

DeeMe

ミュオン電子転換過程探索実験

@ J-PARC MLF

大阪大学 青木正治

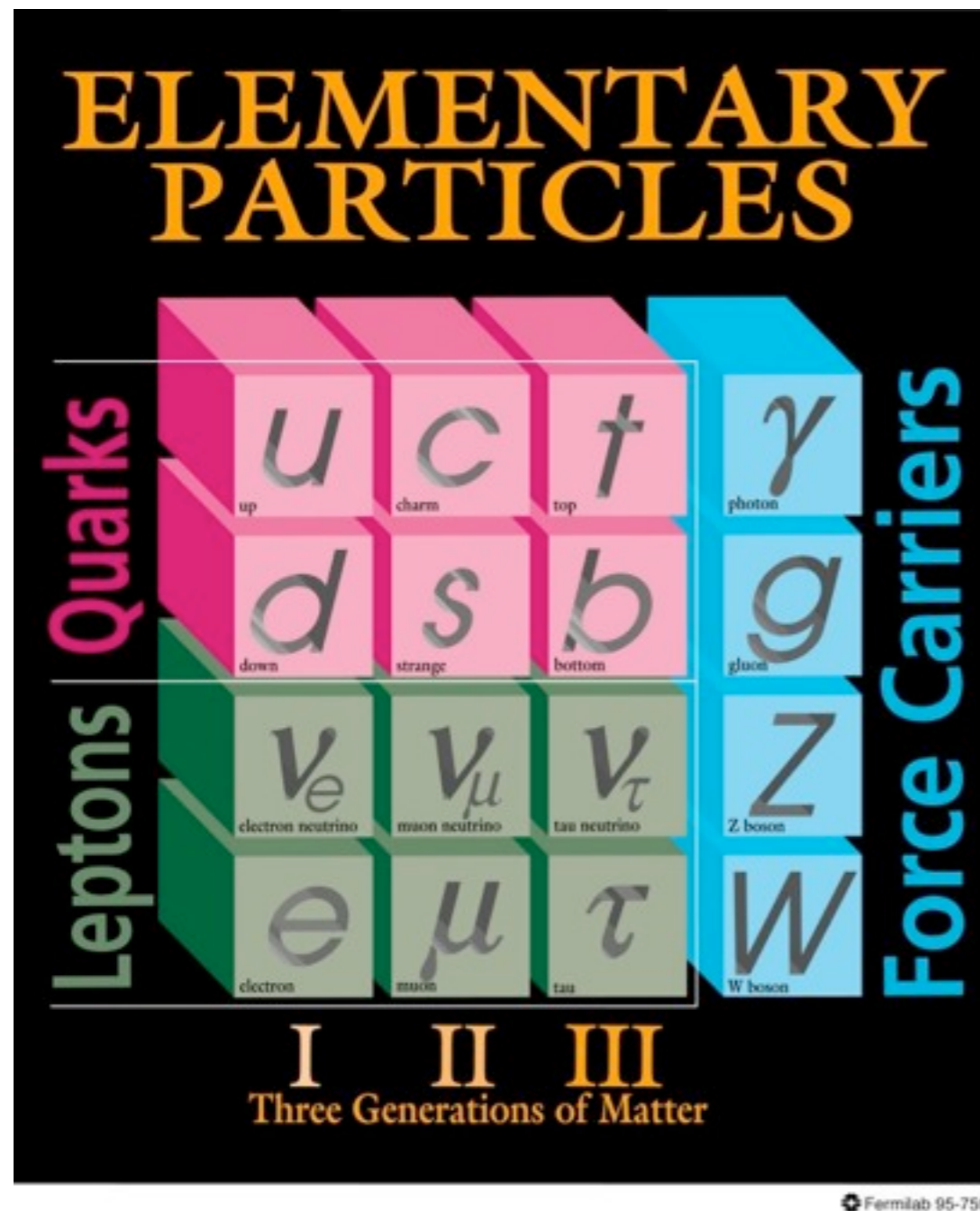
京都大学セミナー 2011/3/1

目次

- インTRODクシヨソ
- 実験方法
- テスト実験
- DeeMeデザイン
- DeeMe研究開発
- まとめ

イントロダクション

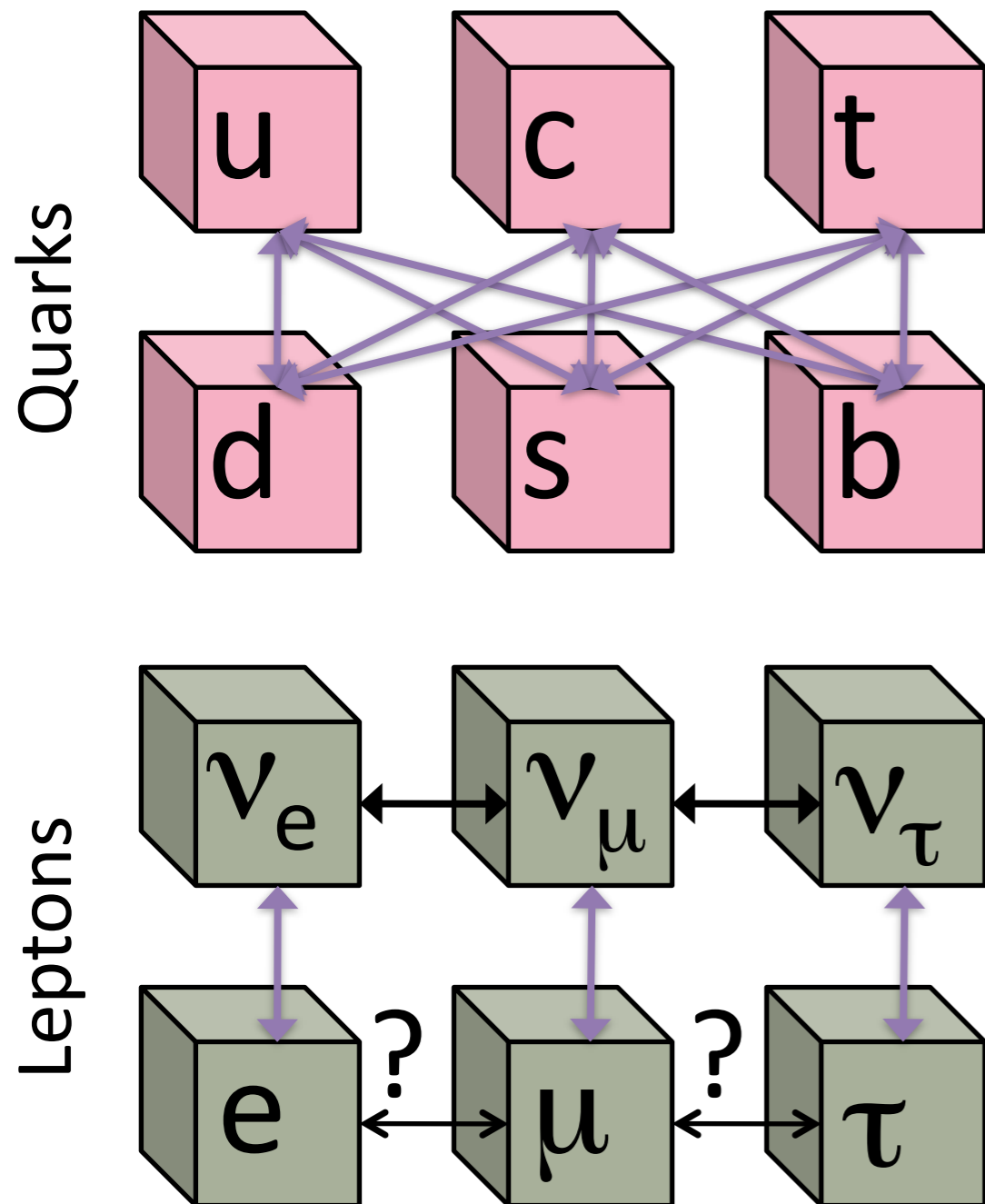
Standard Model of Particle Physics



- There are three generations (flavors) of Quarks and Leptons.
- Muon was found at 1936.
 - I.I. Rabi said “Who ordered that?”
- Is the muon excited state of electron?
 - The world-first search for muon rare process: $\mu \rightarrow e \gamma$ @1947
 - Null Result \rightarrow a hint of generation
- $BR_{\text{theory}}(\mu \rightarrow e \gamma) \sim 10^{-4}$ @ 1958
 - But exp. already gave $BR_{\text{exp.}} < 2 \times 10^{-5}$
 - \rightarrow Two neutrinos model
- $\nu_e \neq \nu_\mu$ @1962 BNL
 - Toward the establishment of the concept of “generation/ flavor”.

Muon played very important role in the development of particle physics.

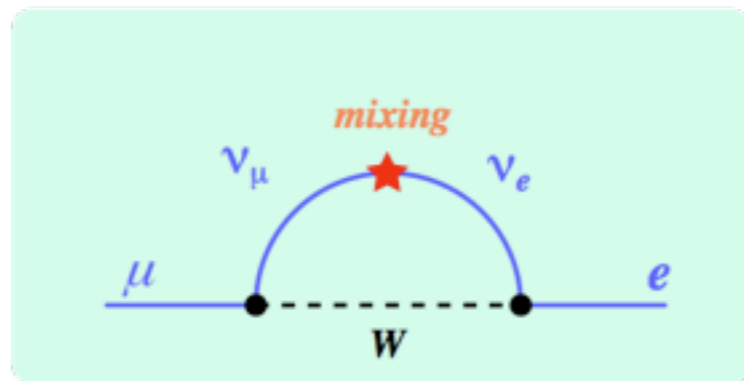
フレーバー物理



- Quark Mixing
 - Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix
 - Established --- Nobel Prize@2008
- Neutrino Mixing
 - Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS) Matrix
 - Homestake, Kamiokande, SNO etc.
 - Observed and Established.
- Charged Lepton Flavor Violation (CLFV)
 - No observation yet at all.
 - Implemented to the Standard Model of Particle Physics as “forbidden”.

荷電レプトン・フレーバ非保存

- 荷電レプトン・フレーバ非保存過程 (CLFV)
 - 素粒子の標準模型では禁止過程
 - 例: $\mu^- + A \rightarrow e^- + A$, $\mu \rightarrow e\gamma$, $\mu \rightarrow eee$, $\tau \rightarrow e(\mu)\gamma$, $\tau \rightarrow e(\mu)h$...
- ニュートリノ振動によるLOOPの効果 → 非常に小さい



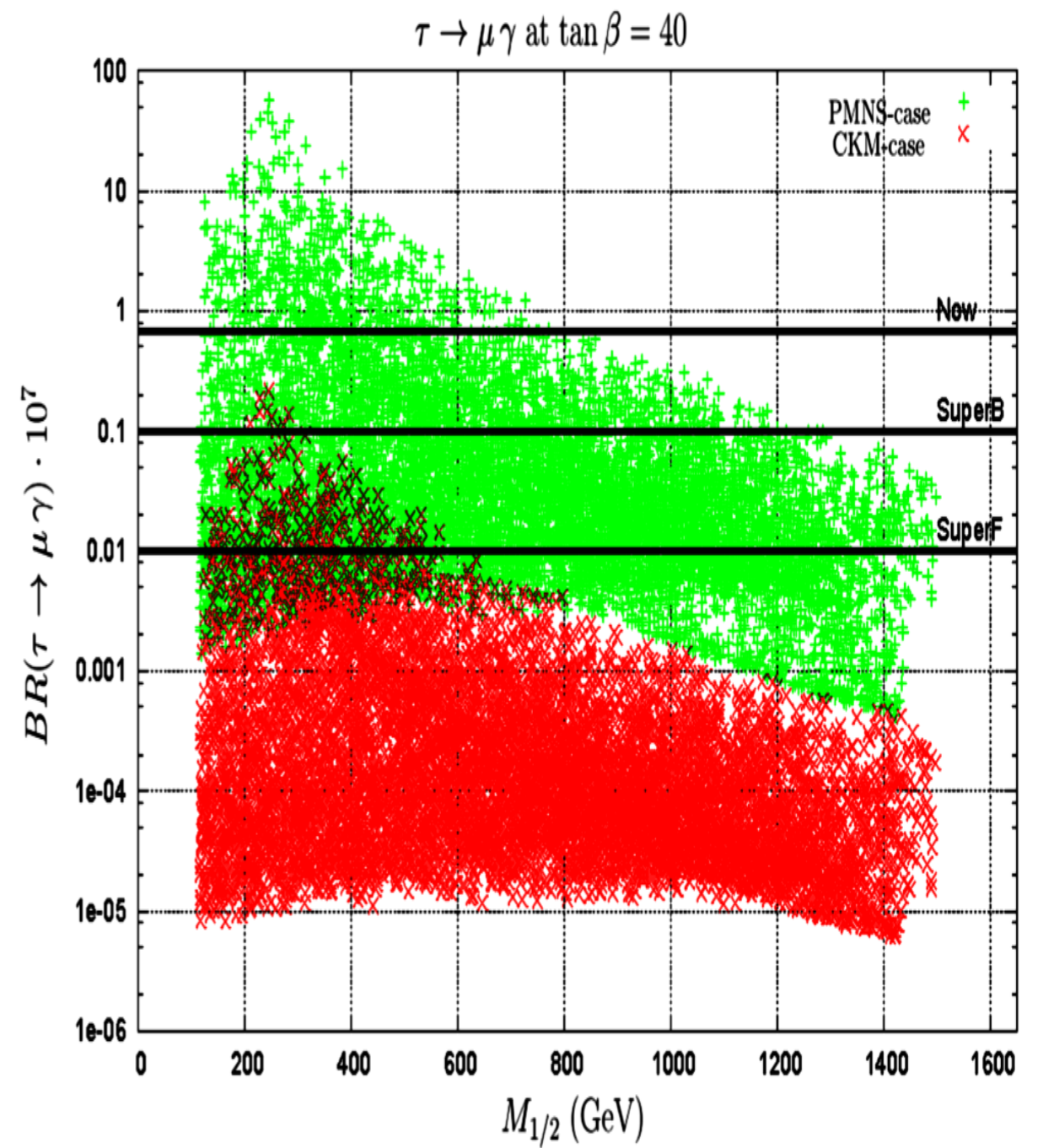
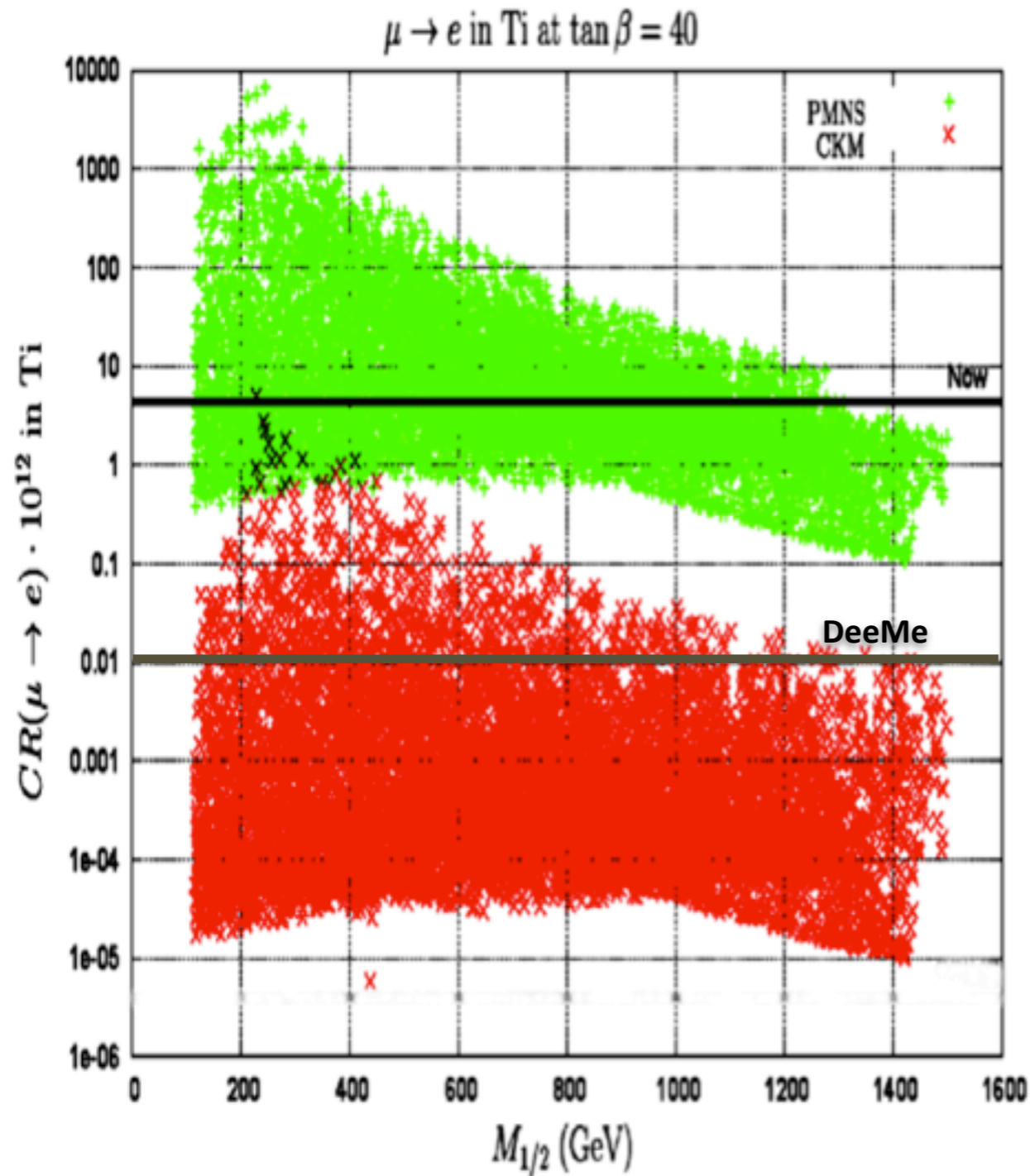
$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \sum_i \left| U_{\mu i} U_{ei}^* \frac{m_{\nu_i}^2}{M_W^2} \right|^2 \simeq 10^{-60} \left(\frac{m_\nu}{10^{-2} \text{ eV}} \right)^4$$

A. de Gouvea

- CLFV →
標準理論 (ニュートリノ振動拡張済) を超えた新物理

CLFV Predictions

SUSY SO(10) GUT

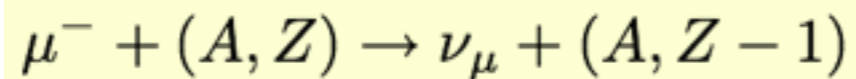


L. Calibbi, A. Faccia, A. Masiero and S.K. Vempati PRD 74(2006) 116002

μ -e轉換過程

- Muonic Atom (1S state)

Muon Capture(MC)



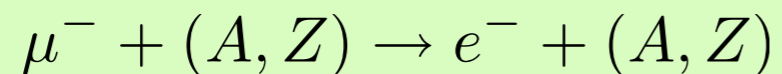
Muon Decay in Orbit (MDO) $\mu^- \rightarrow e^- \nu \bar{\nu}$

- MC:MDO = 1:1000(H), 2:1(Si), 13:1(Cu)

- $\tau(\text{free } \mu^-) = 2.2 \mu\text{s}$

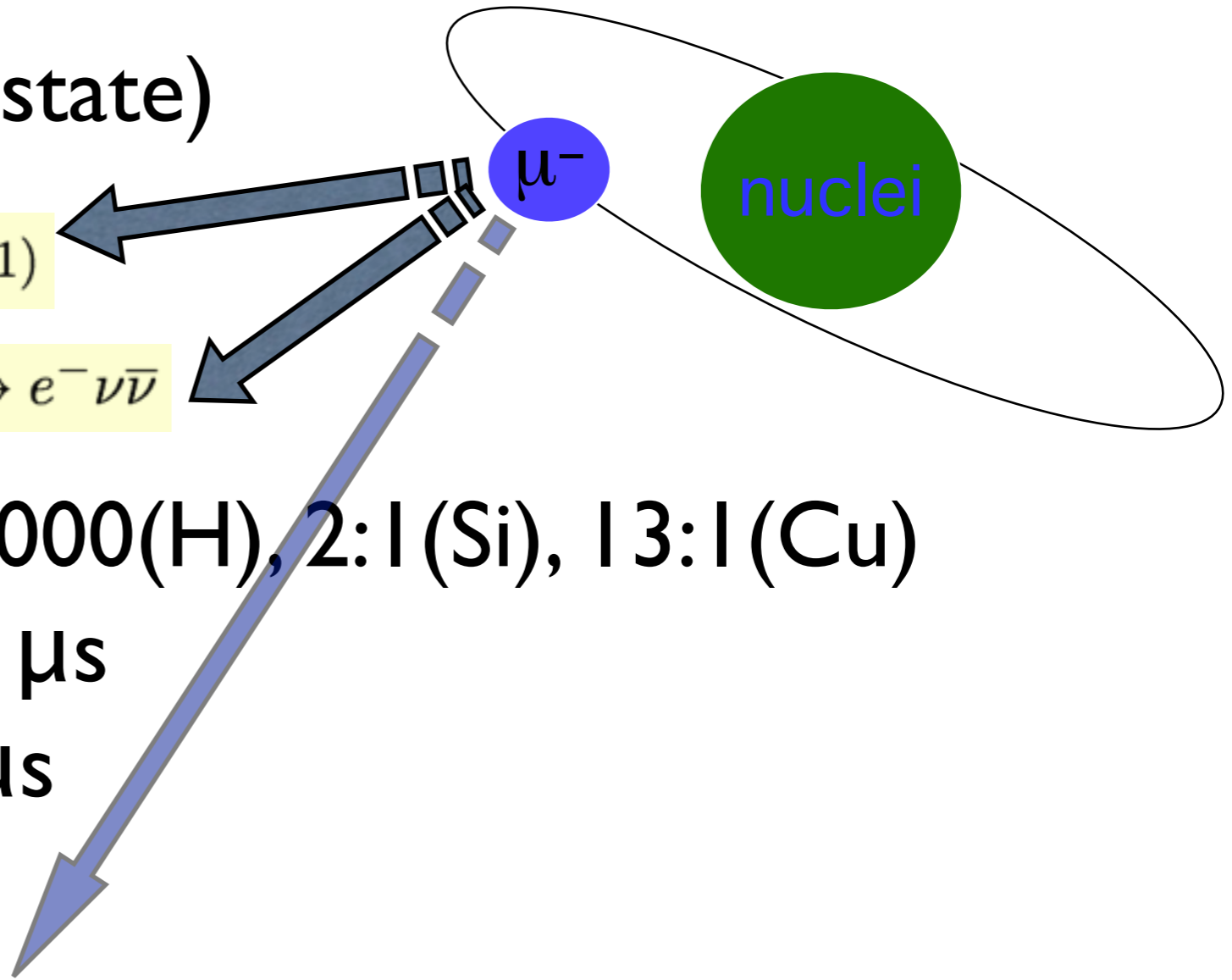
- $\tau(\mu^-; \text{Si}) = 0.76 \mu\text{s}$

- μ -e Conversion



荷電レプトン・フレーバ非保存過程 (CLFV)

$$\text{BR}[\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)] \equiv \frac{\Gamma[\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)]}{\Gamma[\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1)]}$$



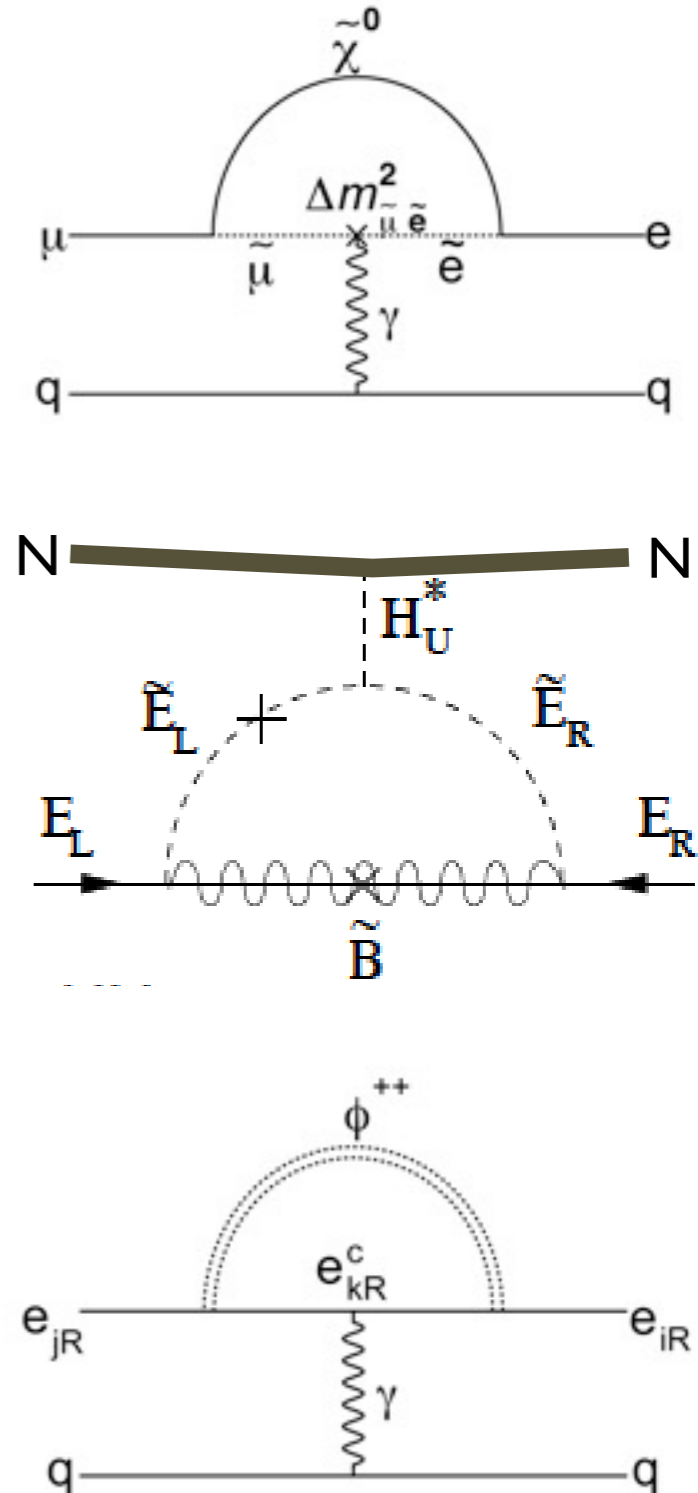
μ - e 転換過程の物理

- SUSY-GUT, SUSY-seesaw (Gauge Mediated process)
 - $BR = 10^{-15} = BR(\mu \rightarrow e\gamma) \times O(\alpha)$
 - $\tau \rightarrow l\gamma$

- SUSY-seesaw (Higgs Mediated process)
 - $BR = 10^{-12} \sim 10^{-15}$
 - $\tau \rightarrow l\eta$

- Doubly Charged Higgs Boson (LRS etc.)
 - Logarithmic enhancement in a loop diagram for $\mu\bar{N} \rightarrow e\bar{N}$, not for $\mu \rightarrow e\gamma$
 - M. Raidal and A. Santamaria, PLB 421 (1998) 250

- Little Higgs Models
- Randall-Sundrum Models
- SUSY with R-parity Violation
- Leptquarks
- Heavy Z'
- Multi-Higgs Models

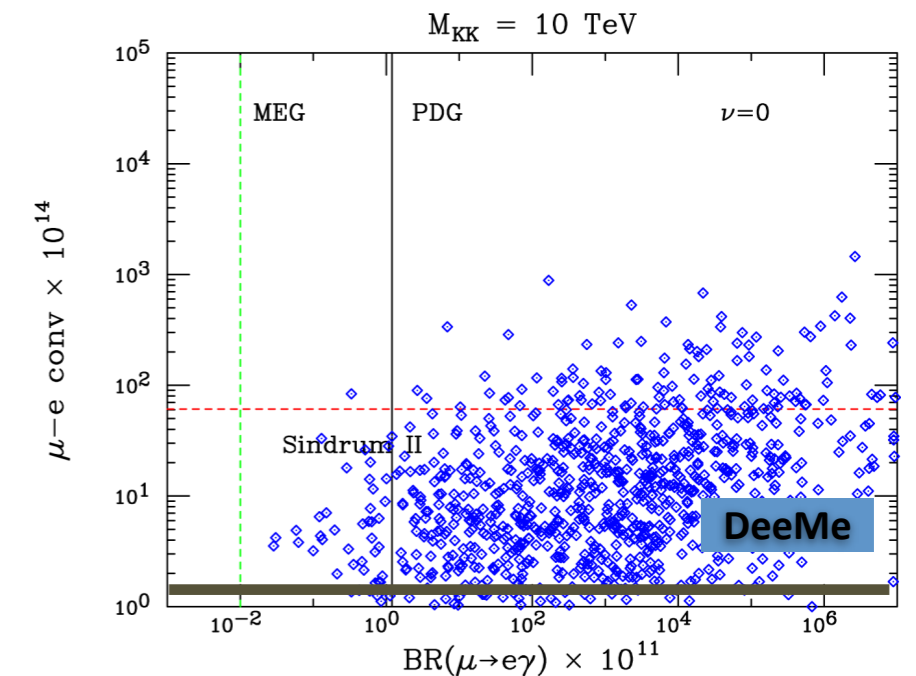


Non-SUSY models at TEVs

Many proposed TeV-scale models have new particles, which have lepton-flavor numbers or have lepton-flavor violating interactions.

SM on Randall&Sundrum BG

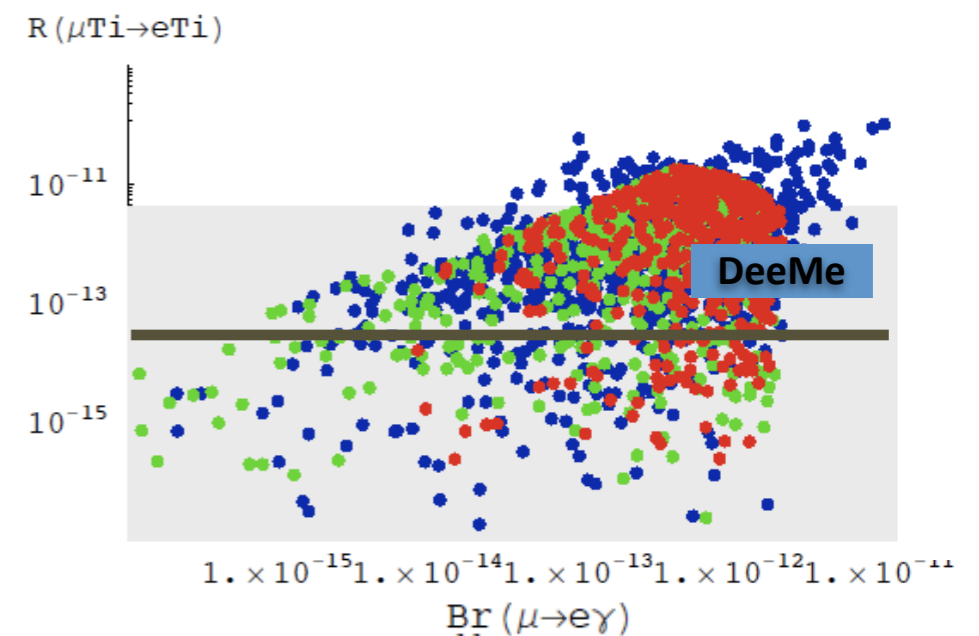
- SM particles propagate over curved 5th dim. space.
- Overlapping of wave functions of quark/lepton and Higgs explains hierarchical structure.
- Kaluza-Klein particles have large flavor-violating interactions.



(Agache et al)

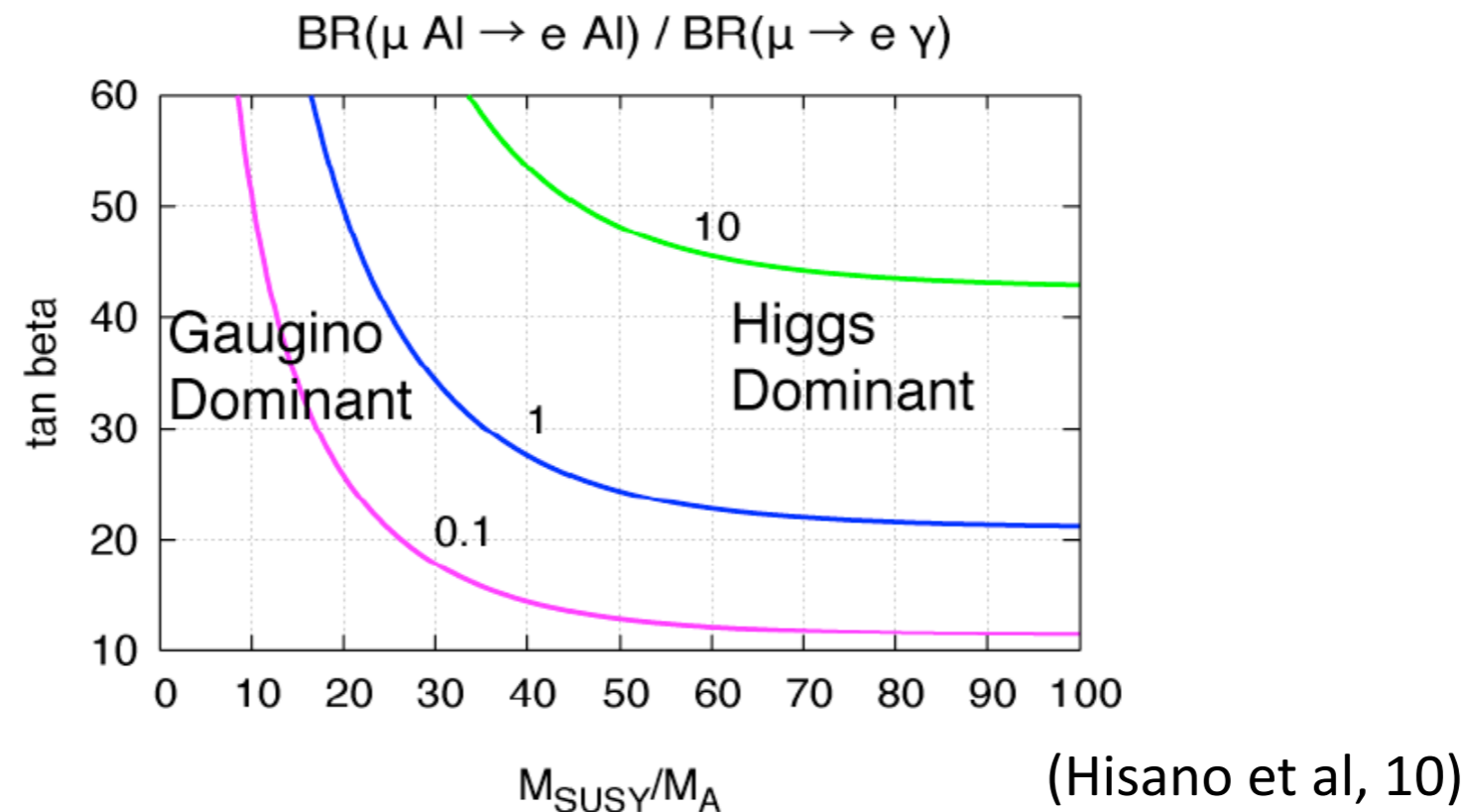
Littlest-Higgs model with T parity

- SM Higgs is pseudo NG boson.
- T parity is imposed to escape from EW precision test and also to introduce the DM candidate.
- T-odd mirror leptons/quarks have flavor-violating interactions.



What is the BSM if cLFV is found?

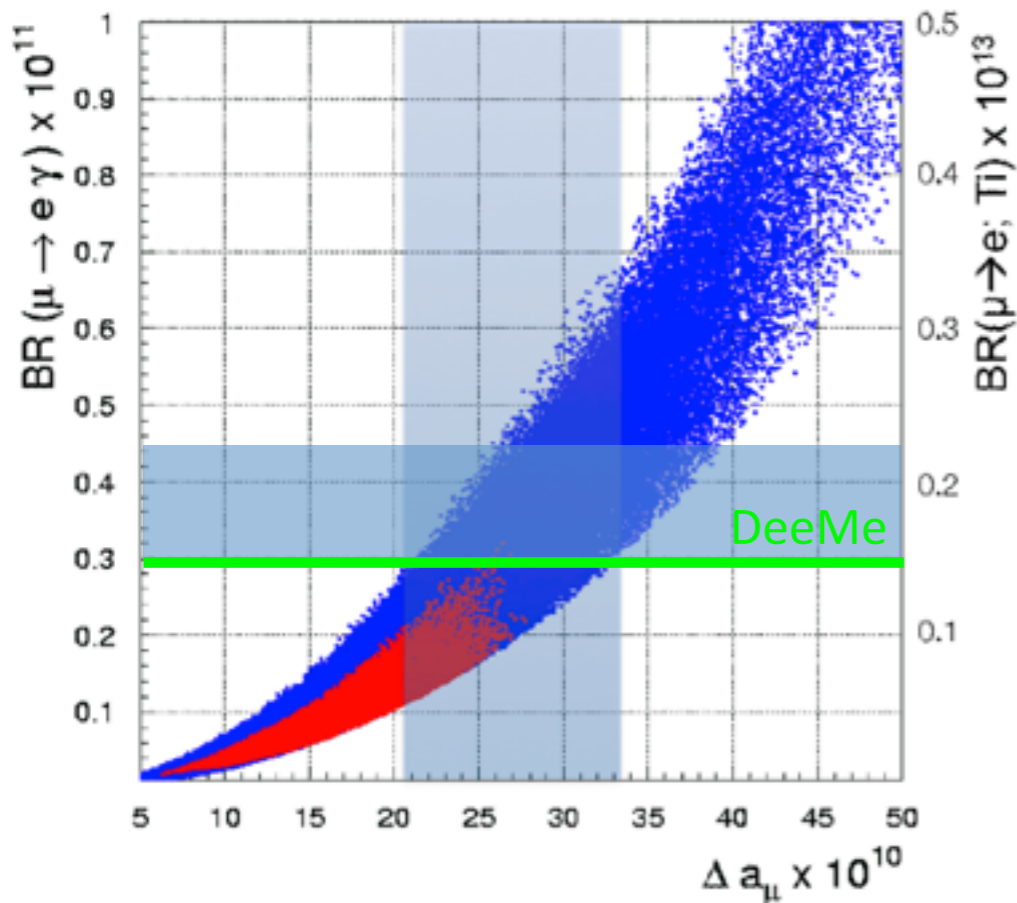
In SUSY SM, the Higgs mediation contribution is sizable when SUSY particle masses are larger $O(1-10)$ TeV. Ratio between μ -e conversion rate and $\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma)$ is modified.



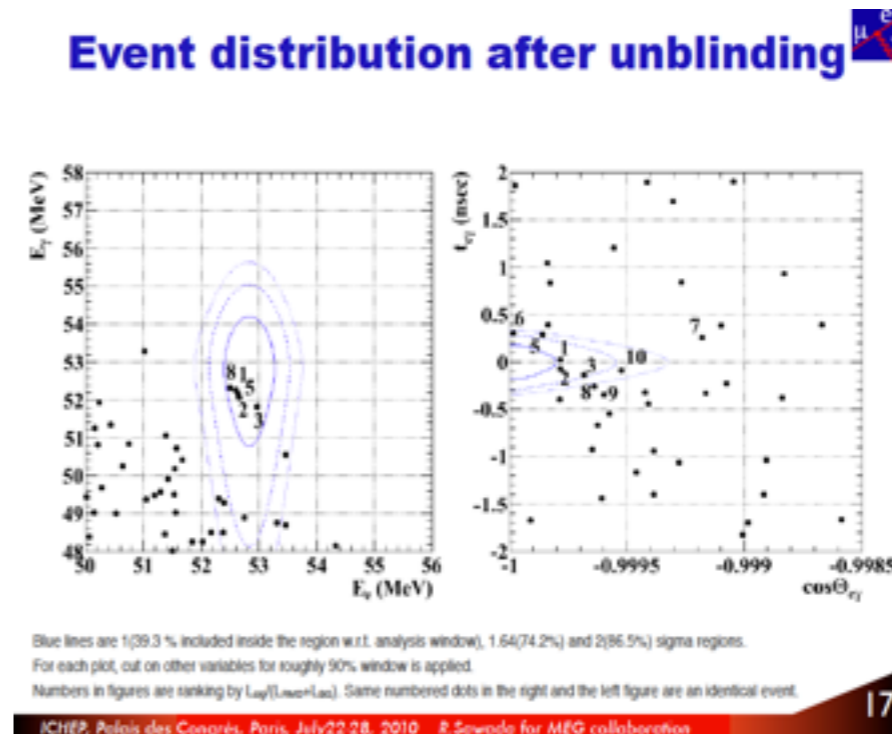
(Hisano IFMFS2010)

他のミュオン実験との関係

- muon g-2
 - 実験と理論で 4σ のズレ (注: BaBarのISR dataを考慮すると 3σ と言う説もある)
- MEG 2009 analysis @ ICHEP2010(Paris)
 - Most probable $N_{\text{sig}} = 3.0 \sim 4.5$ 、但し $N_{\text{sig}} = 0$ は排除できない。
 - B.R. = $N_{\text{sig}} / 10^{12}$

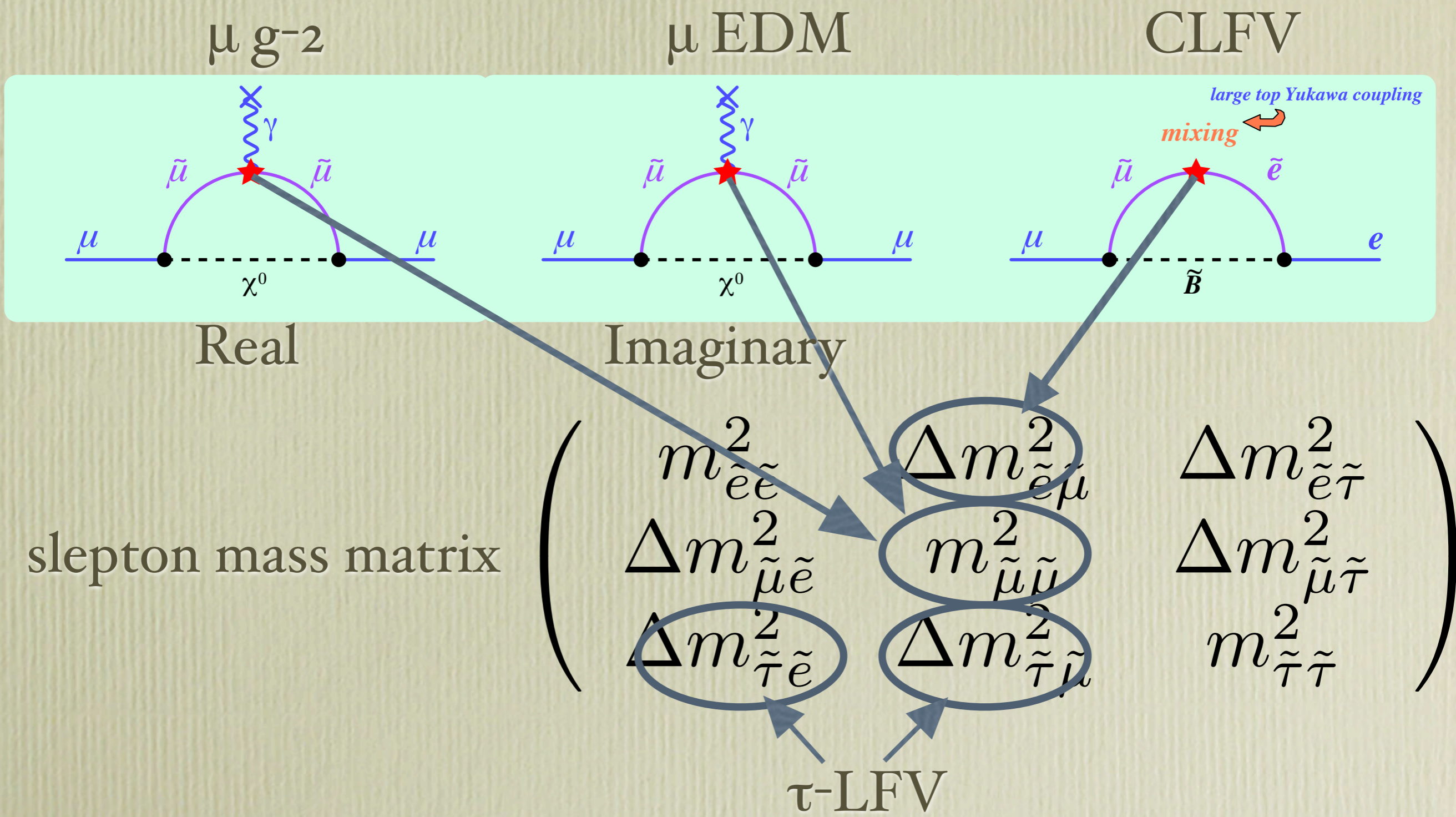


G. Ishidori *et al.*, PRD 75 (2007) 115019

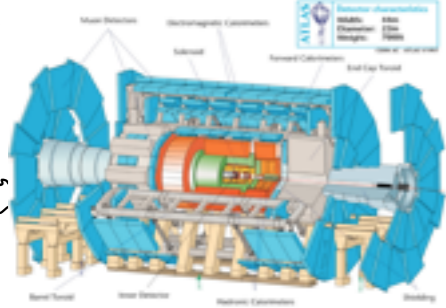


MEG talk at ICHEP2010 Paris

Physics of slepton mass matrix

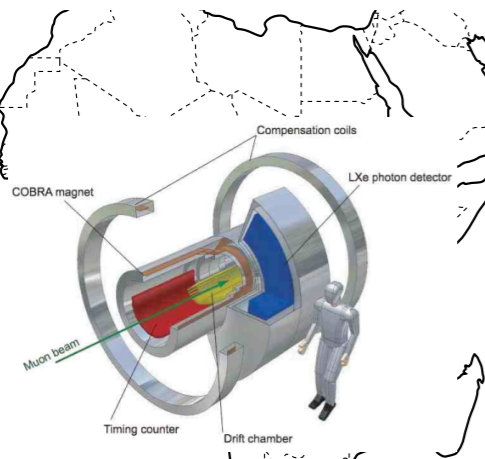


CLFV and Related Programs

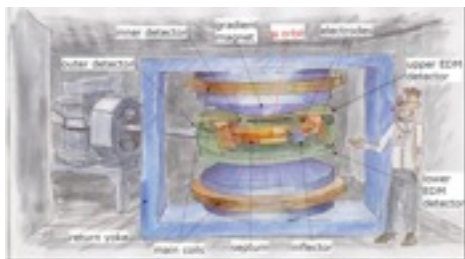


LHC: SUSY Search

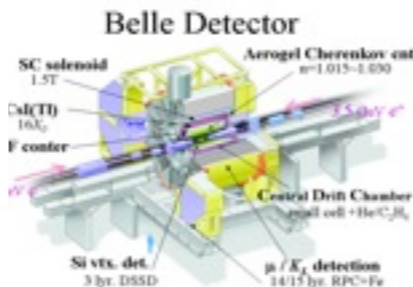
$$B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-, B_s \rightarrow \tau \mu, \tau \rightarrow \mu \mu$$



PSI/MEG: $BR(\mu \rightarrow e \gamma) < 10^{-13}$



PSI: μ EDM



Belle Detector

KEKB: $\tau \rightarrow e(\mu) \gamma, \tau \rightarrow e(\mu) \eta \dots$
 $BR < 10^{-8}$

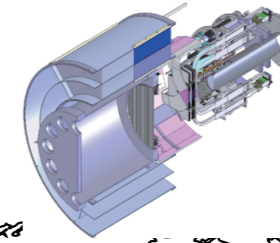


J-PARC: $BR(\mu - N \rightarrow e - N) < 10^{-14}, 10^{-16}$

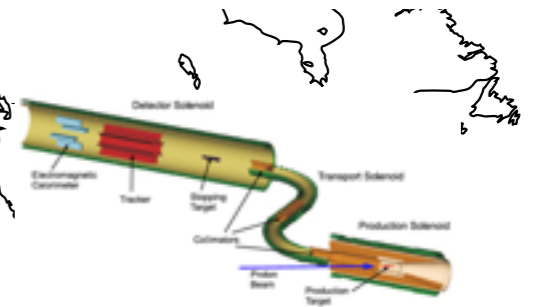
J-PARC: $K_{e2}/K_{\mu 2}$

J-PARC: μ g-2 < 0.1 ppm

J-PARC: μ EDM



TRIUMF: PIENU



FNAL: $BR(\mu - N \rightarrow e - N) < 10^{-16}$

FNAL: μ g-2 < 0.1 ppm



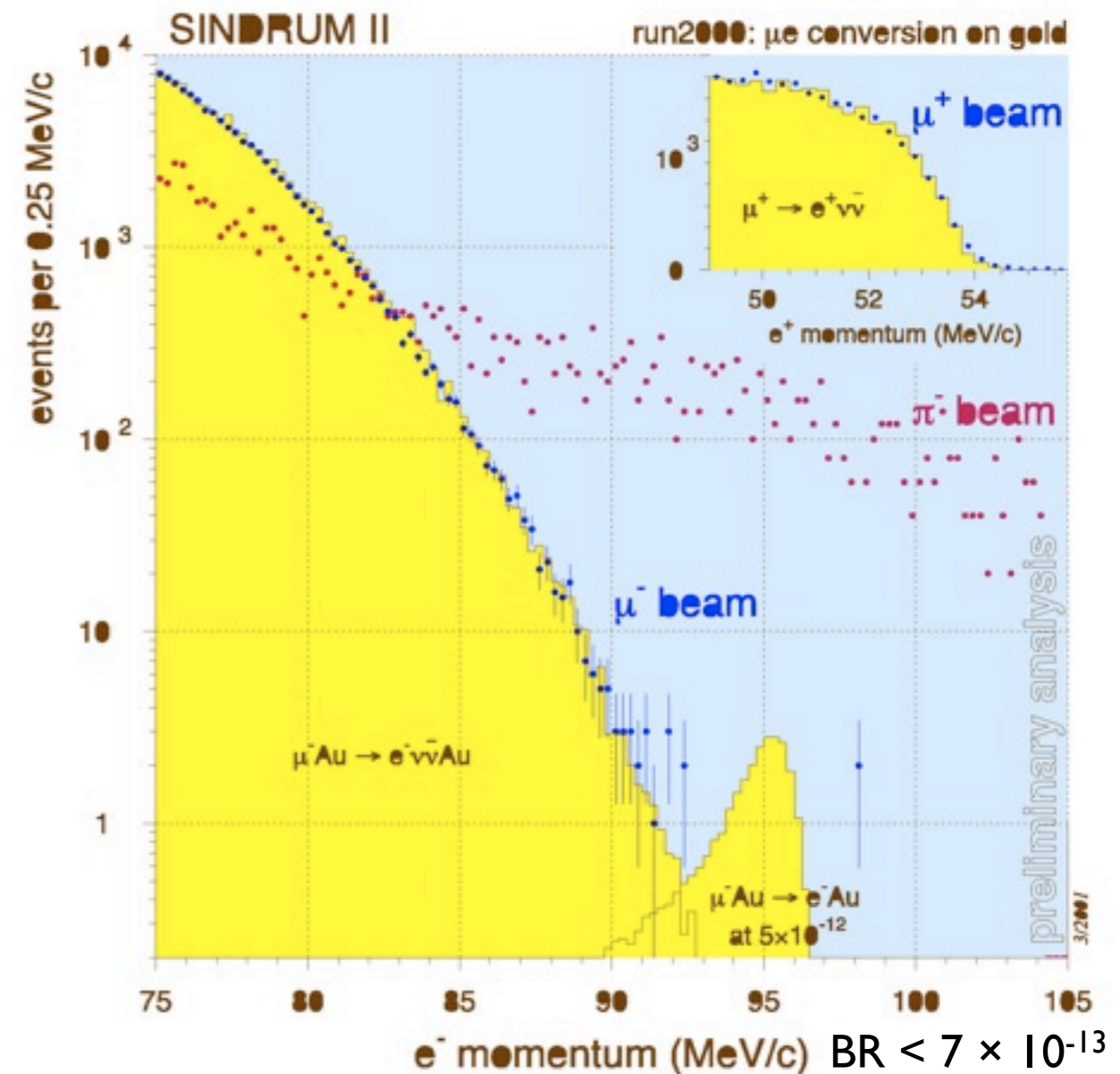
BNL: μ g-2 < 0.5 ppm
 >3- σ off from SM

実験方法

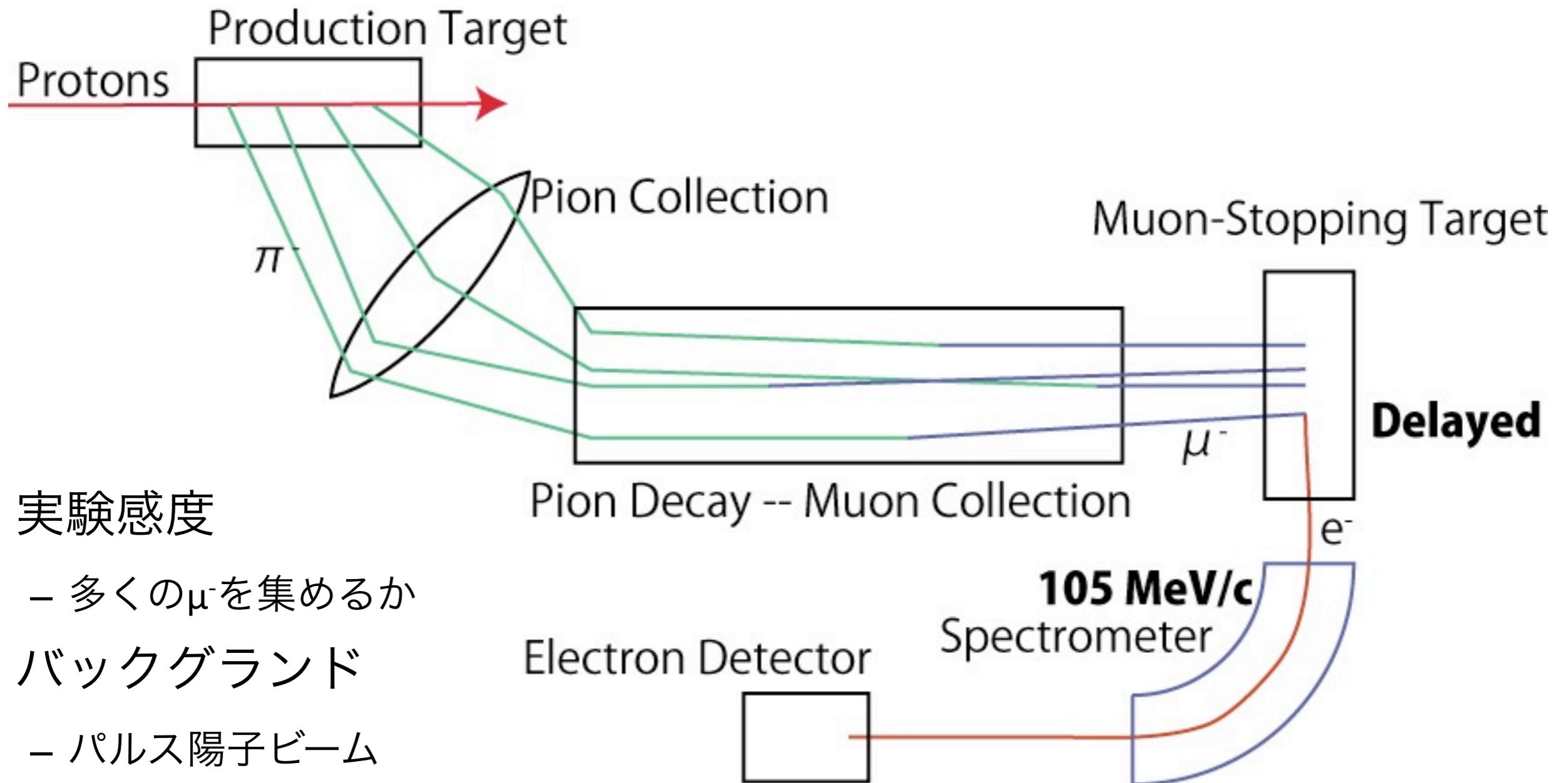
μ -e転換過程: 測定の実理

- 信号: $\mu^- + (A,Z) \rightarrow e^- + (A,Z)$
 - 「単色」 「単一」 の「遅延」 電子
 - 単色: 105 MeV
 - 遅延: $\sim 1 \mu\text{s}$
 - アクシデンタルBG無し
- バックグラウンド
 - Muon Decay in Orbit (MDO)
 - $E_e < 102.5 \text{ MeV}$ (BR: 10^{-14})
 - $E_e < 103.5 \text{ MeV}$ (BR: 10^{-16})
 - Beam Pion Capture
 - $\pi^- + (A,Z) \rightarrow (A,Z-1)^* \rightarrow \gamma + (A,Z-1)$
 $\gamma \rightarrow e^+ e^-$
 - 即発
- 信号とバックグラウンドの分離
 - 遅延タイミング
 - $E_e > 102.5 \text{ MeV}$

SINDRUM II

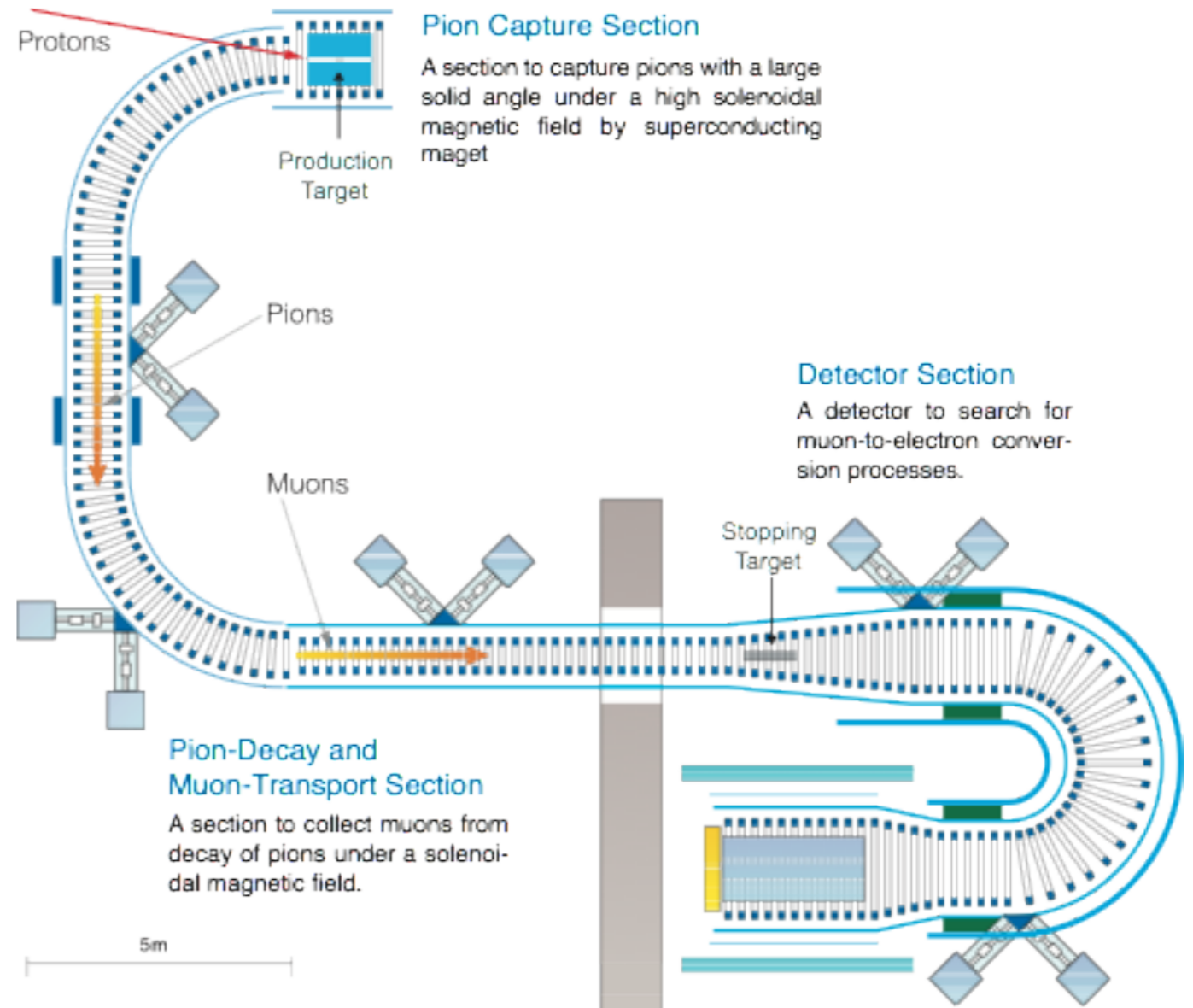
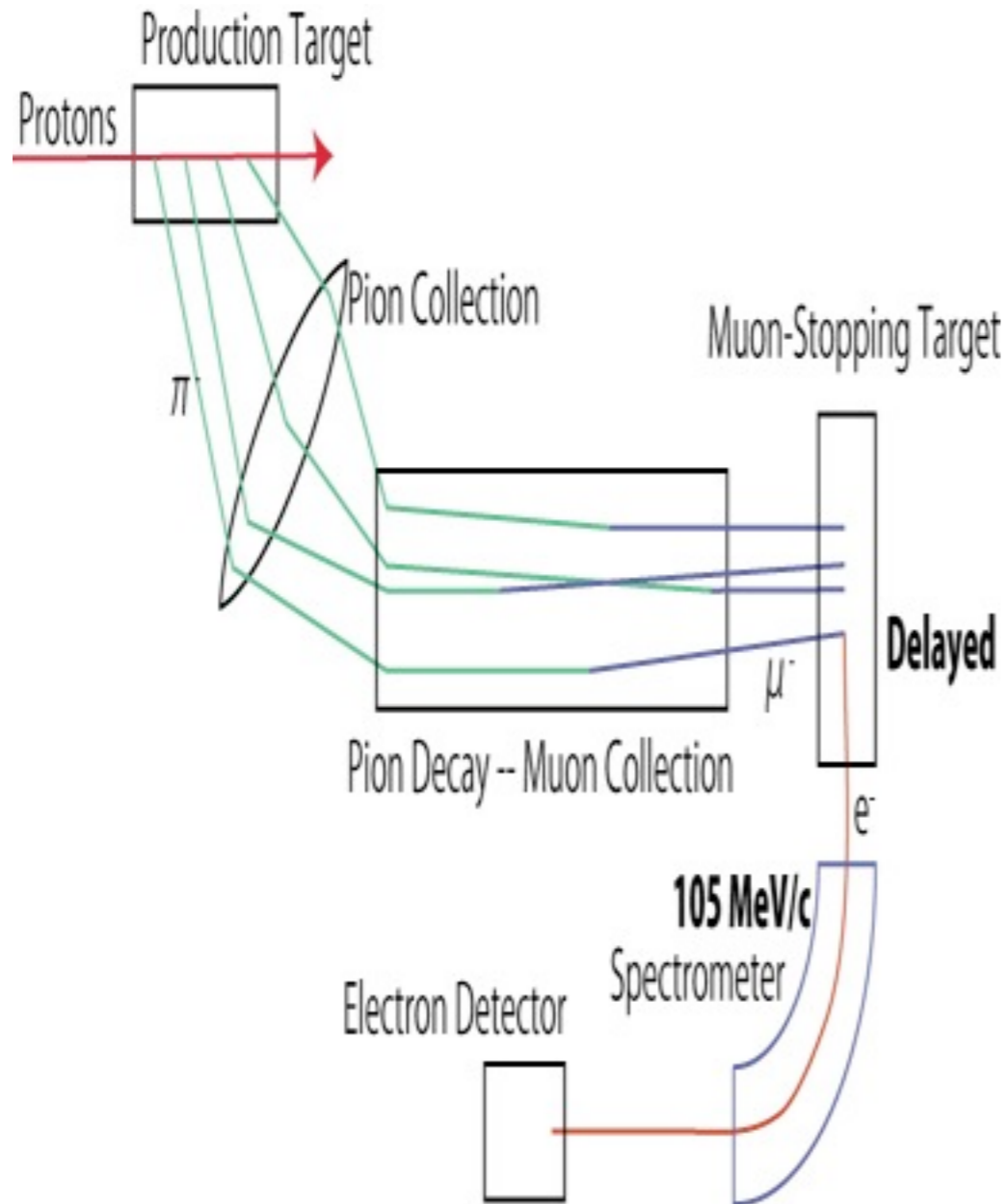


一般的な実験方法



- 実験感度
 - 多くの μ^- を集めるか
- バックグラウンド
 - パルス陽子ビーム

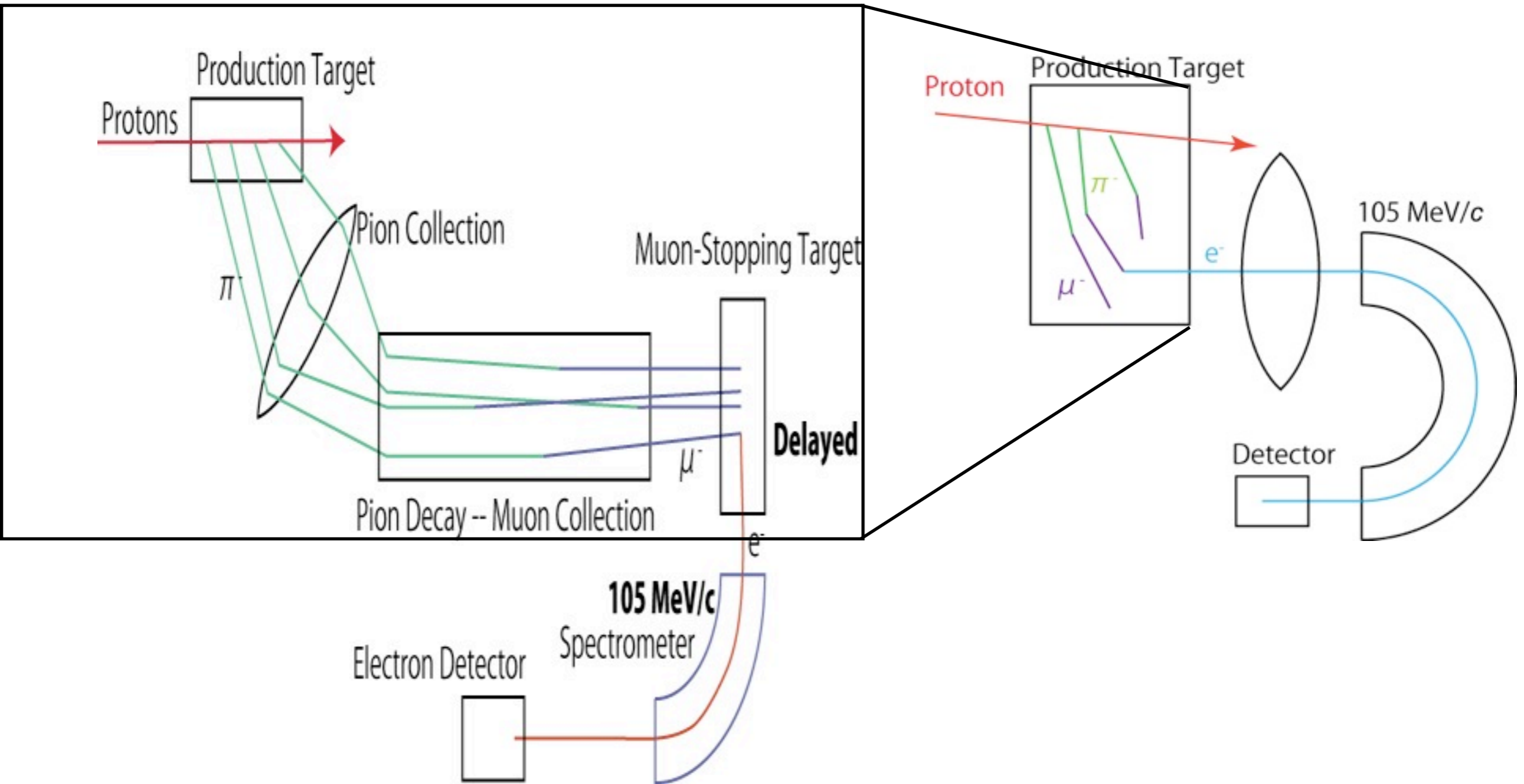
COMET @ J-PARC/MR



COMET: BR[AI] < 10^{-16}



μ -e electrons may directly coming from a production target.



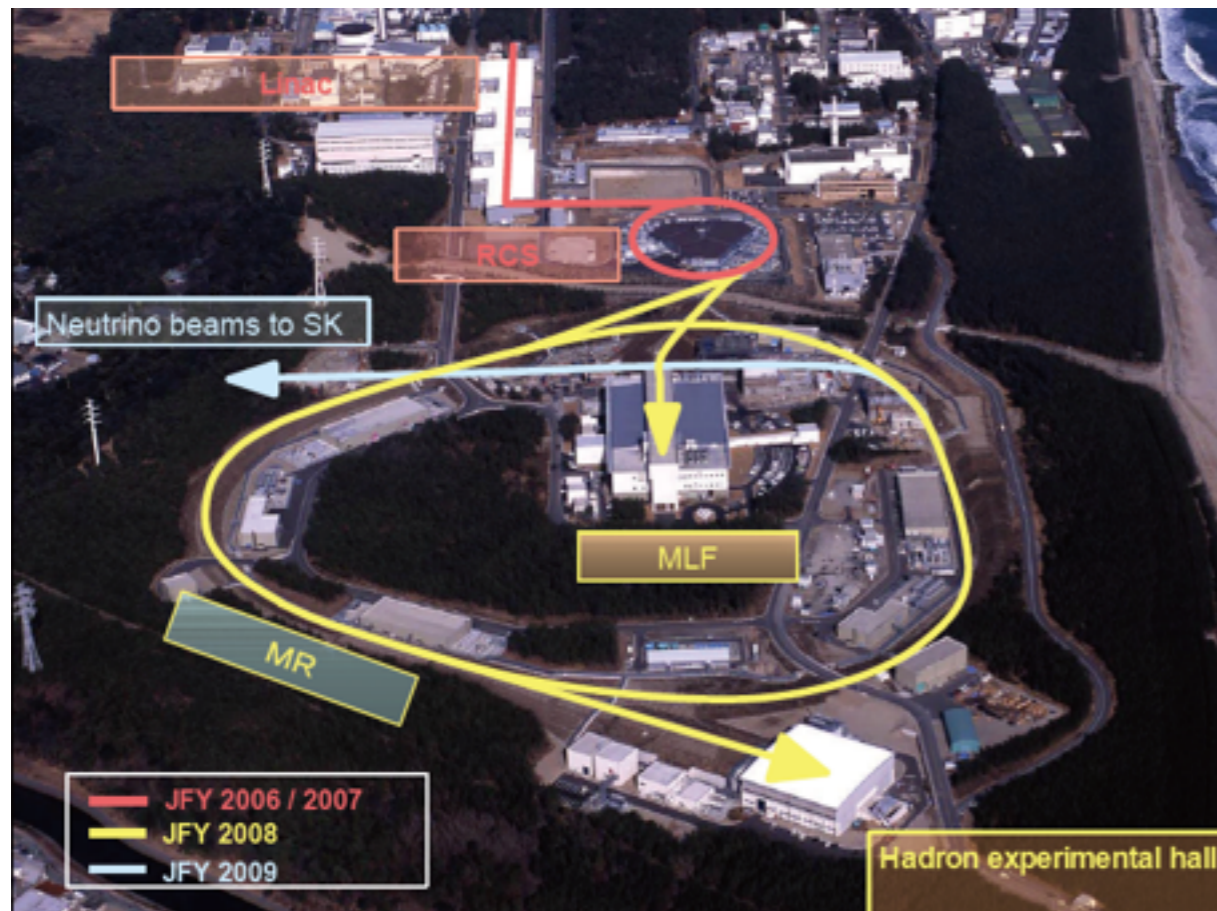
an electron analogue of the surface muon.

Experiment could be very simple, quick and low-cost.

テスト実験

テスト実験

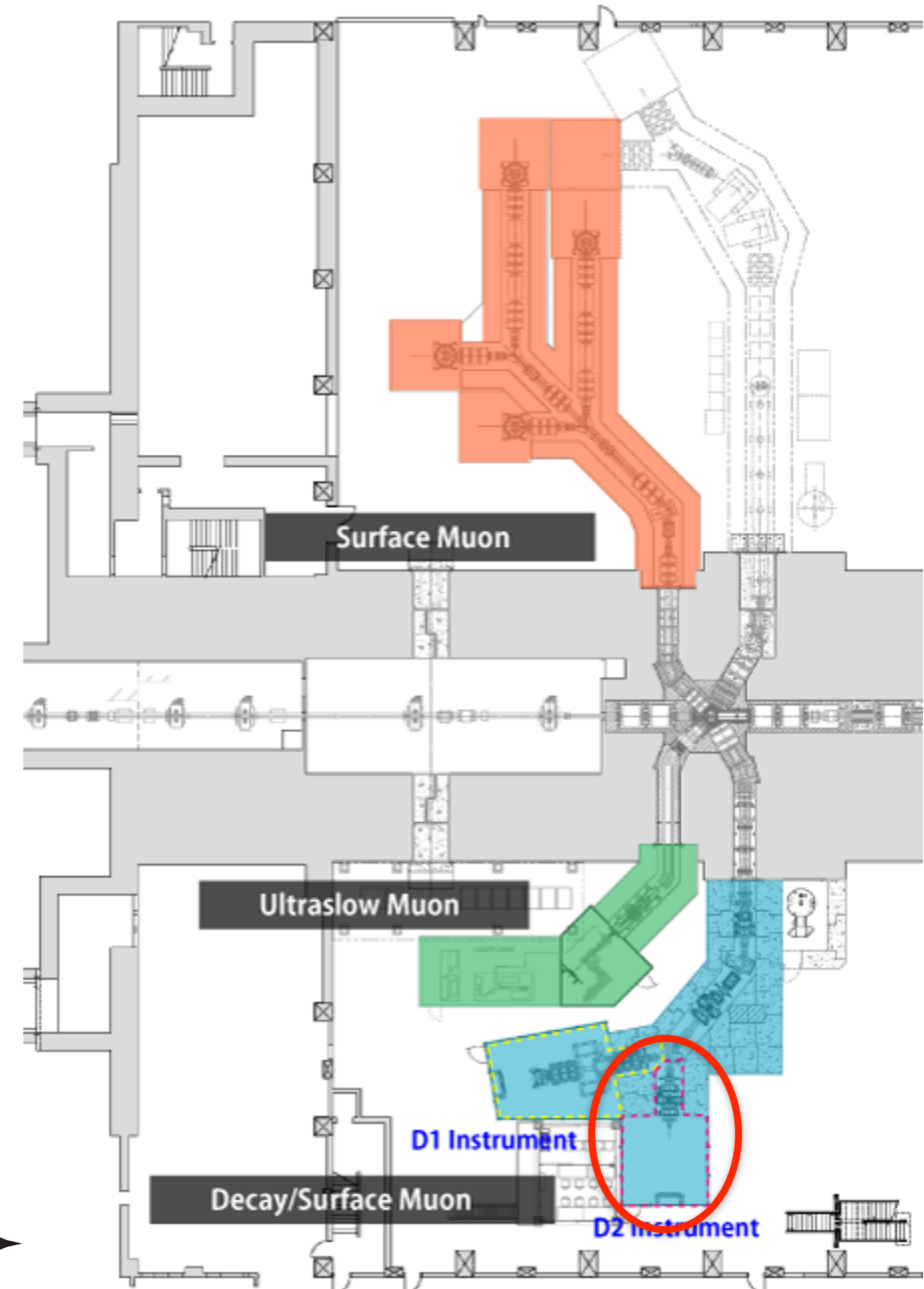
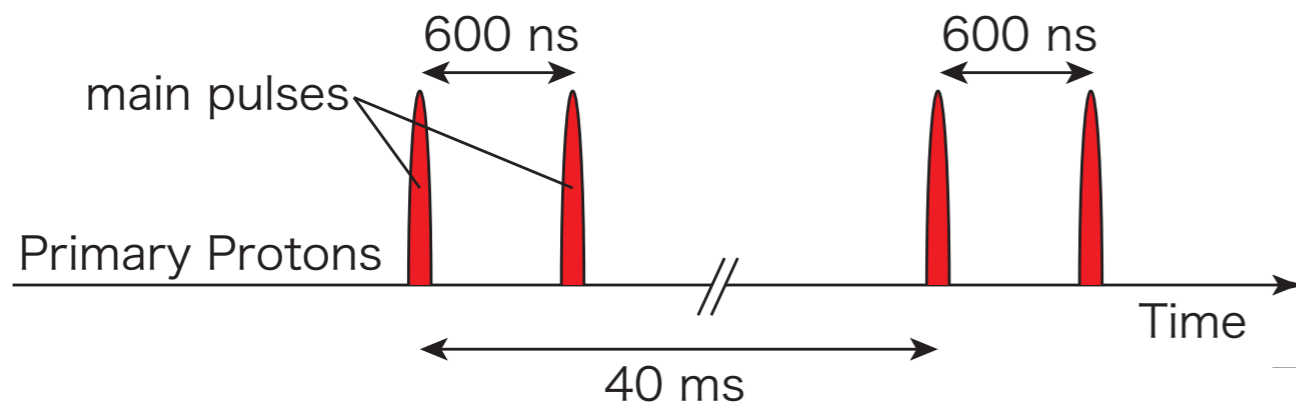
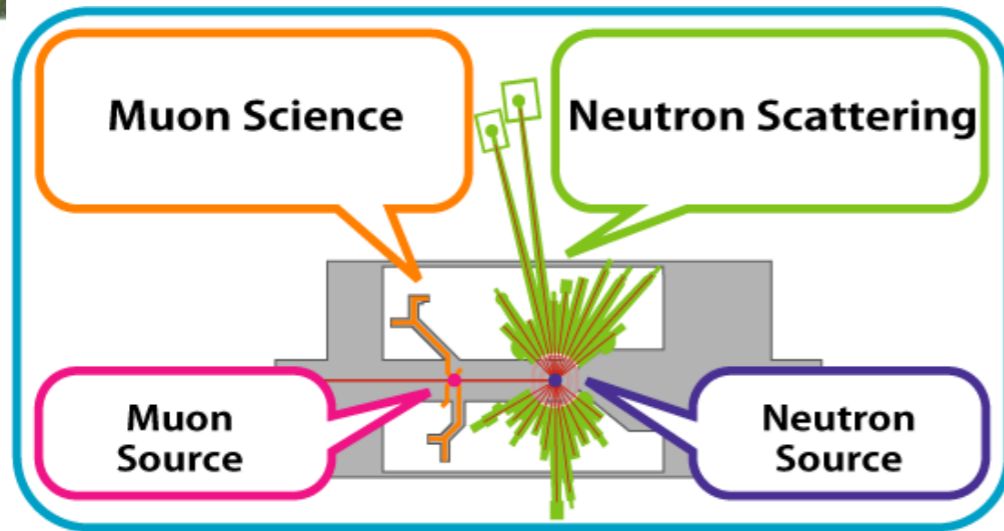
- 陽子標的に中に静止する μ^- の収量
→ 東海村J-PARC MLFでの試験を実施(2009年)



MLF

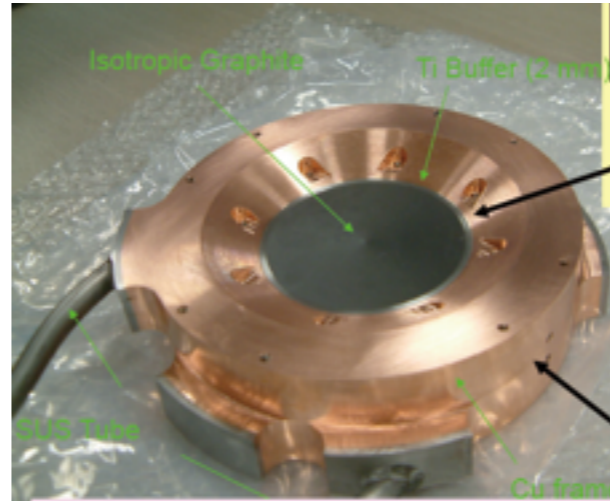


J-PARC MLF Muon Facility

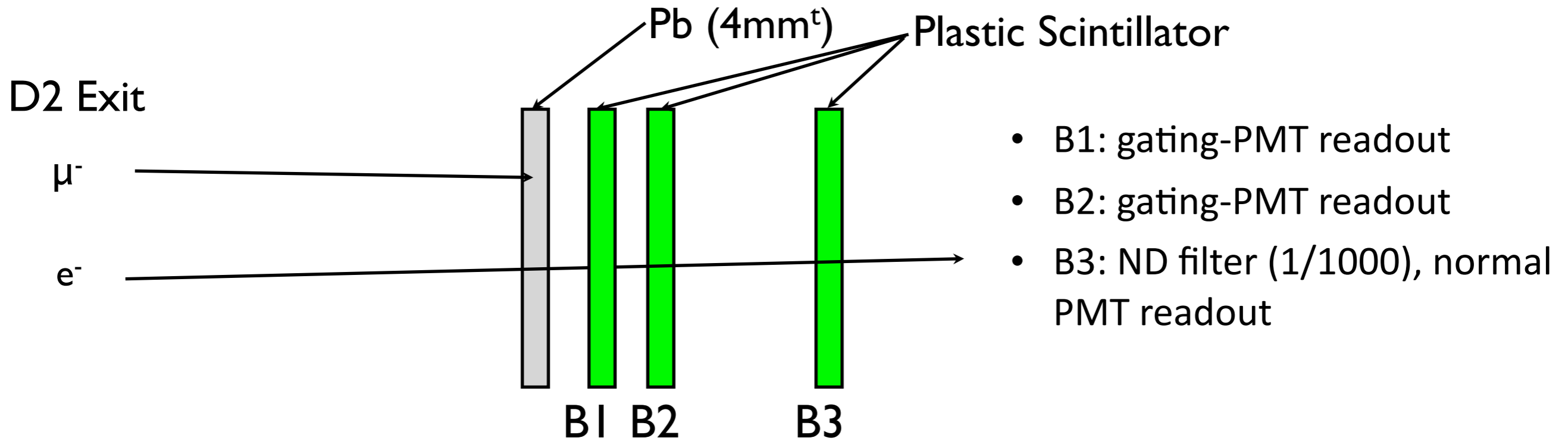


テスト測定@ D2エリア

- MLFミュオンDラインD2エリア
- グラファイト標的
- 立体角: 40 msr
- モーメントムバイト: 3%r.m.s.
- ビームライン長: ~40 m
- 表面ミュオン収量: ~160 kHz @ 17 kW
- ミューオニック原子収量測定
 - 標的からのミッシェル電子収量
 - 遅延電子の時間スペクトル
 - グラファイト中の電子: 2.0 μsec
 - SUS, アルミ、銅など: $\ll 2.0 \mu\text{sec}$
 - 遅延電子の運動量スペクトル



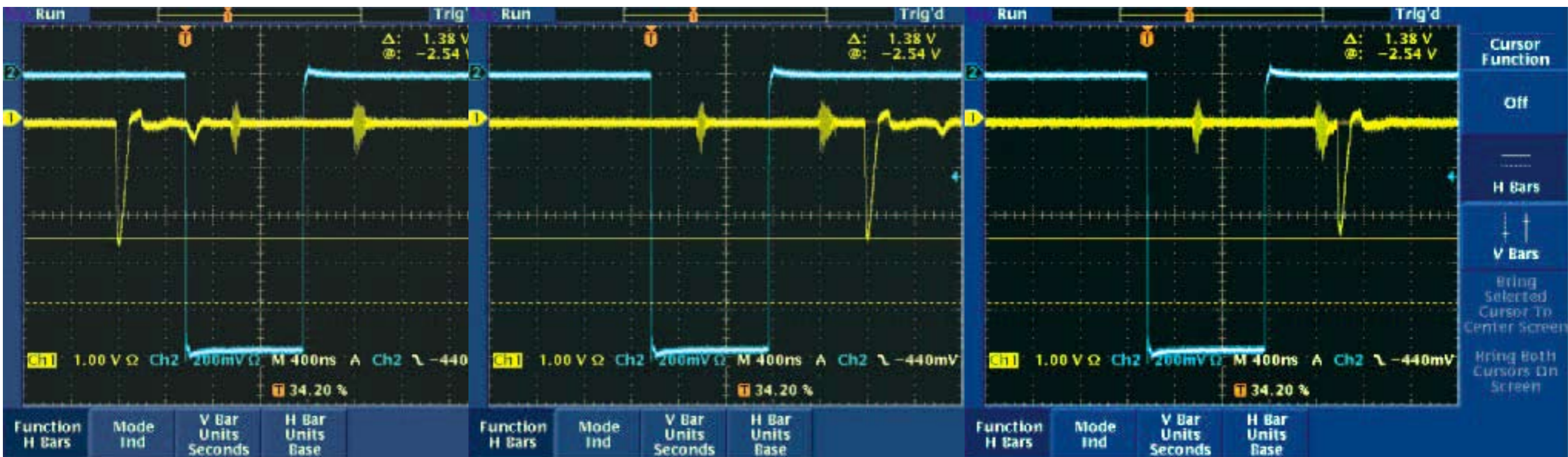
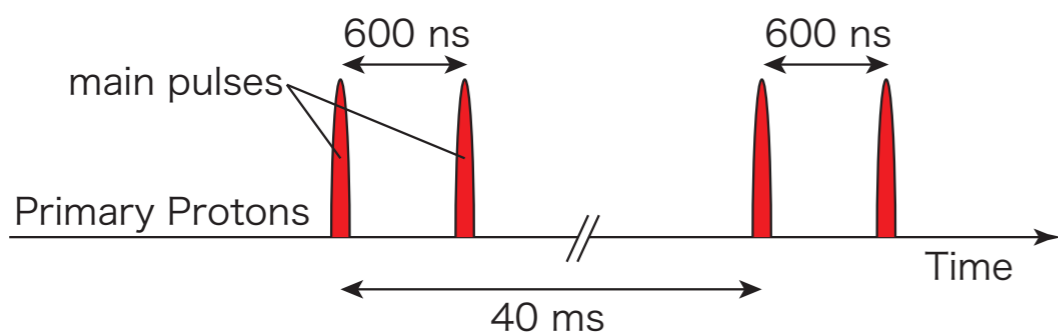
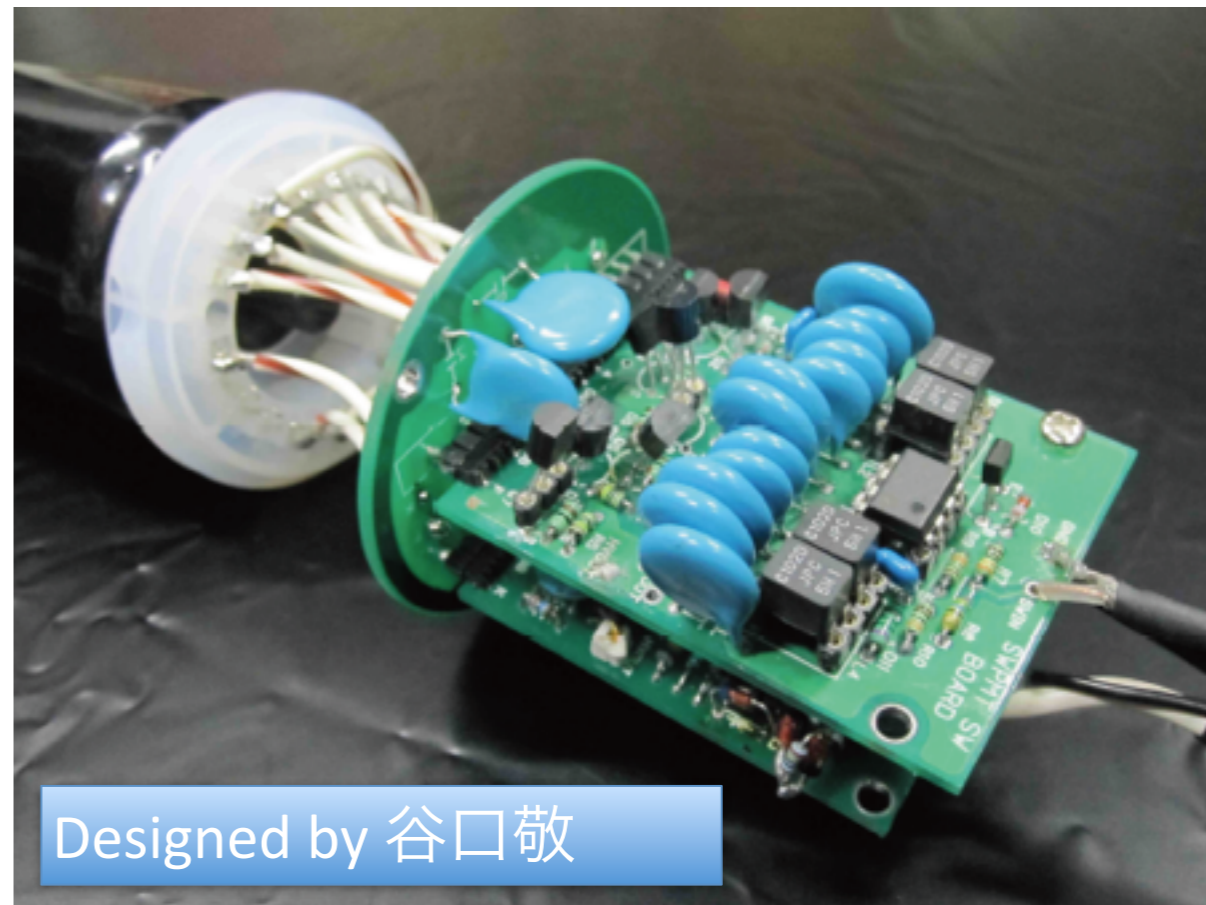
カウンター配置



- プロンプトバースト ($>10^4/\text{pulse}$)の後のタイミングで計数
- ビームタイムの制限上、ビーム強度を絞りすぎる訳には行かない。
 - → gating-PMTにより、プロンプトタイミングのみPMTをoffにする。
- プロンプト μ^- がプラスチックシンチ中に静止すると遅延ヒット源となる。
 - → 鉛アブソーバで μ^- を吸収
 - 電子検出効率 $\sim 50\%$ @ 40 MeV/c

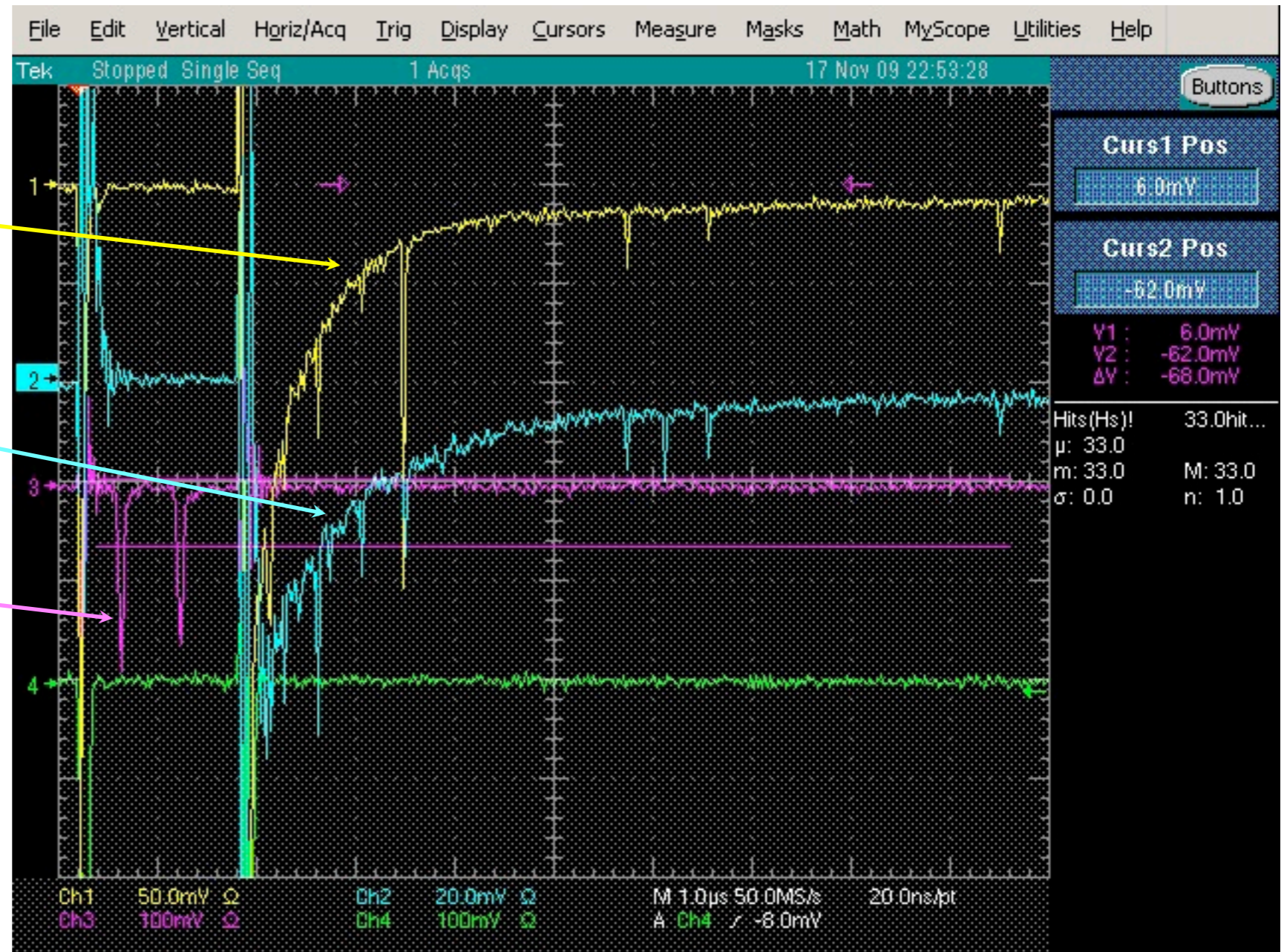
gating PMT

- プロンプト粒子数: $\sim 1e4$
- 標準PMTでは耐えられない。
- COMETで開発したgating-PMT
 - off/on gain ratio = $1e-6$



gating-PMTによる信号：例

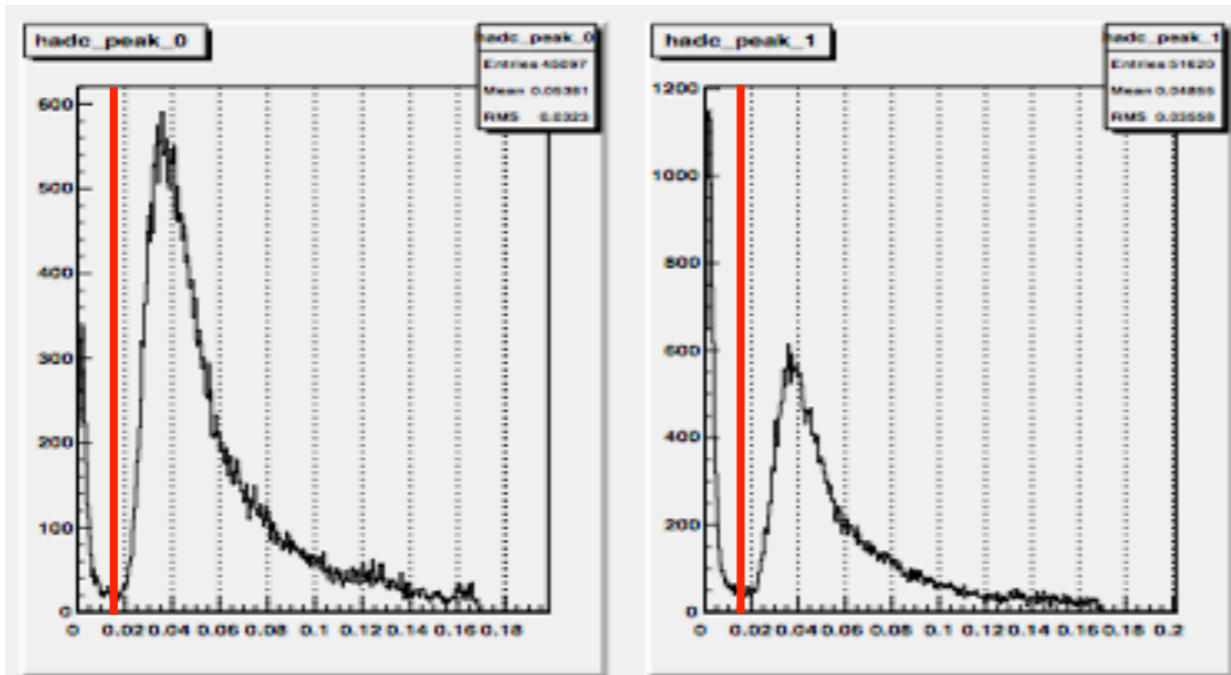
- B1
- Plas. Scinti.
- gating
- B2
- Plas. Scinti.
- gating
- B3
- Plas. Scinti.
- normal PMT
- ND filtered



プラスチックシンチレータからの遅延蛍光でベースラインが動くものの個別の遅延ヒットは十分観測できている。

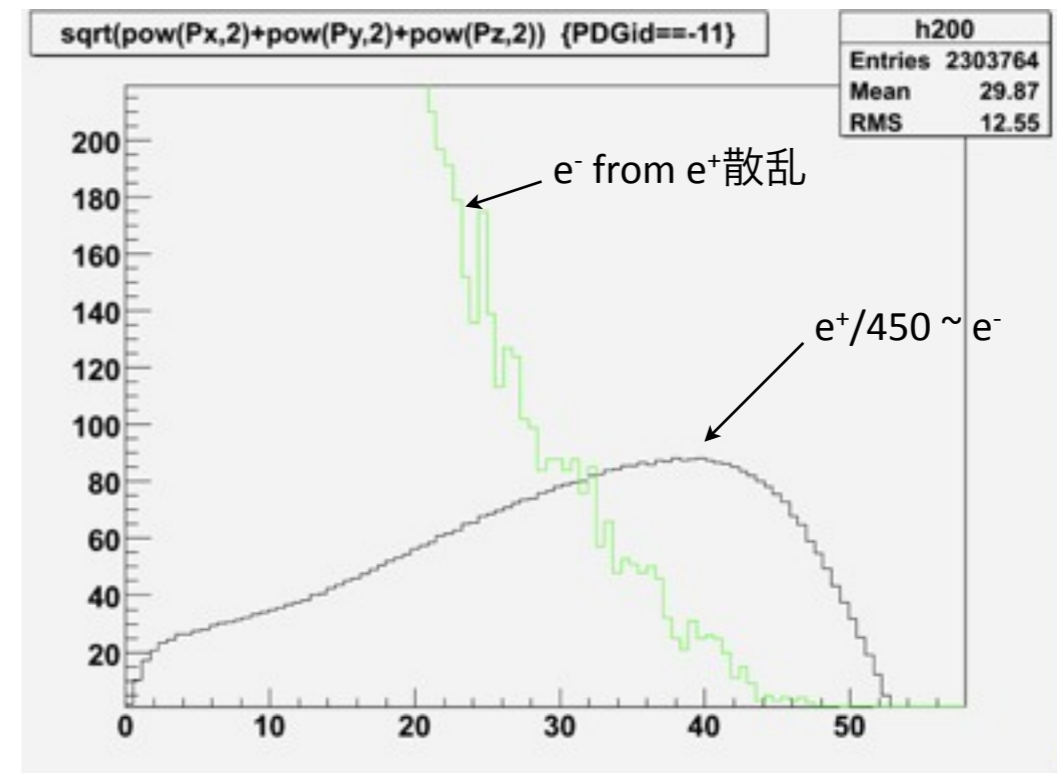
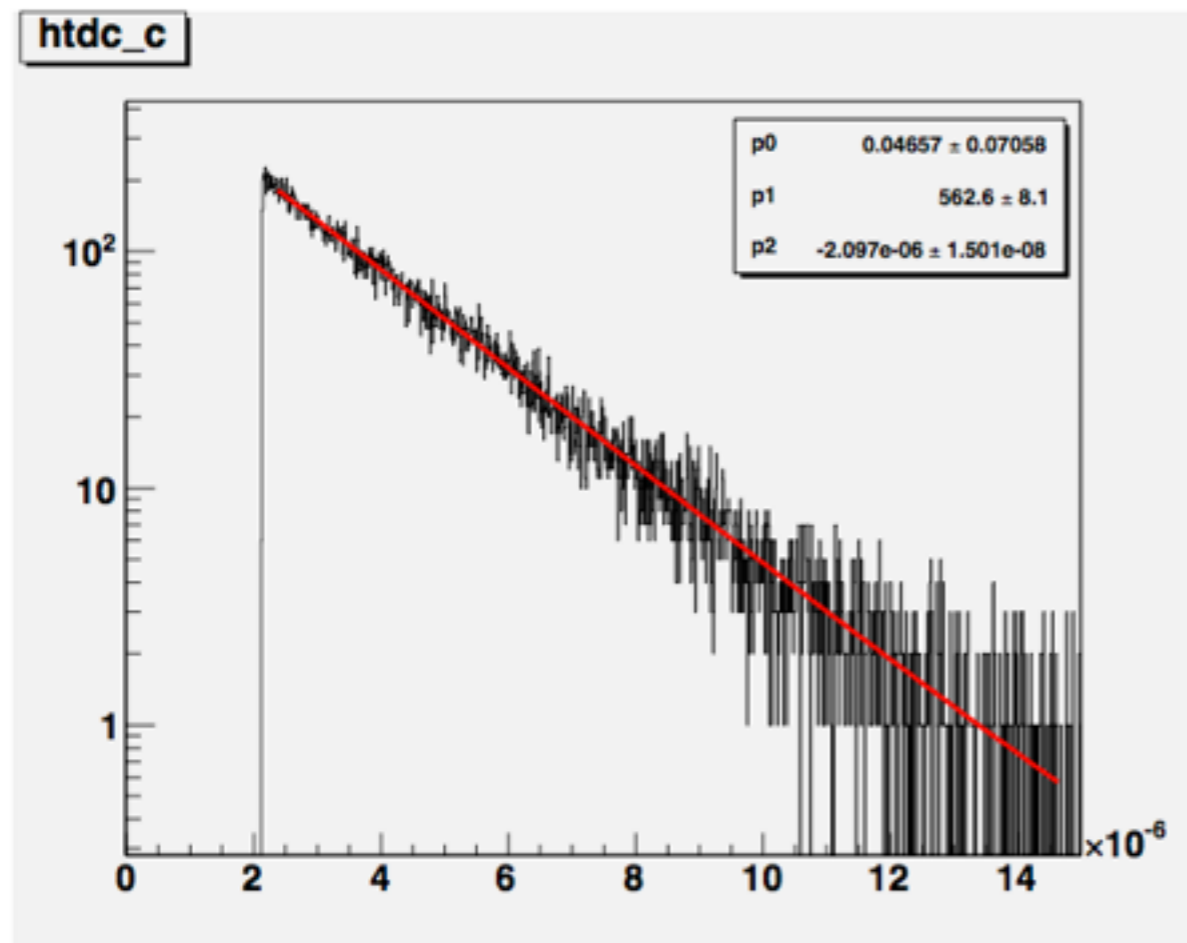
解析

- PMTからの信号を500MHz FADCで記録。
- ベースラインテンプレートを作って差し引く。
- B1(B2)でタグしたB2(B1)信号は、ペDESTALと信号の切れが良い -> 十分な検出効率を持っている。
- B1*B2のタイミングで時間スペクトルを得る：
 - $\tau = 2.10 \pm 0.02 \mu\text{s}$
 - $\tau_{\mu^+}(2.2\mu\text{s})$ と $\tau_{\mu^-c}(2.0\mu\text{s})$ の平均。分離するには統計が足りないが、無矛盾である。

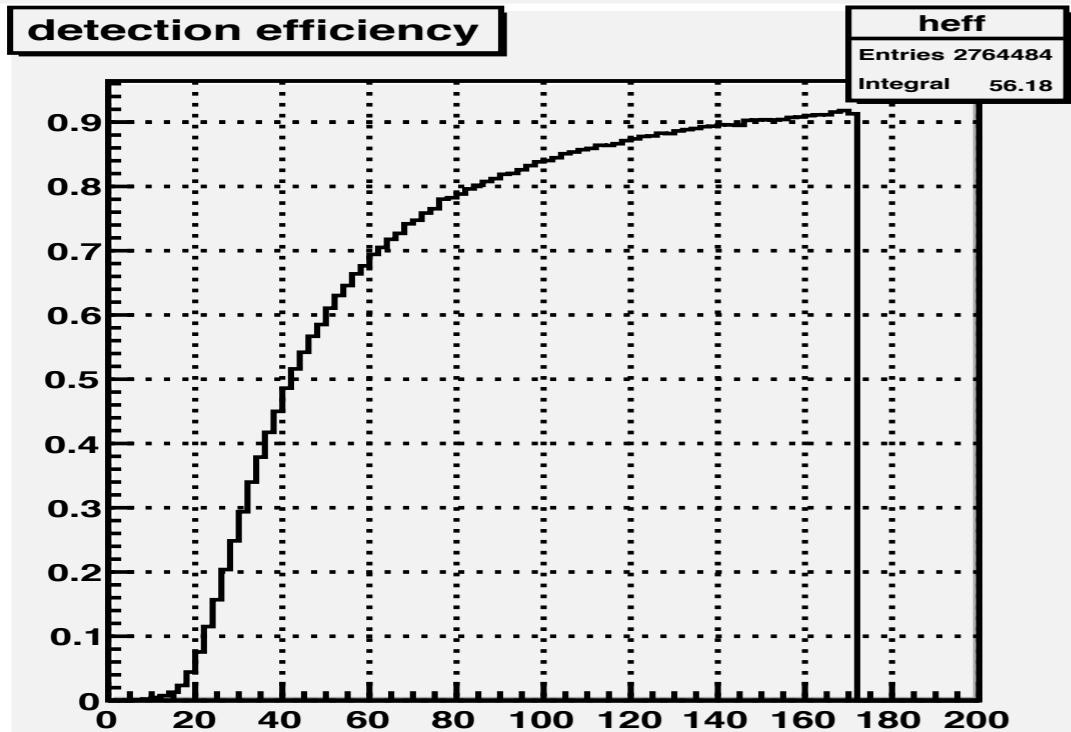


B1 pulse height
(B2 tagged)

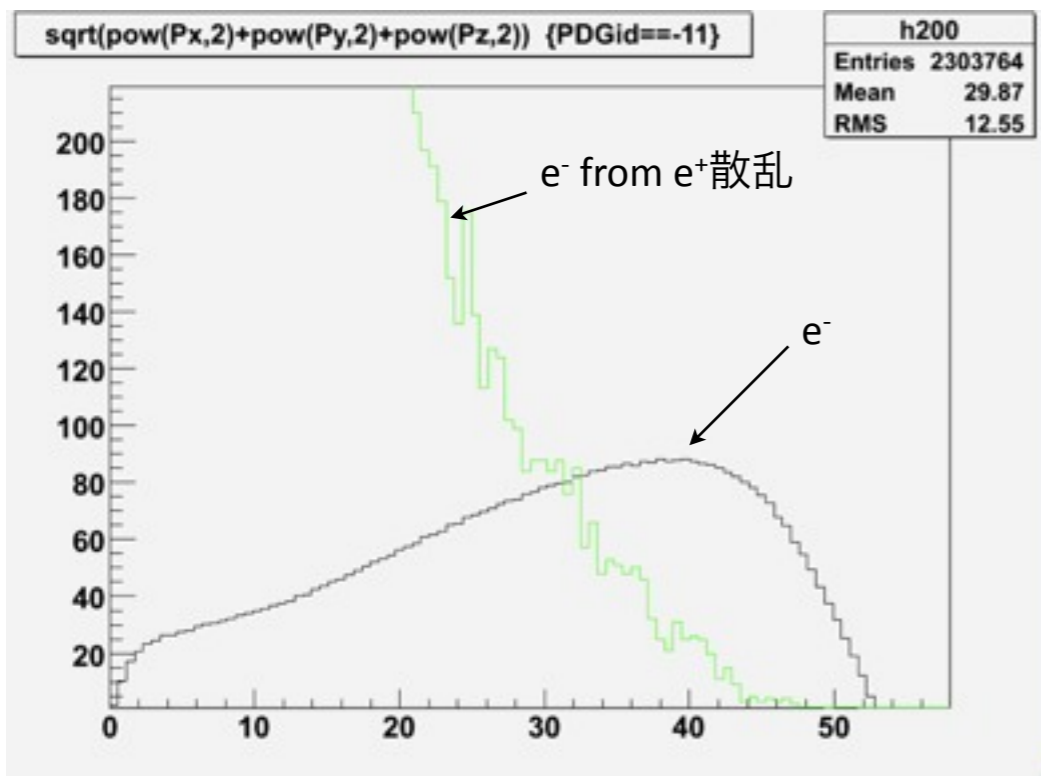
B2 pulse height
(B1 tagged)



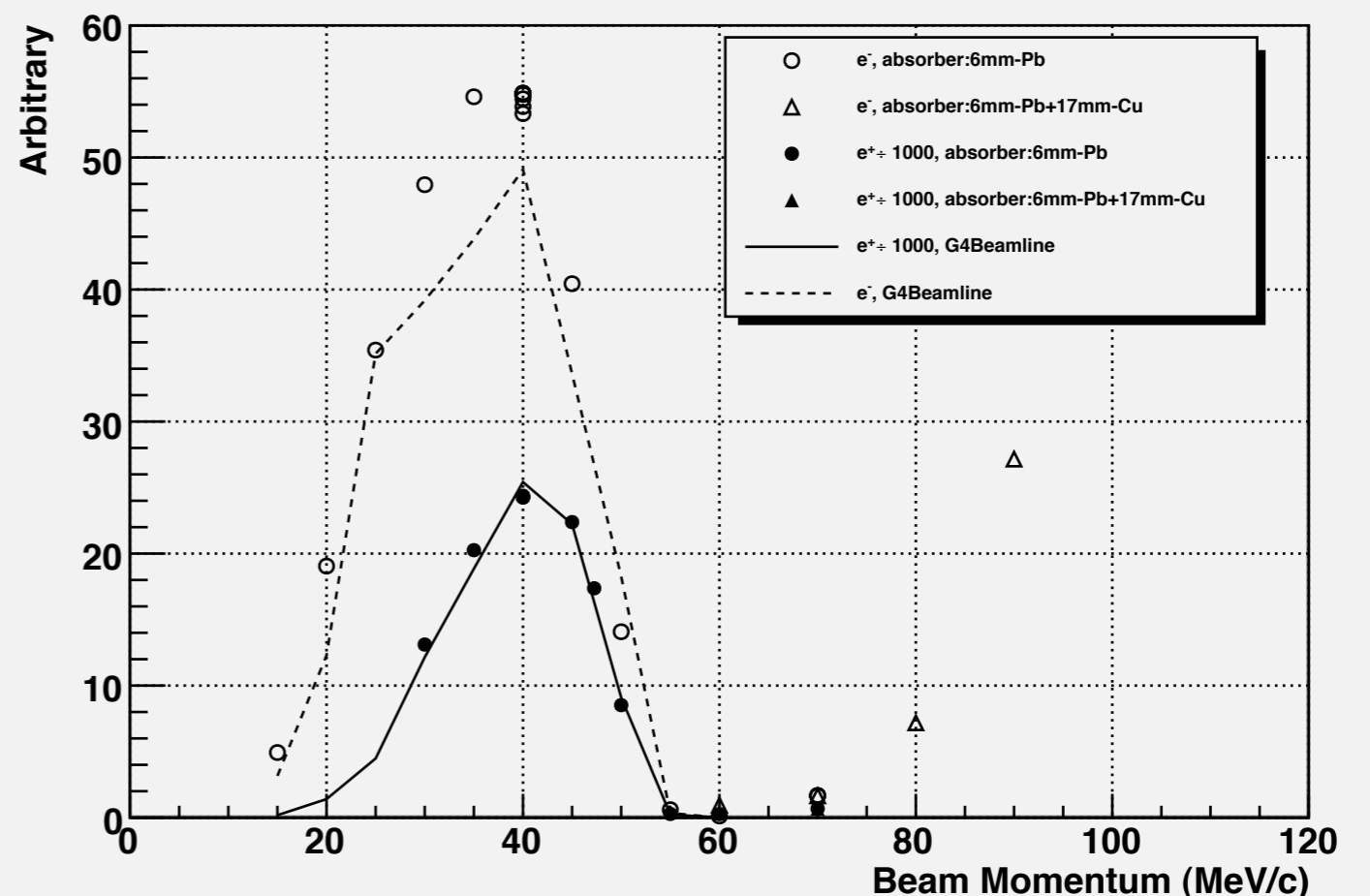
P Spectrum



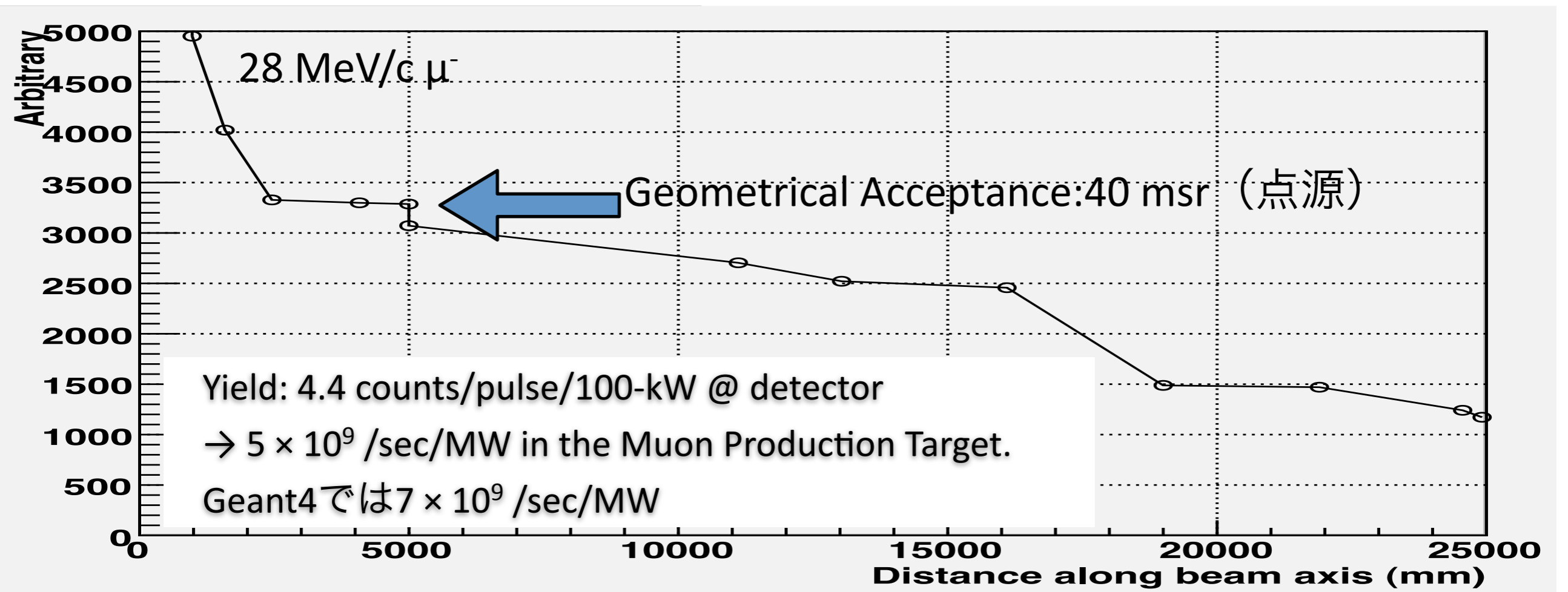
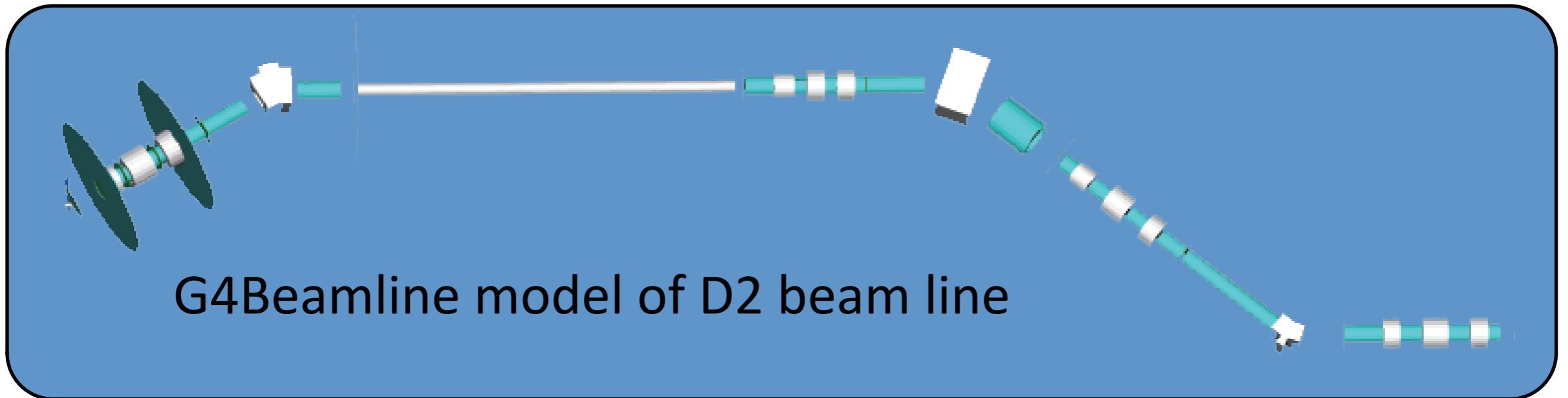
- 検出器のdetection efficiencyは鉛板の影響により、低エネルギーで落ち込む。
- $p_e > 40 \text{ MeV/c}$ では μ^- 崩壊からの e^- が支配的
- $p_e \sim 50 \text{ MeV/c}$ のMichel Edgeは確かに Michel Edge
- $p_e < 30 \text{ MeV/c}$ では μ^+ 崩壊からの e^+ の散乱 e^- が支配的



D2 Momentum Scan



G4Beamline Estimation



DeeMe デザイン

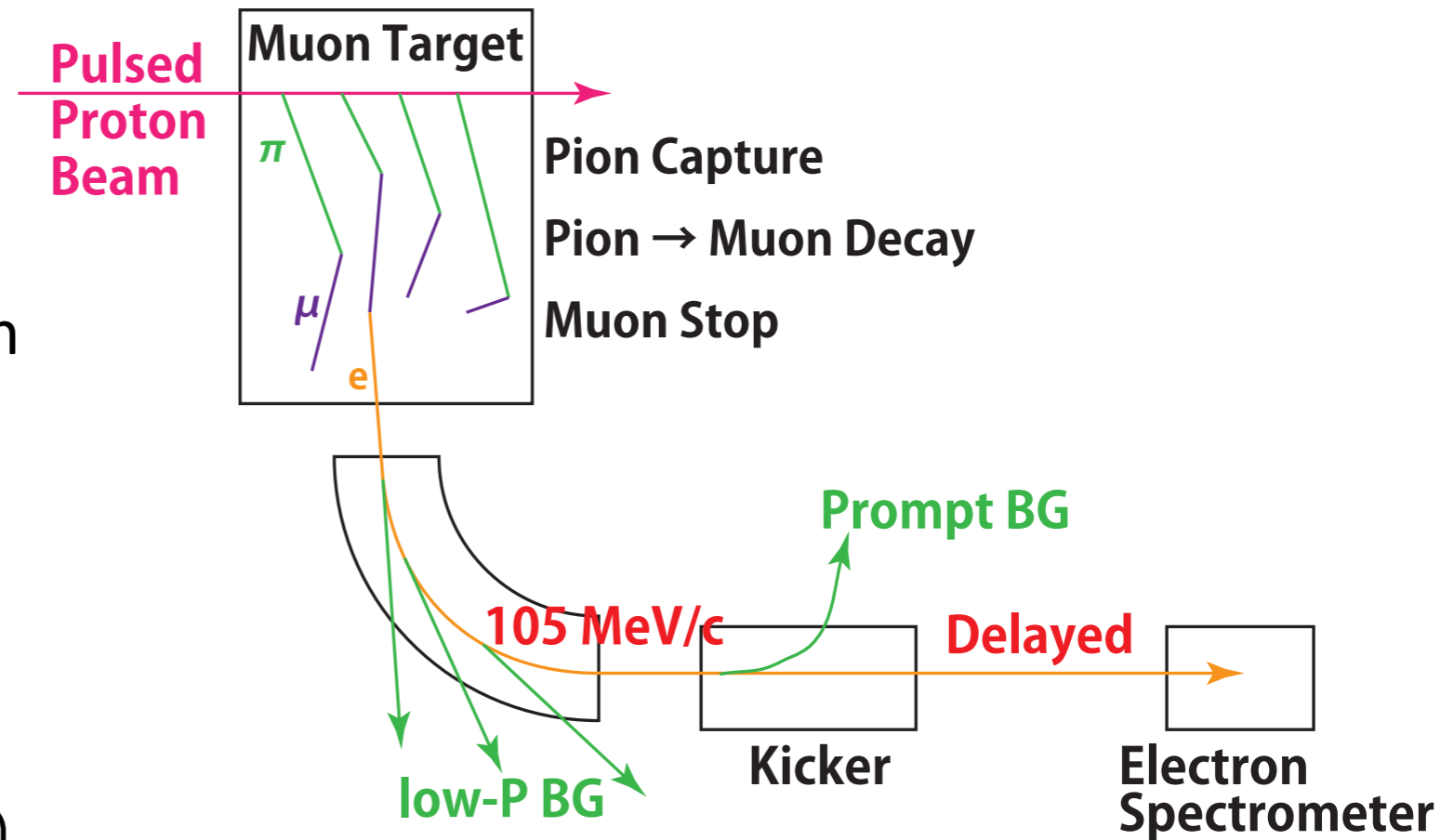
DeeMe

- Signal : $\mu^- + (A,Z) \rightarrow e^- + (A,Z)$
- A single mono-energetic electron
 - 105 MeV
 - Delayed : $\sim 1\mu\text{S}$
- No accidental backgrounds
- Physics backgrounds

- Muon Decay in Orbit (MDO)
 - $E_e > 102.5 \text{ MeV}$ (BR: 10^{-14})
 - $E_e > 103.5 \text{ MeV}$ (BR: 10^{-16})

– Beam Pion Capture

- $\pi^- + (A,Z) \rightarrow (A,Z-1)^* \rightarrow \gamma + (A,Z-1)$
 $\gamma \rightarrow e^+ e^-$
- Prompt timing



- Low E main part: suppressed by the beamline.
- High E tail: Electron Spectrometer ($\Delta p < 0.5\%$)

- Extremely-High-Quality Pulsed Proton Beam from RCS
 - After Proton -- one per a minute.
 - Main pulse: Kicker to reduce the detector rate.

DeeMe計画概要

- ビームライン
 - 実験感度向上のためには、大立体角ビームラインが必要である。そのために、MLFミュオン施設にHラインを新設する。
 - Hラインは、ミュオンg-2やミュオンHFSなどの実験にも利用できるmulti purpose beamline →高い費用対効果費
- ターゲット改造
 - 回転ターゲットのサイズと素材を改造して、ミュオニック原子の収量を上げる。
 - 外径を20 mm大きくし、素材をシリコンカーバイドとする。
- バックアッププラン
 - タイムリーに物理結果を出して行く事が重要である。目標5年。
 - Hラインの建設スケジュールによっては、まずDラインで測定を行う可能性も考慮する。

実験感度

- Single Event Sensitivity: S

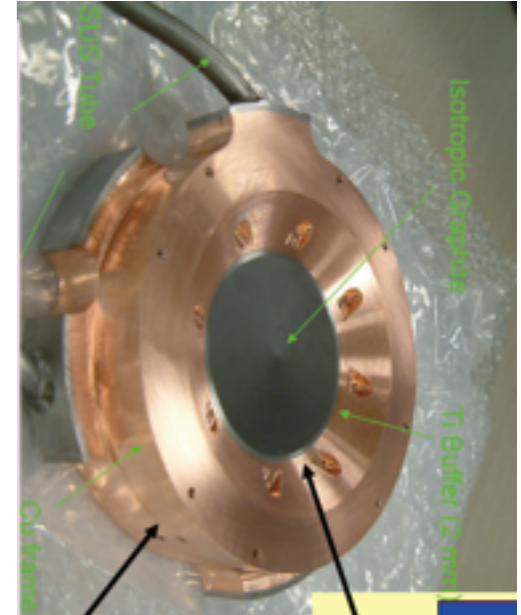
$$S = \frac{1}{N_{\text{obs}}^{\mu}}$$

$$N_{\text{obs}}^{\mu} = R_{\mu\text{-stop}} \times f_{\text{C}} \times f_{\text{MC}} \times A_{\mu\text{-e}} \times T$$

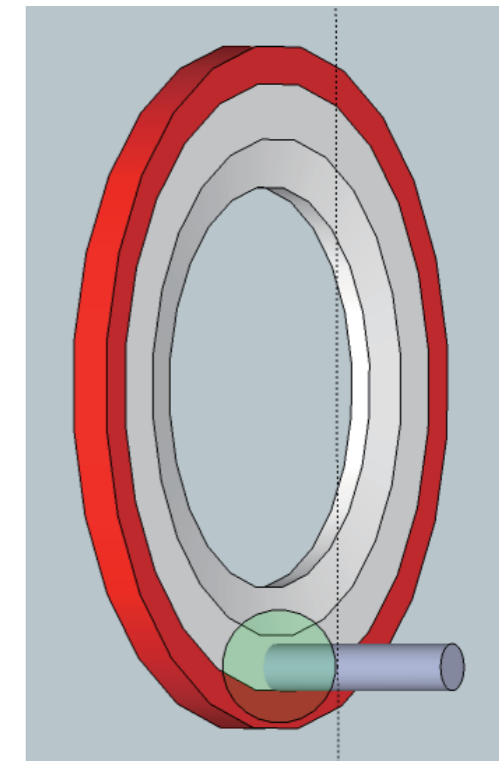
- $R_{\mu\text{-stop}}$: ミュオニック原子収量 -- ターゲット形状とサイズ
- f_{C} : 目的の原子に捕獲される割合 -- ターゲット材料
- f_{MC} : muonic nuclear-capture rate -- ターゲット材料
- $A_{\mu\text{-e}}$: ミュオン電子転換-電子に対するアクセプタンス
-- ビームライン
- T : 測定時間
– 2×10^7 sec (およそ8ヶ月)の物理データ収集期間とする。

ターゲット形状

- $R_{\mu\text{-stop}}$: ミュオニック原子収量
 - プロダクションターゲットの形状で定まる。
 - Monte Carlo計算の不定性は~30%以下
 - 2009のテスト実験で実証済

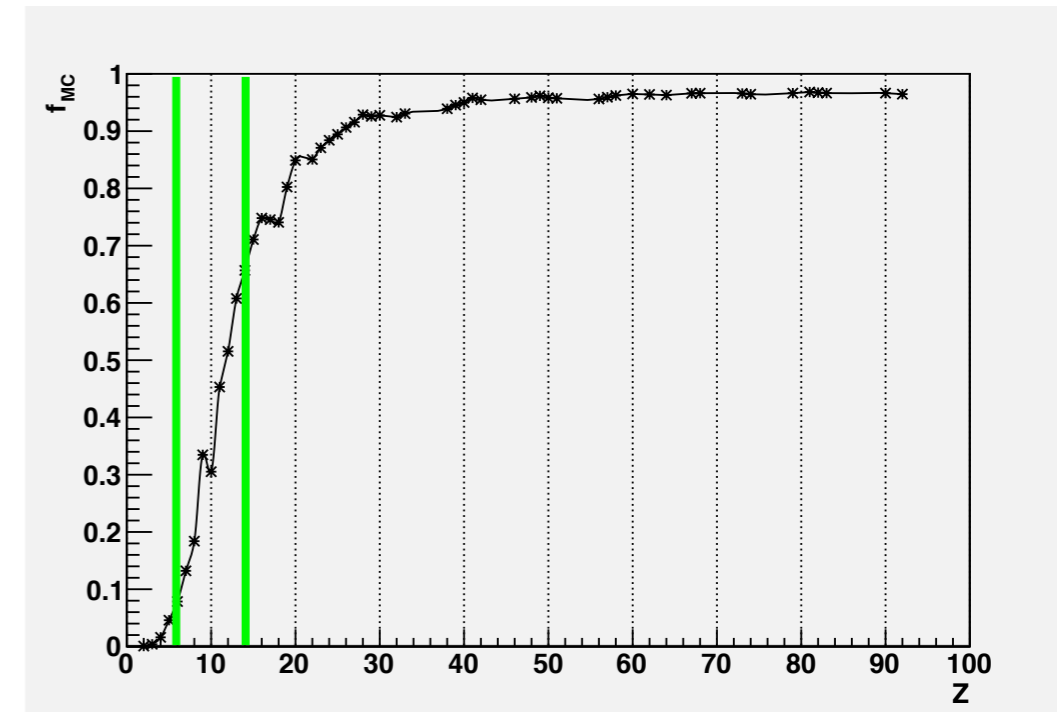


回転ターゲット外径	$R_{\mu\text{-stop}}$
固定標的	5×10^9 /sec/MW
標準外径	10×10^9 /sec/MW
拡大外径	15×10^9 /sec/MW

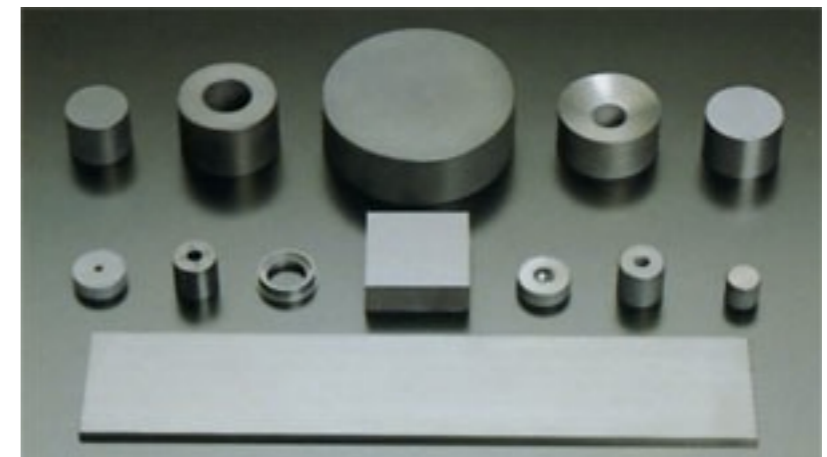


ターゲット材料

- f_c : 目的の原子に捕獲される割合
 - 単一素材: $f_c = 1$
 - 複合材料: Z にほぼ比例する (Fermi-Teller Z law)
 - 例えばシリコンカーバイドではSi:C = 7:3
- f_{MC} : muonic nuclear-capture rate
 - $(1-f_{MC})=f_{\text{free-decay}}$: f_{MC} が大きい程 μ^- を効率的に活用している。
- prompt backgroundを避けるため、 $\tau_{\mu^-} >$ 数百nsec: light Z
- 工学的要請:
 - 耐熱衝撃性
 - 融点
 - 放射線耐性



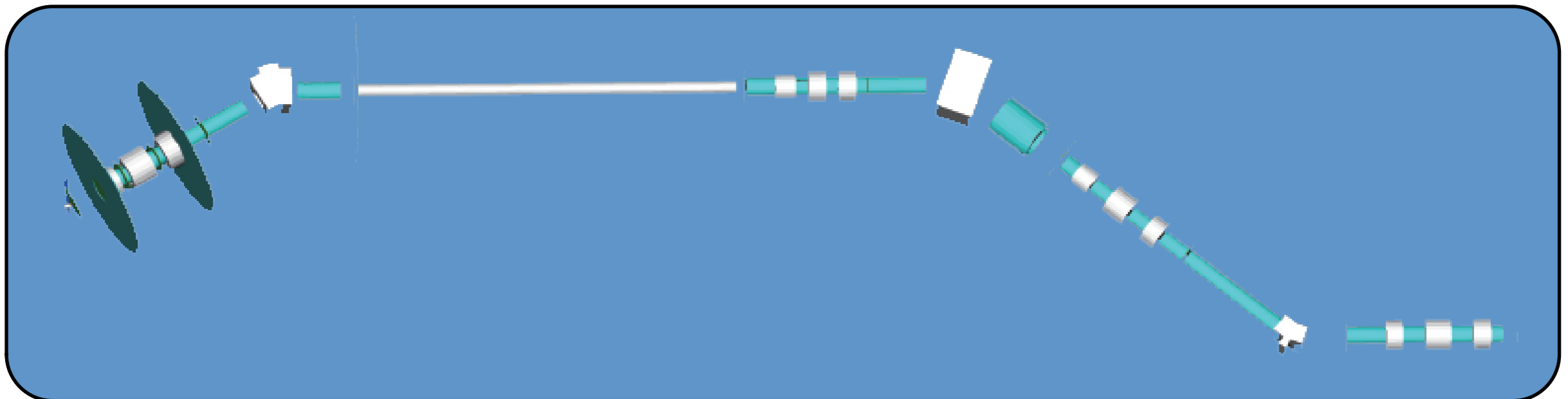
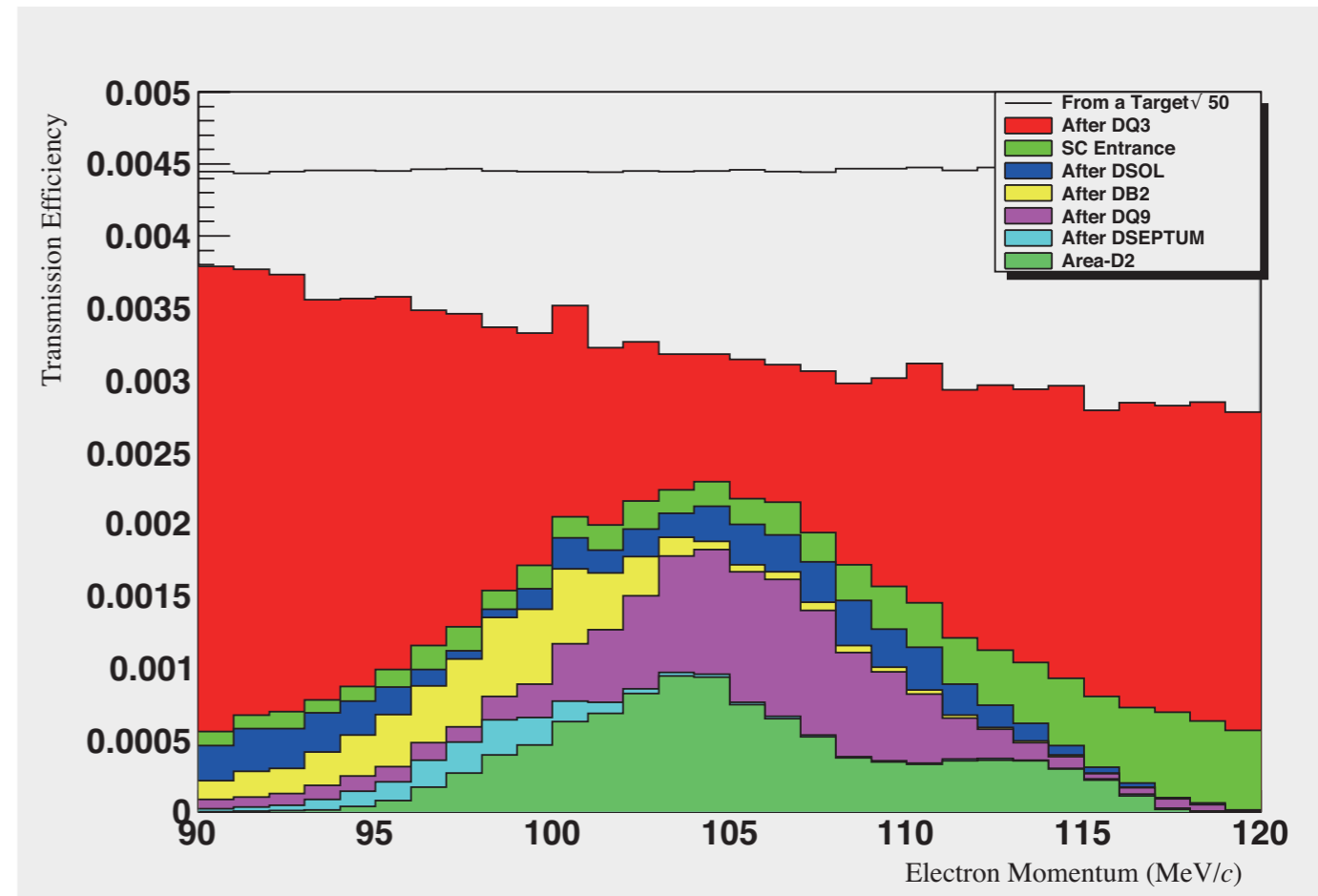
ターゲット材料	$f_c \times f_{MC}$
グラファイト	0.08
シリコンカーバイド (SiC)	0.46



SiC: 核融合炉の炉心ブランケット材料候補

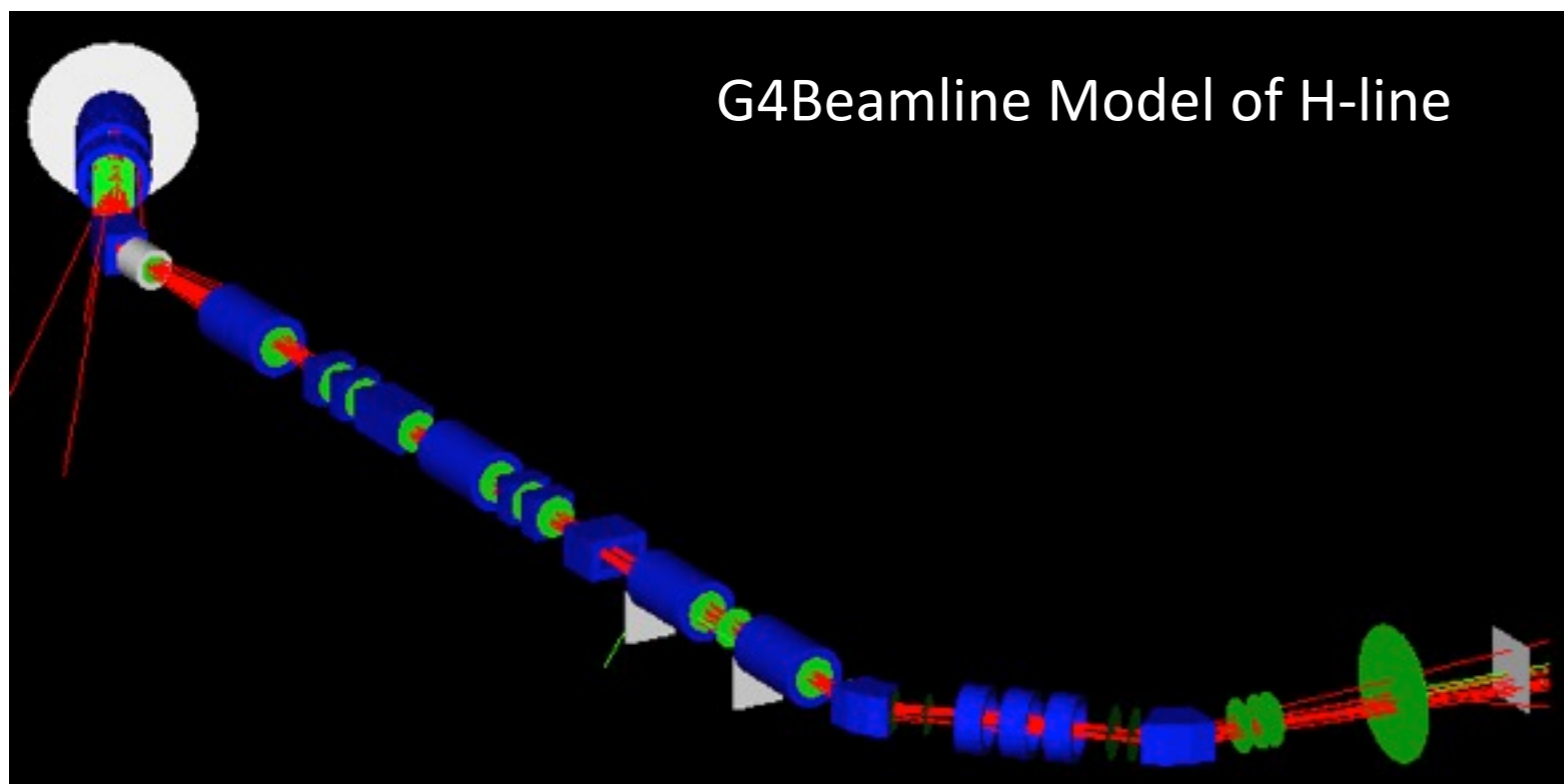
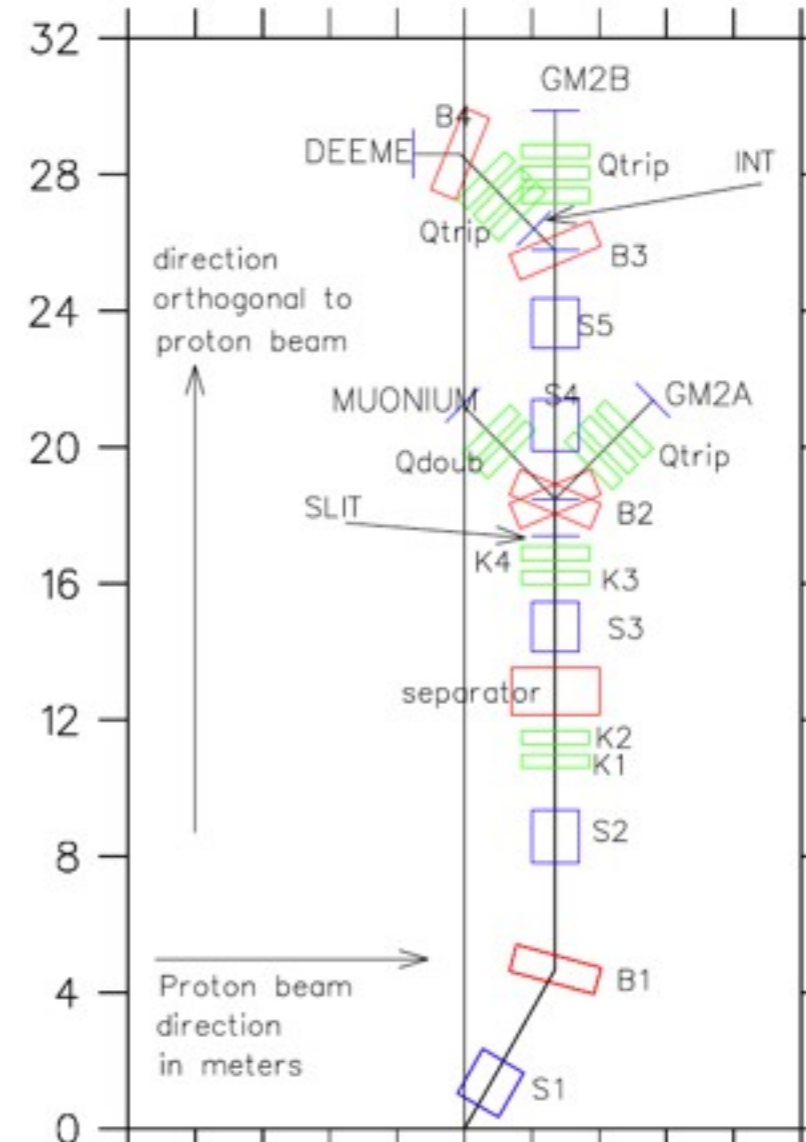
ビームライン(D)

- Dラインのアクセプタンス
 - 点源に対しては30 msrだが、
 - μ -e 電子 (分布源) に対しては
高々10 msr

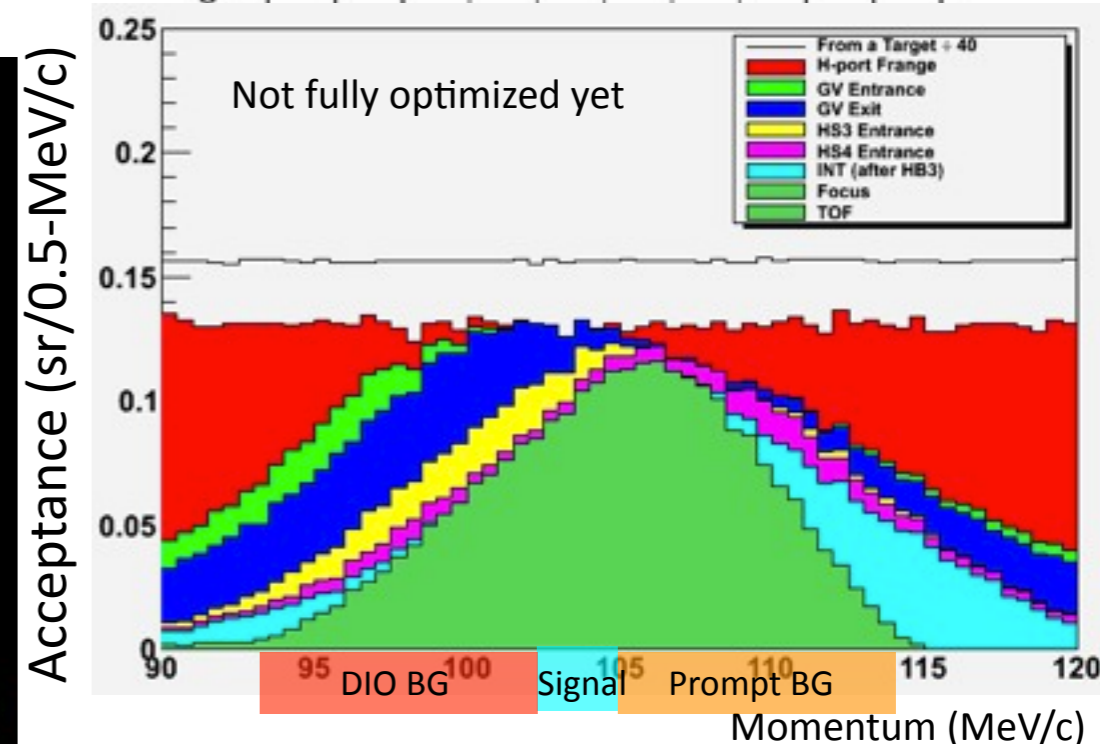


Beamline: H-line

- the 1st concept by Jaap Doornbos (TRIUMF)
 - multi purpose beamline
 - DeeMe + g-2 + muon-HFS
 - large acceptance
 - > 100 msr
 - straight section for kickers and a separator.
 - moderate Δp so that the BG's can be monitored simultaneously.
 - DIO backgrounds ($p < 102.5$ MeV/c)
 - Prompt backgrounds ($p > 105.0$ MeV/c)
- The detailed design based on the concept is on-going with MUSE group.



G4Beamline Model of H-line



実験感度

	Hライン SiCターゲット	Hライン Cターゲット	Dライン SiCターゲット	Dライン Cターゲット
$R_{\mu\text{-stop}}$	15×10^9	15×10^9	15×10^9	15×10^9
ターゲット材料	SiC	C	SiC	C
$f_c \times f_{Mc}$	0.46	0.08	0.46	0.08
A[beamline]	0.25%	0.25%	0.025%	0.025%
A[detector]	79%	79%	79%	78%
E_e threshold	102.5 MeV/c	102.0 MeV/c	102.0 MeV/c	101.0 MeV/c
A[E_e cut]	52%	60%	60%	63%
A[time window]	0.49	0.75	0.49	0.75
測定時間	2×10^7 sec	2×10^7 sec	2×10^7 sec	2×10^7 sec
S.E.S	1.5×10^{-14}	5.7×10^{-14}	6.6×10^{-14}	3.2×10^{-13}
N_{DIO}	0.9×10^{-14}	5.5×10^{-14}	2.4×10^{-14}	2.7×10^{-13}

参考 (SINDRUM II 最新結果)

$$BR[\mu^- + Au \rightarrow e^- + Au] < 7 \times 10^{-13}$$

$$BR[\mu^- + Ti \rightarrow e^- + Ti] < 4.3 \times 10^{-12}$$

MLF年間運転時間 $\sim 2 \times 10^7$ sec

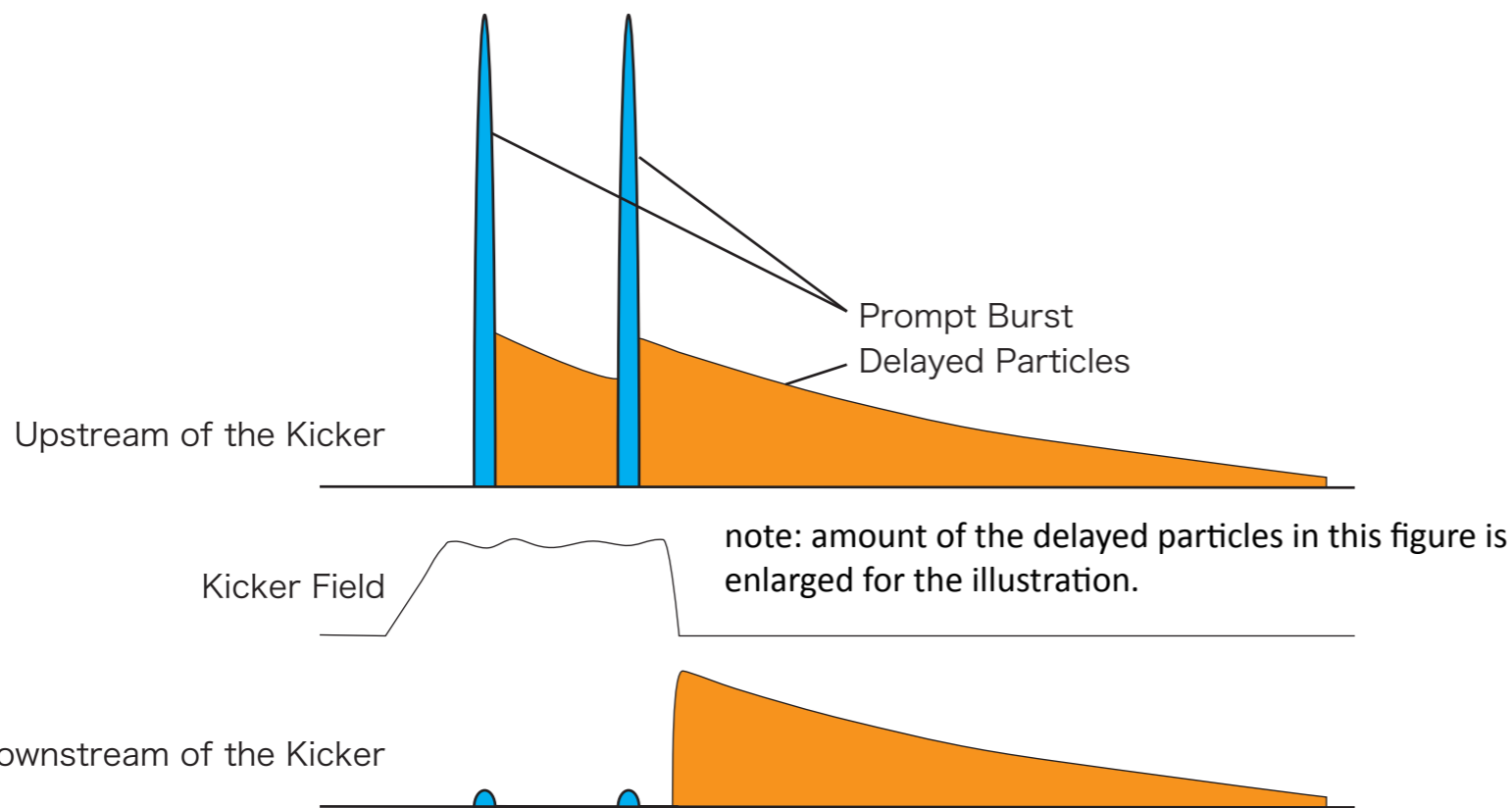
DeeMe 研究開発

開発項目

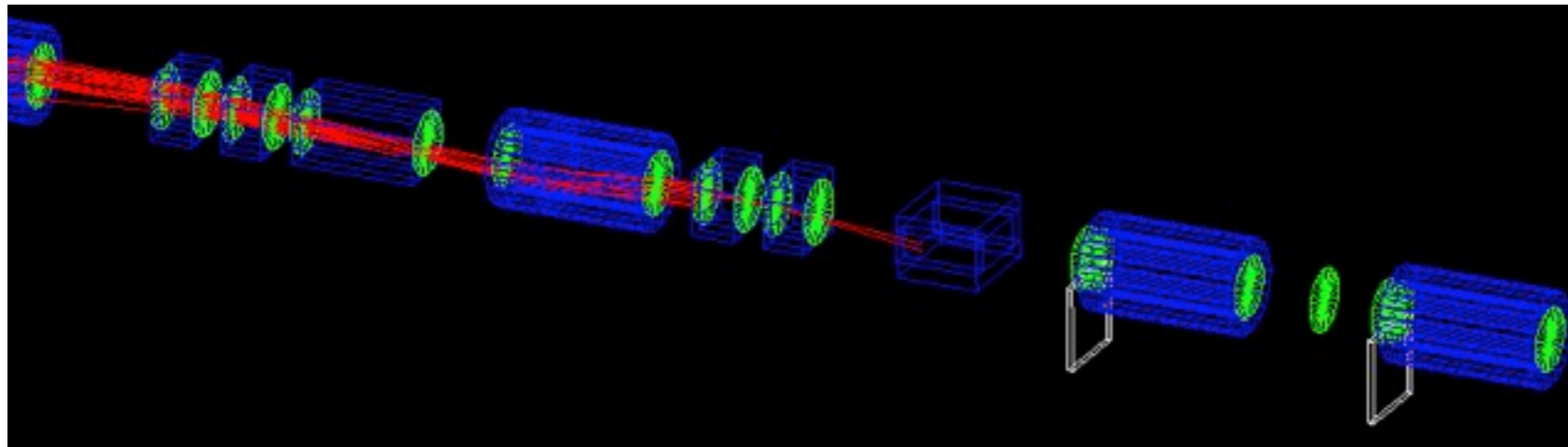
- Hライン
 - 大アクセプタンス (> 100 msr)
- キッカー
 - 大口径(320 × 320)
 - 高磁場 > 385 G
 - 速い立ち下がり < 300 nsec
- SiCターゲット
 - primary下流への影響?
- 検出器
 - プロンプトバーストに耐えるワイヤーチェンバー
- After Proton測定（と必要ならば改善）

Secondary-Beamline Kicker

- prompt burst: coincide with the primary proton pulse from RCS.
 - 50M particles/pulse (based on the test measurement at 2009)
 - detector (counter and wire chamber) will be blind for while.
- Reduce the prompt burst by kicker $< 1/1000$
 - detector rate will be 33k particles/pulse, and it is acceptable.



Mag. Field	> 385 Gauss
Gap	320 mm
Width	320 mm
Length	400 mm
No.	4
Fall Time	< 300 nsec
Rep. Rate	25Hz

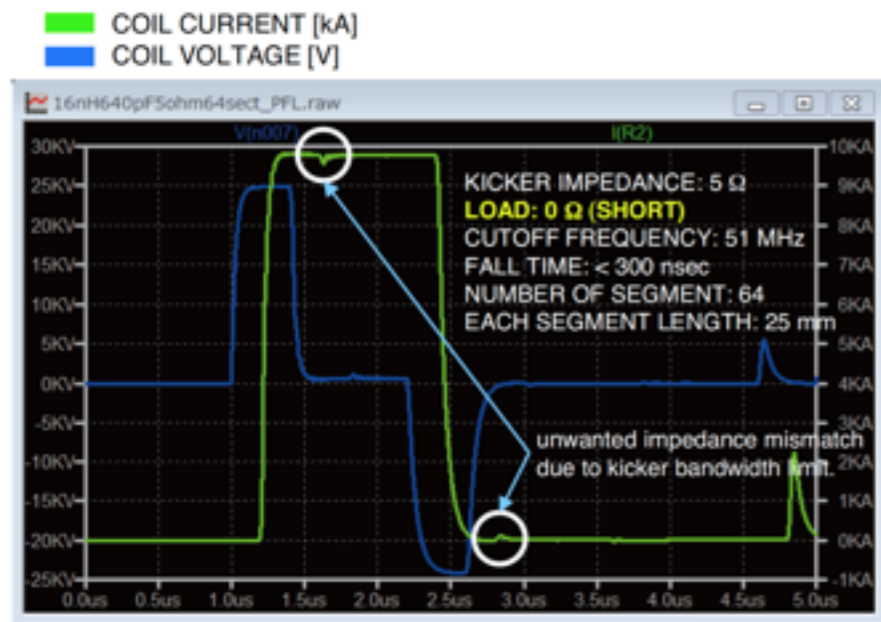
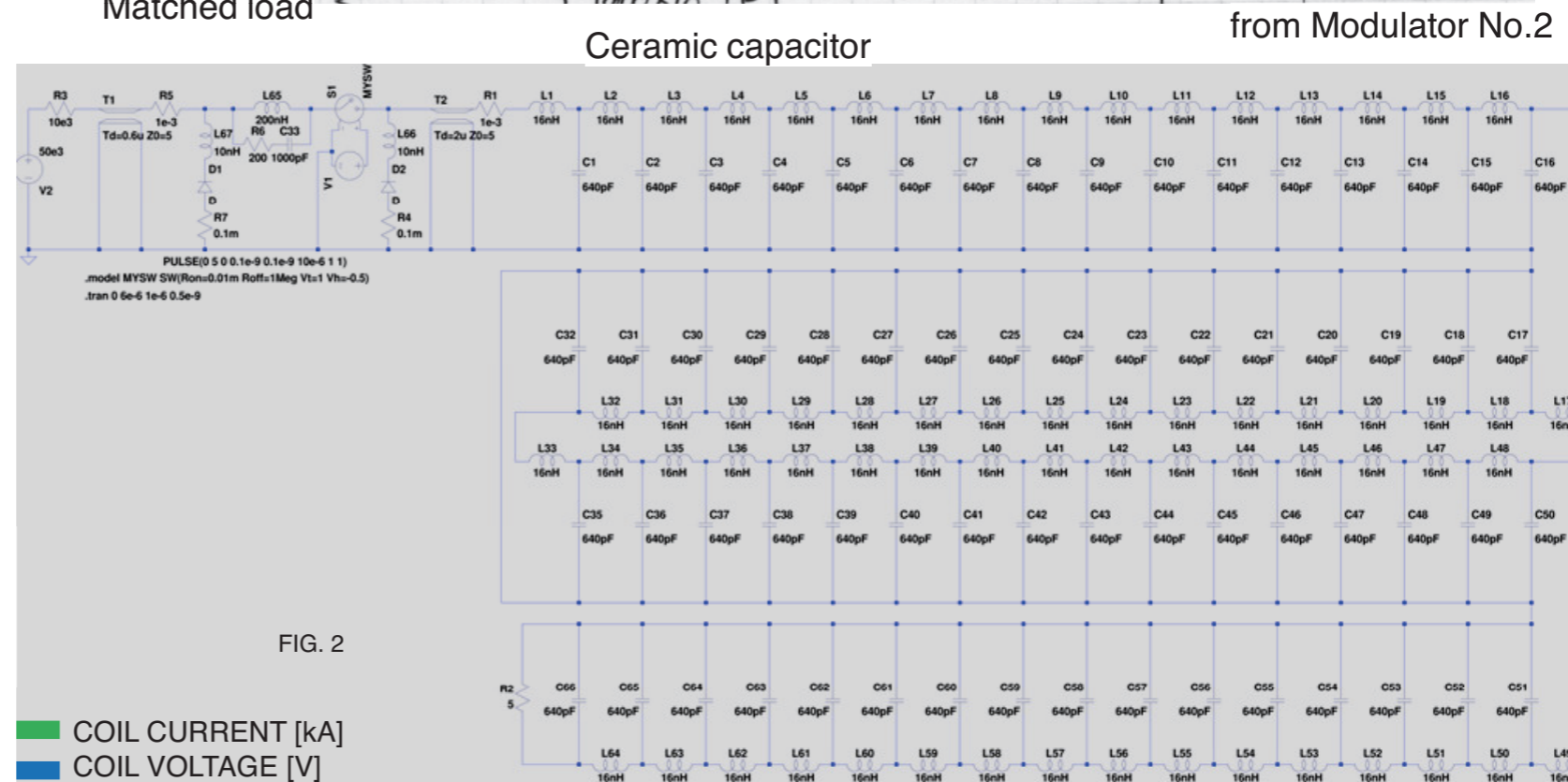
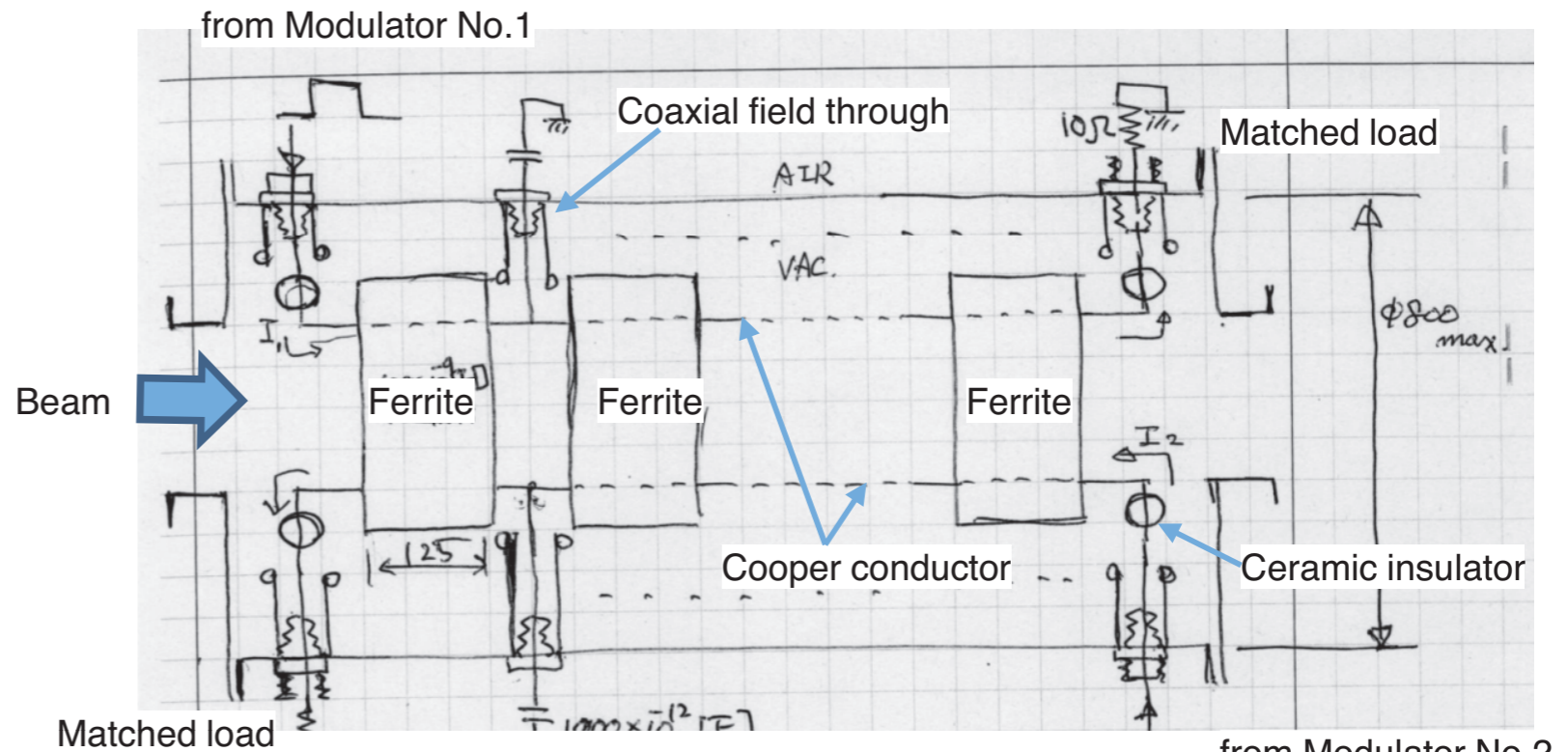


キッカーデザイン案

KEK加速器グループ

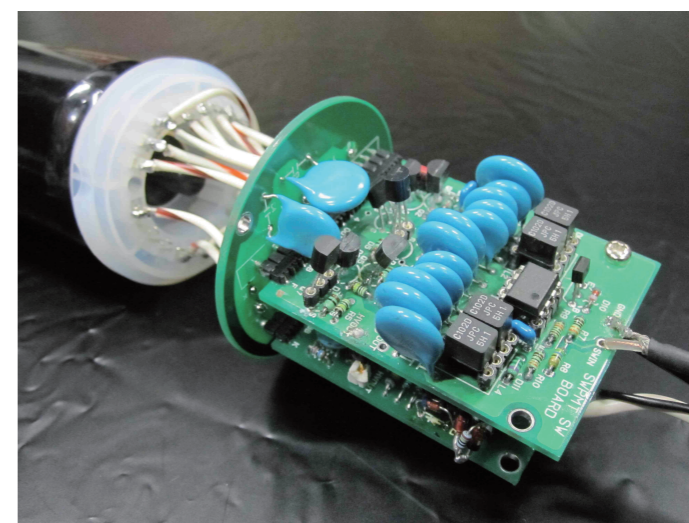
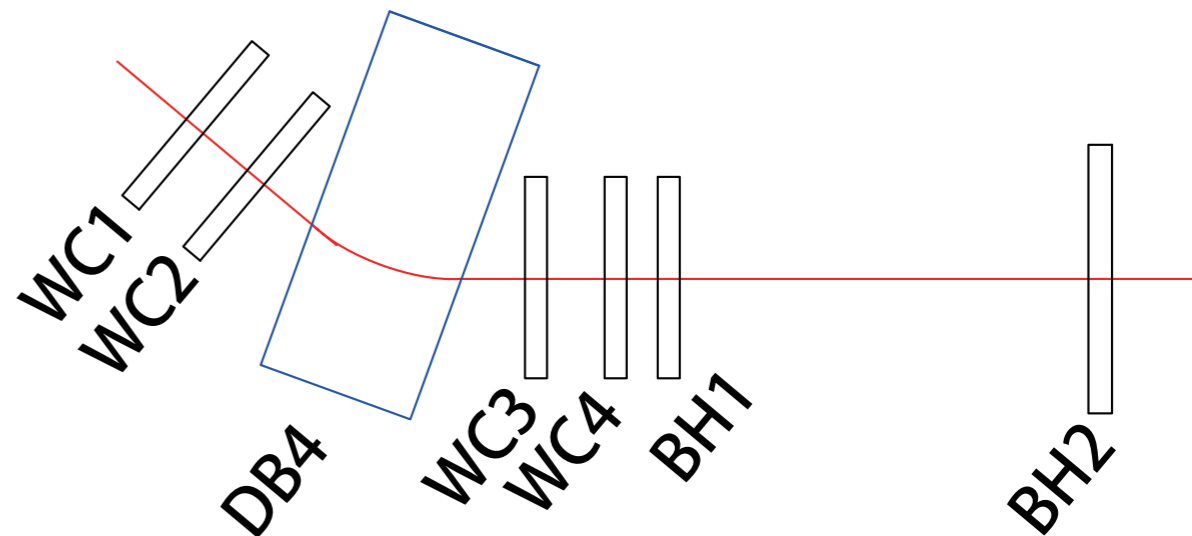
小林仁、松本浩

磁場	> 385 Gauss
Gap	320 mm
Width	320 mm
Length	400 mm
台数	4台
Fall Time	< 300 nsec
繰り返し	25Hz

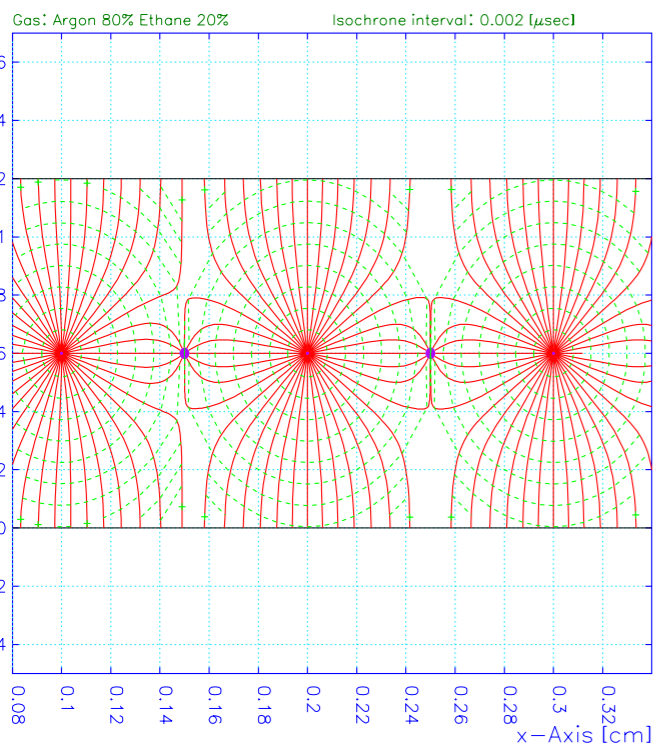


検出器

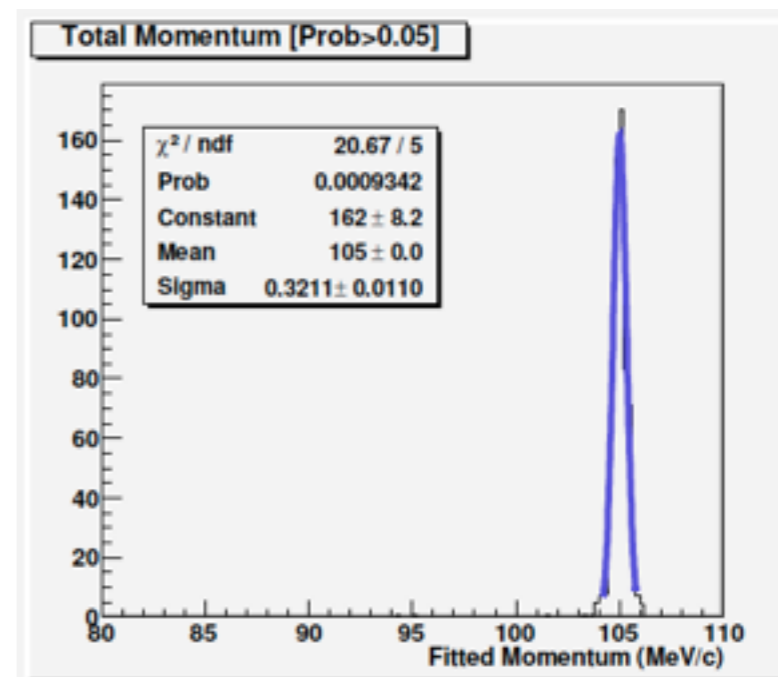
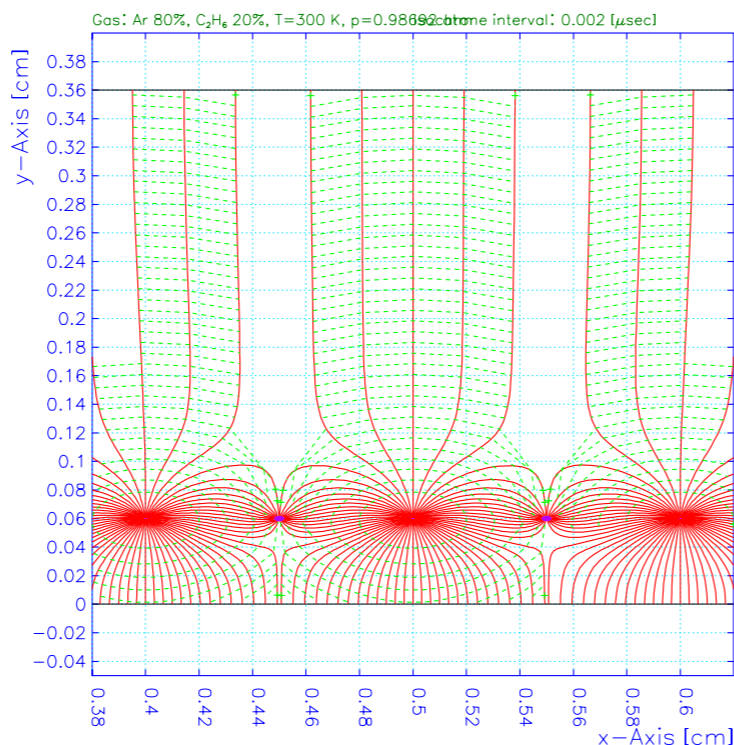
- prompt burst = 33k per pulse
- BH1,2: hodoscope
 - gating PMT --- established
- WC1-4: wire chamber
 - micro-cell or asymmetric-cell
 - Doable, but may need further R&D
- $\sigma < 0.5 \text{ MeV}/c$



Electron drift lines from a wire

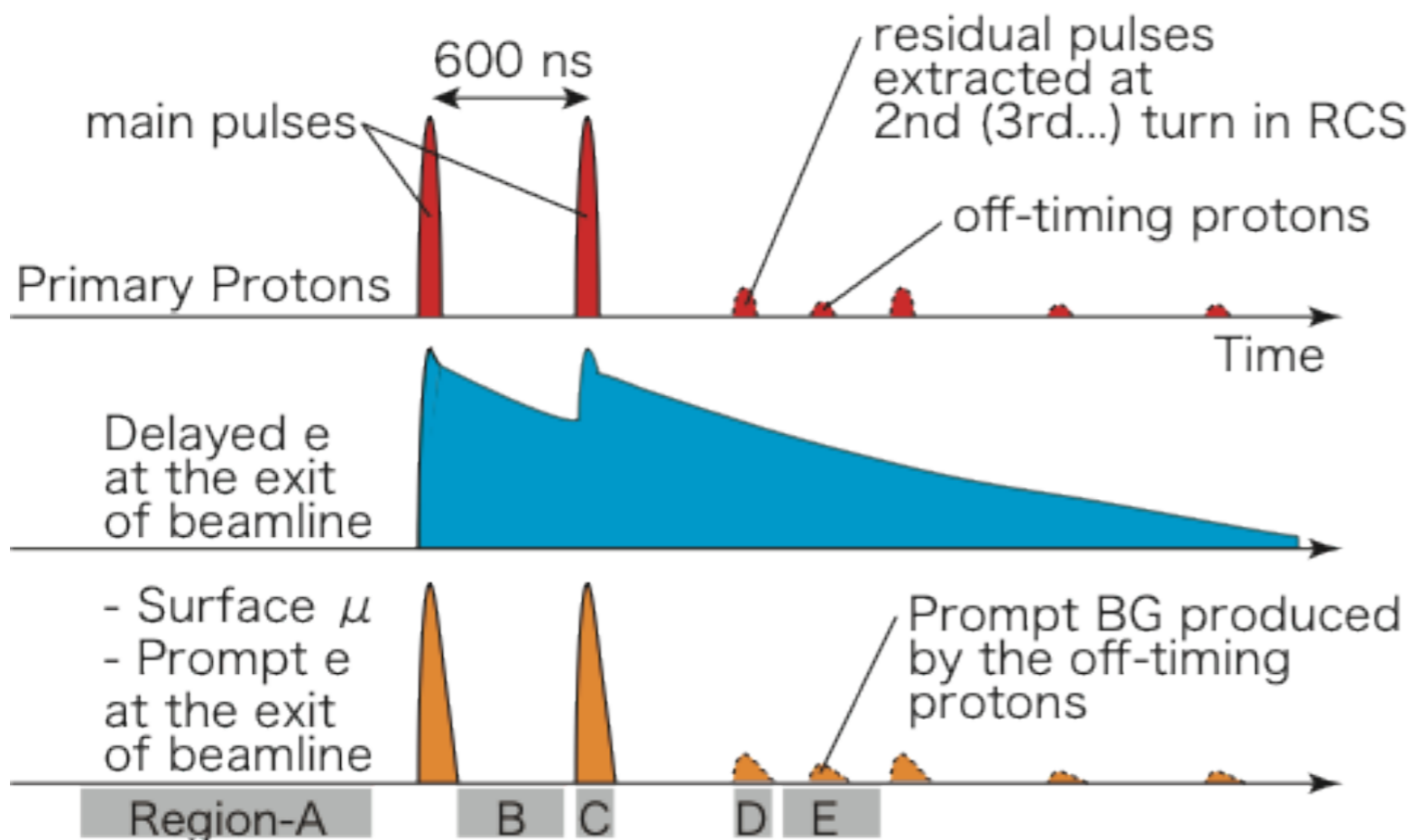


Electron drift lines from a wire



Backgrounds

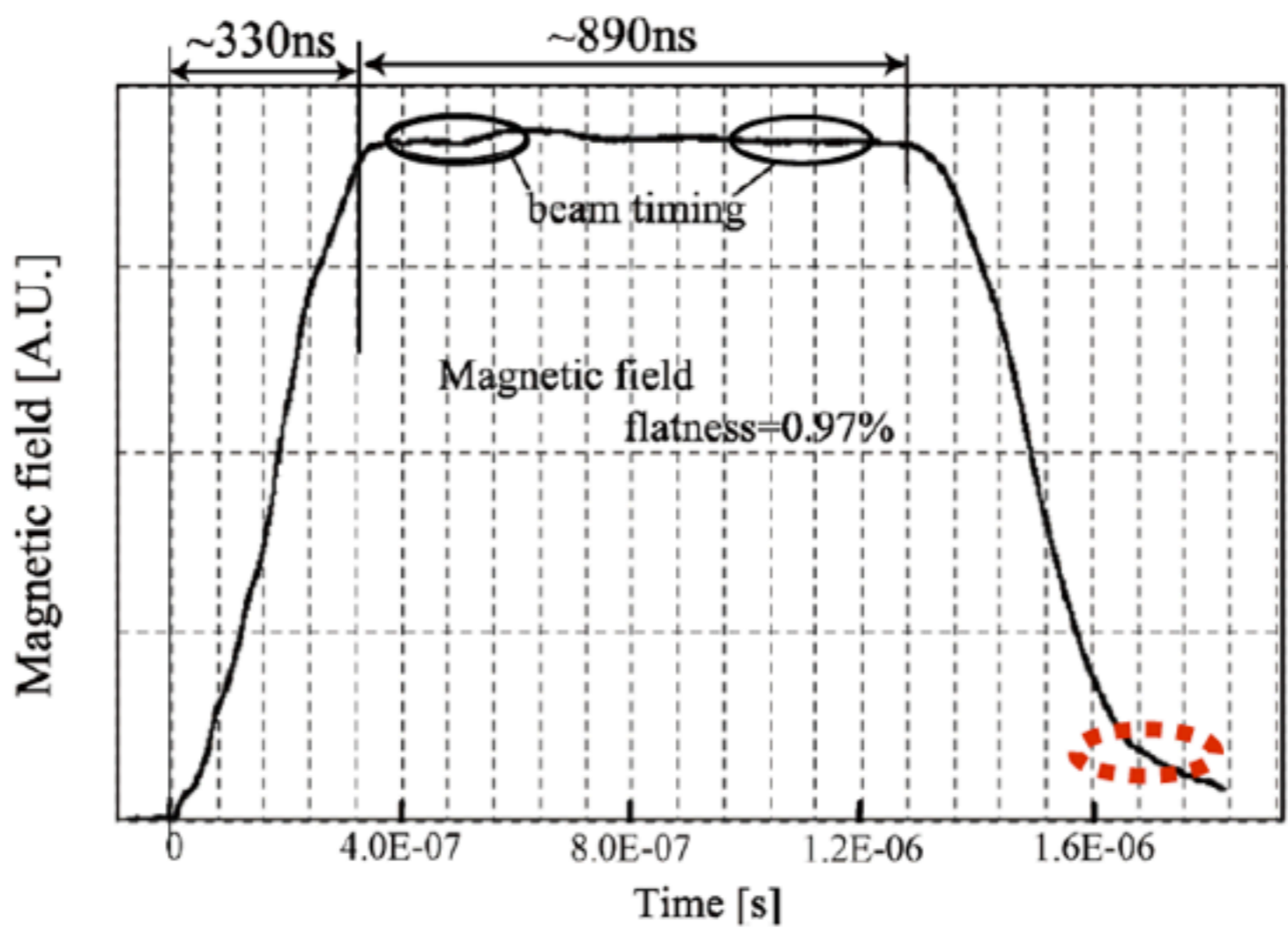
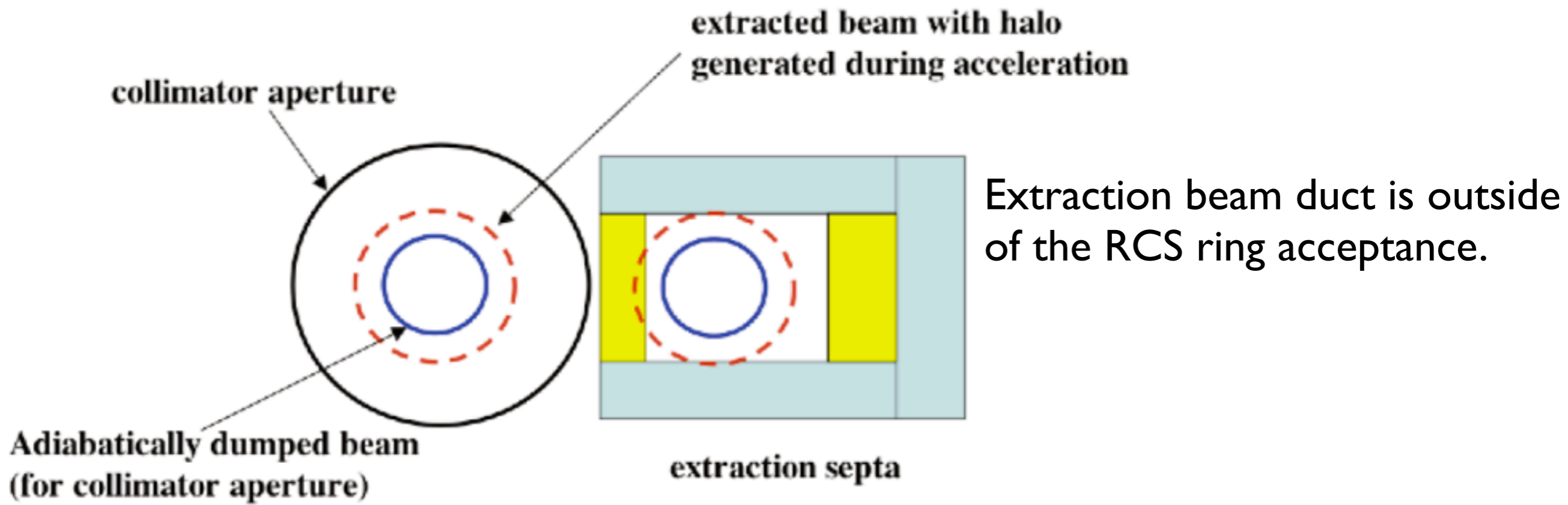
- Signal: μ -e Electron: $P_e = \underline{105 \text{ MeV}/c}$ and Delayed
- Muon Decay in Orbit : mostly $E_e < 55 \text{ MeV}$
 - $N_{DIO} < 10^{-14}$: $E_e > 102.5 \text{ MeV}$
- Prompt Particles: any off-timing protons could become potential background.
 - Pulsed proton technique
 - $6\text{M}/\text{pulse} \times 50 \text{ pulses}/\text{sec} \times 4 \times 10^7 \text{ sec} \times (5/10) = (10^{-16})^{-1}$ --- After-proton ratio $\sim 10^{-17}$



How much easy/difficult to achieve $\sim 10^{-17}$

- Fast Extraction (not the slow ex.)
 - No scattering by septum during the slow-ex.
 - no effect from inter-bunch protons.

→ pulsed-proton from RCS @ MLF



年次計画

- 方針

- 5年後には物理結果を得る。
- 10^{-14} に達するとインパクトは大きい。

- 概要

- Hラインを基本計画として準備を進める。
- RCS after-protons の測定を進める。
- 24年度末の段階で判断し、必要ならばDラインでの測定も行う。
- とにかく、何らかの物理結果を5年で得たい。

予算

科研費の枠内

項目	コスト(千円)	小計	備考
検出器		73,000	(103,000)
	電磁石	(30,000)	
	ホドスコープ	10,000	gating-grid type
	WC開発	3,000	
	WC建設	50,000	
	読み出し	10,000	
ターゲット		30,000	
	SiCターゲット	30,000	
Hライン新設		1,480,000	
	HS1	400,000	
	HS2-5	300,000	
	HB1	50,000	
	HB2-4	90,000	
	Quads	50,000	
	キッカー電磁石	60,000	
	キッカー電源	160,000	
	真空	30,000	
	電磁石電源	300,000	
	ケーブル等	40,000	
Dライン改造		70,000	
	キッカー電源PFN	50,000	
	DSEPTUM改造	20,000	

Multi-purpose beamline:
他の用途にも転用可能

いまの研究体制

Hライン設計

建設

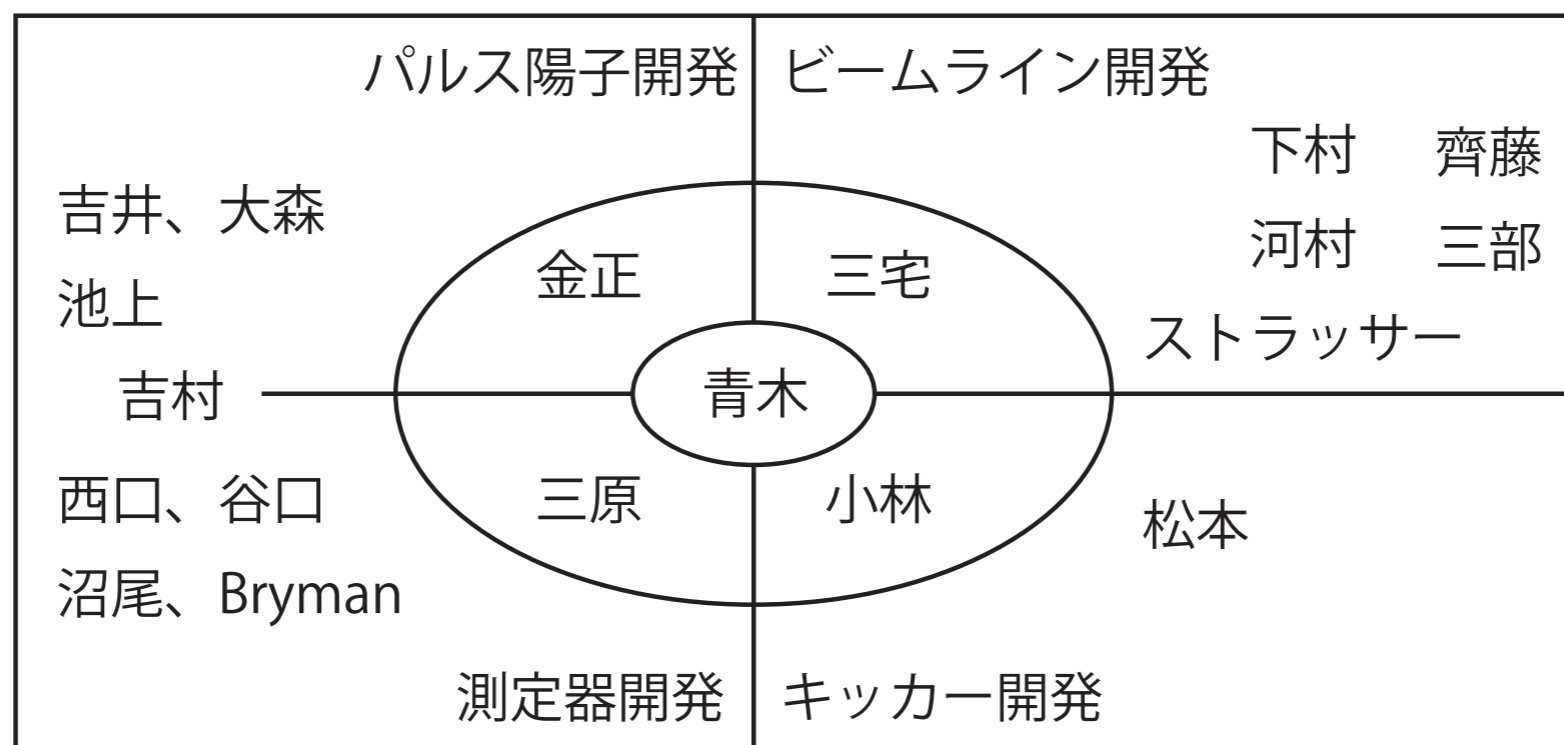
中古電磁石調達

バックアップDライン案検討

extinction測定器開発

extinction測定

extinction悪化メカニズムの解析



全体設計

トラッキングチェンバー開発

カウンター開発

物理解析

Hラインキッカー開発

バックアップDラインキッカー改造

博士課程のテーマとして最適です。

まとめ

- 10^{-14} の感度でミュオン電子転換過程を探索することができればインパクトは大きい。
- 無論COMETやMu2eが実験を開始する前に結果を得なければ意味は薄い。
- J-PARCからの「成果」をMaximizeするシナリオである。
- 5年後には何らかの物理結果を得る研究計画を提案した。これは科研費との整合性も高い。
- 大立体角ビームライン(Hライン)が必要である。他の実験とビームラインを共用することが可能である。
- コスト(ビームラインを除く)は科研費で手が届く範囲である。
- 博士課程の研究テーマとしても最適化と思います。

End of Slide