

鉄系超伝導体の磁気励起スペクトル

佐藤 正俊

Comprehensive Research Organization for Science and Society
(CROSS = 総合科学研究機構)、Nagoya Univ. & JST TRiP

名大佐藤チーム (JST プロジェクト)

小林義明, 安井幸夫, 川股隆行, 伊藤正行, ほか

J-PARC 新井グループ (BL-01)

梶本亮一、中村充孝、稲村泰弘、新井正敏

Tokyo University of Science

茂吉武人、元屋清一郎

Quantum Beam Sci. Directorate, JAEA

加倉井和久

超伝導の発現機構 (超伝導対形成機構)

- (i) Phononの介在-(古典的BCS機構)
- (ii) 磁氣的機構-(銅酸化物、その他で既知)

では、鉄系超伝導の機構は何？

研究分野を開く新たなものか？ 物理研究者の最大の問いかけ？

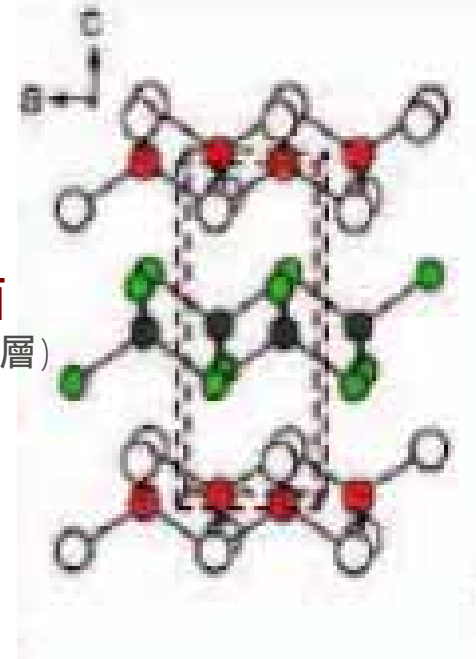
これに答える研究をここ数年進めてきた

銅酸化物との類似点 1

強い相互作用を持つ(強相関の)
2次元電子伝導層

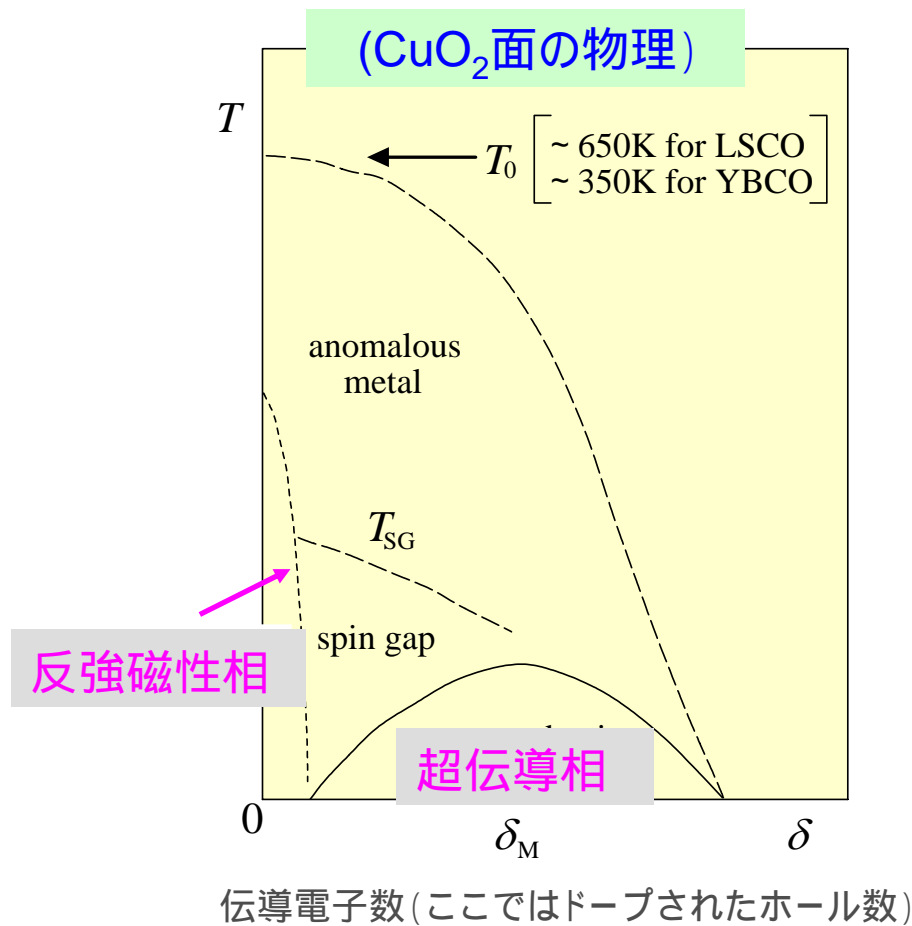
Fe-As面
(2次元伝導層)

La-O面

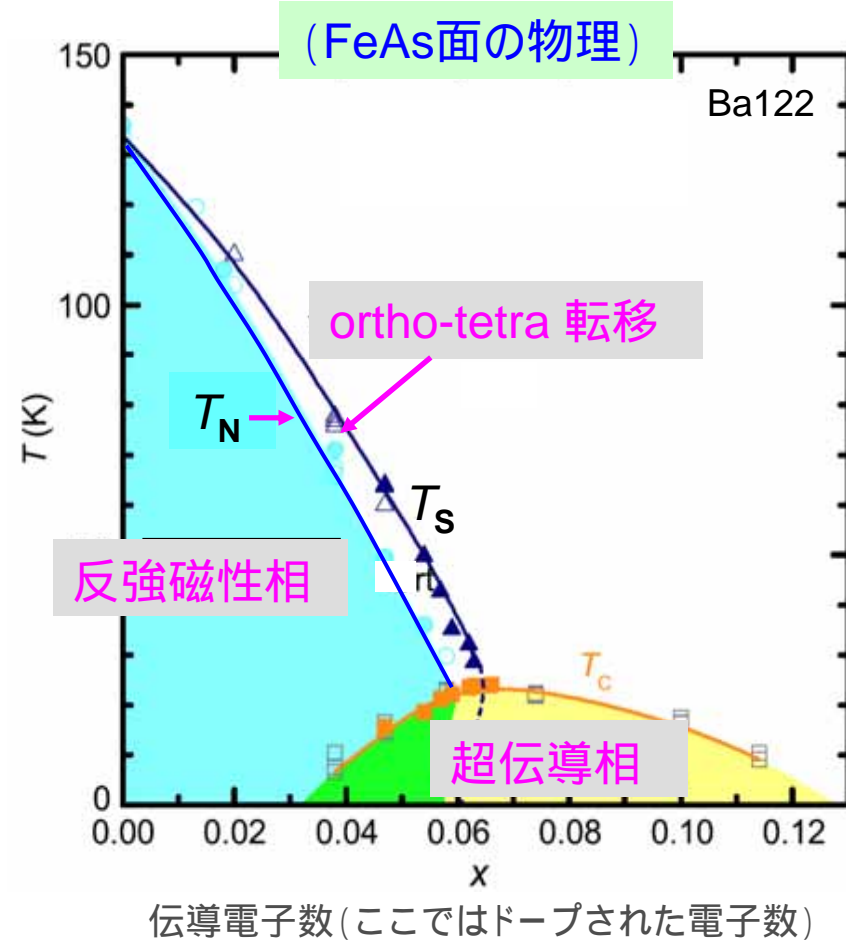


銅酸化物との類似点 2

反強磁性相に隣接した超伝導
(磁氣的機構を大多数が真っ先に考えた根拠)



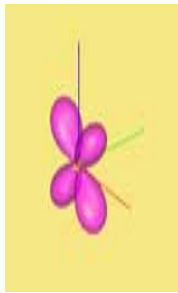
銅酸化物超伝導体



鉄系超伝導体

銅酸化物と異なる特徴

多バンド系である (3d電子の5個の軌道から成る)



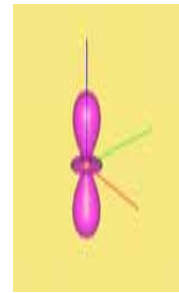
xz



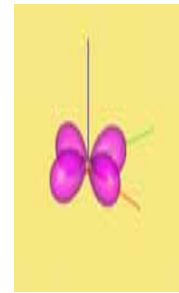
yz



xz



$3z^2 - r^2$

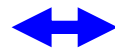


$x^2 - y^2$

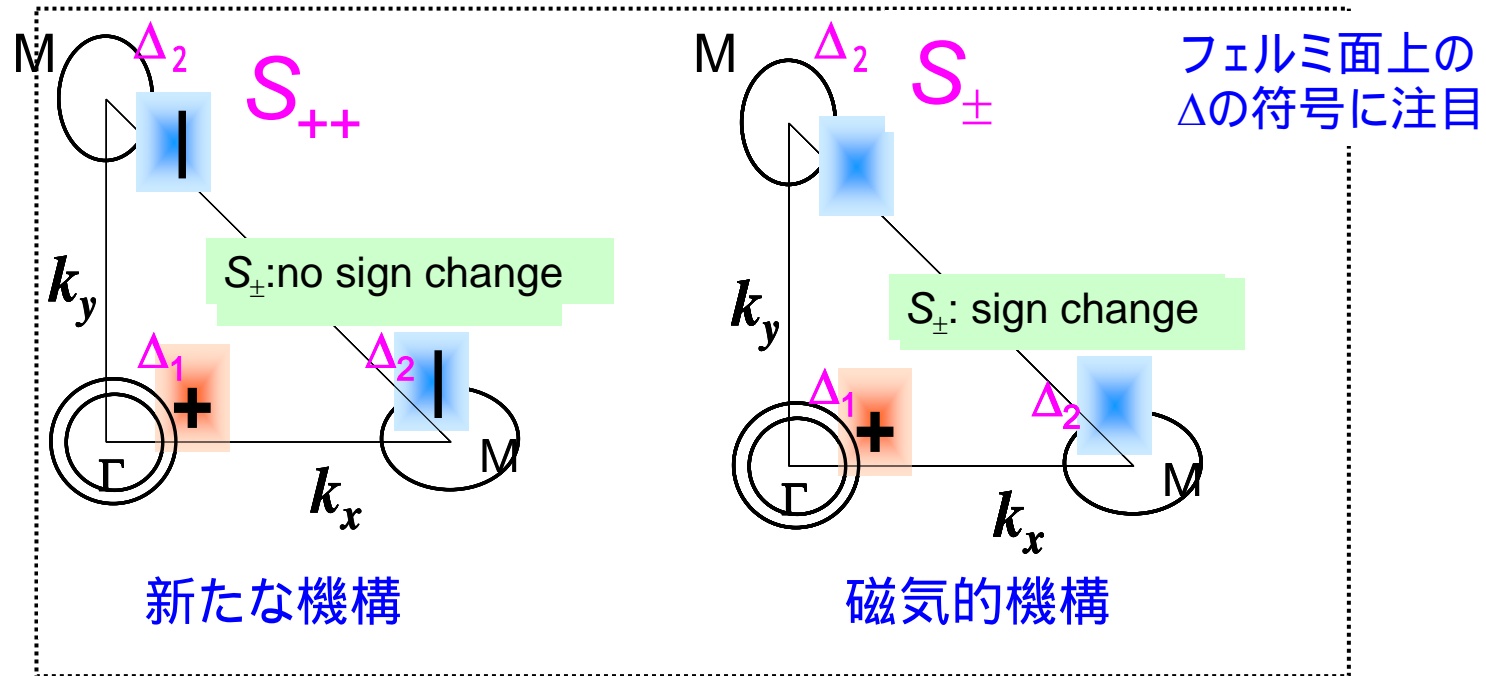
銅酸化物は $x^2 - y^2$ 軌道の
single band

この軌道の自由度が効けば新しい機構もあり得る

考えられる超伝導
gapのsymmetry



Pairing Mechanism



Δ の符号を決める手法

- (1) 非磁性不純物によるpair breaking effect (S_{\pm} の場合にだけ現れる)
- (2) 磁気励起スペクトル $\chi''(Q, \omega)$ のresonance peak (S_{\pm} の場合にだけあると言われた) ← neutron
- (3) NMR $1/T_1-T$ 曲線のcoherence peak (S_{\pm} の場合だけ現れないと思われていた)

(1) まず、非磁性不純物ドーピングの効果

非磁性不純物が T_c を下降させる原因

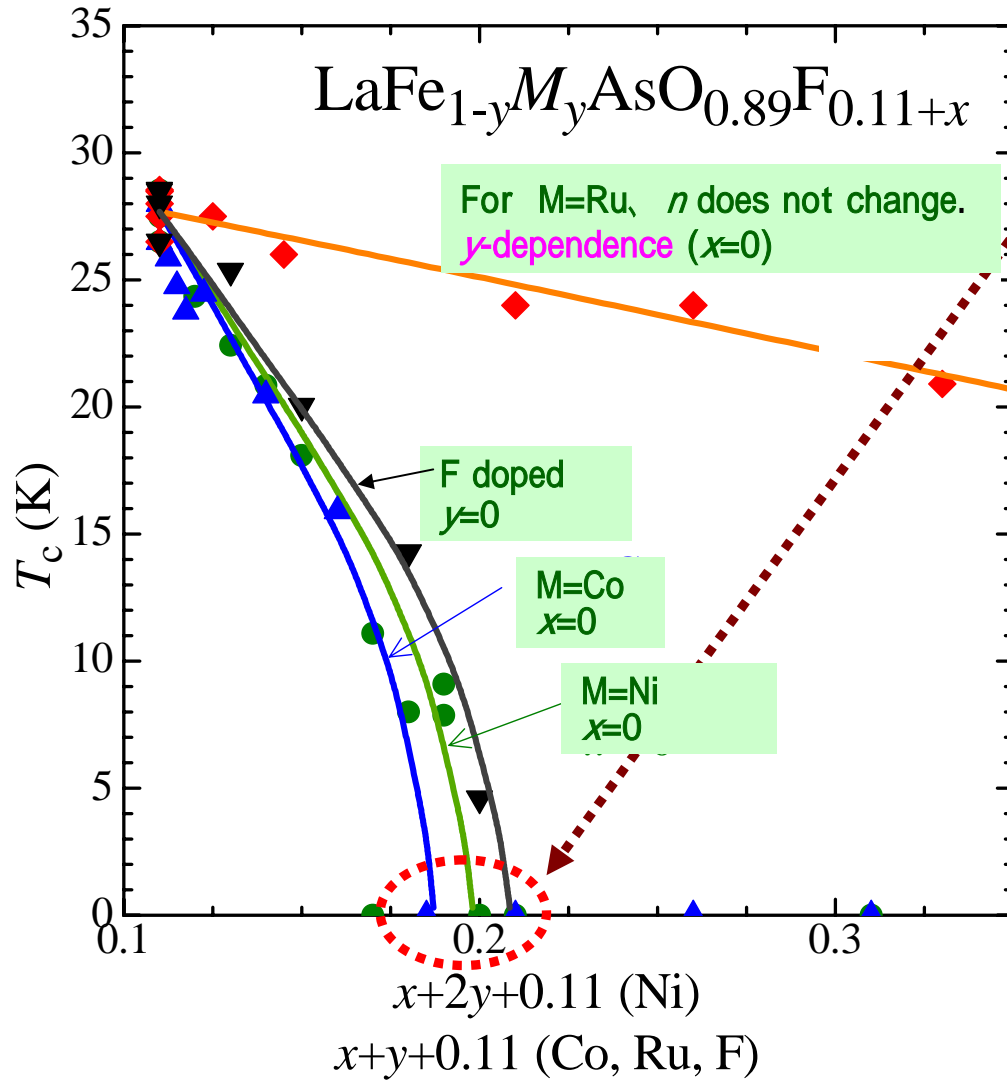
- (i) 不純物散乱が超伝導電子対を破壊する効果
(S_{\pm} に現れる pair breaking)
- (ii) 伝導電子数変化
- (iii) 電子局在効果
- (iv) その他

LaFe_{1-y}M_yAsO_{0.89-x}F_{0.11+x}を用いた実験

M=Ni, Co, Ru (各原子1個が伝導電子を、それぞれ、2個、1個、0個の伝導電子を加える)

Fも1個の伝導電子を加えるが、FeAs層の外なので伝導電子を散乱はしない

T_c の伝導電子数依存性 (ただし、Ruは $y + 0.11$ に対しプロット)



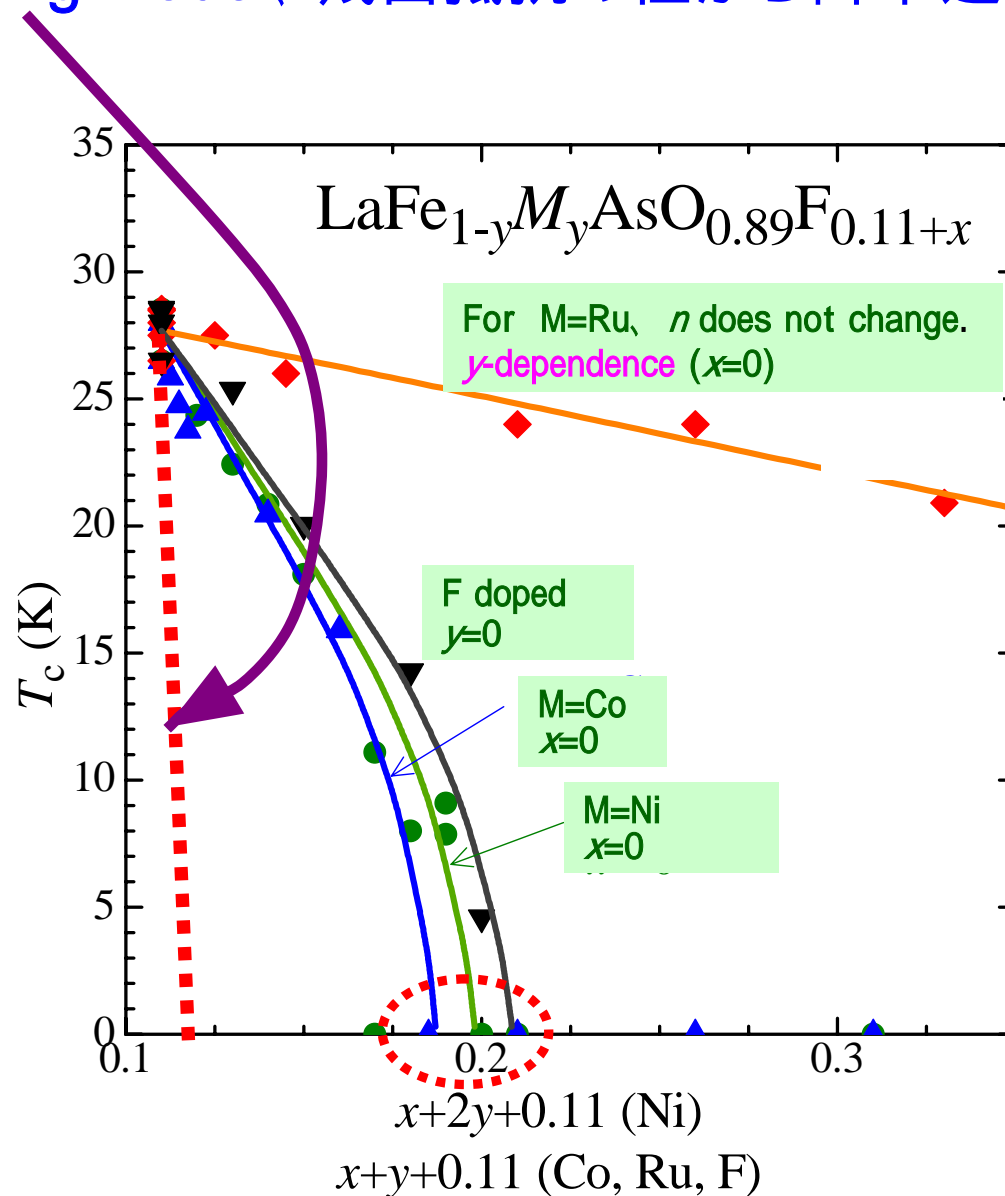
T_c は不純物が伝導電子を散乱する場所にいるかどうかによらず、電子数のみで決まる



散乱によるpair breaking effectが見当たらない

M=Ruでは T_c が殆ど下降しない
(電子数変化が無いから)

(S_{\pm} に見られるはずの)
 pair breaking model, 残留抵抗の値から降下速度を計算できる



残留抵抗を単結晶に換算するため1/4-1/5に小さくしている

Pair Breaking 効果は見えない

(多くの傍証も蓄積された)



S_{\pm} symmetryに強い疑問符

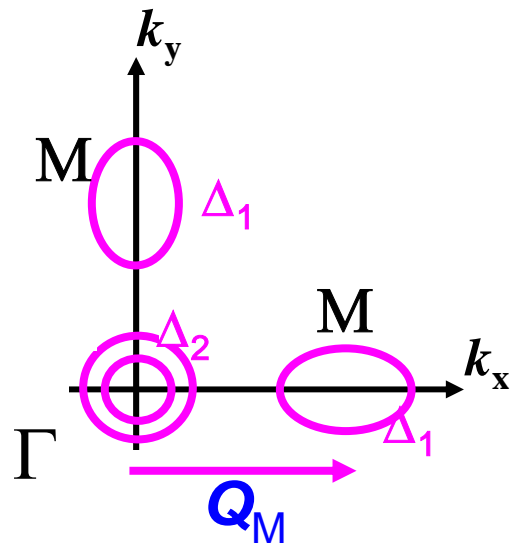
しかし、そうしている間にも、
NMR, 中性子散乱実験がほかで進み...

「 $\chi''(Q, \omega)$ にpeakが見えたから S_{\pm} 」

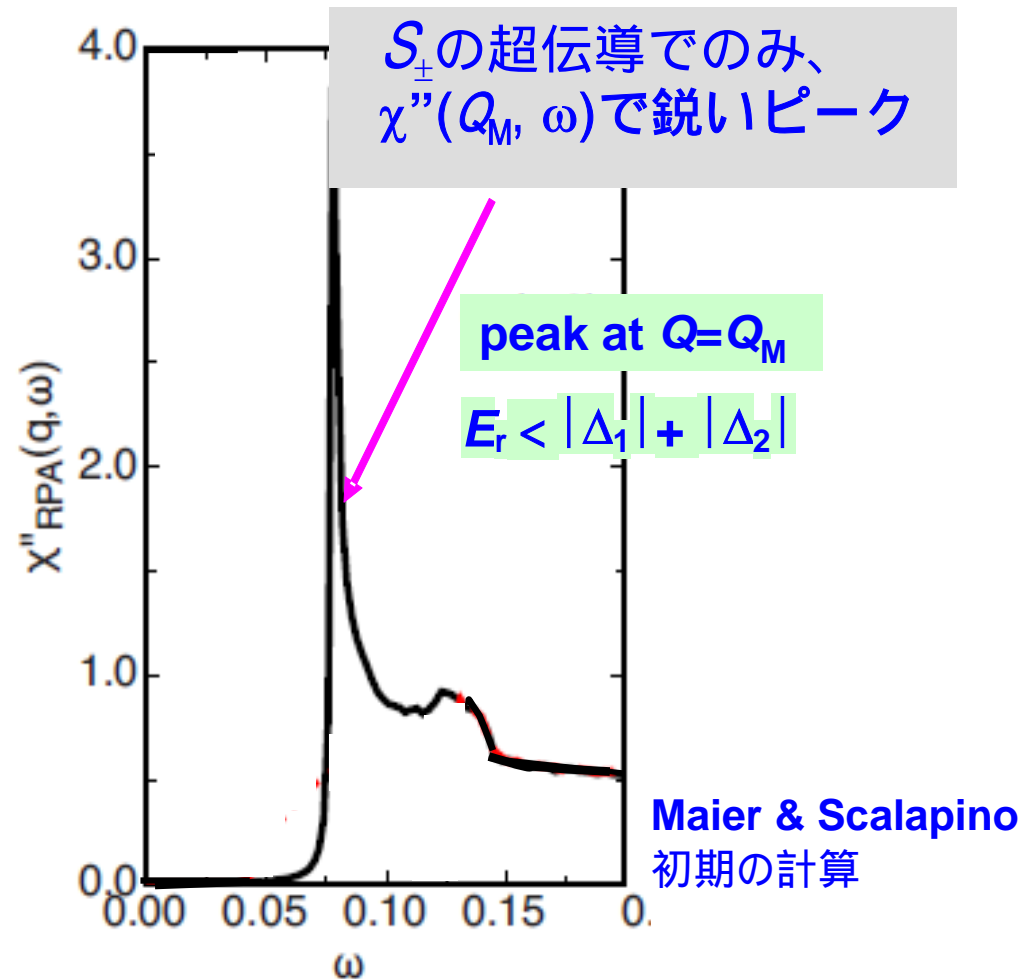
「NMRの $1/T_1$ にcoherence peakが見えないから S_{\pm} 」

との主張が瞬く間に広がっていた

(2) magnetic excitation spectra $\chi''(Q, \omega)$



Q_M は2つのFermi面の差し渡しのベクトル(nesting vector)



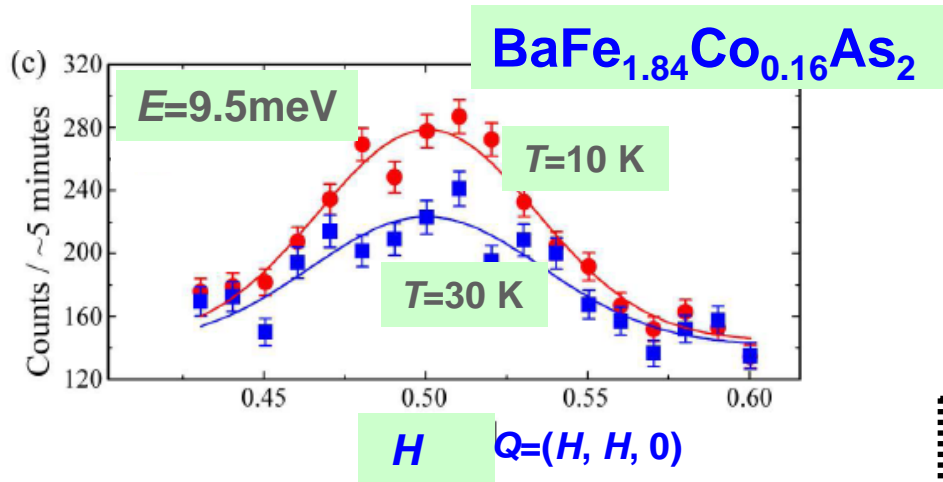
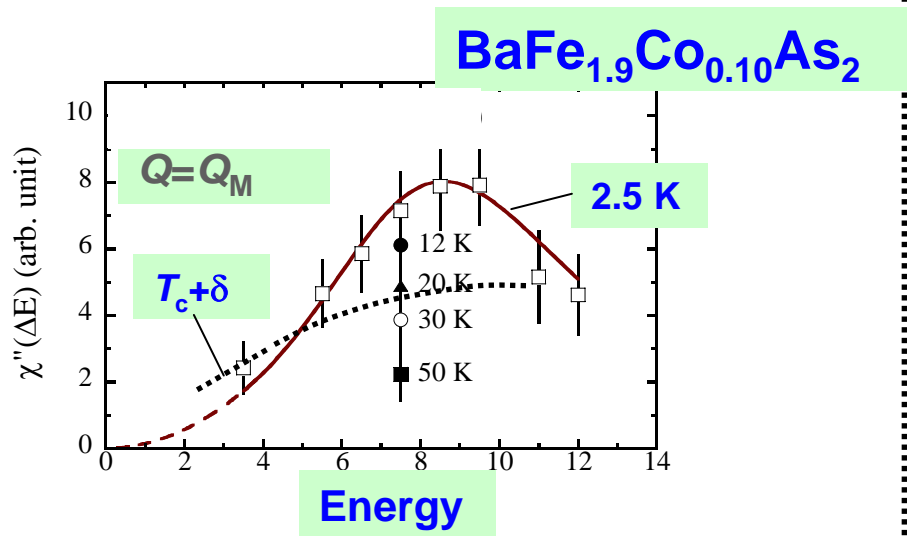


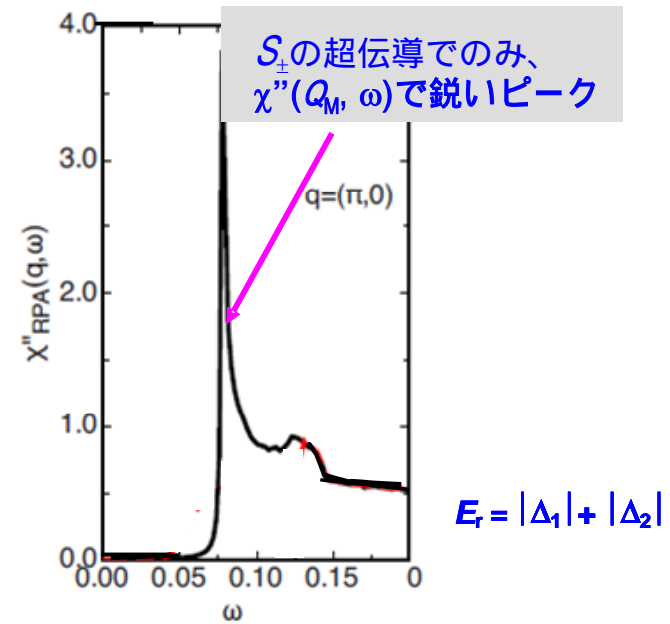
FIG. 1: (a) Reciprocal space of both the tetragonal unit cell and the square lattice. The gray circles indicate the nuclear Lumsden et al arXiv: 0811.4755



our data JPSJ 80 (2011) 073703.

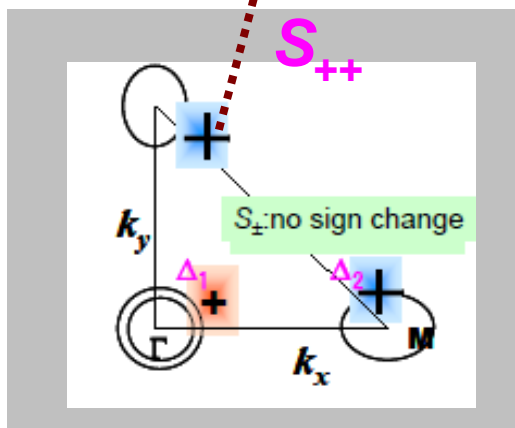
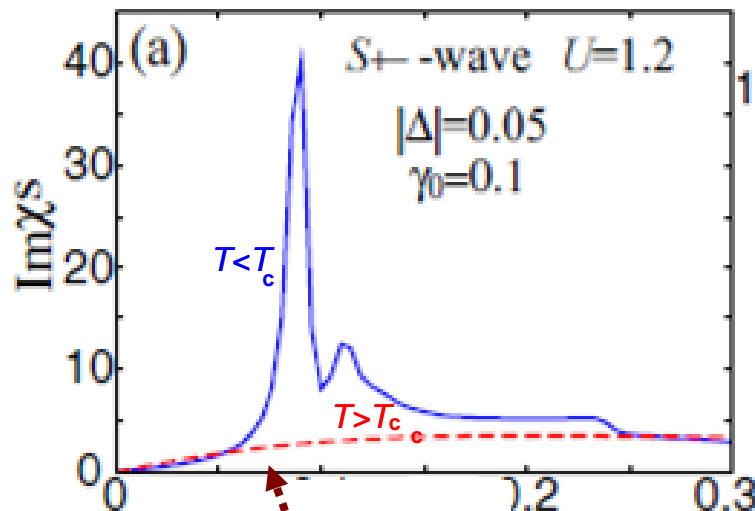
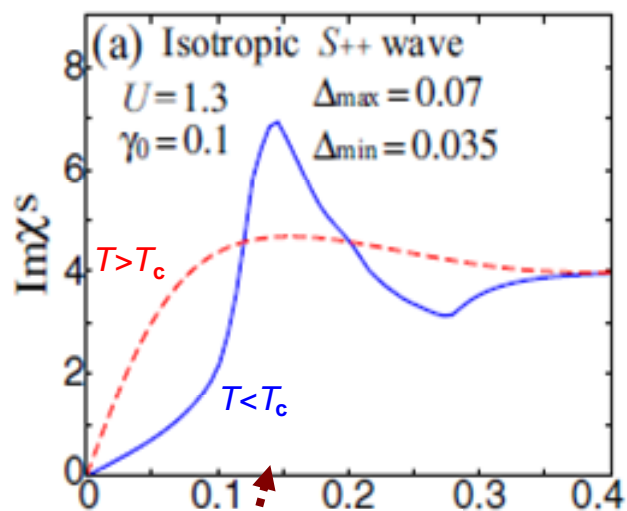
理論

$\chi''(Q, \omega)$ peak at $Q=Q_M$

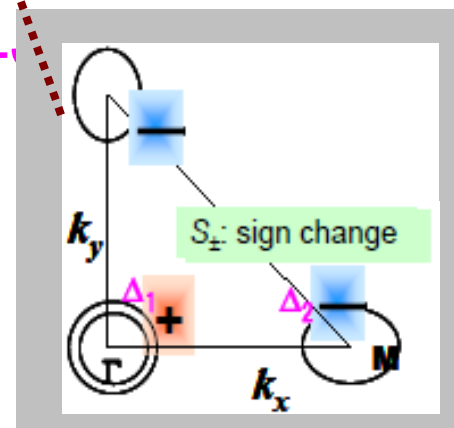


実は S_{++} でもピークは出る

Dissipationless mechanism (Onari, Kontani, Sato.)



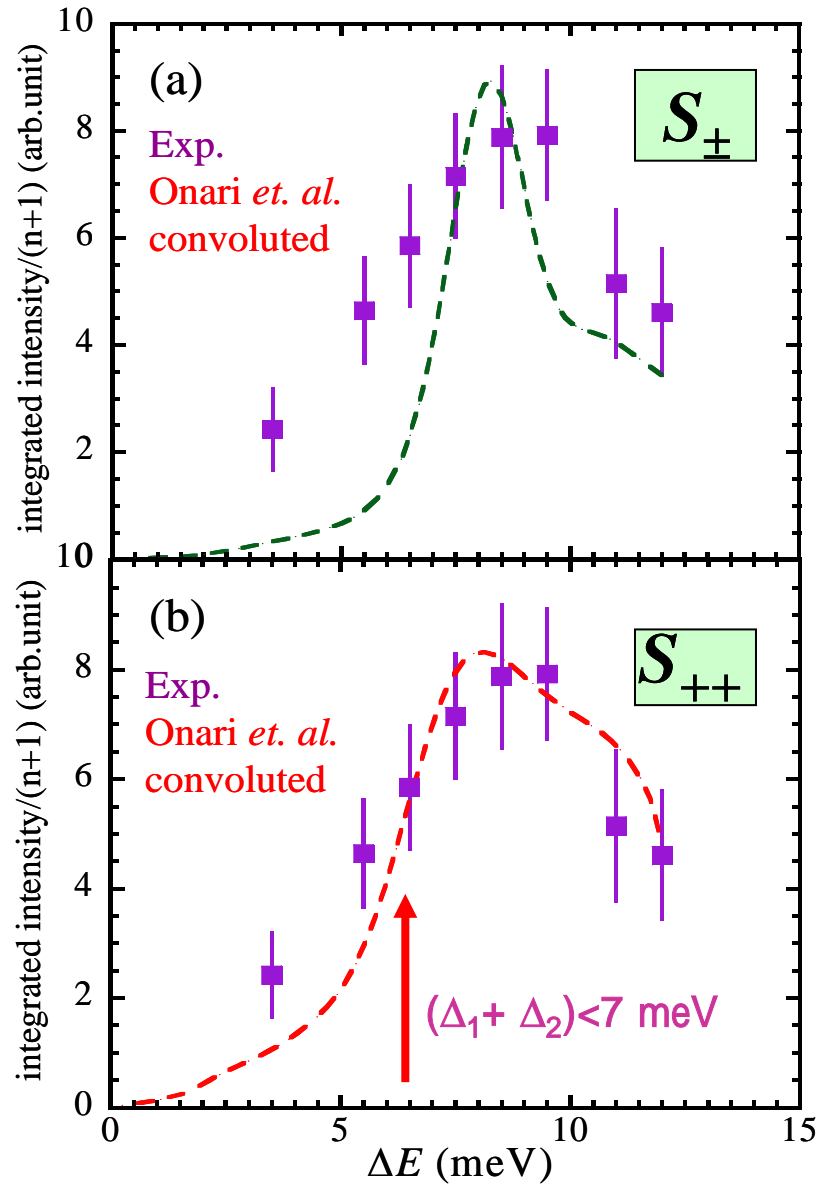
$(E_r > |\Delta_1| + |\Delta_2|)$



$(E_r < |\Delta_1| + |\Delta_2|)$

違いは巾と E_r 値

Ba(Fe_{0.9}Co_{0.1})₂As₂ (aligned crystals, $T_c \sim 23$ K)



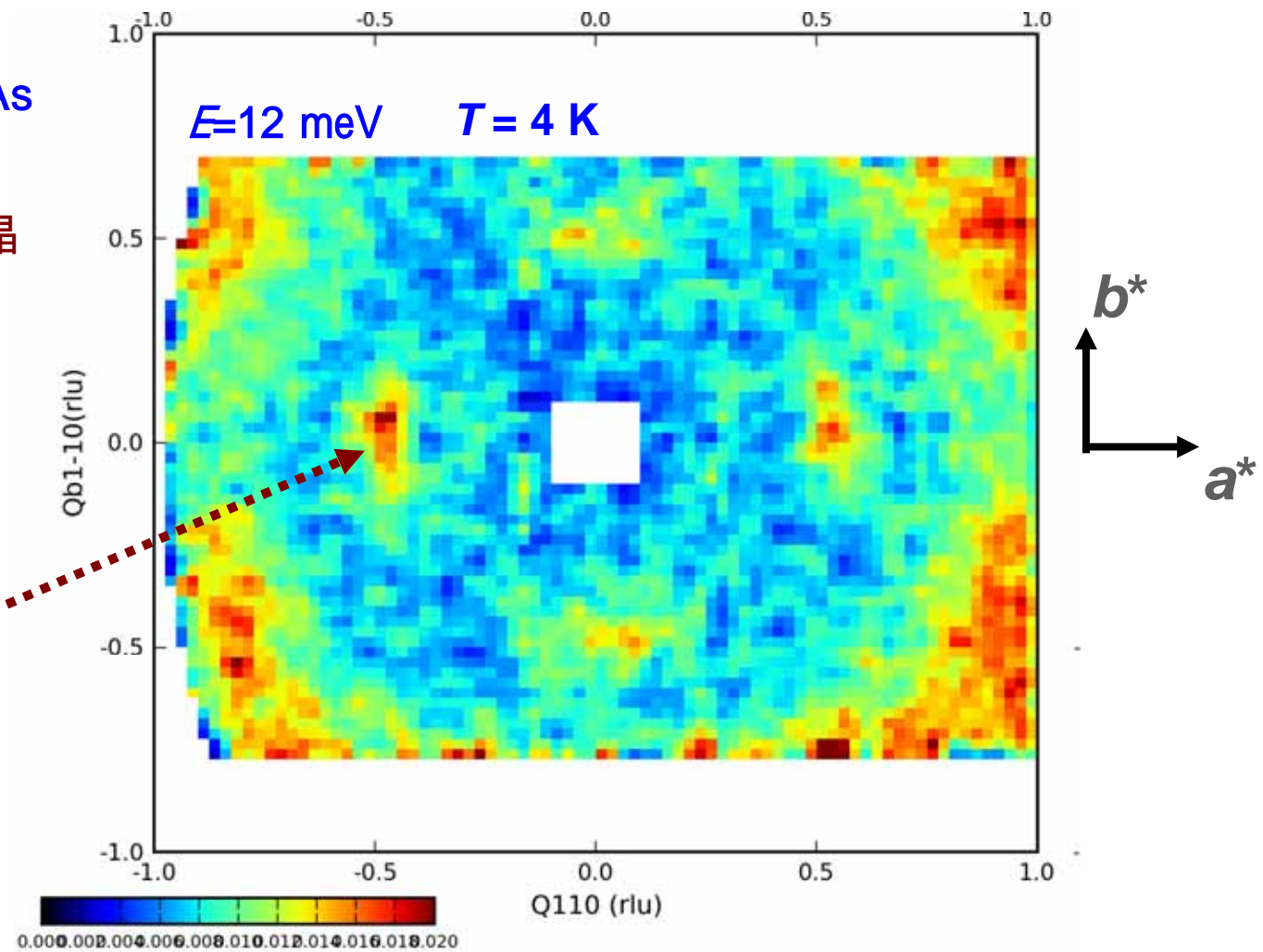
Our data:
Tatematsu, Yasui, Sato *et al.*

$\chi''(Q, \omega)$ Data at J-PARC

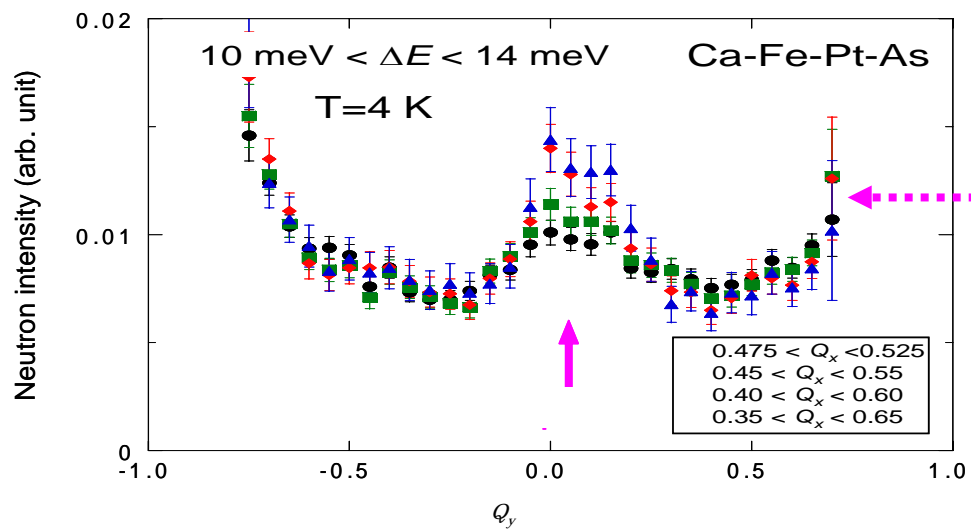
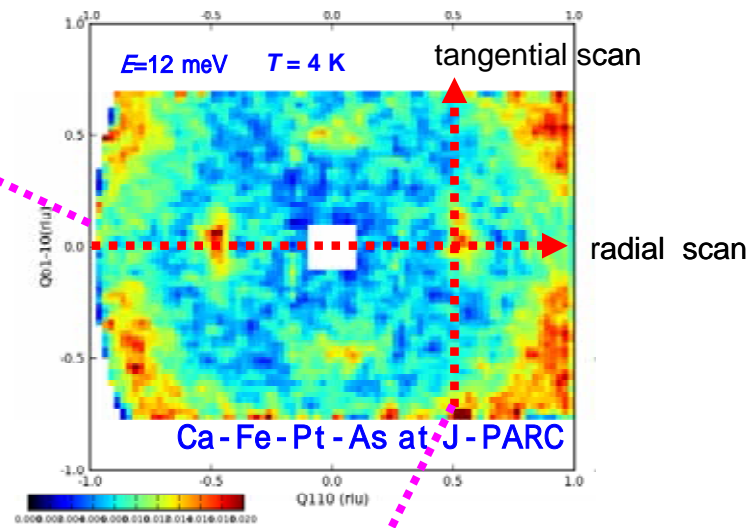
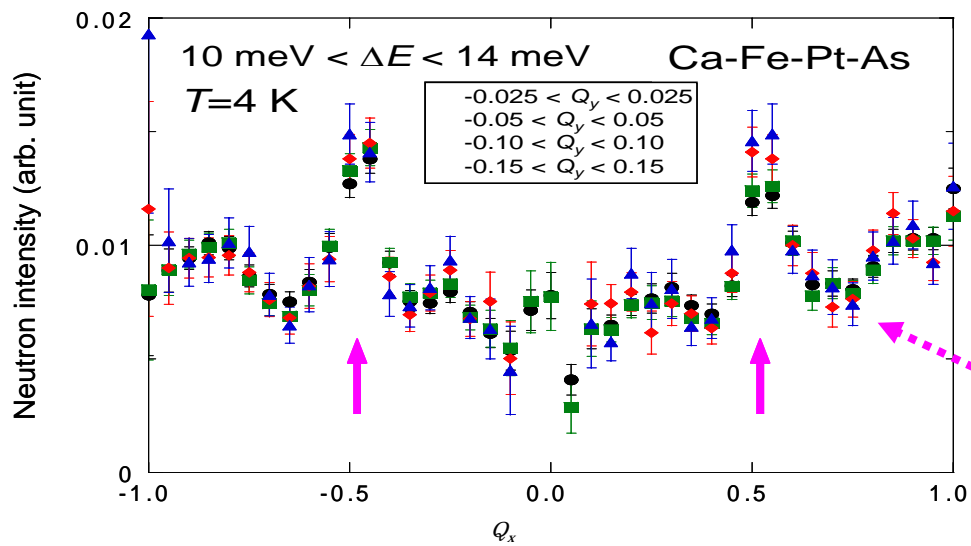
Ca-Fe-Pt-As
at J-PARC

(4.5 g 単結晶
 $T_c=30$ K)

磁気反射ピーク

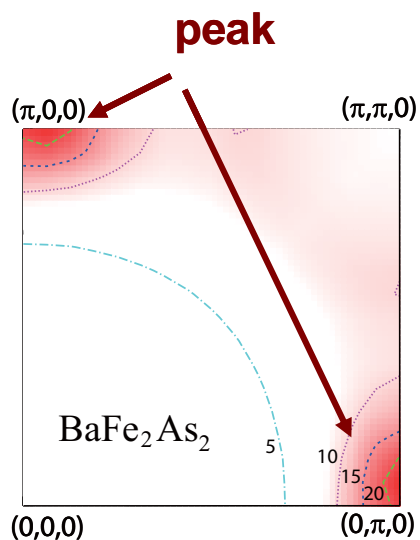
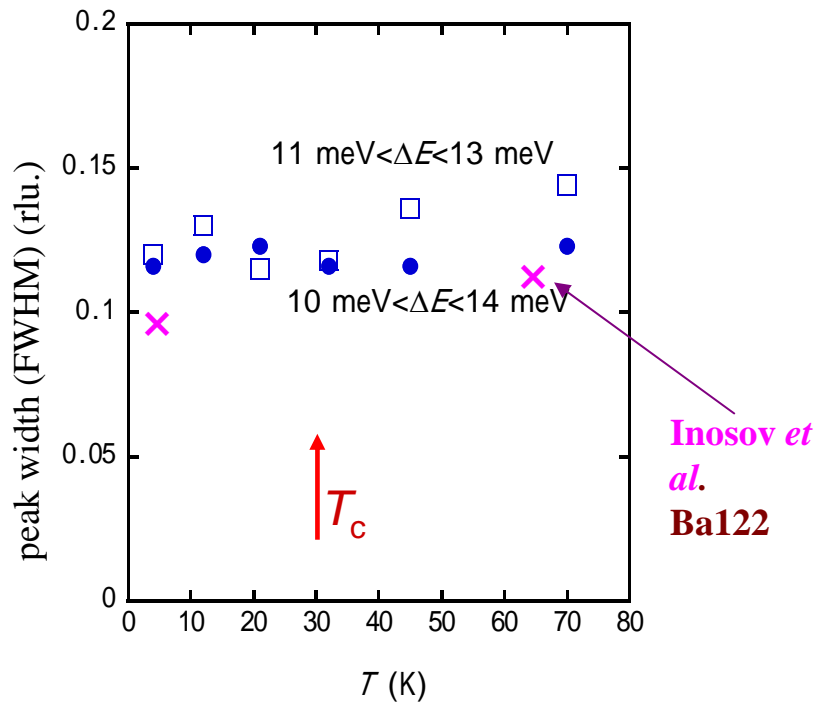
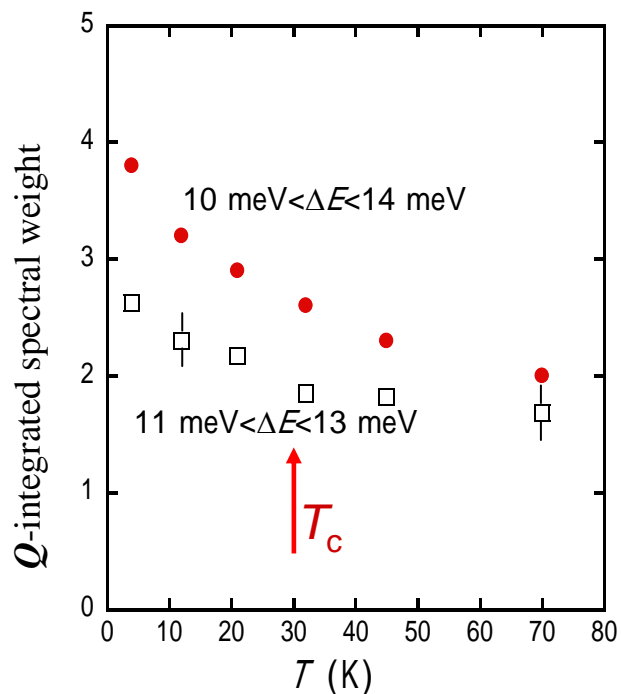


JST TRIP Sato team and J-PARC Arai group



幅:異方的

幅、強度の温度変化



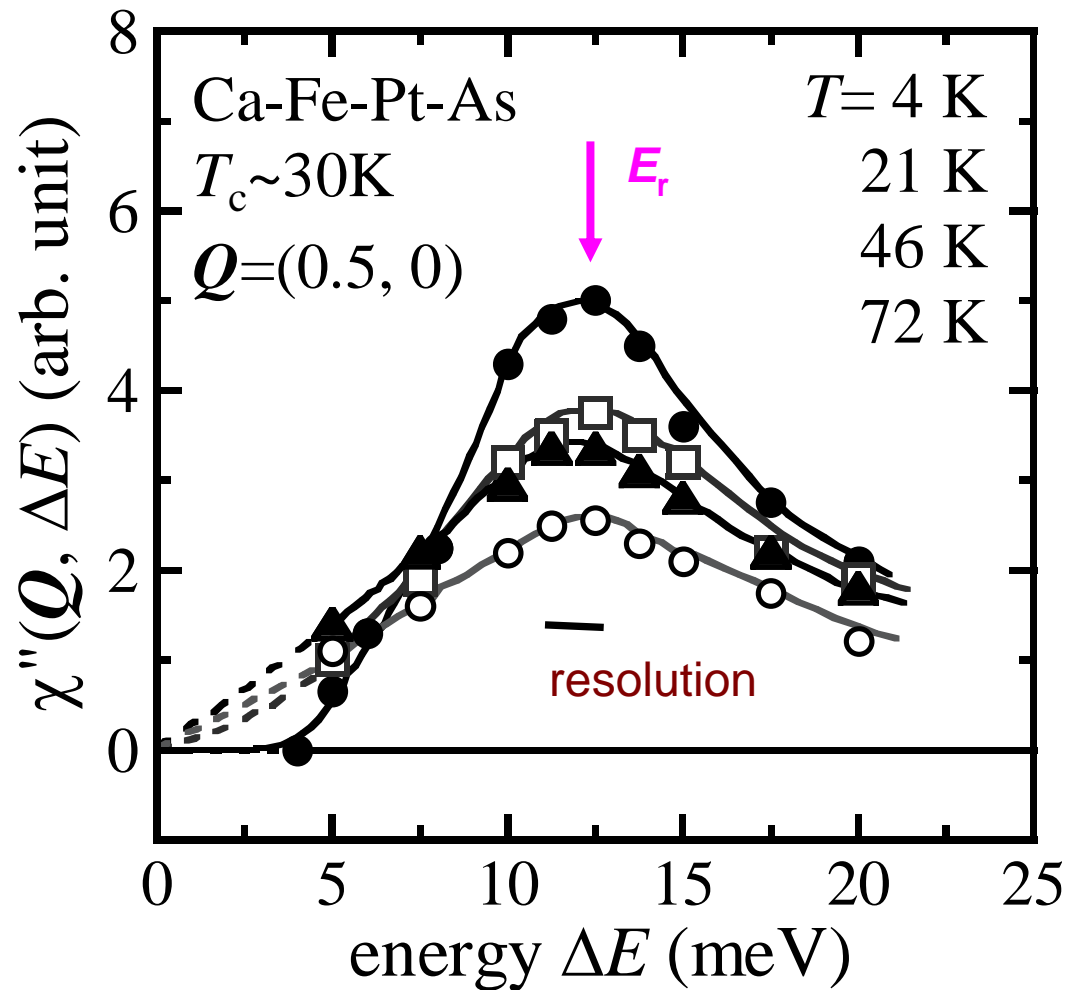
Onari & Kontani:
 3次元性を取り入れると巾を説明可

$\delta Q_x < 0.083$
 $\delta Q_y < 0.17$
 Kontani *et al.*

Maier & ScalapinoやNagai & Kuroki
 巾がはるかに小さい arXiv:1201.2453)

resonanceにしては巾の変化が小さすぎる?
 T_c での異常が小さすぎる?

energy spectra



$E_r \sim 12.5\text{ meV} \leftrightarrow (|\Delta_1| + |\Delta_2|) < 2\Delta_{\max} \sim 4k_B T_c = 10.3\text{ meV}$

$E_r > |\Delta_1| + |\Delta_2|$ の可能性 (S_{++} の可能性) の方がむしろ高い

ここまでのまとめ

pair breaking なし.

magnetic spectra: S_{\pm} に期待される resonance と見るには、現時点では無理

absence of the NMR coherence peak:
well reproduced even by S_{++} (詳細は割愛).

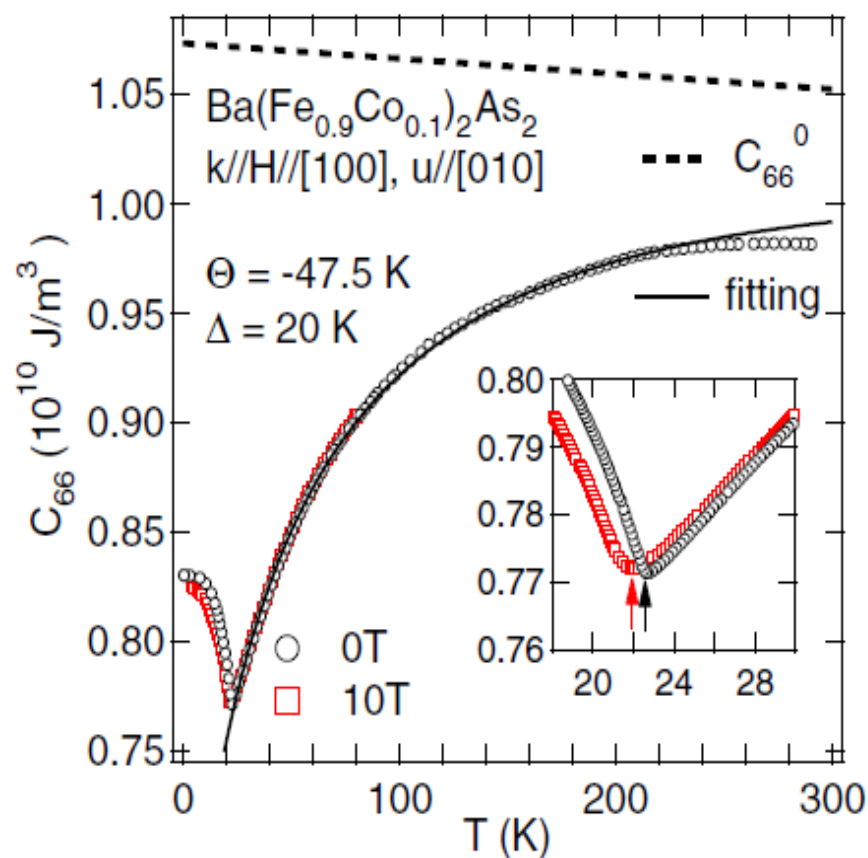
S_{++} ではないのか？

それなら new mechanism の候補は何？

“orbital fluctuation”

紺谷ら(名大)、大野ら(新潟大)

軌道自由度が特徴の系



後藤(新潟大)、小林(名大) & 佐藤(CROSS)

C_{66} のソフト化

3d xz 、 y z 軌道の揺らぎとの結合に密接に関係

T_c への不純物効果・・・新しい発現機構

↓
Orbital fluctuation
 C_{66} のソフト化

↓
それにつながる実験結果が、・・・

↓
新しい研究の地平へ

まとめ

強相関、軌道揺らぎ、格子系、及びそれらの結合が絡む固体電子論の中心的課題と重なる問題

このような学術的研究に中性子散乱の寄与すべき問題が中心部分にある

純粹に、実験、理論とも日本からの発信