

謎の粒子ミュオン —その意外な素顔—

ミュオンが拓く物質科学

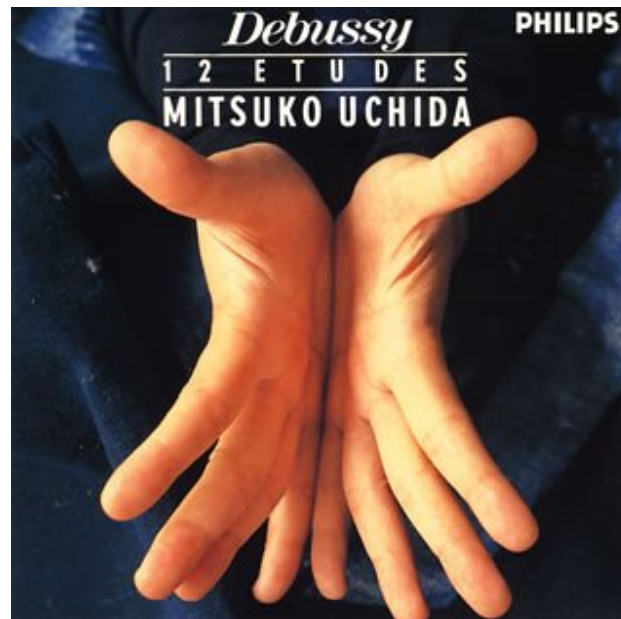
高エネ機構・物構研/総研大
門野良典

目次

- パリティー鏡の中の世界
- ミュオン—Who ordered that?!
- 第三の量子ビーム「ミュオン」
- ミュオンスピン回転法による磁性・超伝導研究

パリティ—鏡の中の世界

自然は対称が好き？／「右」と「左」とは？



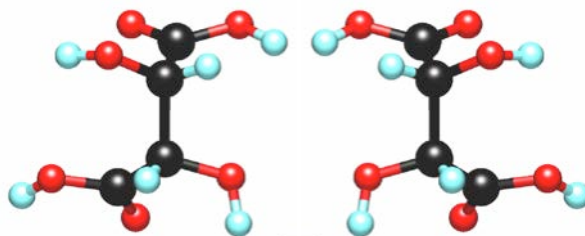
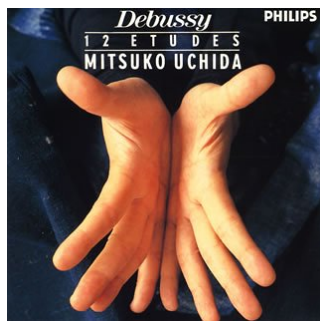
Q: 鏡に映ると左右は入れ替わるのになぜ上下は入れ替わらないのか？



「鏡の国のアリス」より

Chirality (キラリティ、カイラリティ)

- 鏡映像と元の像が重ならない



区別するための概念: 右手・左手 / 右巻き・左巻き

Q: 宇宙人にどうやって「右」と「左」の概念を伝えるか？

「オズマ問題」(M.ガードナー著、"The Ambidextrous Universe")



「オズマ計画」
1960年代に米国の電
波天文台で始まった地球
外生命探査計画:

児童文学作品「オズの魔法
使い」の中でオズマ姫が遠
い仮想上の国オズと電波で
連絡を取ろうとする挿話に
由来。

Q: 宇宙人にどうやって「右」と「左」の概念を伝えるか？

「オズマ問題」(M.ガードナー著、"The Ambidextrous Universe")

A: 自然法則(宇宙人の世界と共通)で左右**非**対称なものがあればよい。

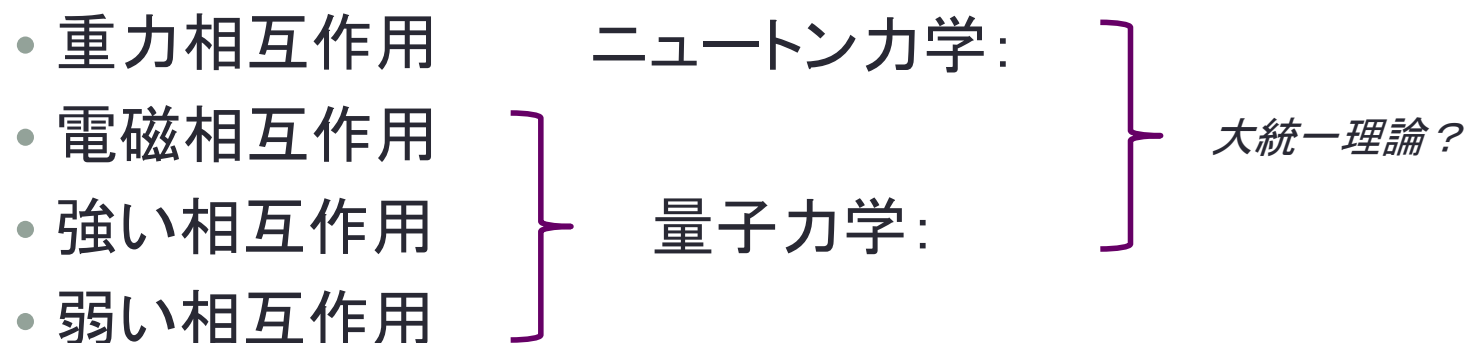


- 重力相互作用(ニュートン力学)は左右(空間)について対称。
- 生物由来のもの→左右どちらも同じ確率で存在し得る(遺伝による選択は環境によって異なる)。
- 電磁相互作用→左右を区別できる(フレミングの法則、磁石のS/Nなど)。ただしどちらか一方を「右」と決めるのは人間。
- 分子(光学異性体など)→「不斉合成」では元になるキラル分子(右／左は人の手で決める)を必要とする。



Q: そもそも自然法則は左右対称か？

自然界を支配する4つの力



力学という相互作用の枠組みはいずれも左右(空間)について対称。
→つまり「パリティ」(鏡映対称性)という保存量がある？

A. Yes!...1956年までの物理学者のコンセンサス

ミュオン – “Who ordered that!?”

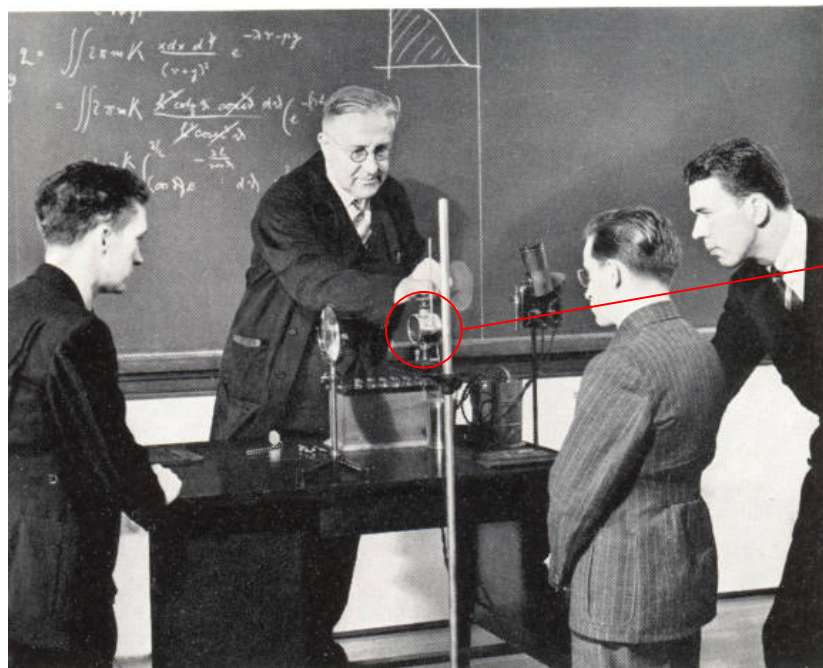
素粒子の世界／なぜミュオンは存在する？

宇宙線の発見



Victor Francis Hess (1883–1964)
Nobel Prize in Physics, 1936

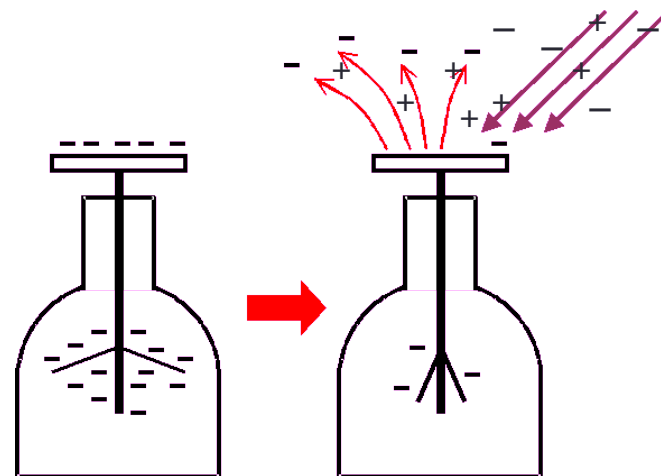
どうやって放射線を測る？



学生に放射線検出装置を実演中のHess博士



はく検電器



気球による電離放射線の観測

当時の常識:

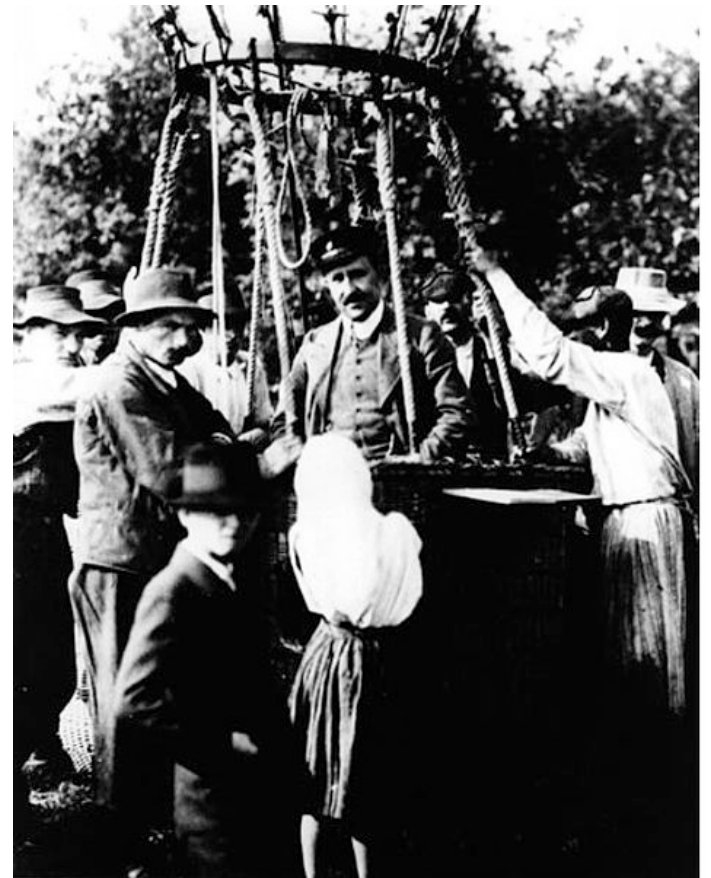
電離放射線は、地表付近の放射性物質から来るもの。→地表から遠ざかるほど放射線レベルは低いはず。

実験:

精度を上げた検出装置を伴って気球に乗船、高度5.3 kmまでの高さにわたり放射線のレベルを測定。

結果:

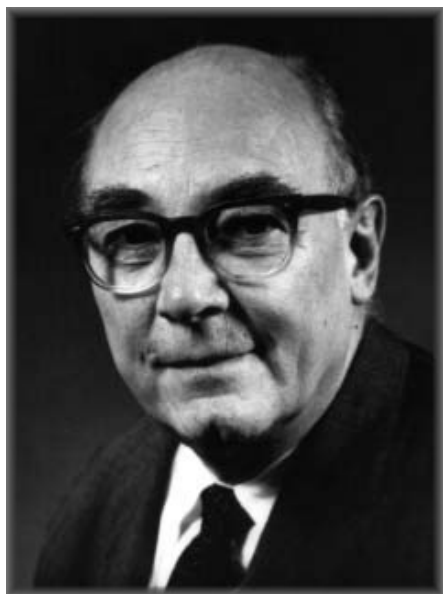
高度が上がるほど放射線強度が上昇。
自然放射線は宇宙から来る！



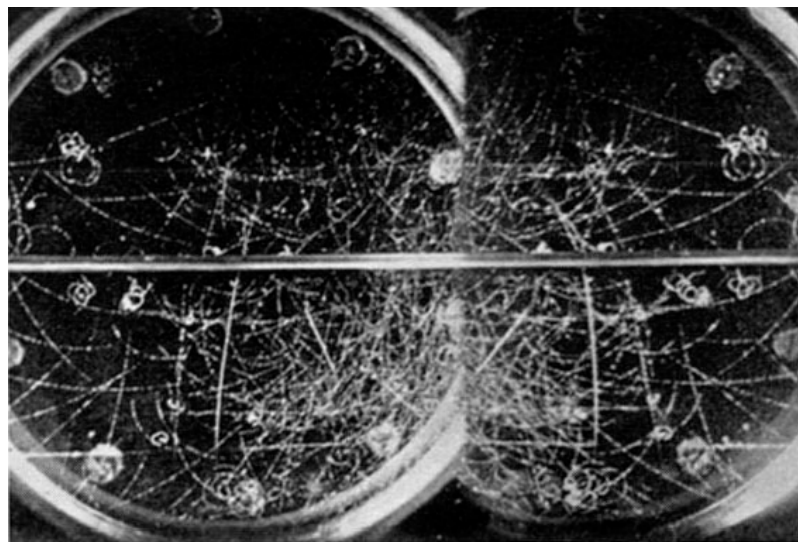
気球観測(1911~1912年)

陽電子と”Mesotron”の発見

C.D.アンダーソン(陽電子の発見者)とS.ネッダーマイヤー(当時大学院生)は電子の約200倍の質量を持った粒子を宇宙線の中で発見(1936年)→「メソトン」と命名



Carl D. Anderson (1905–1991)
Nobel Prize in Physics, 1936

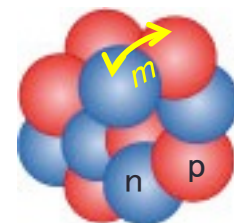


磁場中に置かれた霧箱中で電子よりも緩やかに曲がる荷電粒子が「メソトン」

陽電子と”Mesotron”の発見

メソトロン発見に先立って、湯川秀樹は核力(強い相互作用)を説明する粒子＝中間子の予言を発表していた(1935年)

クーロン相互作用＝光子のやり取り
→強い相互作用＝「中間子」のやり取り



$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \sim 6.6 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$$

ハイゼンベルグの不確定性原理
 \hbar = プランク定数 / 2π

$$\frac{\text{核子間の距離} (\sim 2 \times 10^{-15} \text{ m})}{\text{光速} (3 \times 10^8 \text{ m/s})} \sim 6.6 \times 10^{-24} \text{ s}$$

$$\rightarrow \Delta E = \hbar / \Delta t \sim 100 \text{ MeV}$$

$$\therefore \text{中間子の重さ} \sim 100 \text{ MeV}/c^2 (\sim 200 m_e)$$



湯川秀樹(1907–1981)
Nobel Prize in Physics, 1949

Cf. 最初の新粒子「陽電子」はP.M. ディラックが予言(1928年)

メソトロンは湯川秀樹の「中間子」？

B.ロッシは、大気中と物質中での吸収(消失)割合の違いから、メソトロンが**平均寿命2.4(3)マイクロ秒**で崩壊する不安定粒子であることを示した。(1941年)

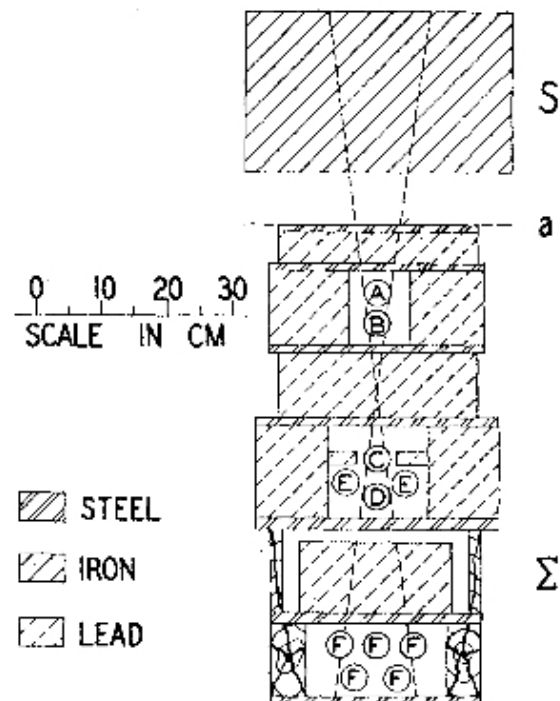


Bruno Rossi(1905–1993)

平均寿命が長過ぎる！
(核子と相互作用しない)
→中間子ではない！

ミュオンと命名

→真空管回路により、複数の検出器が同時に信号を出すかどうかで真の信号とバックグラウンドを分ける「同時計数法」(coincidence)を開発・応用



謎の新粒子「ミュオン」の発見

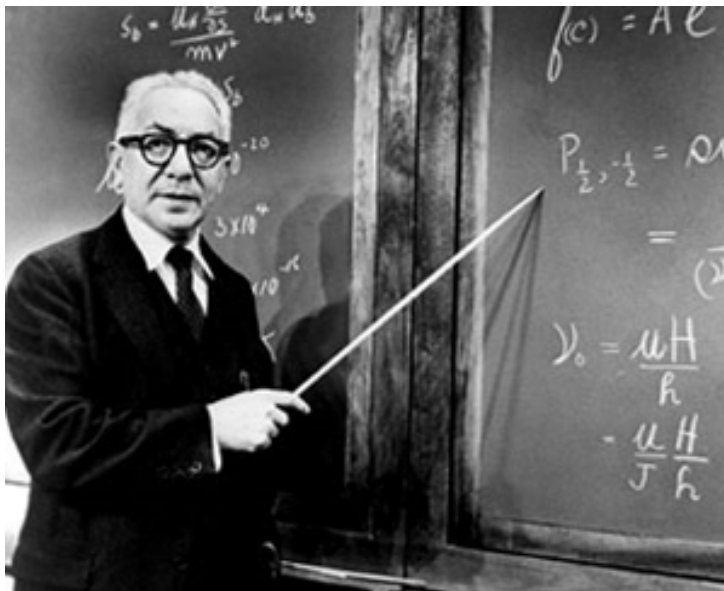
それまで知られていた「素粒子」＝陽子／中性子、電子／陽電子、光子

これらだけで世界はなりたっていたれば物理学者はhappyだった…

誰も予想しないミュオンの発見の報に接したI.I. ラビの言葉：

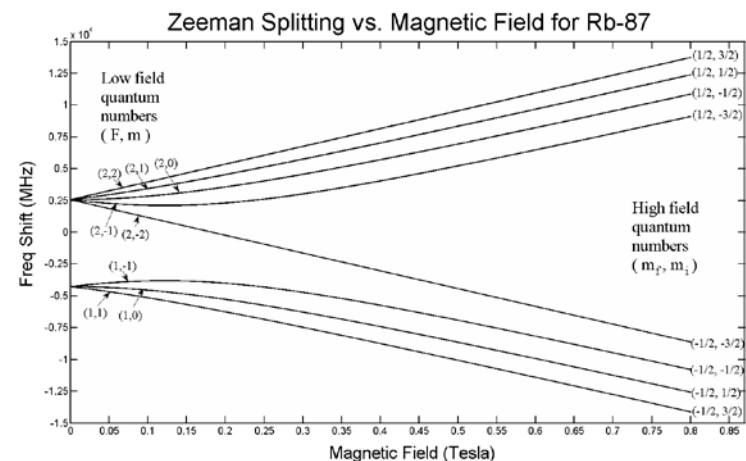
Who ordered that!? (だれがそんなものを注文したのかね?)

(ちょうど中華料理店で食事中だった。)



I.I. Rabi (1898–1988)
Nobel Prize in Physics, 1944

核磁気共鳴の開拓者

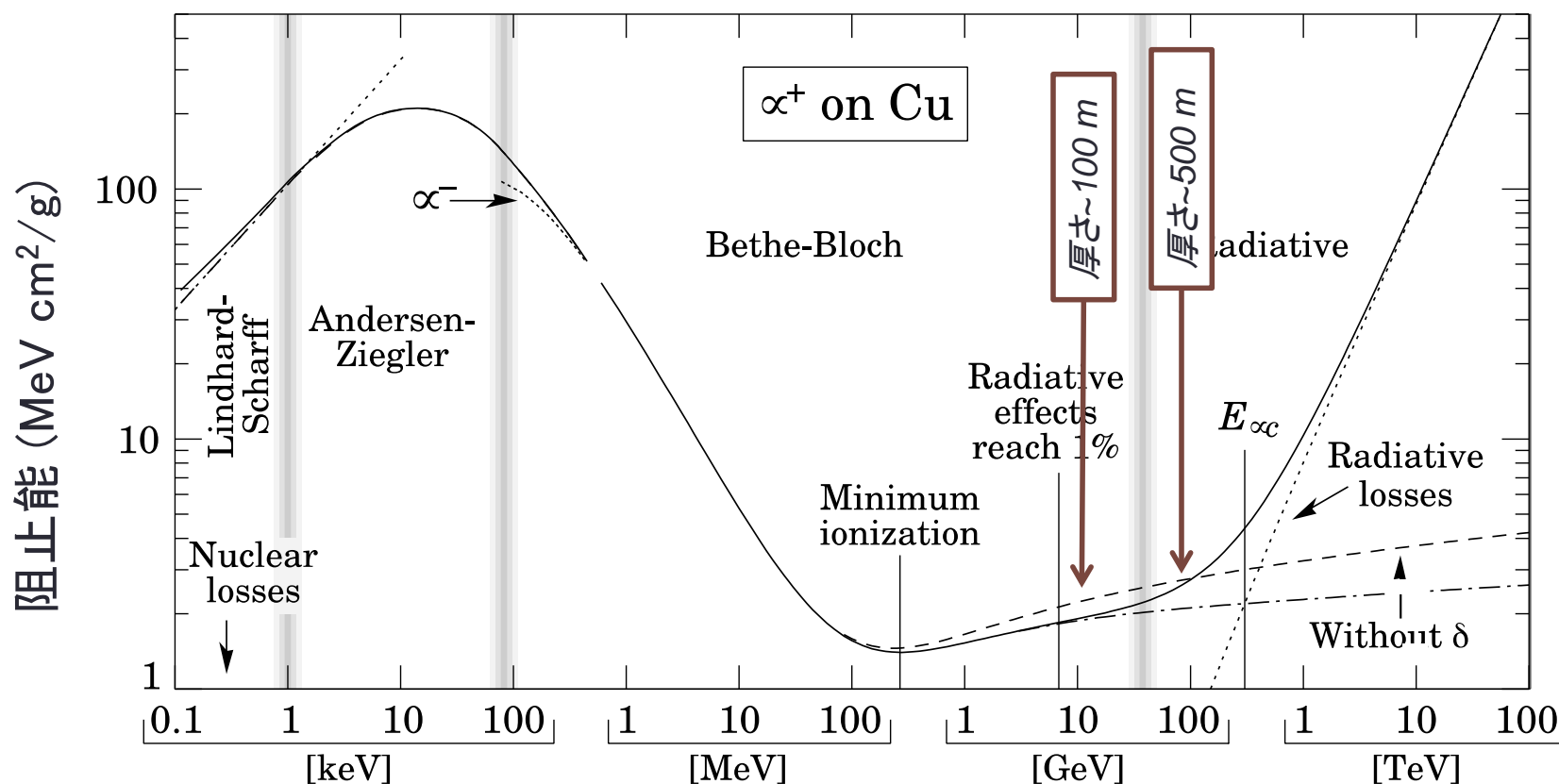


Breit-Rabi diagram

ミュオン：最も透過力がある粒子線

ある運動エネルギーを持つミュオンが透過できる厚さは、物質の密度(と原子番号)で決まる。

例：銅(密度 $\sim 9 \text{ g/cm}^3$)中のミュオン

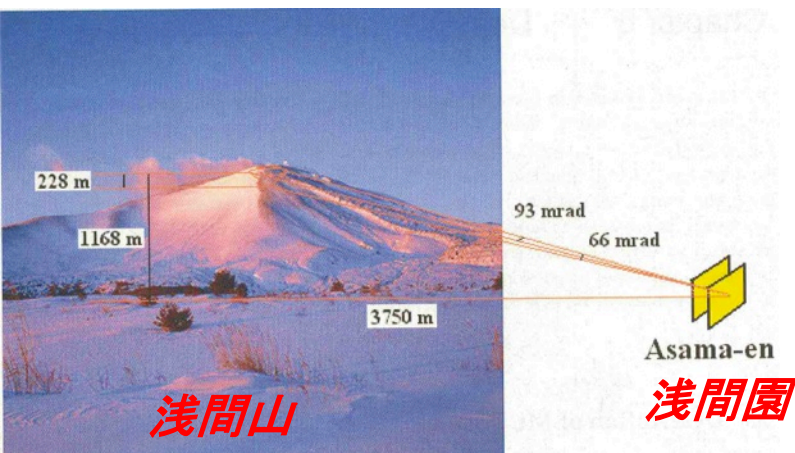


ミュオンの運動エネルギー

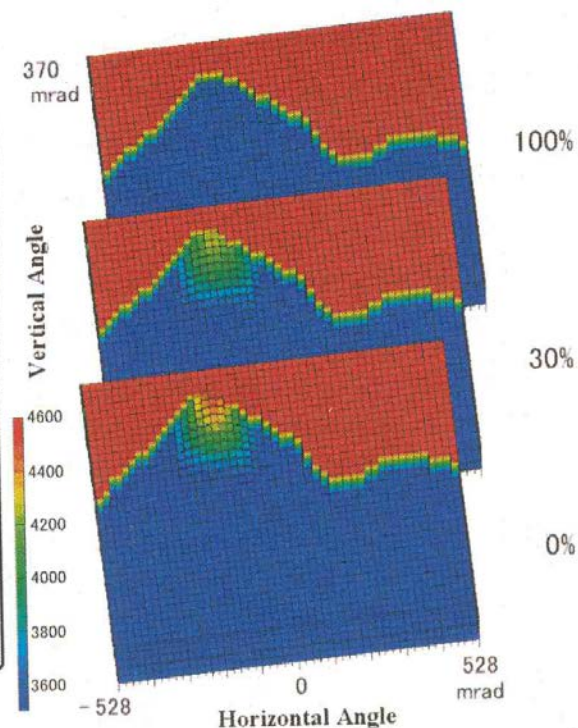
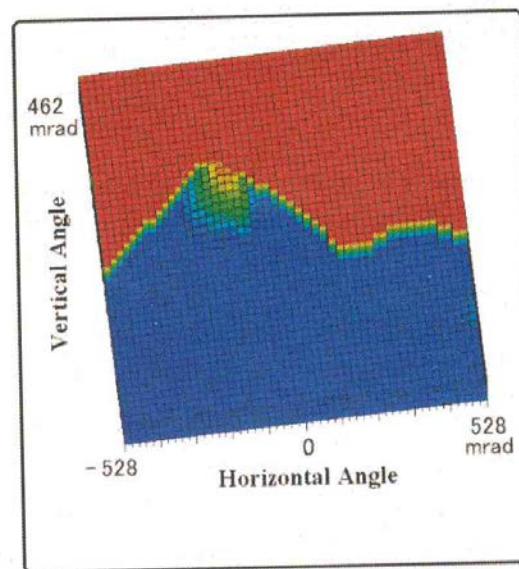
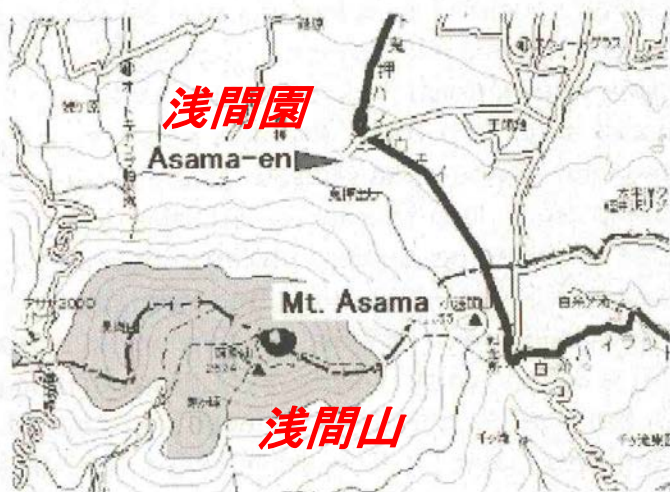
宇宙線ミュオンを用いて大型構造物の内部を透視

例1

宇宙線として地表に降り注ぐミュオンは強度は弱いが高エネルギーが高く、火山や溶鉱炉を透過したり止まったりする。



永嶺・田中

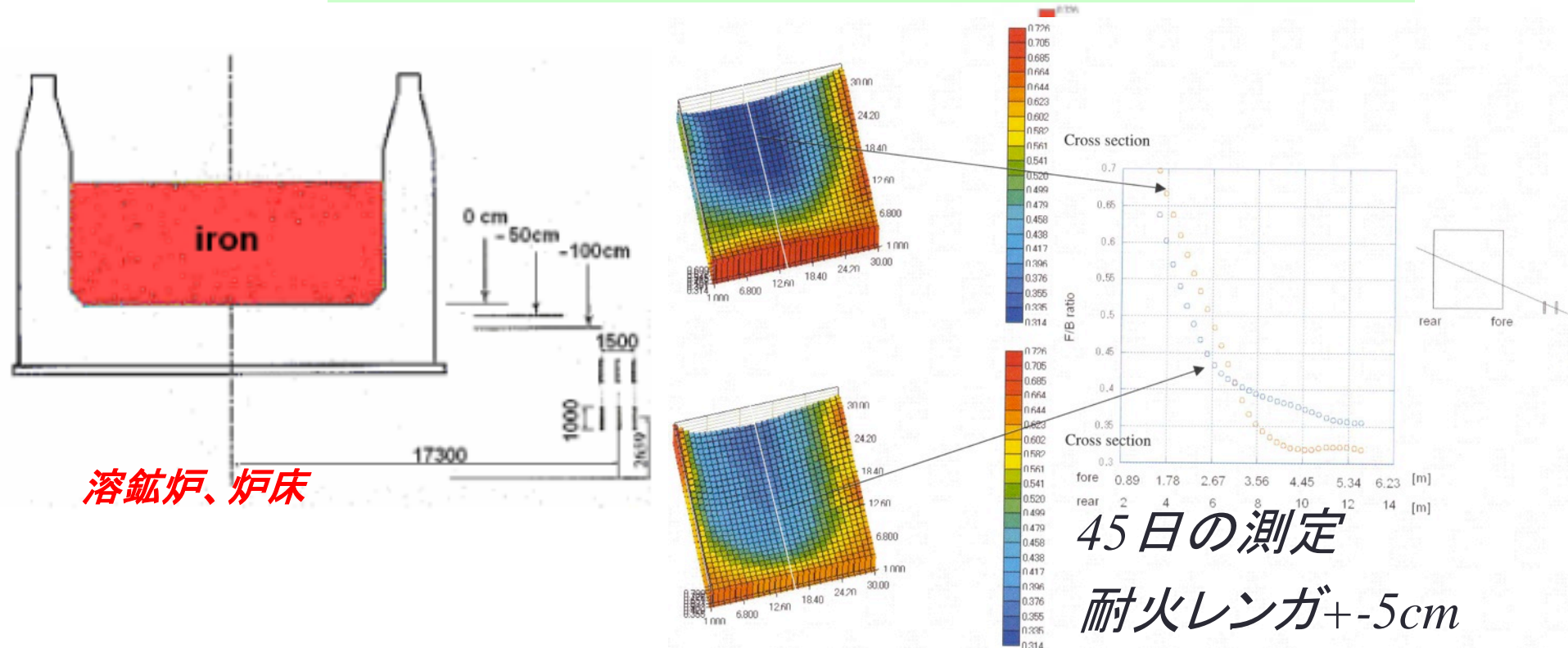


火口を透かしてみることができる。

例2

運転中高炉のレンガ耐熱壁厚さの測定と寿命予測

宇宙線ミュオンをうまく使うと、例えば溶鋳炉のレントゲン写真
を取るように、中を覗き見る事が出来る。 By 永嶺 *et al.*



45日の測定

耐火レンガ $\pm 5\text{cm}$

鉄密度 $\pm 0.2\text{g/cm}^3$

K. Nagamine *et al.* Proc. Japan Academy 81B(2005)257

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見



Tsung-Dao Lee (1926–)
Nobel Prize in Physics, 1957



Chen Ning Yang (1922–)

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG,† *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in β decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

RECENT experimental data indicate closely identical masses¹ and lifetimes² of the θ^+ ($\equiv K_{\tau_2^+}$) and the τ^+ ($\equiv K_{\tau_3^+}$) mesons. On the other hand, analyses³ of the decay products of τ^+ strongly suggest on the grounds of angular momentum and parity conservation that the τ^+ and θ^+ are not the same particle. This poses a rather puzzling situation that has been extensively discussed.⁴

One way out of the difficulty is to assume that parity is not strictly conserved, so that θ^+ and τ^+ are two different decay modes of the same particle, which necessarily has a single mass value and a single lifetime.

PRESENT EXPERIMENTAL LIMIT ON PARITY NONCONSERVATION

If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned, together with small percentages of states possessing the opposite parity. The fractional weight of the latter will be called \mathfrak{F}^2 . It is a quantity that characterizes the degree of violation of parity conservation.

The existence of parity selection rules which work well in atomic and nuclear physics is a clear indication that the degree of mixing, \mathfrak{F}^2 , cannot be large. From



The Nobel Prize in Physics 1957

"for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles"



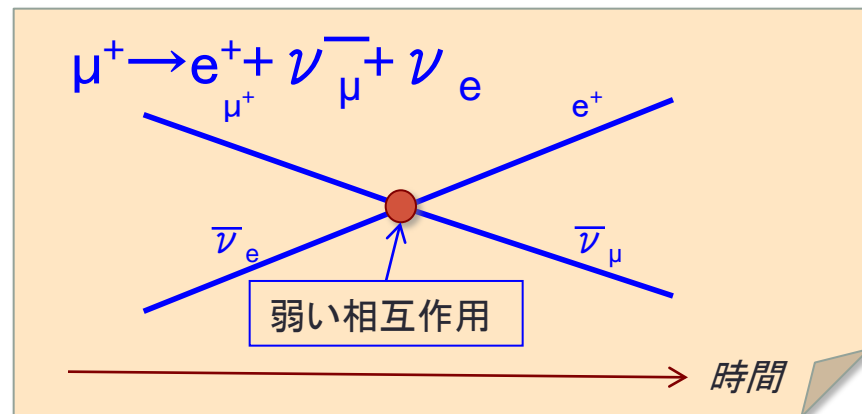
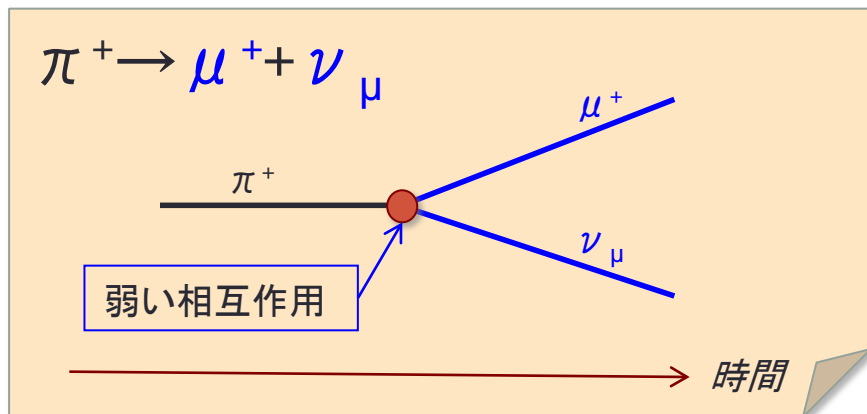
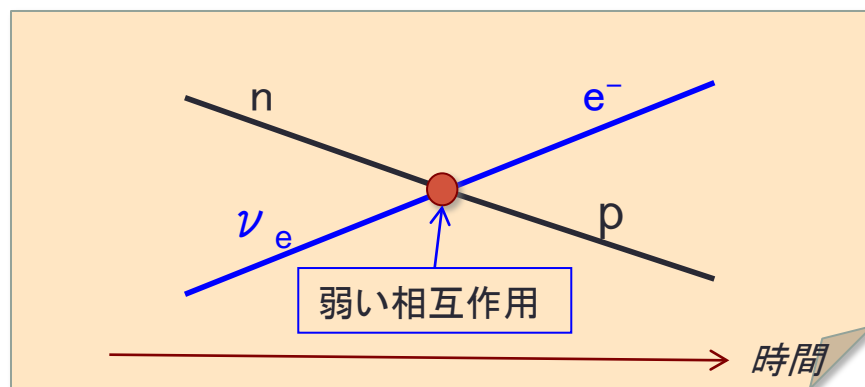
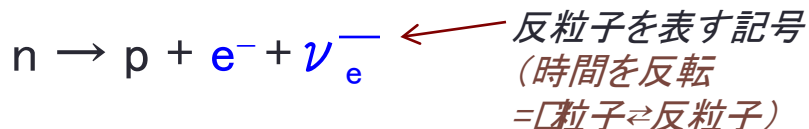
「弱い相互作用」=原子核、 π 中間子、 μ 粒子等のベータ崩壊

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

弱い相互作用＝原子核、 π 中間子、 μ 粒子等の「ベータ崩壊」を支配

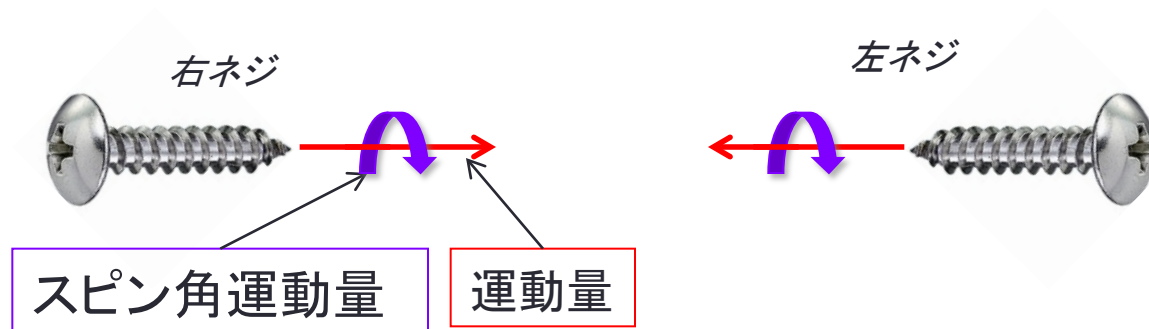
荷電レプトン(電子、ミュオンなど)とニュートリノが対になって現れる:

例: ストロンチウム90



弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

弱い相互作用でのパリティの破れとは:



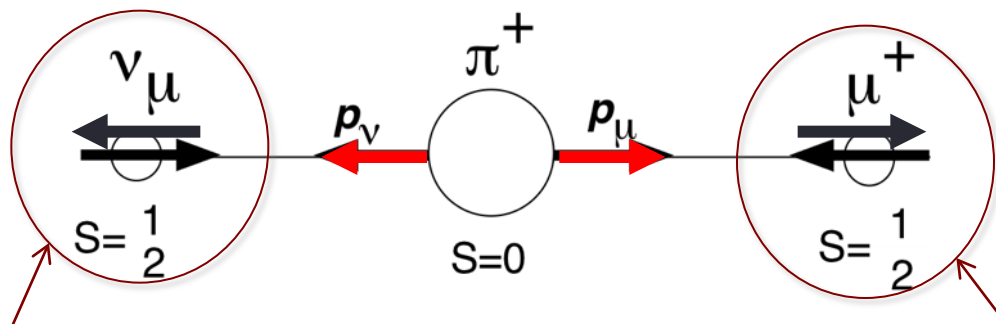
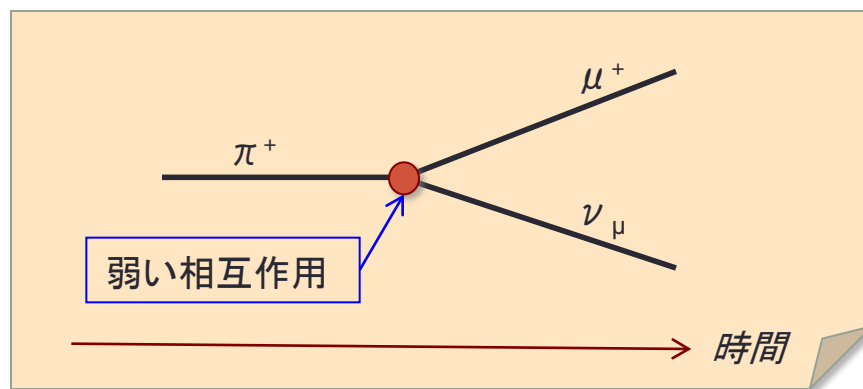
この宇宙では「右巻き」と「左巻き」ニュートリノが等分に存在しない！

(*o*)

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

弱い相互作用で起きていること:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



パリティが保存する＝右巻きと左巻きのニュートリノは等確率で現れるはず。

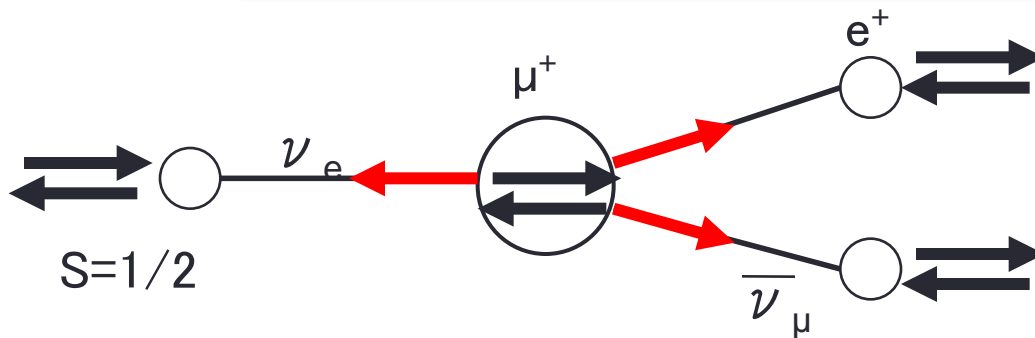
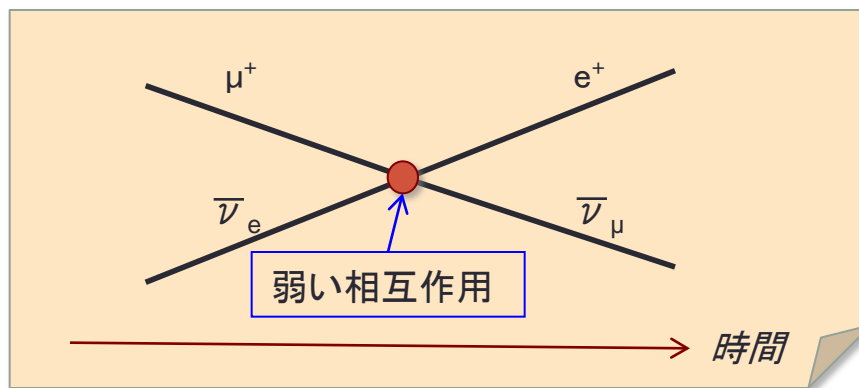
運動量・角運動量の保存から、
ミュオンも左右巻き等確率で出現
→スピン偏極はゼロのはず

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

弱い相互作用で起きていること:

反粒子を表す記号

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$



パリティが保存する＝右巻きと左巻きのニュートリノは等確率で現れるはず。

運動量・角運動量の保存を満たせば陽電子・ニュートリノは等方的に放出・偏極もなし

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 、 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ 崩壊でのパリティ非保存の検証(1957年: R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich)

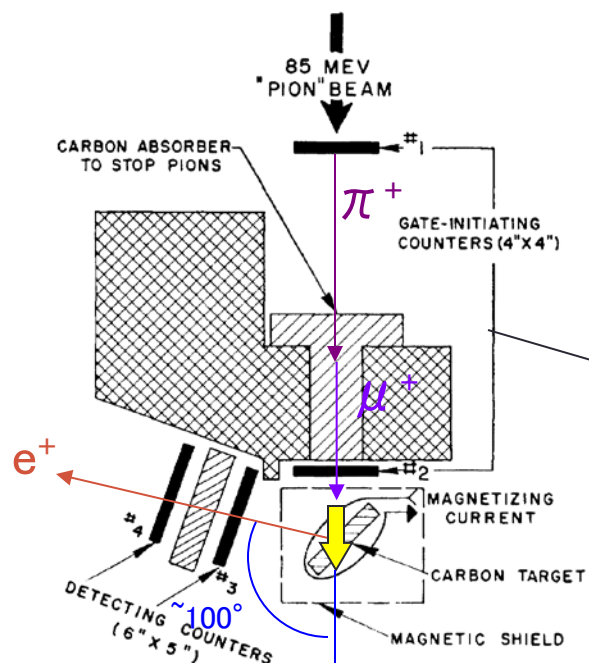


FIG. 1. Experimental arrangement. The magnetizing coil was close wound directly on the carbon to provide a uniform vertical field of 79 gauss per ampere.

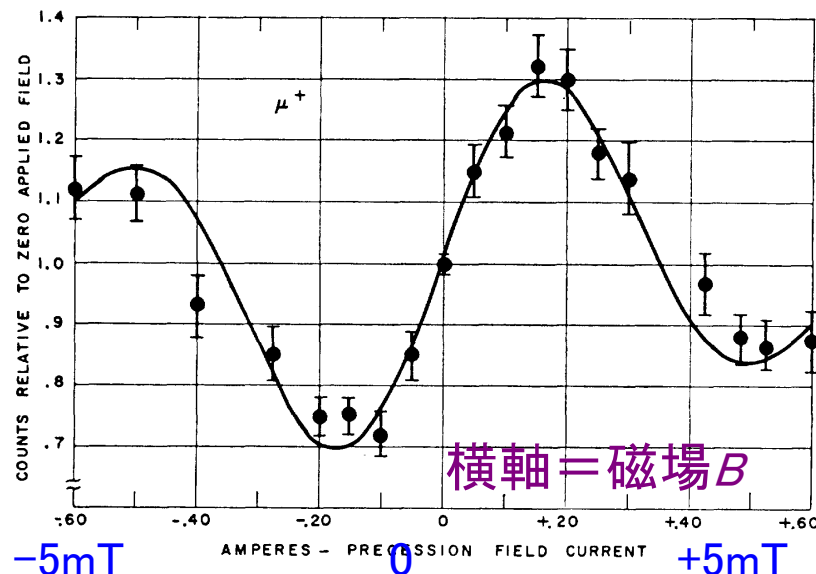


FIG. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution $1 - \frac{1}{3} \cos \theta$, with counter and gate-width resolution folded in.



この間に来た e^+ のみを数える↑
磁場をかけて μ^+ スピンと検出器の相対角度を変えながら測定(数は積分)

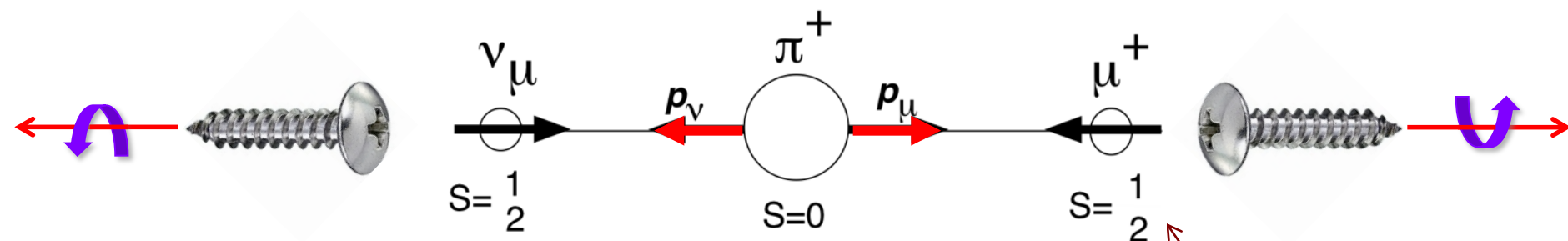
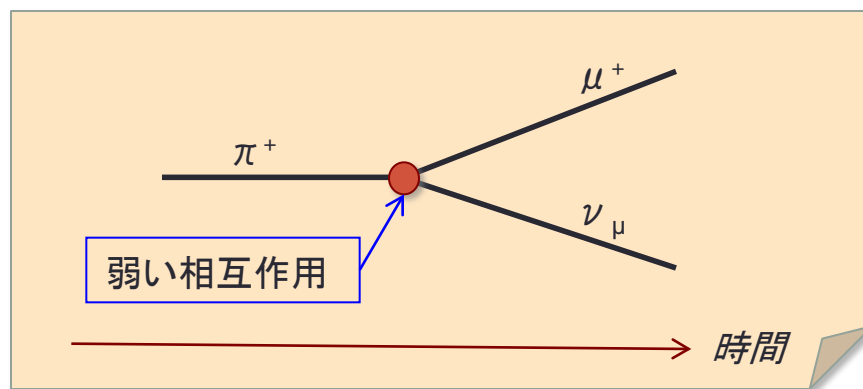
$$e^+ \text{ の数} \propto 1 - \frac{1}{3} \cos \theta; \theta = \gamma_f B t$$

[$B \sim 15\text{G}$ で $\theta \sim 100^\circ$]

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

弱い相互作用で起きていること:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



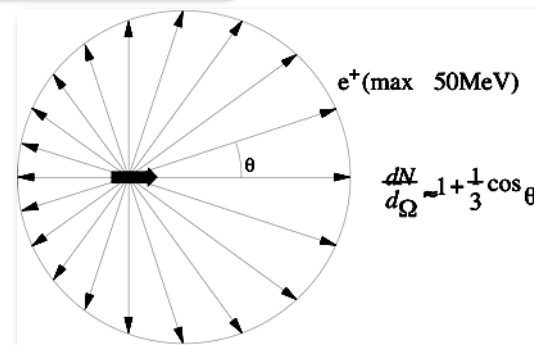
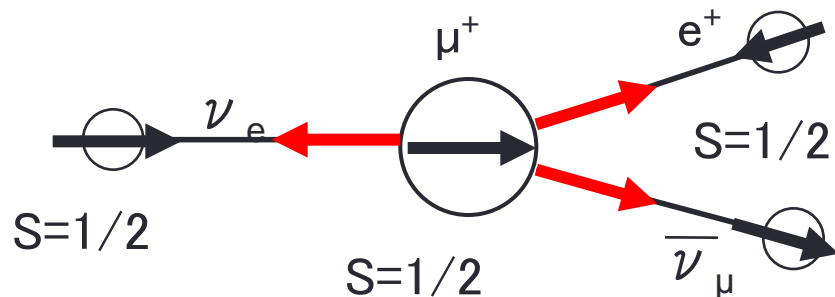
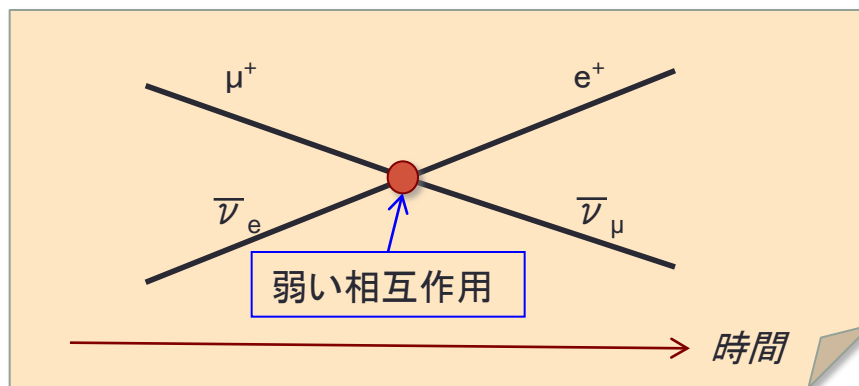
ニュートリノは~100%左巻き！

運動量・角運動量の保存から、ミュオン進行方向に~100%スピンの揃っている(ミュオンも左巻き)！

弱い相互作用におけるパリティの非保存の発見

弱い相互作用で起きていること:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$



反ニュートリノ=右巻き
ニュートリノ=左巻き



陽電子・ニュートリノはミュオンのスピンに対して非対称に放出される。

素粒子の「標準理論」

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウ	ストレンジ	ボトム
レプトン	eニュートリノ 電子	μニュートリノ ミューオン	τニュートリノ タウ

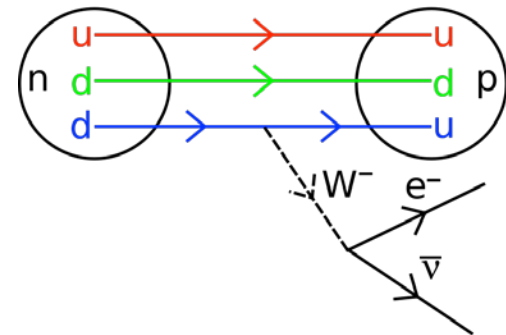
ヒッグス場に伴う粒子

ゲージ粒子

強い力 グルーオン
電磁力 光子
弱い力 Wボゾン Zボゾン

ヒッグス粒子

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



弱い力を媒介する
Wボゾンは一方の
キラルリティのニュー
トリノとしか結合し
ない。
(理由は謎)

素粒子の「標準理論」

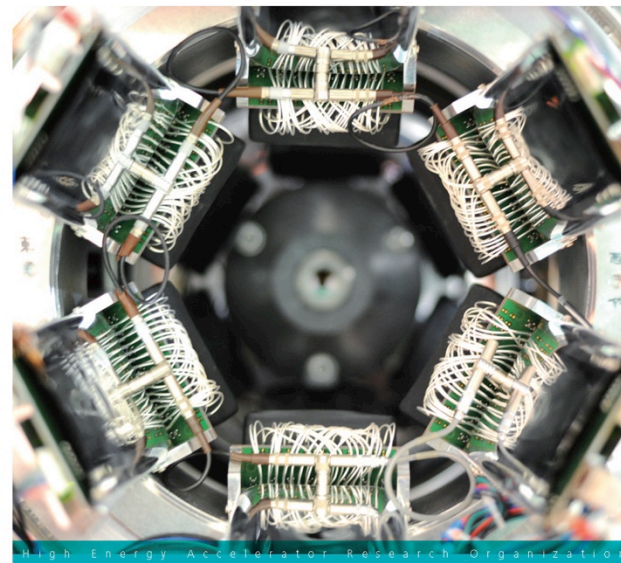
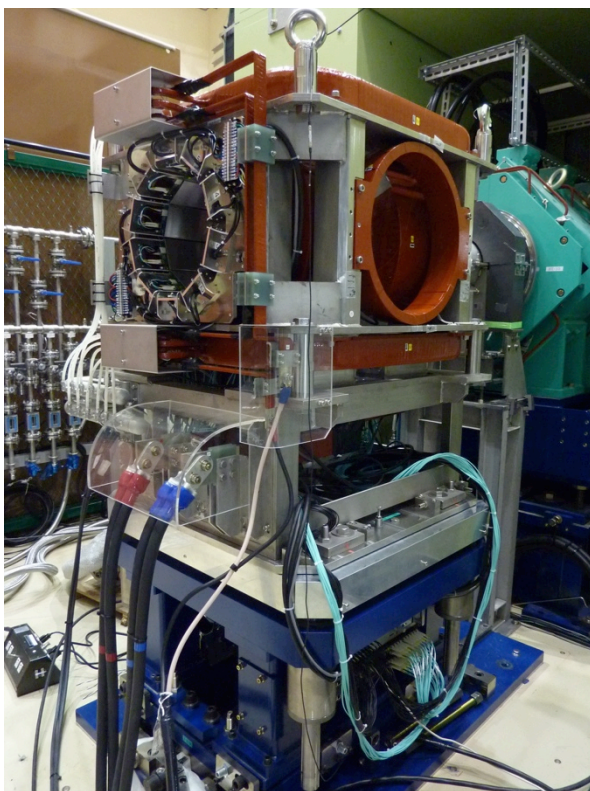
…未解決の問題

- ・ミュオンは「第2世代の基本粒子」
 - …なぜ存在するかは謎
- ・弱い相互作用ではパリティ保存が100%破れている
 - …なぜそうなのかも謎
- ・ニュートリノは質量を持つ
 - …~100%左巻き？
 - (質量を持つ＝光速度より遅い→光の座標系から見ると左巻きが右巻きに逆転！)
- ・重力はどう量子力学と折り合うか？
- ・ダークマター／ダークエネルギーとは？

第三の量子ビーム「ミュオン」

…ミュオンの意外な素顔

強力な物質研究手法としてのミュオン

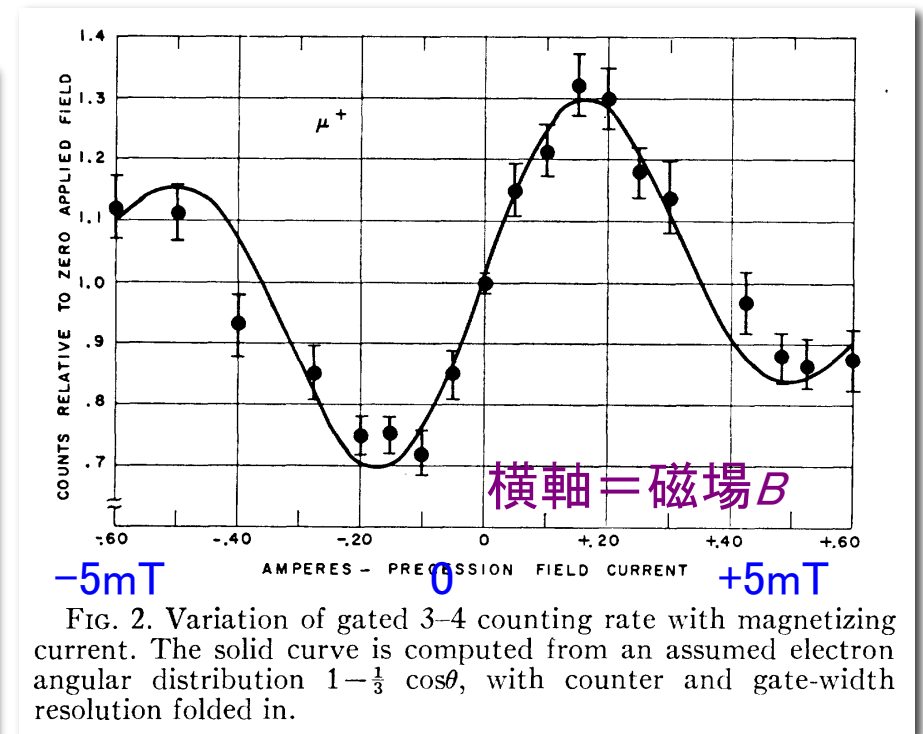
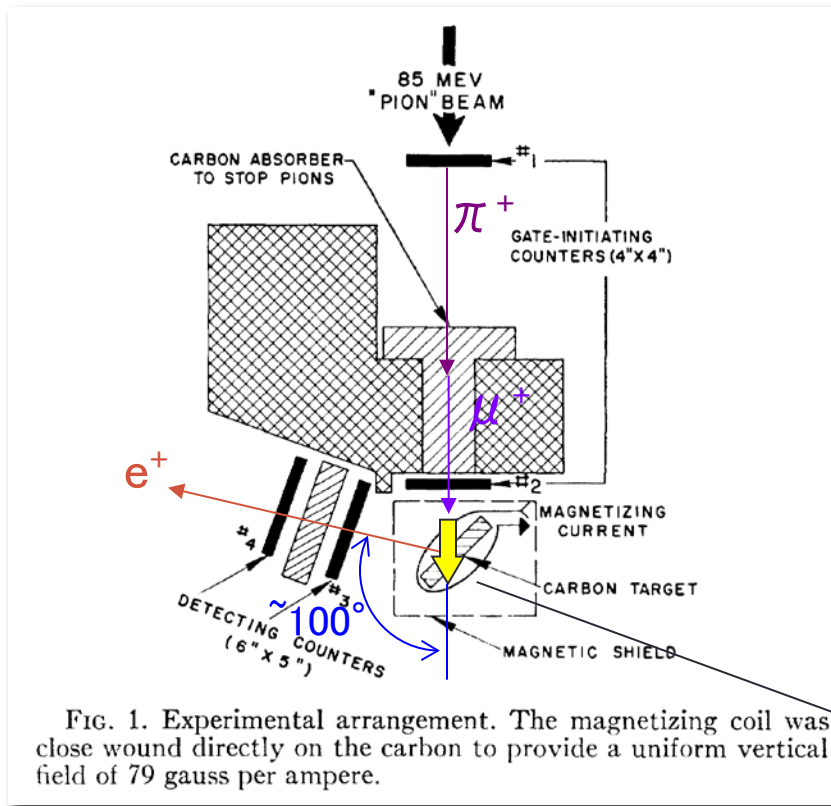


ISSN 1344-1299

2013
at KEK
ANNUAL REPORT
Vol.1



物質中のミュオン



この間に来た e^+ のみを数える↑

外部磁場をかけて μ^+ スピンと検出器の相対角度を変えながら測定(数は積分)

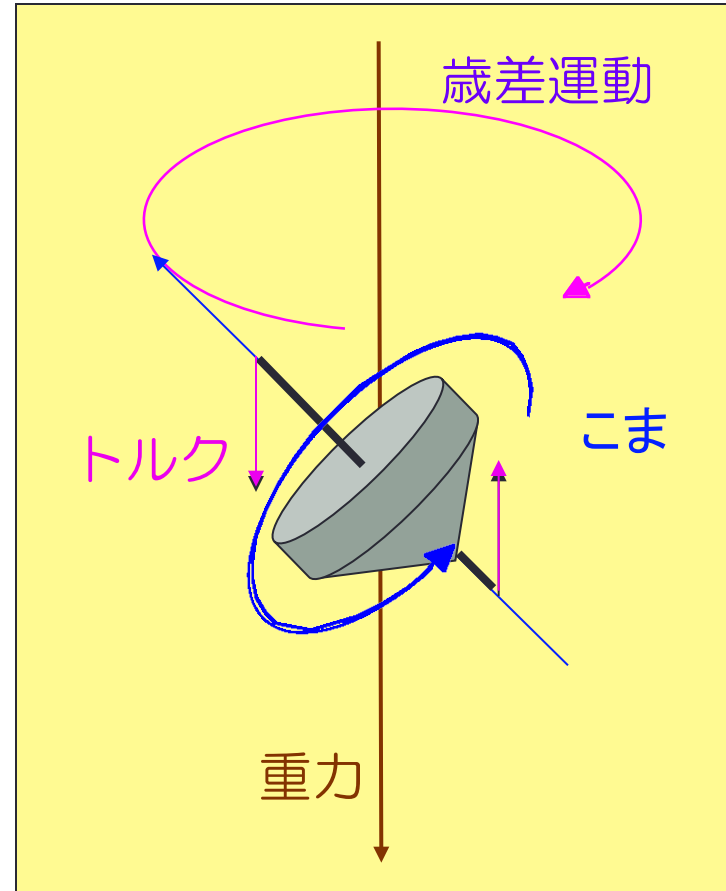
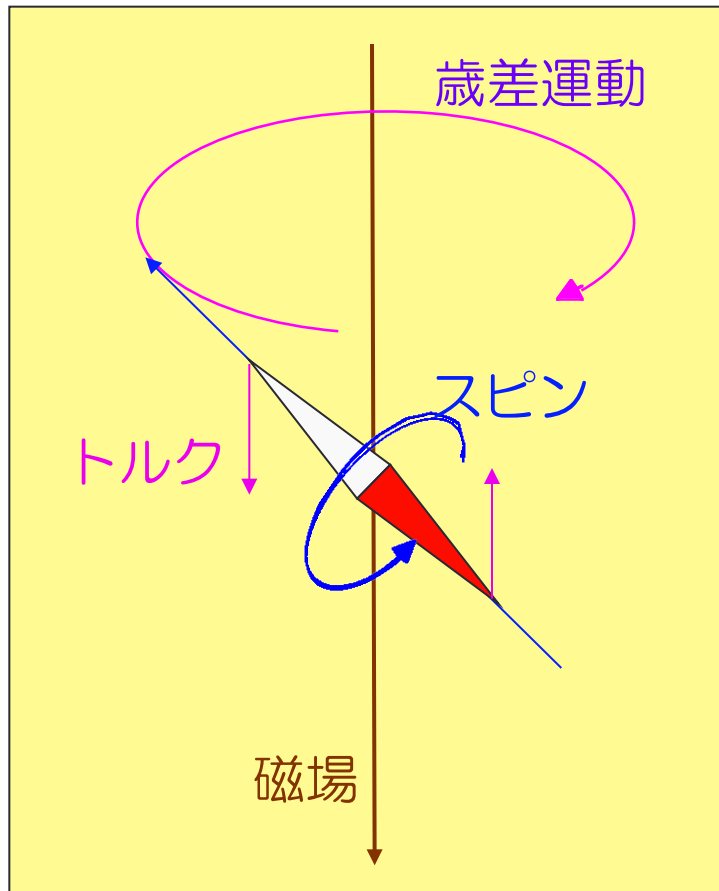
$$e^+ \text{の数} \propto 1 - \frac{1}{3} \cos \theta; \theta = \gamma_f B t$$

$$\gamma_f = 2\pi \times 0.1355 \text{ MHz/mT (磁気回転比)}$$

$$[B \sim 1.5 \text{ mT で } \theta \sim 100^\circ]$$

磁場中のスピン（＝磁気モーメント）の運動

（古典論的理解）



磁場中のスピンはこまと同じように首振り運動（歳差運動）を行なう。この時歳差運動の周波数は磁場に比例



原子磁石ミュオン

—物質の内部磁場を見る超高感度な探針—

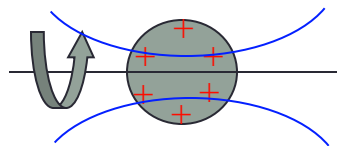
ミュオン (μ^+) とは？

- ・ 重さ＝陽子（プロトン）の約 9 分の 1
- ・ 電荷＝ $+e$ （又は $-e$...ここでは $+e$ の方のみ考える）
- ・ スピン＝ $1/2$ （量子化された角運動量の最小単位）
- ・ 寿命 2.2 マイクロ秒で陽電子とニュートリノに崩壊

...つまり**陽子の軽い放射性同位体**

電荷と角運動量（自転運動）を持つ粒子は磁気モーメントを持つ

ミュオン＝こまのように自転する極微の棒磁石



...回転＝電流→磁場（古典論）

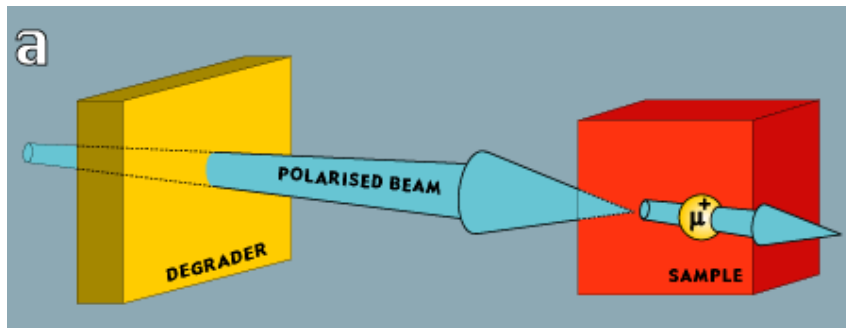
原子磁石ミュオン

自然は偶然にも、スピンの100%偏極したミュオンという粒子を創造し、その偏極度を簡単に測れる方法まで用意してくれた。

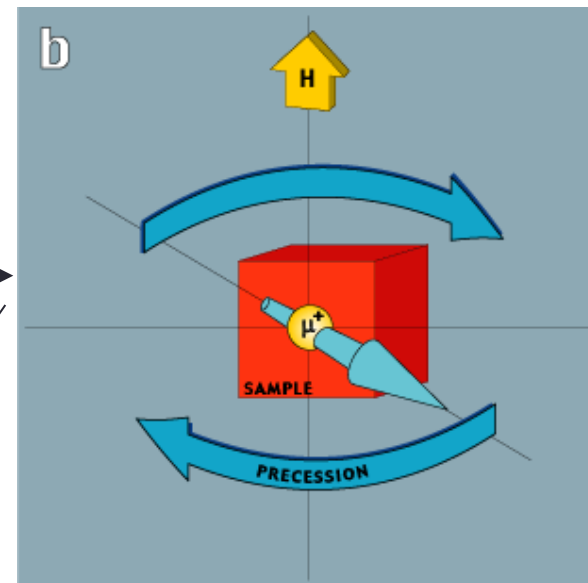
X線、中性子に次ぐ第3の量子ビームとして活用すべし！

ミュオンスピン回転法=μSR

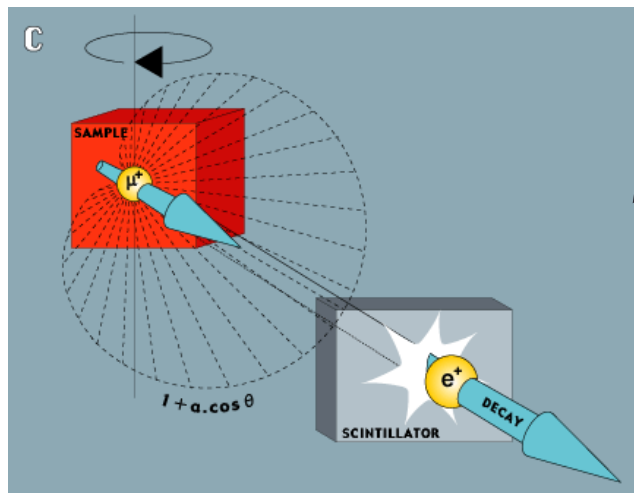
μSR=muon Spin Rotation, Relaxation...



a) 生成標的からほぼ100%スピンのそろったミュオンを取り出し、二次ビームラインで輸送して試料中に注入する。



b) 注入されたミュオンは原子と原子の間に止まり、そこでの局所磁場を感じて、その磁場に対してスピンが歳差運動（precession）をする。



c) ミュオンは崩壊する。スピンの方向に陽電子を放出し、それを検出器で捉える。→スピンの回転に伴って検出信号は周期的に脈動する。

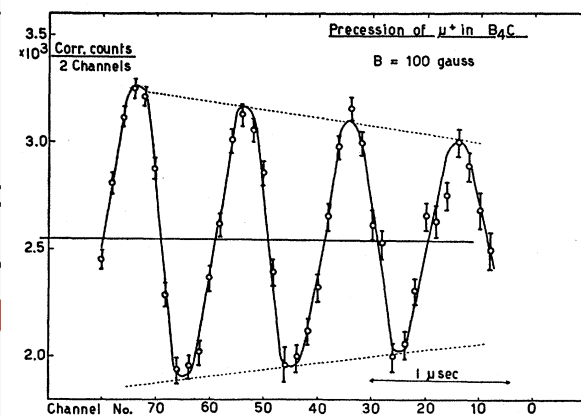


FIG. 7. Muon precession in boron carbide after decay and background correction.

μ SR発展の歴史

1958: μ SRによる最初の物性研究

...小型cyclotronでの実験(黎明期)

1974: TRIUMF、PSI(当時SIN)稼働

...大型cyclotron「中間子工場」の登場

197?:「表面ミュオン」の発見

1979: ゼロ磁場 μ SR法の確立

1980: 日本国内初のミュオンBL稼働(KEK、当時東大)

...大型synchrotronによる世界初のパルス状ミュオン
ビーム／日本における μ SR研究の開始

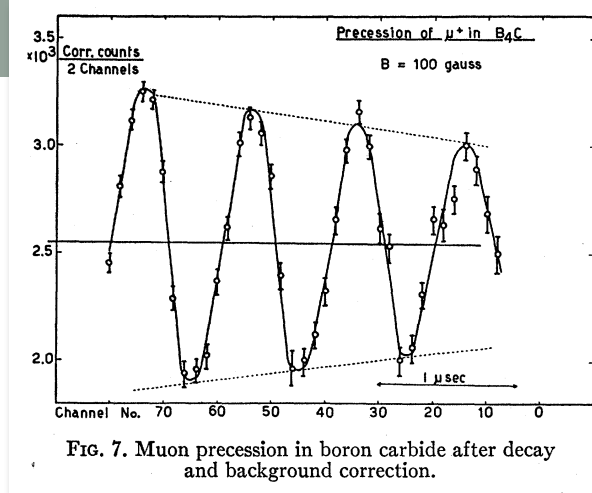
1986: RAL(英国)ミュオンBL稼働

...高温超伝導体の発見／ μ SRへの認知度上昇

1994: 理研RALミュオンBL稼働

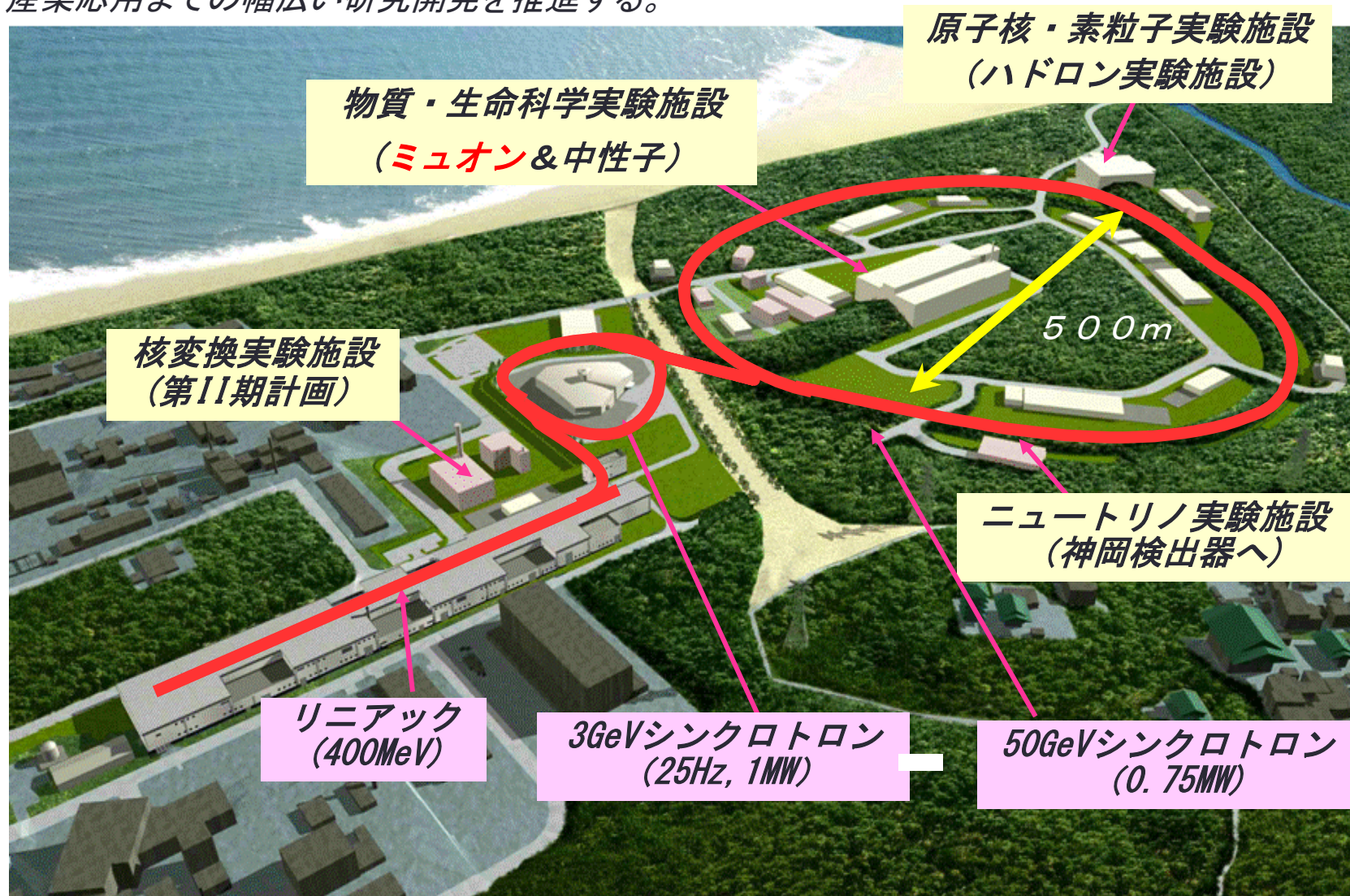
2008: J-PARC(東海)稼働

→世界最高強度のパルス状ミュオン源(2009~)



大強度陽子加速器施設(J-PARC)の構成

世界最高レベルのビーム強度を有する複合陽子加速器施設により**多彩な二次粒子を用いた新しい研究手段を提供し**、物質科学、生命科学、原子核・素粒子物理学など、基礎科学から産業応用までの幅広い研究開発を推進する。



日本原子力研究開発機構 と高エネルギー加速器研究機構の共同事業

物質生命科学実験棟



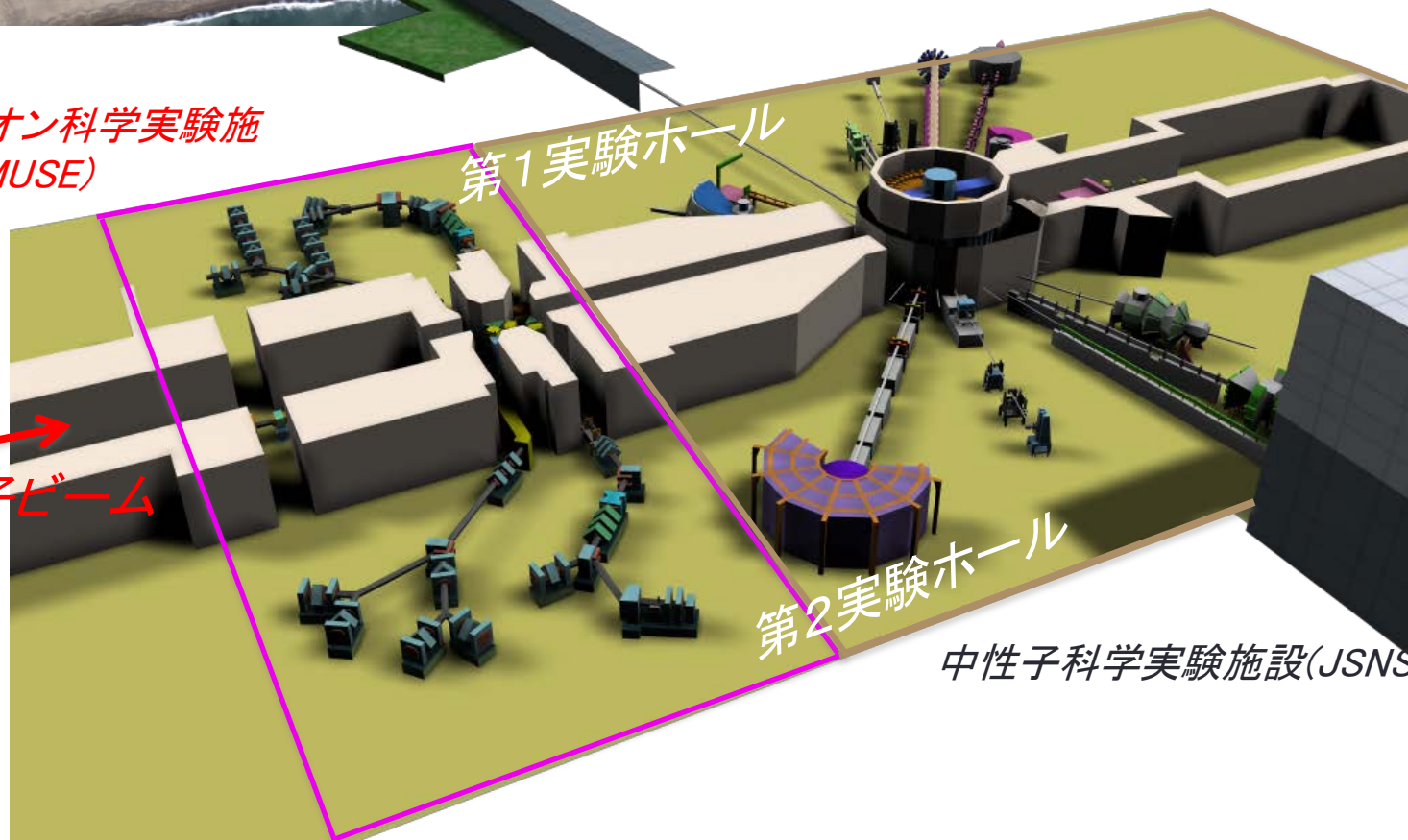
ミュオン科学実験施設(MUSE)

第1実験ホール

陽子ビーム

第2実験ホール

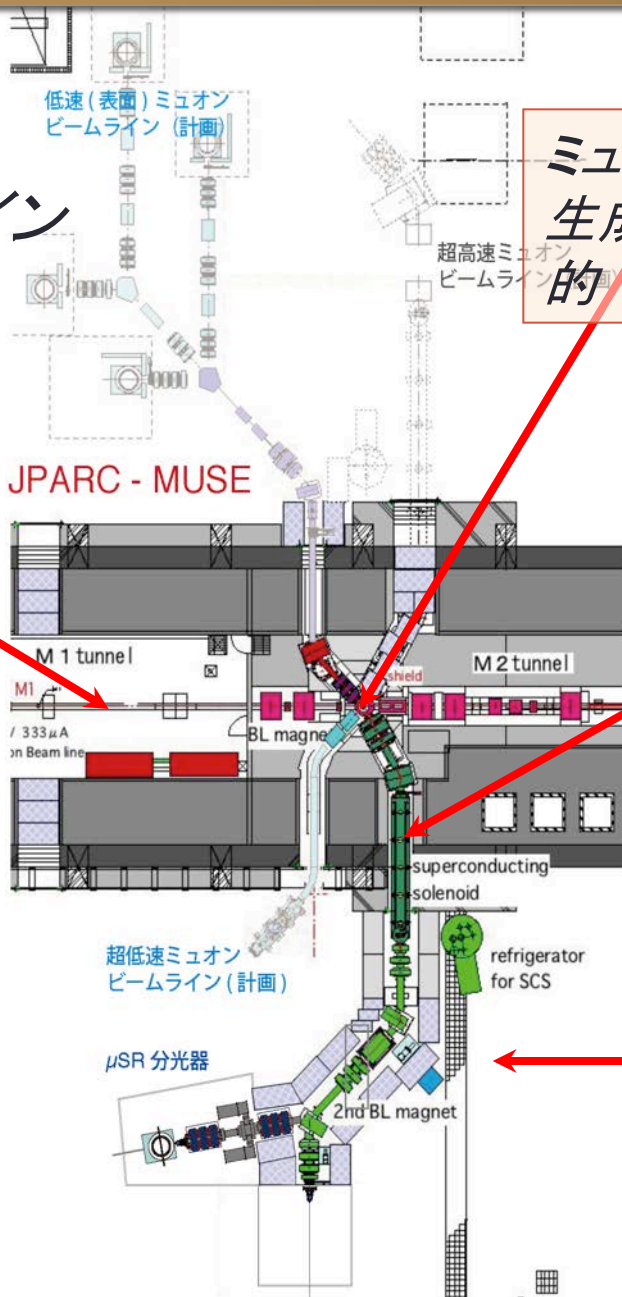
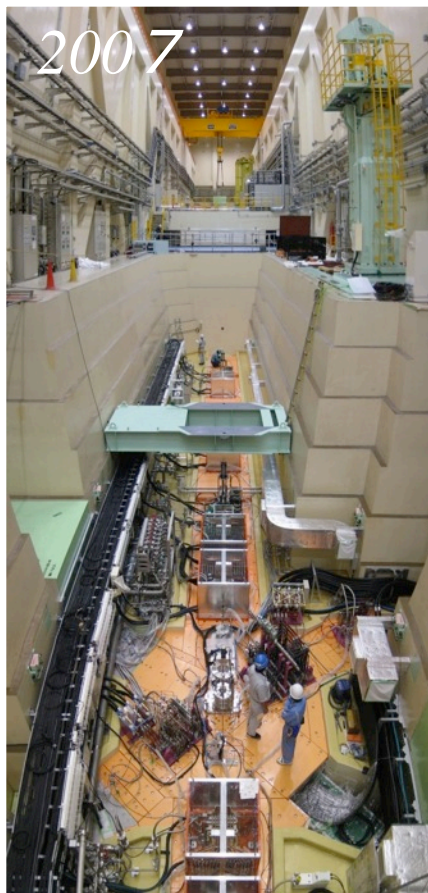
中性子科学実験施設(JSNS)



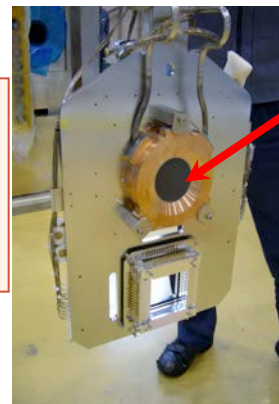
建設状況

陽子ビームライン

2007



ミュオン生成標的

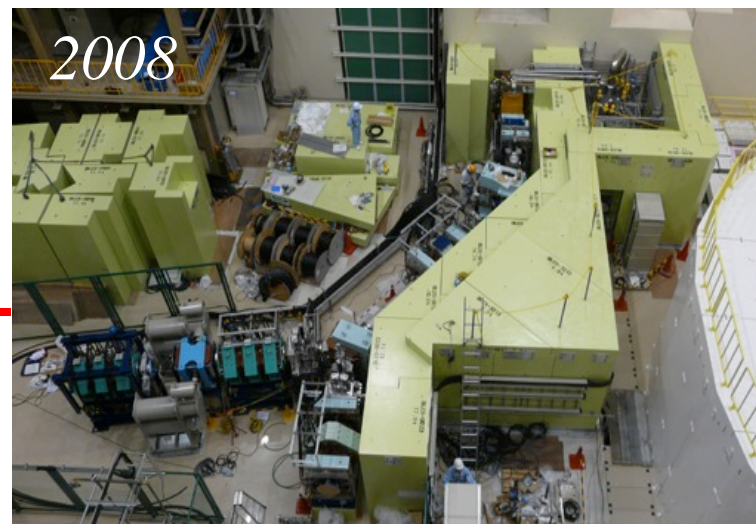


炭素(グラファイト、厚さ20mm)



超伝導ソレノイド

2008



J-PARC MUSEの現状 (2014年)

稼働状況

・年2回の実験課題
公募・実施

・物構研S型課題の
公募・実施

採択課題数:

・一般課題

2014A期 23件

予備採択 6件

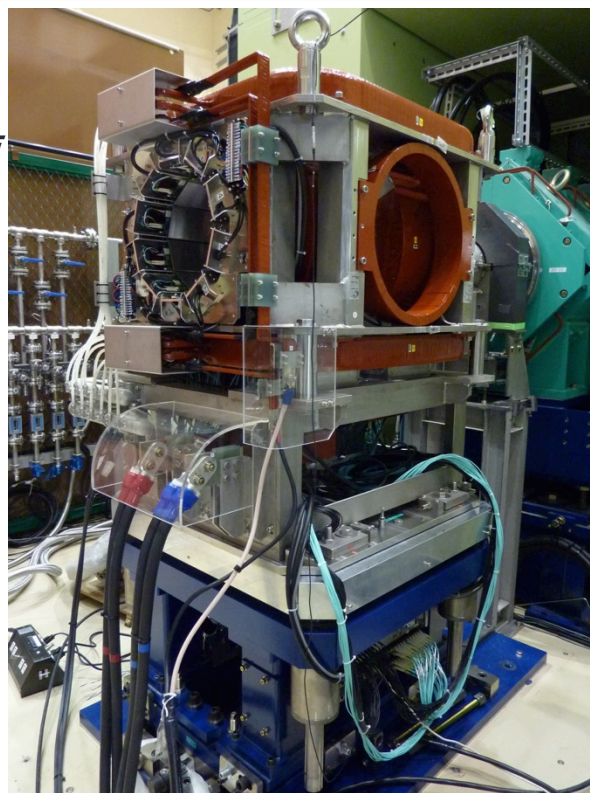
2014B期 21件

予備採択 16件)

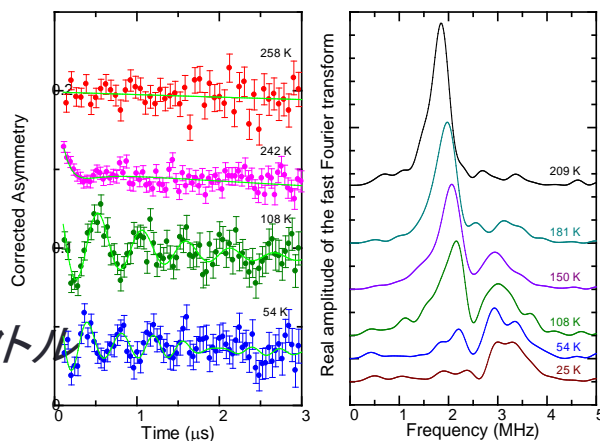
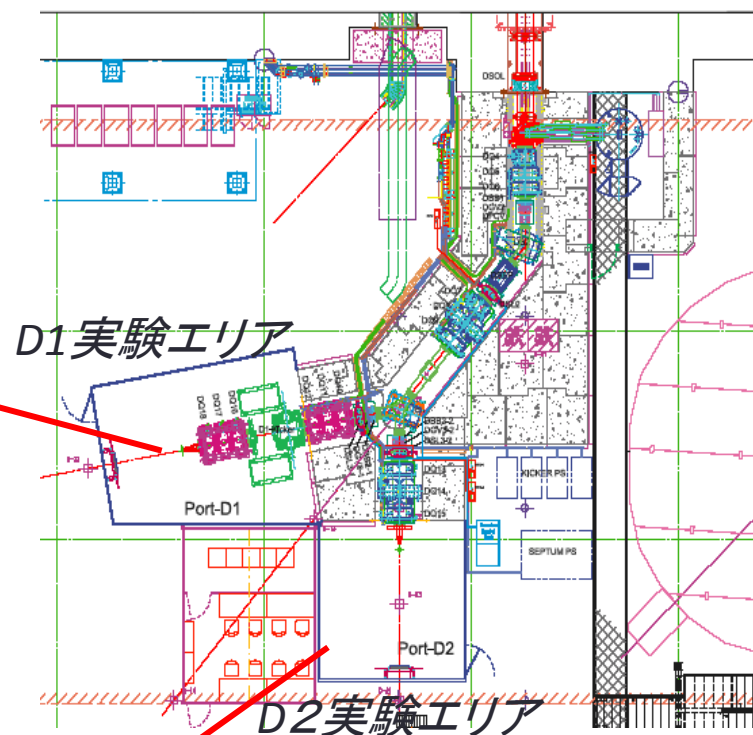
・S型課題

実施中 5件

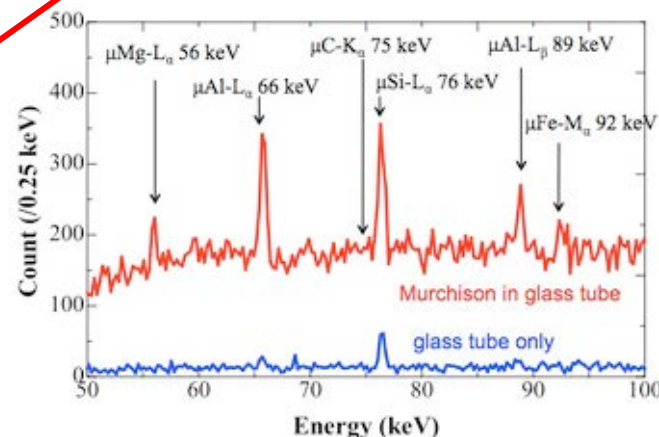
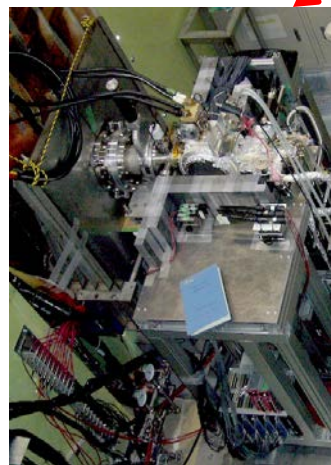
一次採択 4件



D1実験装置(μ SR分光器)



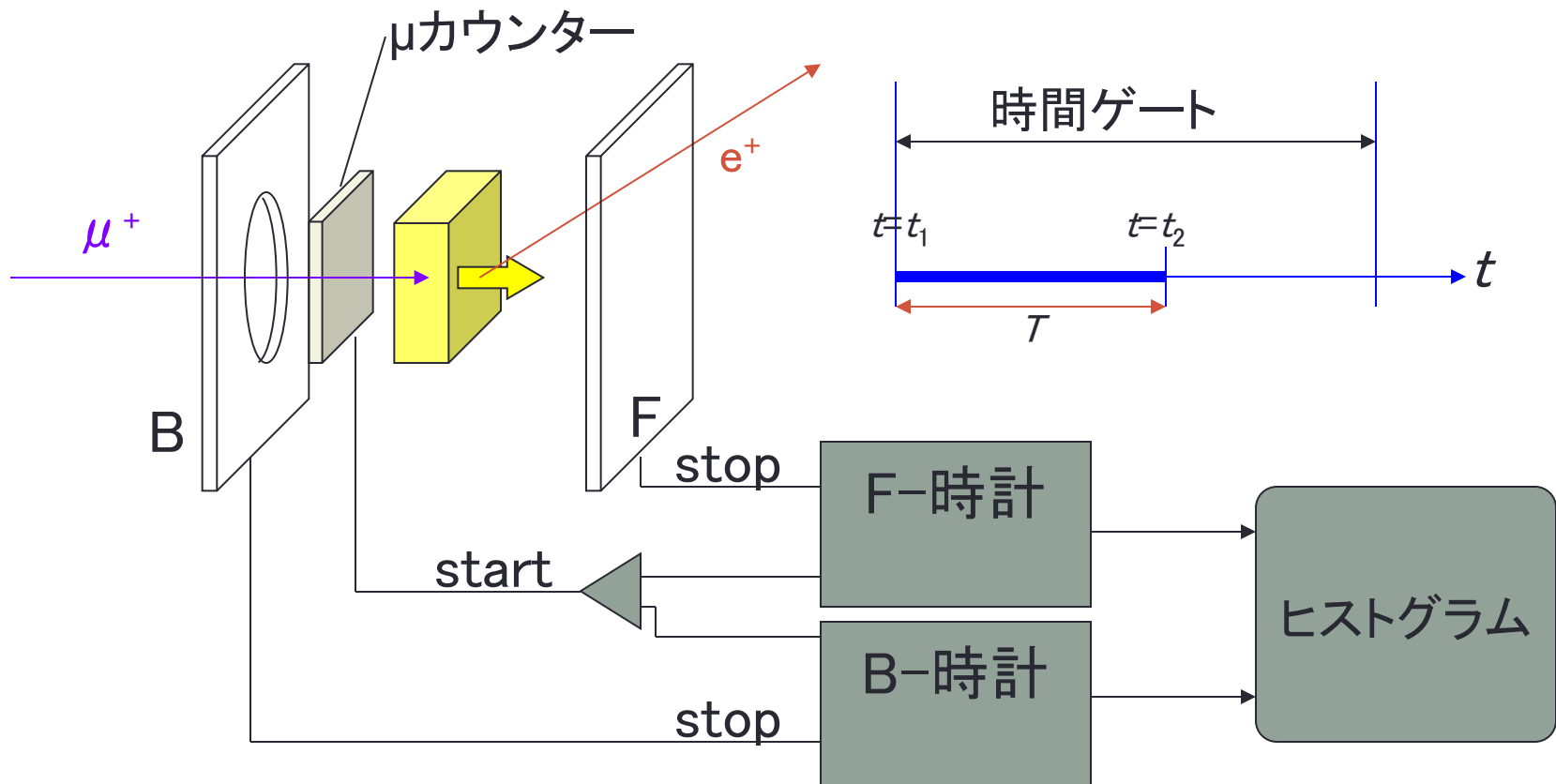
μ SRスペクトル



負ミュオン特性X線スペクトル

μ SRの原理

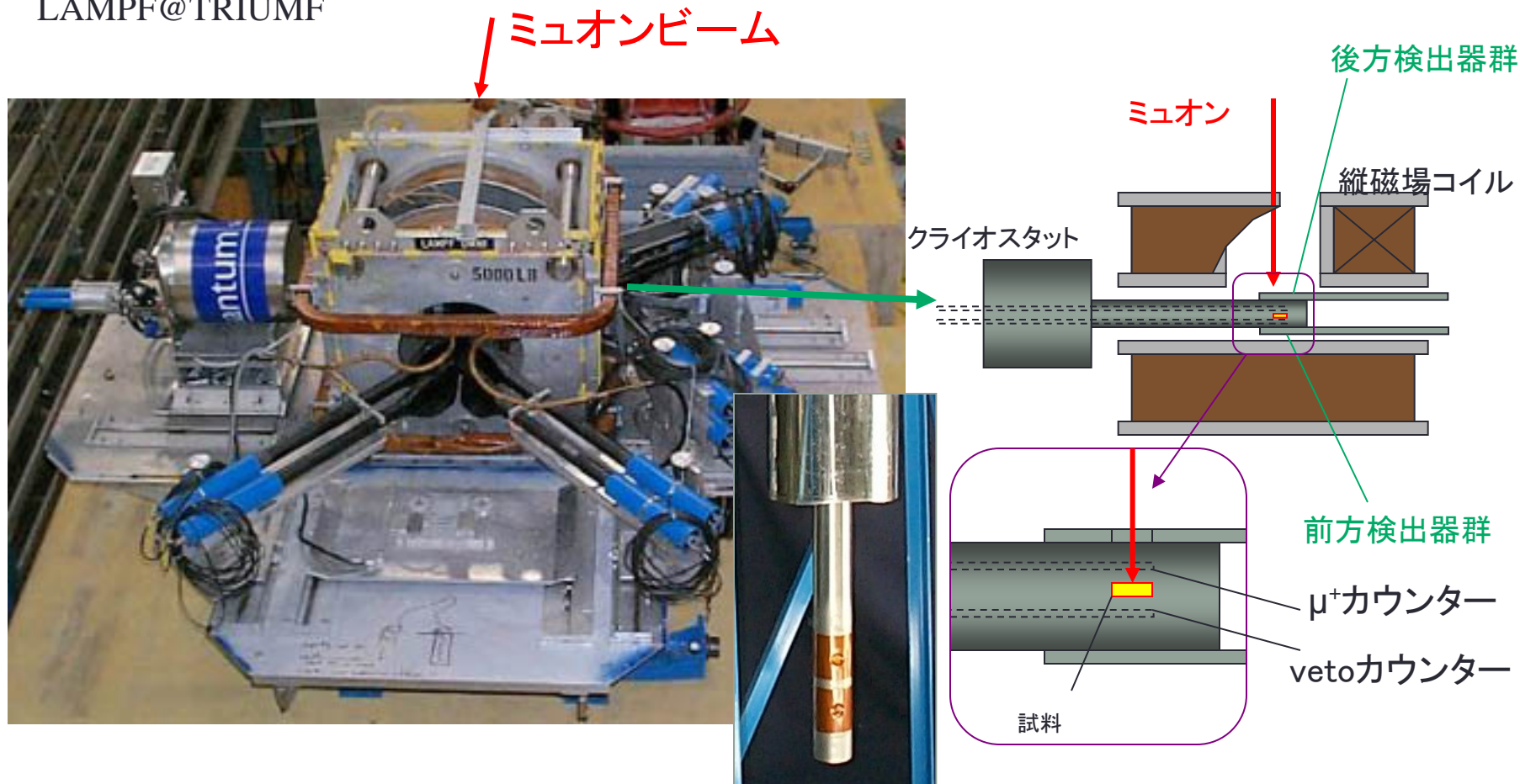
ミュオンを試料に注入し($t=t_1$)、そこから放出される
高エネルギー崩壊(陽)電子を検出する($t=t_2$)。
ただし崩壊時刻は予言不可能(β 崩壊)なので一定の時
間ゲートを開けて崩壊を待つ。



μ SR実験装置

直流状ビームではミュオンを一つ一つ同定し、
その崩壊陽電子を観測→少数の検出器でOK
⇒時間ゲート中に2つめのミュオンが来た場合
には陽電子の親ミュオンが不明→事象を破棄

LAMPF@TRIUMF

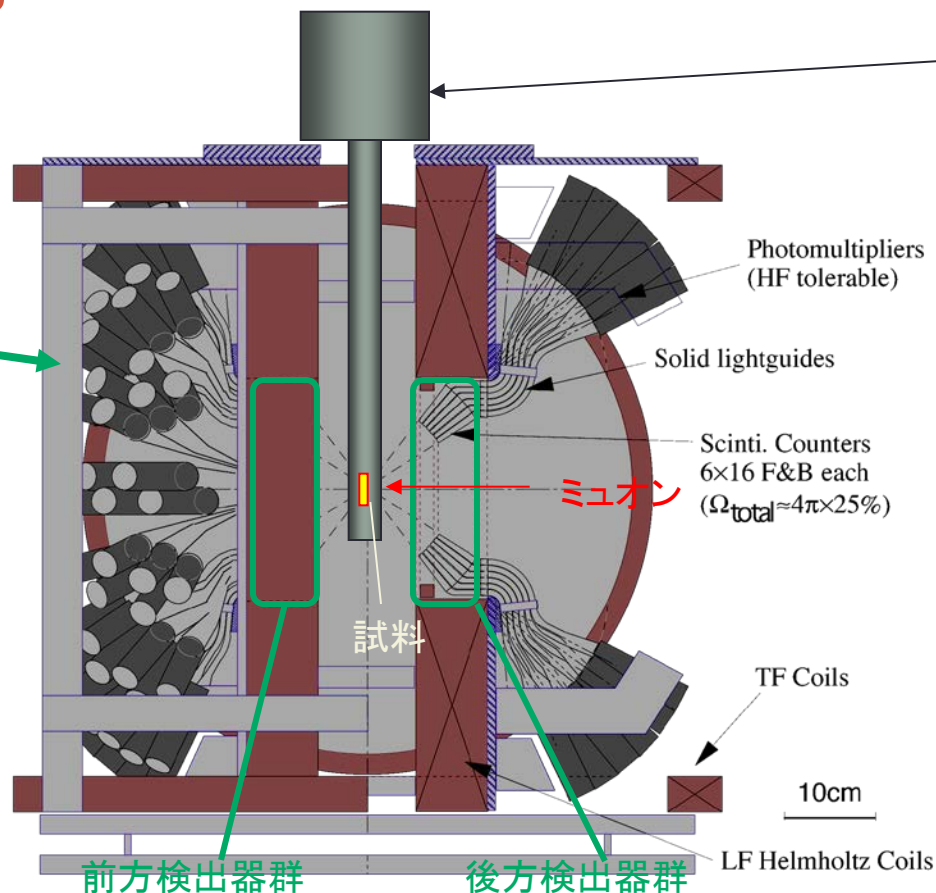


前方検出器と後方検出器の非対称度 (Asymmetry) \propto ミュオンの偏極度

μ SR実験装置

パルス状ビームではパルス毎に多数の崩壊陽電子を同時に観測→検出器を分割
ミュオンの注入時刻($t=0$)は加速器のタイミングで決める

ARGUS@RIKEN-RAL

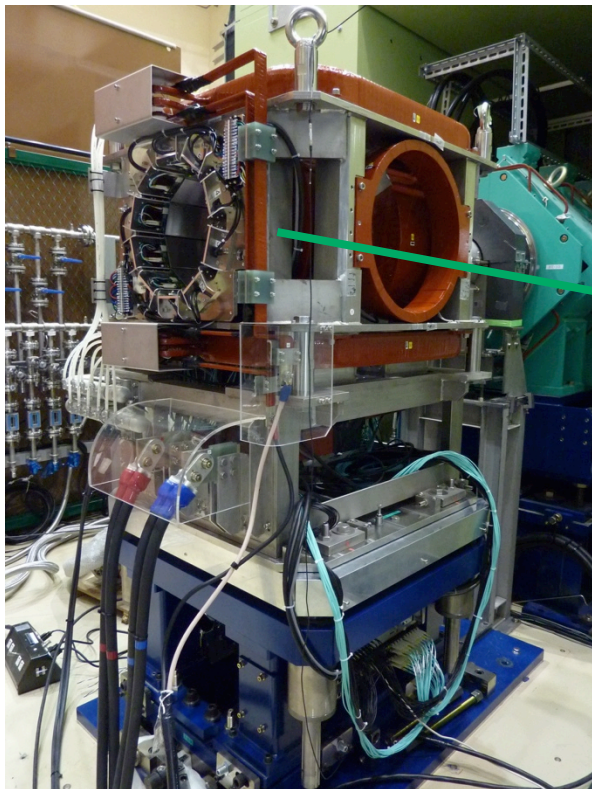


...直流ビームでは大強度化のメリットが少ない→パルス化の流れ
[大強度ビーム施設ではパルス状ビームが標準(RAL,J-PARC)]

μ SR実験装置

J-PARCでは大強度ビームに対応して検出器の分割数が1000を超える: 光電子増倍管→半導体センサーへ

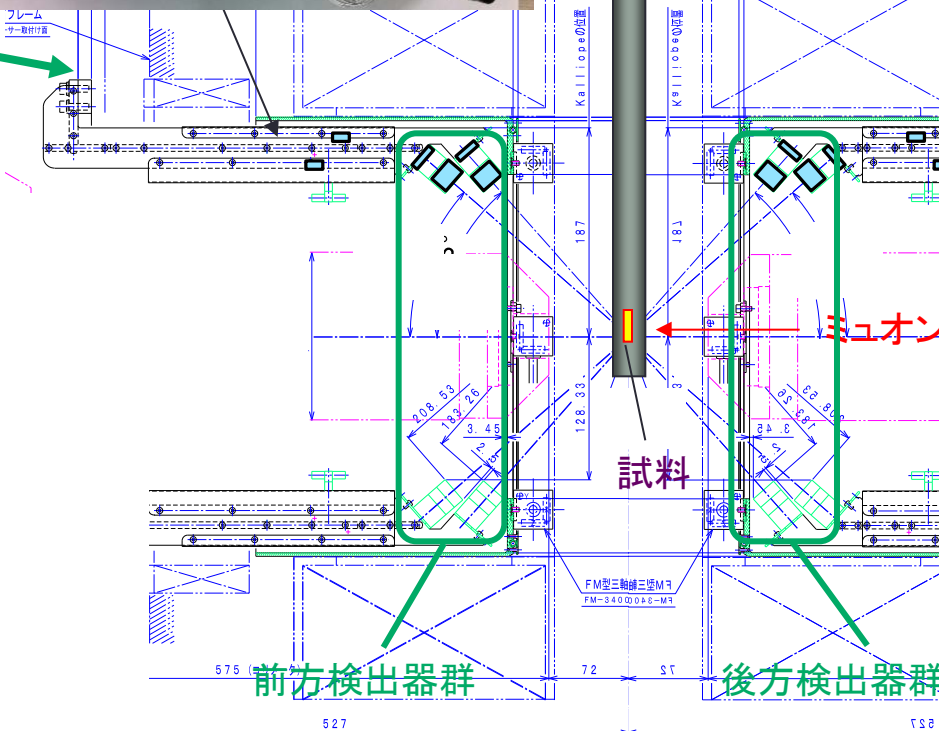
D1分光器@J-PARC MUSE



(Since 2014~)

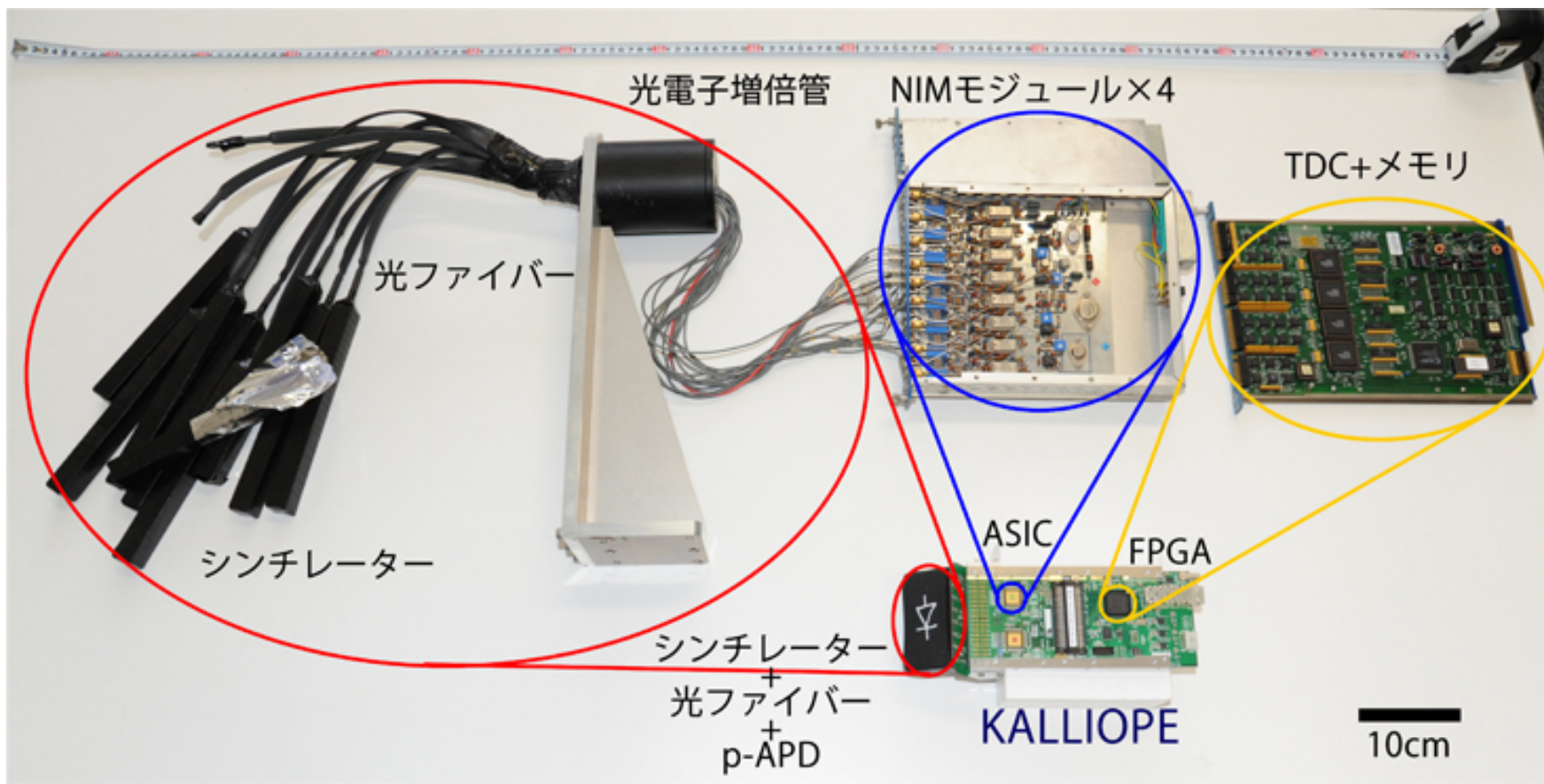
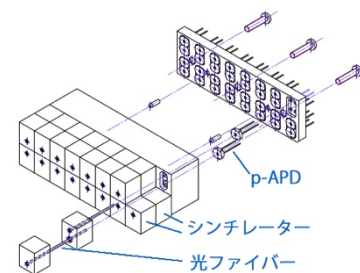


Kalliopeモジュール
(16検出器/台)



μ SR実験装置

J-PARCでは大強度ビームに対応して検出器の分割数が1000を超える: 光電子増倍管→半導体センサーへ



ミュオンスピン回転法 (μ SR) による 物性・材料研究

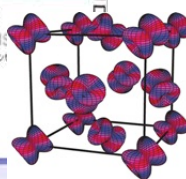
Periodic Table of Elements with color-coded groups and physical states.

Legend:

- Alkali metals (アルカリ金属)
- Alkaline earth metals (アルカリ土類金属)
- Transition elements (遷移元素)
- Lanthanoids (ランタノイド)
- Actinoids (アクチノイド)
- Monometals (単金属)
- Non-metal elements (非金属元素)
- Solid (固体)
- Liquid (液体)
- Gas (気体)
- Artificial elements (人工元素)

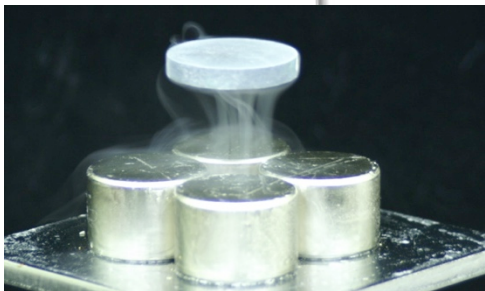
Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

*d electrons
Spin, charge, orbit are independent*



Periodic Table of Elements (continued) showing Lanthanoids and Actinoids.

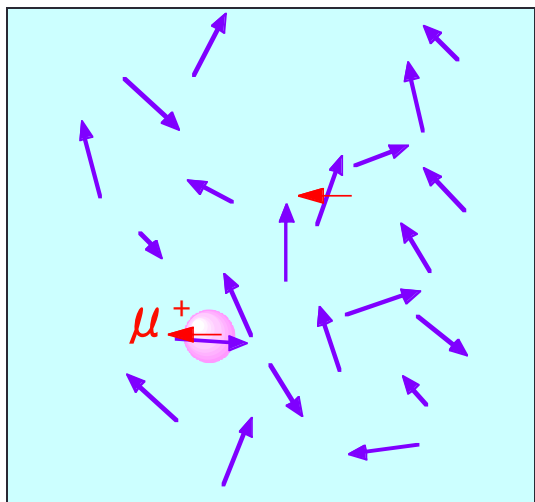
*f electrons
Spin & orbit are strongly coupled*



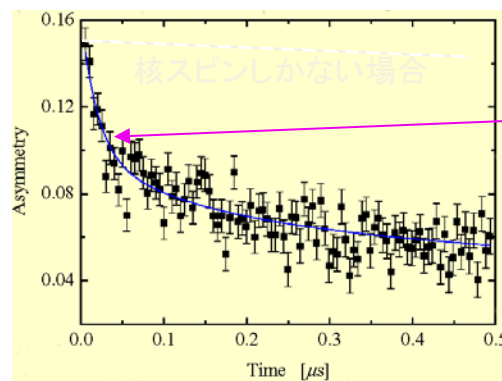
例) μ SRによる磁性研究:

ミュオンは再隣接原子からの磁場を直接感じる

磁気秩序がない状態

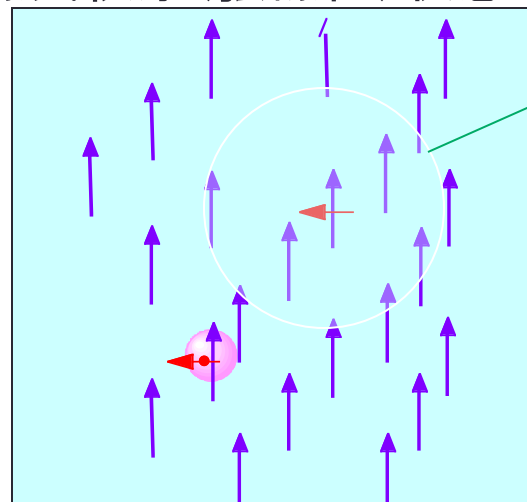


内部磁場はサイトに依存、ミュオン偏極も時間とともに減少



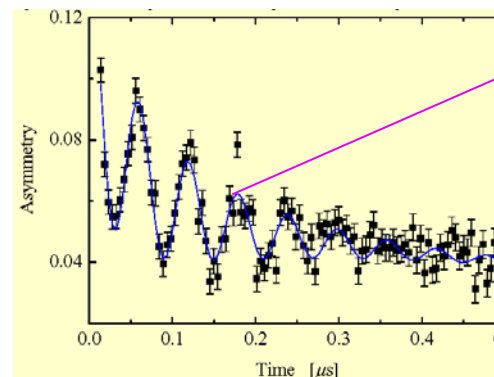
緩和の速さから磁気モーメントの大きさを推定可能

磁気秩序(強磁性)状態



最隣接の磁気モーメントからの双極子磁場にのみ敏感

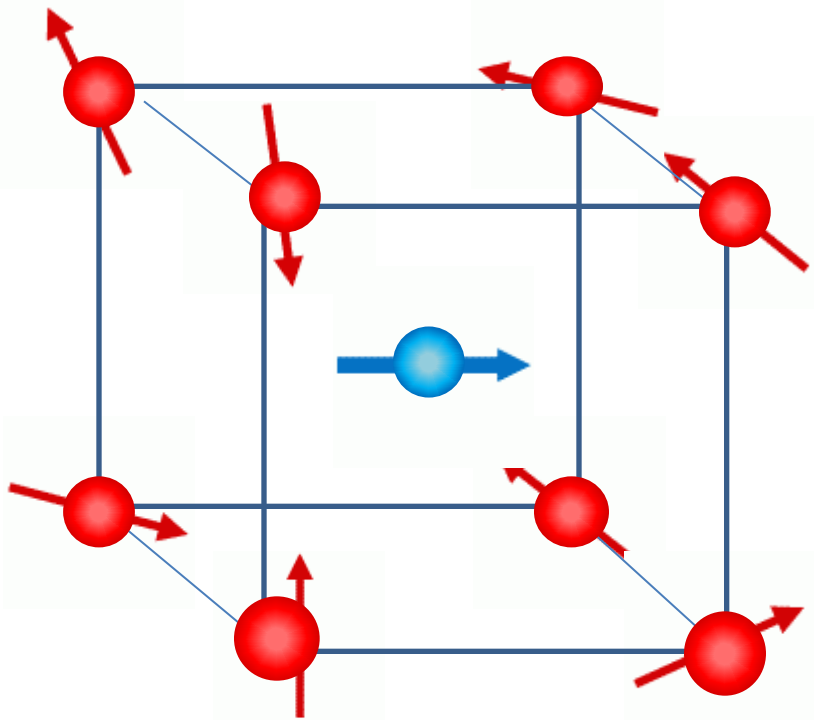
内部磁場はサイト毎に一定、ミュオンスピンは同じ周期で回転



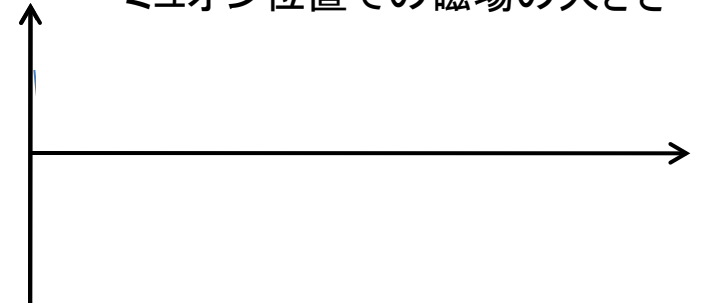
脈動する信号:

- ・周波数
- ・緩和率
- ・振幅

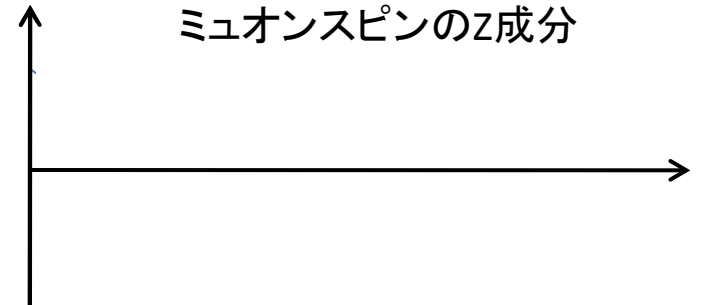
ただし、磁気構造の違いには必ずしも敏感でない



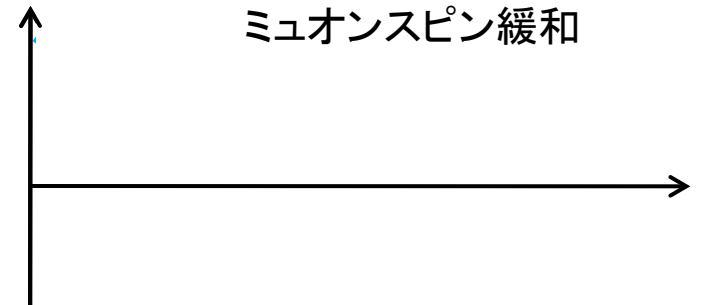
ミュオン位置での磁場の大きさ



ミュオンスピンのZ成分



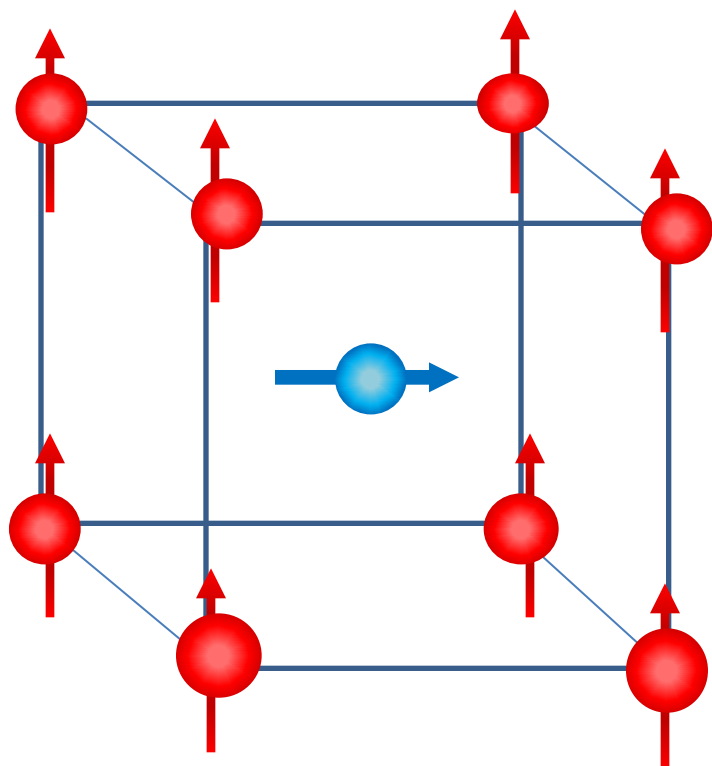
ミュオンスピン緩和



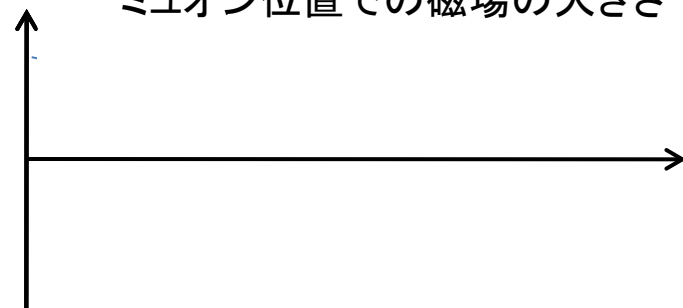
常磁性状態 ($T \gg T_C$)

速い電子スピン揺らぎによるそれぞれのミュオンスピンの運動は異なるものとなる。ミュオンスピン緩和。

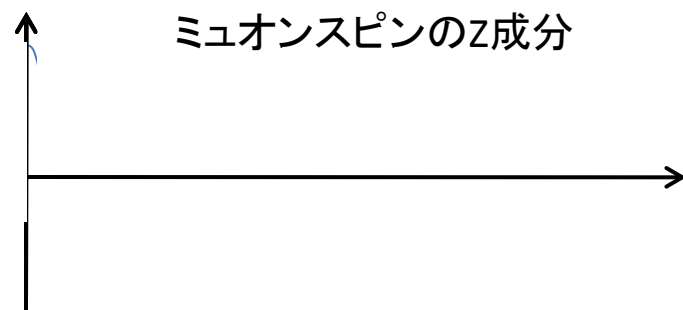
相関時間と内部磁場はミュオンスピンの磁場依存性より求められる。



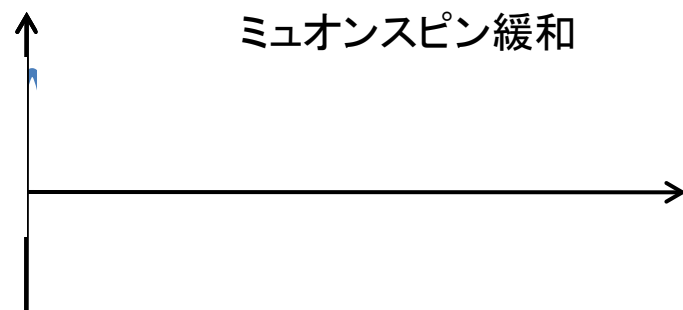
ミュオン位置での磁場の大きさ



ミュオンスピンのZ成分



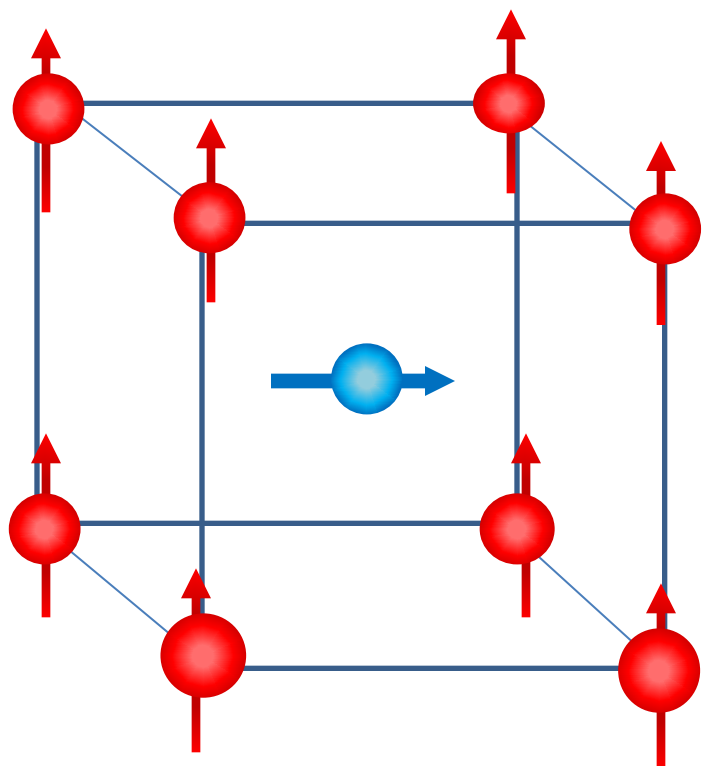
ミュオンスピン緩和



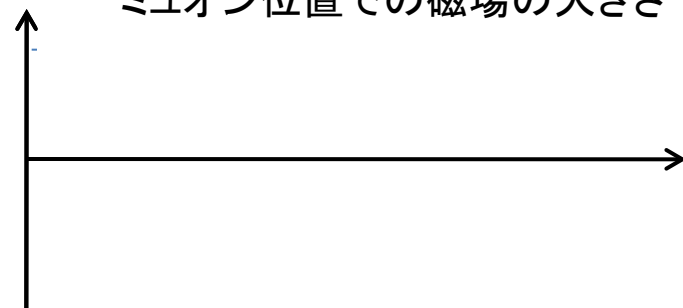
磁気秩序温度近傍 ($T \sim T_C$)

遅いスピン揺らぎに伴い

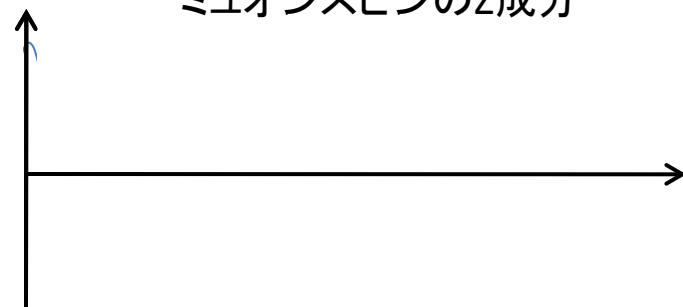
それぞれのミュオンの運動にわずかな差があり、平均としてのミュオンスピンの運動も緩和を示す。



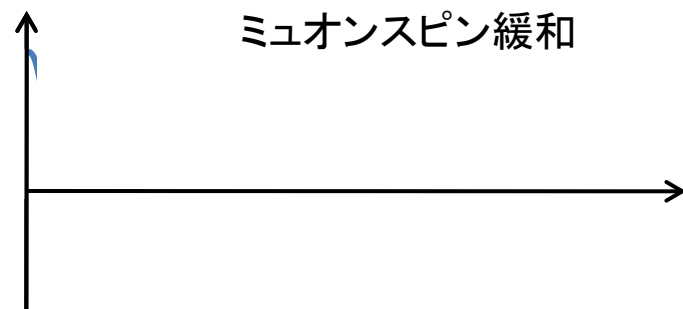
ミュオン位置での磁場の大きさ



ミュオンスピンのZ成分



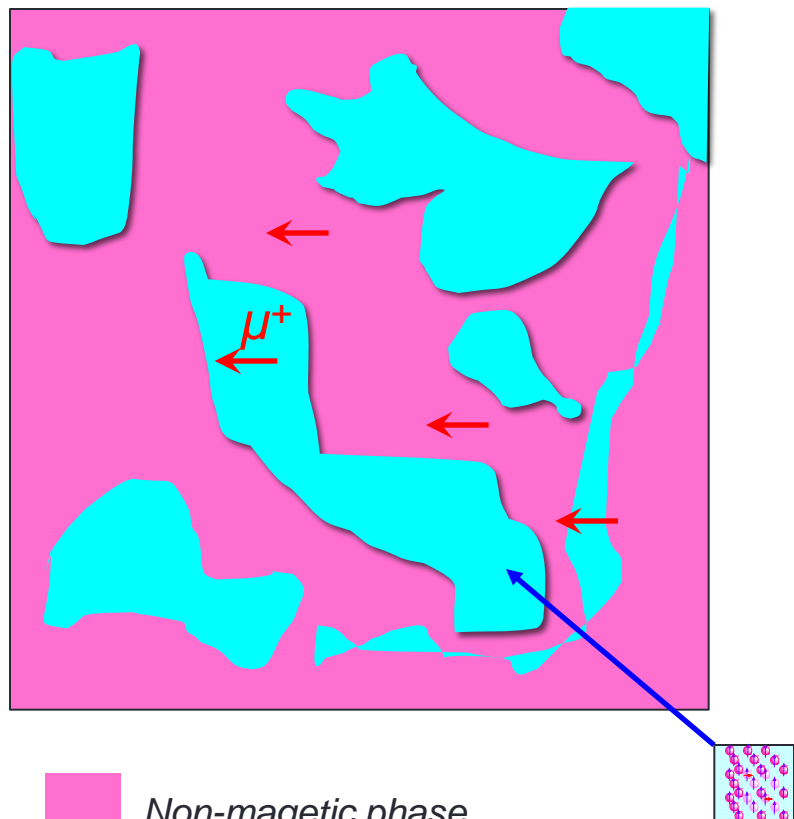
ミュオンスピン緩和



磁気秩序状態 ($T \ll T_C$)
 ミュオンスピン回転が見られるようになる。
 すべてのミュオンスピンの運動が一致。

実空間での相分離がある場合

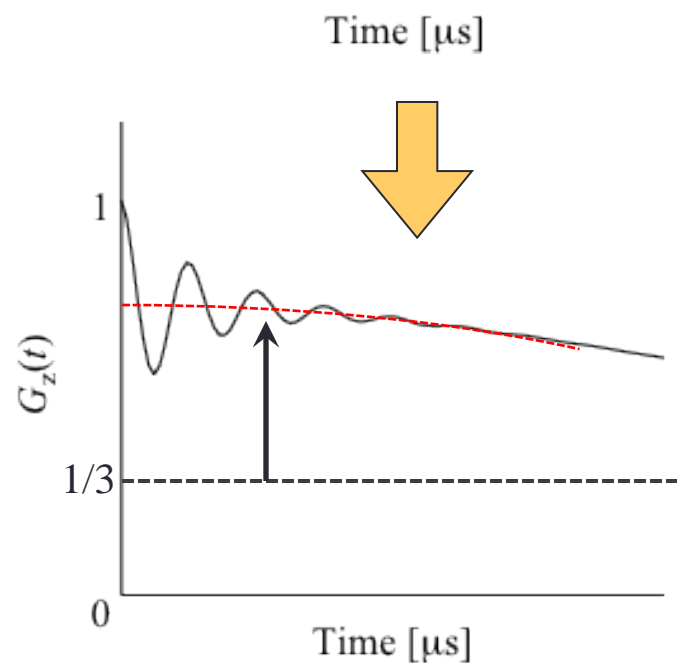
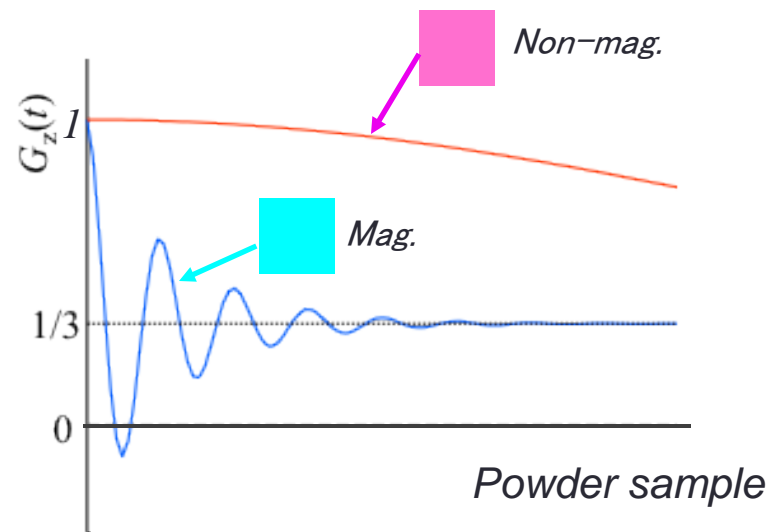
ミュオンは試料中をランダムにサンプリング



Non-magnetic phase

Magnetic phase

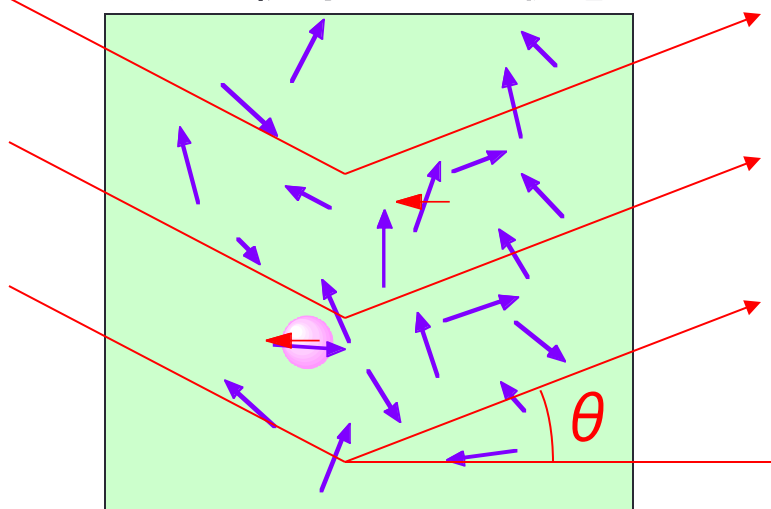
cf. multiple sites in the unit cell



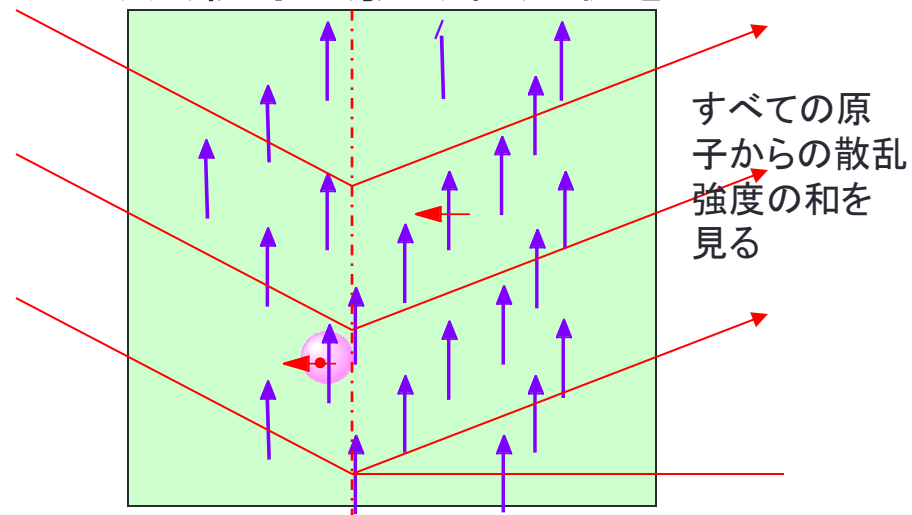
例)磁性研究：中性子回折の場合

中性子回折強度は長距離秩序の度合いに比例

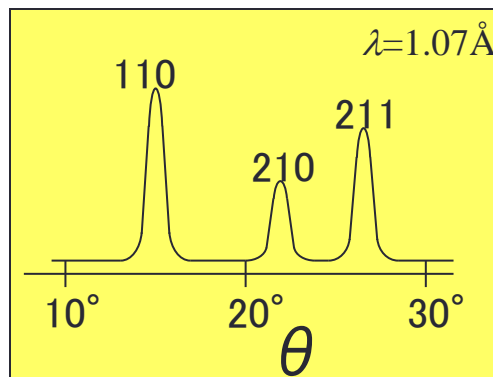
磁気秩序がない状態



磁気秩序（強磁性）状態



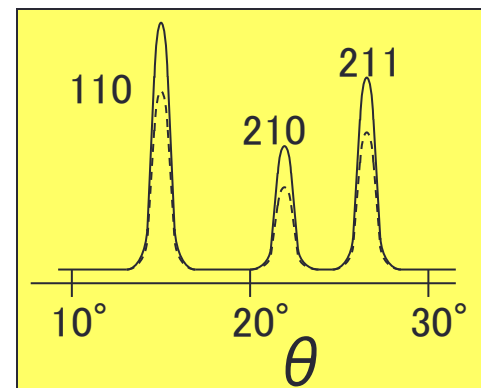
中性子は原子核からの回折のみ



$$2d\sin\theta = \lambda$$

Bragg条件

磁気散乱による回折強度の増大

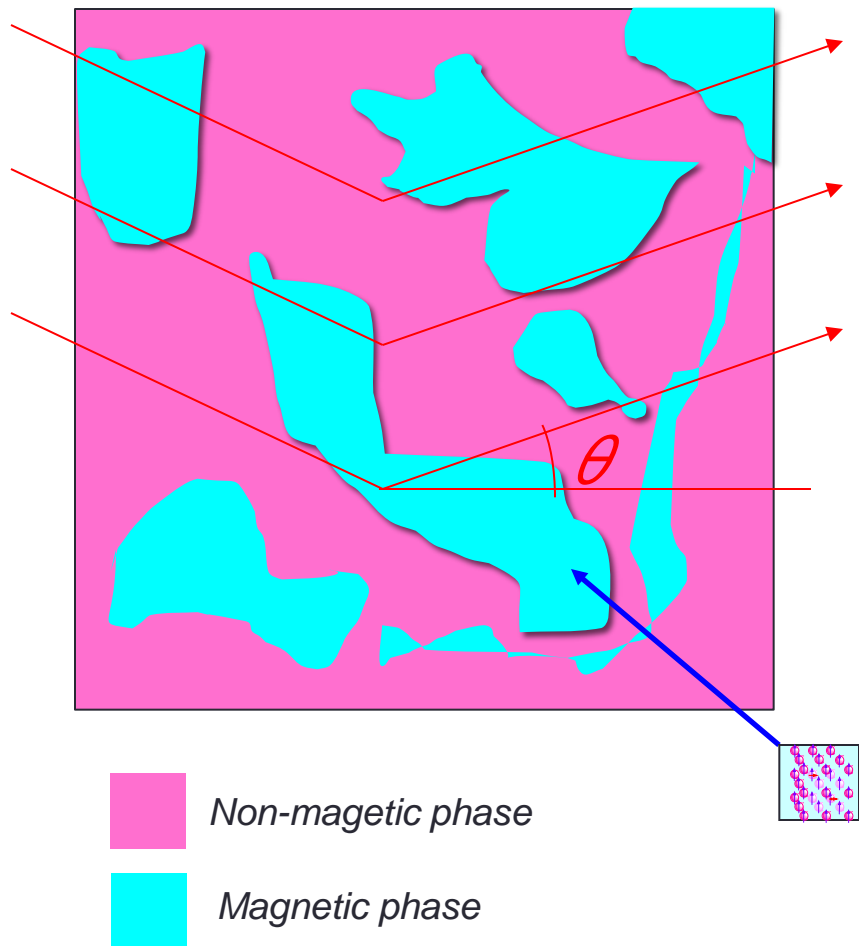


回折強度から体積平均した磁気モーメントの大きさを推定可能

磁気構造によって回折パターンが変化：構造解析に最適

実空間での相分離がある場合

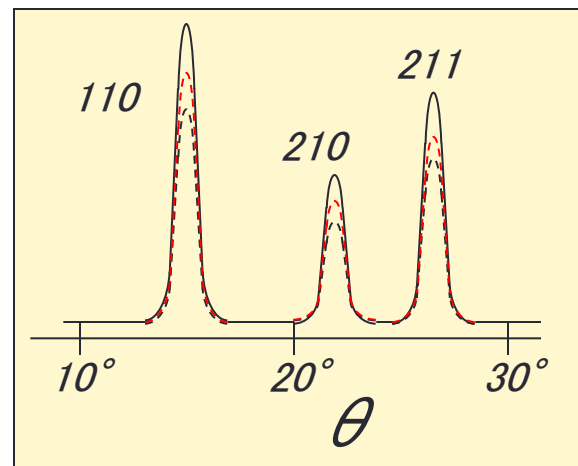
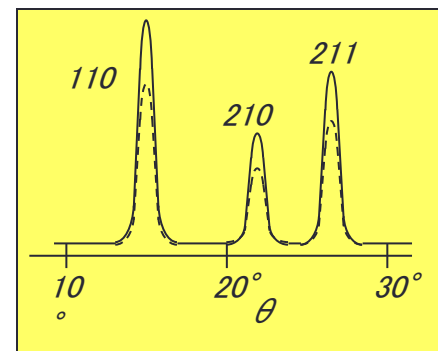
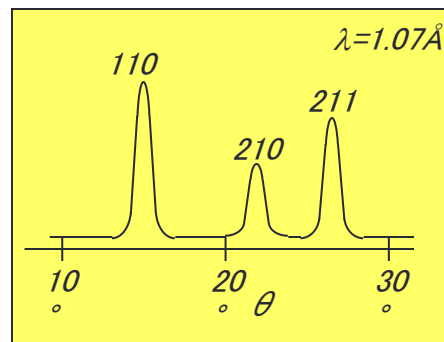
中性子／X線は全体積を平均化



Non-mag.

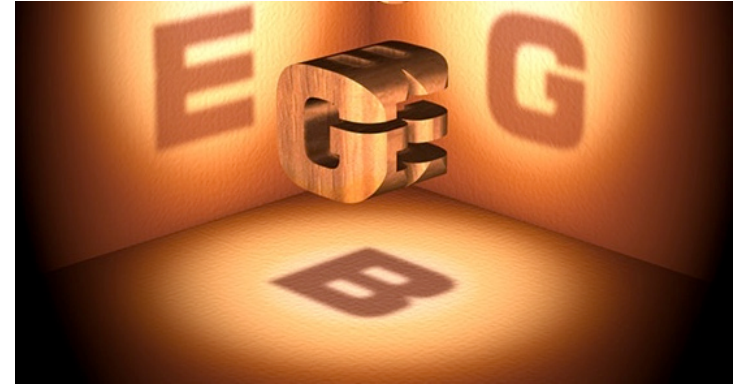


Mag.



... 相分離を判別することは困難

μSRで見えるもの



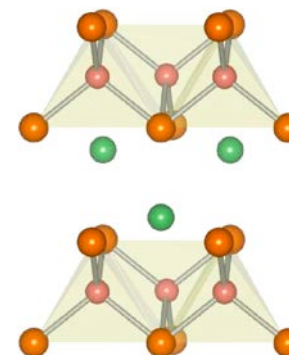
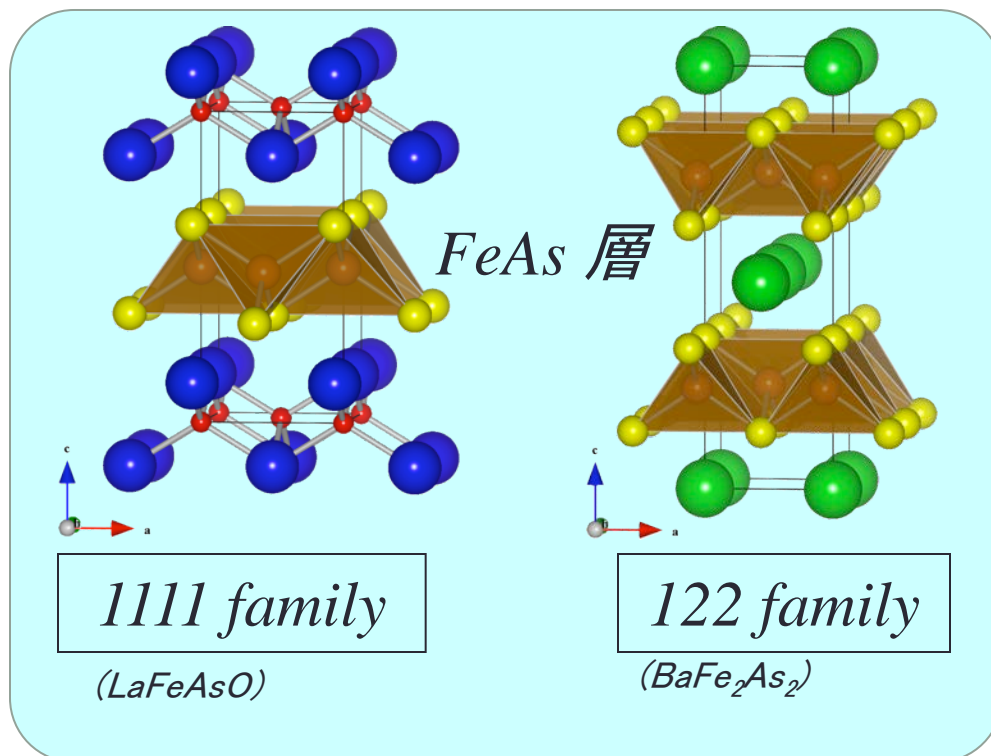
- 局所電子状態($\mathbf{q}=0$):
電子スピンの作る局所内部磁場($\omega=\gamma_\mu B$)、およびその揺らぎ(τ_c)を観測
観測量＝スペクトル密度 $P(\omega)$ [とその揺らぎによる変調]



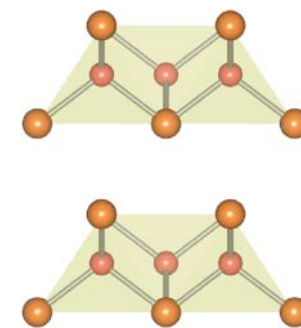
相補的

放射光・中性子等の回折プローブで見えるもの
電荷・スピン分布: 散乱体の全体積に体する平均
観測量＝構造因子 $S(\mathbf{q}, \omega)$

典型例：鉄系超伝導体の磁性研究



111 family
(LiFeAs)



11 family
(FeSe)

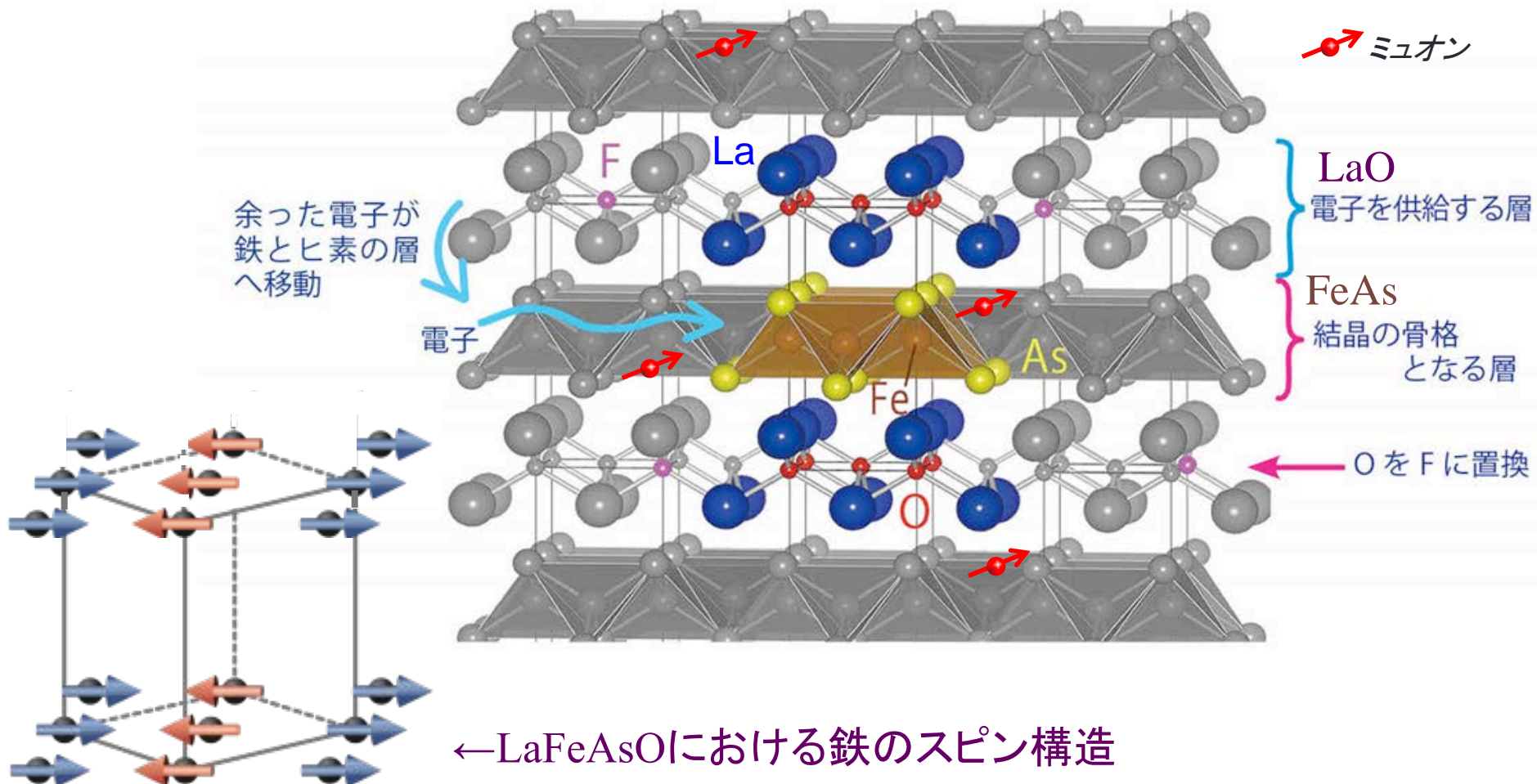
...more

- 高い転移温度 T_c (最高~55 K) を持つ超伝導が鉄を含む物質で実現。→ 「超伝導と磁性は相容れない」という常識を覆す。
- 銅酸化物と類似の特徴が数多く見受けられる。→ 二次元-FeAs 面へのキャリア注入とともに、母物質の反強磁性(スピン密度波)が壊さて現れる超伝導etc...

典型例：鉄系超伝導体の磁性研究

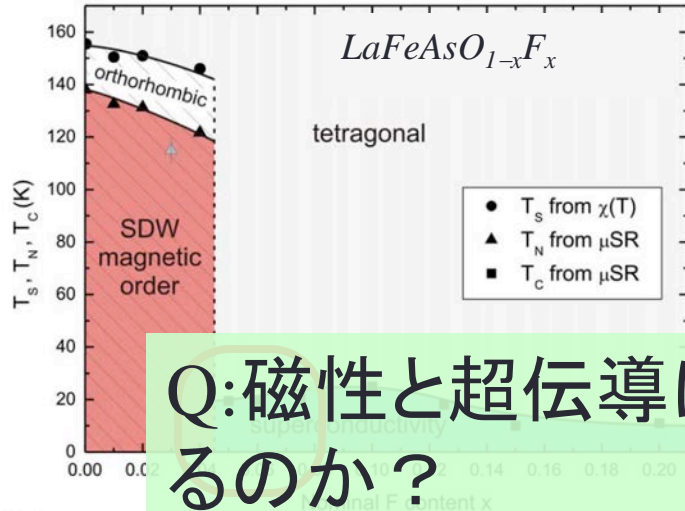
$\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$: $x = 0$ では反強磁性体

→ O^{2-} を F^- で置換すると($x > 0$)、磁性が消えて超伝導が出現



Phase diagram

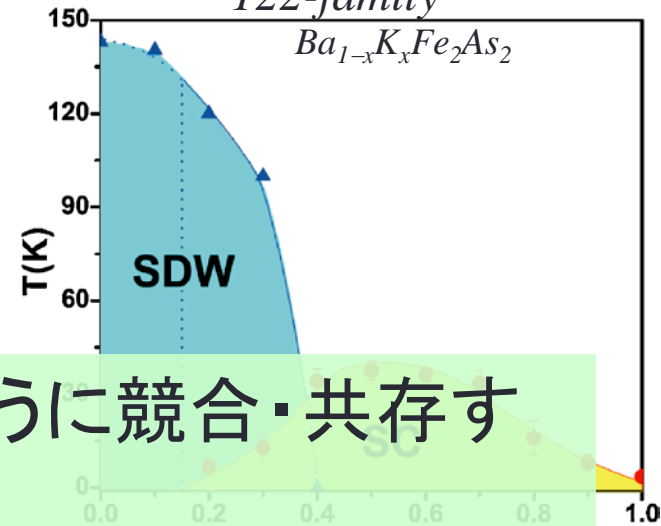
1111-family



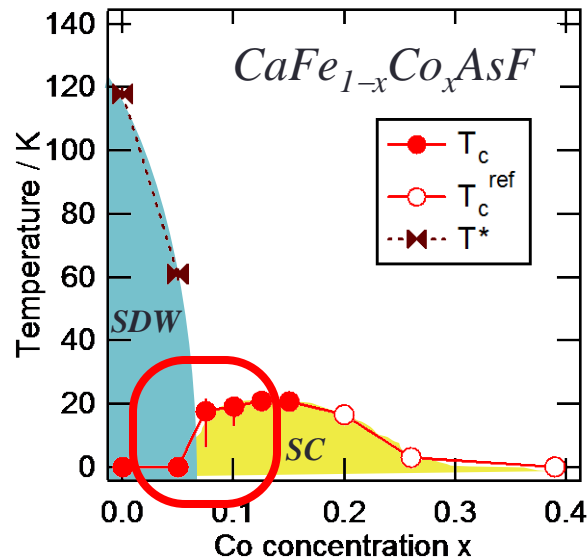
Q:磁性と超伝導はどのように競合・共存するの？

x : Electron-doping

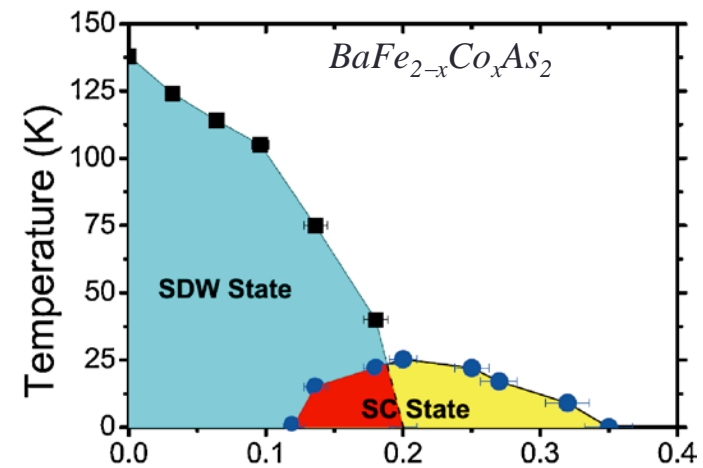
122-family



x : Hole-doping



x : Electron-doping

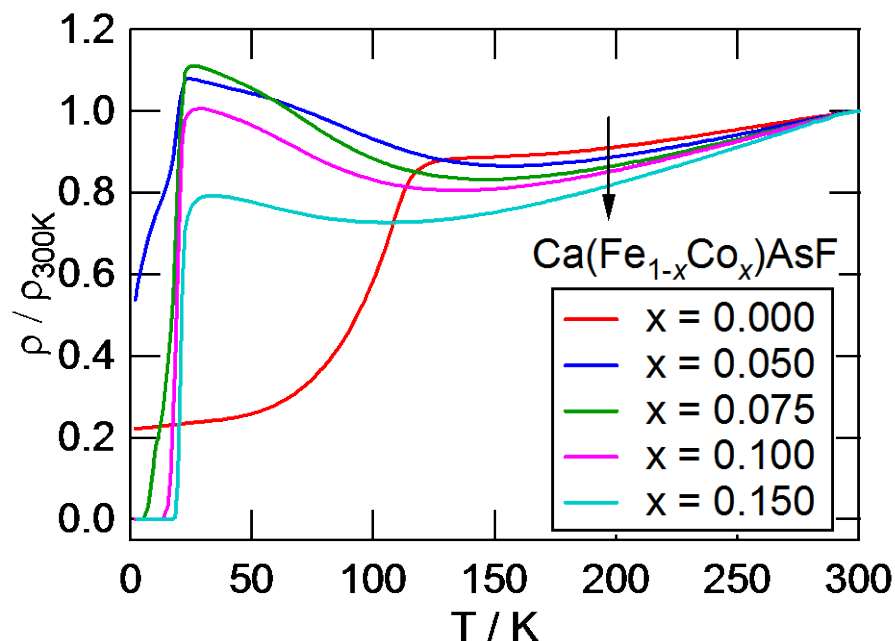
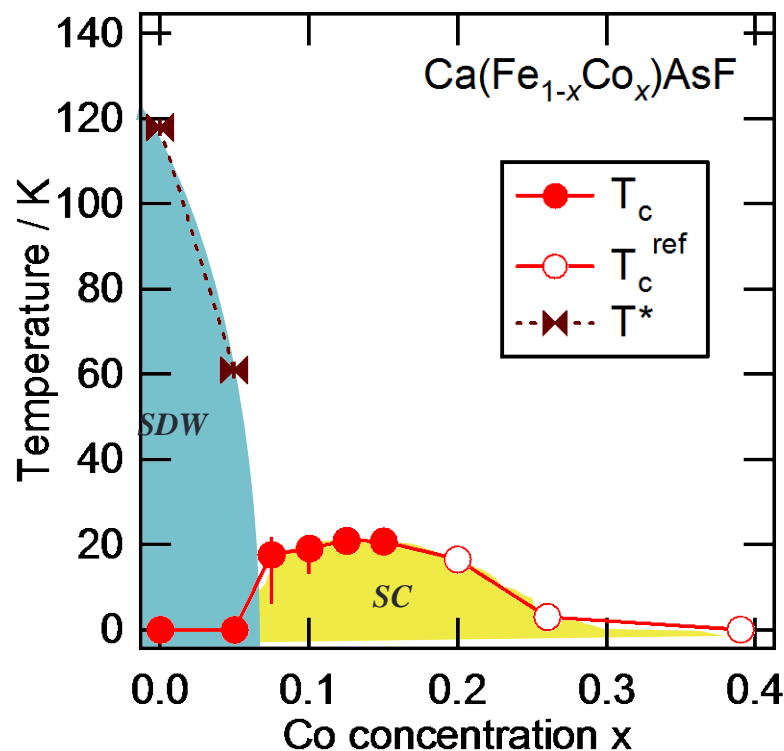


x : Electron-doping

(...hole-doping is difficult)

Samples:

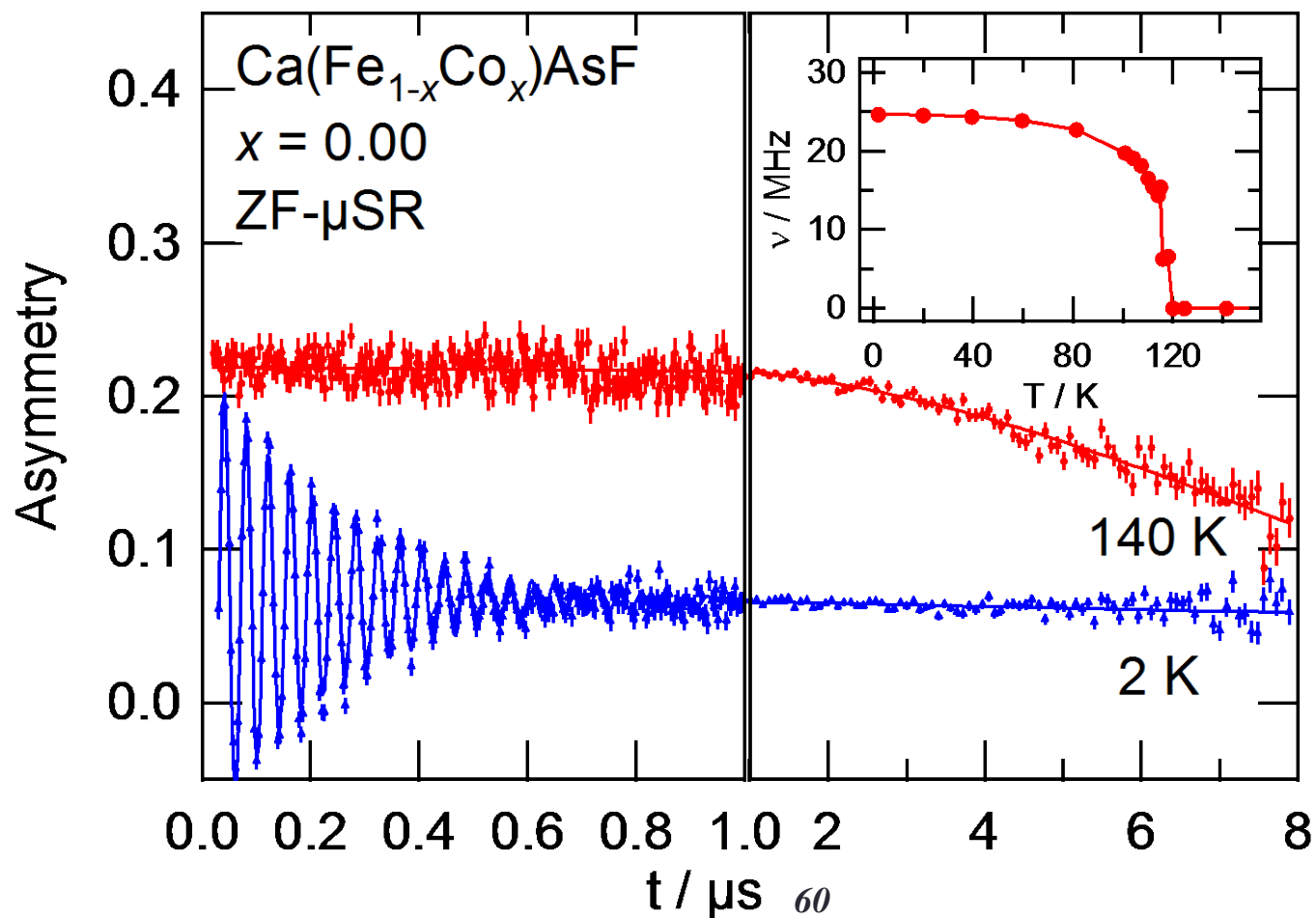
Matsuishi et al., '08



- $\text{CaFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{AsF}$
 $x=0.0, 0.05, 0.075, 0.10, 0.125, 0.15$

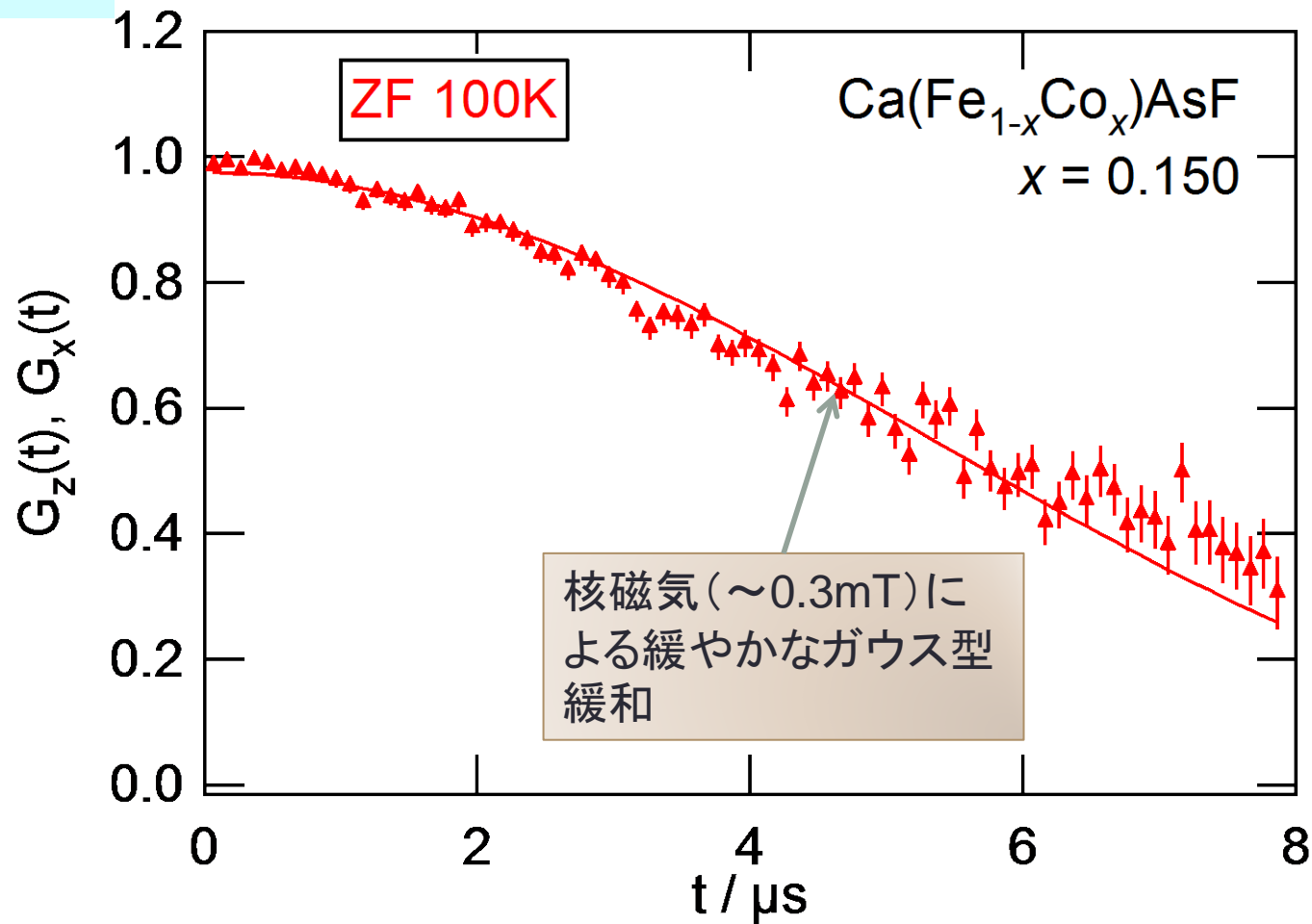
$x=0.0$

外部磁場=0で、単一周波数25 MHz のミュオンspin回転信号
 \Rightarrow ミュオンは自発磁化に伴う一定の内部磁場を観測.



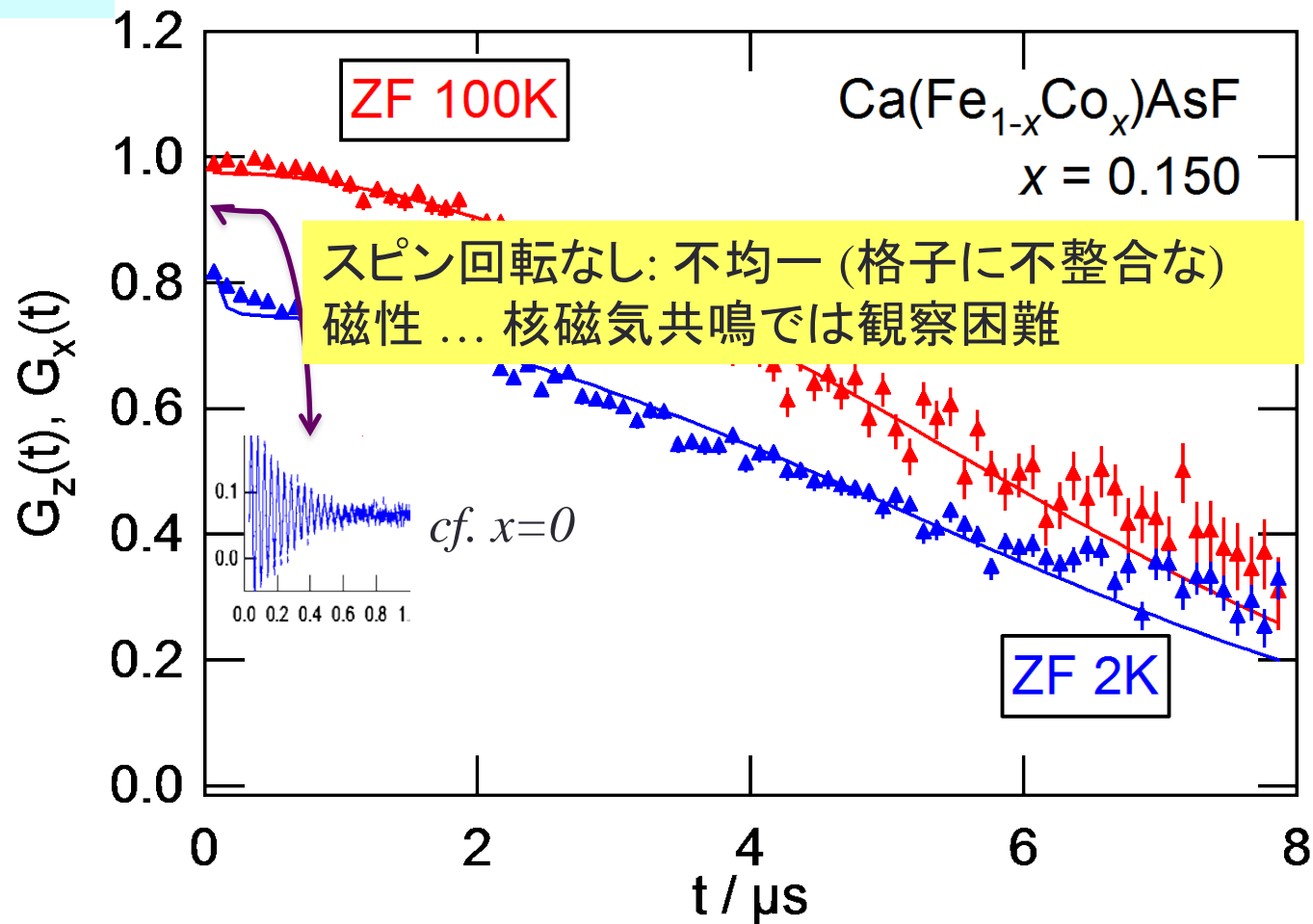
Result: $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{AsF}$ [111]-family]

$x=0.15$

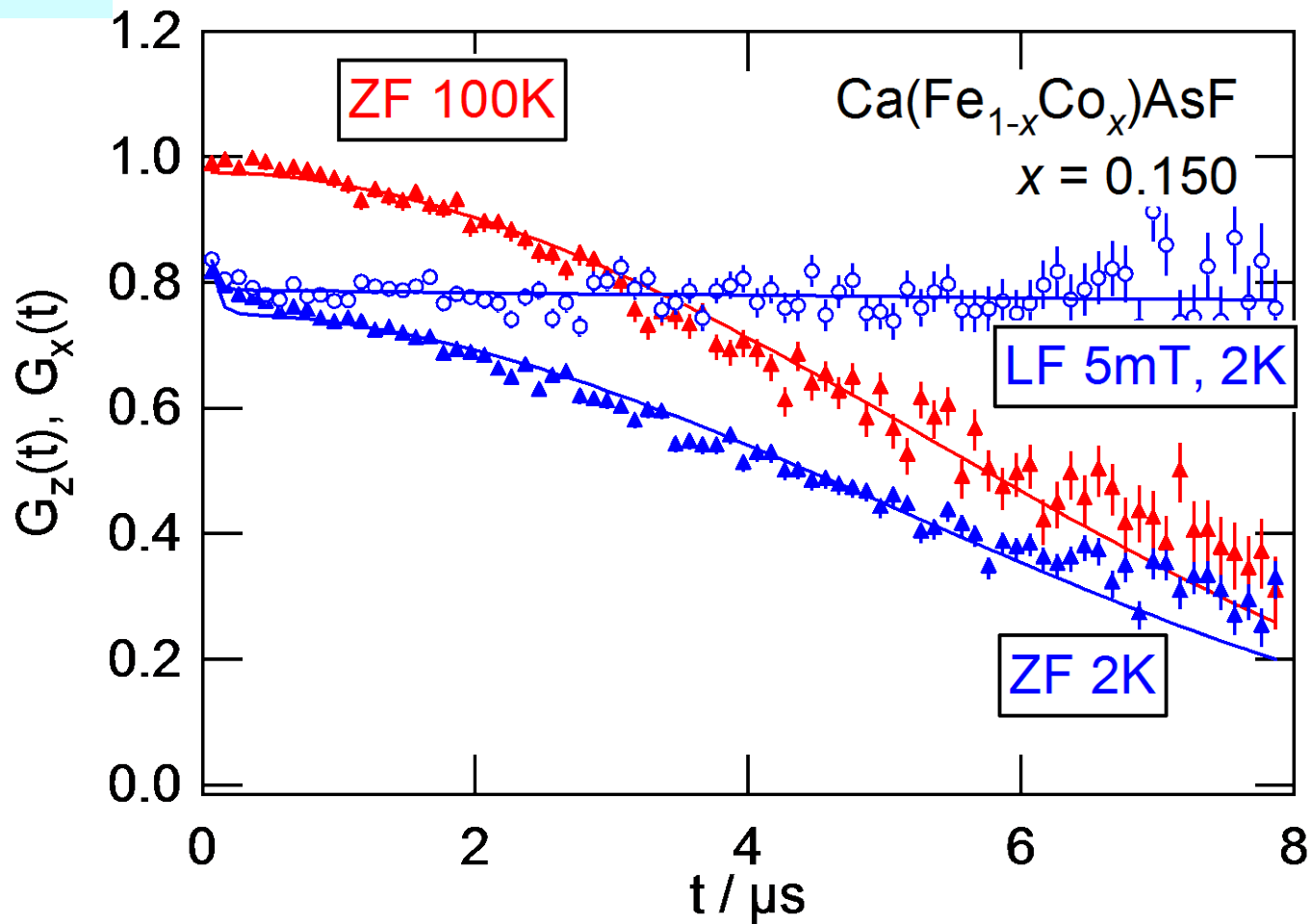


Result: $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{AsF}$ [111]-family]

$x=0.15$

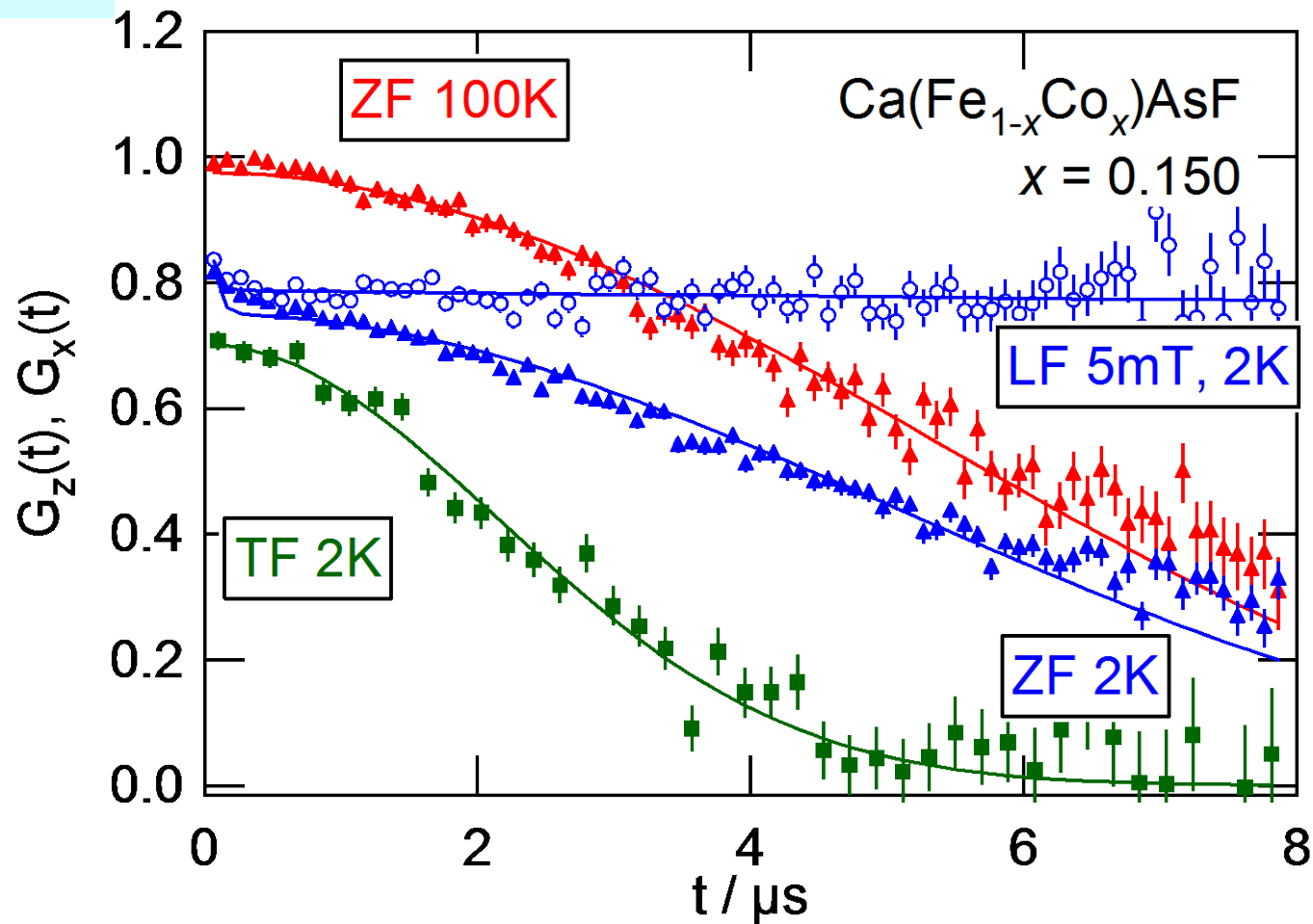


$x=0.15$



縦磁場: 非磁性な相では核スピンからの弱い内部磁場のみ。

$x=0.15$

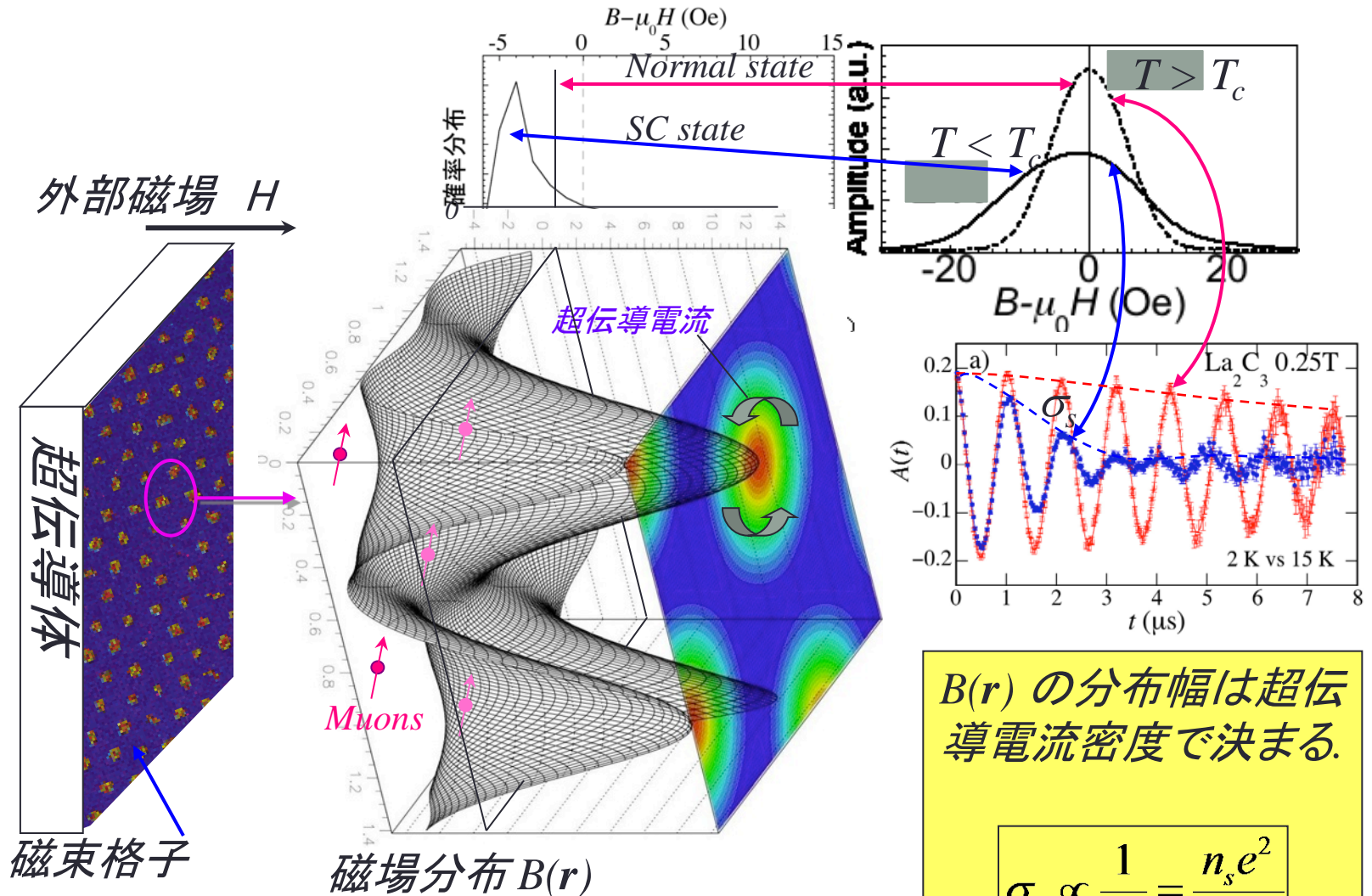


横磁場: 非磁性相で大きな減偏極 \Rightarrow 超伝導(磁束格子)状態.

μ SRで超伝導を見る

第二種超伝導体の磁束格子状態

超伝導体中では磁束が規則的に並んだ状態 \Rightarrow 磁場分布が空間的に不均一

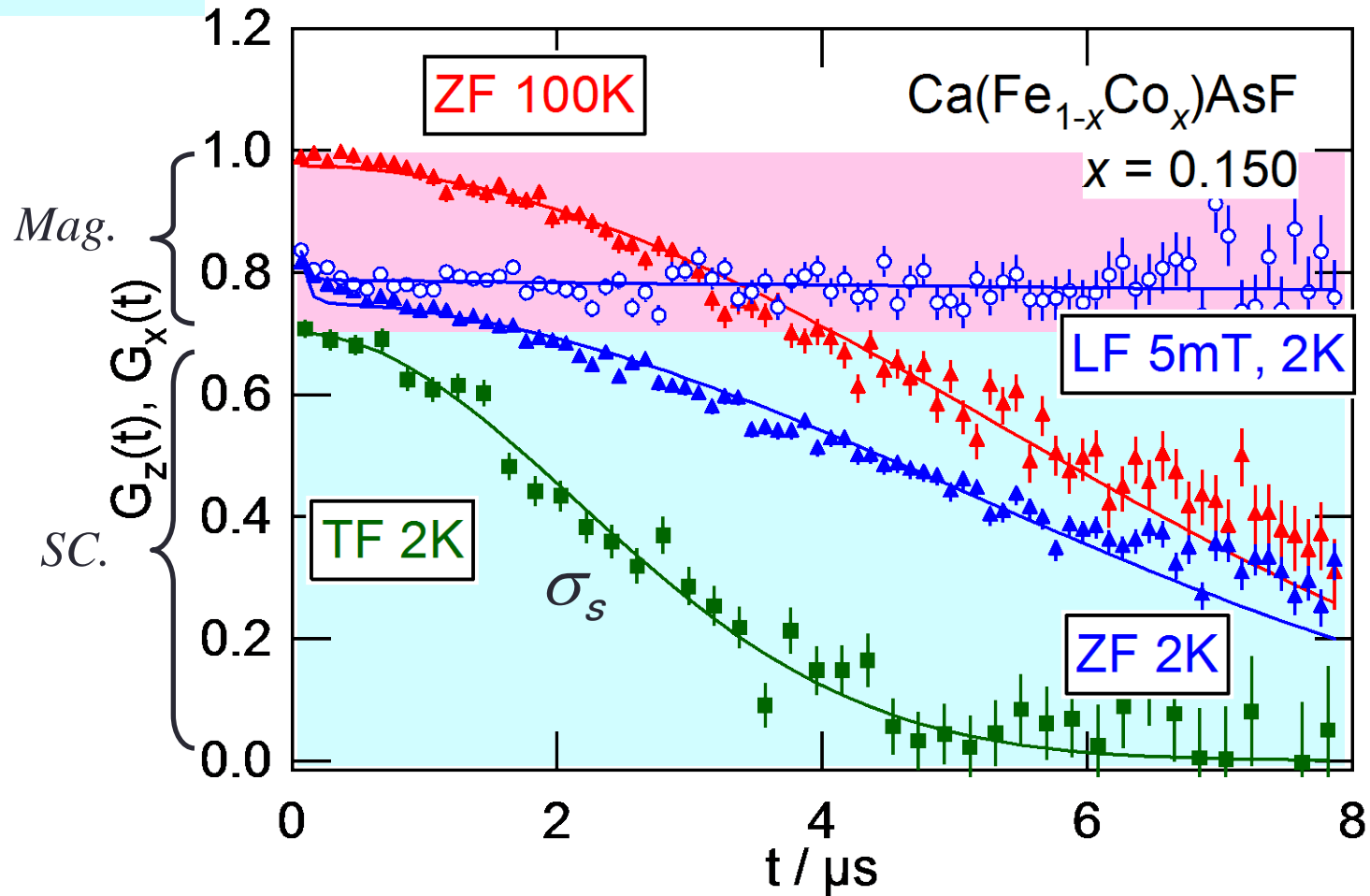


$B(r)$ の分布幅は超伝導電流密度で決まる。

$$\sigma_s \propto \frac{1}{\lambda^2} = \frac{n_s e^2}{m^* c^2}$$

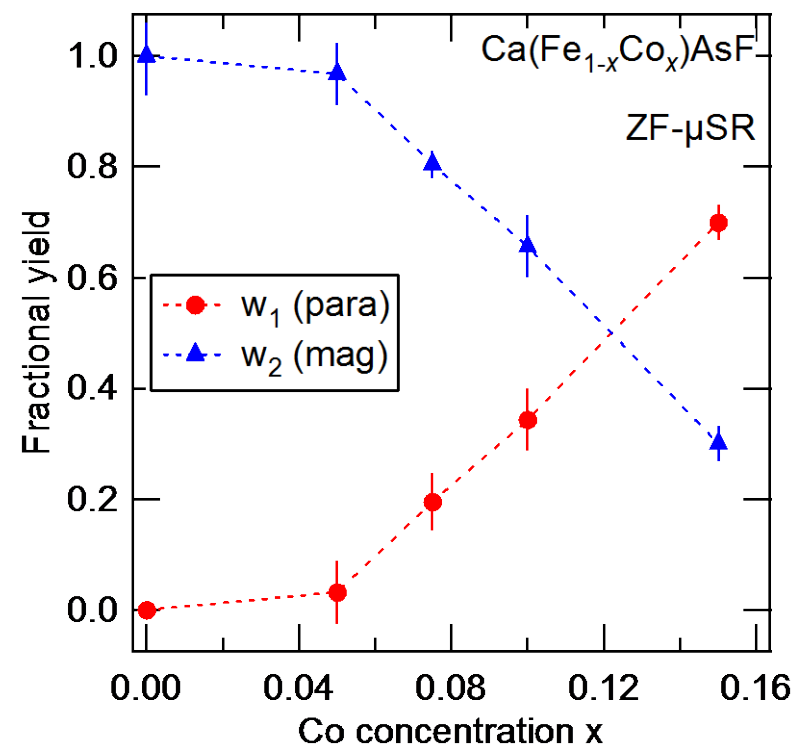
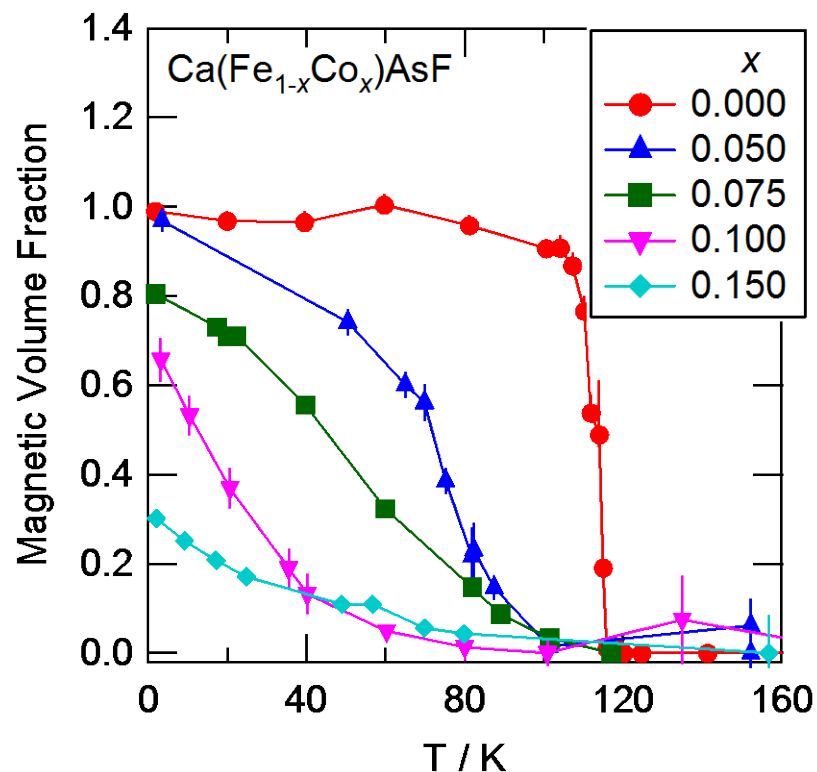
ミュオンは $B(r)$ をランダムにサンプリング

$x=0.15$



Paramagnetic domain = Superconducting region.

Co濃度 x と磁性相・超伝導相の関係

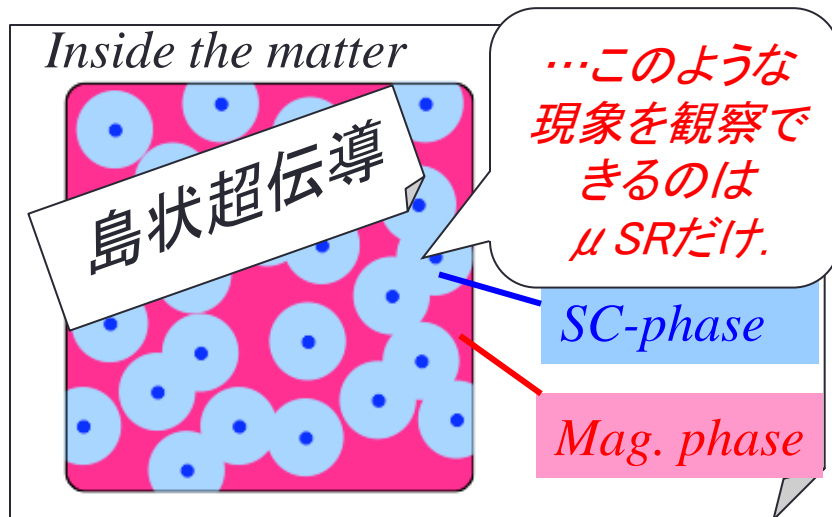
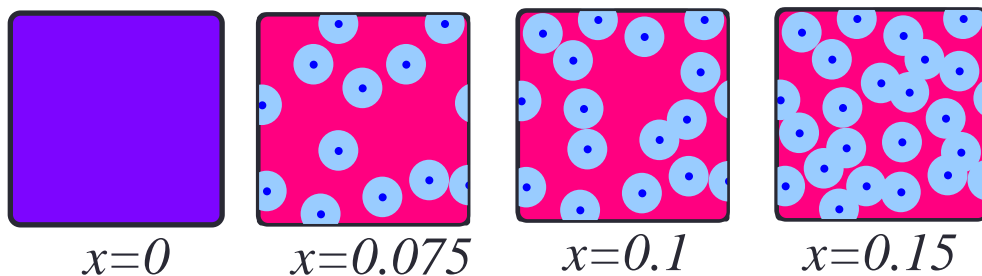


$x > 0.05$ でコバルト濃度の増大に比例して磁性相が減少し、代わりに超伝導相の体積が増加する。

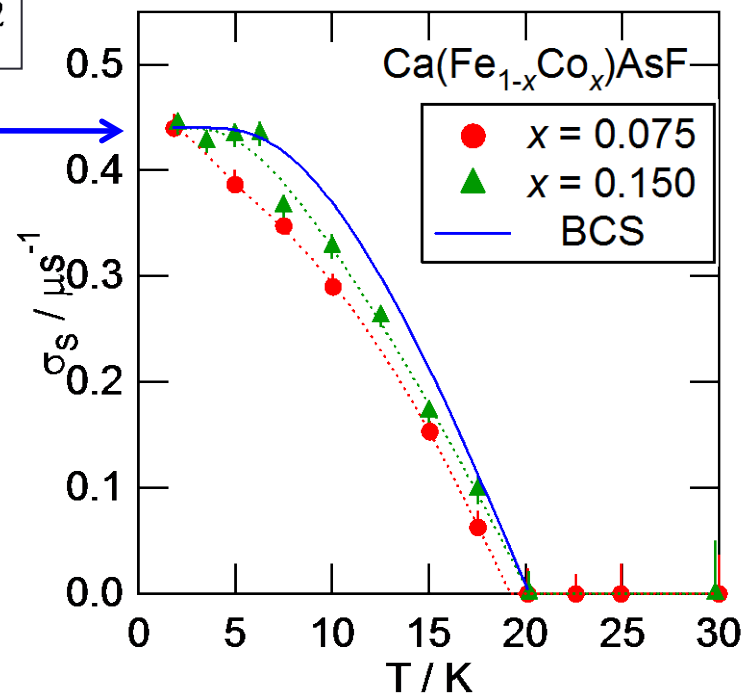
超伝導電流密度 n_s vs
Co 濃度 x :

$$\sigma_s \propto \frac{1}{\lambda^2} = \frac{n_s e^2}{m^* c^2}$$

σ_s (従って n_s) は x に依存しない。



ドメインサイズ $\sim 1 \text{ nm}$



銅酸化物で Cu を Zn 等で置換した場合 (Zn の周りが磁性相になる) と逆の現象。

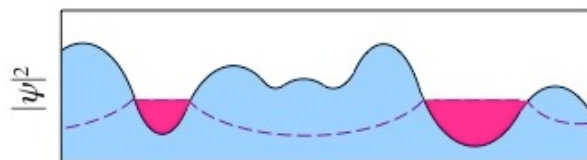
S. Takeshita et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 027002 (2009).

島状超伝導 vs 多孔質超伝導

鉄系超伝導体
(*e*-doped)

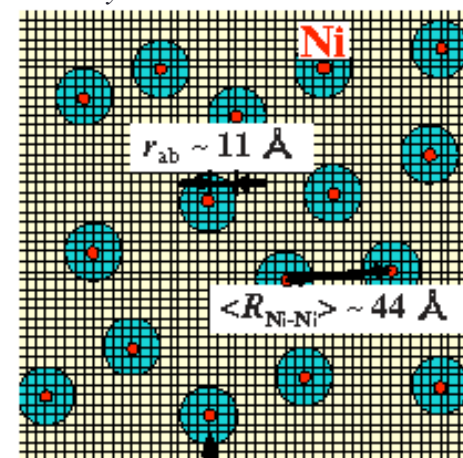
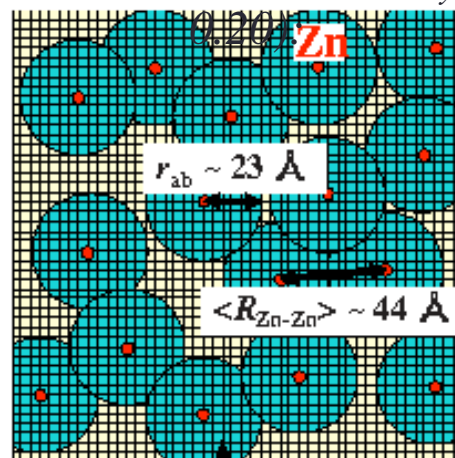
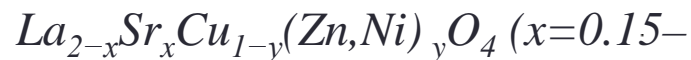
マンガン 54.938049	鉄 55.8457	コバルト 58.933200	ニッケル 58.6934	銅 63.546	亜鉛 65.409	ガリウム 69.723
43	44	45	46	47	48	49

超伝導相はコバルト原子の周りに.



銅酸化物超伝導体
(*h*-doped)

亜鉛の周りで超伝導が押さえられ、代わりに磁性相が出現.

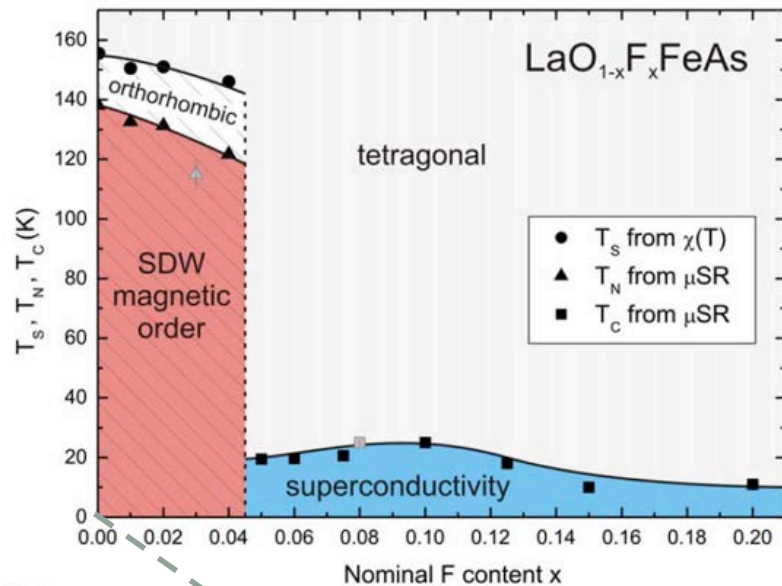


magnetic

Adachi et al., '08

...suggesting importance of very “local” spin correlation (“Zhang-Rice” singlet) in cuprates?

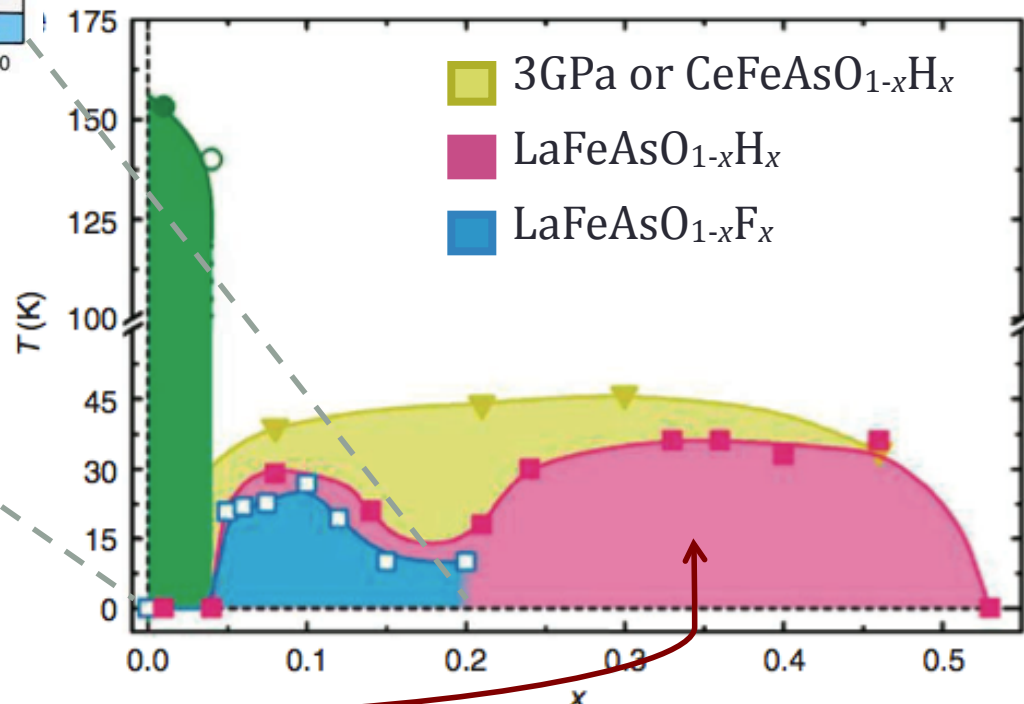
$$0 \leq x \leq 0.2$$



Luetkens *et al.*, Nature Mater. **8**, (2009) 943.

1111-family

O^{2-} を H^- で置換する方法で、従来のキャリア濃度を大幅に超える領域までキャリア濃度を増大させたところ、それまでより高い T_C を持つ新しい超伝導相が出現！

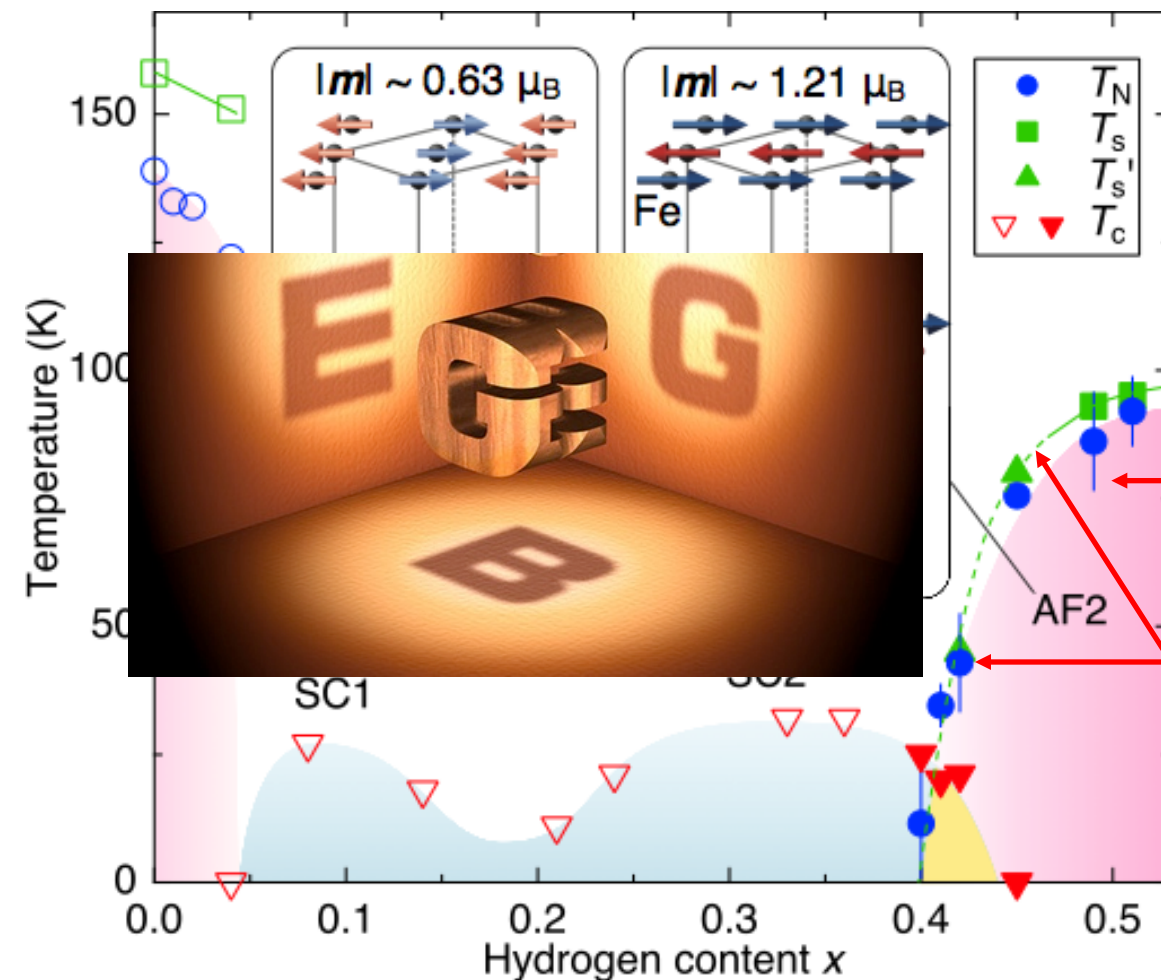


新しい超伝導相は
磁性と無関係？

Imura *et al.*, Nature Comm. **3**, (2012) 943.

最近の進展: $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{H}_x$ ($0 \leq x \leq 0.5$)

放射光・中性子・ミュオンの協奏的利用



M. Hiraishi, et al., in *Nature Physics* (2014)

ミュオンにより、磁気転移温度及び、磁気体積分率の水素量 x 依存性を決定し、超伝導相と磁性相の共存領域が存在する事を見いだした

中性子散乱により、 $x = 0$ の母相とは異なる磁気構造を見だし、磁気秩序変数の温度依存性を決定した。

X線散乱により、鉄系超伝導体における新規結晶構造 ($Aem2: x=0.51$)、及び格子定数の異常 ($x=0.45$)を見いだした。

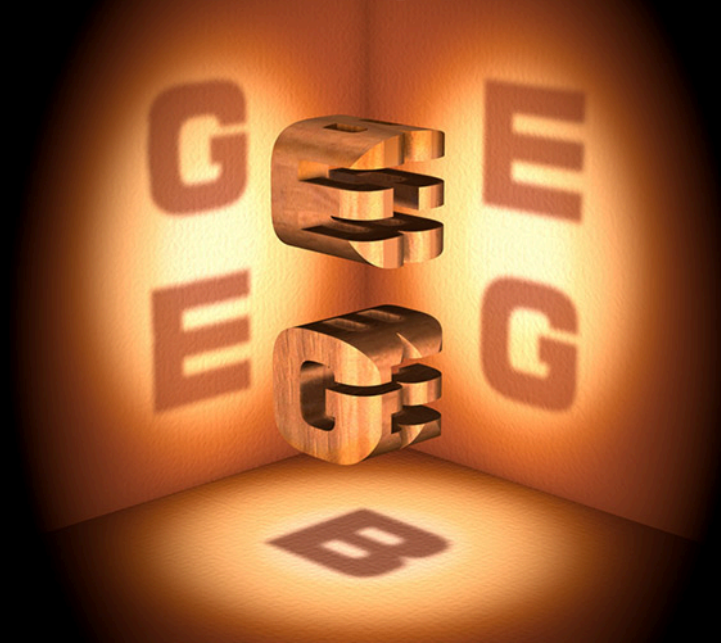
3つのプローブを相補的に用い、高ドーピング域において今までにない特徴を持つ反強磁性相の存在を明らかにした。SC2とAF2の密接な関連が示唆されている。

ミュオン

…いまだになぜ存在するか分からない素粒子

量子ビームとしてのミュオン

…物質の性質・機構を原子スケールで解き明
かすための強力な手段



Fin

現代物性物理学のテーマ＝電子相関

- 凝集体中で電子が1原子の範囲を超えて広がる



原子間の相互作用



新物質評価手段としての μ SRの特徴—unique “niche”

ニッチ、すきま

原子レベルでの局所磁気プローブ:

中性子回折に比べて

1) 長距離秩序の有無に関わらず磁性を評価可能

...小さな磁気モーメント S / 大きな単位体積 V_0 に適用可能

中性子回折強度 $\propto V \cdot S^2 / V_0^2 \Leftrightarrow$ ミュオン回転周波数 $\propto S$
回転振幅 \propto 磁性相の体積

2) 比較的少量の粉末試料で磁性を評価可能

3) 磁気秩序変数に線形に応答

核磁気共鳴(NMR)に比べて

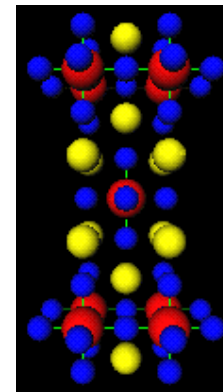
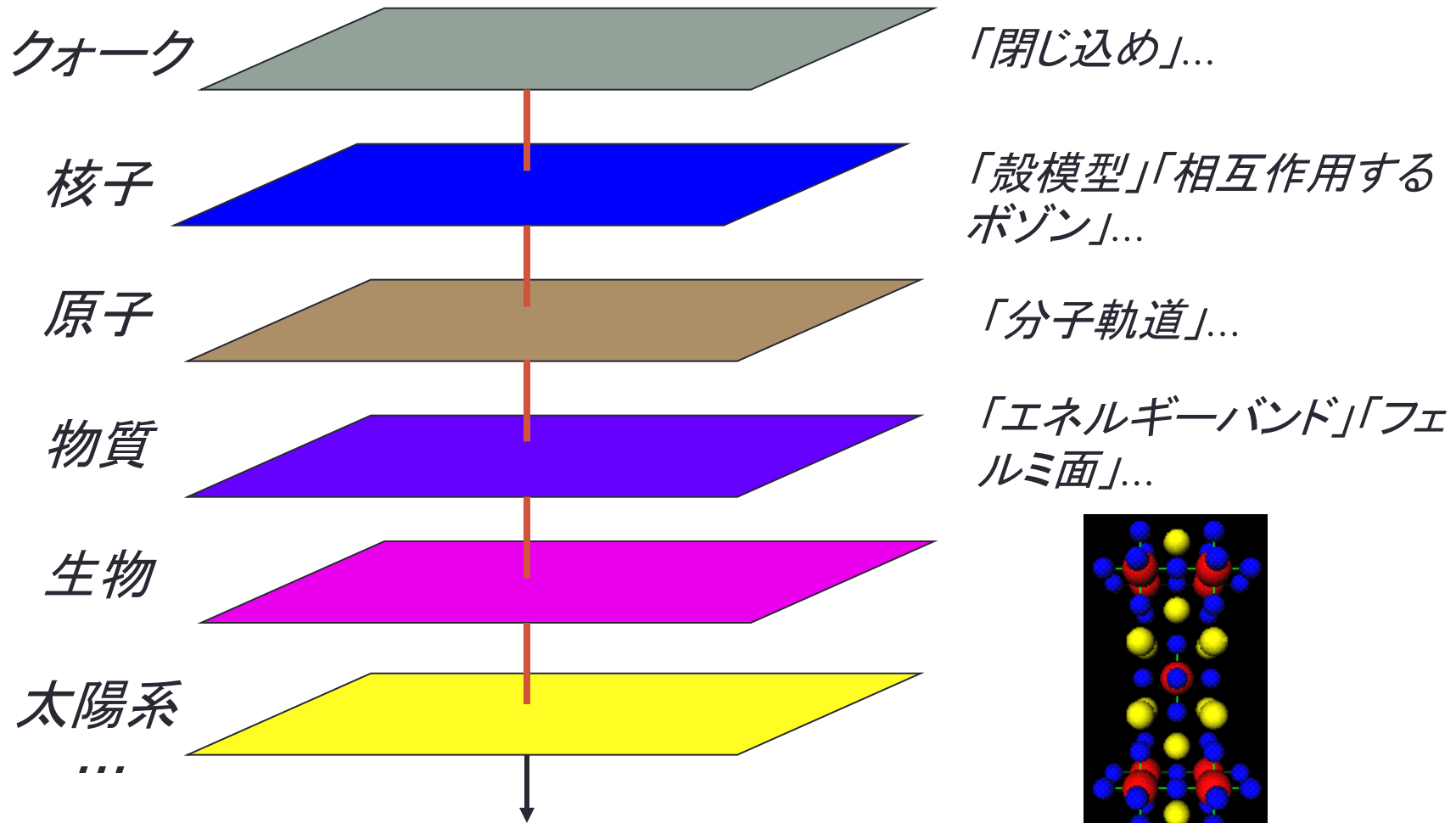
1) 核スピンの有無に関わらず全ての物質で適用可能

2) 純粹に磁気相互作用のみ(スピン=1/2)で解釈の
任性が少ない / 常にゼロ磁場測定可能

3) 磁気秩序変数に線形に応答

中性子 / NMR両者に比べて

これらが見れない時間スケールの現象を μ SRで見る事が可能



“*More is Different* [多は異なり].” (...by P.W. Anderson)