

ハイパーカミオカンデにおける 中性子捕獲事象の 識別アルゴリズムの研究

岡山大理, 東理大理工^A, 東大宇宙線研^B

原田 将之, 小汐由介,

石塚正基^A, 矢野孝臣^B, 竹田敦^B, 篠木正隆^A

for Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration

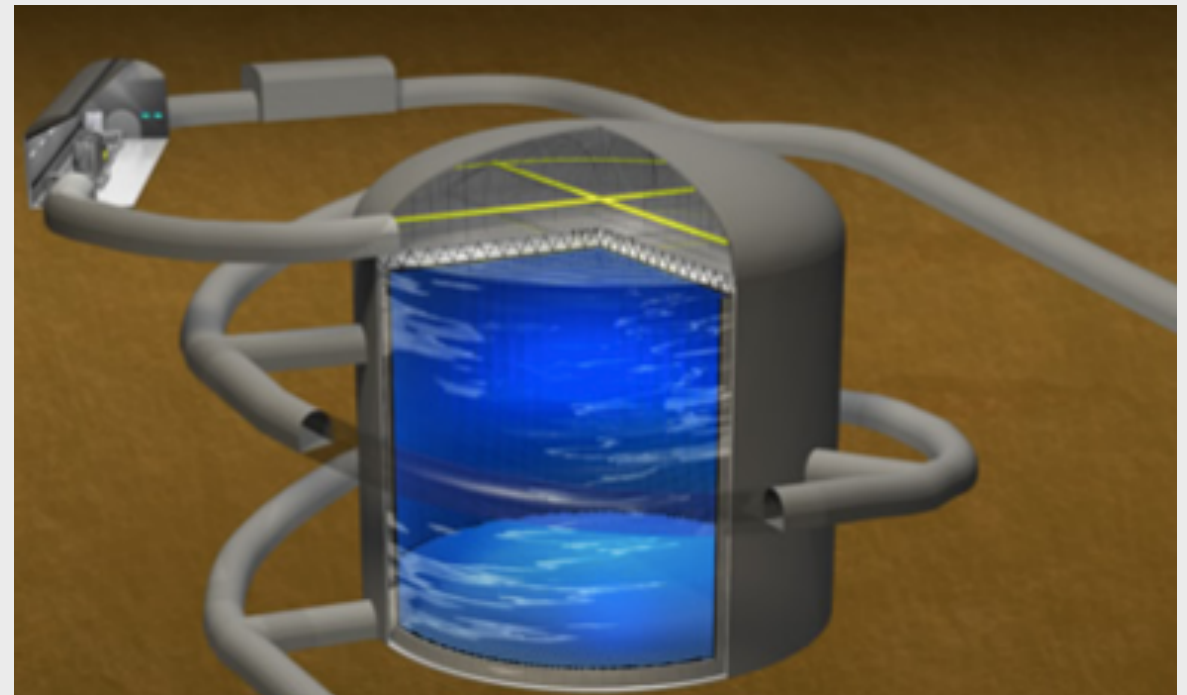
2018年9月16日 日本物理学会2018年秋季大会

目次

1. イントロダクション
2. 事象識別アルゴリズム
3. 中性子捕獲事象の識別効率
4. まとめと今後

1.1 研究背景

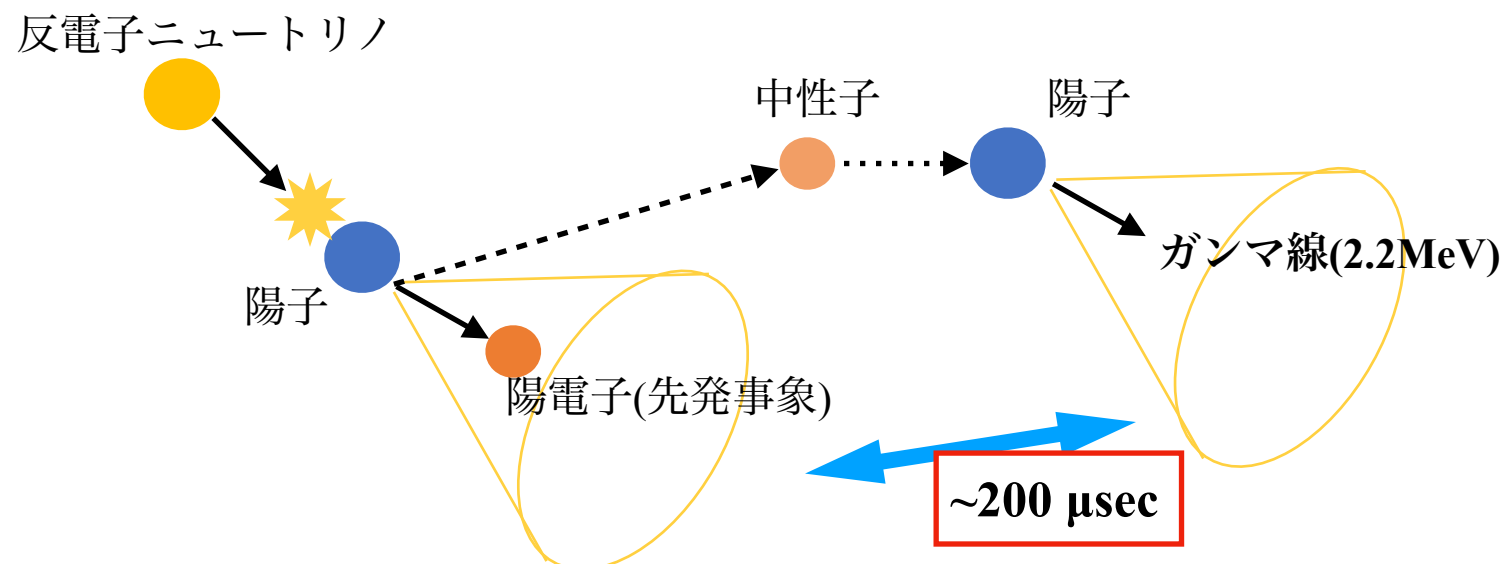
- 直径約74 m、高さ約60 mの大型水チェレンコフ検出器を建設するハイパーカミオカンデ計画が進行中
- 1光子検出率が**Super-K PMTの約2倍**の新型PMT40000本
- 低エネルギーでのエネルギー感度が向上する→中性子捕獲
(SKでは同定効率20%)



1.2 中性子捕獲

- 逆ベータ崩壊や深非弾性散乱などで放出された中性子が原子核に捕獲されガンマ線を放出する現象
- Hyper-Kでは水分子中の陽子による中性子捕獲で2.2 MeVのガンマ線を放出
- 中性子捕獲事象と先発荷電粒子との同時遅延計測を用いて事象識別
- 2.2 MeVのガンマ線はHK PMTで約10ヒットしかなく、探索が難しい

例：水中での逆 β 崩壊



1.3 シミュレーション

- 環境

- ✓ WCSim . . . ハイパーカミオカンデで用いられているGeant4ベースのMCシミュレーションソフト

- シミュレーション

- ✓ 粒子：ガンマ線、 2.2 MeV
- ✓ 位置：タンク内ランダム位置、ランダム方向
- ✓ イベント数：100000

- ノイズ

- 今回考えるノイズは、PMTのダークノイズのみ
 - ✓ ダークレート 3.0kHz, 4.2kHz, 8.4kHzについて計算
- 実際は岩盤やPMTなどからの放射線が大きなノイズになるため、考慮が必要

2. 事象識別アルゴリズム

- 3つの段階によって識別される

1.Event Pre-selection

→10 nsec中のヒット数により大まかな識別

2.Vertex Reconstruction

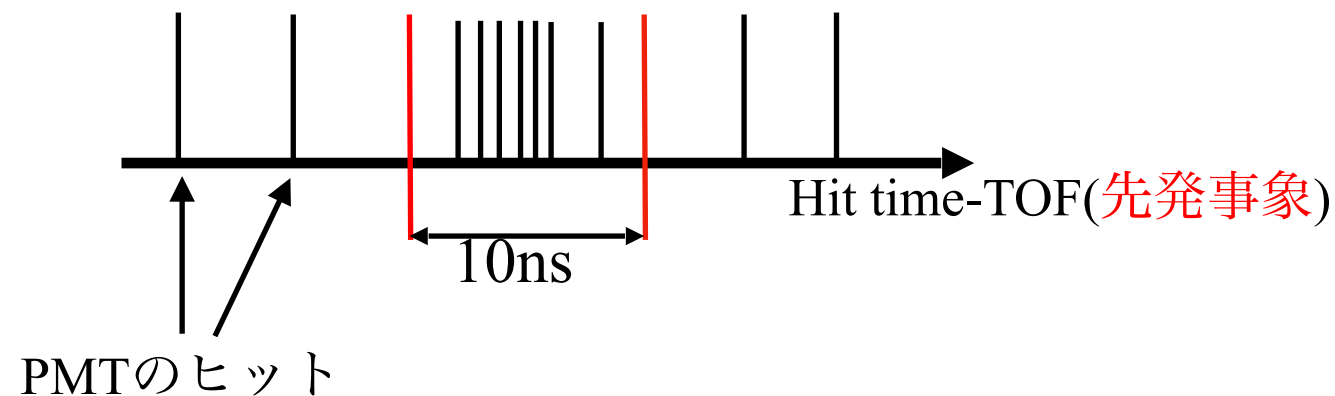
→中性子捕獲事象の位置を再構成

3.TMVA Evaluation

→多変数解析による事象識別

2.1 Event Pre-selection

- (ヒット時間 - TOF) 分布を作成
- 10 nsec のwindowを用いて中性子捕獲事象候補を探す
→ 最も多くのヒットがあった範囲を候補とする



ヒット数が最大になるwindow内のヒットが以降の識別に用いられる

ダークレートによってヒット数に閾値を設定

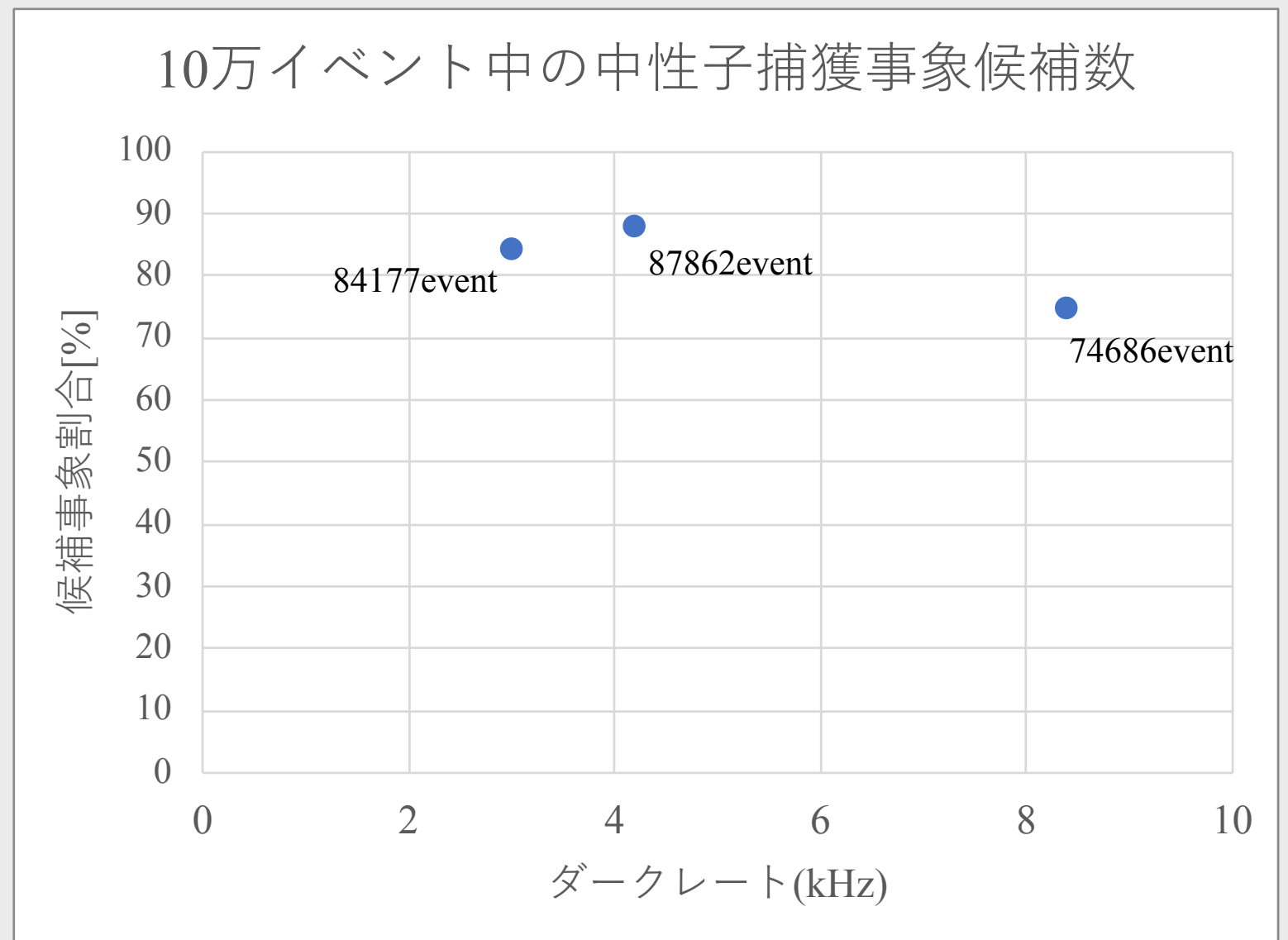
ダークレート	しきい値
3.0kHz	7ヒット
4.2kHz	<u>7ヒット</u>
8.4kHz	11ヒット

2.1.1 しきい値カット結果

- しきい値は1 ms 中での1中性子捕獲事象候補に対し、背景事象での候補が100イベントを超えたところに設定

✓4.2kHzでのイベント数が多くなることを確認

→しきい値が3.0kHzと同じ7ヒットなのが原因



2.2 Vertex Reconstruction

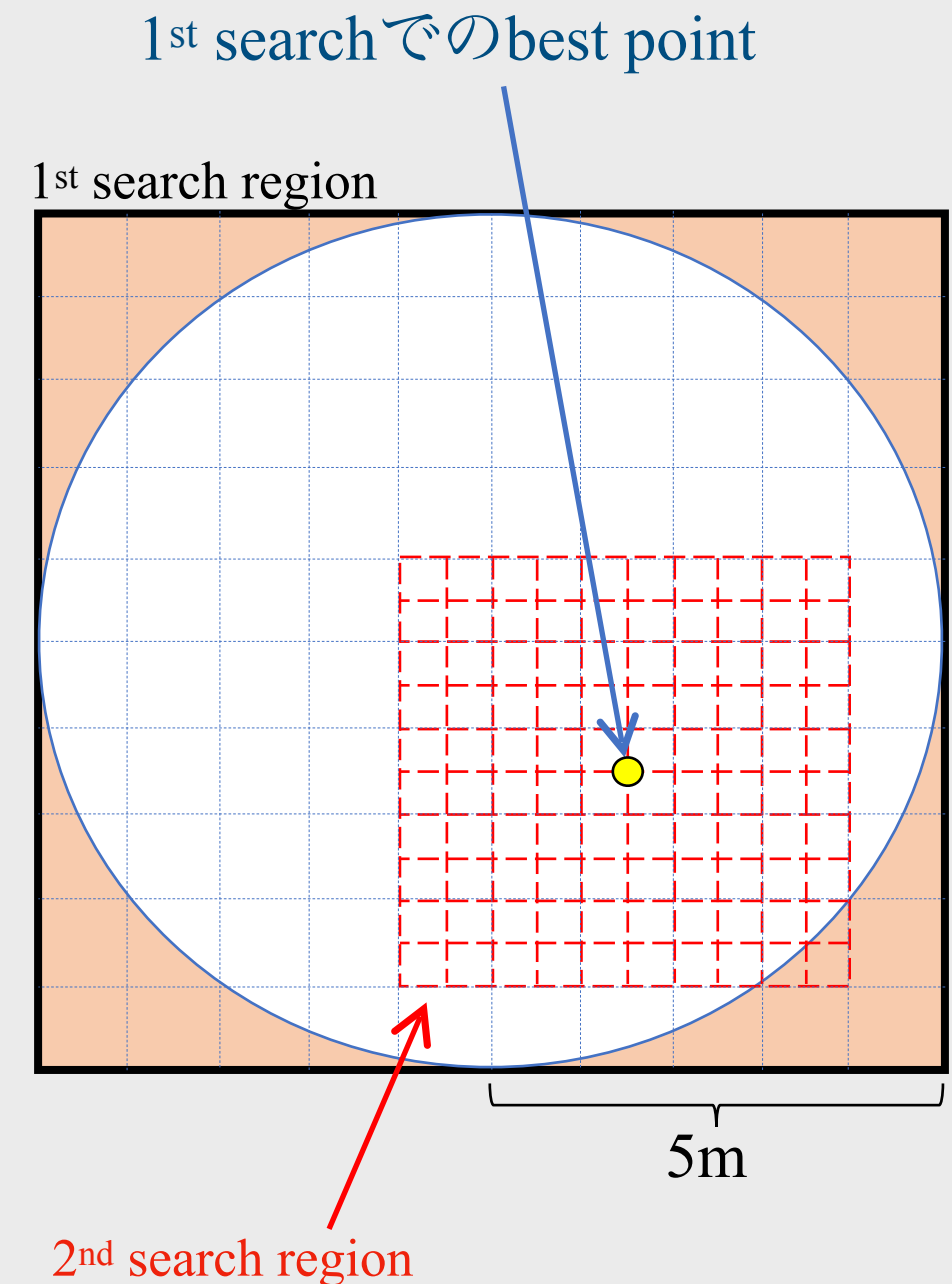
- 正確な評価のために中性子捕獲事象発生位置を再構成
→事象候補window内の情報（位置、時間）を用いる

以下の繰り返しにより事象を再構成する

1. グリッドを用いた位置の仮再構成
2. 各格子点での事象候補探索
3. Goodness計算による評価

2.2.1 グリッドを用いた位置の仮再構成

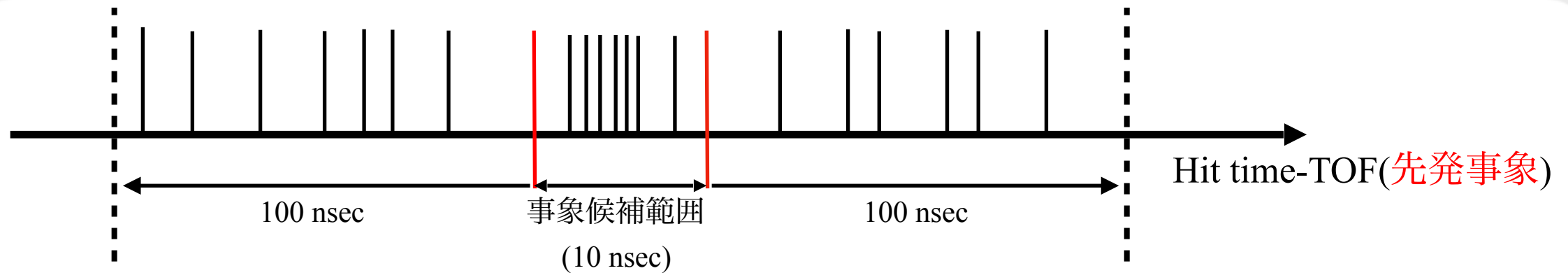
- 先発事象の位置を中心に半径5mで格子を作成
- 格子点でそれぞれ
 - 2.事象候補探索
 - 3.Goodness計算による評価を行い、仮再構成
- 仮再構成点を中心に半分の大きさに格子を作成
を格子サイズが20 cmになるまで繰り返す



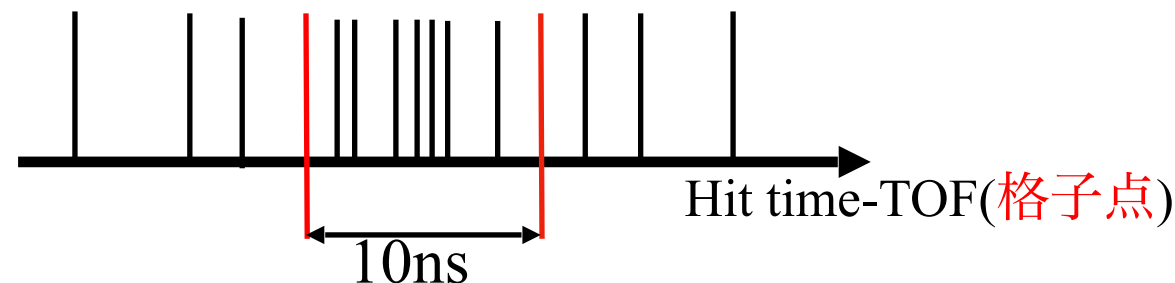
2.2.2 事象候補探索

- 格子点を用いて(ヒット時間 - TOF)分布を作成

→10 nsec 中のヒット数が最多の範囲を用いて再構成の評価



事象候補範囲 ± 100 nsec の範囲のヒットと格子点から分布を作成



2.2.3 Goodness計算による評価

- 格子点における候補に対しGoodnessを計算

→Goodnessが最大となる点を仮再構成点とする

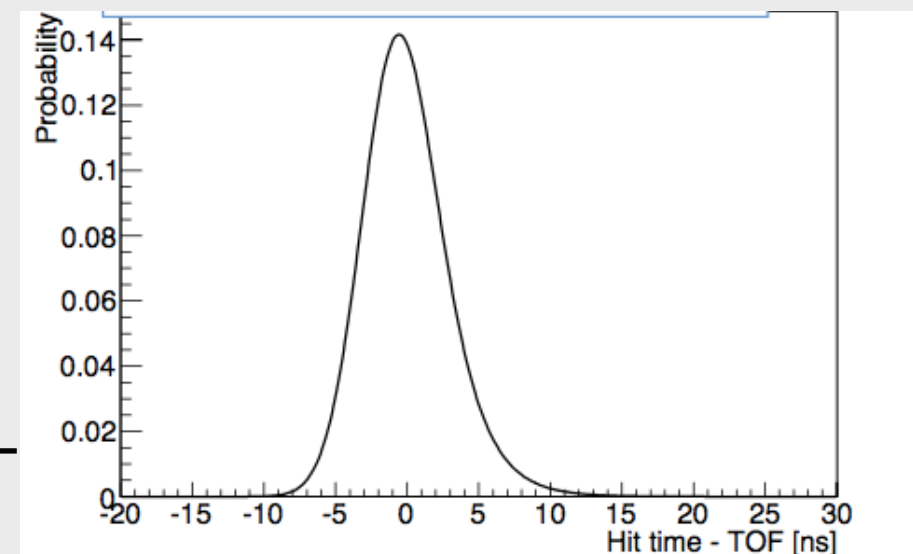
- Goodnessの定義

$$\text{goodness} = \sum_i^{\text{hits in window}} g(t_i)$$

$$g(t) = \frac{\lambda}{2} \exp \left[\frac{\lambda}{2} (2\mu + \lambda\sigma^2\sigma - 2t) \right] \times \text{erfc} \left(\frac{\mu + \lambda\sigma^2 - t}{\sqrt{2}\sigma} \right)$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{2}} \int_x^\infty e^{-k^2} dk$$

λ : 指数部分の崩壊定数
 μ : ガウス部分のピーク
 σ : ガウス部分の標準偏差
 t : ヒット時間 - TOF



2.2.4 事象再構成結果

ダークレート	イベント数	レゾリューション(1σ)
0.0 kHz (閾値7)	74630	252 cm
3.0 kHz (閾値7)	83895	277 cm
4.2 kHz (閾値7)	87215	284 cm
8.4 kHz (閾値11)	74595	284 cm

✓ダークレートにより分解能が下がることを確認

✓8.4kHz、0kHzではしきい値の設定が厳しく分解能がいい

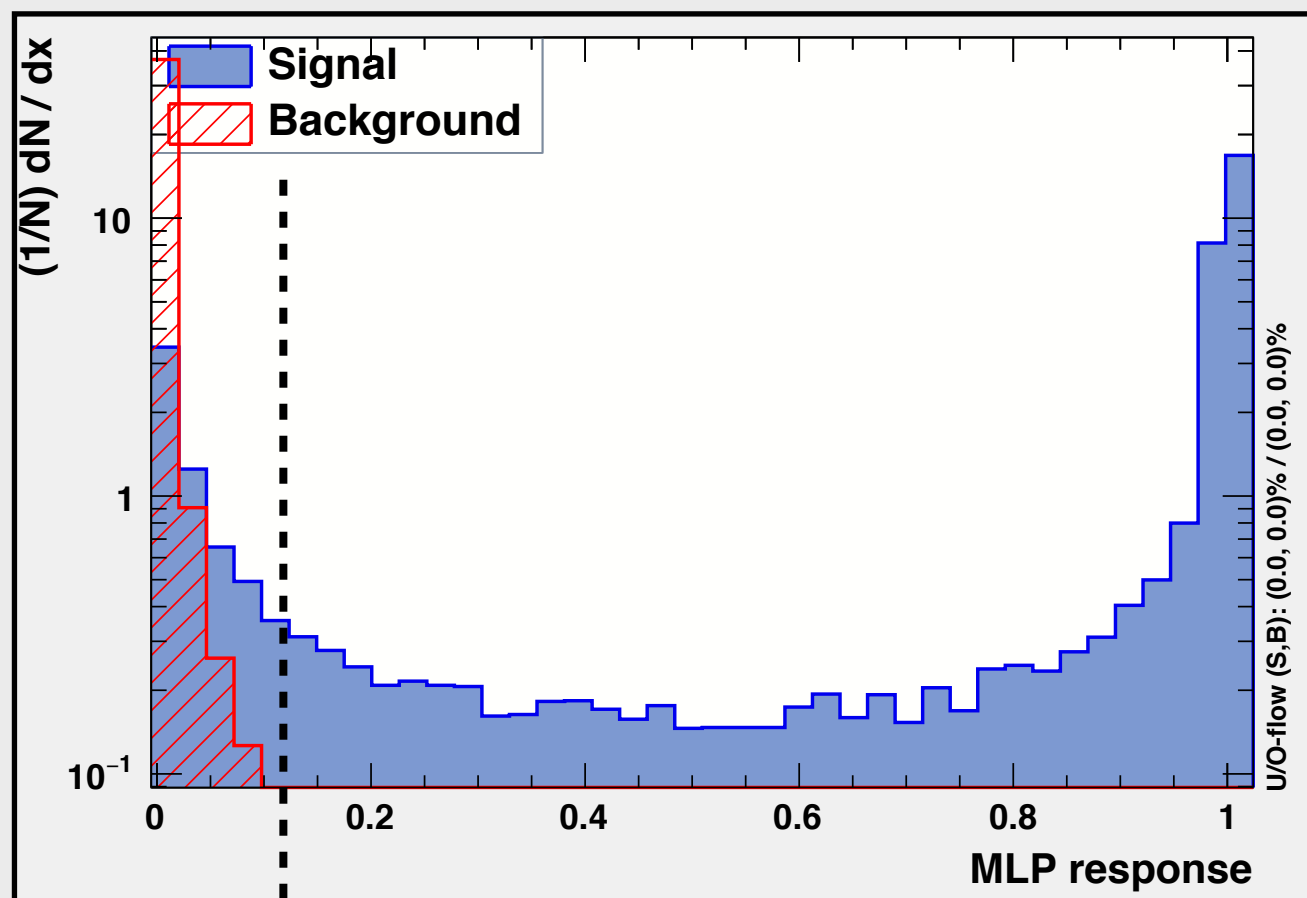
✓4.2kHzではしきい値の設定が緩く、分解能は落ちている

2.3 TMVA Evaluation

- 多変数解析を用いて、中性子捕獲からの信号とノイズ由来の信号を識別する
- TMVAに用いる変数
 - Acceptance . . . 各ヒットPMTへの入射確率から計算
 - Opening angle . . . 各ヒットPMTとガンマ線との角度の平均
 - Neutron captured time . . . 先発事象から中性子捕獲までの時間
 - # of hits in 10 nsec window . . . 10 nsec window内での最大ヒット数
 - Goodness . . . 事象再構成を行った際のGoodness

2.3.1 Classificationによるカット

- 10イベントに1回の誤識別を許すようにカットを施す
→残ったイベントの割合で中性子捕獲事象と識別できたとする
- 多変数解析での分離結果（例：8.4kHz）



✓ノイズ方向に寄っているシグナル事象

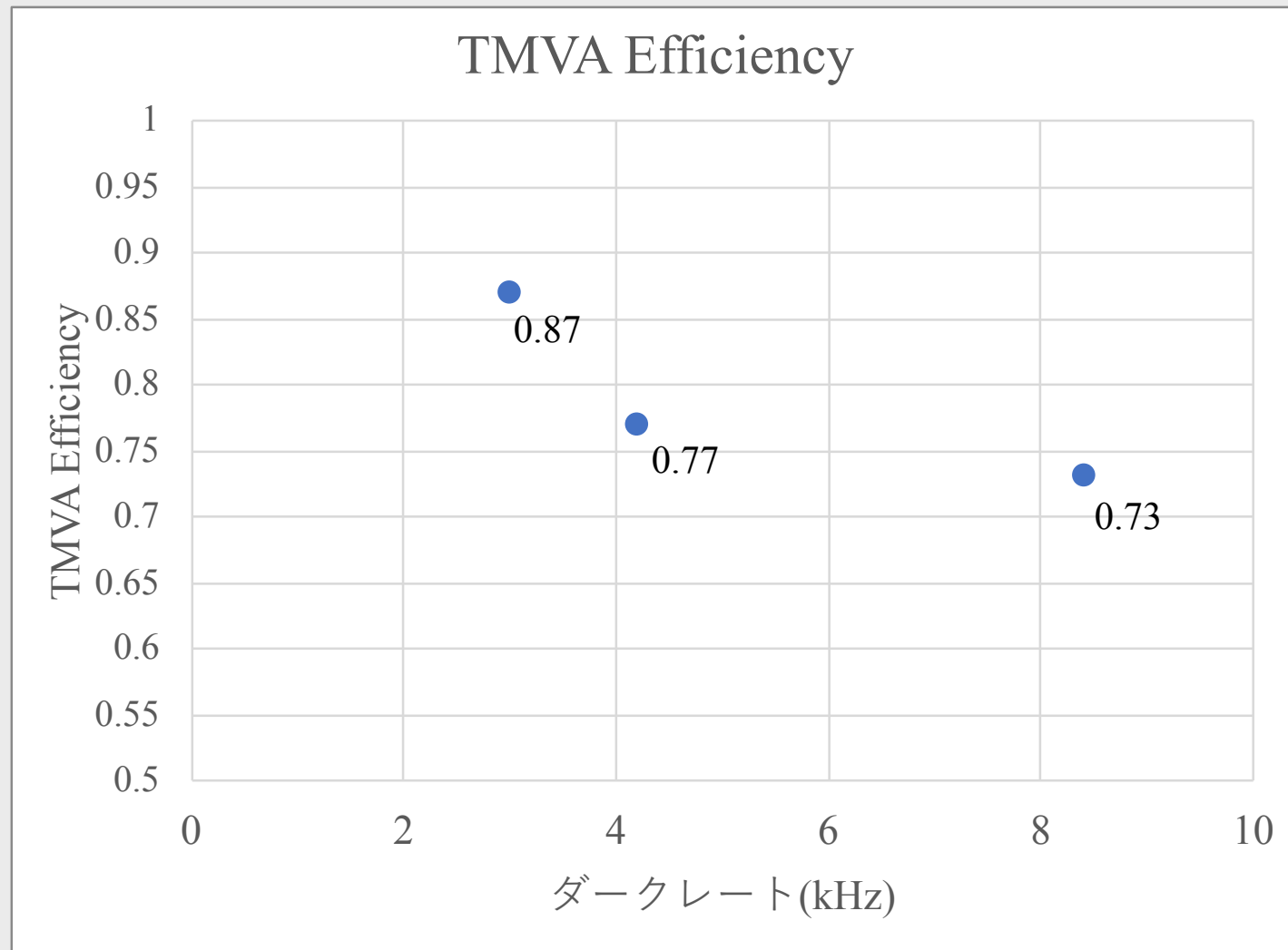
▶ Pre-selectionでノイズを候補とした

▶ ヒットがまばらで変数値がノイズらしい捕獲事象

が考えられる

2.3.2 TMVA 計算結果

TMVA Efficiency ・ ・ ・ TMVAに用いたイベントのうちカット後に残った割合



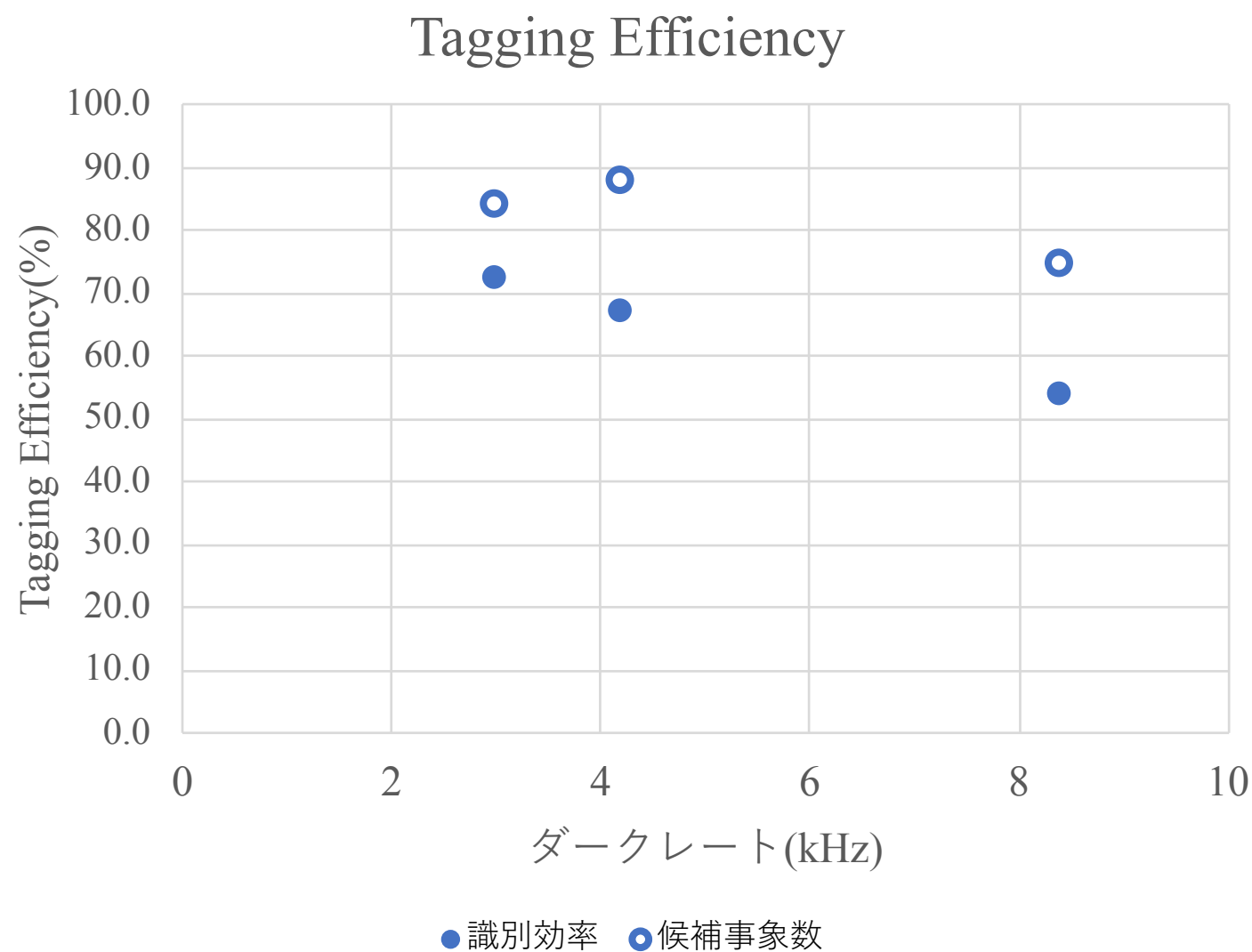
✓4.2kHzでの値が悪いことを確認

⇒Pre-selectionの低いしきい値によるノイズ事象を識別できている

3. 識別効率

- 中性子捕獲事象の識別効率は以下の式で決定される

Pre-selectionで閾値以上のイベント数 × TMVA Efficiency



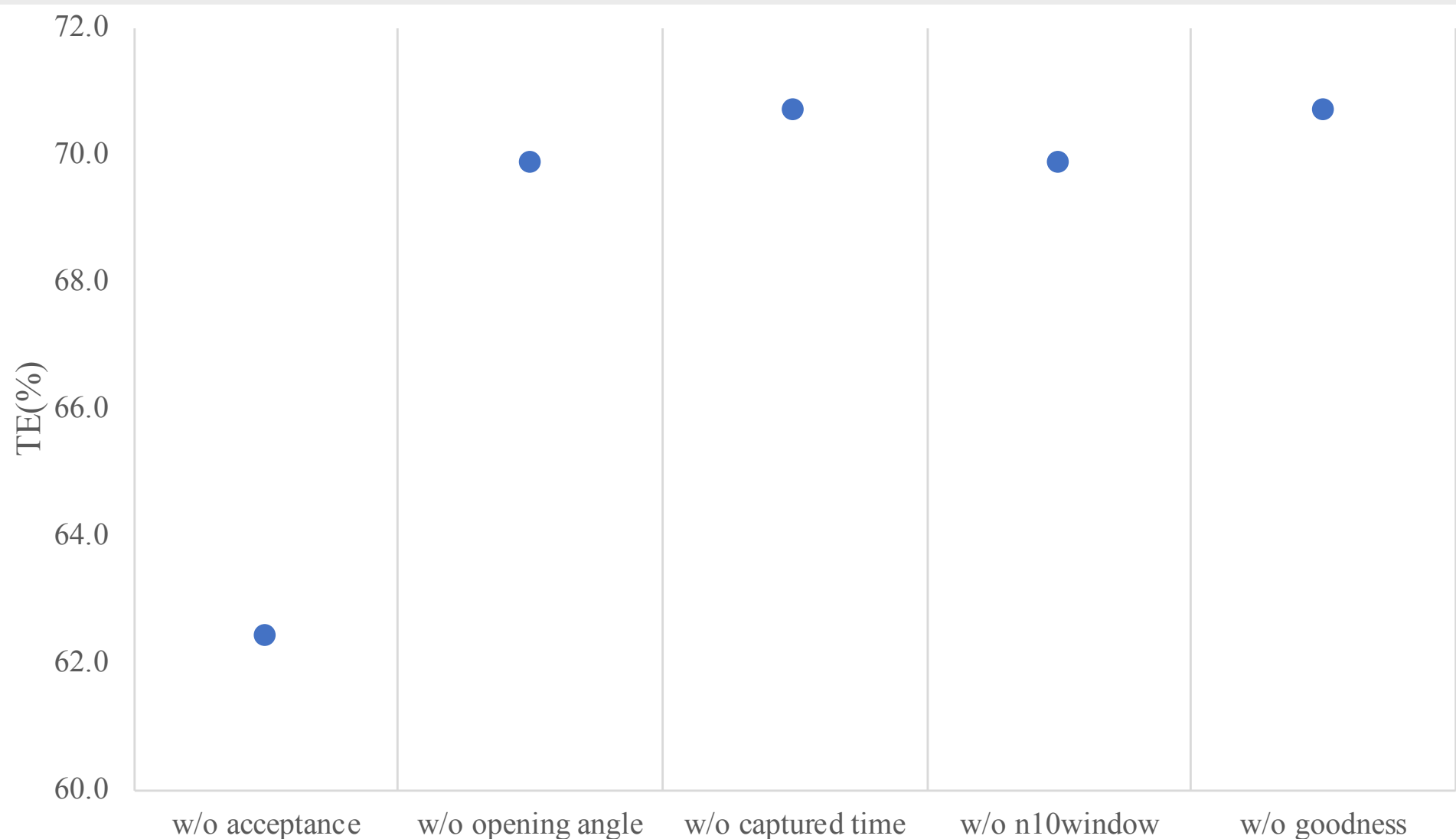
Dark rate	Tagging Efficiency (1 σ 統計誤差)
3.0kHz	72.7(± 0.2)%
4.2kHz	67.2(± 0.2)%
8.4kHz	54.2(± 0.2)%

✓ 4.2kHzでPre-selectionと
TMVAの効果で相殺して
いることを確認

3.1 変数の評価

- 各変数を抜いて計算

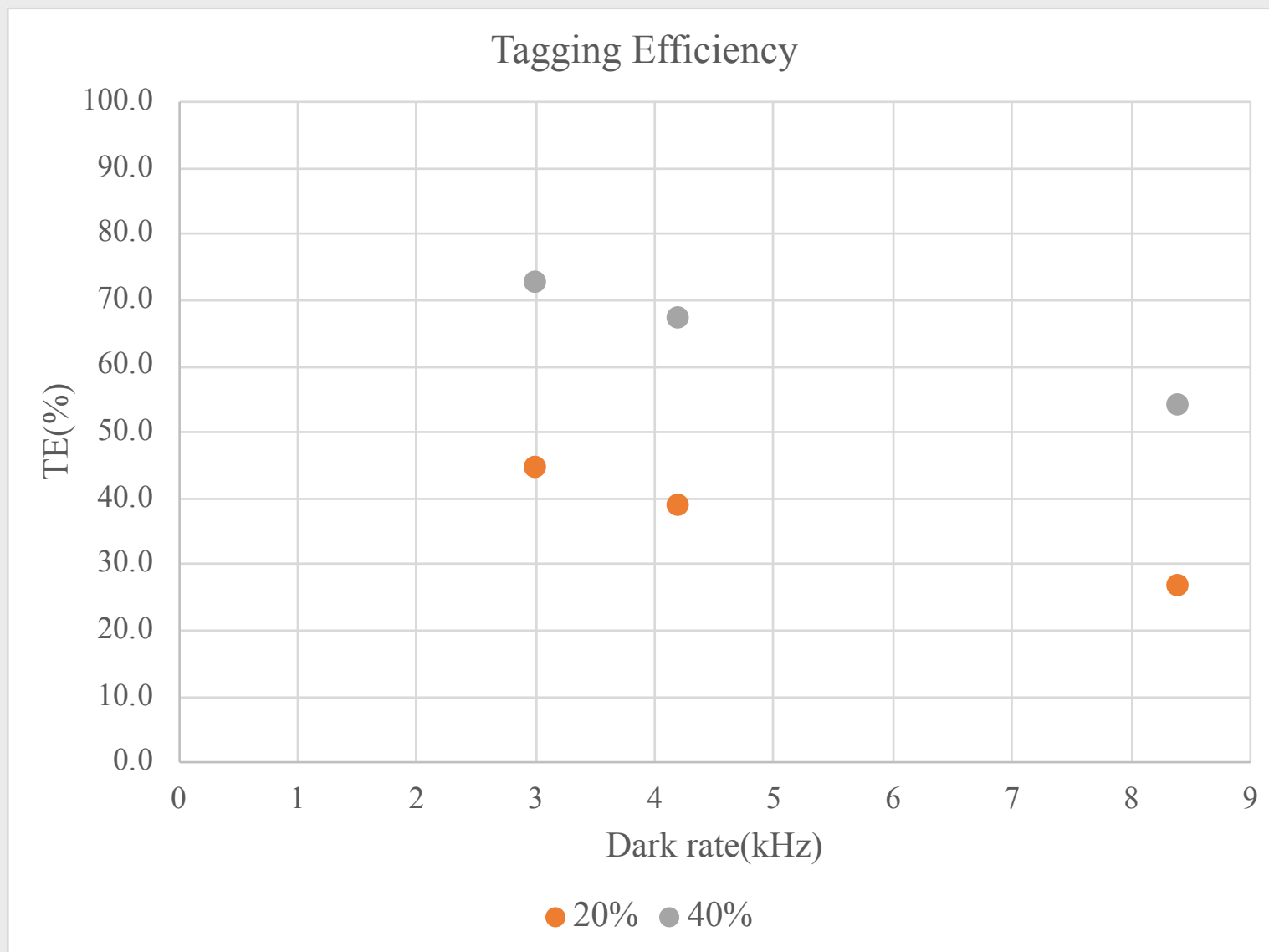
→3.0kHzでの各変数の識別効率への寄与を計算した



✓ Acceptanceの寄与
が大きいことを確
認した

3.2 PMT被覆率による比較

- PMTのCoverageを20%にした時との比較



ダークレート	TE(p.c.20%) [%]	上昇率
3.0 kHz	44.5	1.63
4.2 kHz	38.8	1.73
8.4 kHz	26.7	2.03

✓光電面被覆率が40%になることで高ダークレートほど効率の上昇率が高いことを確認

4. まとめ

背景

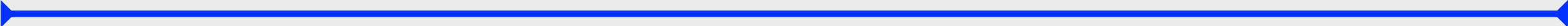
- ハイパーカミオカンデ計画が進行中
- 中性子捕獲の同定効率の向上が見込まれる

今回の結果

- ☒ 中性子捕獲の識別効率を計算した
- ☒ 被覆率の違いによる識別への効果を確認した

今後

- ☐ TMVAにインプットする新しい変数を考える
- ☐ ダークノイズ以外のノイズを導入する
- ☐ 適切なしきい値選定方法を考える



BACK UP

1.4 バックグラウンド

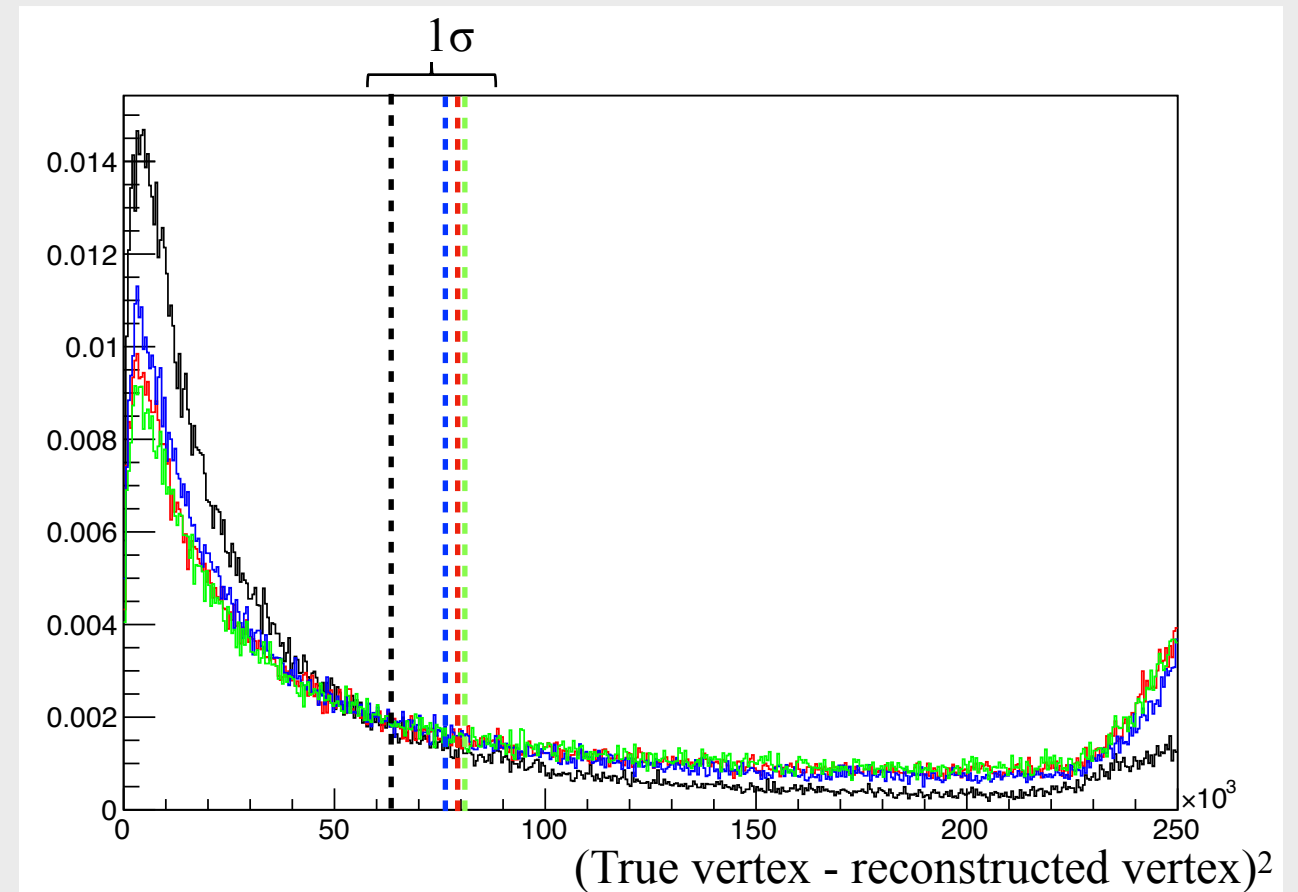
- 今回考えるノイズは、PMTのダークノイズのみ
 - ▶ ノイズのレートは3.0kHz, 4.2kHz, 8.4kHzについて計算した
- 実際は岩盤やPMTなどからの放射線が大きなノイズになるため、考慮が必要

2.2.4 事象再構成結果

✓ダークレートにより分解能が下がることを確認

✓8.4kHz、0kHzではしきい値の設定が厳しく分解能がいい

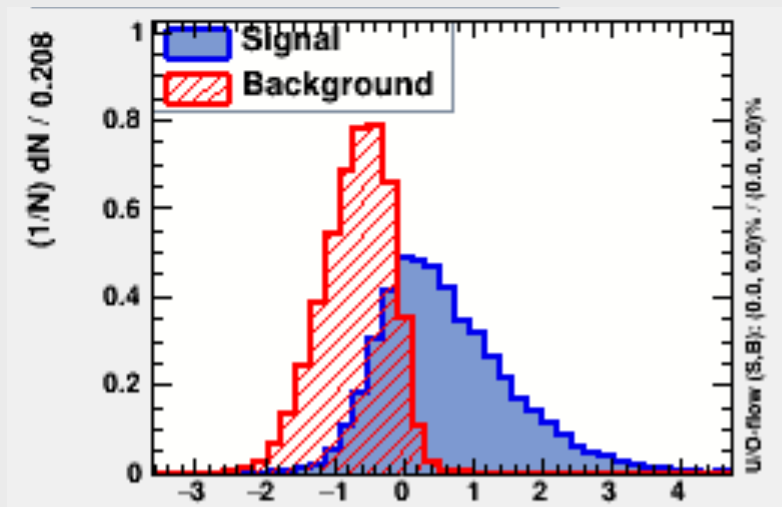
✓4.2kHzではしきい値の設定が緩く、分解能は落ちている



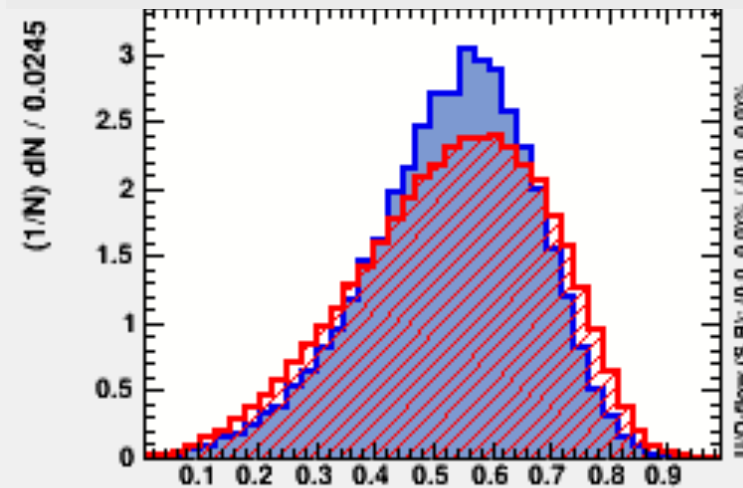
ダークレート	イベント数	レゾリューション
0.0 kHz (閾値7)	74630	252 cm
3.0 kHz (閾値7)	83895	277 cm
4.2 kHz (閾値7)	87215	284 cm
8.4 kHz (閾値11)	74595	284 cm

変数分布

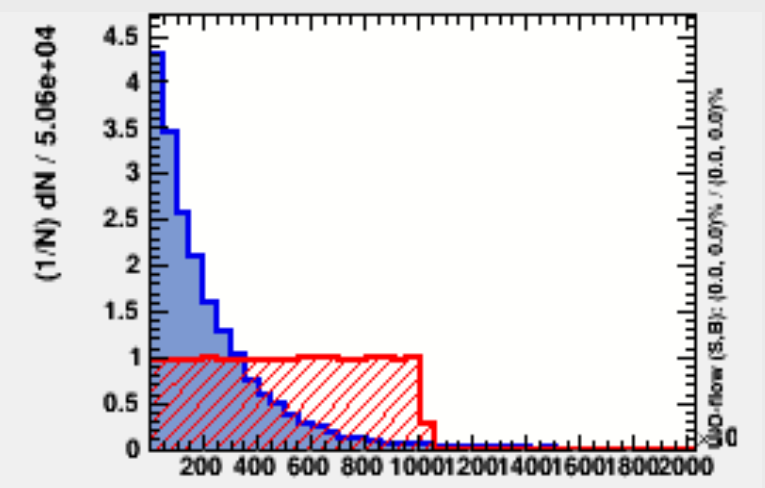
- 各変数での候補事象とノイズの分布（例：8.4kHz）



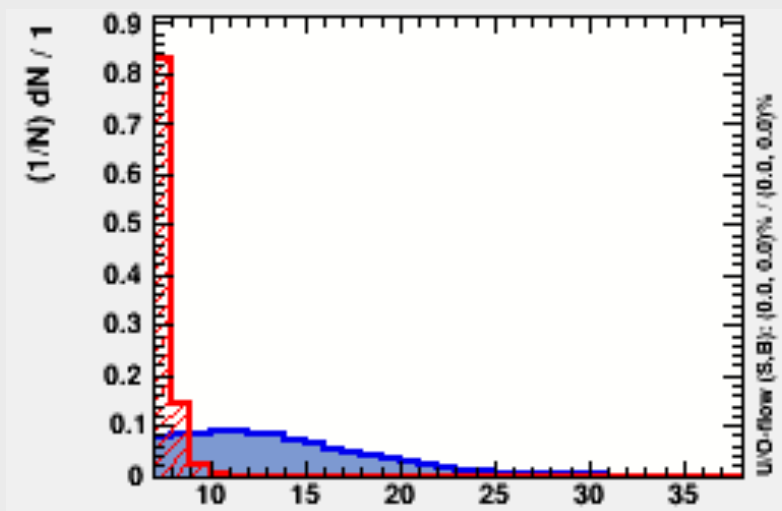
Acceptance



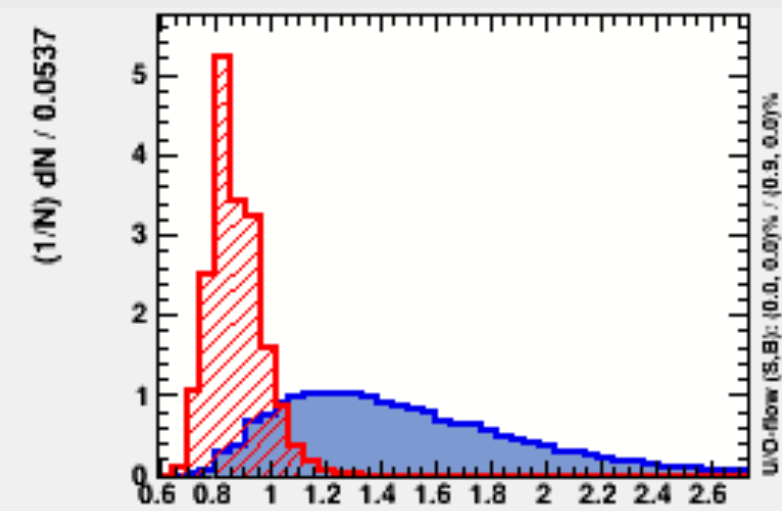
Opening angle



Capture time



N10window



Goodness

1.2 Neutron Tagging

- 中性子捕獲事象を識別することで反応の識別をおこなう

例：SRN探索

超新星背景ニュートリノにより起こる逆 β 崩壊反応

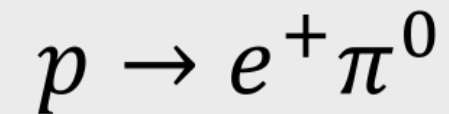


大気 ν の反応でできる e^- と
区別がつかない

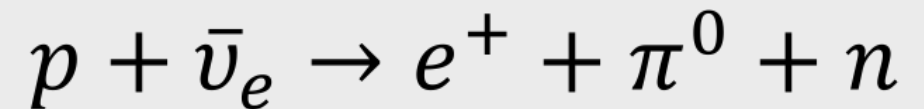
この中性子を見ることで識別できる

例：陽子崩壊

陽子崩壊の反応の例



バックグラウンドとなる大気 ν の反応の例

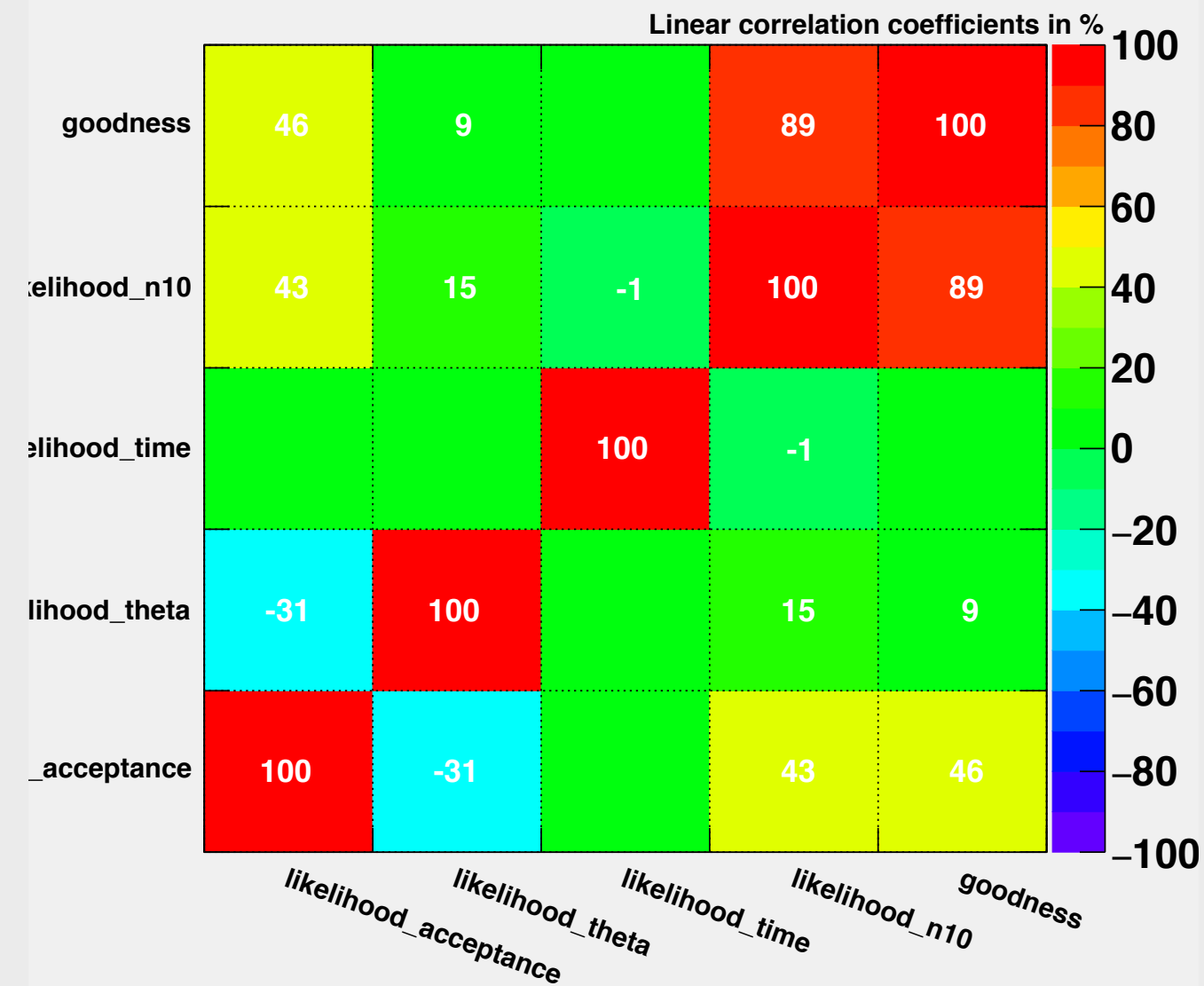


この中性子を見ることで識別できる

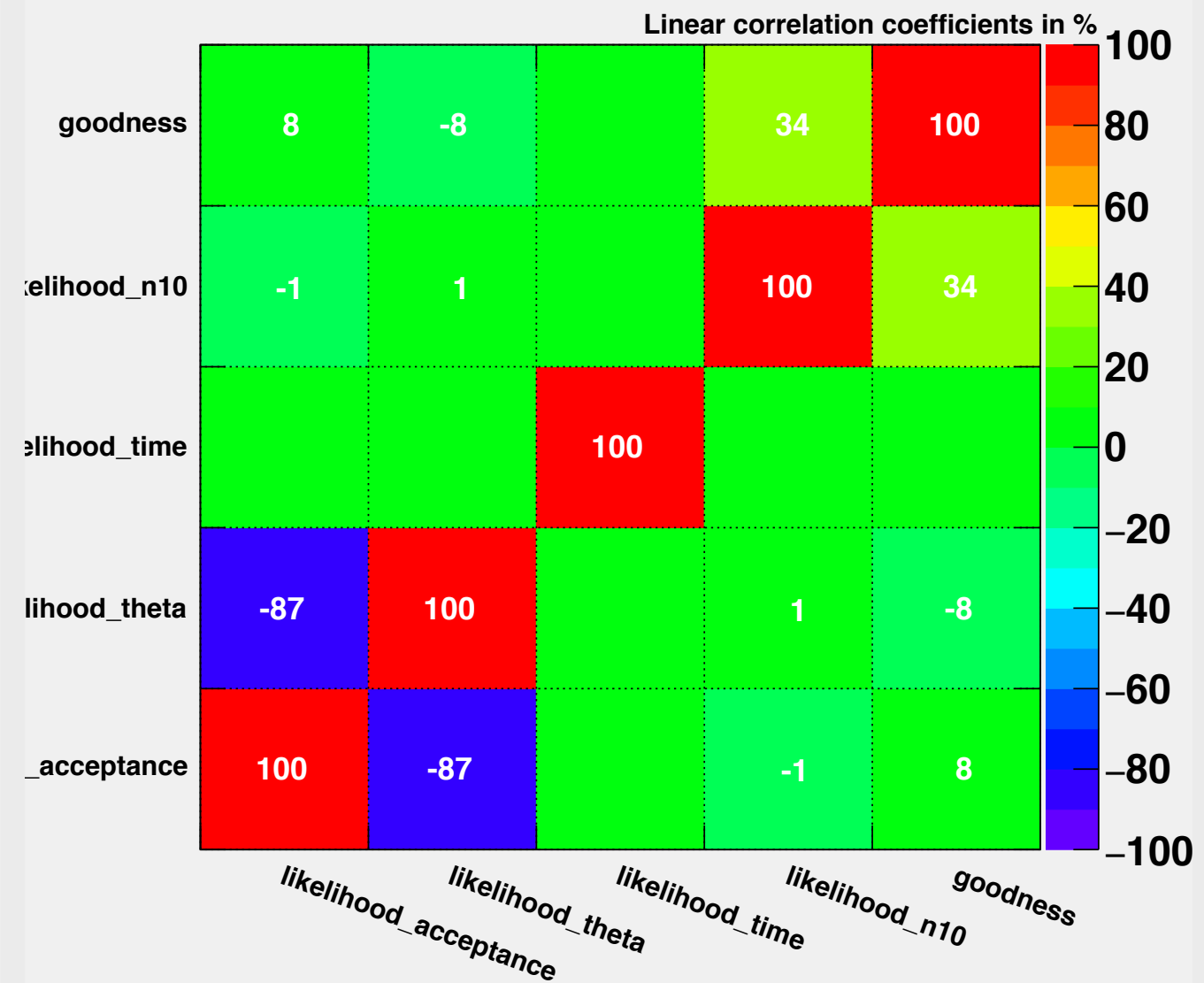
各変数の相関

- 各変数の相関（例：8.4kHz）

Correlation Matrix (signal)



Correlation Matrix (background)



各変数の相関

