

# Quantum phase transition of organic spin liquid

RIKEN, Meson Science Laboratory  
Shigeki Fujiyama

K. Ueda, SF, and R. Kato, [arXiv.2307.14563](https://arxiv.org/abs/2307.14563)



日本物理学会創立70周年記念企画

## 物理学70の不思議

- 16. 原子核の形
- 19. 格子QCD
- 5. 素粒子の世代
- 13. 陽子=クォーク3つ?
- 11. ヒッグス粒子
- 37. 素粒子と物性
- 36. 量子コンピュータ
- 14. テトラクォーク
- 18. 原子核の地図
- 6. ニュートリノ
- 38. モンテカルロ計算
- 53. フェルミ液体論
- 17. 超重原子核
- 10. クォークの閉じこめ
- 39. マヨラナ粒子
- 45. 光誘起相転移
- 41. トポロジカル秩序
- 4. クォーク・グルーオン・プラズマ
- 26. 磁場の起源
- 49. 物質設計
- 30. 乱流
- 44. メタマテリアル
- 15. ストレンジ原子核
- 8. 暗黒エネルギー
- 34. 量子力学の検証
- 55. 隠れた秩序
- 12. 反物質
- 7. 暗黒物質
- 1. 宇宙のはじまり
- 48. 極限環境
- 46. 界面
- 51. 超伝導
- 21. 中性子星
- 2. 4次元時空
- 3. インフレーション
- 31. 量子電磁力学
- 52. 銅酸化物高温超伝導
- 33. 冷却原子
- 29. 核融合
- 20. 恒星
- 50. 金属と絶縁体
- 57. 統計力学の基礎
- 9. 宇宙の物質生成
- 27. 太陽コロナ
- 60. ガラス
- 58. 非平衡状態
- 47. スピントロニクス
- 24. 相対論的ジェット
- 56. 量子と古典
- 54. スピン・軌道相互作用
- 59. 可積分系
- 22. 超大質量ブラックホール
- 25. 宇宙線
- 35. 量子通信
- 65. タンパク質
- 32. 原子時計
- 43. 超短パルスレーザー
- 23. ブラックホールと情報
- 67. 分子機械
- 61. 粉体
- 63. 生物の運動
- 42. 観るの極み
- 70. 物理学はどこへ?
- 64. シマウマの縮
- 66. 電子と生命
- 40. 還元と創発
- 62. 経済物理
- 69. 私たちと物理
- 68. 物理と生命

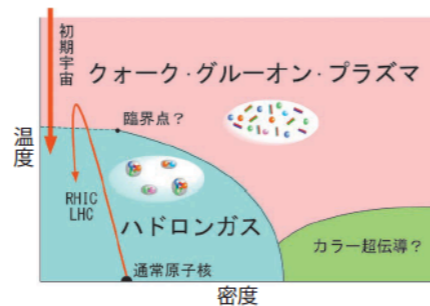
# Phase transitions at $T = 0$ K

43

## ビッグバン 10 マイクロ秒後の世界

138 億年前のビッグバンで、宇宙は超高温高密度の火の玉として生まれた。そのごく初期ざっと宇宙時間 10 マイクロ秒、宇宙はクォーク・グルーオン・プラズマ状態 (QGP) から中間子、陽子、中性子など (ハドロン) への相転移という大変化を起こす。この「非閉じ込め・閉じ込め」相転移はたちまち完了し、宇宙に裸のクォークは存在しなくなる。このシナリオは、いまから 20 年前には仮説にすぎなかった。当時はまだ QGP の存在は実証されていなかったのである。

1960 年代、それまで素粒子だと考えられていたハドロンが、より「素」なクォークとグルーオンからなること、同時にそれらは「閉じ込め」られ単独では取り出せないこともわかってきた。これらを定式化したのが、量子色力学である。一方、空間のエネルギー密度が極端に高くなると、その空間内を多数のクォークとグルーオンが自由に飛び交う「非閉じ込め」状態になることも予想された。これが QGP であり、実験室で実現するために、相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) が米国で建設された。この実験では、自らの質量の 100 倍もの運動エネルギーをもたせた金の原子核同士を正面衝突させ、原子核程度の大きさの空間に超高温高密度状態をつくり出す。この状態の温度は 4 兆度に達



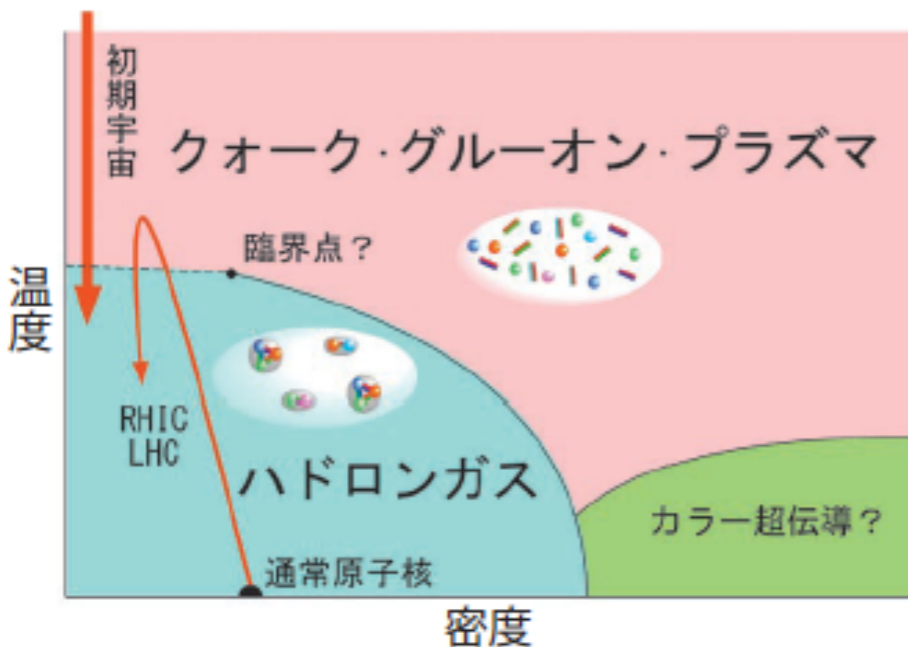
し、さまざまな観測量により QGP の生成は明らかとなった。そのうえ、QGP の性質はほぼ粘性のない流体であることも判明し、ガス状という大方の予想を見事に裏切っていた。

予想される相図を示すが、わかっているのは通常の原子核付近と高温低密度側のみである。はたして臨界点や 1 次相転移は発見されるのか？ 高密度側のカラー超伝導相は見つかるのか？ CERN の LHC 実験もはじまっており、目が離せない。

最後に問題、RHIC の衝突点温度は 4 兆度に達したと記したが、どんな原理の温度計を用いたのか？ 考えてみてほしい。できればその困難さも。

会誌編集委員会

K. Itahashi

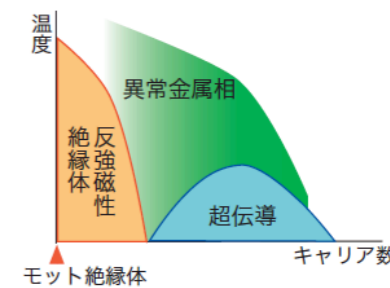


45

## 銅酸化物高温超伝導体：30 年来の未解決問題

銅酸化物高温超伝導体は 30 年前に発見された。当初、超伝導転移温度が 30 K ( $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ) や 90 K ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) と、既知の超伝導体に比べ高いことが注目された。それまで超伝導状態を記述するのに有効と考えられてきた BCS 理論では、電子・格子相互作用を起源とする超伝導の転移温度は高くてもせいぜい 30 K 程度であると考えられていたため、この結果は驚くべきことであった。これらの物質群に共通の特徴として、(1) 結晶構造に銅と酸素からなる 2 次元面 ( $\text{CuO}_2$  面) を有し、この面に対して「適切な量の」キャリアを導入することにより超伝導が発現する、(2) キャリアの導入されない物質は反強磁性モット絶縁体である、などがあげられる。

当時まで、転移温度の高い超伝導は「よい金属」つまりは「キャリアの数が十分に多く、3 次元的なフェルミ面をもち、近くに磁気秩序相 (電子が局在化する相) が無い金属」で発現するものと思われてきた。しかし、上記の銅酸化物超伝導体はそれらの直感をすべて裏切るものであった。加えて、キャリア濃度が低い領域では、超伝導転移温度より高い温度領域の金属状態で異常な物性が観測される。[1] 電子間散乱によって生じる電気抵抗が、温度に比例す



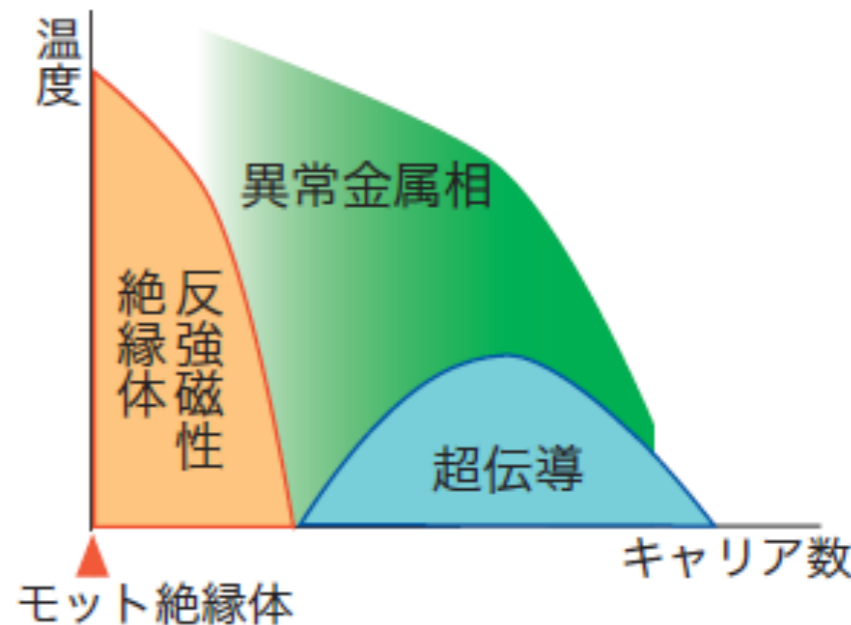
る異常な温度依存性をもつ、[2] 金属中のスピンゆらぎが顕著に抑制される、[3] 微視的スケールで電子状態が不均一になる傾向が観測されるなど、通常の金属理論では理解できない数々の異常が観測されている。これらは伝導電子とスピンの相関に起源をもつと考えられる。しかし、さまざまなアプローチが試みられているものの、すべての実験結果を矛盾なく理解できる段階に到達しているとはいえない。

銅酸化物高温超伝導は単に転移温度が高い、という定量的問題以上に、電子のもつ遍歴性と局在性、モット絶縁体へのキャリアドーピングの物理、キャリア数制御による量子相転移 (ゼロ温度での相転移) など、固体物性論における根本的な未解決問題を提示し続けている。物性分野の「難問中の難問」なのである。

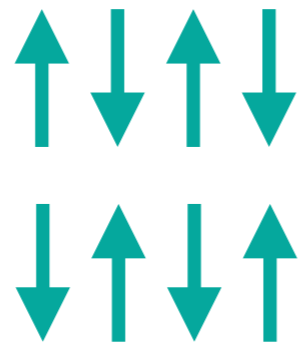
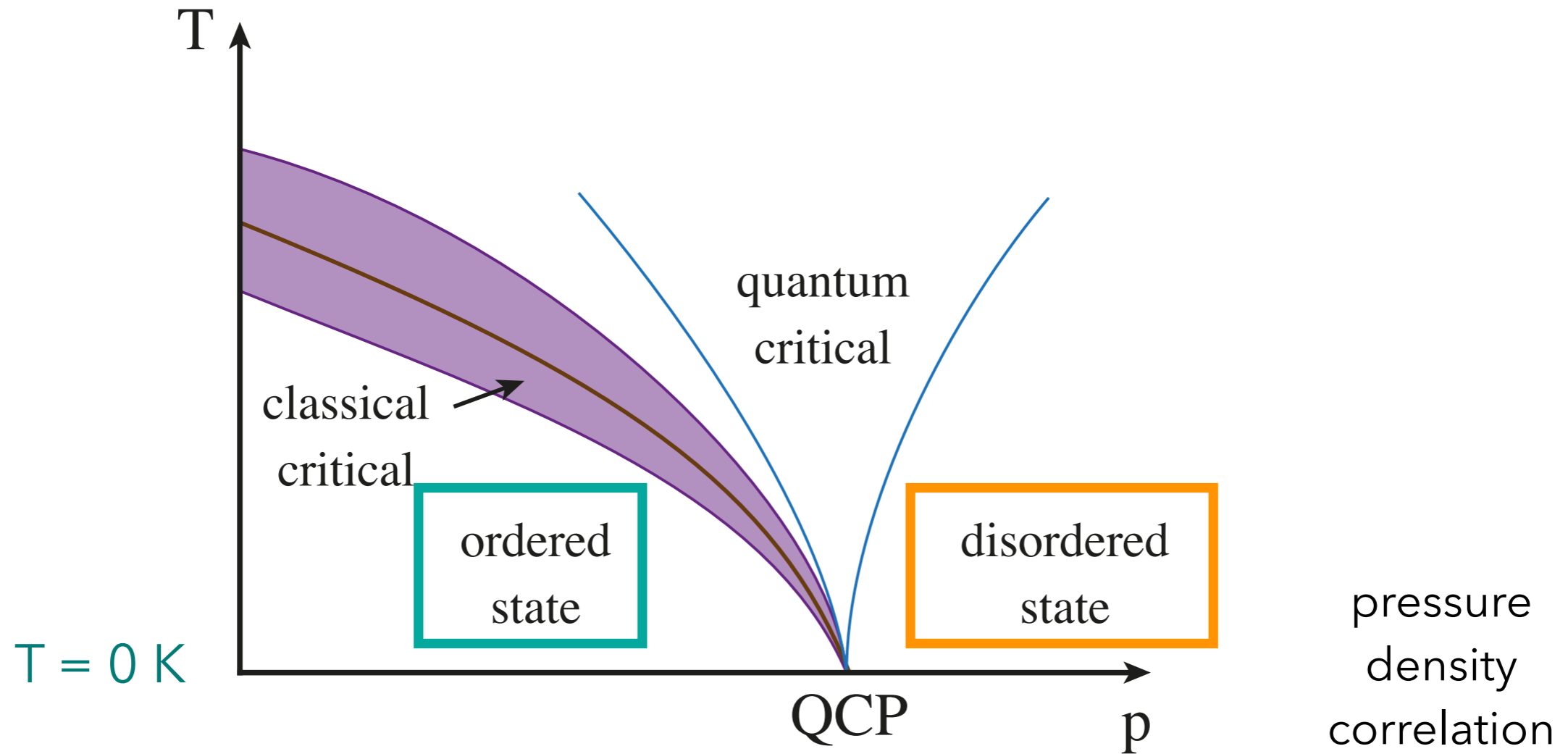
会誌編集委員会

会誌編集委員会

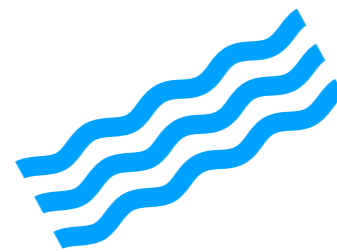
S. Fujiyama



# Quantum phase transition in spin system with AF correl.



magnetic moment  
 $\Delta = 0$



$\Delta = 0$



quantum state  
 $\Delta > 0$

$s = 1$

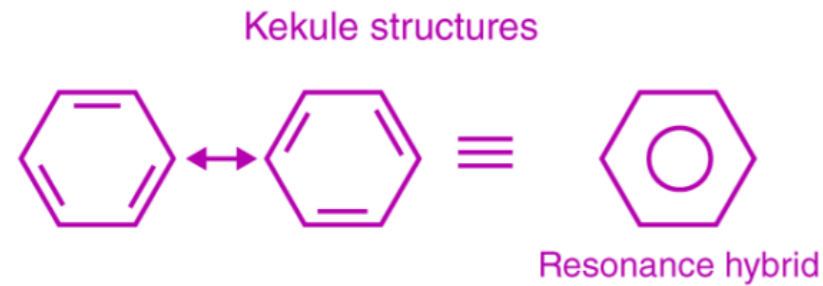
$s = 0$

particle/wave  
excitation

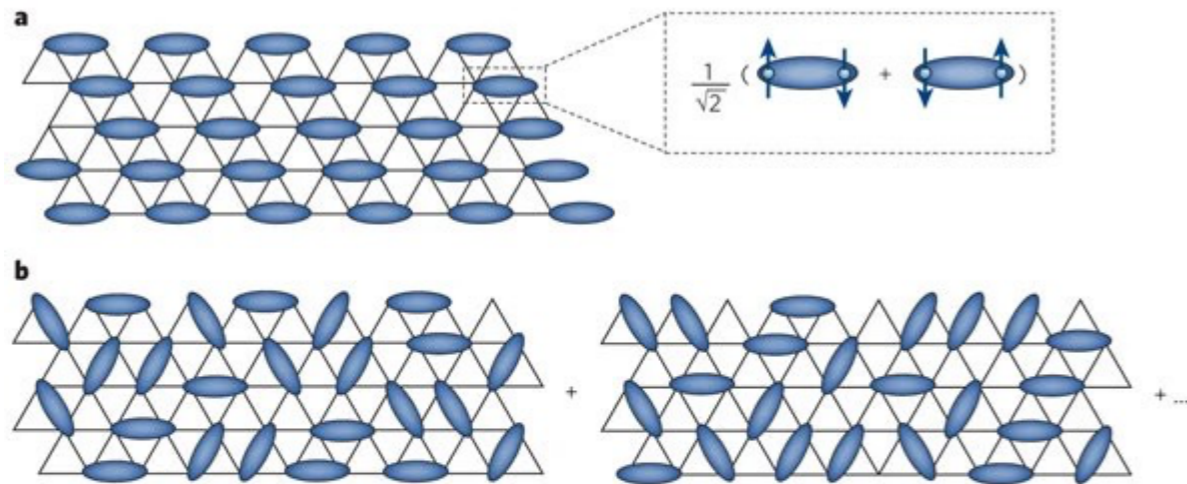
pressure  
density  
correlation

# Resonated singlet state

- $\Delta > 0$  (gapped) : many examples

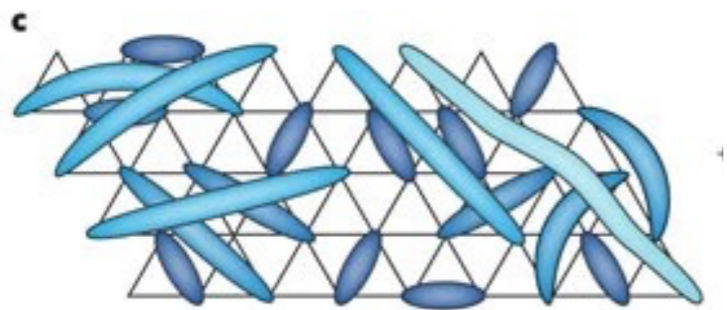


benzene : stable molecule (gapped)



- geometrical frustration
- large  $R_s$

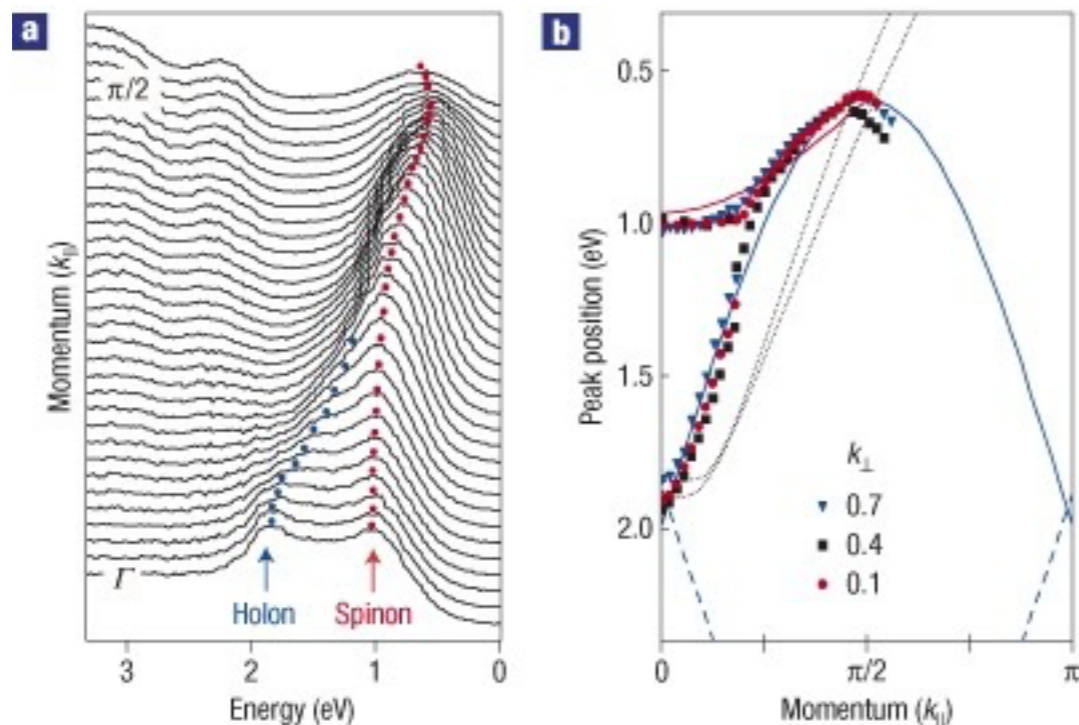
- $\Delta = 0$  (gapless) :



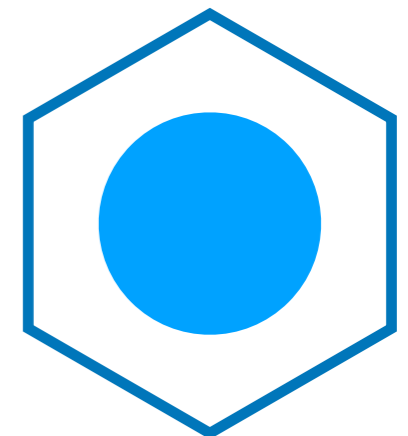
long-ranged singlet pairs are necessary

# An idea : fractionalization of electron spins = spinons

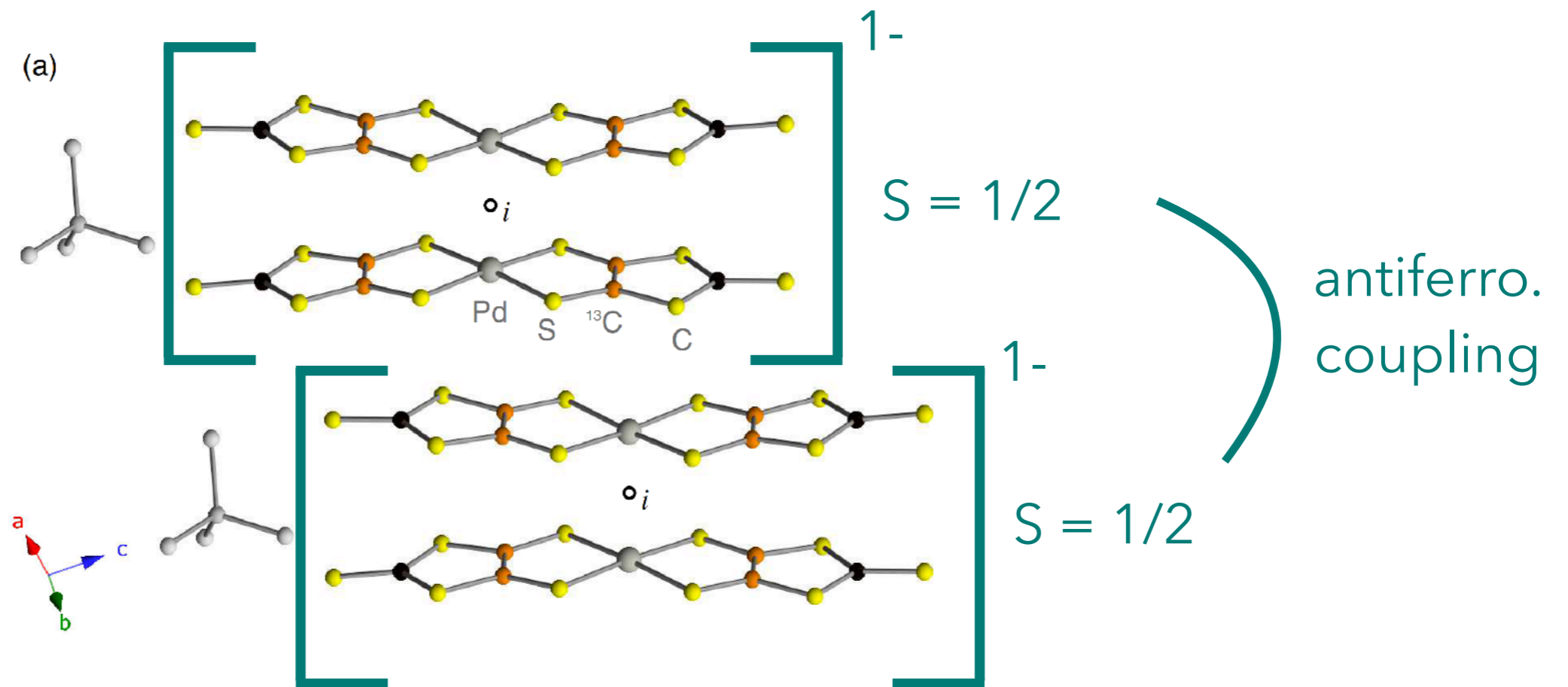
- Degenerated singlet states transient into a condensed state of fractionalized spins (= spinons), establishing a large Fermi surface of spinons. (Anderson)
- “1 dim. case”  
spinon-holon separation is well established (Tomonaga-Luttinger)



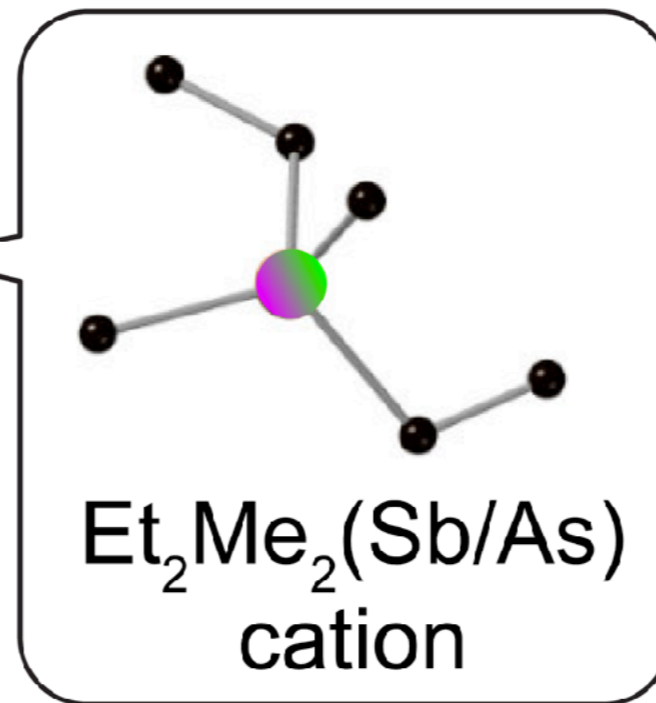
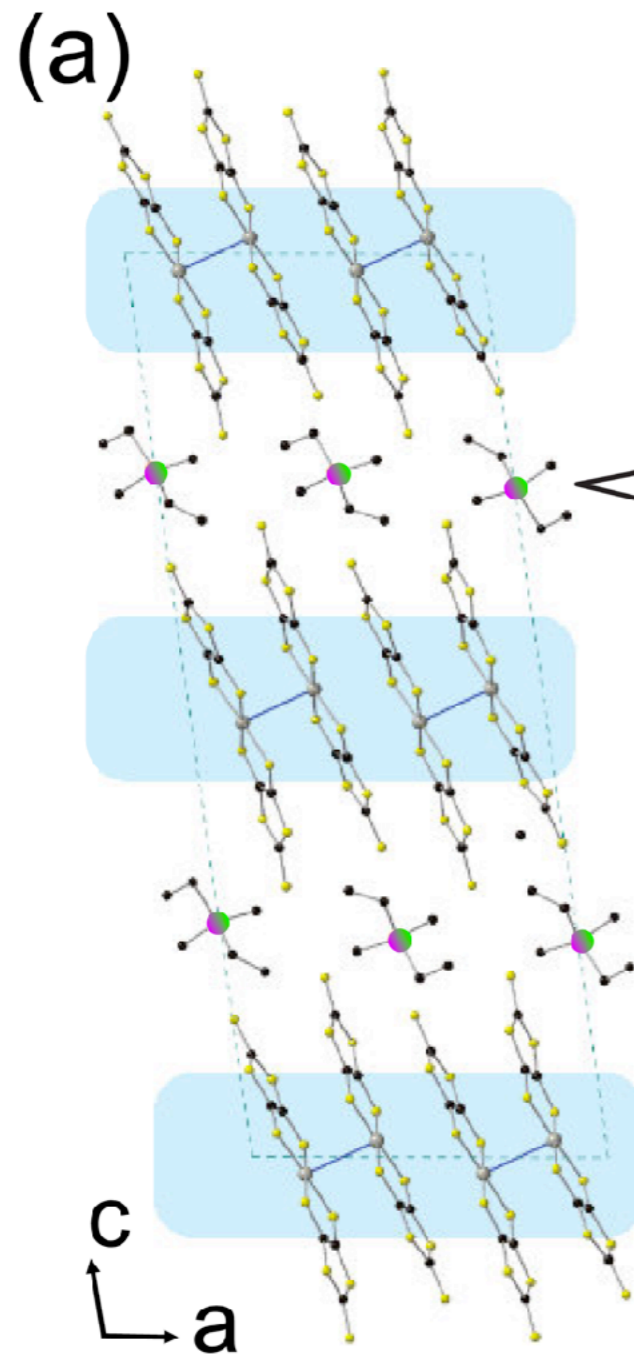
- “2 dim. case”  
Open question: spinon Fermi surface established or not ?



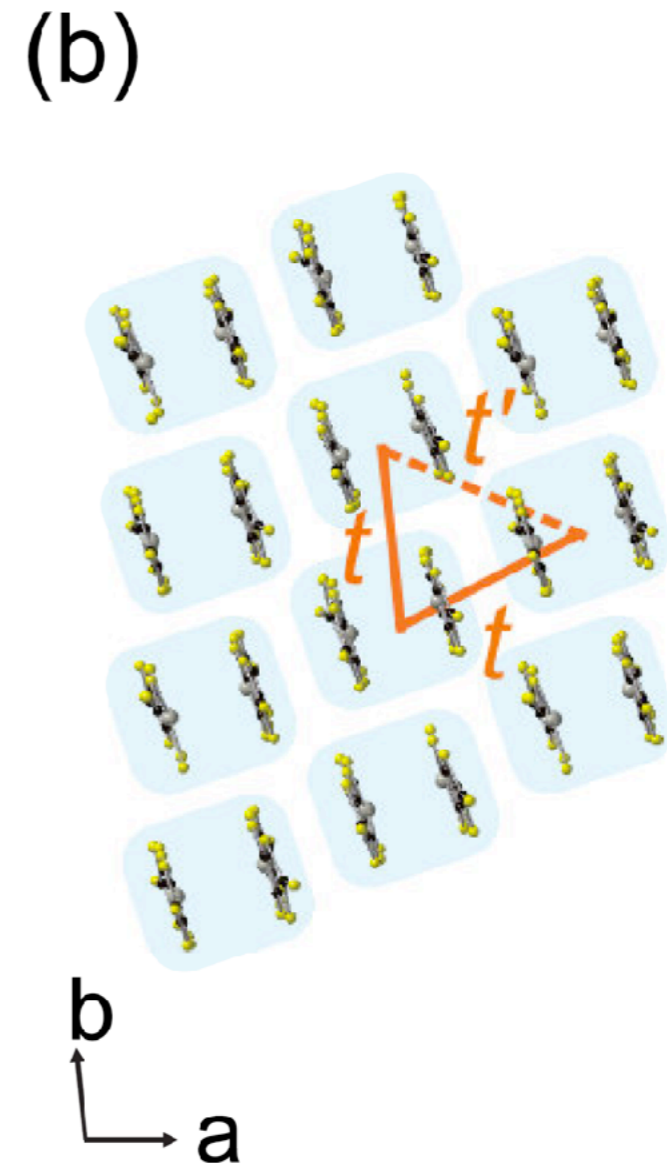
# dimer Mott insulator $X[\text{Pd}(\text{dmit})_2]_2$



# Material design to tune $t'/t$

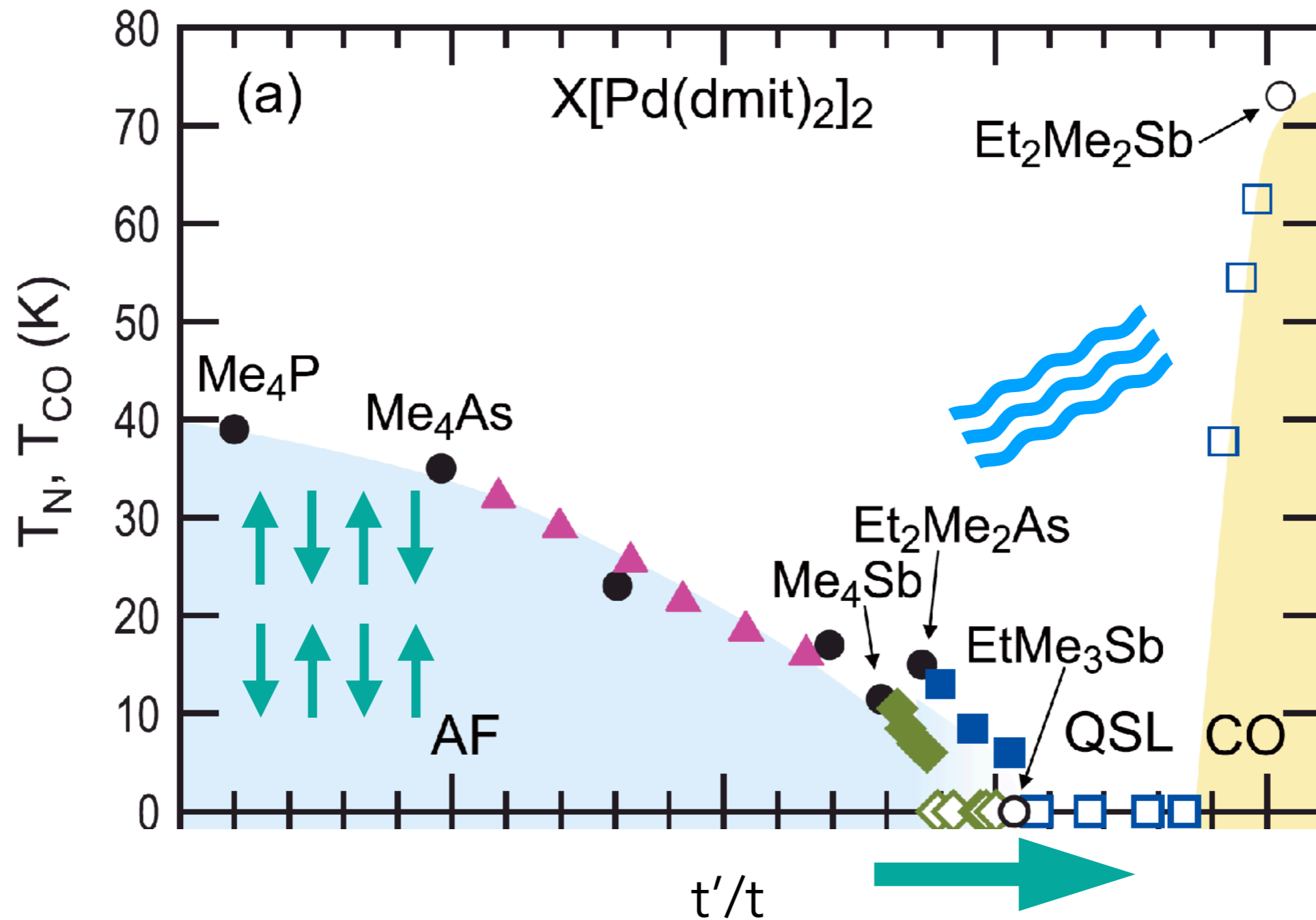


$S=1/2$  layer



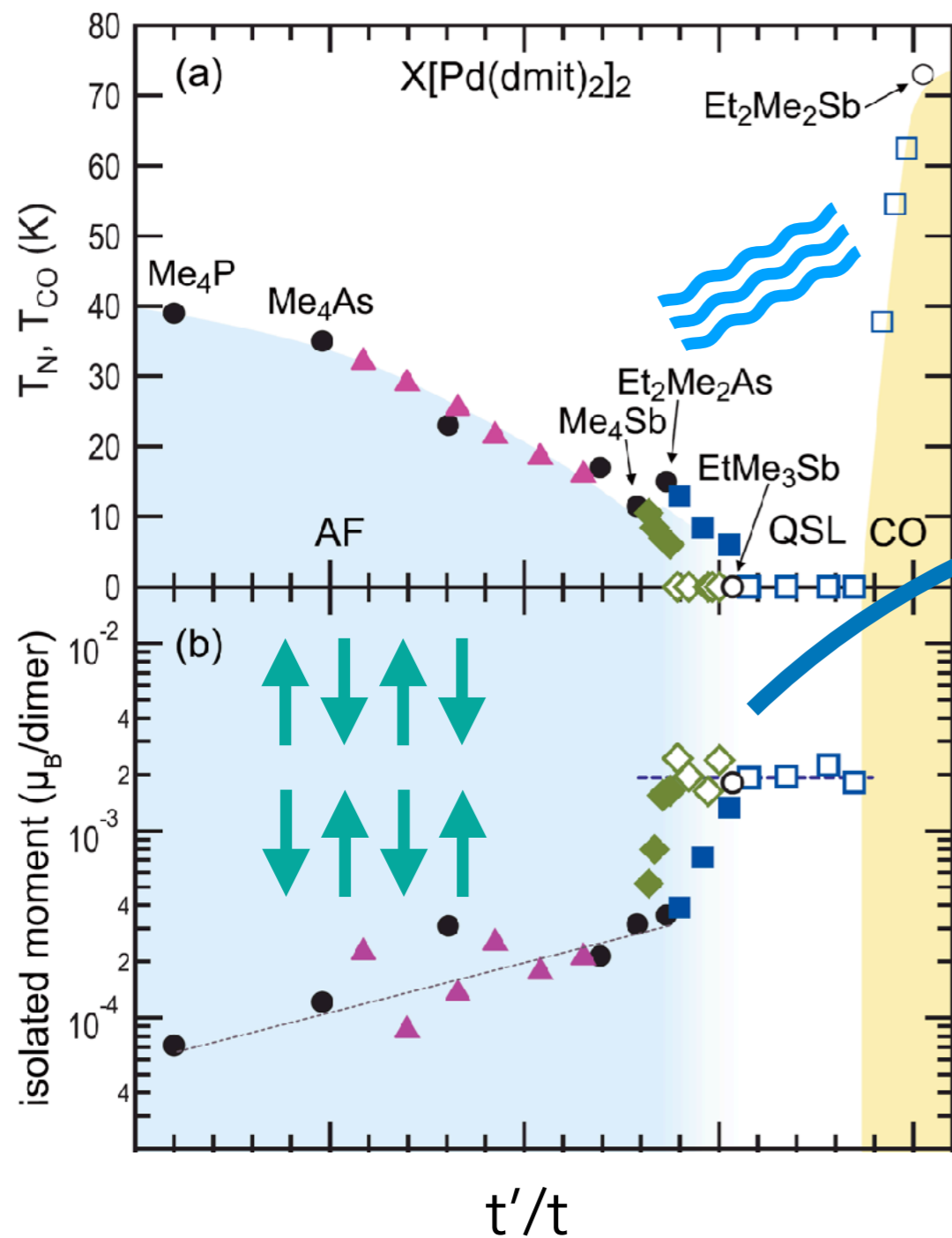


# Weak 1st order transition from AF to QSL

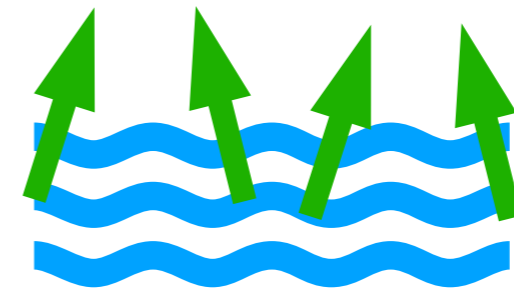


- Small magnetic moment prohibits precisely identifying AF-QSL critical point.
- Other factors than spin correlation can provoke 1st order transition.

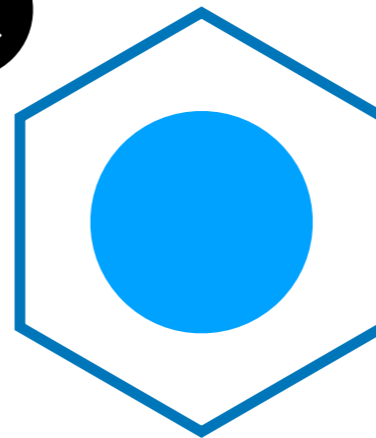
# QSL resides as a phase, not a point



- Magnitudes of the magnetic isolated moment ( $\mu_B$ ) plateaus to  $t'/t$  in the QSL phase.

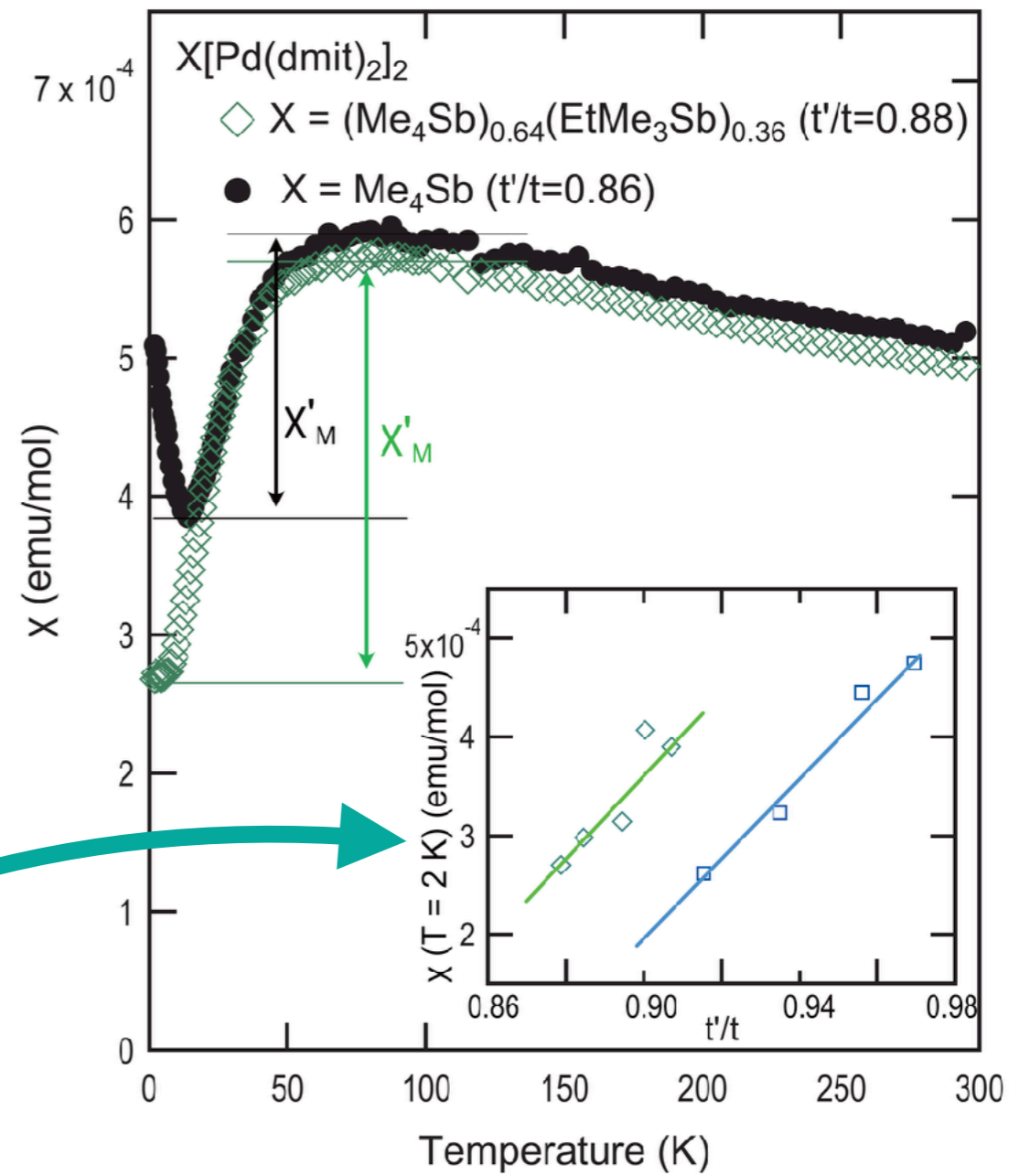
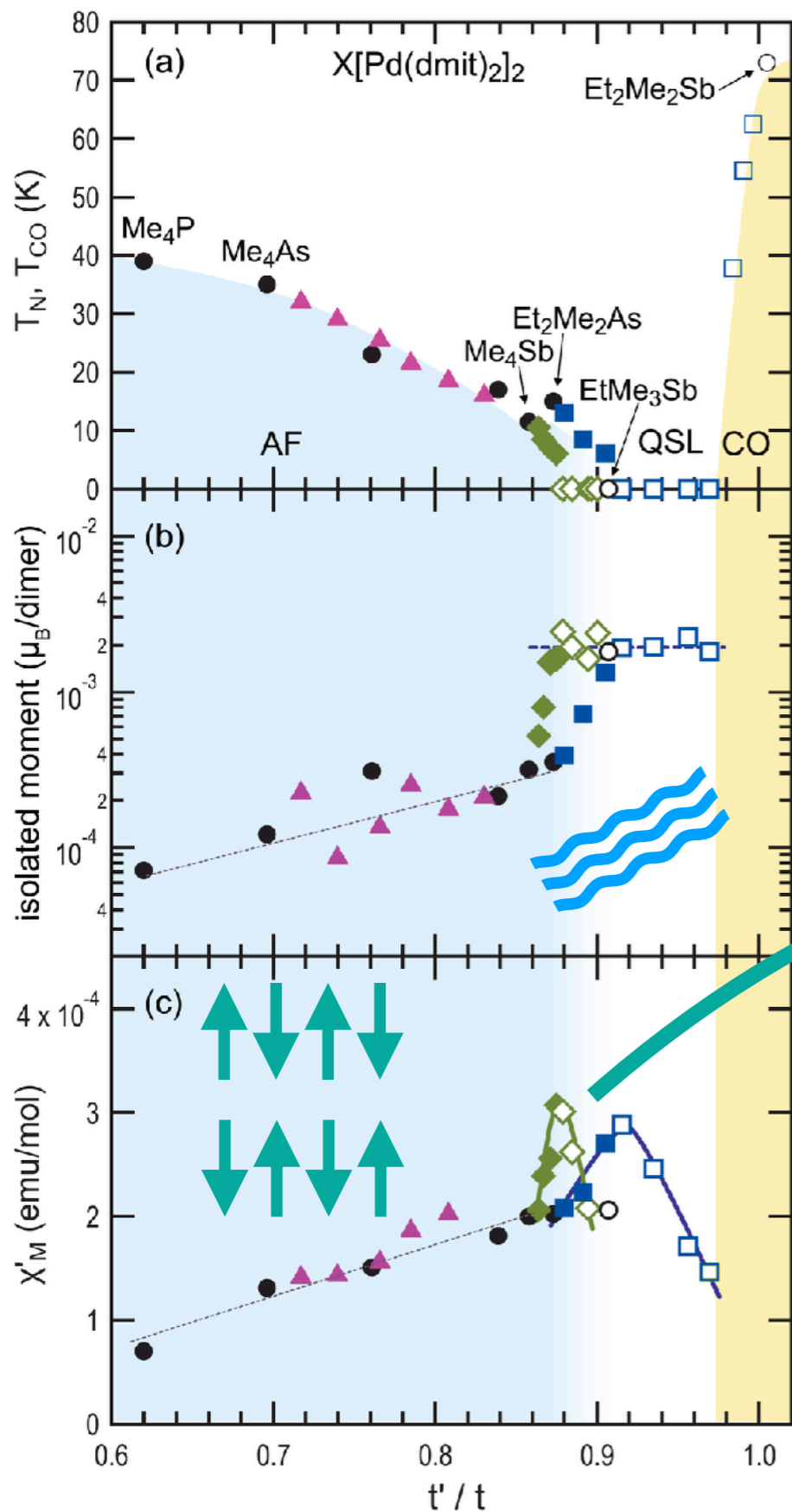


- In the reciprocal space



- Similar with graphene (Dirac electron)

# Anomalous suppression of $\chi(q=0)$



- Quantum critical fluctuation suppresses  $\chi(q=0)$ .

# Toward the centennial of QM

- Experimental survey from classical AF to QSL as a function of the anisotropy of the couplings has been done.
- gapless QSL resides as a phase.
- Magnetic moments by impurities seem to 'float' in the QSL phase.
- $\chi(q=0)$  is suppressed near QCP
- Transient states from classical to quantum (particle to wave) states both in condensed matter and Iwasaki's state share similar problem.



