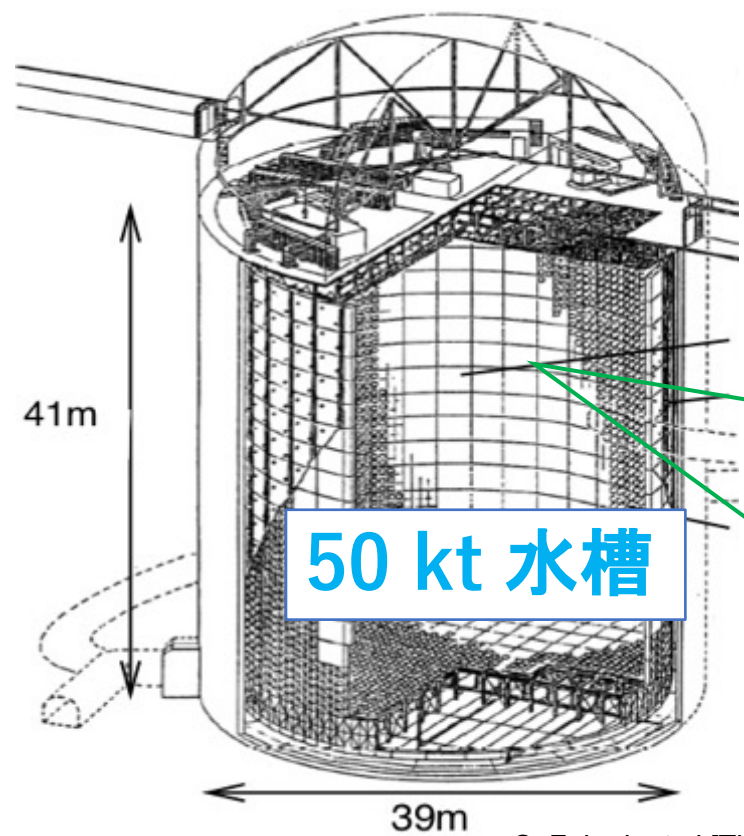


SK-Gdの中性子識別向上のための 光電子増倍管ノイズ解析

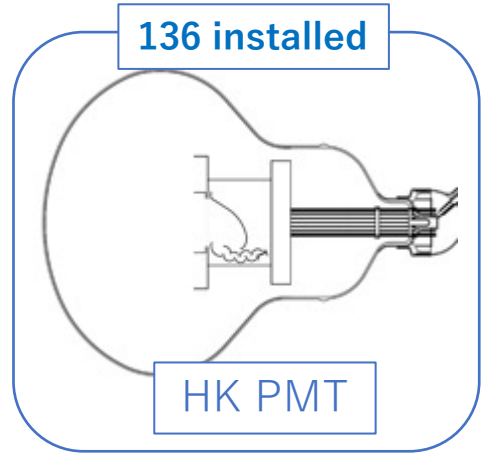
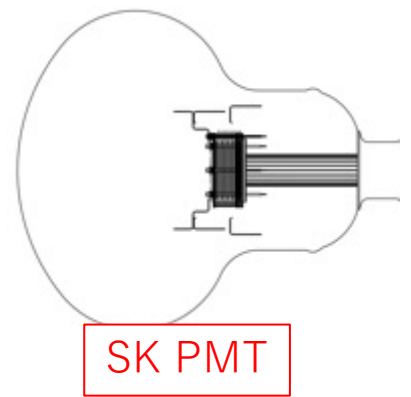
前川 雄音
Keio Univ.

2022年2月20日

スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande; Super-K)

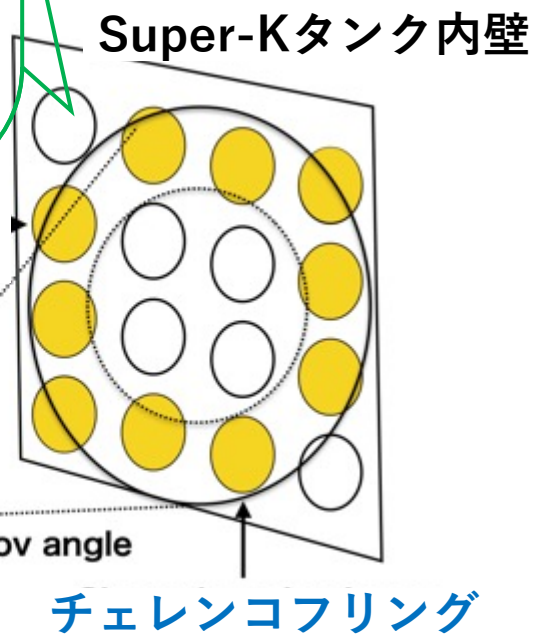


11129本



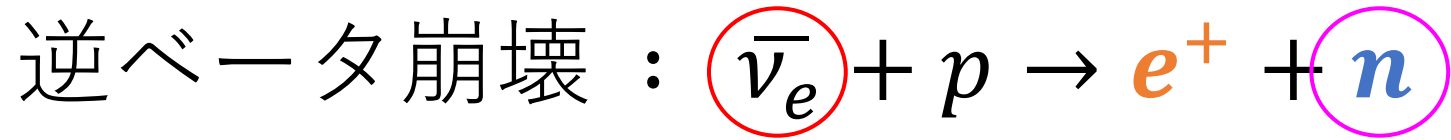
50 cm径 光電子増倍管
(Photomultiplier tube; PMT)

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

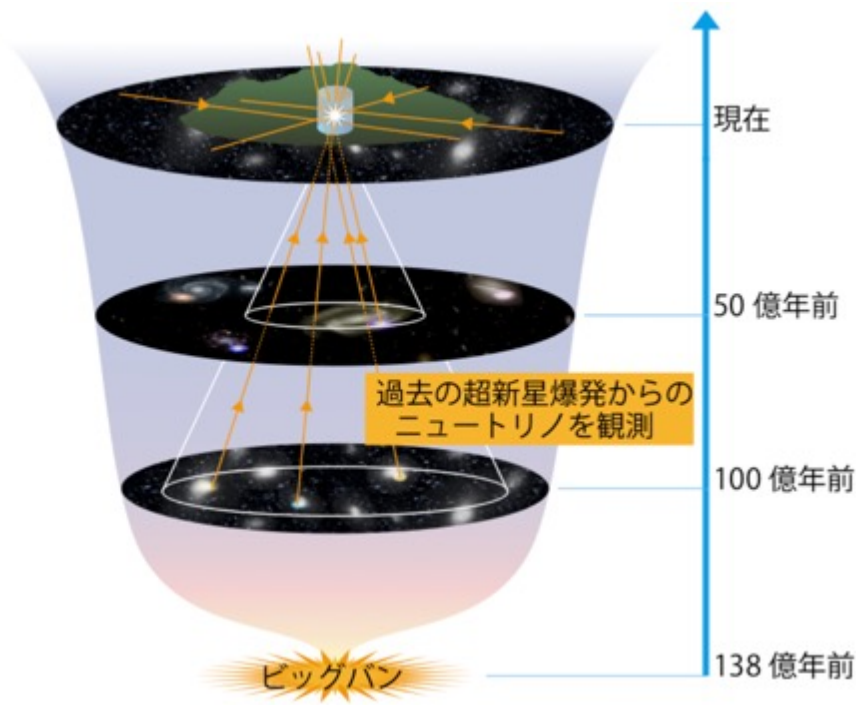


荷電粒子の発生時間、位置、運動量を得るため
光電子増倍管(PMT)の正確なヒット情報(光量、時間)が必要。

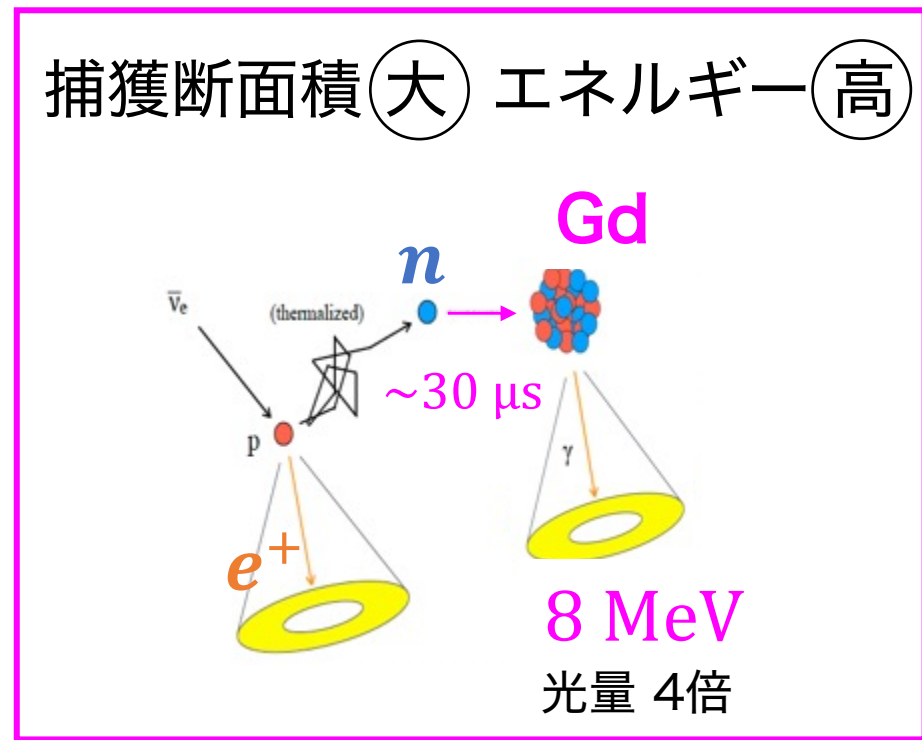
SK-Gd実験



超新星背景 ν



Gd添加で中性子を識別



2020年からSuper-Kにガドリニウム (Gd)が添加された

Super-Kamiokande IV

Run 77472 Sub 279 Event 285409251

18-01-20:05:35:14

Inner: 1164 hits, 3559 pe

Outer: 1 hits, 1 pe

Trigger: 0x10000007

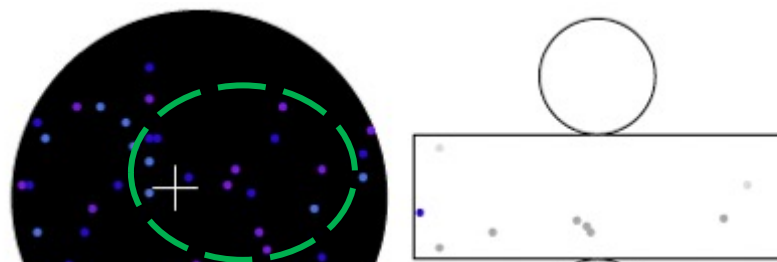
D_val1: 436.3 cm

Evis: 394.7 MeV

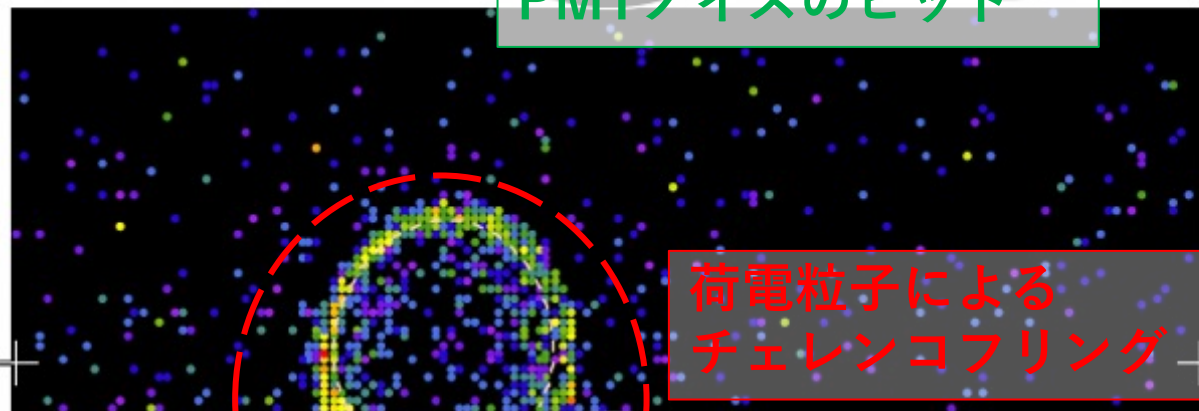
MeV/c

光量

- >26.7
- 23.3-26.7
- 20.2-23.3
- 17.3-20.2
- 14.7-17.3
- 12.2-14.7
- 10.0-12.2
- 8.0-10.0
- 6.2-8.0
- 4.7-6.2
- 3.3-4.7
- 2.2-3.3
- 1.3-2.2
- 0.7-1.3
- 0.2-0.7
- <0.2

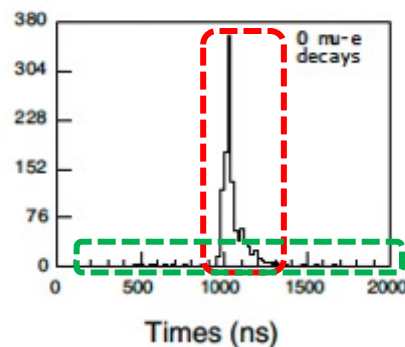
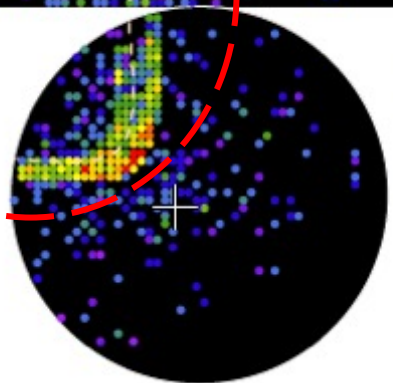


イベントに由来しない
PMTノイズのヒット



荷電粒子による
チェレンコフリング

Super-K イベント ディスプレイ



Super-K イベント選出

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

N : 同時ヒットPMT本数

電子の場合

6本ヒット / 1 MeV

PMTの検出タイミングから粒子の座標・方向・エネルギーを再構成。

中性子によるガンマ線信号の識別に
PMTノイズヒットやオフタイミング信号
が影響を及ぼす。

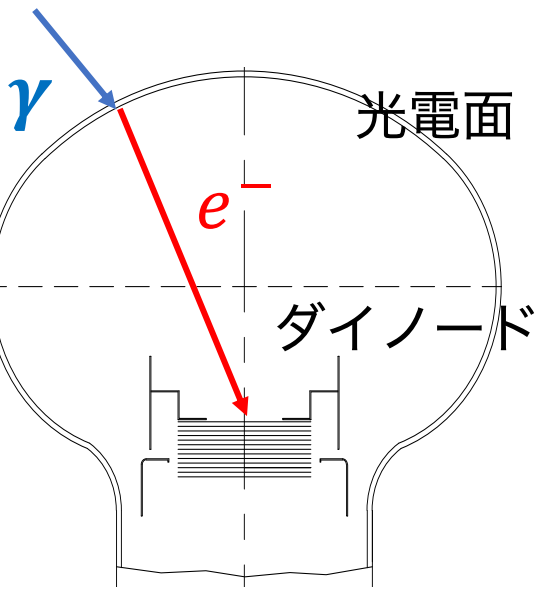
本発表の内容

- PMTオフタイミング信号調査
- PMTノイズ除去手法
- 中性子線源を用いたノイズ除去手法の実証

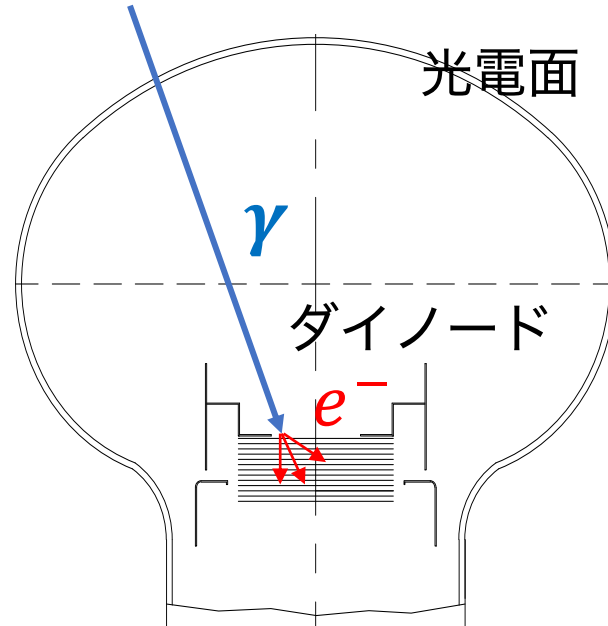
PMTオフタイミング信号

- PMTのオフタイミング信号は主に以下の3つに分けられる。

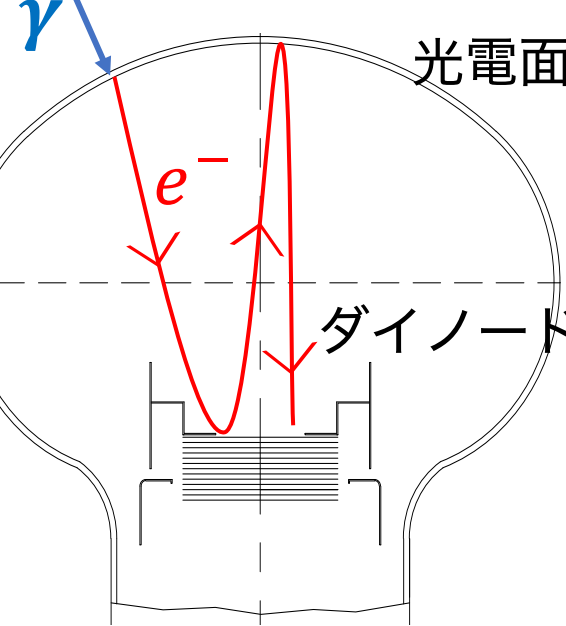
メインパルス
通常の信号



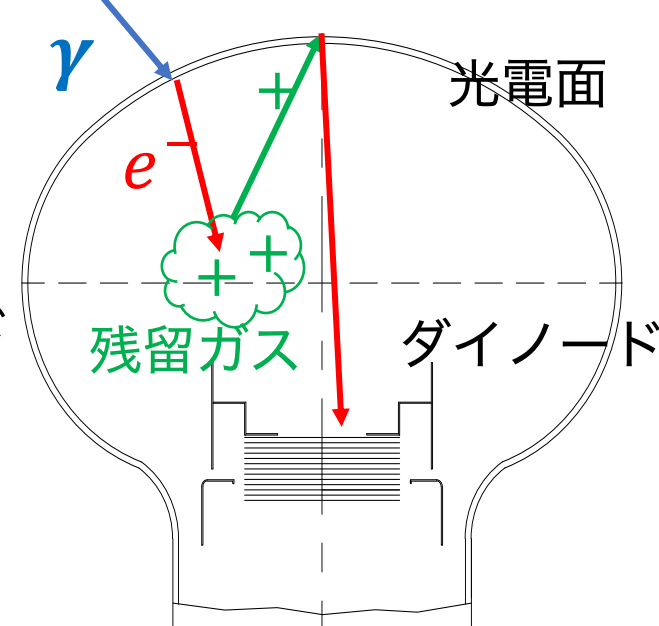
プレパルス
~30 ns 早い



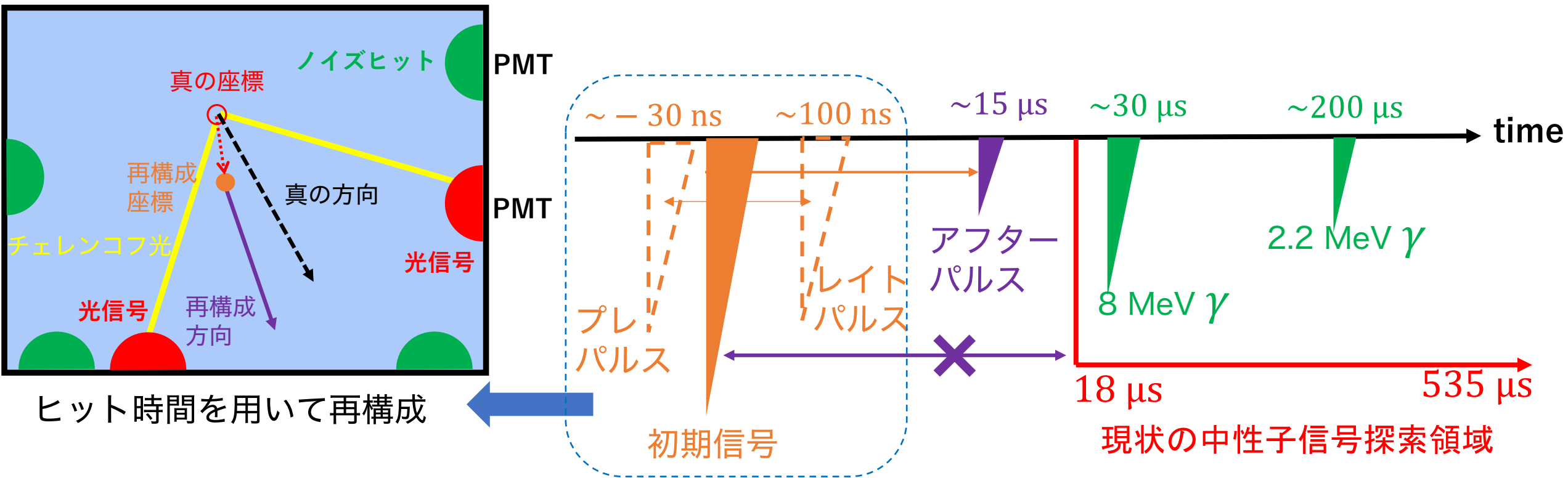
レイトパルス
~100 ns 遅い



アフターパルス
~15 μs 遅い



オフタイミング信号の影響

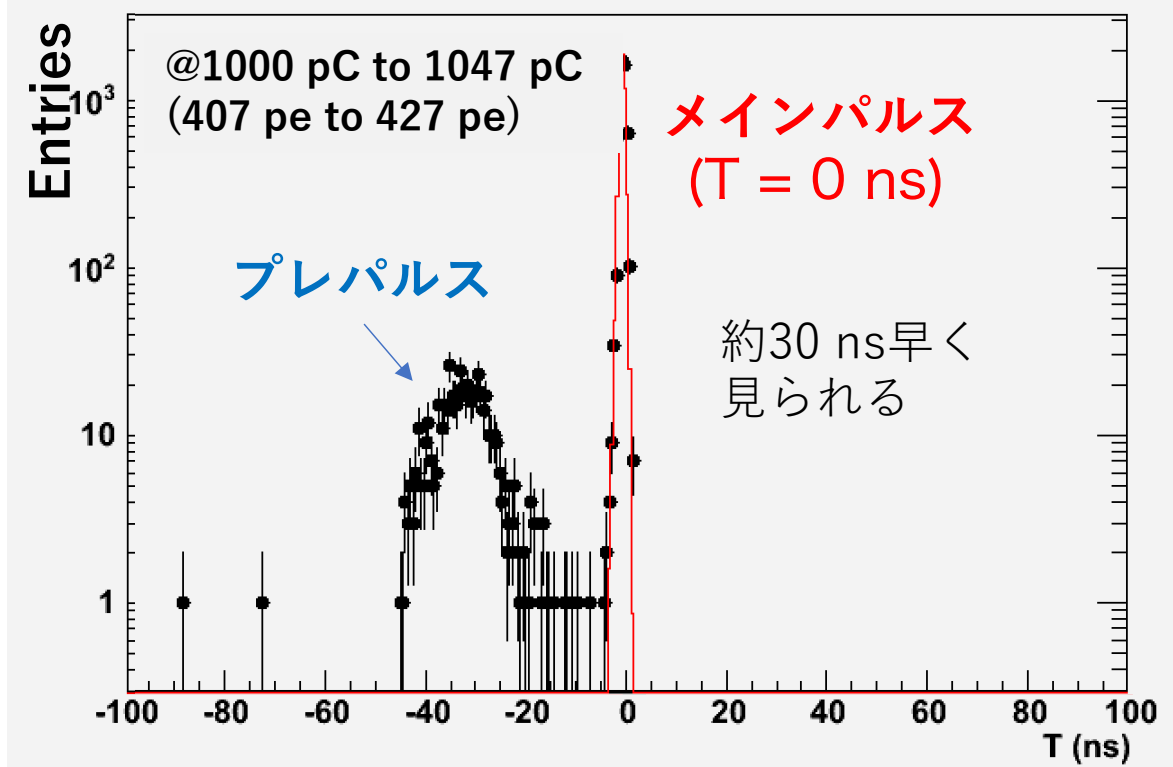


再構成精度向上、中性子探索範囲の拡大に活用できる。

Super-Kに取り付けられたSK PMTとHK PMTに対してオフタイミング信号を調査

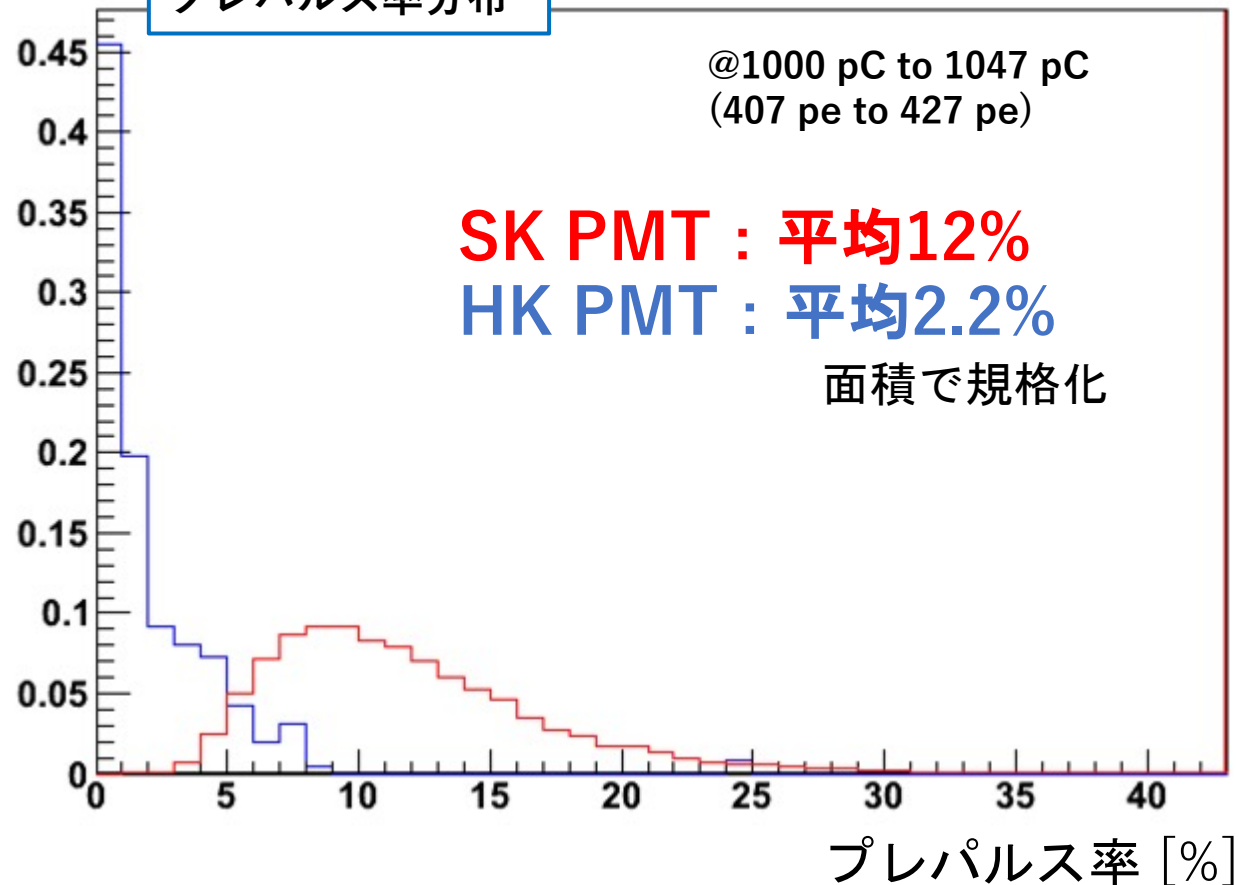
プレパルス

1本のSK PMTのヒットタイミング分布



$$\text{プレパルス率} = \frac{\text{プレパルス}/\text{hits}}{\text{メインパルス}/\text{hits}}$$

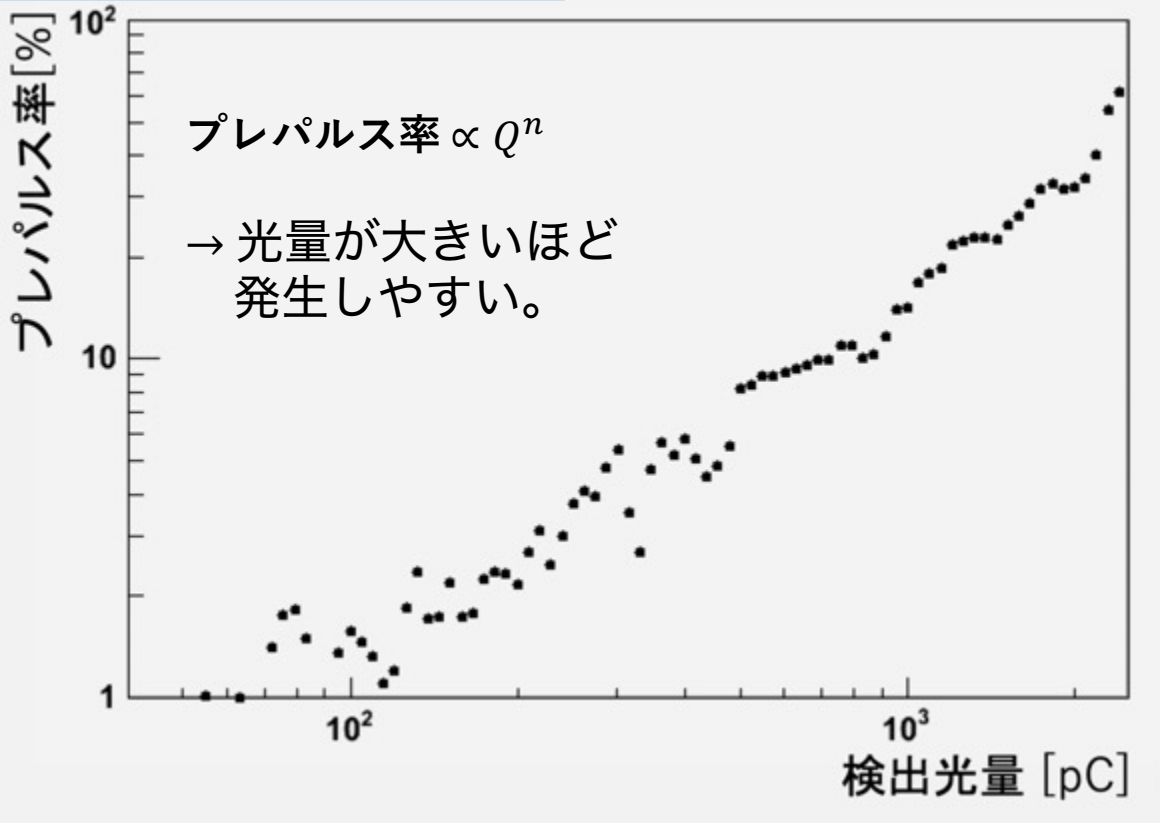
プレパルス率分布



SK PMTとHK PMTのプレパルス率の違いを確認

プレパルスの依存性

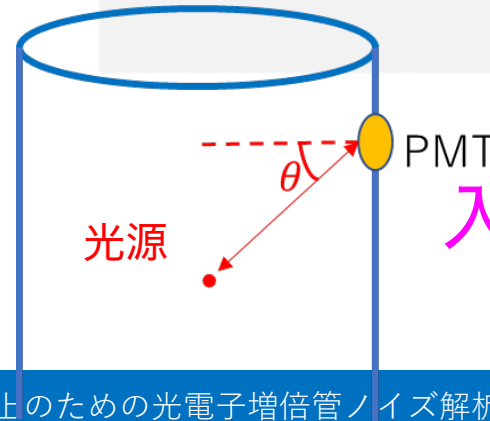
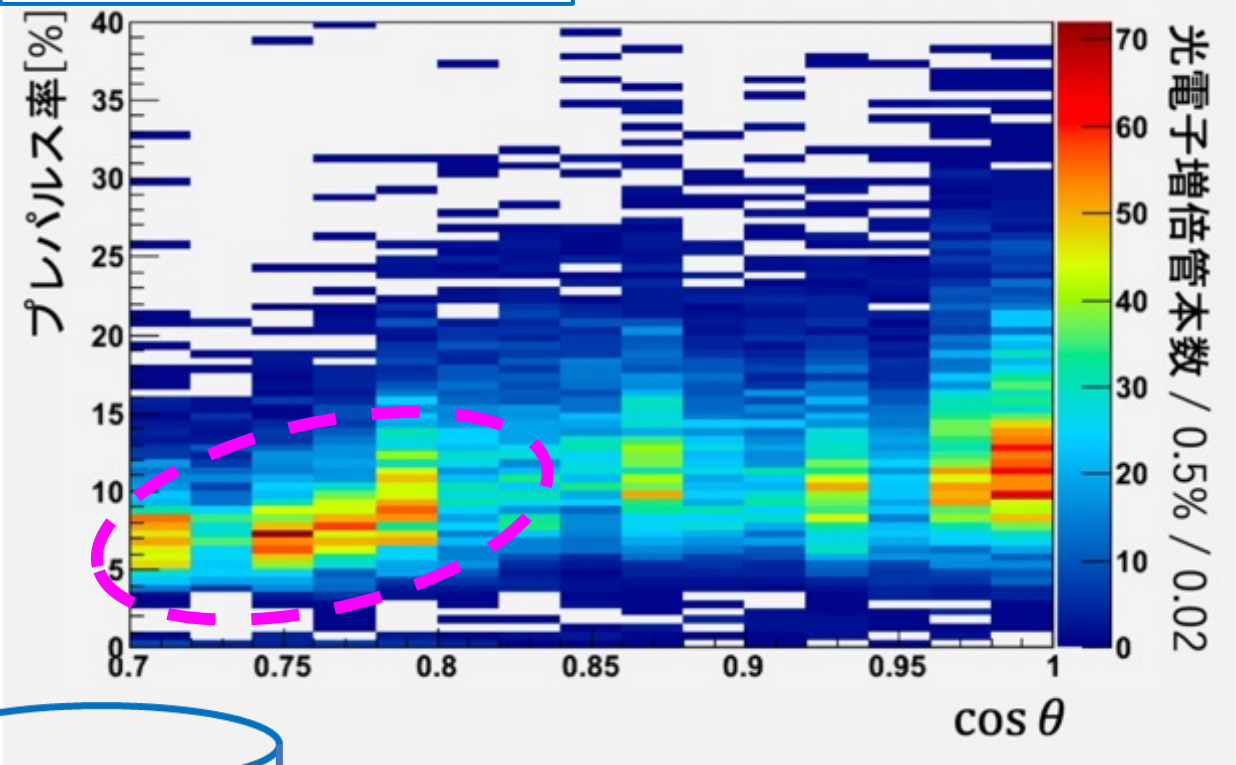
プレパルスと光量の相関



検出光量に対する依存性を確認

プレパルスと入射角の相関

@1000 pC to 1047 pC

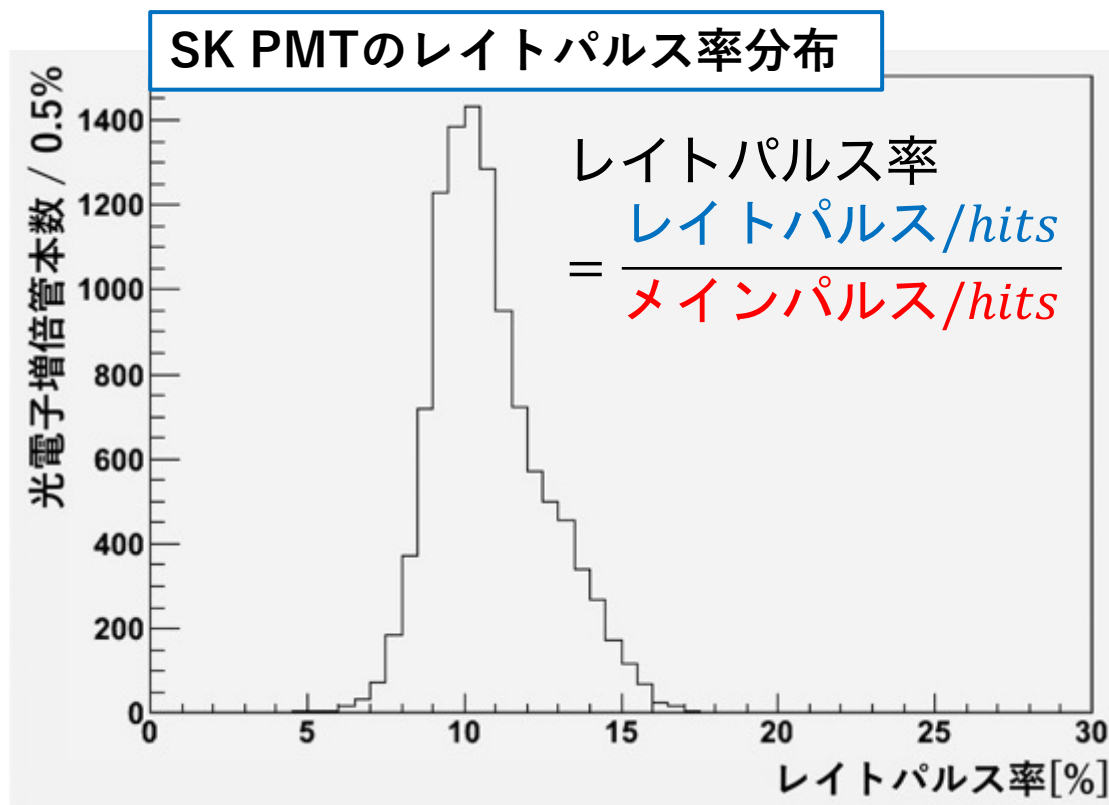


入射角 θ との依存性を確認

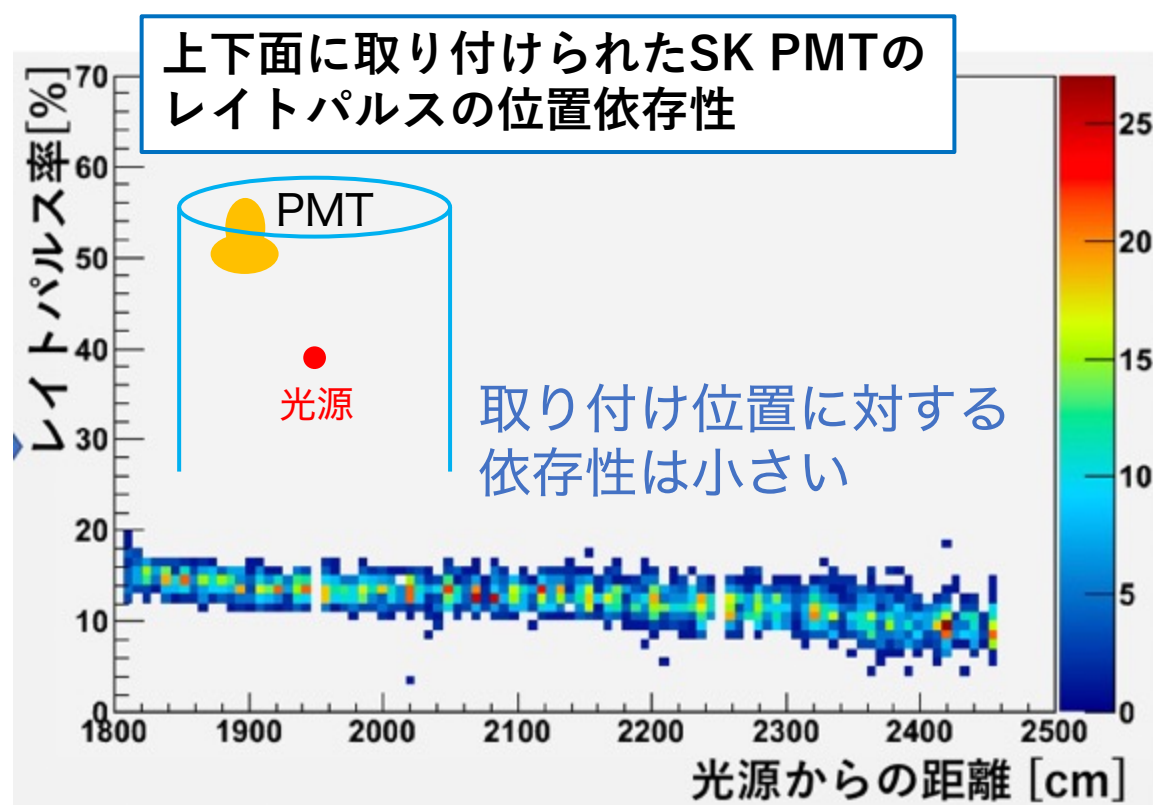
レイトパルス

レイトパルス = 取得データ (水中の散乱 + 反射 + レイトパルス)

- レイトパルスを除いた検出器シミュレーション (散乱 + 反射)



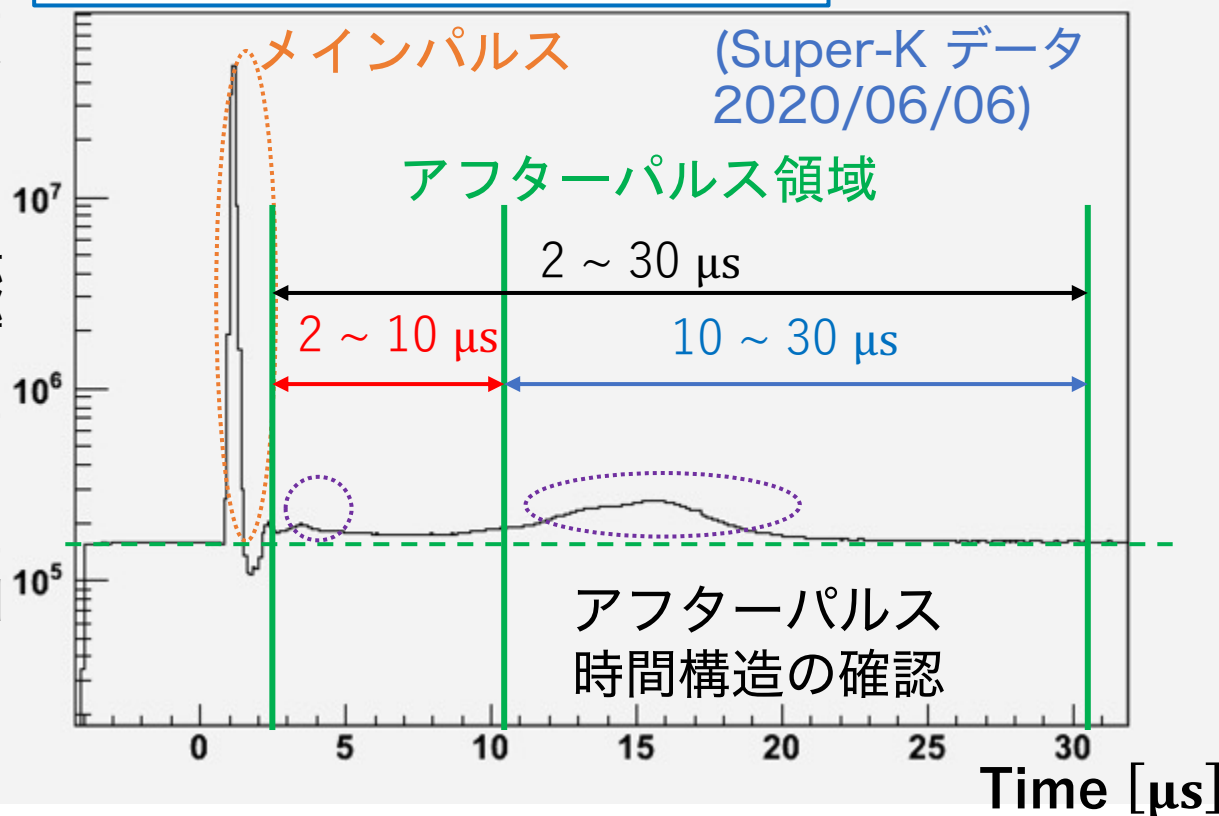
1光電子のメインパルスに対して
平均 11% (SK PMT)、9.9% (HK PMT)
のレイトパルスが確認された。



アフターパルス

アフターパルスタイミング分布

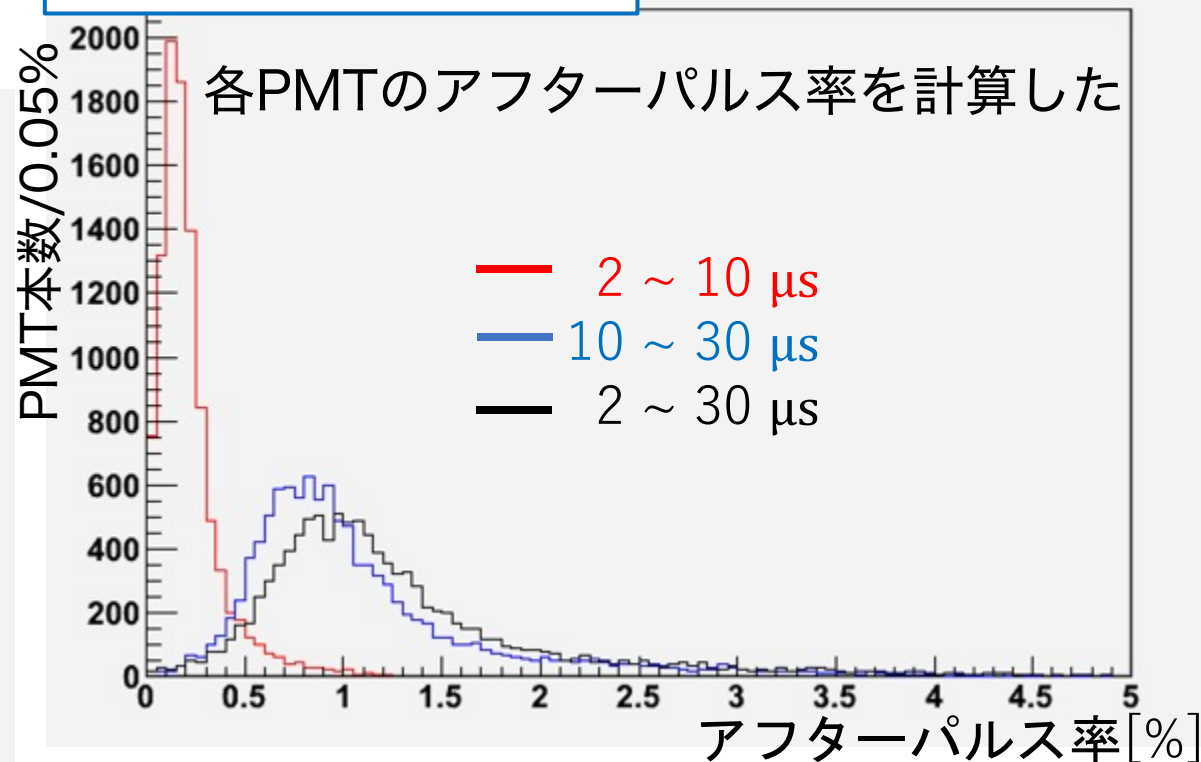
全イベントの積算PMTヒット数



アフターパルス率

= アフターパルス領域のヒット数 / メインパルスの光電子数

アフターパルス率分布



アフターパルスの 時間領域	平均アフターパルス率	
	SK PMT	HK PMT
2 μs ~ 10 μs	0.22%	1.0%
10 μs ~ 30 μs	1.1%	2.6%
2 μs ~ 30 μs	1.3%	3.7%

時間構造とアフターパルス量をモデル化→ 中性子探索範囲の拡大

本発表の内容

- PMTオフタイミング信号調査
- PMTノイズ除去手法
- 中性子線源を用いたノイズ除去手法の実証

除去手法開発のためのノイズ調査

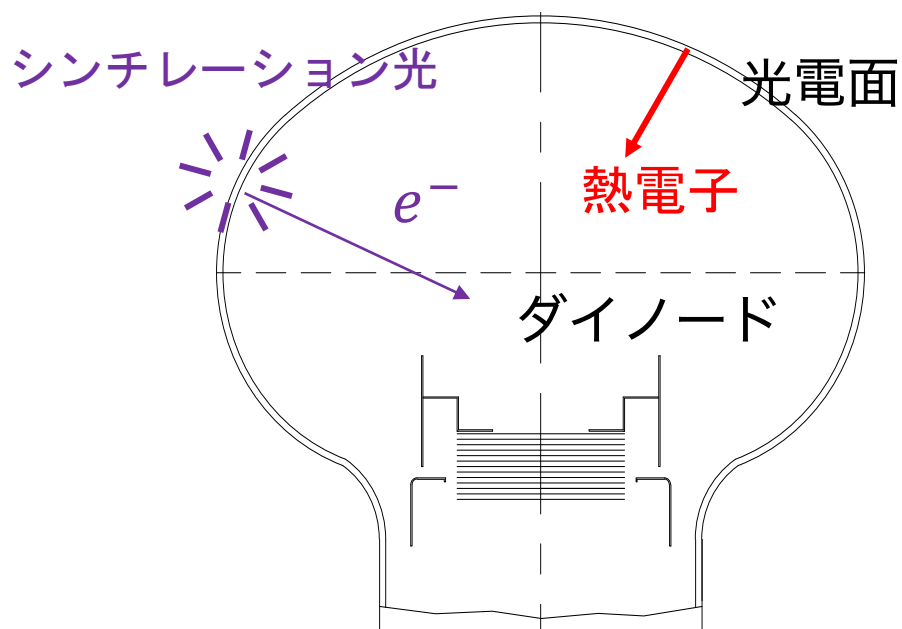
(2020/06/06 : Super-K中)

平均PMTノイズレート : 6.17 kHz × 11129 PMTs



ノイズヒットは
無視できない量
(200 nsで14ヒット)

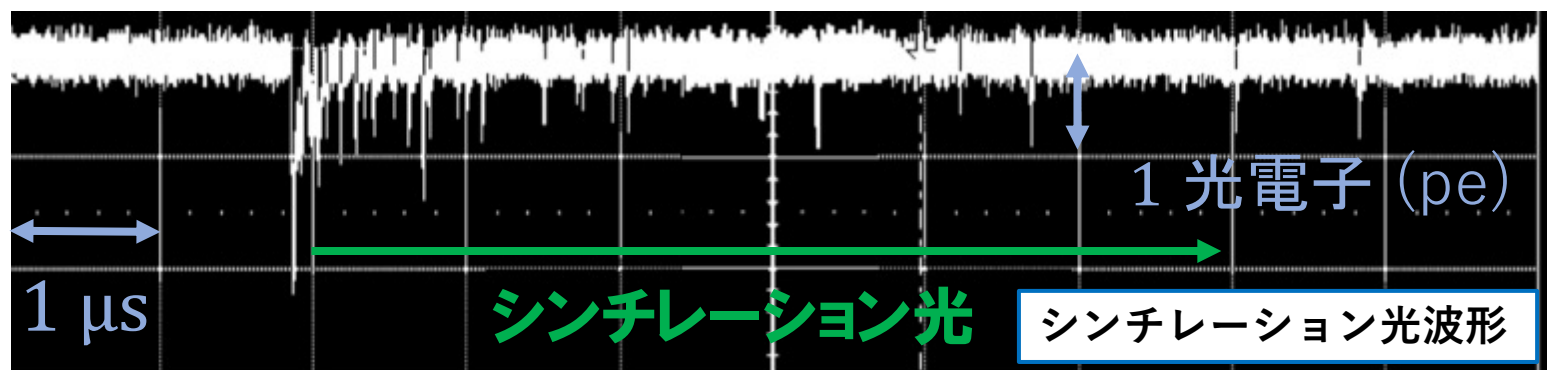
暗中で発生するノイズ



- **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** を持った複数ヒット。

シンチレーション光の特徴を利用してノイズ低減

PMTガラスによるシンチレーション光



シンチレーション光は10 μsに密集した複数のヒットを伴う。

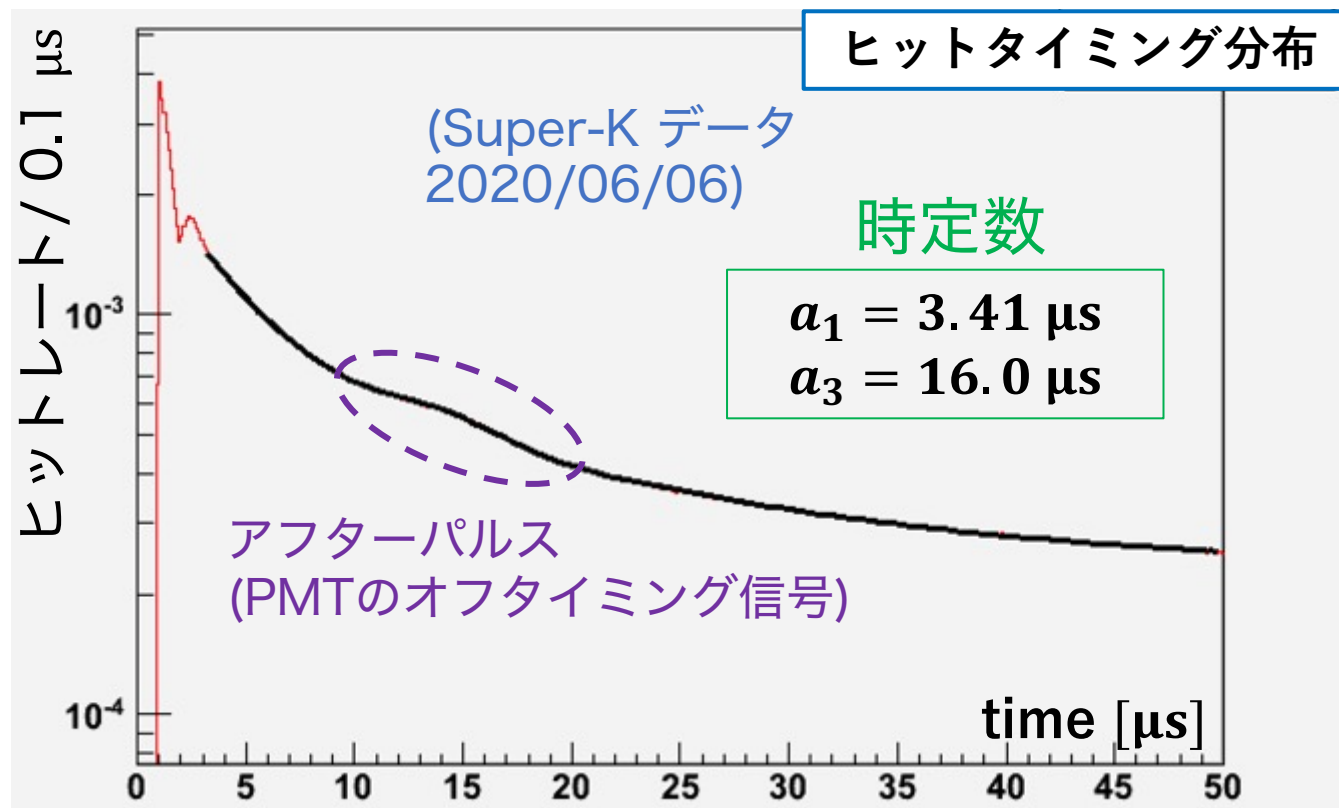
T. Mochizuki, Master thesis, University of Tokyo, (2019).

ヒット時間分布中のシンチレーション光時定数をフィッティングにより求めた。

$$y = a_0 \exp\left(-\frac{x}{a_1}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{x}{a_3}\right)$$

$$+ a_4 + a_5 \exp\left(-\frac{(x - a_6)^2}{a_7^2}\right)$$

熱電子 アフターパルス



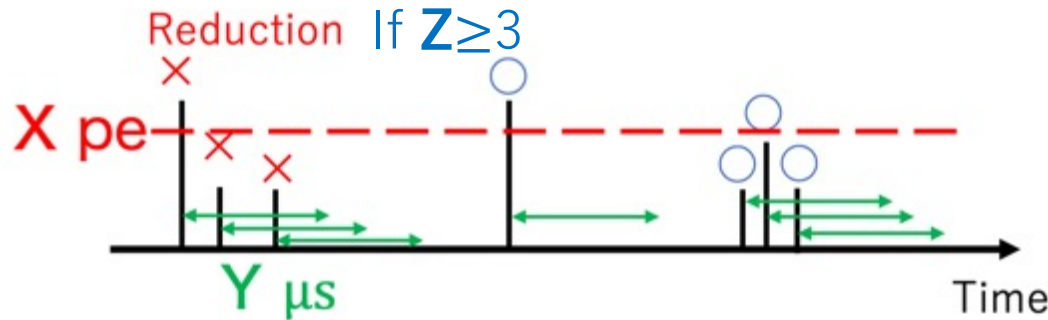
シンチレーション光除去解析

シンチレーション光ノイズの特性から各PMTでノイズヒットを解析的に除去する。

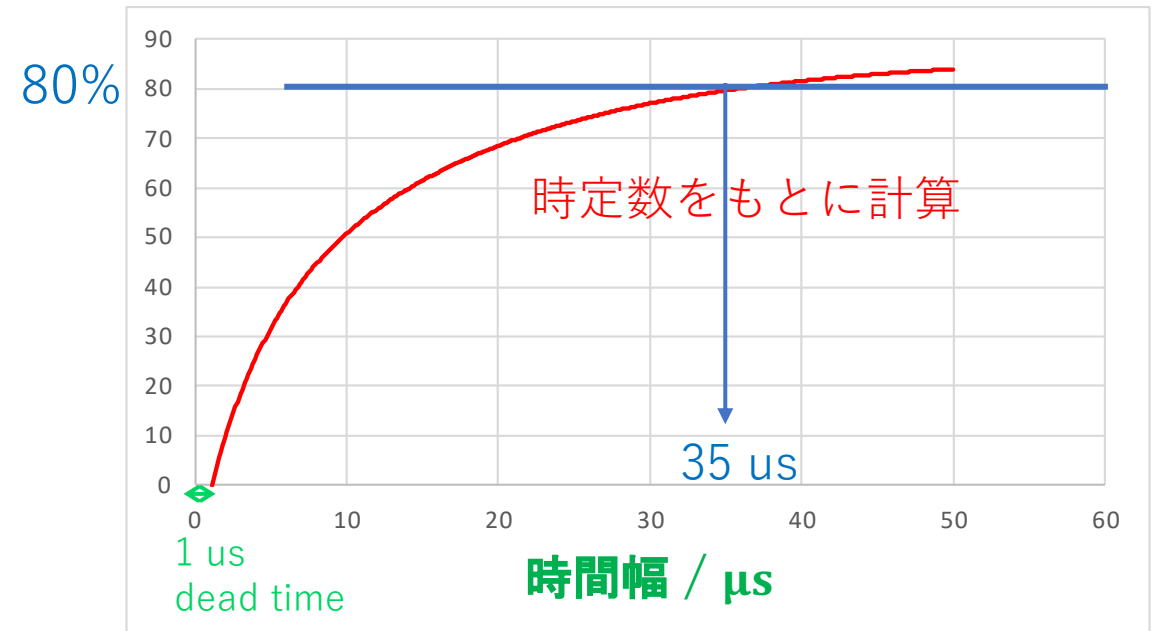
連続したヒットを除去する

$Y \mu\text{s}$ のウィンドウ内の
ヒット数 $\geq Z$ 、光量の最大値 $> X \text{ pe}$

1つのPMTのヒット模式図

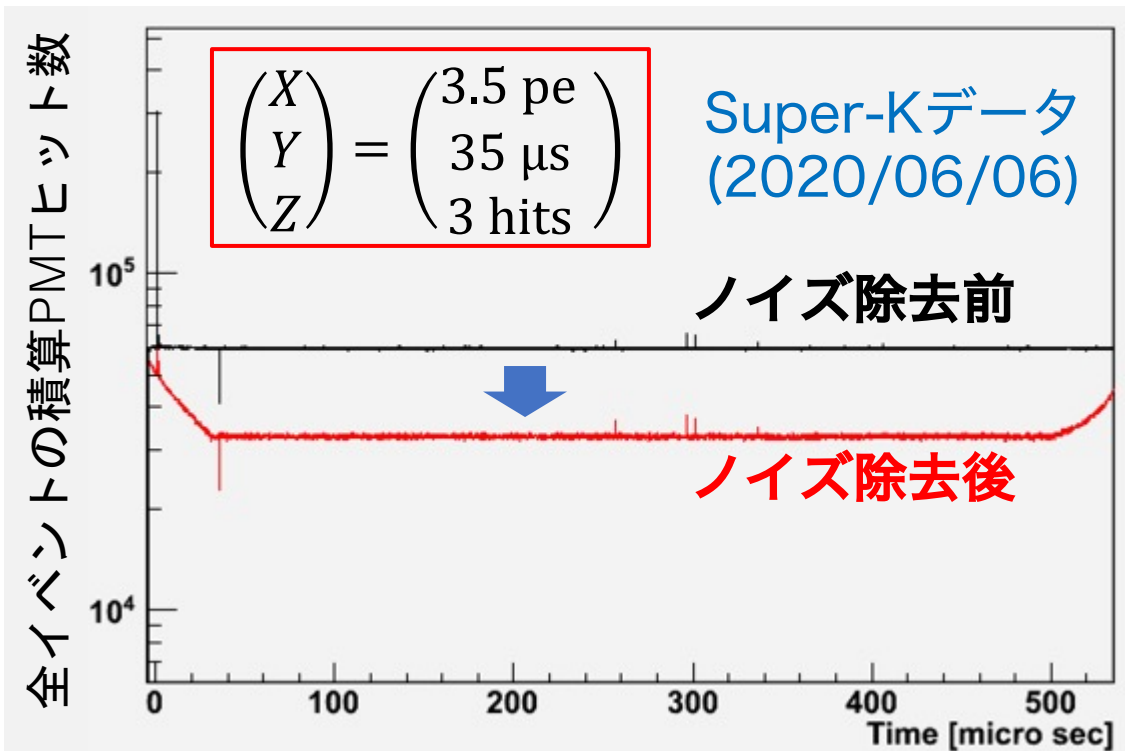


シンチレーション光の後続ヒットが含まれる割合



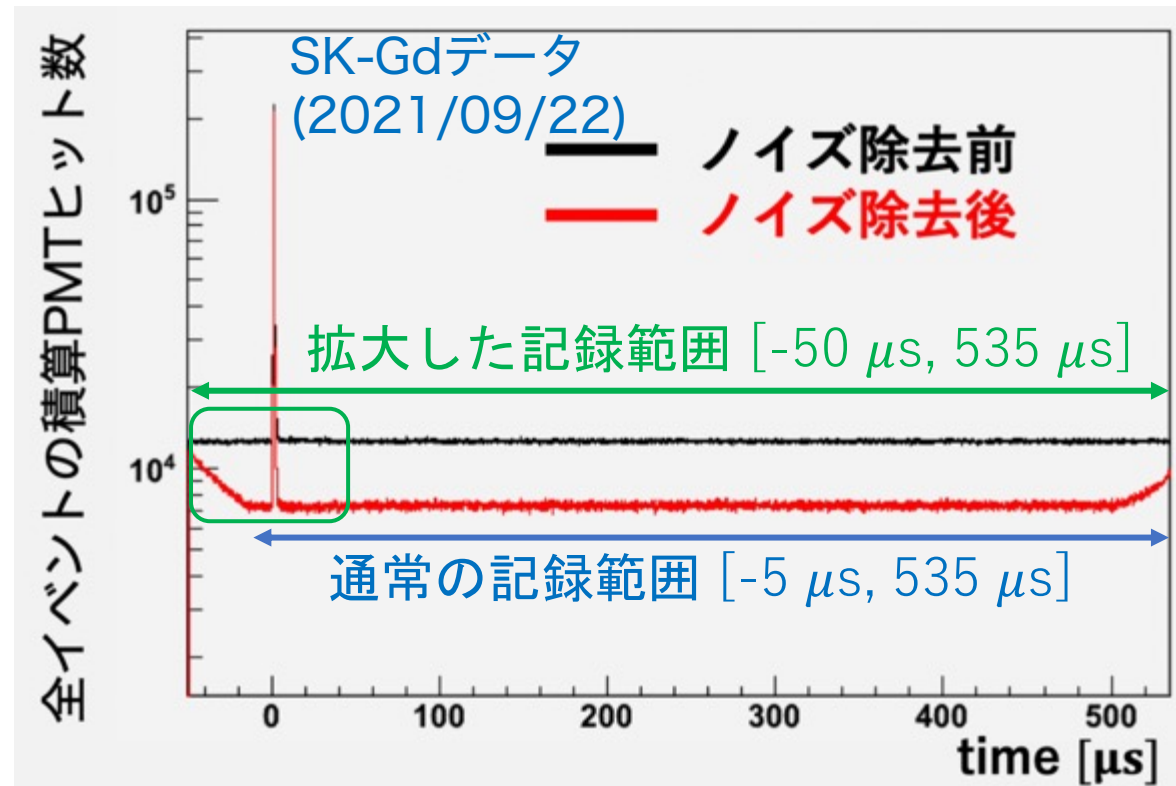
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.5 \text{ pe} : & \text{後続ヒットの多い光量} \\ 35 \mu\text{s} : & 80\% \text{でヒットが含まれる範囲} \\ 3 \text{ hits} : & \text{偶発的なバックグラウンドを抑える} \end{pmatrix}$$

現行のデータ記録範囲 のノイズ除去効果



ノイズ除去を行うことで、
ノイズ領域のヒット数が55%に減少した
(6.2 kHz → 3.4 kHz)。

拡大したデータ記録範囲 のノイズ除去効果



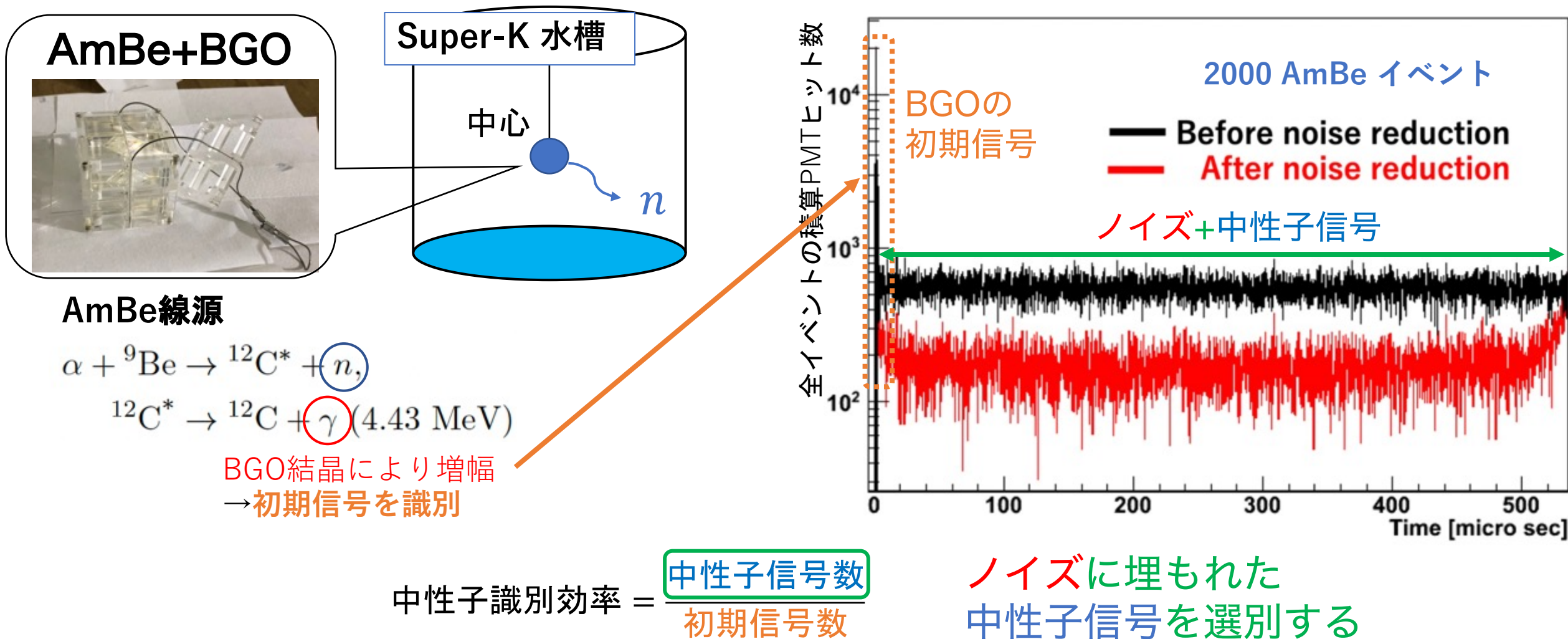
今後、記録範囲を拡大することで、
初期信号に含まれるノイズも良く落とせる。

本発表の内容

- PMTオフタイミング信号調査
- PMTノイズ除去手法
- 中性子線源を用いたノイズ除去手法の実証

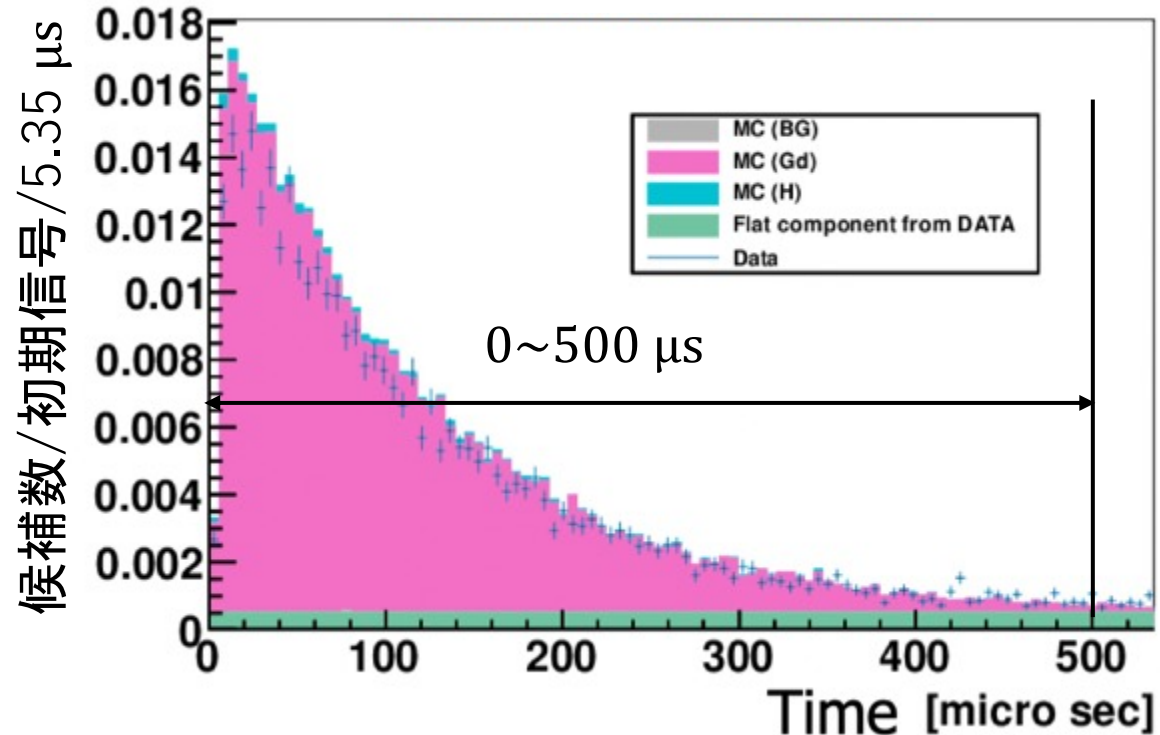
SK-Gdにおける中性子識別効率評価

中性子線源により、中性子識別効率と検出器シミュレーションを実証。



中性子識別効率の計算

最終中性子候補事象の時間分布



ノイズから選別した中性子候補には

- 残存したPMTノイズ
- 初期信号を伴わない中性子などバックグラウンドが存在

→フラットな時間成分

$$\text{フィット関数} : y = A \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\mu}} \right) + B$$

($\tau \sim 115 \mu\text{s}, \mu = 3.4 \mu\text{s}$)

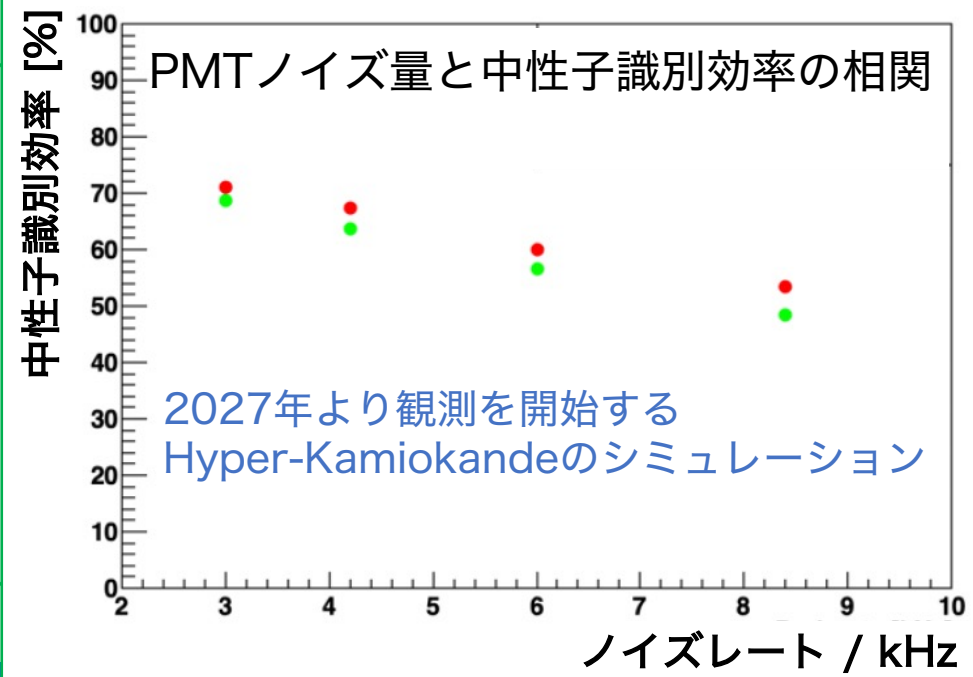
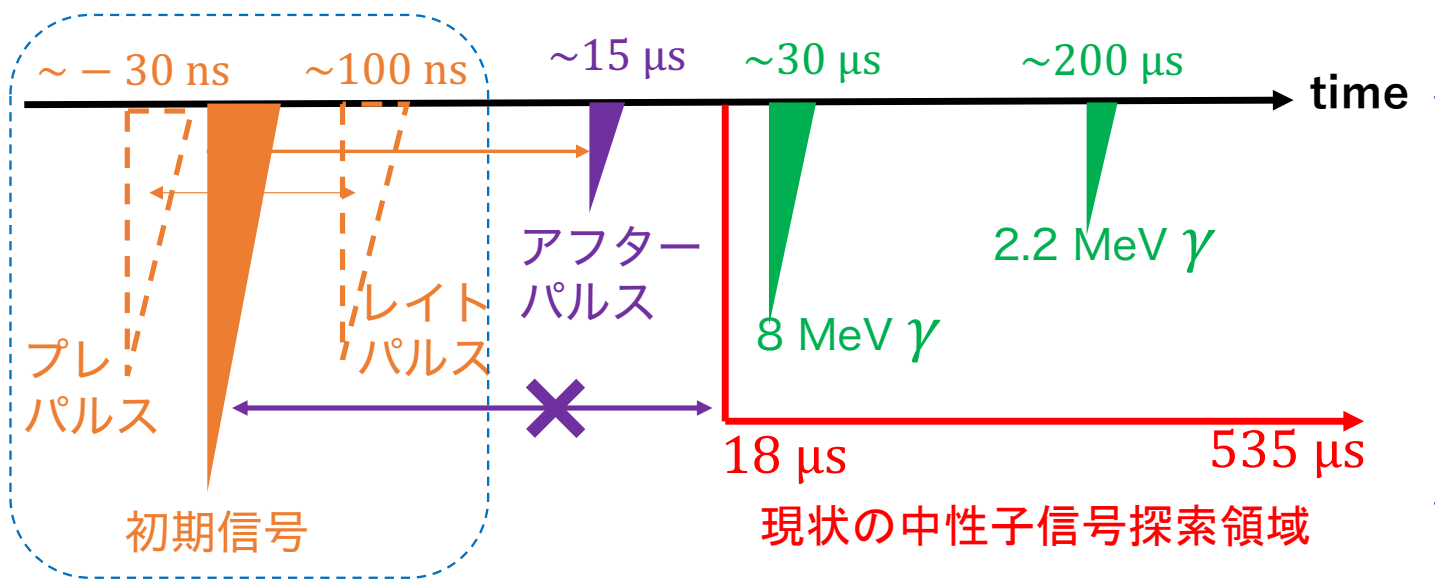
$$\text{中性子識別効率} = \frac{\text{最終中性子候補数} - \text{フラット成分}}{\text{初期信号数}} = \frac{\text{測定データ}}{\text{測定データ}} = \frac{34.32\%}{\text{ノイズ除去前}} \rightarrow \frac{35.80\%}{\text{ノイズ除去後}} \quad (4.3\% \text{向上})$$

ノイズ混入量を基準に中性子候補を選別して中性子検出効率が向上した

まとめ

オフタイミング信号の調査

- 初期信号の再構成精度向上
- 中性子探索範囲の拡大



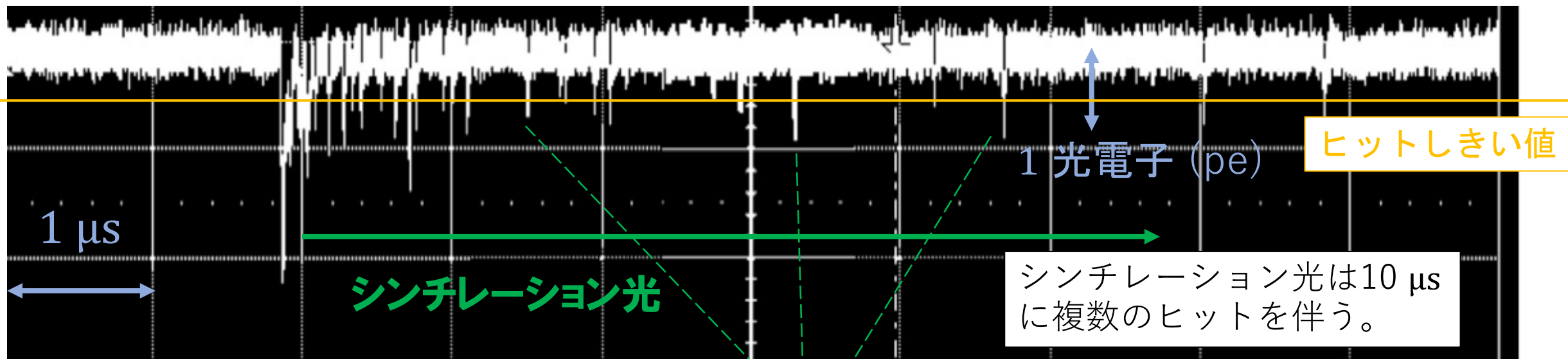
PMTノイズレートの低減 (6.2 kHz→3.4 kHz)

- 中性子識別効率が4.3%向上。
- 記録範囲の拡大で、初期信号のノイズ除去が可能

→SK-Gd、Hyper-Kamiokandeの性能向上

Back Up

PMTガラスによるシンチレーション光波形



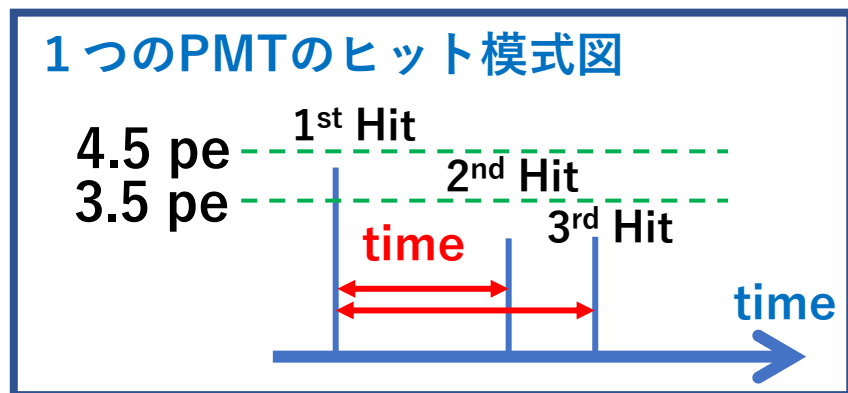
T. Mochizuki, Master thesis, University of Tokyo, (2019).

シンチレーション光のヒット時間構造
→ 時定数の調査

- 6 kHzのランダムな熱電子の10 μs での期待値は 0.06ヒット。
→シンチレーション光は短い時間で密集して現れる

シンチレーション光の時定数

ヒット時間分布中のシンチレーション光時定数をフィッティングにより求めた。



シンチレーション光

$$y = a_0 \exp\left(-\frac{x}{a_1}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{x}{a_3}\right)$$

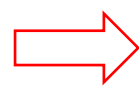
$$+ a_4 + a_5 \exp\left(-\frac{(x - a_6)^2}{a_7^2}\right)$$

熱電子

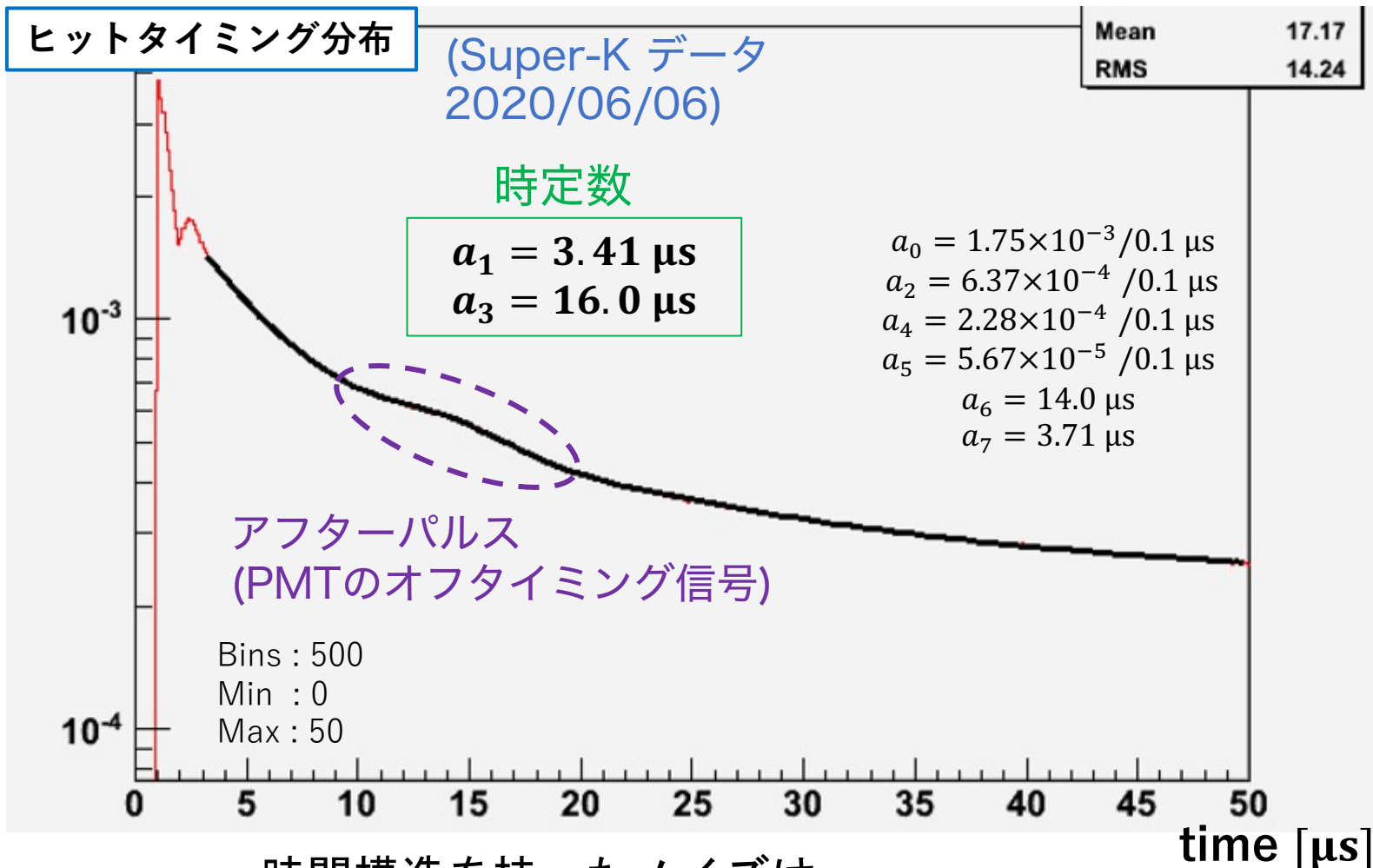
アフターパルス

$$a_4 = 2.28 \times 10^{-4} / 0.1 \mu\text{s} \Rightarrow 2.28 \text{ kHz}$$

熱電子のレート



時間構造を持ったノイズは
6.17 - 2.28 = 3.86 kHzに相当する



中性子候補選別の見積もり

AmBe線源のシミュレーションを利用し、中性子候補数を見積もる。

初期信号イベント数：78138

初期信号に対する 最終中性子候補数 [%]	PMTノイズ除去前			PMTノイズ除去後		
	BG	H	Gd	BG	H	Gd
	0.23	1.2	38	0.09	0.72	38

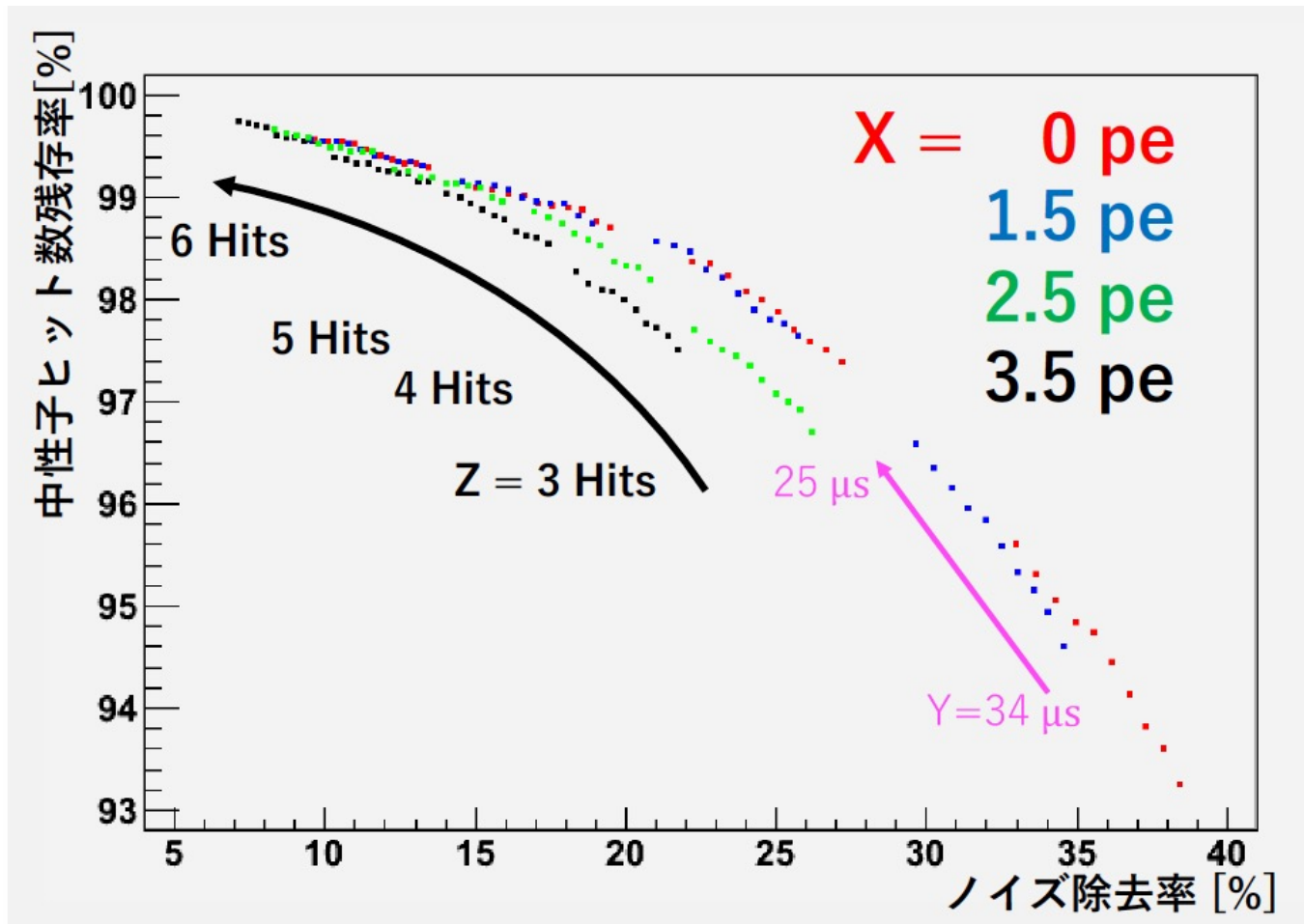
BG：バックグラウンド

最終中性子候補のBGの混入率

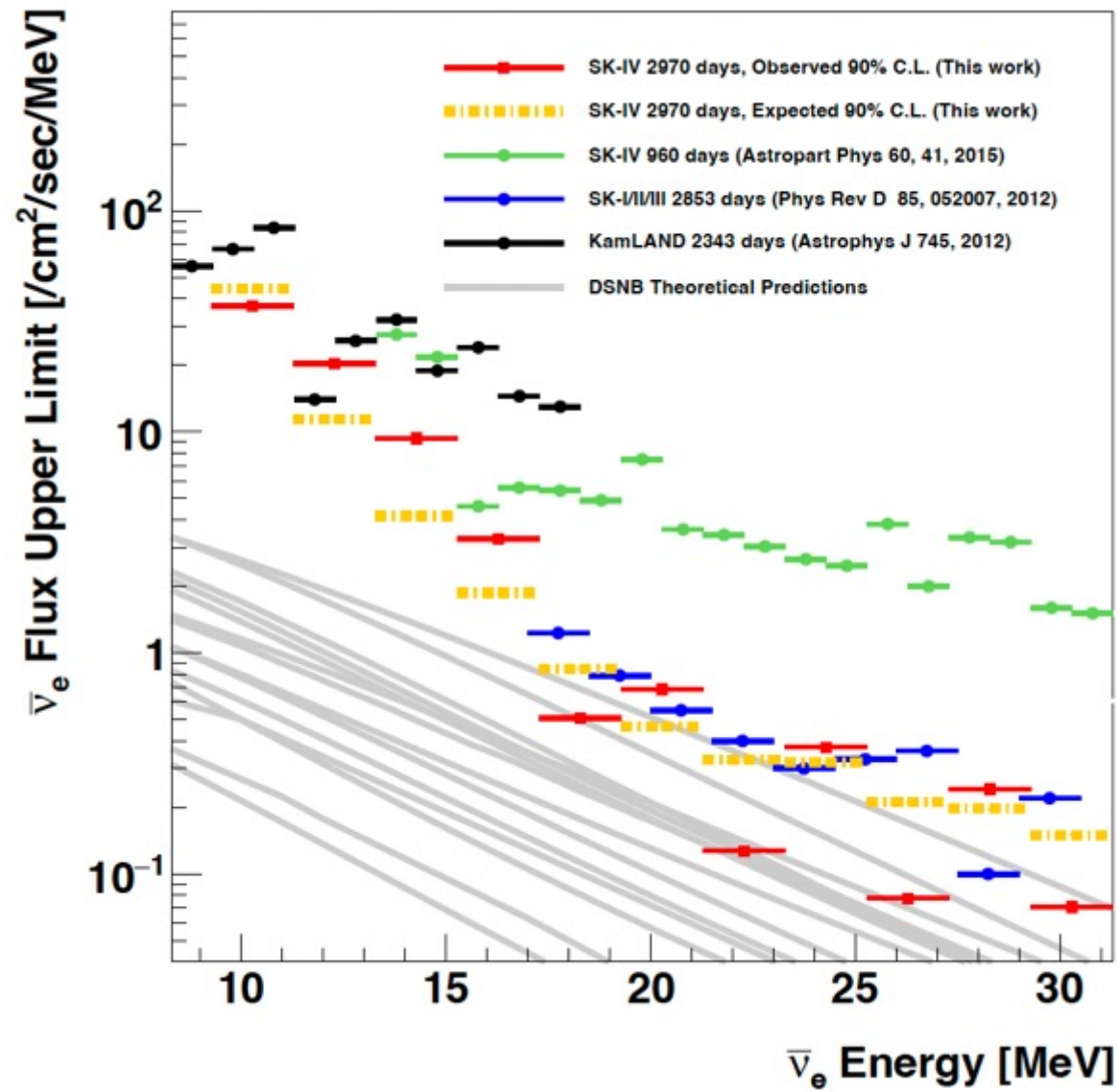
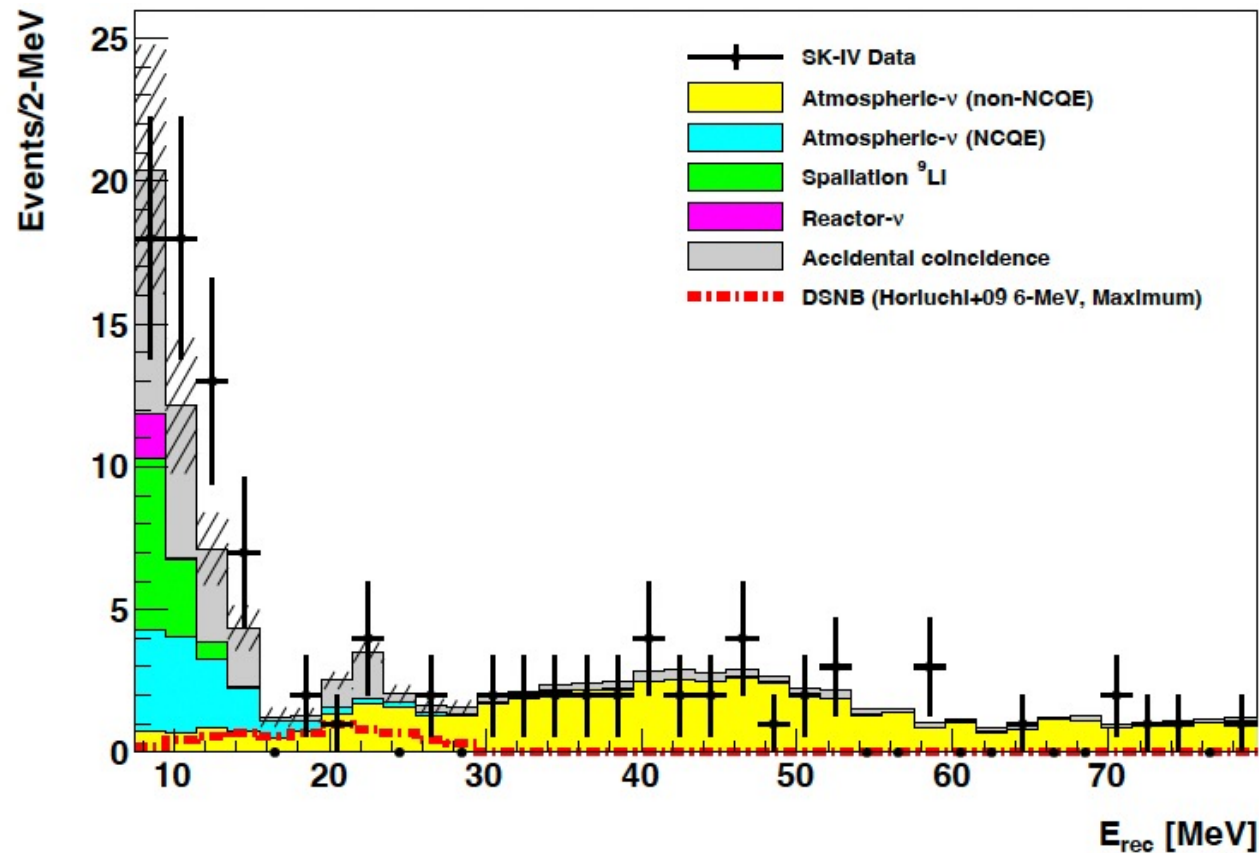
$$\frac{\text{BG}}{\text{BG} + \text{H} + \text{Gd}} = 0.59\% \quad \rightarrow \quad 0.23\%$$

ノイズ除去前 ノイズ除去後

ノイズ混入率 6割減少

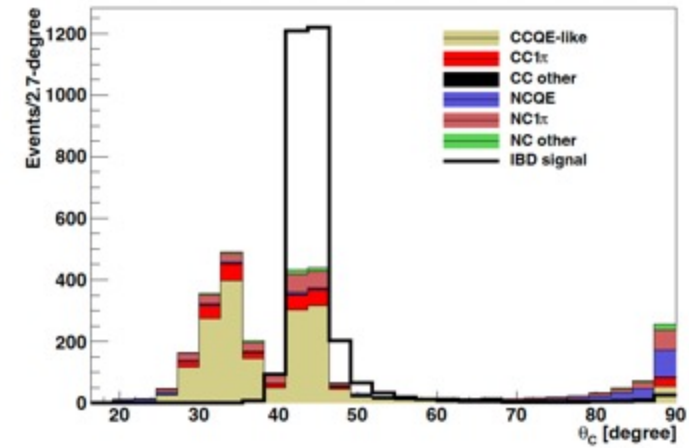
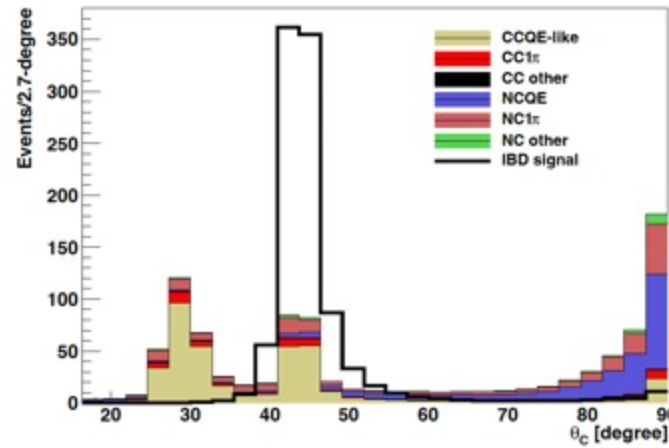
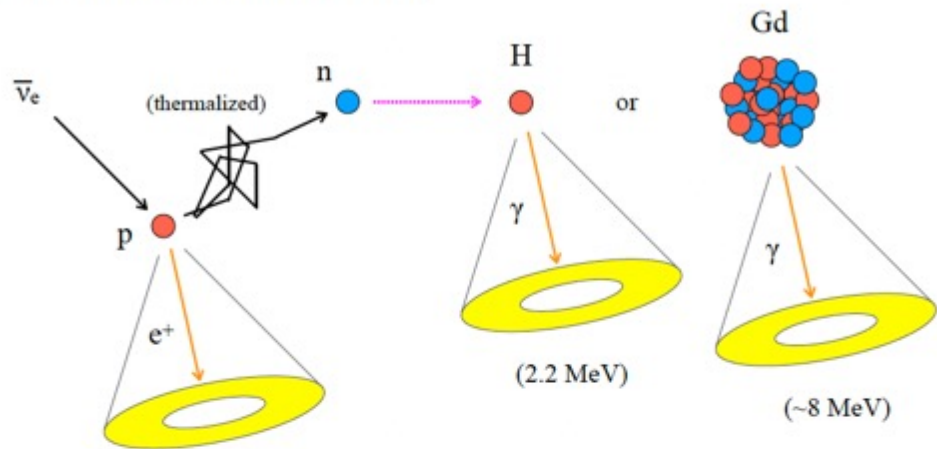


Super-K の背景 ν 探索

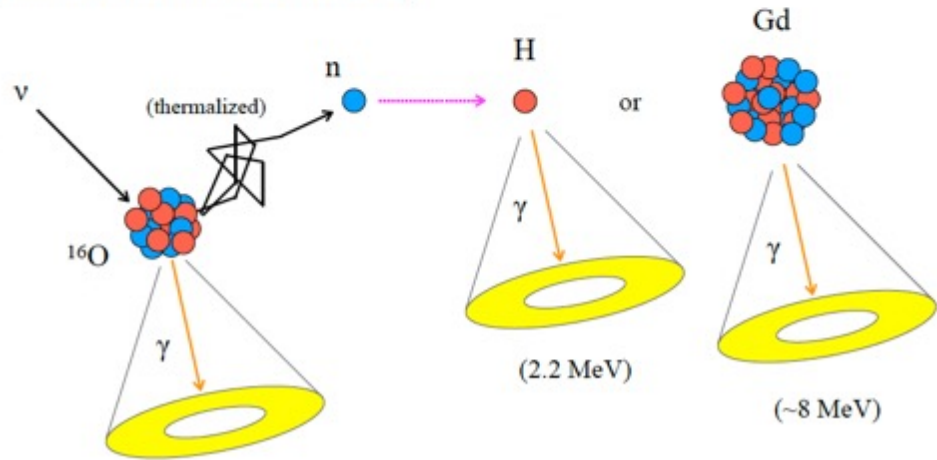


$$E_\nu = E_{rec} + 1.8 \text{ MeV}$$

Supernova relic neutrino (IBD)



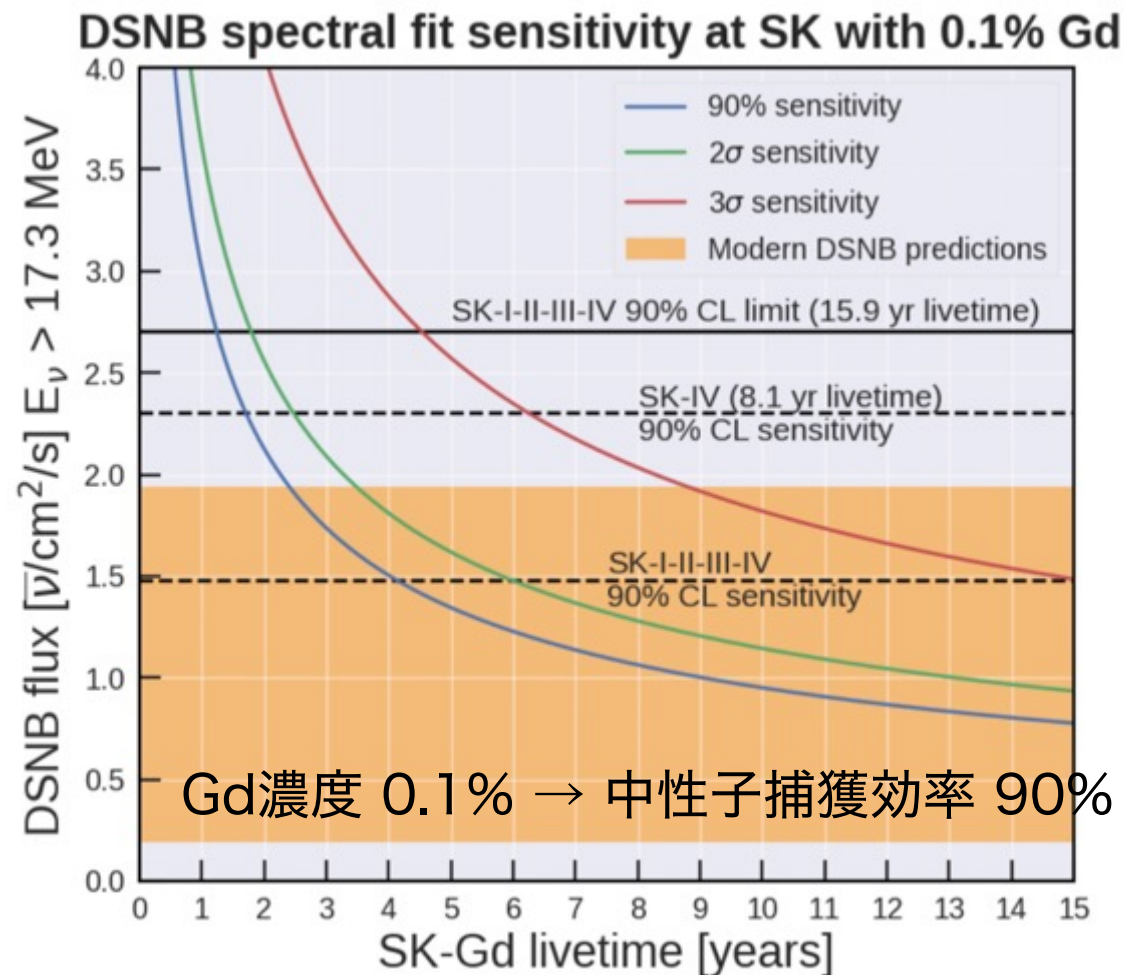
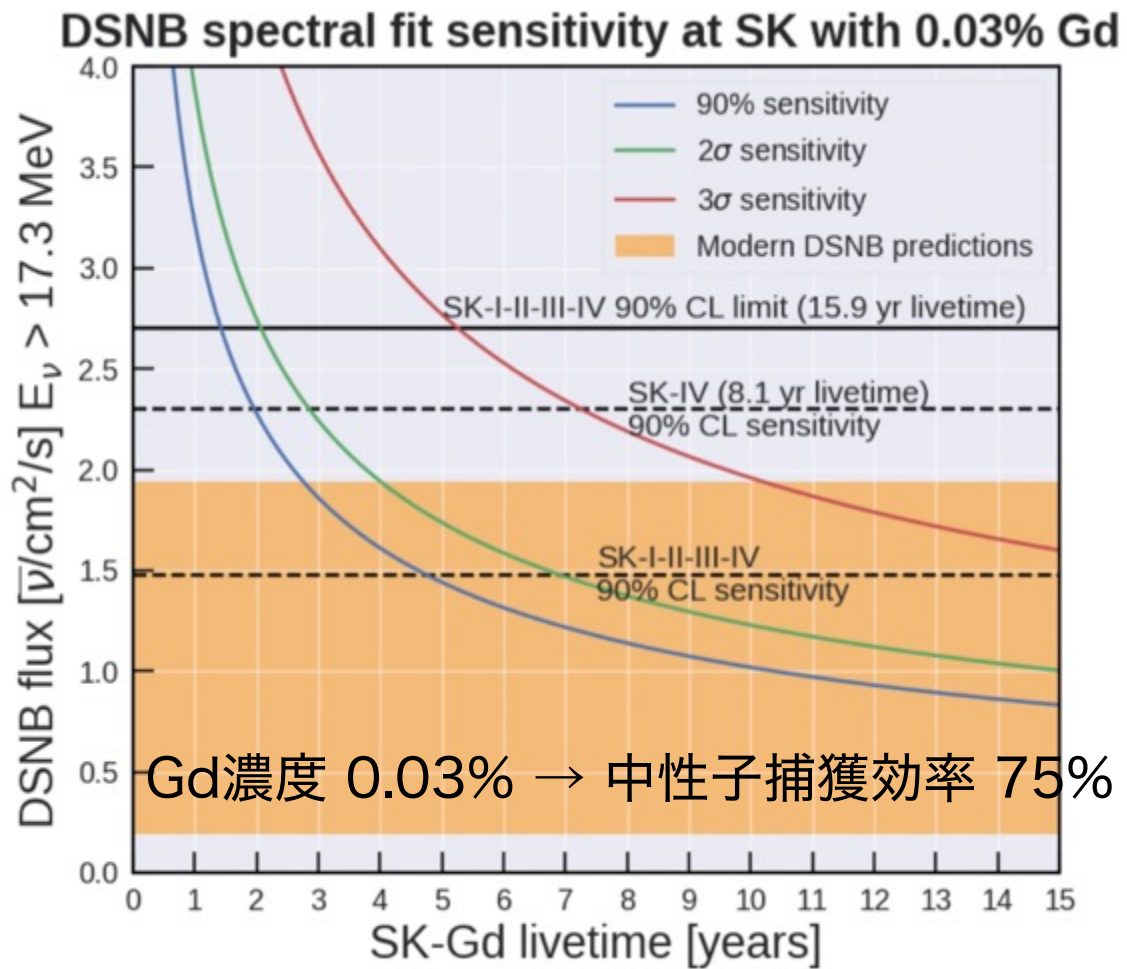
Atmospheric neutrino (NCQE)



大気ニュートリノのバックグラウンドは主にチェレンコフ角の違いを利用してカット

大気ニュートリノと似たスペクトルを持つ加速器ニュートリノを利用してNCQE反応の統計を増やし断面積の理解を進め、不確かさを削減

SK-Gdでは中性子捕獲性能がよくなり、捕獲位置が良くわかり、さらに初期信号の近くで捕獲されるようになる。



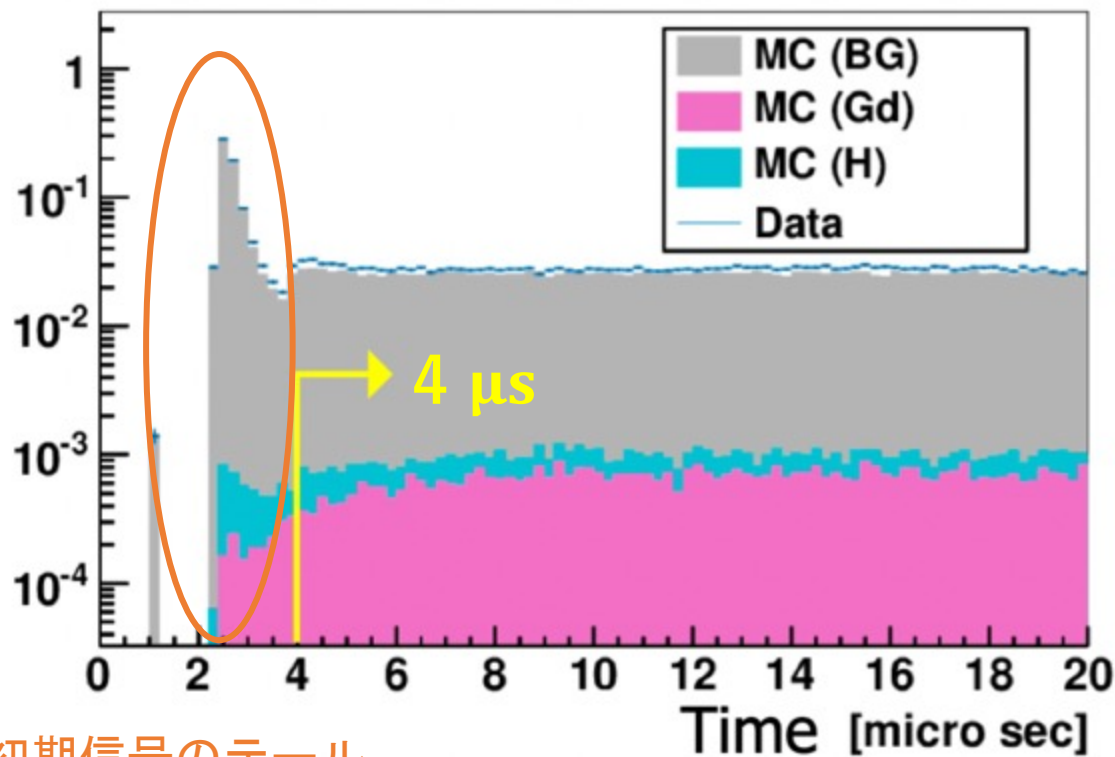
現在のSK-Gdでは濃度0.01% (捕獲効率50%)で運用中

SRNの感度はおおよそ $\propto \sqrt{\text{観測期間}}$

低フラックスのモデルの場合、中性子識別効率が発見期間に大きく影響する。

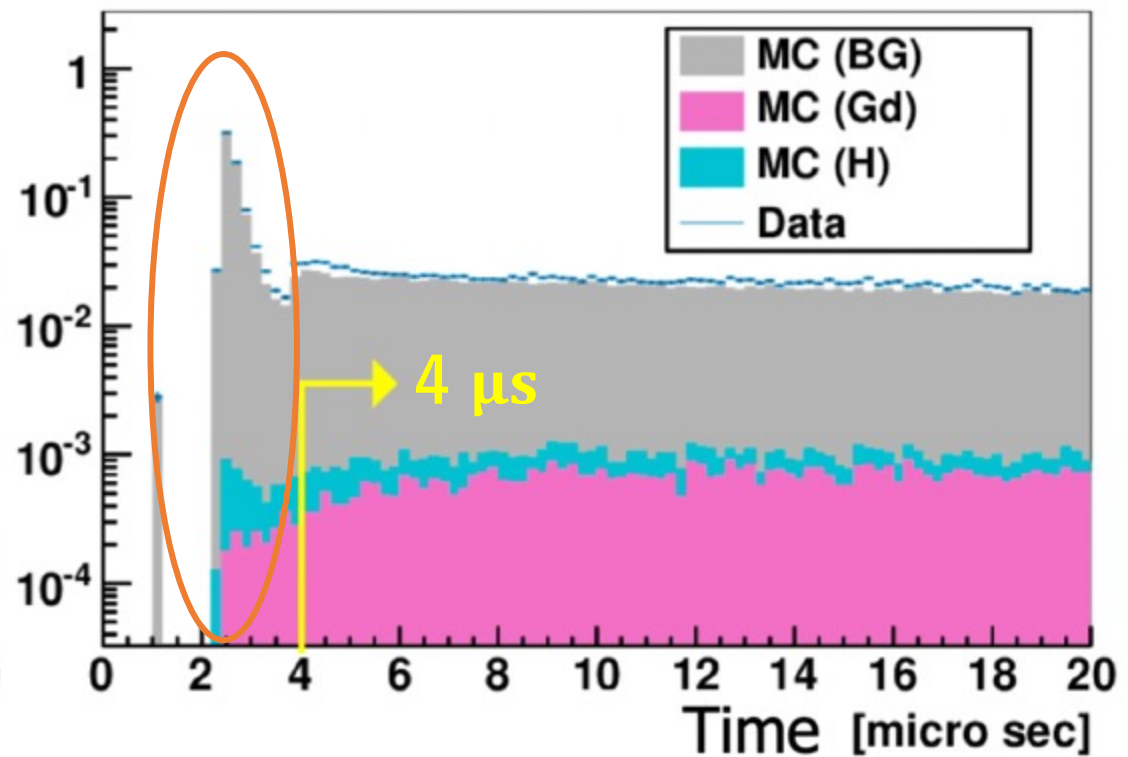
再構成時間によるカット

Before Noise Reduction



初期信号のテール
(BGO 時定数 = $O(\sim 100 \text{ ns})$)

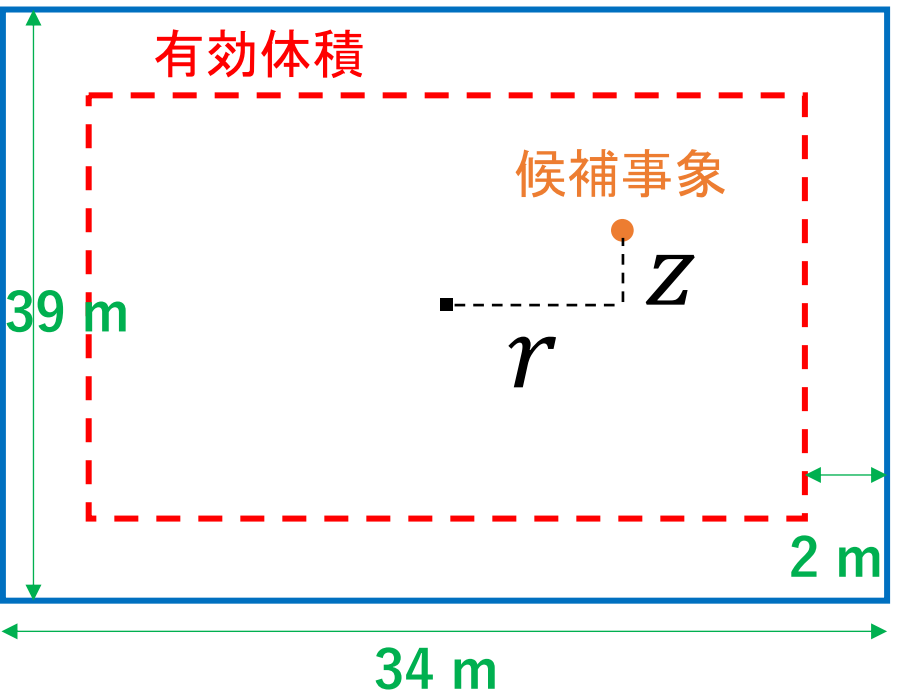
After Noise Reduction



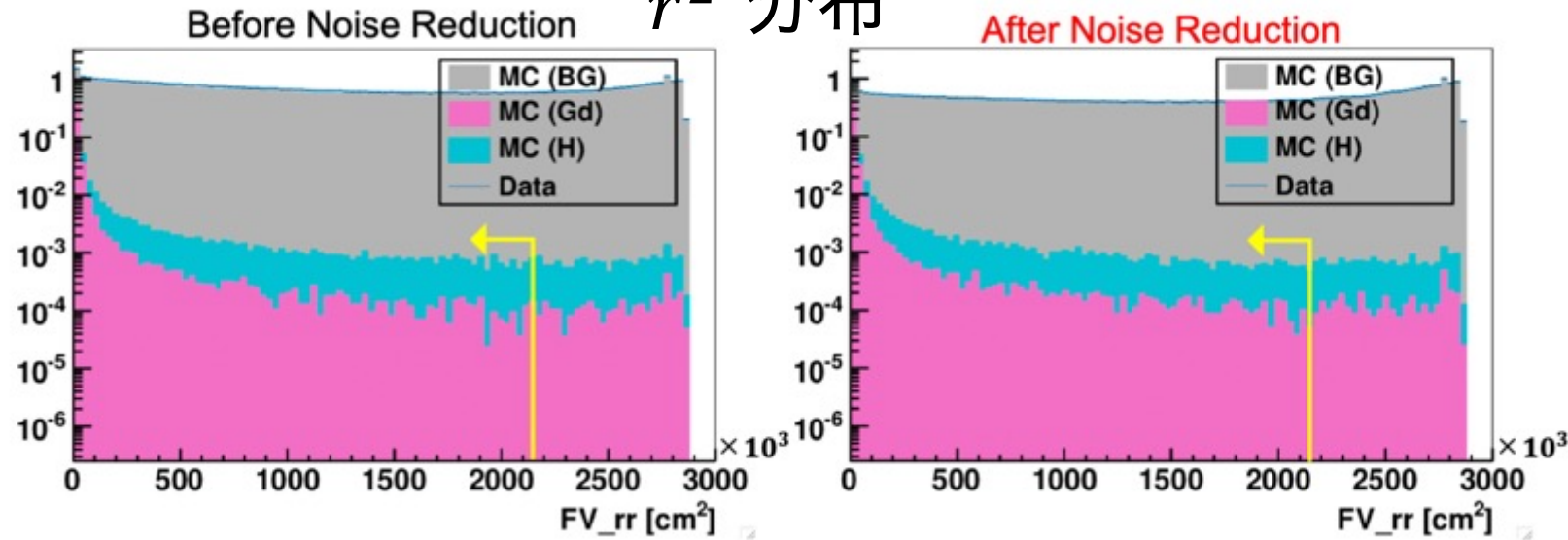
BG : ノイズによるバックグラウンド
H : 水素原子核に捕獲された信号
Gd : Gd原子核に捕獲された信号

有効体積によるカット

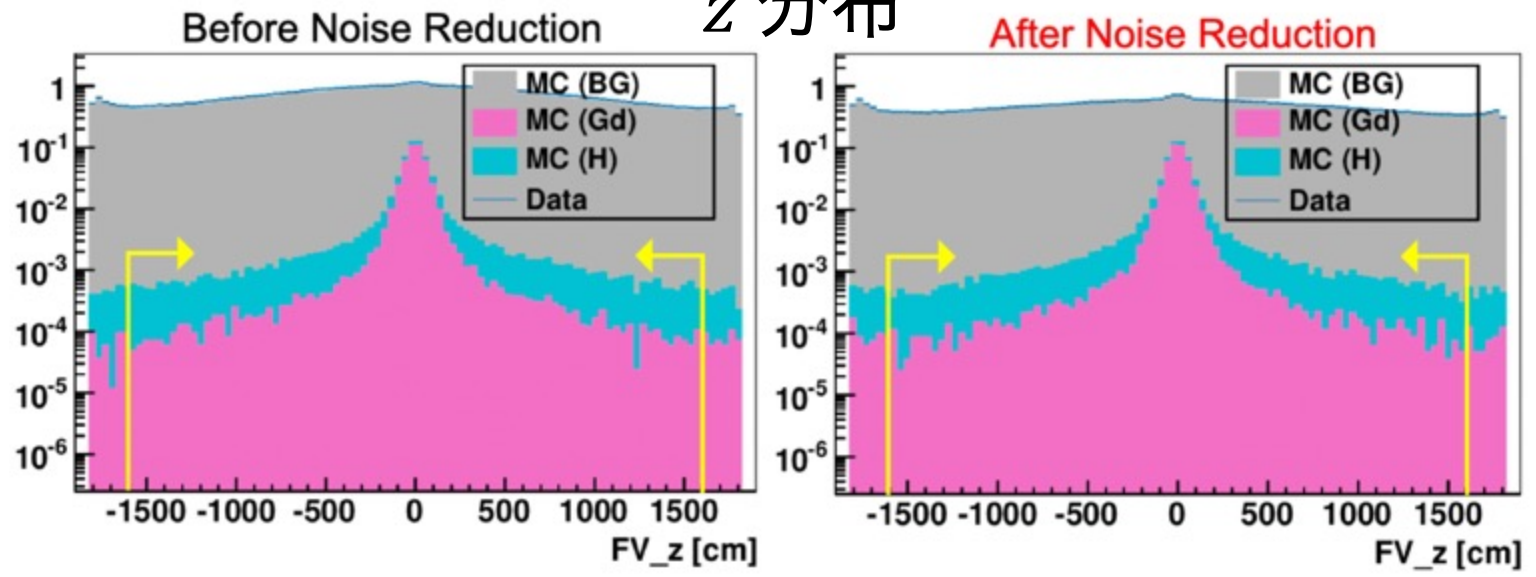
スーパーカミオカンデでは、
壁に近い位置にノイズが多い
→壁から2 m離れた候補を選択

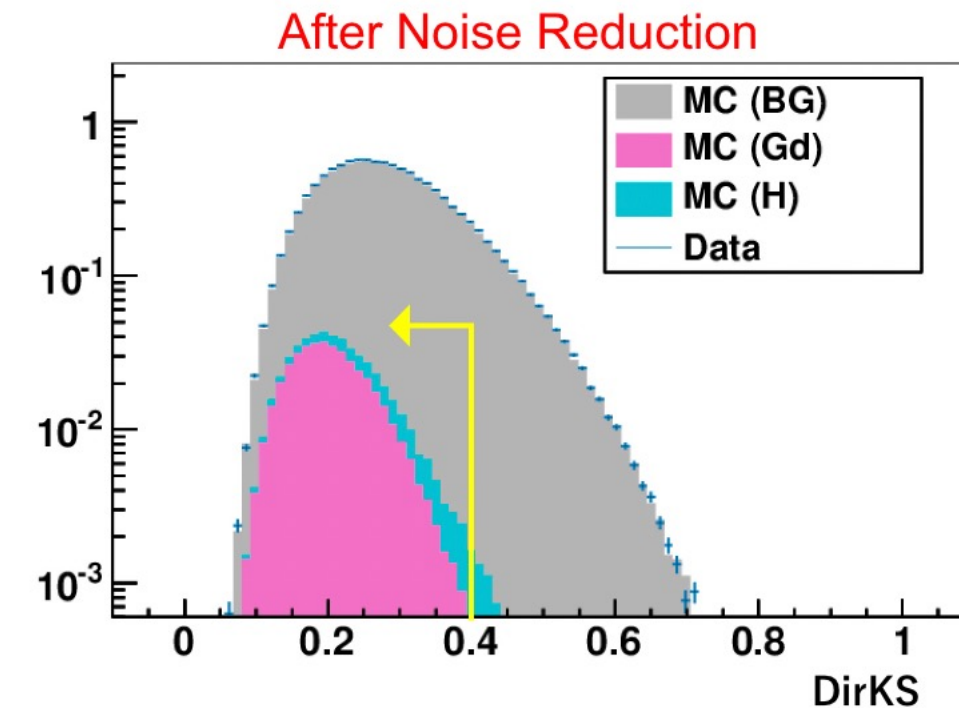
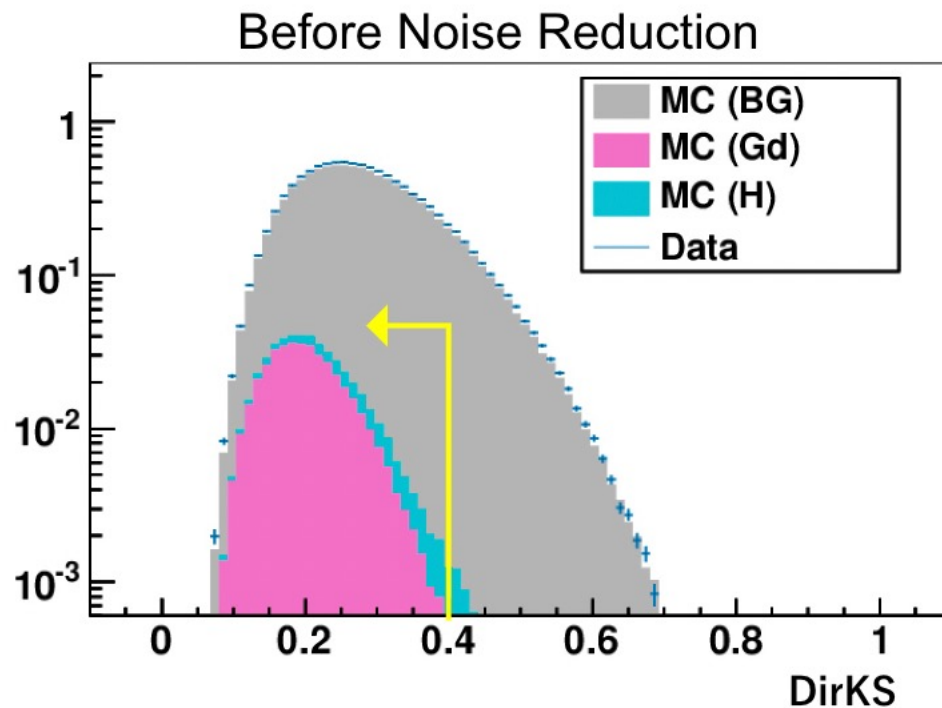
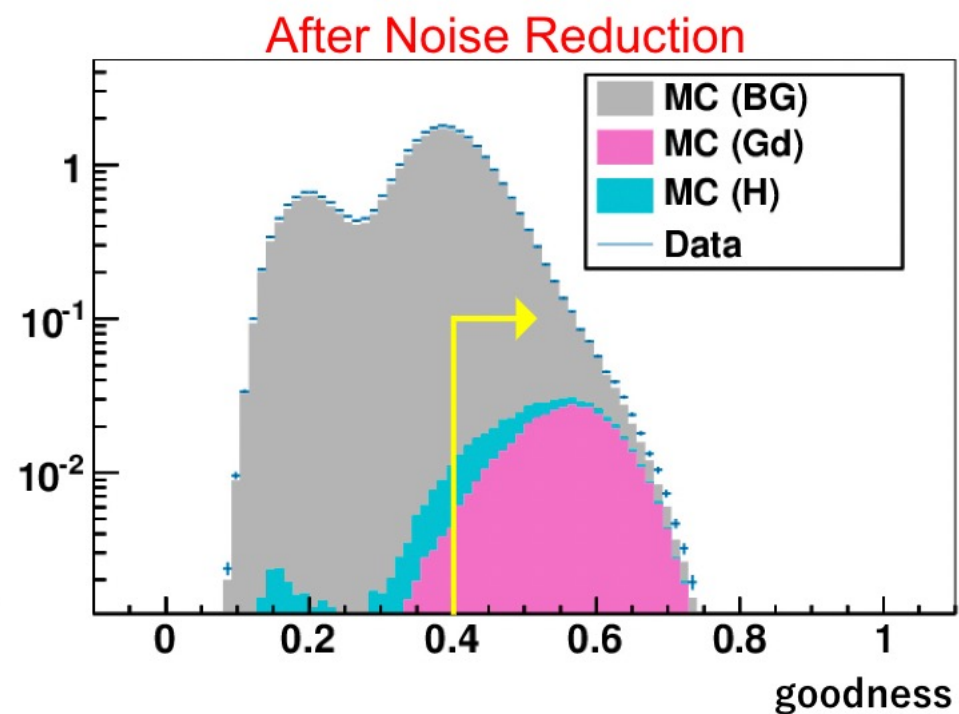
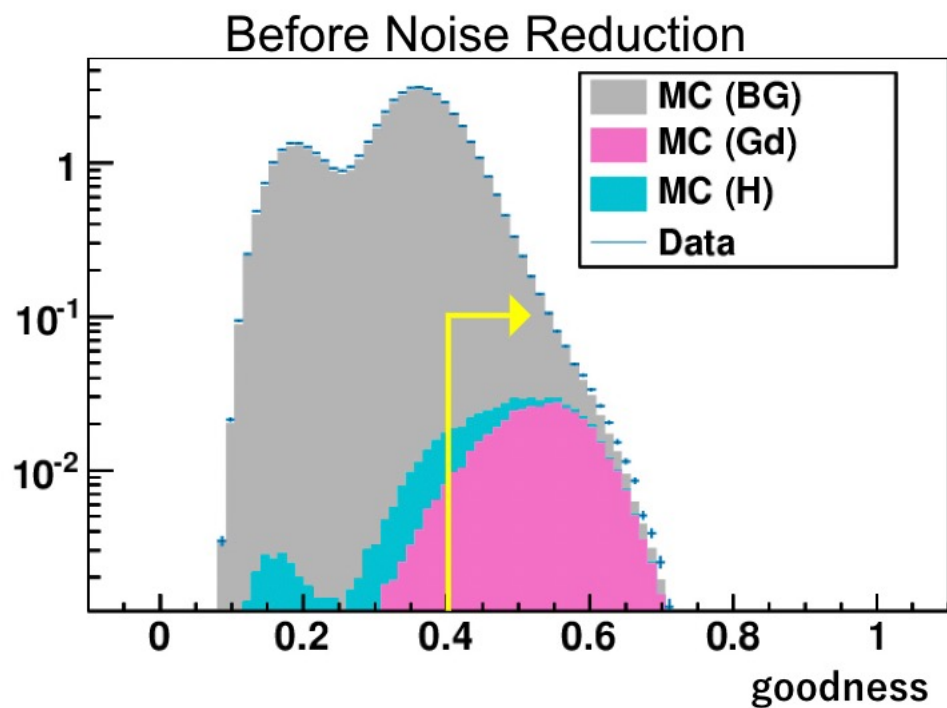


r^2 分布



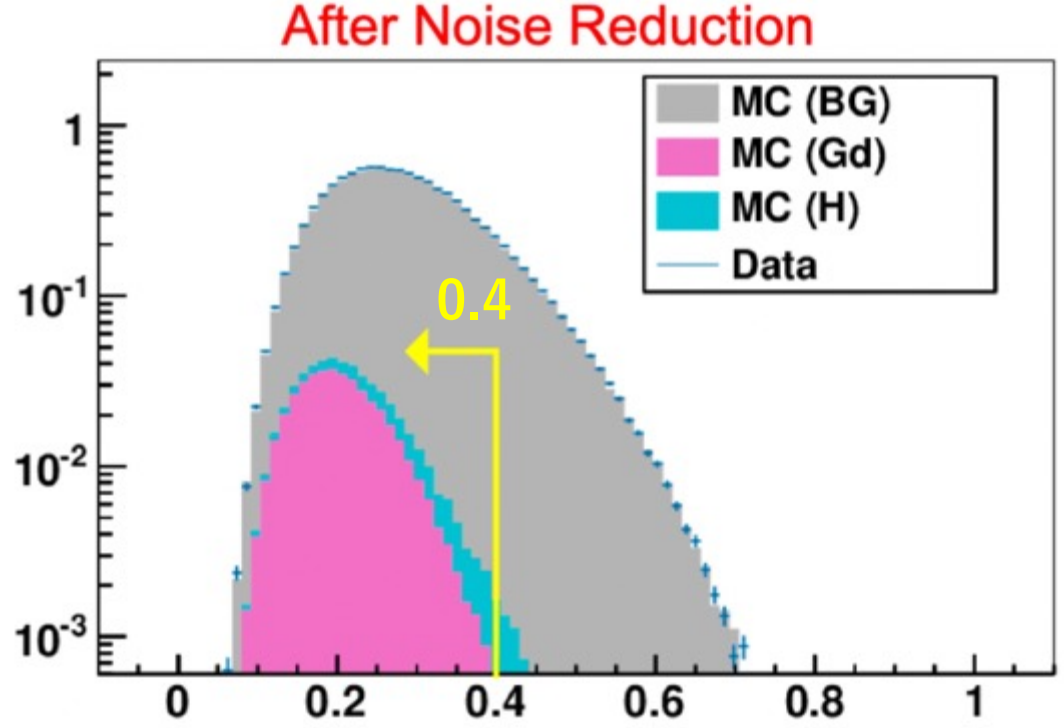
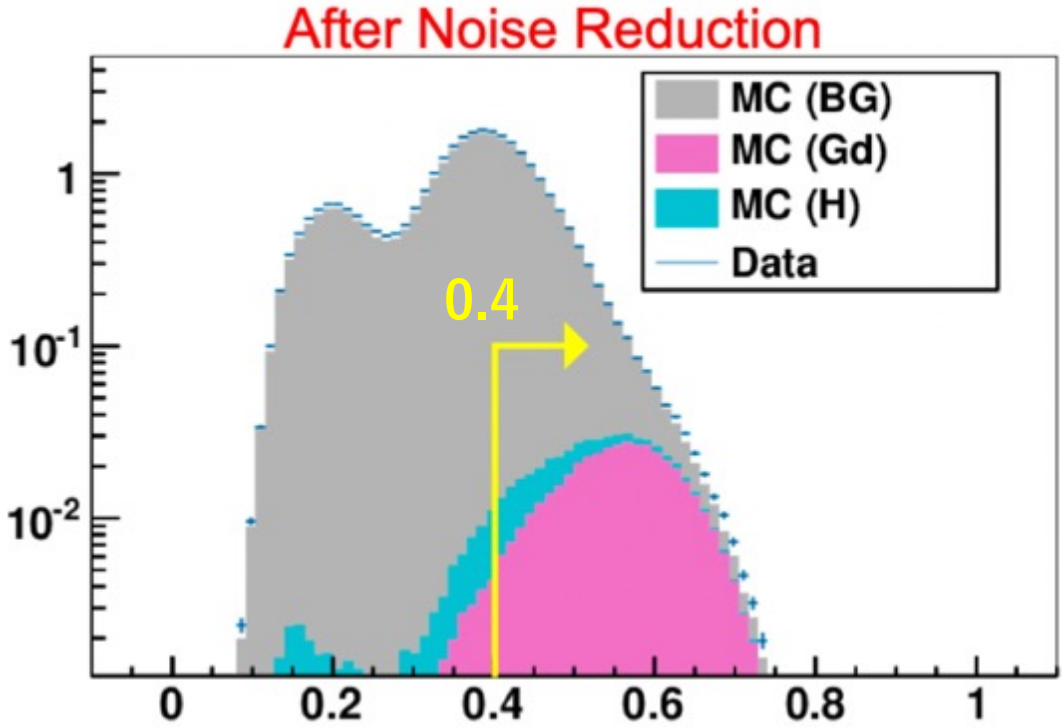
z 分布





再構成品質によるカット

ノイズや、ノイズの混入が多い候補事象は再構成がうまくいかない
→再構成品質をパラメータ化してノイズを排除



悪 ← 位置の再構成品質 → 良

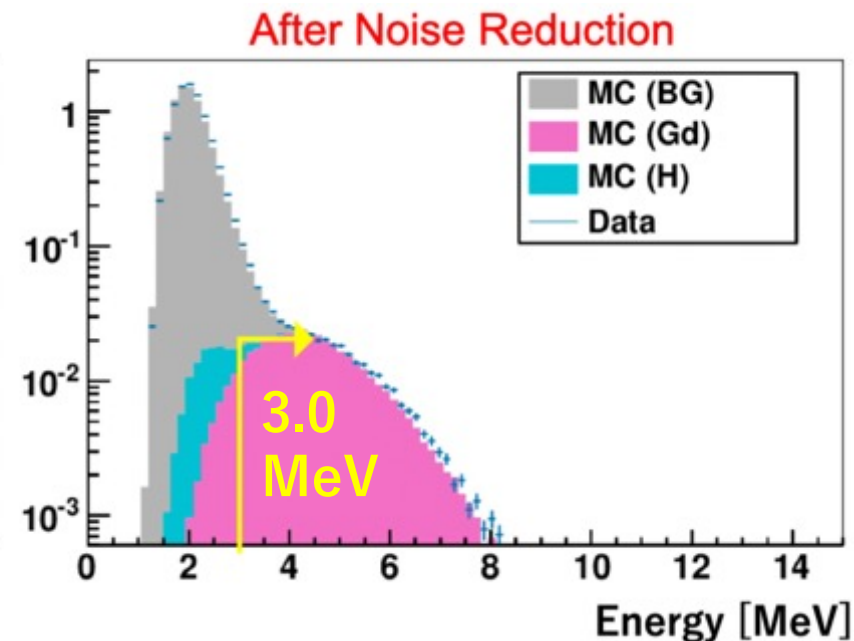
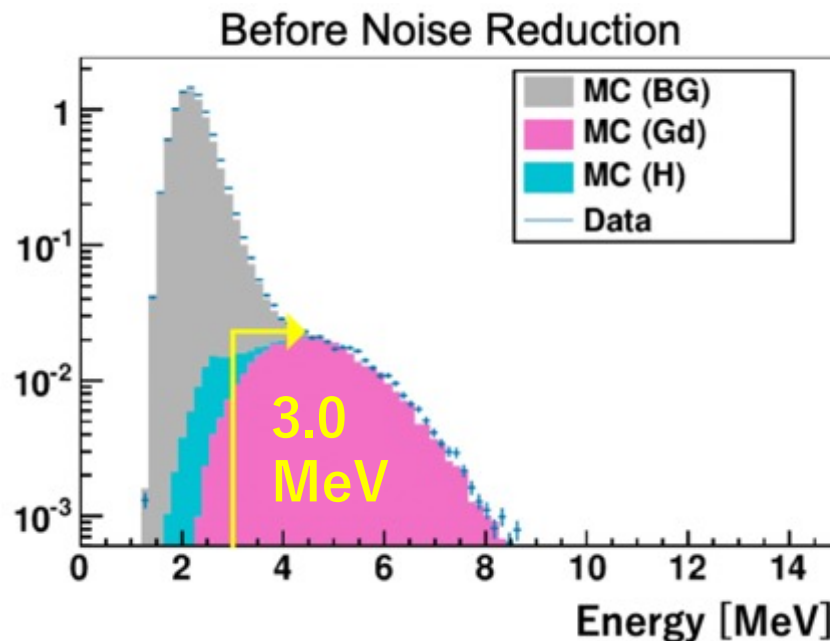
良 ← 方向の再構成品質 → 悪

位置・方向が良く再構成できた候補事象を選択

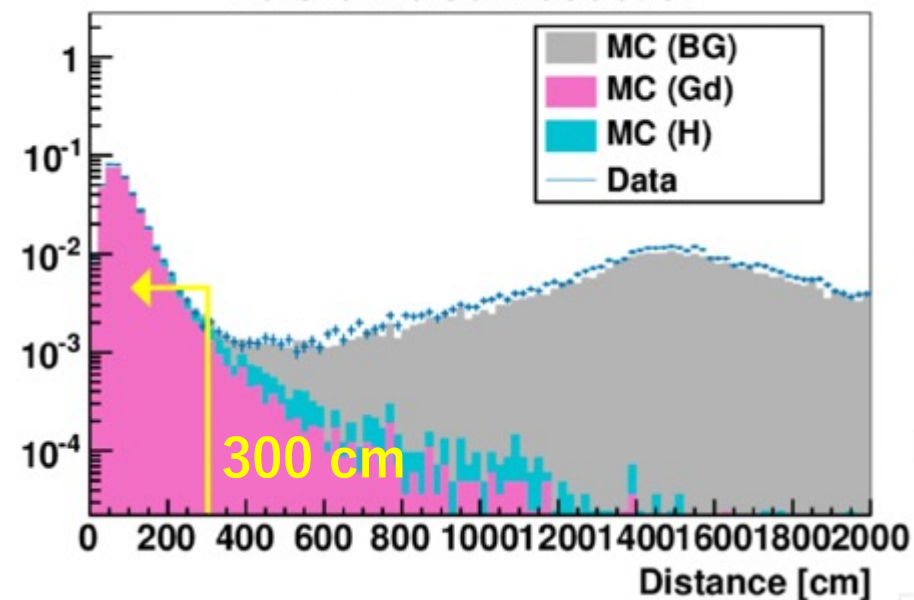
エネルギーのカット

(再構成エネルギー) > 3 MeV

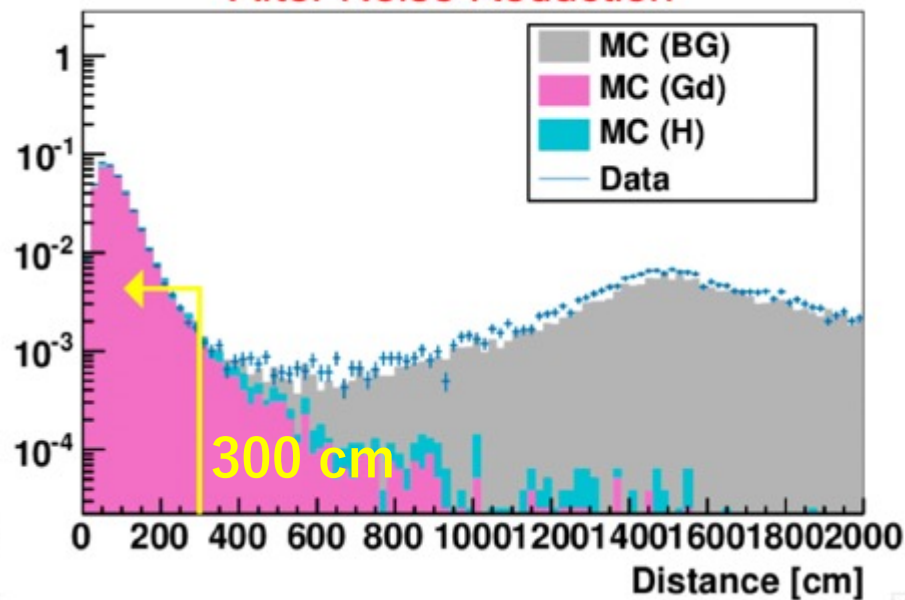
の候補事象を選択



Before Noise Reduction



After Noise Reduction



線源からの距離によるカット

中性子は線源 (タンク中心) から放出されている

(線源からの距離) < 300 cm

中性子候補セレクション結果

候補事象数（初期信号数に対する割合）

シミュレーションを使用することで、各セレクションのノイズ排除率を確認できる

候補事象選択項目	Before reduction			After reduction		
	バックグラウンド(BG)	H	Gd	バックグラウンド(BG)	H	Gd
再構成時間	5178171(6627%)	13099(17%)	35548(45%)	3438884(4401%)	11986(15%)	35593(46%)
有効体積	3637817(4656%)	11725(15%)	35258(45%)	2145562(2746%)	10704(14%)	35289(45%)
位置再構成品質	759155(972%)	6070(7.8%)	32056(41%)	773888(990%)	7520(9.6%)	33190(42%)
方向再構成品質	662127(847%)	5763(7.4%)	31946(41%)	673493(862%)	7155(9.2%)	33058(42%)
Energy	27871(36%)	1346(1.7%)	30381(39%)	14184(18%)	817(1.0%)	30026(38%)
線源からの距離	182(0.23%)	907(1.2%)	29559(38%)	69(0.09%)	563(0.72%)	29338(38%)

バックグラウンド(BG)の混入率

最終中性子候補事象数

$$\frac{BG}{BG+H+Gd} = \frac{182}{182+907+29559} = 0.59\% \quad \rightarrow \quad \frac{69}{69+563+29338} = 0.23\%$$

ノイズ除去前 ノイズ除去後

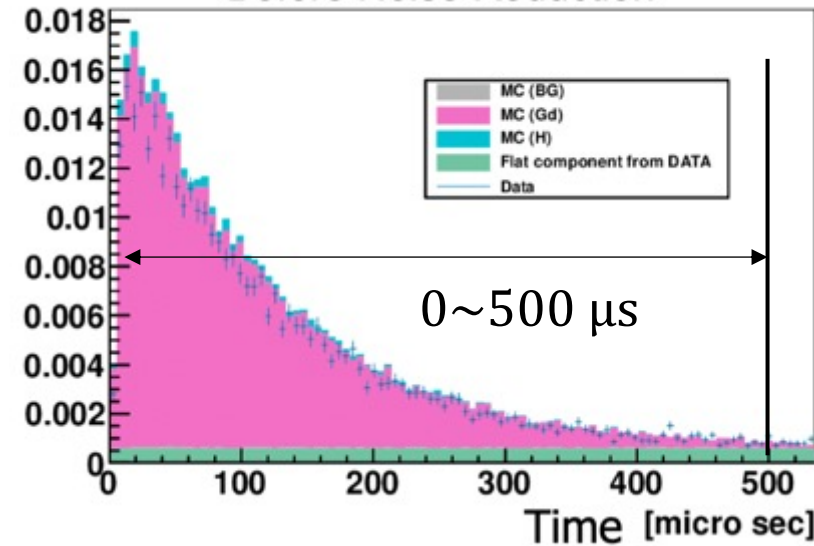
ノイズ混入率
4割減少

中性子識別効率の計算

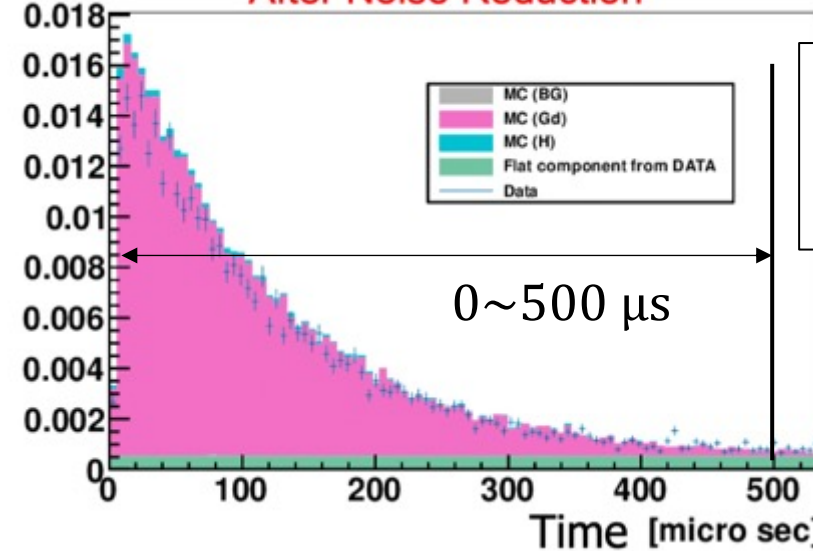
最終中性子候補から、識別効率を計算する

最終中性子候補事象の時間分布

Before Noise Reduction



After Noise Reduction



中性子識別効率

$$= \frac{(\text{最終中性子候補数}) - (\text{フラット成分})}{(\text{初期信号数})}$$

フィット関数

$$y = A \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\mu}} \right) + B$$

($\tau \sim 115 \mu\text{s}, \mu = 3.4 \mu\text{s}$)

測定データ

シミュレーション

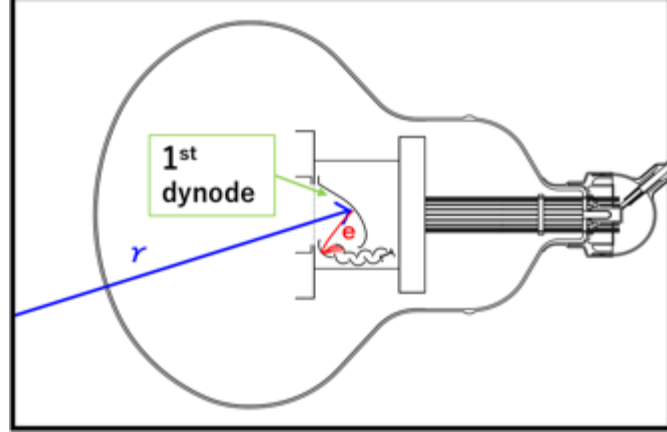
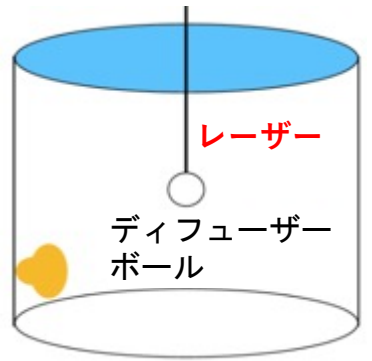
	最終中性子候補数	フラット成分	初期信号数	識別効率	
Data (before reduction)	17744	2522.2	44356	34.317 ± 0.569%	↓ 0.927%
Data (after reduction)	17187	2376.36	44356	33.390 ± 0.550%	
MC (before reduction)	19114.4	0	49406.2	38.688 ± 0.461%	↓ 0.998%
MC (after reduction)	18621.7	0	49406.2	37.690 ± 0.451%	

中性子識別効率の低下を1%以内に抑えつつ、ノイズの混入率を4割程度に減らした

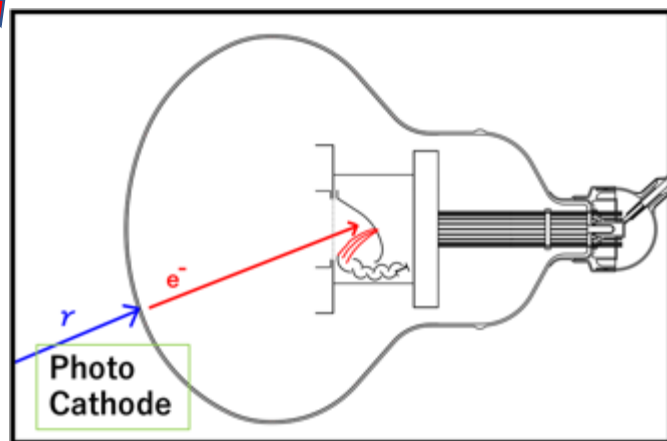
プレパルス、レートパルス

- レーザーによる時間校正
さまざまなレーザー強度に対して、PMTのヒットタイミングを校正した。

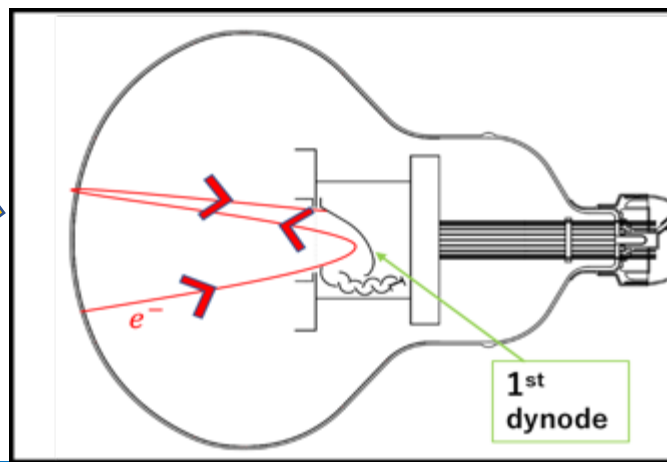
※説明のためこのページでは、SKに136本挿入された新型のPMTの結果を図示



プレパルス
第1ダイノードでの光電子発生。

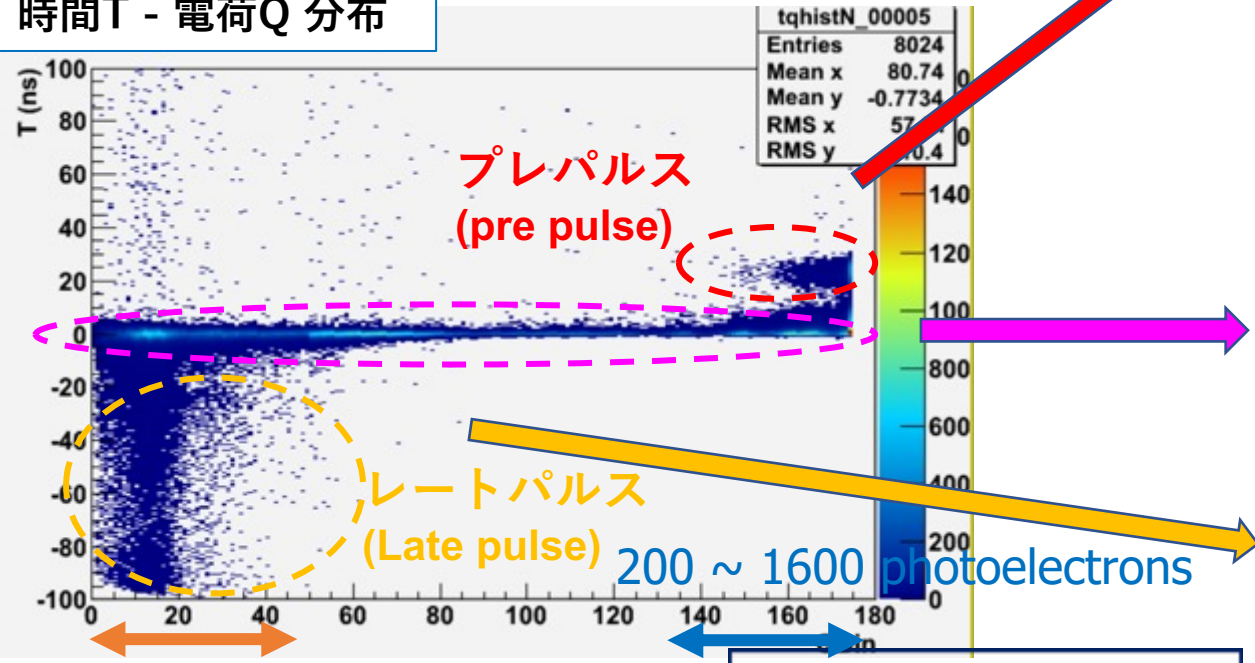


メインパルス
光電面での光電子発生。



レートパルス
第1ダイノードにおける光電子の反跳。

時間T - 電荷Q 分布



faster
later

0 ~ 20 photoelectrons

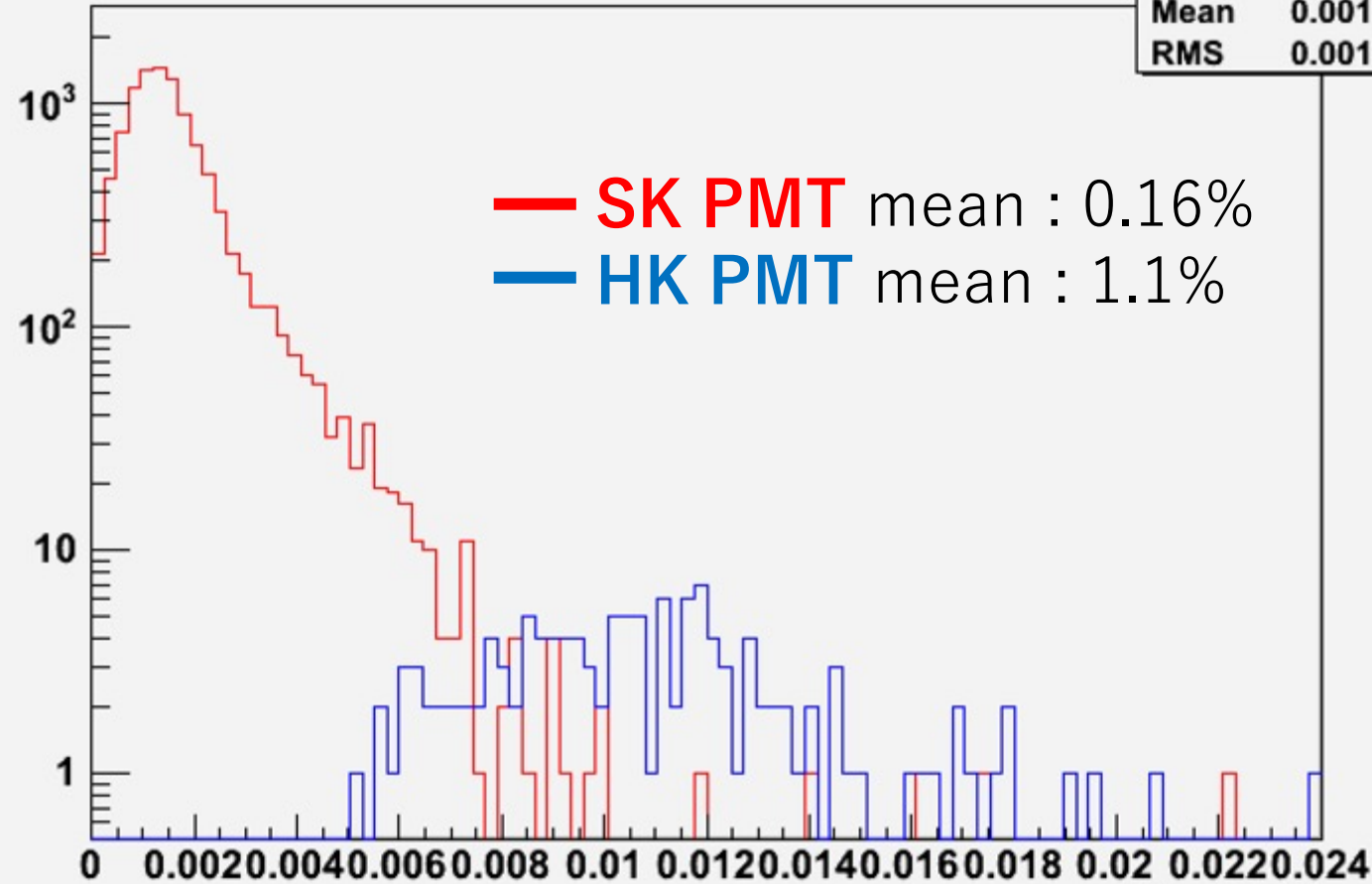
200 ~ 1600 photoelectrons

QBins = $\begin{cases} 5 \cdot Q & (0 < Q \leq 10 \text{ pC}) \\ 50 \cdot \log_{10} Q & (10 < Q < 3981 \text{ pC}) \end{cases}$
1 pe (photoelectron) = 2.46 pC

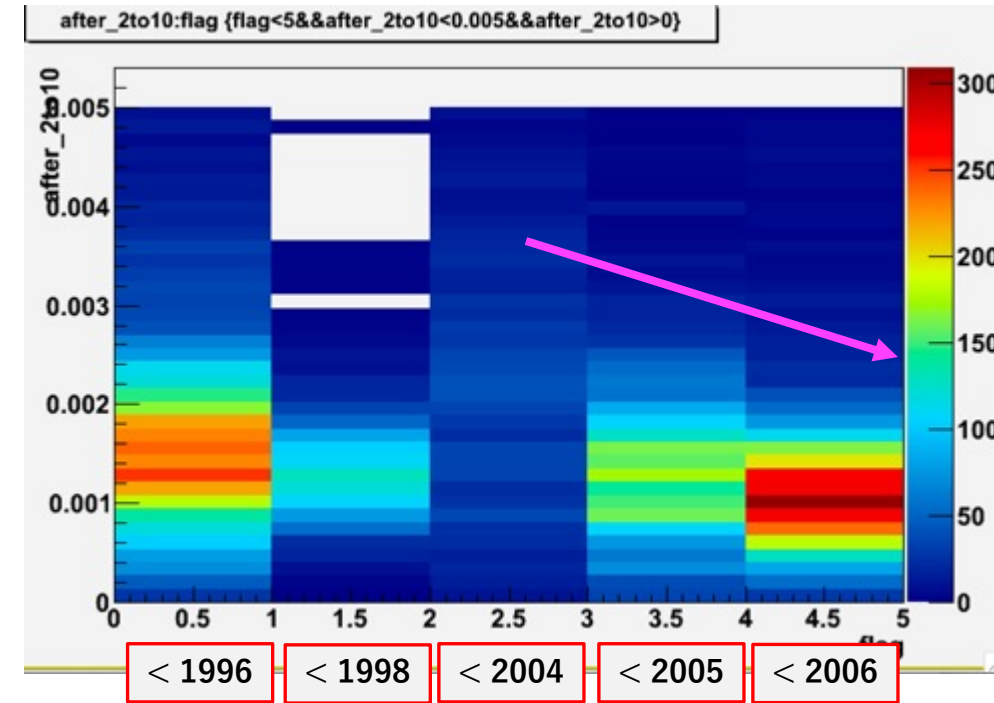
after_2to10 result

After_2to10 distribution

htemp	
Entries	10290
Mean	0.001604
RMS	0.001097



After_2to10 / Main

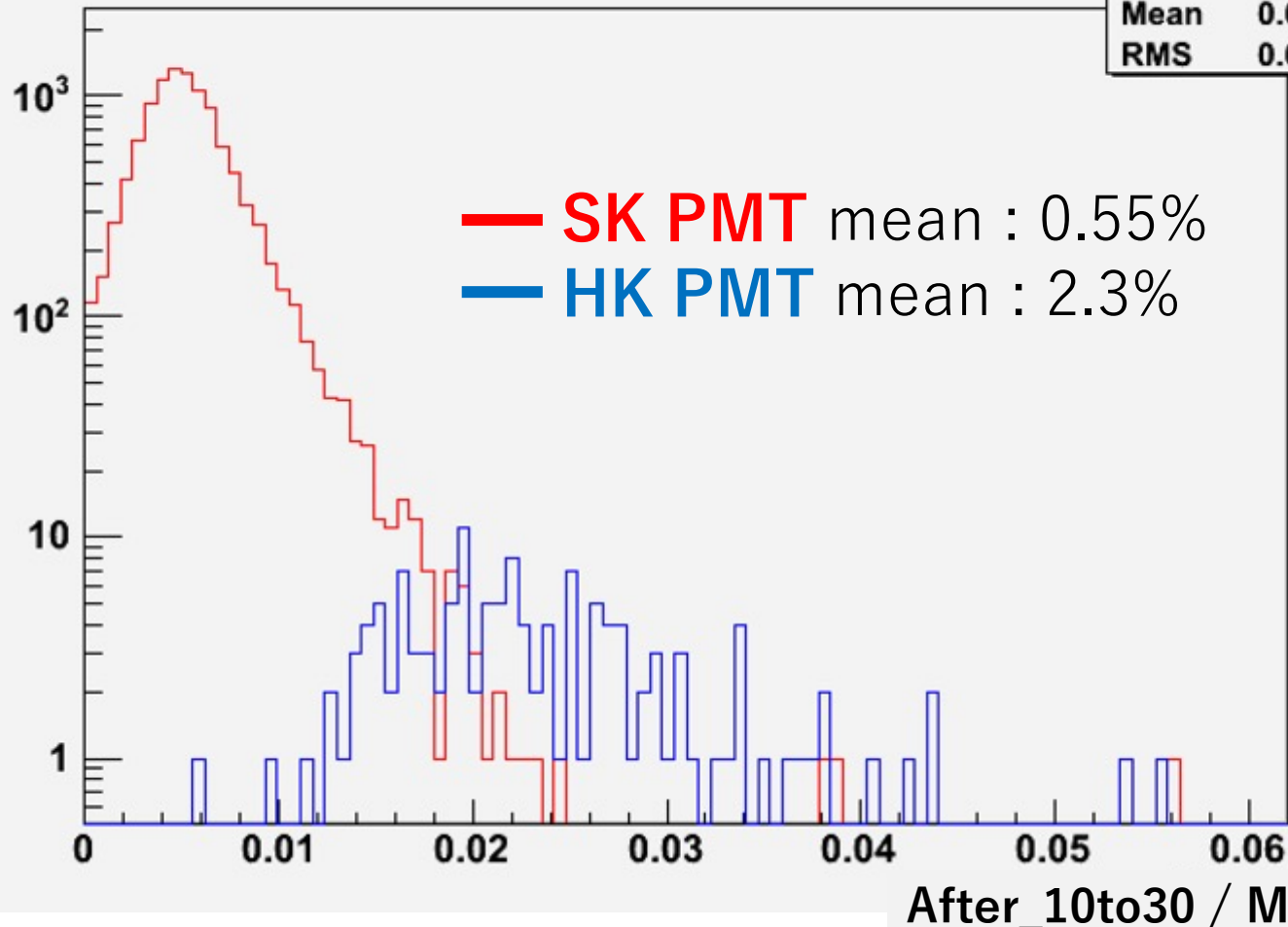


↑ The differences in the manufacture timing of SK PMTs.

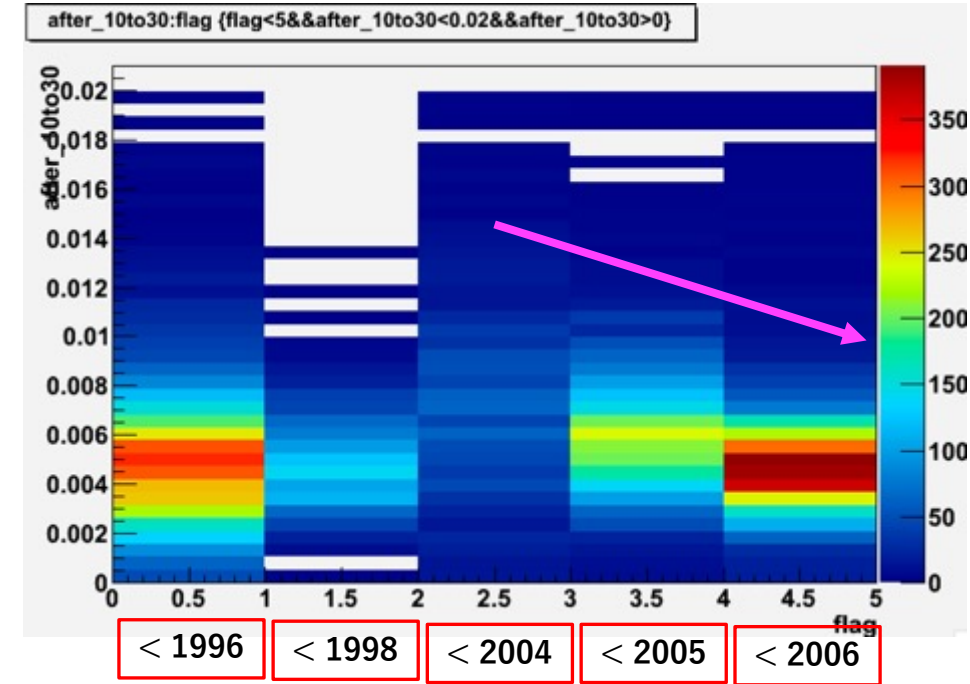
For the last three years, older ones tend to have larger after pulse.

after_10to30 result

After_10to30 distribution



htemp	
Entries	10567
Mean	0.005458
RMS	0.002709



↑ The differences in the manufacture timing of SK PMTs.

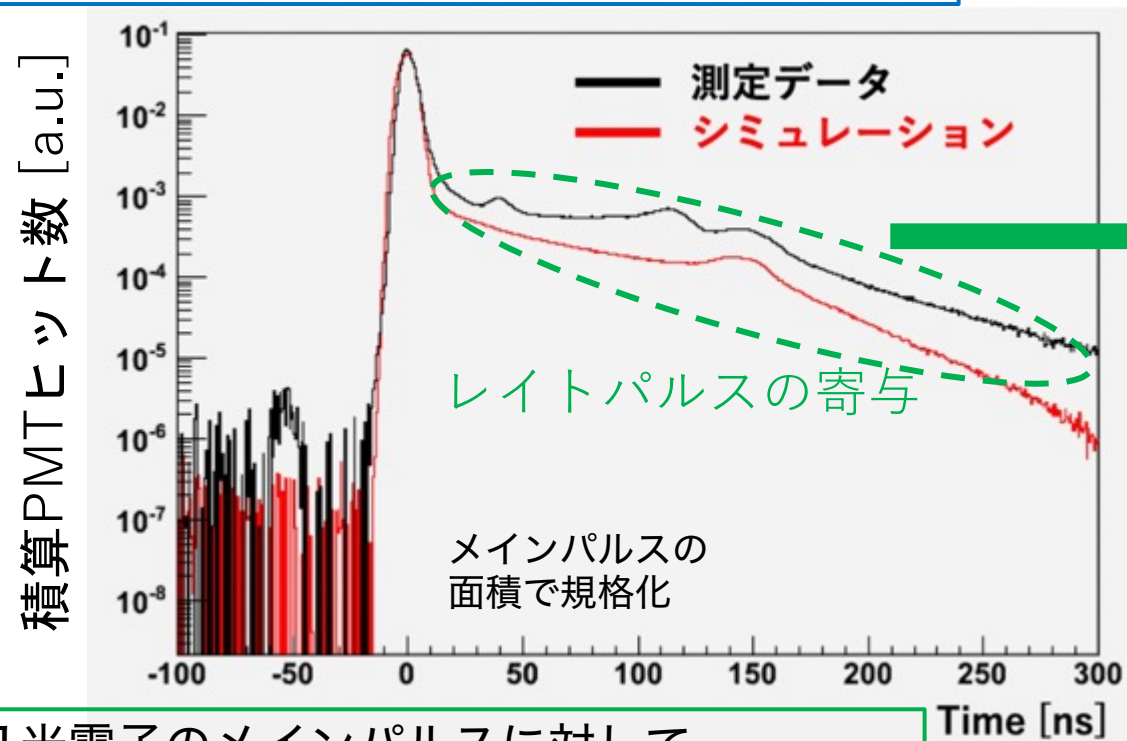
For the last three years, older ones tend to have larger after pulse.

レイトパルス

レイトパルス分布 = 取得データ分布 (水中の散乱, 反射)

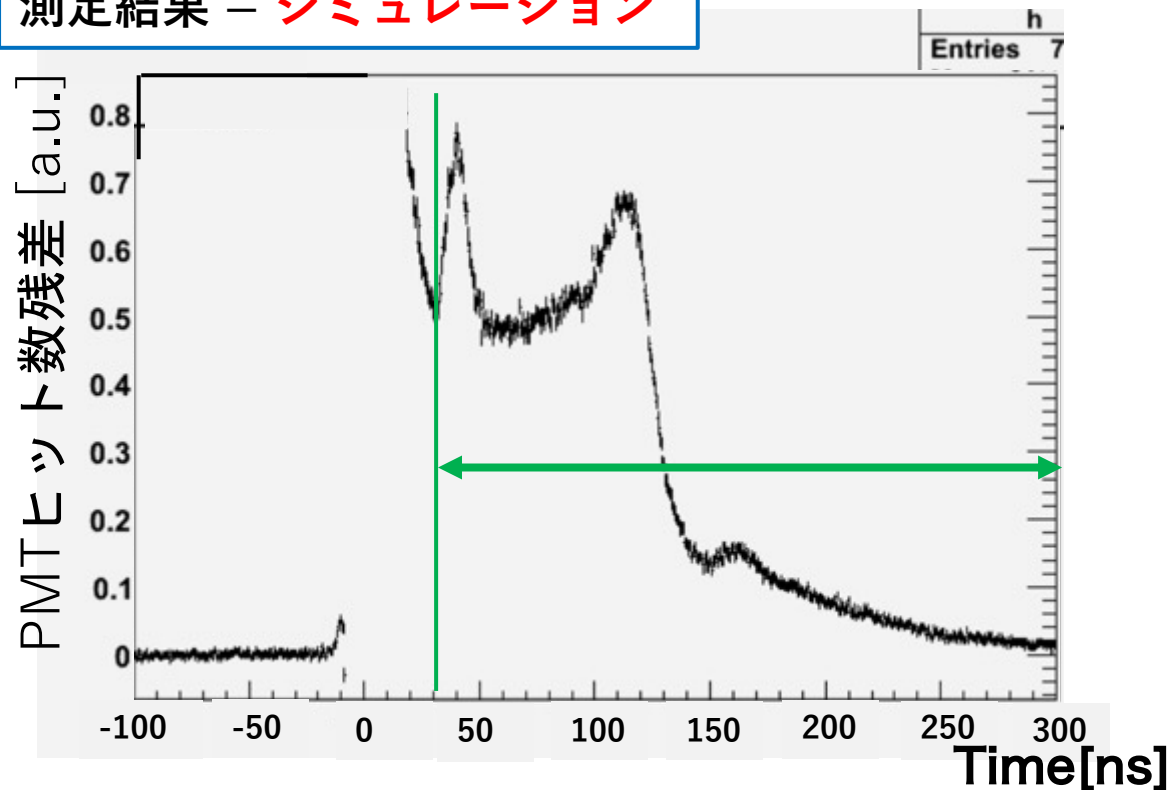
– 検出器シミュレーション (散乱, 反射, レイトパルスを除いたPMT時間)

1 光電子のSK PMTヒットタイミング分布



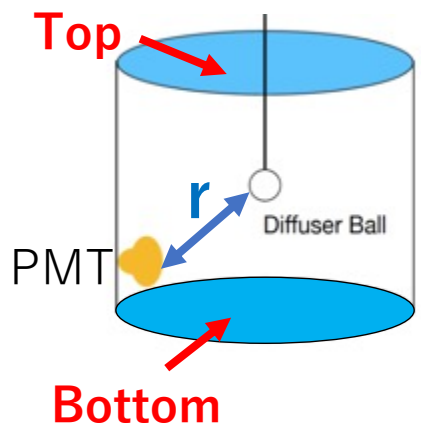
1光電子のメインパルスに対して平均 11% (SK PMT)、9.9% (HK PMT) のレイトパルスが確認された。

測定結果 – シミュレーション



レイトパルスの光量依存、個体差が得られた。

レートパルスの性質



レートパルスの光源からの距離に対する依存性を調べた。

測定結果
+ 散乱光
+ 反射光
+ レートパルス

散乱 & 反射
を減算

〔レートパルス〕

