



J-PARCにおける
ミュー粒子g-2/EDM精密測定
の紹介
+ 極冷ミュー粒子源開発の現状

理化学研究所

上野一樹

for new J-PARC muon g-2/EDM collaboration

もくじ

- インTRODakション
 - ミュー粒子異常磁気モーメント、EDM
 - 測り方
 - J-PARCでの新実験
- 極冷ミュー粒子源開発
- まとめ



磁気・電気双極子モーメント

電磁場中のスピン1/2粒子

$$\mathcal{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} - \vec{d} \cdot \vec{E}$$

B:磁場、
E:電場

磁気モーメント

$$\vec{\mu} = g \left(\frac{q}{2m} \right) \vec{s}$$

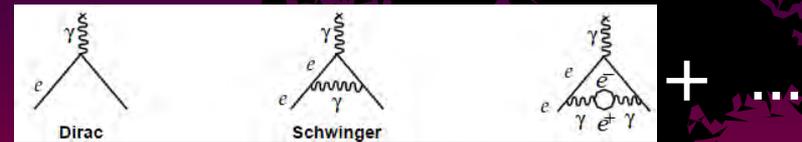
q:電荷、m:質量、s:スピン

ディラック方程式 $\Rightarrow g=2 \Rightarrow a=0$

$$a = \frac{g-2}{2}$$

標準模型 (SM) $\Rightarrow g \neq 2 \Rightarrow a \neq 0$

(例) 電子の場合

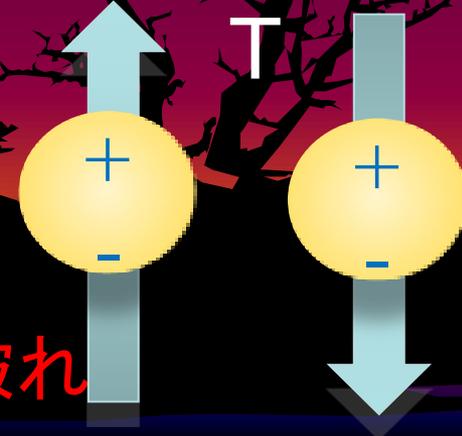


電気双極子モーメント (EDM)

$$\vec{d} = \eta \left(\frac{q}{2mc} \right) \vec{s}$$

もしあれば...

CPT定理: T対称性の破れ \rightarrow CP対称性の破れ



ミュー粒子異常磁気モーメント

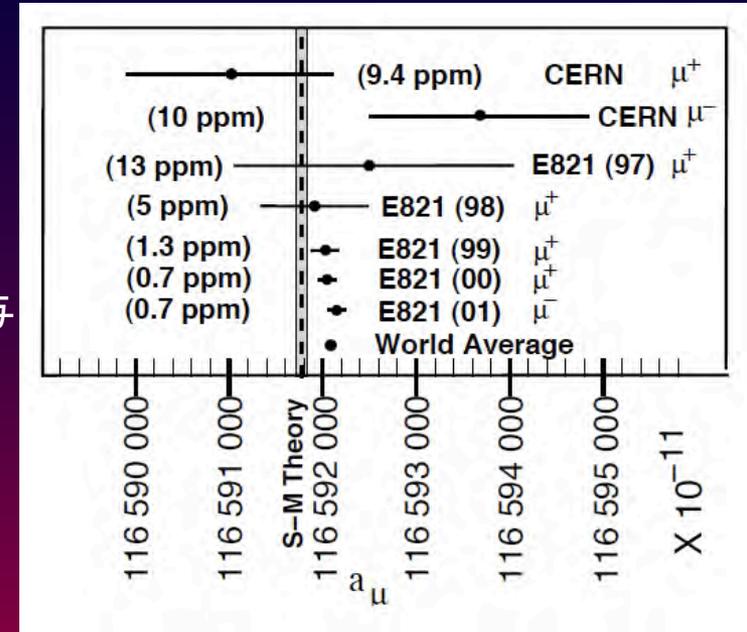
ミュー粒子g-2: 実験とSMにわずかなずれ

$$a_{\mu} = \frac{g-2}{2}$$

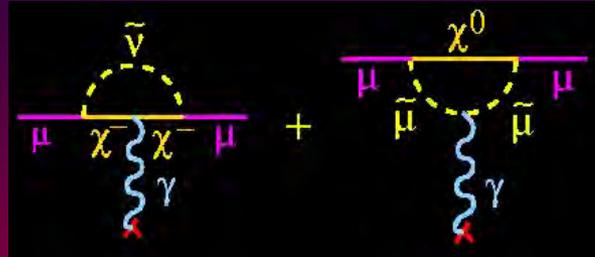
BNL E821実験

$$\Delta a_{\mu}^{\text{Exp-SM}} = 255(63)(49) \times 10^{-11} \Rightarrow 3.2\sigma$$

<http://pdg.lbl.gov/2010/reviews/rpp2010-rev-g-2-muon-anom-mag-moment.pdf>



(例) 超対称性粒子(SUSY)の寄与



新しい物理?

最新の実験精度 G. W. Bennett et al. PRD (2006)

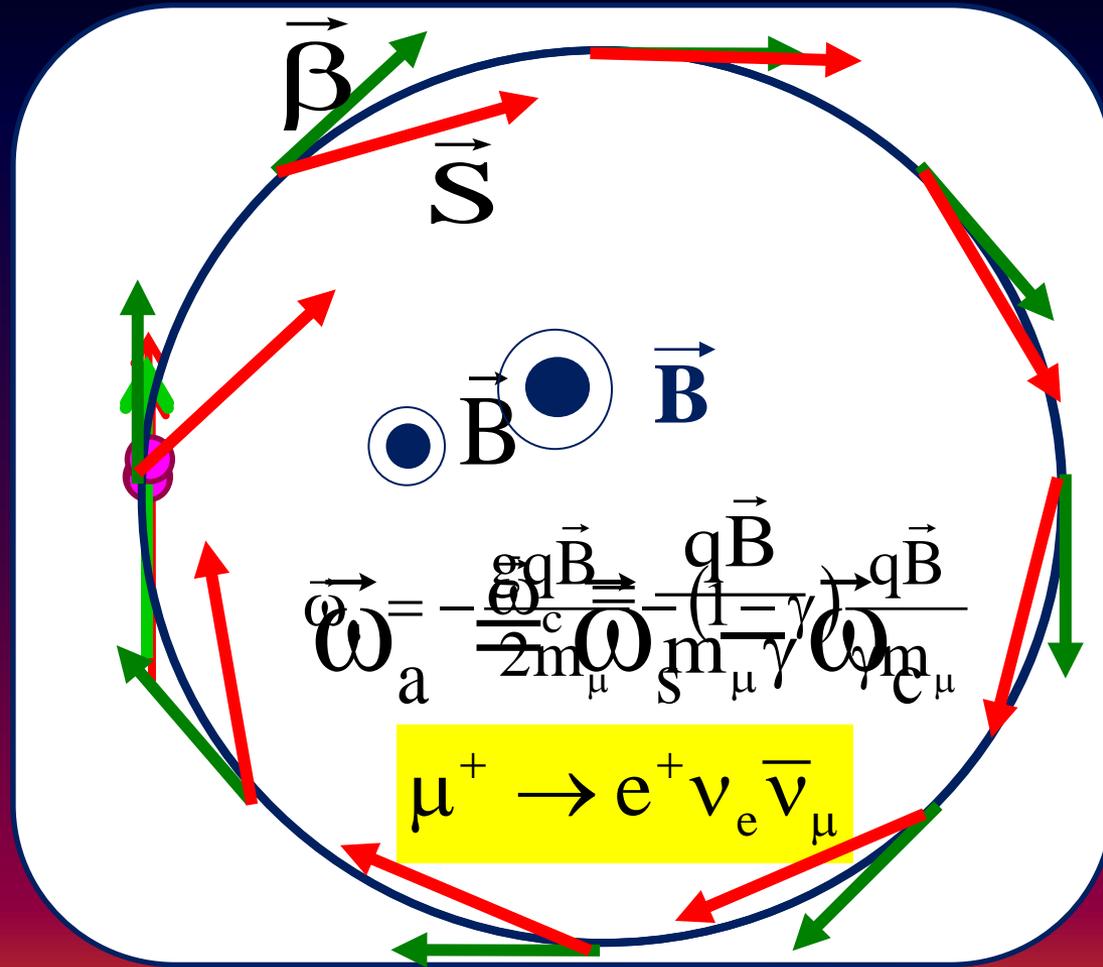
$$\frac{\Delta a_{\mu}^{\text{exp}}}{a_{\mu}} = 0.54\text{ppm}$$



更なる精度向上
⇒ ずれの検証

ミュー粒子異常磁気モーメントの測り方

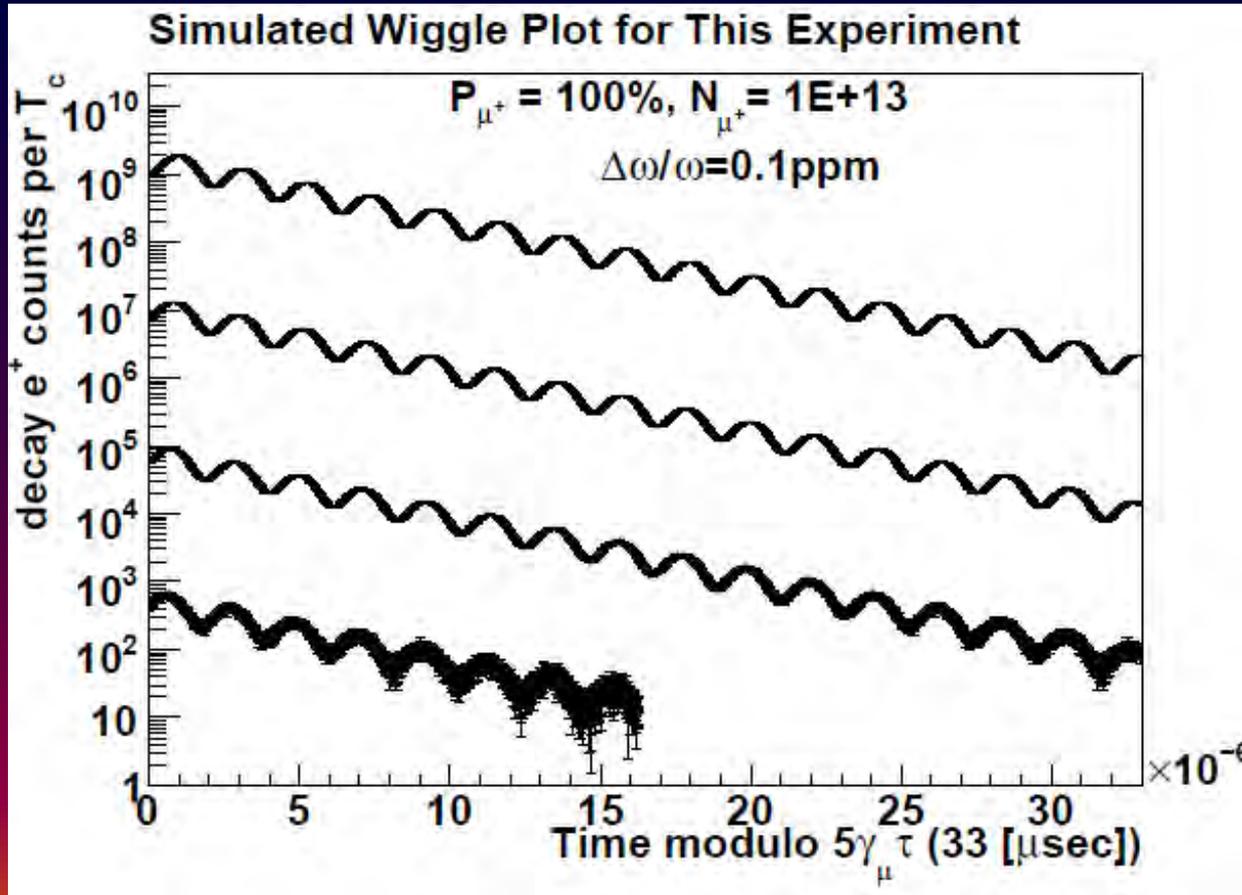
1. スピンにより磁場中でのくるくる回転
2. 電荷により一様磁場中で周回運動
3. 一様磁場中で歳差運動
4. 寿命 \Rightarrow 陽電子とニュートリノに崩壊
5. 陽電子はミュー粒子のスピンの方向に出やすい
6. 陽電子数の時間変動 \Rightarrow ミュー粒子のスピン歳差運動周波数



$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = -\left(\frac{g-2}{2}\right) \frac{q\vec{B}}{m_\mu} = -a_\mu \frac{q}{m_\mu} \vec{B}$$

ミュー粒子異常磁気モーメントの測り方(続き)

陽電子数の時間変動の例(シミュレーション)



このウネウネの周波数と磁場が
わかる $\Rightarrow a$ がわかる!

$$\vec{\omega}_a = -a_{\mu} \frac{q}{m_{\mu}} \vec{B}$$

ミュー粒子EDMの測り方(見つけ方)



EDMがある

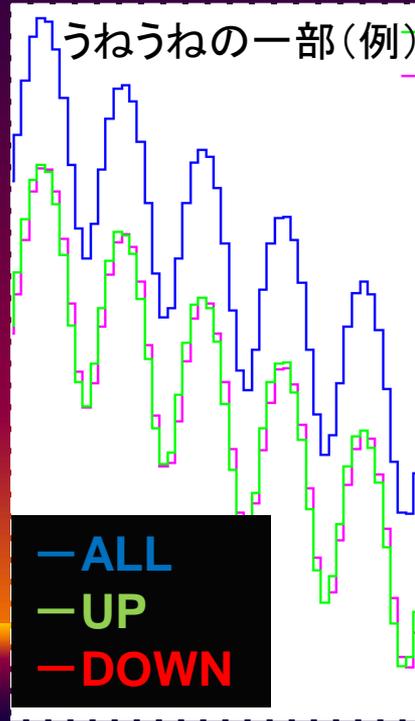
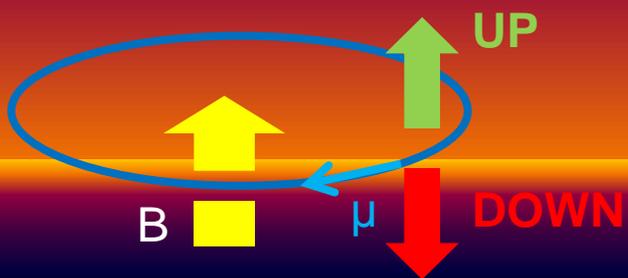
⇒歳差運動にEDMからの寄与

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_{\text{EDM}} = \frac{e}{m_\mu} a_\mu \vec{B} + \frac{2c}{\hbar} \text{EDM} (\vec{\beta} \times \vec{B})$$

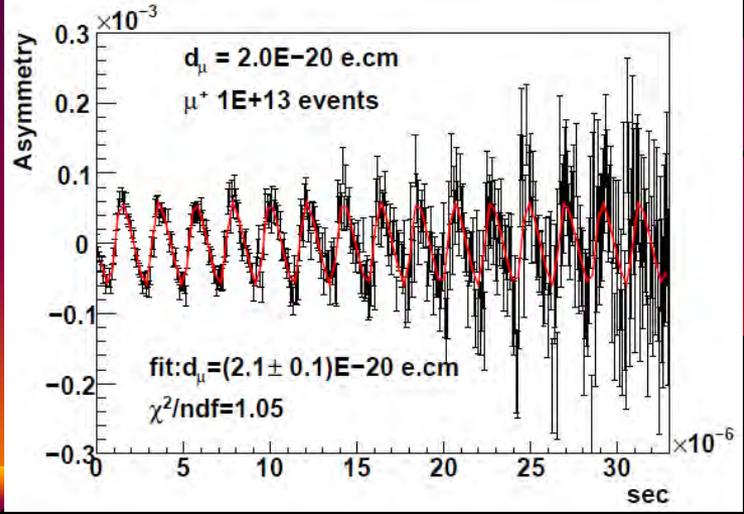
これらを分離したい

$$\vec{\omega}_{\text{EDM}} \propto \vec{\beta} \times \vec{B}$$

陽電子の放出角度
の時間変動に違い



UP、DOWNのAsymmetry(例)



この周波数を測る

ミュー粒子スピン歳差運動測定

実際には・・・

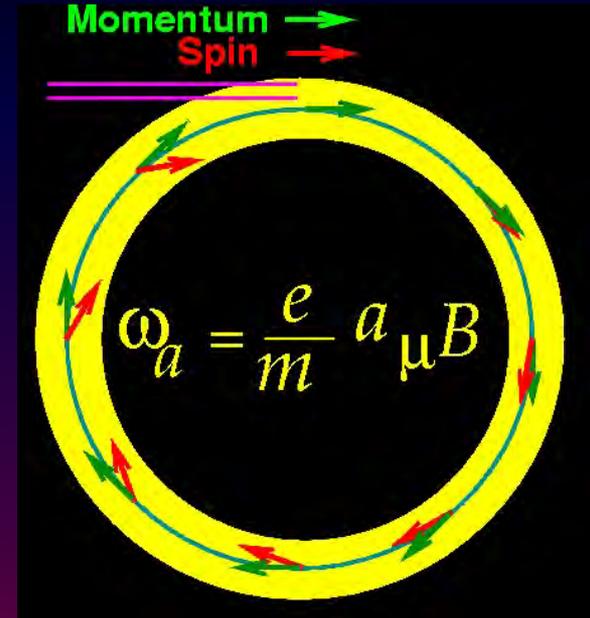
$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

ミュー粒子のfocusing⇒電場
邪魔な項。。

BNL E821実験では
⇒magic momentum

$$\gamma = 29.3, p = 3.094 \text{ GeV}/c \rightarrow (a_\mu - 1/(\gamma^2 - 1)) = 0$$

~~$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$~~



EDMの項: アッパーリ
ミットから無視
($d_{lim} \sim 1e-19e \cdot cm$)

米国フェルミ国立研究所(FNAL)で継続する計画あり。5倍の精度(0.1ppm)

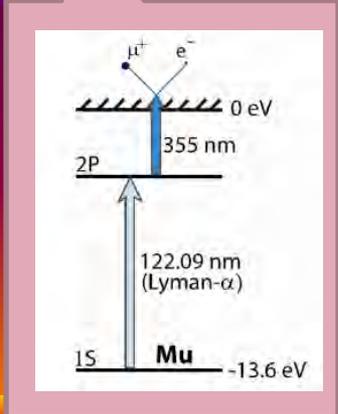
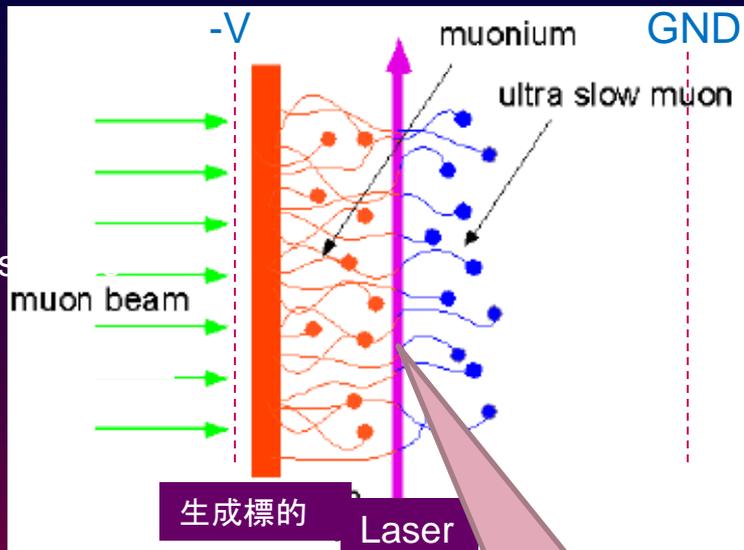
J-PARCにおける新実験

違った方法で攻める

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_{\mu} \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

- 貯蔵リング収束電場 $E=0$
- $P_T/P_L \sim 10^{-5}$ 程度のペンシルビーム
 - 極冷ミュオン粒子⇒どのように実現？⇒次頁
- 高強度・高均一度のコンパクト貯蔵リング磁場
 - 3 tesla (R=33.3cm), 1ppm local → MRI技術応用
 - 非常に弱い(<0.1ppm)収束磁場オプションも検討
- コンパクト貯蔵リング内側に更にコンパクトな崩壊陽電子検出器
g-2:0.1ppmの精度、EDM:<1e-20e·cm が目標

極冷ミュー粒子



◆ 表面ミュー粒子ビーム

- ◆ Polarization ~ 100%
- ◆ Momentum $p(\mu^+) \sim 27 \text{ MeV}/c$

◆ ミュオニウム生成

- ◆ 標的内でストップ⇒電子をつかまえてミュオニウム生成
- ◆ 真空領域へ熱拡散
- ◆ $p \sim 2.6 \text{ keV}/c$ ($p_T \sim 2.1 \text{ keV}/c$) @300K

室温標的

◆ レーザー乖離

- ◆ $1S \rightarrow 2P \rightarrow \text{unbound}$
- ◆ $122\text{nm}(\text{Lyman-}\alpha) + 355\text{nm}$

再加速 $300 \text{ MeV}/c \rightarrow$ ペンシルビーム $p_T/p \sim 10^{-5}$

BNL, FNAL, and J-PARC

	BNL-E821	Fermilab	J-PARC
Muon momentum	3.09 GeV/c		0.3 GeV/c
gamma	29.3		3
Storage field	B=1.45 T		3.0 T
Focusing field	Electric quad		None
# of detected μ^+ decays	5.0E9	1.8E11	1.5E12
# of detected μ^- decays	3.6E9	-	-
Precision (stat)	0.46 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm

J-PARC g-2/EDM collaboration

- 現在92人
- 25機関: KEK, RIKEN, U-Tokyo, TRIUMF, BNL, PMCU, CYCRC-Tohoku, Osaka, Rikkyo, TITech, SUNYSB, RAL, UCR, UNM, Victoria
- 7力国: Czech, USA, Russia, Japan, UK, Canada, France

Msaharu Aoki⁸, Pavel Bakule²⁰, Bernd Bassalleck²⁴, George Beer²⁶, Gerry Bunce²⁷,
Abhay Deshpande¹⁹, Simon Eidelman⁴, Douglas E. Fields²⁴, Miloslav Finger⁶, Michael Finger Jr.⁶,
Yuya Fujiwara^{17,14}, Yoshinori Fukao¹⁰, Noriyosu Hayashizaki¹⁶, Seiko Hirota^{10,14}, Hiromi Iinuma¹⁰,
Masanori Ikegami¹⁰, Masahiro Ikeno¹⁰, Katsuhiko Ishida¹⁷, Masa Iwasaki¹⁷, Ryosuke Kadono¹⁰,
Takuya Kakurai¹², Takuya Kamitani¹⁰, Yukihide Kamiya¹⁰, Sohtaro Kanda¹², Frédéric Kapusta⁵,
Naritoshi Kawamura¹², Takashi Kohriki¹⁰, Sachio Komamiya¹⁴, Kunio Koseki¹⁰, Yoshitaka Kuno⁸,
Alfredo Luccio¹², Oleg Luchev², Muneyoshi Maki¹², Glen Marshall²², Mika Masuzawa¹⁰,
Yasuyuki Matsuda⁹, Teijiro Matsuzaki¹⁷, Tsutomu Mibe¹⁰, Katsumi Midorikawa², Satoshi Mihara¹⁰,
Yasuhiro Miyake¹⁰, William M. Morse³, Jiro Murata^{17,13}, Ryotaro Muto¹⁰,
Kanetada Nagamine^{23,10,18}, Takashi Naito¹⁰, Hisayoshi Nakayama¹⁰, Megumi Naruki¹⁰,
Makiko Nio²¹, Hajime Nishiguchi¹⁰, Daisuke Nomura¹⁰, Hiroyuki Noumi¹⁵, Tomoko Ogawa²,
Toru Ogitsu¹⁰, Kazuki. Ohishi¹⁷, Katsunobu Oide¹⁰, Masahiro Okamura³, Art Olin^{22,26},
Norihiro F. Saito², Naohito Saito^{10,14}, Yasuhiro Sakemi⁷, Ken-ichi Sasaki¹⁰, Osamu Sasaki¹⁰,
Akira Sato¹², Aurore Savoy-Navaro⁵, Yannis K. Semertzidis³, Yuri Shatunov¹²,
Koichiro Shimomura¹⁰, Boris Shwartz⁴, Wilfrid da Silva²⁵, Patrick Strasser¹⁰, Ryuhei Sugahara¹⁰,
Michinaka Sugano¹⁰, Ken-ichi Tanaka¹⁰, Manobu Tanaka¹⁰, Nobuhiro Terunuma¹⁰,
Nobukazu Toge¹⁰, Dai Tomono¹⁷, Eiko Torikai¹², Toshiyuki Toshito¹¹, Akihisa Toyoda¹⁰,
Kyo Tsukada¹², Tomohisa Uchida¹⁰, Kazuki Ueno¹⁷, Vlasov Vrba¹, Satoshi Wada²,
Akira Yamamoto¹⁰, Kaoru Yokoya¹⁰, Koji Yokoyama¹⁷, Makoto Yoshida¹⁰, Mitsuhiro Yoshida¹⁰,
Koji Yoshimura¹⁰

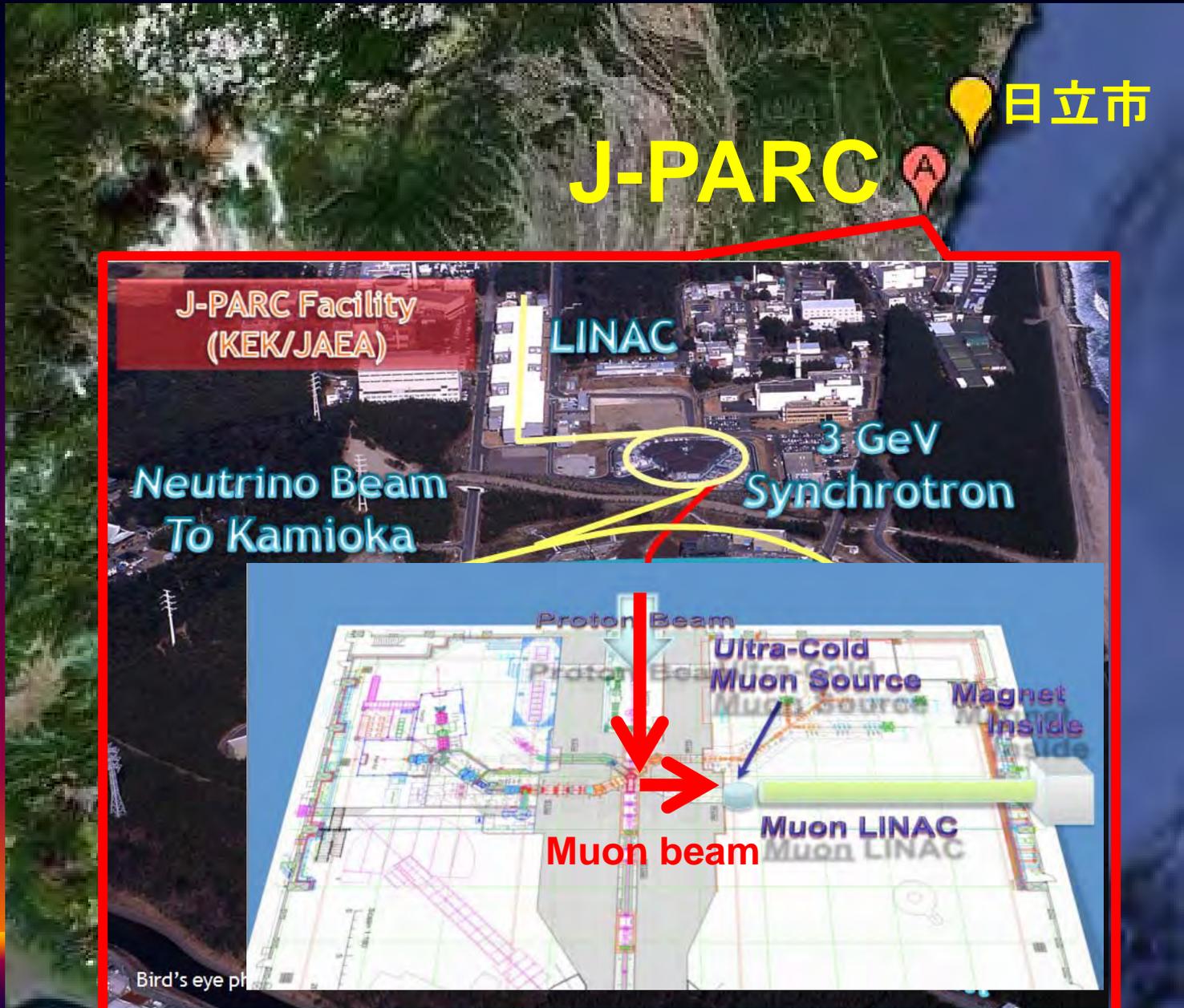
JPARC のミュオンビームを使って実験します



JPARC のミュオンビームを使って実験します



JPARC のミュオンビームを使って実験します



Bird's eye ph

3 GeV 陽子ビーム
(333 uA)

グラファイト標的
(20 mm)

表面ミュオンビーム
(28 MeV/c, $4 \times 10^8/s$)

ミュオニウム生成
(300 K ~ 25 meV \Rightarrow 2.3 keV/c)

シリコン
飛跡検出器

光速の94.3%まで加速

超精密磁場
(3T, ~1ppm ローカル)

66 cm diameter

Muon
storage

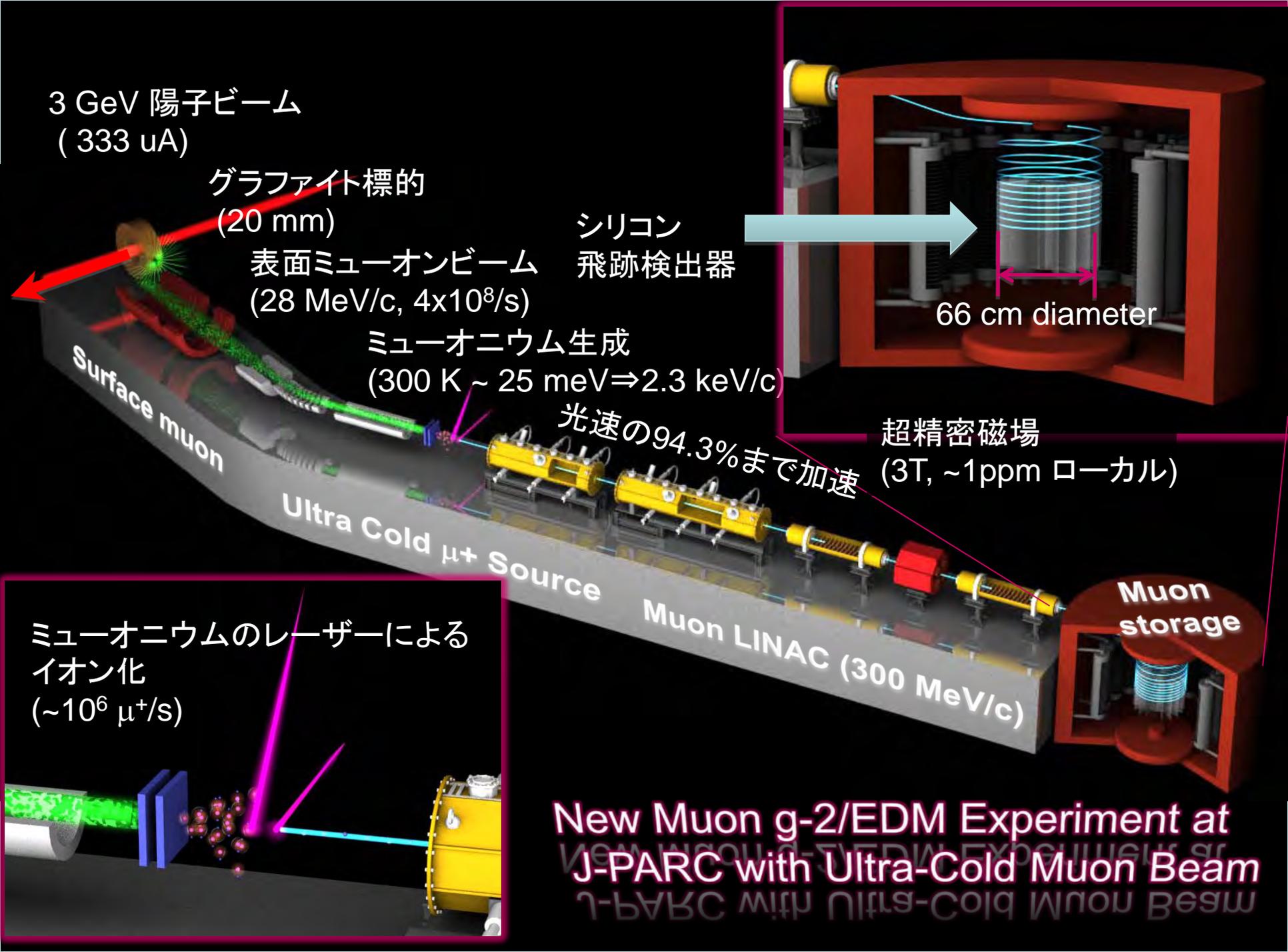
Surface muon

Ultra Cold μ^+ Source

Muon LINAC (300 MeV/c)

ミュオニウムのレーザーによる
イオン化
($\sim 10^6 \mu^+/s$)

New Muon g-2/EDM Experiment at
J-PARC with Ultra-Cold Muon Beam



R&D項目

- ・極冷ミュー粒子源開発
- ・初期加速部開発

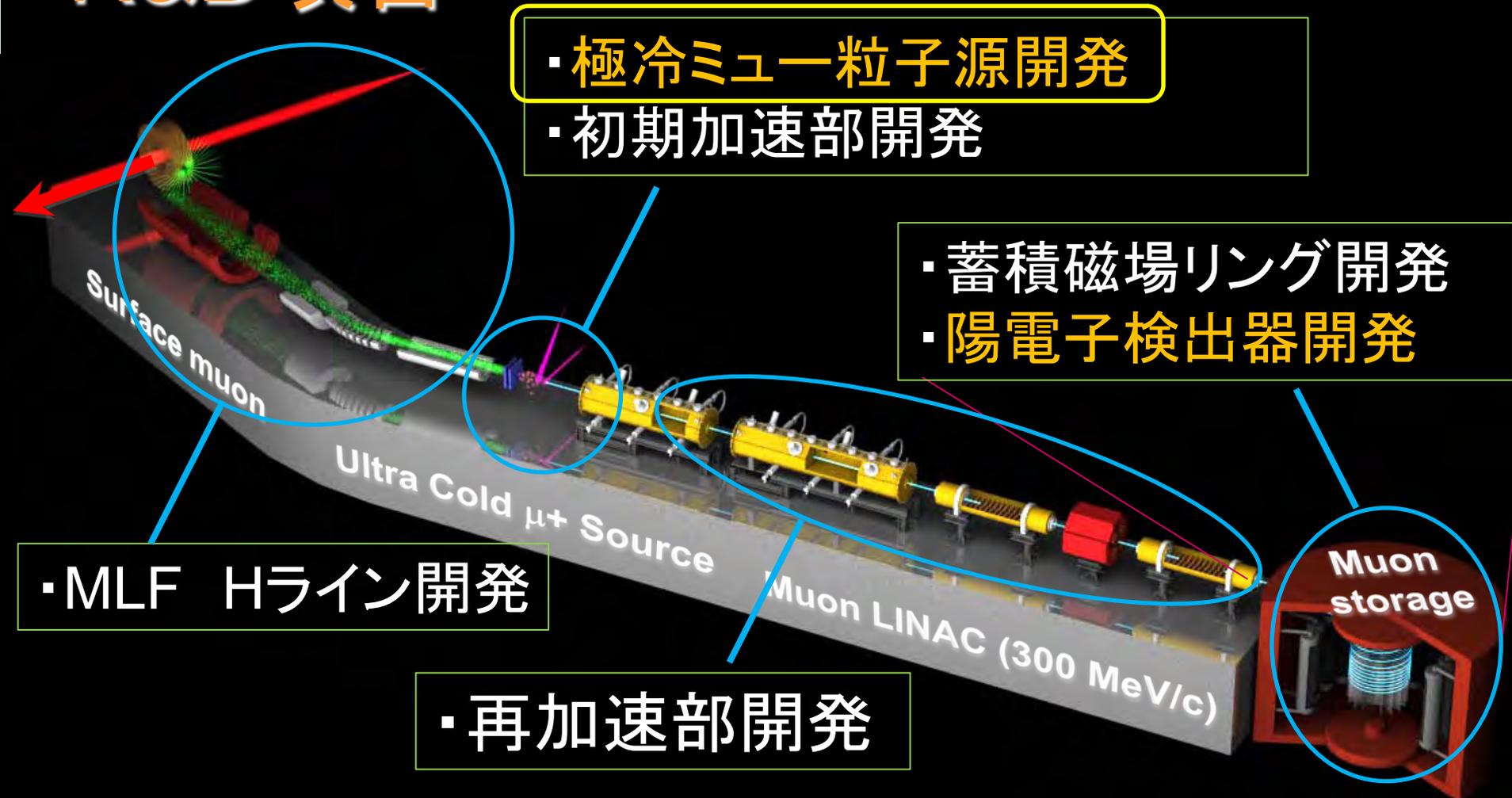
- ・蓄積磁場リング開発
- ・陽電子検出器開発

・MLF Hライン開発

・再加速部開発

Muon storage

New Muon g-2/EDM Experiment at
J-PARC with Ultra-Cold Muon Beam



もくじ

- インTRODクシヨン
 - ミュー粒子異常磁気モーメント、EDM
 - 測り方
 - J-PARCでの新実験
- 極冷ミュー粒子源開発
- まとめ

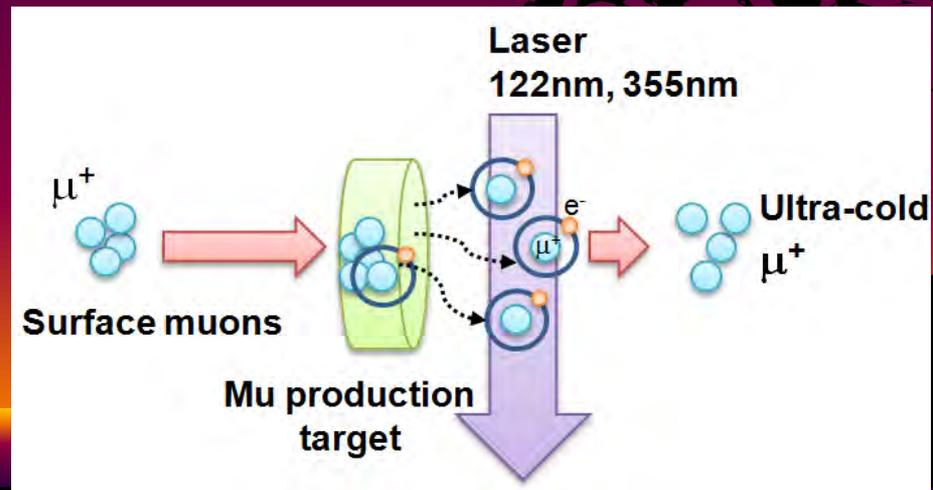


極冷ミュー粒子源開発

pt/p $\sim 10^{-5}$ 、 10^6 /sの安定した極冷ミュー粒子ビームがほしい

- ・レーザーの強度アップ⇒理研RAL研究所にて開発中
- ・レーザー照射位置の決定
- ・ミュオニウム生成標的の最適化

ミュオニウム標的探し
+
ミュオニウム分布測定



ミュオニウム標的開発

そもそも。。。

- 冷たいミュー粒子取り出しの例はほとんどない
 - 標的: 温めたタングステン (Hot W 2100K)
 - (KEK-MLF, 理研RALによる)
- ミュオニウムが真空領域(標的外)に出てくる量(分布)もあまり調べられていない
 - Hot W、SiO₂粉末で生成率~4%
 - 分布はSiO₂粉末2次元空間分布測定(位置分解能 FWHM 6mm)のみ

ミュオニウム標的開発

というわけでミュオニウム標的探し＋分布測定

- Requirements

- 室温標的である (g-2的にはこれが必要)
- 安定で取り扱いやすい
- 生成率がこれまでと同等or以上
- 空間分布をmmレベルで知る (レーザー照射位置のため)

➡ 段階的なスタディ

1. 様々なターゲットで生成率簡易測定
(MuSR(muonium spin rotation)実験)
2. 空間分布＋時間発展測定 (Imaging実験)

S1249実験@TRIUMF, Canada

1. MuSR実験 (June 2010)
2. Imaging実験 (Nov 2010 & Oct 2011)

← ビームトラブルにより途中で撤退

S1249実験メンバー(下線有はspokes person)

K. Ishida, Y. Fujiwara*, K. Ueno, M. Iwasaki, D. Tomono, K. Ohishi,
K. Yokoyama, H. Ohnishi, (RIKEN)

T. Mibe, N. Saito*, H. Inuma, Y. Fukao, S. Hirota*, T. Kakurai*, S.
Kanda* (KEK/IPNS)

Y. Miyake, K. Shimomura, P. Strasser, N. Kawamura (KEK/IMSS)
P. Bakule (RAL)

Y. Matsuda (Univ. Tokyo)

G. Marshall, A. Olin, D. Contreras* (TRIUMF)

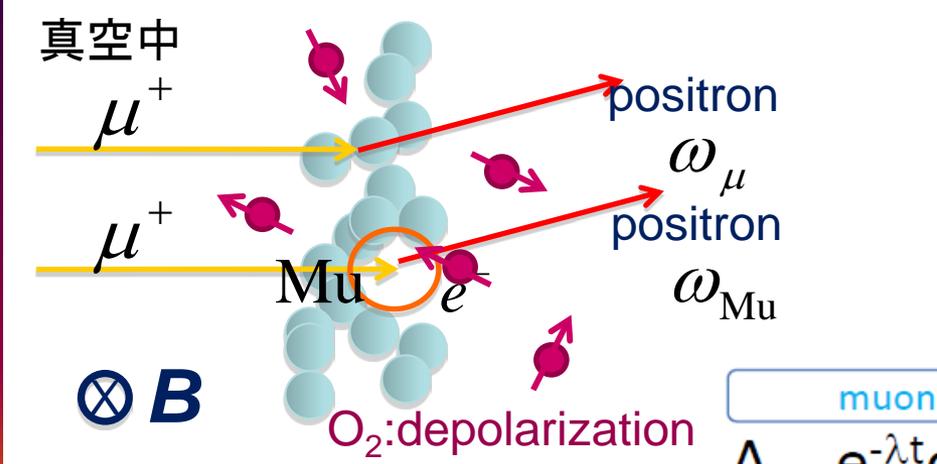
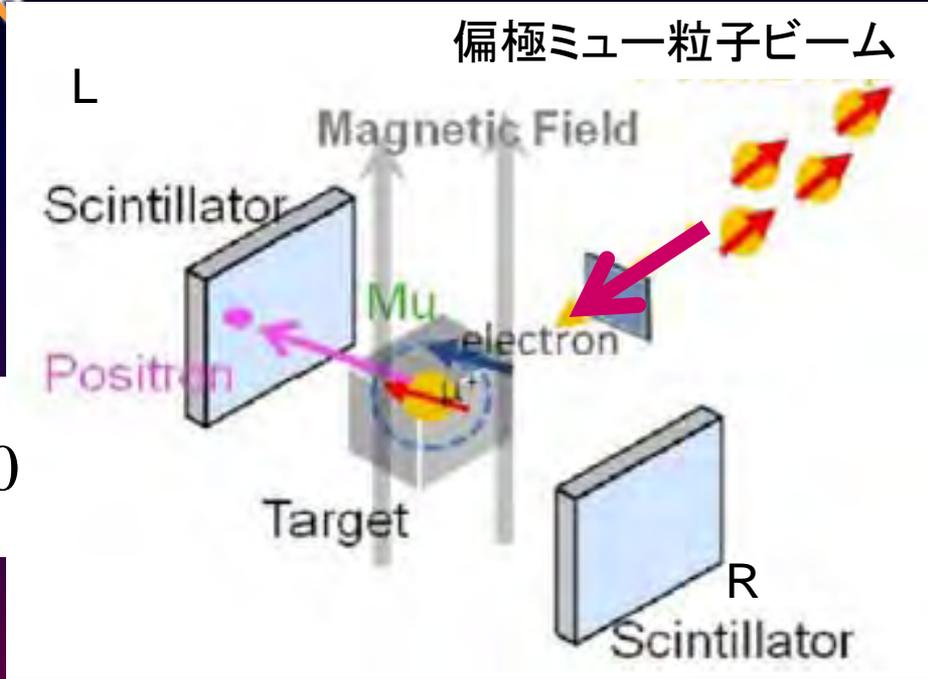
G. Beer (Univ. Victoria)

* Graduate/undergraduate students

Step 1 MuSR実験

・MuSR測定
 ミュー粒子、ミュオニウムの
 スピン回転の周波数を比較

$$\omega_{\text{Mu}} / \omega_{\mu} = \frac{\mu_{\mu} + \mu_e}{2} / \mu_{\mu} \approx \frac{m_{\mu}}{2m_e} \sim 100$$



陽電子数の時間変化を測定
 ⇒LR-asymmetry
 それぞれの振幅の比を見る

$$A_{\text{Mu}} e^{-\lambda t} \cos(\omega_{\text{Mu}} t + \phi_{\text{Mu}}) + A_{\mu} \cos(\omega_{\mu} t + \phi_{\mu}) + A_0$$

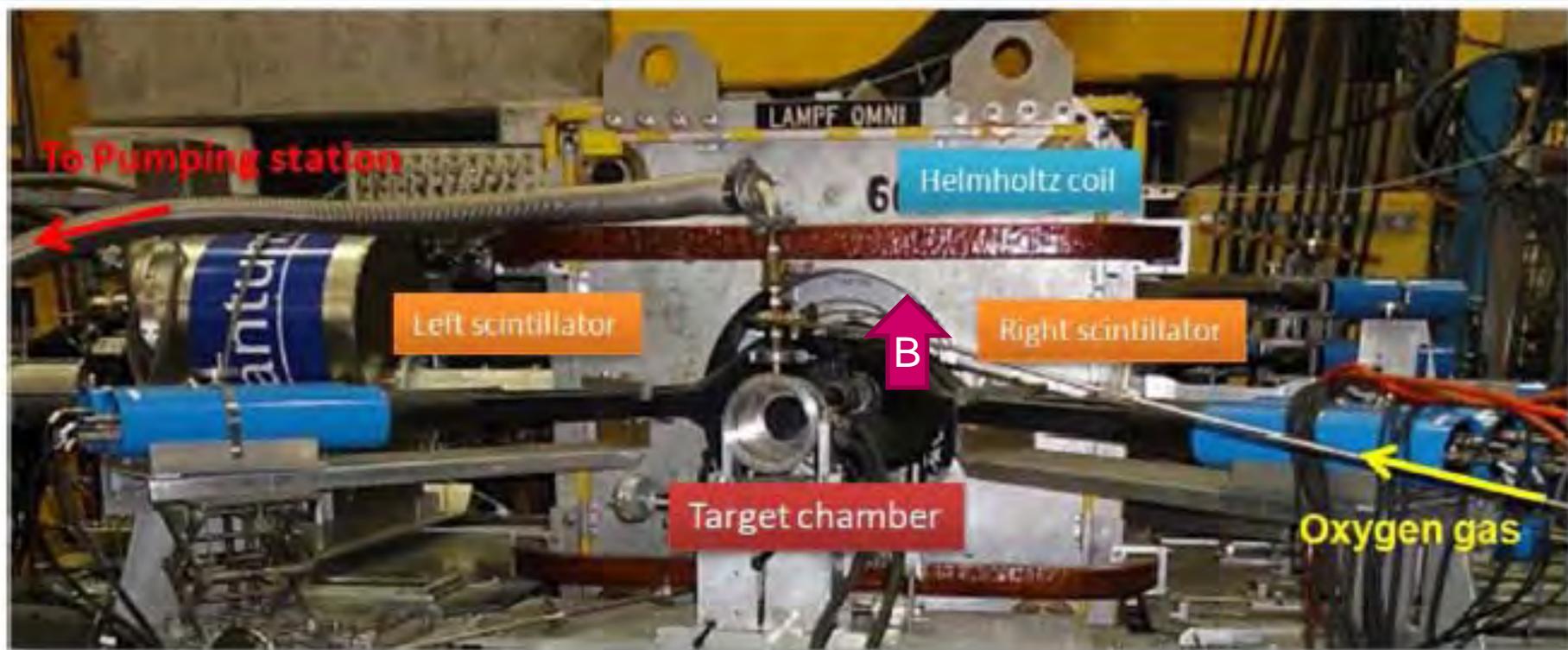
・さらに、酸素を入れて表面にミュオニウムが出てきて
 いるかも簡単にチェック

Step 1 MuSR実験

S1249 : June 23-29, 2010

セットアップ: M20ビームライン

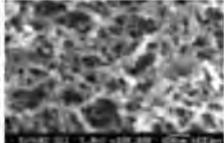
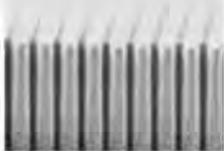
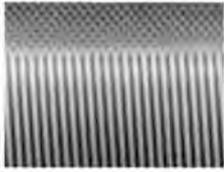
MuSR(μ SR)用セットアップは用意されている
(物性実験に良くつかわれる)



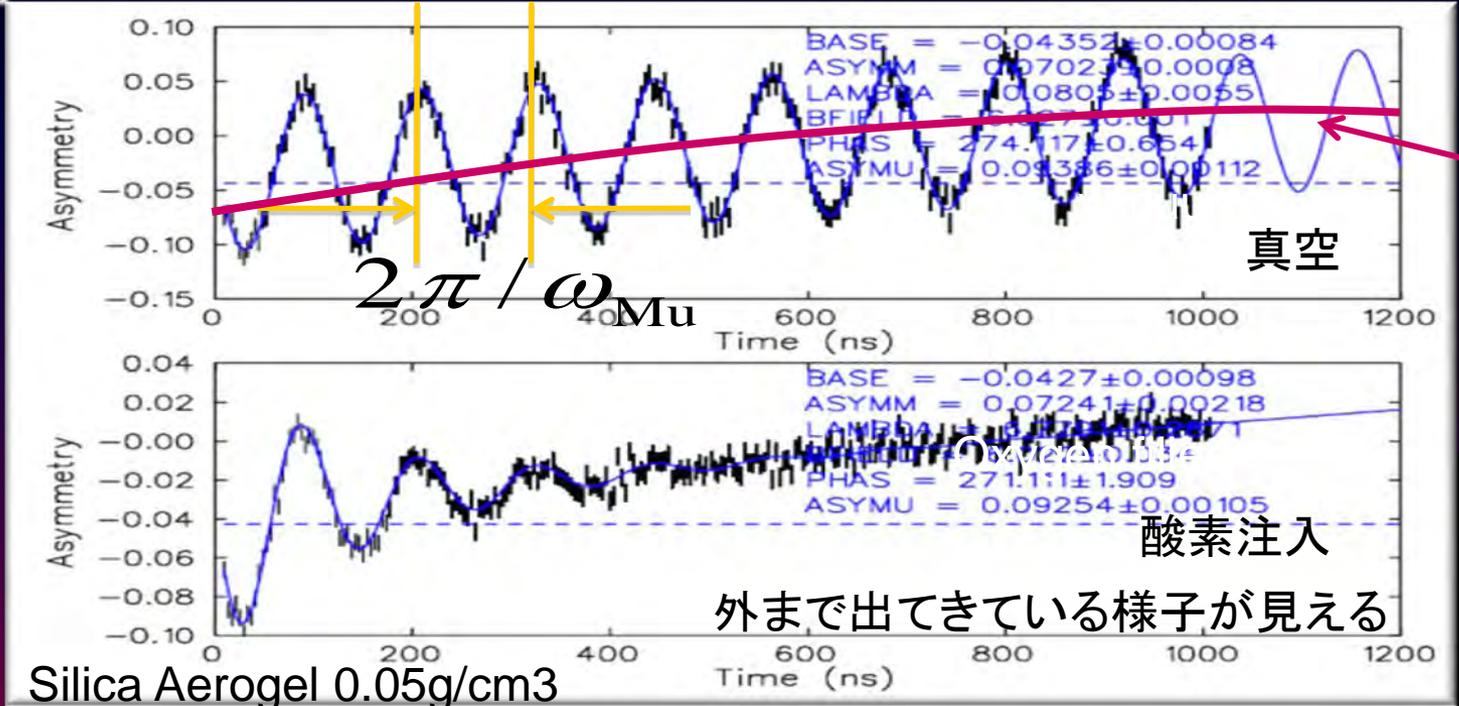
Step 1 MuSR実験

S1249 : June 23-29, 2010

試したターゲットたち

Material	Density (g/cm ³)	Thickness (mm)	Structure	
Silica powders (SiO ₂)	0.03, 0.075	37.5	Chain of nano-grains	
Silica aerogel (SiO ₂)	0.03, 0.05, 0.11	20	Chain of nano-grain	
Porous Silica (SiO ₂)	1.1	0.05 – 0.07	Nano-porous (10 μm pitch)	
Porous Alumina (Al ₂ O ₃)	2.9	0.09 ,0.255, 0.4	Nano-porous (60-450 nm pitch)	

Step 1 MuSR実験



Silica Aerogel 0.05g/cm3

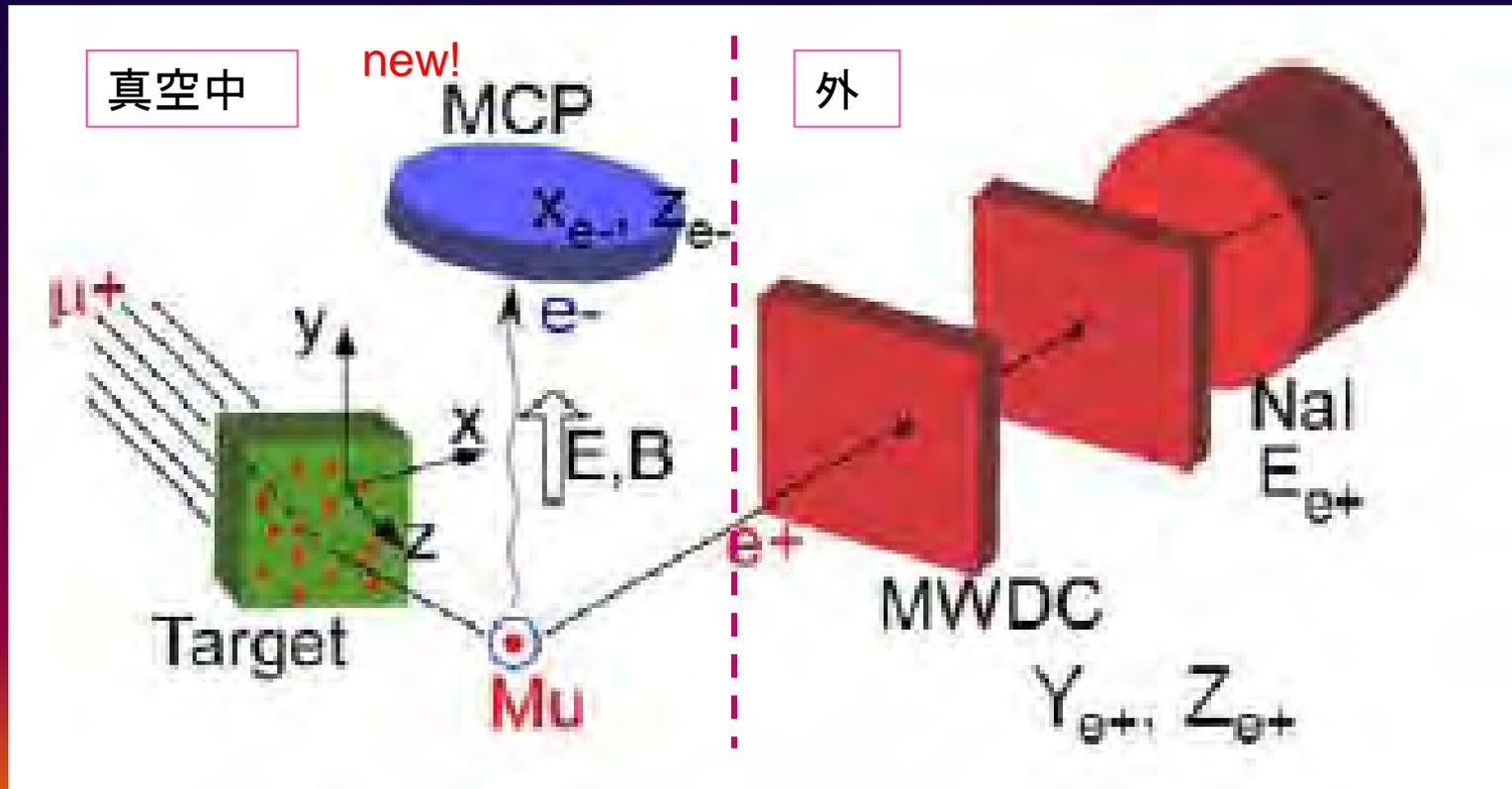
標的	A_μ	A_{Mu}	R_{Mu}
SiO ₂ plate	0.061 ± 0.001	0.079 ± 0.002	0.72 ± 0.02
Cab -O-Sil	0.077 ± 0.001	0.0712 ± 0.0009	0.65 ± 0.01
Nanogel	0.073 ± 0.001	0.082 ± 0.0008	0.691 ± 0.009
Silica Aerogel 0.03	0.0934 ± 0.0005	0.0630 ± 0.0005	0.574 ± 0.005
Silica Aerogel 0.05	0.0936 ± 0.0007	0.0667 ± 0.0006	0.588 ± 0.006
Silica Aerogel 0.1	0.0933 ± 0.0007	0.0692 ± 0.0005	0.597 ± 0.006
Porous Silica 1	0.1186 ± 0.0009	0.0159 ± 0.0009	0.21 ± 0.02
Porous Silica 2	0.1163 ± 0.0007	0.0158 ± 0.0007	0.21 ± 0.01
Porous Alumina	0.1472 ± 0.0008	0.001 ± 0.001	0.02 ± 0.02

SiO₂粉末

SiO₂ Aerogelが(調べた
中では)最適
⇒Step2へ

Step 2 Imaging実験

- 真空中のミュオニウム分布・生成率測定
Imaging実験セットアップ概念図



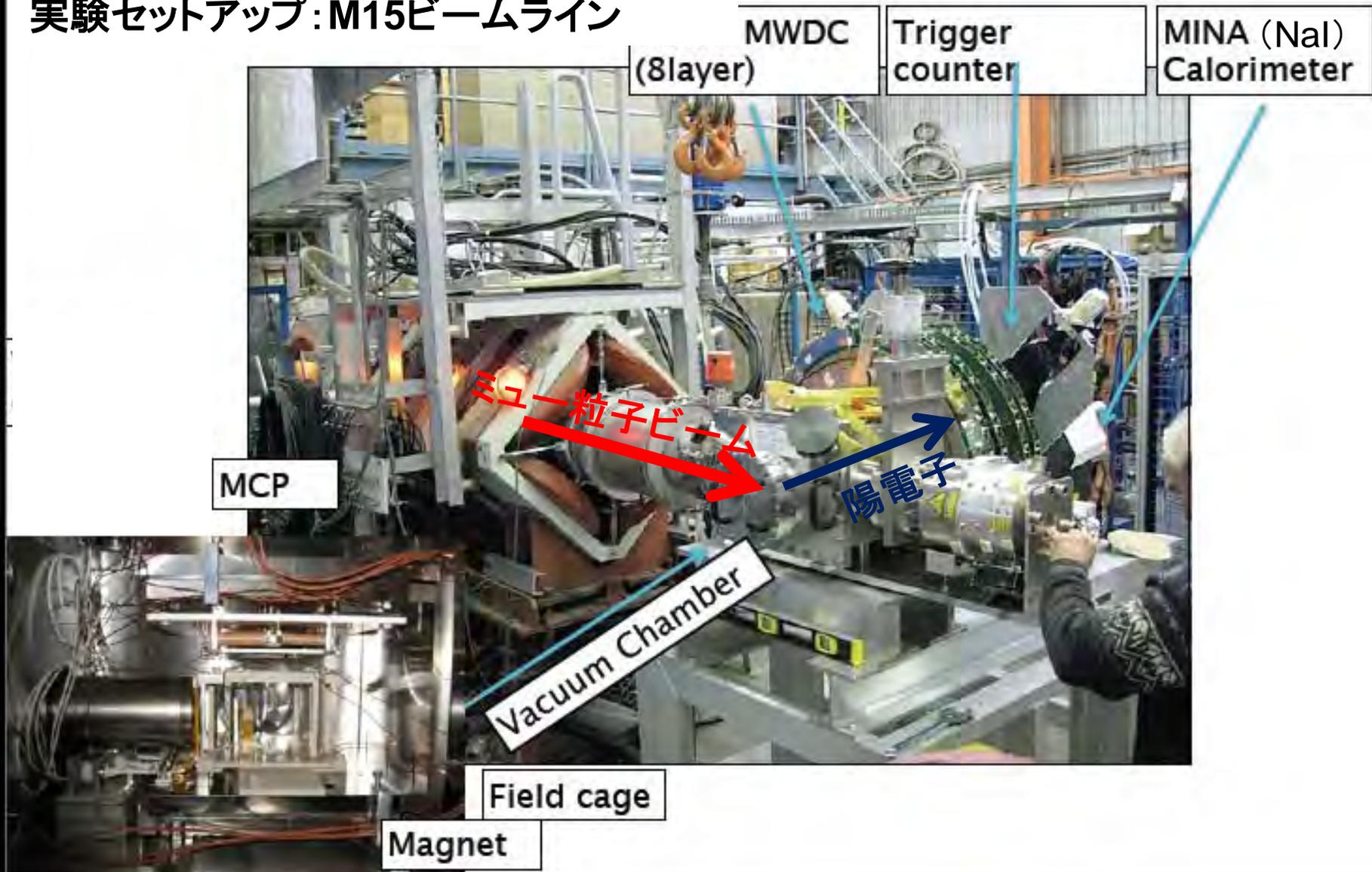
過去の実験：陽電子のみ測定

⇒本実験：取り残される電子も捉える⇒3次元空間分布

Step 2 Imaging実験

S1249 : Nov 18-23, 2010, Oct 20-30, 2011

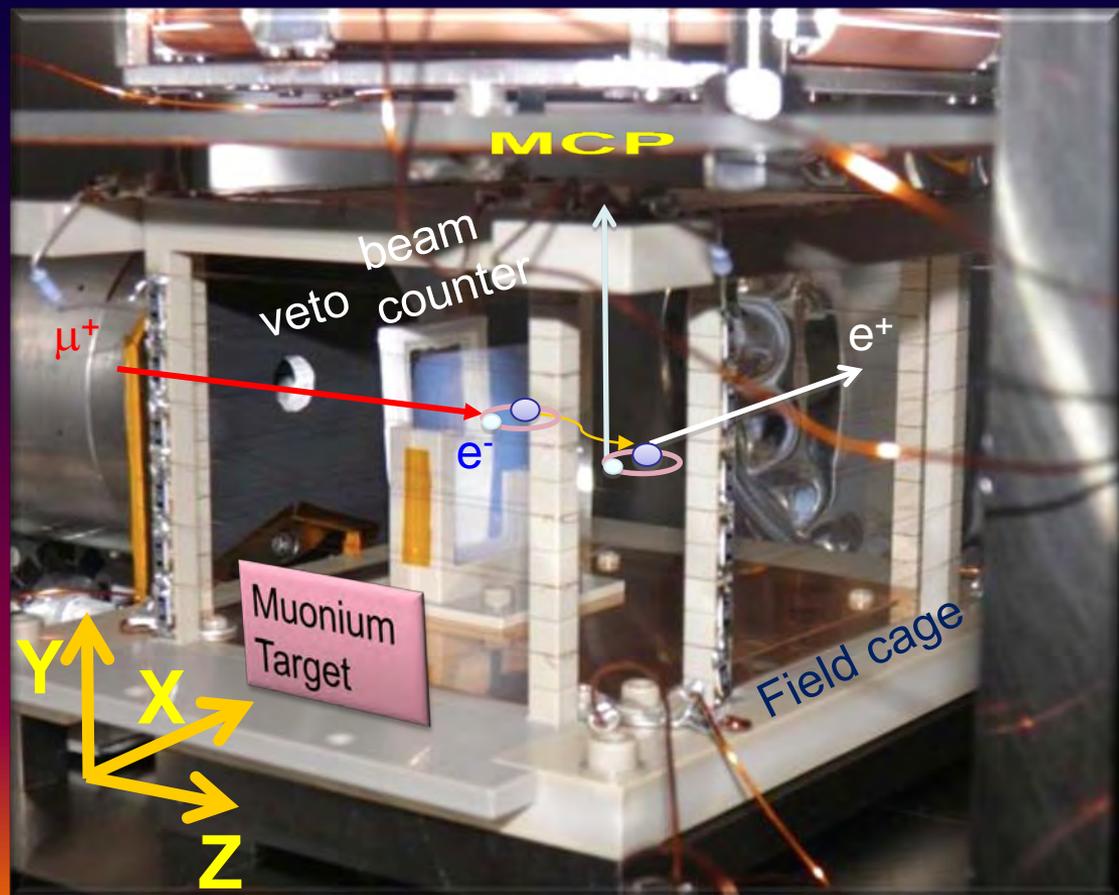
実験セットアップ: M15ビームライン



Step 2 Imaging実験

S1249 : Nov 18-23, 2010, Oct 20-30, 2011

セットアップ写真: 真空チェンバ中身拡大



磁場: 100G

電場: 100V/cm

MCP

位置分解能: 0.1mm

MWDC

位置分解能: 0.5mm

座標系(単位: mm)

MCP中心: (0,52,0)

標的表面: (0,0,-13.4)

標的

SiO₂ Aerogel(4種), ガラス
密度[g/cm³]:

0.027, 0.049, 0.099, 0.18, 2.0

ビーム運動量(表面でhalf
stopになるよう調整):

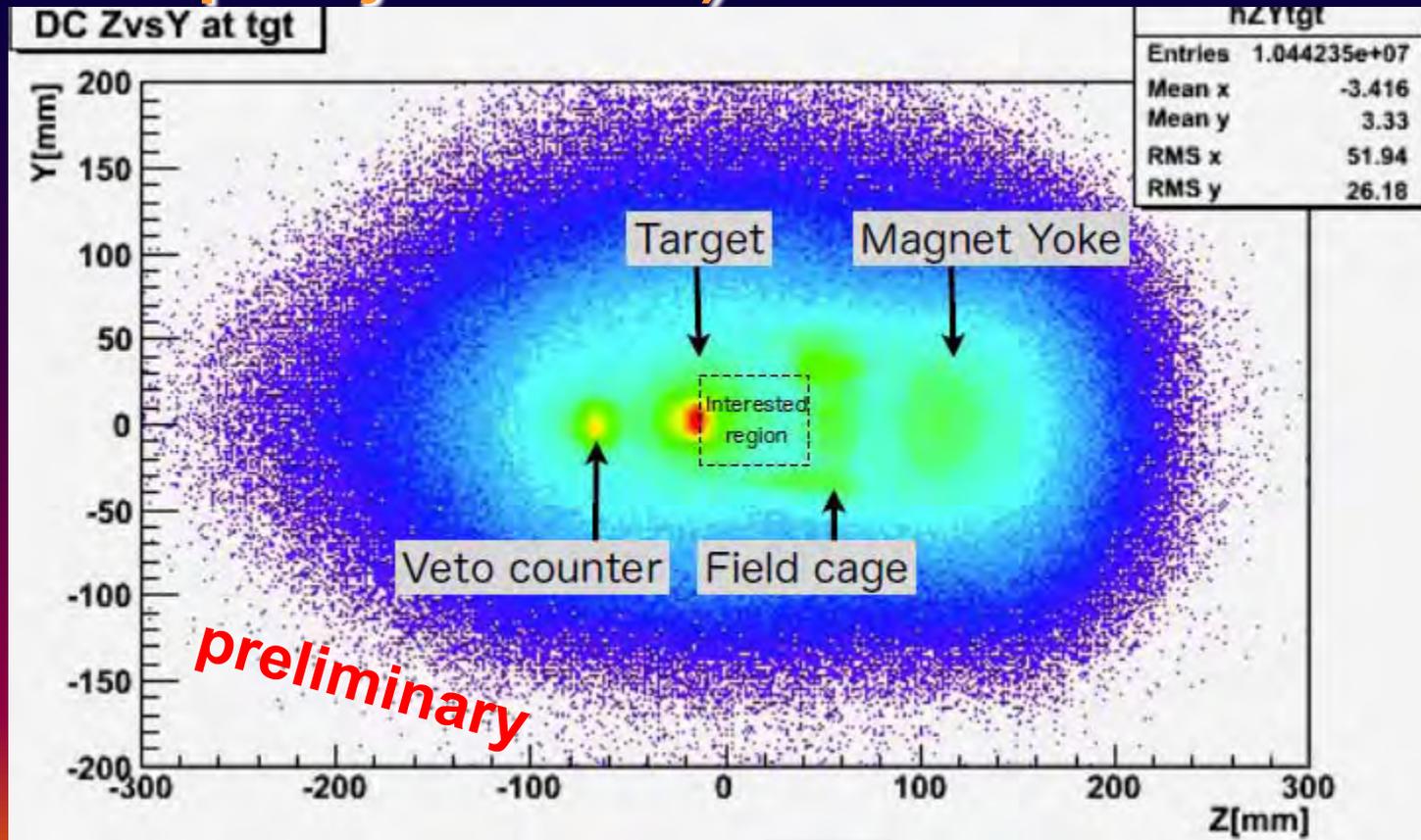
0.027g/cm³ ⇒ 22.9MeV

解析

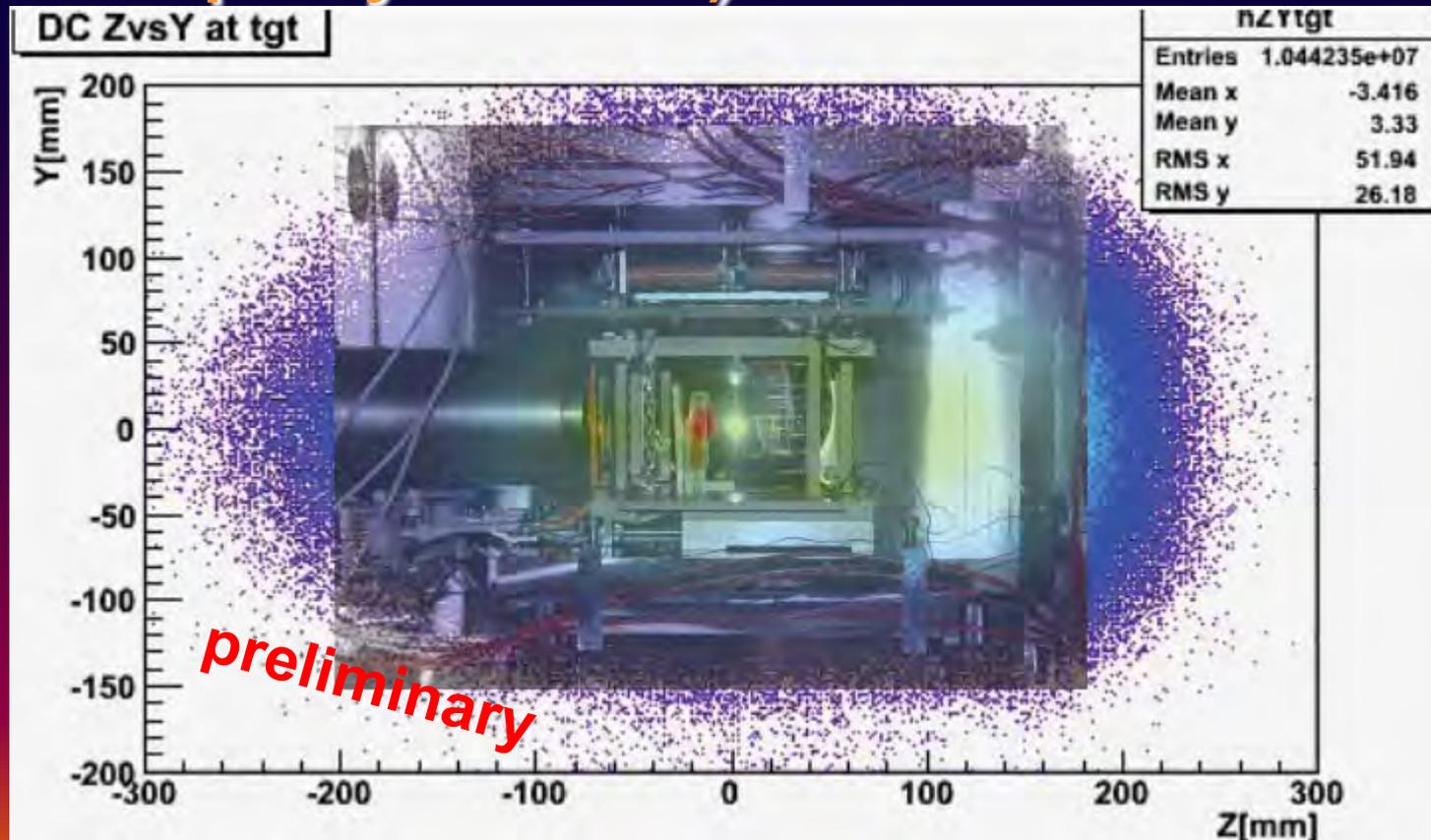
- まずは過去の結果との比較のためMWDCのみの解析
- その後MCPの解析も追加
- 現状、preliminaryな結果のみ



MWDC imaging : decay vertex ($x=0$ projection)



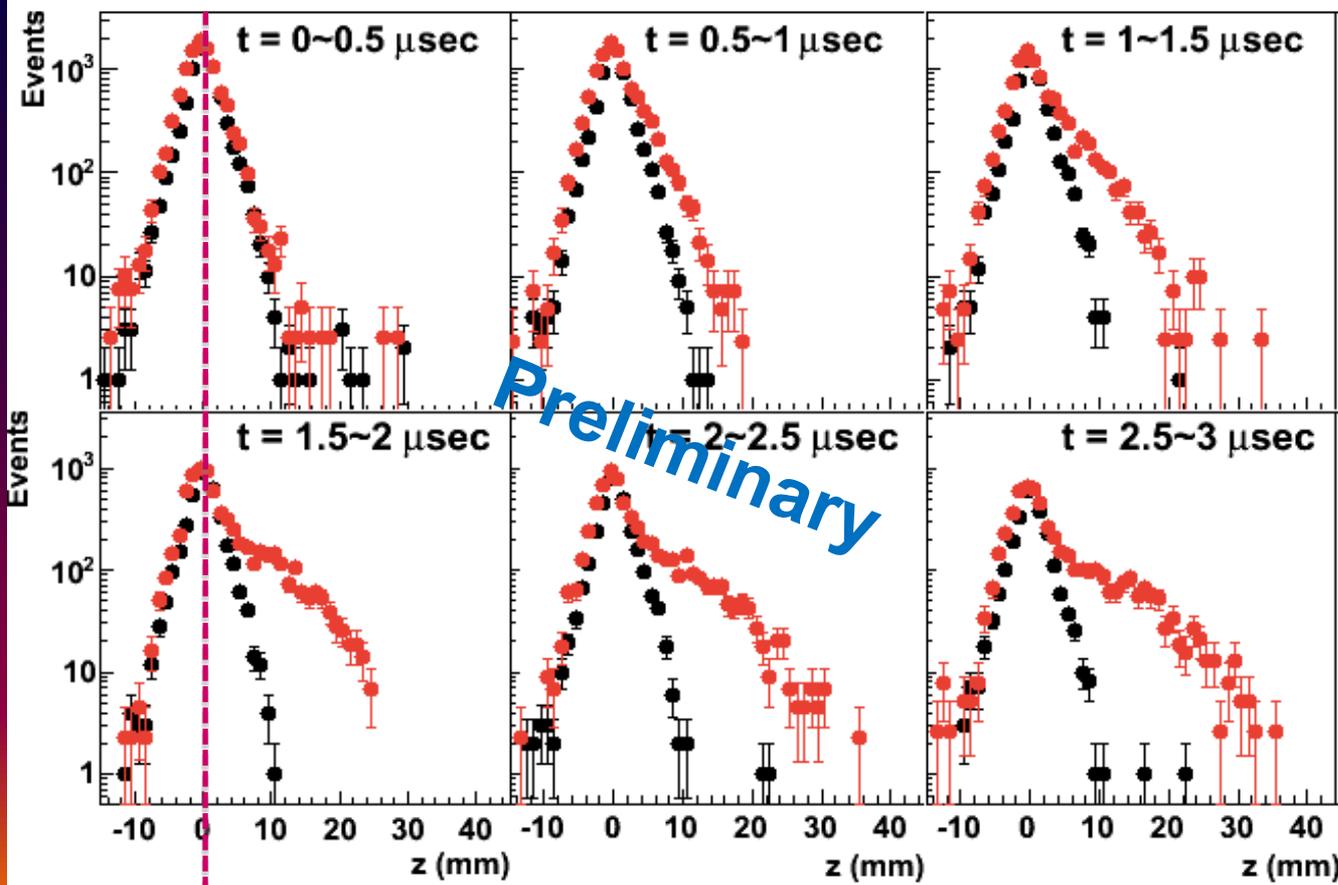
MWDC imaging : decay vertex ($x=0$ projection)



ミュオニウム空間・時間発展分布

Reconstructed decay vertex position

● Aerogel 27mg/cc
● ガラス



Target surface

- ガラス:バックグラウンドとして用いた
- 真空領域にミュオニウムからの信号らしきものが見える
- 全ての密度のもので同様な信号を確認
- オンライン解析の段階では密度依存性は特に見られなかった

現在、詳細な解析を進めている

今後

- 詳細な解析を詰め、ミュオニウム生成量を過去の実験と比較
- MCPデータの解析と合わせ、3次元空間・時間発展分布を導出
- ミュオニウム発生機構の理解

⇒g-2/EDM実験へのフィードバック

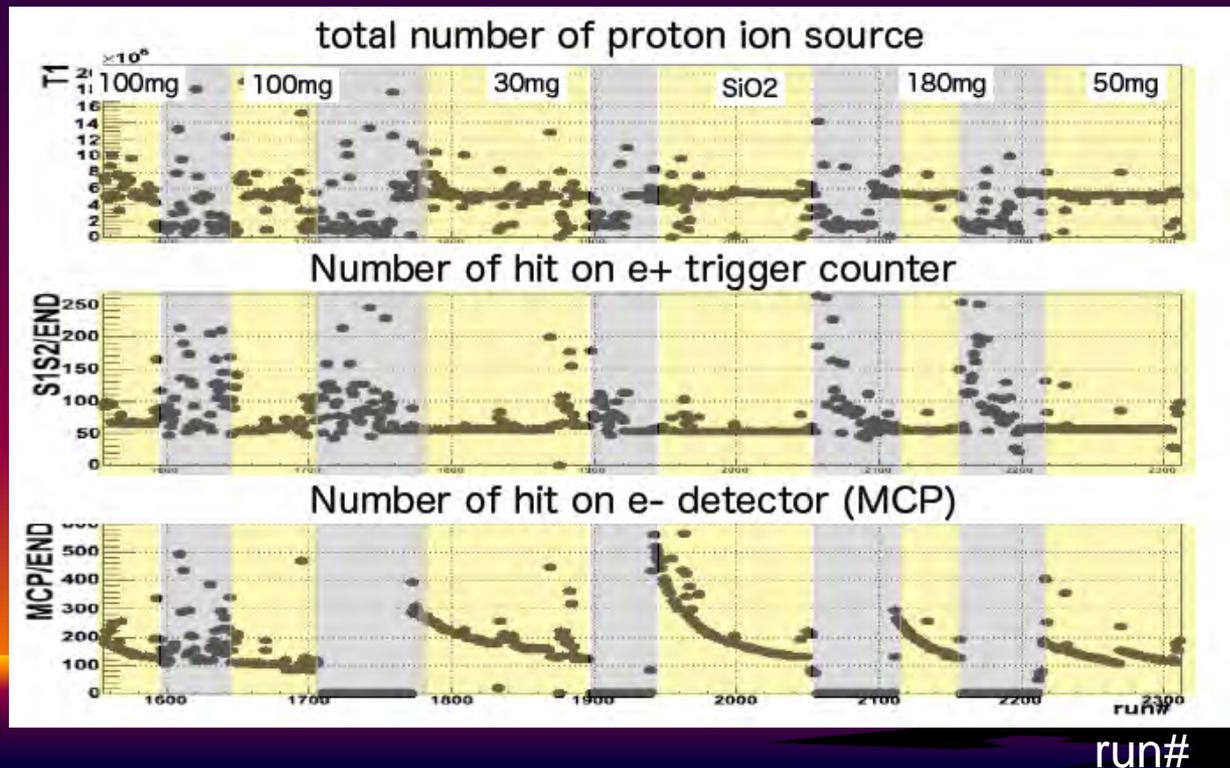
時間があれば・・・ MCPデータの解析

- 二つの問題点

- ・再位置キャリブレーションの必要性

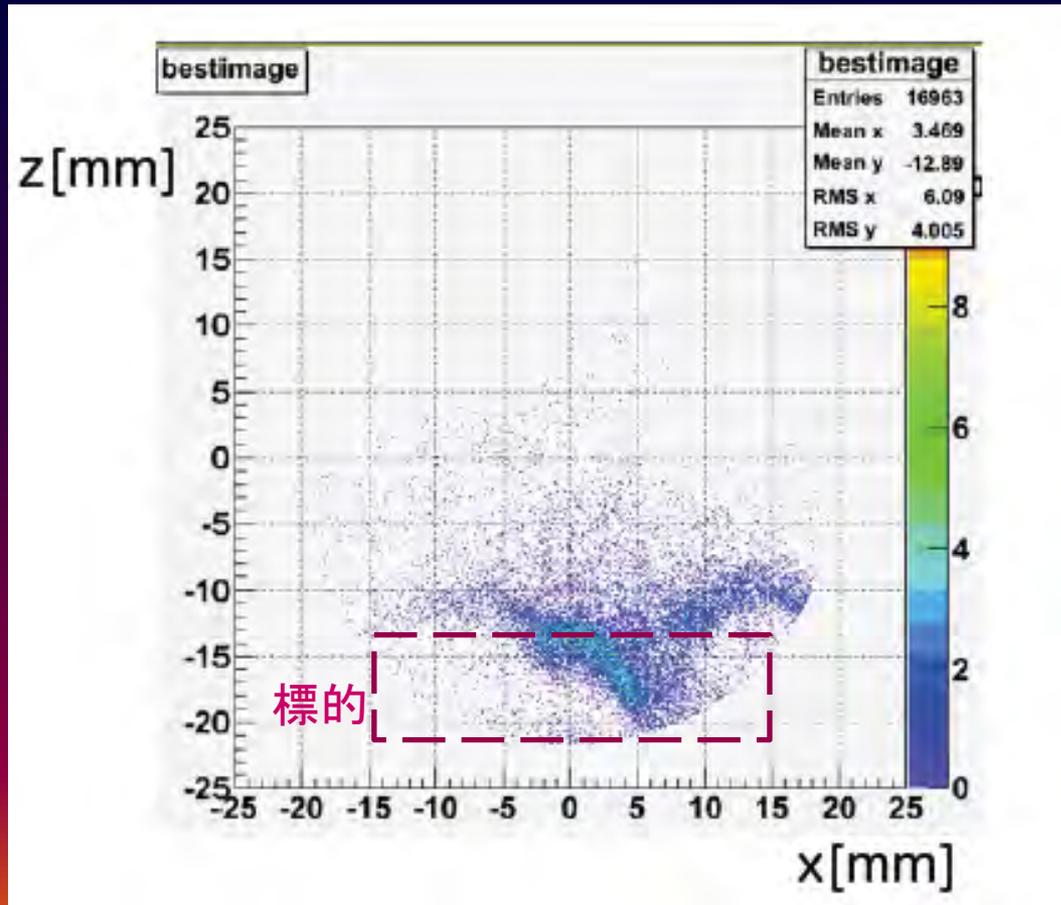
⇒当初の予定より標的近くでは電場の乱れが大きい？

- ・実験中のレート変化



ターゲットに近い領域のみ電子・陽電子のコインシデンスレートに変化があることを確認
⇒更なるチェック

MCP imaging (標的: 0.027g/cm^3)

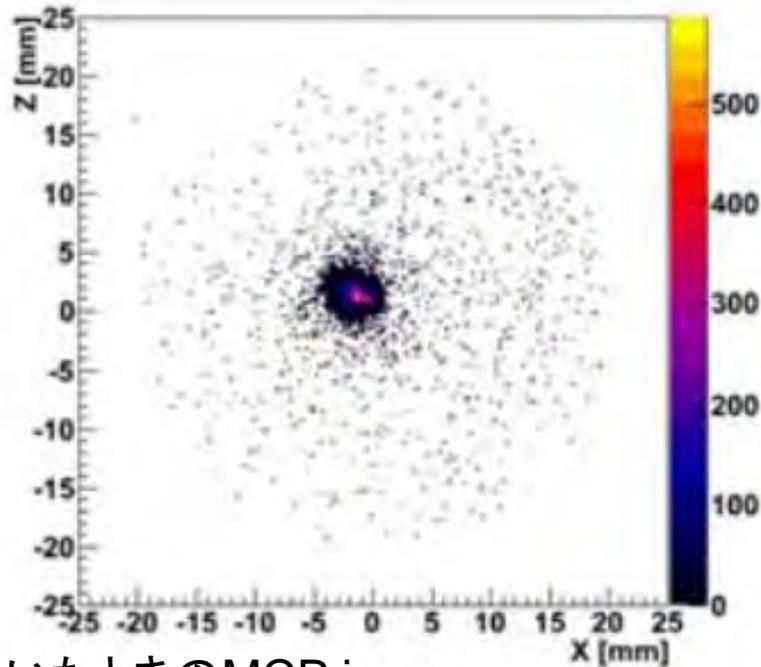
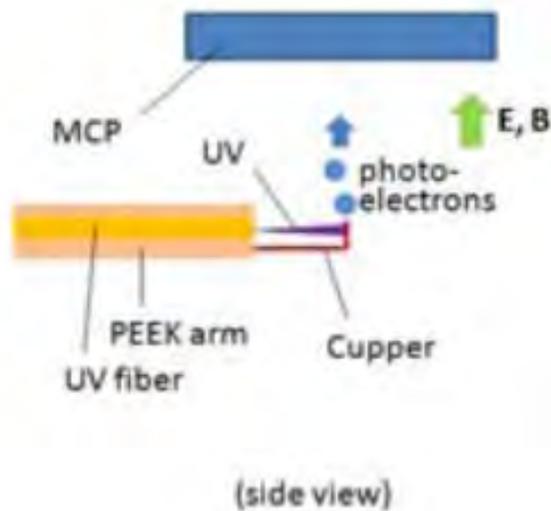


曲がっている? ⇒ 再位置キャリブレーションが必須

MCP再位置キャリブレーション

- ひよろひよろ電子(\sim 数eV)を作るのは困難
⇒UV+銅(光電効果)を用いる方法を考案
⇒銅:仕事関数 $\sim 4.7\text{eV}$
⇒UV 200nmの場合、平均エネルギー: $\sim 2\text{eV}$

UV源:フラッシュランプ



銅標的中心を(-2, 2)に置いたときのMCP image

ひよろひよろ電子のイメージングに成功⇒今後詳細を詰める

まとめ

- J-PARCにおける新しいミュー粒子g-2/EDM超精密実験
 - g-2:0.1ppm、EDM:<1e-20が目標
 - 極冷ミュー粒子を用いた新たな手法
- 極冷ミュー粒子源開発
 - 新たな標的(SiO₂ aerogel)にて真空中に出てくるミュオニウムを確認
 - 現在解析中⇒今後詰めていく
 - ⇒結果を基に本実験用標的を開発