

J-PARC/MLFにおける ステライルニュートリノ探索

10/13/2016, 計測システム研究会@J-PARC

岩井 瑛人, ミシガン大学

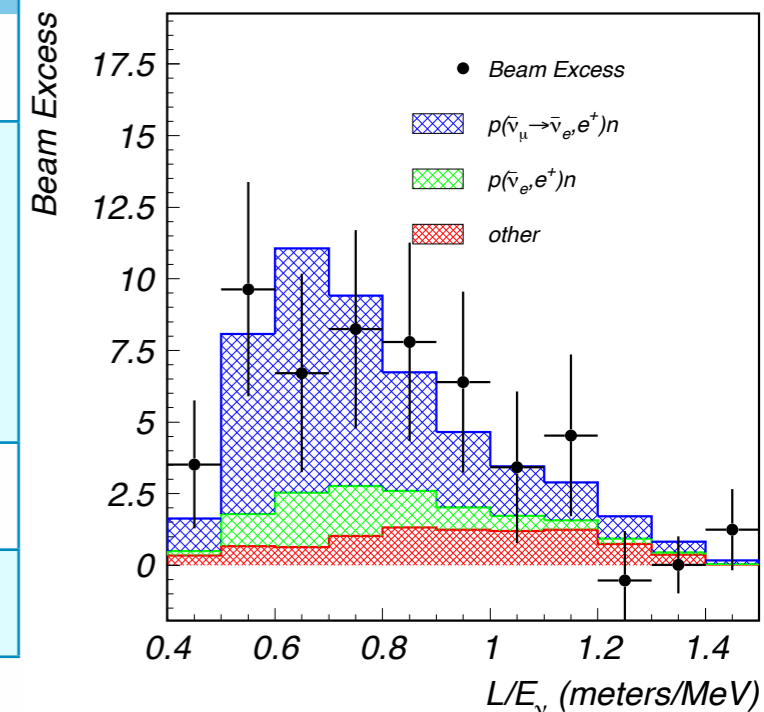


ステライルニュートリノ探索

- 1988年以来、既知のニュートリノ振動では説明できない、混沌とした実験事実がある。

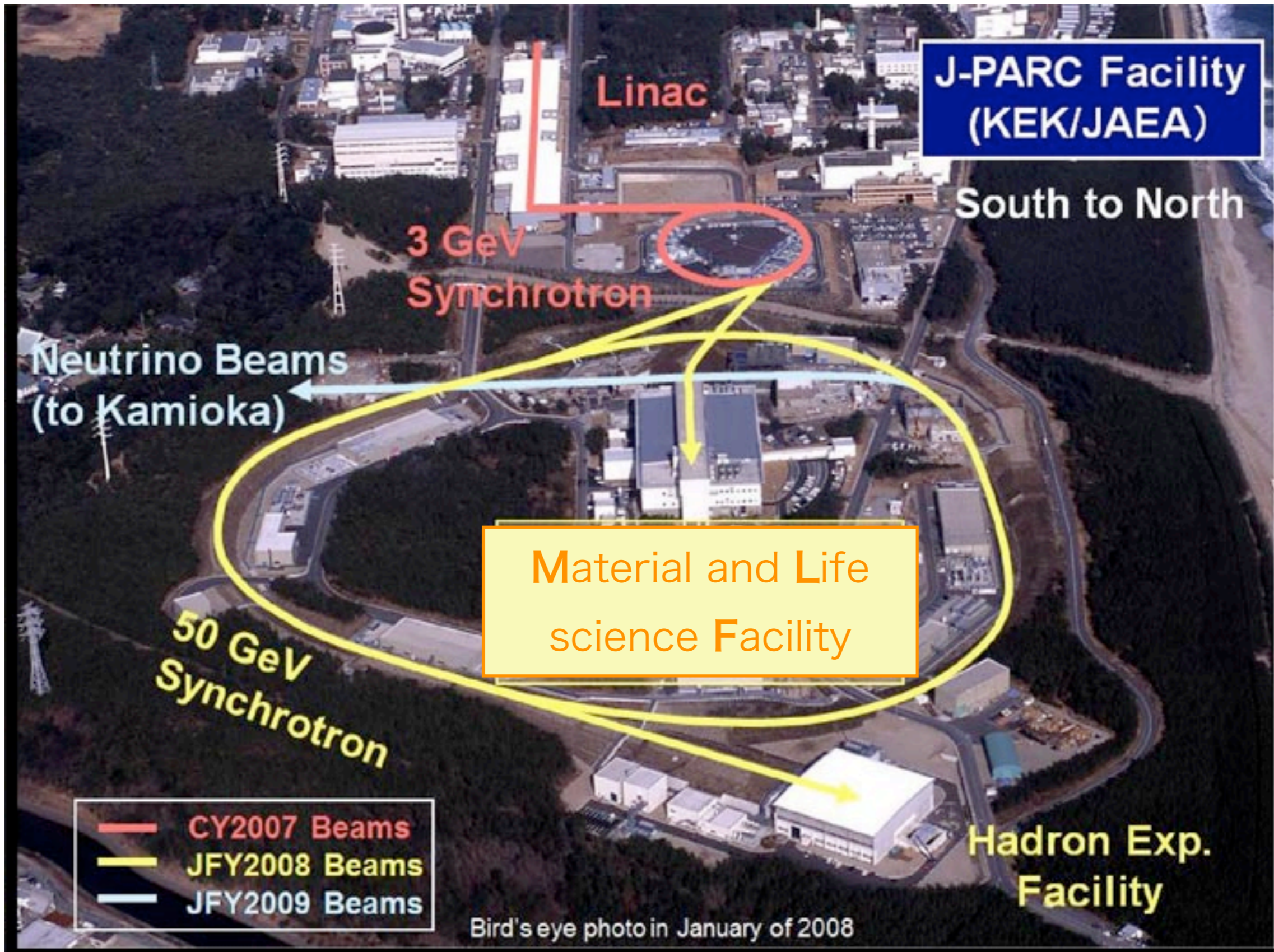
実験	ニュートリノ源	信号	有意性	E/L
LSND	μ decay at rest	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	3.8σ	40MeV/30m
MiniBooNE	π decay in flight	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	3.4σ	800MeV/600m
		$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	2.8σ	
		comb.	3.8σ	
Gallium/SAGE	e capture	$\nu_e \rightarrow \nu_x$	2.7σ	<3MeV/10m
原子炉	β 崩壊	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$	3.0σ	3MeV, 10-100m

LSND
Phys. Rev. D **64**, 112007 (2001)



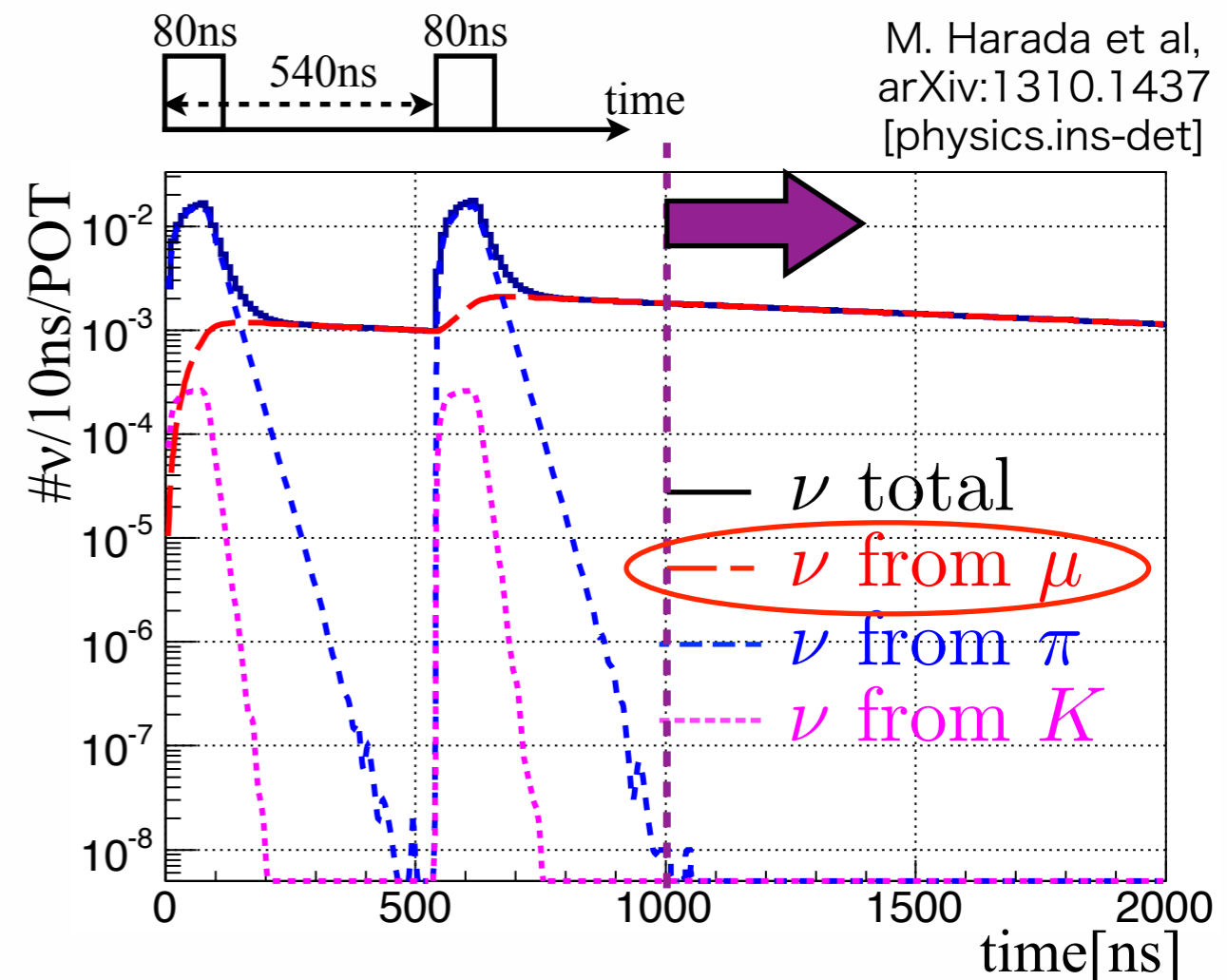
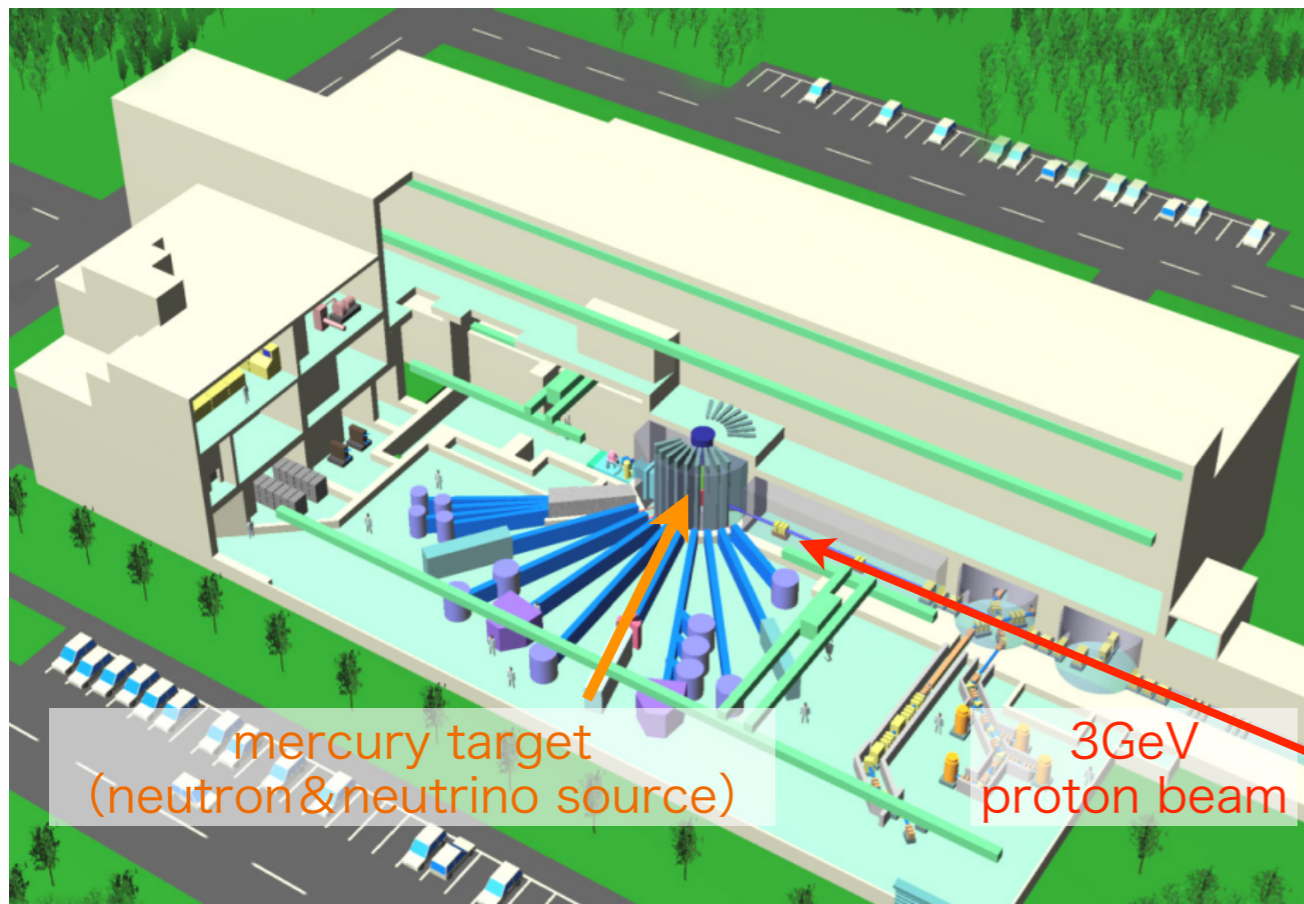
- $O(1\text{eV}^2)$ のニュートリノ振動??
- LEP実験より、質量 $M_Z/2$ 以下の弱い相互作用 (Zとカップル) するニュートリノは3種類のみ
 - ➔ 弱い相互作用をしないニュートリノ??
- ✓ 事実なのか、間違いなのか、完全決着(5σ 以上)を目指す!

J-PARC E56 JSNS² at MLF

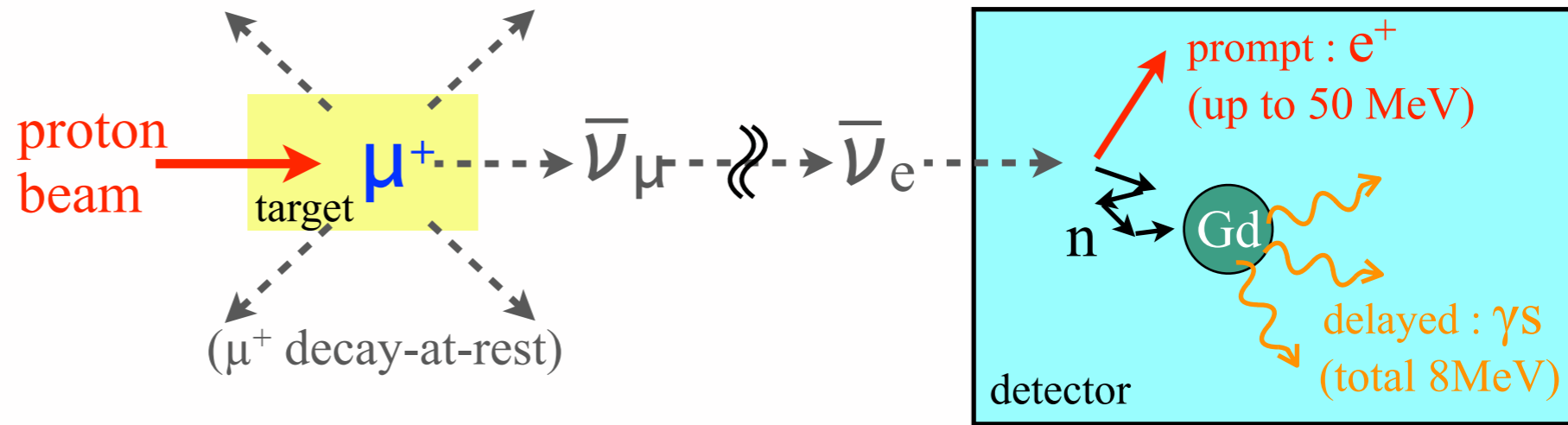


MLFの中性子源: RCS + HG target in MLF

- RCSの大強度陽子ビームによる世界クラスの大強度中性子源
- ビームエネルギー: 3 GeV +ニュートリノ源!!
- ビームパワー: 設計値: 1 MW, 連続利用運転: 500 kW
- ビームから1 μs 以降を選ぶことにより、静止ミューオン崩壊由来のニュートリノのみを観測することができる

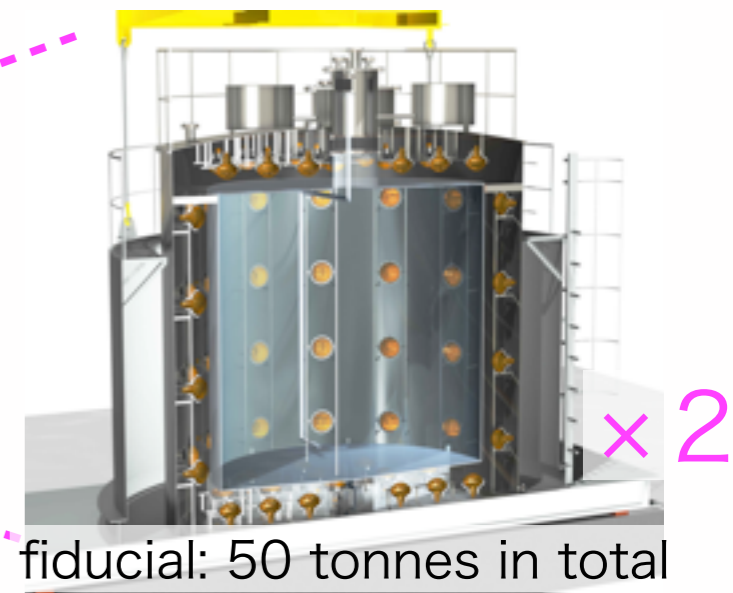
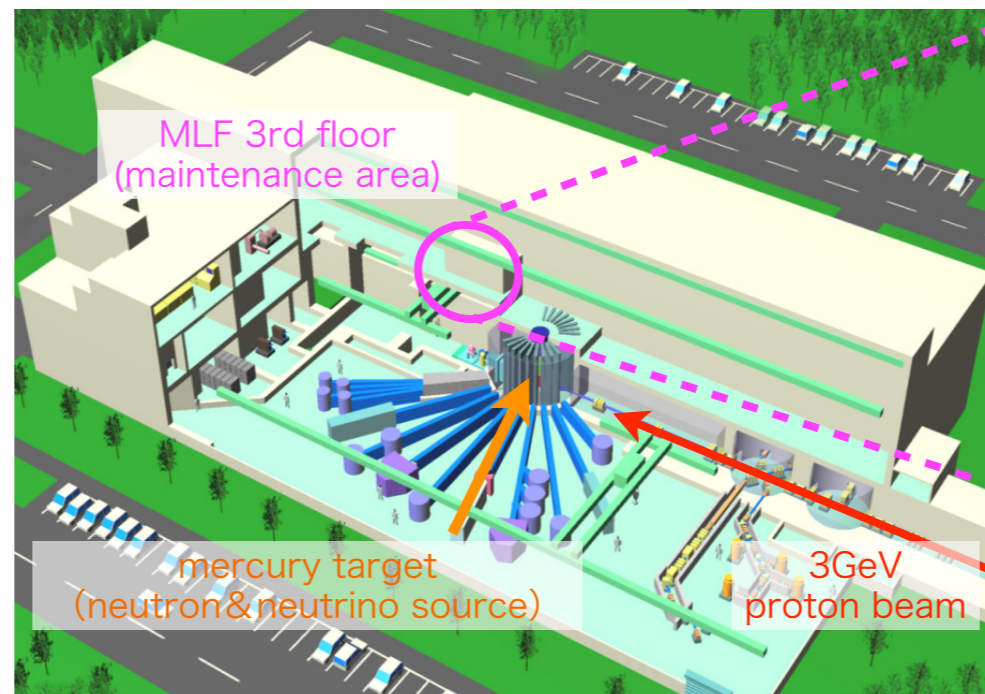


測定原理



- シグナル: $\bar{\nu}_\mu (\rightarrow \bar{\nu}_4) \rightarrow \bar{\nu}_e$
- ニュートリノ源: ν_μ from $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ decay at rest
 - intrinsic $\bar{\nu}_e$: $\pi^- \rightarrow \mu^- \rightarrow e^-$ チェーンは π/μ 捕獲により 3 桁抑制
- 逆 β 崩壊 (IBD: $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$) の遅延同時計測
 - 断面積、エネルギー再構成がよく理解されている
 - 後発事象は、Gdによる中性子捕獲からの(複数の) γ 線として観測
- LSNDの直接的な追検証が可能

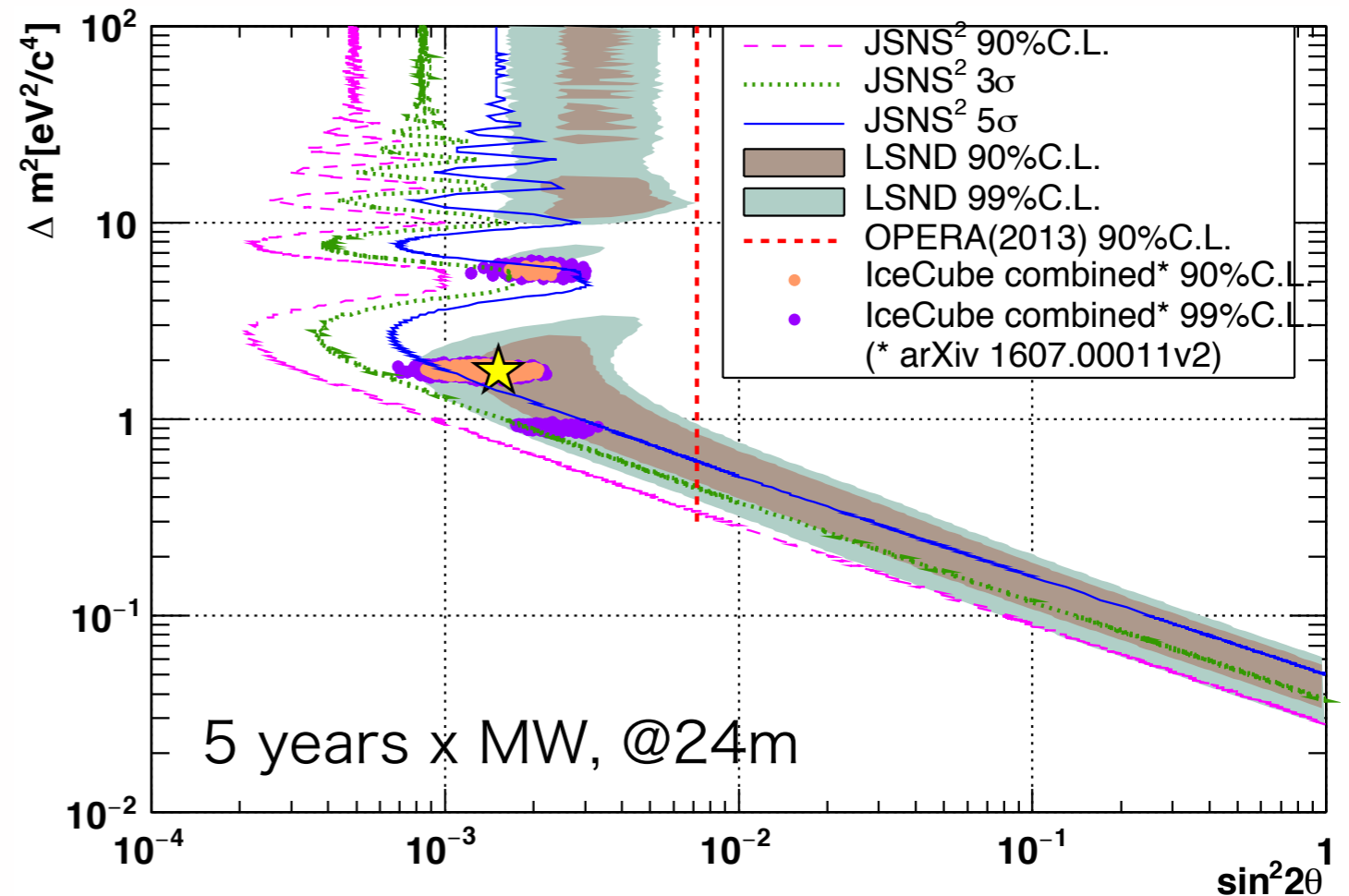
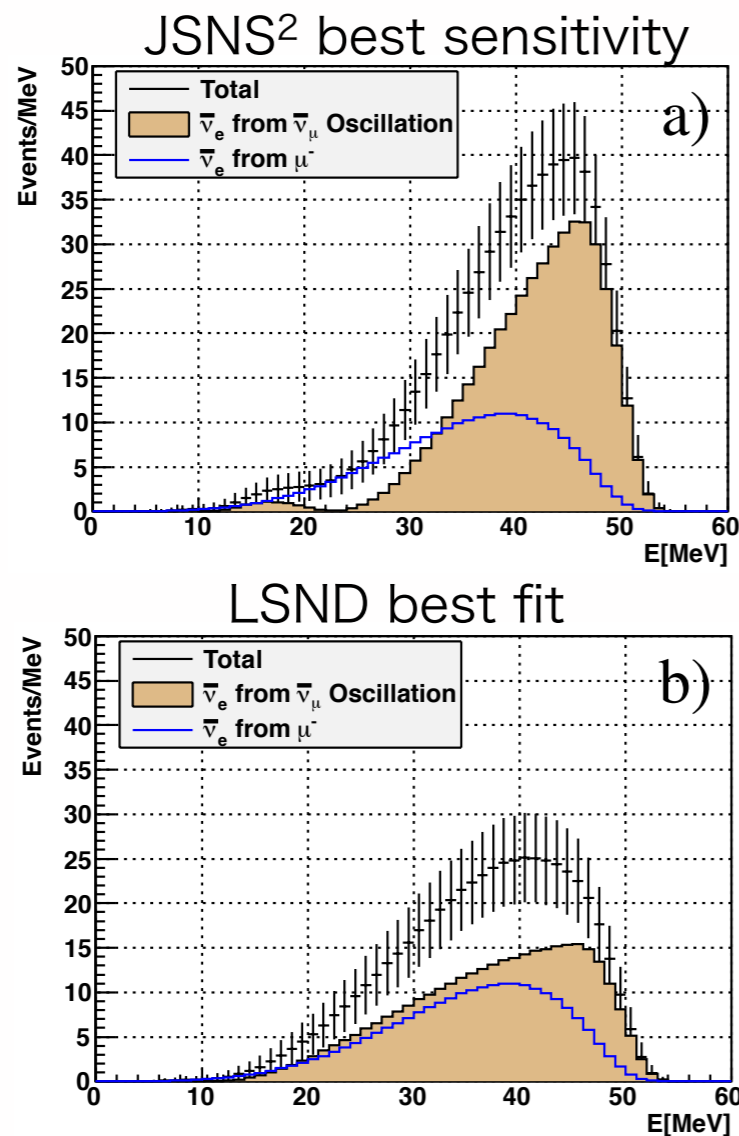
検出器



- ベースライン: 24 m
- 有効体積: 50トン
- エネルギー分解能: $\sigma_E/E[\%] \sim 15\%/sqrt([MeV])$
- 中性子捕獲による後発事象
 - Gd 入り液体シンチレータ (DayaBay, Double Chooz, RENO ...)
 - 技術手法は確立されている
- PSD and/or Cherenkov による粒子識別(γ/n)
- ~~新ビームライン, 新実験棟~~
 - 建設から1.5年でデータ取得開始へ
- Reasonable cost (~ 2 億/detector, 計 4 億)

信号抽出と感度

- 信号事象と主要なニュートリノ由来の背景事象 (intrinsic $\bar{\nu}_e$) はエネルギー分布の違いを用いて抽出できる
- LSNDにより示唆されたパラメータ領域の殆どを 5σ の感度で探索可能 (5年 x 1MW)



Timeline

- 
- 2013
 - ▶ 3月～5月: MLF実験ホール(2F)での背景事象測定
 - ▶ 9月: 実験プロポーザルを提出 (17th J-PARC PAC)
 - 2014
 - ▶ 4月～6月: 実験候補地実地での背景事象測定 (MLF 3F)
 - ▶ 12月: J-PARC RCS 1 MW trial
 - 2015
 - ▶ 1月: Stage-1 approval
 - ▶ 夏: RCS RF-PS アップグレード (1 MW 連続運転のため)
 - 2016
 - ▶ 5月～6月: 液シンを用いた背景事象測定 at MLF 3F
 - ▶ 1台目検出器の財源 (基盤S)
 - 2017
 - ▶ 技術設計書(Technical Design Report)の提出
 - 2018
 - ▶ データ取得開始 (2018年度末)

Timeline

- 
- 2013
 - ▶ 3月～5月: MLF実験ホール(2F)での背景事象測定
 - ▶ 9月: 実験プロポーザルを提出 (17th J-PARC PAC)
 - 2014
 - ▶ 4月～6月: 実験候補地実地での背景事象測定 (MLF 3F)
 - ▶ 12月: J-PARC RCS 1 MW trial
 - 2015
 - ▶ 1月: Stage-1 approval
 - ▶ 夏: RCS RF-PS アップグレード (1 MW 連続運転のため)
 - 2016
 - ▶ 5月～6月: 液シンを用いた背景事象測定 at MLF 3F
 - ▶ 1台目検出器の財源 (基盤S)
 - 2017
 - ▶ 技術設計書(Technical Design Report)の提出
 - 2018
 - ▶ データ取得開始 (2018年度末)

実験候補地での背景事象測定

The most critical technical issue is a detailed estimate of the actual background rate at the 3rd floor of the MLF. The PAC recommends a direct measurement of this background with a small-scale prototype detector. If the background levels are as predicted (based on an extrapolation from rates measured at BL13 using a simulation), the experiment would be technically feasible and could receive stage-I approval.

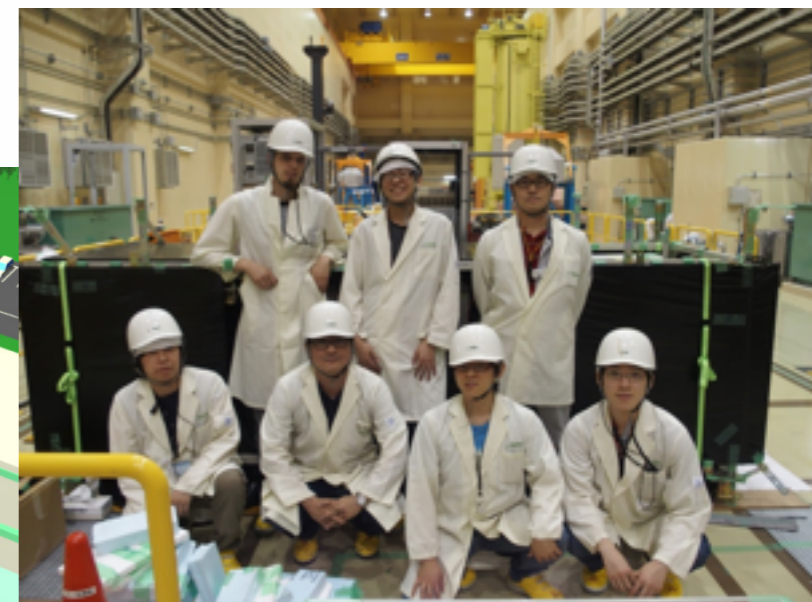
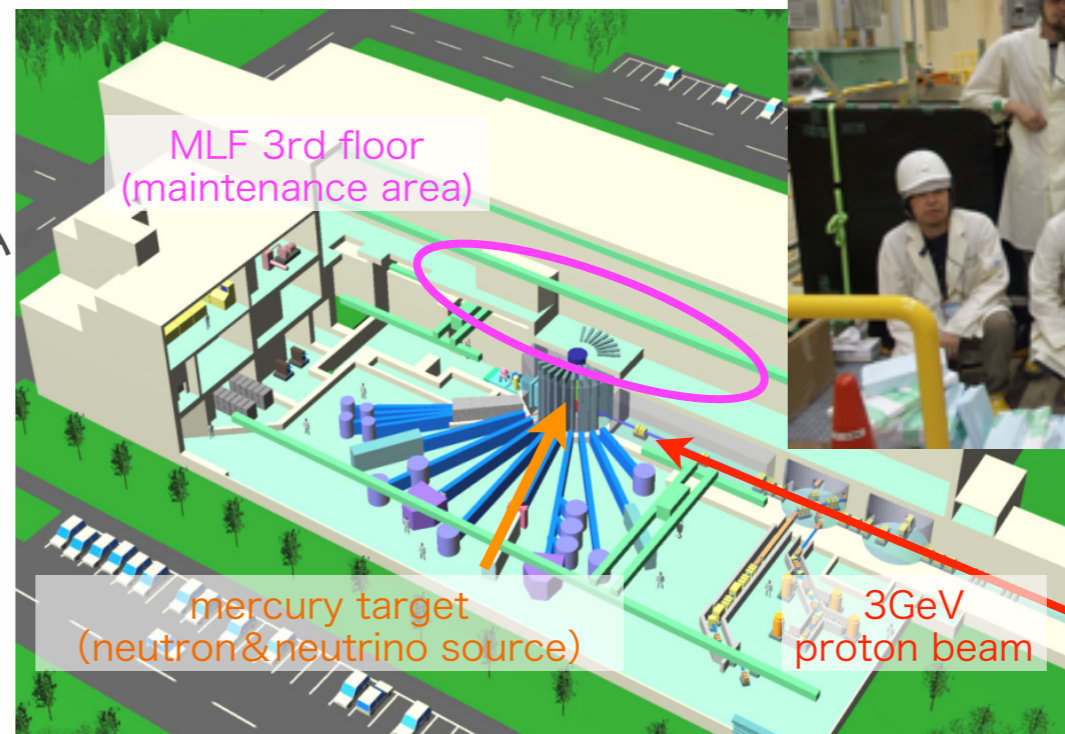
17th J-PARC PAC

compare beam ON/OFF

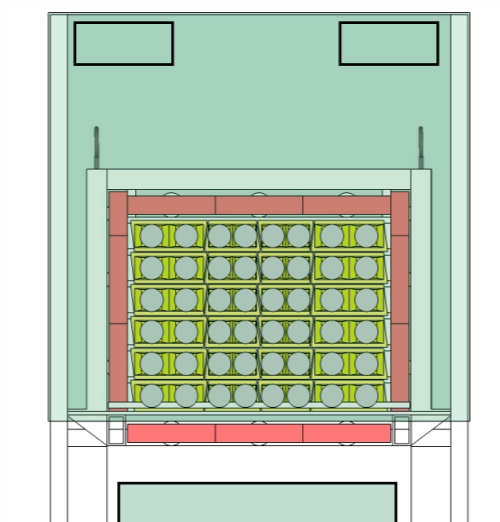
	beam-on	beam-off	comment
target BG		×	delayed signals were not required
backgrounds		○	huge, rejected by veto
		○	rejected by detecting mother μ
		○	accidental coincidence

実験候補地での背景事象測定

- 標的シンチチレータ
 - 24 pieces, 計 500kg
- 2層からなるベトーシステム
 - inner and outer ベトー
 - 検出効率 > 99.9%



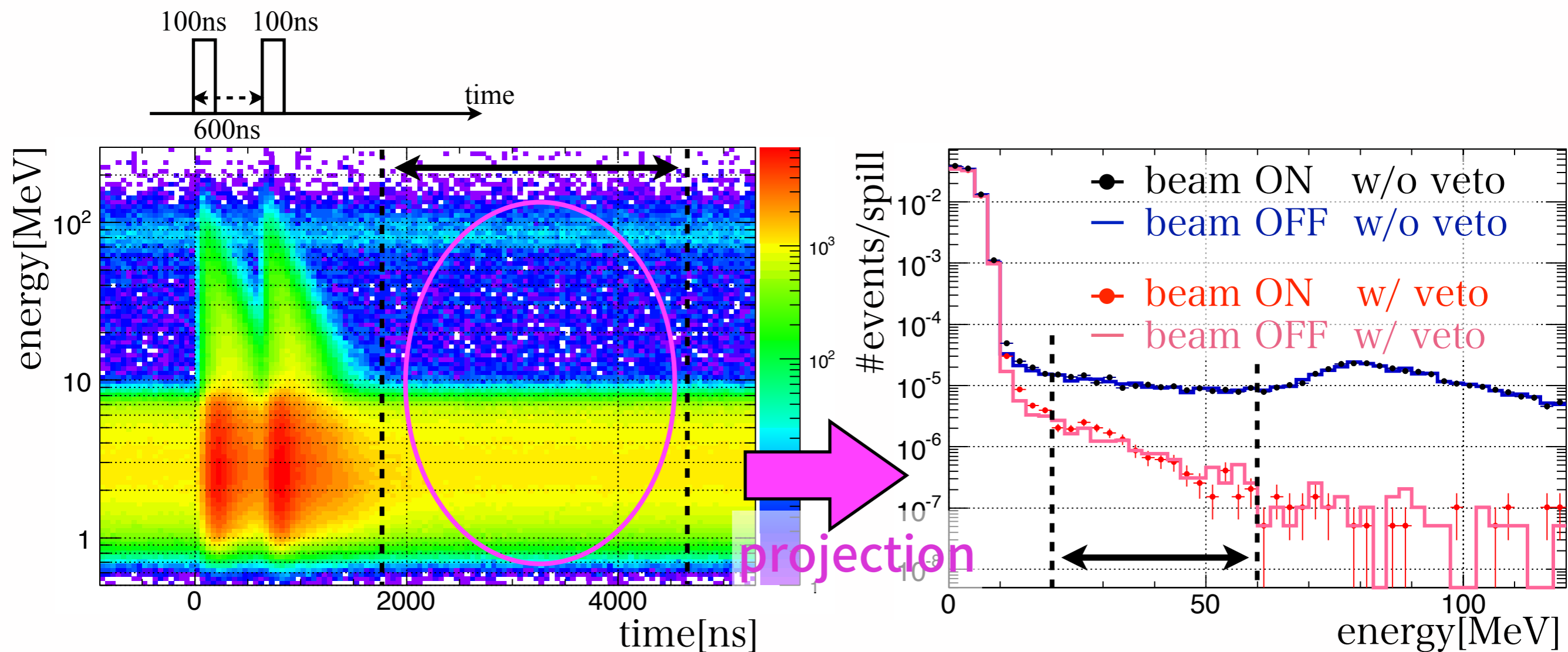
front view



side view



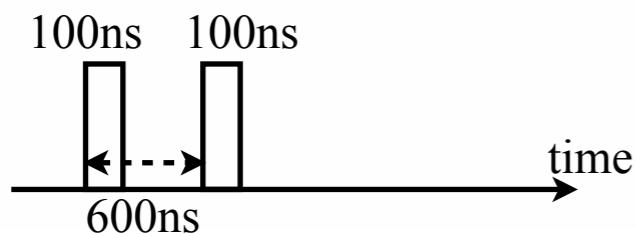
実験候補地での背景事象測定



#/spill/300kW	ON	OFF	$\Delta(\text{ON-OFF})$
w/o veto	$(1.68 \pm 0.03) \times 10^{-4}$	$(1.64 \pm 0.03) \times 10^{-4}$	$(4.0 \pm 4.2) \times 10^{-6}$
w/ veto	$(1.58 \pm 0.09) \times 10^{-5}$	$(1.52 \pm 0.09) \times 10^{-5}$	$(0.6 \pm 1.3) \times 10^{-6}$

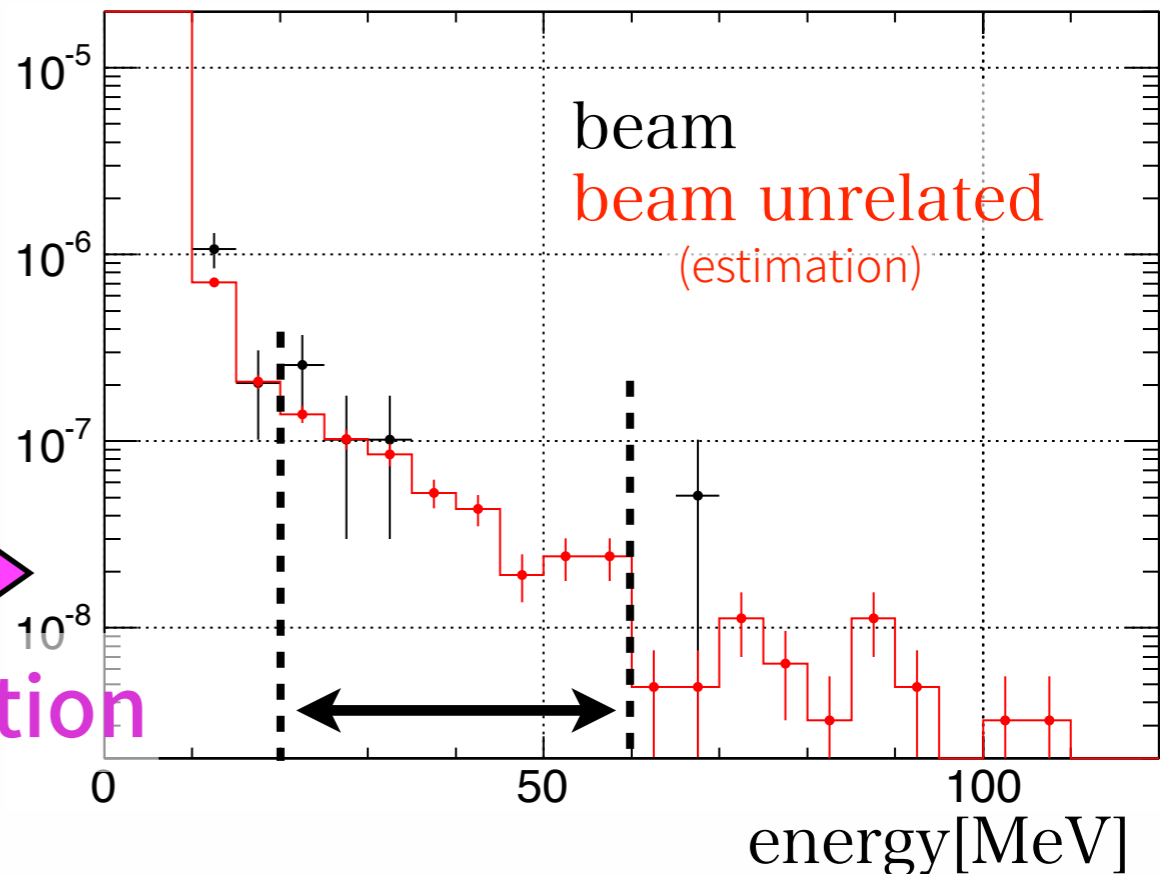
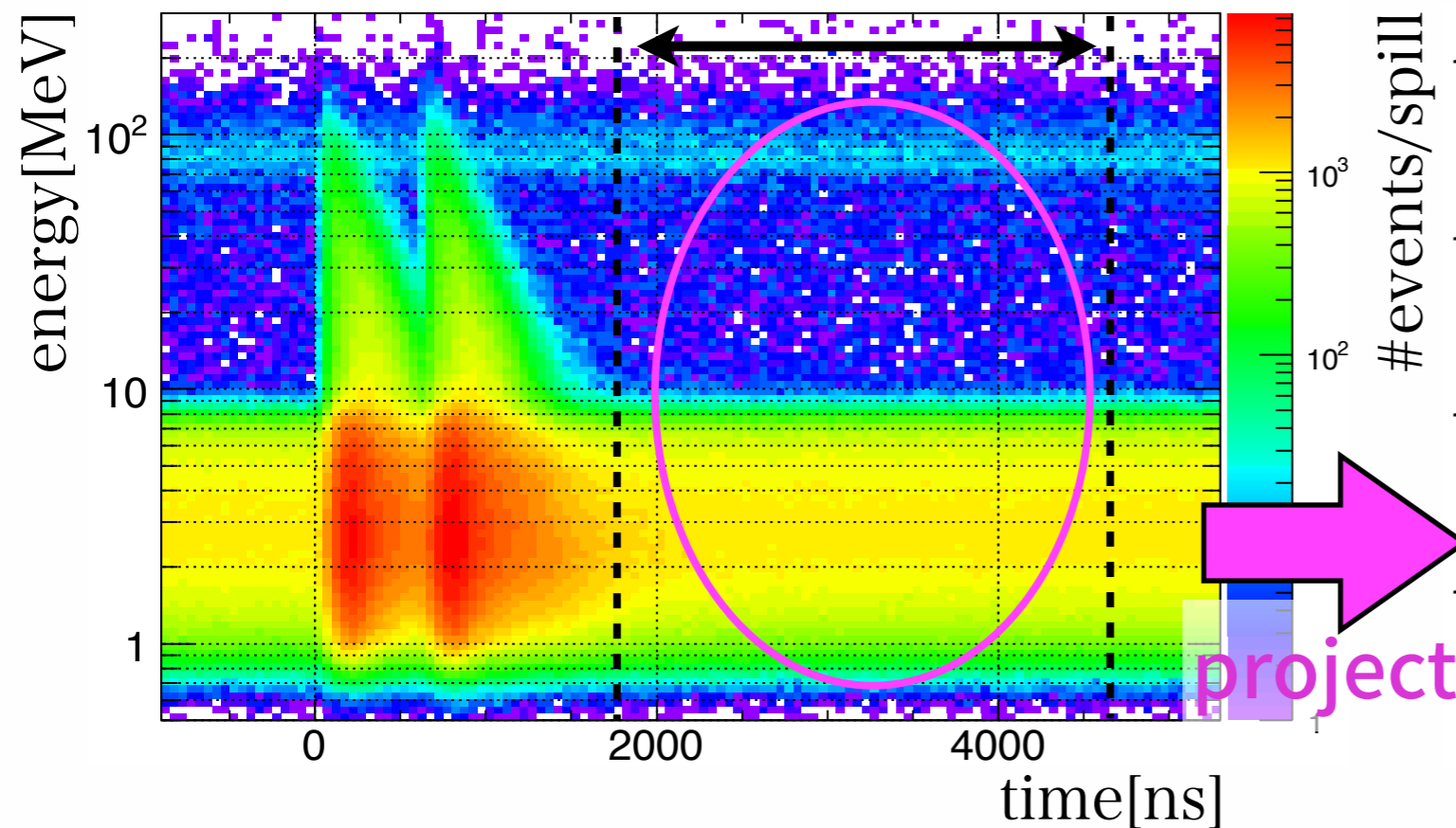
S. Ajimura et al,
 Prog. Theor. Exp. Phys.
 (2015) 063C01

背景事象測定



	beam-on	beam-off	comment
Target BG "beam Michel-e"		×	delayed signals were not observed
cosmic μ		○	huge, rejected by veto
Michel-e from cosmic μ		○	suppressed by checking timing of mother μ
Other cosmic related		○	accidental hit on bunch timing

on bunch hit



#/spill/300kW	ON	OFF	$\Delta(\text{ON-OFF})$
w/o veto	$(1.68 \pm 0.03) \times 10^{-4}$	$(1.64 \pm 0.03) \times 10^{-4}$	$(4.0 \pm 4.2) \times 10^{-6}$
w/ veto	$(1.58 \pm 0.09) \times 10^{-5}$	$(1.52 \pm 0.09) \times 10^{-5}$	$(0.6 \pm 1.3) \times 10^{-6}$
+ "on-bunch cut"	$(4.6 \pm 1.5) \times 10^{-7}$	$(4.9 \pm 0.3) \times 10^{-7}$ *estimation	$(-0.3 \pm 1.6) \times 10^{-7}$

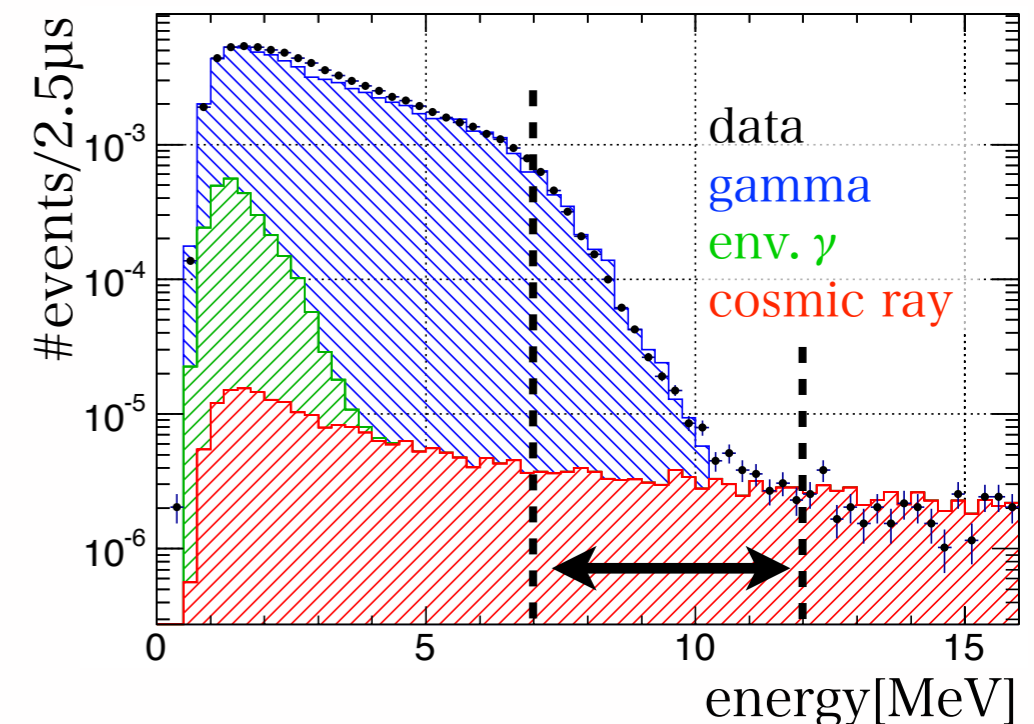
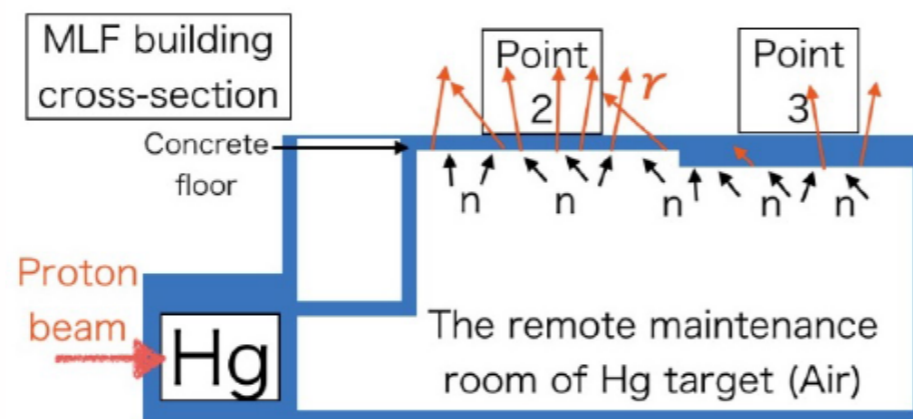
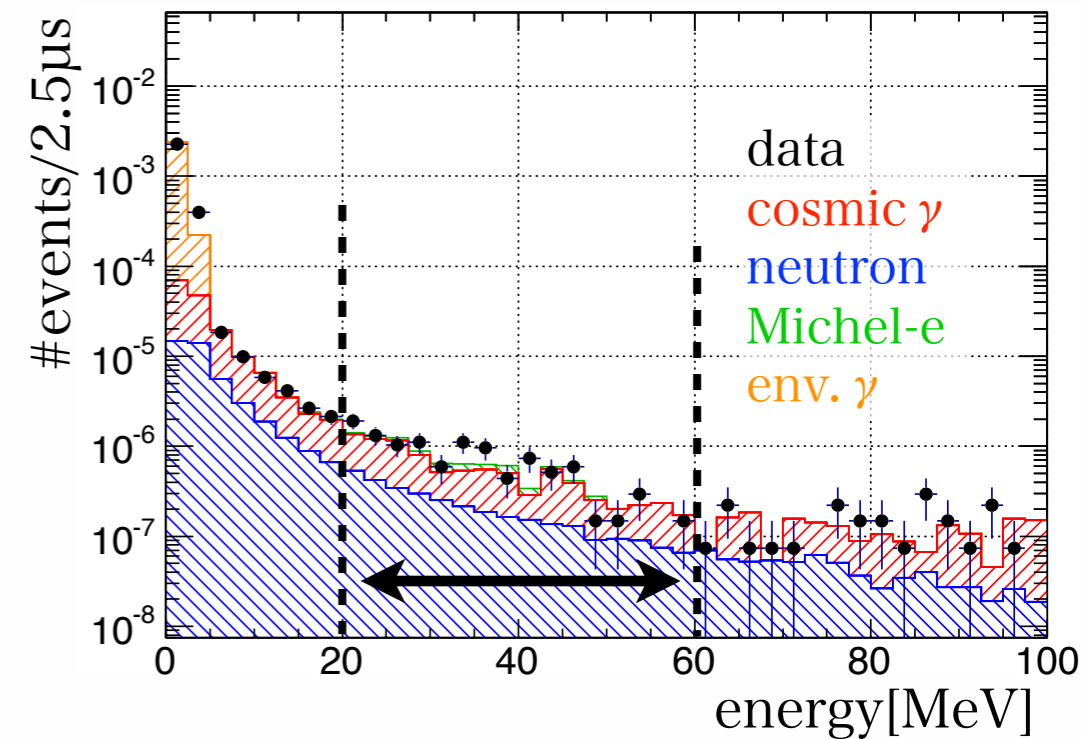
S. Ajimura et al,
Prog. Theor. Exp. Phys.
(2015) 063C01

$\Rightarrow <13 / 5\text{yr}/\text{MW}/50\text{t}$
(90% C.L.)

Accidental BG

S. Ajimura et al,
Prog. Theor. Exp. Phys.
(2015) 063C01

- 宇宙線起源の先発事象BG
 - ビーム無し時の先発事象のエネルギー領域 (親ミューオン検出による Michel-e 除去)
 - 液シン(NE213), NaIを用いた別測定
 - 6%以内で一致
- ビーム由来 γ 線による後発事象BG
 - 床コンクリートからの γ 線
 - 検出器下に鉛ブロックを敷く事で抑止



Timeline

- 2013
 - ▶ 3月～5月: MLF実験ホール(2F)での背景事象測定
 - ▶ 9月: 実験プロポーザルを提出 (17th J-PARC PAC)
- 2014
 - ▶ 4月～6月: 実験候補地実地での背景事象測定 (MLF 3F)
 - ▶ 12月: J-PARC RCS 1 MW trial
- 2015
 - ▶ 1月: Stage-1 approval

2016
Based on the background measurements presented, the PAC is convinced that the background rates described in the proposal are achievable. The PAC recommends stage-1 status for P56.

- 2017
 - ▶ 技術設計書(Technical Design Report)の提出
- 2018
 - ▶ データ取得開始 (2018年度末)

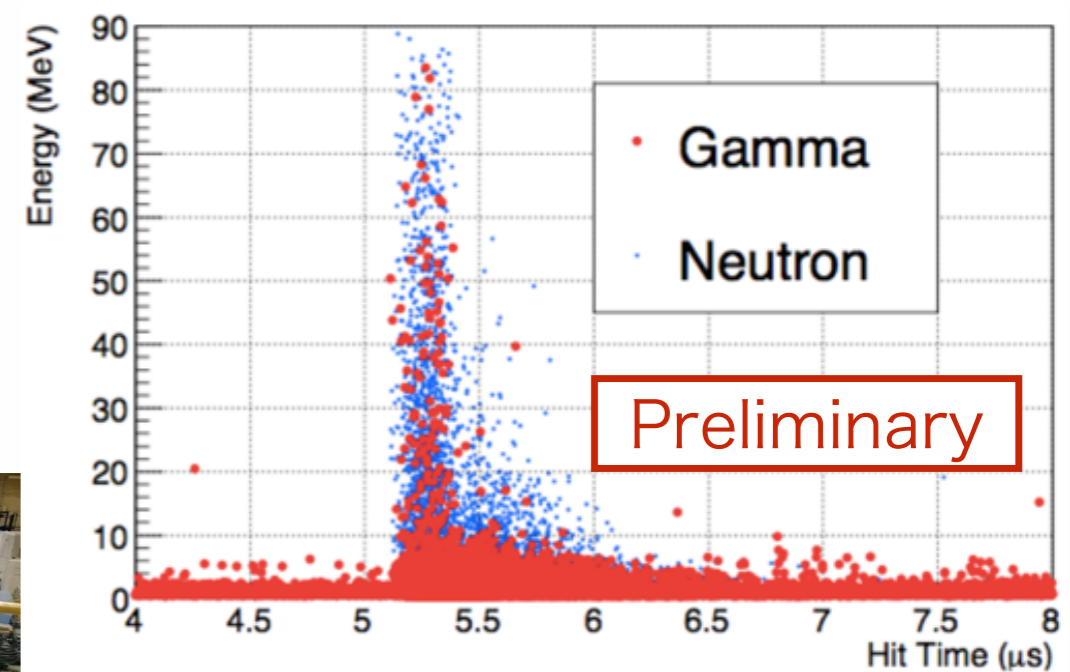
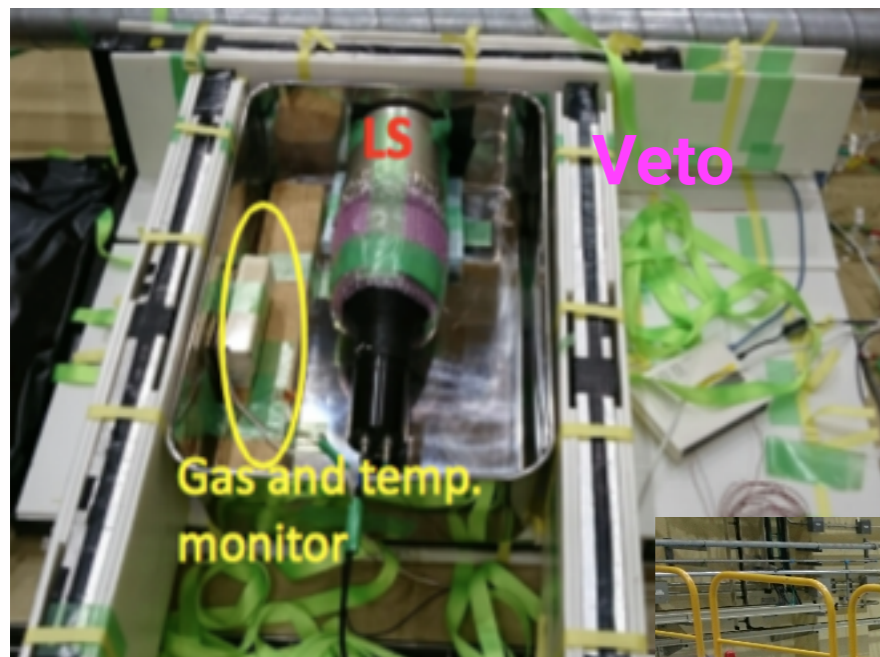
Timeline

- 
- 2013
 - ▶ 3月～5月: MLF実験ホール(2F)での背景事象測定
 - ▶ 9月: 実験プロポーザルを提出 (17th J-PARC PAC)
 - 2014
 - ▶ 4月～6月: 実験候補地実地での背景事象測定 (MLF 3F)
 - ▶ 12月: J-PARC RCS 1 MW trial
 - 2015
 - ▶ 1月: Stage-1 approval
 - ▶ 夏: RCS RF-PS アップグレード (1 MW 連続運転のため)
 - 2016
 - ▶ 5月～6月: 液シンを用いた背景事象測定 at MLF 3F
 - ▶ 1台目検出器の財源 (基盤S)
 - 2017
 - ▶ 技術設計書(Technical Design Report)の提出
 - 2018
 - ▶ データ取得開始 (2018年度末)

候補地での液シンを用いた測定

- 狙い

- ビーム中にやってくる中性粒子の識別 (n/ γ)
- 候補地での液シン運用 (安全面での予行演習)



Timeline

- 
- 2013
 - ▶ 3月～5月: MLF実験ホール(2F)での背景事象測定
 - ▶ 9月: 実験プロポーザルを提出 (17th J-PARC PAC)
 - 2014
 - ▶ 4月～6月: 実験候補地実地での背景事象測定 (MLF 3F)
 - ▶ 12月: J-PARC RCS 1 MW trial
 - 2015
 - ▶ 1月: Stage-1 approval
 - ▶ 夏: RCS RF-PS アップグレード (1 MW 連続運転のため)
 - 2016
 - ▶ 5月～6月: 液シンを用いた背景事象測定 at MLF 3F
 - ▶ 1台目検出器の財源 (基盤S) ←有効体積25トン
 - 2017
 - ▶ 技術設計書(Technical Design Report)の提出
 - 2018
 - ▶ データ取得開始 (2018年度末)

Signal and BGs

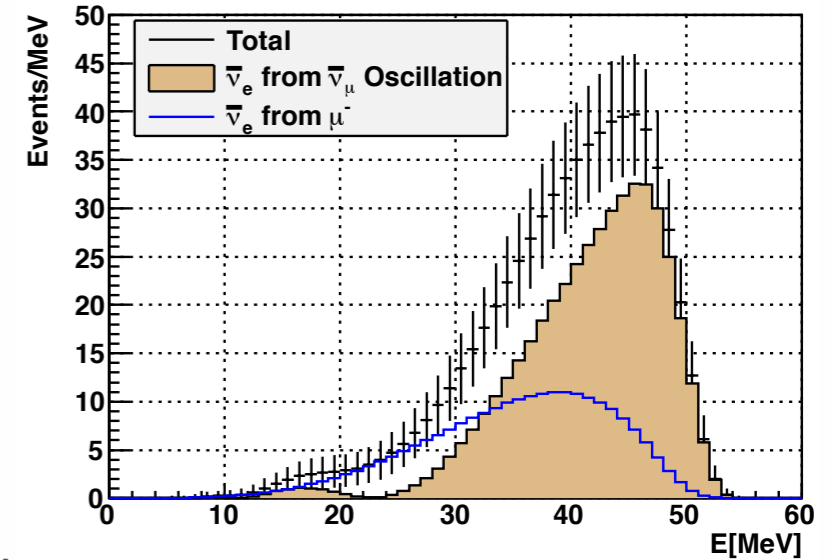
	Contents	#/50t/5yr/MW	Notes
BG	$\bar{\nu}_e$ from μ^-	233	主なBG
	$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{12}\text{N}_{\text{gs}}$	15	
	ビーム高速中性子 (からの Michel-e)	<13 (90% C.L.)	実測定に基づく
	宇宙線高速中性子	33	実測定に基づく 1/100 除去を仮定
	Accidental	32	実測定に基づく
信号	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	470	$\Delta m^2 = 2.5 \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 0.003$ (JSNS ² best sensitivity)
		336	$\Delta m^2 = 1.2 \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 0.003$ (LSND best fit)

TDR提出に向けて

- 検出器 R&D

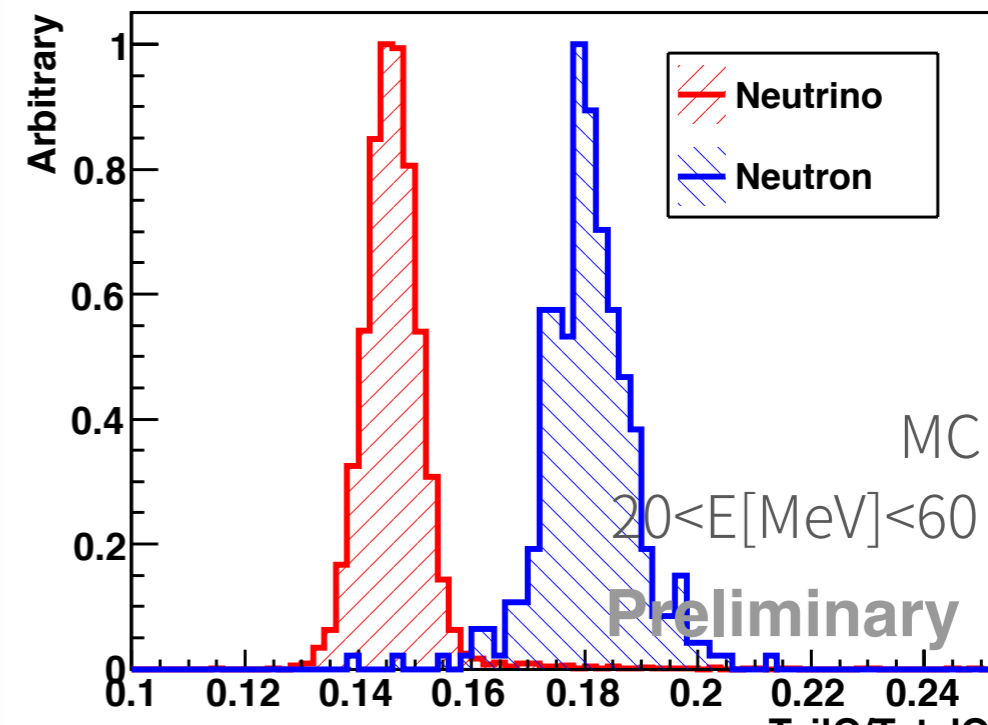
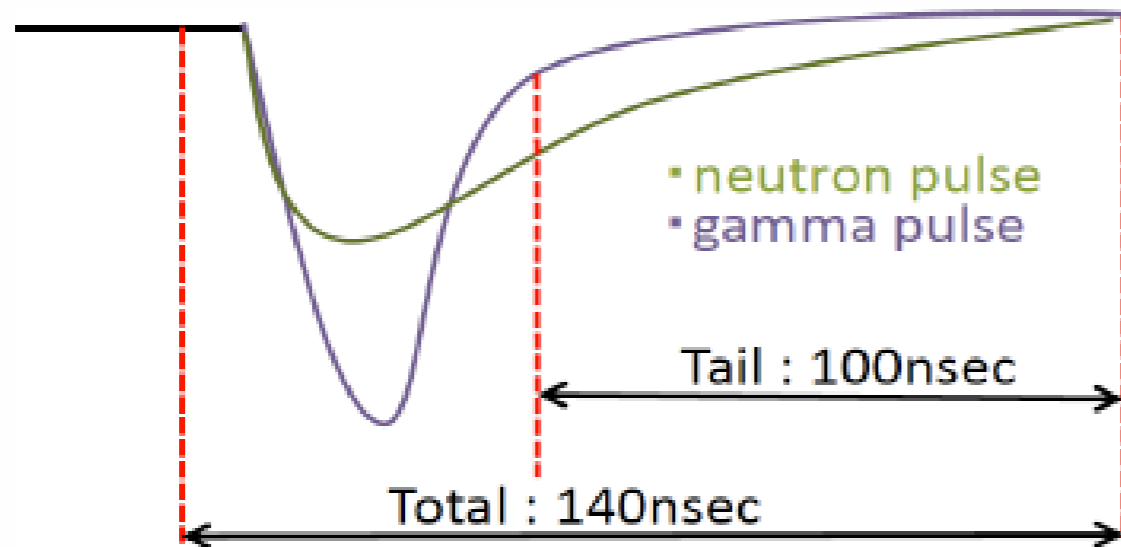
- ▶ 良いエネルギー分解能
- ▶ 良い高速中性子除去能力

➔ Pulse Shape Discrimination (PSD) and/or Cherenkov



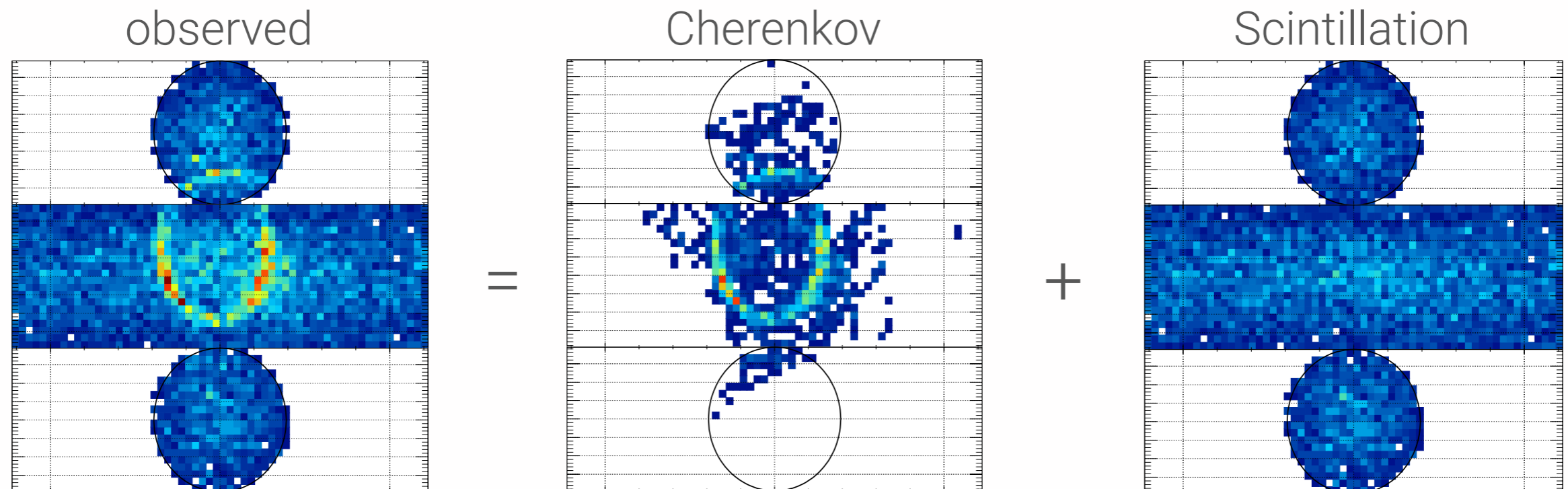
- PSD

✓ $^{241}\text{Am}^9\text{Be}$ 線源 → JSNS² 領域での性能見積



Cherenkov による粒子識別

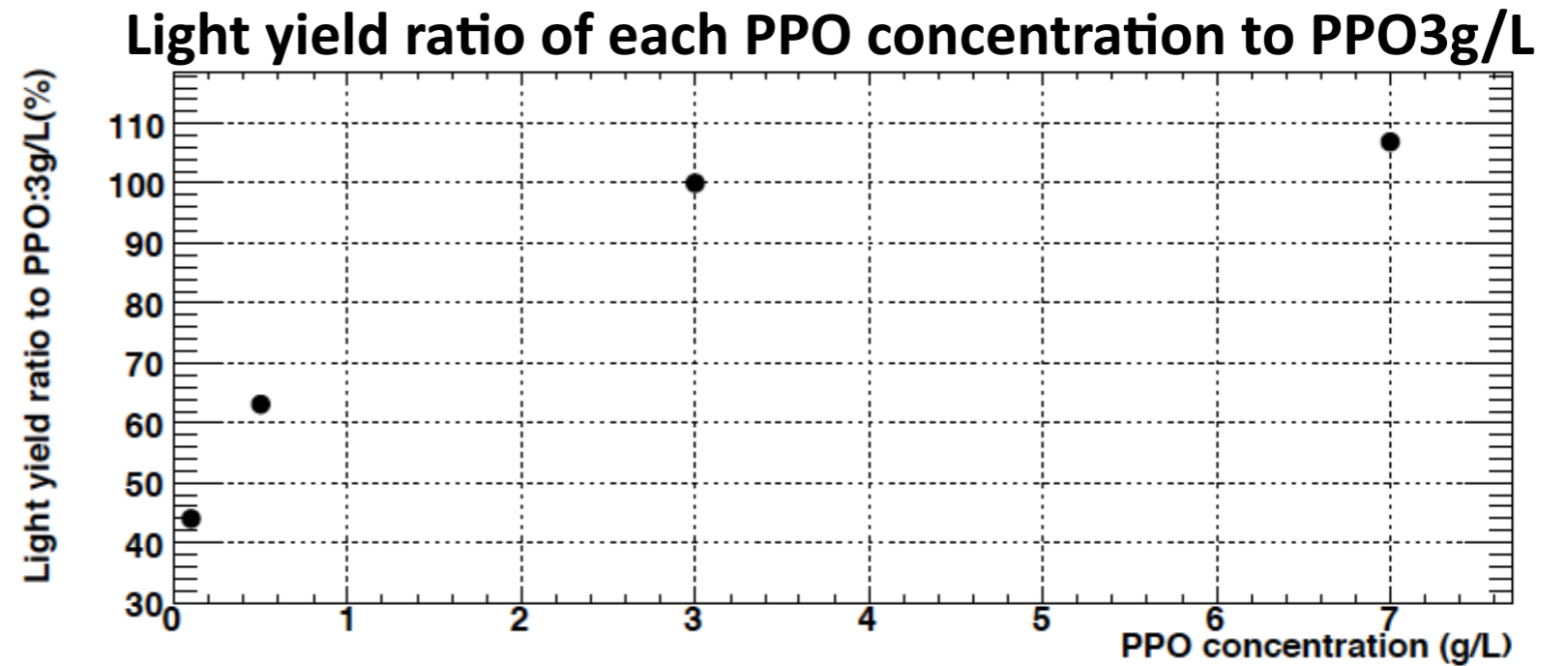
- 目的
 - n/γ 粒子識別 (PSDとのハイブリッド)
 - 電磁シャワー進行方向の再構成
- 開発要素
 - 液体シンチレータ発光によるバックグラウンド
(エネルギー分解能, PSDの観点からは、シンチ光量が多い方が望ましい)
 - PMTによる有限の photo-coverage
(コストの観点からはなるべくPMTの数は減らしたい)



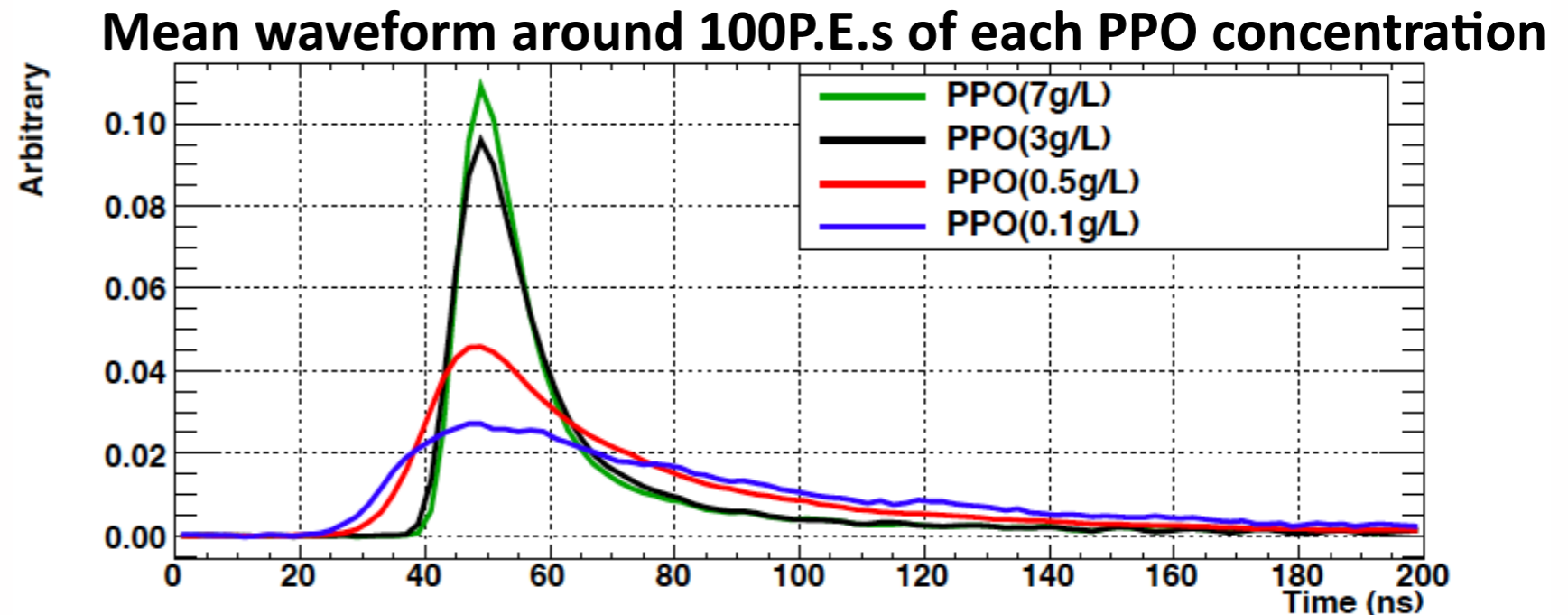
※低発光液体シンチレータと100% coverageでの概念図(MC)

液体シンチレータの特性

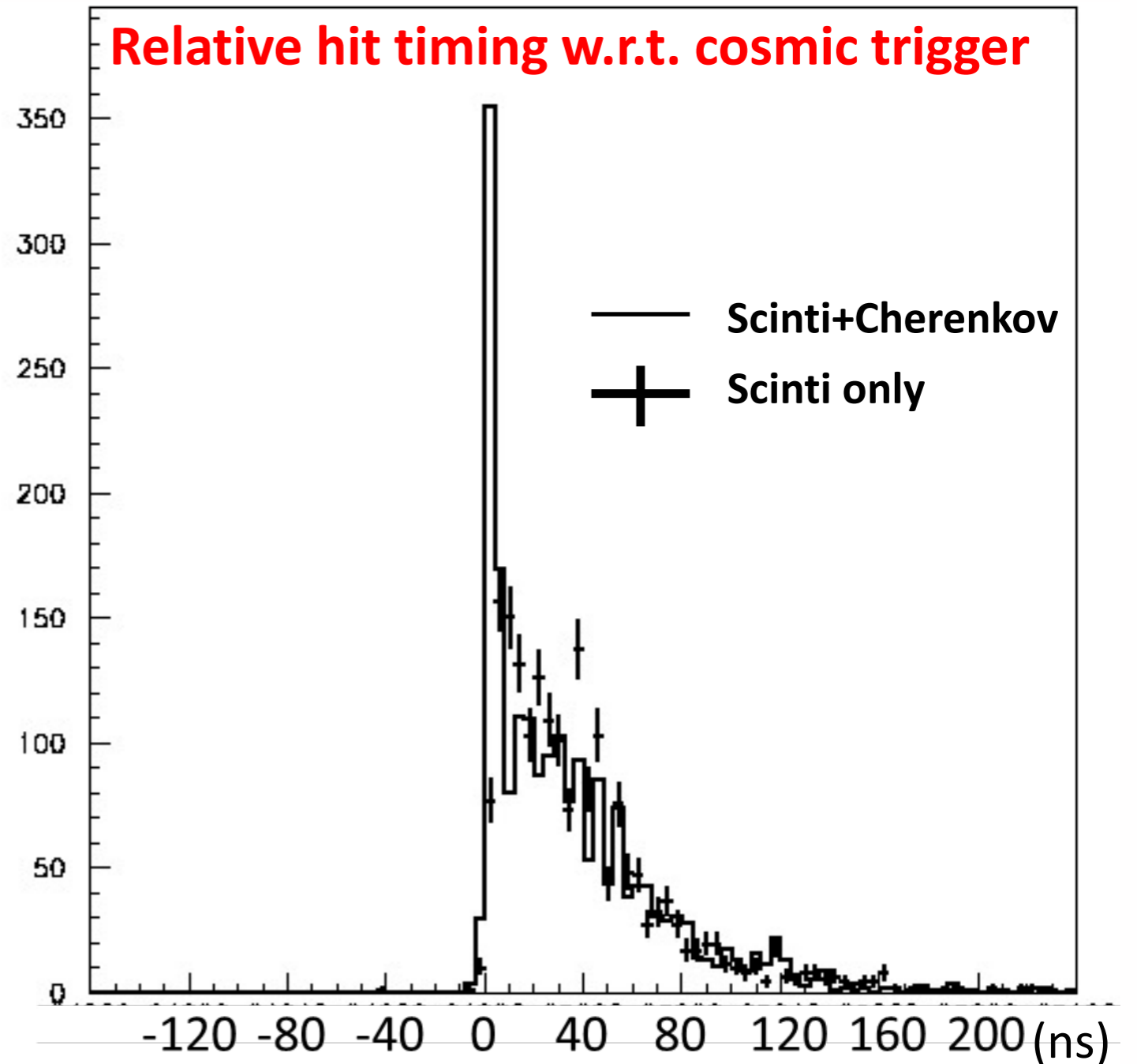
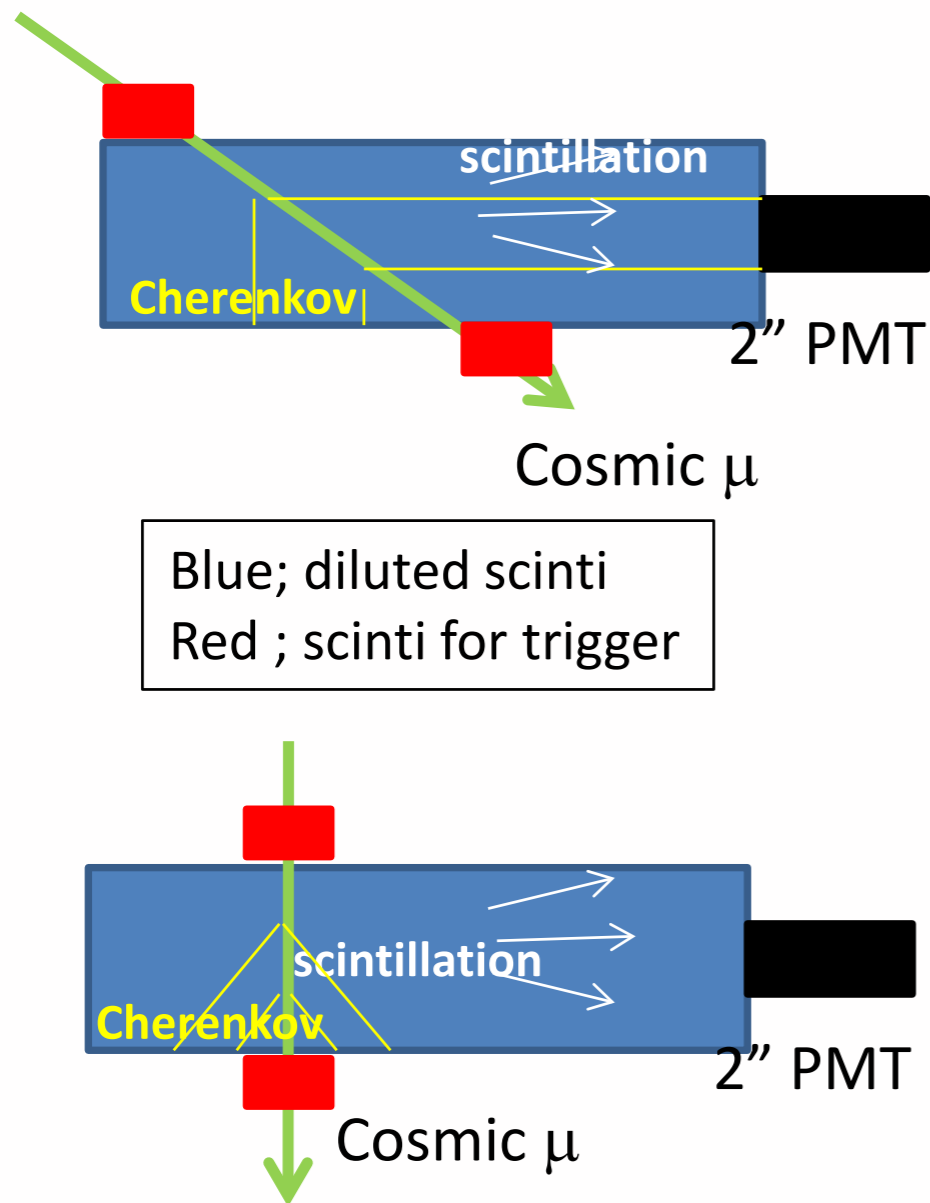
- 濃度 vs 光量



- 濃度 vs 時定数

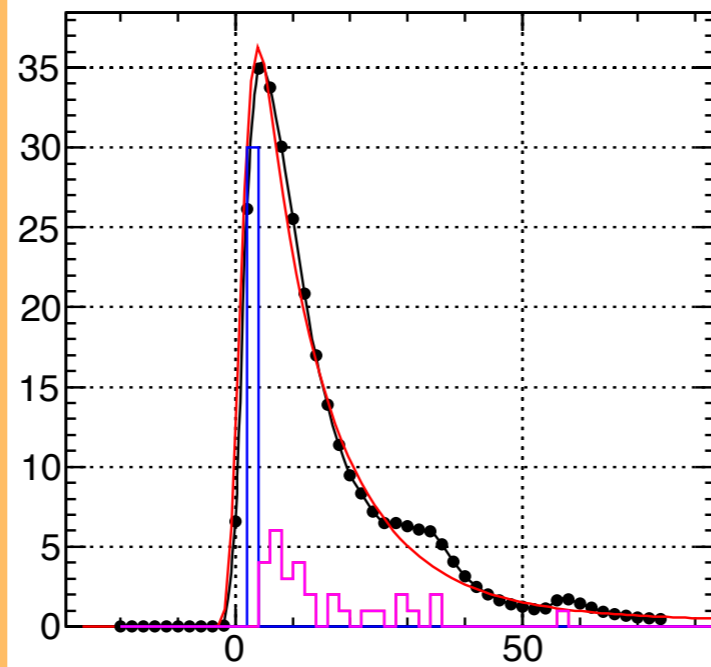
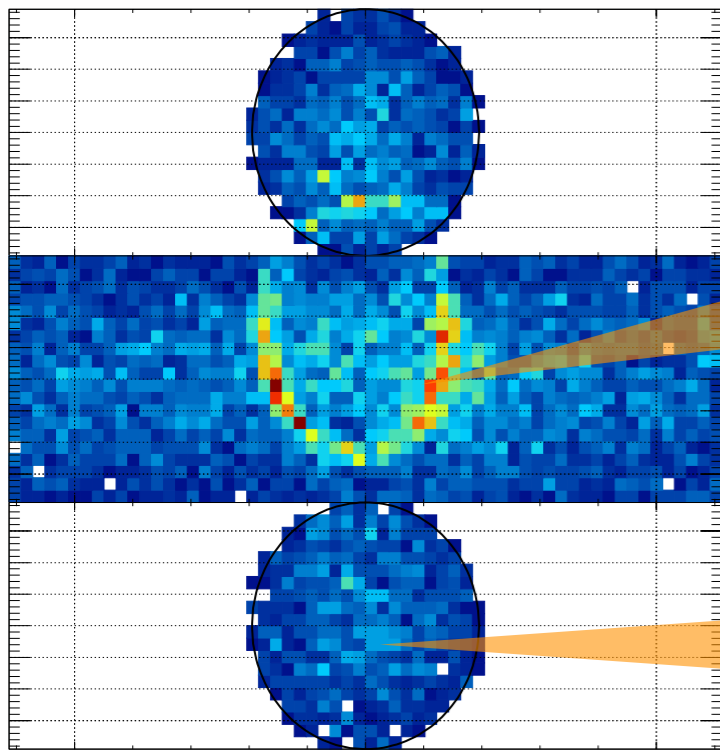


Cherenkov による粒子識別

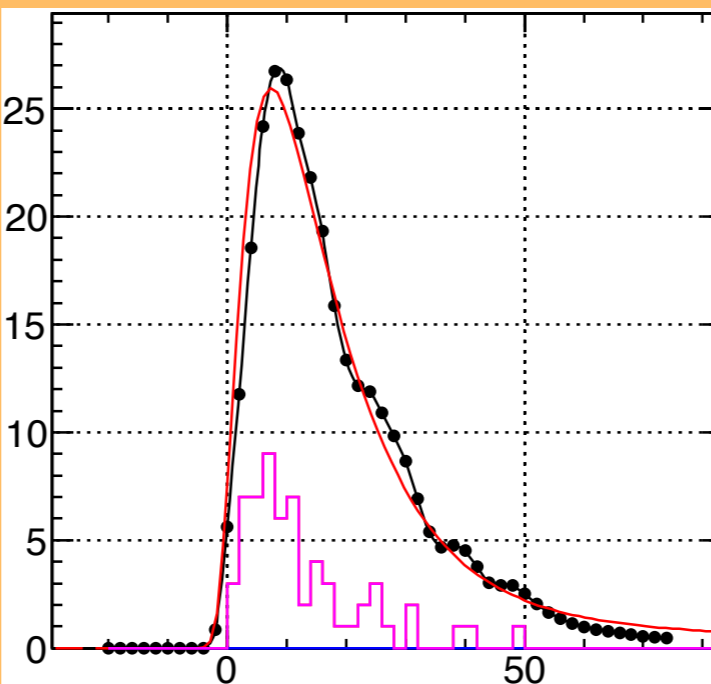


Cherenkov による粒子識別

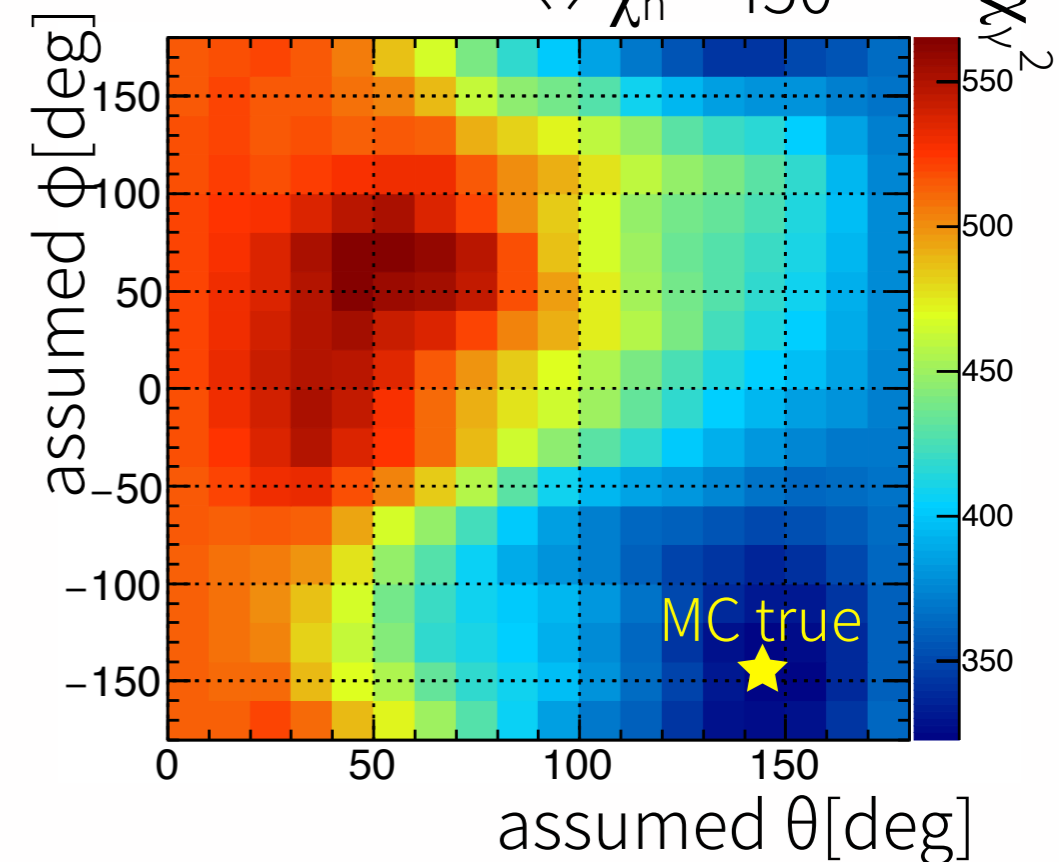
- 飛跡方向を仮定して、観測された波形情報を評価する



raw hit time (Cherenkov)
raw hit time (scintillation)
observed/generated
template for true direction



$$\Leftrightarrow \chi_n^2 = 450$$

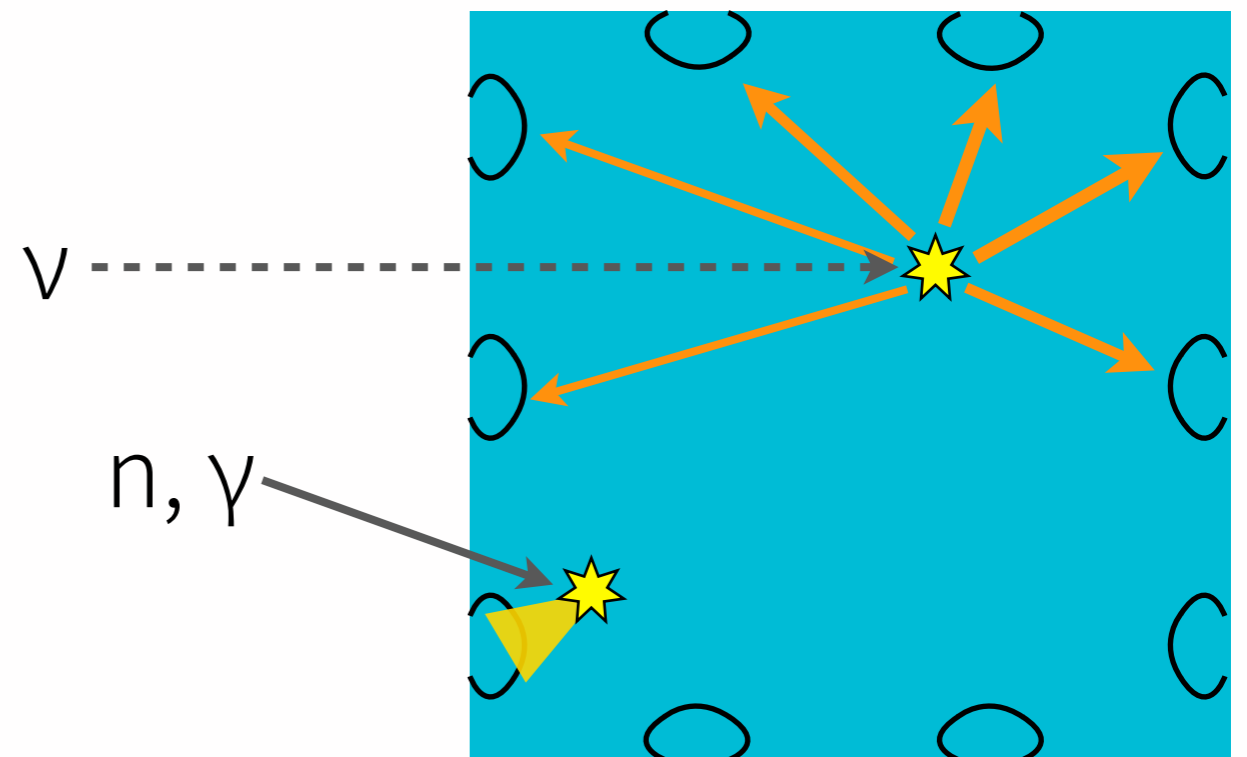
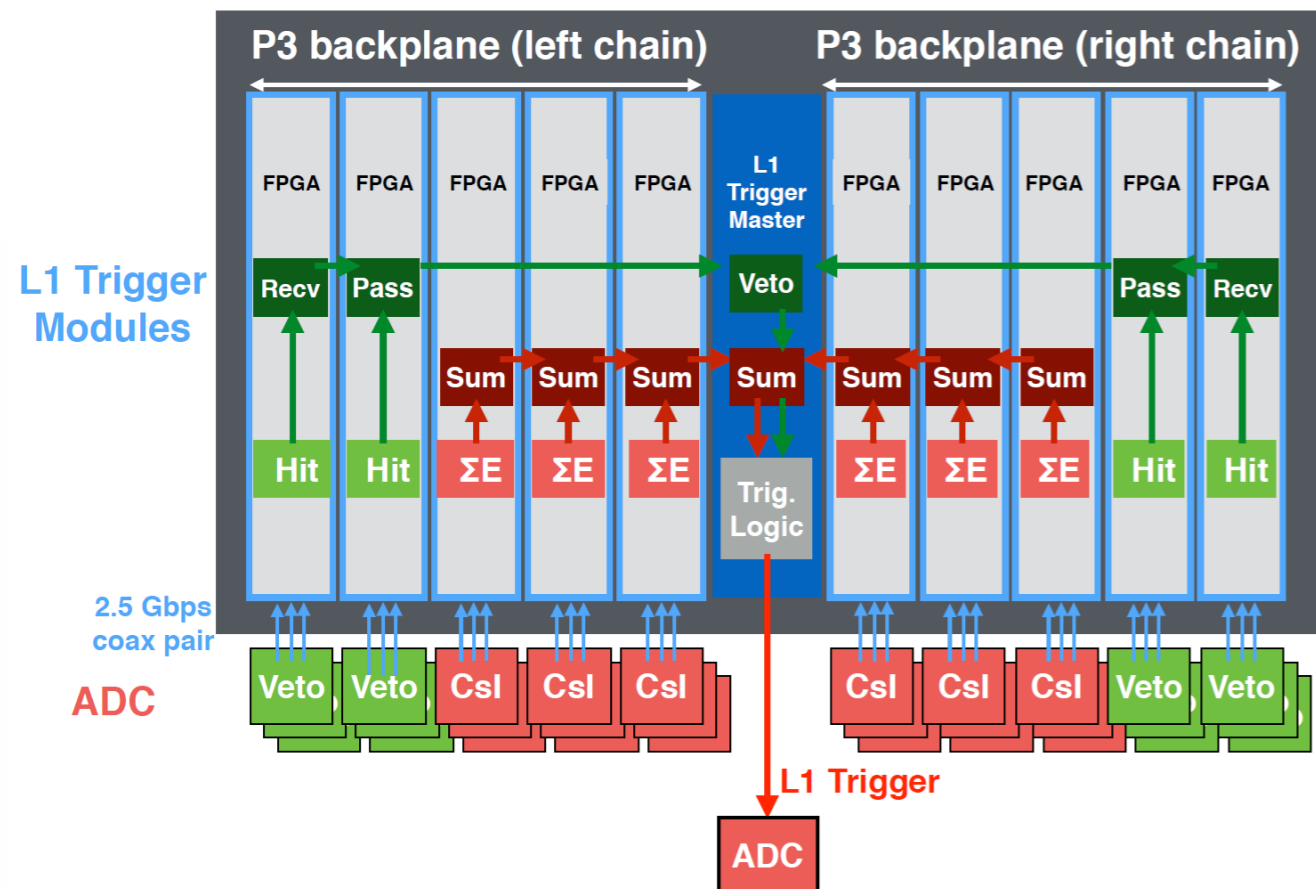


高い高速中性子除去能力を得るために

- 波形評価時に Cherenkov に加えて PSD を加味することで、 n/γ の分離はさらに良くなる
- ➡ Cherenkov, PSD は共に波形情報が重要
- 高精度, 高信頼度な waveform digitizer が必要
- E14 KOTO実験の500MHz FADC + trigger board?
- CAEN 500MHz FADC?

個人的なエレキの構想

- KOTOでエレキもやってた → KOTOのエレキの転用
 - チャンネル数： $\sim 250(\text{JSNS}^2) < \sim 3000(\text{KOTO})$
 - 500MHz, 12bit
 - L1 トリガー：共にエネルギー和トリガー + ベト
 - ▶ さらに、エネルギー和の一部ビットをヒット数（或いはパターン）に割り当て → total E vs #hitPMT
 - 必要に応じて L2 も（ハードウェア）



Summary

- J-PARC MLF でのステライルニュートリノ探索
 - RCS1MW のビームを用いた大強度ニュートリノ源
 - LSND実験の直接的な追検証
 - Flash ADC, Gd入り液シンなど比較的新しい技術を用いた検出器
- 高い高速中性子除去能力を備えた検出器
 - PSD, Cherenkov いずれも波形情報が重要
 -