

# J-PARCにおける ミュオン科学

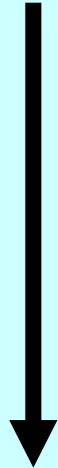
東京工業大学理工学研究科 教授

日本中間子科学会 会長

西田信彦

# ユーザーの組織

- 中間子科学連絡会



主にKEKミュオン科学施設支援

平成18年9月24日 組織替え

- 日本中間子科学会

会員 約150名

物性物理、化学、生物、原子核、素粒子分野



# 物質中のミュオンがとる状態

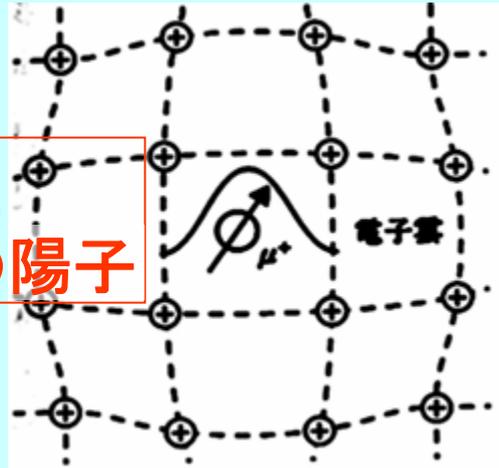
$\mu^+$

軽い水素 (質量 約1/9)

・金属中

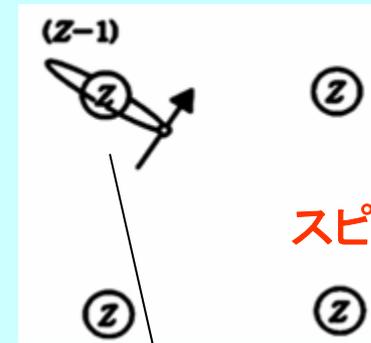
電子雲で遮蔽された  
スピン偏極100%の陽子

プロトンNMR



$\mu^-$

スピン偏極 (Z-1) 擬似原子核



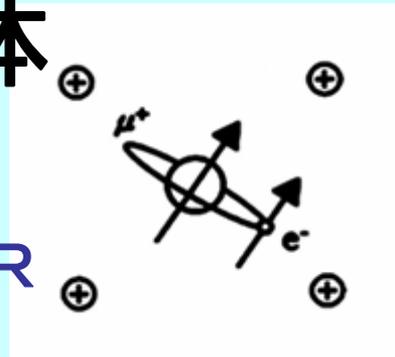
スピン偏極16%

(Z-1)不純物NMR

絶縁体、半導体

水素原子と同等

電子スピン共鳴 ESR



ミュオニウム

スピン偏極 50%の  
スピン1の電子

ミュオン原子

重い電子

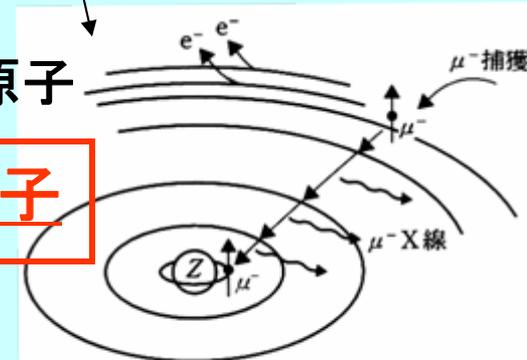
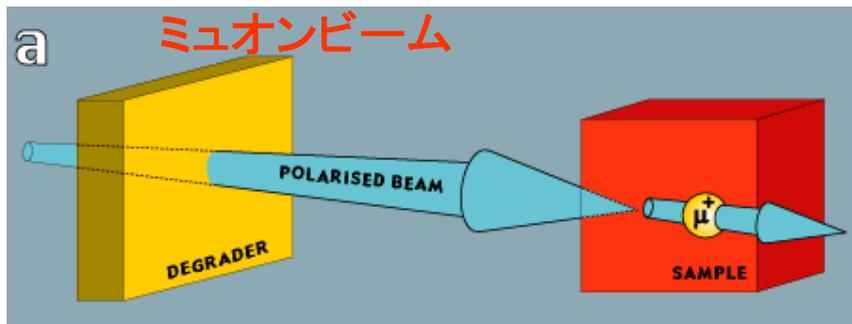


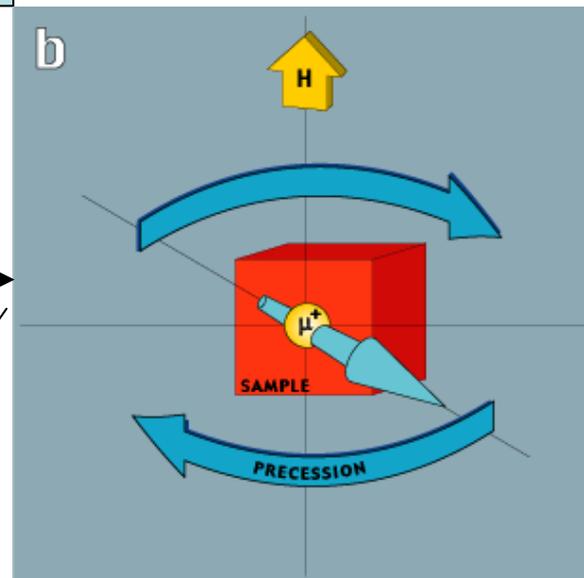
図 2.9 ミュオン原子の生成

# ミュオン spin 回転・緩和法 $\mu$ SR

$\mu$  SR=muon Spin Rotation, Relaxation...

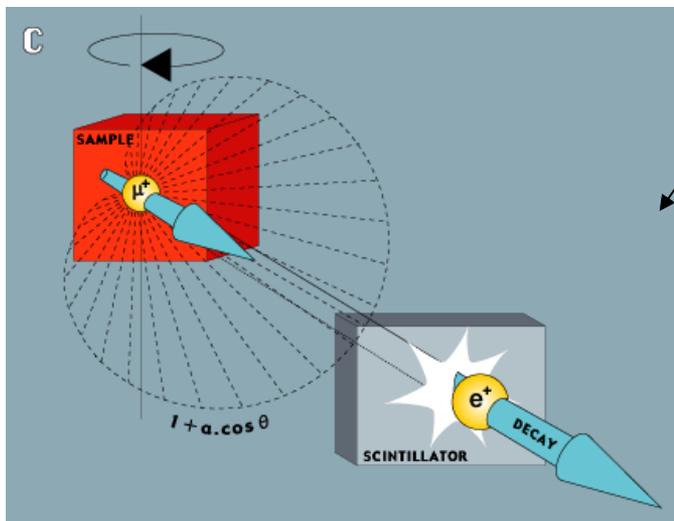


a) 100% spin 偏極ミュオン 打ち込み。



## スピンの動きを ns で追える

b) ミュオンは局所磁場を感じて spin 歳差運動 または spin の向きを変える



c) ミュオン崩壊陽電子 (平均エネルギー 35MeV) 観測  
→ ミュオン spin 回転を検出

# ミュオン科学

J-PARCにおけるミュオン利用の可能性は基礎科学から応用に至るまで広範囲に渡っており、これらの分野においてJ-PARCミュオン施設は世界的研究拠点として中心的な役割を果たすことが大いに期待されます。

## 基礎科学

### 物性物理学

銅酸化物超伝導体の物性  
量子臨界点近傍の物性  
第二種超伝導の磁束格子状態  
半導体中の水素同位体中心

### 化学

ラジカル化学  
水素化反応のダイナミクス  
超臨界状態の化学

### 素粒子物理

超対称性とミュオン稀崩壊  
量子電磁気学

## 学際分野

### $\mu$ 触媒核融合

アルファ捕獲と媒質効果  
超微細相互作用効果  
ミュオン原子

### 生物物理

材料としての生命体構成物質  
電子状態と分子機能

## 応用

### 非破壊分析

バルク敏感元素分析  
トモグラフィ  
ラジオグラフィ

### ビーム開発

超低速ミュオンビーム  
ミュオンビーム冷却/再加速

### 産業利用

水素エネルギー利用関連  
磁性材料評価  
**燃料電池**

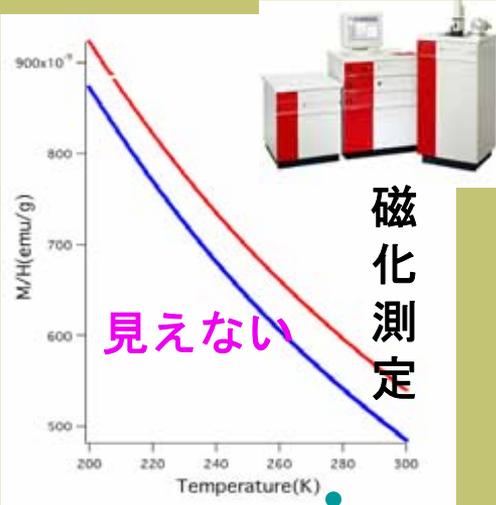
# J-PARC ミュオン施設で期待すること

- 表面  $\mu^+$   $3 \times 10^7 / \text{秒}$  RALの5倍  
100MHz  $\Delta\omega / \omega$  1ppm 10sec
- 崩壊  $\mu^-$   $10^{6-7} / \text{秒}$  他の施設の5-100倍  
 $\mu^+$  SR実験より 100倍以上の時間がかかる  
J-PARCで  $\mu^-$  実験のブレークスルーの可能性
- 超低速  $\mu^+$   $10^4 / \text{秒}$   
0-200nm  
分解能 5nm  
100MHz スピン回転観測可能  
日本が開発した、新ビーム

# マイクロな超高感度磁気プローブ:

## $\mu$ + SR

通常のマクロ測定では観測  
 不能な反強磁性など多数



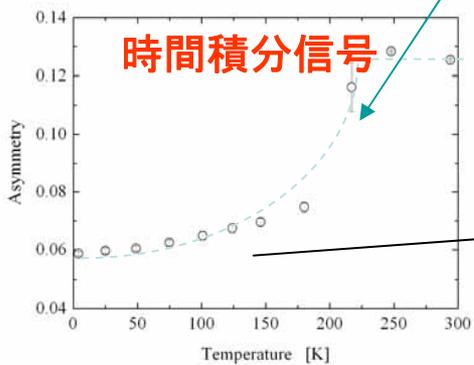
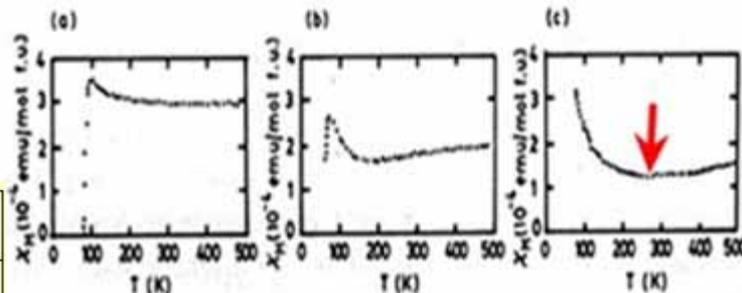
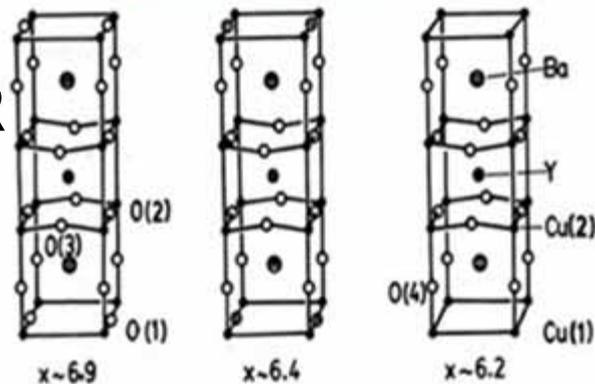
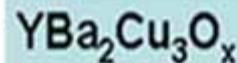
磁化測定

見えない



銅酸化物  
 超伝導体

$\mu$  + SR

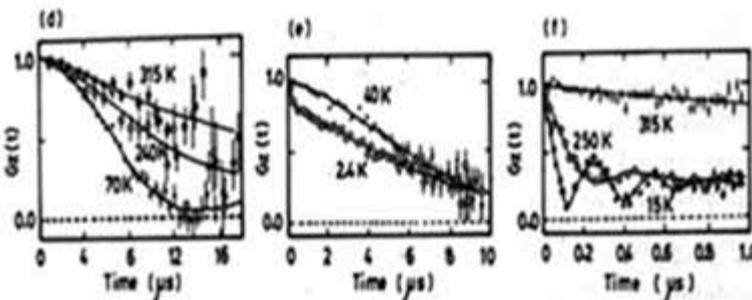
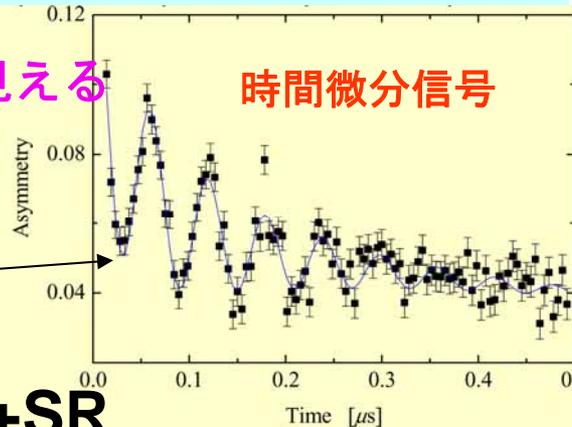


時間積分信号

見える

時間微分信号

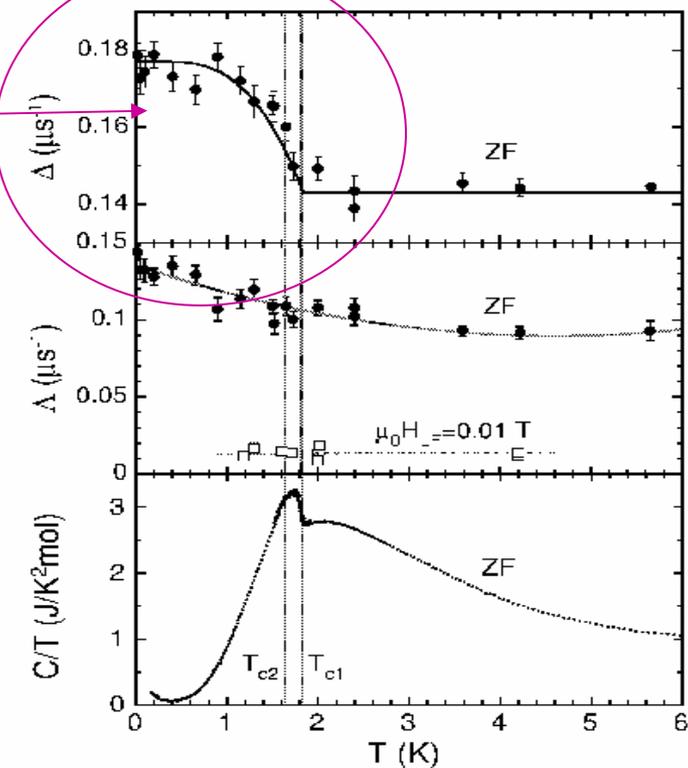
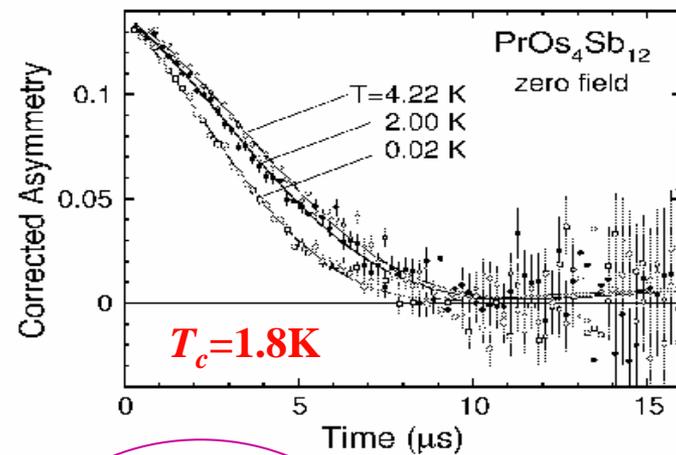
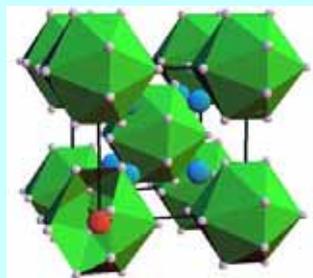
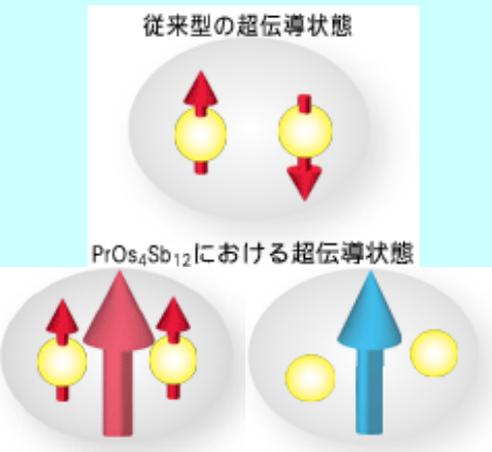
$\mu$  + SR



# 磁性を持った超伝導状態

## $\mu$ SRの特徴を活かした典型例

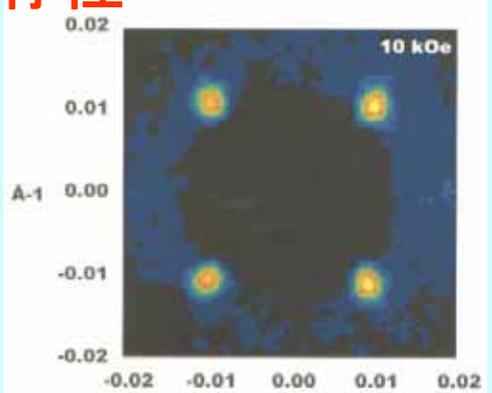
$\mu$ SRで超伝導状態に付随した微小磁場を発見



都立大、KEK、原研

# 超伝導混合状態の研究 磁束侵入長の温度依存性

例:  $\mu$ SRとSANSの実験結果から再構成された  
 $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  ( $T_c=15$  K)における磁束格子状態の  
 磁場の空間分布

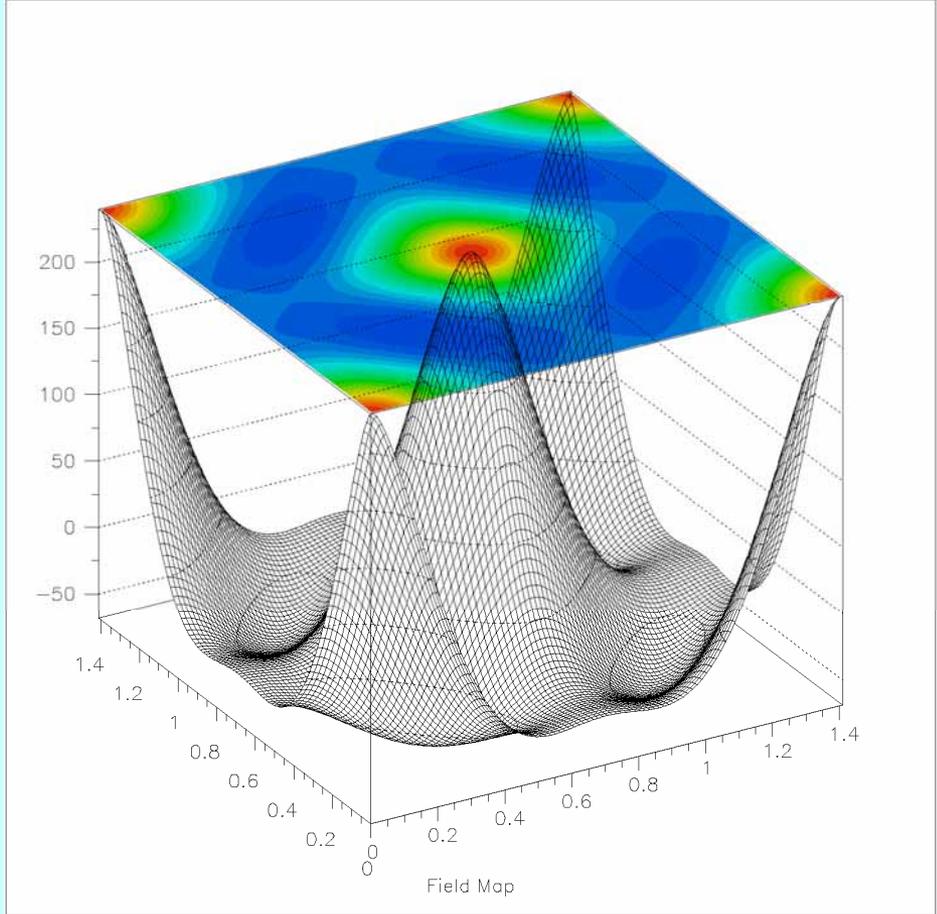
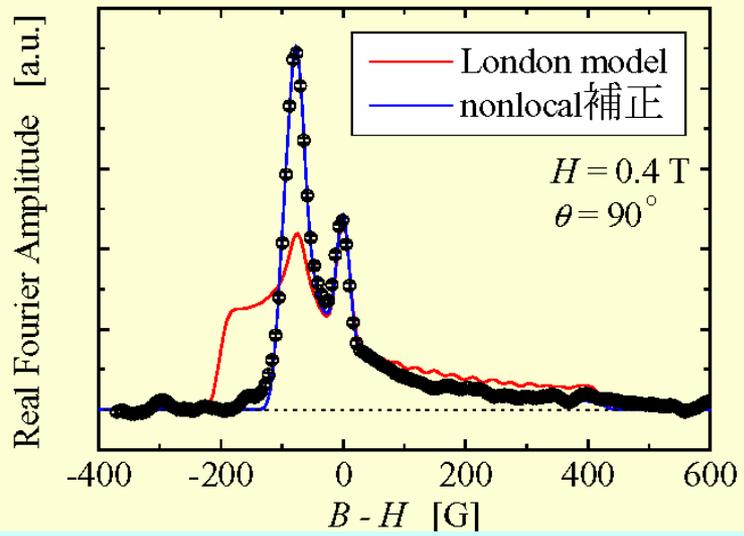


SANS →

...四角格子を組む原因である  
 フェルミ面の異方性(非局所  
 効果)を考慮する必要がある

$$B(x,y) = \bar{B}_0 \sum_{\mathbf{K}} \frac{e^{-i\mathbf{K}r} e^{-K^2 \xi^2}}{1 + K^2 \lambda^2 + (n_2 K^4 + d K_x K_y) \lambda^4}$$

$n_2, d \propto C$ : a parameter determined  
 by the band structure



# $\mu$ - スピン回転緩和法

- スピン偏極 ( $Z=1$ ) 原子核の出現  
化学反応で作りがたい物質作成
- $C_{60}$        $C \rightarrow B$  に置換可能
- $(CH_2)_n$      $C \rightarrow B$  : 約1% ドーピング
- 酸化物       $O \rightarrow N$

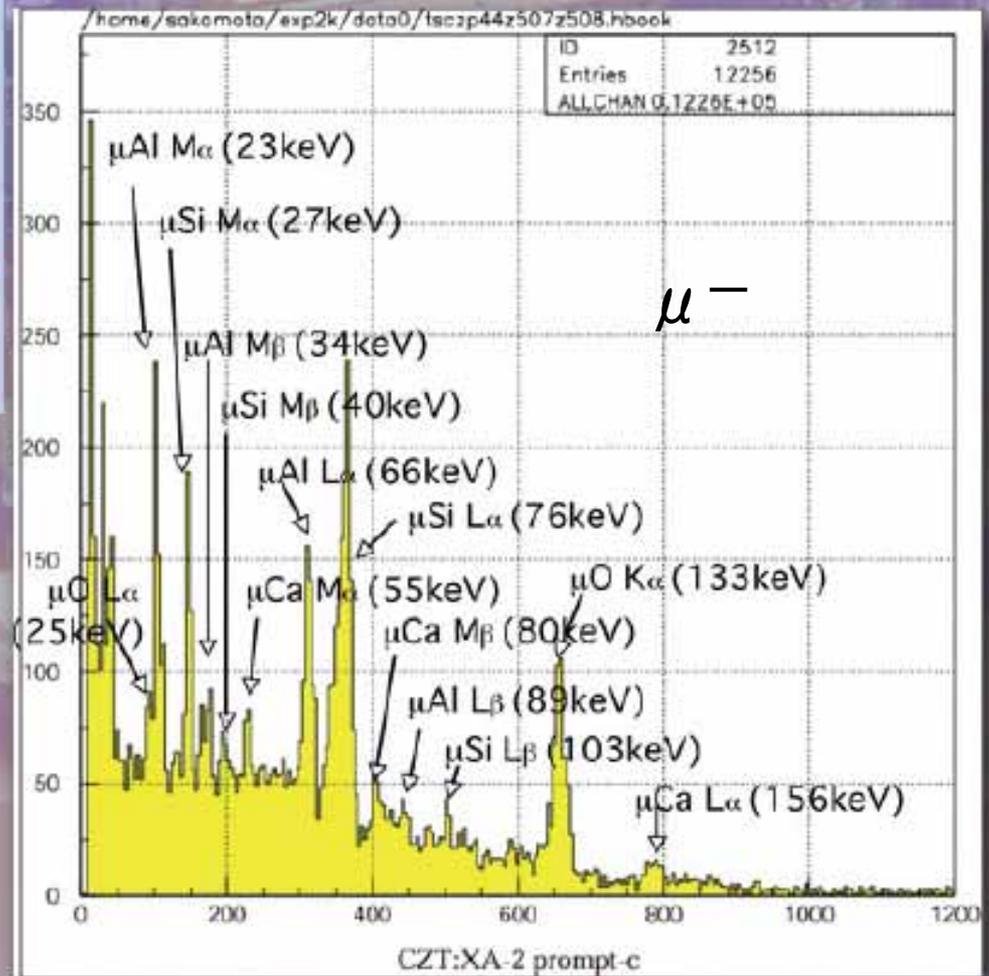
ナイトシフト 化学シフト 等 の測定

# ミュオンX線非破壊元素分析

## ミュオンX線非破壊元素分析

負ミュオンは通常の電子に比べて200倍も重たいため、原子に捕獲・束縛される過程で通常のX線よりも桁違いに高いエネルギーの特性X線（元素によって異なるX線）を出します。このX線は数mm～数cmという厚みを買通して検出器に到達できるので、**ミュオンを試料深くに注入して試料内部の元素分析を行なうことが可能**になります。

↓唐三彩（中国の古陶器）からのミュオンX線スペクトル。通常の蛍光X線分析装置では測れない元素が見える。



# 超低速ミュオン

KEK-MSL+理研-RALが、独自に開発。

- 表面・界面、薄膜、微小な単結晶試料  
の $\mu$ SR実験が可能

100MHzのスピン回転を、10ppmで決定するのに、30min程度の

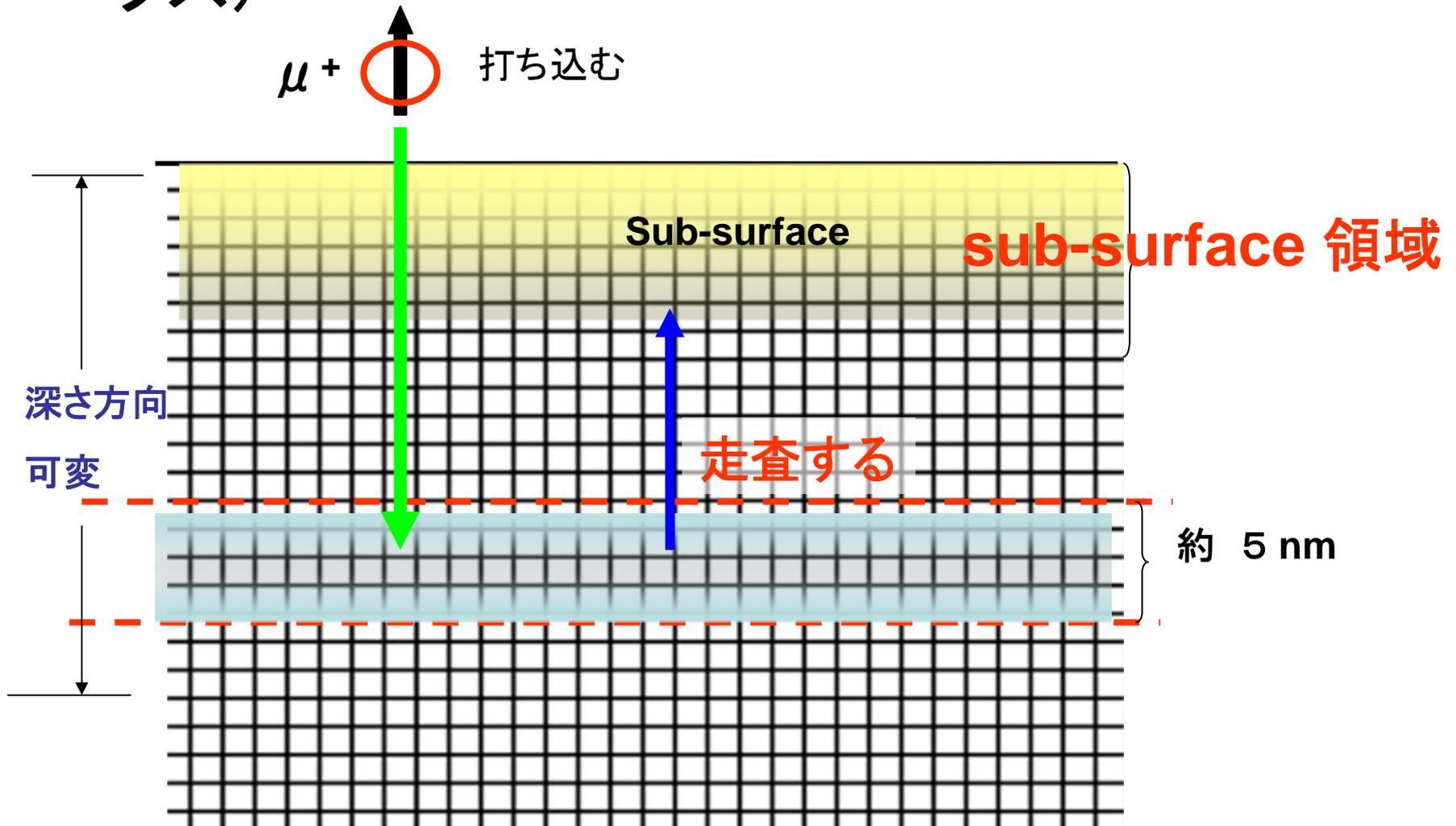
日本が、独自に開発したものであり、J-PARCでのみ運転しうるものである。

## 5-3)超低速ミュオンチャンネル (Phase2)

|          | 超低速ミュオン( $\mu^+$ )     |
|----------|------------------------|
| ビームエネルギー | 0-30 keV               |
| 飛程       | 0 nm - 200 nm          |
| エネルギー幅   | $\ll 1\%$              |
| 時間幅      | 8.3 ns(現在) --> ps      |
| ビームの大きさ  | 3x4mm(現在) --> 1 $\phi$ |
| 強度       | $10^{4-5}$ 秒           |
| ポート数     | 2                      |

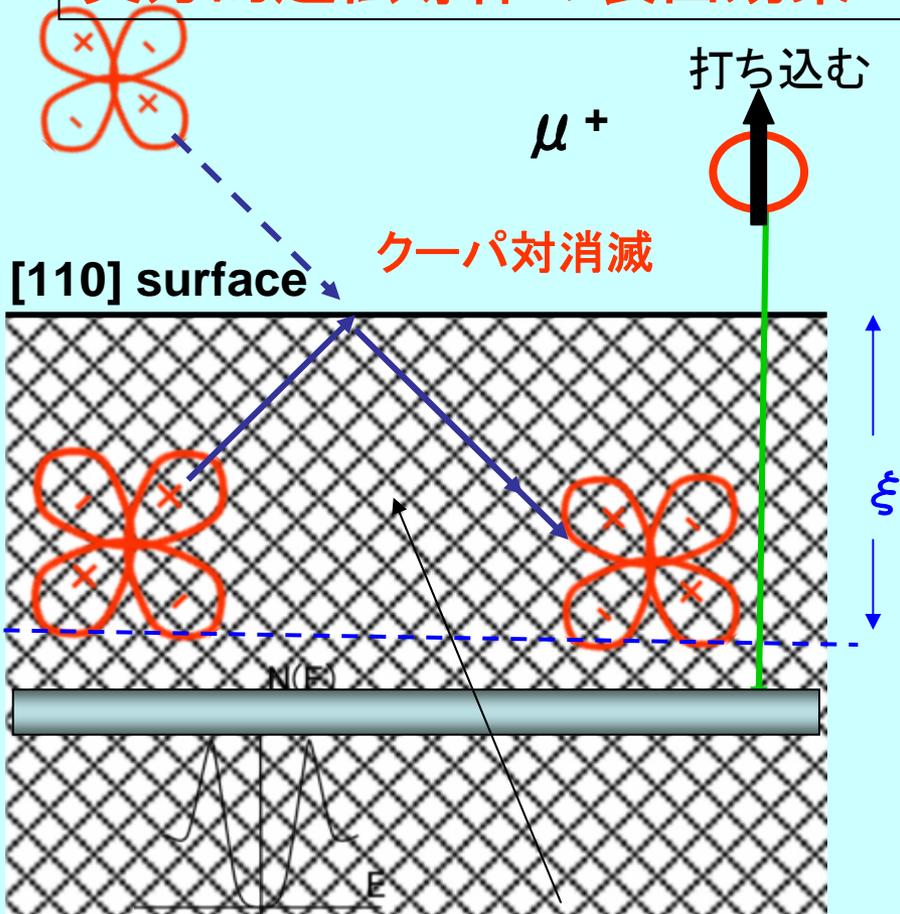
# 超低速ミュオン： 表面・界面の電子状態

触媒反応 異方的超伝導体 界面磁性(スピントロニクス)



# 超低速ミュオンによる表面・界面研究

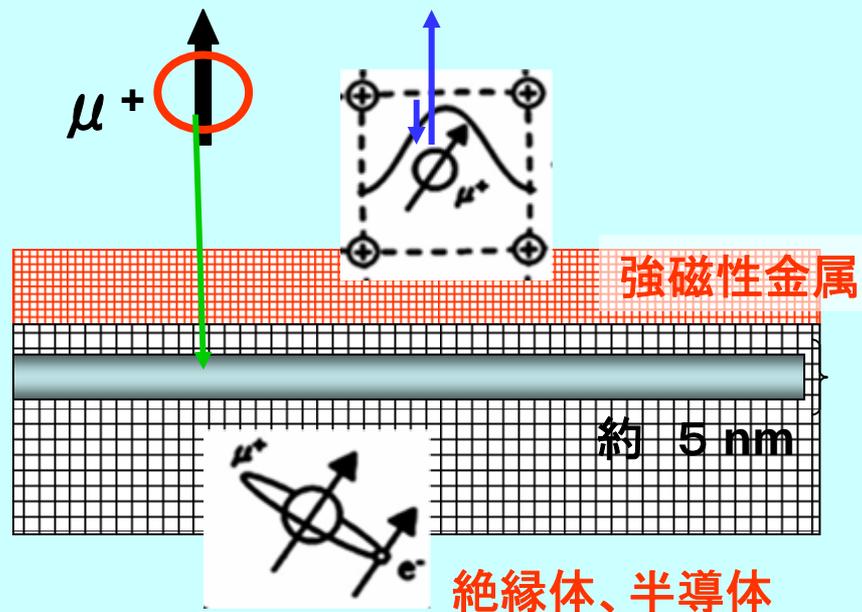
## 異方的超伝導体の表面効果



競合する他の秩序 反強磁性、SDW の出現の可能性

例  $d_{x^2-y^2}$

## 強磁性金属・絶縁体、半導体 界面の磁性



# J-PARCでつくられるミュオン

超低速  $\mu^+$

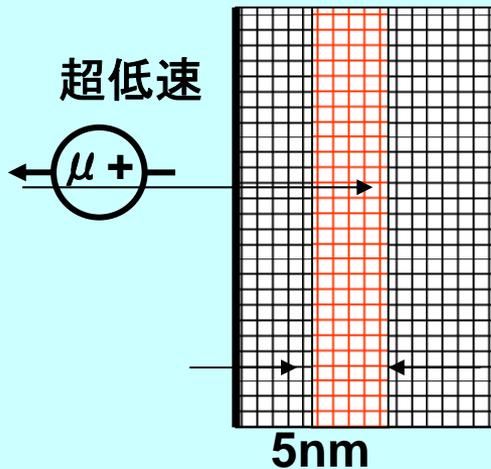
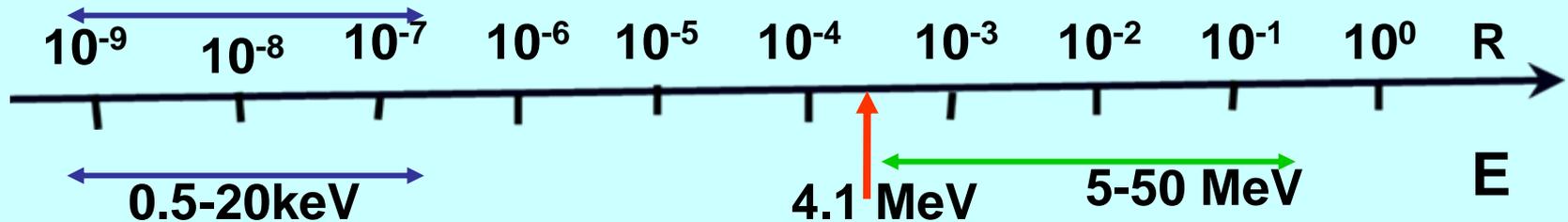
表面  $\mu^+$

崩壊  $\mu^+$   
崩壊  $\mu^-$

0.5nm-200nm

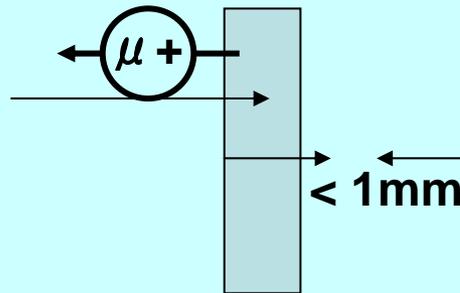
0.2mm

0.2-1.8cm 銅 飛程 [m]

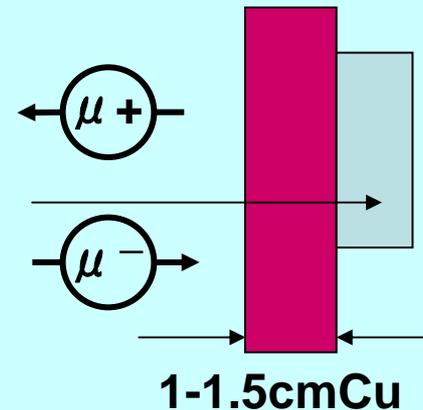


表面、界面の研究

スピン偏極 100%



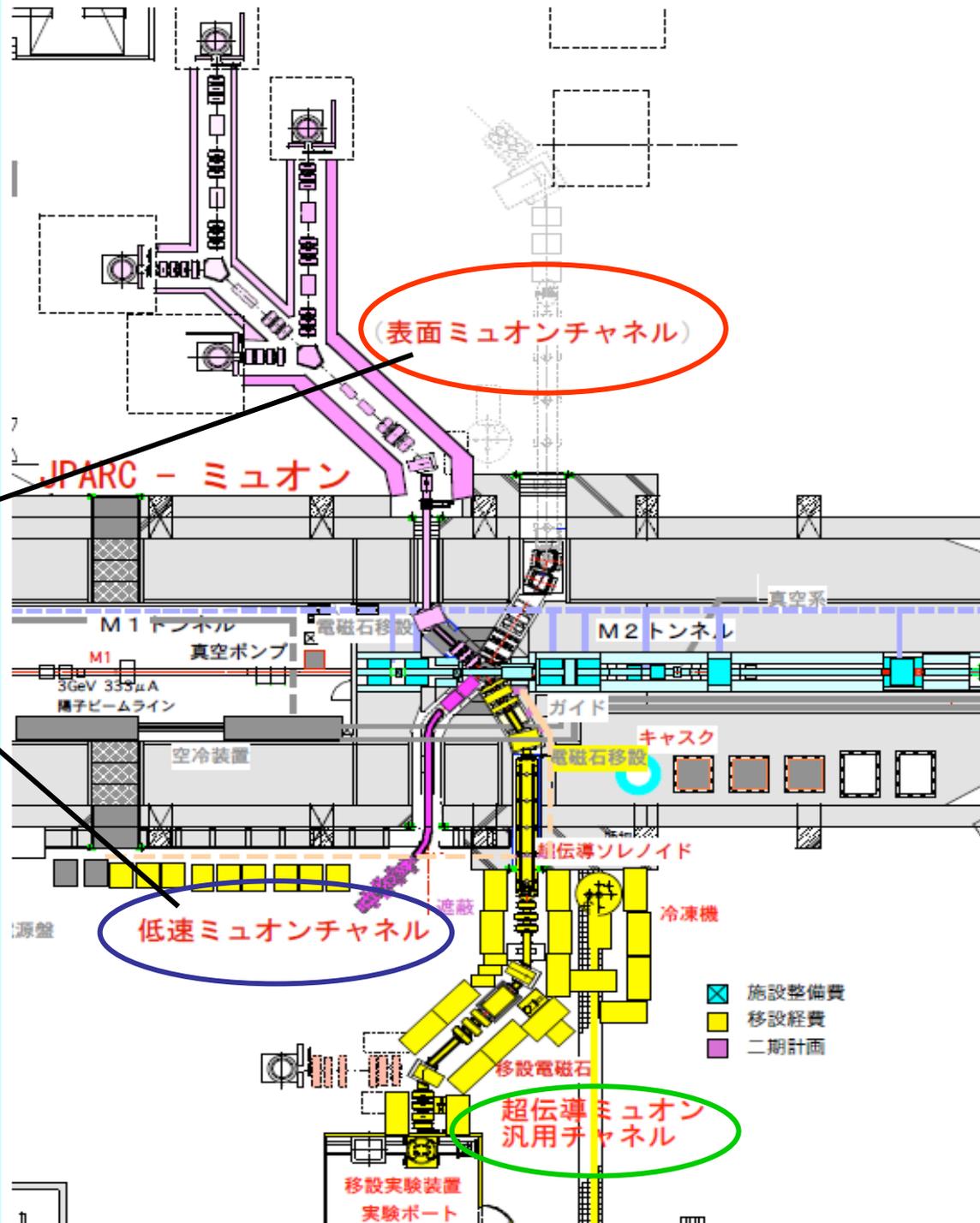
$\mu^+$ SR、MuSR:  
物性研究、化学反応



高圧物性実験  $\mu^\pm$ SR  
ミュオンX線元素分析  
ミュオンラディオグラフィ

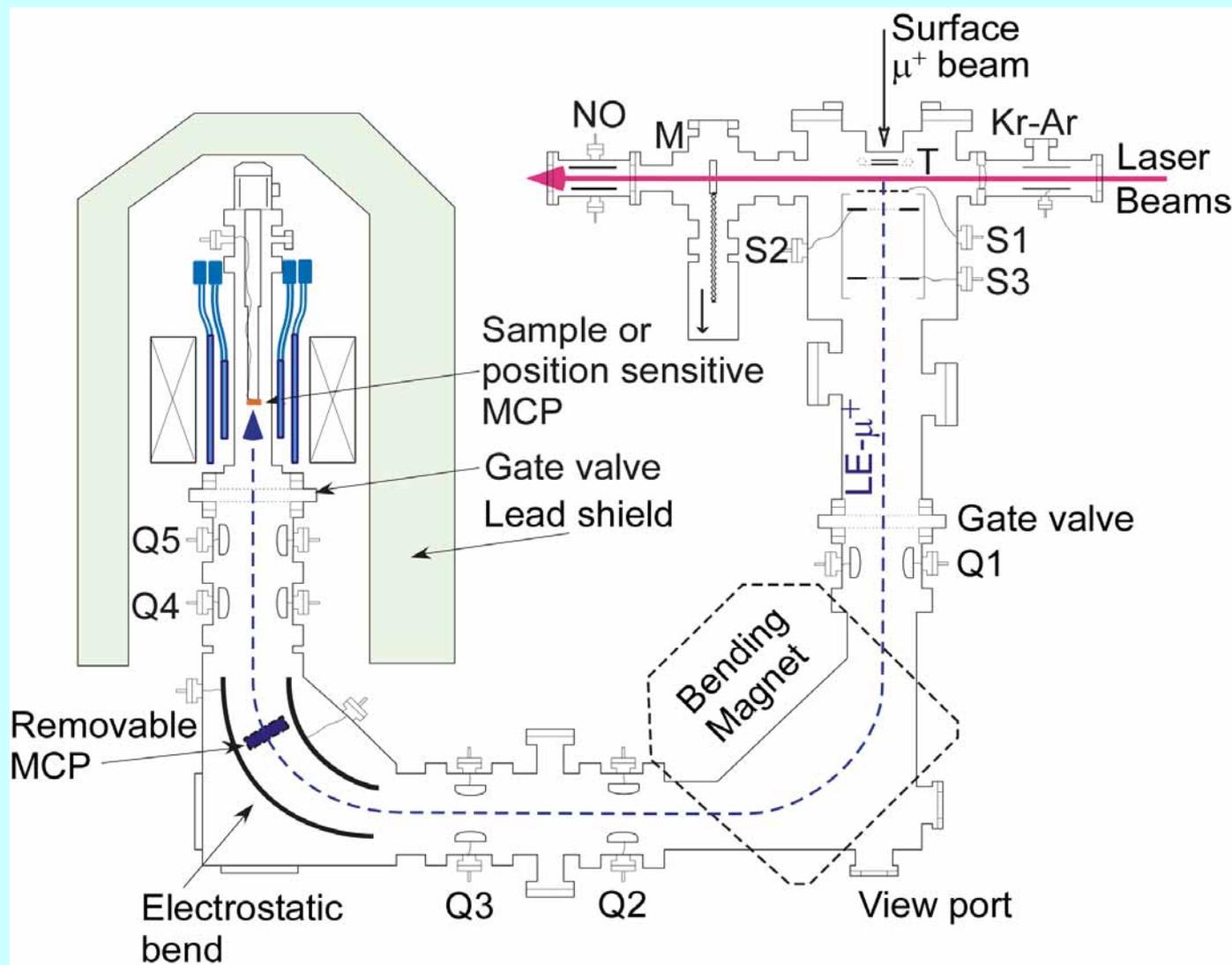
# J-PARC ミュオン ビーム ライン

## Phase 2の計画



# 低速ミュオンライン (RIKEN-RAL Port 3)

Developped by KEK + RIKEN



# J-PARC利用に対する要望

(1) ★Phase2計画の早期完成

★最高強度への早期達成

日本ミュオンビーム停止の影響

国際的にミュオンビーム利用の要望大

日本ユーザーの活動 大。

例:2007年度前期、

TRIUMFカナダ: 34週ビームタイムに対し47週の要望

(日本ユーザー:15週割り当て)

PSIスイス:日本ユーザー 課題数、全体の20%。

## (2) 利用に対して

- 国際的に開かれた運営
- 大学共同利用の適切な実施
- 企業の利用要請に対する受け入れ態勢の明確化

- 参考資料

- (1) J-PARCでのミュオン科学の提案実験

- (2) 3種類の、(a)表面ミュオン、(b)崩壊ミュオン、(c)超低速ミュオン、の発生の仕方

- (3) J-PARCのミュオン施設ミュオンビームラインの特性

# [1] J-PARC物質生命科学施設の ミュオン施設への実験提案

- Surface  $\mu^+$       ● Decay  $\mu^+$       ● Ultra-slow  $\mu^+$   
● Decay  $\mu^-$

- 1. パルスレーザーシステムによるミュオニウム反応性の研究  
(D.G.Fleming、UBC カナダ)
- ● 2.  $\mu$  SR法による4f-および5f-電子系の微視的研究  
(髭本亘、R.H.Heffner、JAE)
- 3. ミュオン触媒核融合の鍵となる過程の精密研究(石田勝彦:理研)
- ● 4. ミュオン触媒核融合における共鳴分子生成の研究(河村成肇:  
KEK)
- 5. 高温超伝導銅酸化物の起源の $\mu$  SR研究(小池洋二:東北大)
- ● ● 6. 第3世代 $\mu$  SR分光器による高精度局所磁場分布の測定  
(門野良典:KEK)
- 7. 高圧下の $\mu$  SR研究(幸田章宏:KEK)
- 8. 負ミュオンによる化学分析(久保健哉:ICU)
- 9. レーザー共鳴イオン化法による超低速ミュオンを用いた薄膜や多層  
膜の磁性研究(松田恭幸:理研)

● Surface  $\mu^+$

● Decay  $\mu^+$

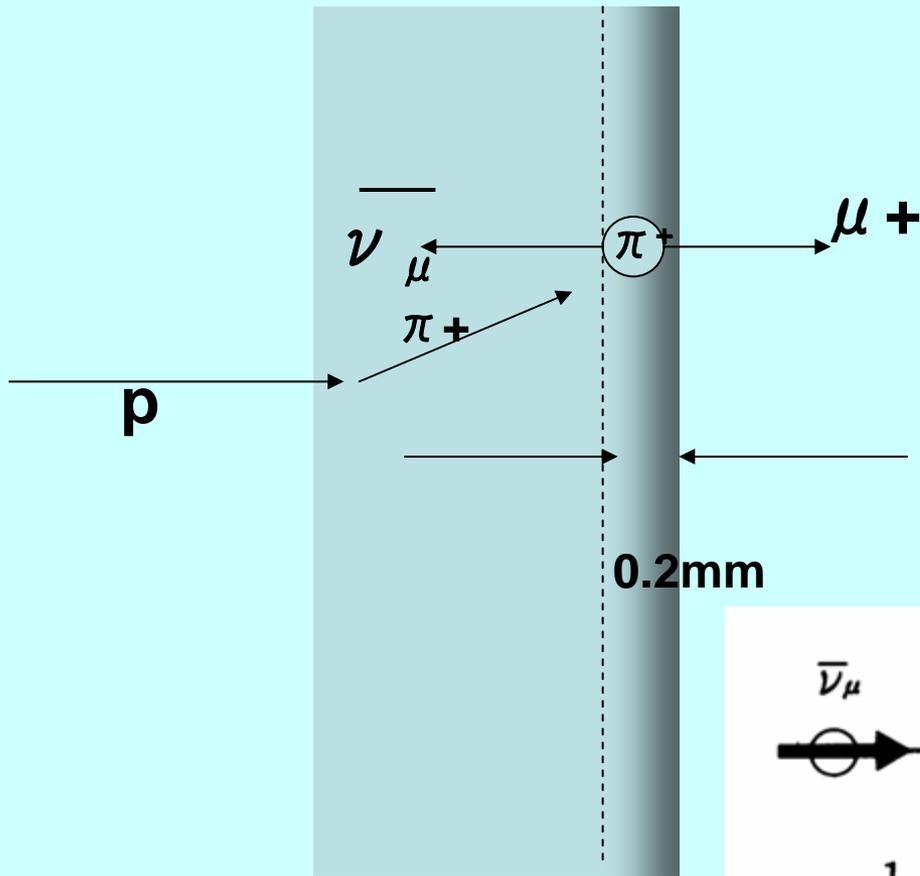
● Ultra-slow  $\mu^+$

● Decay  $\mu^-$

● 大強度ミュオン

- 11. 超低速ミュオンビームおよび負ミュオンビームのための大立体角ビームチャンネル＝スーパーオメガ(三宅康博、下村浩一郎、KEK)
- 12. 強力なペンシルビームによる生命科学に関連した分子の先端的イメージ技術研究(永嶺謙忠: UC-Riverside & 理研)
- 13. 強力なペンシルビームによる先端的物質科学研究(永嶺謙忠: UC-Riverside & 理研)
- 14. ナノ秒以下の短パルスを持つ超低速ミュオン散乱による物質表面研究(永嶺謙忠: UC-Riverside & 理研)
- 15. 超低速ミュオンビームを用いた表面界面の超伝導や磁性の研究(西田信彦: 東工大)
- 16. 圧力下における有機伝導体の  $\mu$  SR(大平聖子、お茶ノ水女子大学)
- 17. 超伝導崩壊ミュオンチャンネルの建設(下村浩一郎、KEK)
- 18. 表面ミュオンチャンネルの建設(下村浩一郎、KEK)
- 19. レーザー照射下の  $\mu$  SR実験(下村浩一郎、KEK)
- 20. ミュオン原子の化学的性質の研究(篠原厚、大阪大学)
- 21. J-PARCにおける不安定核のミュオン原子の研究
- 22. 自動車産業に有用な物質についての  $\mu$  SR研究－実用条件での研究(杉山純、トヨタ中央研)
- 23. ミュオンスピンをプローブとした下部マントル層の高温電気伝導の研究(田中宏幸、名古屋大)
- 24. 高磁場下の1GHz高周波および超音波を用いた  $\mu$  SR(渡辺功雄、理研)

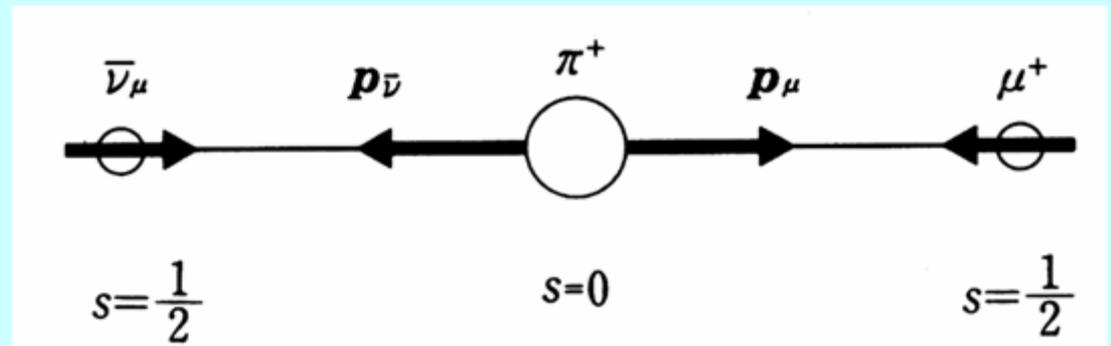
# [2](a) Surface $\mu^+$



静止  $\pi^+$  の崩壊

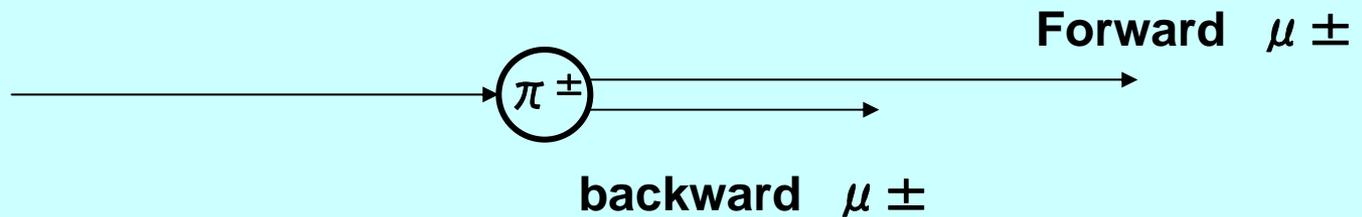
$E=4.1\text{MeV}$

100% polarization



# [2](b) Decay muon $\mu^\pm$

Pion decay in flight



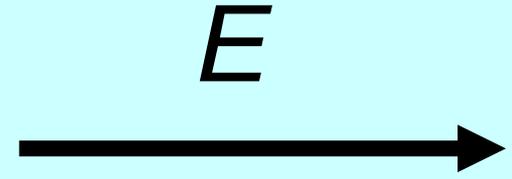
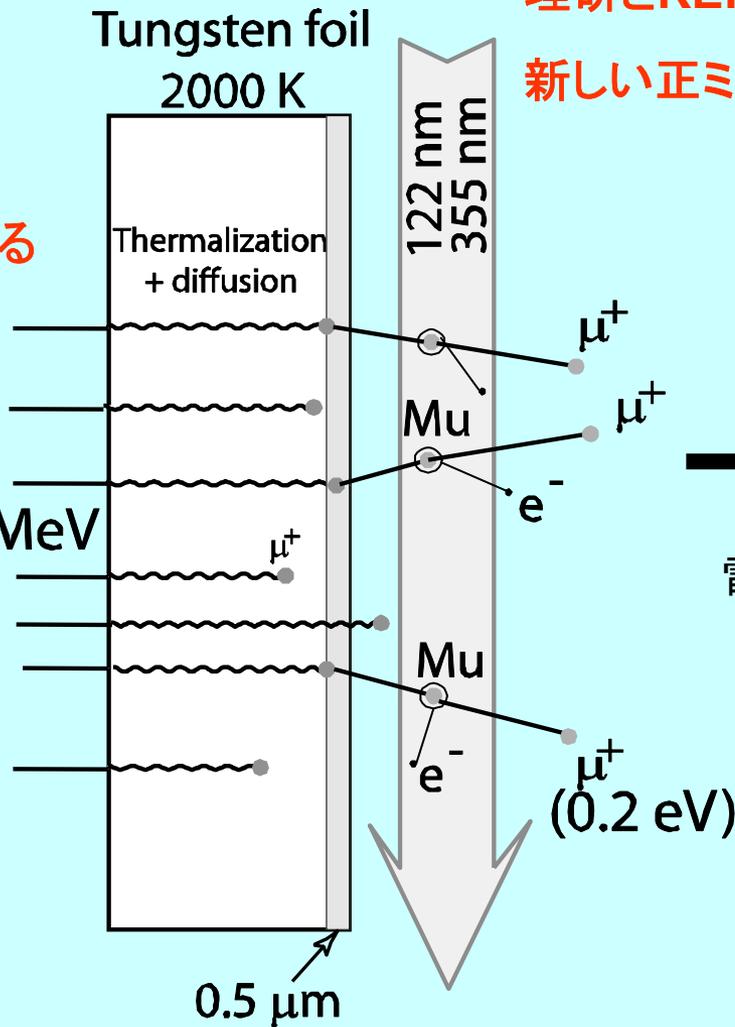
**E=5-50 MeV**

# [2](c) 超低速ミュオン発生 の原理

理研とKEKによって開発された、  
新しい正ミュオンである。

ミュオニウム (Mu) を金属  
タングステンから蒸発させ  
その後レーザーで解離する

J-PARC  
 $5 \times 10^8 \mu^+/\text{sec}$

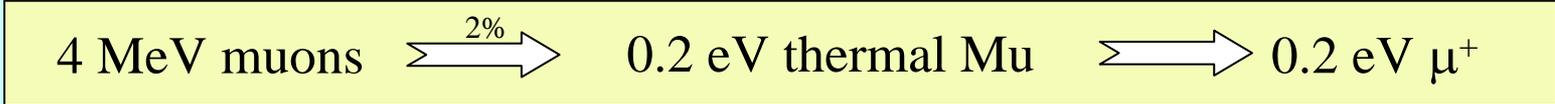


電場で加速

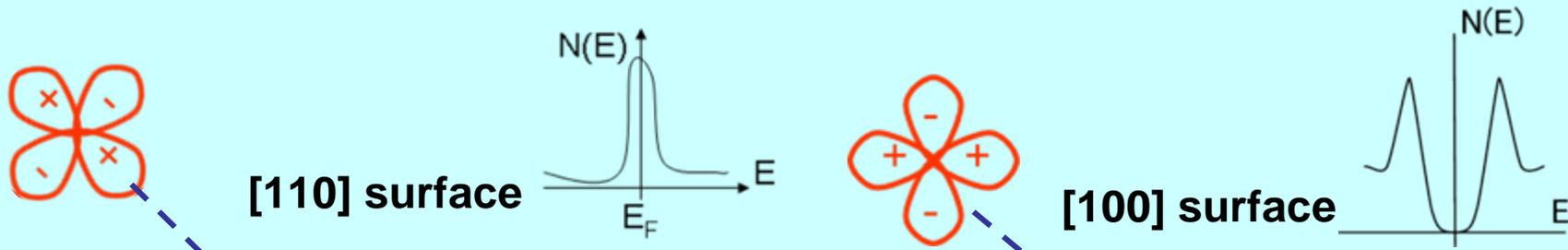
0.5-30keV

$10^4 \mu^+/\text{sec}$

生成率:  $2 \times 10^{-5}$

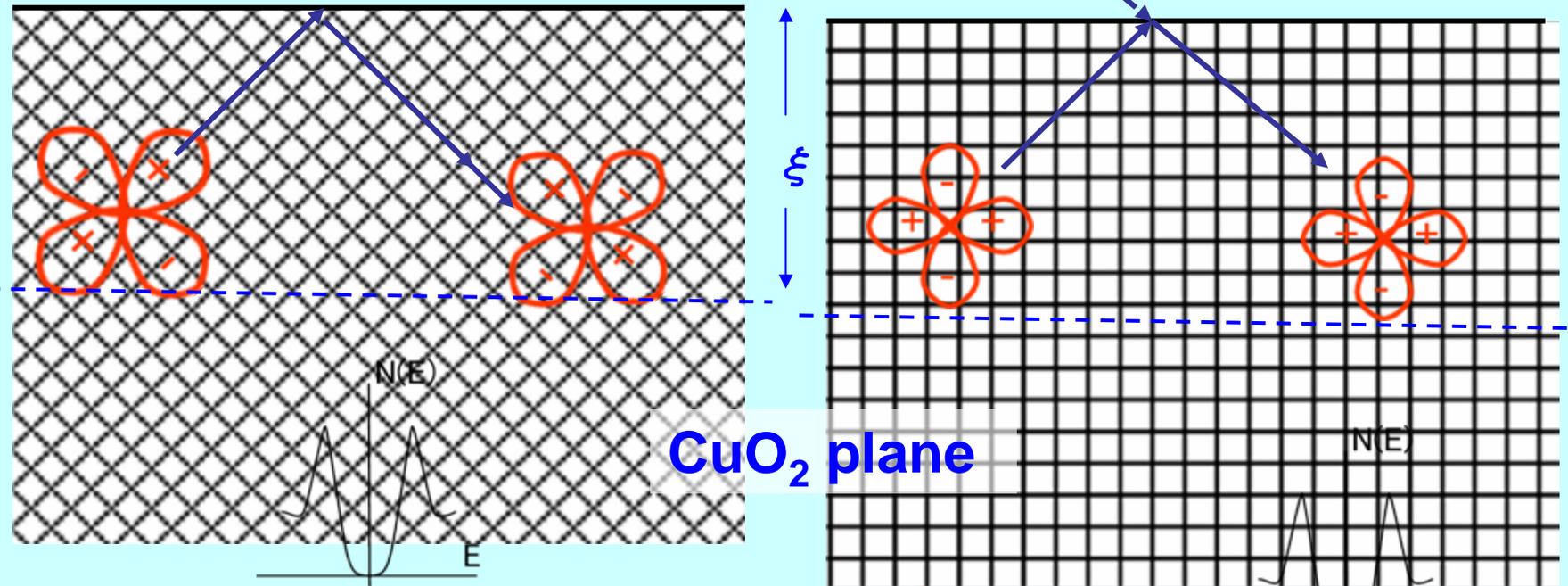


# Andreev bound state : explained in terms of Cooper pair orbital wave function

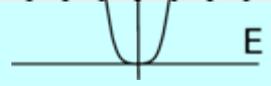


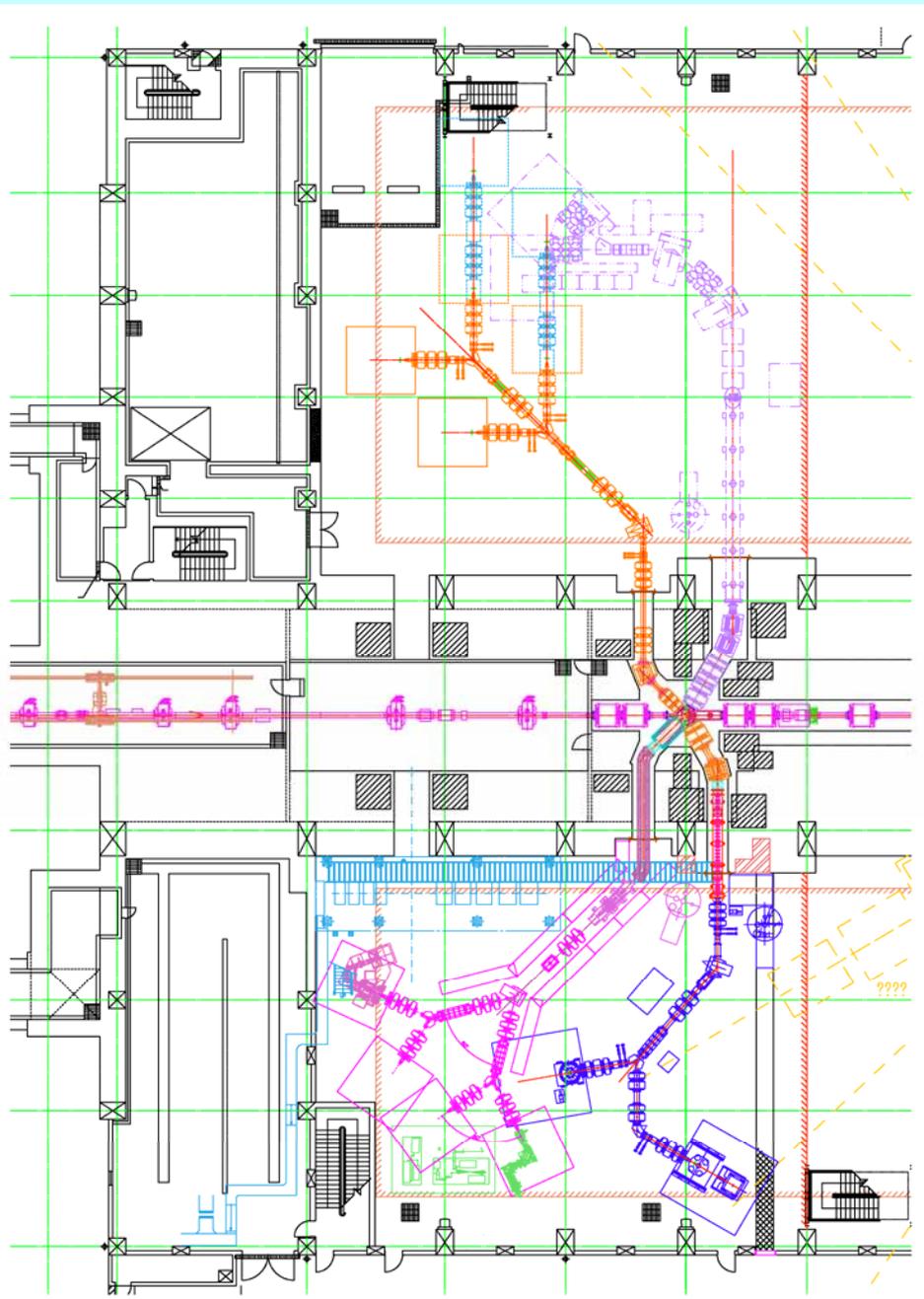
**Cooper pairs disappear**

**Cooper pairs are intact**



In case of the Cooper pair:  $d_{x^2-y^2}$





### 5-1) 表面・崩壊ミュオンチャネル (Phase 1)

|          | 表面ミュオン ( $\mu^+$ )       | 崩壊ミュオン ( $\mu^\pm$ )  |
|----------|--------------------------|-----------------------|
| ビームエネルギー | 4.1MeV                   | 5-50 MeV              |
| 飛程       | $\sim 0.2 \mu\text{m}$   | 1 mm - ~ cm           |
| エネルギー幅   | $\sim 10\%$              | $\sim 15\%$           |
| 時間幅      | $\sim 100 \text{ ns}$    | $\sim 100 \text{ ns}$ |
| ビームの大きさ  | 30 mm x 40 mm            | 70 mm x 70 mm         |
| 強度       | $3 \times 10^7/\text{秒}$ | $10^{6-7}/\text{秒}$   |
| ポート数     | 2                        | 2                     |

### 5-2) 表面ミュオンチャネル (Phase 1' & Phase 2)

|          | 表面ミュオン ( $\mu^+$ )     |
|----------|------------------------|
| ビームエネルギー | 4.1MeV                 |
| 飛程       | $\sim 0.2 \mu\text{m}$ |
| エネルギー幅   | $\sim 10\%$            |
| 時間幅      | $\sim 100 \text{ ns}$  |
| ビームの大きさ  | 30 mm x 40 mm          |
| 強度       | $10^{6-7}/\text{秒}$    |
| ポート数     | 4                      |

### 5-3) 超低速ミュオンチャネル (Phase2)

|          | 超低速ミュオン ( $\mu^+$ )    |
|----------|------------------------|
| ビームエネルギー | 0-30 keV               |
| 飛程       | 0 nm - 200 nm          |
| エネルギー幅   | $\ll 1\%$              |
| 時間幅      | 8.3 ns(現在) --> ps      |
| ビームの大きさ  | 3x4mm(現在) --> $1 \phi$ |
| 強度       | $10^{4-5}/\text{秒}$    |
| ポート数     | 2                      |