COMET実験 @ J-PARC

大石 航

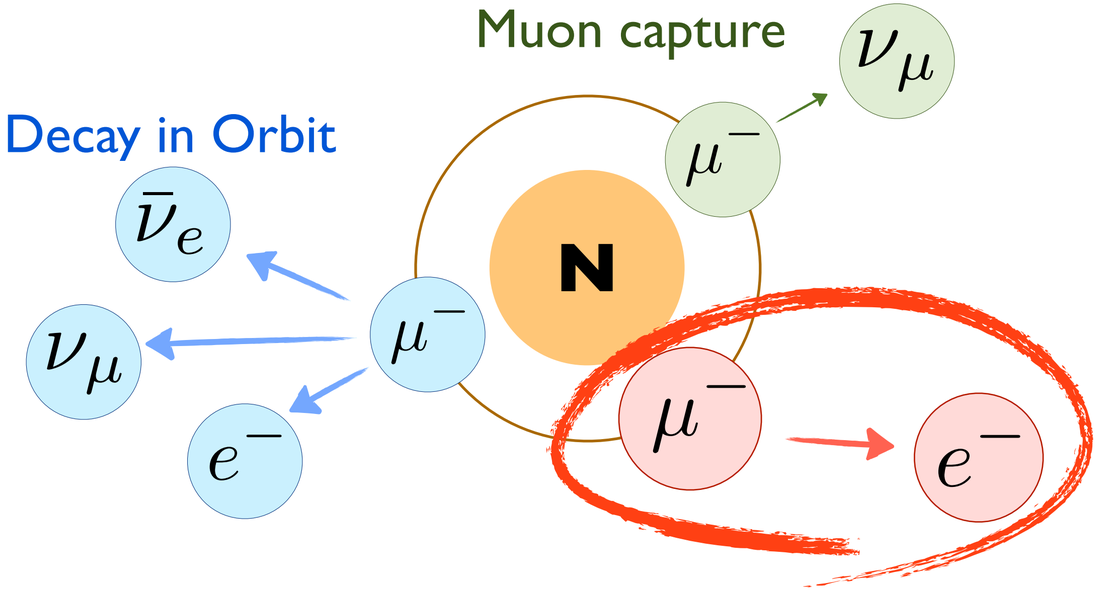
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

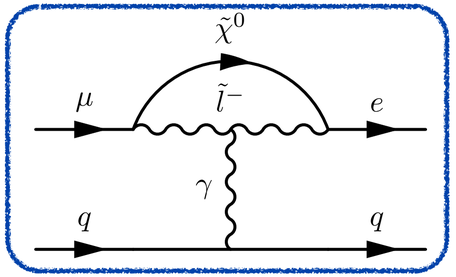
Workshop on Muon LFV and Beyond

東京大学 本郷キャンパス

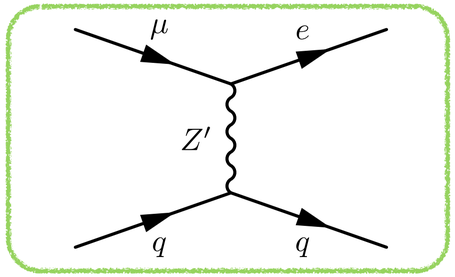
2026年8月6日

ミューオン・電子転換過程





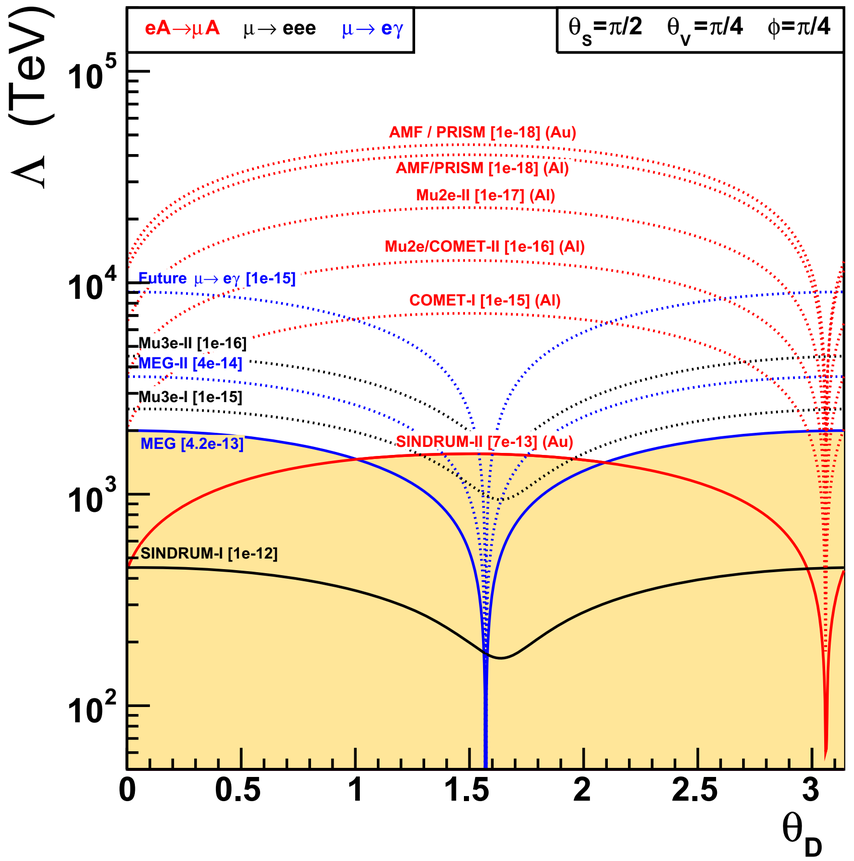
Photonic process



Four-fermion process

レプトンフレーバ非保存過程

- ニュートリノを伴わないミューオン崩壊
  - ニュートリノ振動含む標準模型では強く制限される。
  - Branching ratio: BR(μN→eN) ~ BR(μ→eγ) < 10^{-54}
- いくつかのBSM模型では **~10^{-15}** 程度まで増幅する可能性がある。
  - Z', leptoquarks, heavy right-handed neutrinos, SUSY-GUT, etc
- 他稀崩壊過程 (μ→eγ and μ→eee) と併せて、理論模型の分別



Davidson, S., Eur. Phys. J. C 82, 836 (2022).

COMET 実験

J-PARCの最高強度陽子ビームを活用し転換過程を探索

- 最終目標: 単一事象発見感度(SES)で **O(10^{-17})**
  - ⋆ 現在の上限値を1万倍改良、或いは転換過程発見を目指す。
- J-PARC 南実験棟に高強度ミューオンビームラインを建設
- Phase-I と Phase-II に分けた段階的アプローチ

Phase-I

- ✓ 目標感度 O(10^{-15})
- ✓ 物理測定（転換過程探索）
  - CyDet 検出器群
- ✓ ビーム測定（背景事象の理解）
  - StrECAL検出器群

Phase-II

- ✓ 目標感度 O(10^{-17})
- ✓ 物理測定
  - by StrECAL

アップデートして使用

実験原理

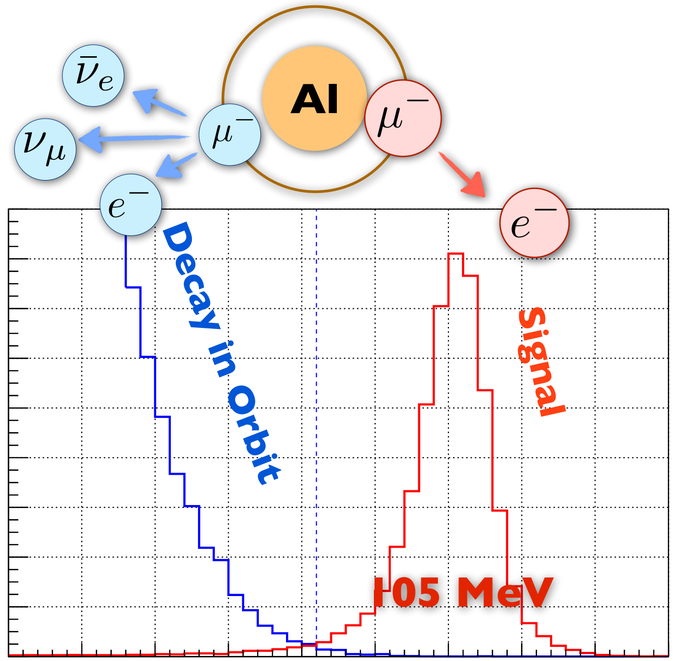
信号事象と背景事象

- $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$　単一エネルギー **105 MeV** (アルミ原子の場合)
- 背景事象: **decay-in-orbit (DIO)**
  - ★ DIO電子の最高エネルギーは信号領域に侵入する → 運動量分解能 < 200 keV/c

高強度ミューオンビームの実現

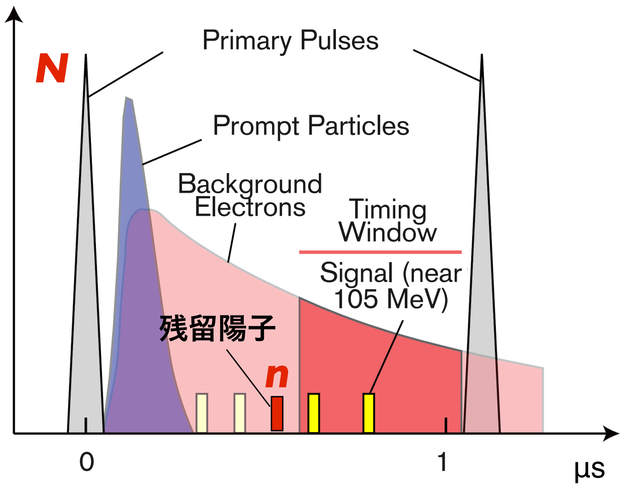
- 高強度の陽子ビーム
  - ★ 静止標的を用いて大量のパイオン→ミューオンを生成する。
  - ★ **高効率の π→μ 輸送ビームラインが必須。**
  - ★ 陽子ビーム起源の背景事象 (Antiproton, radiative pion capture, etc)も発生
- バンチ化されたビーム構造
  - ★ **Delayed timing window** によって、即発背景事象を避ける。
  - ★ バンチ間に残留陽子がいると、高エネルギー電子につながる。

extinction = n/N (右図) < 10^{-10}



測定された電子の運動量分布（MC）

w/ BR(μN→eN) = 10^{-15}



測定の時間構造

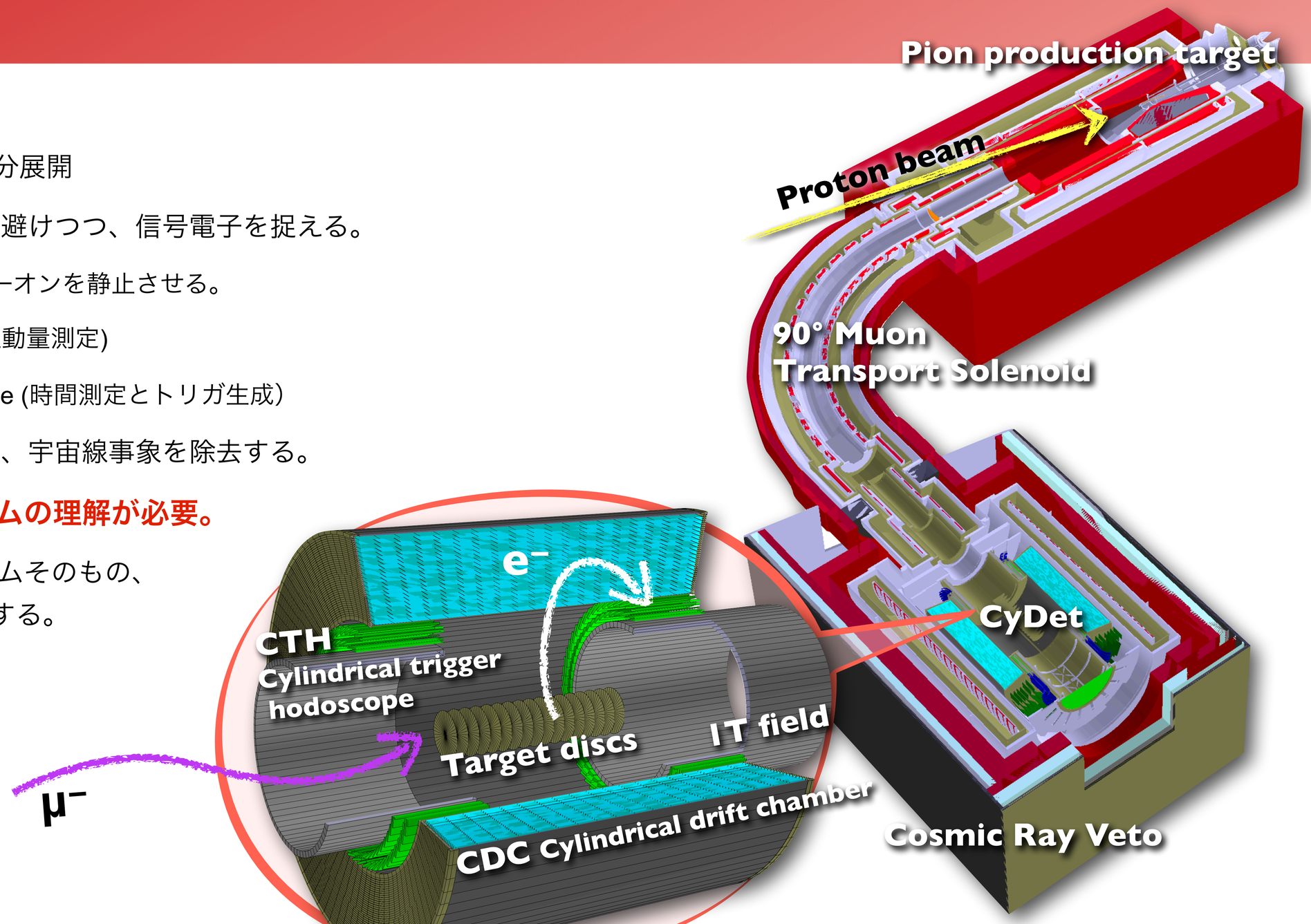
Phase-I

目標感度 O(10^{-15})

- ミューオン輸送ソレノイドを90度分展開
- 円筒型 **CyDet** 検出器群でビームを避けつつ、信号電子を捉える。
  - ⋆ アルミ標的を中央に内包し、ミューオンを静止させる。
  - ⋆ **CDC**: Cylindrical Drift Chamber (運動量測定)
  - ⋆ **CTH**: Cylindrical Trigger Hodoscope (時間測定とトリガ生成)
- Cosmic Ray Veto が CyDet を囲い、宇宙線事象を除去する。

新しいビームラインなので、ビームの理解が必要。

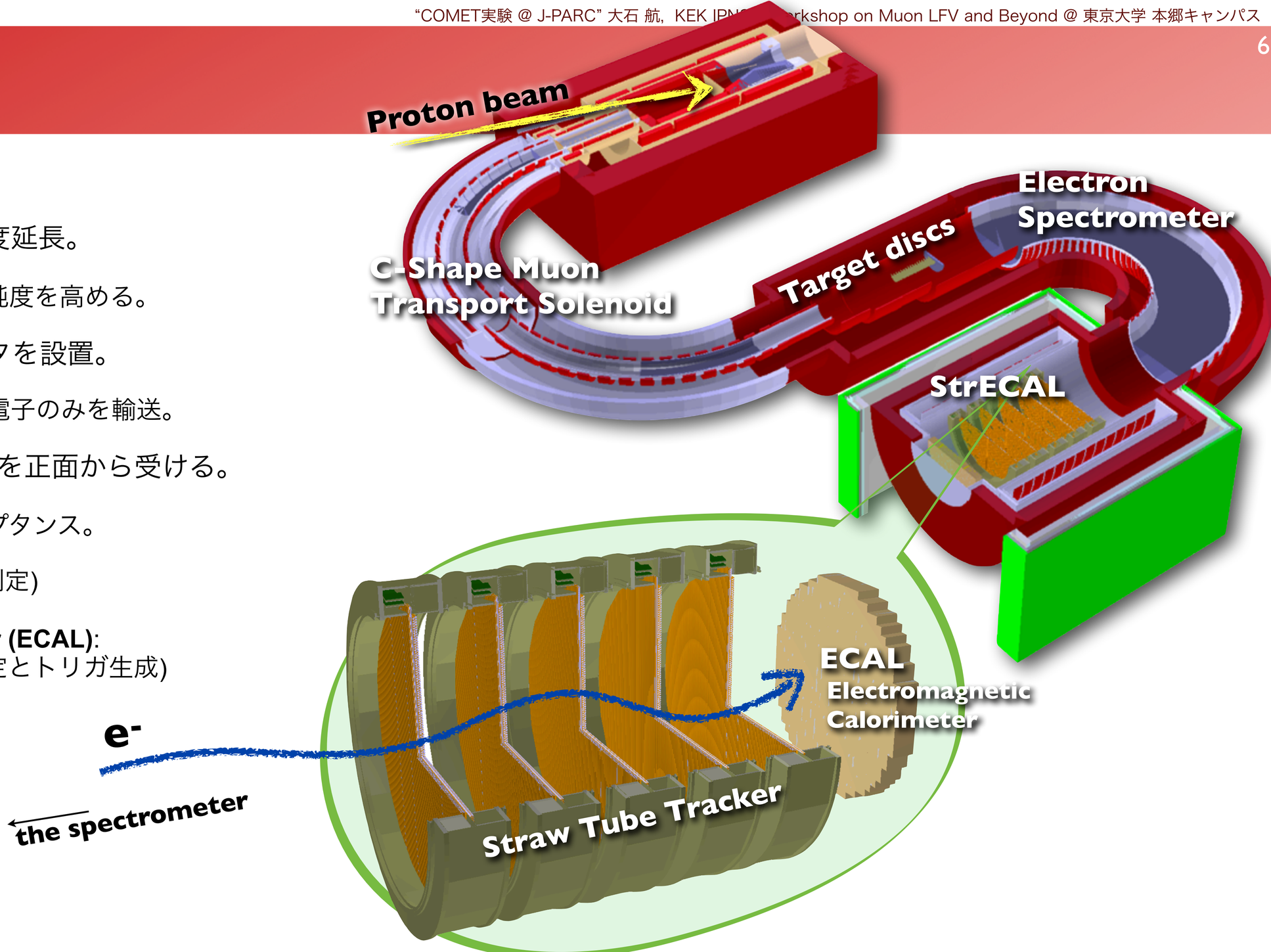
- **StrECAL** 検出器群を使用してビームそのもの、
  またビーム起源背景事象を測定する。



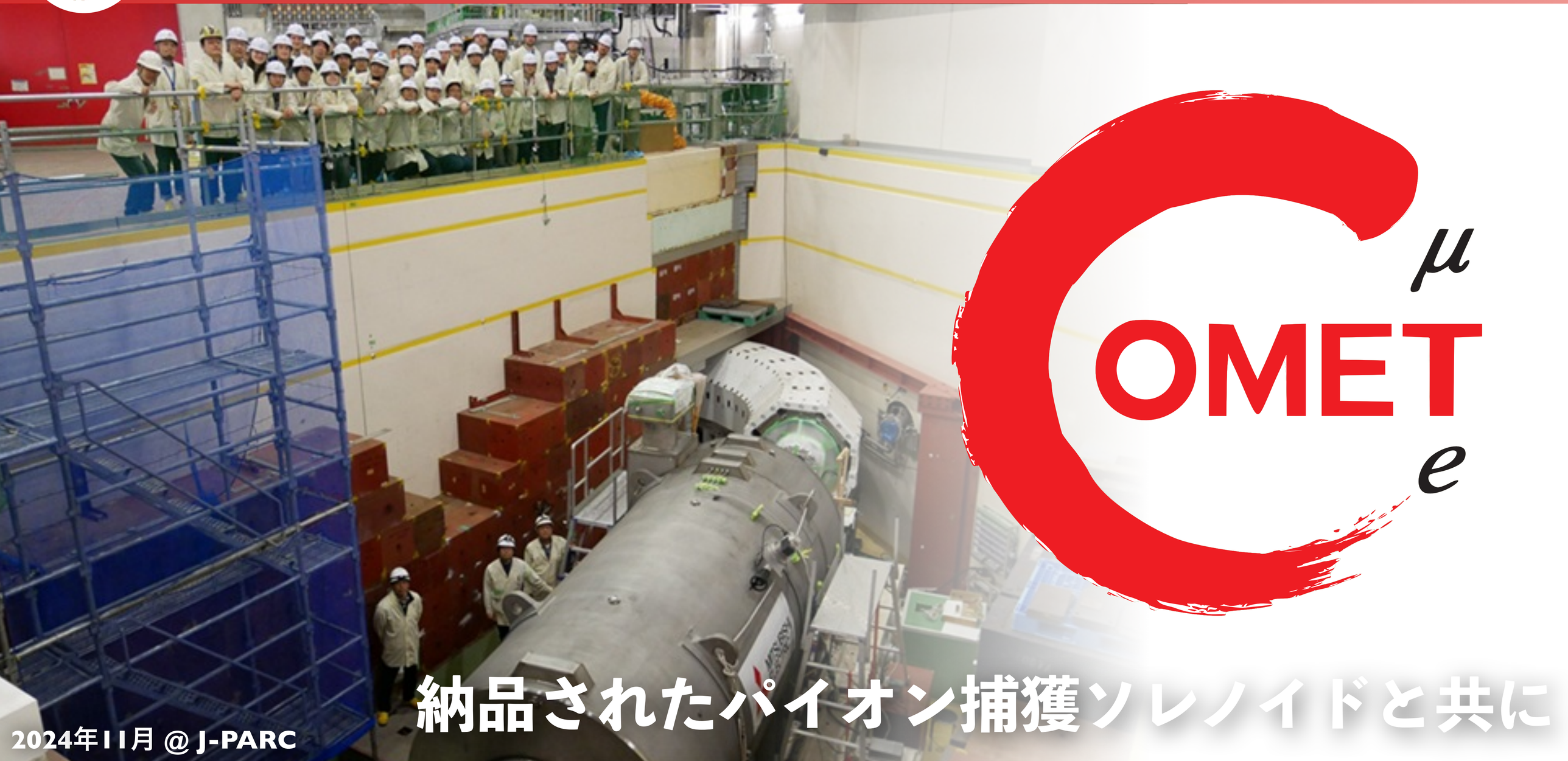
Phase-II

目標感度 O(10^{-17})

- 輸送ビームラインをさらに90度延長。
  - ⋆ 静止標的におけるミューオン純度を高める。
- さらなる電子スペクトロメータを設置。
  - ⋆ 信号領域付近の高エネルギー電子のみを輸送。
- **StrECAL** 検出器群は信号電子を正面から受ける。
  - ⋆ 信号電子に対する高いアクセプタンス。
  - ⋆ **Straw Tube Tracker** (運動量測定)
  - ⋆ **Electromagnetic Calorimeter (ECAL)**:
    (エネルギー&時間測定とトリガ生成)



COMET Collaboration



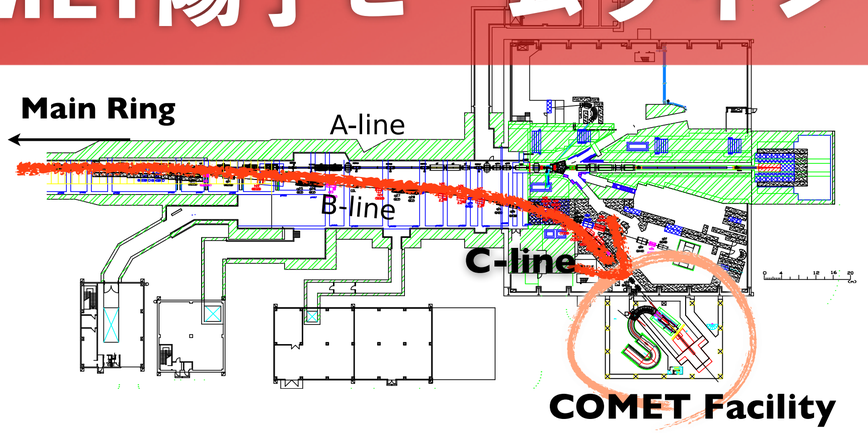
納品されたパイオン捕獲ソレノイドと共に

2024年11月 @ J-PARC

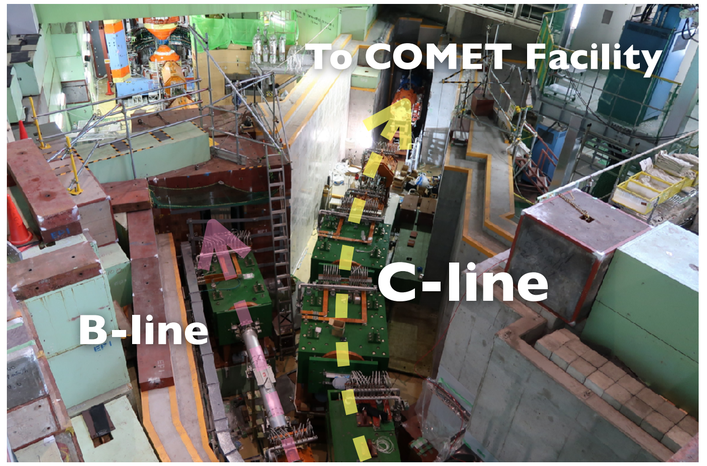
陽子ビーム・COMET陽子ビームライン

COMET用の特殊な運転

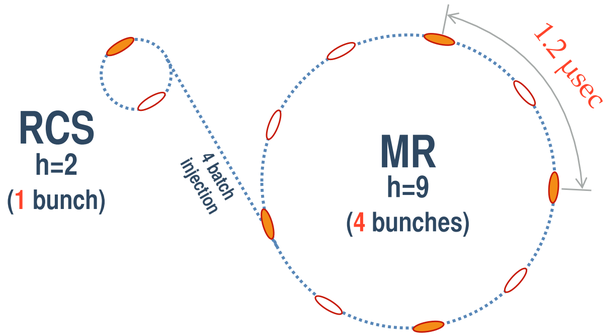
- 加速は8 GeVまで。
  - (1) 反陽子生成を抑制する。
  - (2) **Extinction** < 10^{-10}
- Phase-I (II) では 3.2 (56) kW運転
- バンチ化された遅い取り出し (bunched SX)
  - 9つのバケットの内、4つを陽子で埋める。



Beam line for COMET (red line)



The C-Line branching point

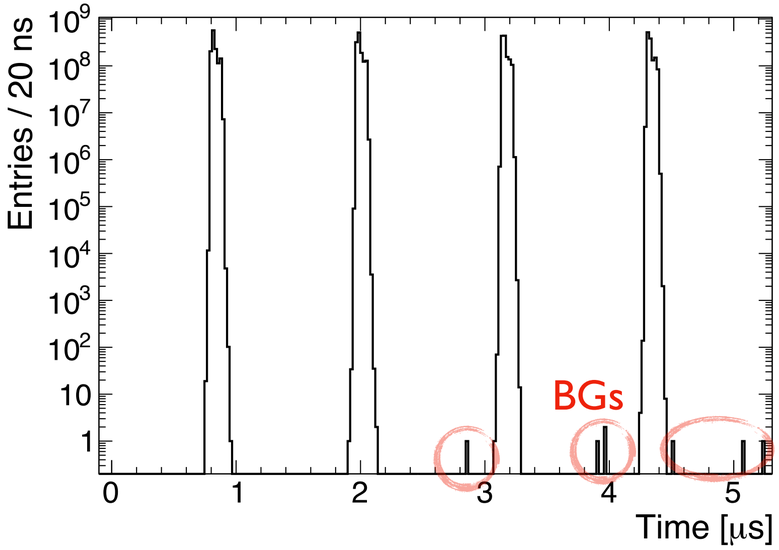


Extinction は < 1.0×10^{-10} を達成。

- T78@ K1.8BR of the Hadron Facility (T78 exp. in 2021)

ハドロン実験施設 C-Line

- A-line → B-line → C-line と分岐。COMET実験室に導入。
- **8 GeVでのBunched SX運転に成功**（Phase-α; 後述）



No inter-bunch contaminations in T78 exp.

K. Noguchi, et al., Proc. of Sci., 402 (2022)

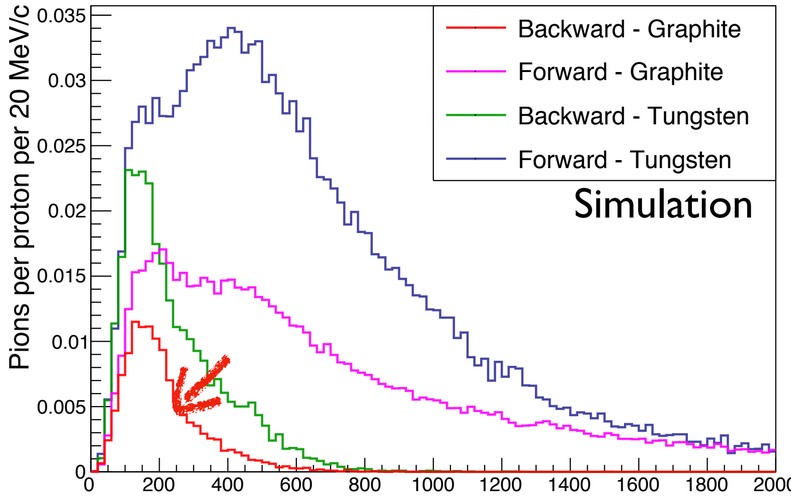
パイオン生成

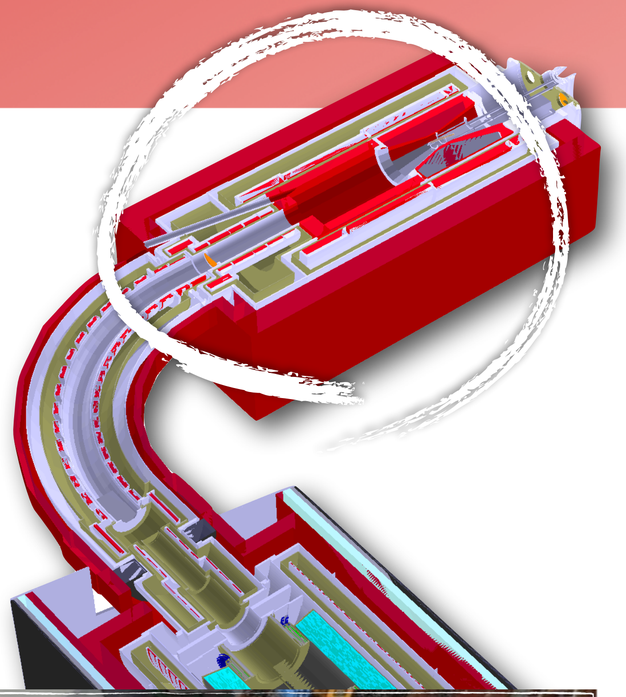
陽子標的

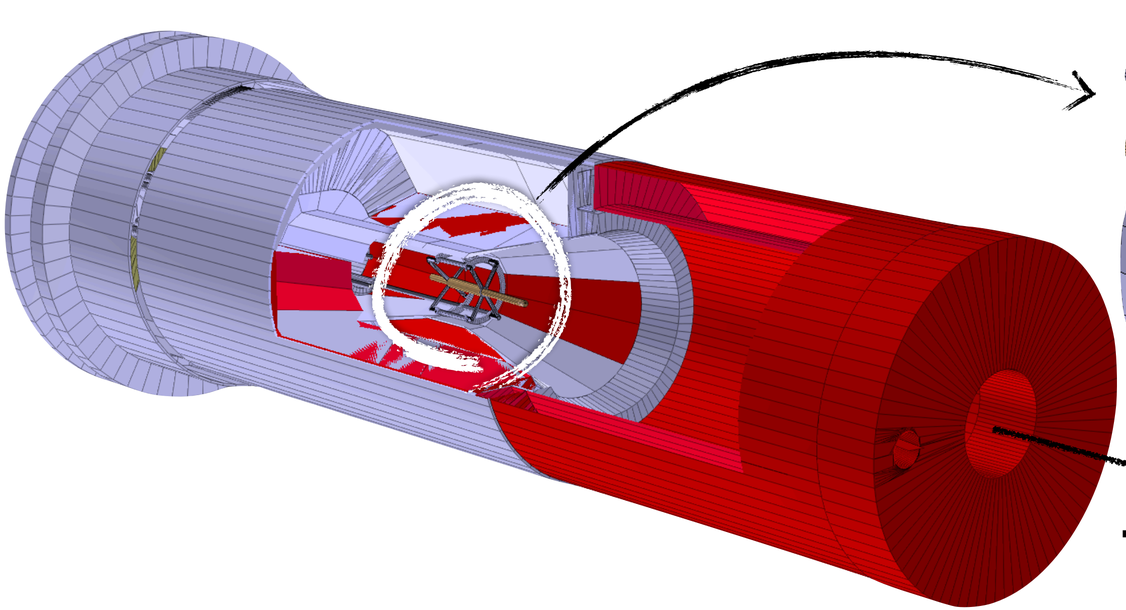
- Graphite (Tungsten) for Phase-I (II).

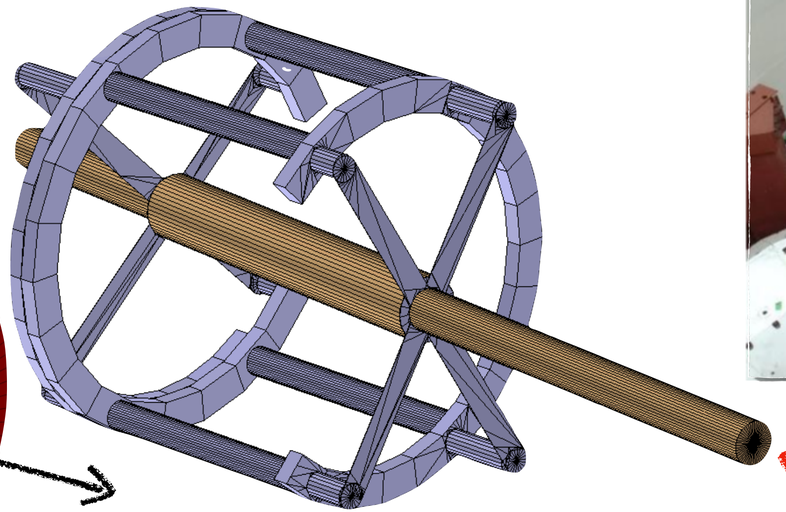
パイオン捕獲ソレノイド (Pion capture solenoid)

- 4.4 T の超伝導ソレノイド
- 後方散乱したパイオンを磁場で捕獲し、輸送する。
  - ⋆ 低エネルギー成分を相対的に高効率で抽出できる。
- 2024年11月に納品&設置された。









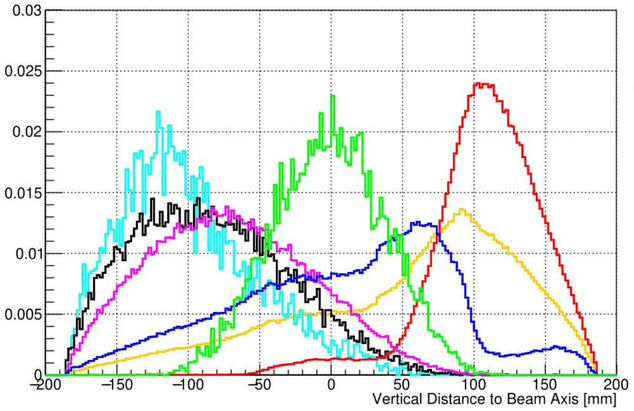
To TS

Proton

ミューオン輸送ソレノイド

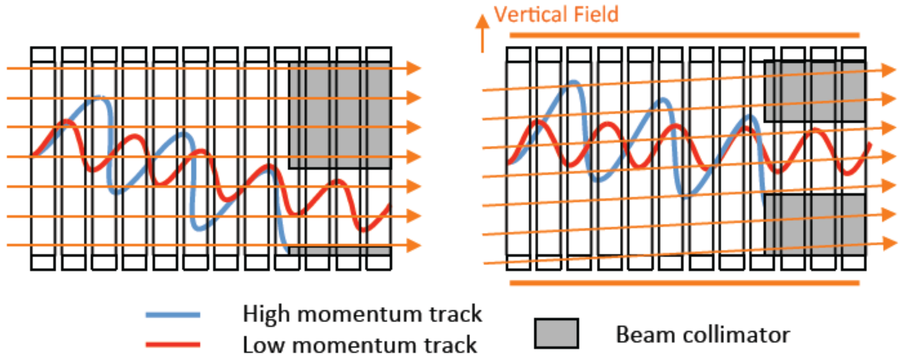
特徴的な90度湾曲型で電荷と運動量を選択。

- 3 Tの超伝導ソレノイド
- 荷電粒子の螺旋運動の中心は縦方向にドリフトする。
  - ⋆ 電荷の正負、運動量ごとに方向やドリフト量は変わる。
  - ⋆ ドリフトを補正するためのダイポール磁場と、
    最適化されたコリメータを導入して、運動量を選択する。
- 30–50 MeV/c の負ミューオンが中央に分布するよう最適化
- コリメータは高速ミューオンを含むその他粒子を抑制できるよう設計。

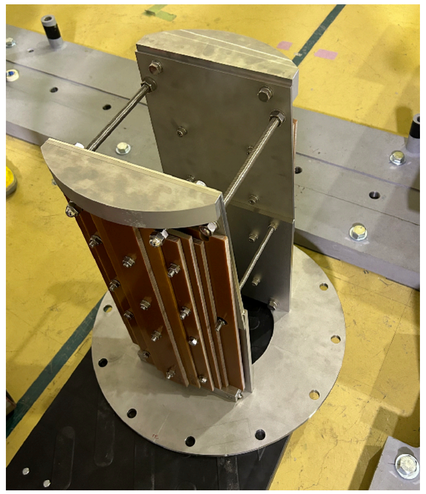


コリメータ前での粒子の縦方向位置
標的に静止するミューオンは中央に集中。

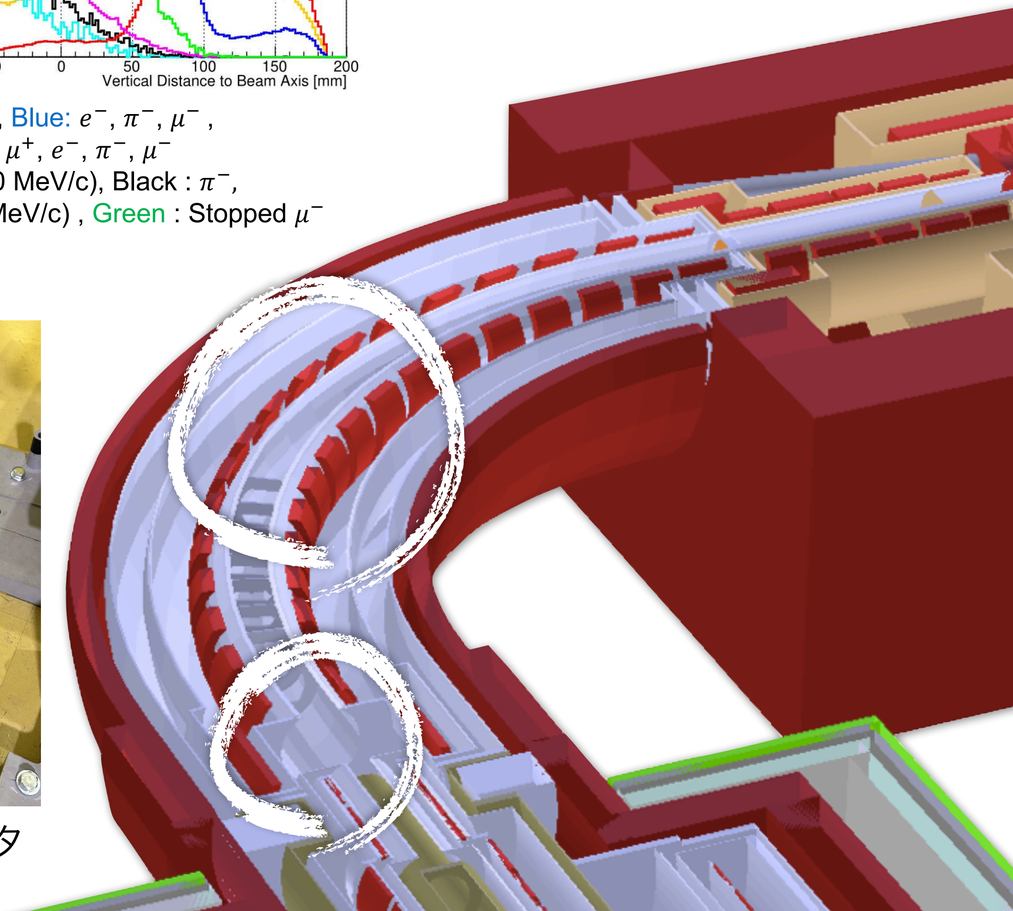
Red : p, e^+, π^+, μ^+, Blue: e^-, π^-, μ^- ,
Orange : p, e^+, π^+, μ^+, e^-, π^-, μ^-
Magenta: μ^-(p > 70 MeV/c), Black : π^-,
Cyan: e^- (p> 100 MeV/c) , Green : Stopped μ^-



湾曲ソレノイド中の荷電粒子の動き



ミューオン コリメータ

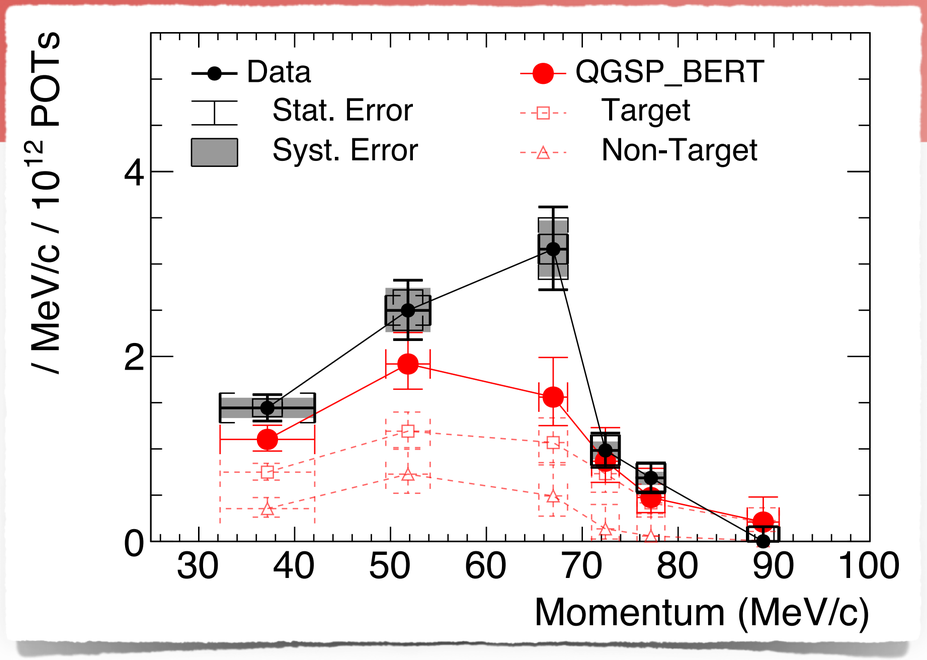


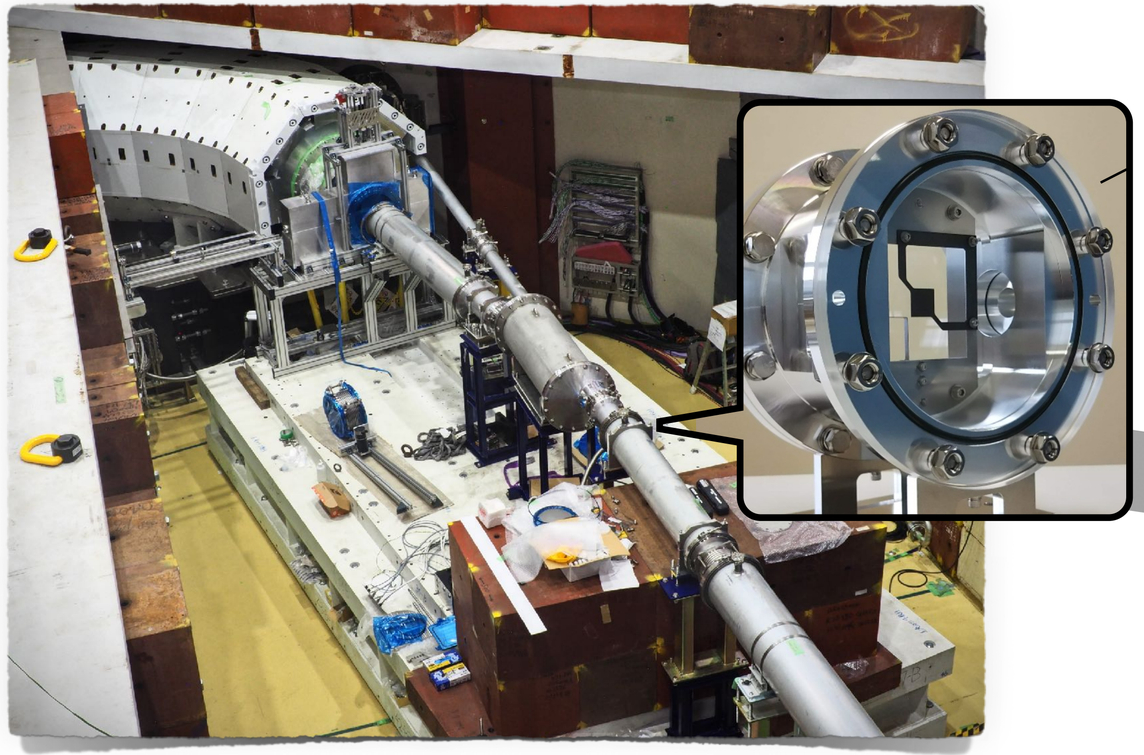
N. Sumi, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 33 (5) (2023), 1–5
Y. Arimoto, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 34 (5) (2024), 1–5

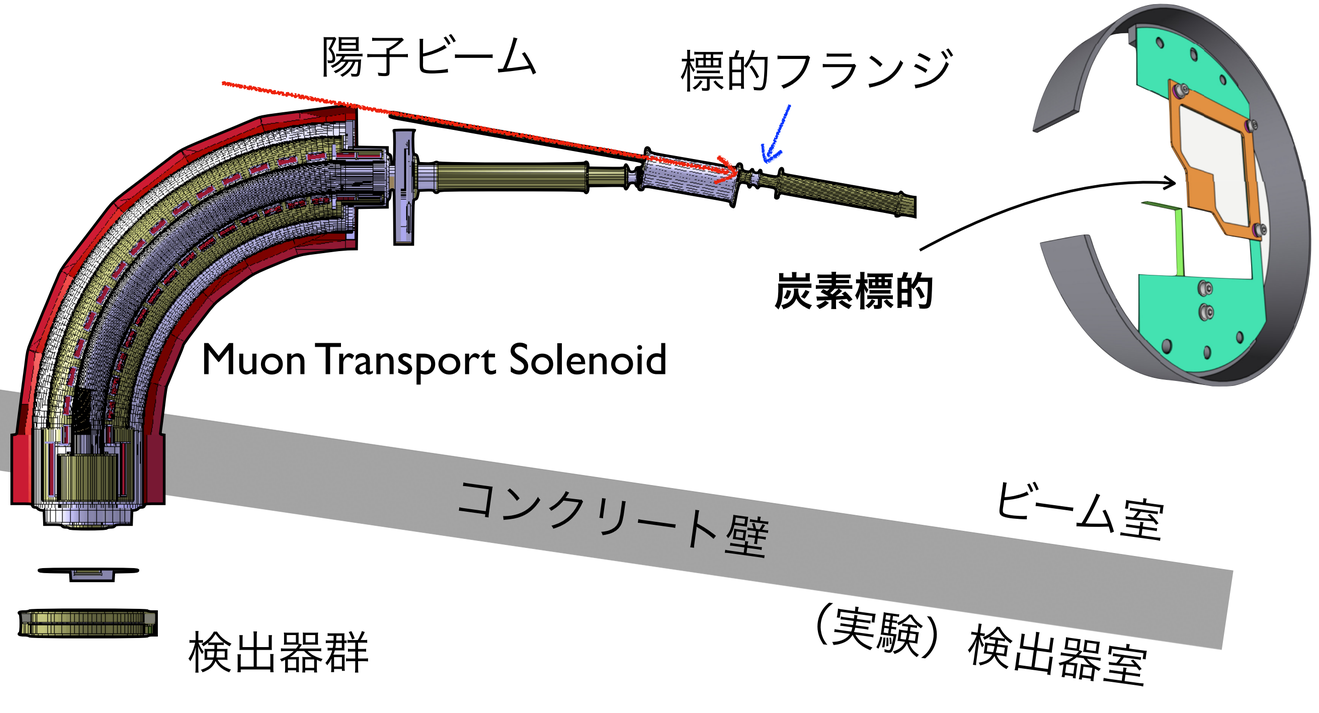
Phase-α

2023年: COMETビームラインの初コミッショニングを実施

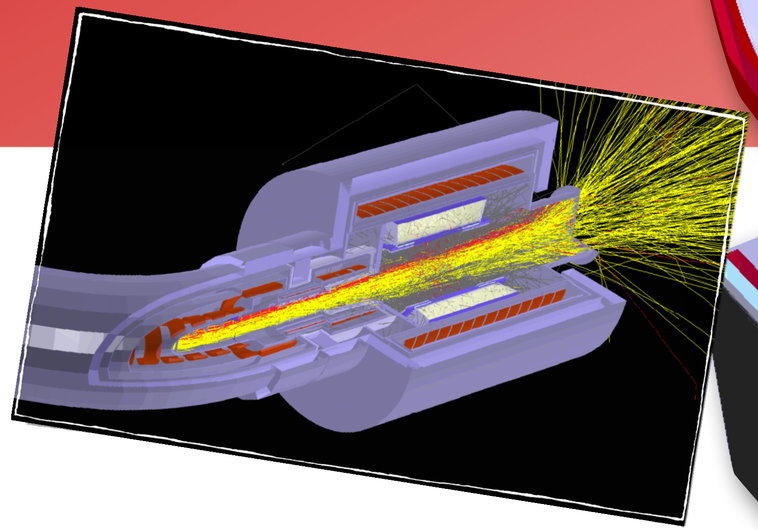
- 陽子ビームのCOMET実験室への初めての入射に成功。
- ミューオン輸送ソレノイドによる低速ミューオン輸送の実証。
  - ⋆ 簡素な検出器系で輸送後のミューオンの運動量分布を実測。
  - ⋆ まもなく論文出版予定。

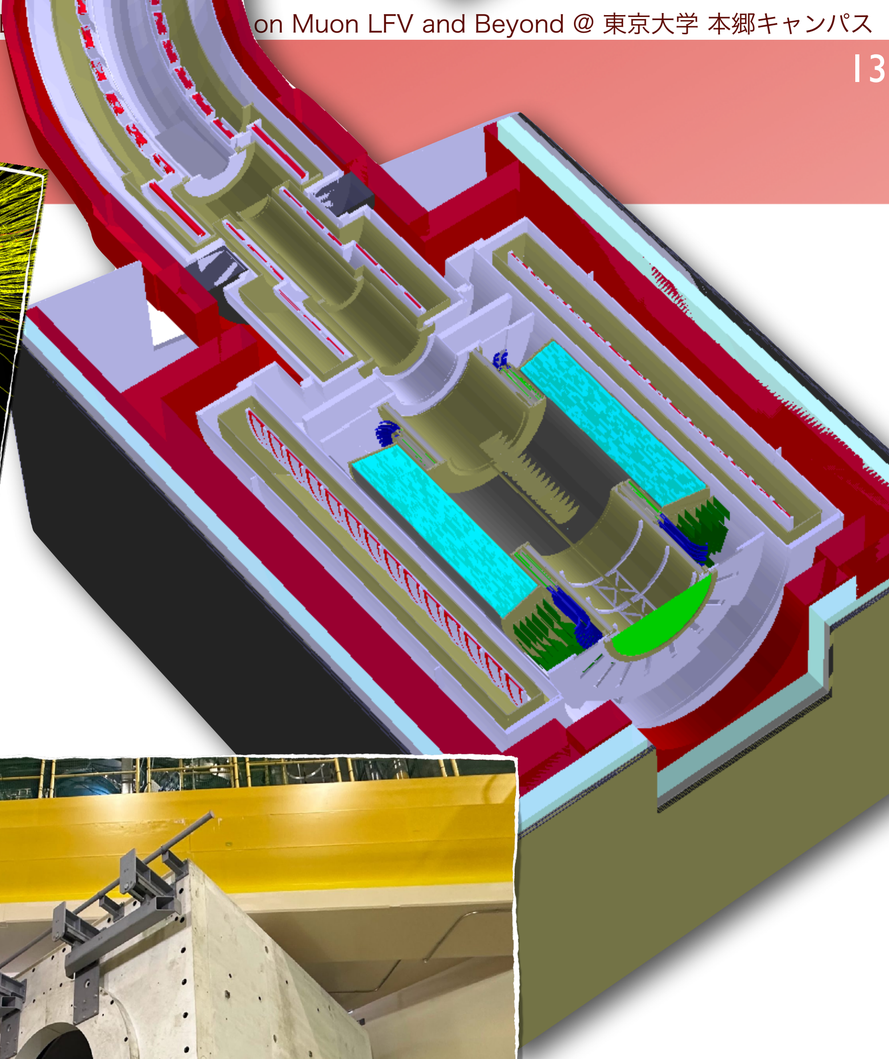






検出器ソレノイド



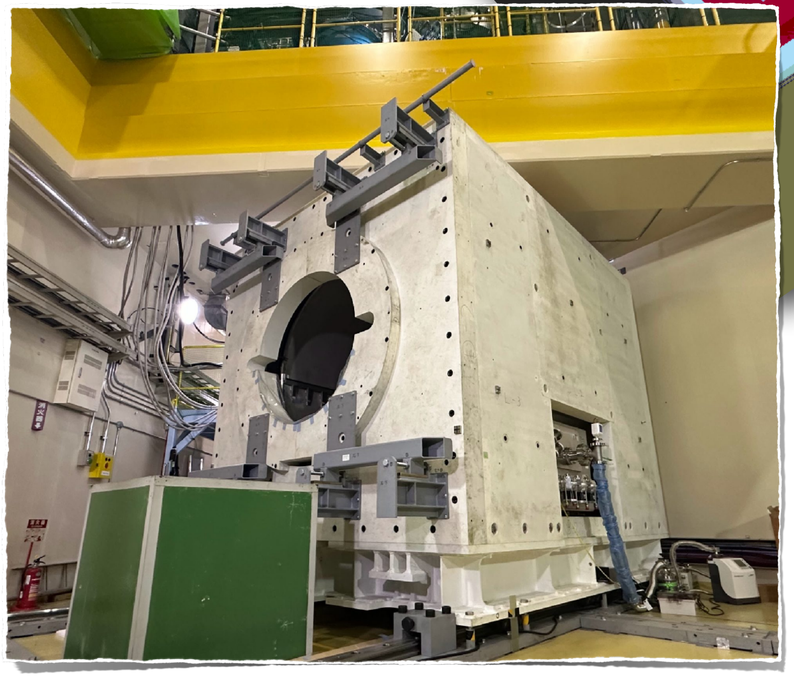


測定にとって最も重要なソレノイド

- 1 T の超伝導ソレノイド
- 運動量較正のために磁場を下げて運用。
  - ⋆ DIO e^- やMichel e^+ の ~ 50 MeV/c を活用する。
  - ⋆ 鉄ヨークによるヒステリシスも含め、再現性が課題。

2025年12月に設置完了

- Phase-I用の全ての超伝導磁石の設置完了！
- 設置作業のタイムラプスがYouTubeにて公開中。
  - ⋆ https://www.youtube.com/watch?v=y7w5exfLMx4
- 磁場励起含め、コミッショニング作業中。



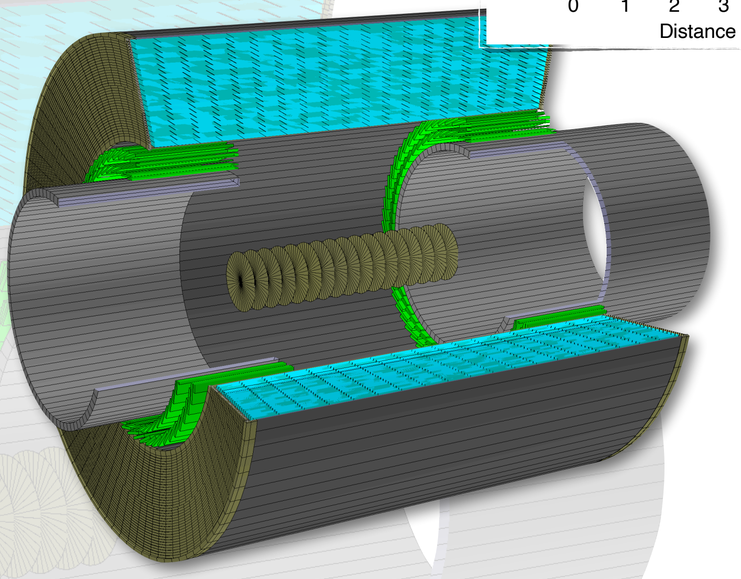
磁場測定に向けて準備中

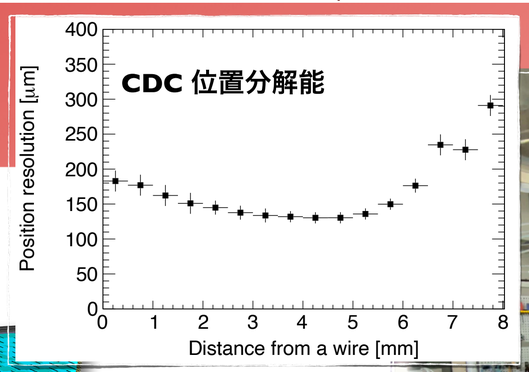
- 磁場測定システムは完成・コミッショニング中。
- 測定にかけられる時間 vs 測定密度・精度の最適化が進んでいる。

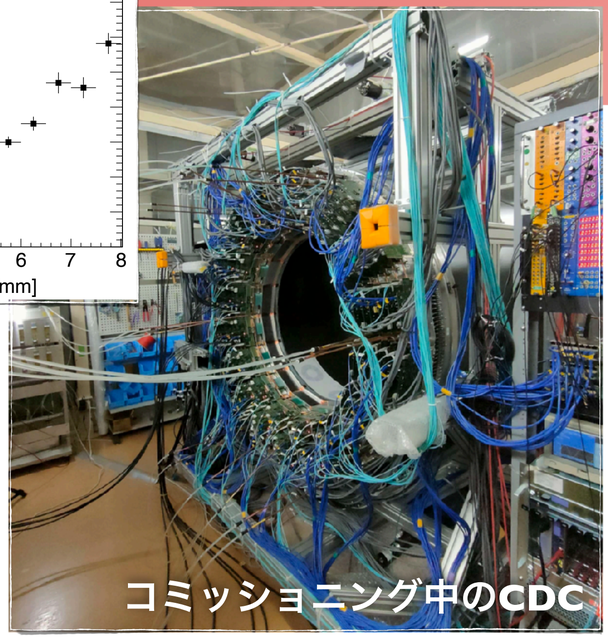
CyDet（CDC+CTH）

要求

- 大量のビーム粒子の突入を避ける。
  - ⋆ 横方向運動量が大きい信号電子を効率よく測定する。
- CDC:位置分解能 < 200 μm
- CTH: データ取得トリガ信号の発行 & イベント時間測定 < 1 ns





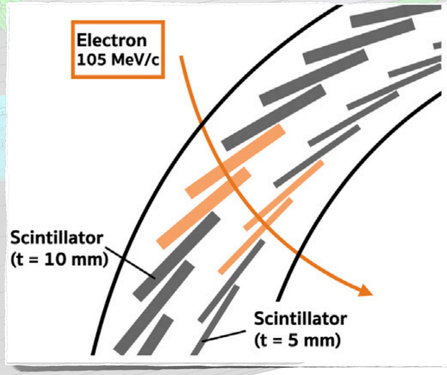


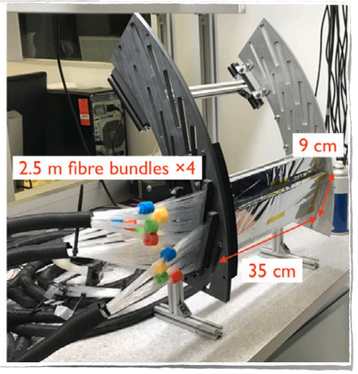
CDC

- ガス混合: **He : iso-C_4H_{10} = 90:10**
- ~5000 (金蒸着タングステン) センスワイヤ 20層
- CDC内径は1 T中で < 60 MeV/c のDIO電子が届かないよう設定。
- 長期コミッショニング試験が進んでいる。

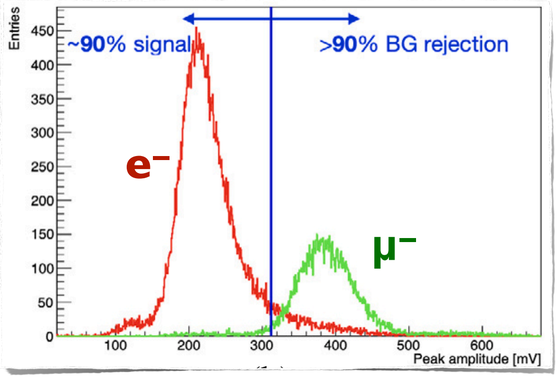
CTH

- 上下流側で2×124 プラスチックシンチレータバー + MPPC読出し
  - ⋆ 厚さ: (内層) 5 mm (外層) 10 mm
- 4層のシンチレータが荷電粒子通過を検知し、トリガを発行。
- 内層には鉛シールドを設置→内側からのBGを抑制する。





CTHによるトリガ発行



dE/dx での粒子識別

A. Sato, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.A, 1069 (2024), 169926
Y. Fujii, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys Res.A. 1067, (2024), 169665

StrECAL（Straw-Tube Tracker + ECAL）

要求

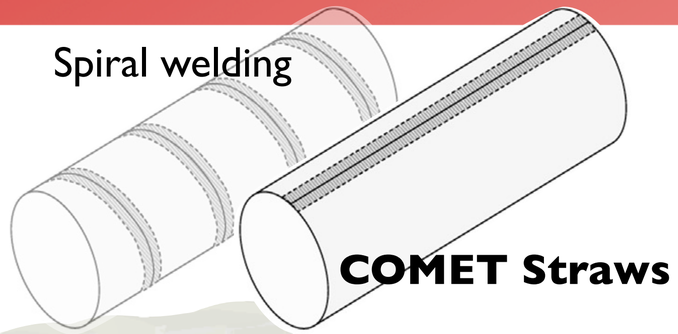
- Straw Tracker: 運動量分解能 < 200 keV/c ・ 真空中での動作 < 100 Pa
- ECAL: トリガ生成 & T_0測定 ・5%以下でのエネルギー分解能と粒子識別

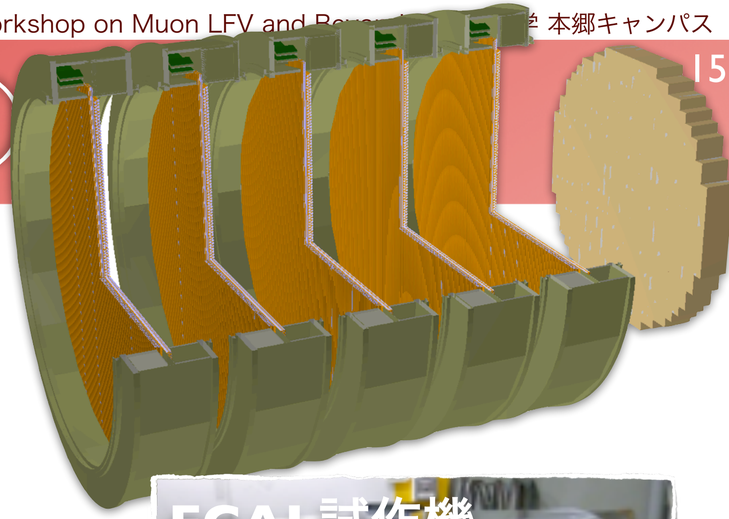
Straw-Tube Tracker デザイン

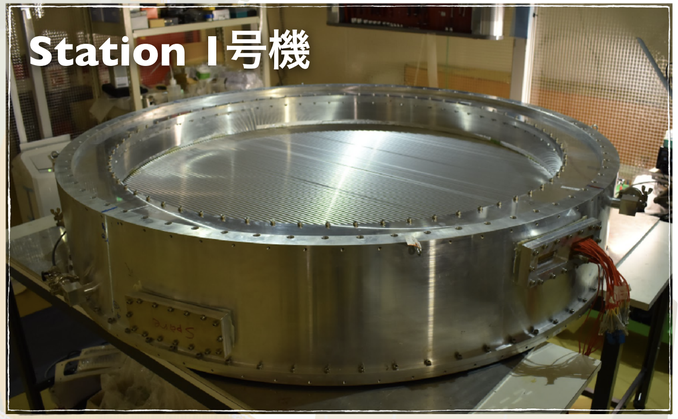
- 極薄アルミマイラー製ストローチューブ
  - ⋆ 直径9.75 mm、厚さ 20 μm (Phase-IIでは 直径5 mm 12 μm厚)
  - ⋆ 超音波蒸着により接着面の物質量を最小限に
- ガス混合: **Ar:C_2H_6 = 50:50**
- 試作機は **空間分解能 ~ 110 μm, 真空 < 0.1 Pa での動作**達成。
  - ⋆ 運動量分解能 < 200 keV は十分達成可能。

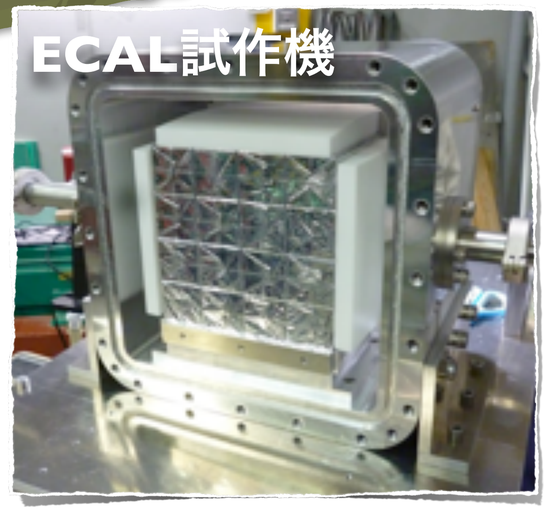
ECALデザイン

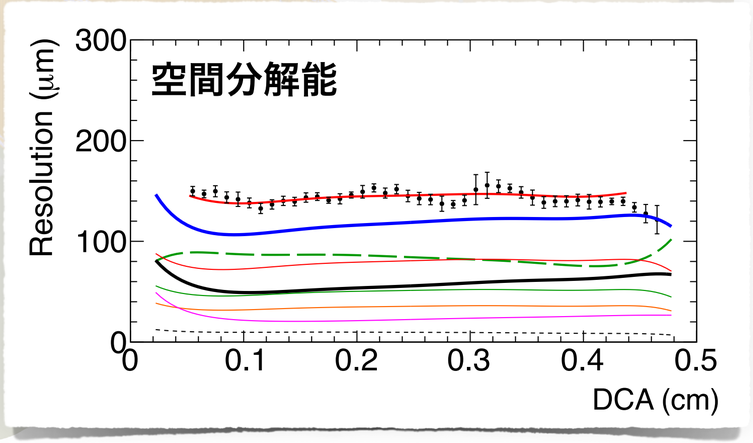
- 大型 2×2×12 cm^3 LYSO無機結晶シンチレータを使用。
- 8×8 結晶の試作機による試験結果は、105 MeV/c 電子について
  - ⋆ **エネルギー分解能 3.9%**
  - ⋆ **位置分解能 7.7 mm**
  - ⋆ **時間分解能 0.5 nsec**

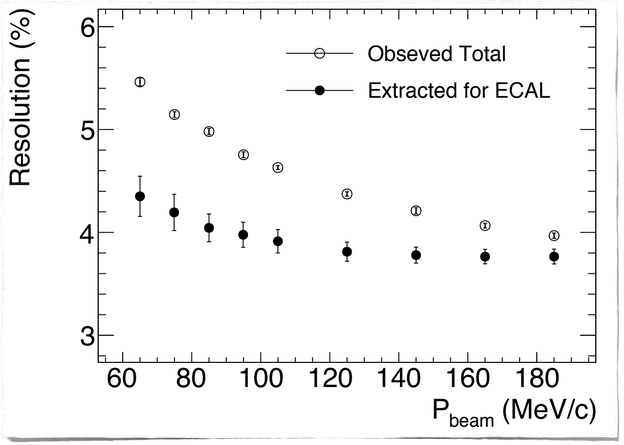










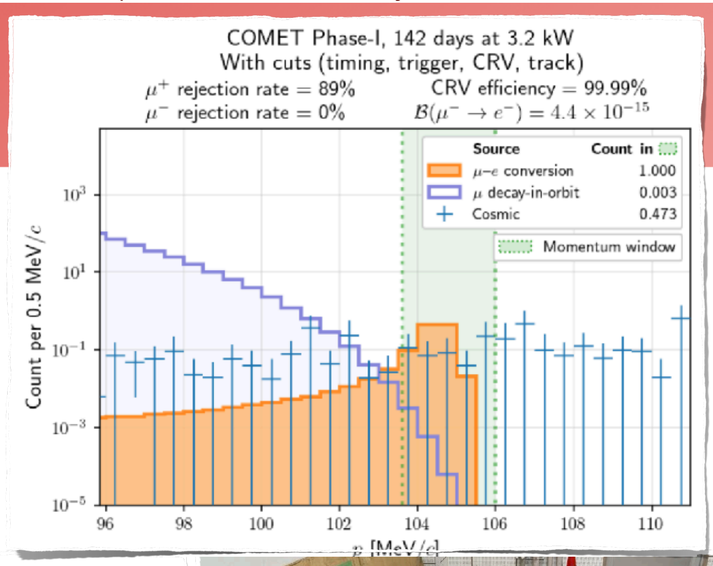


H. Nishiguchi, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 958 (2020) 162800

Cosmic Ray Veto

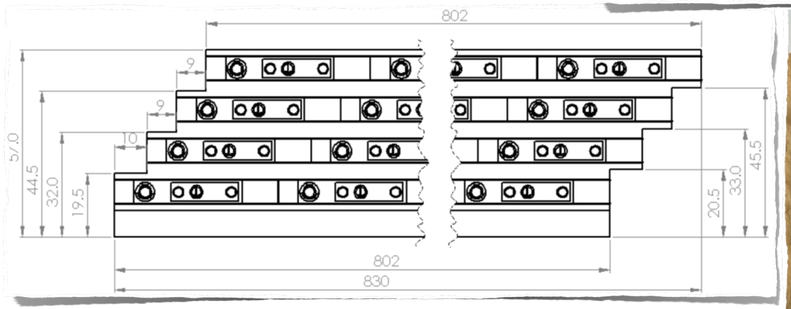
宇宙線起因の105 MeV擬似信号を排除

- 宇宙線が最も寄与の大きい背景事象の原因。
- CRVには検出効率 > 99.99%が要求される。

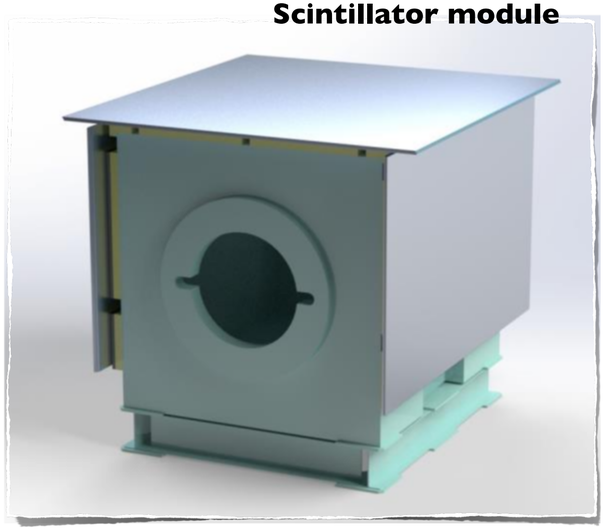


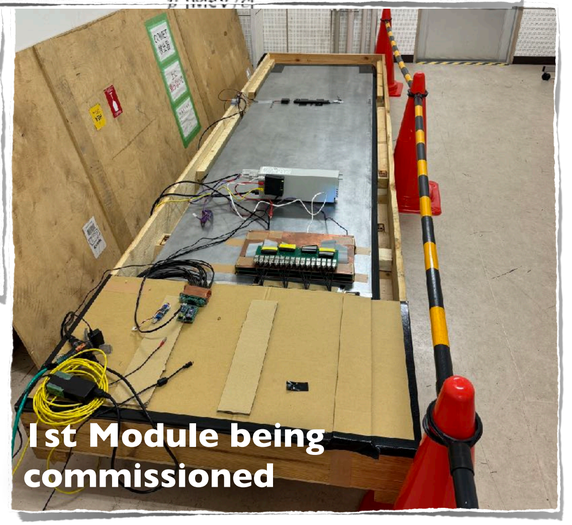
設計

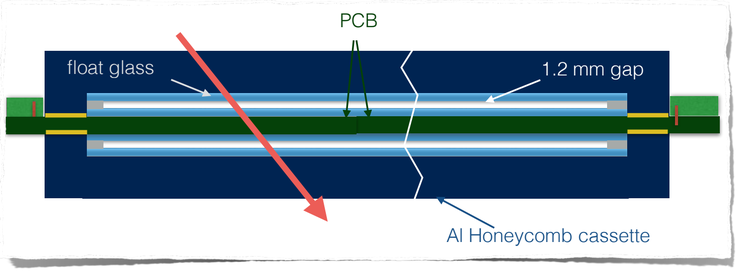
- **プラスチックシンチレータストリップ**
  - ★ 4層積層＋MPPCによる読み出し
- **Resistive Plate Chamber (RPC)**
  - ★ 5–7層 積層



Scintillator module

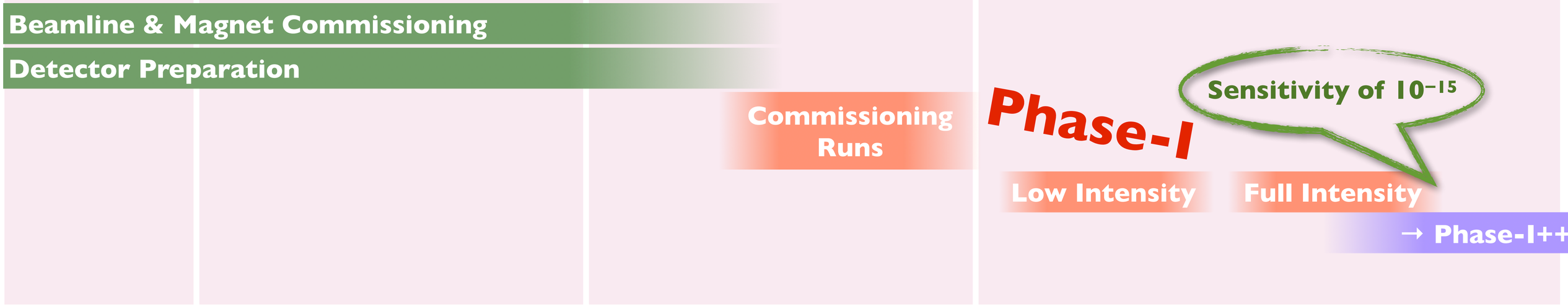






RPC module

スケジュール ～実験実現に向けて～



Phase-Iを実現するため、あと一歩のところまで来ている。

- ミューオン輸送ビームライン設置は2025年末に完了。
  - 周辺装置（パイオン捕獲磁石の冷却系など）の設置を残している。
  - 特に放射線遮蔽体の設置が課題：Phase-I本格始動 (MR 3.2 kW運転) のためには不可欠。
- CyDet＋CRVの製作 → CommissioningがJ-PARCの新開発棟にて進行中。
  - CDC一式 + CTHとCRVは一部＋トリガーDAQを組み込んだ全体のシステム試験を実施する。

スケジュール ～実験実現に向けて～

2026	2027	2028	2029~
Beamline & Magnet Commissioning			
Detector Preparation			
		Commissioning Runs	Phase-I
			Low Intensity
			Full Intensity
			Sensitivity of 10^{-15}
			→ Phase-I++?

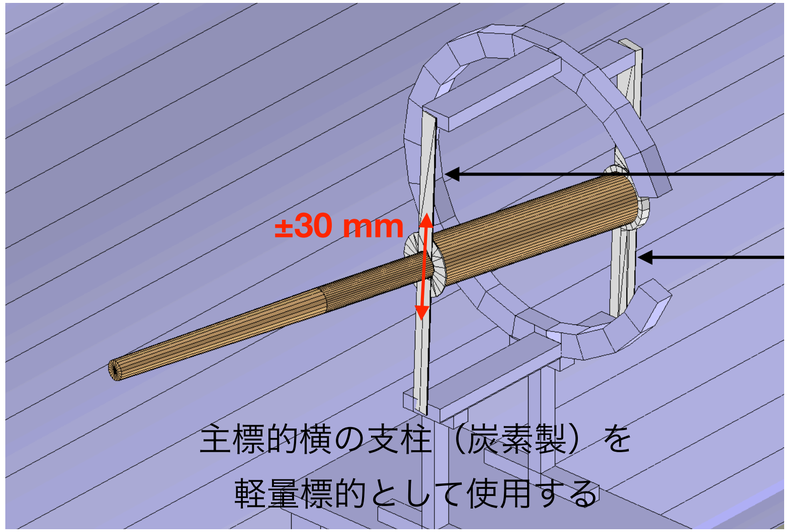
Phase-I Commissioning は2028年中頃に開始予定

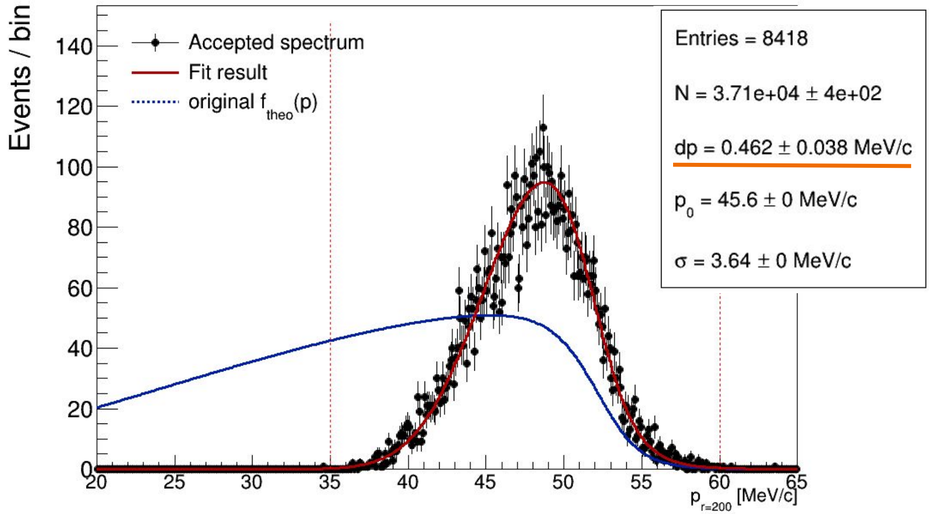
- ✦ 実験→測定→解析の実験フレームワークの構築・安定した運用実績を示す。
  - ⋆ 陽子ビーム導入・全ビームライン・磁石運用＋検出器群＋測定・解析
- ✦ Phase-I 3.2 kW の1%未満（27 W）の陽子ビームパワーにて実施する。
  - ⋆ MRの運用下限強度のため、ビーム施設側と協議しながら実現に向けて準備中。
  - ⋆ 放射線施設運用のため、自治体との協議・許可申請も進行中。

Commisioning — Low Intensity Run

運動量測定・較正手法の確立を目指す

- DIO e^- や Michel e^+ の測定を行う。
  - ★ 検出器ソレノイドの磁場の変更（1 T→ 0.5 T)
  - ★ ダイポール磁場反転（e^+）
    - ❖ Positive muon beam で何か面白いことできる可能性？
- 簡素な低物質量の陽子標的を用いて、比較的綺麗な実験環境で測定。
  - ★ DIOやMichelの統計量は十分確保できる。
- MCを用いた運動量較正手法の確立を進めている。





MCを用いた運動量較正手法（研究中）

Commissioningの後はLow-Intensity Runに移行

- Commissioningの10倍程度までビームを増強。
- SINDRUM-II実験と同等以上の物理成果達成を目指す。
  - ★ その結果をもって、Phase-I本番への迅速な移行を狙う。

おわりに

COMET実験はミューオン・電子転換過程を探索

- 単一事象発見精度: O(10^{-15}) (Phase-I)
- ミューオン輸送ビームラインは2025年末に完成。
  - ⋆ Phase-α (2023)ではミューオン輸送を実証。
- 検出器 (CyDet, StrECAL) の実機建設
  - ⋆ コミッショニングが進んでいる。
- まず 低強度でのCommissioning を速やかに実施。
- Phase-I Low Intensity → Full Intensity へ段階的感度向上
- 米国Mu2eとの競争も課題
  - ⋆ FNALの2028年からの長期シャットダウン前（2027年秋）にRun 1を実施予定。
  - ⋆ 詳しくは西口さんによるCLFV2026報告にて。

Phase-I以降へのロードマップ (KEKビジョン2026)

- 昨今の状況から、Phase-IIへの大きなジャンプは非現実的。
- コストパフォーマンスのよいアップデートを段階的に。
  - ⋆ 陽子ビーム強度のさらなる増強
  - ⋆ 陽子標的をグラファイトからタングステンへ
  - ⋆ ビームラインの部分的拡張（輸送ソレノイドを180°に？）
- 南実験棟ミューオンビーム施設の多角化利用も視野に。
  - ⋆ ミューオン触媒核融合や産業利用