

秋保大滝

超伝導、中性子散乱 そして 物質物理開発

物質物理開発研究室
佐藤 正俊



名大着任
直前

上京（1965）

“熱田津に船乗りせむと月待てば、潮もかなひぬ今は漕ぎ出でな”



（額田王）大潮と満月

東大紛争（1968—1969）

人生の理想を求めた当時の友たちの苦闘

（“嗚呼玉杯に”の時代に通じる？）

4月23日学部卒業、24日大学院入学

研究ideaを模索する時代へ（1969—）

超伝導、金属磁性を学ぶ。

BCS、Kondo effectの後の苦悶？

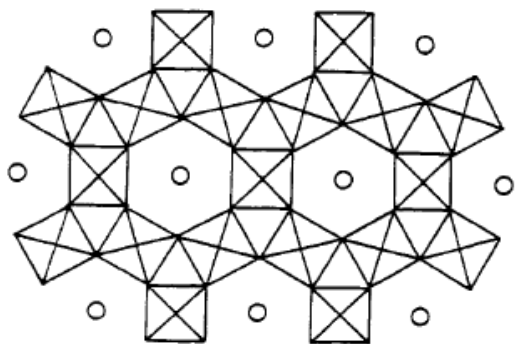
アリアドネの糸（1972）—帰る場所への道標と難問解決の手引きと。

学問の本質はアイデアであり、結婚の本質はアイである

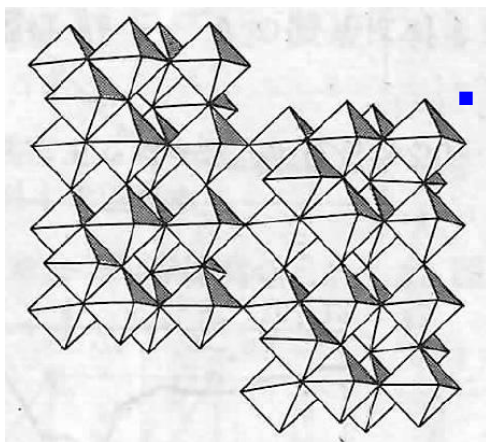
遍歴電子強磁性体のmodified RPA理論の初の検証くらい

中性子散乱へ

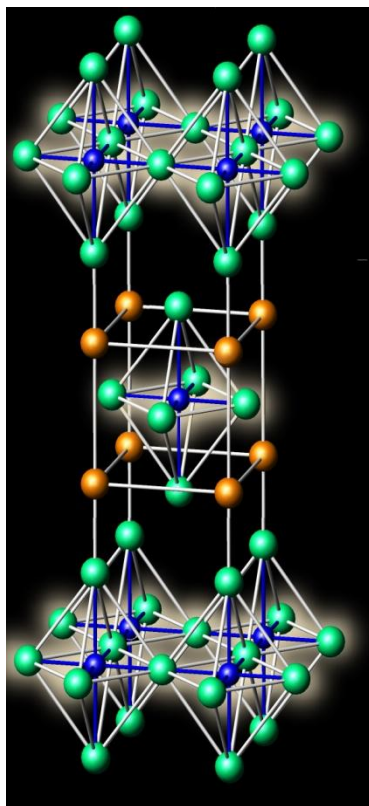
tungsten bronze A_xWO_3 (A=K, Rb, Tl etc.)から



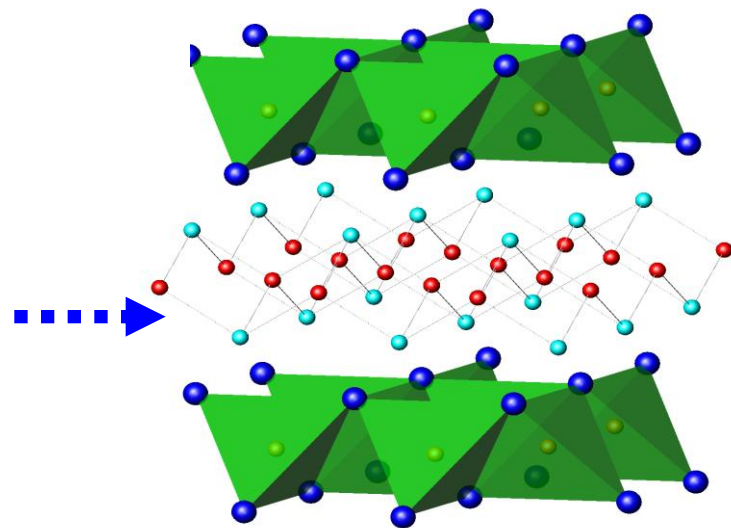
H-タングステンブロンズ
 A_xWO_3 (A=K, Rb etc.)



モリブデンブロンズ
 $A_{0.3}MoO_3$ (A=K, Rb)

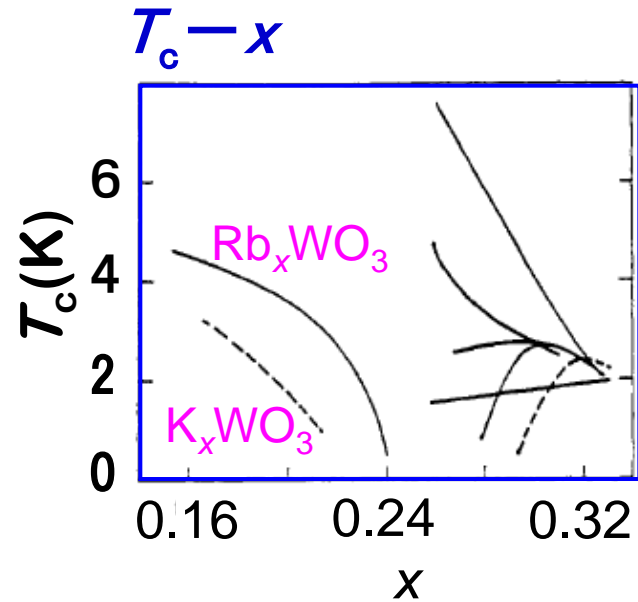
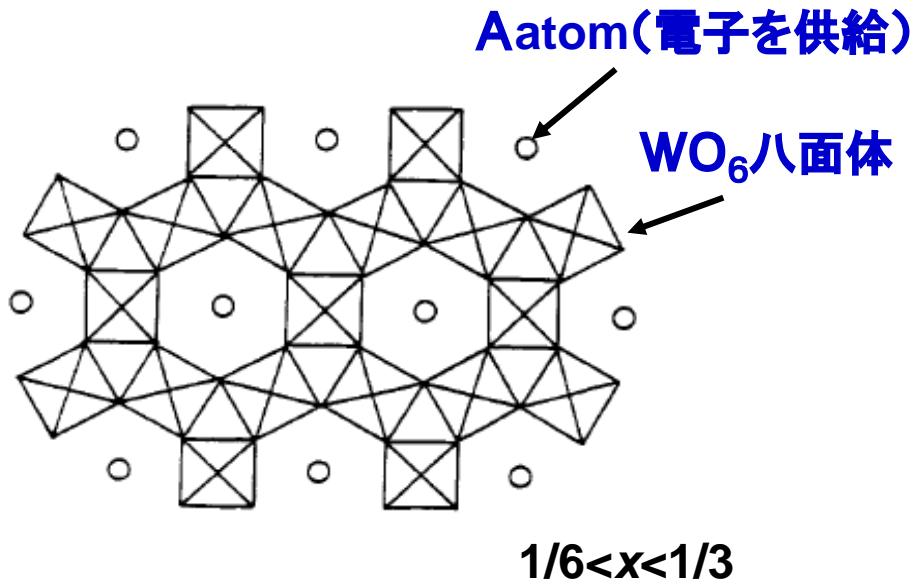


銅酸化物高温超伝導体



Fe pnictides

(I) A_xWO_3 (A=K, Rb, Tl etc.)

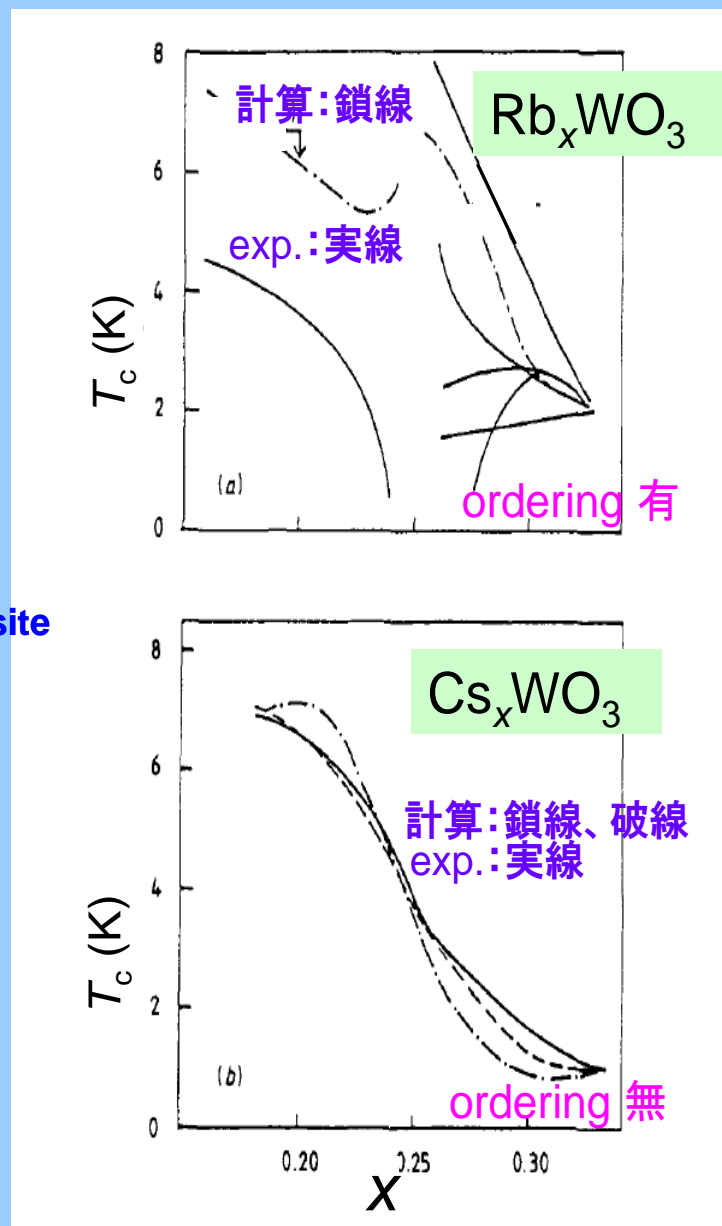
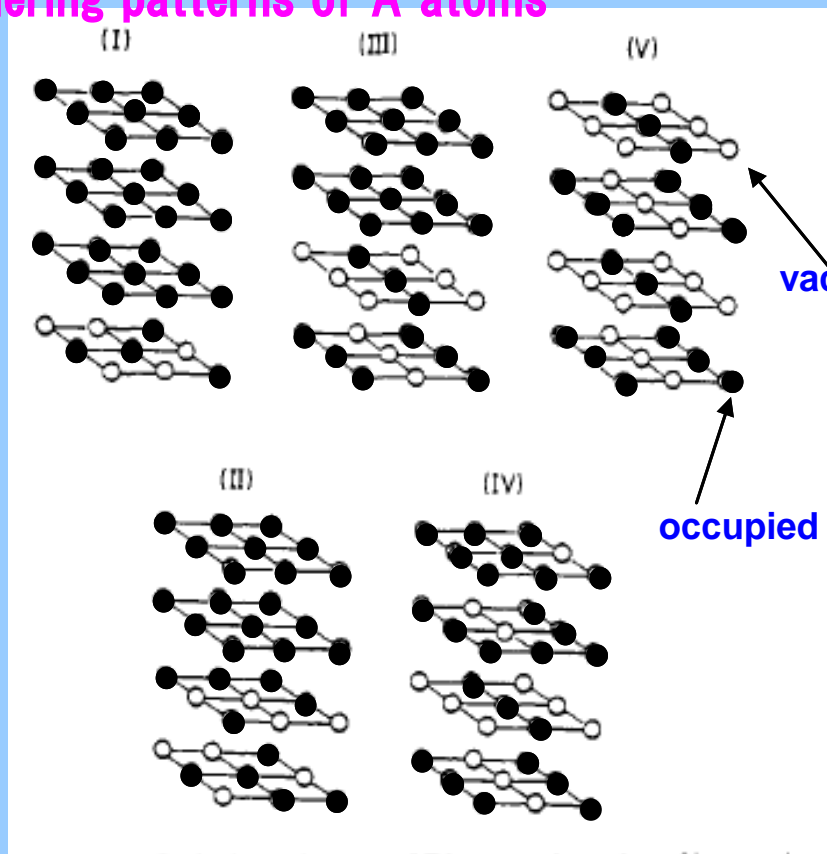


A atoms の局所振動と秩序
超伝導 T_c の決定の仕方を知る糸口？

*) 以下の研究紹介では、すべて時間の関係で詳細を省く

A atom ordering in A_xWO_3 (A=K, Rb) (中性子回折)

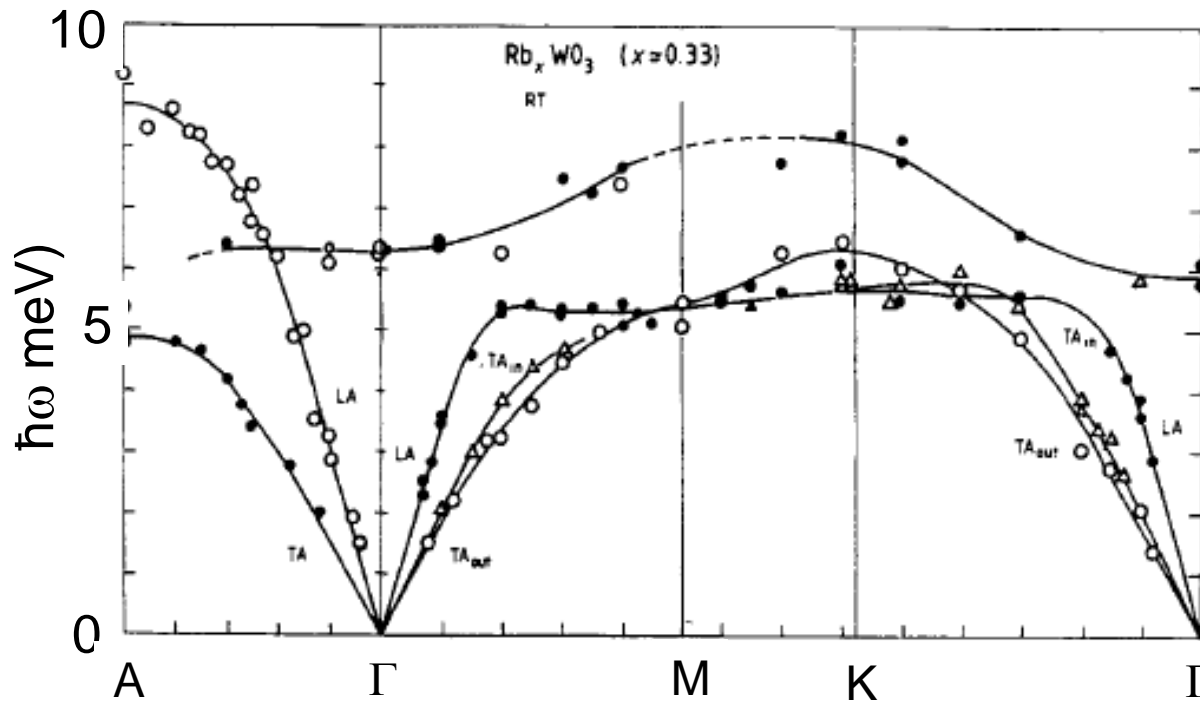
Ordering patterns of A atoms



局所構造励起モデルとの比較

フォノン分散関係に見るA 原子の局所モード

large crystal ($\sim 10\text{cc}$)



← energy ω of the Rb local mode ($\omega \propto M^{-1/2}$)

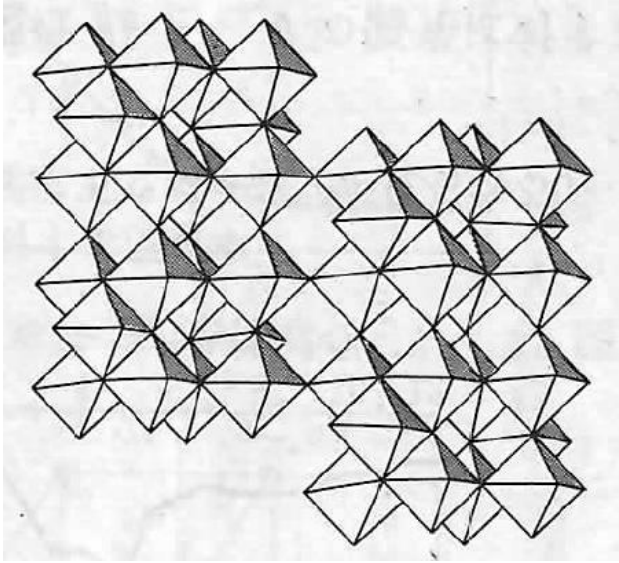
Figure 3. Dispersion curves of Rb_xWO_3 ($x \approx 0.33$). These are the refined data of those published previously (Sato 1980). LA indicates the longitudinal acoustic branches. TA_{out} and TA_{in} indicate the transverse acoustic branches with out-of-plane and in-plane characteristics, respectively. In each direction of the reciprocal space the same abbreviations are used for the data taken by the settings of the spectrometer to measure the phonons with the same polarisation.

M dependence of T_c : a kind of isotope effect

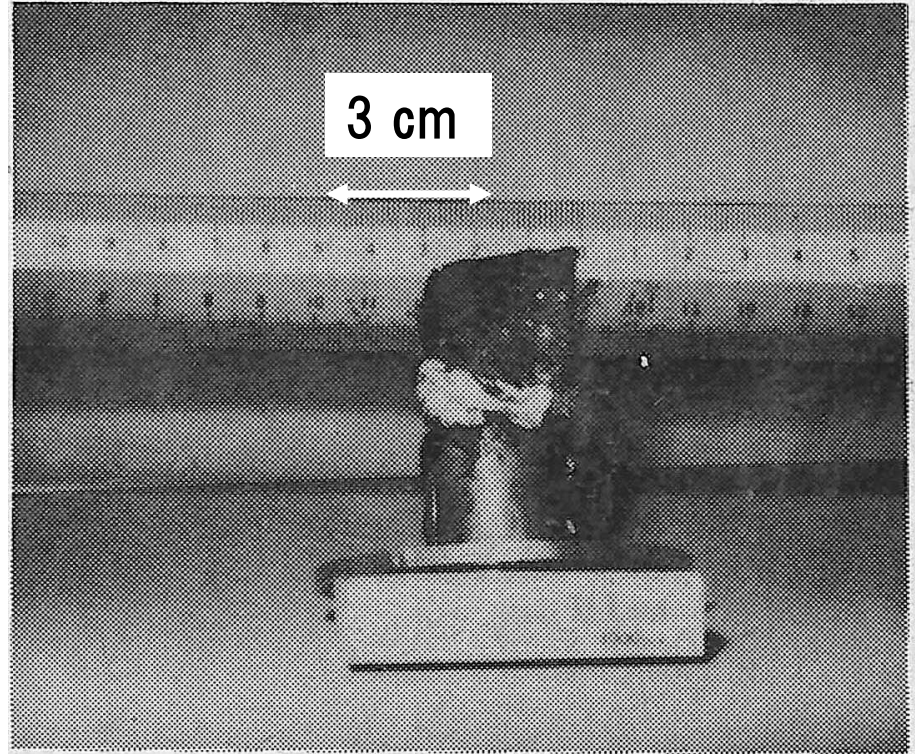
cf. rattling

(II) molybdenum bronze $A_{0.3}MoO_3$ (A=K, Rb)

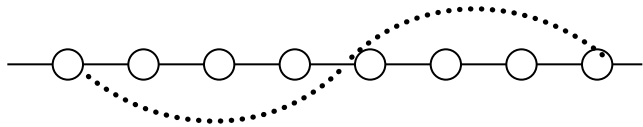
—soft phonon near the Peierls instability—



large crystal of
1-dim. conductor



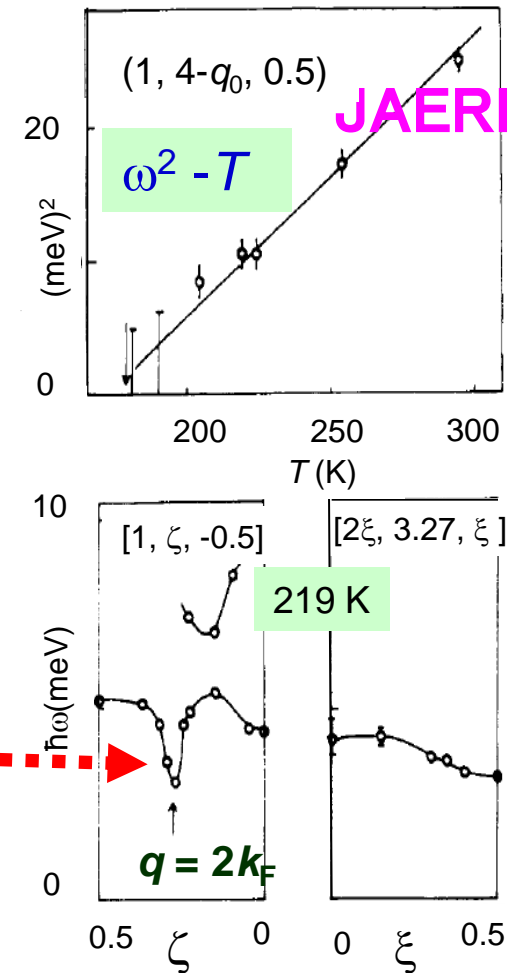
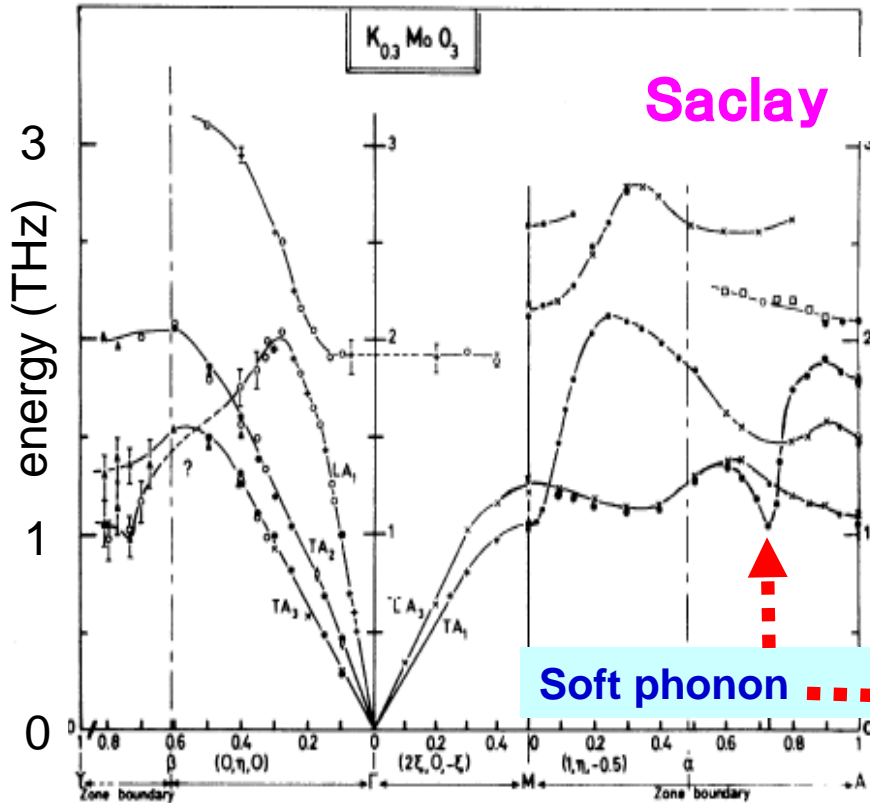
Peierls distortion of 1-dim. conductors



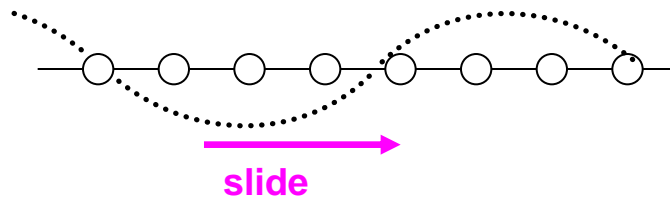
電荷密度波と格子ゆがみ:

phonon softening at $q = 2\pi/\lambda = 2k_F$ (incommensurate)

Phonon dispersion curves



incommensurate CDWのすべり運動

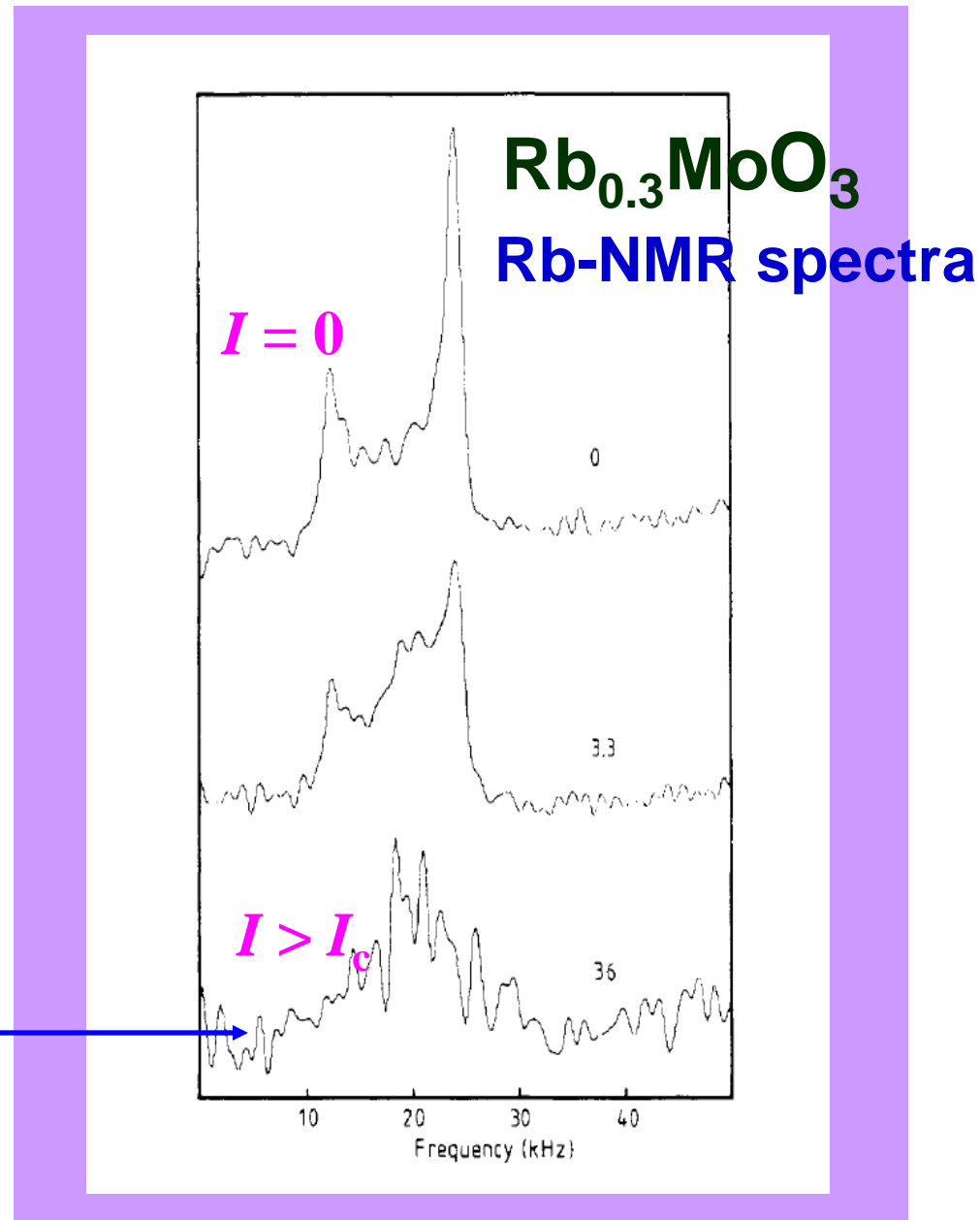


$$\lambda = 2\pi/q = \pi/k_F$$

incommensurate

motional narrowing

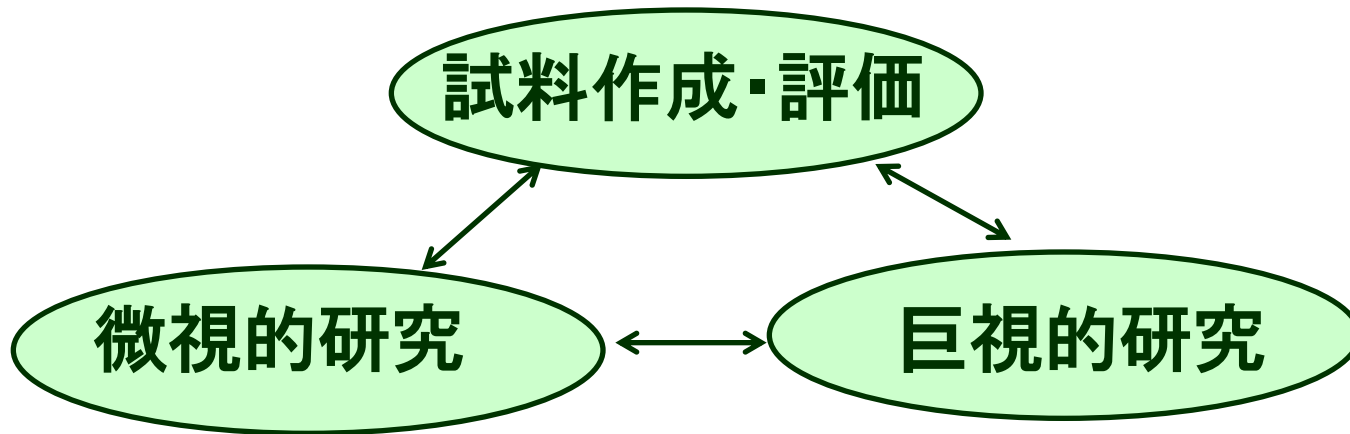
波が動いてRbサイトの
共鳴磁場が平均化している



電子が偏在する低次元の酸化物伝導体



高温超伝導体への夢



試料の自作を貫く

全サイクルの研究が出来る楽しさ
+
広い角度からの研究(客観性)

(III) High- T_c Cu-Oxides

Z. Phys. B - Condensed Matter 64, 189-193 (1986)

J.G. Bednorz

Condensed
Matter
Zeitschrift
für Physik B
© Springer-Verlag 1986

Possible High T_c Superconductivity in the Ba - La - Cu - O System

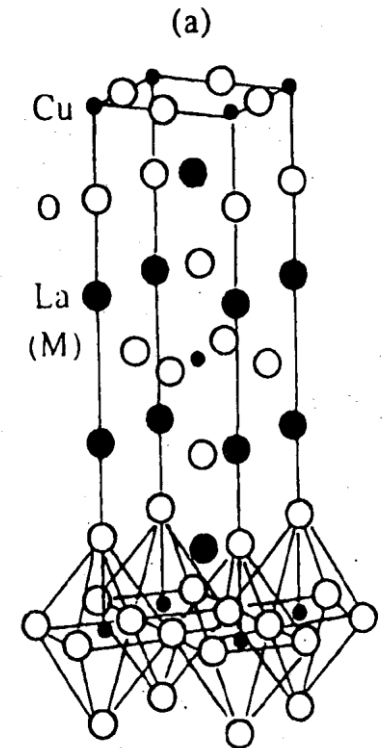
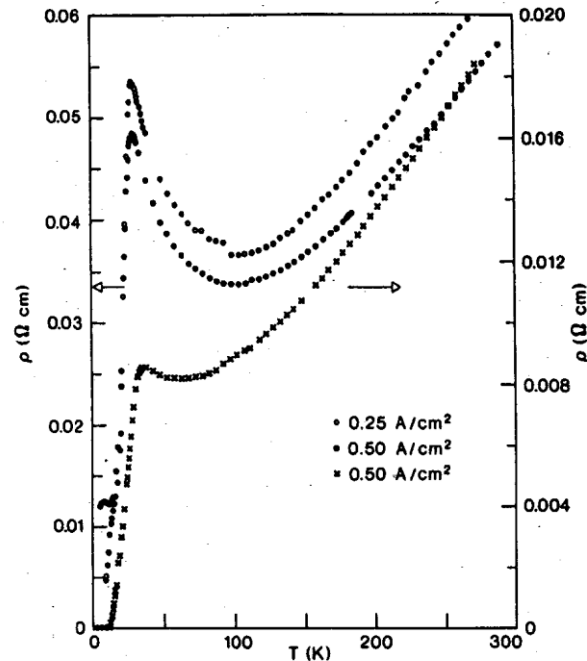
J.G. Bednorz and K.A. Müller

IBM Zürich Research Laboratory, Rüschlikon, Switzerland

Received April 17, 1986

Metallic, oxygen-deficient compounds in the Ba - La - Cu - O system, with the composition $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{5(3-y)}$ have been prepared in polycrystalline form. Samples with $x=1$ and 0.75 , $y>0$, annealed below 900°C under reducing conditions, consist of three phases, one of them a perovskite-like mixed-valent copper compound. Upon cooling, the samples show a linear decrease in resistivity, then an approximately logarithmic increase, interpreted as a beginning of localization. Finally an abrupt decrease by up to three orders of magnitude occurs, reminiscent of the onset of percolative superconductivity. The highest onset temperature is observed in the 30 K range. It is markedly reduced by high current densities. Thus, it results partially from the percolative nature, but possibly also from 2D superconducting fluctuations of double perovskite layers of one of the phases present.

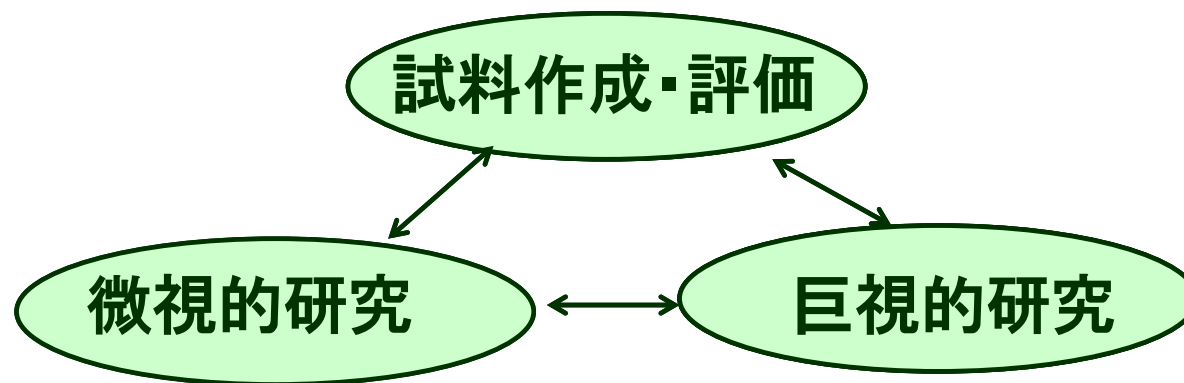
J.G. Bednorz and K.A. Müller: Ba - La - Cu - O System



- (1) タリウム系High- T_c の発見
- (2) YBCO系High- T_c の大型単結晶作成と、それを用いた一連の中性子散乱研究による物性解明への道筋
- (3) (高温までの輸送特性測定) + (NMR、中性子散乱)



High- T_c 系の異常金属相を表す相図の提案
(超伝導発現に関する物理描像の形成)



→ broad viewを大切に

本日のキーワード

Mott絶縁体への正孔ドーピングで超伝導 (active magnetism)



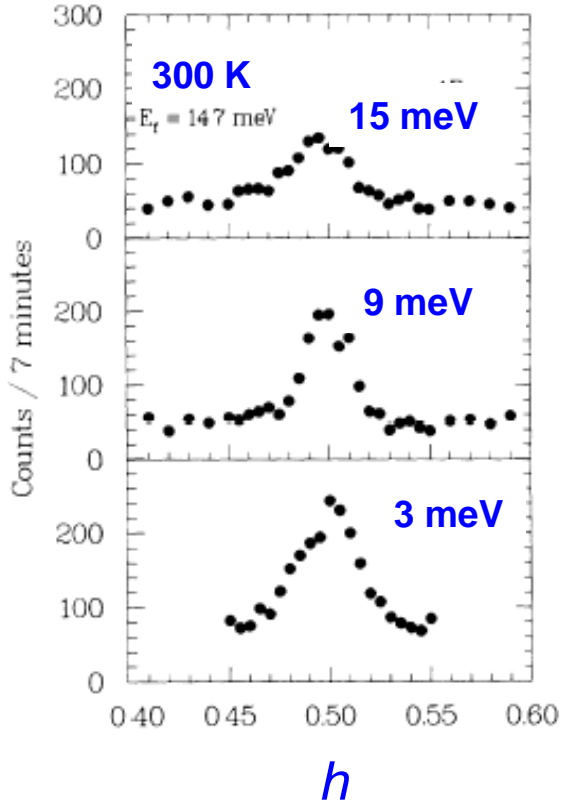
単結晶

64 mm

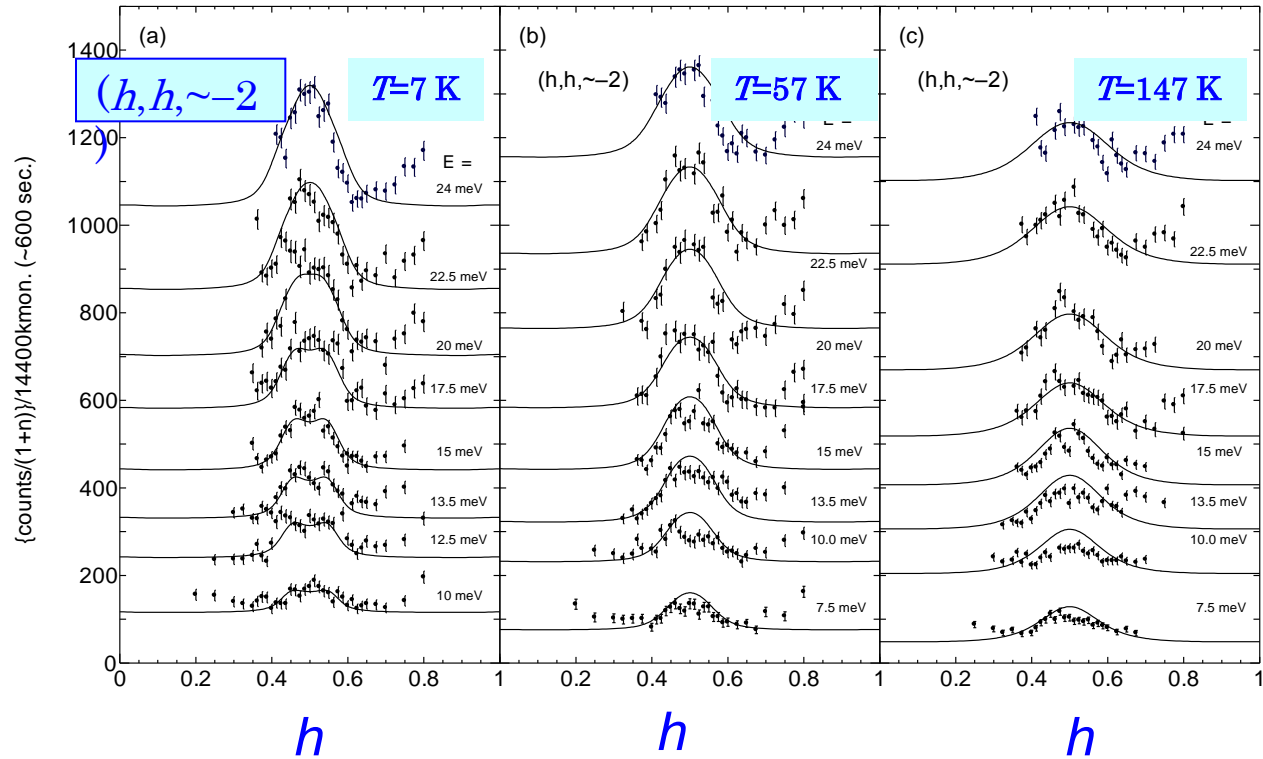
磁気励起スペクトル 強度 $\chi''(q,\omega)$

逆格子空間内の h -scan along $Q = (h, h, \sim -2)$

YBCO large crystals



at various energies

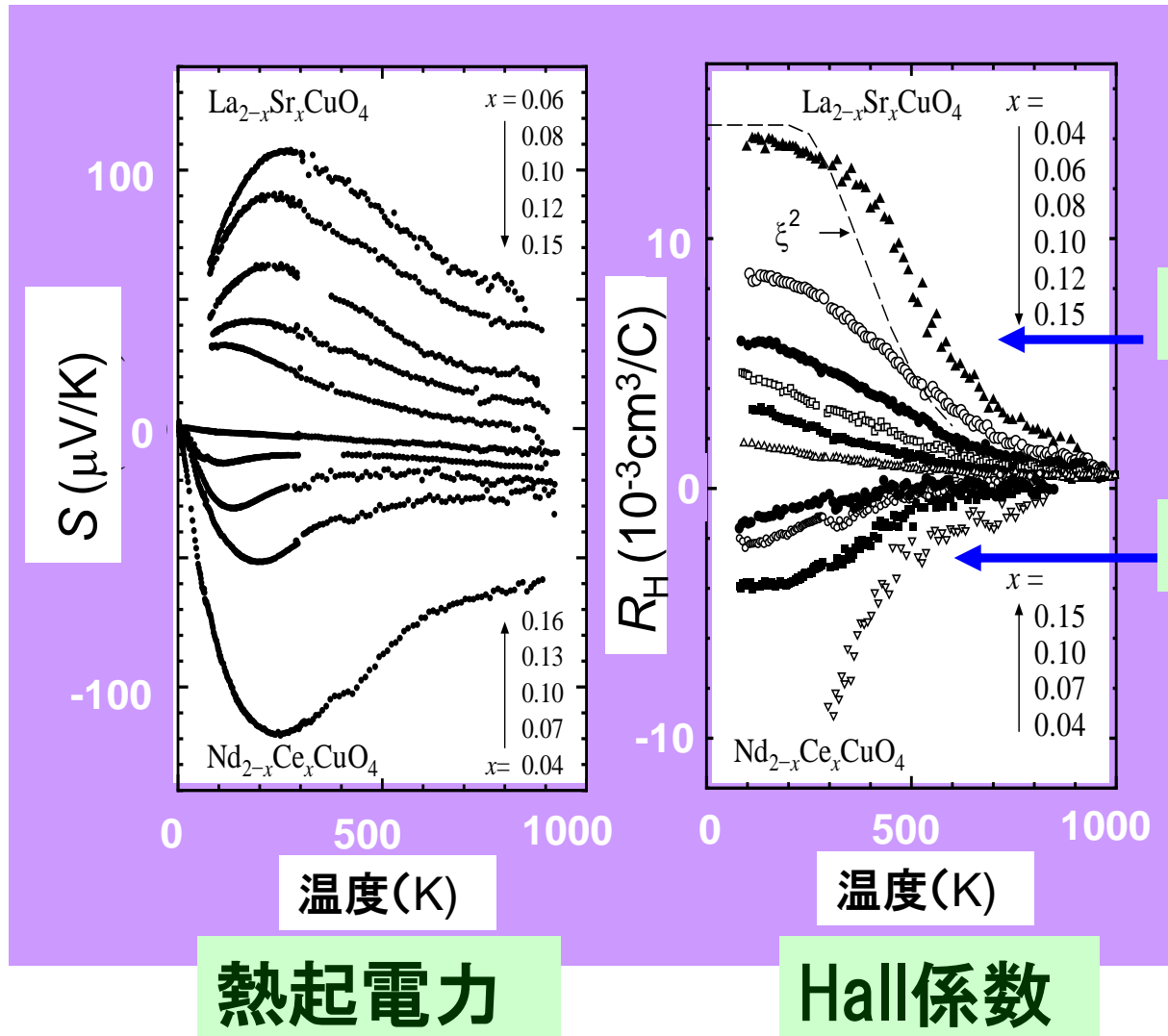


$$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5} \quad \chi(q,\omega) = \chi^0(q,\omega) / \{1 + \mathcal{J}(q)\chi^0(q,\omega)\}$$

$T_c \sim 50$ K

Magnetic excitations relevant to the superconducting pairing

active magnetism & anomalous transport



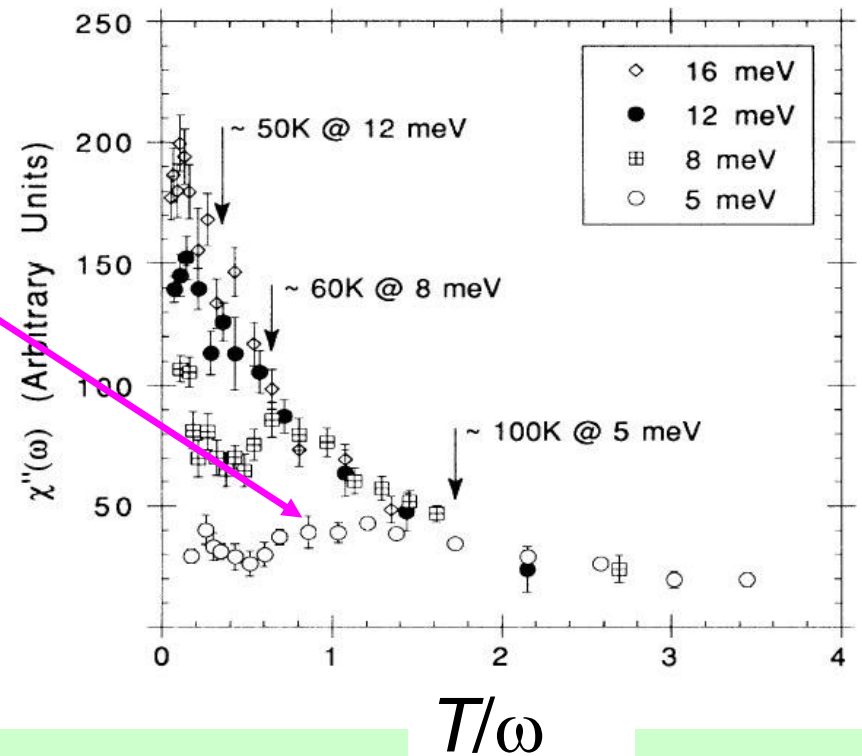
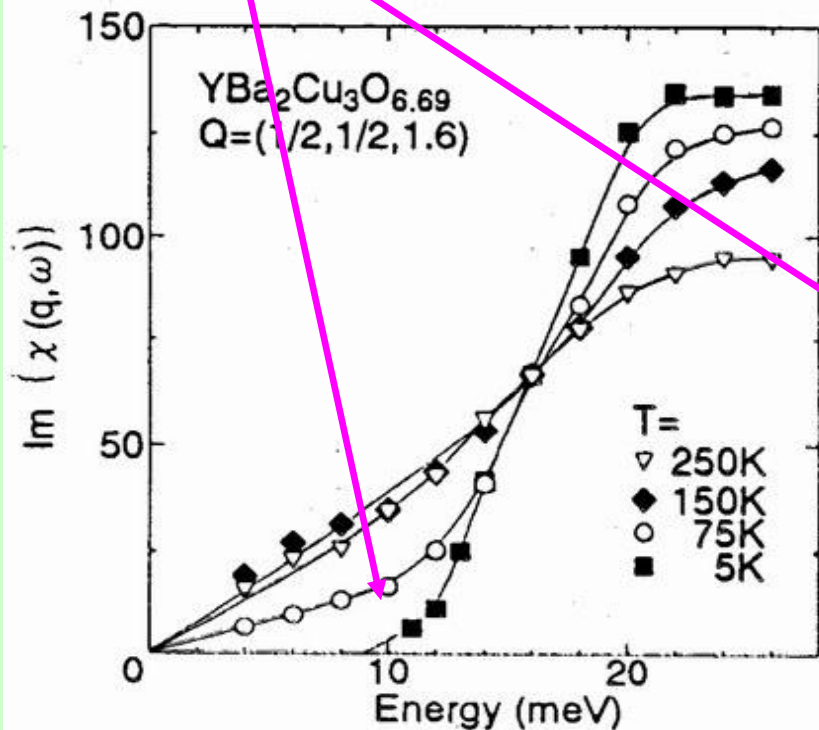
$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$

(for various x 's)

$\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$

pseudo gap [gap-like structure in $\chi''(q,\omega)$ of YBCO]

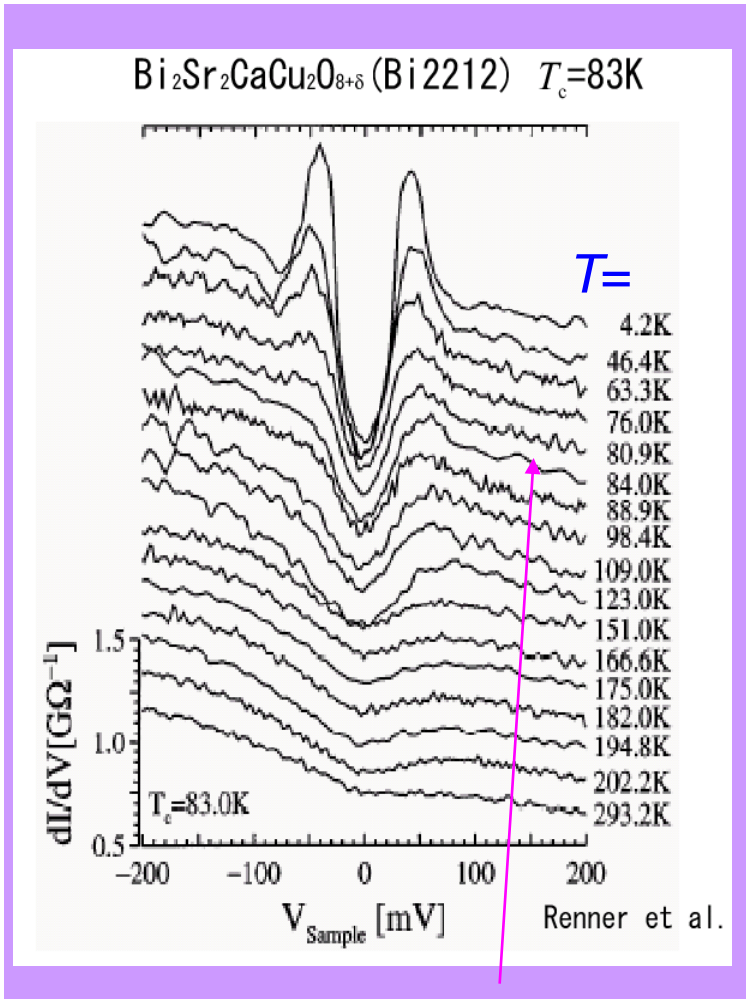
Gap formation much above T_c



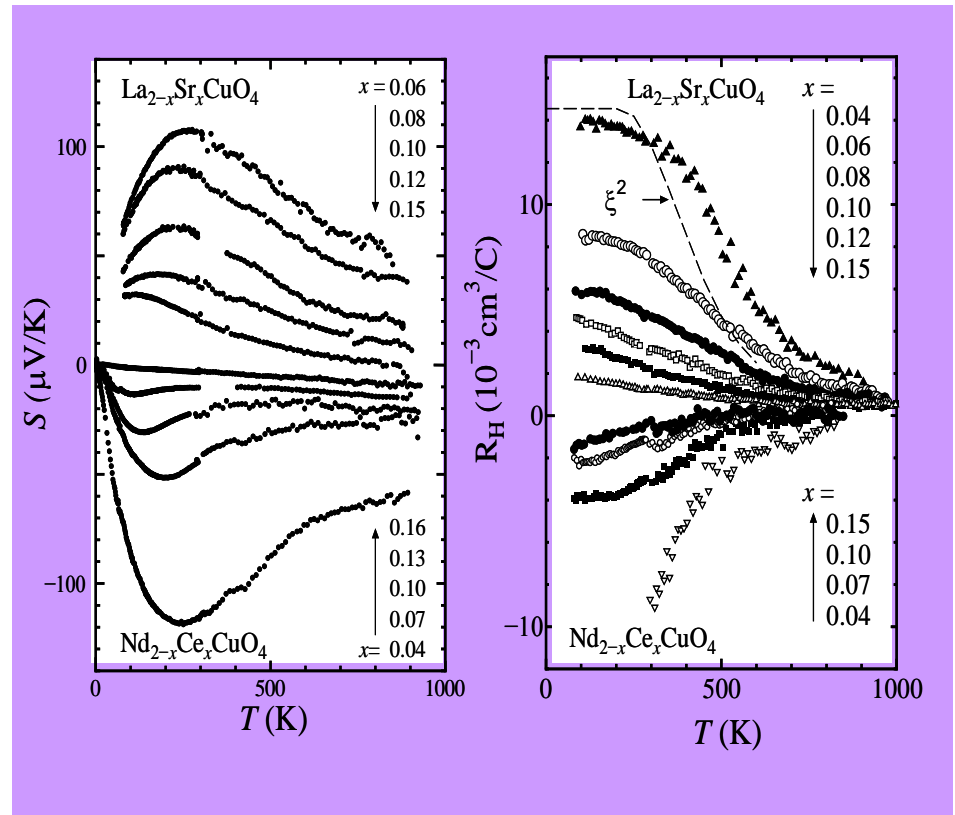
Rossat-Mignod *et al.*

BNL, Nagoya

pseudo gap in STS spectra



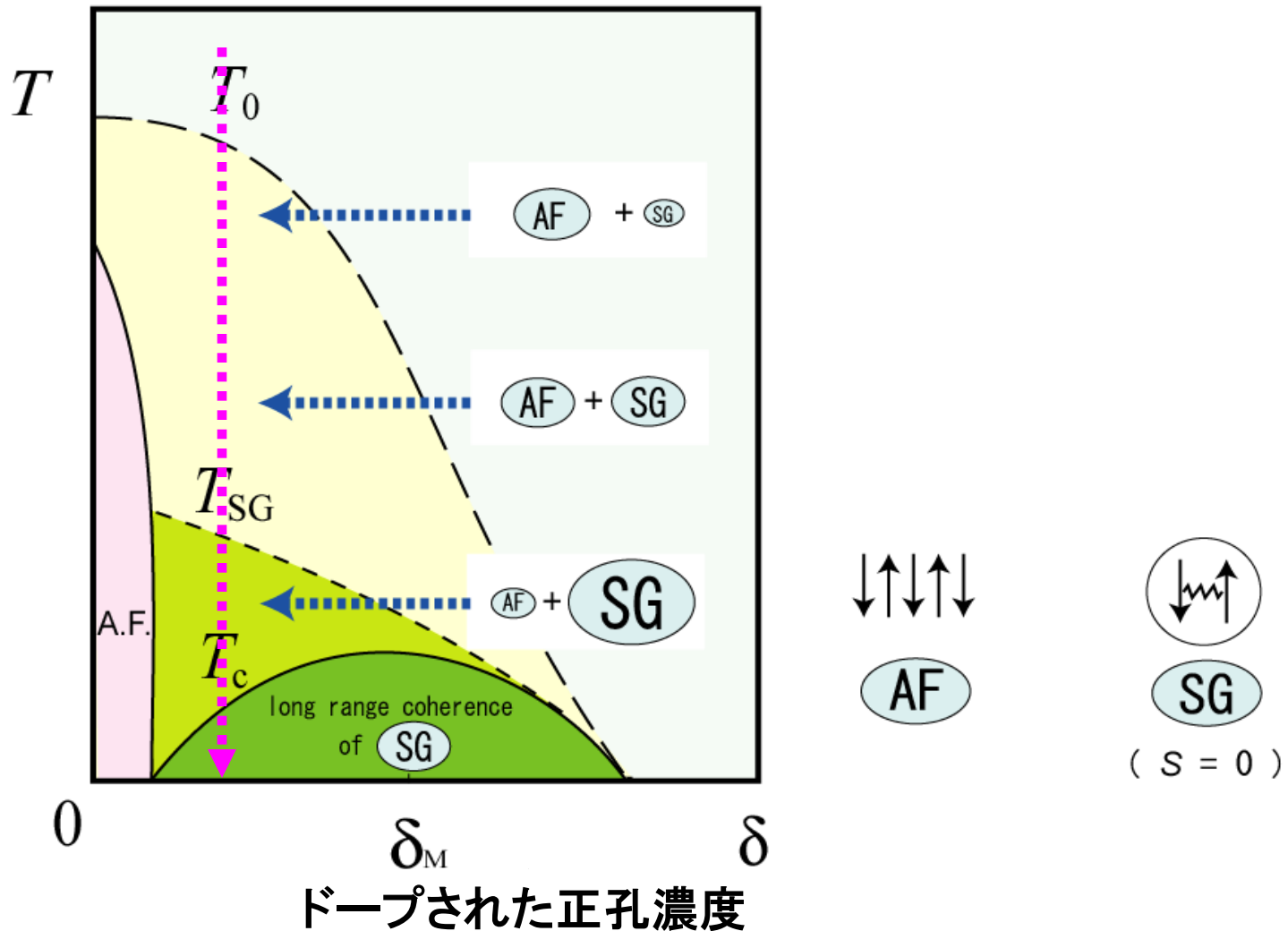
Renner et al. T_c



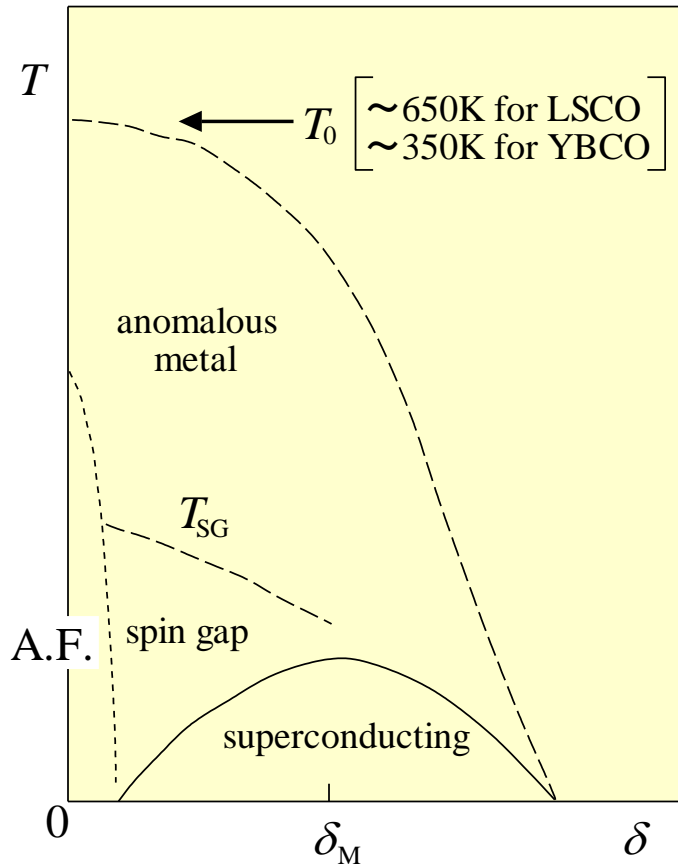
High- T_c の異常金属相

Growth of AF Correlation & Pseudo Gap

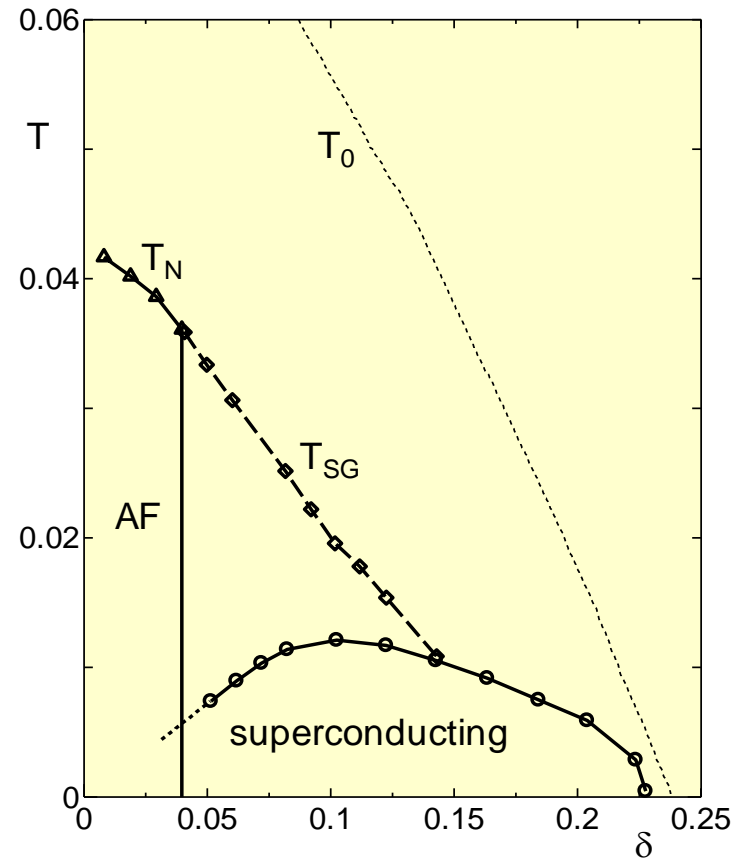
Phase Coherence of Singlet Pairs \rightarrow Superconductivity



theoretical description

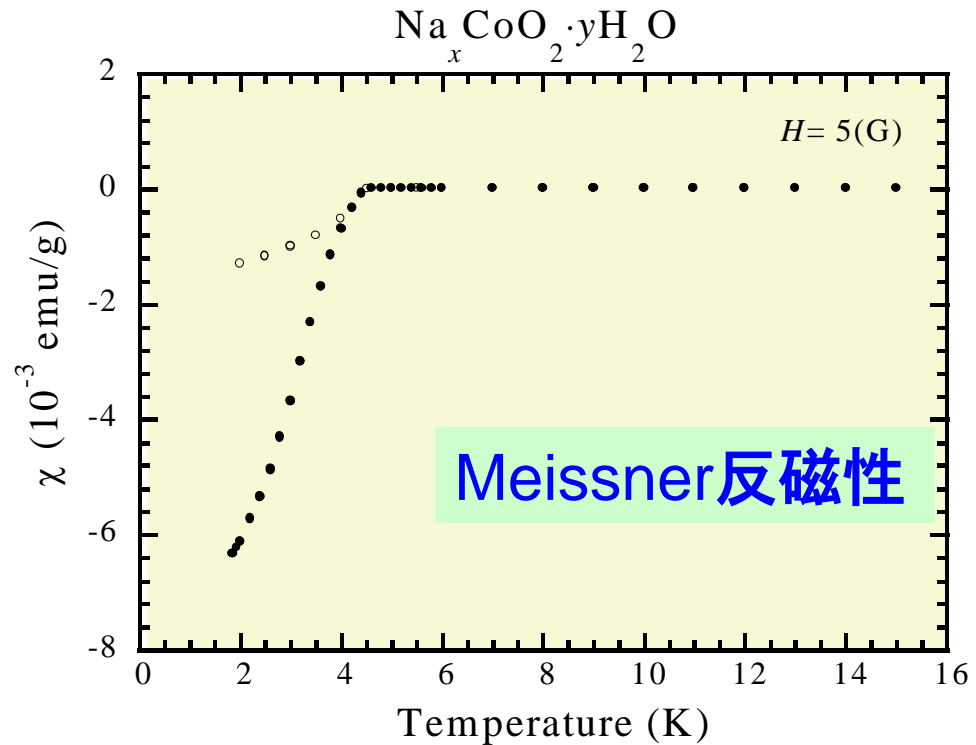
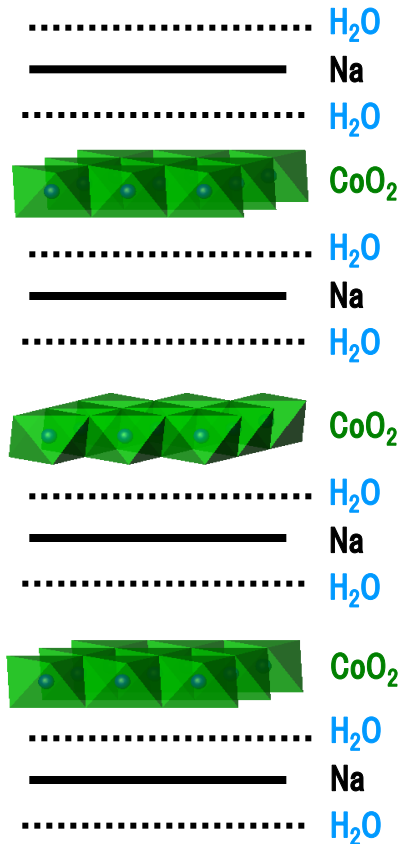


M. Sato



A. Kobayashi *et al.*

(IV) Superconducting State of $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$

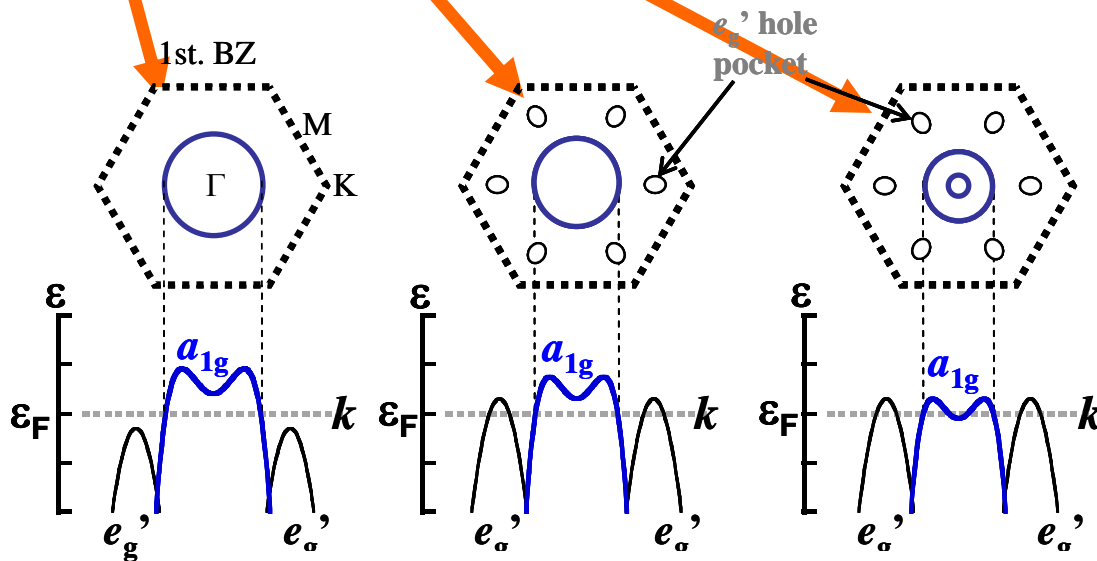


全ての異常な型の超伝導の可能性の指摘があった稀な系

(electron-electron interaction)

- a) d - or $(d_1 + id_2)$ -wave singlet
- b) p - or f -wave triplet
- c) extended s -wave

ペア対称性がバンド構造に敏感



種々のフェルミ面の形状を持つ可能性

Co サイトの結晶場の変化

(electron-phonon interaction)

- d) ordinary s -wave

Experiments

<samples>

polycrystals & single crystals

$\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ & its mother system Na_xCoO_2

<多方面からの実験>

magnetic susceptibilities

specific heats

oxygen isotope effect on T_c

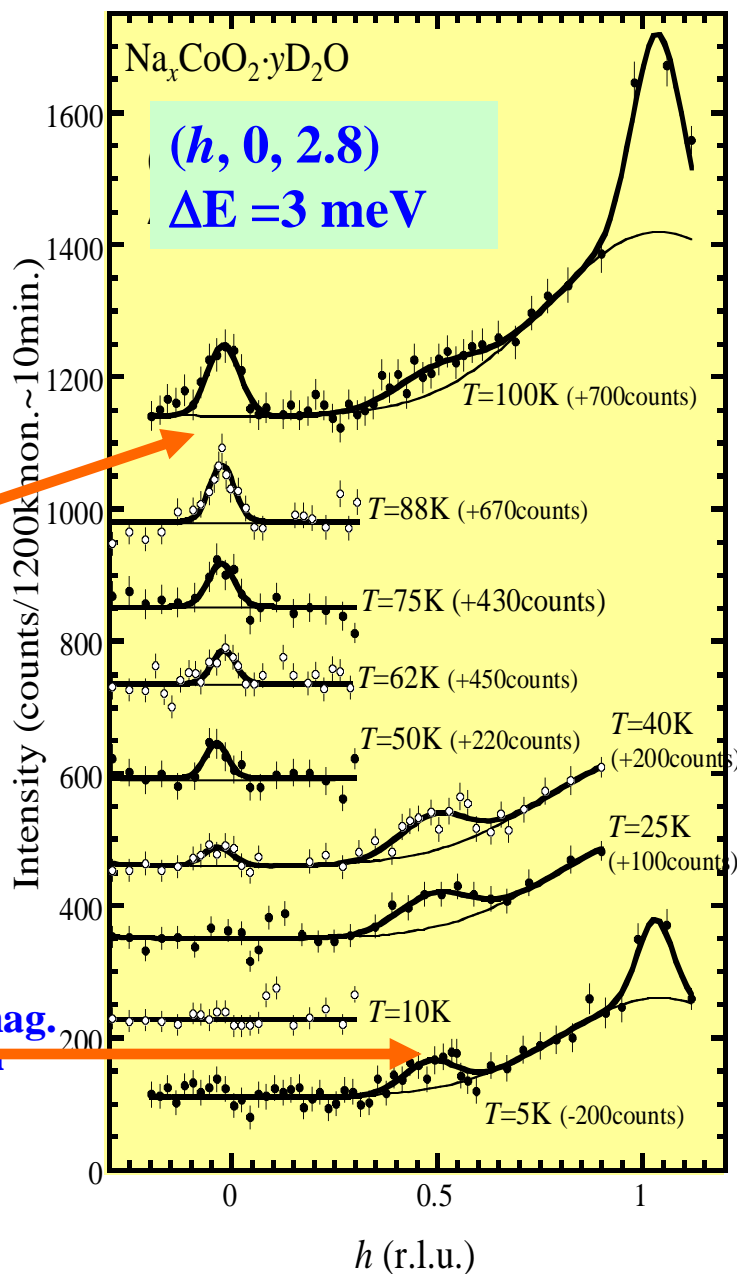
impurity effect on T_c

NMR (Knight shifts, longitudinal relaxation rates)

neutron scattering

broad viewを大切に

磁気励起スペクトル (中性子非弾性散乱)



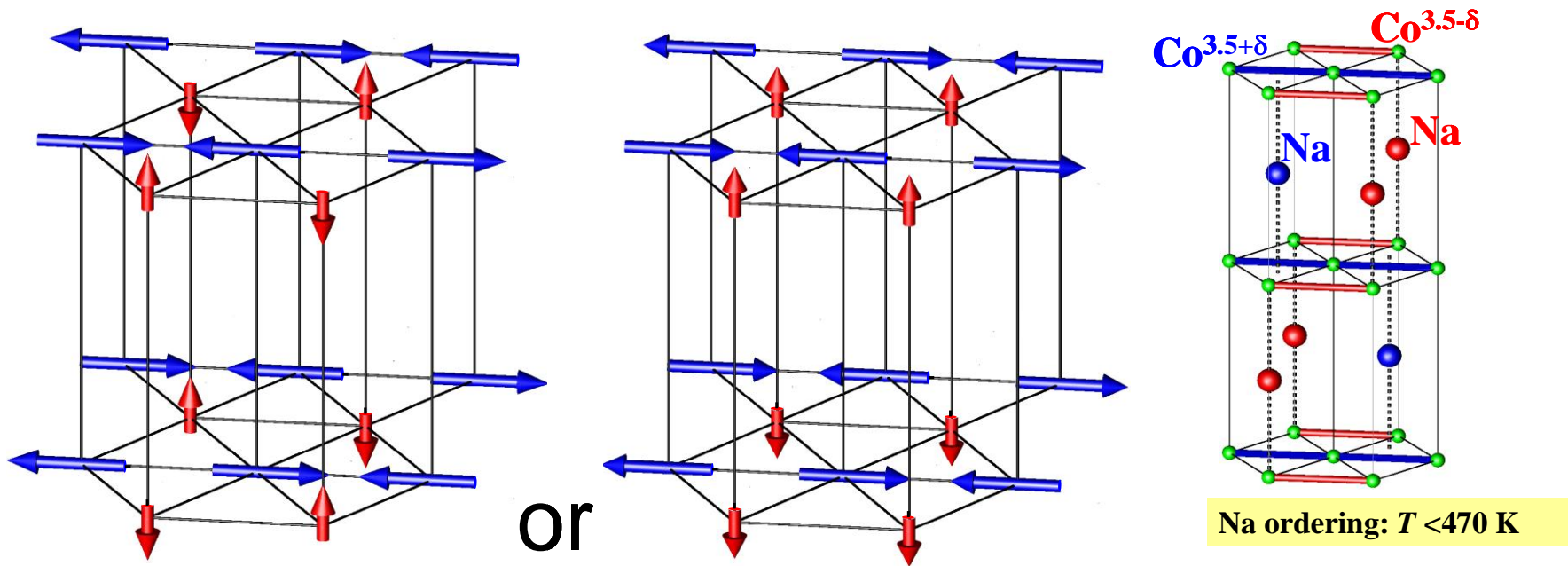
Ferromagnetic fluctuations disappear as T approaches zero.

triplet pairing の可能性を否定
NMR Knight shift も同じ結論

ferromag. fluctuation

antiferromag. fluctuation

magnetic structure of $\text{Na}_{0.5}\text{CoO}_2$

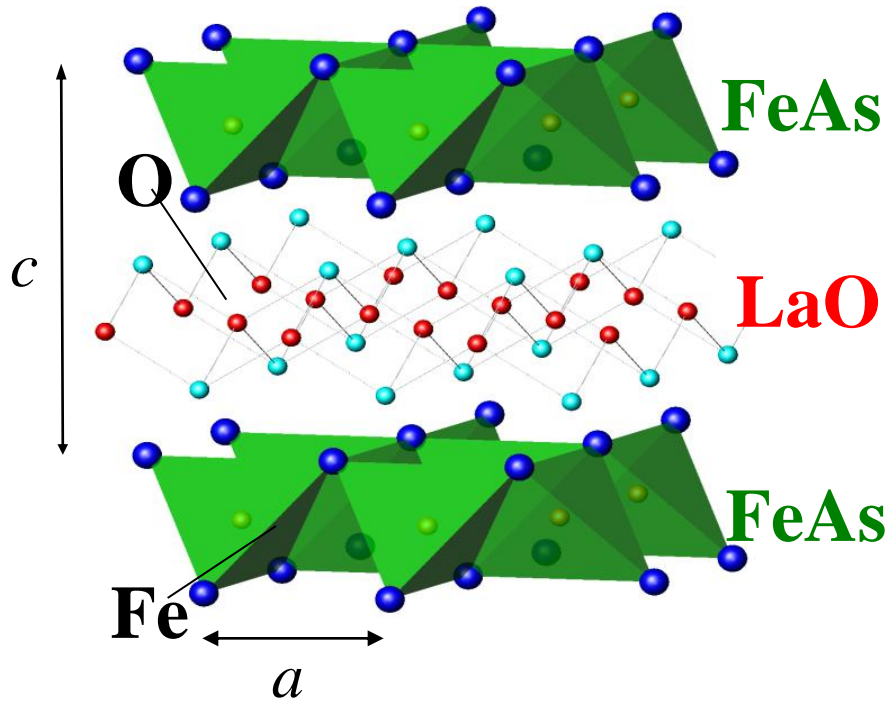


M. Yokoi, M. S. *et al.* JPSJ 74 (2005) 3046.

collaboration of NMR and neutron scattering

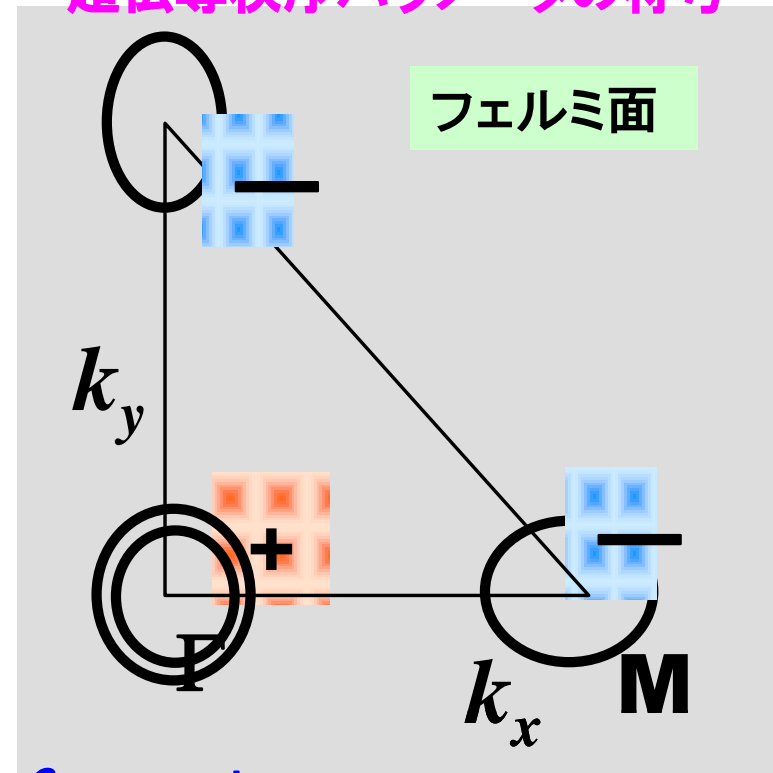
(V) Fe系超伝導体の超伝導機構

$\text{LnFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ (Ln=La, Nd, etc.)



$T_c \text{max} = 55\text{K}$

超伝導秩序パラメータの符号



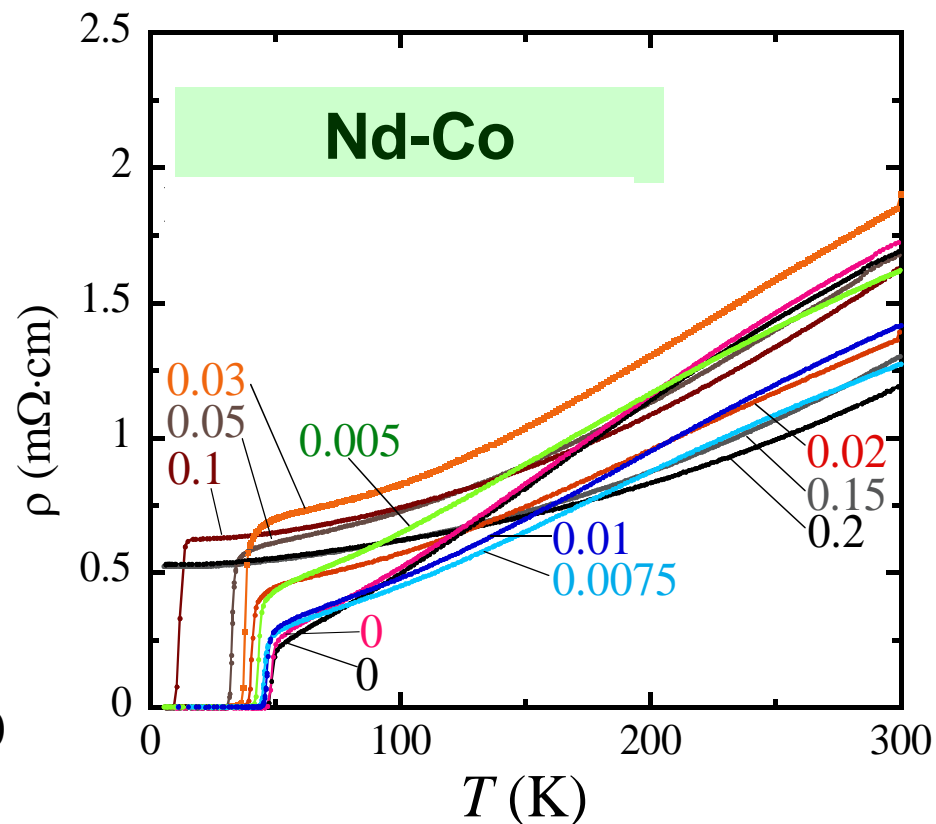
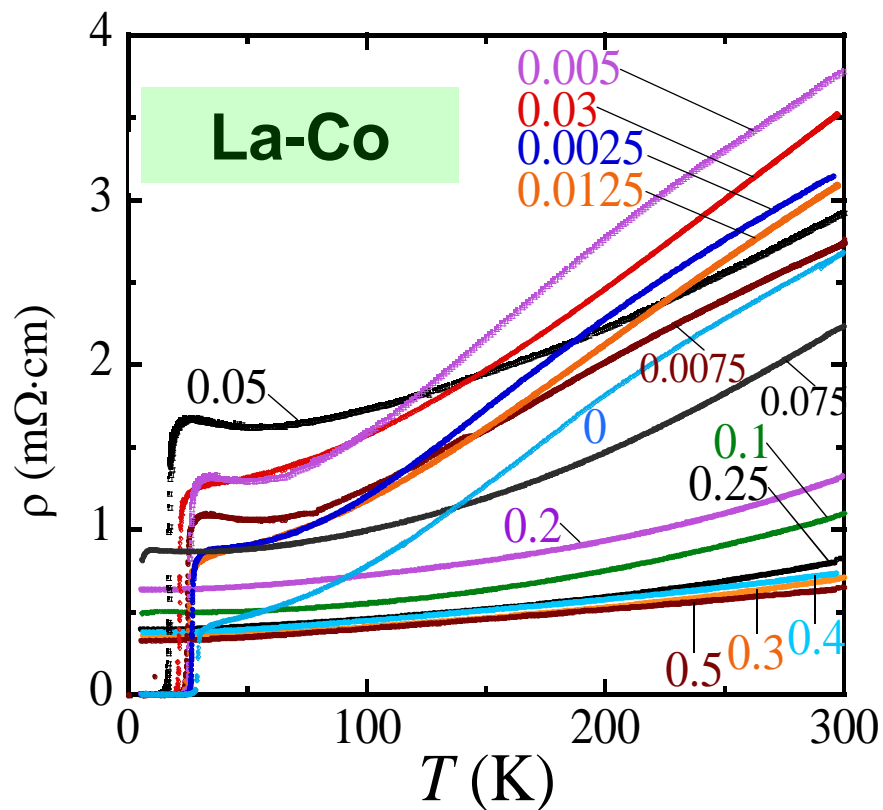
S_{\pm} symmetry:

非磁性不純物によるpair breaking あり

磁氣的機構なら S_{\pm} symmetry, そうでないとき新しい超伝導発現機構

電気抵抗 ρ

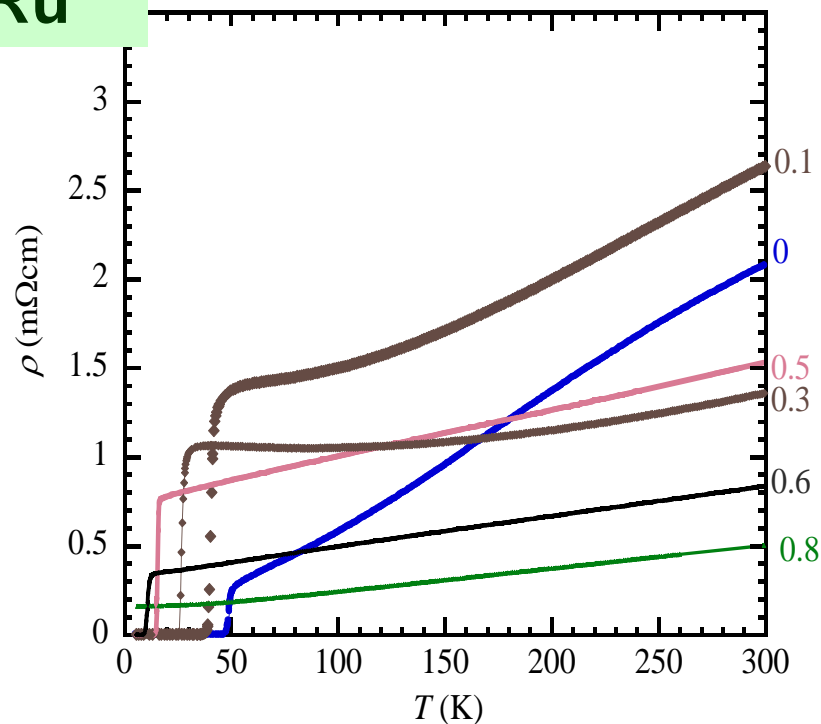
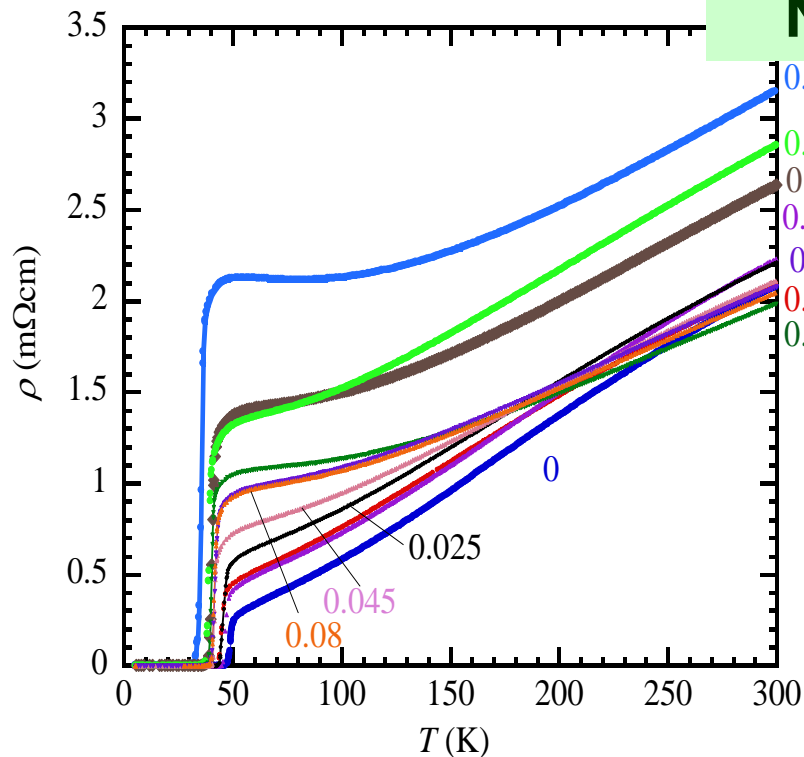
$\text{LnFe}_{1-y}\text{M}_y\text{AsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ (y 変化、電子数変化あり)



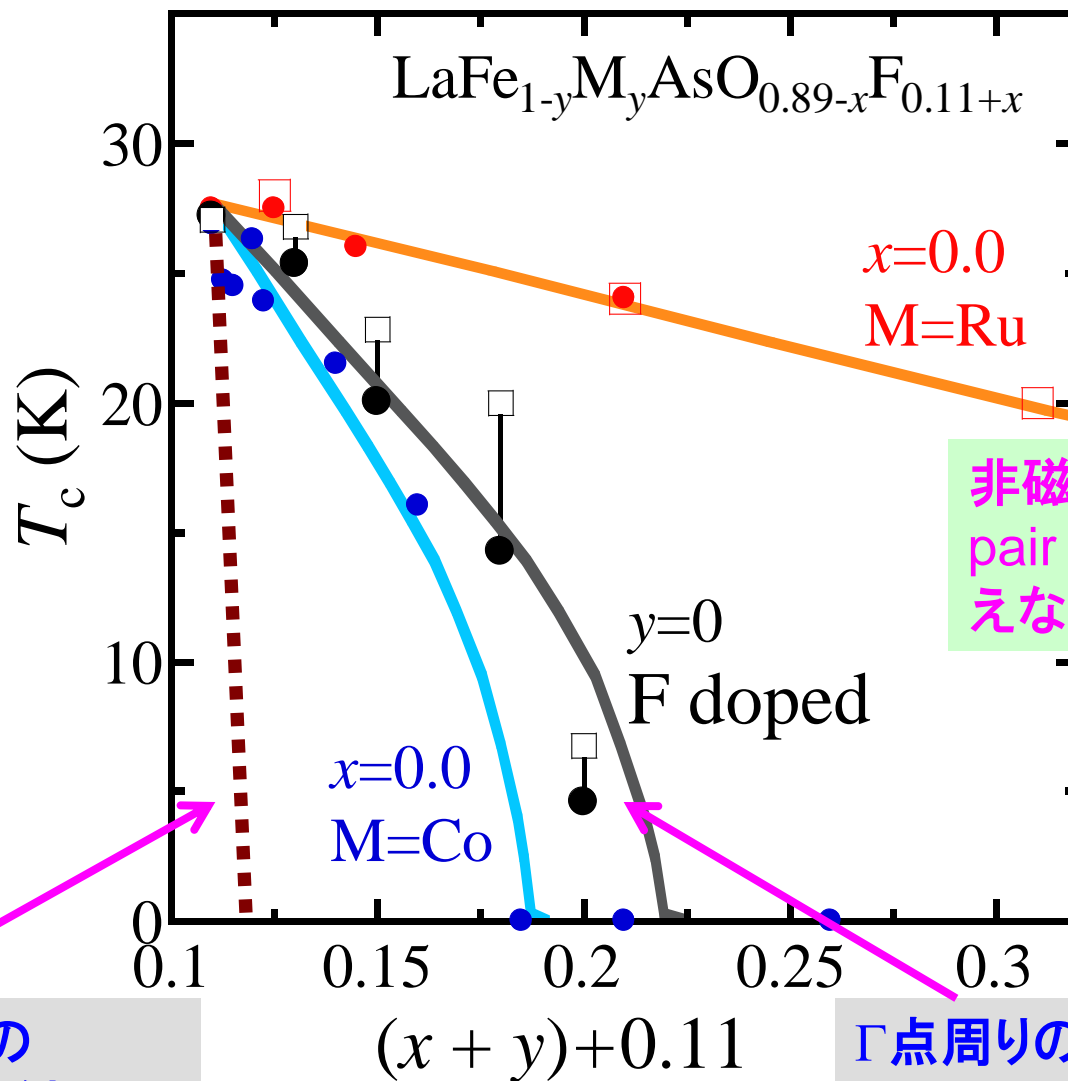
電気抵抗 ρ

$\text{LnFe}_{1-y}\text{M}_y\text{AsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$
(y 変化、電子数変化なし)

Nd-Ru



$y=0.6$ でも超伝導



非磁性不純物Ruの
pair breaking は全く見
えない

非磁性不純物の
pair breaking がある
場合の見積もり

Γ 点周りのフェルミ面が
消える効果でゆっくり
下がる

超伝導発現機構

電子・格子相互作用 — 最もよく知られた通常の機構

磁氣的相互作用 — ここ20年ほど研究され、いきわたった機構

鉄系の超伝導機構が、それらと異なる可能性

oxide conductors [bronze]

Cu oxide superconductors

[pseudo gap, Hall抵抗、磁気励起、
tunneling、stripe、phonon]

clarification and understanding
of the characteristics

[Spin 1/2, Neighborhood of Mott
Insulator phase, low dimensionality]

strong magnetic fluctuation
anomalous metal

frustration

strongly correlated electrons

Low dim. spin systems
spin gap, multiferroic

CaV_4O_9
 $\text{Na}_3\text{Cu}_2\text{SbO}_6$
 CuNb_2O_6
 LiVCuO_4
 LiCu_2O_2
 $\text{Li}_2\text{ZrCuO}_4$

Pyrochlore systems
spin ice & spin liquid

$\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$
 $\text{Hg}_2\text{Cu}_2\text{F}_6\text{S}$
 $\text{Cu}(\text{Co}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{S}_4$
(スピネル)
 $\text{Ag}_2\text{Cu}_2\text{O}_3$

$\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$
 $\text{Co}_3\text{V}_2\text{O}_8$
(kagome stair case)

supercond.
of riangular
lattice

$\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$

$\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ (pyrochlore)
unusual
anomalous Hall
effect

spin glass
 $\text{Fe}_{1-x}\text{Al}_x$

New phenomena of
strongly correlated
electrons

Li_2RuO_3
(honeycomb lattice)
 $\text{La}_4\text{Ru}_6\text{O}_{17}$

spin transition
of Co oxides

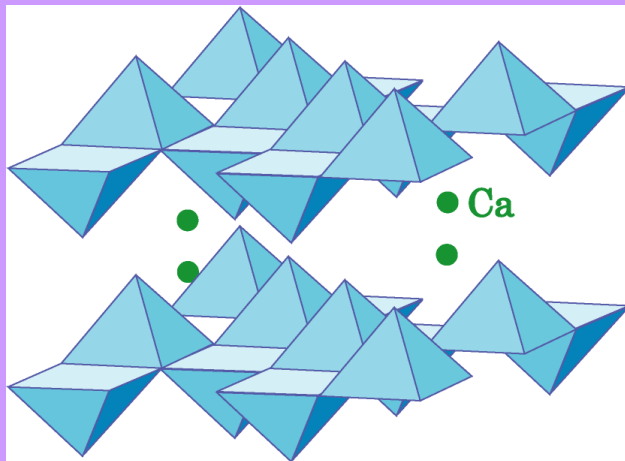
$\text{TbBaCo}_2\text{O}_{5.5}$
 $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$

supercond. of
Fe pnictides

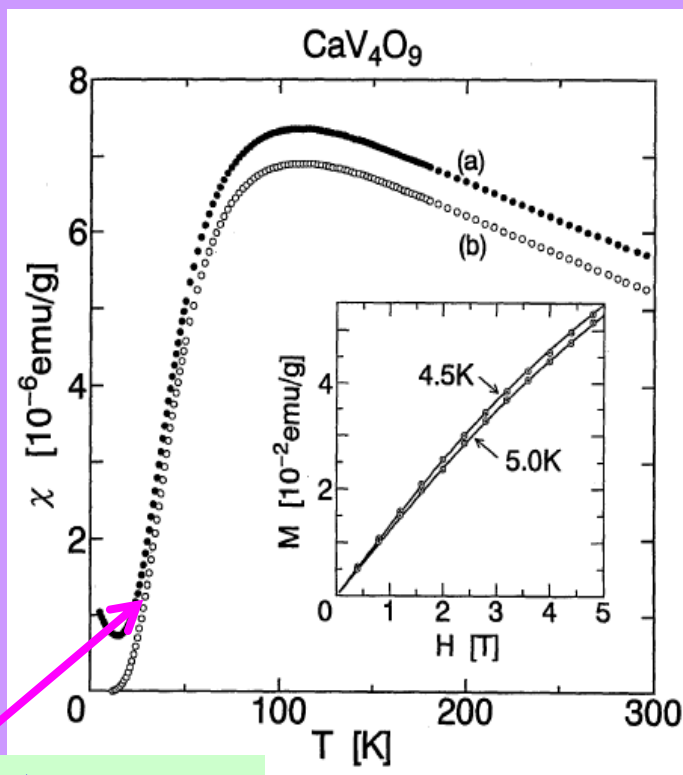
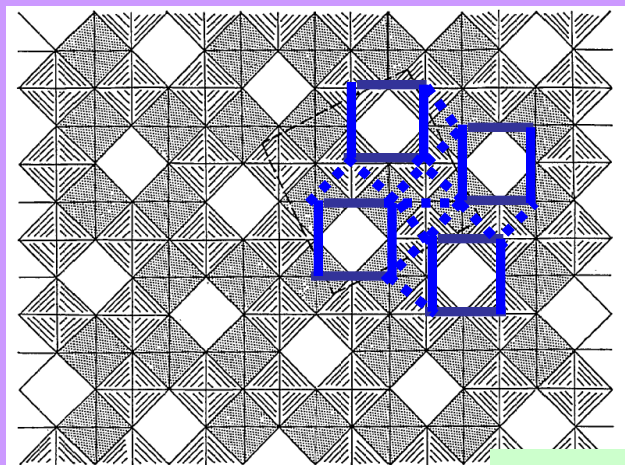
$\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$

(VI) plaquette singlet系 (spin gap系)

CaV_4O_9 (V^{4+} : $s = 1/2$)



上向きと下向きの VO_5
ピラミッドの連結(V^{4+} : $S=1/2$)

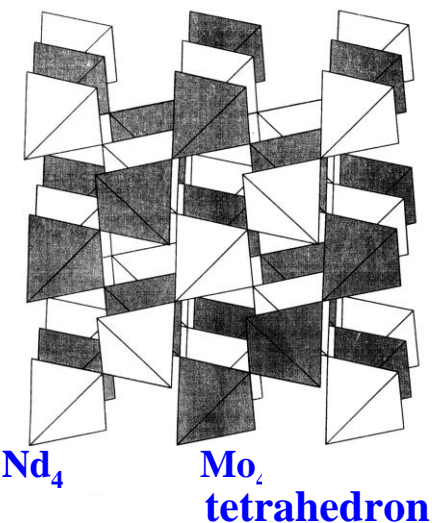


全スピンの消える

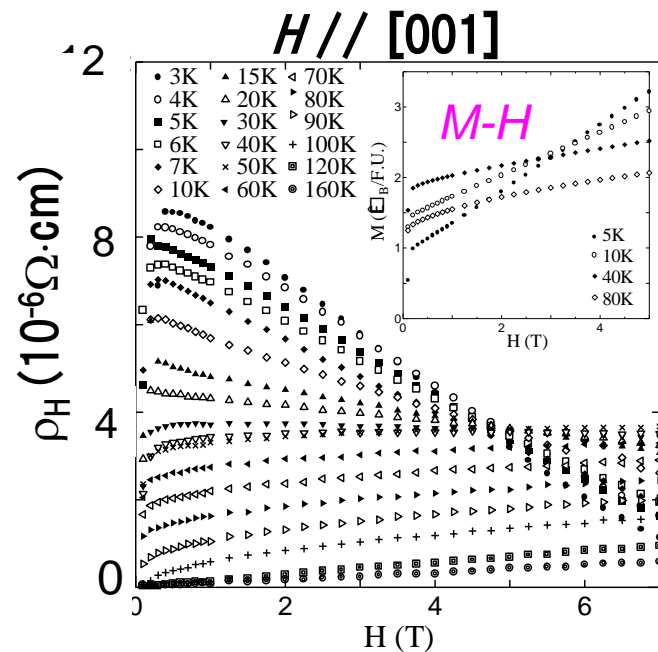
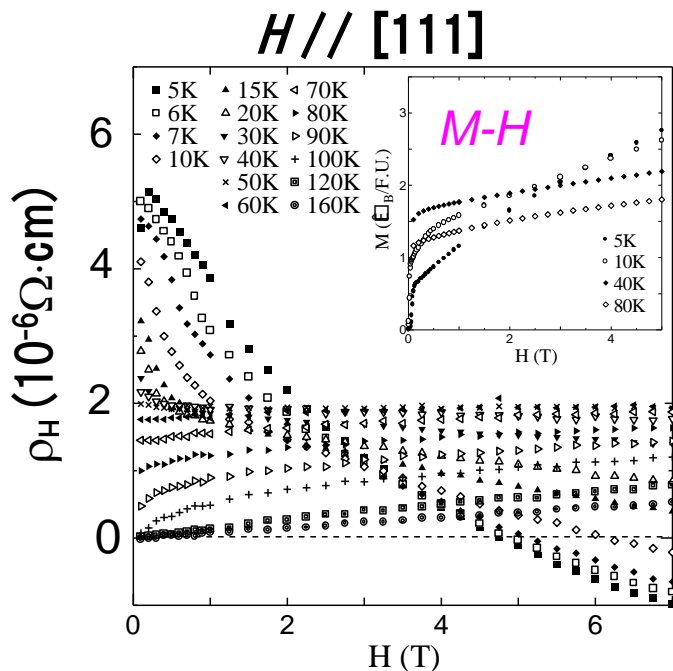
(VII) $\text{Nd}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ - 特異な異常Hall効果 -

通常の異常ホール抵抗 ($\rho_H - R_0 H = 4\pi R_s M$)

機構説明が50年来の課題



$T_c \sim 93 \text{ K}$



$\rho_H - R_0 H = 4\pi R_s M$ が成立しない !!

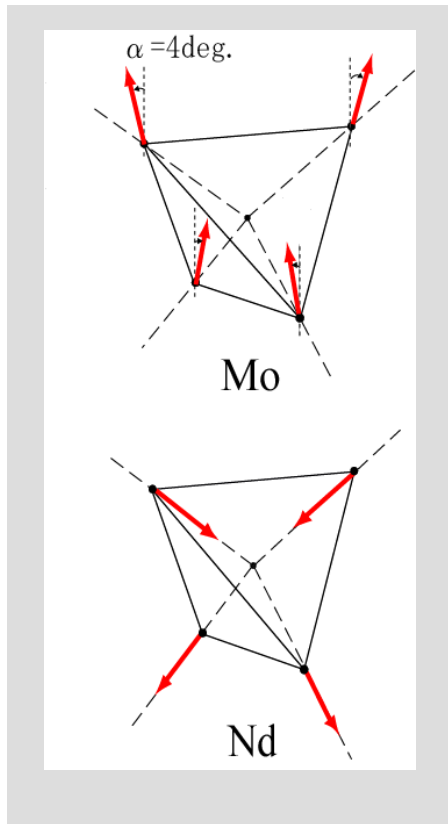
この振舞いの理解が機構説明の大きな手がかりとなる

chirality ($\chi \equiv \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 \times \mathbf{S}_3$) 機構騒ぎ

χ は3個のスピンの張る立体角に比例 (3個のスピンのcoplanarでないとき nonzero)

(i) $\rho_H - R_0 H = 4\pi R_s M_{Mo} + 4\pi R'_s M_{Nd}$ (Sato's group, empirical)

(ii) $\rho_H - R_0 H \propto \chi$ (Nagaosa's group)



この系は特殊な構造に起因して実際に $\chi \neq 0$ となる稀な例

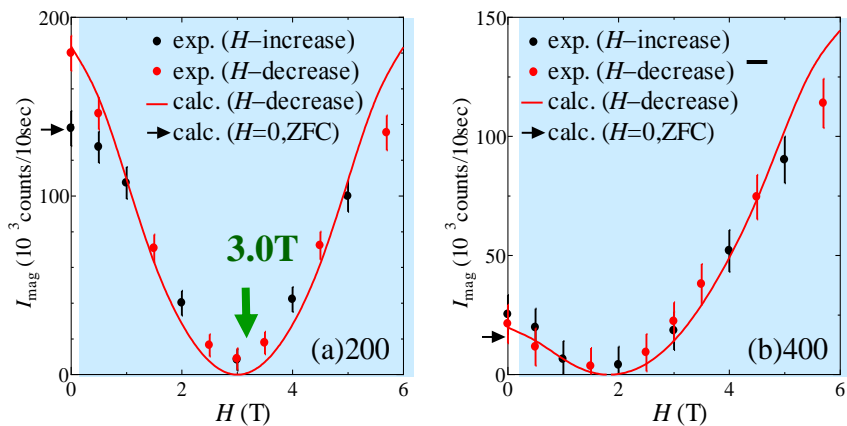
$\rho_H - R_0 H \propto \chi$ か？

磁気構造の磁場変化から χ の磁場変化を求め $\rho_H - R_0 H$ のそれと比較すればよい

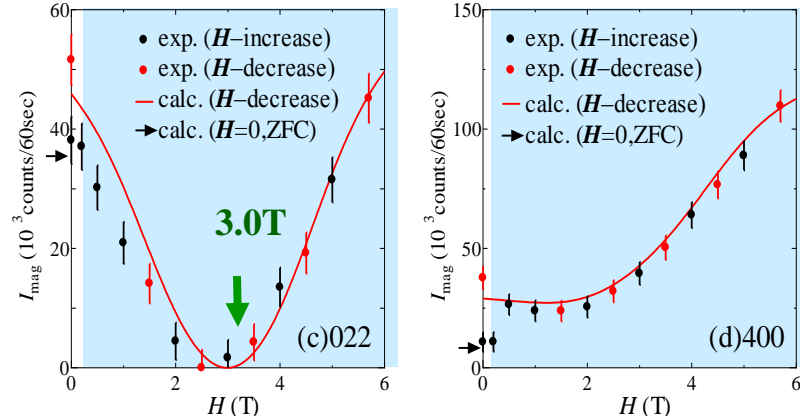
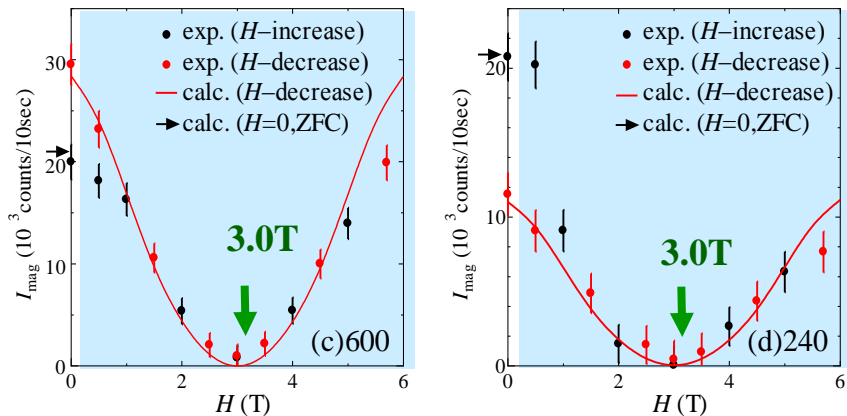
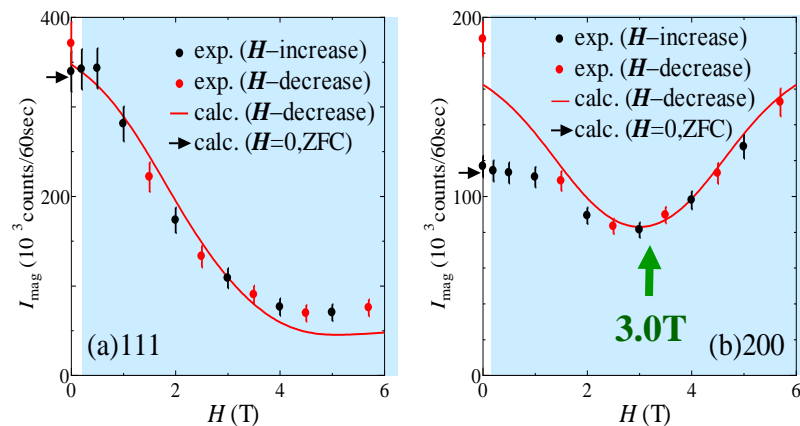
(1) chirality χ ($\equiv \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 \times \mathbf{S}_3$)の磁場依存性を計算する

(← 磁気構造の磁場依存性 ← 中性子散乱)

H -dep. of I_{mag} ($H//[001]$, $T=1.6\text{K}$)



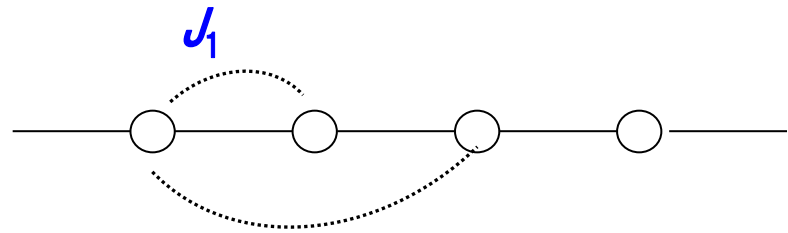
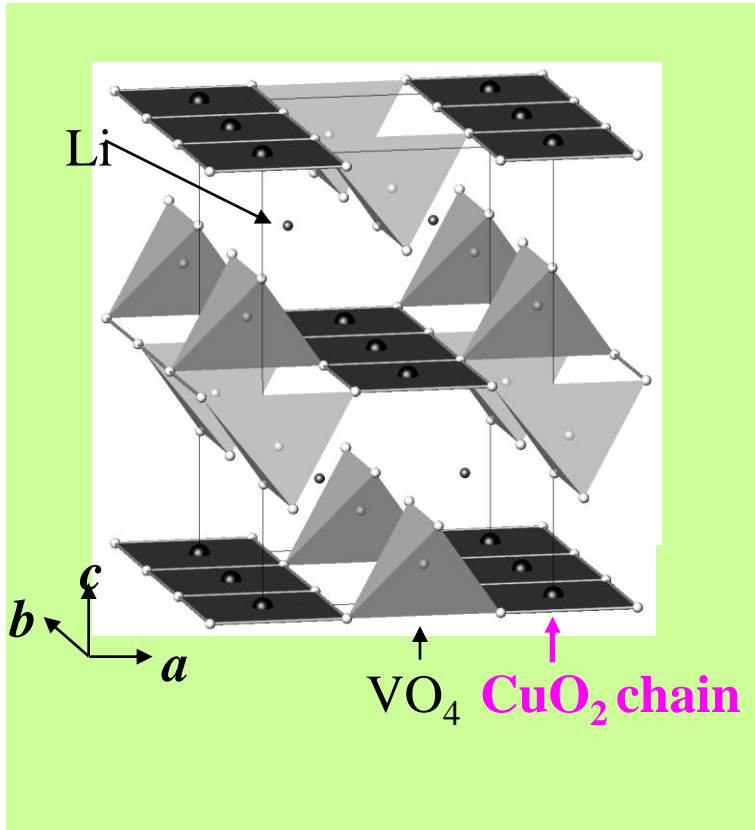
H -dep. of I_{mag} ($H//[011]$, $T=1.6\text{K}$)



→ chiralityモデルの否定 → 新たな理解へつながる
broad viewの重要性

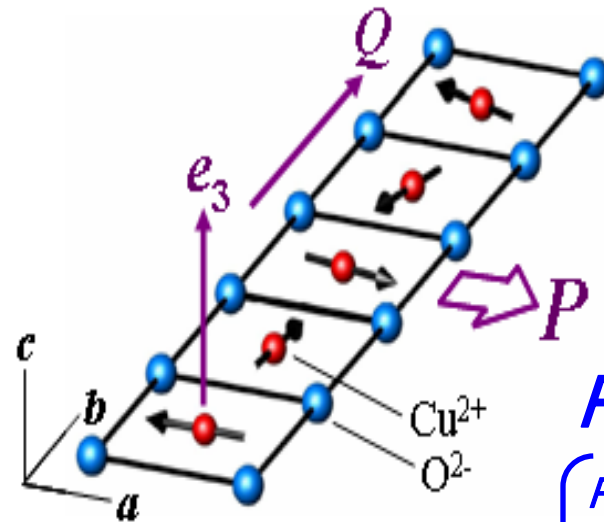
(VIII) 量子スピン系のマルチフェロイック

LiVCuO₄



$J_2 (>0, \text{AF})$

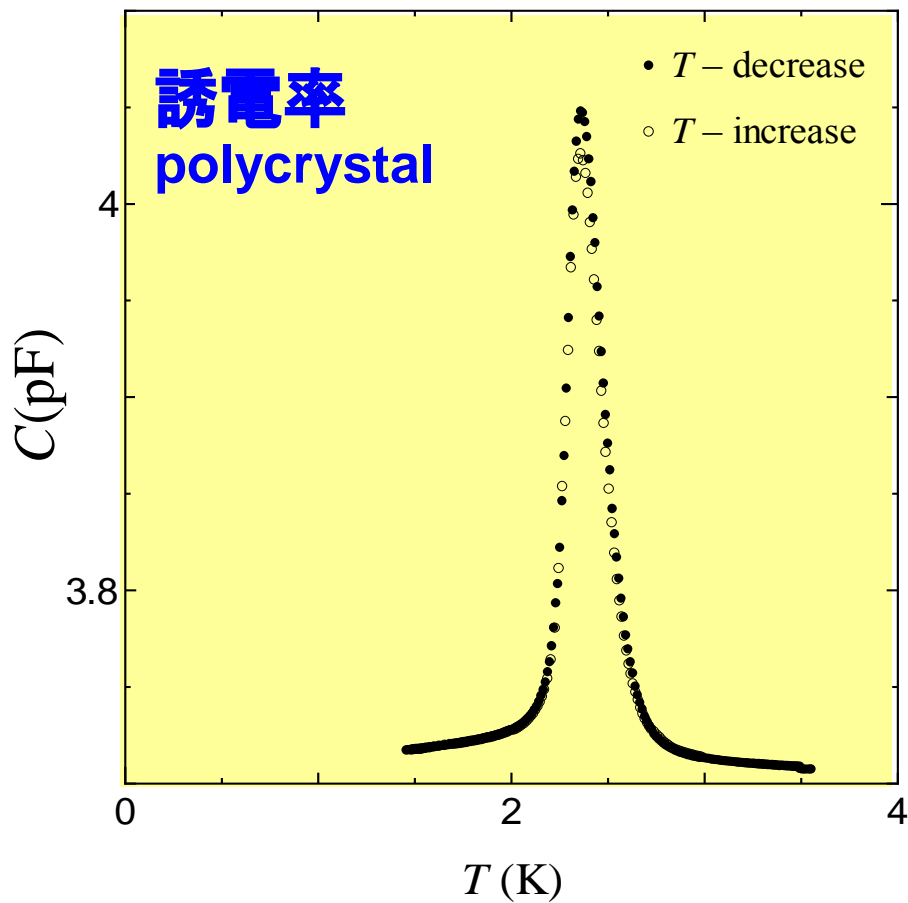
$|J_2 / J_1| > 1/4 \rightarrow$ ヘリカル構造



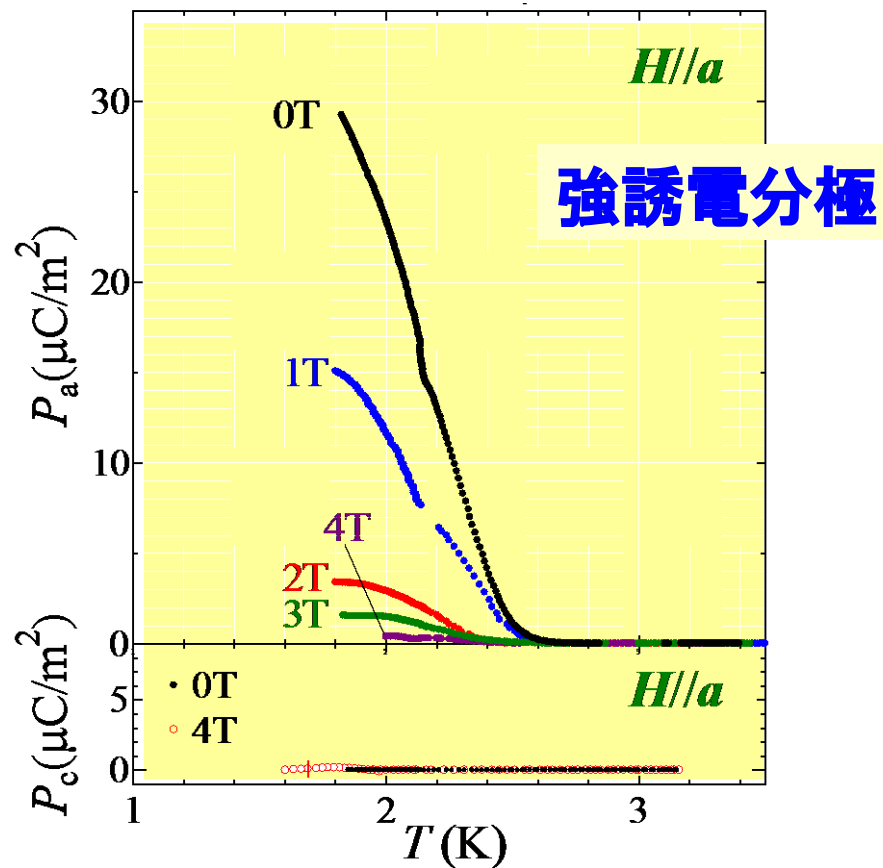
$P \propto Q \times e_3$

P : 自発電気分極
 Q : スピン変調ベクトル
 e_3 : ヘリカル軸

LiVCuO₄



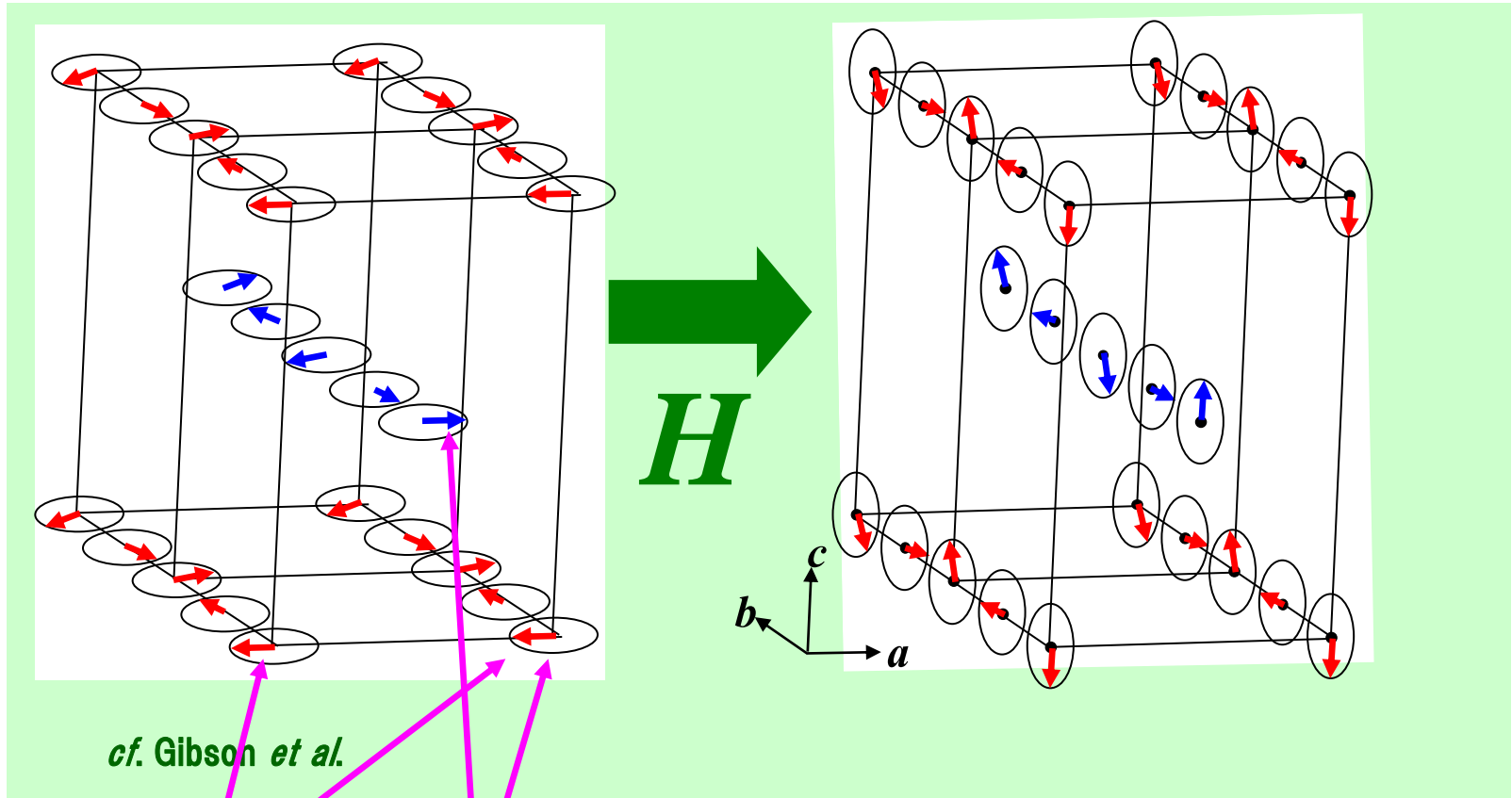
LiVCuO₄



under magnetic field H

H-dep. of magnetic structure

Spin Flop



cf. Gibson et al.

in-phase

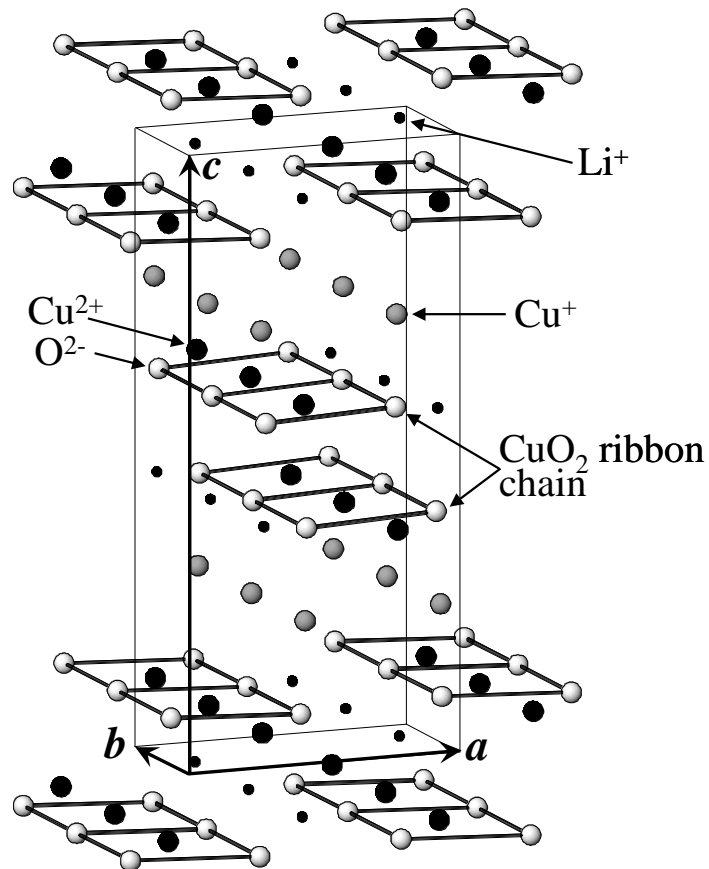
anti-phase

ab -plane helical structure

$Q \sim 0.466 b^*$ ($\phi \sim 84^\circ$)

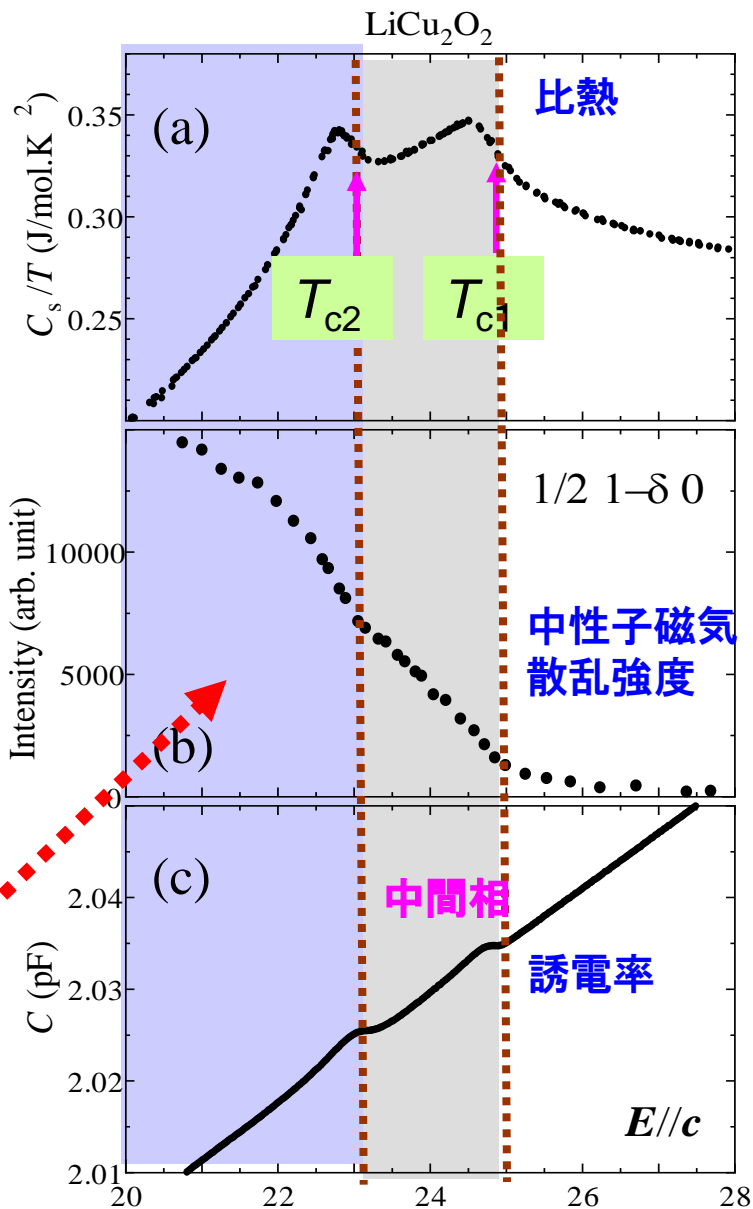
$\mu = 0.25(\pm 0.03)\mu_B$

LiCu₂O₂



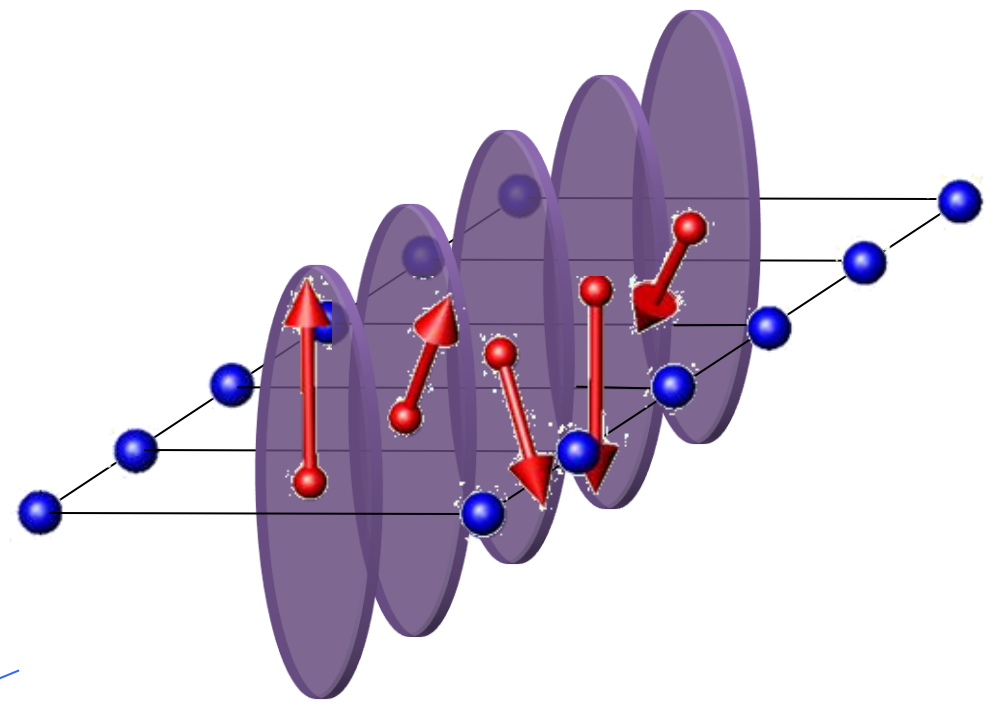
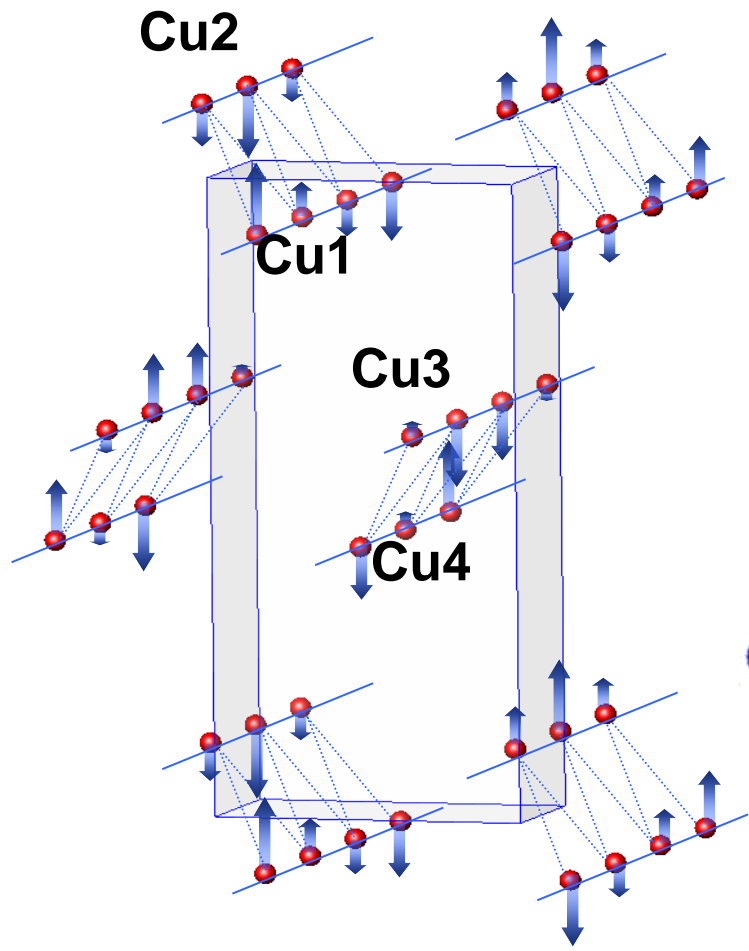
マルチ
フェロイック相

2つの磁気転移



$T_{c2} < T < T_{c1}$ sinusoidal

$T < T_{c2}$ helical

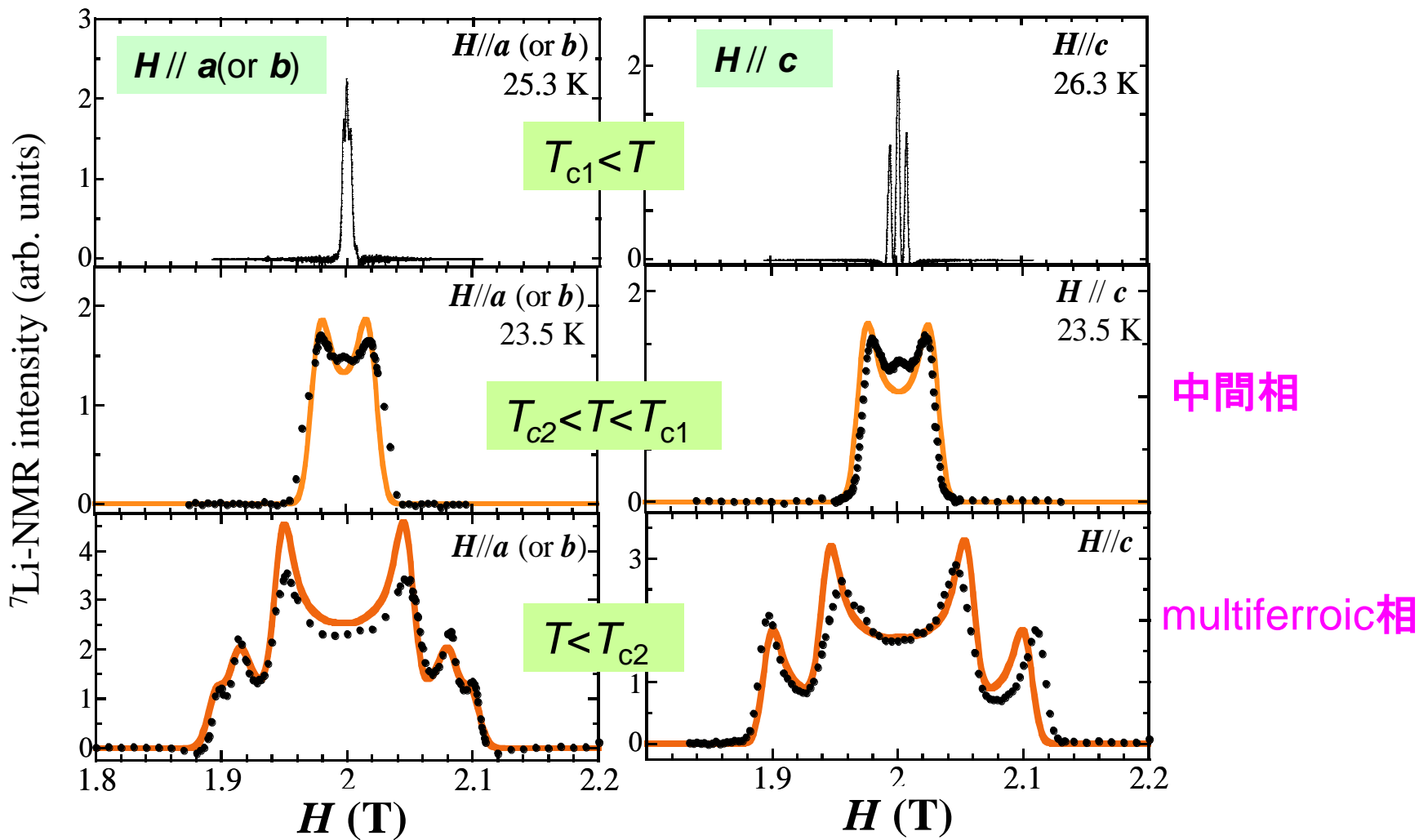


ユニットセルに4本のチェーン
sin波の相対位相も決まる

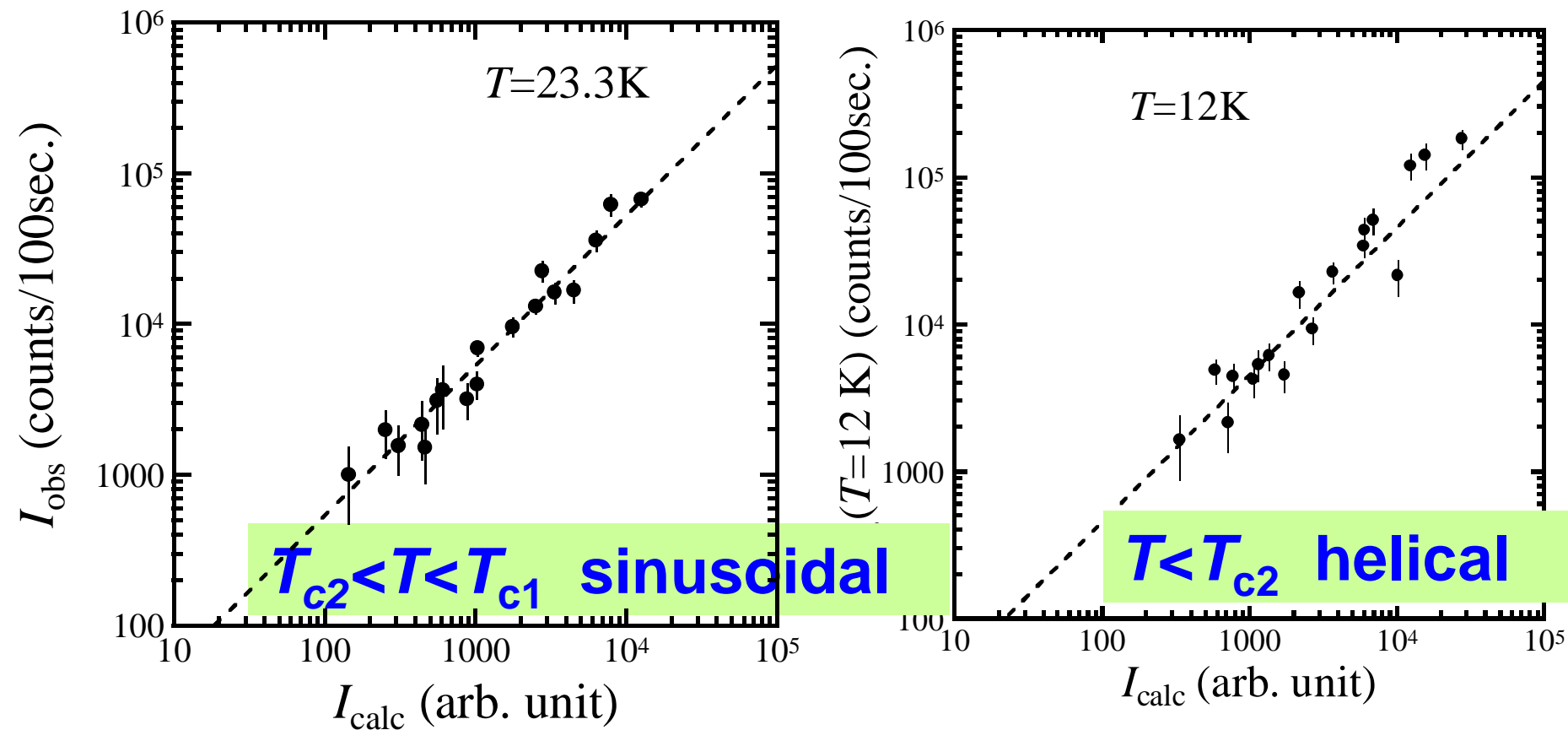
4本のチェーンの相対位相は左図と同じ

NMR + neutron scattering

使用データ(I): Li-NMR spectra against H (T)



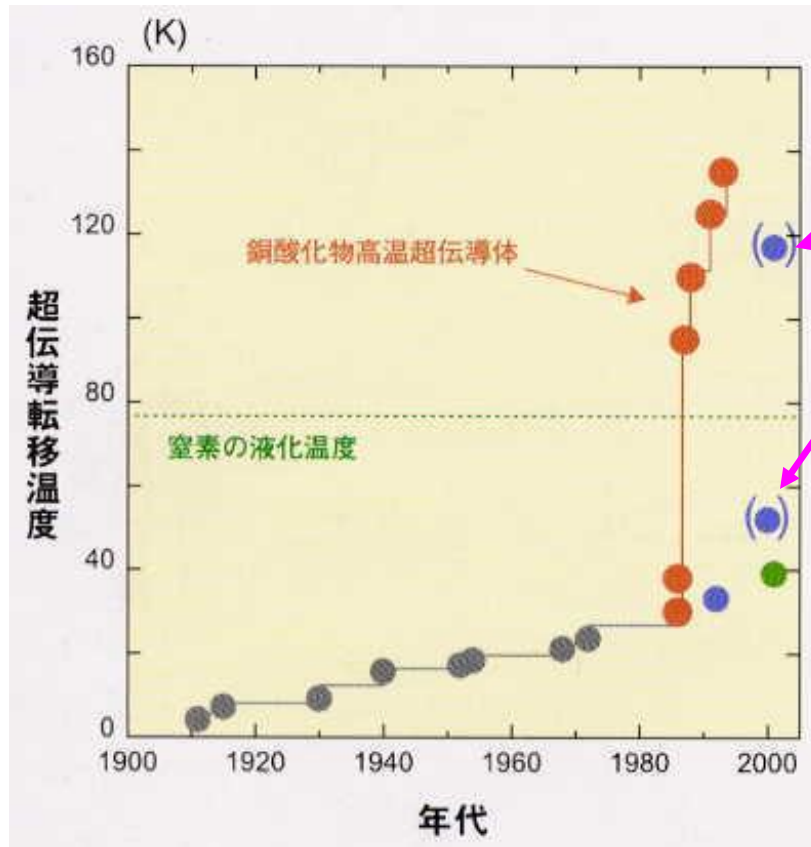
使用データ(II): 中性子回折



観測強度 ~ 計算強度

broad view

“キャッチフレーズ”に踊らされない判断



C_{60}

まやかし (guilty)

innocentでないもの多数

研究・教育

(これまでの研究室スタッフ、撮影年不詳)



小野田雅重



世良正文



社本真一



小林義明



原科浩



安井幸夫

研究・教育 (来し方)

・己の教育責任の直視 (鐘を毀たんとするものの故事)

男なり、なすべきことはなし果てむ、今日もこの語にいきすがりぬる (牧水)

剣太刀いよよ研ぐべし、いにしえゆ、清らけくこそ負ひしその名ぞ (家持)

- ・学生との思いやりのある緊張関係
- ・学生のためは自分のため、自分のためは学生のため
- ・知の探究者としてともに戦う学生こそ

(博士学位取得者)

松田祐司、社本真一、近藤新二、福田憲司、田中秀吉、原科浩、西川崇、上田英二、
樹神克明、武田淳、安井幸夫、深町俊彦、金田昌基、安倍誠、宮下健、伊藤雅典、
飯久保智、影山健友、左右田稔、藤田利晃、植松大輔、横井麻衣、茂吉武人、
三浦陽子

以上24名

(同数を越えるMC卒業生)

彼らからもらった元気は測り知れない

名古屋 高等教育 研究

第8号
2008年3月

Nagoya Journal of Higher Education

このジャーナルがめざすもの 編集委員会

【特集-大学院教育におけるコースワークの位置と役割】

特集の趣旨 夏目 達也

大学院教育を考える 吉田 俊和

—教育発達科学研究科 心理発達科学専攻—

経済学研究科のカリキュラム改革と期待される教育効果について 荒山 裕行

“Disorder by Information”時代の大学院科学教育 佐藤 正俊

名古屋大学工学研究科の大学院教育—現状と課題— 早川 義一

名古屋大学環境学研究科における文理連携型コースワーク 山口 靖

—体系理解科目の改革例—

【研究論稿】

社会人大学院生を対象とする研究方法論の授業実践 近田 政博

フランスにおける大学院教育制度整備の現状と課題 夏目 達也

米国における大学院生向け研究倫理教育コースの設計 齋藤 芳子

近代ドイツの大学における「学修の手引き」 藤井 基貴

—ケーニヒスベルク大学哲学部に注目して—

【特別寄稿】

学際的カリキュラムの陥穽 吉田 文

—人文・社会系学部学士課程カリキュラム—

ラーニング・アウトカムズを重視した大学教育改革の 川端 太津夫

国際的動向と我が国への示唆

アメリカの大学におけるTA養成制度と 吉良 直

大学教員準備プログラムの現状と課題

Toward Excellence in Graduate Education: Gerald W. Fry

A Mixed Methods and Interdisciplinary Study

The Situation of Post-Graduate Formation in Germany Marianne Merkt

and New Tasks for Higher Education Centers in it

【英文要旨】

名古屋大学
高等教育研究センター

“Disorder by Information” 時代の大学院科学教育

佐藤 正 俊

名古屋高等教育研究
第8号 (2008年) 抜刷

熟田津に船乗りせむと月待てば、

潮もかなひぬ今は漕ぎ出でな