

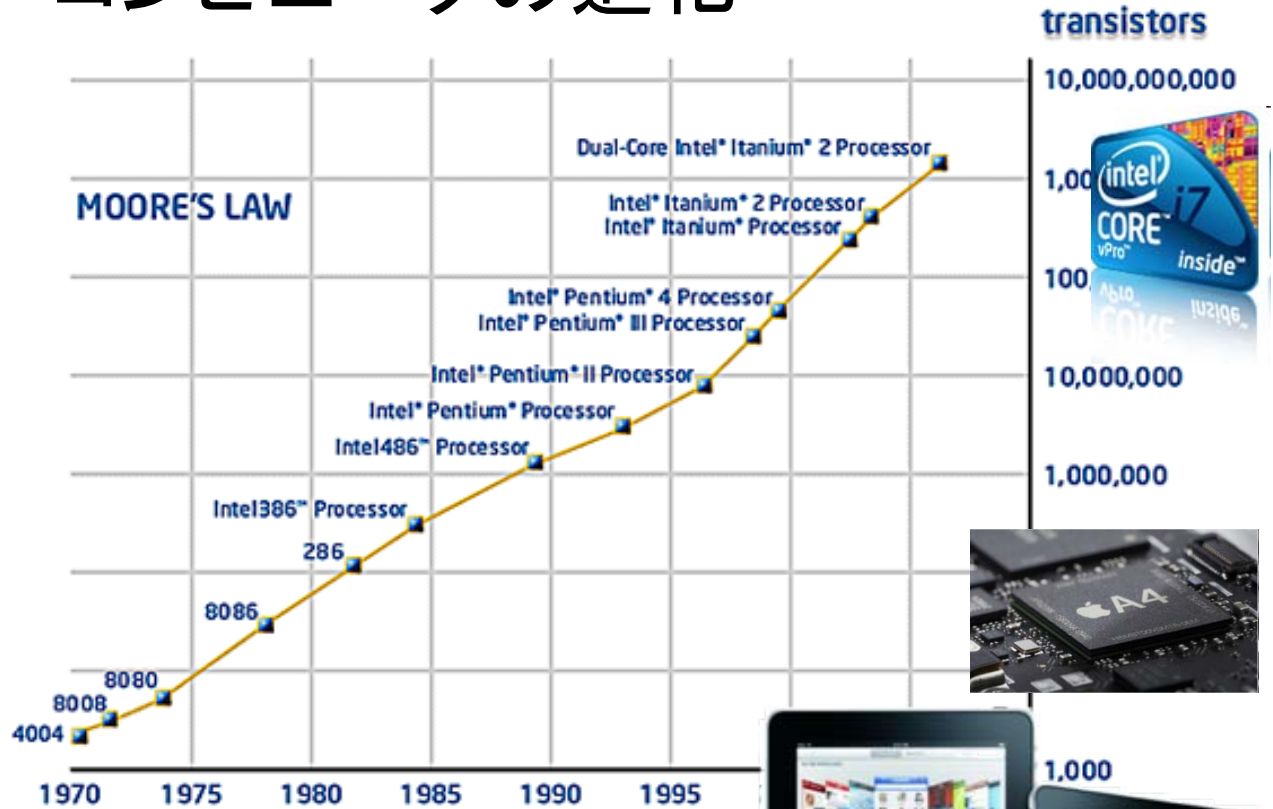
平成23年度理学研究科主催FD 研修会
「新たな大学院教育の展開のためのFD研修会」

分子スピン量子コンピュータ ー分子スピンの整列から制御へー

理学研究科物質分子専攻

佐藤和信

コンピュータの進化

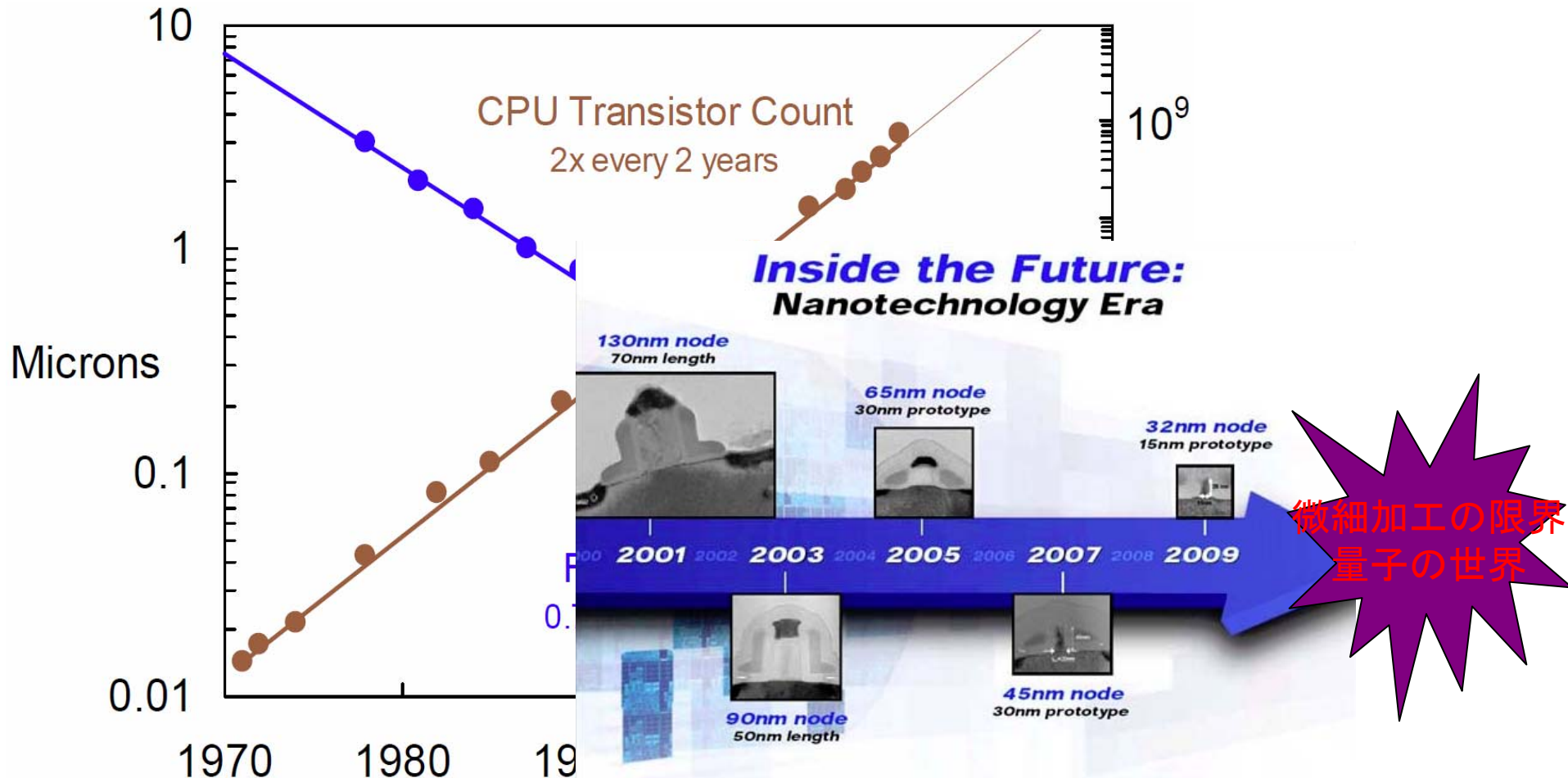
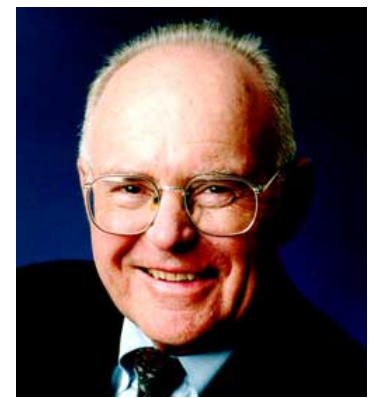


チューリング完全電子計算機ENIAC(1946年)
真空管17,468本・総重量27 t・底面積167 m²
部屋全体がコンピュータ



ムーアの法則

- 半導体チップの集積度は、2年で倍増



現在のコンピュータと量子コンピュータ

- デジタル情報の最小単位: ビット(二進数)

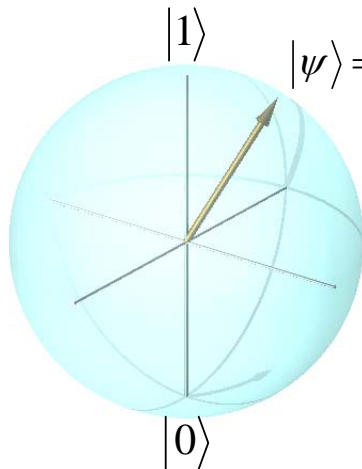


- 0または1
- 2つのうちどちらかの情報しか持つことができない



- 量子情報の最小単位: 量子ビット

ブロッホ球



$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|1\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|0\rangle$$

重ね合わせ

- 重ね合わせ状態、絡み合い状態 (EPR対)が利用可能

- 0と1の両方の情報を同時に持つことができる
- お互いに相関する情報が利用可能



現在のコンピュータと量子コンピュータ

基本論理ゲート

- NOT(否定)



A	Y
0	1
1	0

- AND(論理積)



A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- OR(論理和)

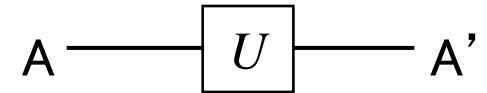


A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

- 基本論理ゲートの組合せでさまざまな機能をもつ回路を実現可能

量子ゲート

1量子ゲート



- NOT $|0\rangle \rightarrow |1\rangle$ $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

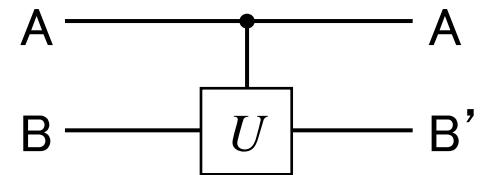
- Phase $|0\rangle \rightarrow e^{i\phi}|0\rangle$

- Hadamard

$$|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

2量子ゲート

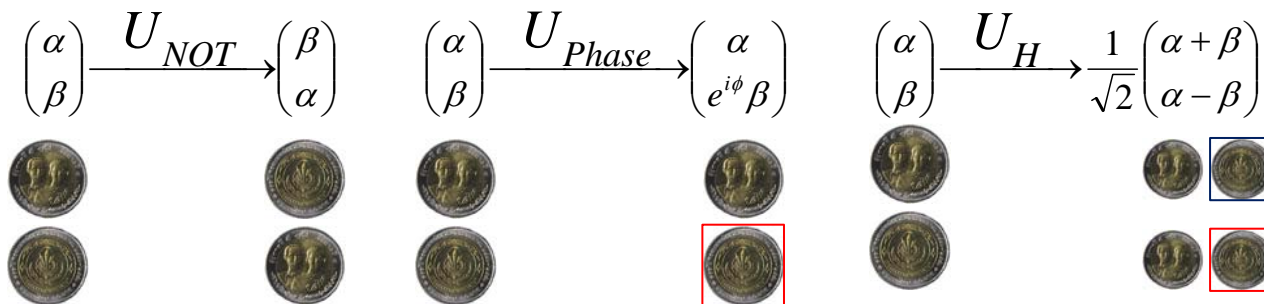
- 制御NOT
- 制御Phase



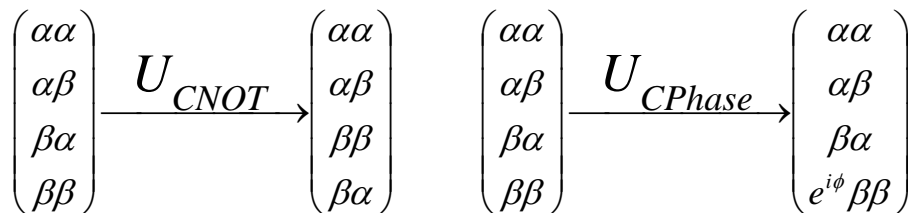
$$|in\rangle \xrightleftharpoons[U^{-1}]{U} |out\rangle \quad \text{ユニタリ変換 (可逆変換)}$$

量子ゲート

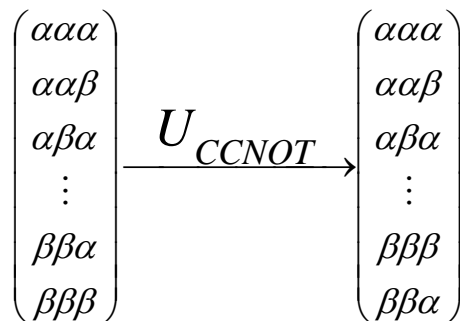
1量子ゲート NOTゲート、Phaseゲート、Hadamardゲート



2量子ゲート 制御NOTゲート、制御Phaseゲート



3量子ゲート 制御-制御NOTゲート (Toffoliゲート)



$$U_{NOT} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$U_{Phase} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{pmatrix}$$

$$U_H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

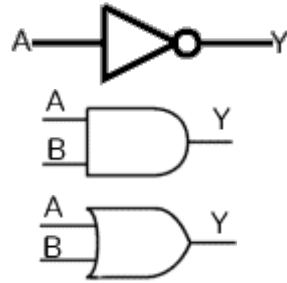
$$U_{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$U_{CPhase} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\phi} \end{pmatrix}$$

現在のコンピュータと量子コンピュータ

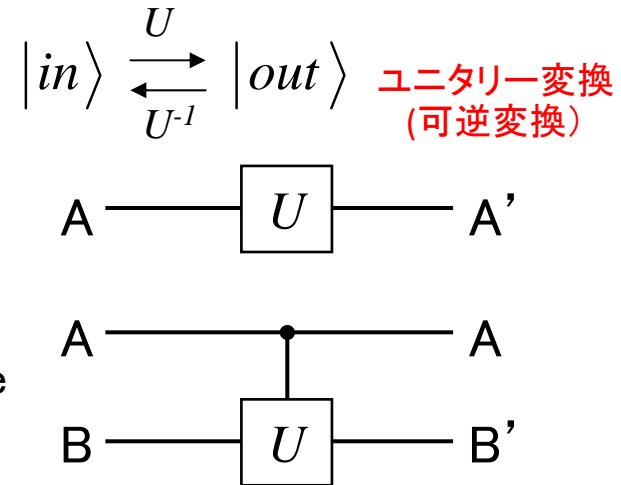
基本論理ゲート

- NOT(否定)
- AND(論理積)
- OR(論理和)
- 基本論理ゲートの組合せでさまざまな機能をもつ回路を実現可能



量子ゲート

- NOT
- Phase
- Hadamard
- 制御NOT
- 制御Phase



・ エネルギー消費問題

可逆論理ゲートの考案(1980年代前半: Bennet、Benioff、Feynman、Deutsch)

・ 公開鍵暗号(RSA暗号)

暗号化・復号に大きな2つの素数 p , q を利用する。復号するには、秘密鍵と p , q を知らないと難しい。

→ Shorの因数分解アルゴリズム(1994)により崩壊?

・ データ探索問題

Groverの検索アルゴリズム(1996)

名前 → 電話番号

・ 量子並列化

Deutsch-Jozsa のアルゴリズム

QC/QIPを実現するための量子情報リソース

さまざまな量子ビット

量子ビット(Qubit)	“0”	“1”
単一光子	$ V\rangle (\uparrow\rangle)$ $ R\rangle (V\rangle + i H\rangle)$	$ H\rangle (\leftrightarrow\rangle)$ $ L\rangle (V\rangle - i H\rangle)$
量子ドット	$ ground\ state\rangle$	$ excited\ state\rangle$
超伝導量子ビット	$ N=0\rangle$	$ N=1\rangle$
スピン	$ \uparrow\rangle$	$ \downarrow\rangle$

直線偏光
円偏光

狭い空間に閉じ込めた電子やイオンの電子状態

超伝導状態のループを貫く磁束量子

分子内の電子スピンや核スピン

分子スピン量子コンピュータ

量子情報科学

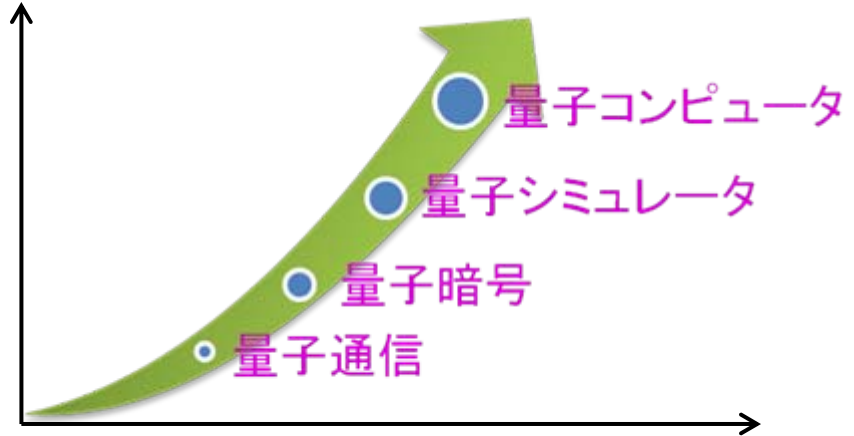
粒子の波動性を活用する情報科学

波動関数の重ね合わせ状態
絡み合い状態(EPR対)
量子状態の非クローン性



情報伝達の安全性を保障,
量子並列化による高速演算, ...

複雑さ



□ 理論

- ◆ 量子情報理論
- ◆ 量子アルゴリズム

□ 実験・実装

- ◆ 量子情報のリソースとなりうる量子システムの探索
- ◆ 量子情報処理の実現(初期化、演算、記録、読み出し)

量子コンピュータを実現するには

D. P. DiVincenzoによる5つの必要条件 (1996):

1. 量子ビットの拡張性(scalability)
2. 量子ビットの初期化(initialization)
3. 量子状態の長い継続性(long decoherence)
4. 量子ゲートによる制御(gate operation)
5. 演算結果の出力(readout)

物理系

情報の削除

情報の記憶

情報操作

物理系の観測

時間のリセット

技術
時間制御

測定・検出

分子内の電子・核スピン

非平衡状態の生成

分子と外界の相互作用を
遮滅

パルス磁気共鳴分光法

スピン磁気モーメントの
観測

量子コンピュータを実現するには

D. P. DiVincenzoによる5つの必要条件 (1996):

1. 量子ビットの拡張性(scalability)
2. 量子ビットの初期化(initialization)
3. 量子状態の長い継続性(long decoherence)
4. 量子ゲートによる制御(gate operation)
5. 演算結果の出力(readout)

物理系

情報の削除

情報の記憶

情報操作

物理系の観測

時間のリセット

技術
時間制御

測定・検出

分子内の電子・核スピン

非平衡状態の生成

分子と外界の相互作用を
遮滅

パルス磁気共鳴分光法

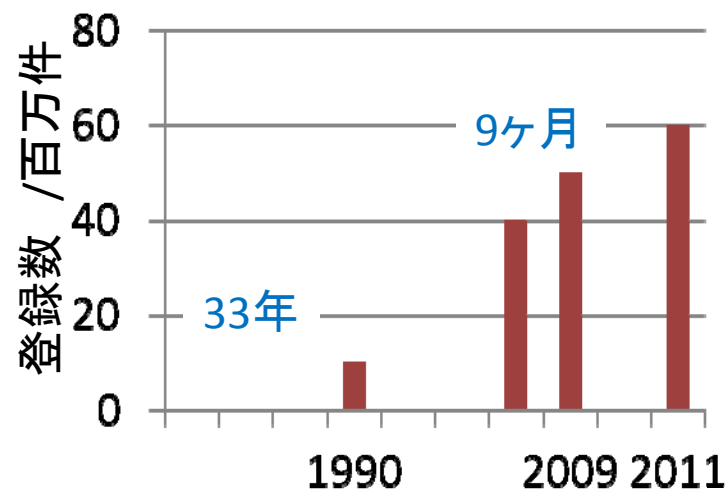
スピン磁気モーメントの
観測

物質世界の広がり

Chemical Abstracts Service

The screenshot shows the CAS Media Library website interface. At the top, there is a navigation bar with links for ACS, Journals, C&EN, and CAS. Below this is the CAS logo and an advanced search box. The main content area features a video player with a blue background and the text "5,000 万件" (50 million items) prominently displayed. To the left of the video player are several buttons labeled "Home", "SciFinder メディア", "CAS メディア", and "STN メディア". The bottom of the page contains a footer with navigation links and the copyright notice "Copyright © 2012 American Chemical Society".

世界最大の化学物質データベース
に登録されている6000万件以上

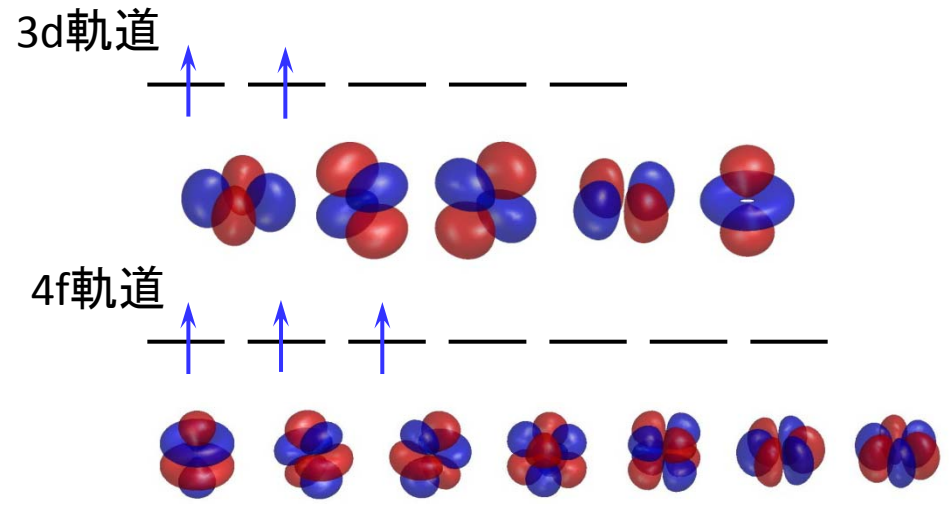
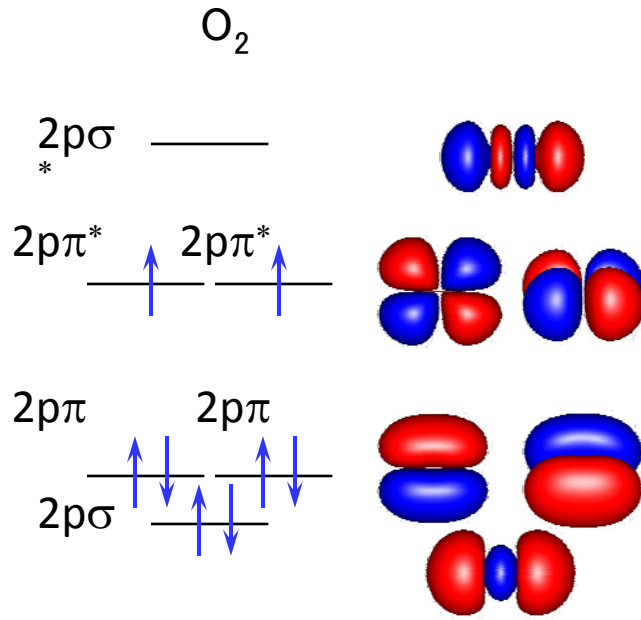


多くが安定な閉殻分子
結合電子対を形成して、
電子スピンの性質が顕
わにでてこない。

分子スピンの系

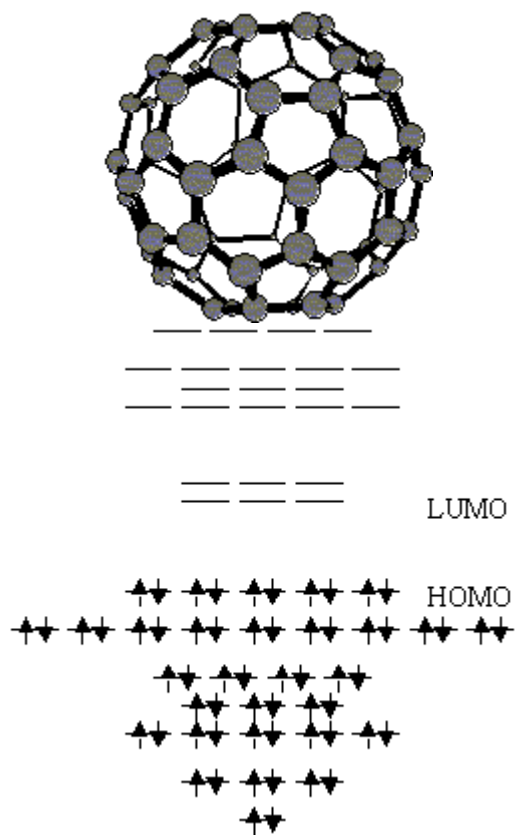
- 代表的な常磁性分子(開殻系)

- 酸素分子 分子軌道が縮重
- 有機ラジカル(NOラジカル) 電子数が奇数
- 遷移金属錯体 遷移金属、希土類のd、f軌道の縮重

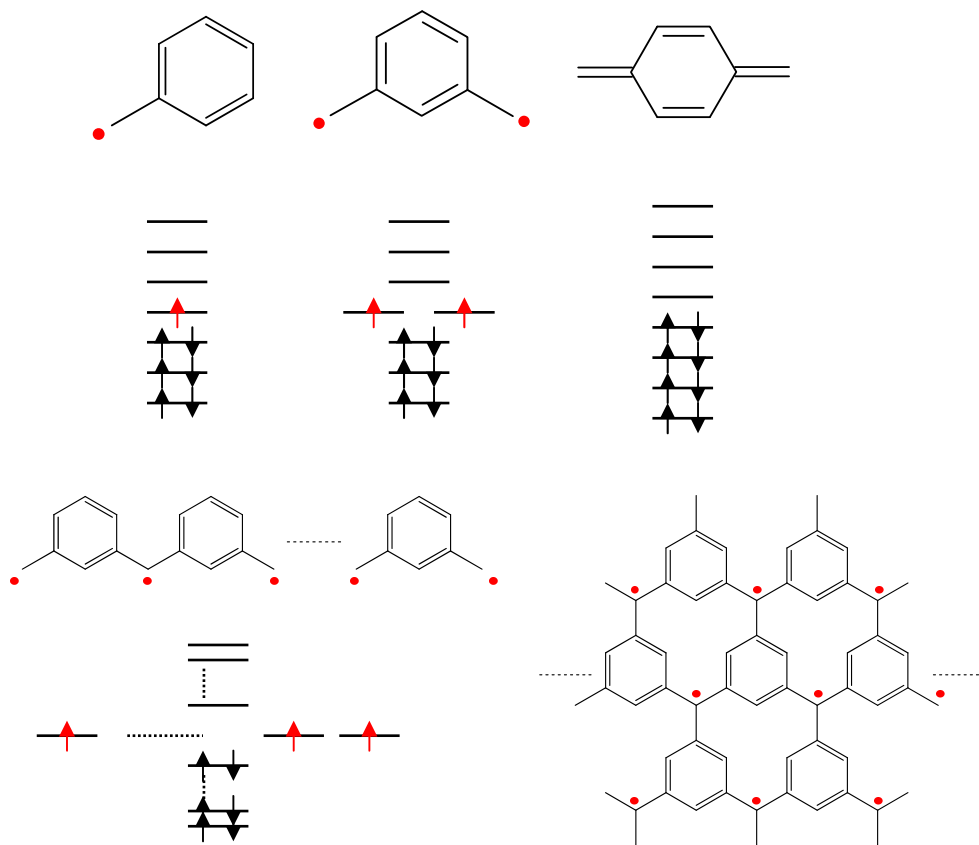


遷移金属元素のd、f軌道よりも高い縮重度を 分子軌道にもたせる

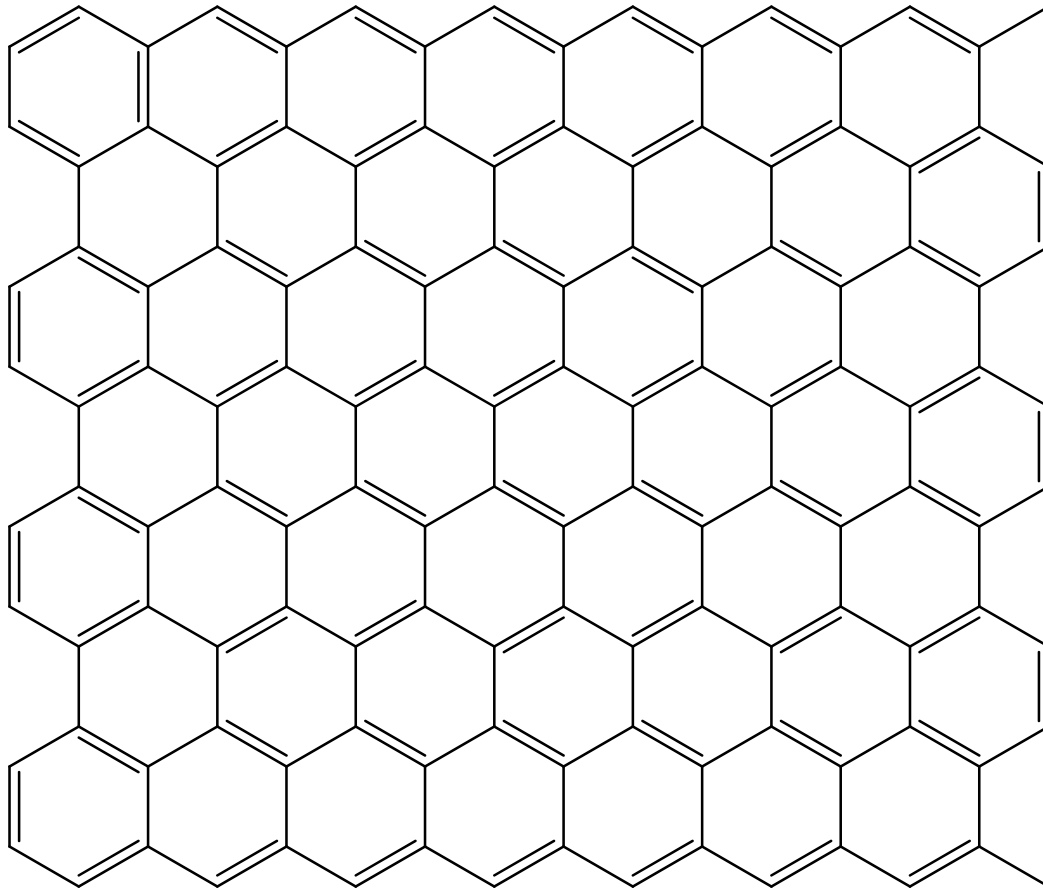
分子の高い幾何学的な
対称性



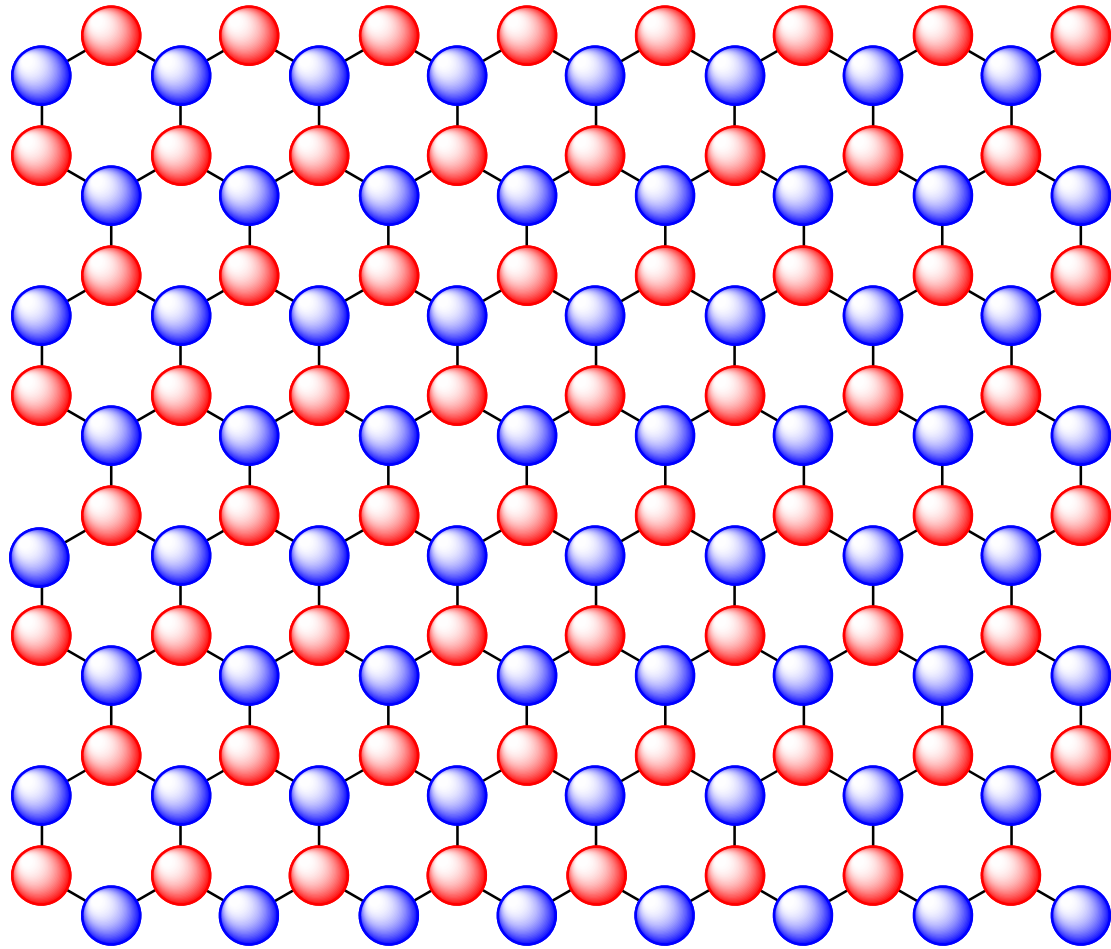
π 共役系の広がりを利
用(トポロジック的対称性)



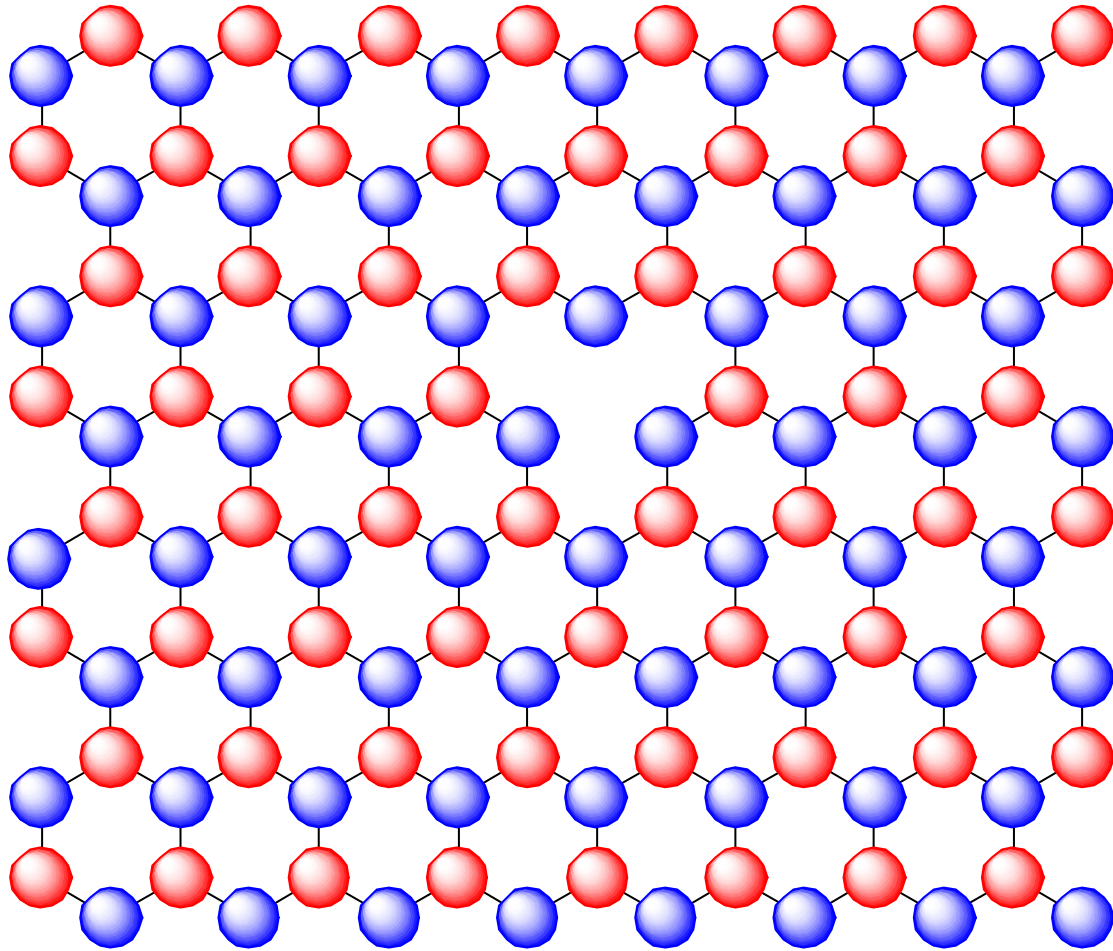
グラフェン



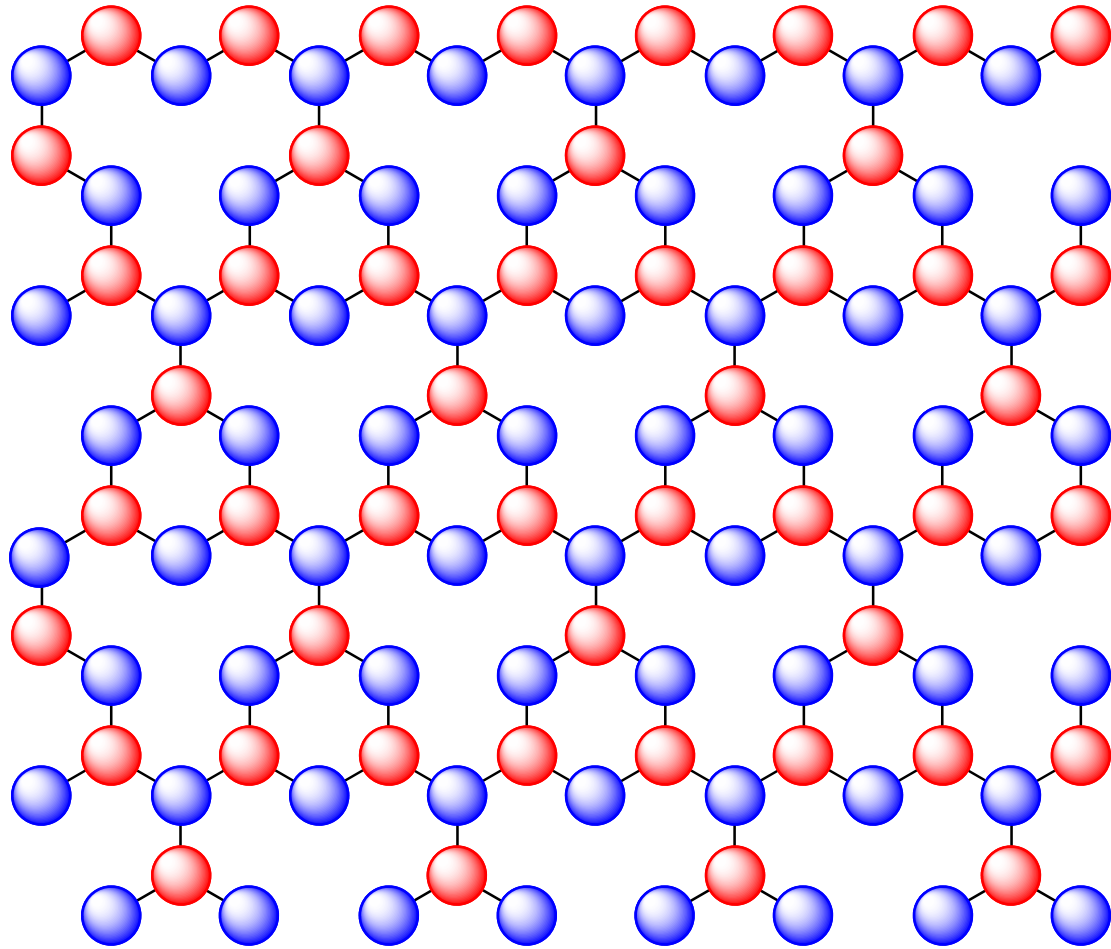
グラフェン



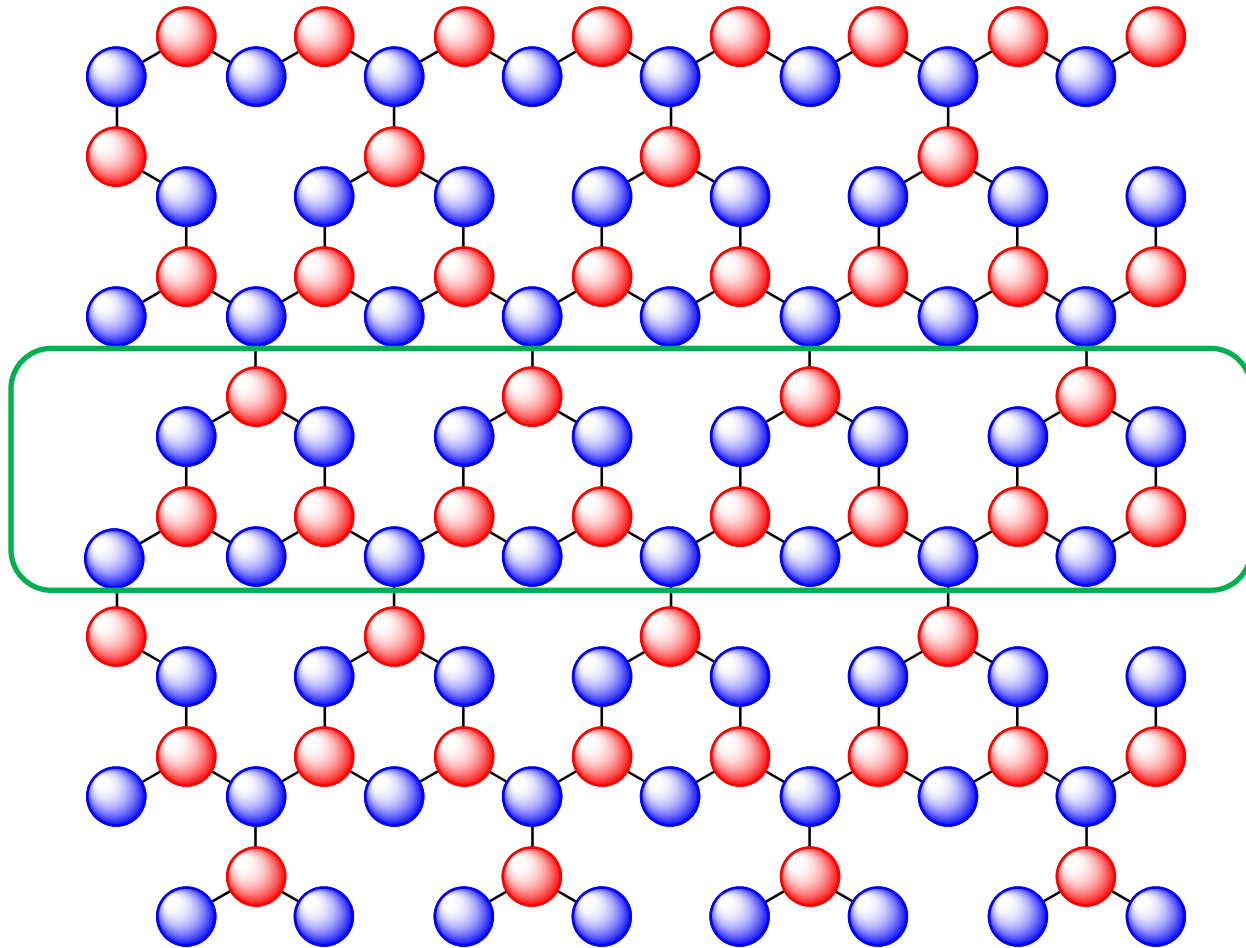
グラフェン



グラフェン

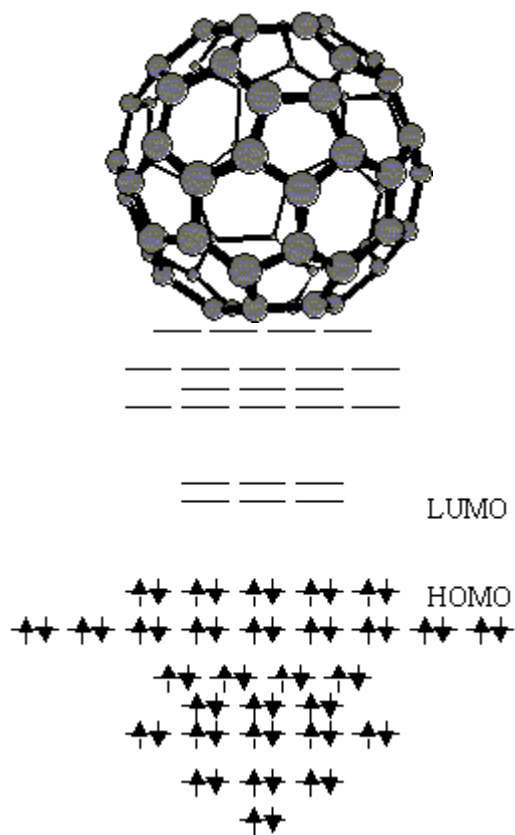


グラフェン

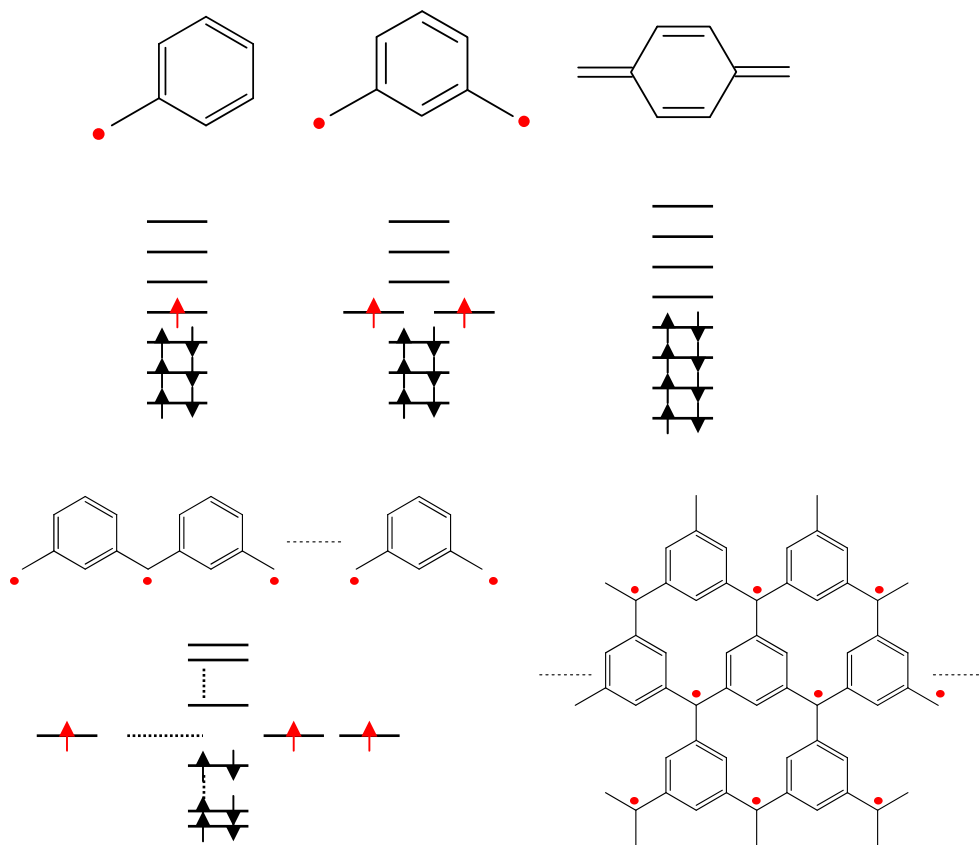


遷移金属元素のd、f軌道よりも高い縮重度を 分子軌道にもたせる

分子の高い幾何学的な
対称性



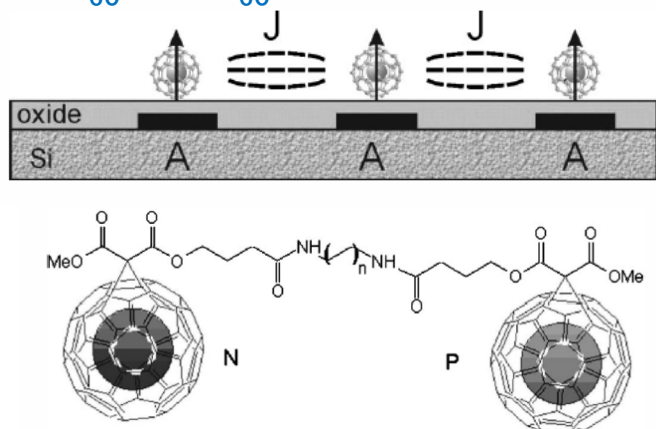
π 共役系の広がりを利
用(トポロジー的対称性)



電子スピン系を用いた量子情報制御

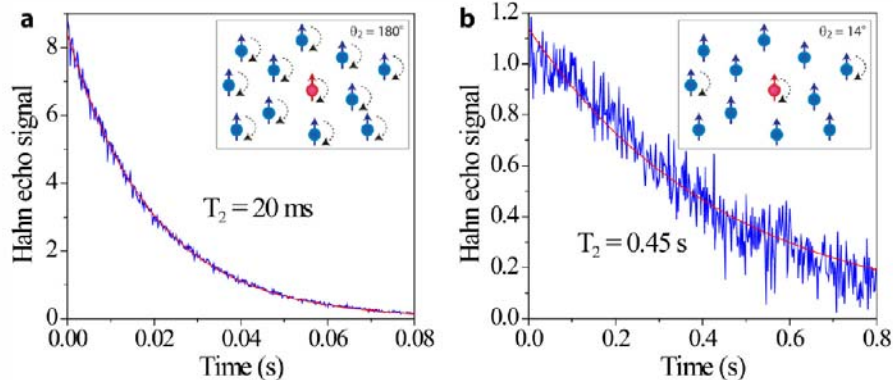
原子内包フラーレン

N@C₆₀, P@C₆₀



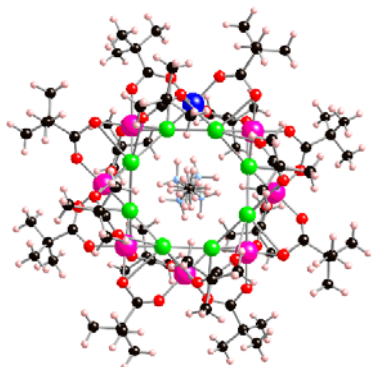
Fullerene-based electron-spin quantum computer
W. Harneit, *Phys. Rev. A*, **65**, 032322 (2002).

シリコン²⁸Si結晶中のリン



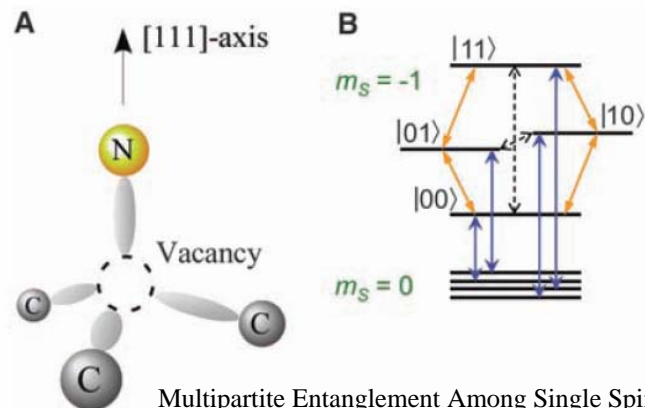
Electron spin coherence exceeding seconds in high purity silicon
J. J. L. Morton, K. Itoh et al., *Nature Materials*, in press(2011).

遷移金属クラスター



Will spin-relaxation times in molecular magnets permit quantum information processing?
J. J. L. Morton, R. E. P. Winnpenny et al., *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 057201 (2007).

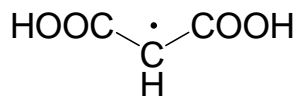
ダイヤモンド中のNVセンター



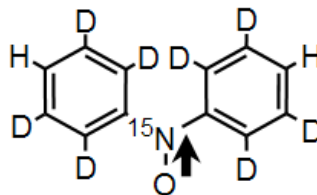
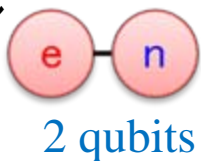
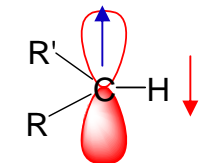
Multipartite Entanglement Among Single Spins in Diamond
P. Neumann, N. Mizuochi, et al., *Science*, **320**, 1326 (2008).

分子スピン量子コンピュータモデル

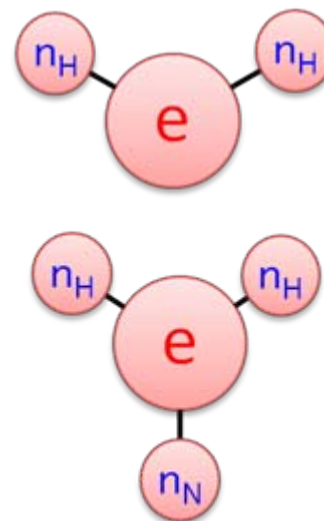
電子スピンバスモデル(電子-核スピン系)



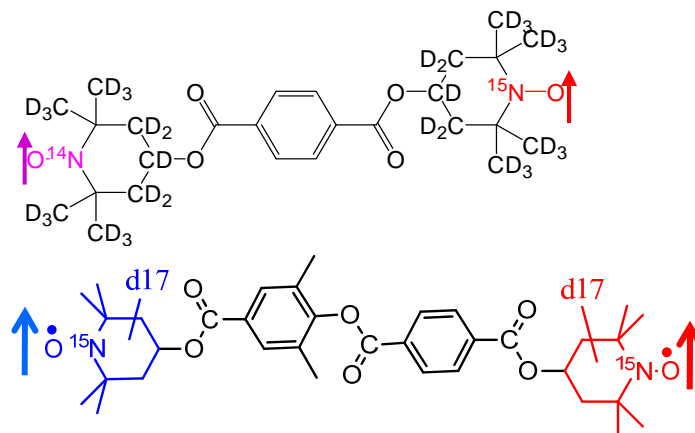
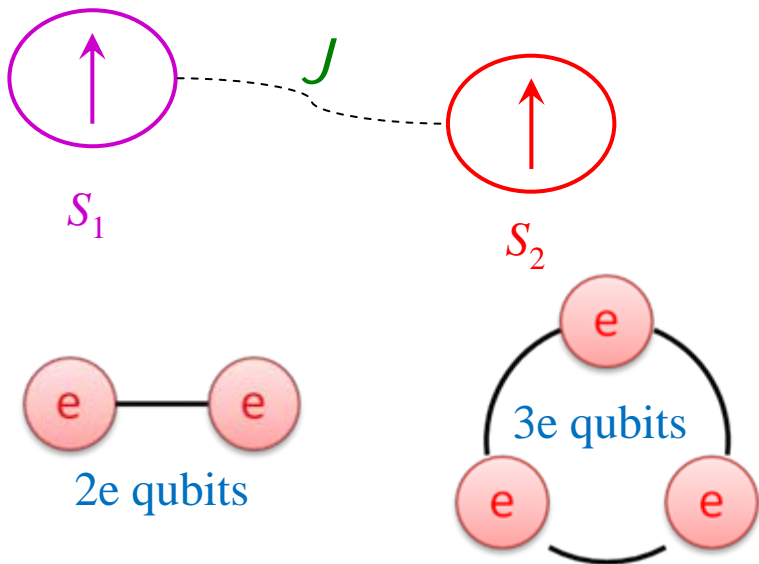
マロニルラジカル



同位体標識した
DPNO



多電子スピン系



磁氣的に非等価なスピンサイトを配置

弱く相互作用する安定ラジカル系
ビラジカル、トリラジカル、テトララジカル

分子スピン系の利点

- 電子スピンの高いスピン分極
- 電子スピンの非局在化(動きやすさ)
- 電子スピンの長いスピン-格子緩和時間と位相記憶時間／核スピンの長い位相記憶時間
 - デコヒーレンス問題に有利
- 核スピンの情報を介在する電子スピンバスとして利用可能
- 分子設計による分子の多様性を活用可能
 - 電子-核スピン間の超微細結合相互作用や電子スピン間の相互作用(交換相互作用、双極子相互作用)の制御可能
 - 系に含まれるスピンの数を増やすことが可能

量子コンピュータを実現するには

D. P. DiVincenzoによる5つの必要条件 (1996):

1. 量子ビットの拡張性(scalability)
2. 量子ビットの初期化(initialization)
3. 量子状態の長い継続性(long decoherence)
4. 量子ゲートによる制御(gate operation)
5. 演算結果の出力(readout)

物理系

情報の削除

情報の記憶

情報操作

物理系の観測

時間のリセット

技術
時間制御

測定・検出

分子内の電子・核スピン

非平衡状態の生成

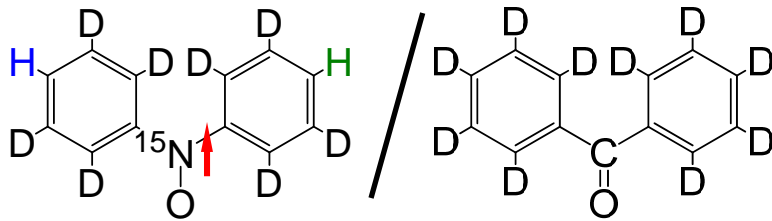
分子と外界の相互作用を
遮断

パルス磁気共鳴分光法

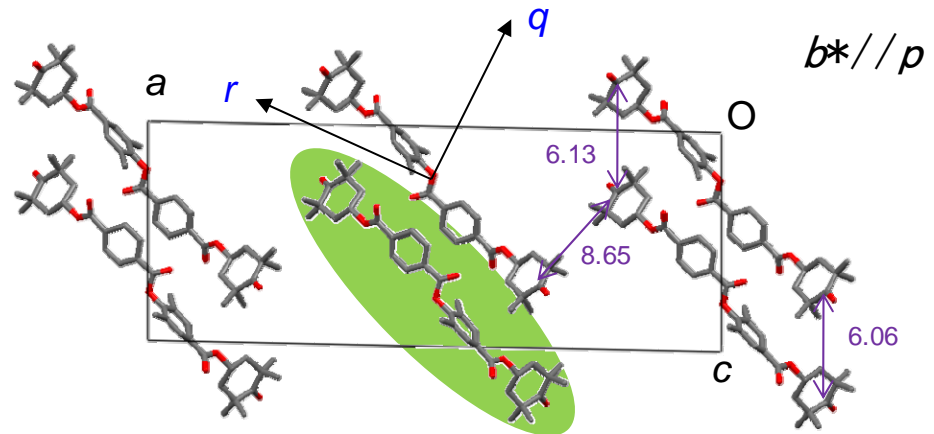
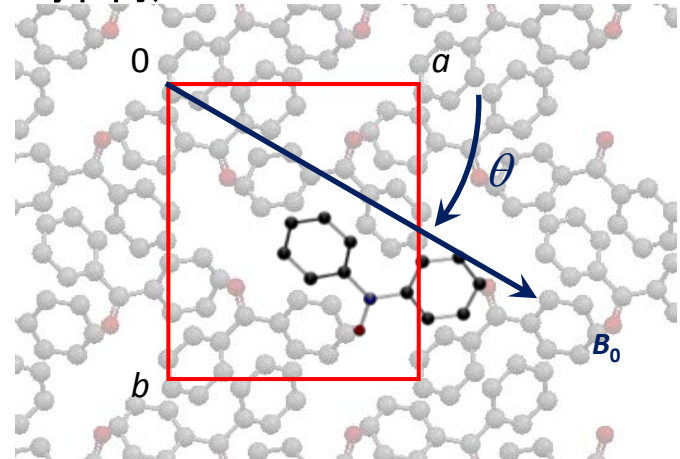
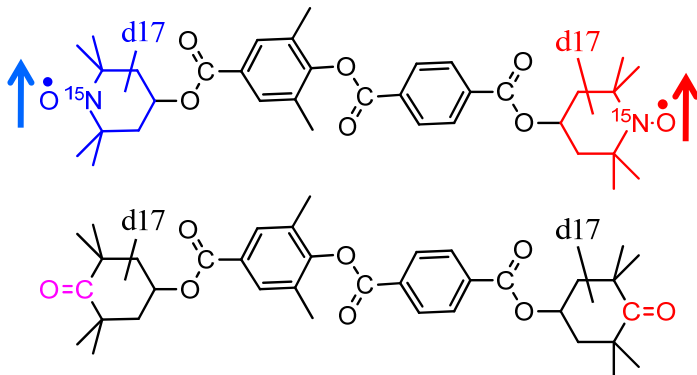
スピン磁気モーメントの
観測

デコヒーレンスの抑制

- エネルギーの散逸を逡減
 - スピン間の相互作用を弱くする
 - スピン系と周囲の相互作用を弱くする
 - スピン濃度を薄く(分子間相互作用の抑制)



希釈単結晶($1:10^2-10^3$)



量子コンピュータを実現するには

D. P. DiVincenzoによる5つの必要条件 (1996):

1. 量子ビットの拡張性(scalability)
2. 量子ビットの初期化(initialization)
3. 量子状態の長い継続性(long decoherence)
4. 量子ゲートによる制御(gate operation)
5. 演算結果の出力(readout)

物理系

情報の削除

情報の記憶

情報操作

物理系の観測

時間のリセット

技術

時間制御

測定・検出

分子内の電子・核スピン

非平衡状態の生成

分子と外界の相互作用を
逡減

パルス磁気共鳴分光法

スピン磁気モーメントの
観測

パルス磁気共鳴分光

- 核磁気共鳴法 (パルスNMR、FT-NMR)
 - 核スピんに強いラジオ波パルスを照射
 - ラジオ波の周波数で回転する回転座標系でスピンの運動を観測



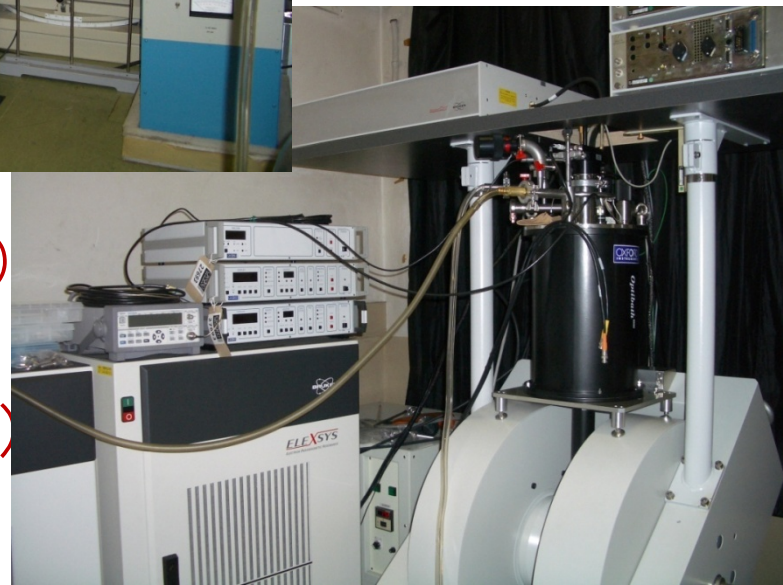
300MHz NMR分光器
基礎教育実験棟3階



Xバンド分光器
9.5 GHz

Qバンド分光器
34 GHz

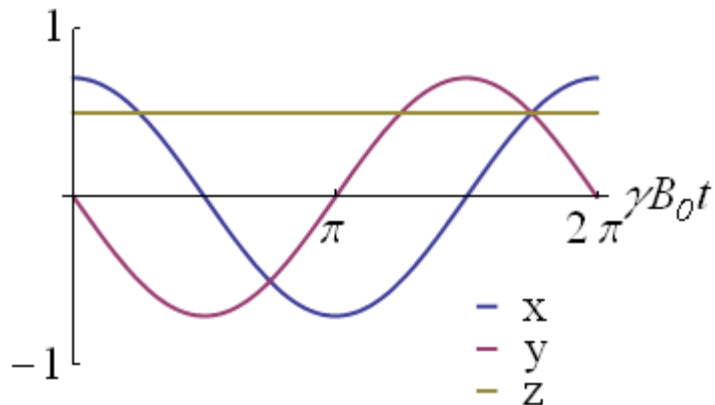
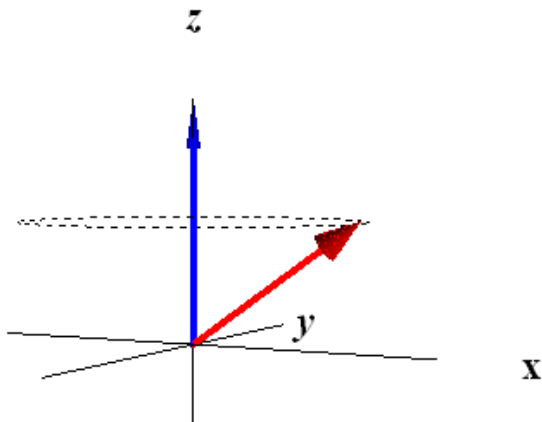
- 電子磁気共鳴法 (パルスESR、FT-ESR)
- 電子-核二重共鳴法 (パルスENDOR)
- 電子-電子二重共鳴法 (パルスELDOR)



スピン磁気モーメントの運動

$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} = \boldsymbol{\mu} \times \gamma \mathbf{B}_0$$

$\gamma = g\mu_B$; 磁気回転比



全磁化の運動方程式

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}_0$$

$$\mathbf{M} = \sum_i \boldsymbol{\mu}_i$$

$$\frac{dM_x}{dt} = \gamma M_y B_0, \quad \frac{dM_y}{dt} = -\gamma M_x B_0, \quad \frac{dM_z}{dt} = 0$$

$$\frac{d^2 M_x}{dt^2} = -\gamma^2 B_0^2 M_x$$

$$\frac{d^2 M_y}{dt^2} = -\gamma^2 B_0^2 M_y$$

$$\frac{d^2 M_z}{dt^2} = 0$$

固有振動数

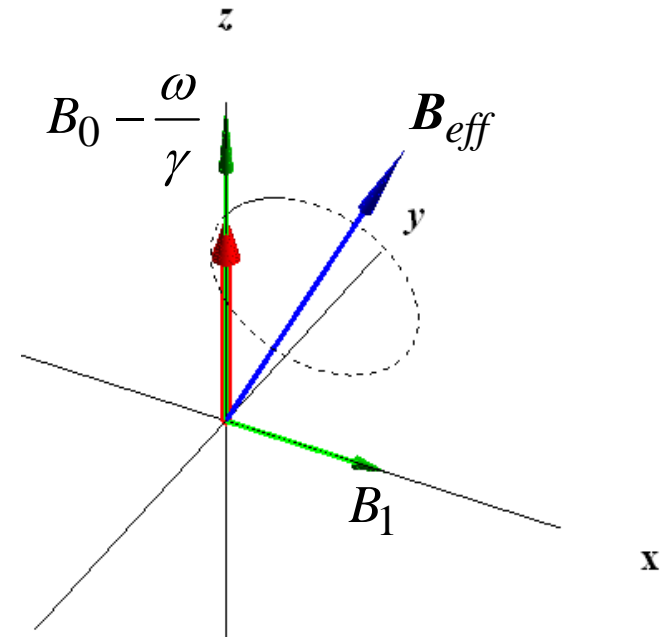
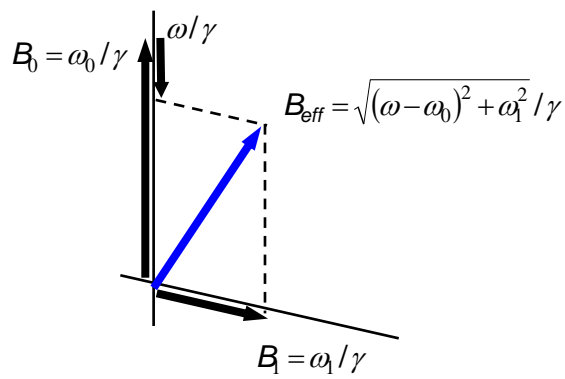
$$\omega_0 = \gamma B_0$$

交流磁場中における磁気モーメント (回転座標系)

$$\begin{aligned}\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} &= \boldsymbol{\mu} \times \gamma(\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1(t)) \\ &= \boldsymbol{\mu} \times \gamma(\mathbf{B}_0 + B_1 \exp(i\omega t))\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{d'\boldsymbol{\mu}}{dt} &= \boldsymbol{\mu} \times \gamma \left[\left(B_0 - \frac{\omega}{\gamma} \right) \mathbf{k} + B_1 \mathbf{i} \right] \\ &= \boldsymbol{\mu} \times \gamma \mathbf{B}_{eff}\end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_{eff} = \left(B_0 - \frac{\omega}{\gamma} \right) \mathbf{k} + B_1 \mathbf{i}$$

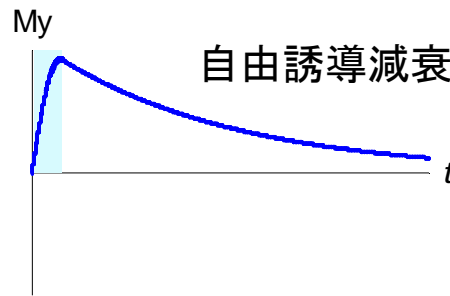


パルス磁気共鳴分光

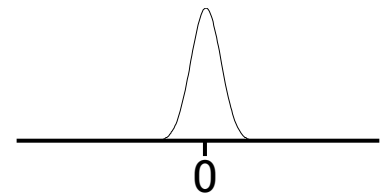
- 核磁気共鳴法 (パルスNMR、FT-NMR)
 - 核スピんに強いラジオ波パルスを照射
 - ラジオ波の周波数で回転する回転座標系でスピンの運動を観測



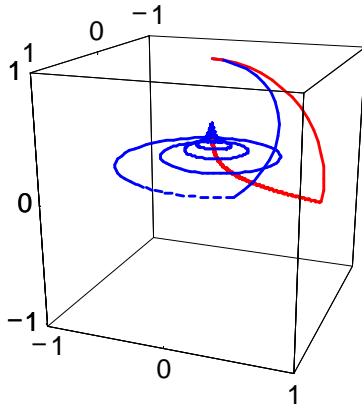
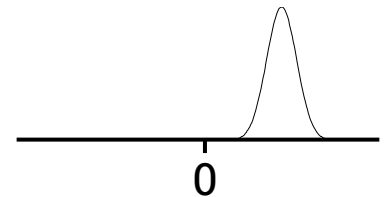
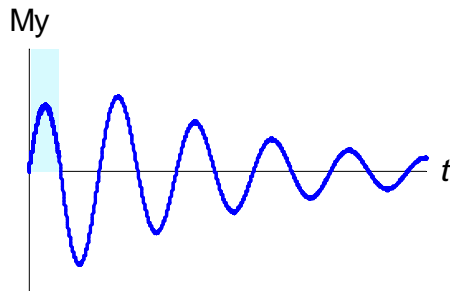
共鳴時



FT

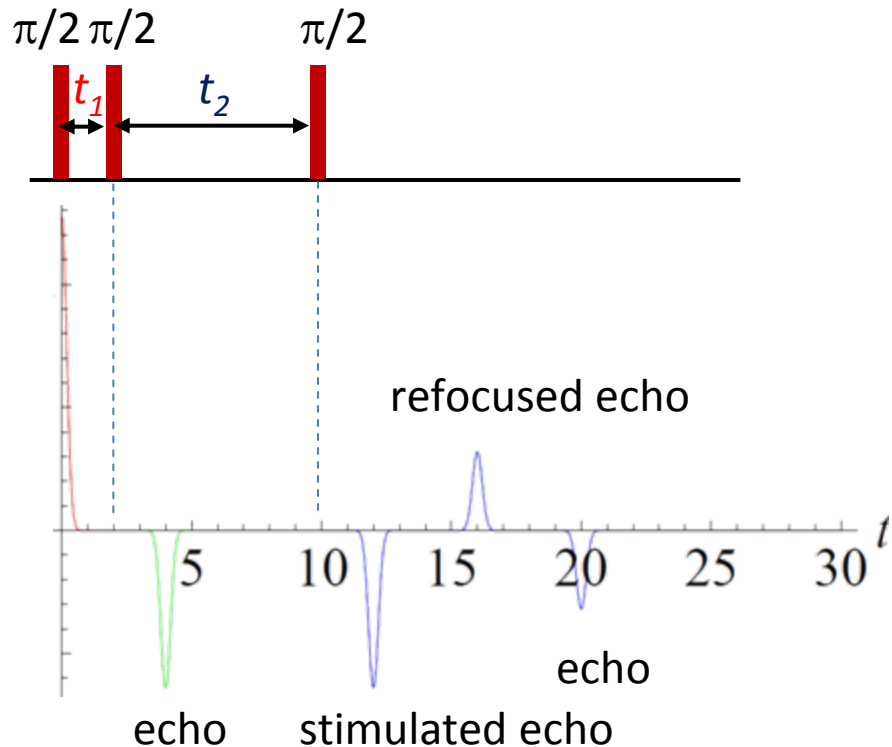
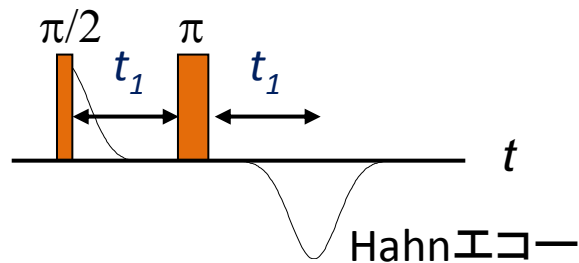
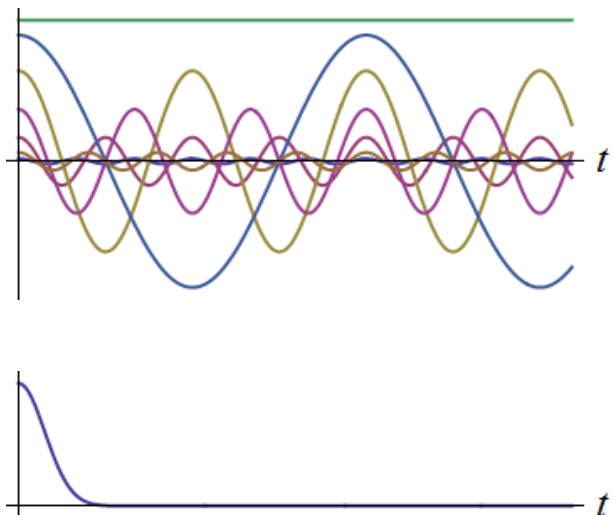
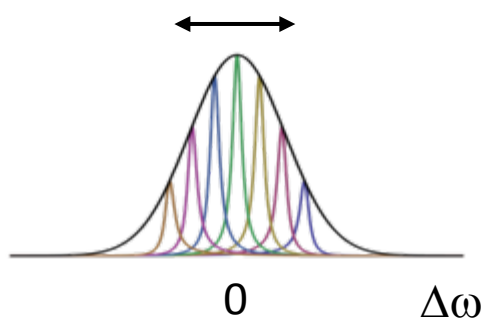


非共鳴時



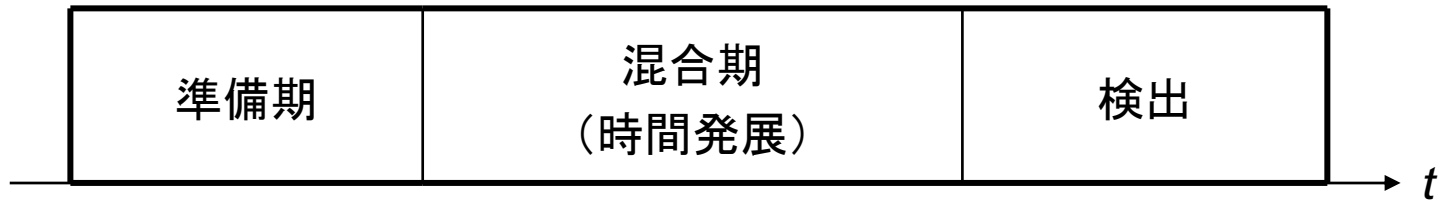
複数パルスによるスピン位相の再集束 (スピンエコー)

不均一磁場

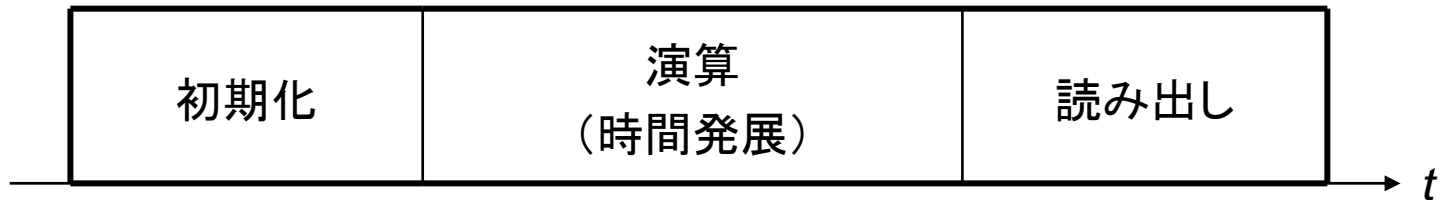


量子状態制御技術としてのパルス電子磁気共鳴分光

分光測定



QC実験

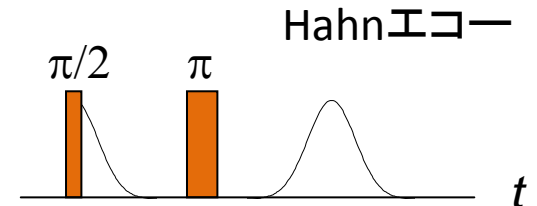
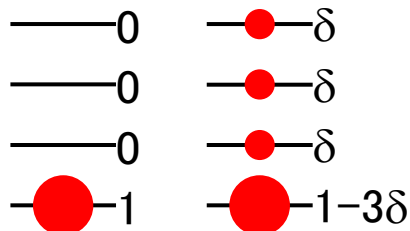


純粋状態
擬純粋状態

選択的／非選択的スピン回転
パルス強度、パルス幅

自由誘導減衰
スピンエコー

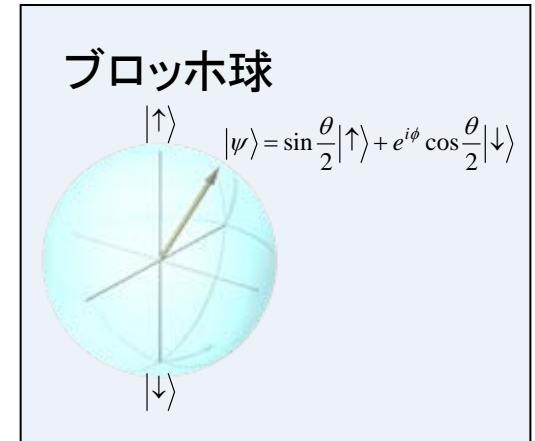
$\psi(t)$ の時間制御



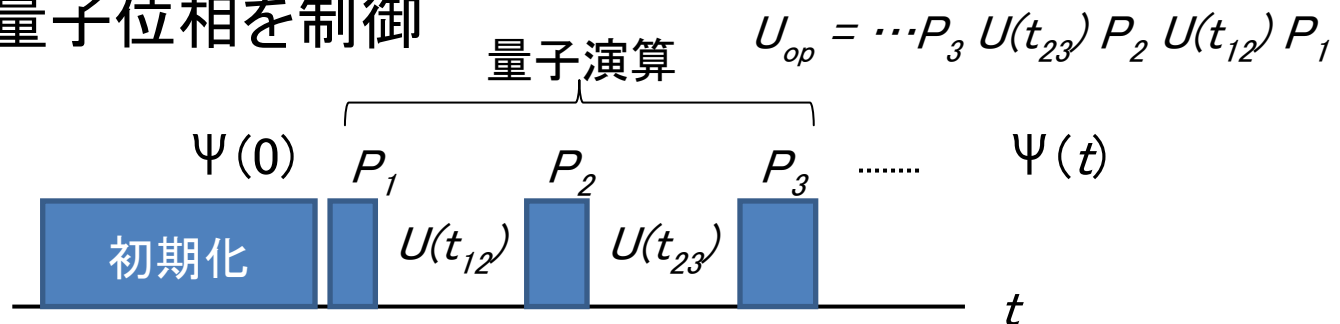
パルス磁気共鳴における量子状態制御

□ 適用可能なパルス

- デルタ関数的なパルス(ハードパルス)
 - 非選択的
- 有限のパルス幅をもつ矩形パルス(スピンの選択性と遷移の選択性)
 - 共鳴条件近傍での非選択パルス
 - 共鳴条件近傍での選択パルス(ソフトパルス)
- 波形制御したパルス



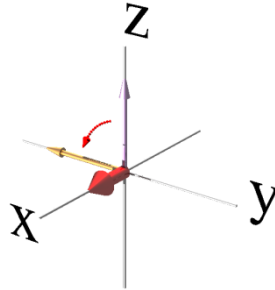
- いろいろなパルスの組み合わせ
- 複数パルスの間隔を制御して時間展開による量子位相を制御



パルス磁気共鳴におけるスピン回転と量子ゲート

□ $\pi/2$ x-パルス

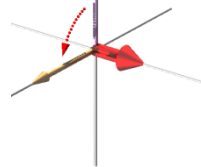
$$|\uparrow\rangle \xrightarrow{P_x(\pi/2)} \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle - i|\downarrow\rangle)$$



□ $\pi/2$ y-パルス

アダマールゲート

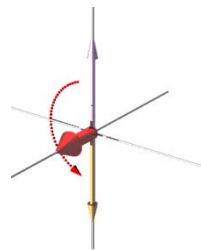
$$|\uparrow\rangle \xrightarrow{P_y(\pi/2)} \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$$



□ π x-パルス

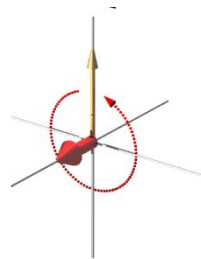
NOTゲート

$$|\uparrow\rangle \xrightarrow{P_x(\pi)} -i|\downarrow\rangle$$

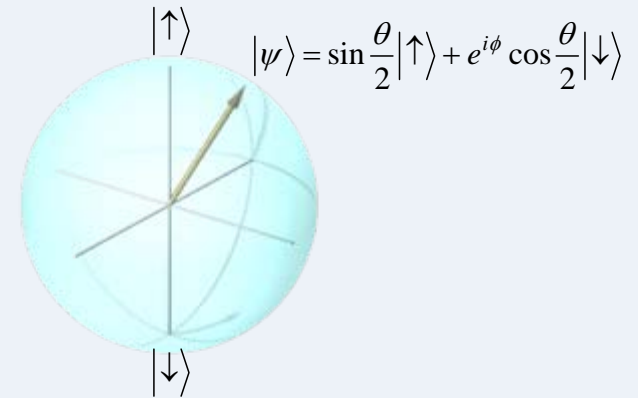


□ 2π x-パルス

$$|\uparrow\rangle \xrightarrow{P_x(2\pi)} -|\uparrow\rangle$$

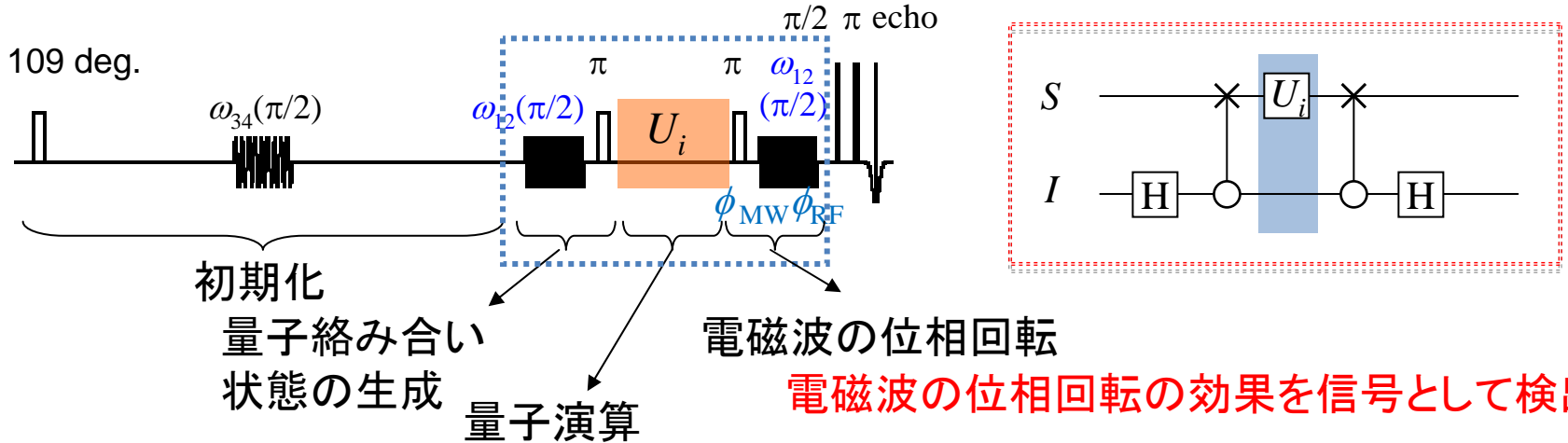


• ブロツホ球



スピノール (4π 周期性)

パルス電子-核二重共鳴を用いた電子-核スピン系の量子状態制御



$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle - |--\rangle) \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}}(|-+\rangle - \underline{|+-\rangle})$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|++\rangle + |--\rangle) \xrightarrow{X} \frac{1}{\sqrt{2}}(|-+\rangle + \underline{|+-\rangle})$$

$Z \updownarrow$ $Y \times$ \updownarrow

$$U_i = I$$

$$I_{echo} = \frac{1}{4}(-1 + \cos[\phi_{MW} - \phi_{RF}])$$

$$U_i = Z$$

$$\exp(-i\pi S_z) \quad P_x^{24}(2\pi)$$

$$I_{echo} = \frac{1}{4}(-1 - \cos[\phi_{MW} - \phi_{RF}])$$

$$U_i = X$$

$$\exp(-i\pi S_x) \quad P_x^{34}(\pi)P_x^{12}(\pi)$$

$$I_{echo} = -\frac{1}{4}$$

$$U_i = Y$$

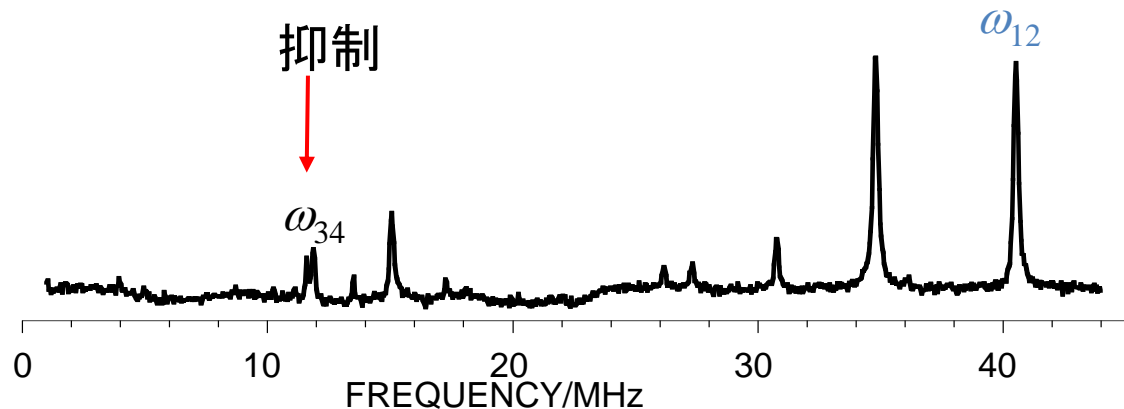
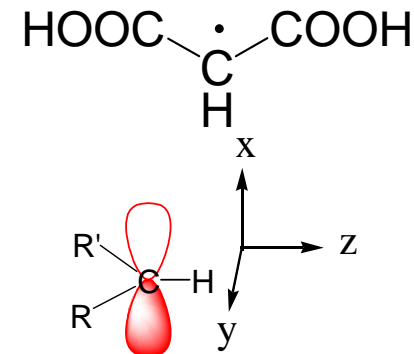
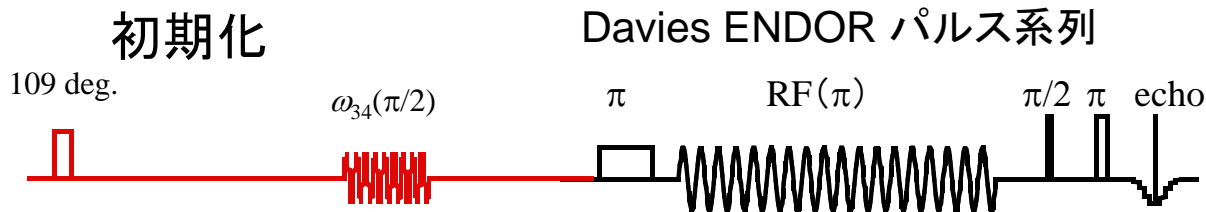
$$\exp(-i\pi S_y) \quad P_x^{24}(2\pi)P_x^{34}(\pi)P_x^{12}(\pi)$$

$$I_{echo} = -\frac{1}{4}$$

$$P_x^{24}(\theta)$$

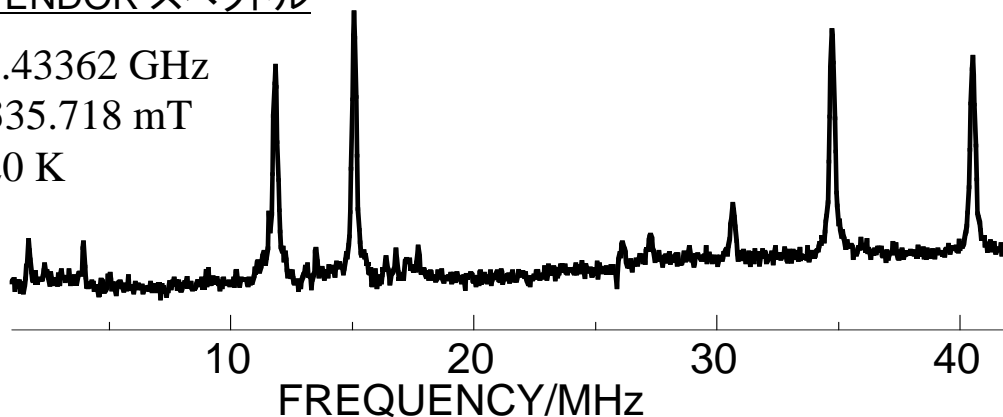
$$\rightarrow I_{echo} = -3\cos\theta + 4\cos\frac{\theta}{2}$$

パルス電子-核二重共鳴法による電子-核スピ ン系の初期化(擬純粋状態の生成)

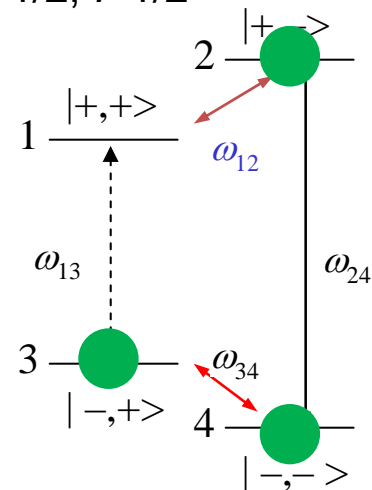


Davies ENDOR スペクトル

$\nu = 9.43362$ GHz
 $B = 335.718$ mT
 $T = 20$ K

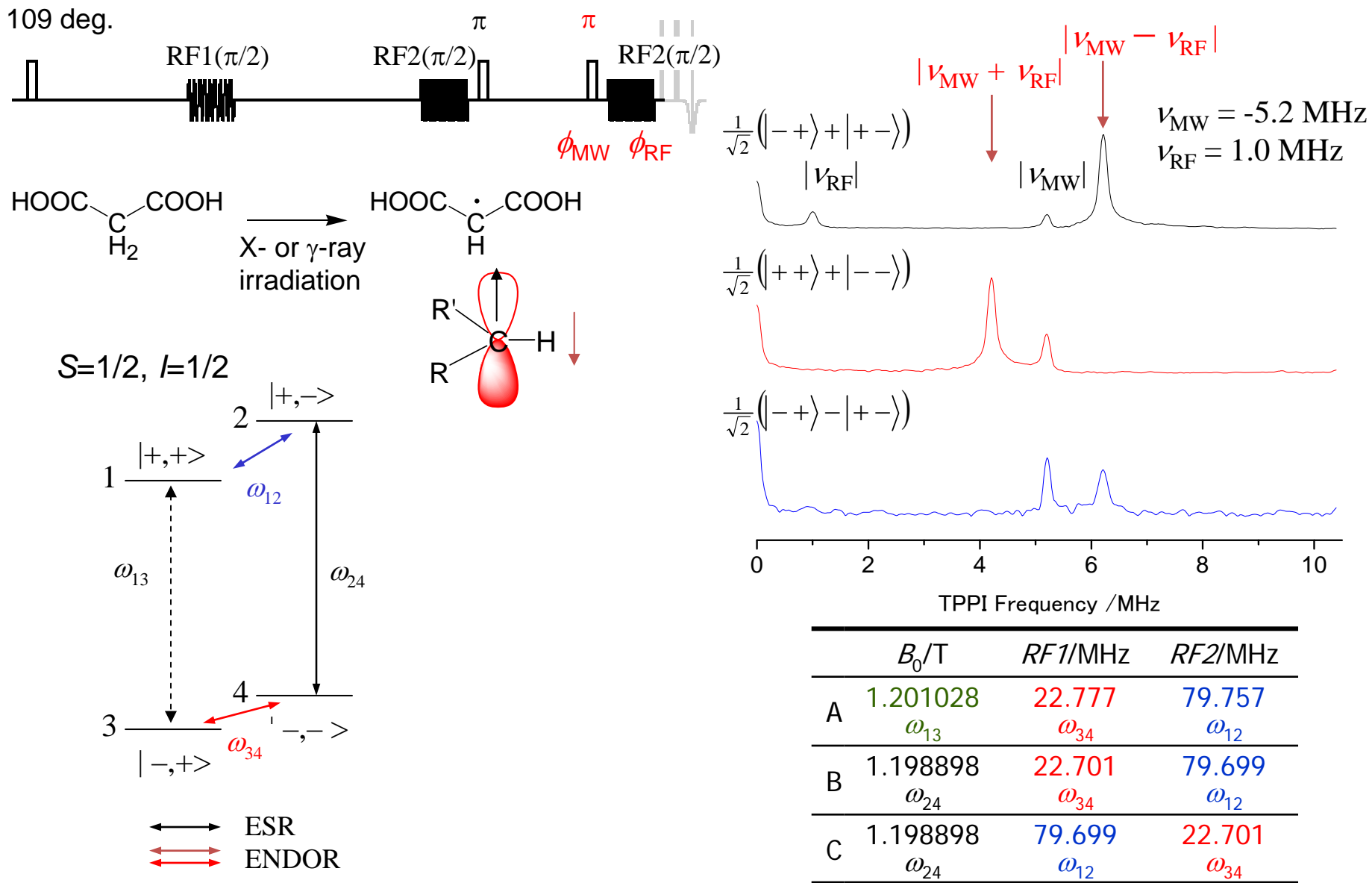


$S=1/2, I=1/2$

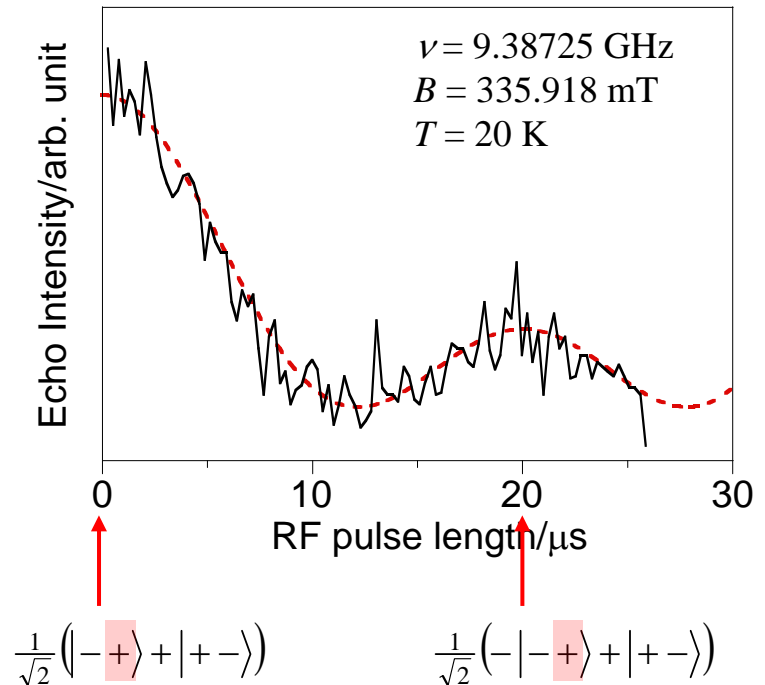
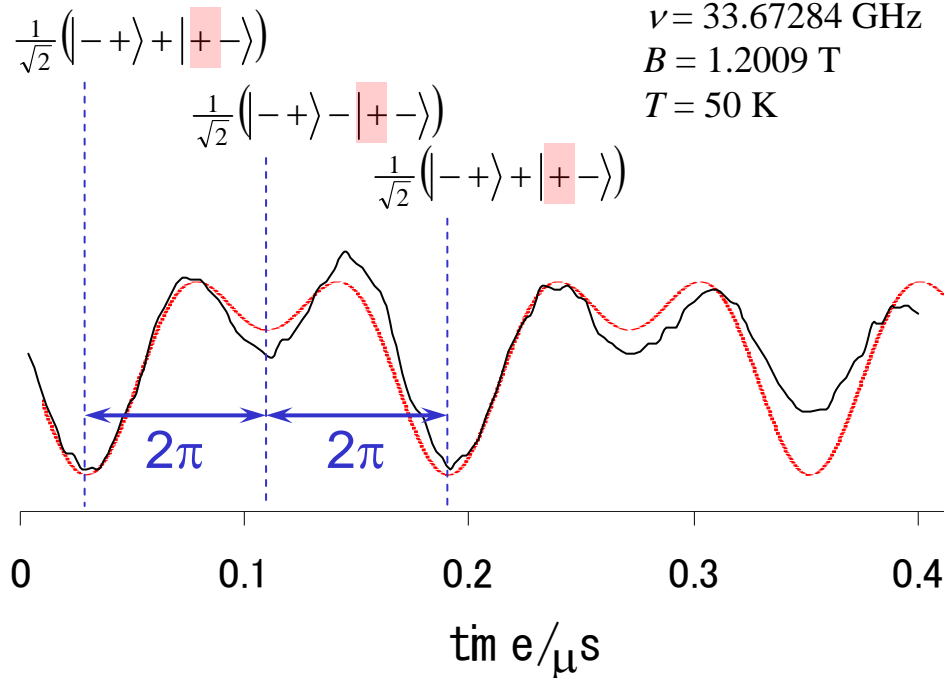
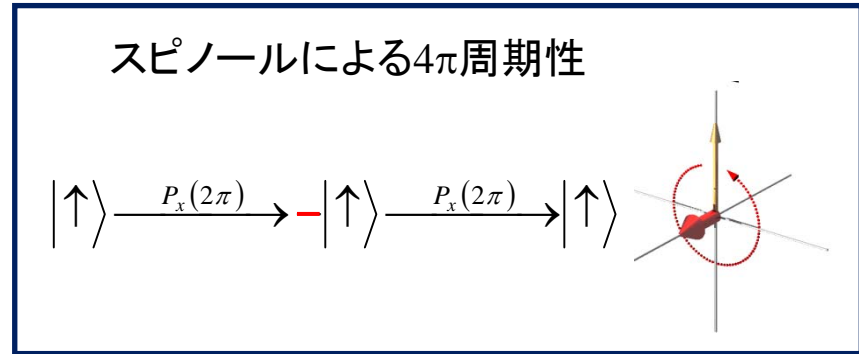
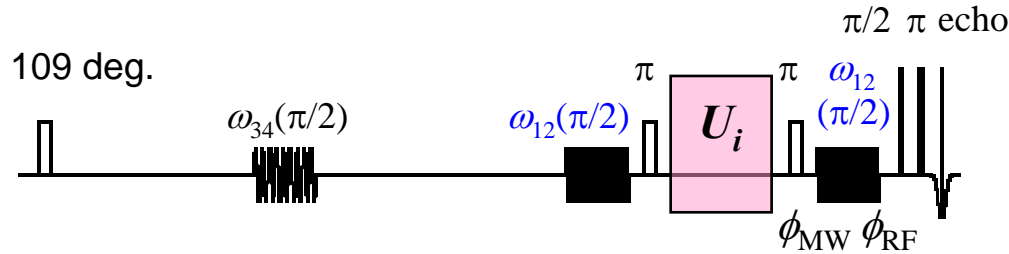


←→ ESR
 ←→ ENDOR

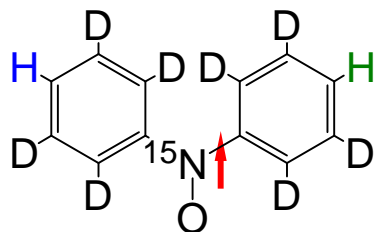
電子-核スピン系における量子絡み合い状態の観測



電子及び核スピン-1/2のスピンール性の実証 と量子状態変換



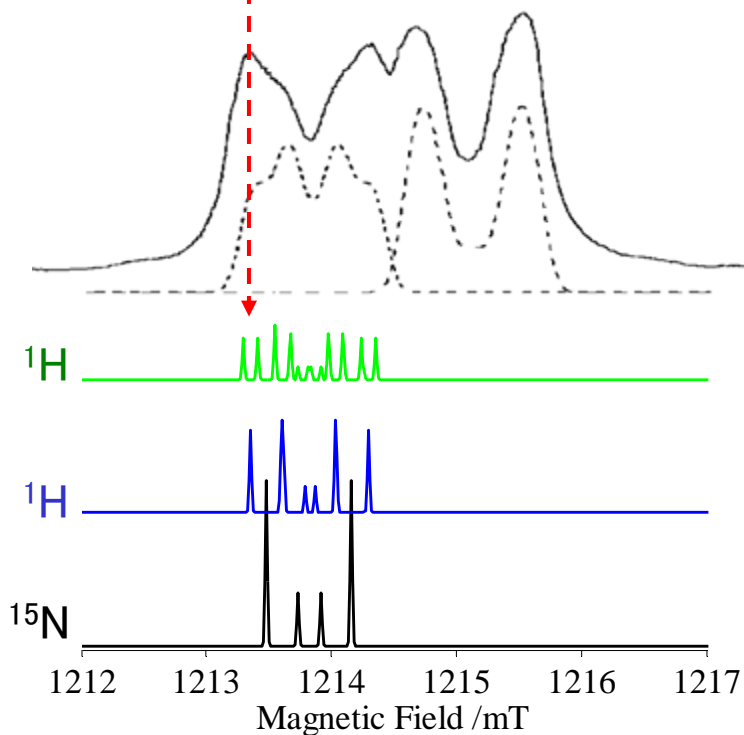
電子-多核システムとしての同位体標識DPNO



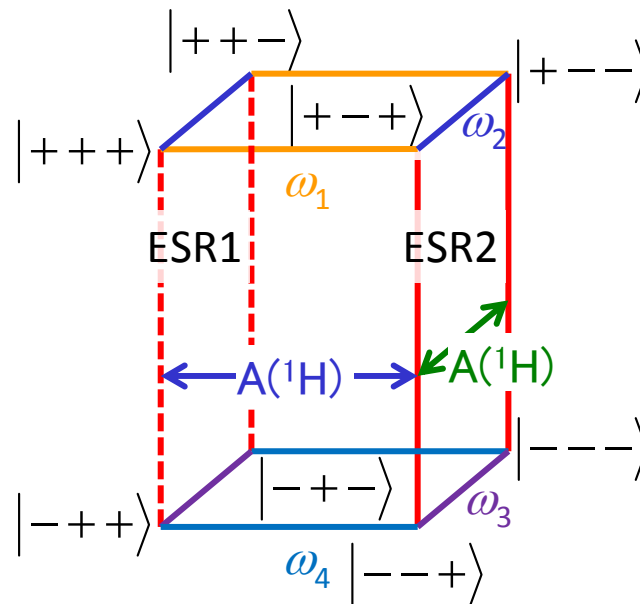
DP¹⁵NO-*d*₈

$T = 50.0$ K
 $\nu_{\text{MW}} = 34.10594$ GHz
 $\theta_{ab} = 30$ deg.

モニターするESR遷移

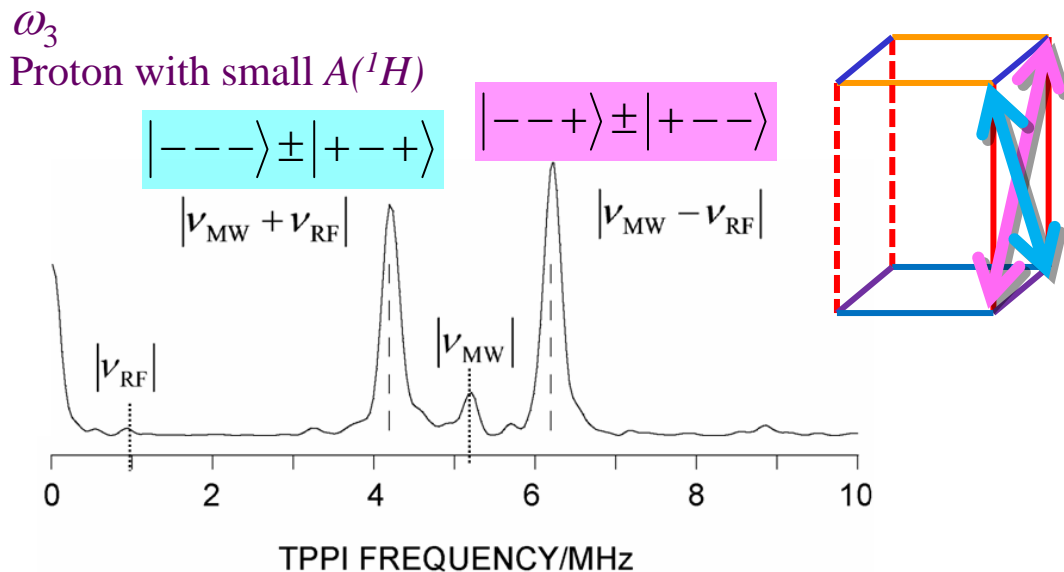
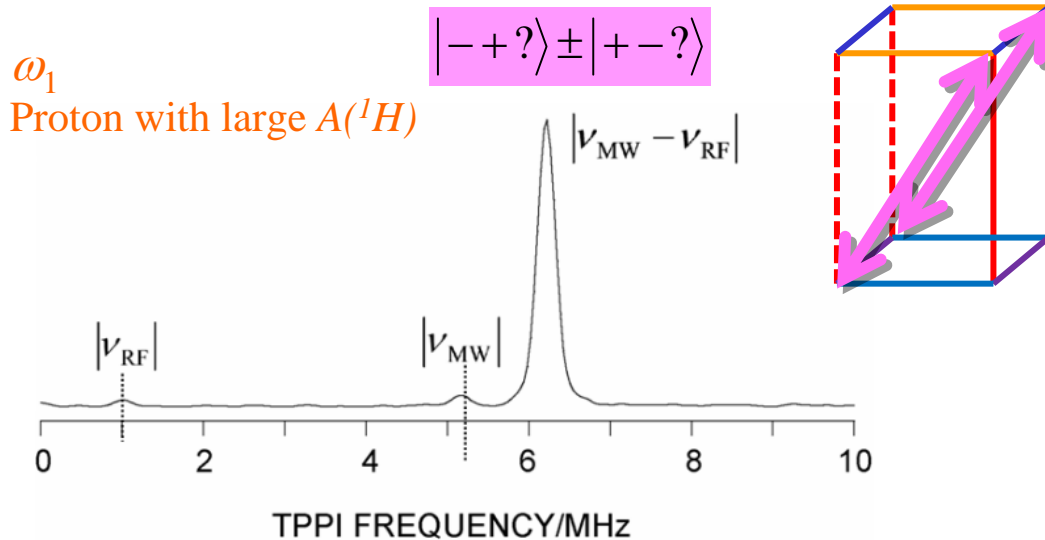
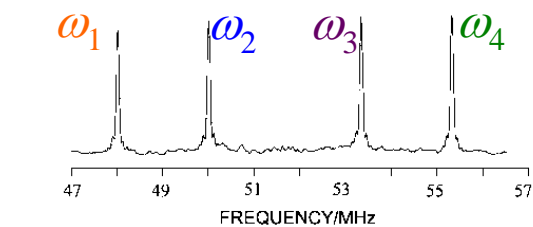
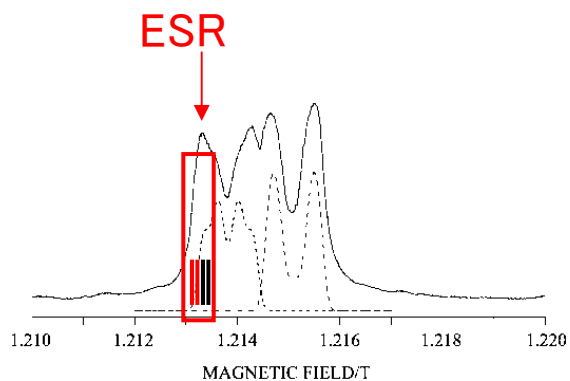
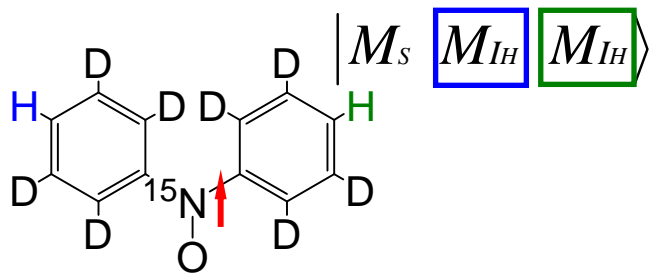


$|eH_1H_2\rangle$

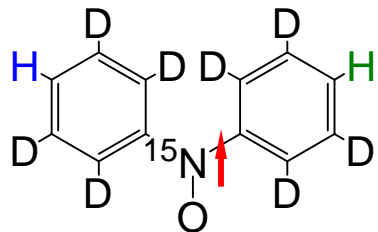


- ESR1 & 2 : マイクロ波パルスにより操作可能なESR遷移
- $\omega_1 - \omega_4$: RFパルスにより操作可能なNMR遷移

電子-多核スピンの系に置ける量子絡み合い状態の観測

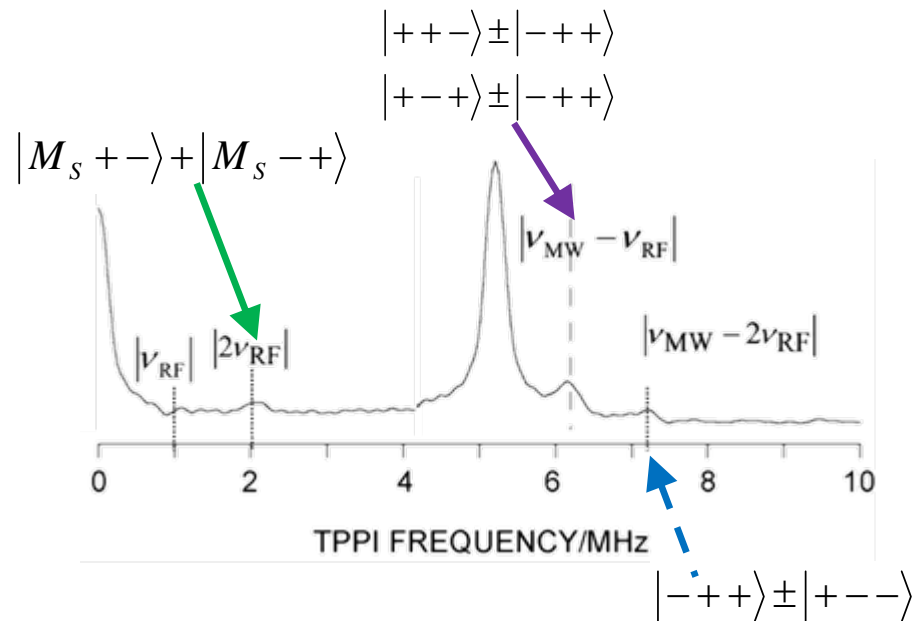
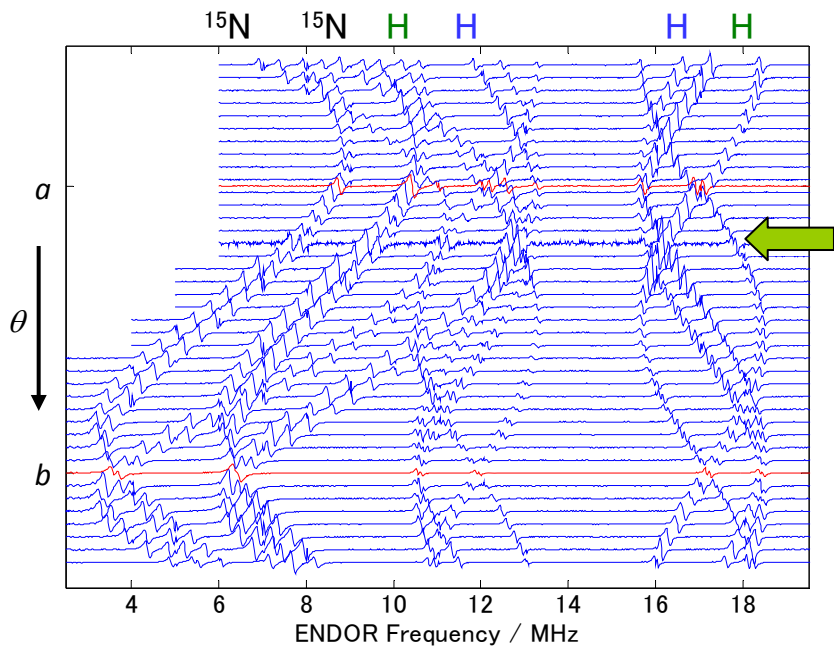


パルスENDOR法による多量子コヒーレンスの観測 の観測



DP¹⁵NO-*d*₈

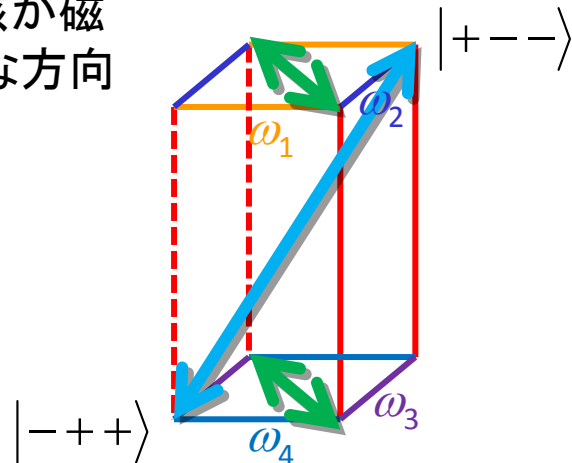
ENDORスペクトルの角度依存性
(*ab* plane)



2つの水素核が磁
氣的に等価な方向

$$\omega_1 = \omega_2$$

$$\omega_4 = \omega_3$$

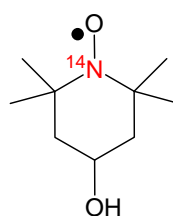
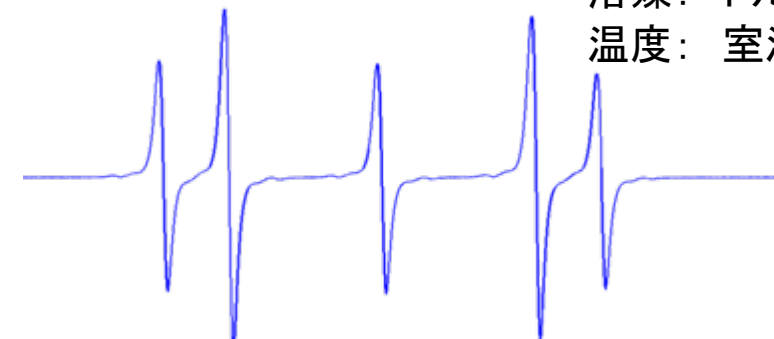


2電子スピン系の溶液ESRスペクトル

溶媒: トルエン

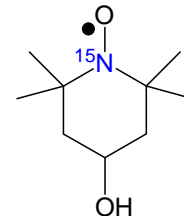
温度: 室温

$$|J_4| \gg |J_1|, |J_{23}|$$

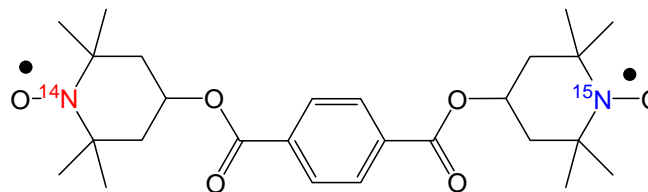


2

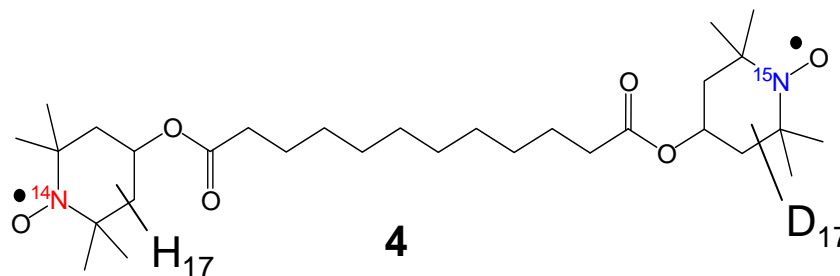
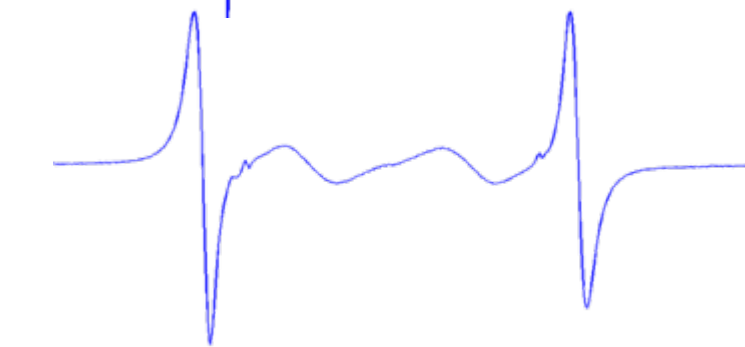
+



3



1

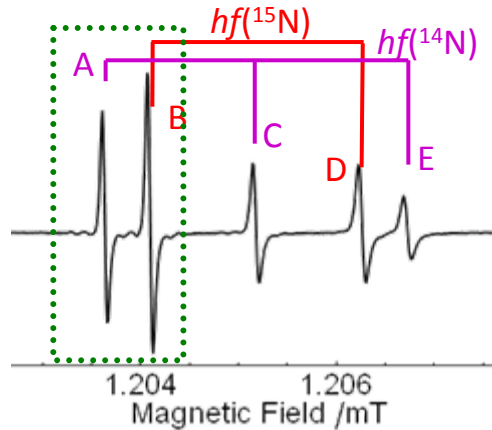
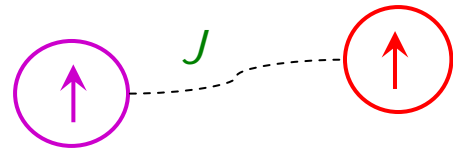


4

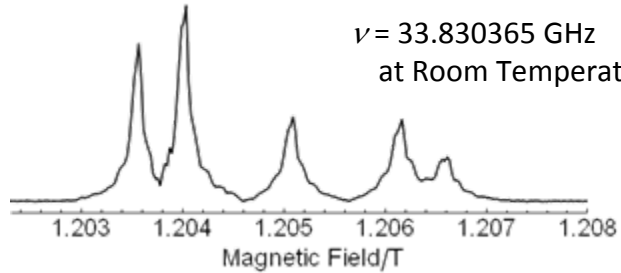
334
Magnetic Field / mT

336

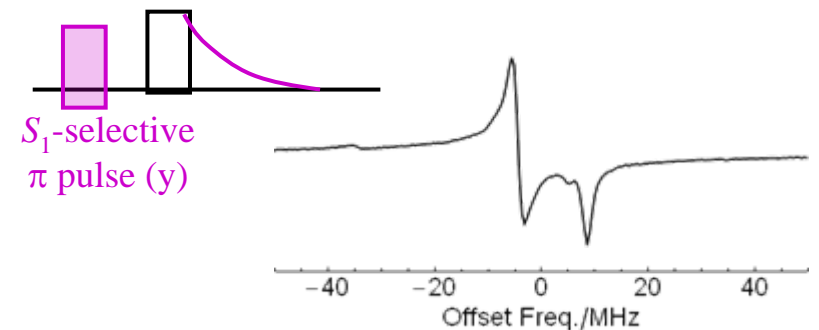
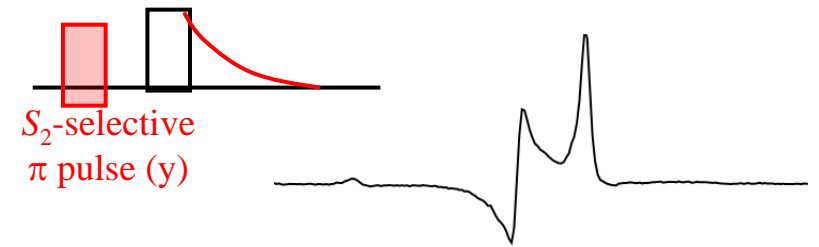
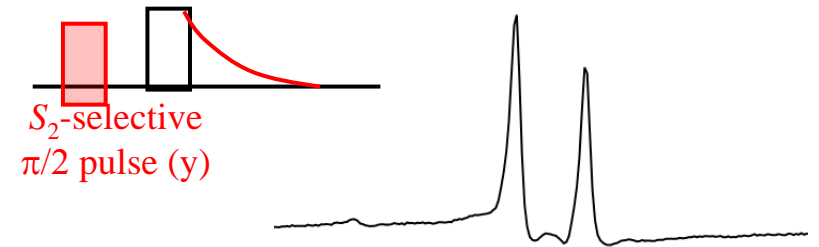
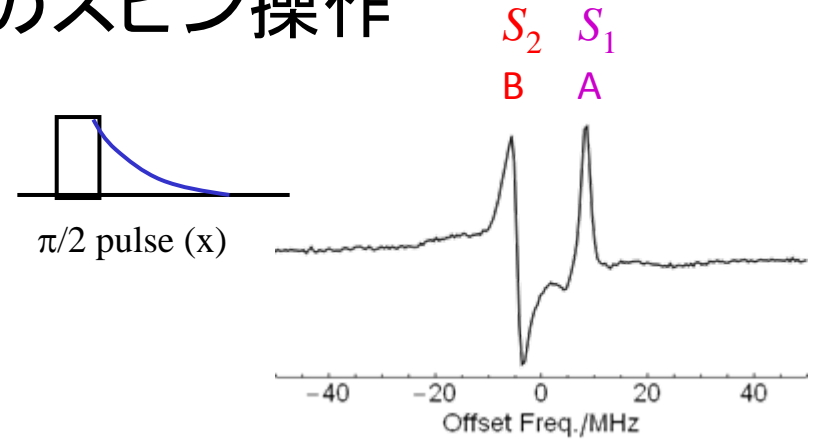
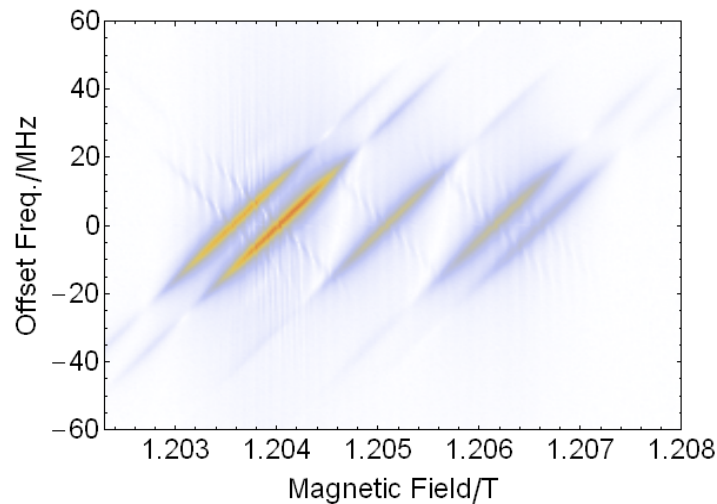
2電子スピンのスピ操作



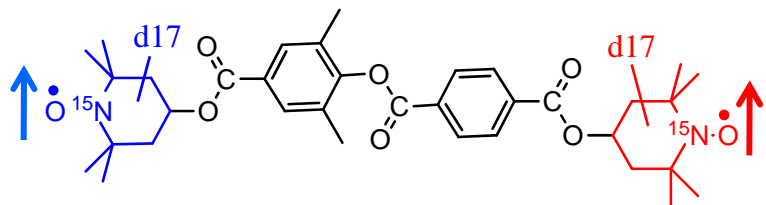
Field-swept FT-ESR



$\nu = 33.830365$ GHz
at Room Temperature

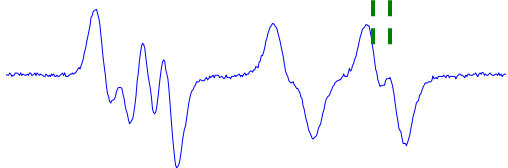


2電子スピン量子ビットを用いたCNOT演算



$\theta_{rp} = 10$ degrees

0.4 mT



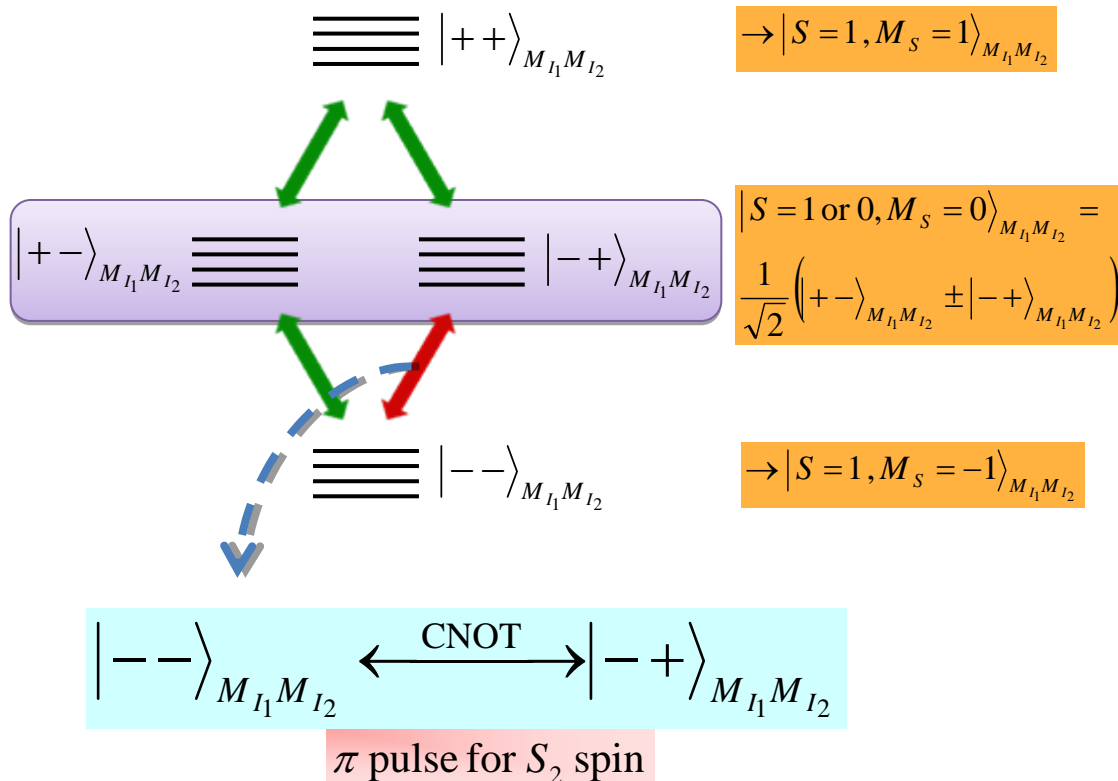
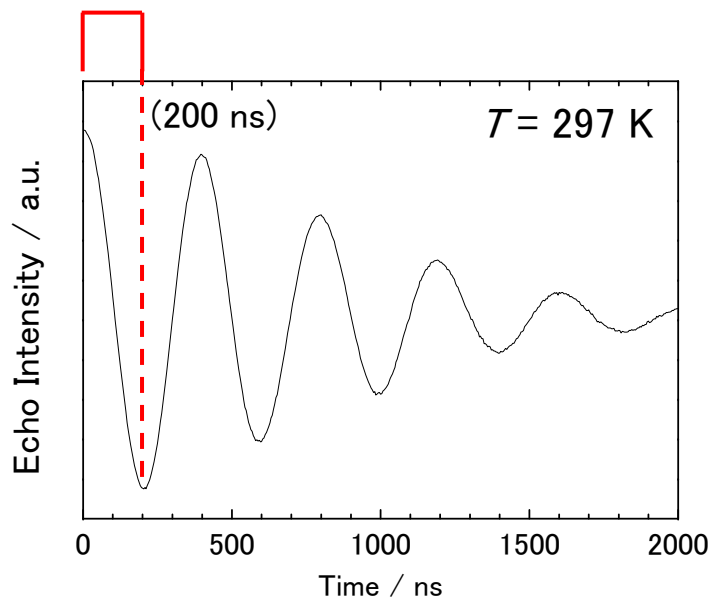
1208 1210 1212 1214
Magnetic field / mT

$$S_1 = S_2 = I_1^{15\text{N}} = I_2^{15\text{N}} = 1/2 \quad |M_{S_1} M_{S_2}\rangle_{M_{I_1} M_{I_2}}$$

$$H = \beta (\tilde{S}_1 \cdot \mathbf{g}_1 + \tilde{S}_2 \cdot \mathbf{g}_2) \cdot \mathbf{B} + \tilde{S}_1 \cdot \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \tilde{S}_2 \cdot \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{I}_2$$

$$- \beta_n (g_{n1} \tilde{I}_1 - g_{n2} \tilde{I}_2) \cdot \mathbf{B} + \tilde{S}_1 \cdot (\mathbf{D}_{12} + \mathbf{J}) \cdot \mathbf{S}_2$$

π pulse: 遷移選択励起によるCNOT演算



電子-核スピン系・2電子スピン系における 量子状態制御

- パルス電子-核多重共鳴法によるヘテロスピン系の操作
 - 擬初期状態の生成
 - 量子コヒーレンスの観測
 - 量子状態の変換
 - 電子スピン、および核スピンのスピノール性の実証
- パルス電子-電子多重共鳴法によるホモスピン系の操作
 - スピン選択的な量子状態変換
 - 選択的なMW波パルスによる初等量子ゲートの実現

パルス多重磁気共鳴法を用いた分子スピンの量子状態制御

- 擬初期状態の生成
- 量子状態変換・制御
- スピン磁気モーメントの観測



状態ベクトルのユニタリー
変換・書き換え
スペクトル情報の書き換え

パルス磁気共鳴分光手法

複雑なスペクトルに隠された電子状態の情報を意図的に抽出(情報の選別)
分光手法の最適化

パルス多重磁気共鳴法を用いた分子スピンの量子状態制御

分子スピンの電子状態

時間に依存しないSchrödinger方程式

開殻系の電子状態理論

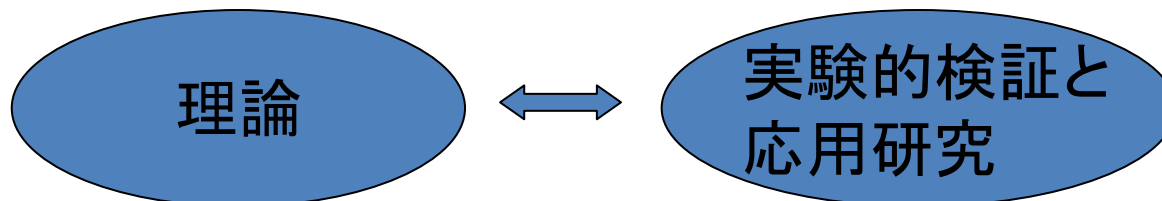
パルス電子磁気共鳴技術

状態ベクトルの操作と時間発展の理解

時間に依存するSchrödinger方程式

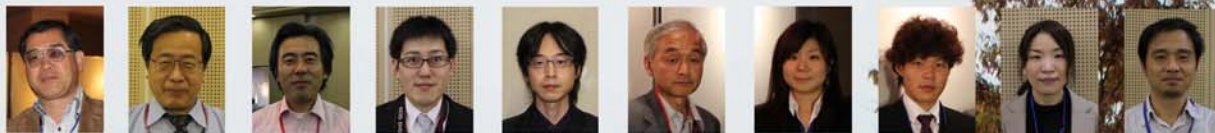
Liouville-von Neumann運動方程式

量子情報科学の基礎知識と分光技術の応用



第5回日露ワークショップ

開殻系化合物と分子スピndeバイス



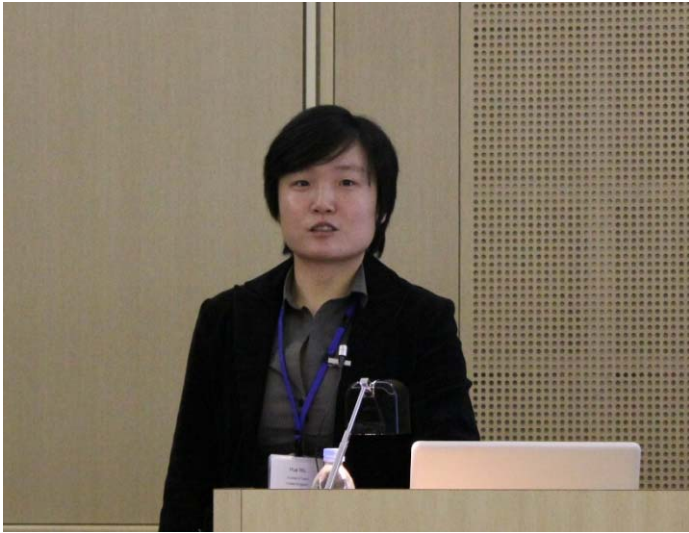
淡路夢舞台、2011年11月

日露ワークショップ

開殻系化合物と分子スピンドバイス

- 2012 Postov-on-Don, ロシア
- 2011 淡路島, 日本
- 2010 Nizhny Novgorod, ロシア
- 2009 淡路島, 日本
- 2008 Yekaterinburg, ロシア
- 2007 Novosibirsk, ロシア





Ms. Hua Wu (UK)



Ms. Elizaveta Suturina (Russia)

Mr. Morten Albring (UK)



Mr. Anton Lonchakov (Russia)



謝辞:平成23年度留学生交流支援制度SS&SVプログラム

「数学研究所をハブとする理学の大学院留学生国際研究交流ネットワークプログラム」

