

KamLAND

-近傍超新星爆発と電子回路-

石徹白晃治 (東北大RCNS)

第五回超新星v研究会, 1/7-8, 国立天文台



KamLAND検出器



KamLANDと近傍超新星爆発



KamLANDの次期電子回路



まとめ

 ~~KamLAND検出器~~

 KamLANDと近傍超新星爆発

 KamLANDの次期電子回路

 まとめ

KamLAND

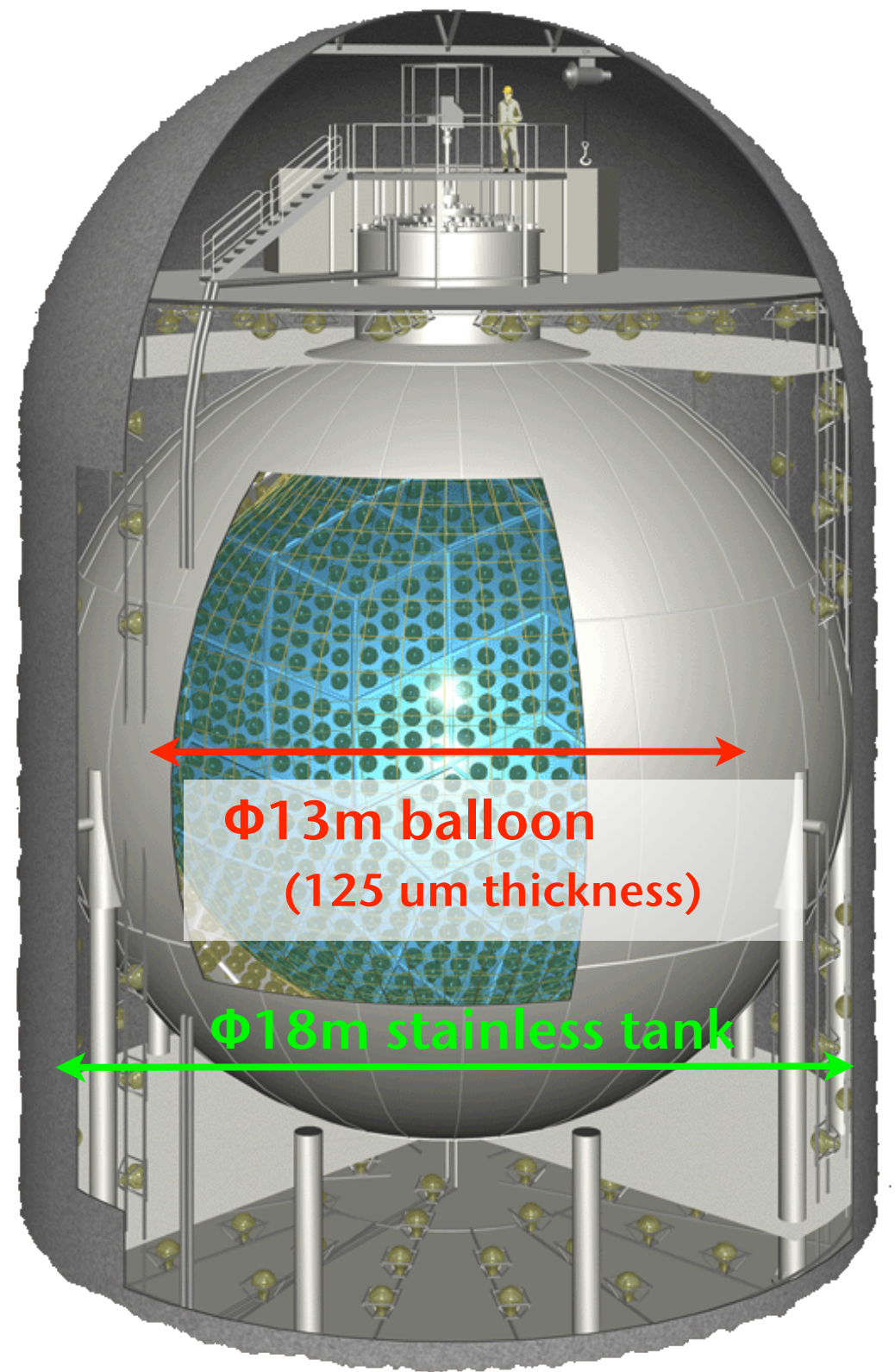
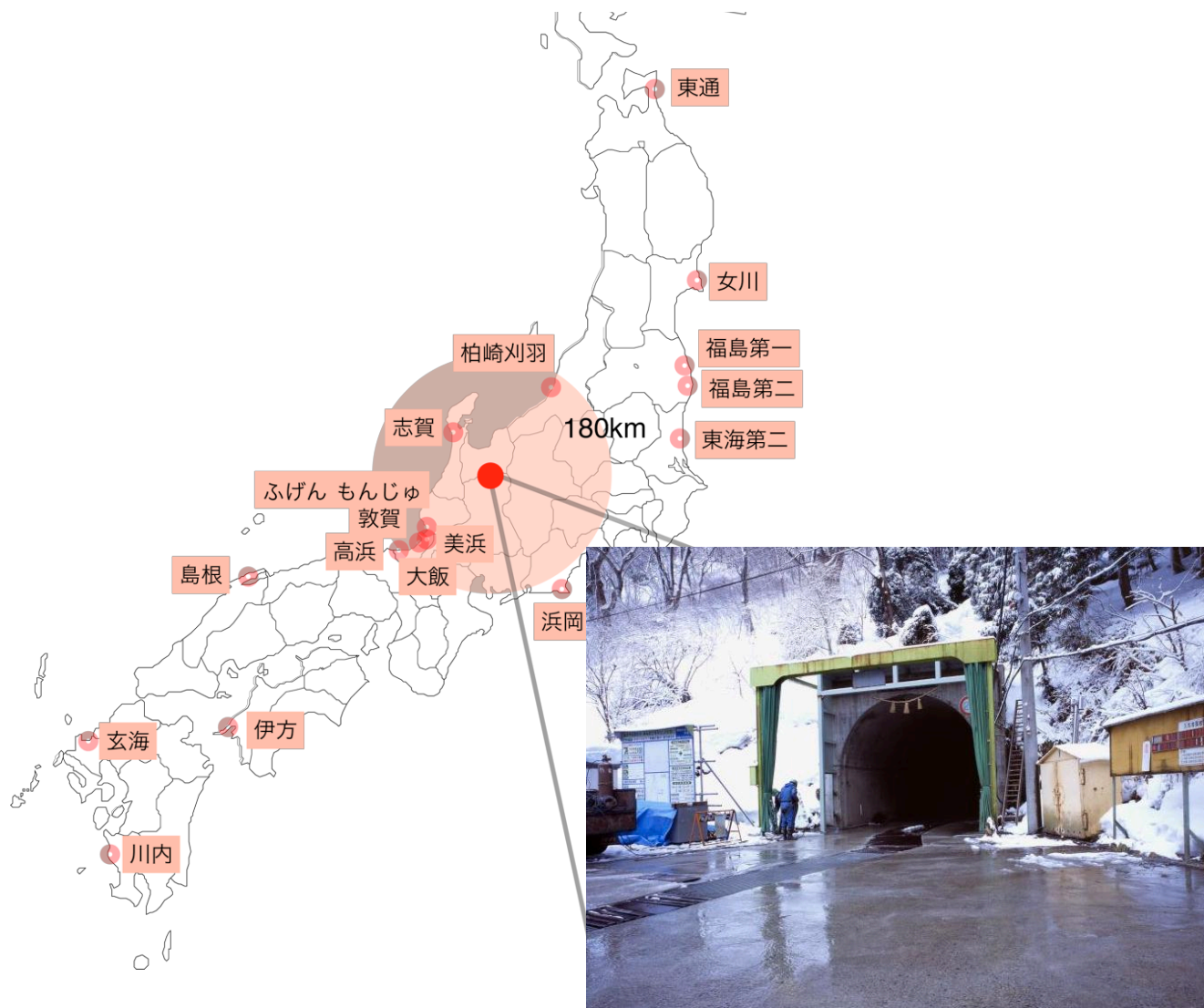
Kamioka Liquid scintillator
Anti-Neutrino Detector (since 2002)

- 1,000 m depth (Kamioka mine)

- 1,000 t liquid scintillator

Dodecan (80%), Pseudocumene (20%), PPO (1.36g/l)

- 1,325 17inch + 554 20inch PMTs



Outer detector (for muon veto)

- 3.2kton water cherenkov detector
- ~100 20inch PMTs

KamLANDの反応チャンネル

Charged-current channels

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

$$n + p \rightarrow d + \gamma$$

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$$

Neutral-current channels

$$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + {}^{12}\text{C}^* (\rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma)$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$

$$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$$

KamLANDの反応チャンネル

Charged-current channels

$$\begin{aligned}\bar{\nu}_e + p &\rightarrow n + e^+ \\ n + p &\rightarrow d + \gamma\end{aligned}$$

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$$

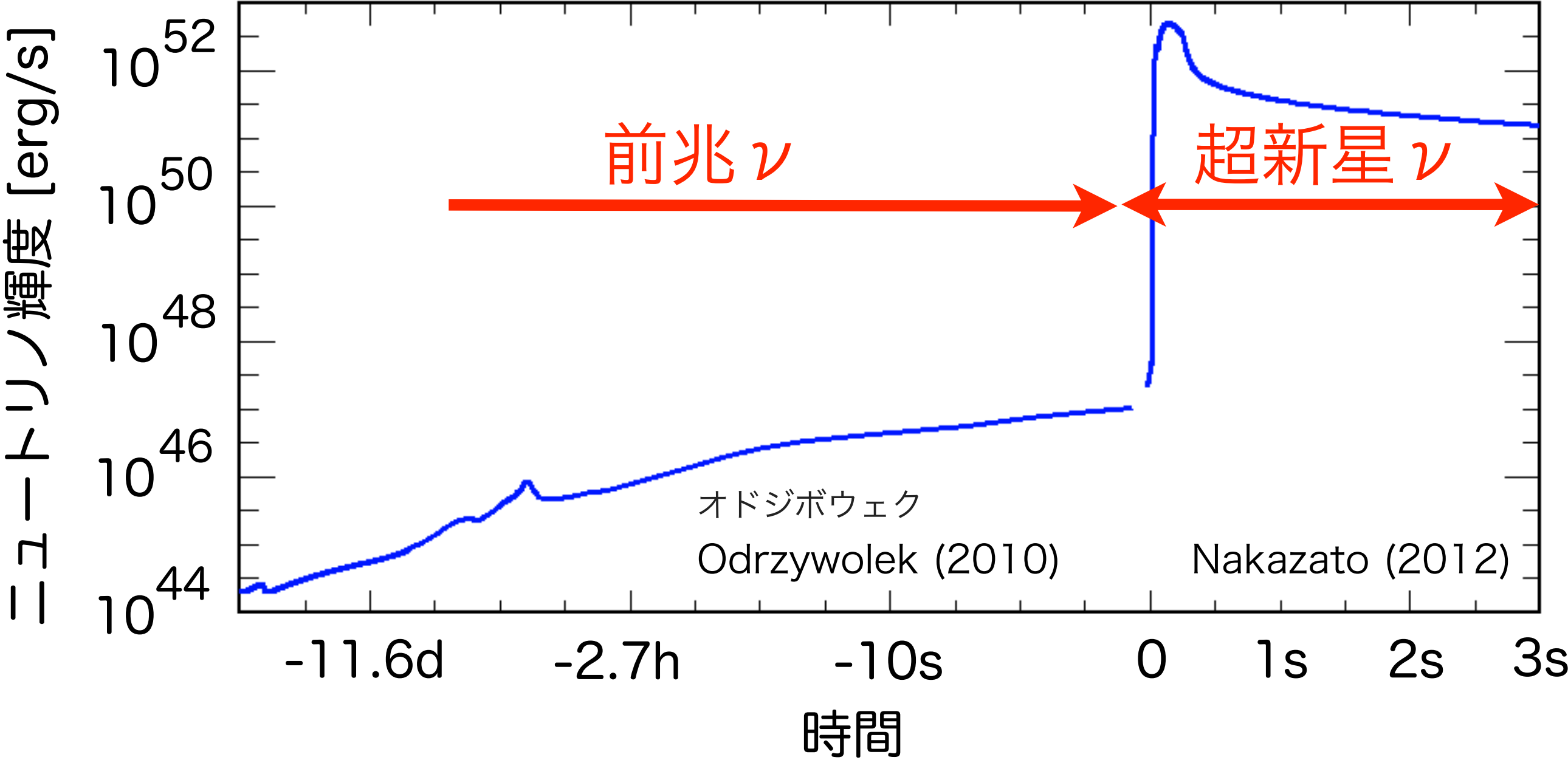
Neutral-current channels

$$\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_x + {}^{12}\text{C}^* (\rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma)$$

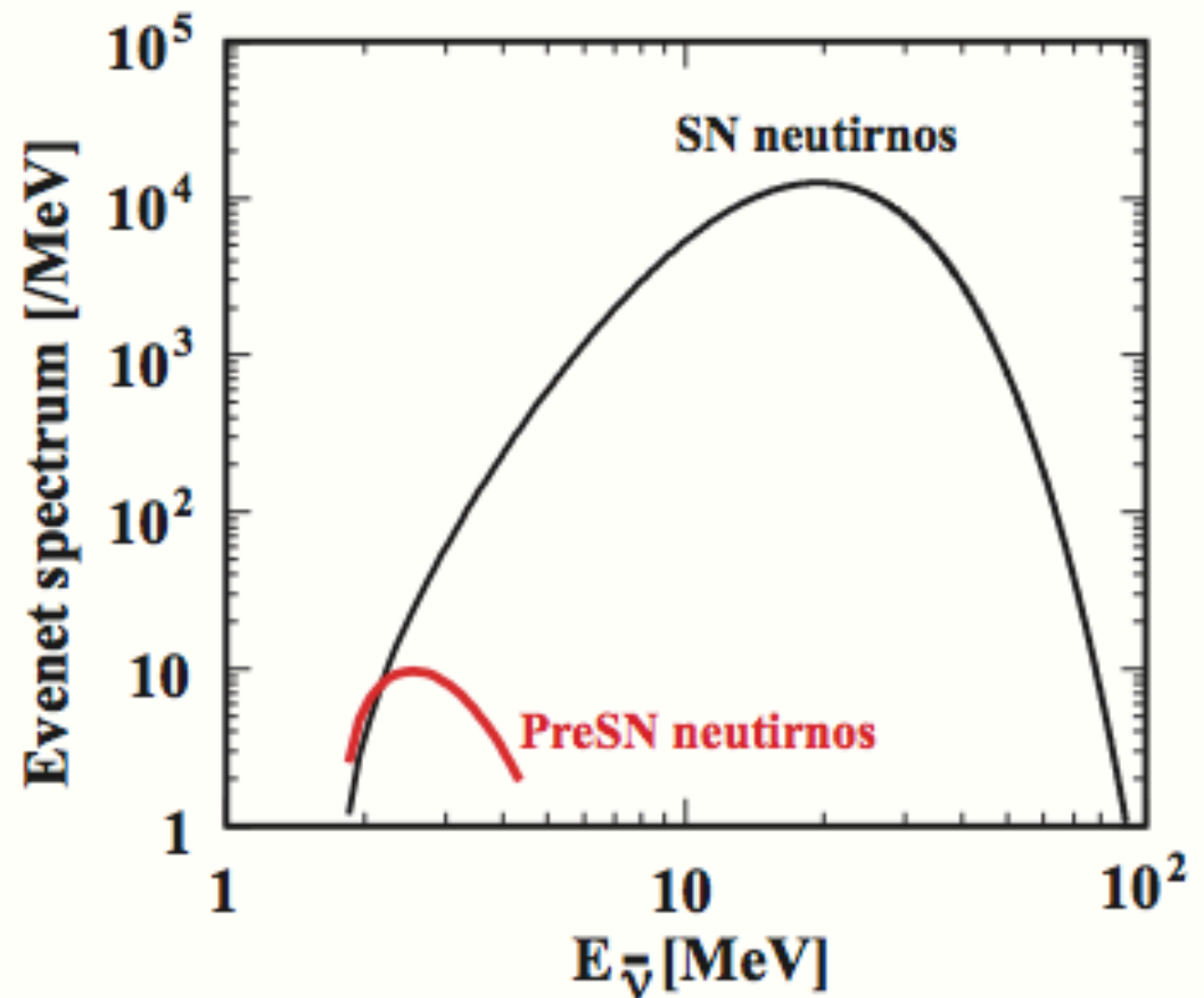
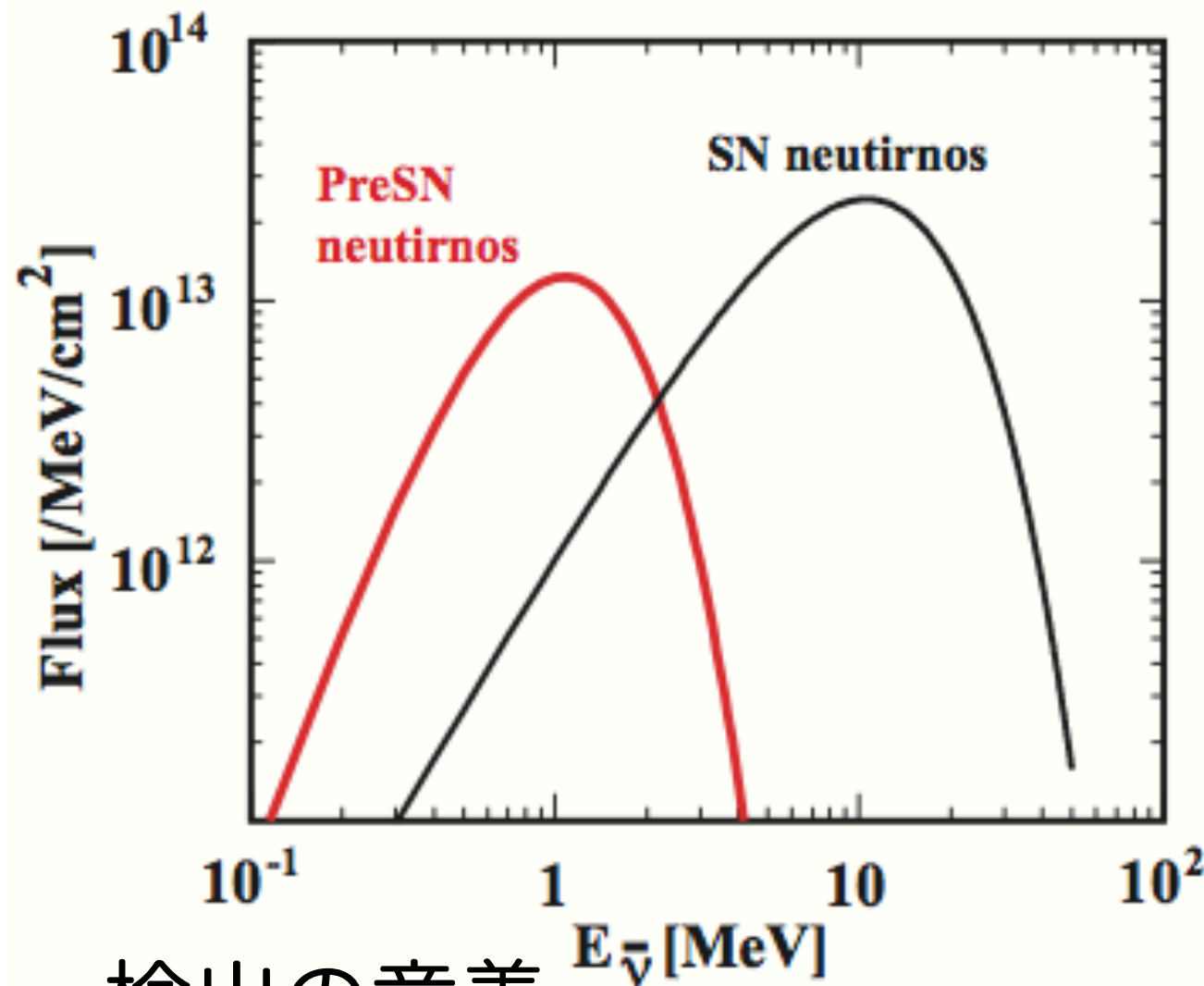
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$

$$\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$$

超新星前後のニュートリノ放出



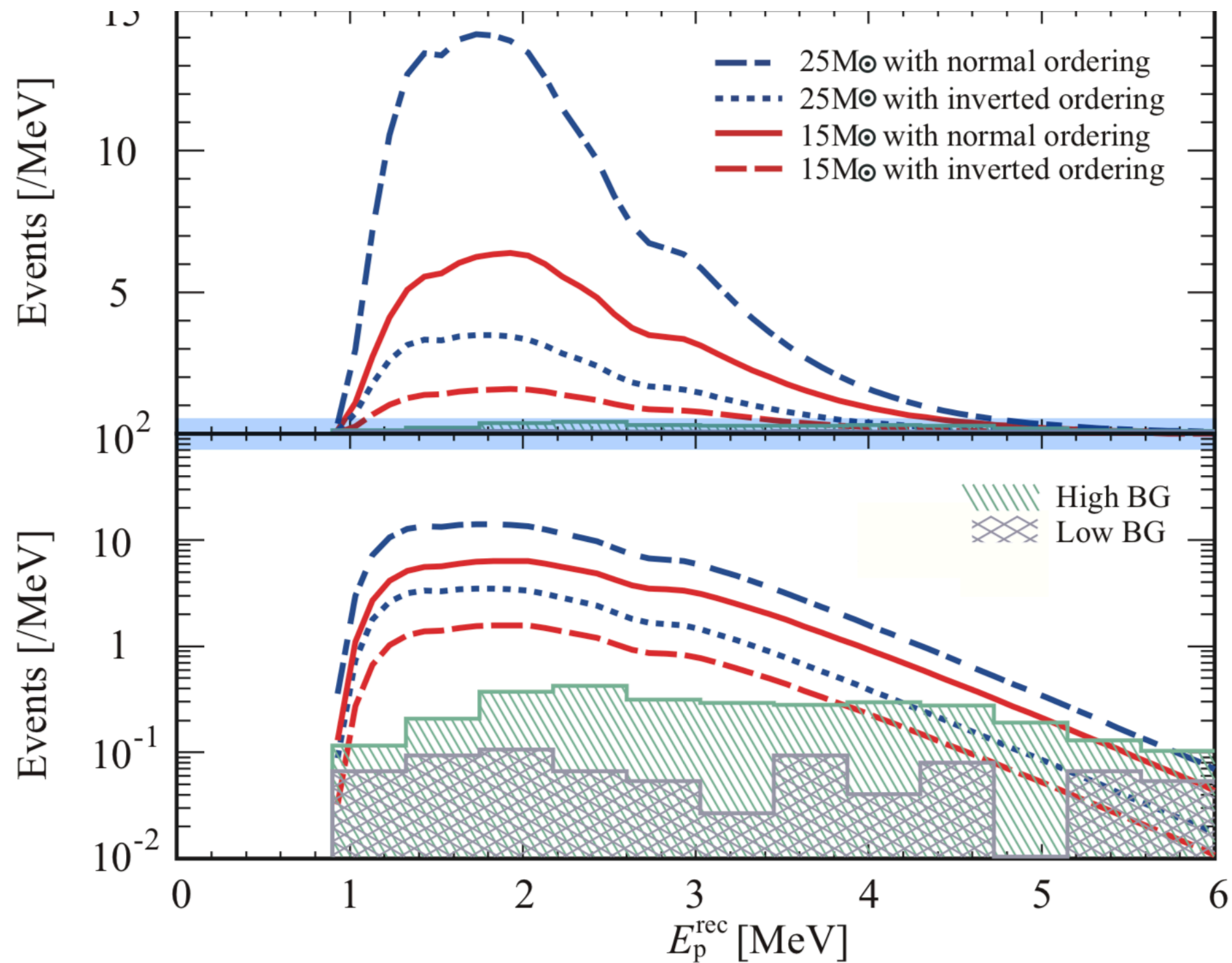
超新星前兆ニュートリノ



検出の意義

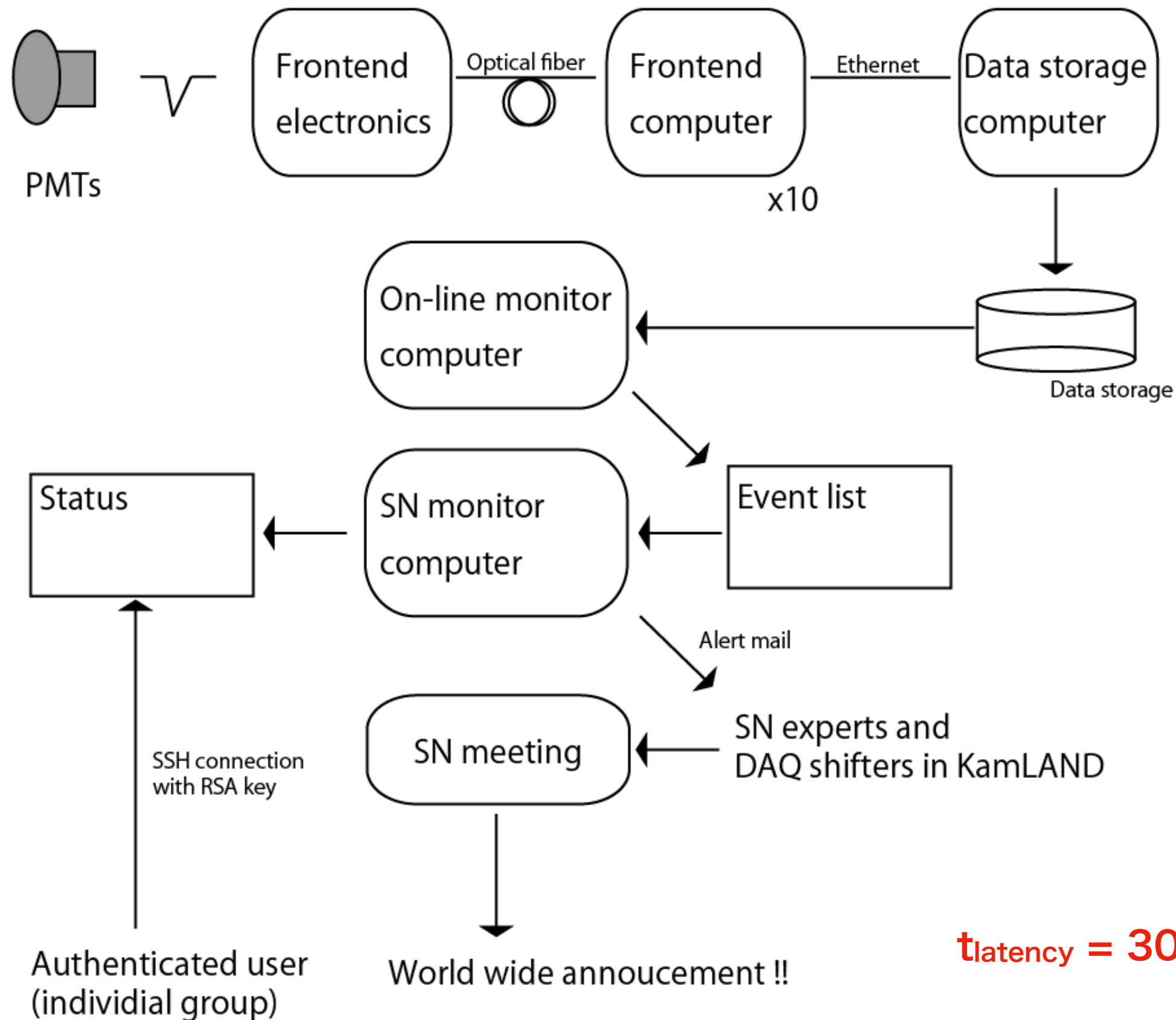
- 恒星進化の最終段階を解明
- 超新星爆発の初期条件，超新星爆発の理解
- 重元素生成の詳細理解
- 爆発前アラーム

KamLANDでのスペクトル



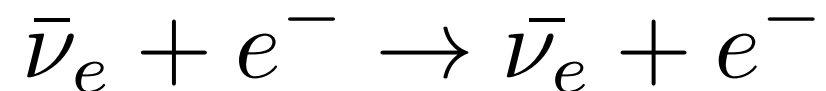
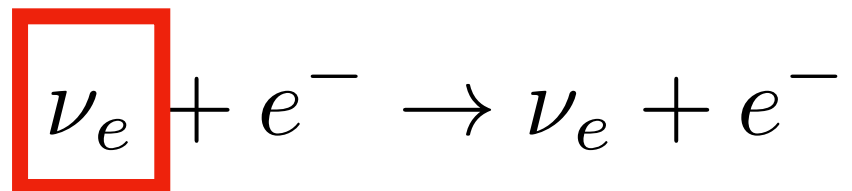
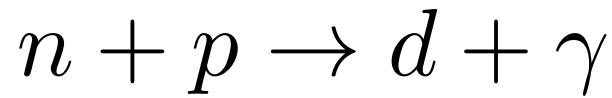
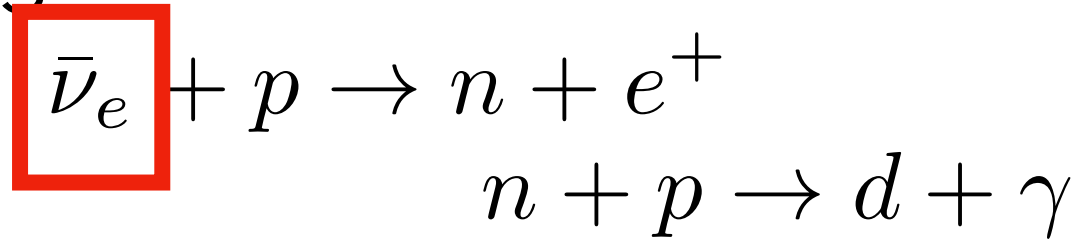
最後の48時間で 4 -30イベント (BG 0.14 - 0.8イベント)

速報体制

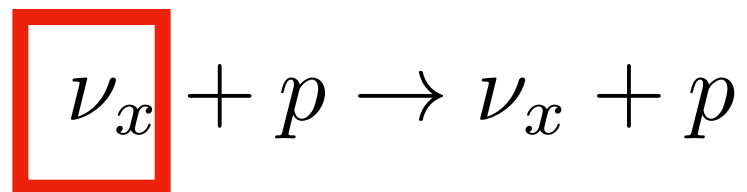
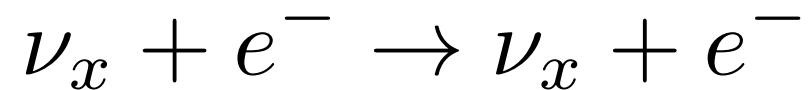
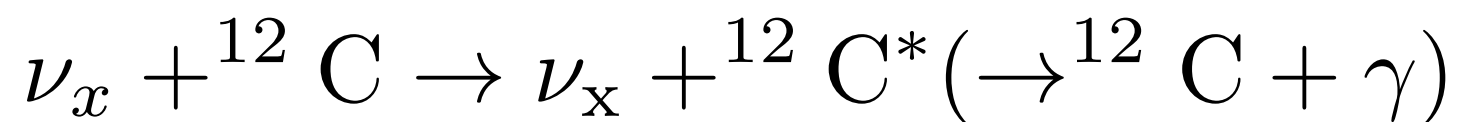


KamLANDの反応チャンネル

Charged-current channels

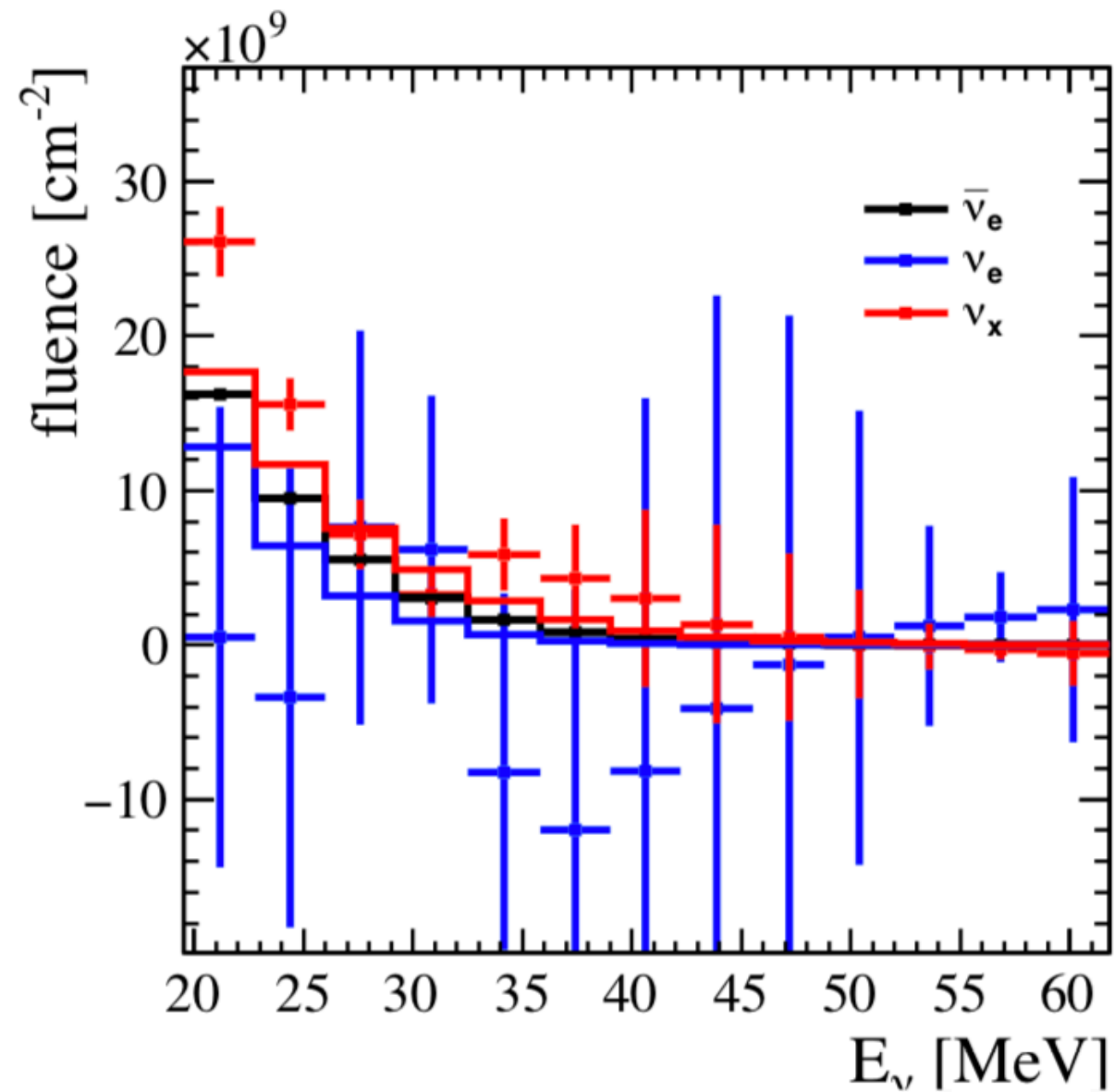


Neutral-current channels

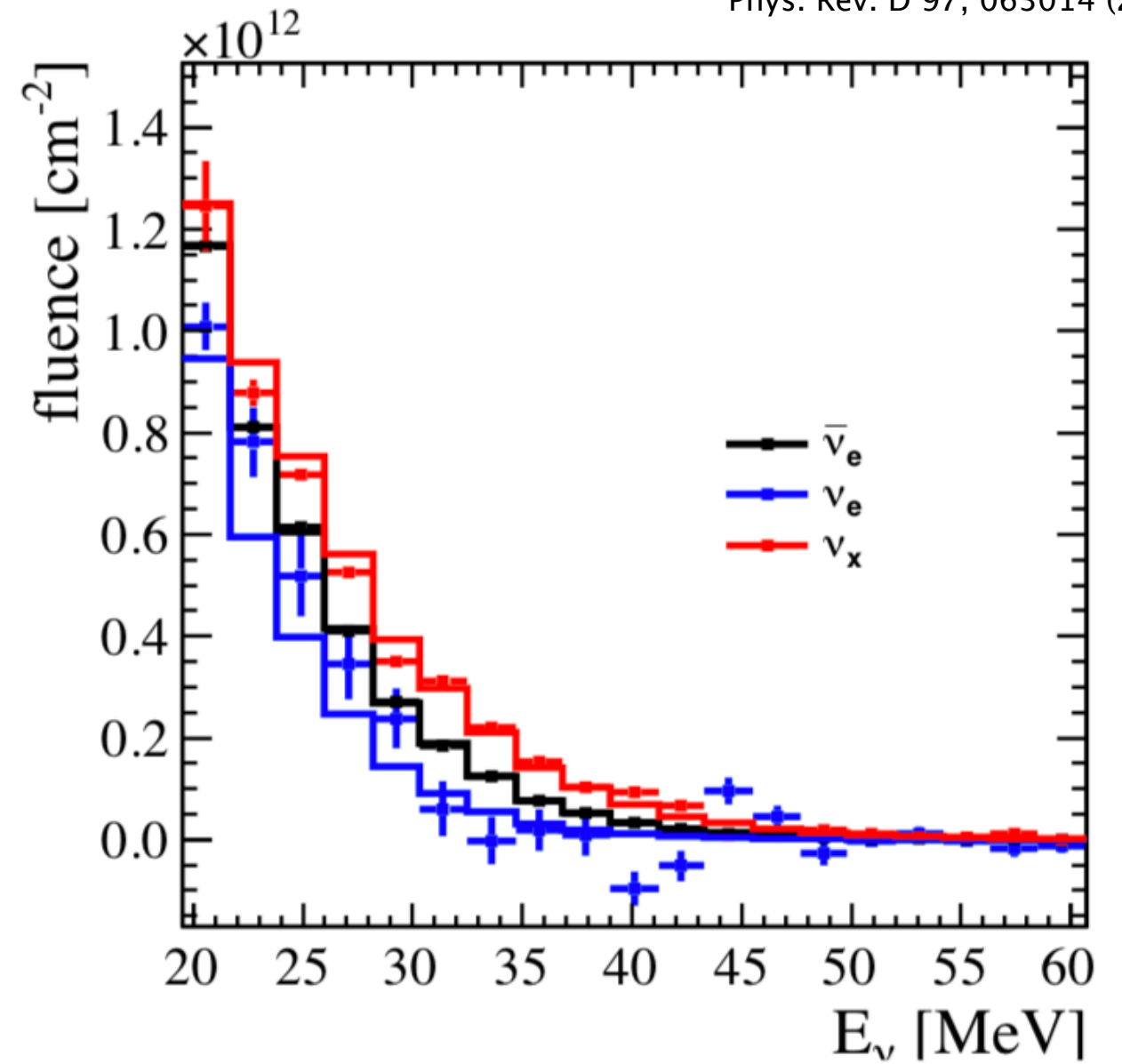


スペクトルの復元

Phys. Rev. D 97, 063014 (2018)



JUNO 10kpc
(KL ~2.2kpc)



JUNO 1kpc
(KL ~220pc)

近傍超新星爆発

前兆ニュートリノの観測および速報
ニュートリノスペクトルの復元

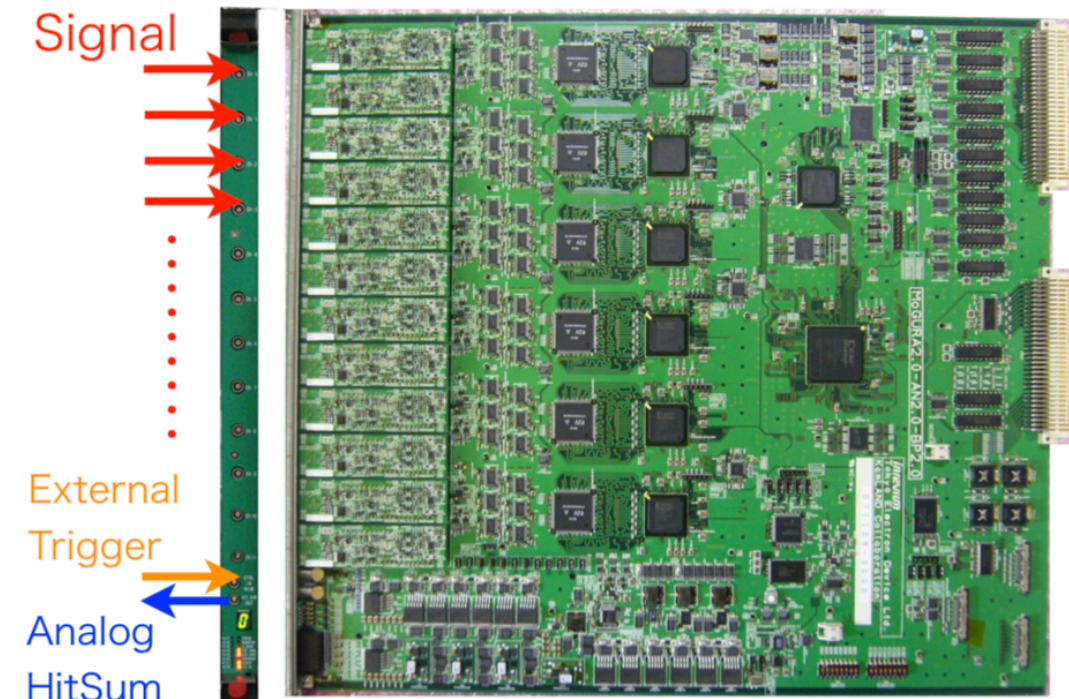
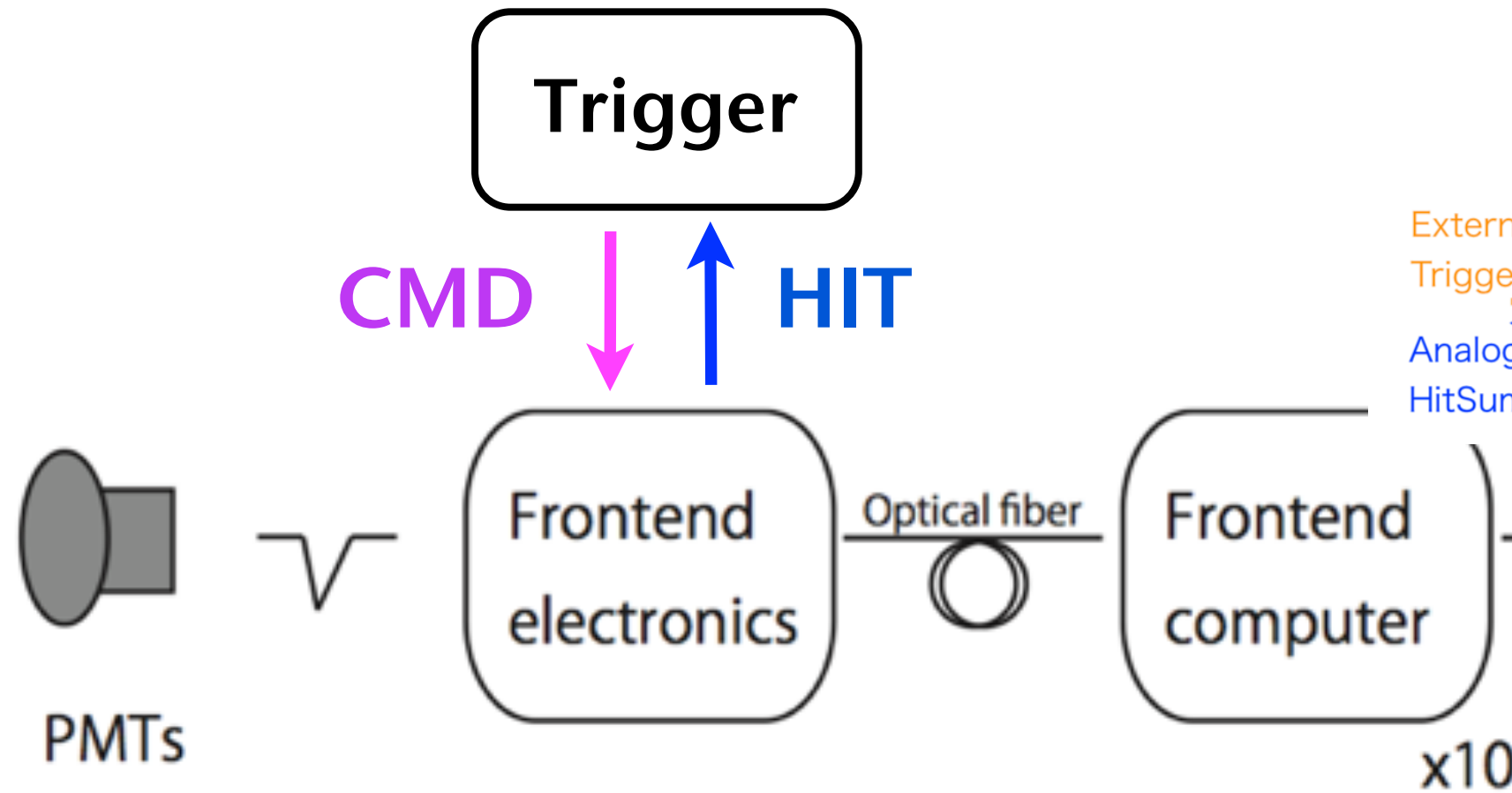
近傍超新星爆発

前兆ニュートリノの観測および速報
ニュートリノスペクトルの復元

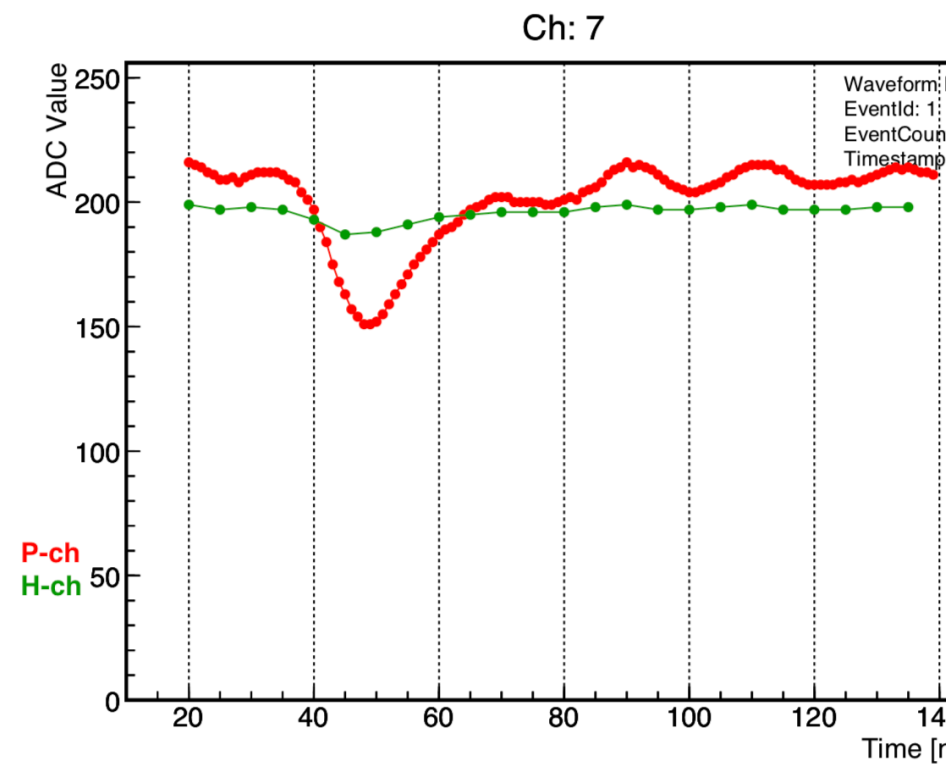
データ取得は可能か？

実験してみた!!

電子回路の役割

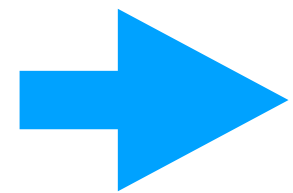


- 電圧(アナログ)を計算機が解釈できるデジタルに変換
- 各PMTでHIT判定
- HIT数の和から物理イベントを判定
- イベント判定されたデータを計算機へ送る

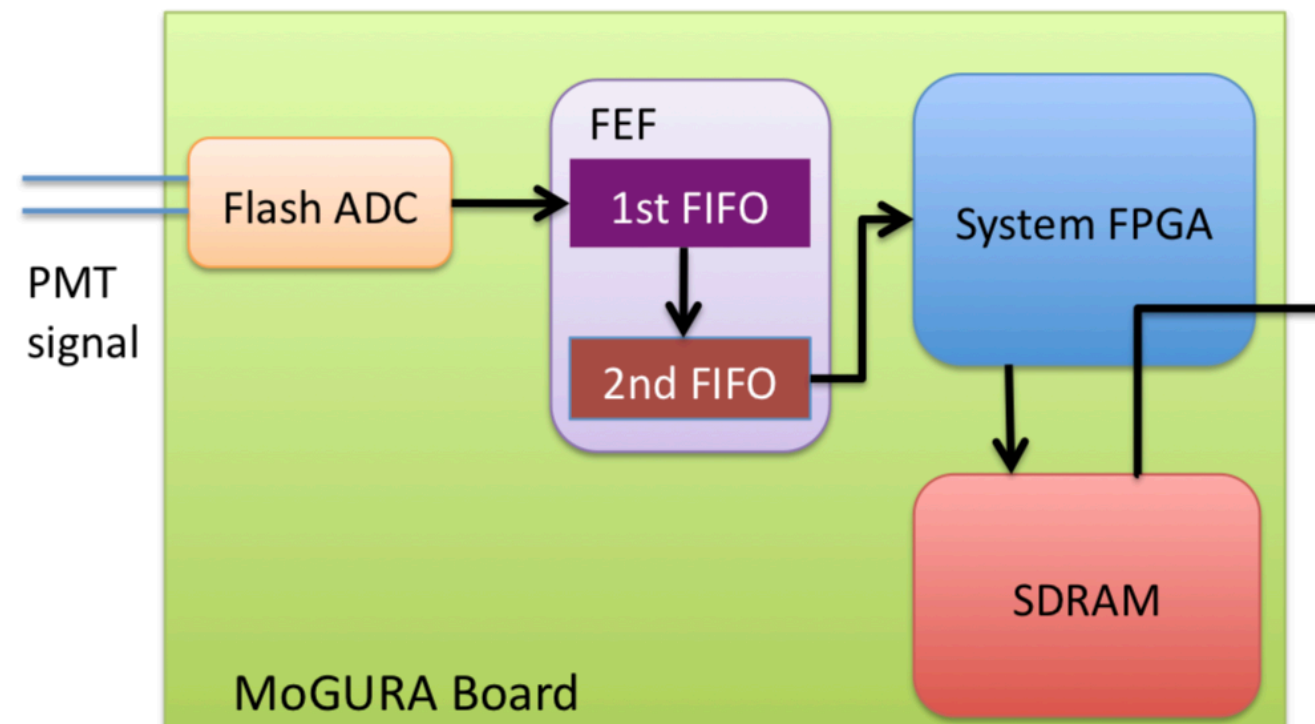
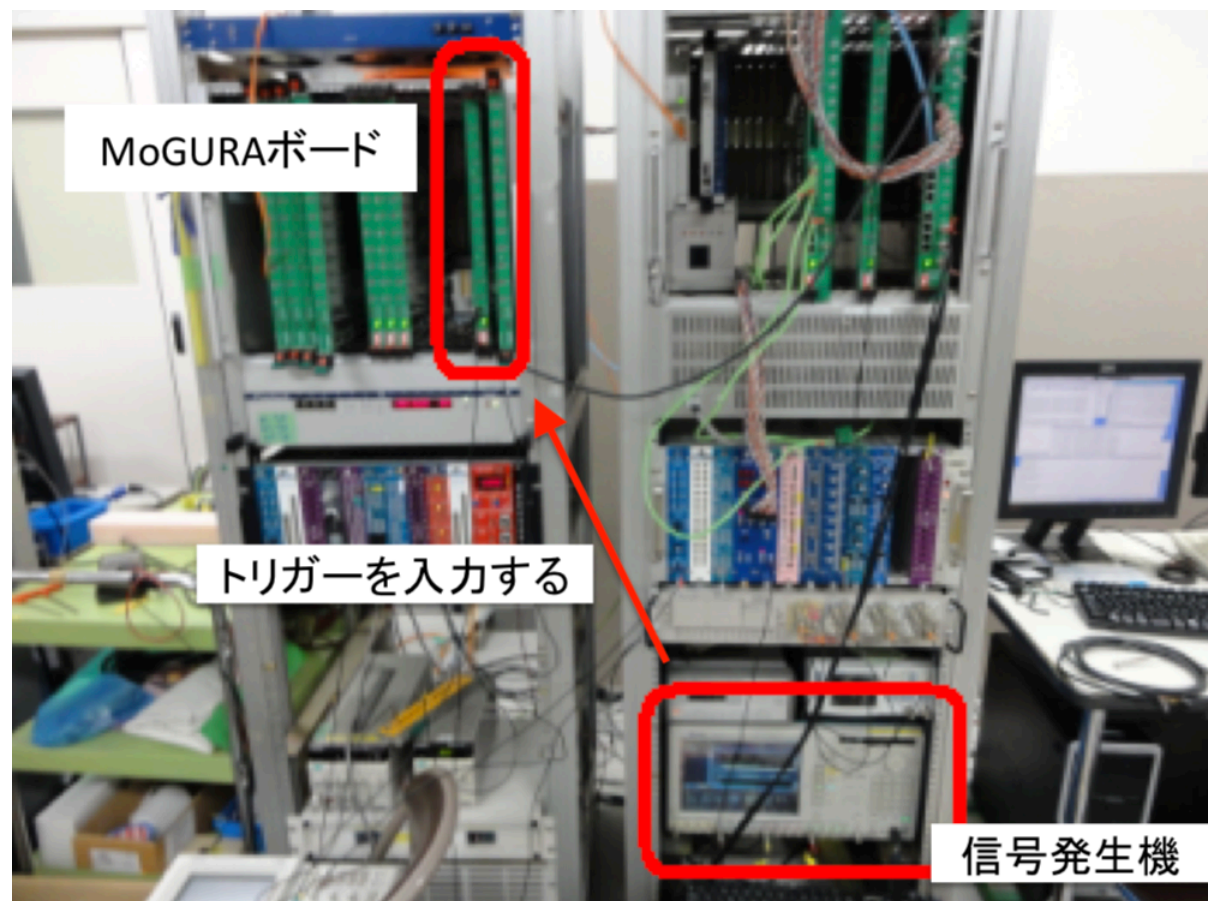


近傍超新星爆発とDAQ

実験室での高負荷耐性



Nakazatoモデルで60-80msでError
(200pcの超新星爆発を仮定)



ボトルネックは2ndFIFO (石川、修士論文)

近傍超新星爆発対策

姑息的アプローチ

- PMTのhit数だけを記録
- トリガーを間引く (~6500イベント程度まで)

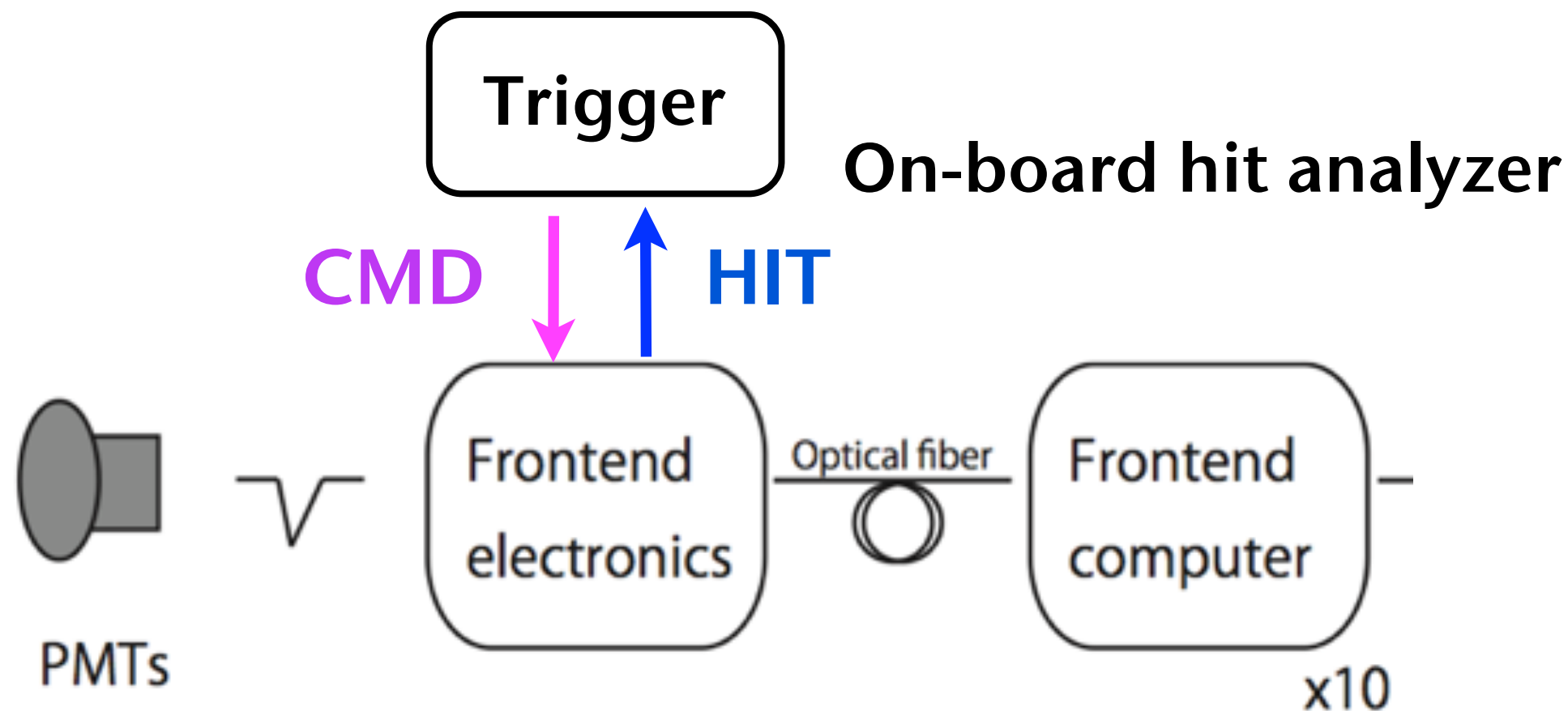
根本的アプローチ

- FPGA間通信の高速化
- VME -> Ethernetによる高速化
- 巨大なオンボードメモリー (DDR)

近傍超新星爆発対策

姑息的アプローチ

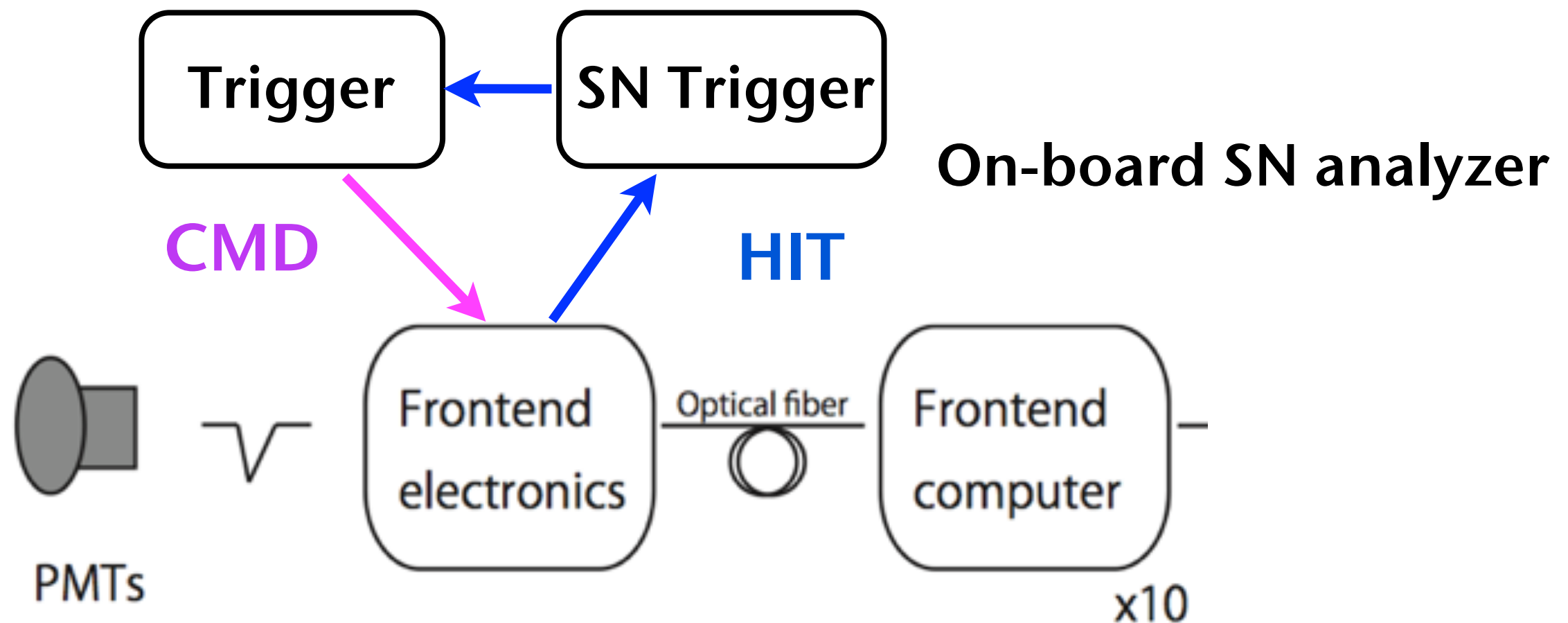
- PMTのhit数だけを記録
- トリガーを間引く (~6500イベント程度まで)



近傍超新星爆発対策

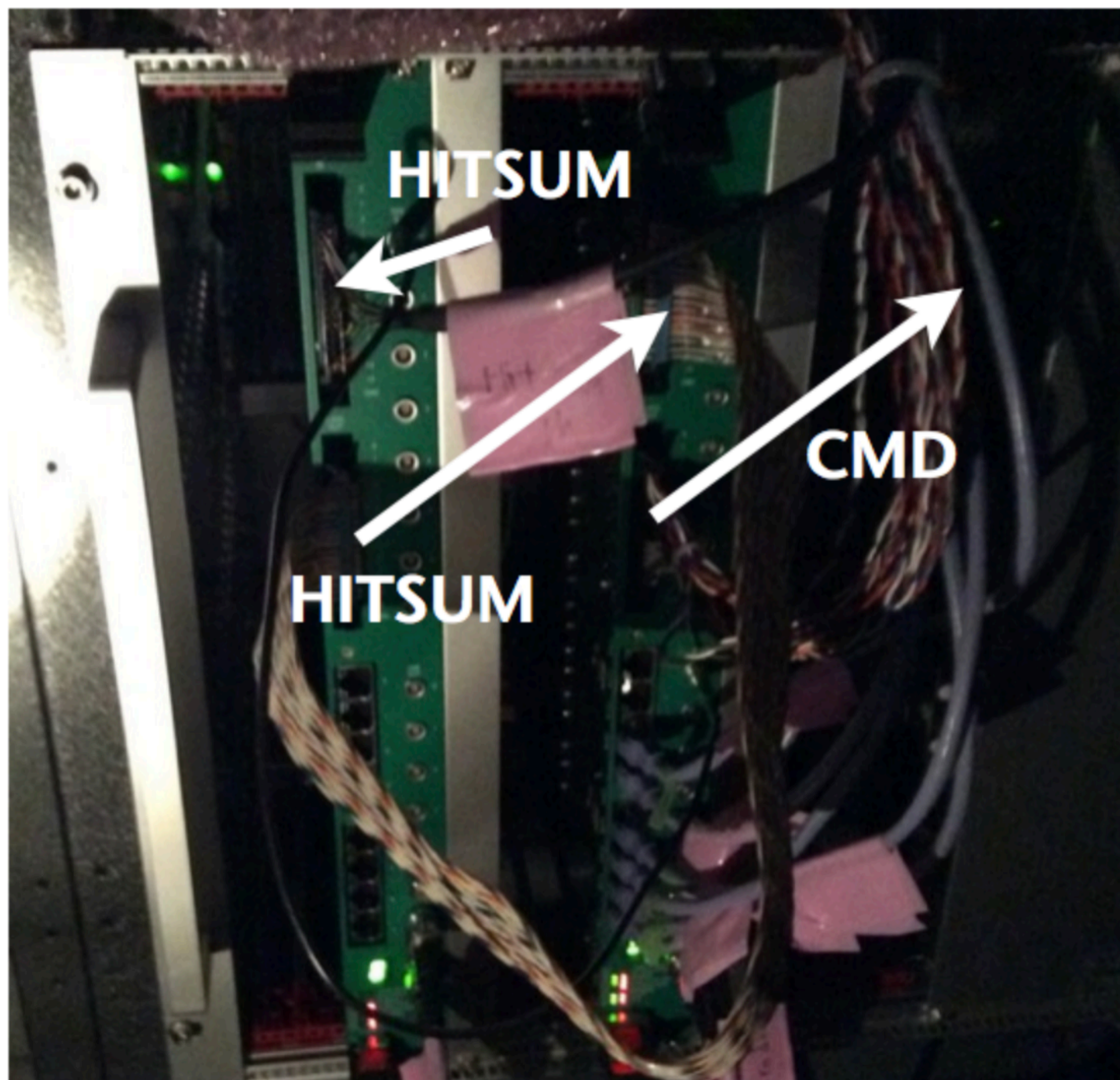
姑息的アプローチ

- PMTのhit数だけを記録
- トリガーを間引く (~6500イベント程度まで)



近傍超新星爆発対策

SN TRG MOG TRG

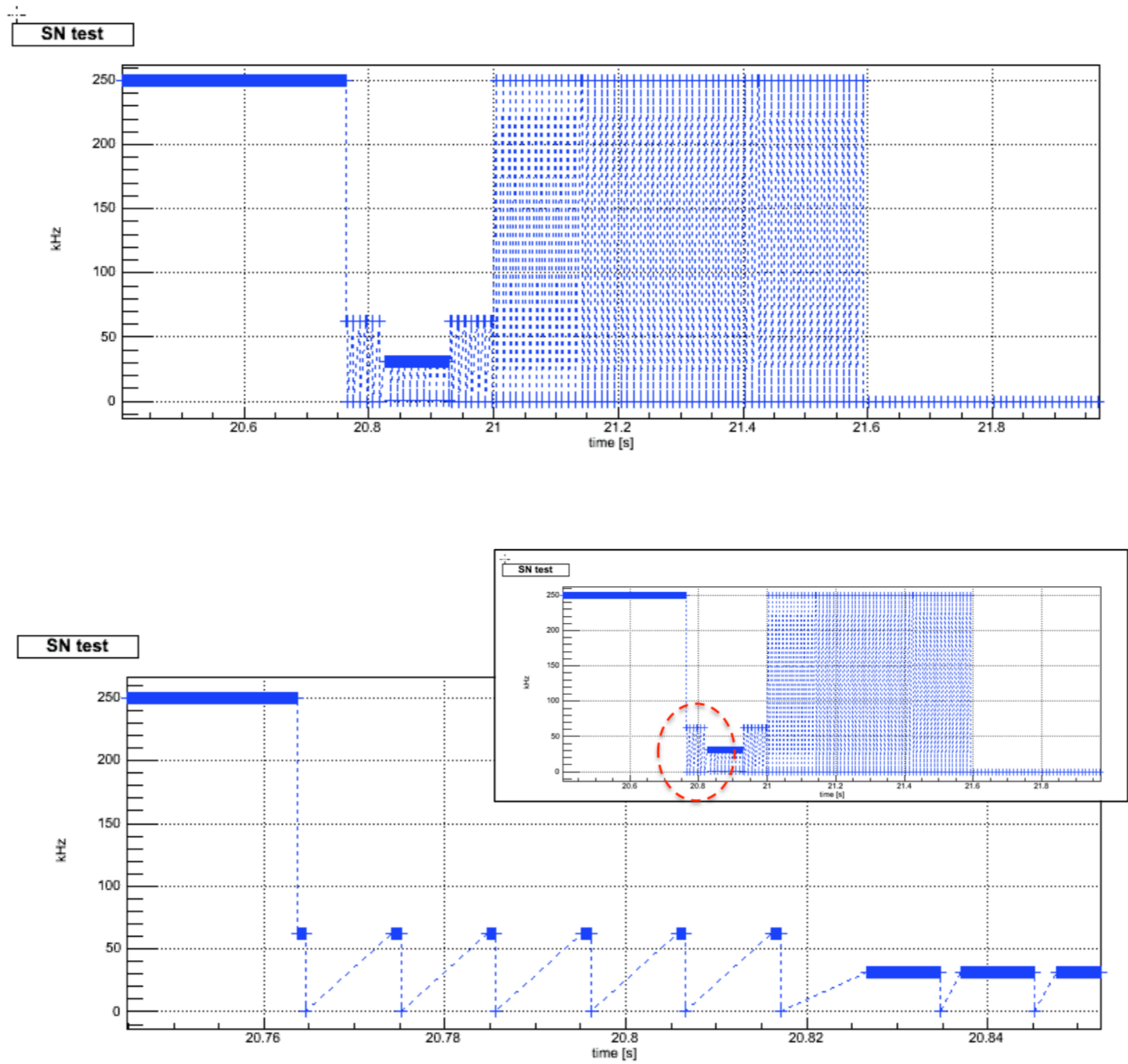


性能

- 20-25msで間引き開始
- 誤動作確率: $< 0.01/\text{yr}$
- 永続的なHIT信号記録

2015年9月

近傍超新星爆発対策



 ~~KamLAND検出器~~

 KamLANDと近傍超新星爆発

 KamLANDの次期電子回路

 まとめ

次期電子回路

近傍超新星爆発の根本的アプローチ

- FPGA間通信の高速化
- VME -> Ethernetによる高速化
- 巨大なオンボードメモリー (DDR)

KamLAND2(-Zen)の高感度化

- 10C BGのタグ ($0\nu\beta\beta$ 崩壊探索)
- On-board “r” reconstruction

KamLAND-Zen



Neutrino-less Double-beta decay search
using ^{136}Xe loaded LS in a mini balloon

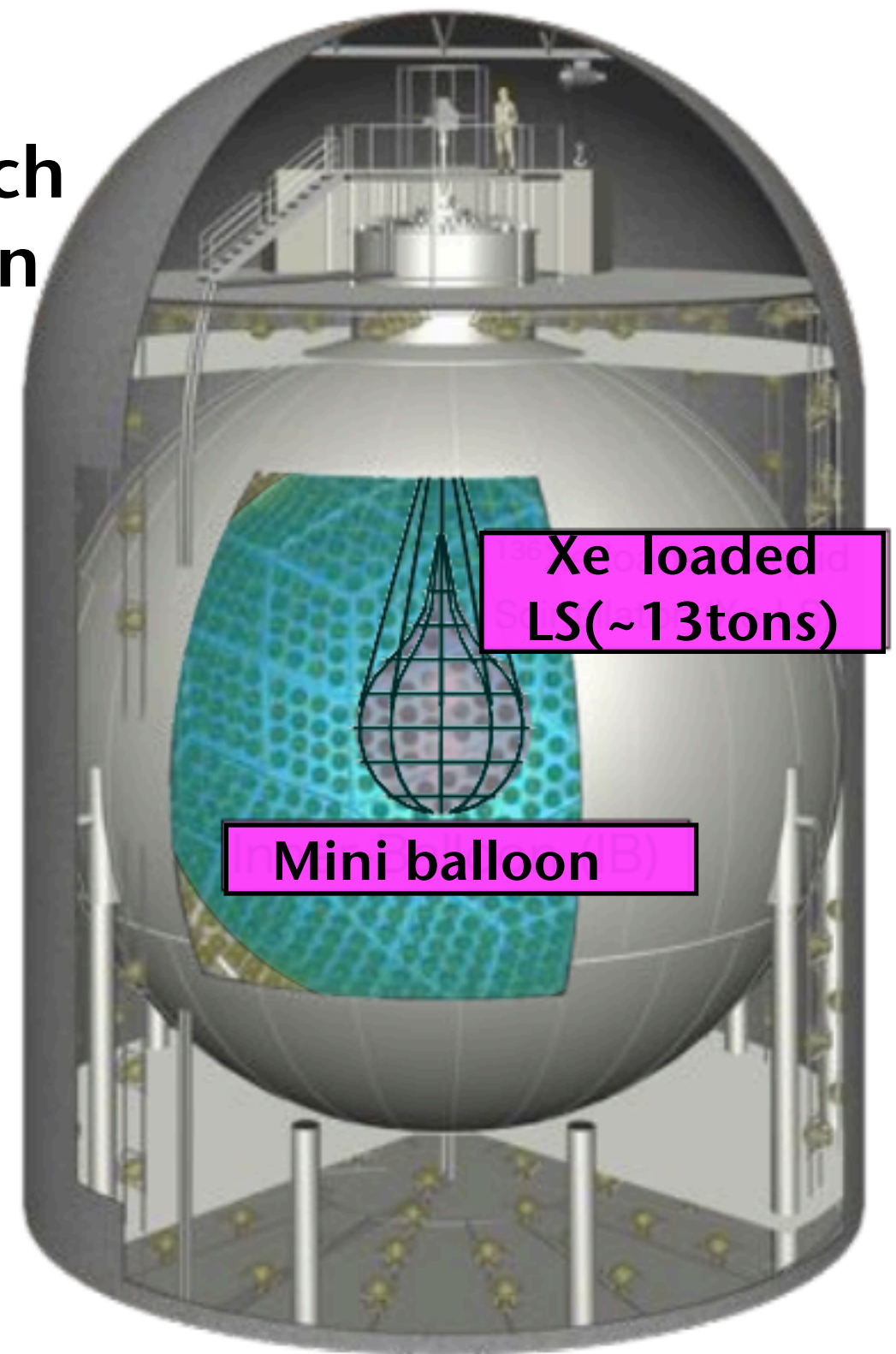
decane 80.2%, pseudocumene 19.8%,
PPO 2.7g/l, **Xe 2.4wt%**

Advantages of KamLAND-Zen

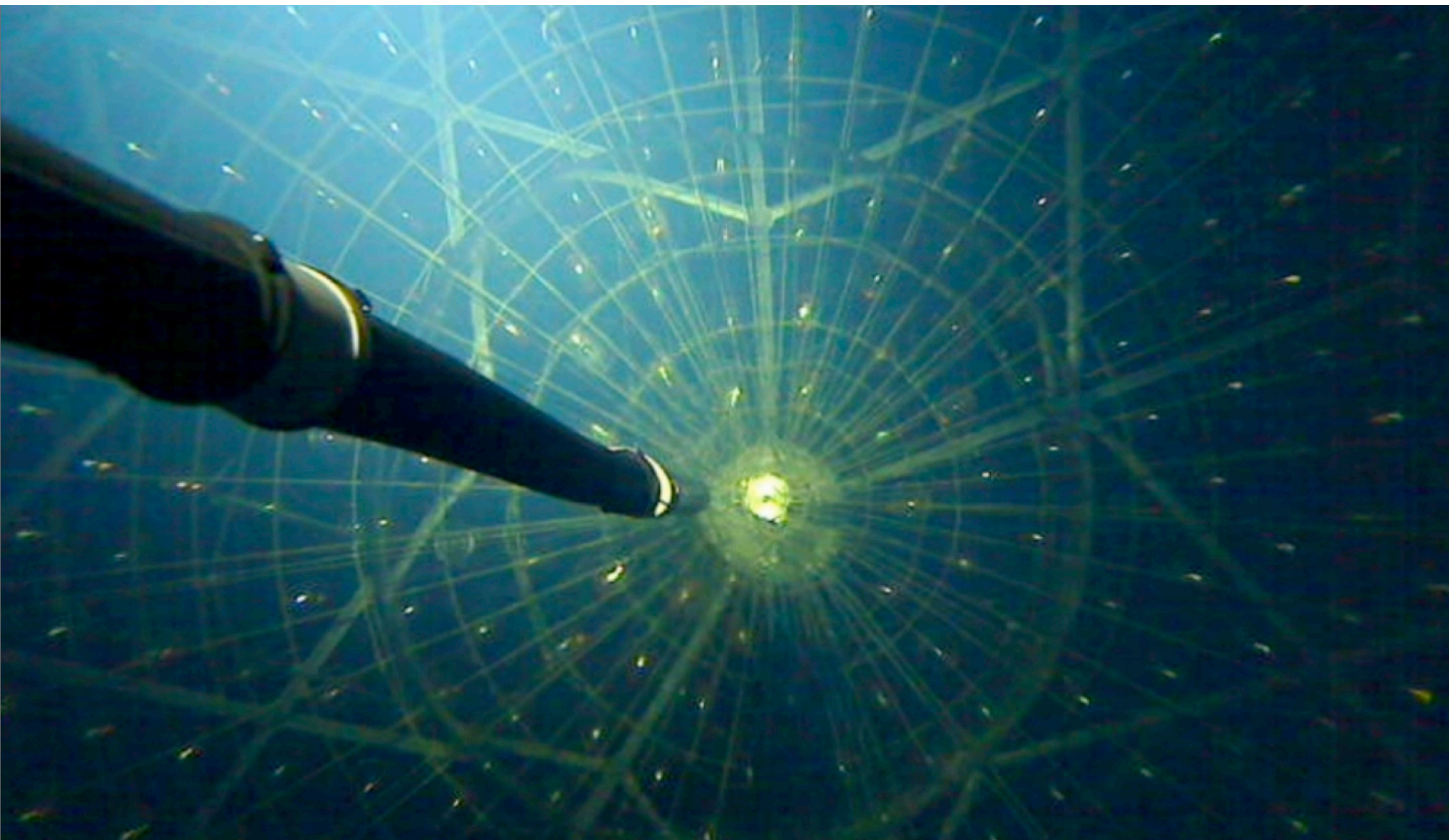
- **running detector: start quickly**
- **pure LS & 9m radius active shield**
 $U < 3.5 \times 10^{-18} \text{ g/g}$, $\text{Th} < 5.2 \times 10^{-17} \text{ g/g}$
- **high scalability**
replacement of a mini balloon
off-measurement

Why ^{136}Xe

- Good solubility to LS (**3wt%**)
- Chemically stable (easy to handle)
- Establishment of **enrichment method**
- Q-value is 2.46MeV -> **Low BG region in KamLAND**

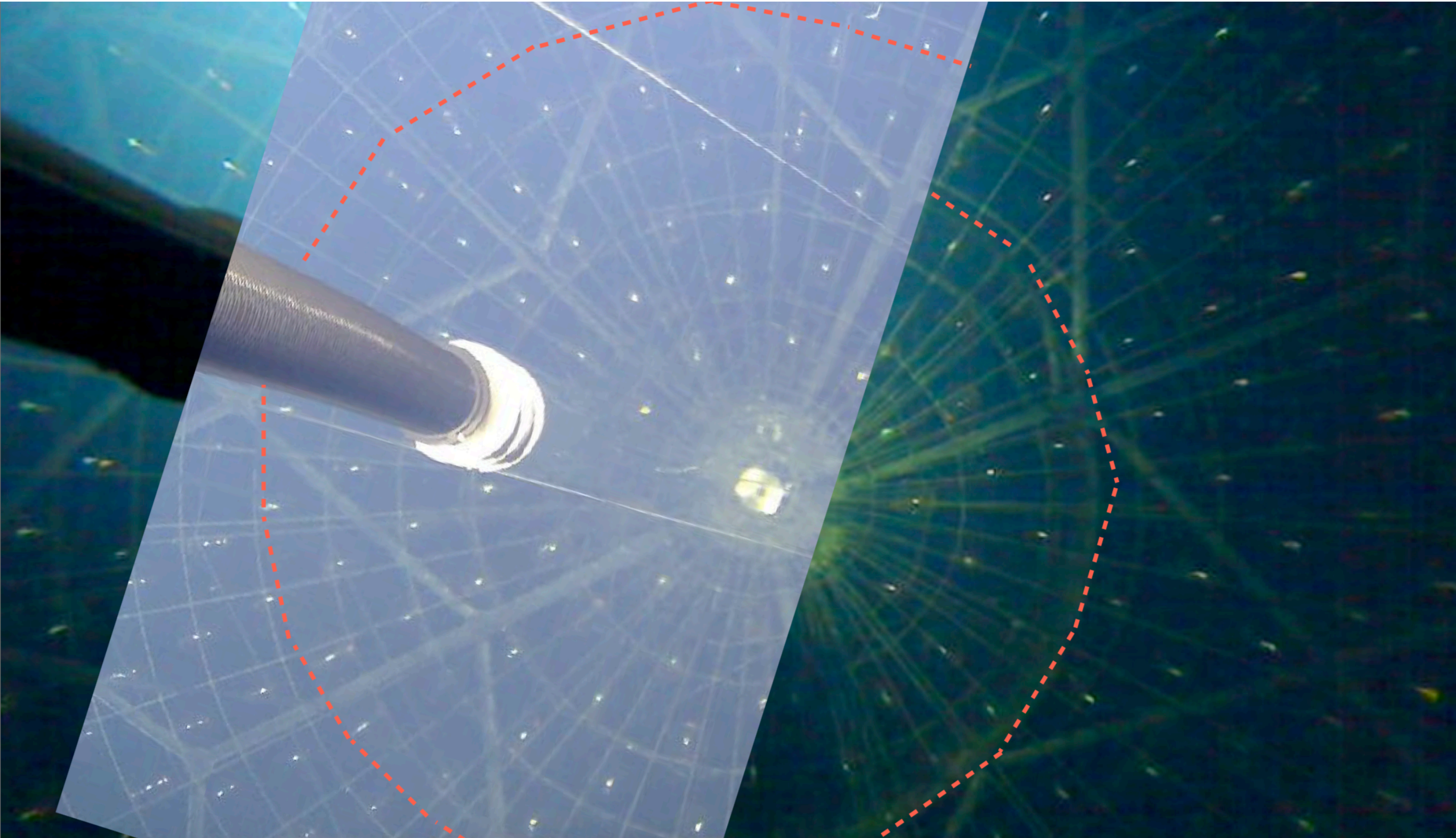


KamLAND-Zen400

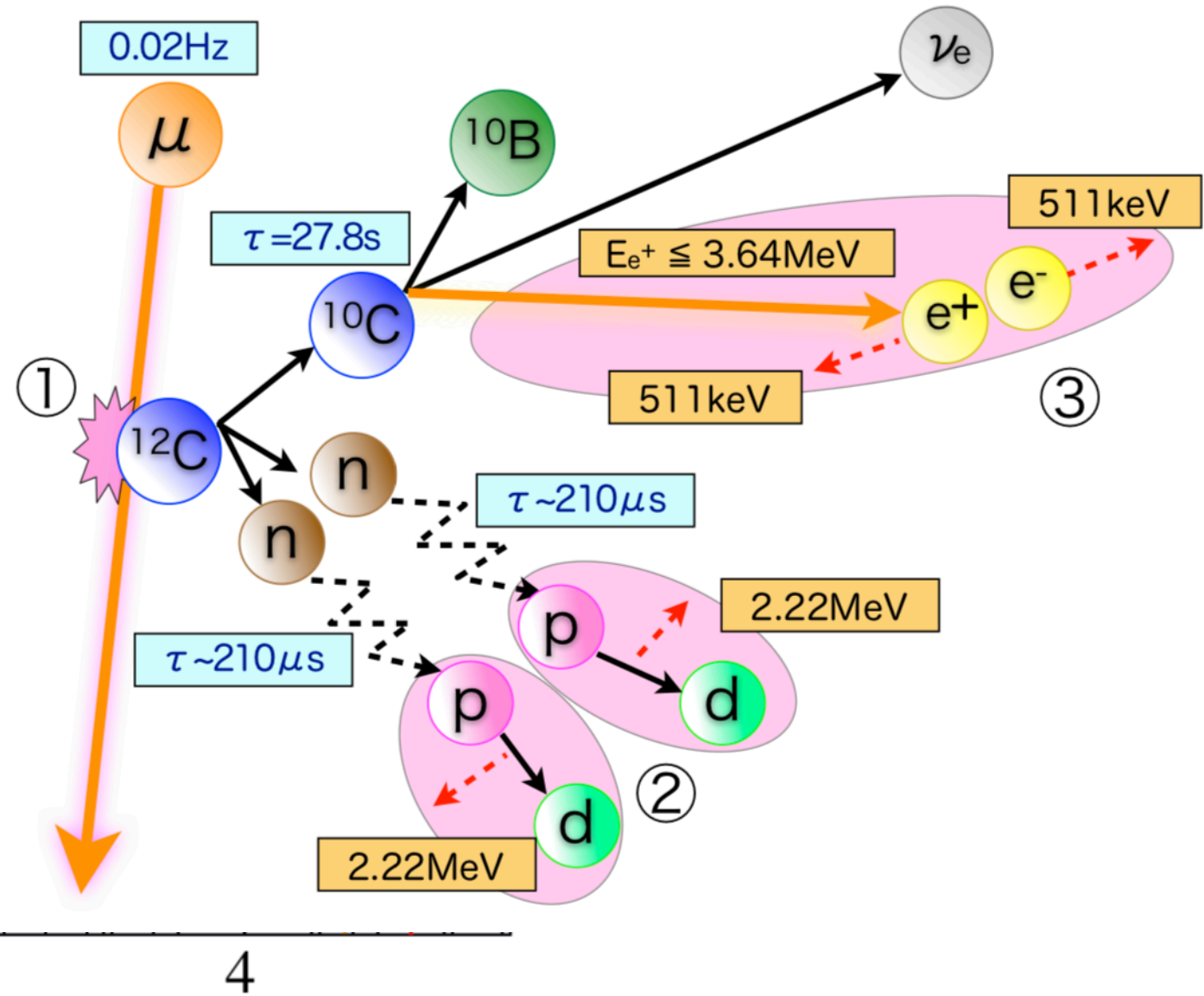
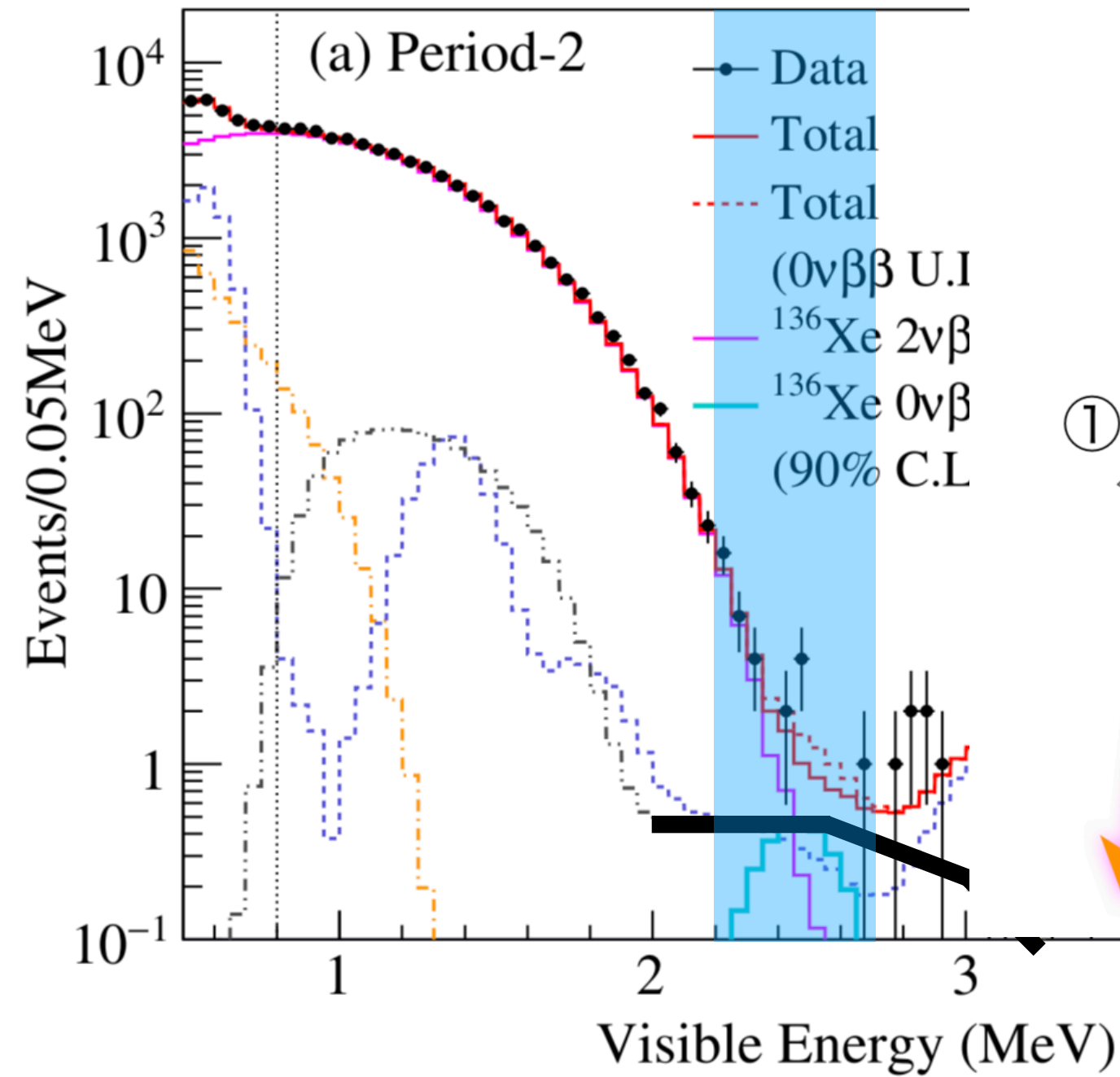


KamLAND-Zen800

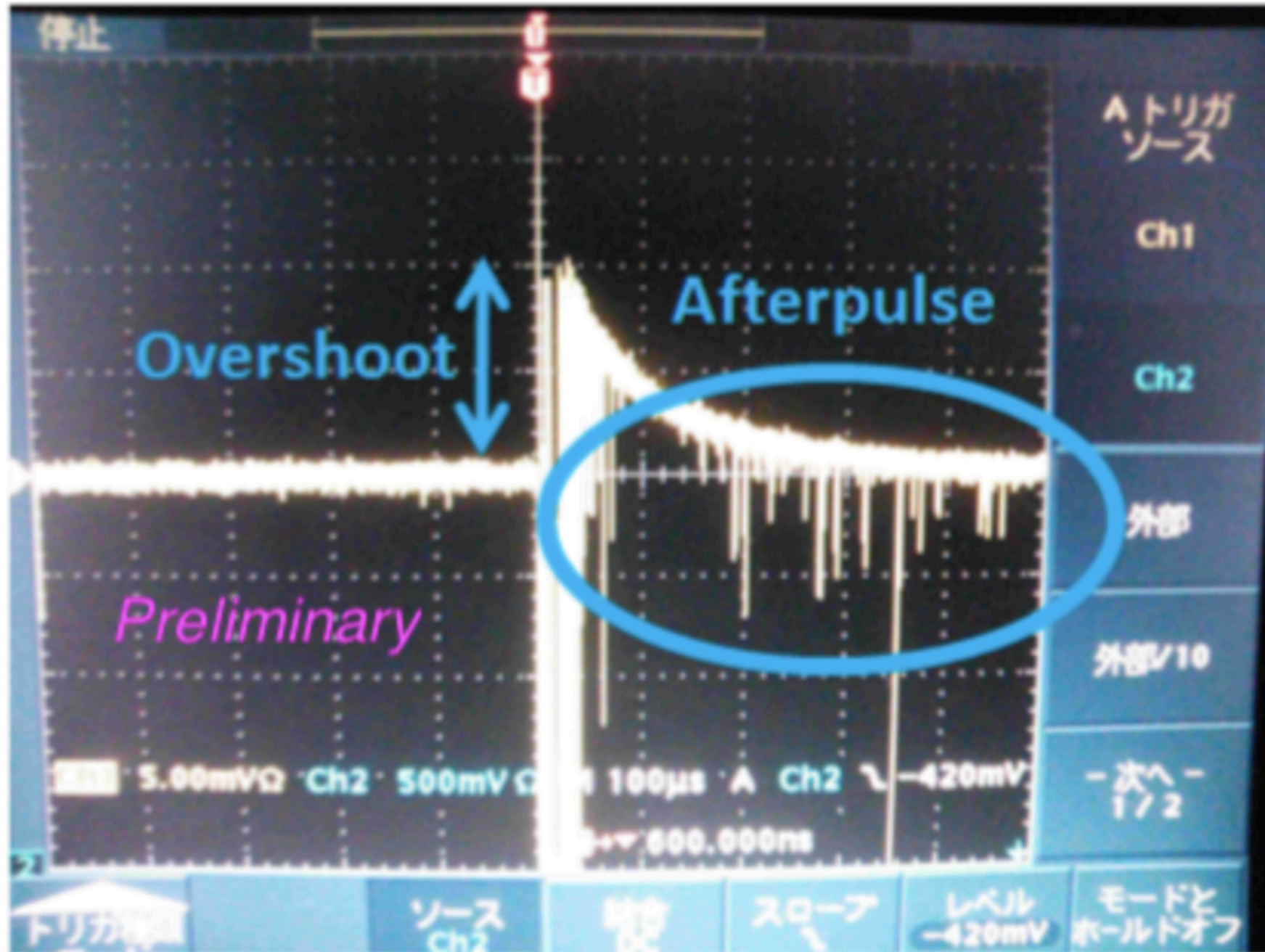
2018年5月バルーンインストール, 2019年1月Xe入れ終了



KamLAND-Zen400 Spectrum



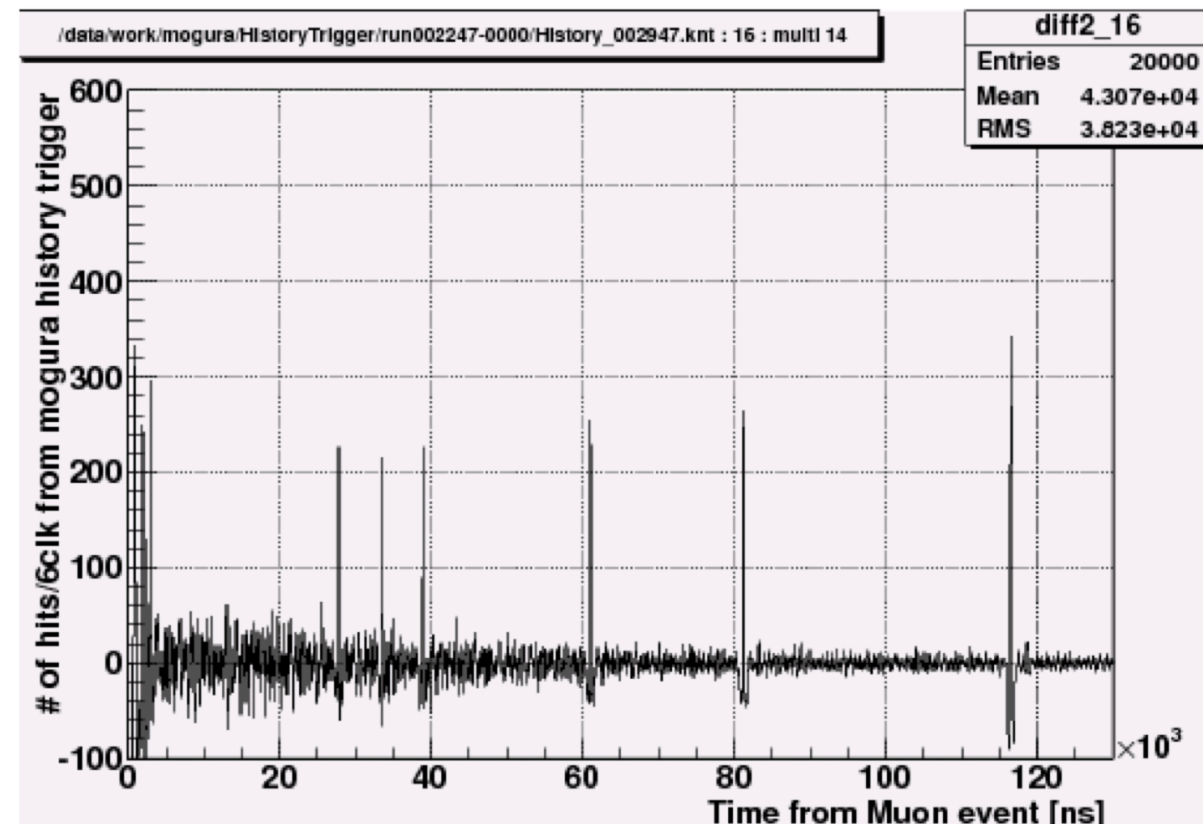
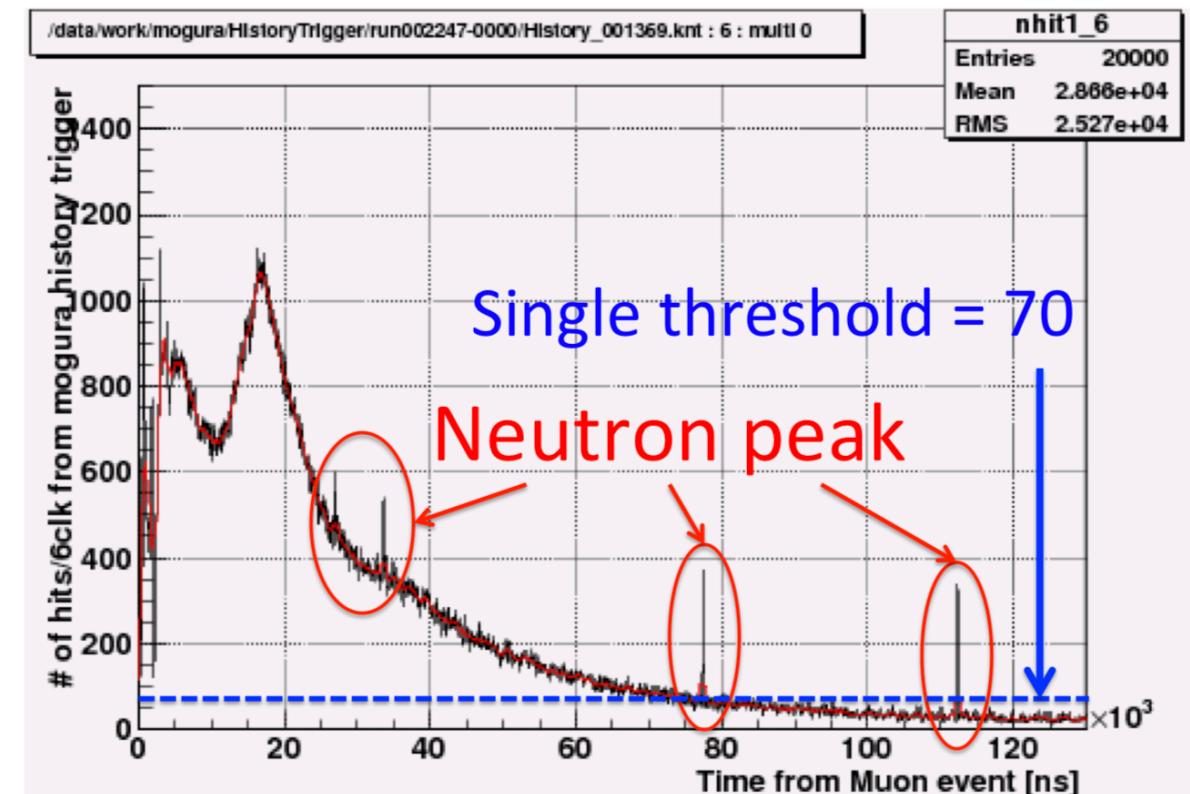
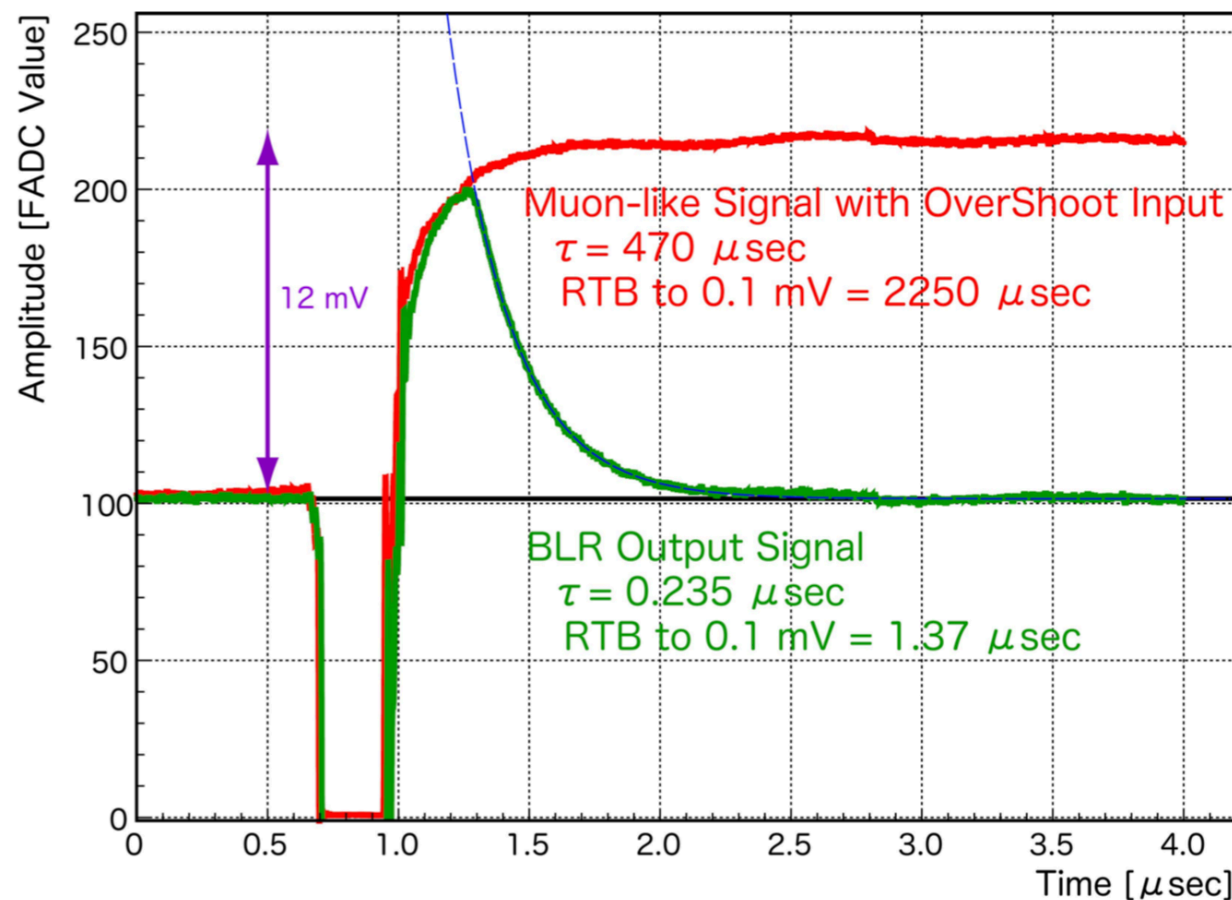
n 中性子検出の困難



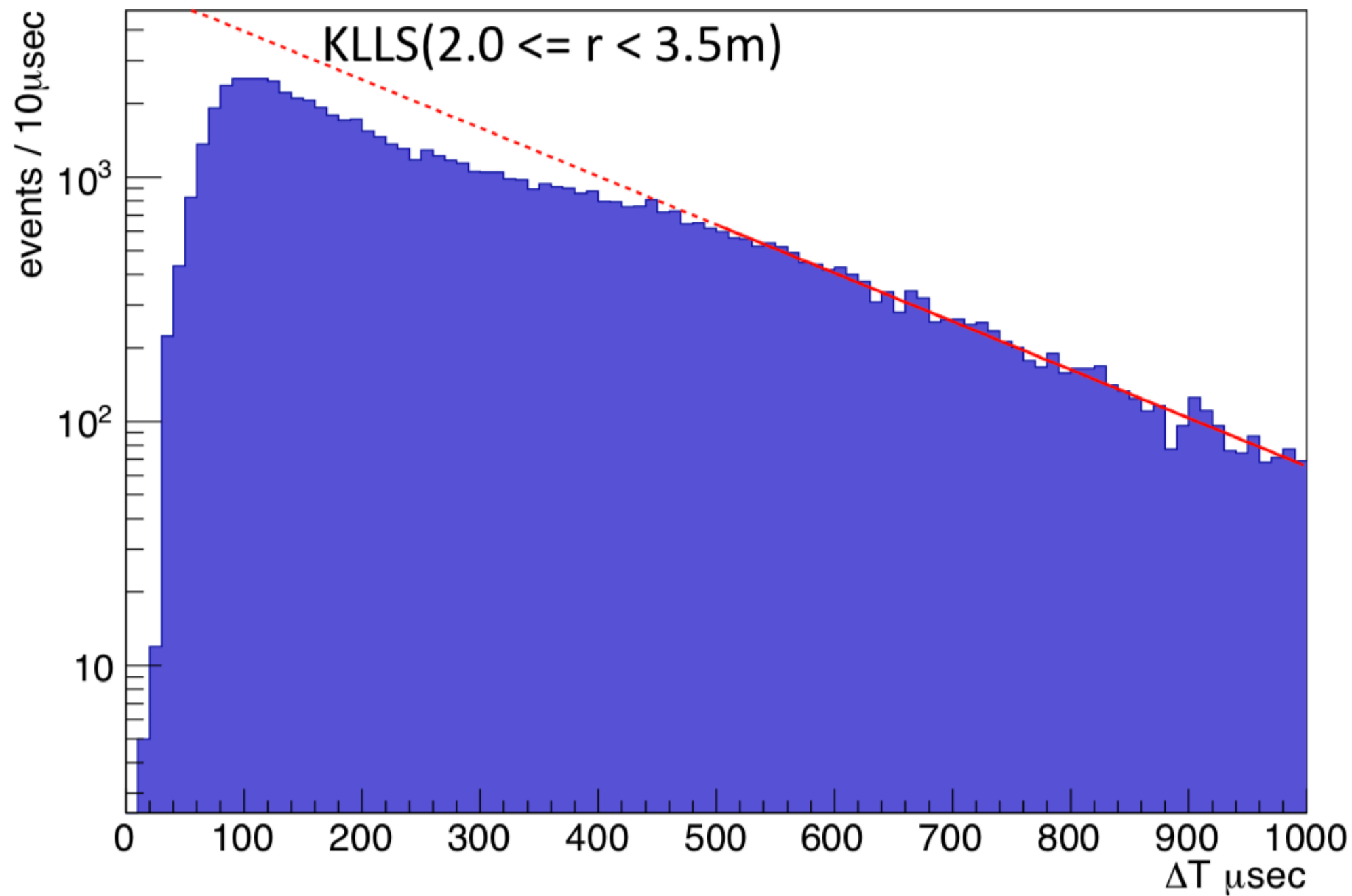
現在の対応方法

アナログ回路によるベースライン安定化

トリガー判定の工夫



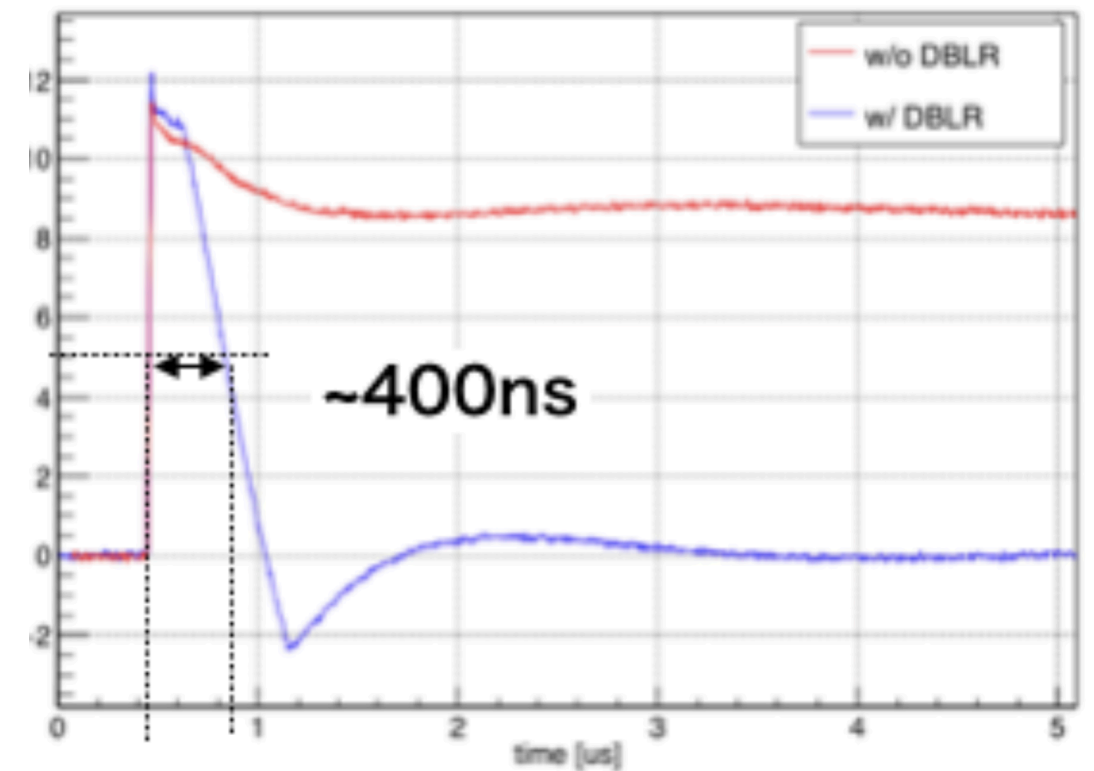
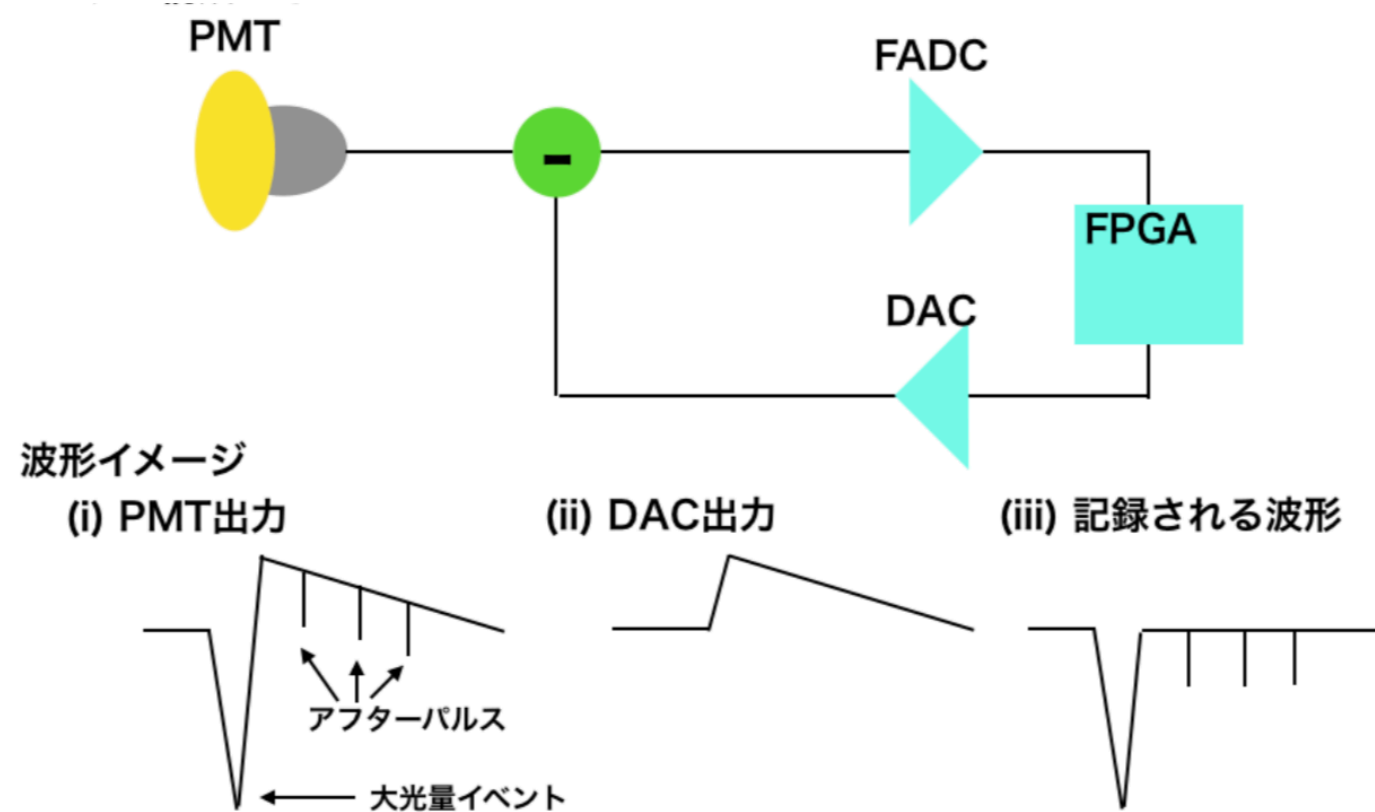
それでも



結果として10Cのタギング率は**65%**

次期電子回路

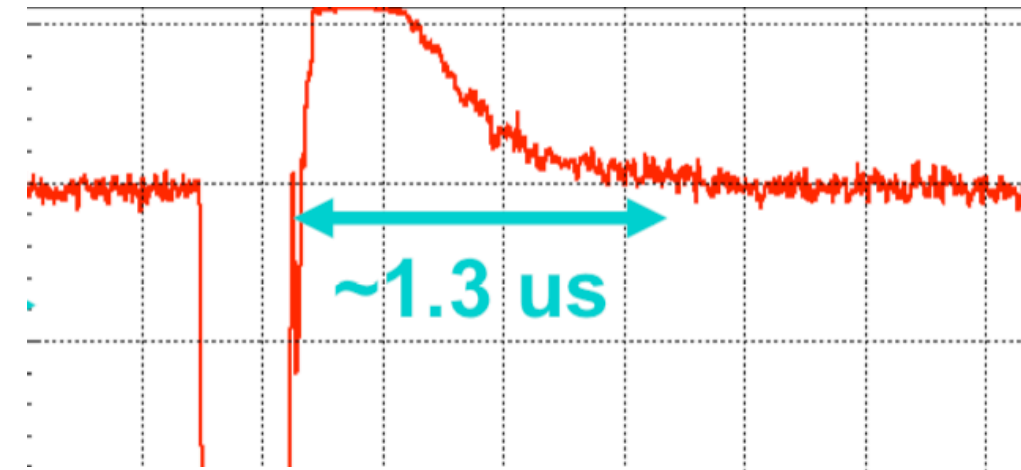
デジタル信号処理によるベースライン安定化



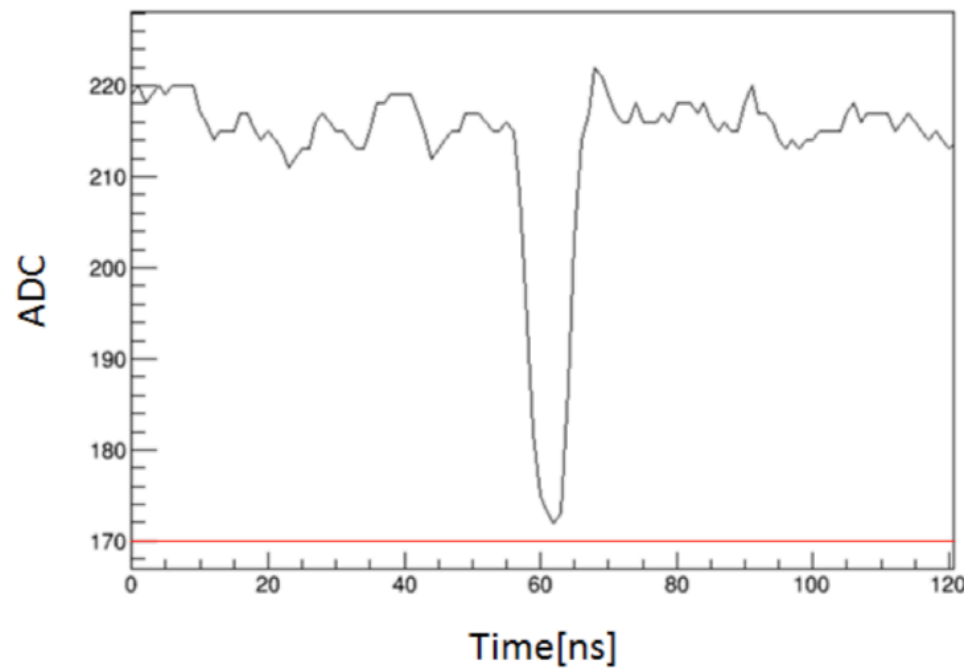
Zen800でも2-Zenでも使える!!

次期電子回路

オーバーシュート中のヒット判定



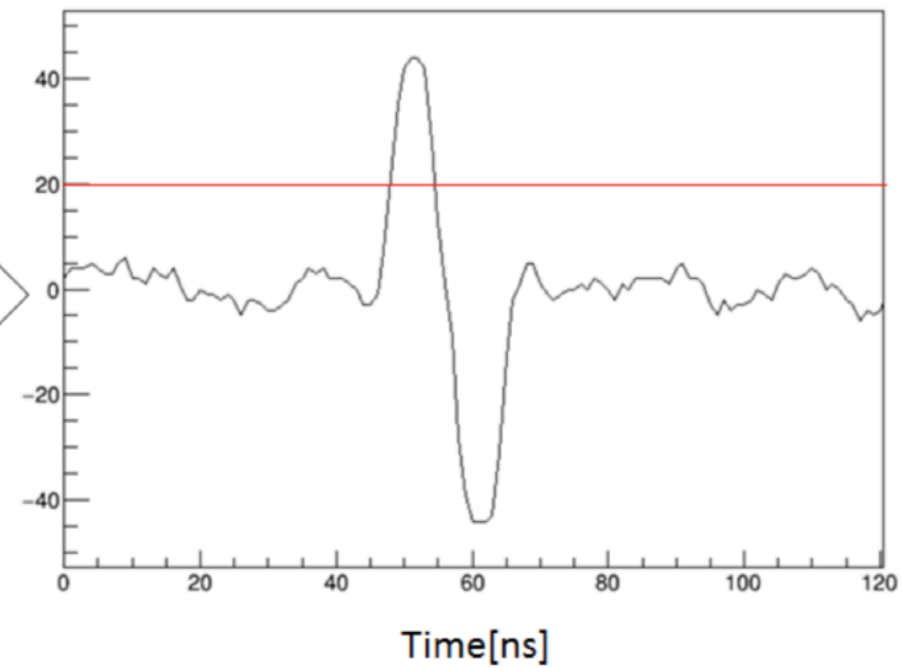
従来の判定法



微分をとる

8ns前のADC値との差

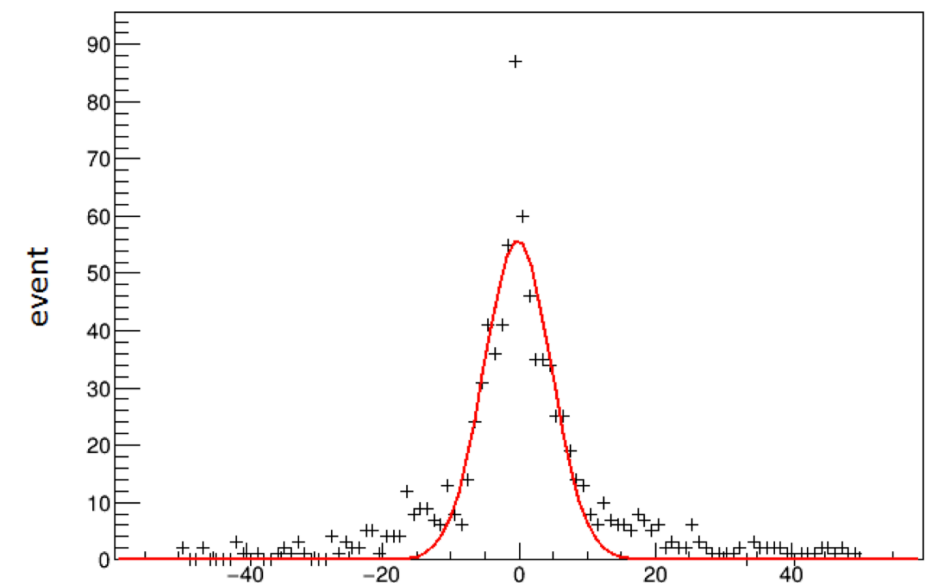
微分ヒット判定



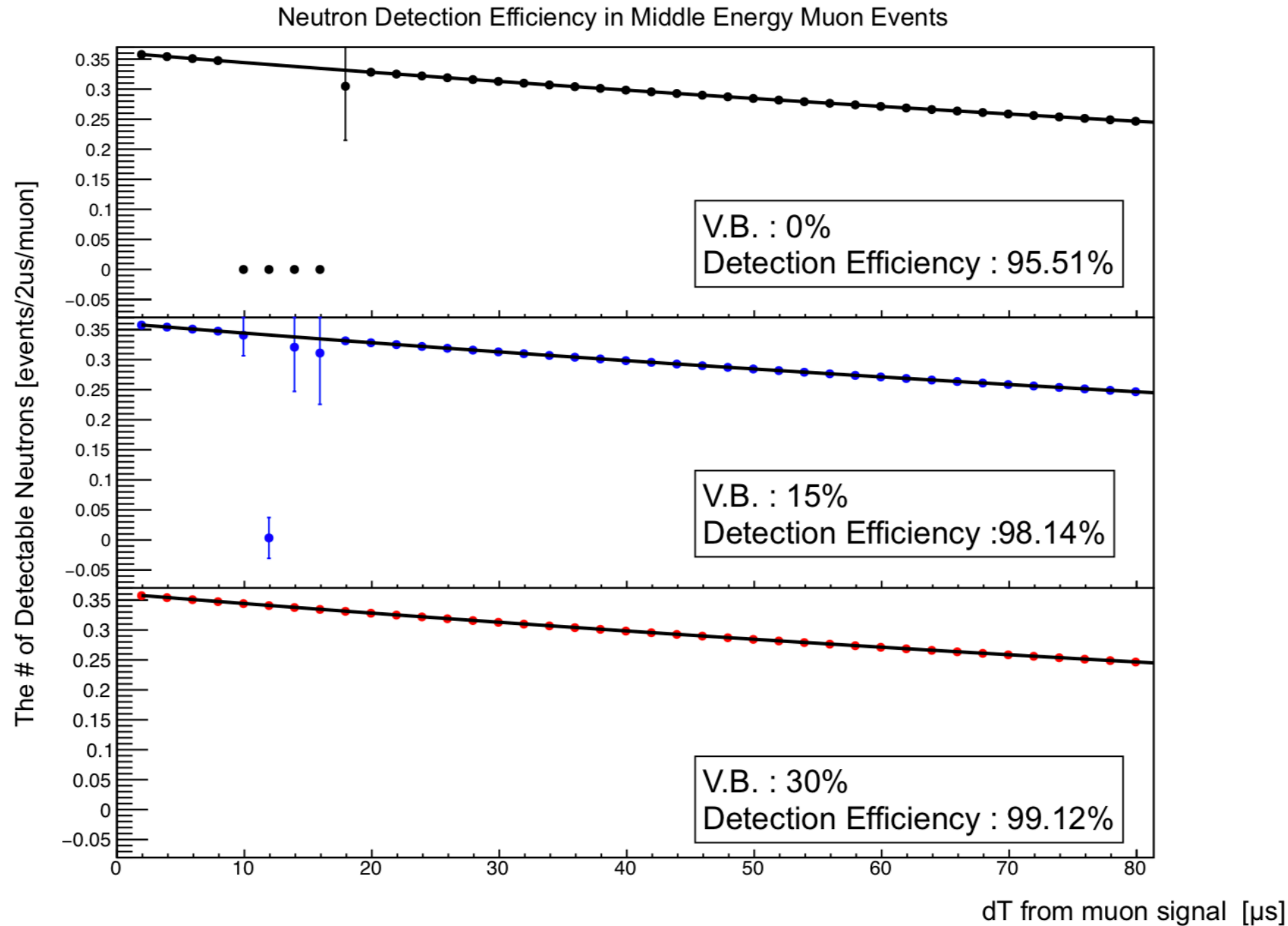
eshold: 20
erpolation: linear
f waves: 101
l(averaged): 0

ボード内コインシデンスを要求

近隣PMTでの広がり10ns程度



次期電子回路



n検出効率: 95% -> 10Cタグ効率: 83%
(解析方法の工夫と合わせて96%以上を見込む)

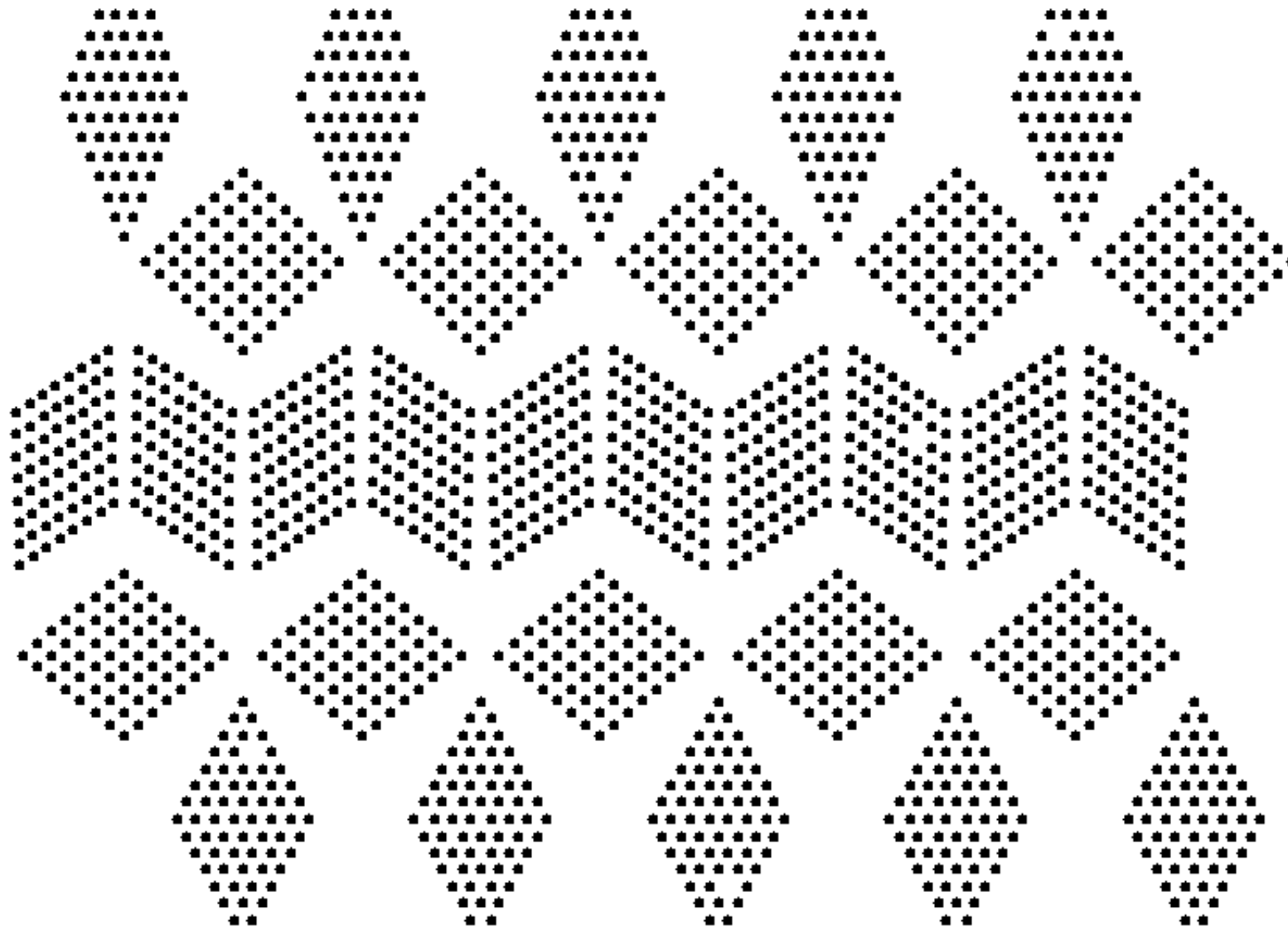
さらなる希望

On-board “r” reconstruction

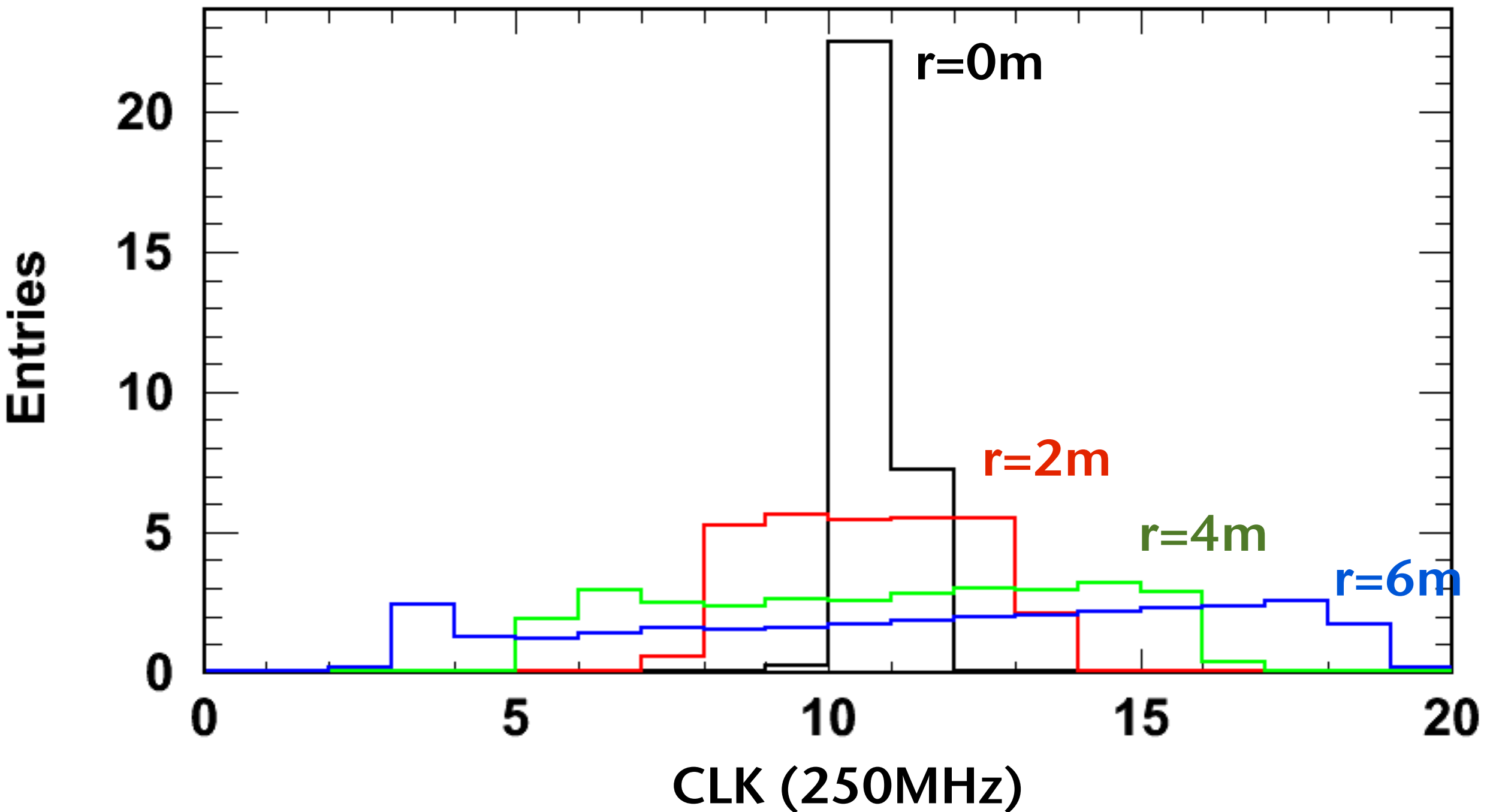
バルーンを無くせる -> LS量を増やせる!!

-> 地球 v や超新星 v の統計量増加!!

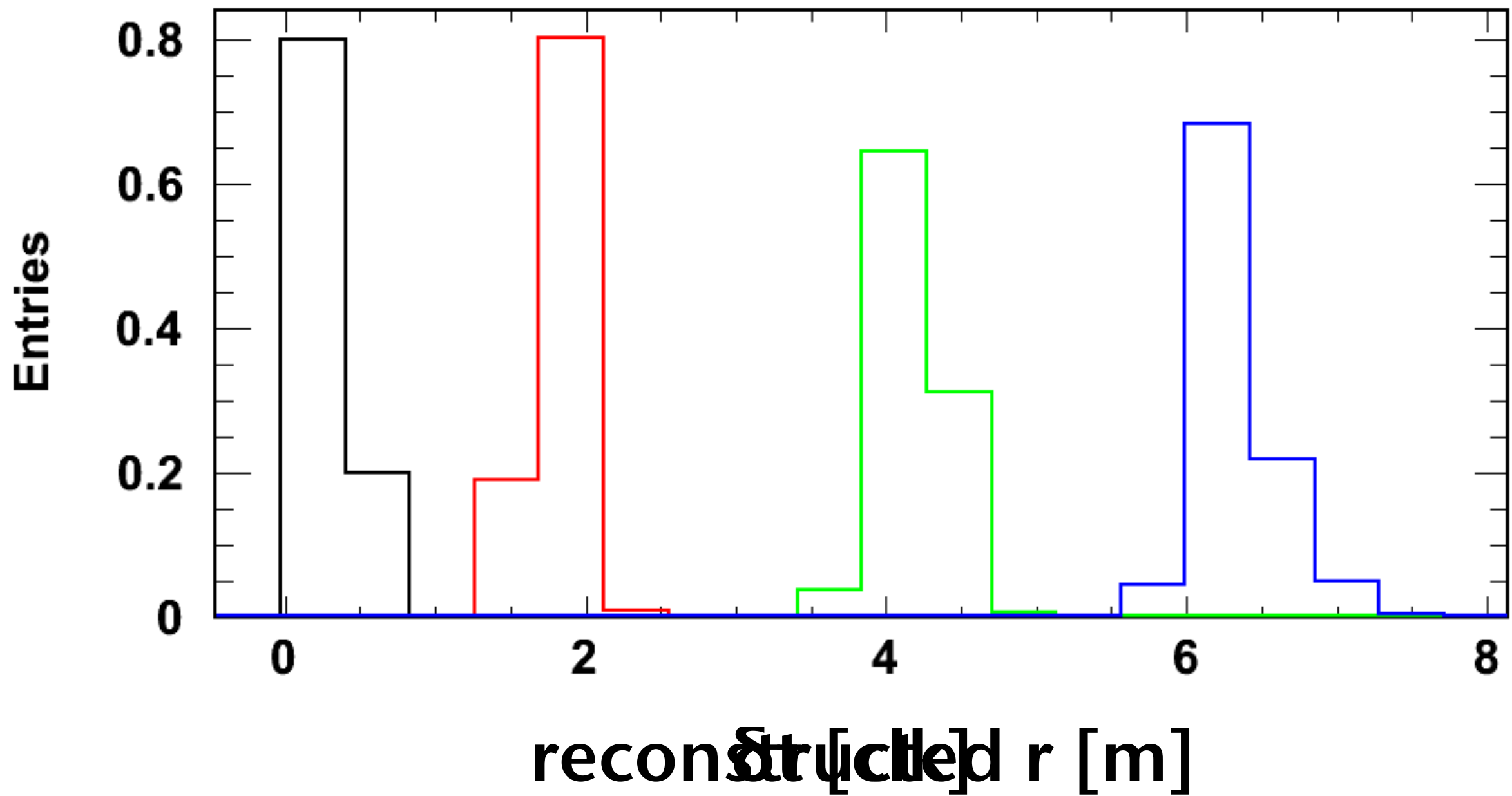
方法: ダイヤモンド単位でのヒット時間



Diamond HitTiming



Definition: $\delta t = t_{\text{first}} - t_{\text{last}}$



Rough estimation: $\Delta r < 30\text{cm}@10\text{MeV}$

さらなる夢

ソフトウェアトリガー

Zynqによる高度なトリガー処理

例: 深層学習で α イベントの識別

拡張できるようにFADC (フロントエンド)回路の設計

ミューオンの崩壊電子の測定

20 MeV以上のキャリブレーション

予定

本新学術: 概念設計&機能実証

今後: KamLANDへの導入

- 2019年度: FADC, Trigger, DAQ開発
- 2020年度: システムテスト (FADC, Trigger, DAQ)
- 2021-2022年度: 生産&全数評価
- 2023年度: インストール&コミッショニング



KamLAND検出器



KamLANDと近傍超新星爆発



KamLANDの次期電子回路



まとめ

まとめ

KamLANDは(近傍)超新星 ν 観測にユニークな役割
全フレーバーのスペクトル復元, 前兆 ν 観測

前兆 ν 速報: LIGO, Virgo, SNOなどに
DAQ改良: 間引き, PMTヒット数記録

KamLANDの次世代電子回路開発

近傍超新星 ν 観測, $0\nu\beta\beta$ 観測の高感度化

- ☒ 概念設計&機能実証
- ☐ システムテスト
- ☐ 生産&全数評価
- ☐ インストール&コミッショニング