

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 (13:15~13:45)
- 研究室紹介 (13:45~14:00)





welcome

to Lorentz Festival

&

Condensed Matter Theory Group



Contents



1. 柳瀬教授による研究紹介 (13:15~13:45)
2. 研究室紹介 (13:45~14:00)
 - ✓ 大学院生の生活
 - ✓ 入学後の流れ



Contents



1. 柳瀬教授による研究紹介 (13:15~13:45)

2. 研究室紹介 (13:45~14:00)

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ



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2回生)



Contents

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ

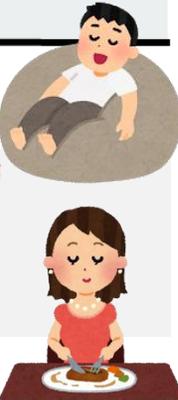


Contents

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ



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) 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）



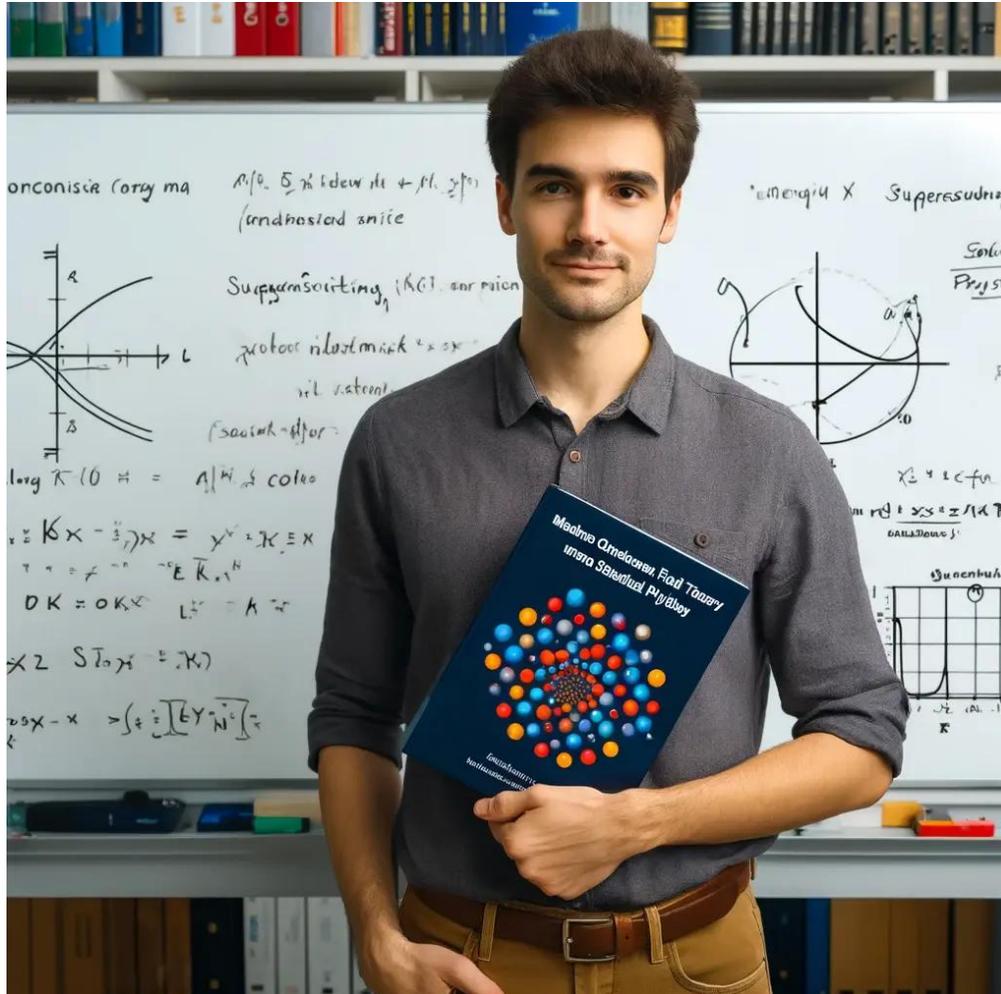
	月	火	水	木	金	土	日
午前							
午後	自主ゼミ (先輩・後輩と Keldysh)	先行研究 リサーチ	凝縮系 セミナー	ランチ セミナー	共同 研究ミー ティング (@Zoom)	ゼミ 予習	ゼミ 予習
	先行研究 リサーチ	自主 ゼミ (他大学の知 人とトポロ ジー)	TA 業務	先行研究 リサーチ		自主 ゼミ (素粒子論 の学生と 場の理論)	
深夜		研究 計算	研究 計算		研究 計算		帰宅
	帰宅	帰宅	帰宅	帰宅	帰宅	帰宅	

Contents

- ✓ 大学院生の生活
- ✓ 入学後の流れ

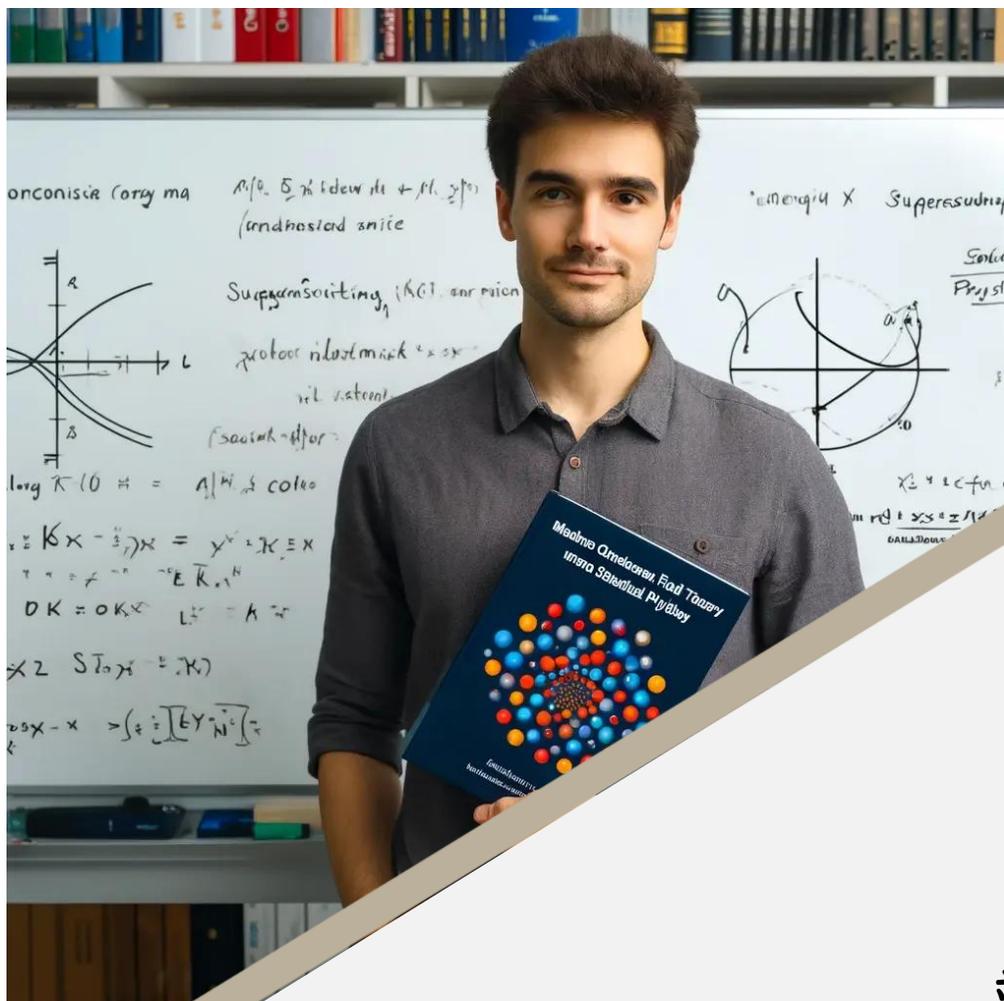


4～5月頃の修士一年生



“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



AGD



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



准教授 池田隆介



准教授 吉田恒也



講師 Robert Peters



助教 手塚真樹



助教 大同暁人

夏以降の修士一年生

学会に参加したい



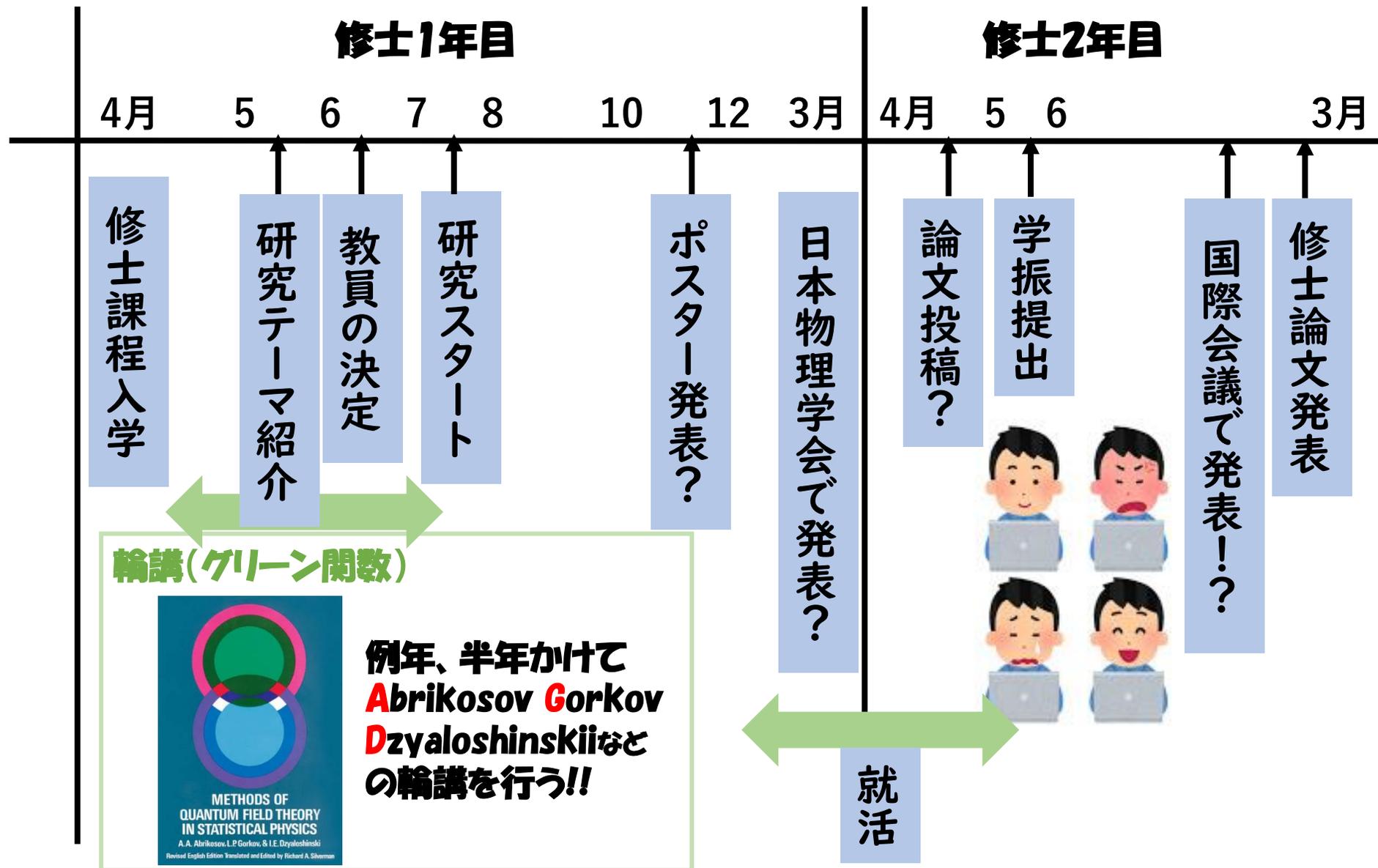
必死に勉強!



論文を書きたい



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～

大学院生との交流会

(研究紹介や質疑応答など)

以下、雑談コーナー用資料

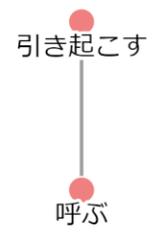
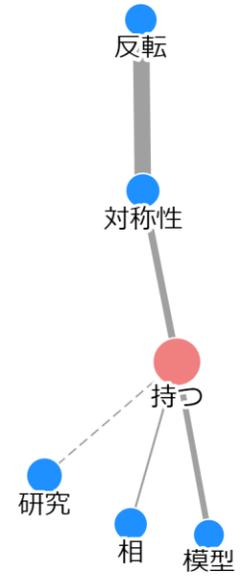
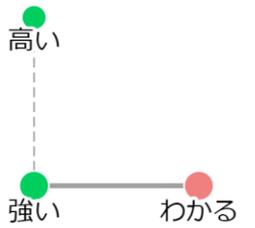
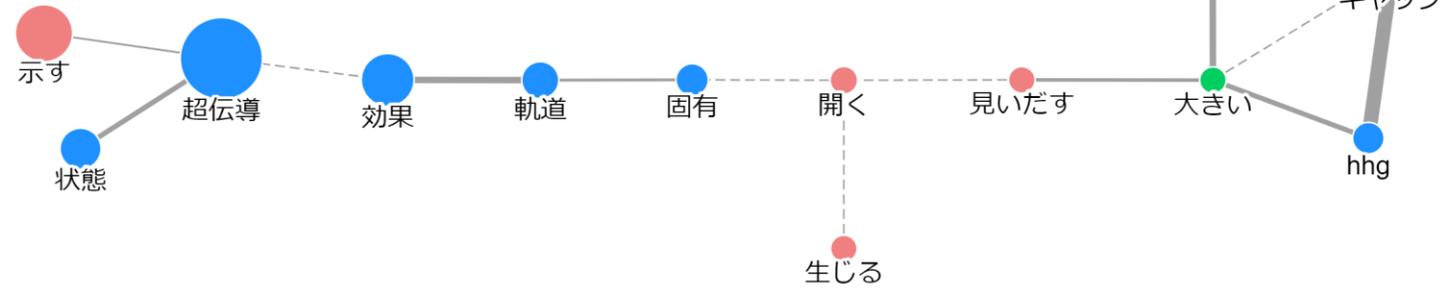
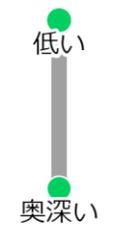
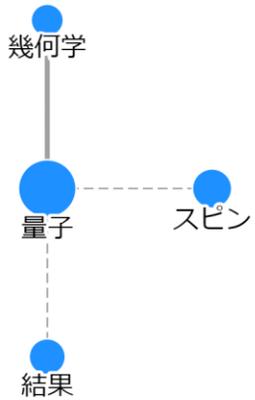
アブスト・テキストマイニング

- ここ数年の凝縮系理論から出た論文のアブストラクト（概要）をテキストマイニングで解析した
 - 対象
 - 2022~2024に出た論文。但し、凝縮系理論研究のサイトの論文リストに掲載されているもののみを対象にした
 - 方法
 - アブストラクトの英文を一旦、DeepLで日本語に翻訳、それを解析サイトで解析した
 - 内容
 - Wordクラウド
 - ワードクラウドスコアが高い単語を複数選び出し、その値に応じた大きさと色で図示しています。単語の色は品詞の種類で異なり、青色が名詞、赤色が動詞、緑色が形容詞、灰色が感動詞を表しています。単語をクリックすることで、詳しい本文をご覧いただけます。
 - 共起キーワード
 - 文章中出现する単語の出現パターンが似たものを線で結んだ図です。出現数が多い語ほど大きく、また共起の程度は強い方から順に 太い実線 > 細い実線 > 破線 で描画されます。

グループ全体

超伝導

高い 超える かわる 新しい 持つ 解析 特徴 反転 調べる 状態 ギャップ 異い 効果 幾何学 揺らぎ モデル 領域 基づく 効果 薄い 相 おる 結果 含む 温度 引き起こす 応答 できる 相互作用 使いやすい 誘起 軌道 示す 奥深い 依存 開く 対称性 研究 sde 量子 模型 固有 見いだす づける 電流 行う hhg 電子 理論 沿う 呼ぶ 磁場 スピン 用いる 現れる 強い 鋭い 明らか 小さい 近い 素早い 低い わかる 分かる 大きい

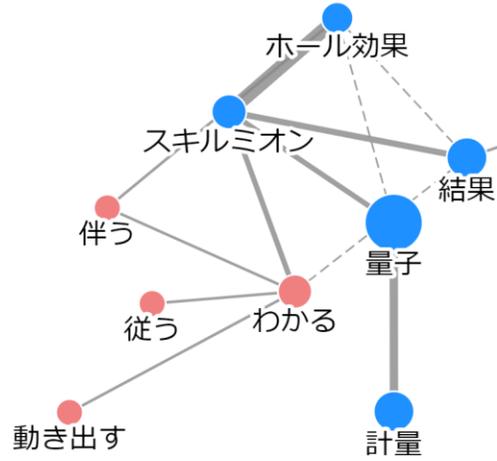
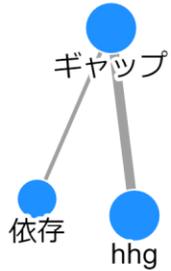
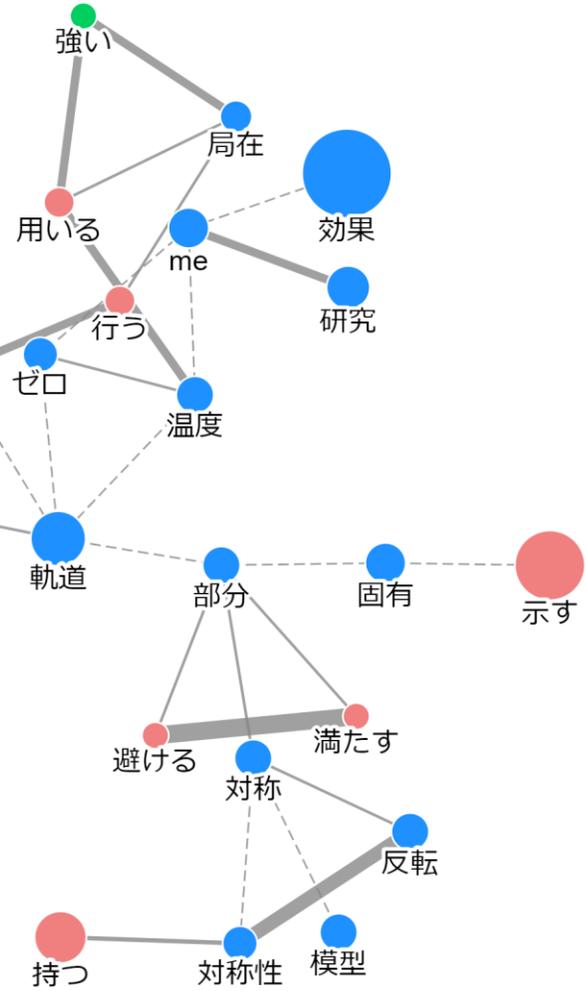
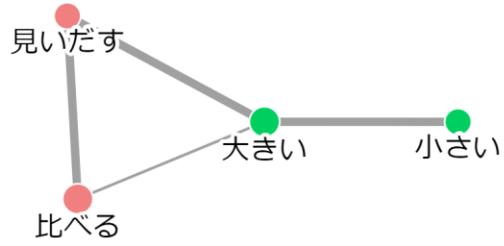
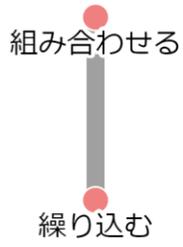


柳瀬グループ

奥深い かわる 状態 待ち望む
見いだす 基づく 異い 軌道 破れる
属する 応答 幾何学 反強磁性 効果 低い
生じる 呼ぶ ポール 軸 e2 薄い 相 特徴
超伝導 クーパー 三重項 揺らぎ
ut sde 電子 磁場 量子 強磁性 これら 調べる
現れる 小さい 高い 探る 対 理論 反転 引き起こす
誘起 対称性 示す アナ 相互作用 沿う 用いる
果たす ダイオード 電流 名づける 持つ
うる 異なる スピン 流れる 強い 明らか

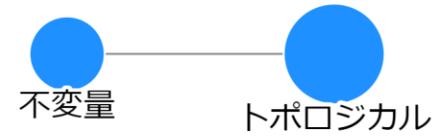
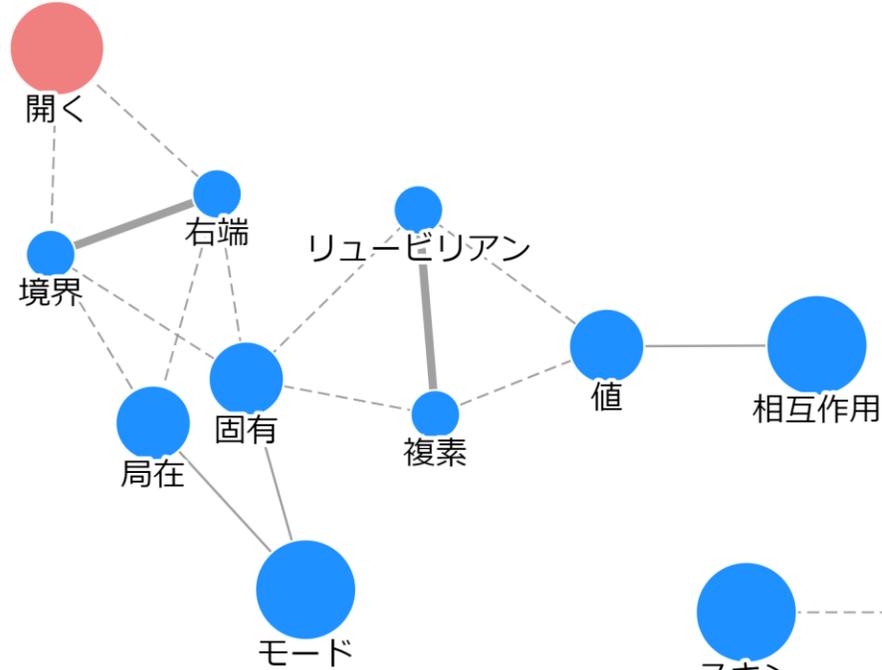
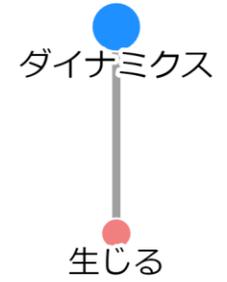
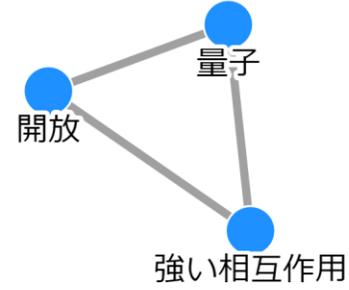
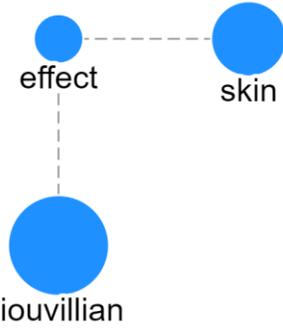
Petersグループ

動き出す 果たす 比べる
含む 温度 見いだす ギャップ
強い かかわる 依存 結果
等しい 解析 ゼロ 電子 対称性 計量 模型 従う 小さい
スペクトル 研究 スキルミオン
理論 伝導 局在 hhg 量子 伴う 領域 繰り込む
わかる 対称 gqm 相互作用 超伝導 基づく
用いる 持つ 反転 存在 避ける
満たす 示す ホール効果 軌道 スピン 大きい
現れる エーデルシュタイ... 固有 me 組み合わせる
効果 行う 部分
当てる 超える



吉田グループ

開放
モード 数値 引き起こす 境界 スピン 開く
値 用いる 解析 強い相互作用 skin 相関 行う
境界条件 強い 示す 温度
見いだす トポロジカル 複素 調べる
生じる 相互作用 不変量 局在 結果
右端 存在 効果 軌道 effect
ダイナミクス 誘起 効果 づける
繰り込む liouville 固有値
dmft リュービリアン 量子 スキン 持つ
固有 捉える



池田グループ

最近
報告 影響 論争 率 可能性
現在 クリーン データ 曲線 論じる 図 再検討 相 存在
理論 伝導 清浄 液体
触発
抵抗 薄膜 超伝導 揺らぎ
温度
転移 下 ラーキン 量子 絶縁体
特徴
アスラマソフ 磁場 扇形 渦 池田 結果
ゼロ 説明
及ぼす 示唆 領域
振る舞い 可能

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

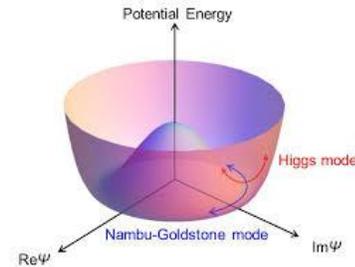
- ゼロ電気抵抗
- 磁束の量子化
- Josephson効果



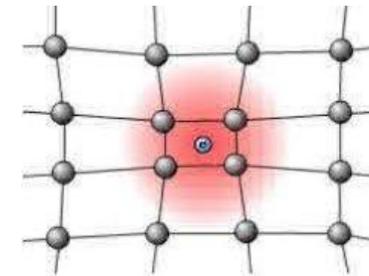
完全反磁性
(Meissner-Ochsenfeld効果)

超伝導体メカニズム

自発的対称性の破れ

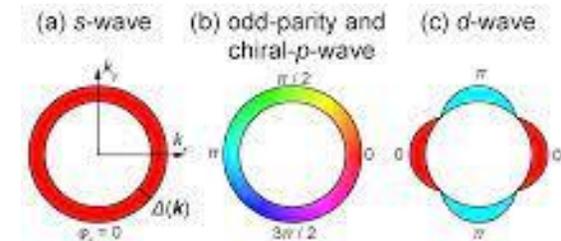


BCS理論



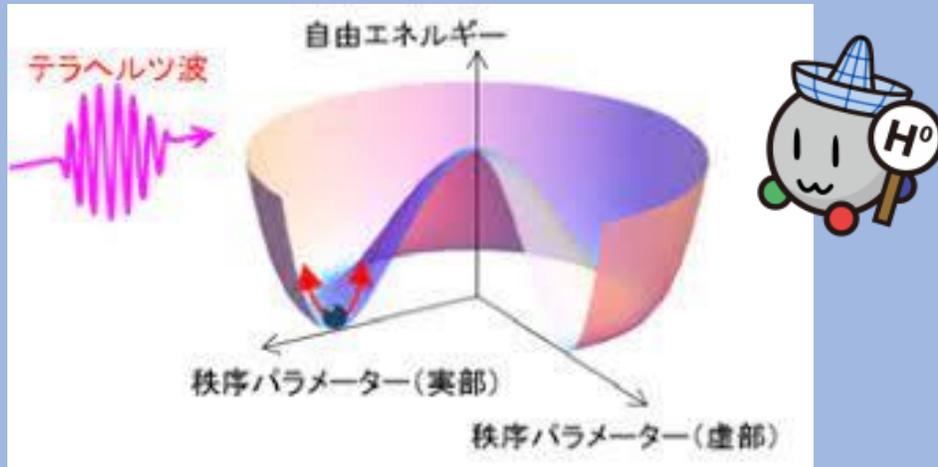
多様な超伝導体

- 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

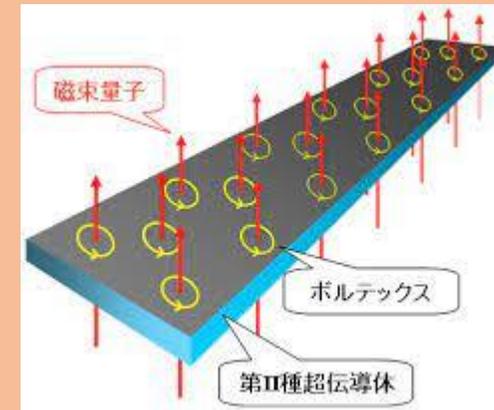


超伝導の様々な応答メカニズム

Higgsモード



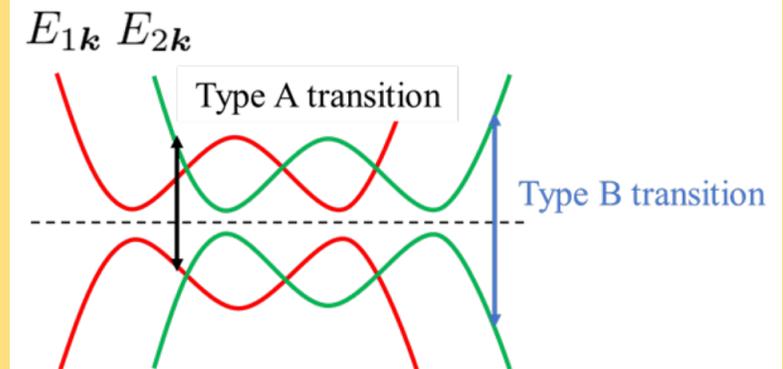
ボルテックス



秩序変数の熱揺らぎ

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

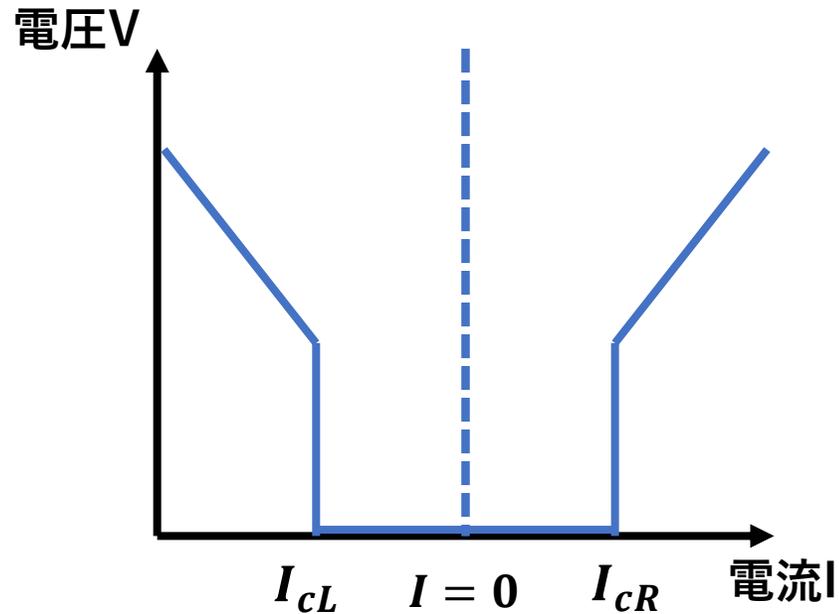
準粒子励起



超伝導ダイオード効果 (SDE)

ある閾値以上の電流を流すと超伝導状態が壊れることが知られているが…

通常の超伝導の場合

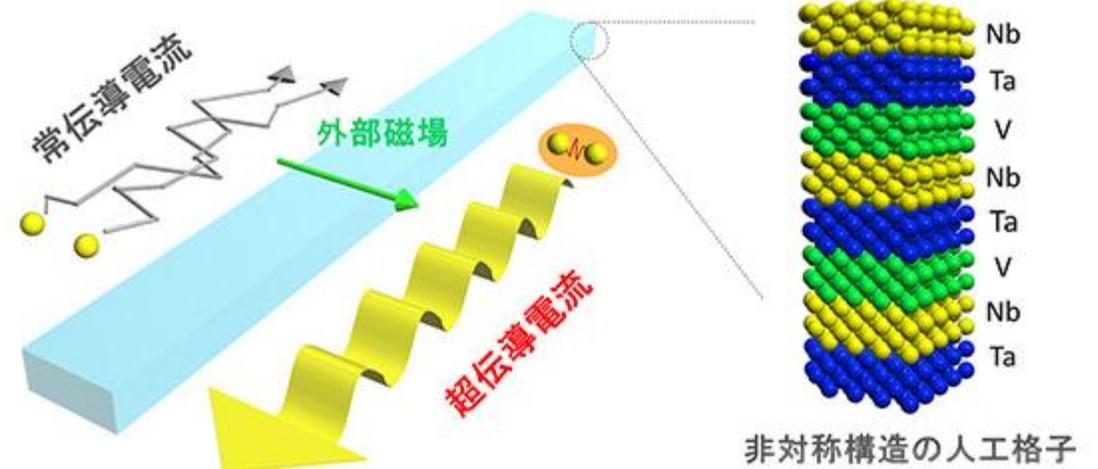


$$|I_{cL}| = |I_{cR}|$$

臨界電流の大きさは方向に依らない

時間反転/空間反転対称性の破れた超伝導の場合

$$|I_{cL}| \neq |I_{cR}| \quad ! \quad ! \quad (\text{ダイオードっぽい?})$$



大同助教

ヘリカル超伝導との関係性!?

ヘリカル超伝導:

クーパー対が有限重心運動量を持った状態

空間/時間反転対称性の破れ

学術変革領域研究(A) 「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」
研究期間(年度) 2023-2028

空間/時間反転対称性の破れによって
多彩な現象が引き起こされる

交差応答

例. 磁気電気効果 (ME効果)

$$P_{\mu} = \alpha_{\mu\nu} H_{\nu}$$

$$M_{\nu} = \alpha_{\mu\nu} E_{\mu}$$

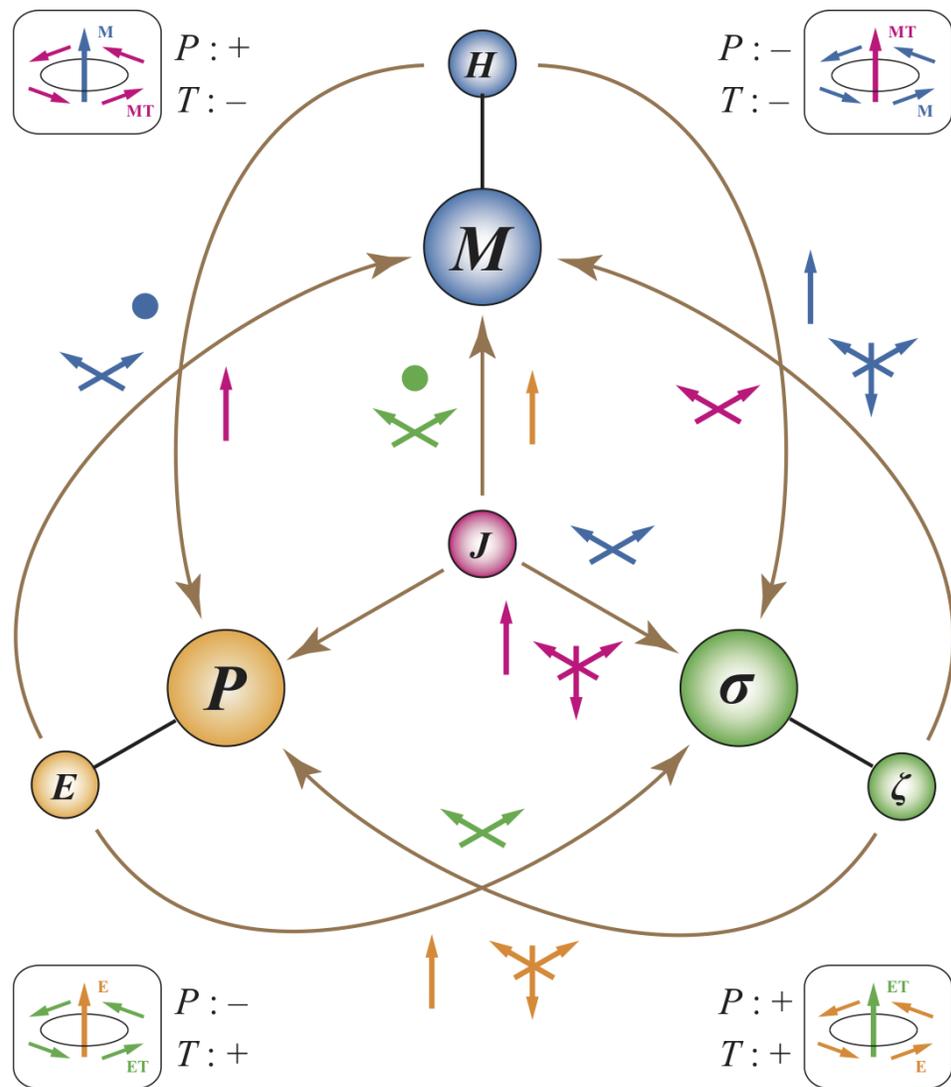
ME効果が現れるためには空間/時間反転
対称性の両方が破れている必要がある



多極子展開

= (回転操作) × (時間反転) × (空間反転)
 操作の回転操作に関して離散化したもの？

タイプ	記号	空間反転	時間反転	単極子	双極子	四極子	八極子
E	Q_{lm}	$(-1)^l$ 極性	+	(+, +) 			
M	M_{lm}	$(-1)^{l+1}$ 軸性	-	(-, -) 			
MT	T_{lm}	$(-1)^l$ 極性	-	(+, -) 			
ET	G_{lm}	$(-1)^{l+1}$ 軸性	+	(-, +) 			



量子幾何学

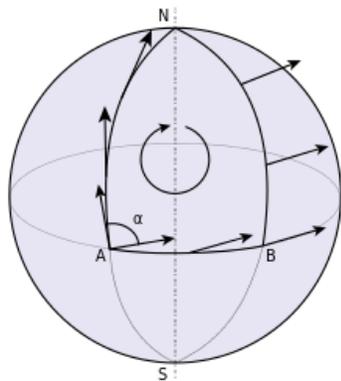
凝縮系理論では「低エネルギー有効理論」を考えることが多く、
その場合「曲がった」幾何が現れることがある→何故か？

例えば、宇宙は基本的に平坦な空間だが…

人間の場合

地球からの重力の束縛から離れられない
かといって地中深く沈み込むこともできない

地球の表面(S^2)に活動が制限される



曲がった幾何

亜光速の隕石orニュートリノの場合

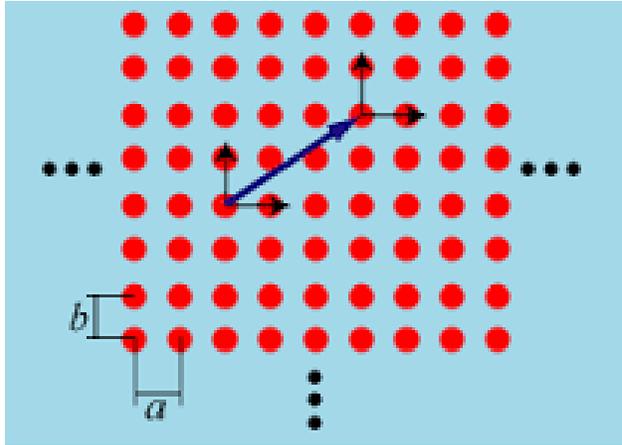
地球の存在をほとんど感知しない

元々の平坦な空間(R^3)で自由に動く

ポテンシャルや考えているエネルギースケールによって有効な自由度が制限される

→第一原理的には「平坦」な空間を考えていても有効的に「曲がった幾何」があらわれることがある

結晶中の有効理論



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

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

$$H_k = e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} H e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$$

但し、
$$\psi_{nk}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} u_{nk}(\mathbf{r})$$

各結晶運動量 k に対して
離散エネルギースペクトル $\{E_{nk}\}$ が与えられる

ある n に注目したときの E_{nk} のことを
エネルギーバンドという (バンド理論)

並進対称性 (真空)

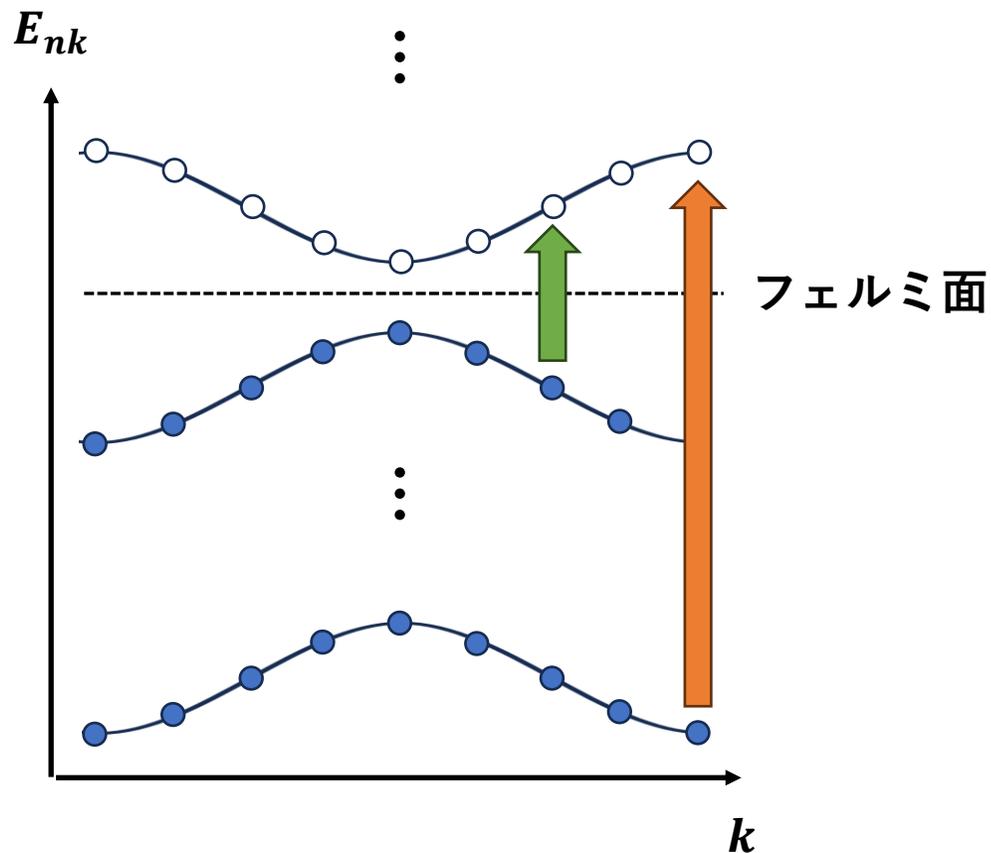
$$H(\mathbf{r}) = H(\mathbf{r} + \mathbf{t}), \forall \mathbf{t} \in \mathbb{R}^3$$

➡ 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



低エネルギーの物理を考える際には
フェルミ面近傍のバンドのみを考えればよい

パウリの排他律
複数の電子が同じ「状態」にはなれない

⇒左図のような状態が最安定（基底状態）

電子が移ることで励起状態が実現するが…

移る電子がフェルミ面に

近いバンドにある⇒低エネルギー励起

遠いバンドにある⇒高エネルギー励起

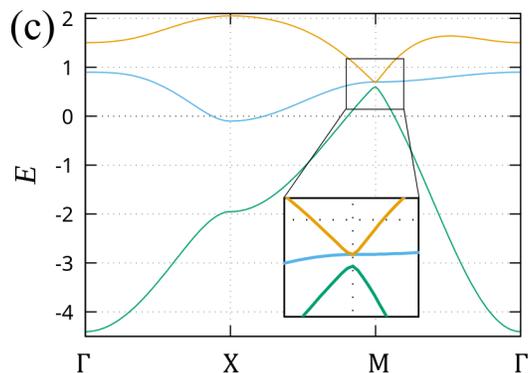
よってフェルミ面近くのバンドのみを取り扱ったモデルでも有効理論として有用

⇒元々平坦なヒルベルト空間からの低次元への射影を考えるのに相当

射影された空間は一般には「曲がった幾何」を持っている

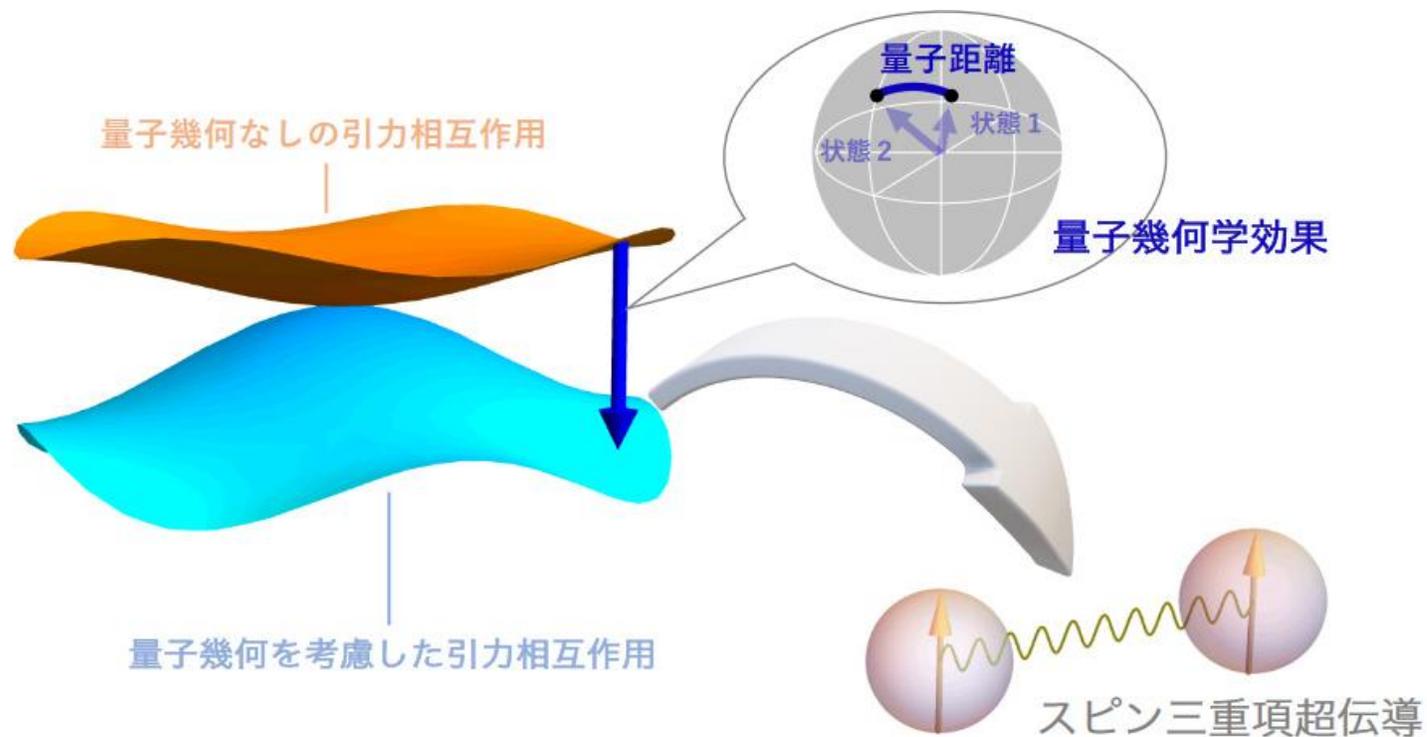
量子幾何誘起強磁性揺らぎによるスピン三重項超伝導 (北村、D3柳瀬G)

今までは超伝導体や磁性の発現メカニズムなどはバンドの構造 $\{E_{nk}\}$ から説明されることが多かった



但し、左図のようにフェルミ面近傍に
バンド縮退があるような場合には幾何的な効果が強く効いてくる

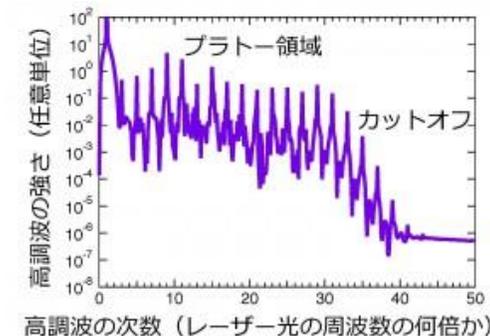
磁気揺らぎ $\chi(q)$



高次高調波発生 (high harmonic generation, HHG)

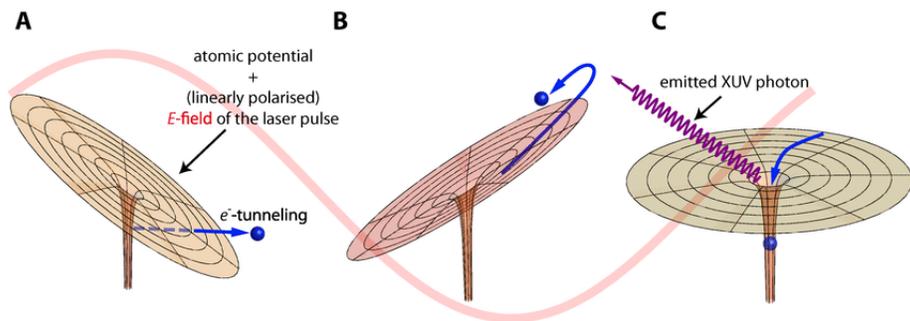
$$j_x(t) = \alpha_1 E(t) + \alpha_2 E^2(t) + \dots + \alpha_n E^n(t) + \dots$$

強電場下において非線形の寄与(十分大きいn)が強く現れることがある→高次高調波発生

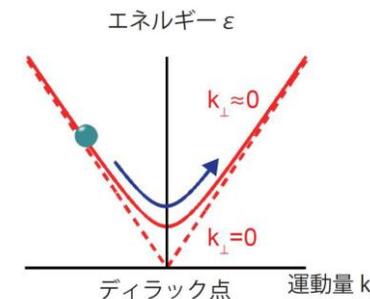
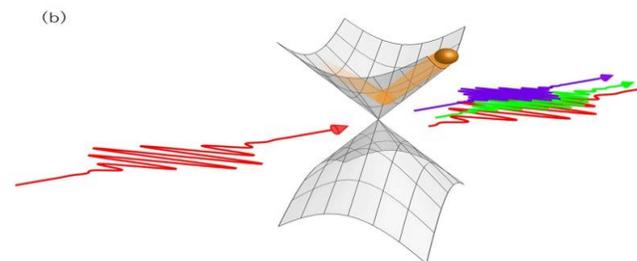


メカニズム

(a) 3ステップモデル (原子ガスなど)



(b) 電子速度の矩形波的变化 (ディラック半金属など)



光-物質結合が強い領域でのHHGの非従来のギャップ依存性 (児藤、Peters Gr. OB)

- モット絶縁体であるCa₂RuO₄において

従来のモデルでは説明できないHHGのギャップ依存性が報告されていた (京大、田中研)

- その現象を説明するメカニズムを新たに理論的に提案

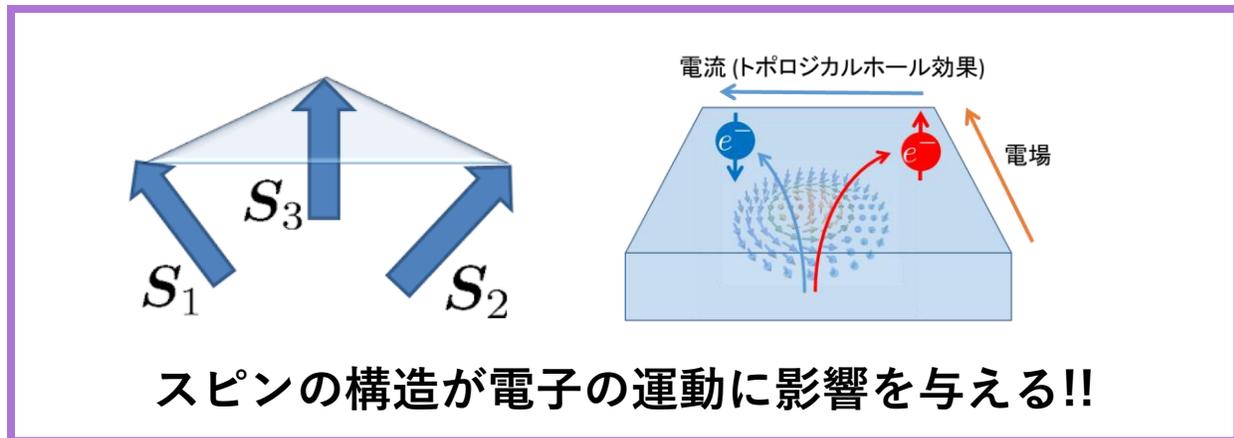
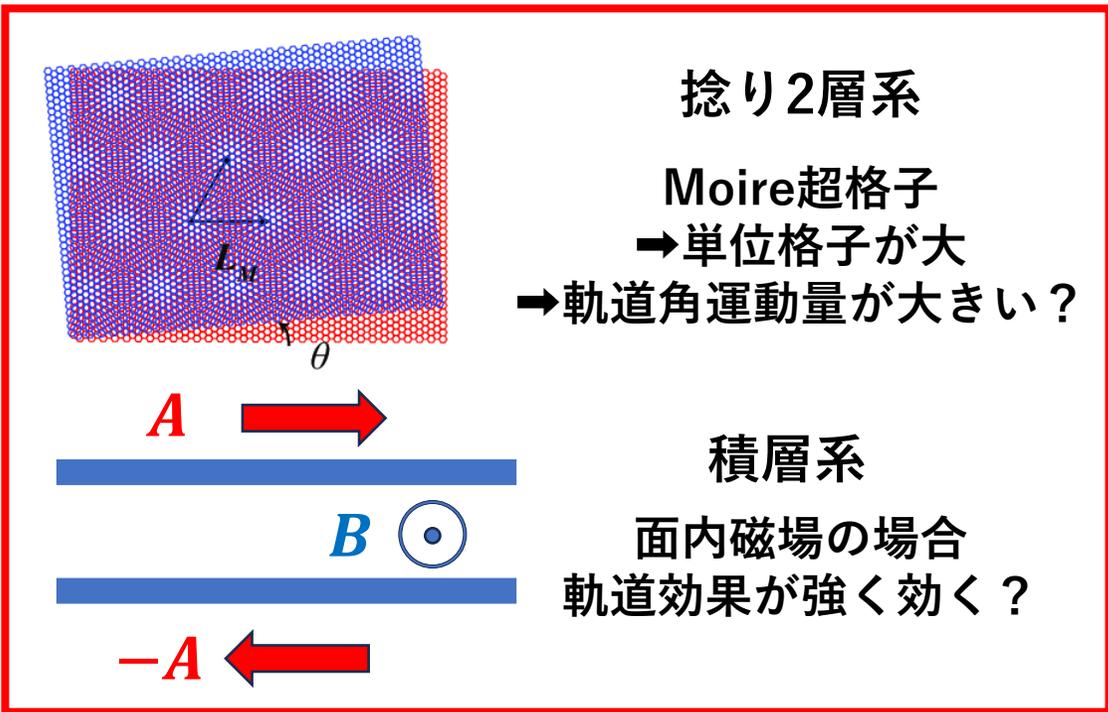
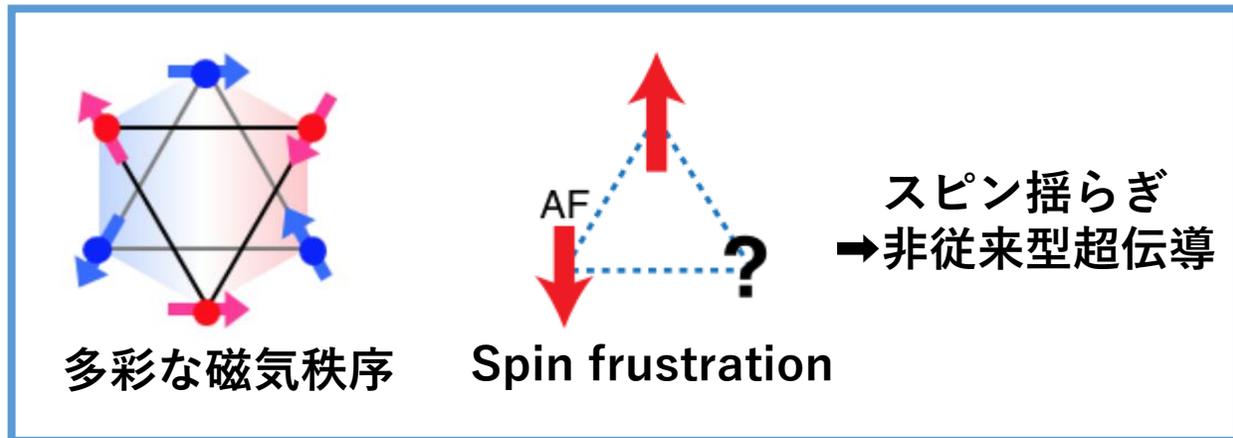
スピンと軌道

マクロには磁場と磁化が結合しているが... $F = M \cdot B$

ミクロには2種類の「磁化」が存在する

- スピン
- 軌道

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} (\hat{p} - eA)^2 - \gamma B \cdot \hat{S}$$



量子開放系

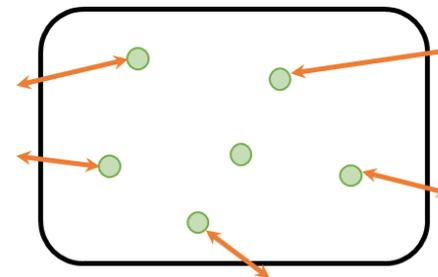
量子力学の授業では

ハミルトニアンがエルミート \rightarrow 時間発展がユニタリー変換 \rightarrow 確率（粒子数）保存

上の主張は成り立たないように見える系は存在しないか？

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（後述）



リュービリアン

ある近似の成り立つ範囲では次のように時間発展が表記できる

$$\frac{d\rho}{dt} = \mathcal{L}(\rho) = -i[H, \rho] + \sum \left[L_j \rho L_j^\dagger - \frac{1}{2} \{L_j L_j^\dagger, \rho\} \right]$$

密度行列： $\rho = \sum P_i |i\rangle \langle i|$



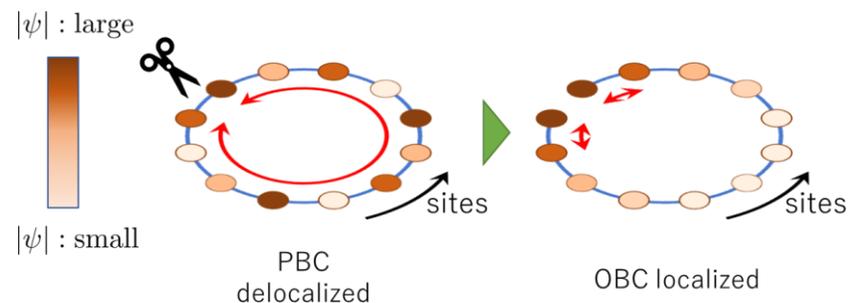
非エルミート有効ハミルトニアン

$$H_{\text{eff}} = H - \frac{i}{2} \sum L_j L_j^\dagger$$

重い電子系の平衡状態における \mathbb{Z}_2 -非エルミート・表皮効果 (金城、D2 Peters Gr.)

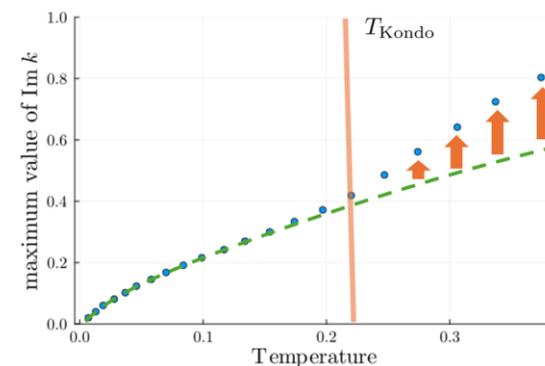
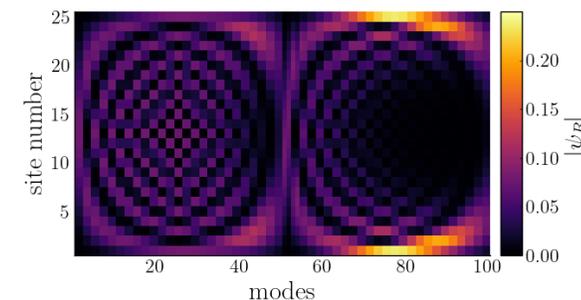
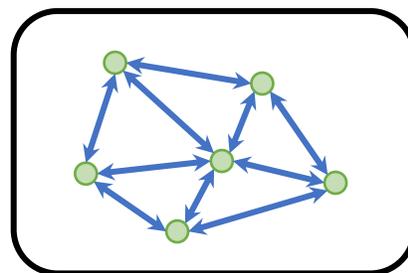
非エルミート表皮効果

- 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



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

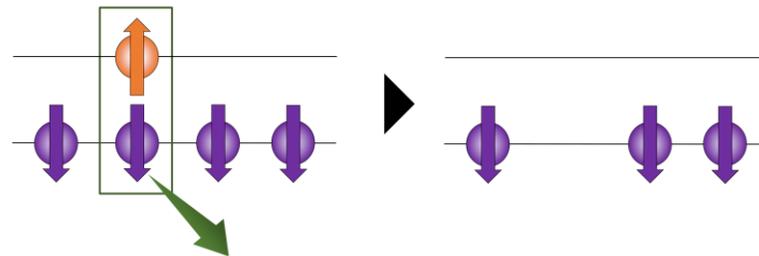


実は有効ハミルトニアンが非エルミートという点で量子開放系と共通
 \rightarrow 概念・手法の交換ができるのでは？

二体損失を持つフェルミオン鎖における 相互作用誘起ルービリアン・表皮効果 (濱中、D1吉田Gp.)

二体損失

- 一つのサイトに2つのフェルミオンがそろったときに初めて外界へと散逸する現象
- 冷却原子系によって実現可能



$$L_j = \sqrt{2\gamma} c_{j\uparrow} c_{j\downarrow} \Rightarrow V_{\text{eff}} = -i\gamma \sum n_{j\uparrow} n_{j\downarrow}$$

複素パラメータの有効相互作用

ルービリアンを $|i\rangle \otimes |j\rangle$ に対する行列として解析

ルービリアンを用いた新たなトポロジカル不変量を定義

解放量子系でのトポロジカル現象の新たな指標となることを確かめた

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

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



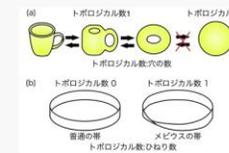
電気伝導度などに方向性が現れる

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

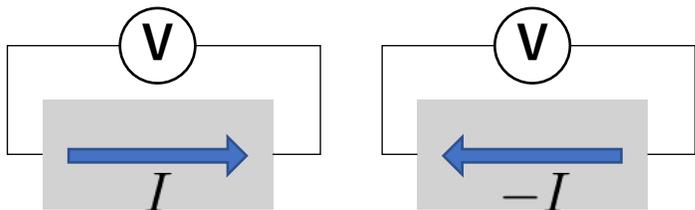
$$H \neq H^\dagger$$

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

一般に固有値は複素数

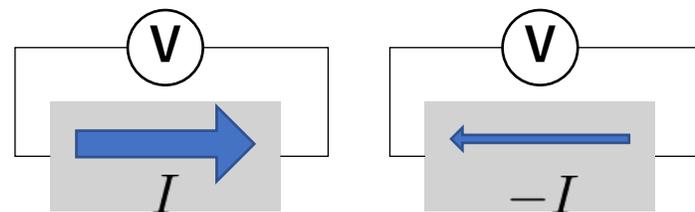
相反性

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



非相反性

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



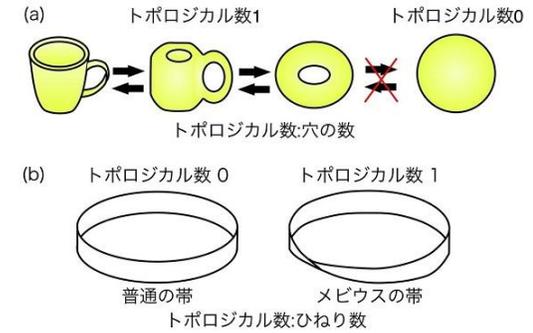
電気伝導度などに方向性が現れる

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

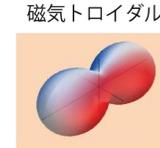
4種類之多極子



極性テンソル
(時間反転偶)



軸性テンソル
(時間反転奇)

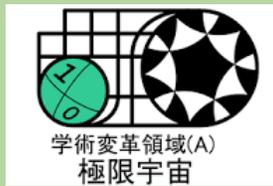


極性テンソル
(時間反転奇)

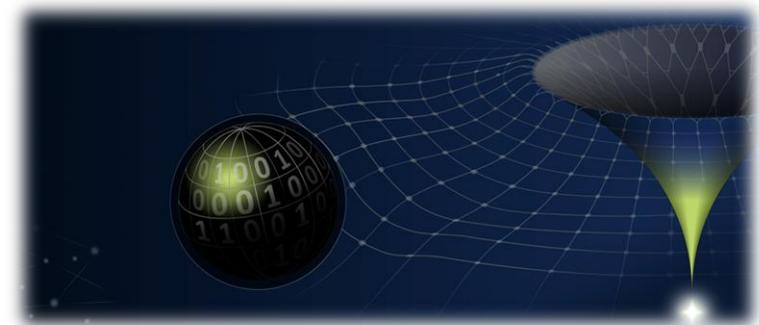


軸性テンソル
(時間反転偶)

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

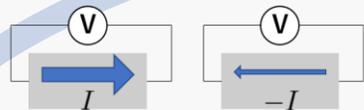
$$H \neq H^\dagger \quad \text{場合によっては } \det H = 0$$

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

一般に固有値は複素数

非相反性

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



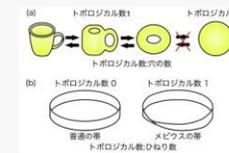
電気伝導度などに方向性が現れる

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…

非線形応答

線形応答

$$j = \sigma E \quad \text{オームの法則}$$



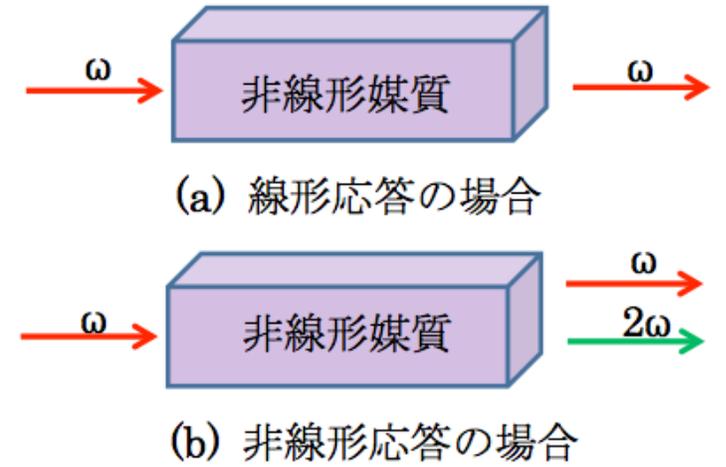
非線形応答

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

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**



空間反転操作

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

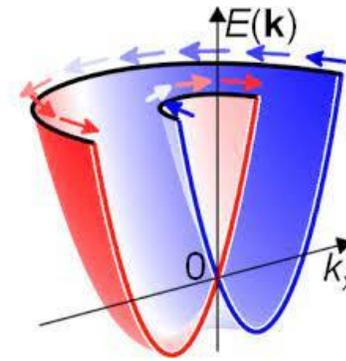
$$E^\alpha \rightarrow -E^\alpha$$

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

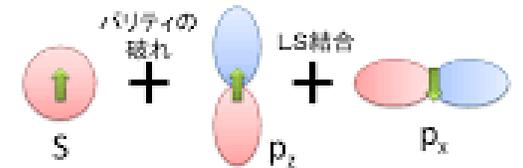


偶数次の非線形応答には空間反転対称性の破れが必要

空間反転対称性の破れに伴う様々な効果



ラッシュバ効果



パリティ混成