
Science, 316, 723 (2007)

## 線形共振器

+ non-adiabatic detuning

### マイクロ波共振器



Transmon

3-qubit control

Phase qubit: Nature, 449, 438 (2007)  
Charge qubit: Nature, 449, 443 (2007)

## 2ビット論理ゲート アニメーション



20世紀

21世紀

最大の科学的成果

量子力学

局所实在論否定

近代物理学

コヒーレント重ね合わせ

エンタングルメント

巨視的量子効果

超流動 超伝導 ジョセフソン効果

ナノテク  
ナノサイエンス

巨視的量子コヒーレンス  
固体素子量子ビット  
人工原子

情報科学

エントロピー

古典サイバネティクス

自動機械

コンピュータ

情報量的宇宙史観

融合

- 画期的科学・工学理念
- 量子情報処理
- 量子通信
- コヒーレント  
エレクトロニクス

# まとめ



- 量子力学の「超常性」を俯瞰  
古典实在論の否定  
⇒ 常識としての確立を期待
- 日常の世界に近い大きさと  
量子性を実現する超伝導回路
- 量子コンピューターの驚異的  
な可能性（平行宇宙の利用）