

# ミューオンの将来計画

西口 創 (KEK素核研)

高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング

『J-PARCで展開する高エネルギー物理学の将来展望』

2011/08/09, いばらき量子ビーム研究センター

# お品書き

---

## 1. 現在の話題

(世界のミューオン実験の現状のお話)

## 2. 今後10年の話題

(J-PARCでの実施が計画されている将来計画のお話)

## 3. ミューオン実験で幸せになるために

(J-PARCで実現すると嬉しいお話)

将来計画検討小委員会(第7回委員会, 2010年  
6月12日)での三原氏の発表

[http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hecsbc/files/slides/100612\\_mihara.pdf](http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hecsbc/files/slides/100612_mihara.pdf)

が話のベースです。

それに、この1年の間に起こった最新事情  
(色々なことがありました) を加味して、更  
に明るい将来展望のための意見等を加味して  
います。

# 現在の話題

---

---

# 1 ページでミューオン実験の現状おさらい

## LFV

$\mu \rightarrow e\gamma$  (MEG, Running 2008~)

$\mu N \rightarrow eN$  (no experiment, after 1999)

$\mu \rightarrow eee$  (no experiment, after 1988)

## g-2 / EDM

g-2 (E821, Completed ~2001)

$\mu$ EDM (E821, Completed ~2001)

## misc.

Michel (TWIST, Completed ~2007)

Life ( $\mu$ LAN/FAST, Completed ~2008)

Lamb Shift (R-98-03, Completed ~2009)

HFS (no experiment, after 1998)

## muon sources/cooling

World Record - Pulse (MUSE, Running)

World Record - DC (PSI, Running)

Large Acceptance CS (MuSIC, Running)

Laser Cooling (RIKEN-ISIS, Developing)

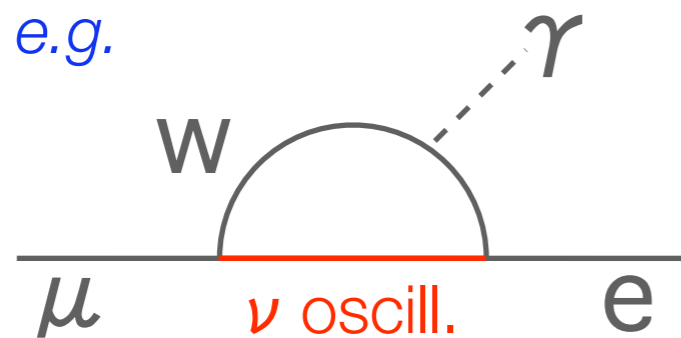
Ionization Cooling (MICE, Developing)

Phase Rotation (PRISM, Developing)

# なんで charged LFV だけ見つかってない？

## 📌 SM + simple $\nu$ Oscillation

- charged LFV is possible



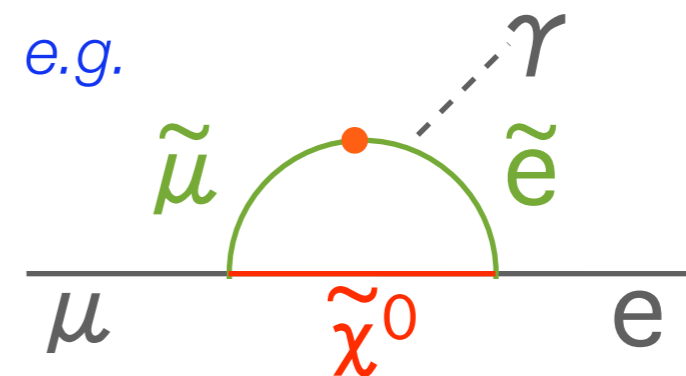
- but extremely rare (small  $\nu$ )

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \sum_i \left| U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{m_{\nu i}^2}{m_W^2} \right|^2$$

- $\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) = 10^{-50} \sim 10^{-40} !!!$

## 📌 beyond SM

- charged LFV is largely enhanced



- still rare but observable level

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) \simeq \frac{\alpha^3 \pi \theta_{\tilde{e}\tilde{\mu}}^2}{G_F^2 \tilde{m}^4}$$

- $\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) = 10^{-15} \sim 10^{-11} !!!$

# なぜ今、 charged LFV が熱い？

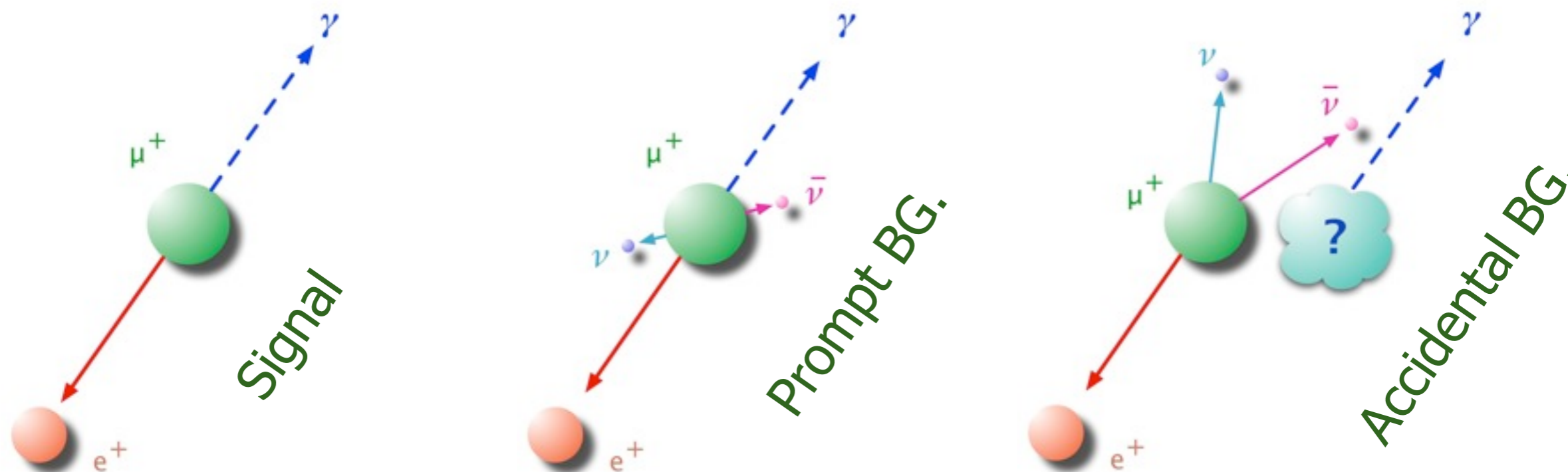
- \* charged LFV だけ未発見
- \* quark mixing は SM のメカニズムの一部
- \* neutrino oscillation は必ずしも New Physics を前提としない
- \* charged LFV は SM 前提だと起こりえない (実験感度内では)

charged LFV **is** “NEW PHYSICS”

- \* 実験感度が既に理論予言領域を荒らし始めている LHCと相補的
- \* eg.  $B(\mu \rightarrow e\gamma) : 10^{-11} \sim 10^{-15}$  が理論予言領域(by SUSY-GUT, LH, ED, etc.)
- \* neutrino sector の混合角の情報から更にenhanceされつつある
- \* 実験上限値 :  $B(\mu \rightarrow e\gamma) < 2.4 \times 10^{-12}$  (by MEG 2009 / 2010)

# $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索

## ❖ 信号事象 & 背景事象

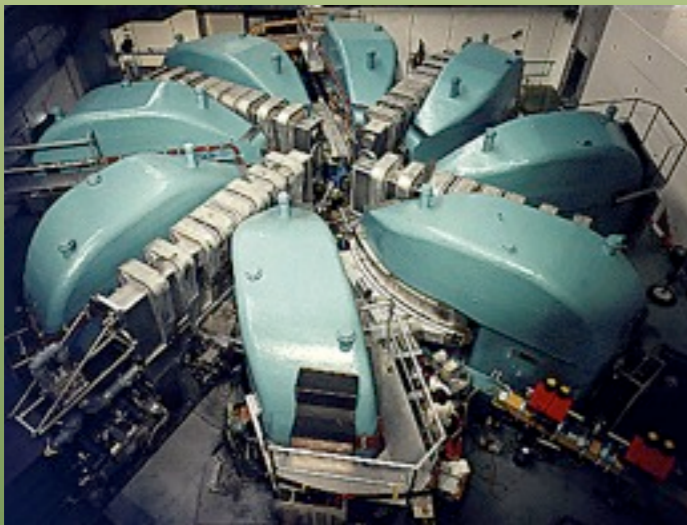


- ❖ 綺麗な 2 体崩壊 ( $E_e = E_\gamma = 52.8 \text{ MeV}$ ,  $\theta_{e\gamma} = 180^\circ$ , Time Coincidence)
- ❖ 実験感度は偶発背景事象 (accidental overlap) によって制限
  - ❖ DCビームを使うのが正解
  - ❖ 優れた分解能(エネルギー, 位置, 時間)を極めて High Rate で



# MEG実験 - 3 Features

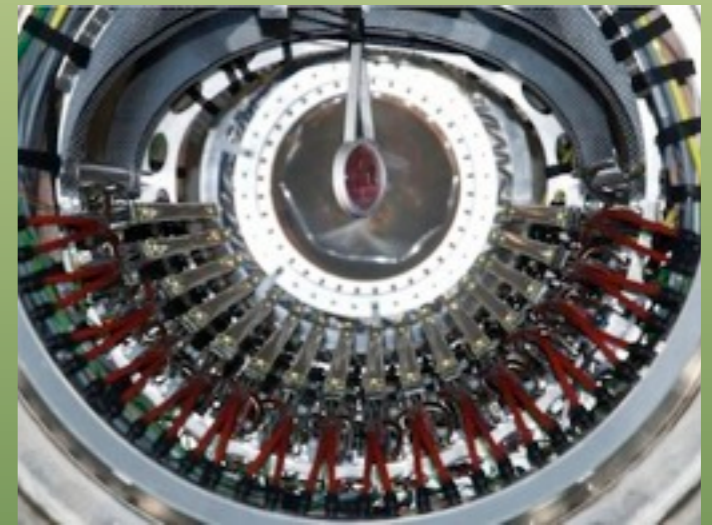
- ❖ 実験感度は偶発背景事象(accidental overlap)によって制限
- ❖ DCビームを使うのが正解
- ❖ 優れた分解能(エネルギー, 位置, 時間)を極めて High Rate で



World Most Intense  
DC Muon Beam at PSI  
 $10^8$  muon/sec



Liquid Xenon  
Scintillation Detector  
(gamma)



COBRA Spectrometer  
(positron)

# MEG実験 - Detector Apparatus






(4) Liquid Xenon Scintillation Photon Detector



muon stopping target



## The MEG Collaboration

( 5 countries      ,  
/12 institutes / ~60 persons )

(1) World's Most Intense DC Muon Beam



(2) Specially Graded Solenoidal Magnet

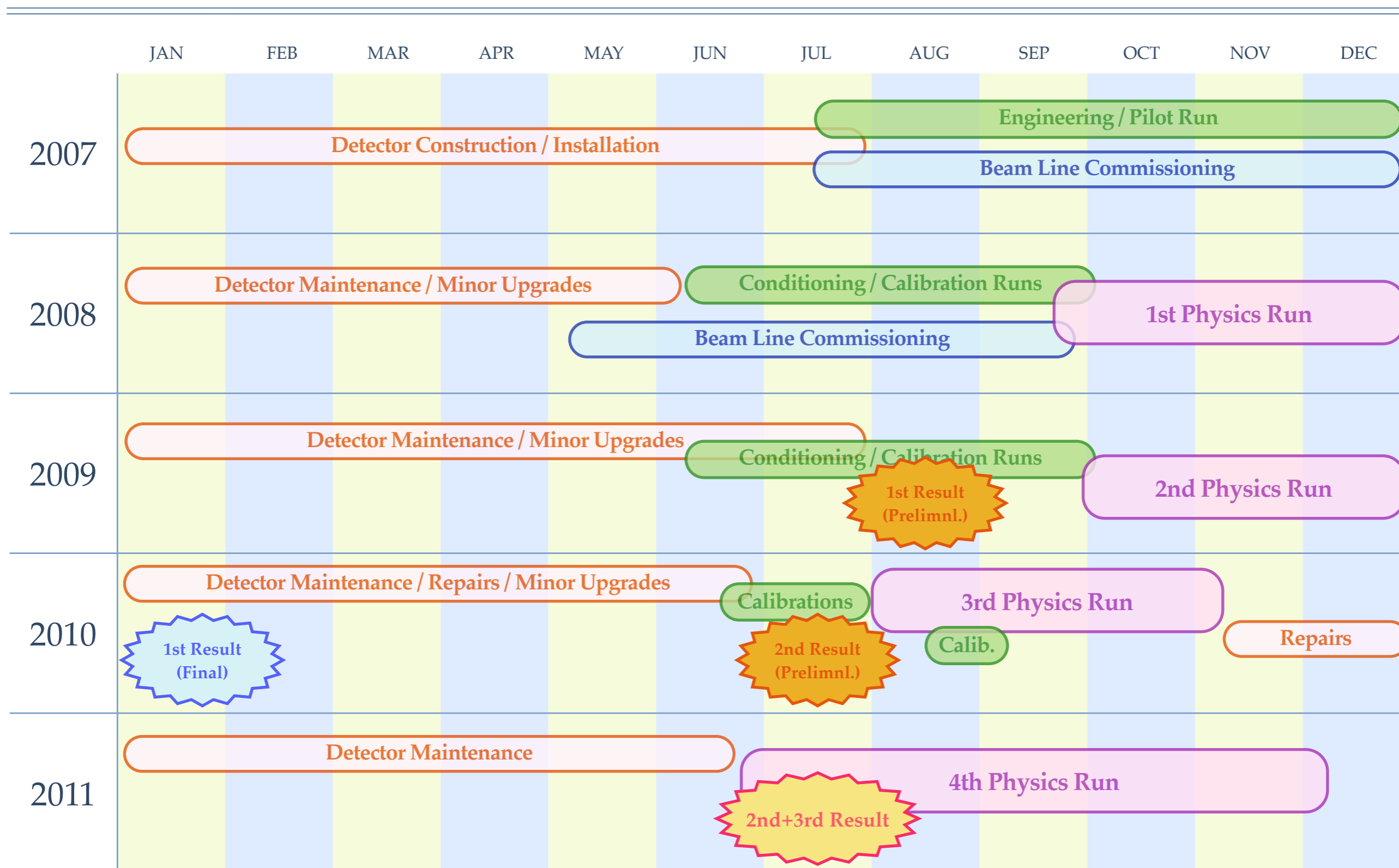


(3) Very LIGHT and Sensitive DC, and Very Fast TC



1m

# MEG実験 - 年表



# MEG実験 - 物理解析

## ❖ ブラインド解析

- ❖ 信号領域ブラインド。検出器の較正、理解(分解能/検出効率)はサイドバンドデータで。BG評価も。

## ❖ ミュオン数規格化

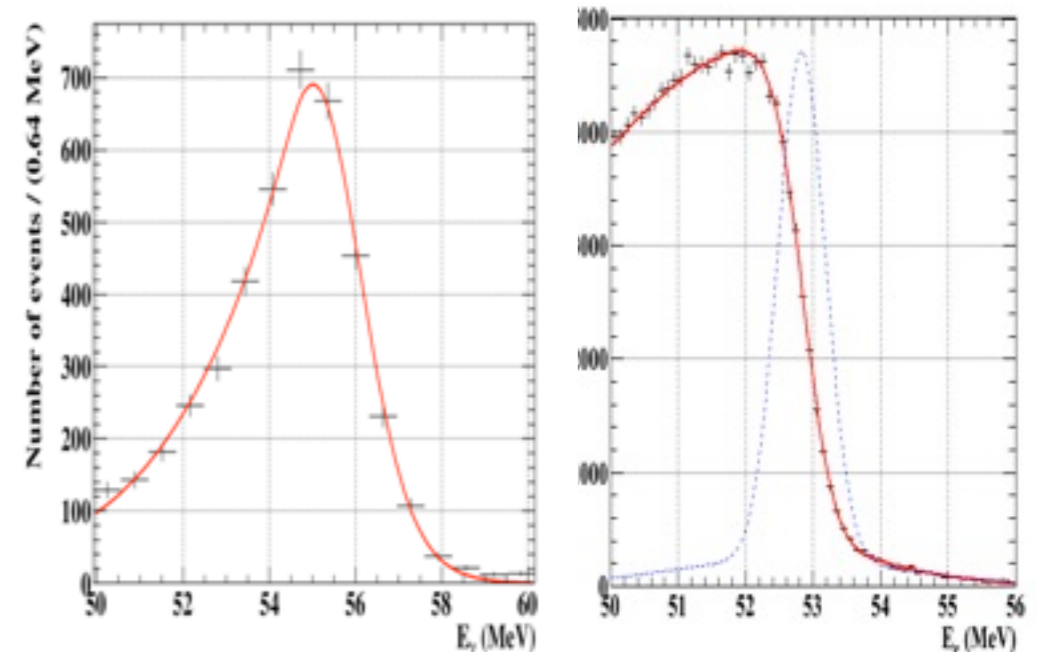
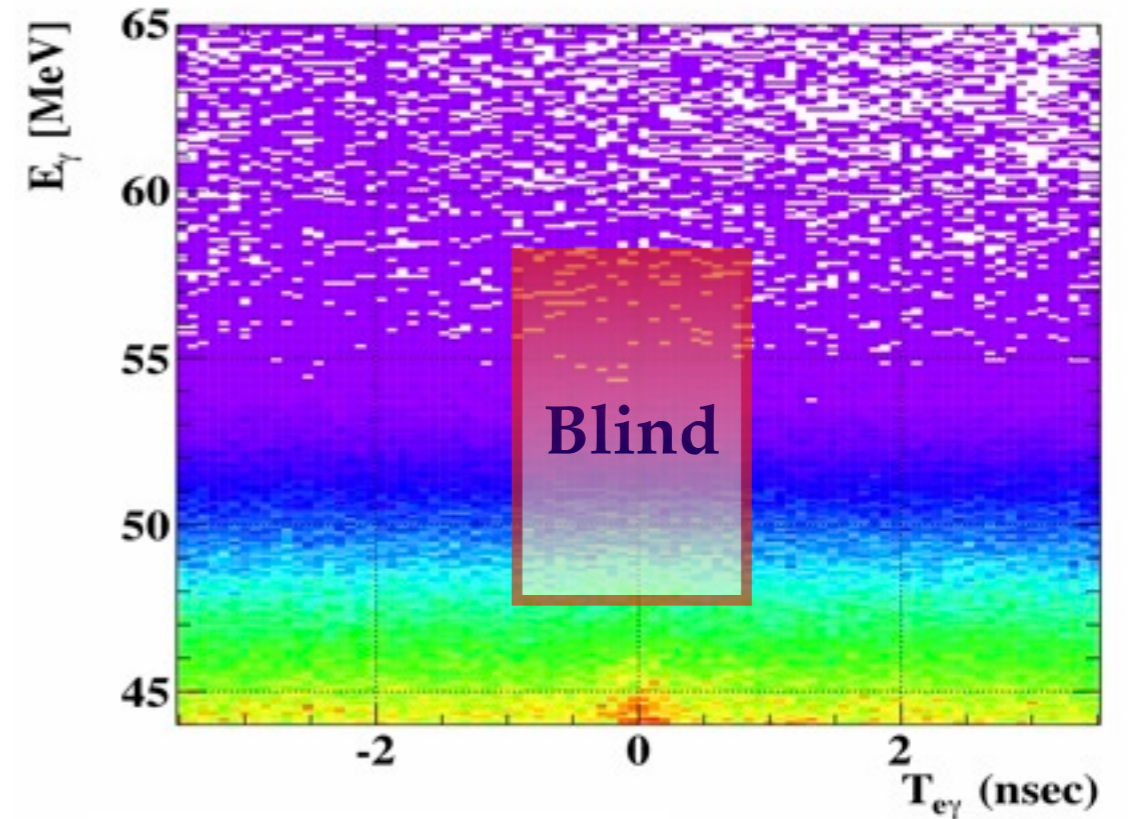
- ❖ Michel  $e^+$  を数えるトリガを物理トリガに組み込み。

## ❖ Likelihood Fitting

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(N_{sig}, N_{RD}, N_{BG}) \\ = \frac{N^{N_{obs}} e^{-N}}{N_{obs}} \prod_{i=1}^{N_{obs}} \left[ \frac{N_{sig}}{N} S + \frac{N_{RD}}{N} R + \frac{N_{BG}}{N} B \right] \end{aligned}$$

- ❖ Fit Parameter は  $N_{sig}, N_{RD}, N_{BG}$  ( $N=N_{sig}+N_{RD}+N_{BG}$ )
- ❖ Observable は  $E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma}$  の5つ。
- ❖ PDF は signal / BG. 双方ともデータから構築
- ❖  $10\sigma$ の広い範囲で signal / BG. 同時にfitting.
- ❖ サイドバンドの  $N_{RD}$  と  $N_{BG}$  がコントロールサンプル

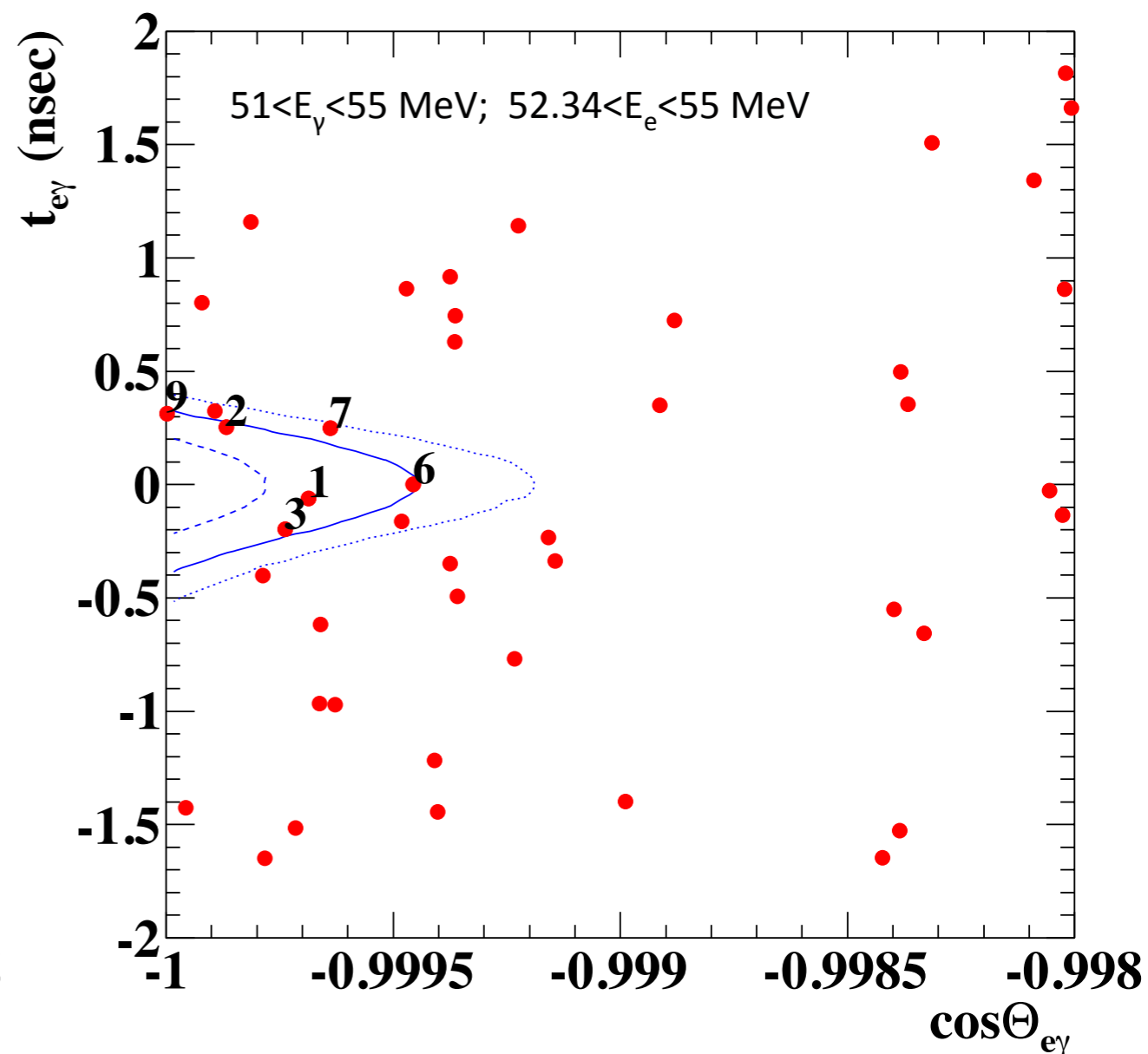
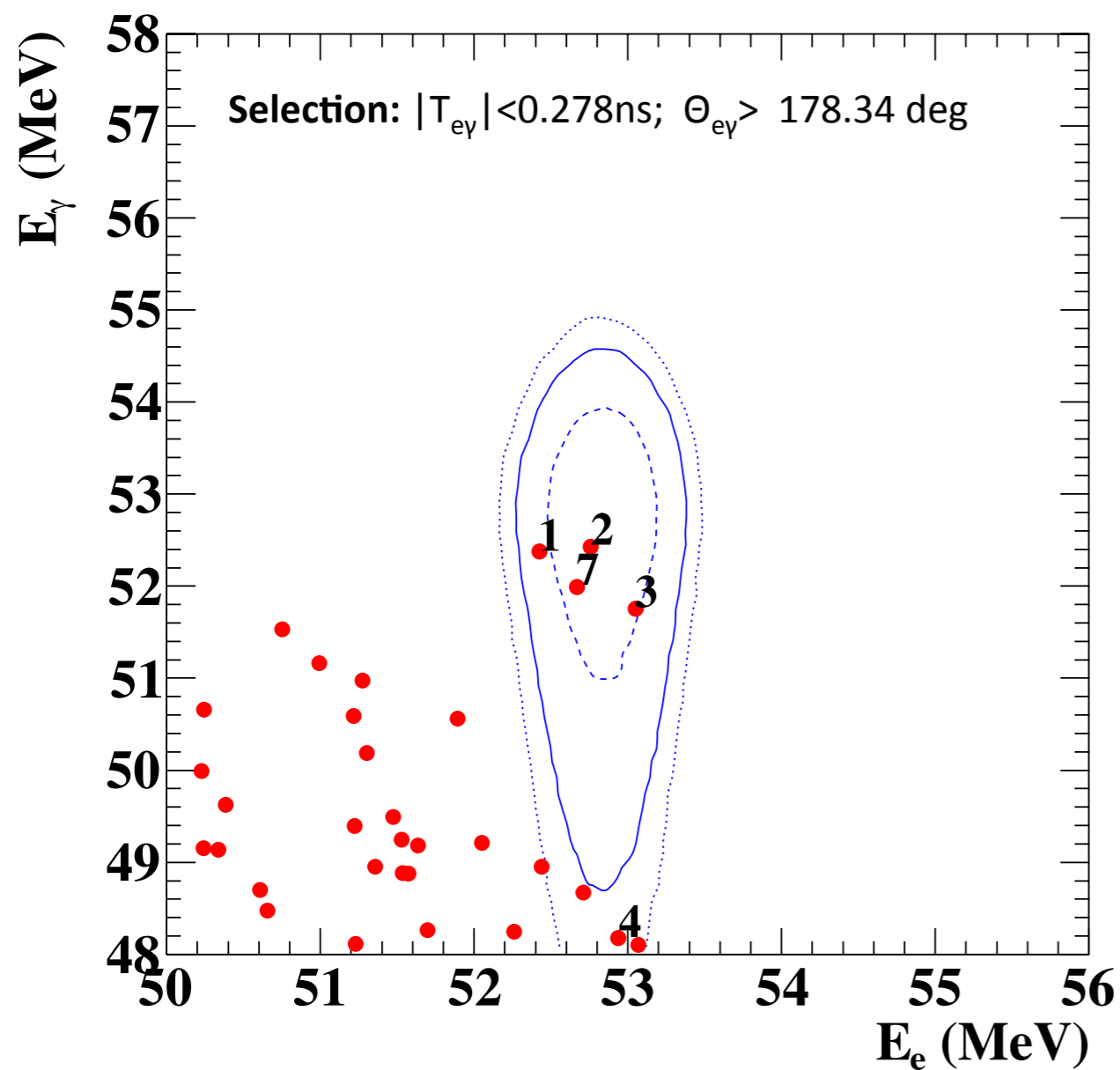
## ❖ 3つの解析グループが独立に相互チェック



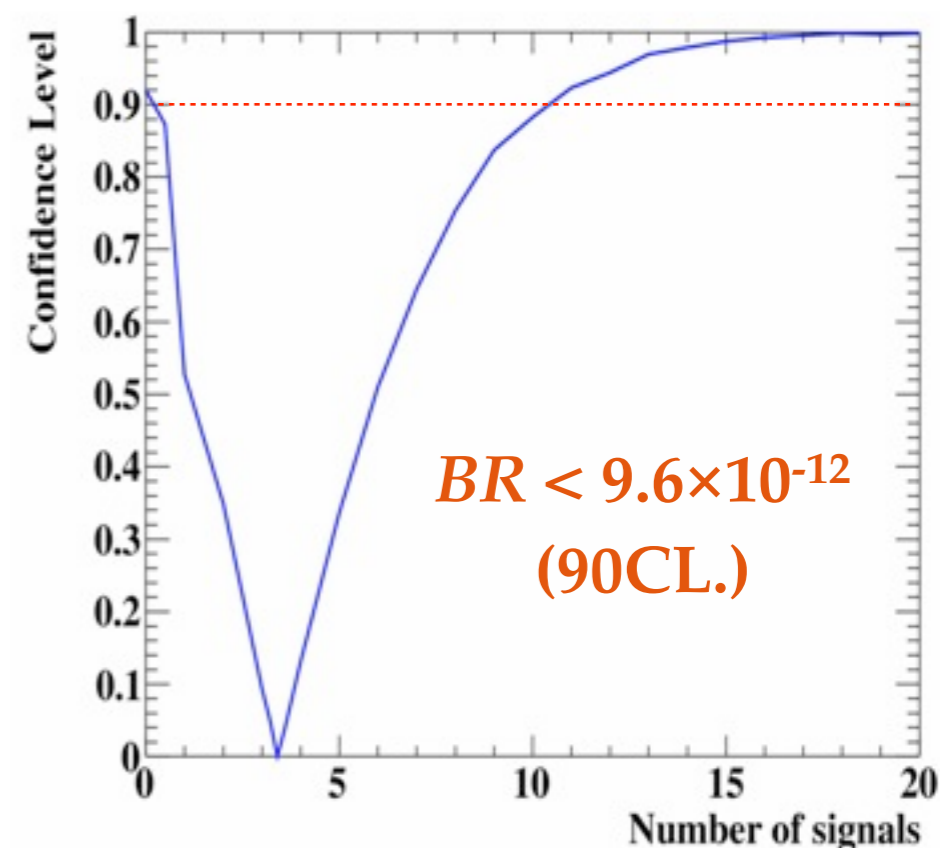
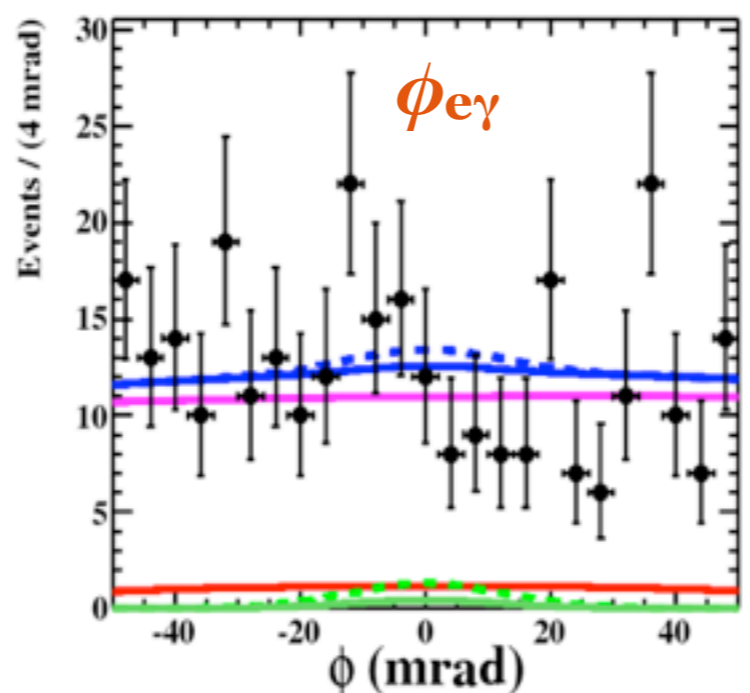
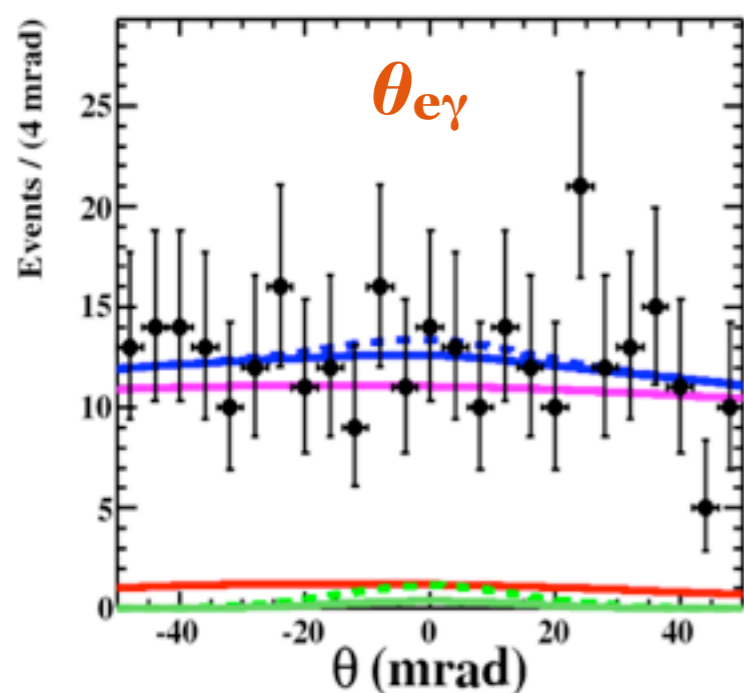
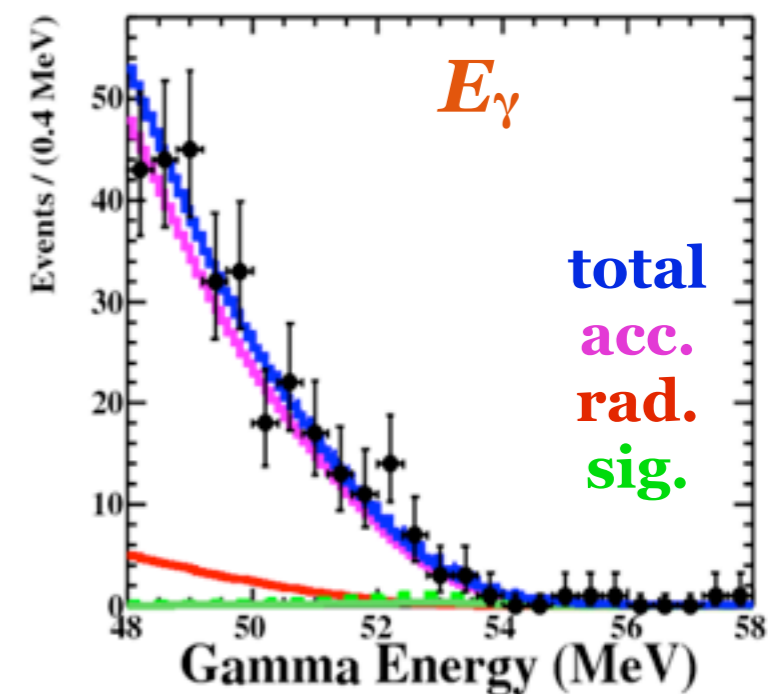
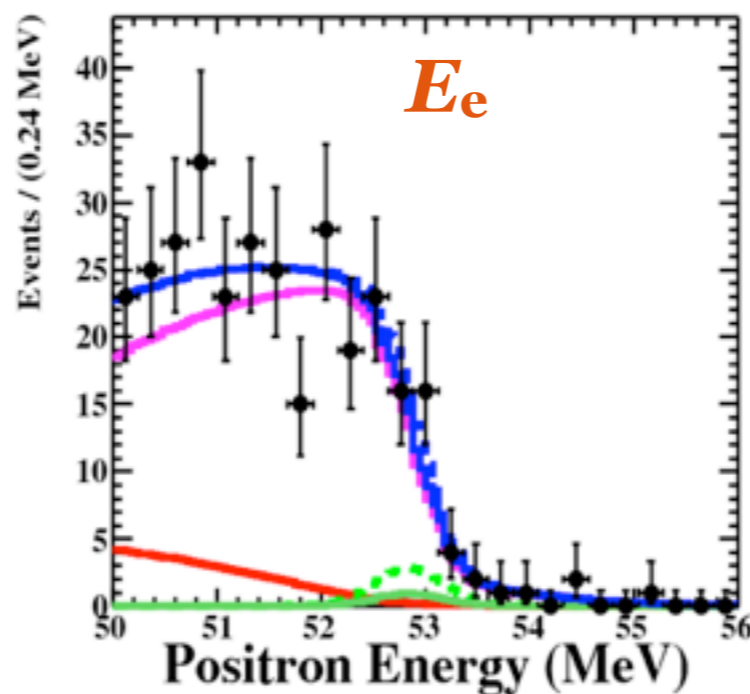
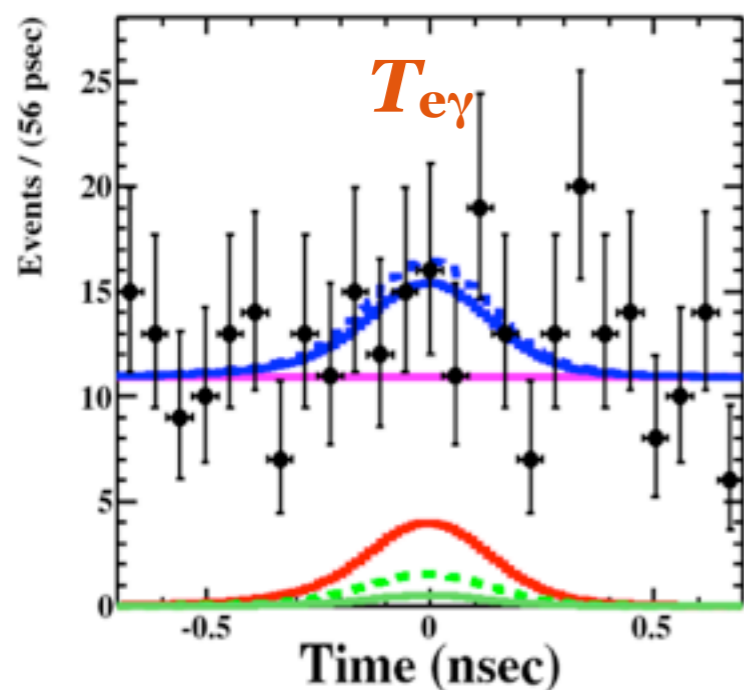
$E_\gamma$  Sig. PDF

$E_e$  BG PDF

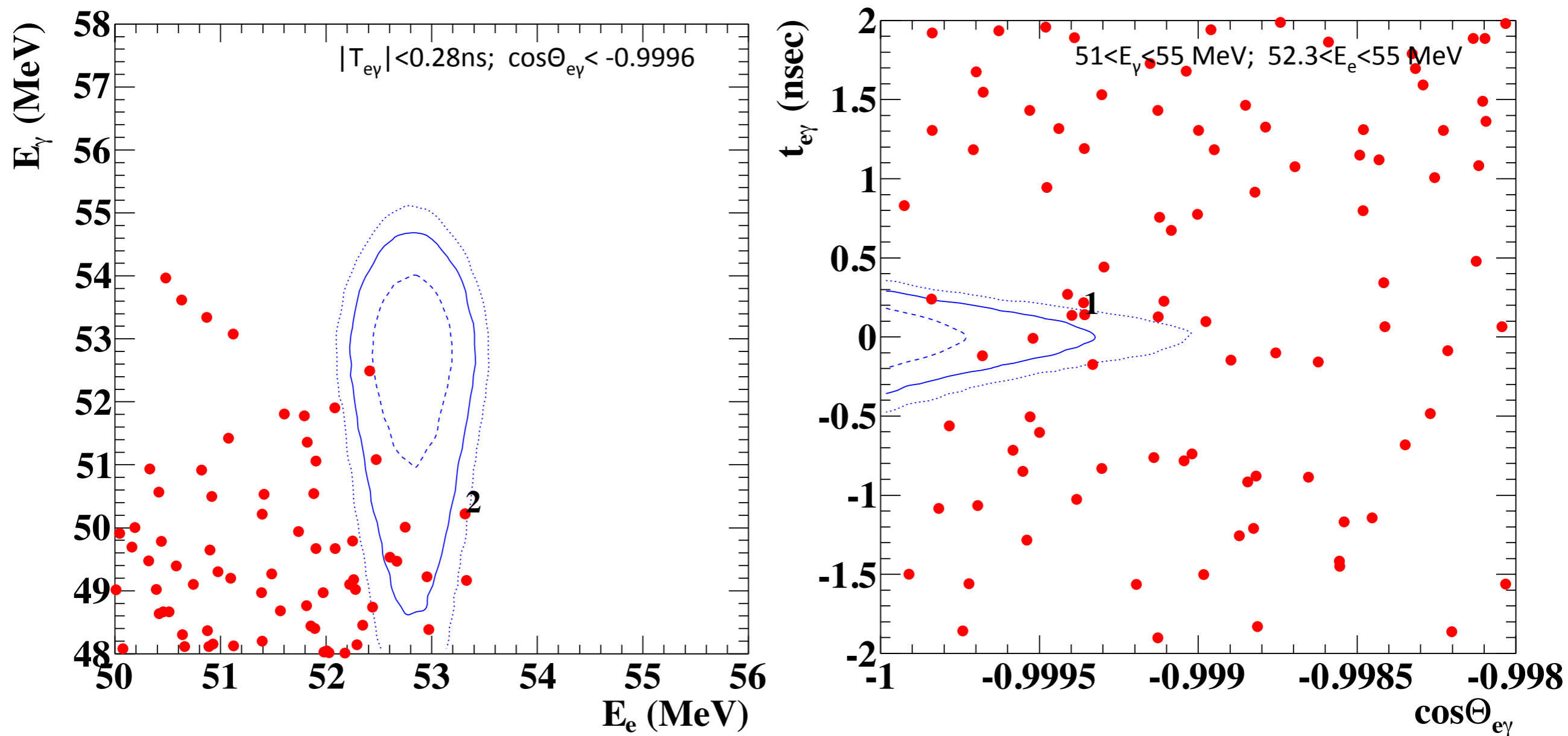
# MEG実験 - Run 2009 (Event Distribution)



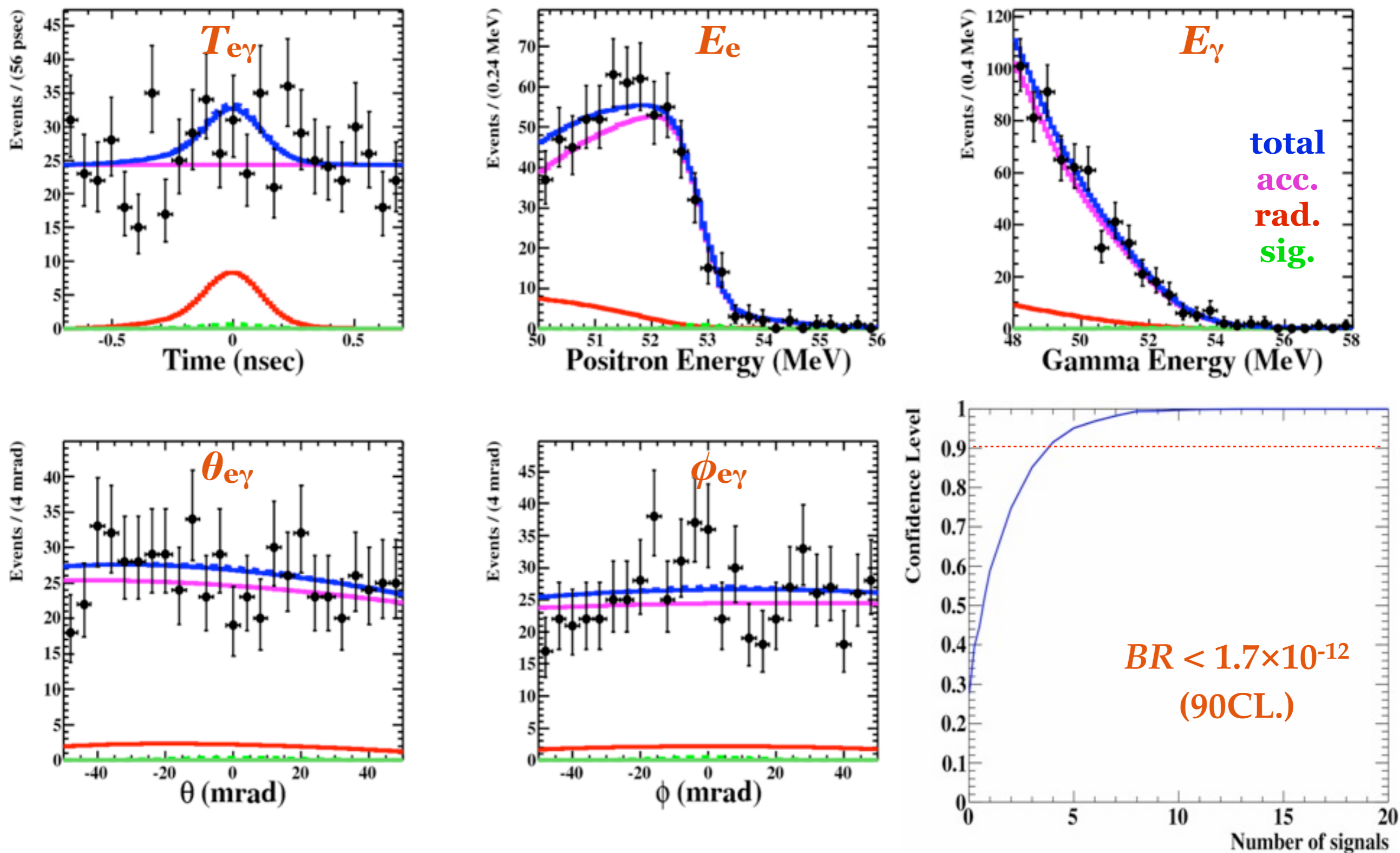
# MEG実験 - Run 2009 (LH fit / CL curve)



# MEG実験 - Run 2010 (Event Distribution)

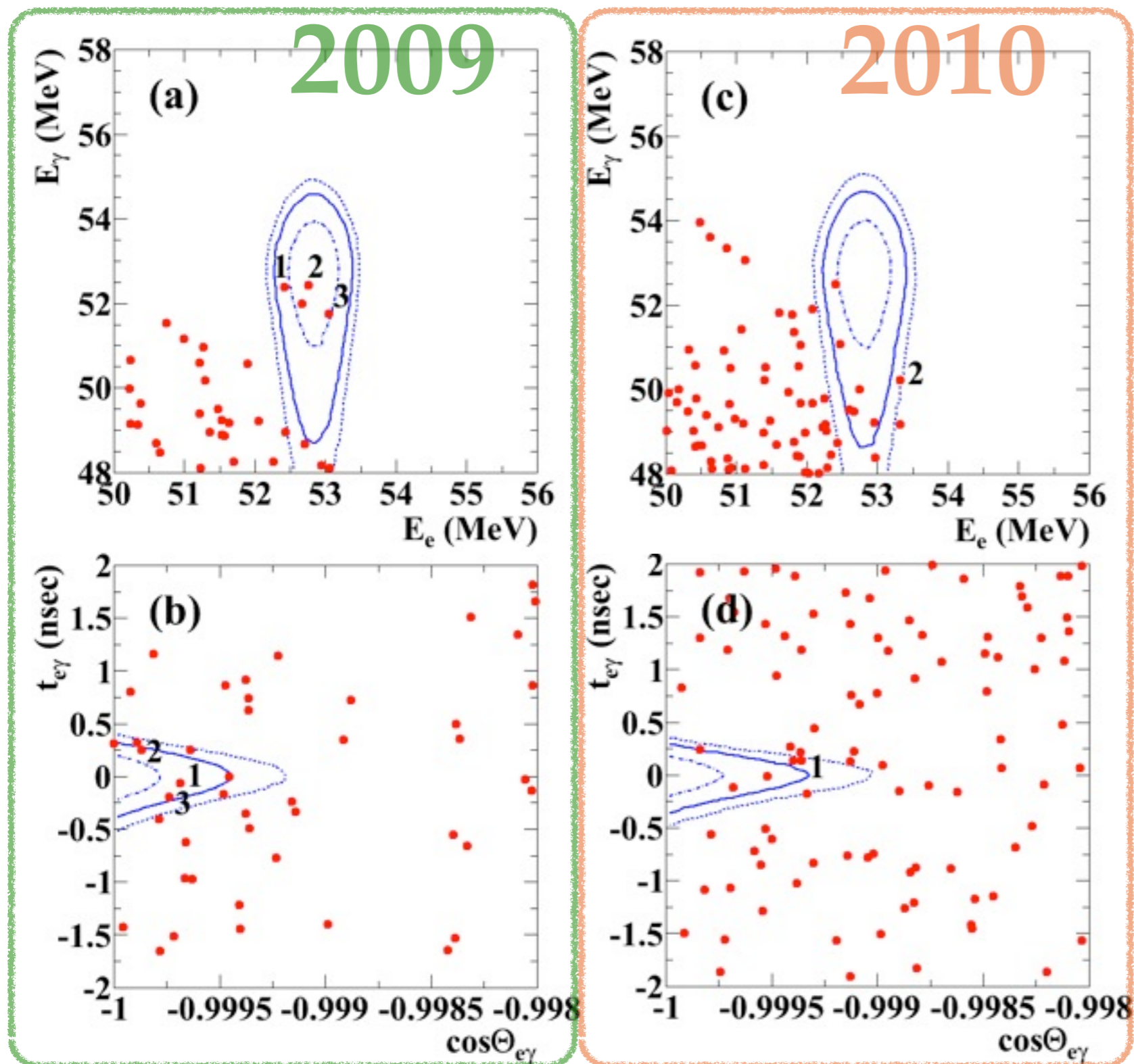


# MEG実験 - Run 2010 (LH fit / CL curve)





# MEG実験 - Run 2009/2010 Combined



	BR(fit)	LL (90CL)	UL (90CL)
2009	$3.2 \times 10^{-12}$	$1.7 \times 10^{-12}$	$9.6 \times 10^{-12}$
2010	$-9.9 \times 10^{-13}$	--	$1.7 \times 10^{-12}$
2009+ 2010	$-1.5 \times 10^{-13}$	--	<b><math>2.4 \times 10^{-12}</math></b>

- \* 2009+2010では Null Result
- \*  $\mu \rightarrow e\gamma$ のBest Limit更新
- \* factor 5 厳しい制限
- \* MEG2011は順調に進行中
- \*  $O(-13)$ の世界へ突入！！

# MEG実験 - 最新結果の詳細はこちら

## New limit on the lepton-flavour violating decay $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$

J. Adam,<sup>1,2</sup> X. Bai,<sup>3</sup> A. M. Baldini<sup>a,4</sup>, E. Baracchini,<sup>5</sup> C. Bemporad<sup>ab,4</sup>, G. Boca<sup>ab,6</sup>, P. W. Cattaneo<sup>a,6</sup>, G. Cavoto<sup>a,7</sup>, F. Cei<sup>ab,4</sup>, C. Cerri<sup>a,4</sup>, A. de Bari<sup>ab,6</sup>, M. De Gerone<sup>ab,8</sup>, T. Doke,<sup>9</sup> S. Dussoni<sup>ab,8</sup>, J. Egger,<sup>1</sup> K. Fratini<sup>ab,8</sup>, Y. Fujii,<sup>3</sup> L. Galli<sup>ab,4</sup>, G. Gallucci<sup>ab,4</sup>, F. Gatti<sup>ab,8</sup>, B. Golden,<sup>5</sup> M. Grassi<sup>a,4</sup>, D. N. Grigoriev,<sup>10</sup> T. Haruyama,<sup>11</sup> M. Hildebrandt,<sup>1</sup> Y. Hisamatsu,<sup>3</sup> F. Ignatov,<sup>10</sup> T. Iwamoto,<sup>3</sup> P.-R. Kettle,<sup>1</sup> B. I. Khazin,<sup>10</sup> O. Kiselev,<sup>1</sup> A. Korenchenko,<sup>12</sup> N. Kravchuk,<sup>12</sup> A. Maki,<sup>11</sup> S. Mihara,<sup>11</sup> W. Molzon,<sup>5</sup> T. Mori,<sup>3</sup> D. Mzavia,<sup>12,†</sup> H. Natori,<sup>3,1</sup> D. Nicolò<sup>ab,4</sup>, H. Nishiguchi,<sup>11</sup> Y. Nishimura,<sup>3,‡</sup> W. Ootani,<sup>3</sup> M. Panareo<sup>ab,13</sup>, A. Papa,<sup>1</sup> R. Pazzi<sup>ab,4,†</sup>, G. Piredda<sup>a,7</sup>, A. Popov,<sup>10</sup> F. Renga<sup>a,7,1</sup>, S. Ritt,<sup>1</sup> M. Rossella<sup>a,6</sup>, R. Sawada,<sup>3</sup> F. Sergiampietri<sup>a,4</sup>, G. Signorelli<sup>a,4</sup>, S. Suzuki,<sup>9</sup> F. Tenchini<sup>ab,4</sup>, C. Topchyan,<sup>5</sup> Y. Uchiyama,<sup>3,1</sup> R. Valle<sup>ab,8,§</sup>, C. Voena<sup>a,7</sup>, F. Xiao,<sup>5</sup> S. Yamada,<sup>11</sup> A. Yamamoto,<sup>11</sup> S. Yamashita,<sup>3</sup> Yu. V. Yudin,<sup>10</sup> and D. Zanella<sup>a,7</sup>

(MEG Collaboration)

<sup>1</sup>Paul Scherrer Institut PSI, CH-5232 Villigen, Switzerland

<sup>2</sup>Swiss Federal Institute of Technology ETH, CH-8093 Zürich, Switzerland

<sup>3</sup>ICEPP, University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>4</sup>INFN Sezione di Pisa<sup>a</sup>; Dipartimento di Fisica<sup>b</sup> dell'Università, Largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

<sup>5</sup>University of California, Irvine, CA 92697, USA

<sup>6</sup>INFN Sezione di Pavia<sup>a</sup>; Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica<sup>b</sup> dell'Università, Via Bassi 6, 27100 Pavia, Italy

<sup>7</sup>INFN Sezione di Roma<sup>a</sup>; Dipartimento di Fisica<sup>b</sup> dell'Università "Sapienza", Piazzale A. Moro, 00185 Roma, Italy

<sup>8</sup>INFN Sezione di Genova<sup>a</sup>; Dipartimento di Fisica<sup>b</sup> dell'Università, Via Dodecaneso 33, 16146 Genova, Italy

<sup>9</sup>Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

<sup>10</sup>Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

<sup>11</sup>KEK, High Energy Accelerator Research Organization 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

<sup>12</sup>Joint Institute for Nuclear Research, 141980, Dubna, Russia

<sup>13</sup>INFN Sezione di Lecce<sup>a</sup>; Dipartimento di Fisica<sup>b</sup> dell'Università, Via per Arnesano, 73100 Lecce, Italy

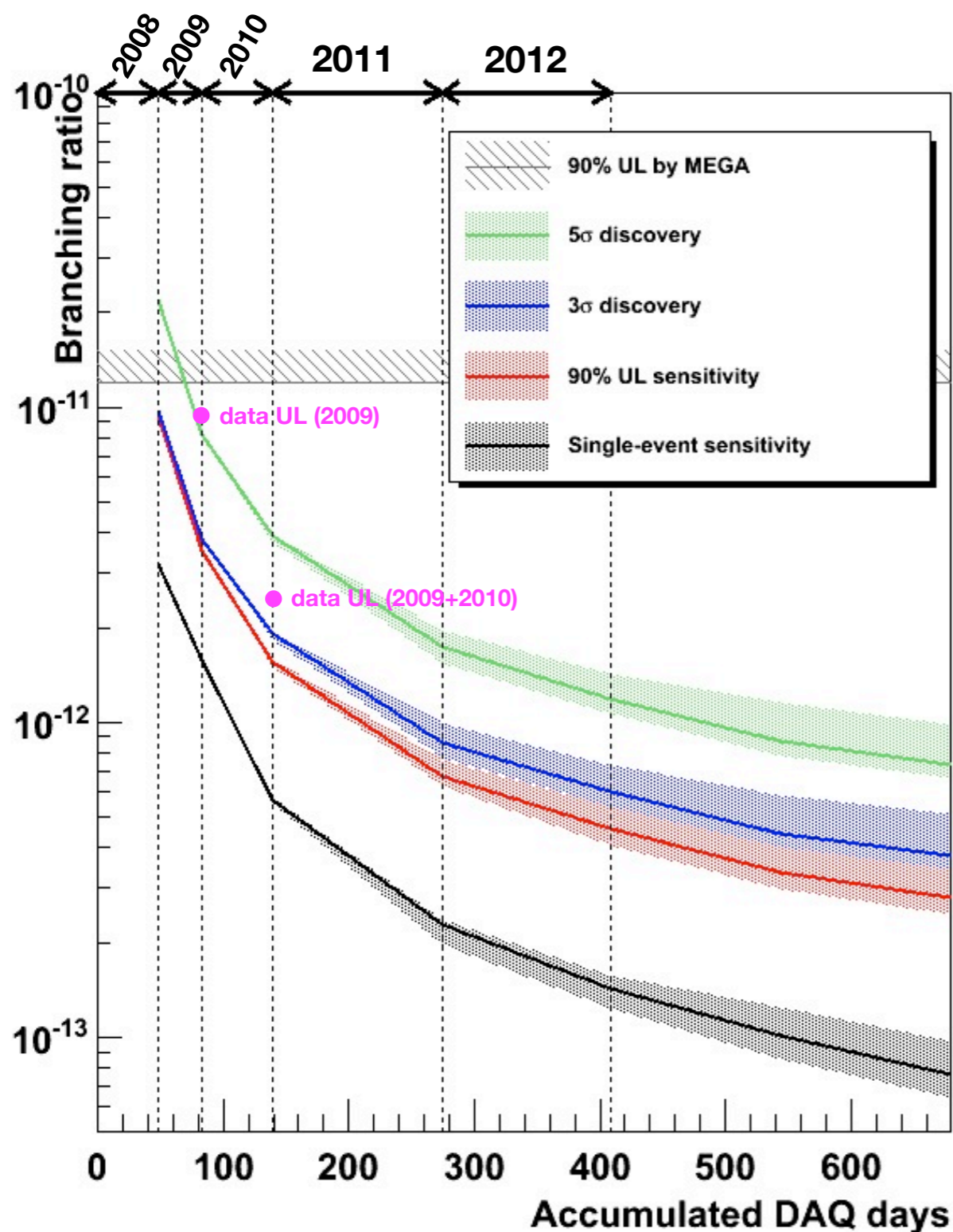
(Dated: August 2, 2011)

We present a new result based on an analysis of the data collected by the MEG detector at the Paul Scherrer Institut in 2009 and 2010, in search of the lepton flavour violating decay  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ . The likelihood analysis of the combined data sample, which corresponds to a total of  $1.8 \times 10^{14}$  muon decays, gives a 90% C.L. upper limit of  $2.4 \times 10^{-12}$  on the branching ratio of the  $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$  decay, constituting the most stringent limit on the existence of this decay to date.

**hep-ex / 1107-5547**

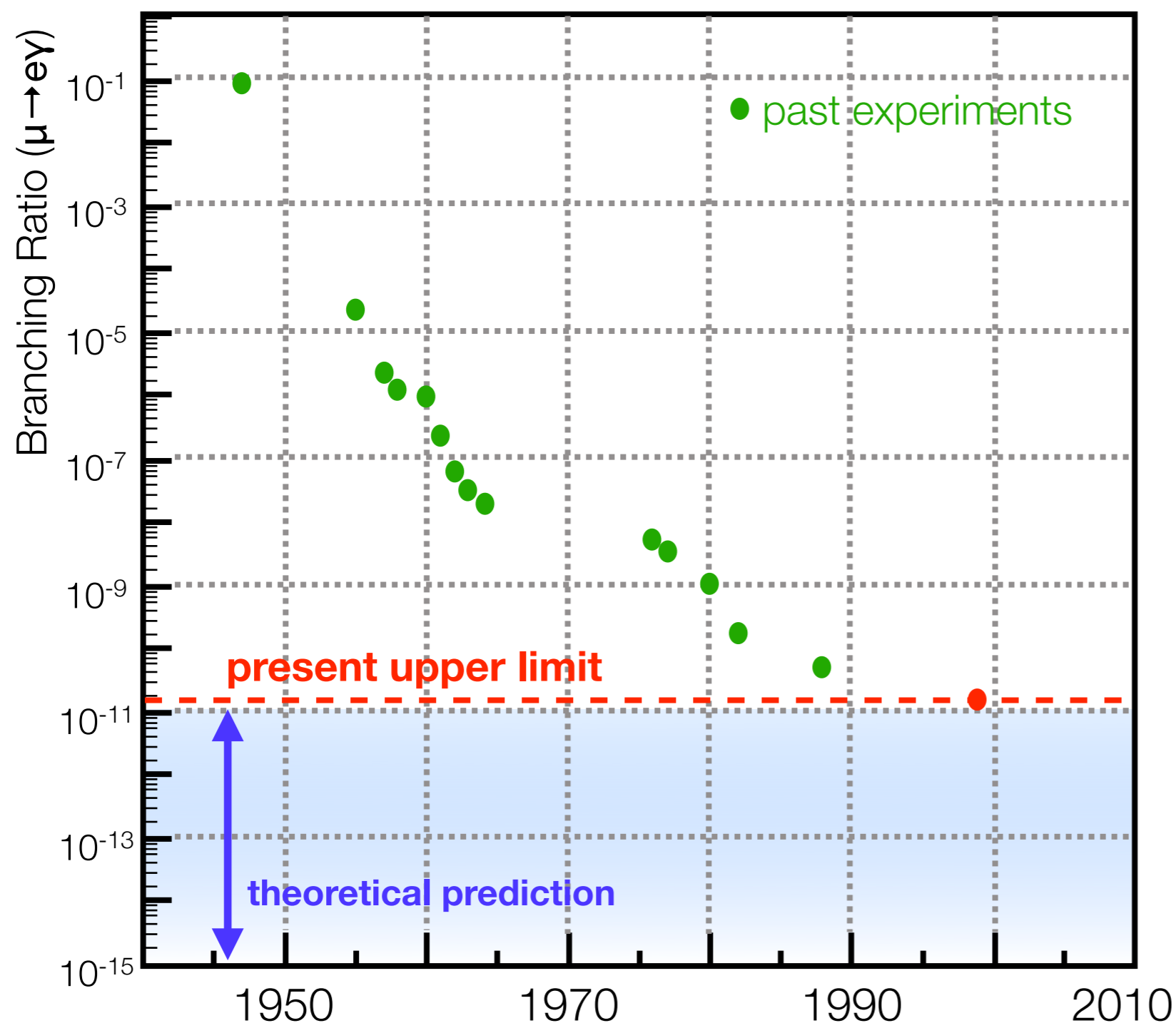
**(submitted to PRL)**

# MEG実験 - 今後の展望



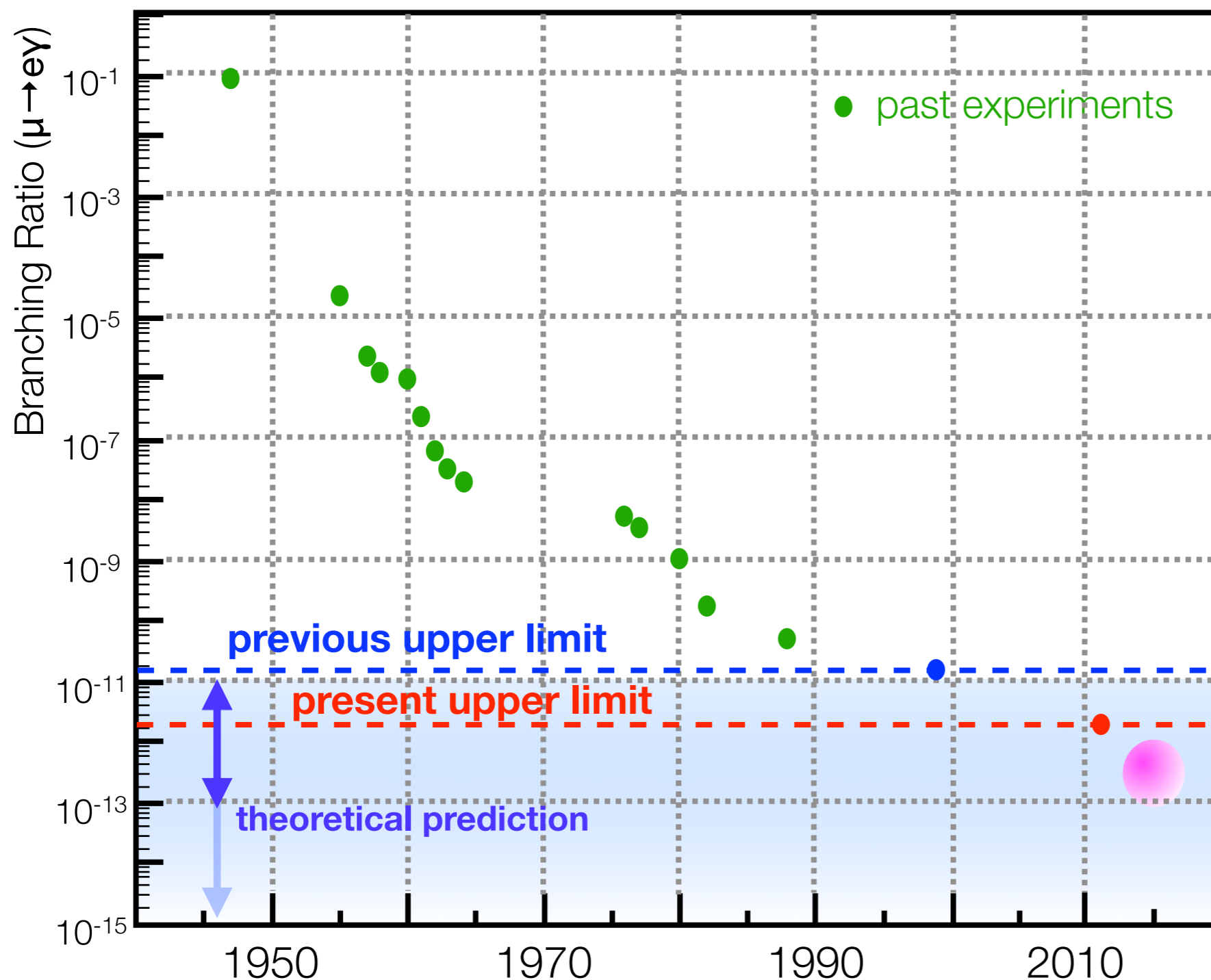
- ❖ RUN2009+2010でBest Limit更新
- ❖ RUN2011は順調に進行中
- ❖  $O(10^{-13})$ の世界へ突入！！
- ❖ RUN2012まで現状（+minor UG）で
- ❖ RUN2013以降は更なる改良も検討中
- ❖ eg. cable総交換によるpositron spectrometerのefficiency向上 etc.

# $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索 - 過去・現在・未来



History of  
 $\mu \rightarrow e \gamma$   
 (60年余の歴史！)

# $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索 - 過去・現在・未来



History of  
 $\mu \rightarrow e \gamma$   
**UPDATED**  
 (60年余の歴史！)

# 今後10年の話題

---

---

## 将来計画検討小委員会の「将来計画の策定に向けた提言」のうち、ミューオン実験に関する箇所の抜粋

最も早期発見の期待が高まっているものが、MEG実験での $\mu \rightarrow e \gamma$ 事象である。これが発見された場合には、SuperKEKBにおける $\tau$ のレプトンフレーバーを破る稀崩壊探索に加えて、J-PARCにおける $\mu \rightarrow e$  転換探索実験を強く推進すべきである。ミューオンの $g-2$ 精密測定・EDM探索実験は、米国フェルミ研究所との競合が予想される中、競争と協力を考えながら主導的に推進することが望まれる。

# J-PARC でのミュオン実験プログラム

## ❖ muon LFV

- ❖ 2つの $\mu N \rightarrow e N$ 実験プロポーザル
- ❖ ハドロンホールで**COMET** (正当派、MECO-like実験) : E21
- ❖ MLFで**DeeMe** (ゲリラ部隊(?), 安く早く) : P41

## ❖ muon g-2/EDM

- ❖ MLFで、Magic  $\gamma$  を使わない新しいコンセプトの実験

## ❖ muonium HFS

- ❖ MLFで、先の実験の100倍統計で新実験



# $\mu N \rightarrow e N$ ってホントに必要？

❖  $\mu \rightarrow e \gamma$  だけじゃダメなんです。

❖ 理由 1 : 到達実験感度が違う

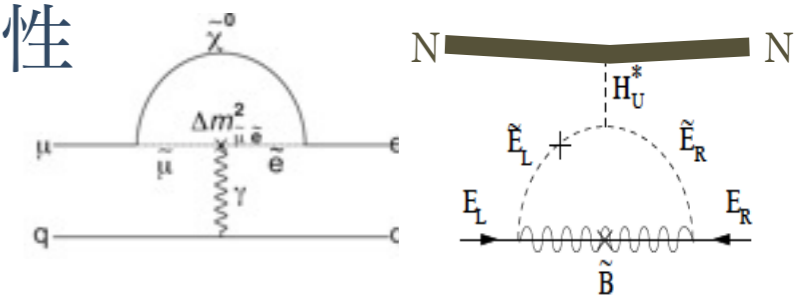
❖  $\mu N \rightarrow e N$  探索はビーム強度で制限されない

❖  $\mu \rightarrow e \gamma$  (discovery 実験) /  $\mu N \rightarrow e N$  (measurement 実験)

❖ 理由 2 : non-photonic 過程にも感度

❖  $\mu \rightarrow e \gamma$  で null result でも  $\mu N \rightarrow e N$  で発見出来る可能性

❖ モデル依存性の追求に不可欠



❖ 理由 3 : LFV 実験の将来は「分岐比の比」を測ることが不可欠

❖ 例) photonic dominant と仮定すると  $B(\mu \rightarrow e \gamma) / B(\mu N \rightarrow e N) \sim O(10^2)$  を予言しているが、例えば Little Higgs などでは  $B(\mu \rightarrow e \gamma) / B(\mu N \rightarrow e N) \sim 1$ 。

“ $\mu \rightarrow e \gamma$ ” vs. “ $\mu N \rightarrow e N$ ”

	$\mu \rightarrow e \gamma$	$\mu N \rightarrow e N$
B.G.	Accidental	Beam
challenge	Detector Performance	Beam Quality
muon source	DC muon	Pulsed muon
beam intensity	(almost) limited	no limitation

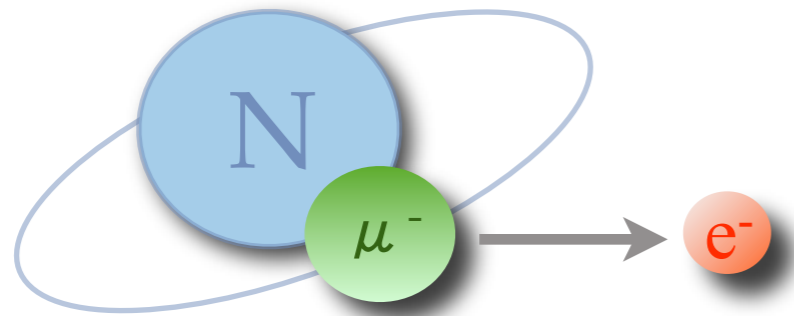
- \*  $\mu \rightarrow e \gamma$  : accidental B.G.  $\propto$  (rate)<sup>2</sup>
- \* MEG (and its upgrade) may be the final experiment.
- \*  $\mu N \rightarrow e N$  : Required Beam is still not Realized.
- \* Once we would obtain a required beam,  $\mu$ -e conversion might be a next step.

discovery

measurement

# $\mu N \rightarrow eN$ 探索実験 : Signal & BG

## • Signal



- $E_e = m_\mu - B_\mu \sim 105 \text{ MeV}$
- coherent process ( $Z_{\text{ini}} = Z_{\text{end}}$ )

Single Mono-Energetic Electron

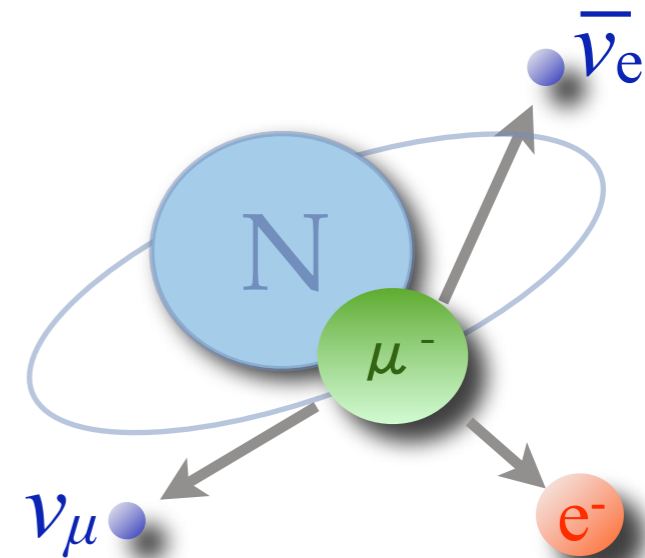
use  $\mu^-$  to be captured inside stopping target

Background dominated by **Beam Quality**

- Wait until pion decays
- **Pulsed** Beam is the best

## • Backgrounds

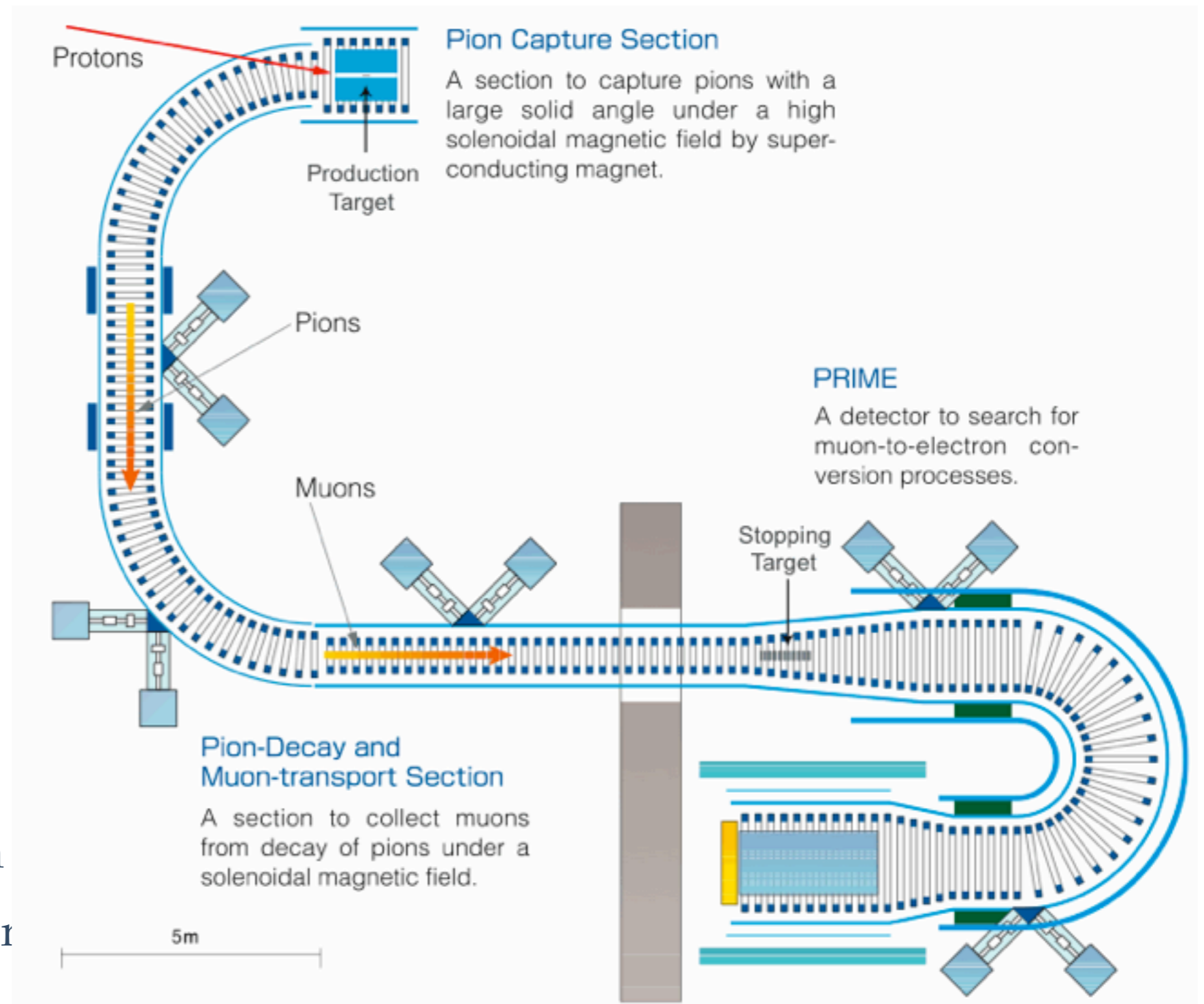
- muon decay in orbit



- radiative muon capture
- radiative pion capture
- electrons from muon DiF
- cosmic rays

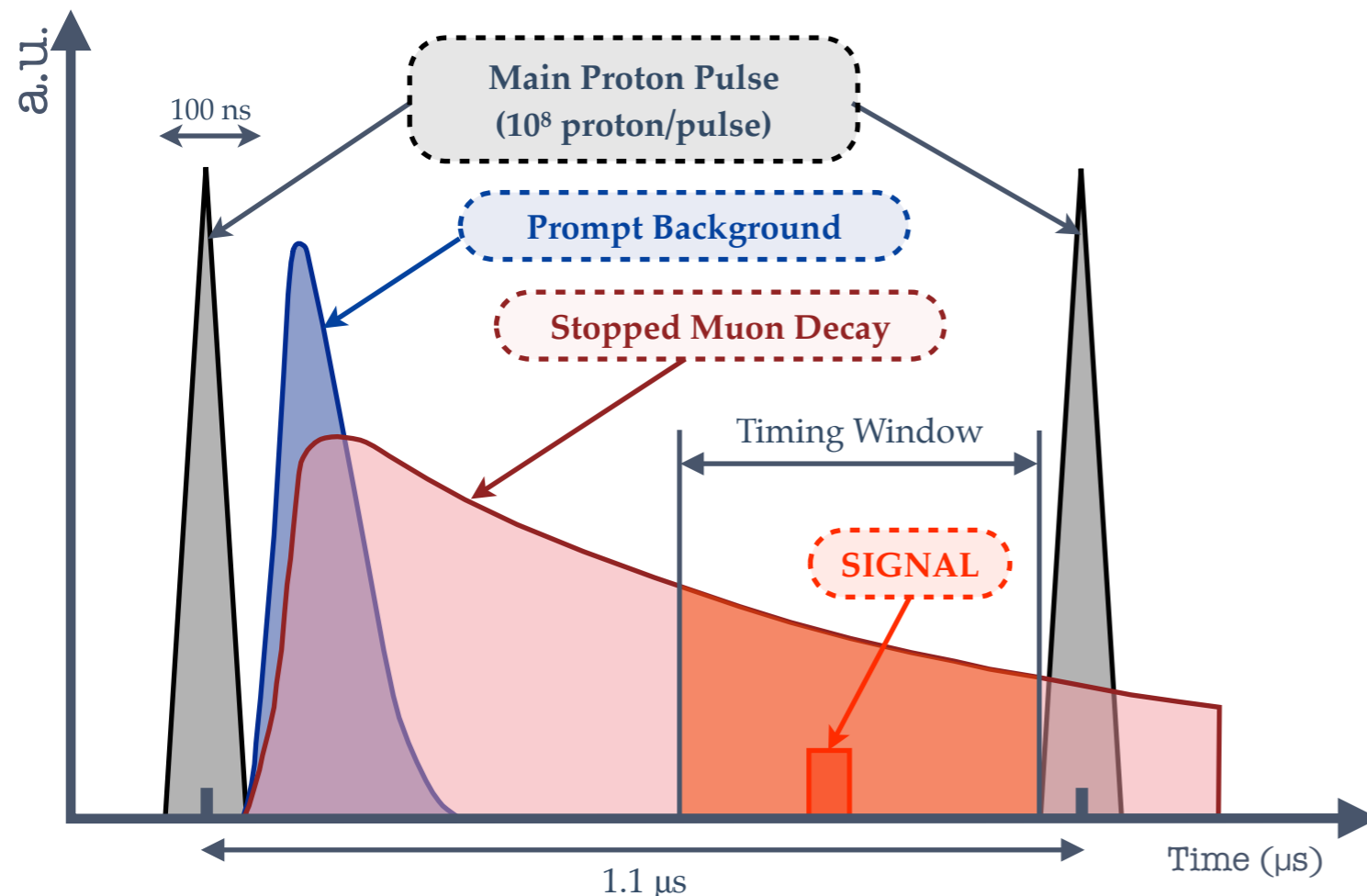
# ハドロンホールで COMET 実験 : E21

- ❖  $\mu N \rightarrow e N$  を S.E.S.  
 $2.6 \times 10^{-17}$  の感度で探索
- ❖ J-PARC のパルス陽子  
 ビームから **bunched-  
 slow extraction**
- ❖ pion production target  
 in a solenoid magnet
- ❖ Muon transport &  
 electron momentum  
 analysis using **C-shape  
 solenoids**
- ❖ momentum selection
- ❖ Tracker and Calorimeter  
 to measure electrons



# COMET実験：陽子ビーム requirement

- \*  $\tau_{\text{muonic}}$  : eg.  $\tau_{\text{muonic}}(\text{Al}) \sim 880\text{ns}$
- \* Prompt BG. を抑えるため、 $10^{-9}(-10)$ のオーダーでのextinction達成が不可欠



- \* RCSで空バケツを作る (harmonics=2で1fill)
- \* MRはh=9で3個fillして十分なpulse間隔を持つ。
- \* **Beam Parameters;**
  - \* power : 56 kW
  - \* energy : 8 GeV
  - \* current : 7 microA

# COMET実験：Status

\* Extinction を実際にJ-PARCで測定(2010)

\* **FX** : abort line でスタディ

\* **SX** : ハドロンホールで実測

\* Extinction  $\sim O(10^{-7})$

\* **double kicking** を検証

\* 更なる  $O(10^{-6})$  向上を確認

\* Superconducting Solenoidデザイン

\* コイル線材スタディ

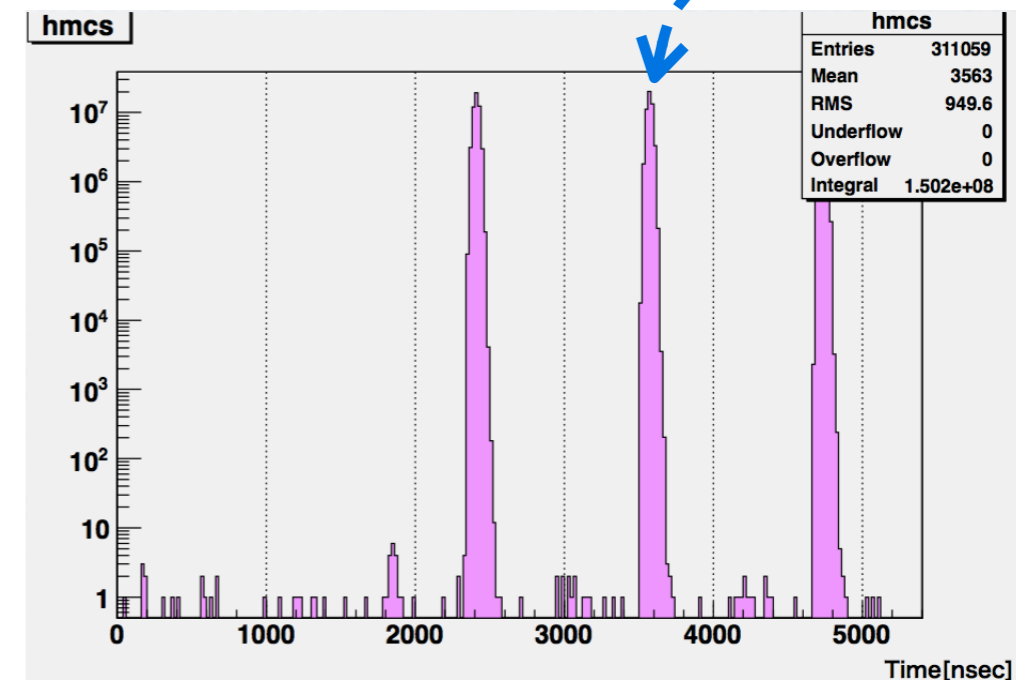
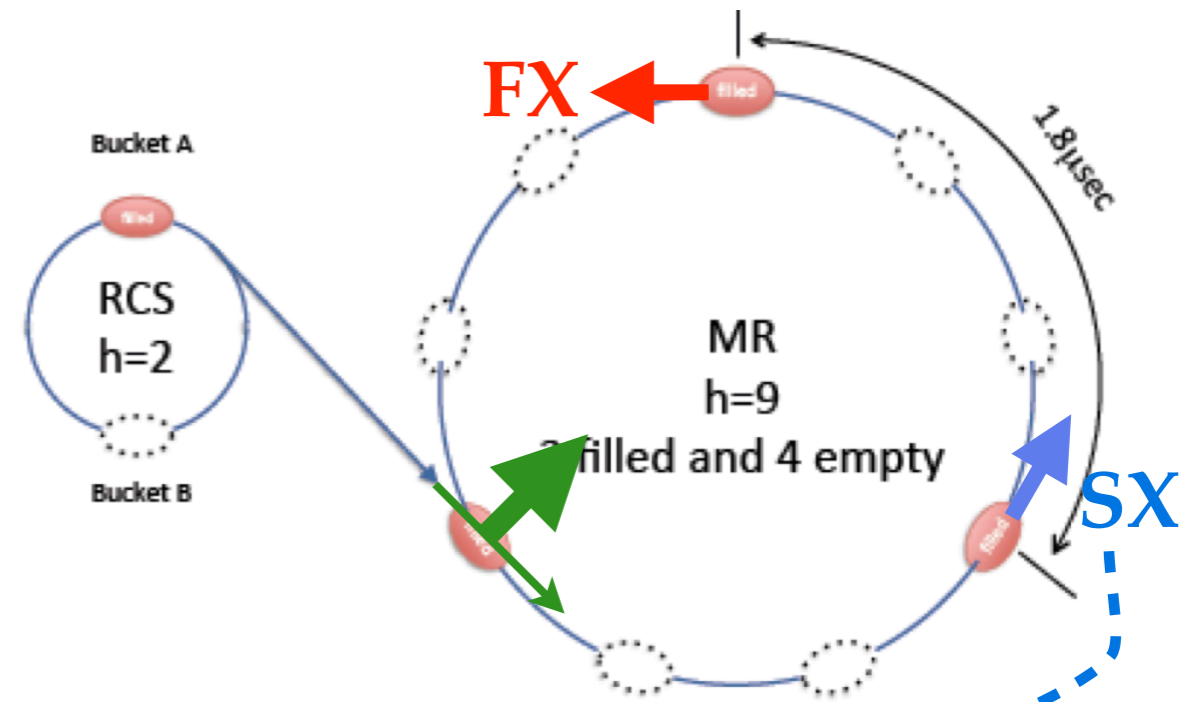
\* 中性子照射試験

\* コイルエンジニアリング設計

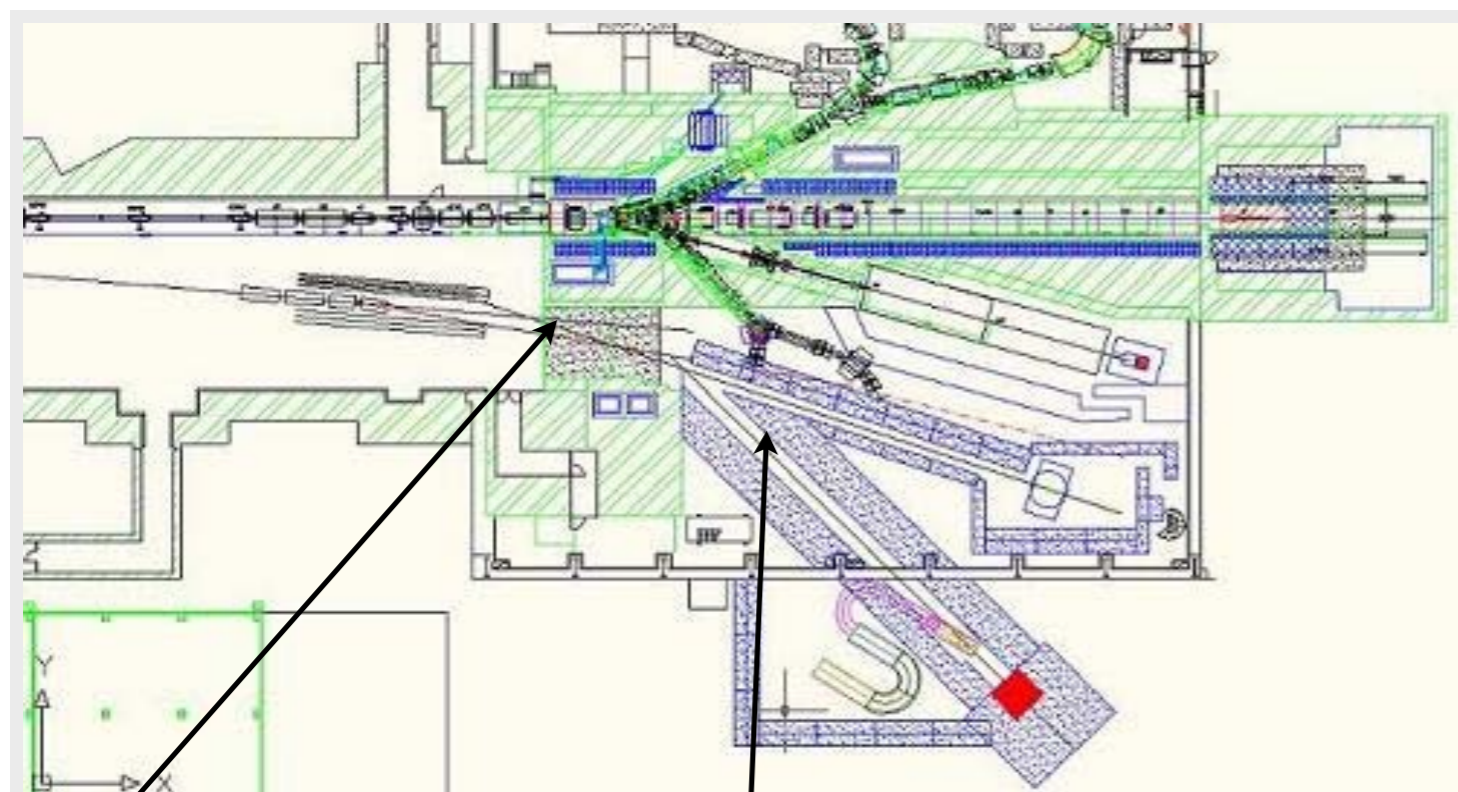
\* 検出器R&D

\* Crystalテストビーム実験

\* 真空中でのトラッカーR&D

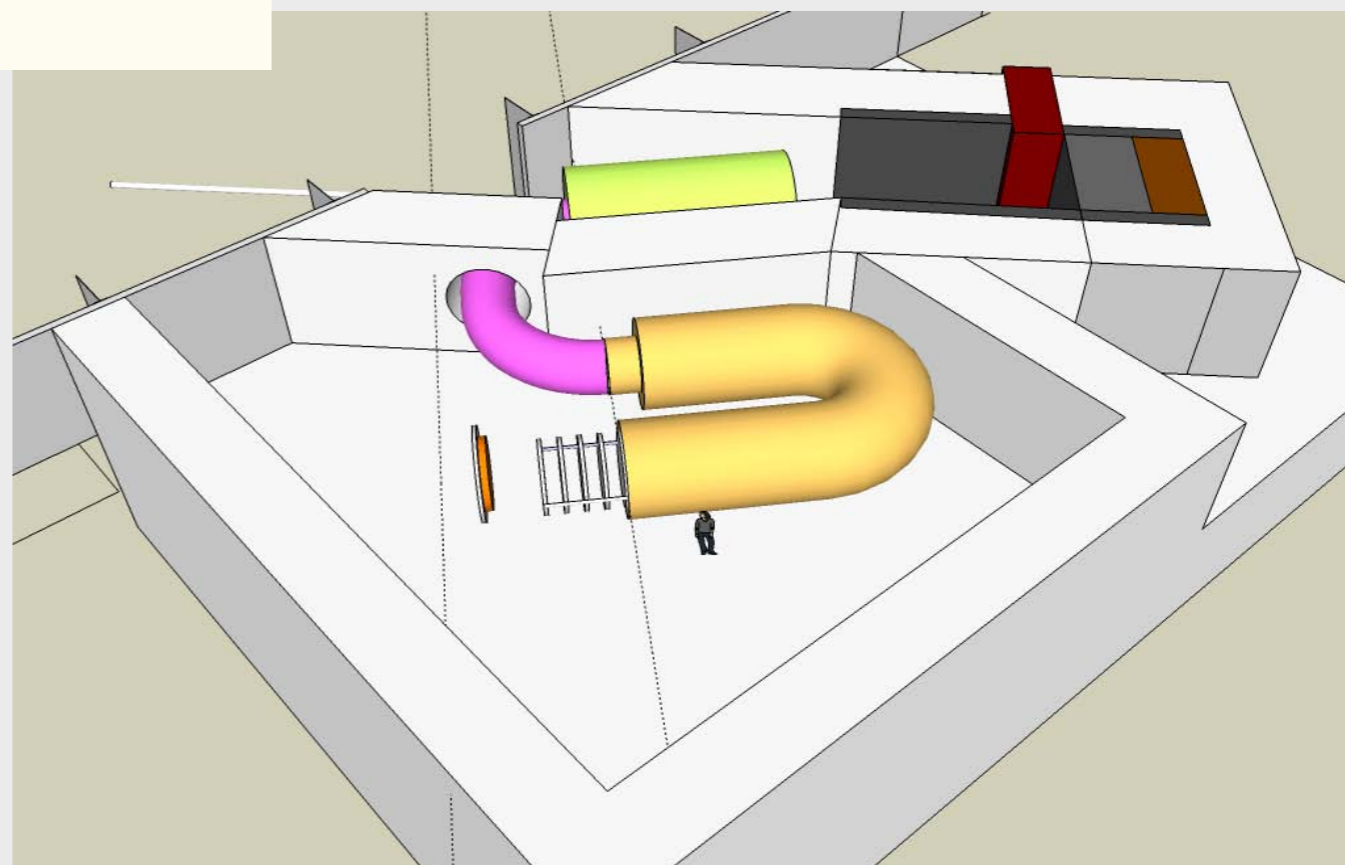
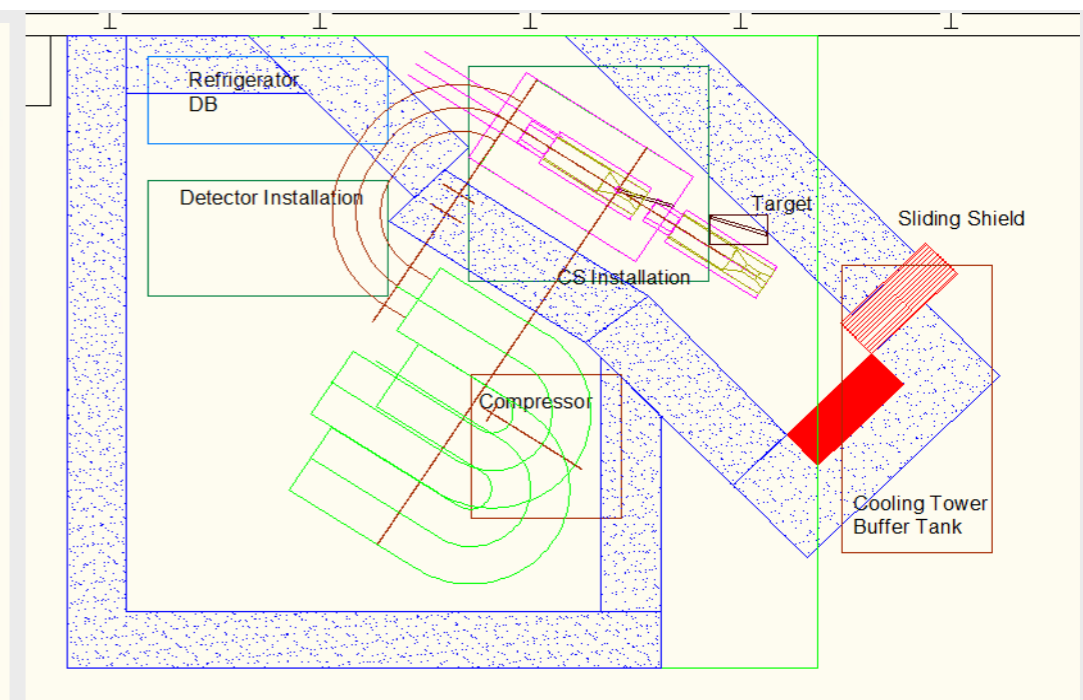


# COMET実験：Layout



high-momentum  
proton beamline

proton beamline  
for COMET



# COMET実験：今後の展望

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
MR studies	studies							
Proton beamline			construction					
Pion capture			construction			installation		
Muon transport				construction		installation		
Detector				construction		installation		
infrastructure				construction		installation		
data taking							engineering	physics run

(!) Kuno-san's informal estimation, To be updated.



# MLFでのミュオン実験 (高エネルギー)

## ❖ J-PARC MLF MUSE

### ❖ D-Line

- ❖ Decay Muon Line
- ❖ 稼働中

### ❖ U-Line

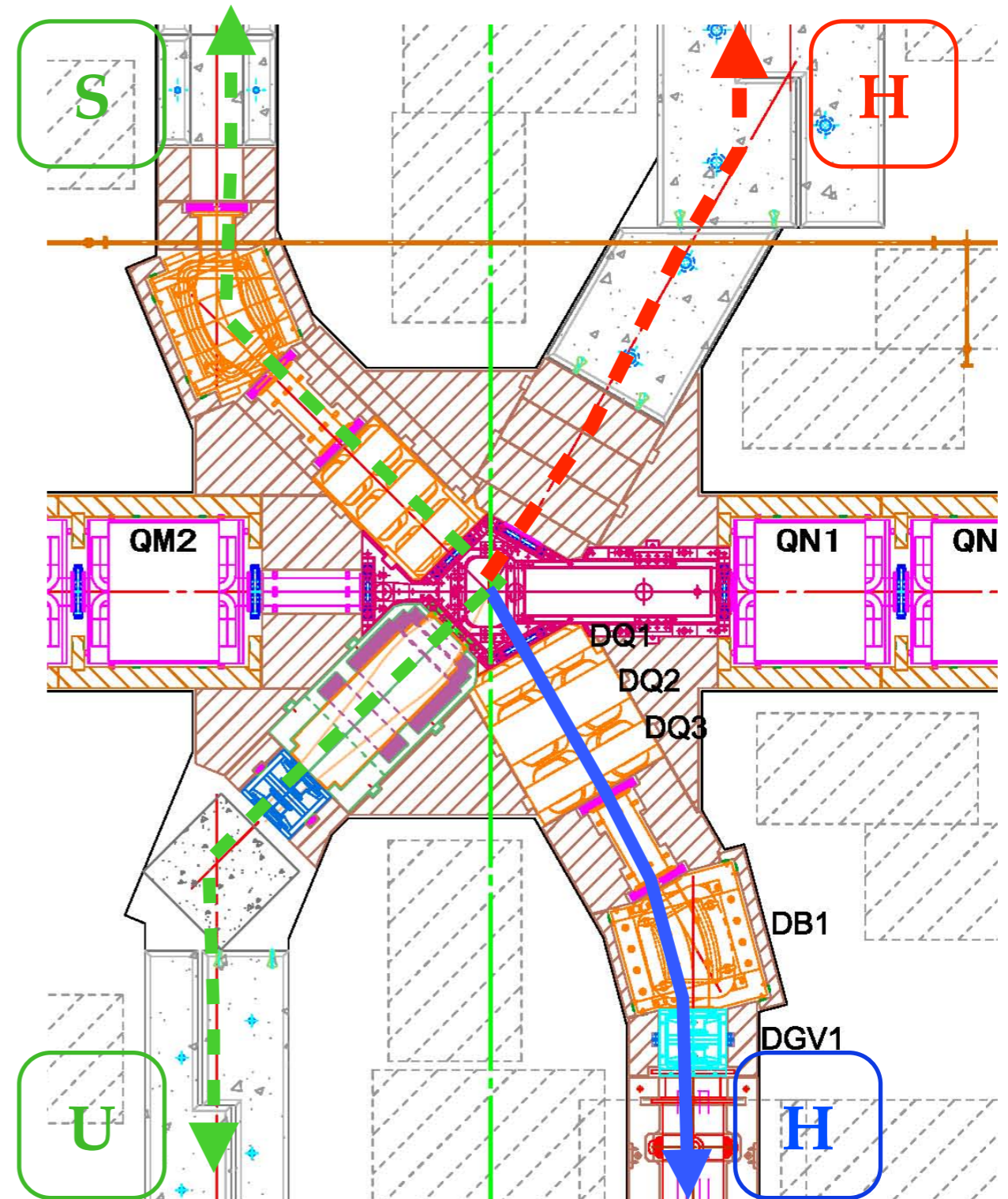
- ❖ Ultra-slow Muon Line
- ❖ 建設中

### ❖ S-Line

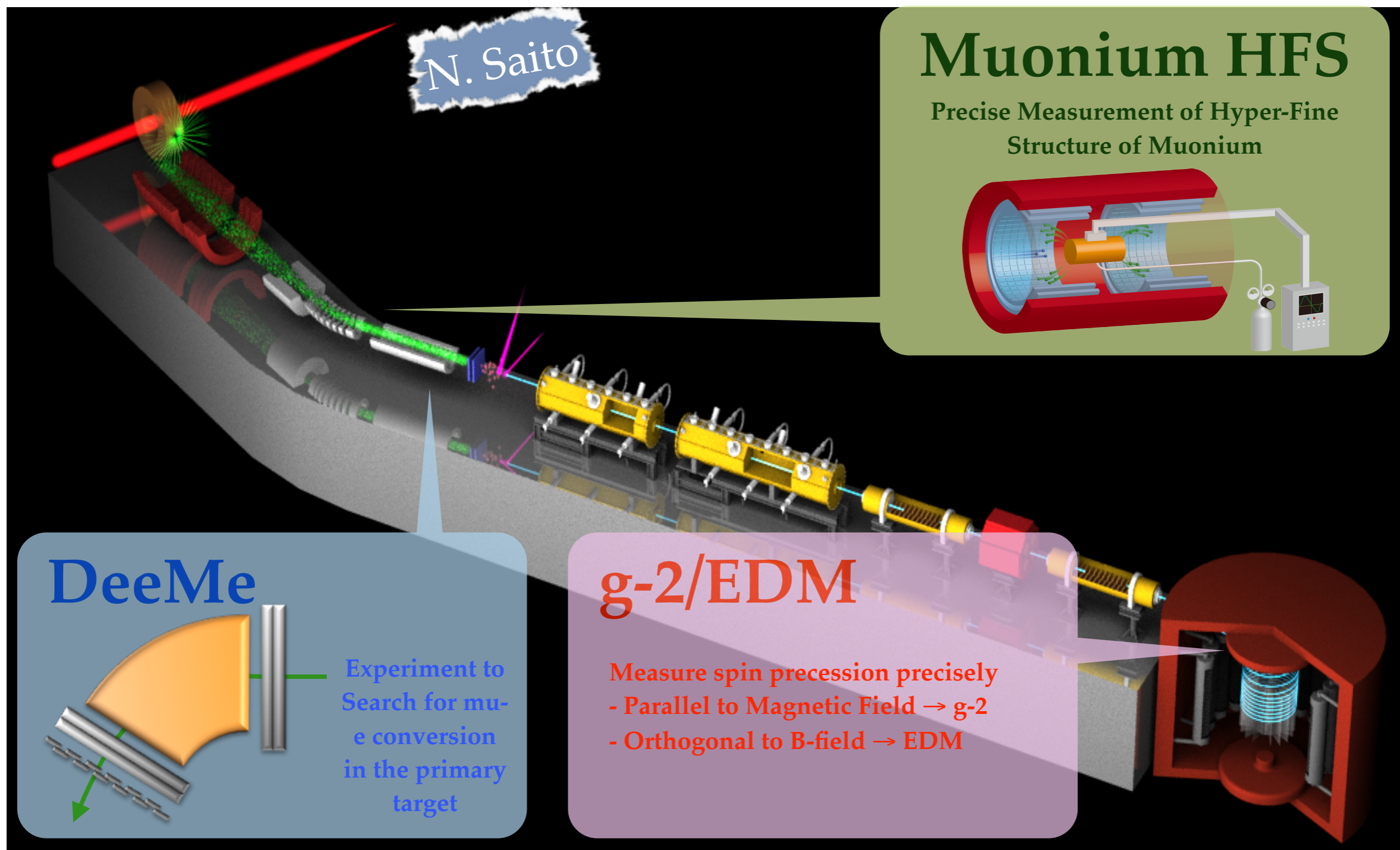
- ❖ Surface Muon Line
- ❖ 建設中

### ❖ H-line

- ❖ High-Momentum Line
- ❖ 新たに建造計画



# H-Lineでミュオン実験3連発



# muon g-2 測定原理

## ❖ Muon Magnetic Moment

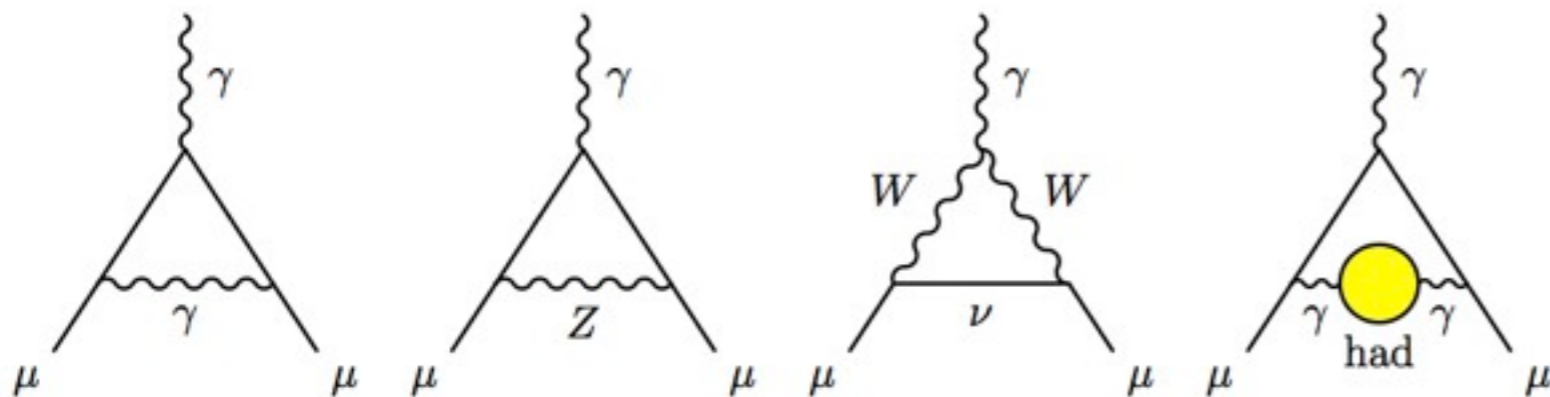
- ❖ Magnetic moment and spin can be related as

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

- ❖ Dirac equation predicts 'g=2'

$$\mu = (1 + a) \left( \frac{e\hbar}{2m} \right), \quad a = \frac{g - 2}{2}$$

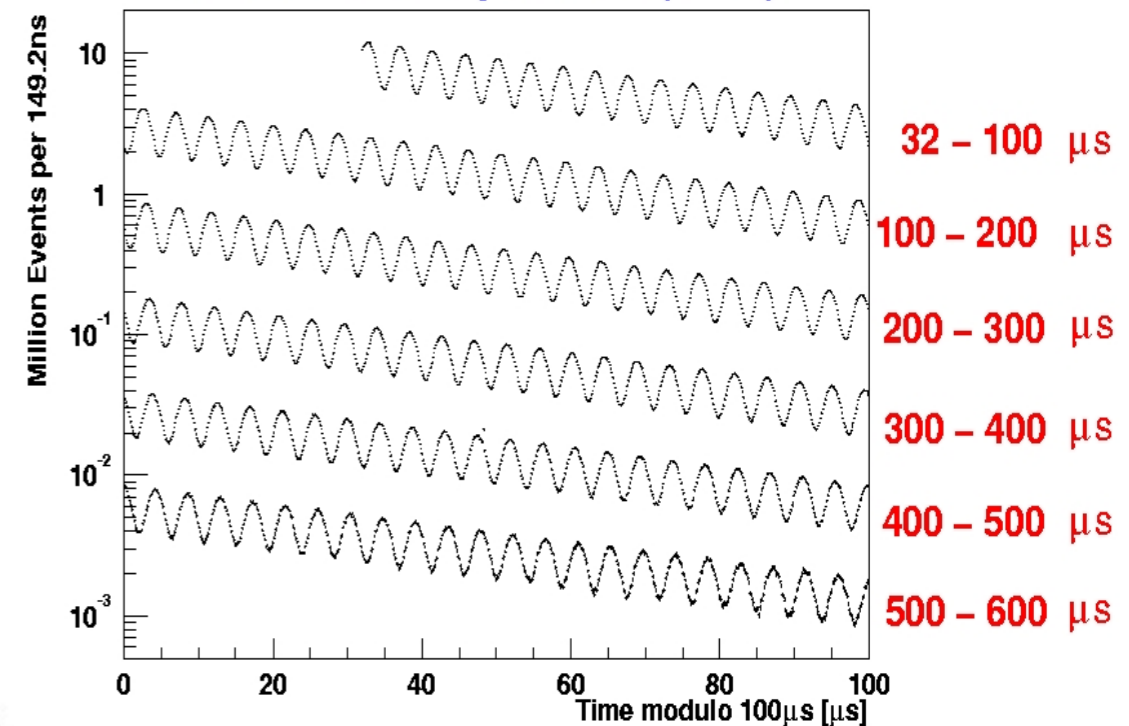
- ❖ Radiative corrections would make g≠2



## ❖ Muon Spin Precession

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

electron time spectrum (2001)



# muon g-2 測定で便利な “Magic $\gamma$ ”

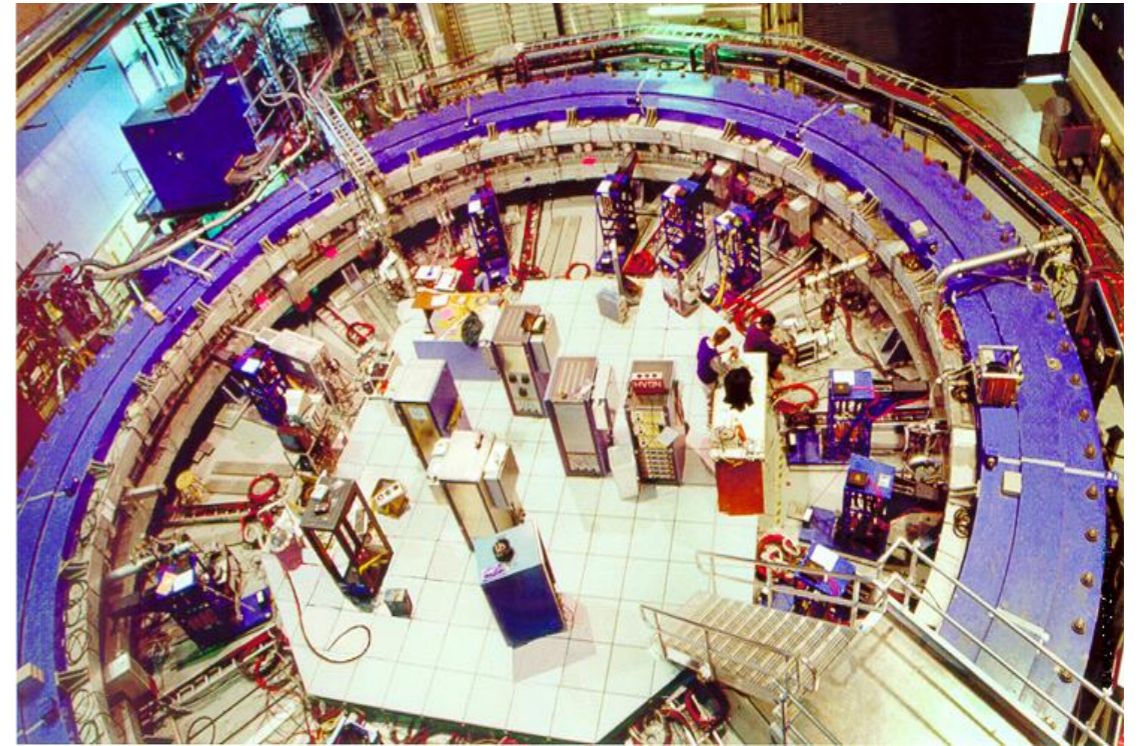
- \* Magic  $\gamma$  technique

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

- \*  $\gamma_{\text{magic}} = 29.3$
- \*  $p_{\text{magic}} = 3.09 \text{ GeV}/c$

→  $\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m} a_{\mu} \vec{B}$

- \* E821 Experiment @ BNL



- \* Current Precision

$$\begin{aligned} \Delta a_{\mu}^{\text{today}} &= a_{\mu}^{(\text{exp})} - a_{\mu}^{(\text{SM})} \\ &= (295 \pm 88) \times 10^{-11} \end{aligned}$$

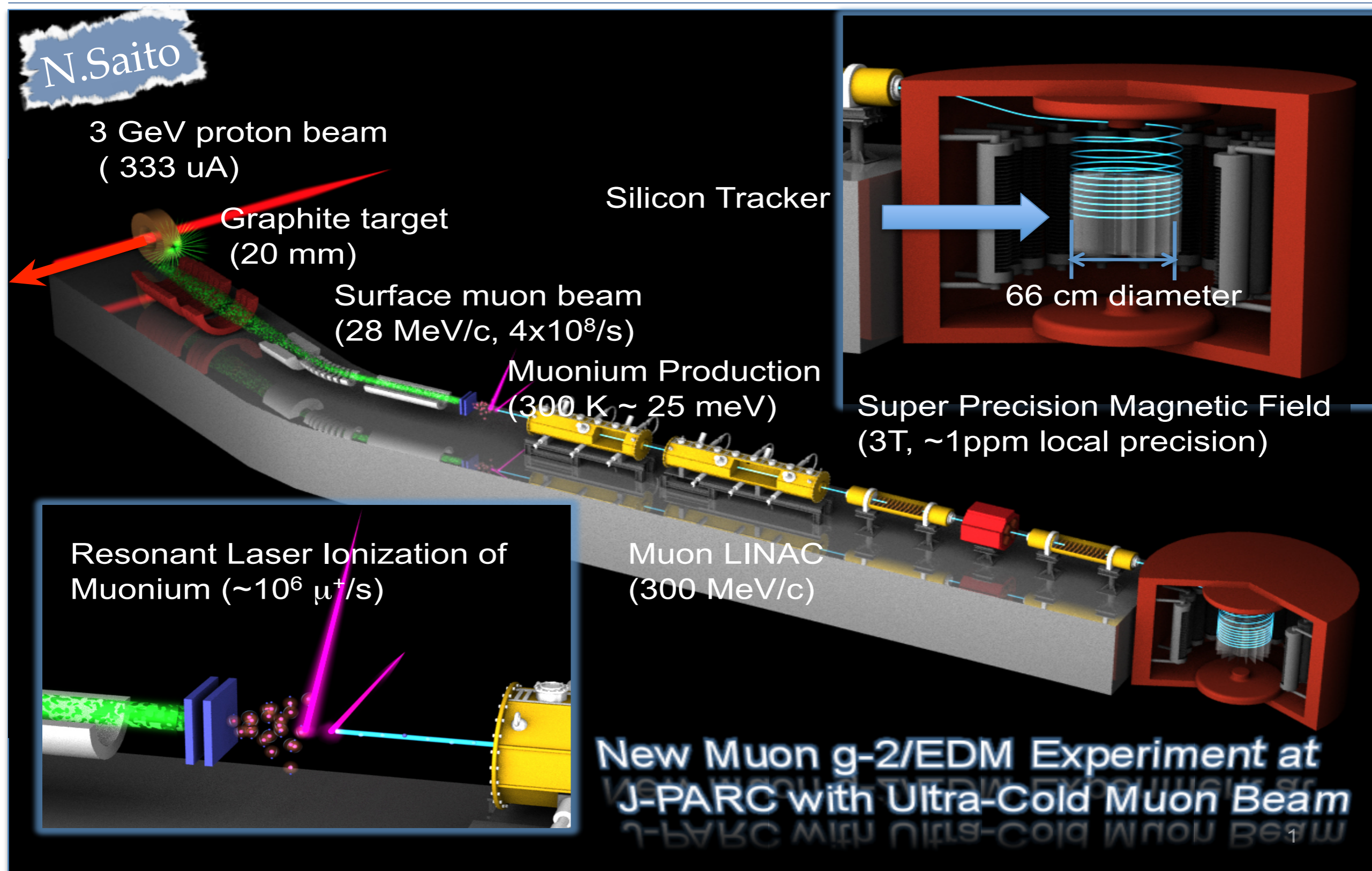
# Magic $\gamma$ を使わない新しい実験コンセプト

---

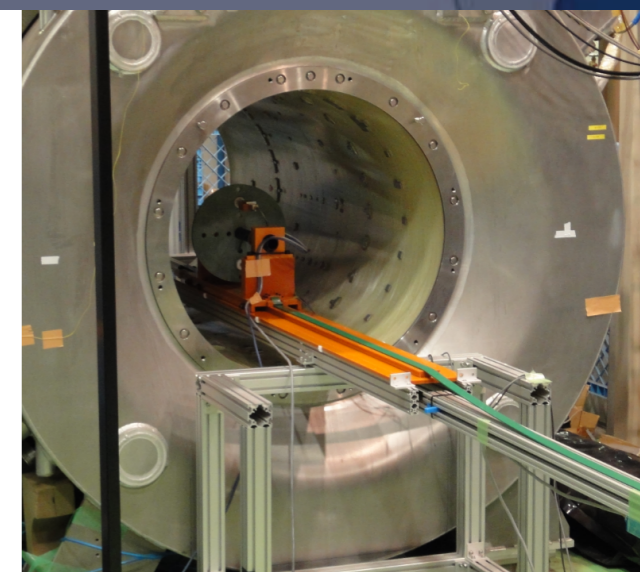
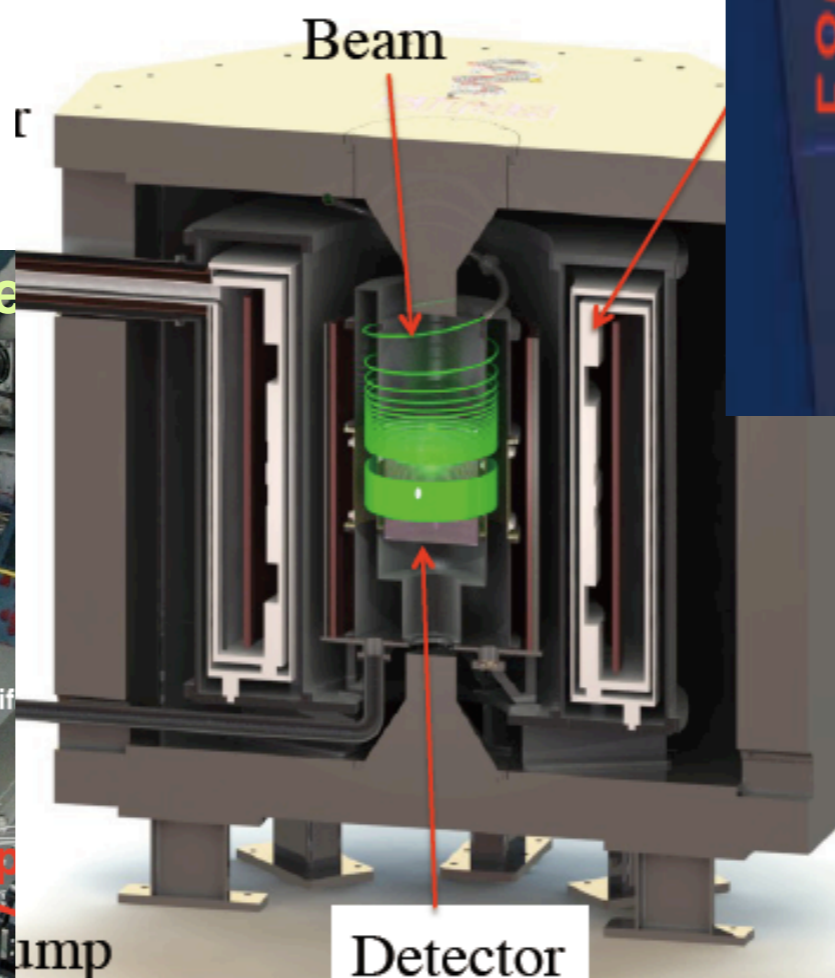
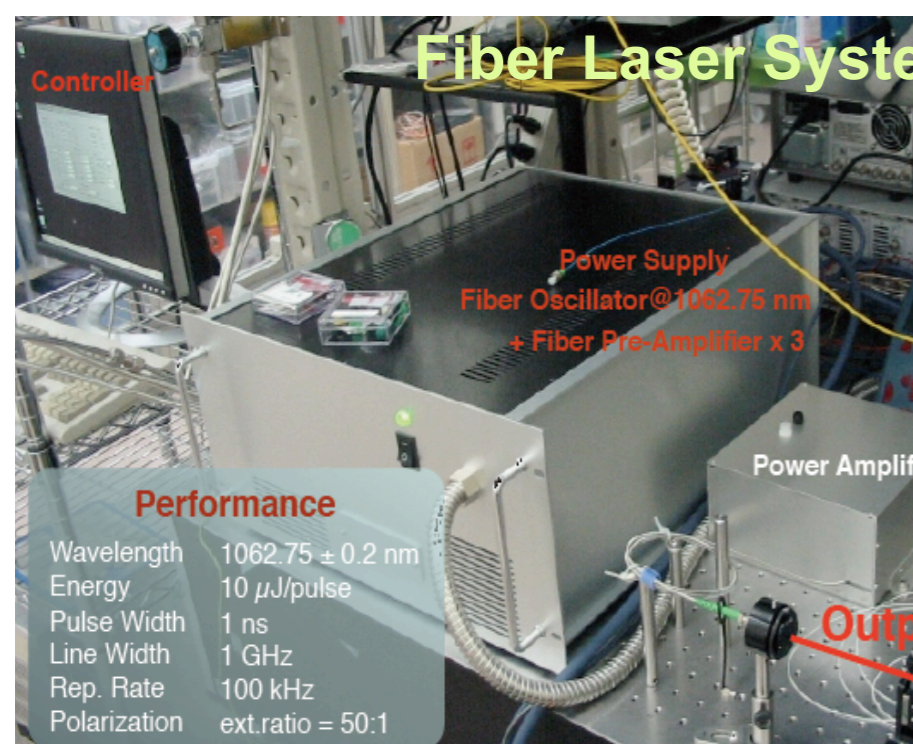
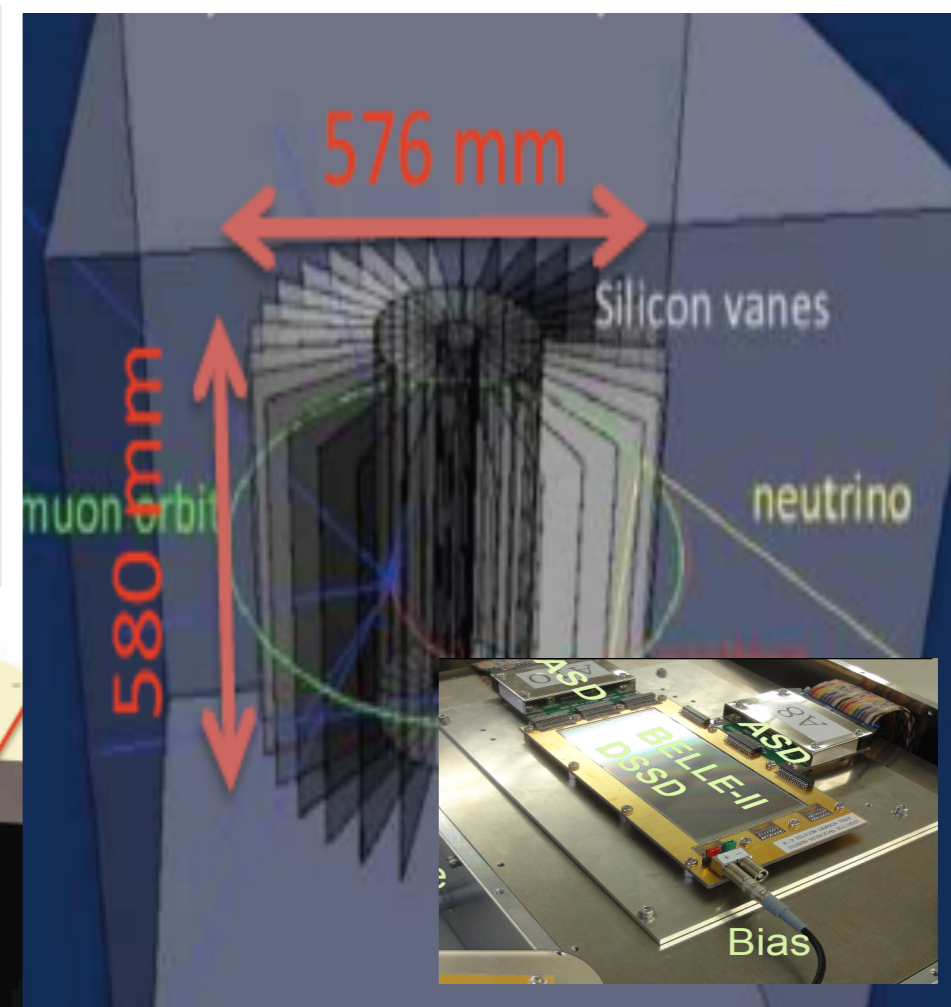
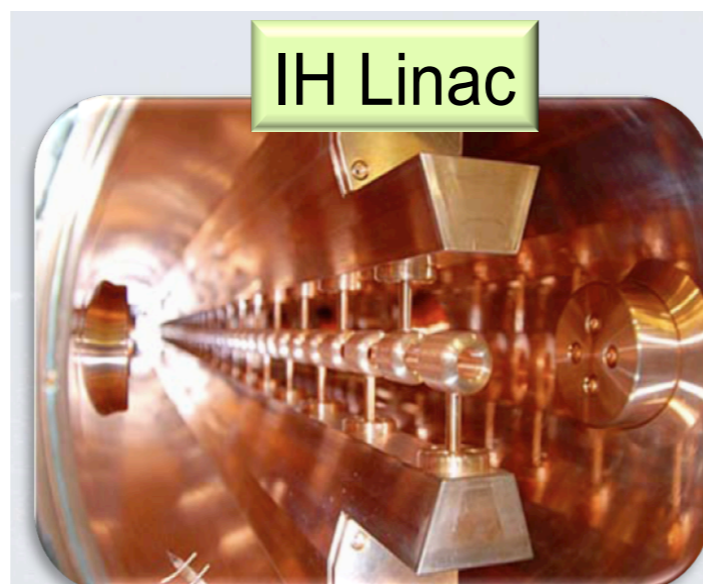
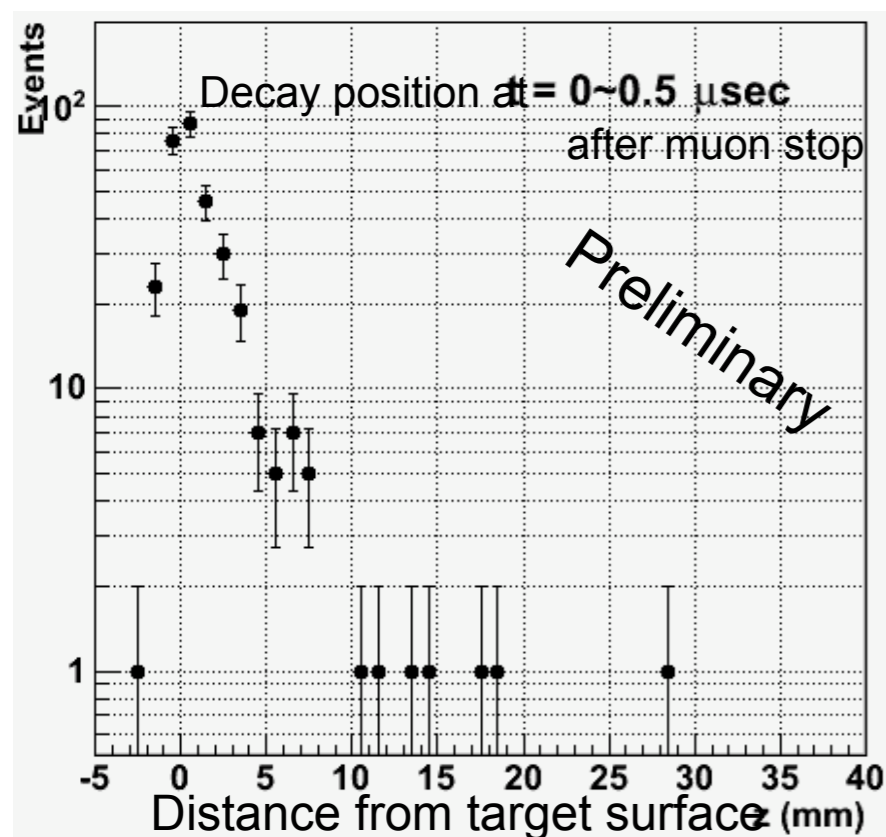
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[ a_{\mu} \vec{B} - \left( a_{\mu} - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left( \vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

- ❖ Measure the muon spin precession
  - ❖ Off magic momentum **with ultra-cold muon beam** at 300 MeV/c
  - ❖ Stored in **ultra-precision B-field w/o E-field** so that the  $\beta E$  drops
  - ❖ Many technical challenges are undergoing at J-PARC.

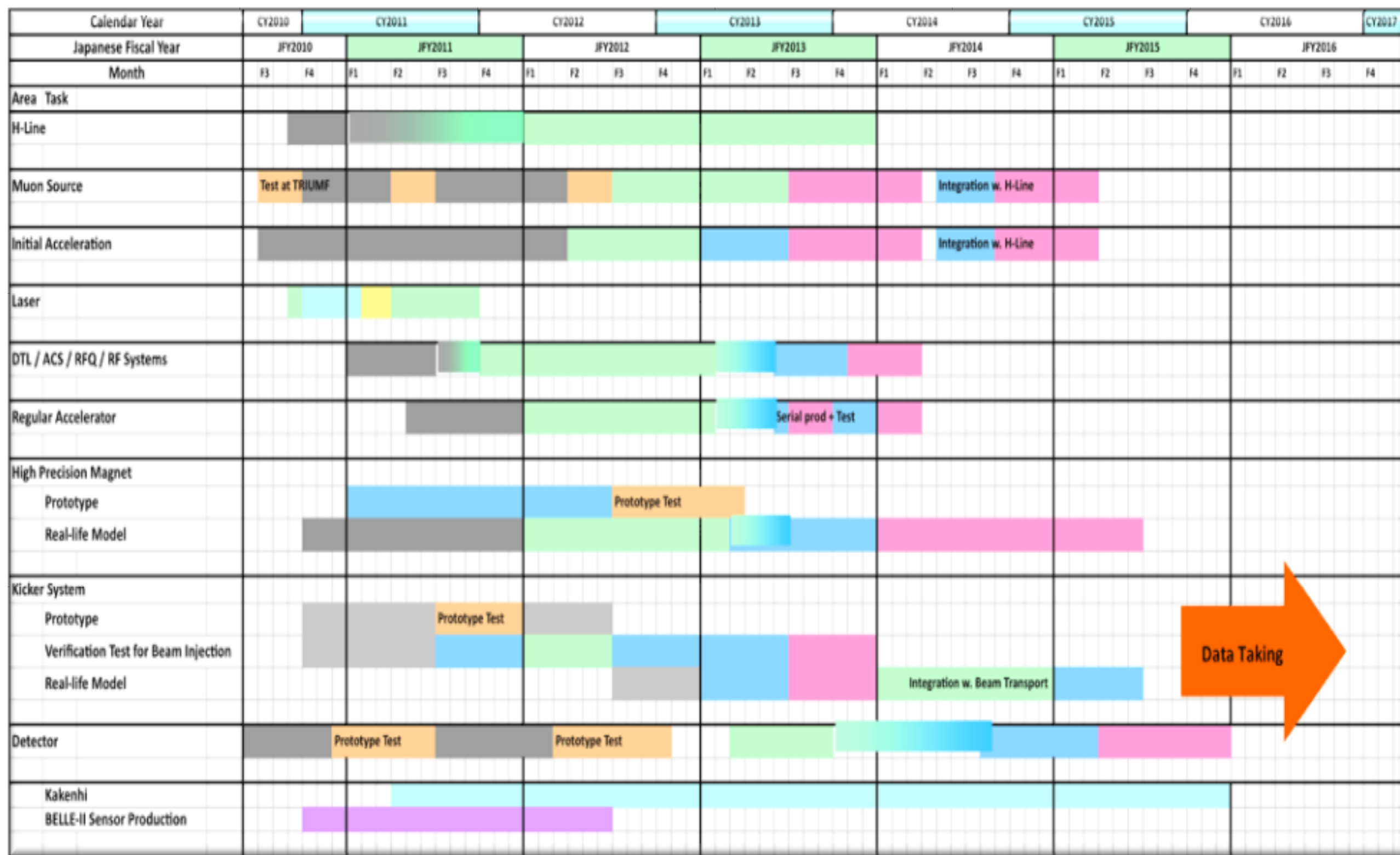
# 新 muon g-2/EDM 実験



# 新 muon g-2/EDM 実験：準備状況



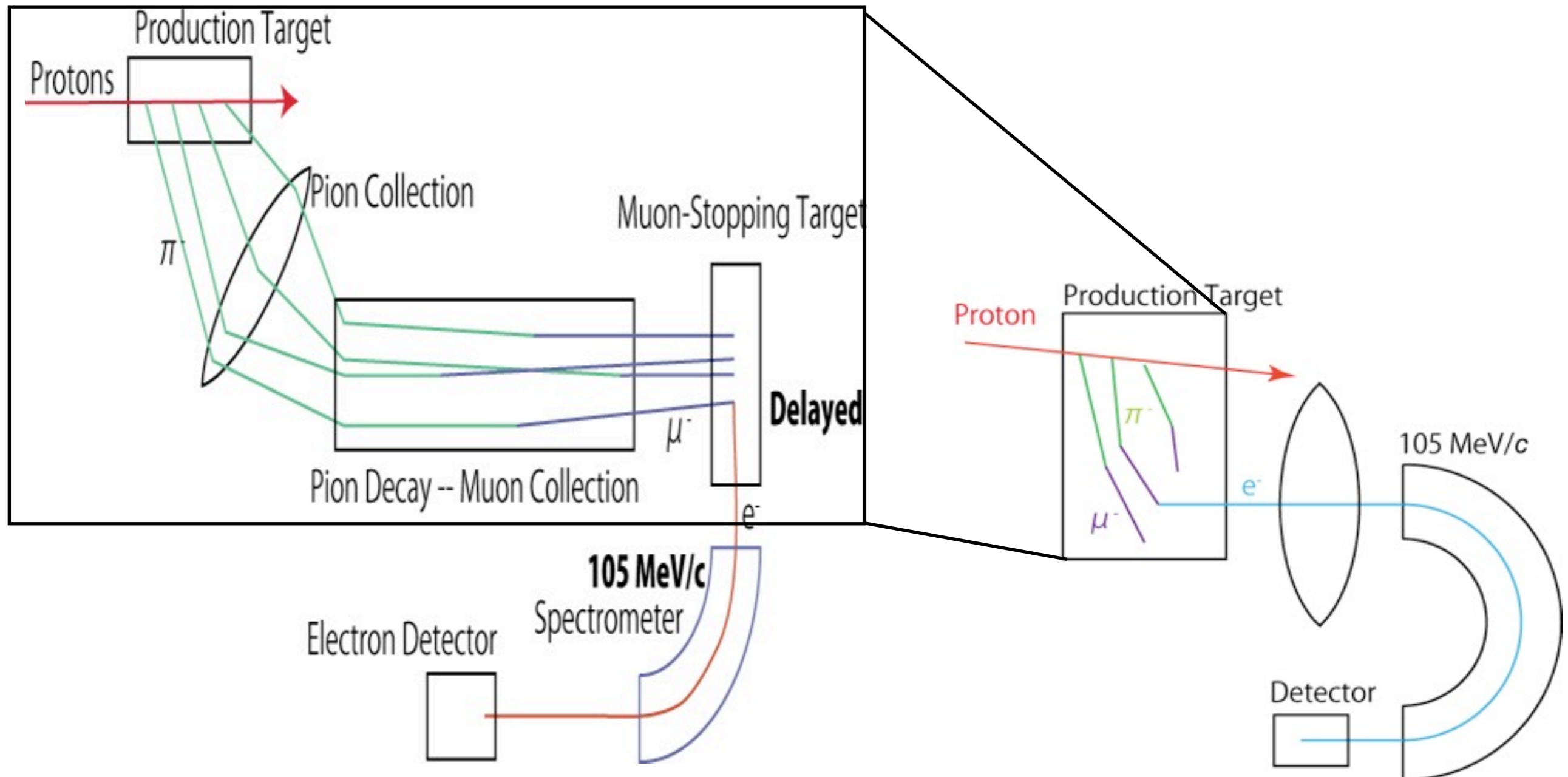
# 新 muon g-2/EDM 実験：今後の展望





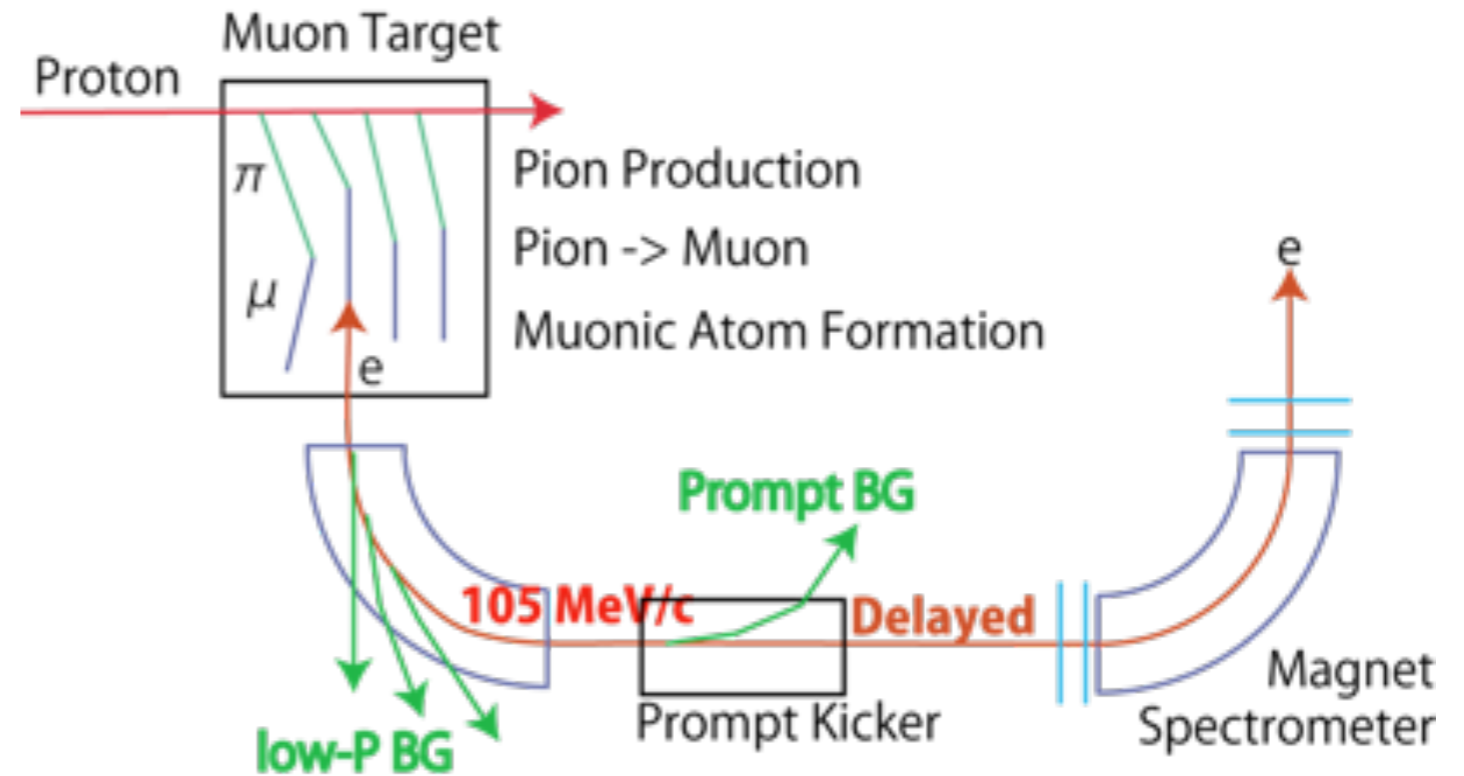
# 安く手っ取り早くとにかく $\mu N \rightarrow e N$

- ❖ DeeMe : もうひとつの  $\mu N \rightarrow e N$  探索アイデア。
- ❖ 「 $\pi$ 生成標的 =  $\mu$ 生成標的 =  $\mu$ 停止標的」というコンセプト。



# MLFで DeeMe 実験 : P4 1

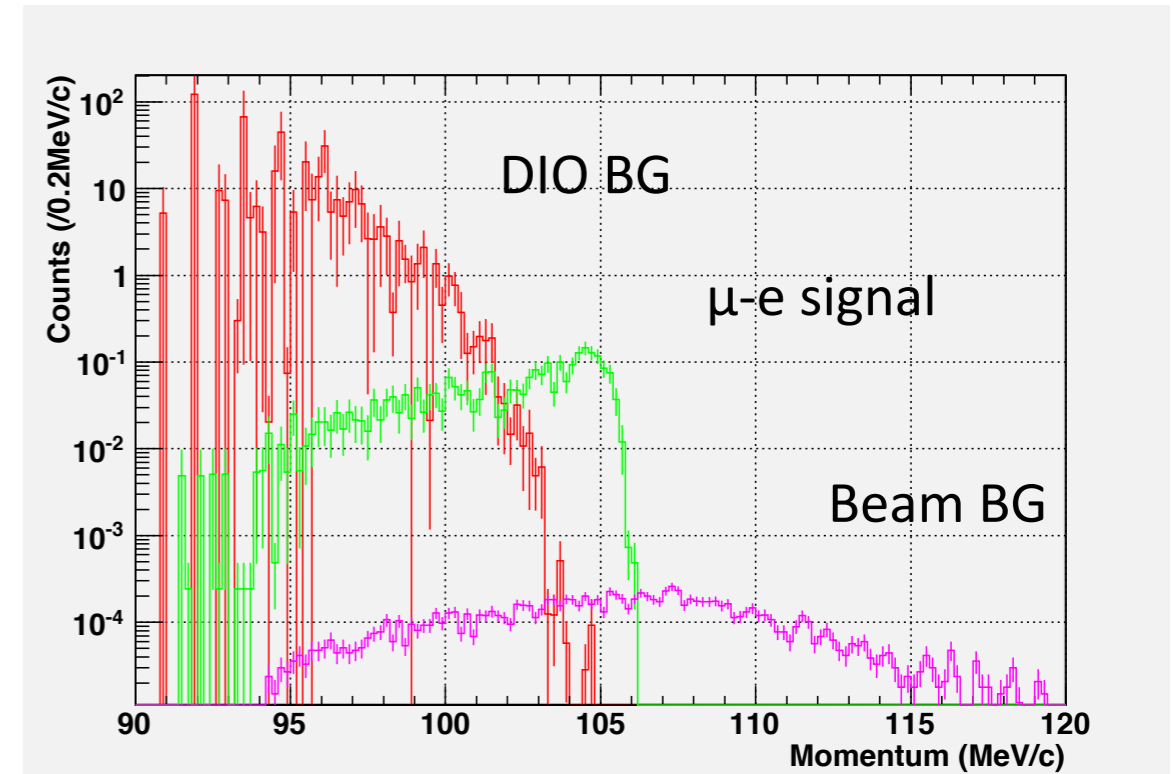
- \* 信号はCOMETと同じ
- \* 単色・遅延・電子
- \* 105MeV,  $\sim 1\mu\text{s}$  delayed
- \* Accidental BG 無し
- \* Main BG source
  - \* Muon Decay in Orbit
  - \* Beam Pion Capture *etc.*



- \* 低運動量部分：ビームラインでカット
- \* 高運動量部分：スペクトロメータで測定
- \* 主パルス：キッカーで排除
- \* アフタープロトン：
  - \* RCSからの高品質パルスビーム (原理的に無い筈)
  - \*  $R_{AP} < 10^{-17}$  (要検証実験)

# DeeMe 実験：感度 & バックグラウンド

- ❖ Signal Sensitivity
  - ❖ SES. =  $2 \times 10^{-14}$  (for  $2 \times 10^7$  sec run)
- ❖ Backgrounds
  - ❖  $R_{AP} = 10^{-19}$
  - ❖ Detector Live-time Duty =  $1 / 20000$
  - ❖ DIO Background : 0.09
  - ❖ Beam-related BG. :  $< 0.01$
  - ❖ Cosmic- $\mu$  Induced  $e^-$  BG. : 0.018
  - ❖ Cosmic- $\mu$  Induced  $\mu^-$  BG. :  $< 0.001$



- ❖ BGで制限されていないので、Runタイムを増やして感度を上げる事可能
  - ❖  $5 \times 10^{-15}$  (for  $8 \times 10^7$  sec)

# DeeMe実験：コスト評価／スケジュール

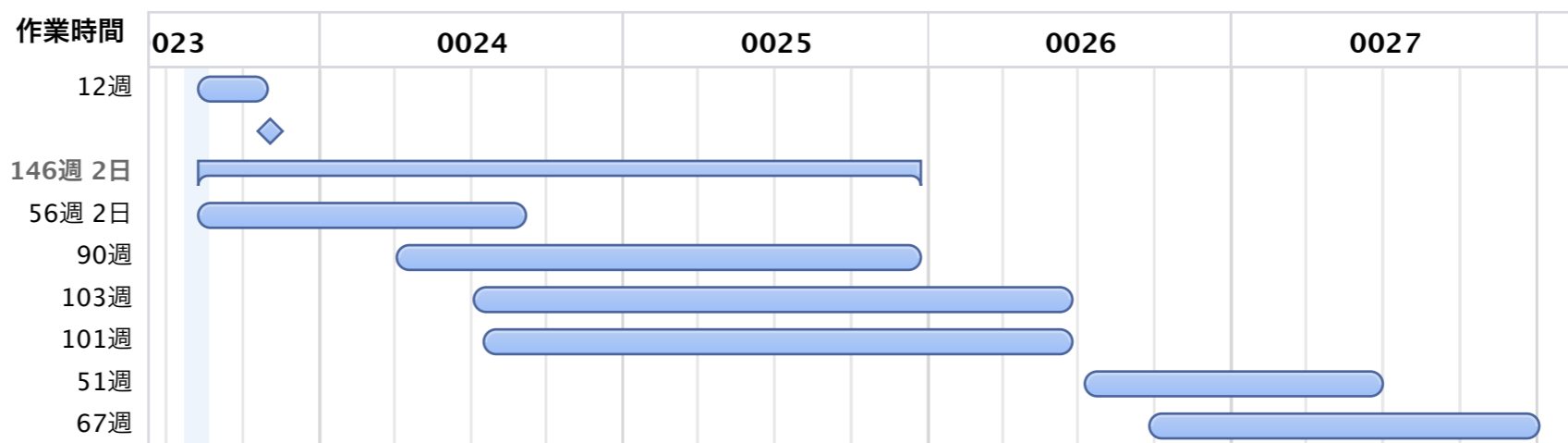
項目	コスト(千円)	小計	備考
検出器		103,000	(73,000)
	電磁石	30,000	
	ホドスコープ	10,000	gating-grid type
	WC開発	3,000	
	WC建設	50,000	
	読み出し	10,000	
ターゲット		30,000	
	SiCターゲット	30,000	
Hライン新設			施設
キッカー	電磁石	60,000	220,000
	電源	160,000	
ポスドク(3人)		15,000	15,000
合計		368,000	科研費の枠内

Multi-purpose beamline:  
他の用途にも転用可能

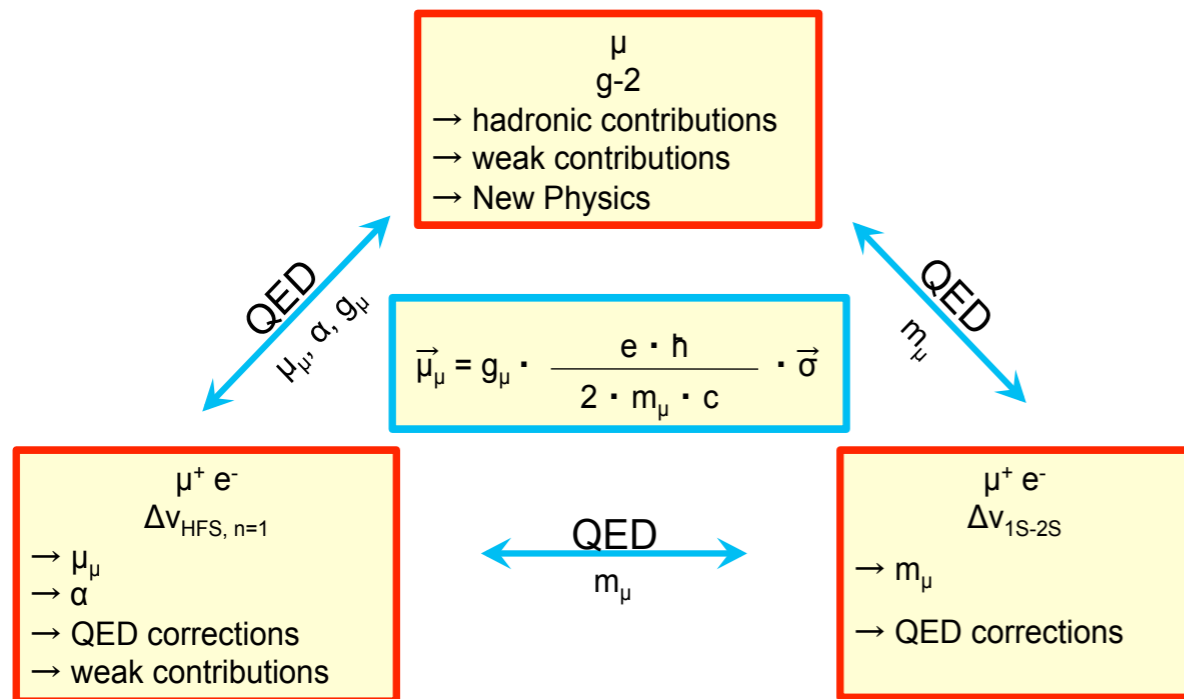
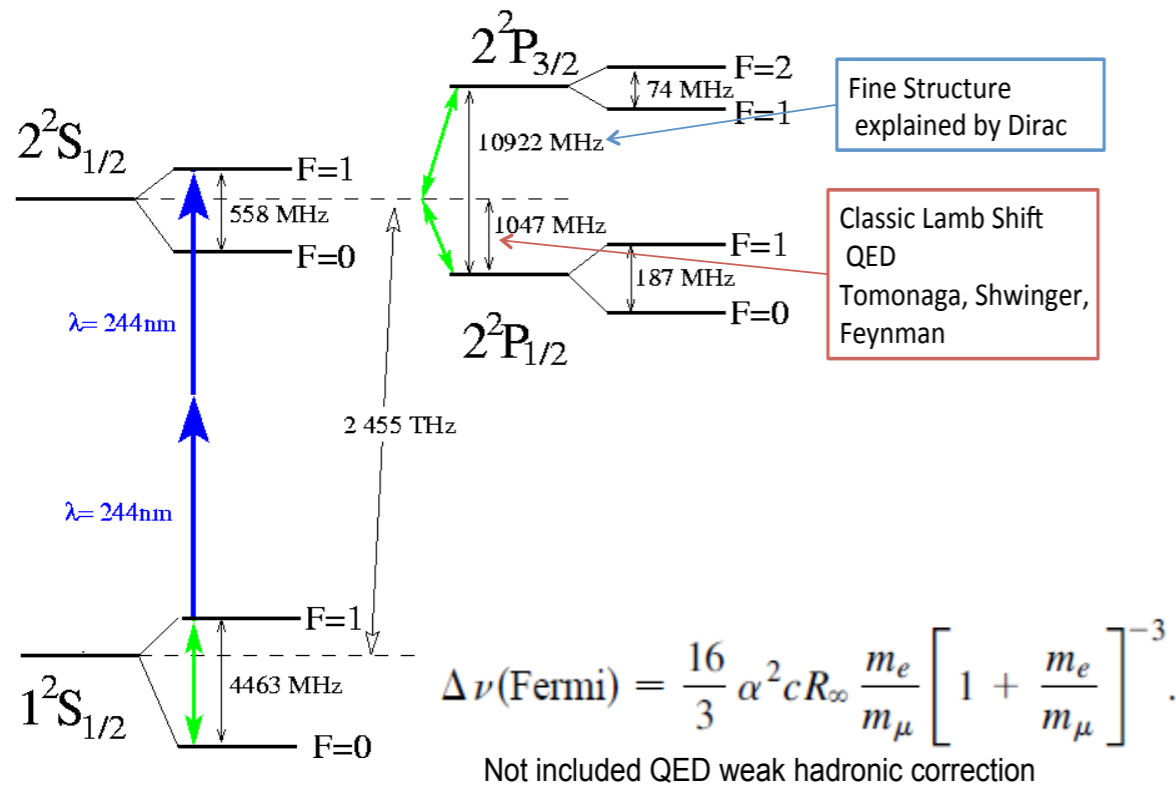
## タスク

- 1) デザイン
- ◆ 2) 科研費申請
- 3) Hライン建設
  - 3.1) 上流部分
  - 3.2) 下流部分
- 4) キッカー建設
- 5) 測定器建設
- 6) ビームタイム
- 7) 解析

## 作業時間

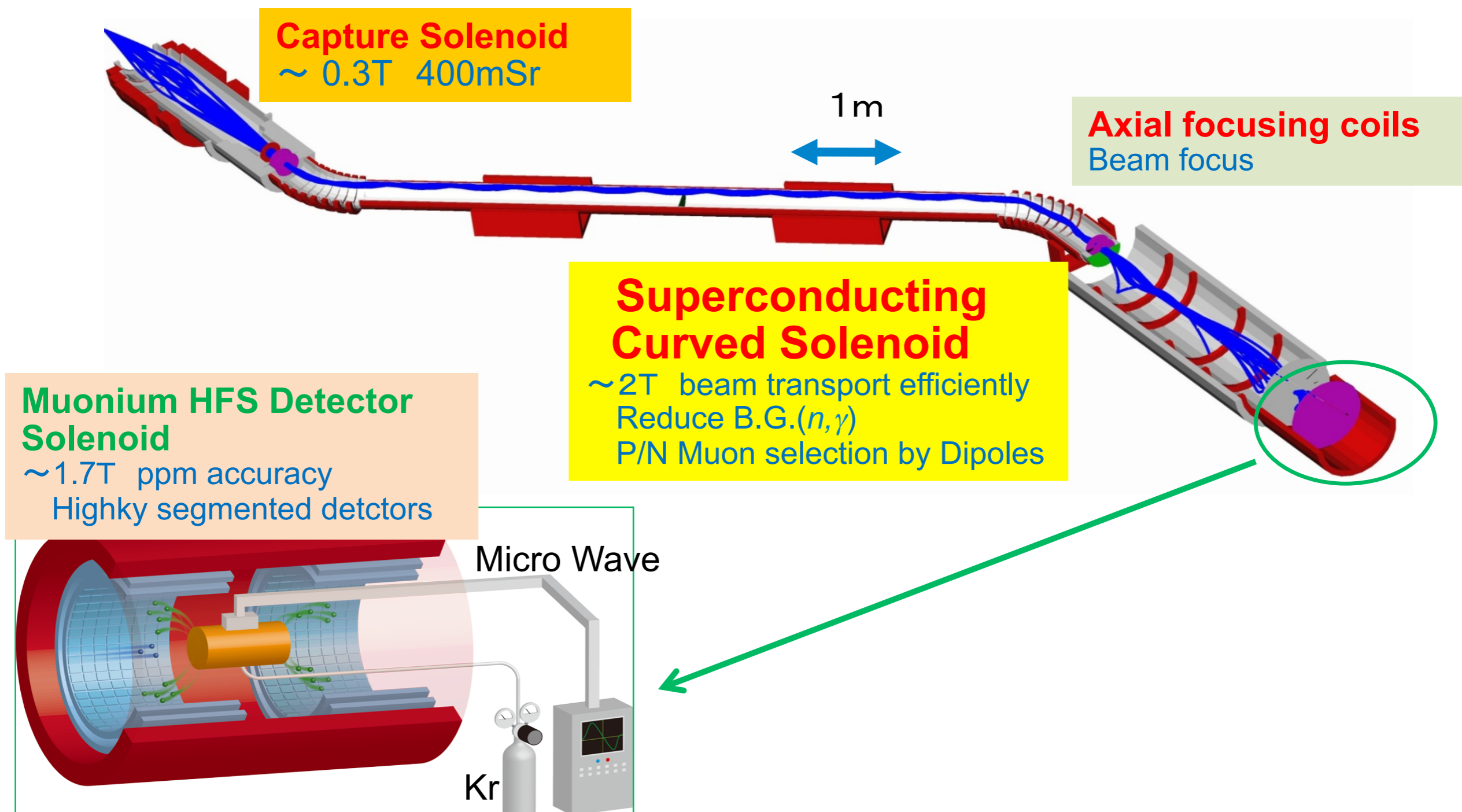


# muonium HFS



- \* 先のLANLでの実験では、統計で limitされていた。
- \* これを、
  - \* pulsed muon
  - \* ×100 statistics
  - \* intense low energy beam
- \* を用いて精度を向上させ
- \* 超微細構造定数 $\alpha$
- \* CPT & Lorentz 普遍性試験
- \*  $\mu_\mu / \mu_p$ の精度向上
- \* に寄与する

# muonium HFS



# J-PARCハドロンホールでのミュオン展望

---

- ❖ COMET実験が唯一提案されているミュオン実験プログラム
- ❖ LHC/MEGの結果を他の切り口から見ることは重要で、そのためには様々なLFVプロセスを測るのが極めて有用。タイムリーな実現が望まれる。
- ❖ stage-1 approved、stage-2に向けTDR執筆／design work進行中
- ❖ Issues:
  - ❖ Extinction - 去年の測定でかなり好感触。今後スタディ継続
  - ❖ ソレノイドデザイン - 現実的なエンジニアリング設計がほぼ完成
  - ❖ 検出器 - 諸々スタディ進行中
  - ❖ ビームパワー - ハドロンSXで56kW(8GeV)供給
- ❖ いつ青信号???

# J-PARC MLF でのミュオン展望

- ❖ MLFで3つのミュオン実験プログラム

- ❖ new g-2/EDM
- ❖ DeeMe
- ❖ new muonium HFS

- ❖ H-Line建造計画が追い風

- ❖ 3実験とも、今後数年以内の実験開始を目指してデザイン策定鋭意進行中

- ❖ **H-Line 3兄弟の今後の成長に期待**





# 未来の話題

---

---

# 明るい未来に向けて

---

- ❖ **共通キーワードは大強度化／高純度化**
  - ❖ 未来の大強度化の話題の前に、そもそも現状のJ-PARCでのデザインパワー実現の問題
  - ❖ *eg. for COMET* : ハドロンSXで56kW(8GeV)
    - ❖ このまま待ってて良いのでしょうか？
    - ❖ 他の事、考えた方が良いか？
    - ❖ **例えば、ミューオン実験用ストレッチャーリングをMRに併設するとか????**

一方、g-2/EDMの未来は？

## Magic vs “New Magic”

### ■ Measure Precession Frequency in $B$ and $E$

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

BNL/Fermilab Approach

$$a_{\mu} - \frac{1}{\gamma^2 - 1} = 0$$

$$\eta \approx 0$$

$$\gamma_{\text{magic}} = 29.3$$

$$p_{\text{magic}} = 3.09 \text{ GeV}/c$$

J-PARC Approach

$$\vec{E} = 0$$

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_{\eta}$$

$$\vec{\omega}_a = -\frac{e}{m} a_{\mu} \vec{B}$$

14m diameter

66 cm diameter

# Spin Rotation and EDM

- Precession frequency vector with g-2 and EDM

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

Choose  $B$ ,  $E$  and  $\gamma$  to  
cancel  $g-2$  rotation

ex.  $p_\mu = 125 \text{ MeV}/c$

$B = 1 \text{ T}$ ,  $E = 0.64 \text{ MV/m}$

Spin Frozen mode

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

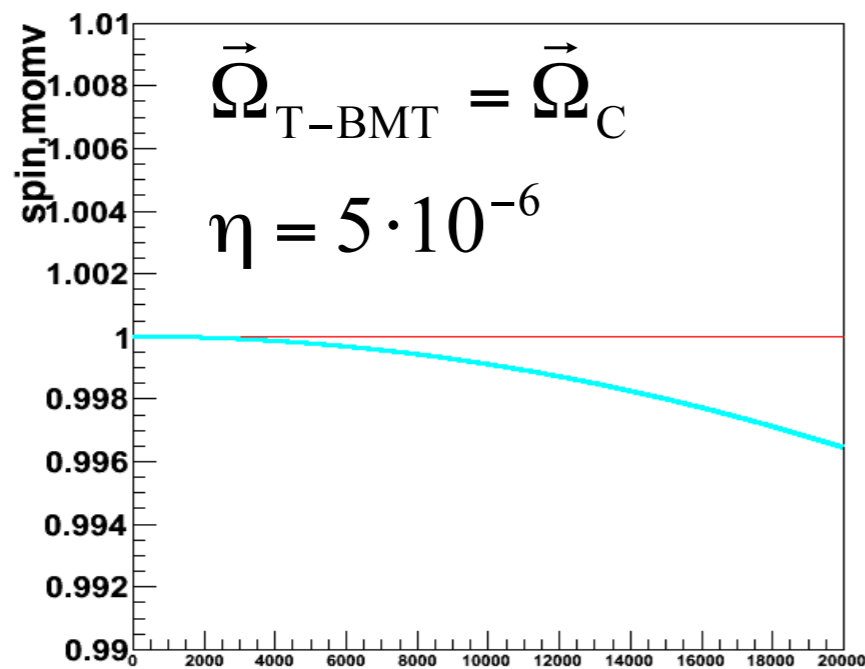
Eliminate  $E$ -field  
with Ultra-cold  
muon beam

$E=0$ , spin //  $B$

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

# Spin Rotation and EDM

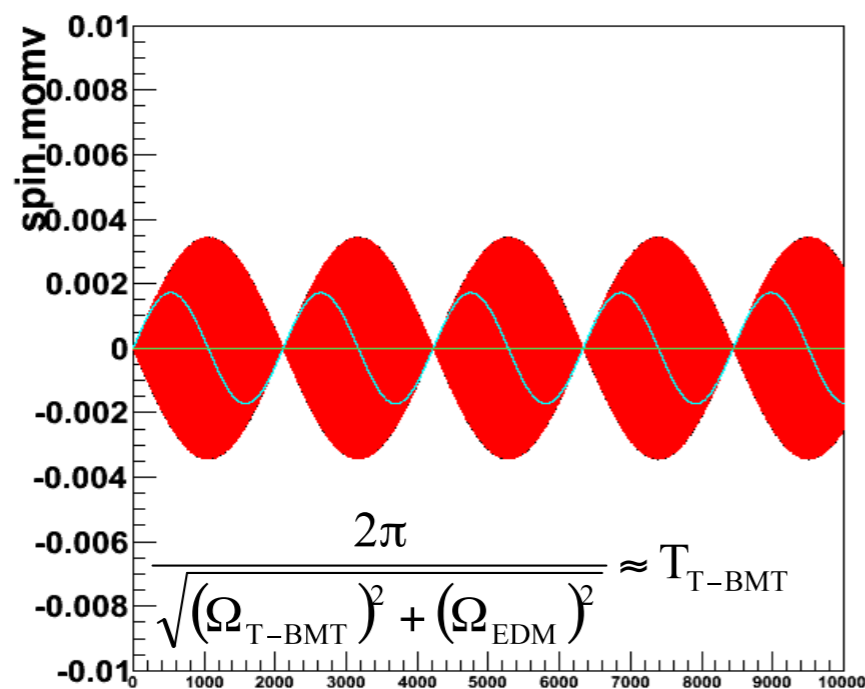
- “Spin Frozen” method and “E=0” method



## Spin Frozen case

pure EDM effect can be extracted if “frozen condition” is satisfied precisely.

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



## E=0 with spin // B case

“beat” with g-2 frequency with amplitude proportional to EDM → Use g-2 rotation as systematics control

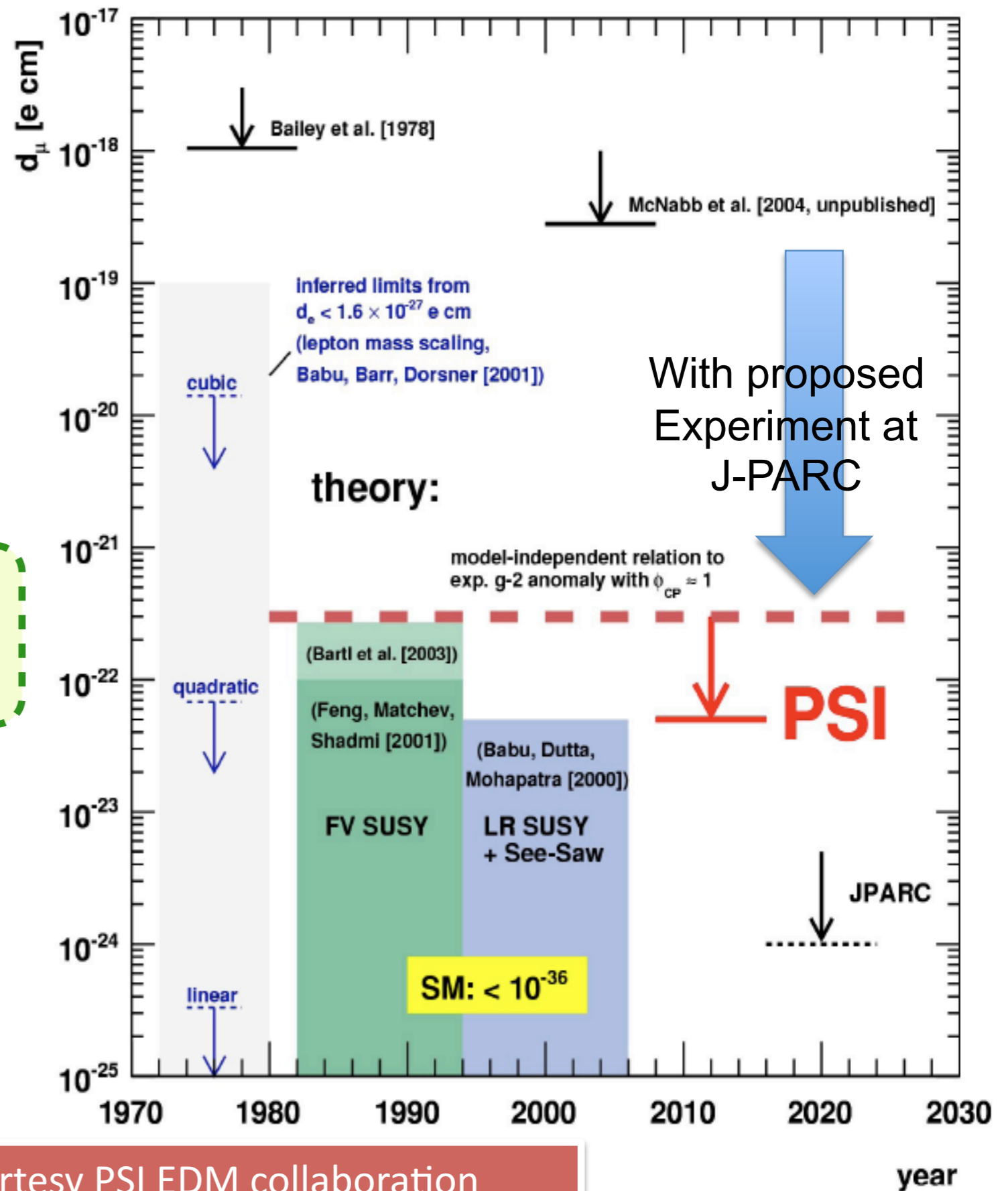
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

# Muon EDM

- Direct CPV in Lepton Sector
  - CPV Required beyond KM

current limit  $\sim 1 \times 10^{-19}$

- Potential Sensitivity of J-PARC Exp.
  - $\sim 1e-21$  @ MLF



## 夢：ミューオン専用リング

---

- ❖ 例えば先に挙げたMRに併設するストレッチャーリング
  - ❖ 蓄積リングでphase rotationして高輝度化
    - ❖ → PRISM/PRIME実現への布石
  - ❖ 逆phase rotationしてDC化して
    - ❖  $\mu \rightarrow eee$ 実験。またはMEG2-J？
- ❖ 大強度ミューオンはEDM測定にも追い風
  - ❖ 10kHz (最低24MWを想定)が最適 (らしい)。
- ❖ ミューオン専用ビームラインがもし実現可能ならば、様々な問題 (他実験との干渉等) を解決する上、更なる物理実験への展望が開ける。

# まとめ

---

- ❖ 今、それからこの先の10年も、ミューオンが熱い！！
- ❖ LHCと並行して新結果を出し続けているMEG。このhotなactivityをkeepするためにも、ミューオン基礎実験はなんとかして継続的に進めていきたい。
- ❖ この先10年、ミューオンを用いたLFV・g-2・EDM・HFSといったミューオン実験メインストリームをJ-PARCで実施すべく、鋭意努力中。
- ❖ Competitor は FNAL。
  - ❖ COMET.vs.Mu2E、g-2/EDM@Fermi、共に同時期／同感度での実施を計画。
  - ❖ 素早いアクションが必須。
  - ❖ 実験／加速器、双方がアイデアを出し合って早期実現を目指す
- ❖ なんと言っても物理が魅力。Fundamentalで且つBrand new。若い人を「物理の魅力」で引きつけるためにも、是非ともミューオン基礎実験を「継続的」に進めて行きたい。



Back Up Slides

# COMET Collaboration

## COMET Collaboration List

84 people from 20 institutes ( August 2011 )



### Imperial College London, UK

A. Kurup, J. Pasternak,  
Y. Uchida, P. Dauncey,  
U. Egede, P. Dornan

### University College London, UK

M. Wing, M. Lancaster,  
R. D'Arcy, S. Cook

### University of Glasgow

P. Soler



### JINR, Dubna, Russia

V. Kalinnikov, A. Moiseenko,  
G. Macharashvili, J. Pontecorvo,  
B. Sabirov, Z. Tsamaiaidze,  
and P. Evtukhovitch

### BINP, Novosibirsk, Russia

D. Grigorev, A. Bondar, G. Fedotovitch,  
A Ryzhenenkov, D. Shemyakin

### ITEP, Russia

M. Danilov, A. Drutskoy, V. Rusinov,  
E. Tarkovsky



Department of physics and astronomy,  
University of British Columbia,  
Vancouver, Canada

D. Bryman

### TRIUMF, Canada

T. Numao, I. Sekachev



Department of Physics,  
Brookhaven National Laboratory, USA

R. Palmer, Y. Cui

Department of Physics, University of  
Houston, USA

E. Hungerford, K. Lau



### MPI-Munich

T. Ota



### Institute for Nuclear Science and Technology

Vo Van Thuan, T.P.H. Hoang

### University of Science, HoChi Minh

Chau Vau Tao



### Tbilisi State University

M. Nioradze,  
Ni. Tsverava  
Y. Tevxadze



### University of Malaya

Wan Ahmad Tajuddin

### University Technology Malaysia

Md. Imam Hossain



### Kyoto University, Kyoto, Japan

Y. Iwashita, Y. Mori, Y. Kuriyama, J.B Lagrange

### Department of Physics, Osaka University, Japan

M. Aoki, T. Hiasa, T. Hayashi, S. Hikida, Y. Hino, T. Itahashi, S. Ito,  
Y. Kuno, H. Nakai, T. H. Nam, H. Sakamoto, A. Sato, N.M. Truong

### Department of Physics, Saitama University, Japan

M. Koike, and J. Sato

### High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Japan

Y. Arimoto, K. Hasegawa, Y. Igarashi, M. Ikeno, S. Ishimoto,  
Y. Makida, S. Mihara, H. Nishiguchi, T. Nakamoto, T. Ogitsu,  
C. Ohmori, Y. Takubo, M. Tanaka, M. Tomizawa, T. Uchida,  
A. Yamamoto, M. Yamanaka, M. Yoshida, M. Yoshii,  
K. Yoshimura

# New g-2/EDM Collaboration

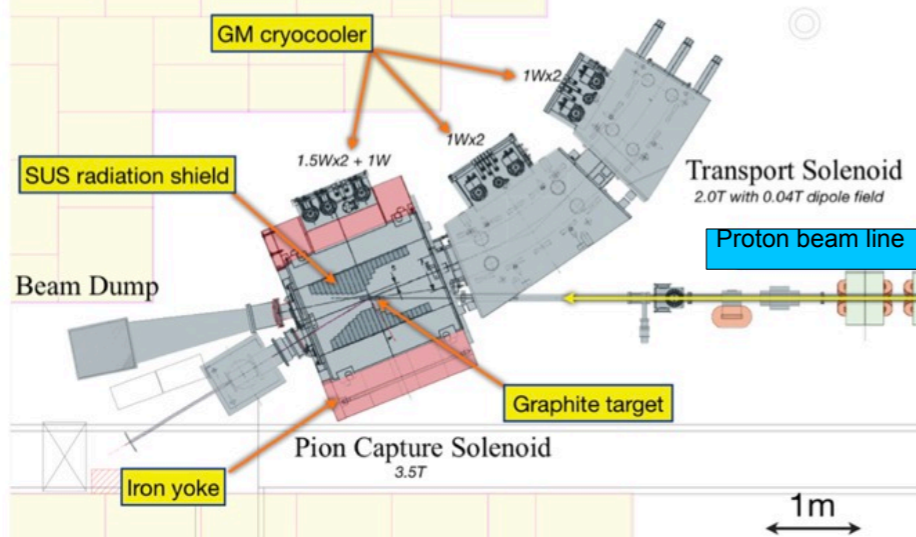
- 85 members (was 77 ...still evolving)
- M. Aoki, P. Bakule, B. Bassalleck, G. Beer, A. Deshpande, S. Eidelman, D. E. Fields, M. Finger, M. Finger Jr., **Y. Fujirawa**, **Y. Fukao**, **S. Hirota \***, H. Inuma, M. Ikegami, N. Hayashizaki, K. Ishida, M. Iwasaki, R. Kadono, **T. Kakurai**, T. Kamitani, Y. Kamiya, **S. Kanda**, N. Kawamura, S. Komamiya, K. Koseki, T. Kohriki, Y. Kuno, A. Luccio, O. Luchev, M. Maki, G. Marshall, M. Masuzawa, Y. Matsuda, T. Matsuzaki, T. Mibe, K. Midorikawa, S. Mihara, Y. Miyake, J. Murata, W.M. Morse, R. Muto, K. Nagamine, T. Naito, H. Nakayama, M. Naruki, H. Nishiguchi, M. Nio, D. Nomura, H. Noumi, T. Ogawa, T. Ogitsu, K. Ohishi, K. Oide, A. Olin, N. Saito, N.F. Saito, Y. Sakemi, K. Sasaki, O. Sasaki, A. Sato, A. Savoy-Navarro, Y. Semeritzidis, Yu. Shatunov, K. Shimomura, B. Shwartz, P. Strasser, R. Sugahara, M. Sugano, K. Tanaka, **K. Tanaka**, N. Terunuma, N. Toge, **D. Tomono**, E. Torikai, T. Toshito, A. Toyoda, **K. Tsukada**, **K. Ueno**, V. Vrba, S. Wada, A. Yamamoto, K. Yokoya, **K. Yokoyama**, Ma. Yoshida, M. H. Yoshida, and K. Yoshimura
- 19 Institutions
- Academy of Science, BNL, BINP, CRNS-APC, **UC Riverside, Charles U., KEK, NIRS, UNM, Osaka U., RCNP, STFC RAL, RIKEN, Rikkyo U., SUNYSB, CRC Tohoku, U. Tokyo, TITech, TRIUMF, U. Victoria**
- 7 countries
- Czech, USA, Russia, Japan, UK, Canada, France

# Pion Capture System Demonstration

## Demonstration of Pion Capture System

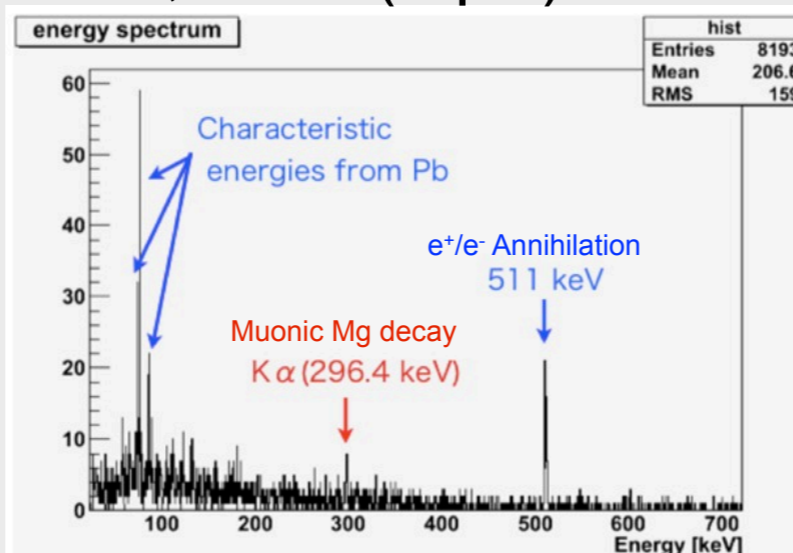
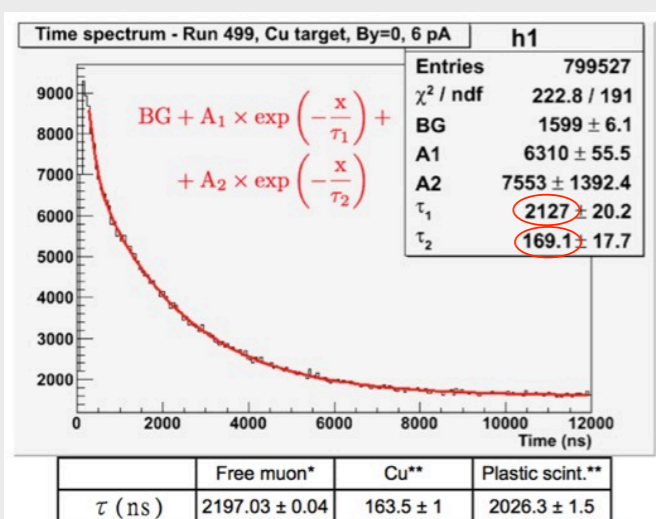
### MuSIC@Osaka-U

RCNP cyclotron  
400 MeV, 1  $\mu$ A



preliminary

Measurements on June 21, 2011 (6 pA)



MuSIC muon yields

$\mu^+$  :  $3 \times 10^8$ /s for 400W

$\mu^-$  :  $1 \times 10^8$ /s for 400W

cf.  $10^8$ /s for 1MW @PSI  
Req. of  $\times 10^3$  achieved...

# COMET Budget Break Down

## Cost Estimation at CDR (2009)

Item	Cost (Oku JPY)	
Proton beam line		
Proton beam line magnets	17	→ 12.3
Proton beam dump	2	
Radiation shielding for a proton beam line	3	
Superconducting Solenoid	35.7	→ 30.0 ?
Detector		
Electron tracker	2.1	
Electron calorimeter	2.3	
Cosmic ray shield	3	
DAQ system	0.5	
Infrastructure		
Refrigeration	4.7	
Pion production system and tungsten shielding	2.3	
Civil construction		
Extension of the NP experimental hall	3	
Total	75	→ 65

More detailed cost estimation will be presented in the technical design report (TDR) 2011.

hope the in-kind contribution of about a total of 5 oku JPY from COMET collaborators outside Japan.

→ 60

# ミュオン基礎物理 (G-2, $\mu e$ 転換) 実験設備

平成23年5月30日版

平成24年度要求額 5億円 (総額 36億円)

- ミュオン輸送装置 3億円 (4.3億円)

- 極冷ミュオン源 1億円 (3億円)

- ミュオン蓄積装置 1億円 (10億円)

今年度は計上していないが概算要求したいもの

- ミュオン加速器 0億円 (15億円)

- ビーム純化装置 0億円 (2.2億円)

- 遮蔽体 0億円 (1.5億円)

上記の他に科研費で獲得を目指すもの (総額 5億円)

- ミュオン電子転換実験 2億円

- G-2検出器 3億円

ミュオン輸送装置 4.3億円

極冷ミュオン源  
3億円

ビーム純化装置 2.2億円

ミュオン蓄積装置 10億円

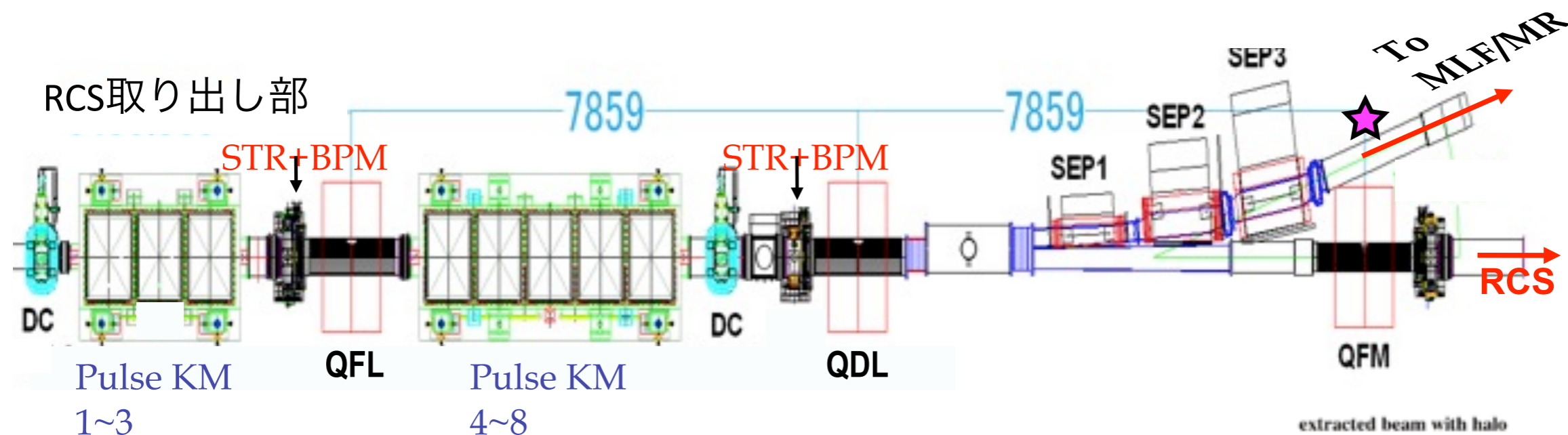
ミュオン加速器 15億円

# 概算要求案 (5月末に提出)

## ミュオン基礎物理( $g-2$ 、 $\mu-e$ 転換)基盤設備年次計画(4年計画)

項目	備考/年次	H24	H25	H26	H27	項目計
ミュオン輸送装置		3	1	0.3		4.3
極冷ミュオン源		1	2			3
ミュオン蓄積装置		1	4	5		10
ミュオン加速装置			8	4	3	15
ビーム純化装置						
	キッカー電磁石		0.6			0.6
	電磁石電源			1.6		1.6
遮蔽体			0.5	0.5	0.5	1.5
合計		5	16.1	11.4	3.5	36.0

# DeeMe : After Proton @ RCS



- RCSのデザインには余裕がある(低ビームロス実現のため)
  - 真空ダクト口径 =  $486\pi$  mm.mrad (コリメータ  $350\pi$  mm.mrad)
  - 取出しライン口径 =  $324\pi$  mm.mrad
  - キック角 = 17 mrad ---  $> 2000\pi$  mm.mrad

- 早い取りだし --- 非常にクリーン
- RCSグループと共同で $R_{AP}$ の予備測定(2011/2):
  - $R_{AP} < 10^{-19}$
- DAQを強化して今年度の運転でも測定する予定。

