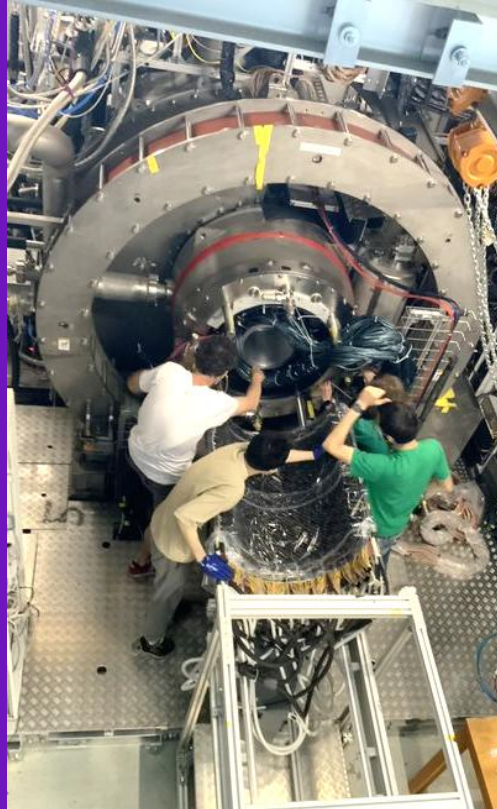
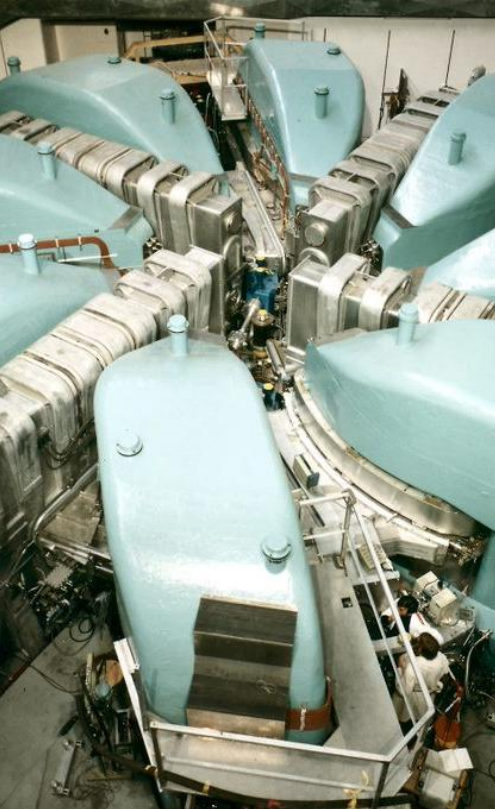




MEG II 実験



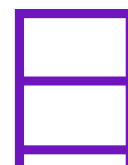
内山 雄祐

August 6, 2026

Workshop on Muon LFV and Beyond
@ UTokyo, Hongo

あと

49



ほんとに終わっちゃうの？

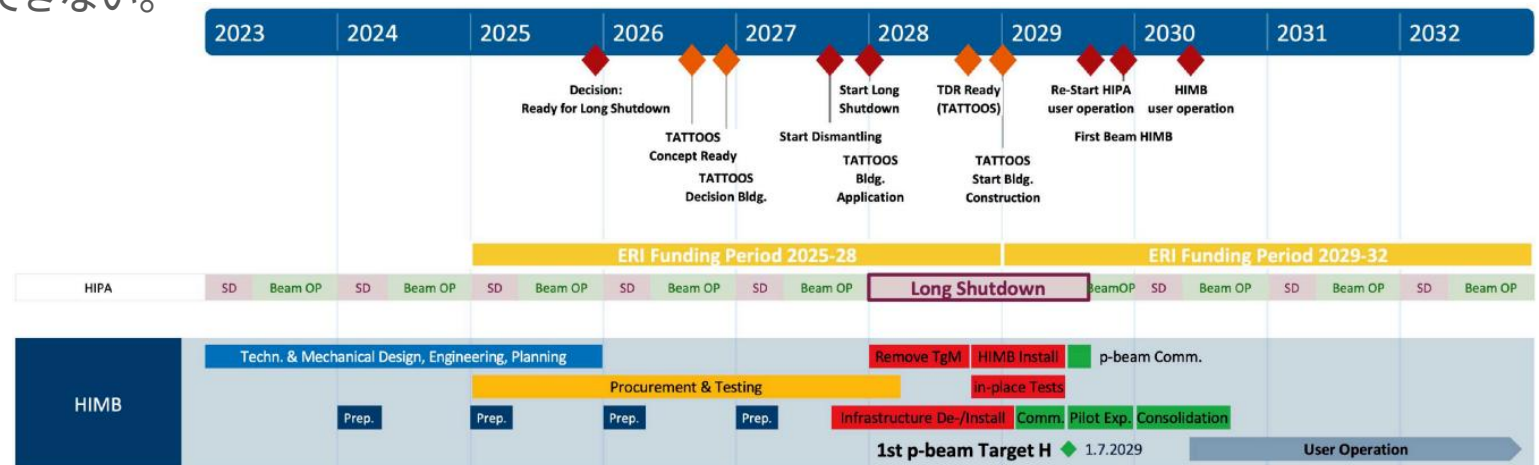
IMPACTプロジェクトのためにPSI加速器の2年間停止

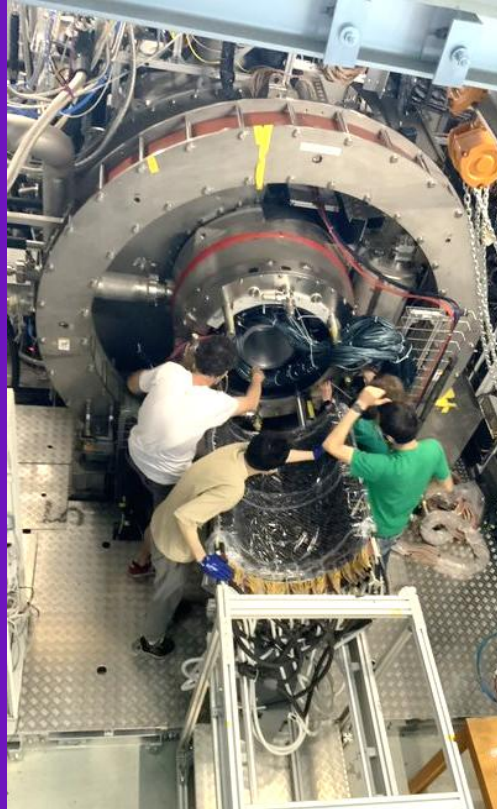
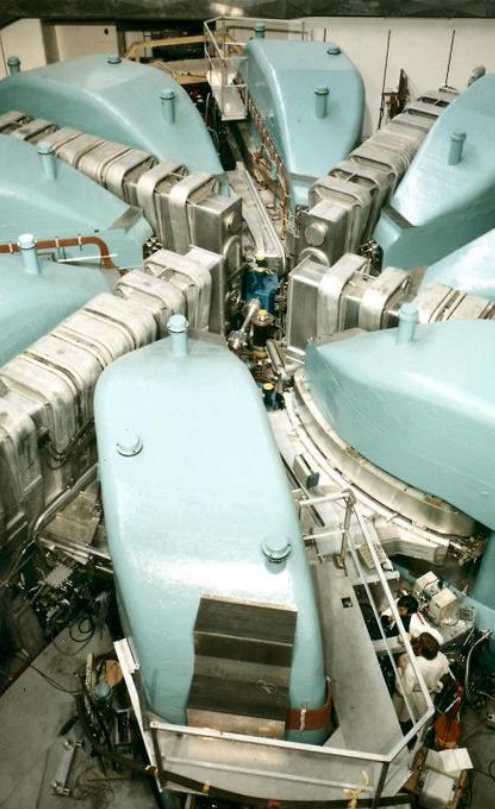
- ❑ HIMBビームライン建設
- ❑ もともとは2027/1月から停止予定だった。去年12月に計画の1年延期が決定された。
- ❑ なので、2027年も加速器は動く。
- ❑ 液体ヘリウム供給施設が計画通り2027年から止まる → MEGのビームラインが動かせない。

長期停止後に再開？

- ❑ データをとるのは大変。人的・予算的負担。
- ❑ 2年空くといろいろな技術(記憶)が薄れる。学生など新しい人の教育もできない。
- ❑ 検出器がそもそも持たない(後述)。
- ❑ 新しい開発ができない。

来年はMu3eに期待
(今年9月からコミショニングラン)

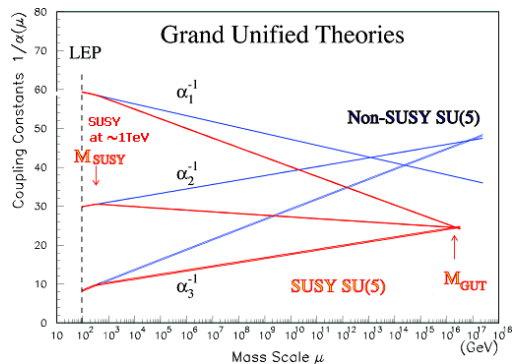




MEG II 実験の限界

MEG IIの限界はどこにあるのか？
MEG IIの限界を引き出すには？

MEG 30年の歴史



'Indication' of **SUSY-GUT** by LEP.
ICEPP physicists started to
consider experiments to prove it.

Proposal to PSI
by JP & RU

IT joined.
Proposal to INFN

Discovery of Higgs at LHC.

Birth of 'MEG' concept.

LOI

Start of MEG run

MEG II proposal

Start of MEG II run

1st result of MEG II

2020

2025

1990

1995

2000

2005

2010

2015

$\mu \rightarrow e\gamma$ is signal for SUSY-GUT,
considering large top mass.

Establishment of
neutrino oscillation.
→ Many theoretical
studies for $\mu \rightarrow e\gamma$.

($g - 2$) anomaly by E821.
→ raised anticipation
for $\mu \rightarrow e\gamma$.

Final result
of MEGA: $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$

Termination of MECO
→ US joined

1st result of MEG

End of MEG run

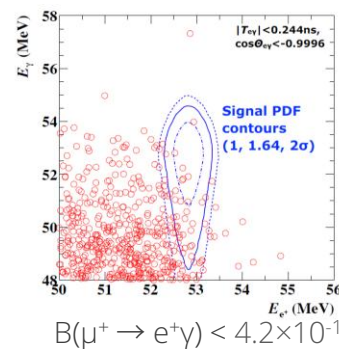
2nd result of MEG II
 $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.5 \times 10^{-13}$

End of MEG II run

($g - 2$) anomaly disappeared

Large θ_{13} by
T2K, DayaBay
and RENO

Final result of MEG



MEG 30年の歴史

SUSY GUT and SUSY Seesaw model

L.J.Hall, V.Kostelecky, S.Raby, 1986; A.Masiero, F.Borzumati, 1986

The flavor off-diagonal terms in the slepton mass matrix are induced by renormalization effects due to GUT and/or neutrino interactions.

$$(m_{\tilde{l}}^2)_{ij} = m_0^2 \delta_{ij} \quad @ M_{\text{planck}}$$

GUT Yukawa interaction

Neutrino Yukawa interaction

$$(\Delta m_{\tilde{l}}^2)_{ij} \neq 0$$

CKM matrix

LFV

Neutrino oscillation

岡田さん
2006年
@MEG-LFVセミナー

Start of MEG II run

1st result of MEG II

2020

2025

2nd result of MEG II

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma < 1.5 \times 10^{-13}$$

End of MEG II run

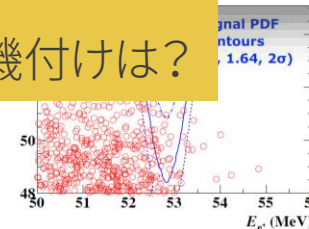
今でも有効ですか？
これに代わる、LFV探索の強い動機付けは？

Establishment of
neutrino oscillation.

→ Many theoretical
studies for $\mu \rightarrow e \gamma$.

2026/8/6

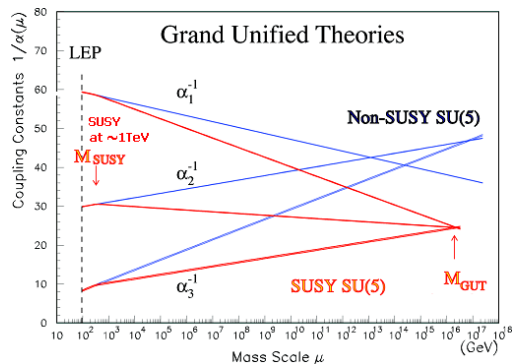
YUSUKE UCHIYAMA



$$B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$$

(g - 2) anomaly disappeared

MEG 30年の歴史



'Indication' of **SUSY-GUT** by LEP.
ICEPP physicists started to
consider experiments to prove it.

Proposal to PSI
by JP & RU

IT joined.
Proposal to INFN

Discovery of Higgs at LHC.

Birth of 'MEG' concept.

LOI

Start of MEG run

MEG II proposal

Start of MEG II run

1st result of MEG II

2020

2025

1990

1995

2000

2005

2010

2015

$\mu \rightarrow e\gamma$ is signal for SUSY-GUT,
considering large top mass.

Termination of MECO
→ US joined

Final result
of MEGA: $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$

($g-2$) anomaly by E821.
→ raised anticipation
for $\mu \rightarrow e\gamma$.

Establishment of
neutrino oscillation.
→ Many theoretical
studies for $\mu \rightarrow e\gamma$.

1st result of MEG

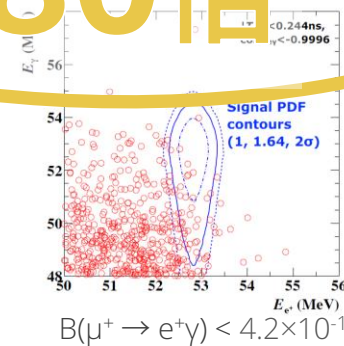
80倍

Large θ_{13} by
T2K, DayaBay
and RENO

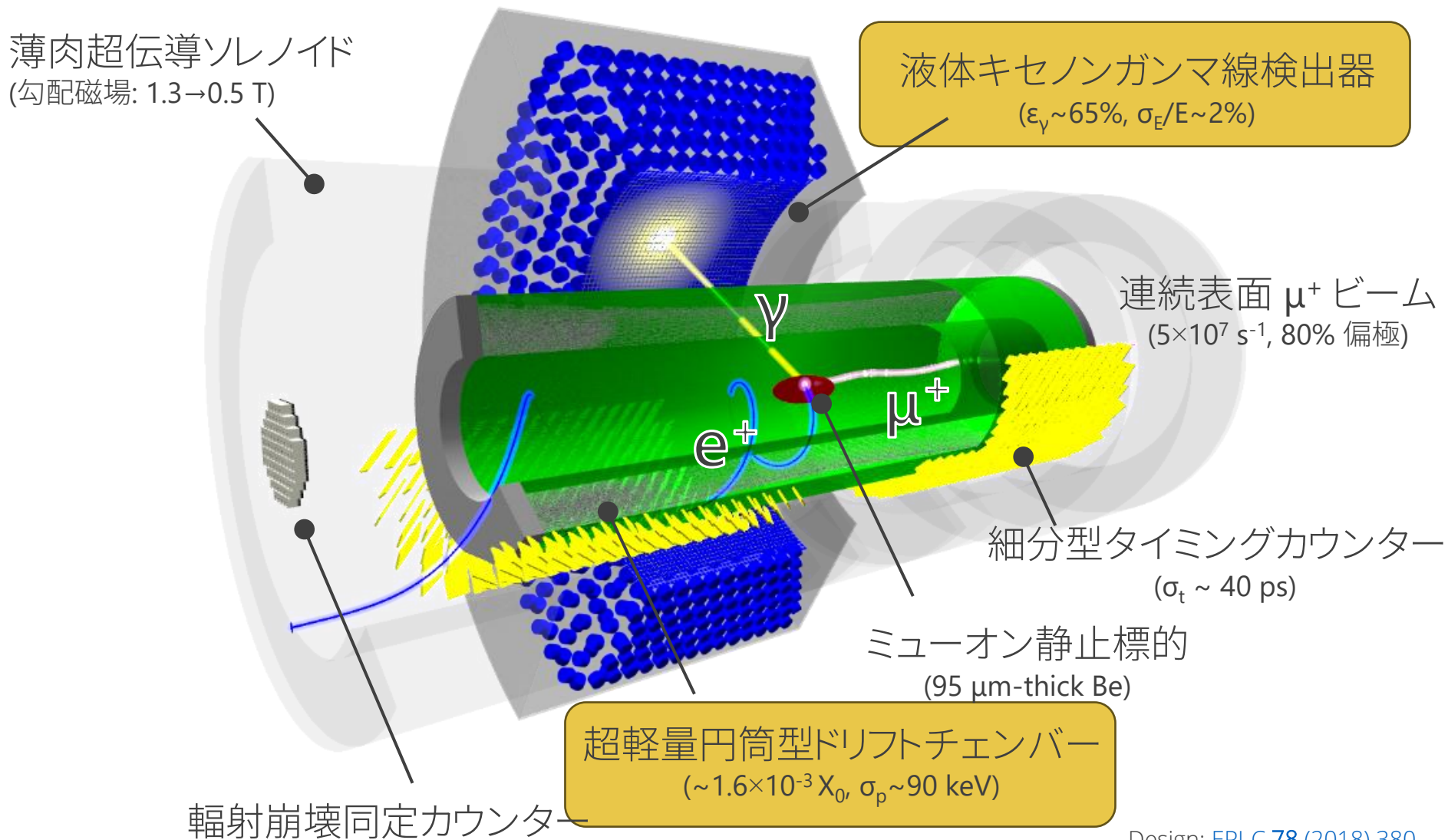
2nd result of MEG II
 $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.5 \times 10^{-13}$

End of MEG II run

($g-2$) anomaly disappeared



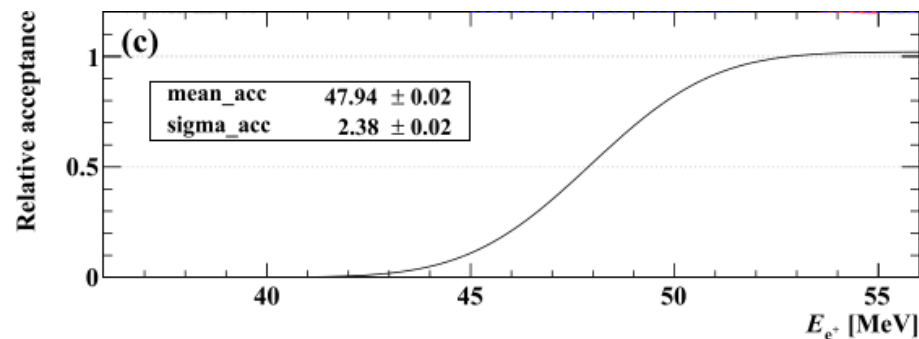
実験セットアップ



実験セットアップ

薄肉超伝導ソレノイド
(勾配磁場: 1.3→0.5 T)

レート耐性を上げるために勾配磁場により低運動量 e^+ を検出器に当てない



連続表面 μ^+ ビーム
($5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 80% 偏極)

- 検出器立体角 $\sim 11\%$
- 極角アクセプタンス: $[70^\circ, 110^\circ]$
- e^+ 運動量アクセプタンス: $\geq 48 \text{ MeV}$

型タイミングカウンター
($\sigma_t \sim 40 \text{ ps}$)

停止標的
(Black Be)

輻射崩壊同定カウンター

$\mu \rightarrow e\gamma$ 検出に特化

LXeガンマ線検出器

液体キセノン検出器のパイオニア

- ❑ 冷却・純化・校正システム確立、真空紫外光有感光センサーの開発
- ❑ 暗黒物質・ダブルベータ・PIONEER実験などに波及

全吸収型シンチレーションカロリメーター

MPPCを導入で性能大幅改善を図ったが...

- ❑ 位置分解能は改善。読み出しの粒度がそのまま効く。
- ❑ 時間分解能は変わらない(期待通り。光電子統計が効く)。
- ❑ エネルギー分解能:
 - (本質的な)分解能は**改善なし**。~1.7% (ベスト)
 - MCでは <1% が出ると計算されている。

光電子統計では決まらない。センサーの問題でもなさそう。
LXeの発光メカニズムでなにか**未知の揺らぎ**があることを示唆。

全吸収型シンチレーションカロリメーターの限界か!?

センサー間の「重み」を最適化することで分解能の限界に挑戦中

- 4760個の重みを校正データを使って一気に最適化する。線形解析。
- (私見)NNはこの手の限界性能追及には向いていない。



超軽量ドリフトチェンバー

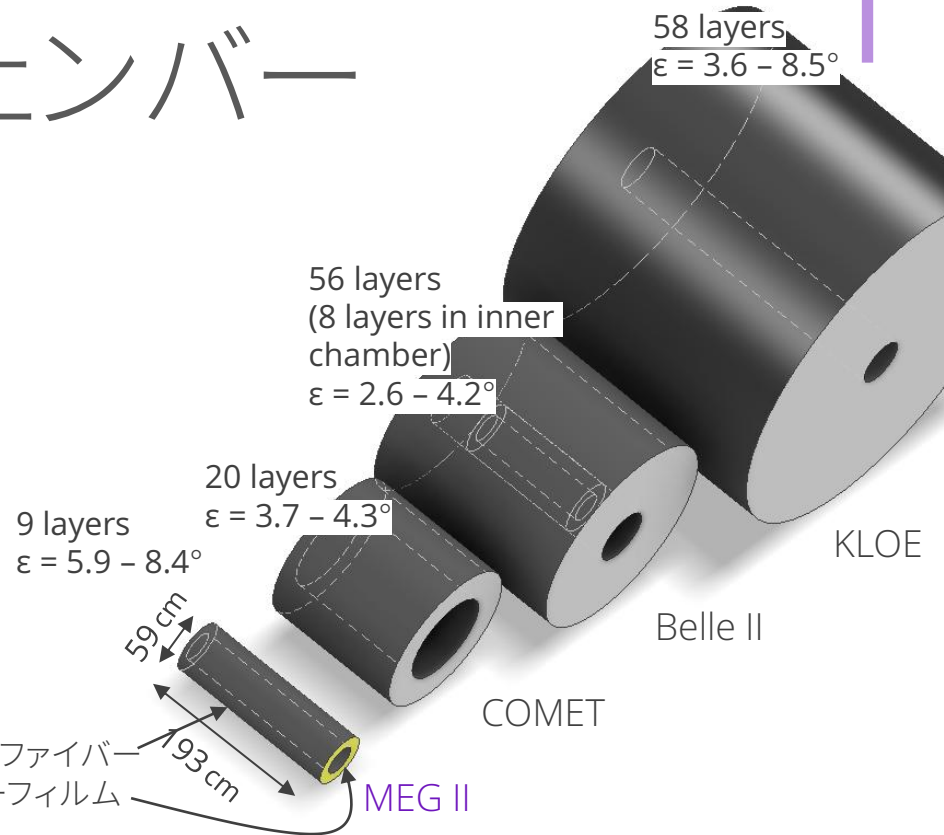
特徴

1. 軽量化を尽くした飛跡検出器
2. 超高計数率

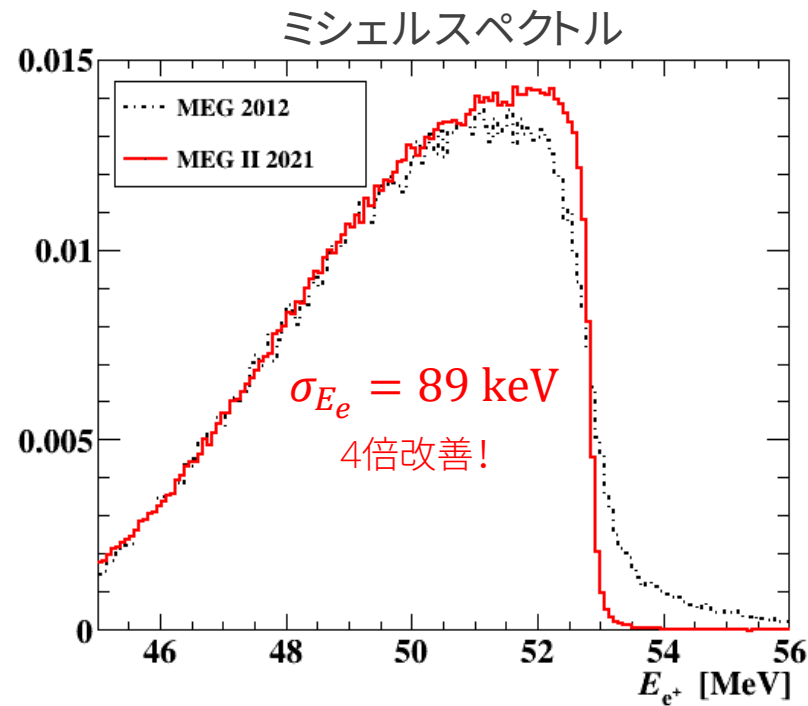
0.0016 X_0 for a e^+ track
Up to 1.7 MHz per cell,
35% occupancy in 250ns

構造体

外側は2 mmのカーボンファイバー
内側は20 μm のマイラーフィルム



	Gas	Cell size	Sense wire	Field wire	
CLEO II	Ar:C ₂ H ₆ 50:50	14 mm	20- μm Au-W	110- μm Au-Al, 110- μm Cu/Be	Crimp
BESIII	He:C ₃ H ₈ 60:40	12–16.2 mm	25- μm Au-W	110- μm Au-Al	Crimp
Belle II	He:C ₂ H ₆ 50:50	6–18 mm	30- μm Au-W	126- μm Al	Crimp
COMET	He:iC ₄ H ₁₀ 90:10	16–16.8 mm	25- μm Au-W	126- μm Al	Crimp
KLOE	He:iC ₄ H ₁₀ 90:10	20–30 mm	25- μm Au-W	81- μm Ag-Al	Crimp
MEG II	He:iC ₄ H ₁₀ 90:10	6.6–9 mm	20- μm Au-W	40- μm Ag-Al	Solder



低物質量化を極限まで突き詰めた。
53 MeV e^+ に対する分解能の限界。

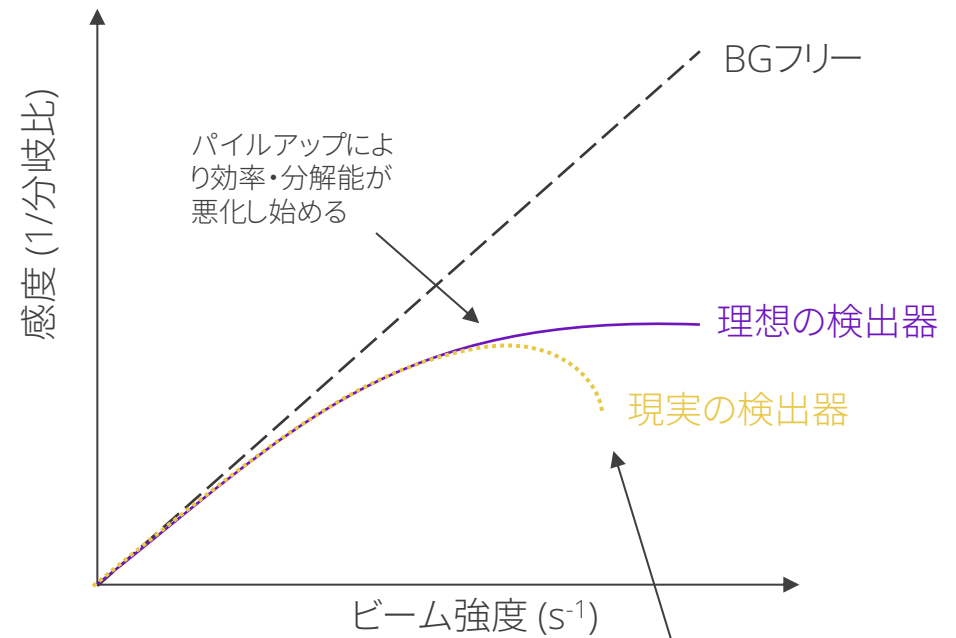
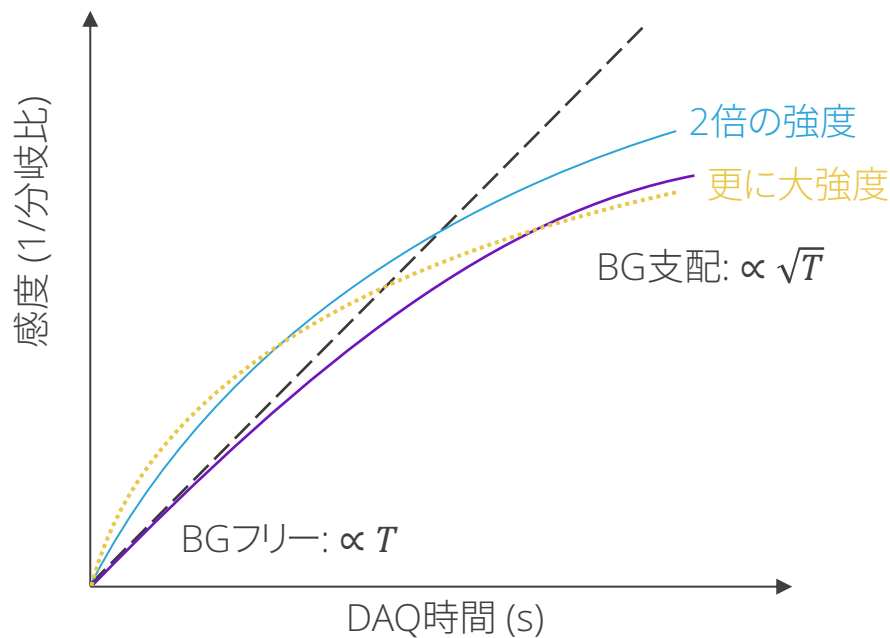
これよりよい性能は既存および現在開発中の検出器技術ではおそらく不可能。

ビーム強度の限界

π E5ビームラインの限界強度: $\sim 1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$

$\Leftrightarrow$ MEG IIの限界(最適点): **$5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$**

$$R_{BG} \propto R_{\mu}^2 \cdot \delta E_e \cdot (\delta E_{\gamma})^2 \cdot \delta \omega_{e\gamma} / 4\pi \cdot \delta t_{e\gamma}$$



検出器が運転できない
(放射線損傷、エージング、
放電etc.)

測定器のレート耐性の壁

強度制限の要因

どれか一つの要因が制限しているのではなく、いろいろギリギリ

1 トリガー・DAQ

- DAQシステム帯域 (250 MB/s) いっぱいのトリガーレート (a few %の取りこぼし)。
- コインシデンストリガーは (ビームレート)² で増える。
- オンラインでの検出器の較正・分解で E_γ 閾値の制約。

2 計算機資源

- ~3 PBのディスクストレージ $\Leftarrow$ 7 TB/day
- CPU数 ~1000。解析時間はレートで指数関数的に増える (e^+ のトラッキング)。
- 1年分のランのプロセスに数カ月。
- 64 kCHF/year

3 液体キセノン検出器

- 光センサーのレート耐性・放射線耐性：PMTのゲイン減少 (ダイノード劣化)、MPPCの量子効率減少
- パイルアップ。

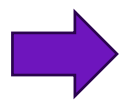
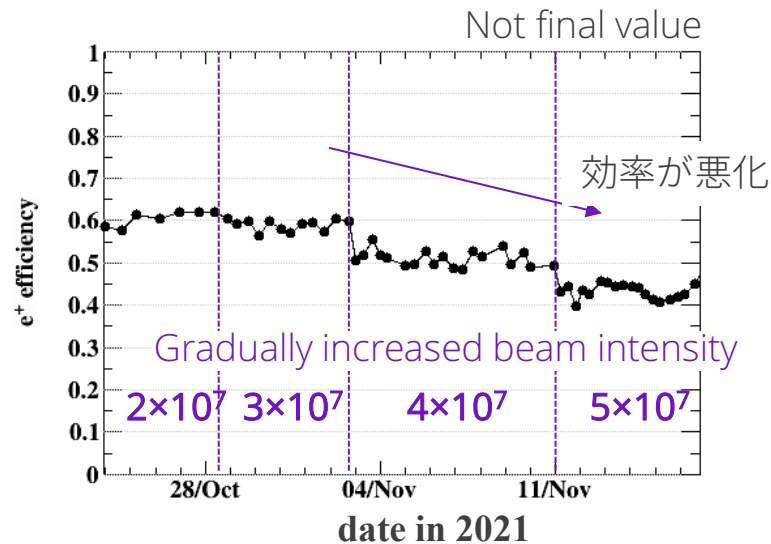
4 ドリフトチェンバー

- 高計数率下 (ヒット占有率~35%) でのパターン認識
- エージング効果。ストリーマー、放電。

高計数率 e^+ トラッキング

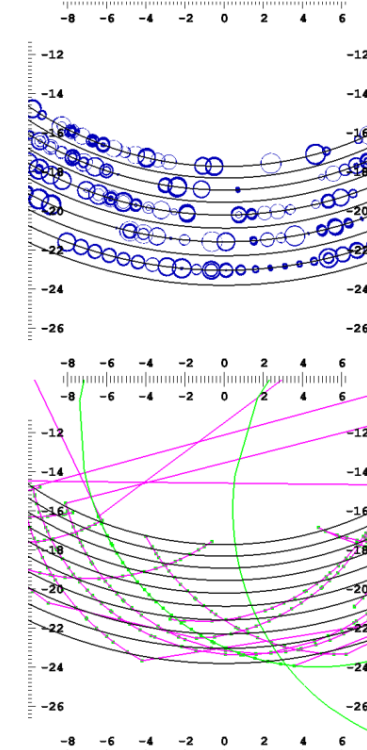
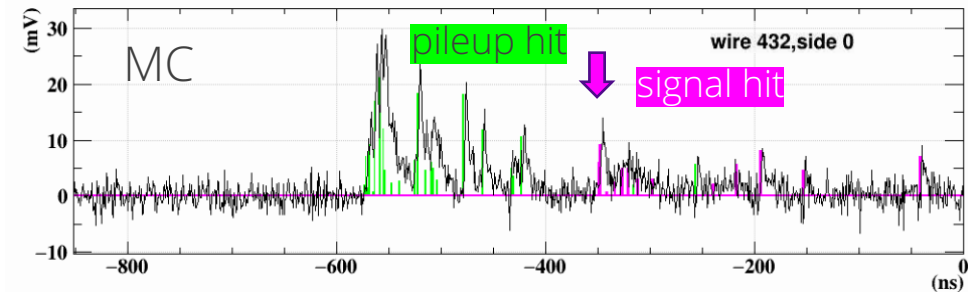
課題

1. 波形からのヒット検出
2. トラックファインディング(パターン認識)



機械学習を活用

最終的なトラッキングにはカルマンフィルター(DAF)をつかう。



ほぼすべてのヒットは
飛跡を持つ e^+ のヒット

Figure 17 Example of event in one stereo view projection at $z = 0$. Top: circles correspond to the drift distance of hits relative to T_0 of the signal track; hits are selected within the $[-50 \text{ ns}, 200 \text{ ns}]$ time window around T_0 . Bottom: reconstructed tracks with hit points in both stereo view, the green curve is the trajectory of the signal positron.

波形データに対するCNNモデル

[Eur. Phys. J. C \(2024\) 84:473](#)

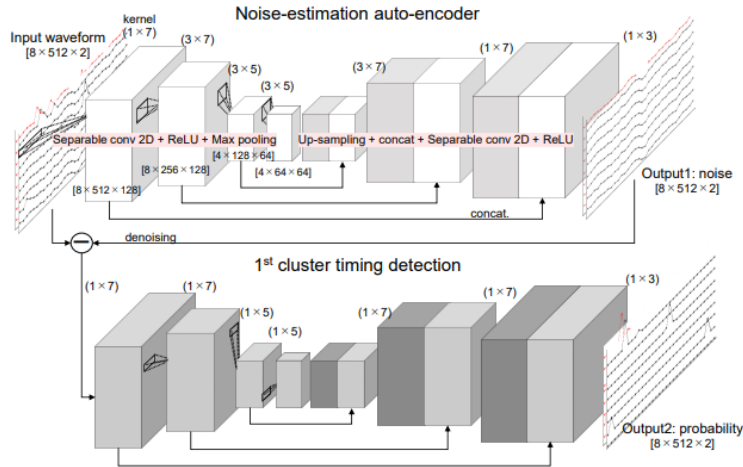
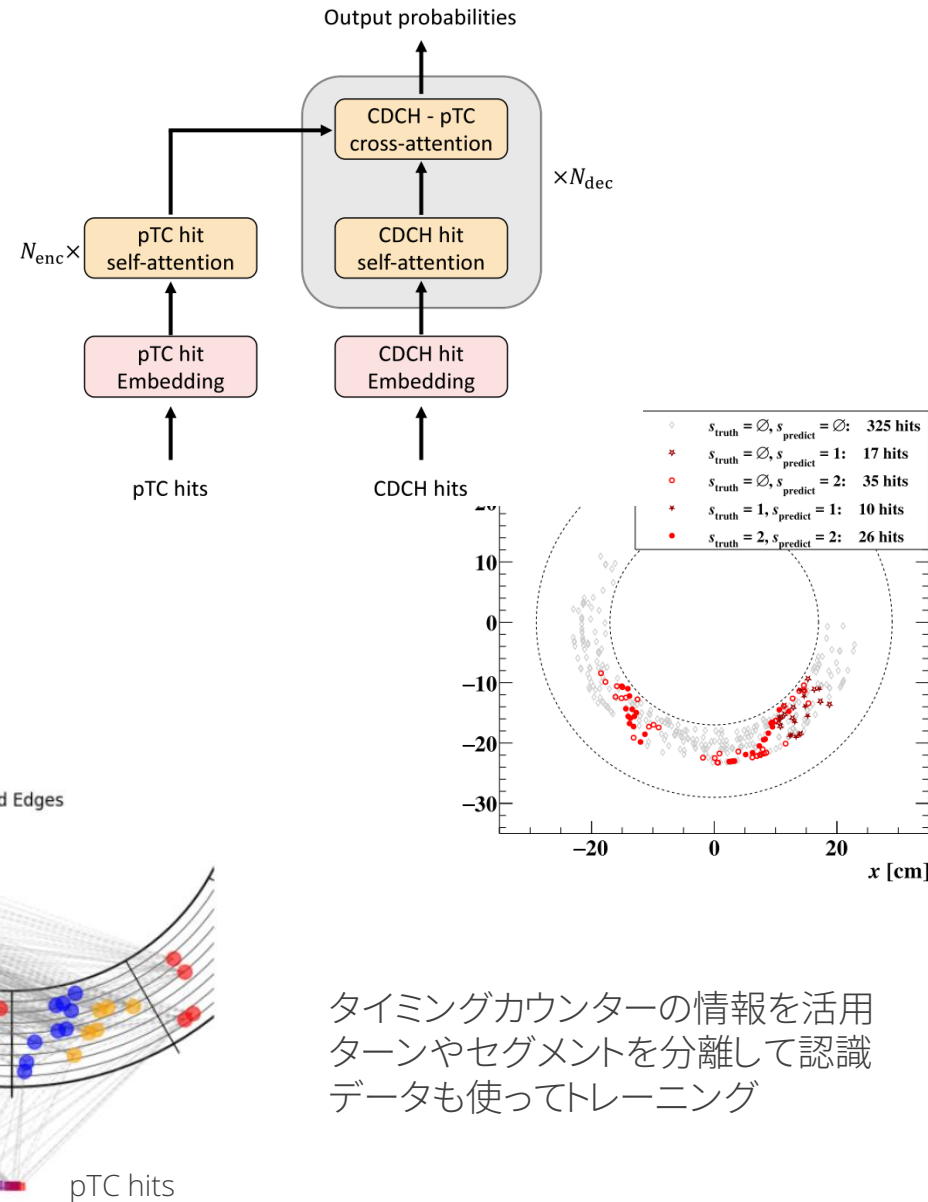


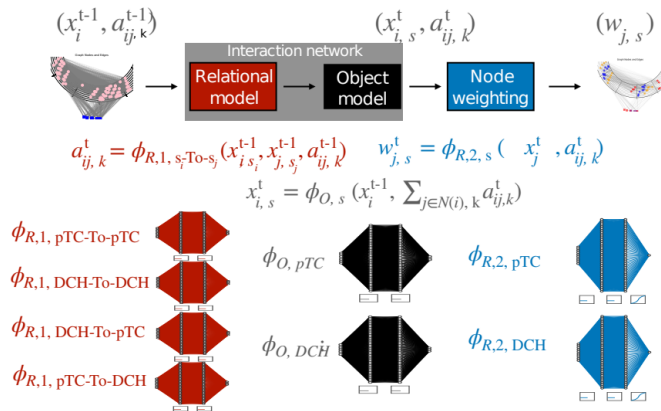
Figure 12 Architecture of the hit detection CNN model.

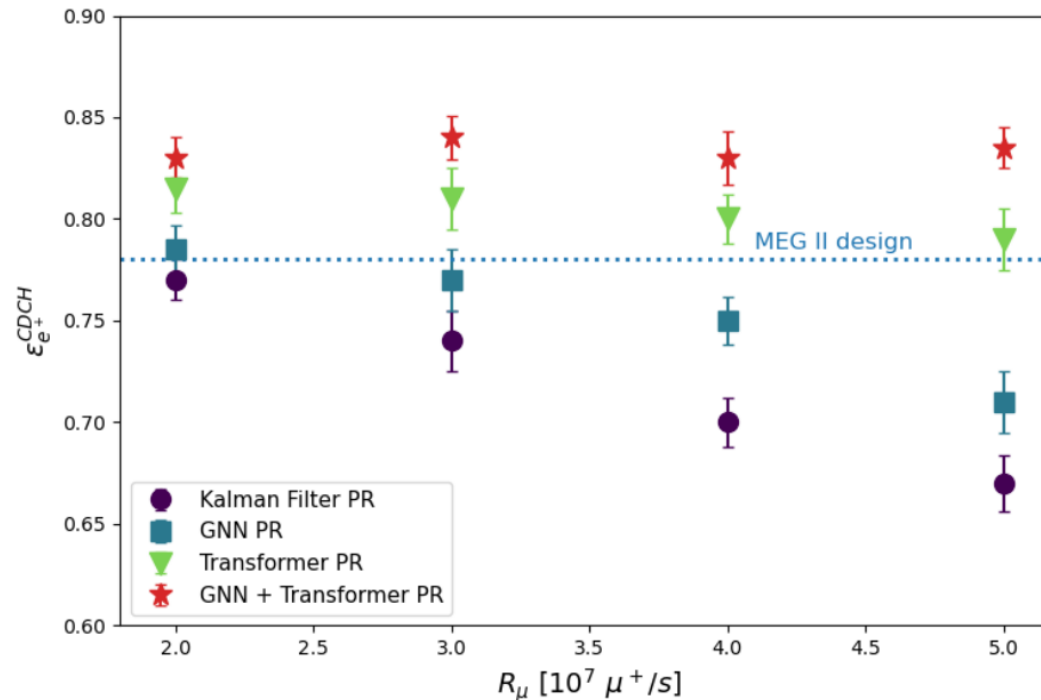
Transformerを用いたパターン認識モデル

[NIM-A 1092 \(2026\) 171817](#)



GNNを用いたパターン認識モデル





性能(効率・分解能)改善と計算時間短縮*を同時に達成。
 従来の方とCNN波形解析、TransformerとGNNのパターン認識、4通りの組み合わせでトラッキングをして、
 再構成された最適なトラックを採用。

次の解析に導入 感度を10-15%向上

限界突破!!

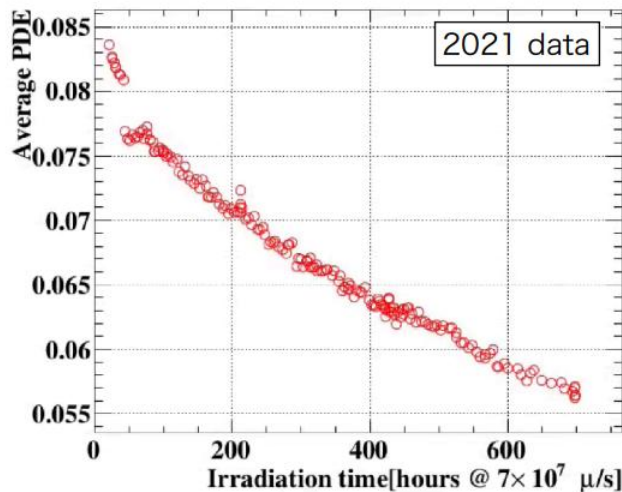
* GPU等使っていない

高計数率下でのLXe運用

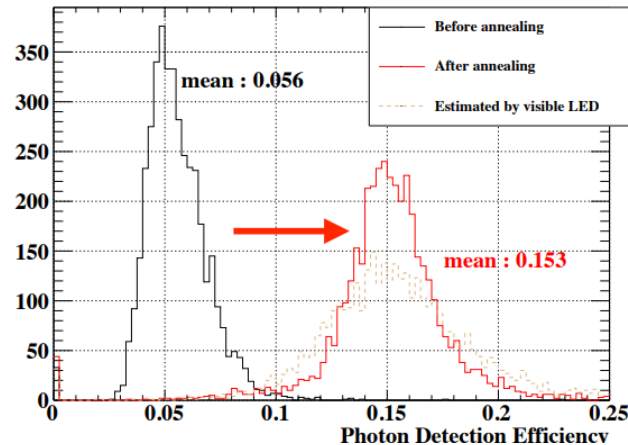
課題

1. センサーの劣化(エージング・放射線損傷)
2. パイルアップの認識・分離

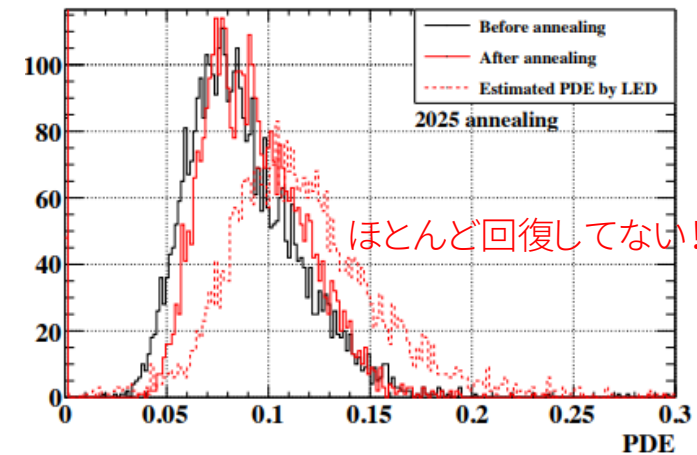
MPPC PDE vs Irradiation time



2021ラン後→2022ラン前



2024ラン後→2025ラン前



PDE(光子検出効率)の減少問題

- 何らかの放射線損傷で徐々にPDEが落ちていく。原因は未解明。
- アニール(熱処理)でPDEを回復させることができることが判明。毎年ラン後にアニールを実施。
- 近年、アニールでPDEが回復されていないことが判明。今年のランは何とかもちそう。

他にも

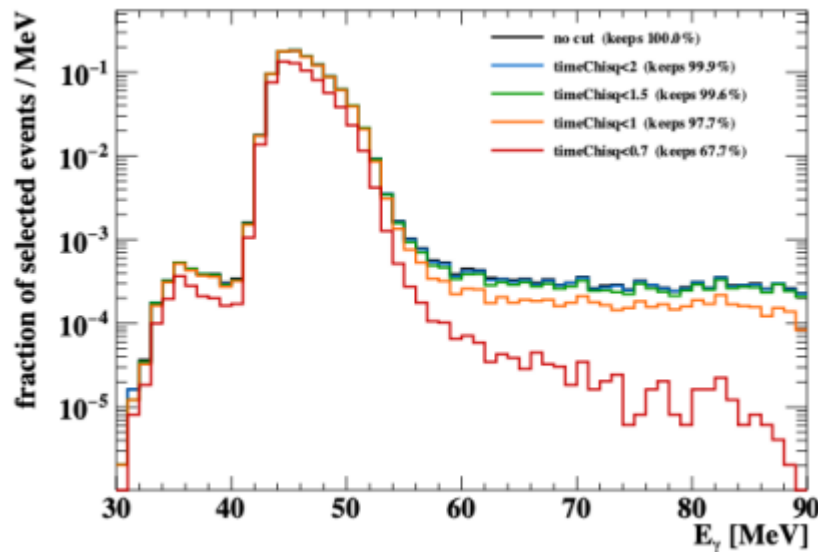
- PMTのゲイン減少、デッドチャンネルの増加、高電流チャンネル、etc.

満身創痍で最後まで駆け抜ける

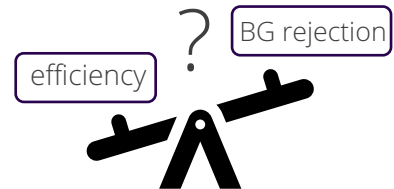
パイルアップ解析

キセノンボリウムは光学的に分割されていない

- 複数のガンマ線が近い時間に入射すると、シンチ光が重なり合って観測される(パイルアップ)
- ~500 kHzでガンマ線(>0.2 MeV)が入射
- ⇒パイルアップを識別するだけでなく、分離して信号を正しく再構成する必要。



厳しいカットを掛けると高エネルギーテールを落とせる。
⇒パイルアップの影響が残っている。まだ解析で頑張れる余地。

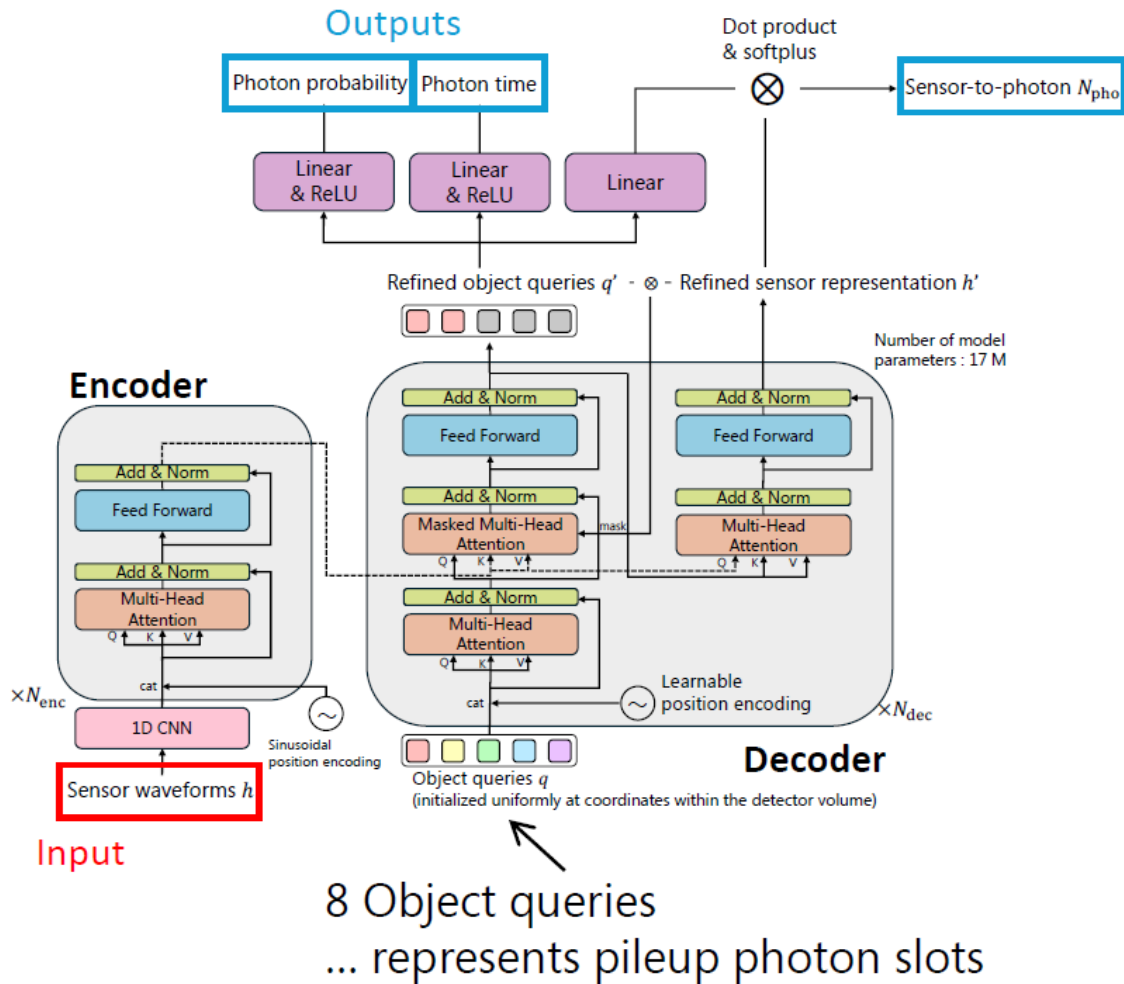


- より見つける効率を上げる
- 信号を落とさずにパイルアップを落とす方法
- 見つけたパイルアップを取り除く

センサーの情報を複合的に解析する
時間・電荷・波形情報の統合

BDT 機械学習モデル 波形による分離

次の解析に向けて



物体検出のモデルを参考

波形データ(4760チャンネル分)を入力

パイラップ情報と、それぞれのガンマ線に対応する光量分布、時間分布を出力

MCとデータの微細な違いが影響

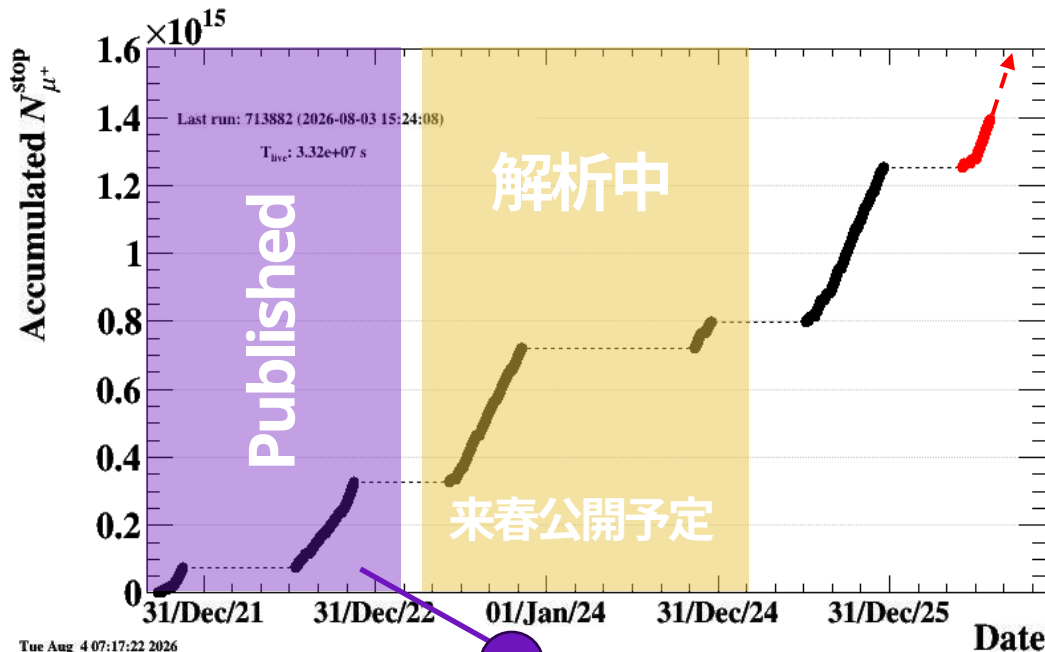
MCをデータに近づける

データを使って学習

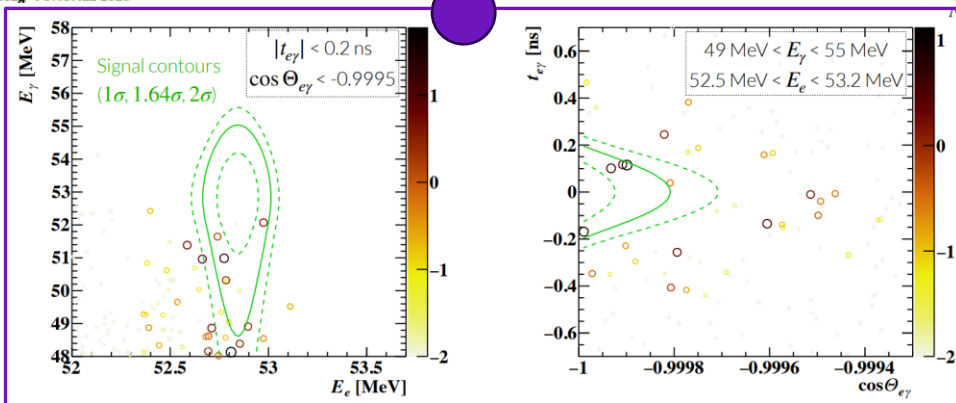


限界突破目指して

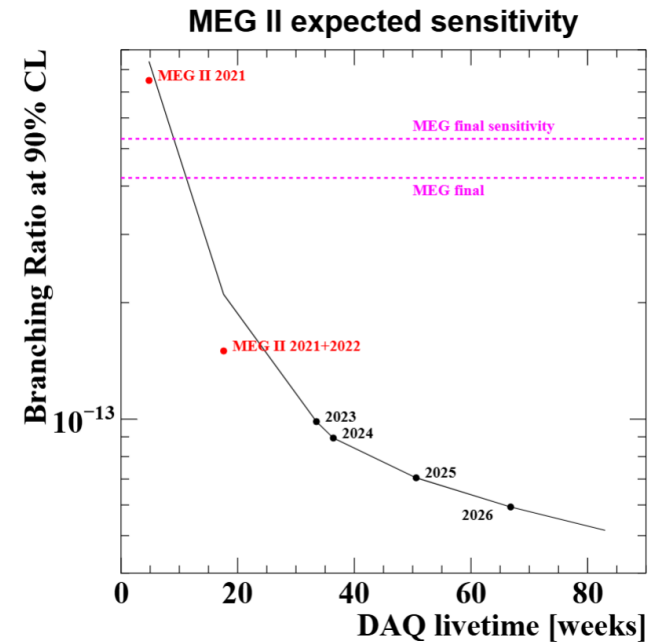
現状と今後の見込



Tue Aug 4 07:17:22 2026



$\mu \rightarrow e\gamma$ 事象は見つからず $B(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.5 \times 10^{-13}$



次の結果(2021-2024)は来春(初夏?)。2倍以上のデータ。
最終的には、4倍以上のデータ。
この中に $\mu \rightarrow e\gamma$ が含まれている可能性は大いにある。

他モード

幾何・運動量アクセプタンスの制限

- $\mu \rightarrow eee, \mu \rightarrow e\gamma\gamma$ はリミットに匹敵できない。
- “ $\mu \rightarrow e\gamma$ like” なキネマティクスをもったモード

● $\mu \rightarrow e\mathbf{X}, \mathbf{X} \rightarrow \gamma\gamma$

MEG(1) データで探索 ([Eur. Phys. J. C 80, 858 \(2020\)](#)).
その後、他実験によりMEG(II)で探索できる領域での
 $X \rightarrow \gamma\gamma$ がほぼ棄却されたよう。

● $\mu \rightarrow e\mathbf{a}\gamma$ JHEP09(2021)173

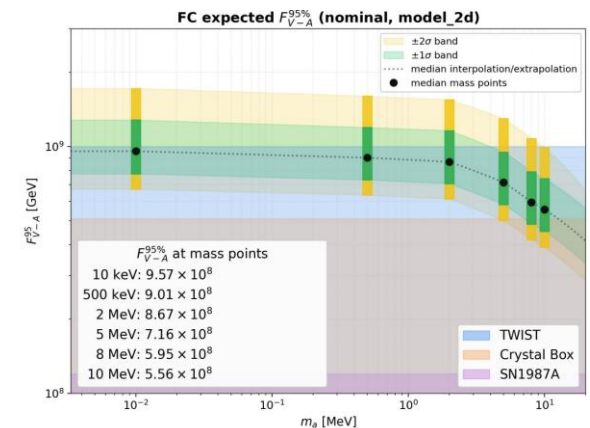
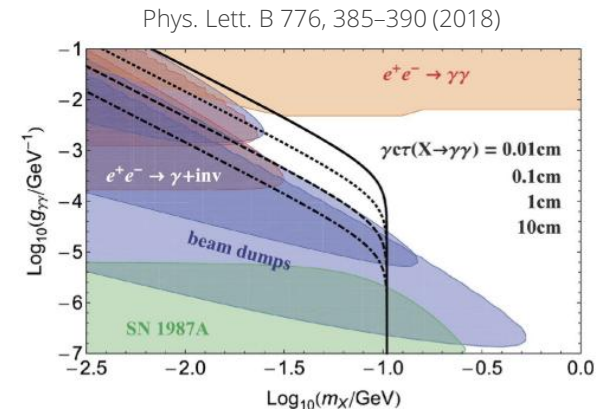
MEG IIで低強度ランの小統計サンプルを使用。

- バックトゥバック条件を緩める。
 - ガンマ線エネルギー閾値をできるだけ下げる。
- 解析進行中 ([ICHEP2026](#))

MEG IIデータを使ってもっと他に何かできませんか？

$\mu \rightarrow e\gamma$ 最適化

多モード探索



まとめ

MEG IIは最終局面を迎えている

データ収集は9/23で終了

限界性能を出すために解析を詰めている

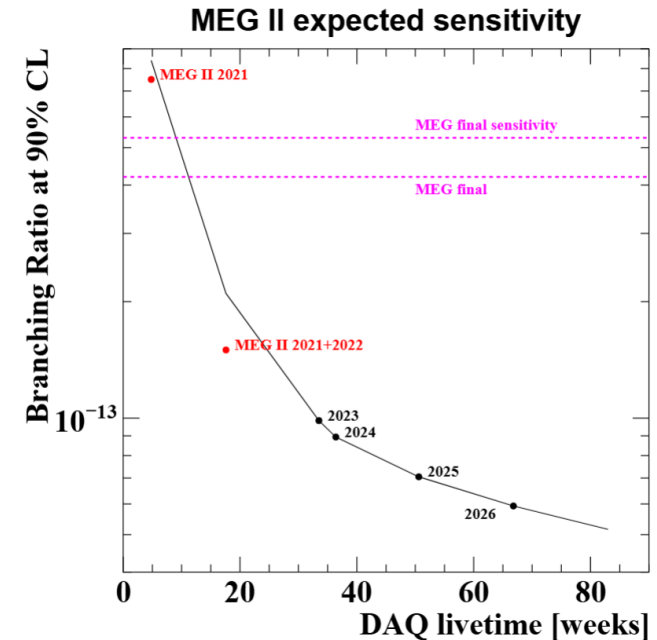
次の結果は来春。初の 10^{-14} 台の感度

最終結果はさらに2-3年後？

e+測定は究極精度までいっている。

γ (中世粒子)測定はやはり難しい。カロリメトリーの限界か？

MEG IIで見た限界は新実験で突破



限界突破

