

スピン・軌道相互作用 -その起源と実例-

電子に対する相対論的な効果により、
軌道角運動量とスピン角運動量の間には相互作用が働く

外部磁場の下でのゼーマン効果

→ 原子における電エネルギー・スペクトルの微細構造

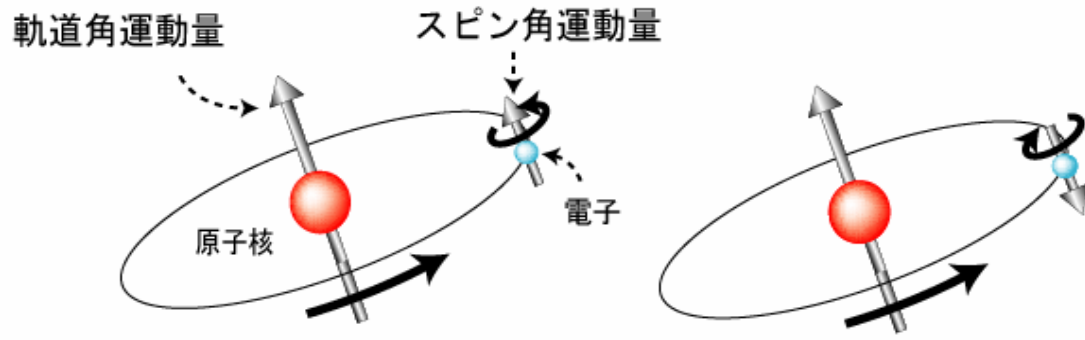
→ 半導体における価電子帯のエネルギー分岐

→ 2次元電子正孔系におけるスピン軌道結合効果

$$H_{so} = f(r) \underline{\vec{l} \cdot \vec{s}}$$

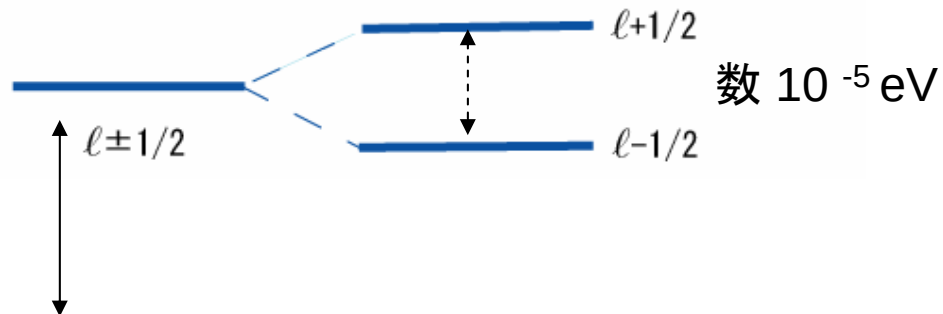
$$f(r) \equiv \frac{1}{2m^2c^2} \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr}$$

原子(の軌道電子)におけるスピン軌道結合効果



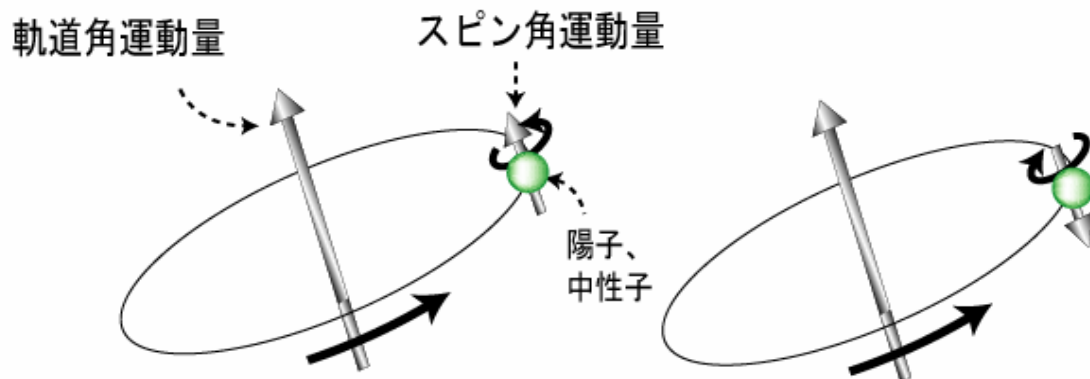
高エネルギー側への
エネルギー分岐

低エネルギー側への
エネルギー分岐



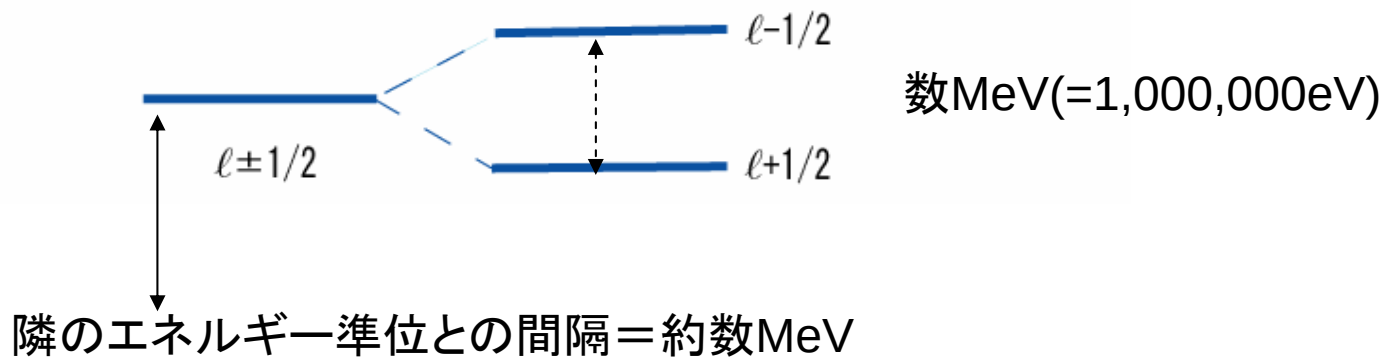
隣のエネルギー準位との間隔＝約数eV

原子核の一粒子エネルギースペクトル におけるスピン軌道相互作用



低エネルギー側への
エネルギー分岐

高エネルギー側への
エネルギー分岐



スピン軌道相互作用項の導出

原子核が軌道電子のいる場所につくる電場

$$\vec{E} = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3}$$

速度 v で運動する電子が'感じる'有効磁束密度

$$\begin{aligned} B &= -\frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E} = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{c^2 r^3} \\ &= \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{1}{c^2} \frac{Ze}{mr^3} \vec{\ell} \quad (\vec{\ell} \equiv \vec{r} \times m\vec{v}) \end{aligned}$$

磁束密度の中の磁気モーメントベクトルに働くポテンシャル(相互作用)

$$H_{so} = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B} = \frac{e}{m} \vec{s} \cdot \vec{B} \quad \left(\vec{\mu}_s = \frac{-e}{m} \vec{s} \right) \quad \text{一般のポテンシャルに対して}$$

$$= \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{Ze^2}{mc^3} \frac{1}{r^3} \vec{\ell} \cdot \vec{s}$$

$$H_{so} = \frac{1}{m^2 c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial V(r)}{\partial r} \vec{\ell} \cdot \vec{s} \quad ; V(r) = - \left(\frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{1}{r}$$

$$H_{so} = \frac{1}{2m^2 c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial V(r)}{\partial r} \vec{\ell} \cdot \vec{s}$$

← 相対論的效果 (1/2)

参考：運動系における‘有効電場’、‘有効’磁場

「静止」系(S系)における電場、磁場 $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z), \vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$

S系に対して、x軸方向に速度vで運動する系(S'系)における電場、磁場

$$\vec{E}' = (E_{x'}, E_{y'}, E_{z'}), \vec{B}' = (B_{x'}, B_{y'}, B_{z'});$$

$$E_{x'} = E_x, E_{y'} = \gamma[E_y - \beta(cB_z)], E_{z'} = \gamma[E_z + \beta(cB_y)],$$

$$B_{x'} = B_x, (cB_{y'}) = \gamma[(cB_y) + \beta E_z], (cB_{z'}) = \gamma[(cB_z) - \beta E_y],$$

$$\beta \equiv v/c, \gamma \equiv 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

| β | が十分小さいとき

$$E_{y'} \cong E_y - \beta(cB_z), E_{z'} \cong E_z + \beta(cB_y),$$

$$cB_{y'} \cong (cB_y) + \beta E_z, (cB_{z'}) \cong (cB_z) - \beta E_y,$$

$$\rightarrow \vec{E}' \cong \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}, \quad \vec{B}' \cong \vec{B} - \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c^2}$$

参考文献

J.H.ディヴィス「低次元半導体の物理」(シュプリンガー・フェアラーク東京)、
九工大図書館蔵書番号(428.8,D-2) pp.403-407

浜口智尋「半導体の物理」(朝倉書店)、
九工大図書館蔵書番号(?) pp.31-40

R. Winkler,「Spin-Orbit Coupling Effects in Two-Dimensional
Electron and Hole Systems」(Springer)、2003
九工大図書館蔵書番号(420.8,S-3,191) pp.403-407