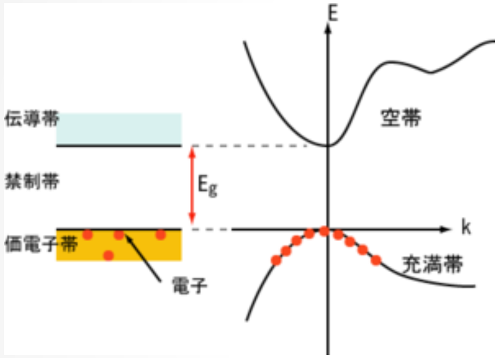
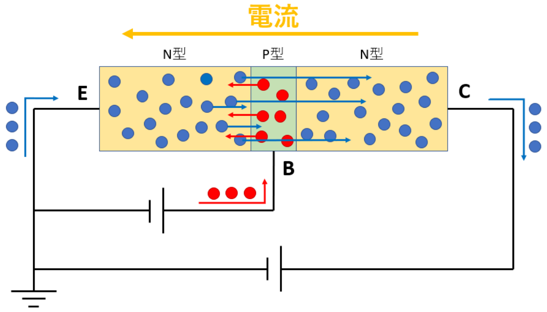
# 物質科学と高エネルギー物理が拓く非平衡物理のフロンティア

岡　隆史
東大　物性研究所 (2020/1/1より)
マックスプランク複雑物理研究所　　（10月末まで）
マックスプランク固体物理化学研究所（10月末まで）

# 物質科学と高エネルギー物理が拓く<u>非平衡物理</u>のフロンティア

非平衡物理が大切な理由：　状態の劇的な変化と制御



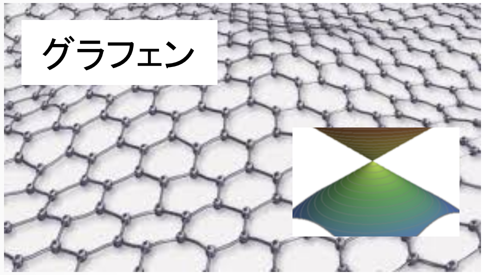
平衡：半導体

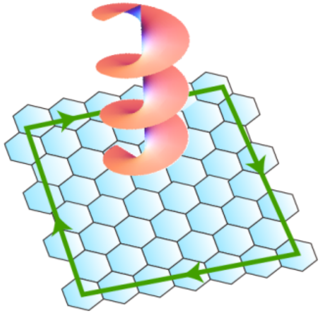
非平衡：非線形デバイス
や LED

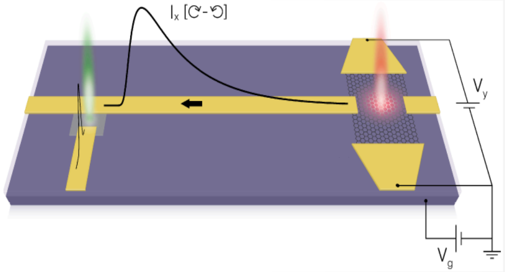
応用：コンピュータ etc

# 物質科学と高エネルギー物理が拓く非平衡物理のフロンティア

非平衡物理が大切な理由:　状態の劇的な変化と制御





平衡:Dirac電子

非平衡:光誘起ホール効果
（フロッケ・トポロジカル絶縁体）

応用:
光コンピュータ
超高速エレクトロニクス？

# 物質科学と高エネルギー物理が拓く非平衡物理のフロンティア

今日の話では次の３分野の連携を例に見ていく

物性実験 --- 物性理論 --- 高エネルギー物理

また、連携には

- 面白いサイエンス
- 出会いの場（人と人のつながり）
- 辞書

が必要

# 物性物理の3つの柱

**物質合成**

量子物質（ディラック・ワイル半金属等）

**革新的実験技術**

超高速分光、時間分解ARPES

**アイデア**

光誘起相転移 (那須先生)

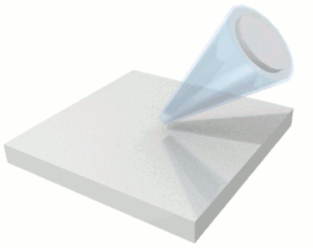
↓ 分割・普遍化 （かみくだく）

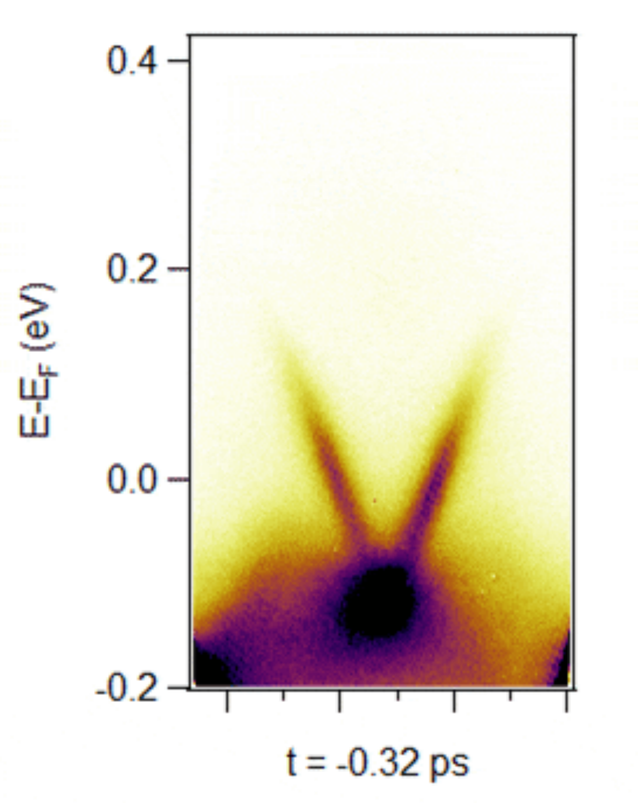
熱化、フロッケ・エンジニアリング、相制御、非エルミート制御

↕ 連携 → 学術変革

- 冷却原子系
- 高エネルギー物理
- 数理物理・分類理論

時間分解角度分解光電子分光(ARPES)



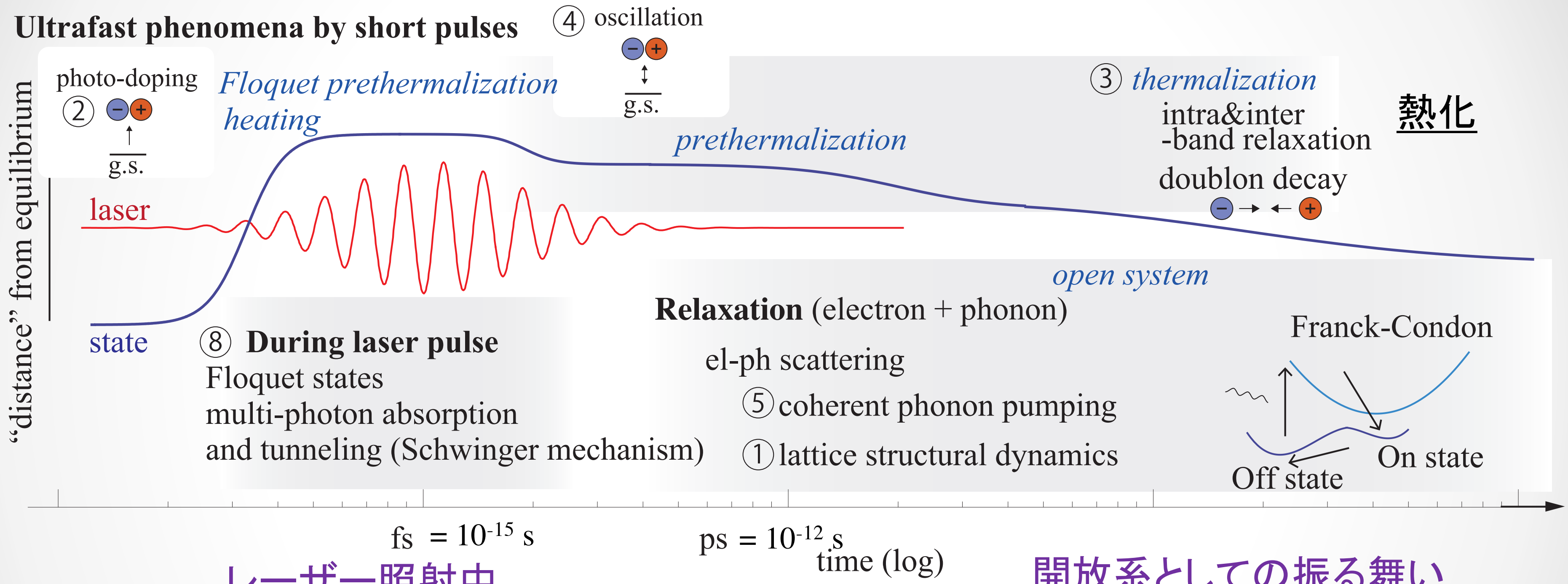



**2D Dirac電子**
**@トポロジカル絶縁体($Bi_2Se_3$)表面**

電子状態の観測と格子振動

Shen group @ Stanford

# 時系列に分解




熱化

レーザー照射中

フロッケ状態

トンネル励起

開放系としての振る舞い

非エルミート性

数字については下の論文を参照

Oka, Kitamura, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 10, 387 (2019)

# フロッケ状態（周期駆動系）

- 状態の制御
- 量子、古典
- 線形、非線形

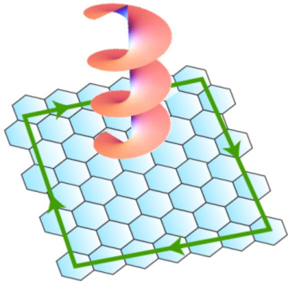
物性実験

物性理論
（場の理論）

高エネルギー物理
（超弦理論・重力）

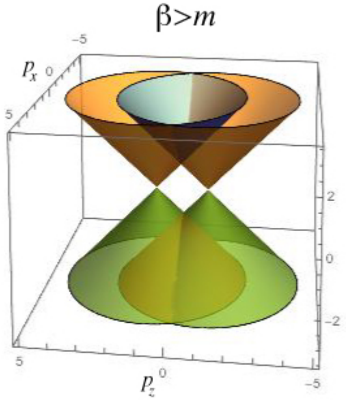
固体電子系
Wang, Gedik *et al.* Science ’13
Mciver, et al. Nat. Phys. ‘20

冷却原子系
Jotzu, Esslinger *et al.* Nature ’14



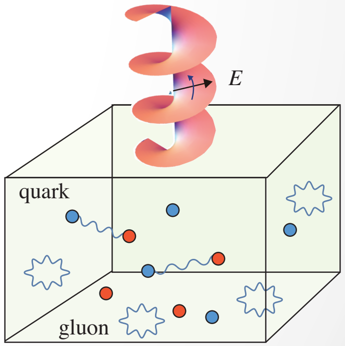
Oka-Aoki 2009

2D Dirac + 円偏光




3D Dirac + 円偏光

Ebihara, Fukushima, Oka, 2016
Bucciantini, Roy, Kitamura, Oka, 2016
Takayoshi, Wu, Oka, 2020




ホログラフィック・フロッケ状態

Hashimoto, Kinoshita, Murata, Oka, 2017
Kinoshita, Murata, Oka, 2018

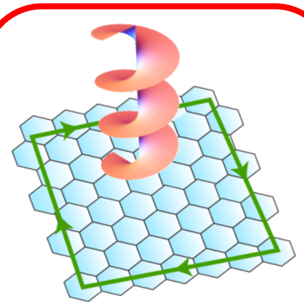
物性実験

物性理論
（場の理論）

高エネルギー物理
（超弦理論・重力）

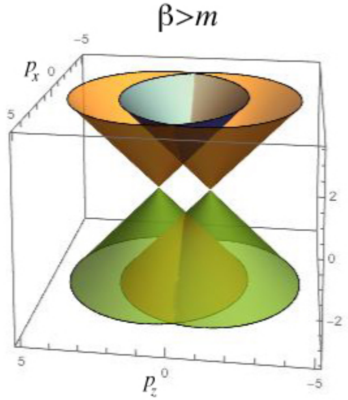
固体電子系
Wang, Gedik *et al.* Science '13
McIver, et al. Nat. Phys. '20

冷却原子系
Jotzu, Esslinger *et al.* Nature '14



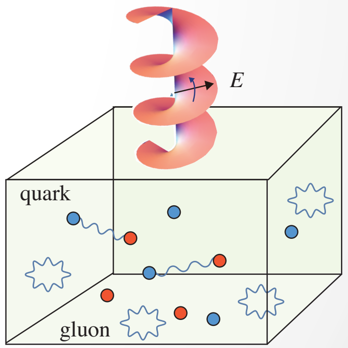
Oka-Aoki 2009

2D Dirac + 円偏光




3D Dirac + 円偏光

Ebihara, Fukushima, Oka, 2016
Bucciantini, Roy, Kitamura, Oka, 2016
Takayoshi, Wu, Oka, 2020




ホログラフィック・フロッケ状態

Hashimoto, Kinoshita, Murata, Oka, 2017
Kinoshita, Murata, Oka, 2018

# フロッケ理論 (ブロッホの定理)

時間周期系

$$i\partial_t \psi = H(t)\psi \qquad H(t) = H(t+T) \qquad \Omega = 2\pi/T$$

離散フーリエ変換 ↓

$$\Psi(t) = e^{-i\varepsilon t}\sum_m \phi^m e^{-im\Omega t}$$

フロッケハミルトニアンの固有値問題

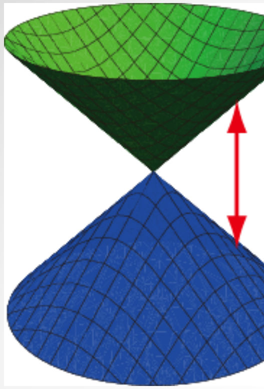
$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \mathcal{H}^{mn}\phi_\alpha^m = \varepsilon_\alpha \phi_\alpha^n$$

ε: 擬エネルギー

$$(\mathcal{H})^{mn} = \frac{1}{T}\int_0^T dt H(t) e^{i(m-n)\Omega t} + m\delta_{mn}\Omega I$$

~ $m$ 光子吸収　　$i\partial_t$ 由来

# フロッケスペクトル: Dirac電子 + 円偏光




coupling to AC field

$$\boldsymbol{k} \rightarrow \boldsymbol{k} + \boldsymbol{A}(t)$$

$$k = k_x + ik_y$$
$$\boldsymbol{A}(t) = (F/\Omega \cos \Omega t, F/\Omega \sin \Omega t)$$
$$A = F/\Omega$$

時間依存シュレディンガー方程式

$$i\partial_t \psi_k = \begin{pmatrix} 0 & k + Ae^{i\Omega t} \\ \bar{k} + Ae^{-i\Omega t} & 0 \end{pmatrix} \psi_k$$

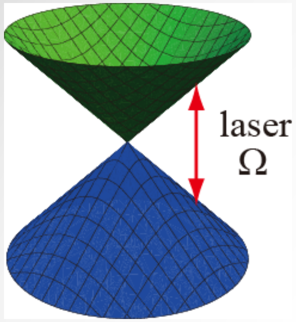
$$(\mathcal{H})^{mn} = \frac{1}{T}\int_0^T dt H(t) e^{i(m-n)\Omega t} + m\delta_{mn}\Omega I$$

$$H^{\mathrm{Floquet}} = \begin{pmatrix} \Omega & k & 0 & A & 0 & 0 \\ \bar{k} & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 0 & A \\ A & 0 & \bar{k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega & k \\ 0 & 0 & A & 0 & \bar{k} & -\Omega \end{pmatrix}$$

truncated at m=0,+1, -1 for display

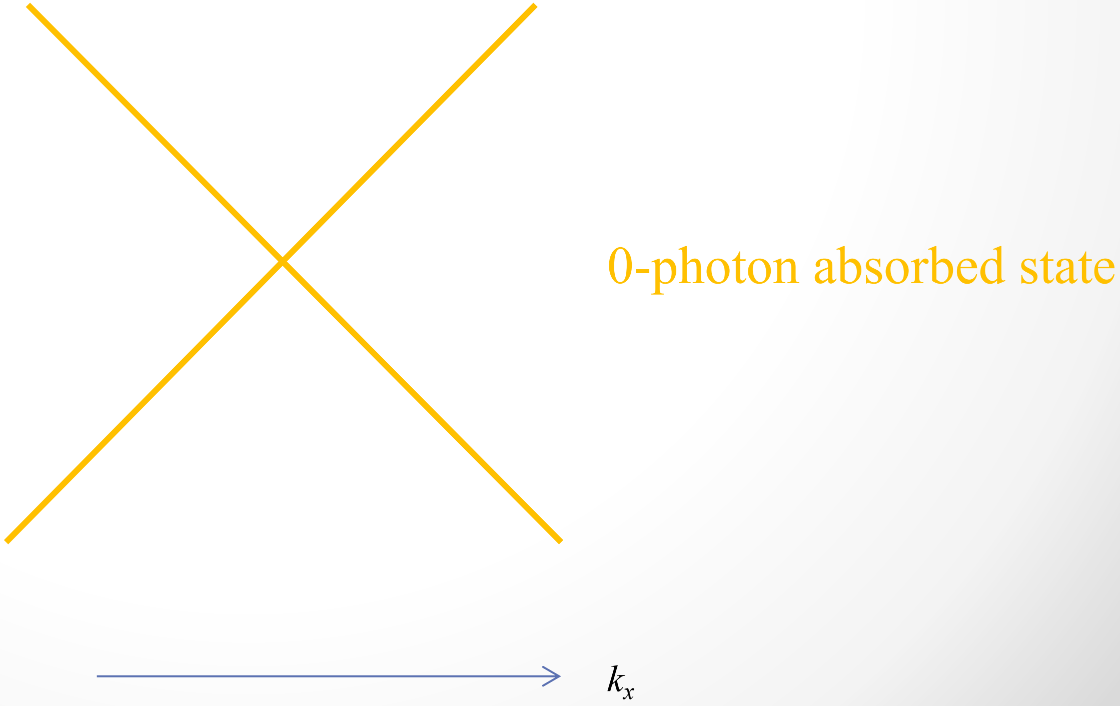
# フロッケスペクトル: Dirac電子 + 円偏光

TO, Aoki 2009



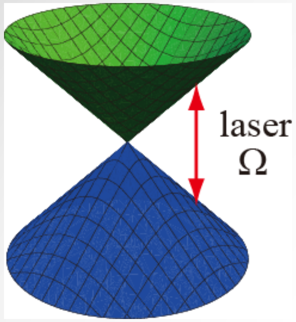

$$H^{\text{Floquet}} = \begin{pmatrix} \Omega & k & 0 & A & 0 & 0 \\ \bar{k} & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 0 & A \\ A & 0 & \bar{k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega & k \\ 0 & 0 & A & 0 & \bar{k} & -\Omega \end{pmatrix}$$

0-photon absorbed state



# フロッケスペクトル: Dirac電子 + 円偏光

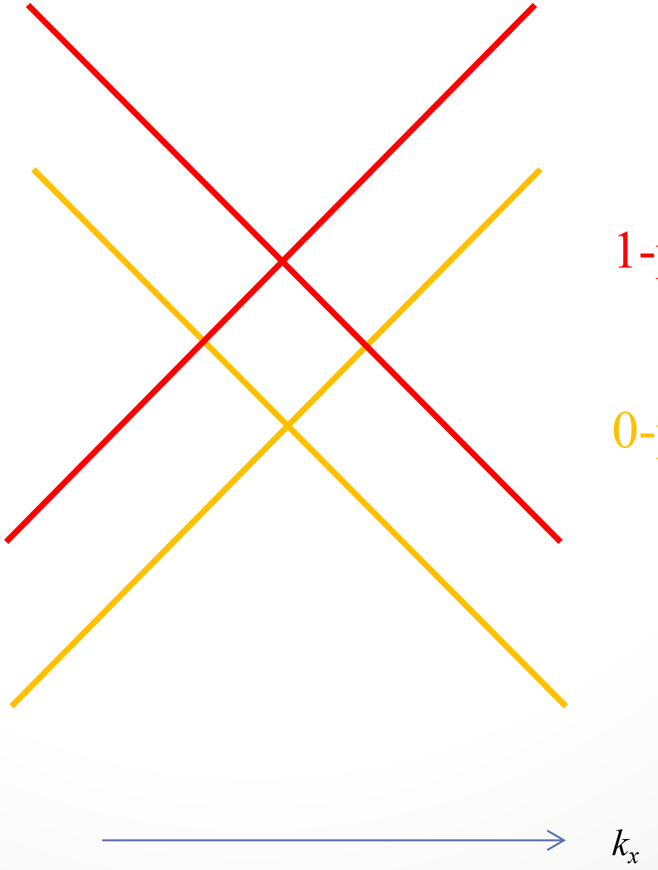
TO, Aoki 2009




$$H^{\mathrm{Floquet}} = \begin{pmatrix} \Omega & k & 0 & A & 0 & 0 \\ \bar{k} & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 0 & A \\ A & 0 & \bar{k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega & k \\ 0 & 0 & A & 0 & \bar{k} & -\Omega \end{pmatrix}$$

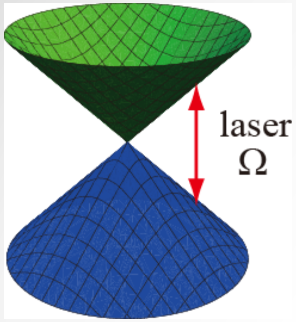
1-photon absorbed state

0-photon absorbed state



# フロッケスペクトル: Dirac電子 + 円偏光

TO, Aoki 2009

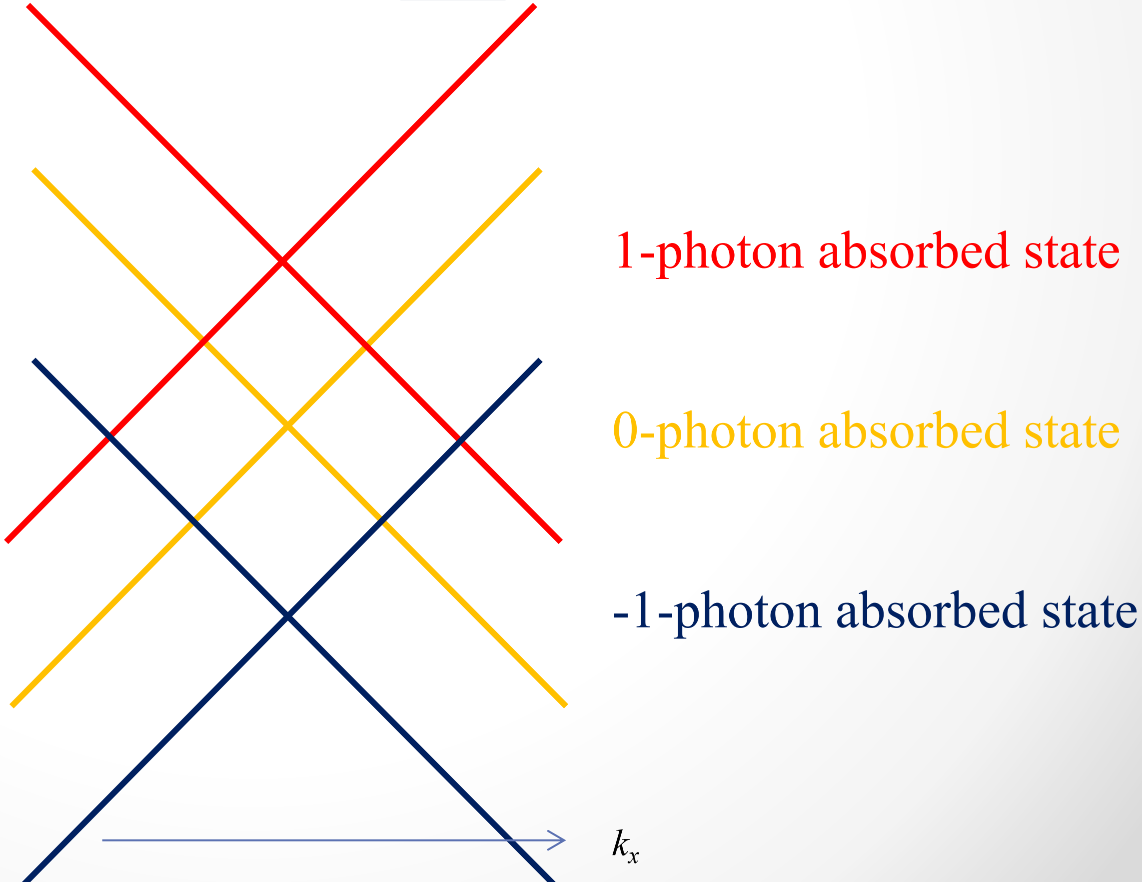



$$H^{\mathrm{Floquet}} = \begin{pmatrix} \Omega & k & 0 & A & 0 & 0 \\ \bar{k} & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 0 & A \\ A & 0 & \bar{k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega & k \\ 0 & 0 & A & 0 & \bar{k} & -\Omega \end{pmatrix}$$

1-photon absorbed state

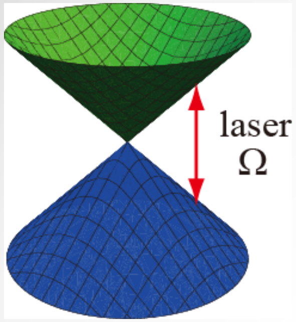
0-photon absorbed state

-1-photon absorbed state



# フロッケスペクトル: Dirac電子 + 円偏光

TO, Aoki 2009

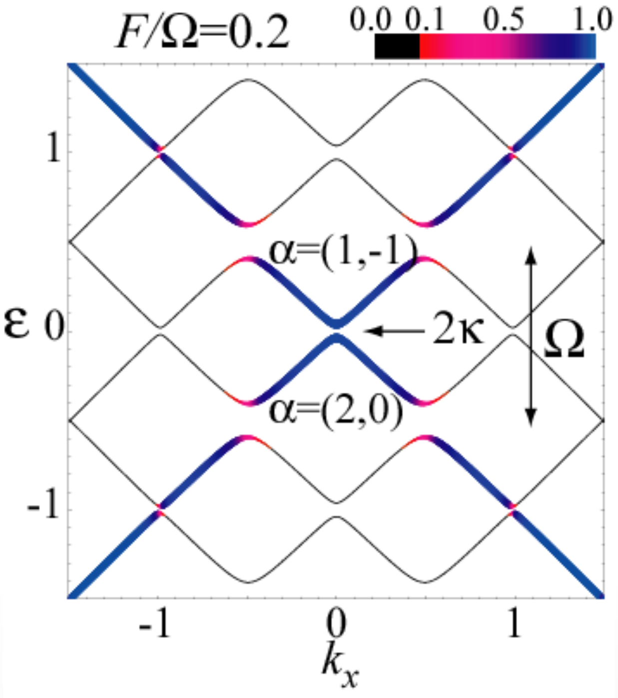



$$H^{\mathrm{Floquet}} = \begin{pmatrix} \Omega & k & 0 & A & 0 & 0 \\ \bar{k} & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 0 & A \\ A & 0 & \bar{k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega & k \\ 0 & 0 & A & 0 & \bar{k} & -\Omega \end{pmatrix}$$

1-photon absorbed state

0-photon absorbed state

-1-photon absorbed state



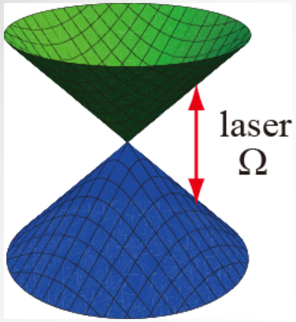

1-photon absorbed state

0-photon absorbed state

-1-photon absorbed state

# フロッケスペクトル: Dirac電子 + 円偏光

TO, Aoki 2009



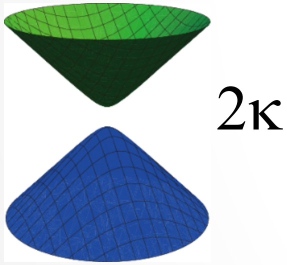

$$H^{\mathrm{Floquet}} = \begin{pmatrix} \Omega & k & 0 & A & 0 & 0 \\ \bar{k} & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 0 & A \\ A & 0 & \bar{k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega & k \\ 0 & 0 & A & 0 & \bar{k} & -\Omega \end{pmatrix}$$

1-photon absorbed state

0-photon absorbed state

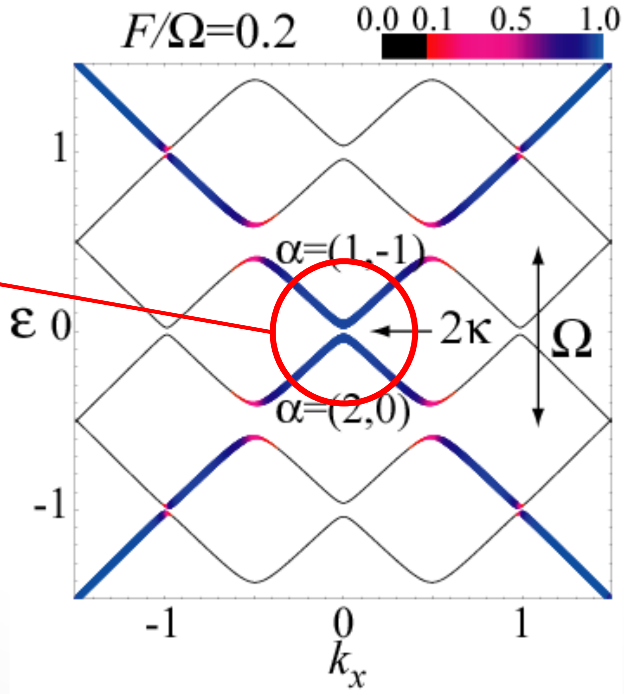
-1-photon absorbed state

near Dirac point




Dirac gap

$$\kappa = \frac{\sqrt{4A^2+\Omega^2}-\Omega}{2} \sim A^2/\Omega$$



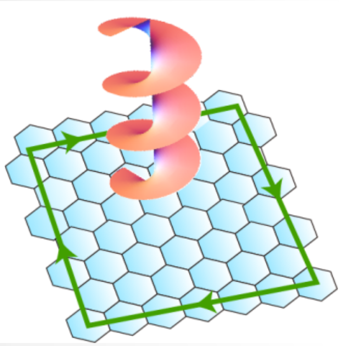

1-photon absorbed state

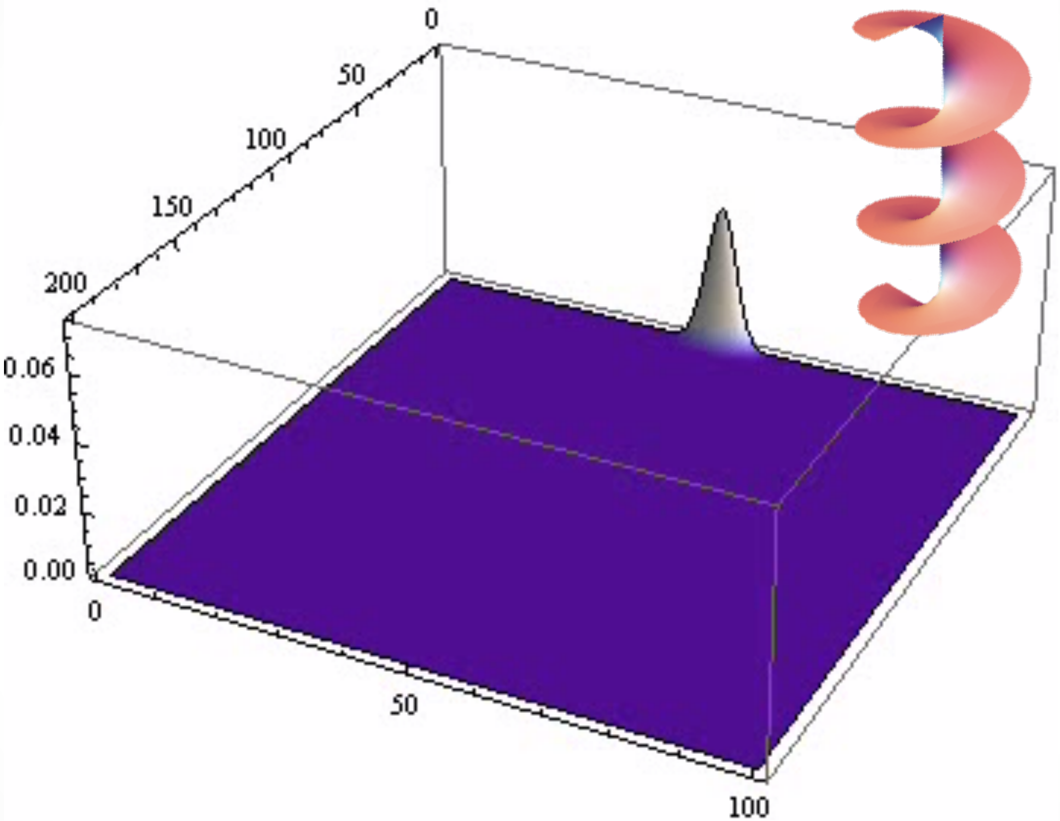
0-photon absorbed state

-1-photon absorbed state

# フロッケ・トポロジカル絶縁体

Dirac電子 + 円偏光 ＝ 量子ホール状態（Chern絶縁体）






円偏光照射によってトポロジーを制御

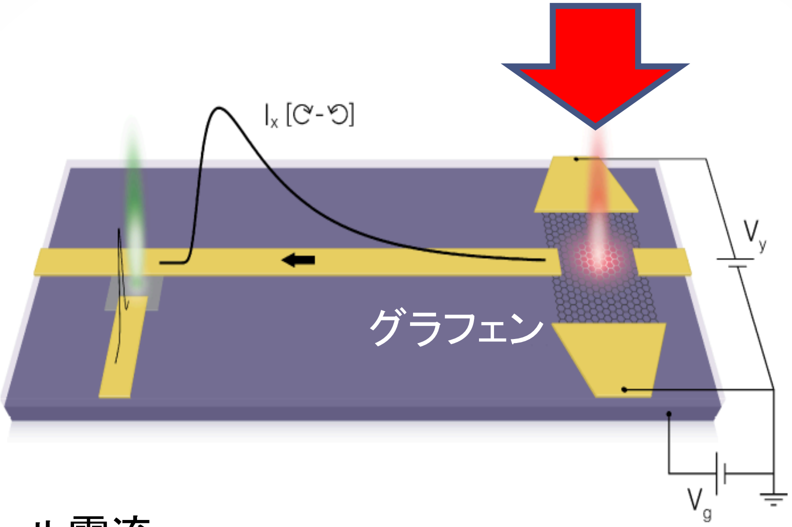
→ フロッケ・エンジニアリング

Oka, Aoki '09,
Lindner, Rafael, Galitski '11,
Kitagawa, TO, Fu, Brataas, Demler '11

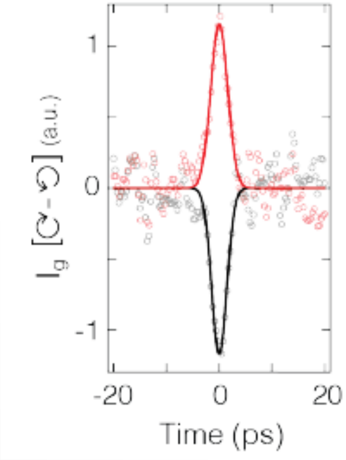
# 超高速エレクトロニクスへの応用

McIver, et al. Nat. Phys. ‘20

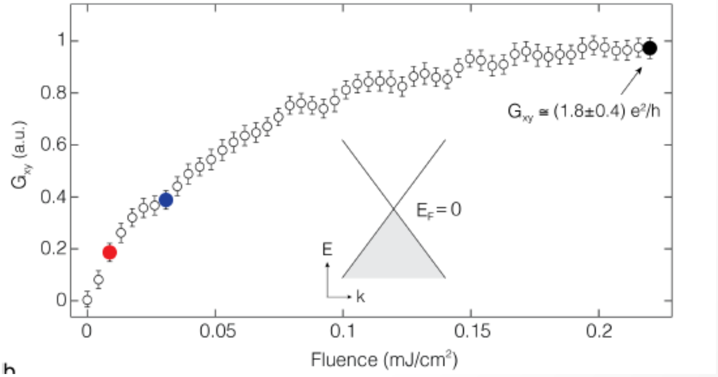
円偏光レーザー




ホール電流




ホール伝導率



物性実験

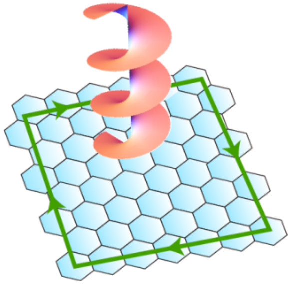
物性理論
（場の理論）

高エネルギー物理
（超弦理論・重力）

固体電子系
Wang, Gedik *et al.* Science ’13
McIver, et al. Nat. Phys. ‘20

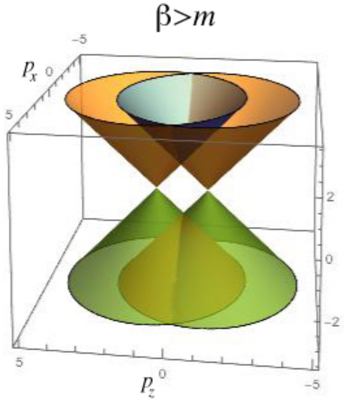
冷却原子系
Jotzu, Esslinger *et al.* Nature ’14

↔



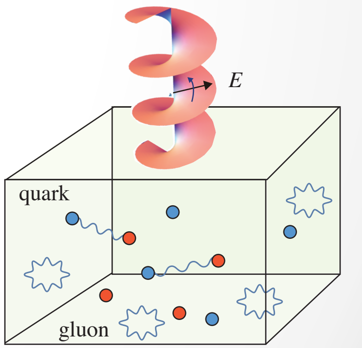
Oka-Aoki 2009

2D Dirac + 円偏光




3D Dirac + 円偏光

Ebihara, Fukushima, Oka, 2016
Bucciantini, Roy, Kitamura, Oka, 2016
Takayoshi, Wu, Oka, 2020

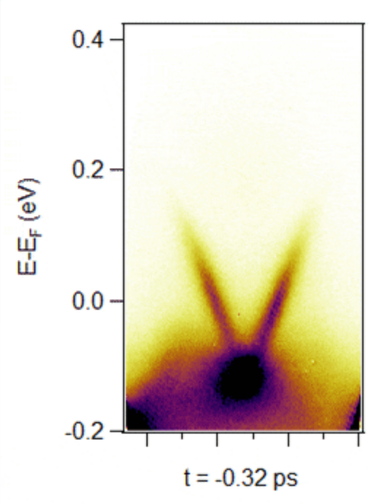



ホログラフィック・フロッケ状態

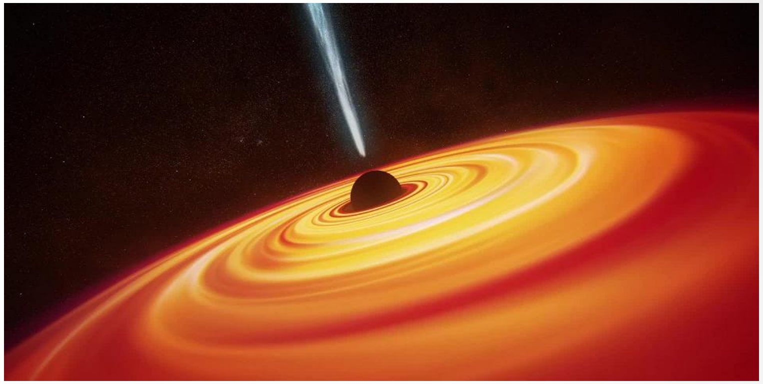
Hashimoto, Kinoshita, Murata, Oka, 2017
Kinoshita, Murata, Oka, 2018

## 場の理論

## 重力




ホログラフィ



- 熱化
- カノニカル分布の普遍性
- 情報の喪失
  （励起の詳細を忘れる）
- 輻射と緩和

- ブラックホールの形成
- No-hair theorem
- 情報の喪失
- ブラックホールの消失

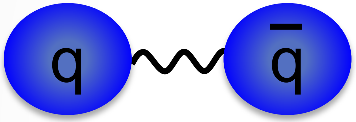
## 場の理論

3D Dirac粒子＋ボソン

$$\mathcal{L}_{\rm QCD} = \bar{\psi}_i i(\gamma^\mu D_\mu)_{ij}\psi_j - \frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^{\mu\nu}_a + \text{SUSY partners}$$

quark (electron)　　anti-quark (hole)

meson (exciton)




gluon (Coulomb force)

## 重力

曲がった5次元時空の
非線形電磁気学

$$S = -T_7 \int d^8\sigma \sqrt{-\det[h_{ab} + 2\pi\alpha' F_{ab}]}$$

$h_{\rm ab}$: AdS metric

運動方程式（非線形マクスウェル方程式）

$$-\partial_z\left(\frac{\sqrt{1+\frac{z^6}{R^4}d^2}\,\partial_z A_1}{z\sqrt{1-\frac{z^4}{R^4}\{(\partial_0 A_1)^2-(\partial_z A_1)^2\}}}\right)+\partial_0\left(\frac{\sqrt{1+\frac{z^6}{R^4}d^2}\,\partial_0 A_1}{z\sqrt{1-\frac{z^4}{R^4}\{(\partial_0 A_1)^2-(\partial_z A_1)^2\}}}\right)=0$$

D3/D7系　Karch-Katz '02

c.f. reviews
Erdmenger et al. “Mesons in gauge/gravity duals”
夏梅誠「超弦理論の応用」

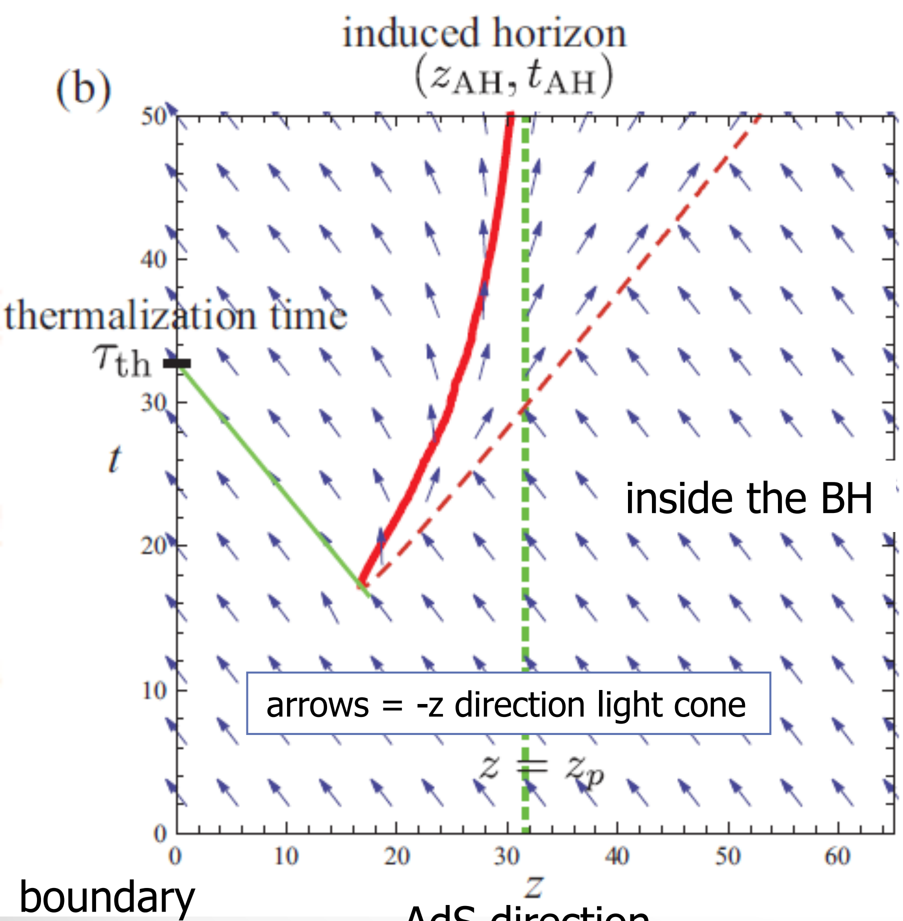
# 地平線の形成と有効ホーキング温度

非線形マクスウェル方程式

$$-\partial_z\left(\frac{\sqrt{1+\frac{z^6}{R^4}d^2\partial_z A_1}}{z\sqrt{1-\frac{z^4}{R^4}\{(\partial_0 A_1)^2-(\partial_z A_1)^2\}}}\right)+\partial_0\left(\frac{\sqrt{1+\frac{z^6}{R^4}d^2\partial_0 A_1}}{z\sqrt{1-\frac{z^4}{R^4}\{(\partial_0 A_1)^2-(\partial_z A_1)^2\}}}\right)=0$$

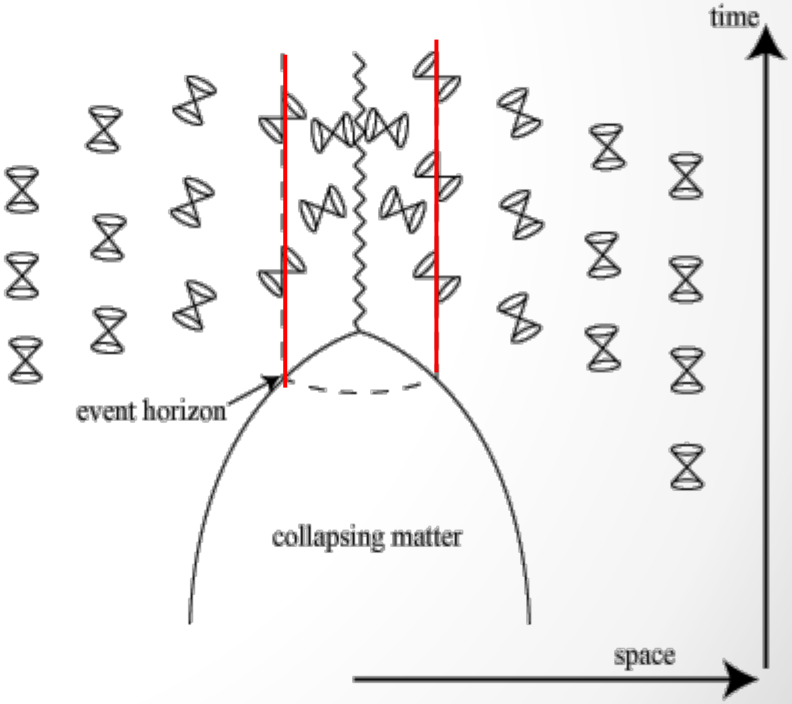
線形化 ➡ 光の向き（光円錐）

電場により変化




AdS direction

cf) BH形成 (Hawking-Page transition)




Hashimoto TO JHEP '13

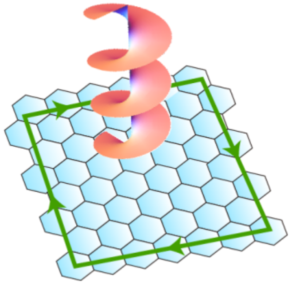
物性実験

物性理論
（場の理論）

高エネルギー物理
（超弦理論・重力）

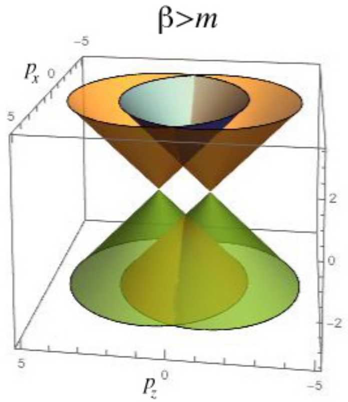
固体電子系
Wang, Gedik *et al.* Science ’13
McIver, et al. Nat. Phys. ‘20

冷却原子系
Jotzu, Esslinger *et al.* Nature ’14



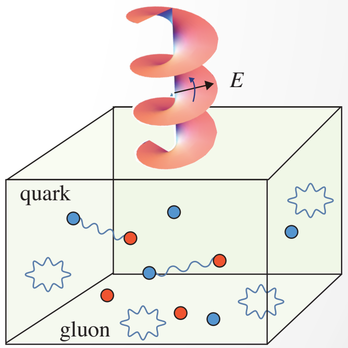
Oka-Aoki 2009

2D Dirac + 円偏光




3D Dirac + 円偏光

Ebihara, Fukushima, Oka, 2016
Bucciantini, Roy, Kitamura, Oka, 2016
Takayoshi, Wu, Oka, 2020




ホログラフィック・フロッケ状態

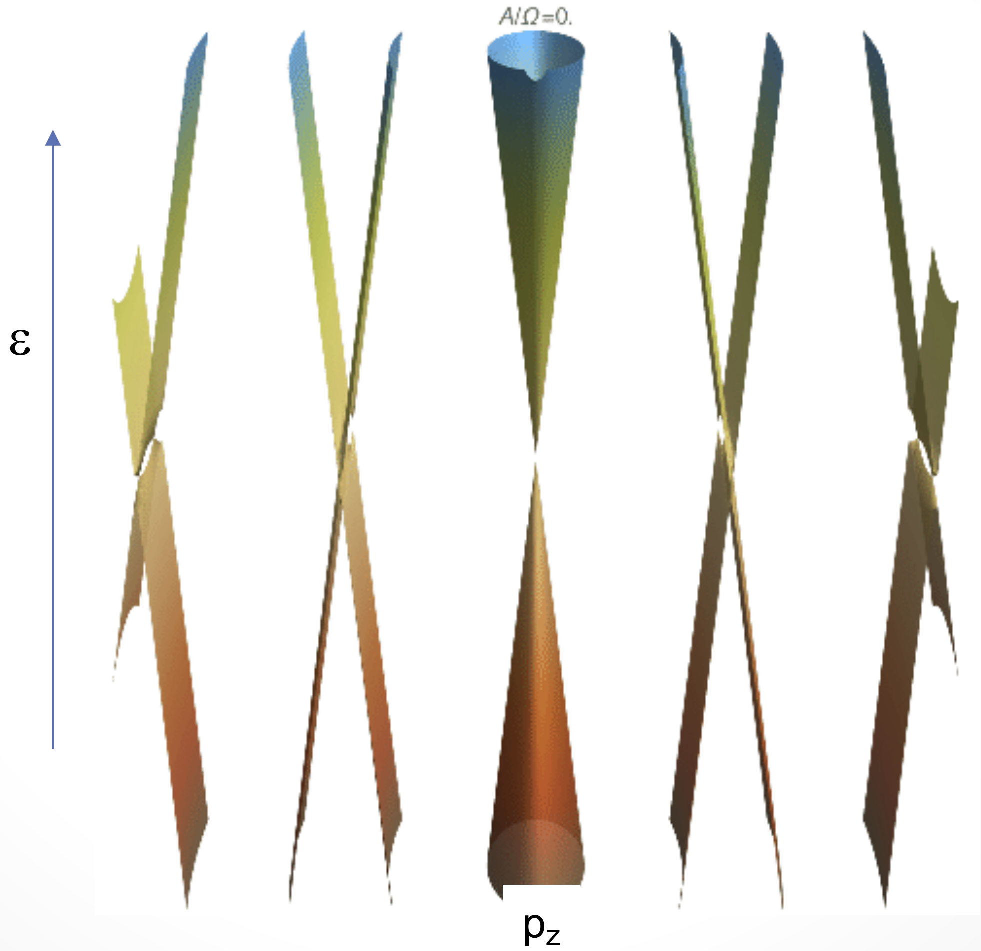
Hashimoto, Kinoshita, Murata, Oka, 2017
Kinoshita, Murata, Oka, 2018

# フロッケ・ワイル半金属

$$H = \sum_{i=1,2,3} \gamma^0 \gamma^i (\hat{p}_i - A_i) \qquad \boldsymbol{A}(t) = A(\cos \Omega t, \sin \Omega t)$$

Bucciantini, Roy, Kitamura, Oka, ‘17

フロッケ
擬エネルギー




ディラック点がワイル点に分裂し、他のワイル点と対消滅

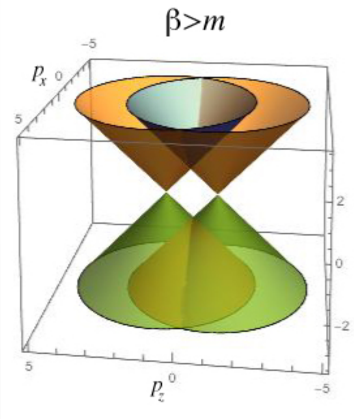
# ホログラフィック・フロッケ・ワイル半金属

## 場の理論

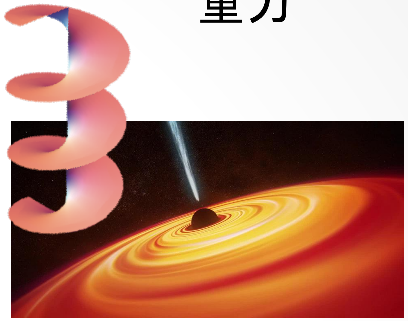
$$H = \sum_{i=1,2,3} \gamma^0 \gamma^i (\hat{p}_i - A_i)$$

$$\boldsymbol{A}(t) = A(\cos \Omega t, \sin \Omega t)$$

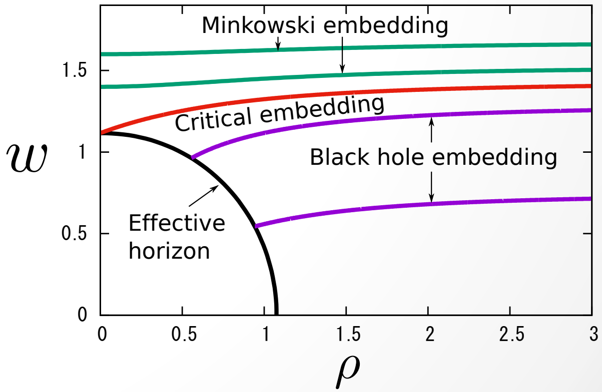
- 円偏光レーザーによる周期駆動
- ホール応答
- ギャップの制御（絶縁体・金属転移）




## 重力



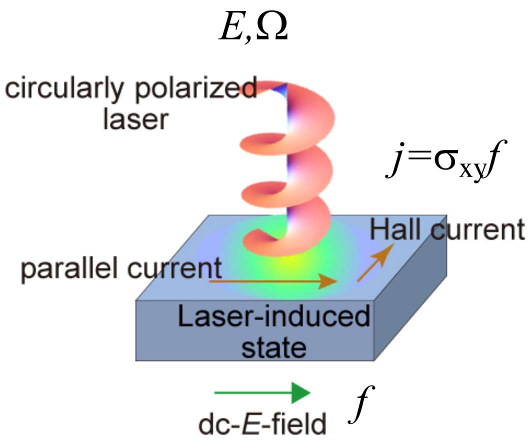
- 回転電場による周期駆動（回転座標系で静止）
- ホール応答
- D7ブレーンの埋め込みの変化

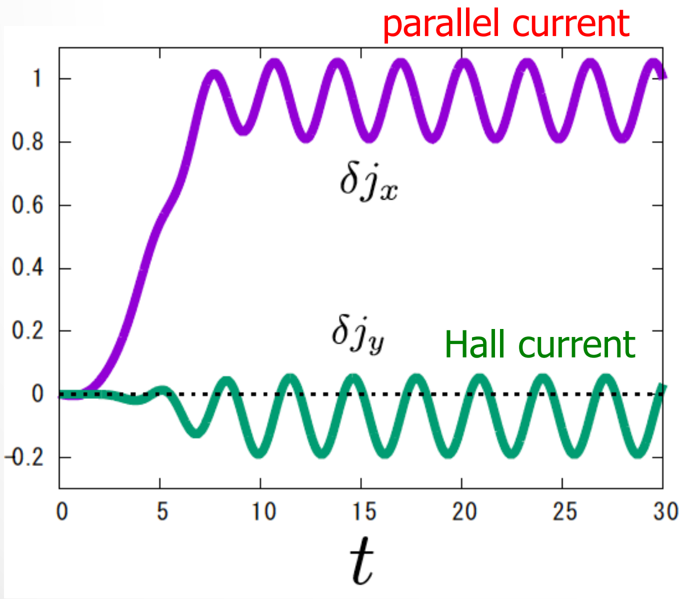


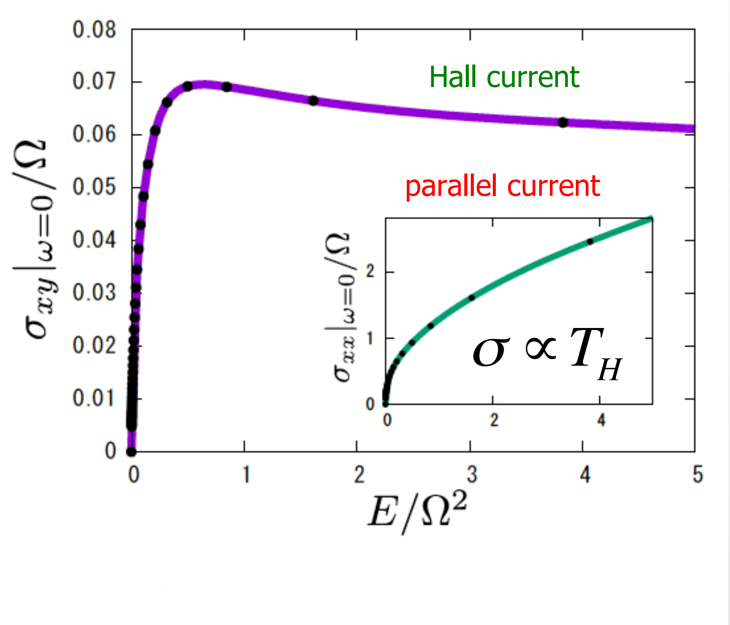

Hashimoto, Kinoshita, Murata, Oka, 2017
Kinoshita, Murata, Oka, 2018

# ホール応答

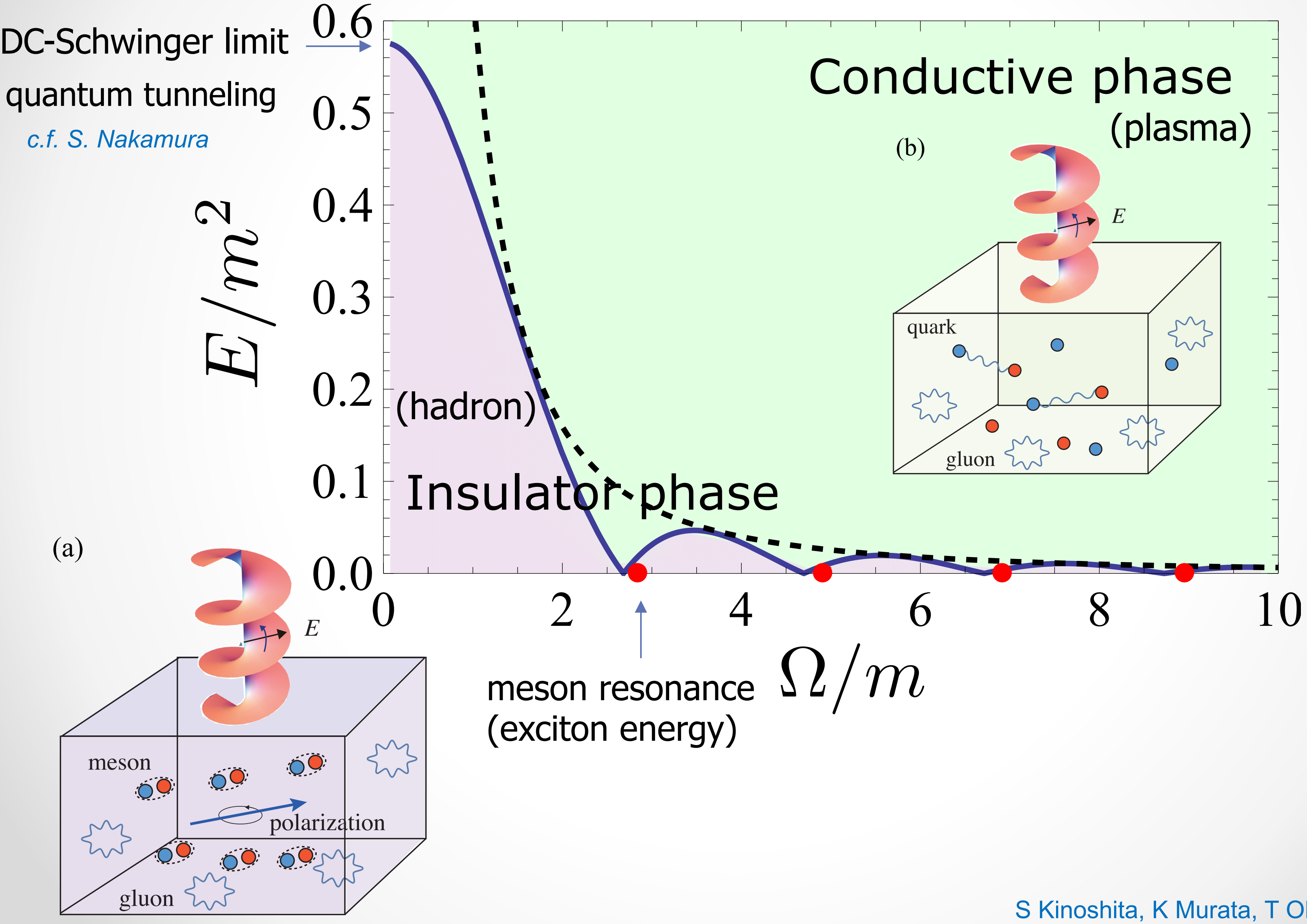
Hashimoto-Kinoshita-Murata-TO JHEP '17



# 非平衡相図

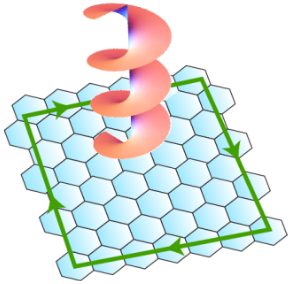



S Kinoshita, K Murata, T Oka JHEP '18

| 物性実験 | 物性理論<br>（場の理論） | 高エネルギー物理<br>（超弦理論・重力） |
|---|---|---|

固体電子系
Wang, Gedik *et al.* Science ’13
McIver, et al. Nat. Phys. ‘20

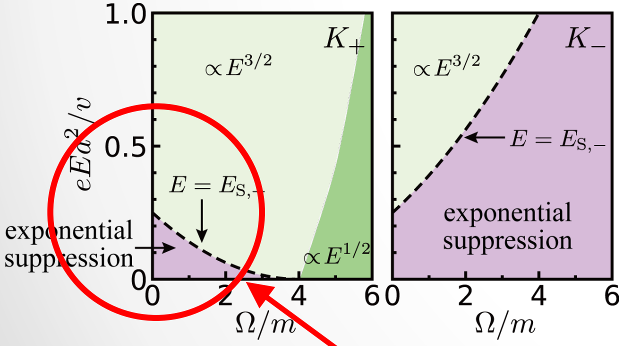
冷却原子系
Jotzu, Esslinger *et al.* Nature ’14

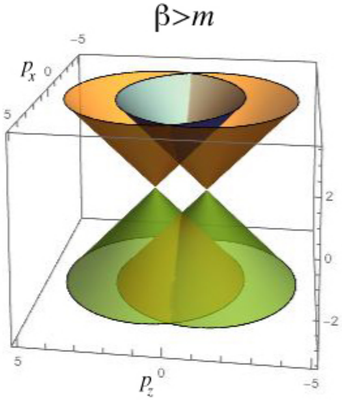


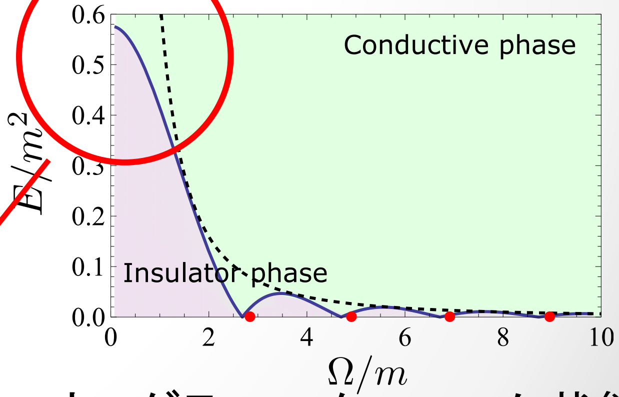
Oka-Aoki 2009

2D Dirac + 円偏光

円偏光中の
Schwinger limit?




3D Dirac + 円偏光

ホログラフィック・フロッケ状態

非断熱遷移における
幾何学効果

c.f. Fukushima, Shimazaki 2020

Ebihara, Fukushima, Oka, 2016
Bucciantini, Roy, Kitamura, Oka, 2016
Takayoshi, Wu, Oka, 2020

Hashimoto, Kinoshita, Murata, Oka, 2017
Kinoshita, Murata, Oka, 2018

# まとめ

## 物質科学と高エネルギー物理が拓く非平衡物理のフロンティア

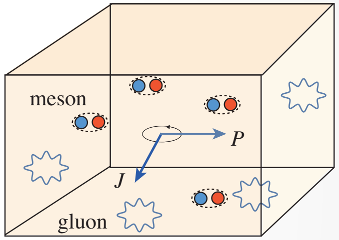
- フロッケ状態、非エルミート状態のトポロジーの分類理論

- 非平衡系特有の秩序状態

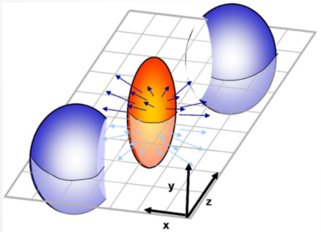
振動秩序 (Floquet condensate)、フロッケ時間結晶

$$J_x + iJ_y = \langle \bar{\psi}(\gamma_x + i\gamma_y)\psi \rangle = |J|e^{i\Omega t - i\delta}$$

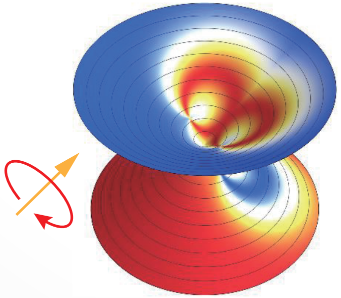
Kinoshita, Murata, Oka, 2018




- 高エネルギー物理への波及？



重イオン衝突時の
電場は回転している



生成される粒子分布
はカイラル対称性を破る

Takayoshi, Wu, Oka, 2020

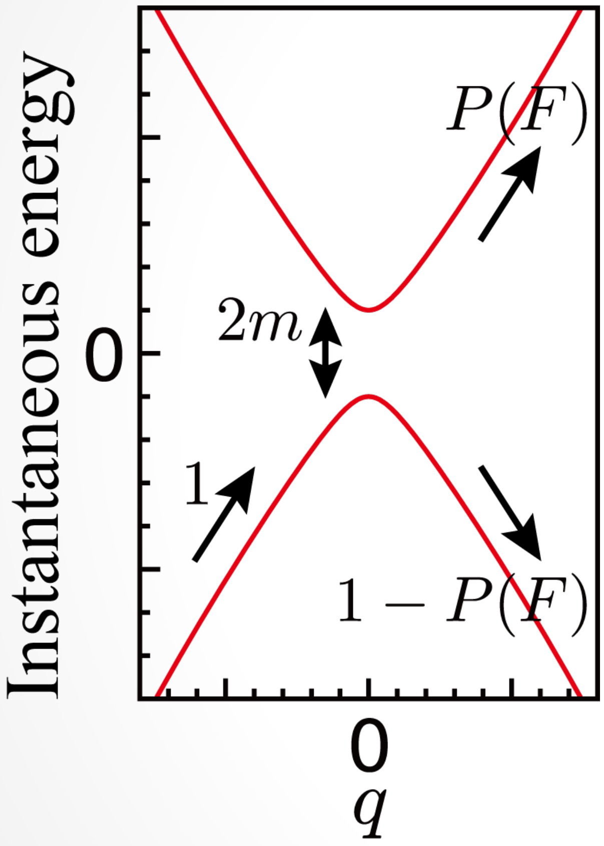
回転電場によるホログラフィック・フロッケ状態

カーブラックホールとの共通点or違い？

$$a(t,\rho) = b(t,\rho)e^{i[\Omega t + \chi(t,\rho)]}$$

回転座標系（内部空間）

# Landau-Zener model



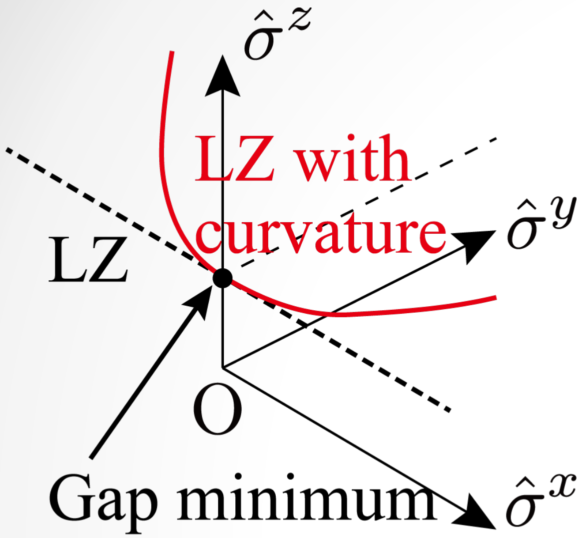

$$\hat{\mathcal{H}}(q) = m\hat{\sigma}^z + vq\hat{\sigma}^x$$

$$q = -Ft$$

Landau-Zener formula

$$P(F) = \exp\left[-\pi\frac{m^2}{|vF|}\right]$$

# Twisted Landau-Zener model

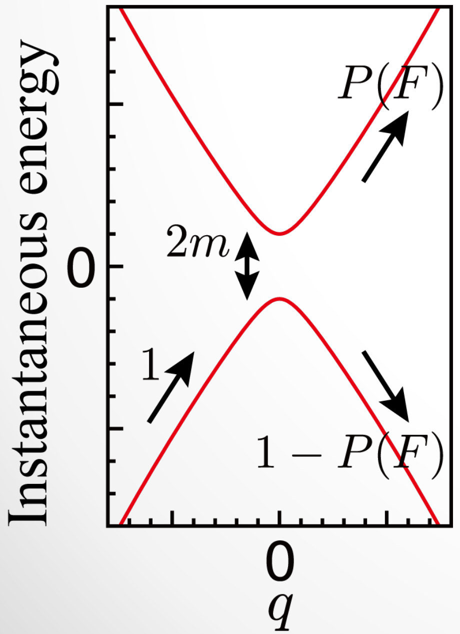



$$\hat{\mathcal{H}}(q) = m\hat{\sigma}^z + vq\hat{\sigma}^x + \frac{1}{2}\kappa_{\parallel}v^2q^2\hat{\sigma}^y$$

$$q = -Ft$$

curvature

Tunneling formula




$$P(F) = \exp\left[-\pi\frac{(m+\kappa_{\parallel}vF/4)^2}{|vF|}\right]$$

Nonadiabatic geometric effect

Berry 1990 (first order in κ)

Takayoshi, Wu, Oka 2020

(with general form)