


KamLAND実験に おける計測システム

石徹白晃治 (東北大RCNS)

計測システム研究会@核融合研究所, 2013年7月10-11日

KamLAND Collaboration

A. Gando,¹ Y. Gando,¹ H. Hanakago,¹ H. Ikeda,¹ K. Inoue,^{1, 2} K. Ishidoshiro,¹ H. Ishikawa,¹ M. Koga,^{1, 2}
R. Matsuda,¹ S. Matsuda,¹ T. Mitsui,¹ D. Motoki,¹ K. Nakamura,^{1,2} A. Obata,¹ A. Oki,¹ Y. Oki,¹
M. Otani,¹ I. Shimizu,¹ J. Shirai,¹ A. Suzuki,¹ Y. Takemoto,¹ K. Tamae,¹ K. Ueshima,¹ H. Watanabe,¹
B.D. Xu,¹ S. Yamada,¹ Y. Yamauchi,¹ H. Yoshida,¹ A. Kozlov,² S. Yoshida,³ A. Piepke,^{2, 4} T.I. Banks,⁵
B.K. Fujikawa,^{2, 5} K. Han,⁵ T. O'Donnell,⁵ B.E. Berger,⁶ J.G. Learned,⁷ S. Matsuno,⁷ M. Sakai,⁷ Y. Efremenko,^{2, 8} H.J.
Karwowski,⁹ D.M. Markoff,⁹ W. Tornow,^{2, 9} J.A. Detwiler,¹⁰ S. Enomoto,^{2, 10} and M.P. Decowski,^{2, 11}



¹Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan
²Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), University of Tokyo, Kashiwa, 277-8583, Japan
³Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan
⁴Department of Physics and Astronomy, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama 35487, USA
⁵Physics Department, University of California, Berkeley, and
Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA
⁶Department of Physics, Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523, USA
⁷Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii 96822, USA
⁸Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37996, USA
⁹Triangle Universities Nuclear Laboratory, Durham, North Carolina 27708, USA; Physics Departments at Duke
University, Durham, North Carolina 27705, USA; North Carolina Central University, Durham, North Carolina
27701, USA and the University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, North Carolina 27599, USA
¹⁰Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, University of Washington, Seattle, Washington 98195, USA
¹¹Nikhef and the University of Amsterdam, Science Park, Amsterdam, the Netherlands

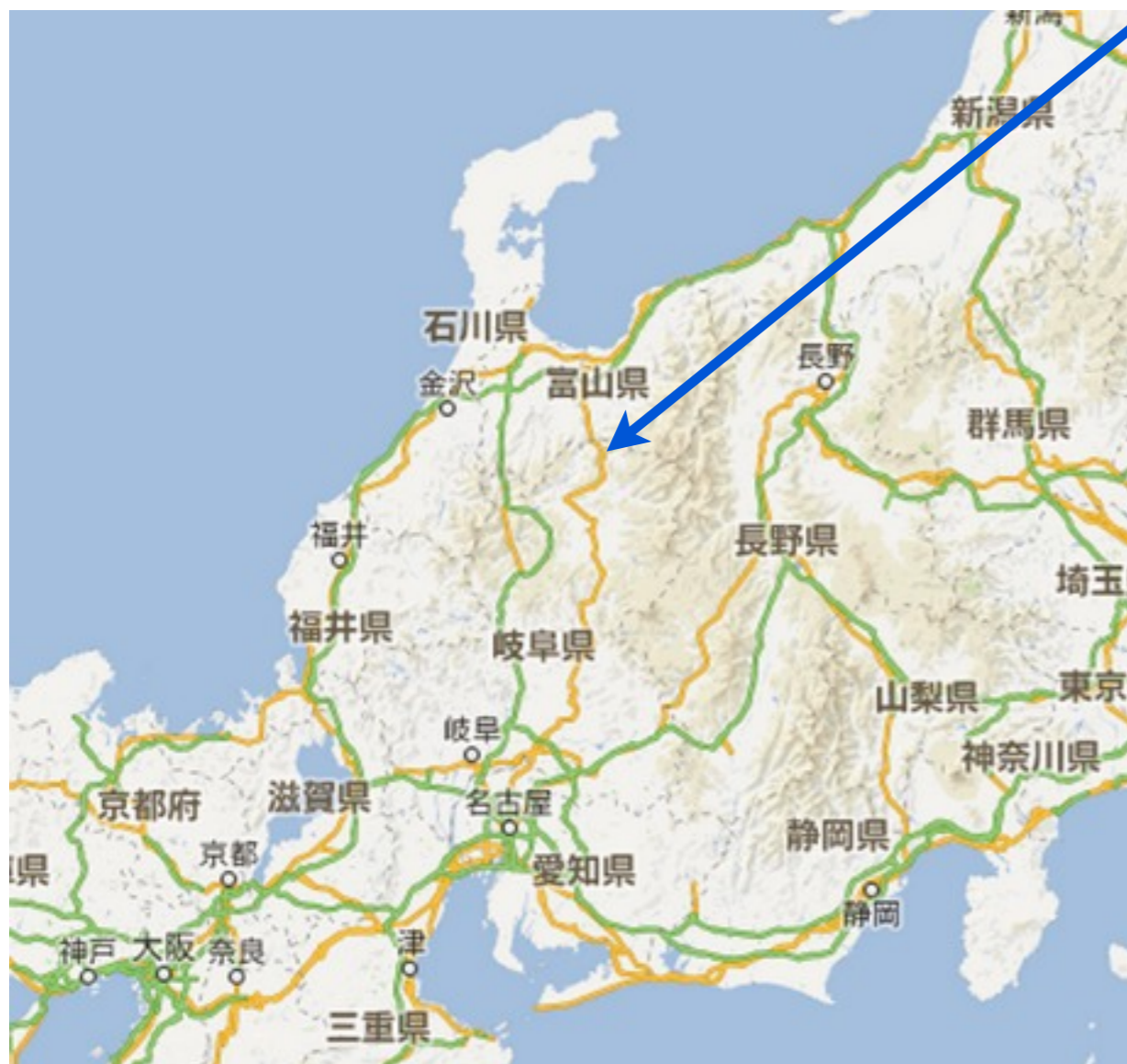
今日の話

KamLAND/KamLAND-Zen実験

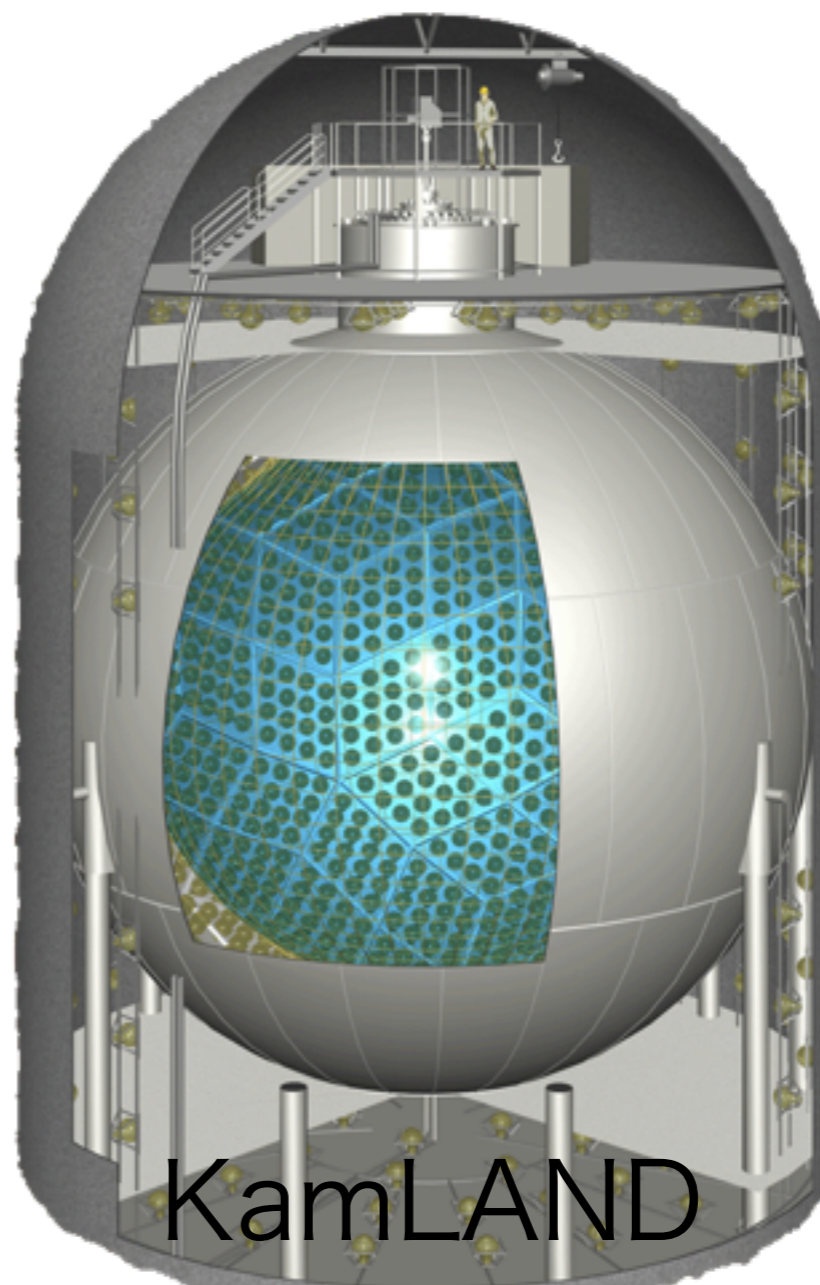
KamLANDの計測システム

行っているR&D

KamLAND



岐阜県飛騨市神岡町



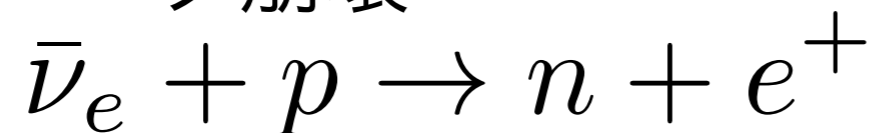
KamLAND

1kt液体シンチレータ型ニュートリノ検出器

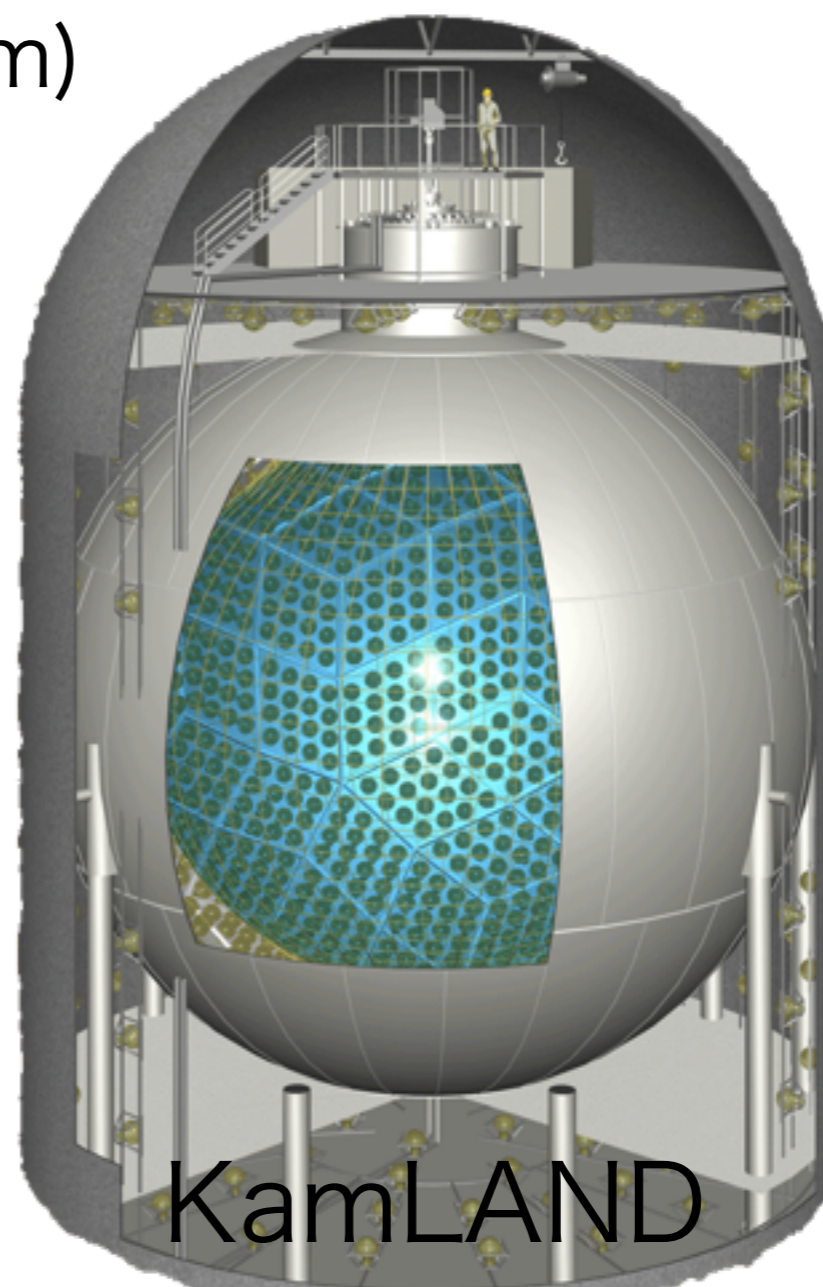
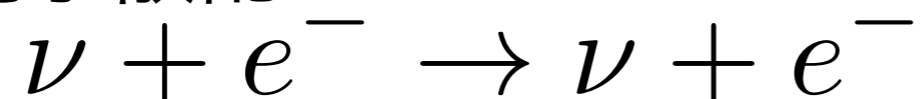
- 地下~1,000m => 宇宙線遮蔽
- Φ 18mステンレスタンク (μ vetoのためのOD検出器)
- Φ 13mバルーン (厚さ125 μ m)
- 1,325 + 554 PMTs

検出原理

- 逆ベータ崩壊

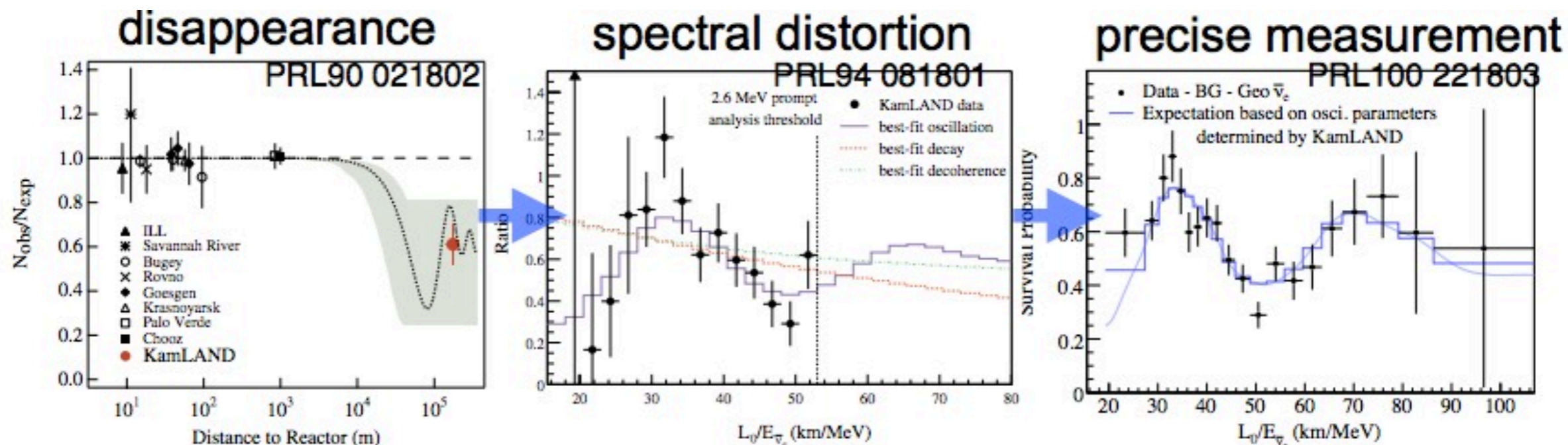


- 電子散乱

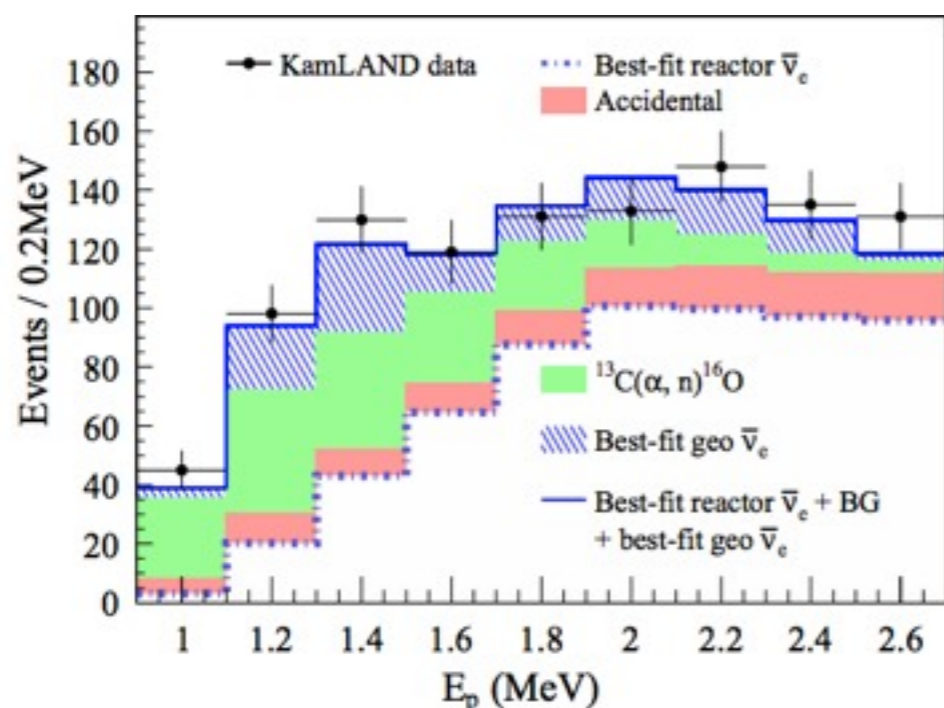


KamLANDの成果

ニュートリノ振動の精密測定

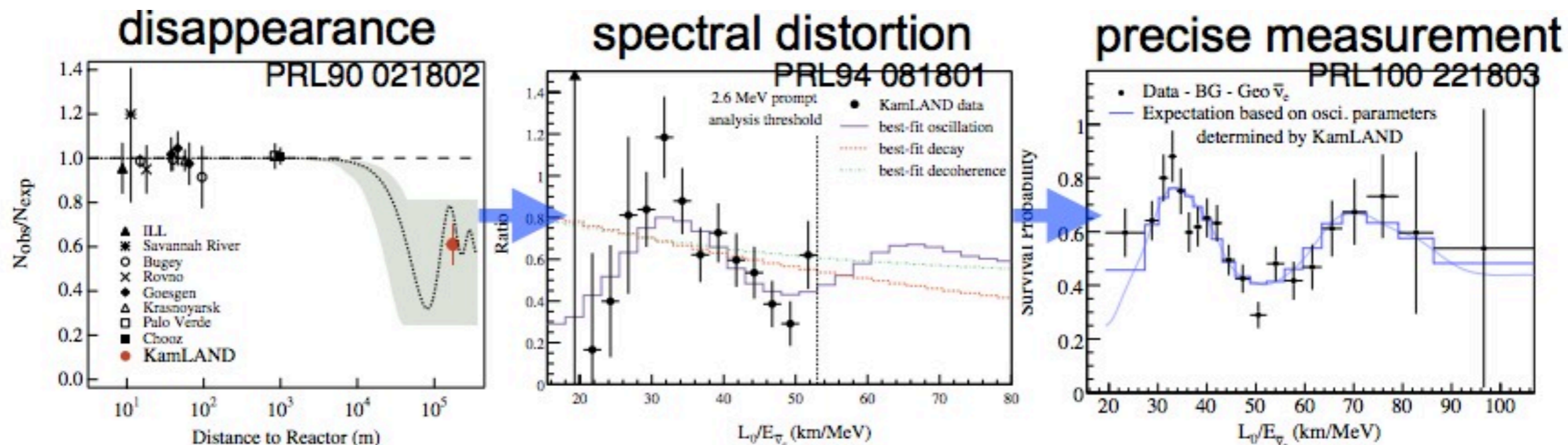


地球ニュートリノの検出

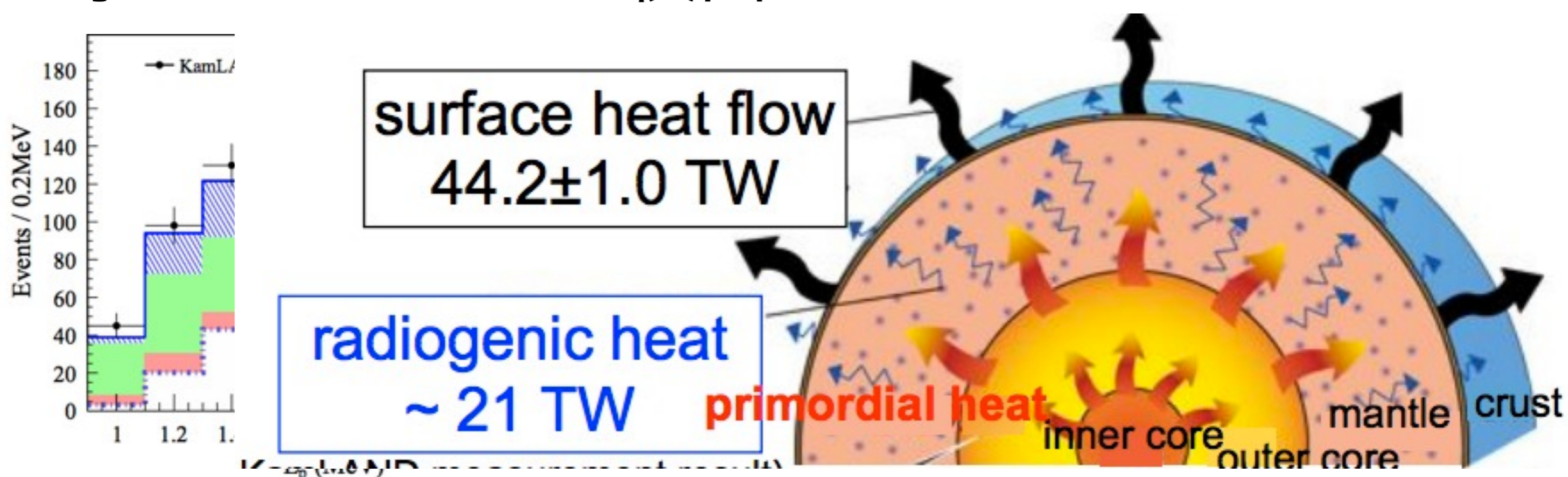


KamLANDの成果

ニュートリノ振動の精密測定



地球ニュートリノの検出

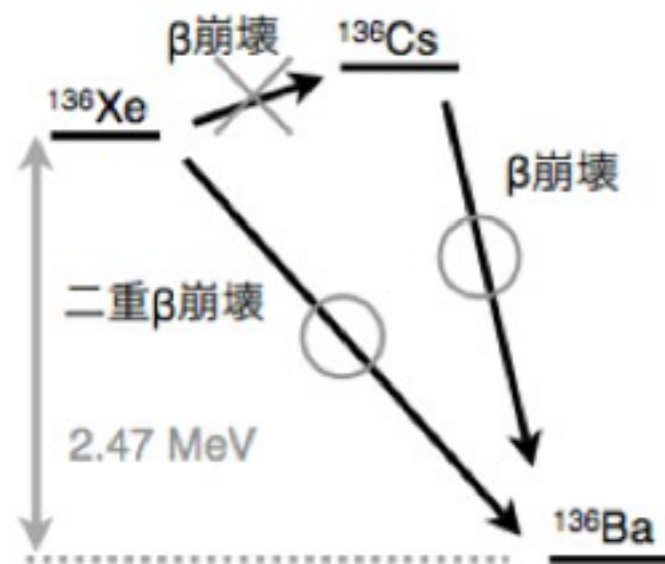


KamLAND-Zen

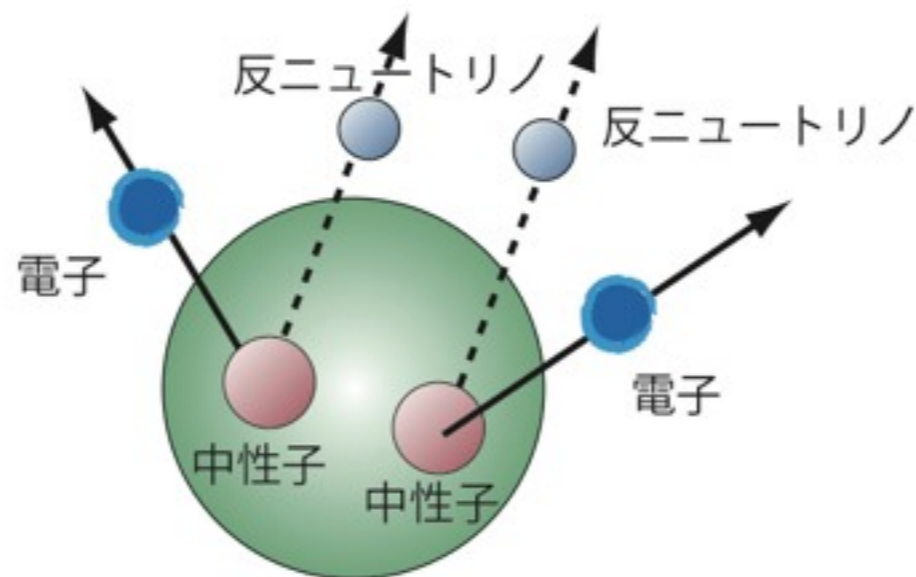
ニュートリノの正体に迫る

- 粒子と反粒子は別 => ディラック粒子
- 粒子と反粒子は同じ => マヨナラ粒子

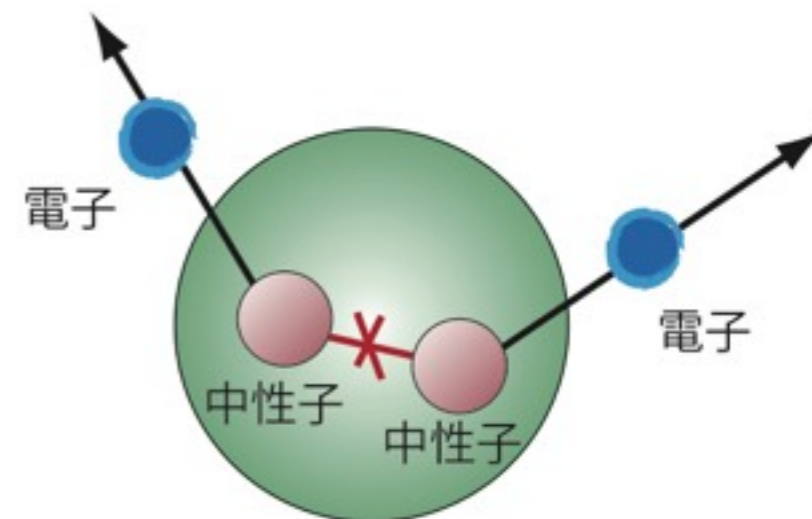
方法: ^{136}Xe の2重ベータ崩壊



通常の2重ベータ崩壊



ニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊



ニュートリノがマヨナラ粒子である場合のみ起こる

KamLAND-Zen

物理的意義

- ニュートリノ質量の決定
- ニュートリノの軽い質量
- 物質優勢宇宙の謎

Xe含む液シンの導入

- $\Phi 3.1\text{m}$ のミニバルーン
- 330kgのXe

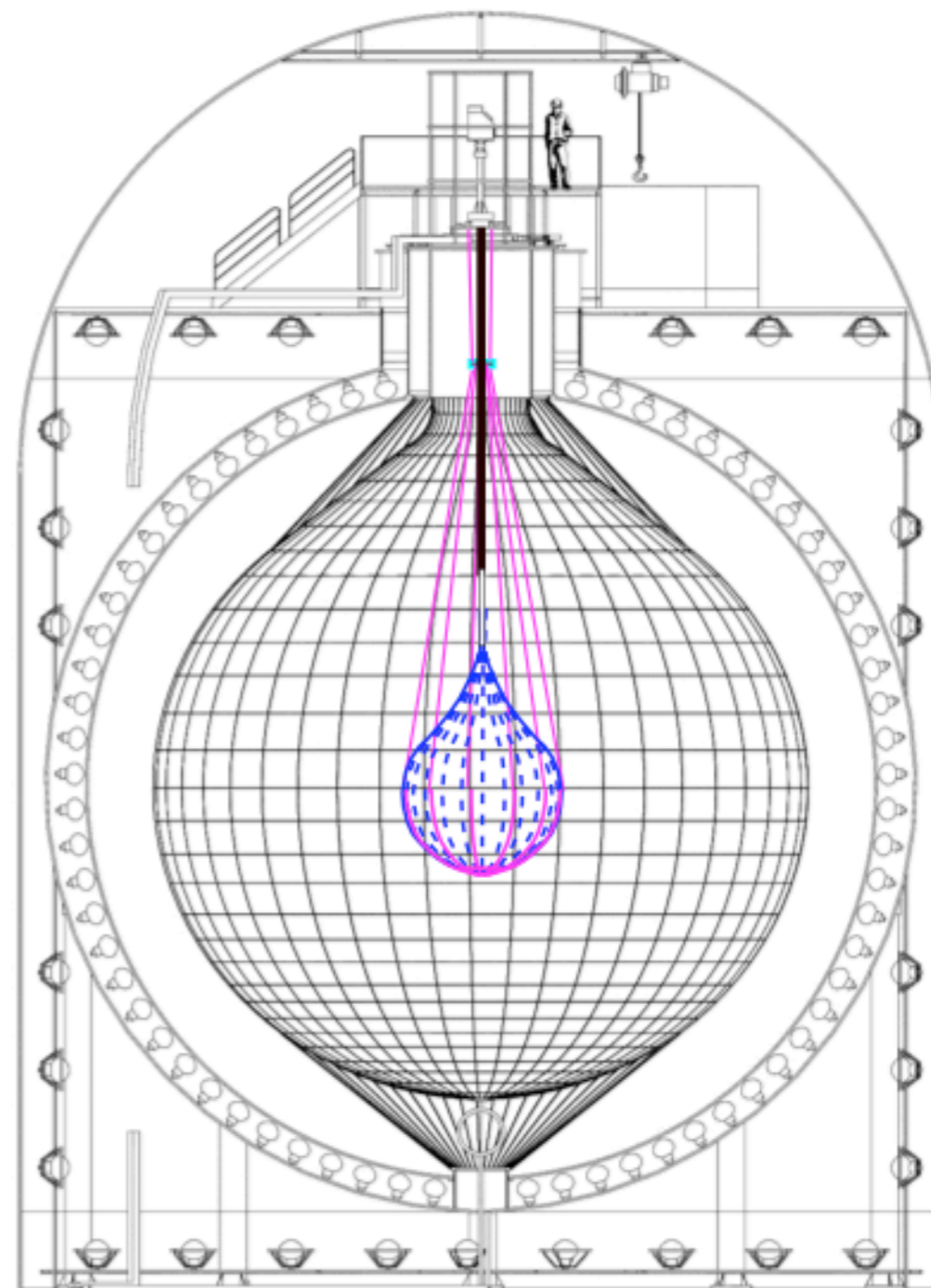
KamLAND-Zenの成果

世界最高レベルでの探索

KKDCクレームと呼ばれる

$0\nu 2\beta$ 検出主張を排除

Phys. Rev. Lett. 110, 062502 (2013)



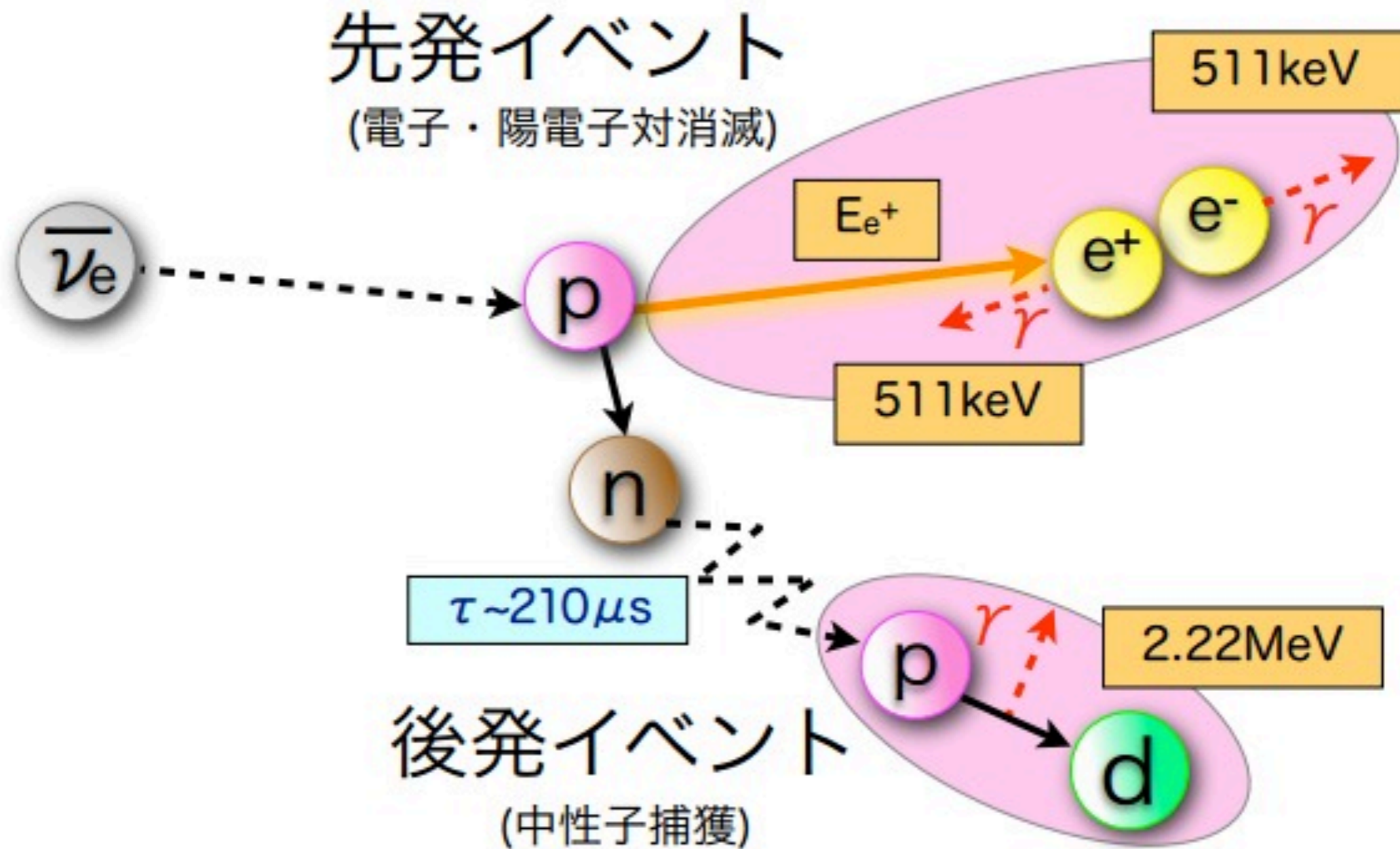
今日の話

KamLAND/KamLAND-Zen実験

KamLANDの計測システム

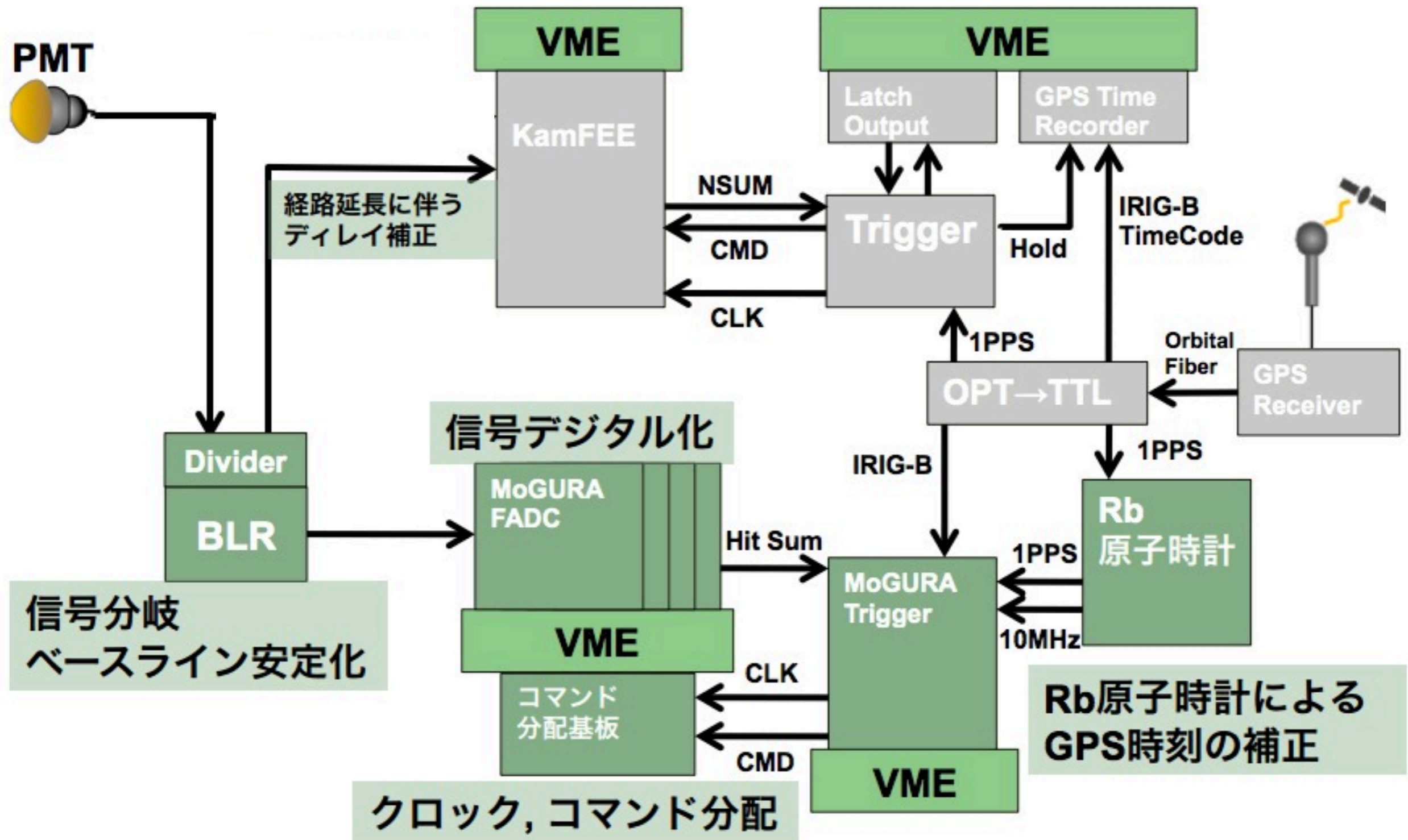
行っているR&D

逆ベータ崩壊



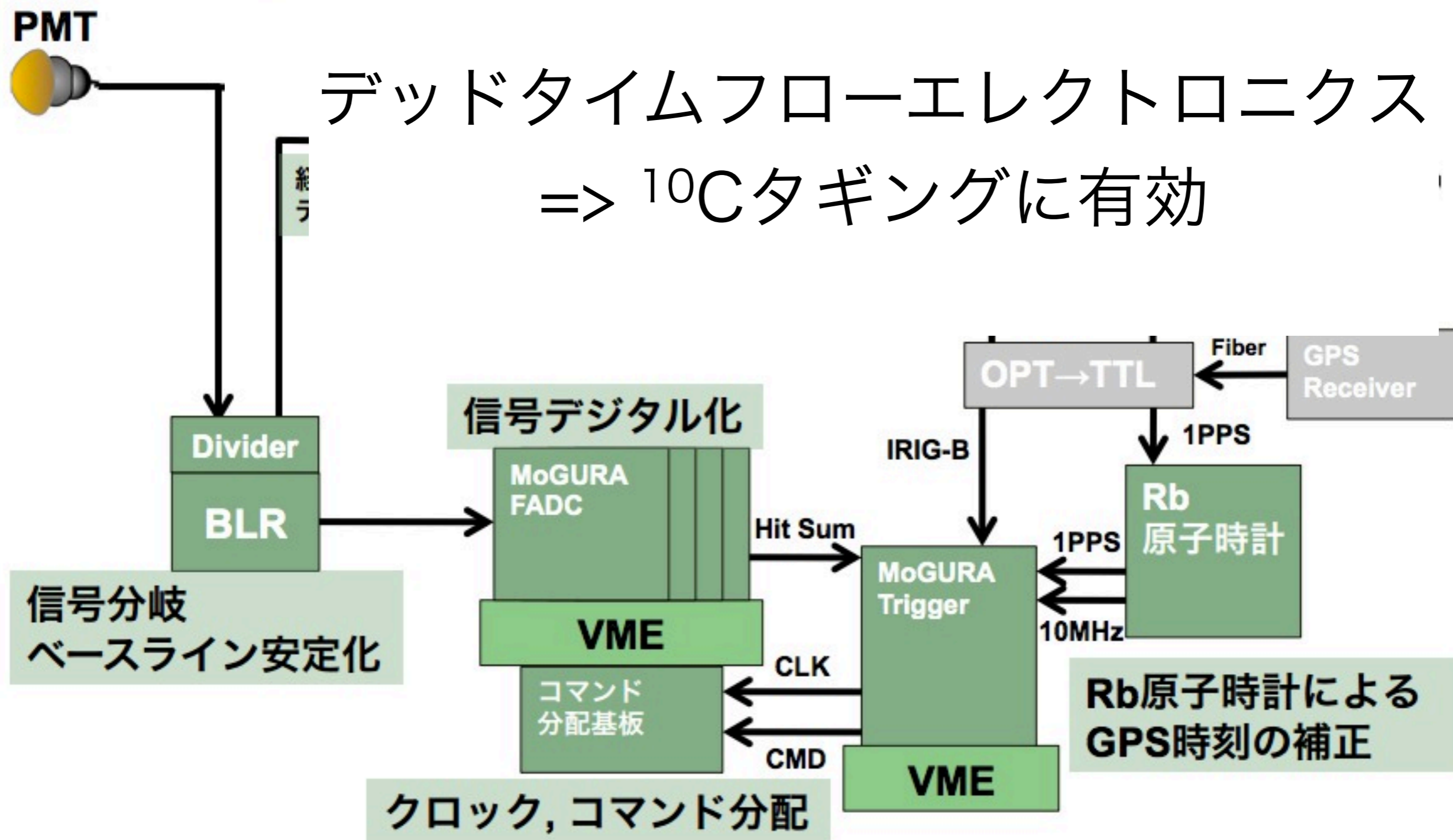
超低バックグラウンドの実現

エレクトロニクス

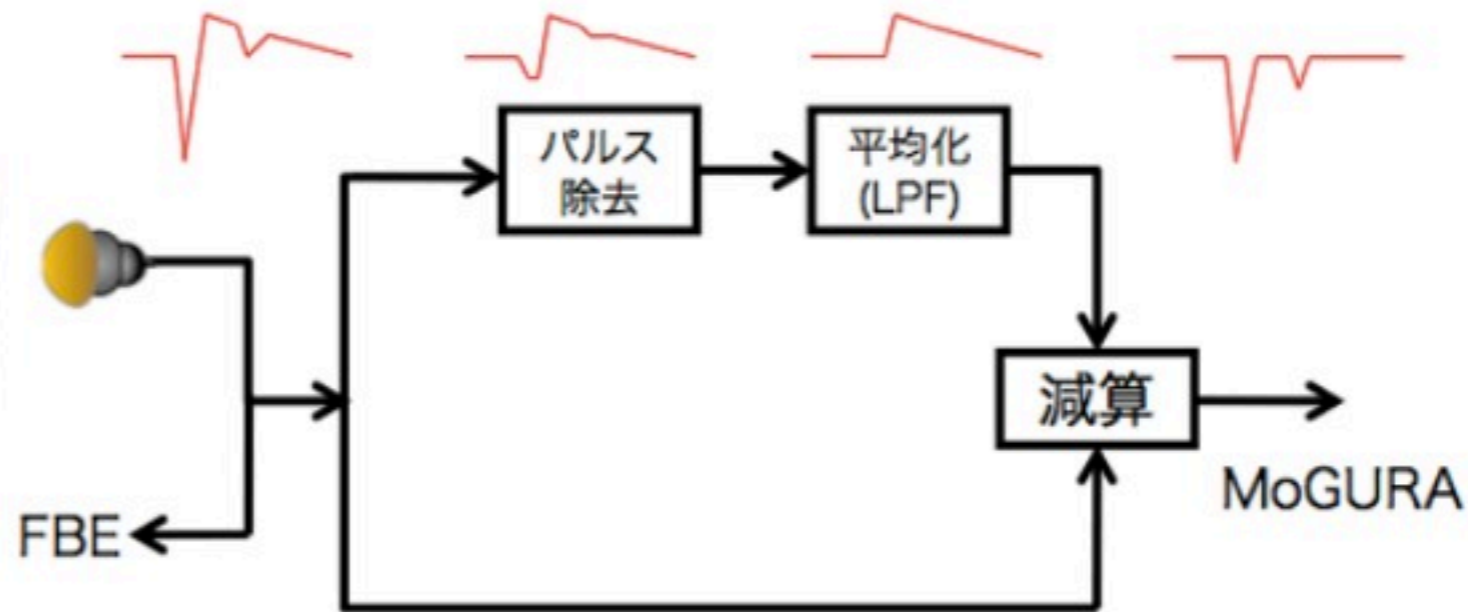
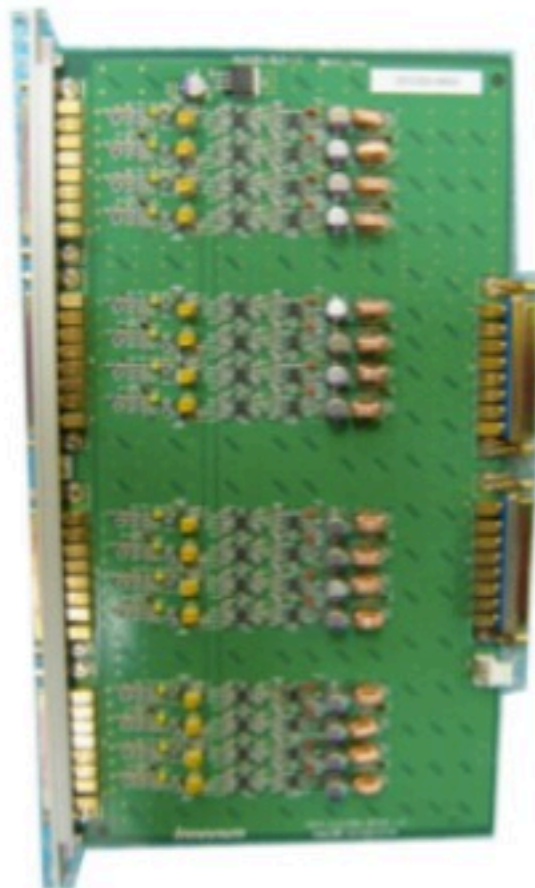
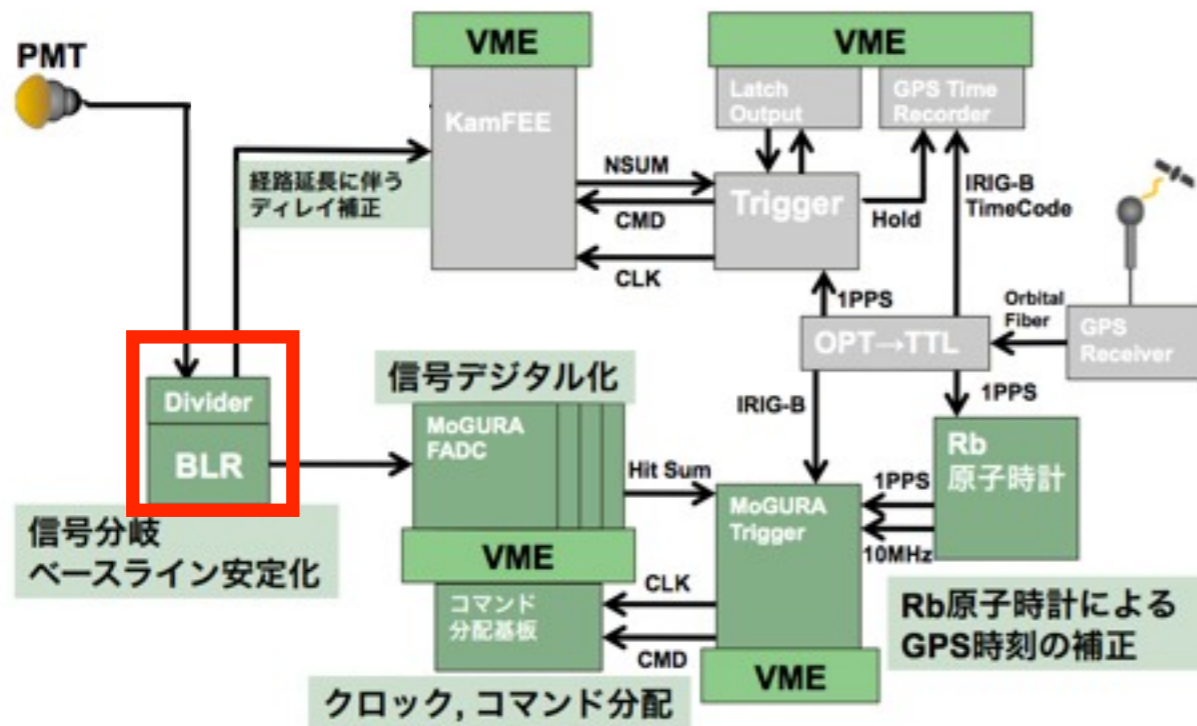


エレクトロニクス

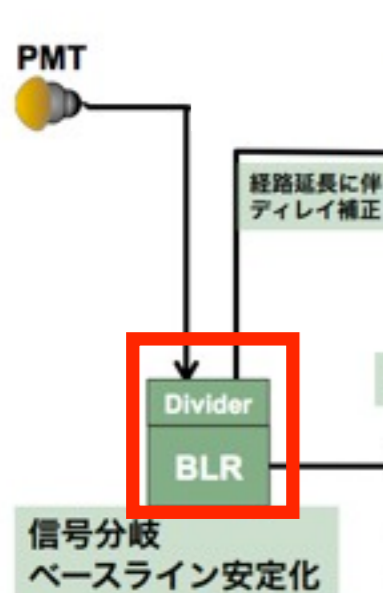
デッドタイムフリーエレクトロニクス
=> ^{10}C タギングに有効



ベースラインの安定化



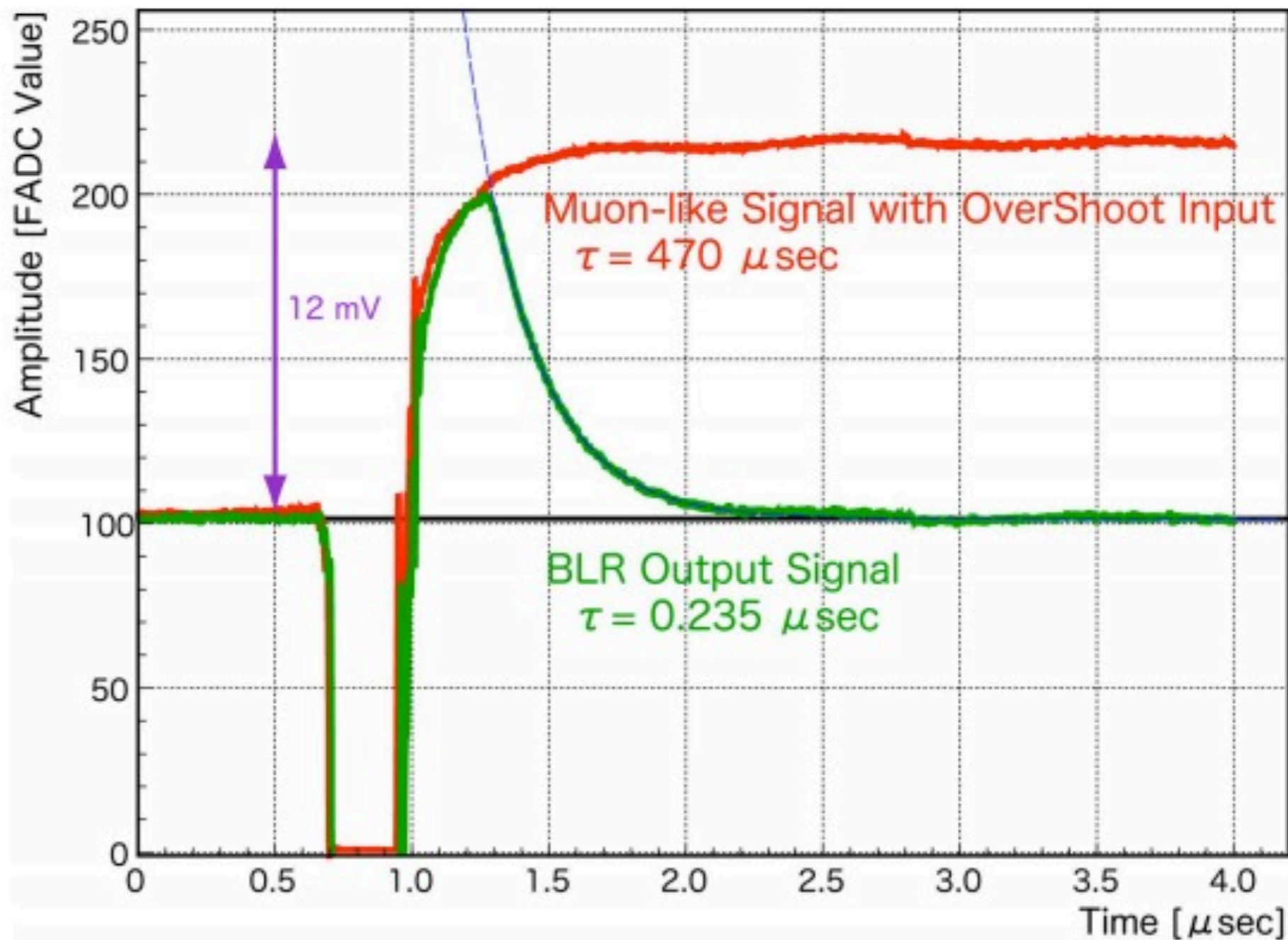
ベースラインの安定化



クロ

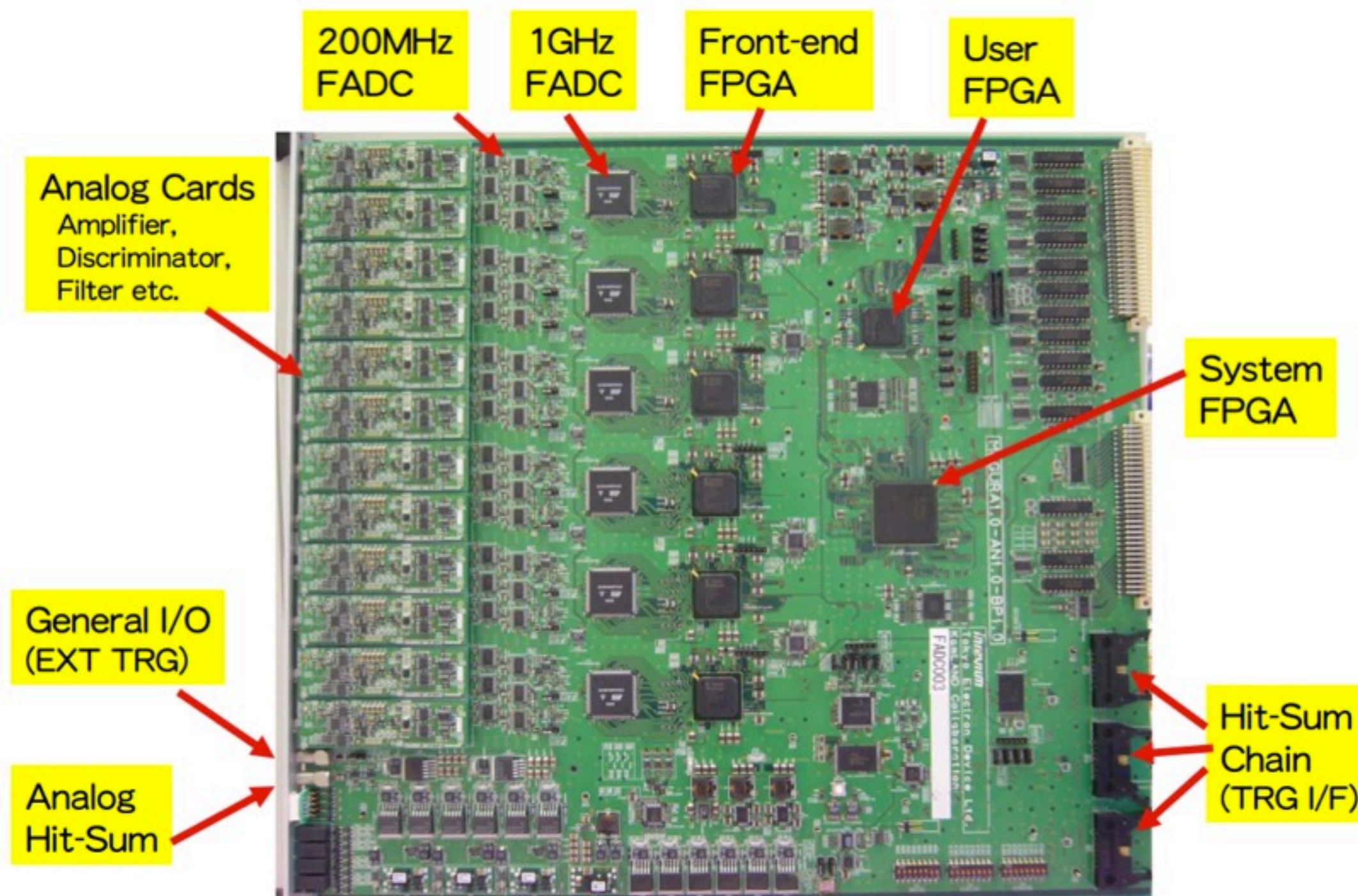


VME VME



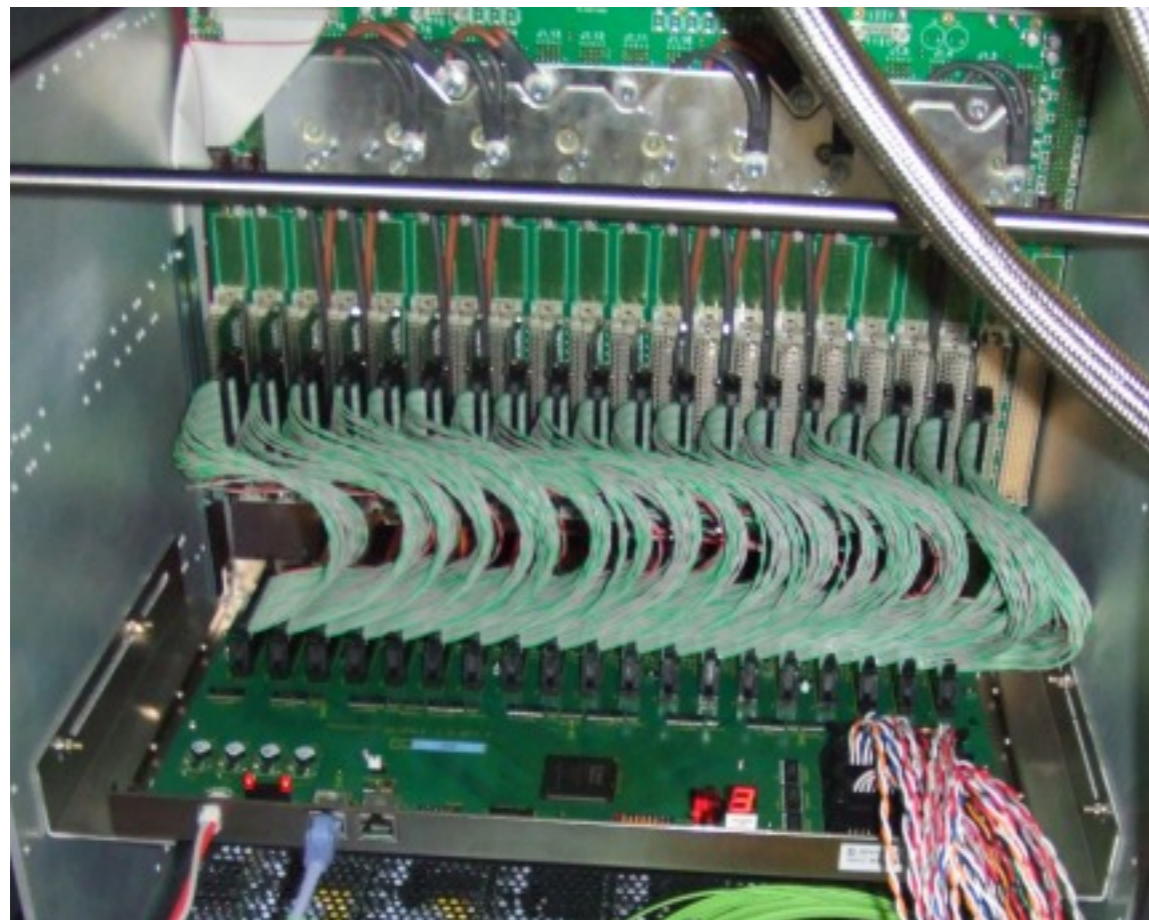
FADC回路

特徴: デッドタイムフリー回路、1GHz (200MHz) サンプリング、
広いダイナミックレンジ、VME9U、VME読み出し、

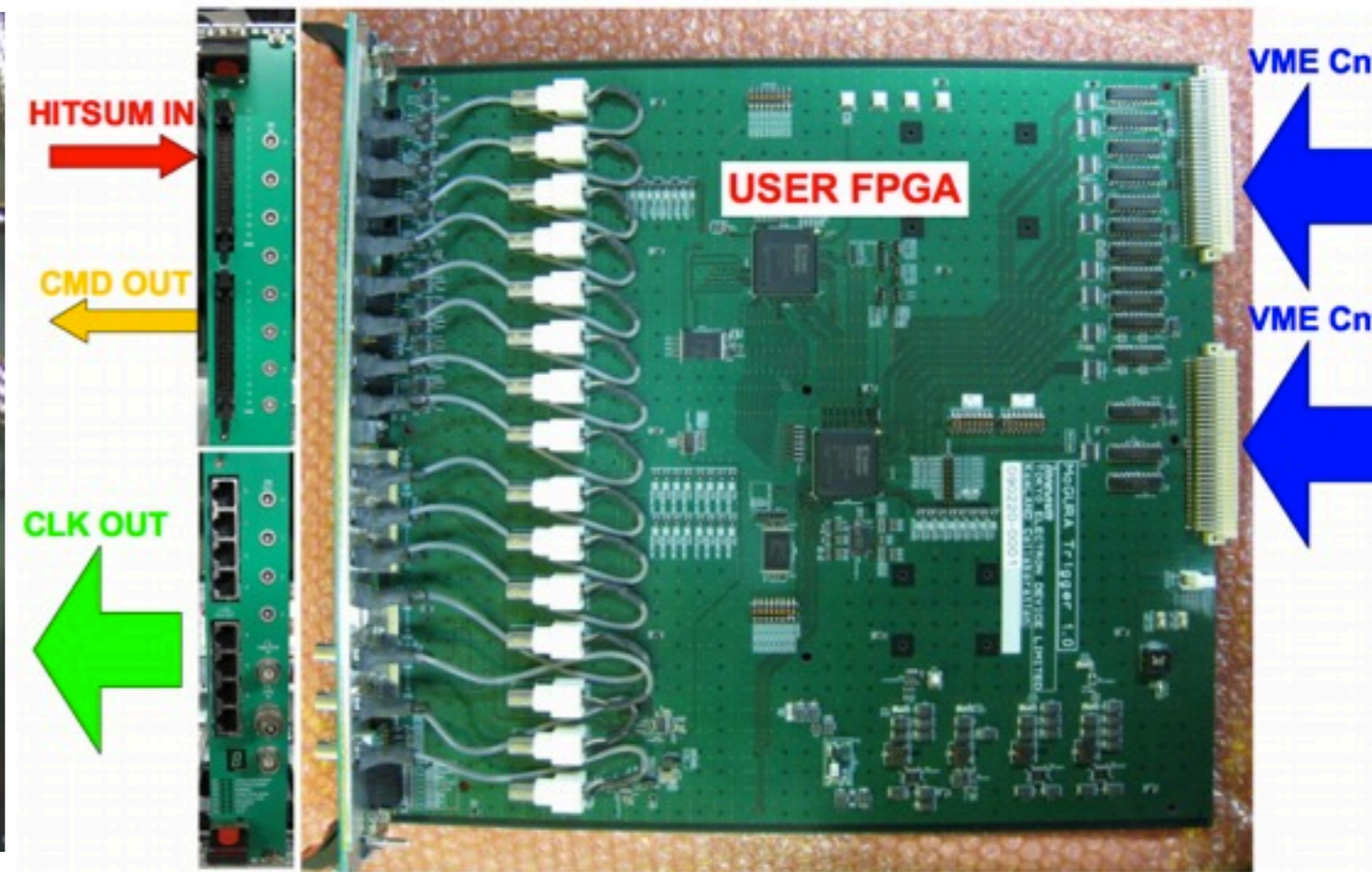


その他エレクトロニクス

特徴: VME9U 2スロット, VME読み出し,
デジータチャーンで全FADCからHITSUMを集める
コマンド分配基板を通じてFADCにトリガーを発行



コマンド分配基板

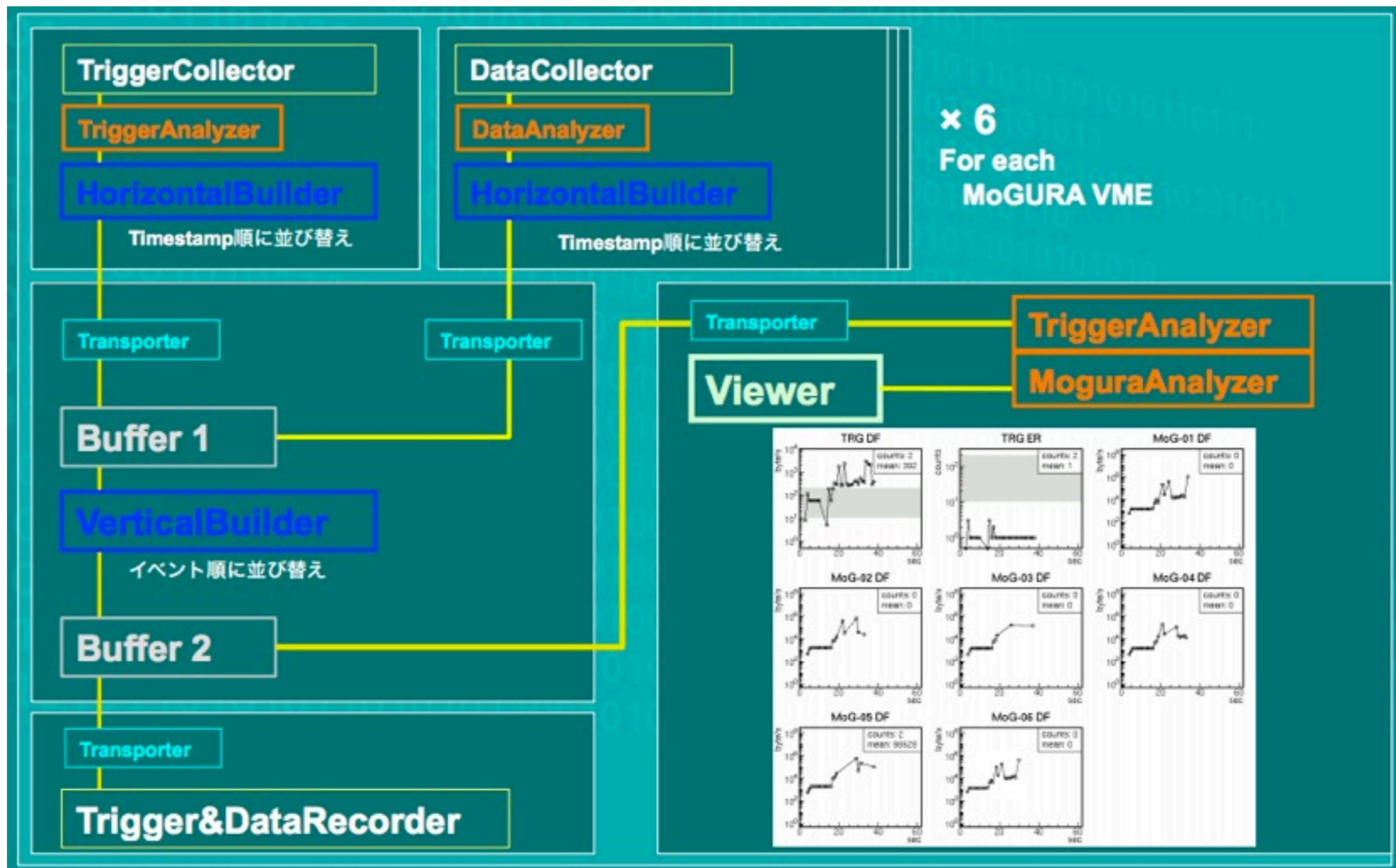


トリガー基板

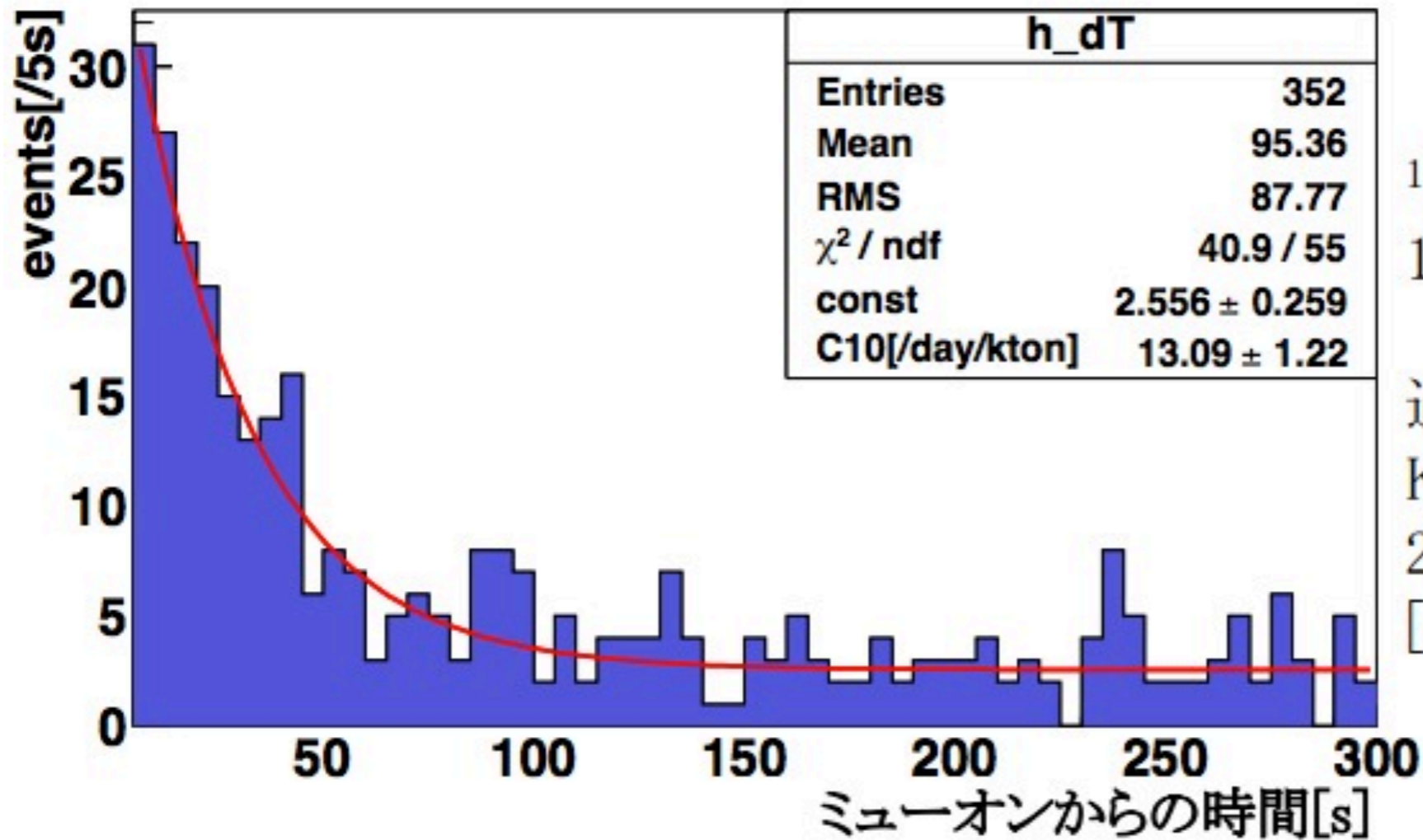
運用

2009年9月にKamLANDにインストール (~300GB/day)
KiNOKOベースのDAQで運用

榎本三四郎氏が開発した分散オブジェクト技術为基础としたネットワーク技術



^{10}C タギングの実証



^{10}C タグ数

17.8 ± 1.8 [event/day/kton]

過去の研究からの

KamLANDでの ^{10}C 崩壊数

21.1 ± 1.8 [event/day/kton]

[arXiv:0907.0066]

$84.4 \pm 11.2\%$ の ^{10}C を タギング 可能

今日の話

KamLAND/KamLAND-Zen実験

KamLANDの計測システム

行っているR&D

MoGURA 2へ

¹⁰Cタギングの実証に成功

しかし、数が不十分 (~1300/1900)

MoGURA 2へ

^{10}C タギングの実証に成功

しかし、数が不十分 (~1300/1900)

FADCが廃盤

MoGURA 2へ

¹⁰Cタギングの実証に成功

しかし、数が不十分 (~1300/1900)

FADCが廃盤

MoGURA2が必要

MoGURA 2へ

¹⁰Cタギングの実証に成功

しかし、数が不十分 (~1300/1900)

FADCが廃盤

MoGURA2が必要

- FADCの子ボード化
- Ethernet化

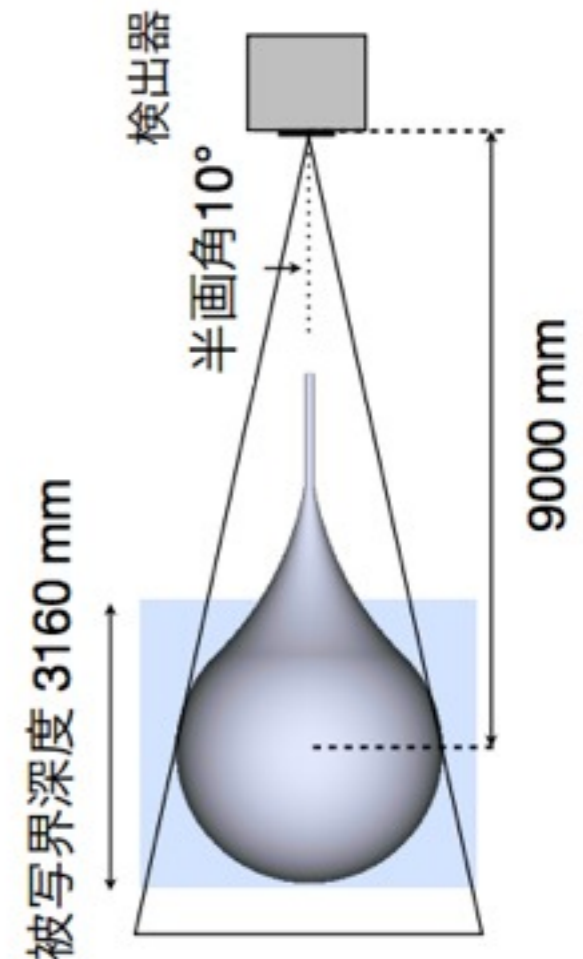
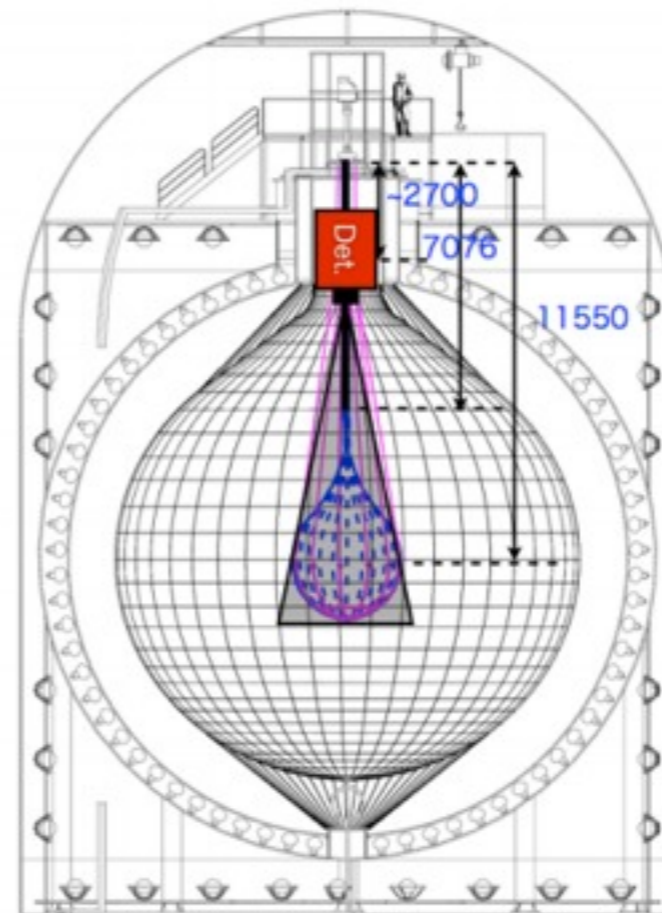
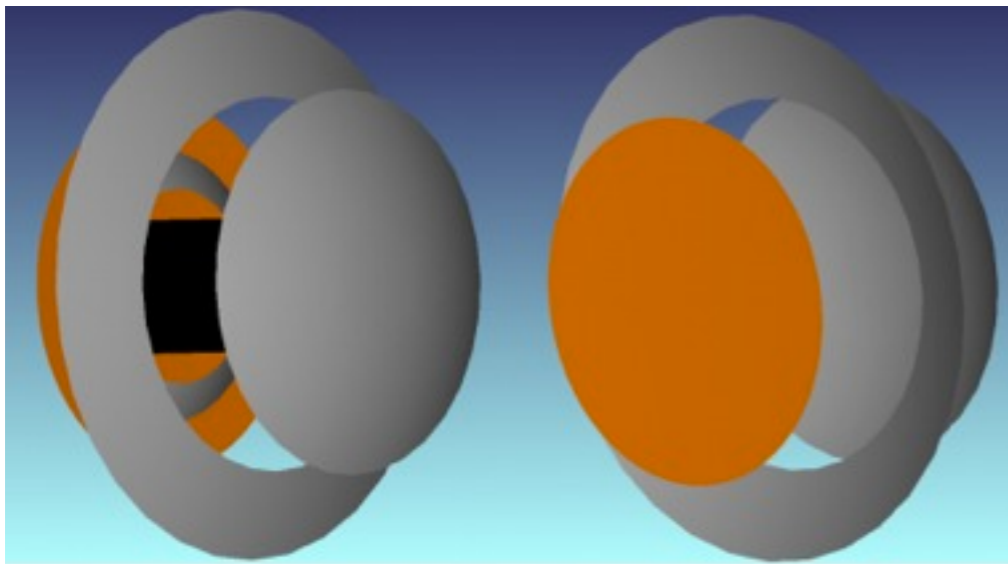
イメージングカメラ

KamLANDの弱点

- β/γ イベントの区別できない
- 方向を検出できない

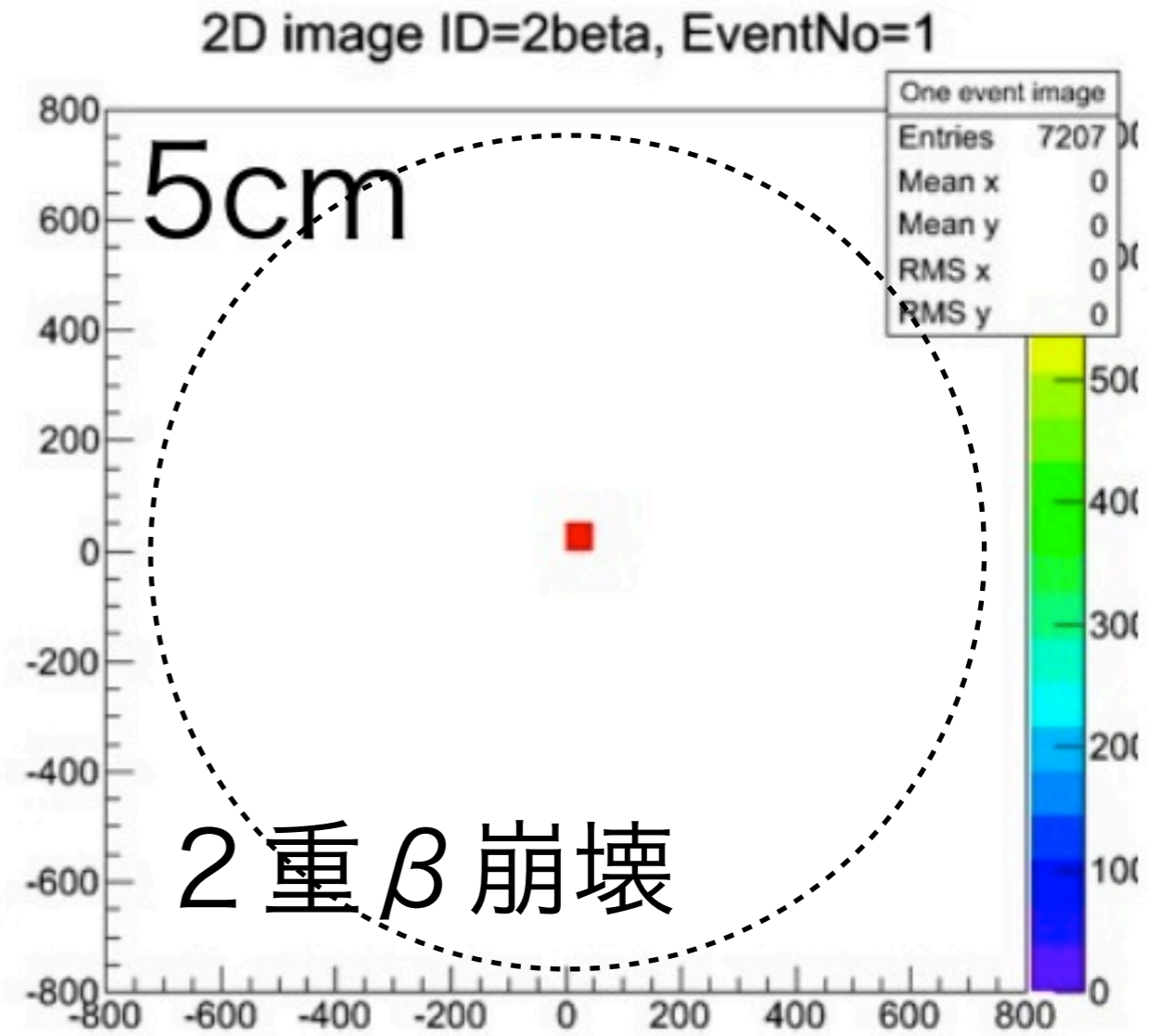
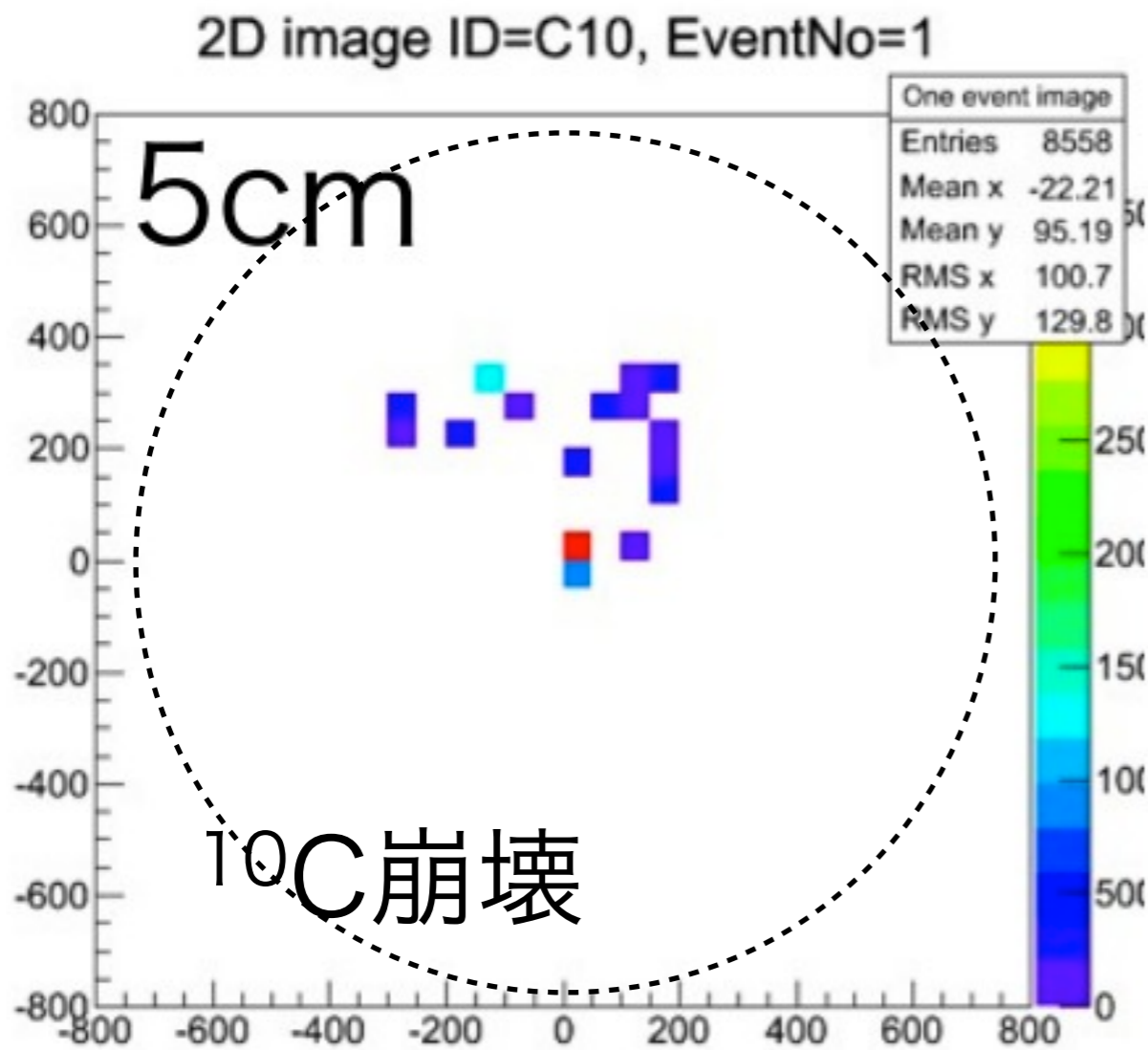
イメージングカメラ

広角反射型光学系 + 撮像デバイス

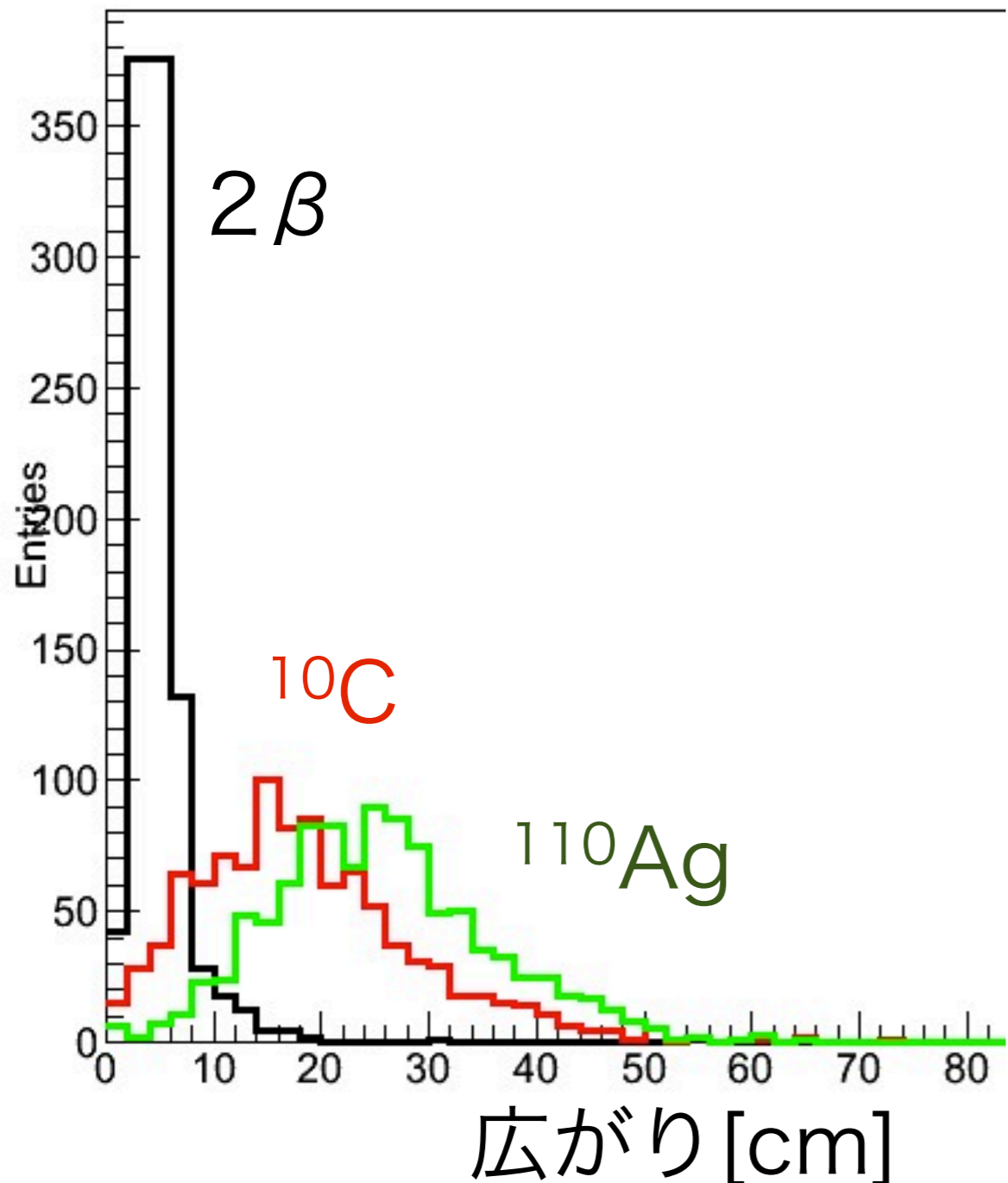


β / γ の粒子識別

r 線によるvertex広がりを利用した粒子識別

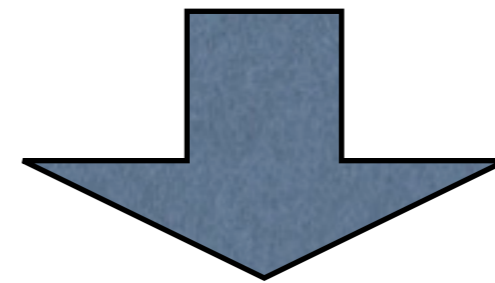


識別効率



ZEMAXによる光線追跡

- ^{10}C や ^{110}Ag を約90%除去
(10%の誤り除去)



より現実的なデザイン

- 光学系の改良
- 光検出器の選定
- エレクトロニクス

まとめ

KamLAND: 1kt液体シンチレータ型ニュートリノ検出器

原子炉ニュートリノ、地球ニュートリノで成果

2重ベータ崩壊探索が進行中 (KamLAND-Zen実験)

2009年に新型エレクトロニクス (MoGURA)導入

デッドタイムフリー回路 => バックグラウンドタギング

KiNOKOベースのDAQで稼働中

MoGURAのアップデートを計画

FADC部分の子ボード化, Ethernet化

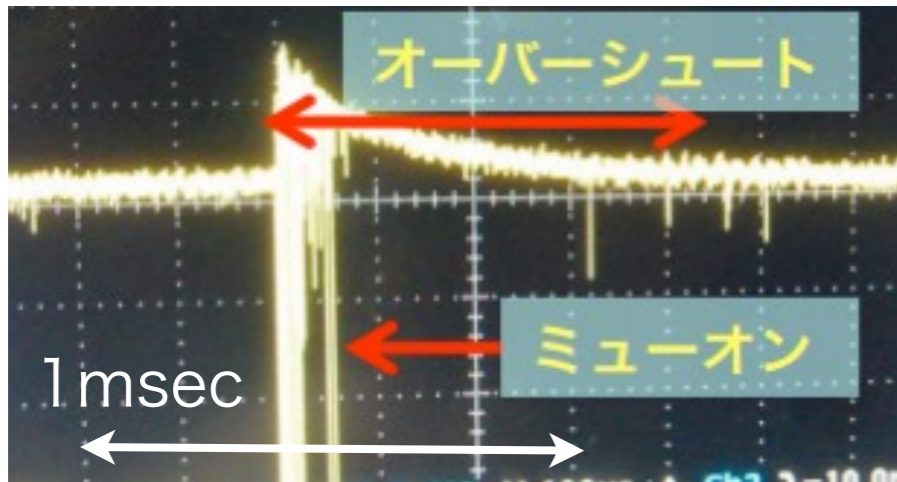
イメージングカメラの開発を開始

目標: β / γ 識別 (方向検出の実現)

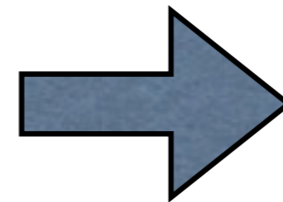
ベテルギウス超新星爆発へ向けた対策

新システムの必要性

1. ミューオン通過後のオーバーシュートによって直後の信号が取得できない



約1msecの間ベースライン上昇
0.5msecの時定数で減衰



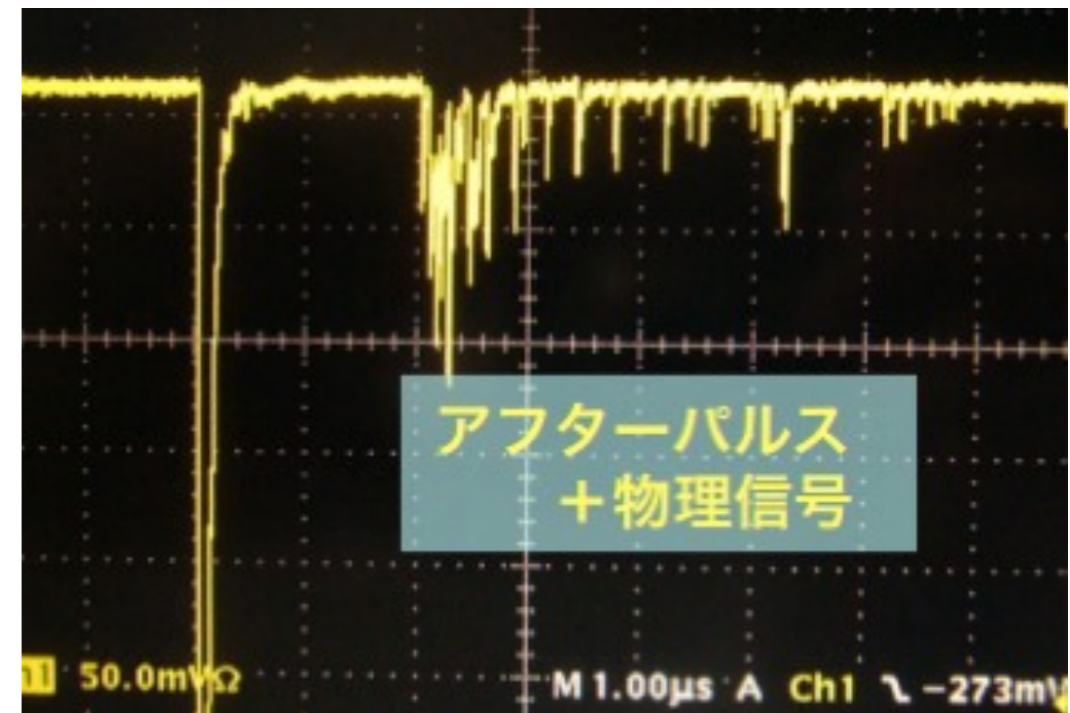
有効な物理イベントが取れない

2. デッドタイムの存在

既存回路での信号デジタル化 (ATWDX2)

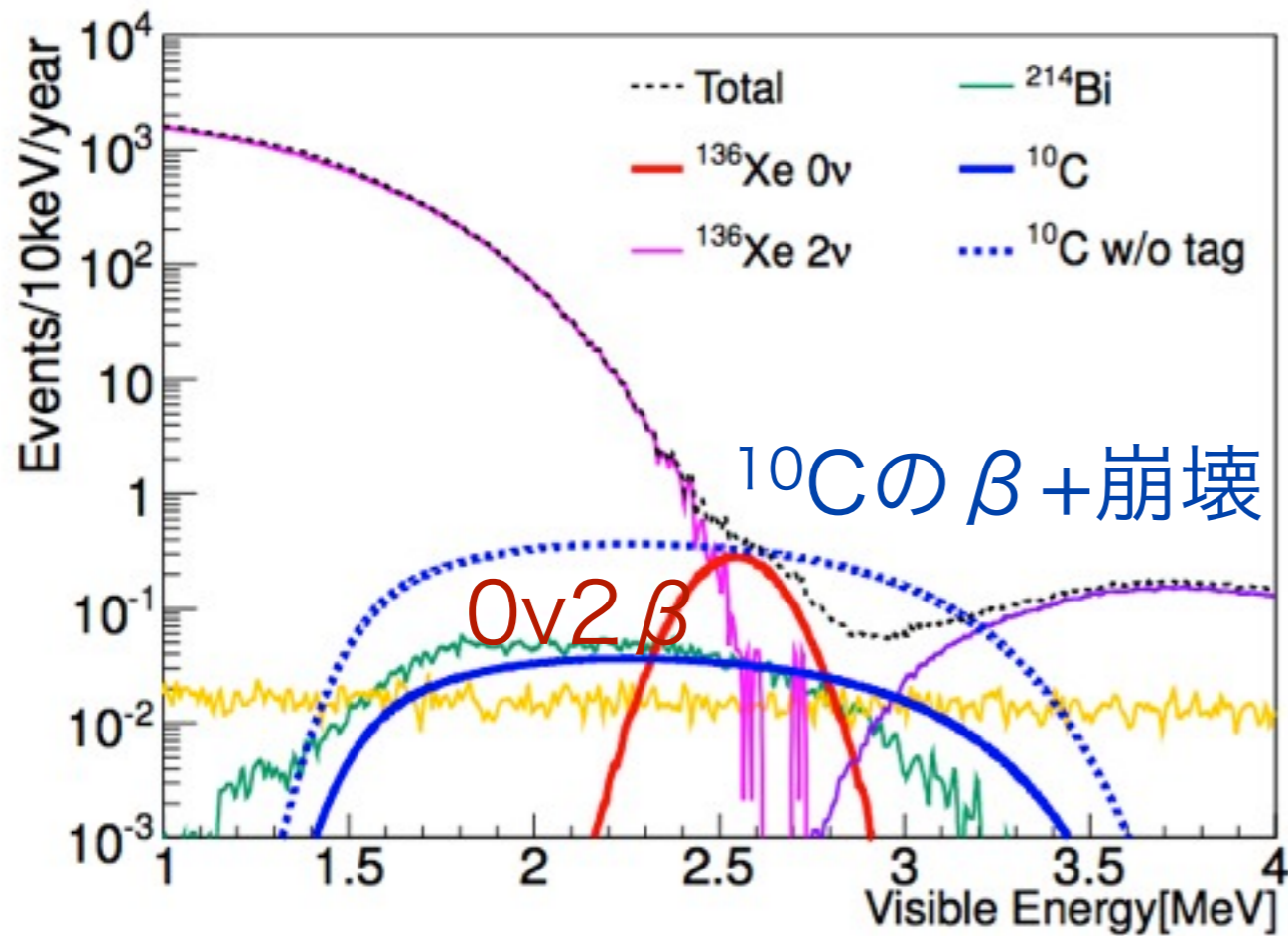
連続2信号以降にデッドタイム

(変換速度 ~25usec)



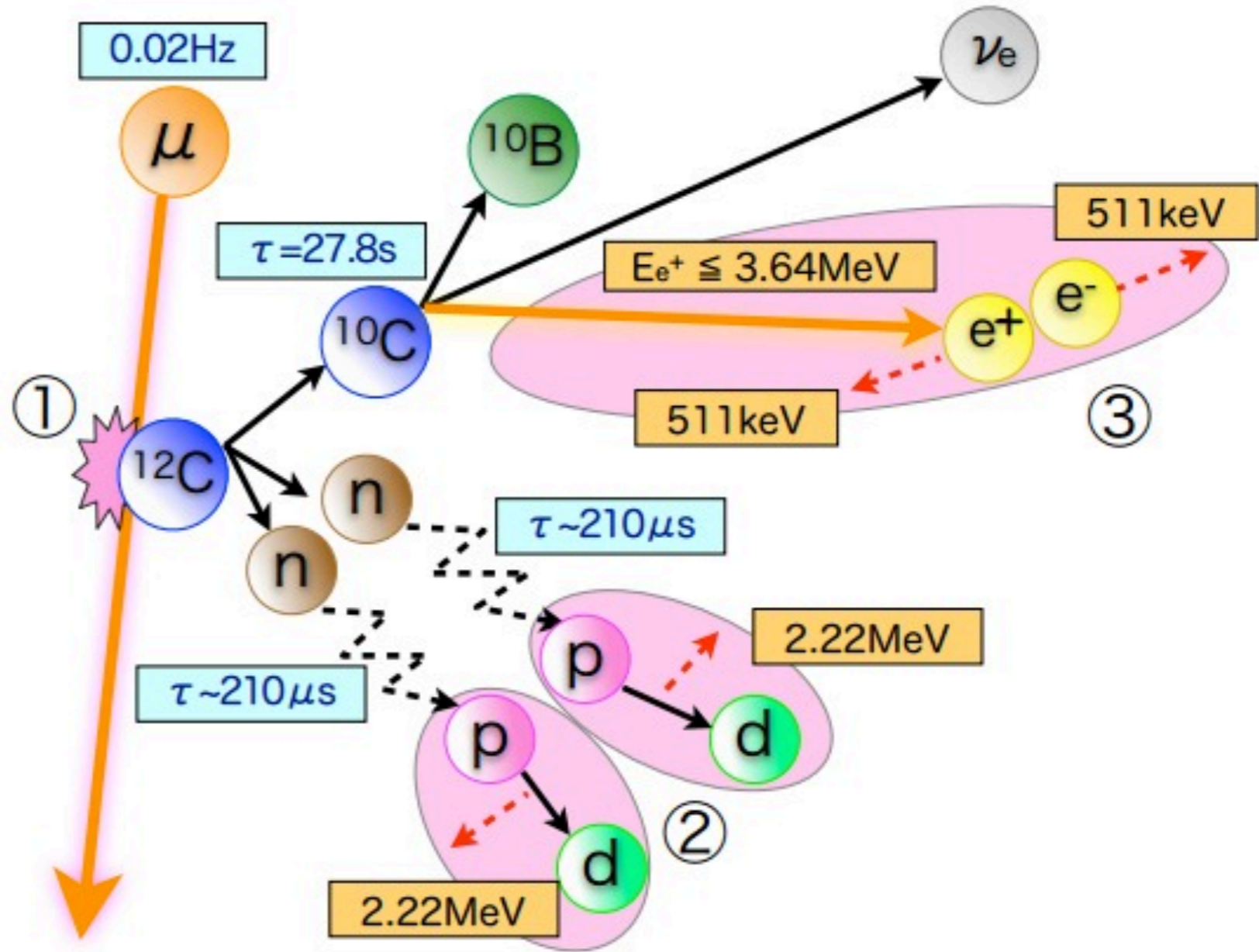
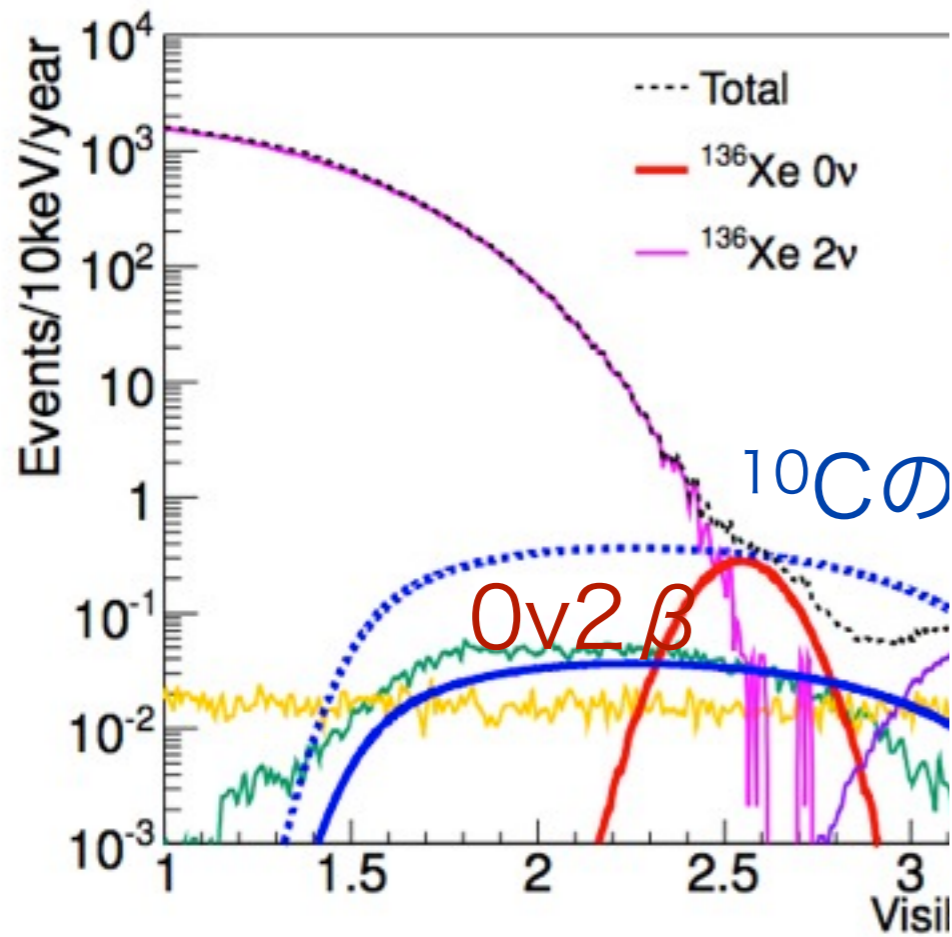
物理的意義

全物理イベントの取得 => バックグラウンドのタギング

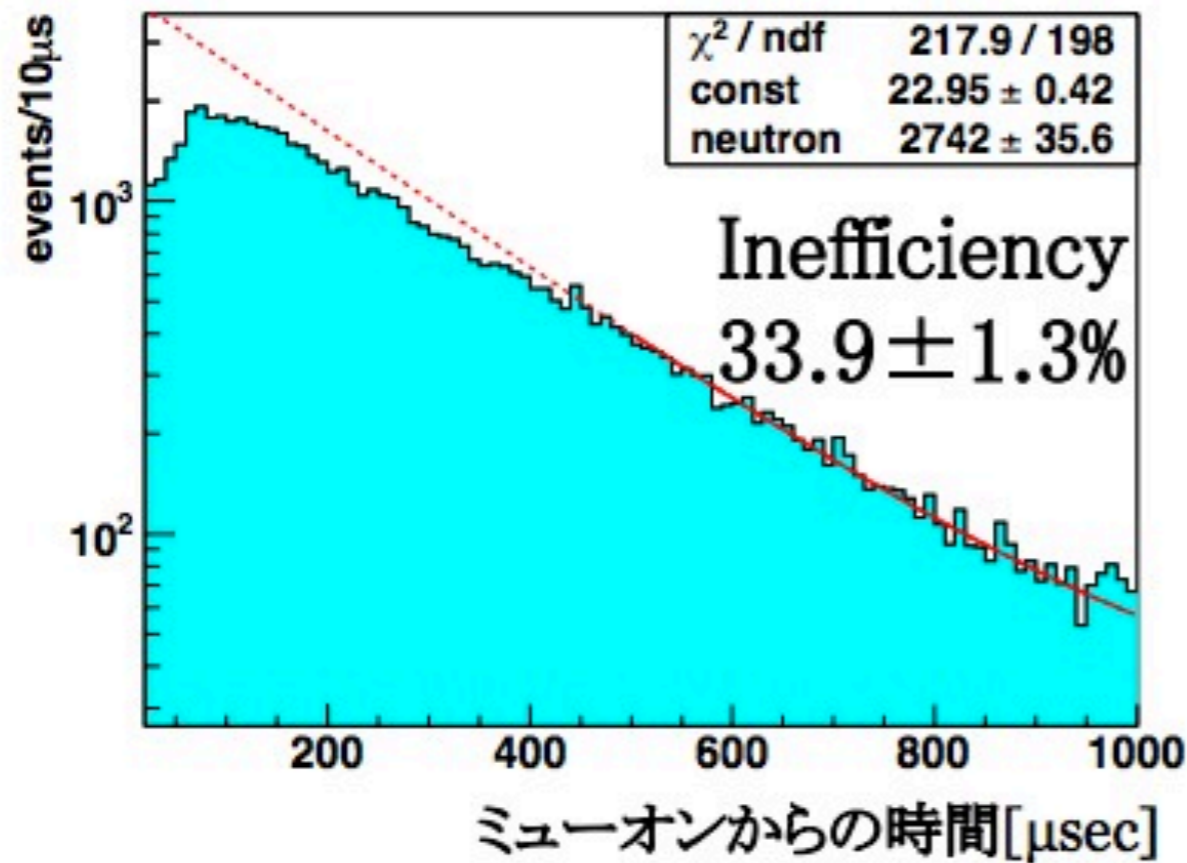


物理的意義

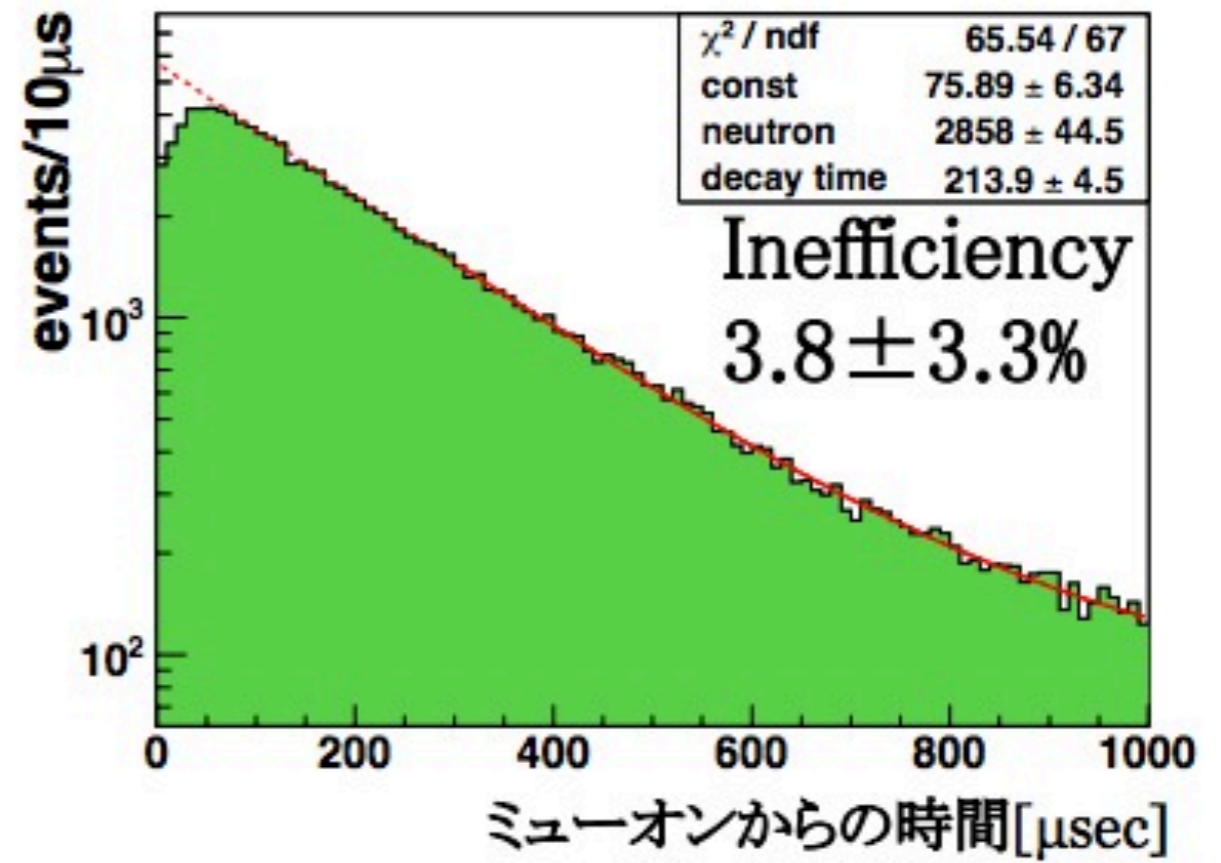
全物理イベントの取得 => バックグラウンドのタギング



宇宙線ミュオン後の中性子捕獲事象検出効率



これまでのトリガー



新トリガー

これまでのトリガーと比較して中性子損失効率が約1/9に抑制可能になった

新トリガーのパフォーマンス

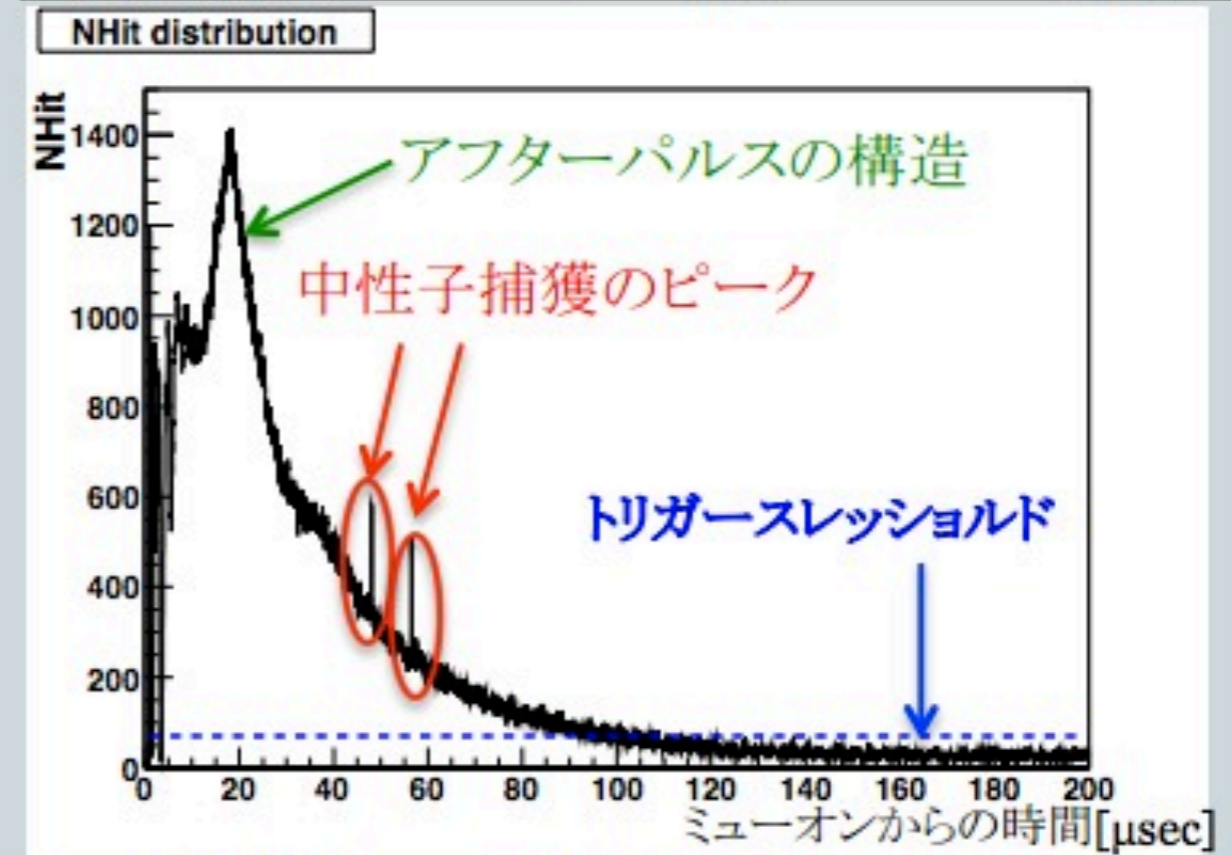


アフターパルスによる波形ロス

アフターパルス

PMT真空部の残留ガス(H、Ar)などがイオン化され、光電面を励起することにより発生する疑似パルス。大型のPMTを用いているKamLANDでは影響が大きく、特に宇宙線ミュオンによる大発光に対しては数十から数百 μsec に渡って疑似信号が入る。

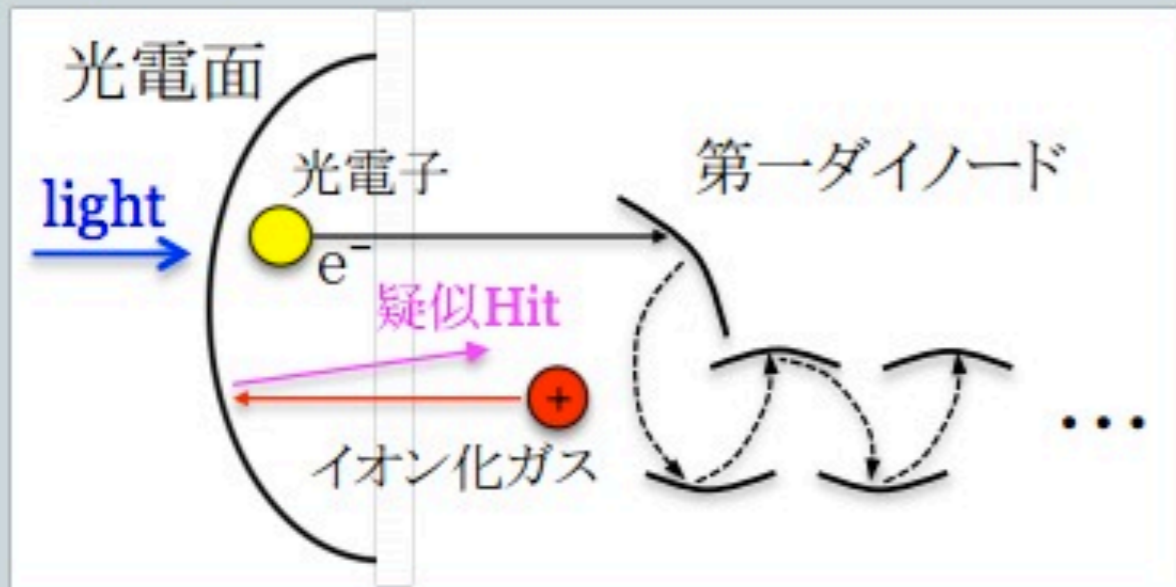
宇宙線ミュオン後のNHit分布



NHit: 120nsec内のPMTのヒット数の和
宇宙線ミュオン: 950hit以上

宇宙線ミュオン後はアフターパルスにより、数十から数百 μsec の間、連続的にトリガーが発行され続ける。

MoGURAでは長時間のトリガーの連続発行に耐えられない

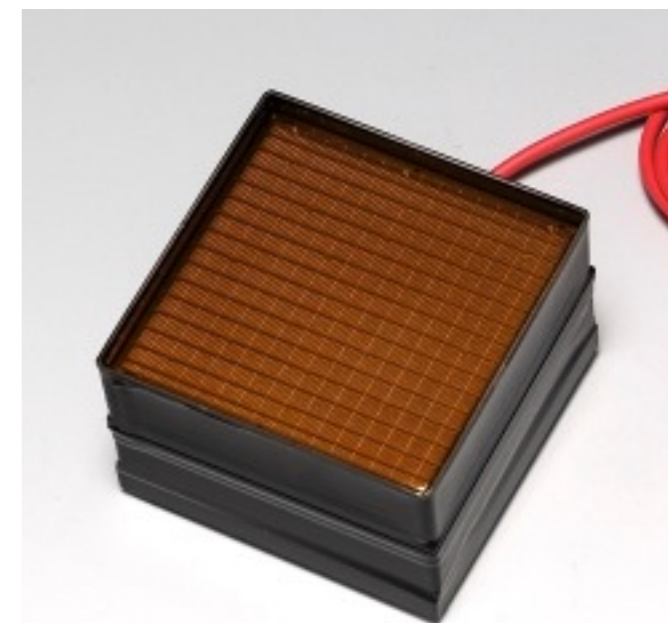


R&D

光検出器として256chのMPMT
必要な分解能を得るのに3x3のアレイ

2304ch x 数10の処理

E-hutまでの引き延ばすのは厳しい
油のなか前段処理回路を入れる



H9500

検討中