

シンポジウム：
荷電レプトンフレーバー非保存探索による
LHC時代の素粒子物理

DCミューオンビームによる cLFV探索

2013年3月26日
日本物理学会第68回年次大会
@広島大学

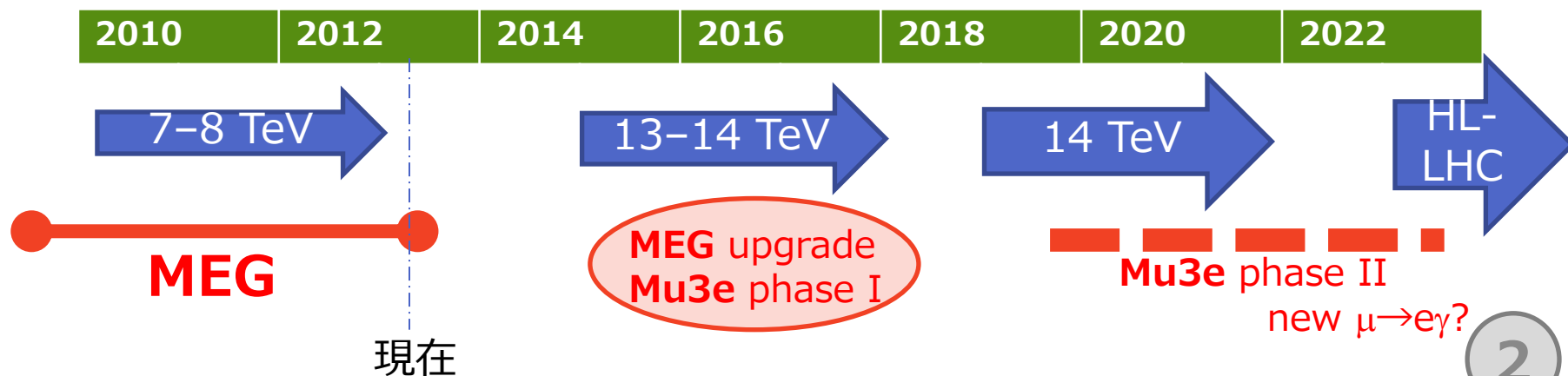


東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

素粒子物理国際研究センター
内山 雄祐

目次

- 直流ビームとその実験のポイント
- 現状
 - MEGの最新結果
- 将来計画（～5年）
 - MEGアップグレード
 - Mu3e実験
- その先

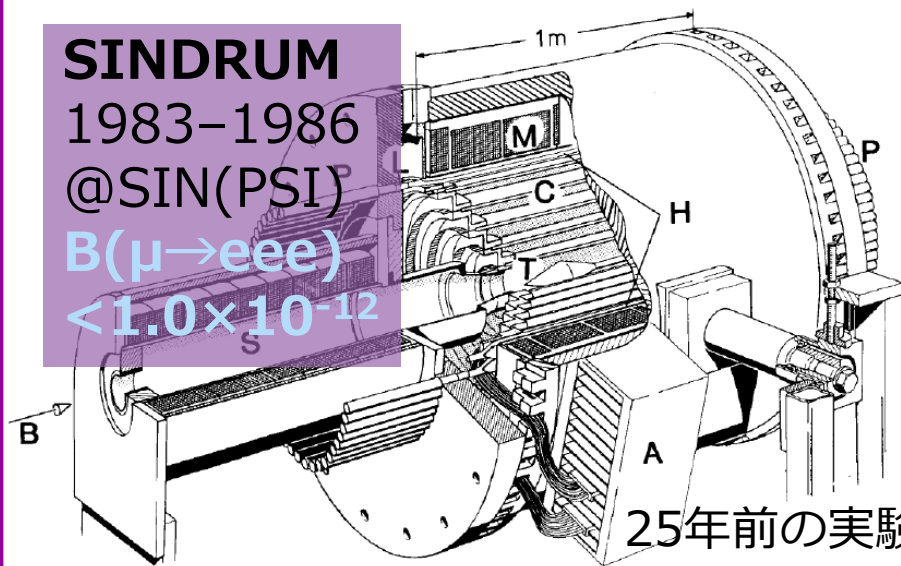


DCミューオンビームによるcLFV 探索

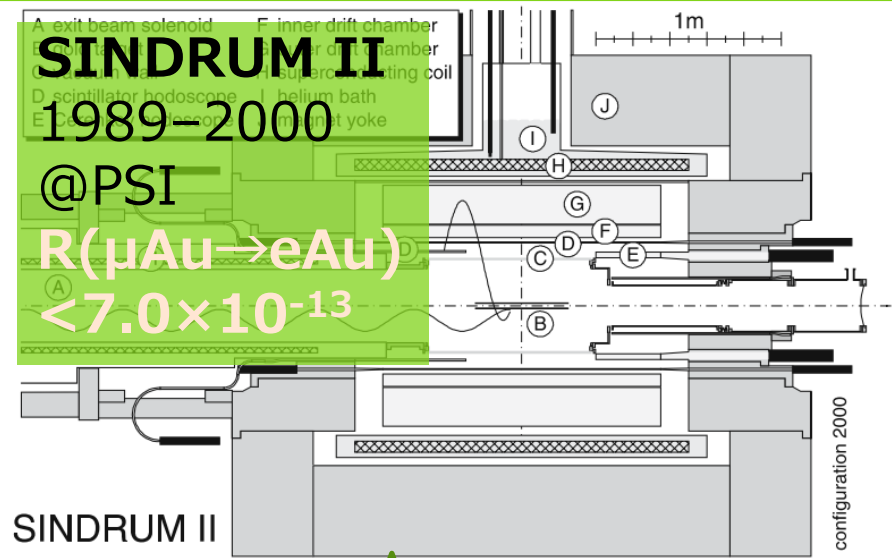
- $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$
- $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$

History

SINDRUM
1983–1986
@SIN(PSI)
 $B(\mu \rightarrow eee)$
 $< 1.0 \times 10^{-12}$

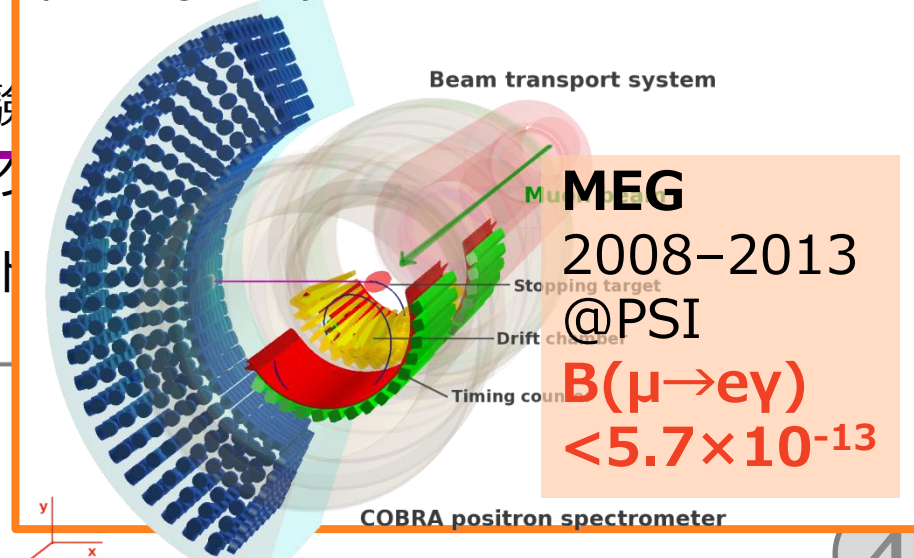


SINDRUM II
1989–2000
@PSI
 $R(\mu\text{Au} \rightarrow e\text{Au})$
 $< 7.0 \times 10^{-13}$

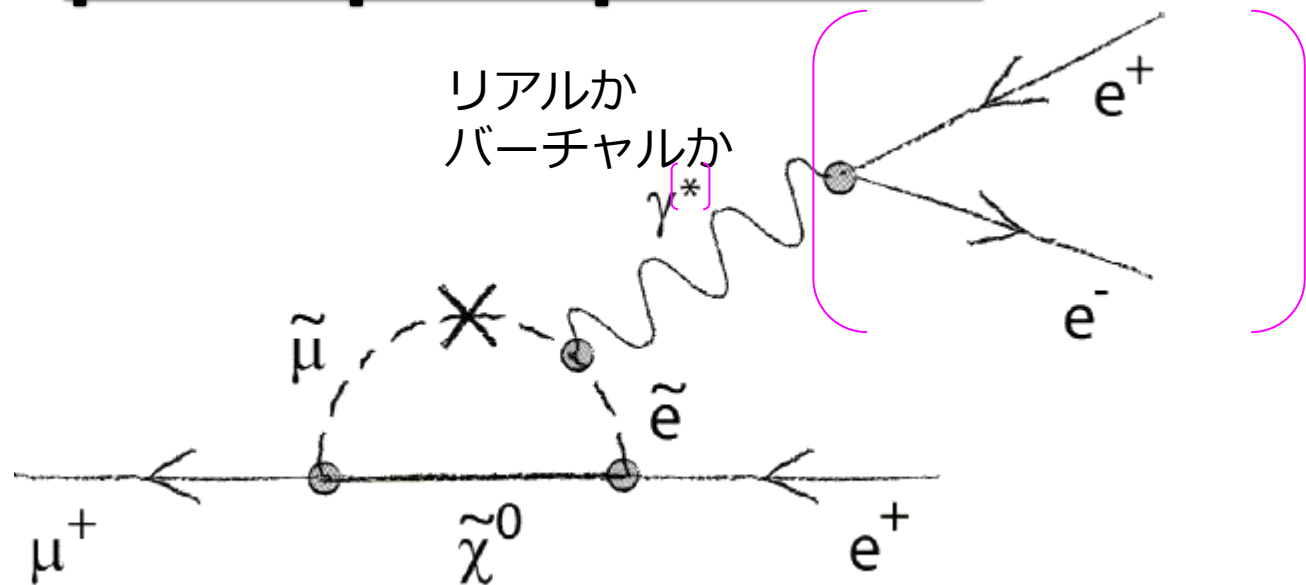


μLFV は
PSI!?

Liquid xenon gamma-ray detector

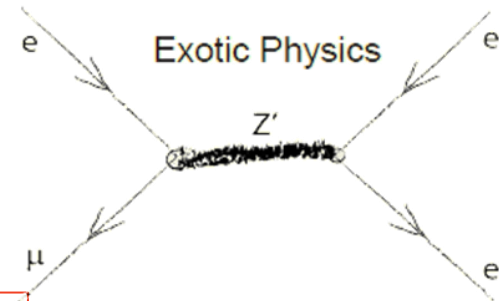


$\mu \rightarrow e\gamma$ と $\mu \rightarrow eee$



• 基本同じ物理

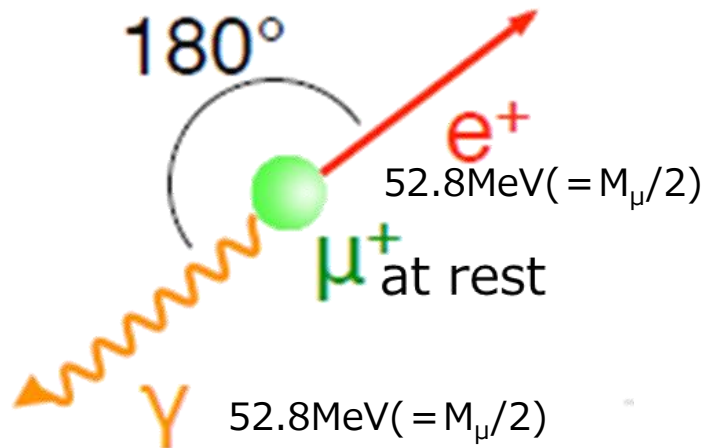
- 主に光子が媒介(SUSYなど)では、 $B(\mu \rightarrow eee)$ は $B(\mu \rightarrow e\gamma)$ の2桁落ち
- $\mu \rightarrow eee$ はそれ以外にも感度あり。
 - ✓ Z, H, H^{++}, Z' など。treeダイアグラムの寄与も。
 - ✓ $\mu \rightarrow e\gamma$ でも高次の効果で効くので感度0ではない。



BSM探索において相補的

$\mu \rightarrow e \gamma$ と $\mu \rightarrow e e e$

相違点

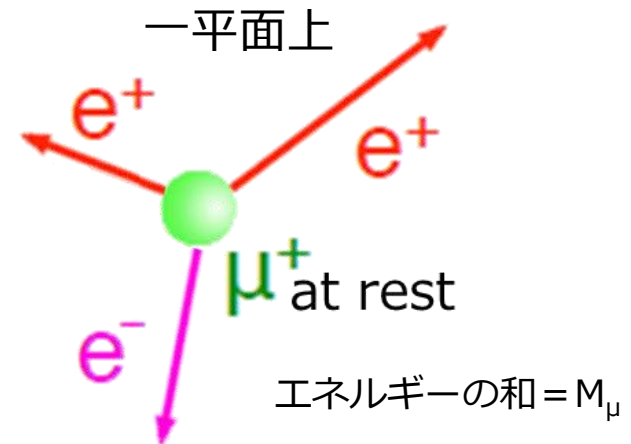


2体崩壊

- シグナルが明瞭
- アクセプタンス(立体角・運動量)が稼ぎやすい

中性粒子 (γ)

- 高精度・高効率検出が難しい
- 方向が再構成できない
- 崩壊点のマッチがとれない



3体崩壊

- 信号Kinematicsがモデル依存
- アクセプタンス(立体角・運動量)を稼ぐのが大変
- より厳しいコインシデンス

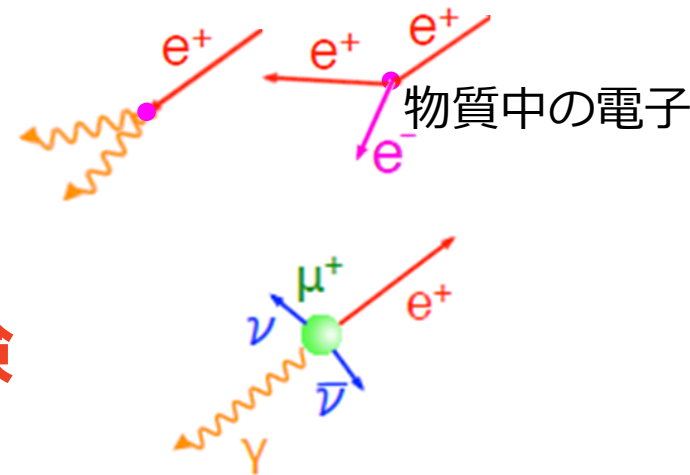
荷電粒子only

- 高精度測定
- 3粒子とも運動量ベクトルを再構成できる
- 信号Kinematicsがモデル依存
- 崩壊点のマッチも見れる

$\mu \rightarrow e \gamma$ と $\mu \rightarrow e e e$

共通点

- **物質量を極限まで減らす(検出器・ターゲット)**
 - 低運動量領域($O(10\text{MeV})$) $\Rightarrow$ 多重散乱で測定精度が制限。
 - 余分なBGの発生を抑える。
 - e^-e^+ 対消滅からのガンマ線や、Bhabha散乱による e^+e^- 対
- **複数の粒子のcoincidence実験**
 - 多変数でphysics BGを抑制
 - 偶発BGが効きだすところまでビーム強度を上げられる
 - それぞれの粒子のsingle rate $\propto$ (瞬時的)beam rate
 - **直流ビーム**が最適！



Accidental background

$\mu \rightarrow e\gamma$ 例

$$\bullet R_{BG} \propto R_{\mu}^2 \cdot f_e \cdot f_{\gamma} \cdot \delta\omega/4\pi \cdot \delta t$$

たまたま同時
たまたまback-to-back

signal

PSI世界最強直流ミュオンビーム

High rate e^+
measurement

High
resolution γ
measurement

×

特殊勾配磁場
スペクトロメータ

液体キセノン
ガンマ線検出器

この3点が $\mu \rightarrow e\gamma$ 実験では特に重要

⇒ MEG実験

MEG実験



~60 collaborators

π E5 beamline @PSI

μ^+ beam

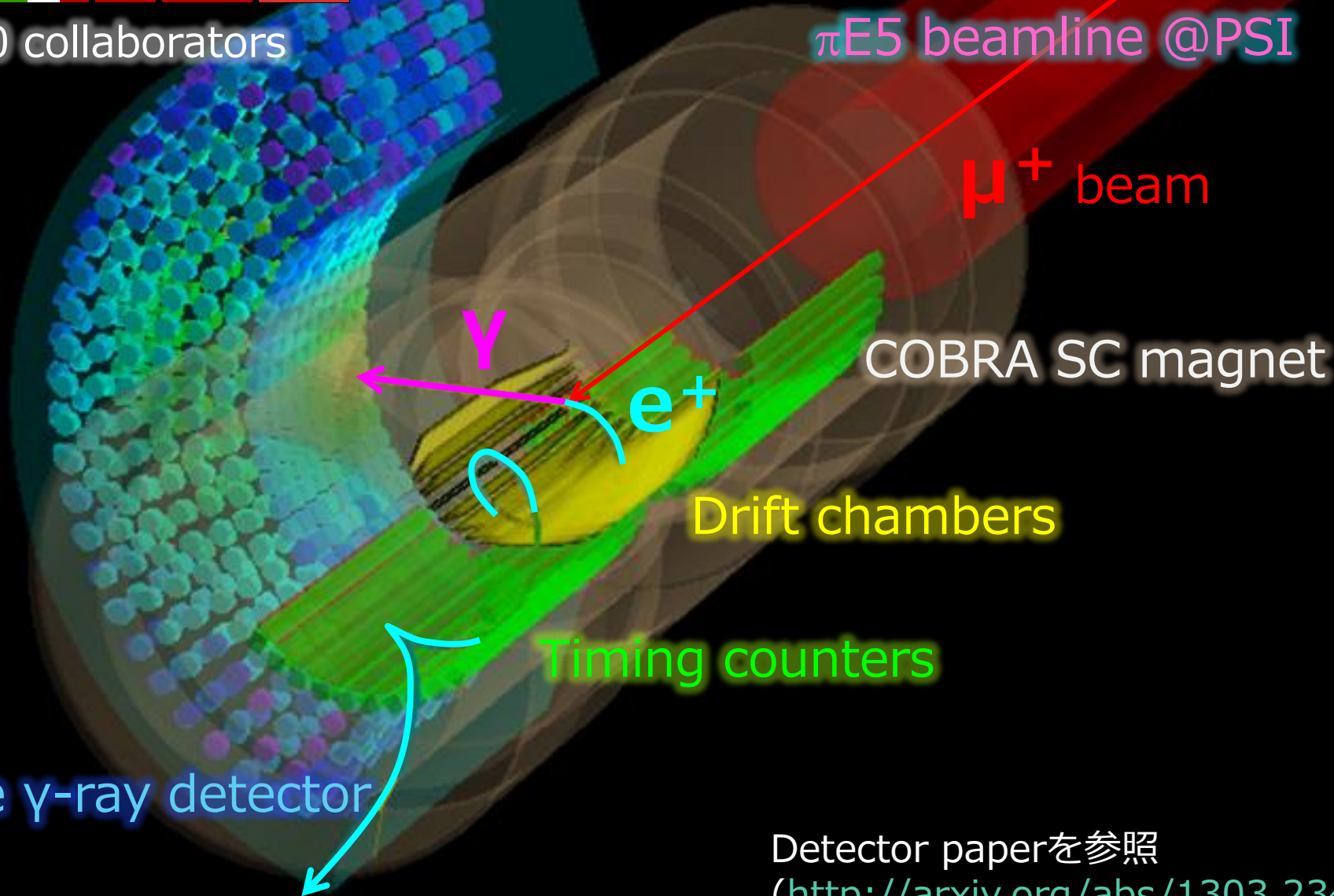
COBRA SC magnet

Drift chambers

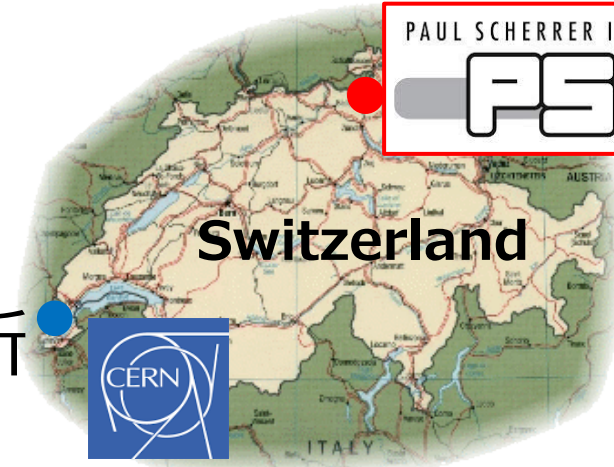
Timing counters

LXe γ -ray detector

Detector paperを参照
(<http://arxiv.org/abs/1303.2348>)



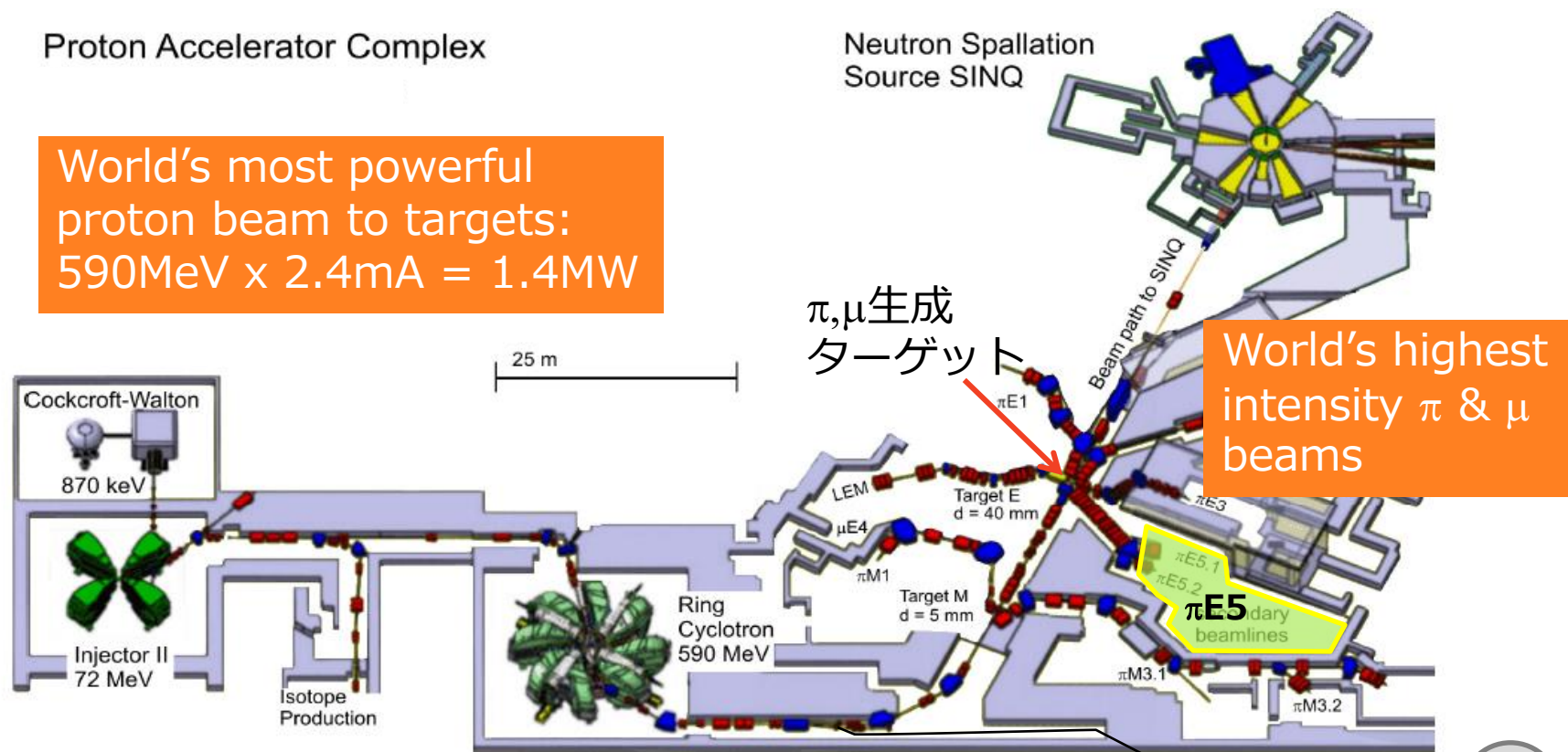
- Paul Scherrer Institut
– スイス最大の国立科学研究所



Proton Accelerator Complex

World's most powerful
proton beam to targets:
 $590\text{MeV} \times 2.4\text{mA} = 1.4\text{MW}$

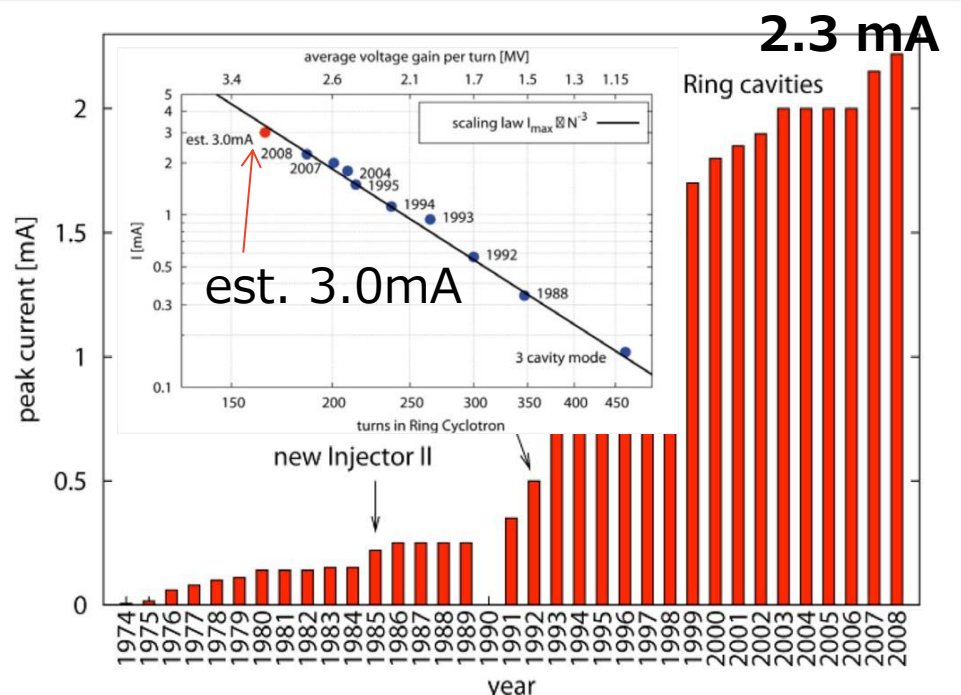
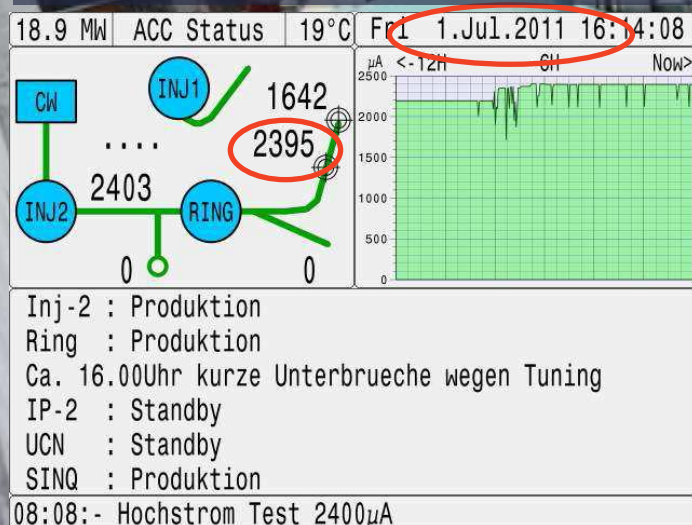
Neutron Spallation
Source SINQ



World's highest
intensity π & μ
beams

Ring Cyclotron

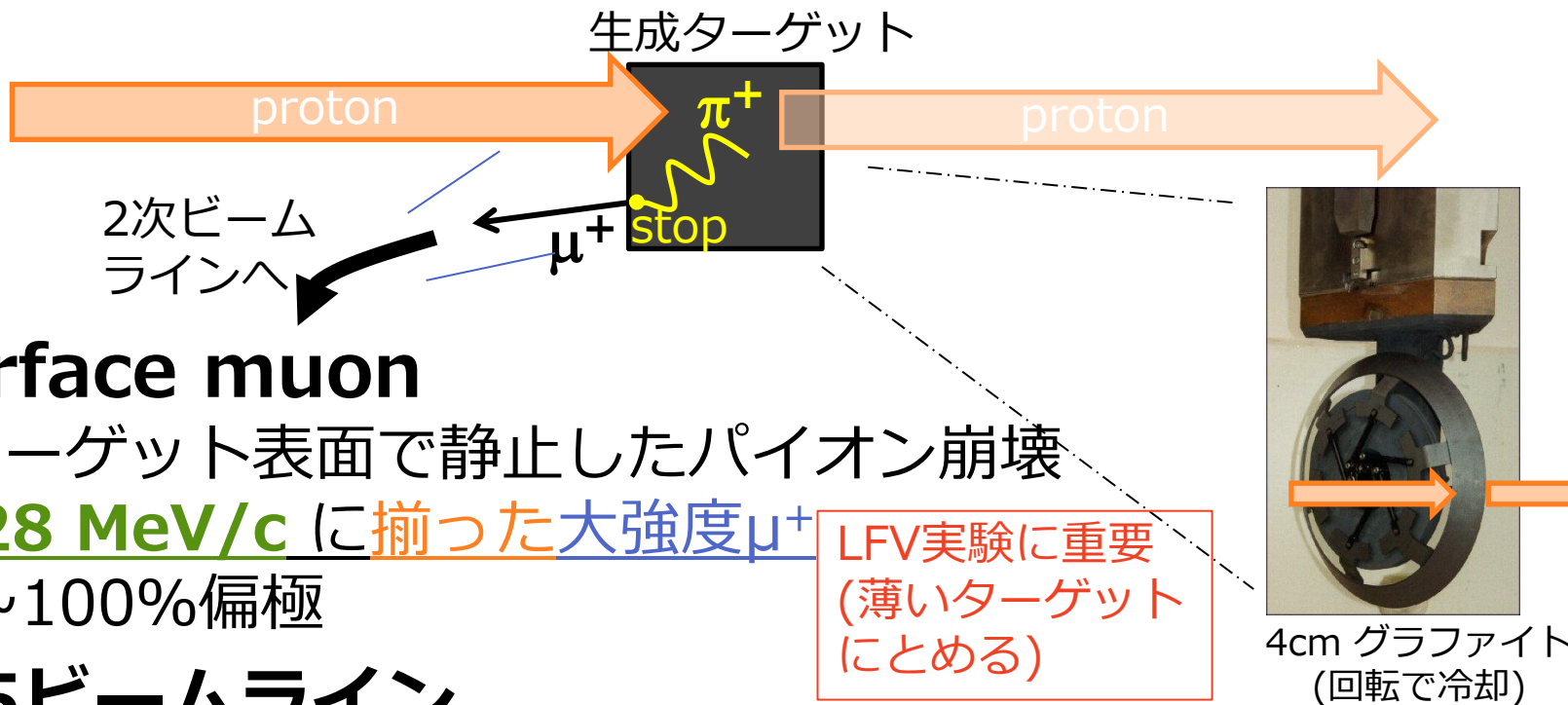
1.4 MW



陽子を590MeVまで加速
周波数: 50.6 MHz
μ寿命に対して十分早い
≡ 直流ビーム

来年40周年を迎える。
未だバリバリ現役。増強中

ミューオン生成



• Surface muon

– ターゲット表面で静止したパイオン崩壊

- **28 MeV/c** に揃った大強度 μ^+
- $\sim 100\%$ 偏極

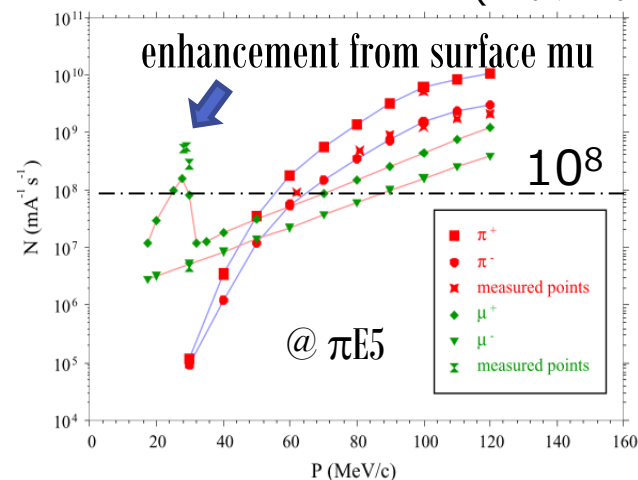
• π E5ビームライン

- 世界最大強度のsurface μ^+ ビームを供給
- up to a few $10^8 \mu^+/\text{sec}$

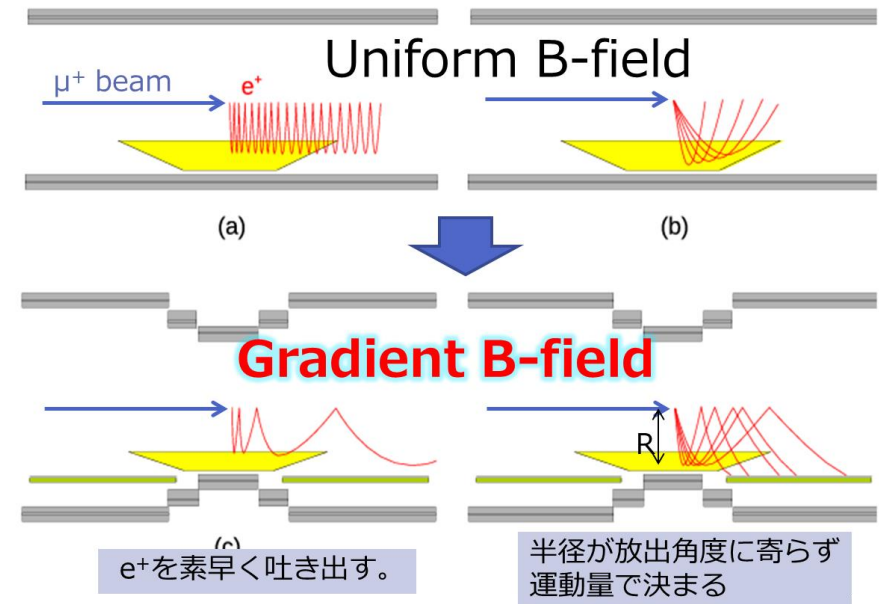
LFV実験に重要
(薄いターゲットにとめる)

4cm グラファイト
(回転で冷却)

現状、実験サイトは一意に決まる



e^+ スペクトロメータ

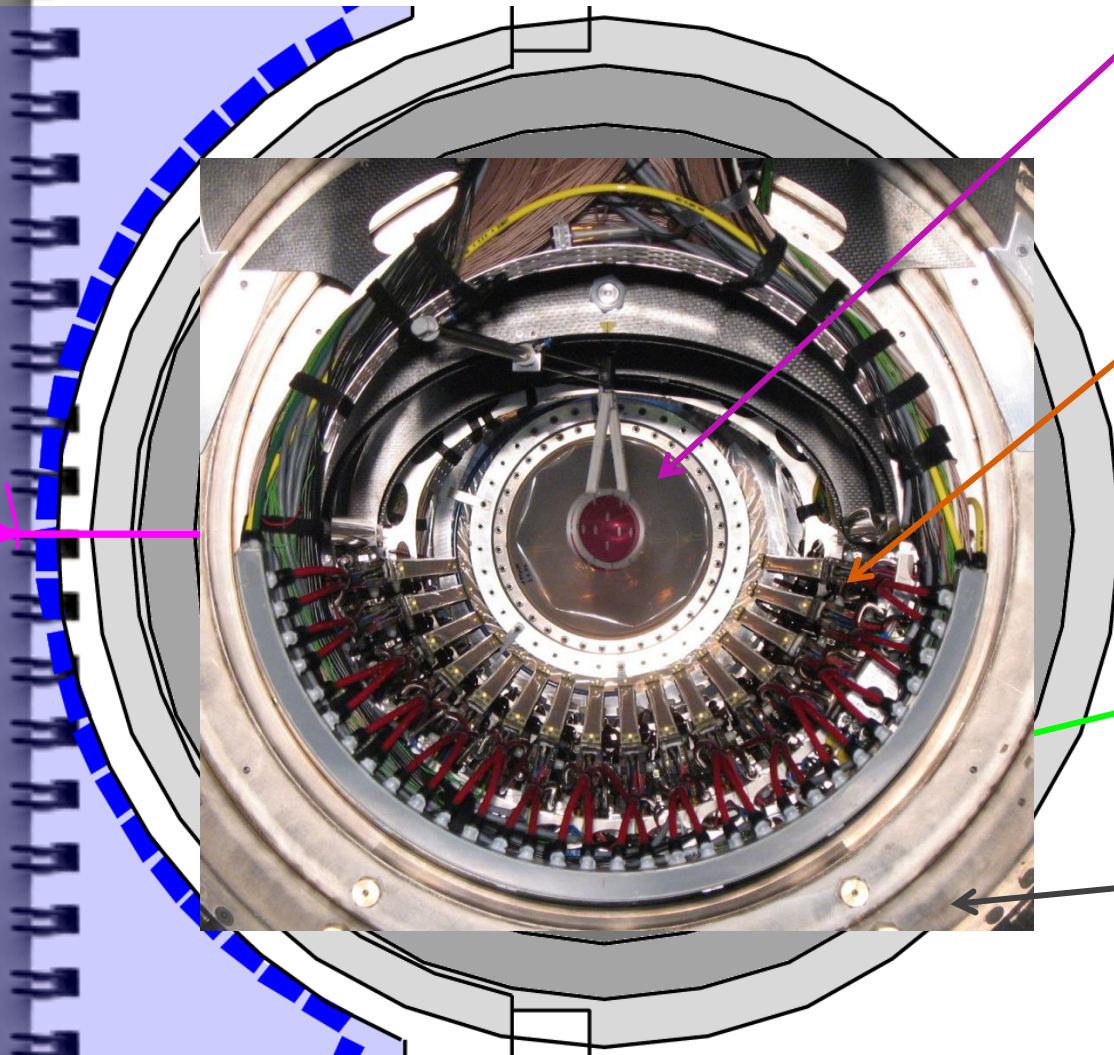


特殊な勾配磁場を形成

- ステップ構造の超伝導コイル
- 1.3T(中心) $\Rightarrow$ 0.5T(端)

KEK・東大の経験・アイデア
日本企業の超伝導技術

e⁺スペクトロメータ



静止ターゲット

- $3 \times 10^7 \mu^+/\text{sec}$ を薄いターゲットに止める
- 205 μm 厚ポリエチレン

軽量ドリフトチェンバー

極薄

- 16枚のモジュール
- 12.5 μm 厚カソードフォイル
- He:ethane=50:50
- 全体はヘリウムガス
- $\sim 2 \times 10^{-3} X_0$ for e⁺ trajectory

タイミングカウンタ

- プラスチックシンチレータ

マグネット

- ガンマ線を透過させるため薄い(0.2 X_0)超伝導コイルを使用

ガンマ線検出器

900L 液体キセノン シンチレータ

高性能

- 高い密度 ($X_0=2.8\text{cm}$) $\Rightarrow$ 高検出効率
- 高発光量・早い応答 $\Rightarrow$ 高分解能
- 一様性・純化可 $\Rightarrow$ 大型化

挑戦

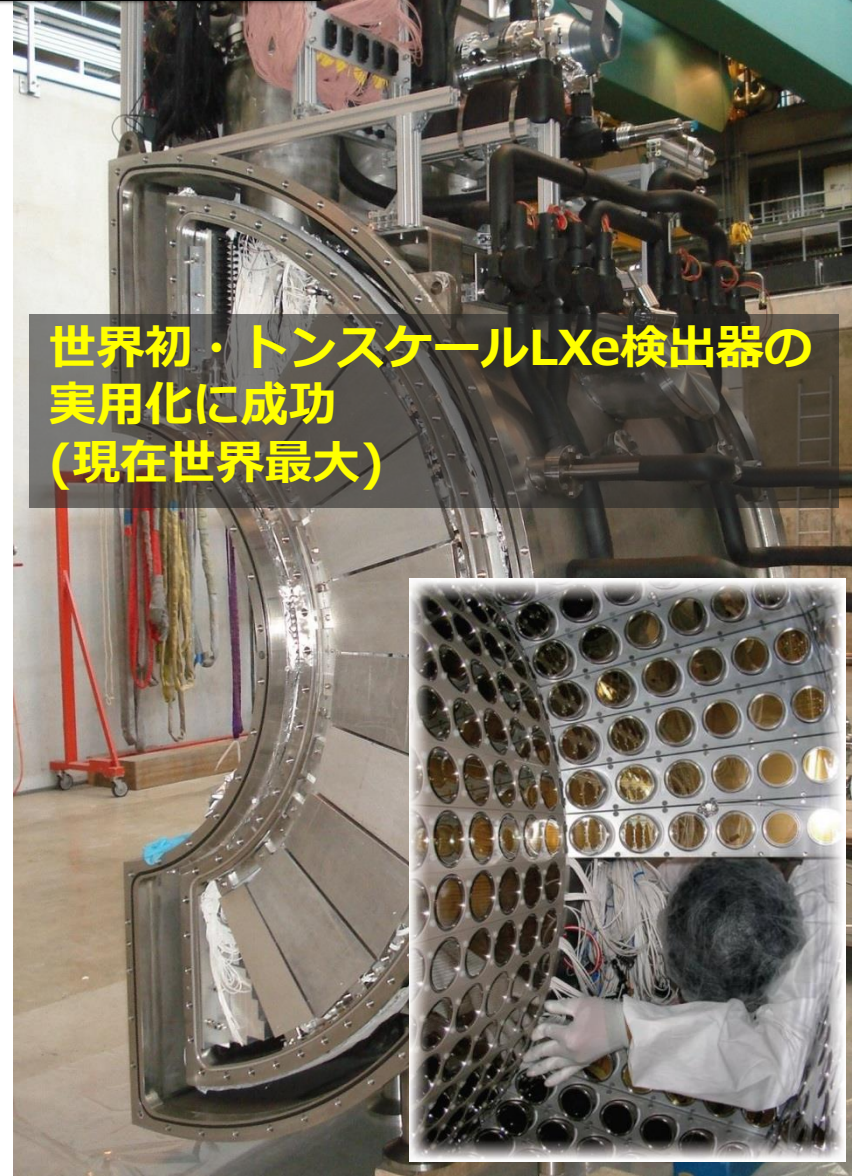
- 真空紫外光 (178nm)
- 低温 (165K)
- 高純度

達成分解能 (@52.8MeV)

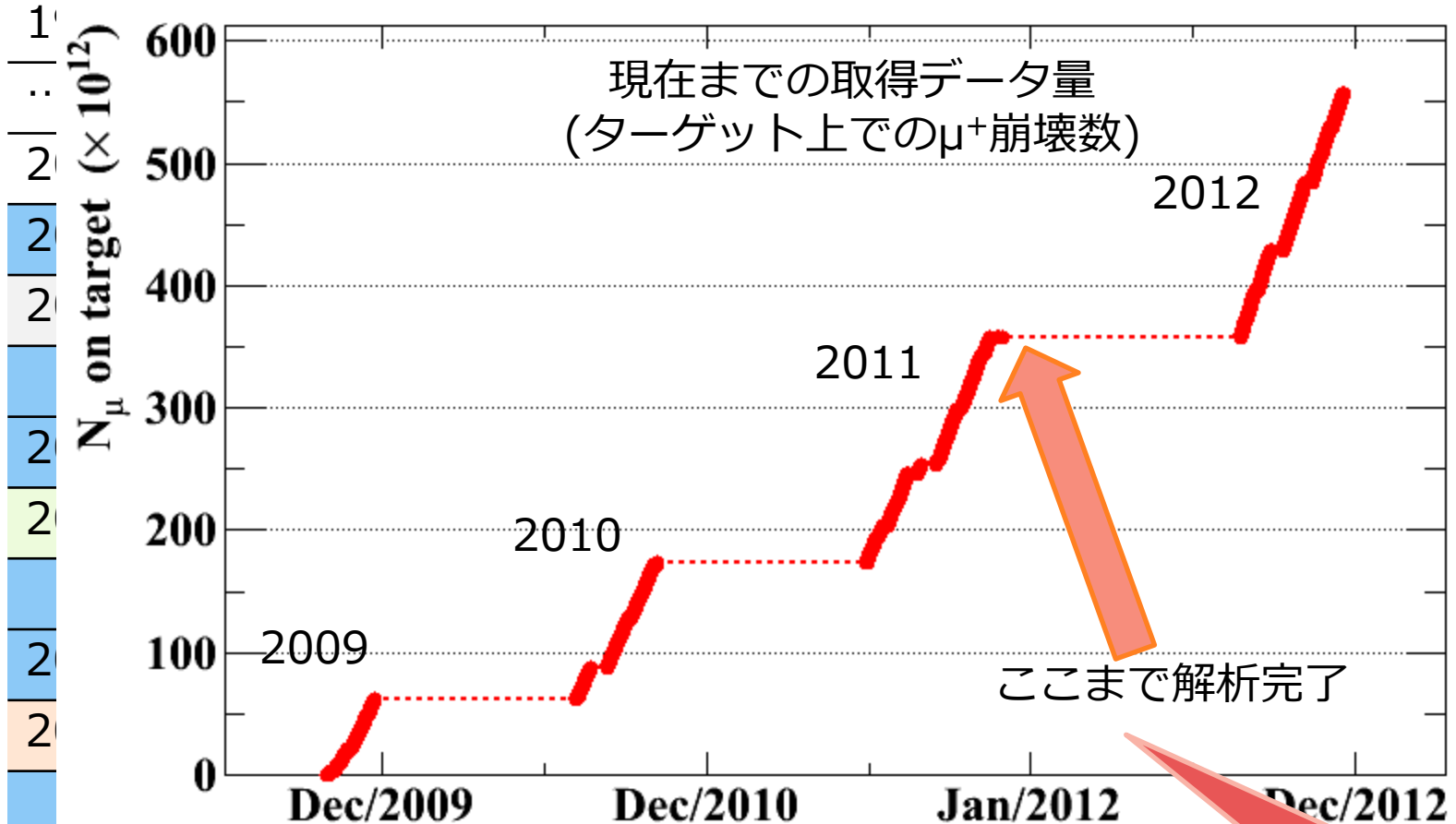
- $\sigma_E/E = 1.7\%$
- $\sigma_t = 67 \text{ ps}$
- $\sigma_x = 5\text{--}6 \text{ mm}$

東大・早稲田・KEKのパイオニア的研究
日本企業の光検出器技術

世界初・トンスケールLXe検出器の
実用化に成功
(現在世界最大)



MEGの歩み



準備に10年
DAQ、5年

New!

3rd result (2009–11 data)

([arXiv:1303.0754](https://arxiv.org/abs/1303.0754))

This talk

What's new?

改良

解析アルゴリズムの改善

- e^+ : トラッキングコード刷新
- γ : 波形を使ったpileup除去の導入
- 2009-2010データの再解析
 - ✓ 合計、20%のsensitivity改善

詳しくは
29pRC02:藤井
のトークを

倍増

2011データ

- 統計量2倍 : 2011 = 2009+2010
 - ✓ DAQ efficiency改善: 72→96%
- ハードウェア改良
 - ✓ LXe検出器の較正デバイスの改良
 - NaI→BGO for $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 較正
 - より良い較正、エネルギースケール・分解能の見積もり
 - ✓ e^+ スペクトロメータの光学計測の改良(アライメント)
 - 角度測定的不定性軽減

感度

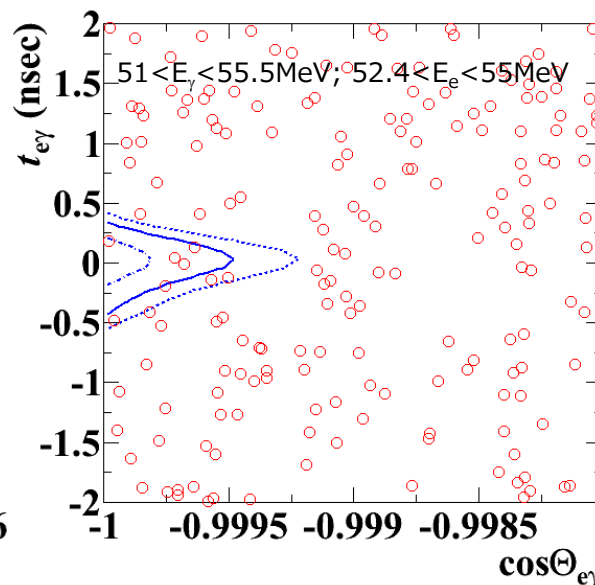
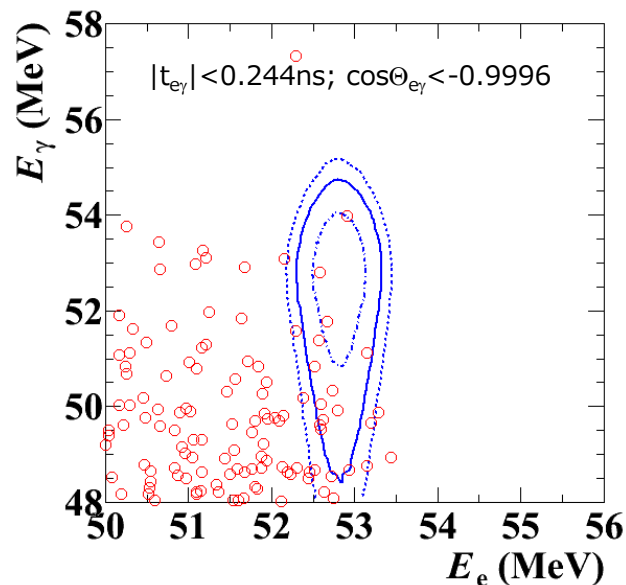
Combined analysis 2009-2011

- Sensitivity(期待90%UL): 7.7×10^{-13}
- 倍の感度で探索

2倍

2009–2010 data

• まず2009–2010再解析データを見た



Best fit

$$N_{\text{sig}} = 0.3$$

$$\mathcal{B} = 8.9 \times 10^{-14}$$

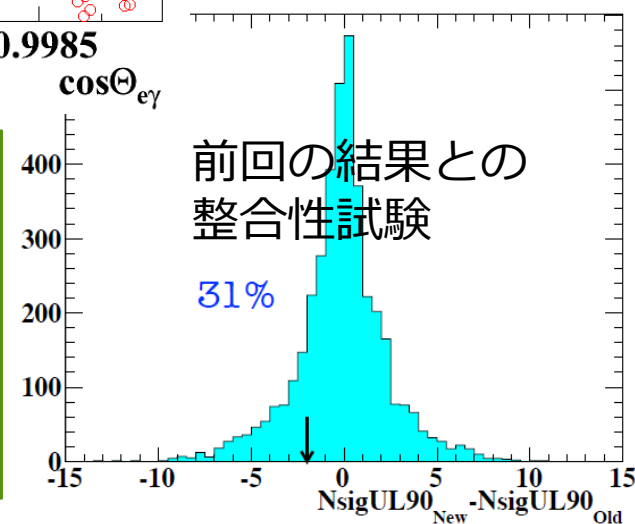
Consistent with
null signal

Limit

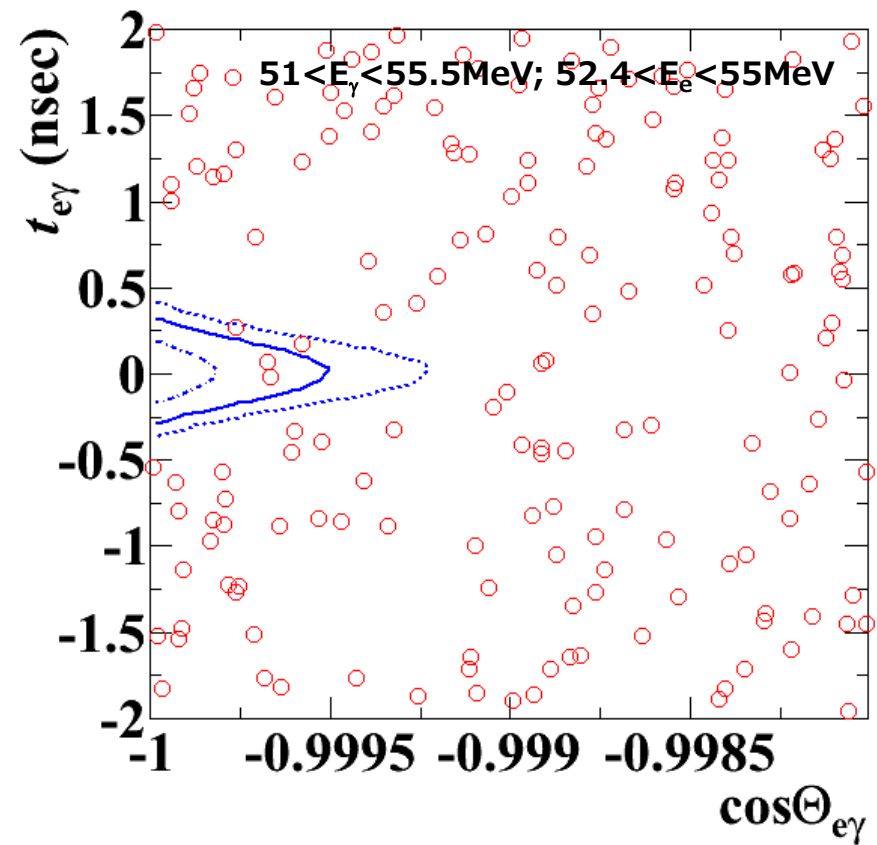
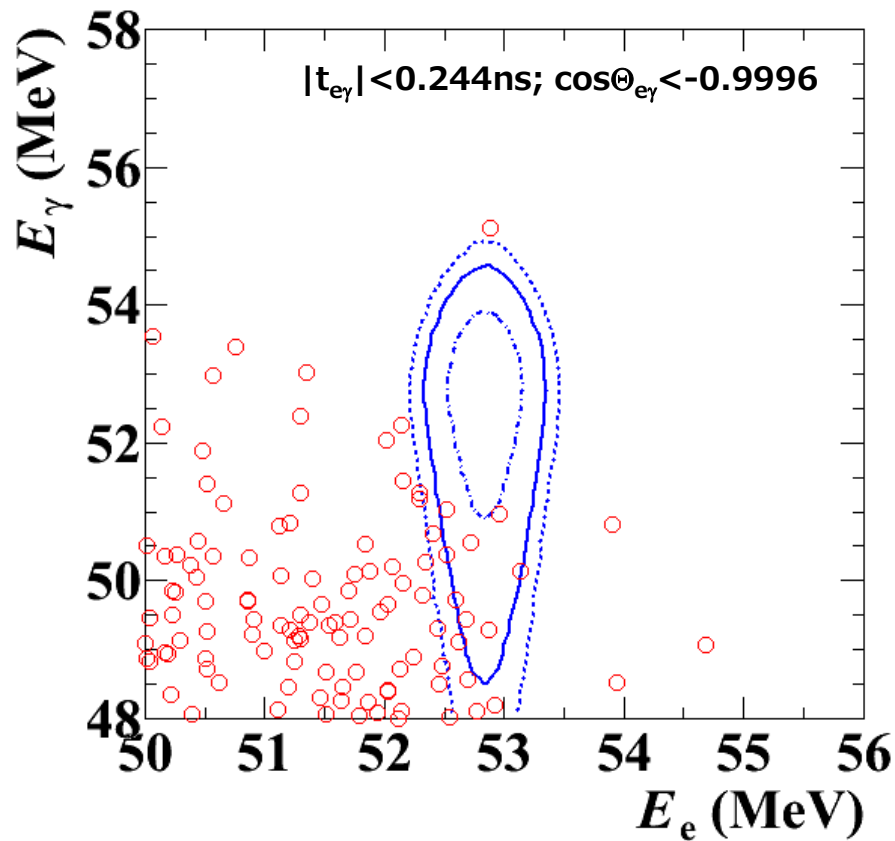
$$\mathcal{B} < 1.3 \times 10^{-12}$$

(@ 90% C.L.)

Consistent but
tighter UL

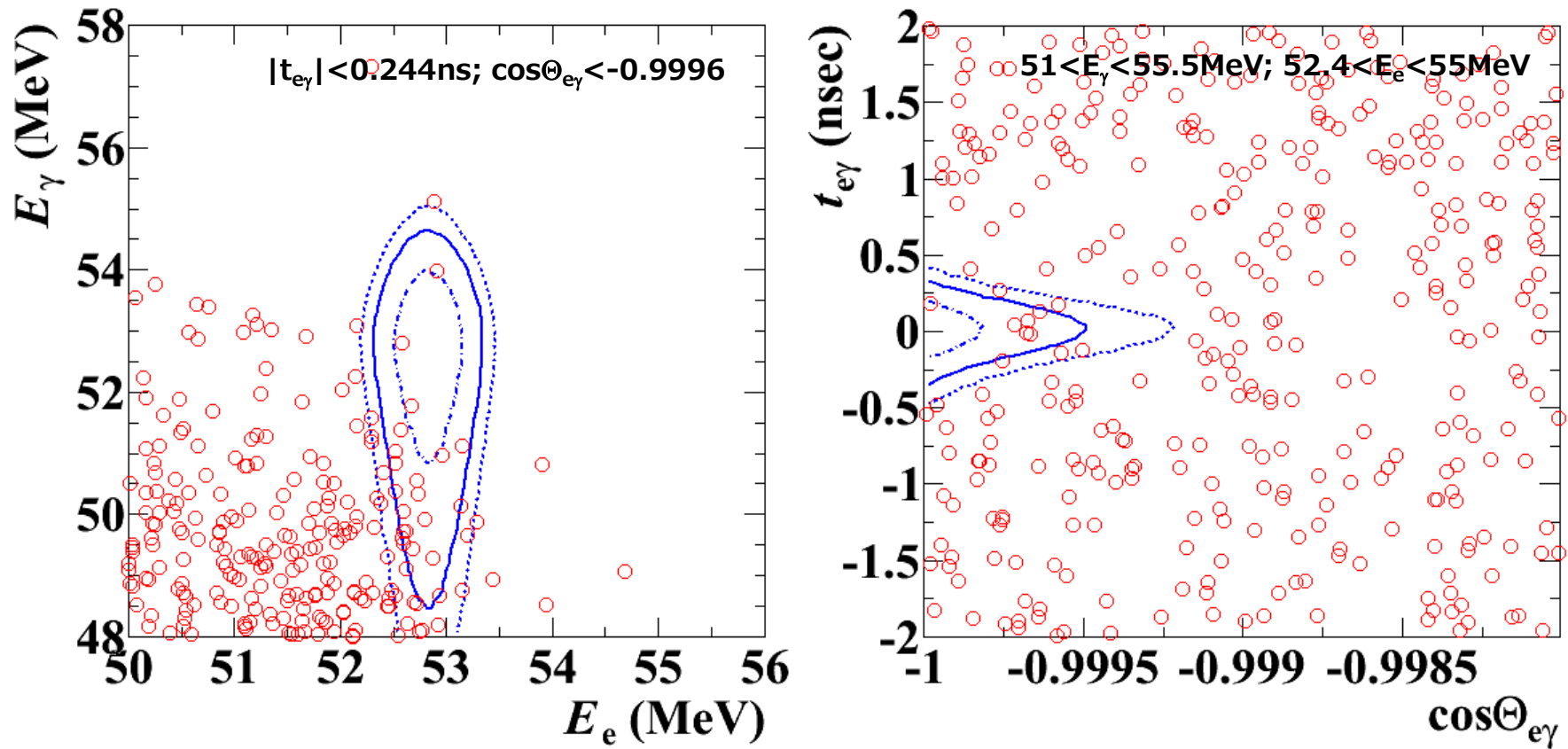


2011 data



2009-2011 data

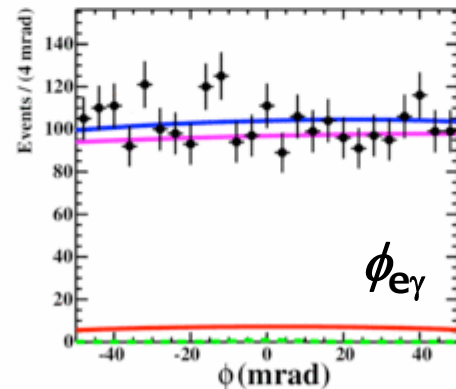
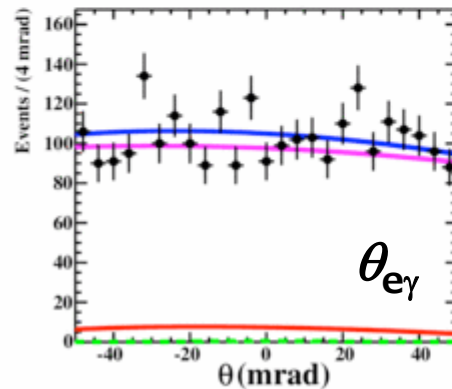
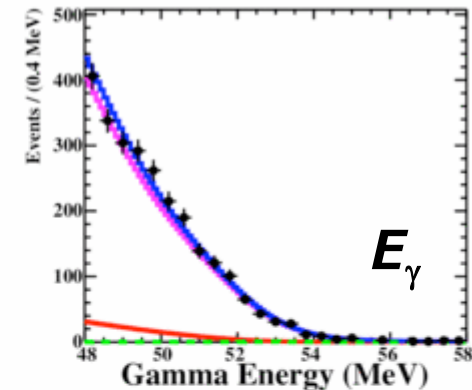
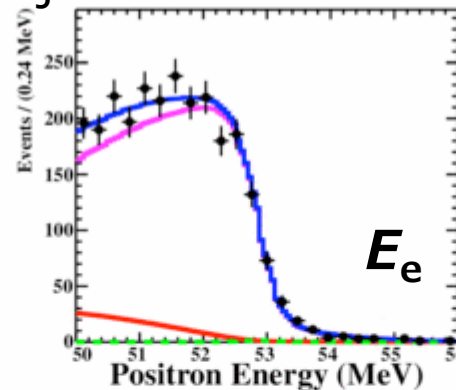
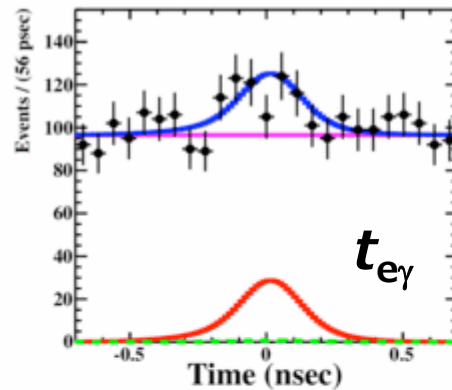
全部合わせると



イベントの超過はみられない。

Likelihood fit

Projected distribution



— ACC (best fit)
 — RMD (best fit)
 — Signal (best fit)
 — Total

Best fit

$$N_{\text{sig}} = -0.4$$

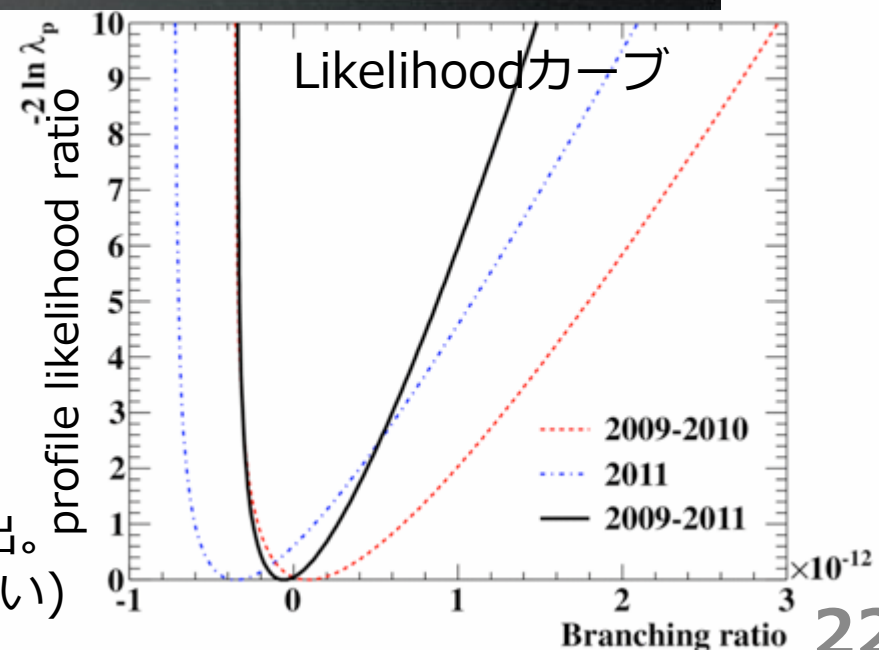
$$\mathcal{B} = -5.8 \times 10^{-14}$$

- BG onlyとコンシステント

結果

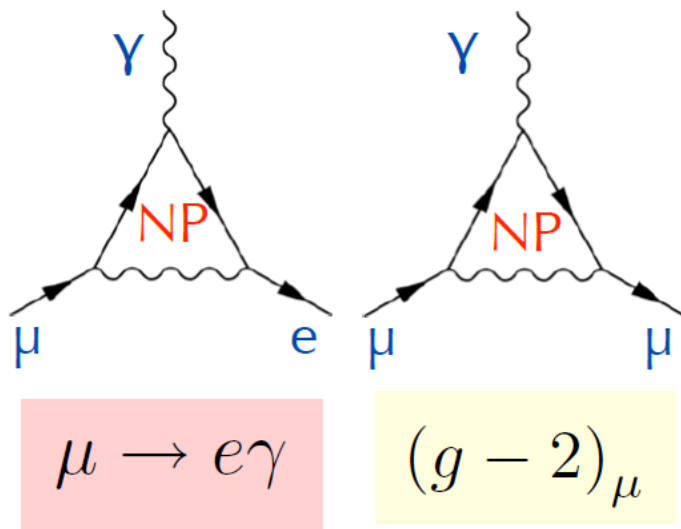
	BR(fit)	90% UL	sensitivity
2009+2010	0.09×10^{-12}	1.3×10^{-12}	1.3×10^{-12}
2011	-0.35×10^{-12}	0.67×10^{-12}	1.1×10^{-12}
2009-2011	-0.06×10^{-12}	<u>0.57×10^{-12}</u>	0.77×10^{-12}

- 前結果よりさらに4倍
厳しい上限値が導かれた。



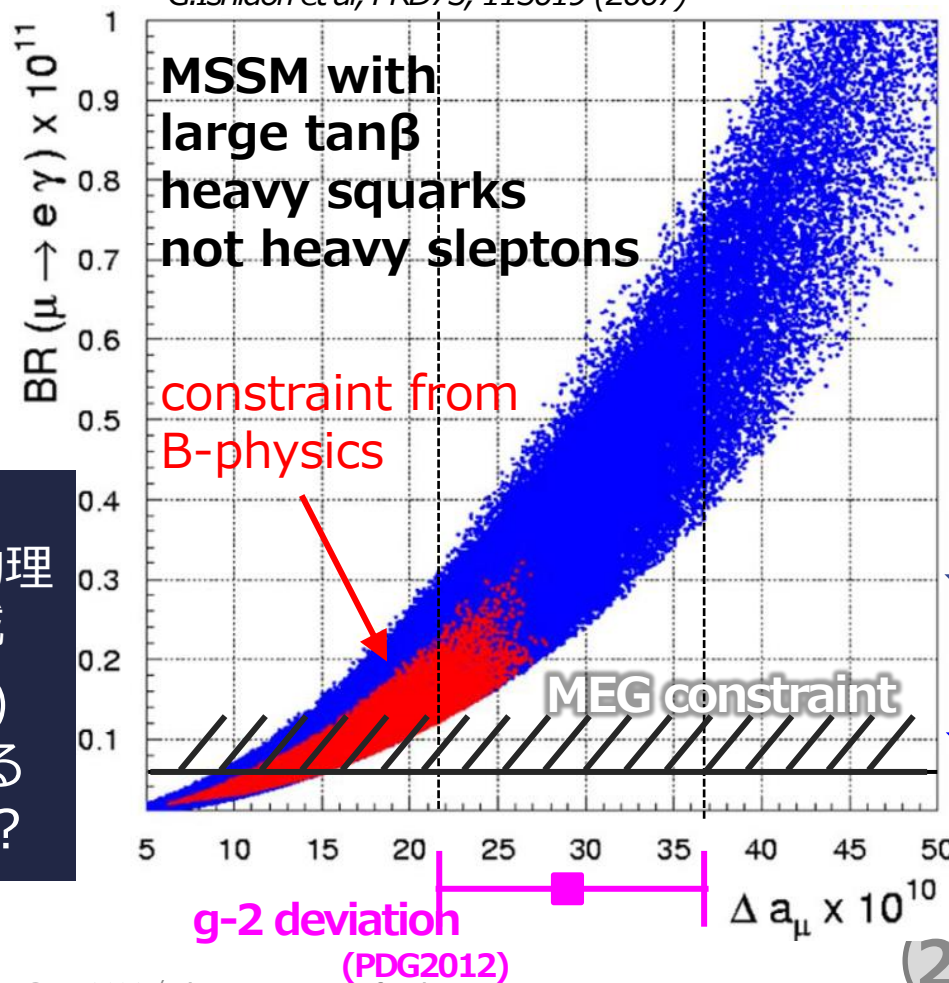
※ULはfrequentist的に導出。
(likelihood curveは直接は使っていない)

$g-2$ との関係



似たダイアグラム。同じ物理が寄与。
一般的に強い相関。

G.Ishidori et al, PRD75, 115019 (2007)

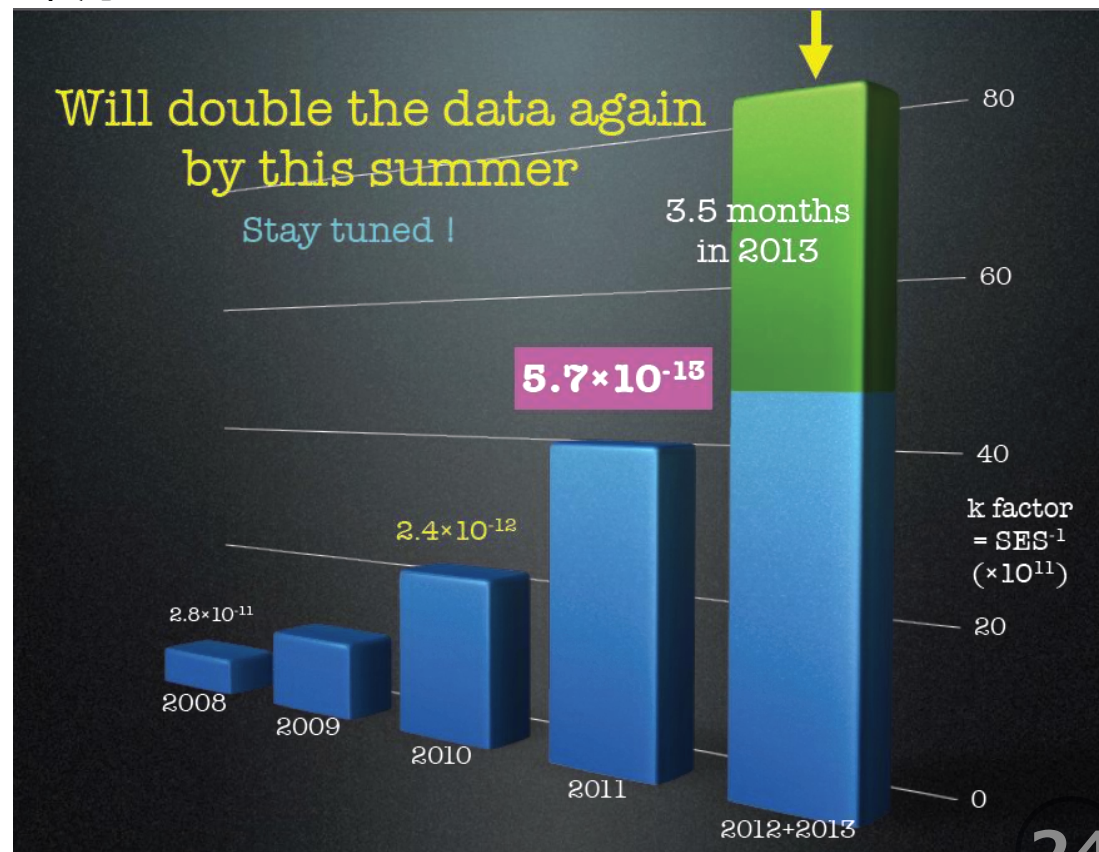
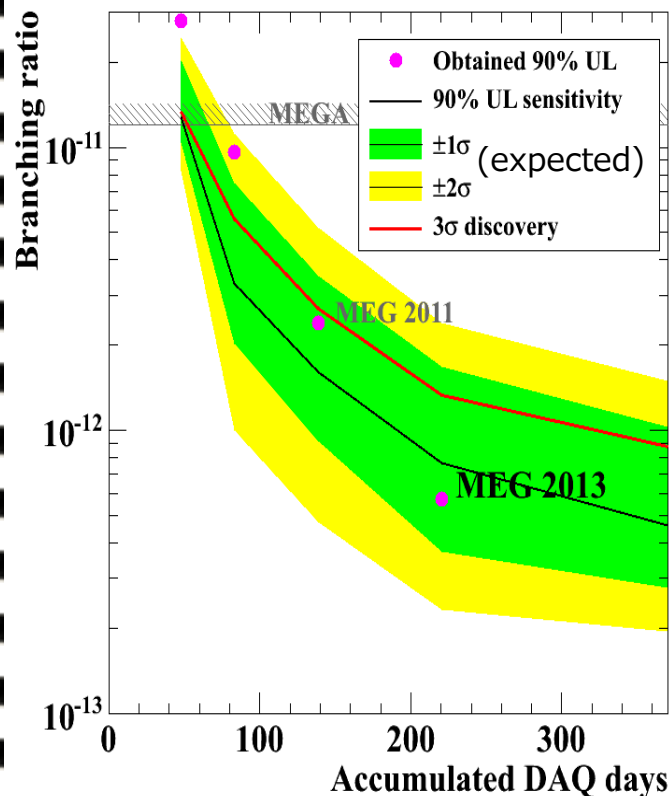


LHCとは独立にBSMに強い制限。
□ カラードセクターでは見えない物理
□ LHCでは到達できない高エネ領域
($g-2$ がBSMを見ているならば、)
新物理はフレーバを強く保護する
巧妙な仕組みを持つことを示唆!?

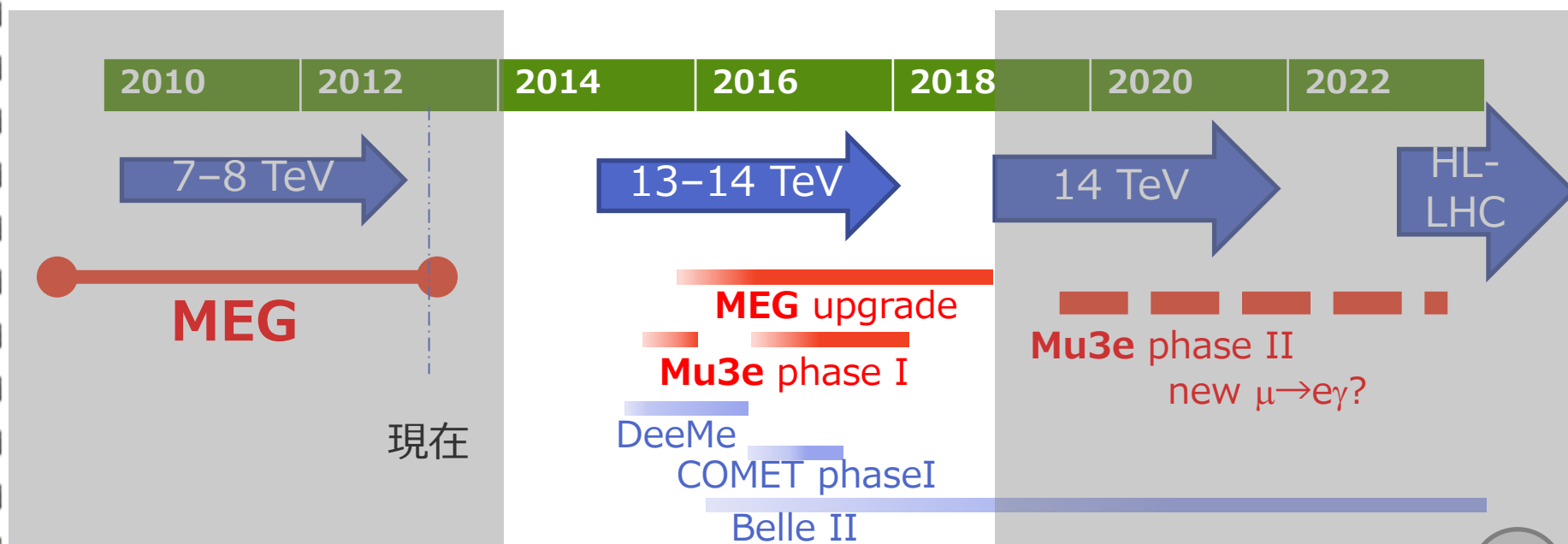
今後の見込み

- 2012年データ取得済み
 - 15%高いビームレイト
- 今年8月までデータ収集
 - データ量さらに倍
 - 10^{-13} 台半ばでの探索をさらに進める
 - 感度向上がなまる⇒MEG-I終了。

LHC13TeVの最初の結果が始める時点での、cLFVからの最高のインプットとなる



近い将来の計画 (~5年)



MEGアップグレード

目標 設定

一桁感度を伸ばすことは重要 ⇒ 目標感度

- 超対称大統一理論などで興味深い
- 次世代実験に匹敵

$\sim 5 \times 10^{-14}$

時間

5年程度の時間スケール

- LHCでの革新に遅れをとらない
- 次世代実験より早く

堅実に

- MEGの経験
- MEGのConceptはそのまま
- 全く新しい技術・実験原理ではなく、
- 確立した(でも新しい)技術の応用で立ち向かう

低予算 ・ 早期実現

- 既存装置の活用
 - ✓ beam line, LXe, magnet, etc
- 協力体制・信頼関係の築かれたチーム

MEGアップグレード

• どうやって？

統計
>10倍

- 2-3倍のビームレイト
 - ✓ 現ビームライン π E5で可能
- 2倍の検出効率
 - ✓ 現検出器(特に e^+ サイド)の大幅な損失を改善
- ビームタイムの効率使用

可

必須
要件

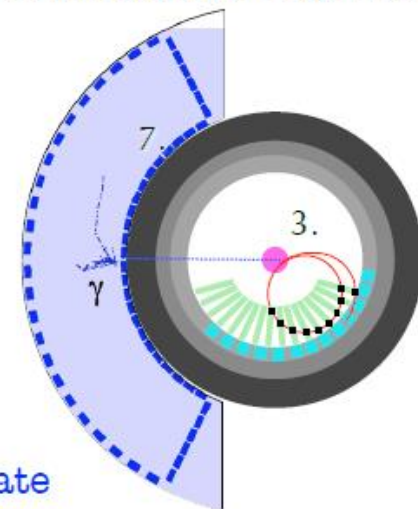
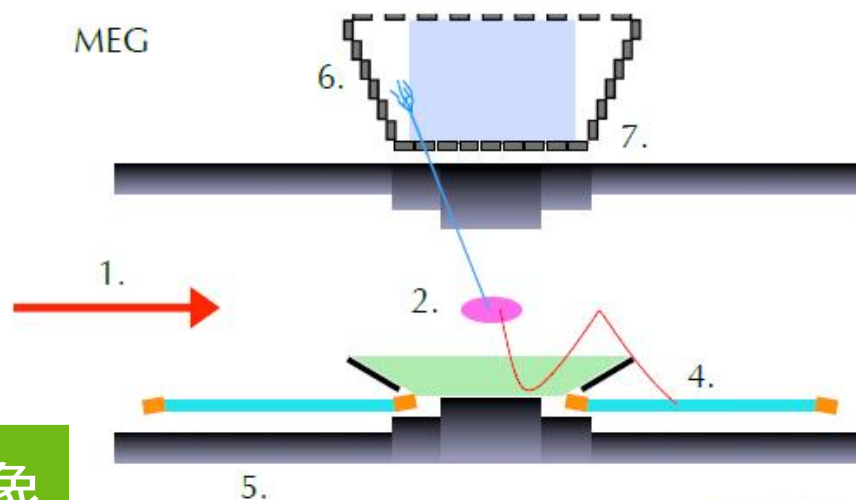
挑

- 高レイトで安定に動く検出器
- 増倍するBGの抑制 $10\text{倍統計} \times 3\text{倍レイト} = 30\text{倍BG}$
 - $(e^+\text{運動量で}2) \times (\gamma\text{エネルギーで}2) \times (\text{角度で}2)^2 \times (\text{時間で}2) = 32$
 - BG生成自身を減らす。
 - ✓ より薄いターゲット・トラッカー
 - 放射崩壊や対消滅事象の積極的ヴェト法を考える

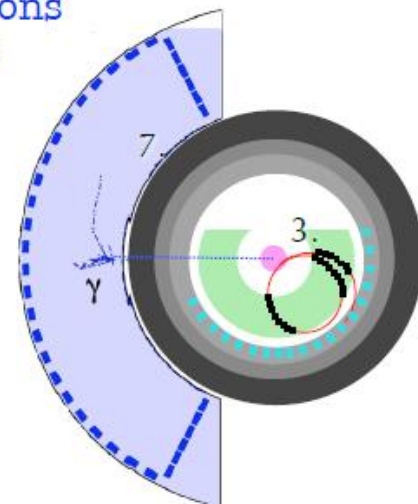
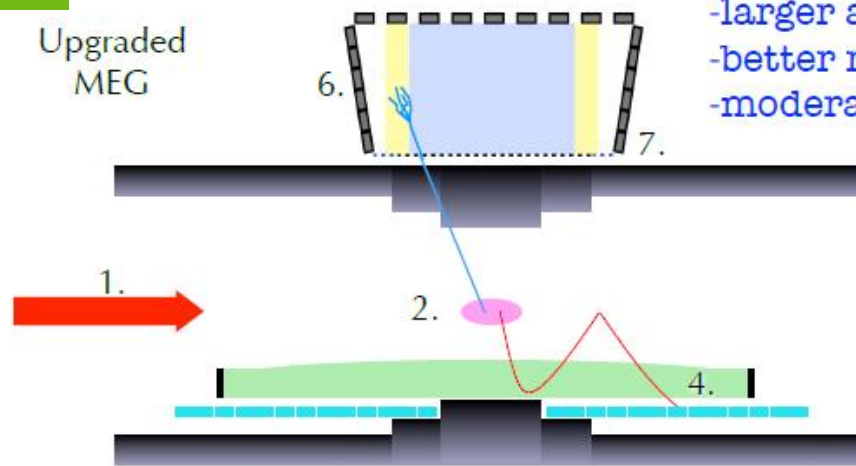
MEGアップグレード

upgrade design based on
our long time experience

全体像



-higher beam rate
-larger acceptance
-better resolutions
-moderate cost



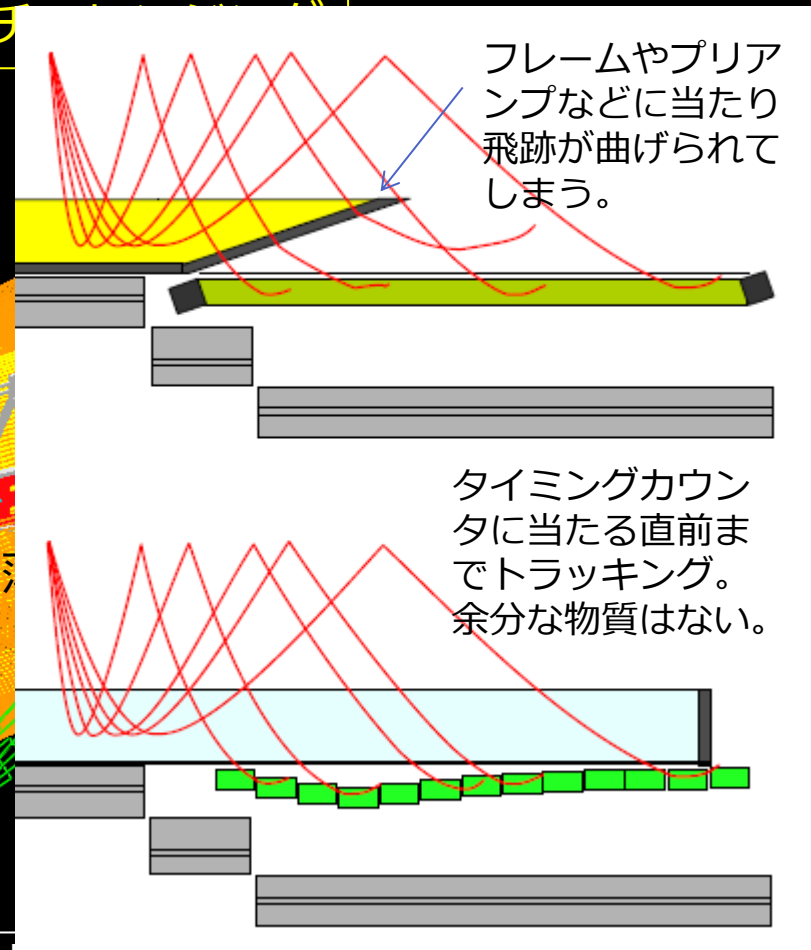
MEG Upgrade Proposal
(<http://arxiv.org/abs/arXiv:1301.7225>)

New トラックカー

単一ボリウムステレオワイヤー・ドリフトチェンバー

- ・ 高レイト耐性・持久性
- ・ 小さなセルでヒット数・分解能向上
 - 1200センスワイヤー
 - 130 μ m hit resolution
- ・ 長く単一ボリウムでTCへの透過性
 - 検出効率2倍に。
 - ガンマ線BGの生成を抑制
 - 飛行距離の精密測定 (時間分解能)

最も



より

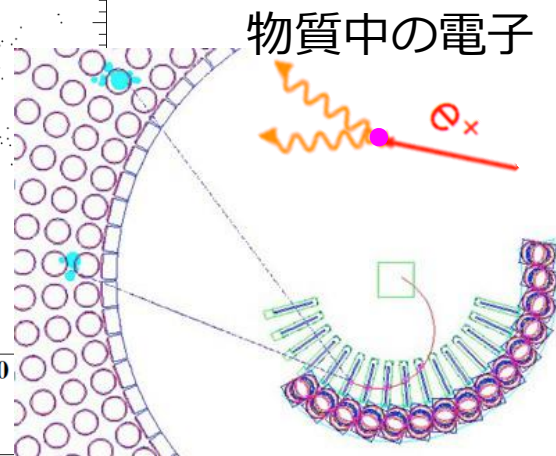
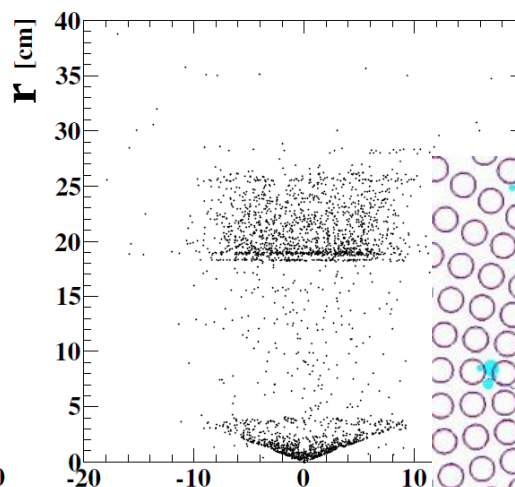
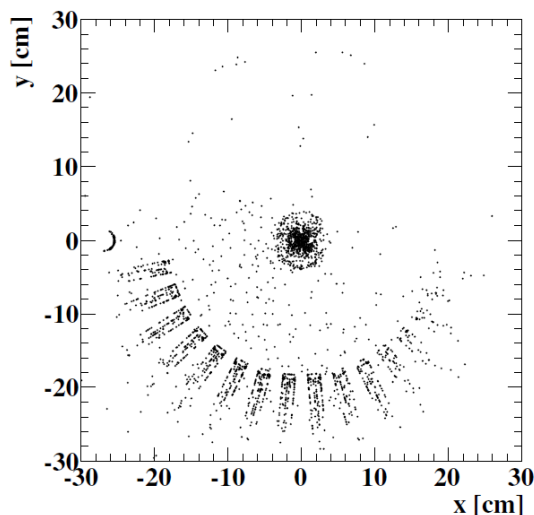
26aHC15:西村

・ 多量カウンタヒットで

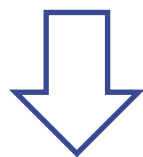
・ 期待分解能 30–35 ps

LXe検出器に20MeV以上エネルギーを落とすガンマ線の生成ポイント

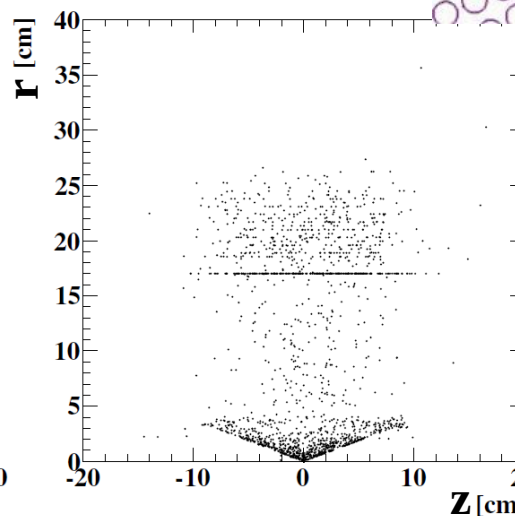
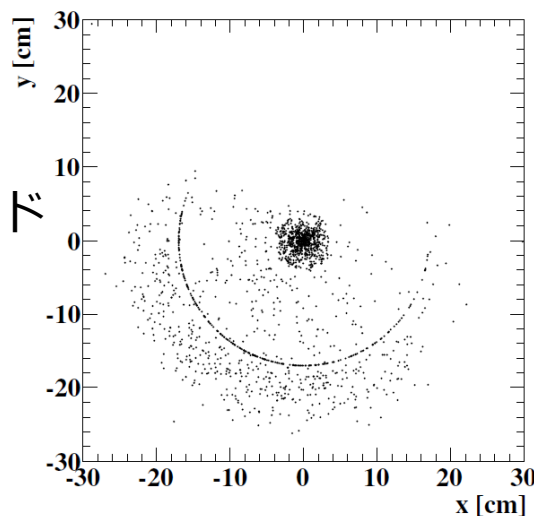
現検出器



物質中の電子



アップグレード
検出器



ガスのみのト
ラッキングボ
リューム

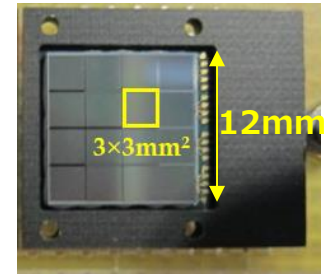
トラッカー起源の γ 線BGを半分にできる。

ガンマ線検出器

重要な読み出し部分をPMTからより
細かなSiPMに置き換える

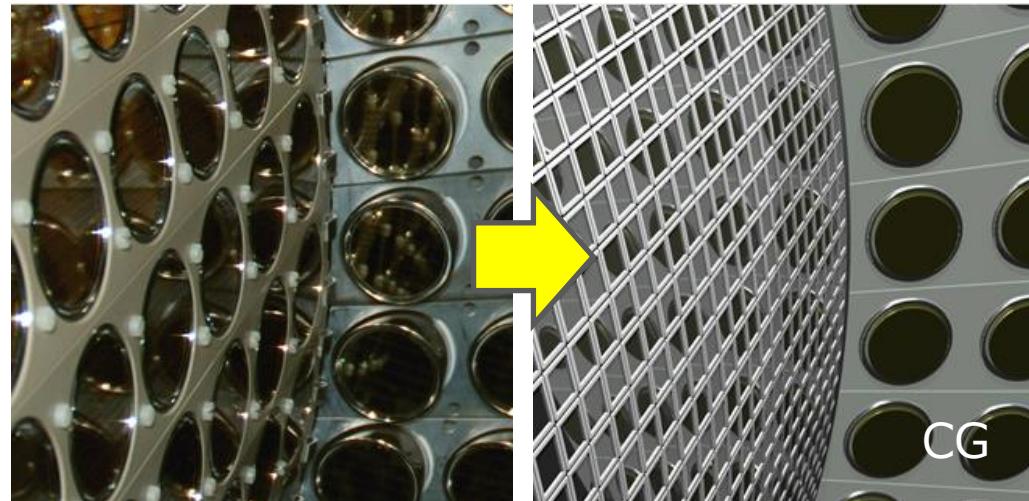
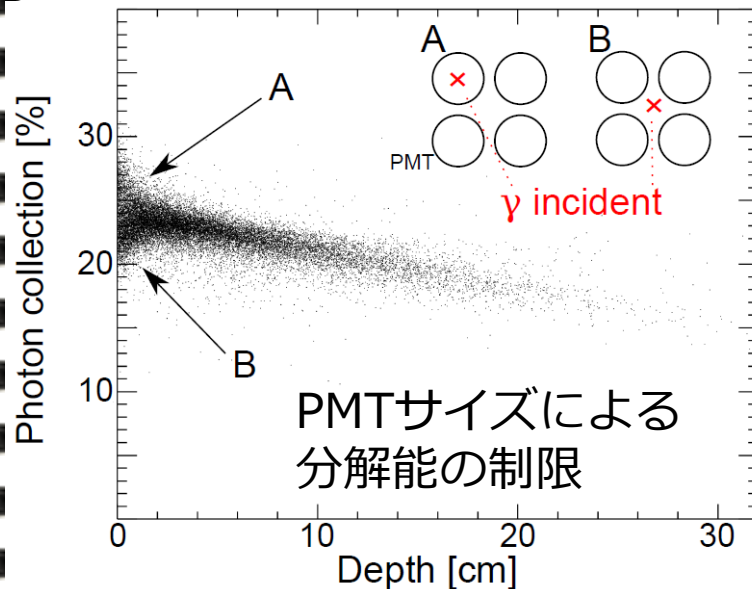
- シンチ光の収集率の一様性が上がり、
- 分解能が向上
- パイルアップ識別能力向上
- 薄いデバイスにより、検出効率改善

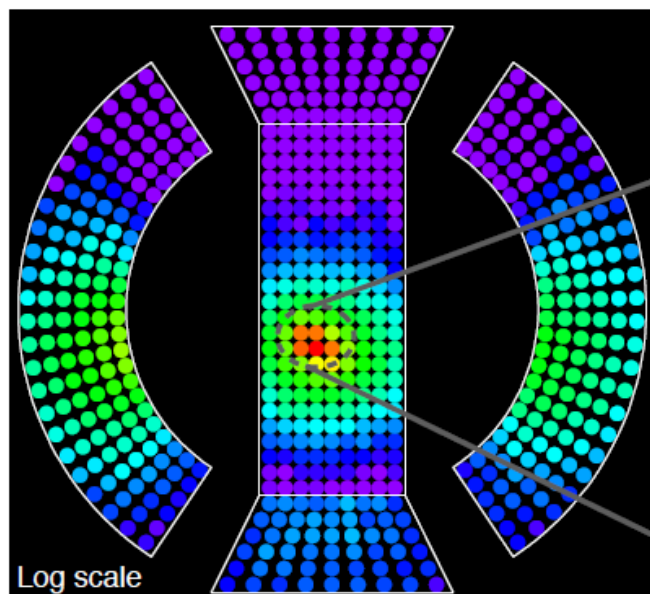
UVに感度を持つ大型SiPMを開発中



世界最大のUV有感SiPM with
1p.e. counting, >15%PDE
開発成功

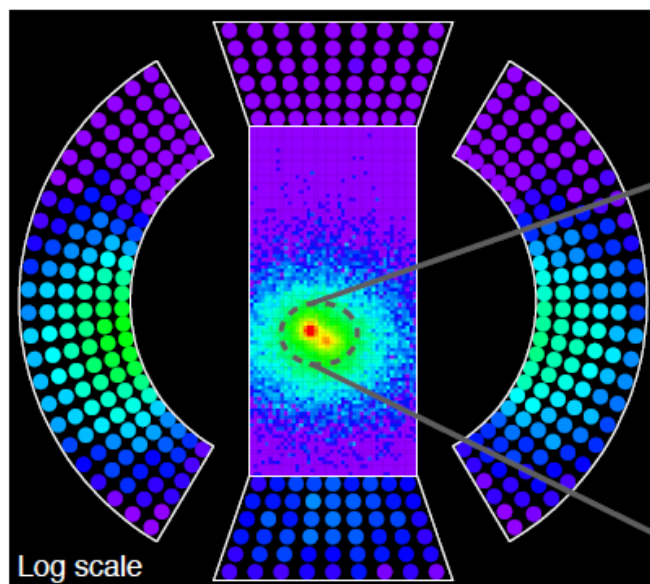
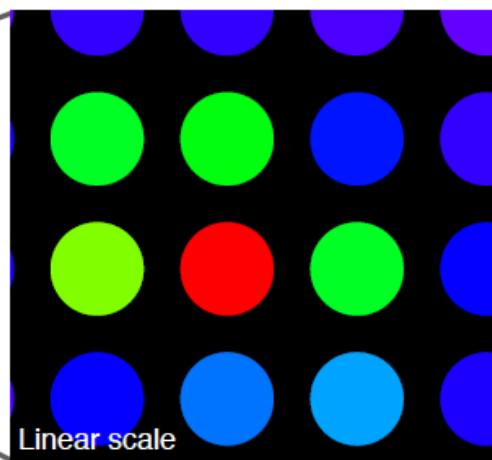
28pRF03:金子





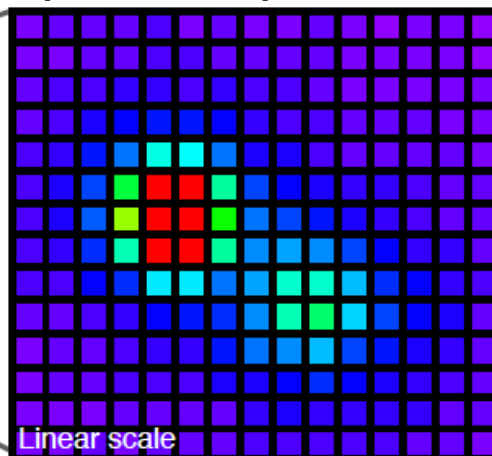
2インチPMT
(前面に216個)

pileupイベント
(28 + 25 MeV)



12mm角SiPM
(~4000個)

相互作用のイメージング能力Up



Where We Will Be

TABLE XI: Resolution (Gaussian σ) and efficiencies for MEG up

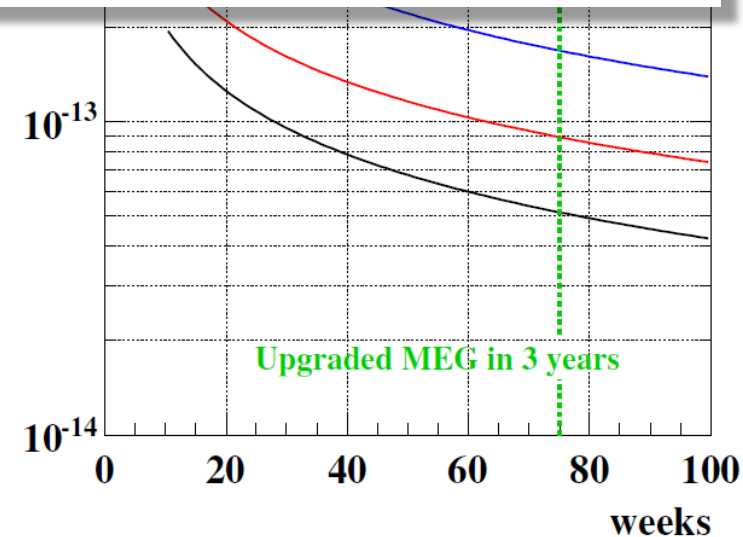
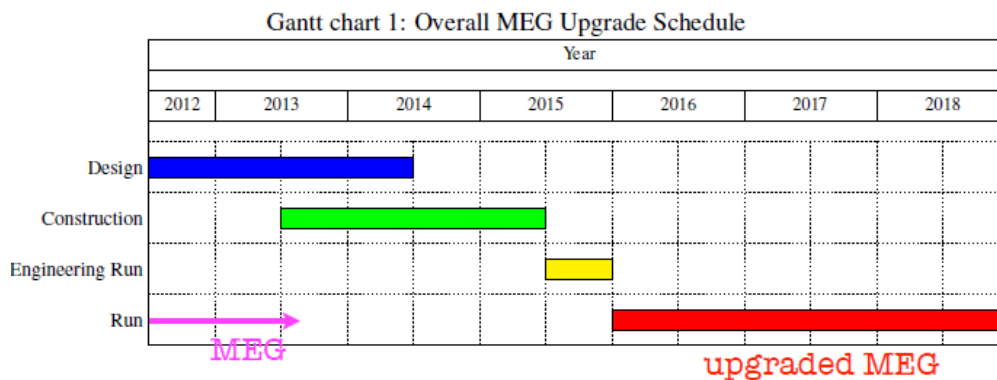
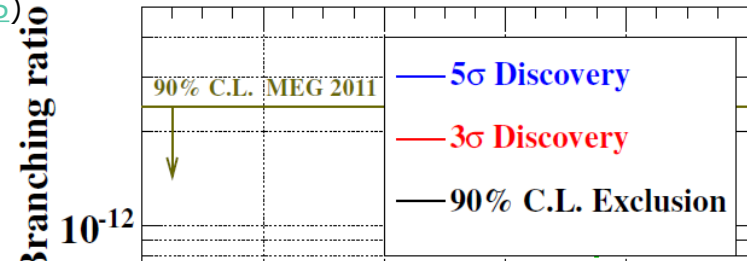
PDF parameters	Present MEG	Upgrade sce
e^+ energy (keV)	306 (core)	130
e^+ θ (mrad)	9.4	5.3
e^+ ϕ (mrad)	8.7	3.7
e^+ vertex (mm) Z/Y(core)	2.4 / 1.2	1.6 / 0.7
γ energy (%) ($w < 2$ cm)/($w > 2$ cm)	2.4 / 1.7	1.1 / 1.0
γ position (mm) u/v/w	5 / 5 / 6	2.6 / 2.2 / 5
γ - e^+ timing (ps)	122	84
Efficiency (%)		
trigger	≈ 99	≈ 99
γ	63	69
e^+	40	88
muon rate	3.3×10^7 /sec	7×10^7 /sec



MEGアップグレード

- 昨年暮れ、proposalをPSIに提出 (<http://arxiv.org/abs/arXiv:1301.7225>)
- 今年1月、PSI評価委員会から承認を得る

will ensure that PSI keeps its world leadership in the study of this process. The Committee approves the upgrade proposal and expects that, after the upgrade is successfully completed, MEG will be given the highest priority in $\pi E5$.



For a new $\mu \rightarrow eee$ 実験

□ 現在のリミット： 1×10^{-12} (1988)

目標 設定

MEGの結果を考慮 $\Rightarrow$ 最低ライン 10^{-15}

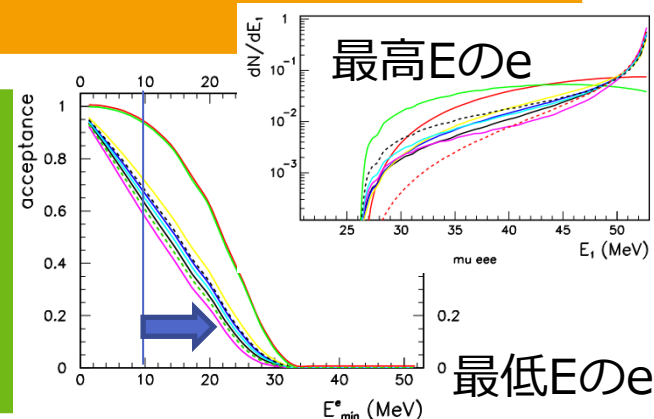
1×10^{-16} まで行ければ興味深い領域を広くカバー

- MEG upgrade超え、COMET, Mu2eに匹敵
- ただし、GHzビームが必須

シグナル アクセプ タンス

3体崩壊 Kinematics

- 立体角を大きく。
- シグナル分布はモデル依存
- $> 10 \text{ MeV}$ の電子を検出できる
よう設計 $\Rightarrow 50\%$



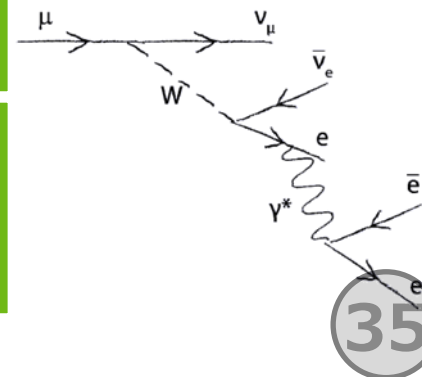
BG

アクシデンタルBG

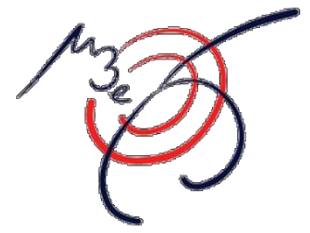
- 崩壊点・時間・運動量で区別

物理BG ($\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^- \nu \nu$)

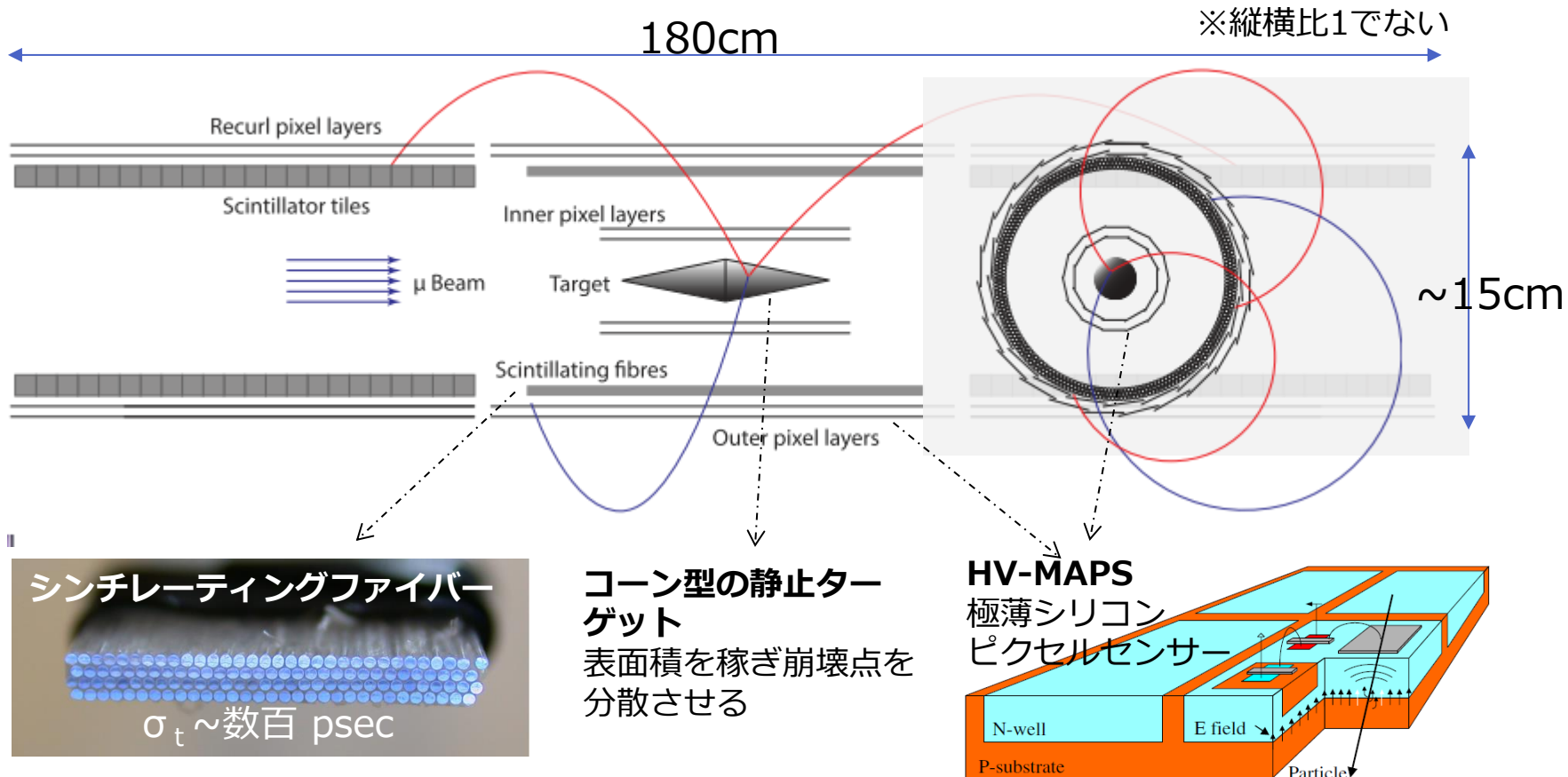
- 運動量のみで区別
- $\sigma_{\text{Emis}} \sim 0.7\%$ for $< 10^{-15}$



Mu3e実験



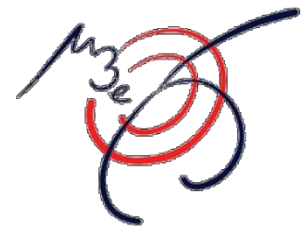
新しいテクノロジーで立ち向かう



- Geometrical acceptance $\sim 70\%$

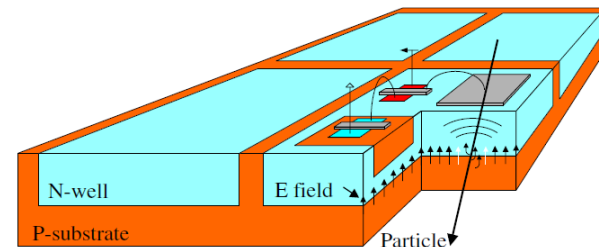
ハイデルベルク大が中心

Silicon pixel tracker



- クーロン多重散乱を極限まで抑えるために極薄のデバイスが必要。
- HV-MAPS
 - 30–50 μm まで 薄くできる
 - amp, digitization on chip
 - 早い読み出し: 50ns timestamp

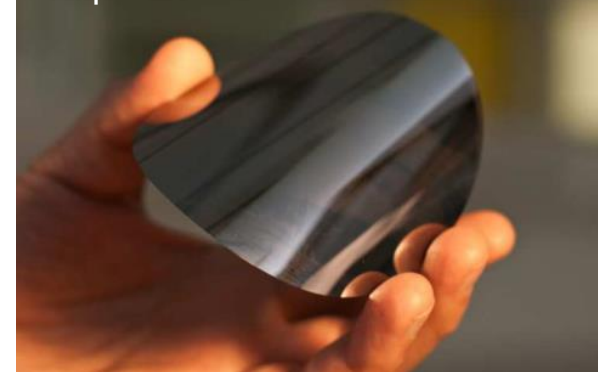
読み出し回路をチップ上に搭載



(High voltage monolithic active pixel sensors)

2013: Extensive beam test campaign

50 μm 厚のシリコンウェハー



モックアップ



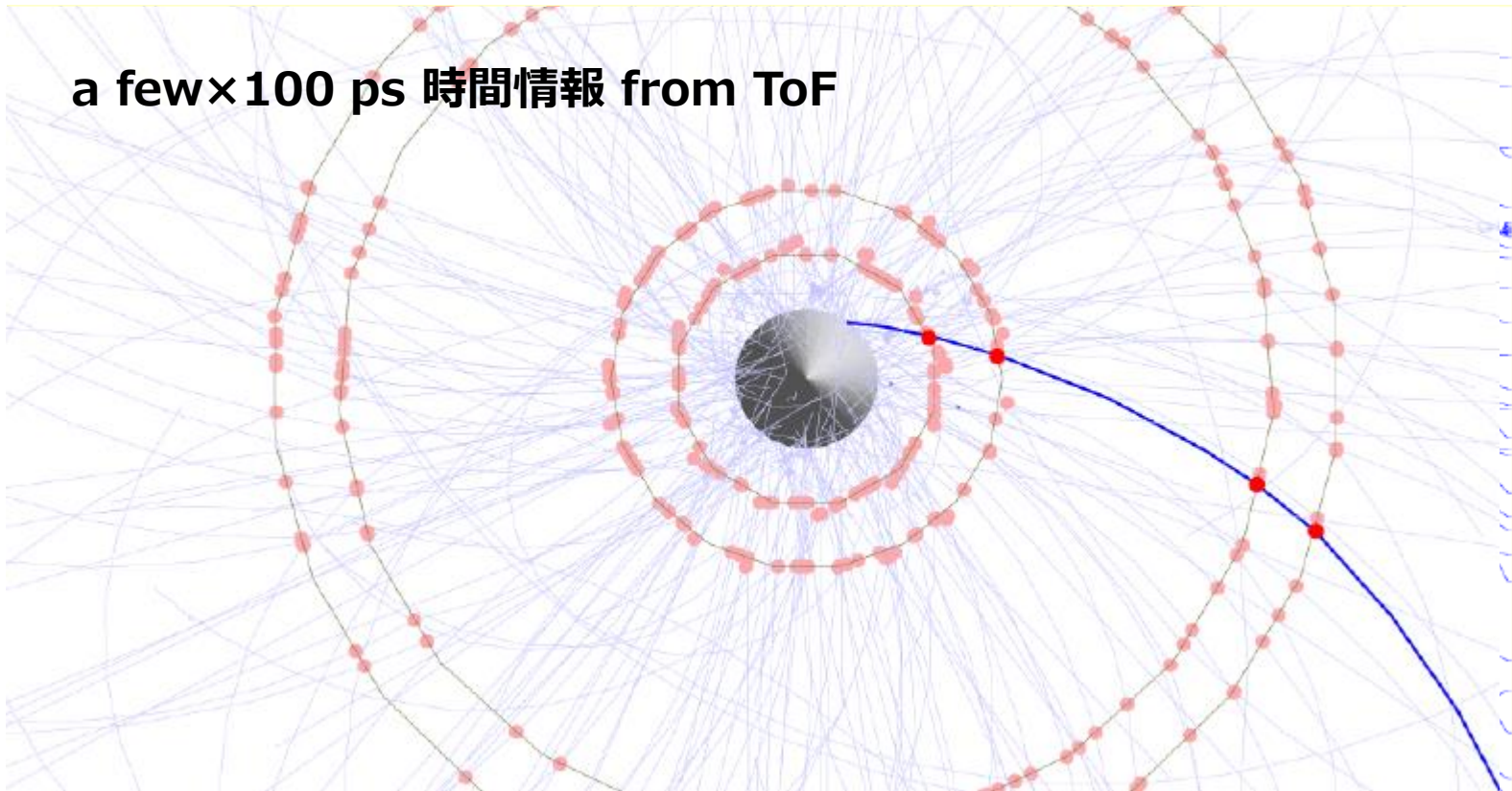
- HV-MAPS
 - Flex print
 - Kapton Frame
- <1% X_0 per layer

Tracking



- 100 μ 崩壊 @ $2 \times 10^9/s$

a few $\times 100$ ps 時間情報 from ToF



Staging approach

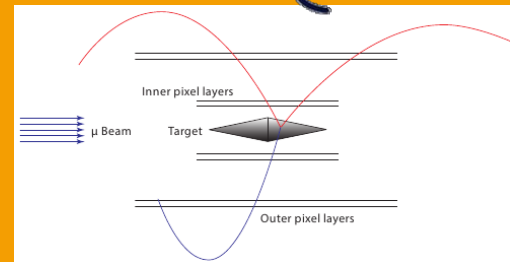


Phase
IA

2015

中央シリコンのみで早期実現

- $\leq 10^7 \mu/s$ @ $\pi E5$
- 新しい技術の経験・実験原理の実証
- 感度 $O(10^{-14})$

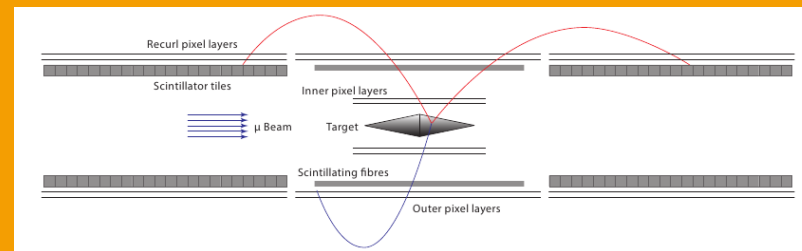


Phase
IB

2016~

第一サイドステーションとToF導入

- $\sim 10^8 \mu/s$ @ $\pi E5$ の最大強度
- 感度 $O(10^{-15})$
✓ 統計リミット

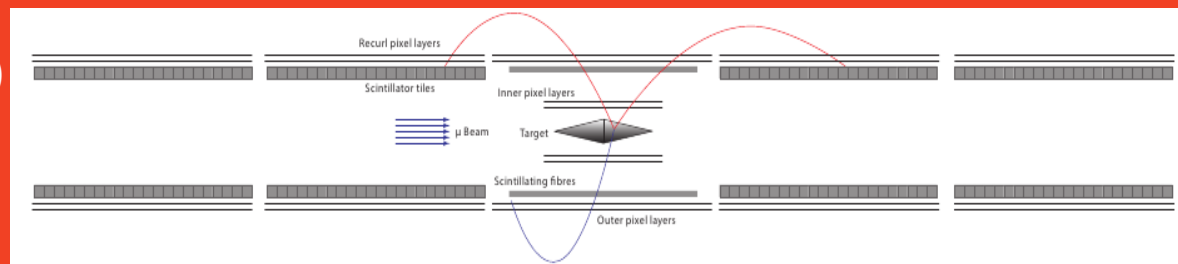


Phase
II

2017以
降

Full configuration

- $\sim 2 \times 10^9 \mu/s$ @ 新しいビームライン
- 感度
 $O(10^{-16})$



Mu3e



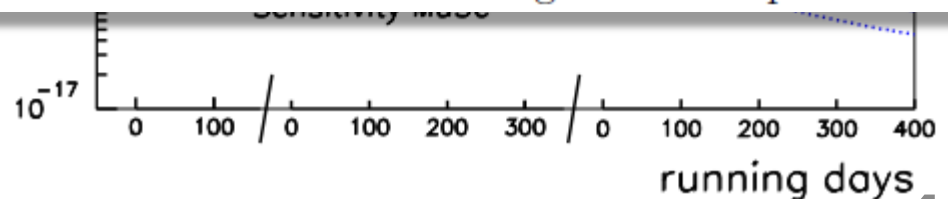
- 昨年暮れ、proposal (phase I) をPSIに提出 (<http://arxiv.org/abs/1301.6113>)
- 今年1月、PSI評価委員会から承認を得る

– 今後テクニカルレビュー

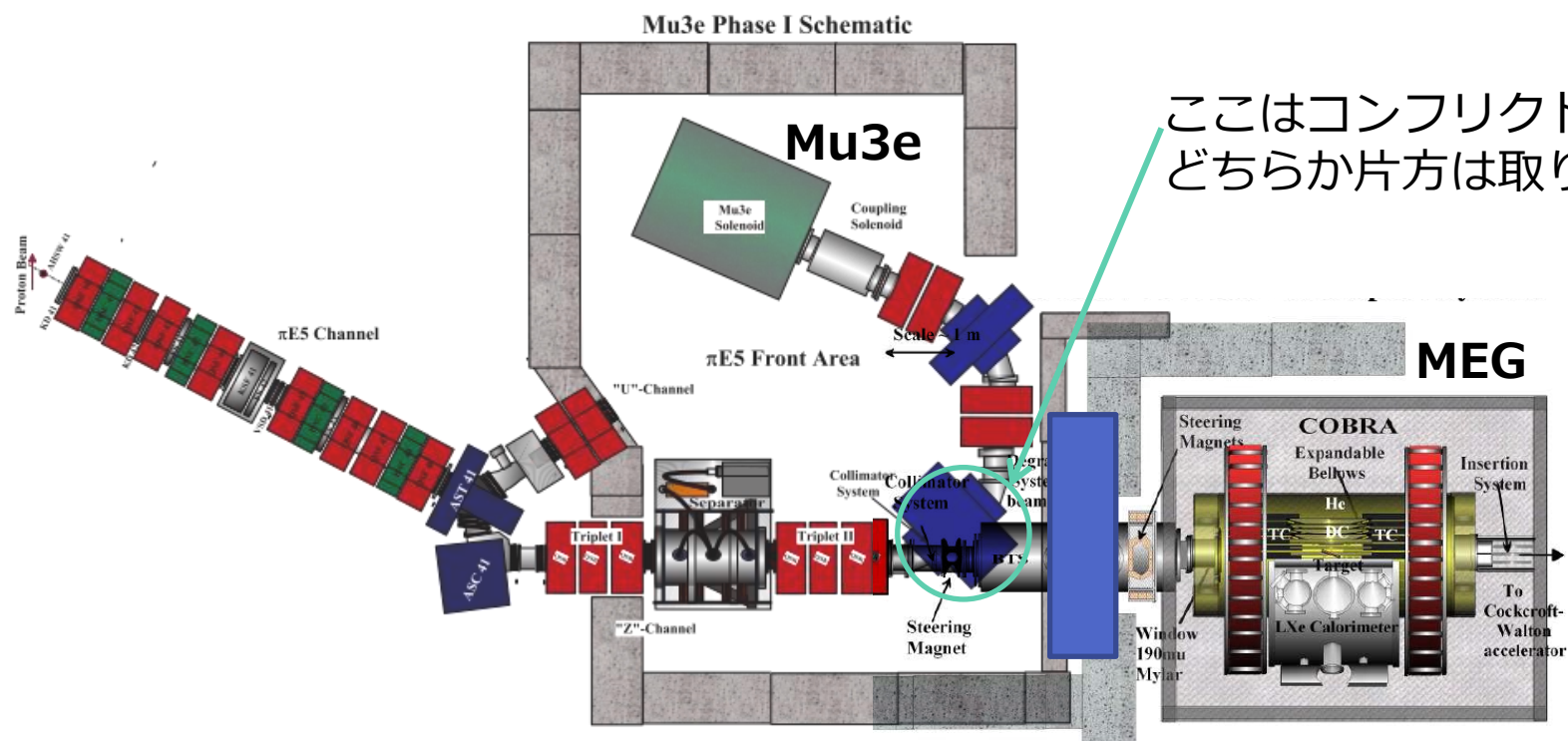


Muon physics has emerged as a cornerstone of the high intensity frontier. Successful completion of the proposed experiment would cement PSI's world-leading role in this field and the Committee is keen to facilitate this experiment. In this context the Committee also recommends that the PSI management undertake a detailed study of a new high-intensity muon beam HiMB.

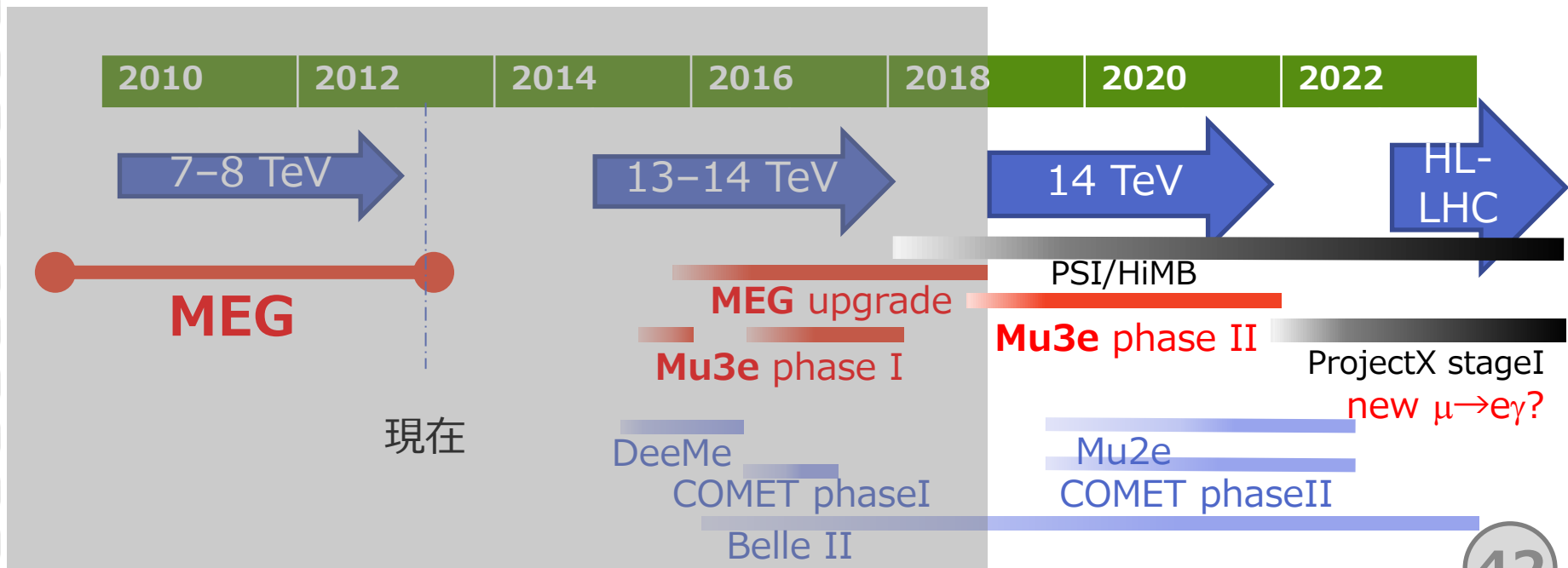
expected tight constraints on available beam time in $\pi E5$. It appears that Mu3e and MEG can be set up at the same time, with the beam being switched from one experiment to the other. The collaboration is encouraged to make provisions for efficient switching between experiments.



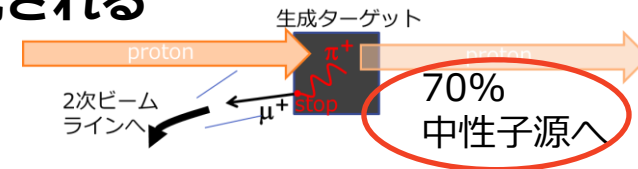
- π E5エリアの共有
- 実験準備は並行して進められるように。
- ビームライン上流の設備も共有。
- ビームを切り替える
 - 同時にビーム共有は無理。



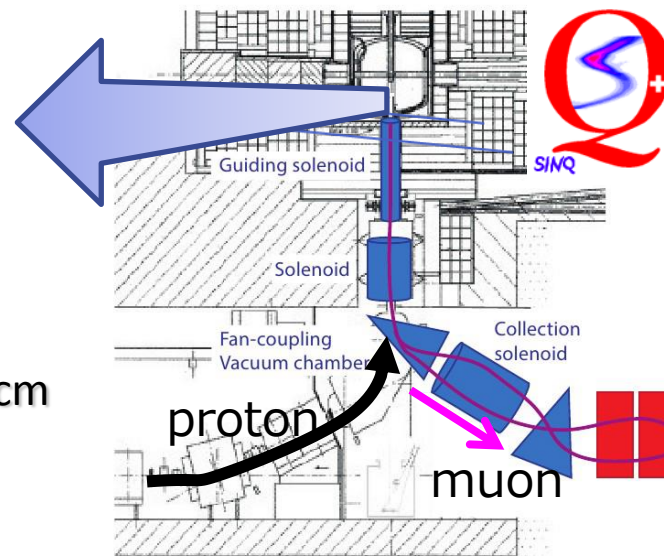
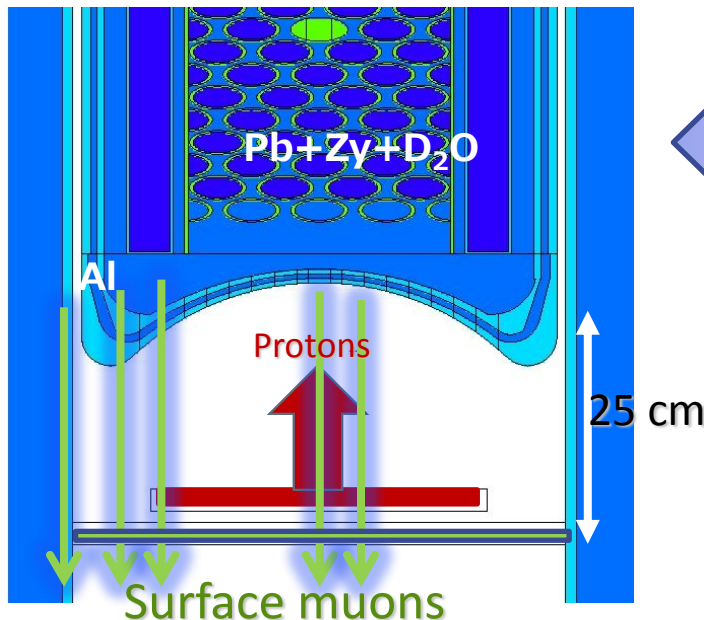
その先 (5-10, >10年)



- PSI次世代 **H**igh **i**ntensity **M**uon **B**eamプロジェクト
- Spallation neutron(SINQ)ターゲット窓で生成される
ミューオンを取り出す
 - 大強度proton (1次ビームの70%が止まる)
 - 広いパイオンレンジ(<150MeV)
 - 広いボリューム(9000倍)
 - 高い断面積
- $\sim 3 \times 10^{10}$ surface μ^+ /sec (見積もり)
- 本格的な研究を今年開始
 - 来年までに実現可能性を見極める
- 2016-2017のSINQ長期停止に合わせて建設



Mu3e phase IIには十分。
他の利用も模索し始める。



今後もPSIが素
粒子実験High
intensityフロン
ティアをリード
していけるかか
かっている

Project X

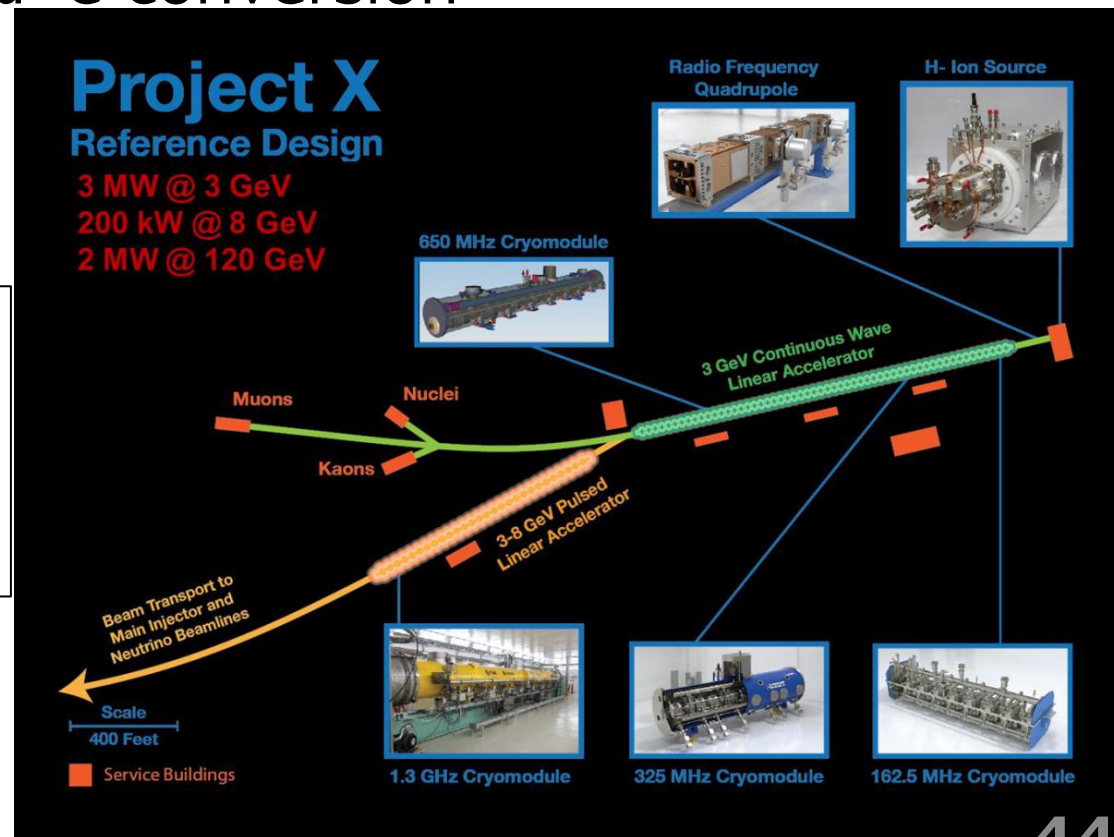
• 次世代MW陽子加速器施設@Fermilab

- 3MW@3GeV, continuous wave linac
- パルス構造を柔軟に調整可 (1–160MHz)
 - パルスモード → μ -e conversion
 - 高周波モード → 次世代 $\mu \rightarrow e\gamma, eee$

US高エネ戦略のKey

今夏のSnowmassにむけて
PXで可能な物理プログラムが
検討中。
次世代 $\mu \rightarrow e\gamma, eee$ も含まれてい
る。

早くて2017年から
5年かけて建設？

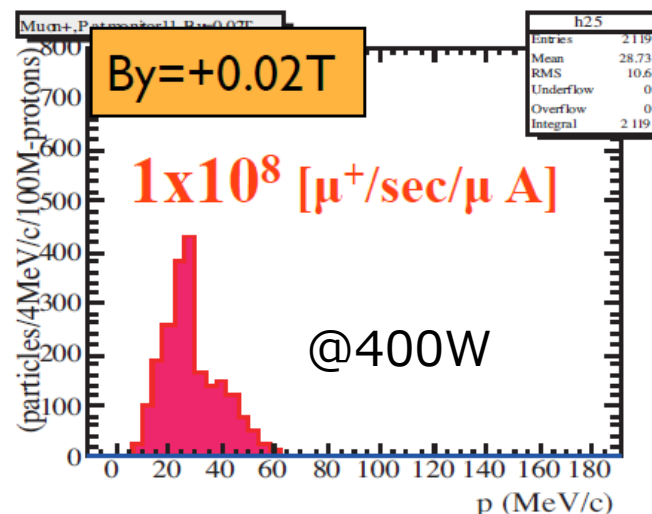
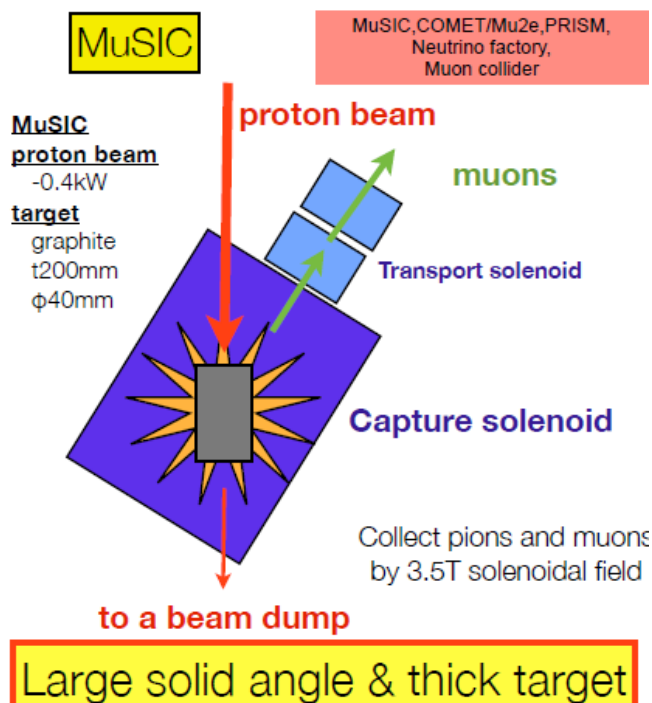


日本でも!?

RCNP/MuSIC

- 大阪大学RCNPで大強度DCミュオン源MuSICを建設中
- 世界初の超伝導パイオン捕獲システム
– 1 μ A陽子ビームで $\sim 1 \times 10^8 \mu^+/\text{sec}$
- RCNPサイクロトロン施設のアップグレードも検討中
– MW級陽子ビーム $\times$ MuSIC $\Rightarrow > 10^{11} \mu^+/\text{sec} !!$

今年4月から運転開始



- 位相空間回転($\Rightarrow$ 究極 μ -e転換実験)
- $\mu \rightarrow eee$ 実験 を目指す

Courtesy of A.Sato (Osaka Uni.)

‘HL-LHC時代’のDCミューオン ビームによるcLFV探索

1	物理からの要請： 大いにある (LHC, COMETなどの結果。それらと相補的。)
2	利用可能なDCミューオン源： 前途有望 (複数のプロジェクトが欧米日で進行中。)
3	洗練された実験アイデア： ??

時間スケールが構想から実現までO(10年)。
次の実験を考えだす時期か。

- 堅実に一步一步改善していく。
- 技術革新・画期的アイデアで一気に。
- まずは
 - ✓ 10^{-15} 台での $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索ができないか？
 - ✓ Mu3eよりよい $\mu \rightarrow eee$ 実験アイデアを考えられるか？

Conclusion

現在

$\mu \rightarrow e\gamma$ 10^{-13} 台の存在が棄却されだした

□ BSMモデルの構築に強い制限

- ✓ pre-MEGから20倍厳しい制限
- ✓ すでに多くのパラメータ領域を棄却

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) < 5.7 \times 10^{-13} @90\%CL$$

追い詰めて

□ さらに倍の統計量で探索

- ✓ MEGの最終結果に注目！

次

捕まえて

$\mu \rightarrow e\gamma$ 10^{-14} 台, $\mu \rightarrow eee$ 10^{-15} 台の探索準備が進行中

□ 当面はまだPSIがリードしていく

将来

取り調べ

その先の探索を可能にする大強度ビームの計画も進行中

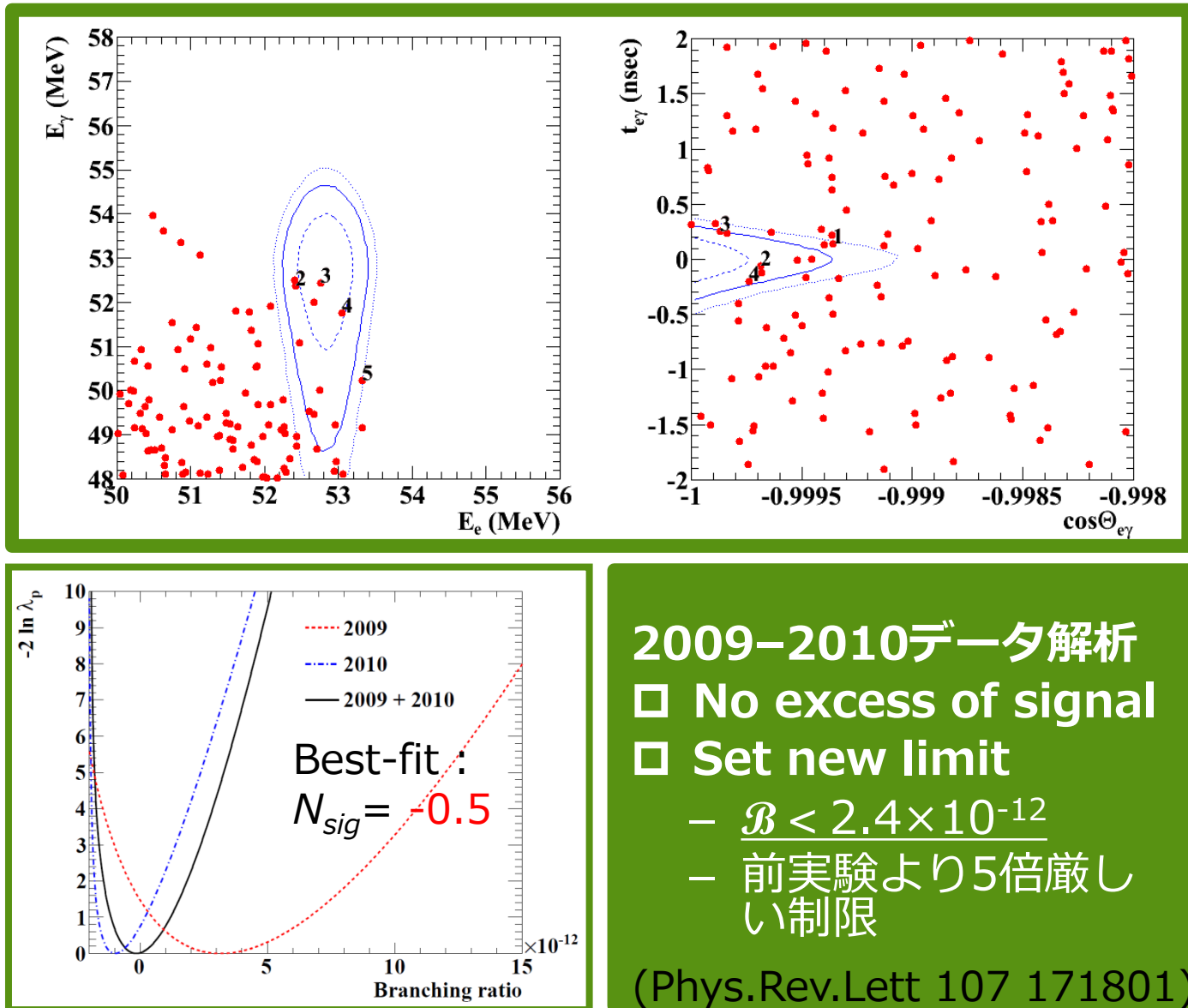
- $\mu \rightarrow eee$ 10^{-16} 台の実験計画
- その他の実験も考え始める時期

Table 3.8: List of the top-ten important flavour-changing measurements chosen by G. Isidori, with wished for sensitivity (not listed in order of importance); SES stands for single-event sensitivity, and σ is the uncertainty.

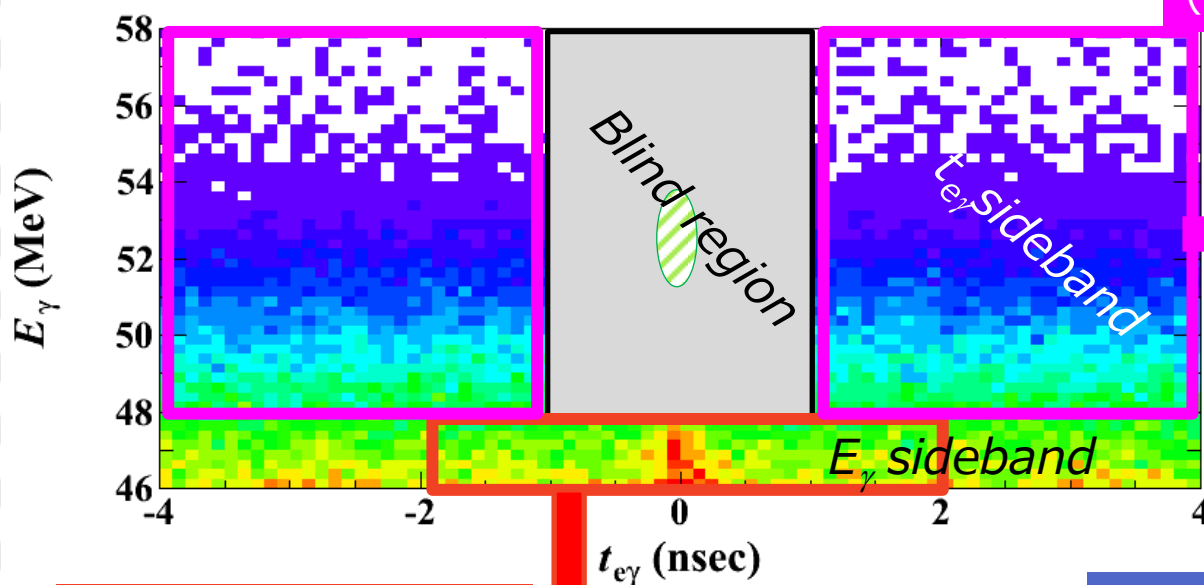
Process	Sensitivity
$B(\mu \rightarrow e\gamma)$	SES < 10^{-13}
$B(\mu N \rightarrow eN)$	SES < 10^{-16}
$B(\tau \rightarrow \mu\gamma)$	SES < 10^{-9}
$B(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$	$\sigma_{\text{rel}} < 5 \%$
ϕ_s	$\sigma < 0.01$
$B(K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu})$ (K^+ & K_L)	$\sigma_{\text{rel}} < 5 \%$
$B(B^+ \rightarrow \ell\nu)$	$\sigma_{\text{rel}} < 5 \%$
$a_{\text{CP}}(D \rightarrow \pi\pi\gamma)$	$\sigma < 0.005$
$ V_{ub} $	$\sigma_{\text{rel}} < 5 \%$
CKM angle γ	$\sigma < 1^\circ$

Physics Briefing Bookより。

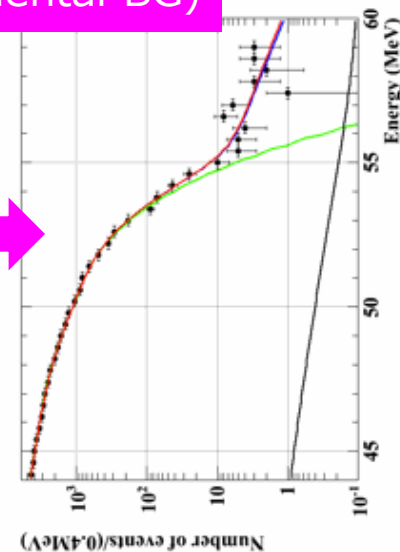
これまでの結果



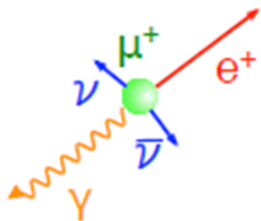
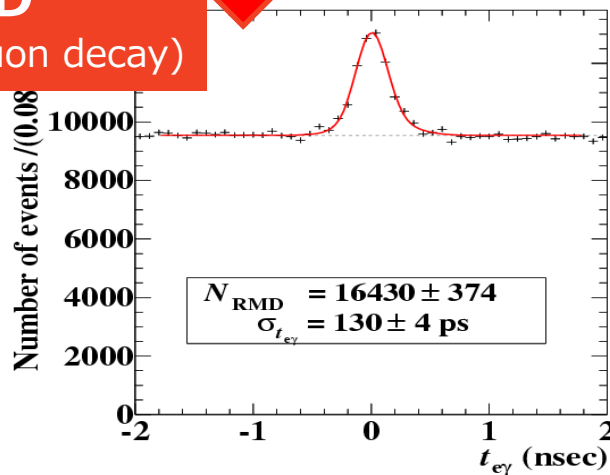
解析



ACC
(accidental BG)



RMD
(Radiative muon decay)

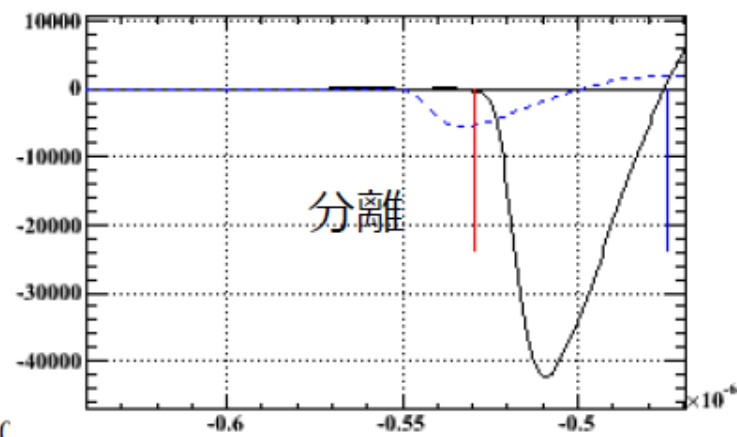
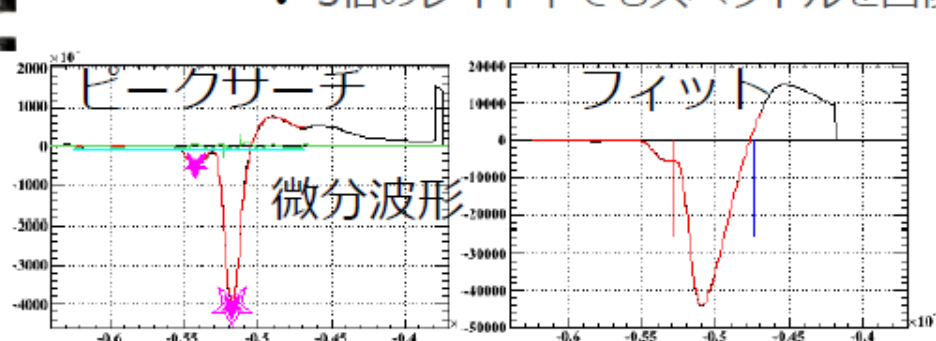


$(E_e, E_\gamma, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma})$
5次元分布

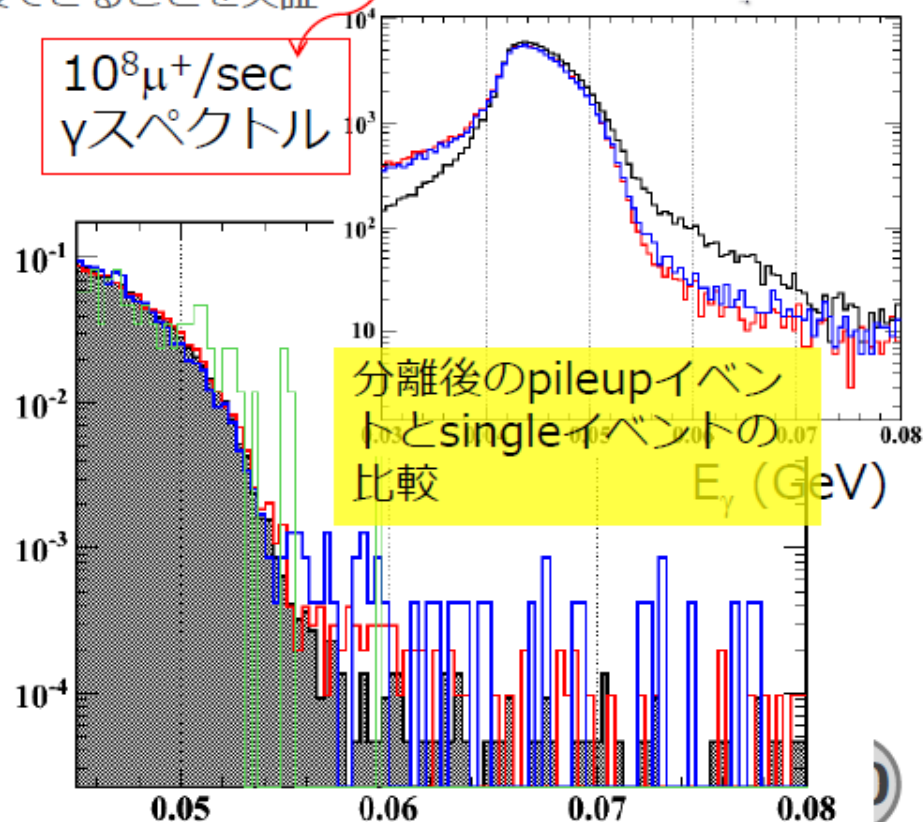
$(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{ACC}})$
max. likelihood fit
で推定

γ パイルアップ分離解析

- 波形を使ったパイルアップ分離法を今年開発
 - 個々のPMTの出力をすべて波形データとして記録。
 - 位置・時間・エネルギー再構成を行った後に和波形を作る。
 - 光量分布および時間分布でのパイルアップサーチ情報も統合。
 - 和波形のフィットによりパイルアップを分離しメイン γ 線を再構成。
 - 精度・効率のよいパイルアップ分離を実現 分解能、検出効率の改善
 - 高計数率測定に向けてますます重要に (今年15% $\uparrow$ 、upgrade3倍)
 - 3倍のレート下でもスペクトルを回復できることを実証

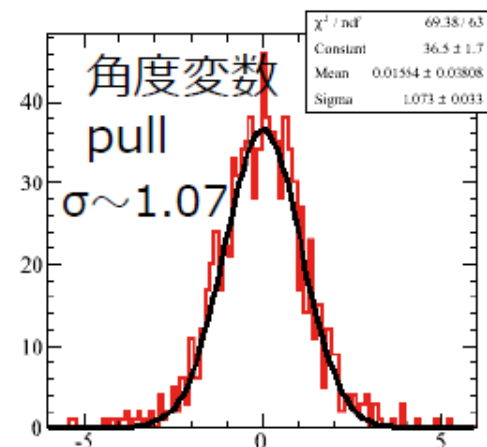


$10^8 \mu^+/\text{sec}$
 γ スペクトル

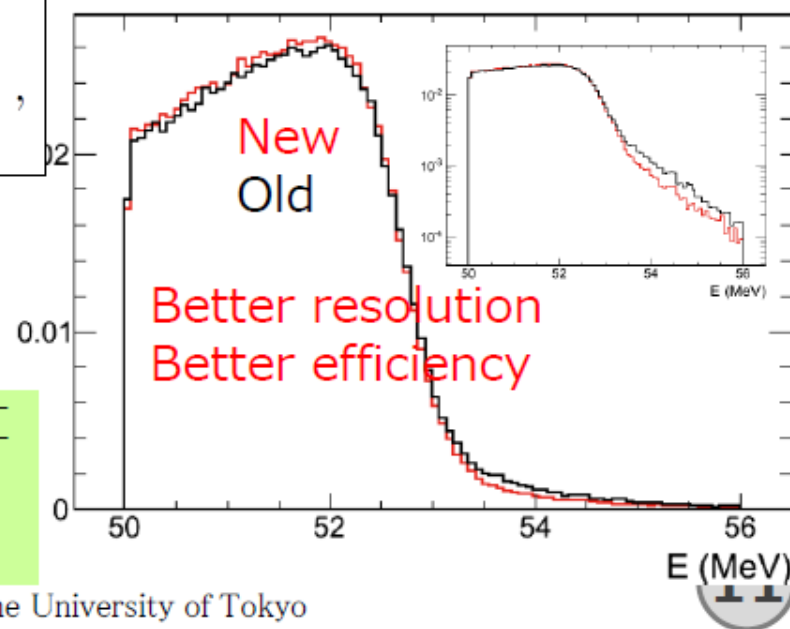


e⁺飛跡再構成

- e⁺トラッキングコード(Kalman filter)を新調
 - ジオメトリ・粒子輸送にGeant3プログラムを活用
 - トラック毎に再構成精度・相関を計算
 - 共分散行列をlikelihood fitに組み込む
 - 汎用性・拡張性のあるコーディングで、Upgradeスタディ(異なった検出器)にも活用。



e⁺エネルギースペクトル (Michel spectrum)



$$\mathcal{L}(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}) = \frac{e^{-N}}{N_{\text{obs}}!} e^{-\frac{(N_{\text{RMD}} - \langle N_{\text{RMD}} \rangle)^2}{2\sigma_{\text{RMD}}^2}} e^{-\frac{(N_{\text{BG}} - \langle N_{\text{BG}} \rangle)^2}{2\sigma_{\text{BG}}^2}} \times \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} (N_{\text{sig}} S(\vec{x}_i) + N_{\text{RMD}} R(\vec{x}_i) + N_{\text{BG}} B(\vec{x}_i)),$$

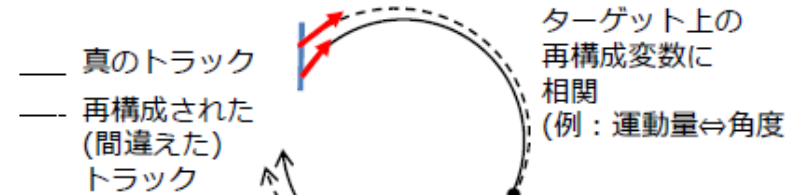
$$\begin{aligned} & S(E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \phi_{e\gamma}, \theta_{e\gamma} | \vec{x}_\gamma, \Sigma_e) \\ &= S(t_{e\gamma} | E_\gamma, E_e) \times S(E_\gamma | \vec{x}_\gamma) \\ &\times S(\phi_{e\gamma} | \vec{x}_\gamma, \Sigma_e) \times S(\theta_{e\gamma} | \vec{x}_\gamma, \Sigma_e) \times S(E_e | \Sigma_e) \end{aligned}$$

変数間の相関および測定精度をイベント毎に考慮した多次元確率密度分布関数を使って信号の同定精度を最大限引き出す。



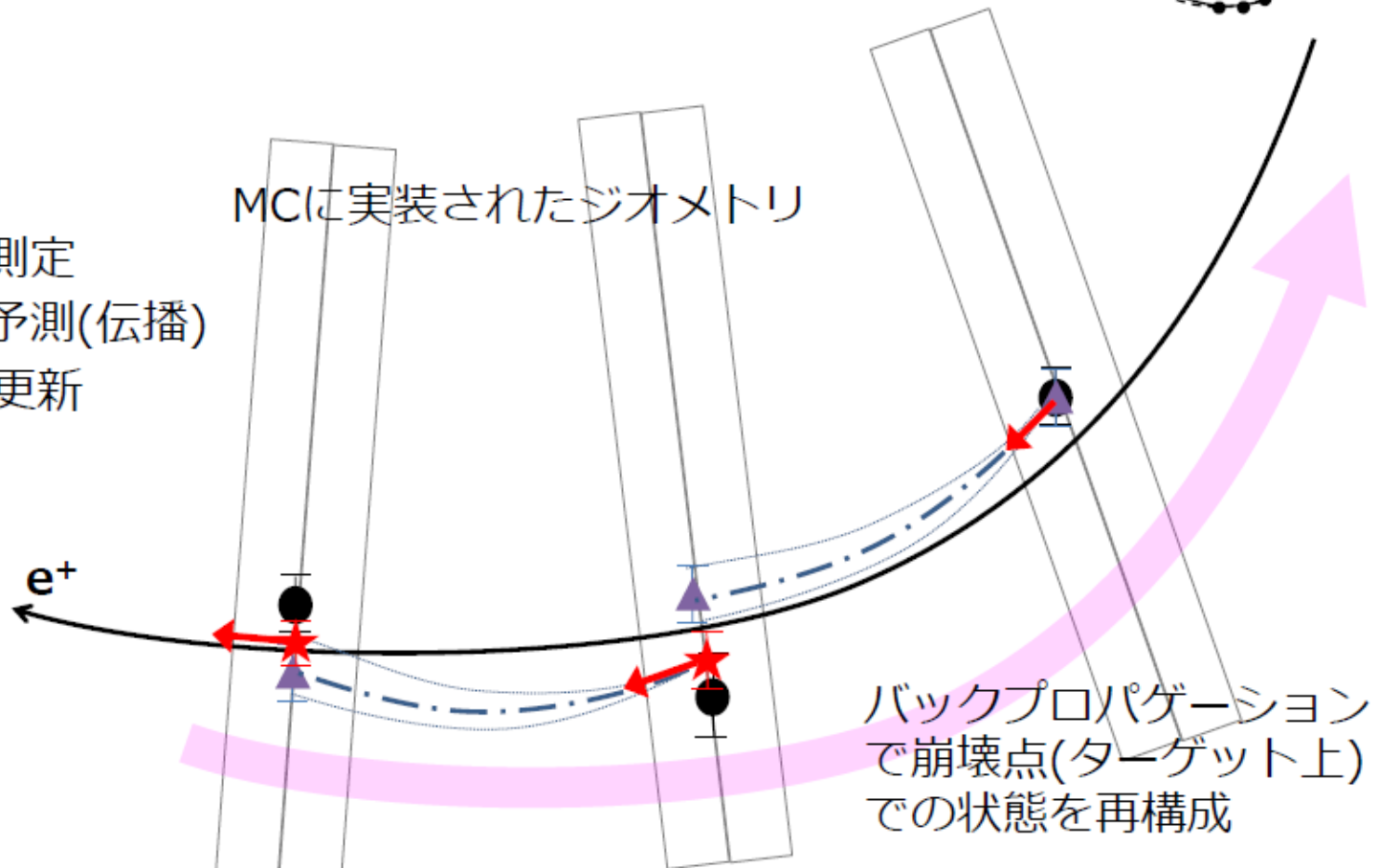
粒子の輸送をGEANT3のプログラムを使って計算 (GEANE)

- 磁場中の運動
- 物質効果
- 誤差の伝播(共分散行列の計算)



- 測定
- ▲ 予測(伝播)
- ★ 更新

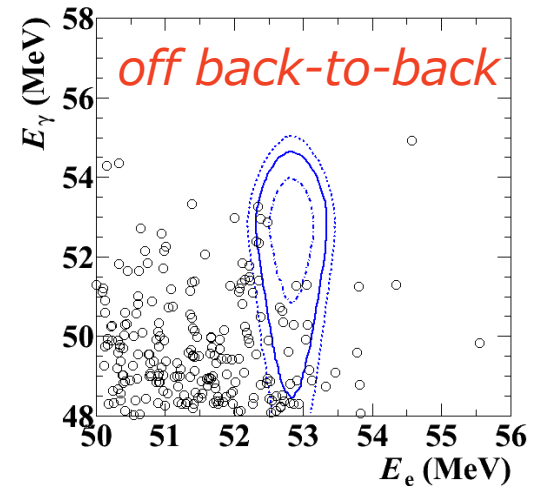
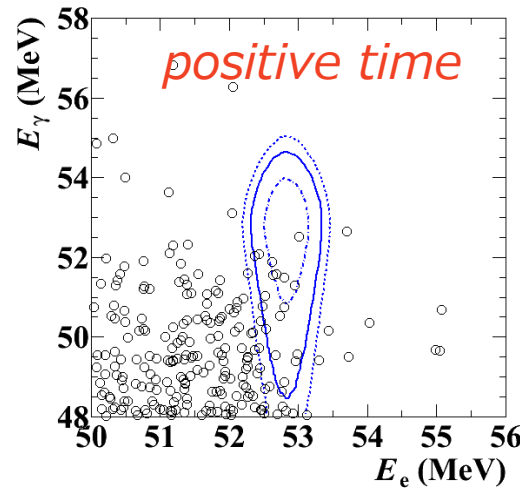
MCに実装されたジオメトリ



サイドバンド

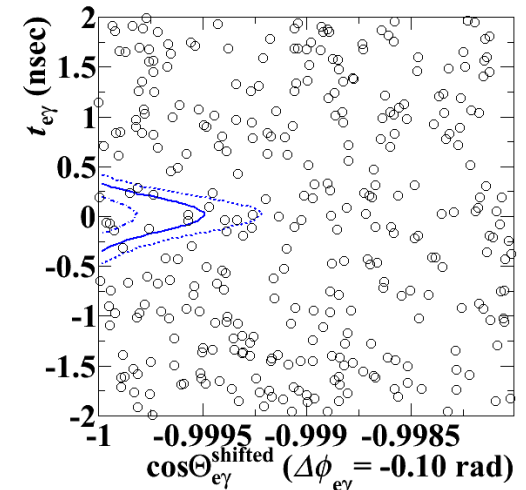
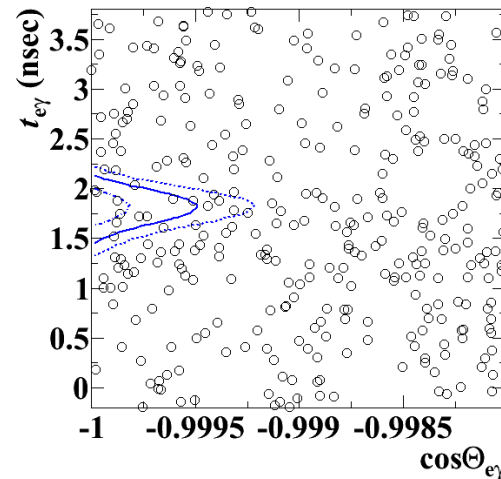
・ サイドバンドデータを使って解析を最終チェック

likelihood fit,
UL の計算まで
時間または角度のずれた
領域で解析してみる。



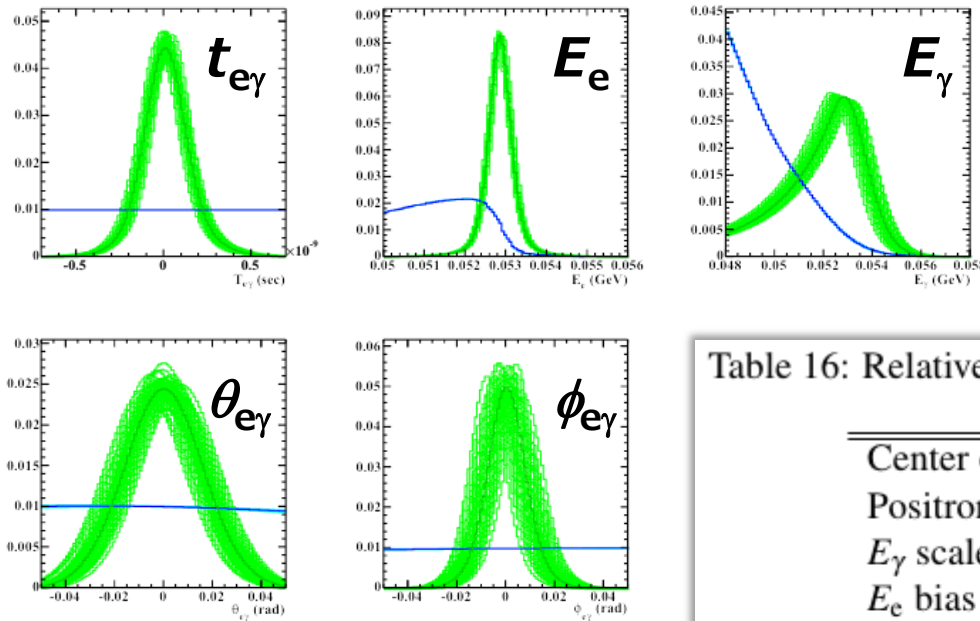
BGレイトは期待値と
合致することを確認。

得られたULもSensitivity
とconsistent



2009-2011 combined data

系統誤差



back-to-backに対する
不定性が最大

系統誤差の影響は
全体でULを1%の変化量

Table 16: Relative contributions of uncertainties to upper limit of $\mathcal{B}$.

Center of $\theta_{e\gamma}$ and $\phi_{e\gamma}$	0.18
Positron correlations	0.11
E_γ scale	0.07
E_e bias	0.06
$t_{e\gamma}$ signal shape	0.06
$t_{e\gamma}$ center	0.05
Normalization	0.04
E_γ signal shape	0.03
E_γ BG shape	0.03
Positron angle resolutions (θ_e , ϕ_e , z_e , y_e)	0.03
γ angle resolution (u_γ , v_γ , w_γ)	0.03
E_e BG shape	0.01
E_e signal shape	0.01
Angle BG shape	0.00
Total	0.25

Likelihood analysis

$$\mathcal{L}(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}) =$$

$$\frac{e^{-N}}{N_{\text{obs}}!} e^{-\frac{(N_{\text{RMD}} - \langle N_{\text{RMD}} \rangle)^2}{2\sigma_{\text{RMD}}^2}} e^{-\frac{(N_{\text{BG}} - \langle N_{\text{BG}} \rangle)^2}{2\sigma_{\text{BG}}^2}} \times$$

$$\prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} (N_{\text{sig}} S(\vec{x}_i) + N_{\text{RMD}} R(\vec{x}_i) + N_{\text{BG}} B(\vec{x}_i)),$$

サイドバンドからのBG数制限

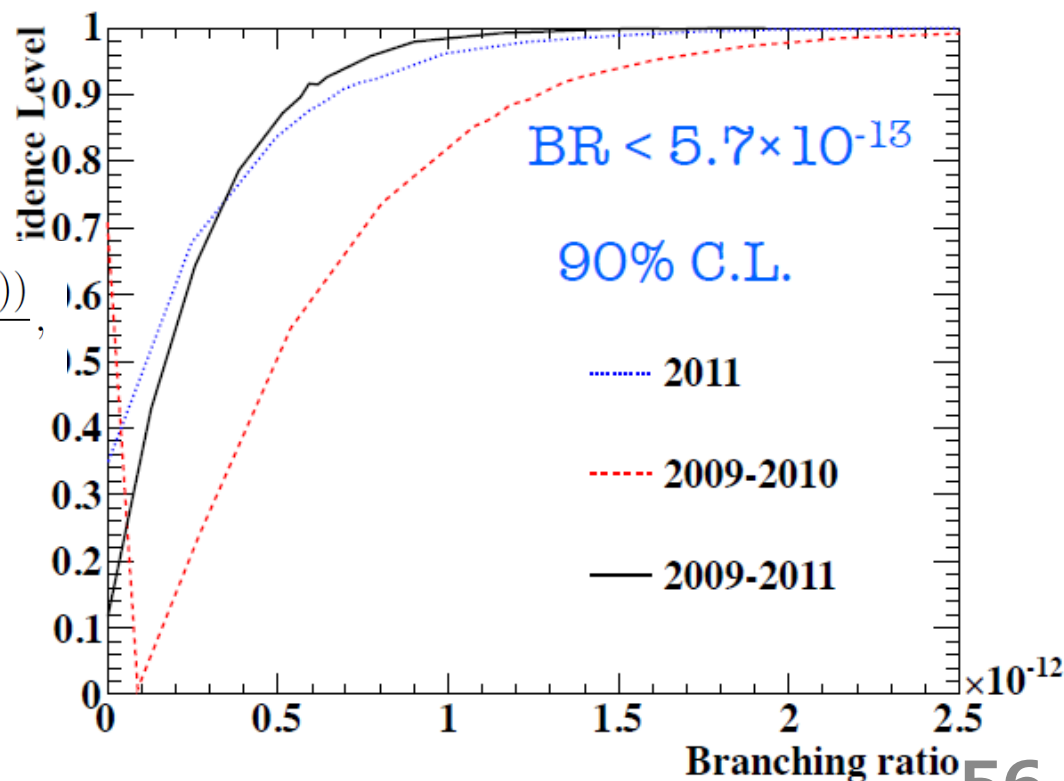
μ→eγ signal

Radiative muon decay

Accidental BG

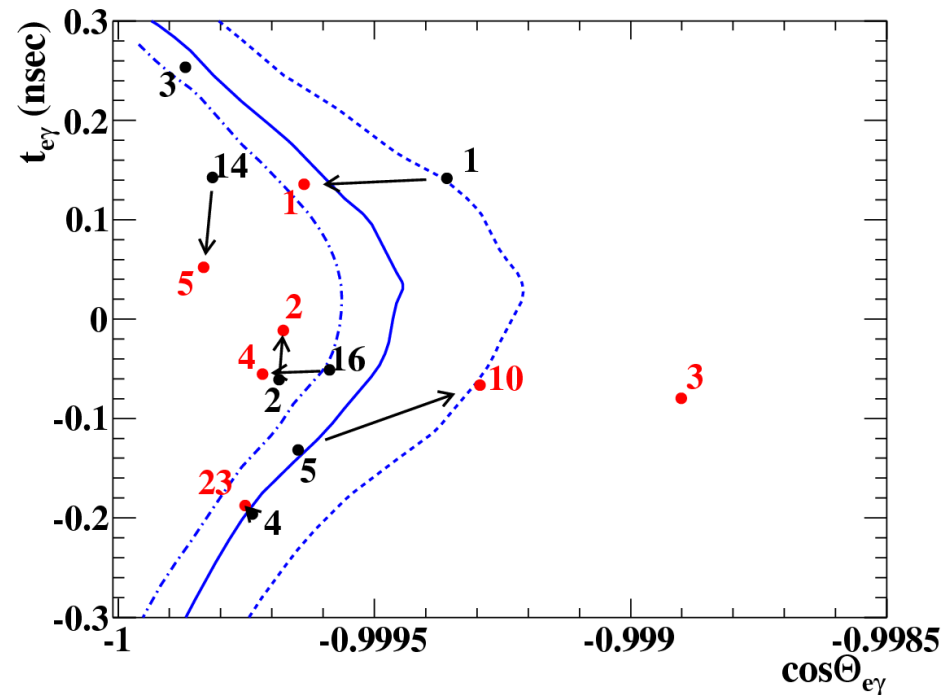
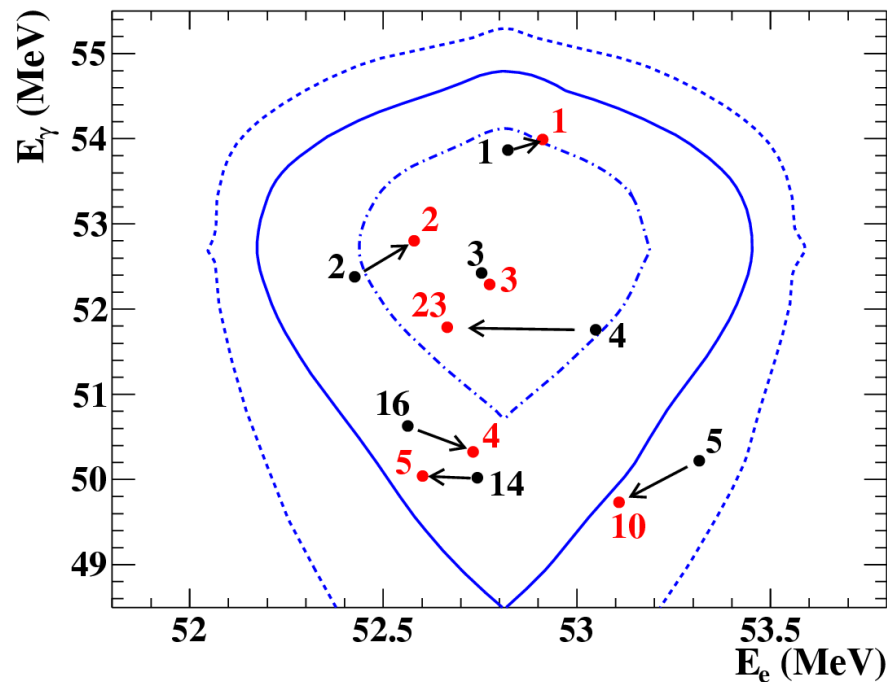
profile likelihood ratio

$$\lambda_p(N_{\text{sig}}) = \frac{\mathcal{L}(N_{\text{sig}}, \hat{\hat{N}}_{\text{RMD}}(N_{\text{sig}}), \hat{\hat{N}}_{\text{BG}}(N_{\text{sig}}))}{\mathcal{L}(\hat{N}_{\text{sig}}, \hat{N}_{\text{RMD}}, \hat{N}_{\text{BG}})},$$

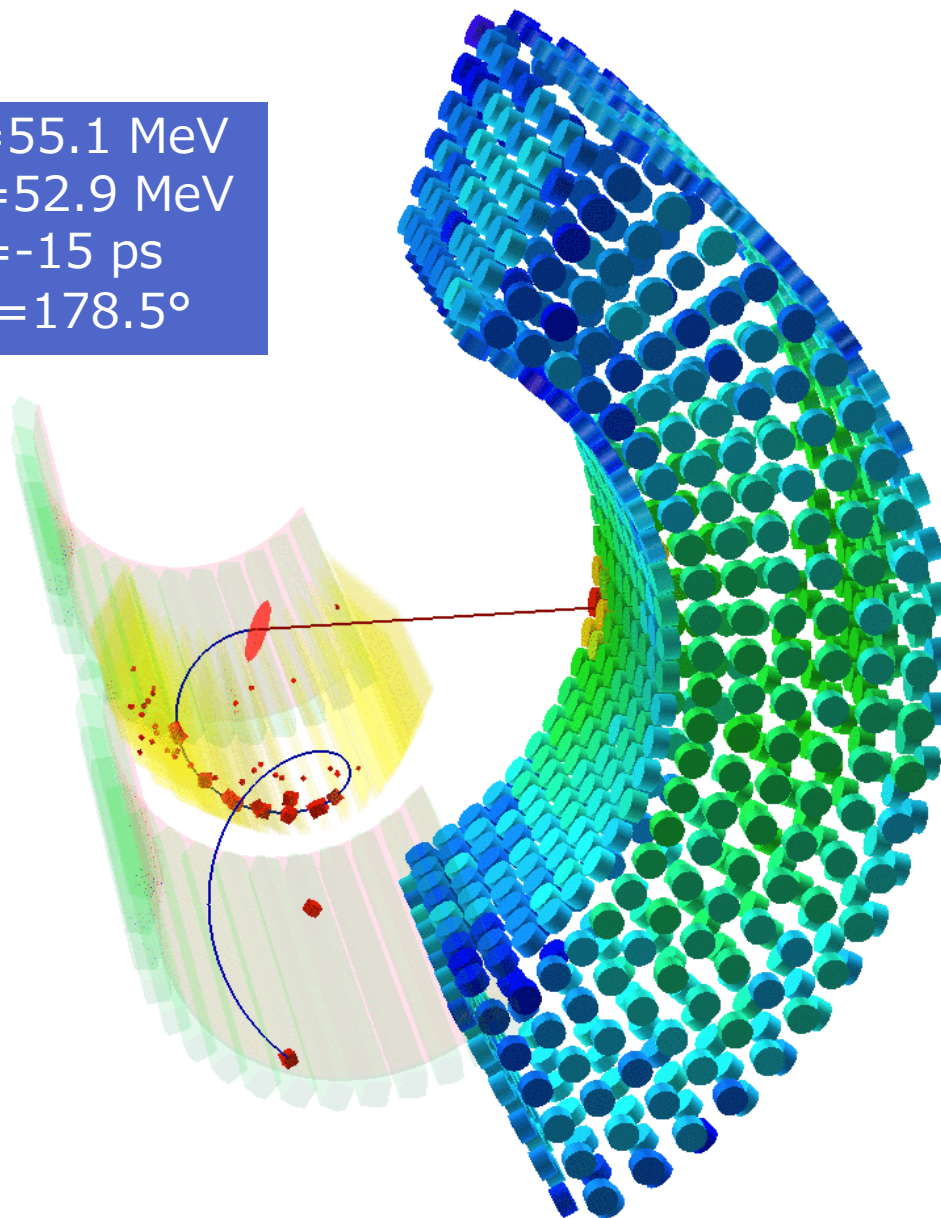


再解析による変動

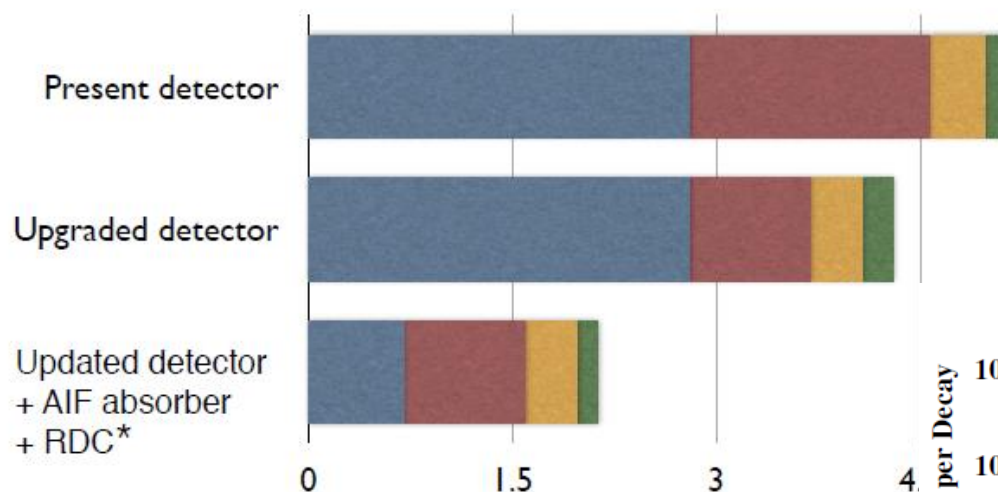
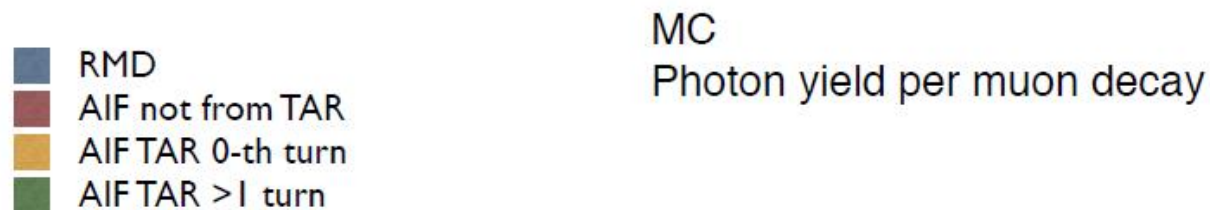
- 再構成された変数の変化は分解能よりずっと小さい。
- テイル(再構成ミス)イベントの大きな変化によるイベントの消滅・出現



$E_\gamma = 55.1 \text{ MeV}$
 $E_e = 52.9 \text{ MeV}$
 $t_{e\gamma} = -15 \text{ ps}$
 $\Theta_{e\gamma} = 178.5^\circ$



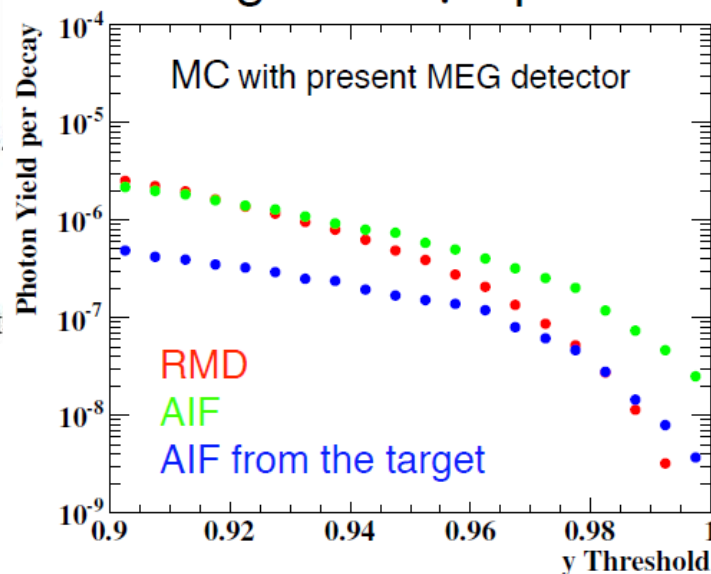
Accidental BG γ components



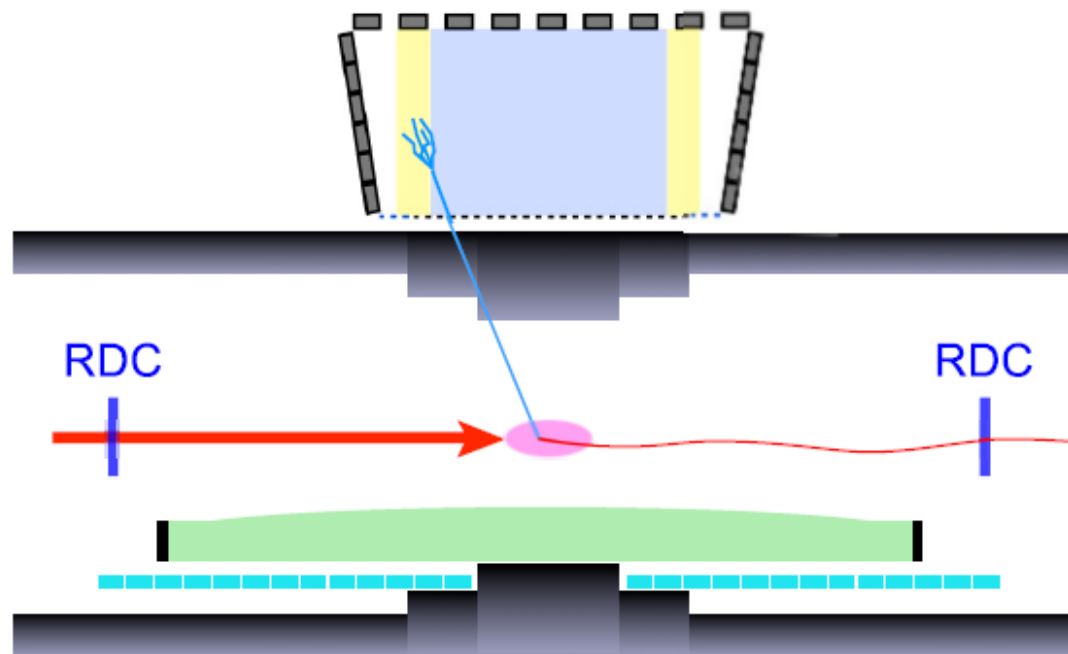
Energy deposit in LXe $> 0.9 \times M_{\mu}/2$

* If we reject RDC coincident events. (actually we will include those event

Background γ Spectrum

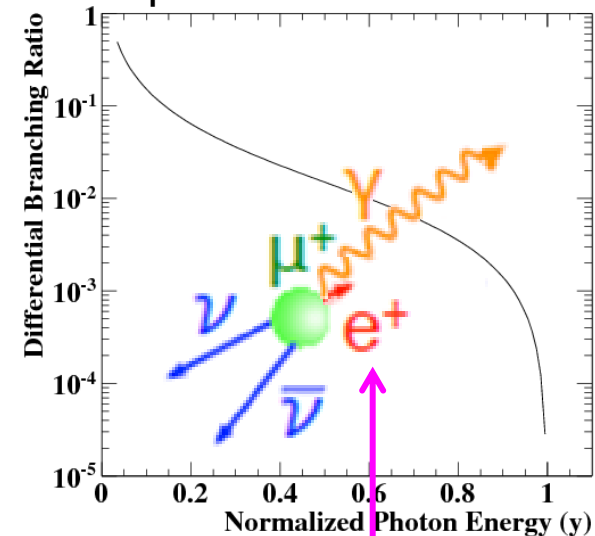


Radiative Decay Counter (RDC)



- Two counters at both ends of the detector
- Detect low energy e^+ coinciding with a high energy γ
- Typical e^+ bending radius is smaller than 4-9 cm depending on z-position.

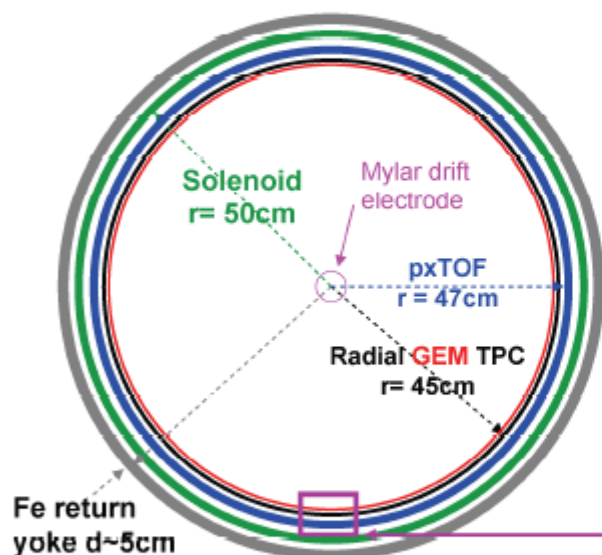
γ シングルスペクトル



このポジトロンを検出し
アクシデンタルBGをタグ
する

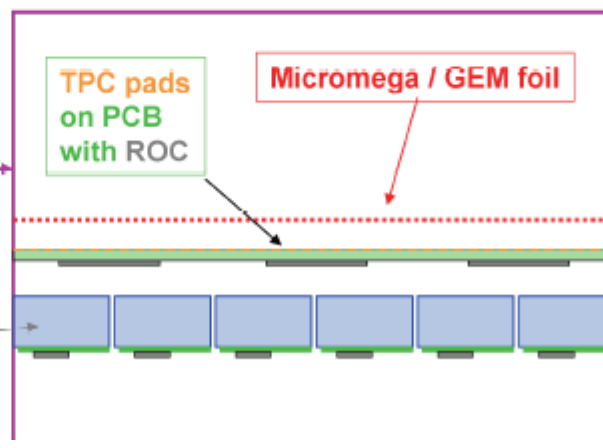
MEG upgradeのオプション

Cross-section of $\mu \rightarrow 3e$ Experiment

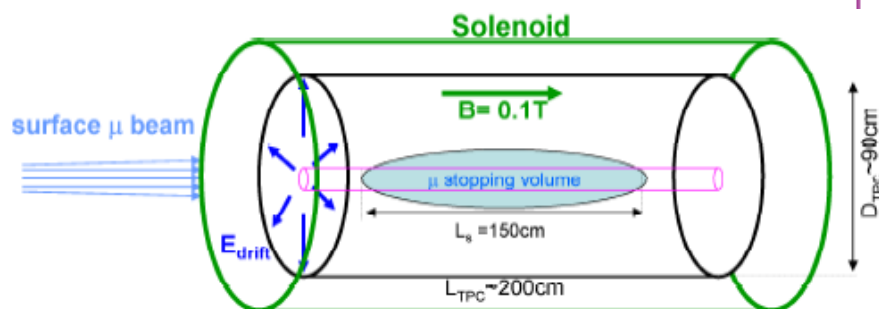


Inner surface of solenoid ($\sim 6\text{m}^2$) is equipped:

- 1) **GEM or Micromega TPC Pad readout**
0.75mm x 0.75mm pad size, gain $\sim 3-4\text{K}$
resolution $\sim 200\mu$ in x,y & t (ILC exp.)
few mm double track resolution
- 2) **Scint. Pixel TOF system**
1cm x 1cm time resolution $\sim 50\text{psec}$

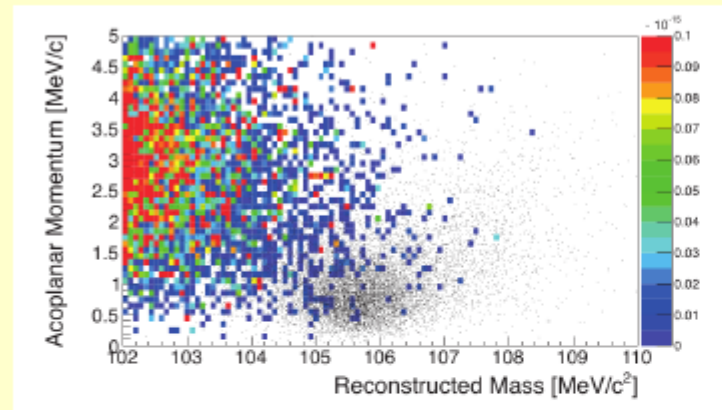


Scintillator based
pixel TOF with Si-
PM & TDC ROC

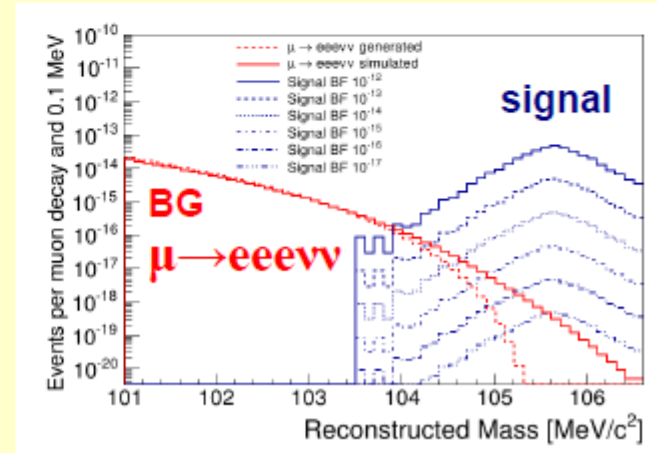
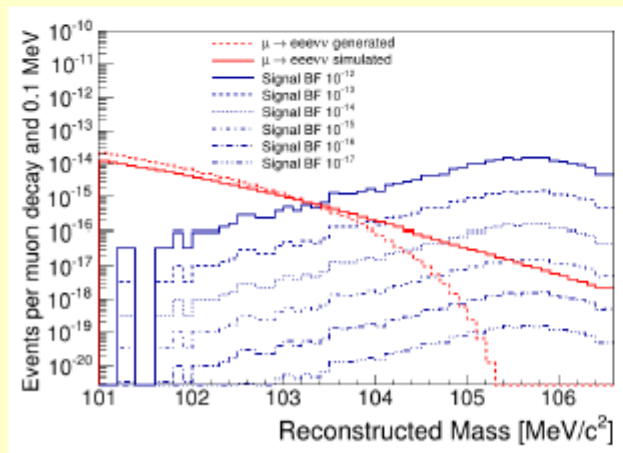
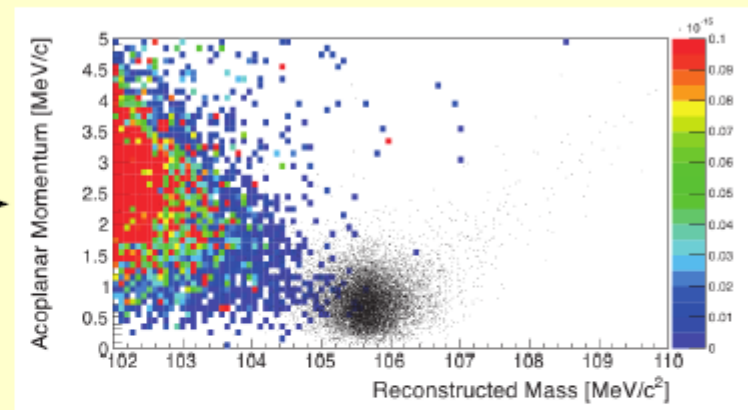


Sensitivity Study

Phase IA: rate $\leq 2 \cdot 10^7$ muons/s



Phase II: rate $\sim 2 \cdot 10^9$ muons/s



Andre Schöning, Mu3e Collaboration

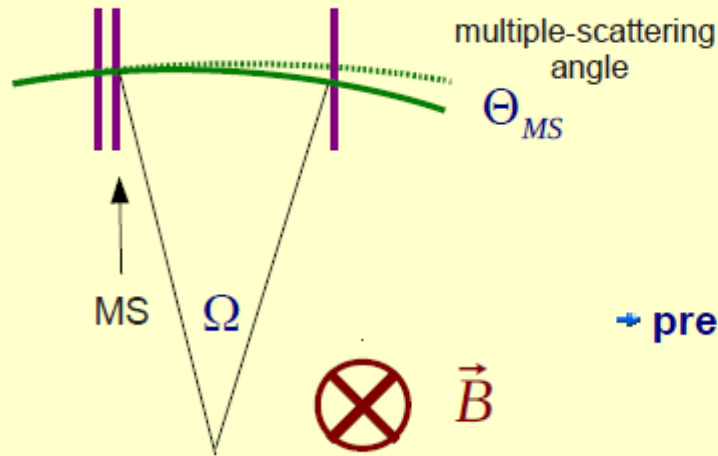
52

PSI, Open Users Meeting, January 15-16, 2013

Efficiencies and Backgrounds

	Phase IA	Phase IB	Phase II
Backgrounds:			
Michel	0	$< 2.5 \cdot 10^{-18}$	$5 \cdot 10^{-18}$
$\mu \rightarrow eee\nu\nu$	$1 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{-17}$
$\mu \rightarrow eee\nu\nu$ and accidental Michel	0	$< 2.5 \cdot 10^{-21}$	$7.5 \cdot 10^{-18}$
Total Background	$1 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-17}$	$2.3 \cdot 10^{-17}$
Signal:			
Track reconstruction and selection efficiency	26 %	39 %	38 %
Kinematic cut (2σ)	95 %	95 %	95 %
Vertex efficiency (2.5σ) ²	98 %	98 %	98 %
Timing efficiency (2σ) ²	-	90 %	90 %
Total efficiency	24 %	33 %	32 %
Sensitivity:			
Single event sensitivity	$4 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-17}$	$7 \cdot 10^{-17}$
muons on target rate (Hz)	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$
running days to reach $1 \cdot 10^{-15}$	2600	350	18
running days to reach $1 \cdot 10^{-16}$	-	3500	180
running days to reach single event sensitivity	6500	11 700	260

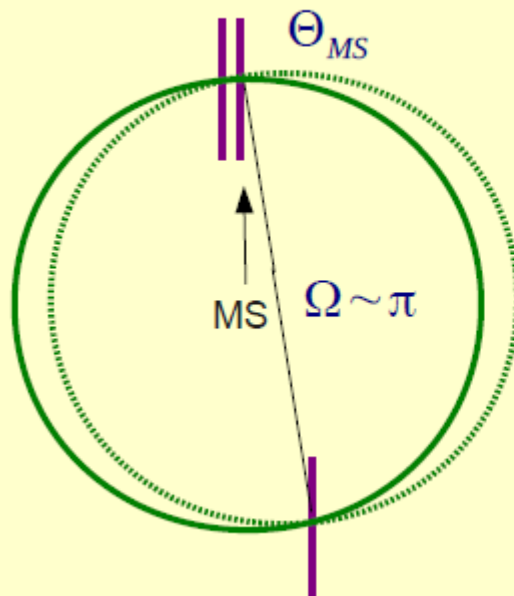
- Momentum resolution given by (**linearised**):



$$\frac{\sigma_p}{P} \sim \frac{\Theta_{MS}}{\Omega}$$

- precision requires large lever arm
(large bending angles Ω)

- Momentum resolution for **half turns** given by:



$$\frac{\sigma_p}{P} \sim O(\Theta_{MS}^2)$$

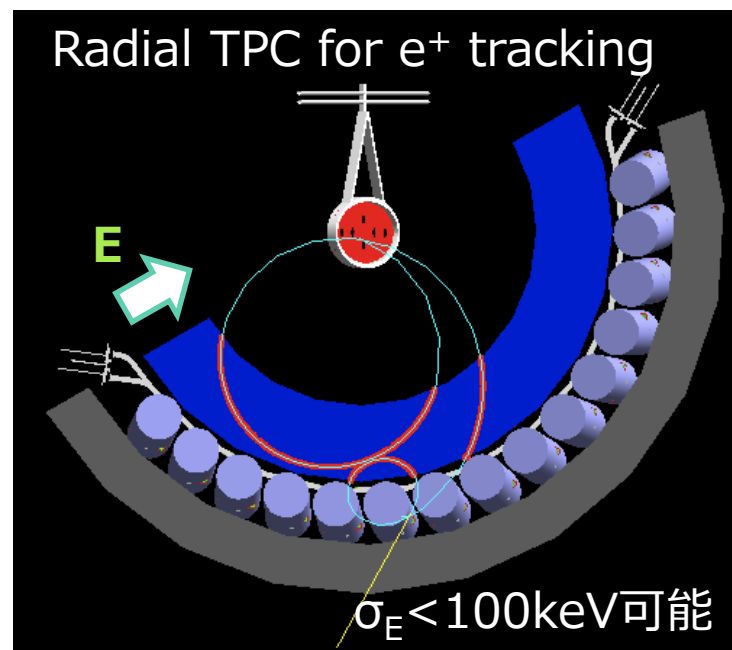
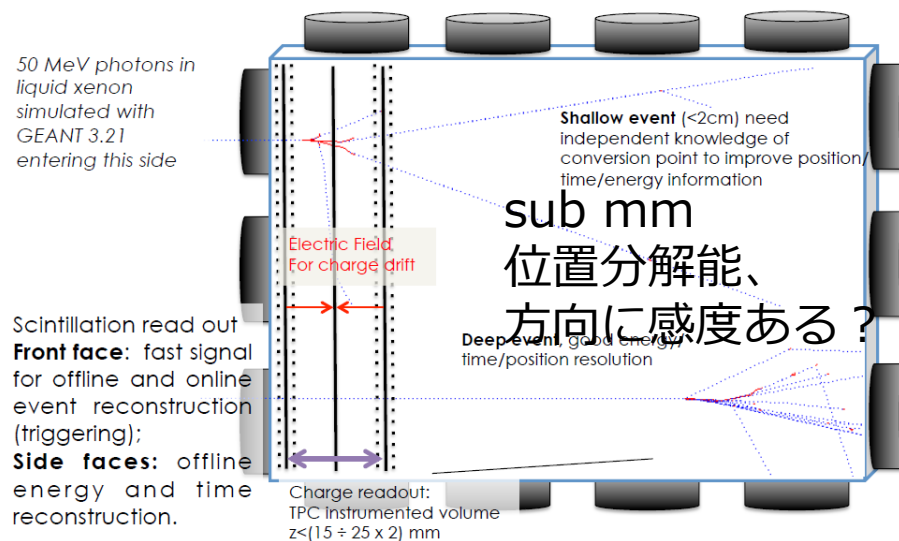
- best precision for **half turns**
- design tracking detector for measuring **recurlers**

- **MEG-base**

- 立体角を増やす

- 今10%

- ガンマ線の方法再構成？



$\mu \rightarrow e \gamma$ with converted γ (DeJong)

The simple minded geometry seems to work. Needs many m^2 pixel tracking

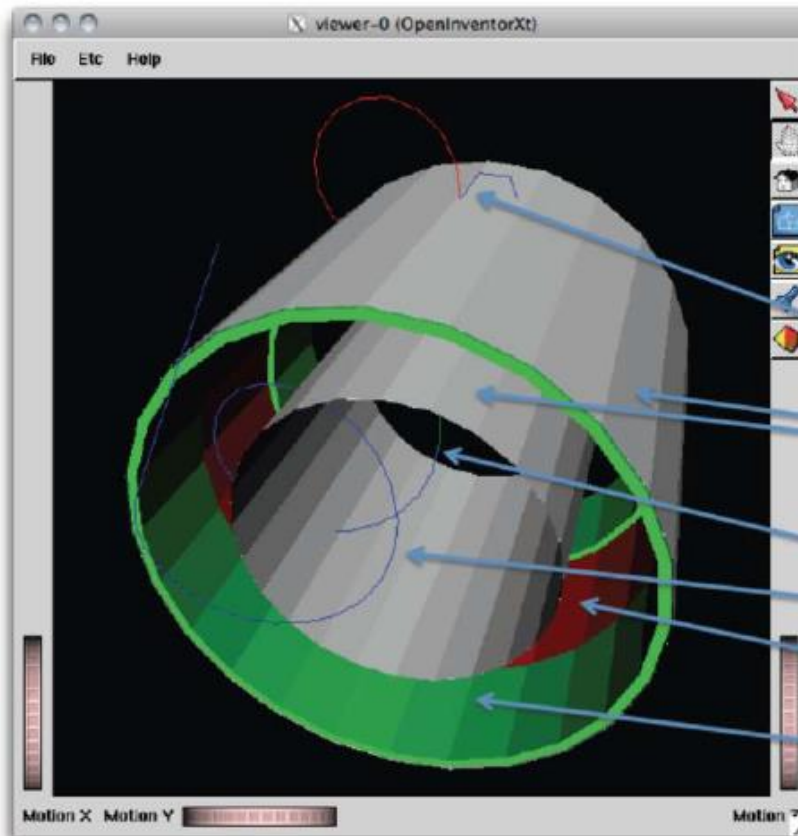
$O(10^{-16})$ の感度を目指す！？

$3 \times 10^{11} \mu/\text{sec}$ @ Project X

Target radius ~ 2 cm

$B = 0.5$ T

Positron $R = 35$ cm



Converted photon

Double pixel layers

$R = 47$ cm and 75 cm

$\mu \rightarrow e \gamma$ decay from stopped muon

Positron

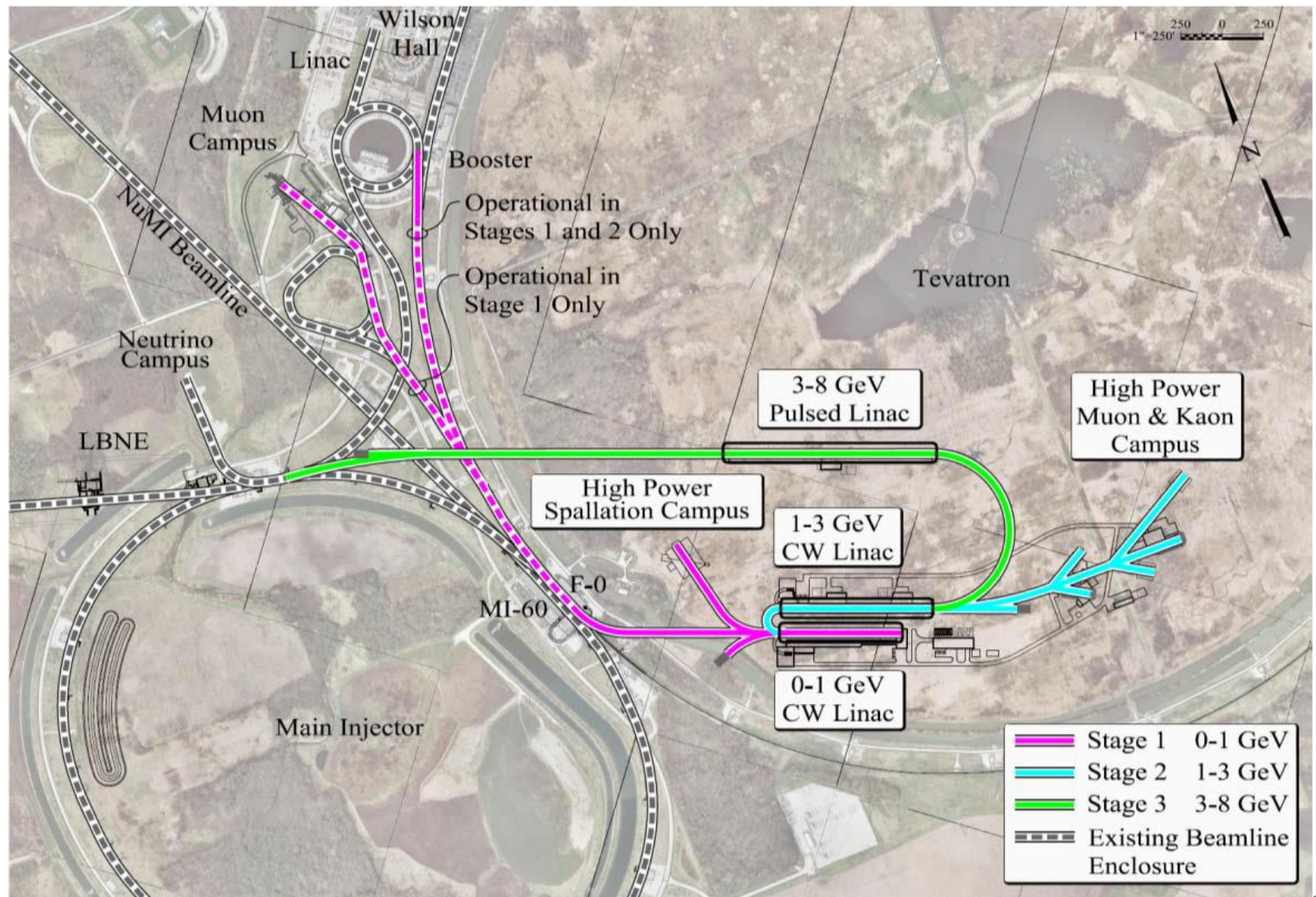
Converter

Calorimeters or tof
triggering, tof

Many design constraints and options - need mass to convert photons, minimal mass for tracking, separation of layers, resolutions

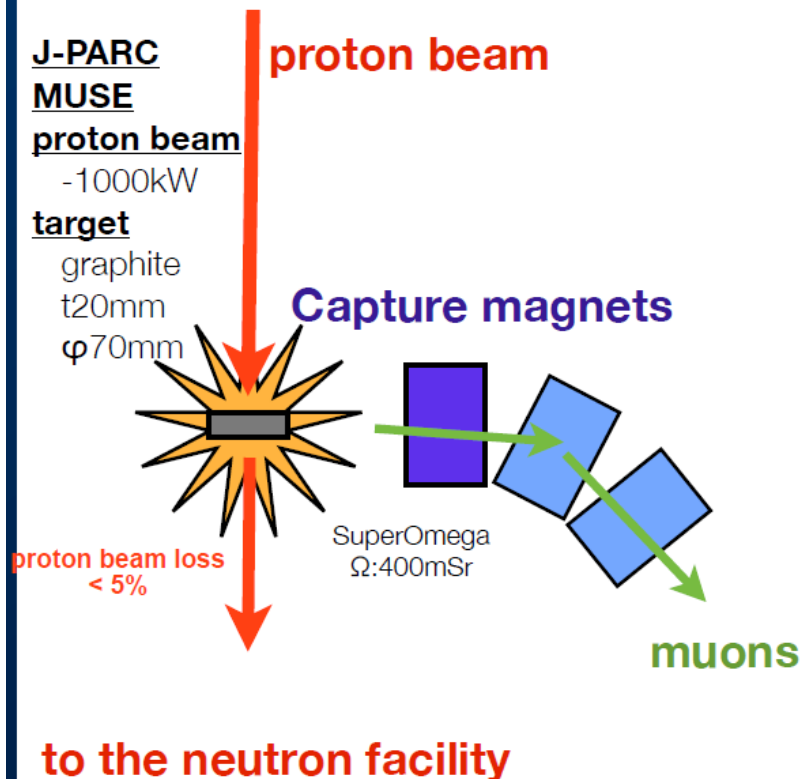
Frtiz DeJong, PXPS

Project X サイト



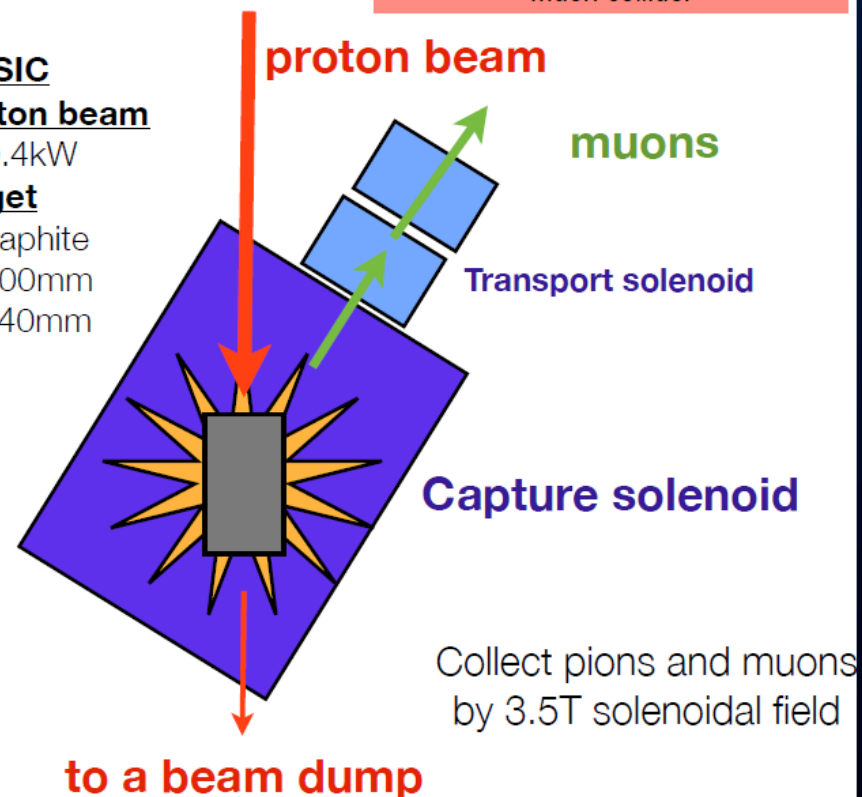
Muon collection at the MuSIC

Conventional muon beam line



MuSIC

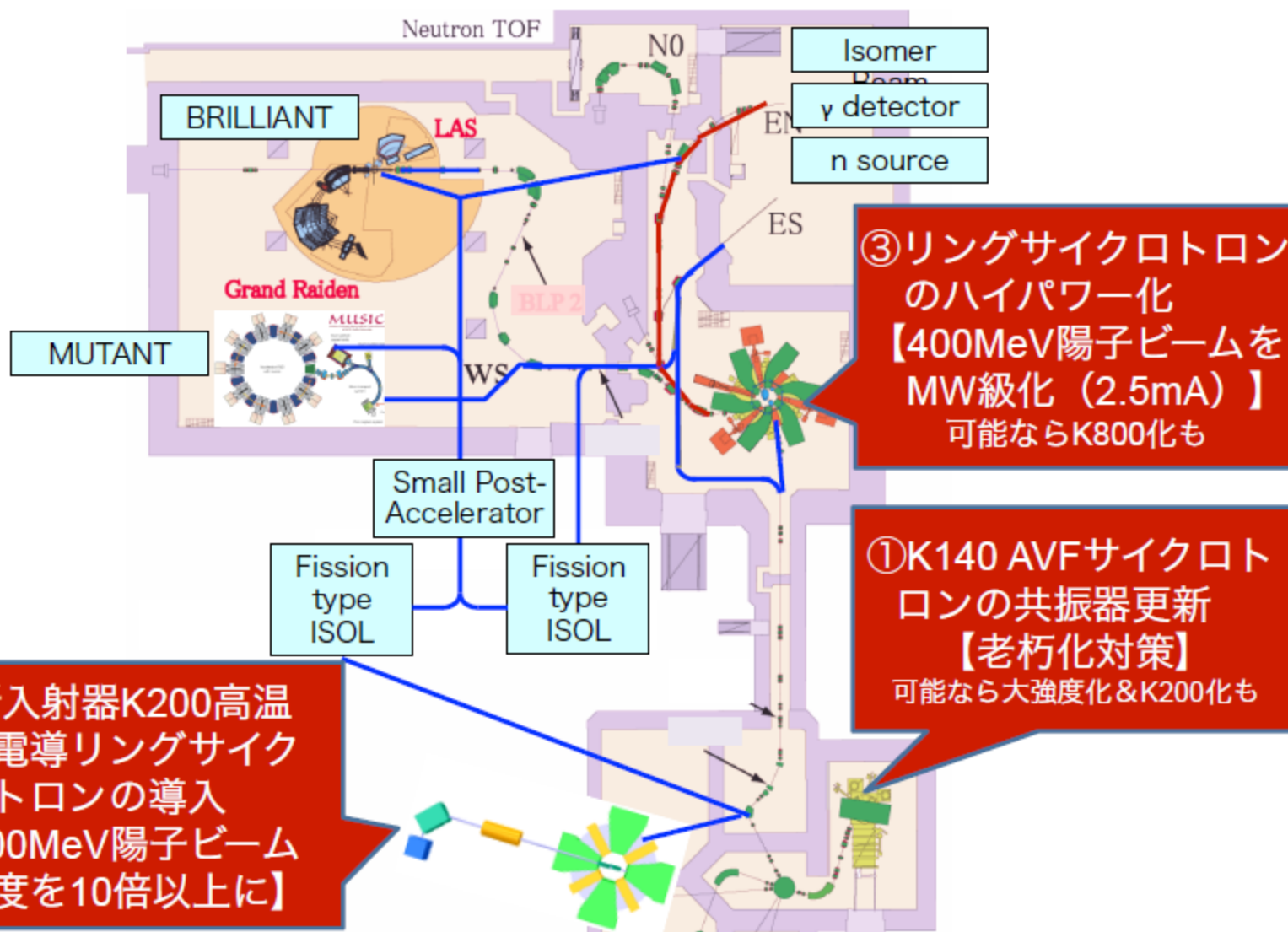
**MuSIC
proton beam**
-0.4kW
target
graphite
t200mm
φ40mm



MuSIC, COMET/Mu2e, PRISM,
Neutrino factory,
Muon collider

Large solid angle & thick target

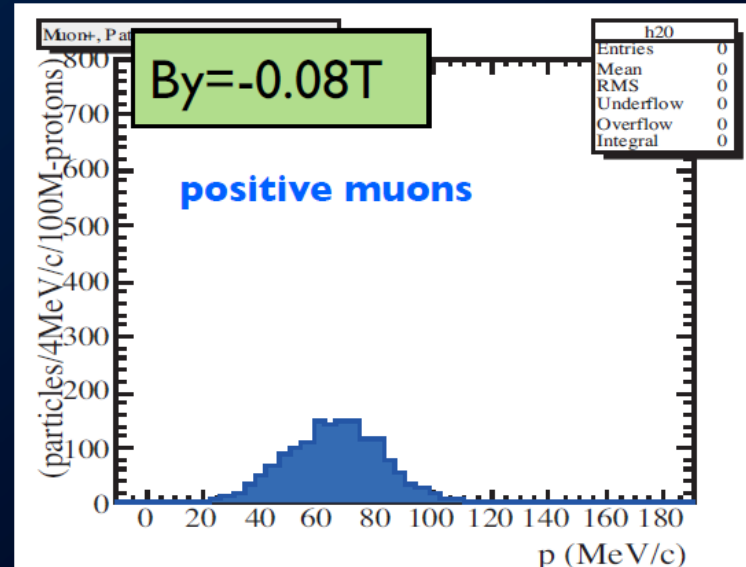
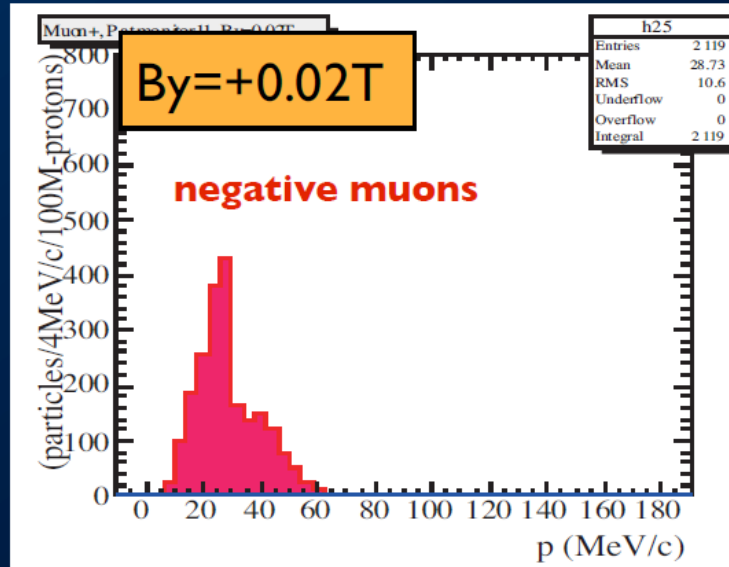
RCNPサイクロトロン施設のアップグレード



A Future Plan of RCNP: 1MW proton cyclotron

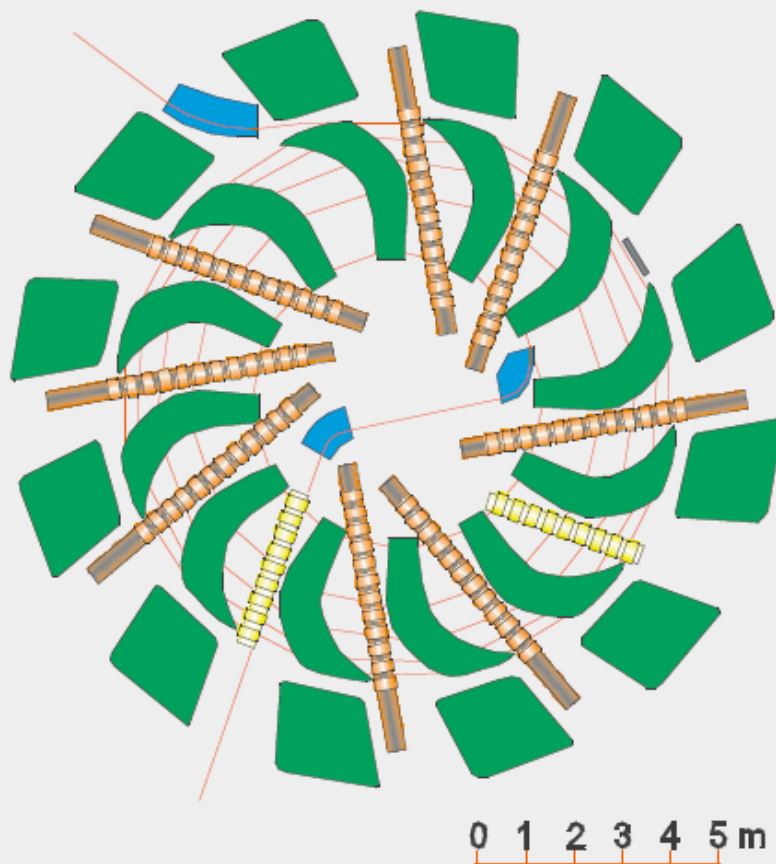
2023~???

		The present MuSIC	A future plan
Proton cyclotron	proton beam energy	400 MeV	400 MeV
	proton beam current	1 μ A	2.5 mA
	proton beam power	400 W	$\times 2.5 \times 10^3$ 1 MW
MuSIC system	production target	Graphite, L=20cm	$\times 2$ Tungsten, 16cm
	Solenoid field	3.5 Tesla	$\times 1.4$ 5.0 Tesla
Muon beam	μ^+ yield	1×10^8 /sec	7×10^{11} /sec
	μ^- yield	1×10^8 /sec	7×10^{11} /sec



Proposal for a 10 MW driver

[1997, Th.Stammach et al]



parameters	1 GeV Ring	PSI Ring
Energy	1000 MeV	590 MeV
Injection energy	120 MeV	72 MeV
Magnets	12 ($B_{\max} = 2.1$ T)	8 ($B_{\max} = 1.1$ T)
Cavities	8 (1000 kV)	4 (800 kV)
Frequency	44.2 MHz	50.63 MHz
Flat tops	2 (650 kV)	1 (460 kV)
Injection radius	2.9 m	2.1 m
Extraction radius	5700 mm	4462 mm
Number of turns	140	186
Energy gain at extraction	6.3 MeV	2.4 MeV
DR/dn	11 mm	5.7 mm
Turn separation	7 s	7 s
Space charge limit	10 mA	2.2 mA (3.0 @ 4 MV/turn)
Beam power	10 MW	1.3 MW

M.Seidel, J-PARC/Japan, 7.7.2009