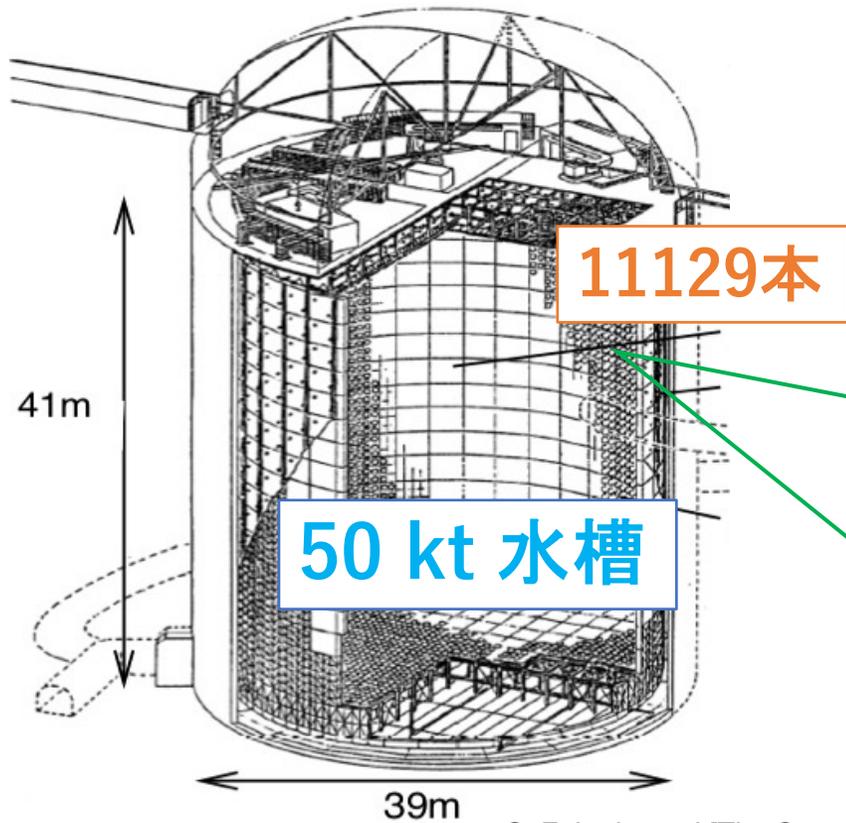


# スーパーカミオカンデにおける 低エネルギー事象再構成の向上

前川 雄音, 西村 康宏  
Super-Kamiokande Collaboration

慶應義塾大学  
2023年9月18日

# スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande; SK)



50 cm径 光電子増倍管  
(Photomultiplier tube;  
PMT)

S. Fukuda et al. [The Super-Kamiokande Collaboration],  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A501, 418 (2003)

荷電粒子の発生時間、位置、エネルギーを得るため  
光電子増倍管(PMT)の正確なヒット情報(光量、時間)が必要。

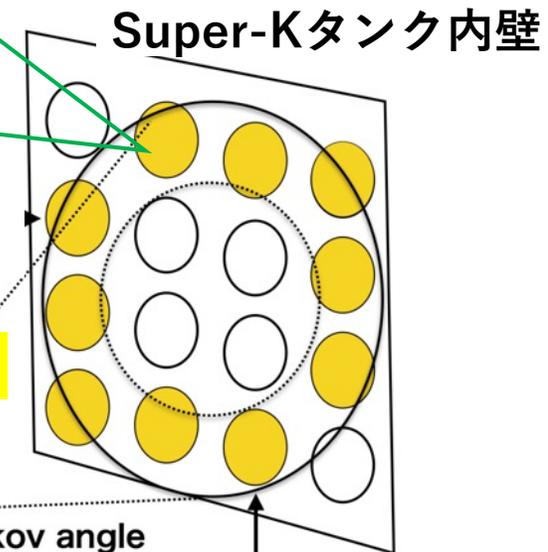
本解析ではGd添加前のSKを想定。

チェレンコフ光

荷電粒子

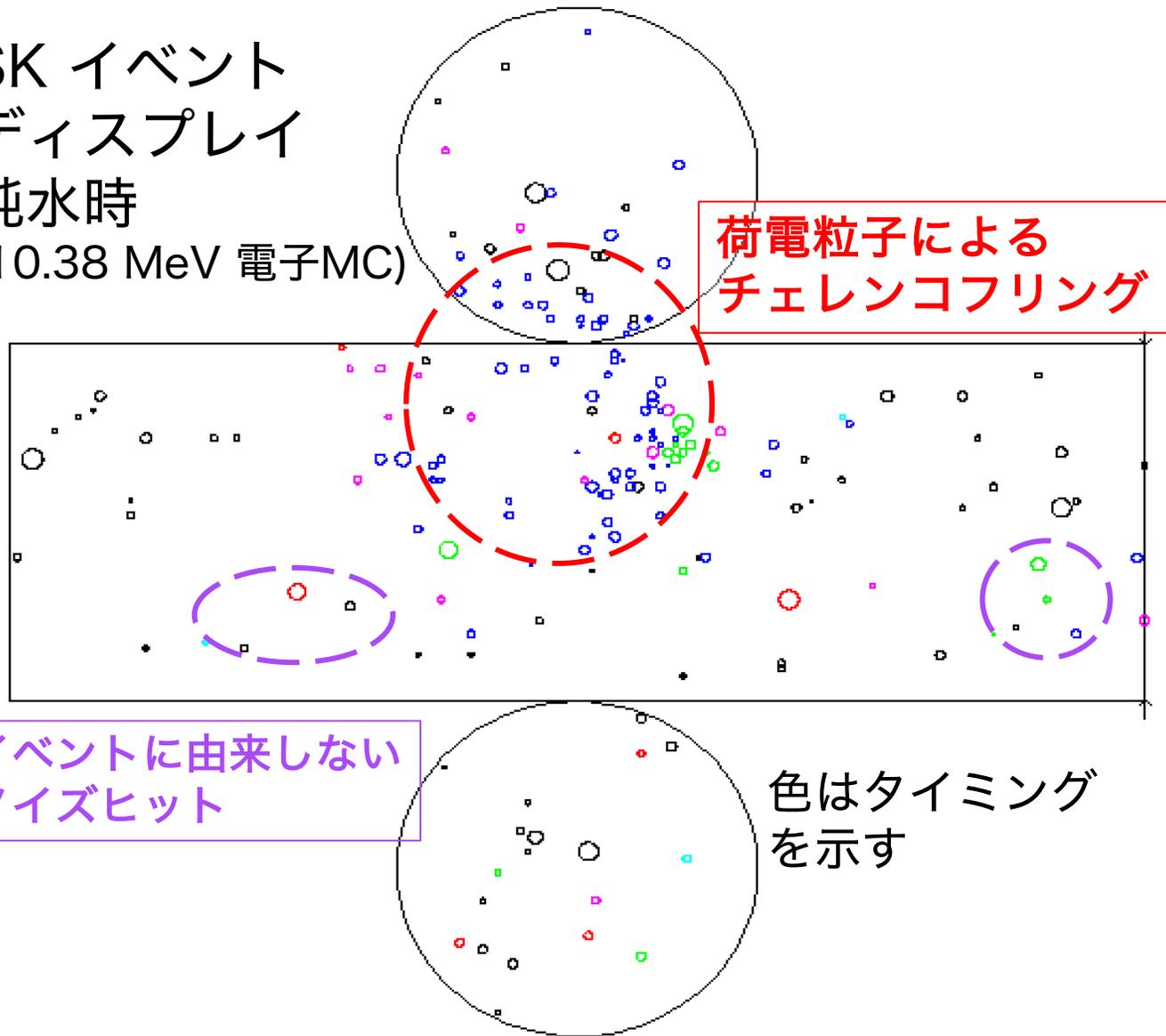
$\theta_c$ : Cherenkov angle

チェレンコフリング



# SK イベント ディスプレイ

純水時  
(10.38 MeV 電子MC)



# SK イベントトリガー

$$N_{\text{光信号}} + N_{\text{ノイズ}} \geq N_{\text{しきい値}}$$

$N$  : 同時ヒットPMT本数

(2019/08/05 : 純水 SK中) 平均PMTノイズレート

6.22 kHz × 11129 PMTs

低エネルギー電子イベントの場合  
6 hits / 1 MeV

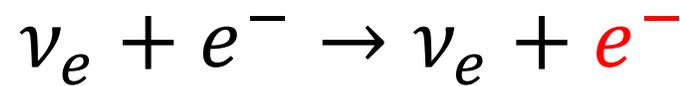
PMTの検出タイミングから粒子の  
位置・方向・エネルギーを再構成。

低エネルギーイベントの再構成は  
PMTノイズヒットの影響を受けやすい

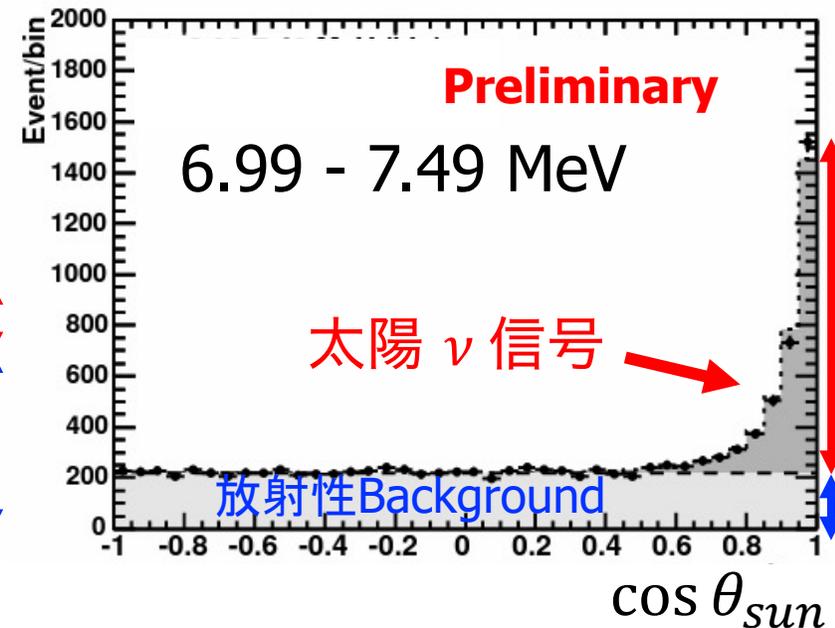
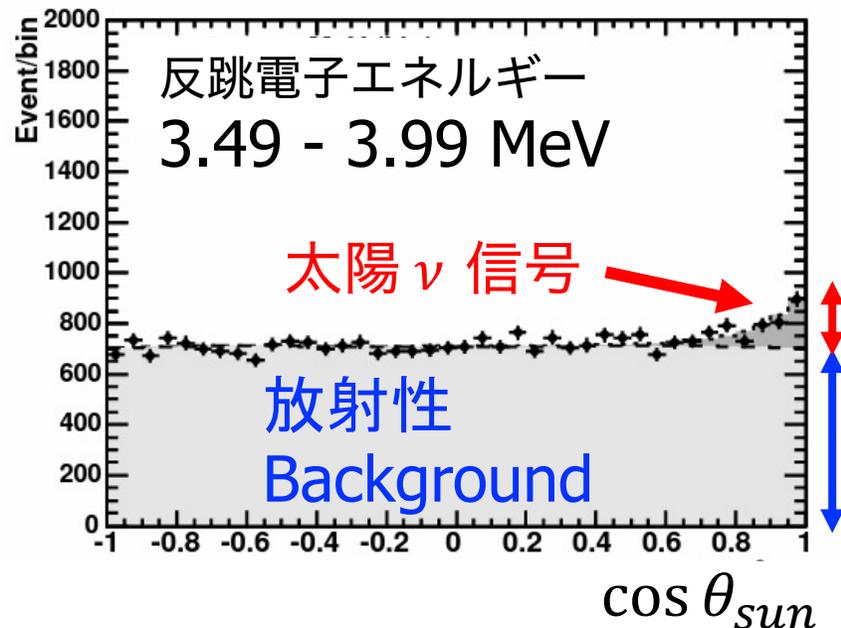
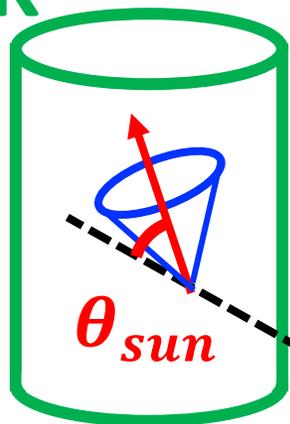
# 太陽ニュートリノ観測

太陽  $\nu$

反跳電子



SK



スーパーカミオカンデでは3.5 ~ 20 MeVの太陽ニュートリノに感度を持ち、物質効果の高精度測定を目指している。

➡ 低エネルギーイベントはBGが多い & 信号数が少ない。

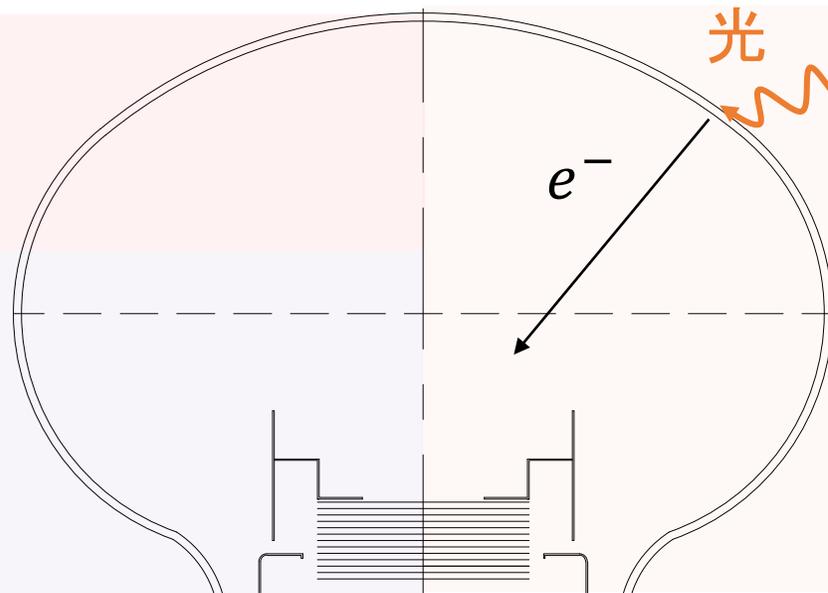
本発表では低エネルギー感度向上を目指し  
PMT由来のノイズの低減による信号再構成の精度向上を行った。

# 本発表の内容

- 光電子増倍管ヒット概要
- 機械学習によるノイズヒットの除去
- ノイズ低減を利用した事象再構成の評価

# 光電子増倍管 ヒット

## 光信号ヒット



チェレンコフ光

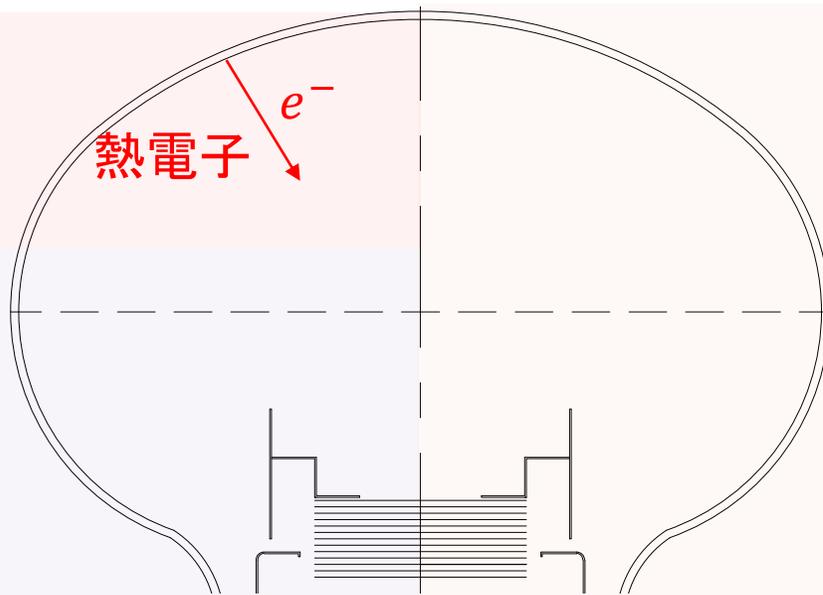
- 荷電粒子が水中を通過する際に放出される光信号。
- 数 ns の時間幅で放出され、同時に複数のPMTにヒットする。

# 光電子増倍管 ヒット

## ノイズヒット

### 光電面からの熱電子

- ランダムな1電子のヒット。

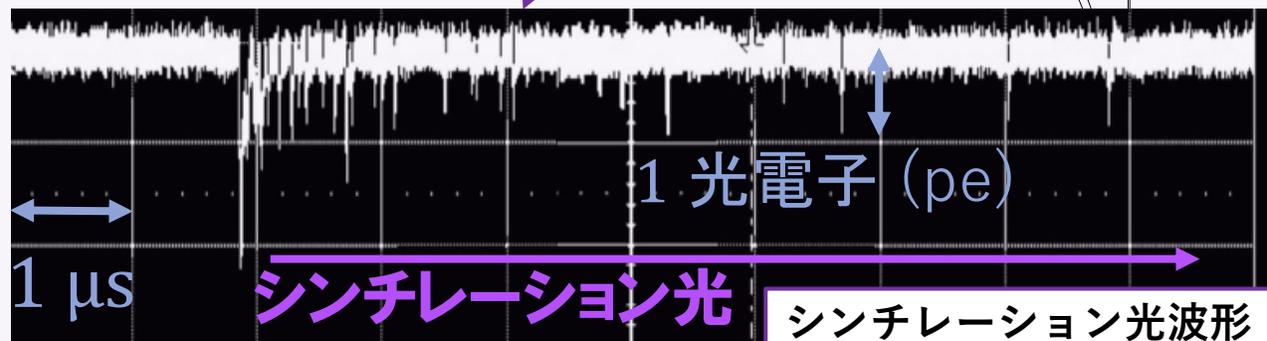
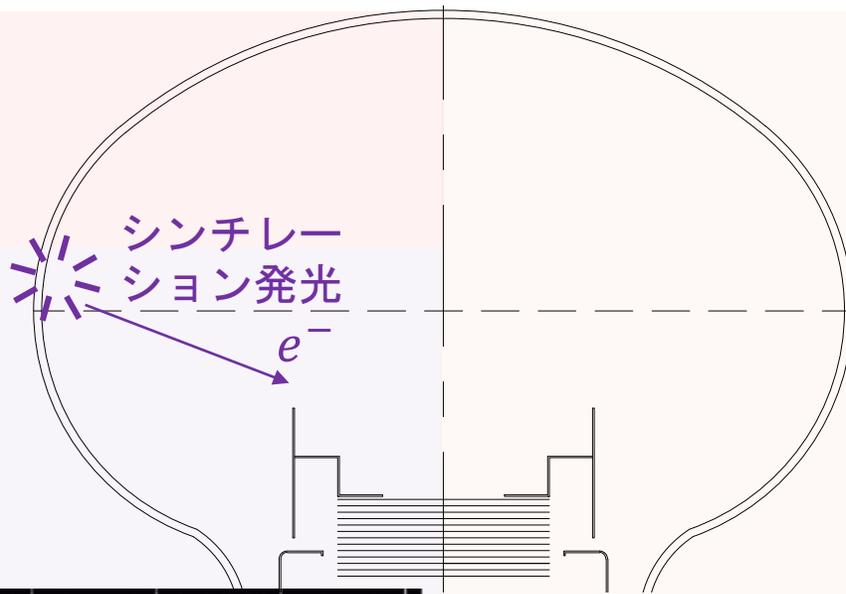


# 光電子増倍管 ヒット

## ノイズヒット

### シンチレーション光

- 放射性同位体がガラス中で起こす時間構造を持った複数持続ヒット。



約2, 8, 30  $\mu\text{s}$ の時定数を持ち  
ノイズの4割程度を占めることが分かっている。  
2022年 年次大会, 2023年 春の大会で報告

複数持続ヒットの時間・電荷情報を用いて  
シンチレーション光ノイズを除去できる。

# 光電子増倍管 ヒット

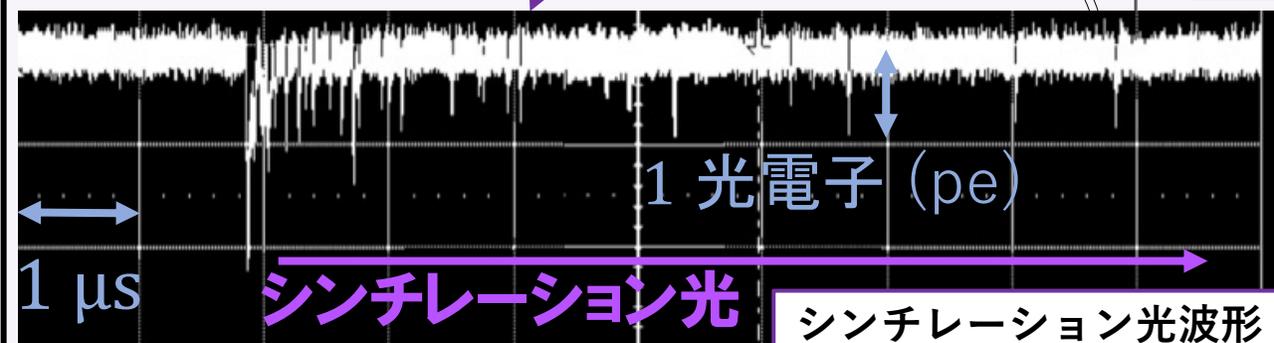
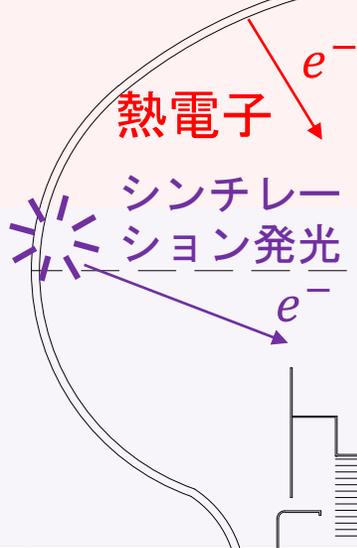
## ノイズヒット

### 光電面からの熱電子

- ランダムな1電子のヒット。

### シンチレーション光

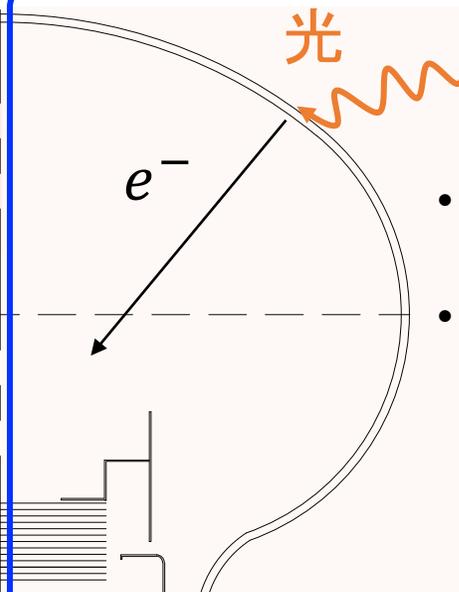
- 放射性同位体がガラス中で起こす時間構造を持った複数持続ヒット。



## 光信号ヒット

### チェレンコフ光

- 荷電粒子が水中を通過する際に放出される光信号。
- 数 ns の時間幅で放出され、同時に複数のPMTにヒットする。



ノイズヒットと信号ヒットの特徴の違いから、イベント再構成前にノイズヒットの低減を試みた

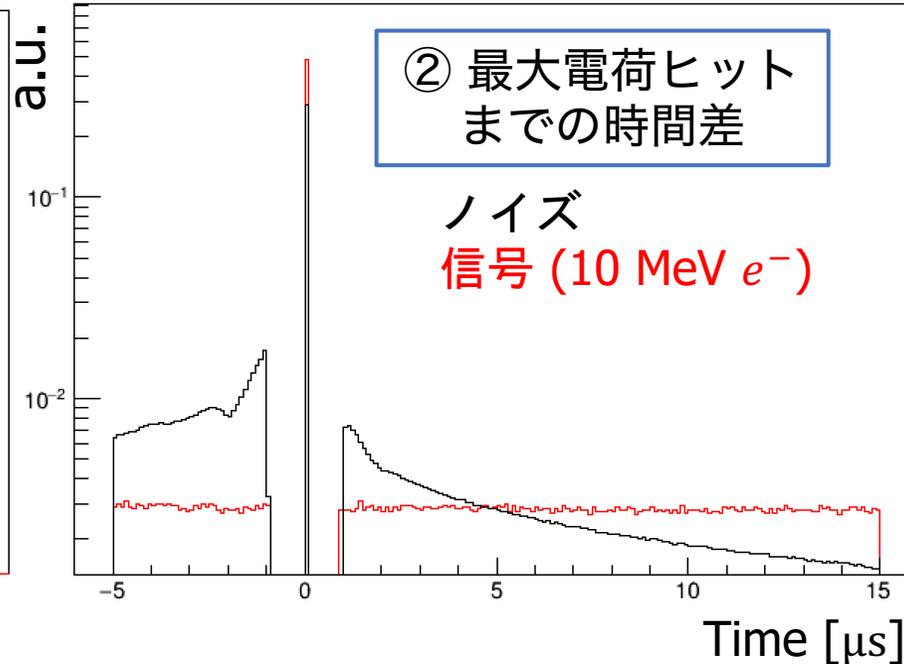
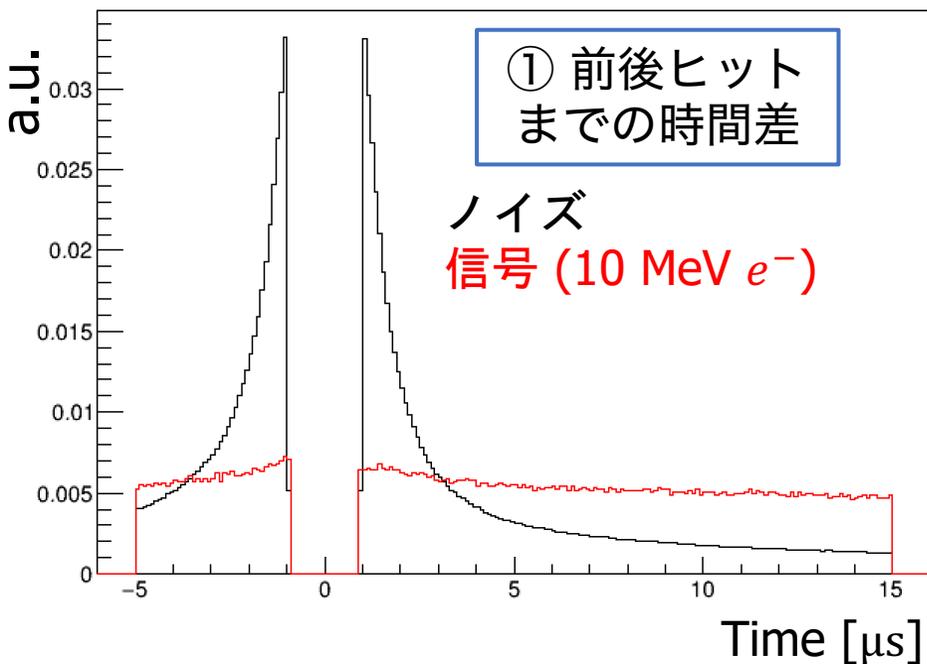
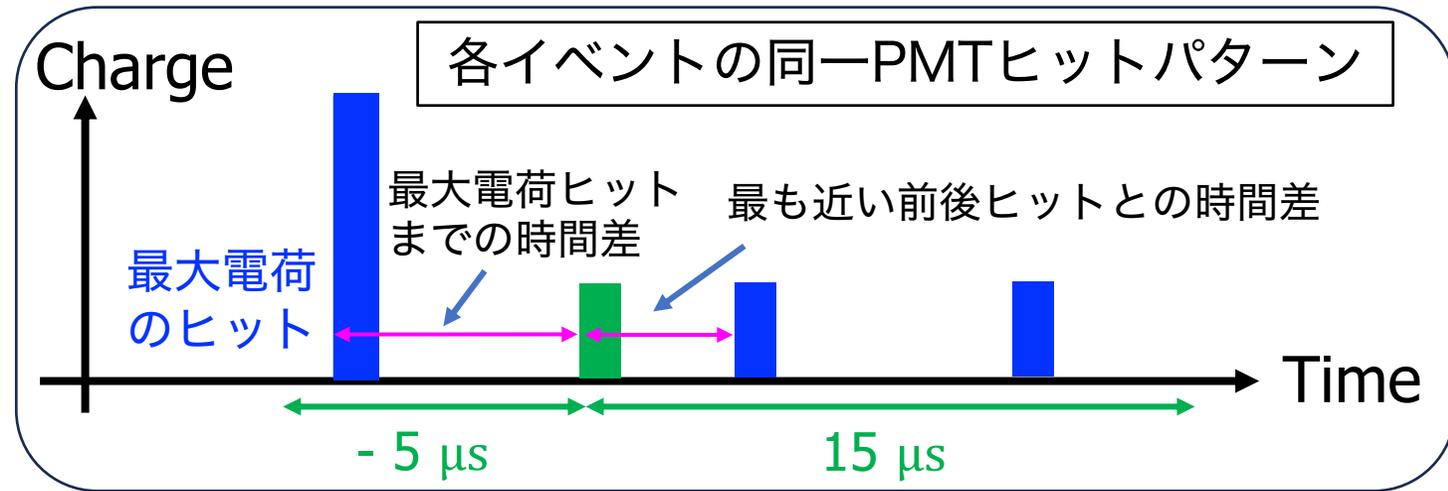
# 本発表の内容

- 光電子増倍管ヒット概要
- 機械学習によるノイズヒットの除去
- ノイズ低減を利用した事象再構成の評価

# 機械学習によるノイズヒットの除去

シンチレーション光由来の持続ヒットを除去するため、  
同一PMTに2 ヒット以上連続したヒットパターンの特徴を学習

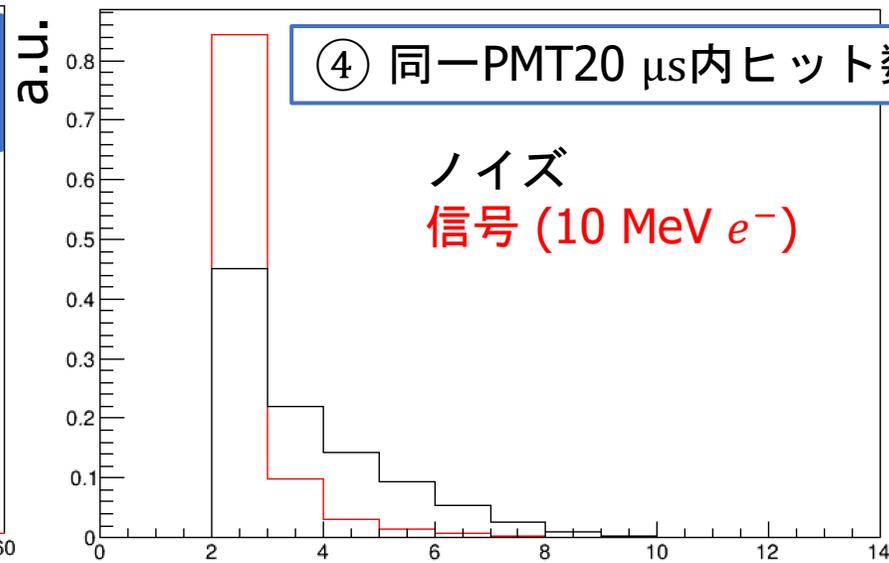
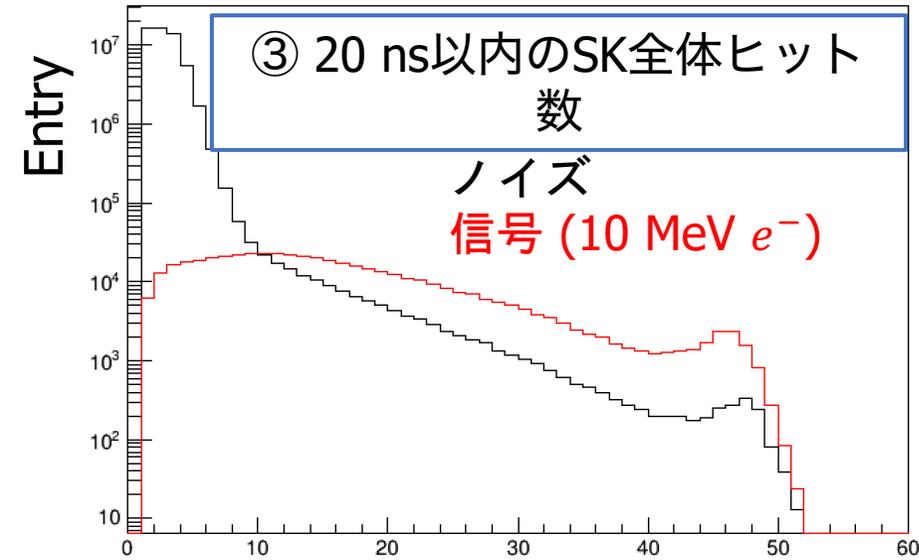
2016年8月10日のノイズデータを使用  
信号は10 MeV電子MCを使用



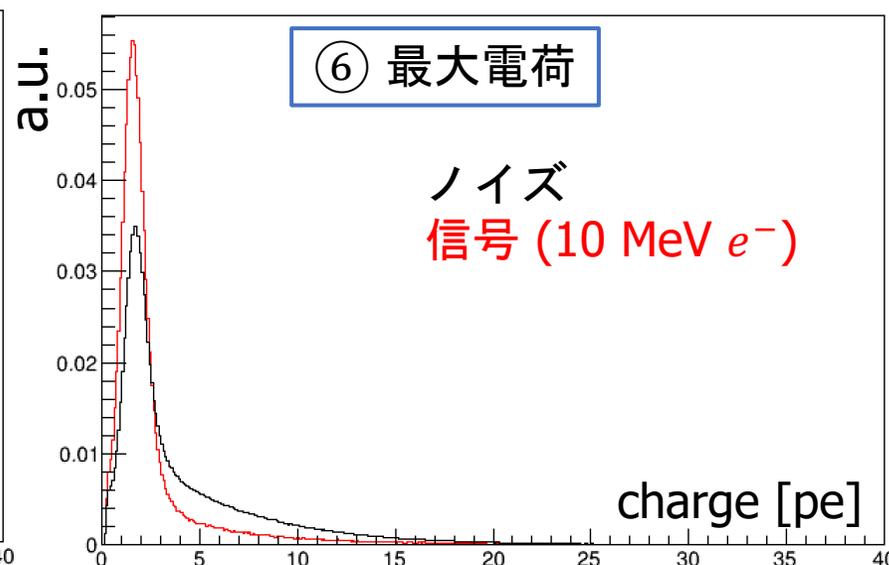
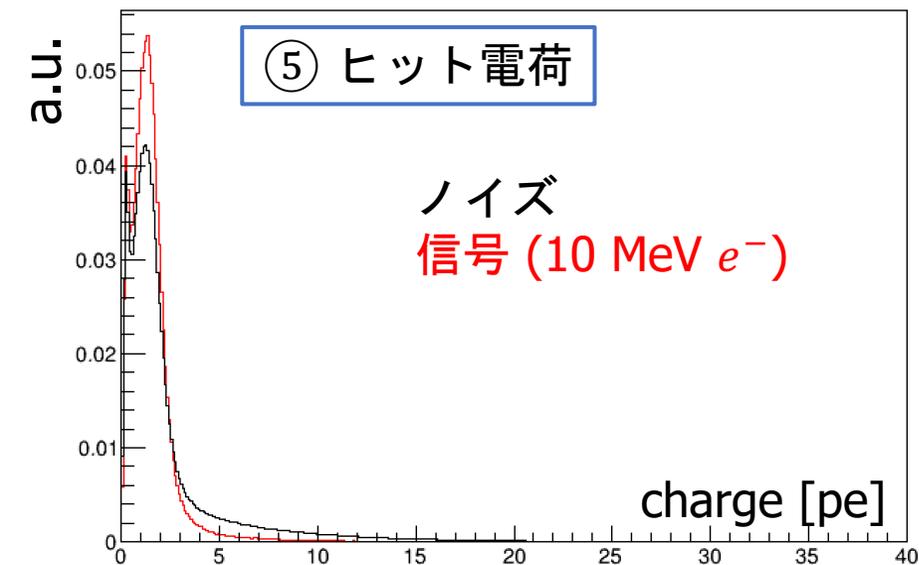
## 学習変数

- ① 最も近い前後ヒットまでの時間差
- ② 最大電荷ヒットまでの時間差
- ③ 20 ns以内のSK全体ヒット数
- ④ 同一PMTの20  $\mu\text{s}$ 内ヒット数
- ⑤ ヒットの電荷
- ⑥ 最大電荷

# 機械学習によるノイズヒットの除去



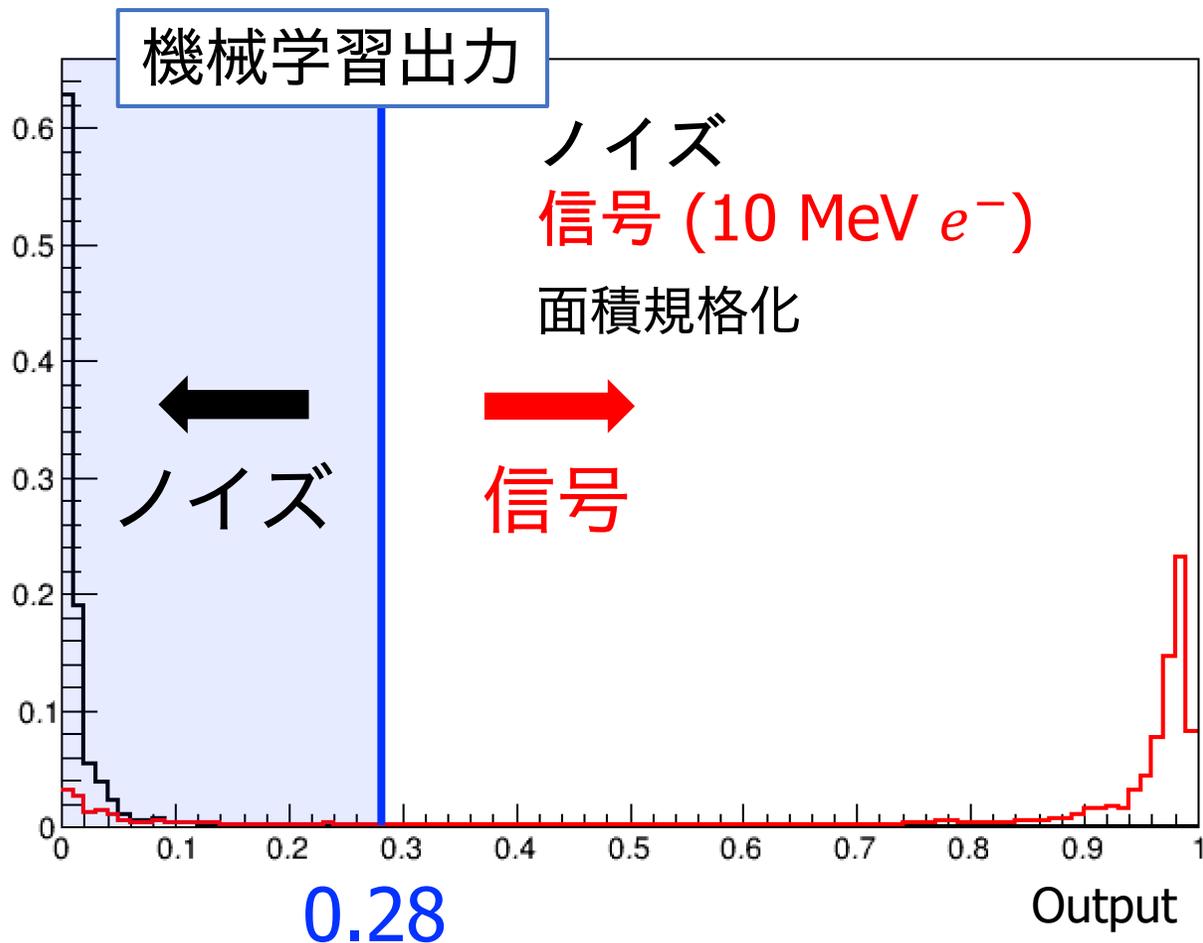
ヒット数、電荷、  
時間差の情報を使用



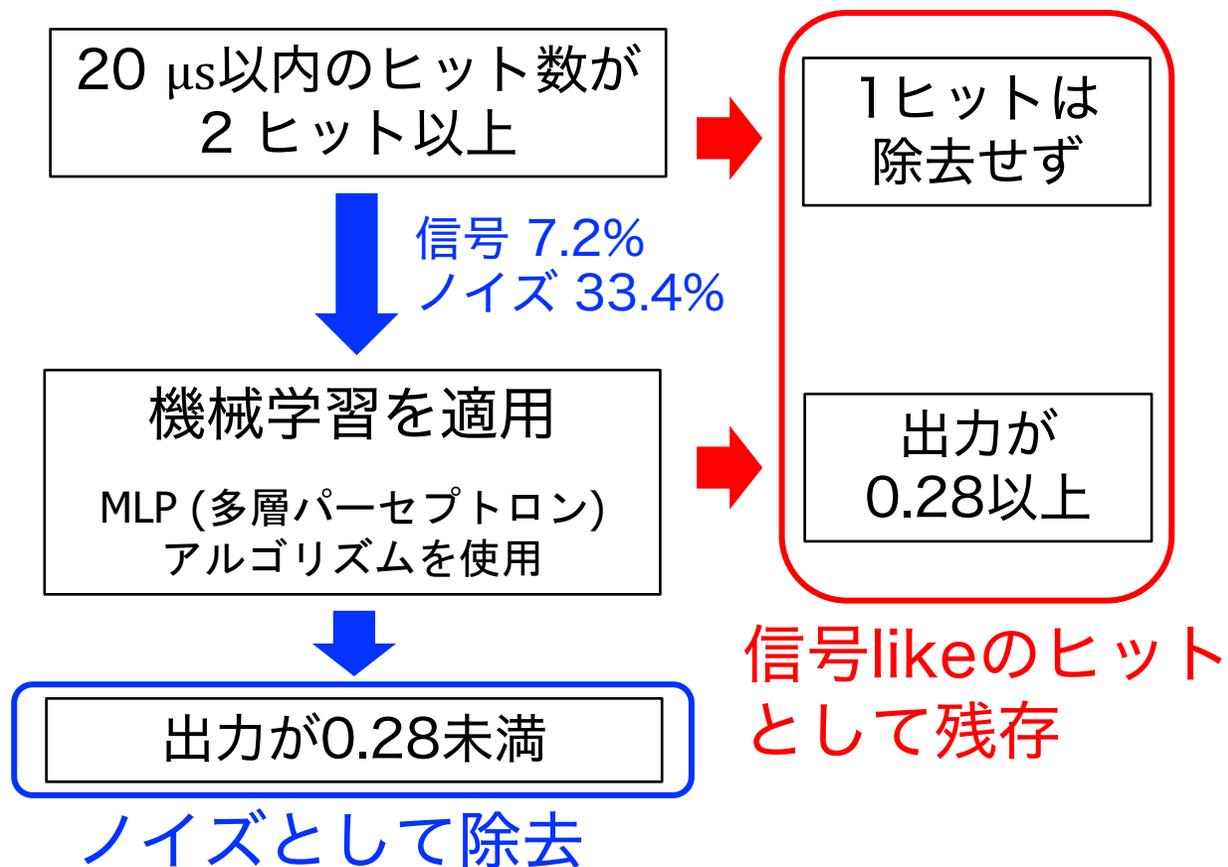
## 学習変数

- ① 最も近い前後ヒット  
までの時間差
- ② 最大電荷ヒットまでの時間差
- ③ 20 ns以内のSK全体ヒット数
- ④ 同一PMTの20  $\mu$ s内ヒット数
- ⑤ ヒットの電荷
- ⑥ 最大電荷

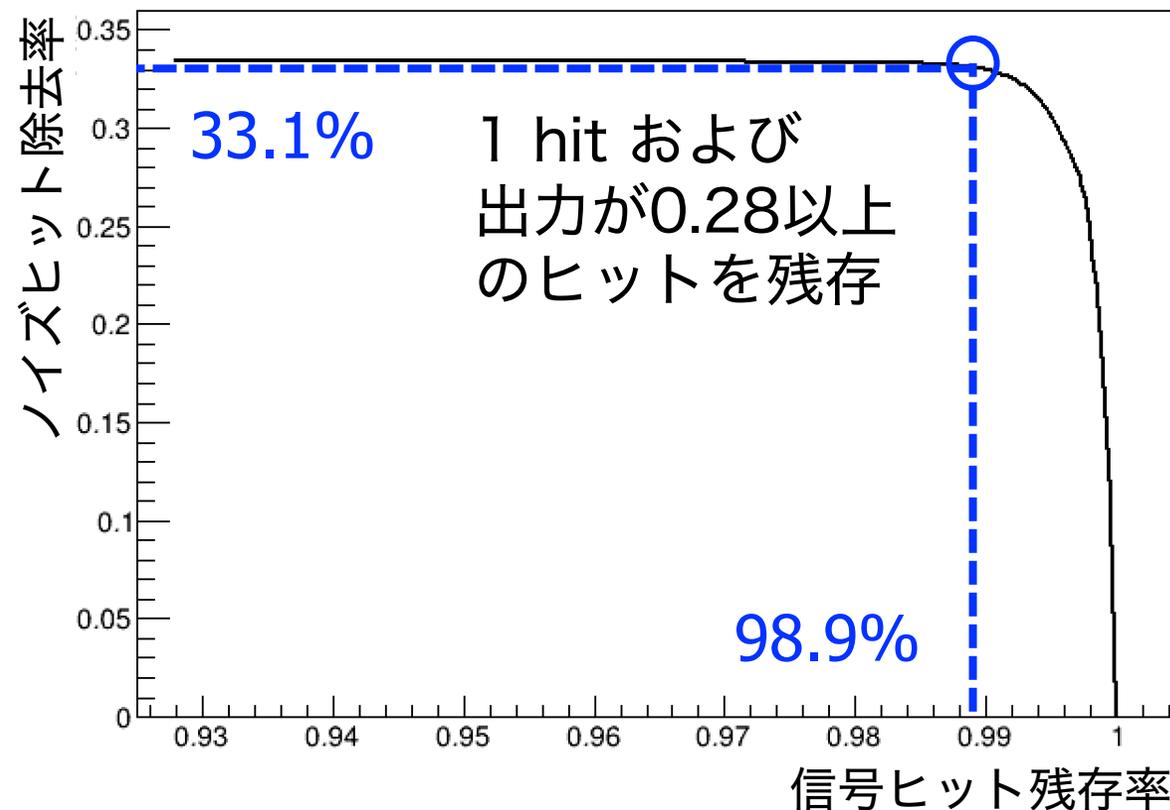
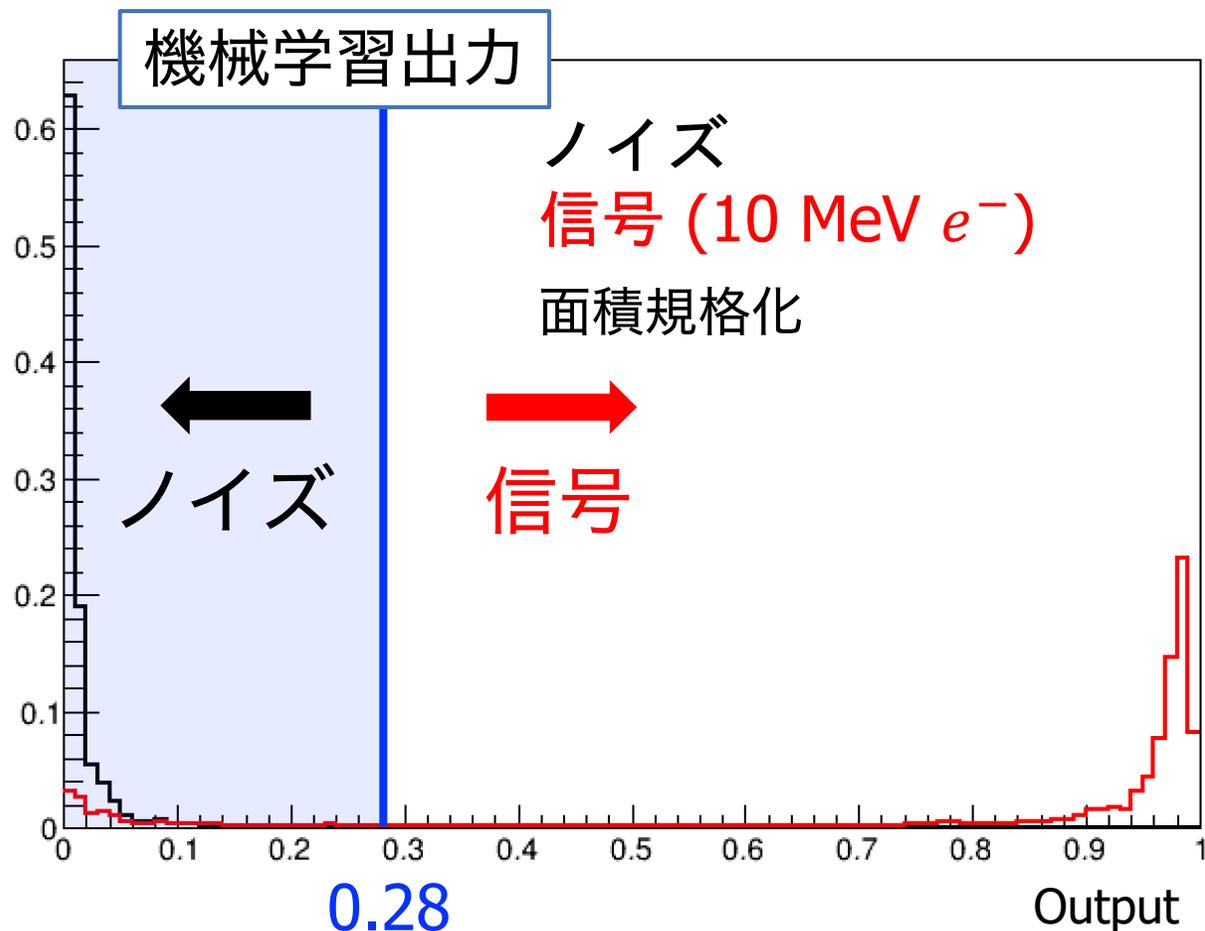
# 機械学習による信号の選別



信号とノイズの比から決定

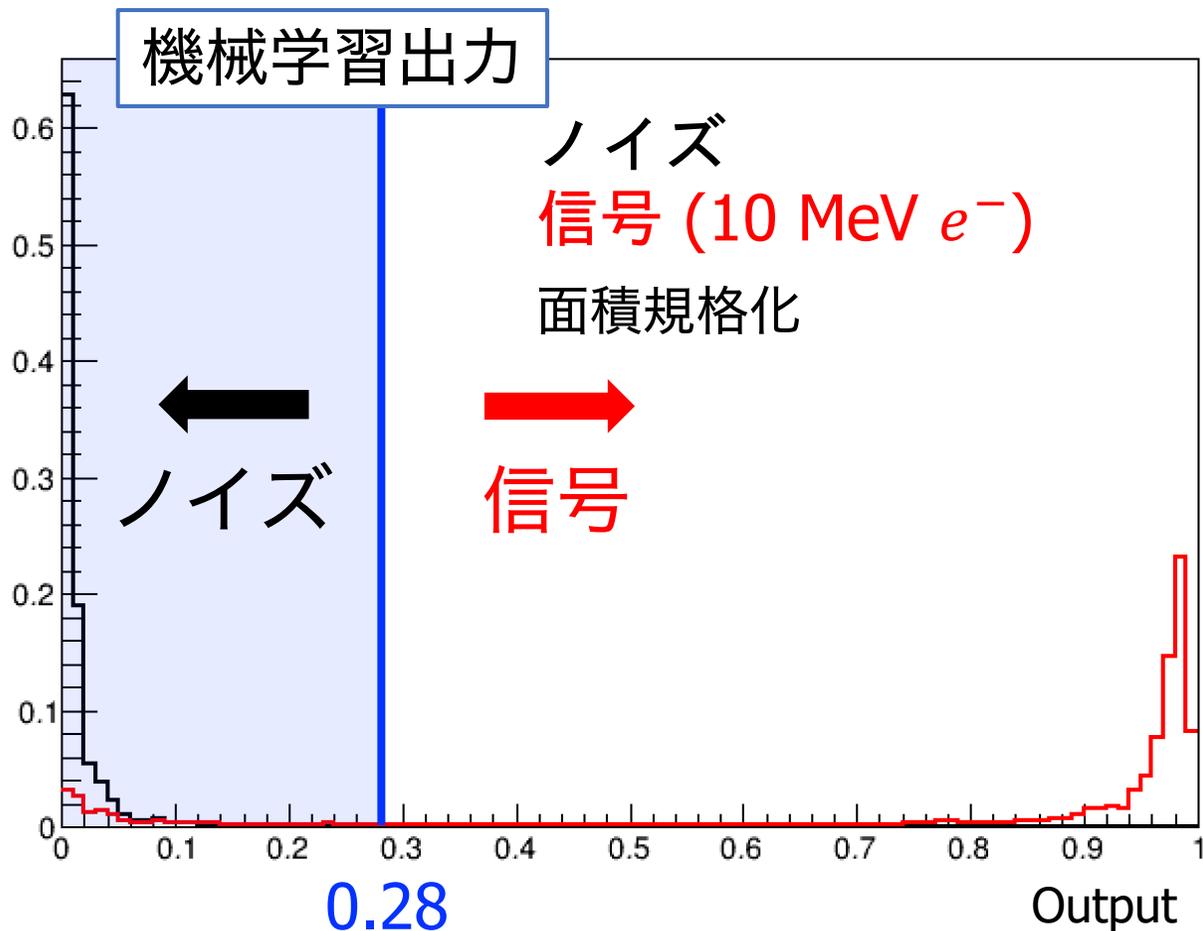


# 機械学習によるノイズの除去性能



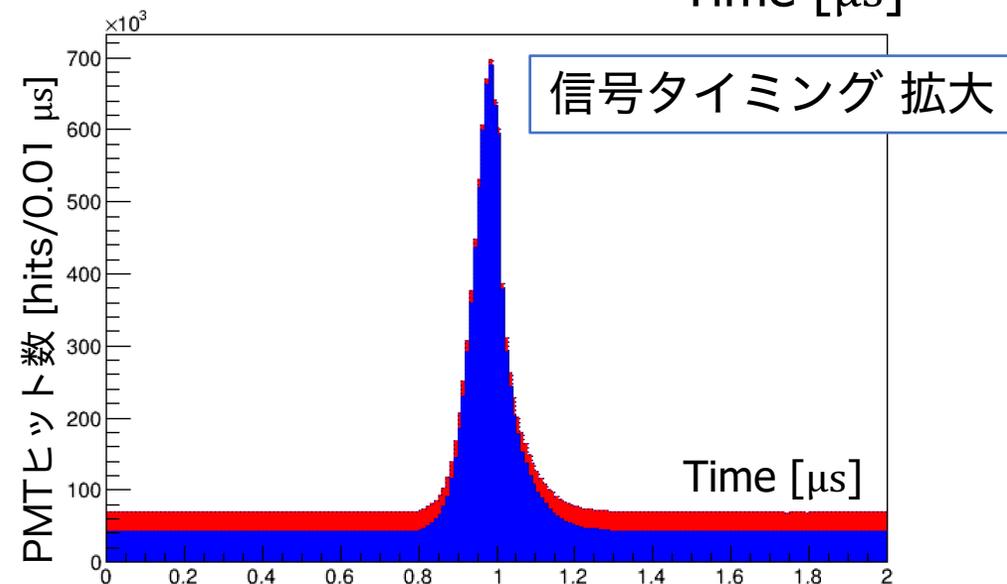
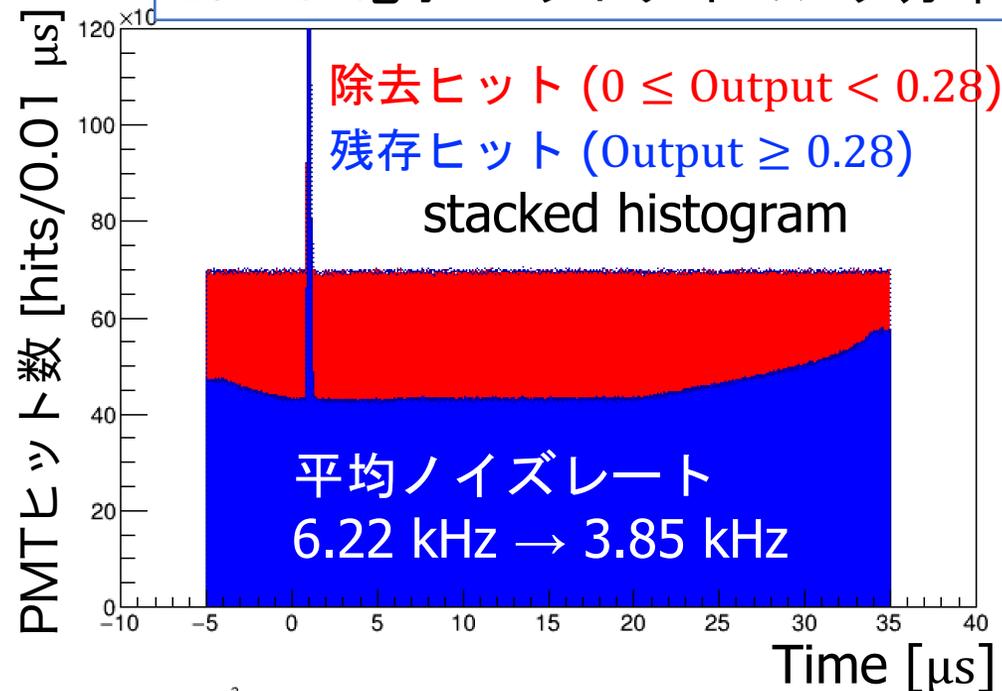
機械学習出力が0.28より下のヒットを除去することで、  
信号ヒットを99%残存させ、ノイズヒットは33%除去することができた。

# 機械学習 結果



機械学習を用いてノイズの1/3を除去できた。  
ノイズ低減データを用いて信号の再構成の評価を行う。

10 MeV電子 ヒットタイミング分布



# 本発表の内容

- 光電子増倍管ヒット概要
- 機械学習によるノイズヒットの除去
- ノイズ低減を利用した事象再構成の評価

# ノイズ低減を利用した再構成の評価

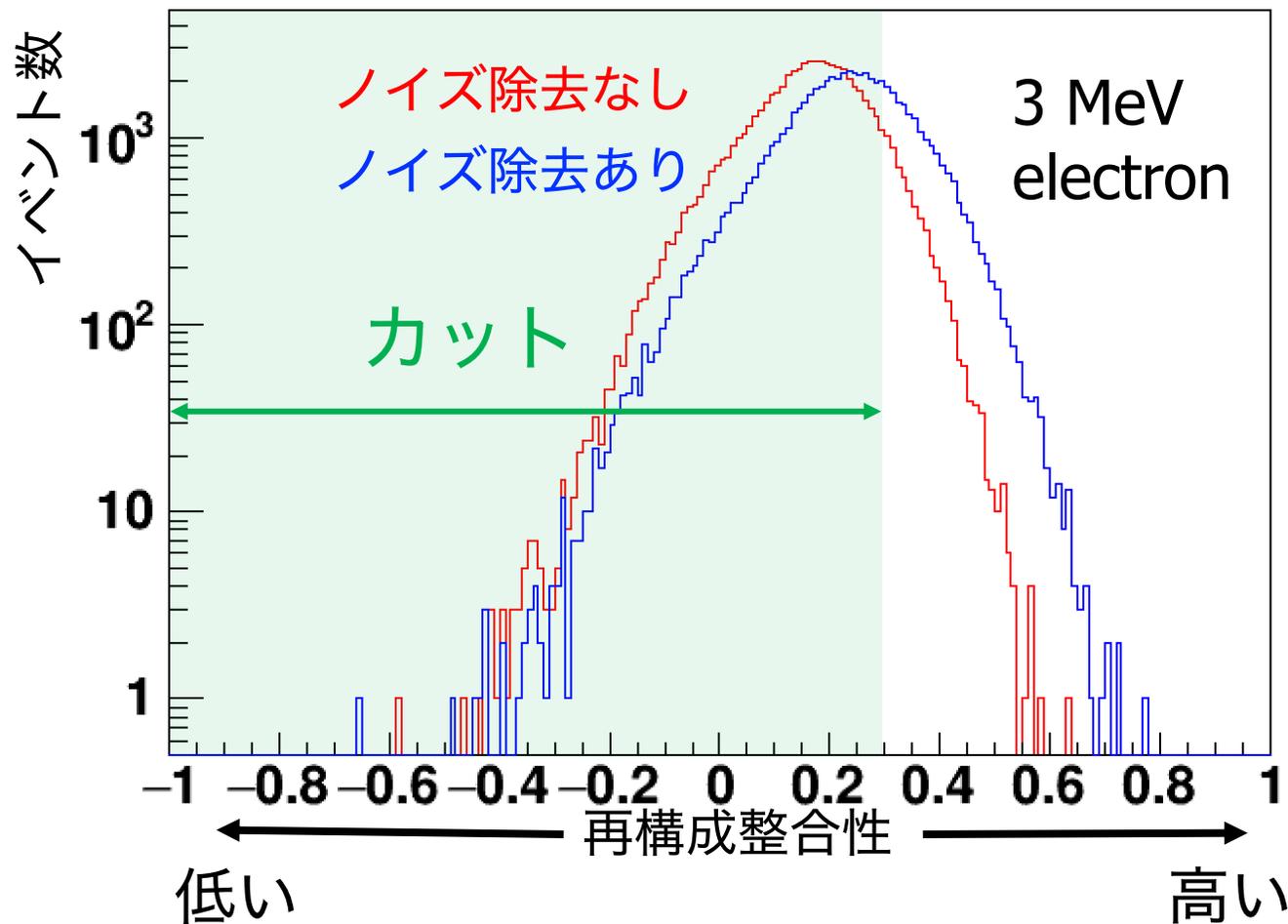
SKタンク内で電子MCを  
100,000 イベント生成

ノイズ除去なし &再構成  
ノイズ除去あり &再構成

① 壁面から2 m以内のイベントを除去  
~ 68% 残存 (有効体積カット)

② 再構成フィット整合性の  
低いイベントを除去

有効体積カット後の再構成フィット整合性



# ノイズ低減適用後のイベント数の比較

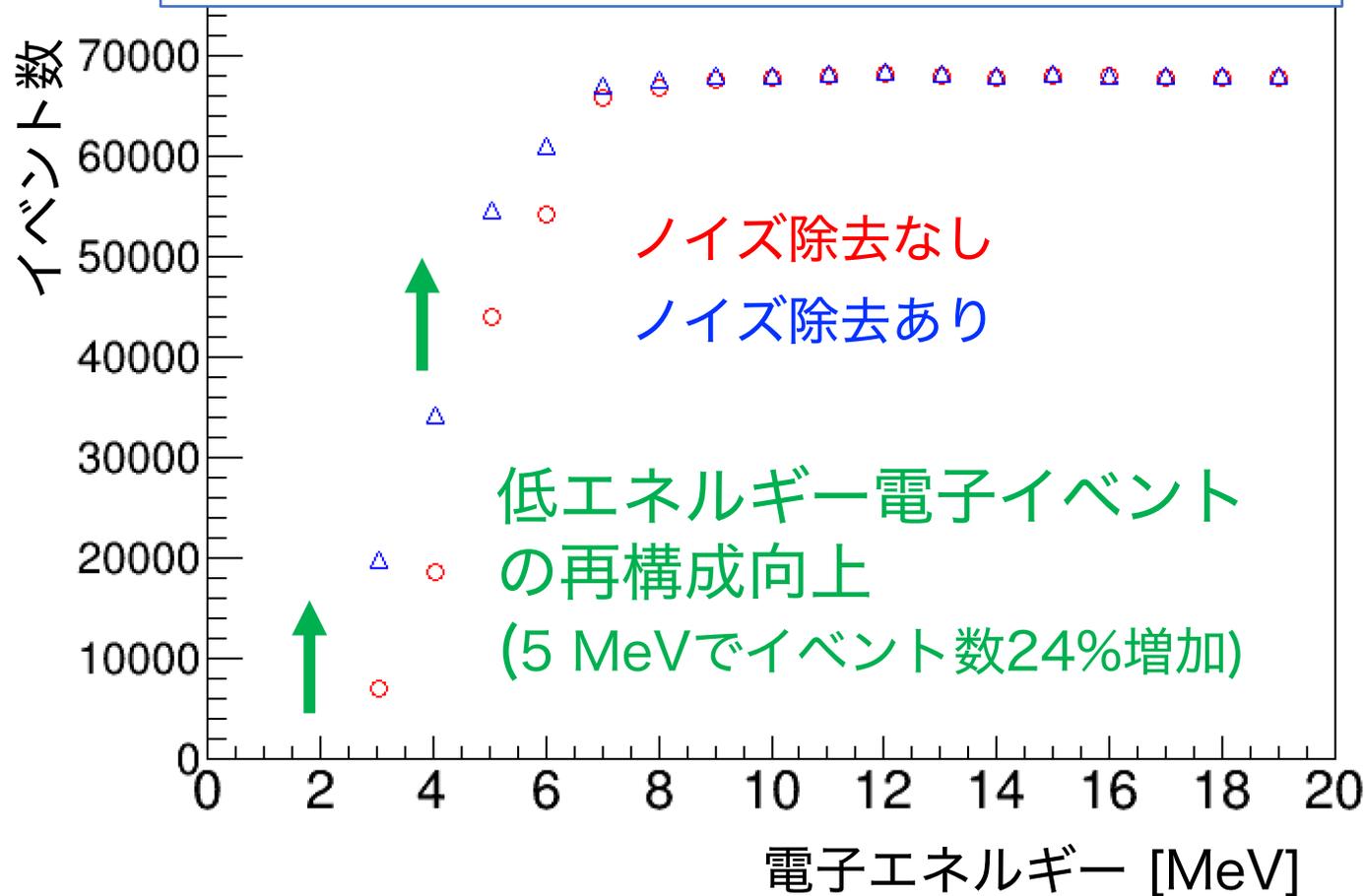
SKタンク内で電子MCを  
100,000 イベント生成

ノイズ除去なし  
&再構成      ノイズ除去あり  
&再構成

① 壁面から2 m以内のイベントを除去  
~ 68% 残存 (有効体積カット)

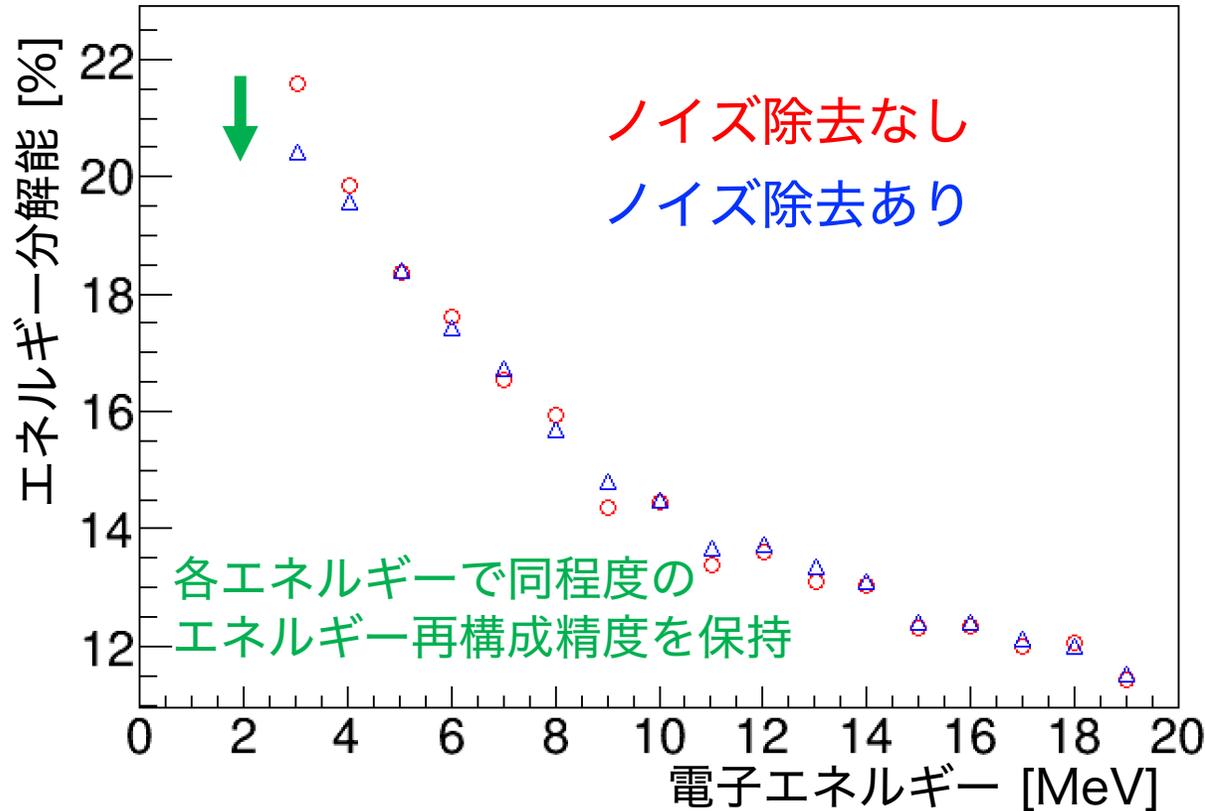
② 再構成フィット整合性の  
低いイベントを除去

有効体積&フィット整合性カット後のイベント数

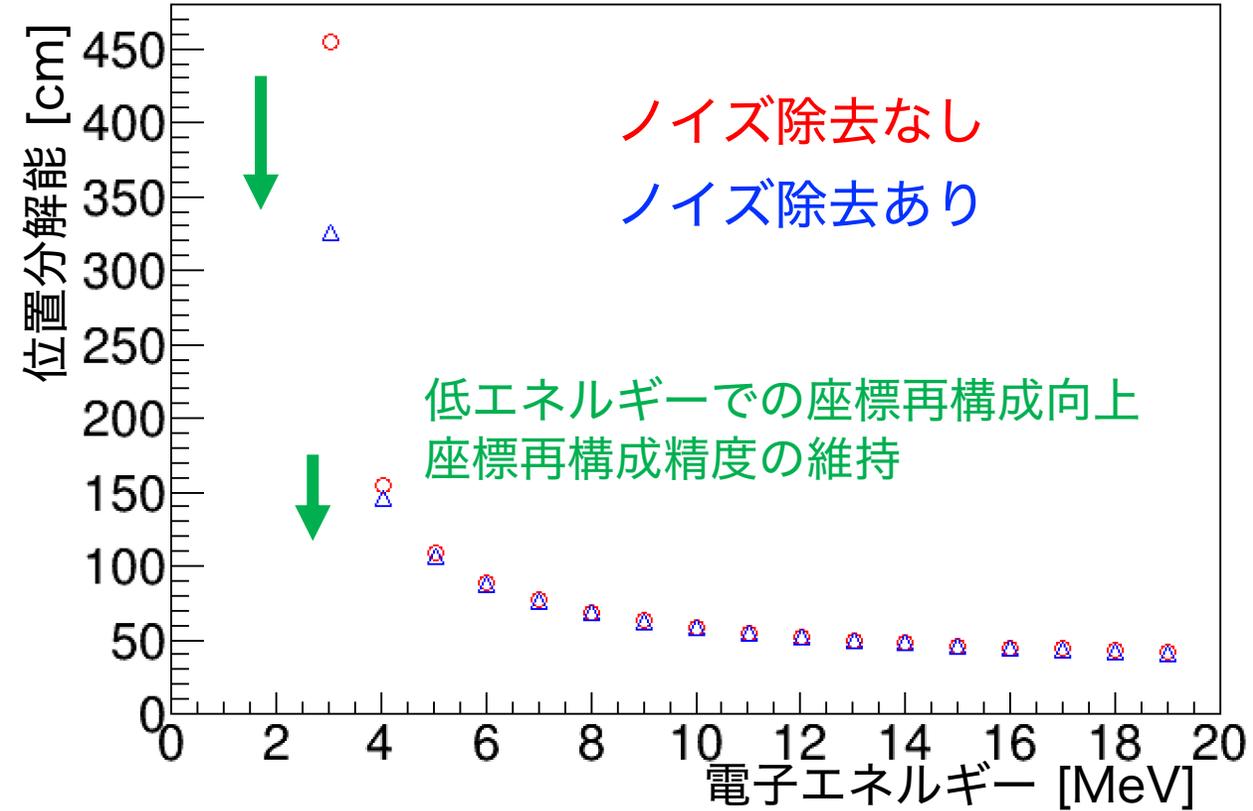


# ノイズ低減適用後の分解能の評価

## エネルギー分解能



## 位置分解能



ノイズ除去による分解能の悪化はなく、低エネルギーでは再構成精度が向上した。

# まとめ

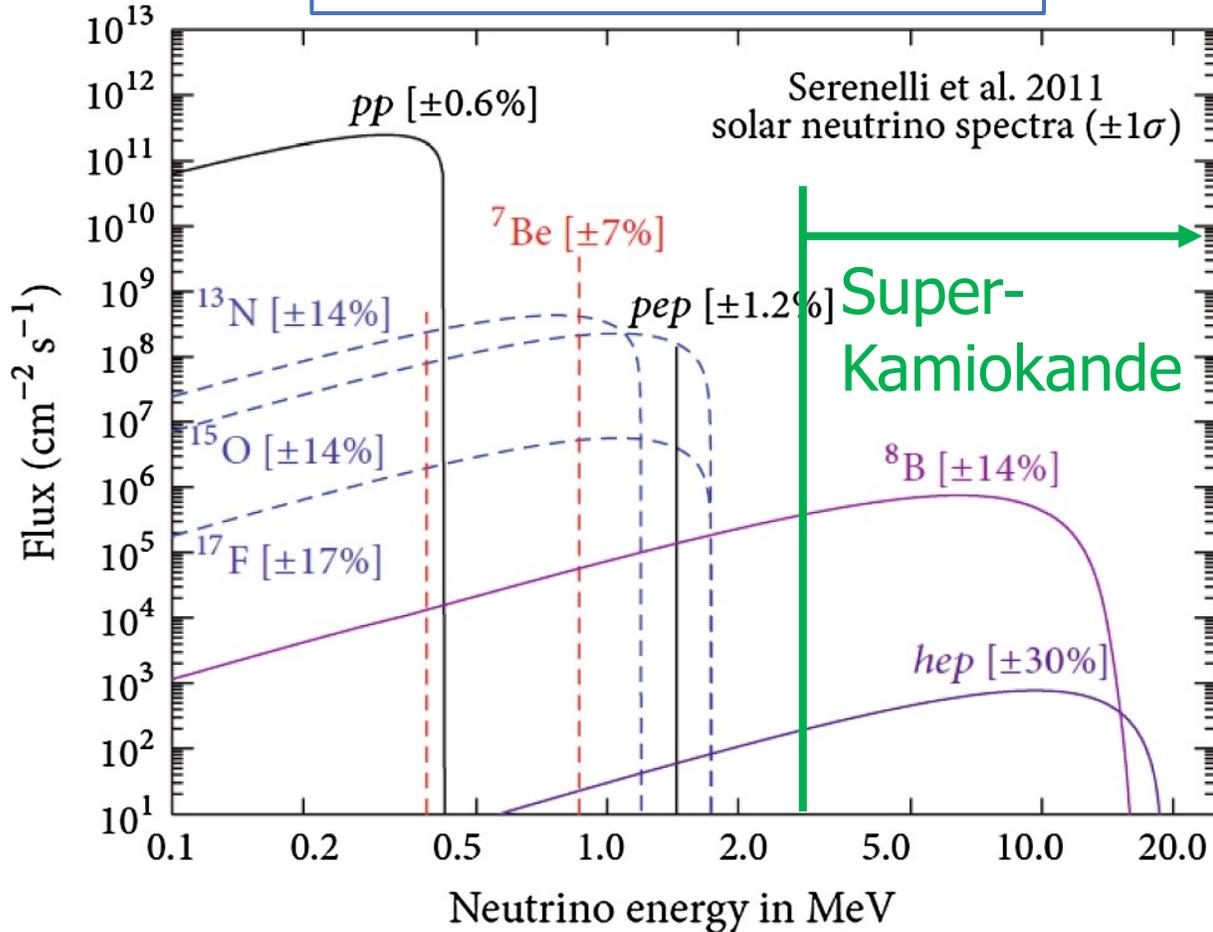
- 機械学習によるノイズヒットと電子信号ヒットの分離により、信号ヒットを99%残存させ、ノイズヒットを33%除去することに成功した。
- ノイズヒットの除去により、3 MeV電子のエネルギー分解能が22% → 20%、位置分解能が455 cm → 325 cmに向上した。再構成効率が向上し、5 MeV電子イベント数は24%増加した。

今回シミュレーションで再構成の評価を行った。  
キャリブレーションデータを用いた観測データで同様の改善が見られるか確認。  
低エネルギーBGとなる、水中の放射性BG事象の再構成評価を行う。

# Back Up

# 太陽ニュートリノ

太陽ニュートリノスペクトル

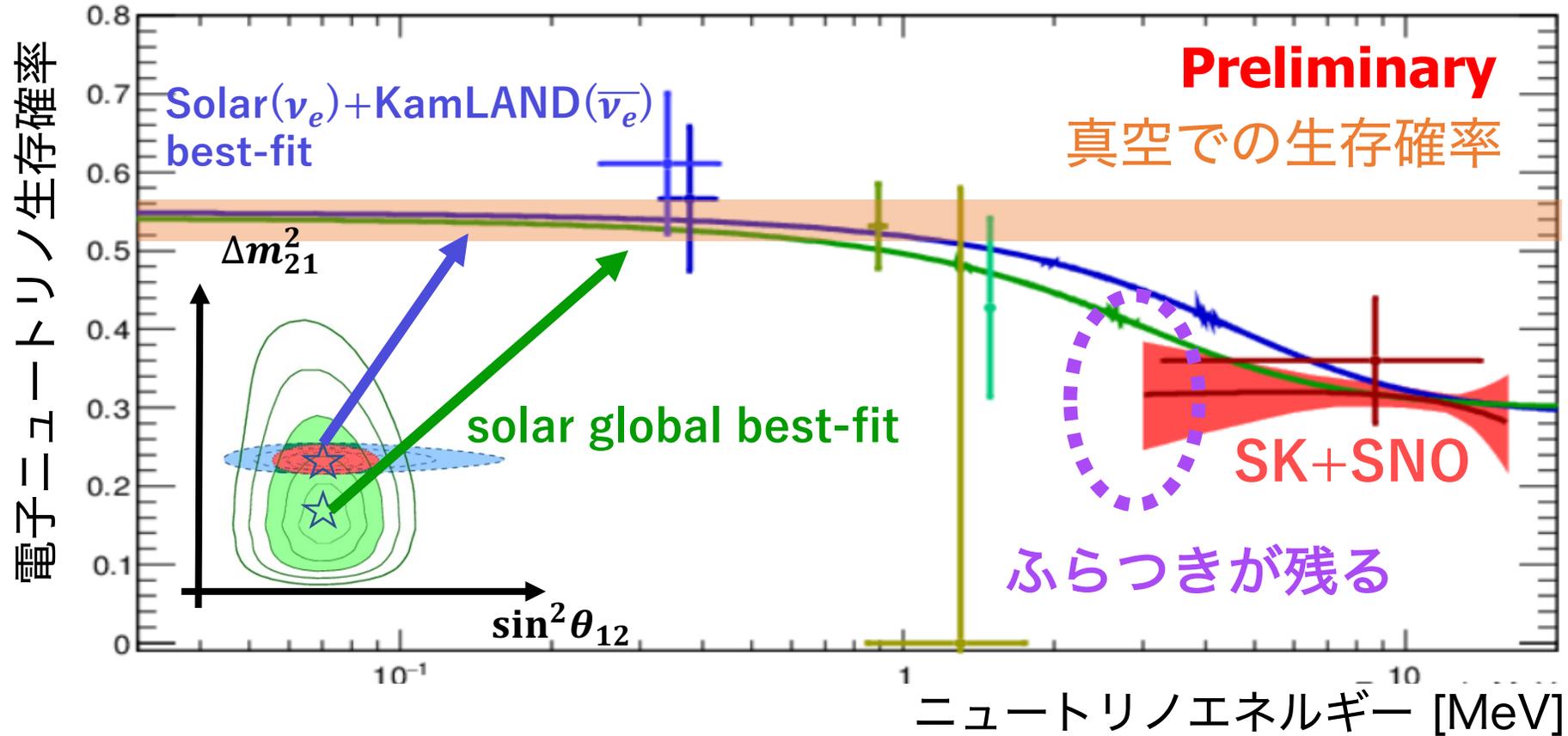


スーパーカミオカンデでは3.5 ~ 20 MeVの太陽ニュートリノに感度を持ち、物質効果の高精度測定やhepニュートリノの観測を目指している。

➡ バックグラウンドの理解と、低エネルギーでの再構成精度が必要となる。

本発表ではPMTノイズの低減を試み、再構成の精度向上を行った。

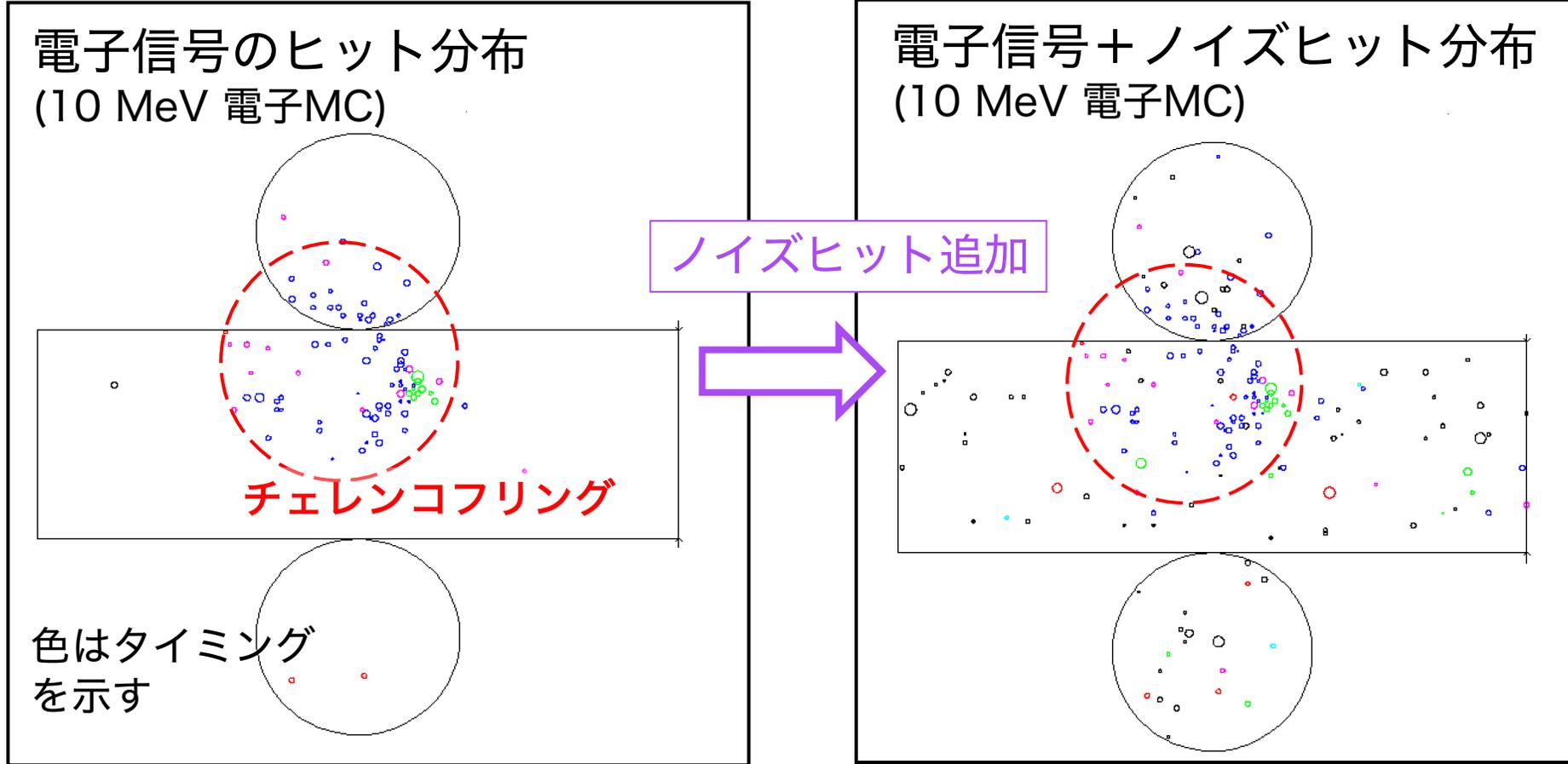
# 太陽ニュートリノ



スーパーカミオカンデでは3.5 ~ 20 MeVの太陽ニュートリノに感度を持ち、物質効果(MSW効果)の高精度測定を目指している。

- ➡ 低エネルギー事象の統計的ふらつきが大きい。(BG, 再構成精度)  
本発表ではPMTノイズの低減を試み、再構成の精度向上を行った。

# SKにおけるノイズの影響



平均PMTノイズレート (2019/08/05 : 純水 SK中)

低エネルギー電子の場合  
**6 hits** / 1 MeV/50 ns

6.22 kHz × 11129 PMTs  
→ **3 hits** / 50 ns

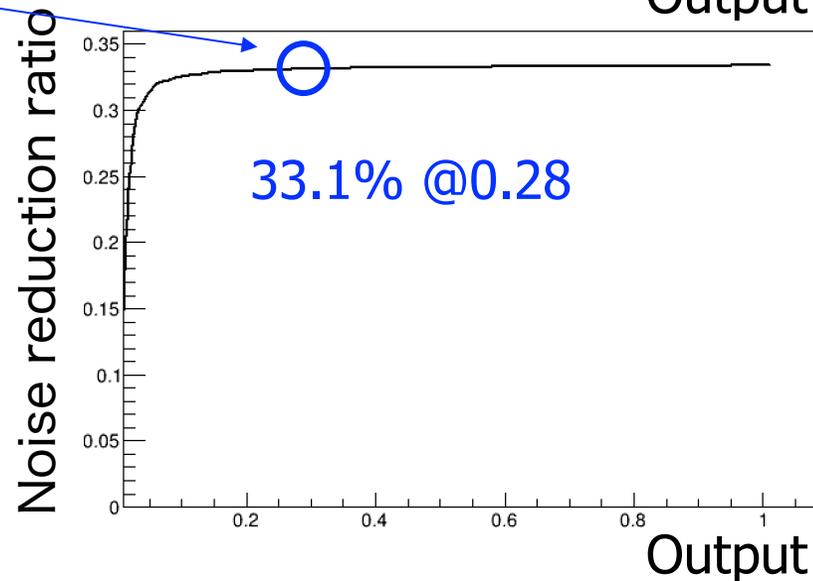
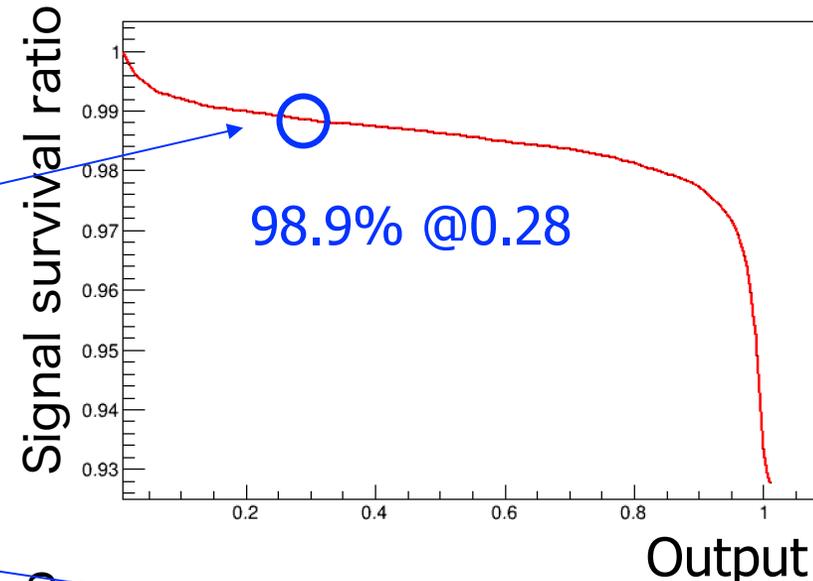
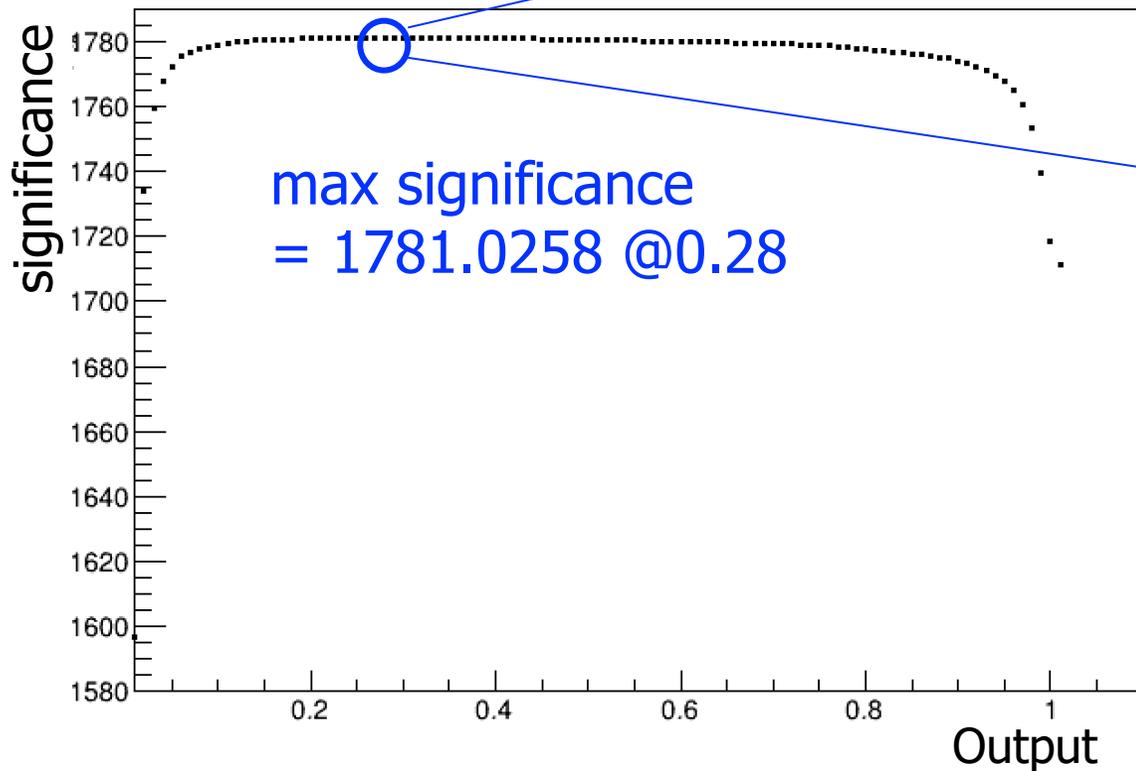
# Determine output threshold

signalのsignificanceが最大となる閾値を決定

$$\text{Significance} = \frac{S}{\sqrt{S+B}}$$

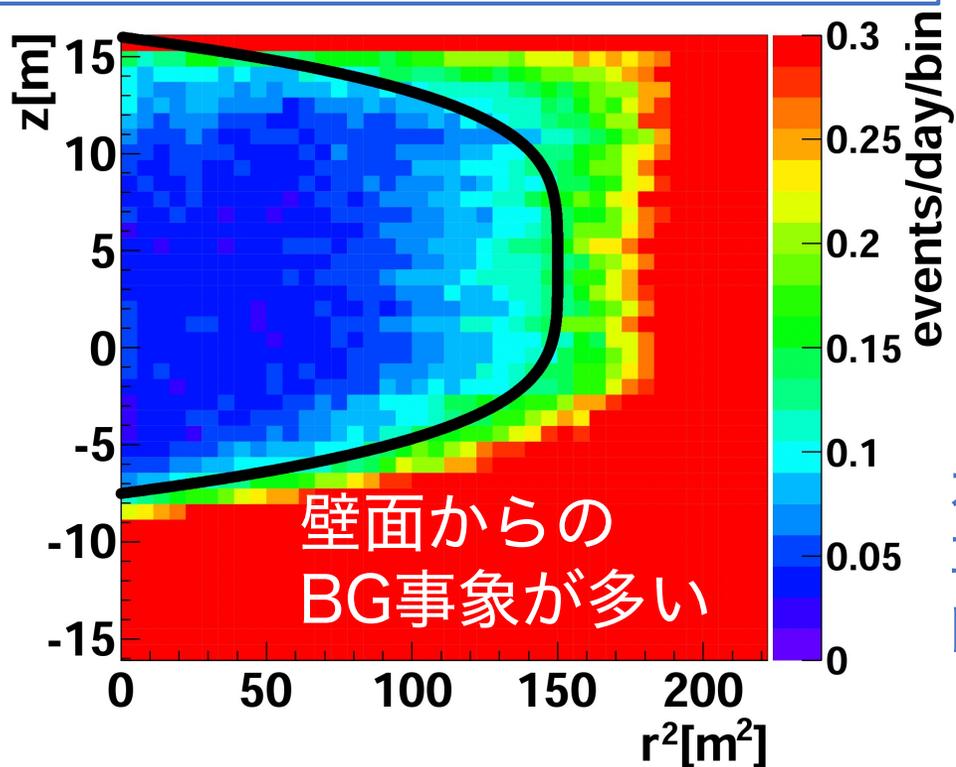
S : 除去後の信号ヒット数

B : 除去後のノイズヒット数



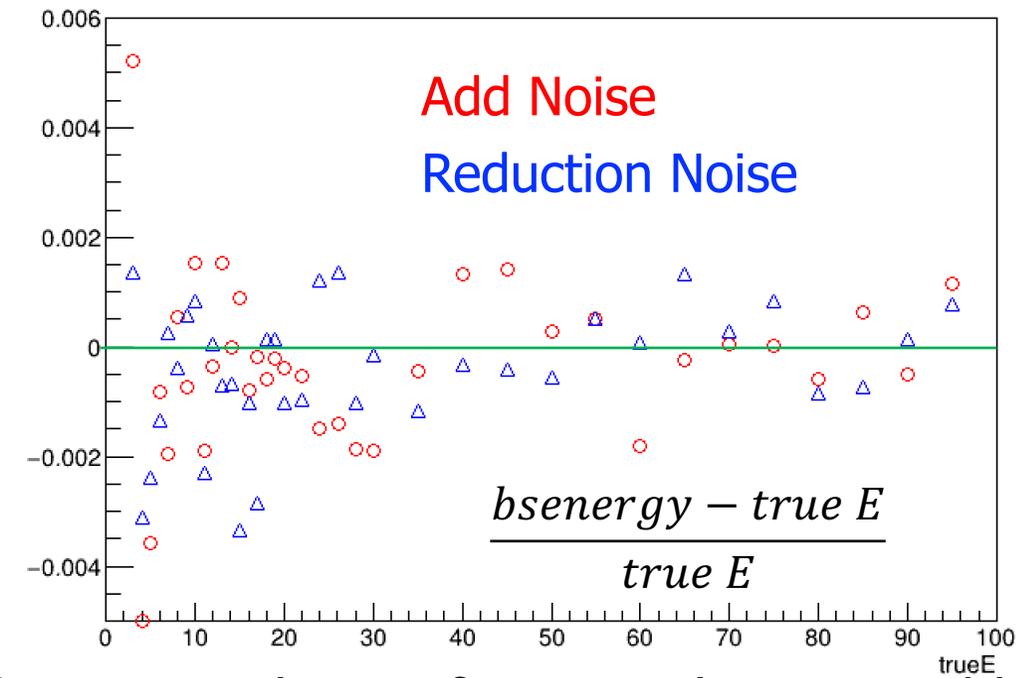
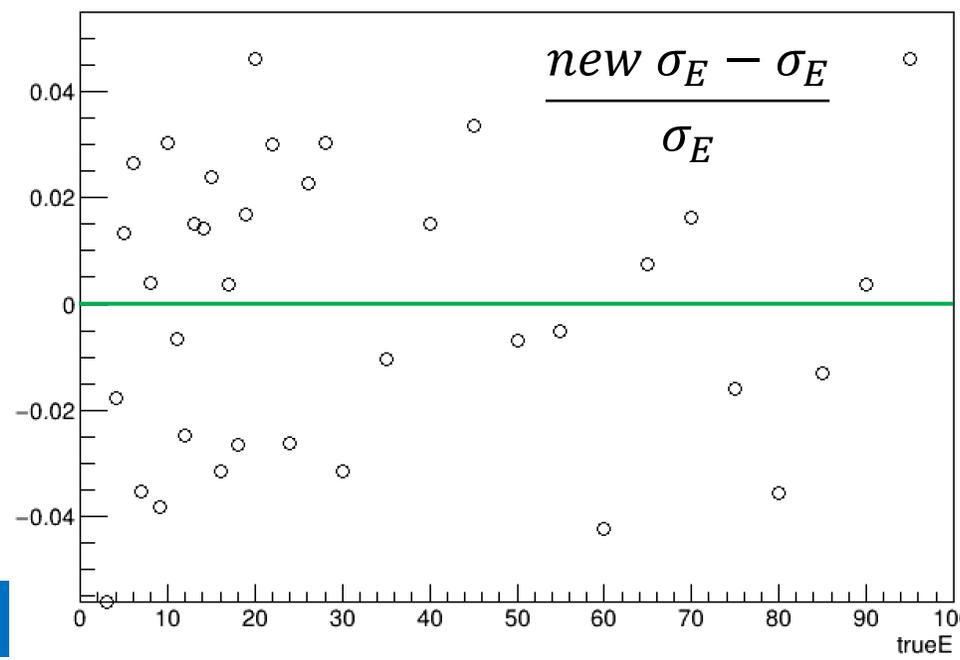
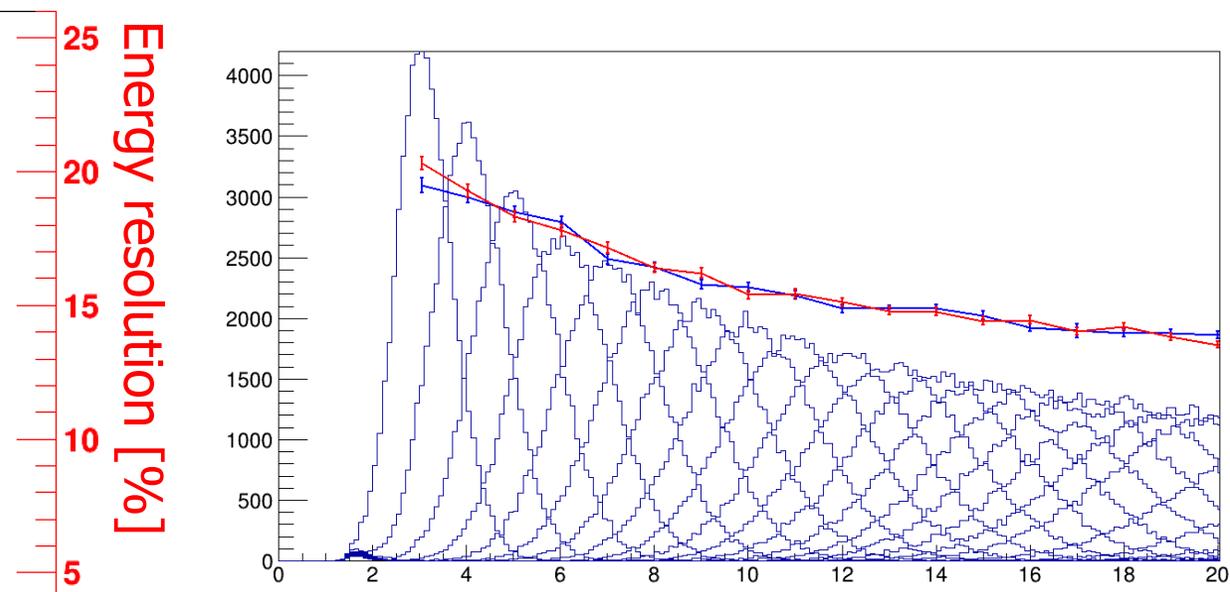
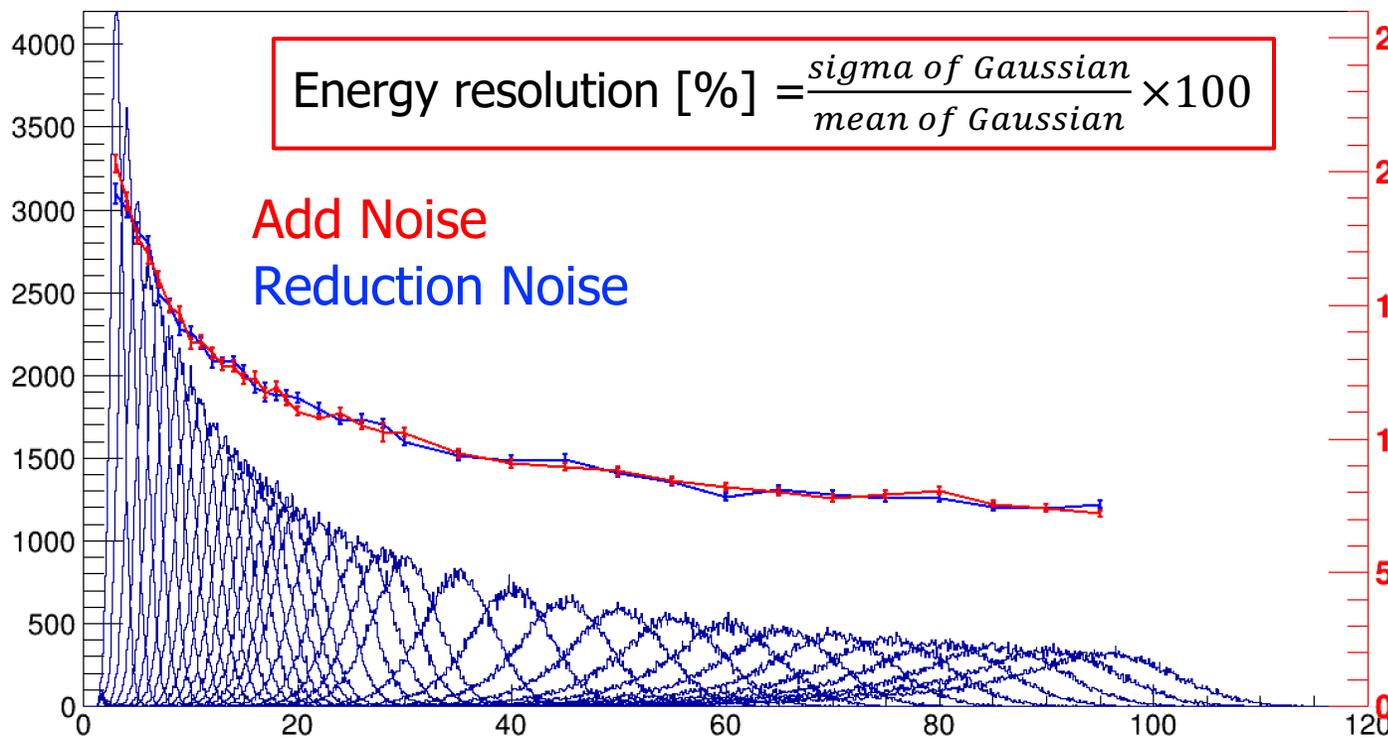
# 太陽ニュートリノ検出

3.49 – 3.99 MeV データの位置分布



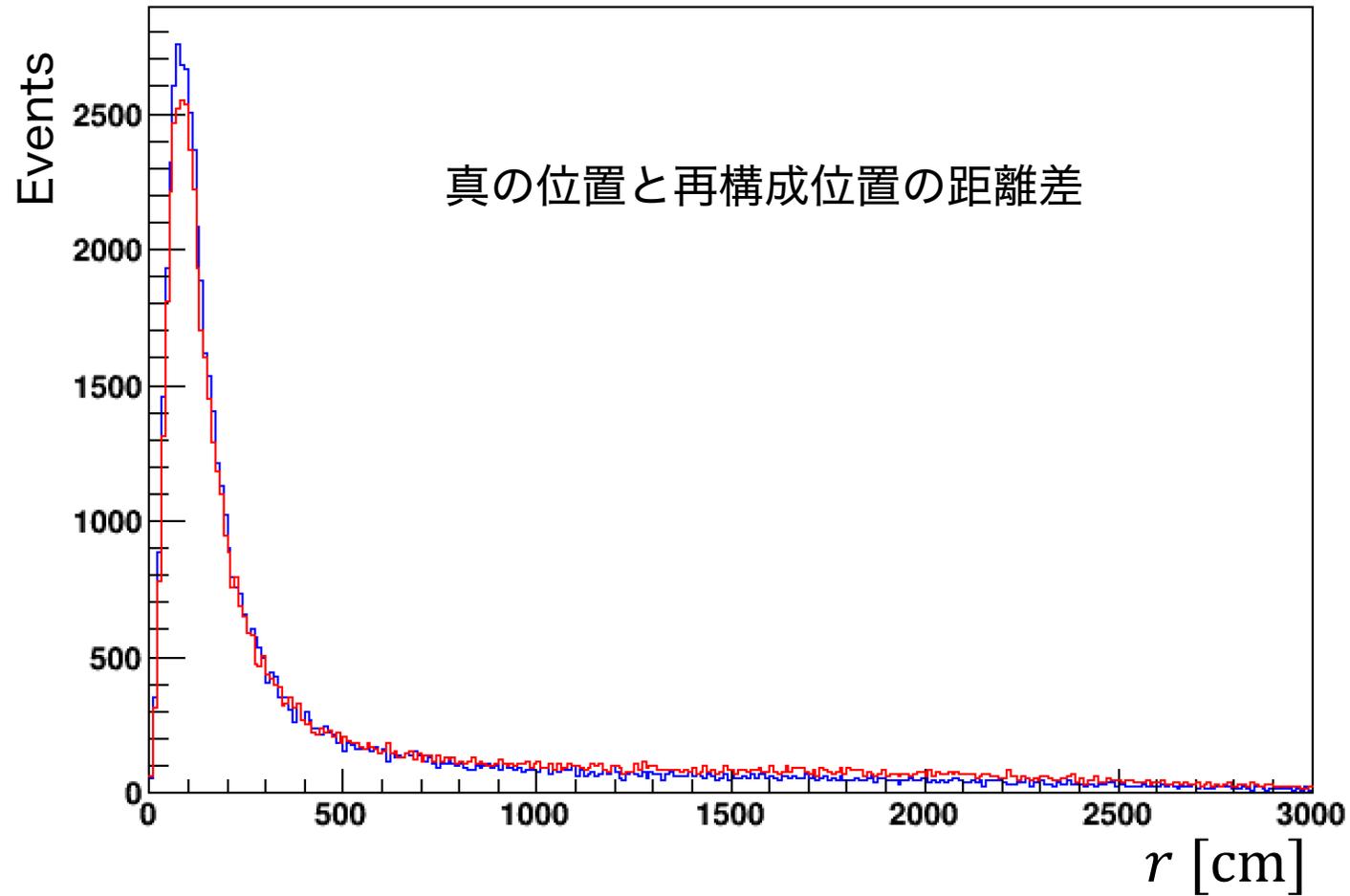
PMTノイズや放射性不純物由来の発光により一部の範囲は解析に使用できていない。

本発表では低エネルギー領域の再構成向上とバックグラウンド低減を目指した、PMTノイズの低減について報告する。



Reconstruction performance is comparable

$$r = \sqrt{(x_{recon} - x_{true})^2 + (y_{recon} - y_{true})^2 + (z_{recon} - z_{true})^2}$$



# シンチレーション光ノイズ調査

シンチレーション光の連続ヒットの時間構造を調査する。→ 時間差分布作成

## 全PMTのヒットタイミング分布

Super-Kで測定 (2022/5/19) 宇宙線イベントを含む測定データ使用

時間差の基準となるFirst Hitを定義する。

(50, 70)  $\mu\text{s}$

(50, 70)  $\mu\text{s}$ のノイズヒットをFirst hitと定義し、時間差の基準とする。

ノイズヒット

Hit Time [ $\mu\text{s}$ ]

First Hit

同一PMTの後続ヒットの時間差を確認する

後続ヒット

時間差

0 (基準)

## 時間差分布

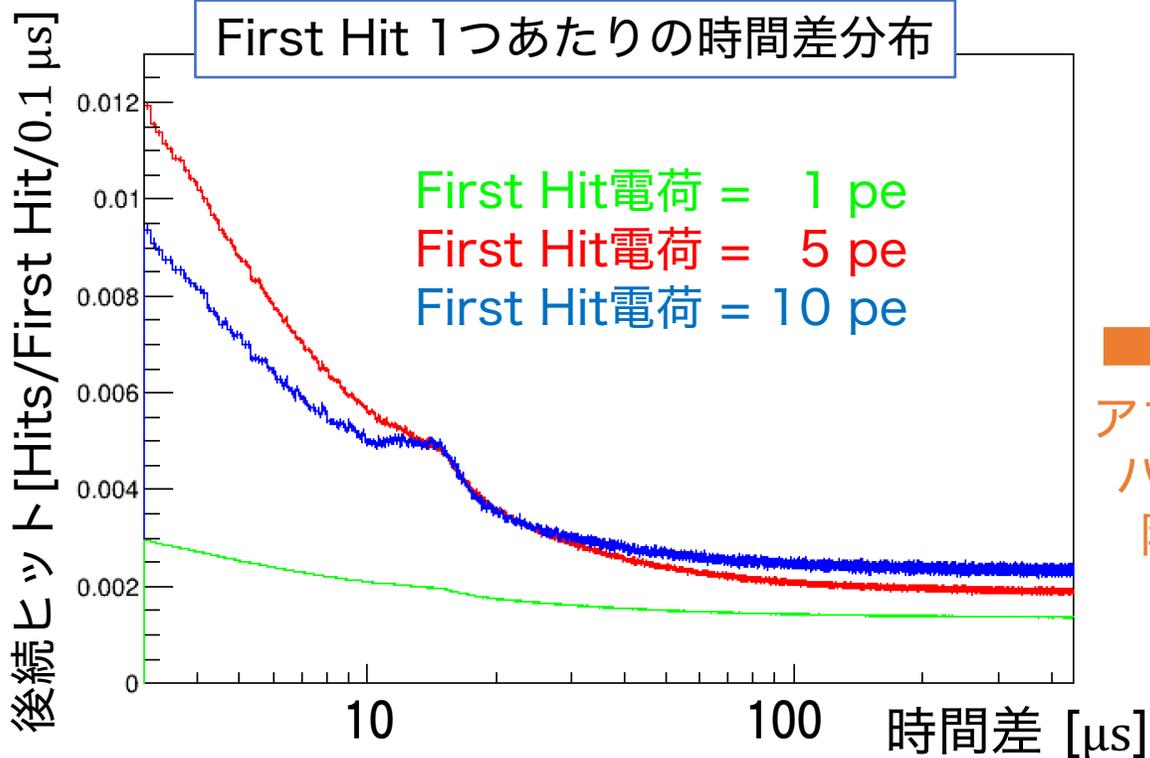
後続ヒットによるテール

アフターパルスのピーク

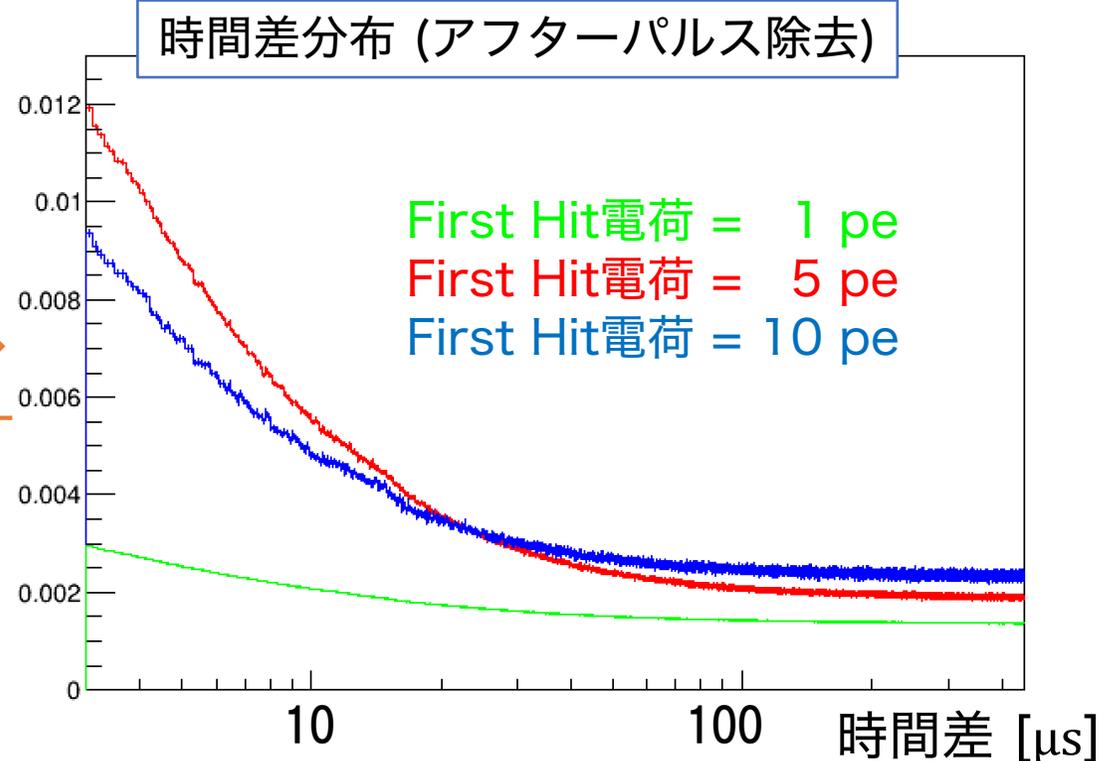
10

100 時間差 [ $\mu\text{s}$ ]

# シンチレーション光ノイズ 時定数調査



→  
アフター  
パルス  
除去

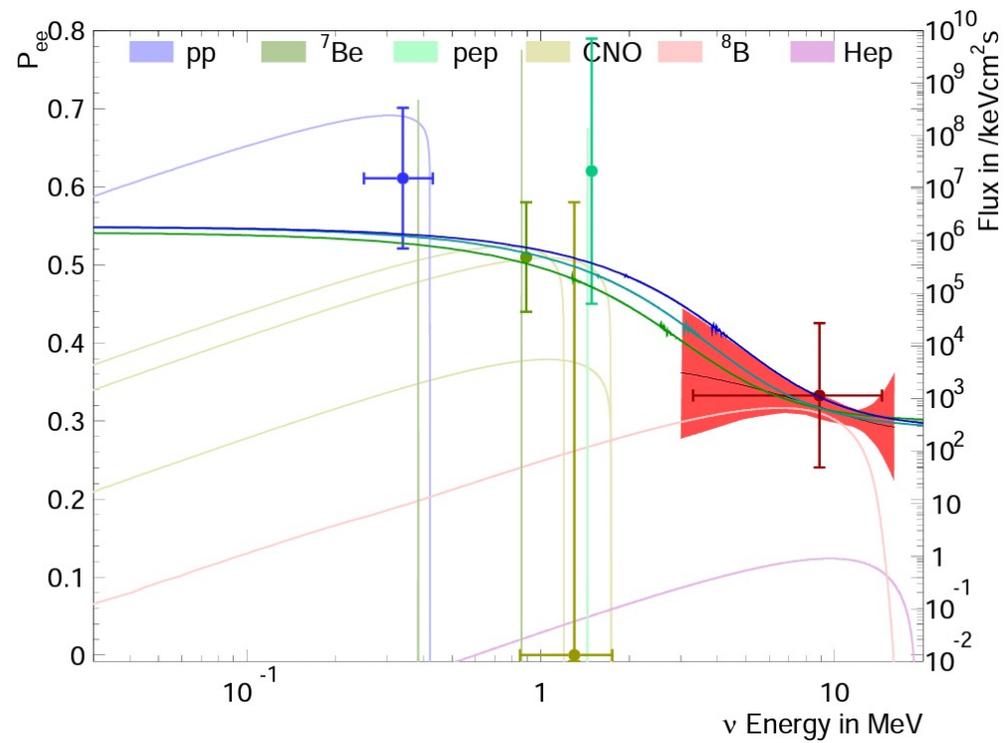
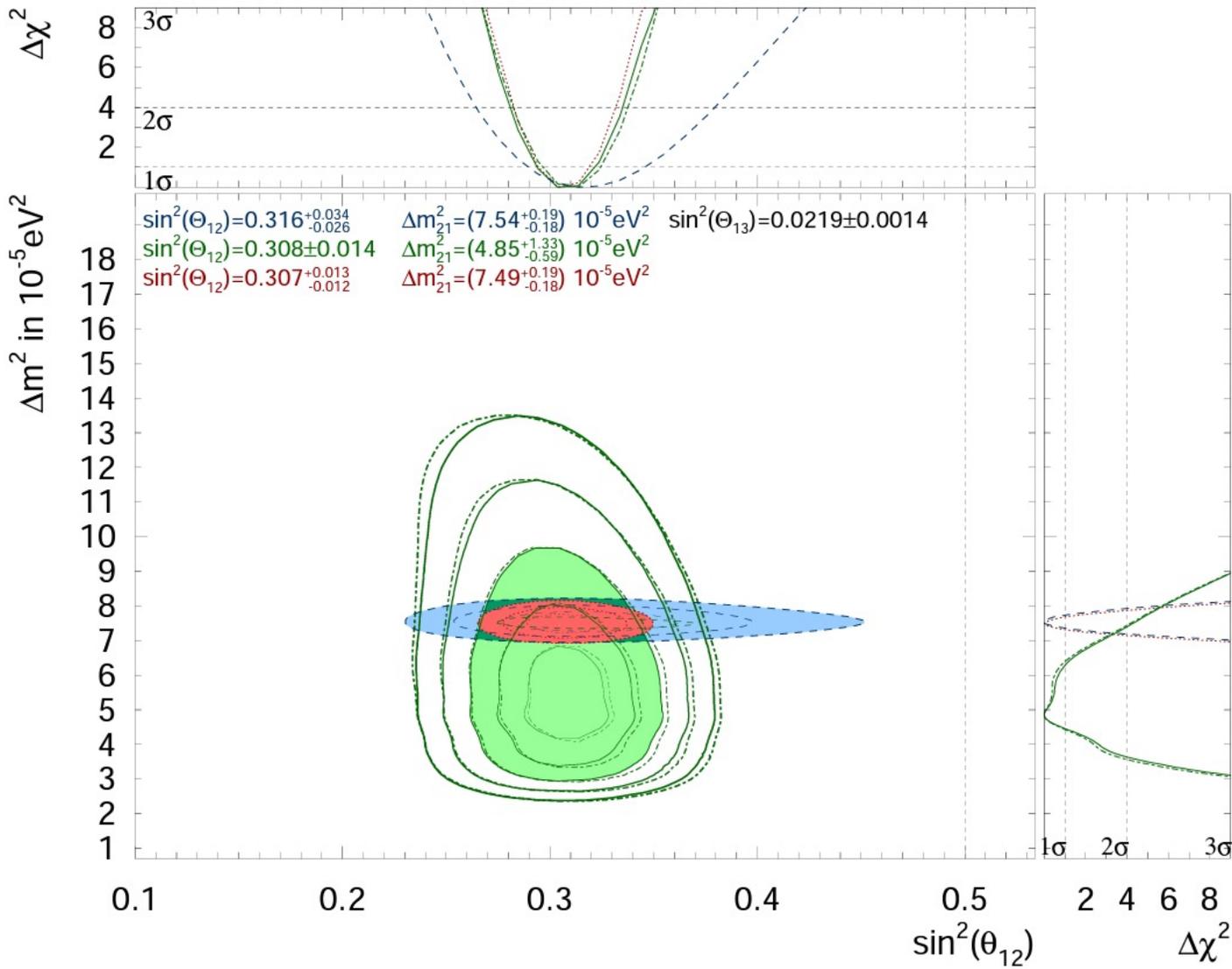


4つの時定数 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ を仮定し、  
時間差構造を4つの指数分布でフィットする。

- [200, 450] $\mu\text{s}$ をフィット →  $\tau_4$ とフラット成分決定
- [80, 200] $\mu\text{s}$ をフィット →  $\tau_3$ を決定
- [20, 80] $\mu\text{s}$ をフィット →  $\tau_2$ を決定
- [3, 20] $\mu\text{s}$ をフィット →  $\tau_1$ を決定

→  
First Hit電荷に対して、時定数は  
おおよそ一定の値となったため、  
1 pe ~ 10 peの平均を取る。

$$\begin{aligned}\tau_1 &= 1.745 \pm 0.008 \mu\text{s}, \\ \tau_2 &= 7.605 \pm 0.011 \mu\text{s}, \\ \tau_3 &= 27.37 \pm 0.09 \mu\text{s}, \\ \tau_4 &= 141 \pm 2 \mu\text{s}\end{aligned}$$



Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-IV  
 (Super-Kamiokande Collaboration) Phys. Rev. D **94**, 052010