Super-Kamiokande検出器における低エネルギー事象のエネルギースケール評価

2018年3月22日(木)

日本物理学会 第73回年次大会

@東京理科大 野田キャンパス

東大宇宙線研, 神戸大理[A], 清華大[B]

中野 佑樹, 長谷川誠[A], 中島康博, Linyan Wan[B]

他 Super-Kamiokande Collaboration

科研費 KAKENHI

若手研究 (B) 17K17880, 研究代表者: 中野 佑樹

「太陽ニュートリノの観測時刻情報を用いた太陽g-mode振動の探索」

内容

- 本研究の背景
- 低エネルギー領域における検出器の応答

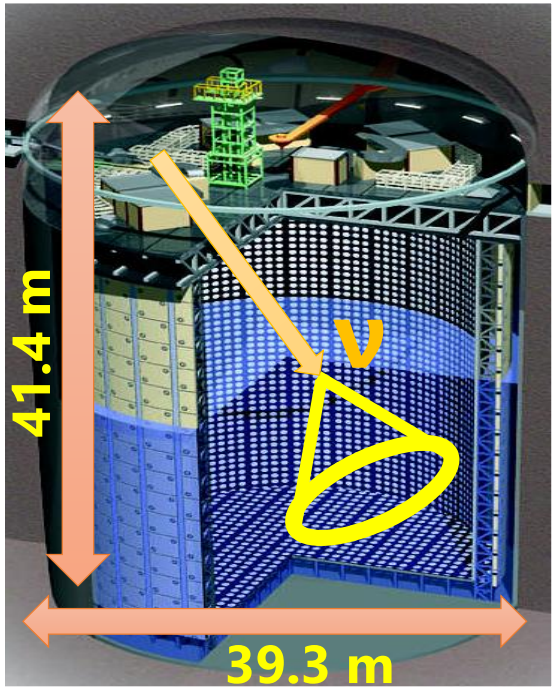
  - 有効Hit数の定義
  - 1 p.e.分布の理解, PMT gainに関して
  - PMT gain変動による影響
- 本研究による改良
- まとめと今後

本研究の背景 (1)

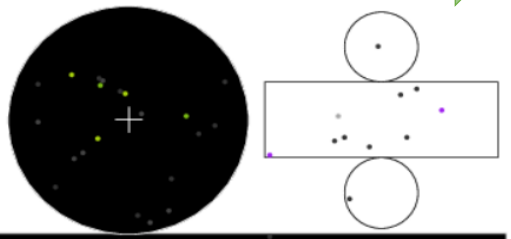
■ Super-Kamiokande

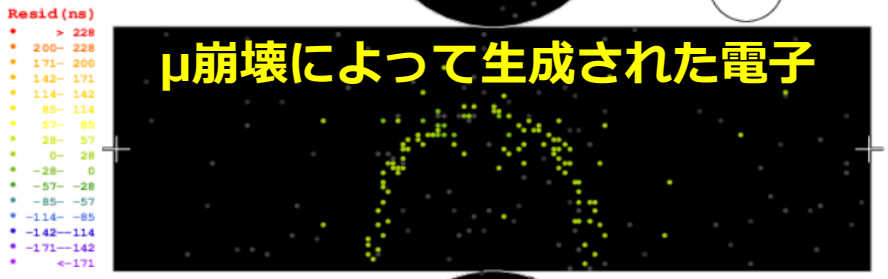
- SK検出器: 広いエネルギー領域に観測対象(物理ターゲット).
- 低エネルギー事象: 太陽ニュートリノ, 超新星ニュートリノ.

太陽ニュートリノ 3.5-19.5 MeV → 超新星ニュートリノ 20~100 MeV → 大気ニュートリノ, 陽子崩壊 ~100 MeV GeV TeV PeV

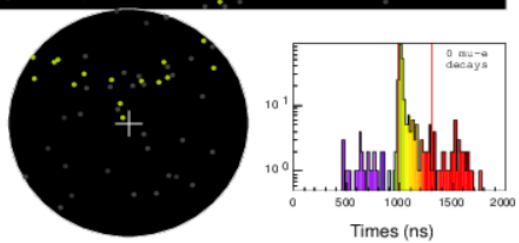


典型的な事象
~30 MeV
220~250 hits





色: Timing



本研究の背景 (2)

■ 今後目指してゆく物理

Sov. J. Nucl. Phys. 42, 913 (1985).
Phys. Rev. D 17, 2369 (1978).

- 太陽ニュートリノの物質効果 (MSW効果).
- 太陽活動と相関のあるニュートリノの周期的な変動の探索.

  → 太陽g-mode振動, 太陽表面の黒点数 (右巻ニュートリノ).
- 超新星爆発由来のニュートリノ (バースト, 背景).

■ 物理を達成するために必要なこと

- 観測事象の再構成の精度 (反応位置, 方向, エネルギー).
- バックグラウンドの理解.
- 上記の項目の安定性の理解.

本研究では, 検出器の応答, 特にエネルギースケールの評価を行った.

低エネルギー領域における検出器の応答

■ 低エネルギー事象の特徴 (100 MeV以下)

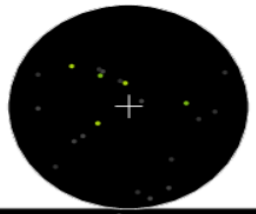
- SKのPMT(11,129本)の内, **5%未満**しか検出しない程度の光量.

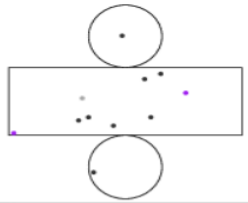
→ 検出器の**光電面**: ~40%, PMTの**量子効率**: ~20%.

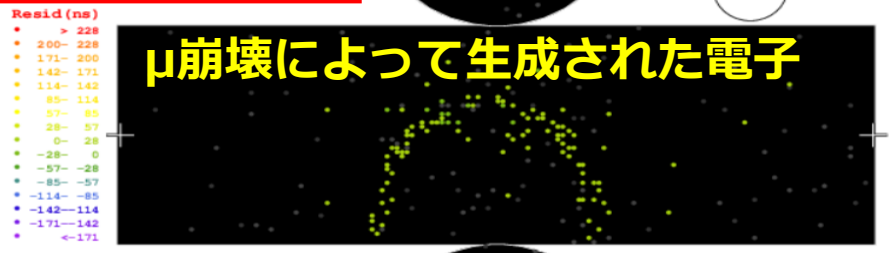
→ 太陽ニュートリノ(^{8}B): **100本未満**.

- 1本のPMTに対して, **1光電子の検出**.

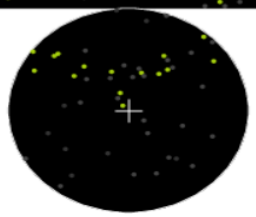
典型的な事象
~30 MeV
220~250 hits

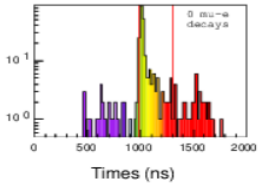






色: Timing





■ エネルギースケールの評価

- エネルギーはヒット数に比例.

- **PMTの1 p.e.分布の理解**.

→ ここを調べる必要がある.

SKにおける有効Hit数の定義

■ 有効ヒット数 Phys. Rev. D 83, 052010 (2011).

- 50 nsecのtime-window中でのHit数.
- ただし, 単にHit数を数える訳ではなく, 各種補正が必要.

→ 複数の光電子(検出器の構造由来), 光電面の入射角度依存性…

Dark rate　PMT生存率　純水の透過率　量子効率

$$N_{\mathrm{eff}} = \sum_{i}^{N_{\mathrm{hit}}} \left[\left(X_i + \varepsilon_{\mathrm{tail}} - \varepsilon_{\mathrm{dark}} \right) \times \frac{N_{\mathrm{all}}}{N_{\mathrm{alive}}} \times \frac{1.0}{S(\theta_i, \phi_i)} \times \exp\left(\frac{r_i}{\lambda_{\mathrm{eff}}} \right) \times \frac{1}{QE_i(t)} \right]$$

散乱, 反射で遅れてくる分

Hitとして数えられる部分　各種補正

PMTの1 p.e.分布

■ 1 p.e.分布の決定 Nucl. Instrum. Meth. A 737, 253 (2014).

-Ni-Cf calibration sourceを用い, 検出器全体で平均 (SK-III).

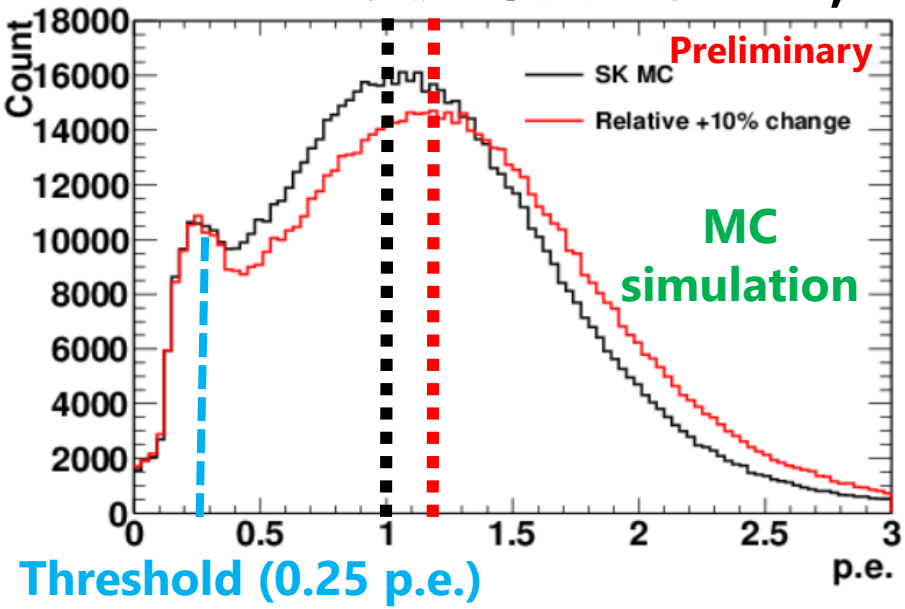
→ SKで利用されているMC simulationに導入.

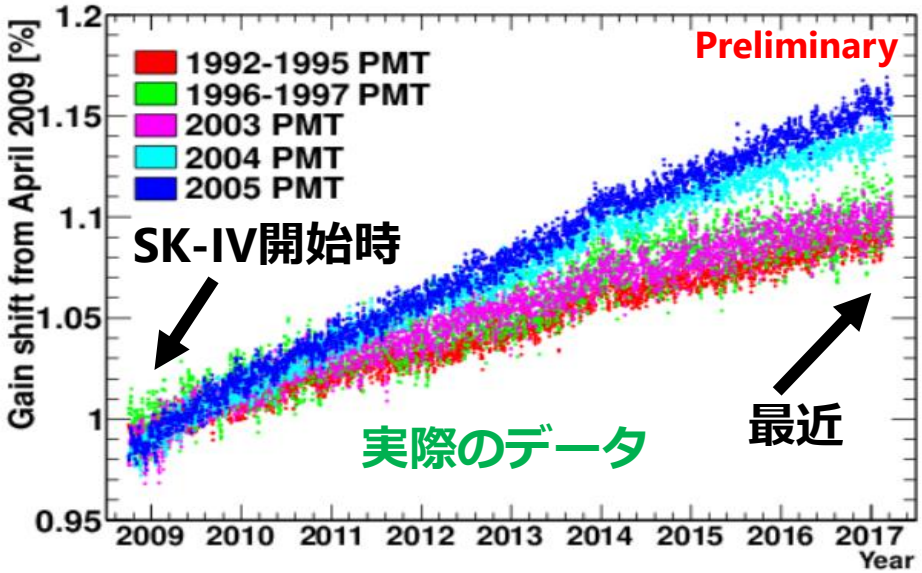
■ 現実のデータ

- Off-timingでのDark rateから1 p.e.をモニター.

→ 年度とともに, ピークの位置がシフト (相対的なGain変動).

→ PMTの製造年度によって, Gainの変化率が異なる (年~2%).



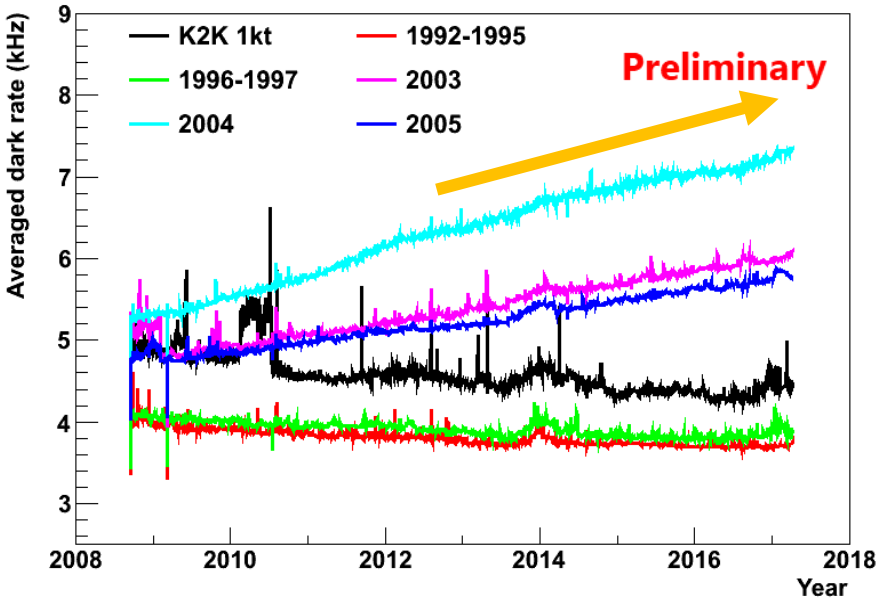


PMT gain変動による影響

■ Dark rateの増加

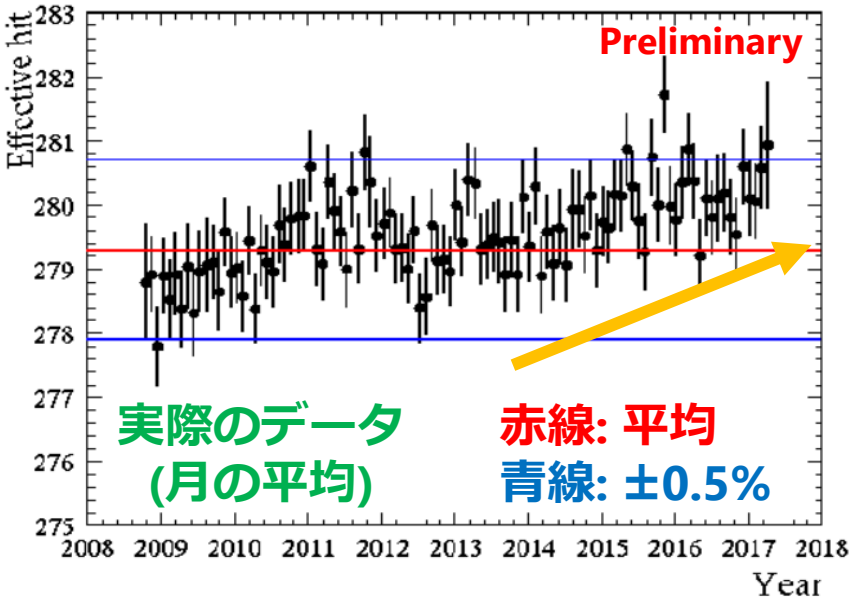
- 前ページ, 1 p.e.分布の内 thresholdを超える割合が増加.
- Dark rateが経年増加?

→ 有効Hit数を計算するときに, 意図せず加算されてしまう?



■ 観測データへの影響

- 宇宙線μ由来の電子.
  → エネルギースケールのモニター.
- 普段±0.5%未満のふらつき.
- 最近だけ見ると, 増加している?



PMT gain/Dark rateの補正

■ 有効ヒット数の計算手法の改良

- PMT 1本1本に対して, Gain補正, Dark rateを考慮.

$$N_{\mathrm{eff}} = \sum_{i}^{N_{\mathrm{hit}}} \left[\left(X_i + \varepsilon_{\mathrm{tail}} - \varepsilon_{\mathrm{dark}} \right) \times \frac{N_{\mathrm{all}}}{N_{\mathrm{alive}}} \times \frac{1.0}{S(\theta_i, \phi_i)} \times \exp\left(\frac{r_i}{\lambda_{\mathrm{eff}}} \right) \times \frac{1}{QE_i(t)} \right]$$

- X_i: (これまで) 各PMTが均一だとして, 算出.

  →各PMTのGainを考慮 (相対的なGain変動).

- $\varepsilon_{\mathrm{dark}}$: (これまで) 検出器の全PMTを平均したDark rate.

  → 実際にHitしたPMT1本1本に対するDark rate.

- 透過率: PMT gainの増加と透過率の増加は区別が難しい.

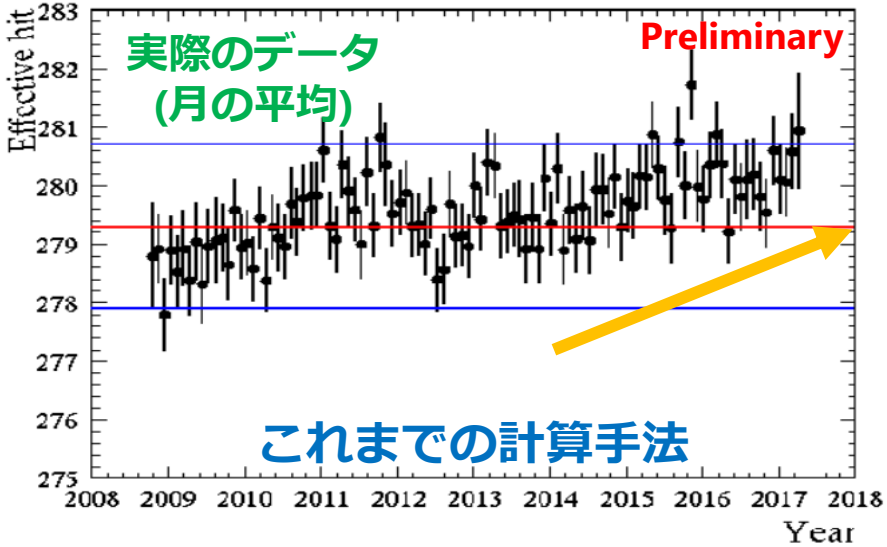
  これまでGainの増加分を全て透過率に押し付けていた.

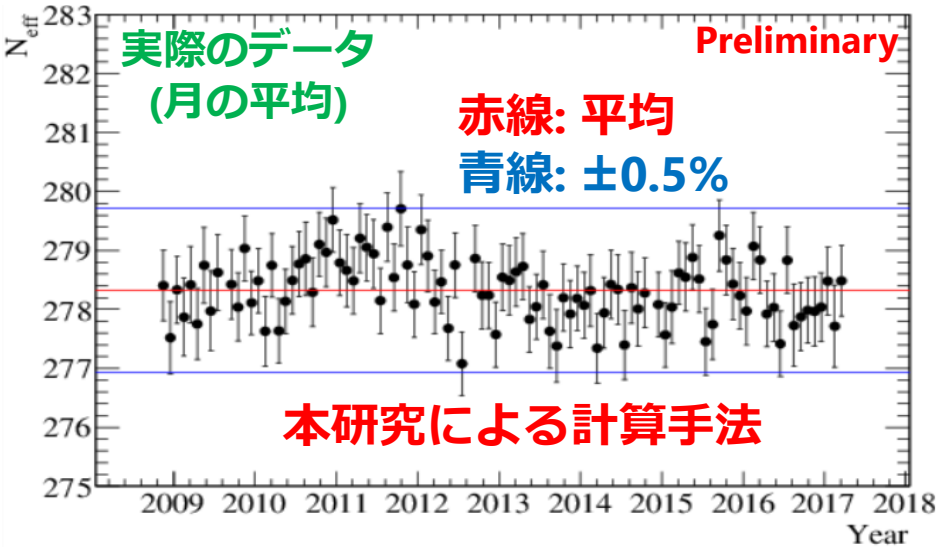
  → こちらも修正を行った (backup).

本研究による結果と今後

■ 宇宙線μ由来の電子によるエネルギースケール

- 同じデータサンプルを用い, 2種類の有効Hit数の計算手法を比較.
- 本研究により, 最近の増加傾向は改善された.





■ 今後の進展

- 今回, 観測データから有効Hit数の計算手法を改良した.
  → MC simulationに導入, 及び観測データとの比較を進めている.
- 他のCalibration sourceを用い, エネルギースケール評価を進める.

まとめと今後

- SK検出器における低エネルギー領域の物理に関して,
  高いエネルギー精度と安定性が要求される.
- 低エネルギー領域では, PMTが1光電子を検出.
  → 1 p.e.分布の時期的な変動を調べた.
  - 相対的なGainの変動, Dark rateの増加がみられた。
  - 同時に宇宙線μ由来の電子の有効Hit数も増加していた.

- 各PMTの対して, PMT gain/Dark rateを考慮することにより,
  有効Hit数の計算手法を改良した.
- 宇宙線μ由来の電子の観測データは, 有効Hit数に改善が見られた.
- 今後は, 他Calibrationによる理解を深める.