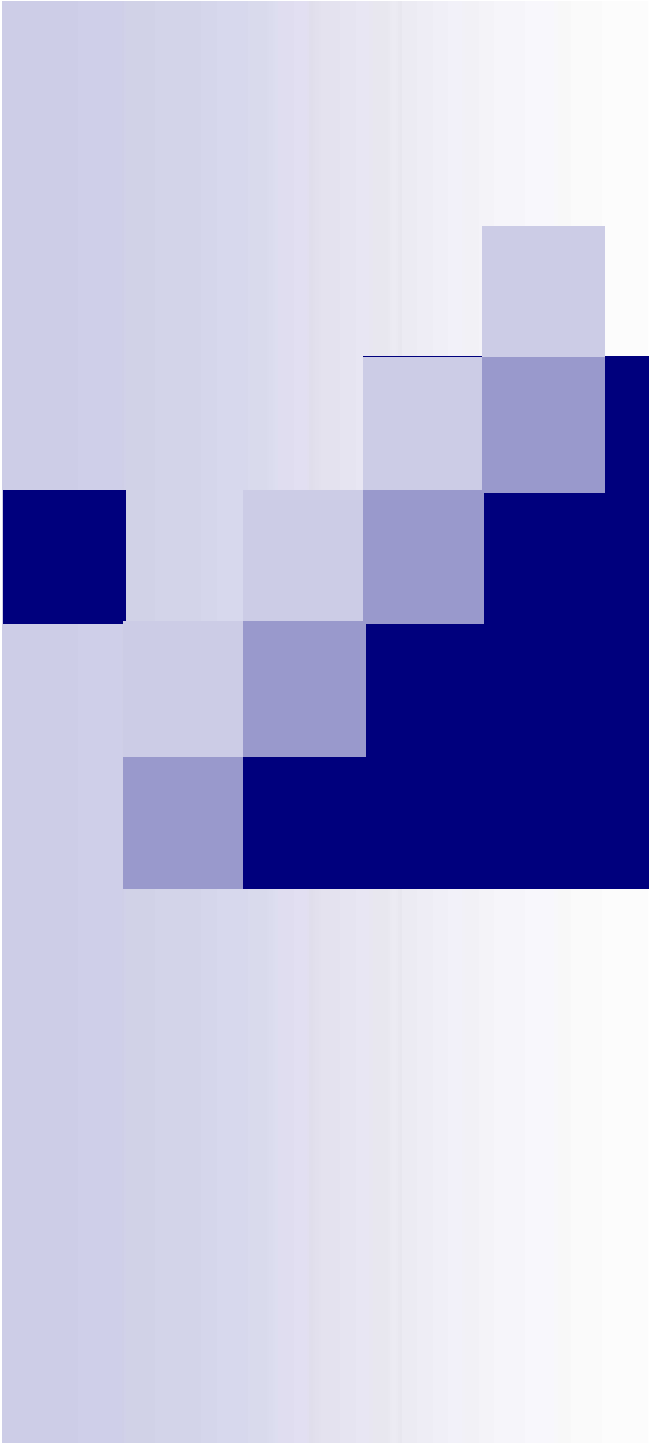




NMR量子コンピュータ

近畿大学理工学部
中原 幹夫



講演予定

- 1. はじめに: 物理で計算?
- 2. 量子ビット, 量子ゲート, 量子コンピュータ
- 3. DiVincenzoの判定条件
- 4. NMR量子コンピュータ
- 5. 例: Shorのアルゴリズム
- 6. おわりに



I. はじめに：物理で計算？

t の 2 乗は落下物の落下距離 L を測れば求められる：

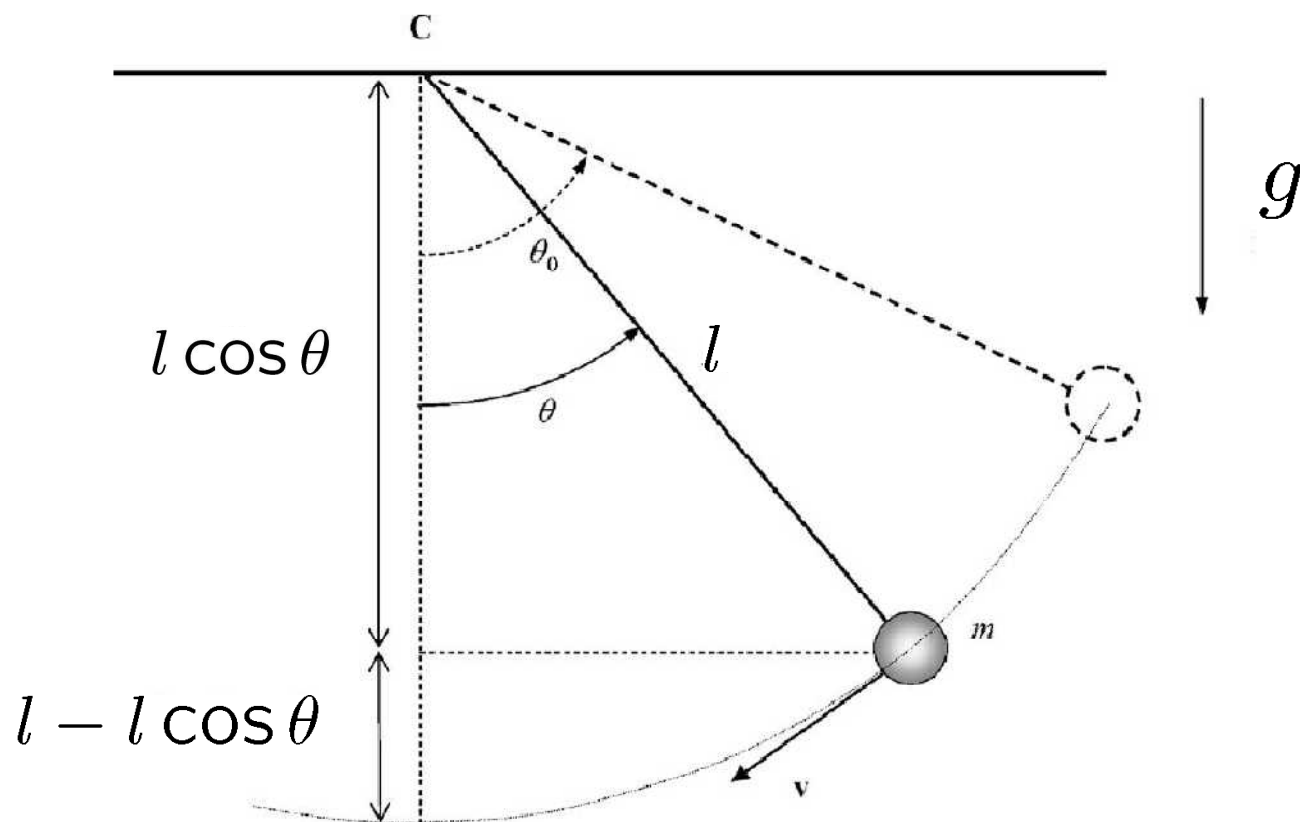
$$L = \frac{1}{2}gt^2.$$

l の平方根は振り子の微小振動の周期を測れば求められる：

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

$l = g/4 \sim 2.45$ m にとると T の測定で π が「計算」できる．

振幅が増えればもっと複雑な「計算」ができる：



$$T = 4\sqrt{\frac{l}{g}} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}} d\phi = 4\sqrt{\frac{l}{g}} K(k),$$

ただし $k = \sin(\theta_0/2)$. $K(k)$ は第 1 種完全楕円積分.



量子情報, 量子コンピューティングとは

- 量子コンピューティング, 量子情報処理では情報を記憶し, 処理するのに量子系を資源として用いる.
- 古典的に存在しない状態や操作を使うと古典コンピューティング, 古典情報処理をはるかに超える演算, 処理ができる. (超並列計算による計算の指数関数的なスピードアップ, 絶対安全な暗号システム, 量子テレポーテーションなど)



講演予定

- 1. はじめに: 物理で計算?
- 2. 量子ビット, 量子ゲート, 量子コンピュータ
- 3. DiVincenzoの判定条件
- 4. NMR量子コンピュータ
- 5. 例: Shorのアルゴリズム
- 6. おわりに

2.1 量子ビット

- 古典情報は $\{0, 1\}$ に値をとる **ビット** を情報の単位とする.
- 量子情報は2次元複素ベクトル空間 $\mathbb{C}^2$ の単位ベクトル「**量子ビット**」を情報の単位とする.

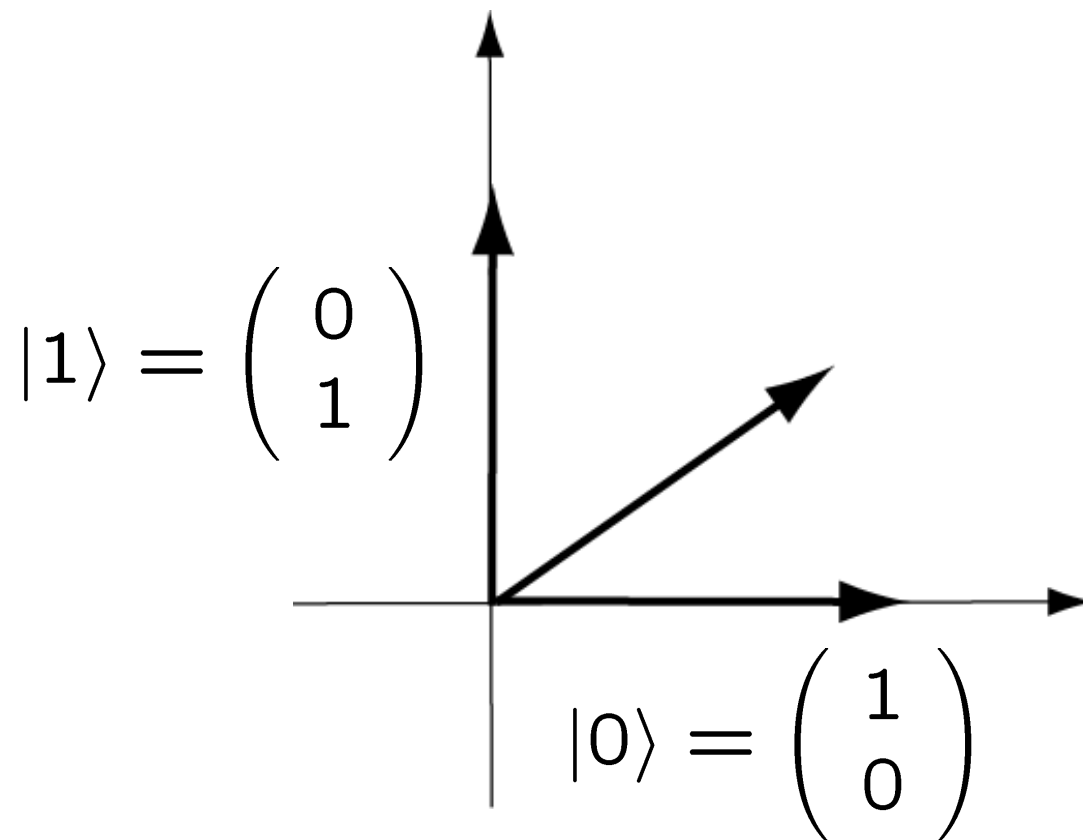
$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, \quad a, b \in \mathbb{C}, \quad |a|^2 + |b|^2 = 1,$$

基底（基本）ベクトル $|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$

$|0\rangle \leftrightarrow 0, \quad |1\rangle \leftrightarrow 1$ と対応させる.

- ただし $|\psi\rangle$ と $e^{i\alpha}|\psi\rangle$ は区別できない.

量子ビット $|\psi\rangle$



$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$

$$a, b \in \mathbb{C}$$

$$|a|^2 + |b|^2 = 1$$

$|\psi\rangle$ は $|0\rangle$ と同時に
 $|1\rangle$ でもある;

$a|0\rangle$ と $b|1\rangle$ の

重ね合わせ状態

2.2 2量子ビット系ともつれた状態

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |01\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$|10\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

EPR対(エンタングルした状態)

物理学で最も賞味期間長い論文は?

アインシュタインが発表 71年前の「量子力学批判」

レドナー教授は、米物理学誌フィジカル・レビューの創刊号(1893年7月)から110年分の引用論文を調べ、発表から何年たっているかの平均値(賞味期間に当たる)を計算して米専門誌「フィジックス・トゥデー」に発表した。

賞味期間が最も長かった「量子力学による自然の記述を完全と考えることができるか?」は、アインシュタインらが1935年に発表した。共著者3人の頭文字を取って「EPR論文」と呼ばれる。この賞味期間は59・6年もあった。発表直後はあまり引用されなかったが、95年ごろから急増し、最近では年80件程度もある。レドナー教授はこの論文を「今、最もホットな論文トップ10」の一つに選んでいる。

物理学で最も「賞味期間」の長い論文は、アインシュタインらが70年以上も前に書いた論文——そんな事実が、米ボストン大のシド・レドナー教授の研究でわかった。有名な相対性理論ではなく、量子力学の根源を論じた取っつきにくい論文だが、最近、量子暗号など「量子情報」と呼ばれる先端技術のエッセンスがこの論文にあり、引用が急増しているのだ。論文の重要度は、引用される回数で測られるのが一般的だが、発表後長く引用されることも影響力を測る物差しになる。

EPR論文は、「量子力学に従うものは、いくらか遠く離れていても分離できず相関関係を持つ」という、「非局所性」とか「量子もつれ(エンタングルメント)」と呼ばれる奇妙な性質を示した。この性質は、私たちの一般常識や世界観と相いれ

ない。量子力学に批判的だったアインシュタインは「量子力学では、こんなおかしいことになる」と挑戦状をたたきつけたのだった。実際、量子力学の建設者の一人ボーアは、この論文に衝撃を受けて激しく反論した。

当時はこんな性質が実験で検証できるとは考えられていなかったが、80年代、「非局所性」が実際に確かめられ、さらにこの性質から盗聴が不可能な量子暗号や、超高速の「量子コンピュータ」への道が開かれることがわかった。

高エネルギー加速器研究機構の筒井泉・助教授は「アインシュタインの論文の中で、最も影響が大きかったのはEPR論文だという人もいる。今後、影響はさらに大きくなるのでは」と話している。(勝田敏彦)

サマー・キャンペーン
参加者を募集

科学技術振興機構

夏休みの高校生に科学技術の最先端に触れてもらう「サマー・サイエンスキャンプ2006」の参加者を、科学技術振興

2.2 多量子ビット系ともつれた状態 ($n>2$)

- n 量子ビット系の一般の状態:

$$|\Psi\rangle = a_{0\dots 00}|0\dots 00\rangle + a_{0\dots 01}|0\dots 01\rangle + \dots + a_{1\dots 11}|1\dots 11\rangle.$$

n 量子ビット系の次元 = $a_{i_1\dots i_n}$ の数 = 2^n ,

- テンソル積 $(a_1|0\rangle + b_1|1\rangle) \otimes \dots \otimes (a_n|0\rangle + b_n|1\rangle)$ は古典的記述を許す.

テンソル積状態の次元 = a_i, b_i の数 = $2n$.

- $n = 1000$ で $2n/2^n \sim 10^{-297} \rightarrow n$ が大きいときはほとんどすべての状態がもつれている.
- 基底ベクトル $|i_{n-1}i_{n-2}\dots i_0\rangle$ を $|x\rangle$ と書くときもある. ただし $x = i_{n-1}2^{n-1} + i_{n-2}2^{n-2} + \dots + i_0$,
例: $|00\rangle = |0\rangle, |01\rangle = |1\rangle, |10\rangle = |2\rangle, |11\rangle = |3\rangle$

2.3 量子アルゴリズム = ユニタリー行列

情報はベクトルが担う．その操作（ゲート）はユニタリー行列（ベクトルの長さを不変にする行列）で行なう．

例： $X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ とおくと

$$X|0\rangle = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle$$

同様に $X|1\rangle = |0\rangle \rightarrow X = \text{NOT}$.

X は，重ねあわせ状態 $a|0\rangle + b|1\rangle$ にも作用する：

$$X(a|0\rangle + b|1\rangle) = a|1\rangle + b|0\rangle.$$

$$\text{一般に: } U_f \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle |0\rangle = \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle |f(x)\rangle.$$

2^n 個のプロセッサの超並列処理！

n 量子ビットの操作

- 「古典」 的：

$U_1 \otimes U_2 \otimes \dots \otimes U_n : |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \dots \otimes |\psi_n\rangle \mapsto U_1|\psi_1\rangle \otimes U_2|\psi_2\rangle \dots \otimes U_n|\psi_n\rangle$, U_k は 2×2 ユニタリ行列.

- n 量子ビット系では $2^n \times 2^n$ ユニタリ行列をフルに使うことができる. 自由度 (操作できるパラメタの数) の比較: $2^{2n} \gg 4n$

ほとんどの操作は古典的な対応物を持たない.

線形代数 (ベクトルと行列) を使えば古典計算を超える計算と情報処理ができることがわかった. ではどんな物理系を使えばこれを実現できるか?

量子力学

H_1 H_2 $\dots$ H_n
Newton の運動方程式

$$\text{質量} \cdot \text{加速度} = \text{力} \quad m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \vec{F}$$

$$|\Psi(0)\rangle \quad |\Psi(t_1)\rangle \quad |\Psi(t_2)\rangle \quad \dots \quad |\Psi(T = t_n)\rangle$$

$$U(T) = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{-iH_n(T-t_{n-1})} \dots e^{-iH_2(t_2-t_1)} e^{-iH_1 t_1}$$



講演予定

- 1. はじめに: 物理で計算?
- 2. 量子ビット, 量子ゲート, 量子コンピュータ
- 3. DiVincenzoの判定条件
- 4. NMR量子コンピュータ
- 5. 例: Shorのアルゴリズム
- 6. おわりに



正しく動くパソコンの必要条件

- ハードウェア (メモリー, CPU)がそろっているか
- 最初にメモリーをリセットできるか
- 計算が終了するまでにパソコンが壊れないか
(10年かかる計算では危うい)
- どんな論理回路でも構成できるか
- 計算結果をプリンターやディスプレイに出力できるか

ある物理系が量子コンピュータの候補となるための必要条件 (DiVincenzo条件)

- 十分な数の量子ビットを用意できるか
- 最初の量子ビットを基準の状態にセットできるか (たとえば $|00\dots 00$ など)
- 計算が終了するまで量子状態は安定か (外界との相互作用によるデコヒーレンスが小さい)
(10年かかる計算では危うい)
- どんな量子回路でも構成できるか
- 計算結果を読み取ることができるか

万能定理

定理 (Barenco たち)

任意の $U \in U(2^n)$ は 1-qubit ゲートと CNOT ゲートに分解できる. すなわち $U(2)$ と CNOT ゲートはユニバーサルである. (基本量子ゲート)

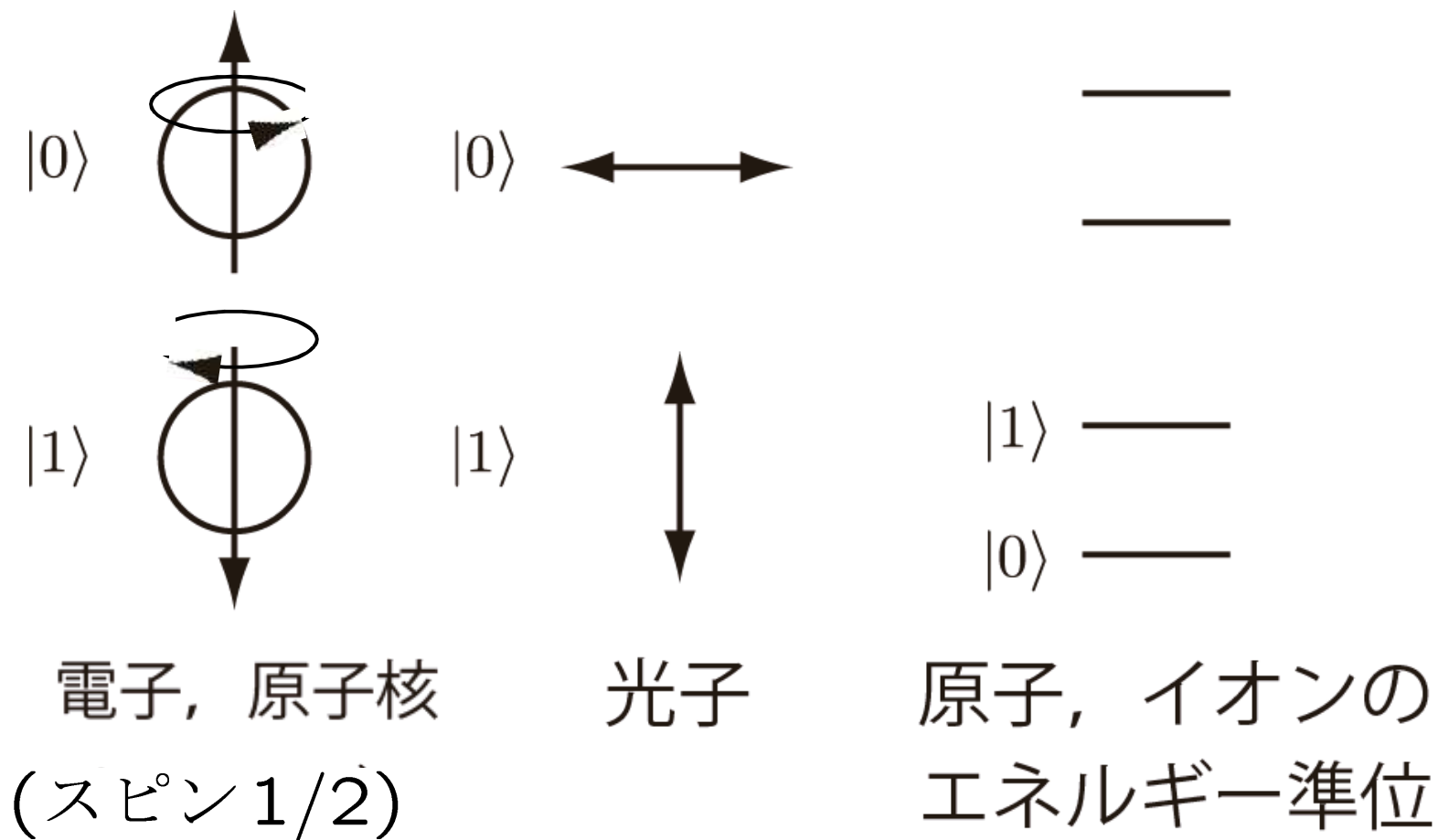
$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} : \begin{array}{ll} \text{input} & \text{output} \\ |00\rangle & \rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle & \rightarrow |01\rangle \\ |10\rangle & \rightarrow |11\rangle \\ |11\rangle & \rightarrow |10\rangle \end{array}$$

第 1 量子ビットが $|0\rangle$ であれば第 2 量子ビットはそのまま, 第 1 量子ビットが $|1\rangle$ であれば第 2 量子ビットを反転.

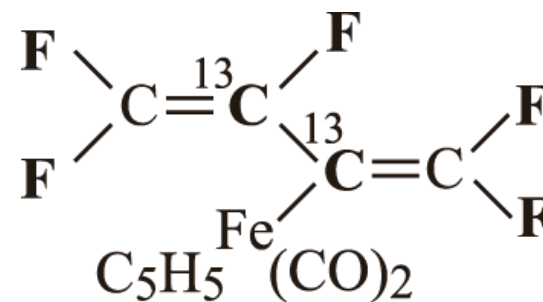
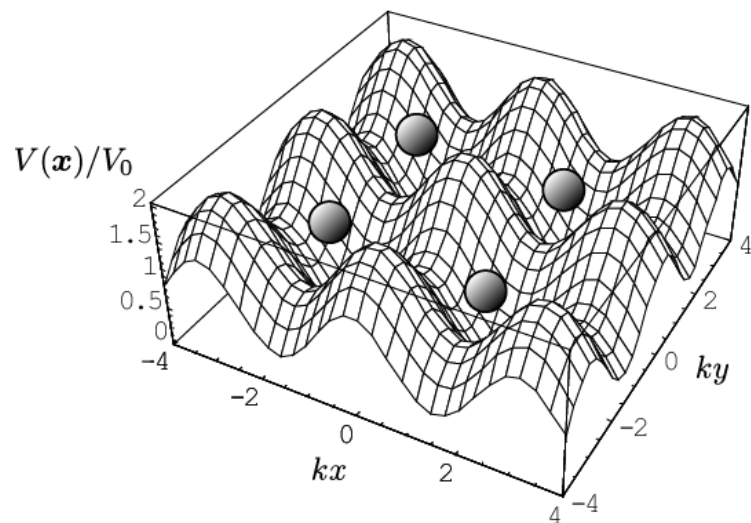
DiVincenzo 2004@近畿大学



物理系の候補:



量子ビットの候補として提唱されている量子系

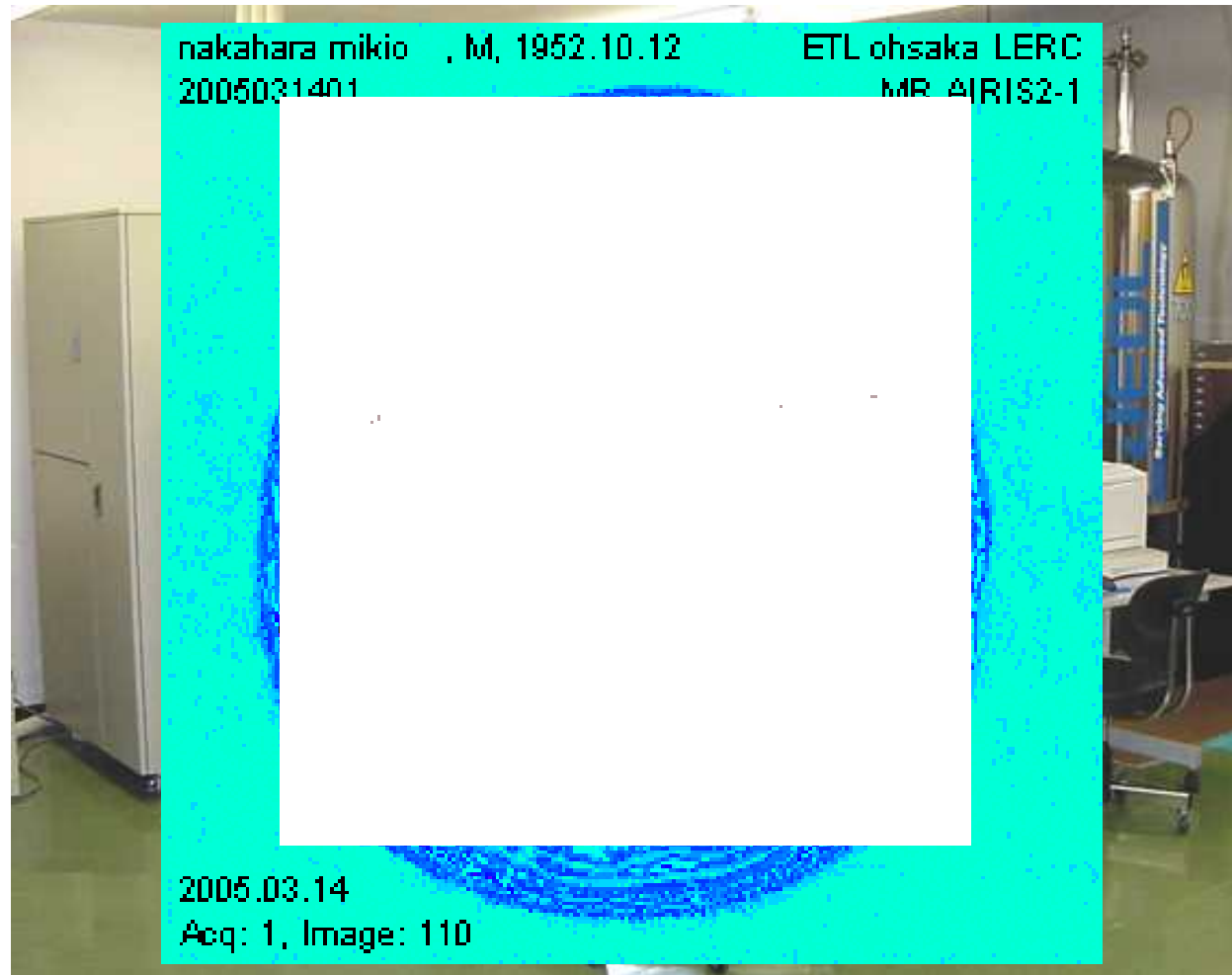




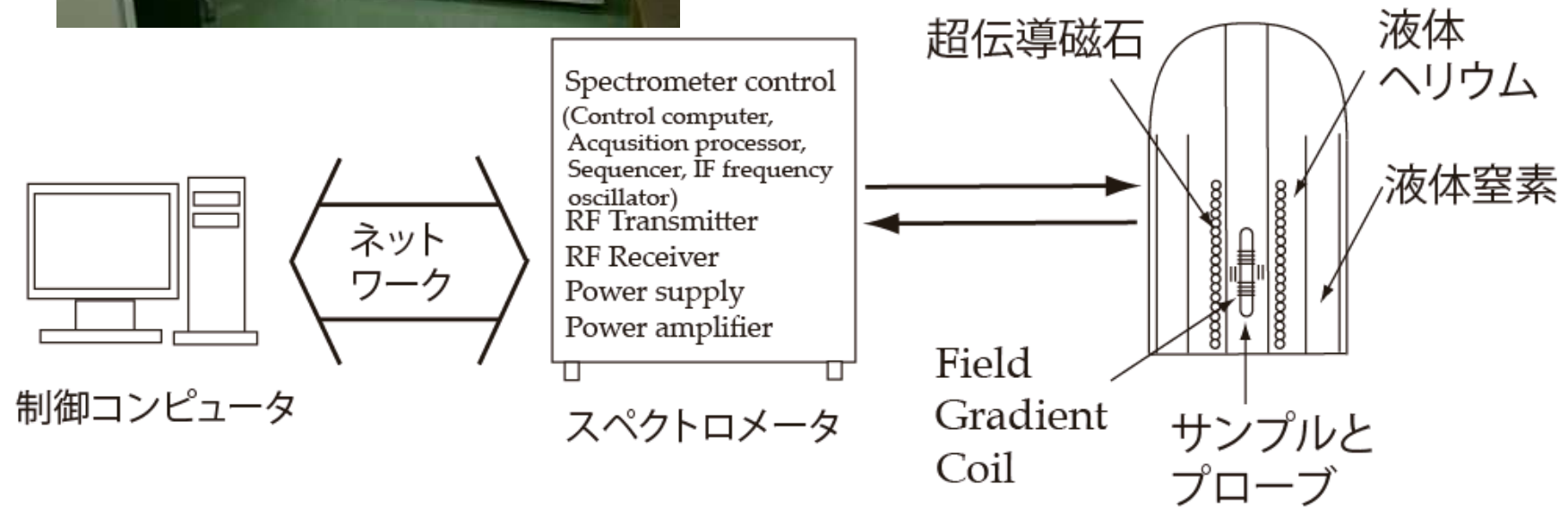
講演予定

- 1. はじめに: 物理で計算?
- 2. 量子ビット, 量子ゲート, 量子コンピュータ
- 3. DiVincenzoの判定条件
- 4. NMR量子コンピュータ
- 5. 例: Shorのアルゴリズム
- 6. おわりに

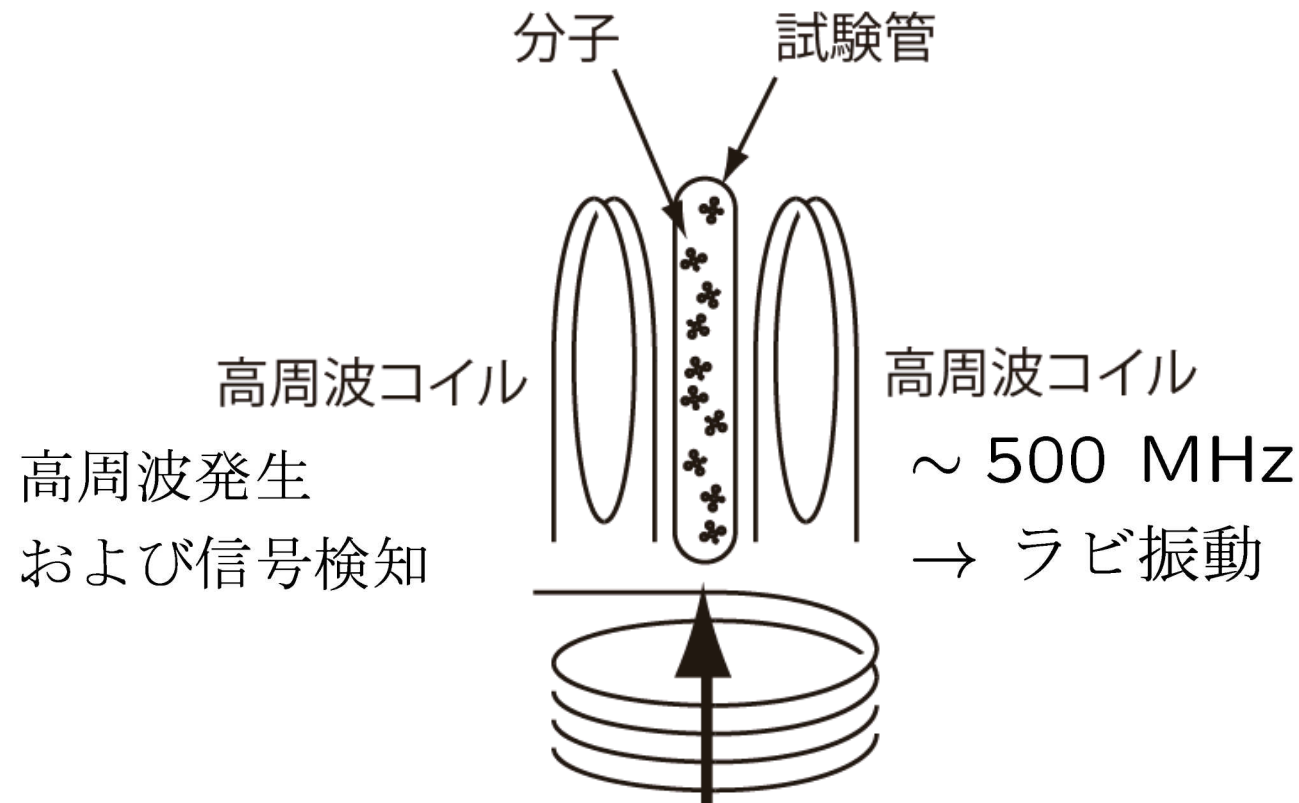
NMR (Nuclear Magnetic Resonance 核磁気共鳴)
=MRI (Magnetic Resonance Imaging 磁気共鳴像)



NMR装置



NMRの概念図

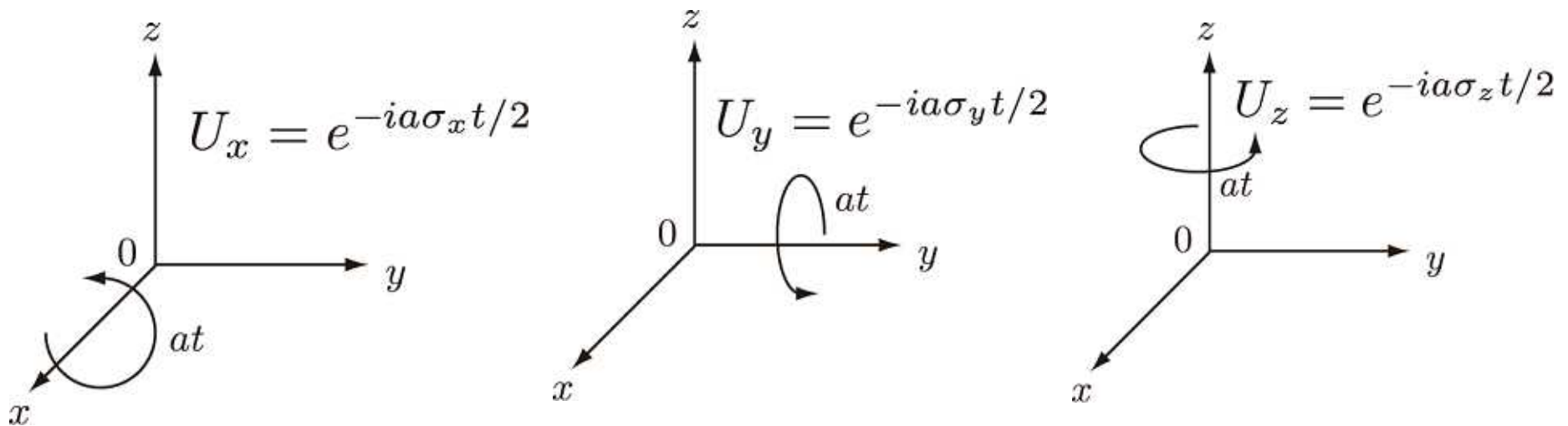


巨力な静磁場 $B_0 \sim 10 \text{ T} \sim$ 地球磁場の20万倍.
→ 核スピンの準位分裂 (ゼーマン効果)

量子ビット操作の基本

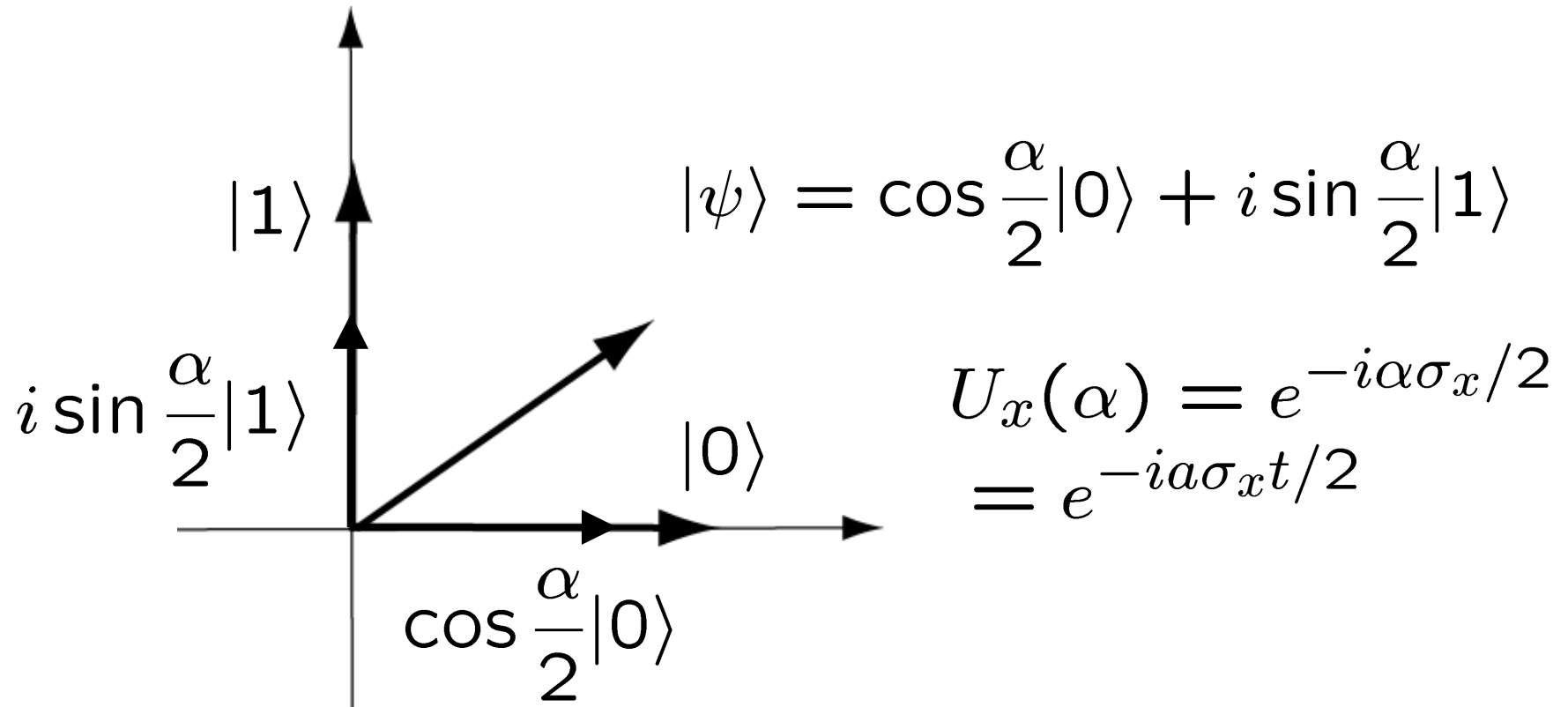
$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

はそれぞれスピンの x, y, z 軸周りの回転を生成する.



$$|0\rangle \rightarrow U_x(at)|0\rangle = \cos \frac{at}{2} |0\rangle + i \sin \frac{at}{2} |1\rangle; \text{ 重ねあわせ状態!}$$

$$|\psi\rangle = \cos \frac{\alpha}{2} |0\rangle + i \sin \frac{\alpha}{2} |1\rangle$$



$\alpha = at$ すなわち t を変えればいろいろな重ねあわせ状態を実現できる.



しかし...

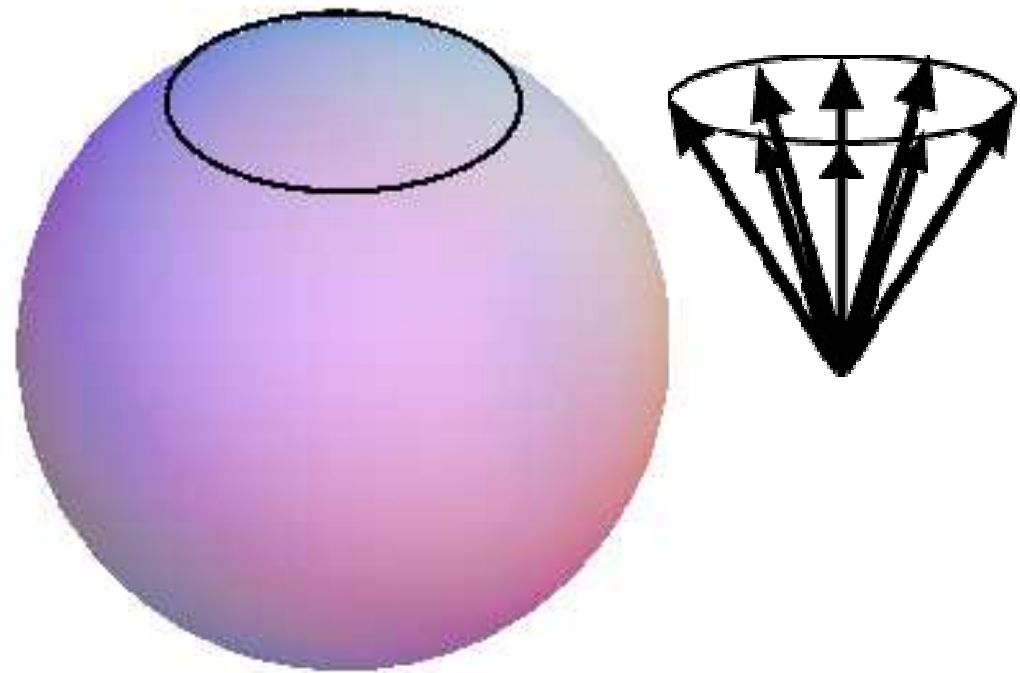
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ を変えることは静磁場の向きを変えることに等しい.
- 超伝導磁石は 1 t 程度の質量で, これを瞬時に動かすことは実用的ではない.
 - 高周波で振動する微小磁場を使った Rabi 振動を利用する.
- まず古典的なアナロジーを調べよう.

磁場中のスピン：古典的描像1

磁場中の磁気モーメントの運動方程式； $\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \gamma\vec{\mu} \times \vec{B}$

例： $\vec{B} = (0, 0, B)$, $\vec{\mu}(0) = \mu(\sin \frac{\pi}{10}, 0, \cos \frac{\pi}{10})$

$$\begin{aligned}\frac{d\mu_x}{dt} &= \gamma B_0 \mu_y \\ \frac{d\mu_y}{dt} &= -\gamma B_0 \mu_x \\ \frac{d\mu_z}{dt} &= 0. \\ \mu_z &= \text{const.}\end{aligned}$$



磁場中のスピン：古典的描像2

x 方向に振動磁場 $\omega_1 \cos(\gamma B t)$ $\omega_1 / \gamma B = 0.05$.

を加える：

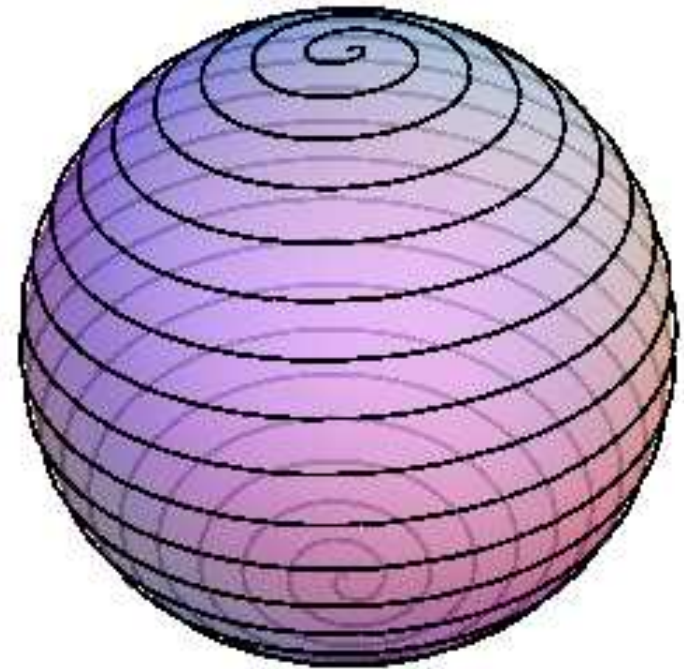
$$\frac{d\mu_x}{dt} = \gamma B_0 \mu_y$$

$$\frac{d\mu_y}{dt} = -\gamma B_0 \mu_x + \omega_1 \cos(\gamma B t) \mu_z$$

$$\frac{d\mu_z}{dt} = +\omega_1 \cos(\gamma B t) \mu_y.$$

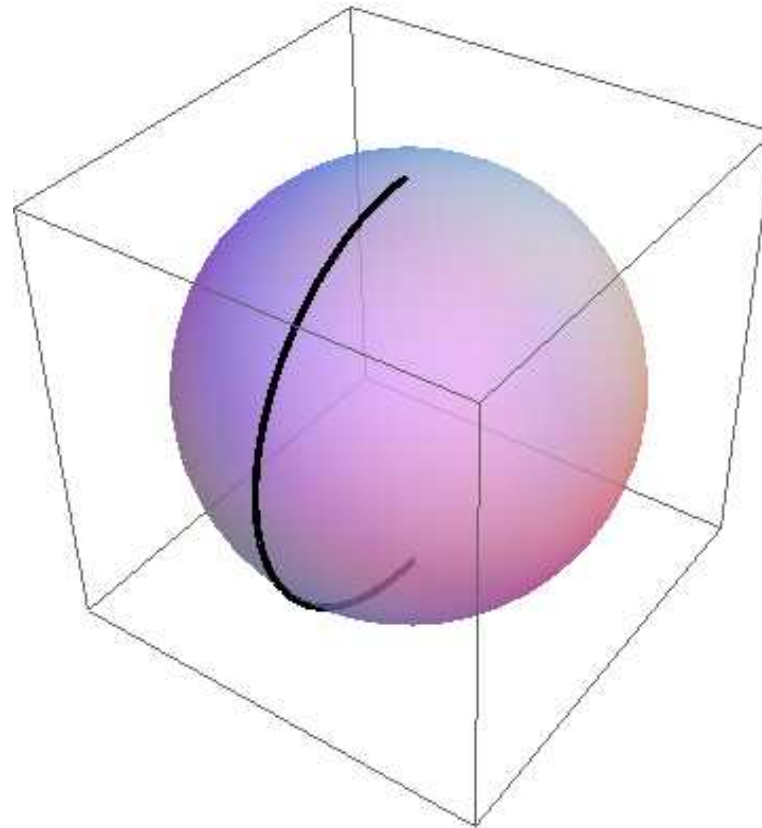
$$\vec{\mu}(0) = \mu(0, 0, 1)$$

磁気モーメントは z 軸周りを回りながら上から下に向きを変える.



回転系から見ると...

γB の角速度で回転する系では磁気モーメント（スピン）は回転せずにまっすぐ上から下に方向を変える。



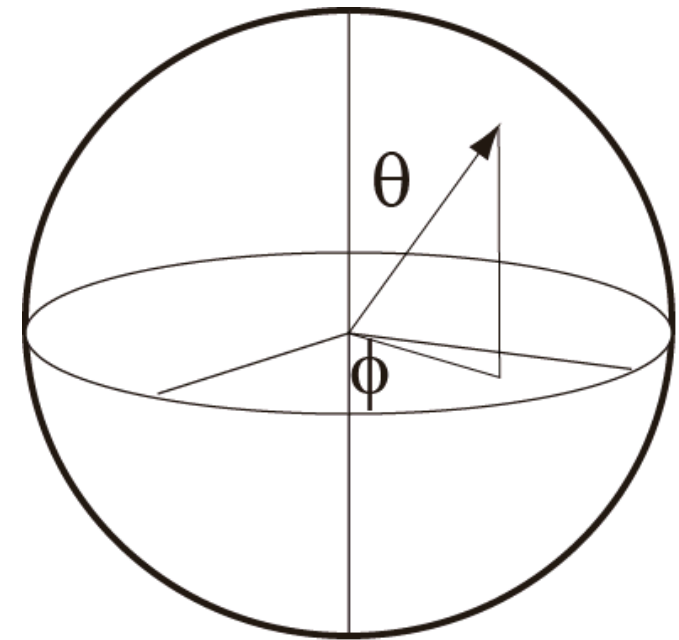
磁場中のスピン：量子的描像1

スピンの状態 $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \Leftrightarrow$ 球上の点.

$|0\rangle = |\uparrow\rangle, |1\rangle = |\downarrow\rangle$ から $a = \cos\frac{\theta}{2}, b = e^{i\phi} \sin\frac{\theta}{2}$
とおくと (θ, ϕ) は球面の極座標を与える.

例： $\theta = 0$ で $a = 1, b = 0$ より $|\uparrow\rangle$,

$\theta = \pi$ で $a = 0, b = 1$ より $|\downarrow\rangle$.



$|1\rangle = |\downarrow\rangle$

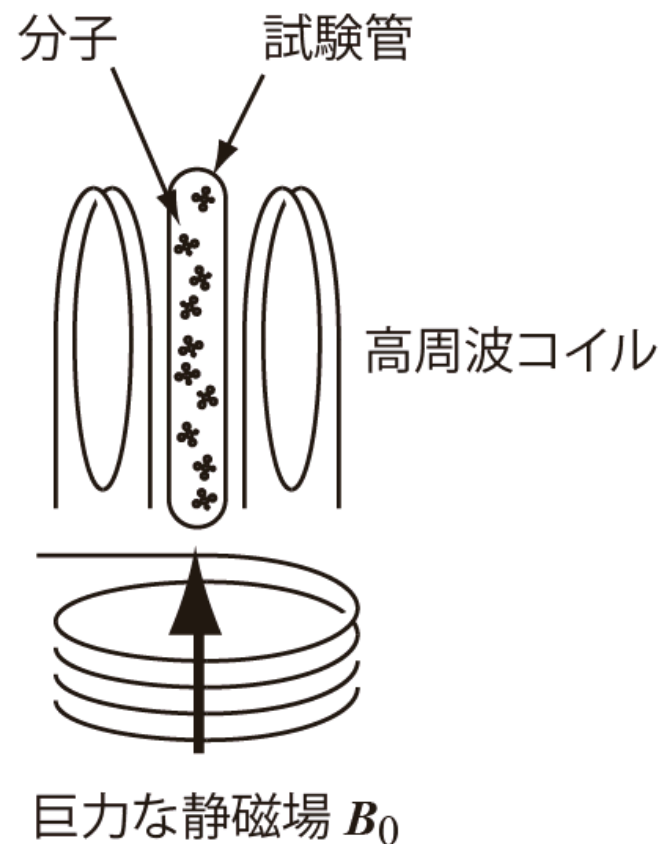
1量子ビットハミルトニアン

$$H = -\gamma B_0 \frac{\sigma_z}{2} + 2\omega_1 \cos(\omega_{\text{rf}} t - \phi) \frac{\sigma_x}{2}$$

共鳴条件 $\omega_{\text{rf}} = \gamma B_0$ が満たされる
とき，角速度 γB_0 の回転系に乗る．

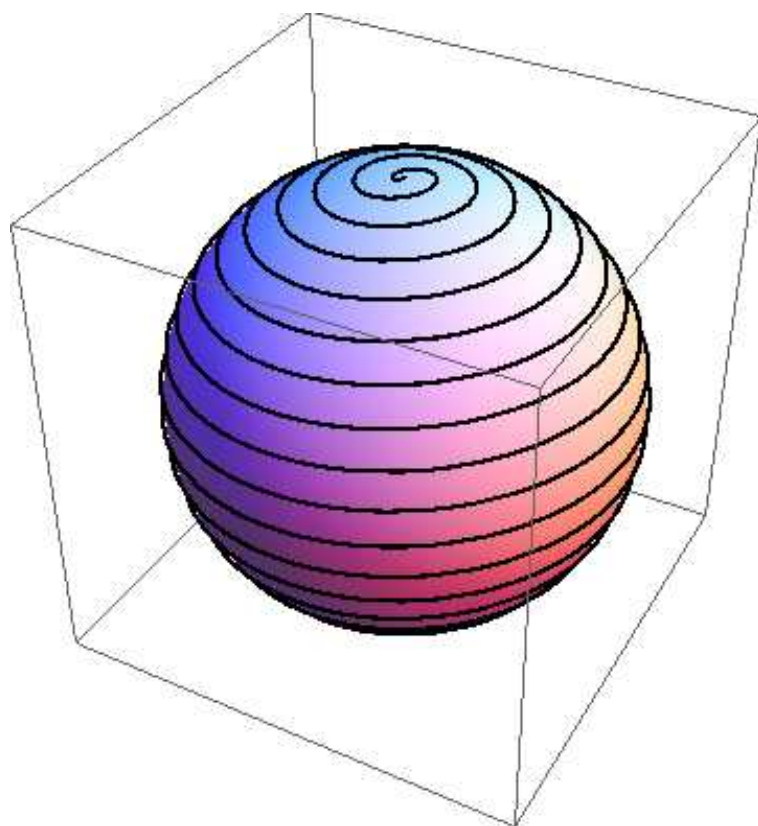
$$\rightarrow H' = \omega_1 (\cos \phi \sigma_x / 2 + \sin \phi \sigma_y / 2)$$

- $\phi = 0 \rightarrow x$ 軸周りの回転，
- $\phi = \pi/2 \rightarrow y$ 軸周りの回転．
- 任意の回転はこれらを組み合わせて得られる．

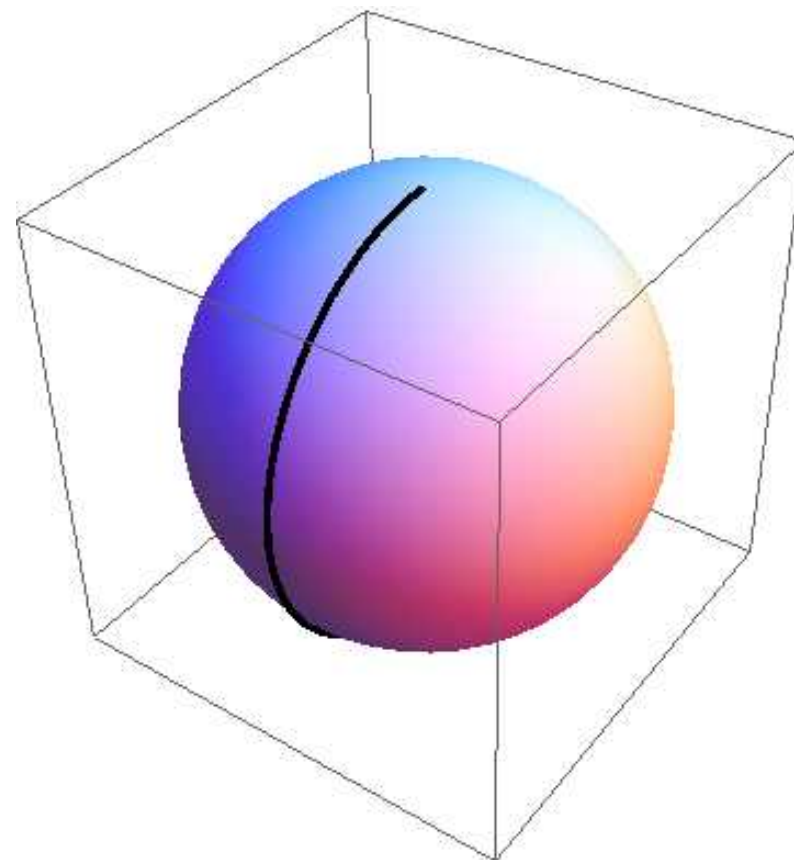


極座標(θ, ϕ)でみたスピンの運動

$$t = 0 \text{ で } |0\rangle, \omega_{\text{rf}} = \gamma B_0$$

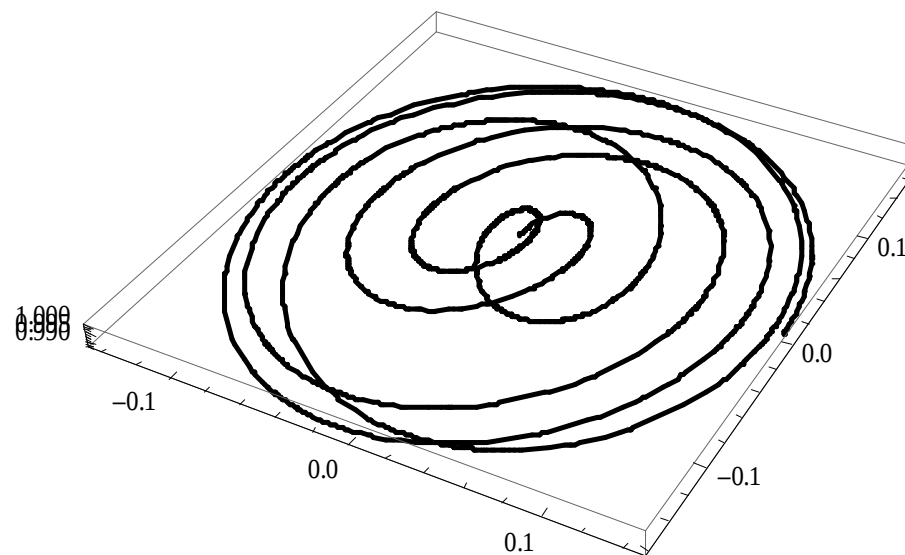


実験室系



回転系

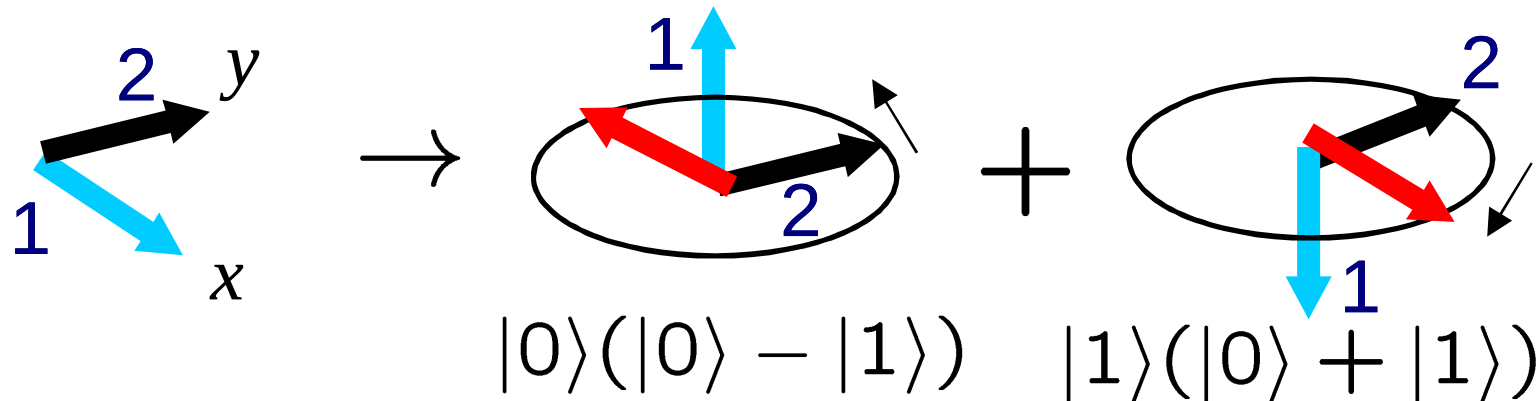
$\omega_{\text{rf}} \neq \gamma B_0$ のとき ($\omega_{\text{rf}}/\gamma B_0 = 1.3$)



$\omega_{\text{rf}} \sim \gamma B_0$ のスピンのみが反転する.

2量子ビット操作

回転系における2量子ビット相互作用： $J\sigma_z \otimes \sigma_z$. 初期状態が $|\Psi\rangle = \frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle)(|0\rangle + i|1\rangle)$ のとき (第1量子ビットは x 軸向き, 第2量子ビットは y 軸向き) 第1量子ビットの作る磁場の中での第2量子ビットの運動を考える. $|\rightarrow_x\rangle = (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ より



$Jt = \pi/2$ だけ待つと量子ビット2はそれぞれ $-x$ 方向と $+x$ 方向を向く.



$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2}(|0\rangle + |1\rangle)(|0\rangle + i|1\rangle) \\
 & \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle(|0\rangle - |1\rangle) + |1\rangle(|0\rangle + |1\rangle)) \\
 & = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle)
 \end{aligned}$$

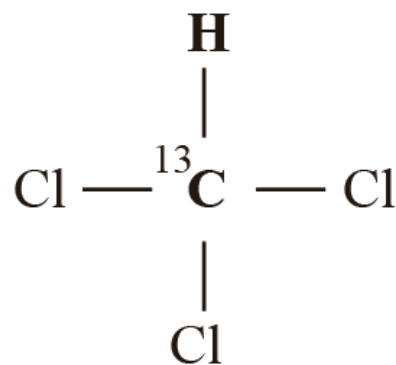
この状態はテンソル積ではかけない纏れた状態である.
 相互作用 $J\sigma_z \otimes \sigma_z$ はテンソル積状態を纏れさす作用を持つ.



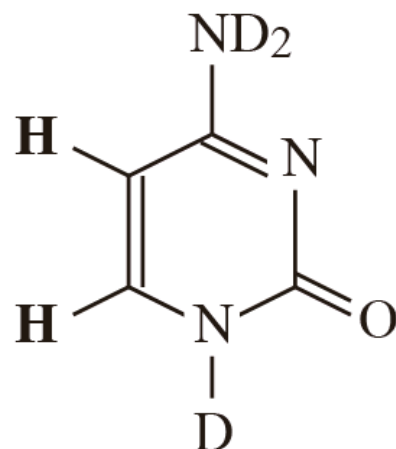
NMRにおけるDiVincenzo条件の現状

- 十分な数の量子ビットを用意できるか
- すべての量子ビットを基準の状態にセットできるか (たとえば $|00\dots 00$ など)
- 計算が終了するまで量子状態は安定か (外界との相互作用によるデコヒーレンスが小さい)
- どんな量子ゲートでも構成できるか
- 計算結果を読み取ることができるか

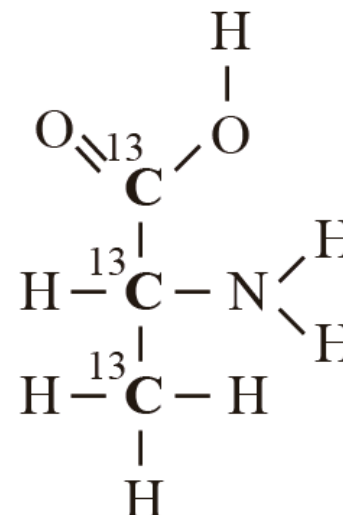
実際の分子



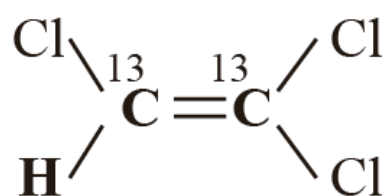
(a)



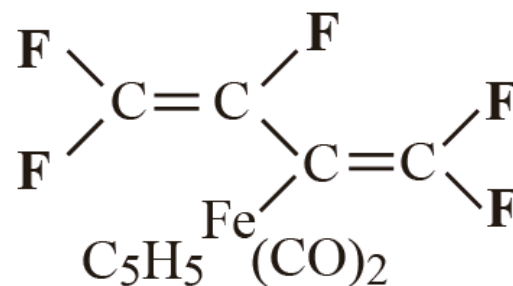
(b)



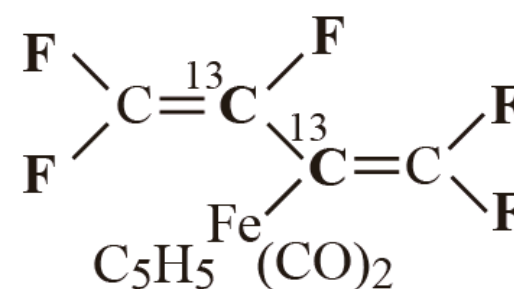
(c)



(d)



(e)



(f)

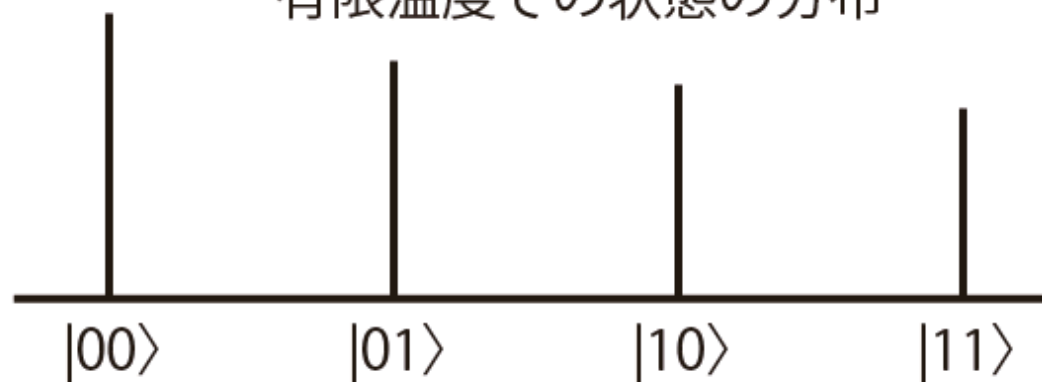


問題点

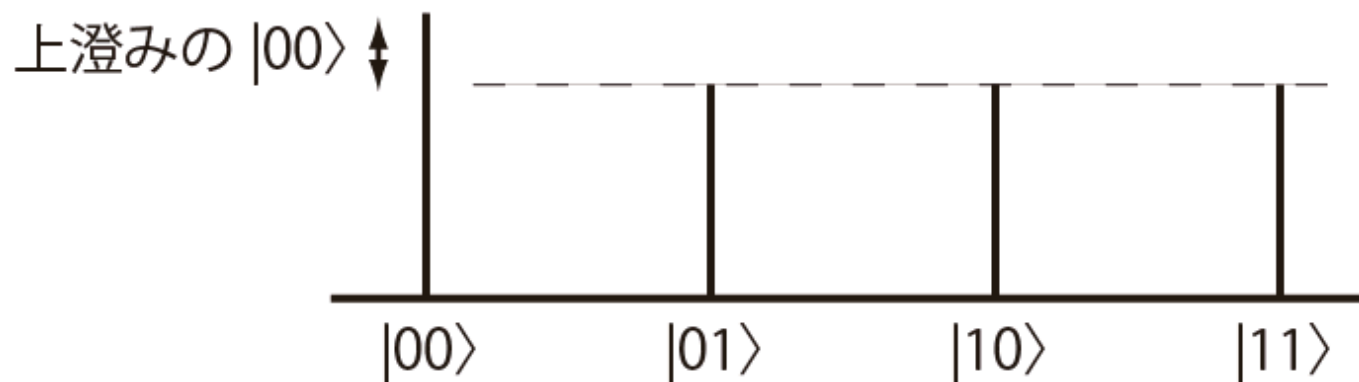
- 同種核は共鳴周波数が近いが，化学シフトにより選択的に操作できる．しかし～10量子ビット程度が限界か？
- 液体NMRは $|00\dots 0\rangle$ から $|11\dots 1\rangle$ までのすべての状態がほぼ同じウエイトで混ざっている． $|00\dots 0\rangle$ をわずかな「上澄み」として取り出すテクニックが必要．ただ信号強度は $\sim 1/2^n$ で小さくなる． $n \sim 10$ くらいが限界か？
- しかしNMRは唯一お金を出しさえすれば買える量子コンピュータである．我々はいろいろな理論のデモンストレーションなどに用いている．

時間平均法による擬似初期状態の生成 (メモリーのリセット)

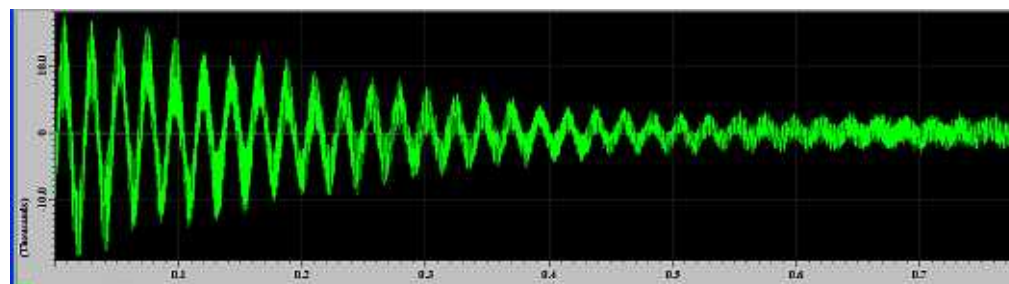
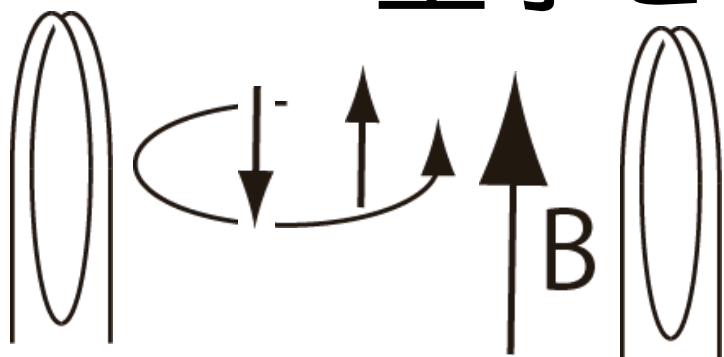
有限温度での状態の分布



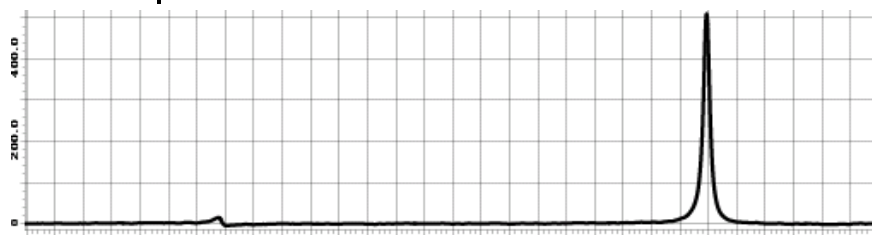
平均化後の状態の分布



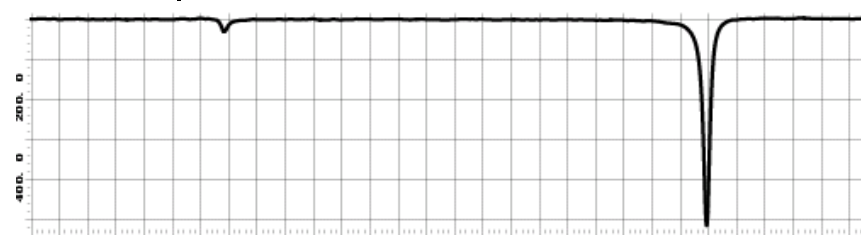
量子ビットの測定 (FID)



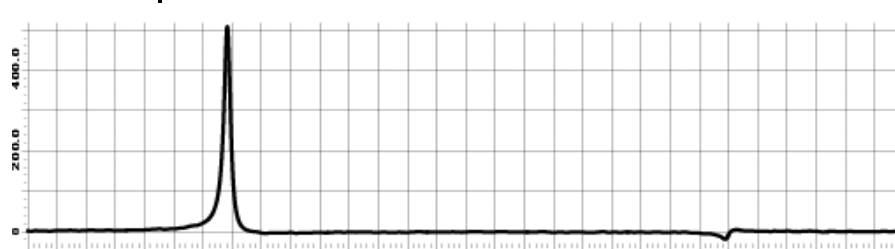
$|00\rangle$



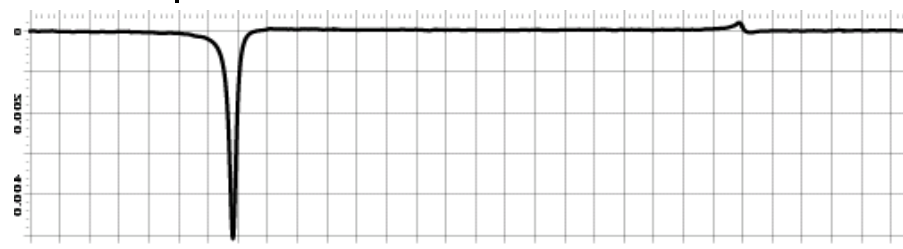
$|01\rangle$



$|10\rangle$

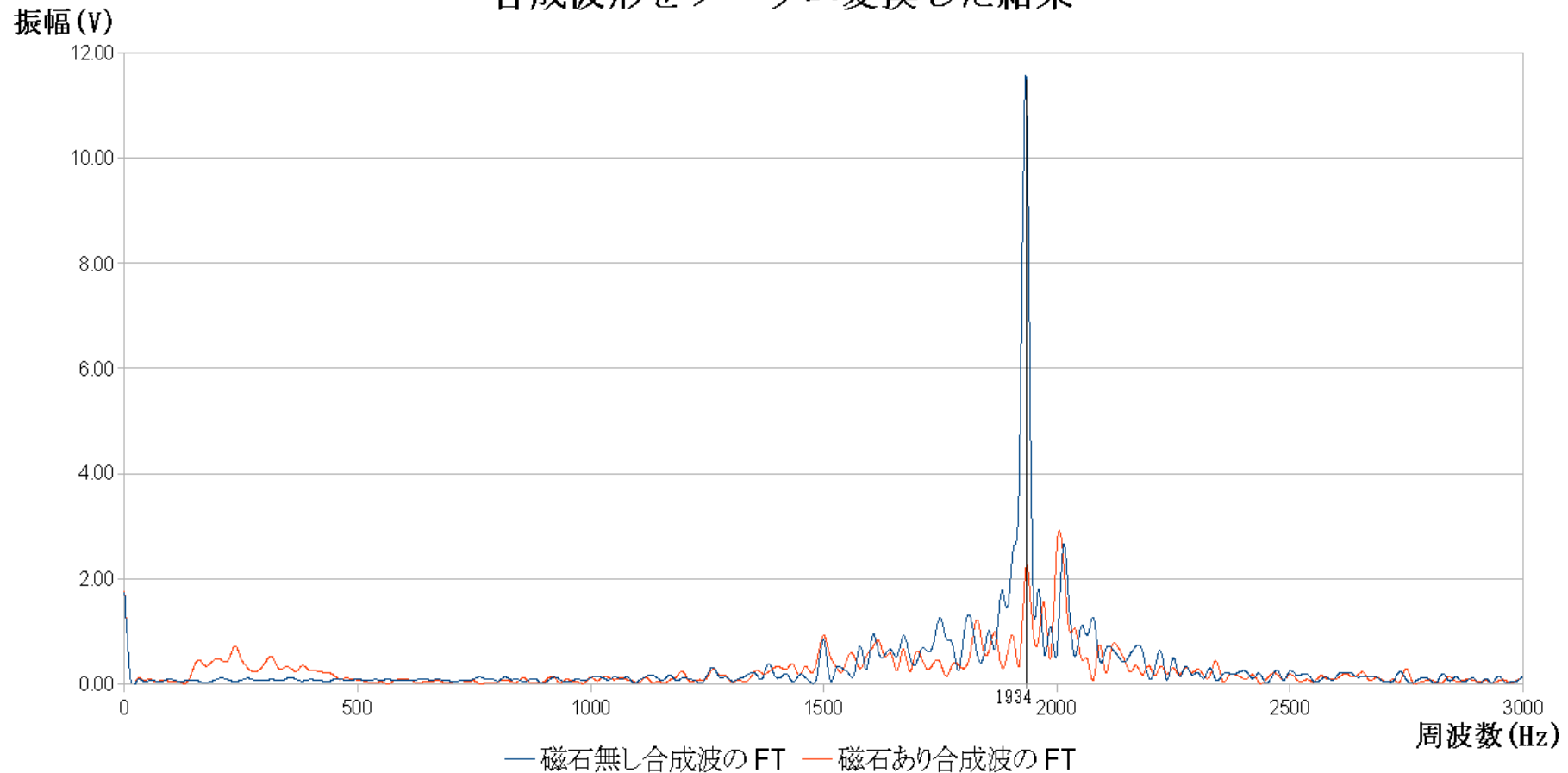


$|11\rangle$



地球磁場のNMR (～¥10,000)

合成波形をフーリエ変換した結果





講演予定

- 1. はじめに: 物理で計算?
- 2. 量子ビット, 量子ゲート, 量子コンピュータ
- 3. DiVincenzoの判定条件
- 4. NMR量子コンピュータ
- 5. 例: Shorのアルゴリズム
- 6. おわりに



素因数分解の困難

- $N=89020836818747907956831989272091600303613264603794247032637647625631554961638351$ の素因数分解は困難.
- $p=9281013205404131518475902447276973338969$ と $q=9591715349237194999547050068718930514279$ の積が N であることは小学生でも計算できる.(多分)
- この事実はRSA (Rivest-Shamir-Adleman) 暗号に用いられ, インターネットなどで我々の生活に日常的に用いられている.

素因数分解のアルゴリズム

大きな複合数 $N = pq$ を素因数分解したい.

[1] N より小さな正数 m をランダムに選び $\gcd(m, N)$ を計算.
 $\gcd(m, N) \neq 1$ であれば $m = p$ or q . 以下 $\gcd(m, N) = 1$ と仮定.

[2] $f_N : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ を $a \mapsto m^a \bmod N$ で定義. $m^P \equiv 1 \bmod N$ となる最小の $P \in \mathbb{N}$ (位数) を求める. (Shor のアルゴリズム)

[3] P が奇数であれば廃棄して [1] へ戻り, 別の m で P が偶数となるまで反復する.

[4] 偶数の P に対して $(m^{P/2} - 1)(m^{P/2} + 1) = m^P - 1 \equiv 0 \bmod N$ が成立. もし $m^{P/2} + 1 \equiv 0 \bmod N$ であれば $\gcd(m^{P/2} - 1, N) = 1$ となり [1] へ戻って別の m から始める. もし $m^{P/2} + 1 \not\equiv 0 \bmod N$ であれば $m^{P/2} - 1$ は p または q を素因数として含む.

[5] $d = \gcd(m^{P/2} - 1, N)$ は p or q で素因数分解は完了.

200

400

600

800

1000

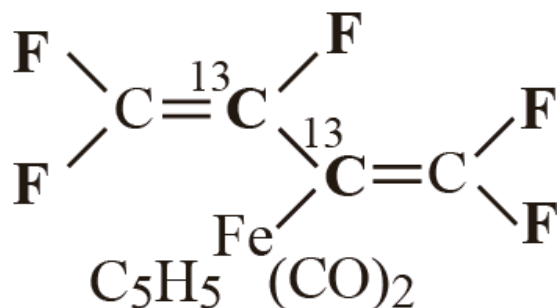




NMRを用いた実現 ($15=3 \times 5$)

L. M. K. Vandersypen 他 (Nature 2001)

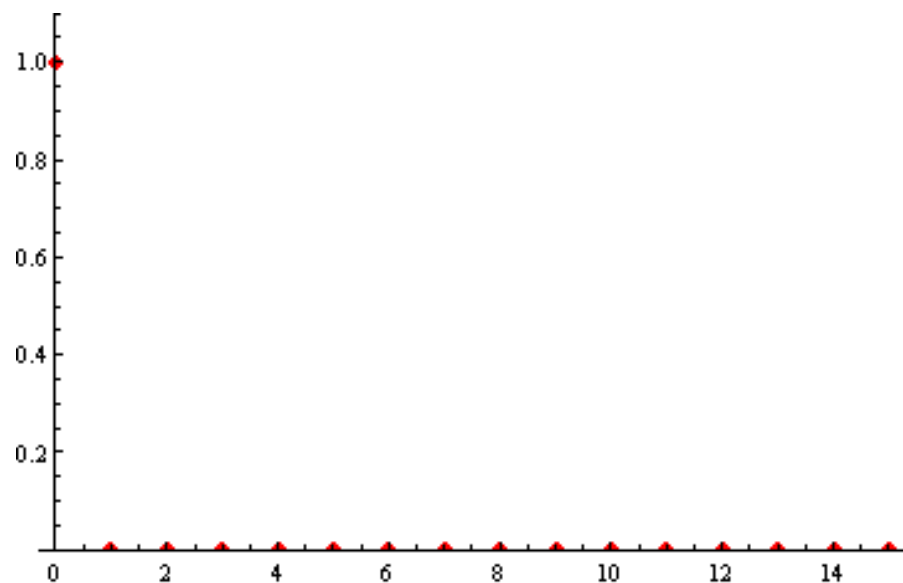
NMRの分子とパルス列(~300 pulses)



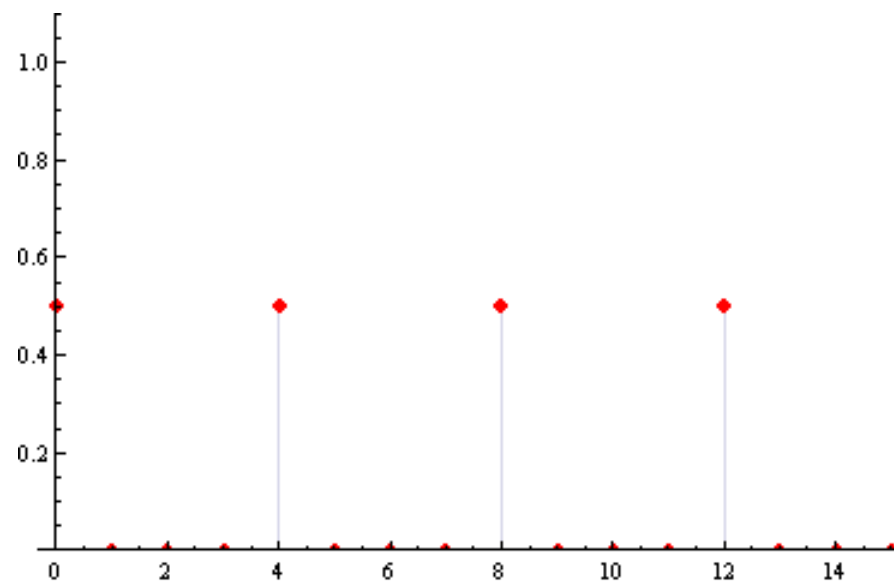
*perfluorobutadienyl
iron complex with the
two ^{13}C -labelled
inner carbons*



ピークの間隔 $= N/P = 4$



初期状態 $|0\rangle$

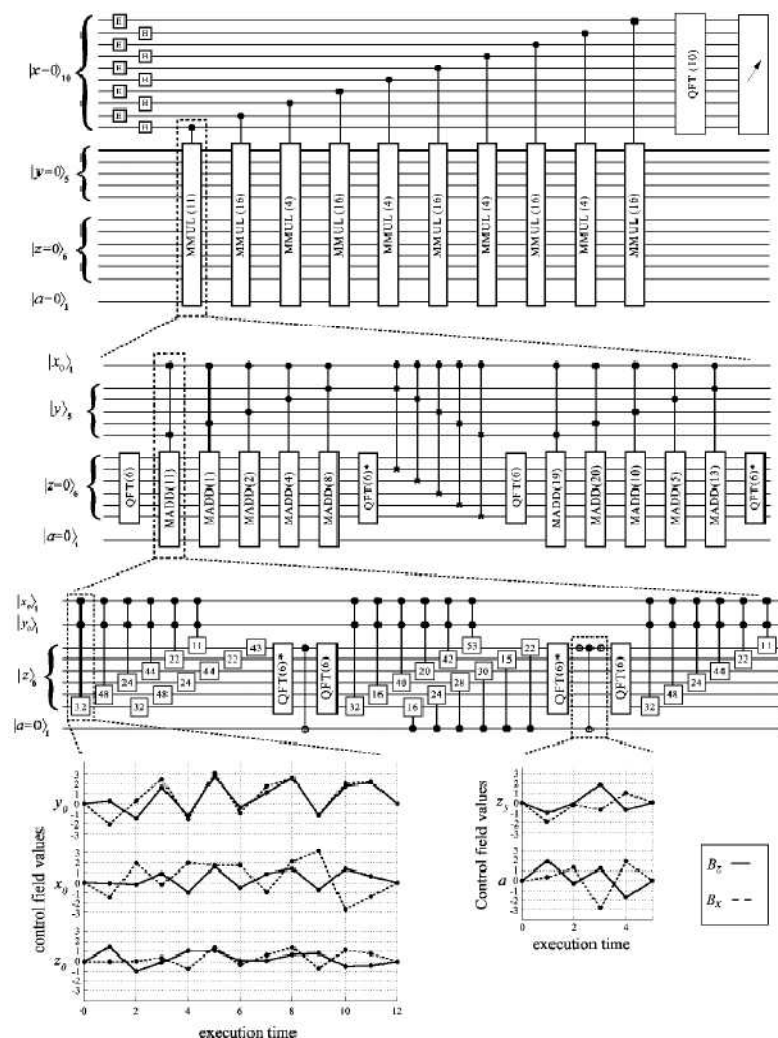


最終状態

$$\frac{1}{2}(|0\rangle + |4\rangle + |8\rangle + |12\rangle)$$

しかしfoolproofな実装では...

Vartiainen, Niskanen, Nakahara, Salomaa (2004)



Shorのアルゴリズム
をfoolproofに実装し
ようとする $と21=3 \times 7$
の素因数分解では少
なくとも22量子ビット
が必要。ステップ数は
約82,000！



講演予定

- 1. はじめに: 物理で計算?
- 2. 量子ビット, 量子ゲート, 量子コンピュータ
- 3. DiVincenzoの判定条件
- 4. NMR量子コンピュータ
- 5. 例: Shorのアルゴリズム
- 6. おわりに



おわりに

- 量子コンピュータは古典的に存在しない状態を使って古典コンピュータをはるかに越える計算ができる。
- 液体NMRは、現状では量子ビット数の問題、リセットの問題などで、究極の量子コンピュータの候補とはなりえない。しかし、さまざまな理論のテクニックを検証するのに有用。
- 実用的な量子アルゴリズムを実装するには、理論、実験とも飛躍的な発展が必要。
- そのためには物理、化学、数学、情報学などの専門家の共同研究が不可欠。
- 共同研究者募集中。
- 高校への出張講義も承ります。

Amazon.co.jp : Quantum Computing: From Linear Algebra To Physical Realizations: Mikio Nakahara, - Windows Internet Explorer

http://www.amazon.co.jp/Quantum-Computing-Algebra-Physical-Realizations/dp/0750309830/ref=sr_1_1?ie=UTF8&s Live Search

Amazon.co.jp : Quantum Computing: From...

amazon.co.jp

こんにちは。おすすめ商品を見るにはサインインしてください。初めての方は[こちら](#)。

マイストア Amazonポイント ギフト券 お買い物情報 アカウントサービス ヘルプ

すべてのカテゴリーを見る

検索 洋書 GO カートを見る ほしい物リスト

洋書 詳細検索 ジャンル ベストセラー 初めての洋書 英語学習 ペーパーバック バーゲン Amazon で売ろう

Amazon プライム

この商品を火曜日(12月9日)までに受け取りたい場合は、13時間 0分以内にご注文ください。

Amazonプライムへの会員登録はお済みですか?ご登録は[こちらから](#)

お急ぎ便送料無料で今すぐ注文する (詳細はこちら)

クリック なか見! 検索

QUANTUM COMPUTING
From Linear Algebra to Physical Realizations

Mikio Nakahara (著), Tetsuo Ohmi (著)

まだカスタマーレビューはありません。今すぐどうぞ。

価格: ¥ 7,967 (税入) この商品は1500円以上国内配送料無料を利用して配送されます。詳細

在庫あり。在庫状況について詳しくは[こちら](#)

この商品は、Amazon.co.jp が販売、発送します。ギフト包装を利用できます。

1点在庫あり。ご注文はお早め。

2008/12/9 火曜日にお届けします! 今から13時間と0分以内にレジに進み、「お急ぎ便」オプション(有料)を選択して注文を確定されたご注文が対象です。詳しくは[こちら](#)

一部サイズが大きい商品の場合、上記の日付が適用されない場合があります。配送オプションを選択する画面、もしくは注文確定するとき必ず配送予定日をご確認ください。

7点の新品/中古商品を見る: ¥ 7,878より

マーケットプレイスからの新品/中古品購入は簡単&安全! Amazonポイントは、Amazon.co.jp が販売する商品にのみご利用、獲得できます。

この商品のURLをメールで携帯に送る

To translate this page in English, [Click here.](#)

数量: 1

ショッピングカートに入れる

または
1-Clickで注文する場合は、[サインイン](#)をしてください。

こちらからも買えますよ

7点の新品/中古商品を見る: ¥ 7,878より

この商品をお持ちですか?
マーケットプレイスに出品する

ほしい物リストに追加する

お友達に知らせる

自分のイメージを掲載する
この本の中身を閲覧する

インターネット | 保護モード: 有効 100%

Amazon.co.jp : Q... 世の中は不思議な... 無題 - ペイント