

# HERMES実験における偏極水素気体標的の制御

柴田研究室 04M01055 今津 義充

## 1. HERMES実験について (HERA MEasurement of Spin)

DESY in Hamburg (Deutsches Elektronen-Synchrotron)

HERA 加速器 (the Hardon-Electron Ring Accelerator)

偏極水素

内部標的

深非弾性散乱(quarkとの弾性散乱)

## 2. Atomic Beam Source (ABS)

...偏極水素原子標的を生成し電子ビーム内に供給する装置

1,524 mm

Resonance Units

Electron Beam Line

Sextupole Magnets

Dissociator

水素原子(e-p system)の陽子をいかに偏極させるか

過程A. 6重極磁場を加える

→ Stern-Gerlachの原理を用いて電子の偏極状態を選択

過程B. 断熱遷移過程を用いる

→ 1つの量子状態を別の状態に変化させる

過程A, Bの組み合わせによって望む状態を実現する

## 3. 水素原子の一様外部磁場との相互作用

水素原子: 巨視的には中性粒子 & 基底(1s)状態

Hamiltonian

$$\mathcal{H}_{stat} = A_{HFS} \vec{I} \cdot \vec{S} + \frac{g_S \mu_B}{\hbar} \vec{S} \cdot \vec{B} + \frac{g_I \mu_N}{\hbar} \vec{I} \cdot \vec{B}$$

固有エネルギー

$$E_1 = \frac{E_{HFS}}{4} (1 + 2x(1 - \epsilon_H))$$

$$E_2 = \frac{E_{HFS}}{4} (-1 + 2\sqrt{x^2(1 + \epsilon_H)^2 + 1})$$

$$E_3 = \frac{E_{HFS}}{4} (1 - 2x(1 - \epsilon_H))$$

$$E_4 = \frac{E_{HFS}}{4} (-1 - 2\sqrt{x^2(1 + \epsilon_H)^2 + 1})$$

$$x = B/B_c^H \quad B_c^H = \frac{A_{HFS} \hbar}{g_S \mu_B} = 50.7 \text{ mT}$$

$$\epsilon_H = g_I^H / g_S \quad \text{mi / ms } 1 / 1000$$

固有状態(Hyper fine states)

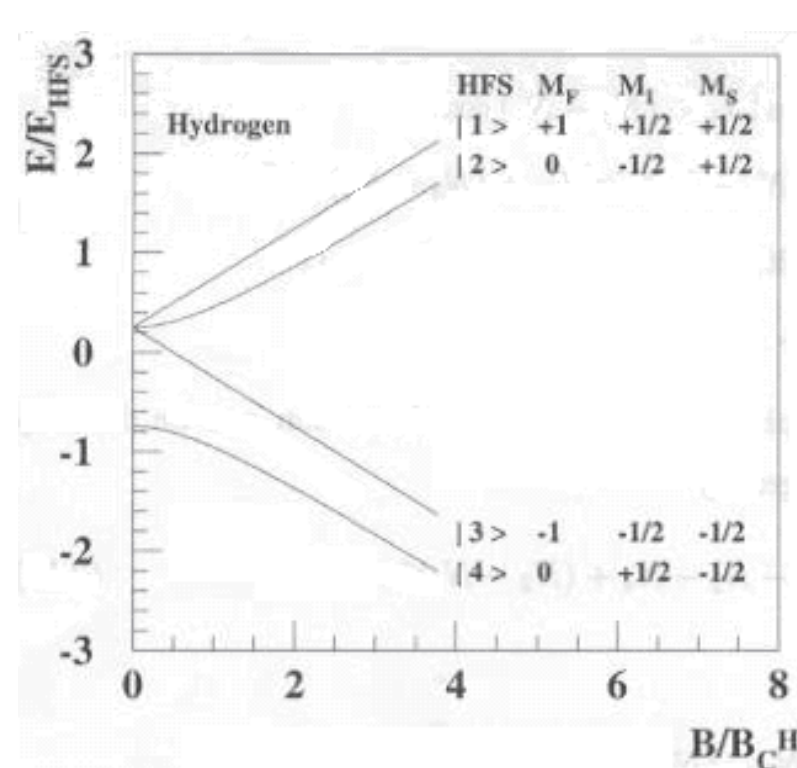
$$|1\rangle = |\uparrow \uparrow\rangle$$

$$|2\rangle = \cos \theta |\uparrow -\rangle + \sin \theta |\downarrow \uparrow\rangle$$

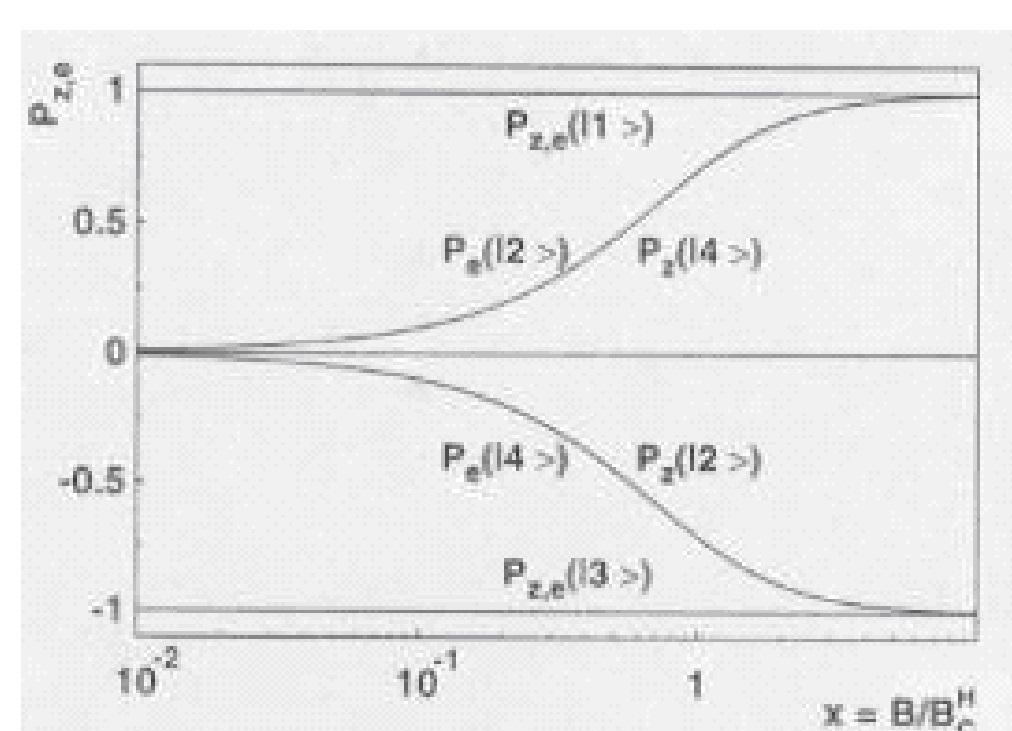
$$|3\rangle = |\downarrow -\rangle$$

$$|4\rangle = -\sin \theta |\uparrow -\rangle + \cos \theta |\downarrow \uparrow\rangle$$

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{x}{\sqrt{x^2 + 1}} \right)}$$



Hyperfine splitting

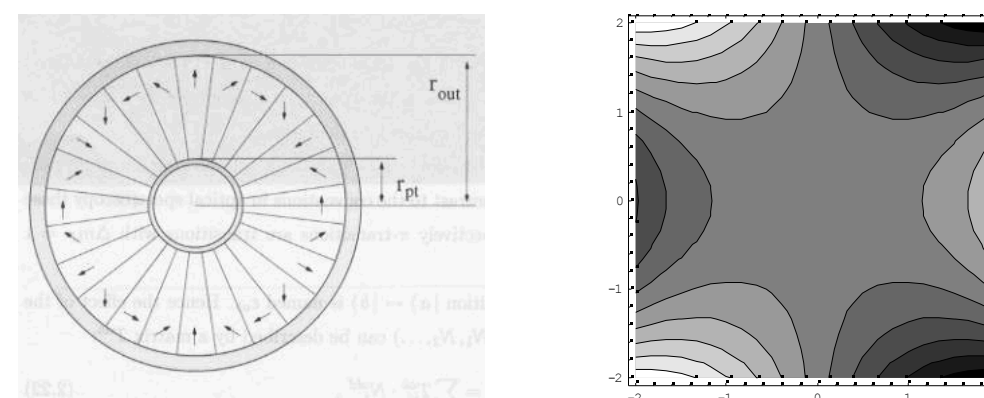


各状態の偏極度の磁場依存性

偏極度  $\langle i | S_z / |S| | i \rangle$

## 4. 6重極磁場における電子スピンの偏極

6重極磁場



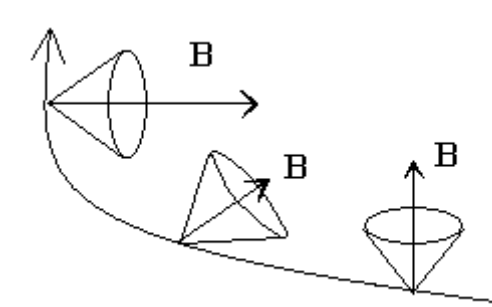
Scalar Potential

$$\Phi = a (4x^3 - 3xr^2)$$

a: 比例定数

水素原子が受ける力:  $F = -\text{grad } E(\mathbf{B}) = - (dE/d|B|) \text{ grad } |B|$

磁場内で磁場に対するスピンの向きは断熱的に変化するとよい



E は磁場の大きさBの関数として決まるpotential

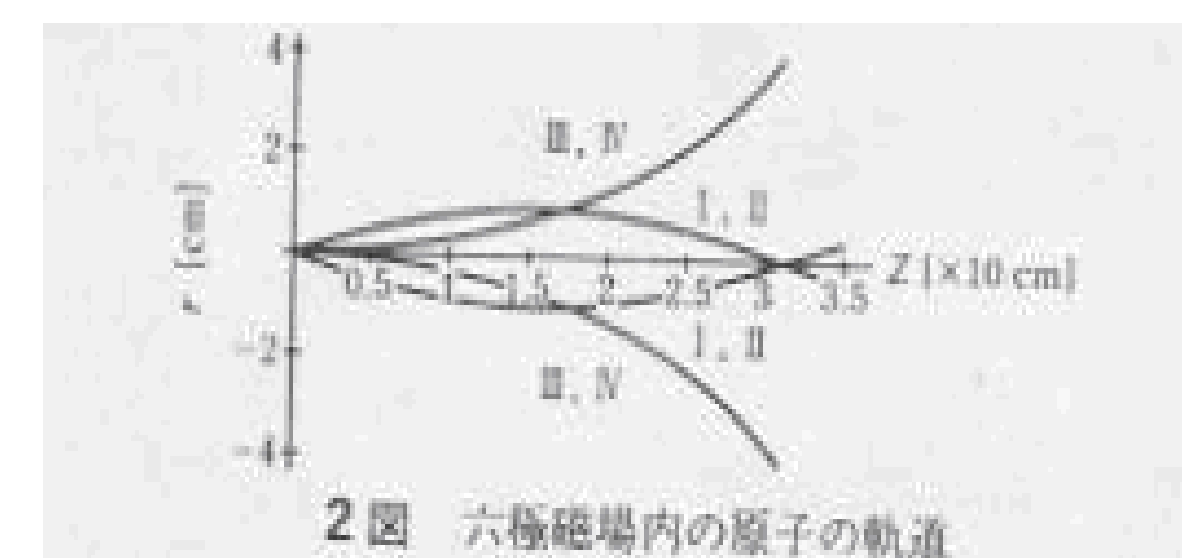
6重極磁場  $\rightarrow \text{grad } |B| = 6a r r$  (r: 半径方向の単位ベクトル)

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = -6a (dE/dB) r / m v^2$$

v: 水素原子のz方向の速度

$$|1\rangle, |2\rangle \rightarrow (dE/dB) > 0$$

$$|3\rangle, |4\rangle \rightarrow (dE/dB) < 0$$



Calculated trajectories in ABS

## 5. 量子状態間の断熱遷移

適当な大きな磁場( $B > B_c$ )の元では...  $\mathcal{H}_{stat} = \frac{g_S \mu_B}{\hbar} \vec{S} \cdot \vec{B} + \frac{g_I \mu_N}{\hbar} \vec{I} \cdot \vec{B}$

$$i\hbar dM/dt = [M, H] = \gamma (M \times B) \quad (M = S \text{ or } I, \gamma = g\mu/\hbar)$$

→ 振る舞いを古典的に捕らえる。(期待値の振る舞い)

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{B} \Leftrightarrow \frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\mu} \times (\gamma \vec{B}) \quad (\vec{\mu} = \gamma \vec{M})$$

Z軸が常に磁場  $\vec{B}$  の方向を向いているような回転座標系での運動を考える。  
実験室系での単位ベクトル  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$

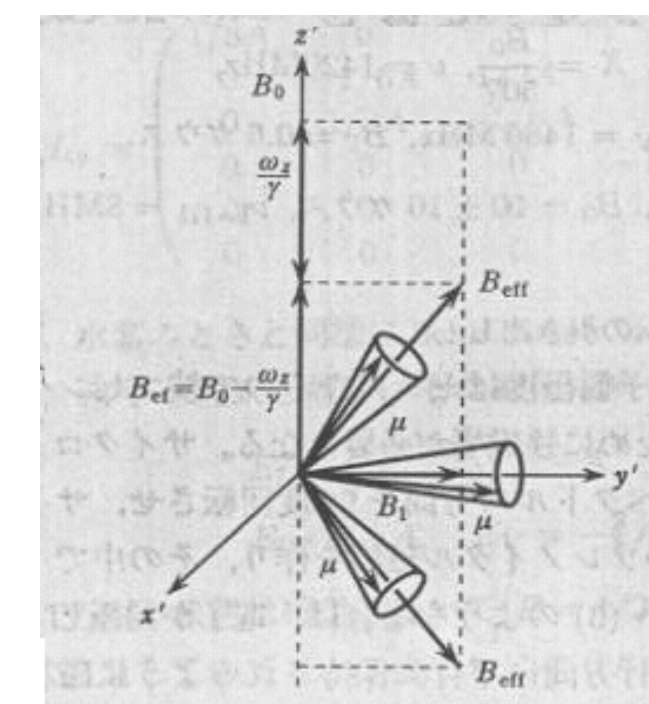
$$\vec{B} = B_0 \vec{k}$$

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\mu} \times (\gamma \vec{B} + \vec{\Omega}) \Leftrightarrow \frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\mu} \times \gamma \vec{B}_{eff} \quad (\vec{B}_{eff} = \vec{B} + \frac{\vec{\Omega}}{\gamma})$$

さらに、 $\vec{B}_1 = B_1 (\vec{i} \sin \omega_z t + \vec{j} \cos \omega_z t)$  を加える

これを  $\Omega = \omega_z \vec{k}$  の系で見ると、

$$\frac{d\vec{\mu}}{dt} = \vec{\mu} \times \gamma \vec{B}_{eff} \quad \vec{B}_{eff} = \vec{k} (B_0 - \frac{\omega_z}{\gamma}) + \vec{i} B_1$$



断熱的な変化であれば、周波数  $\omega_z$  を変化させることによって  
スピン量子状態(歳差運動)を変化させることが出来る

ABS: 勾配磁場の中を水素が走る+垂直振動磁場で実現

SFT: 1480MHz

$$|2\rangle \Rightarrow |4\rangle$$

WFT: 8MHz

$$|1\rangle \Rightarrow |3\rangle$$

| Hydrogen       |                        | high frequency transitions |                    |
|----------------|------------------------|----------------------------|--------------------|
| Pol.           | Inj. States            | appendix                   | between sextupoles |
| $P_e$          | $ 1\rangle,  2\rangle$ | off                        | off                |
| $P_e^+$        | $ 1\rangle,  4\rangle$ | SFT 2-4                    | off                |
| $P_e^-$        | $ 2\rangle,  3\rangle$ | WFT 1-3                    | off                |
| $P_e^+, P_e^-$ | $ 1\rangle$            | off                        | SFT 2-4            |
| $P_e^+, P_e^-$ | $ 2\rangle$            | off                        | WFT 1-3            |
| $P_e^-, P_e^+$ | $ 3\rangle$            | WFT 1-3                    | SFT 2-4            |
| $P_e^-, P_e^+$ | $ 4\rangle$            | SFT 2-4                    | WFT 1-3            |

量子状態の選択