

KamLANDにおけるSRN探索と 高速中性子イベントの除去

新学術「地下素核」第3回超新星ニュートリノ研究会

2017/3/4

小原脩平 (東北大学 RC ν S)

on behalf of KamLAND collaboration

Contents

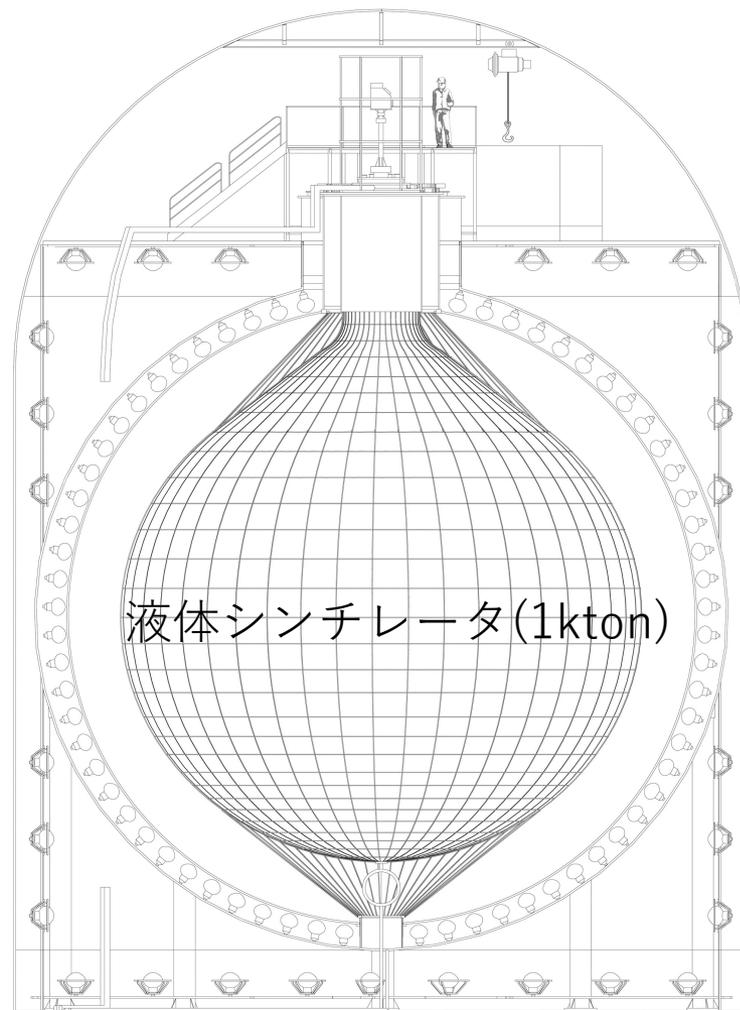
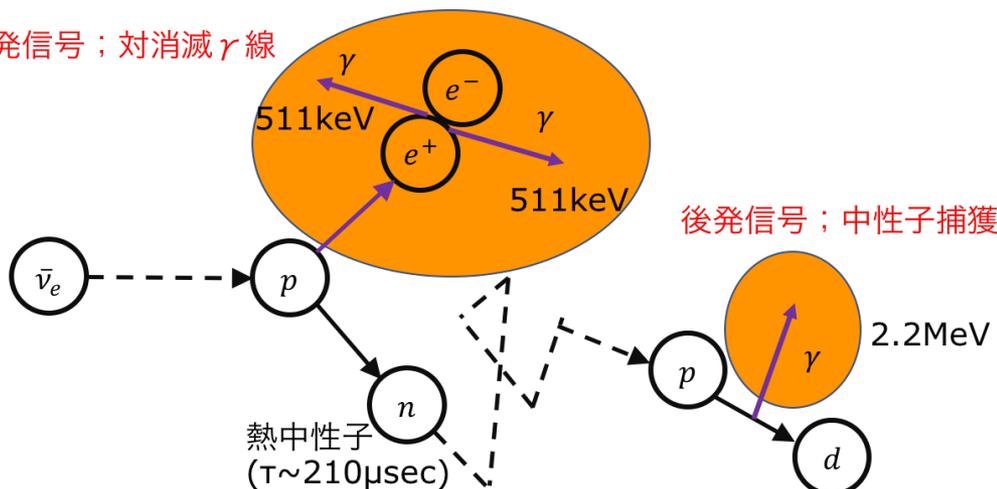
1. KamLANDの紹介
2. KamLANDにおけるSRN探索
3. 高速中性子イベント除去 - OD改修工事 -
4. 大気 ν NCイベント除去 - neutron PSD -
5. まとめ

KamLANDの紹介

逆ベータ崩壊 (Inverse Beta Decay)
遅延同時計測 を利用



先発信号：対消滅 γ 線



→ 高精度で $\bar{\nu}_e$ 事象を選択

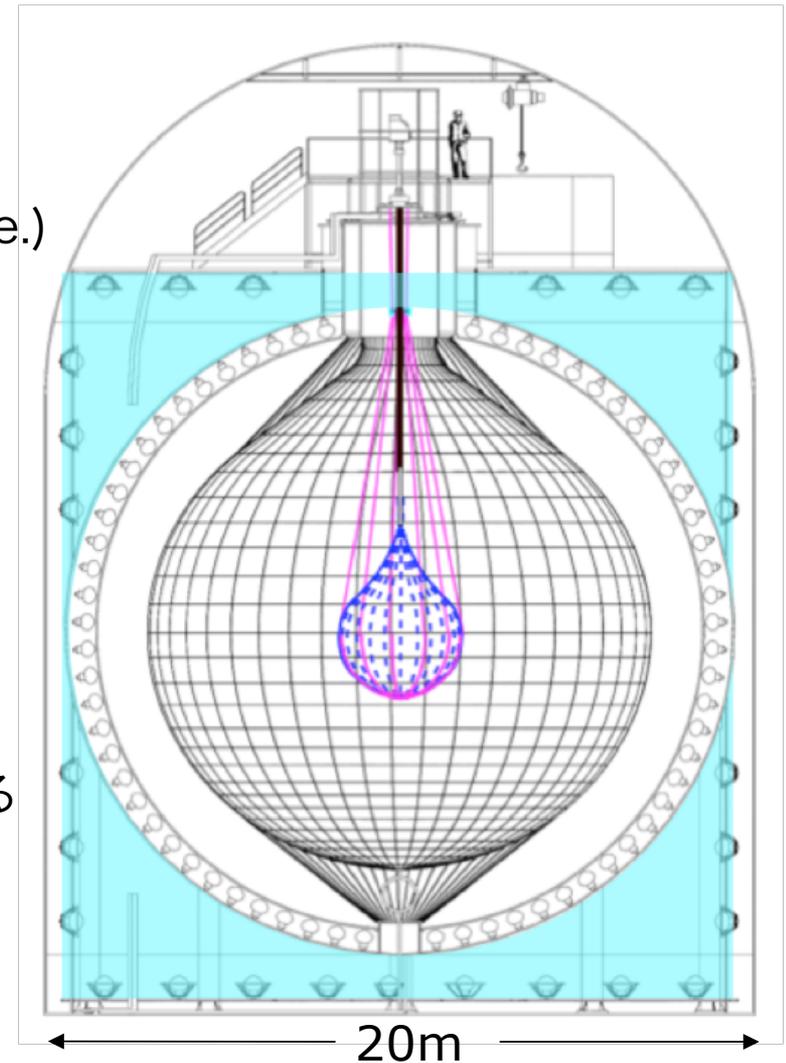
立地とOuter Detector (OD)

立地

- 池の山山頂から地下1,000m (2,700m w.e.)
- MuonRateが地上比 10^{-5} (~0.3Hz)
- 旧KamiokaNDE跡地

水チェレンコフ検出器

- 純水 (3.2kton)
- 225本→140本の20inch PMT
- チェレンコフ光で宇宙線ミュオンを見る
- 周囲の岩盤からくる中性子をブロック



Inner Detector (ID)

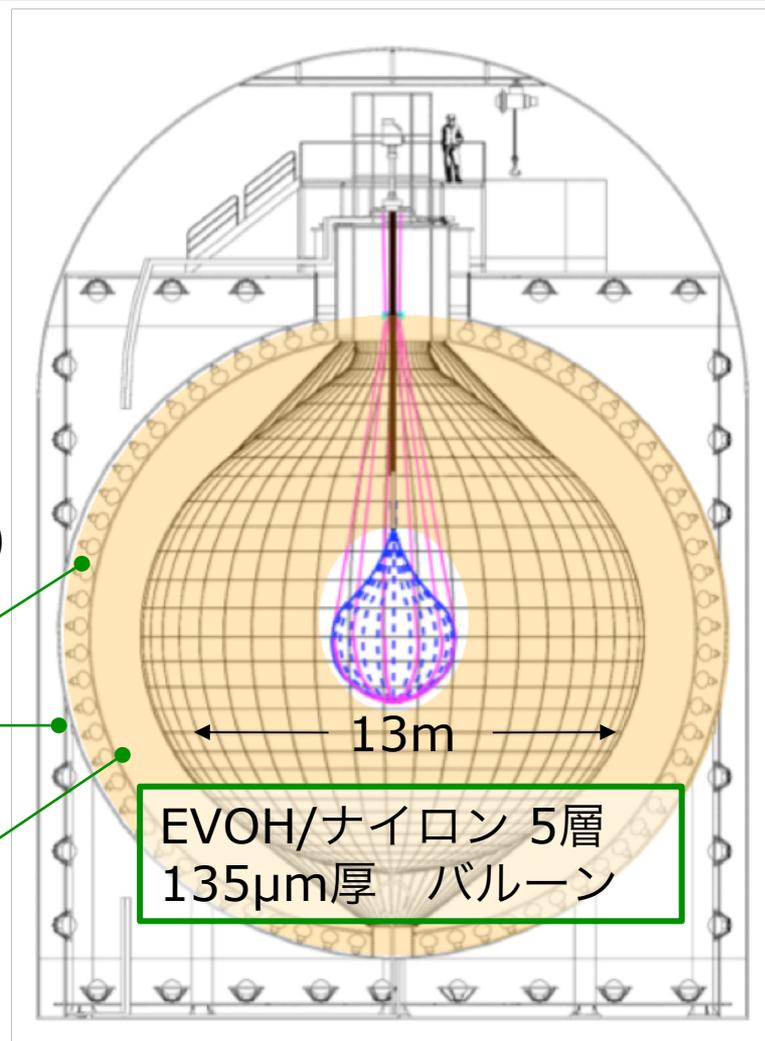
液体シンチレータ検出器

- 1 kton KamLAND-LS
PC 20%, N12 80%, PPO 1.58g/l
- 荷電粒子に対して等方向発光
= 方向感度はない

17inch PMT (1,325本)
20inch PMT (554本)

ステンレスタンク (直径18m)

バッファオイル



KamLANDにおけるSRN探索

メリット

- 低いエネルギー閾値
- 遅延同時計測を利用し高効率で $\bar{\nu}_e$ 事象を選択

デメリット

SKと比べて

- 方向感度がない
- Target Massが小さい

KamLANDにおけるSRN探索

メリット

- 低いエネルギー閾値
- 遅延同時計測を利用し高効率で $\bar{\nu}_e$ 事象を選択



- 原子炉停止中なら低エネルギー側がよく見える
- 反電子ニュートリノに関して高感度
- muon原子核破砕イベントの同定

デメリット

SKと比べて

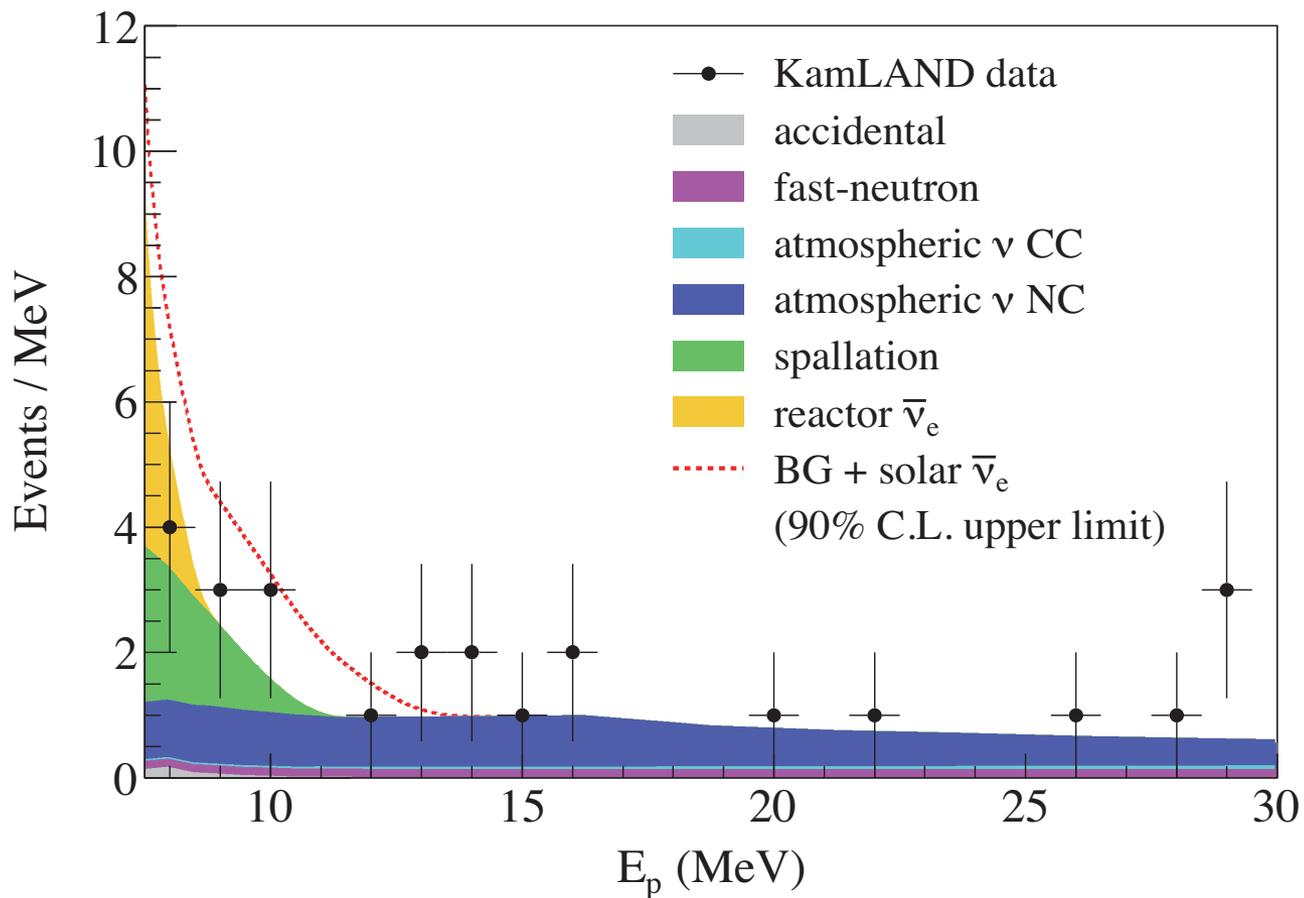
- 方向感度がない
- Target Massが小さい



- 大気ニュートリノが深刻なBG
- Scintillationなので方向感度がない

KamLANDにおけるSRN探索

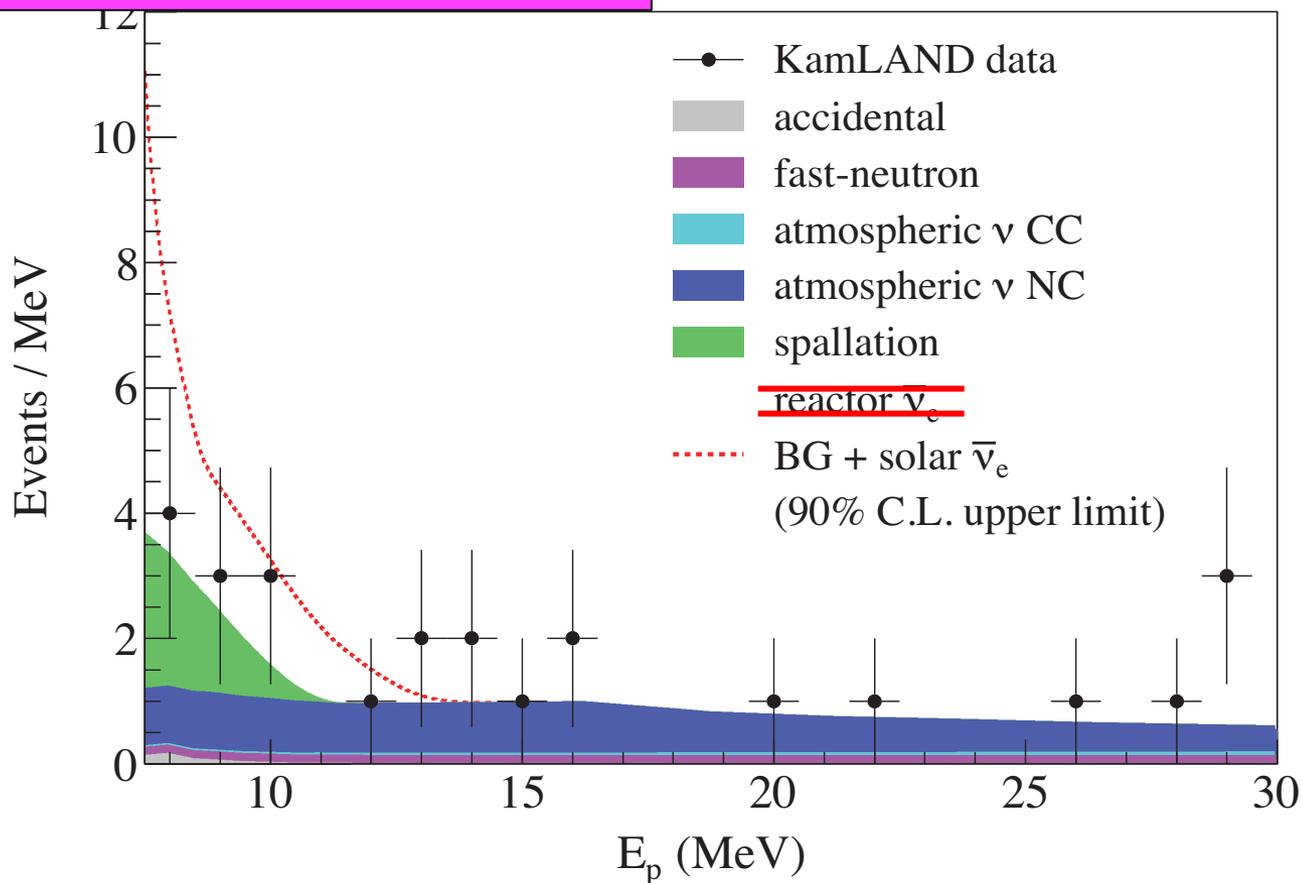
(KamLAND@2011, arXiv:1105.3516v2)



KamLANDにおけるSRN探索

(KamLAND@2011, arXiv:1105.3516v2)

今は Reactor-OFF !!



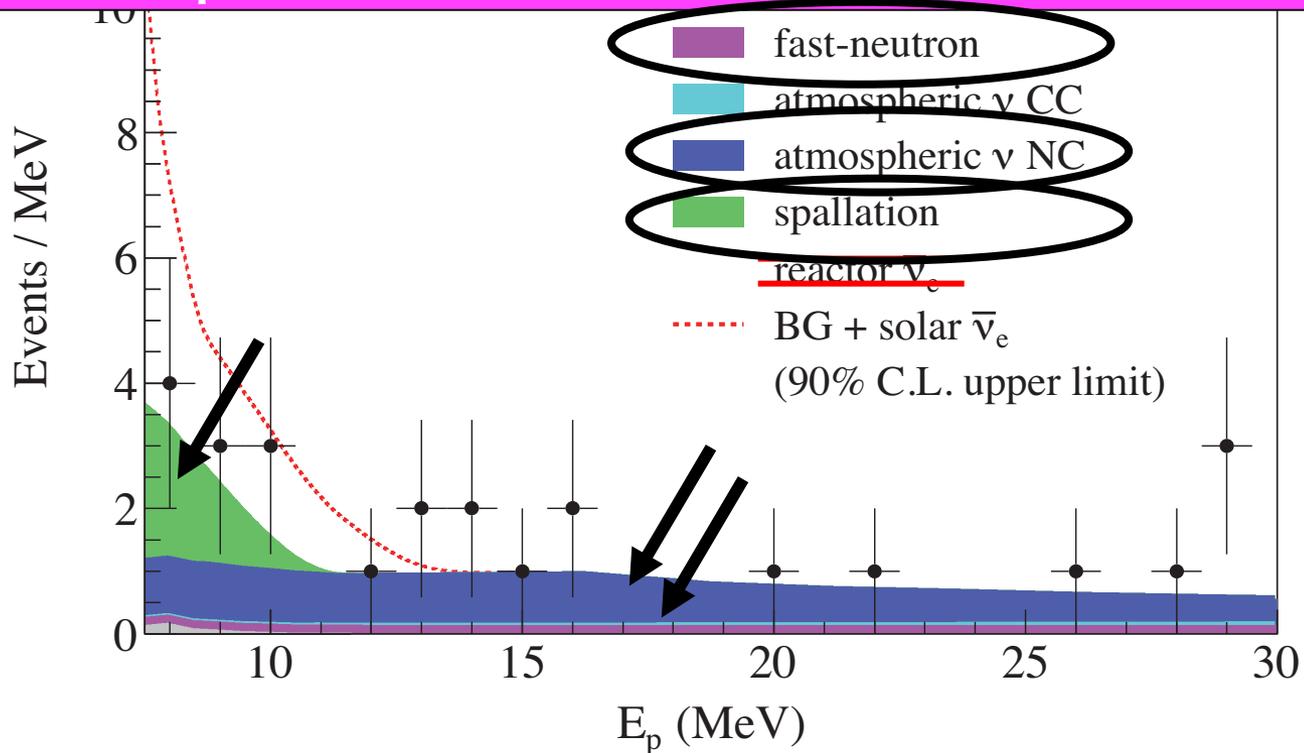
※ illustratorで消しました。Photoshopではない。

KamLANDにおけるSRN探索

(KamLAND@2011, arXiv:1105.3516v2)

今は Reactor-OFF !!

大気 ν とspallation、高速中性子を減らす!!



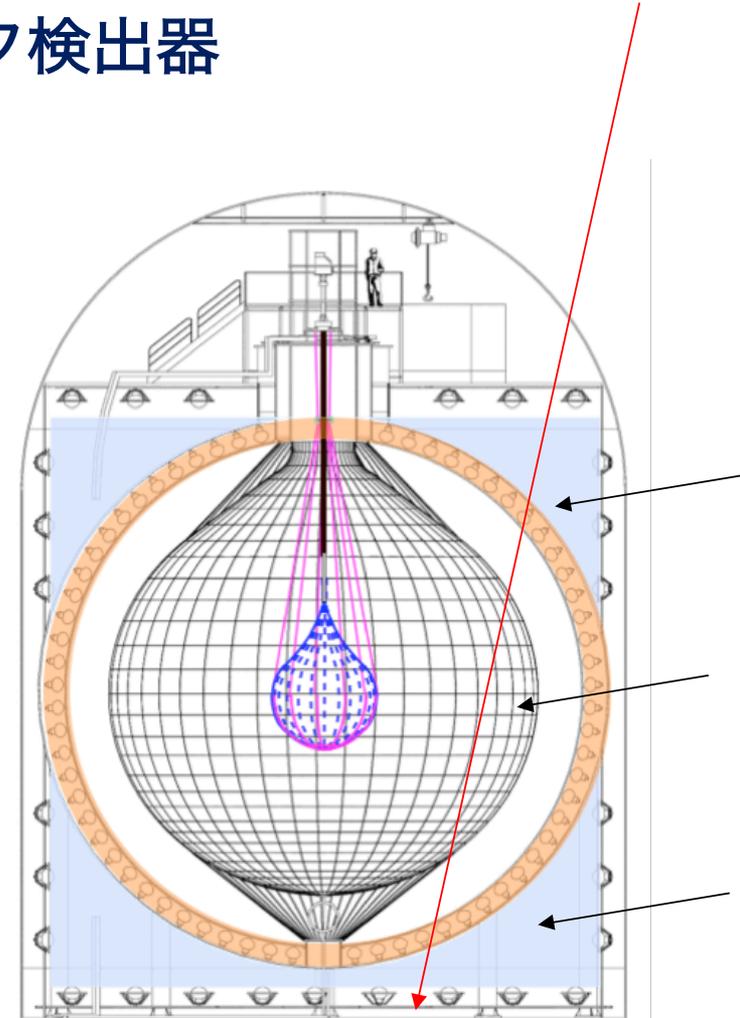
KamLANDにおけるSRN探索

- Outer Detectorの改修工事
- Neutron PSD (challenging)

OD改修工事 - motivation -

OuterDetector (OD) ; 水チェレンコフ検出器

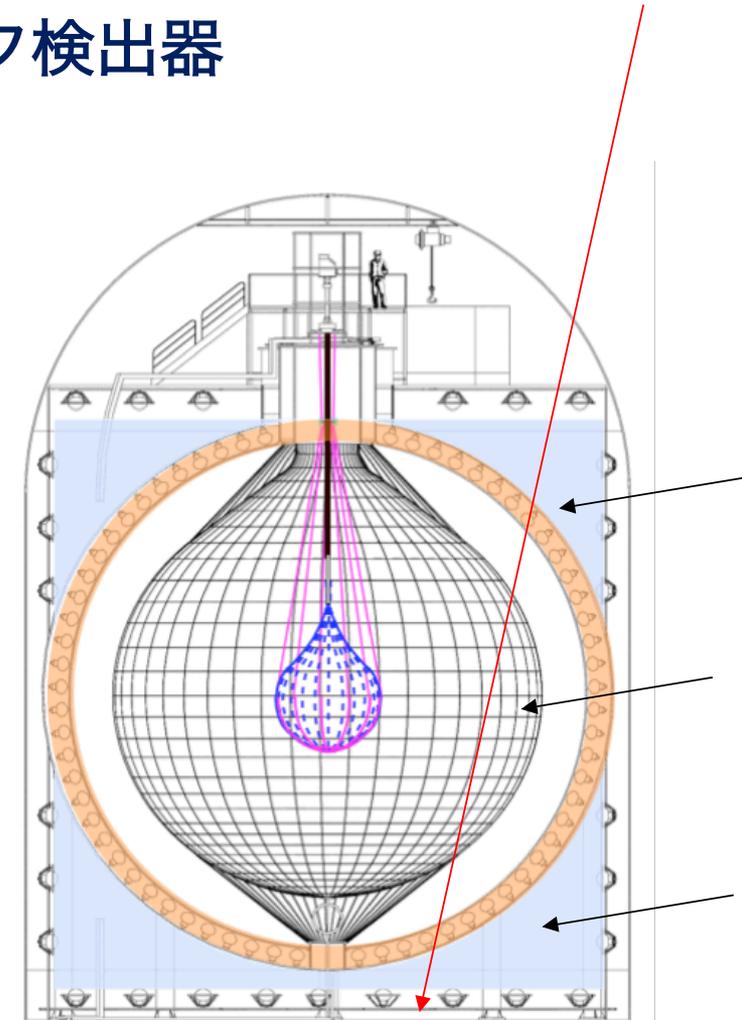
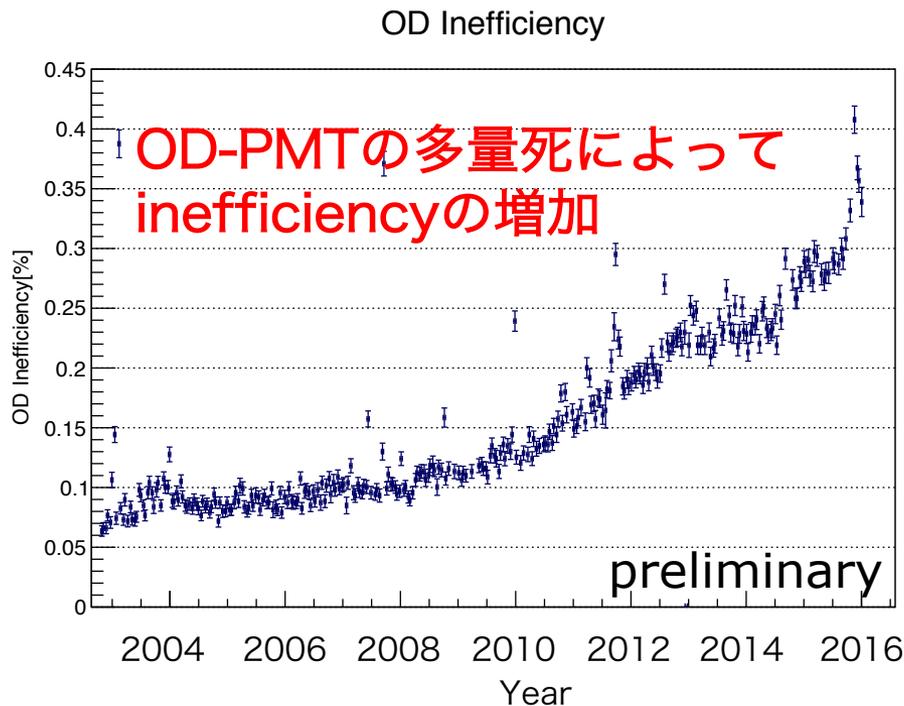
- 宇宙線ミュオン事象を捉える
- 周囲の岩盤からの中性子をブロック



OD改修工事 - motivation -

OuterDetector (OD) ; 水チェレンコフ検出器

- 宇宙線ミュオン事象を捉える
- 周囲の岩盤からの中性子をブロック



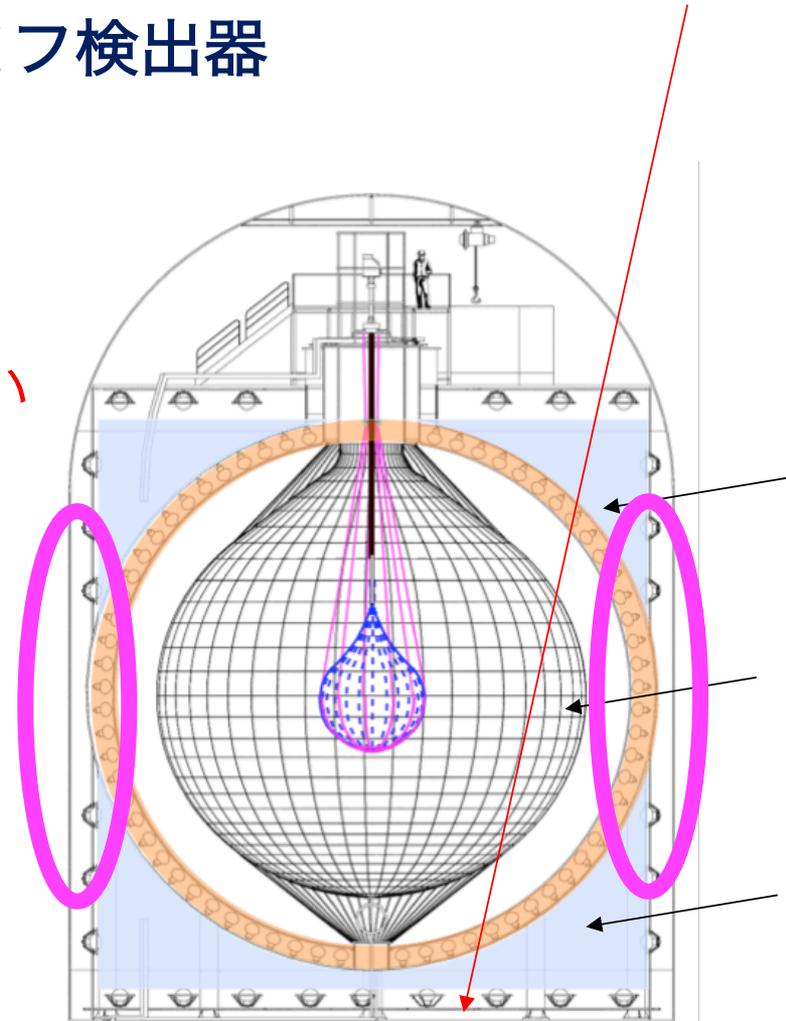
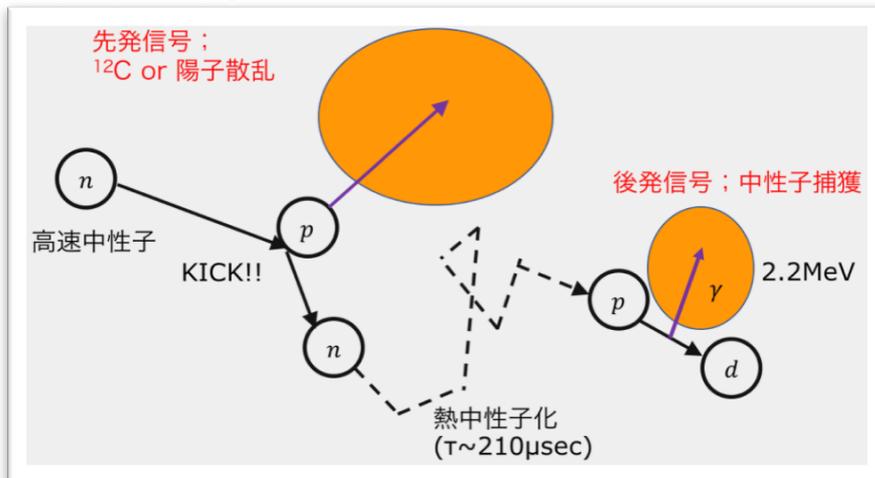
OD改修工事 - motivation -

OuterDetector (OD) ; 水チェレンコフ検出器

- 宇宙線ミュオン事象を捉える
- 周囲の岩盤からの中性子をブロック

赤道付近の厚みが薄く、遮蔽力が弱い

高速中性子が偽IBDをつくる

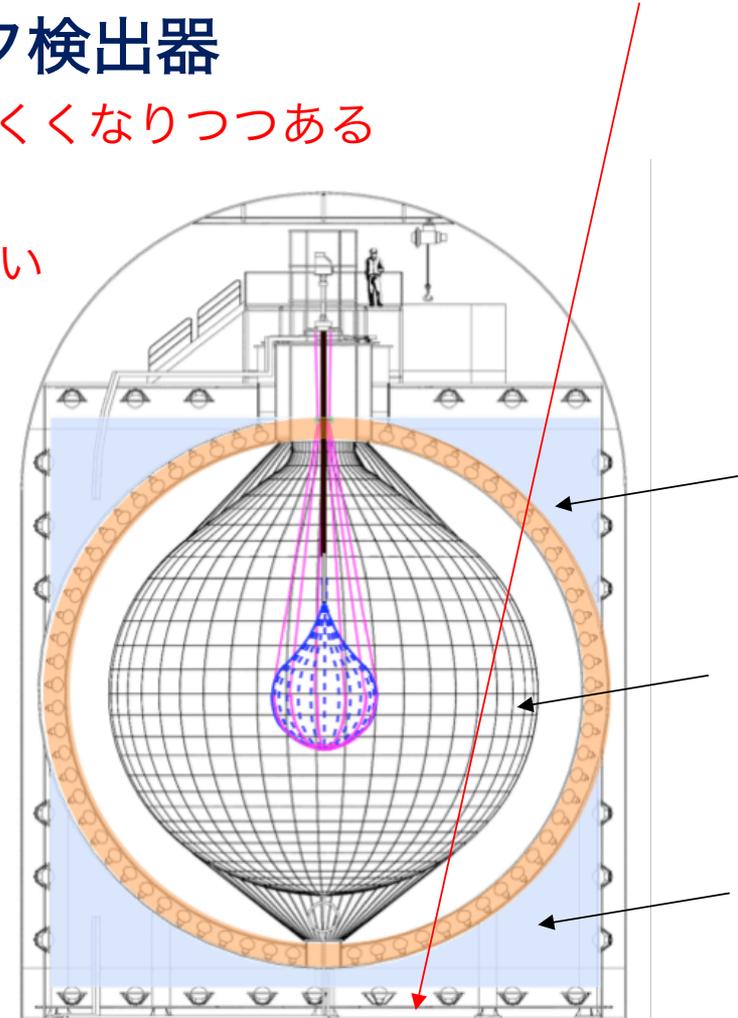


OD改修工事 - motivation -

OuterDetector (OD) ; 水チェレンコフ検出器

- 宇宙線ミュオン事象を捉える ~~が~~ 捉えにくくなりつつある
- 周囲の岩盤からの中性子を ~~ブ~~ロック

赤道付近が弱い



OD改修工事 - motivation -

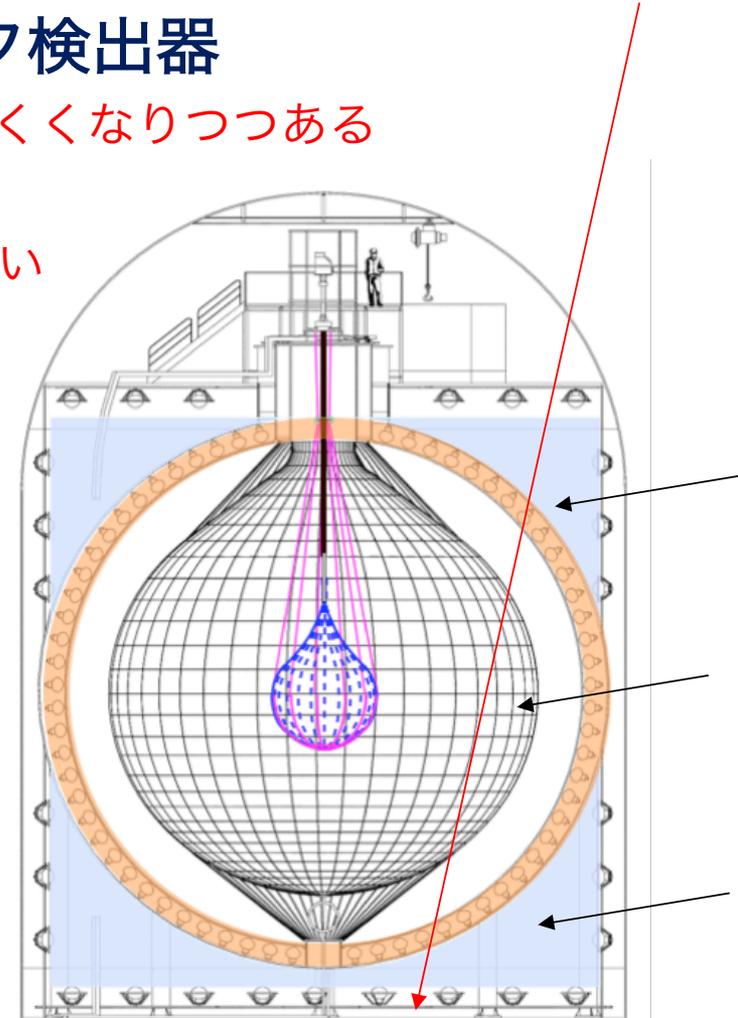
OuterDetector (OD) ; 水チェレンコフ検出器

- 宇宙線ミュオン事象を捉えるが捉えにくくなりつつある
- 周囲の岩盤からの中性子をブロック

赤道付近が弱い



- 死んだOD PMTを付け替え
- 赤道付近にはHigh-Q.E. PMTを設置

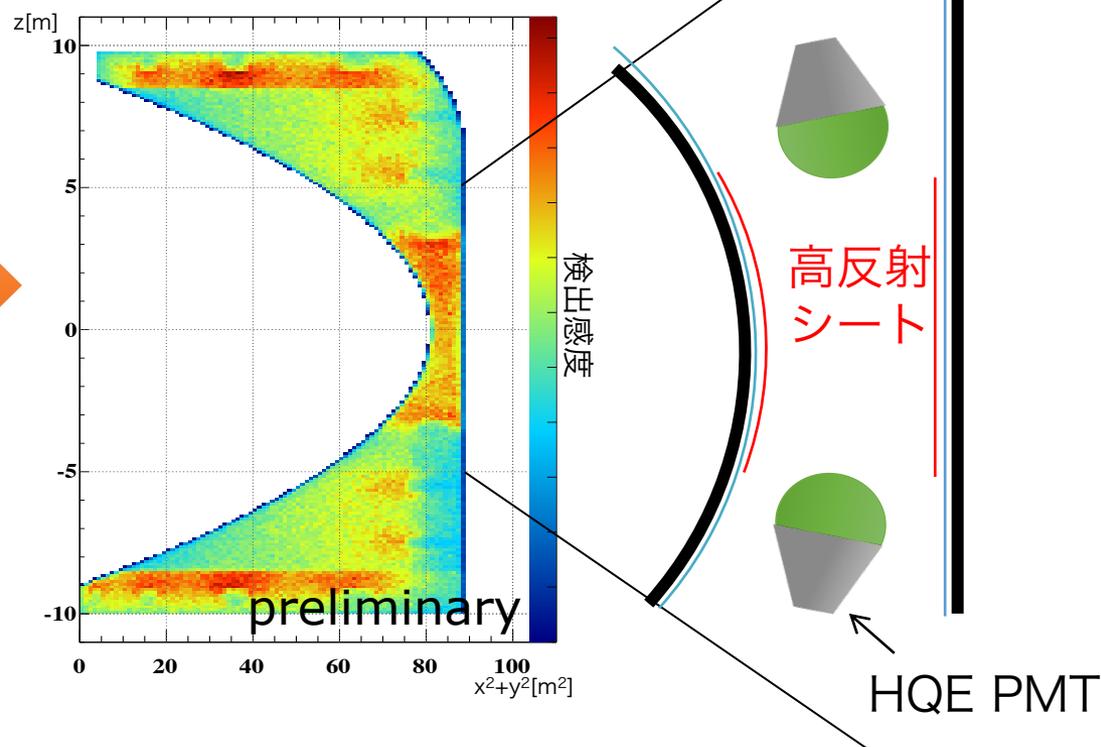
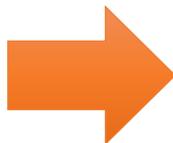
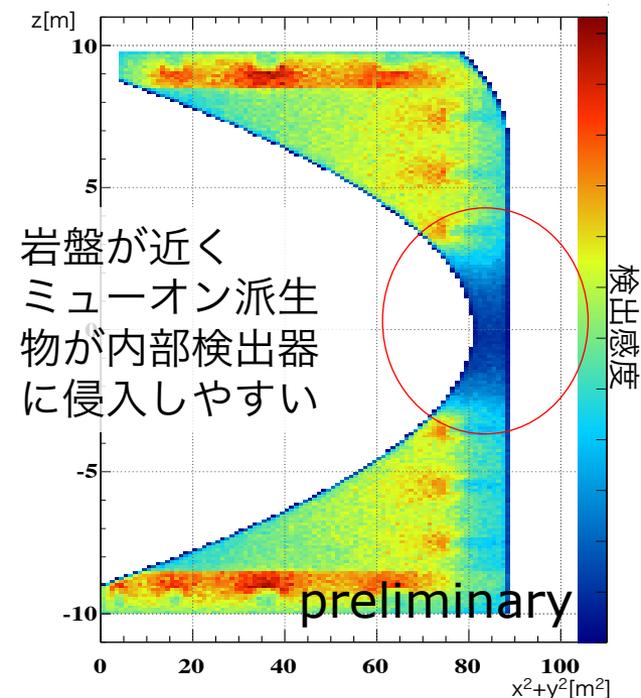


OD改修工事 - 赤道部分の補強 -

HQE PMTを赤道に向けて多めに配置+高反射率の反射シート

刷新前

刷新後デザイン

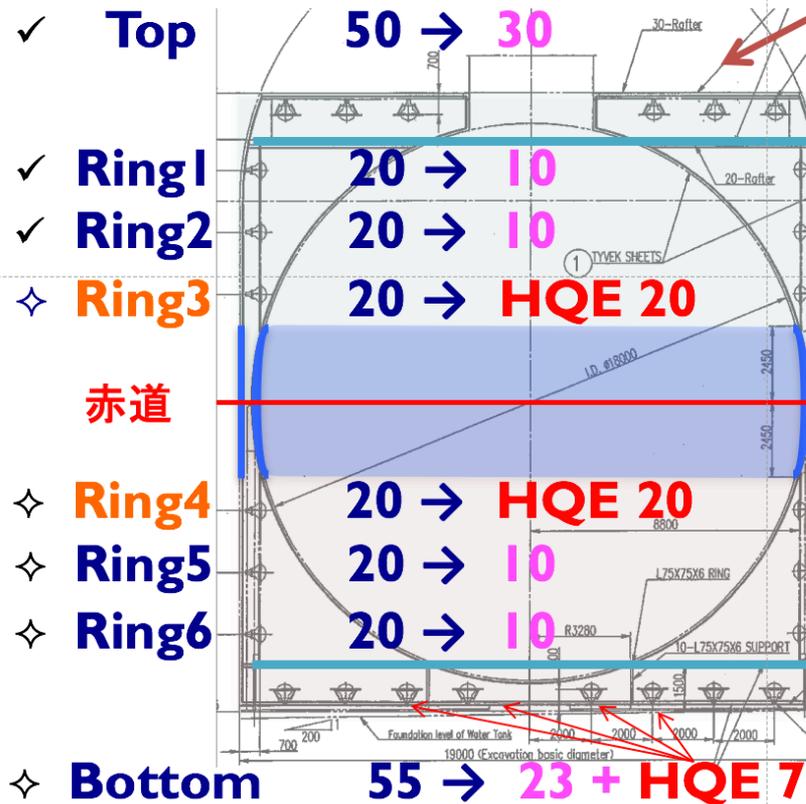


※外水槽検出器内部で一様発生させた ^{222}Rn とその娘核の崩壊事象シミュレーション

OD改修工事 - PMT取替 -

刷新工事期間:2016年1月~3月

全PMTの入れ替え(225→140)



上部ハッチより
クレーンにて
PMT搬出、搬入



←ボートを使って作業
✓ Top, Ring1, Ring2

Ring3,4のPMTは**赤道**
を向けて設置→

タイベックI082D
(± 2.5 m)を追加



足場を使って下からアクセス
◇ Ring3~6, bottom

境界タイベック
の撤廃



OD改修工事の結果 - ミューオン -

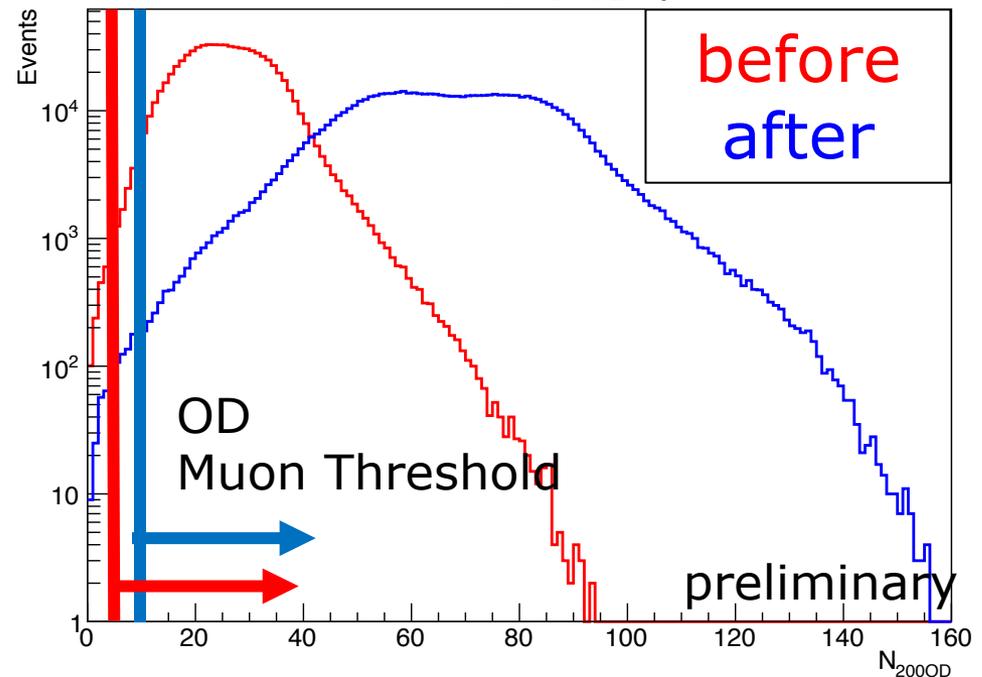
ODで取り逃すミューオン

$$1 - \frac{\text{外部検出器で判定されたミューオン事象}}{\text{内部検出器で判定されたミューオン事象}}$$

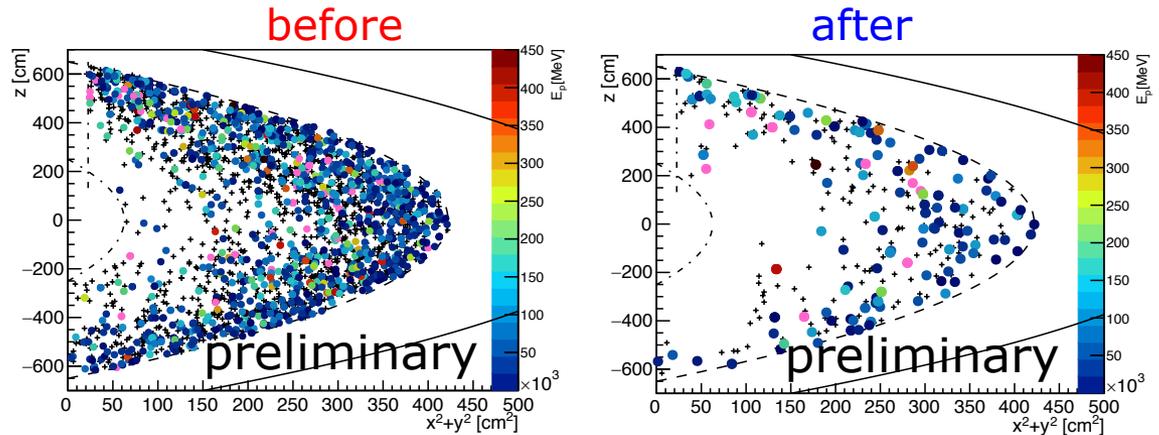
0.29 → 0.11 %

※ 今までは内部検出器で見ても明らかにMuonとわかるような事象でも、外部検出器でMuon判定されない事象が0.29%だったが、今回の改修工事で従来の1/3まで低減した

OD PMT ヒット分布



OD改修工事の結果 - 高速中性子 -



高速中性子事象Vertex分布

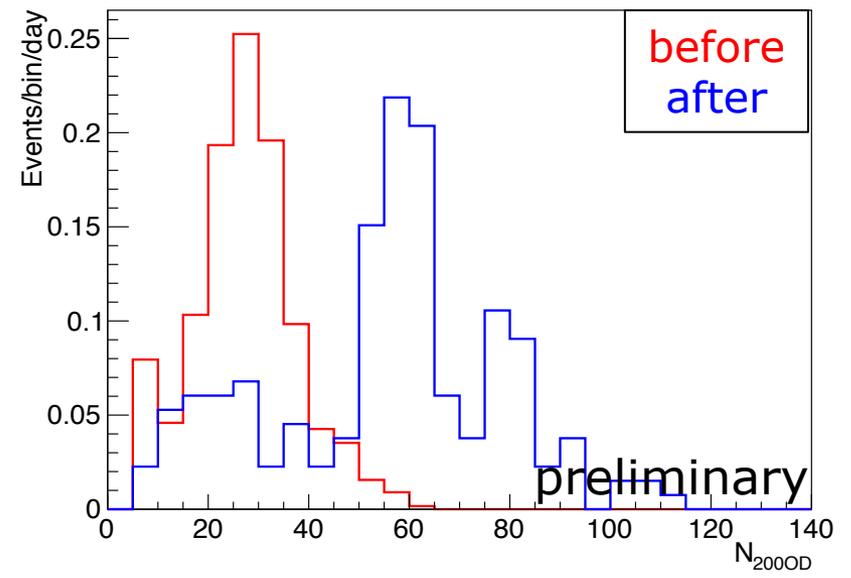
高速中性子事象のODヒット分布

高速中性子事象の検出感度が向上

1.07 ± 0.03 event/day



1.34 ± 0.10 event/day



大気 ν NC の背景事象

(KamLAND@2011, arXiv:1105.3516v2)

Atom. ν NC Reaction	Number of Events (7.5~30.0 MeV) @ 2011
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^{11}\text{C} + \gamma$	13.2
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^{10}\text{B} + p$	1.4
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^6\text{Li} + \alpha + p$	1.4
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^9\text{Be} + 2p$	0.3
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + 2\text{n} + {}^{10}\text{C}$	0.1
Total	16.4±4.7

大気 ν NC の背景事象

(KamLAND@2011, arXiv:1105.3516v2)

Atom. ν NC Reaction	Number of Events (7.5~30.0 MeV) @ 2011
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^{11}\text{C} + \gamma$	13.2
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^{10}\text{B} + p$	1.4
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^6\text{Li} + \alpha + p$	1.4
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + \text{n} + {}^9\text{Be} + 2p$	0.3
$\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + 2\text{n} + {}^{10}\text{C}$	0.1
Total	16.4±4.7

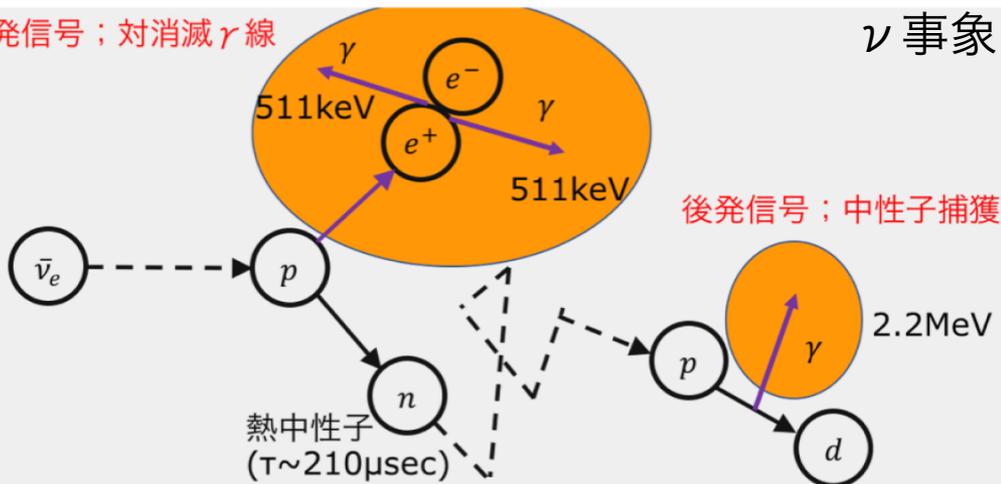
- *Energetic* なneutronができる → 偽IBDをつくる
- 検出器内でできると OD veto できない
- Simulationからの見積もりのみで評価

大気 ν NCイベント除去 - neutron PSD -

PulseShapeDiscrimination

先発信号；対消滅 γ 線

ν 事象

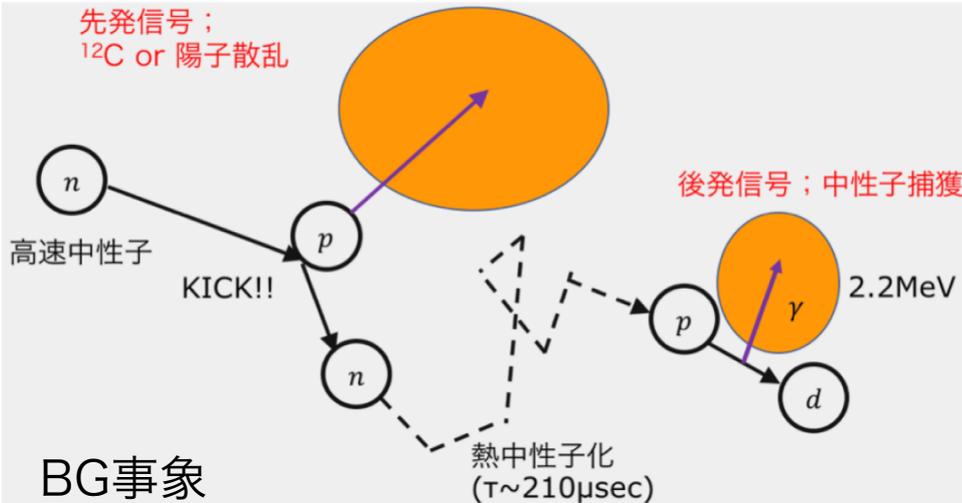


後発信号；中性子捕獲

IBDで発生する
陽電子(e^+)対消滅 γ の発光波形

高エネルギー中性子がけつとばした
陽子(p)の発光波形

先発信号；
 ^{12}C or 陽子散乱



後発信号；中性子捕獲

BG事象

大気νNCイベント除去 – neutron PSD –

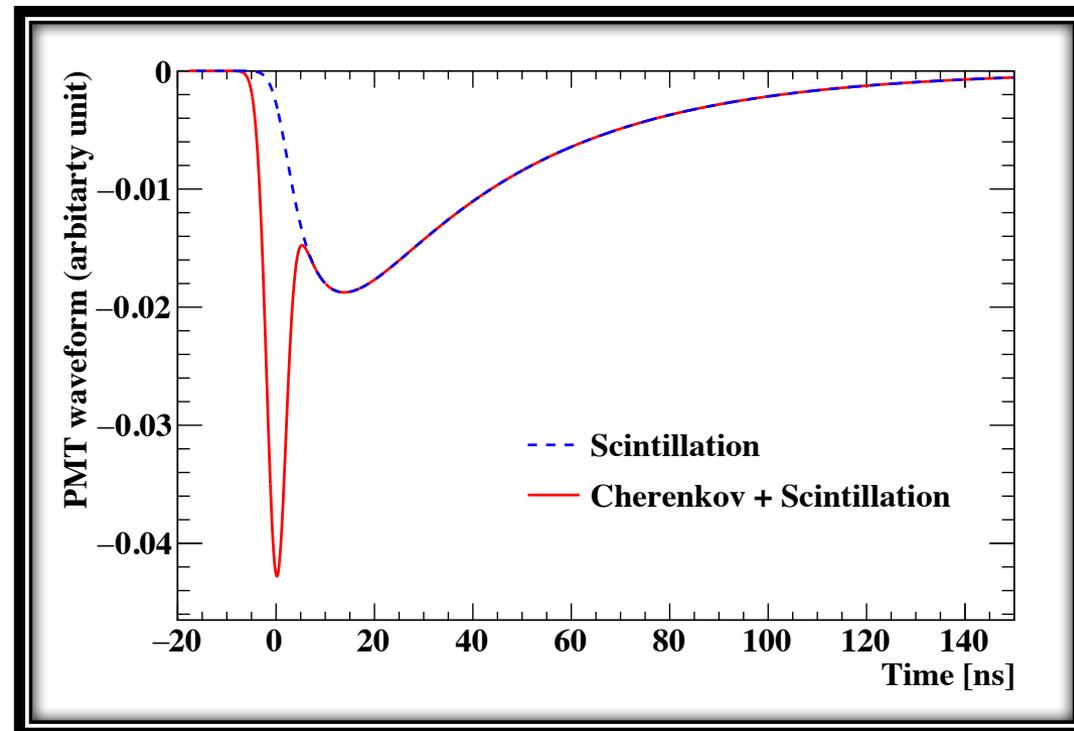
PulseShapeDiscrimination

LABベースの液体シンチレータ検出器(JUNO, Jinping etc,,,)で
PSDのstudyが発展

arXiv:1607.01671v1

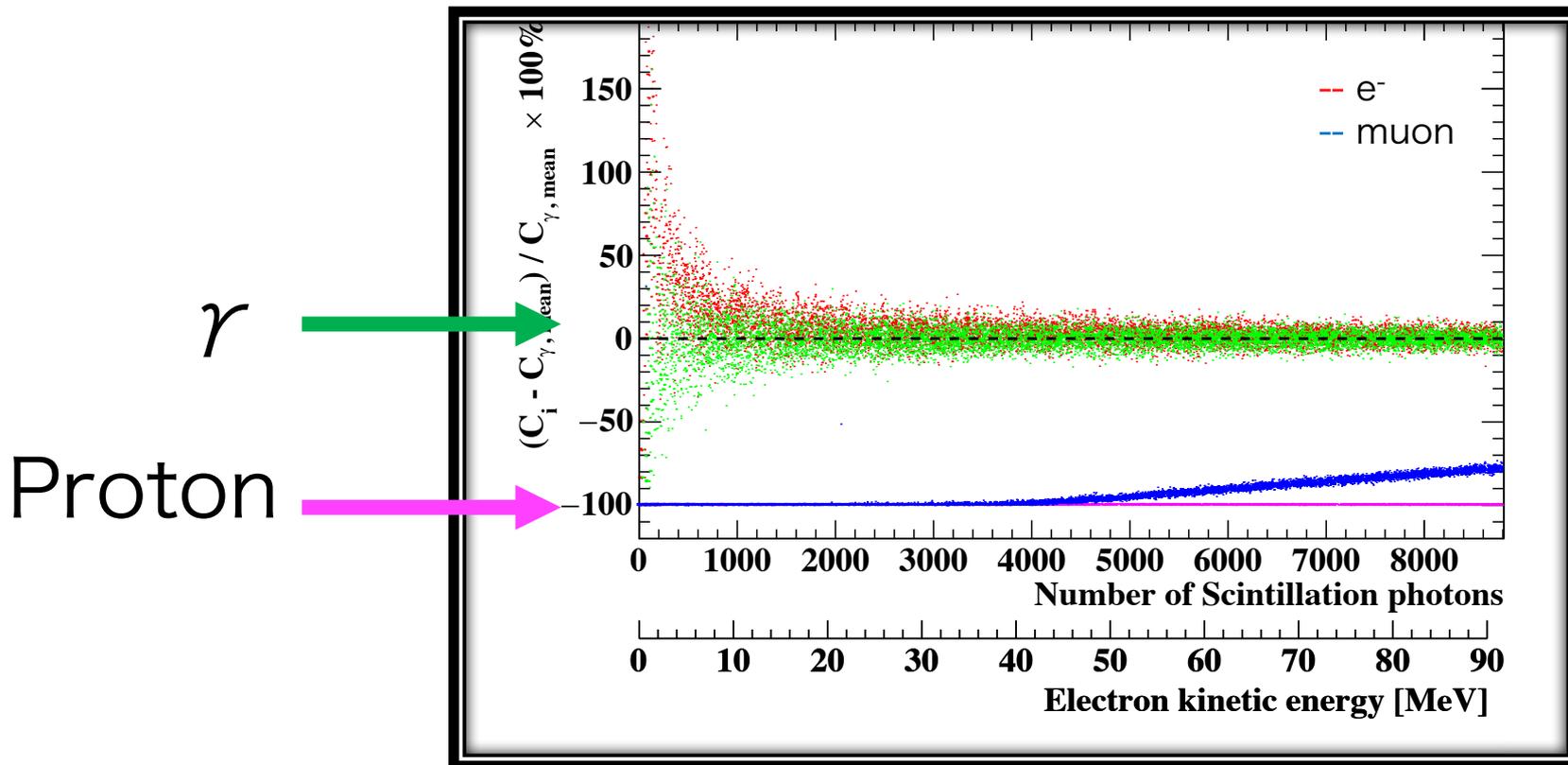
発光波形のうち

- 鋭く&速い成分
→ Cherenkov光によるもの
- なまっていて遅い成分
→ Scintillation光によるもの



大気 ν NCイベント除去 - neutron PSD -

PulseShapeDiscrimination



arXiv:1607.01671v1

γ -protonのPSDができるかもしれない

大気 ν NCイベント除去 – neutron PSD –

PulseShapeDiscrimination

KamLAND-LSでは立ち下がりが早く
Cherenkov光も不十分で見えにくい



低エネルギー(a few MeV)での
 $\alpha - \beta / \gamma$ のPSDは難しい

先行研究

では高エネルギー(10MeV以上)での
 $\gamma - \text{proton}$ のPSDは？

Let's PSD for high energy region !!

大気 ν NCイベント除去 – neutron PSD –

PulseShapeDiscrimination

- studyの途中経過の様子を載せる
- 「LAB-LS@Jinpingでの結果だとatm. ν NCが1/5になるのでそこまでいけばうれしい」的な内容を書く

すいません、お見せできるような絵を作れなかった。。。

背景事象がどれくらい減るか

- atm. ν NCが1/5になるとすると

4.53kton-year

Background	Number of events for 7.5~30.0MeV @2011
Random coincidence	0.22 ± 0.01
Reactor $\bar{\nu}_e$	2.2 ± 0.7
${}^9\text{Li}$ (muon spallation)	4.0 ± 0.3
Fast neutron	3.2 ± 3.2
Atmospheric ν (CC)	0.9 ± 0.2
Atmospheric ν (NC)	16.4 ± 4.7
Total	26.9 ± 5.7

背景事象がどれくらい減るか

- atm. ν NCが1/5になるとすると

4.53kton-year

Background	Number of events for 7.5~30.0MeV @2011
Random coincidence	0.22 ± 0.01
Reactor $\bar{\nu}_e$	$2.2 \pm 0.7 \rightarrow \sim 0$
${}^9\text{Li}$ (muon spallation)	$4.0 \pm 0.3 \rightarrow ?$
Fast neutron	$3.2 \pm 3.2 \rightarrow ?$
Atmospheric ν (CC)	0.9 ± 0.2
Atmospheric ν (NC)	$16.4 \pm 4.7 \rightarrow \sim 3.28$
Total	26.9 $\pm 5.7 \rightarrow 11.6$

Total Backgroundが約半分になる

まとめ

- KamLANDでは**低エネルギー側でSRN探索**が可能
しかも今はReactor停止中
- OD改修工事で**高速中性子・Spallation**による不定性低減
- PSDで**大気 ν** による背景事象低減に *CHARANGE !!*

back up

KamLANDにおけるSRN探索

メリット

- $E_{\text{th}} = 0.9 \text{ MeV}$
 $E_{\bar{\nu}_e} \cong E_p + \bar{E}_n + 0.8 \text{ [MeV]}$
- 遅延同時計測を利用し高効率で $\bar{\nu}_e$ 事象を選択



- 原子炉停止中なら低エネルギー側がよく見れる
- 反電子ニュートリノに関して高感度
- muon原子核破砕イベントの同定

デメリット

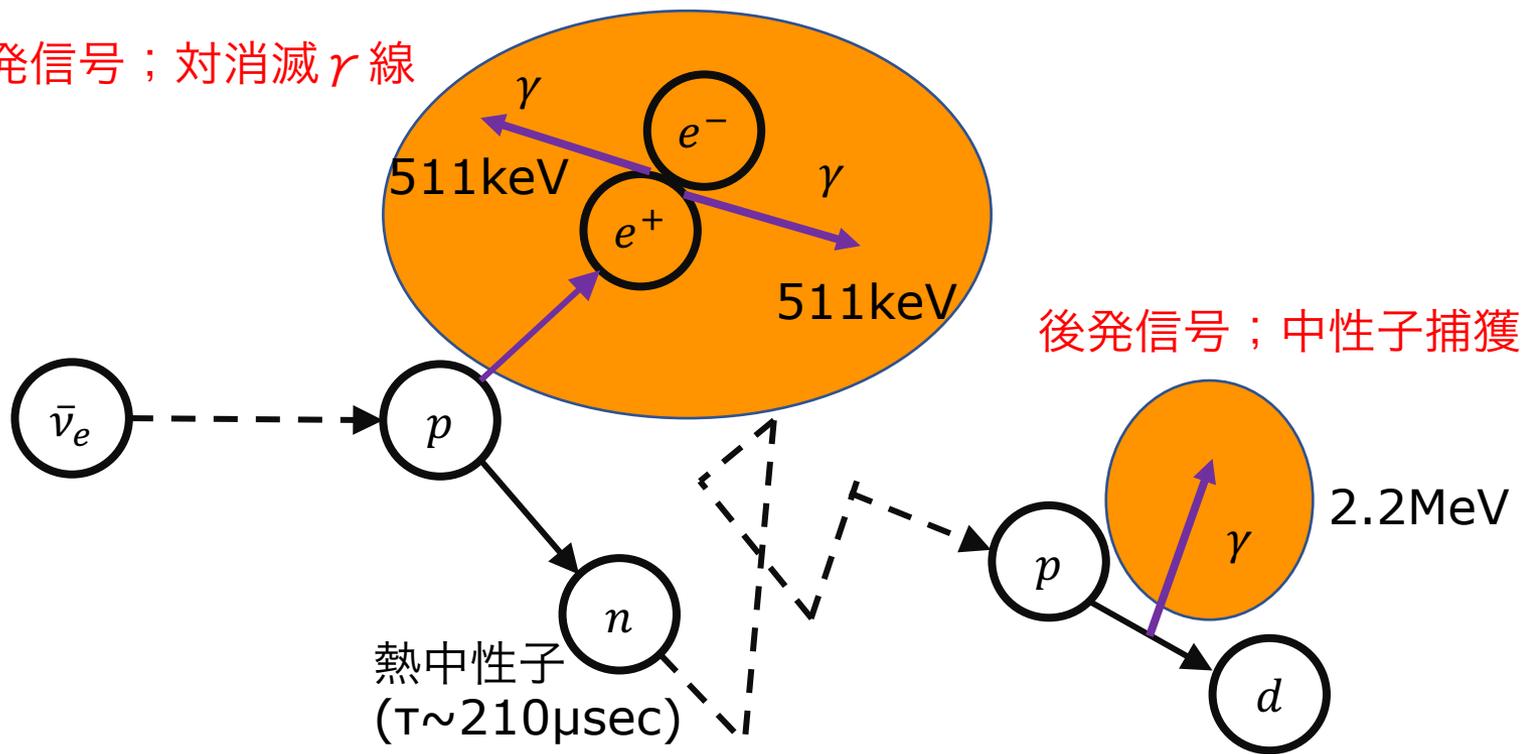
SKと比べて

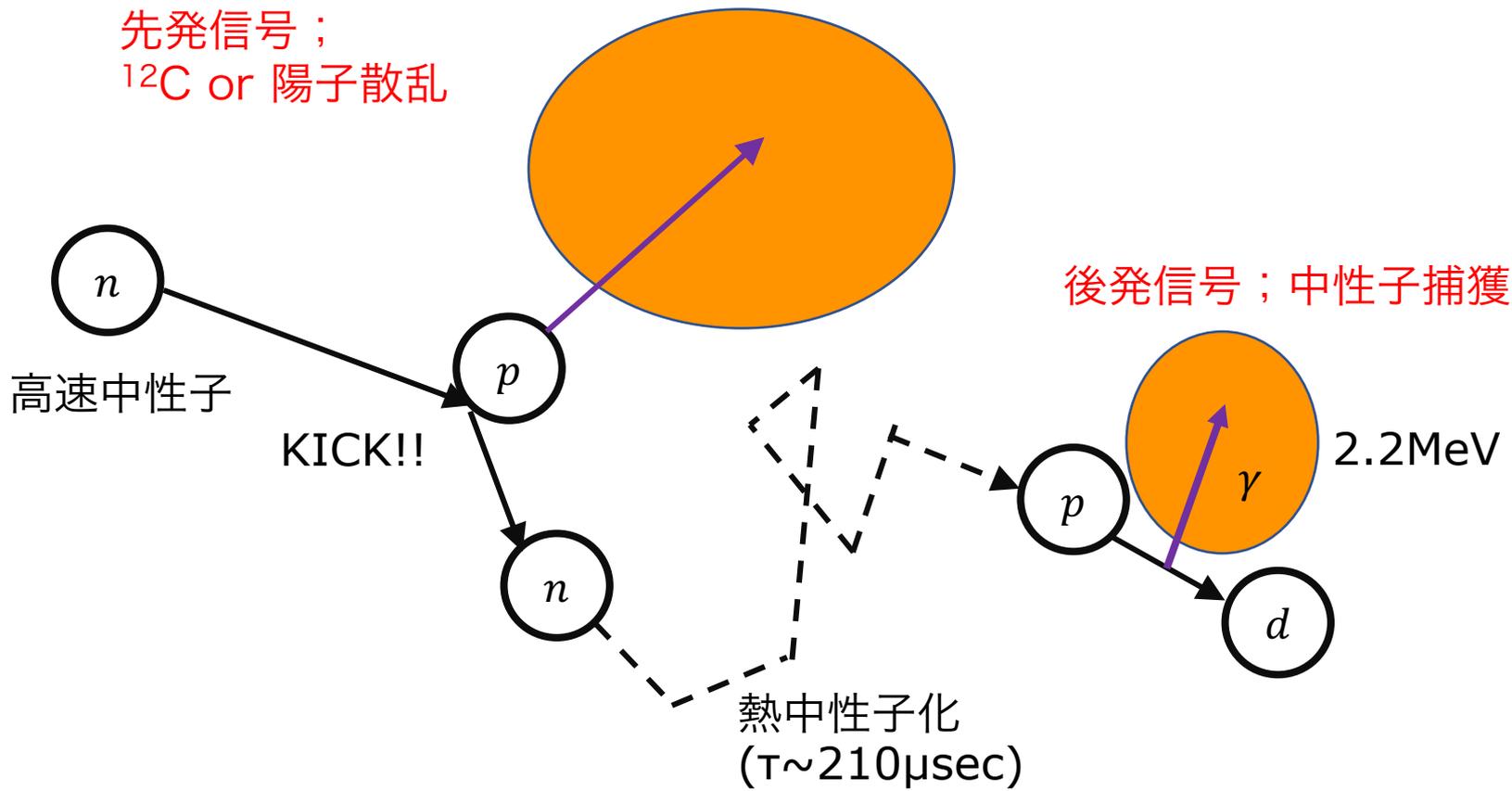
- 方向感度がない
- Target Massが小さい



- 大気ニュートリノが深刻なBG
- Scintillationなので方向感度がない

先発信号；対消滅 γ 線



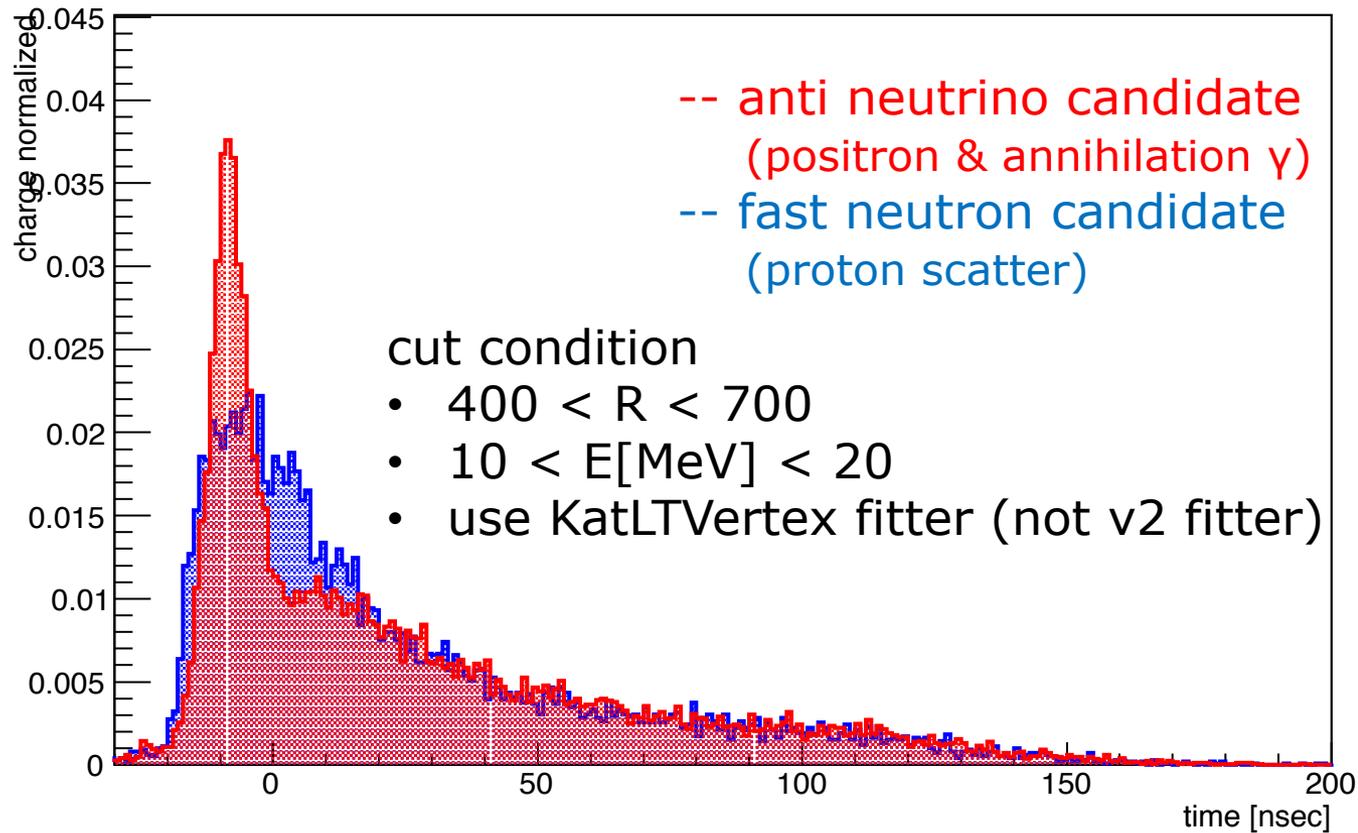


大気 ν の背景事象 (CC)

(KamLAND@2011, arXiv:1105.3516v2)

4.53kton-year Atom. ν CC Reaction	Number of Events (7.5~30.0 MeV) @ 2011	
	N of evt	Untagged
$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$	2.1	0.5
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^{11}\text{B}$	0.7	0.2
$\nu_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^- + n + {}^{11}\text{N}$	0.4	0.1
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^{11}\text{B} + \gamma$	0.4	0.08
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + n + {}^7\text{Li} + \alpha$	0.4	0.08
$\bar{\nu}_\mu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ + 2n + {}^{10}\text{B}$	0.02	0.005
Total	4.0±0.9	0.9±0.2

time spectrum



tmp20170302.eps

- 22evt/4.53kt-year @ 2011 result (7.5~30MeV)
 - 11evt/4.53kt-year @ if 1/5 atom. ν & reactor off (7.5-30MeV)
 - expected SRN 0.4 evt/1kt-year (10-30MeV)
 - \rightarrow S/N = 1.82/11 ; we need more one order BG decreasing ?
-
- Currently we have ~ 7kton-year
 - 17evt BG (if 1/5 atom. ν & reactor off (7.5-30MeV))
 - 2.1evt Expected
 - we can lower threshold than expected (Eth~10MeV)
 - we may obtain 1σ limit for any models