

Study of a 200ton Gadolinium loaded water Cherenkov Detector for Super-K Gadolinium project

Super-Kガドリニウム計画に向けた 200トンガドリニウム入り水チェレンコフ検出器開発

素粒子物理研究室 徐宸原
岡山大学

2016/3/2 ICEPP

目次

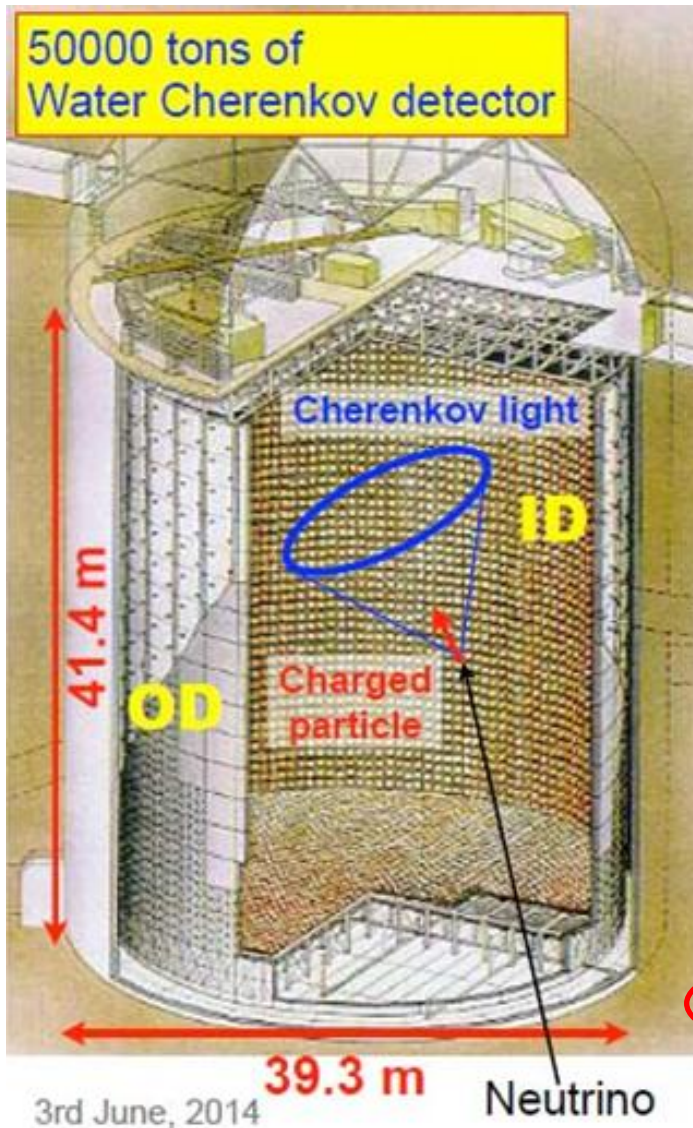
Introduction (3min)

SK-Gd計画overview (2min)

Gd(n, γ)の測定とData解析 (6min)

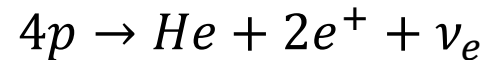
まとめ (1min)

Super-KamiokaNDE

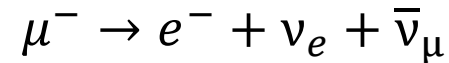
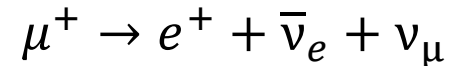


Super-Kでの物理

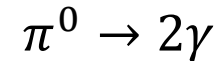
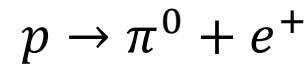
太陽ニュートリノ



大気ニュートリノ

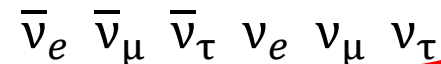


陽子崩壊



超新星爆発ニュートリノ ← 百年二、三回だけ！

超新星背景ニュートリノ



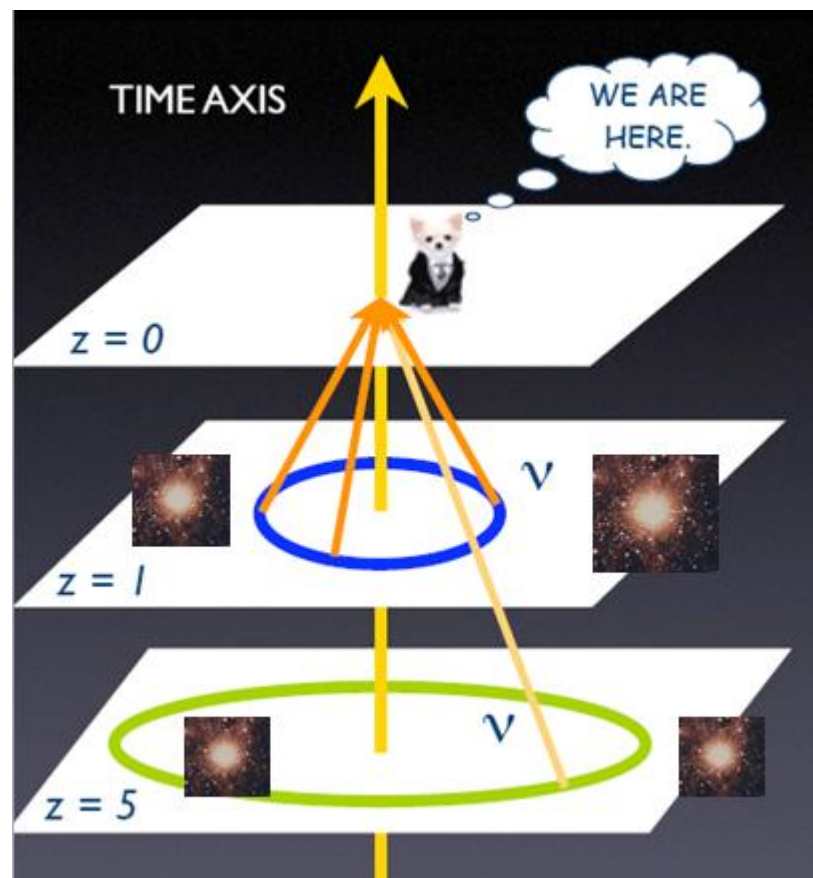
超新星背景ニュートリノ

超新星爆発背景ニュートリノ (Supernova Relic Neutrinos, SRN)

宇宙に最初の星ができて以来、超新星爆発は約1秒に1回の頻度で絶えず起きており、その都度、ニュートリノや重元素物質が宇宙にまき散らされている。こういったニュートリノは、背景として現在の宇宙に大量に存在することが示唆されている。

一方、ニュートリノは超新星の芯から外に直接出ることができる唯一の素粒子であるので、超新星爆発のメカニズムや中性子星・ブラックホール形成過程を「見る」**唯一(?)**の手段であると期待されている。また、超新星背景ニュートリノの観測は宇宙の歴史と大質量星の進化過程に繋がる。

超新星爆発背景ニュートリノは未だに観測された事はありません。



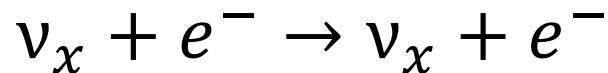
超新星背景ニュートリノ（SRN）反応

逆beta反応（IBD）

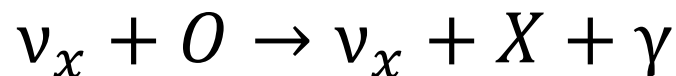
断面積二桁大きい



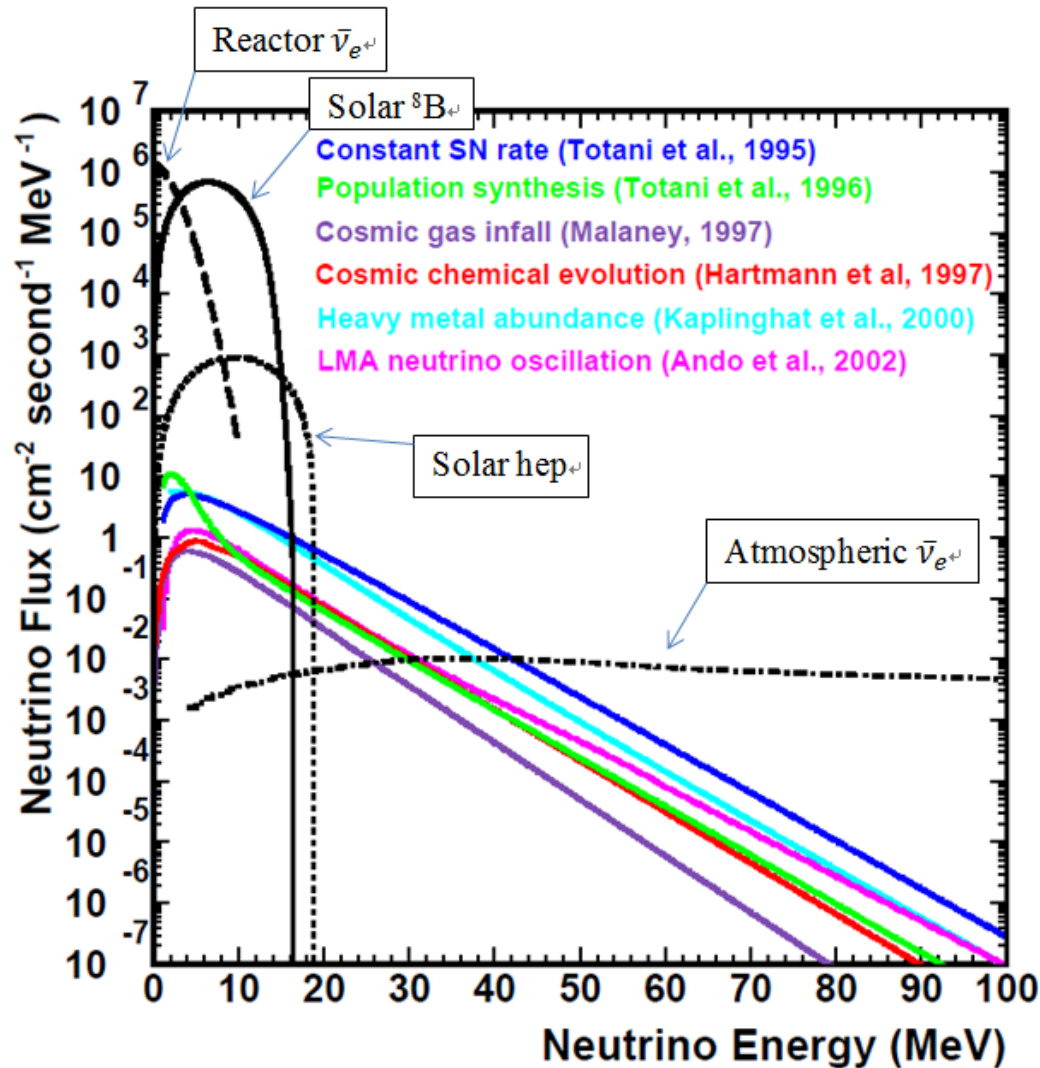
弾性散乱



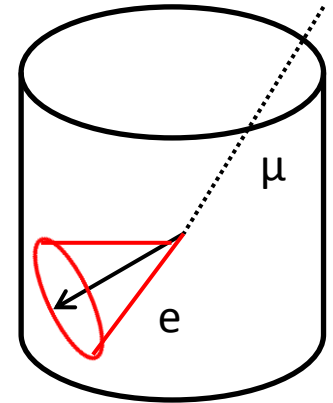
中性カレント反応



SRNの予想された $\bar{\nu}_e$ スペクトル



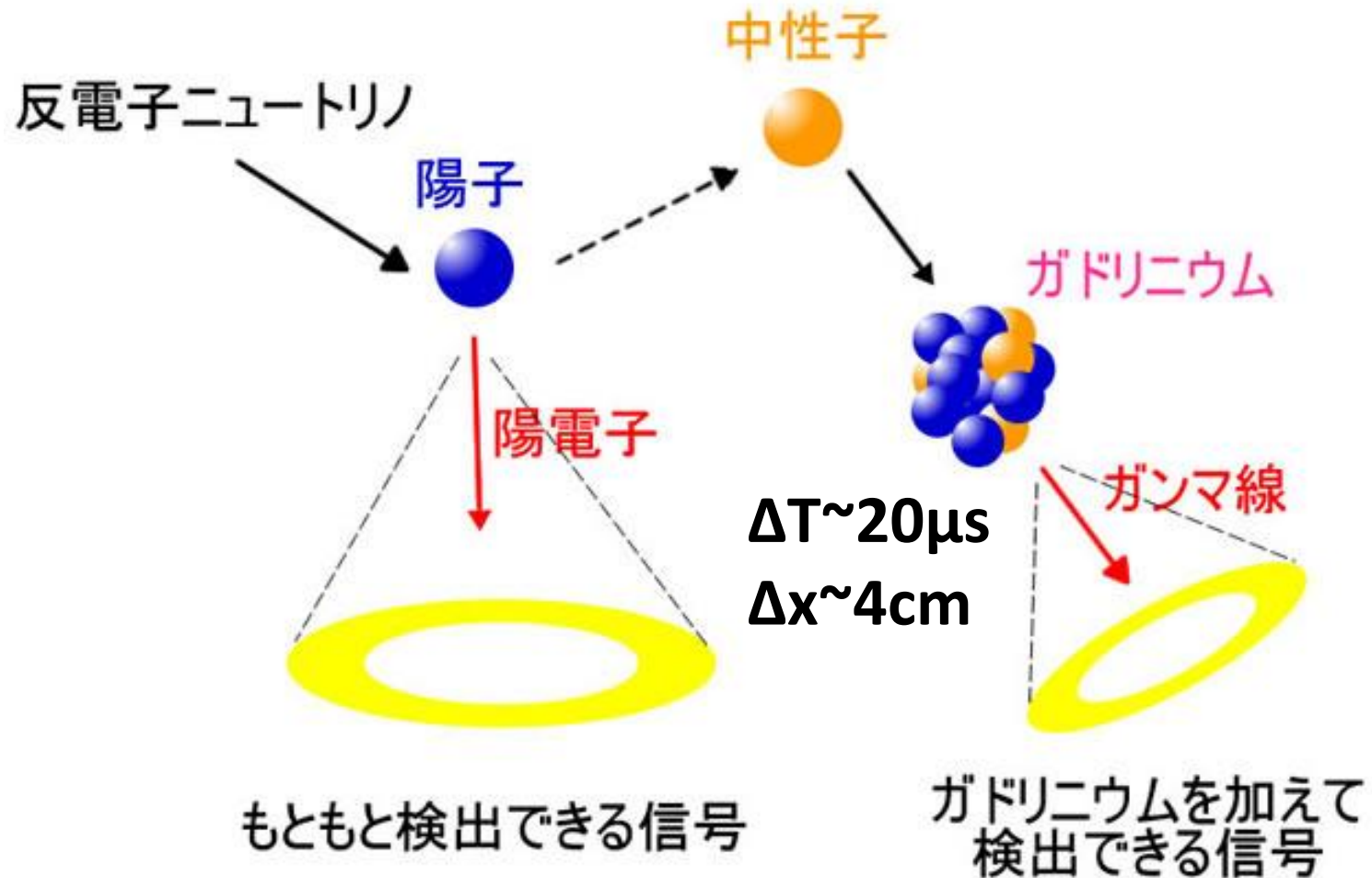
SRNともっとも
区別しにくい
Background:
Invisible muon



SKで10MeVから30MeVに予想されているevent数:
1.3-6.7events/year/22.5kton

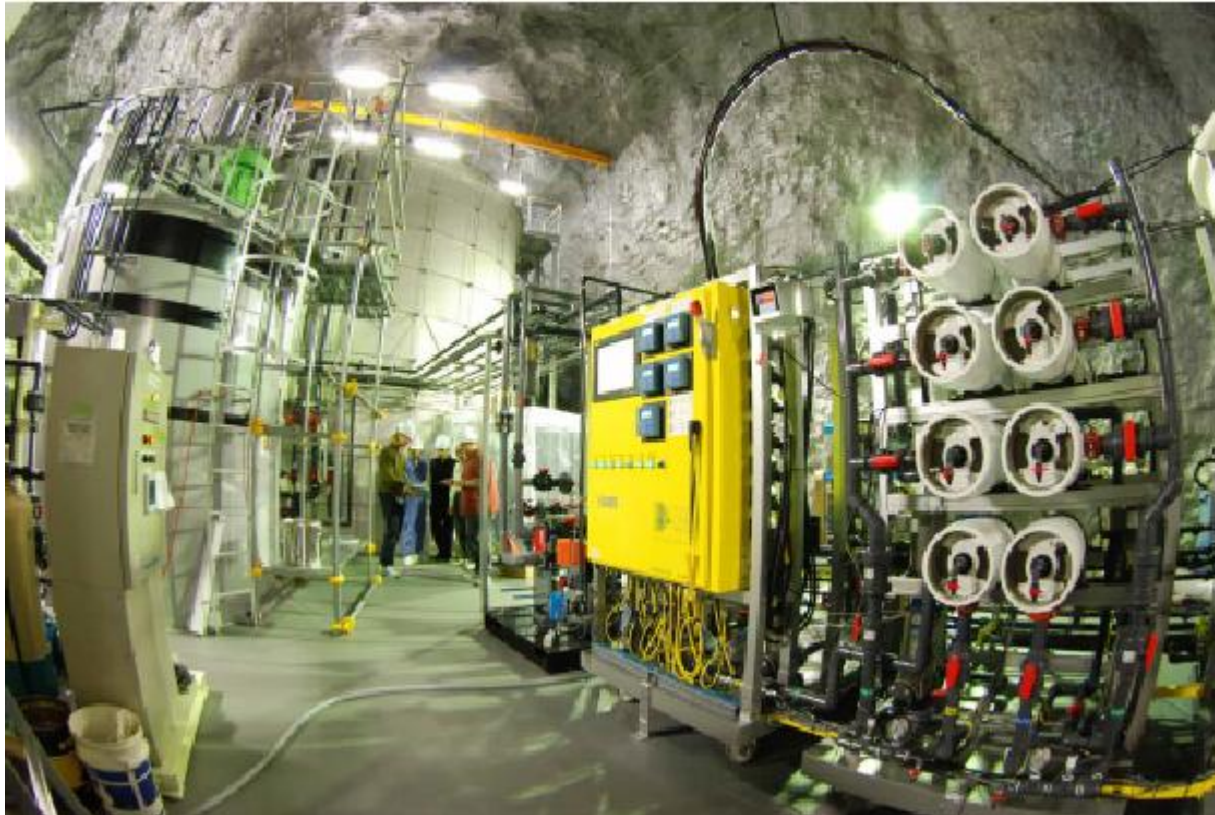
Backgroundを効率良く除去する方法が必要

Neutron tagging by Gadolinium



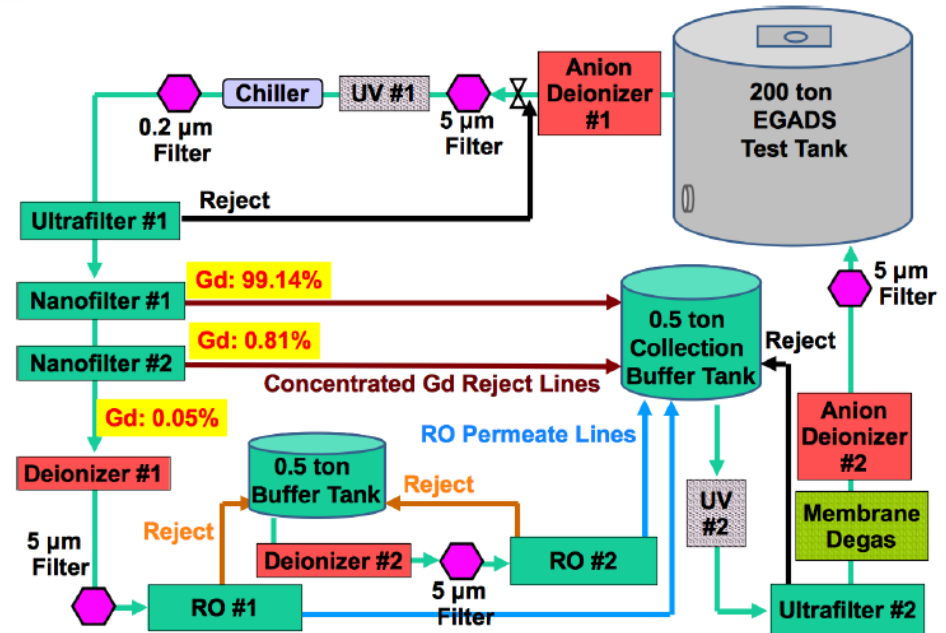
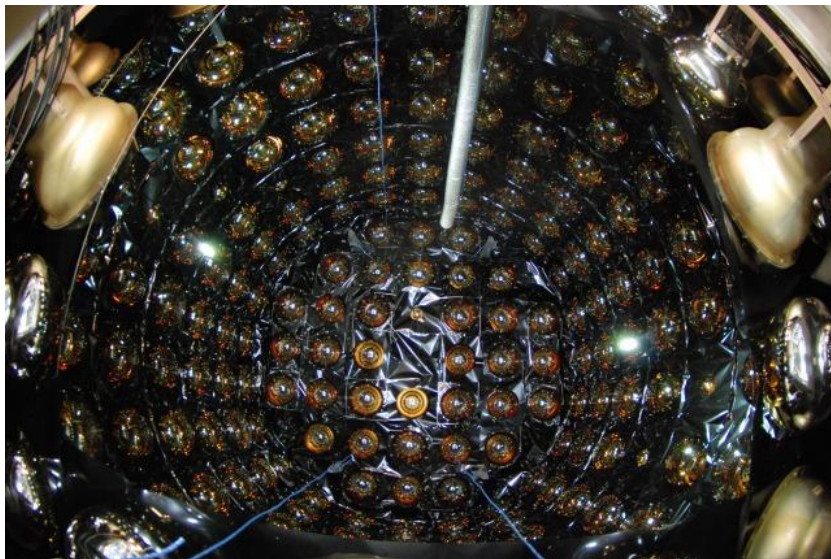
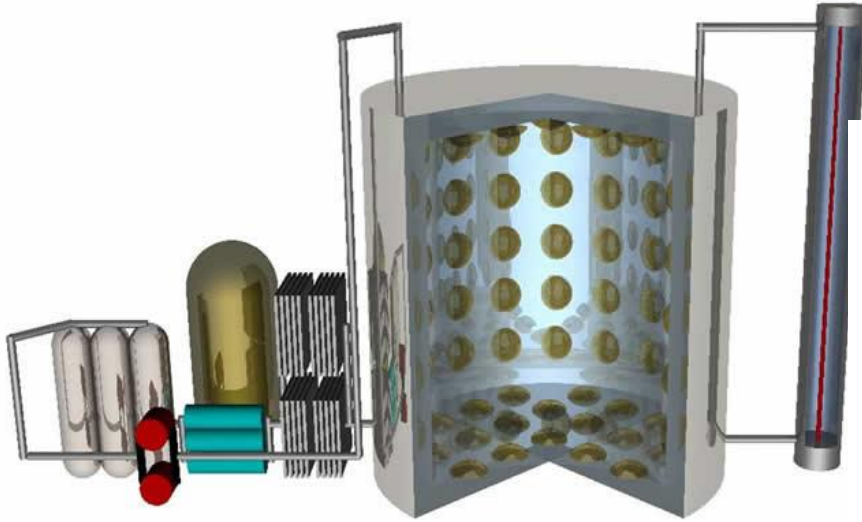
SK-Gd計画とEGADS実験

Kamioka鉱山内部のEGADS実験



SKに0.2%Gdを導入するのが目標！

Evaluating Gadolinium Action on Detector Systems



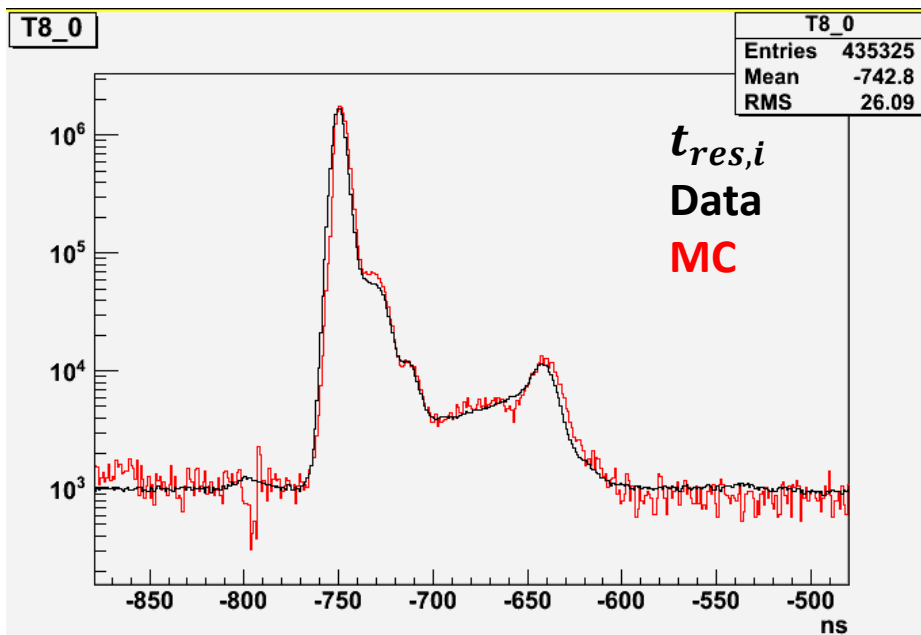
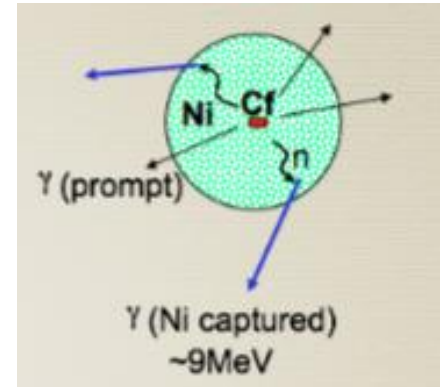
240本PMTを取り付けた200トン検出器

MC simulation tuning

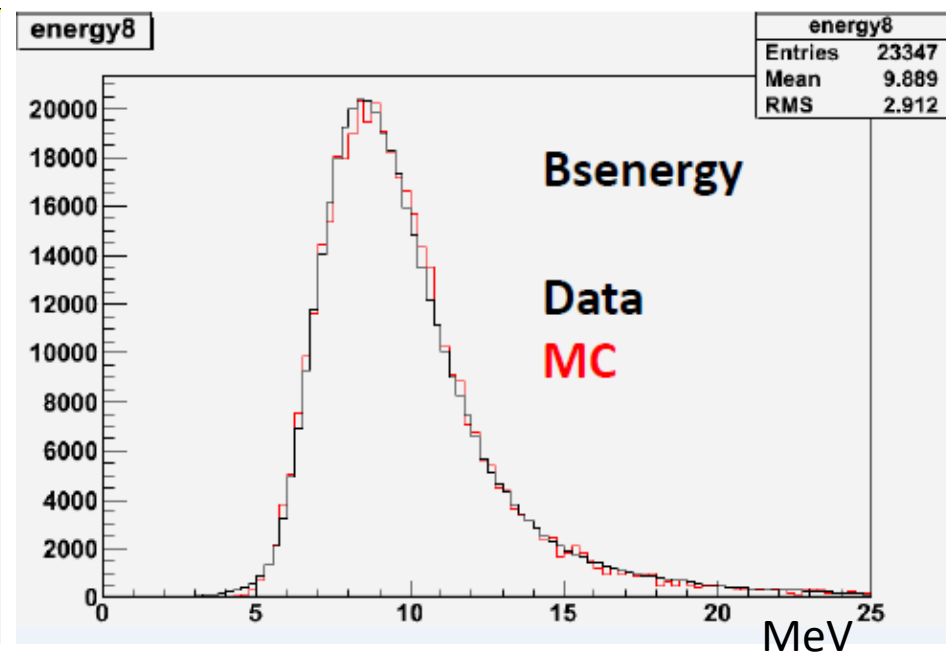
Calibration結果とdark noise、after pulse、水透過率などをsimulation programに導入した。

Cf-Ni線源を純水で測定したDataでMC tuningをした。

Dataの再現性ができた。

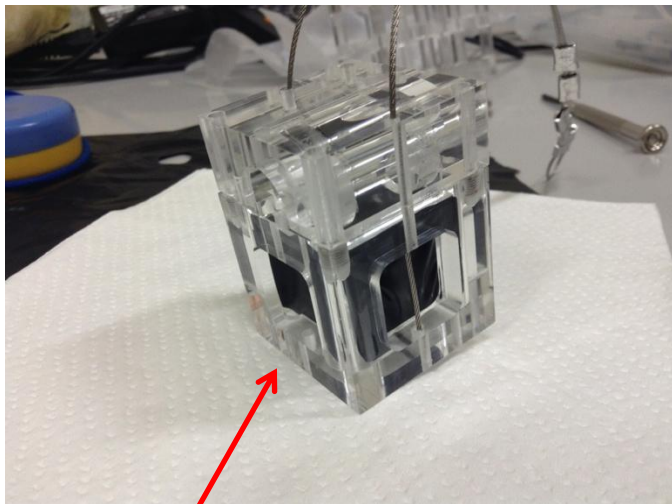


信号のtiming分布



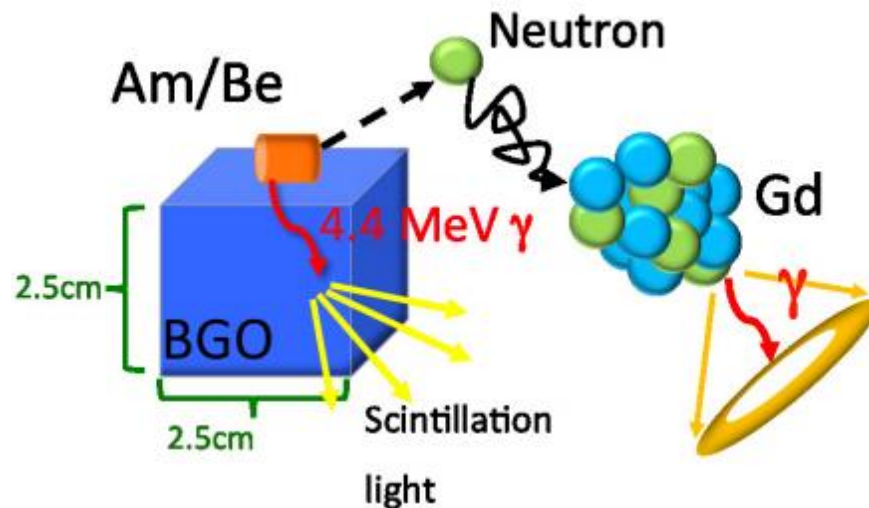
再構成されたエネルギー

中性子捕獲効率測定のsetup

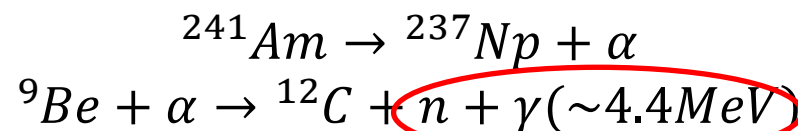


BGOとAm/Be線源

$Bi_4Ge_3O_{12}$ 結晶:
γ線を吸収し, scintillation
光子を全方向へ大量に出
す性質を持っている。



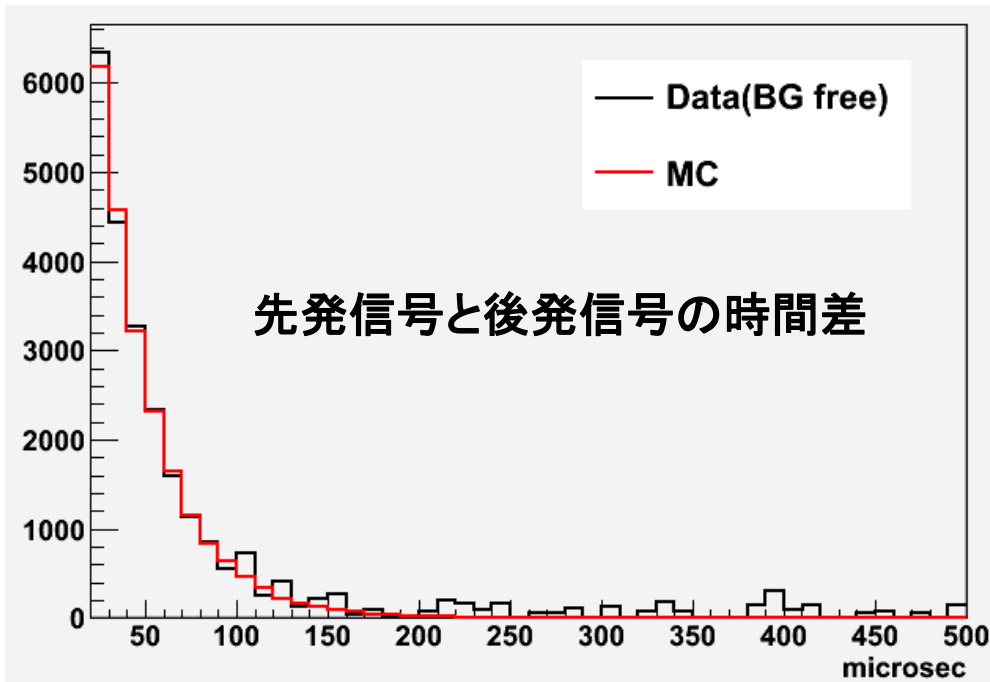
Am/Beを中性子線源にする:



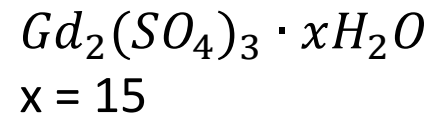
SRNの擬似信号を作る

先発信号: 4.4MeV γ線が起したScintillation光
後発信号: 中性子のGd(n, γ)信号

EGADS検出器中での中性子のlife time



硫酸Gd濃度: 0.2178%
(from Atomic Absorption
Spectroscopy measurement with
3.5 % uncertainty)



Exponential関数でfit:

$$y = p_0 \times e^{\frac{-x}{p_1}} + p_2$$

p_1 : 中性子平均捕獲時間(μsec)

	2178 $\pm$ 44ppm	1055 $\pm$ 21ppm	225 $\pm$ 5ppm
Data	29.89 $\pm$ 0.33	51.48 $\pm$ 0.52	130.1 $\pm$ 1.7
MC	30.03 $\pm$ 0.77	53.45 $\pm$ 1.19	126.2 $\pm$ 2.0

0.2%Gdの中性子捕獲効率の測定

捕獲効率 = Gd capture数 / 中性子数

中性子数 = 4.4MeV gammaがBGO Scintillationを起こす先発信号数

BGOに入っているGe
とwireのFe。合わせて0.1%程度

Gd capture数はMCで見積もる。



	Data
$Eff_{Gd\ capture}$	$84.36 \pm 1.79\%$

	中性子捕獲効率
Gd	??
+	
p	??
+	
Ge	??
+	
Fe	??
+	
⋮	
総	100%

まとめ

EGADS実験は順調にすすめて、0.2%Gdを導入した。

検出器校正測定が終わり、EGADS Tankにおける中性子捕獲効率を見積って、0.2%Gdの時は84.36%という結果でした。

EGADS実験の成功により、Super-Kガドリニウム計画は許可され、SKのofficial planになっている。

将来計画

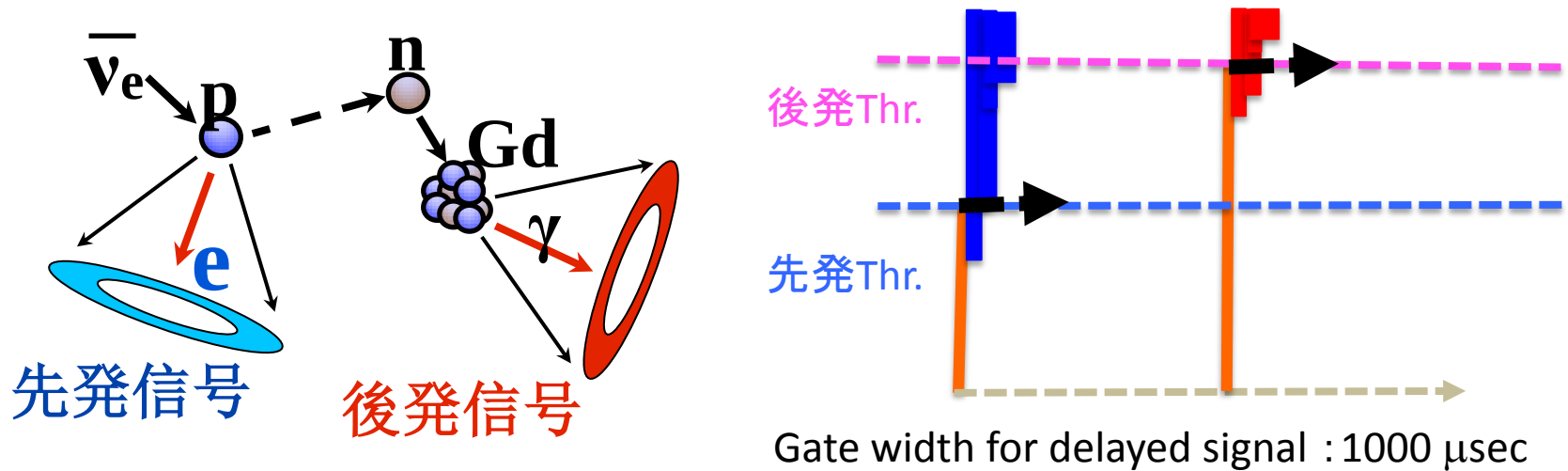
EGADS実験はSK-3と同じ電気回路を使っている。SK-4と同じ回路にupgradeする予定。

EGADSにgps timing moduleを導入し、超新星爆発が起こるとevent時間をより精度よく記録する予定である。

Ra/Rnを除去するsystemは開発中。

Backup

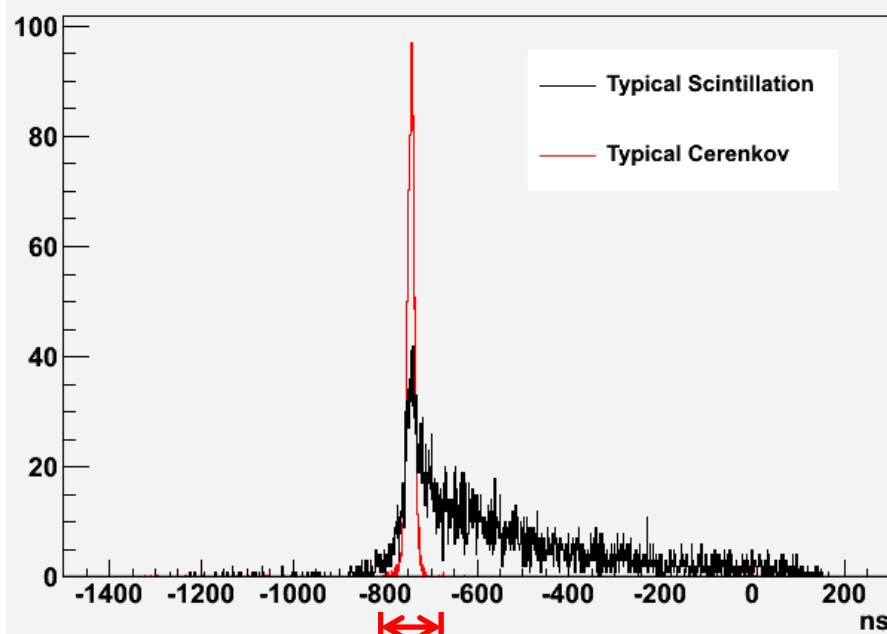
EGADSのData収集System



先発信号が検出されたら、1000 μ secのゲートを開く。その間、信号のしきい値が低めに設定される。

先発信号の選択

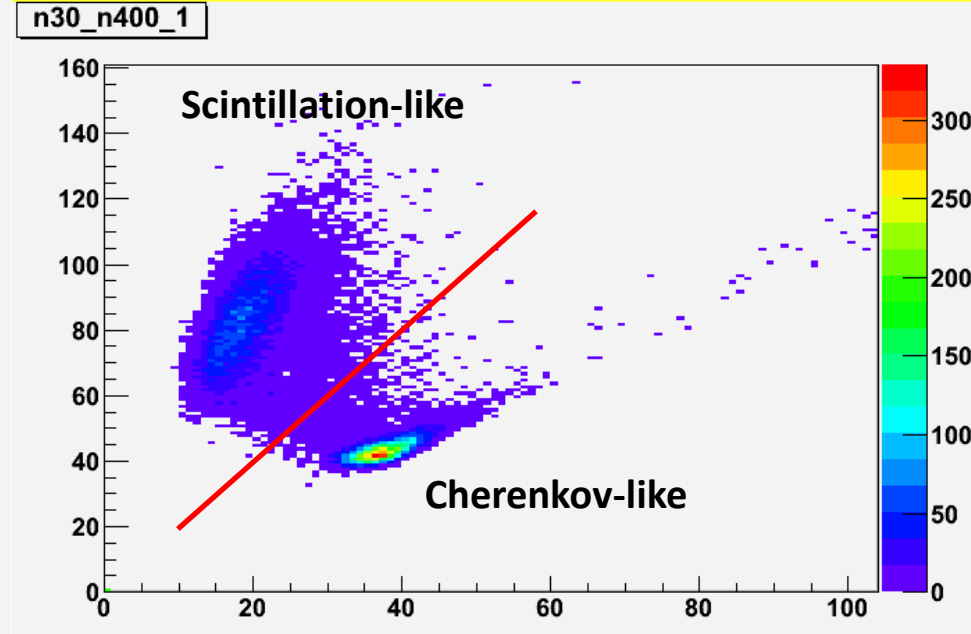
Time distribution of PMTs



N30: 30nsにhit数の最大値

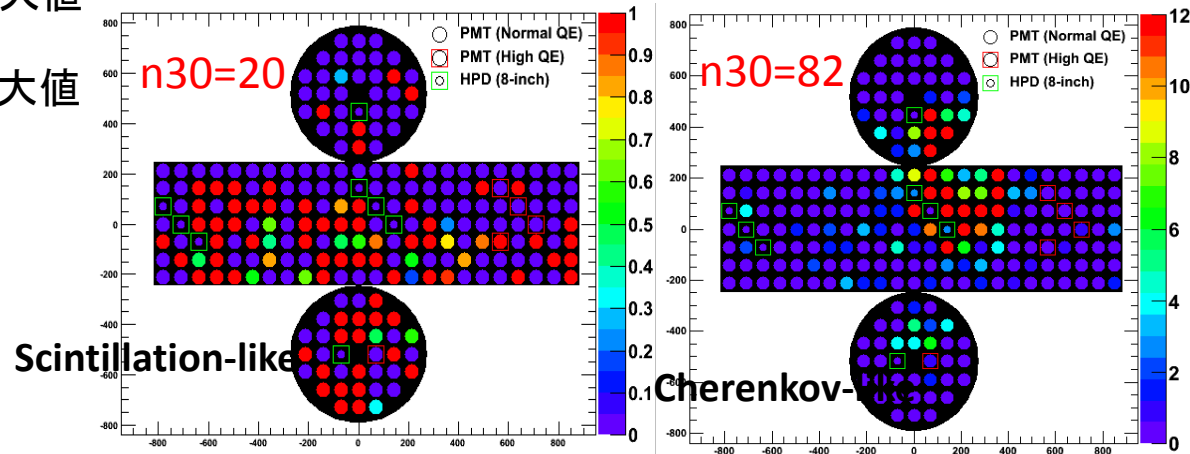
N400: 400nsにhit数の最大値

hit number in 30ns window and 400ns window



先発信号に対する cut :

$$N400/N30 > 2$$



Gdによる中性子捕獲効率

中性子捕獲効率の計算方法:

N50>20のcutをかけた後:

$$N_{prompt} \times \textcolor{red}{Eff_{Gd\ capture}} \times Eff_{cut(Gd)} \times (1 - R_{fake\ prompt}) = N_{delayed}$$

N_{prompt} : 先発信号数(中性子数)

$\textcolor{red}{Eff_{Gd\ capture}}$: Gdによる捕獲効率

$Eff_{cut(Gd)}$: Gd成分に対してN50>20のcut
効率

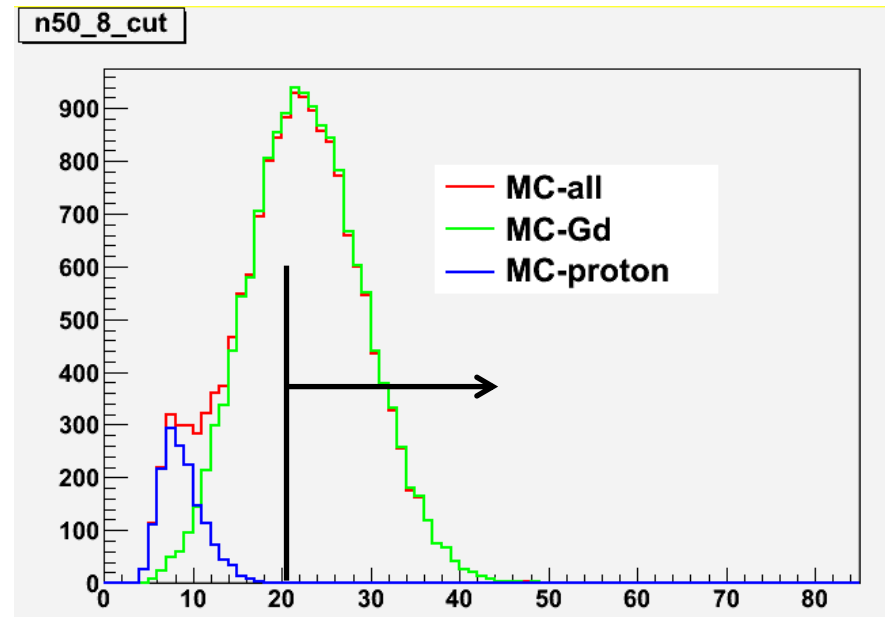
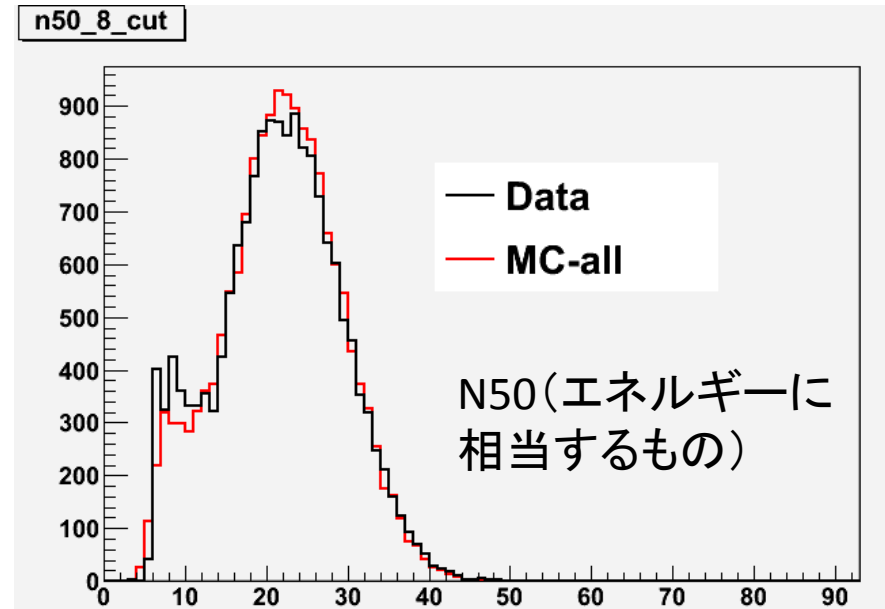
$R_{fake\ prompt}$: 先発信号のBackground rate

$N_{delayed}$: cutした後の後発信号数

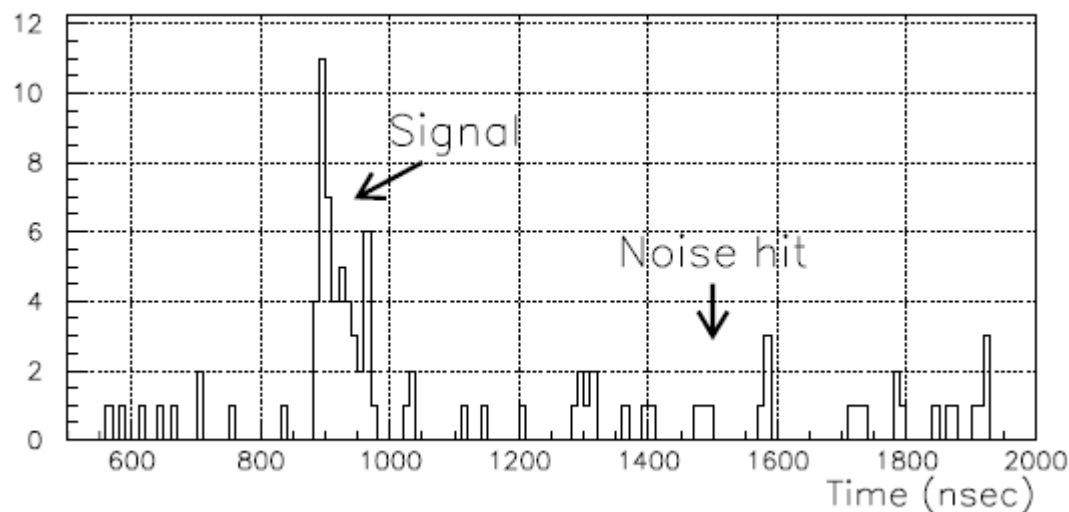
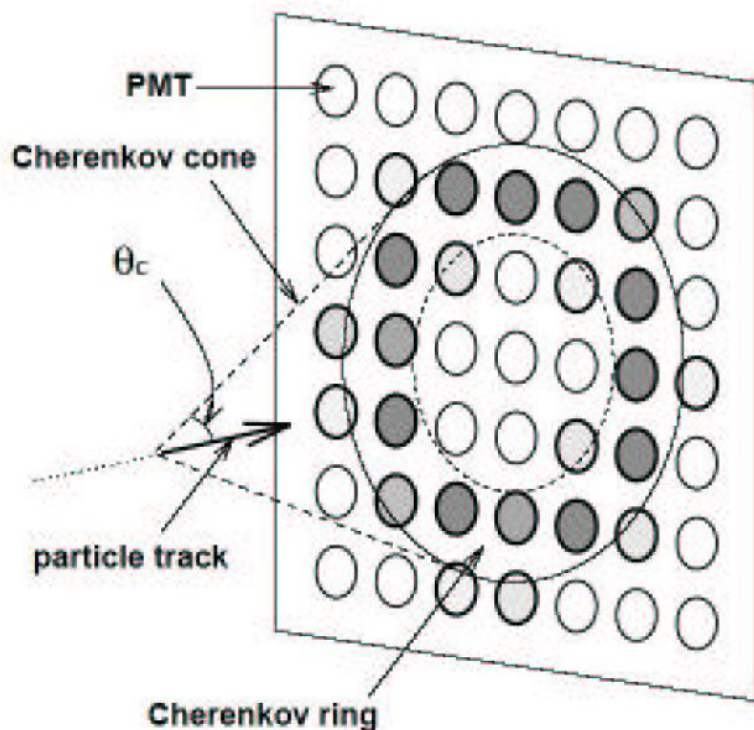
	Data	MC
$Eff_{Gd\ capture}$	$84.36 \pm 1.79\%$	$84.51 \pm 0.33\%$

Precut : Nhits > 5

Ontime(2-500 μ s) - Offtime(502-1000 μ s)



EGADS検出器における事象位置再構成



$$t_{res,i} = t_i - \underbrace{\frac{n}{c} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}_{\text{飛行時間}}$$

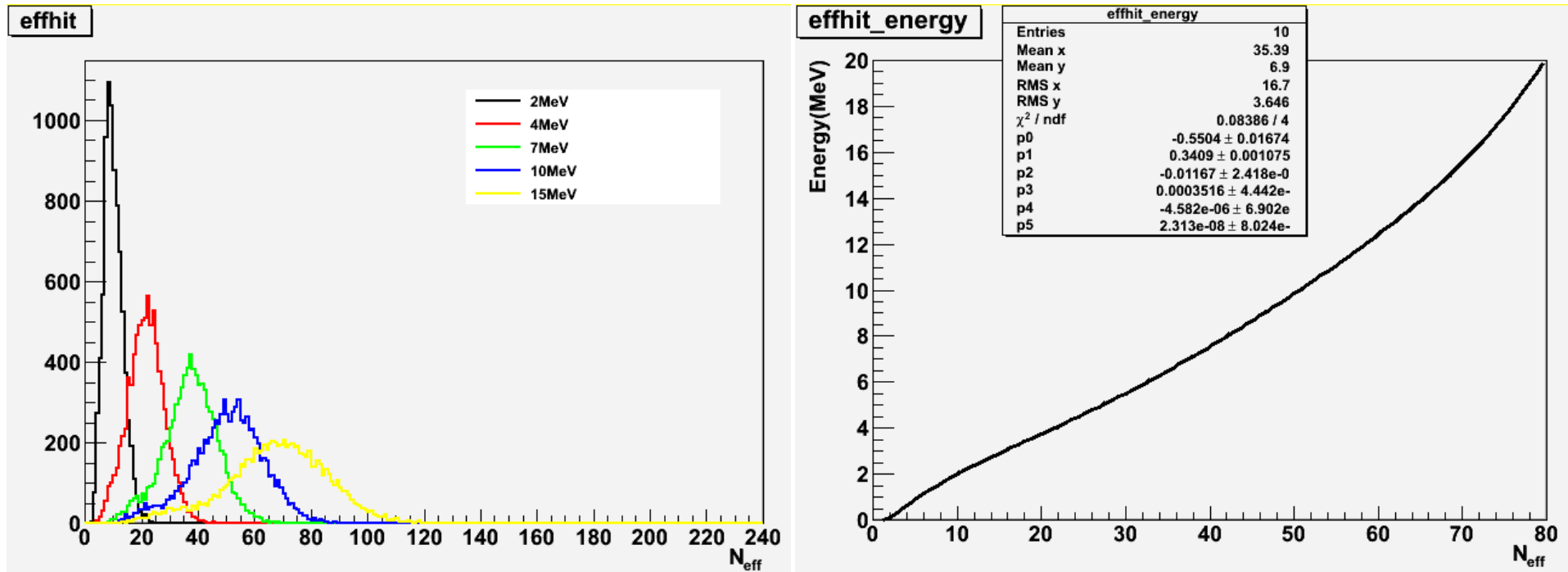
↑
PMTの出力
timing

事象位置から
各PMTまでの
飛行時間

光の飛行時間を差し引いた後、事象のtiming尤度が一番いい発生点(vertex)を探す。

さらにnoise hitを除いた後、Effective Hitを用いてEnergy再構成を行う。

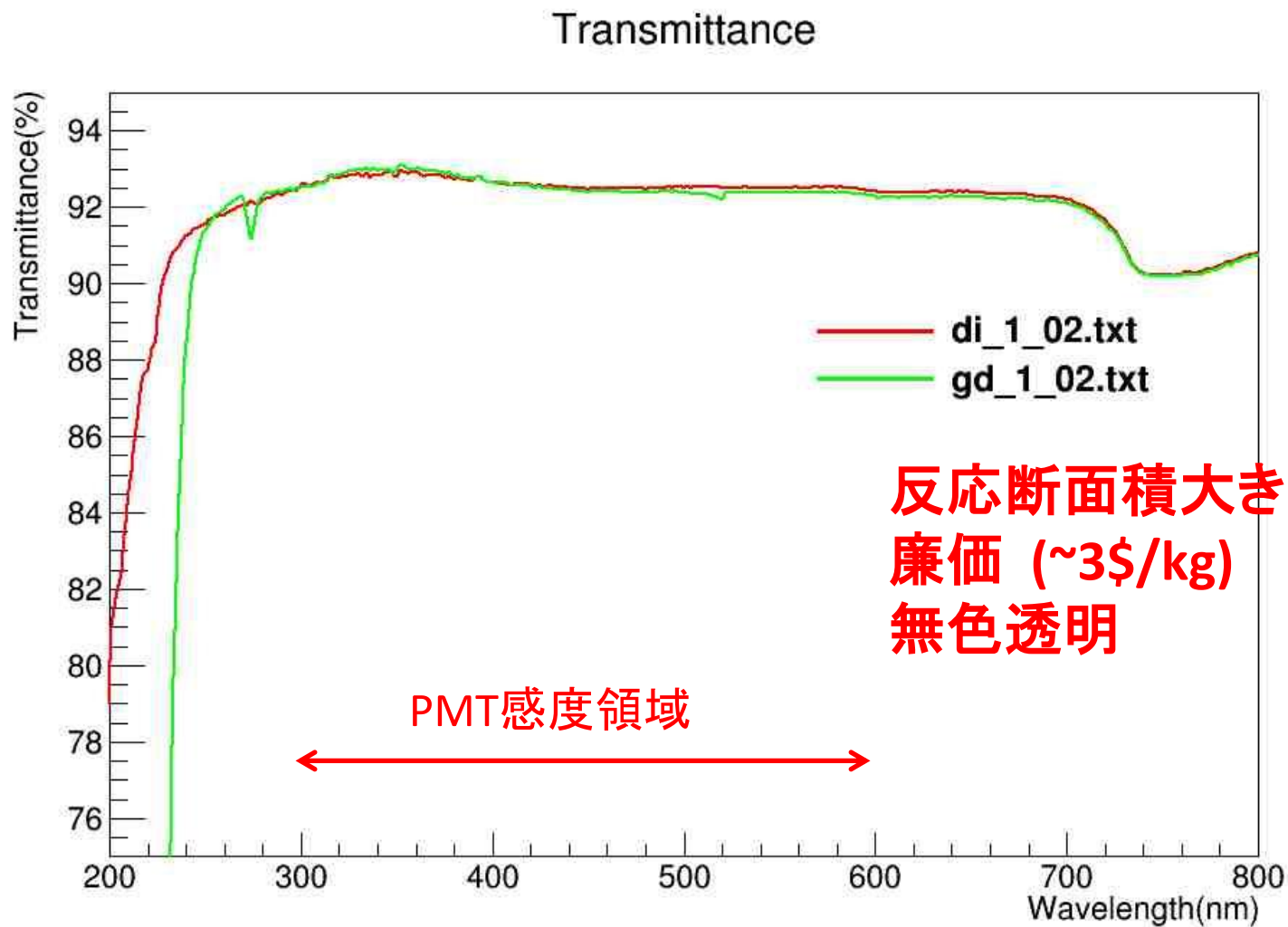
事象のエネルギー再構成



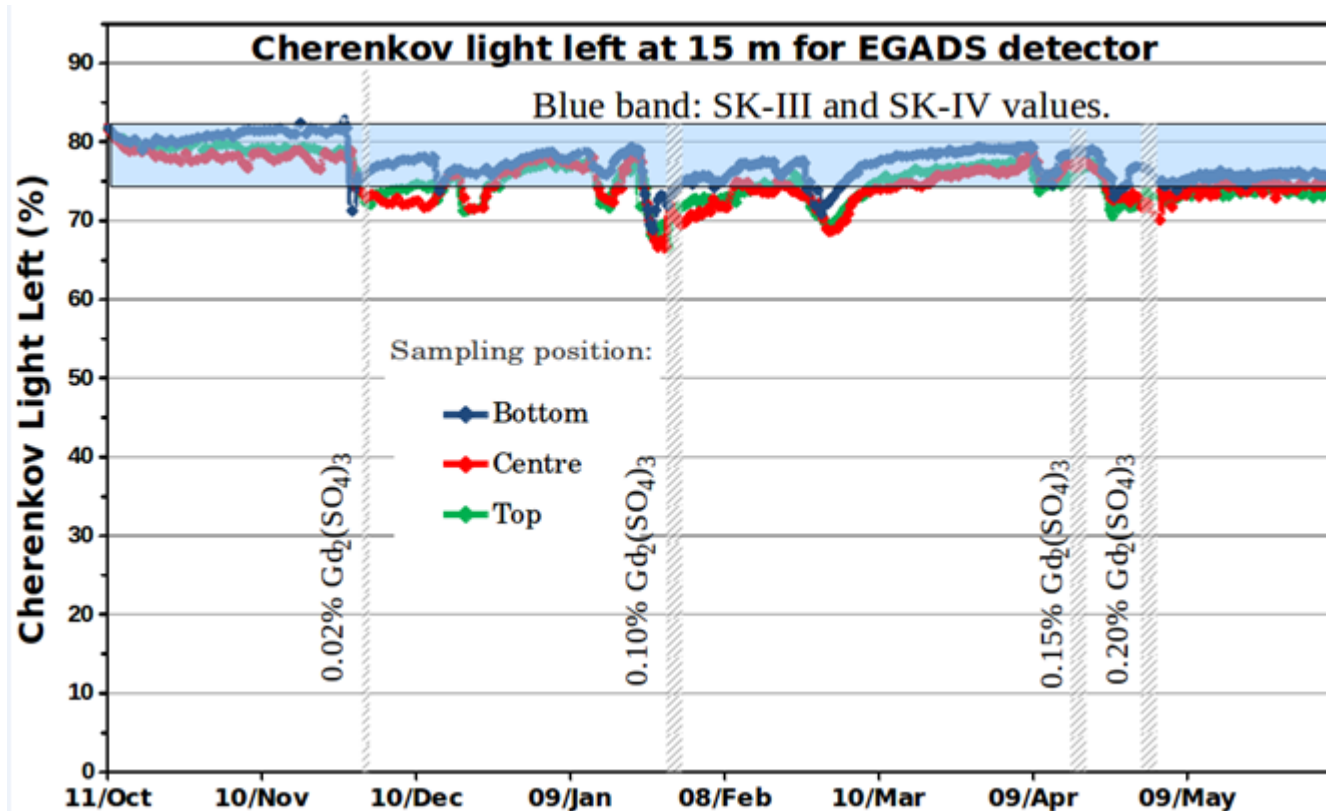
Low energy eventの場合、PMTの信号は1光電子なので、事象のenergyはhit PMTの数に比例する。

MCを用いて、energyと N_{eff} の比例関数を作る。

なぜGadolinium?



透過率モニター



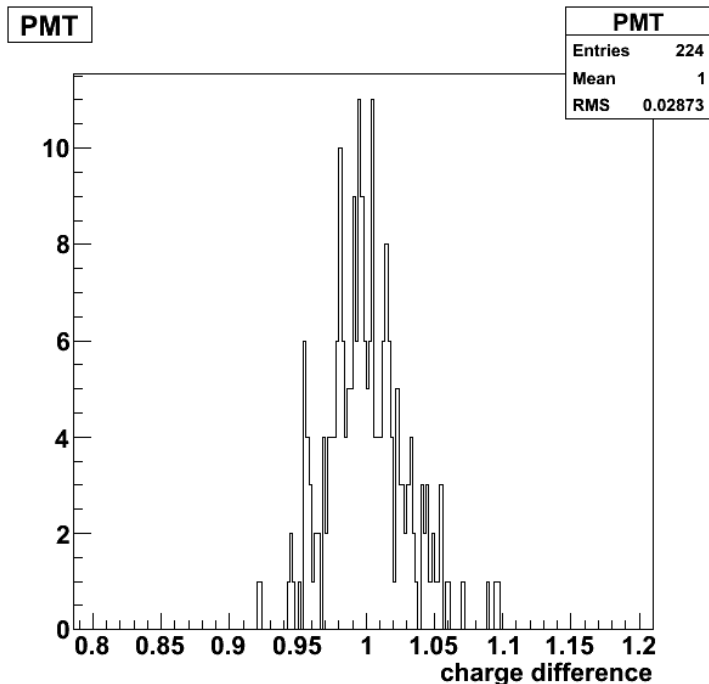
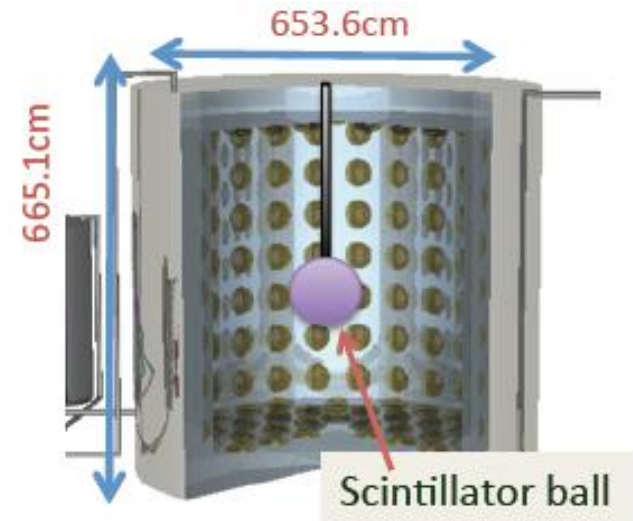
モニターはTankから自動的にsampleを取り、337nm, 375nm, 405nm, 445nm, 473nm, 532nm, 595nmで透過率をはかり、Cherenkov光が15mを走る場合の減衰を計算する

PMTの高電圧値設定

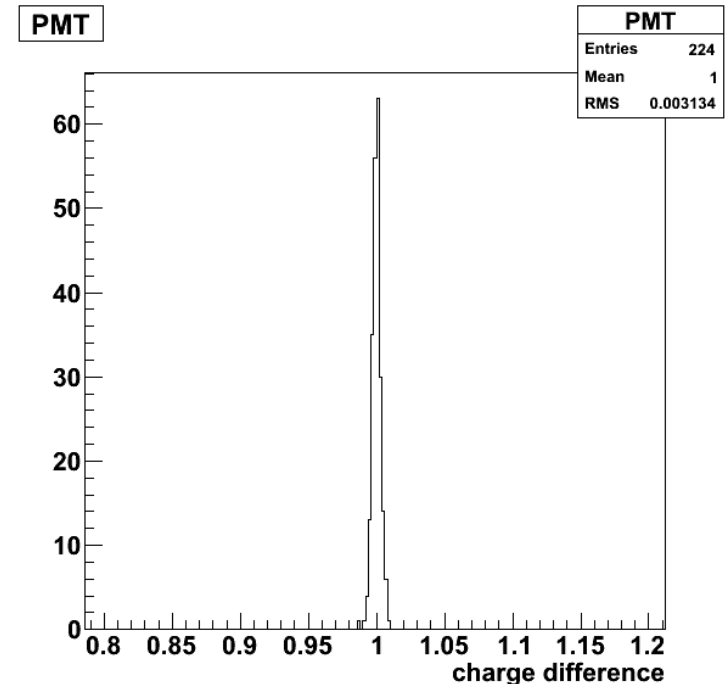
$$Q(i) \propto QE(i) \times Gain(i) \times N_{photon}$$

Xe Lampを光らせ、scintillator ballをtank中心に置き、各PMTの偏差を見る。
(scintillator ball を回転してball自身の非対称性をcancellする)

HV較正後、各PMTの偏差1%以内おさえた。



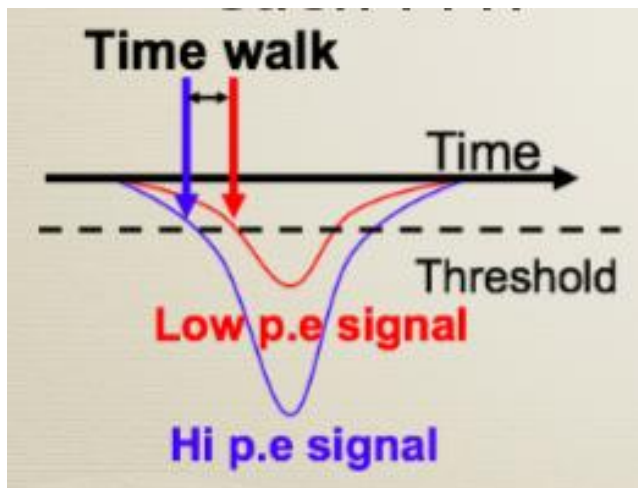
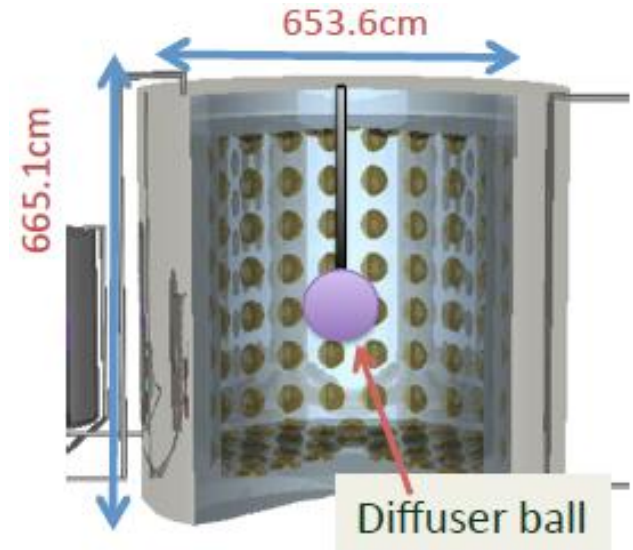
校正後



時間応答測定 (TQmap)

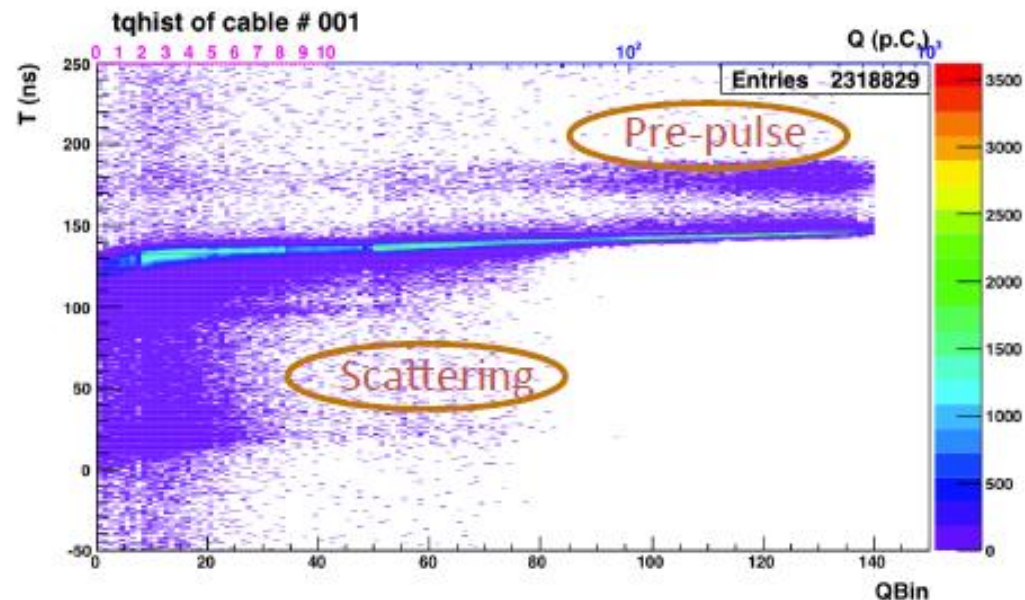
PMTに入る光量は大きい程、time-walkにより、信号を出すtimingが早まる。

信号を出力するtiming-chargeの関係をTQmapに作り、dataに修正をかけている。



Laser Diodeの利点:

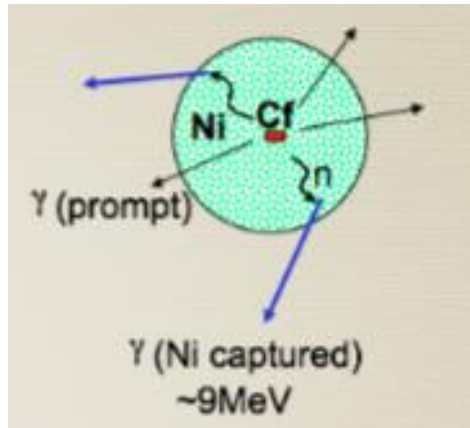
- 1、時間精度が良い(~60ps)
- 2、操作しやすい
- 3、High rate (1kHz) で発光可能
- 4、小光量から大光量まで発光可能



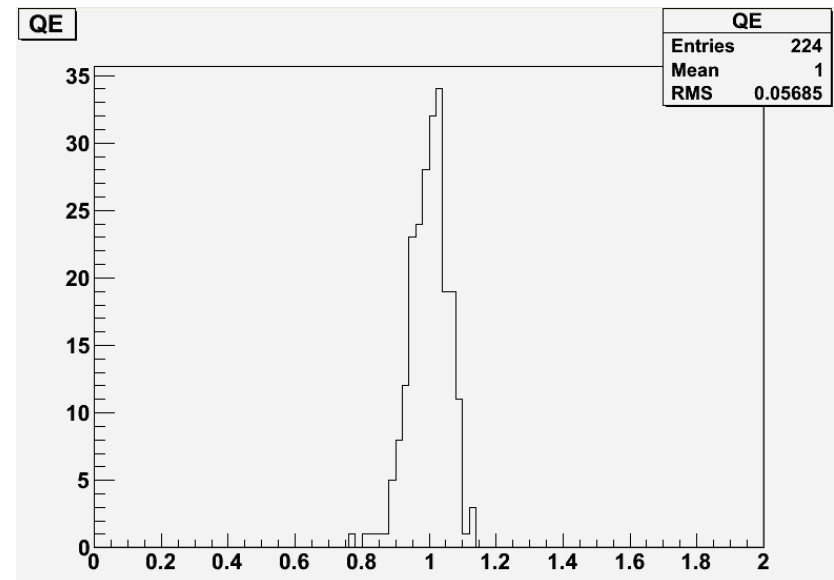
PMTの量子効率校正

Cf-Ni線源を使い、1pe levelの信号測定により、各PMTのhit rateを計算し、さらに場所依存性をcancellする為にMC(全QE同じ)と比較して、relative QE table(量子効率)を作った。

RMS<6%



^{252}Cf 線源を ^{57}NiO のball中心に置き、
 $^{57}\text{Ni}(n,\gamma)^{58}\text{Ni}$ $\gamma \sim 9\text{MeV}$



PMTの相対増幅率(gain)較正

Laser Diodeで高強度（20pe）と低強度（1pe）で dataを取り、両方を比較する事により、各PMTの relative gain (増幅率) のtableを作った。

RMS<7%

高強度の電荷

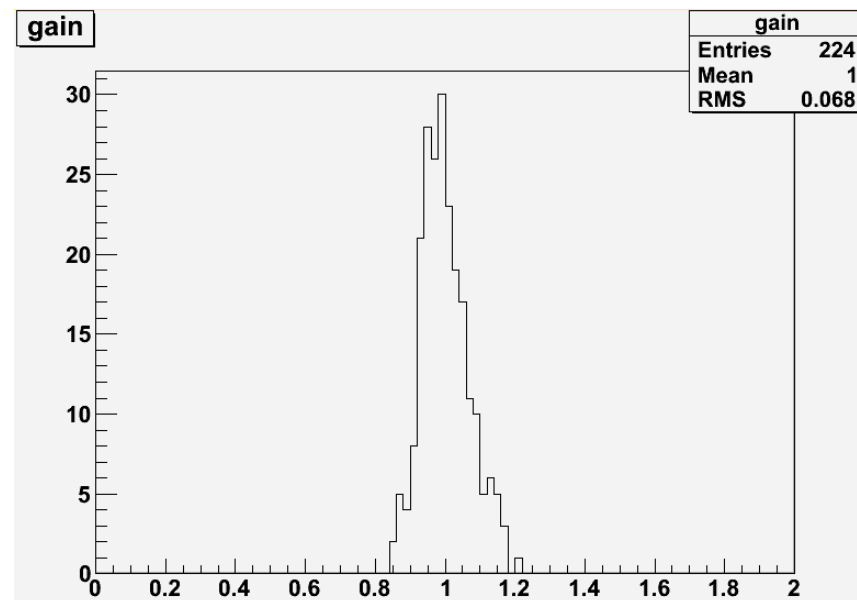
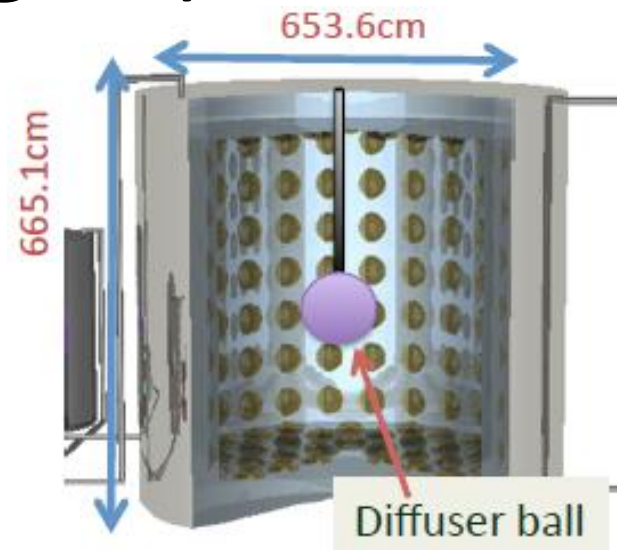
$$Q_{high} \propto I_{high} \times a(i) \times \epsilon_{qe}(i) \times G(i)$$

低強度のhit rate

$$N_{low} \propto I_{low} \times a(i) \times \epsilon_{qe}(i)$$

Relative gain

$$G(i) \propto \frac{Q_{high}(i)}{N_{low}(i)}$$

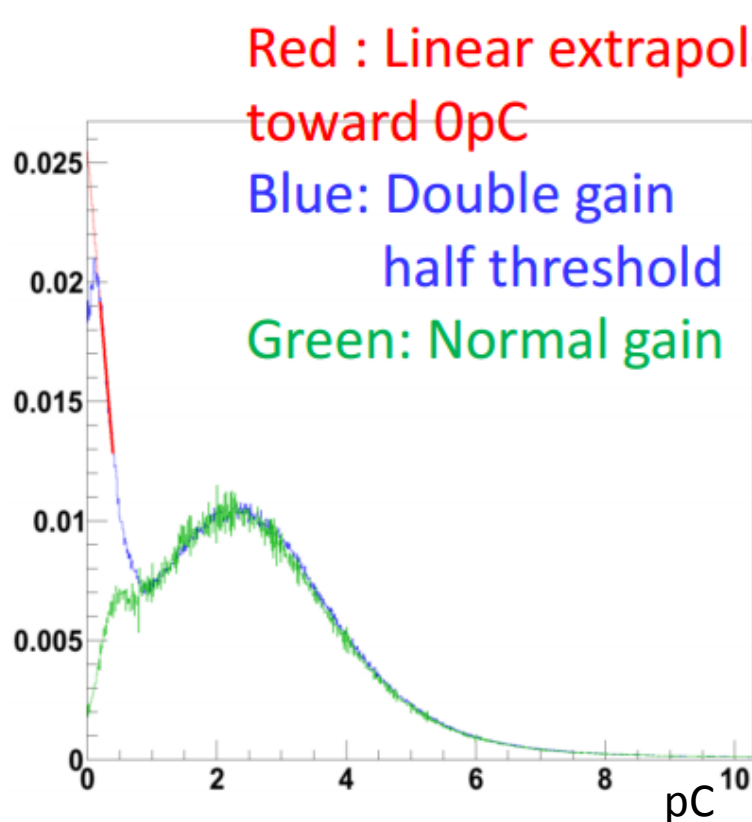


PMTの絶対増幅率(gain)校正

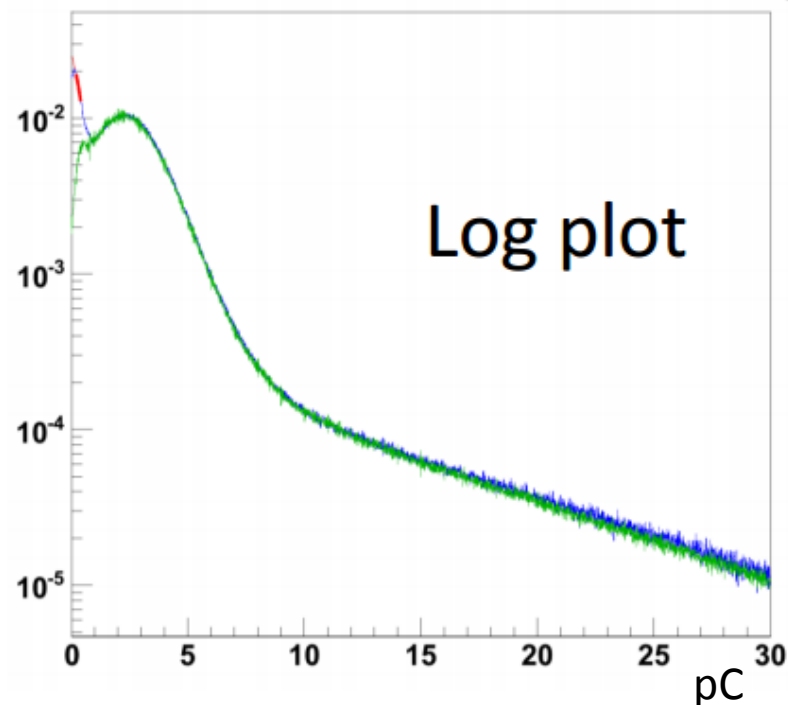
LED光源をTank中心に置き、~1% occupancyで光を発生させる。

PMTのthresholdを普段の半分、gainを普段の二倍にする。

1pC以下はlinear functionでfitする。



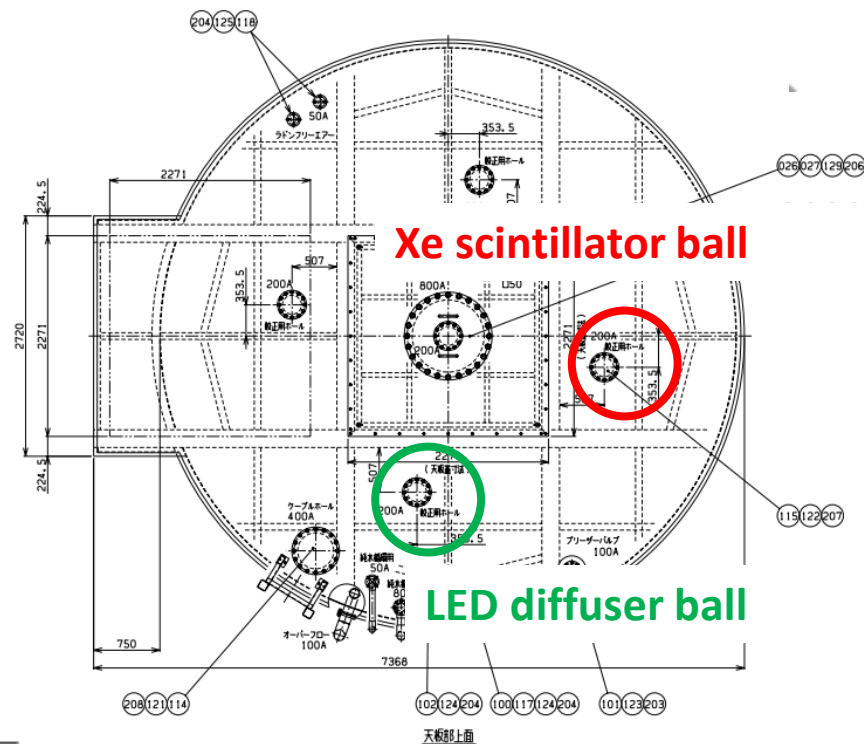
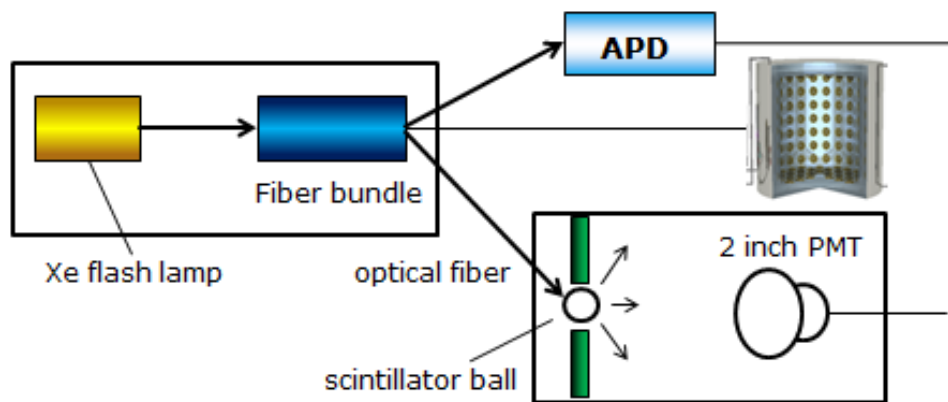
$$\text{pc2pe} = 2.502$$



PMT長期安定性モニター

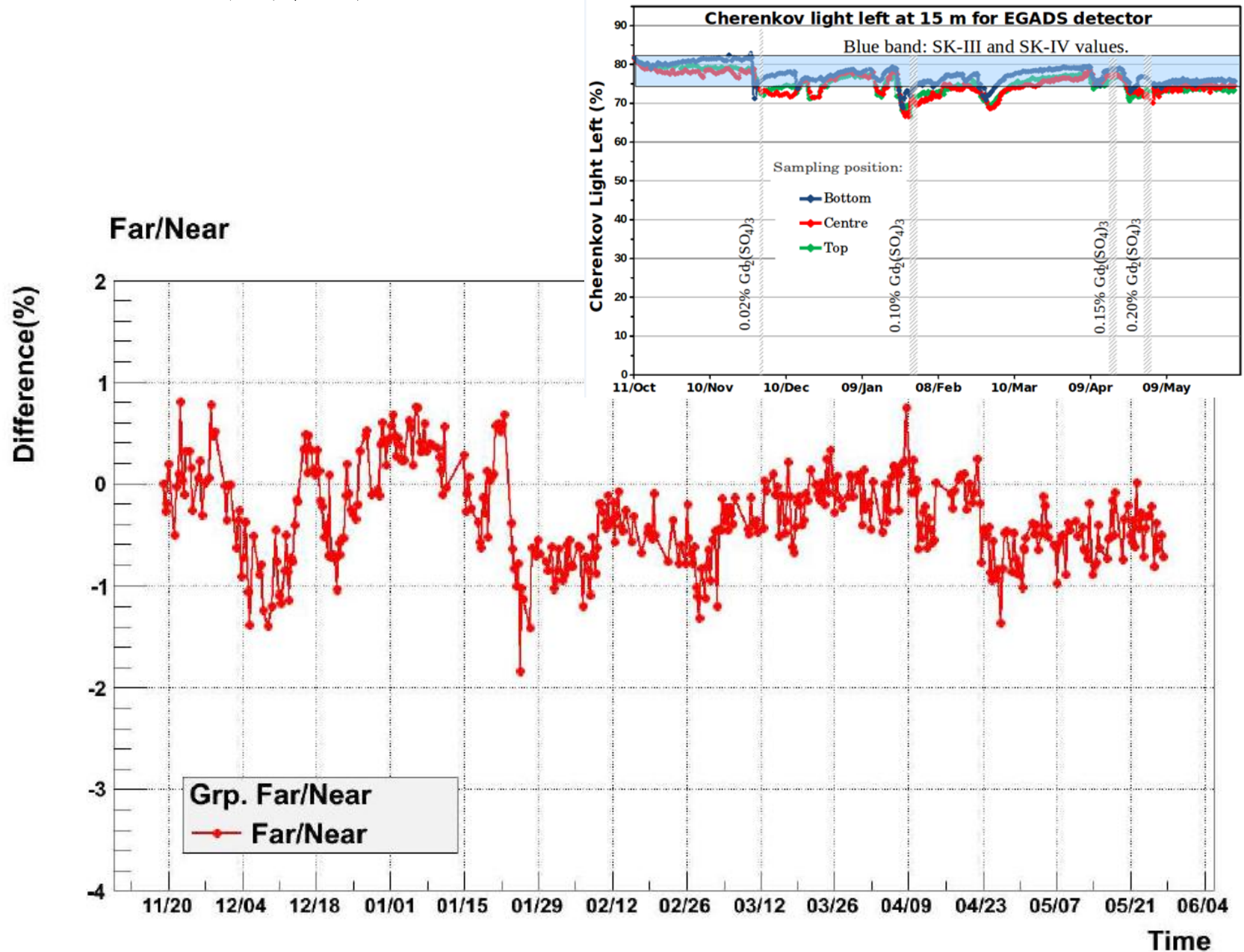
Xeのscintillator ballとLEDのdiffuser ball
を中心部から離れた場所に置き、
normal runの共にXeとLEDのballを1Hz程
度で光らせ、PMTの長期安定性を見る。

Tank外、2inch PMTとAPDでXe Lampから
の光量を監視する。

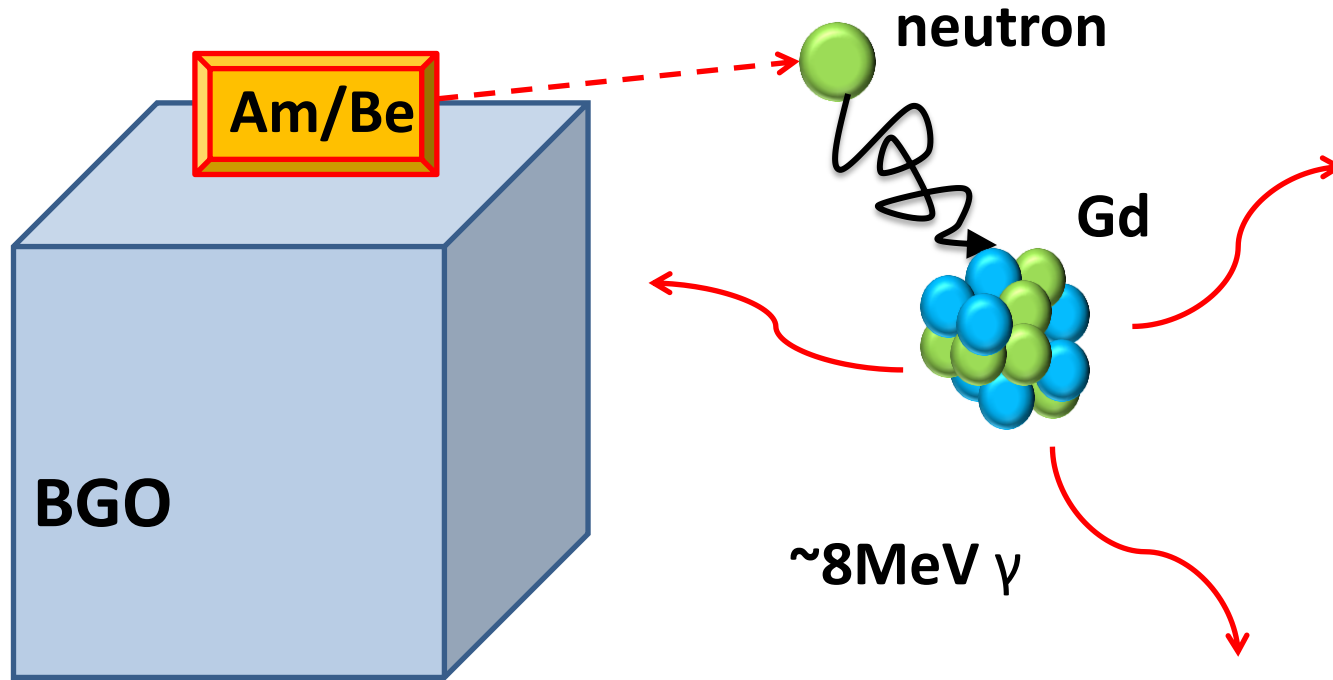


Tank Top View

PMTを利用した透過率の変動測定



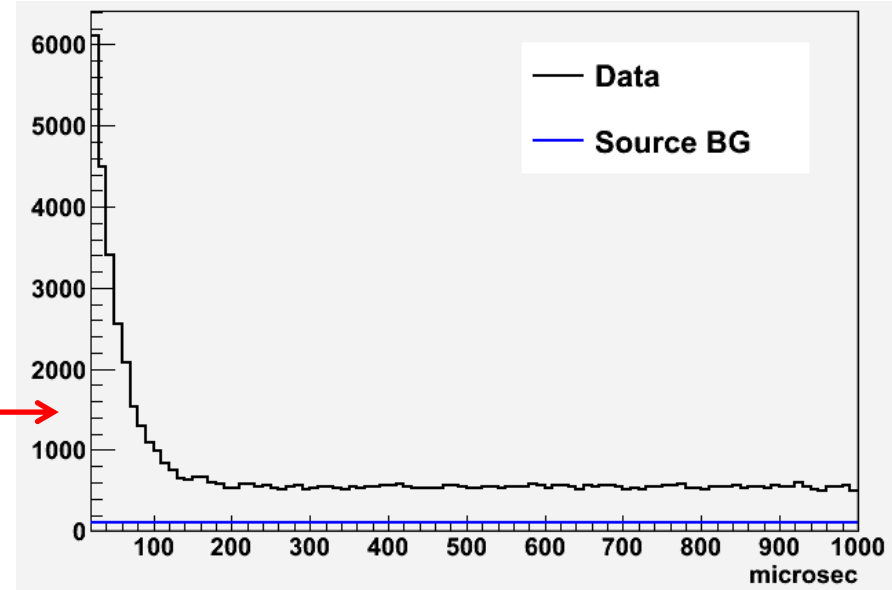
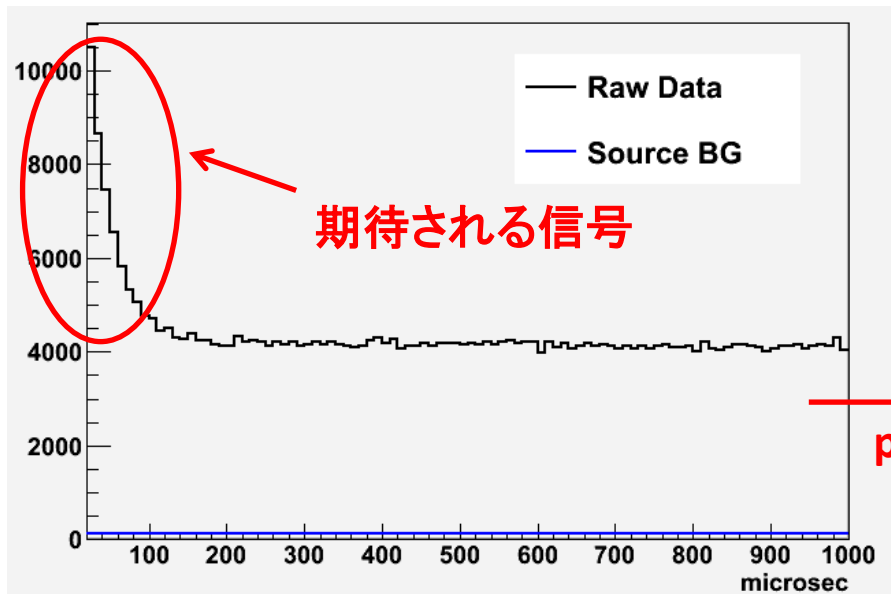
Fake prompt caused by $\text{Gd}(n,\gamma)$



If $\text{Gd}(n,\gamma)$ hit on BGO, then it will produce Scintillation light and it will become fake prompt.

Backgroundの扱い

Prompt信号とdelayed信号の時間差
(0.2%Gdの場合)



1、Precut

HitしたPMT数 > 5

$0.1 < \text{再構成精度1} < 0.4$

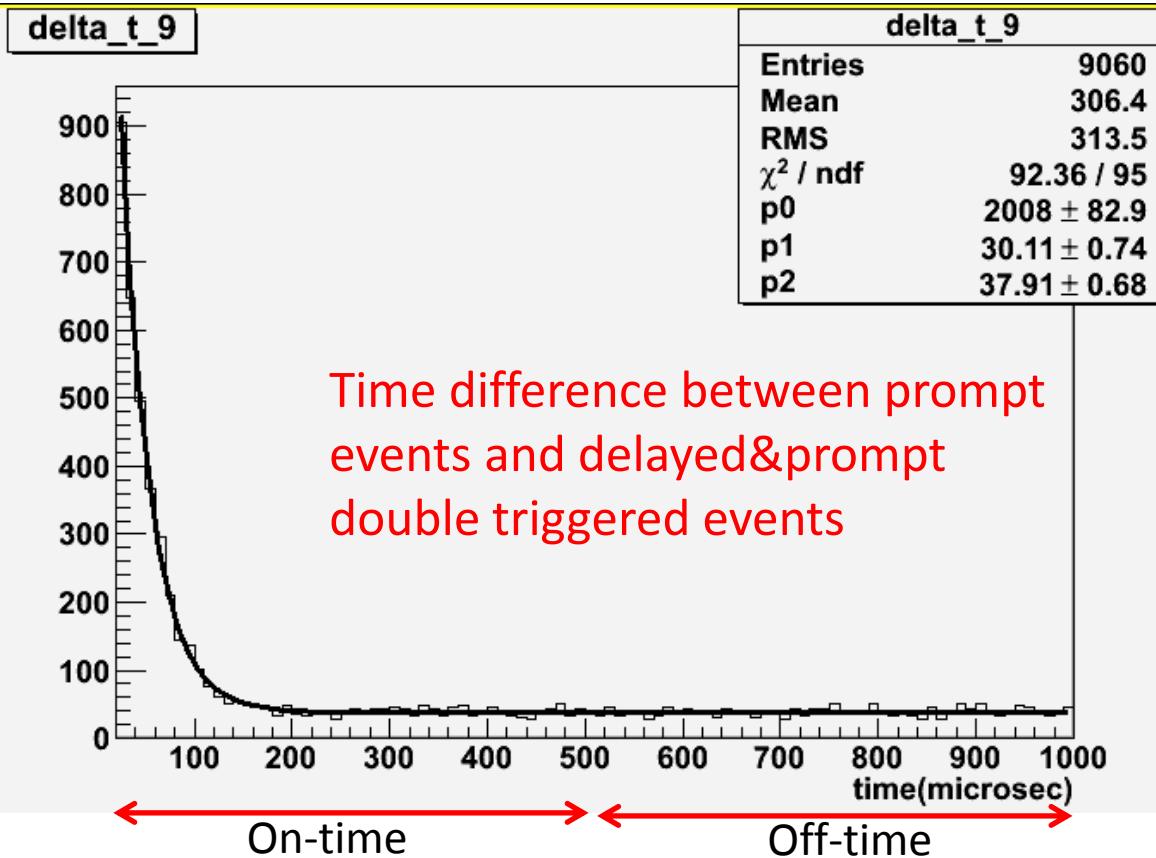
再構成精度2 > 0.4

Tank外にmis-reconstructされた事象
を除く

2、On – Off 手法

Off time(500~1000 μ sec)のイベントを
BGとして、On time(0~500 μ sec)のイ
ベントから差っ引く

Fake prompt (Delayed&Prompt double triggered)



Fitting by exponential function:

$$y = p_0 \times e^{\frac{-x}{p_1}} + p_2$$

p_1 : average capture time of neutron (μsec)

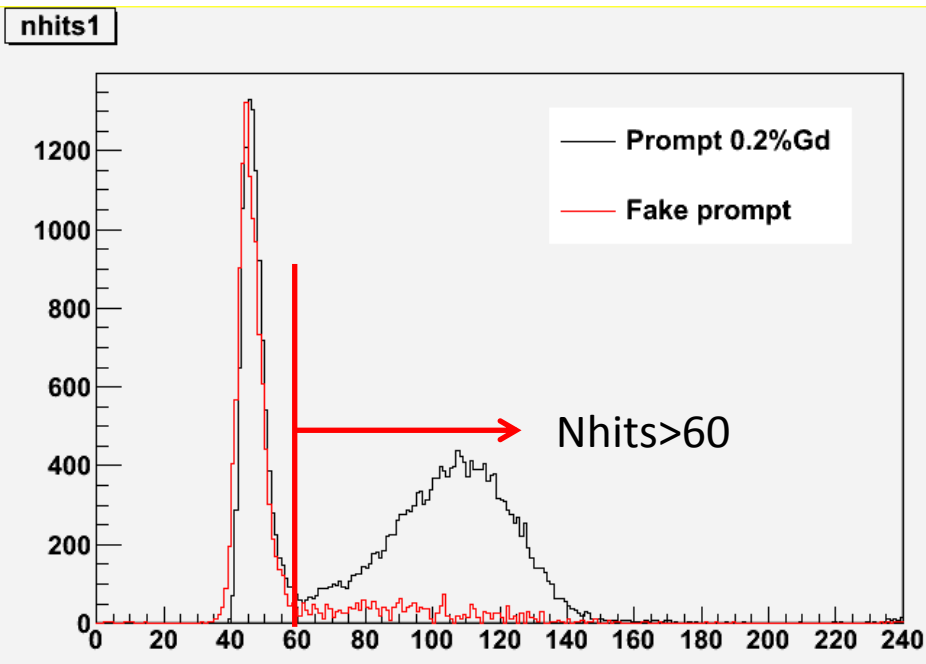
	Life Time(μs)
Fake prompt	30.11 ± 0.74
Neutron in 0.2% Gd	29.89 ± 0.33

On-time(2-500 μs) : accidental 4.4MeV Scintillation, accidental Gd(n, γ) Scintillation, Gd(n, γ) Scintillation corresponds to previous prompt event.

Off-time(502-1000 μs) : accidental 4.4MeV Scintillation, accidental Gd(n, γ) Scintillation

Subtract **off-time** from **on-time** to make distribution for Gd(n, γ) fake prompt.

Prompt selection

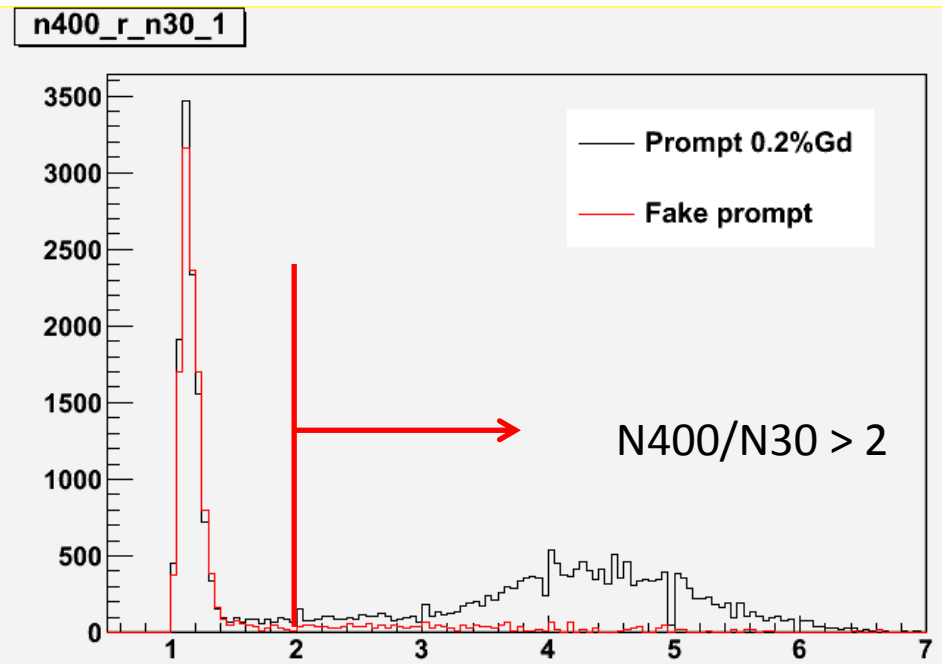


Normalized with $\text{Integral}(0,60)$

Before selection :

Prompt number : 29463

Fake prompt : 13165.7 (44.69%)



Use the same normalization factor

After selection :

Prompt number : 17421

Fake prompt : 1745.5 (10.02%)