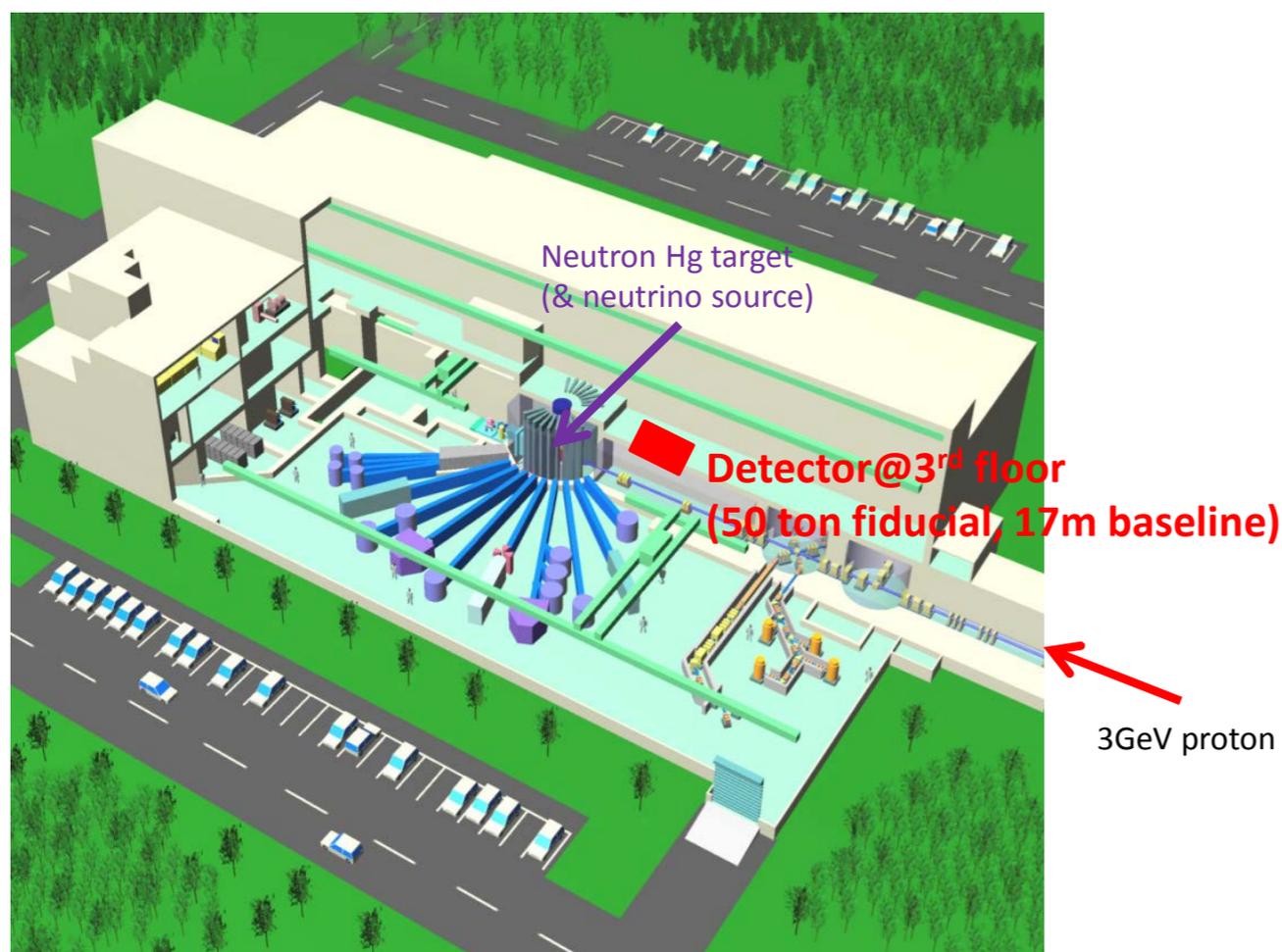


J-PARC MLF施設を用いた ステライルニュートリノ探索

J-PARC Materials and Life science experimental Facility (MLF)



Proposal:
A Search for Sterile Neutrino at J-PARC
Materials and Life Science Experimental
Facility

September 2, 2013

M. Harada, S. Hasegawa, Y. Kasugai, S. Meigo, K. Sakai,
S. Sakamoto, K. Suzuya
JAEA, Tokai, Japan

E. Iwai, T. Maruyama, K. Nishikawa, R. Ohta
KEK, Tsukuba, JAPAN

M. Niiyama
Department of Physics, Kyoto University, JAPAN

S. Ajimura, T. Hiraiwa, T. Nakano, M. Nomachi, T. Shima
RCNP, Osaka University, JAPAN

T. J. C. Bezerra, E. Chauveau, T. Enomoto, H. Furuta, H. Sakai,
F. Suekane
Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, JAPAN

M. Yeh
Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, USA

W. C. Louis, G. B. Mills, R. Van de Water
Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA

2013/Dec/08

KEK IPNS 太田、岩井

領域研究会「ニュートリノフロンティア」@クロス・ウェーブ府中

¹

¹Spokes person : Takasumi Maruyama (KEK)
takasumi.maruyama@kek.jp

¹

目次

- ・ イントロダクション(太田)
 - ★ LSND実験における事象超過
 - ★ ステライルニュートリノを巡る現状
 - ★ 実験の特長(LSNDに対するアドバンテージ)
 - μ DARフラックス, Gdを用いたIBD選別
 - ★ ステライルニュートリノに対する実験感度
- * ニュートリノビームの生成過程や検出器、イベントセレクションについては詳述しません
- ・ BG見積の現状とこれからのBG測定予備実験(岩井)

LSND実験での事象超過

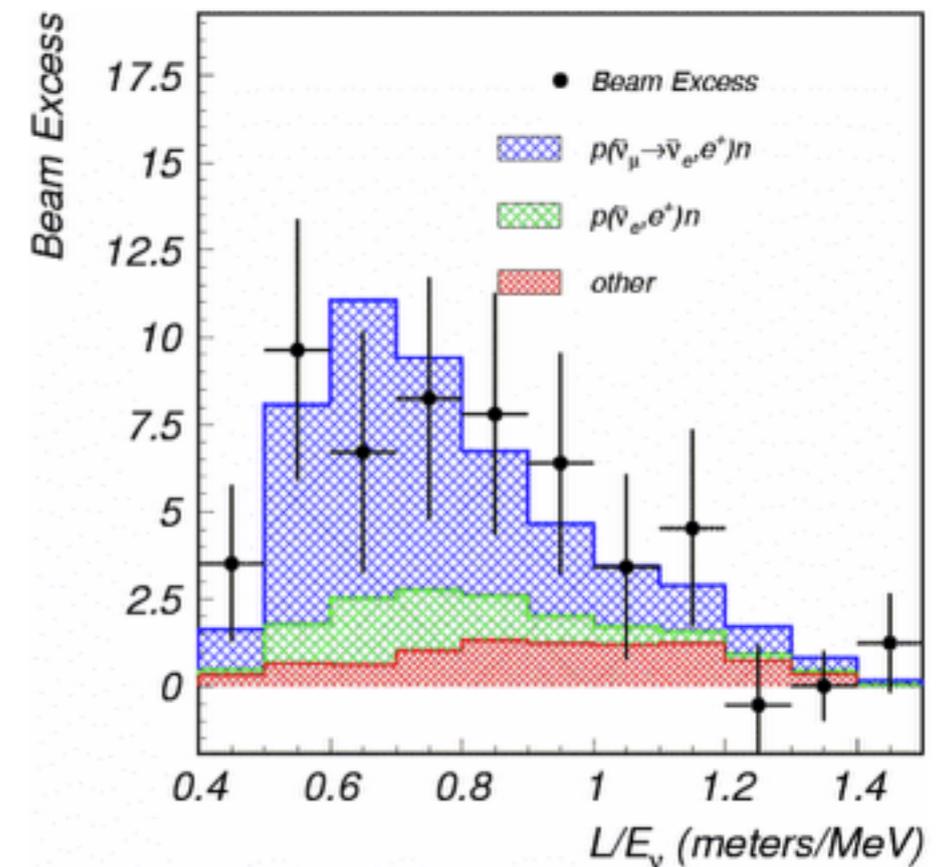
・ LSND実験で $\bar{\nu}_e$ の事象超過が観測され、解釈に決着がつかない(右下図青色部分)

・ 仮に振動による事象だとすると、このL/Eの領域では3つのアクティブ(電弱相互作用する)ニュートリノによる Δm_{12}^2 , Δm_{31}^2 ($\equiv \Delta m_{32}^2$)の振動は観測されない

LSND実験での事象超過

(有意性 3.8σ)

・ このイベントをニュートリノ振動で説明するには標準理論以外のニュートリノが必要になるが、アクティブニュートリノは三種類に限定されるので(LEP実験より)、電弱相互作用を行わないステライルニュートリノが必要になる



**Saw an excess of:
87.9 ± 22.4 ± 6.0 events.**

ステライルニュートリノを巡る現状

- LSNDやMiniBooNE実験でappearance事象が示されたし、原子炉ニュートリノ測定やGa線源測定によるdisappearance事象も示されている(右下表)
 - ▶ $\Delta m^2 > \sim O(1 \text{ eV}^2)$ 領域にステライルニュートリノの存在が示唆されている

- 我々はLSND実験の手法を改善してLSND実験を凌駕する感度を達成することで $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動に対する答えを出す

実験	ニュートリノ源	信号	有意性
LSND	μ Decay-At-Rest	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	3.8σ
MiniBooNE	π Decay-In-Flight	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	3.4σ
		$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	2.8σ
		combination	3.8σ
Ga(校正)	軌道電子捕獲	$\nu_e \rightarrow \nu_s$	2.7σ
原子炉	β 崩壊	$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_s$	3.0σ

実験の特長(LSNDに対するアドバンテージ)

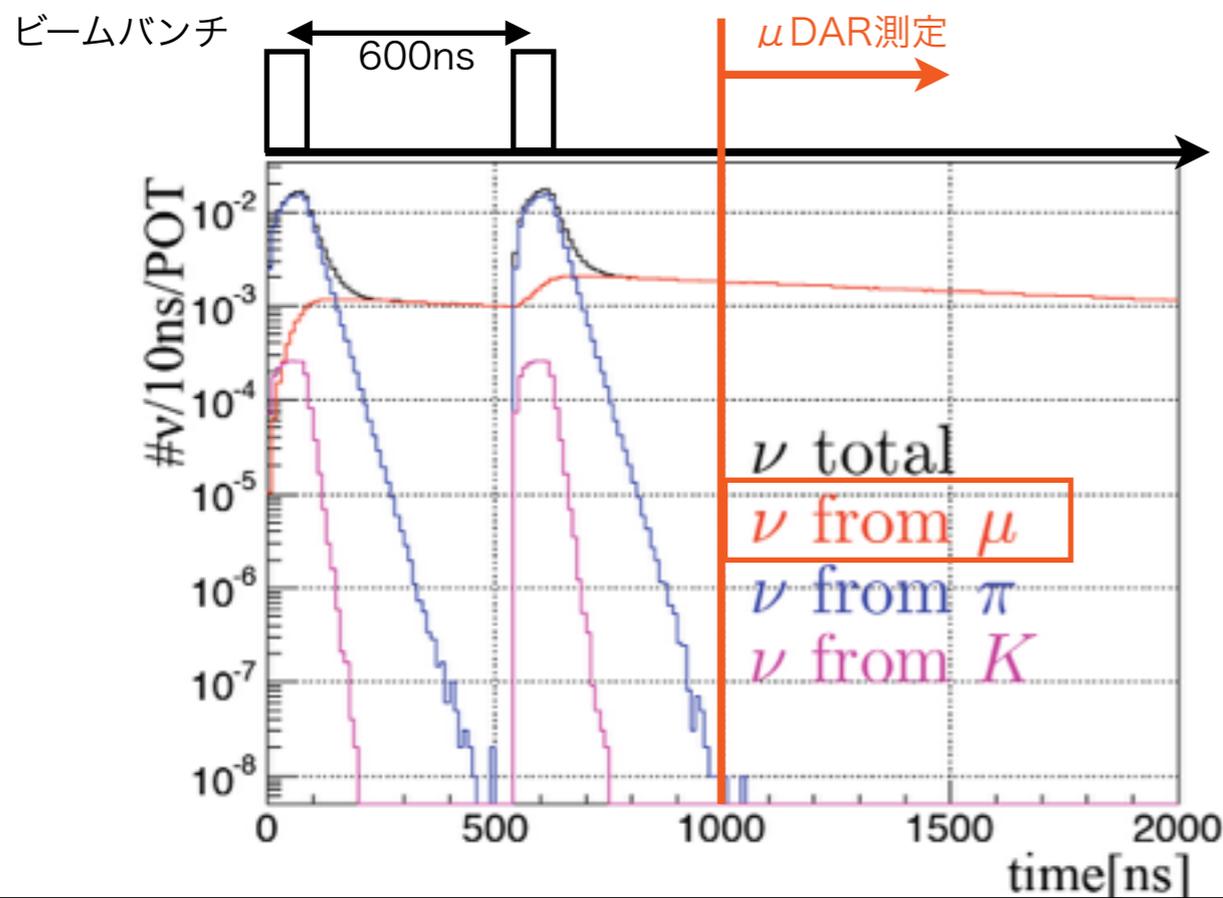
	J-PARC MLF 実験	LSND実験	改善点
ビーム構造	パルス幅150ns, 2バンチ, 25Hz	パルス幅600us 120Hz	低いduty factor によるフラックスの 切り分け
検出器	Gd含有 有機液体 シンチレータ	有機液体 シンチレータ	遅延同時計測でGdを 用い背景事象の除去 能力強化

- ・ フラックスの切り分け: DIF成分とDAR成分を切り離してフラックス形状の不定性を無くす(次頁)
- ・ 検出原理: 逆 β 崩壊($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$)を用いた遅延同時計測
 - Gdを用いた背景事象の除去能力強化
 - ▶ prompt信号: e^+ , delayed信号: Gdによる中性子捕獲 γ 線(計8MeV, 寿命30us)
 \leftrightarrow LSNDではdelayed信号がHによる中性子捕獲 γ 線(計2.2MeV, 寿命200us)
 - ➔ LSNDよりもdelayed信号に対する背景事象を押さえやすい
 - $\mu^+ \rightarrow \nu_e$ 由来の $^{12}\text{C}(\nu_e, e^-)^{12}\text{N}_{g.s.}$ (prompt: e^- , delayed: e^+ (寿命15.9ms \gg 30us)),
 ビーム由来 γ 線, 環境 γ 線に対する除去能力が強くなる

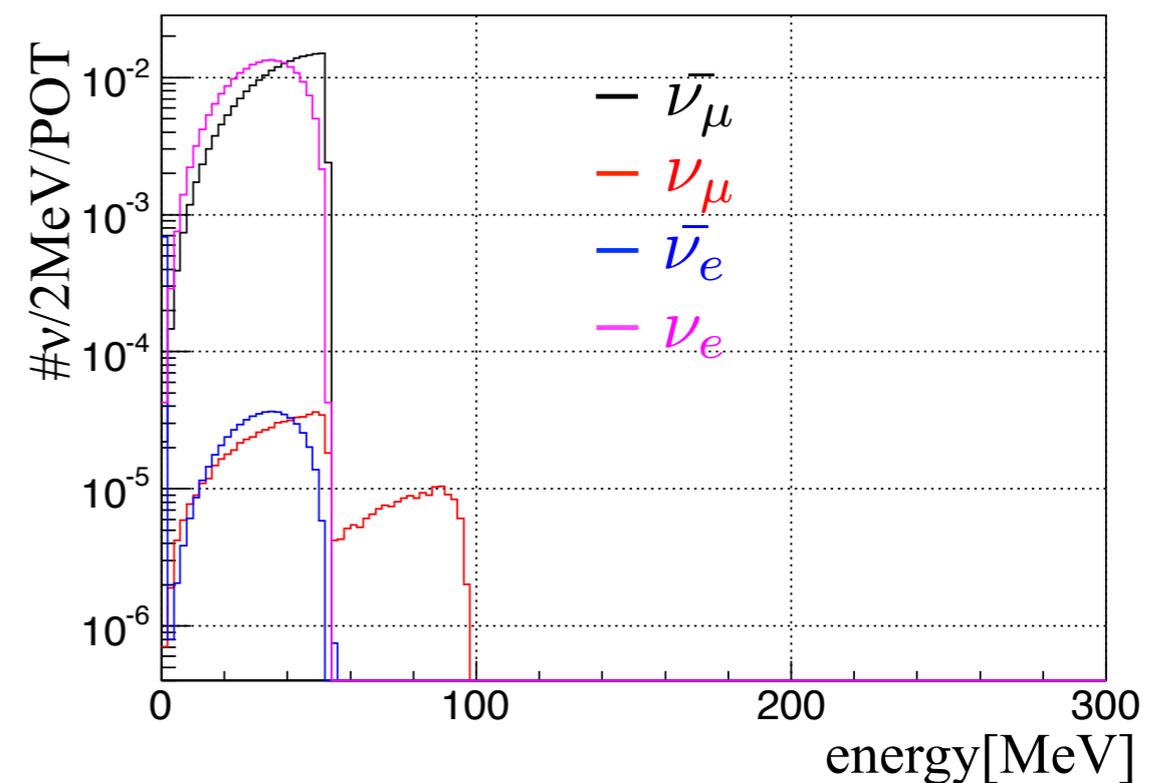
実験の特長: μ DARニュートリノフラックス

陽子ビームと水銀標的の衝突 → signal: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow (\text{振動}) \rightarrow \bar{\nu}_e$
 neutrino BG: $\pi^- \rightarrow \mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e, \pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow \nu_e$

- ビームバンチに近いタイミング(On-bunch)ではDAR成分とDIF成分が混在しており、 π 、K粒子由来のニュートリノも混在している(左下図)
- ビームから1us後には μ DAR由来のニュートリノフラックスのみが残り、形状は静止三体崩壊(終端52.8MeV)なのでよく分かっている(右下図)
- On-bunchタイミングから測定をずらすことでニュートリノ事象以外のBGも低減する
- $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e$ 背景事象は $\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ に対して0.2%に抑制される(右下図)



ビーム立上りから1us後のニュートリノフラックス



振動パターンによる違い(L=17m)

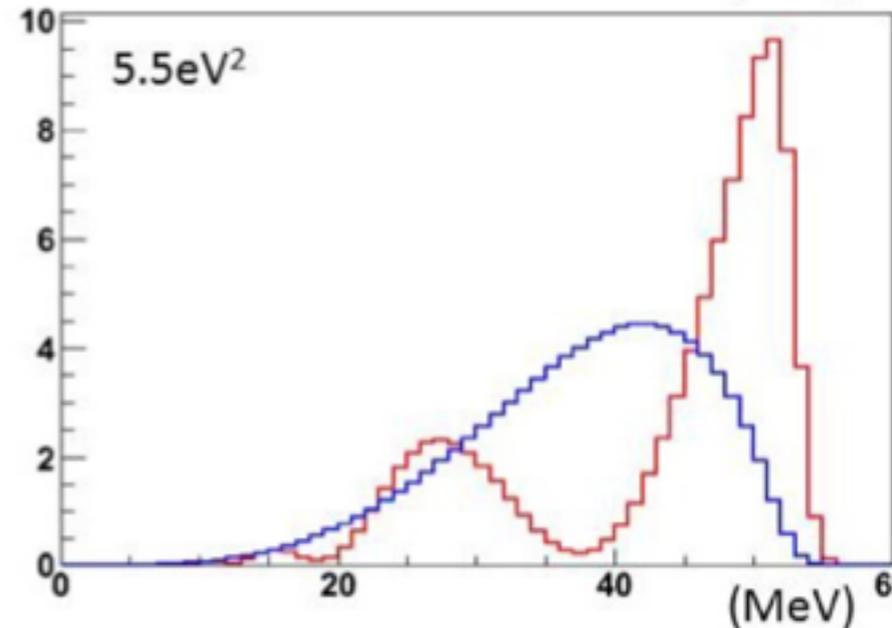
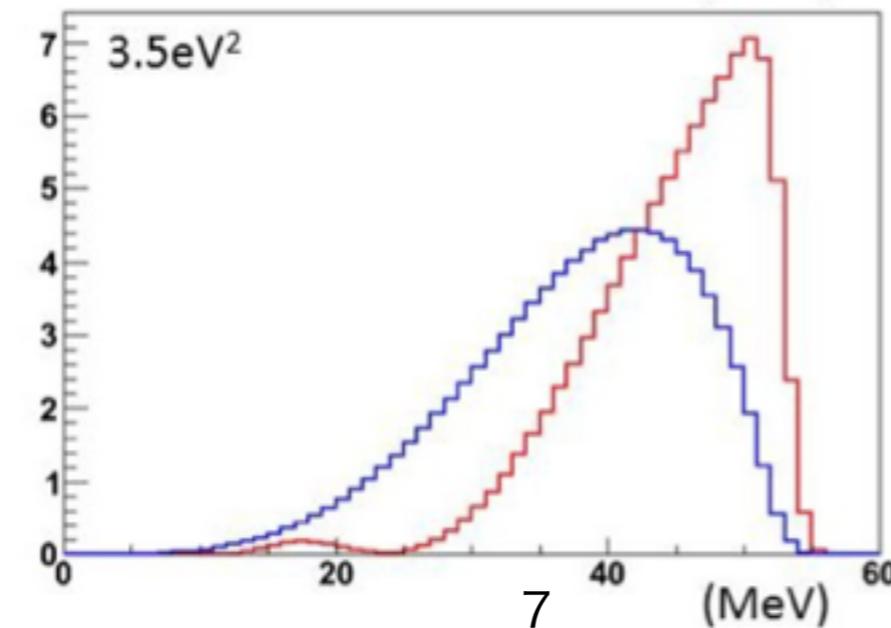
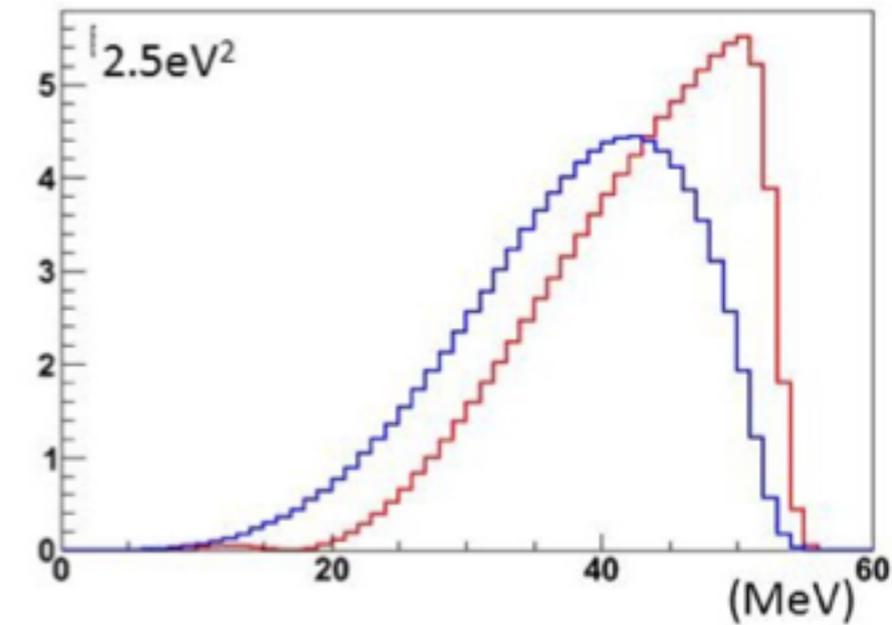
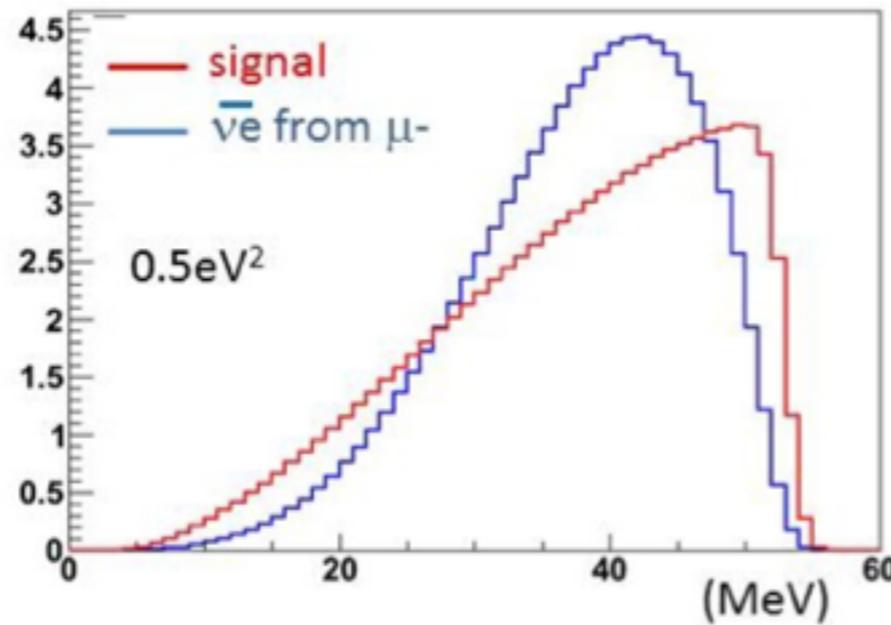
- フラックス形状も逆β崩壊の反応断面積もよく分かっているので測定されるスペクトルの形状も明瞭に分かる→振動パターンもわかるし $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e$ 背景事象を区別出来る
- その他の背景事象をどれだけ抑えられるかは我々の工夫次第

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}] / E_\nu [\text{MeV}])$$

赤: $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動事象
 青: $\bar{\nu}_e$ 背景事象

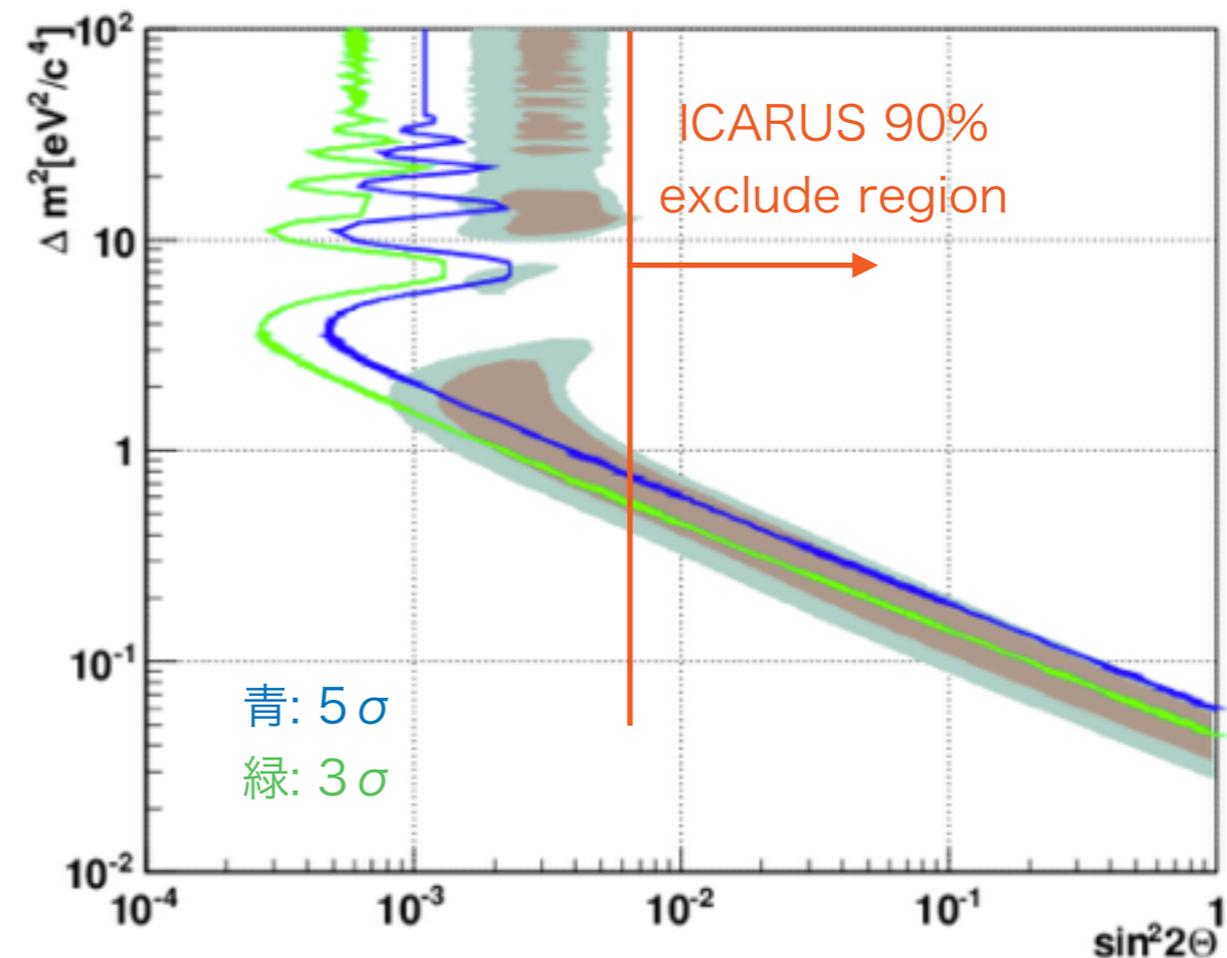
エネルギー分解能: 15%/√E[MeV]
 を仮定

- 検出が期待される振動事象数は
 $\Delta m^2 = 3.0 \text{eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 0.003$
 のとき202/year
- 背景事象数は96/year



ステライルニュートリノに対する実験感度

- 右下図は1MWで4年(検出効率50%)で50t検出器を用いてL=17mで測定した場合の感度(運転時間4000hour/year)
- LSNDが示唆した領域中、 $\Delta m^2 > 2\text{eV}^2$ の領域について有意性 5σ で結論をつけることができる。これで見えなかった場合、L=60m程度で小さい Δm^2 領域をカバーする実験を行うオプションを考えている。
- 感度を出すにあたっては検出器によるイベント再構成のシミュレーションをもとに、IBDイベントに対する選別を行った
- 背景事象として $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e$ 事象のみを仮定している
- $\mu^+ \rightarrow \nu_e$ 由来の $^{12}\text{C}(\nu_e, e^-)^{12}\text{N}_{g.s.}$ 事象はベントセレクションで $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e$ 由来のIBD事象の10%程度に落ちる
- その他の背景事象も $\mu^- \rightarrow \bar{\nu}_e$ 事象に比べて小さいと見積もっている(背景事象については岩井講演で)



背景事象測定

- 検出器設置場所(MLF 3F)の background level を知りたい

- 同 BL13 での測定 $\rightarrow n_{3F} = \frac{n_{BL13}}{\text{data}} \times \frac{N_{3F}}{N_{BL13}} \text{MC}$

- どんな事象が背景事象になるか？

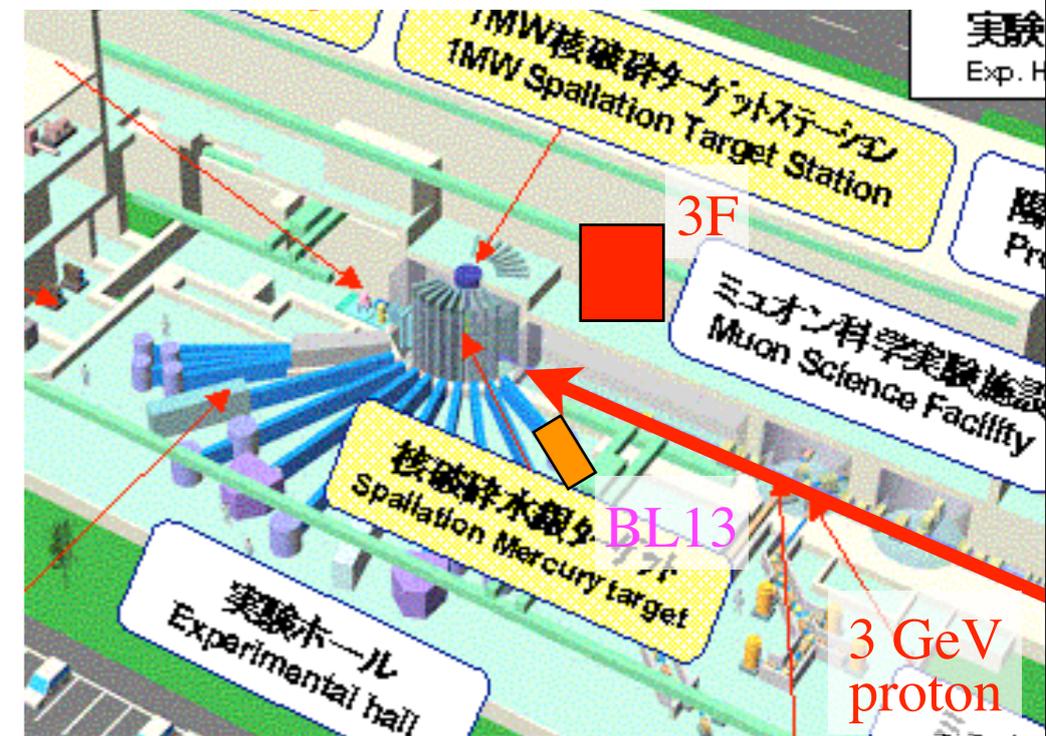
- 信号事象は逆ベータ崩壊： $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$

- 先発：Michel-e like な陽電子

- off-timing ($t \sim 2.2 \mu\text{s}$), up to 50 MeV

- 後発：Gd による熱中性子捕獲からの γ 線

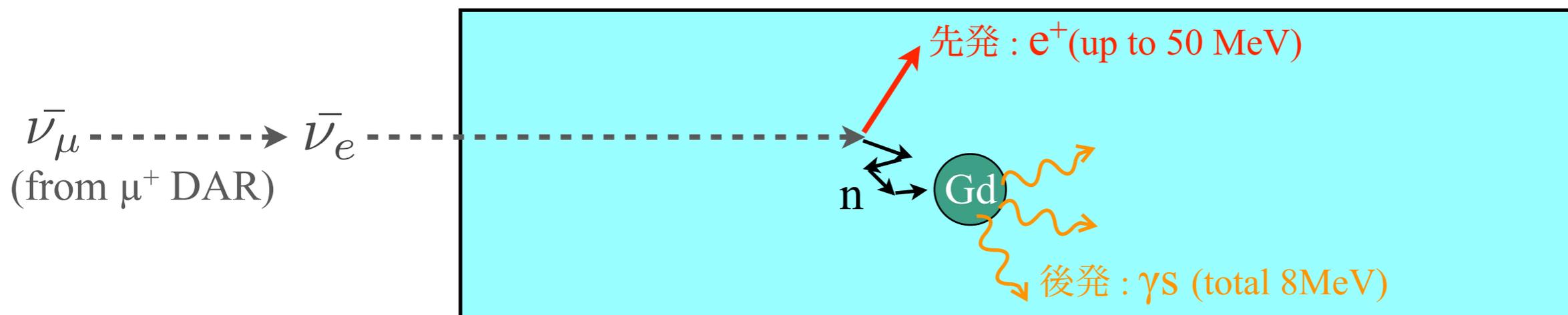
- $t \sim 27 \mu\text{s}$, $E \sim 8 \text{ MeV}$



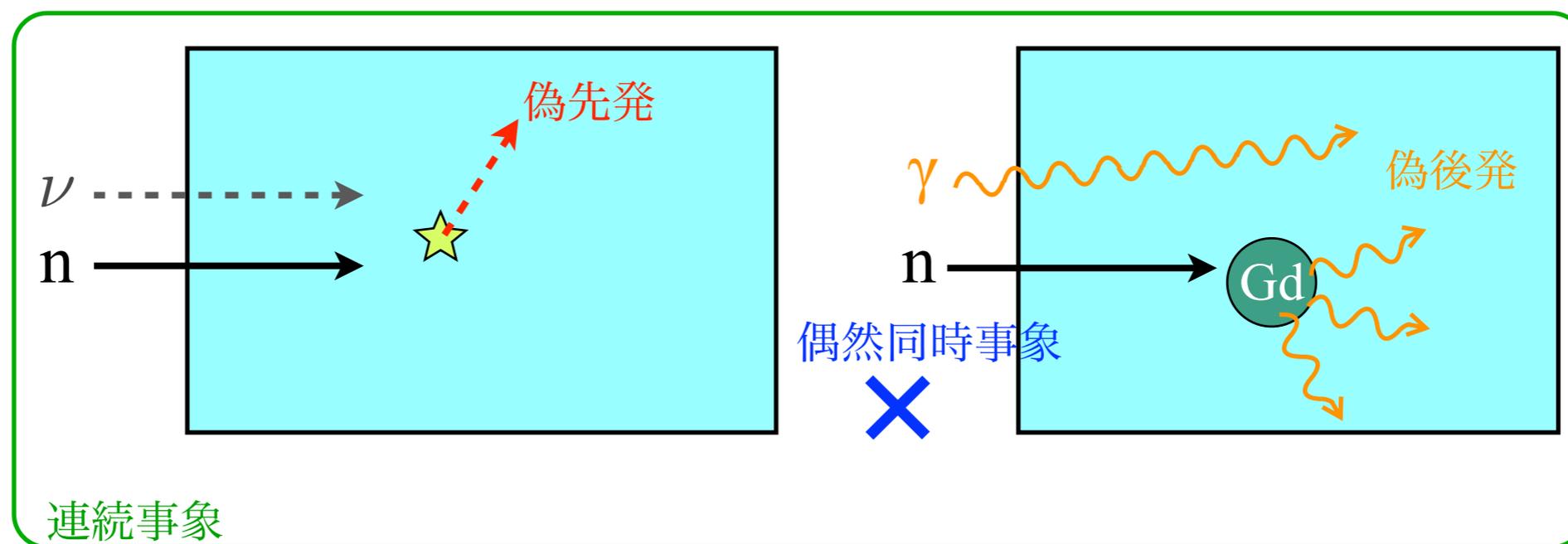
$\leftarrow \mu^+ \text{ DAR からの } \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

本講演の概要

- 信号事象 (逆ベータ崩壊)



- 背景事象



本講演の概要

- 検出器設置場所(MLF 3F)の background level を知りたい

- 同 BL13 での測定 $\rightarrow n_{3F} = \frac{n_{BL13}}{\text{data}} \times \frac{N_{3F}}{N_{BL13}} \text{MC}$

- どんな事象が背景事象になるか？

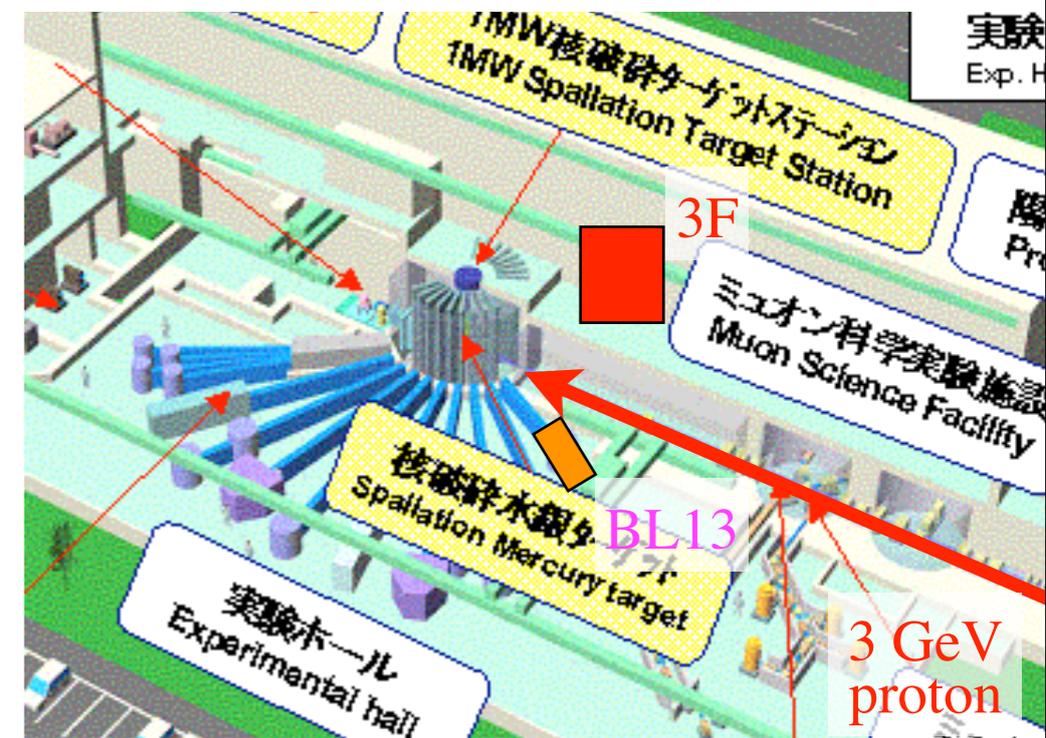
- 信号事象は逆ベータ崩壊： $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$

- 先発：Michel-e like な陽電子

- off-timing ($t \sim 2.2 \mu\text{s}$), up to 50 MeV

- 後発：Gd による熱中性子捕獲からの γ 線

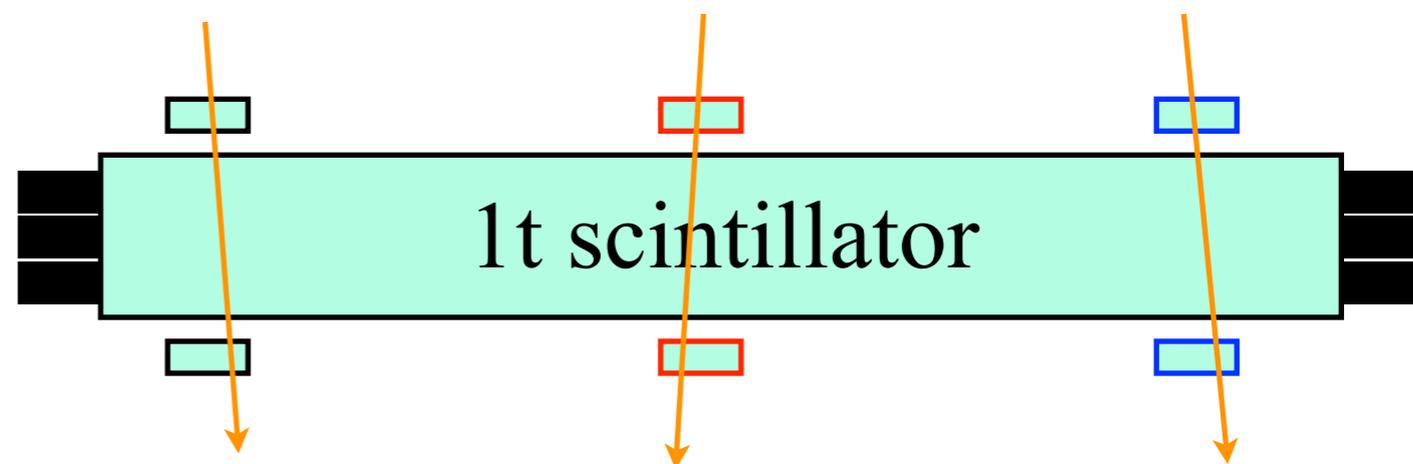
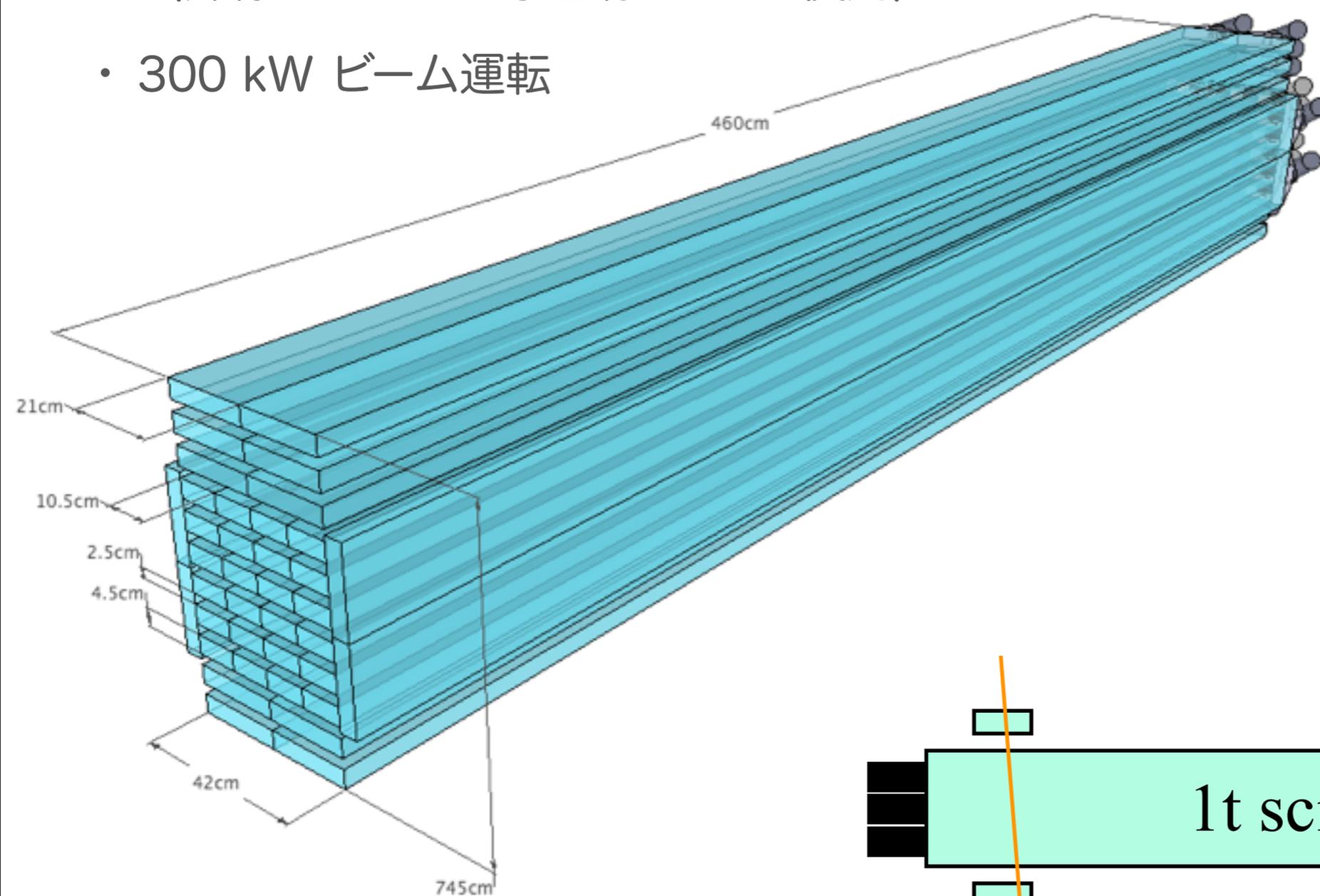
- $t \sim 27 \mu\text{s}$, $E \sim 8 \text{ MeV}$



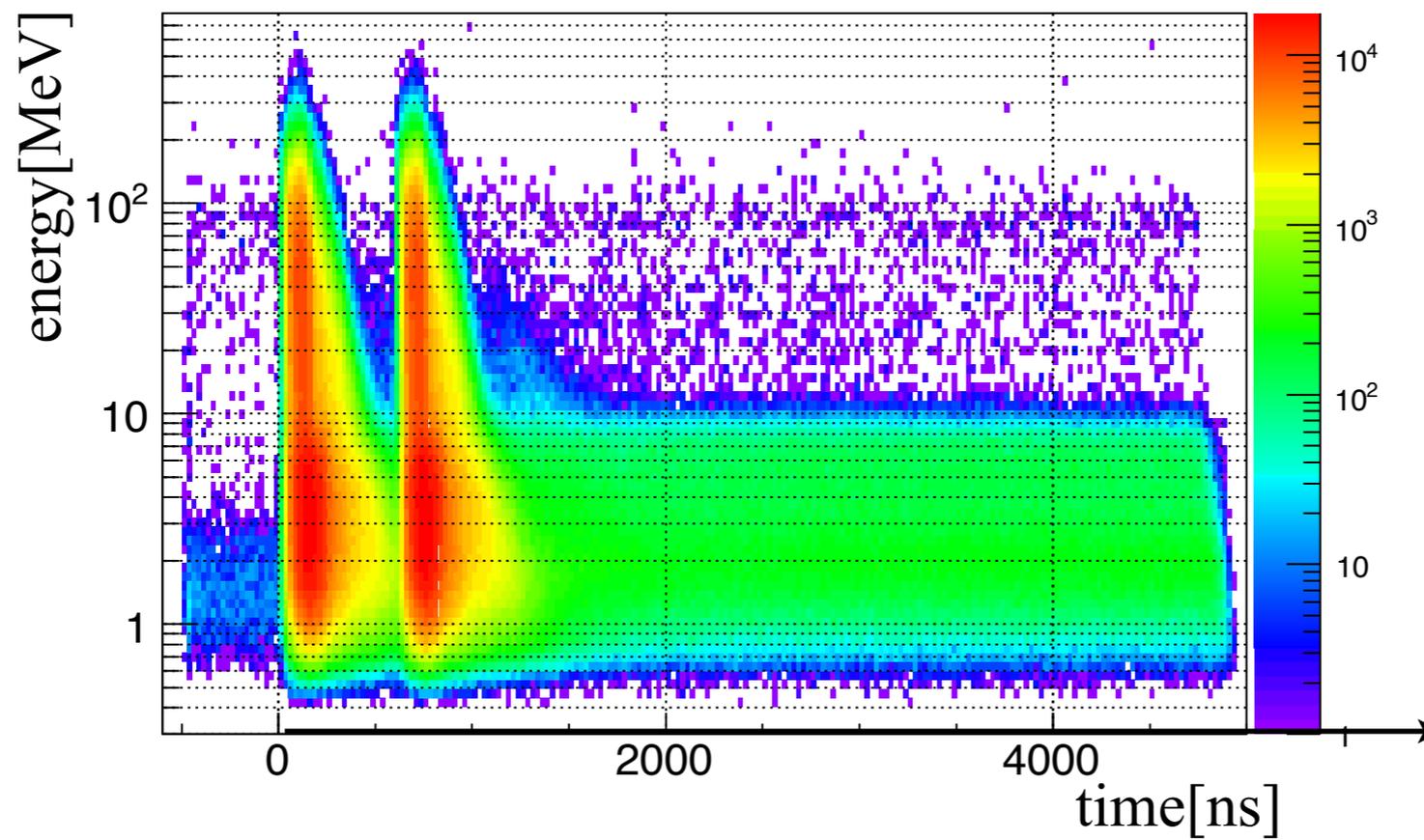
$\leftarrow \mu^+ \text{ DAR からの } \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

1 ton scintillator detector @ BL13

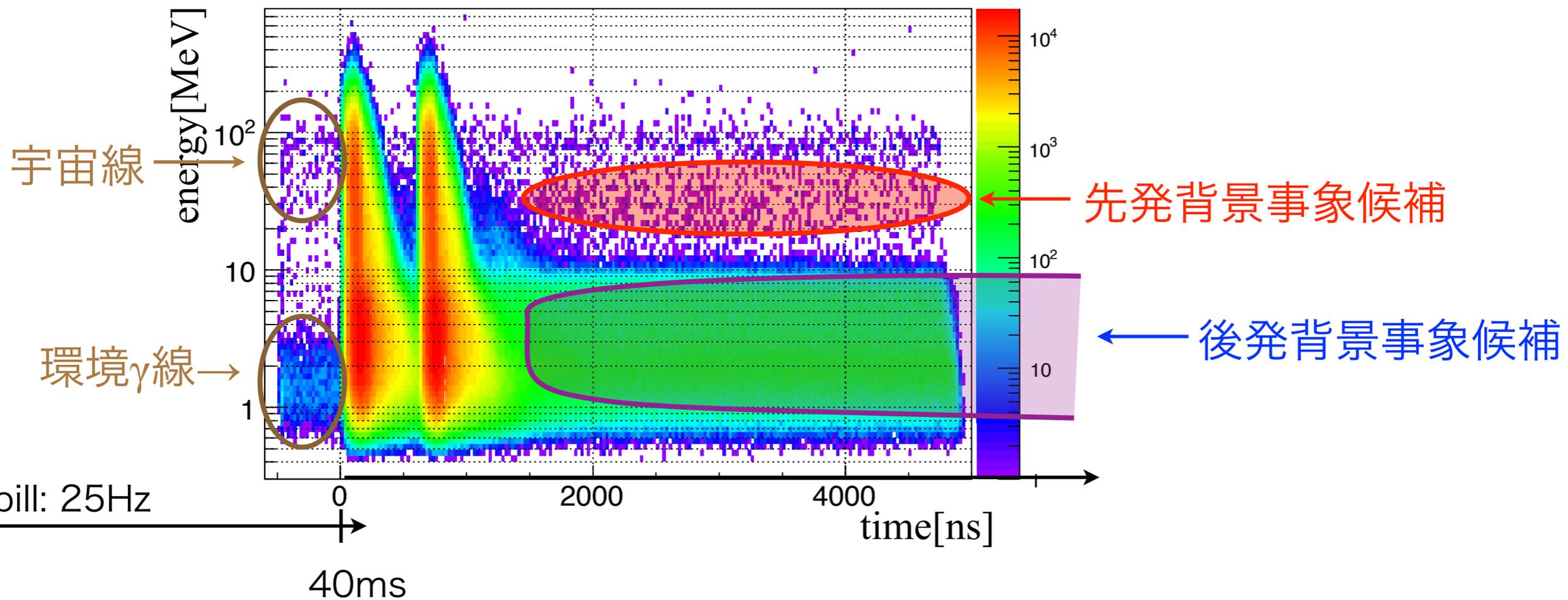
- 4.6m長, 4.5cm厚 の両読みシンチ 38本：総重量 1 ton
(外縁のシンチは宇宙線veto に使用)
- 300 kW ビーム運転



beam data

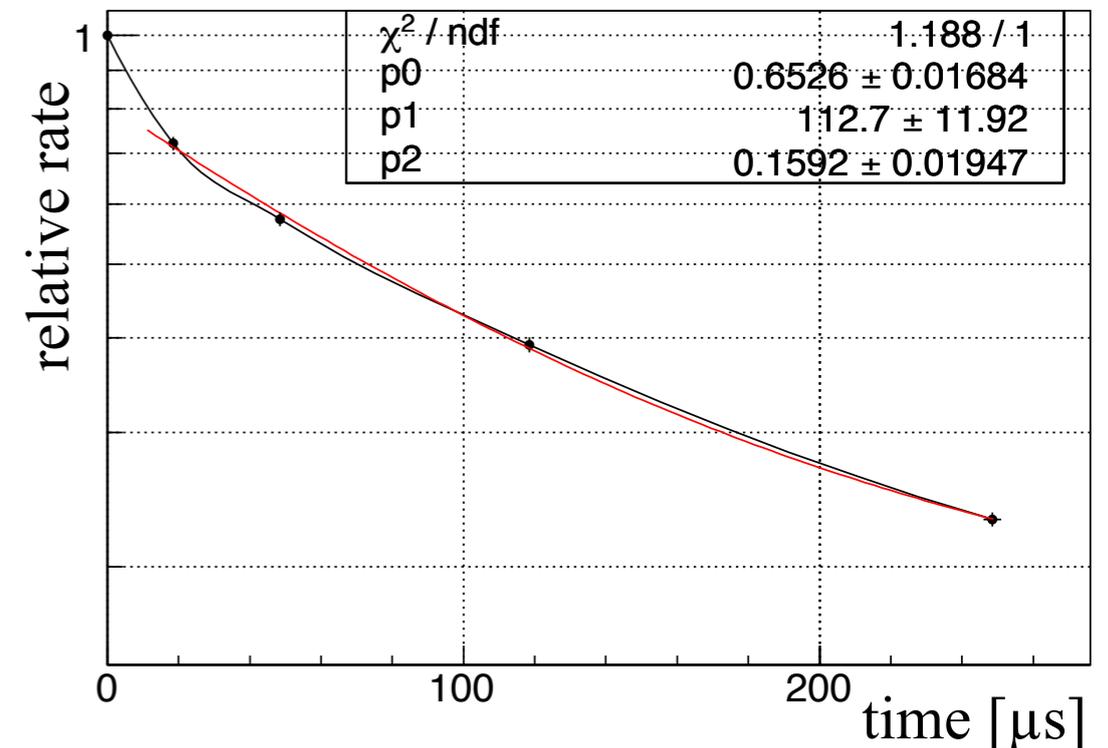


beam data



後発事象に対する背景事象

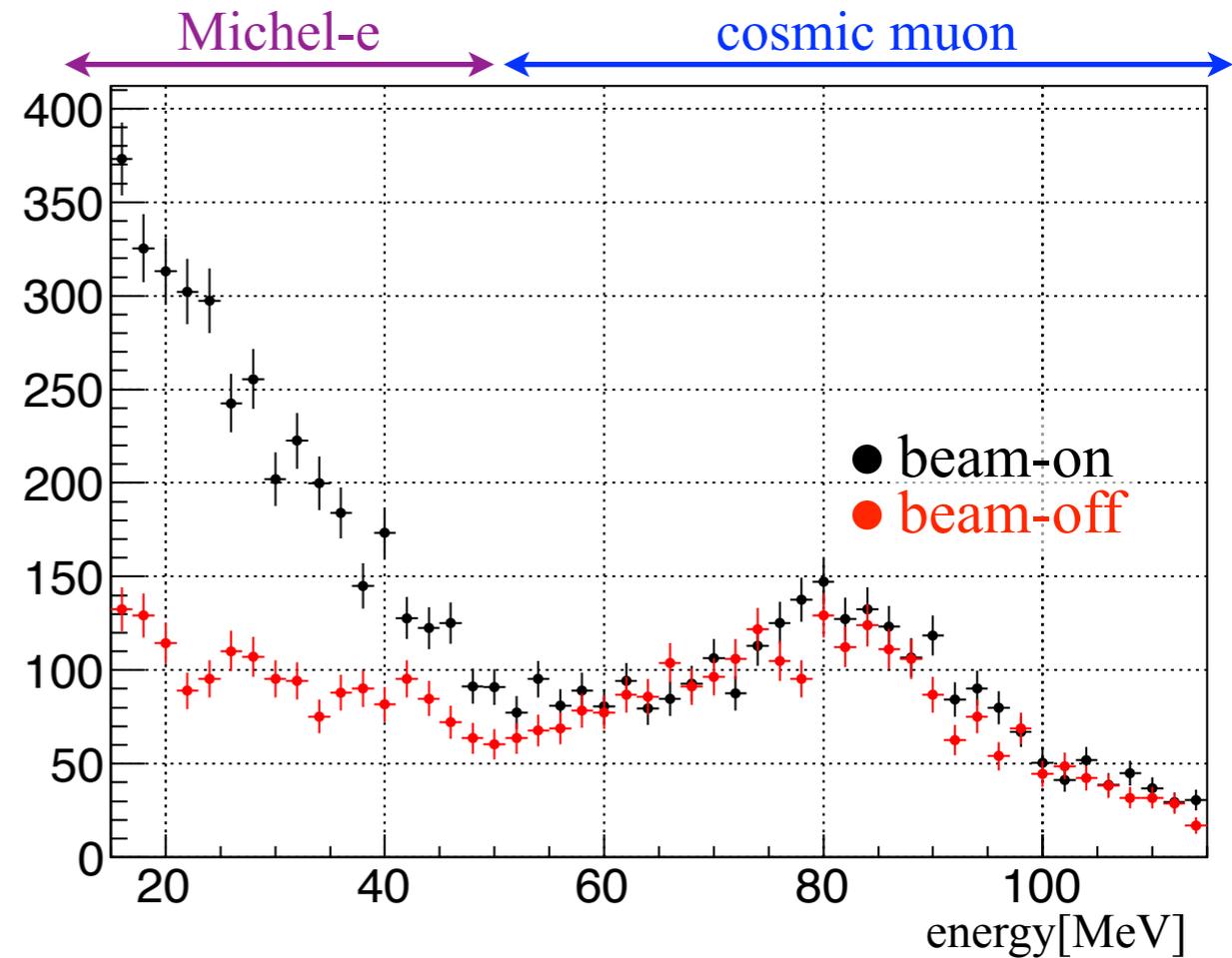
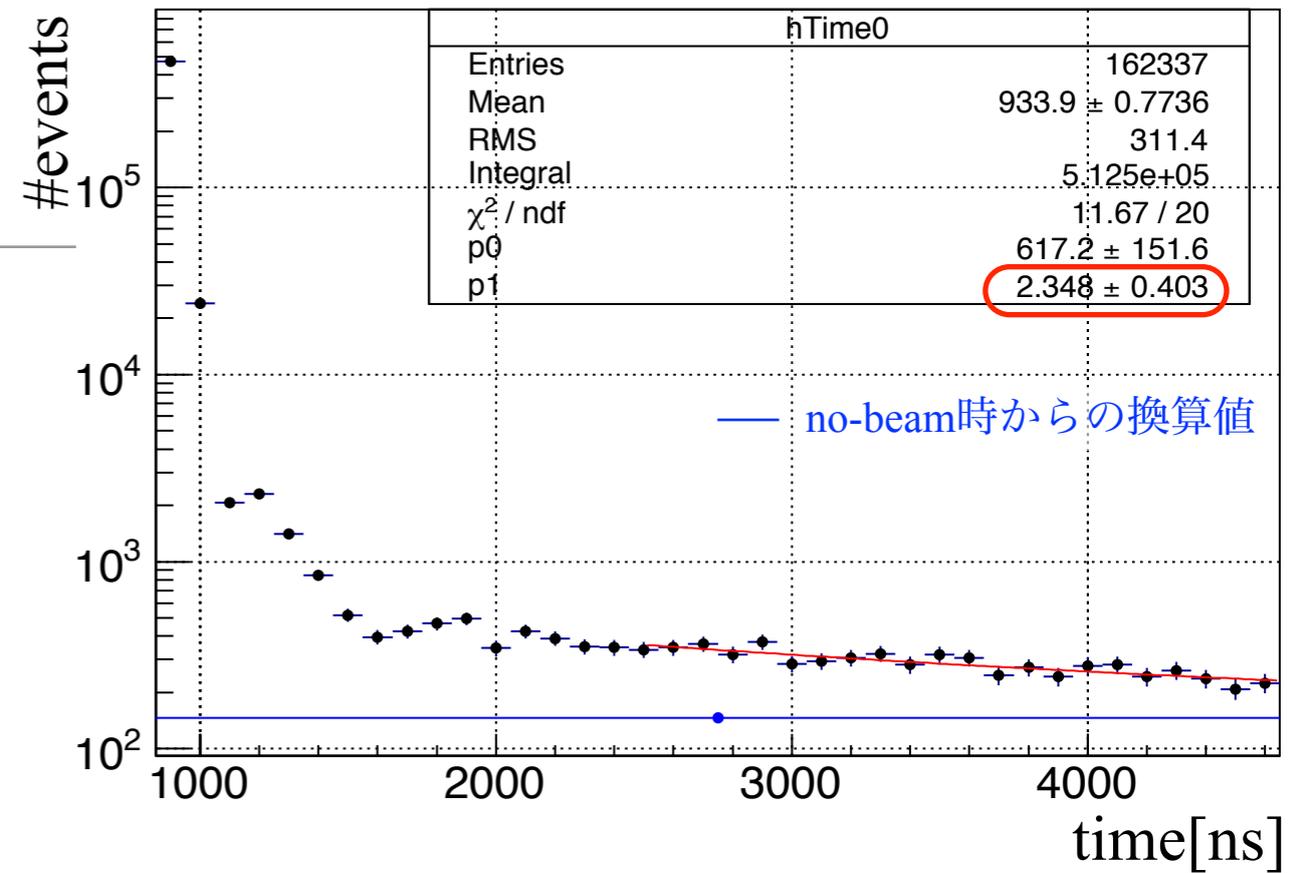
- 背景事象の内訳
 - $E \sim 8 \text{ MeV}$ の γ 線 (外部で中性子が鉄に捕獲され放出される γ 線など)
 - 最終的に熱中性子捕獲からの γ 線として観測される中性子
(Gdに捕獲されると 8 MeV だが、シンチ中の陽子に捕獲されると 2.2 MeV)
- 観測量の時間推移： $\sim 100 \mu\text{s}$ で時間減衰する
 - 観測している window 内の量から換算
- 1t@BL13, 300 kW での背景事象数
 - $6 < E[\text{MeV}] < 12 \Rightarrow \gamma$ 線：0.9/spill/100 μs
 - $1 < E[\text{MeV}] < 4 \Rightarrow$ 中性子：14/spill/100 μs



先発事象に対する背景事象

- $20 < E[\text{MeV}] < 60$ に着目
⇒ $2.2 \mu\text{s}$ の時間減衰が見える
- 外側のシンチに対して宇宙線vetoを要請
⇒ $\sim 50 \text{ MeV}$ の edge が見える

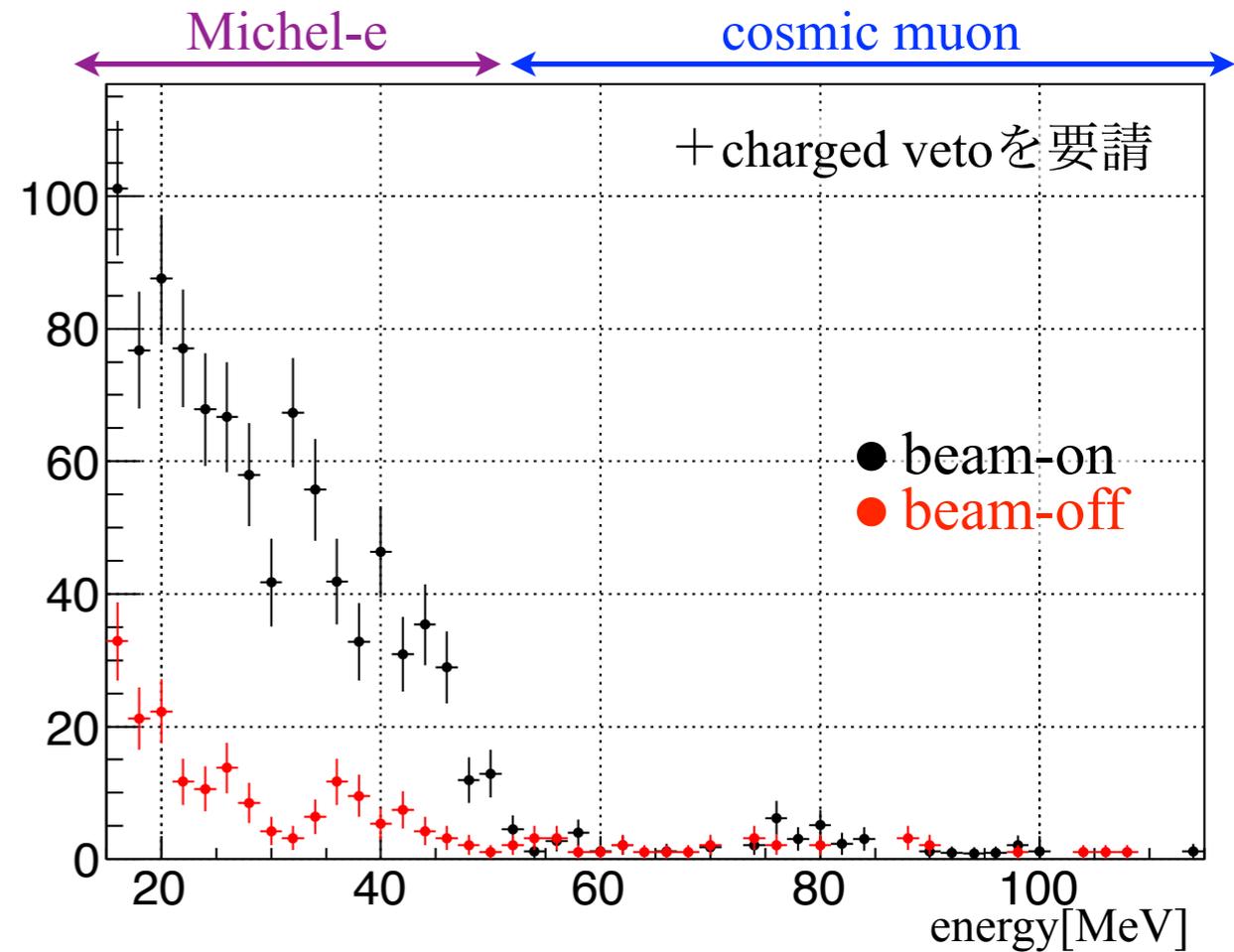
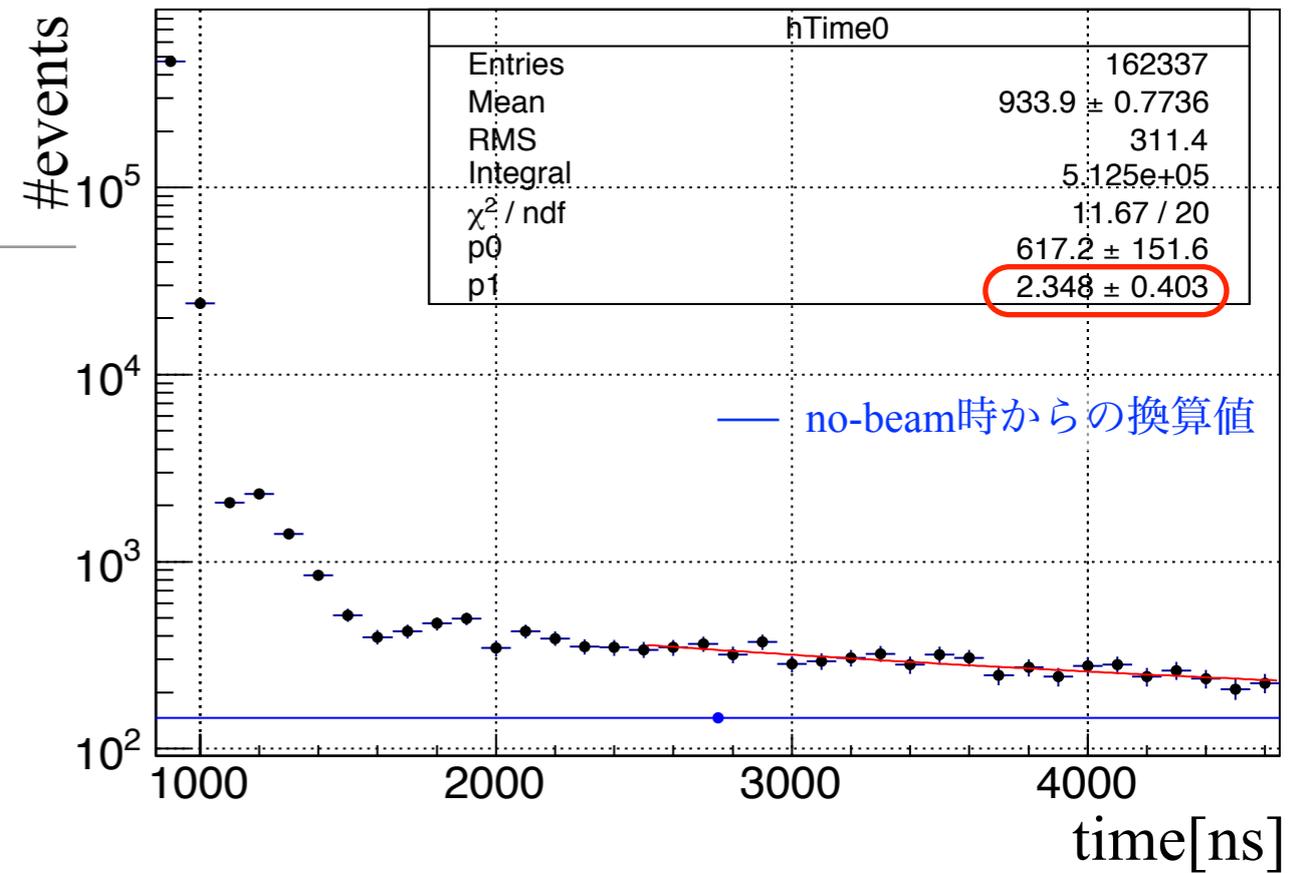
➔ ビームと同期した μ 崩壊からの Michel-electron



先発事象に対する背景事象

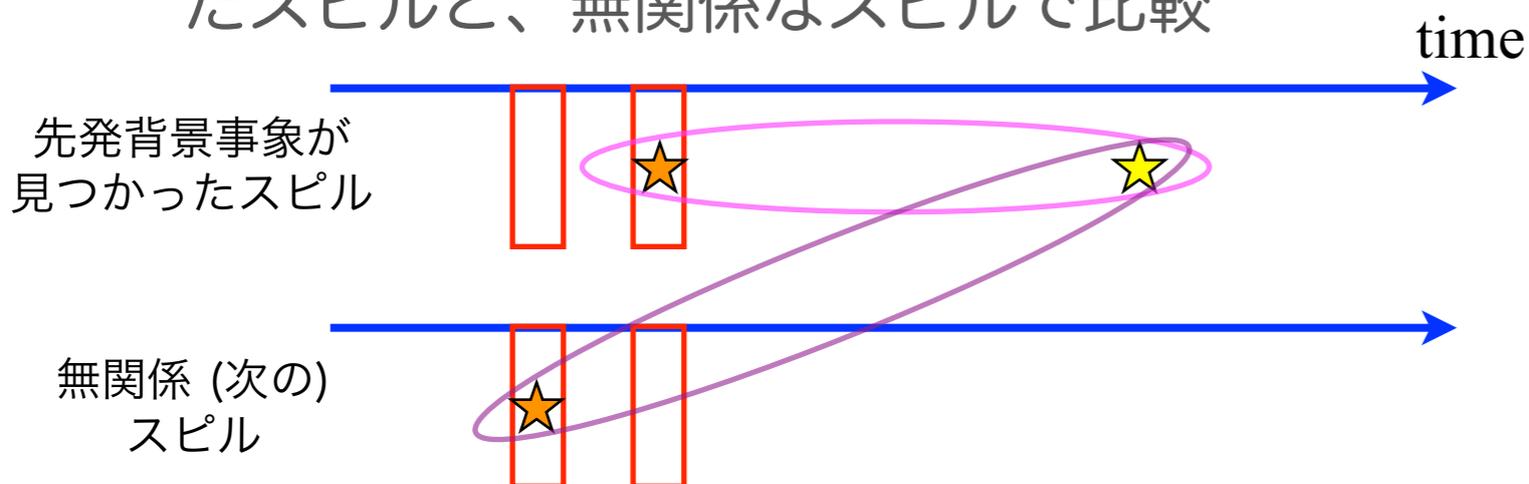
- $20 < E[\text{MeV}] < 60$ に着目
⇒ $2.2 \mu\text{s}$ の時間減衰が見える
- 外側のシンチに対して宇宙線vetoを要請
⇒ $\sim 50 \text{ MeV}$ の edge が見える

➔ ビームと同期した μ 崩壊からの Michel-electron

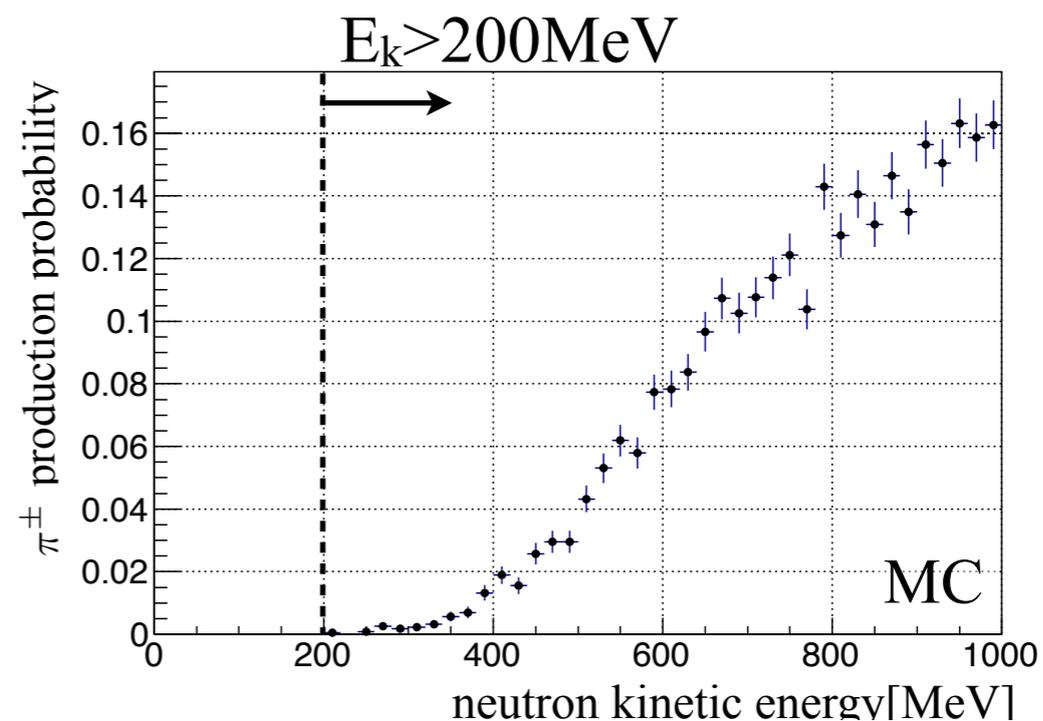
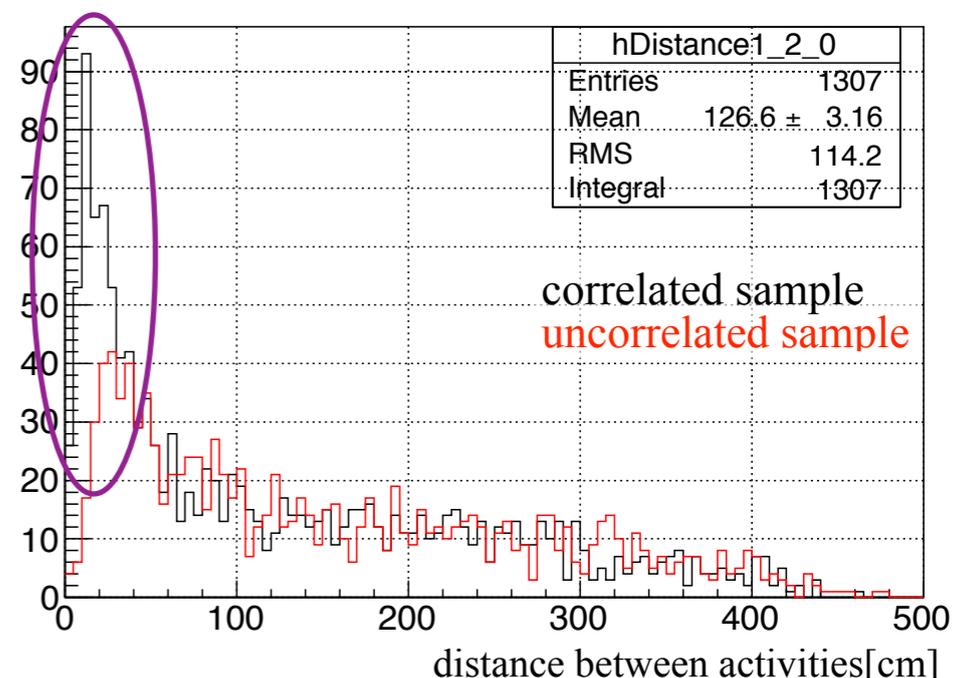
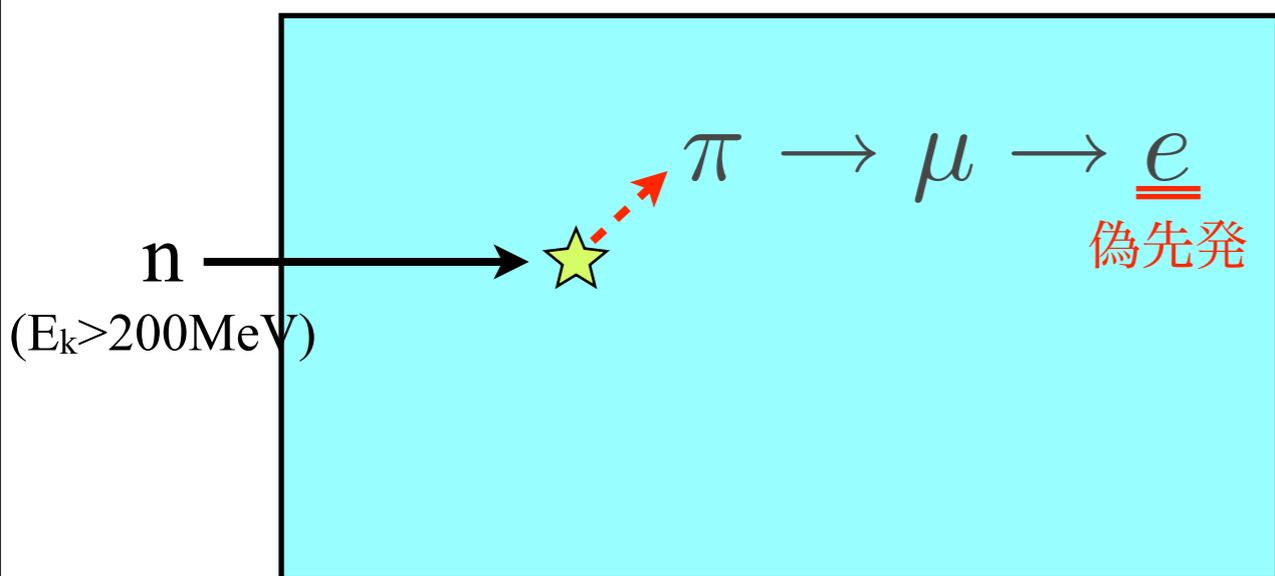


ビームと同期した muon 崩壊

- 先発背景事象とビーム中のアクティビティとの距離の分布を、その事象が見つかったスピルと、無関係なスピルと比較

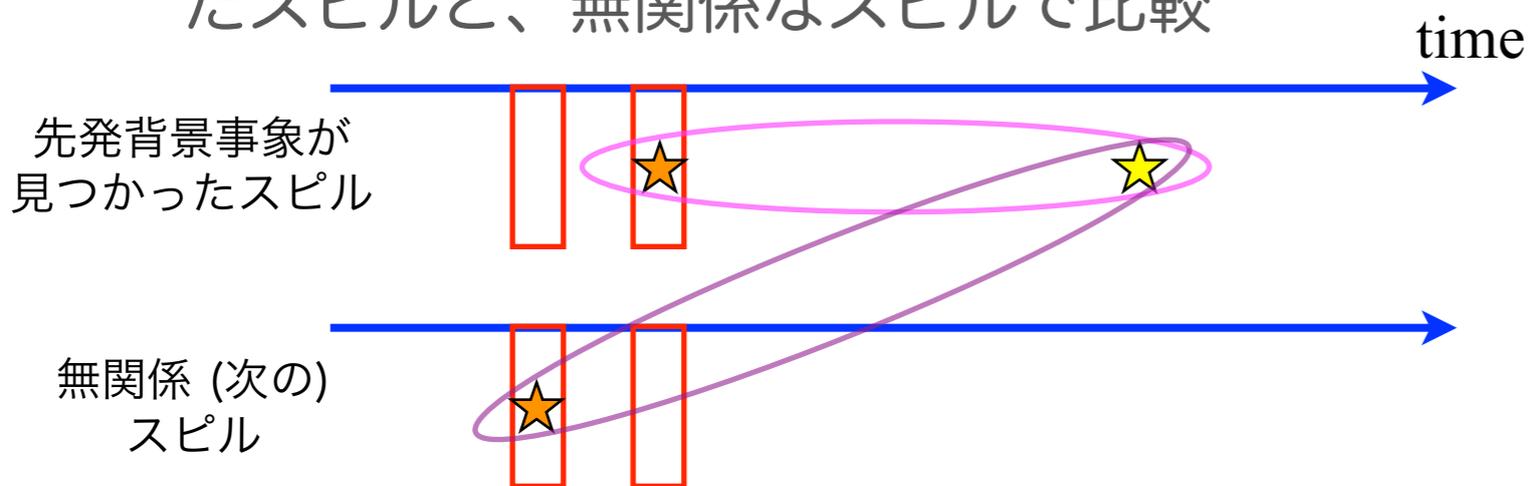


- muon の由来は？

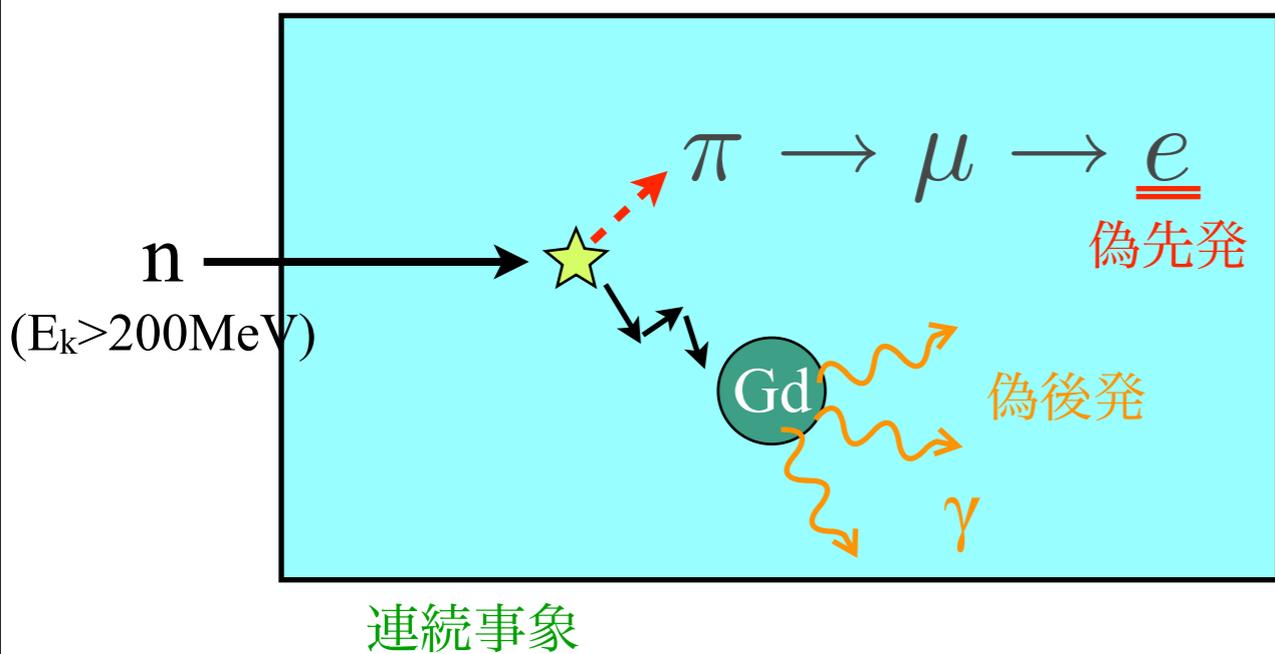
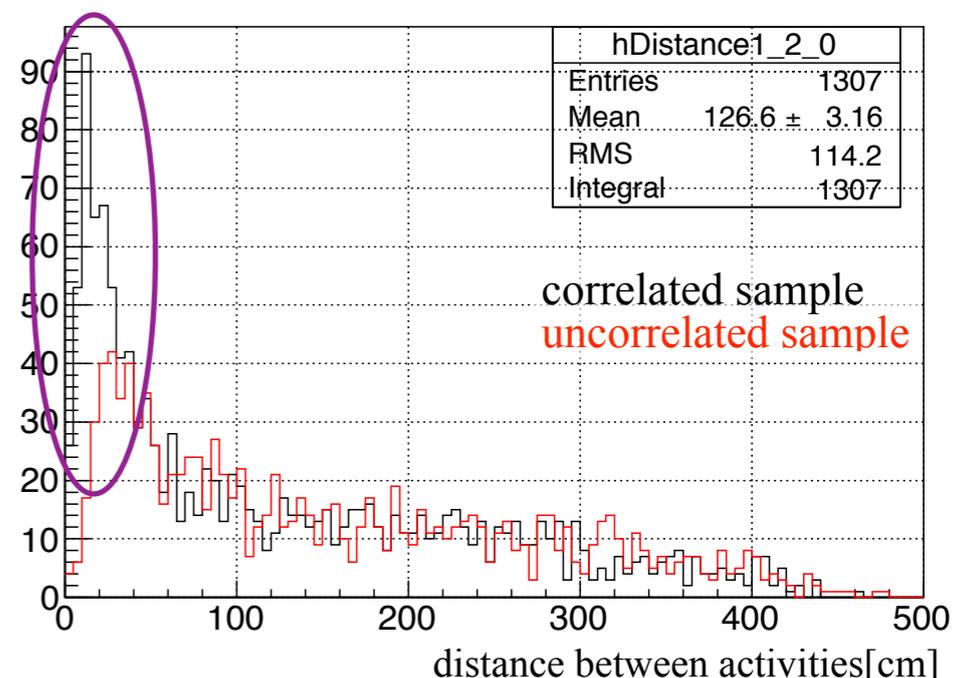


ビームと同期した muon 崩壊

- 先発背景事象とビーム中のアクティビティとの距離の分布を、その事象が見つかったスピルと、無関係なスピルと比較

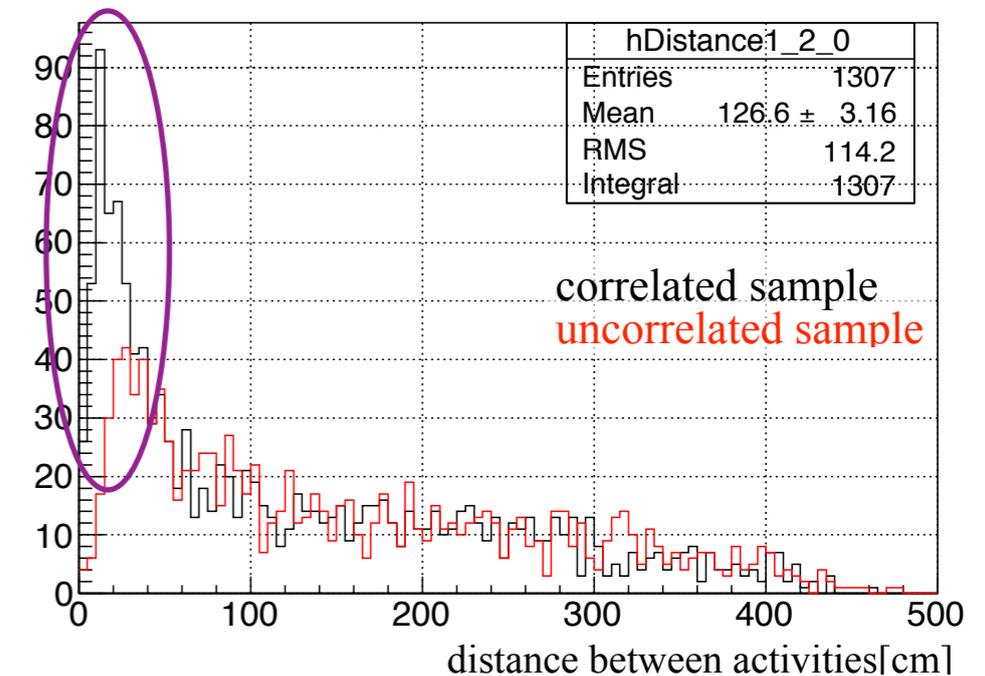
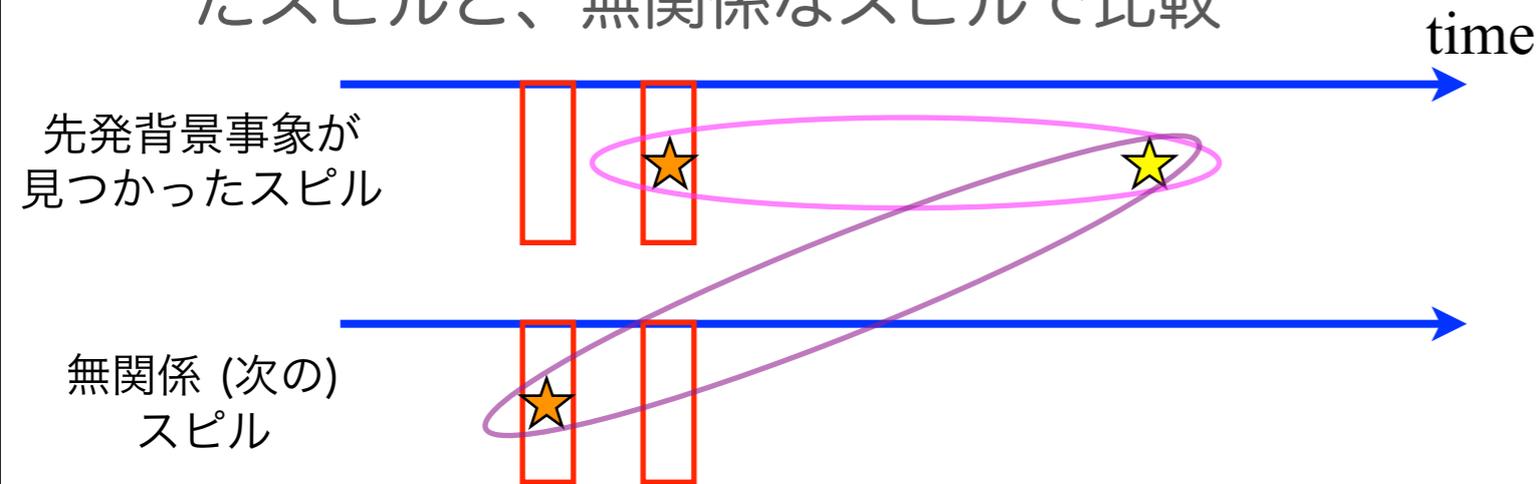


- muon の由来は？



ビームと同期した muon 崩壊

- 先発背景事象とビーム中のアクティビティとの距離の分布を、その事象が見つかったスピルと、無関係なスピルで比較



- ビーム起源の高速中性子の荷電 pion 生成からの Michel-electron か？
- 1t@BL13, 300 kW での背景事象数
 - $\tau_\mu = 2.2\mu\text{s}$ を考慮して $1 < t[\mu\text{s}] < 10$ に換算
 - $5.6 \times 10^{-4} / \text{spill}$

300kW@BL13 → 1MW@3F

- PHITSシミュレーションによる、3Fでの見積

- **後発**背景事象 本実験検出器表面@3F, 1MW
(いずれも全エネルギーでの入射量@検出器表面)

- γ 線 : 14 /spill/100 μ s/detector

- 中性子 : 40 /spill/100 μ s/detector

➔ 5×10^{-2} /spill

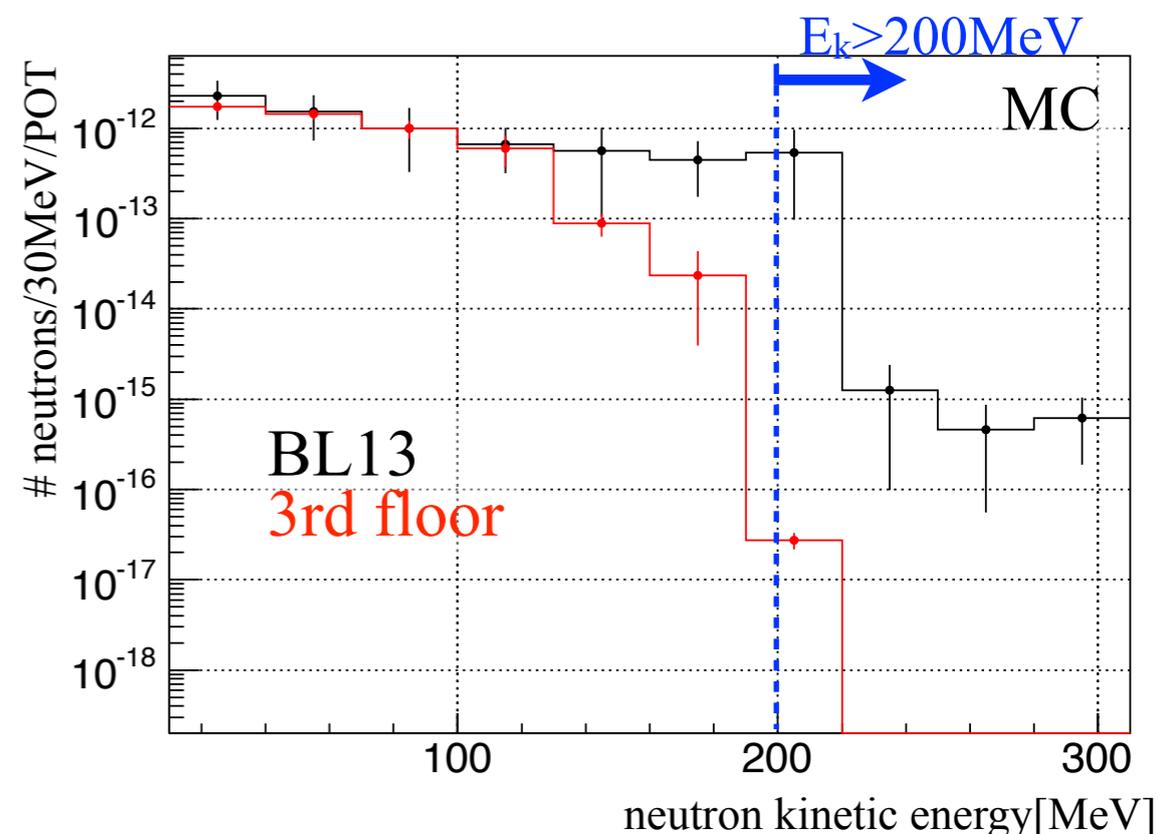
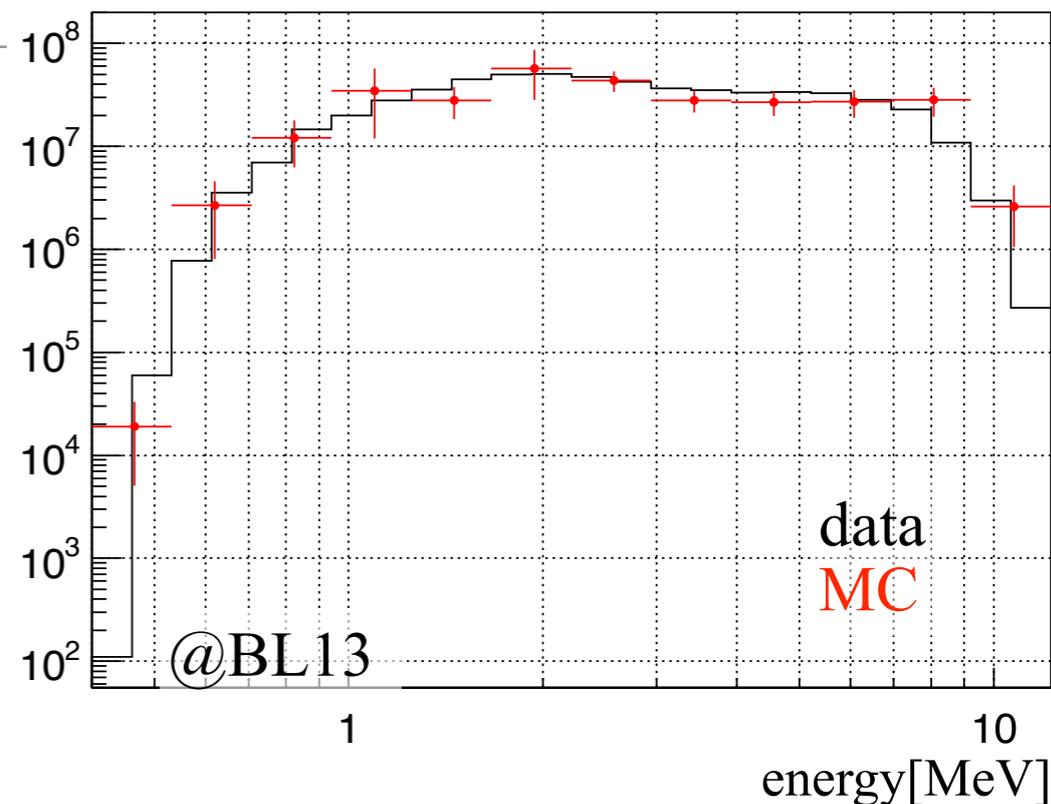
- **連続**背景事象 本実験検出器表面@3F, 1MW

- π^\pm を作る $E_k > 200$ MeV の中性子数の比較

- 2×10^{-7} /spill/detector ($1 < t[\mu\text{s}] < 10$)

➔ 主な背景事象 (μ^- からの $\bar{\nu}_e$) より少なく、実験可能である！

$$n_{3F} = n_{BL13} \times \frac{N_{3F}}{N_{BL13}}$$



300kW@BL13 → 1MW@3F

$$n_{3F} = n_{BL13} \times \frac{N_{3F}}{N_{BL13}}$$

- PHITSシミュレーションによる、3Fでの見積

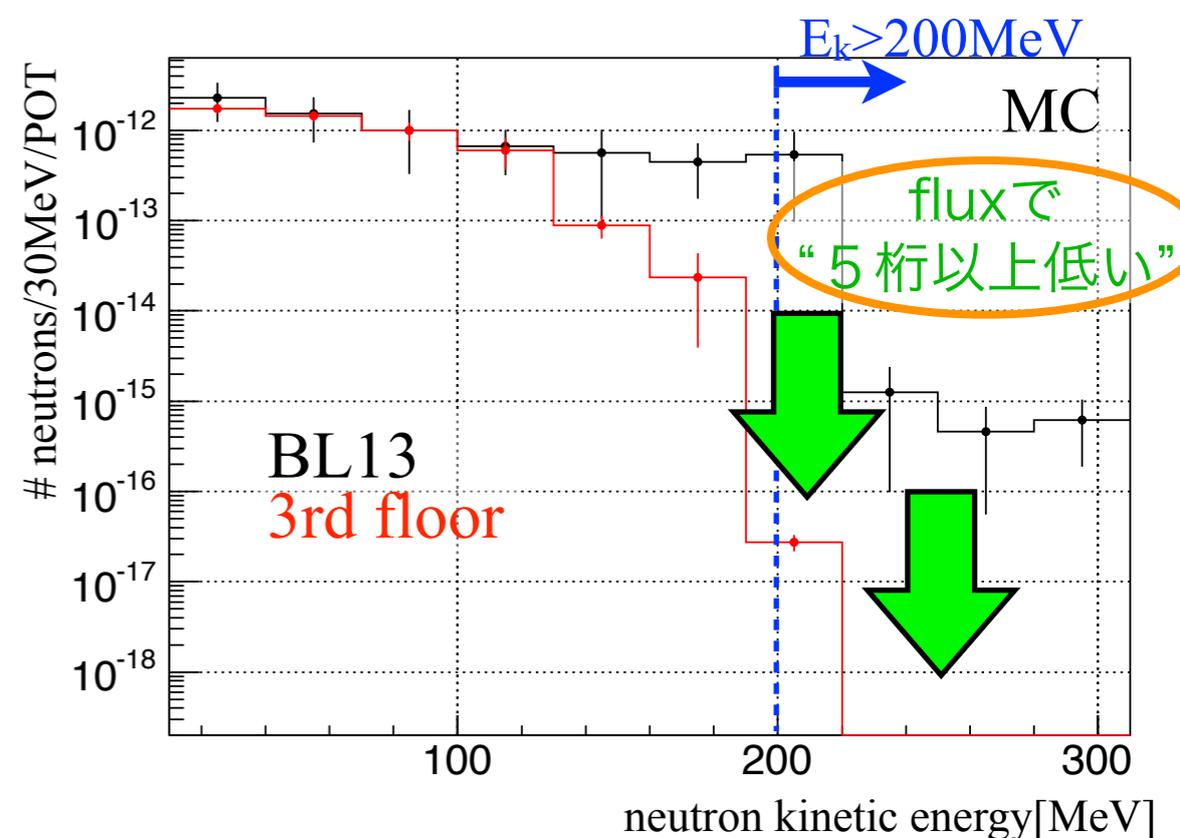
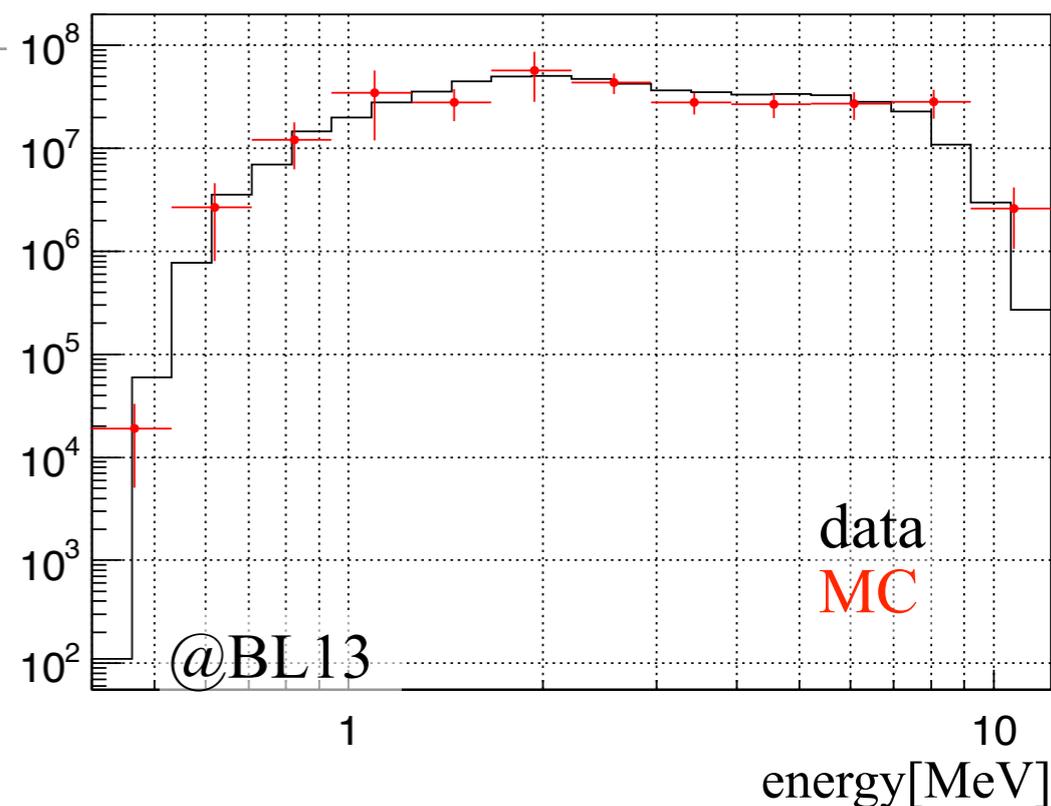
- **後発**背景事象 本実験検出器表面@3F, 1MW
(いずれも全エネルギーでの入射量)

- γ 線 : 14 /spill/100 μ s/detector
- 中性子 : 40 /spill/100 μ s/detector

- **連続**背景事象 本実験検出器表面@3F, 1MW

- π^\pm を作る $E_k > 200$ MeV の中性子数の比較
- 2×10^{-7} /spill/detector ($1 < t[\mu\text{s}] < 10$)

➔ 主な背景事象 (μ^- からの $\bar{\nu}_e$) より少なく、実験可能である！ と proposal に書いた。



背景事象測定@MLF 3F

- 主にビーム起源の高速中性子による $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ の量を測定する
 - 連続的な背景事象であるためフラックス上限値に対する要請は非常に厳しい
(=本実験と同じ大きさ、同じ期間を用意しないと近い感度にならない)
 - 実際には5桁の開きを埋める、上限値を設定したい
 - 5桁低いフラックスなら、カット無しでシグナル事象と同程度の背景事象数
 - 加えて物理カットによる $O(10^3)$ の抑止を期待している
- ➡ 2-3桁低いフラックスの上限値が付けられれば、実験として成立
- この測定の主な背景事象は、擦った宇宙線、宇宙線起源の Michel-electron など
 - ~1t 重さの検出器を、veto検出器で囲む
 - 3桁低いフラックス上限値を目標とした背景事象測定を春から開始したい

まとめ

- J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験
- 9月に proposal を提出 (P56)
 - RCS pulsed beam : DAR μ を $\pi/K/n$ から選別
 - Gd 捕獲による熱中性子検出
 - 低く抑えられた系統誤差
 - μ DAR からの反ミューオン・ニュートリノ : エネルギー分布が well known
 - 反応断面積がよく分かっている逆ベータ崩壊による検出
- ➡ LSNDの領域を 5σ レベルの高い感度での測定を目指す
 - BL13 にて 1 ton scintillator detector を用いた背景事象の測定
 - BL13と比べ 3F での 5桁低い高速中性子フラックス (MC)
- ▶ 春からMLF 3F での beam Michel-e の直接測定による確認 ⇒ 本実験へ