

QCDと他の物理の交点

日高義将

(KEK)

交点

QCDに現れる現象と
似た現象が別の系で
起きる場合

例:カイラル磁気効果

対象にハドロン
原子核が含まれる場合

例:宇宙, 天体物理
中性子星は
原子核でできている

なぜQCDと他の物理の交点が
ありうるか？

他の物理が物性物理の場合

A. どちらも量子多体系の問題だから

**真空が非自明な構造があることは
場の理論が成立時から知られていた**

真空は対称性の破れを起こすことも

1960年代にはわかっていた

場の理論は、 相対論を尊重した物性物理

真空

= Lorentz対称性の自明な量子数を持つ基底状態

物性物理の基底状態

= 非自明量子数(密度が有限)を持つ基底状態

高温, 高密度などの極限状態の研究 =QCD物性

物性物理は多様なので
なんかしら似たものは見つけられる

交点があるパターン

- 対称性(トポロジー)が似る

同様の物理現象が生じる

- 方程式が似る

全く違う物理系が結びつく

例: 川に垂らしたインクが流され広がる様子

株のオプションの適正価格

Balitsky-Kovchegov方程式

生物の個体数の変化の様子の数理モデル

長波長の物理現象は、 普遍的

有効理論は、 (実現した)対称性と

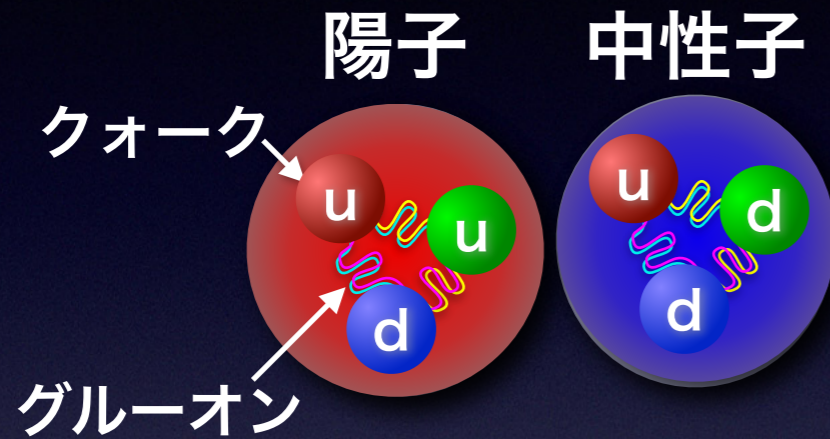
破れた対称性で決まる

今日のトークでは、
他の物理との交点ということで
主に低エネルギー~長波長
の振る舞いに現れる交点を考える

QCDの基礎復習

量子色力学(QCD)

SU(3)ゲージ理論



自由度はクォークとグルーオン

QCD ラグランジアン

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}_j (\gamma^\mu (i\partial_\mu + gt_{ji}^a A_\mu^a) - m) \psi_i + \frac{1}{2} \mathbf{E}^{a2} - \frac{1}{2} \mathbf{B}^{a2}$$

電磁気に似ている

QED

QCD

粒子

電子

クォーク

spin 1/2



1つの電荷

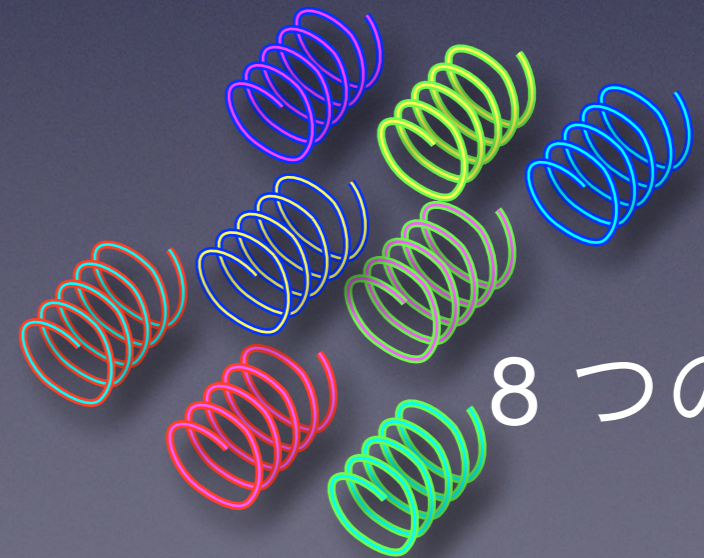
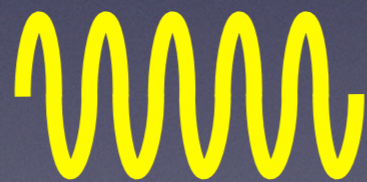
3つの電荷

ゲージ粒子

光子

グルーオン

spin 1



電荷なし

8つの電荷

大きな違いがある

QED

電荷 Q は観測量

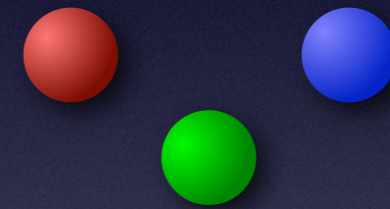


電場と磁場は観測量

E, B

QCD

カラー Q^a は観測量ではない



カラー電場,

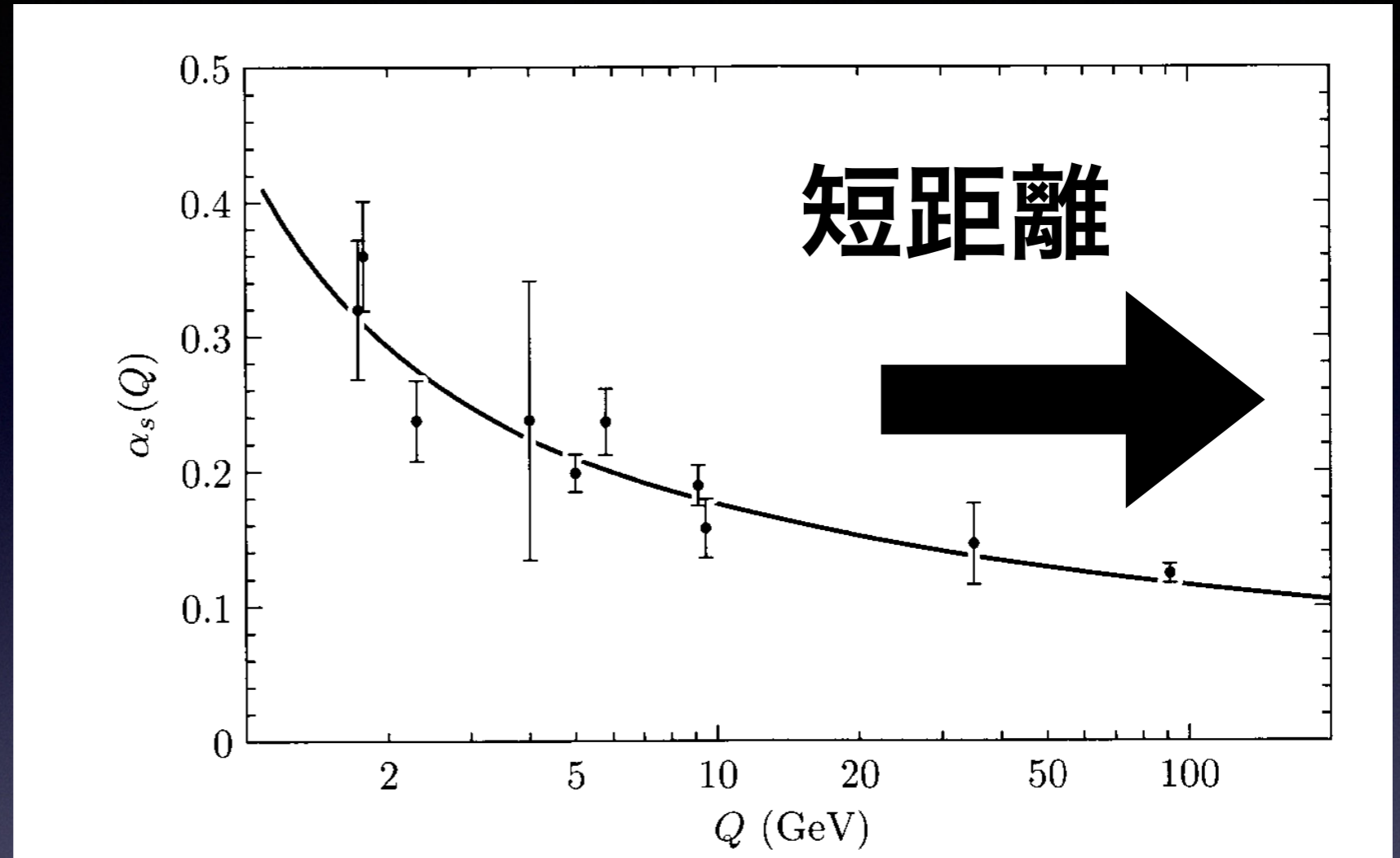
カラー磁場は観測できない

E^a, B^a

結合定数のエネルギー依存性

結合定数

$$\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi}$$



Gross



Politzer

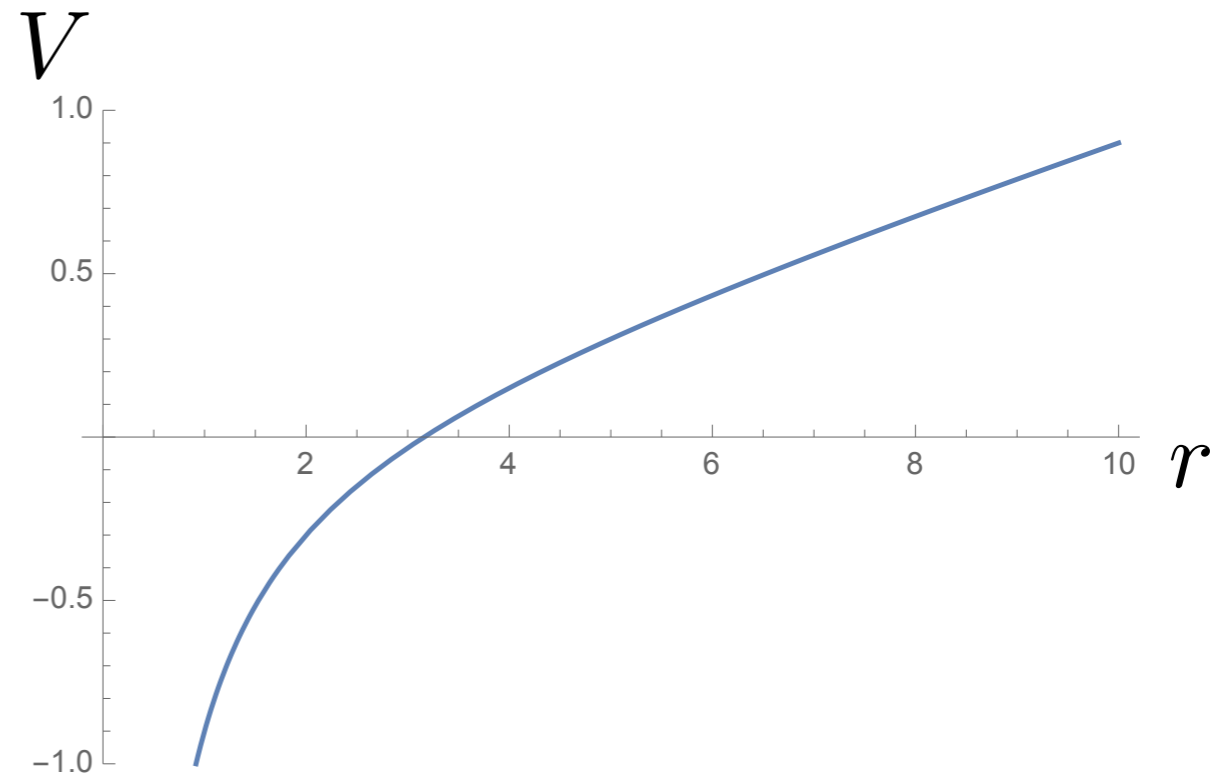
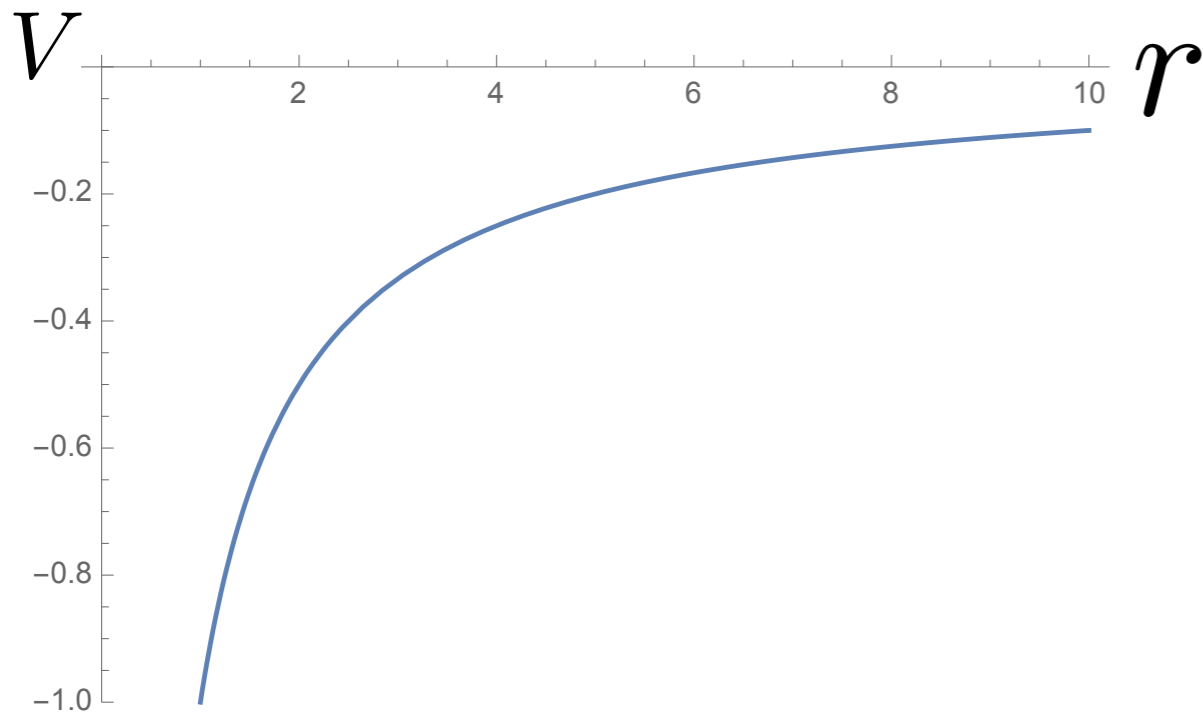


Wilczek

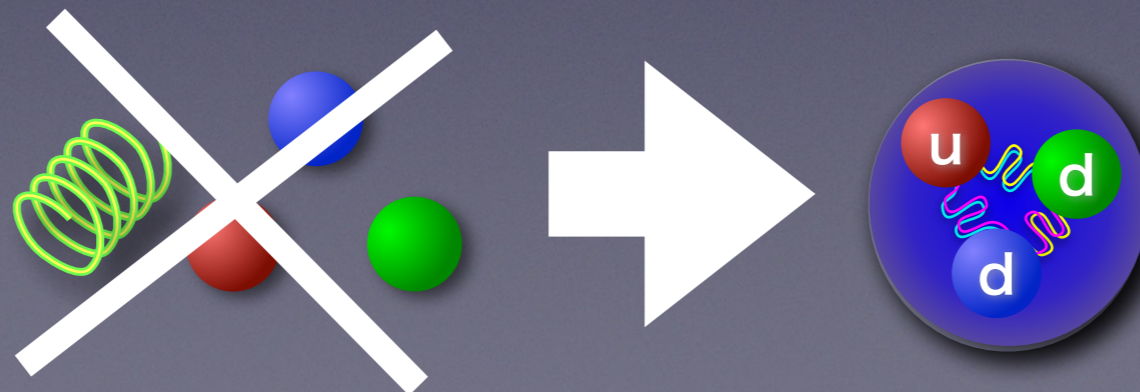
QEDとQCDの違い

QED:クーロンポテンシャル

QCD:閉じ込めポテンシャル

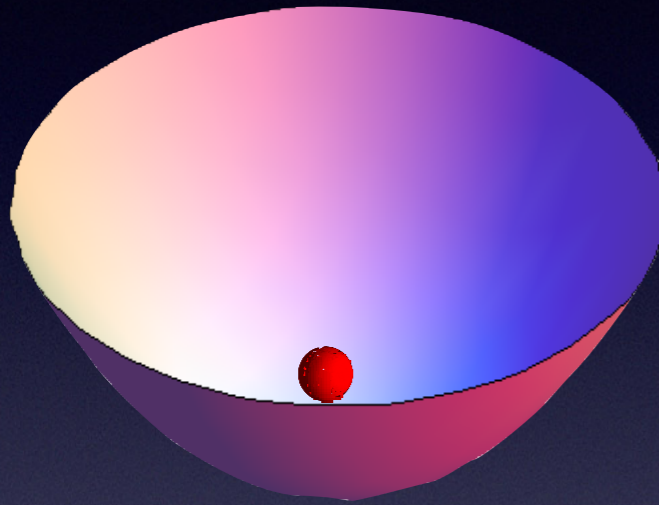


クォークグルーオンの閉じ込め



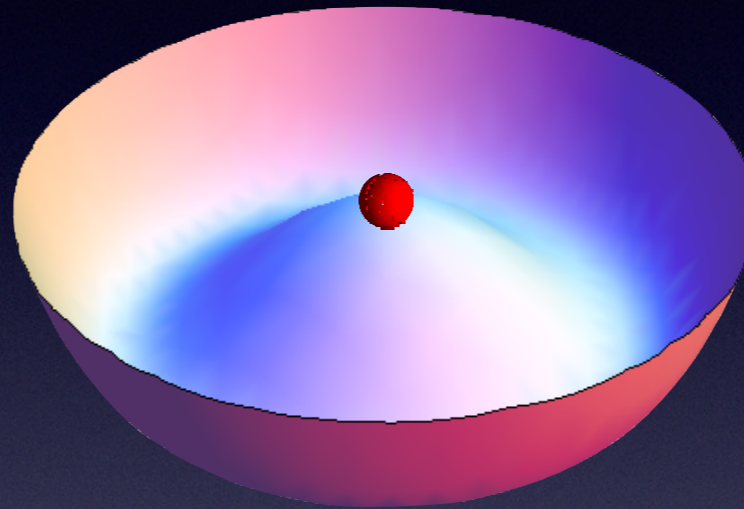
自発的対称性の破れ

対称



安定

対称



不安定



Yoichiro Nambu

対称性が自発的に破れると質量を持たないモードが現れる

パイオンはカイラル対称性 $SU(3)_L \times SU(3)_R$ の
自発的破れに伴う南部ゴールドストーンボソン

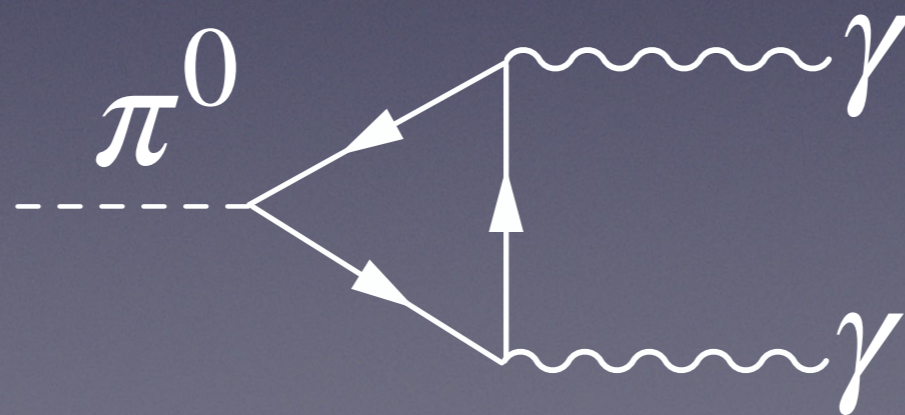
アノマリー

古典的な対称性は量子効果で陽に破れる

η' は南部ゴールドストンの候補だが、
実際は、アノマリーで破れていて重たい

$$m_{\eta'}/m_{\pi^0} \simeq 7.1$$

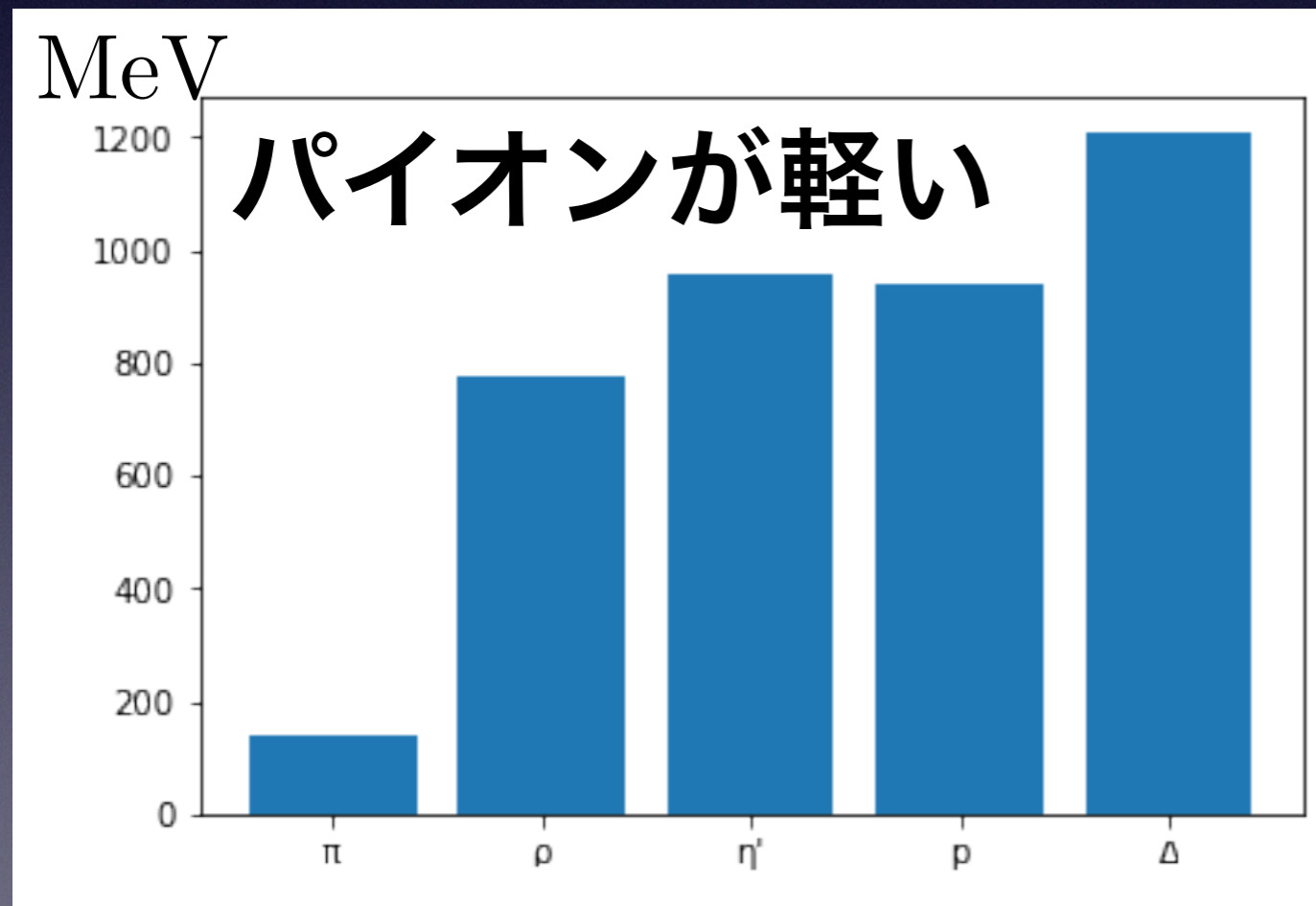
中性パイオンの 2γ への崩壊は、素朴な計算に比べて大きい



簡単なまとめ

QCDは非可換ゲージ理論としてユニークな性質を持つとともに
現代物理の基本的な概念が詰まった理論

- クォークグルーオンの閉じ込め
- カイラル対称性の自発的破れ



- アノマリー

QCDはこれらの概念が絶妙に 絡みあって多様な現象を引き起こす

$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊:

カイラルアノマリー+自発的対称性の破れ

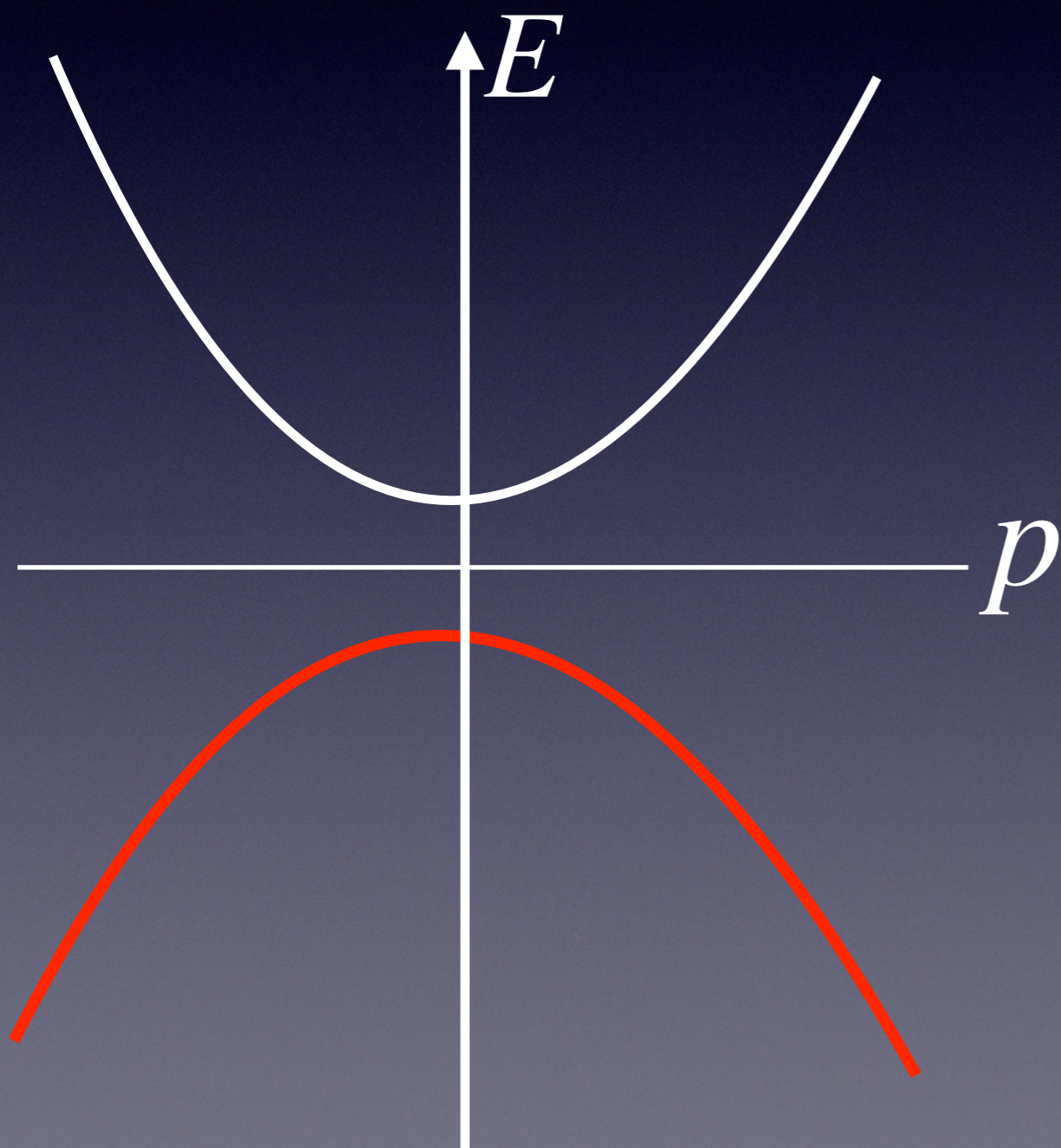
カイラル磁気効果

カイラルアノマリー + 有限温度密度+ パリティの破れ

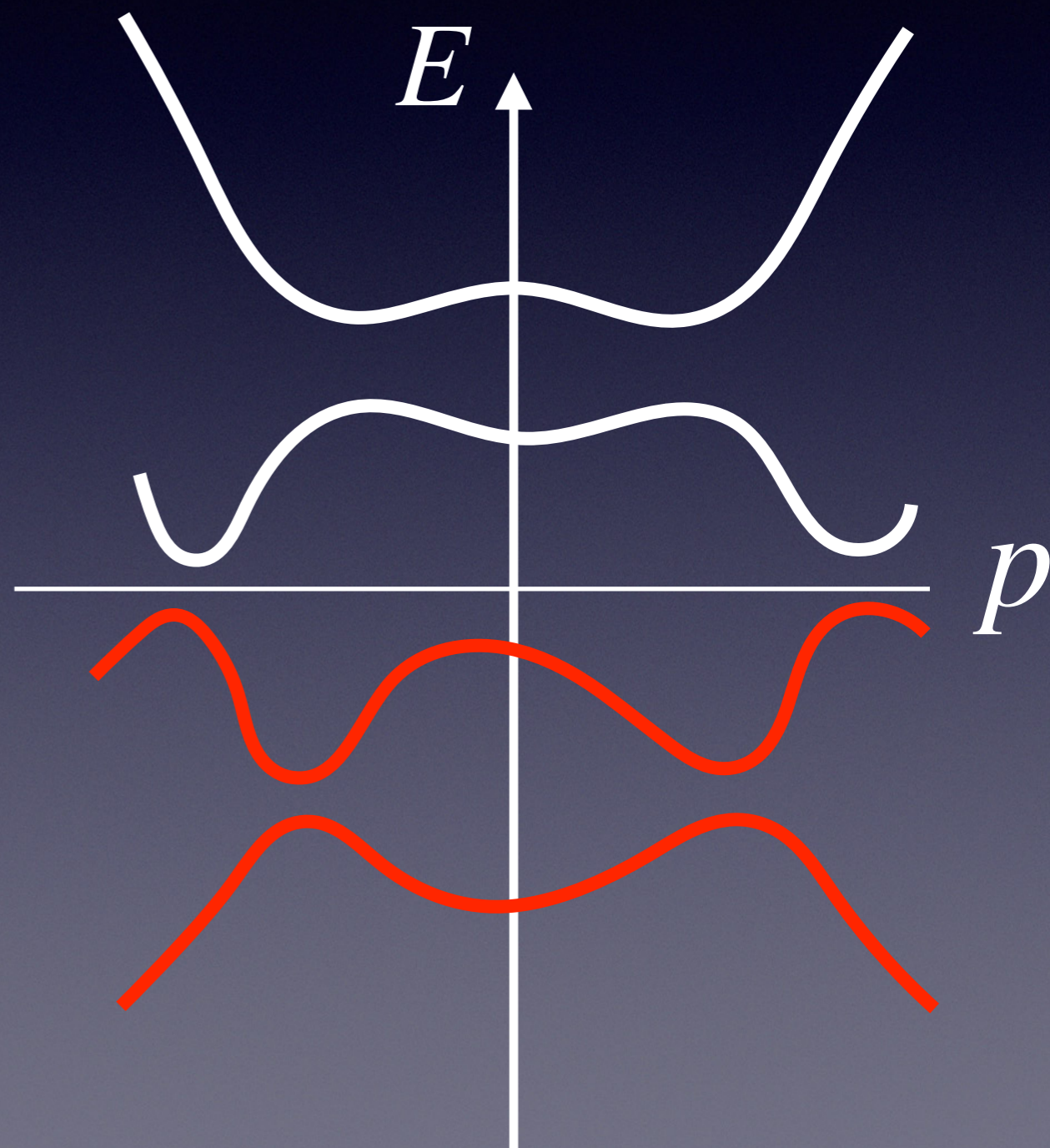
交点

非自明な真空と基底状態

相対論的場の理論の
エネルギースペクトル



固体のバンド構造



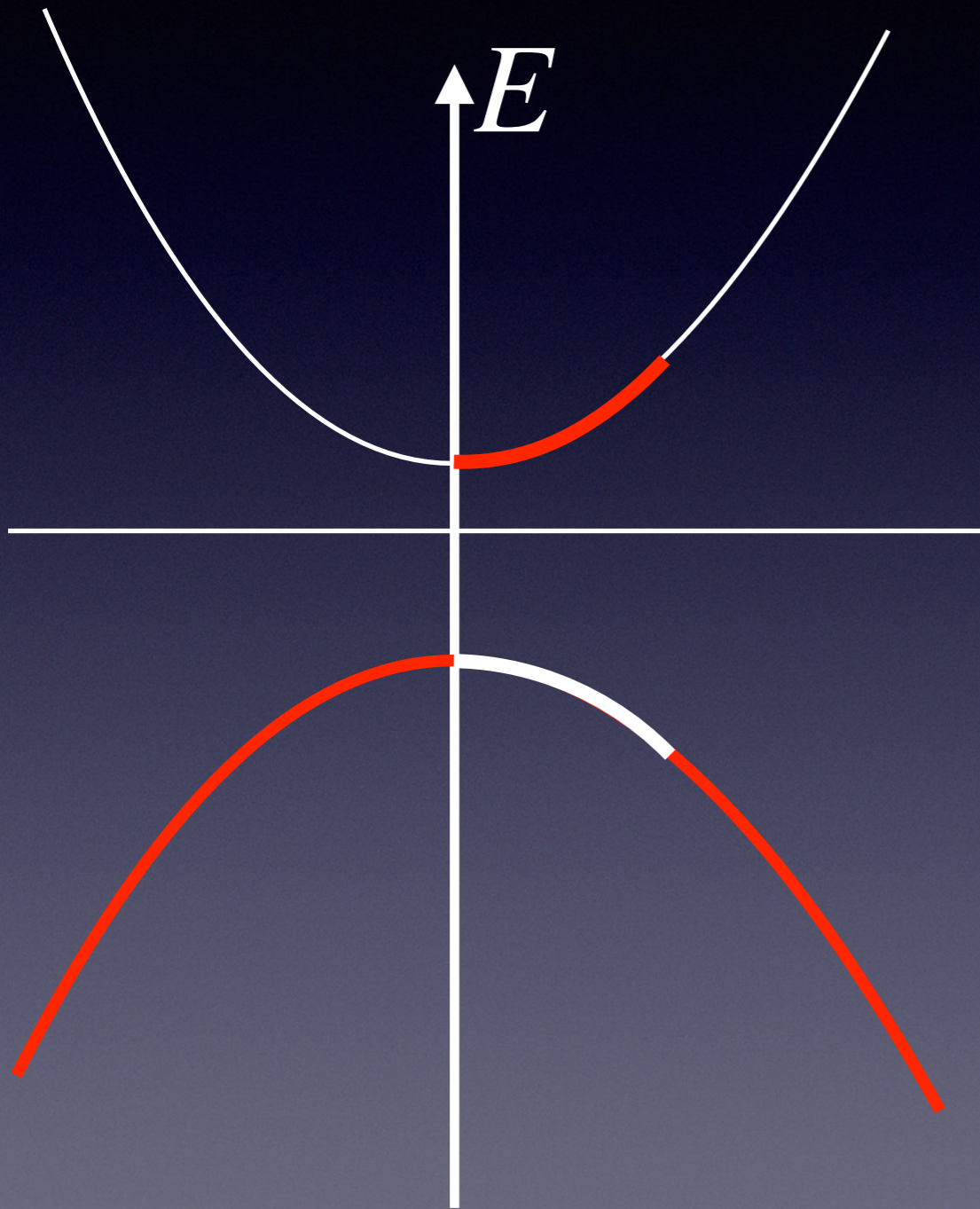
絶縁体のフェルミエネルギー付近と真空は似た構造

電場をかけると粒子が生成

真空: Schwinger 機構

バンド絶縁体: 絶縁破壊

Landau-Zener トンネル



自発的対称性の破れ

自発的対称性の破れ: 簡単な歴史(1900~)

自発磁化

Magnetic domain理論

Weiss (1907)

Ising模型

Lenz (1920)

Ising (1925)

Heisenberg模型

Heisenberg (1928)

スピン波の導入

Bloch (1930)

Bloch則 $M(T) = M(0)(1 - cT^{3/2})$

超伝導と南部-Goldstoneモード

超伝導発見

Onnes (1911)

BCS理論

Bardeen, Cooper, Schrieffer ('57)

南部, Goldstone理論

Nambu('60), Goldstone (61),

Nambu, Jona-Lasinio ('61),

Goldstone, Salam, Weinberg ('62).

(自発的対称性の破れ)

Brout-Englert-Higgs 機構

Anderson('62), Brout, Englert ('64), Higgs ('64),

Guralnik, Hagen, Kibble ('64), Migdal, Polyakov ('65)

超伝導の有効理論 ハドロンの有効模型としての

BCS理論 Nambu-Jona-Lasinio模型

Cooper pairの凝縮 クォーク反クォークの凝縮
(対称性が自発的に破れる)

光子がギャップを持つ ゲージ場がないと
ギャップレスな
モードが現れる

注意: 超伝導はゲージ対称性の自発的破れの発展に貢献したが
ゲージ対称性は厳密で破れていない。
実はトポロジカル秩序を持った相

カイラル対称性の破れの有効理論

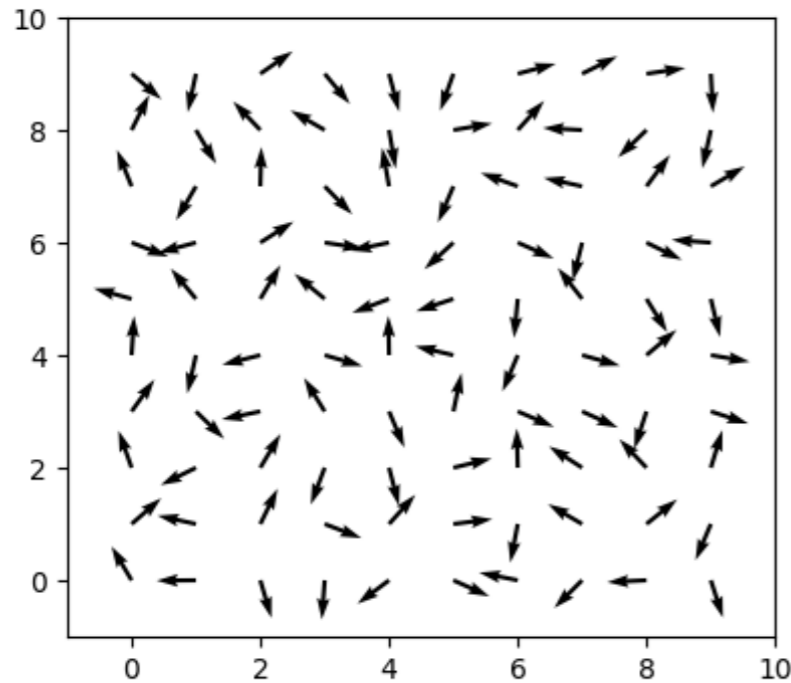
カイラル摂動論

$$\mathcal{L} = f_\pi^2 \text{tr} \partial_\mu U^\dagger \partial^\mu U + \dots \quad U = e^{i\pi}$$

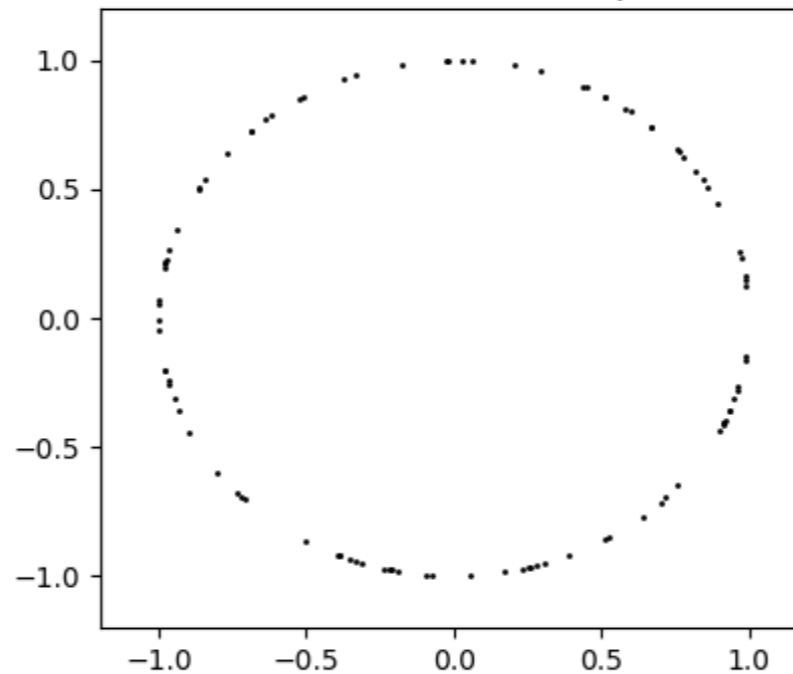
位相が自由度

力学系でも似たような現象解析が知られている
リズム現象: 時間並進の破れ

Kuramoto model



N=100, K=1.05 :t=0 r=0.06,psi=-1.32



自由度として位相:位相縮約理論

Winfree, 蔵本,.....

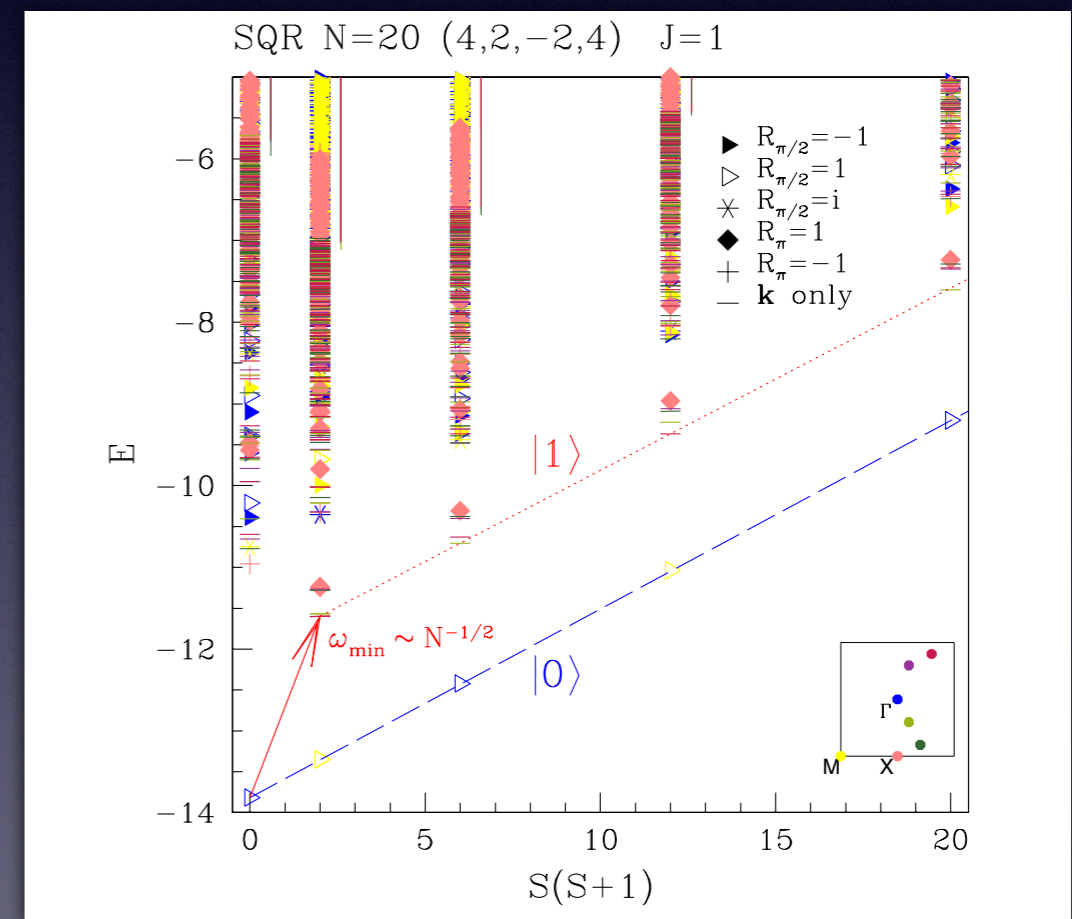
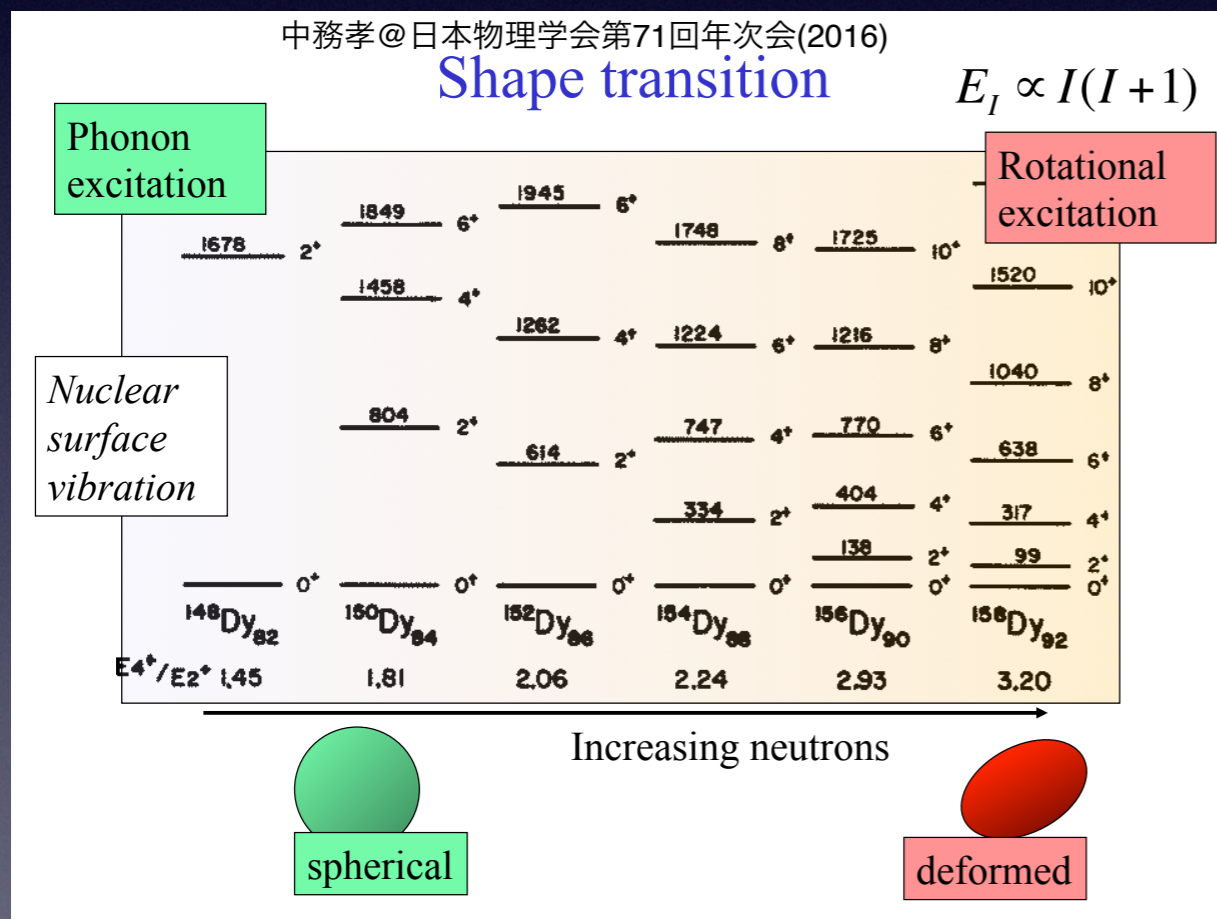
有限系では自発的対称性の破れは起きないこと に伴う低エネルギー励起

注:南部ゴールドストーンモードではない

変形核の回転バンド

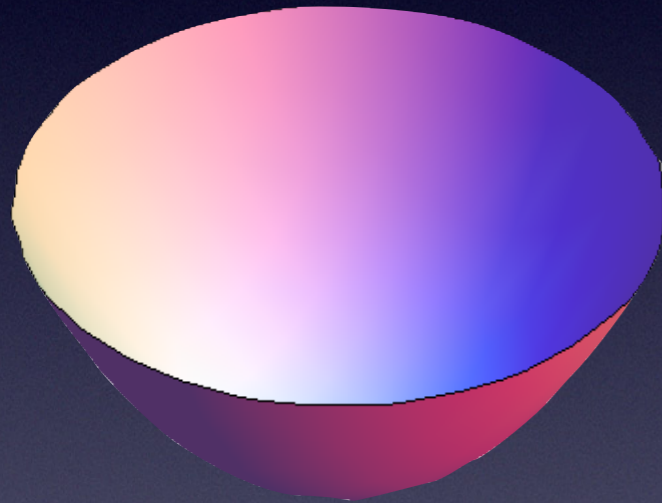
Tower of states

正方格子上的反強磁性体

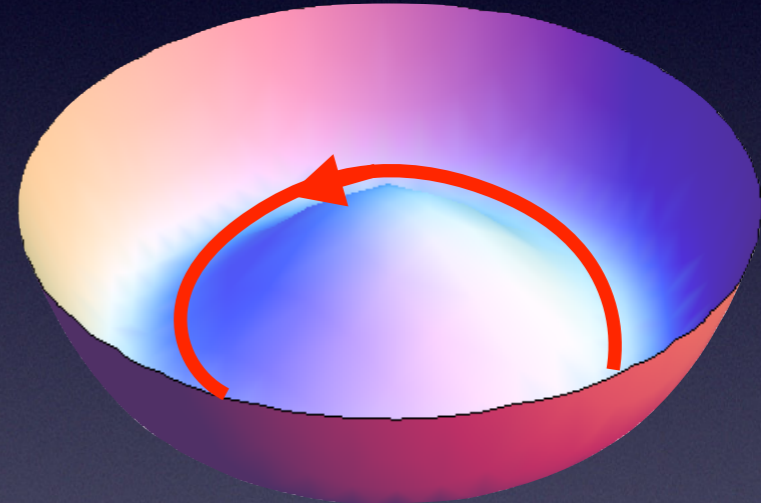


対称性の破れは 対称性を創発する

破れてない真空



破れた真空

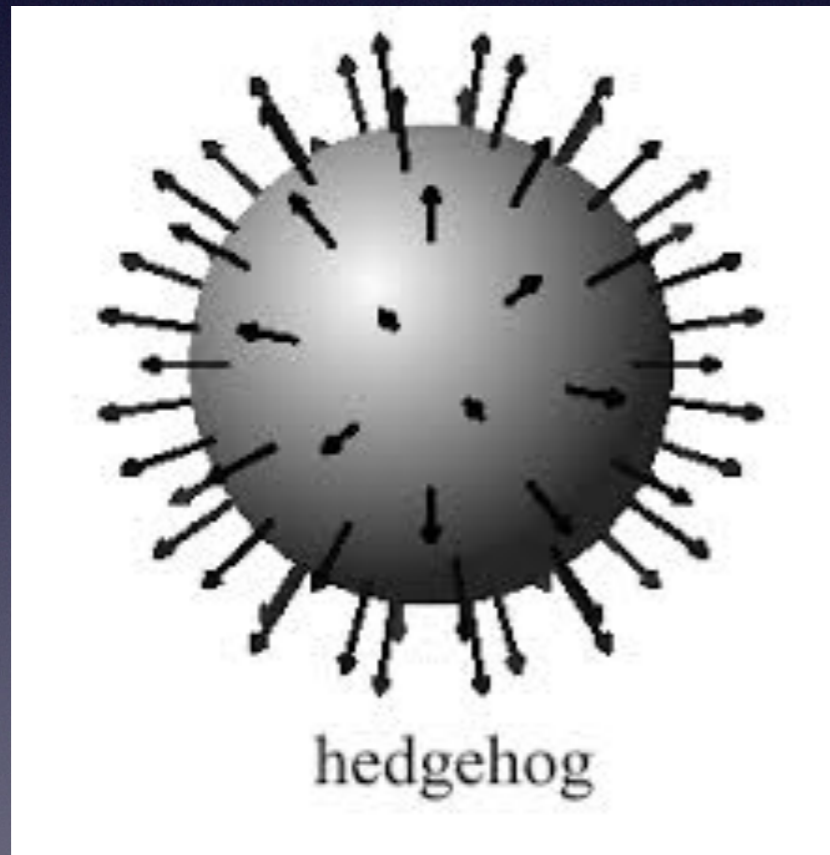


平らな所に巻き付く事が
できるのに対応した $U(1)$
対称性が創発

カイラル対称性の破れで
巻き付いた励起は、
Skyrmionと呼ばれる

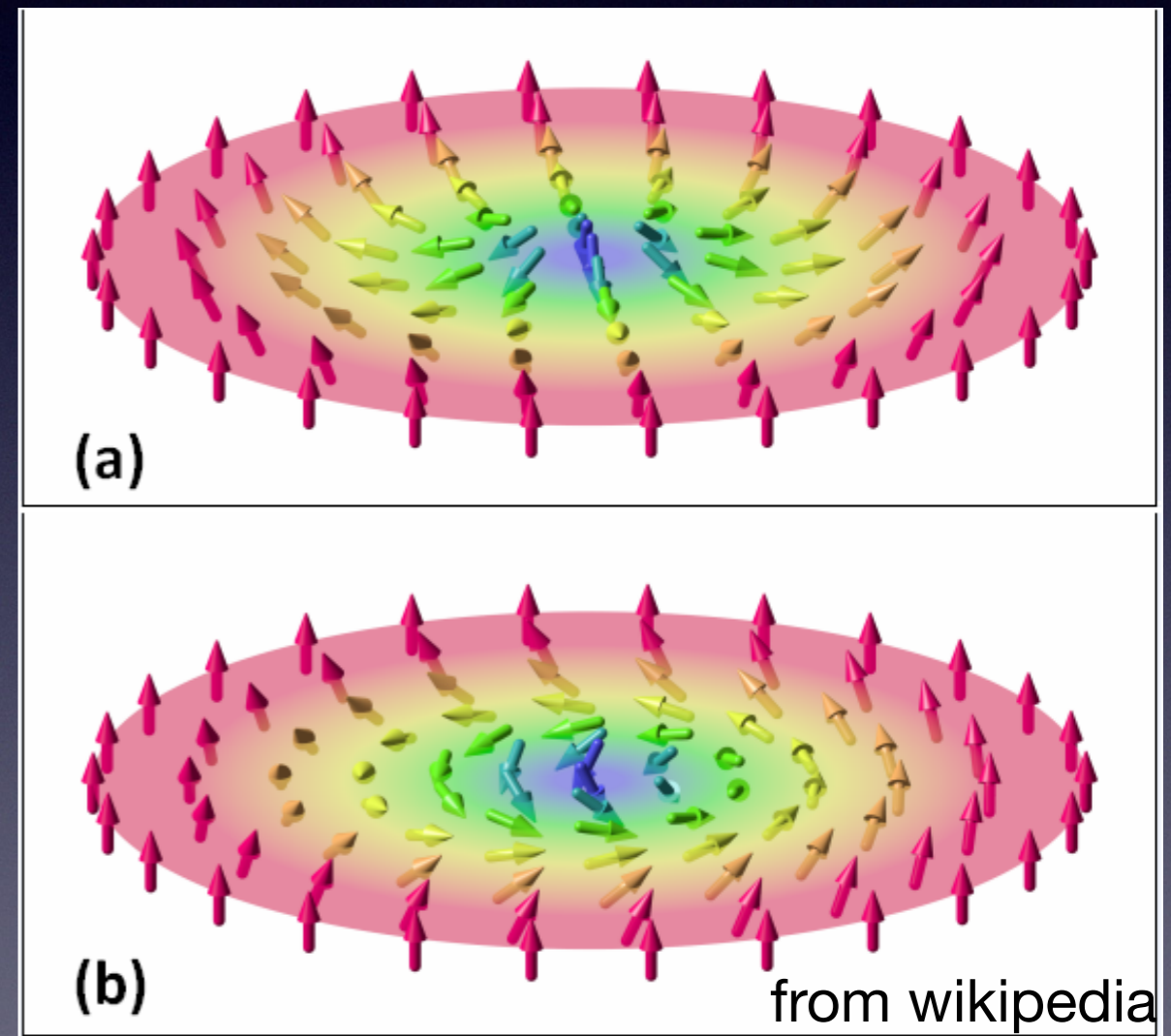
Skyrme 1962

$$\pi_3(SU(N)_R \times SU(N)_L / SU(N)_V) = \mathbb{Z}$$

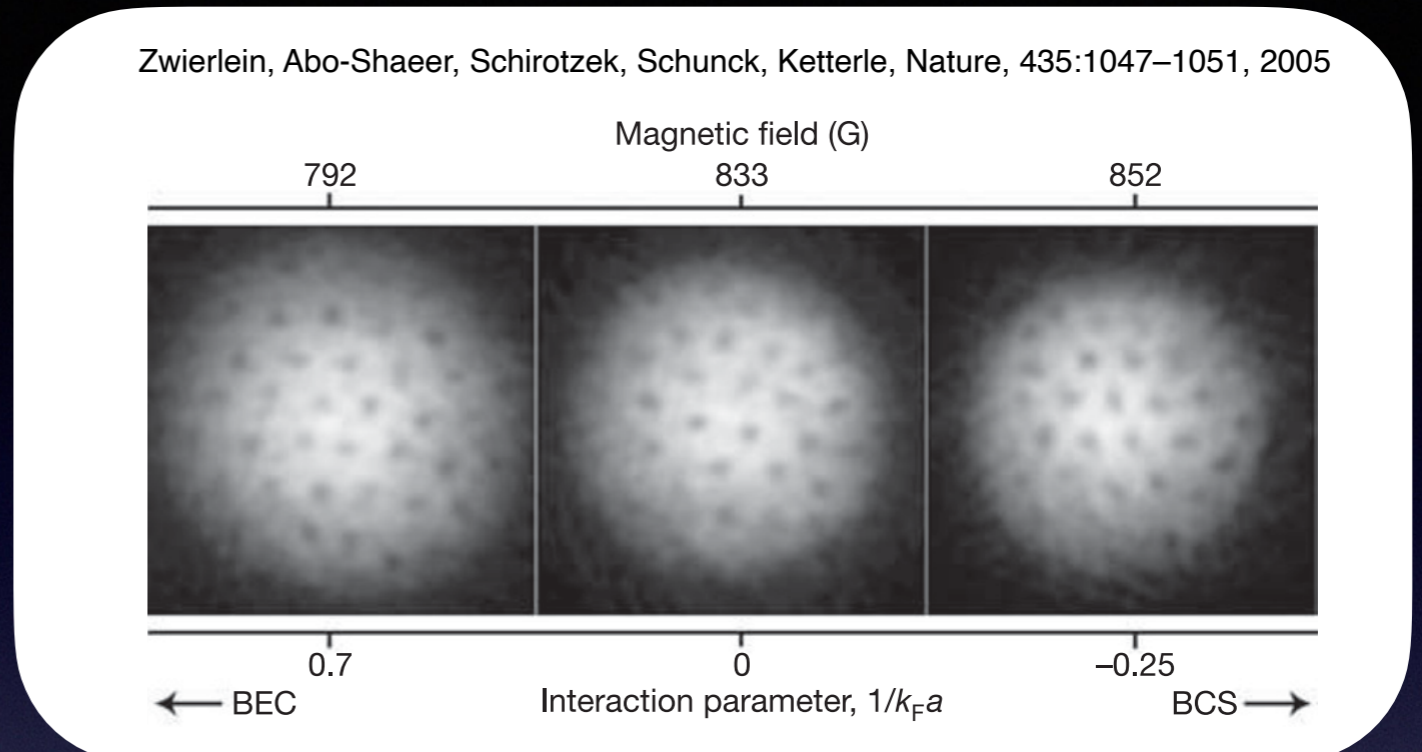
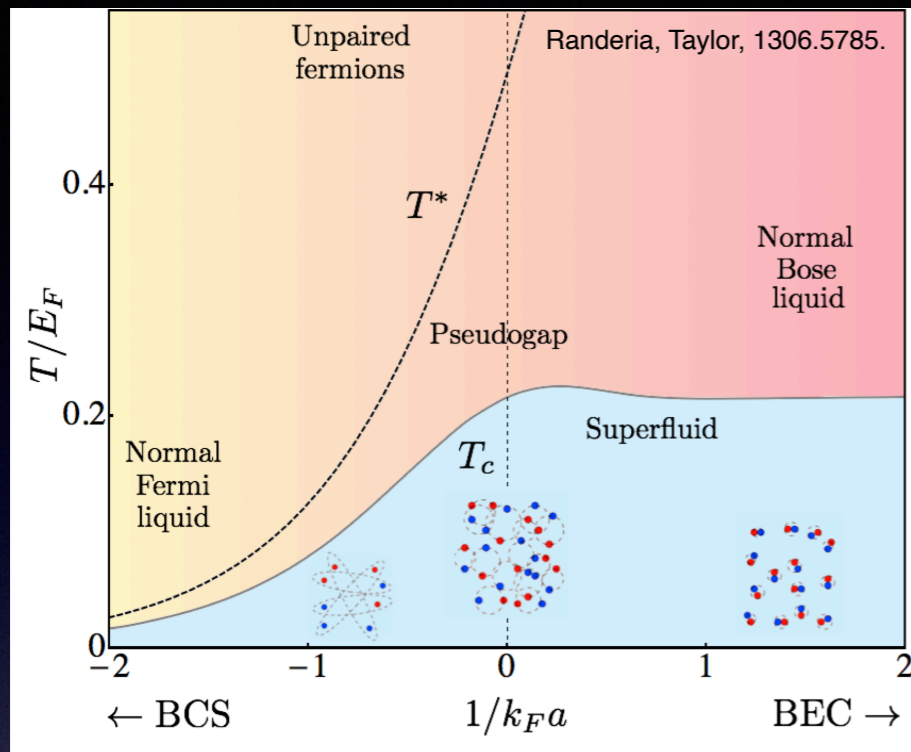


強磁性体でも
磁気Skyrmionが存在

$$\pi_2(O(3)/O(2)) = \mathbb{Z}$$



BEC/BCS cross over



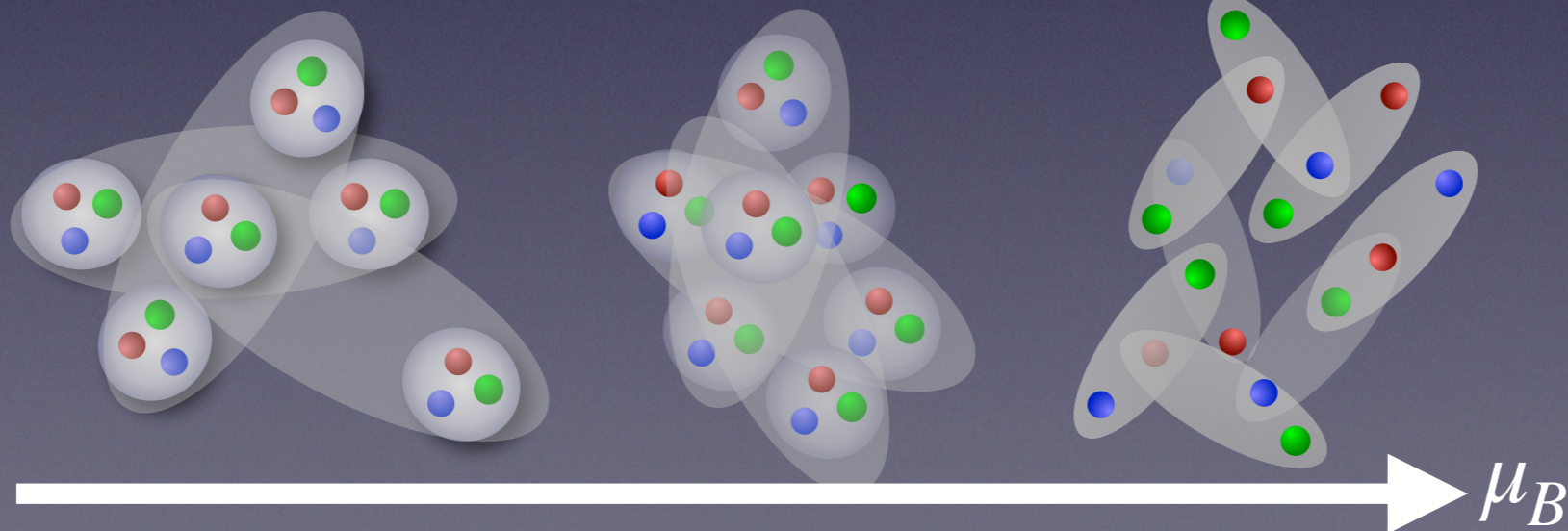
Quark-hadron continuity

Schafer and Wilczek, PRL 82, 3956(1999)

Hatsuda, Tachibana, Yamamoto, Baym, PRL 97 122001 (2006)

ハドロン相

CFL相



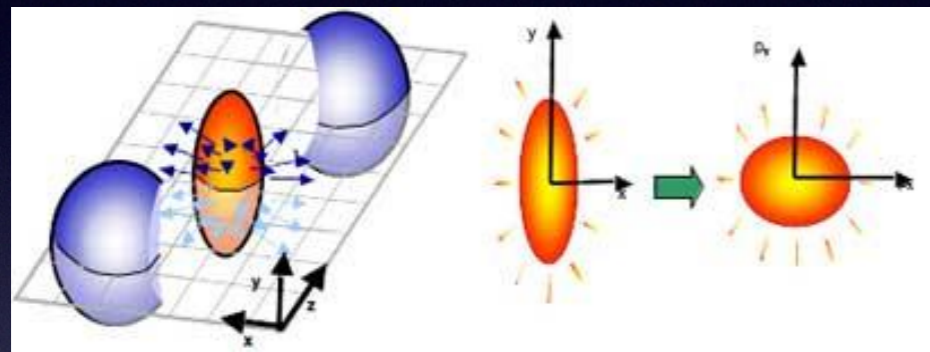
励起: バリオン \Rightarrow クォーク
ベクターメソン \Rightarrow グルーオン

重イオン衝突の物理と物性物理の交点

RHICやLHCで

生成されたとされるQGPは

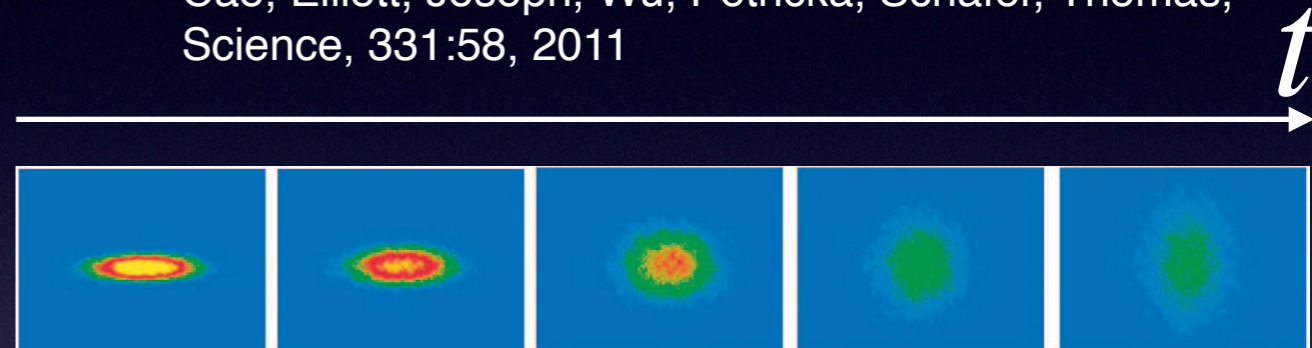
完全流体に近い



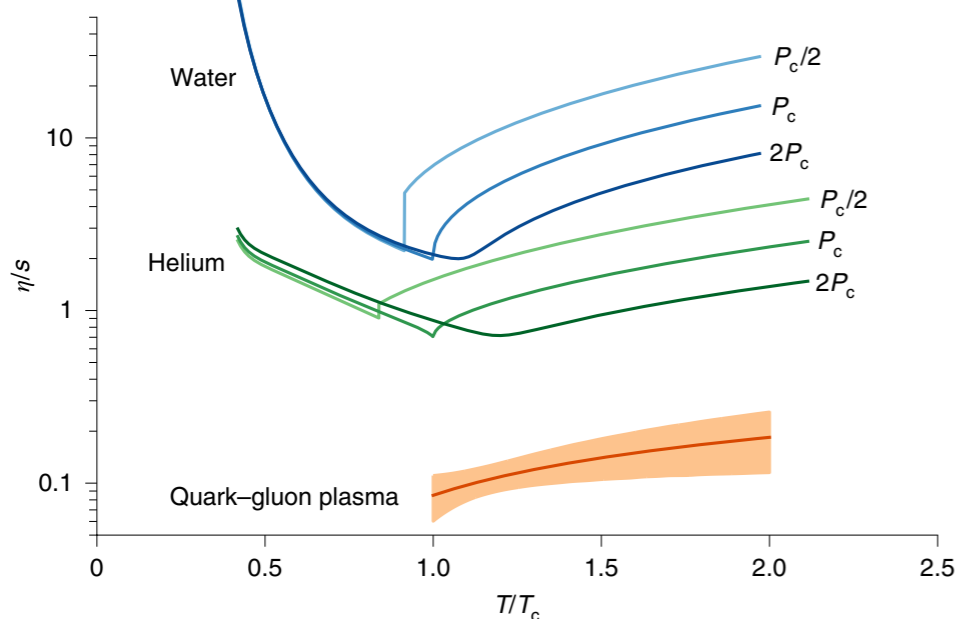
unitary Fermi gasも

完全流体の振る舞い

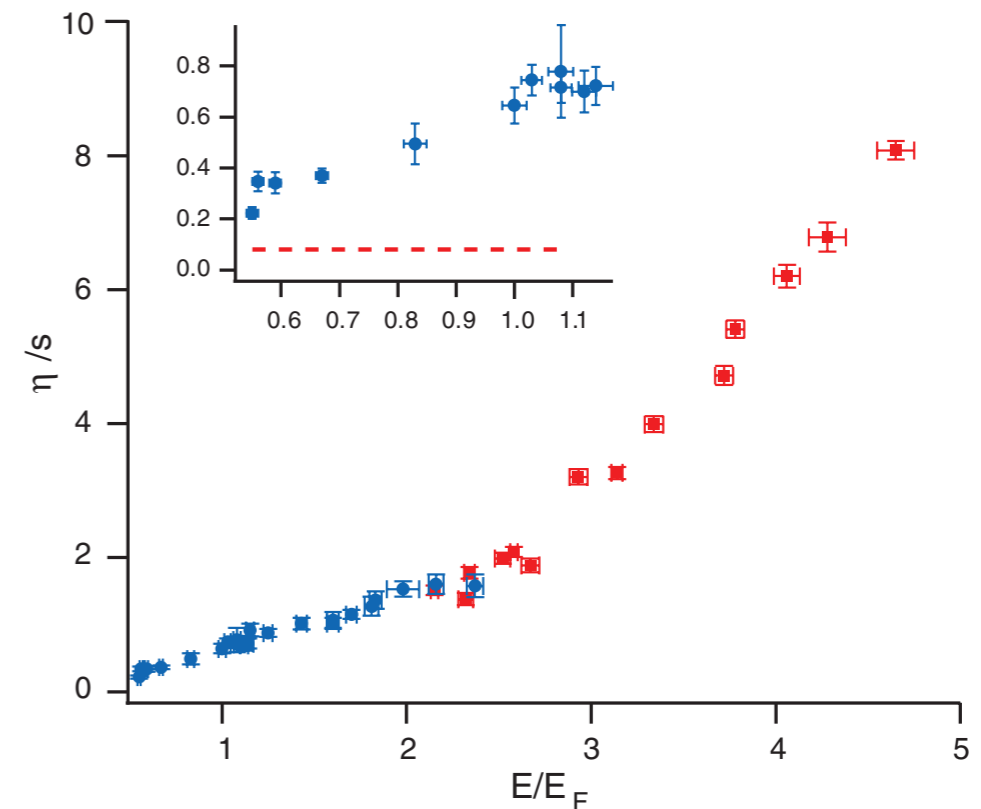
Cao, Elliott, Joseph, Wu, Petricka, Schäfer, Thomas, Science, 331:58, 2011



Bernhard, Scott Moreland, Bass, Nature Physics 15, 1113 (2019)



cf. JETSCAPE Collaboration, 2011.01430



重イオン衝突の物理と物性物理の交点

3+1次元での異常輸送現象

普通のカレント

$$J = \sigma E$$

異常カレント(カイラル磁気効果)

$$J = \sigma_B B$$

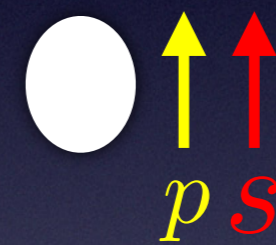
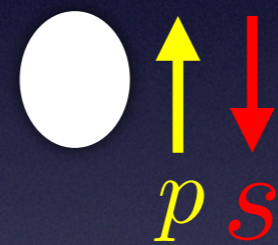
Vilenkin ('80) Nielsen, Ninomiya (83) Fukushima, Kharzeev, Warringa ('08)

パリティ対称性を破る

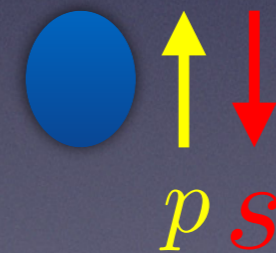
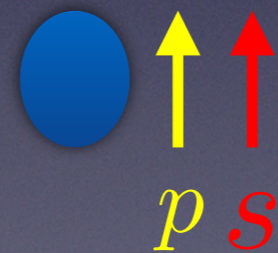
直感的議論

カイラリティ 左巻き 右巻き

粒子



反粒子

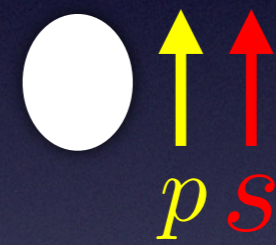
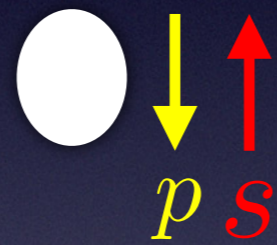


直感的議論

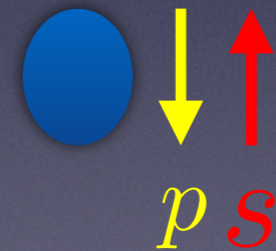
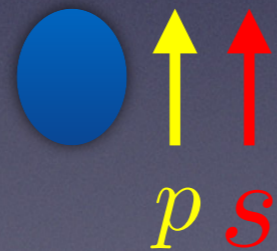
カイラリティ
左巻き 右巻き

B

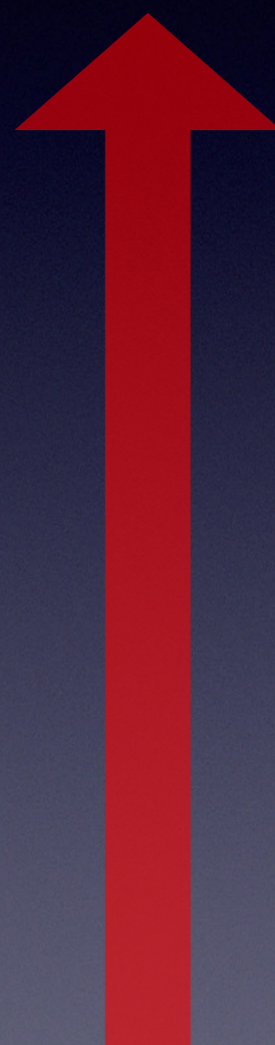
粒子



反粒子



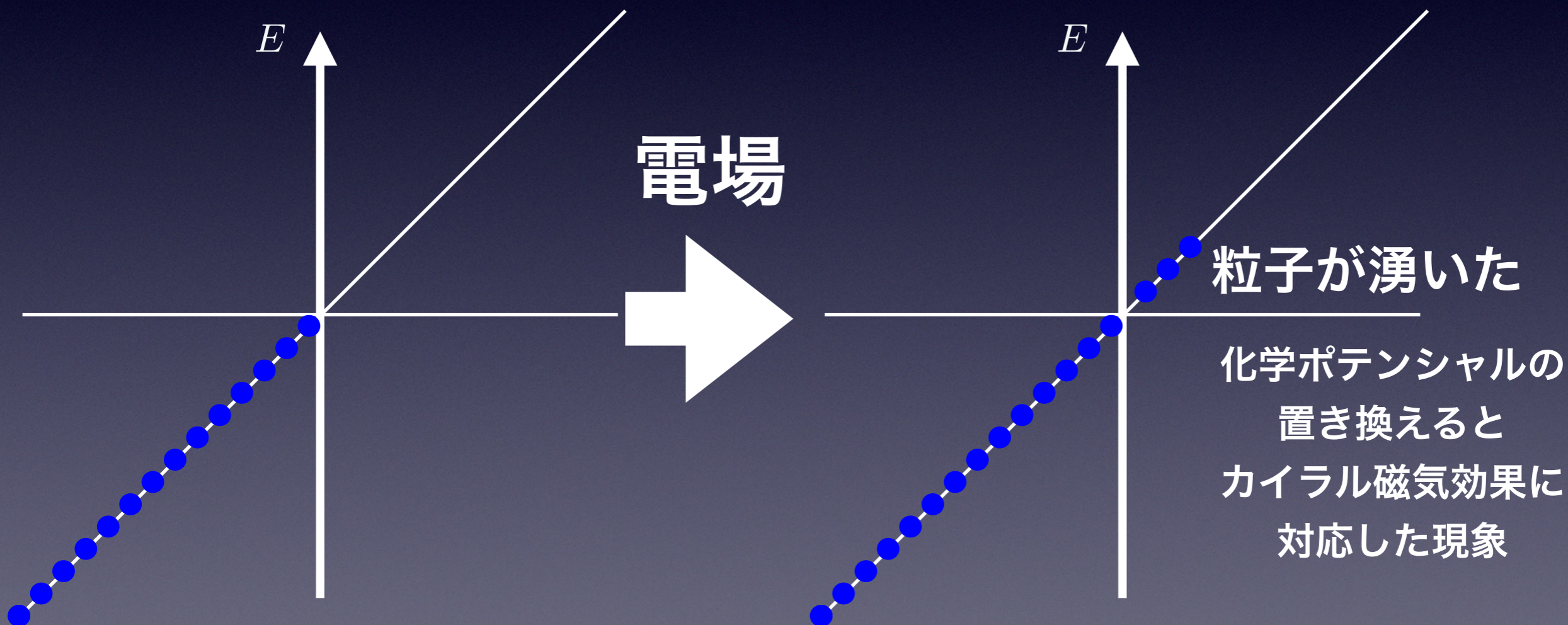
もし $N_L < N_R \Rightarrow J^z > 0$



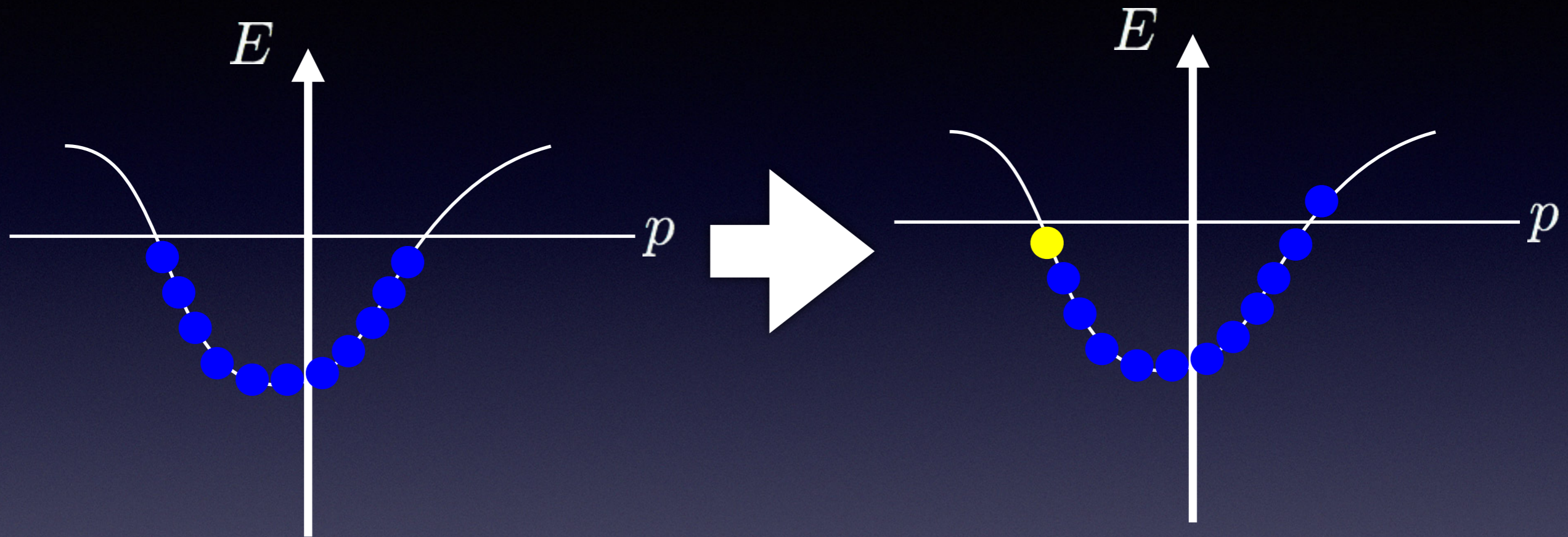
カイラルアノマリー

電場(と磁場)をかけると粒子が現れた

例 (1+1)のWeylフェルミン



ちなみに格子系では、運動量空間がコンパクト



アノマリーはない

格子系ではカイラルなフェルミオンは作れない

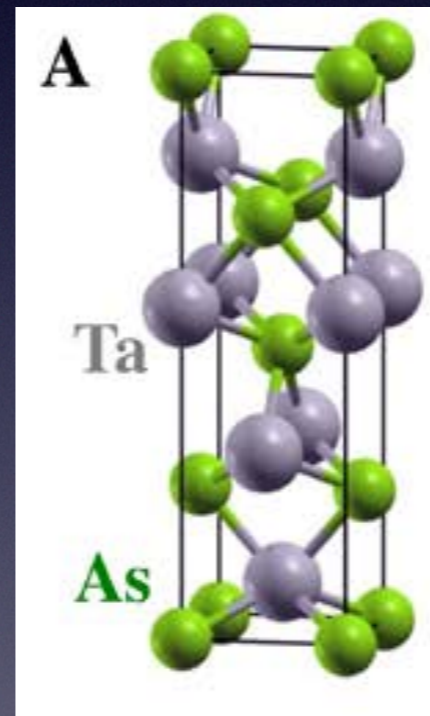
Nielsen-Ninomiyaの定理

Dirac/Weyl半金属

Dirac/Weyl点を持つ物質

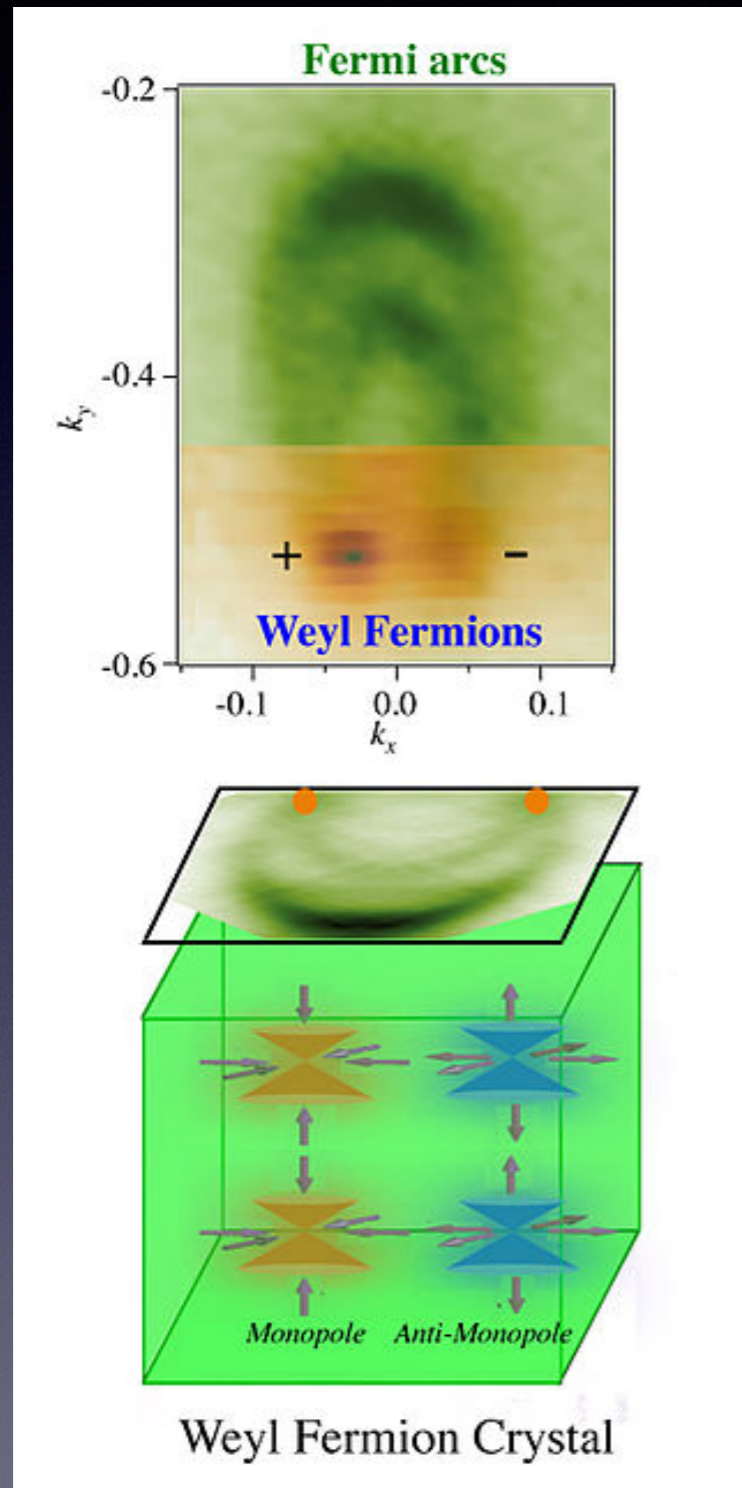
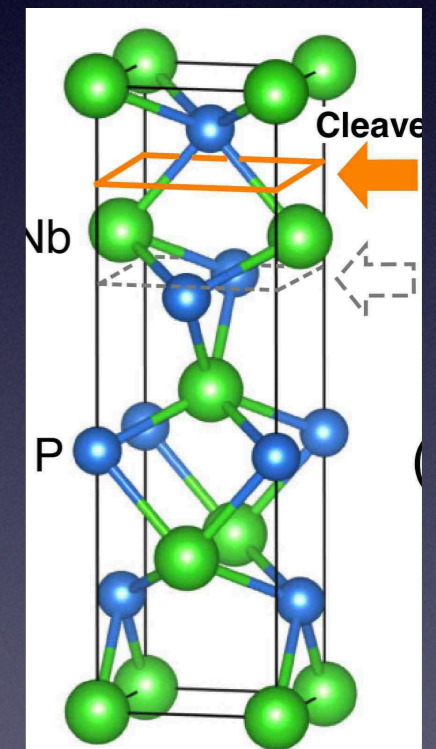
ex) TaAs

Xu, et al, Science. 349: 613–617(2015)



NbP

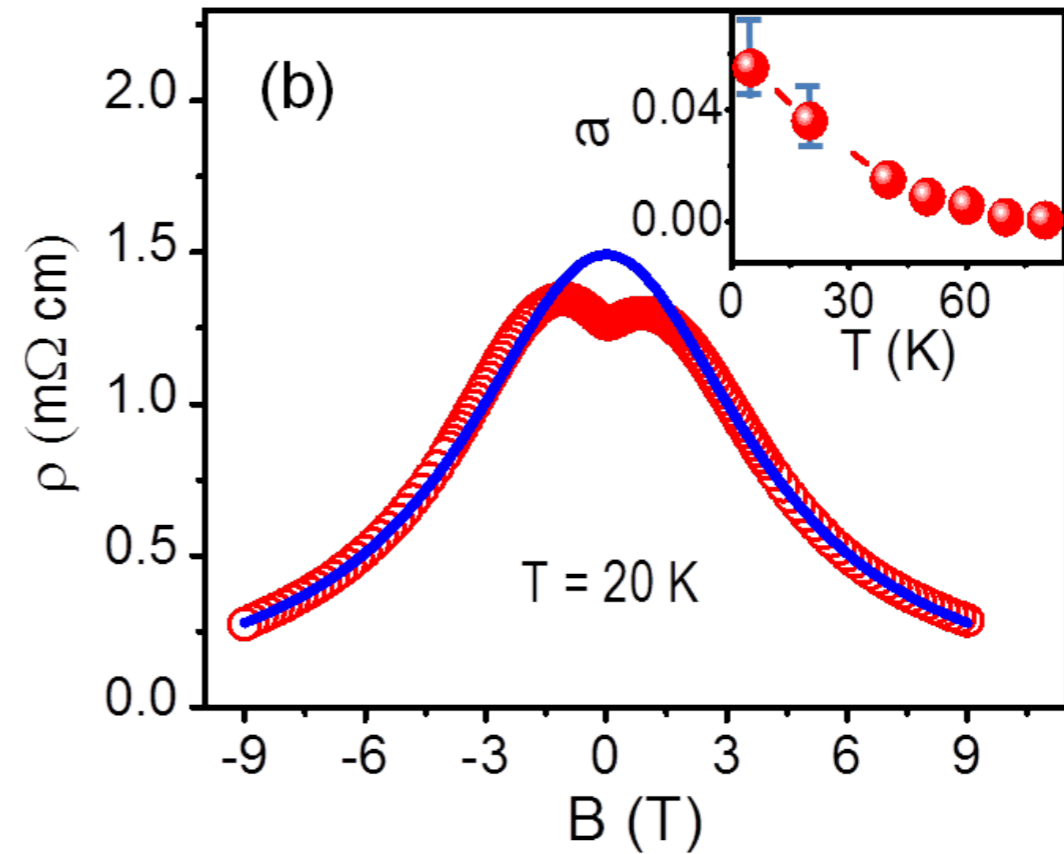
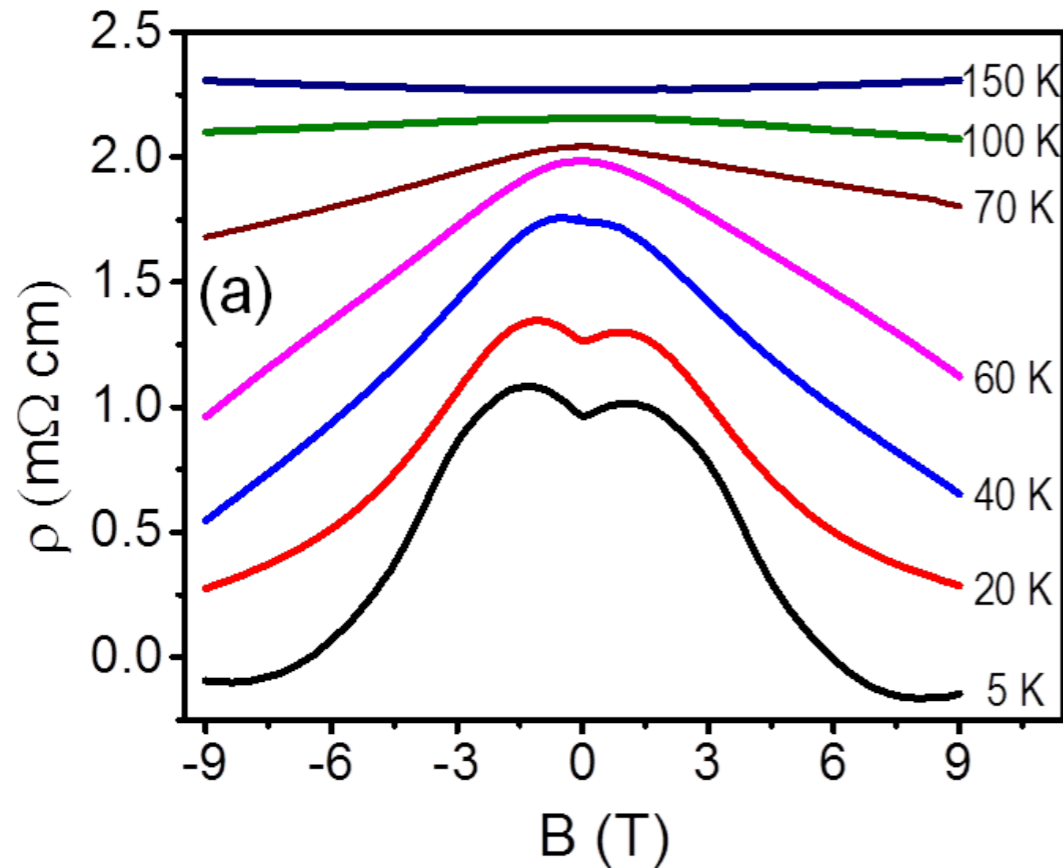
Souma, et al, Phys. Rev. B 93, 161112 (2016)



Xu, et al, Science. 349: 613–617(2015)

カイラル磁気効果 in cond-mat.

Q Li, et al, Nature Physics 12, 550-554 (2016)



抵抗: $\rho = \frac{1}{\frac{\tau}{\chi}(CB)^2 + \sigma_{\text{Ohm}}}$

最近の潮流(ここ10年くらい)

物性のトポロジカル相

トポロジカル絶縁体の発見

対称性に保護された

トポロジカル相や

トポロジカル秩序の

理解の進展

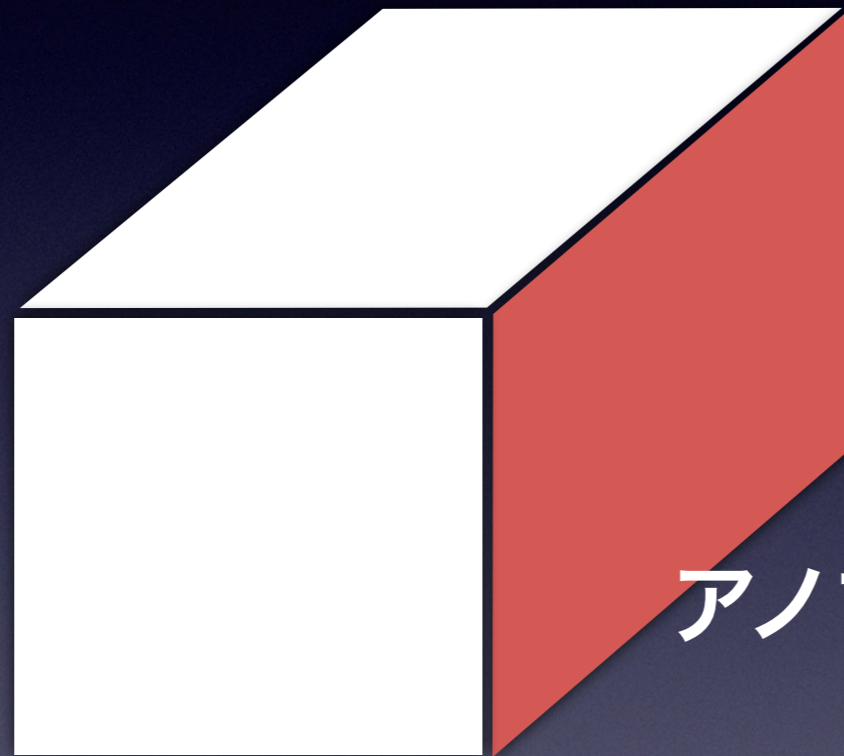
場の理論で知られていた

現象の理解の深化

及び新しい見方の進展

トポロジカル絶縁体, より一般には 対称性に守られたトポロジカル(SPT)相

バルク
絶縁体

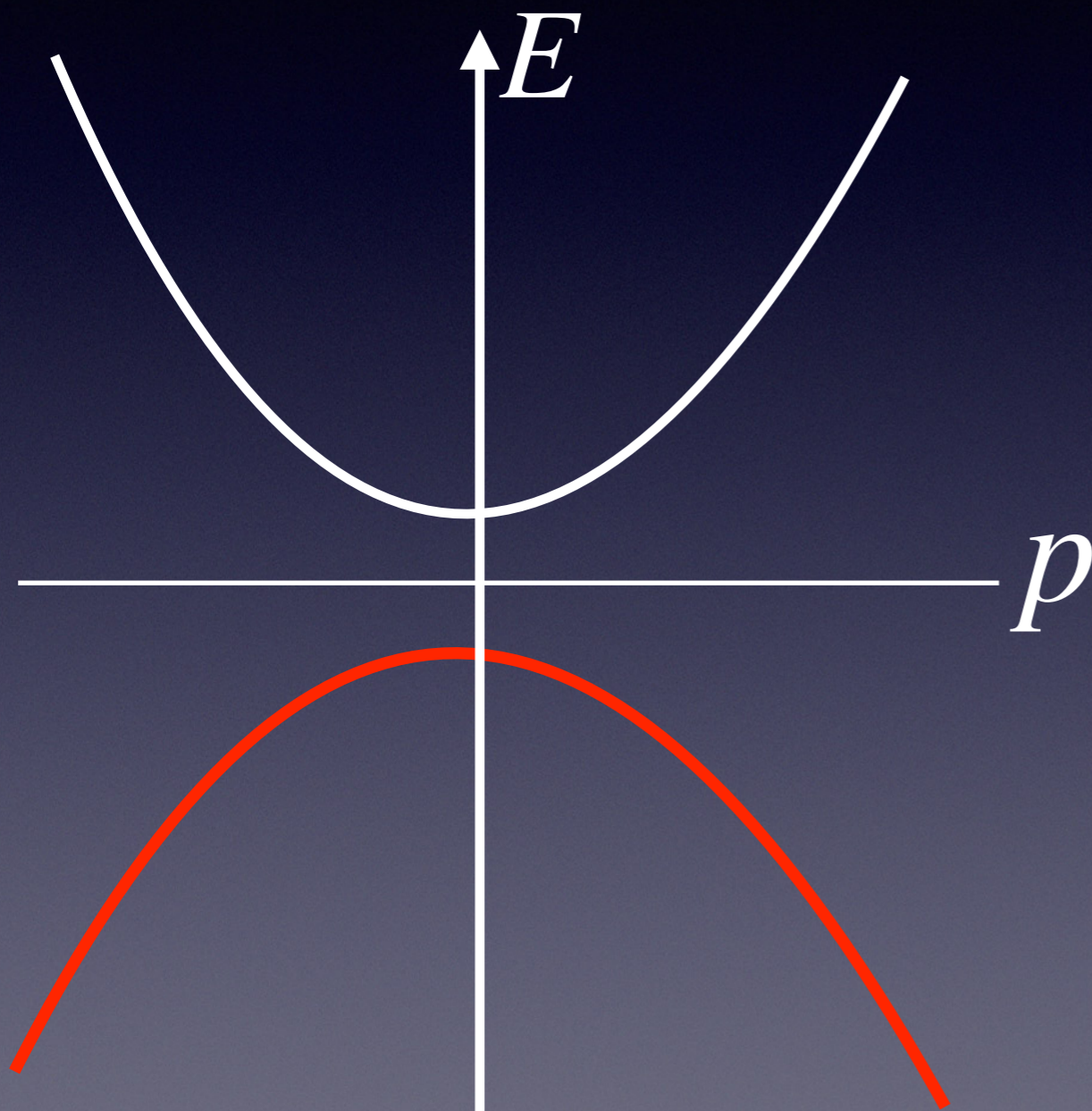


エッジ
金属

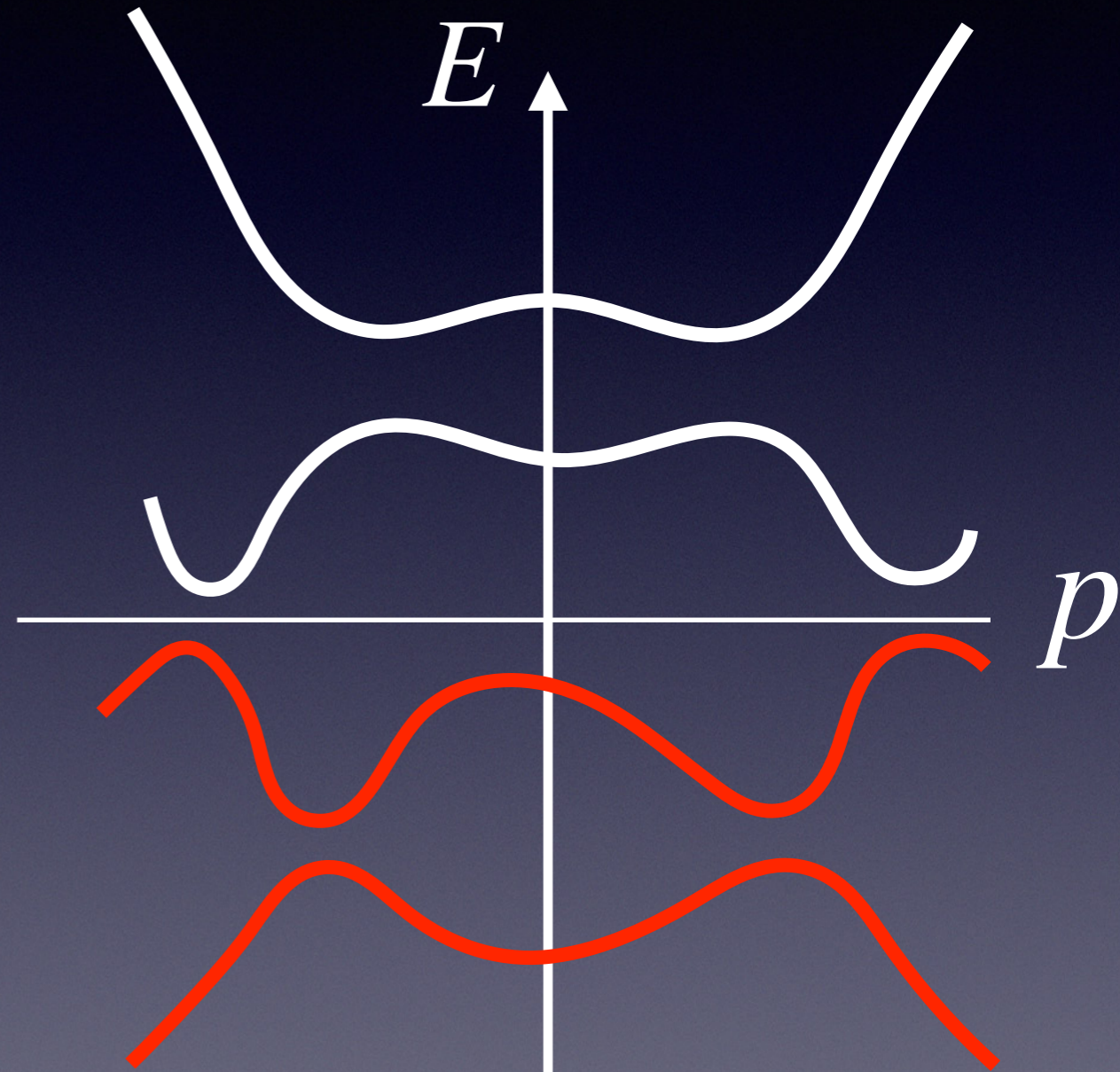
アノマリーを持つエッジ理論

トポロジカル絶縁体

相対論的場の理論の
エネルギースペクトル



固体のバンド構造



ギャップ付近は似ている

どんなギャップの パターンがあり得るか？

トポロジカル絶縁体の分類 フェルミオンの分類

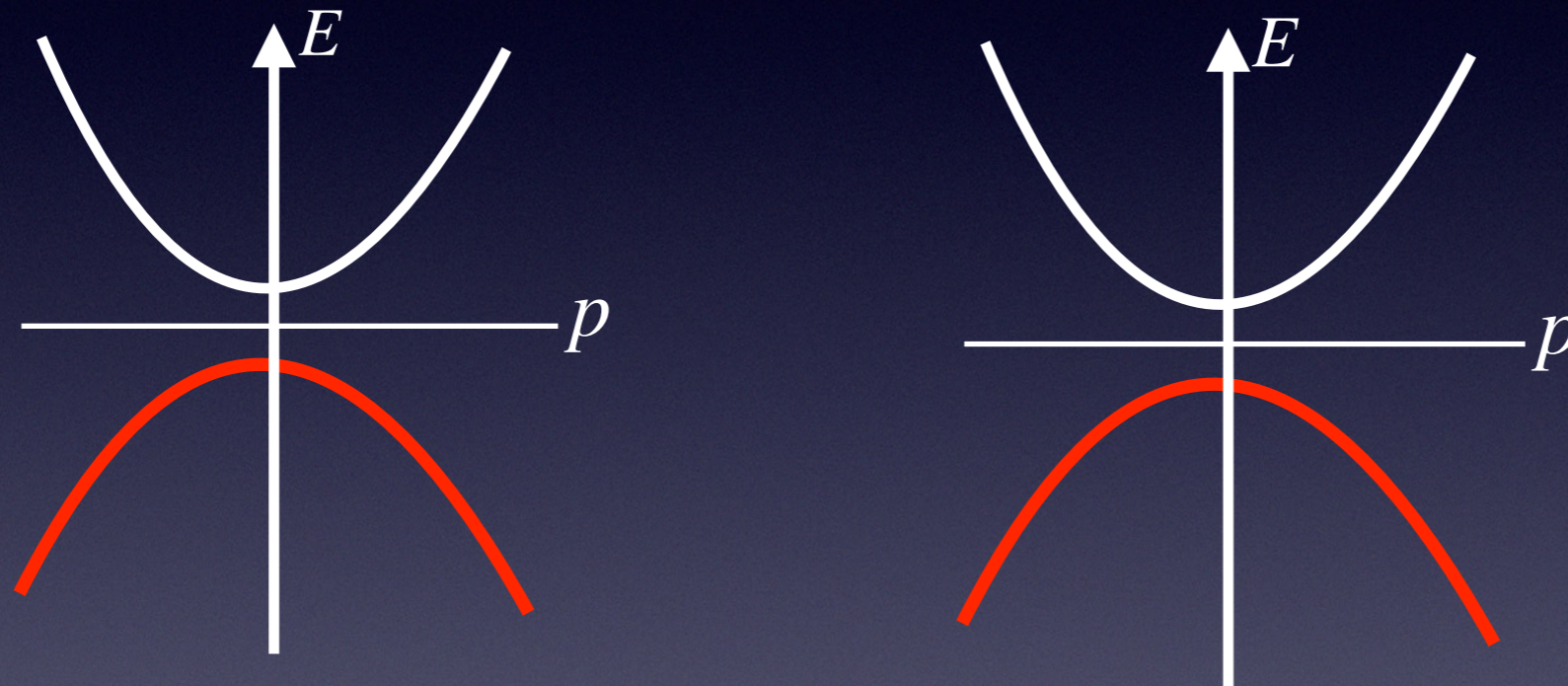
時間反転,
カイラル対称性,
荷電共役対称性などを
課して分類

Dirac, Majorana, Weyl
などの分類に対応

例: (d+1)次元Dirac フェルミオン

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu + m)\psi \quad \text{と} \quad \mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi \quad \text{は}$$

同じスペクトル



実はこの2つは異なるというのが

トポロジカル絶縁体の発見

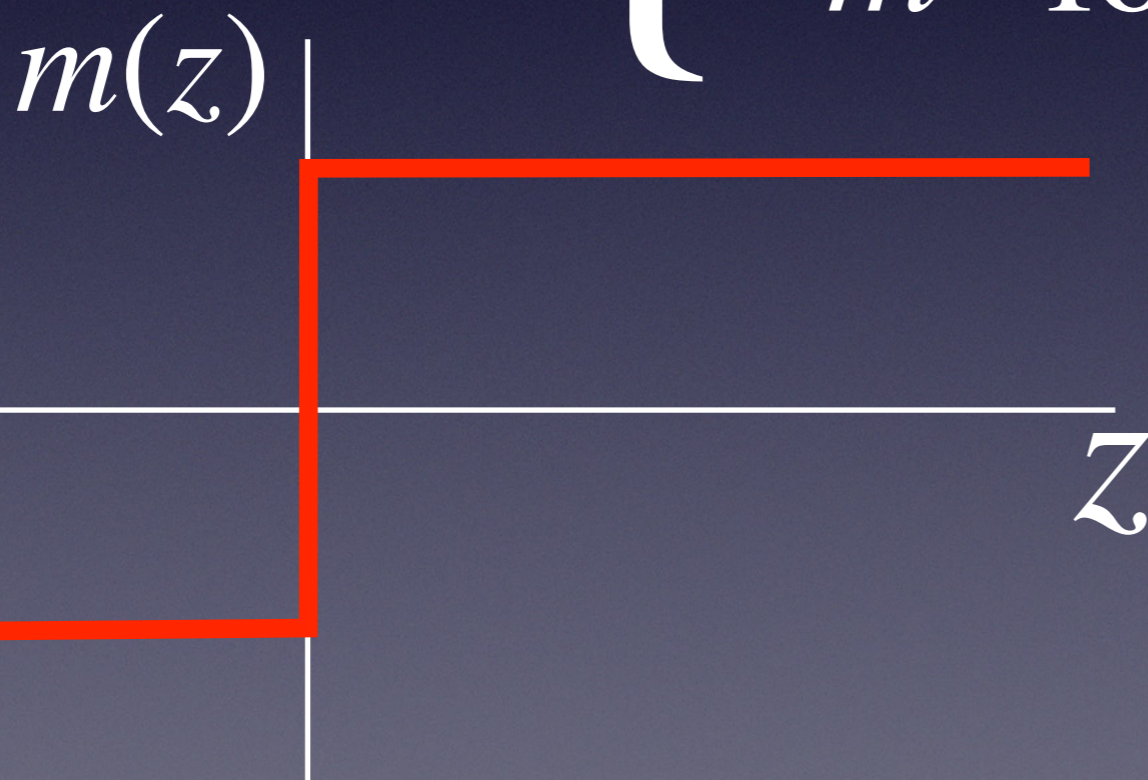
m を実に保ったままこの2つはつながらない

Lattice QCDで使われる

Domain wallフェルミオン

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu + i\gamma^5 \partial_5 + m(z))\psi$$

$$m(z) = \begin{cases} m & \text{for } z > 0 \\ -m & \text{for } z < 0 \end{cases}$$



カイラル
フェルミオンが
 $z = 0$ に局在

Lattice fermionの指数などの理解の深化

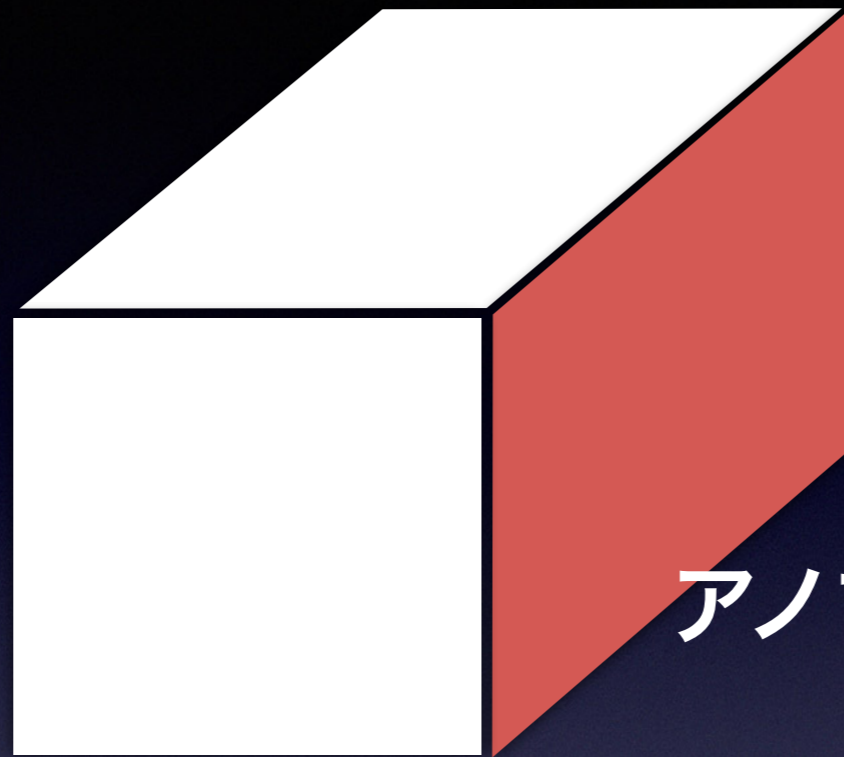
テクニカルな話として、
アノマリーが満たすべき条件式
=Wess-Zumino 無矛盾条件

Wess-Zumino 無矛盾条件の解は、
1次元高い時空のChern-Simons作用を用いて
書けることが知られている



SPT相とアノマリー

バルク
絶縁体



エッジ
金属

アノマリーを持つエッジ理論

バルクエッジ対応

アノマリーインフロー機構

バルクのトポロジカル不変量と
エッジの不変量が一致

バルクのトポロジカル不変量が
エッジのアノマリーをキャンセル

逆に現代的なアノマリーはSPT相を使って定義

トポロジカル秩序を持った物質

空間のトポロジーに応じて基底状態が縮退

フェルミオンでもボソンでもない状態が現れる

例:分数量子ホール系

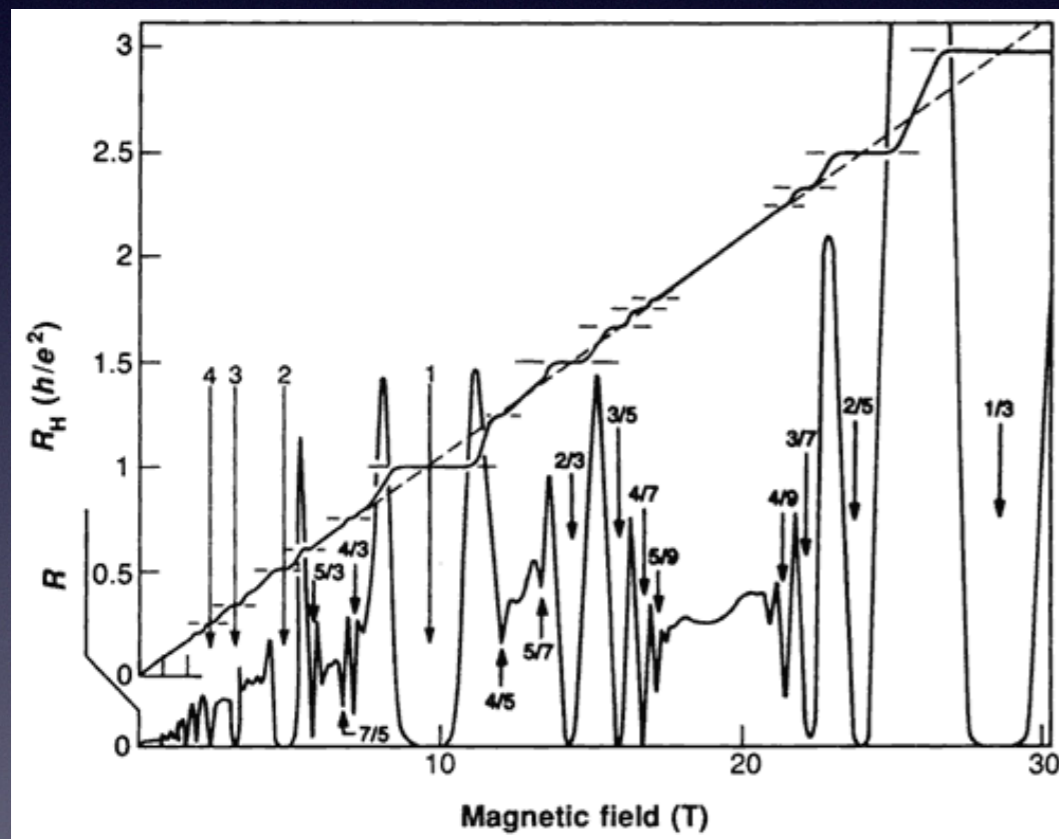
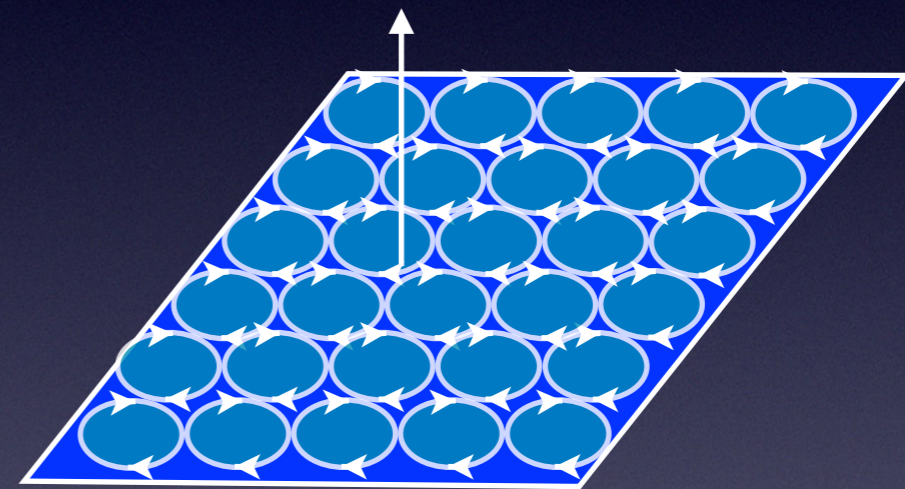
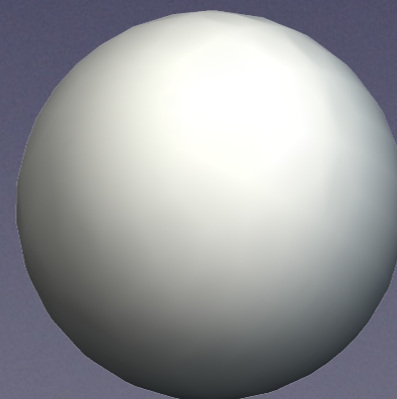


Figure from Nobelprize.org

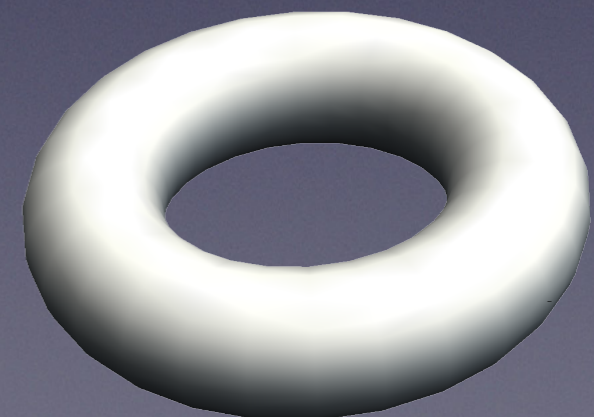
磁場 B



空間のトポロジーに依存した基底状態



縮退なし



基底状態が縮退

トポロジカル秩序

トポロジカル秩序の特徴づけ

- 基底状態の縮退
- エニオン統計
- 長距離エンタングルメント
- 局所的な摂動に対する安定性

典型的なトポロジカル秩序は渦糸や
ドメインウォールなど広がりを持
った物体の対称性の破れと関係

物性のSPT相の理解の
進展と共にトポロジカル秩
序の理解も深まってきた

ゲージ理論の相構造の
理解の進展

普通の超伝導相は
トポロジカル秩序を持った状態
(ゲージ対称性の破れた相ではない)

閉じ込め
非閉じ込め
クーロン相など

高密度QCDの相構造の見直し
クォークハドロン連続性は成り立つ？

Cherman, Sen, Yaffe, PRD 100, 034015 (2019)

Hirono, Tanizaki, PRL 122, 212001 (2019)

cf. Alford, Baym, Fukushima, Hatsuda, Tachibana, Phys. Rev. D 99, 036004 (2019)

Chatterjee, Nitta, Yasui, Phys. Rev. D 99, 034001 (2019)

まとめ

QCDも物性物理も量子多体系

これまでの多くの交点は、
長波長の物理の普遍性によるものが多い

格子構造のような短波長の物理の
他分野との交点はどのようなものがあり得るか？