

物性物理学は、物質の示す多彩な性質を物理学の法則に基づいて解明する分野です。水と氷の違いは？ 磁石とは？ 超伝導とは？ 自然界の呈示する現象を追究することにより「対称性の破れ」などの多粒子系に特有の概念を獲得しました。また、物性物理学は科学技術の進歩や私たちの日常生活の向上とも密接に関係していて、学問的に得られた知識をもとに、物質の機能を引き出し新技術へ橋渡しする側面をもっています。St 研では後者の側面に重心をおいて、「スピントロニクス」と「トポロジカル物質」の理論研究を行っています。

## スピントロニクス

### 磁石の起源

例) 鉄原子

量子力学の性質が巨視的に現れる

## スピントロニクスとは

スピントロニクスはスピン (磁石の性質) を利用する電子技術分野

スピン流の利用

生成: 電流, 熱, 光 → スピン流

伝搬

検出: スピン流 → 磁石の向き

【応用例】情報ビットに利用

1 (↑), 0 (↓)

- 高密度化・高速動作
- 不揮発性メモリ

物理学を活かし  
今はない新技術を創出する

## スピントロニクスの理論研究

物質 (舞台)

接合界面 (ラシュバ系) スカームイオン

反強磁性 フラストレート系 トポロジカル物質

### 量子統計の手法 (線形応答理論)

入力 (外場) → 出力 (物理量)

$$\sigma(\epsilon) = -\frac{e^2 \hbar}{4\pi} \sum_{s,s'} \int \frac{dk'}{(2\pi)^3} \text{Tr}[\hat{v}_x \hat{G}(k', \epsilon + is0) \times \hat{J}_x(k', \epsilon + is0, \epsilon + is'0) \hat{G}(k', \epsilon + is'0)]$$

ファインマンダイアグラム

量子力学・統計力学・相対性理論の融合分野 ⇔ 物質の中の宇宙論

### 創発インダクター

誘導起電力 (電圧が電流の時間微分に比例)

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

コイル

小さなコイルが実現

### 磁気構造の運動

スカームイオンの運動

運動方程式

$$-M\ddot{\mathbf{R}} + \mathbf{G} \times \dot{\mathbf{R}} - K\mathbf{R} = 0$$

自明でない現象を数式で予言する

## トポロジカル物質

波動関数のトポロジーに起因する新奇な量子現象 (2016年ノーベル物理学賞)

### トポロジー (位相幾何学)

切り貼りせず変形して重なる (同相な) 図形を同じとする世界

同相な図形に共通する量を調べる数学の分野

トポロジカル不変量

例1) 「穴」の数

膨らませる

オイラー標数=2

穴の位置を変える

オイラー標数=0

不変量: オイラー標数

例2) 巻き方

$\nu = 0$   $\nu = 1$

赤と緑の線は切断しない  
限り重ならない

不変量: 巻きつき数 ( $\nu$ )

### 量子力学とトポロジー

#### 二重スリット実験

電子

コイル

磁束

干渉縞がずれる

干渉縞にズレが生じる

電子の波動関数の位相が変化する

位相の変化 = “ベリー位相”

#### 自発分極

結晶中の電荷の位置の期待値はベリー位相  $\phi$  と対応する。

並行な点線が重なるように丸める

“時間”

“時間”が1周期進む間の電荷の位置の変化 (結晶 = 周期的な構造を持つ)

$\nu = 0$  元の位置に戻る 分極は生じない

$\nu = 1$  1周期分進む 自発的に分極が生じる

## トポロジカル絶縁体

物質内部は絶縁体で表面のみ金属的である物質

これは結晶内部の電子状態のトポロジーによる性質

絶縁体内部の状態はベリー位相を用いたトポロジカル不変量によって区別できる。

トポロジカル絶縁体  $\nu = 1$

物質の外部  $\nu = 0$

通常の絶縁体  $\nu = 0$

トポロジカル不変量は絶縁体的な状態でのみ定義できるため、不変量が異なる境界は絶縁体でない状態になる必要がある。

## 対称性と物性物理

トポロジカル不変量は物質の対称性によって決定する

- ◆時間反転対称性: 時間を巻き戻す変換 ( $t \rightarrow -t$ )
- ◆空間反転対称性: 点対象な位置に座標を移す変換 ( $r \rightarrow -r$ )
- ◆鏡映対称性: ある面に対して鏡に映す変換
- ◆N回回転対称性: ある軸まわりで  $360^\circ/N$  だけ回転する変換

ルチル構造 Z軸の方向から見た図

z軸まわりの4回回転対称性や鏡映対称性があることが分かる。

結晶中にのみ存在するディラック粒子やワイル粒子などの準粒子は、結晶が持つ対称性が存在することで実現する。