

凝縮系理論グループ

研究室紹介



@ *Lorentz Festival*

Contents

- 柳瀬教授による研究紹介 (13:05~13:35)
- 研究室紹介 (13:35~13:50)
- 大学院生による研究紹介 (14:00~)





welcome

to Lorentz Festival

&

Condensed Matter Theory Group

Contents



1. 柳瀬教授による研究紹介 (13:05~13:35)

2. 研究室紹介 (13:35~13:50)

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ

3. 大学院生による研究紹介 (14:00~)

- ✓ 研究の概観
- ✓ 具体的な研究紹介



Contents



1. 柳瀬教授による研究紹介 (13:05~13:35)

2. 研究室紹介 (13:35~13:50)

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ

3. 大学院生による研究紹介 (14:00~)

- ✓ 研究の概観
- ✓ 具体的な研究紹介



大学院生による

凝縮系理論グループ

研究室紹介 @ Lorentz Festival

司会・進行

田中大登（博士課程1回生）



Contents

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ
- ✓ ミニ研究紹介(2人)
- ✓ 裏番組のお知らせ



Contents

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ
- ✓ ミニ研究紹介
- ✓ 裏番組のお知らせ



普段の生活：理想的な大学院生の一週間

	月	火	水	木	金	土	日
午前	授業	授業			授業		睡眠
午後	 帰宅	授業 帰宅	凝縮系セミナー 帰宅	ランチセミナー 帰宅	輪講 (AGD) グリーン関数の勉強 帰宅	バイト 	 

凝縮系理論グループでは、

- ・ **凝縮系セミナー** (M2以上, 年一回) . . . 自身の研究紹介(1h~)
- ・ **ランチセミナー** (M2以上, 年一回) . . . 論文紹介セミナー(40min~)
- ・ **Green関数に関する教科書の輪講** . . . MIの前期に半年間行う

普段の生活：現実の大学院生の一週間（Tさん）



	月	火	水	木	金	土	日
午前							
午後	自主ゼミ (先輩・後輩と Keldysh)	先行研究 リサーチ	凝縮系 セミナー	ランチ セミナー	共同 研究ミー ティング (@Zoom)	ゼミ 予習	ゼミ 予習
深夜	先行研究 リサーチ	自主ゼミ (他大学の知 人とトポロ ジー)	TA 業務	先行研究 リサーチ		自主ゼミ (素粒子論 の学生と 場の理論)	
	 帰宅	研究 計算  帰宅	研究 計算 帰宅	 帰宅	研究 計算 帰宅	 帰宅	帰宅

Contents

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ
- ✓ 研究紹介(2人)



4～5月頃の修士一年生



” **Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics** ”
(通称 **AGD**) などを先生と一緒に輪読

4～5月頃の修士一年生



並行して、興味のある研究テーマを勉強 / 先輩・先生に質問



教授 柳瀬陽一

- 量子力学B（前期金2）
- 物性物理学1b：超流動・超伝導（後期金3）
- 低温科学A（前期木4）



准教授 池田隆介

- 物理のための数学1（前期水4）
- 統計力学C（後期水2）



准教授 吉田恒也

- 振動・波動論（前期水2）



講師 Robert Peters

- Elementary Course of Physics A（前期月3）
- ILAS Seminar-E2:The wonderful world of quantum physics（前期月2）



助教 手塚真樹

- 物理数学演習（後期金3）



助教 大同 曉人

- 量子力学演習1（前期木3）

夏以降の修士一年生

学会に参加したい



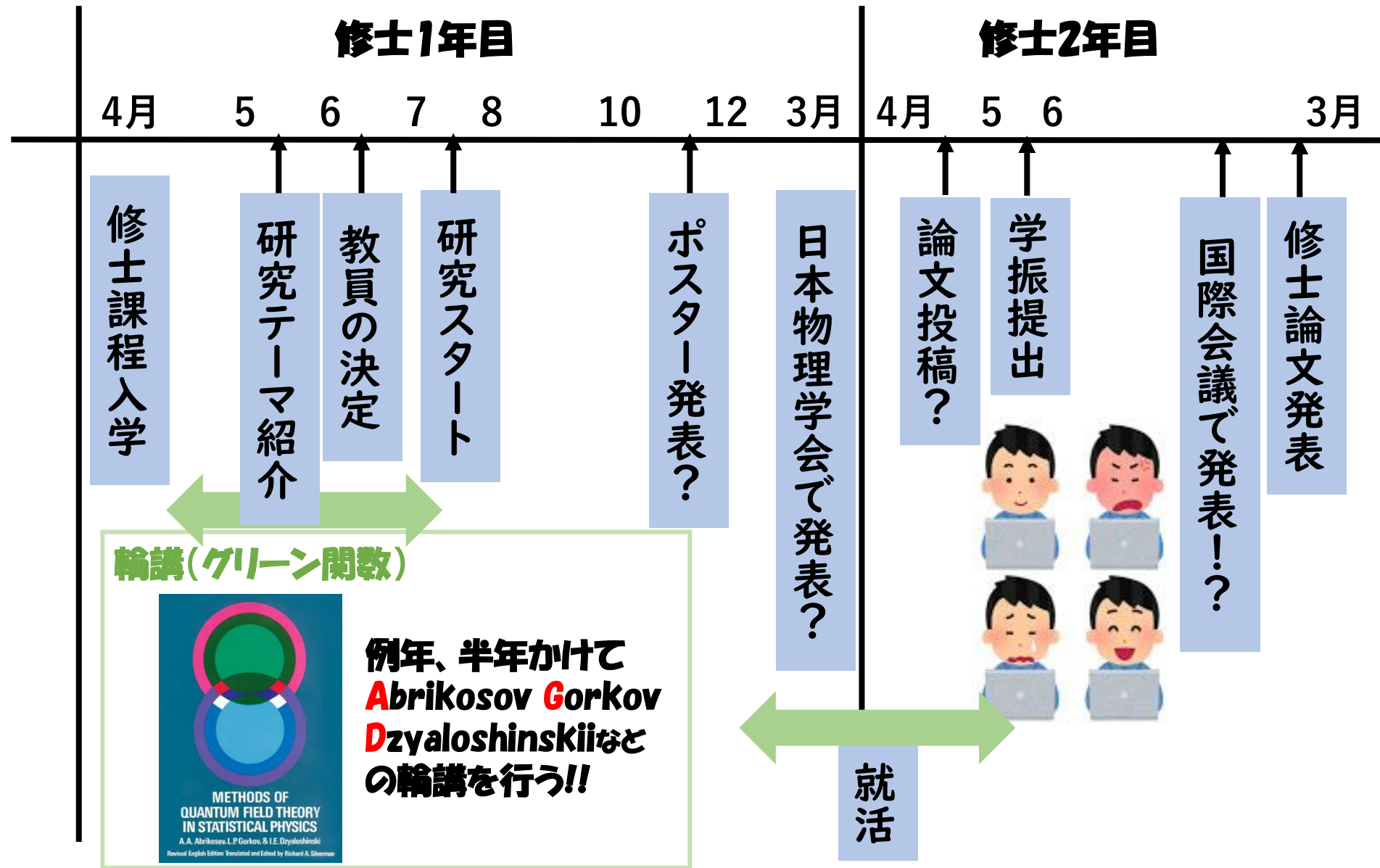
必死に勉強！



論文を書いたい



修士課程入学後の2年間(例)



質疑応答タイム



頼れる仲間!!
楽しい研究!!
是非、凝縮系理論研究室へ!!

引き続き14:00～

大学院生による研究紹介

Contents

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ
- ✓ **研究紹介**



豊富なテーマ

異常 冷却 エルミート ヘリウム
破れる 輸送 原子 重い電子系 液体
対称性の破れ 流体力学 熱 ポール
高次高調波発生 空間 鉄系超伝導体
光学 電子 圧電効果 超伝導 応答 臨界 固体
現象 変換 強相関 幾何学 強相関電子系 量子 角運動量
マグノン 開放系 非線形光学 非線形 磁気 効果
ダイオード 表皮効果 メタマテリアル 相互
トポロジカル 反転 edelstein アナ 磁場

非が付くフロンティア

非線形応答

$$j^\alpha = \sigma^{\alpha\beta} E^\beta + \sigma^{\alpha;\beta\gamma} E^\beta E^\gamma + \dots$$

非エルミート

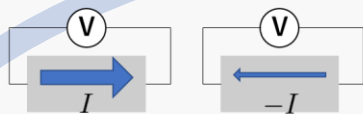
$$H \neq H^\dagger \quad \text{場合によっては } \det H = 0$$

$$E_n |n_R\rangle = H |n_R\rangle, E_n \langle n_L| = \langle n_L| H$$

一般に固有値は複素数

非相反性

$$R(I) \neq R(-I)$$



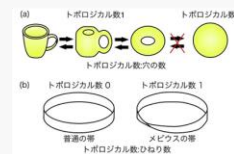
電気伝導度などに方向性が現れる

物理を貫く数理的概念

トポロジー



新学術領域研究
トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア



多極子



新学術領域研究
J-Physics: 多極子伝導系の物理



量子情報



学術変革領域研究(A)
極限宇宙の物理法則を創る



量子多体系が生み出す多彩な現象と 幅広いアプローチ

超流動・超伝導

近藤効果

重い電子系

強磁性体・反強磁性体

量子臨界現象

- ・ (動的) 平均場近似
- ・ ギンツブルク・ランダウ理論
- ・ 繰りこみ群
- ・ ベーテ仮説解

- ・ 共形場理論
- ・ 場の理論
- ・ 乱雑位相近似
- ・ FLEX近似 などなど...

非が付くフロンティア

線形応答

$$j = \sigma E \quad \text{オームの法則}$$

非線形応答

$$j^\alpha = \sigma^{\alpha\beta} E^\beta + \sigma^{\alpha;\beta\gamma} E^\beta E^\gamma + \dots$$

エルミート

$$H = H^\dagger$$

$$E_n |n\rangle = H |n\rangle, E_n \in \mathbb{R}$$

非エルミート

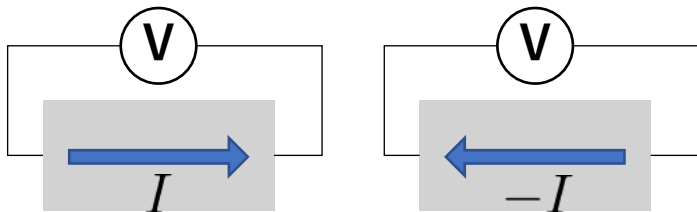
$$H \neq H^\dagger$$

$$E_n |n_R\rangle = H |n_R\rangle, E_n \langle n_L| = \langle n_L| H$$

一般に固有値は複素数

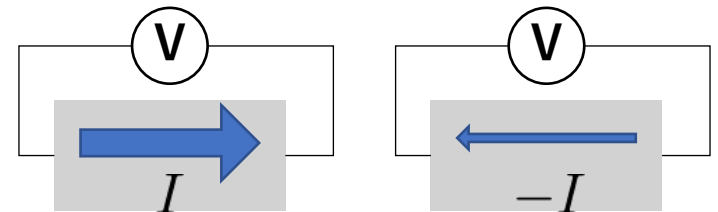
相反性

$$R(I) = R(-I)$$



非相反性

$$R(I) \neq R(-I)$$



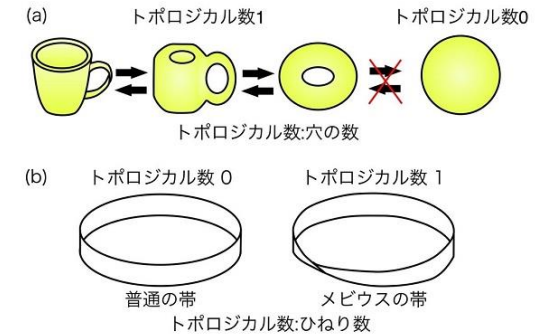
電気伝導度などに方向性が現れる

物理を貫く数理的概念

トポロジー



新学術領域研究
トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア



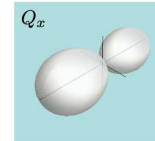
多極子



新学術領域研究
J-Physics：多極子伝導系の物理

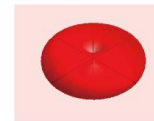
4種類之多極子

電気多極子



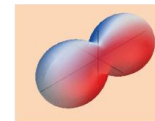
極性テンソル
(時間反転偶)

磁気多極子



軸性テンソル
(時間反転奇)

磁気トロイダル



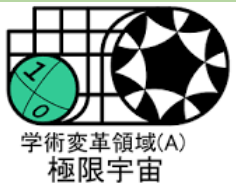
極性テンソル
(時間反転奇)

電気トロイダル

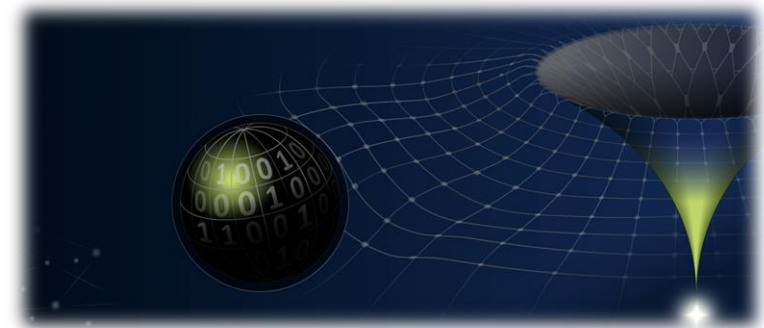


軸性テンソル
(時間反転偶)

量子情報



学術変革領域研究(A)
極限宇宙の物理法則を創る



量子多体系が生み出す多彩な現象と 幅広いアプローチ

超流動・超伝導

近藤効果

重い電子系

強磁性体・反強磁性体

量子臨界現象

- (動的) 平均場近似
- ギンツブルク・ランダウ理論
- 繰りこみ群
- ベーテ仮設解

- パルケ近似
- バンド理論
- 乱雑位相近似
- FLEX近似 などなど...

非が付くフロンティア

非線形応答

$$j^\alpha = \sigma^{\alpha\beta} E^\beta + \sigma^{\alpha;\beta\gamma} E^\beta E^\gamma + \dots$$

非エルミート

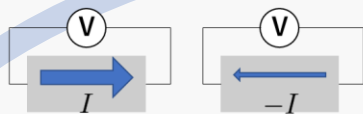
$$H \neq H^\dagger \quad \text{場合によっては } \det H = 0$$

$$E_n |n_R\rangle = H |n_R\rangle, E_n \langle n_L| = \langle n_L| H$$

一般に固有値は複素数

非相反性

$$R(I) \neq R(-I)$$



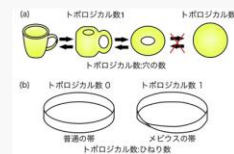
電気伝導度などに方向性が現れる

物理を貫く数理的概念

トポロジー



新学術領域研究
トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア



多極子



新学術領域研究
J-Physics: 多極子伝導系の物理



量子情報



学術変革領域研究(A)
極限宇宙の物理法則を創る



量子多体系が生み出す多彩な現象と 幅広いアプローチ

超流動・超伝導

近藤効果

重い電子系

強磁性体・反強磁性体

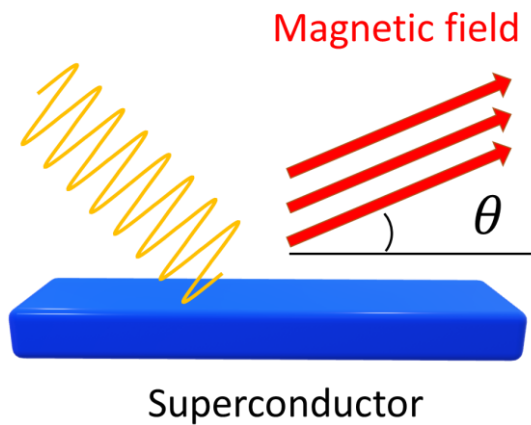
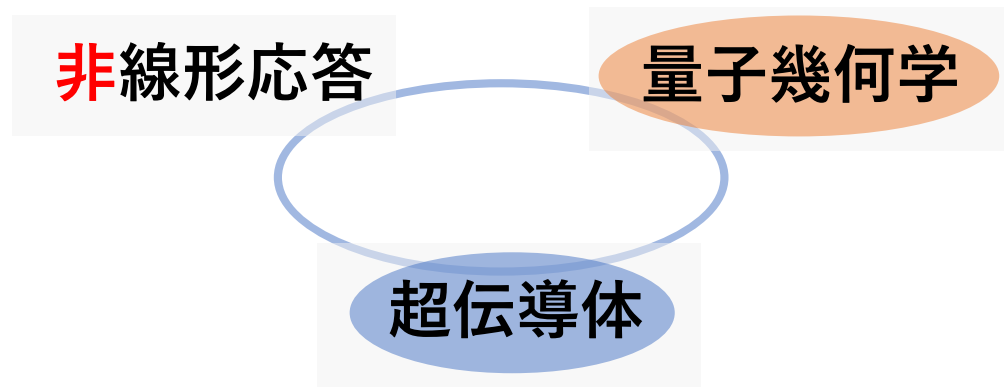
量子臨界現象

- ・ (動的) 平均場近似
- ・ ギンツブルク・ランダウ理論
- ・ 繰りこみ群
- ・ ベーテ仮説解

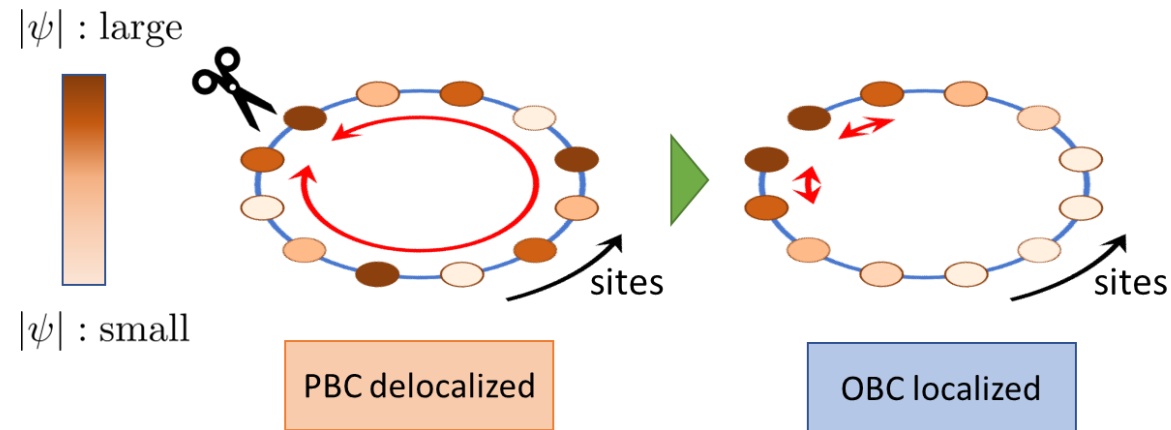
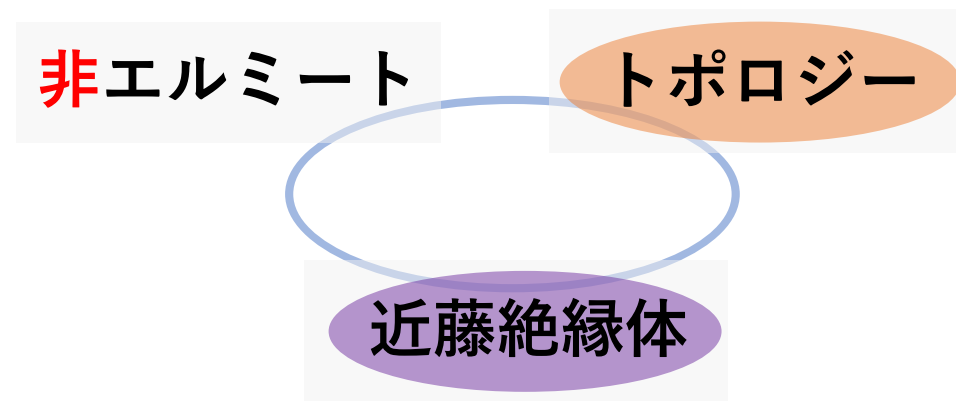
- ・ 共形場理論
- ・ 場の理論
- ・ 乱雑位相近似
- ・ FLEX近似 などなど...

研究紹介

1. 超伝導体の非線形応答 (D1・田中)



2. 近藤絶縁体における非エルミート表皮効果 (D1・金城)



非線形応答

線形応答

$$j = \sigma E \quad \text{オームの法則}$$



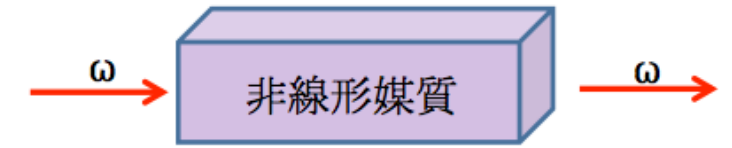
非線形応答

$$j^\alpha = \sigma^{\alpha\beta} E^\beta + \sigma^{\alpha;\beta\gamma} E^\beta E^\gamma + \dots$$

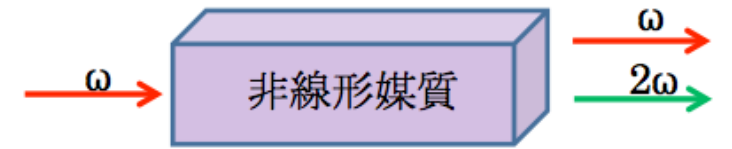
特に単色光 $E = E_0 \cos \omega t$ を照射した場合...

$\sigma^{\alpha;\beta\gamma}(0; \omega, -\omega)$: ω と $-\omega$ の成分から直流成分が発生 → 光電流発生

$\sigma^{\alpha;\beta\gamma}(2\omega; \omega, \omega)$: ω と ω の成分から 2ω 成分が発生 → 第二次高調波発生



(a) 線形応答の場合



(b) 非線形応答の場合

空間反転操作

$$j^\alpha \rightarrow -j^\alpha$$

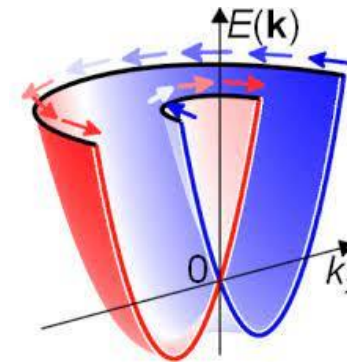
$$E^\alpha \rightarrow -E^\alpha$$

$$E^\alpha E^\beta \rightarrow E^\alpha E^\beta$$

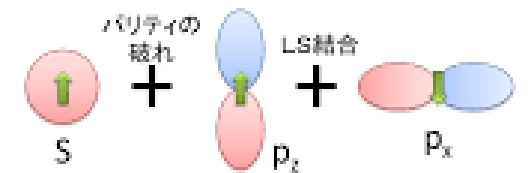


偶数次の非線形応答には
空間反転対称性の破れが必要

空間反転対称性の破れに
伴う様々な効果



ラシュバ効果



パリティ混成

超伝導体とは？

電子間に有効的な引力ある場合、電子がペアを組んで新しい状態が実現する

新たな現象

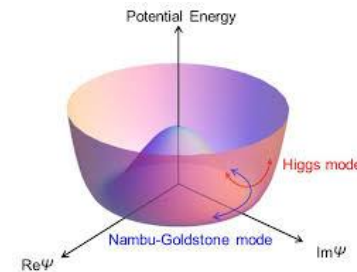
- ゼロ電気抵抗
- 磁束の量子化
- Josephson効果



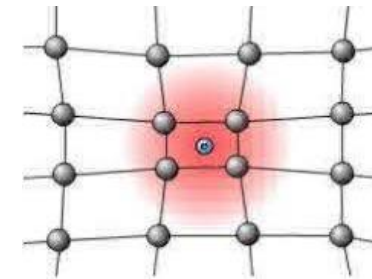
完全反磁性
(Meissner-Ochsenfeld効果)

超伝導体メカニズム

自発的対称性の破れ

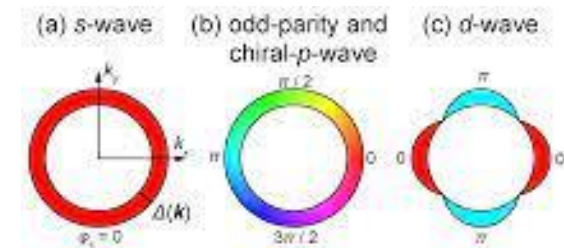


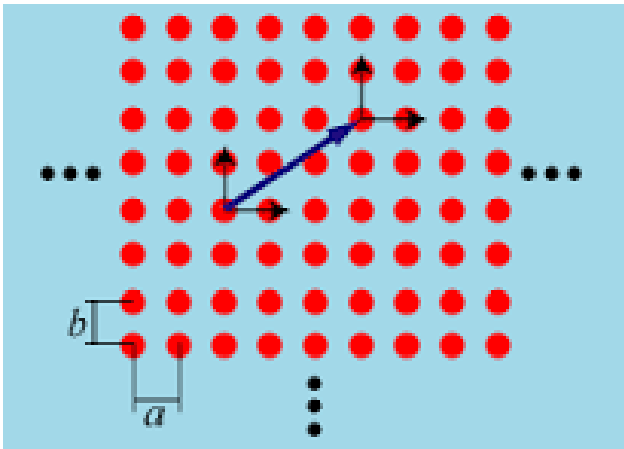
BCS理論



多様な超伝導体

- スピン三重項超伝導体
- トポロジカル超伝導体
- 高温超伝導体
- 異方的超伝導体





結晶中のハミルトニアン：
$$\hat{H}_0 = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\hat{r})$$
$$V(\mathbf{r} + a\mathbf{e}_i) = V(\mathbf{r})$$

Schrödinger方程式：
$$\epsilon_n \psi_n(\mathbf{r}) = H \psi_n(\mathbf{r})$$


Blochの定理

$$\epsilon_{n\mathbf{k}} u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = H_{\mathbf{k}} u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \quad (\mathbf{k}: \text{結晶運動量})$$

但し、
$$H_{\mathbf{k}} = e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} H e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$$
$$\psi_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r})$$

並進対称性 (真空)

$$H(\mathbf{r}) = H(\mathbf{r} + \mathbf{t}), \forall \mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$$

➡ 運動量： p

並進対称性 (結晶)

$$H(\mathbf{r}) = H(\mathbf{r} + a\mathbf{e}_i)$$

➡ 結晶運動量： k

電流を調べるため電子の「速度」が知りたい

$$\mathbf{v}_{\mathbf{k}} = \frac{\partial H_{\mathbf{k}}}{\partial \mathbf{k}} : \text{速度演算子} \quad (\text{c.f. ハミルトン力学: } \dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p})$$

$$\mathbf{v}_{n\mathbf{k}} = \langle u_{n\mathbf{k}} | \mathbf{v}_{\mathbf{k}} | u_{n\mathbf{k}} \rangle = \frac{\partial \epsilon_{n\mathbf{k}}}{\partial \mathbf{k}} ?$$

接続とは？ 曲率とは？

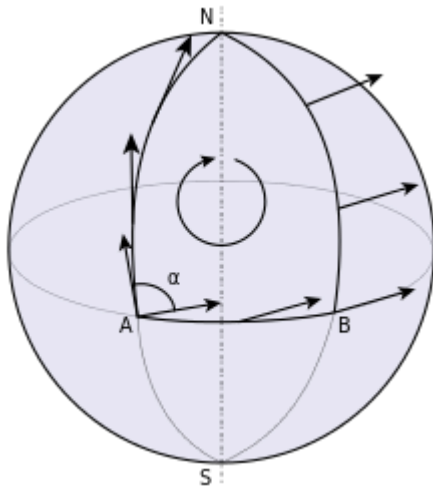
局所ゲージ変換： $\varphi(x) \rightarrow \varphi'(x) = \varphi(x)e^{i\theta(x)}$ 各座標 x で自由にゲージを選ぶことができる

ここで微分操作を考えたい

$$\partial_\mu \varphi(x) dx^\mu = \varphi(x + dx) - \varphi(x) \quad ?$$

座標 x と $x + dx$ でバラバラにゲージを選ぶことができる

➡ ただ x と $x + dx$ の値を比べるだけなのはナンセンス

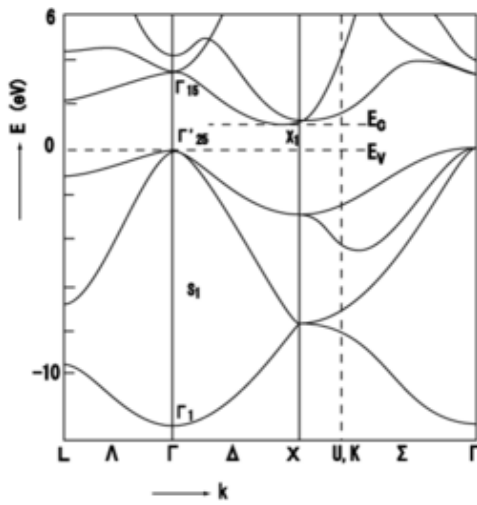


そのために x から $x + dx$ への『平行移動』を考える

$$\varphi_{\parallel}(x^\mu + dx^\mu) = \varphi(x) + iA_\mu(x)\varphi(x)dx^\mu$$

A_μ ：接続場、ゲージ場

後はどのような接続場を用意してやればいいか？



$$v_{nk} = \langle u_{nk} | v_k | u_{nk} \rangle = \frac{\partial \epsilon_{nk}}{\partial k} ?$$

つまり ϵ_{nk} の情報だけで電流が記述できるか？

ハミルトニアンが時間依存する場合にはできない

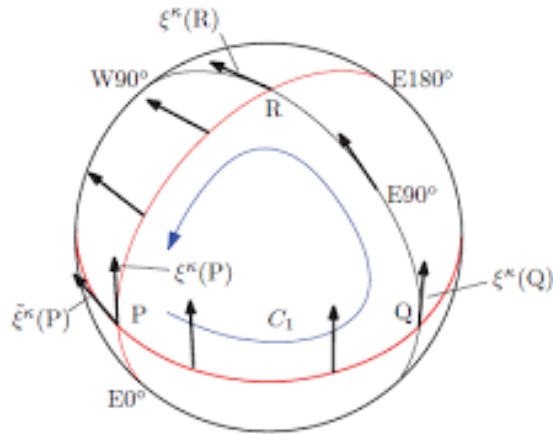
例えば静電場でのベクトルポテンシャル $A(t) = Et$

$$\epsilon_{nk}(t) |u_{nk}(t)\rangle = H_k(t) |u_{nk}(t)\rangle$$

Schrödinger方程式：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_{nk}(t)\rangle = H_k(t) |\psi_{nk}(t)\rangle$$

$$|\psi_{nk}(t=0)\rangle = |u_{nk}(t=0)\rangle$$



$$v_{nk}^{\alpha} = \langle \psi_{nk} | v_k^{\alpha} | \psi_{nk} \rangle \simeq \frac{\partial \epsilon_{nk}}{\partial k^{\alpha}} - \Omega_{k^{\alpha}t}^n$$

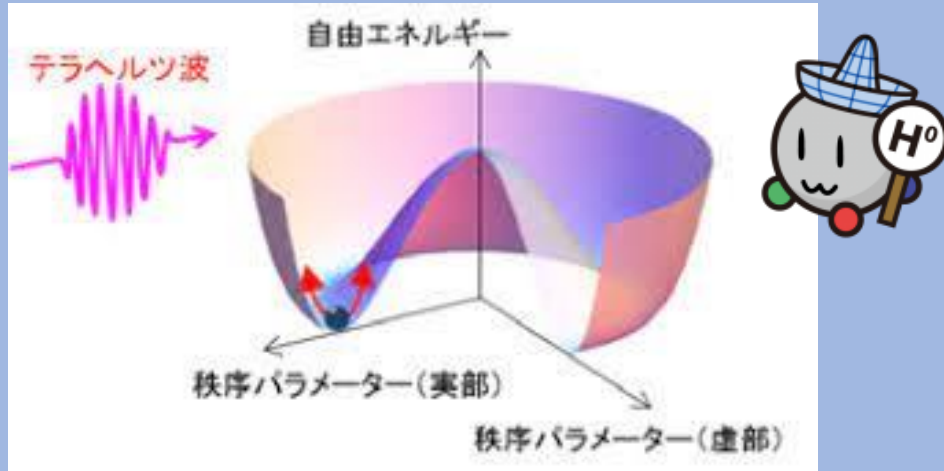
Berry曲率：

$$\Omega_{k^{\alpha}t}^n = i \left[\left\langle \frac{\partial u_n}{\partial k^{\alpha}} \middle| \frac{\partial u_n}{\partial t} \right\rangle - \left\langle \frac{\partial u_n}{\partial t} \middle| \frac{\partial u_n}{\partial k^{\alpha}} \right\rangle \right]$$

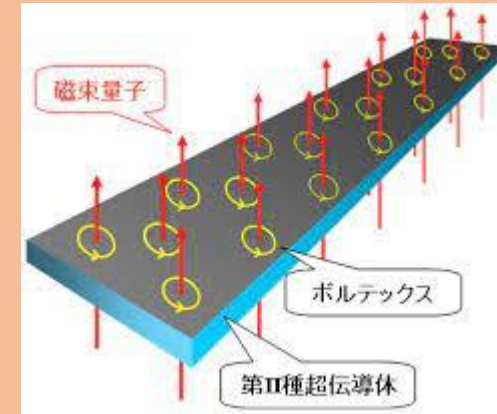
曲がった幾何は面白い!?

超伝導の様々な応答メカニズム

Higgsモード



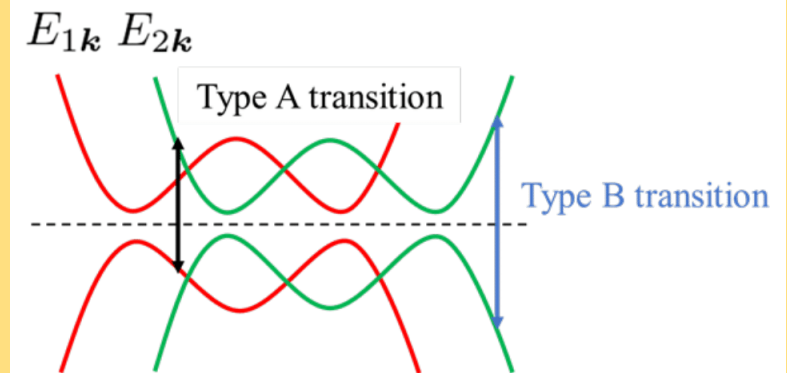
ボルテックス



秩序変数の熱揺らぎ

$$\Gamma \partial_t \Psi(\mathbf{r}, t) = -\eta(\mathbf{r}, t) \Psi(\mathbf{r}, t) + f(\mathbf{r}, t)$$
$$\langle f^*(\mathbf{r}, t) f(\mathbf{r}', t') \rangle = 2\hbar k_B T \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t')$$

準粒子励起



近藤絶縁体における 非エルミート表皮効果

凝縮系理論研究室

Petersグループ D1 金城信

研究をざっくり一言でまとめると。。。。

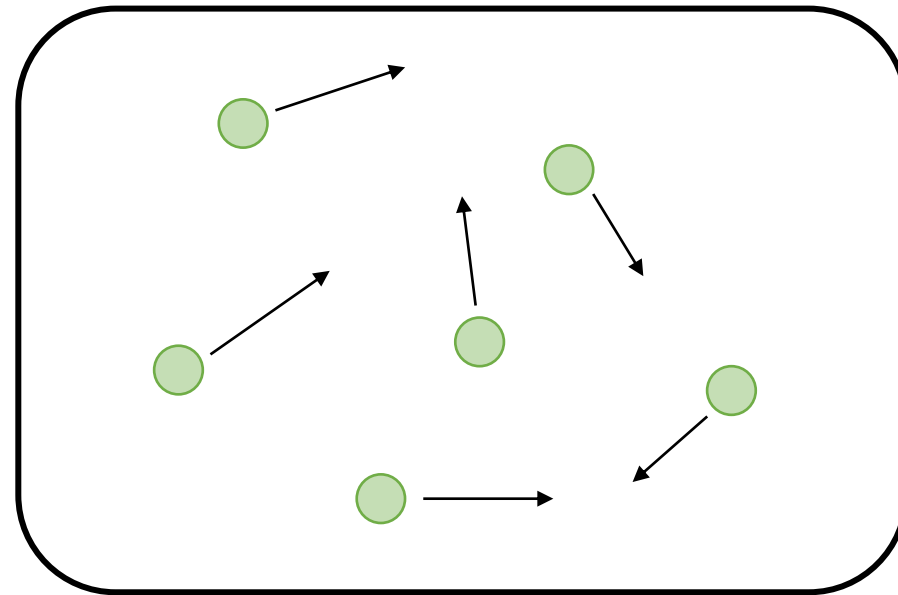
強相関電子系で現れる

非エルミートトポロジカル現象を解析

強相関電子系と量子開放系

固体物理

- 固体中の電子に注目する物理



□ 固体

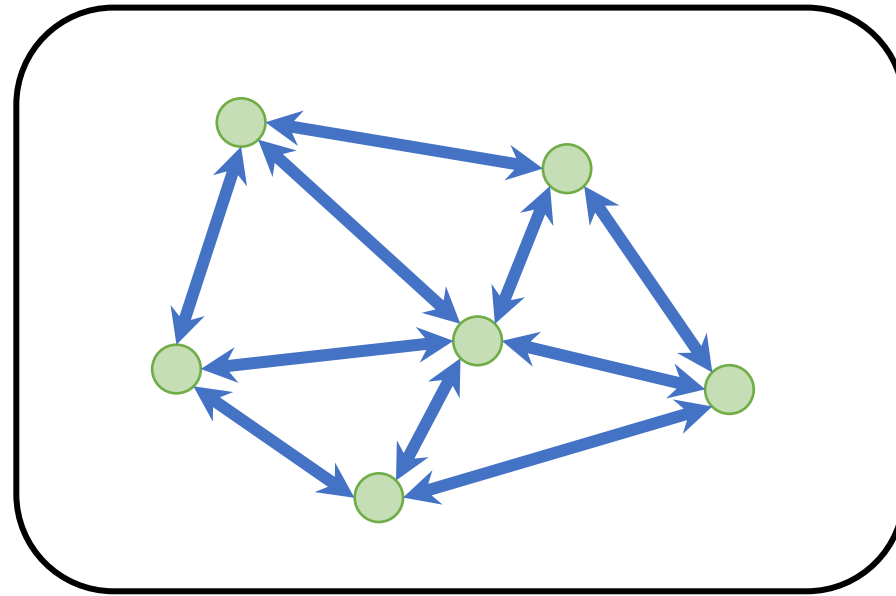
● 電子

系の時間発展、統計的性質などは **ハミルトニアン** が決める

強相関電子系と量子開放系

強相関電子系

- 電子間の相互作用に由来する物理



□ 固体

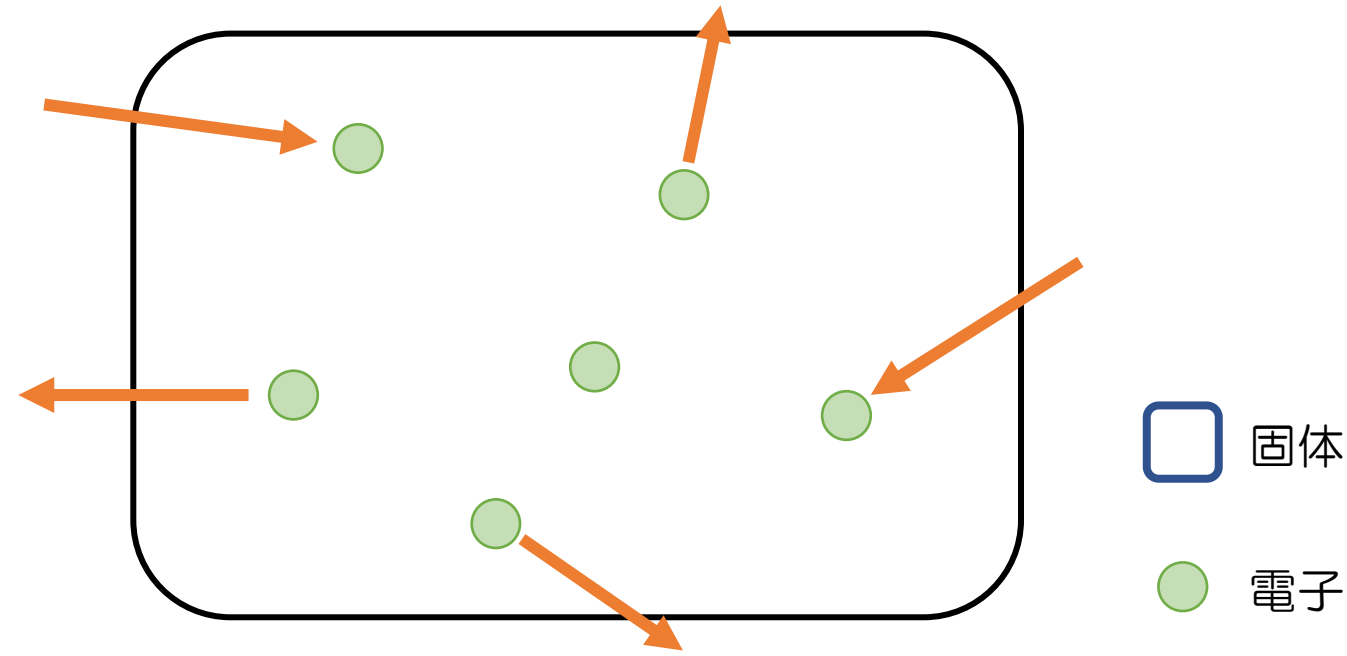
● 電子

ハミルトニアン = 自由電子部分 + 相互作用部分

強相関電子系と量子開放系

量子開放系

- 系と環境の間の相互作用に由来する物理

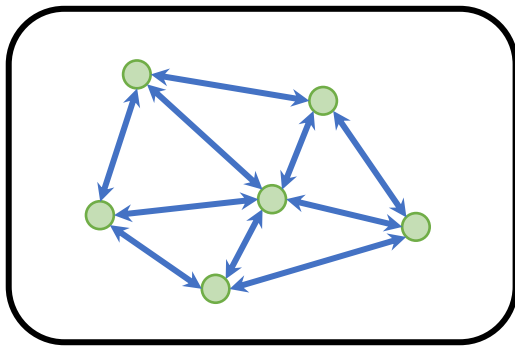


ハミルトニアン = 自由電子部分 + 散逸・流入部分

強相関電子系と量子開放系

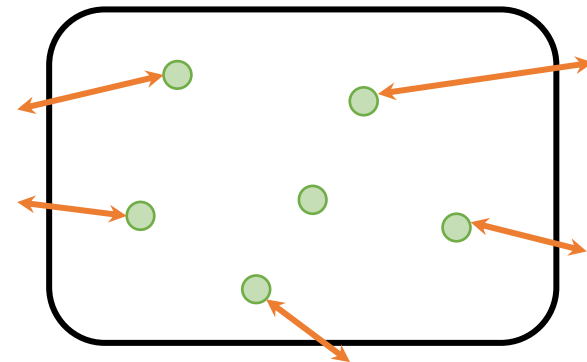
強相関電子系

- 電子間の強い相互作用に由来した物性が発現
 - Mott絶縁体
 - 近藤効果 など



量子開放系

- 系と外界の間の相互作用に由来した物性が発現
 - PT対称性の破れ
 - 非エルミート表皮効果 など



強相関電子系と量子開放系

強相関電子系

- 電子間の強い相互作用に由来した物性が発現
 - Mott絶縁体
 - 近藤効果 など

量子開放系

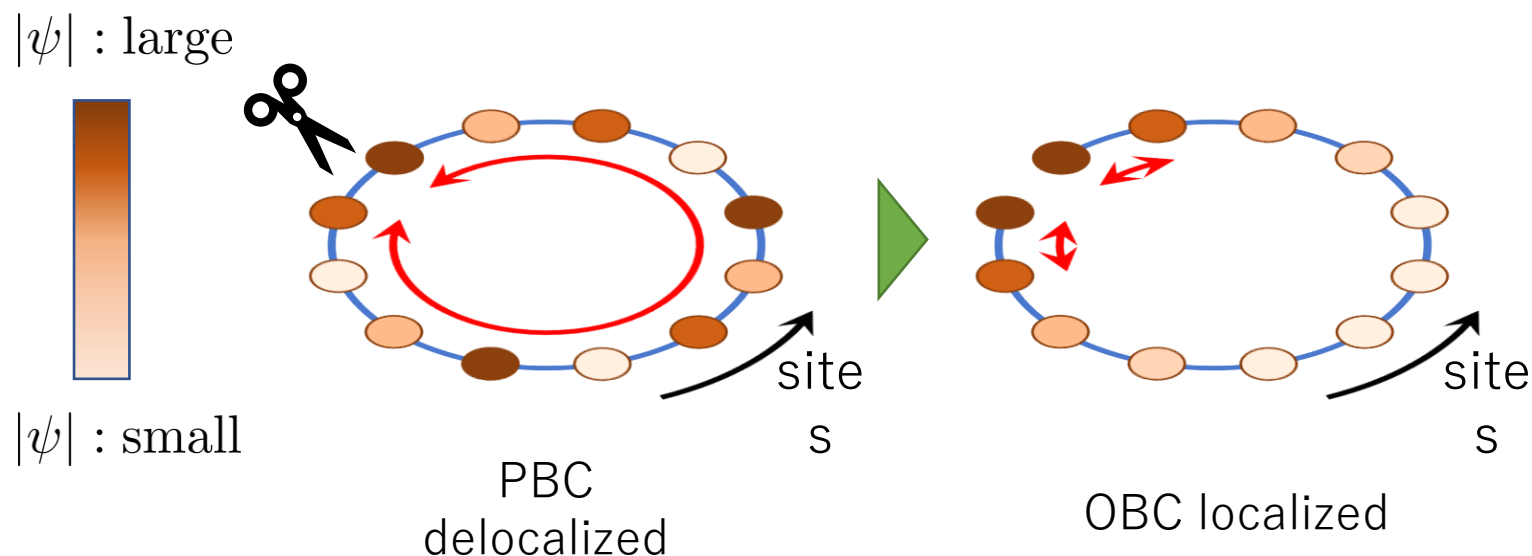
- 系と外界の間の相互作用に由来した物性が発現
 - PT対称性の破れ
 - 非エルミート表皮効果 など

有効ハミルトニアンが非エルミートという共通点

⇒ 概念・手法の交換ができるのでは？

非エルミート表皮効果

- バンド理論：周期境界条件を課して解析
 - 境界の影響を無視する近似 (= 固体の中身は境界の影響を受けない)
- 系の波動関数が非エルミート性によって境界条件に敏感に
 - 波動関数の局在、バンド理論の破綻 ⇒ **非エルミートトポロジー**



非エルミート表皮効果

- バンド理論：周期境界条件を課して解析
 - 境界の影響を無視する近似 (= 固体の中身は境界の影響を受けない)
- 系の波動関数が非エルミート性によって境界条件に敏感に
 - 波動関数の局在、バンド理論の破綻 $\Rightarrow$ **非エルミートトポロジー**

$|\psi|$: large

① 近藤絶縁体（強相関係）で現れる？

② 電子状態に伴って非エルミート表皮効果は変わる？

$|\psi|$: small

PBC
delocalized

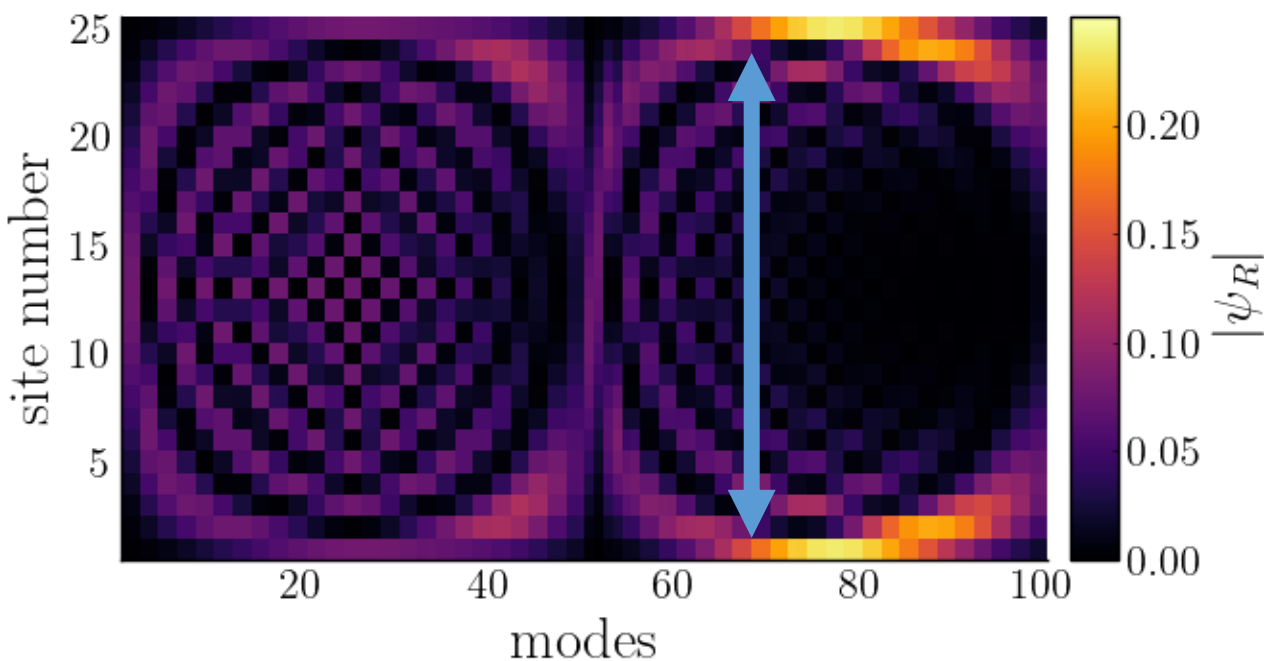
S

OBC localized

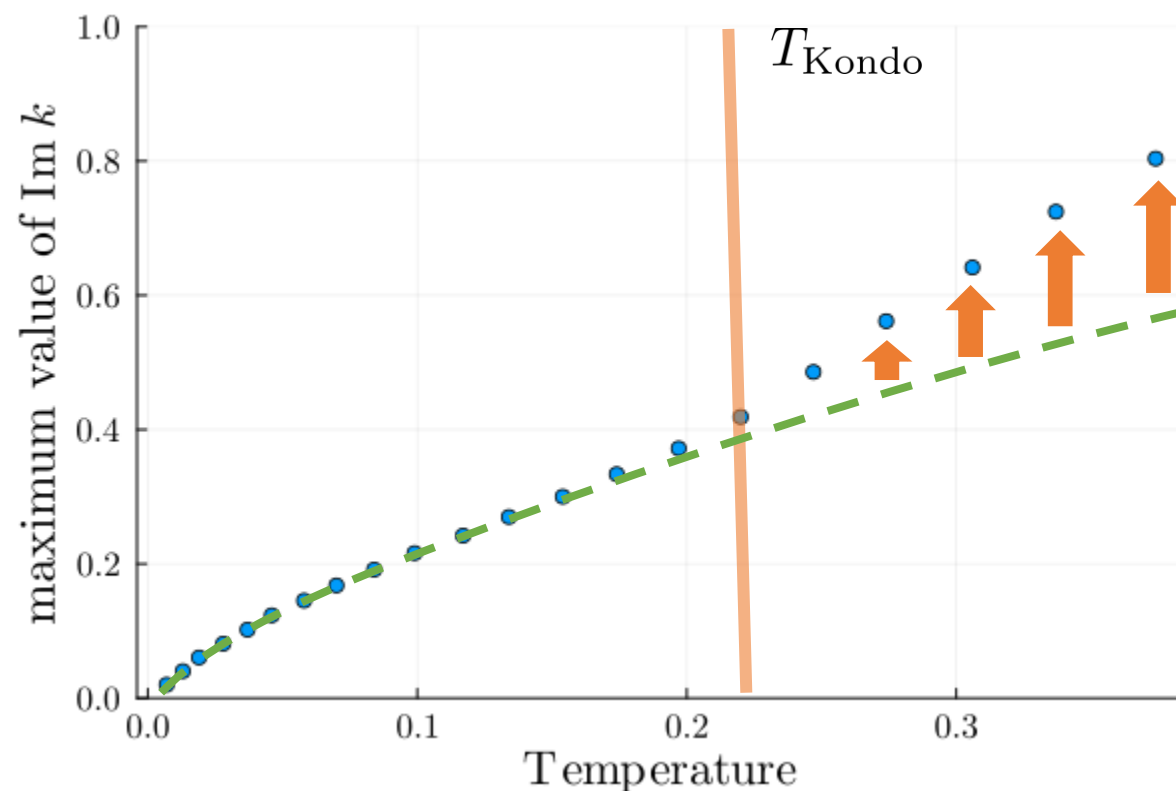
S

結果のまとめ

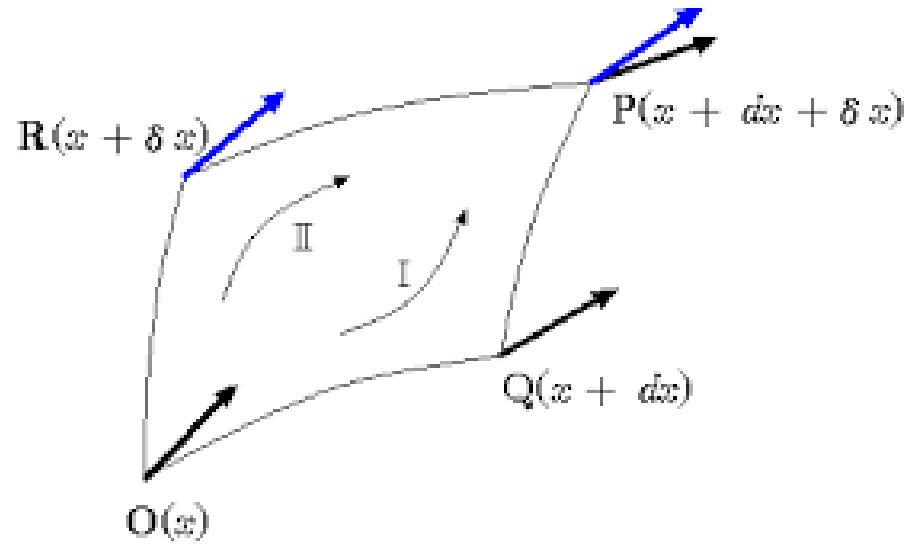
① スピン軌道相互作用が
非エルミート表皮効果を誘起



② 波動関数の局在度は
固体中の電子の状態に伴い変化



$$\varphi(x + dx) - \varphi_{\parallel}(x + dx) = (\partial_{\mu}\varphi(x) - i\mathcal{A}_{\mu}(x)\varphi(x))dx^{\mu} = D_{\mu}\varphi(x)dx^{\mu} \quad : \text{共変微分}$$



$$\text{局所ゲージ変換} : \varphi(x) \rightarrow \varphi'(x) = \varphi(x)e^{i\theta(x)}$$

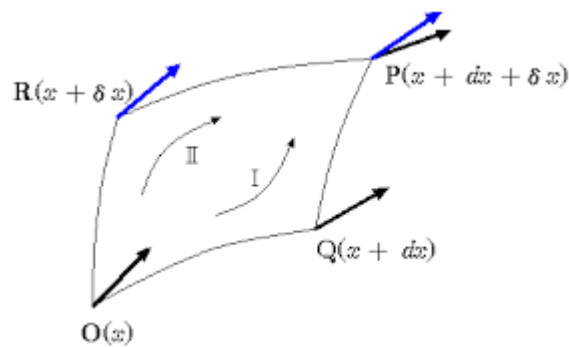
共変微分にも同じ局所ゲージ変換を要請

$$(D_{\mu}\varphi)'(x) = e^{i\theta(x)}D_{\mu}\varphi(x)$$



ゲージ場の変換性が以下のように要請される！

$$\mathcal{A}_{\mu}(x) \rightarrow \mathcal{A}'_{\mu}(x) = \partial_{\mu}\theta(x) + \mathcal{A}_{\mu}(x)$$



$$\varphi(x) \rightarrow \varphi'(x) = \varphi(x)e^{i\theta(x)}$$

$$\varphi_{||}(x^{\mu} + dx^{\mu}) = \varphi(x) + i\mathcal{A}_{\mu}(x)\varphi(x)dx^{\mu}$$

$$\begin{aligned} & \varphi(x^{\mu} + dx^{\mu}) - \varphi_{||}(x^{\mu} + dx^{\mu}) \\ &= (\partial_{\mu}\varphi(x^{\mu}) - i\mathcal{A}_{\mu}\varphi(x^{\mu})) dx^{\mu} \\ &= D_{\mu}\varphi(x)dx^{\mu} \end{aligned}$$

$$\varphi(x) \rightarrow \varphi_{||}^{\parallel}(x + dx + dy)$$

$$\varphi(x) \rightarrow \varphi_{||}^{\parallel}(x + dx + dy) \quad (D_{\mu}\varphi)'(x) = e^{i\theta(x)} D_{\mu}\varphi(x)$$

$$D_{\mu}(x) \rightarrow D'_{\mu}(x) = e^{i\theta(x)} D_{\mu}(x)e^{-i\theta(x)}$$

非線形応答

$$j^\alpha = \sigma^{\alpha\beta} E^\beta + \sigma^{\alpha;\beta\gamma} E^\beta E^\gamma + \dots$$

非エルミート

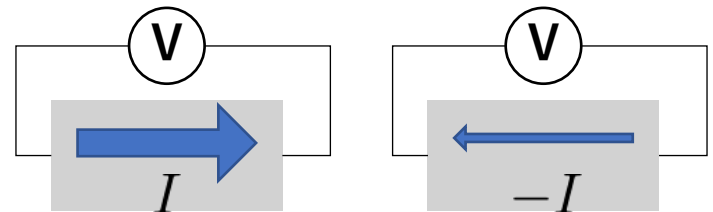
$$H \neq H^\dagger \quad \text{場合によっては } \det H = 0$$

$$E_n |n_R\rangle = H |n_R\rangle, E_n \langle n_L| = \langle n_L| H$$

一般に固有値は複素数

非相反性

$$R(I) \neq R(-I)$$



電気伝導度などに方向性が現れる