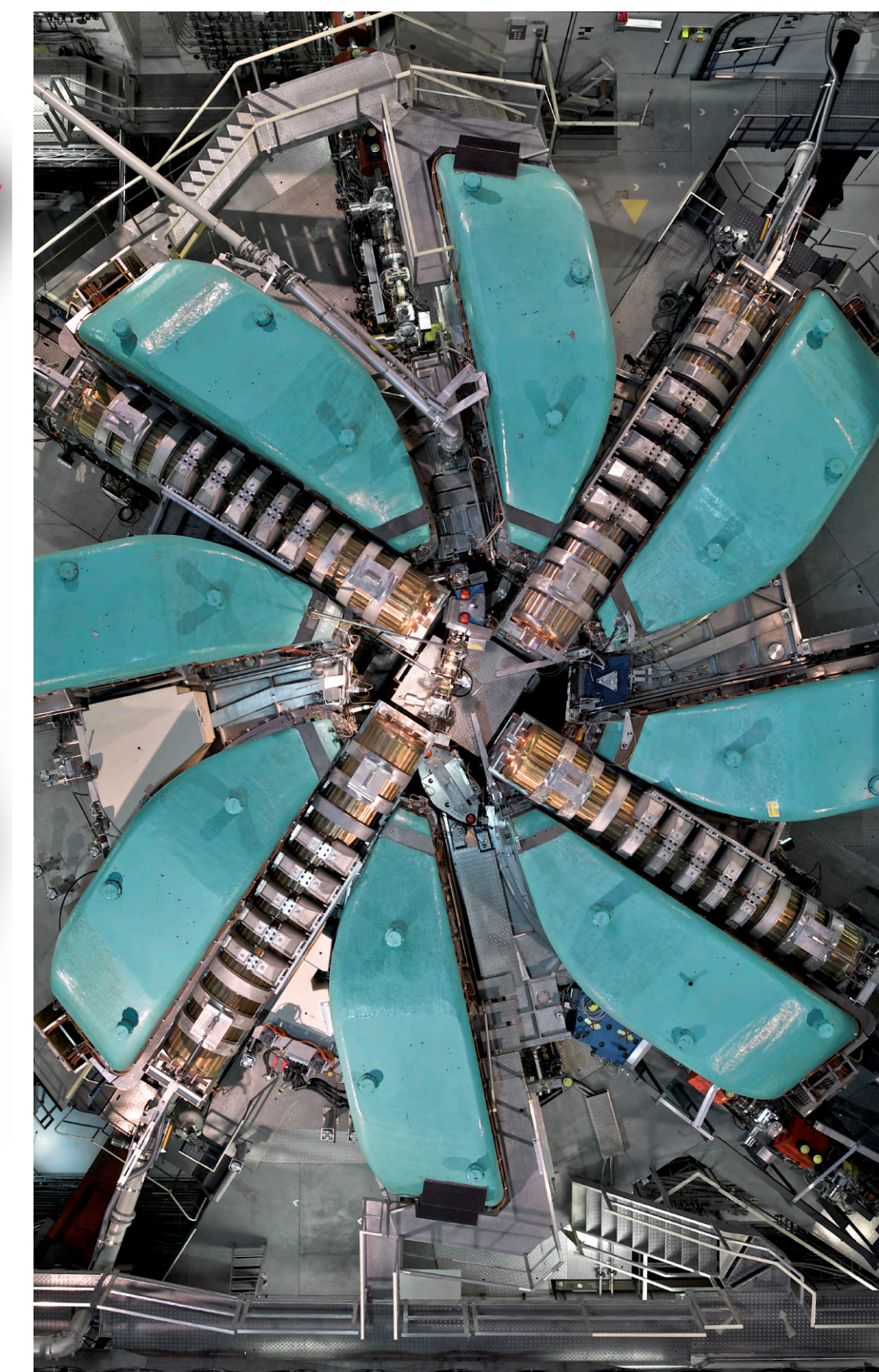
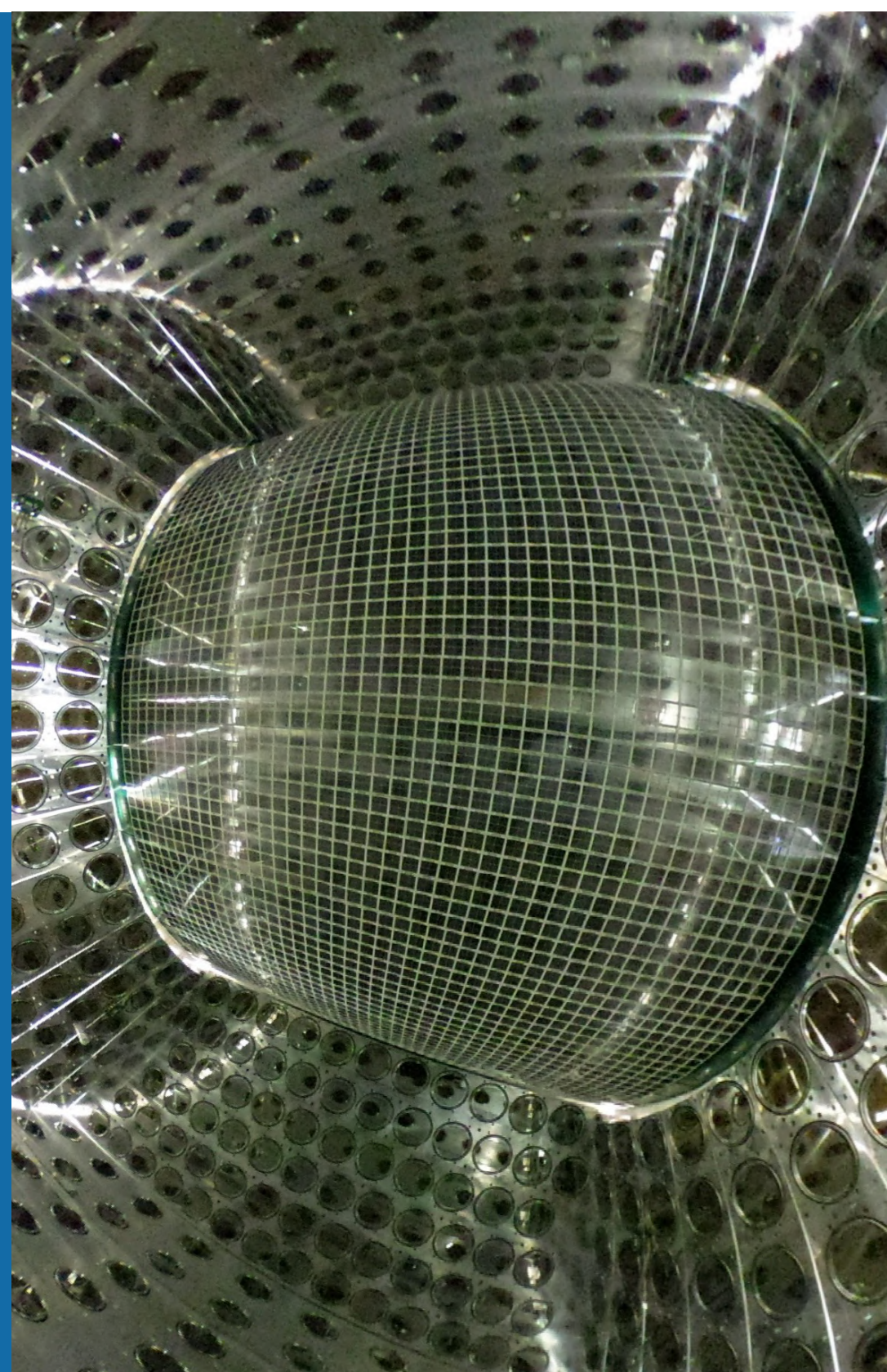


# ミューオン稀崩壊探索の最前線

東京大学素粒子物理国際研究センター 大谷航

2024年6月14日 ICEPP学部向け特別セミナー2024

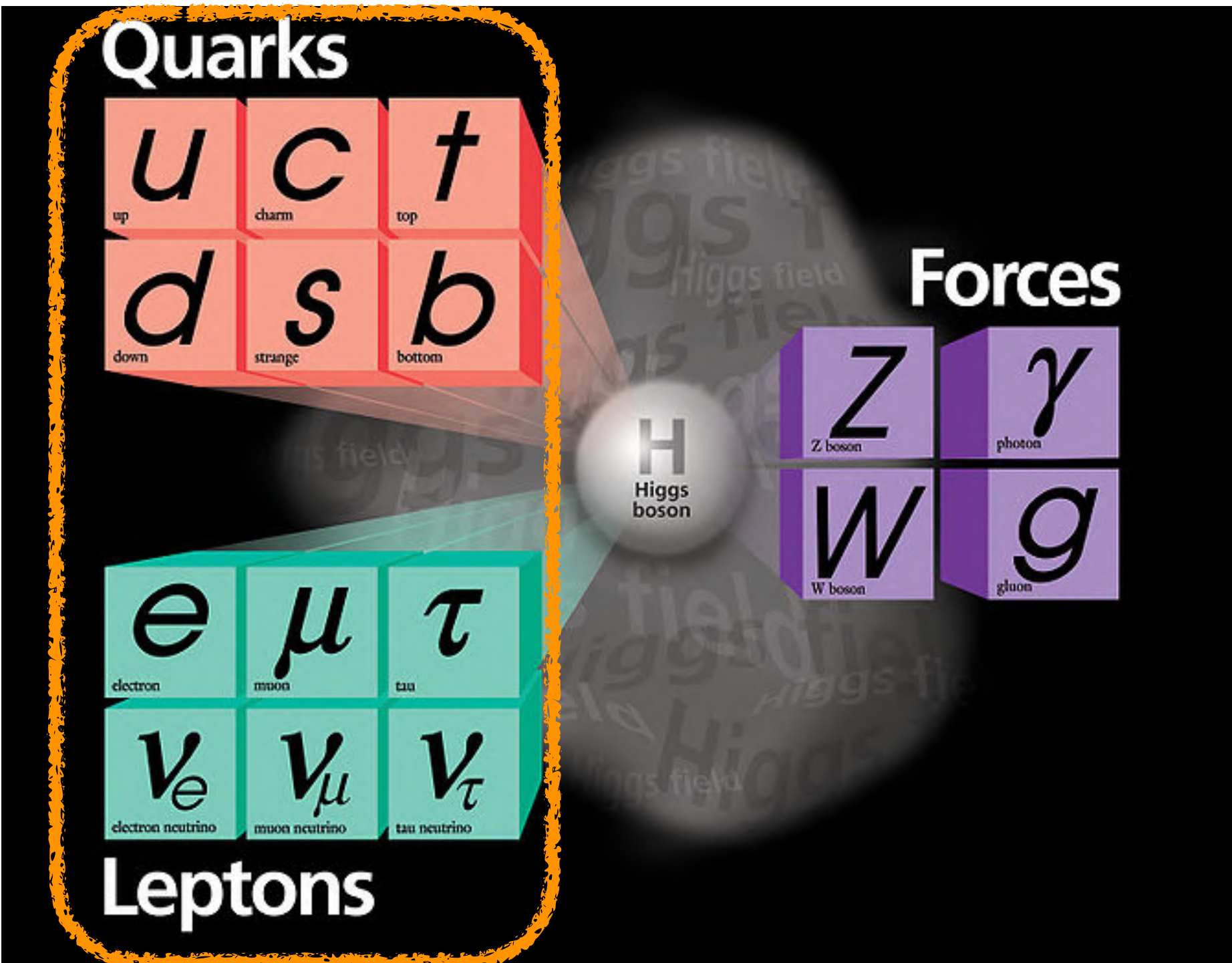


# 素粒子の世代構造

## ●物質粒子(クォークとレプトン)の世代構造

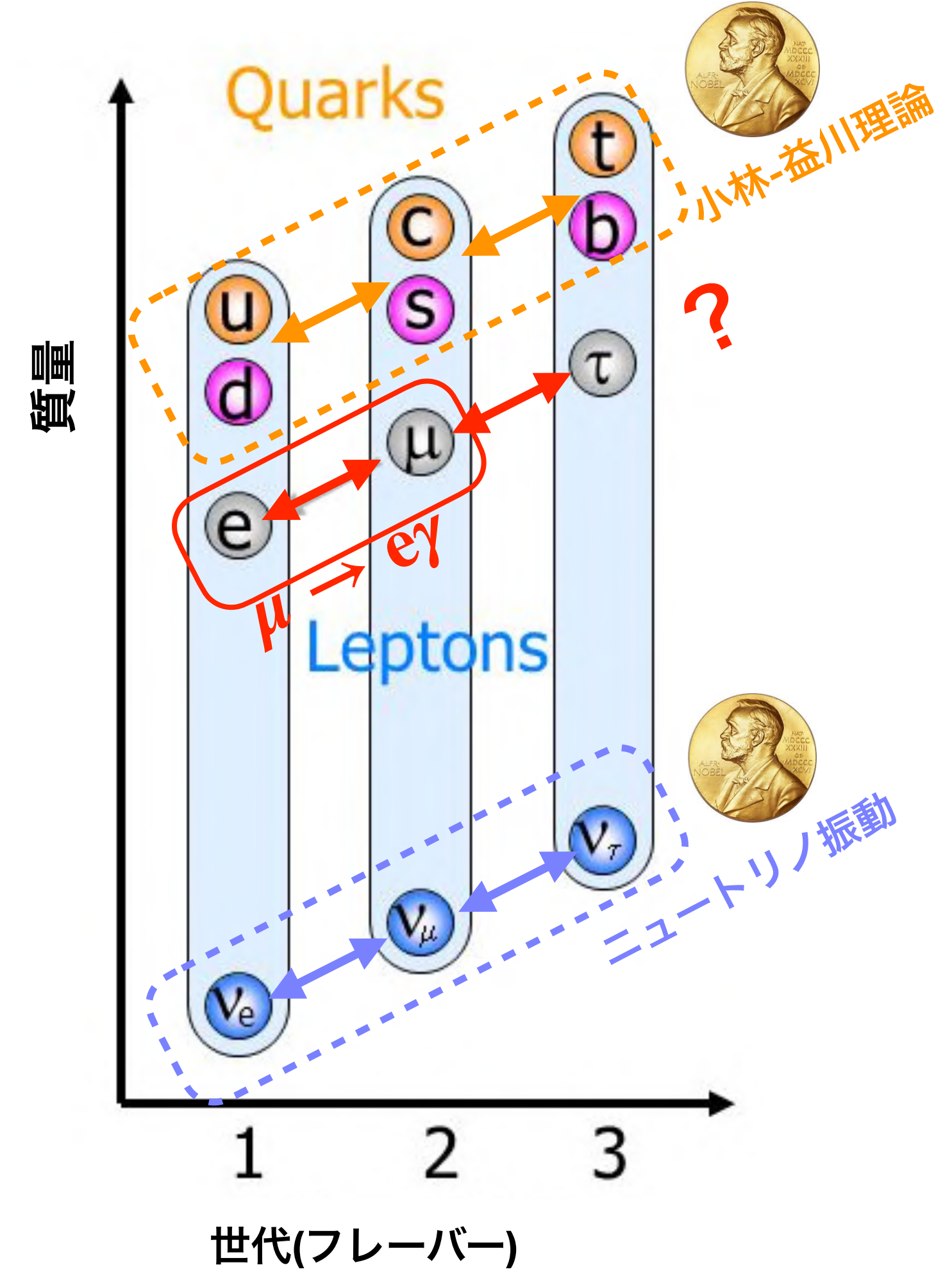
●なぜ世代構造？なぜ3世代？

## ●素粒子の世代構造(フレーバー)は素粒子物理研究の強力なツール



物質粒子

物質粒子(クォークとレプトン)の3世代構造



# フレーバーの保存

## ●レプトンに対して世代数を定義してみる

●電子数  $L_e$

●ミュー粒子数  $L_\mu$

●タウ粒子数  $L_\tau$

	$e^-$	$\nu_e$	$\mu^-$	$\nu_\mu$	$\tau^-$	$\nu_\tau$	$e^+$	$\bar{\nu}_e$	$\mu^+$	$\bar{\nu}_\mu$	$\tau^+$	$\bar{\nu}_\tau$
$L_e$	+1	+1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0
$L_\mu$	0	0	+1	+1	0	0	0	0	-1	-1	0	0
$L_\tau$	0	0	0	0	+1	+1	0	0	0	0	-1	-1

$$\begin{array}{r} \mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \\ L_e \quad 0 = 1 - 1 \quad 0 \\ L_\mu \quad 1 = 0 \quad 0 \quad 1 \end{array}$$

レプトンフレーバーは通常のミュー粒子崩壊では保存されている

# フレーバーの保存

## ●レプトンに対して世代数を定義してみる

●電子数  $L_e$

●ミュー粒子数  $L_\mu$

●タウ粒子数  $L_\tau$

	$e^-$	$\nu_e$	$\mu^-$	$\nu_\mu$	$\tau^-$	$\nu_\tau$	$e^+$	$\bar{\nu}_e$	$\mu^+$	$\bar{\nu}_\mu$	$\tau^+$	$\bar{\nu}_\tau$
$L_e$	+1	+1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0
$L_\mu$	0	0	+1	+1	0	0	0	0	-1	-1	0	0
$L_\tau$	0	0	0	0	+1	+1	0	0	0	0	-1	-1

$$\begin{array}{r} \mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \\ L_e \quad 0 = 1 - 1 \quad 0 \\ L_\mu \quad 1 = 0 \quad 0 \quad 1 \end{array}$$

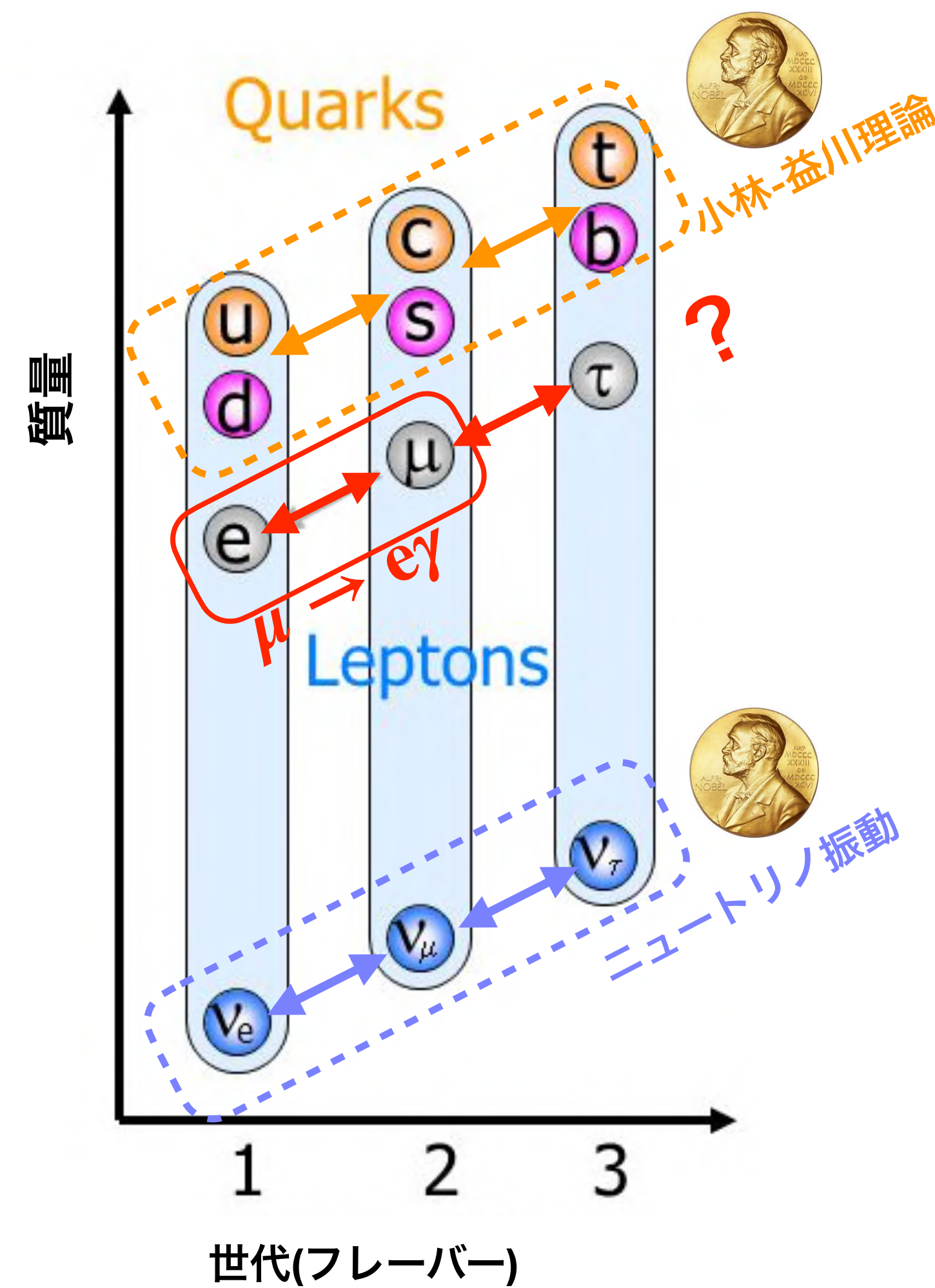
レプトンフレーバーは通常のみュー粒子崩壊では保存されている

**フレーバー保存は理論からの原理的な要請ではない。  
別に破れていてもよい。**

# フレーバーの破れ

- 実際、クォーク、ニュートリノでは大きく破れている
- 電荷を持つレプトン(荷電レプトン)では破れが見つからない
- 荷電レプトンフレーバーは本当に破れていないのか？

物質粒子(クォークとレプトン)の3世代構造



# 荷電レプトンフレーバーの破れ

- ミュー粒子のレプトンフレーバーを破る代表的な現象

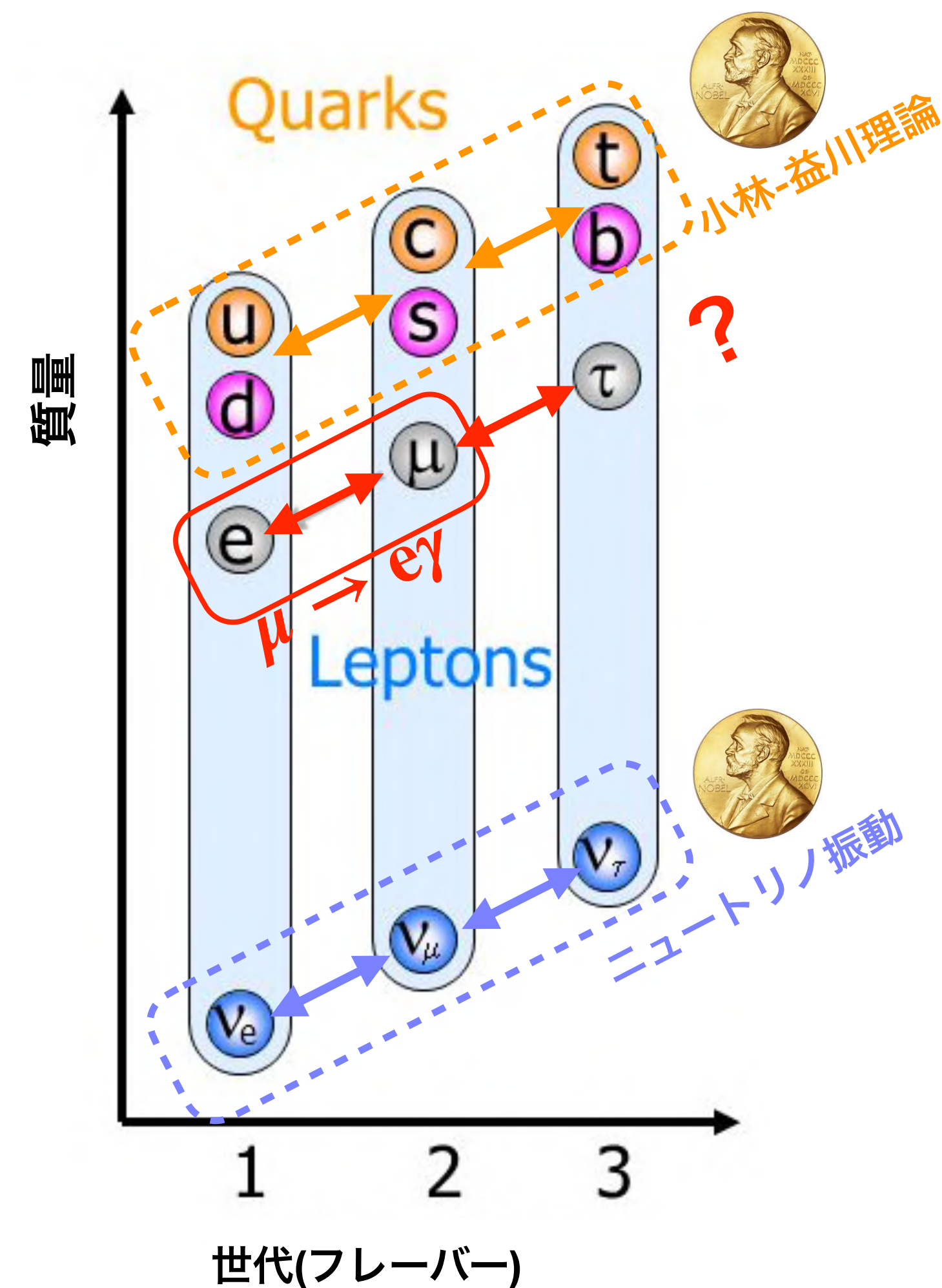
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$$

$$\mu^- N \rightarrow e^- N$$

		$\mu^-$	$\rightarrow$	$e^-$	$\gamma$
$L_e$	0	$\neq$	1	0	
$L_\mu$	1	$\neq$	0	0	

物質粒子(クォークとレプトン)の3世代構造



# なぜ荷電レプトンフレーバーの破れを探索するのか？

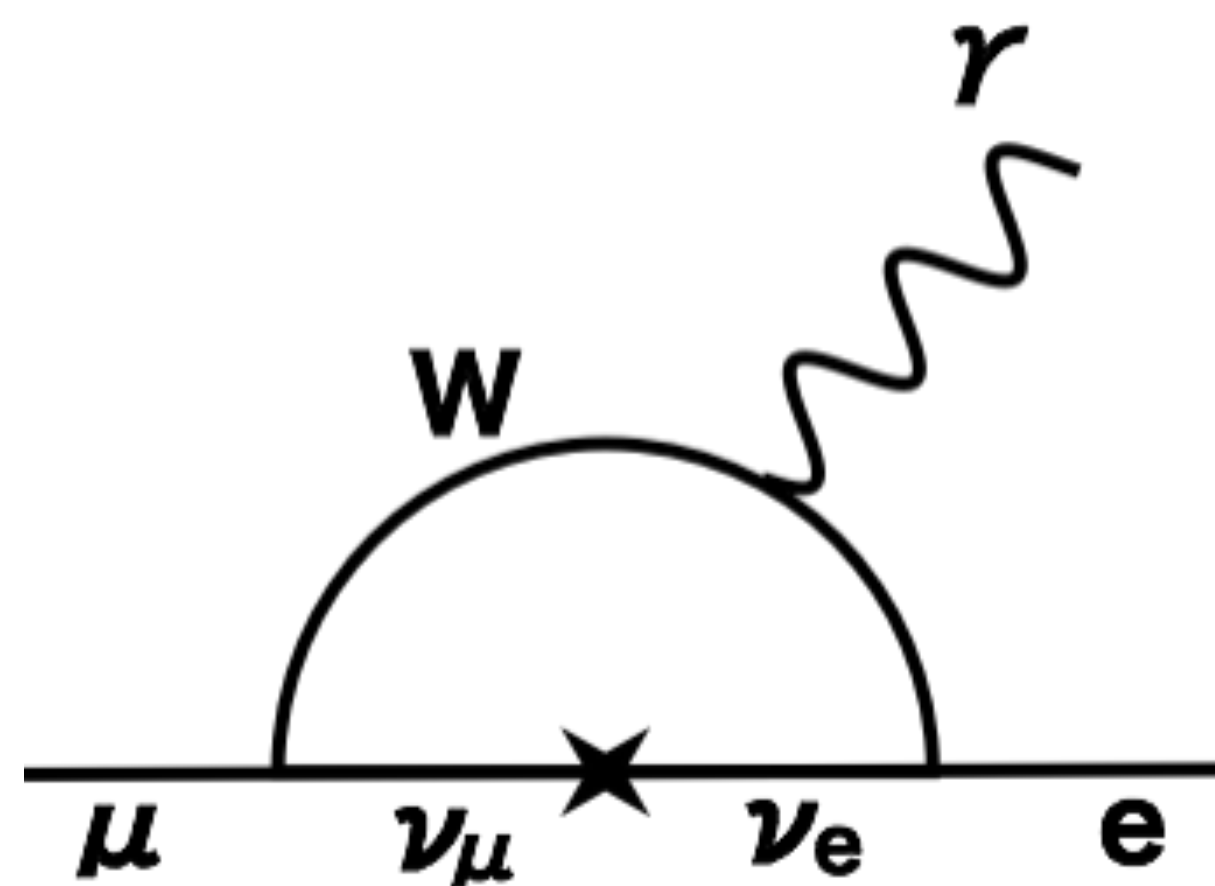
●荷電レプトンフレーバーの破れは「標準理論+ニュートリノ質量(観測済み)」でも起こる！

●ニュートリノのフレーバーの破れ(ニュートリノ振動)によって

●ニュートリノの質量が小さいのでその確率は極めて低く、測定はほぼ不可能

●逆に言うと、実験の邪魔にはならない

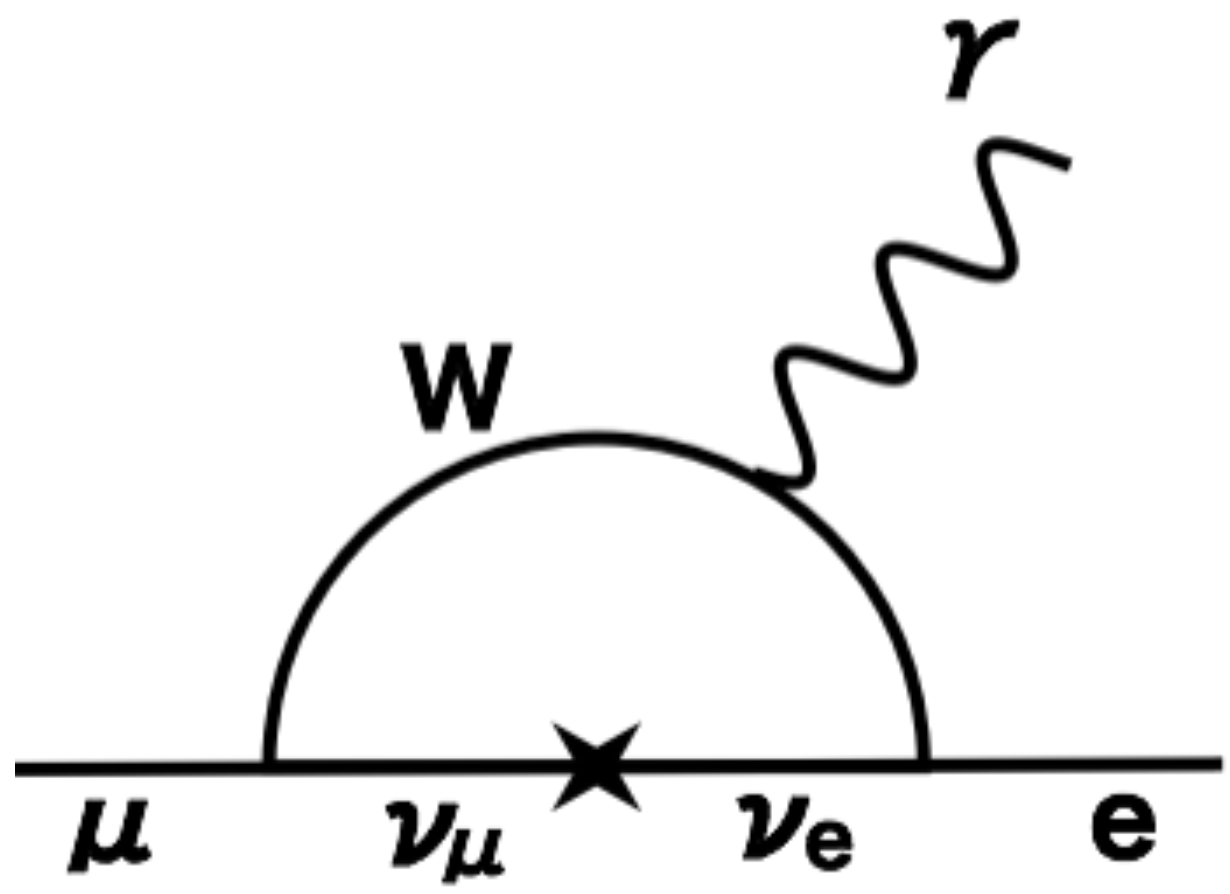
$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim O(10^{-54})$$



# なぜ荷電レプトンフレーバーの破れを探索するのか？

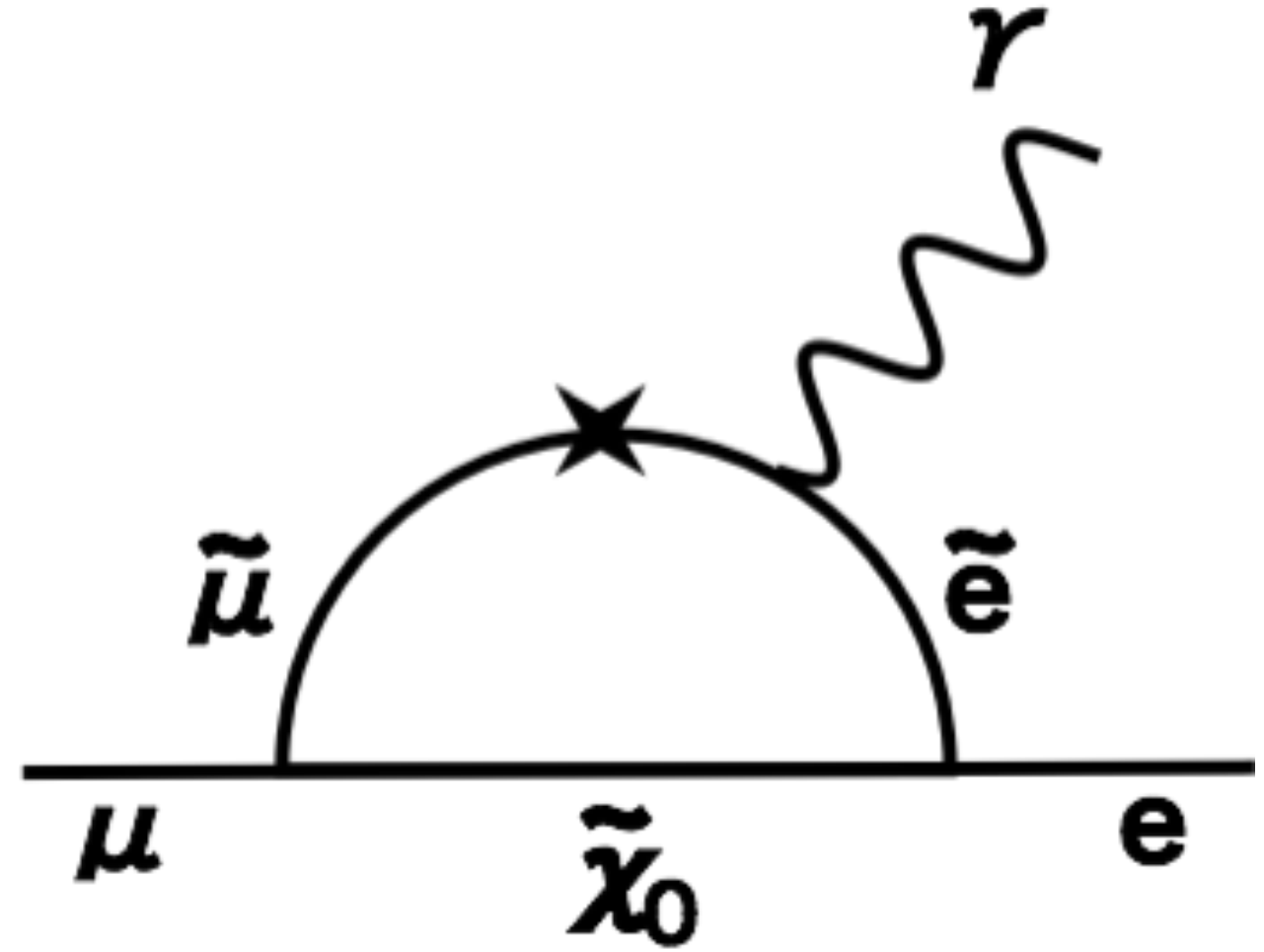
- 超対称大統一理論など有望な標準理論で測定可能なほど大きな荷電レプトンフレーバーの破れが起こり得る

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) \sim 10^{-54}$$



標準理論(+ニュートリノ振動)

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



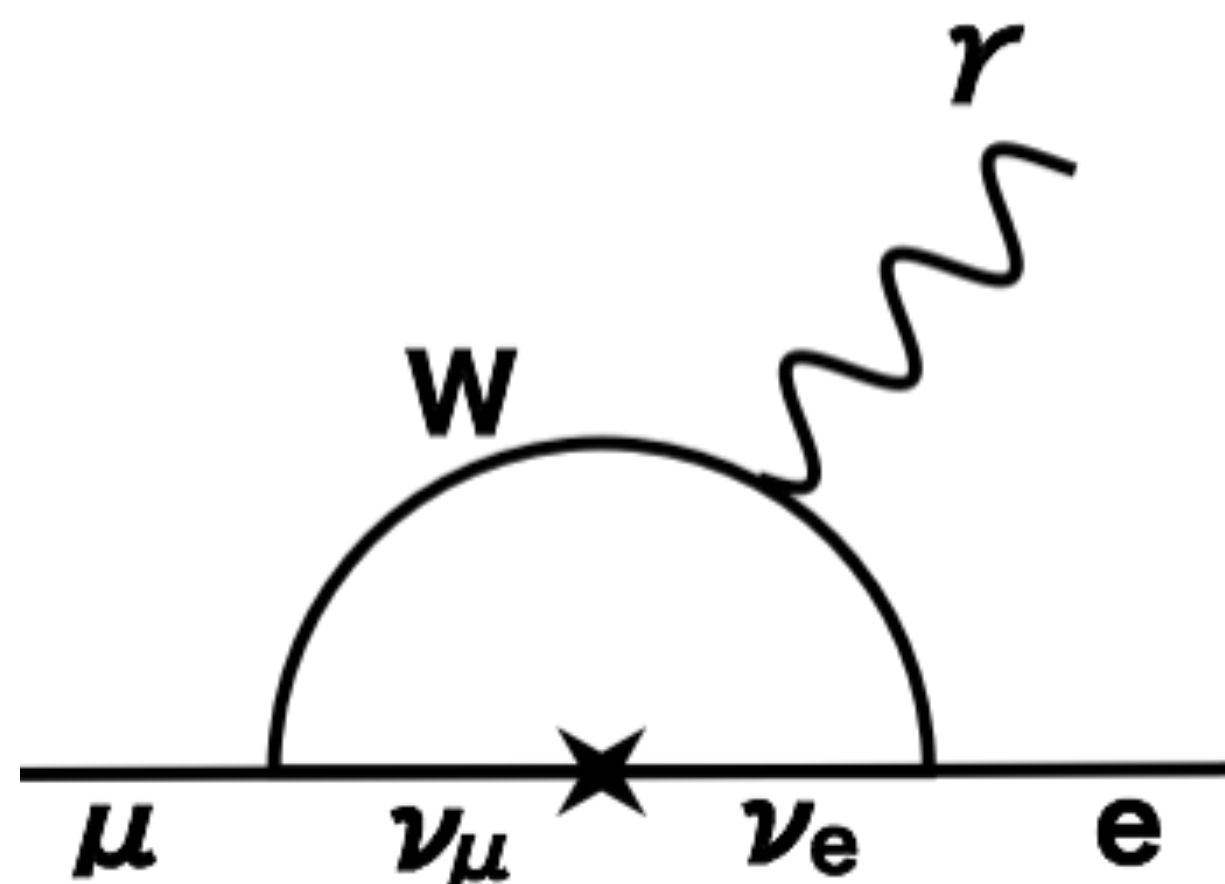
新物理



# なぜ荷電レプトンフレーバーの破れを探索するのか？

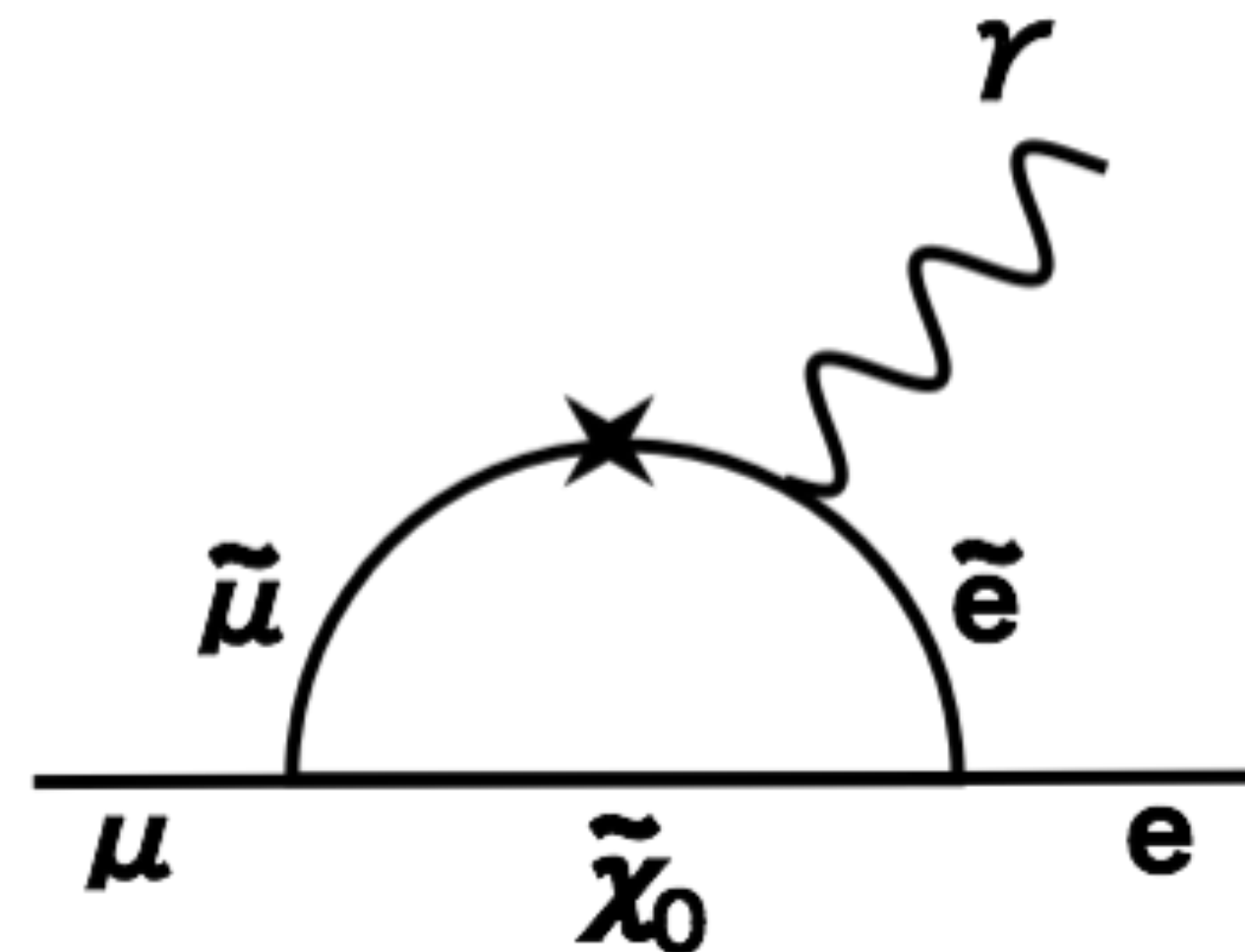
- 超対称大統一理論など有望な標準理論で測定可能なほど大きな荷電レプトンフレーバーの破れが起こり得る

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) \sim 10^{-54}$$



標準理論(+ニュートリノ振動)

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



新物理

**レプトンフレーバーの破れ発見 = 標準理論を超える新物理の決定的証拠！**

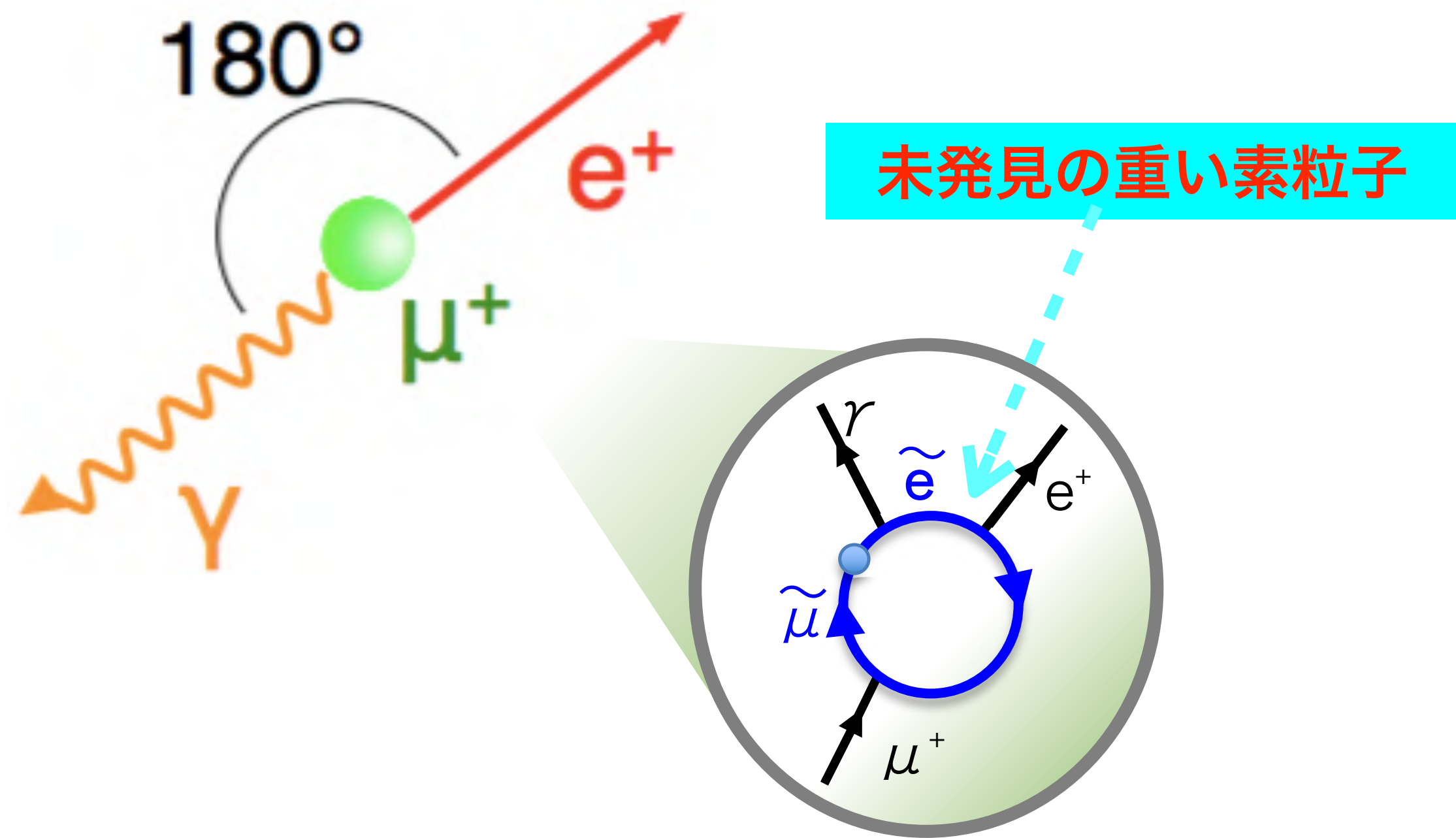
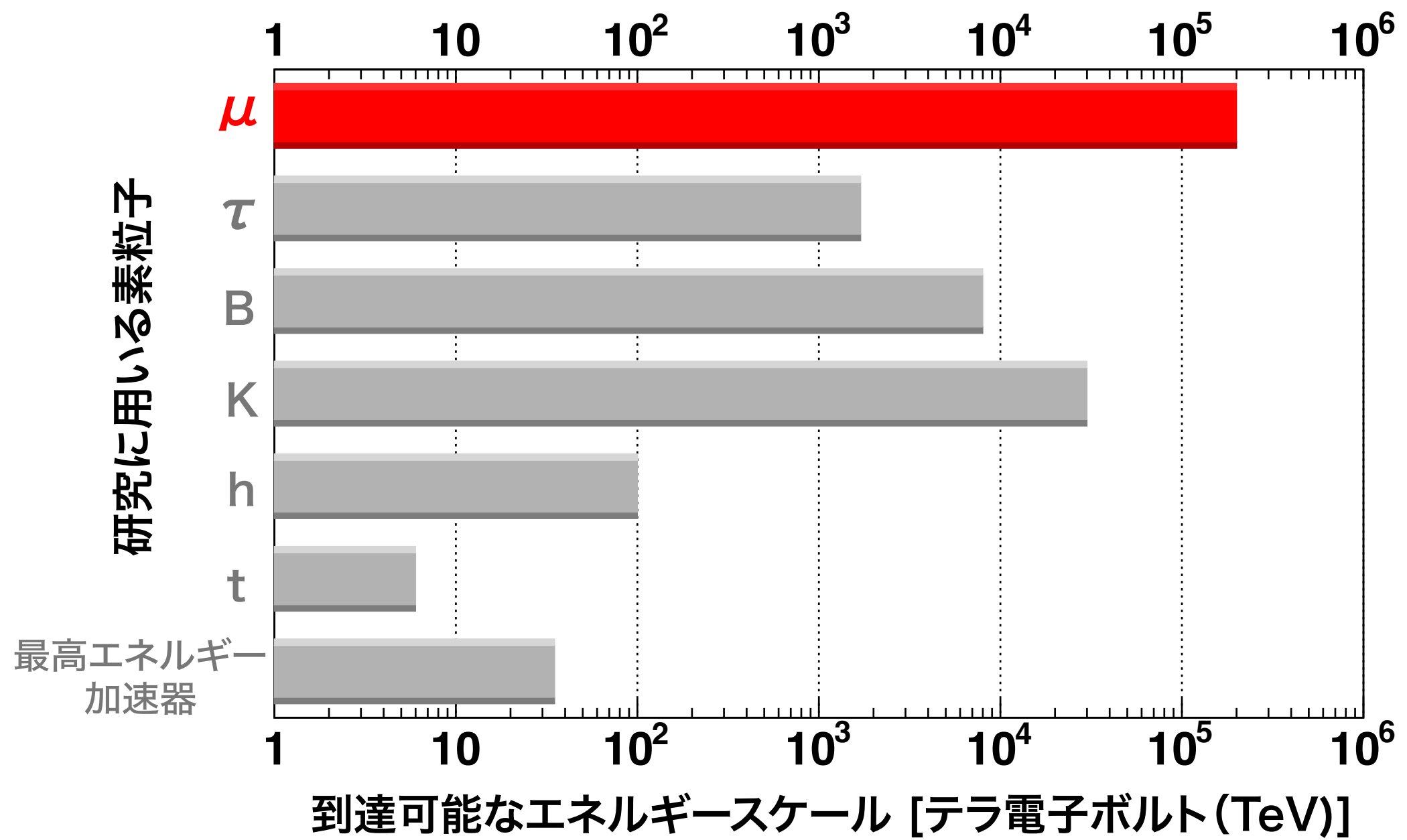
# なぜ荷電レプトンフレーバーの破れを探索するのか？

## ●最高エネルギー加速器実験で新粒子はまだ発見されていない

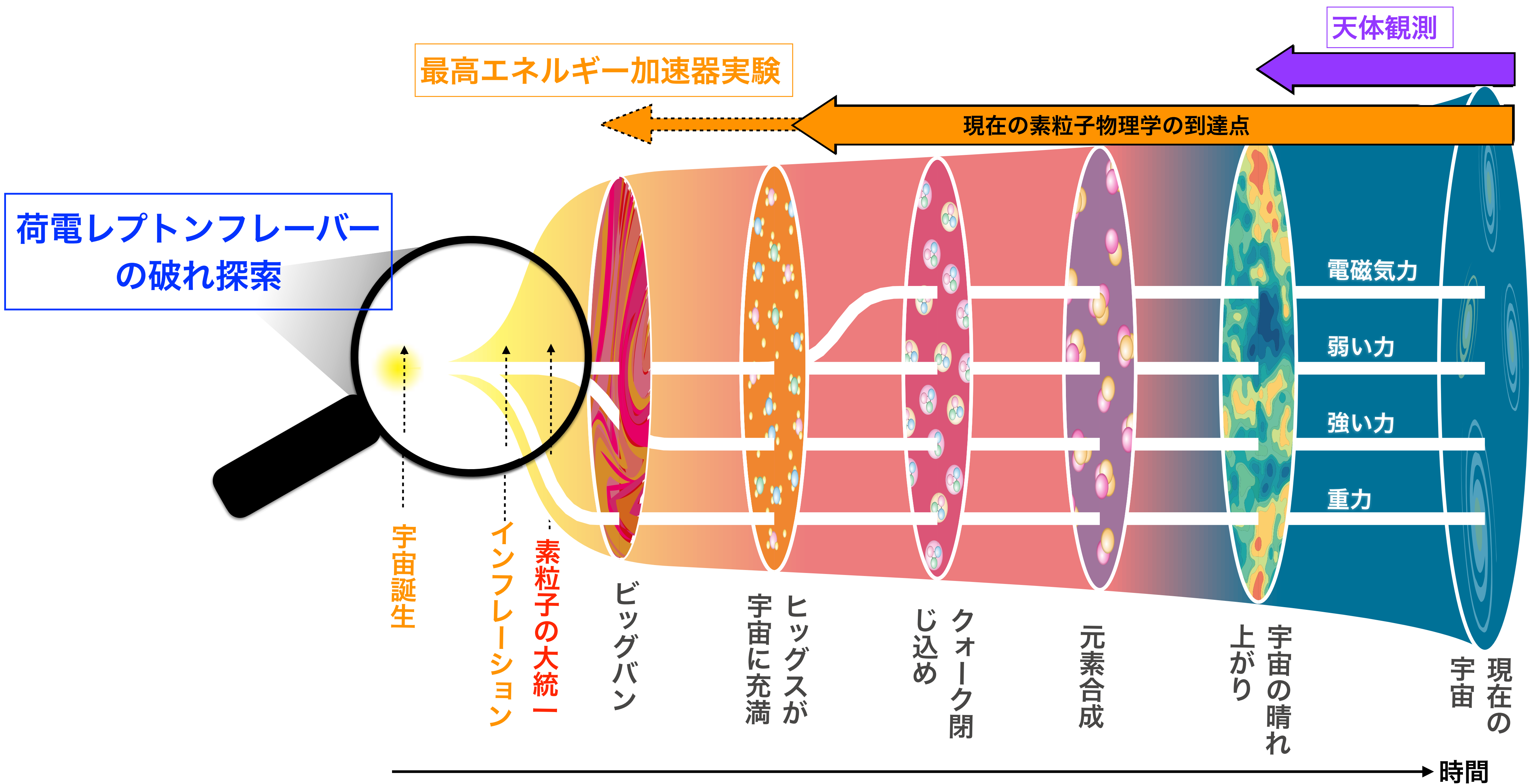
- 新物理がどのエネルギースケールにいるかわからない

## ●稀な現象、対称性のわずかな破れなどを検証することで新物理を研究

- 大強度、精密フロンティア
- 加速器では直接到達できない超高エネルギーの物理に迫れる



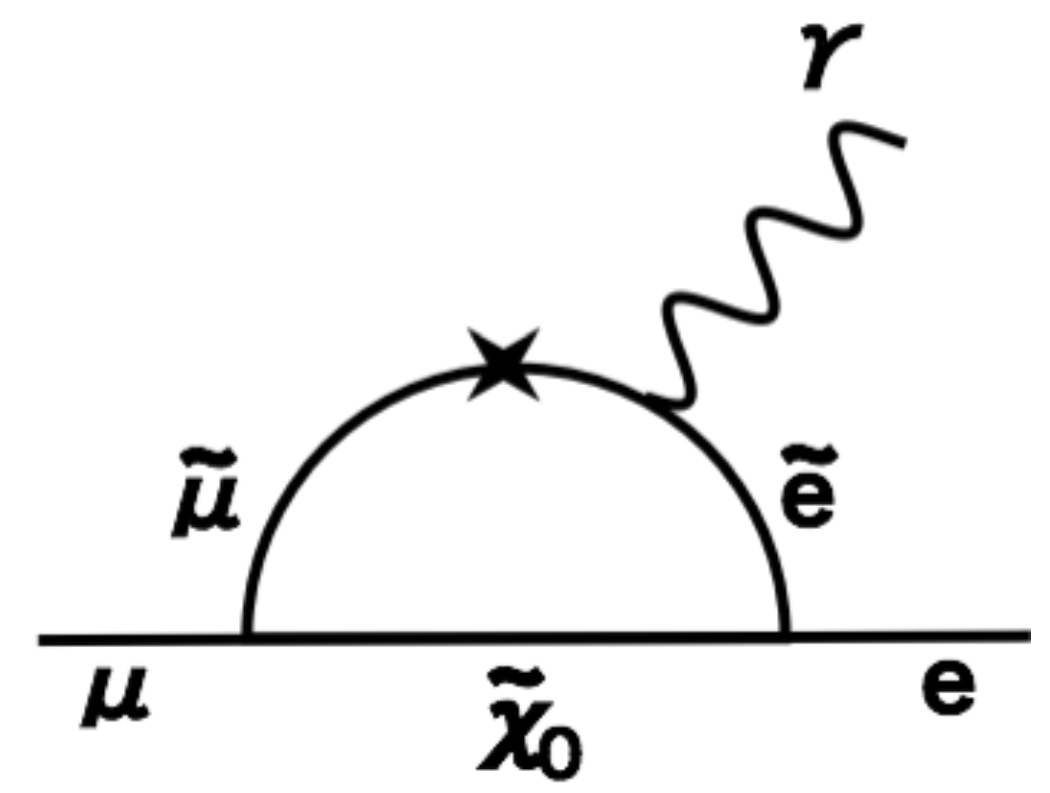
# なぜ荷電レプトンフレーバーの破れを探索するのか？



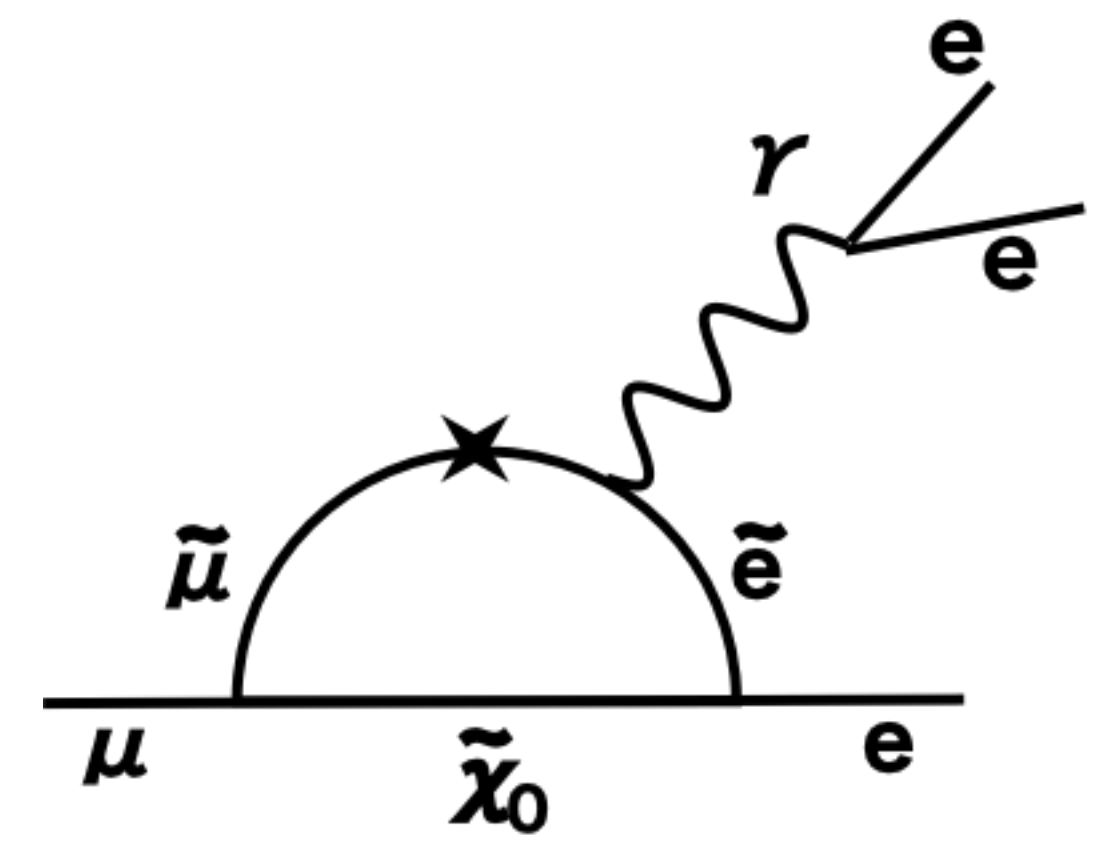
# 荷電レプトンフレーバーの破れ現象の比較

フォトンで結合する相互作用の場合 (たとえば超対称大統一理論)

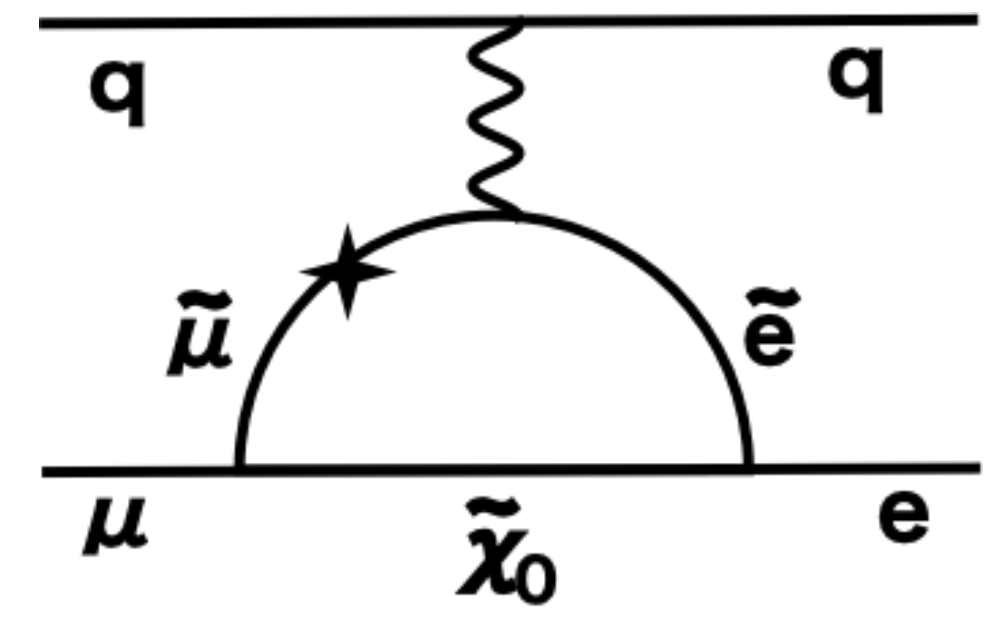
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$$



$$\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$$



$$\mu^- N \rightarrow e^- N$$

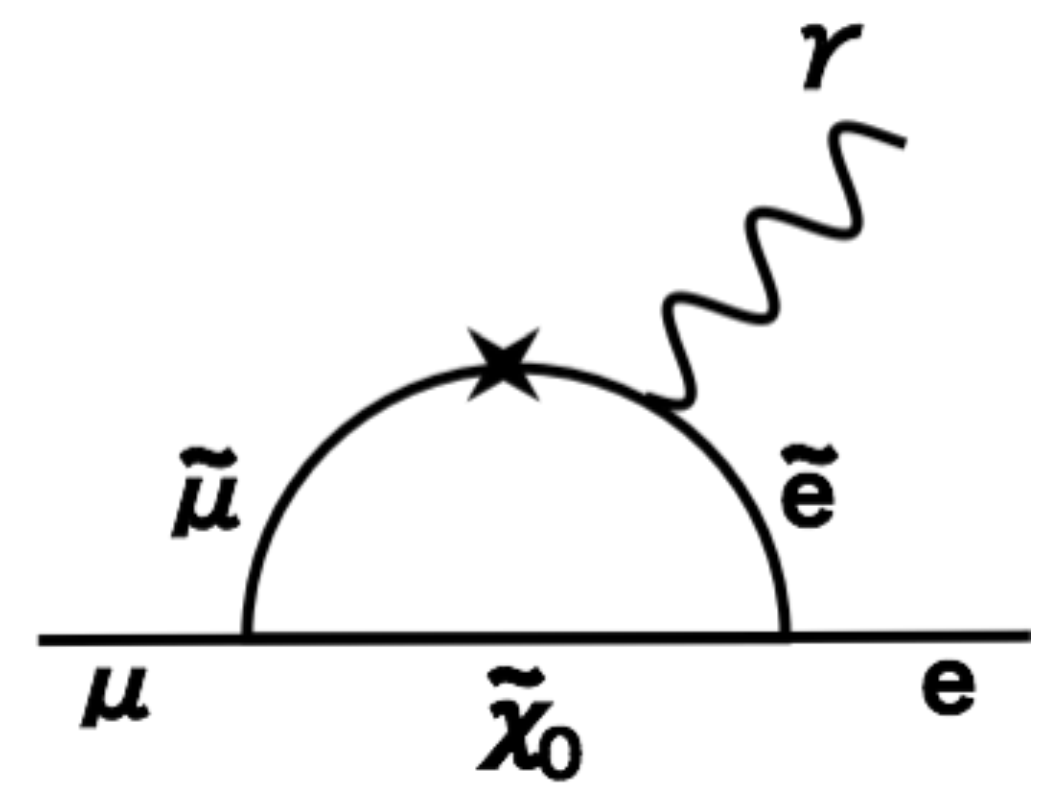


現象の頻度 = 1 : ~ 5.9 x 10^-3 : ~ 2.6 x 10^-3

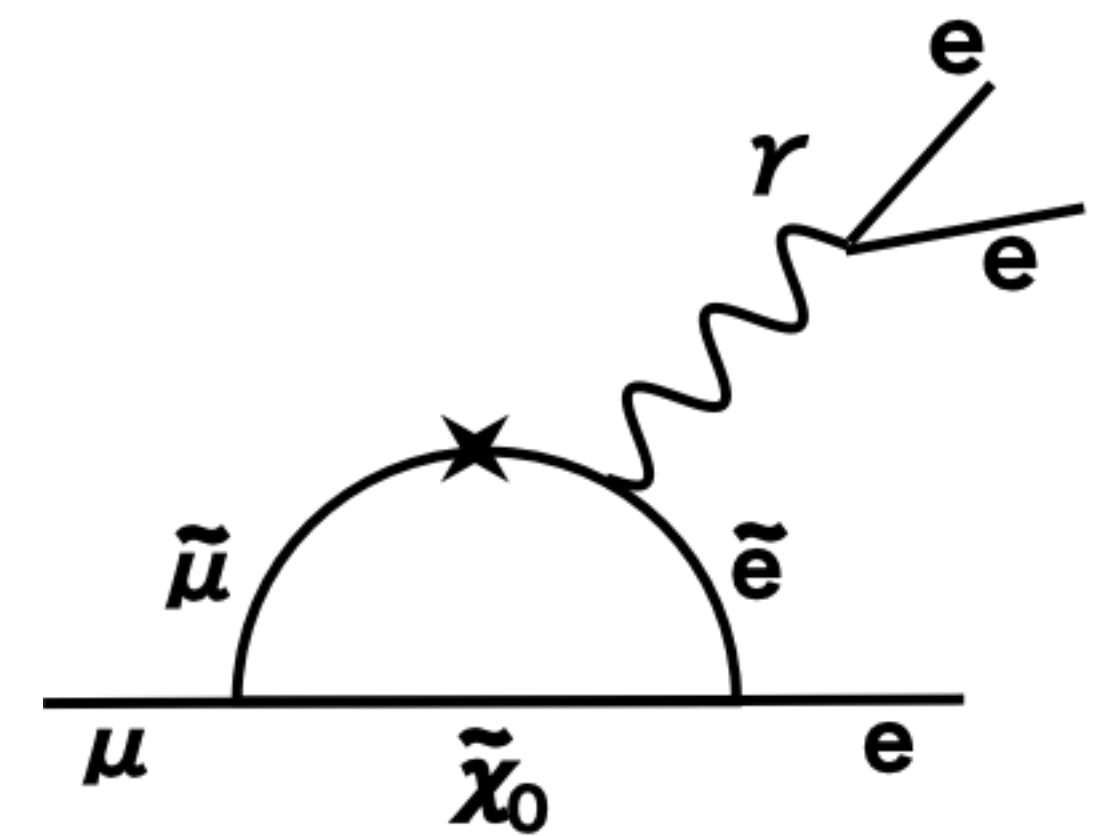
# 荷電レプトンフレーバーの破れ現象の比較

フォトンで結合する相互作用の場合 (たとえば超対称大統一理論)

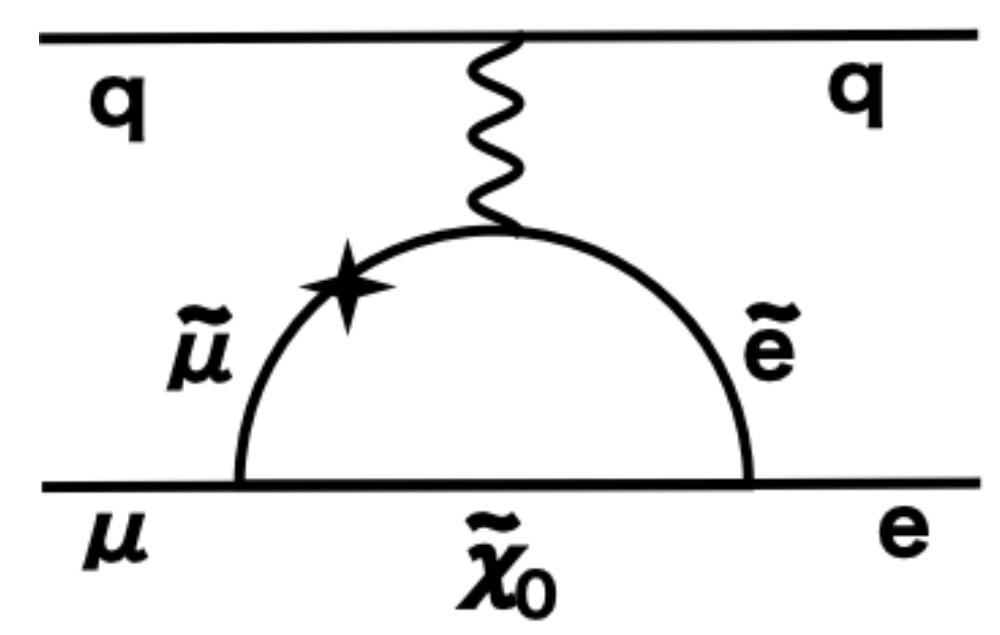
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$$



$$\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$$



$$\mu^- N \rightarrow e^- N$$



現象の頻度=

1

:

$\sim 5.9 \times 10^{-3}$

:

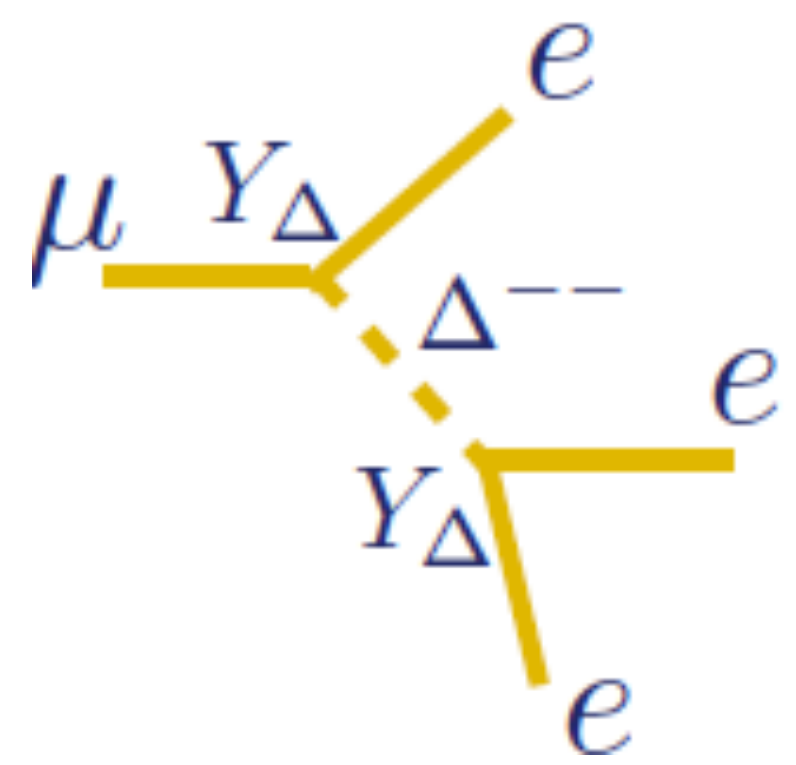
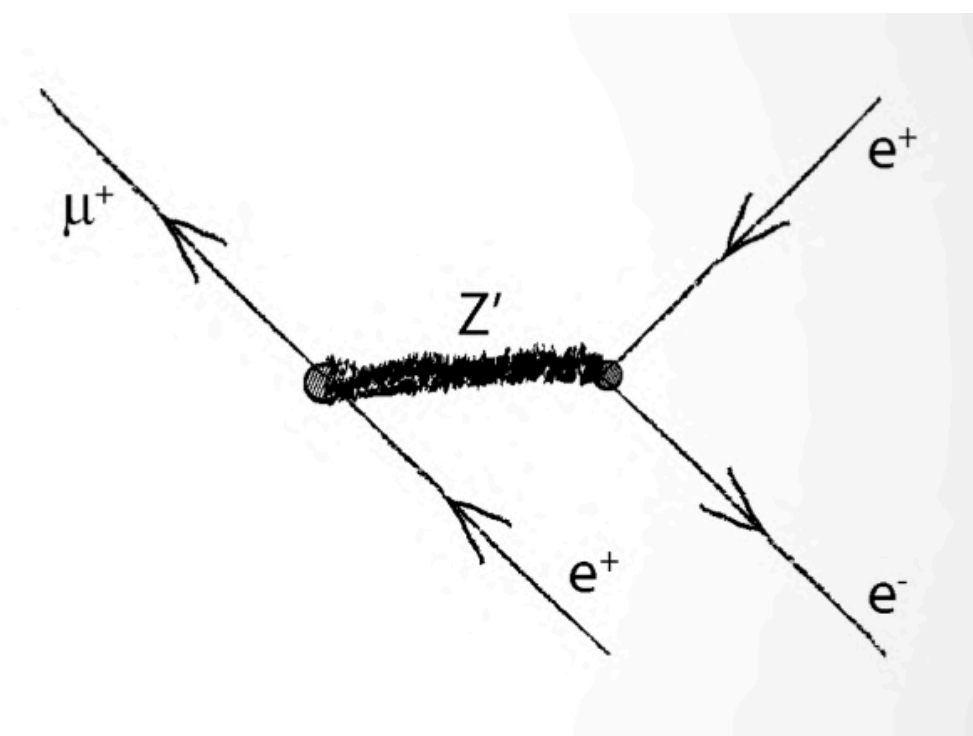
$\sim 2.6 \times 10^{-3}$

$\mu \rightarrow e \gamma$ が見つけやすい

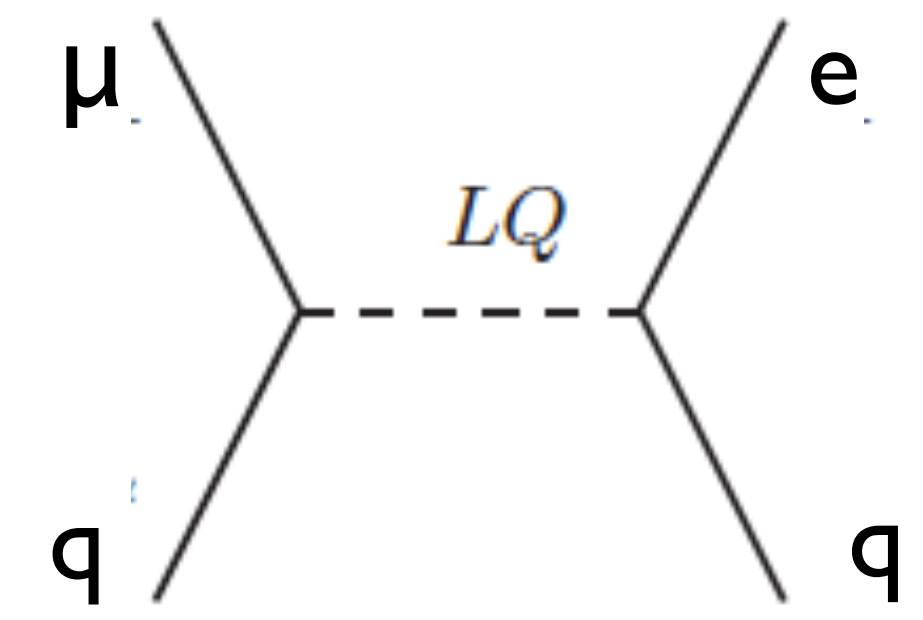
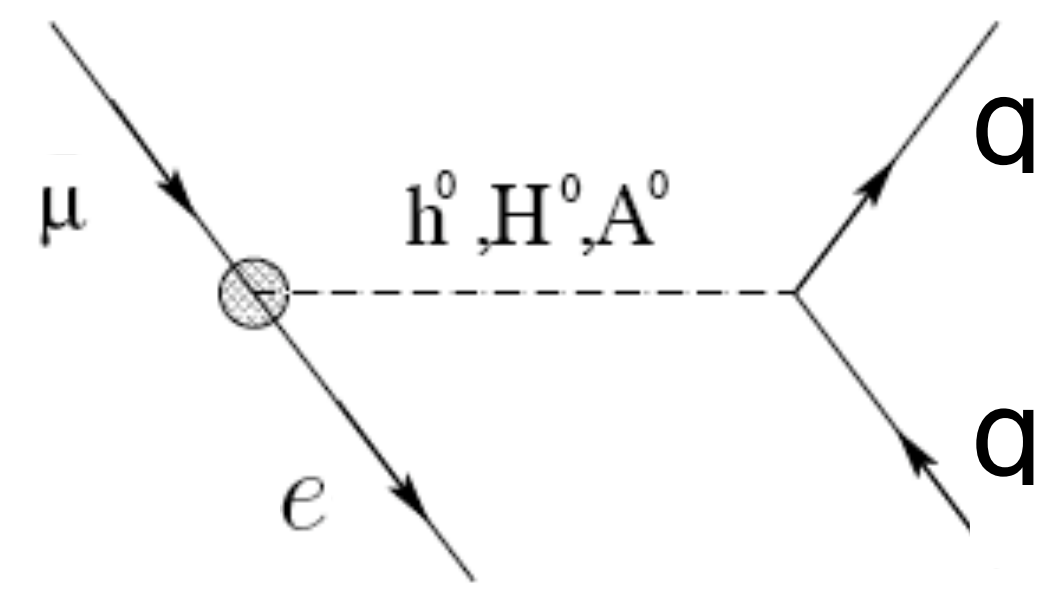
# 荷電レプトンフレーバーの破れ現象の比較

$\mu \rightarrow eee$ や $\mu N \rightarrow eN$ は光子を媒介する相互作用以外の可能性も

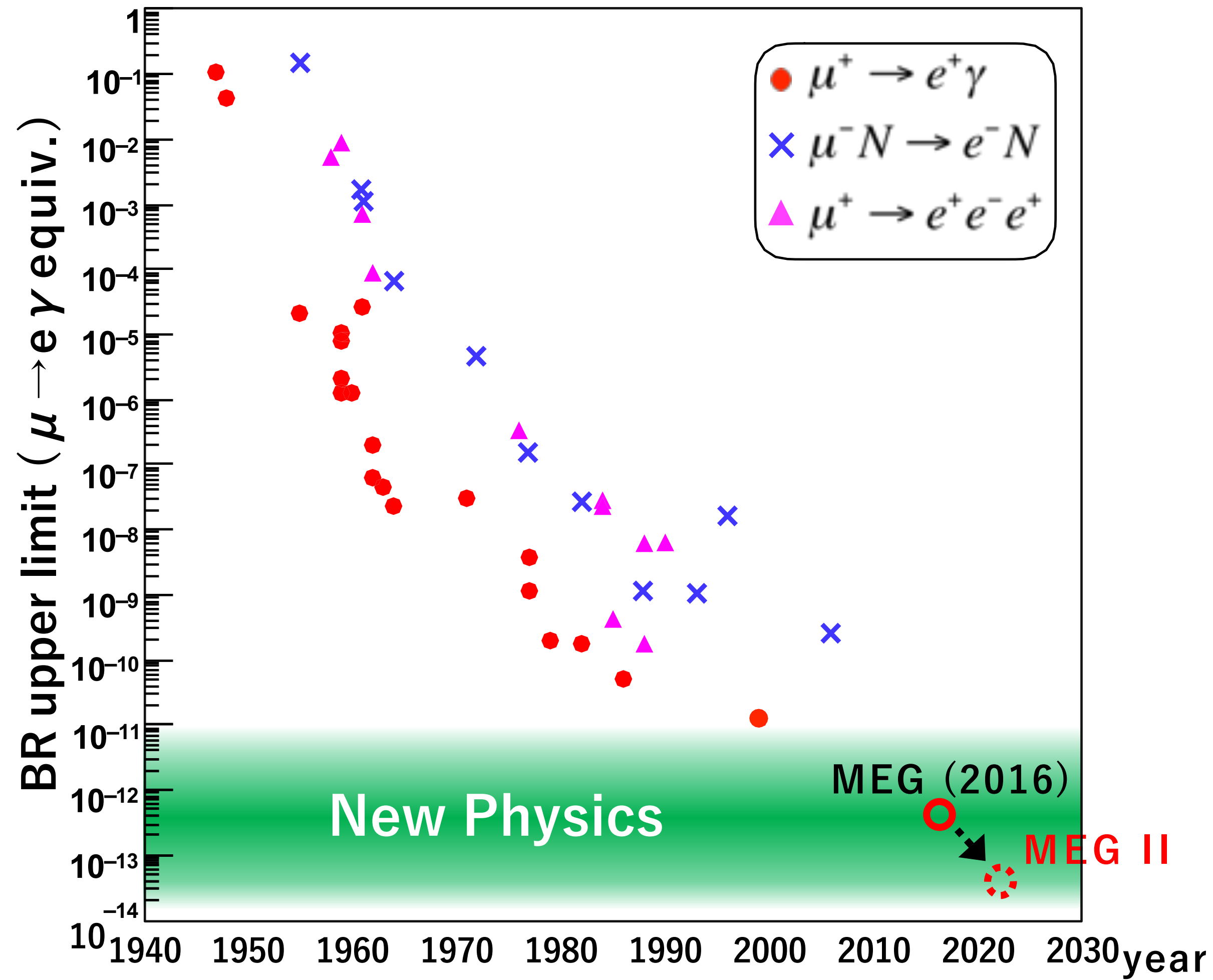
$\mu \rightarrow eee$



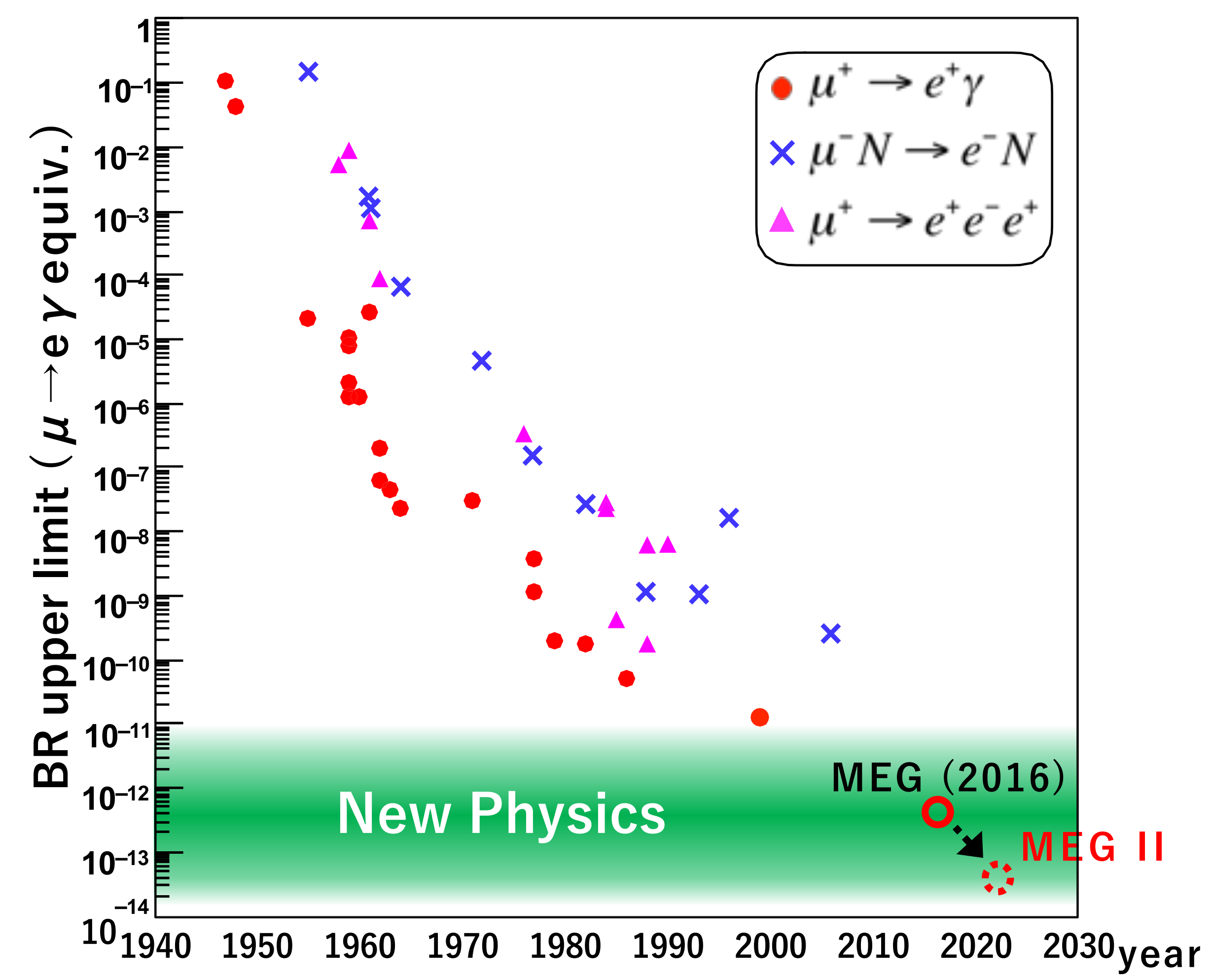
$\mu N \rightarrow eN$



# ミュー粒子を用いたレプトンフレーバーの破れ探索



# ミュー粒子を用いたレプトンフレーバーの破れ探索

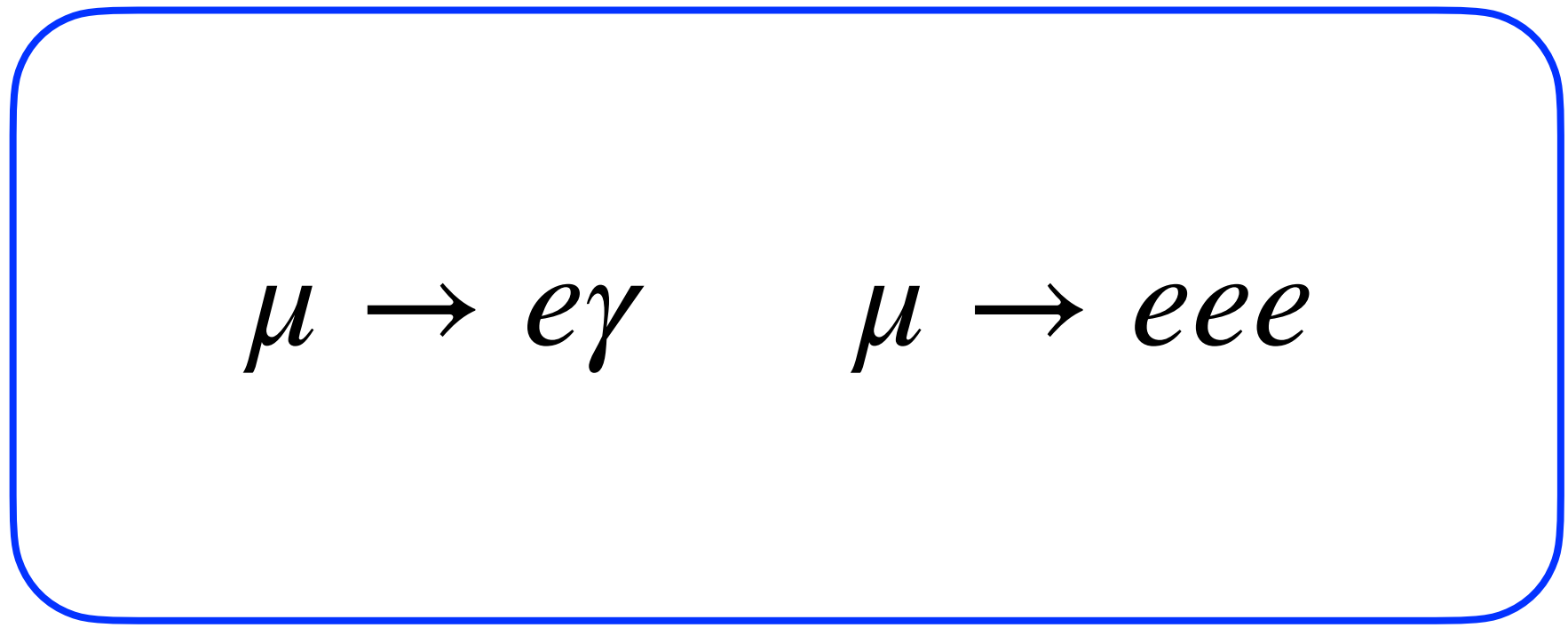


$\mu \rightarrow e \gamma$ 探索実験は既に新物理検証に十分な感度を持っている！

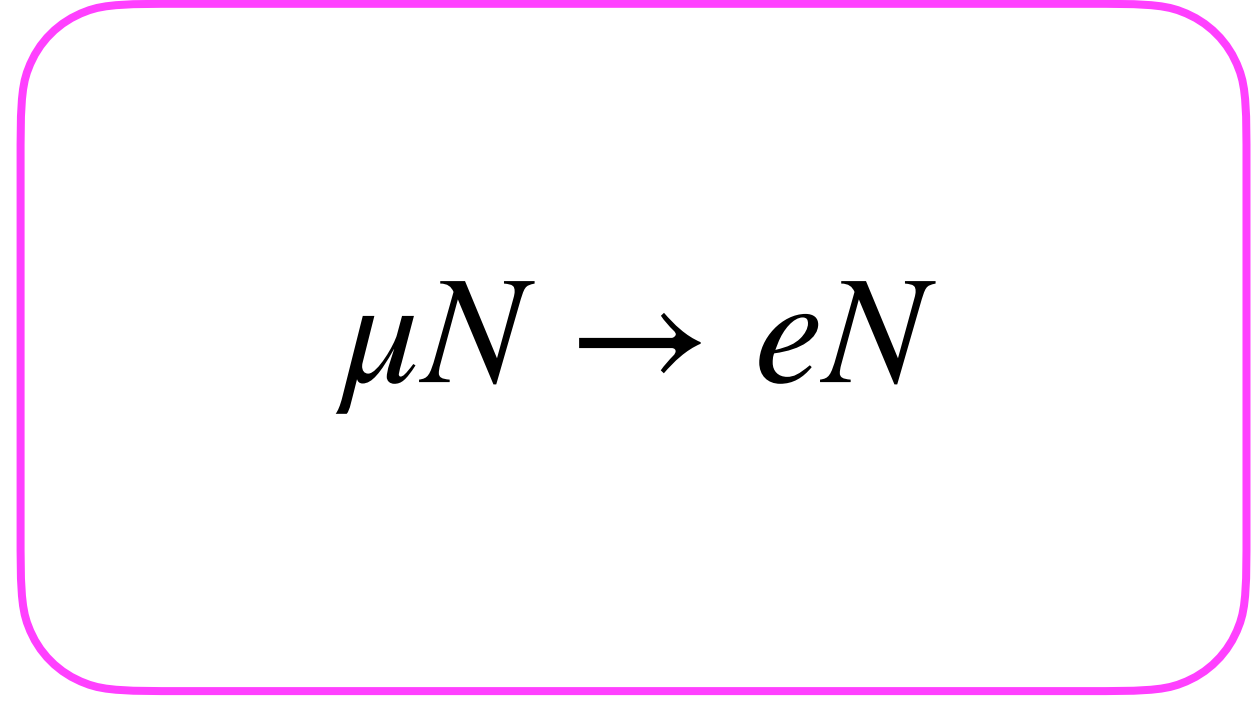


# レプトンフレーバーの破れ現象の探し方

ミュー粒子稀崩壊



ミュー粒子稀過程

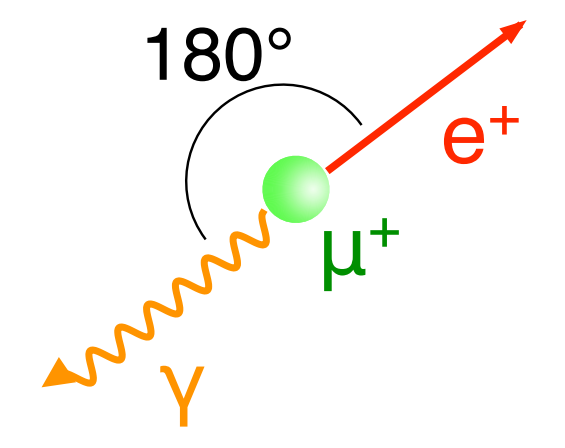


- **信号**：見つけたいもの、非常に稀
- **バックグラウンド**：通常のミュー粒子崩壊 (ほぼすべて)
- **信号はなるべく入ってきて、バックグラウンドがなるべく入ってこないような設計(ビーム、測定器)**
- **信号とバックグラウンドの特徴の違いをなるべく高い精度で測定(測定器)**

# $\mu \rightarrow e\gamma$

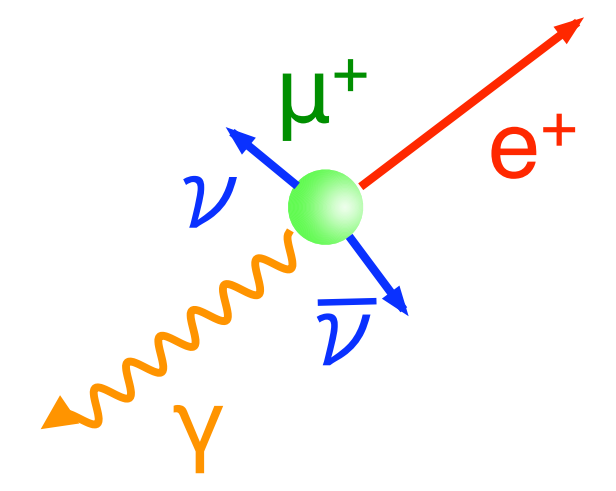
## $\mu \rightarrow e\gamma$ 事象

- 二体崩壊(ガンマ線-陽電子)
- 同時刻
- 同じエネルギー ( $E_e = E_\gamma = 52.8 \text{ MeV}$ )
- 反対方向

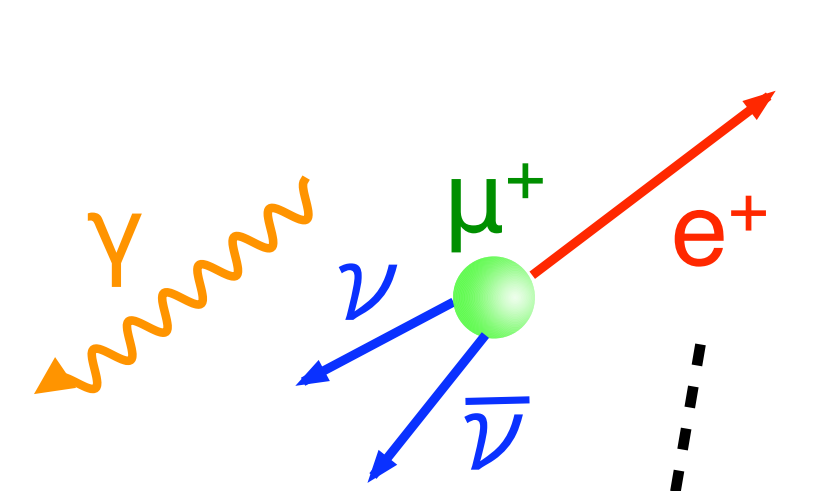


## 背景事象

### 即発背景事象

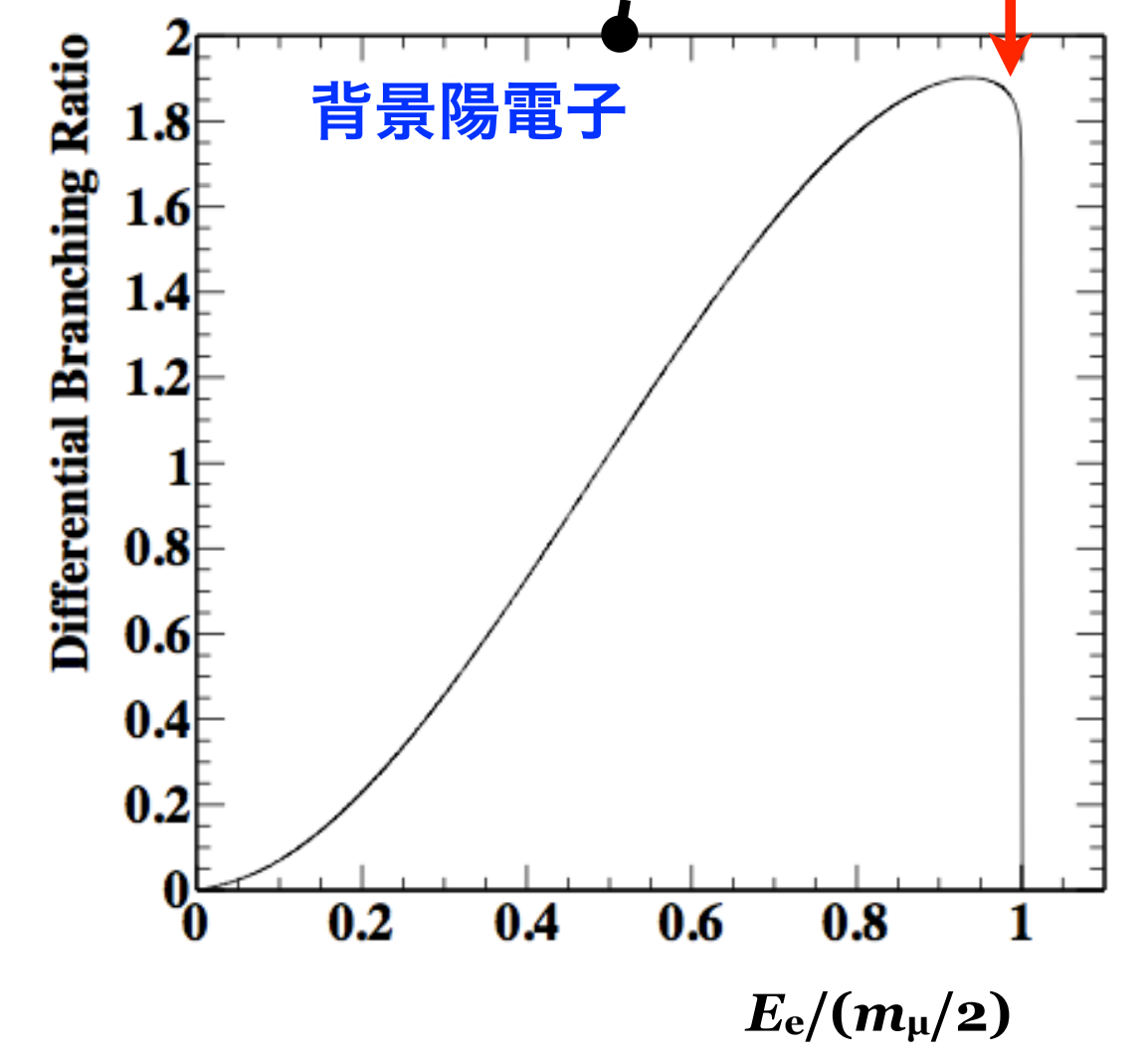
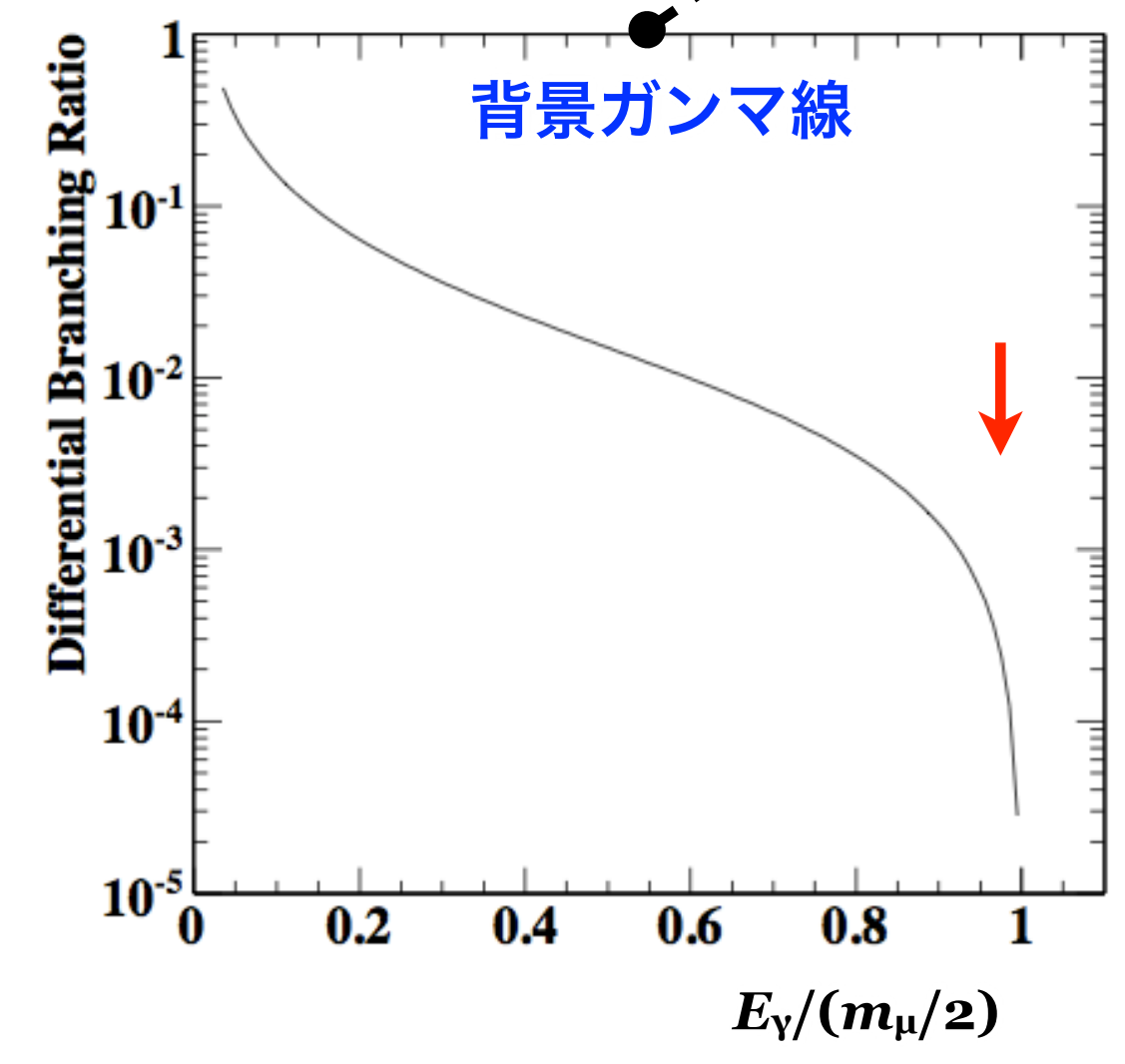


### 偶発的背景事象



### 信号とバックグラウンドを識別する物理量

- $T_{e\gamma} = 0$
- $E_\gamma = 52.8 \text{ MeV}$
- $E_e = 52.8 \text{ MeV}$
- $\Theta_{e\gamma} = 180^\circ$



# $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験への要請

## ●ミュー粒子ビームに対する要請

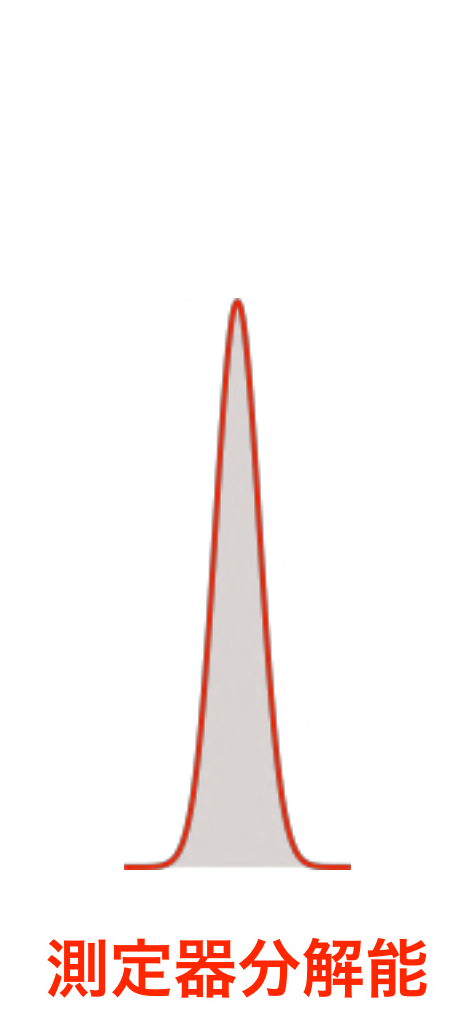
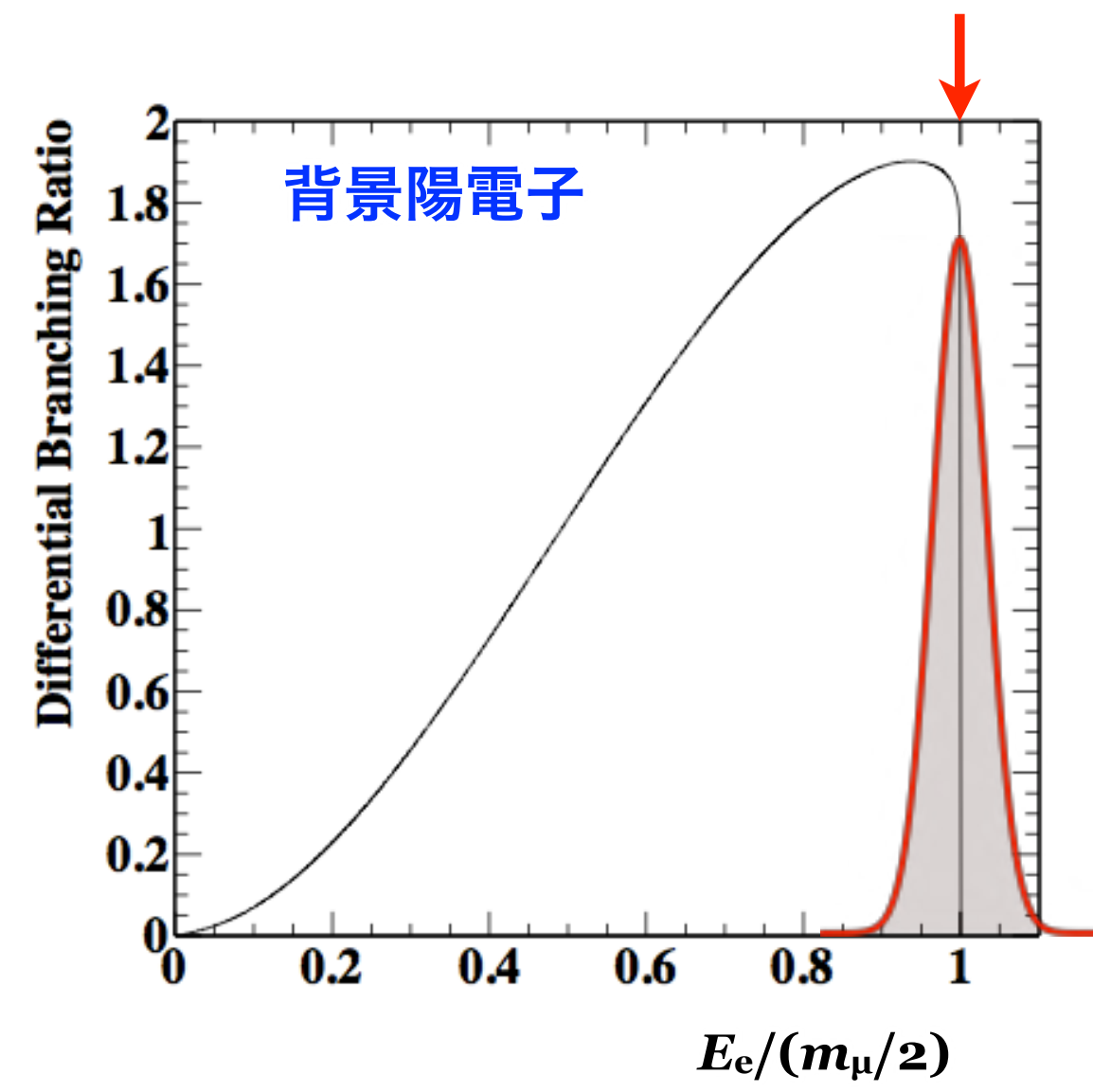
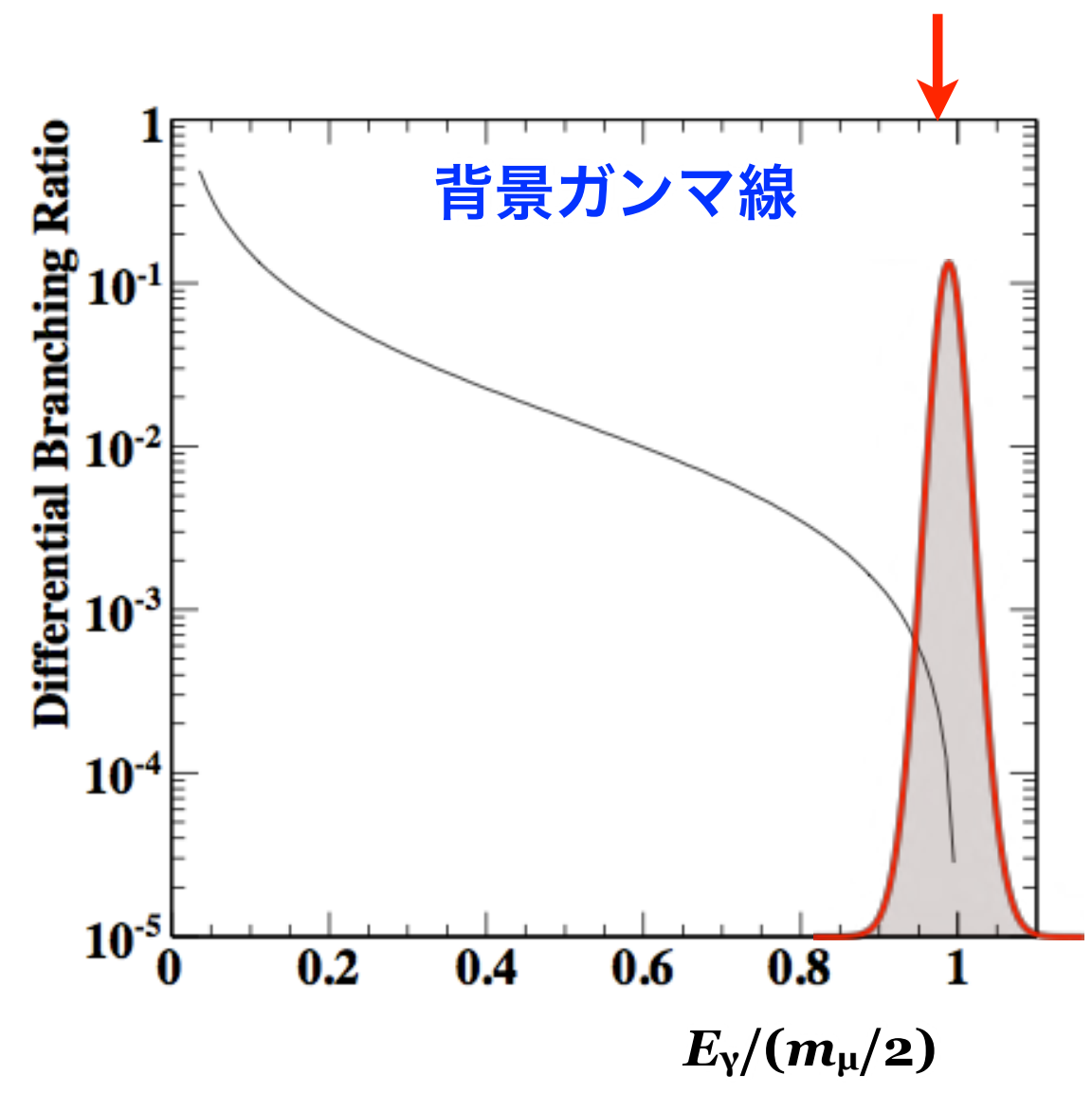
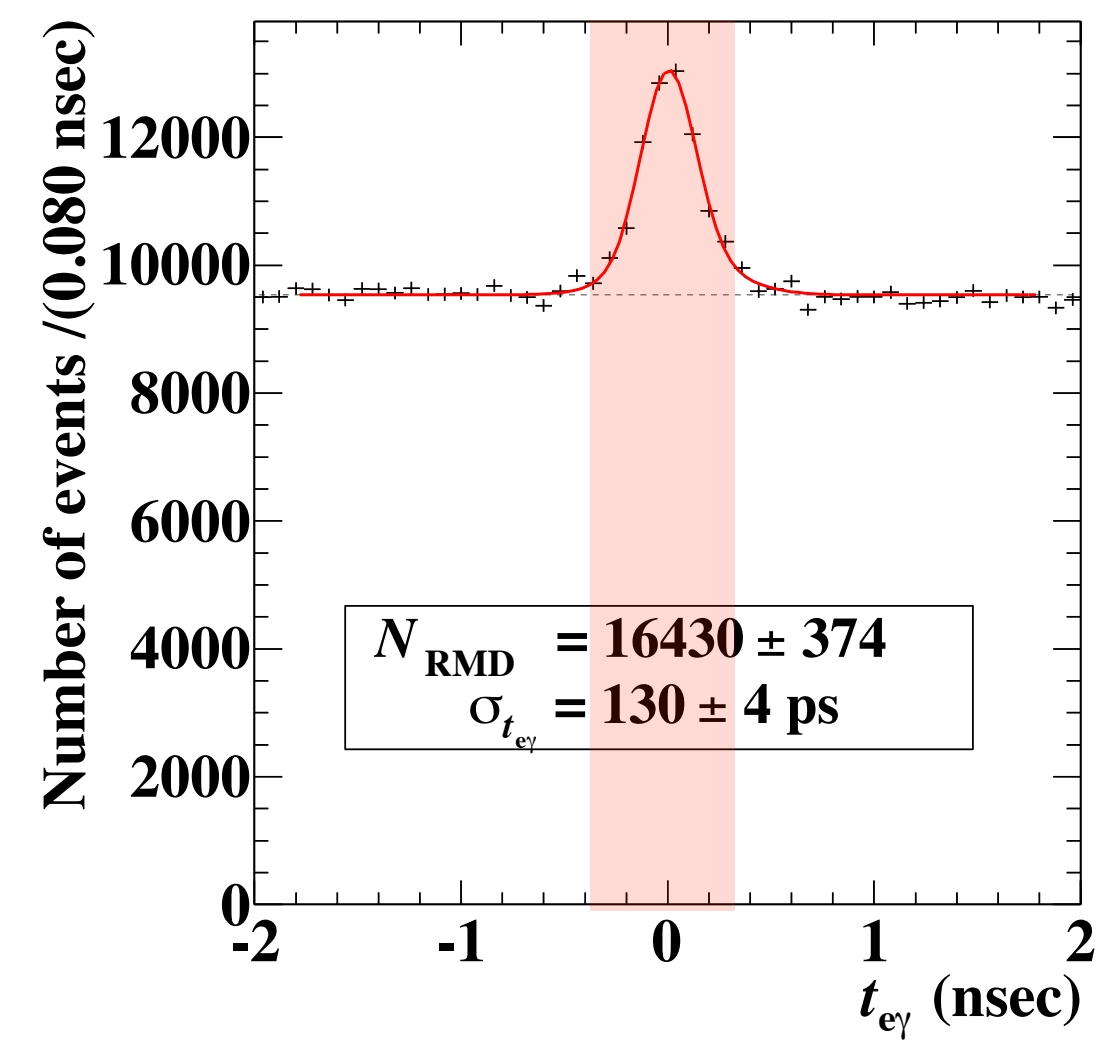
### ●大強度

- 連続(パルスではない)←同じミュー粒子数を調べる際なるべく偶発的背景事象を少なく

## ●測定器に対する要請

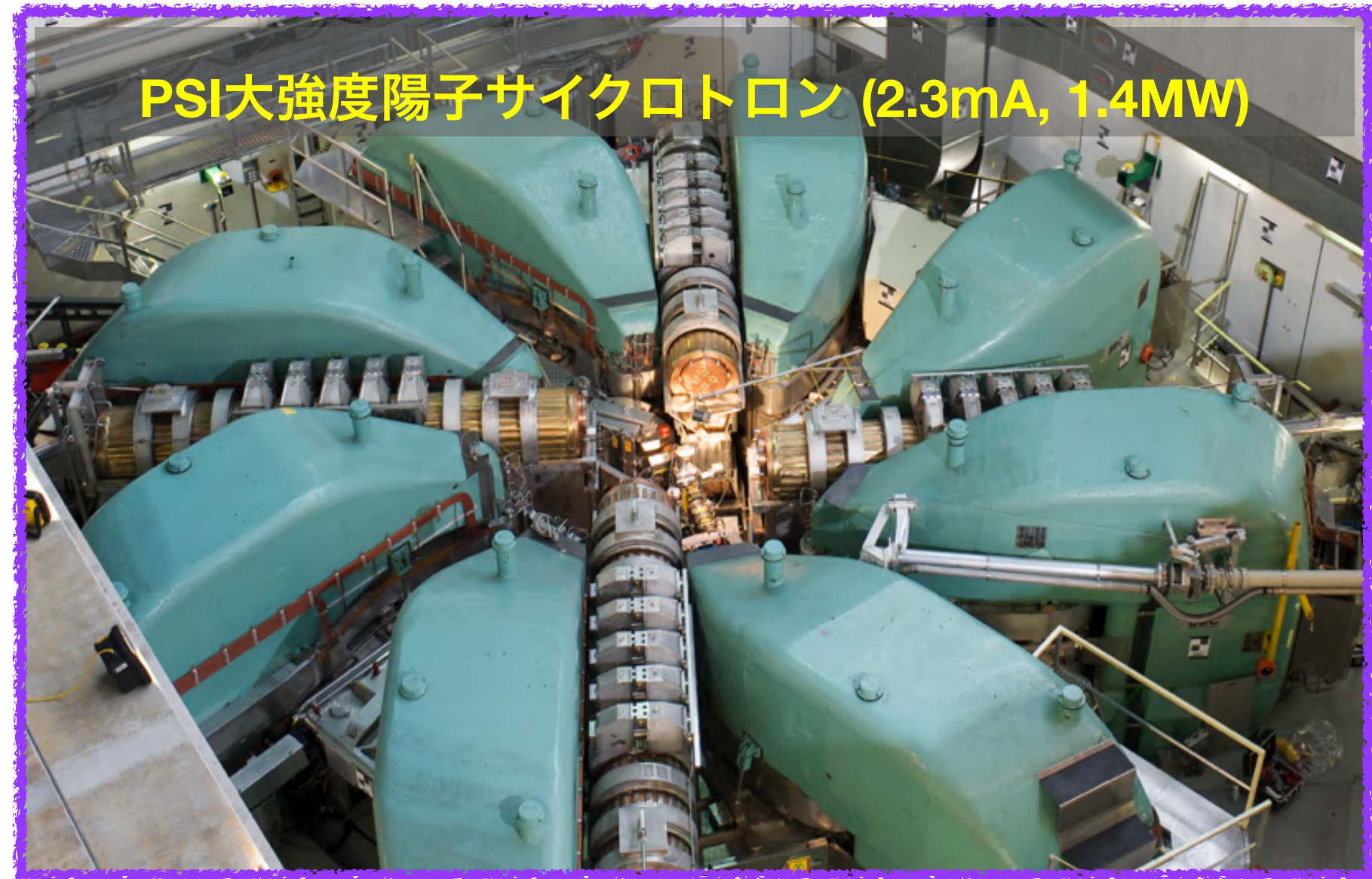
- エネルギー・タイミング・角度の**高精度測定**
- 高レート耐性** (安定性、パイルアップ耐性...)

ガンマ線と陽電子の時間差

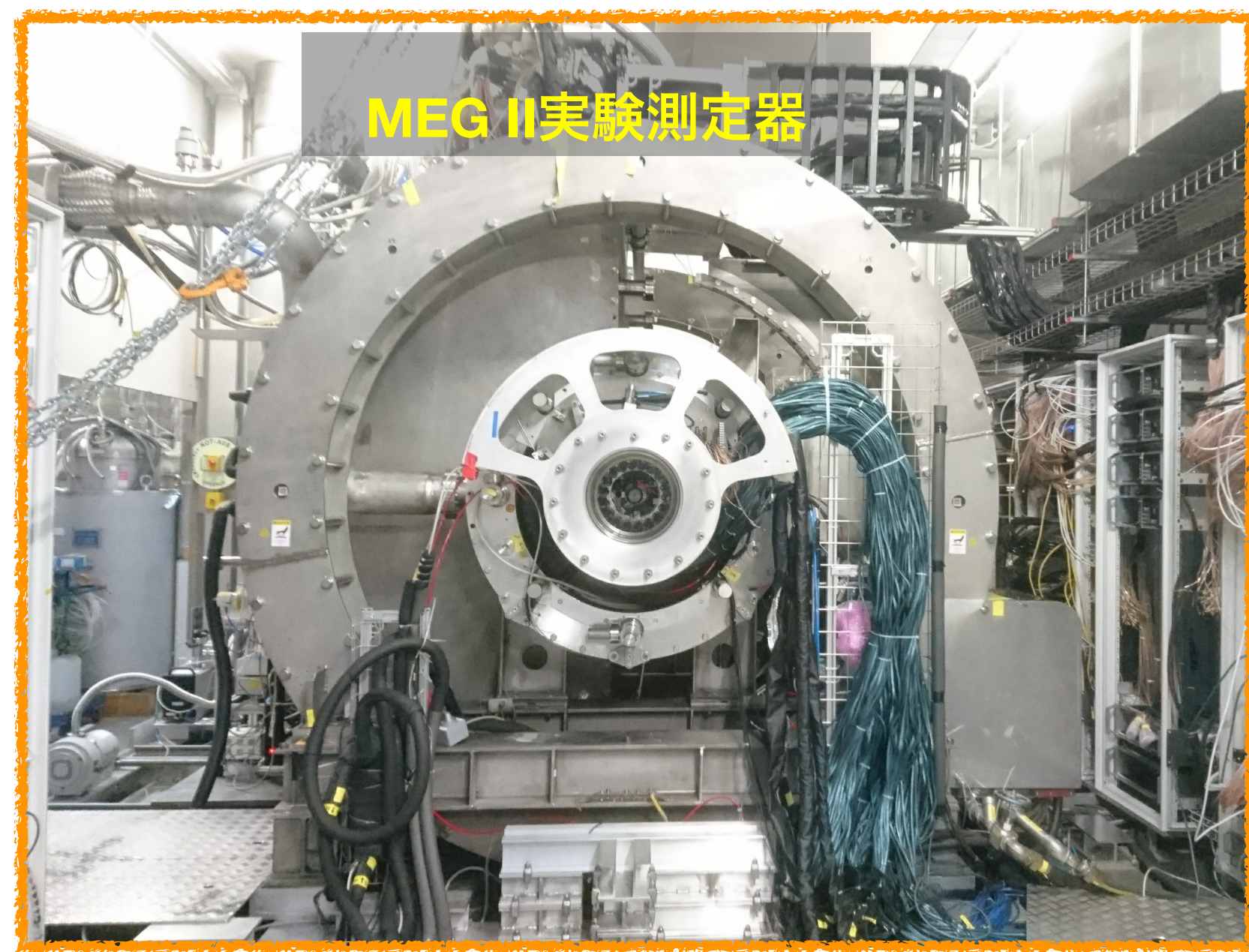


# 高感度 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索の鍵

スイス・ポールシェラー研究所(PSI)の  
世界最大強度のミュー粒子ビーム

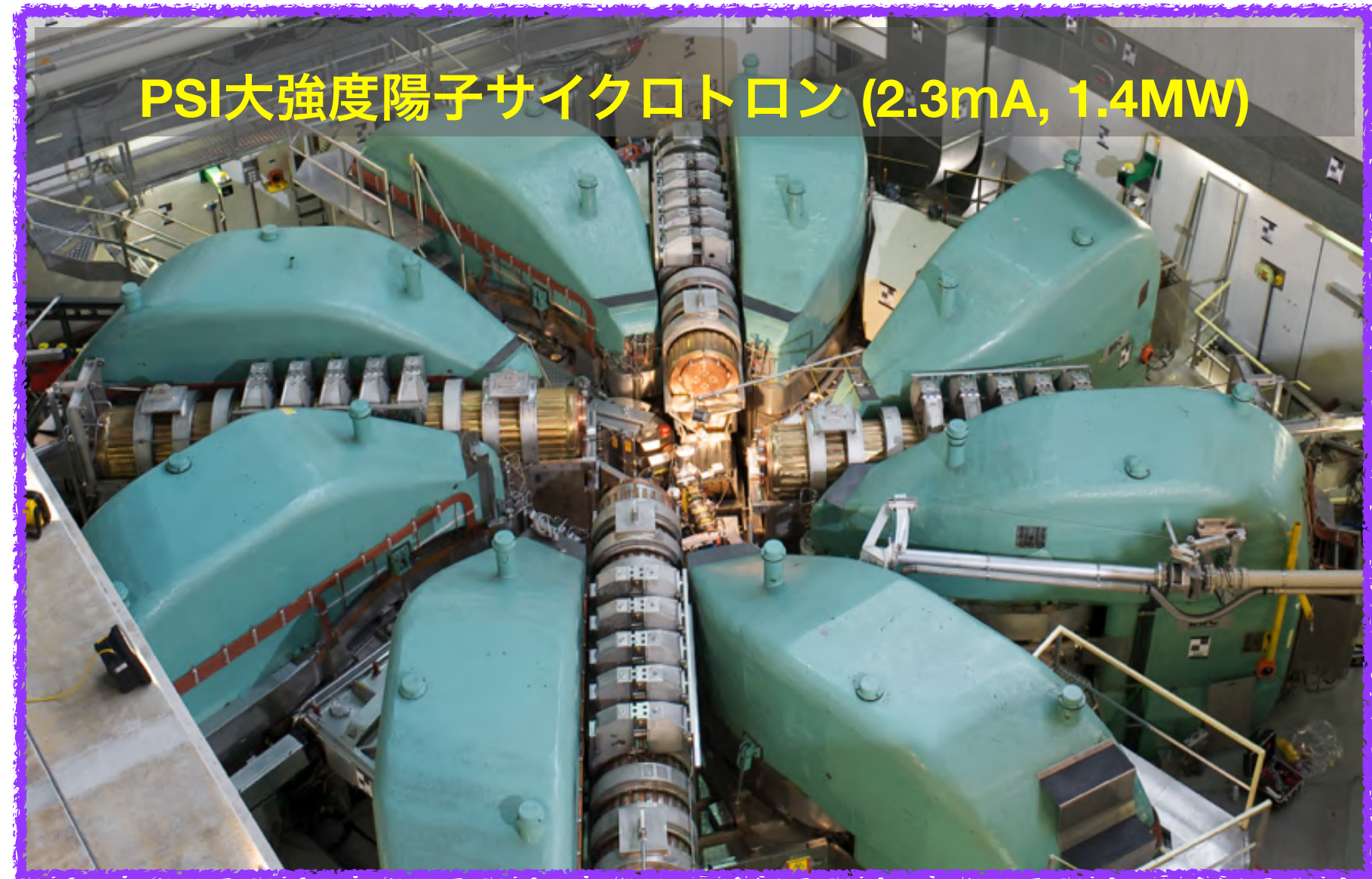


独自開発の革新的な高性能測定器

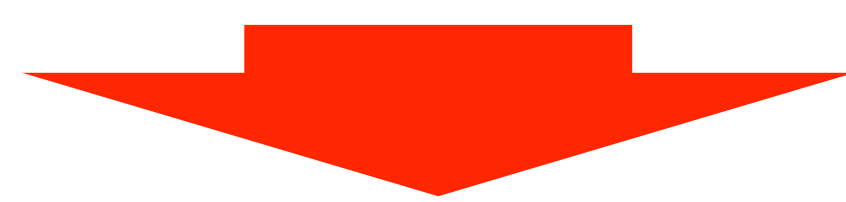


# 高感度 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索の鍵

スイス・ポールシェラー研究所(PSI)の  
世界最大強度のミュオン粒子ビーム



独自開発の革新的な高性能測定器

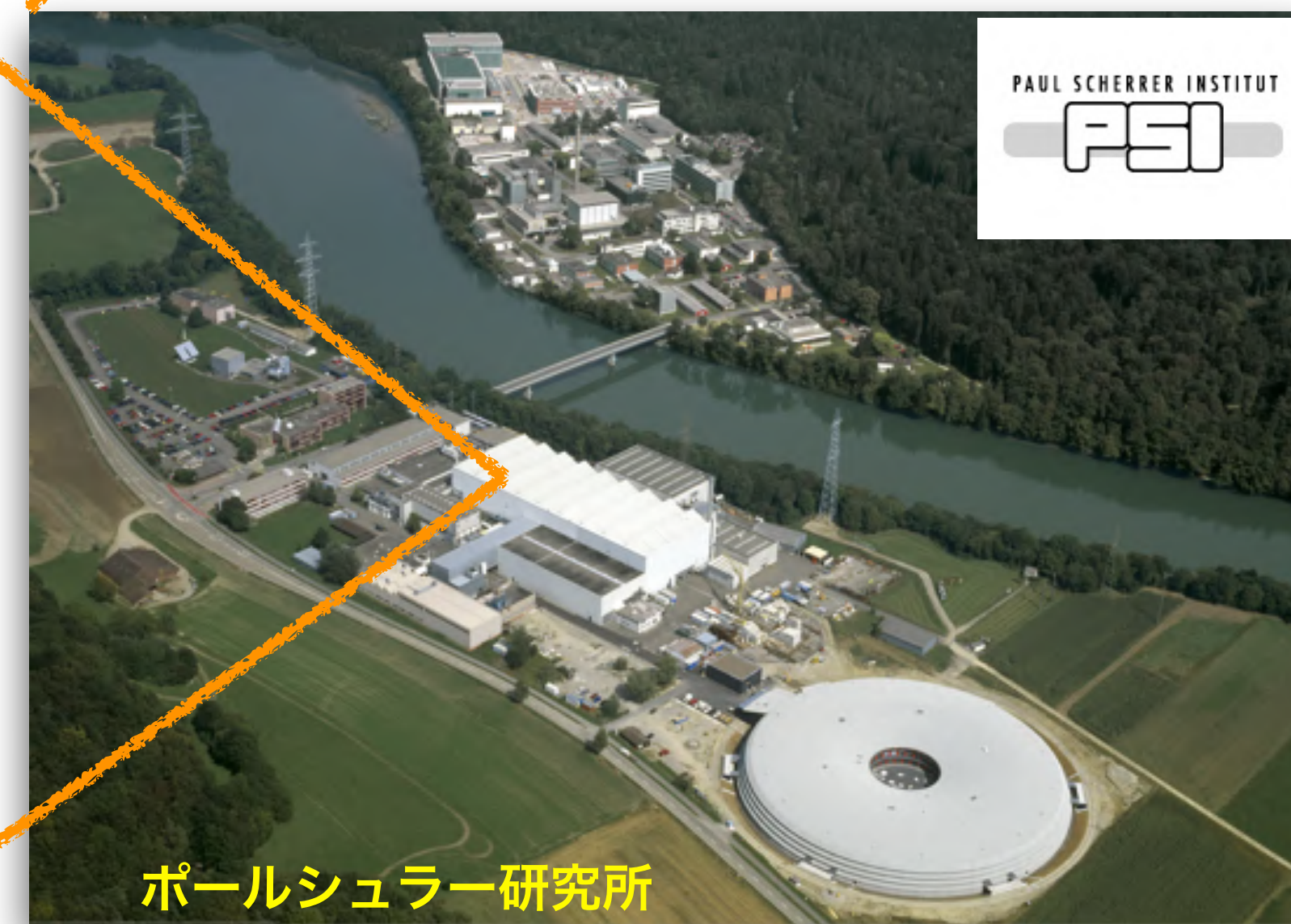
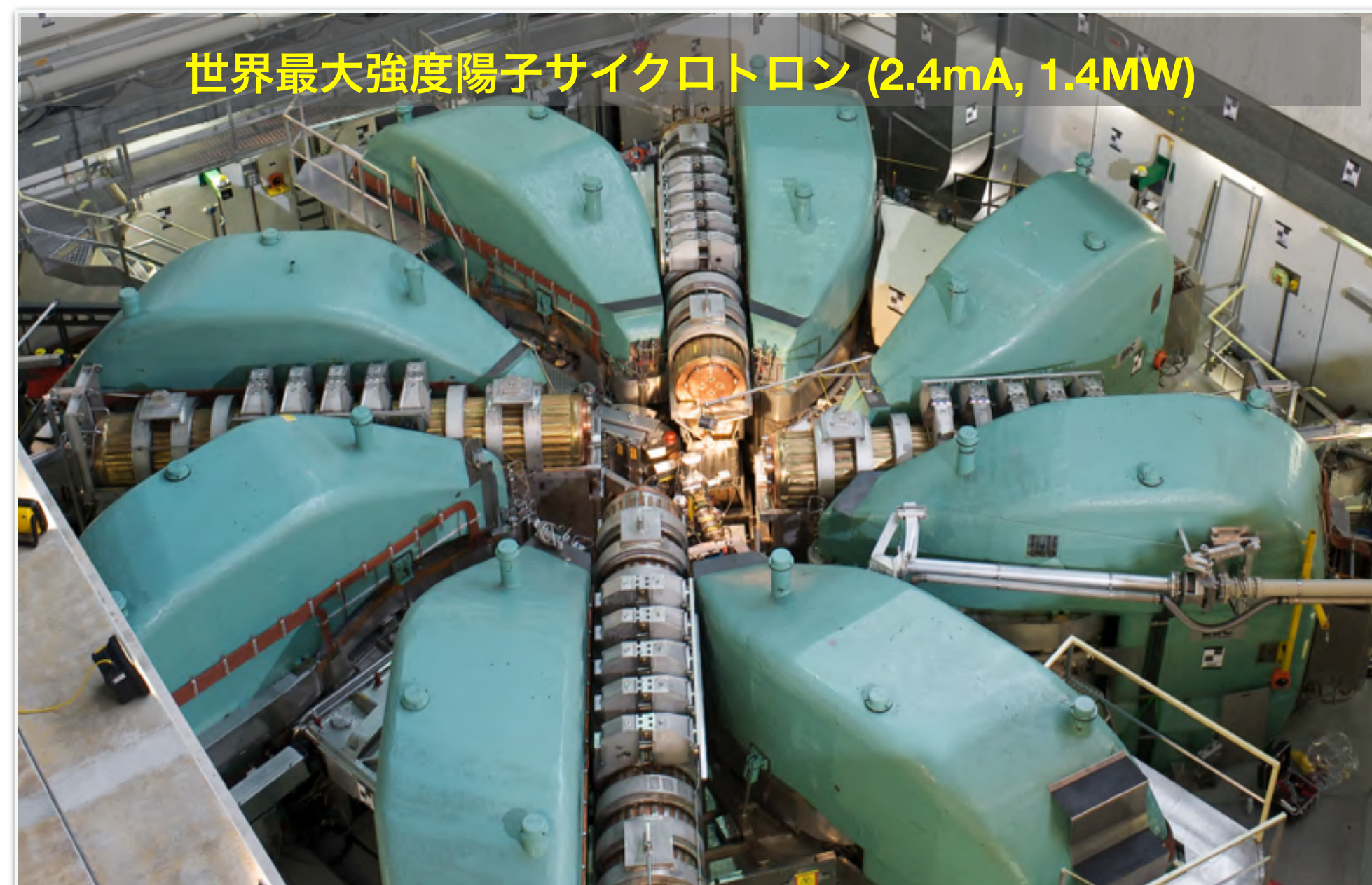


世界最高感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索を実現 @MEG実験

# 世界最大強度のミュオン粒子源@PSI

## ●ポールシェラー研究所 (PSI): High Intensity Proton Accelerator (HIPA)

- 世界最大強度のミュオン粒子源(毎秒 $10^8$ 個以上!)
- 世界最高感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索ができる唯一の場所



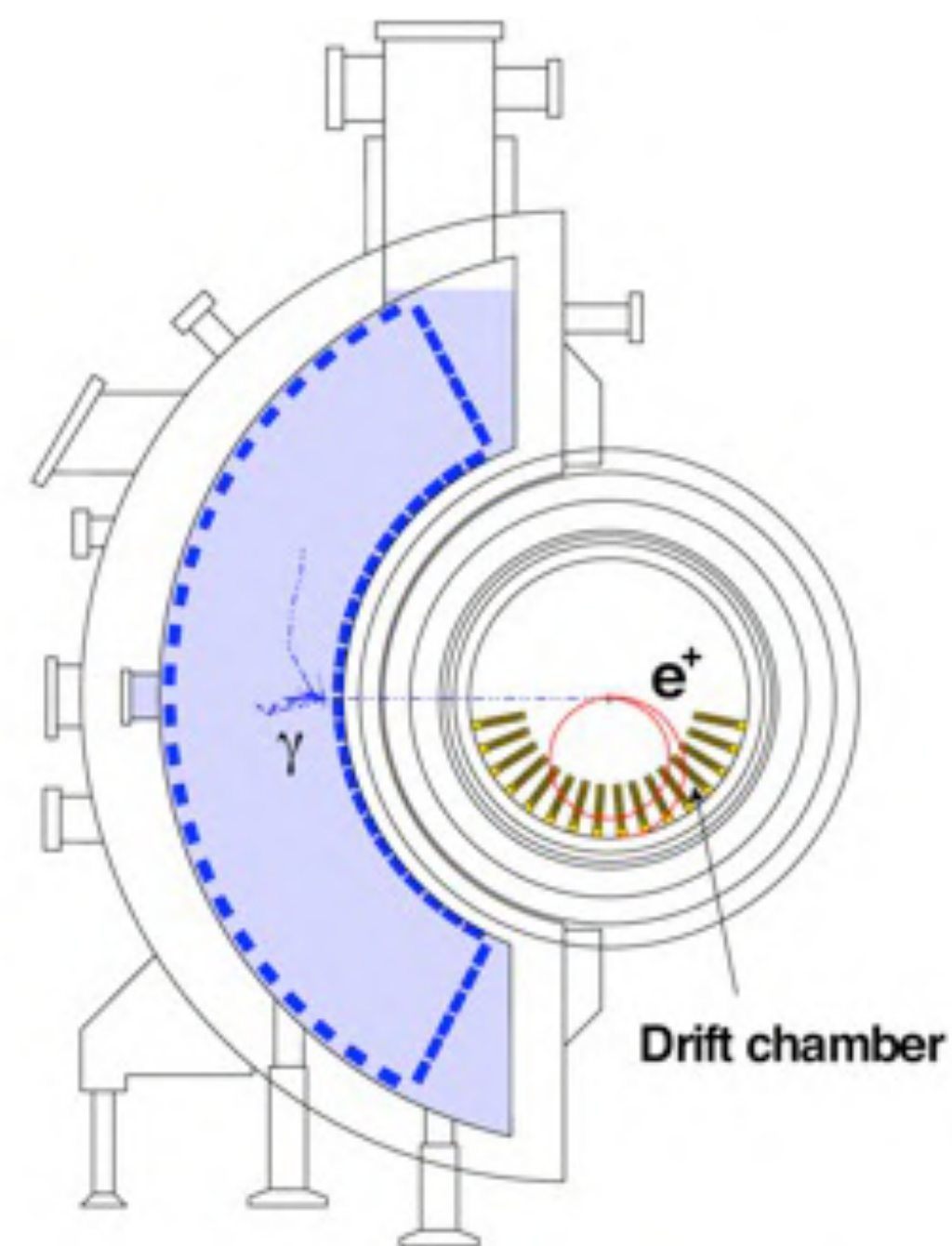
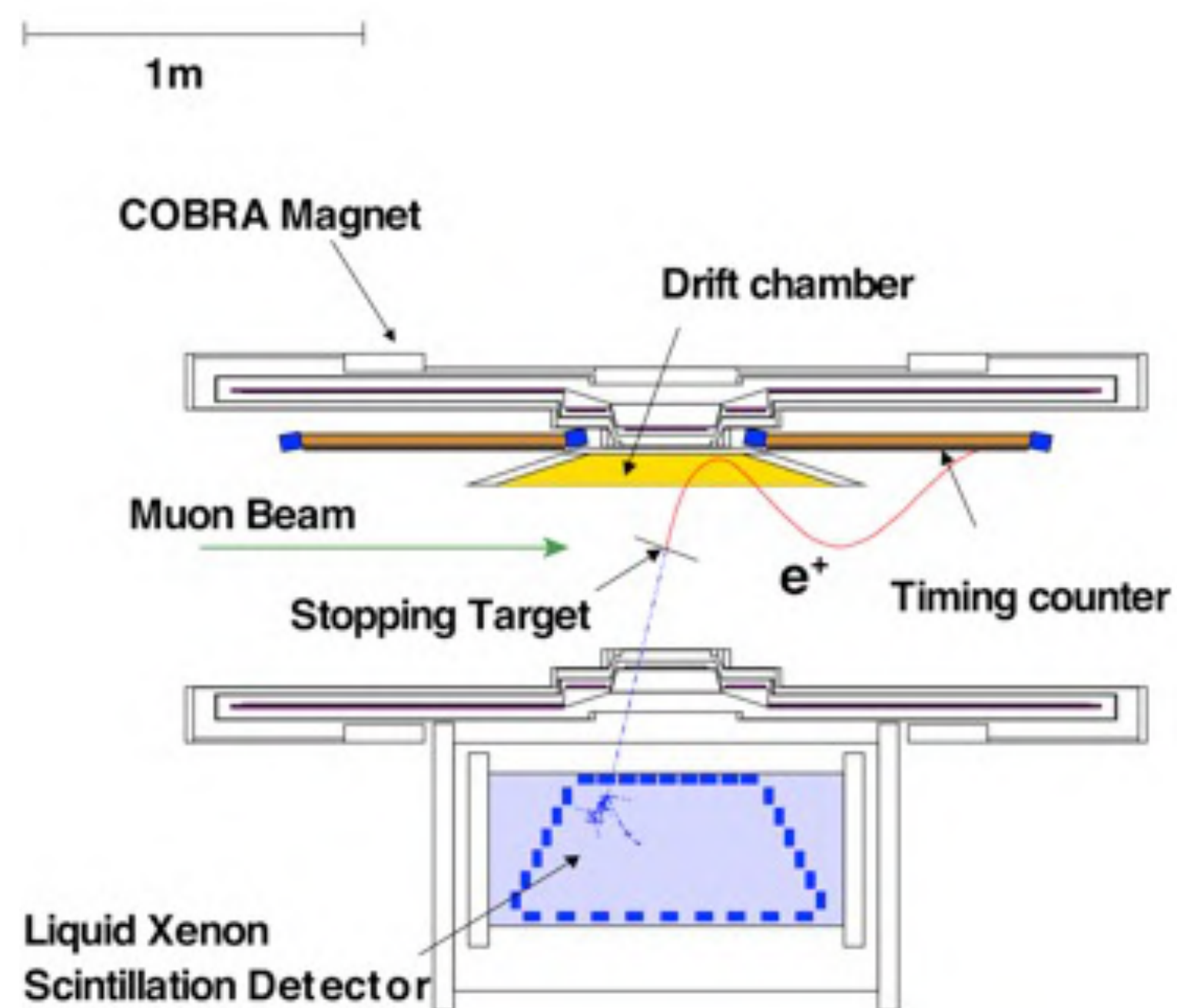
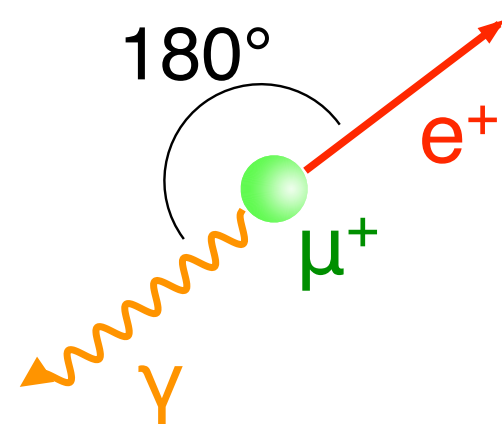
# MEG実験

## ●世界最高感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験

●第一期実験：2008-2013

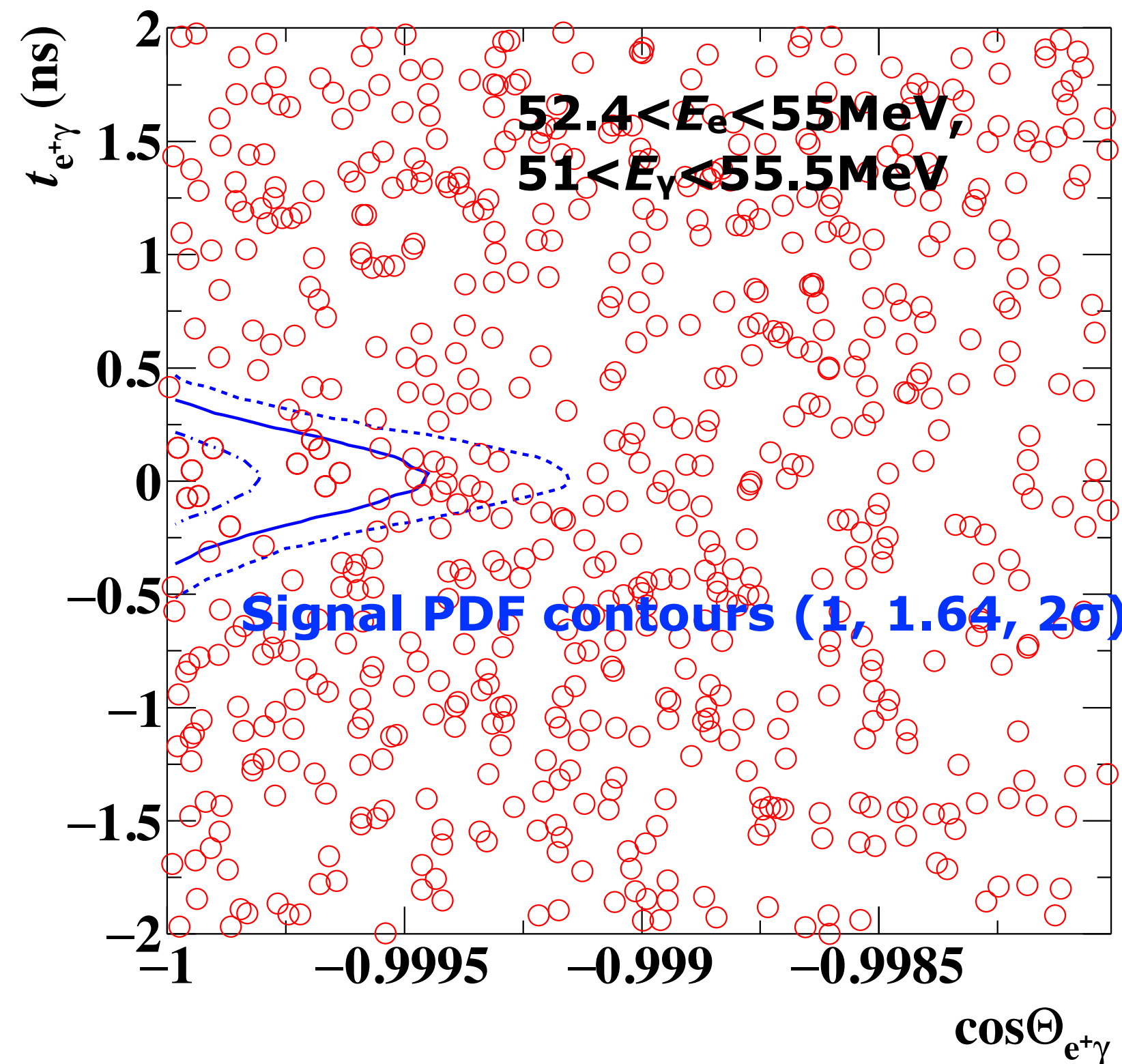
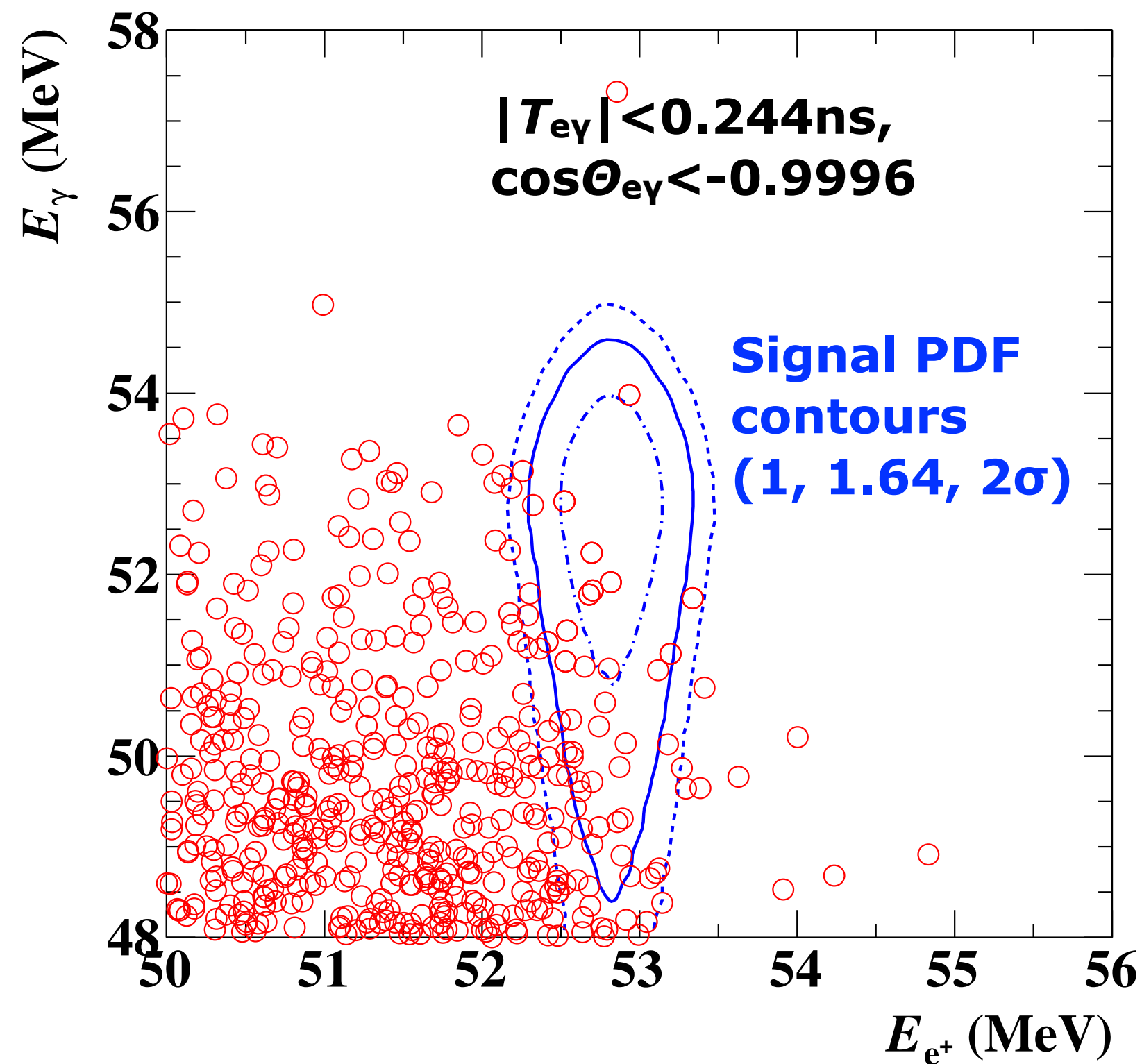
## ●MEG実験測定器

- 陽電子：COBRA分光ロメータ (超低物質質量ドリフトチェンバー+高時間分解能タイミングカウンター)
- ガンマ線：900L 液体キセノンシンチレーション検出器



# MEG実験

- $(T_{e\gamma}, E_\gamma, E_e, \Theta_{e\gamma})$  の4次元空間で信号を探す
- 信号  $(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma)$  なら  $(T_{e\gamma}, E_\gamma, E_e, \Theta_{e\gamma}) = (0, 52.8 \text{ MeV}, 52.8 \text{ MeV}, 180^\circ)$
- ただし、測定器の測定精度(分解能)を考慮する必要あり





# MEGからMEG IIへ

## ●MEG実験は前実験の30倍の実験感度で探索を行った(最終結果@2016)

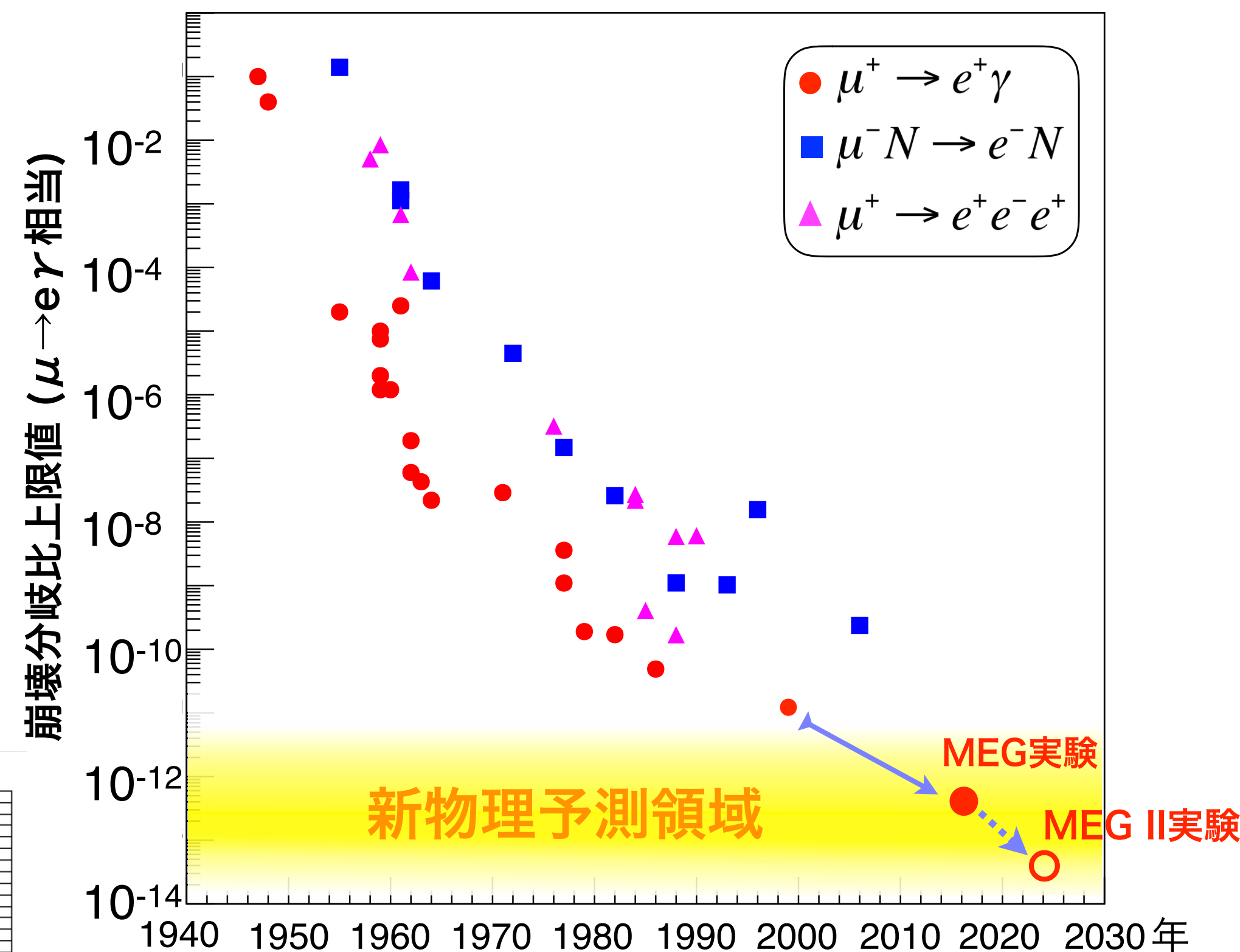
- 既に新物理予測領域に突入していて、いつ見つかってもおかしくない

## ●アップグレード実験 MEG II がよいよ開始！

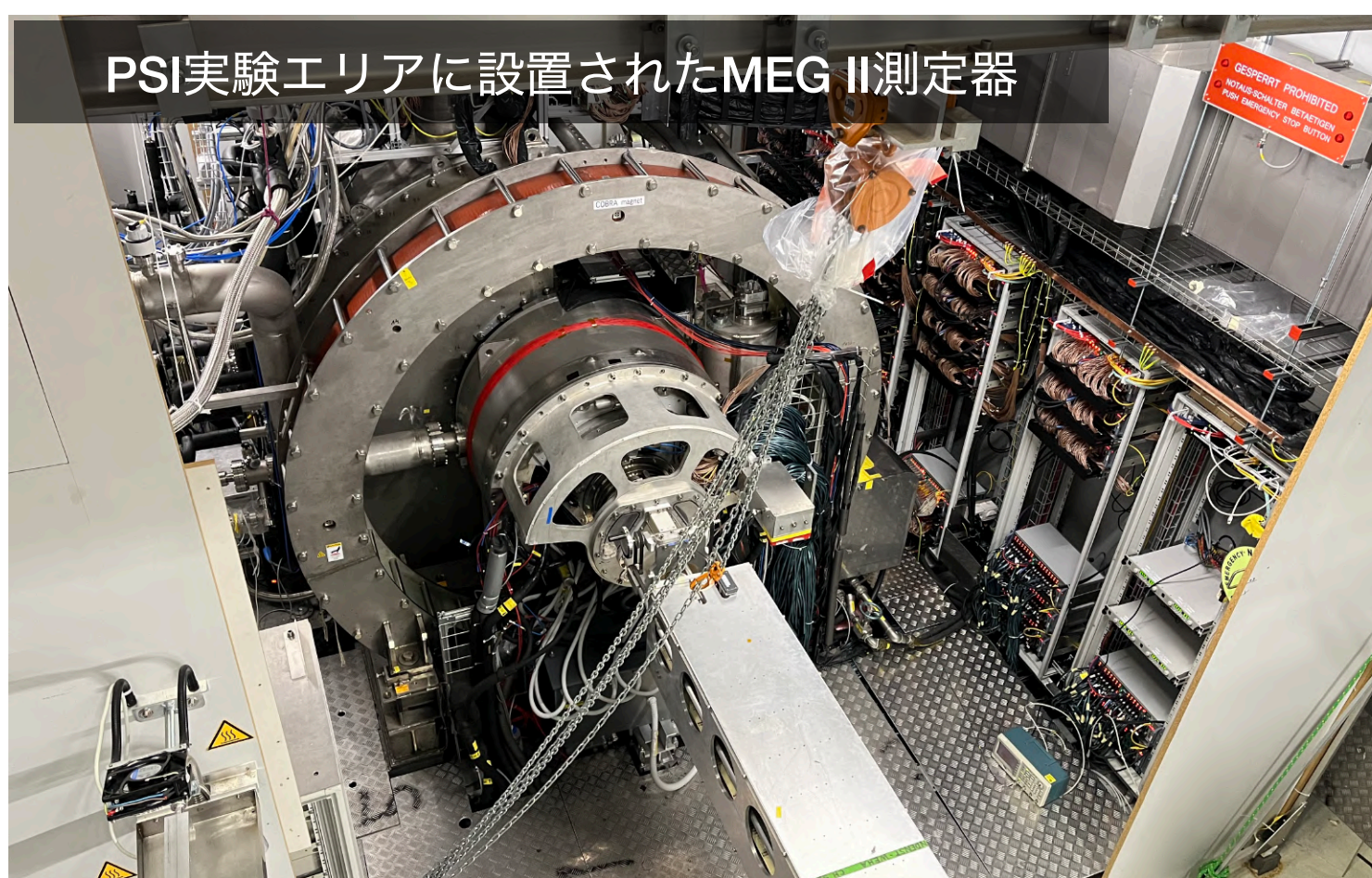
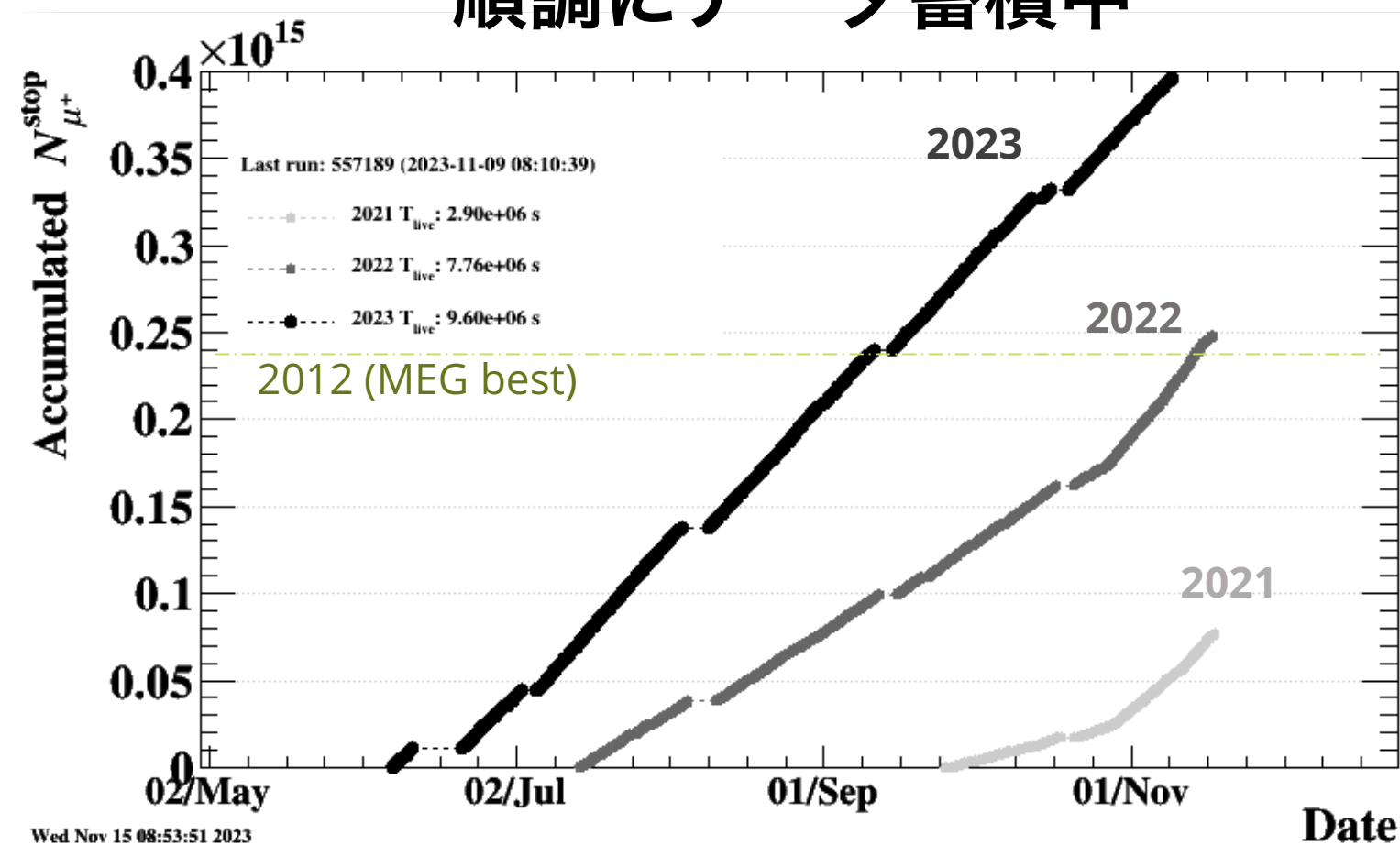
- 目標探索感度：MEGの10倍 ( $\sim 6 \times 10^{-14}$ )
- 2022年 本格測定開始
- 既にMEGを大幅に超える感度の探索が可能なデータ量を取得済み

→ 未到領域へ！

## $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験の歴史



## 順調にデータ蓄積中

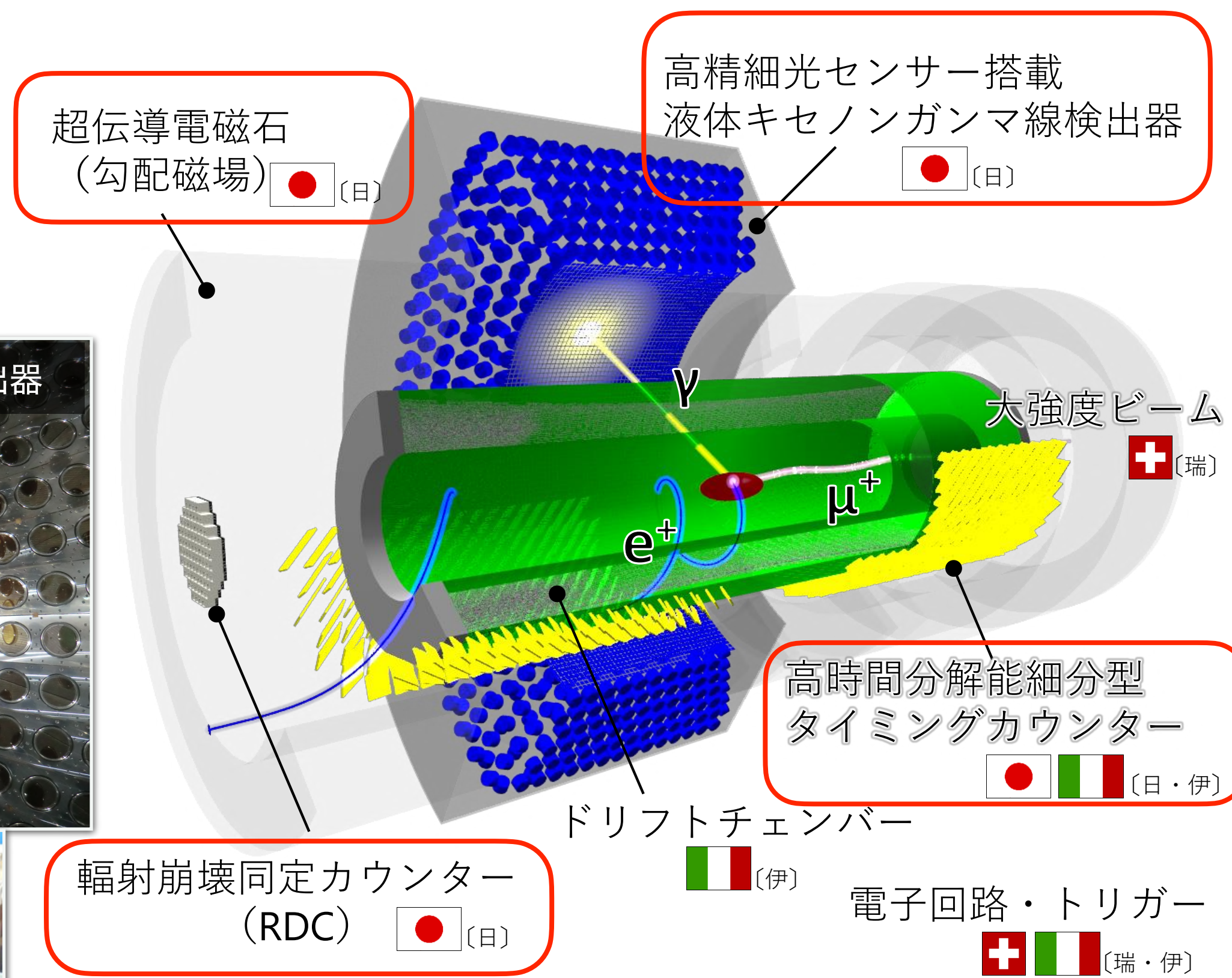
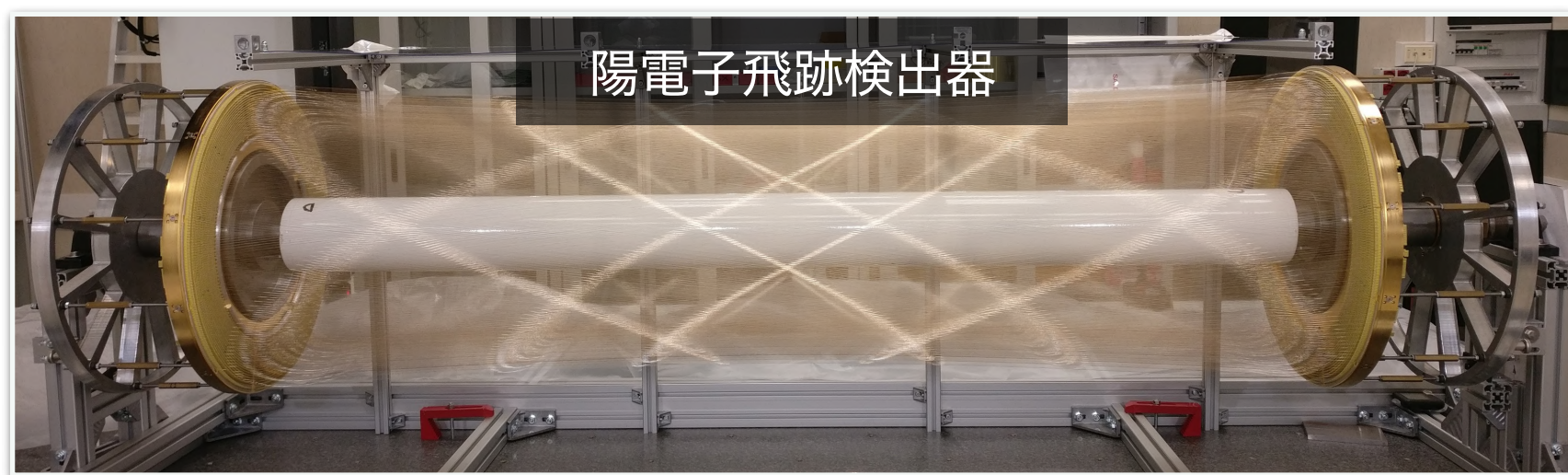
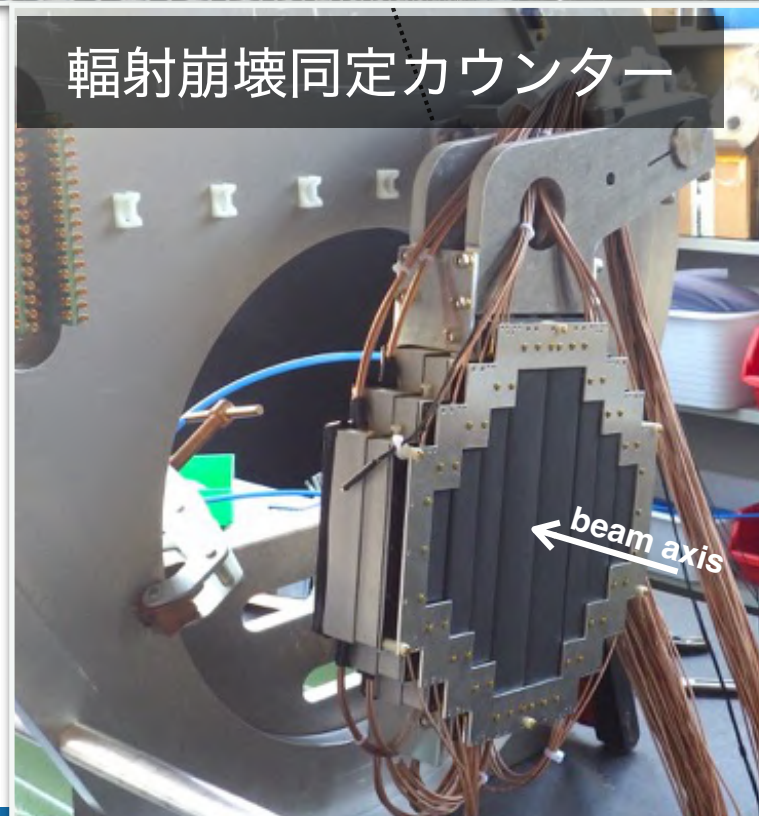
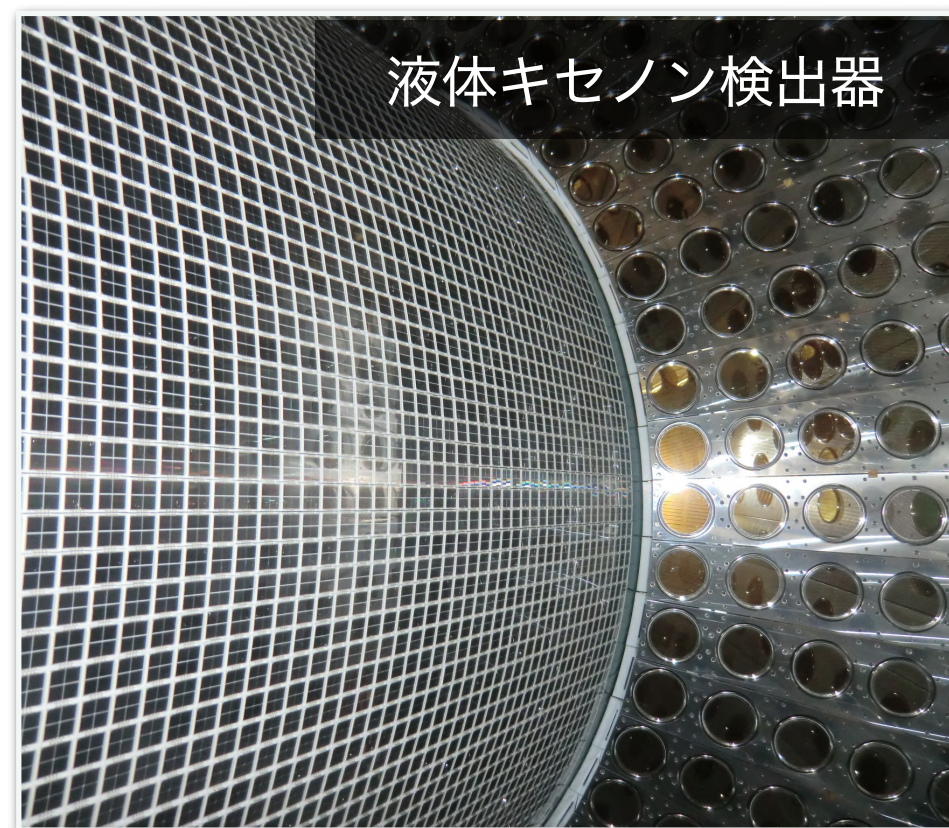
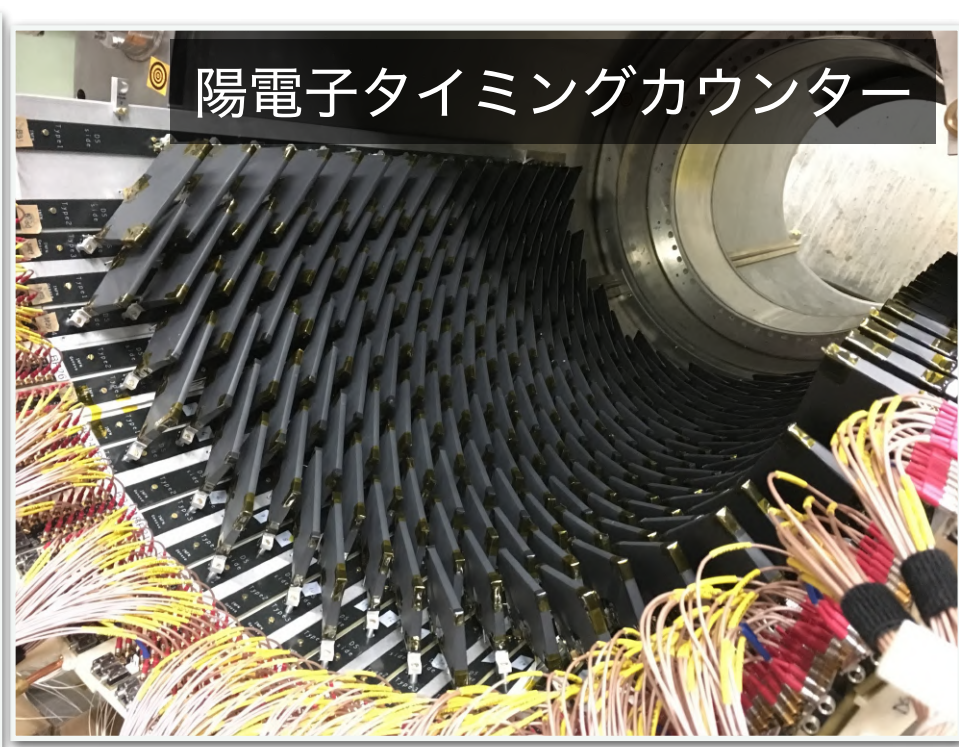


PSI実験エリアに設置されたMEG II測定器

# MEG II実験測定器

## ●世界最高感度の実験には世界最高性能の測定器が必要！

- 独創的で巧みなアイデアに基づく高性能測定器を開発・建設
- ICEPPが中心となり考案、開発

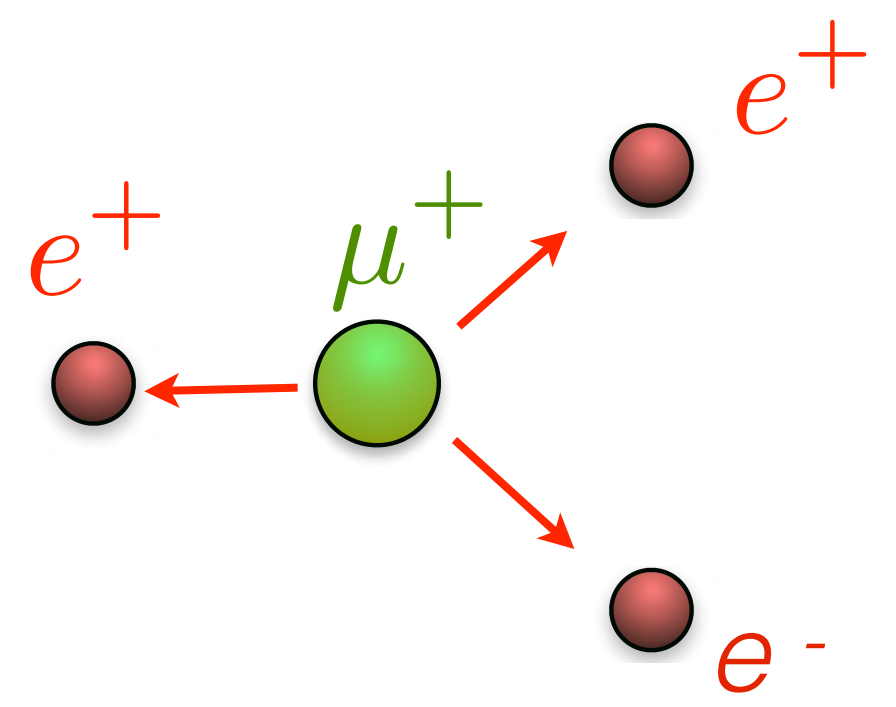


**ICEPPが担当する測定器**

# $\mu \rightarrow eee$

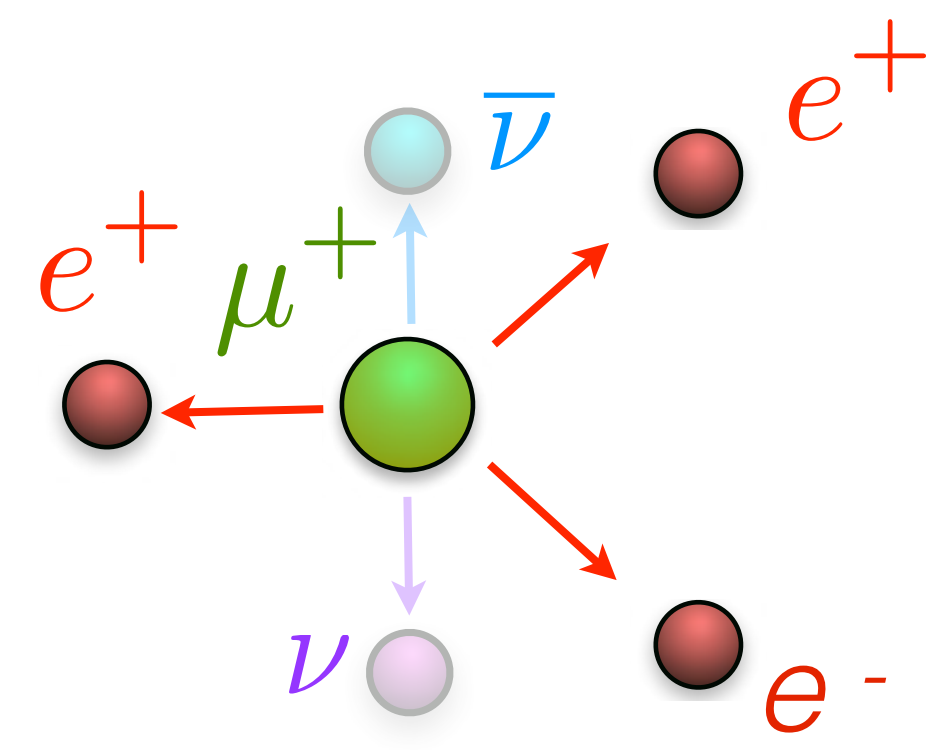
## $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ 事象

- 三体崩壊
- 同時刻
- 単一の崩壊点
- $\Sigma E_e = m_\mu$
- $\Sigma \vec{p}_e = 0$

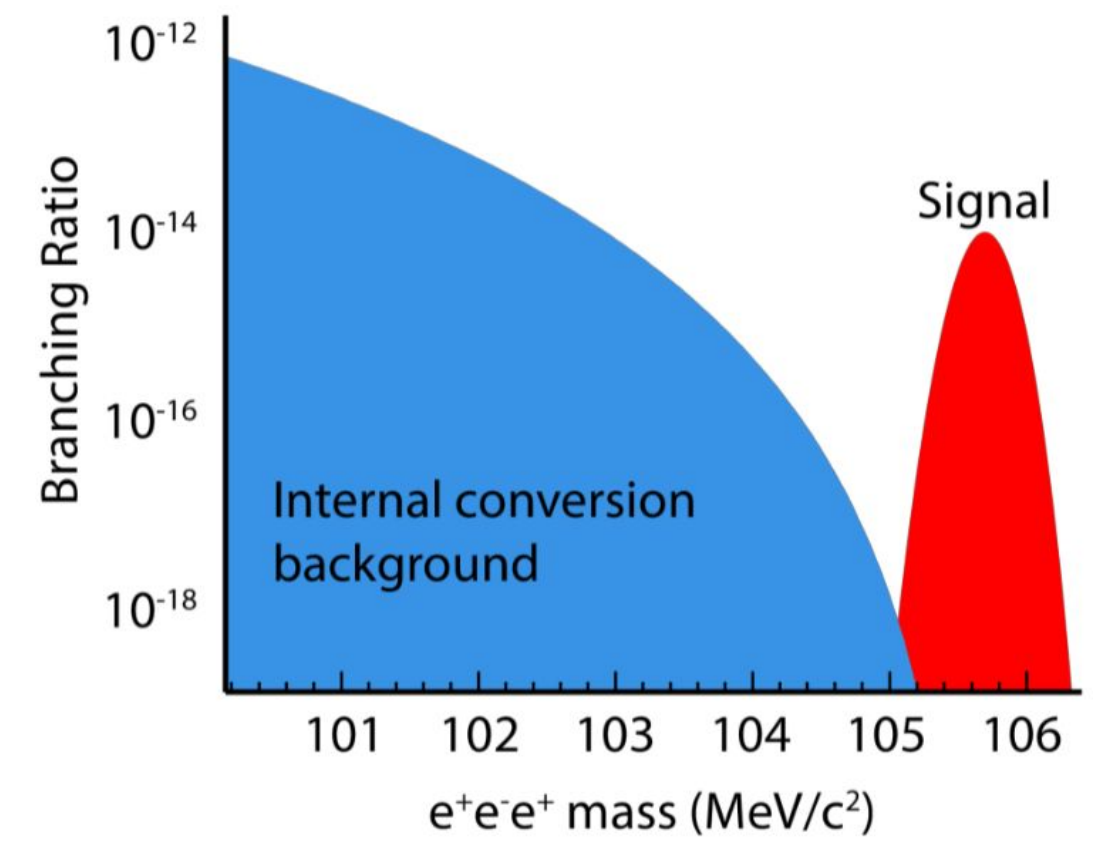
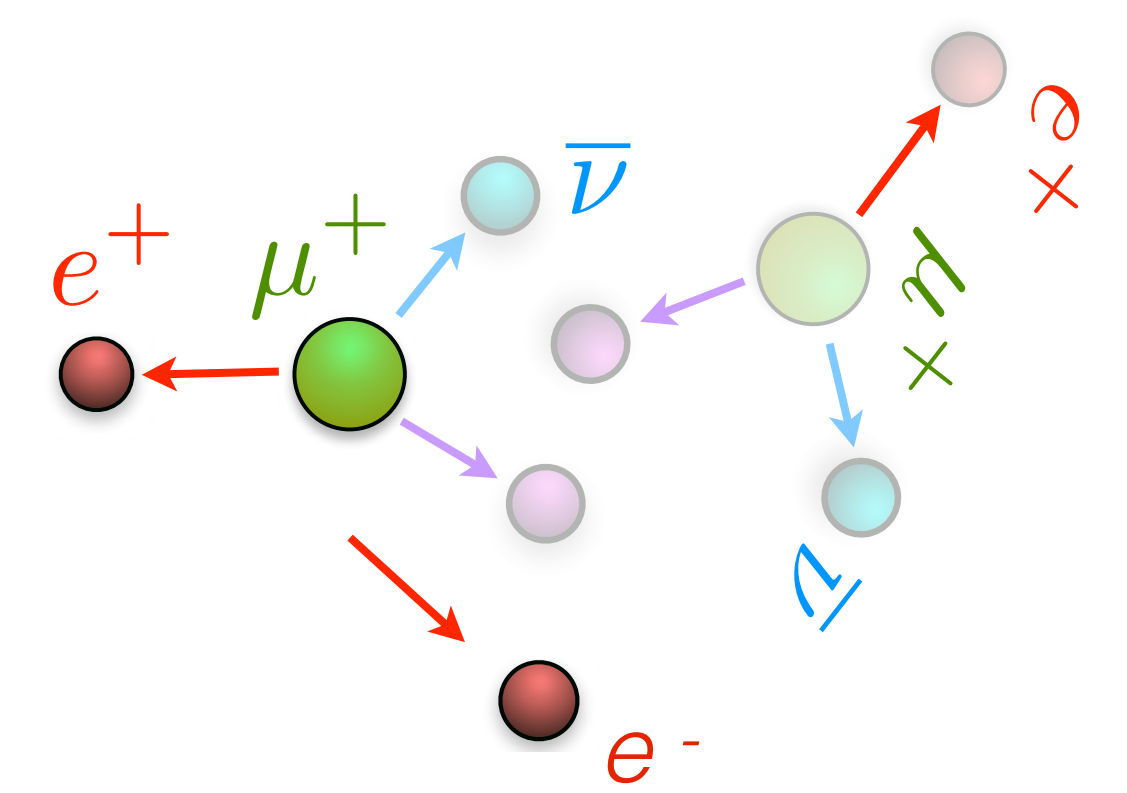


## 背景事象

### 即発背景事象



### 偶発的背景事象



$\mu \rightarrow eee$ の場合、簡単のため電子・陽電子をまとめて「電子」と呼ぶことがある

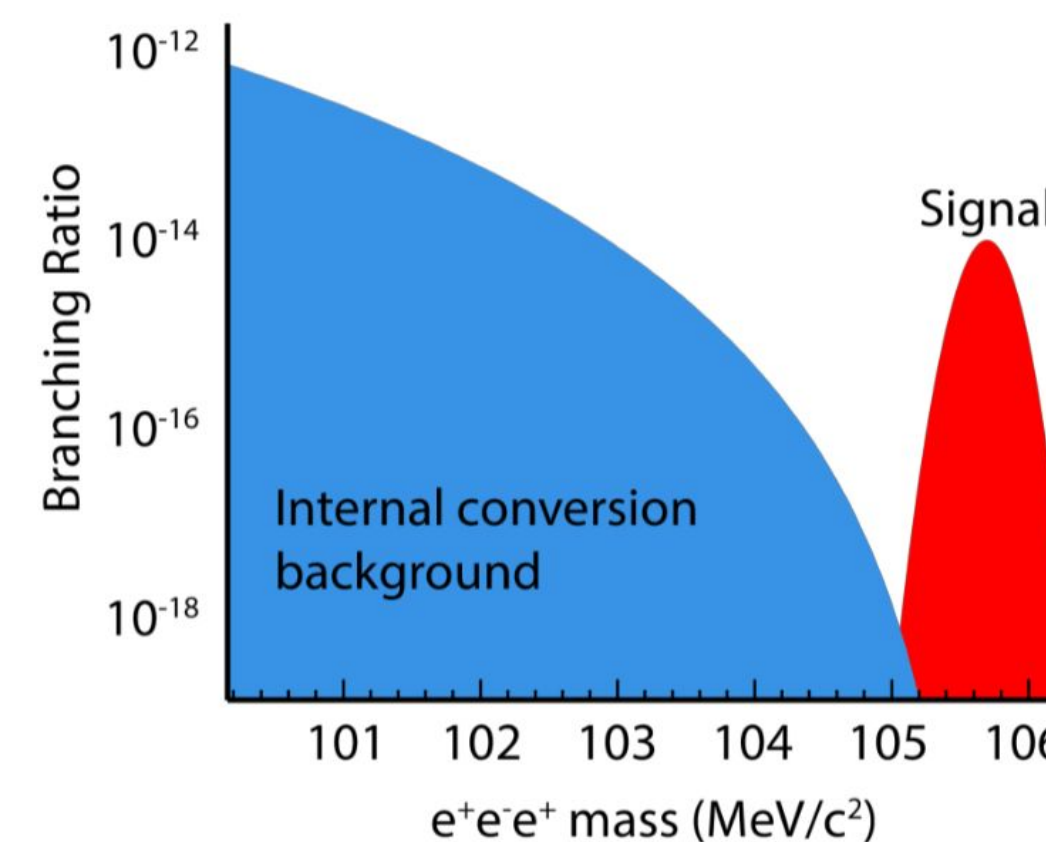
# $\mu \rightarrow eee$ 探索実験への要請

## ●ミュー粒子ビームに対する要請

- 大強度
  - 連続ビーム(パルスビームはだめ)←同じミュー粒子数を調べる際なるべく偶発的背景事象を少なく
  - 正ミュー粒子
- ⇒ $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験と同じ。

## ●測定器に対する要請 ( $\mu \rightarrow e\gamma$ と同様)

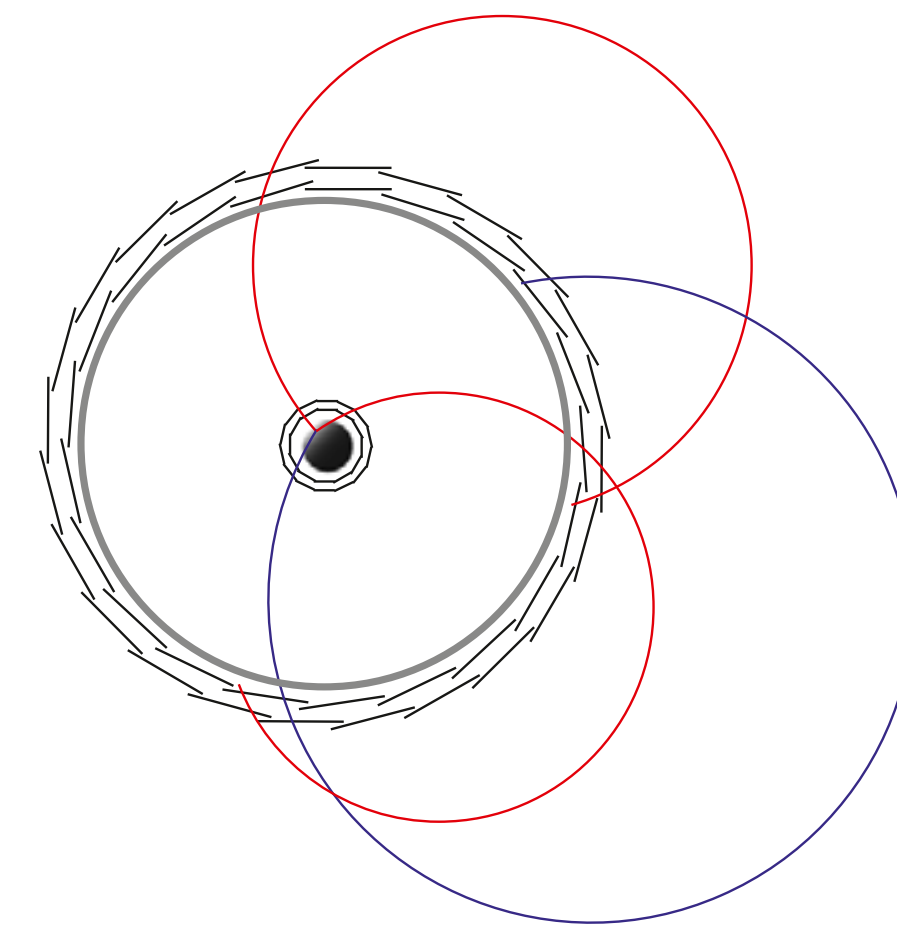
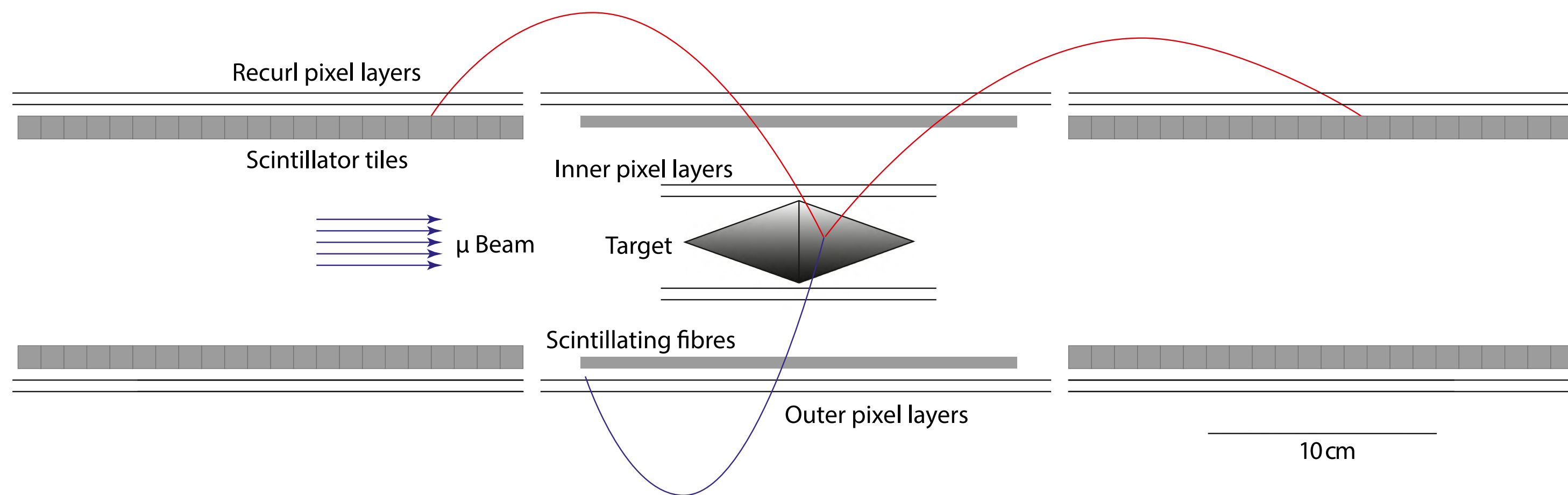
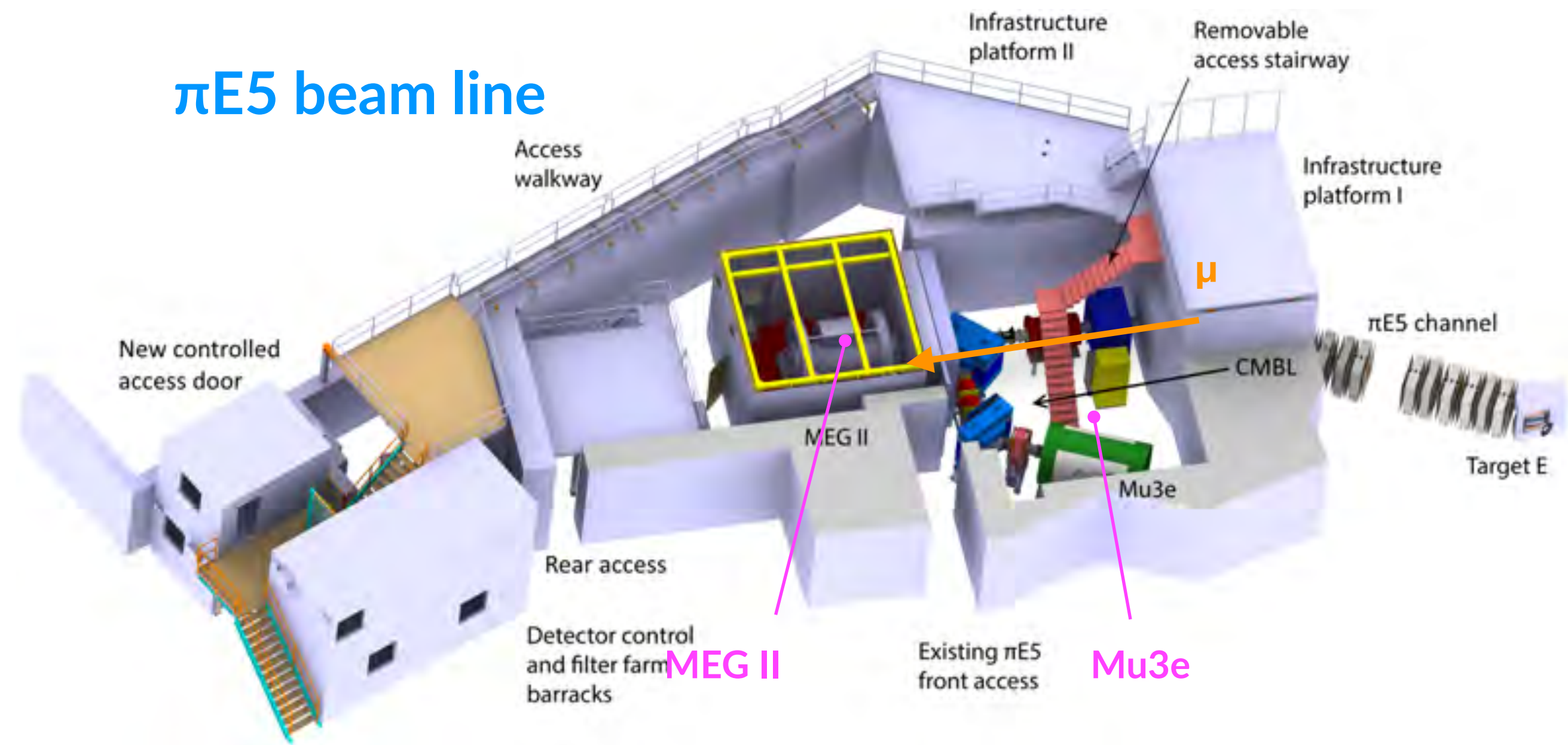
- 電子の運動量の高精度測定 (⇒偶発的背景事象)
- 電子の時間の高精度測定 (⇒即発的背景事象)
- 電子の崩壊点の高精度測定 (⇒即発的背景事象)
- 高レート耐性



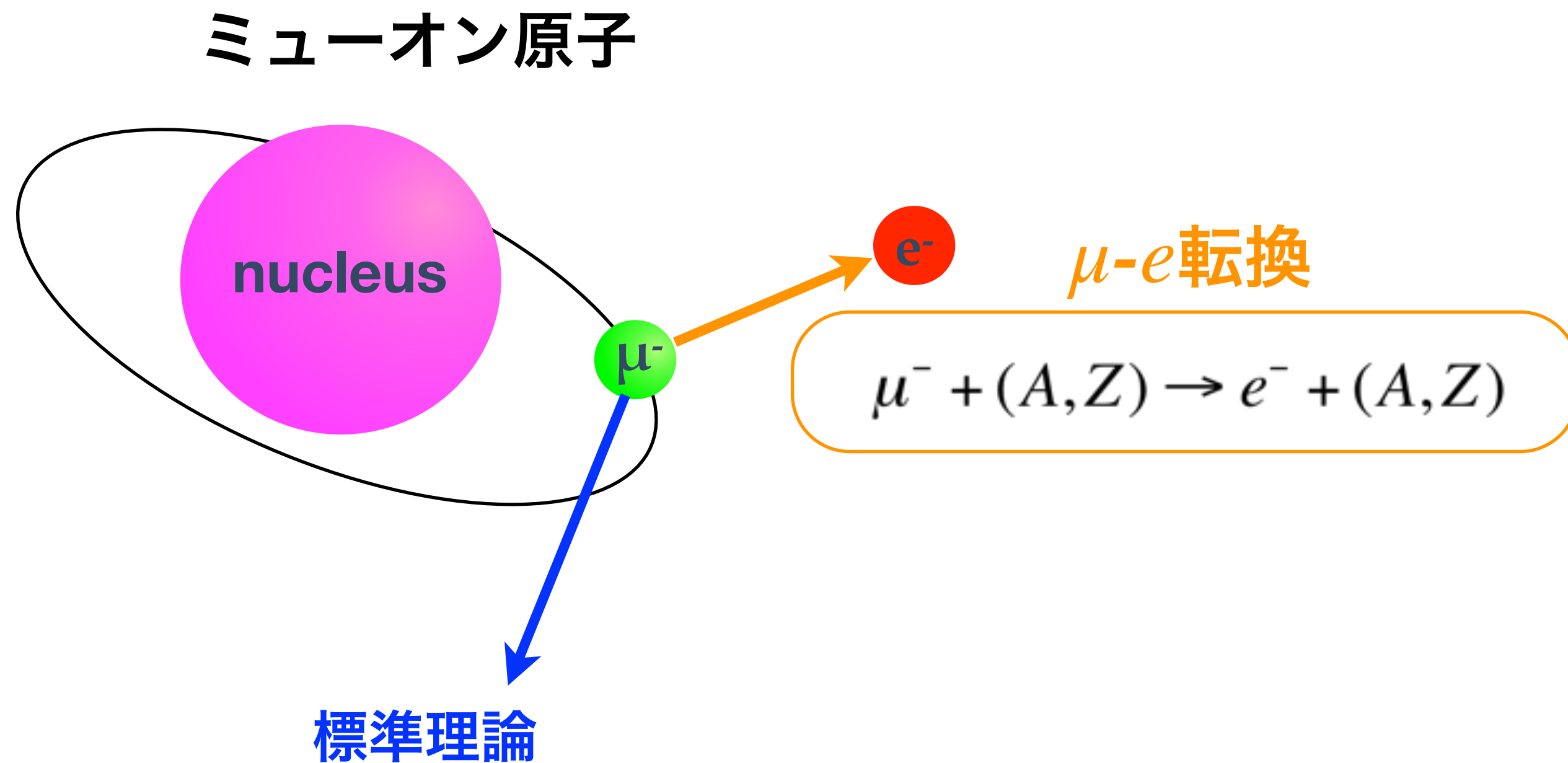
# Mu3e実験

## ●Mu3e：新しい $\mu \rightarrow eee$ 探索実験

- MEG IIと同じビームライン $\pi$ E5使用予定
- 2024-2025年：コミッショニング
- 2025-2026年：物理データ取得



# $\mu N \rightarrow e N$ ( $\mu$ - $e$ 転換)



束縛軌道上での崩壊  
 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

原子核捕獲  
 $\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1)$

## $\mu N \rightarrow e N$ 事象

### ● 単一エネルギーの電子

●  $E_e = m_\mu - B_\mu \sim 105 \text{ MeV}$  (Al原子)

● ミューオン原子でのミュー粒子の寿命  $1 \mu\text{s}$  (Al原子)

⇒ 遅延測定が可能

## 背景事象

● 束縛軌道上での崩壊 (Decay In Orbit, DIO)

### ● ビーム起源

● 輻射パイ粒子崩壊

● ミュー粒子飛行中崩壊 (Decay In Flight, DIF)

● 宇宙線

● 偶発的な背景事象無し

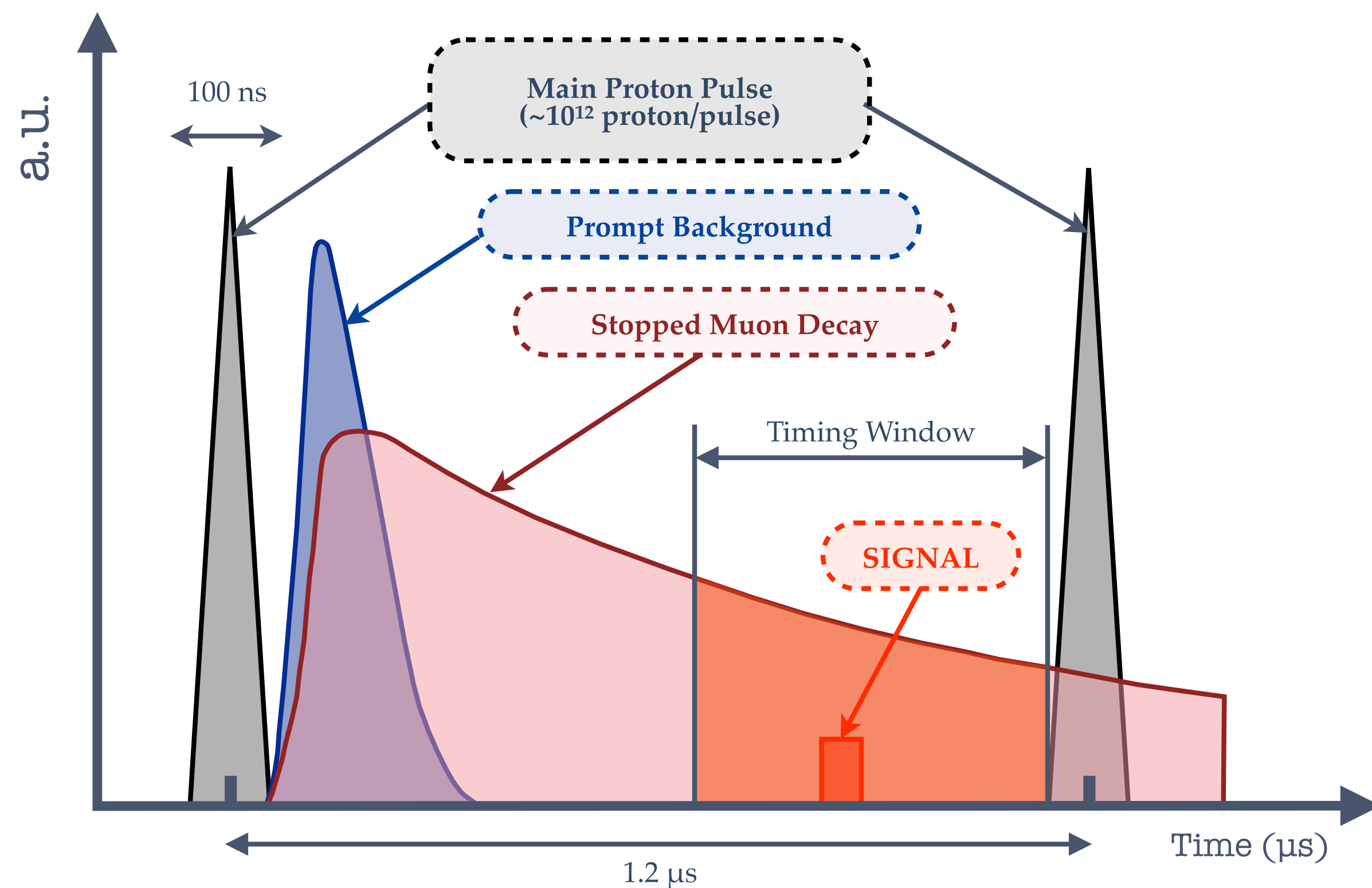
# $\mu N \rightarrow e N$ 探索実験の原理

## ●パルスミュオン粒子ビームを用いた遅延測定

- ミュオン粒子原子におけるミュオン粒子の遅延崩壊
- 寿命は束縛原子に依存 (Al原子:  $0.86 \mu s$ )
- ビーム起源のバックグラウンドはパルスの直後だけ
- パルス間の静かな時間に崩壊するミュオン粒子を調べる

## ●パルス間のビームのもれを如何に下げるかが鍵

- 消滅度(extinction)  $< 10^{-10}$  が必要



# $\mu N \rightarrow eN$ 探索実験

•これまでの探索結果： $R(\mu N \rightarrow eN) \equiv \Gamma(\mu N \rightarrow eN)/\Gamma(\mu N \rightarrow \text{capture})$

• $R(\mu N \rightarrow eN) < 7 \times 10^{-13}$  (N=Au) SINDRUM II (2006)

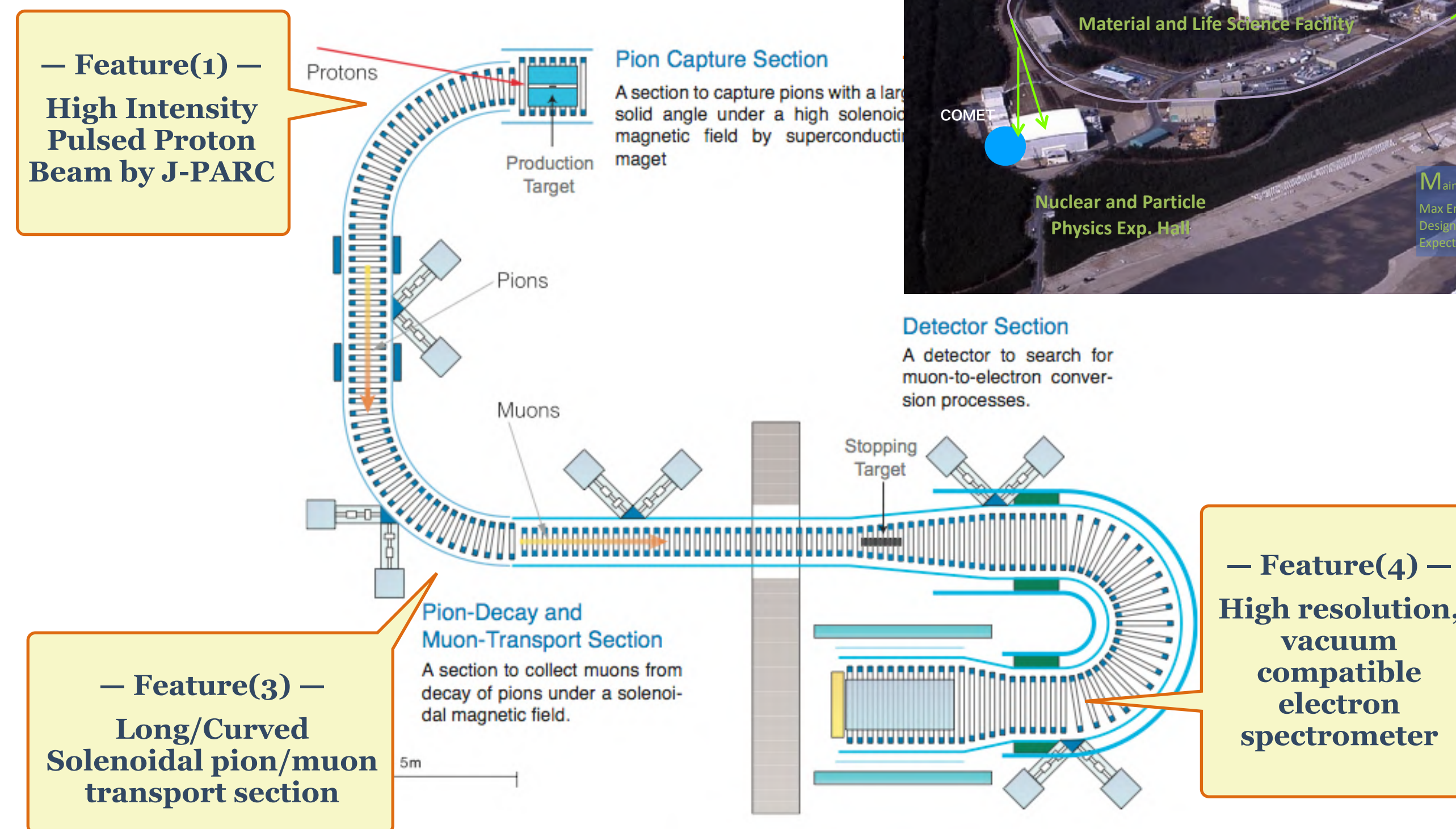
•計画中の $\mu N \rightarrow eN$ 探索実験

•COMET実験 @J-PARC

•Mu2e実験 @Fermilab

•DeeMe実験 @J-PARC

## COMET実験

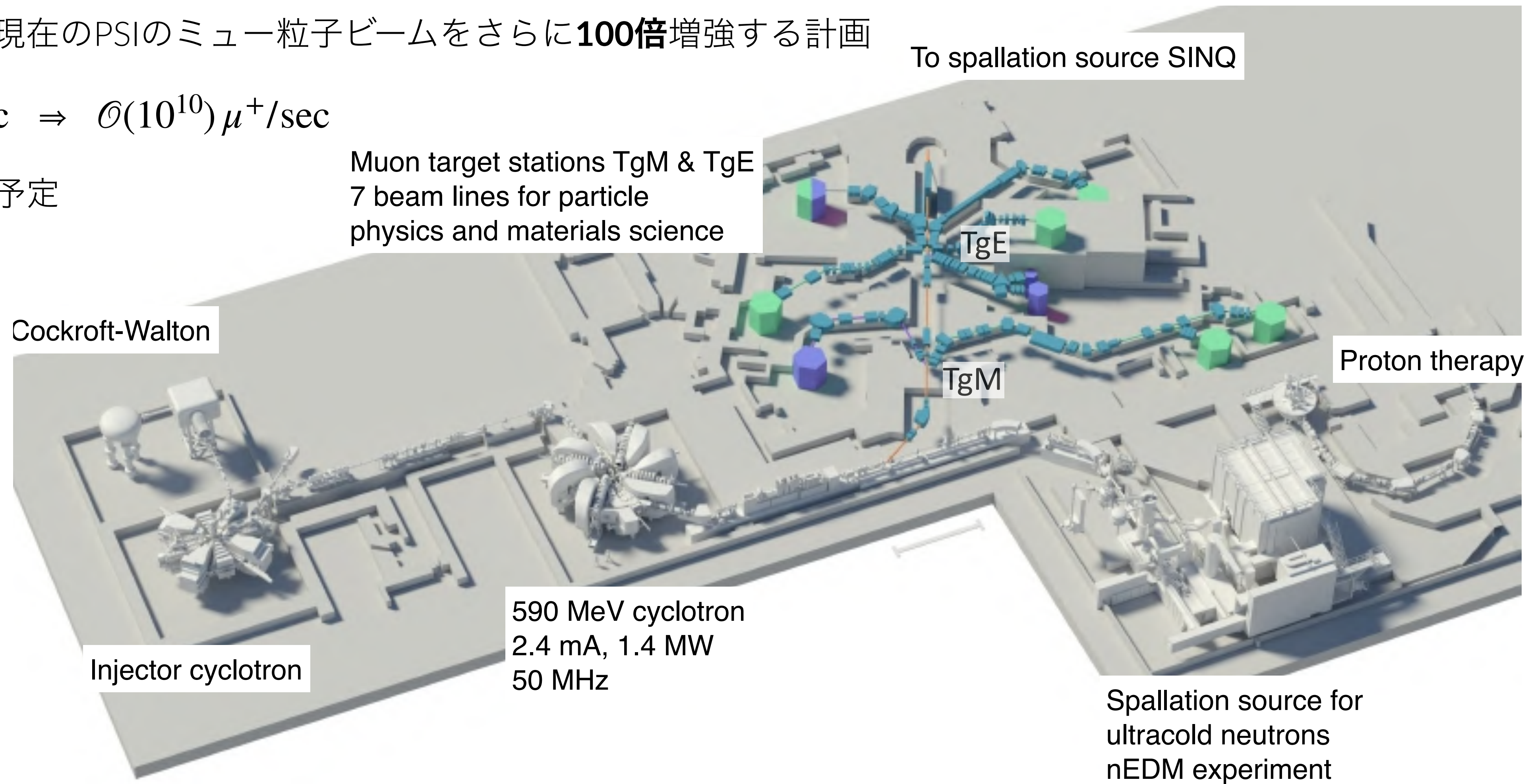




# ビーム増強計画@PSI

## ●High Intensity Muon Beam (HIMB) 計画

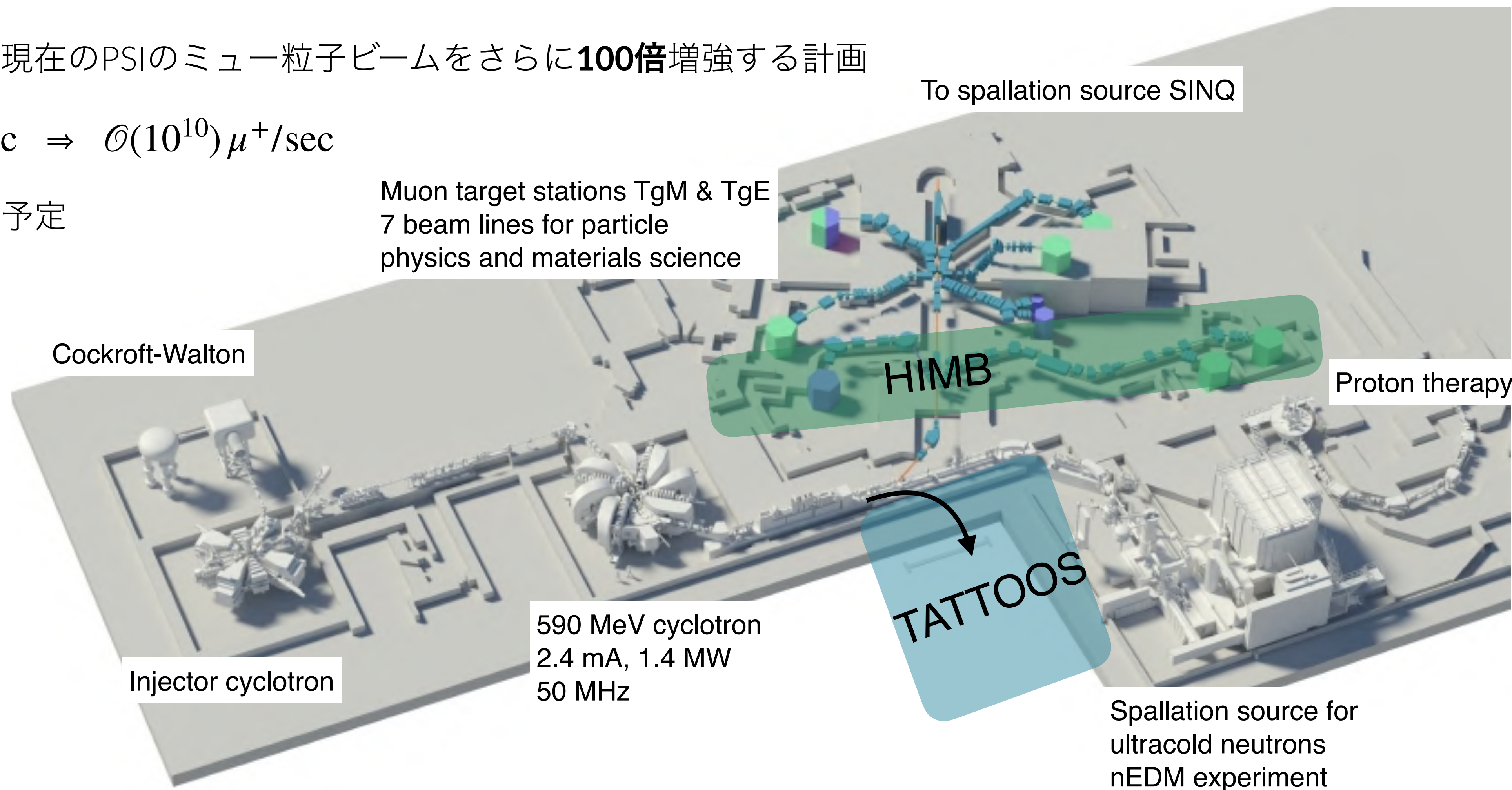
- 世界最大強度を誇る現在のPSIのミュー粒子ビームをさらに**100倍**増強する計画
- 目標： $\mathcal{O}(10^8) \mu^+/\text{sec} \Rightarrow \mathcal{O}(10^{10}) \mu^+/\text{sec}$
- 2027-2028年に導入予定



# ビーム増強計画@PSI

## ●High Intensity Muon Beam (HIMB) 計画

- 世界最大強度を誇る現在のPSIのミュー粒子ビームをさらに**100倍**増強する計画
- 目標： $\mathcal{O}(10^8) \mu^+/\text{sec} \Rightarrow \mathcal{O}(10^{10}) \mu^+/\text{sec}$
- 2027-2028年に導入予定



# 新 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験

- HIMB増強ミュー粒子ビームを使って探索感度 $\mathcal{O}(10^{-15})$ の新しい $\mu \rightarrow e\gamma$ 実験

- $\mu \rightarrow e\gamma$ 発見をより確かなものに

- 新物理をより厳しく検証

- MEG IIでの $\mu \rightarrow e\gamma$ の「発見」から、新実験での「測定」へ

- 崩壊分岐比の絶対値 → 新物理のエネルギースケール

- 崩壊角度分布 → 新物理の対称性

- $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外の物理の可能性

# 将来計画：究極感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験

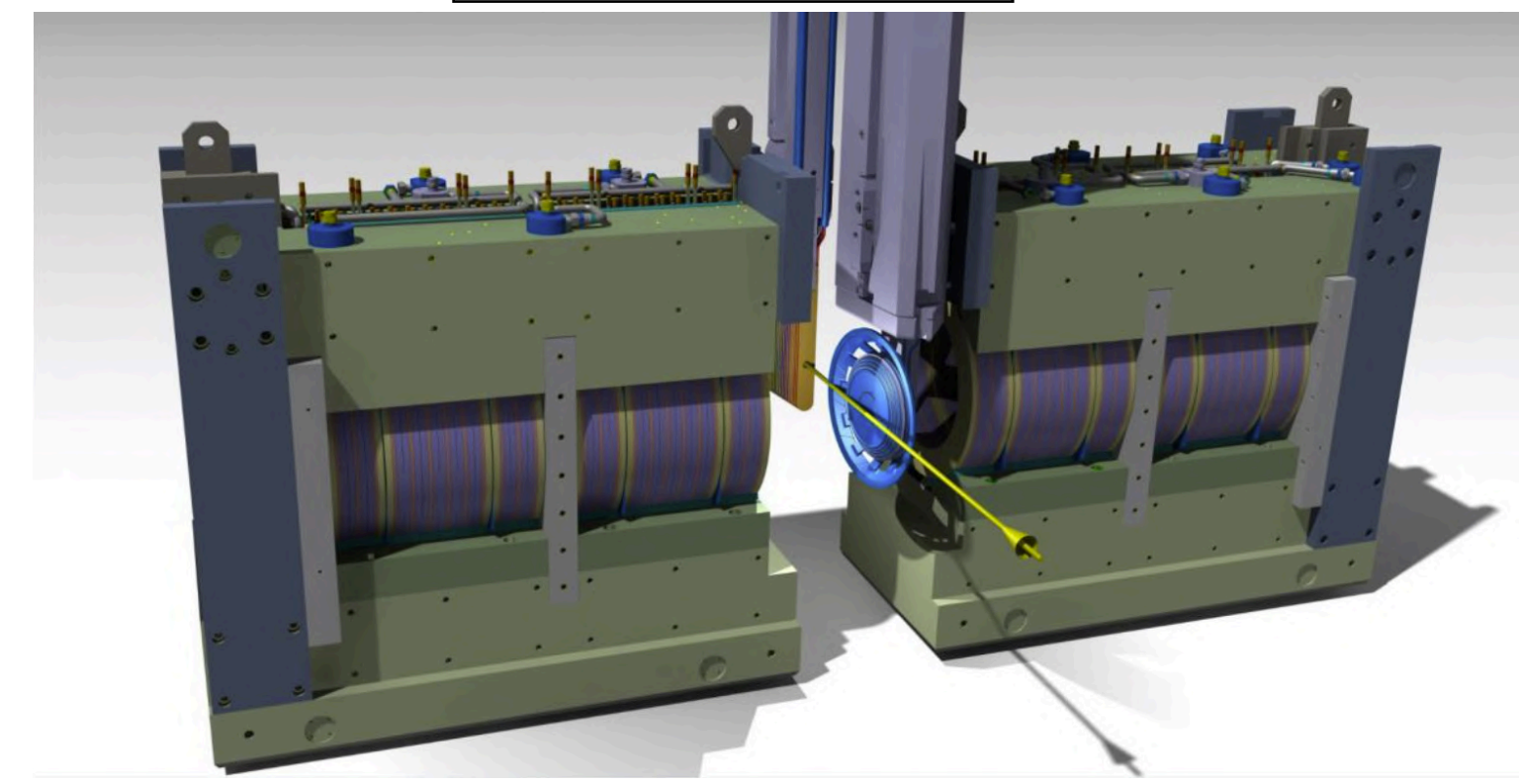
## ●PSIのビーム増強計画 (HiMB計画)

- ビーム強度が最大100倍！

## ●増強ビームを使った新しい $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験実現に向けた研究開発

- MEG IIとはまったく異なる原理の新実験装置で探索感度を格段に向上
- MEG IIで発見した $\mu \rightarrow e\gamma$ を精密測定することが可能。発見から測定へ
- $\mu \rightarrow eee$ など $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外の物理も

HiMB計画@PSI

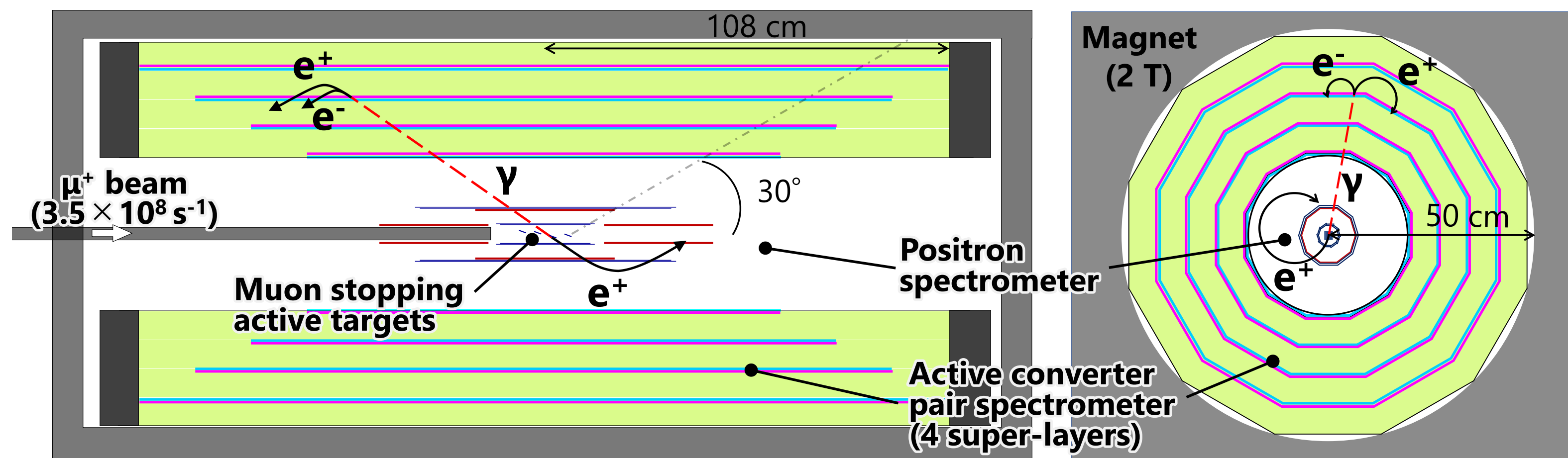


## ●革新的測定器開発の新たな挑戦！

新 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験測定器デザイン



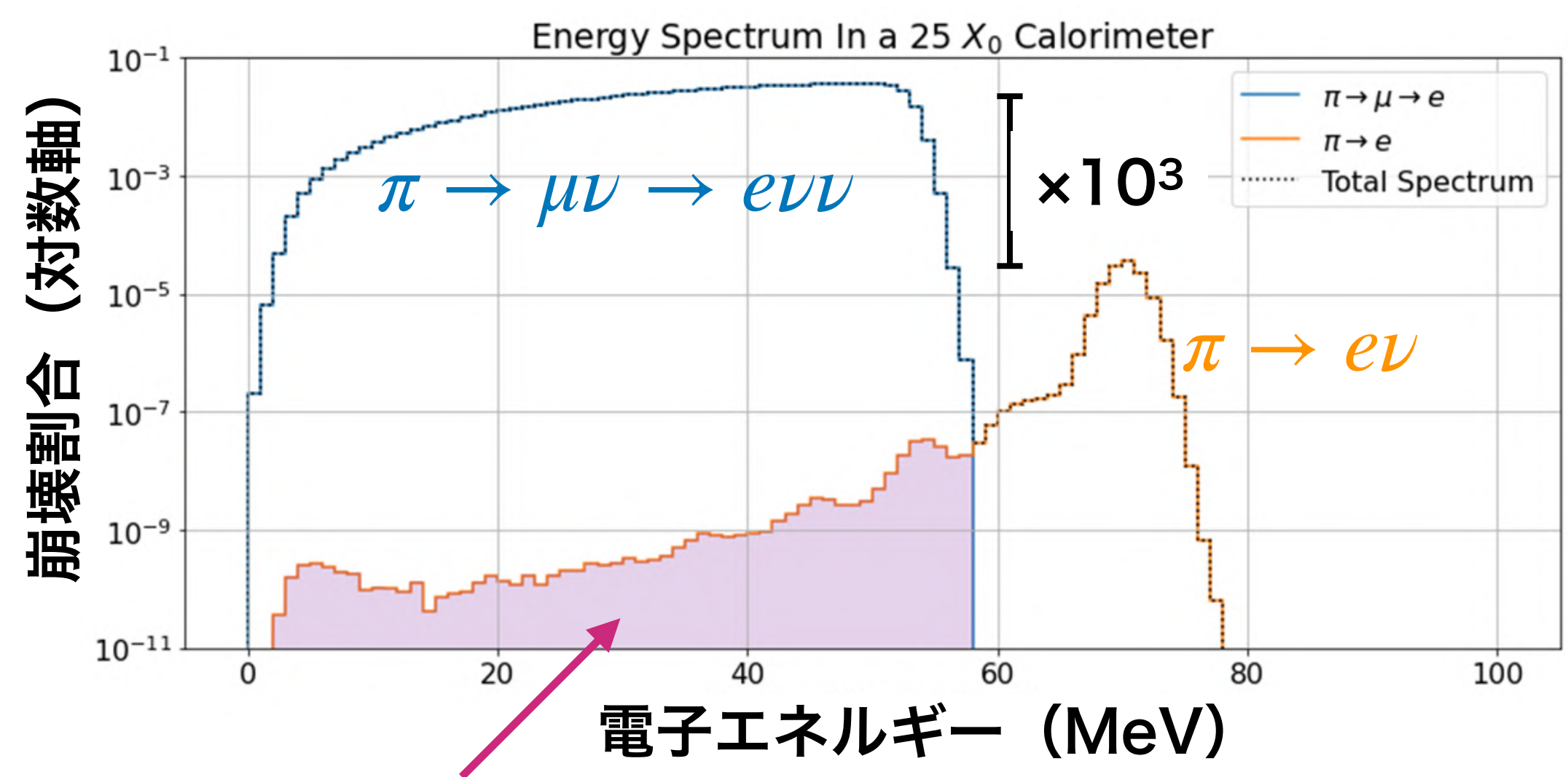
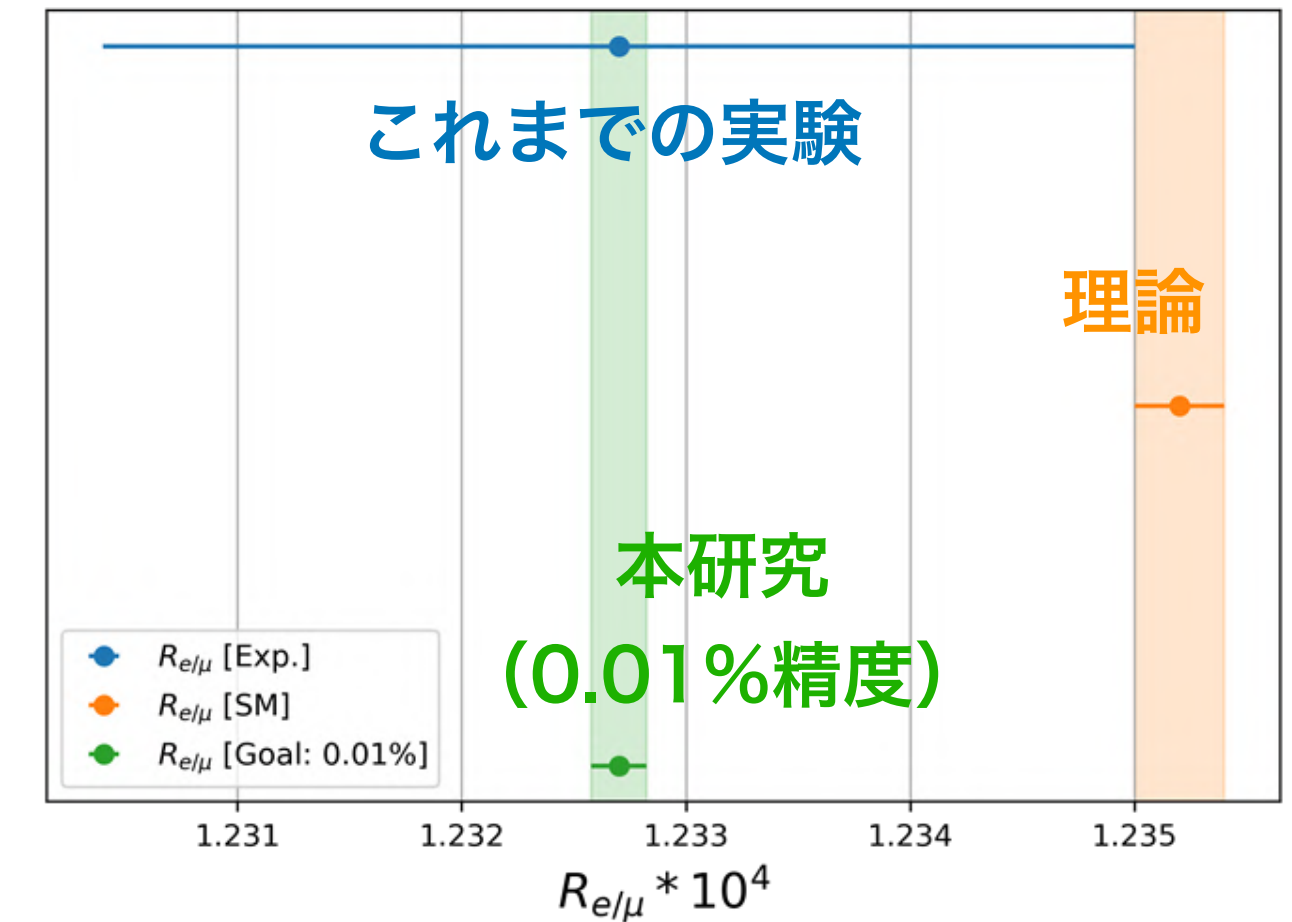
新測定器ビーム試験@KEK



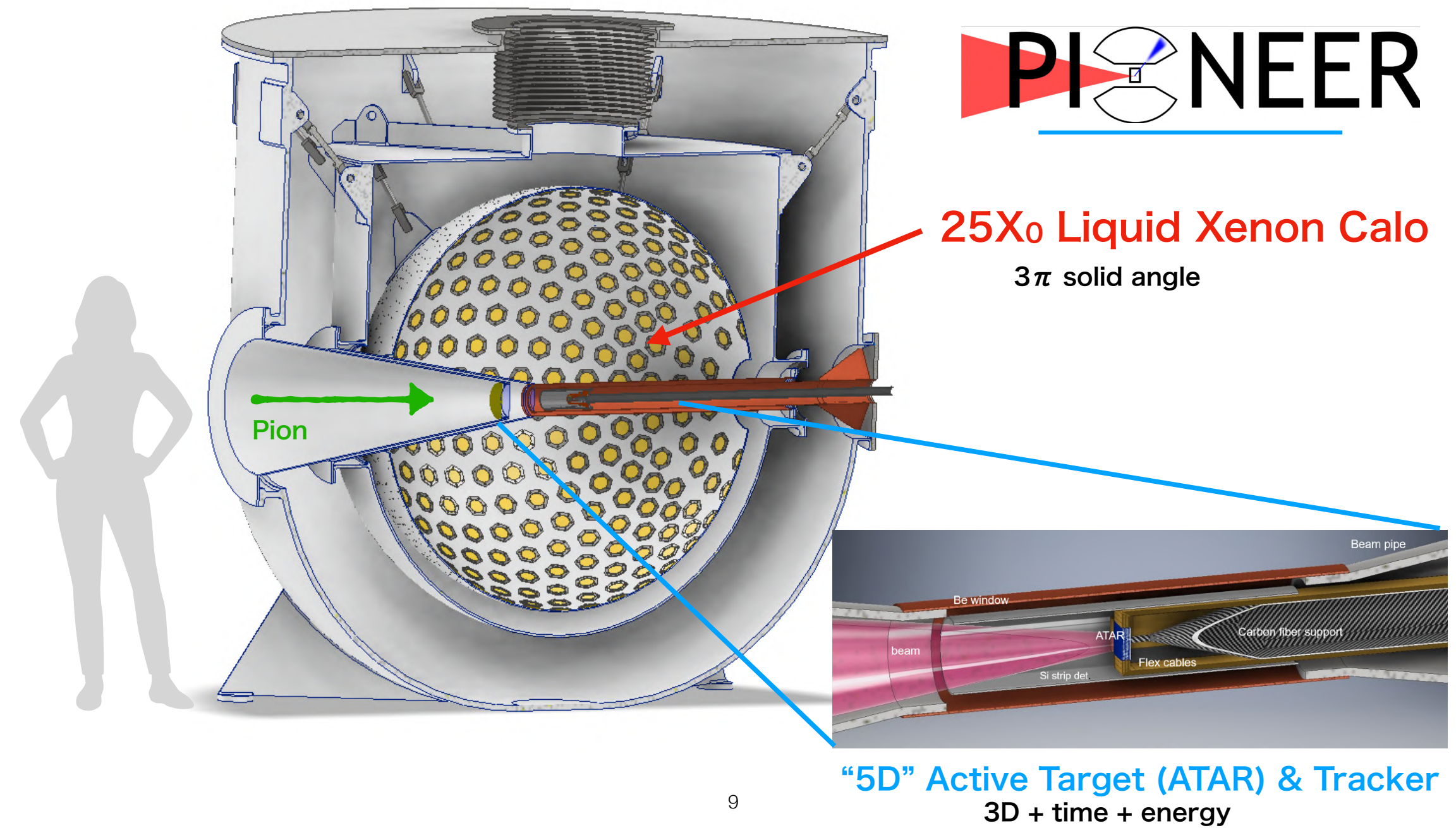
# PIONEER実験

$$R_{e/\mu} = \frac{\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e}{\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu} = \left( \frac{g_e m_e m_\pi^2 - m_e^2}{g_\mu m_\mu m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 \sim 10^{-4}$$

- レプトン( $\mu, e, \tau$ )に対する相互作用は普遍的@標準理論 (レプトン普遍性  $g_e = g_\mu = g_\tau$ )
- レプトン普遍性が破れていることを示唆する複数の実験結果 → 新物理?
- PIONEER実験: パイ中間子の崩壊精密測定でレプトン普遍性を強力に検証 → 新物理探索
- 2022年PSIで実験提案が採択
- 日本グループは最重要測定器である液体キセノン検出器を担当



以前の実験に比べこの低エネルギーテールを大きく削減



# レプトンフレーバーの破れ探索実験の今後



PSIビーム増強 (x100!)

MEG II  
物理データ取得

物理解析

将来実験  
測定器開発      測定器建設      物理データ取得

実験提案(LOI, Proposal)

PIONEER  
測定器開発      測定器建設      物理データ取得

物理解析

Mu3e  
Phase I 物理データ取得

Phase II 物理データ取得

COMET  
Phase I 物理データ取得

Phase II 物理データ取得

Mu2e  
物理データ取得

加速器増強

物理データ取得

# レプトンフレーバーの破れ探索実験の今後



## PSIでの実験

PSIビーム増強 (x100!)

## MEG II

物理データ取得

物理解析

## 将来実験

測定器開発

測定器建設

物理データ取得

実験提案(LOI, Proposal)

## PIONEER

測定器開発

測定器建設

物理データ取得

物理解析

## Mu3e

Phase I

物理データ取得

Phase II

物理データ取得

## COMET

Phase I

物理データ取得

Phase II

物理データ取得

## Mu2e

物理データ取得

加速器増強

物理データ取得

# レプトンフレーバーの破れ探索実験の今後



## PSIでの実験

PSIビーム増強 (x100!)

## MEG II

物理データ取得

物理解析

## 将来実験

測定器開発

測定器建設

物理データ取得

数年で続々と新しい探索結果が出てくる！  
もちろん発見の可能性も

## PIONEER

## Mu3e

Phase I

物理データ取得

Phase II

物理データ取得

## COMET

Phase I

物理データ取得

Phase II

物理データ取得

## Mu2e

物理データ取得

加速器増強

物理データ取得