Basic ideas of Spintronics and Orbitronics

Yuto Masuda

2024 年 12 月 5 日

目 次

研究室 HP を見て内容がわかるようになることを目指す．最初の方は物質中の軌道角運動量を無視する．

1 Spin Current

1.1 Conservation of Angular Momentum and Spin current

電荷保存則

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho = -\nabla \cdot \boldsymbol{j}_{\mathrm{c}} \tag{1.1}$$

角運動量保存則

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{S} = -\nabla \cdot \boldsymbol{j}_{\mathrm{s}} \tag{1.2}$$

$\boldsymbol{M} = \gamma \boldsymbol{S}$ だから，磁化の時間変化はスピン角運動量の流れを生む．

1.2 Spin Relaxation

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{S} = -\nabla \cdot \boldsymbol{j}_{\mathrm{s}} + \boldsymbol{T} \tag{1.1}$$

スピン流の伝搬距離は数 nm ほど．緩和機構には

1. EY 機構
2. D'yakonov-Perel' 機構
3. スピンメモリーロス

などがある．

$$\psi \sim a\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varepsilon_{\uparrow}t/\hbar} \left|\uparrow\right\rangle + b\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varepsilon_{\downarrow}t/\hbar} \left|b\right\rangle \tag{1.2}$$

1.3 Cunduction-electron Spin Current

スピン偏極した伝導電子の流れ．強磁性体

2 Spin Dynamics in Solids

2.1 LLG equation

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{M}}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{i}}{\hbar}\left[\boldsymbol{M}, \hat{H}\right] \tag{2.1}$$

$$\hat{H} = -\boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}} \tag{2.2}$$

$$\Rightarrow \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{M}}{\mathrm{d}t} = -\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}} \tag{2.3}$$

有効磁場 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}$ 形状磁気異方性，結晶磁気異方性，界面磁気異方性による効果を含む．**式** (2.3) は歳差運動を表している．これでは歳差運動し続けるので緩和項を加える．

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{M} = -\gamma \boldsymbol{M} \times \boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}} + \frac{\alpha}{M}\boldsymbol{M} \times \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{M} \tag{2.4}$$

式 (2.4) を LLG 方程式という．

2.2 Exchange Spin Current

Heisenberg の交換相互作用より，

$$\hat{H} = -2J\sum_{i,j}\boldsymbol{S}_i \cdot \boldsymbol{S}_j \tag{2.1}$$

である．有効磁場は

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}} = -\frac{\delta E(\boldsymbol{m})}{\delta \boldsymbol{m}} = -2\frac{J}{\gamma}\sum_{i,j}\boldsymbol{S}_j \tag{2.2}$$

であるので，

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{M}}{\mathrm{d}t} = 2J\boldsymbol{M}_i \times \sum_j \boldsymbol{S}_j + \boldsymbol{T}' \tag{2.3}$$

が磁化の運動方程式．$\boldsymbol{T}'$ は緩和項．連続体近似 $\boldsymbol{S}_i = \boldsymbol{S}(\boldsymbol{r})$，$\boldsymbol{S}_j = \boldsymbol{S}(\boldsymbol{r}+\boldsymbol{a})$ を使う．

$$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r}+\boldsymbol{a}) = \boldsymbol{S}(\boldsymbol{r}) + \frac{\partial \boldsymbol{S}}{\boldsymbol{r}} \cdot \boldsymbol{a} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{S}}{\partial \boldsymbol{r}^2}\boldsymbol{a}^2 + \cdots \tag{2.4}$$

$$\sum_j \boldsymbol{S}_j \to \frac{\partial^2 \boldsymbol{S}}{\partial \boldsymbol{r}^2} a^2 = \nabla^2 \boldsymbol{M} a^2 \tag{2.5}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{r}) = \frac{2Ja^2}{\gamma}\boldsymbol{M}(\boldsymbol{r}) \times \nabla^2 \boldsymbol{M}(\boldsymbol{r}) + \boldsymbol{T}' = -A\gamma\nabla \cdot (\boldsymbol{M}(\boldsymbol{r}) \times \nabla \boldsymbol{M}(\boldsymbol{r})) + \boldsymbol{T}' \tag{2.6}$$

この $\boldsymbol{j}_\mathrm{s} = A\boldsymbol{M}(\boldsymbol{r}) \times \nabla \boldsymbol{M}(\boldsymbol{r})$ を交換スピン流という．磁気モーメントの勾配があるとき，それが消えるまで磁化を変化させる作用が働く．交換相互作用が運ぶ角運動量の流れ．

2.3 Spin-wave Spin Current and Magnon

磁化は磁場を中心に歳差運動する．強磁性体内では交換相互作用のために歳差運動が伝わり，全体で波ができる．これをスピン波といい，それを量子化したものがマグノン．マグノンはスピン流を運ぶ．マグノンによる伝搬は電子伝導を伴わないため絶縁体内でも可能である．

2.4 Spin Torque

スピン偏極した電流が強磁性体に注入されたとき．電流のスピンの向きは強磁性体の磁化の向きにそろおうとする．このとき，角運動量保存則により強磁性体の磁化は逆向きのトルクを受ける．

$$\boldsymbol{S}_1 \times (\boldsymbol{S}_1 \times \boldsymbol{S}_2) \tag{2.1}$$

これをスピン移行トルク (STT) という．STT は磁化と垂直な向きに働く．磁化の大きさを変えるには大きなエネルギーが必要なため，磁化と平行向きには働かない．

2.5 Spin Pumping

スピントルクの逆現象がスピンポンピング．強磁性中の磁化を時間変化させることでスピン流を生み出す．

2.5.1 スピン蓄積

$$\boldsymbol{j}_s = \boldsymbol{j}_\uparrow - \boldsymbol{j}_\downarrow = \frac{1}{e}\nabla(\sigma_\uparrow\mu_\uparrow - \sigma_\downarrow\mu_\downarrow) = \frac{\sigma}{2e}\nabla\mu_s \tag{2.1}$$

スピン蓄積 $\mu_s = \mu_\uparrow - \mu_\downarrow$

$$\nabla^2\mu_s = \frac{1}{\lambda^2}\mu_s \tag{2.2}$$

スピン蓄積があるとスピン流が流れる．

2.5.2 スピンポンピング

スピン蓄積

$$\Delta N \simeq -\frac{\chi}{\gamma}\frac{\Gamma^2+1}{\Gamma}\left(\frac{1}{\Gamma}\boldsymbol{m} \times \dot{\boldsymbol{m}} + \dot{\boldsymbol{m}}\right) \tag{2.3}$$

3 How to induce Spin Current?

スピン流の生成方法を紹介する.

3.1 Spin Hall effect

電流と直行する向きにスピン流が発生．磁場を必要としない．強いスピン軌道相互作用が必要．外因性と内因性がある．外因性は不純物による散乱．内因性はベリー曲率 (バンド構造に依る)

$$\dot{\boldsymbol{r}} = \frac{1}{\hbar}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}\boldsymbol{k}} - \dot{\boldsymbol{k}} \times \boldsymbol{\Omega}_n \tag{3.1}$$

$$\hbar\dot{\boldsymbol{k}} = -e\boldsymbol{E} - e\dot{\boldsymbol{r}} \times \mu_0 \boldsymbol{H} \tag{3.2}$$

3.2 Spin Rashba effect

空間反転対称性の破れた系

$$H = \boldsymbol{s} \cdot (\boldsymbol{p} \times \boldsymbol{e}_z) \tag{3.1}$$

$$H = \begin{pmatrix} \hbar^2(k_x^2 + k_y^2)/2m & \alpha_{\mathrm{SR}}(\mathrm{i}k_x + k_y) \\ \alpha_{\mathrm{SR}}(-\mathrm{i}k_x + k_y) & \hbar(k_x^2 + k_y^2)/2m \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

運動量とスピンがロッキング.

3.3 Light-induced Spin Current

円偏光のスピン.

3.4 Spin Seebeck effect

熱勾配をかける．スピンの歳差運動は反時計回りしかありえない.

4 How to measure Spin Current?

5 Orbital Current

今まで，物質中の軌道角運動量は無視されてきた．空間反転対称性から

$$\langle \boldsymbol{L} \rangle_{\boldsymbol{k}} = \langle \boldsymbol{L} \rangle_{-\boldsymbol{k}} \tag{5.1}$$

時間反転対称性から

$$\langle \boldsymbol{L} \rangle_{\boldsymbol{k}} = -\langle \boldsymbol{L} \rangle_{-\boldsymbol{k}} \tag{5.2}$$

6 Orbitronics

軌道 Hall 効果．軌道 Rashba 効果．軌道トルク．軌道ポンピング.

Reference

1. スピン流とトポロジカル絶縁体，ざっくり書いてる．

2. Spin Current，いっぱい書いてる

3.