

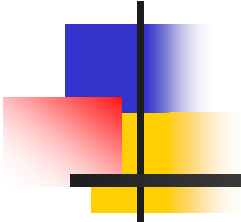
# 粒子線とレーザーの科学

---

## 「ミューオンの科学」

(担当: 松田恭幸 16号館222A)

2009/July/08



# 粒子線とレーザーの科学

---

## 「ミューオンの科学」

(担当: 松田恭幸 16号館222A)

### その2

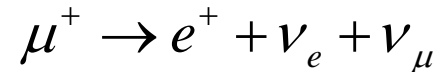
- ミューオンを使った様々な研究
  - (宇宙線ミューオンを使った火山の観測)
  - ミューオンのスピンを使った物性研究
  - ミューオンを使った核融合の研究

# 前回のまとめ

---

- ミューオンとはどんな粒子なのか

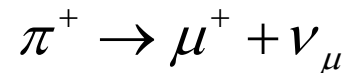
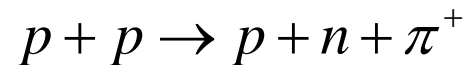
- 質量は  $106\text{MeV}/c^2$  : 陽子のおよそ  $1/9$ 、電子の 200 倍
- (陽)電子と二つのニュートリノに崩壊する。寿命はおよそ  $2.2\mu\text{sec}$



- スピン  $1/2$  を持つ

- どうやってミューオンは作られるのか

- 加速された陽子と陽子を衝突させて  $\pi$  中間子を作り、その崩壊からミューオンをつくる

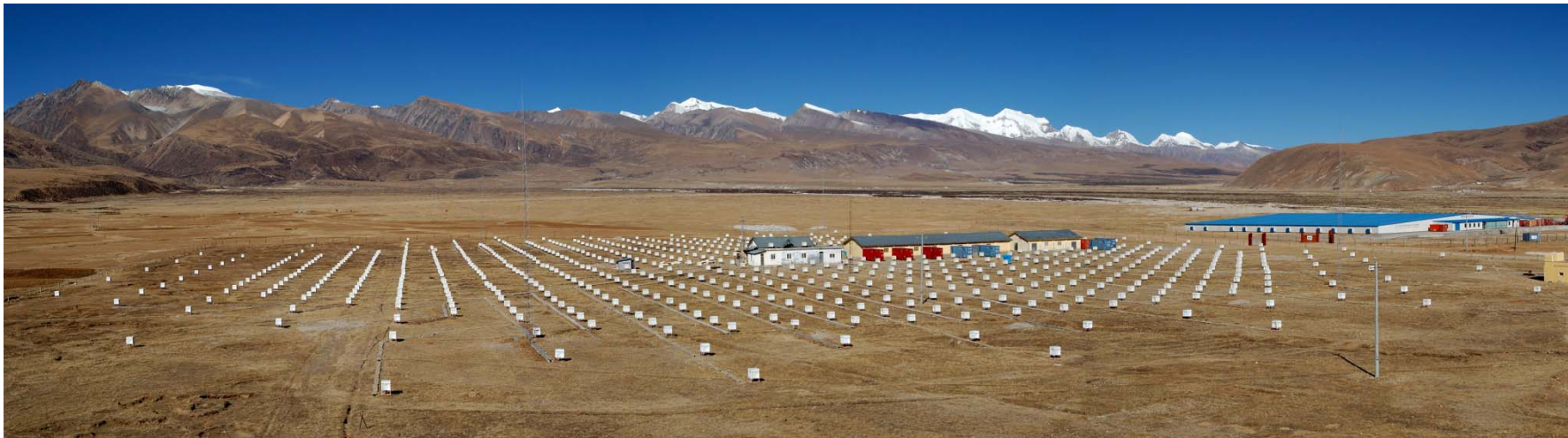


- 陽子を加速する装置 = 陽子加速器
- 天然の加速器 = 宇宙

# 前回のまとめ

---

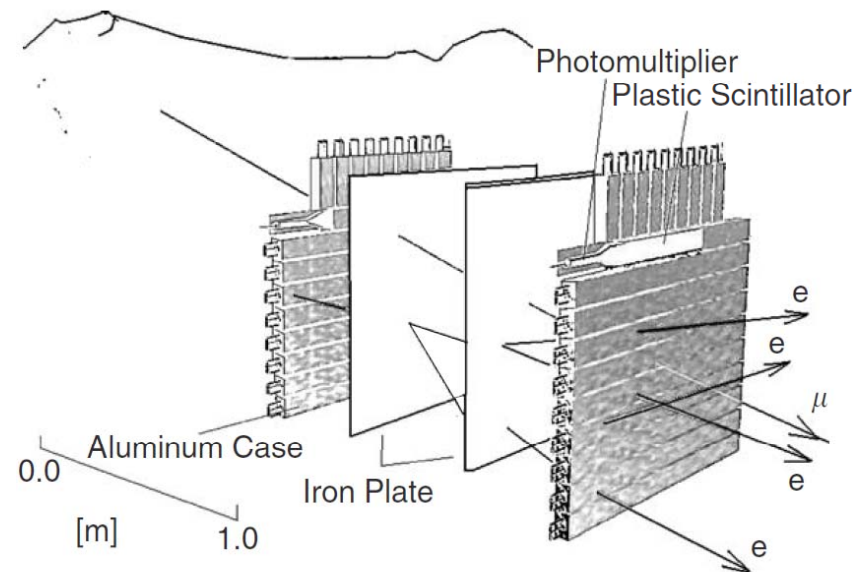
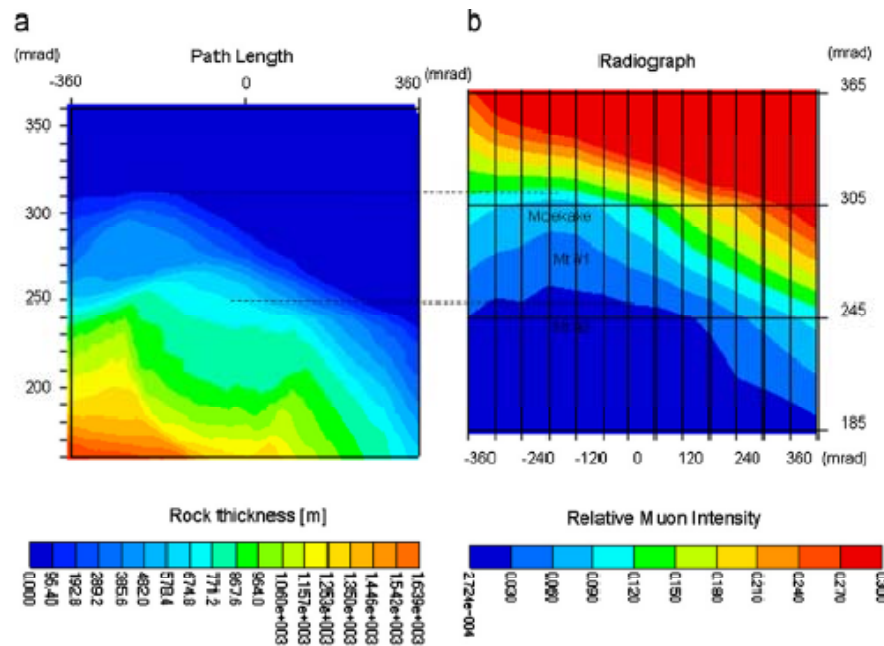
- 宇宙線ミュオンを使った実験
  - 宇宙線の観測



東大宇宙線研究所 AS-Tibet  $\gamma$  実験  
(<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/> より写真転載)

# 前回のまとめ

- 宇宙線ミュオンを使った実験
  - 宇宙線の観測
  - 宇宙線ミュオンを用いたトモグラフィー(透視)



H. Tanaka et al. Nucl. Inst. Meth. A575 (2007) 489,  
H. Tanaka et al. Nucl. Inst. Meth. A555 (2005) 164 から転載

# 前回のまとめ

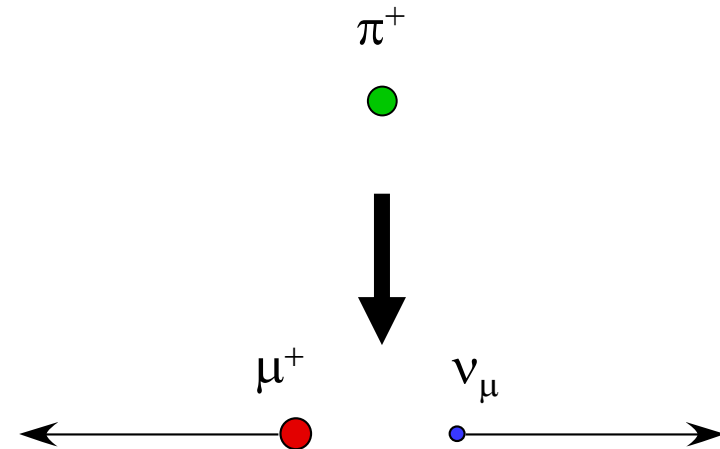
---

- 宇宙線ミュオンを使った実験
  - 宇宙線の観測
  - 宇宙線ミュオンを用いたトモグラフィー(透視)
- これからは加速器を使ったミュオンの実験について紹介していきます

# ミューオンの生成

加速器を使ってミューオンを作るには、まず  $\pi$  中間子を作り、その  $\pi$  中間子が崩壊するときに見えるミューオンを使うのでした(前回の講義参照)

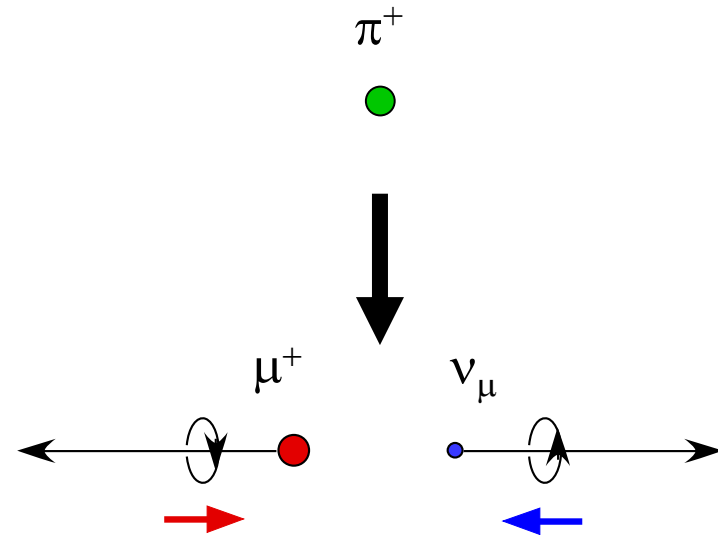
- 止まった  $\pi^+$  中間子が崩壊して  $\mu^+$  が生成されるとき、**エネルギー保存則**と、**運動量保存則**から、生成された  $\mu^+$  はいつも 4MeV の運動エネルギーを持ちます。



# ミューオンの偏極(スピン)

加速器を使ってミューオンを作るには、まず  $\pi$  中間子を作り、その  $\pi$  中間子が崩壊するときに見えるミューオンを使うのでした(前回の講義参照)

- **ミューオンはスピン 1/2 を持っています。**
  - $\pi$  中間子はスピン 0 の粒子であり、ニュートリノはスピン 1/2 を持っています
  - ニュートリノは全て「進行方向に対して左巻き」のスピンを持つことであることが知られています
  - もともとの  $\pi$  は回転していなかったのですから、反対側に飛んでくるミューオン ( $\mu^+$ ) も進行方向に対して左巻きになってくはなりません(角運動量の保存)
- **止まった  $\pi$  から出てくるミューオンのスピンの向きは全て揃っています!** (これを 100% 偏極しているといいます)





## スピンの矢印の表示(補足)

前のトラペで、粒子のスピンを矢印で表しました

スピンは、粒子の自転のように考えることができます  
(実際には素粒子には大きさがありませんので、「自転」というのはあくまでも「例え」です)

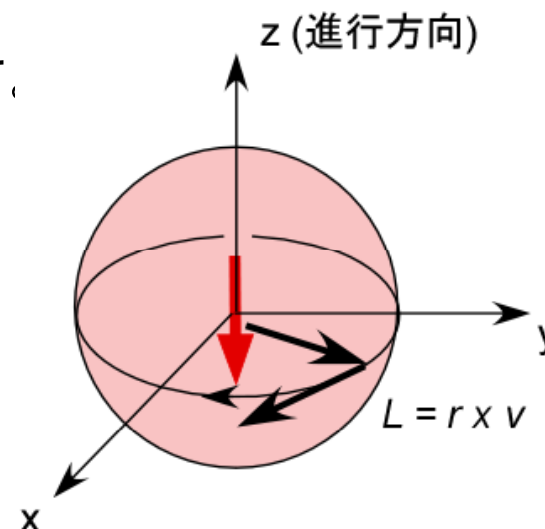
粒子の進行方向を  $z$  軸にとって、右手系の座標系をとり、大きさのある粒子が回転している様子を考えて見ましょう。

この粒子は進行方向に対して左巻きに回っています。

ですから、この粒子の回転による ( $z$  軸まわりの) 角運動量のベクトルは進行方向と逆向きになります。

こうして、スピンを粒子の自転のように考えることで、スピンを矢印で表すことができます。

進行方向に対して左巻きのスピンは、進行方向と反平行の矢印で表されることになります。



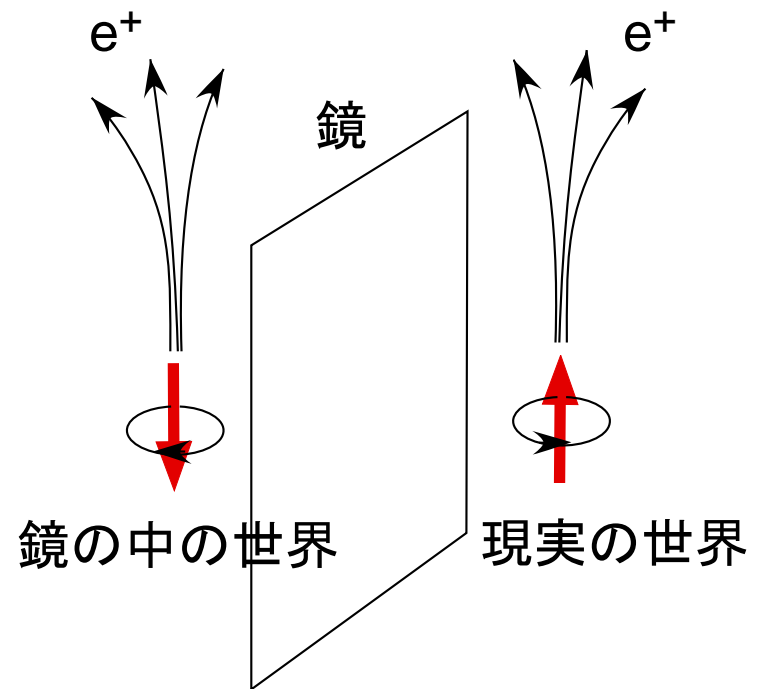
## ミューオンを使った素粒子実験の一例(パリティの破れ)

---

- 加速器からでてくるミューオンのスピンは全て向きが揃っていることが分かりました。この性質を利用した最も有名な実験の一つが 1956 年に行われた「パリティの破れ」の探索実験です。
- 自然界の法則にはいろいろな対称性があります。
  - 平行移動に対する対称性:「ここ」の物理法則と「あそこ」の物理法則は同じです
    - この対称性は守られています
  - 時間移動に対する対称性:「今」の物理法則と「ちょっと前」の物理法則、「ちょっと未来」の物理法則は同じです
    - この対称性も守られています
- 「パリティ」という対称性は、「自然界には右と左の区別がない」ということを意味します。「パリティ」対称性が守られる、ということは、物理過程を鏡に映してみたときに、「これは本物じゃない、鏡に映った像だ」と見分けることはできない、ということです。
  - 当たり前に見えますね。でも、素粒子の世界では本当に成り立っているのでしょうか？

## ミューオンを使った素粒子実験の一例(パリティの破れ)

- コロンビア大学の Garwin らは、加速器からでてくるミューオンが 100% 偏極していることを利用して、この「パリティ」が本当に守られているかどうかを検証する実験を行いました。
- 偏極しているミューオンがあるとします
- 鏡を置くと、偏極の向きがひっくりかえって見えますね
- さて、ミューオンが崩壊するときには陽電子ができるのでした
- もし、ミューオンから出てくる陽電子がミューオンのスピンの向きに出てきやすいならば、鏡の中の世界では逆にスピンの向きと反対に出てきやすいはずです
- つまり、ミューオンのスピンの向きと陽電子が出てくる向きに相関があれば、現実の世界と鏡の中の世界に差があるということですから、「パリティが破れている」ということになります



## ミューオンを使った素粒子実験の一例(パリティの破れ)

- 1956年の12月に行われた実験では、加速器からでてくる100%偏極したミューオンをグラファイトに止めて、止まったミューオンのスピンの向きと、出てくる陽電子の数の分布との関係を測定しました。
- 驚くべきことに、陽電子はスピンの向きの方向によく出てくる(=ミューオンの崩壊ではパリティが破れている)ことが分かりました。これは「自然界には右と左の違いがある」ことを示した最初の実験の一つです。

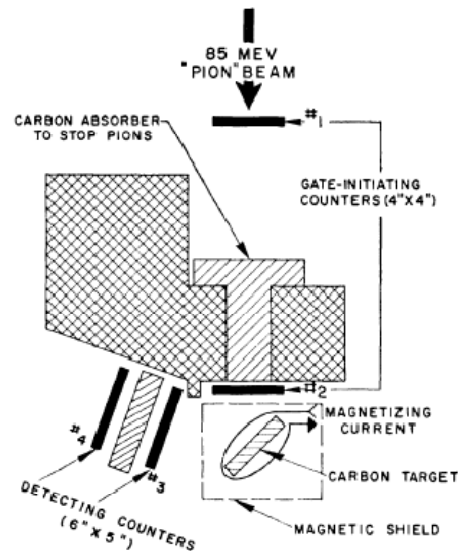


FIG. 1. Experimental arrangement. The magnetizing coil was close wound directly on the carbon to provide a uniform vertical field of 79 gauss per ampere.

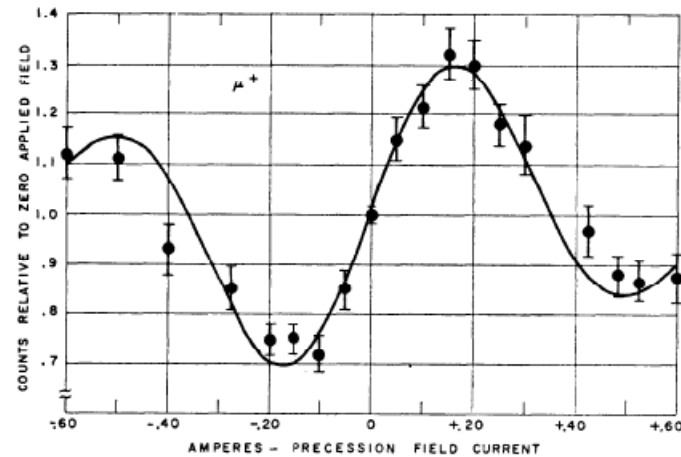


FIG. 2. Variation of gated 3-4 counting rate with magnetizing current. The solid curve is computed from an assumed electron angular distribution  $1 - \frac{1}{3} \cos\theta$ , with counter and gate-width resolution folded in.

R.L. Garwin et al. Phys. Rev. 105, 1415(1957) から

## 余談：パリティの破れと、他の対称性の破れ

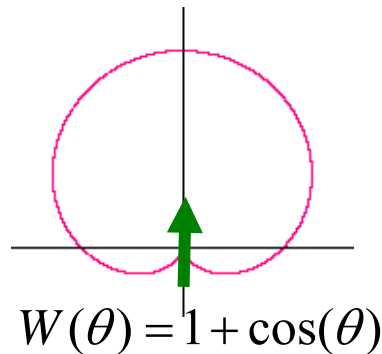
---

- パリティの破れが発見される以前、自然界の法則は
    - パリティ対称性(P)：右と左の対称性
    - 荷電共役対称性(C)：電荷の+と-の対称性
    - 時間反転対称性(T)：時間の流れの向きに対する対称性を持っていると信じられていました。
  - 1956年に行われた2つの実験、ミューオンの崩壊と、 $^{60}\text{Co}$ の崩壊におけるパリティの破れの実験によって、自然界には右と左の違いがあることが分かりました。
    - 1957年 パリティの破れを予言した Lee と Yang がノーベル賞を受賞
  - 1964年、Cronin と Fitch が、C と P を組み合わせた CP 対称性も破れていることを K 中間子の崩壊で発見→1980年ノーベル賞受賞
    - 2008年 CP対称性の破れを説明した小林と益川がノーベル賞を受賞
- じゃあ、C と P と T を組み合わせた CPT 対称性は？
- 私たち(山崎・松田研)は反陽子と陽電子が結び付いた「反水素」を用いて確かめようという実験をすすめています。

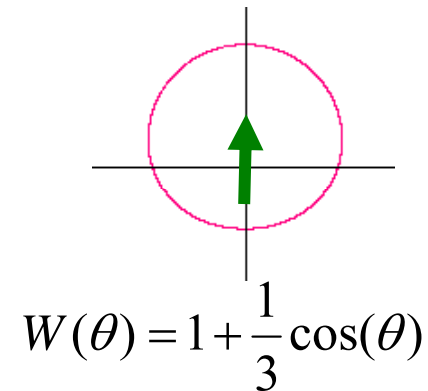
## パリティの破れの応用: $\mu$ SR 法の誕生

- ミューオンが  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$  という過程で崩壊して陽電子とニュートリノになるとき、ミューオンのスピンの向きに陽電子を出しやすいことが分かりました。

最大エネルギーの陽電子の角度分布



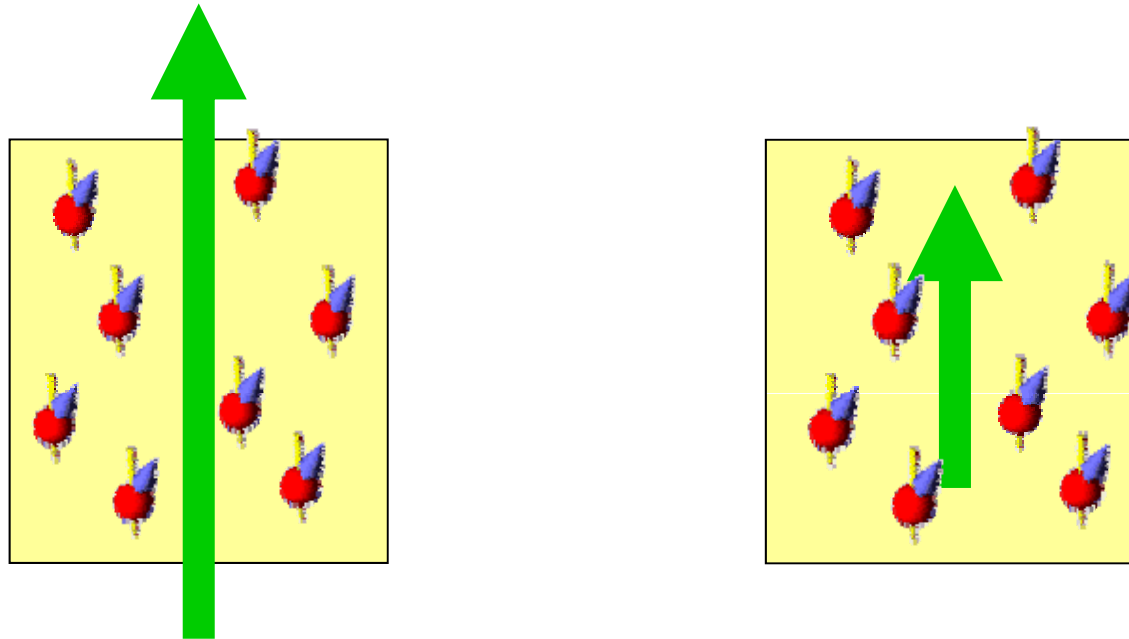
すべてのエネルギーの陽電子の角度分布



- 逆に言えば、陽電子の角度分布とその変化を測定すれば、(物質の中の)ミューオンのスピン分布とその変化が分かることになります  
→ これを使って物質の性質を測定できないか? ( $\mu$ SR 法の誕生)

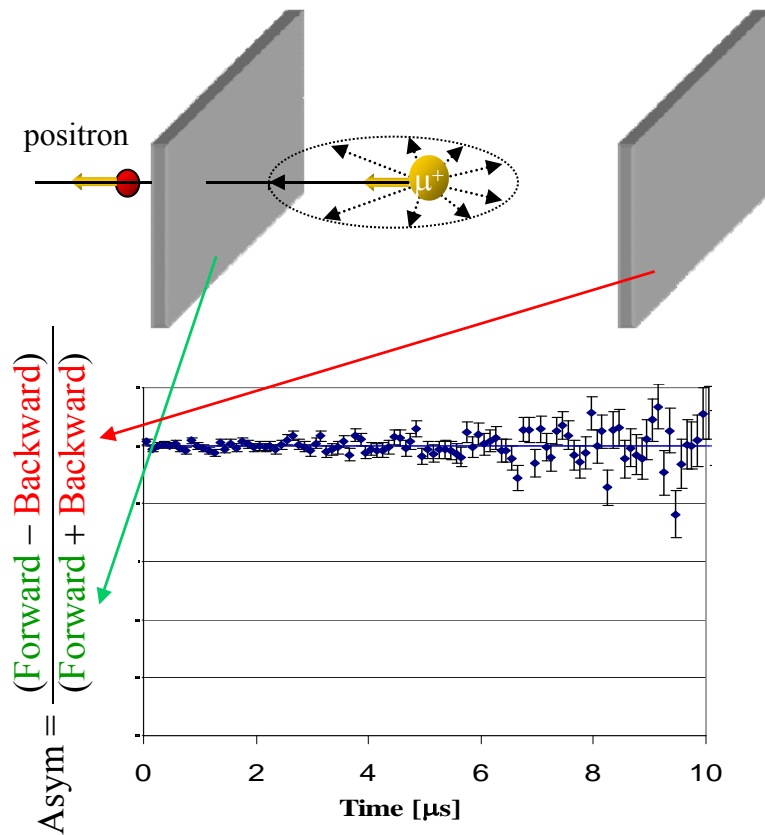
## μSR 法の原理

- スピンの向きは磁場の回りで回転します
- 偏極したミュオンを試料に打ち込むと、ミュオンはその場所の磁場の向きの回りに回転します。
- 磁場が弱ければ、回転する速度も変わります。
- ミュオンのスピンの回転やその緩和を観測することで、試料の中の磁場の様子(=磁気構造)を知ることができます



# μSR 法の原理

偏極したミュオンを物質の中に打ち込み、そのスピンの回転・緩和から、内部の磁気構造とそのゆらぎ、電子のspin状態などを知る実験手法

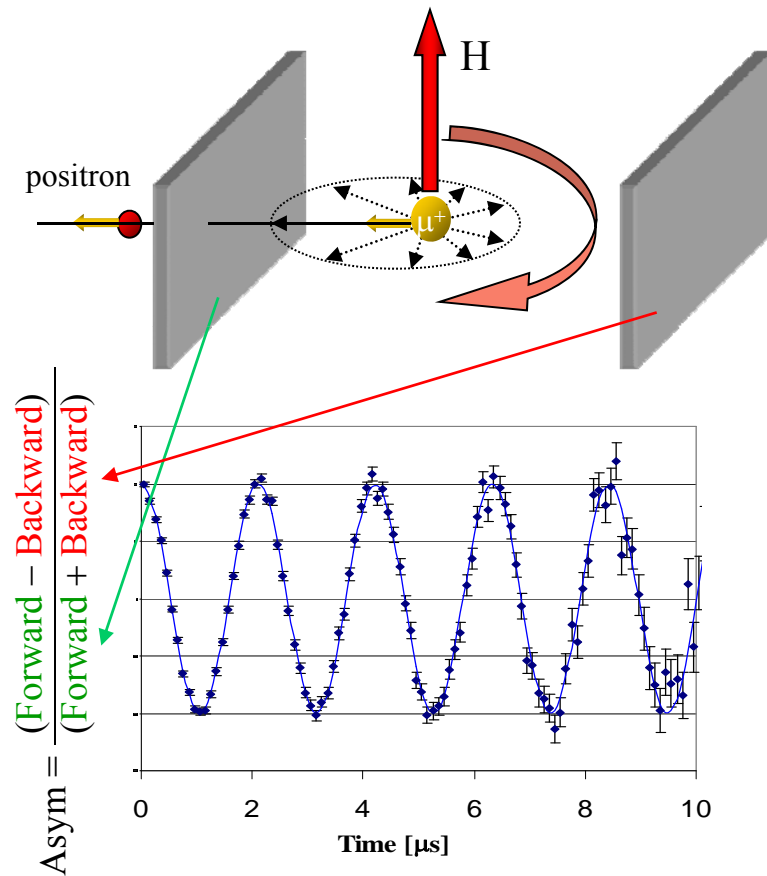


- 試料の前後に陽電子を検出するためのカウンターを置いて、そのカウント数の非対称性から、ミュオンのspinがどちらを向いているのかがわかります
- もし、ミュオンが何も磁場を感じないなら...  
→ カウント数の非対称性は時間とともに変化しません



# μSR 法の原理

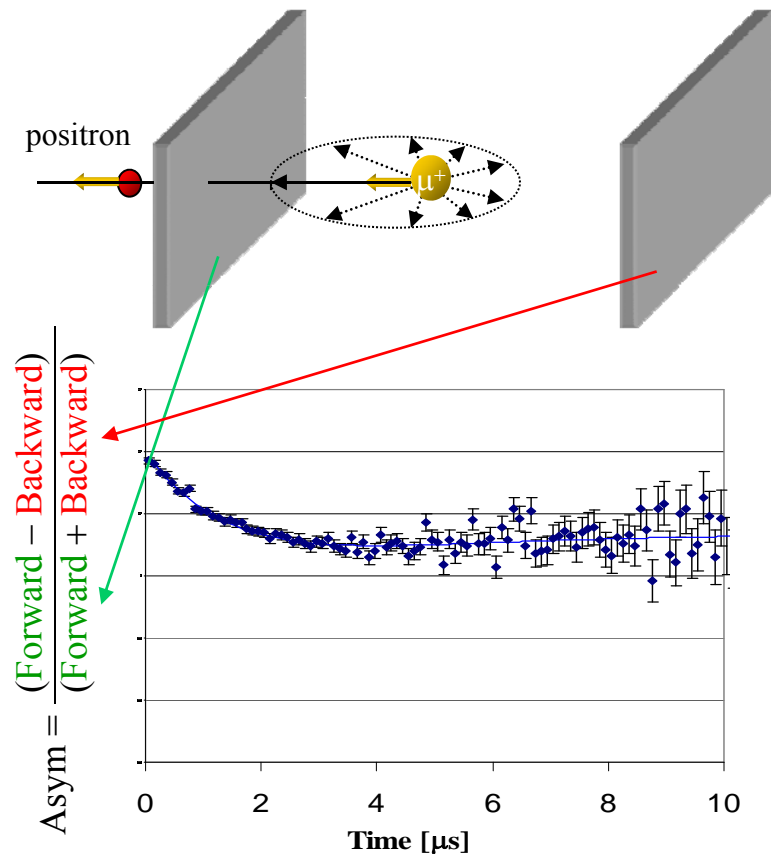
偏極したミュオンを物質の中に打ち込み、そのスピンの回転・緩和から、内部の磁気構造とそのゆらぎ、電子のスピン状態などを知る実験手法



- 試料の前後に陽電子を検出するためのカウンターを置いて、そのカウント数の非対称性から、ミュオンのスピンの向きがどちらを向いているのかがわかります
- ミュオンが常に同じ向きで同じ強さの磁場を感じるなら...  
→ すべてのミュオンが同じ速度で回転しますから、非対称性はコサインカーブを描きます。

# μSR 法の原理

偏極したミュオンを物質の中に打ち込み、そのスピンの回転・緩和から、内部の磁気構造とそのゆらぎ、電子のspin状態などを知る実験手法



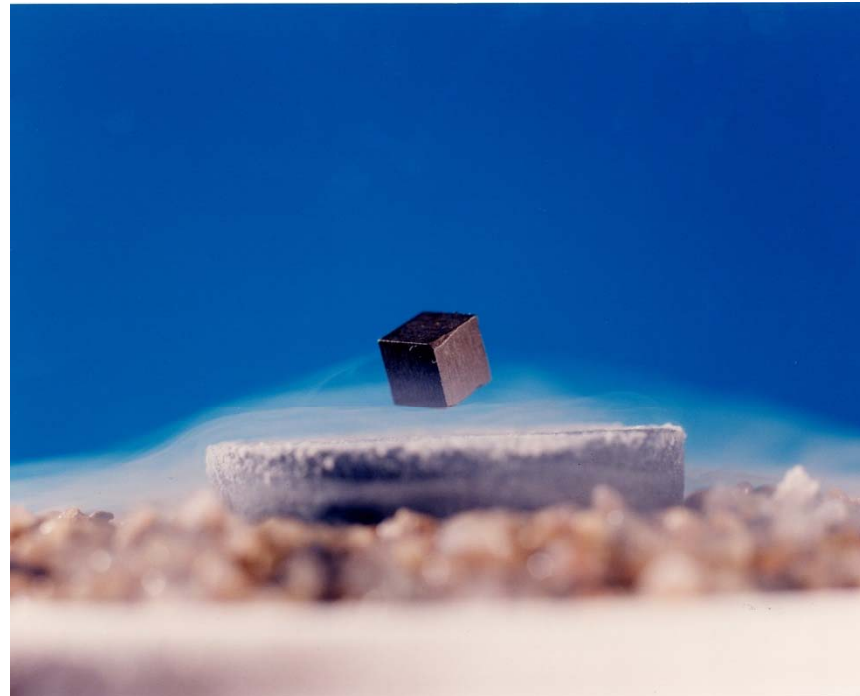
- 試料の前後に陽電子を検出するためのカウンターを置いて、そのカウント数の非対称性から、ミュオンのspinがどちらを向いているのかがわかります
- 試料の中に磁場の分布があるならば(ミュオンが感じる磁場がいろいろな大きさを持って分布しているならば)...
  - spinの向きがバラけてきます
  - ミュオンの偏極率が時間とともに落ちてきます
  - この偏極が落ちてくる形(緩和関数の形)から、逆に内部磁場の分布の様子を知ることができます

## $\mu$ SR 研究の例: 超伝導状態の研究

---

超伝導体には磁束(～磁力線)が入り込みません(マイスナー効果)

磁場を次第に強くしていくと、ある種の超伝導体では急に超伝導が失われてしまいます(第1種超伝導体)が、別の種類の超伝導体では磁力線の一部が超伝導体の中に入り込んで、全体としては超伝導を保ちます(第2種超伝導体)。応用上用いられる超伝導体は、ほとんどが第2種超伝導体です。

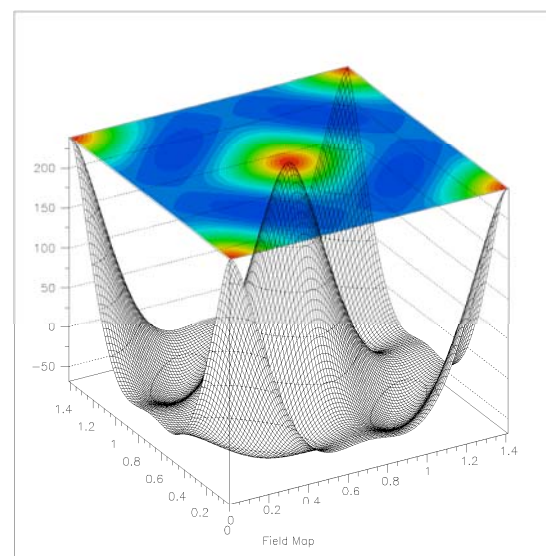
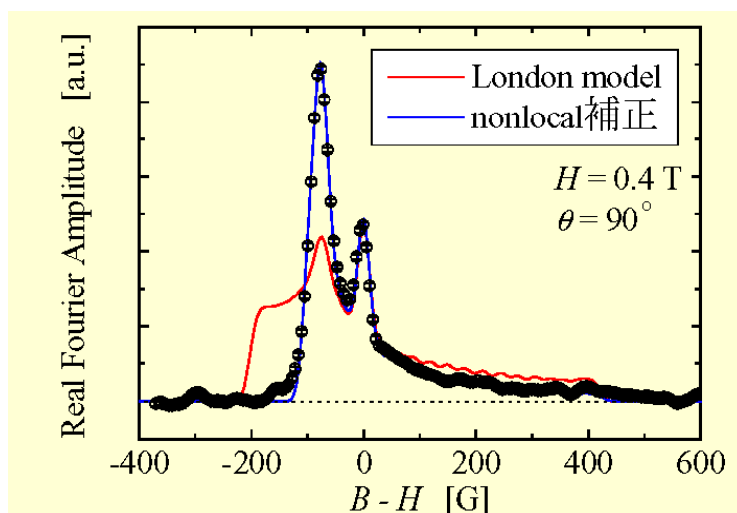


## $\mu$ SR 研究の例: 超伝導状態の研究

では、超伝導体の中に入った磁力線はどうなっているのでしょうか？

実は、磁力線はバラバラに中に入るのではなく、磁力線の束(磁束)が超伝導体の中で、結晶のように一定間隔で並んでいることが知られています。この様子を  $\mu$ SR 法を用いてみることができます

例:  $\mu$ SRと中性子散乱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

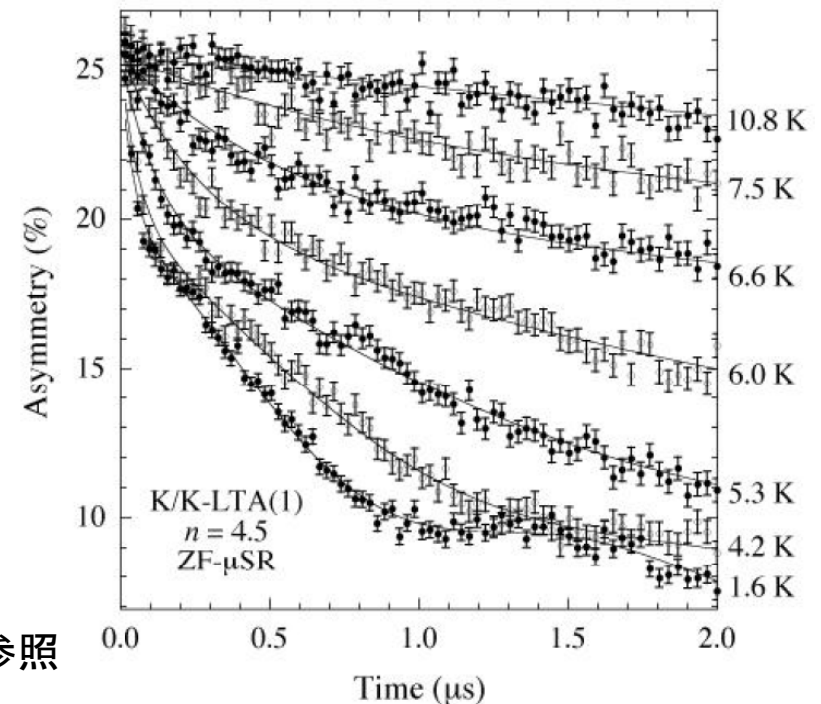
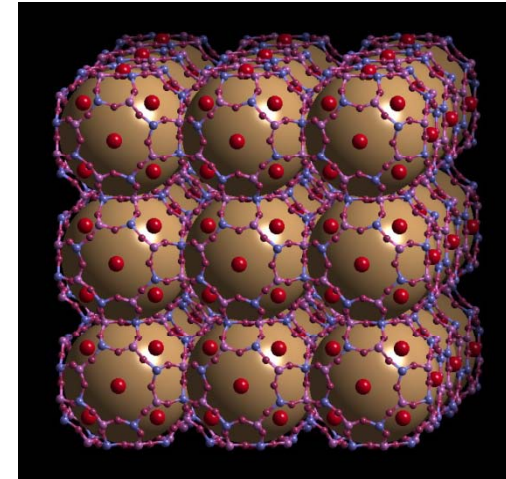


K. Ohishi et al. Phys. Rev. B. 65 (2002) 140505 などから参照

## $\mu$ SR研究の例:ゼオライト結晶中のアルカリ金属

ゼオライトとは、粘土などの中に含まれる鉱物で、SiとAlとOで組まれた大きな「カゴ」のような構造の中に、さまざまなイオンが入り込んでいます。この大きな「カゴ」の中に入っているイオンの種類を変えると、さまざまな性質を示すことから、産業利用が期待されています

「カゴ」の中にカリウムなどのアルカリ金属を入れると、低温で磁石になる(強磁性体になる)ことが $\mu$ SRの研究からわかりました。鉄やコバルトなどの重金属を含まないのに磁石になるというのは、とても不思議な現象として注目されています

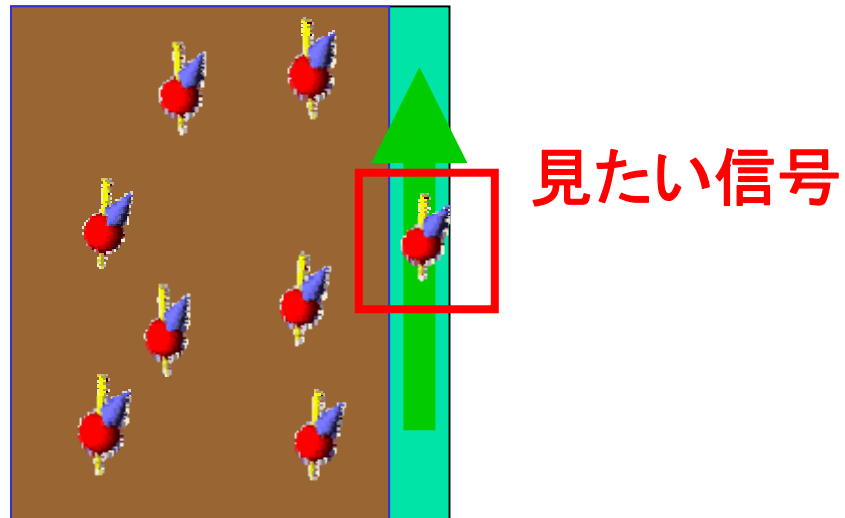


## ところが...

加速器から取り出されるミュオンは止まった  $\pi$  中間子が壊れたときに放出されるものでした。

→ ミュオンのエネルギーは 4MeV と決まっています。

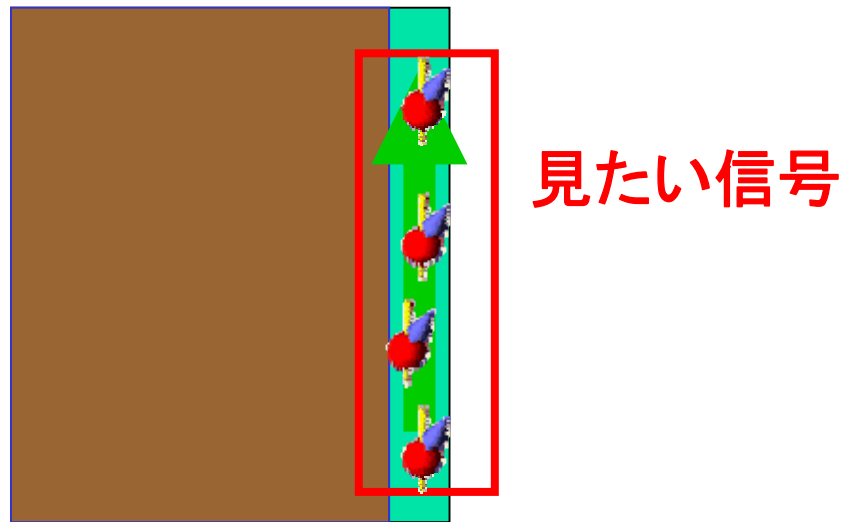
→ 薄い試料の磁気構造を測定しようとする、ほとんどのミュオンは試料を突き抜けてしまい、測定できません



## 超低速ミュオンの必要性

---

もし、エネルギーが低く、その広がりも小さい「超低速ミュオンビーム」を作ることができれば、自分の好きなところにミュオンを止めて、その磁気構造を調べることができます



# どうやって超低速ミュオンを作るのか？

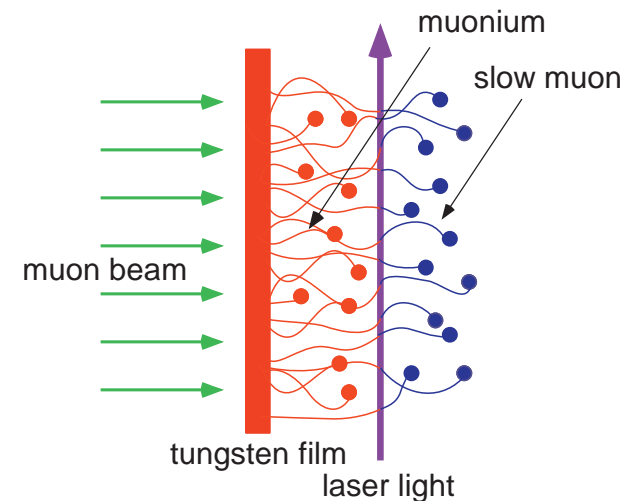
問題点：ミュオンの寿命は短い(2.2 $\mu$ sec)

- 安定粒子(ex. 反陽子)のように「減速器」を使うことはできない(減速している間に崩壊してしまう)

→ 一気にミュオンを減速・冷却することが絶対条件

レーザー共鳴イオン化法 (東大, KEK, 理研)

- ミュオンを加熱したタングステン薄膜に打ち込む
- タングステン内で静止したミュオンは表面へ拡散していく
- 表面付近でミュオンは電子と結びつき、**ミュオニウム原子**となって真空中に放出される
- このときの運動エネルギーは 0.2eV 程度と非常に低い
- このミュオニウム原子からレーザーを用いて電子を剥ぎ取ることで、ほぼ静止した状態のミュオンを得ることができる。あとは自由に再加速すればよい



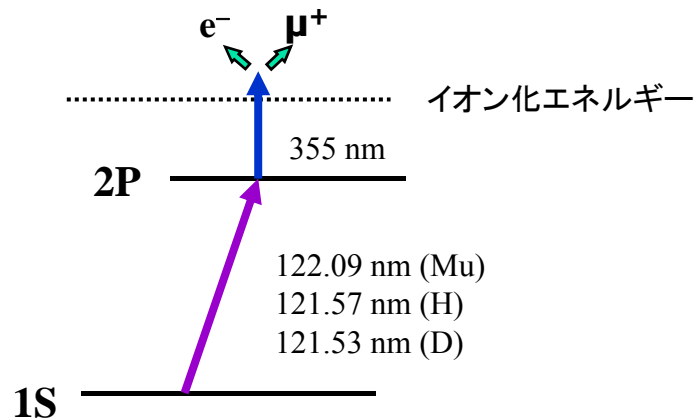


# ミュオニウムのイオン化

ミュオニウム (Mu) は、水素原子の原子核が  $\mu^+$  に置き換えられた水素の“同位体”のことです。



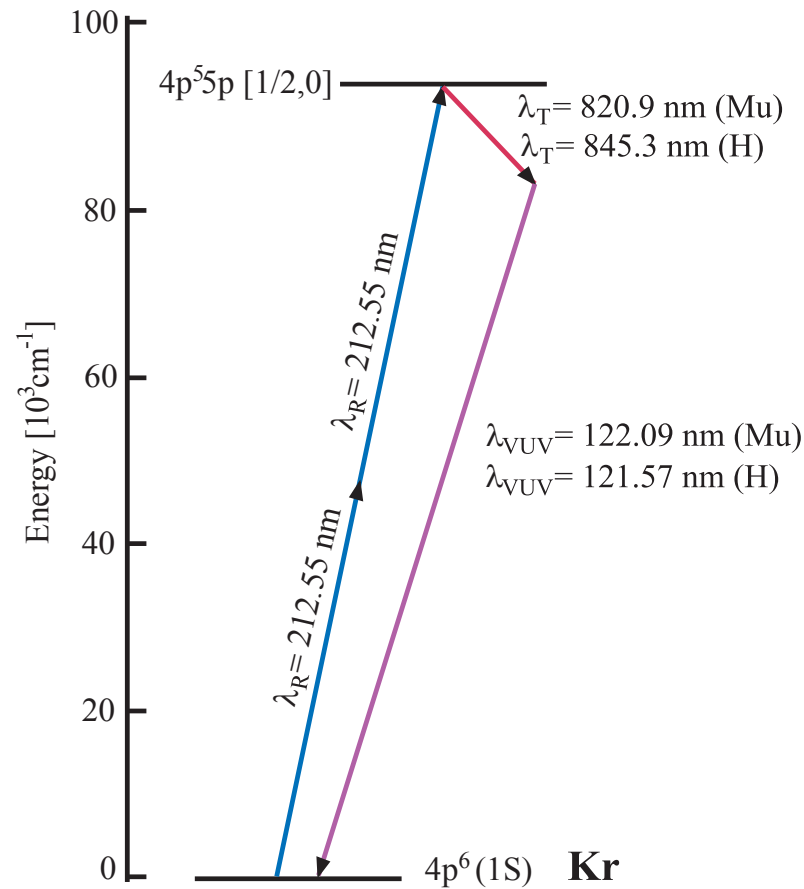
基底状態のミュオニウムから電子を剥ぎ取るには  $13.6\text{eV}$  のエネルギーが必要です。いきなりこの波長 ( $\lambda=91\text{nm}$ ) を作るのはかなり大変...



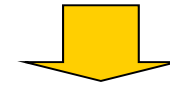
そこで、

- 1) ミュオニウム原子に  $\lambda=122\text{nm}$  の光をあてて電子を 2P 状態に励起し、
- 2) そこからさらに  $\lambda=355\text{nm}$  の光によって電子をはぎとり、フリーのミュオンを得るという**2段階方式**をとることになりました

# ライマンα光の生成

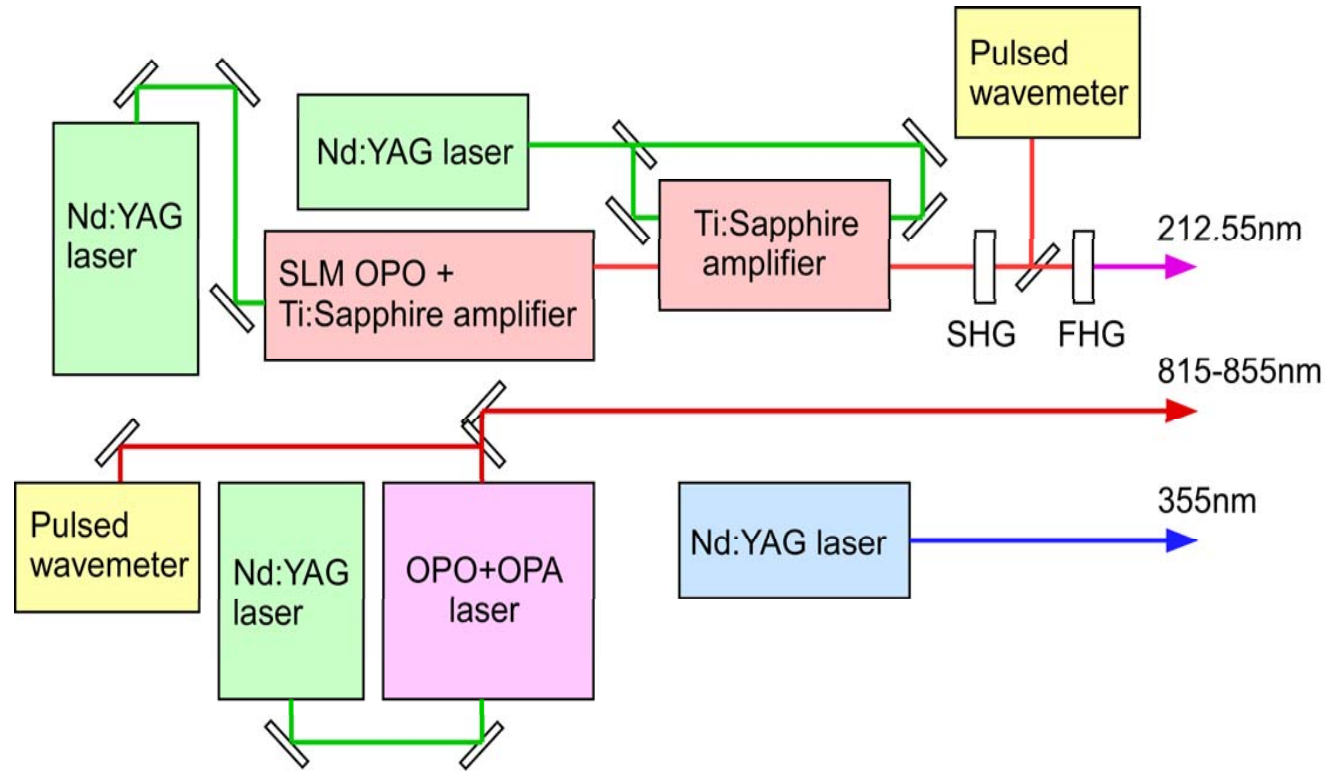


- Kr の  $4p^6 \rightarrow 4p^5 5p$  準位間隔にあわせた **212.55 nm** のレーザーと、**820 nm~850nm** の波長可変レーザーを同時に Kr ガスに照射する



- Kr ガス内での四周波混合を効率よく起こさせ、122nm 近辺で波長可変なレーザーを得る

# レーザー装置



## レーザーの性能

212.55 nm (single mode)  
Energy: 10-15 mJ/pulse  
x 2 beams  
Pulse duration: 4 ns

815-855 nm (波長可変)  
Energy: 25 mJ/pulse  
Pulse duration: 8 ns  
Bandwidth: 160 GHz

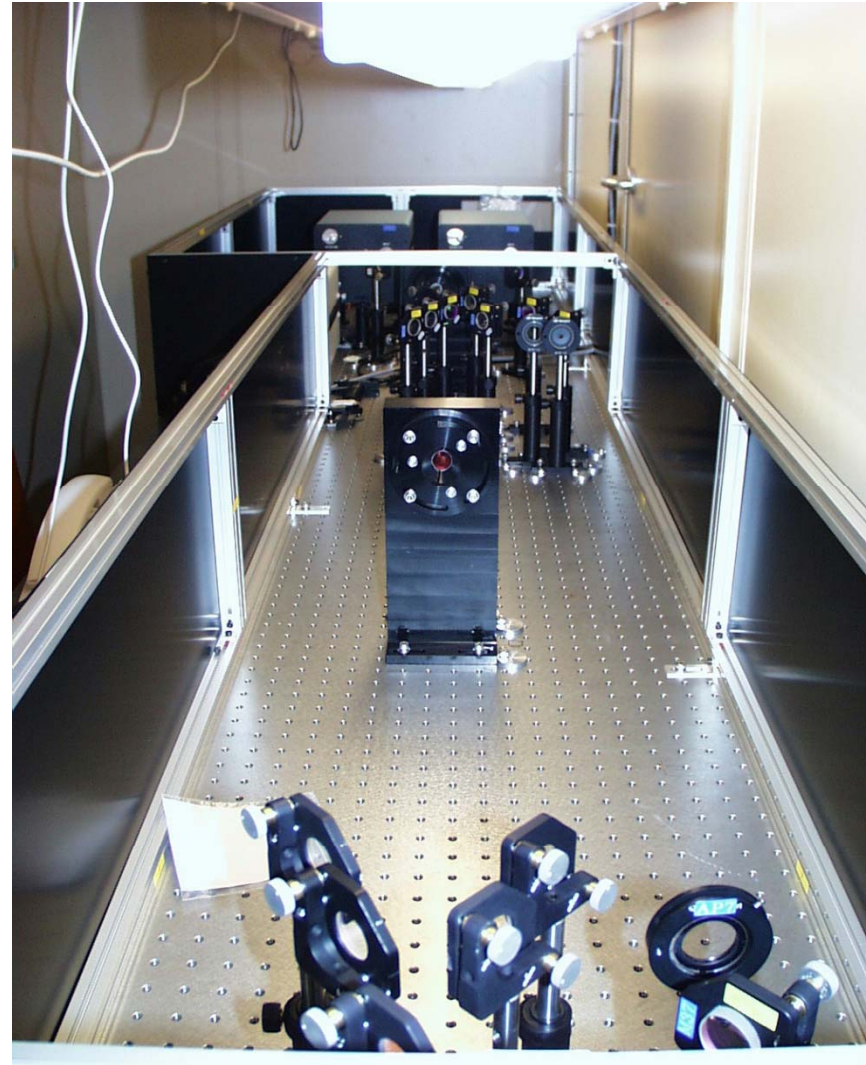
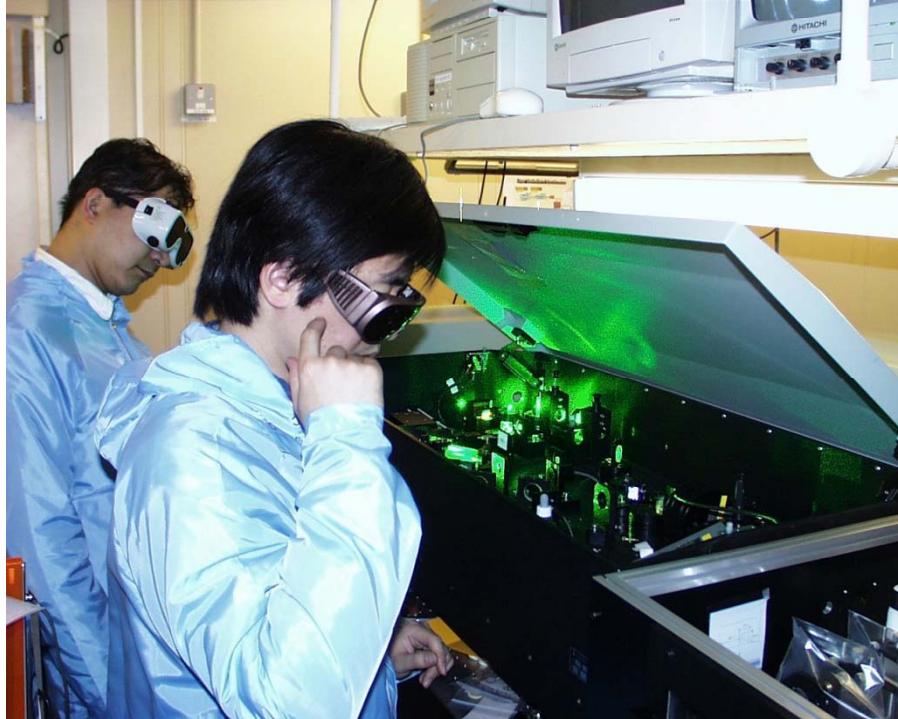
355 nm (YAG 三倍波)  
energy 380 mJ/pulse  
Pulse duration: 10 ns

ミュオンビームに同期した 25 Hz 動作

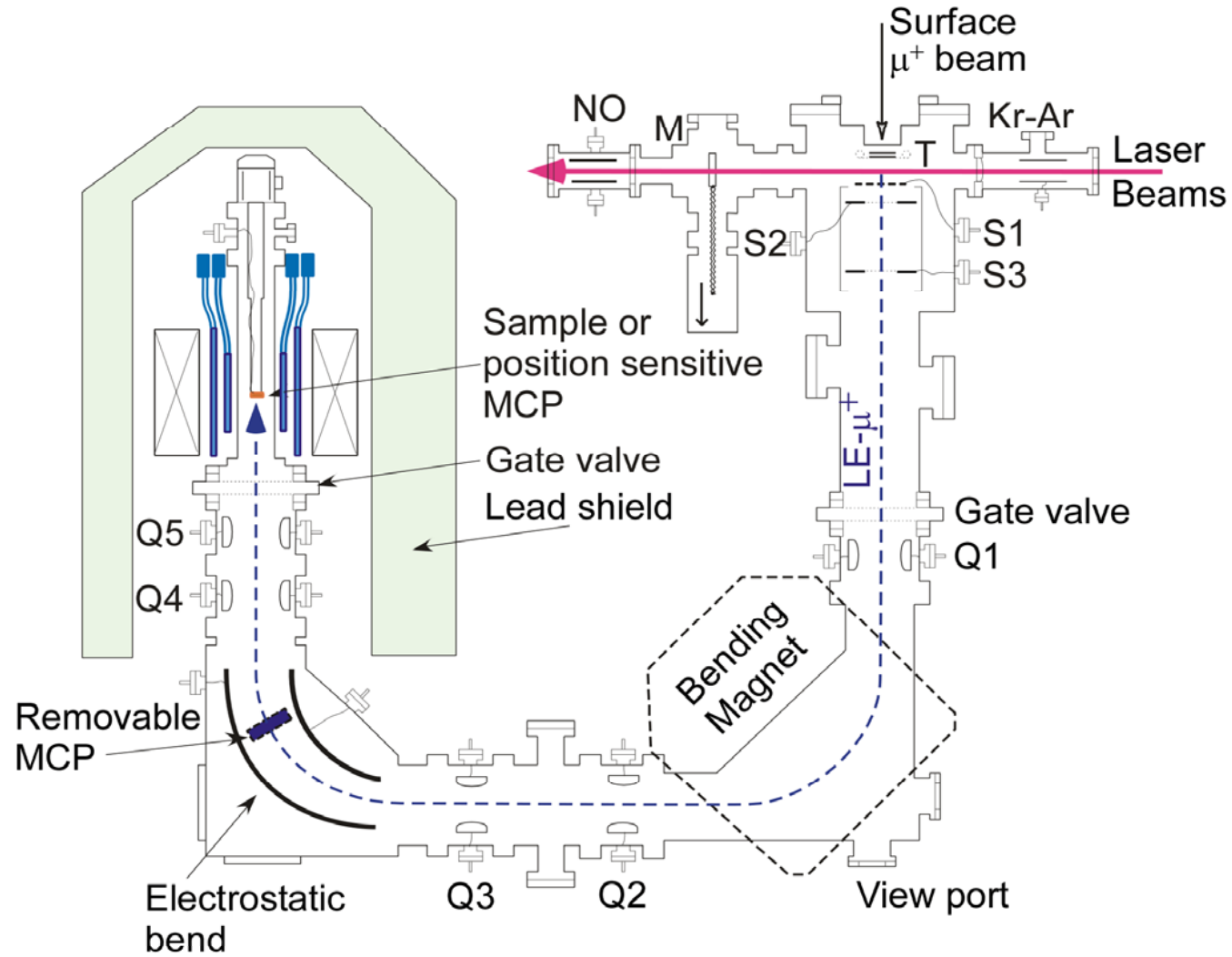
効率よい VUV 光(122nm) 生成のため、各レーザーは 1nsec 以内の精度で同期

# レーザー装置

---

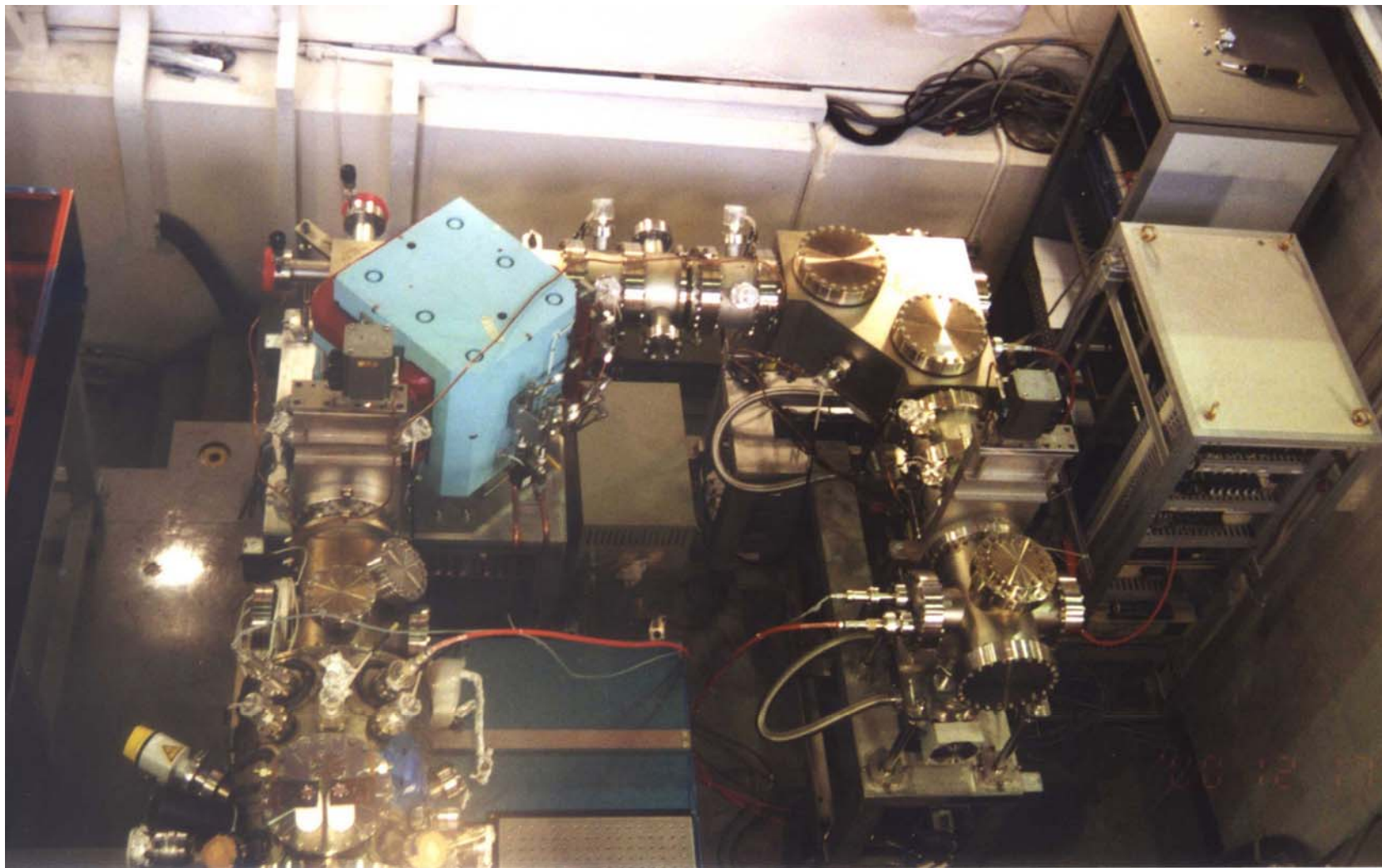


# 超低速ビームライン

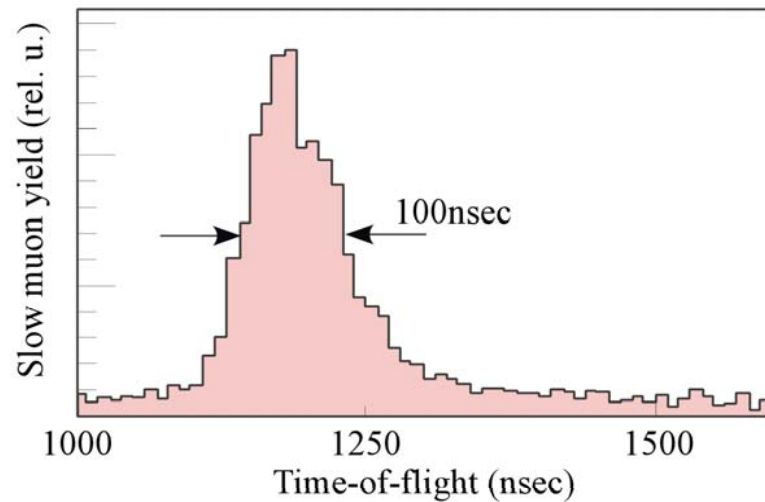
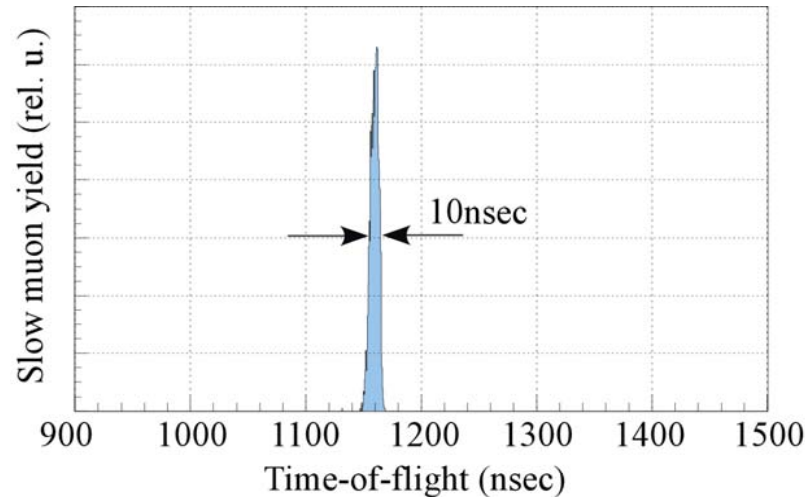


# 超低速ビームライン

---

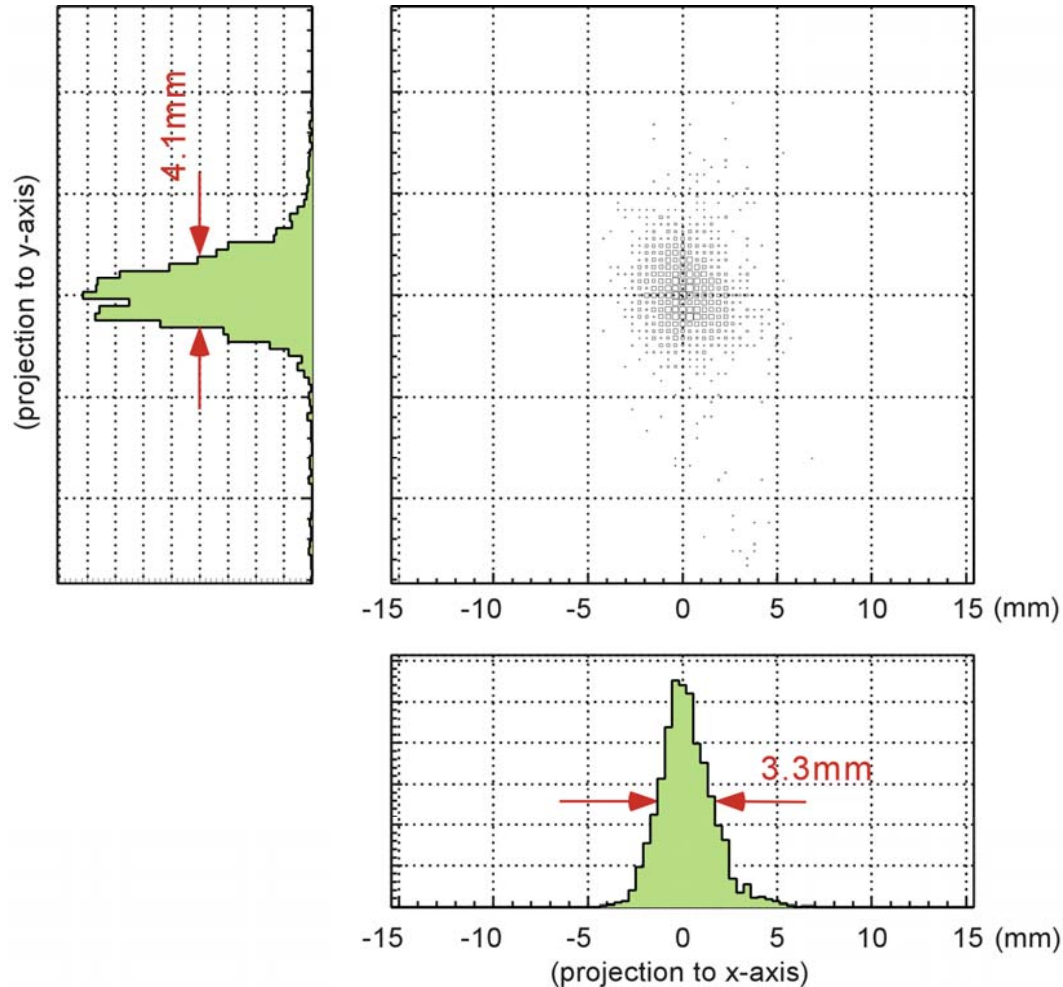


## 超低速ミュオンビームの特長(時間分解能)



- 私たちが開発したレーザー共鳴イオン化法は、パルスミュオン施設において、時間分解能のすぐれたビームを作ることができることが示されました。
- この時間分解能は 100eV のエネルギー分解能に相当し、PSI グループが開発した低温モデレータ法による低速ミュオン( $\Delta E = 500\text{eV}$ )より優れています。
- 上段:レーザー共鳴イオン化法によって得られた我々の超低速ミュオンビームの時間構造
- 下段:同じパルスミュオン施設内において、固体希ガスモデレータ法を用いて得られた低速ミュオンビームの時間構造 (Ph.D. Thesis, Dr. K. Trager, 1999)

## 超低速ミュオンビームの特長(空間分解能)

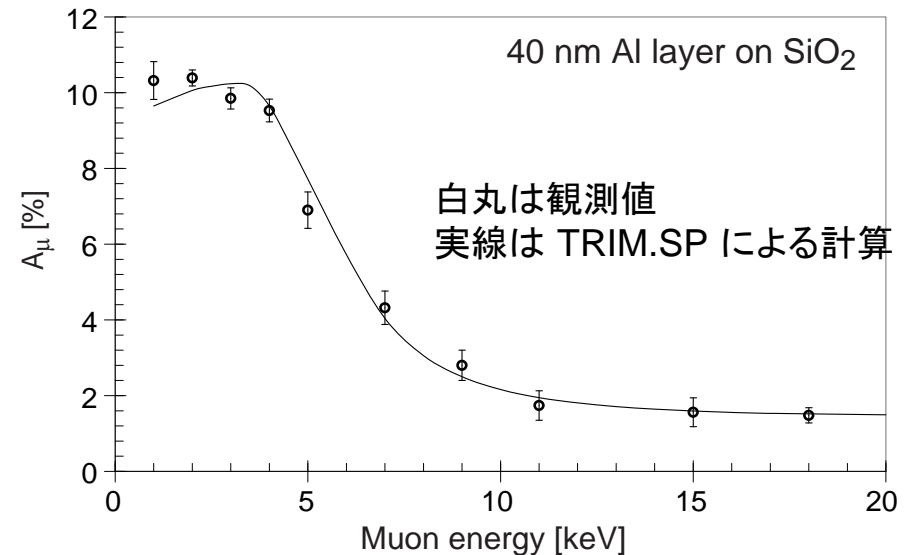
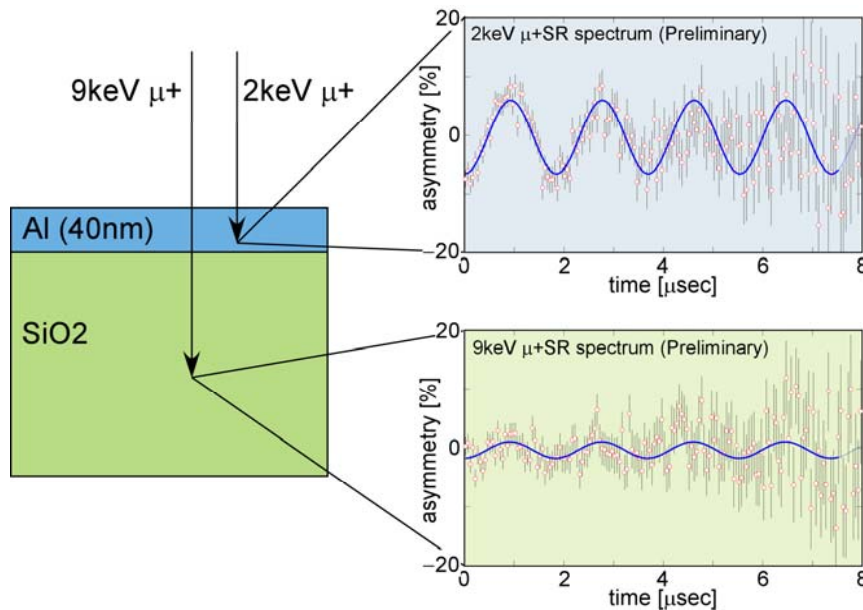


- ビーム幅(FWHM)はX 方向に4.1mm、Y 方向に3.3mm でした。  
(PSI の低速ミュオンビームより小さく、元のビームサイズの 1/100 以下)
- 資料位置でのビームサイズが小さいので、少量のサンプルしか得られないものに対しても S/N がよい  $\mu$ SR 実験を行うことができます。



## 超低速ミュオンビームの特長(深さ分解能)

- サンプルへの入射エネルギーを変えることで、ミュオンが止まる深さを  $\pm 10\text{nm}$  程度の分解能で自由にコントロールできることを確認しました。
- 観測されたミュオンのスピン回転の振幅は、ほぼシミュレーションと合致しています。



## 超低速ミュオンビームの特性(まとめ)

---

### 私たちが開発した超低速ミュオンビームは

- 運動エネルギーが 1~20keV で可変で、打ち込み深さを自由に変えることができる
- 高い時間分解能を持つ
- サンプル位置でのビームサイズが小さい
- バックグラウンドが低く、長い緩和時間まで観測可能
- 他の極端条件との組み合わせ(レーザー照射、パルス電流など)が可能

### 現在物性研究に利用できる最良のミュオンビーム！

ただし、ビーム強度が弱いのが“玉にキズ”...というか、本格的な実験を行う上での最大の障害

(これは手法の問題ではない...PSI と効率ほぼ同等なのだが、もともとのビーム強度で負けてしまっている)

- 東海村に建設中の J-PARC (2008年年末運転開始)には、現在の理研RALミュオン施設の  $10^3$  倍の強度のビームを供給できるビームラインを建設する計画がある  
現在、KEK、原研、理研と共同で、超低速ミュオン専用ビームラインの開発中

## ミュオニウムを使った研究

- 「超低速ミュオンビーム」を作るために使ったミュオニウムは、水素原子の原子核である陽子が  $\mu^+$  に置き換えられた、水素の“同位体”です。



- ミュオニウムの中のミュオンもスピンを持っていますから、磁場の中で回転しますが、その回転速度はおよそ100倍と、とても早いことが知られています。
- ミュオニウムが他の原子や分子と化学結合すると、分子の中のミュオンのスピンは、自由なミュオンと同じようにふるまうことが知られています。
- ミュオニウムのスピン回転をモニターすることで、化学反応の進展をモニターできます。

# 化学反応のプローブとしての Mu

---

Mu は H の 1/9 の質量しかない同位体

→非常に顕著な同位体効果を表します。

(「同位体は化学的に同じ性質を示す」と言われますが、反応については異なるふるまいをします)

## ■ 速度論的同位体効果

- 熱平衡状態にあるときの Mu の平均速度は H の3倍速く、反応も3倍速くなります。

## ■ 零点振動エネルギー

- Mu-X と H-X という共有結合を比較すると、零点振動エネルギーは Mu-X のほうが大きくなります。一般にこの効果は化学反応の速度を遅くします。

## ■ トンネル効果

- 遷移状態の障壁をトンネル効果で透過しやすくなります。この効果は化学反応の速度を速くします。

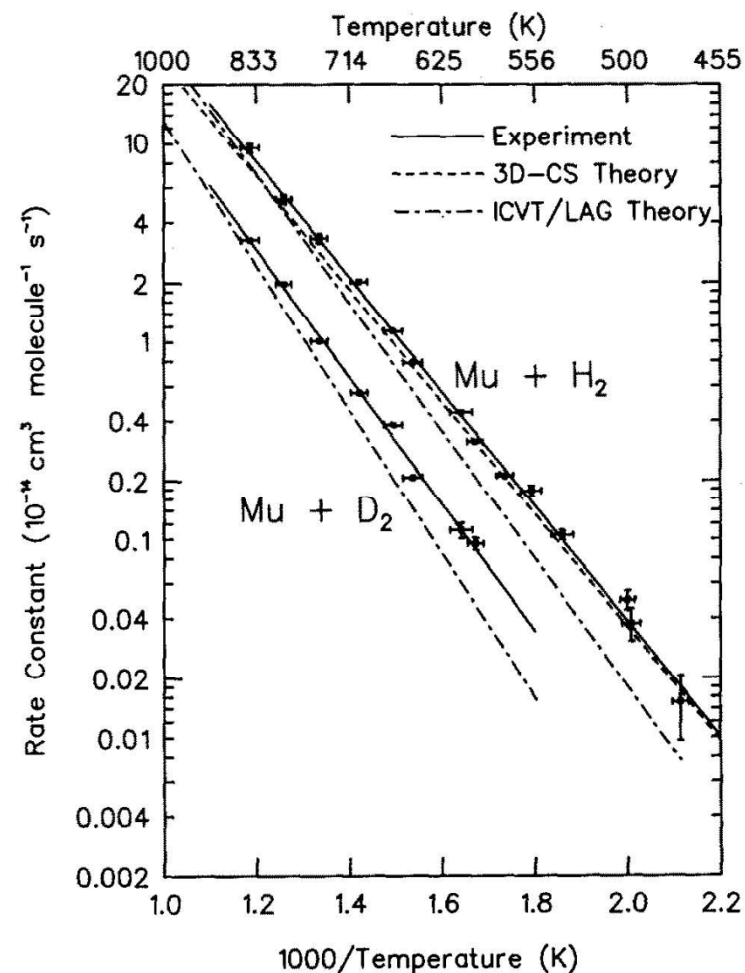
# 実験結果の紹介



I.D. Reid et al. J. Chem. Phys.  
86(1987)5578

この反応 ( $\text{H}_3$  反応) は、電子の数が少ないために非常に厳密な理論的な計算がされています。

→ 理論計算と非常によく一致



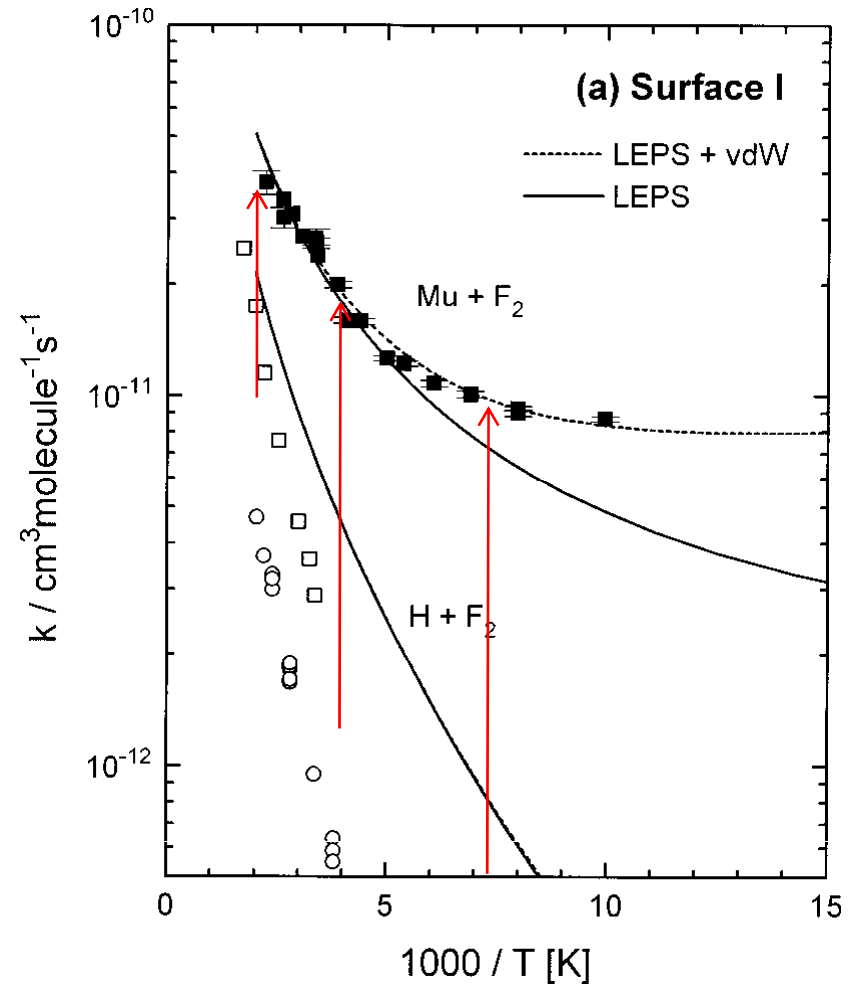
I.D. Reid et al. J. Chem. Phys. 86 (1987) 5578

# 実験結果の紹介

$\text{Mu} + \text{F}_2 \rightarrow \text{MuF} + \text{F}$  反応

A.C. Gonzalez, et al. J. Chem. Phys. 91 (1989) 61

- H の反応と比較して低温側で(グラフ右側で)反応が顕著に促進されている  
→ トンネル効果の影響大



理論計算は

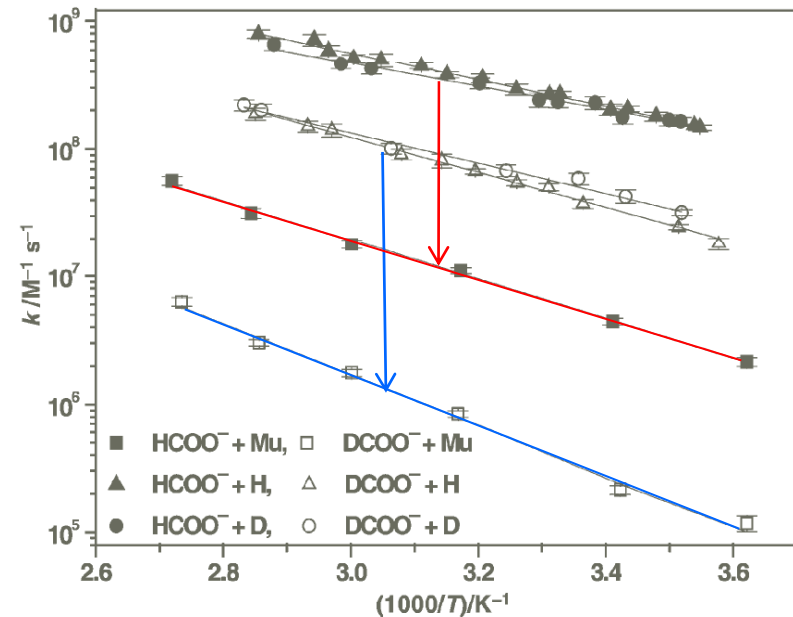
T. Takayanagi et al. J. Phys. Chem. A101(1997)7098

# 実験結果の紹介

$\text{Mu} + \text{HCOO}^- \rightarrow \text{MuCOO}^- + \text{H}$  反応  
(水溶液中)

A.M. Lossack et al. Phys. Chem. Chem. Phys. 3 (2001) 2031

- Mu の反応は H や D との反応と比較して、非常に遅くなっている。  
→ 零点振動エネルギーの効果



A.M. Lossack et al. Phys. Chem. Chem. Phys. 3(2001) 2031

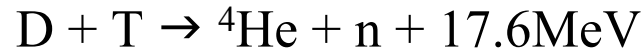
- 
- ここまで、加速器で作られる  $\mu^+$  ビームを使った研究をお話ししました。
    - スピン 1/2 を持つ、 $\mu^+$  ビームは、とても敏感な磁気のプローブです。これを利用して、様々な物質の性質が調べられています。
    - これまでは試料が大きな塊になっていないと調べることができなかったが、レーザーを利用して「超低速ミュオン」ビームを作ることによって、薄膜や多層膜などの薄い(原子100個分ぐらいの薄さ)の試料も測定できるようになります。
    - ミューオニウムは水素原子の同位体です。これを用いて化学反応の進展をモニターすることができます。
  - 加速器では、マイナスの電荷を持った  $\mu^-$  ビームも作ることができます。 $\mu^-$  を用いるとどんな研究ができるでしょう？ 代表的な例として、ミュオンを使った核融合研究のお話をしましょう。



# 核融合反応

---

- 重水素と三重水素(トリチウム)の原子核が反応してヘリウム4と中性子になる反応は、エネルギー源として最も有望な核融合反応として世界各国で研究が行われています。

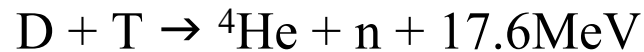


- ところが、プラスの電荷を帯びた原子核と原子核の間には強いクーロン斥力が働きます。この反応を起こすには、クーロン斥力に打ち勝つだけのエネルギーをDやTに与える必要があります。
  - 超高温(数億度)のプラズマを作り、熱エネルギーでクーロン斥力に打ち勝つ方法
    - 代表例:トカマク方式(JT-60、ITERなど)
  - 高温で超高圧状態を作り、熱と圧力でクーロン斥力に打ち勝つ方法
    - 代表例:レーザー慣性核融合方式(激光、NIFなど)

# 核融合反応

---

- 重水素と三重水素(トリチウム)の原子核が反応してヘリウム4と中性子になる反応は、エネルギー源として最も有望な核融合反応として世界各国で研究が行われています。



- ところが、プラスの電荷を帯びた原子核と原子核の間には強いクーロン斥力が働きます。この反応を起こすには、**クーロン斥力に打ち勝つだけのエネルギーをDやTに与える必要**があります。
  - 超高温(数億度)のプラズマを作り、熱エネルギーでクーロン斥力に打ち勝つ方法
    - 代表例:トカマク方式(JT-60、ITERなど)
  - 高温で超高压状態を作り、熱と圧力でクーロン斥力に打ち勝つ方法
    - 代表例:レーザー慣性核融合方式(激光、NIFなど)

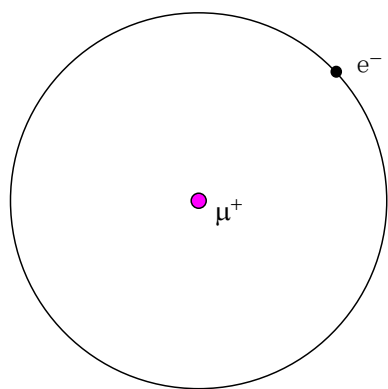
**どれも大変です**

**クーロン斥力に打ち勝たずに核融合を起こせないでしょうか**

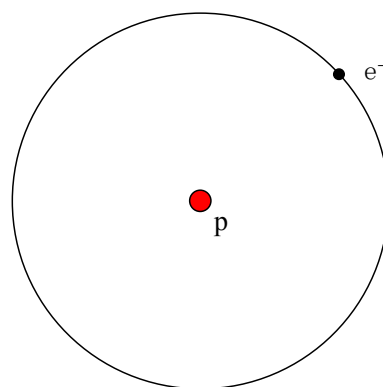
**ミュオンを使ってできます**

# $\mu^-$ 原子 (ミュオン原子)

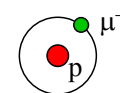
- マイナスの電荷をもった  $\mu^-$  は、物質の中に打ち込まれると次第にエネルギーを失い、最後には原子核につかまって電子のように原子核の周りを回りはじめます ( $\mu^-$  の代わりに電子が一つはじき出されます)。これを  $\mu^-$  原子 (ミュオン原子) と呼びます。
  - これは、電子の代わりにマイナスの電荷を帯びた別の重い粒子が原子核の周りを回っている、エキゾチック原子の一つです。
- $\mu^-$  は電子のおよそ200倍重い粒子です。
  - ミューオンの軌道半径は電子の軌道半径のおよそ  $1/200$  になります  
この原子をうまく使って核融合を起こすことができます



参考: ミューオニウム原子



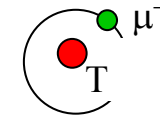
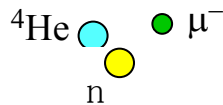
水素原子



ミュオン水素原子

# ミューオン触媒核融合の原理

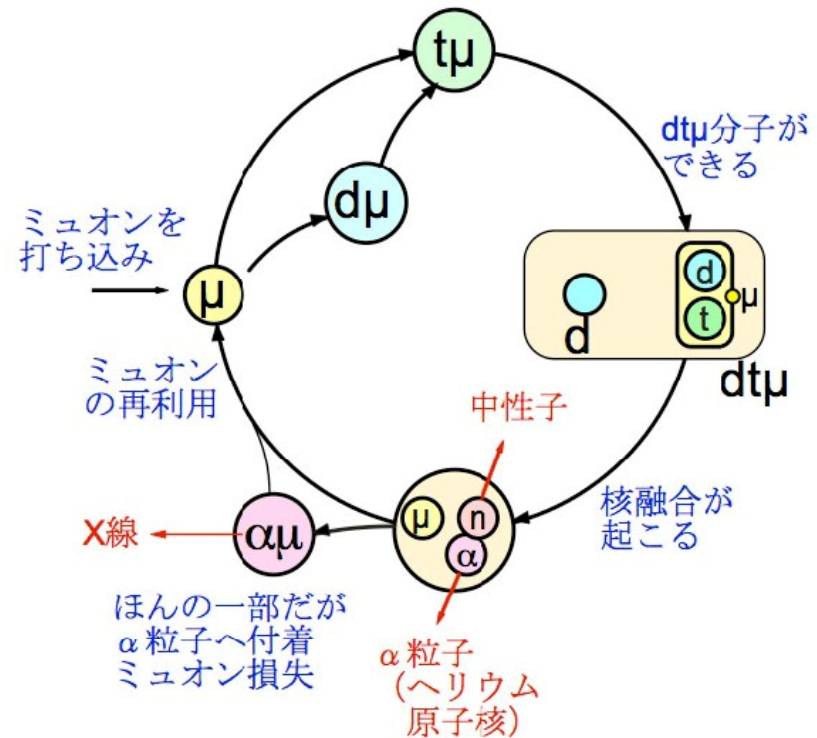
- 先ほど説明したように、通常なら D と T の間には強い斥力が働き、近づくことができません。
- ところが  $\mu^-$  がトリチウムの周りを回っている  $T\mu^-$  原子は、外から見ると「電氣的に中性」です。D のすぐそばまで近づいても斥力を感じません。



- ここで、 $DT\mu^-$  分子が作られますが、このとき D と T の距離は普通の DT 分子のおよそ 1/200 しかなく、すぐに核融合が起きるのです。
- 反応のあと、 $\mu^-$  が残されますが、この  $\mu^-$  は近くのトリチウム原子に捉われると、また次の反応を引き起こします。こうして一つの  $\mu^-$  が次々と核融合反応をおこします。これが「**ミューオン触媒核融合反応**」です。この反応は  $\mu^-$  が 2.2 $\mu\text{sec}$  の寿命で崩壊するまで続きます。
- このミューオン触媒核融合では、クーロン斥力に打ち勝つために高温や高圧にする必要がありません。**手軽な核融合**です。

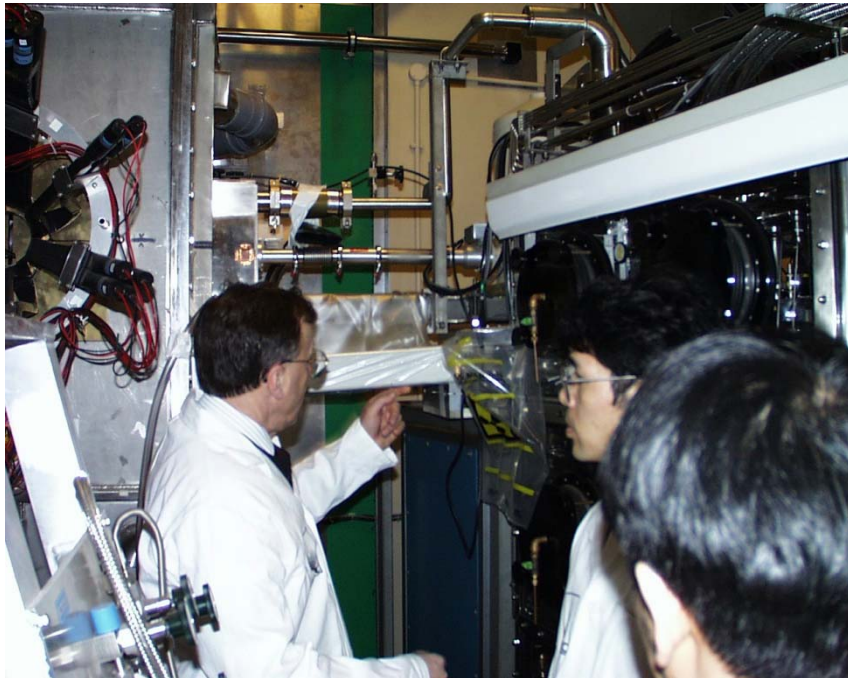
# ミューオン触媒核融合

- 右の図はミューオンが次々と核融合反応を起こす様子を描いたものです。
  - 一つのミューオンで120回程度の核融合反応を起こさせることに成功しています。これがエネルギー源になるには、この10倍以上も効率を上げなくてはなりません。
  - 現在も様々な条件を変えながら効率を上げるための研究が東大、理研、KEKの共同ですすめられています。
- もしかしたら、将来はミューオン触媒核融合発電所ができているかも？



# ミューオン触媒核融合

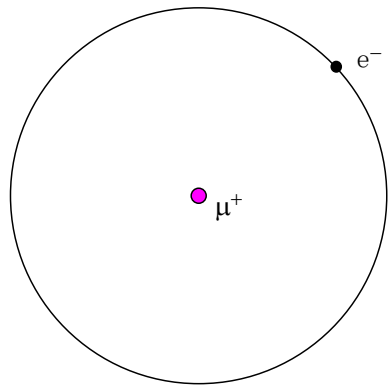
核融合反応をモニターするためのX線  
検出器を交換する作業中です



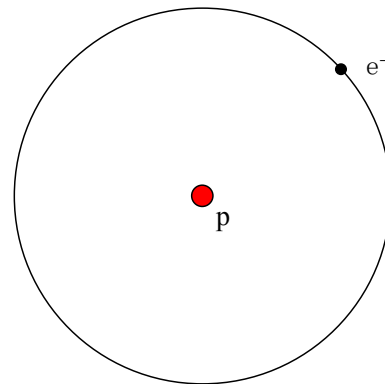
グローブボックスの中のトリチウムガスを  
実験装置に注入しようとしています

## ミュオニック原子の別の応用：原子核の大きさを測る

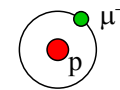
- ミュオニック原子の軌道半径は、通常の原子の  $1/200$  になります。ということは、原子核のすぐそばを回っているということです。
- 原子から放射される光のエネルギーを計算するとき、通常は原子核を「点」だと思って計算します。でも、ミュオニック原子の場合、原子核には「大きさ」があることを計算に入れないと、正しい値が得られません。
- 逆に言えば、ミュオニック原子から放出される光のエネルギーを測定することで、原子核の大きさを調べることができます。



参考：ミュオニウム原子



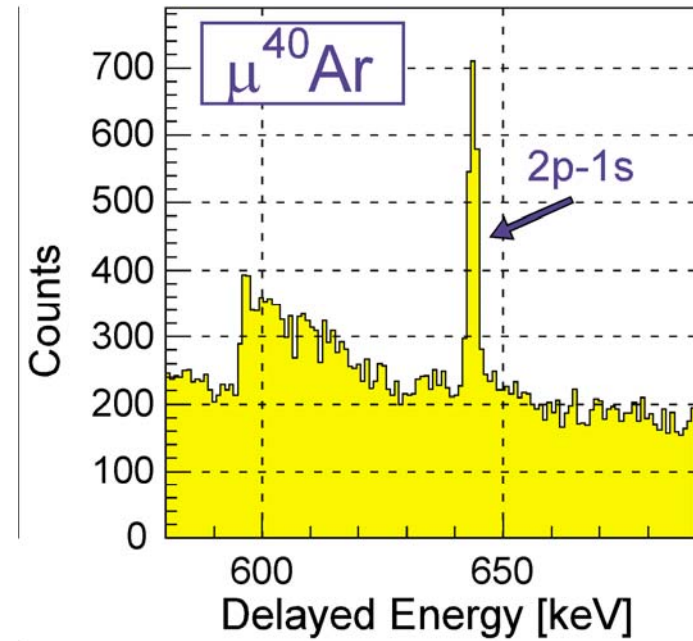
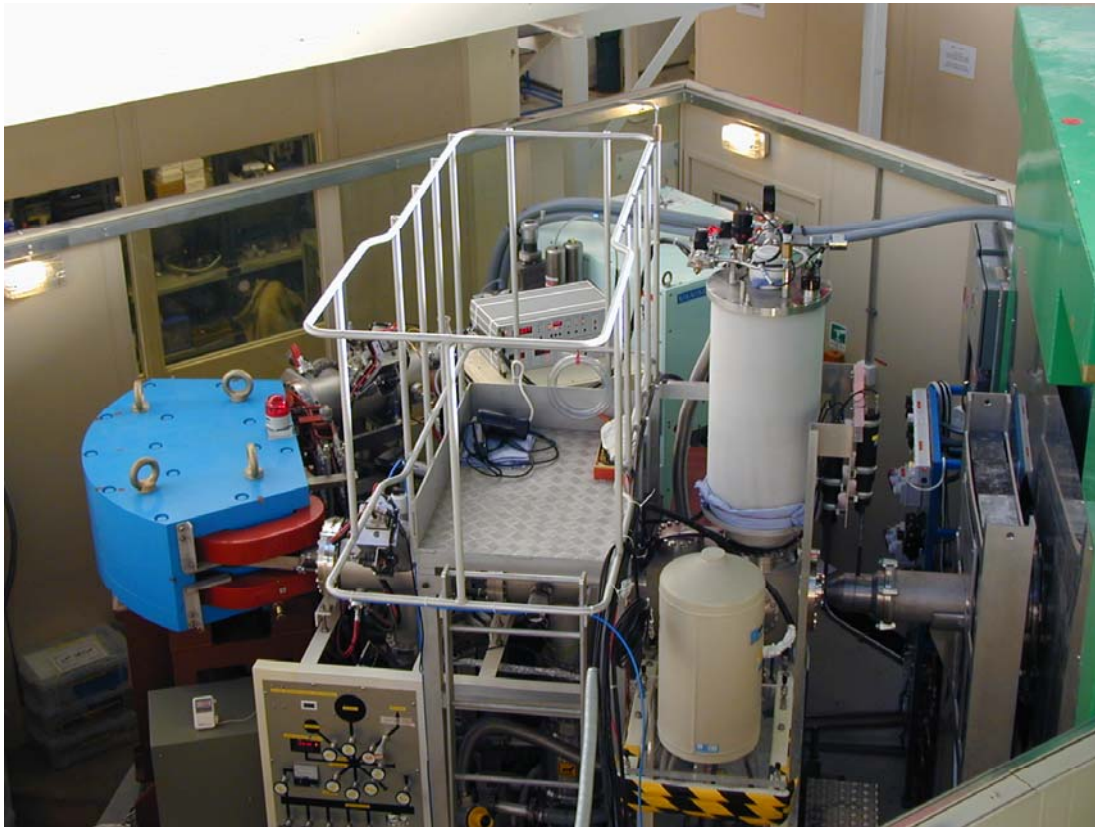
水素原子



ミュオニック水素原子

# ミュオニックX線検出実験

理研RALミュオン施設に作られた実験装置



ミュオニックアルゴン原子から  
放出されたX線のスペクトル



## まとめ

---

ミュオンは、

- 宇宙を見たり(宇宙線観測)
- 火山を見たり(ミュオントモグラフィ)
- 物質の中の磁気構造を見たり( $\mu$ SR 法)
- 化学反応をモニターしたり(ミュオニウムを用いた $\mu$ SR 法)
- 核融合反応を起こしたり(ミュオン触媒核融合)

する、いろいろな応用がある素粒子です。

ミュオンを使うためには、ミュオンを作る加速器が必要です。

- J-PARC という世界最高レベルの施設が日本に完成しました。

新しいミュオンの応用分野を拓いていくのは  
今日、ここにいるあなたがたかも知れません

