

# 凝縮相におけるミュオン転移過程の研究

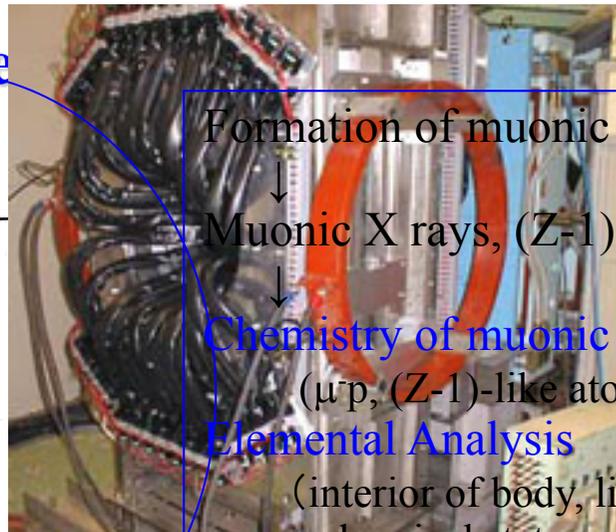
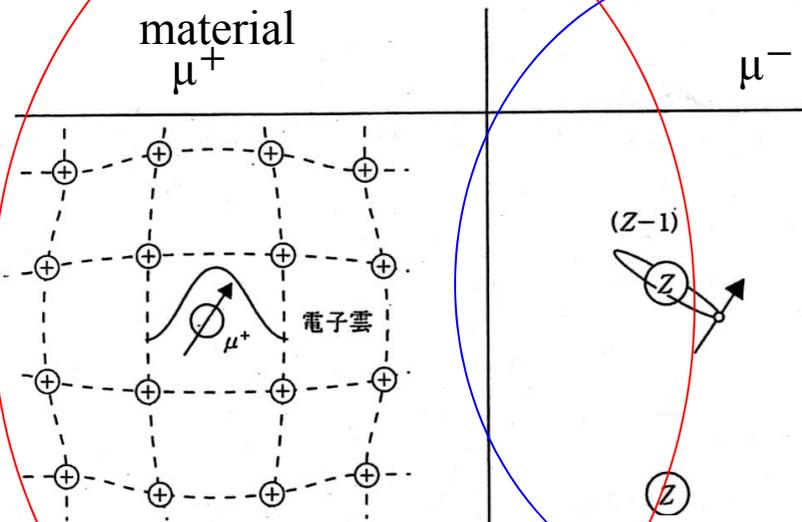
篠原厚、藤原一哉、笠松良崇、二宮和彦<sup>1</sup>、髭本亘<sup>1</sup>、  
P. Strasser<sup>2</sup>、河村成肇<sup>2</sup>、三宅康博<sup>2</sup>、三浦太一<sup>2</sup>、  
久保謙哉<sup>3</sup>、長友傑<sup>3</sup>

阪大院理、原研先端研<sup>1</sup>、J-PARCセンター<sup>2</sup>、国際基督教大理<sup>3</sup>

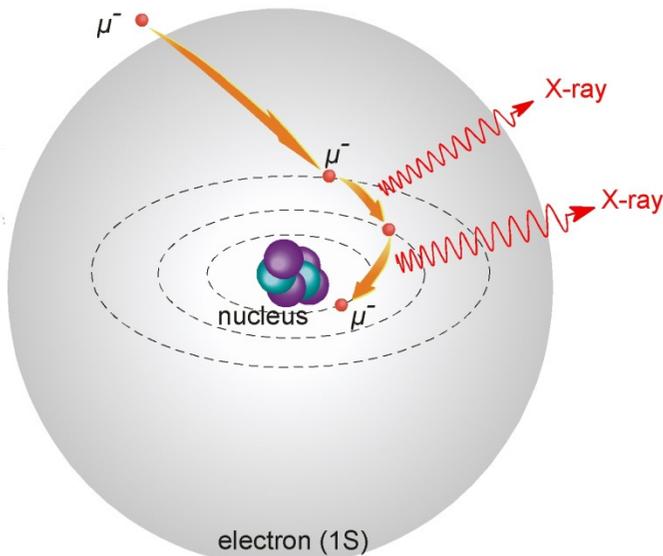
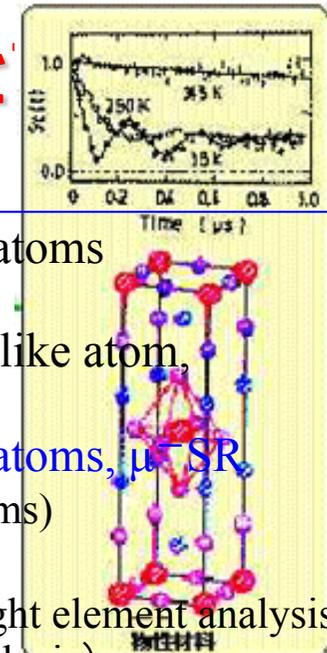
1. 研究背景（これまでの研究概要と課題）
2. 本研究の目的
3. 実験（2010B0080）の概要と結果
4. まとめと今後の計画

# 1. 研究背景 (これまでの研究概要と)

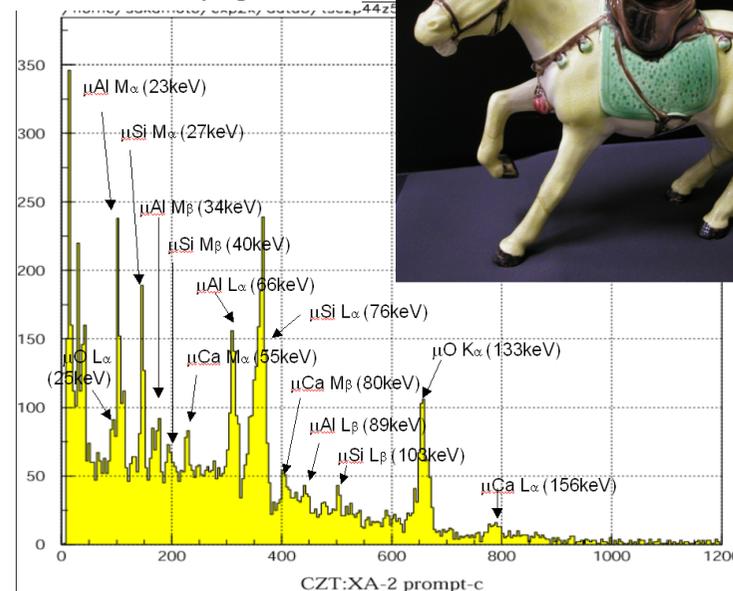
## Behavior of muons trapped



Formation of muonic atoms  
 ↓  
 Muonic X rays, (Z-1)-like atom,  
 ↓  
 Chemistry of muonic atoms,  $\mu^-$  SR  
 ( $\mu^-$ p, (Z-1)-like atoms)  
 Elemental Analysis  
 (interior of body, light element analysis,  
 chemical state analysis)

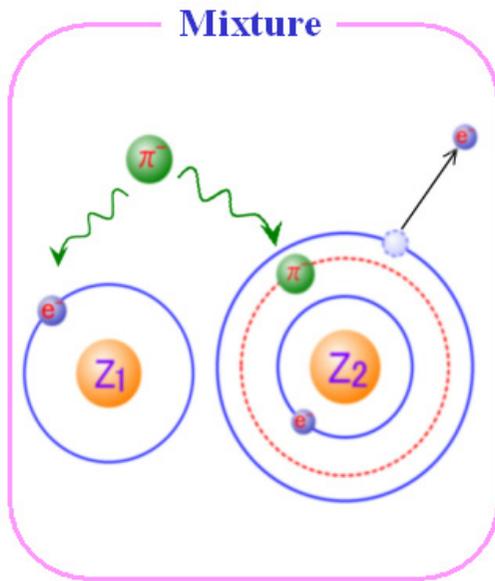


Muonic X-ray spectrum



# ■ Pion/Muon Capture Process on Molecules

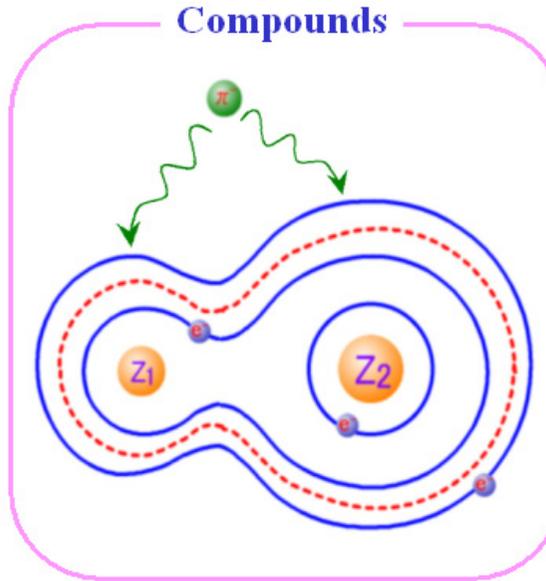
## π<sup>-</sup> Capture on Molecules



**Atomic Capture through Auger process**

$$\frac{W_{Z_2}}{W_{Z_1}} \propto \frac{Z_2^{\text{eff}}}{Z_1^{\text{eff}}}$$

(Z-law)

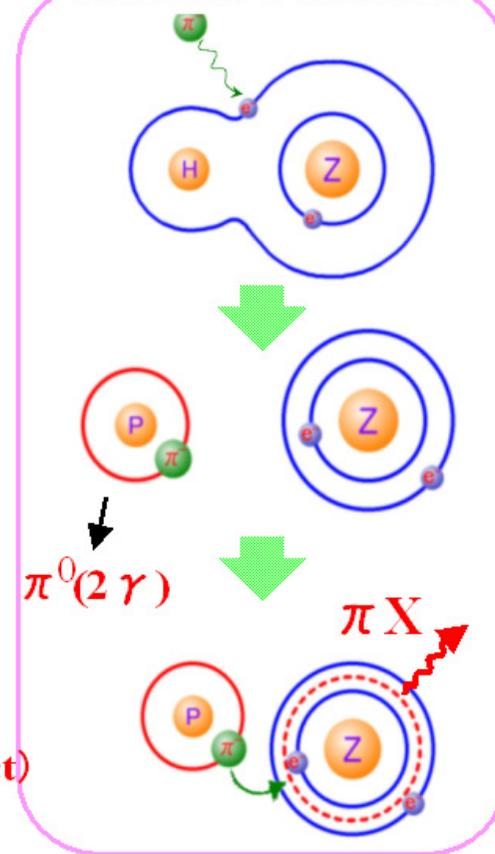


$$\frac{W_{Z_2}}{W_{Z_1}} \propto \frac{Z_2^{\text{eff}}}{Z_1^{\text{eff}}} \text{ (Chemical Effect)}$$

Form Electron Dist. & Structure

Capture on π<sup>-</sup>-LMM orbital

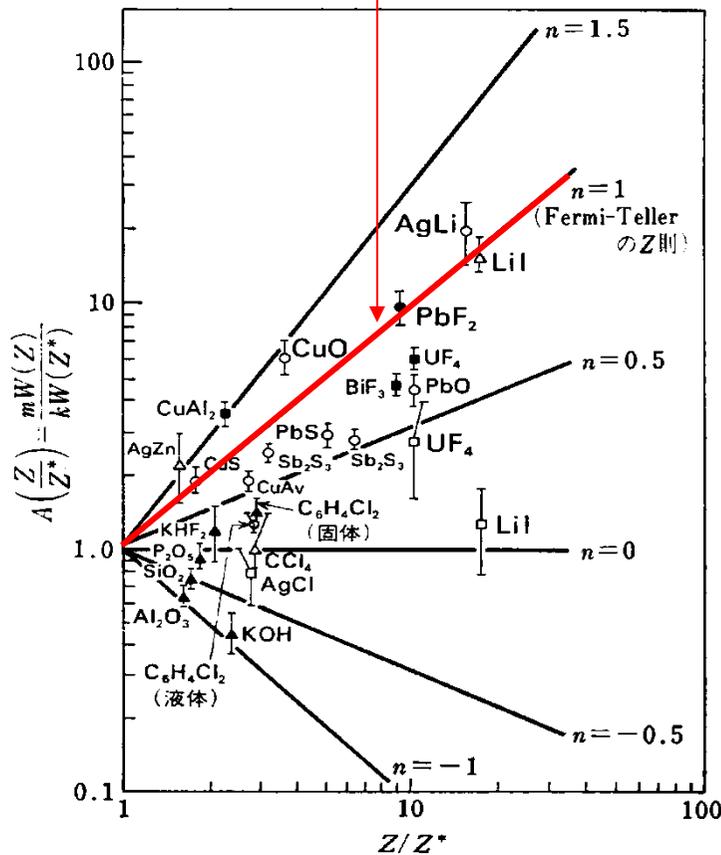
## Hydrogen-containing Molecules & Mixtures



π<sup>-</sup> Transfer { External Internal

# Example of Chemical Effects on the Capture Process

## Z Law of Fermi-Teller



$$-: W(Z)/W(Z^*) = (Z/Z^*)^n$$

**Z Law (n=1)** → nonconforming in most cases  
 ex. Hydrogen effect (n=3) → **LMM model**

## Chemical effects: Oxygen effect (Periodic behavior)

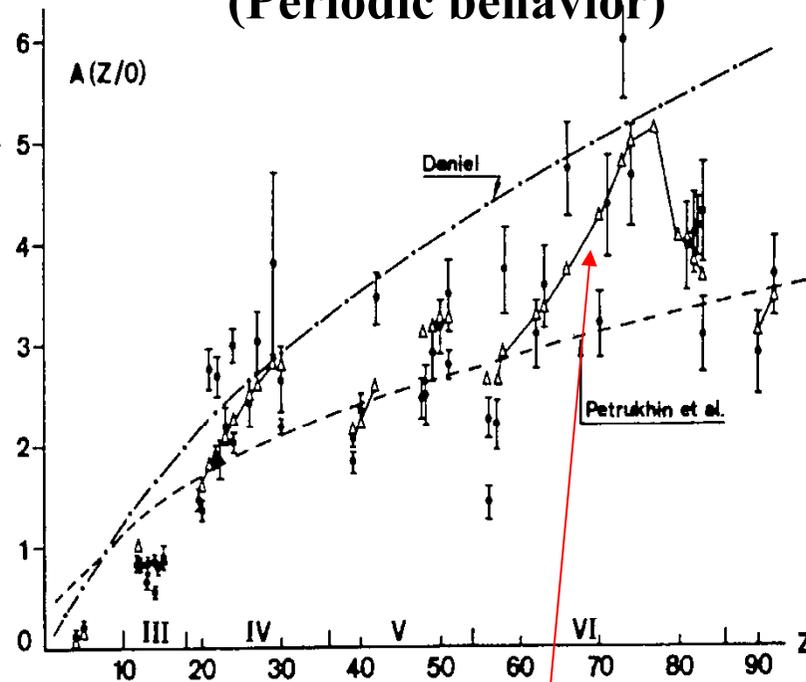
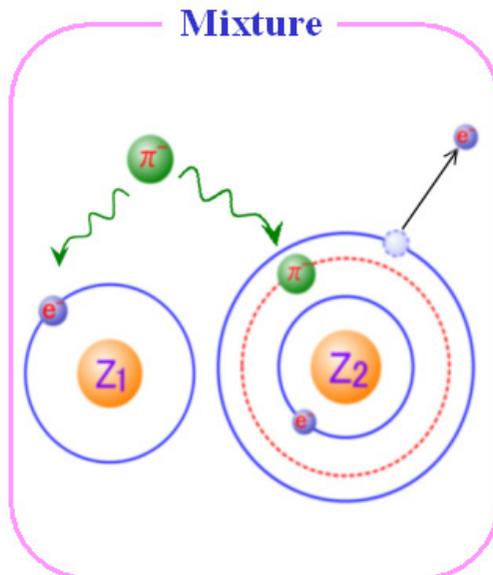


Fig. 1. Ratios  $A(Z/O)$  of atomic capture of muons in oxides  $Z_nO$  as a function of  $Z$ . The experimental data are compiled from refs. <sup>12-19</sup>). The dotted-dashed line corresponds to predictions according to Daniel's formula <sup>2</sup>), the chain-dotted line to those of Petrukhin and Suvorov <sup>3</sup>), the solid line (triangles) to those of this work, case (b).

Analysis by **LMM model**  
 (Schnewly, et al.)

# ■ Pion/Muon Capture Process on Molecules

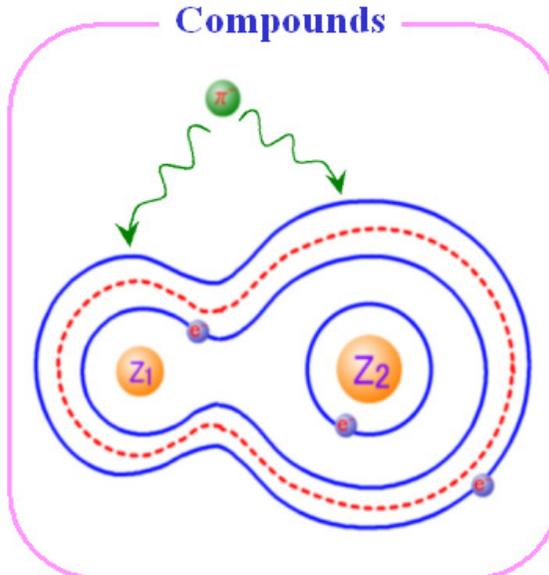
## $\pi$ Capture on Molecules



Atomic Capture through Auger process

$$\frac{W_{Z_2}}{W_{Z_1}} \propto \frac{Z_2^{\text{eff}}}{Z_1^{\text{eff}}}$$

(Z-law)

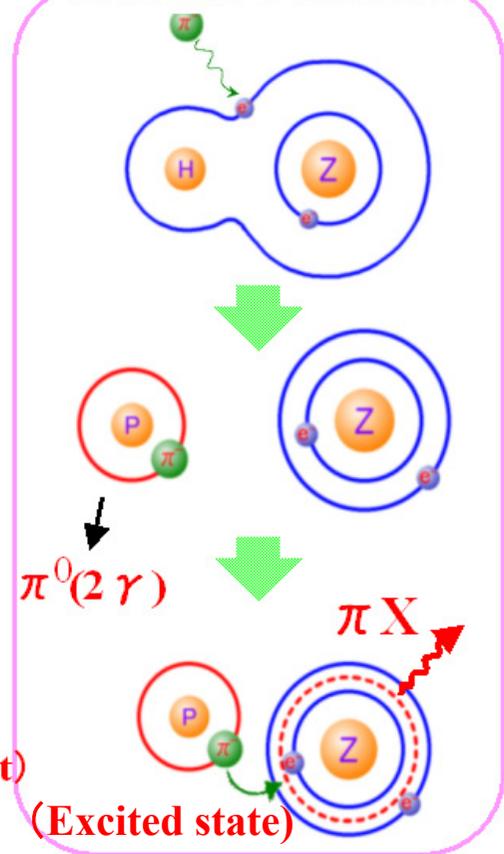


$$\frac{W_{Z_2}}{W_{Z_1}} \propto \frac{Z_2^{\text{eff}}}{Z_1^{\text{eff}}} \text{ (Chemical Effect)}$$

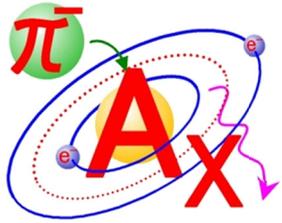
Form Electron Dist. & Structure

**Large Mesomolecular Model**  
(巨大中間子分子モデル)

## Hydrogen-containing Molecules & Mixtures



$\pi$ -Transfer { External Internal }  
↓ mechanism?  
分子効果?



# ■これまでの研究概要 ( $\pi$ AXプロジェクト)

(阪大-KEK-金沢大-京大-名古屋大-東北大-他)

**目的:** 第2世代物質系の化学の展開と物質化学研究における新しい応用を目指して、中間子原子の形成過程とその物質中での挙動を包括的に理解する。

## 1) 分子への $\pi^-$ 捕獲過程 (1982-1987)      巨大中間子分子(LMM)モデル

・簡単な分子系 → 大きな化学効

改訂LMMモデル

## 2) パイ中間子水素原子の挙動 ( $\pi^-$ 転移過程) (1989-1999)

<水素含有物質>

→ 凝縮系の $\pi^-$ 転移過程 → 転移過程における化学効果の発見

Combined LMM model (LMM+Transfer)

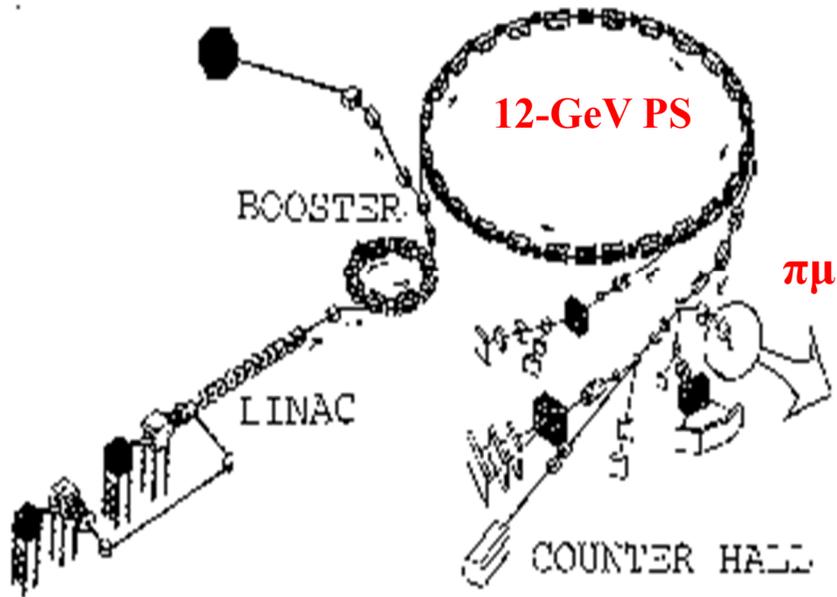
・気相系の $\pi^-$ 転移過程 → 転移速度の圧力依存性の発見

## 3) 原子状態の解明、ミュオン原子化学

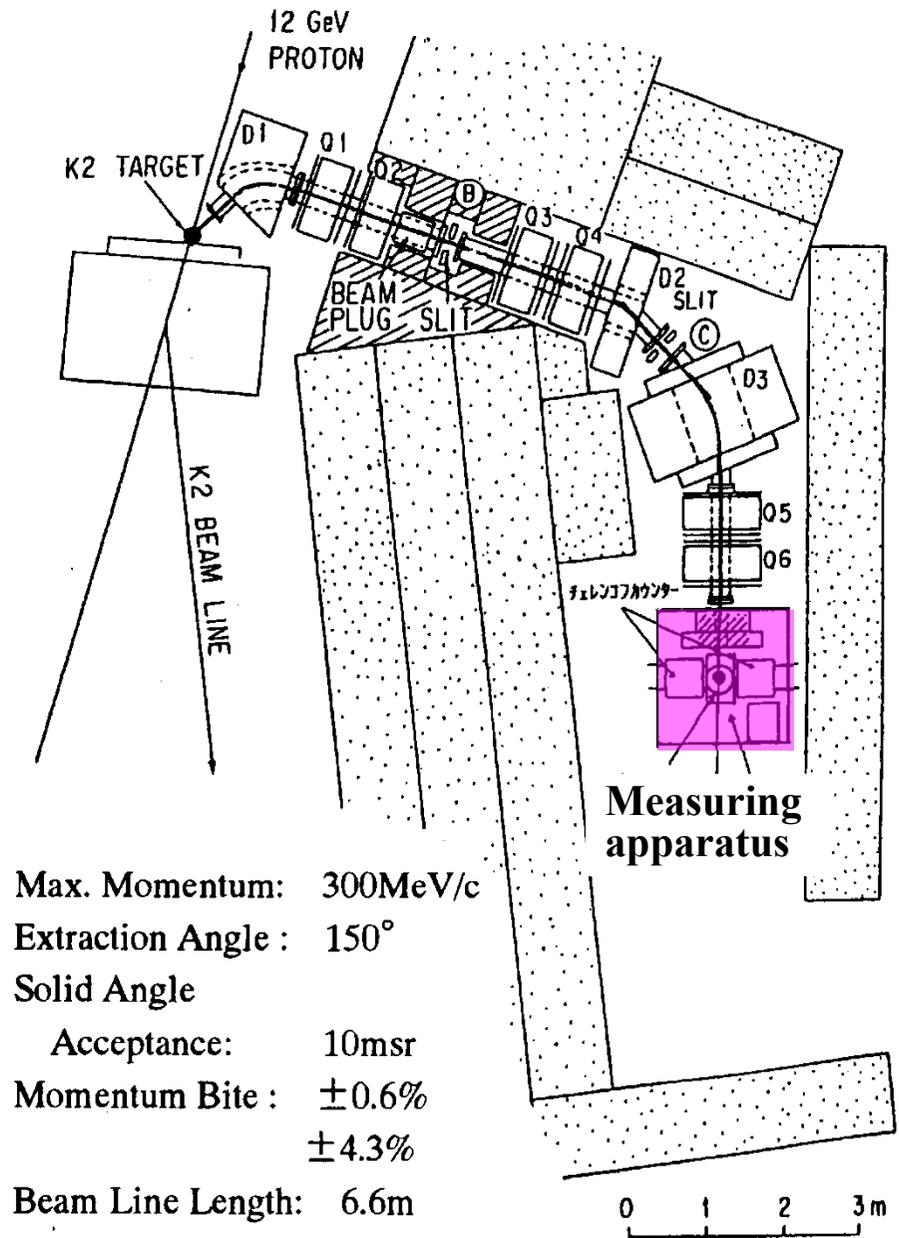
(2003-2005、2007-?)

動的モデル、微視的理解

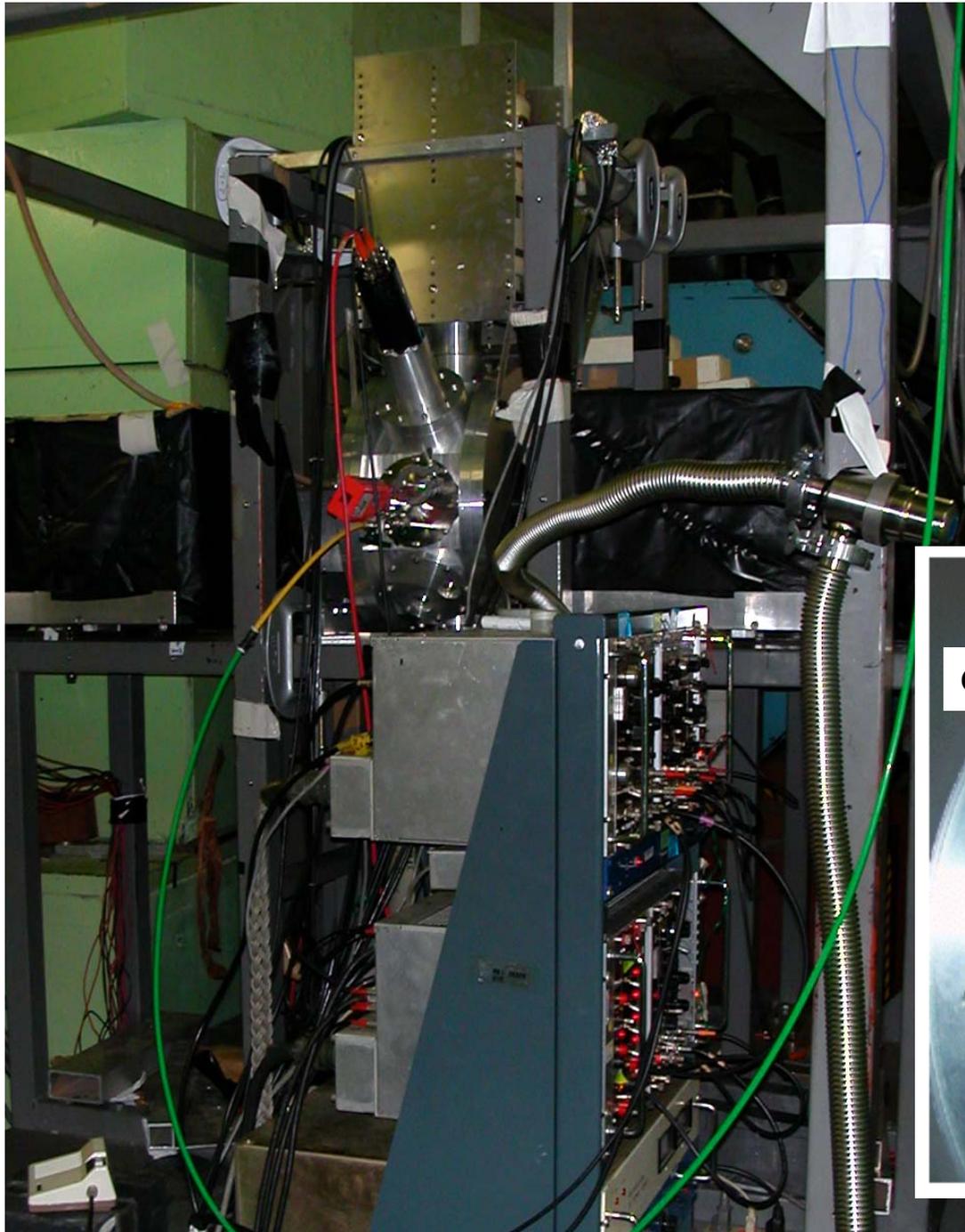
# ■ Experimental Setup



at  $\pi\mu$ -channel of 12-GeV proton synchrotron in KEK

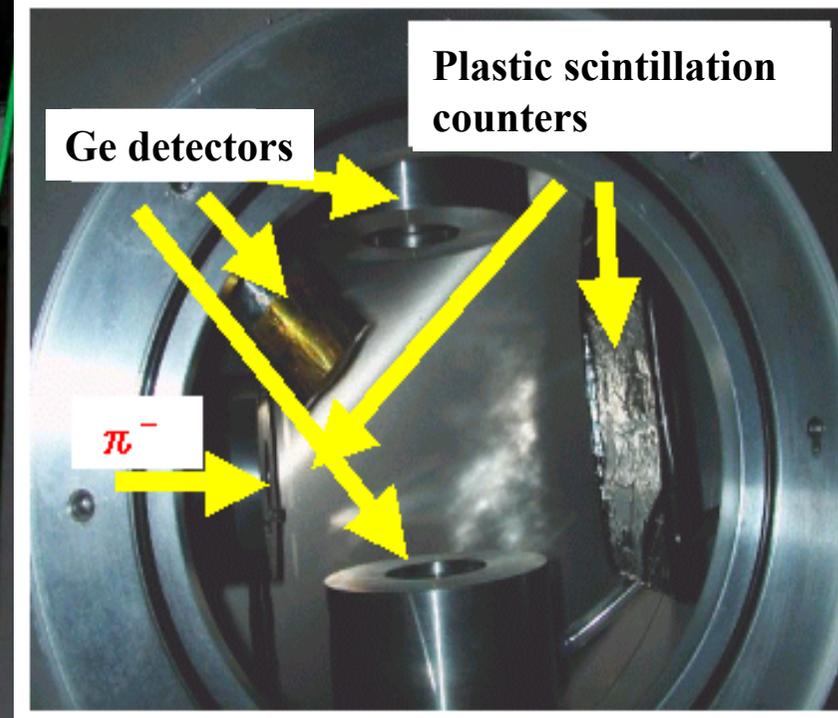


Max. Momentum: 300MeV/c  
 Extraction Angle :  $150^\circ$   
 Solid Angle  
 Acceptance: 10msr  
 Momentum Bite :  $\pm 0.6\%$   
 $\pm 4.3\%$   
 Beam Line Length: 6.6m



■ Overview of the new setup for low energy photon measurement

■ Interior of the new measuring chamber

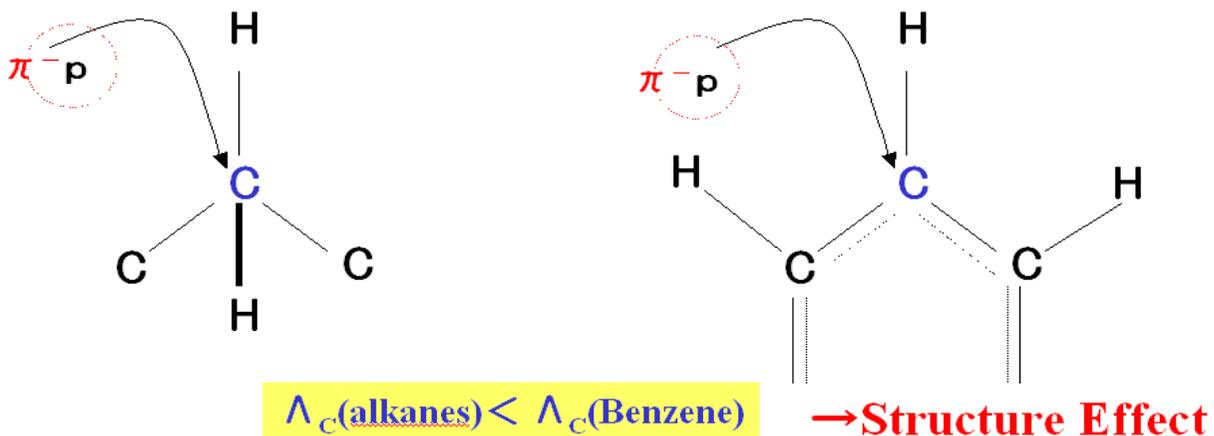


Ge detectors

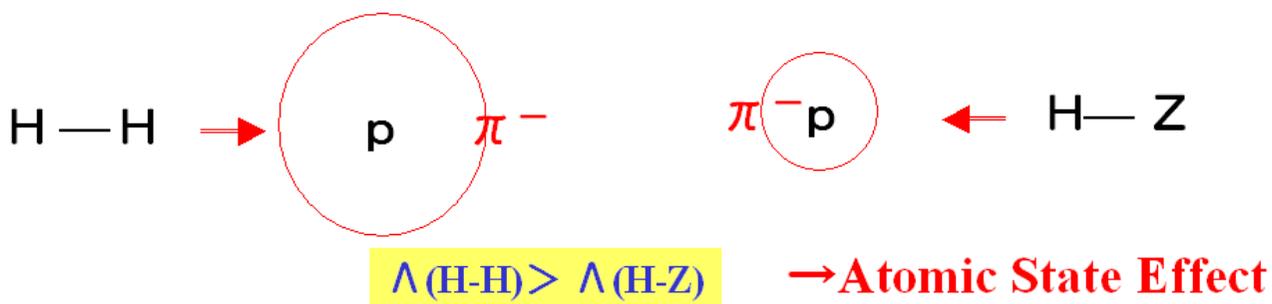
Plastic scintillation counters

$\pi^-$

## Chemical Effect in the Pion Transfer Process



Refs.: A. Shinohara, et al., Phys. Rev. A, 53(1) (1996) 130-138



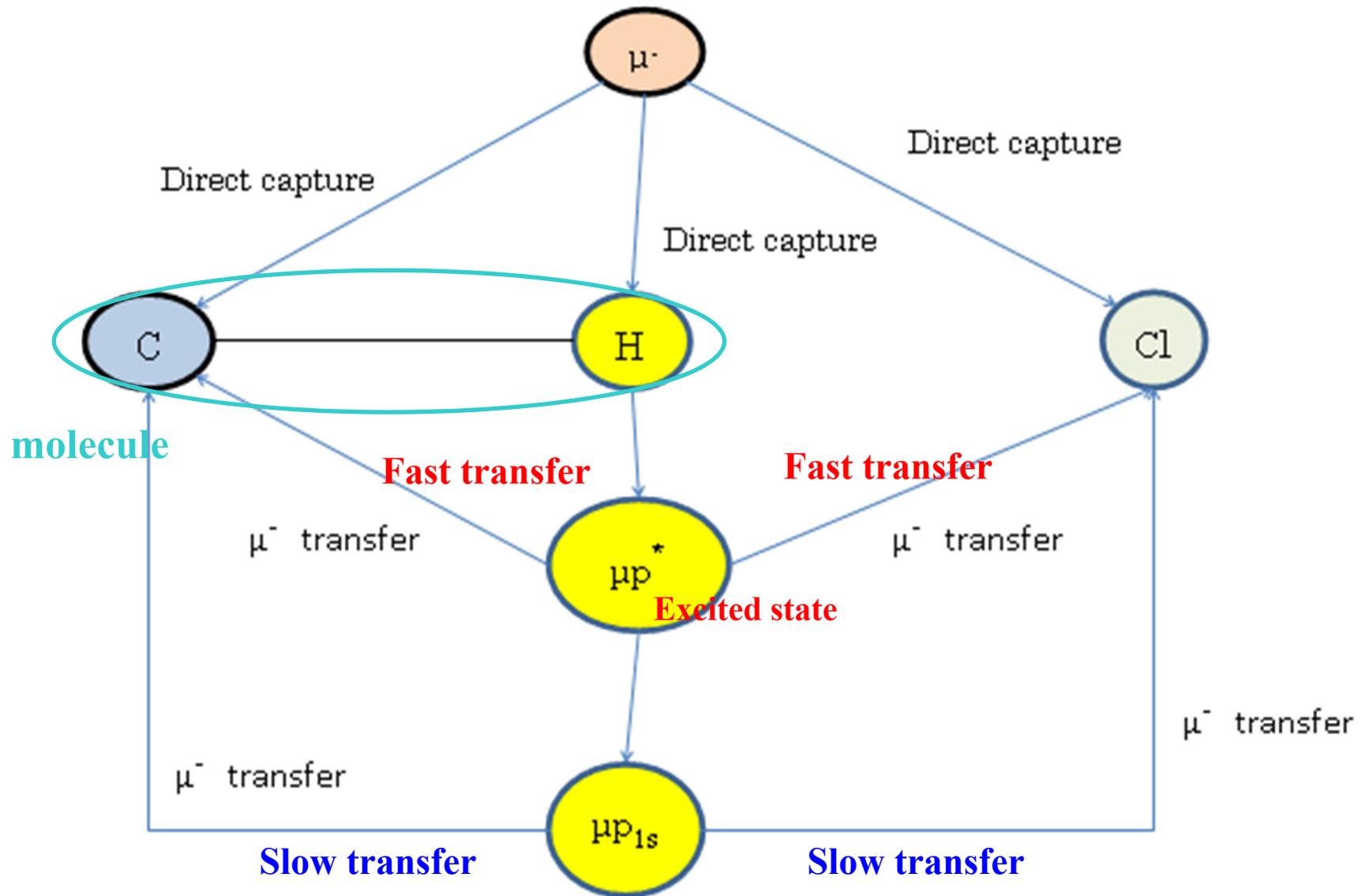
Ref.: A. Shinohara, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. **239**, 169-173 (1999).; T. Muroyama, et al., ibd., **239**, 159-163 (1999).

- 
- Pion transfer rate is influenced by chemical structure around the atom involved in the transfer process.
  - Pion transfer rate is depend on the atomic state (excited state) of pionic hydrogen, which is affected by the chemical environment of the relevant hydrogen.

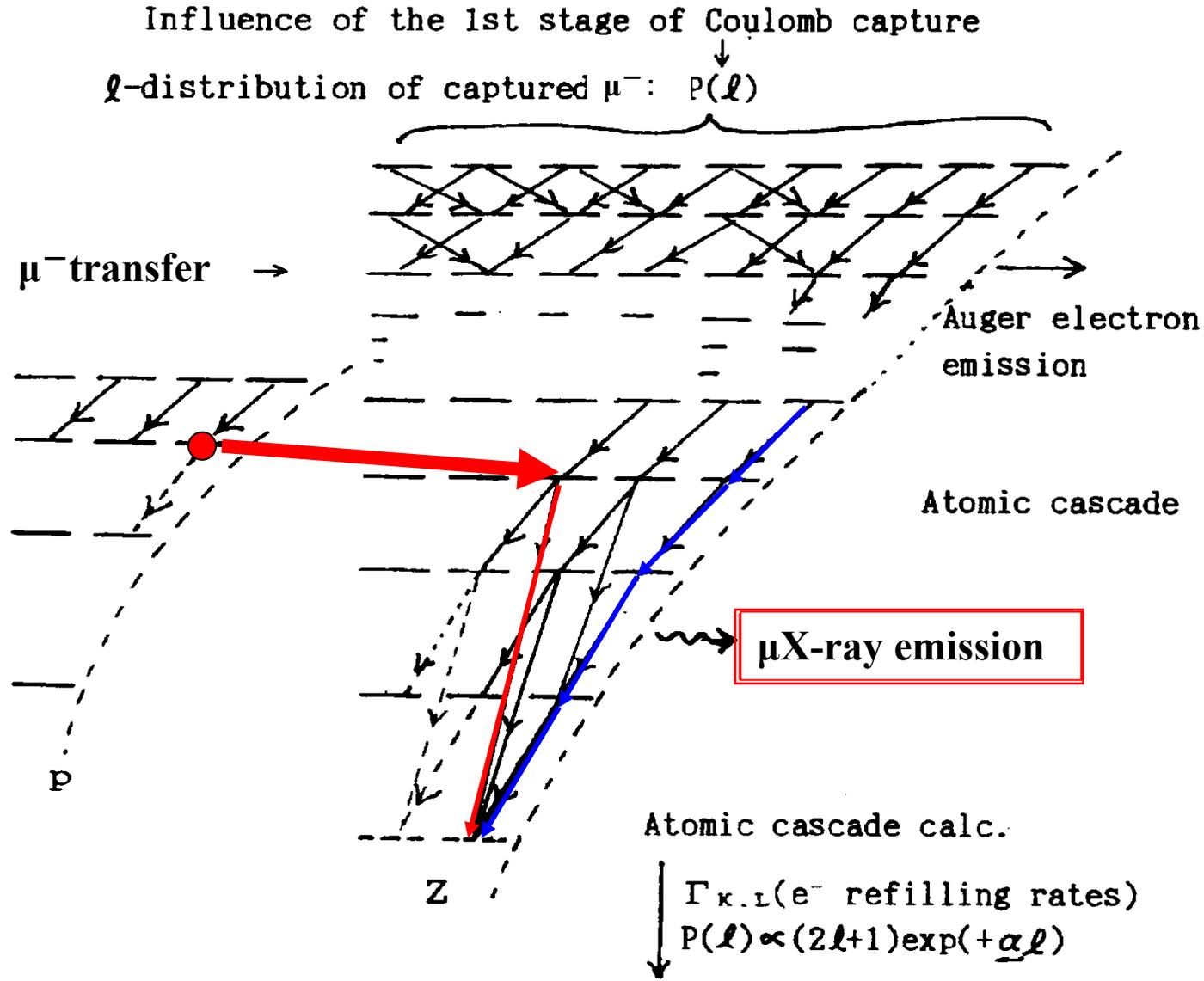
## 2. 本研究の目的

- ミュオン転移過程における化学効果による転移機構の実験的研究のために
- 気相系における分子効果の観測 (RIKEN-RAL)
- 凝縮相における分子効果の観測 (J-PARC-MLF)
  - MLF-D2における液体試料の高S/N測定
  - ミュオンX線強度(微細構造)変化による転移成分の解析
  - 2成分系による分子効果の観測の試み

## ■ 分子へのミュオン捕獲過程の外観



# ■ 原子カスケード計算 ( $\mu^-$ - $p$ からの転移効果)



# ■ 気相系における観測例

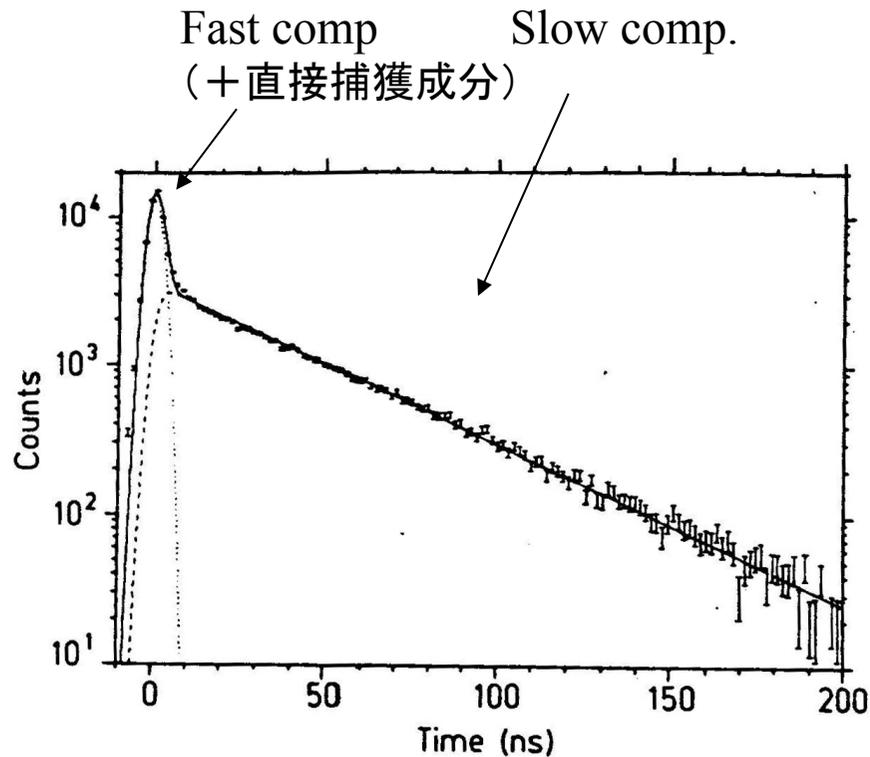


FIG. 1. Time distribution of the muonic Ar  $2p-1s$  events measured in a  $H_2 + (2.02\% \text{ Ar})$  mixture at 14.9 bars. Dotted line: fitted function for direct capture. Dashed line: fitted function for transfer from hydrogen. Solid curve: total fitted function.

Fast成分(励起状態から)で分子効果が期待される  
 Slow成分(1s状態)での可能性は？  
 →凝縮系では、Slow成分の時間が短縮、時間分離？

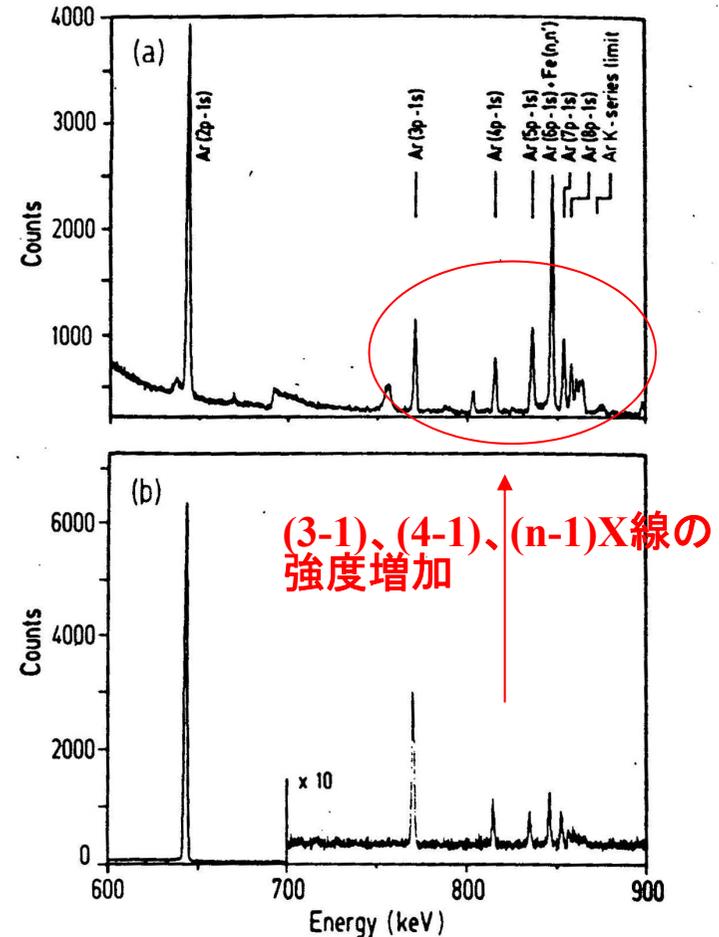
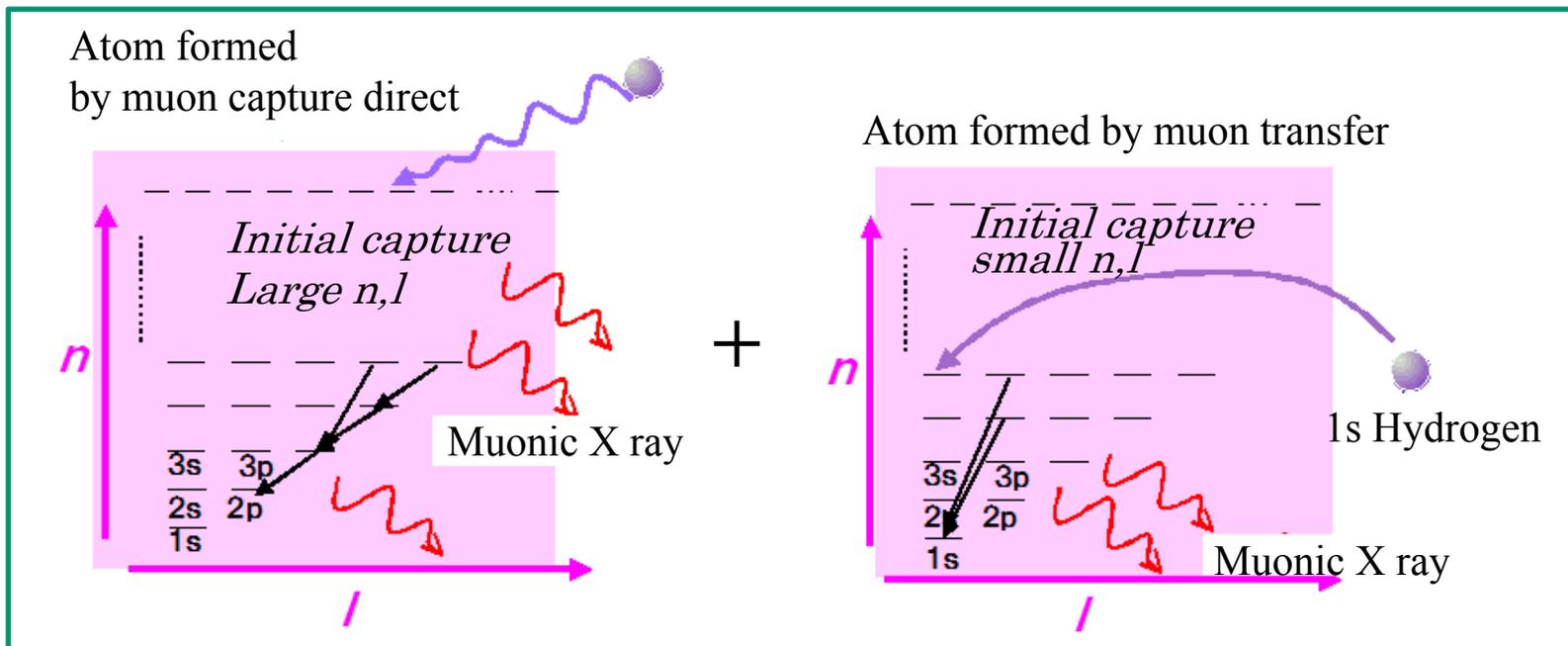


FIG. 2. Muonic Lyman series in argon by (a) transfer from hydrogen in a  $H_2 + (2.02\% \text{ Ar})$  mixture at 14.9 bars, (b) direct capture in pure argon at 1.5 bars.

# ■ 観測の原理



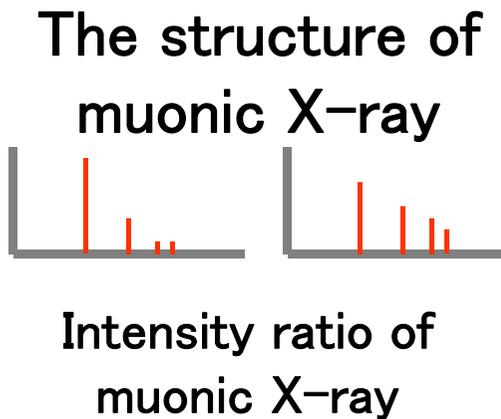
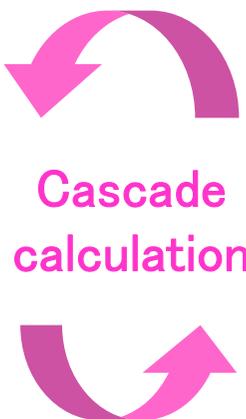
実験値との比較

転移過程の寄与を導出

**Parameter**

Quantum number of muon  
Principal quantum number  
Angular momentum quantum number

**Electronic Filling**



### 3. 実験(2010B0080)の概要と結果

概要: パイ中間子水素原子の炭素原子への転移速度について、 $C_6H_6/C_6H_{12} + CCl_4$ 系において分子効果が観測された。パイ中間子水素原子からの転移過程は励起状態からのみ起こるが、ベンゼンとシクロヘキサンの炭素原子の化学環境の違いが転移過程に影響したことになり、微視的な機構の解明に重要な情報を与える。

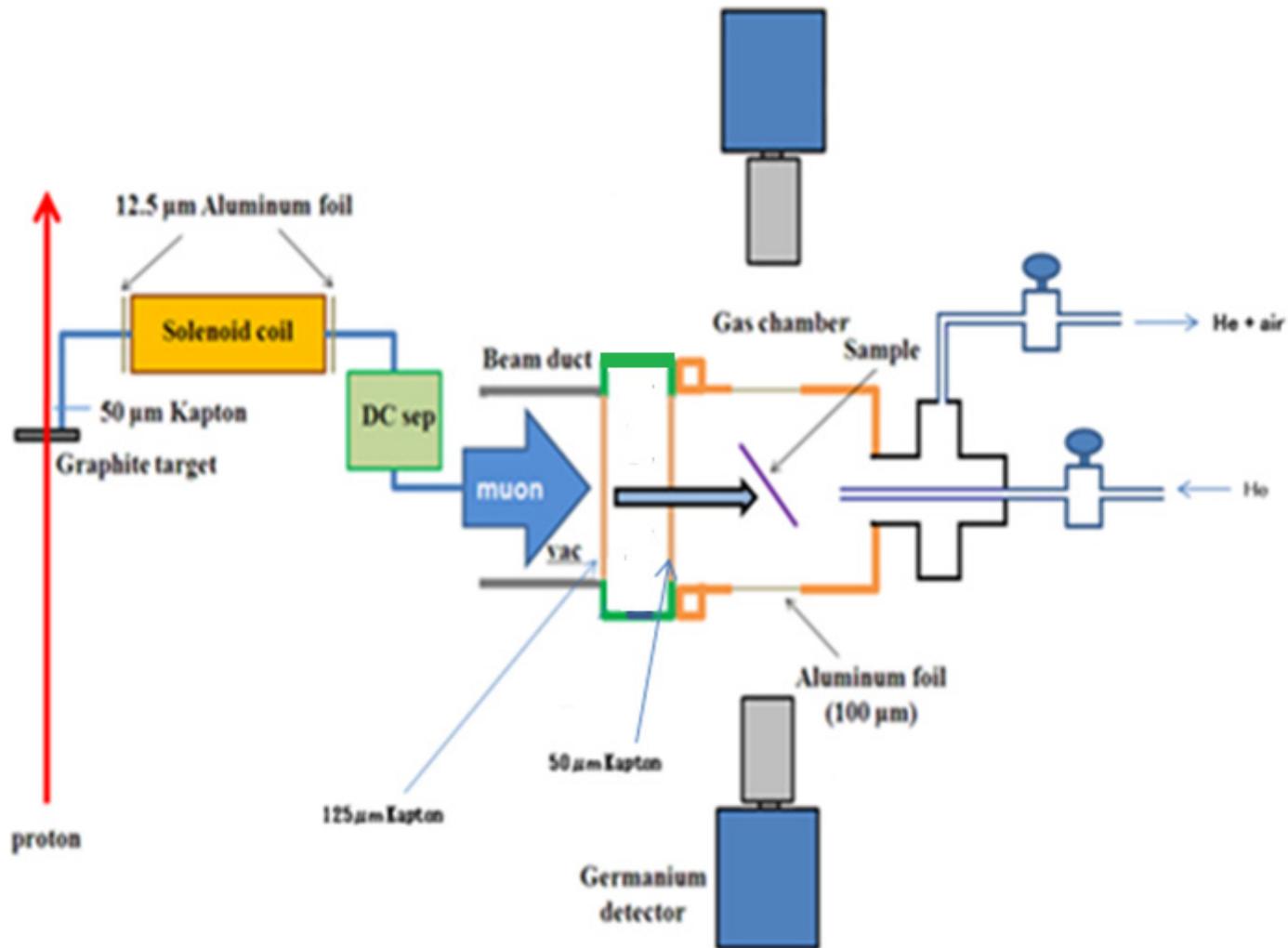
本研究では、ミュオン転移過程における同様の分子効果の有無を調べることを目的とする。

測定試料:  $C_6H_6/C_6H_{12} + CCl_4$ 系(液体2成分系)  
測定量: ミュオンX線スペクトルー時間情報

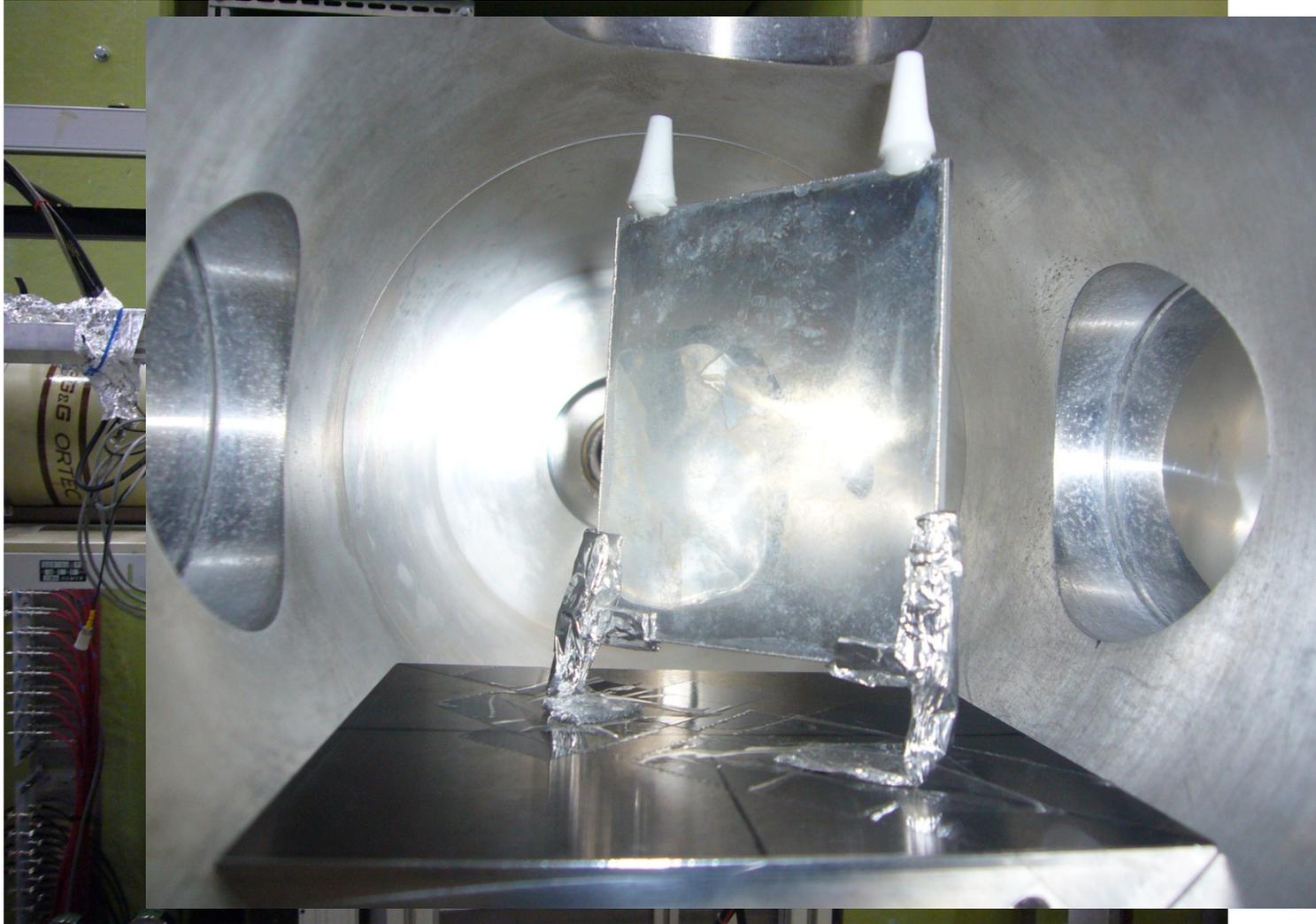
- 液体試料の高S/NのミュオンX線スペクトルの測定
- X線強度パターンからの転移速度の導出
- 励起状態からの転移速度、基底状態からの転移速度の弁別
- 転移過程における分子構造効果

### 3. 1. 実験のセットアップ (at D2-beam line)

- Experiment set up



# Experiment



## 3. 2. ビーム条件のサーベイ

### ■ 最適ビーム運動量の決定

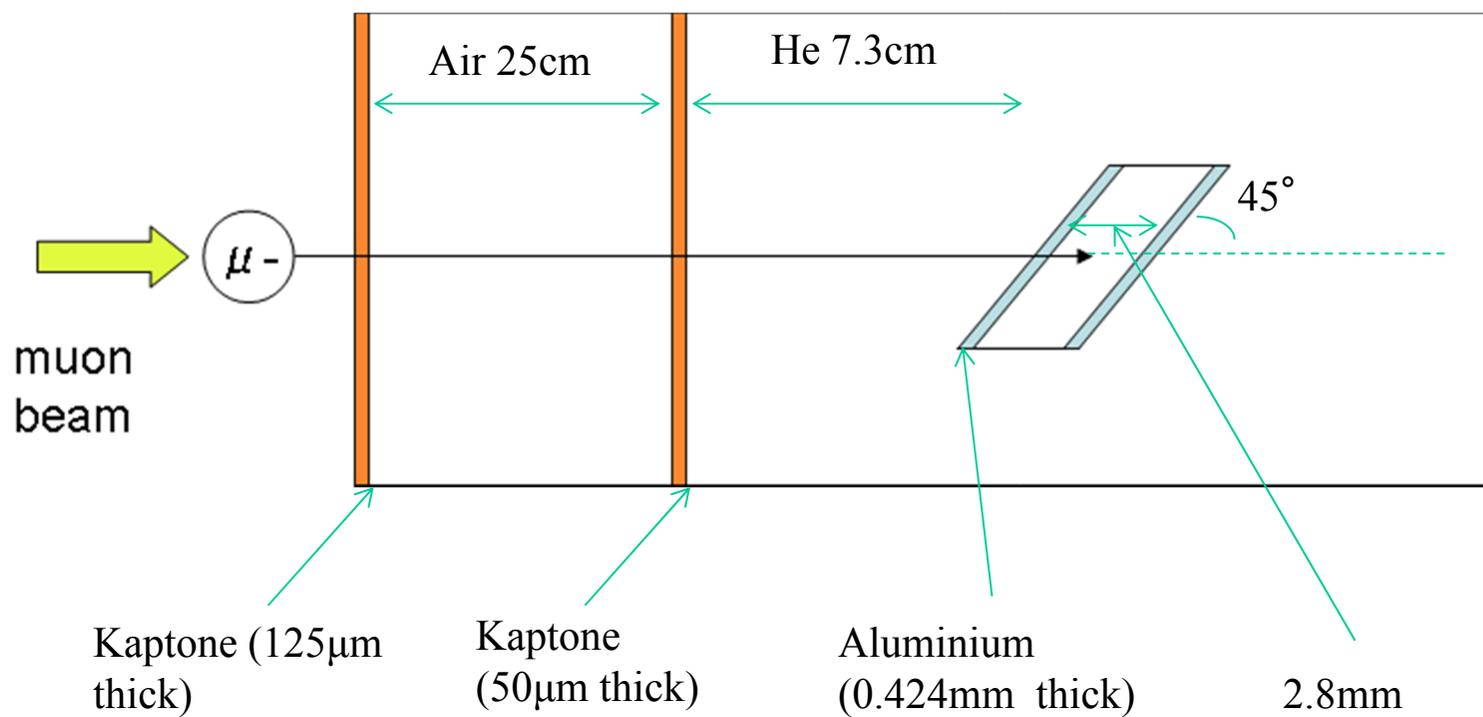
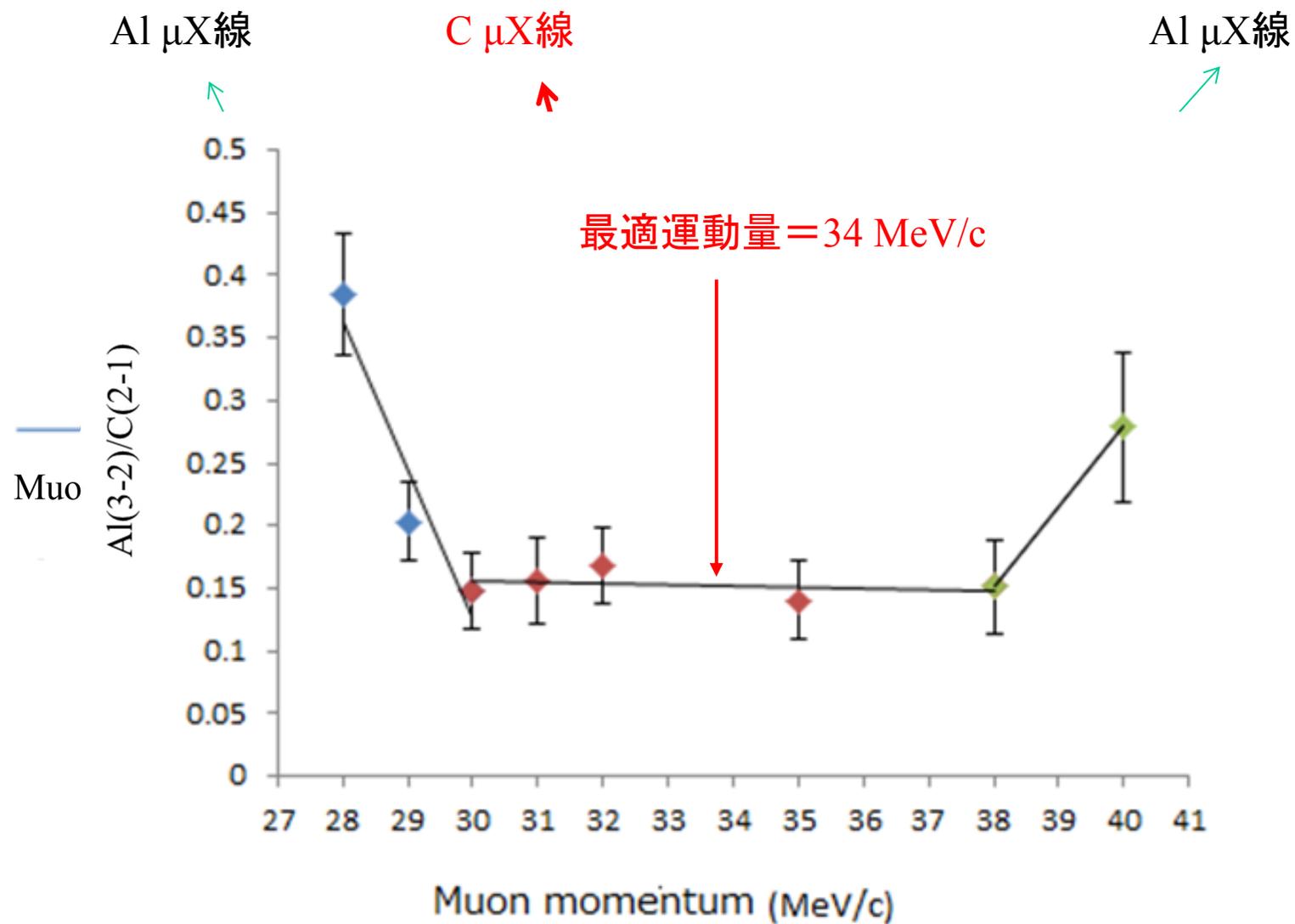


図. ビーム-試料間の構成

## ■ ビームの運動量分布とミュオンX線



## ■ ビーム強度の調整 パイルアップの検討

						timing spectrum		
実験条件		上	下	左	右	Loax(count/pulse)	LEPS(count/pulse)	electron/muon
1	DSL-2	40	80	80	80	0.912732	0.58124	0.220164609
	DSL-3-2	20	20	20	20			
2	DSL-2	80	80	80	80	0.951769	0.616178	0.286467487
	DSL-3-2	20	20	20	20			
3	DSL-2	20	80	80	80	0.713852	0.482305	0.23786794
	DSL-3-2	20	20	20	20			
4	DSL-2	40	80	80	80	1.633468	0.929929	0.173104956
	DSL3-2	30	30	30	30			
5	DSL-2	30	80	80	80	1.579373	0.91911	0.134684685
	DSL3-2	30	30	30	30			
6	DSL-2	20	80	80	80	1.420394	0.840101	0.128288823
	DSL3-2	30	30	30	30			

電子のコンタミネーションによる評価 → **条件6 が最適**

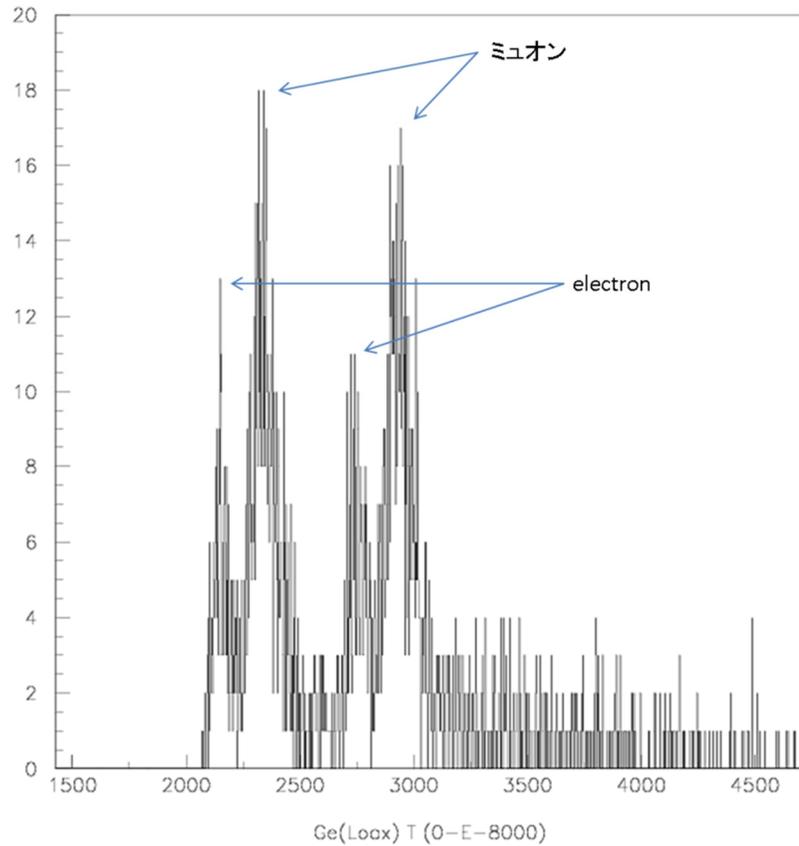


Fig. Timing spectrum of condition 2

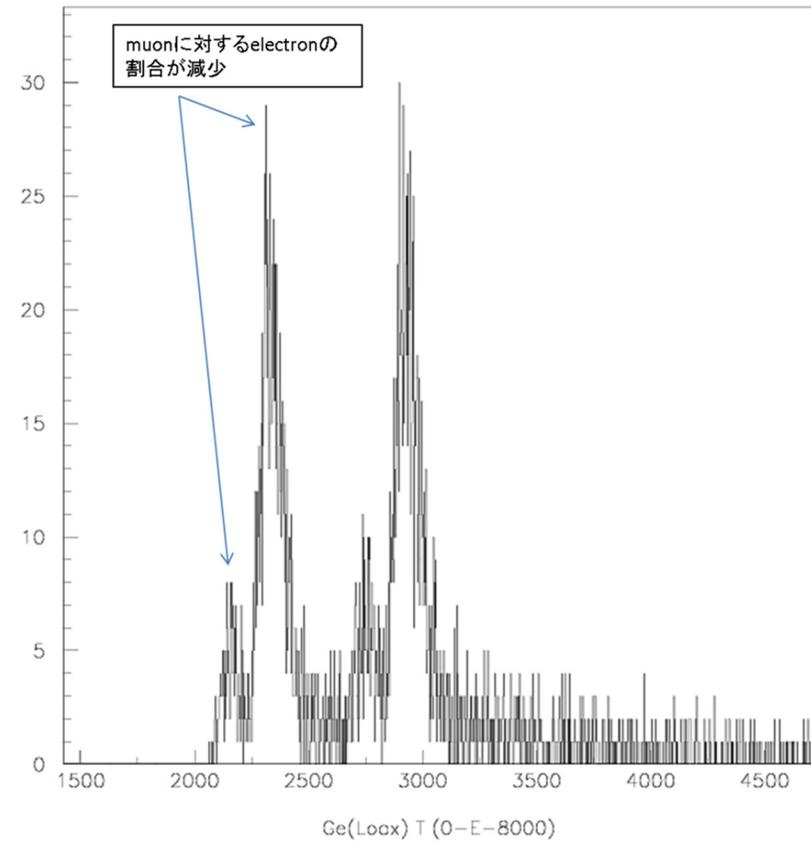


Fig. Timing spectrum of condition 6

## 3. 3. 試料測定

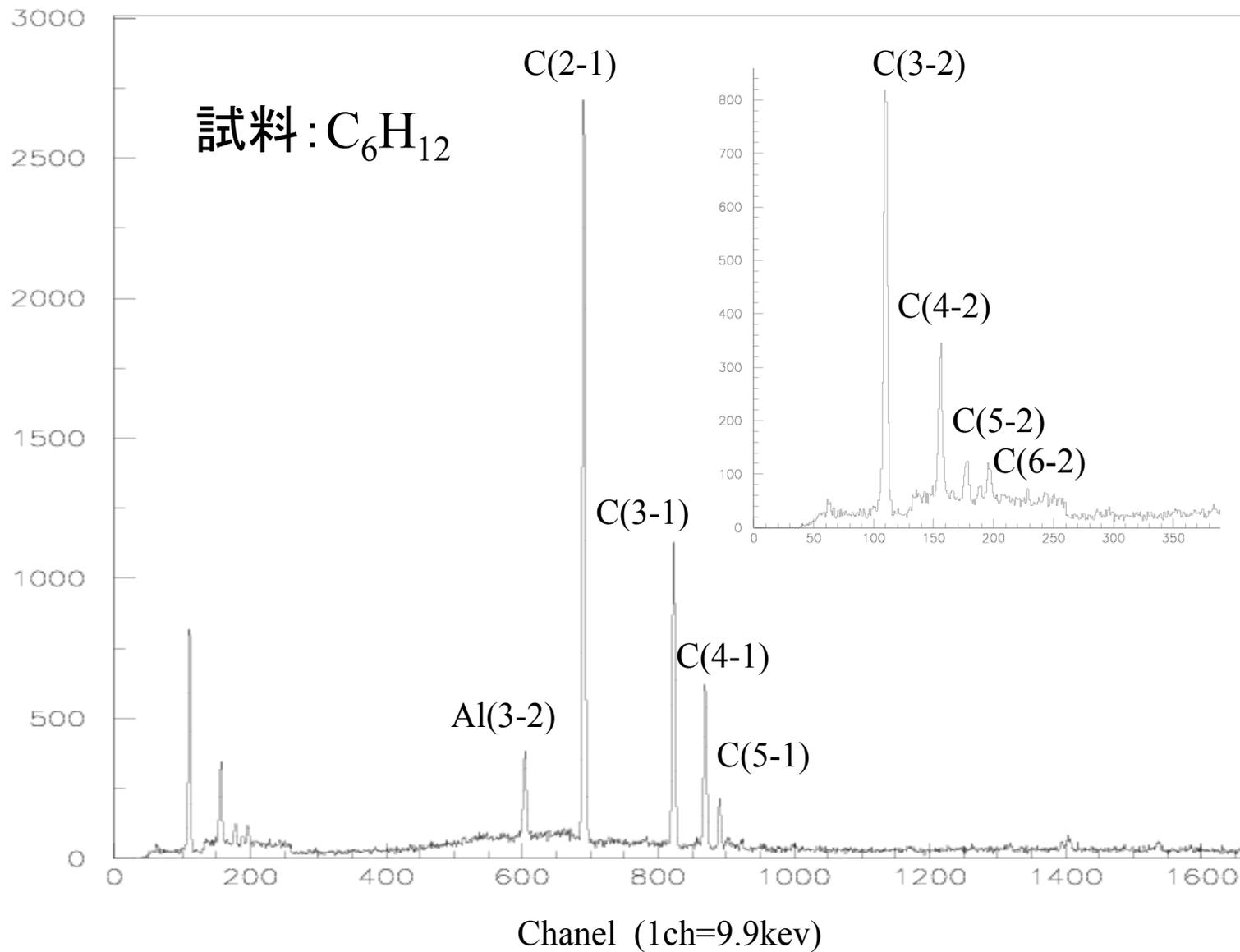
### ■ 測定試料と測定時間一覧

ビーム運動量: 34 Mev/c

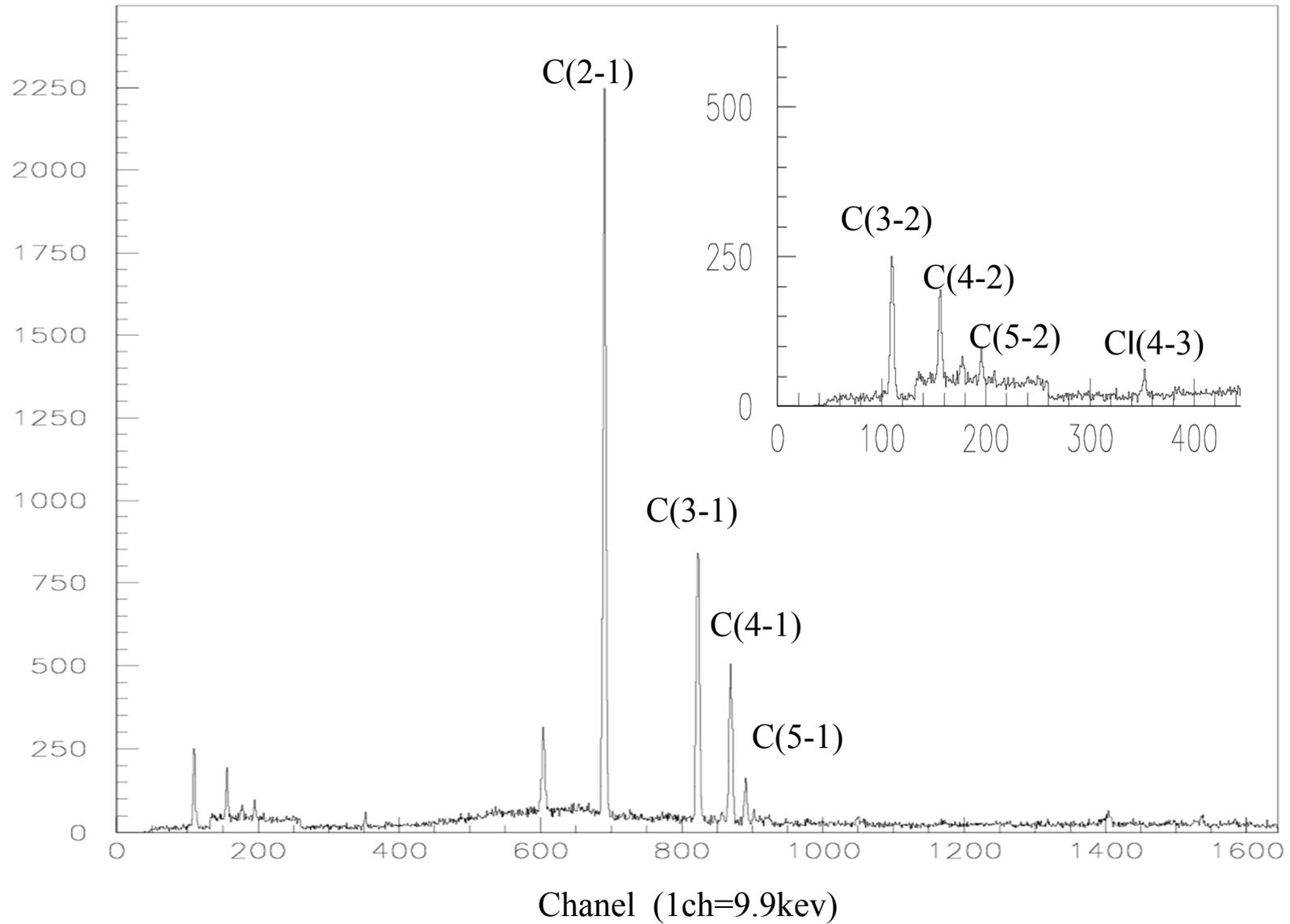
ビーム強度:  $5 \times 10^5 \mu^- / \text{sec}$

sample	Experiment time
C6H12	8h
C6H6	11h
CCl4	9h
C6H12+CCl4=2:1	17h
C6H12+CCl4=97:3	22h
C6H6+CCl4=2:1	No
C6H6+CCl4=97:3	No

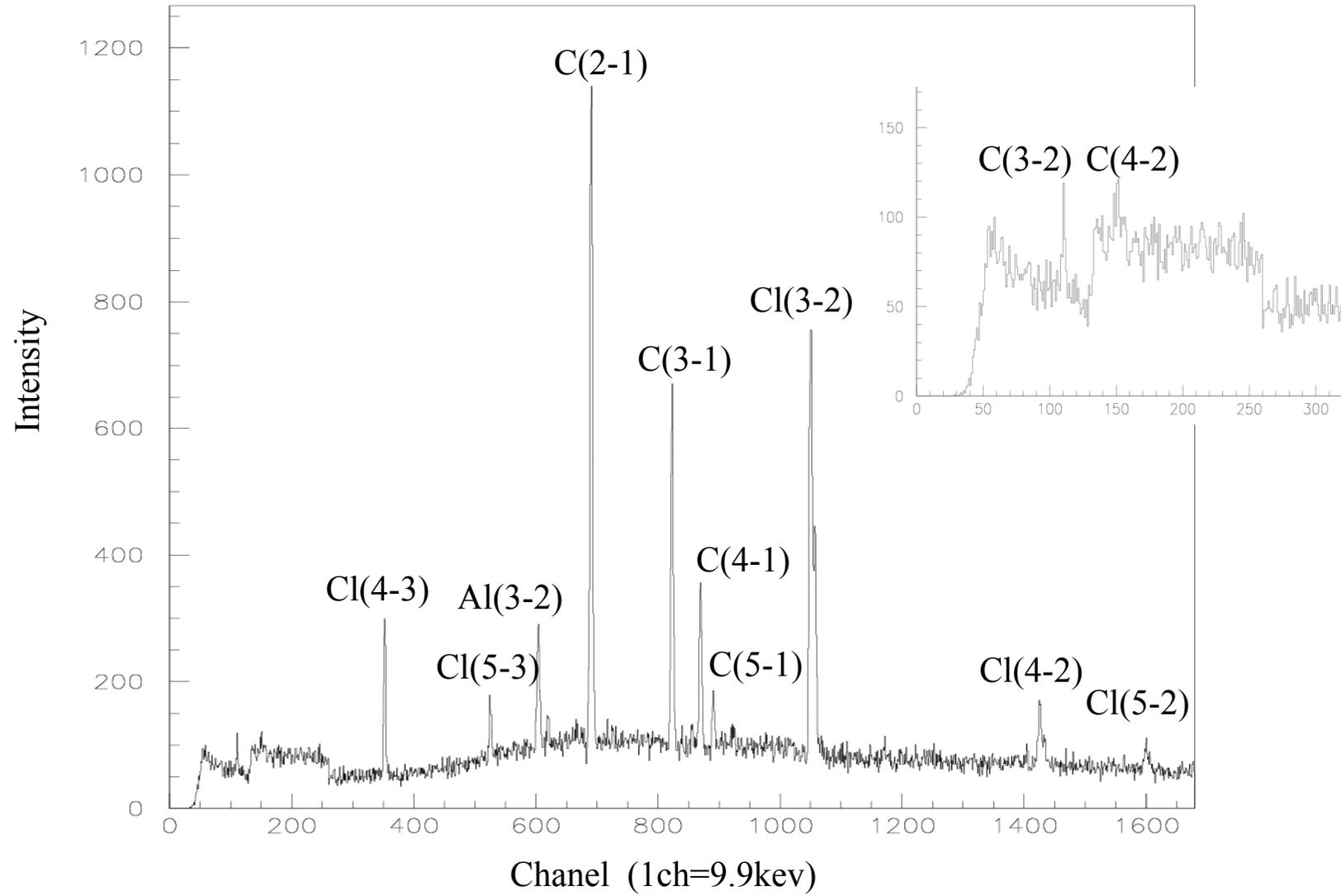
## ■ ミュオンX線スペクトルの例



試料:  $C_6H_6$



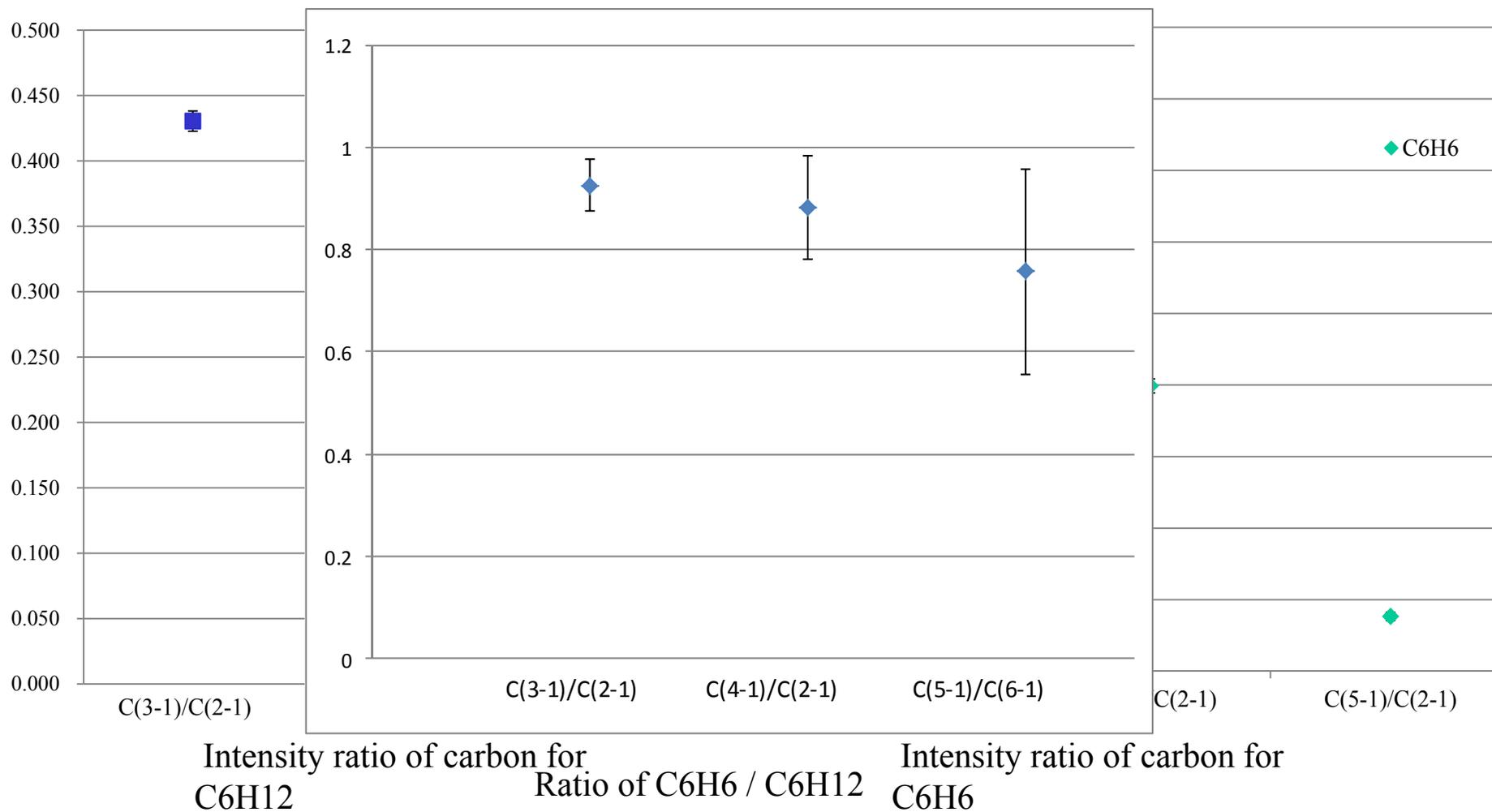
試料:  $C_6H_{12} + CCl_4 = 2:1$



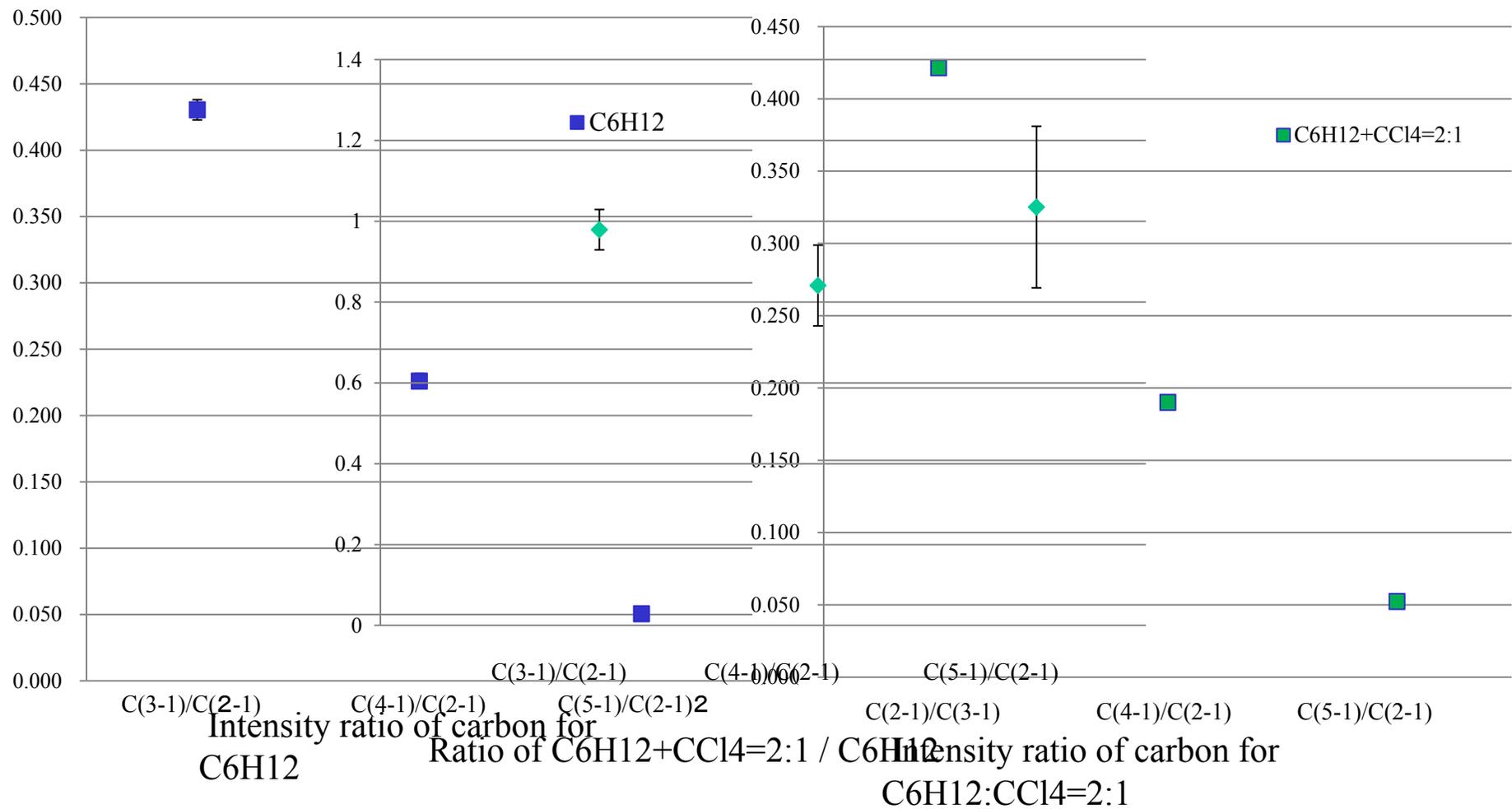
### 3. 4. 結果と(予備的)考察

転移の寄与:  $C_6H_6 < C_6H_{12}$

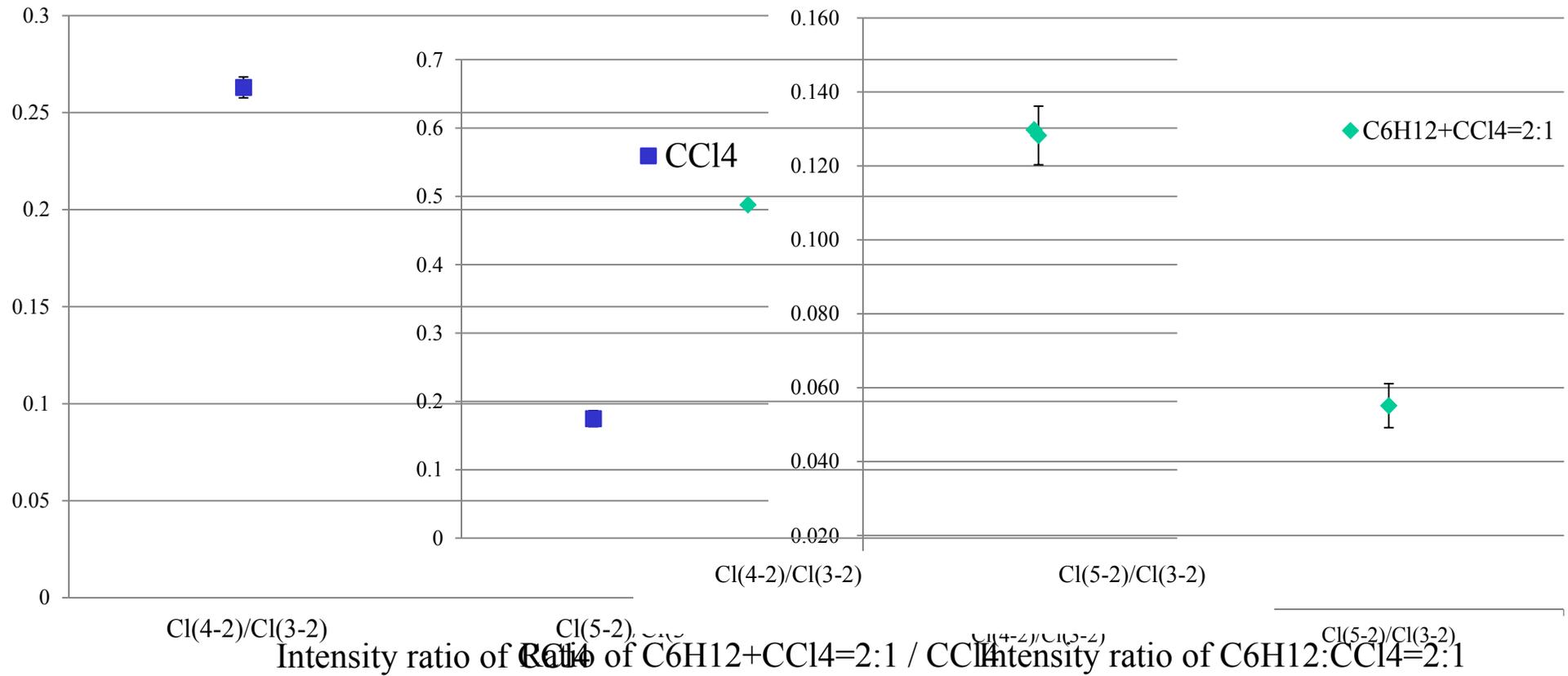
#### ■ X線強度比による定性的考察(全時間領域)



## ■ X線強度比による定性的考察



## ■ X線強度比による定性的考察



## 4. まとめと今後の計画

### ■ 2010B0080のまとめ

- ・ 液体試料について、高S/NのミュオンX線スペクトルの測定に成功した。
- ・ X線測定から推定される飛程幅(運動量分布)が設計通りであることが確認され、より薄い試料の測定が可能なが示された。
- ・ C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>+CCl<sub>4</sub>系についてデータ収集がなされ、X線強度分布から定性的に転移課程の寄与が示された。

### ■ 今後の課題・計画

- ・ C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>+CCl<sub>4</sub>系について、さらなる統計とCl $\mu$ X線の強度変化を確認する。
- ・ 分子効果の考察のため、比較すべきC<sub>6</sub>H<sub>6</sub>+CCl<sub>4</sub>系の測定をする。
- ・ 可能なら時間情報を含めた(遅延成分)スペクトル解析をする。
- ・ カスケード計算の条件を精査し、転移過程の寄与の定量的議論を行う。

→ 2011年度後期(2月) にビームタイム(3d)を実施予定