

スーパーカミオカンデにおける ミュオン崩壊電子を用いた エネルギー較正

2025/2/18

第31回ICEPPシンポジウム

東京大学M1 正木結太

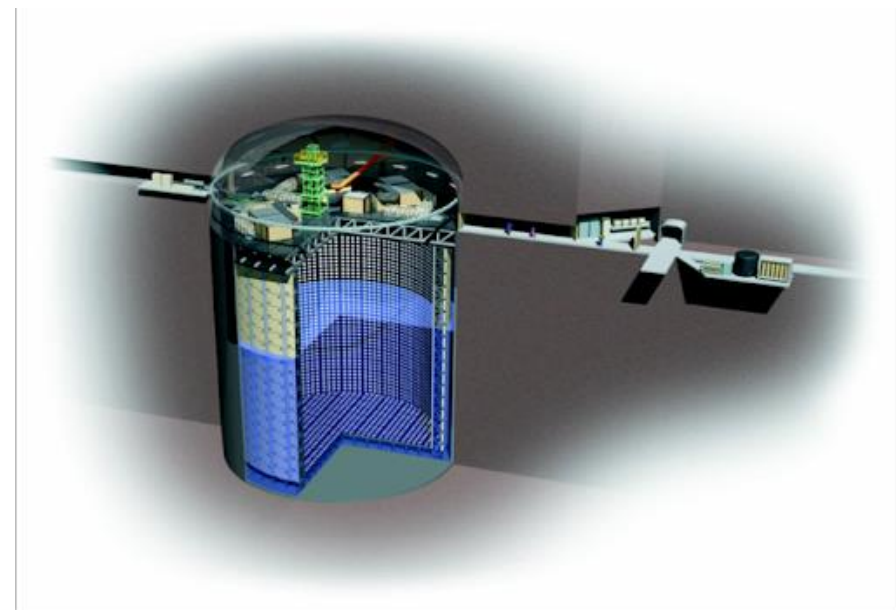
概要

- Introduction
 - スーパーカミオカンデ
 - ミューオン崩壊電子(Decay-e)
 - コイルの故障
- 水透過率の計算
- Decay-eのエネルギー

スーパーカミオカンデ (SK)

- 神岡地下にある大型水チェレンコフ検出器

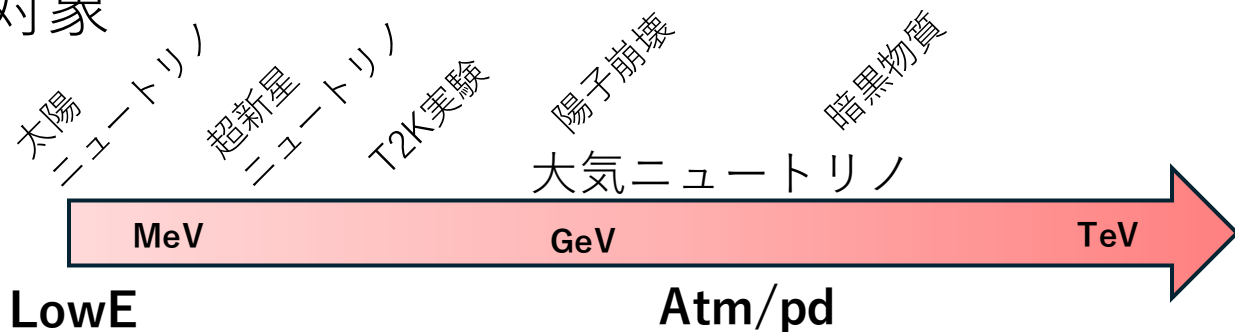
- 直径39.3m, 高さ41.4m
- 20インチ光電子増倍管(PMT) 約11000個
- 内水槽と外水槽で構成



- 検出

- 荷電粒子の放射するチェレンコフ光をPMTで捉える
- 時間、位置、信号の大きさ

- 研究対象

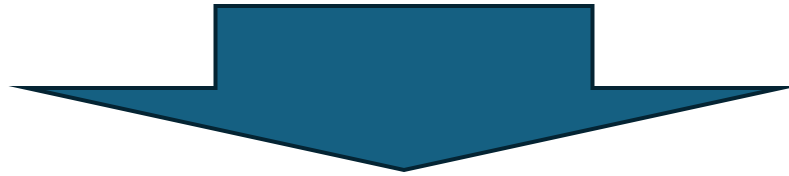


SK-V	SK-VI	SK-VII	SK-VII coil off
2019/1	2020/7	2022/6	2023/12
2020/7	2022/5	2023/10	2024/9



低エネルギー(LowE)領域での物理

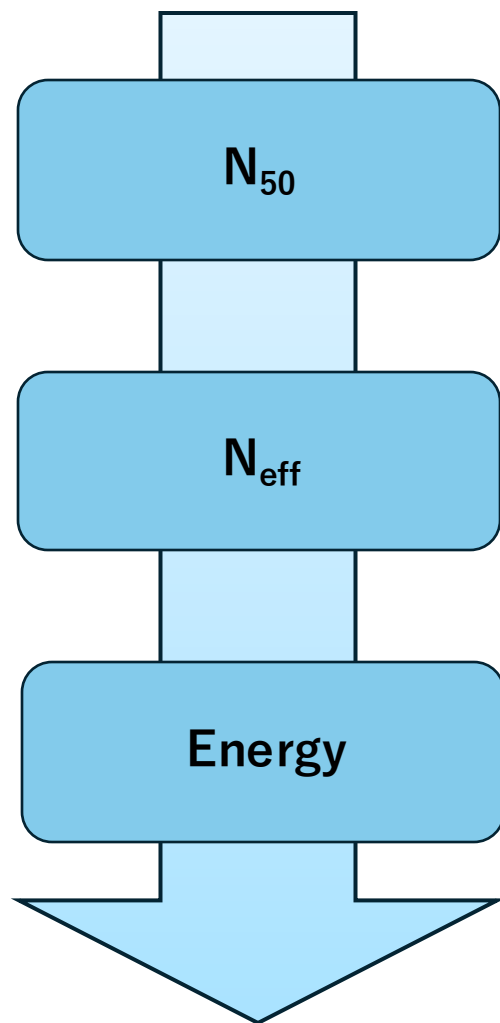
- 太陽ニュートリノ
 - 太陽内の核融合反応によって放出
 - 振動パラメータの値
 - 地球内部の物質効果の確認
 - 太陽内部の化学的組成の解明等
- 超新星背景ニュートリノ
 - 超新星爆発によって放出(未発見)
 - 観測と理論のエネルギースペクトルを比較



ニュートリノの正確なエネルギー測定が必要

検出器のエネルギー較正が重要

低エネルギー領域(LowE)でのエネルギー再構成



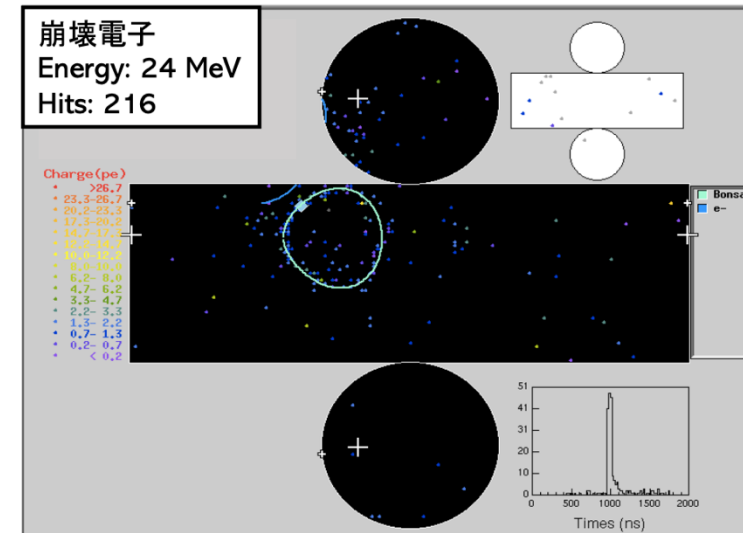
- N_{50} : 50ns以内のPMTヒット本数
 - LowEではチェレンコフ光が少なく、PMT1つ当たり1光子程度の入射

- N_{eff} : PMTの有効ヒット数

$$N_{eff} = \sum_i^{N_{50}} (X_i + \epsilon_{tail} - \epsilon_{dark}) / (1 + gain_i \times C_{gain}) \times \frac{N_{alive}}{N_{all}} \times \frac{S(0,0)}{S(\theta_i, \phi_i)} \times \frac{1}{QE_i} / \exp\left(-\frac{r_i}{\text{water}T}\right)$$

水透過長

- Energy : 荷電粒子の合計エネルギー
 - N_{eff} の関数として算出
 - 電子を用いたMCによって決定



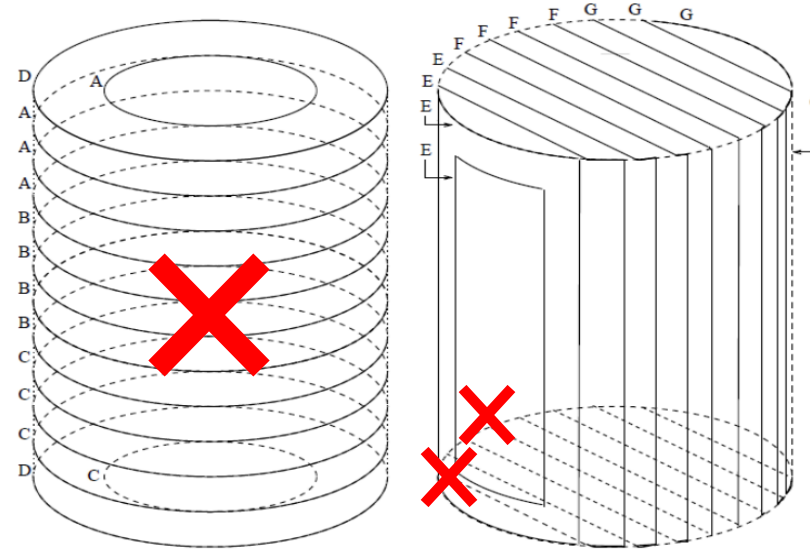
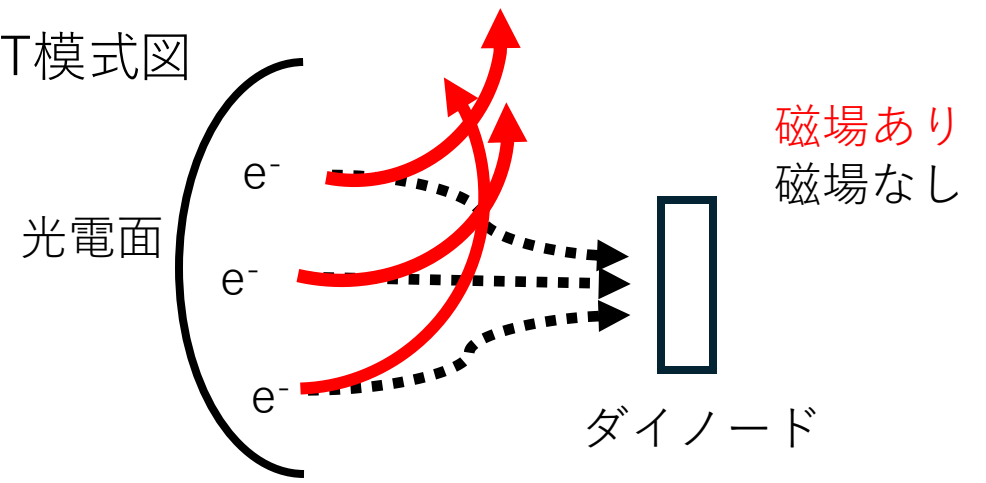
コイル

PMTは磁場に弱い

→地磁気をキャンセルするためにコイル

- 2023年12月、コイルが故障
- 2024年9月には修復完了

PMT模式図



コイル故障箇所

コイル故障の影響

- コイルが故障中のデータも解析に使いたい
 - T2Kのビームタイムも含まれている

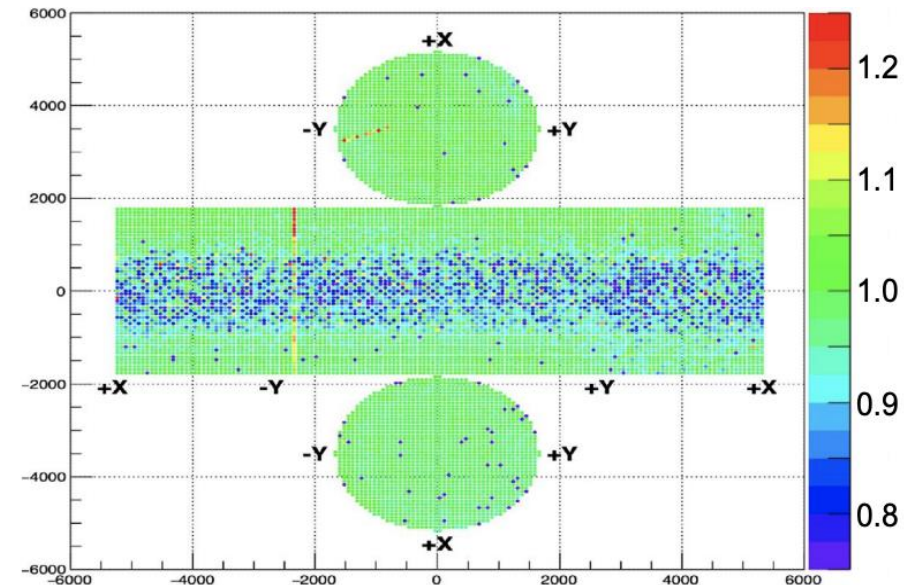
一方...

- 較正用データが十分でない
- 条件が通常時と異なる

- 新たな較正手段 --- 宇宙線由来の事象、線源

- エネルギー再構成の確認 ミューオン崩壊電子、核破砕、核捕獲など

2024/5時点での光電子収集効率の比



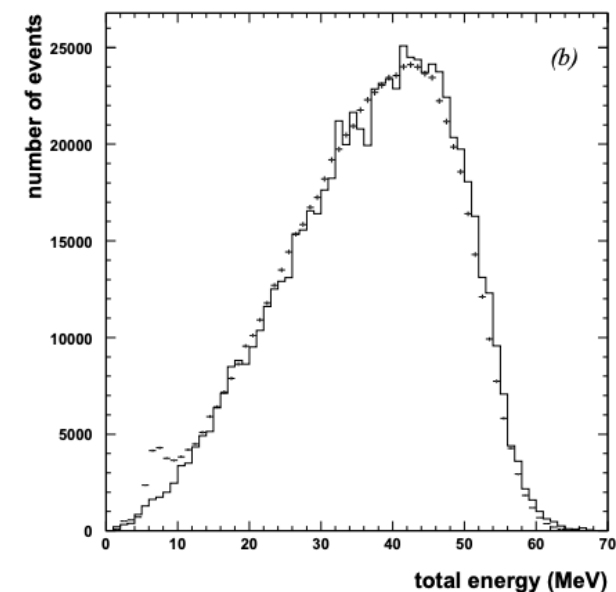
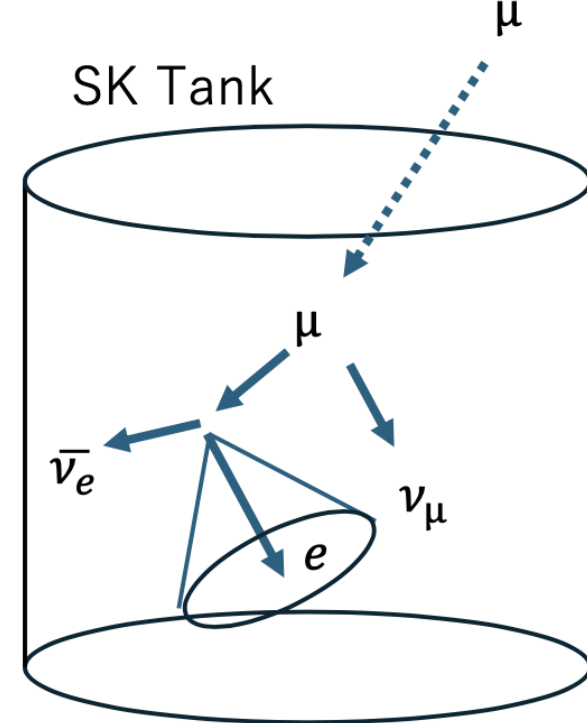
ミューオン崩壊電子 (Decay-e)

- 宇宙線ミューオンがタンク内で静止、電子に崩壊
 - ミューオンの選別
 - 宇宙線かどうか？タンク内で止まったか？
 - 電子の選別
 - 遅延事象の発生点は近いか？時間差は？
 - バックグラウンドの特徴と異なるか？

エネルギースペクトルが既知

データ数が豊富 (約2000event/day)

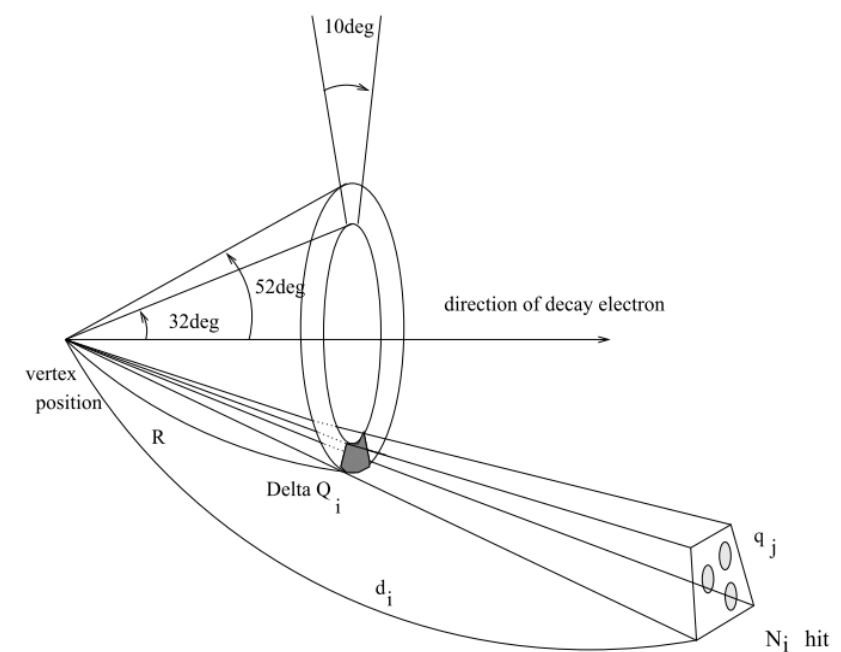
→ **エネルギーなどの較正に用いることができる**



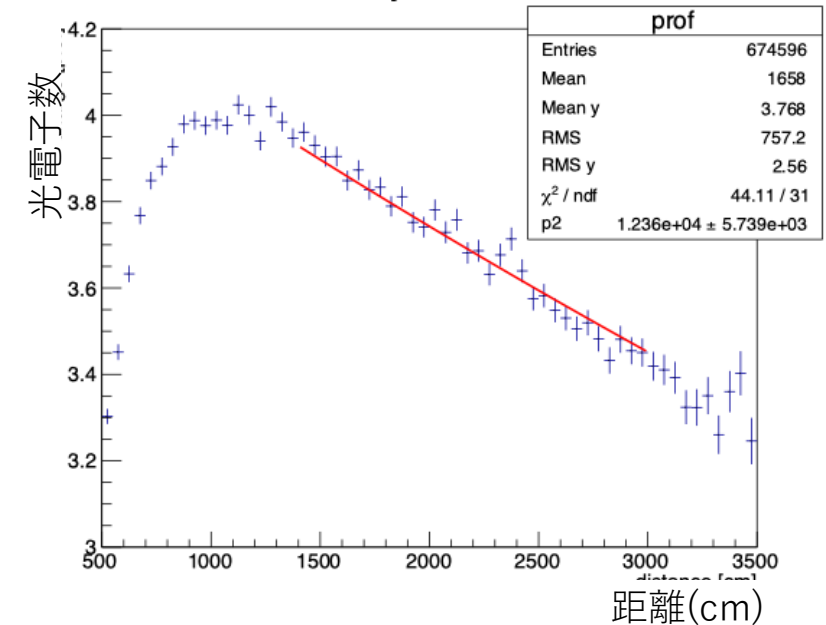
水透過長の計算方法

- ① Decay-e事象再構成
- ② 崩壊から50nsec以内に放出された光子がヒットしたPMTを選ぶ
- ③ 電子進行方向の特定の角度範囲を36分割
- ④ ゲインを補正して電荷を計算、領域ごとに合計
- ⑤ 頂点との距離を計算
- ⑥ 電荷の値を1日分のイベントで平均化
- ⑦ $f(x) = A \exp(-x/\lambda)$ を仮定してフィッティング
 λ : 水透過長, A : y切片, SK7まで4.40に固定

コイル故障期間で水透過長はどう変化しているのか？



1イベント当たりの距離 vs 光電子数



y切片 (A) について

$f(x) = A \exp(-x/\lambda)$ において

Aの値を自由にしてフィッティング

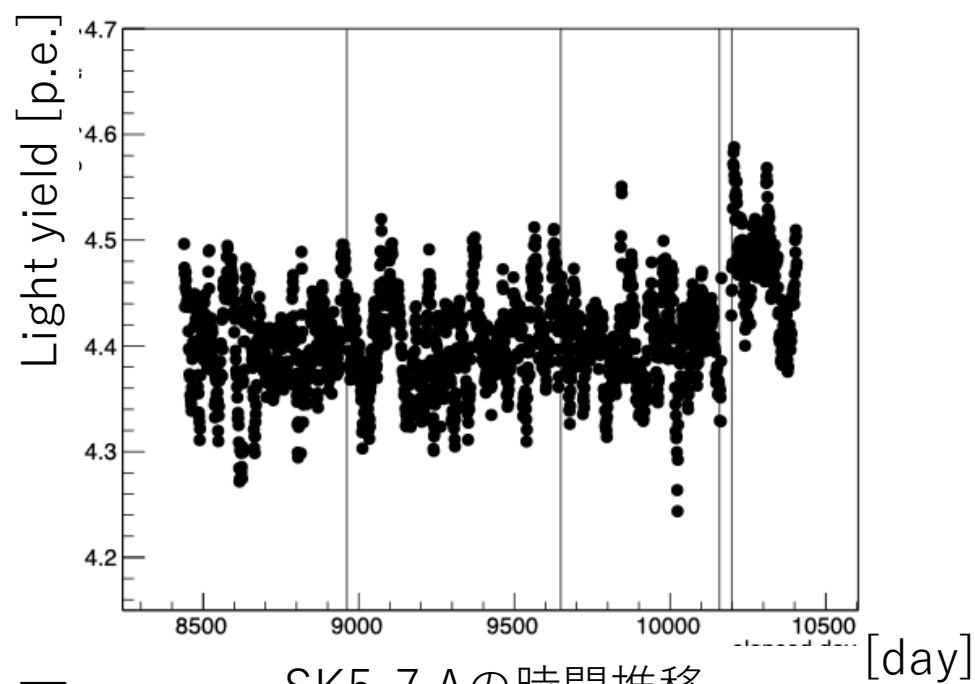
コイル故障期間は他の期間と比べて

Aの値が大きい傾向

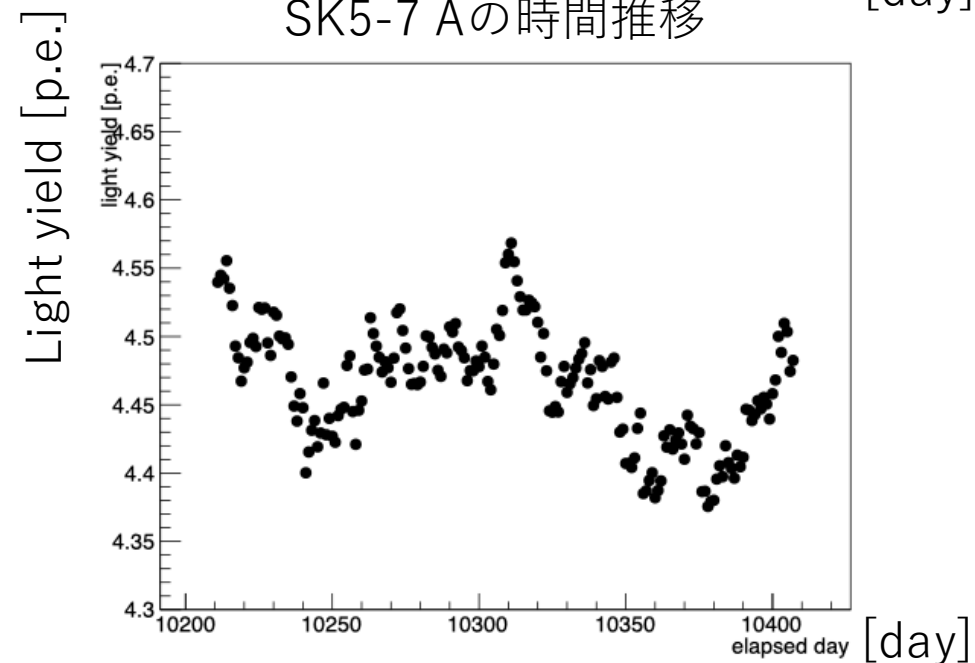


故障期間中のAの平均値を計算

新たなAの値とした ($A = 4.47$)



SK5-7 Aの時間推移



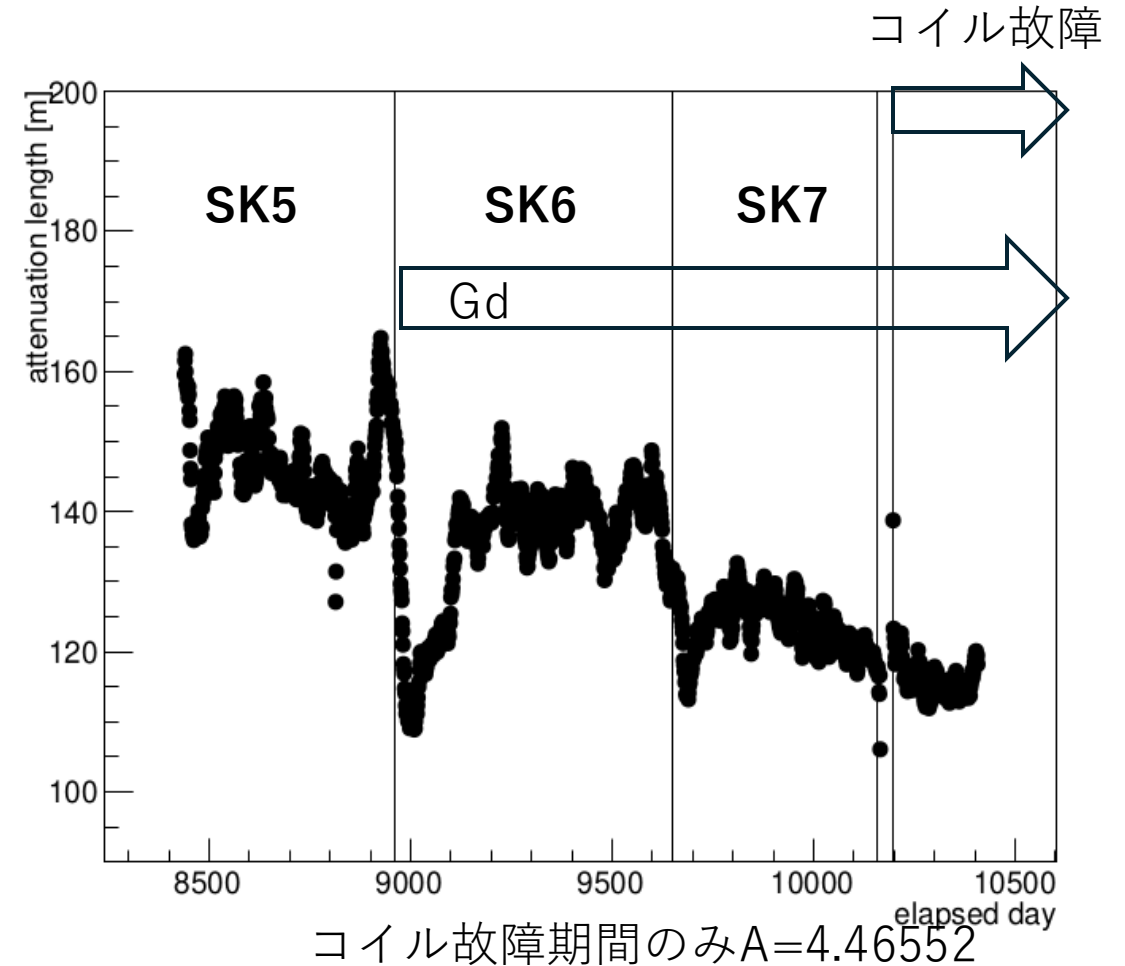
コイル故障期間 Aの時間推移

新しいy切片の適用

- コイル故障前後で滑らかに接続
- 故障期間中で安定している



A=4.47で計算した水透過長の値を
新しい較正用パラメータとして採用

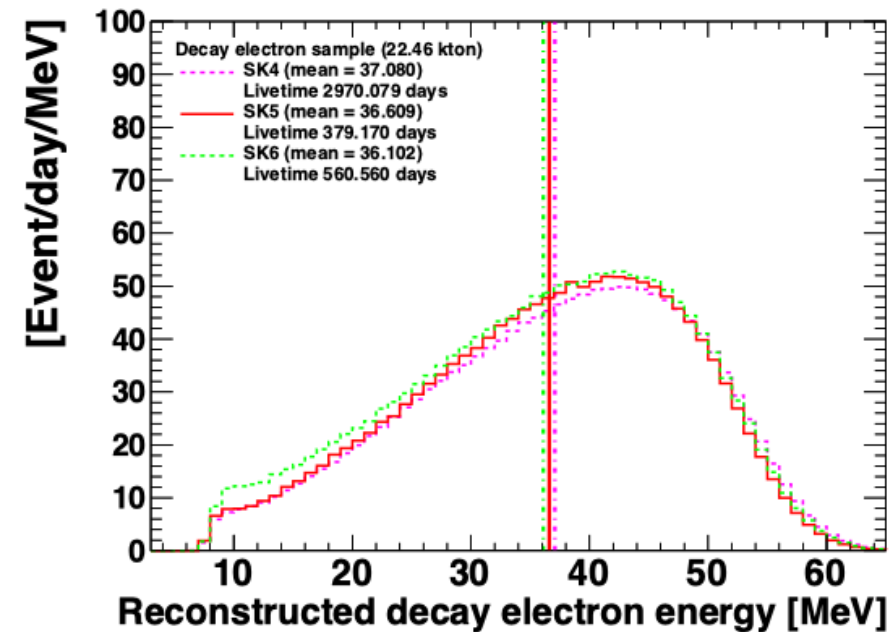


- コイル故障期間も新しい補正によって水透過長は上手く計算できていそう
→故障期間のデータも解析に用いることができるようになる

今後のDecay-eを用いた調査

- 各期間で比較
 - Decay-eのエネルギースペクトル
 - Decay-eエネルギーにおける時間変動
 - PMT Hit数
- コイル故障期間で以前からどのように変化したか？
 - 変動している→較正やエネルギー再構成で修正
 - 変動していない→現在の較正等がうまくいっている

現在調査中



まとめ・今後の展望

- SK7一部の期間でコイルが故障
 - 較正用データが少ない
 - 条件が変化してしまっている
- コイル故障期間における水透過長を計算
 - 安定しており、SK7から大きく変わっていない
 - y切片については新たな値を設定

展望

- Decay-eを利用したエネルギー較正、エネルギー再構成の評価

Back Up

スーパーカミオカンデ

SK-I	SK-II	SK-III	SK-IV	SK-V	SK-VI	SK-VII	SK-VII coil off
1996/4	2002/10	2006/7	2008/9	2019/1	2020/7	2022/6	2023/12
2001/7	2005/10	2008/9	2018/6	2020/7	2022/5	2023/10	2024/9

PMT破損

データシステム
一新

Gd導入に向けた
改修

Gd導入

低エネルギー一較正の詳細

$$N_{eff} = \sum_i^{N_{50}} (X_i + \epsilon_{tail} - \epsilon_{dark}) / (1 + gain_i \times C_{gain}) \times \frac{N_{alive}}{N_{all}} \times \frac{S(0,0)}{S(\theta_i, \phi_i)} \times \frac{1}{QE_i} / \exp\left(-\frac{r_i}{waterT}\right)$$

複数PMT hit
ゲインの補正
幾何効率
PMTまでの距離/水透過率

遅延信号 ダークレート
生存PMT
量子効率

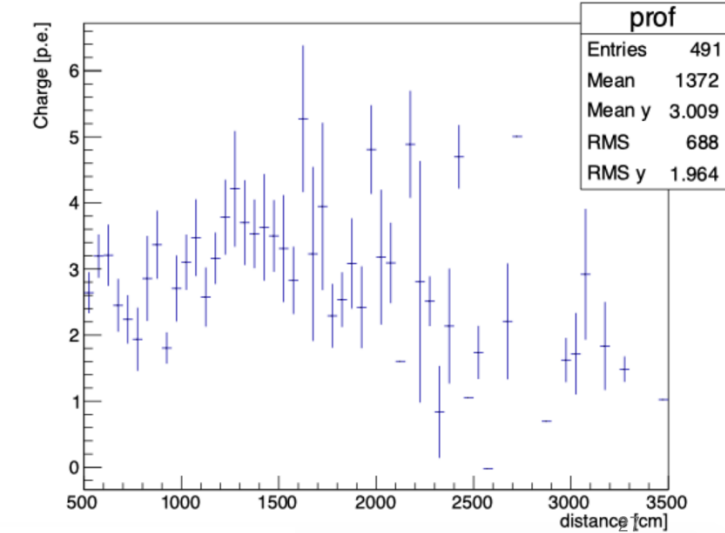
エネルギー再構成関数, $x = N_{eff}$

$$enelf(x) = \begin{cases} p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + p_4x^4 + p_5x^5 & (E < p_6) \\ p_0 + p_1x_j + p_2x_j^2 + p_3x_j^3 + p_4x_j^4 + p_5x_j^5 + (p_1 + p_2x_j + p_3x_j^2 + p_4x_j^3 + p_5x_j^4)(x - x_j) & (E > p_6) \end{cases}$$

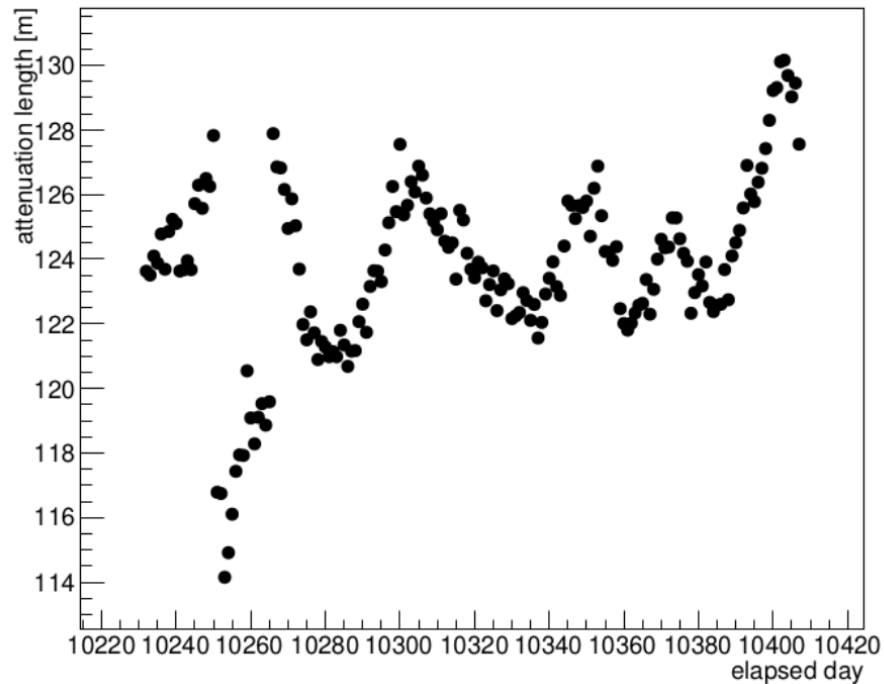
Bad Run

- 不具合等で正しくデータが取れていないRun
- 計算の際は除外しなければならない

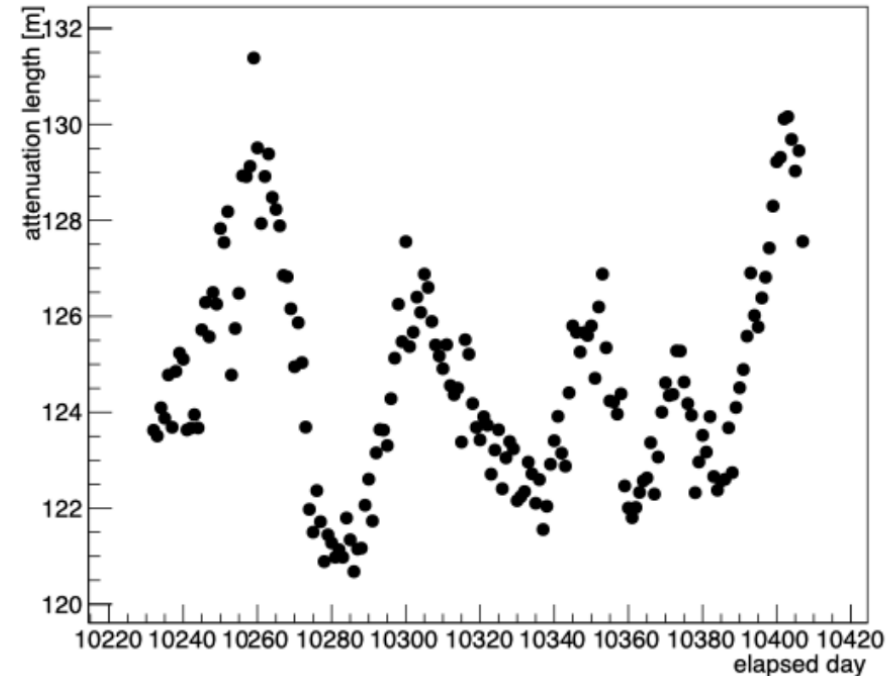
Bad Run Run: 93403



all run



excluding all the bad runs

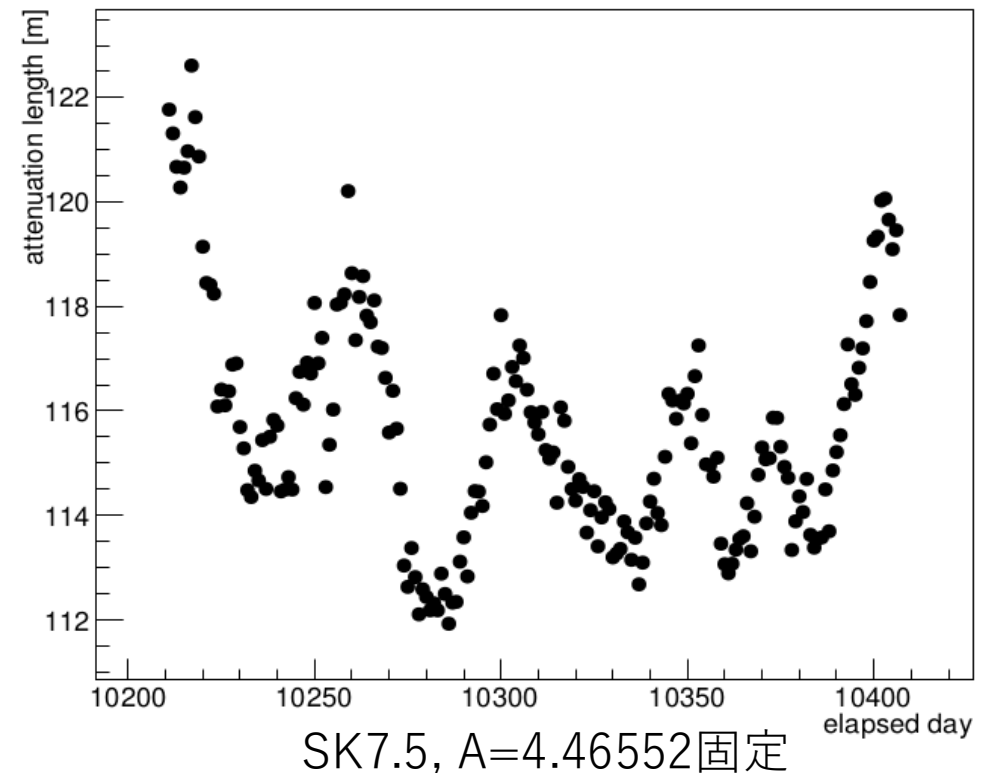
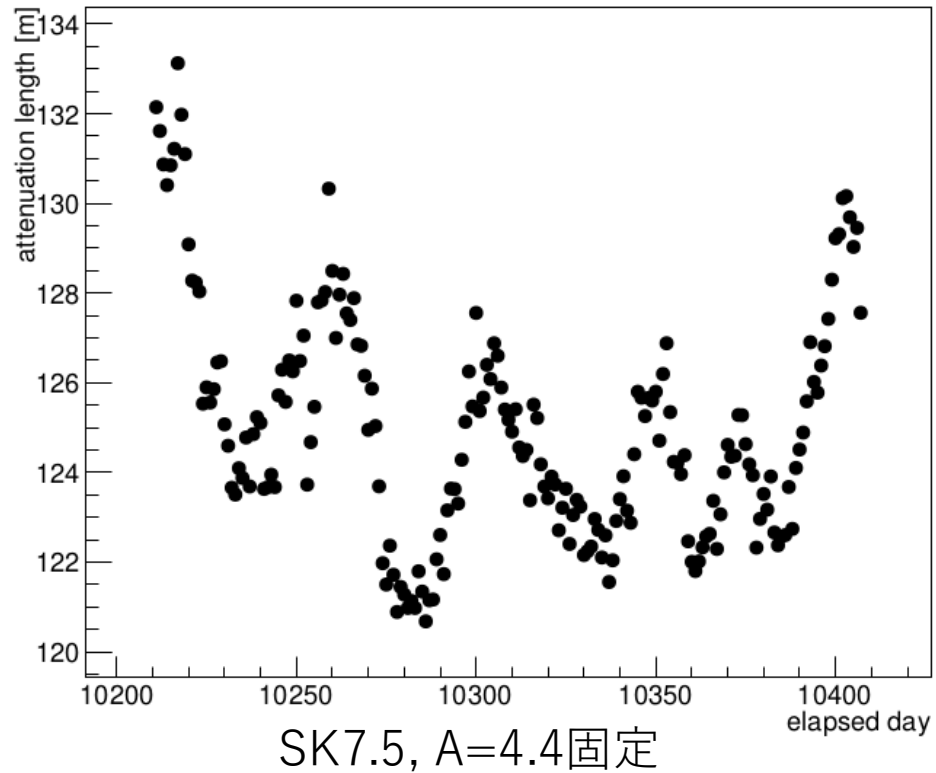


Bad Run List

run number	理由
93357	The coils were off. The number of output/input/waiting files of WIT machines are less than usual
93359	The coils were off.
93382	The coils were off.
93402	There was a trouble in crate 8 module 1 and resulted in error in several PMTs . Cleared this error but PMTs with error are off then.
93403	Some PMTs remained off.
93424	HV was off only for slot-2
93431	WIT probably also didn't receive data during this run

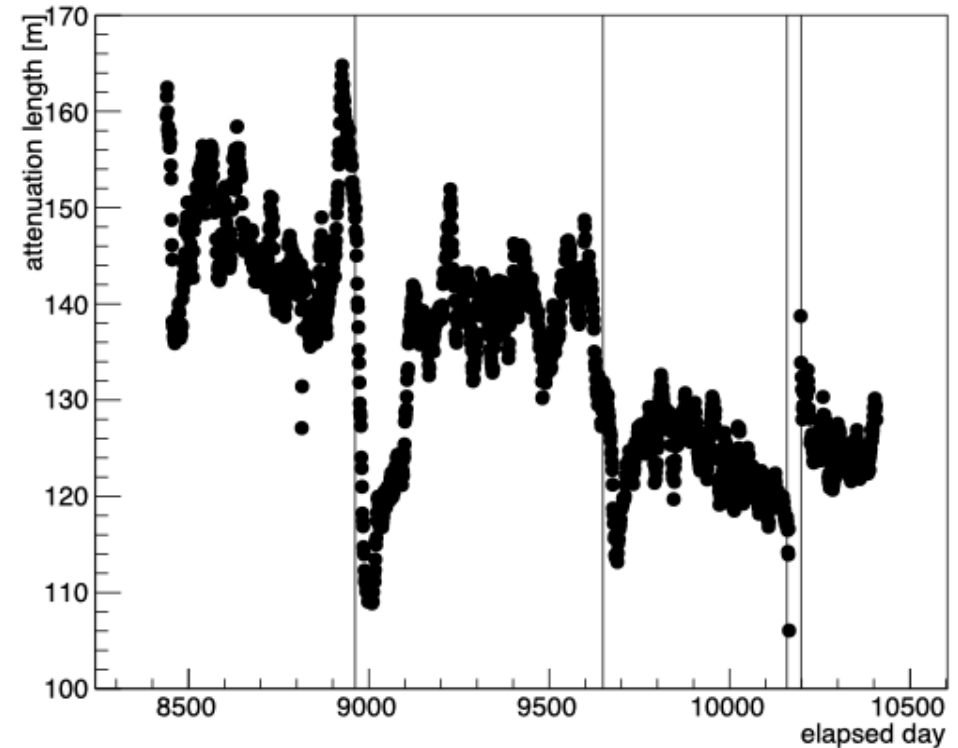
SK7.5 新たなy切片の適用

- SK7.5における二つを比較：変動幅が縮小している



新たなy切片を適用しなかった場合

- 全期間で4.4に固定した状態



全期A=4.4