

ミューオン稀崩壊探索実験 の現状と展望

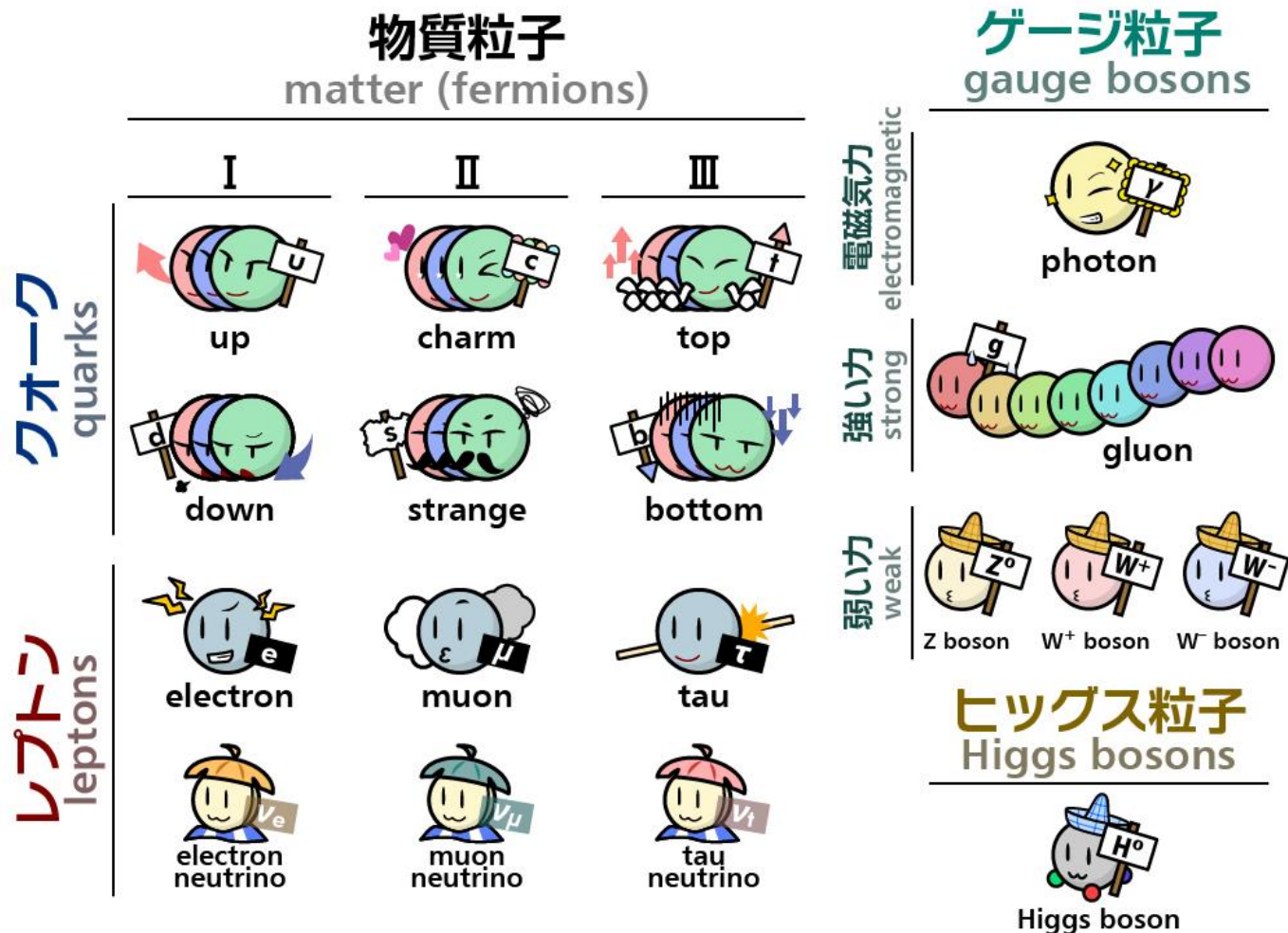
2023年12月22日

上野一樹（大阪大）

素粒子物理の今と未来

イントロダクション

ミューオンと標準理論 (SM)



- 1934年 湯川秀樹中間子理論
- 1936年 宇宙線中にミューオン発見
S. H. Neddermeyer, C. D. Anderson,
Phys. Rev. 51, 884(1937)
- ミュー粒子崩壊の観測
 $\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu}$
- 1947年 $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索実験
→世代の概念のヒント
E. P. Hincks, B. Pontecorvo,
Phys. Rev. 73, 257(1948)
- 1958年 理論予想($\mu \rightarrow e \gamma$ 分岐比) 10^{-4}
G. Feinberg, Phys. Rev. 110, 1482(1958)
実験上限値 2×10^{-5}
S. Lokanathan, J. Steinberger,
Phys. Rev. 98, 240(1955)
- 2成分ニュートリノモデル
少なくとも2成分の
ニュートリノ有
→世代の概念
L. M. Lederman, M. Schwarz, J. Steinberger,
et al., Phys. Rev. Lett. 9, 36(1962)

ミューオンは標準理論の確立に大きく貢献

ミューオンを用いた素粒子物理学実験

標準理論を超える物理 (BSM) の探索

- 荷電レプトンフレーバー非保存 (CLFV)

- 未発見。発見すれば即座にBSM。

- 双極子能率 → 明日関連講演

- 磁気双極子能率($g-2$) : $a_\mu = (g-2)/2$

- BNL, FNAL : SMから 5σ のズレ

- 電気双極子能率(EDM) : d_μ

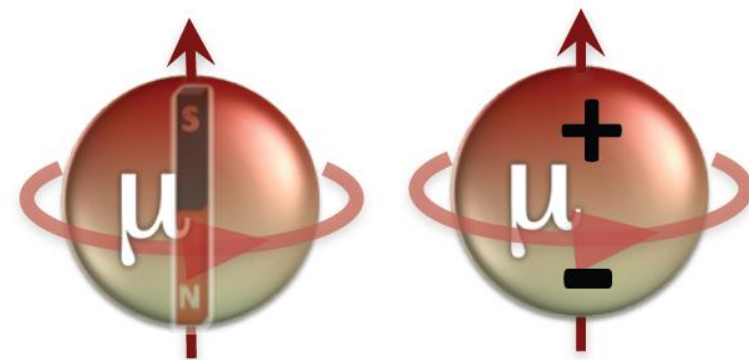
- 未発見。発見すれば即座にBSM。

代表的なCLFV過程

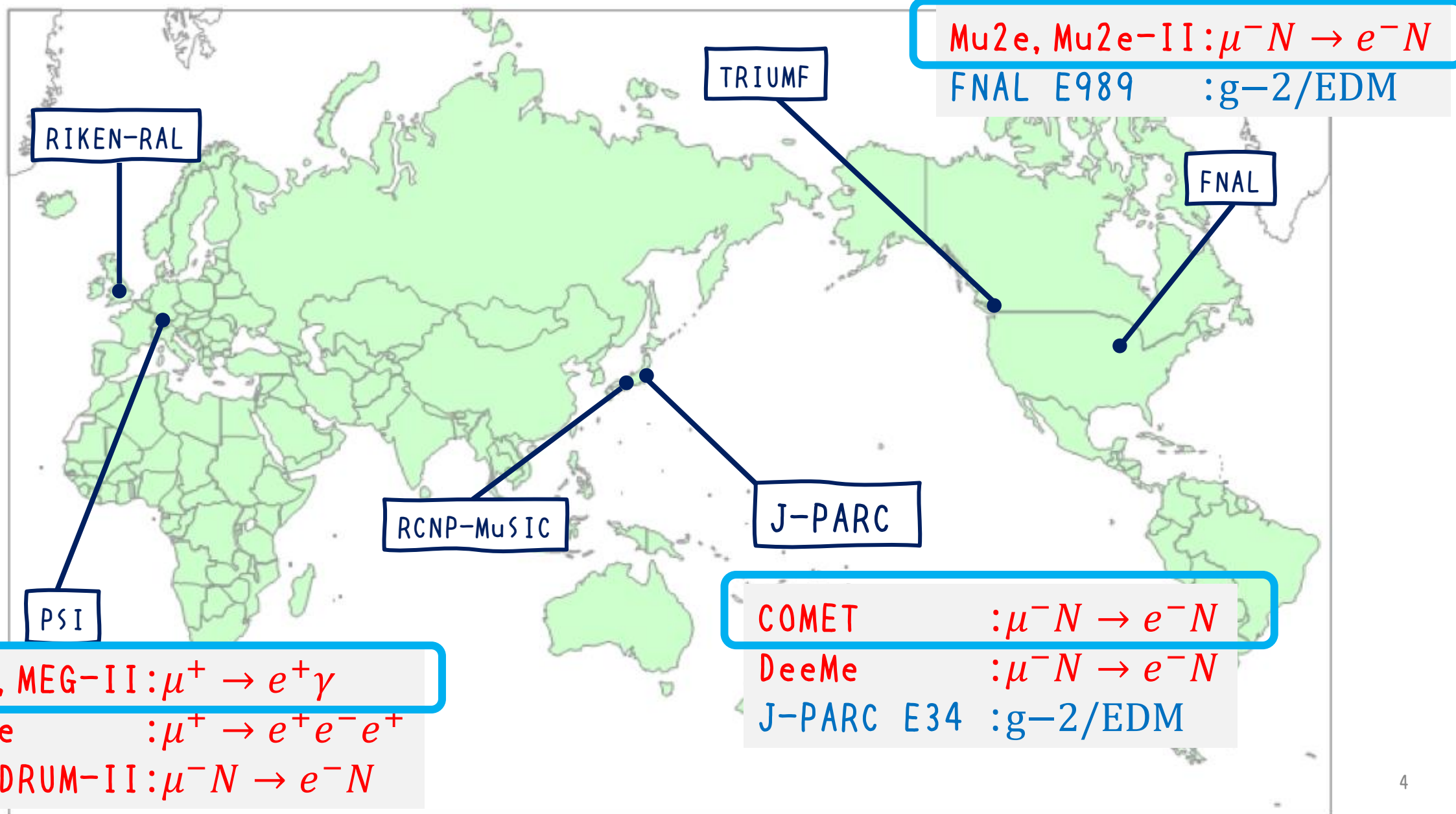
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$$

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

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



ミューオン素粒子物理学実験



P5の結果

Figure 1 – Program and Timeline in Baseline Scenario (B)



Mu2e

Mu2e-II

AMF

In addition, we recommend continued support for the following ongoing experiments at the medium scale (project costs > \$50M for DOE and > \$4M for NSF), including completion of construction, operations, and research:

- d. NOvA, SBN, and T2K (*elucidate the mysteries of neutrinos*, section 3.1).
- e. DarkSide-20k, LZ, SuperCDMS, and XENONnT (determine the nature of dark matter, section 4.1).
- f. DESI (*understand what drives cosmic evolution*, section 4.2).
- g. Belle II, LHCb, and Mu2e (*pursue quantum imprints of new phenomena*, section 5.2).

Recommendation 4: Support a comprehensive effort to develop the resources—theoretical, computational, and technological—essential to our 20-year vision for the field. This includes an aggressive R&D program that, while technologically challenging, could yield revolutionary accelerator designs that chart a realistic path to a 10 TeV pCM collider.

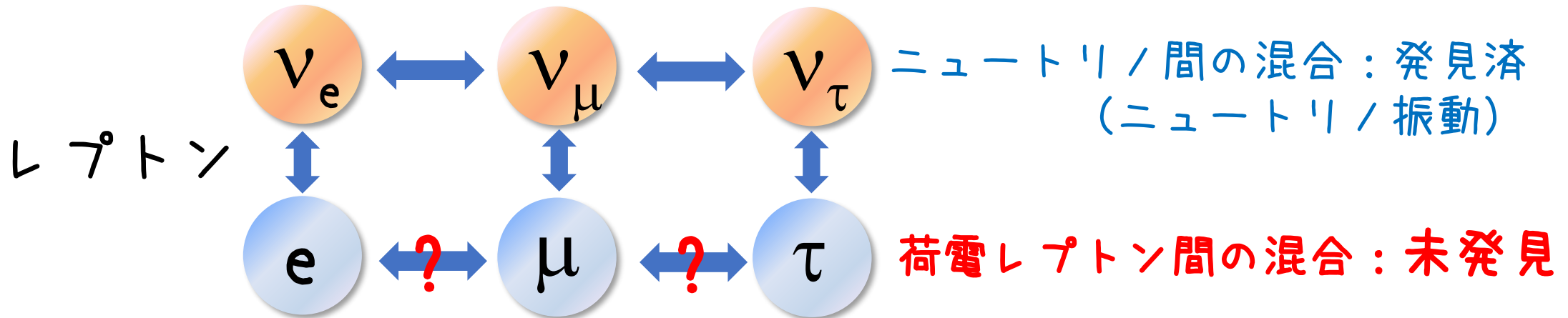
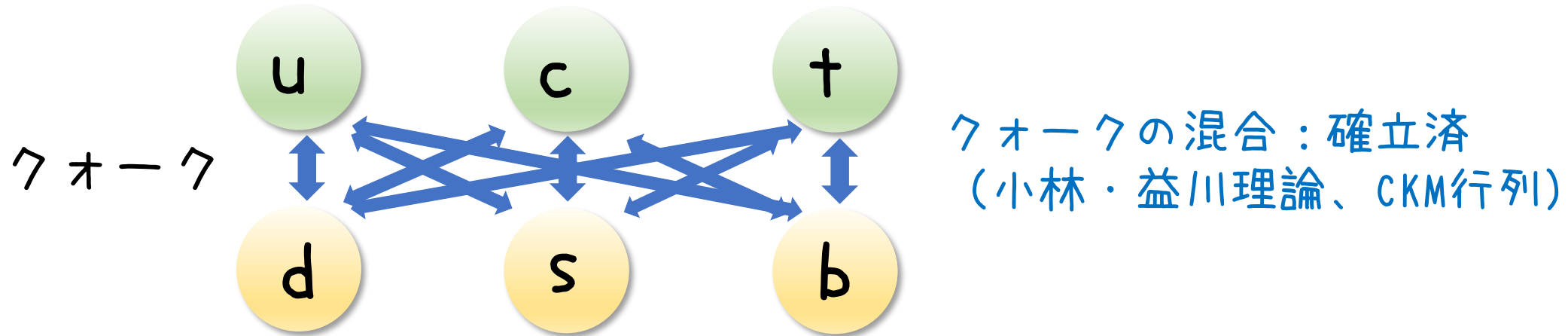
Investing in the future of the field to fulfill this vision requires the following:

- a. Support vigorous R&D toward a cost-effective 10 TeV pCM collider based on proton, muon, or possible wakefield technologies, including an evaluation of options for US siting of such a machine, with a goal of being ready to build major test facilities and demonstrator facilities within the next 10 years (sections 3.2, 5.1, 6.5, and Recommendation 6).
- b. Enhance research in theory to propel innovation, maximize scientific impact of investments in experiments, and expand our understanding of the universe (section 6.1).
- c. Expand the General Accelerator R&D (GARD) program within HEP, including stewardship (section 6.4).
- d. Invest in R&D in instrumentation to develop innovative scientific tools (section 6.3).
- e. Conduct R&D efforts to define and enable new projects in the next decade, including detectors for an e^+e^- Higgs factory and 10 TeV pCM collider, Spec-S5, DUNE FD4, Mu2e-II, Advanced Muon Facility, and line intensity mapping (sections 3.1, 3.2, 4.2, 5.1, 5.2, and 6.3).

Although we do not know if a muon collider is ultimately feasible, the road toward it leads from current Fermilab strengths and capabilities to a series of proton beam improvements and neutrino beam facilities, each producing world-class science while performing critical R&D towards a muon collider. At the end of the path is an unparalleled global facility on US soil. This is our Muon Shot.

荷電レプトンフレーバー非保存

フレーバー混合

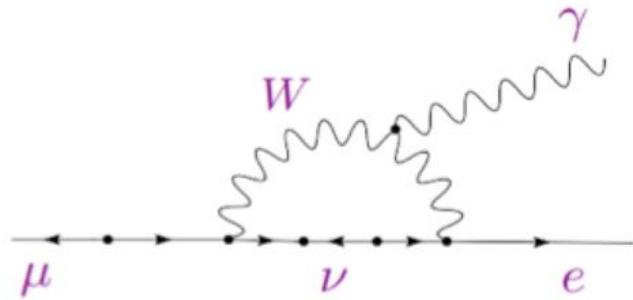


荷電レプトンフレーバー非保存

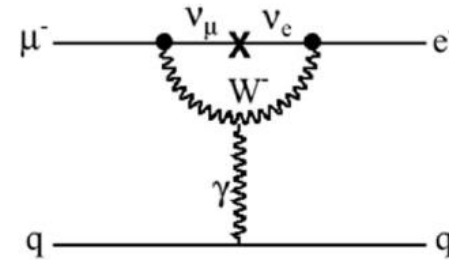
荷電レプトンフレーバー非保存過程(CLFV)

$\mu \rightarrow e\gamma$ 、 $\mu^- N \rightarrow e^- N$ 、 $\mu \rightarrow eee$ など → 標準理論では禁止

標準理論 + ニュートリノ振動による効果



$$\text{BR}(\ell_1 \rightarrow \ell_2 \gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{j=1}^3 U_{\ell_1 j} U_{\ell_2 j}^* \frac{m_{\nu_j}^2}{M_W^2} \right|^2$$
$$\cong \mathcal{O}(10^{-55} - 10^{-54})$$



$$R_{\mu e} = \frac{\Gamma(\mu \rightarrow e)}{\Gamma(\text{capture})}$$
$$\cong \mathcal{O}(\alpha) \times \text{BR}(\mu \rightarrow e\gamma) \lesssim 10^{-54}$$

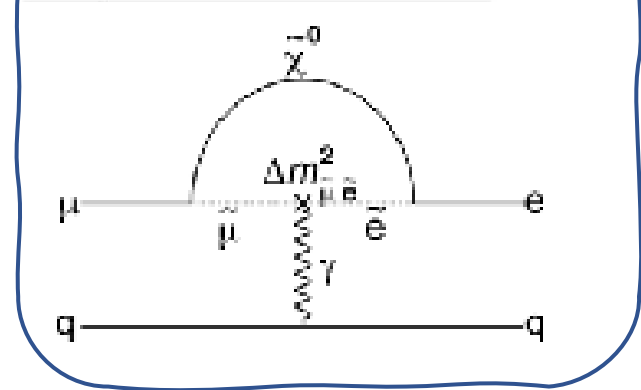
荷電レプトン混合反応の分岐比 $\sim \mathcal{O}(10^{-54})$ 観測不可能。。。



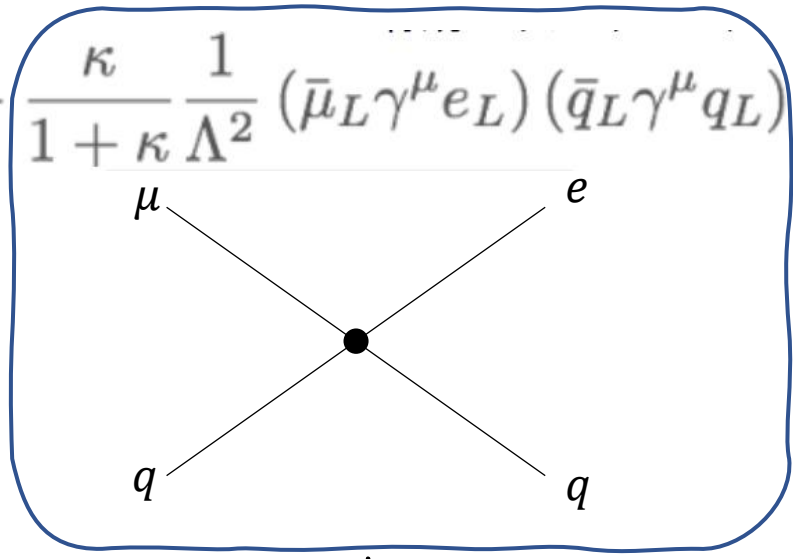
CLFVの発見 = BSM

$$\mu \rightarrow e \gamma, \quad \mu^- N \rightarrow e^- N$$

$$\mathcal{L} = \frac{1}{1+\kappa} \frac{m_\mu}{\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma^{\mu\nu} e_L F_{\mu\nu} + \frac{\kappa}{1+\kappa} \frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\mu}_L \gamma^\mu e_L) (\bar{q}_L \gamma^\mu q_L)$$

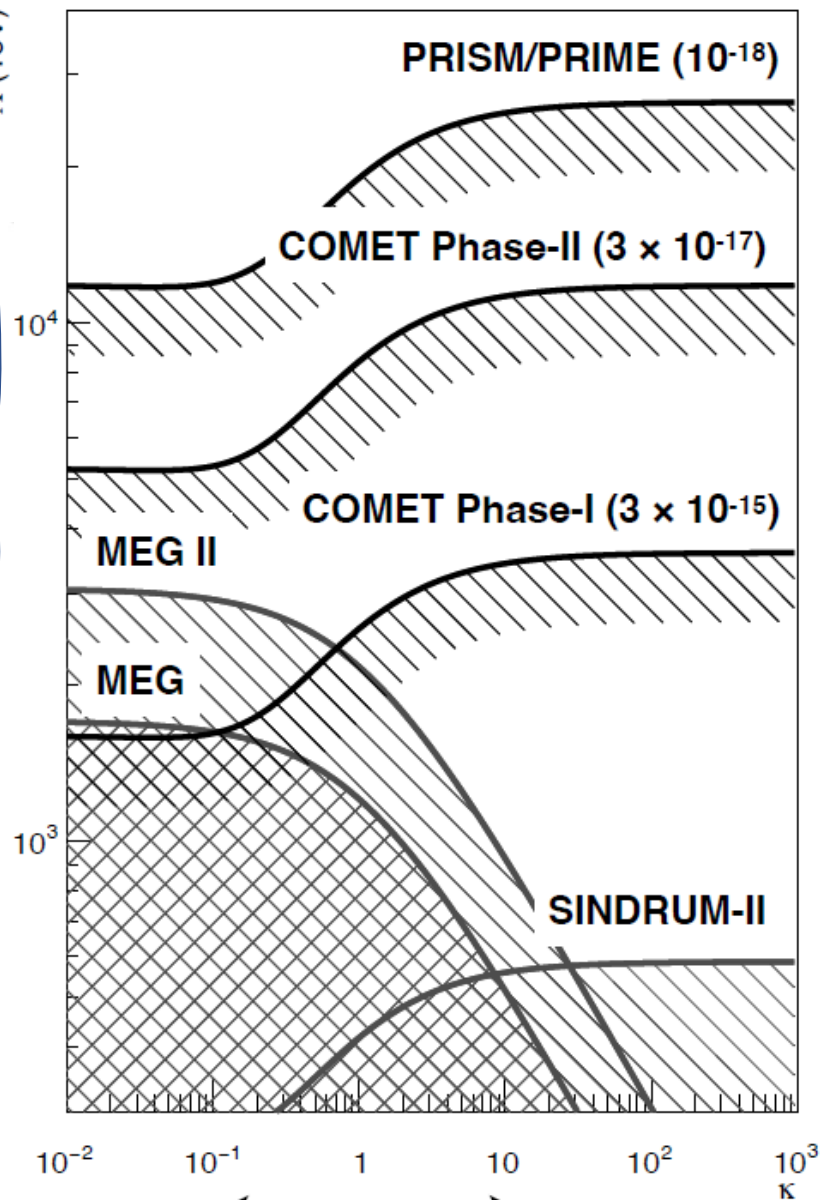


photonic



non-photonic

Λ (TeV)



photonic-like

nonphotonic-like

BSMの例

($\mu^- N \rightarrow e^- N$ の例)

SUSY-GUT

SUSY-SEASAW

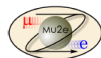
Little Higgs

Leptoquarks

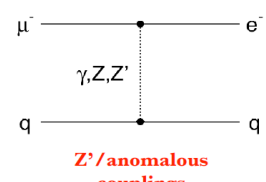
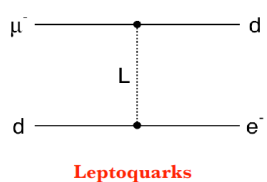
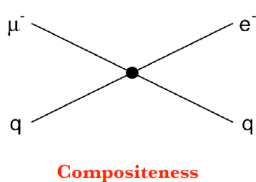
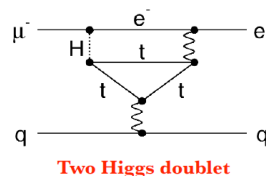
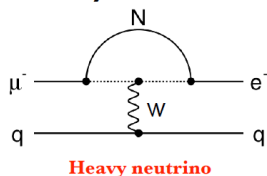
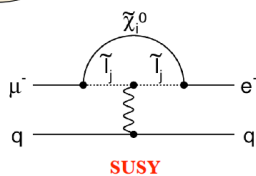
など多数

分岐比

$\sim 0(10^{-15})$



New Physics and $\mu \rightarrow e$

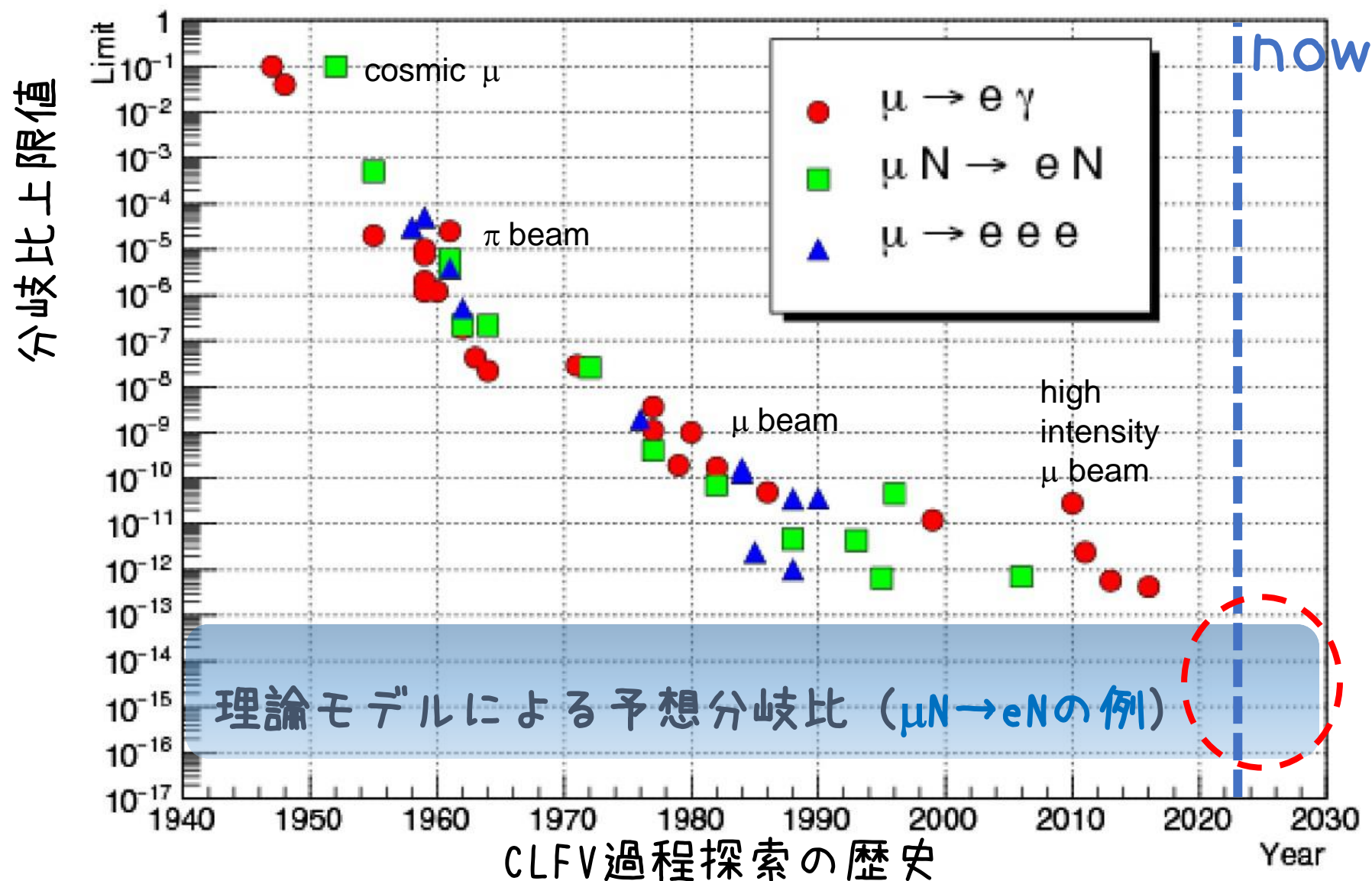


Any signal observation would be an unambiguous sign of **New Physics**

G. Pezzullo NuFact2021スライドより

G. Pezzullo (Yale University)

荷電レプトンフレーバー非保存



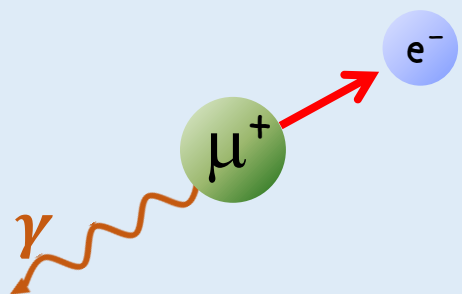
そろそろ
見つかる
かもしれない

CLFV過程探索の歴史

F. Renga, Rev. Phys. 4, 100029(2019)、一部追記

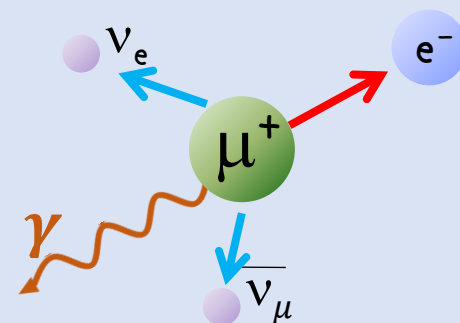
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$$

シグナル

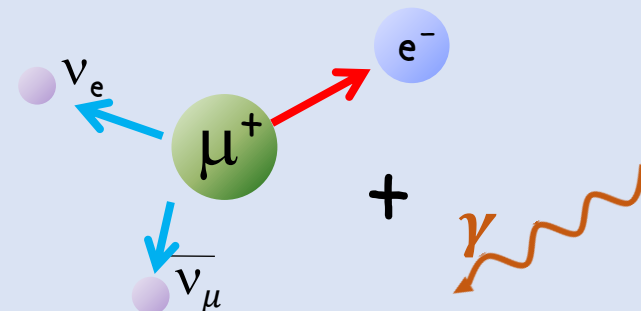


- Back-to-back
- 単一エネルギー
 $E_e = 52.8 \text{ MeV}$
 $E_\gamma = 52.8 \text{ MeV}$
- 同時刻

背景事象



- Radiative muon decay



- 偶発事象

- 大強度直流 μ^+ ビームが必須
- 高分解能検出器も必須
 - エネルギー、タイミング、角度の高精度測定
 - 高レート環境下の運用

ミューオン稀崩壊探索実験@PSI

by W. Ootani
(一部改変)

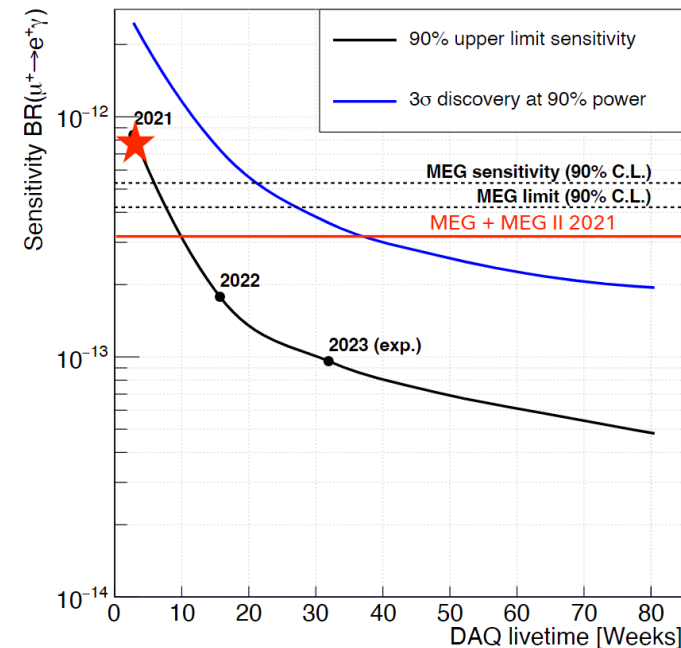
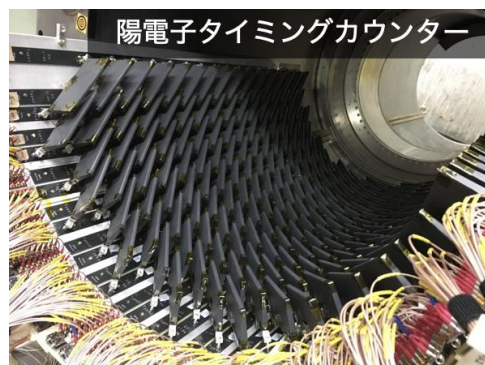
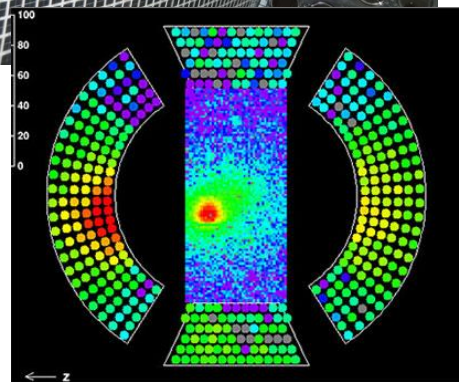
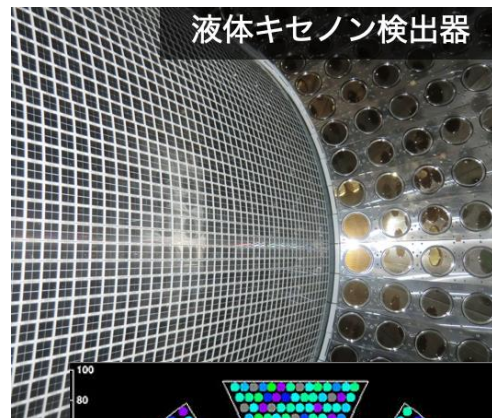
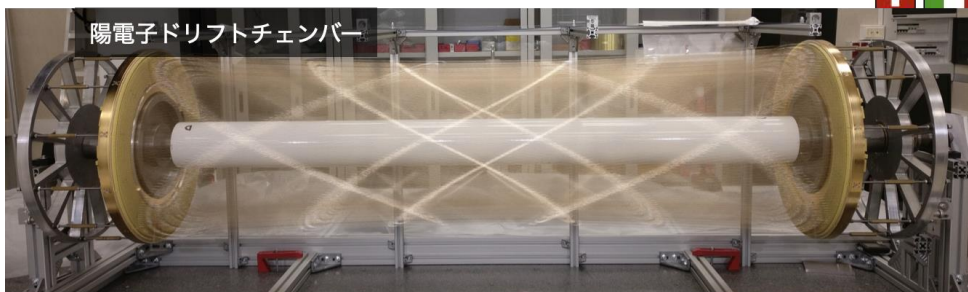
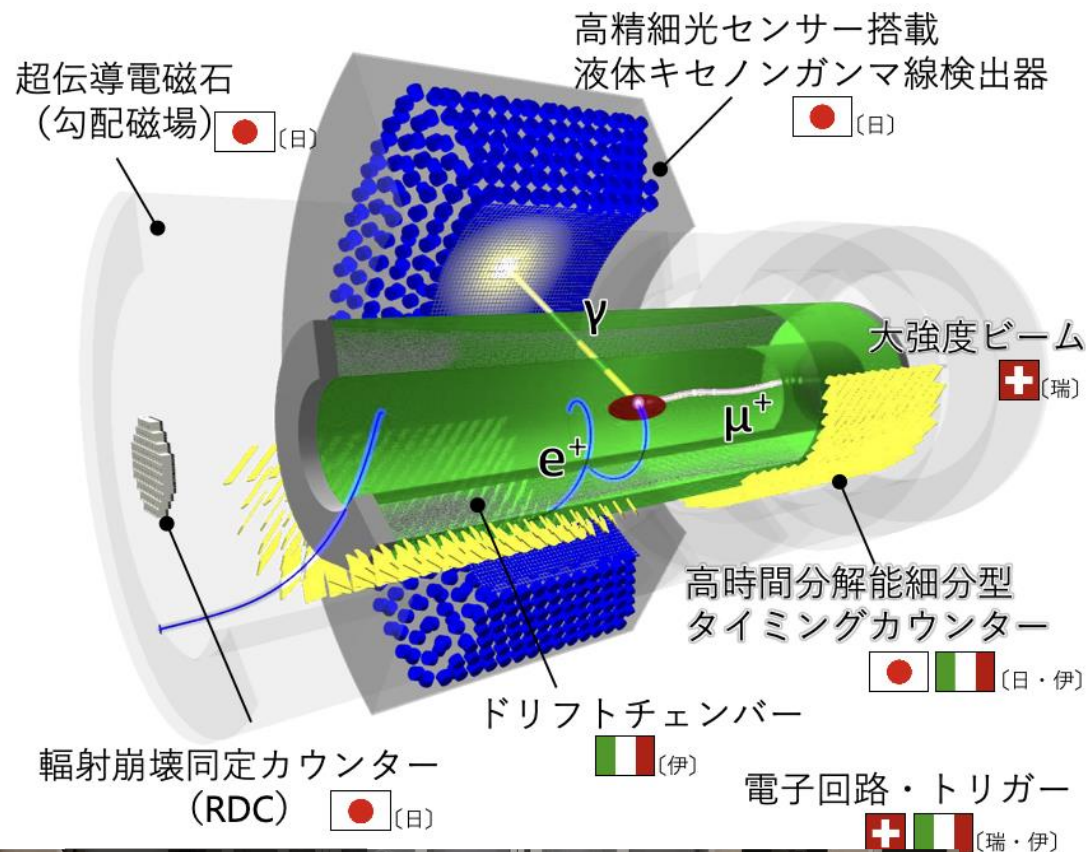
- 世界最大強度の直流ミューオンビーム@PSI
 - 最大 $10^8 \mu/\text{sec}$
- 最高感度ミューオン稀崩壊探索実験いよいよ始まる
 - **MEG II ($\mu \rightarrow e\gamma$)** :
2022年7月本格測定開始！
 - **Mu3e ($\mu \rightarrow eee$)** :
2024年コミッショニング開始予定



⇒新物理を強力に検証、発見の期待

MEG-II

by W. Ootani
(一部改変)



- ▶ The first 7-week data in 2021 achieved a Sensitivity $\sim 60\%$ of MEG 2009-2013.

$$\mathcal{B}_{90} = 7.5 \times 10^{-13}$$

- ▶ A combination MEG + MEG II provides the most stringent limit on the branching ratio of $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

$$\mathcal{B}_{90} = 3.1 \times 10^{-13}$$

森さん
BRIDE2023セミナーより

MEG-II実験スケジュール (+α)

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

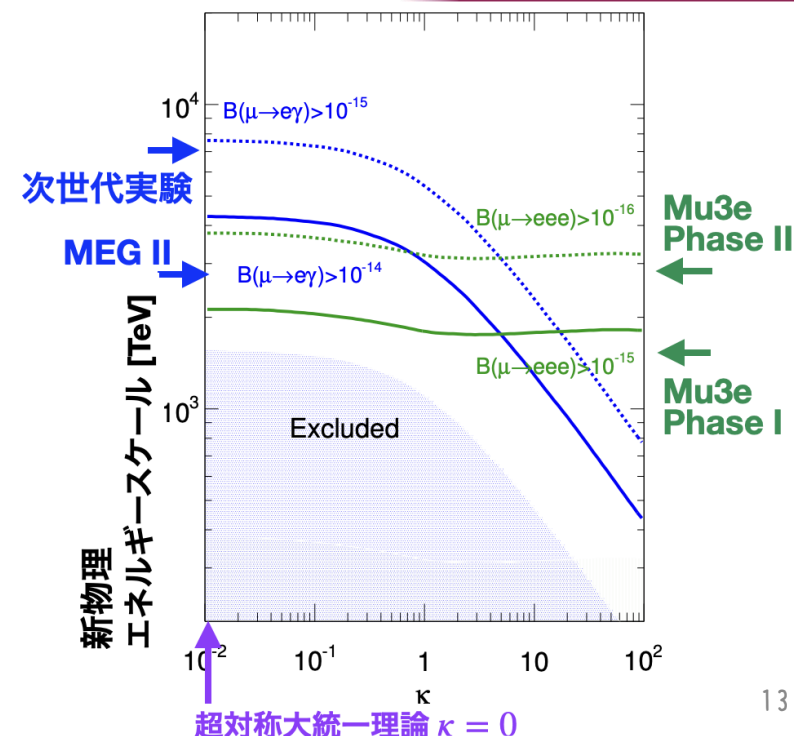
MEG II

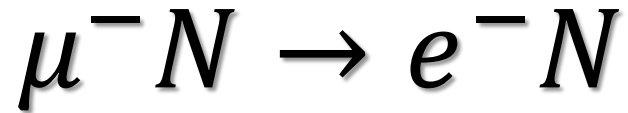


ビーム増強計画

(HIMB, 2027-2028導入予定)

- ビーム強度100倍！ $O(10^{10})\mu/\text{sec}$
- 探索感度を大幅に改善した次世代実験も計画

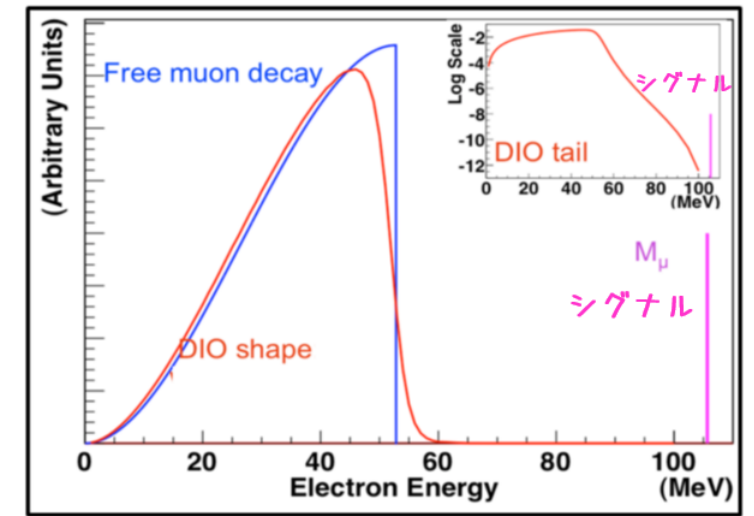




ミューオン電子転換過程

ミューオン原子

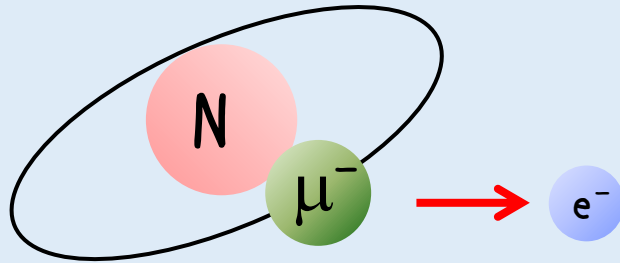
- μ^- ビームを原子核標的に入射、静止
- $1s$ stateのミューオン原子を生成



シグナルとDIOのエネルギースペクトル

R. Bonventre, SciPost Phys. Proc. 1, 038(2019)、一部追記

シグナル

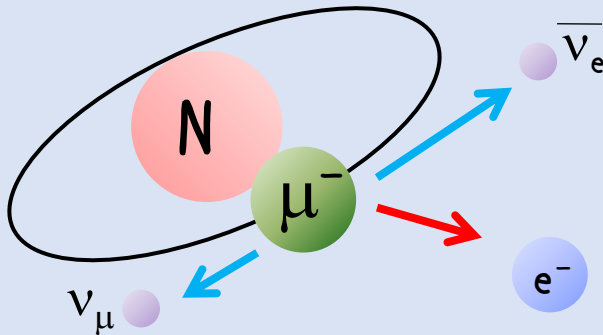


• 単一電子

$$E_e = m_\mu - B_\mu \sim 105 \text{ MeV} \quad (N=A1)$$

• コヒーレント過程

背景事象



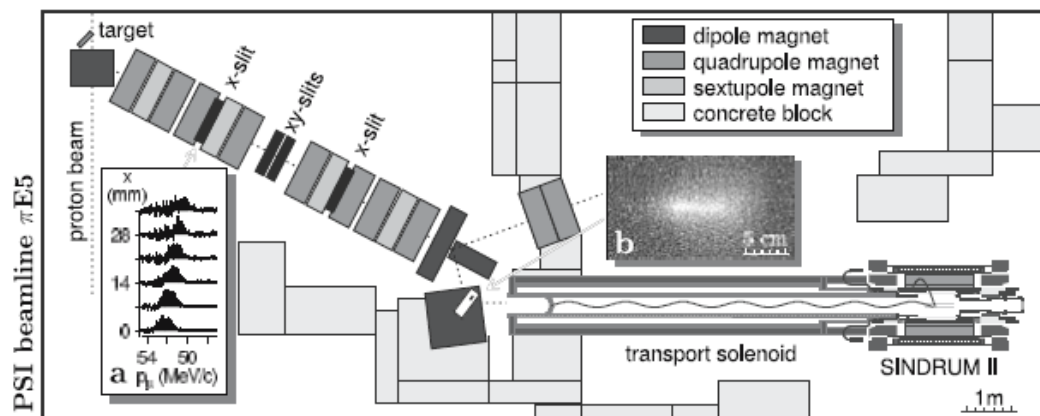
• Decay in Orbit (DIO)

• ビーム起因

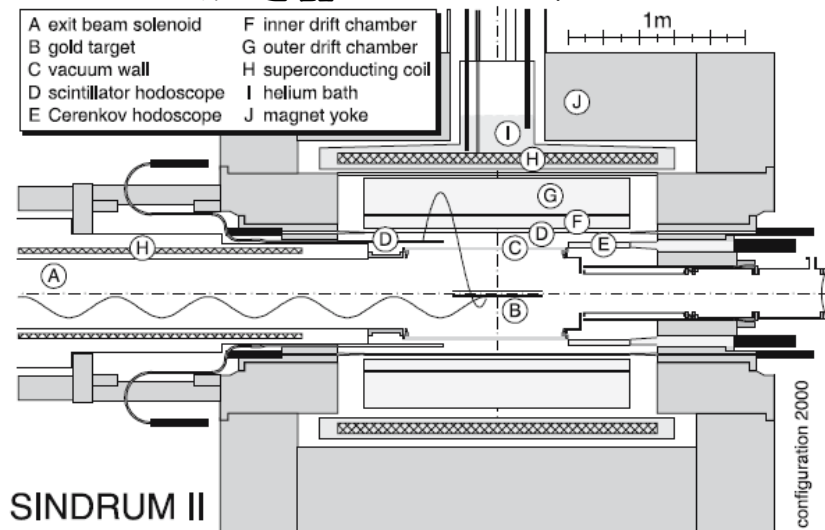
• 宇宙線 など

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

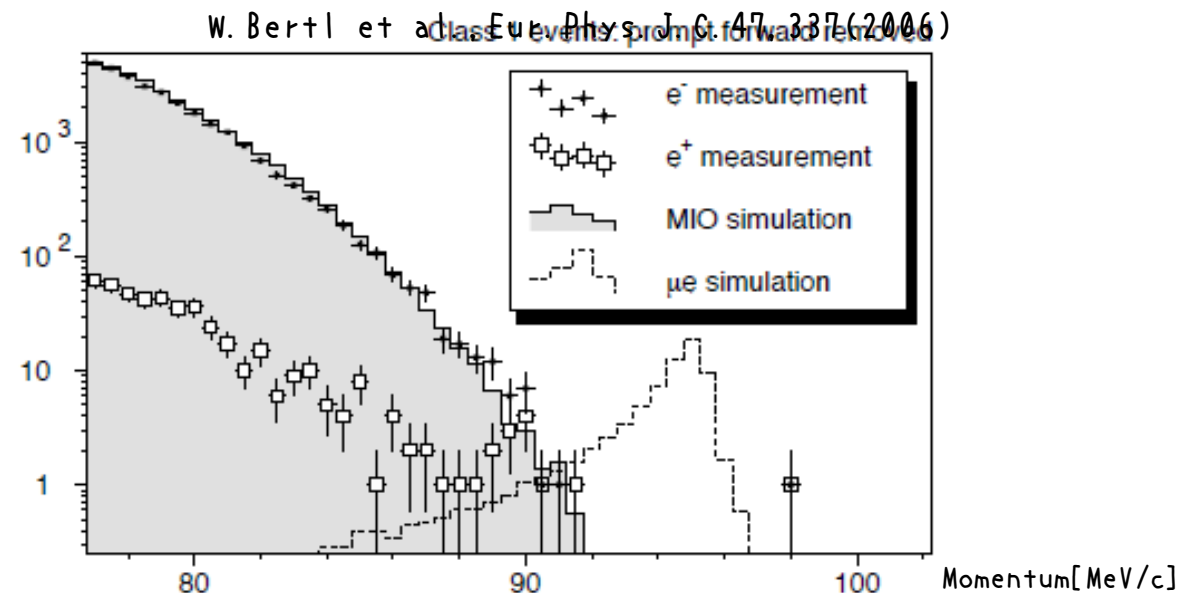
分岐比上限値 $< 7 \times 10^{-13}$ (N=Au, SINDRUM-II@PSI)



加速器ビームライン



スペクトロメータ



課題

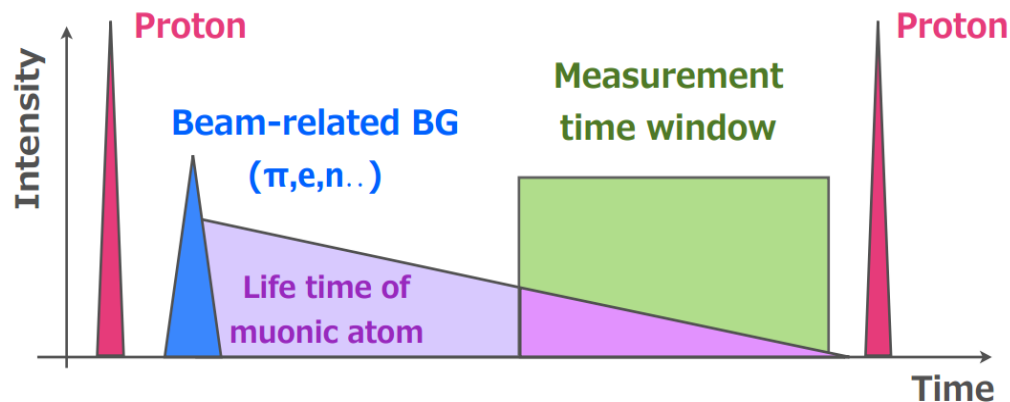
- ① ミューオンビーム大強度化
- ② 背景事象低減
- ③ 高分解能検出器開発

COMET実験

ミューオン電子転換過程探索実験@J-PARC

課題への対応

- ①J-PARCの大強度ビーム
- ②パルス化ビーム、輸送ソレノイド
- ③新たな高分解能検出器開発



パルスビームにより背景事象低減



大強度パルス状陽子ビーム

湾曲型 π/μ 輸送ソレノイド
→ 低運動量 μ の選別

パイ中間子 → ミューオン

高分解能検出器

パイ中間子生成標的

パイ中間子捕獲磁石

ミューオン
静止標的

高効率パイオン捕獲
ソレノイド

電子輸送磁石

湾曲型電子
輸送ソレノイド
→ 高運動量電子
の選別

電子

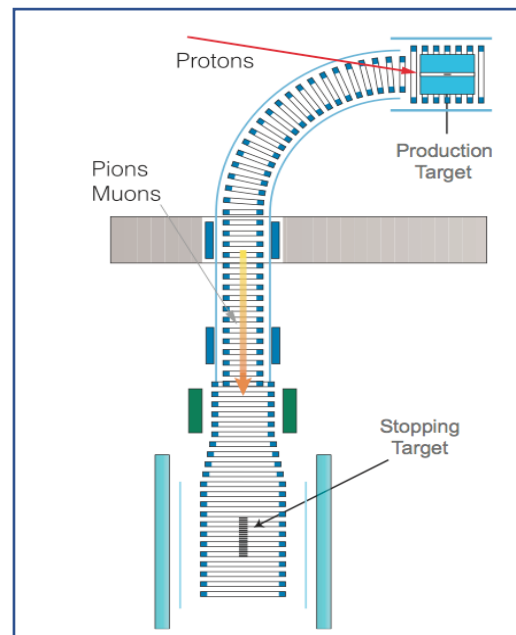
電子検出器

- 検出器ソレノイド磁石
- ストローチューブ飛跡検出器
- LYSOカロリメーター

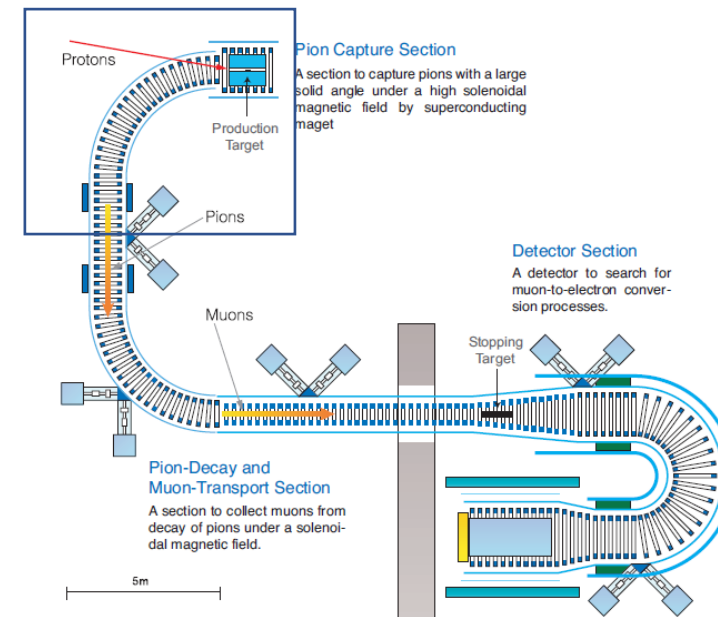
目標感度 : 3×10^{-17} (現状の10000倍)

COMET実験

ステージングアプローチ



Phase-I (2025JFY)



Phase-II (202?-)

Phase-Iの目的

1. Phase-IIのためのR&D

ビーム診断 ⇒ Phase-II同様の検出器使用

2. ミューオン電子転換過程探索

実験感度 $O(10^{-15})$ (現状の100倍) での探索 ⇒ 別の検出器使用

検出器1 : CyDet (Cylindrical Detector System)

ミューオン電子転換過程探索 @Phase-I

CDC (Cylindrical Drift Chamber)

電子の飛跡検出により運動量測定

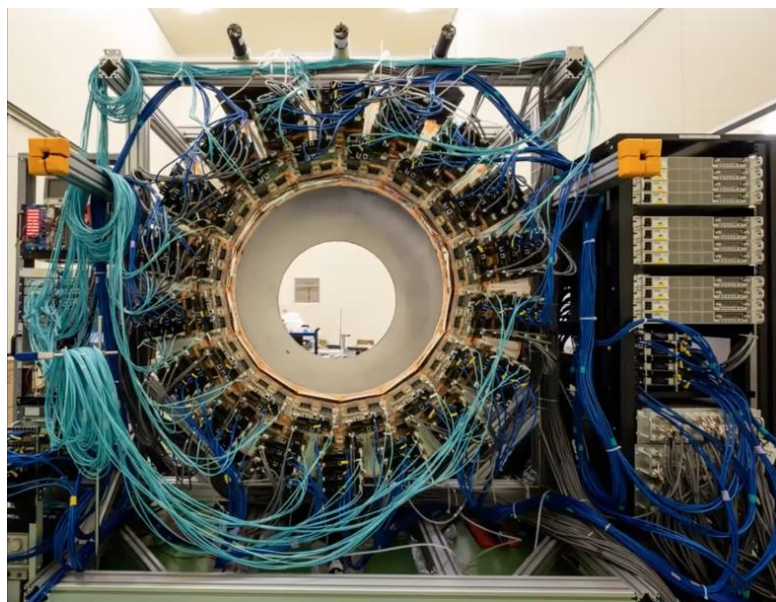
分解能 $< 200 \text{ keV/c}$ @ 105 MeV/c

CTH (Cylindrical Trigger Hodoscope)

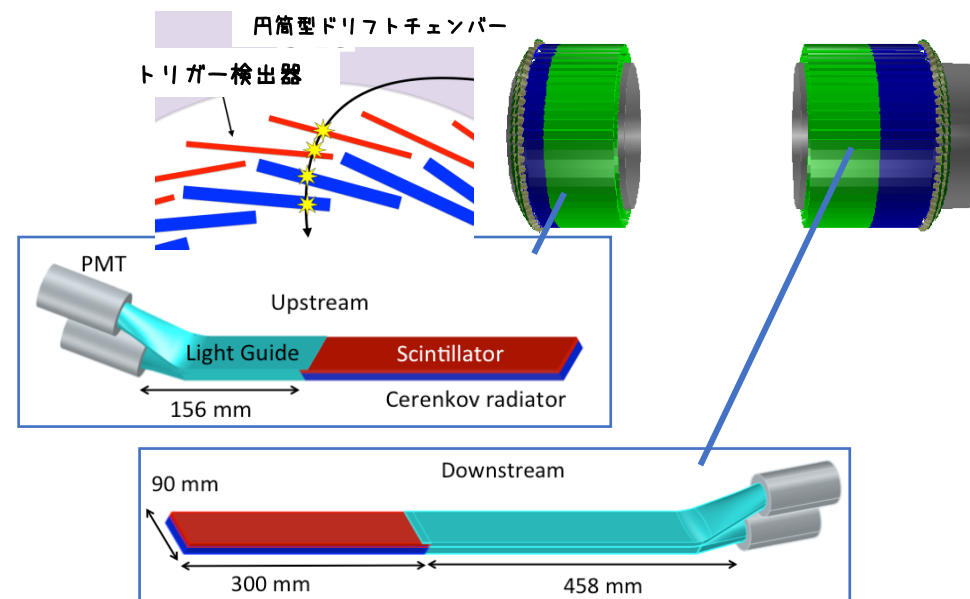
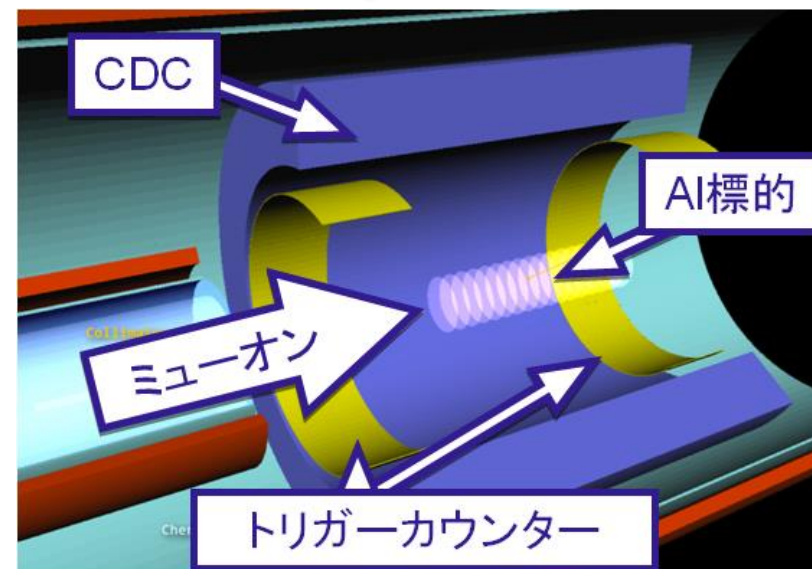
トリガー検出器

シンチレータ (+ チェレンコフ検出器)

光検出器 : fiber+MPPC (or Fine-mesh PMT)



CDC (実機)



CTH

検出器2 : StrECAL

(Straw tube tracker + Electron calorimeter)

ビーム診断@Phase-I

ミューオン電子転換過程探索@Phase-II

Straw tube tracker

電子の飛跡検出により運動量測定

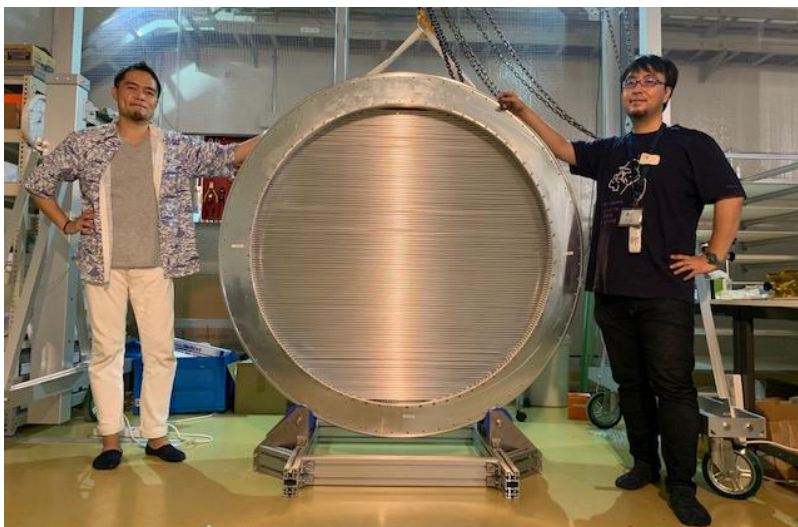
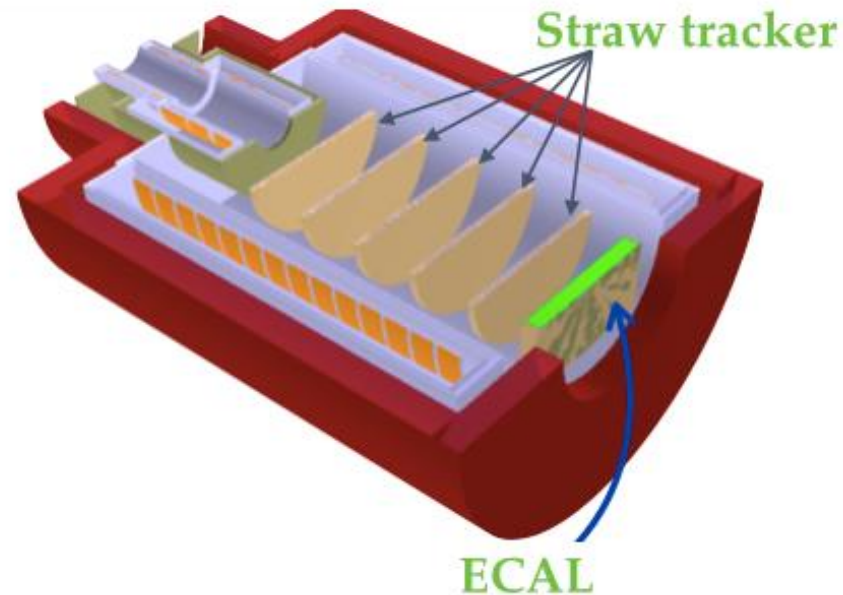
分解能 $< 200 \text{ keV/c}$ @ 105 MeV/c

Ecal (Electron Calorimeter)

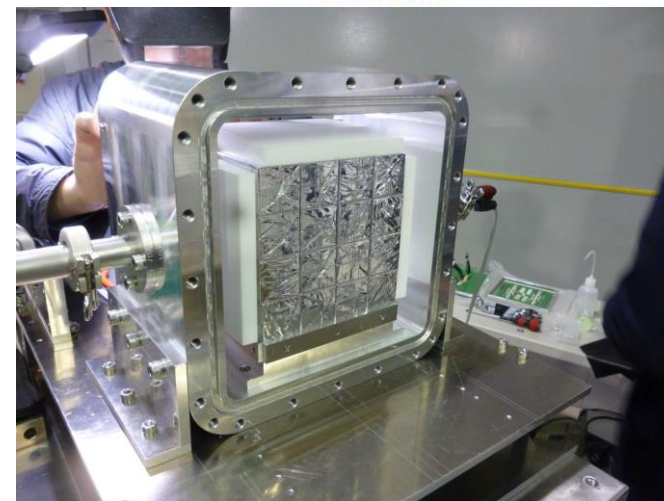
LYSO + APD

エネルギー、タイミング、位置測定

トリガー生成、トラッキング補助、PID

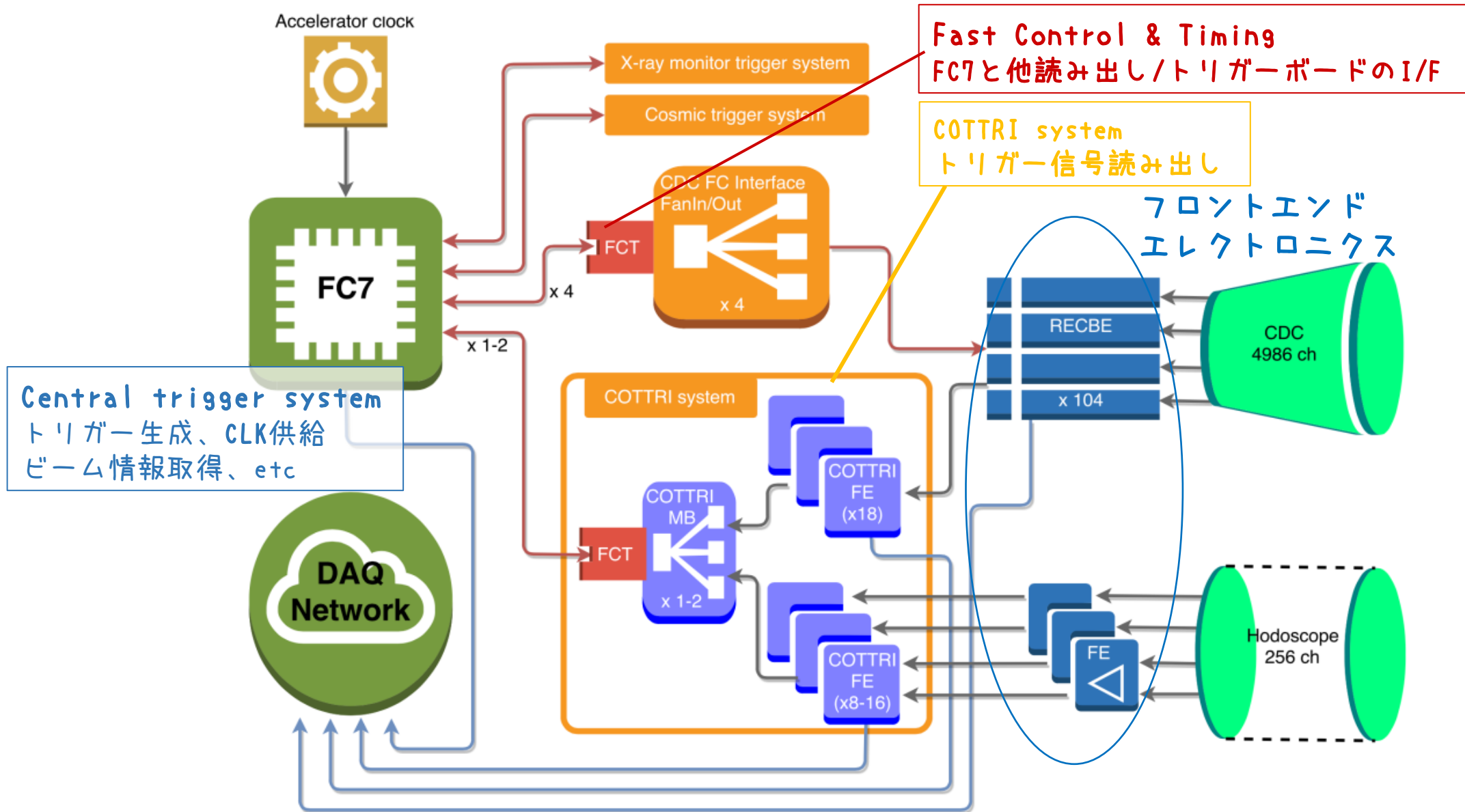


Straw tube tracker(実機)

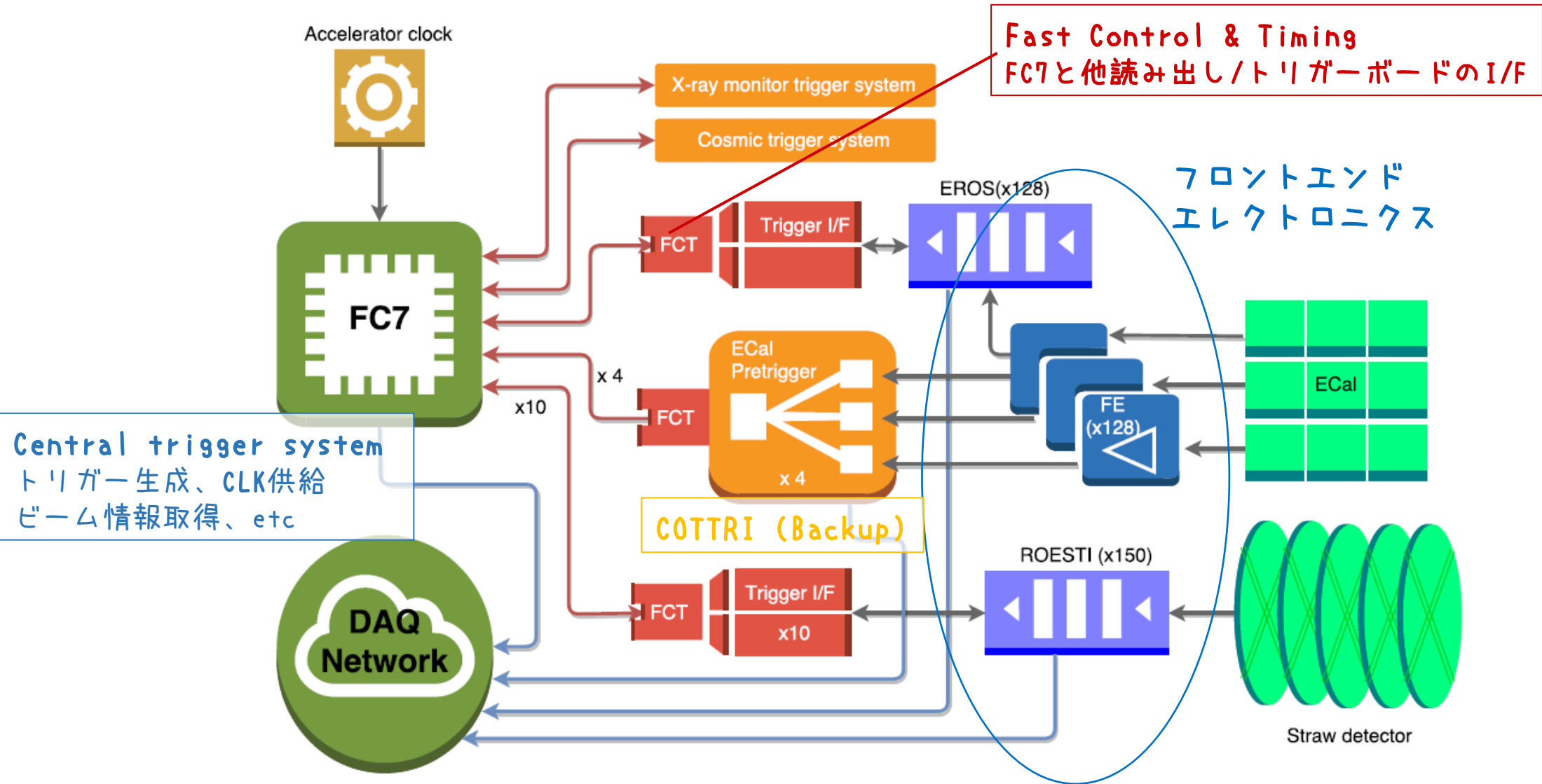


Ecal(prototype)

計測システム (CyDet)

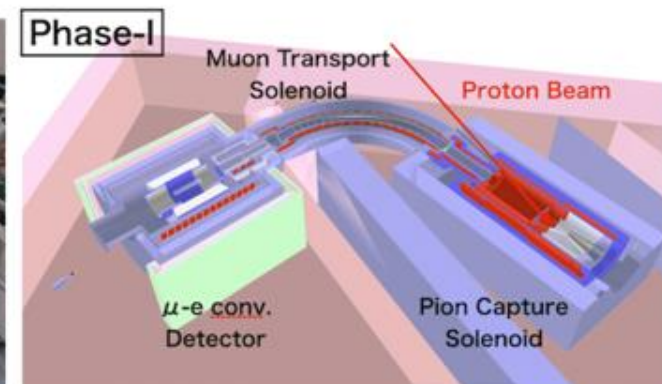
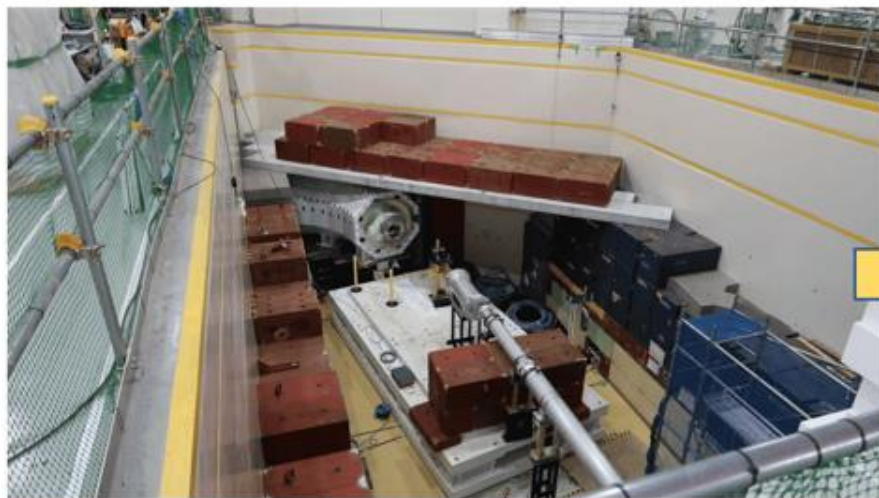


計測システム (StrECal)



COMET実験準備状況

ビームライン



パイオン捕獲ソレノイド、輸送ソレノイド

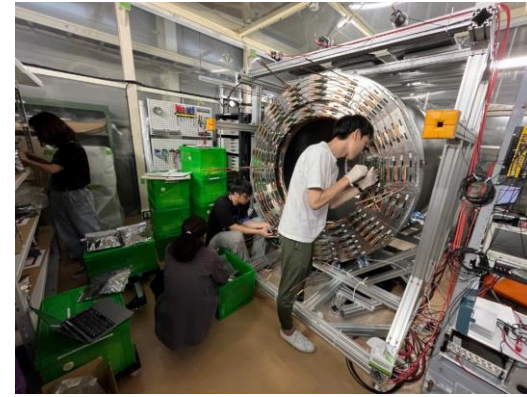
検出器・回路系設置場所



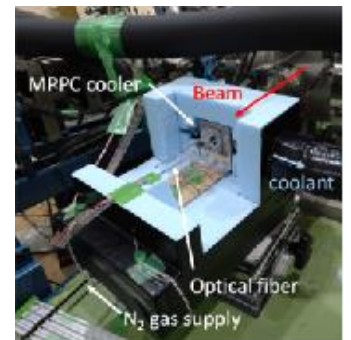
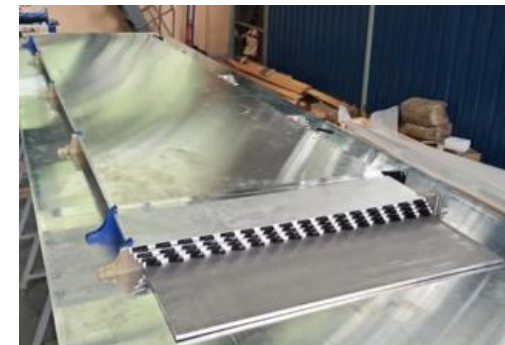
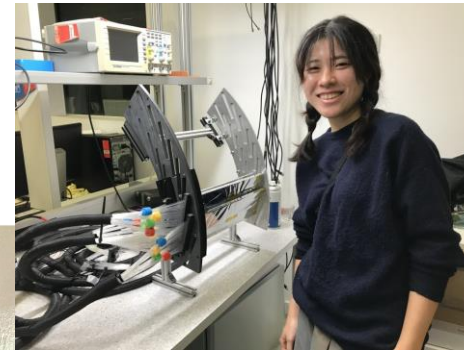
COMET実験準備状況

陽子標的

検出器



ミューオン標的



地味に大変だったこと

- **エレキパーツの放射線耐性**

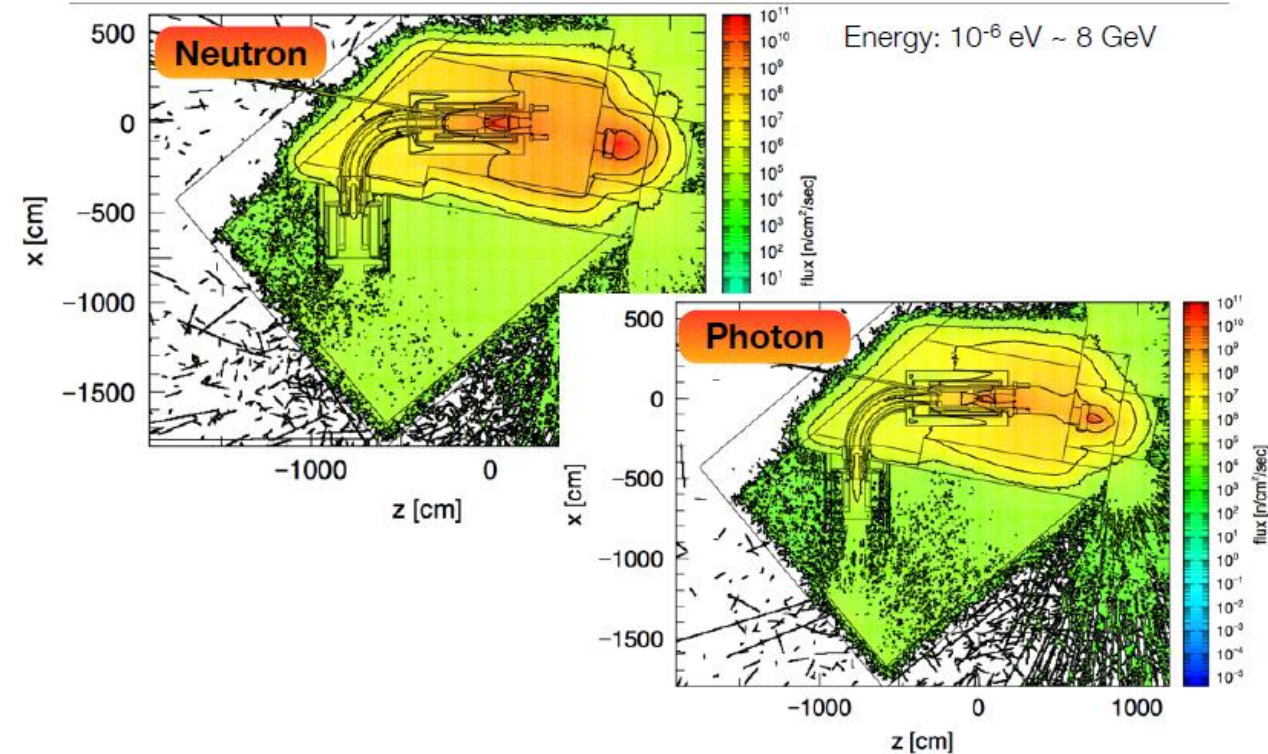
- 大強度ビーム実験であるため、大量の二次粒子が発生
- 特にガンマ線、中性子はパーツに影響大
- **パーツ選定や対策が必須**

検出器領域において

安全ファクターを考慮すると

中性子： $10^{12}/\text{cm}^2$

ガンマ線：1 kGy (150days)



の放射線に耐えられる必要あり

ソフトエラー

ハードエラー

ソフトウェア対策

• SEU対策

• SEUレート調査

• 中性子照射試験

@神戸大学タンデム加速器

• FPGA、DAQ開発

• FPGAにSEU検知・修復機能を実装

• DAQでも監視し、修復できないエラー (URE) 発生時は強制的にFPGAのファームウェアを再ダウンロードする機能を追加

詳細

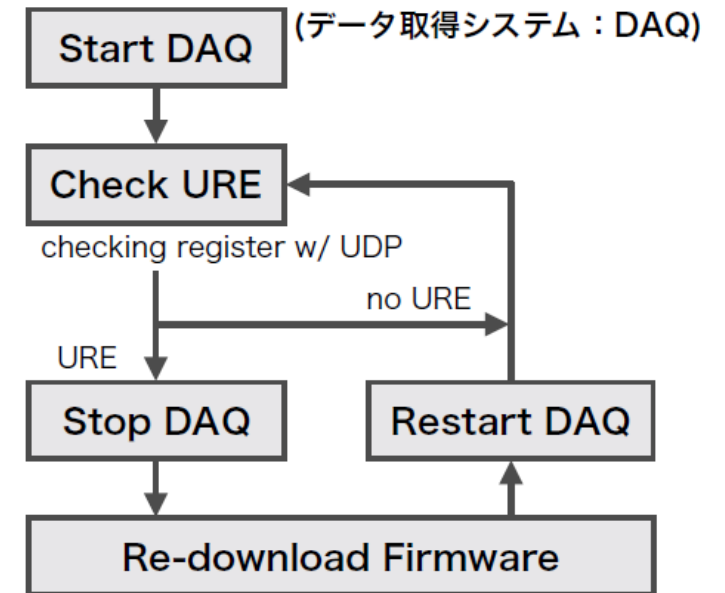
• Configuration RAM

- SEM(IP core from Xilinx)を実装

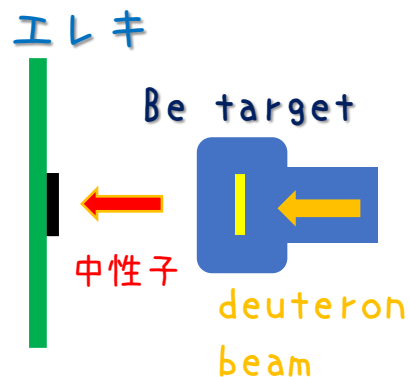
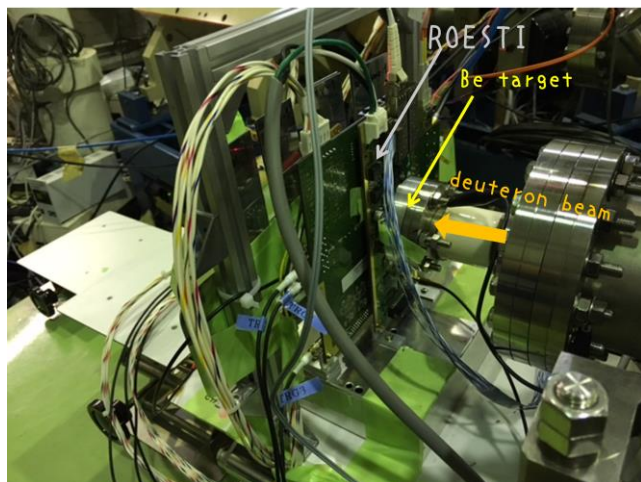
• Block RAM

- ハミングコードを利用したError Correction Code (ECC) (IP core from Xilinx) を実装
- Cyclic Redundancy Check (CRC)によるチェック機能を実装
- ハミング符号、CRC符号をデータに付加。Multi Bit Errors (MBE) の際はオフラインで確認

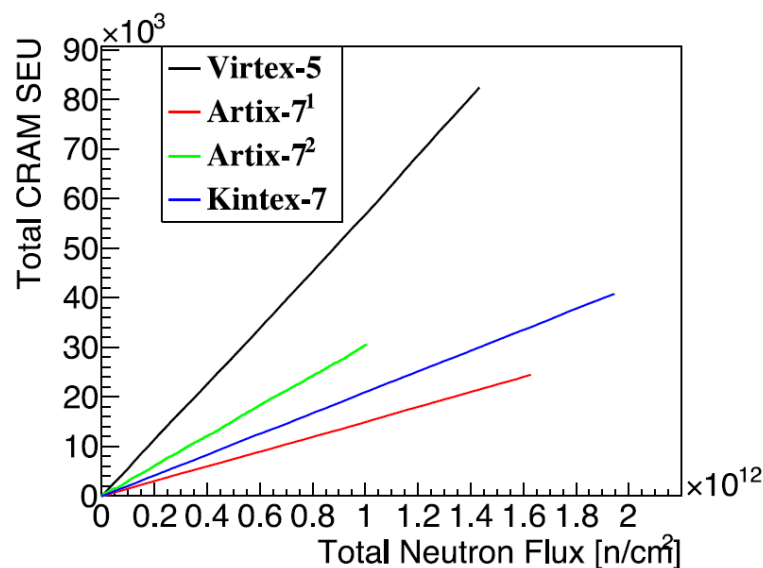
自動ファームウェアダウンロード機能



中性子照射試験



- ・ SEU、URE、MBEの回数をカウント
- ・ URE発生時はDAQ側からFirmware自動再ダウンロード



	CRAM		BRAM		CRAM URE rate in COMET [h ⁻¹]	Dead time
	SEU [[n/cm ²] ⁻¹]	URE [[n/cm ²] ⁻¹]	SEU [n/cm ²] ⁻¹ kB ⁻¹	MBE [[n/cm ²] ⁻¹ kB ⁻¹]		
Virtex-5	$(4.6 \pm 1.4) \times 10^{-8}$	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-10}$	$(7.0 \pm 2.2) \times 10^{-11}$	$(9.7 \pm 3.1) \times 10^{-13}$	1/27	0.024%
Artix-7 ¹	$(3.4 \pm 1.0) \times 10^{-8}$	$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-11}$	$(7.6 \pm 2.3) \times 10^{-12}$		1/30	0.034%
Artix-7 ²	$(2.9 \pm 0.9) \times 10^{-8}$	$(5.4 \pm 1.7) \times 10^{-11}$	$(7.0 \pm 2.3) \times 10^{-12}$	$(1.4 \pm 0.6) \times 10^{-12}$	1/67	0.031%
Kintex-7	$(2.6 \pm 0.8) \times 10^{-8}$	$(5.7 \pm 1.8) \times 10^{-11}$	$(8.7 \pm 2.7) \times 10^{-12}$		1/64	0.011%

- ・ SEU検知・修復機能はうまく動作
- ・ URE発生時の自動ダウンロード機能も動作
- ・ COMET実験で大きな問題ではないことを確認

Y. Nakazawa et al., NIMA, 936, 351(2019)、
S. Dekkers et al., IEEE TNS, 68, 2020(2021)

ハードエラー対策

- 今のところ確実な対処法がない（調べた限り）
- 実際に照射試験をするしかない
 - これまでに複数回実施@神戸大、京都大原子炉、大阪大、東工大、九大、高崎QST
 - 耐放射線パーツ（主に宇宙用）を取り扱ってる業者は存在する
 - 構造等は聞いても当然教えてもらえない
 - ざっくりコマーシャル品より2桁高い値段＋納期も半年以上。遅いものだと1年以上のものも。。

ガンマ線照射試験

- COMETでこれまでにあてた（今あてている）ものたち

Manufacturer	Name
Positive-linear regulator	
Linear Technology	LT1963
	LT1963-3.3
	LT1963-2.5
	LT1963-1.8
	LT3070
	LT1764A
Maxim Integrated	LTC3026
	MAX8556
Texas Instruments	TPS7A7200
	TPS75801
	TPS74401
Analog Devices	ADP1755
Positive-switching regulator	
Linear Technology	LT8612
	LT8614
	LTM4620
	LTM4644
	LTM8033
Texas Instruments	LMZ10503
Negative-linear regulator	
ST Microelectronics	L79
ON Semiconductor	MC7905
New JRC	NJM2828
Linear Technology	ADP7182
	LT1964
	LT3015
	LT3032
	LT3090
	LT3091
Texas Instruments	LM337
Microchip Technology	MIC5271
	TC59

Manufacturer	Name
DAC	
Linear Technology	LTC2624
	LTC2634
	LTC2654
Texas Instruments	DAC7564
Analog Devices	DAC7565
	AD5624R
	AD5684R
	AD5324
	AD5624
	AD5684
ADC	
Linear Technology	LTC2264
Analog Devices	AD9287
	AD9637
High-Speed Differential Line Driver	
Texas Instruments	SN65LVDS391
	SN65LVDS116
	SN65LVDS386
High-Speed Differential Receiver	
Texas Instruments	SN65LVDT348
Splitter	
Maxim Integrated	MAX9175
Positive OR gate	
Texas Instruments	SN74AUP1G32
NOR/OR gate	
Texas Instruments	CD4078BM96
Multiplexer	
Analog Devices	ADG1606

SFP : 9種類

(Avago、ELECOM、サンワサプライ、
DELL、StarTech、FS.COM、10GTek、Finisar)

SFP+ : 4種類

(FINISAR、Starline、Solitechなど)

その他

温湿度計、磁場センサー、MPPC、APD、PMT
ファイバー、接着剤 などなど

COMET実験で使えるエレクトロニクス
選定は（概ね）無事完了

Y. Nakazawa et al., NIMA, 955, 163247(2020)、
K. Ueno et al., PoS(EP5-HEP2019)175、

ついでに

2017 計測システム研究会 発表スライドより

技術・資産の共有化

- そんなわけで放射線対策は中々大変
- 各グループでそれぞれやるのは非効率
- 日本には情報共有の場がない
- 開発もそんなに進んでいない（宇宙は別）
- 今後（特に大強度加速器実験等では）更に必須になってくる技術



Open-Itを利用して共有の場を展開したい

17

技術・資産の共有化

- ひとまず「枠」は作ってみました
- <http://openit.kek.jp/project/RADHARD/RADHARD>
- （とりあえず公開はしています。）

取り組み

• 情報共有

民生用パーツ、マテリアル等の放射線耐性試験結果

耐放射線パーツ、マテリアル等の開発の動向

耐放射線検出器の現状

各機関、グループにおける取り組み

参考になる論文、資料等のまとめ

• 開発

SEU対策FPGAファームウェア

新たな耐放射線パーツ、マテリアル開発

• ワークショップ、セミナー

各グループのスタディについての議論

専門家によるセミナー

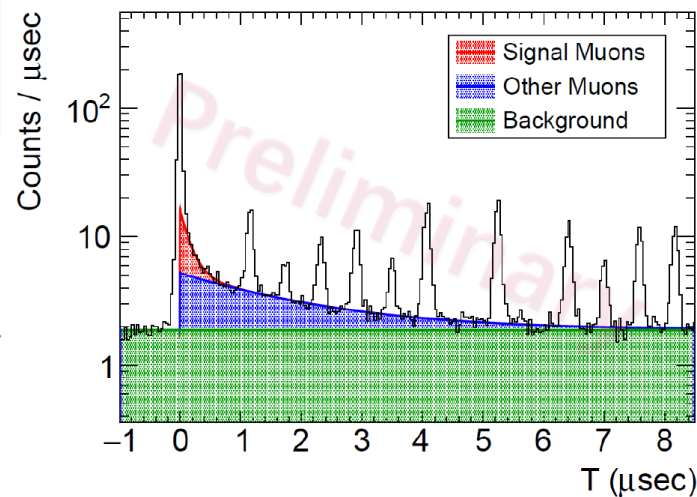
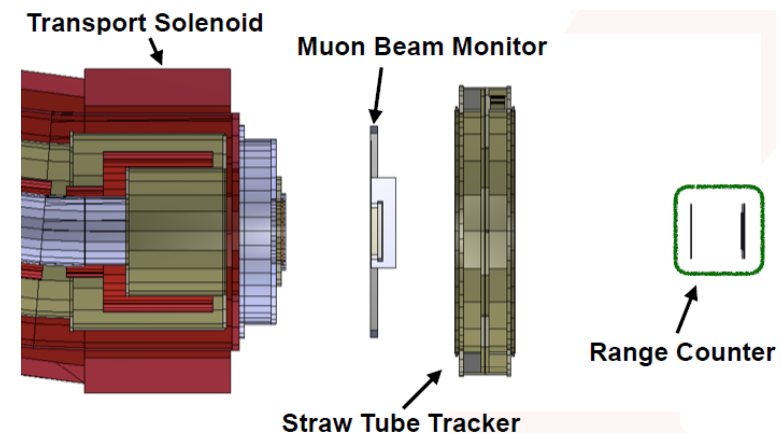
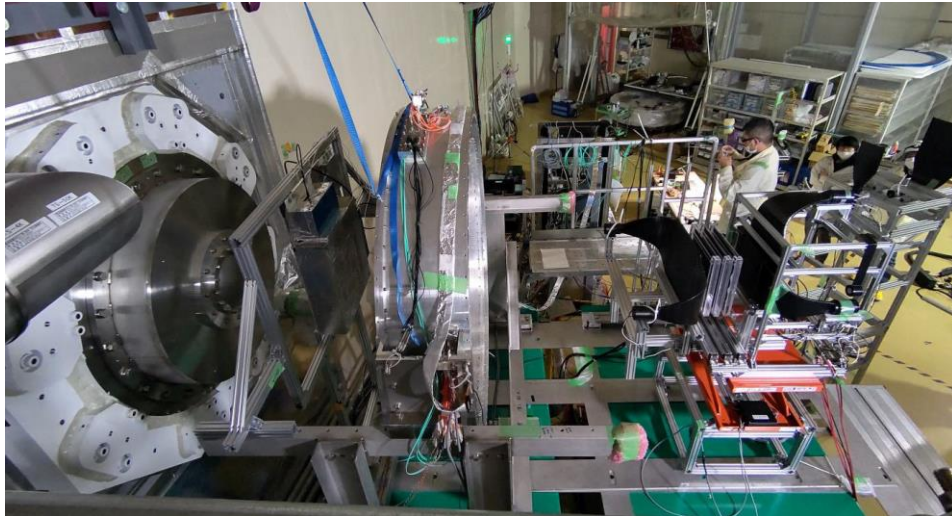
興味ある方は→ <http://openit.kek.jp/project/RADHARD/RADHARD>

COMET Phase- α

2023年2月10-14日、
3月3, 4, 9-15日

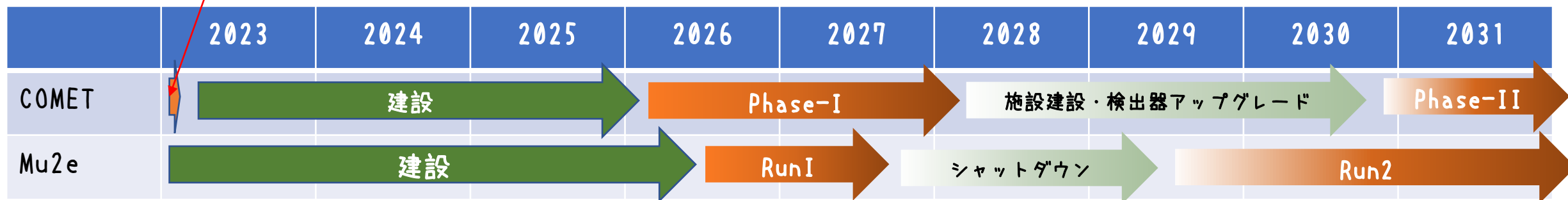
COMETビームライン初ビーム

ビームライン調査
ミューオン収量調査



COMET実験スケジュール

Phase- α
(エンジニアリングラン+ α)

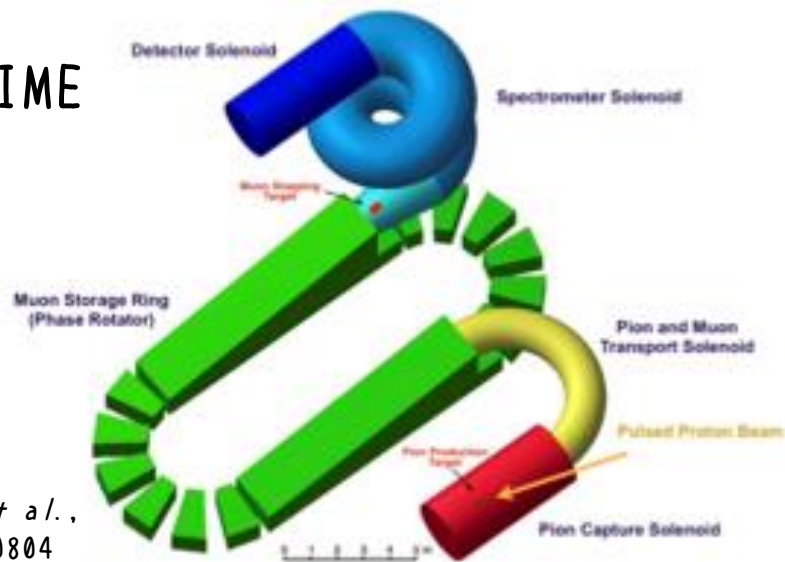


いよいよ物理測定が迫ってきた！
更にPhase-IIやその先へつながりたい
とにかくまずはPhase-I

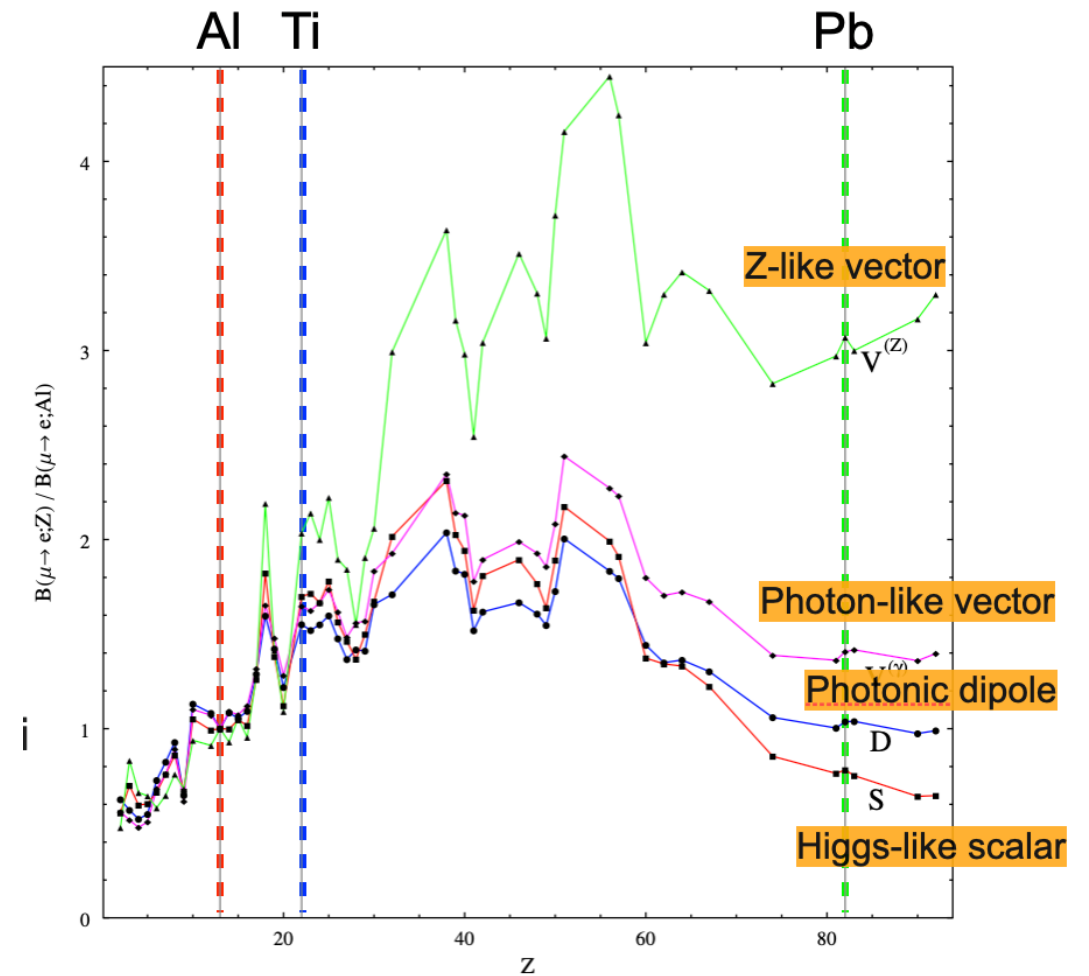
$\mu^- N \rightarrow e^- N$ (COMET Phase-II以降)

- 見つかっていない場合
 - さらなる感度向上
- 見つかった場合
 - ミューオン標的変更
 - BRのA, Z依存
 - 新物理情報調査
 - 背景事象削減は必須

PRISM/PRIME



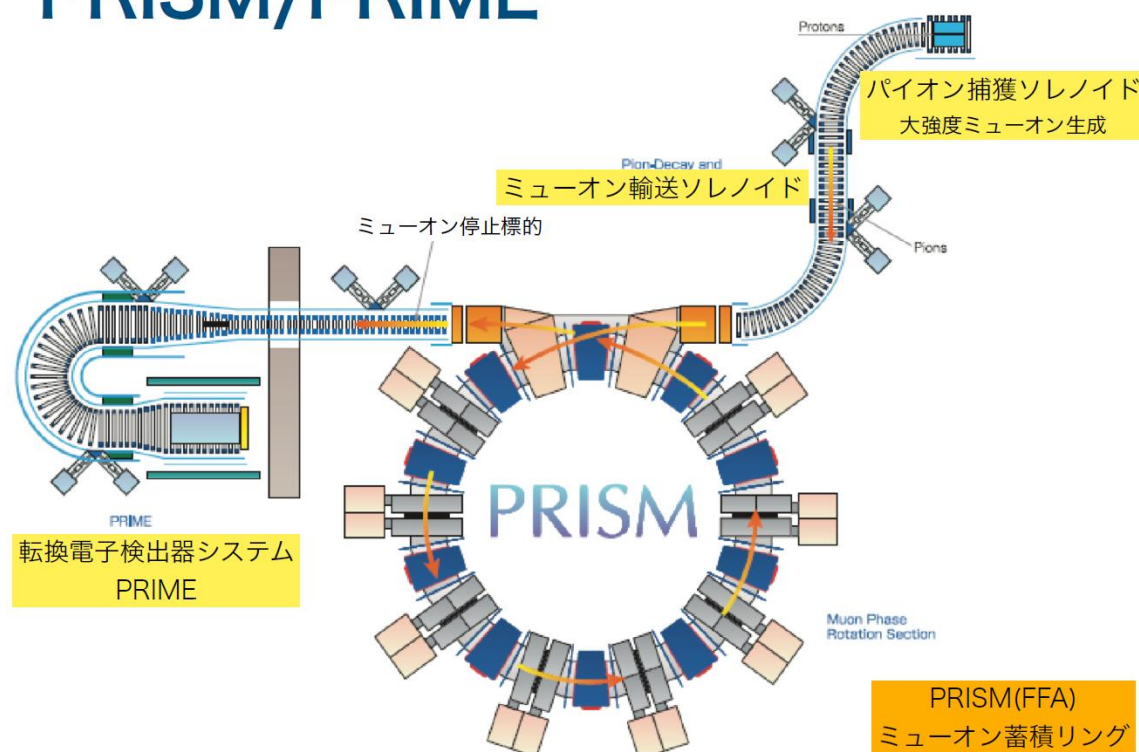
A. Alekou *et al.*,
arXiv:1310.0804



V.Cirigliano et al, Phys. Rev. D 80 013002 (2009)

COMET Phase-II以降

PRISM/PRIME



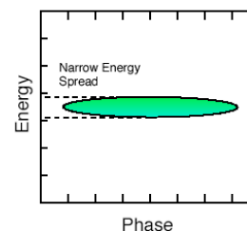
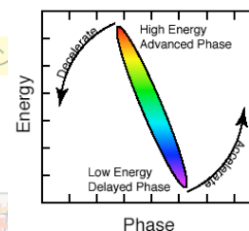
PRISM/PRIME

- DIO電子
 - 運動量分解能の良い検出器
 - 薄い停止標的でエネルギー損失を低減
 - ・ エネルギーの揃ったミューオンビーム
- Pion Radiative Capture
 - 長い飛行距離で崩壊
- Muon Decay in Flight
 - 強力なスペクトロメータで除去
 - ・ PRIME
 - キッカーで除去

by A. Sato

PRISM-FFAG ミューオン蓄積リング

位相空間回転法



FFAGを6周で240m
 π 削減率 10^{-18}

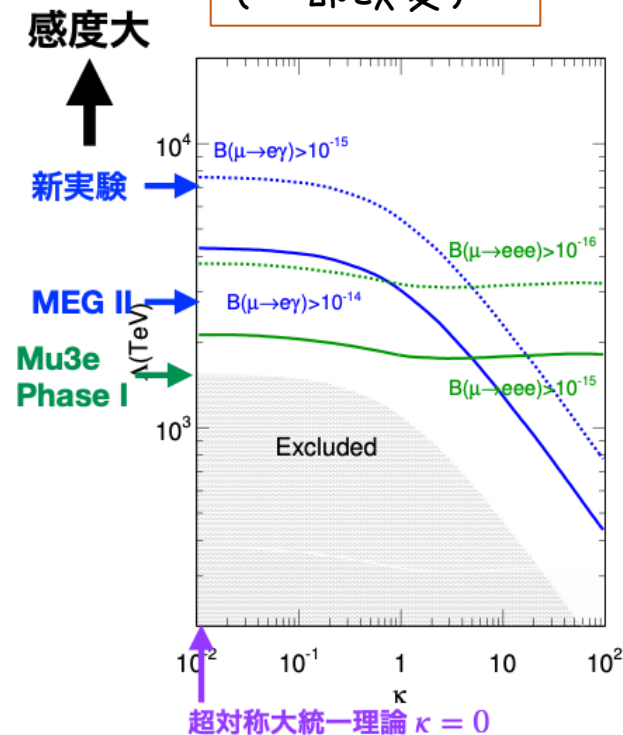
FFAGで電荷と運動量を選別

FFAGへの入射キッカー

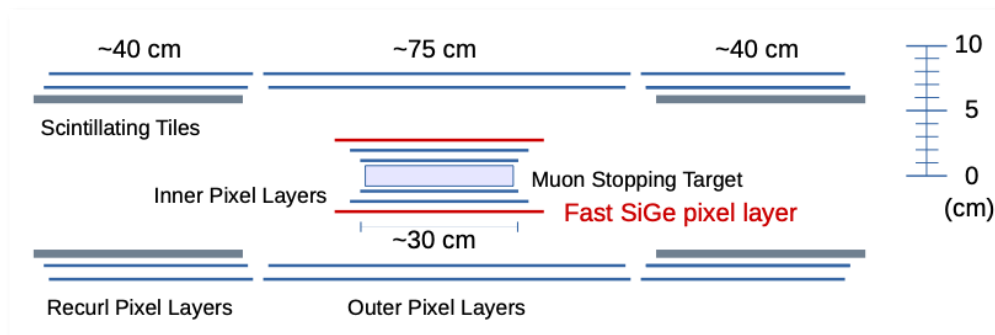
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 、 $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$ 探索

- ミューオン稀崩壊現象探索により宇宙誕生時の素粒子の大統一の謎に迫る
- 2030年以降、次世代直流ミューオン源の登場で稀崩壊実験は新たな段階に(これまでの100倍： 10^{10}) μ/sec
 - PSI：HIMB (2027 2028導入予定)
 - Fermilab：PIP-II (2028稼働開始予定)
- 「発見」から「測定」の時代へ
 - 崩壊分岐比、崩壊角分布の測定で大統一理論のモデルを特定
- 鍵：高レート耐性・高分解能・高効率測定器技術の開発

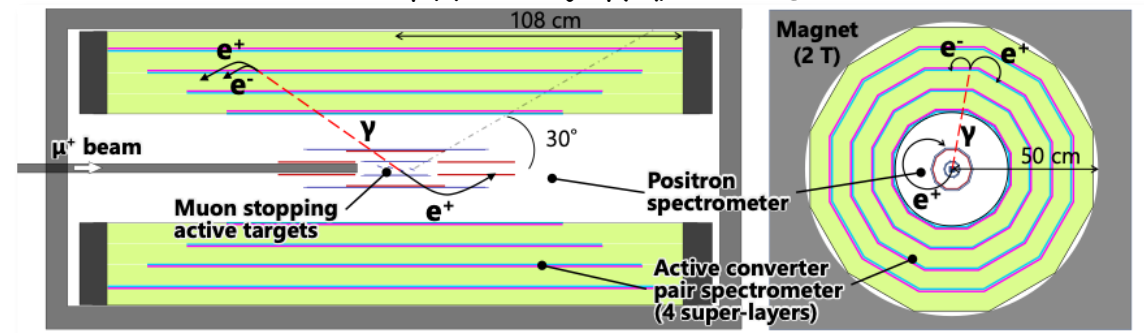
by W. Ootani
(一部改変)



Mu3e Phase II実験コンセプト($\mu \rightarrow eee$)



次世代 $\mu \rightarrow e \gamma$ 実験コンセプト



将来に向けて

学術会議「未来の学術振興構想」—物理学にできること—
素粒子分野からの提案 より

- 大強度ミュー粒子源の実現
- ビームの高品質化
- 先端測定技術の確立

連携

融合

- 次世代ミュー粒子源
- 量子効果の超精密測定

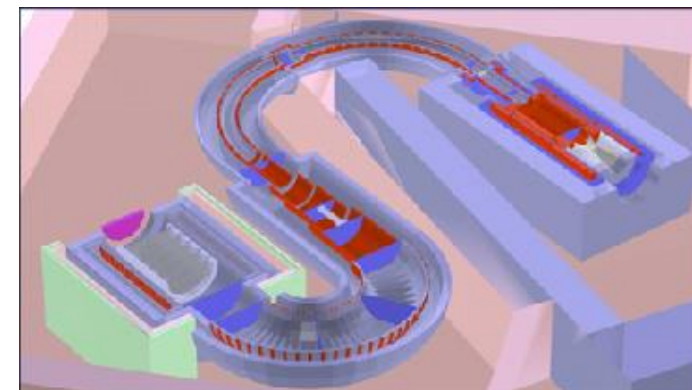
3項目を連携しながら進め、融合させることでビジョンへつなげる

大強度ミュー粒子源の実現

- 大強度ミュー粒子の生成・輸送技術の実現

主にミュー粒子原子稀過程探索@J-PARCを通して開発・実証

- 加速器一次ビーム標的の開発・実証
 - 標的の最適化（材料、形状、冷却手法など）
- 二次粒子捕獲・輸送技術の開発・実証
 - ビーム診断による実証と改善



ビームの高品質化

学術会議「未来の学術振興構想」—物理学にできること—
素粒子分野からの提案 より

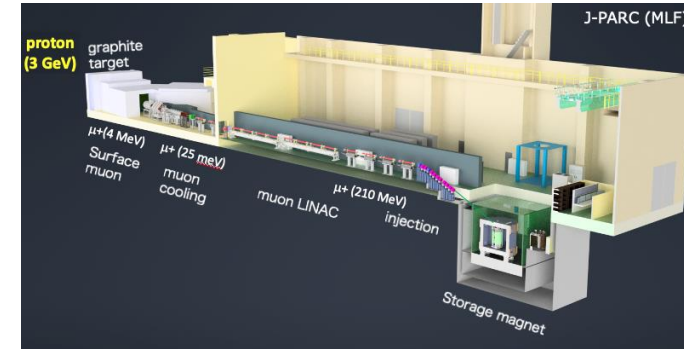
● 高品質ミュー粒子ビームの実現

主にミュー粒子双極子能率測定@J-PARCを通して開発・実証

- 低エミッタンス化技術の実証と改善

 - ミュー粒子冷却・加速技術

- 高品質ミュー粒子ビームの蓄積技術開発



ミュー粒子双極子能率測定実験概念図

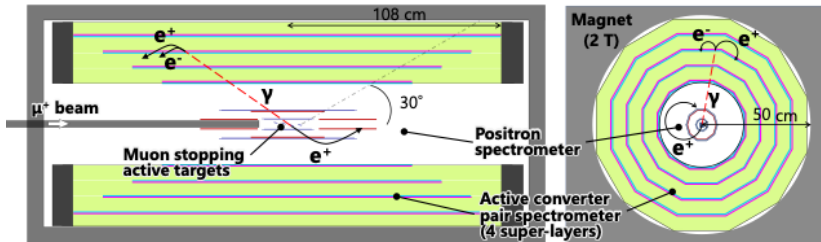
先端測定技術の確立

● 大強度ビームを使い尽くす究極感度実験実現に向けた必要技術の研究開発

主にミュー粒子稀崩壊探索実験@PSIを通して開発

- 高レート耐性・高分解能・高効率測定技術開発

- 高品質大強度ミュー粒子ビームの評価



次世代ミュー粒子稀崩壊探索実験概念図

各項目において、それぞれの物理成果の最大化も目指す

未来の学術振興構想2023（日本学術会議）

⑯ 量子ビームを用いた極限世界の解明と人類社会への貢献

No.	学術の中長期研究戦略の名称	提案者
133	持続可能な社会基盤構築に繋がる重元素研究の推進（再掲）	櫻井 博儀（理化学研究所・仁科加速器科学センターセンター長、日本学術会議連携会員）
135	複雑・不均一系の分子ダイナミクスに挑む量子光科学拠点の構築	渡辺 芳人（自然科学研究機構・分子科学研究所所長、日本学術会議連携会員）
136	J-PARCでの高強度重イオンビームによる超高密度物質の研究	服部 利明（筑波大学数理解物質系数理解物質系長）
137	MLF 第2ターゲットステーション：中性子・ミュオン科学の新たな展開	小林 隆（J-PARCセンターセンター長）
138	量子ビーム施設統合マルチプローブ学術研究基盤	山内 正則（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構機構長、日本学術会議連携会員）
139	超伝導加速器研究拠点	小関 忠（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設加速器研究施設長）

⋮

148	大強度高品質ミュオン粒子ビームによる宇宙の起源の解明と新しい科学分野の開拓	上野 一樹（大阪大学大学院理学研究科准教授）
-----	---------------------------------------	------------------------

⑰ 自然界の基本法則と宇宙・物質の起源の探求

No.	学術の中長期研究戦略の名称	提案者
136	J-PARCでの高強度重イオンビームによる超高密度物質の研究（再掲）	服部 利明（筑波大学数理解物質系数理解物質系長）
148	大強度高品質ミュオン粒子ビームによる宇宙の起源の解明と新しい科学分野の開拓（再掲）	上野 一樹（大阪大学大学院理学研究科准教授）
173	IceCube-Gen2 国際ニュートリノ天文台によるニュートリノ天文学の長期的展開	中山 俊憲（国立大学法人千葉大学学長）
174	高エネルギー加速器による素粒子原子核物理学の研究	山内 正則（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構機構長、日本学術会議連携会員）
175	チリ・アタカマ高地からの CMB 観測 - Simons Observatory および次世代望遠鏡群	大栗 博司（東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構機構長）
176	素粒子標準模型を超える新物理に向けた FASER 実験とFPF計画の推進	音野 瑛俊（九州大学先端素粒子物理研究センター助教）
177	大型液体キセノンを用いた宇宙暗黒物質直接検出実験（DARWIN/XLZD 実験計画の推進）	大栗 博司（東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）機構長）

⋮

ミュオン関係の若手をメインに議論を進めはじめた

まとめ

- ミュー粒子素粒子物理実験計画進行中
 - 荷電レプトンフレーバー非保存
 - COMET@J-PARC、MEG-II@PSI、Mu2e@FNAL
 - COMET実験 (Mu2eも) : いよいよ開始が近づいてきた
- 将来についても考えはじめるべき
 - ビームの大強度化、高品質化、先端測定技術の確立が重要
 - 他分野との連携