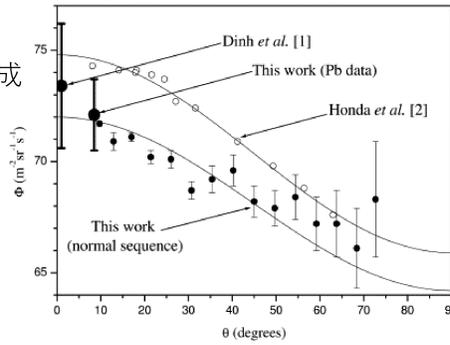


1.宇宙線ミュオンフラックスの天頂角依存性

- 宇宙線ミュオン
 - 1次宇宙線と大気中の原子核の衝突で π などの2次粒子が生成
 - π の崩壊で高度約15 kmで生成 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$
 - 寿命は約2.2 μ s
- フラックスの天頂角依存性
 - 3 GeVのミュオンの崩壊長は約20 km
 - 到来する天頂角方向によって異なる経路長
 - 天頂角 θ の増加に伴い、フラックスは減少
 - 地表では $\cos^n\theta$ の依存性を持つことが知られている[1]



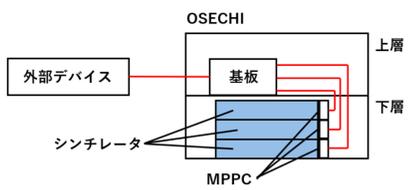
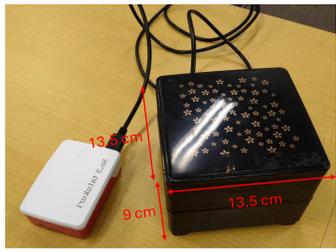
天頂角に対するミュオン強度[2]

本研究の目的

- OSECHIが稼働することを確認する
- 2台のOSECHIでコインシデンス事象が検出できるか確認する
- OSECHIを用いてミュオンフラックスの天頂角依存性 $\cos^n\theta$ の指数部分 n を決定する
- 中高生に向けた教材としての利用可能性を検討する

2.OSECHI検出器

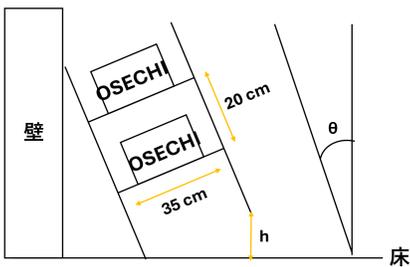
- OSECHI検出器[3]
 - 中高生に向けたアウトリーチ目的に開発
 - $13.5 \times 13.5 \times 9 \text{ cm}^3$ の小型のミュオン検出器
 - プラスチックシンチレータとMPPCでミュオンを検出



- ミュオン事象の選別条件
 - 3つのMPPCから同時にパルスを検出
 - しきい値以上のパルスを検出パルス

3.測定方法

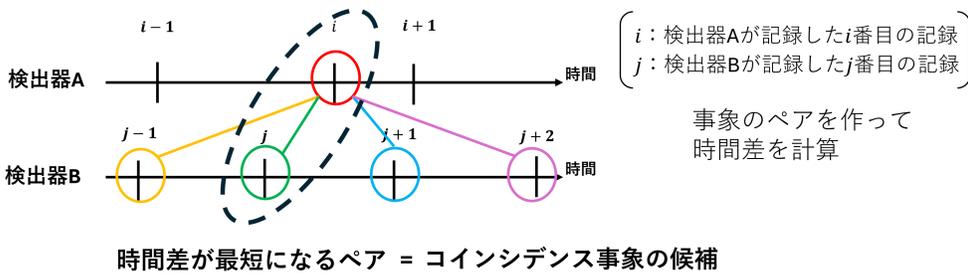
- 測定のセットアップ
 - 2台のOSECHIをアルミラック上に配置



- 2台のOSECHIで到来方向を限定
 - 2台の間隔分、観測領域の立体角を特定



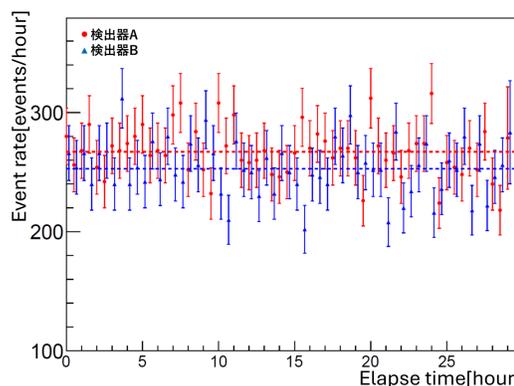
- 2台のOSECHIで検出したコインシデンス事象
 - ミュオンは2台のOSECHI間(20 cm)を数ナノ秒で通過
 - 2台が事象を検出した時間差からコインシデンス事象を選別
 - NTPで同期されたラズパイの時刻を参照 (ミリ秒オーダーの不定性がある)



4.測定の妥当性

- 1台ごとのイベントレートの確認
 - 2台で同程度のイベントレート
 - 観測時間を通して安定

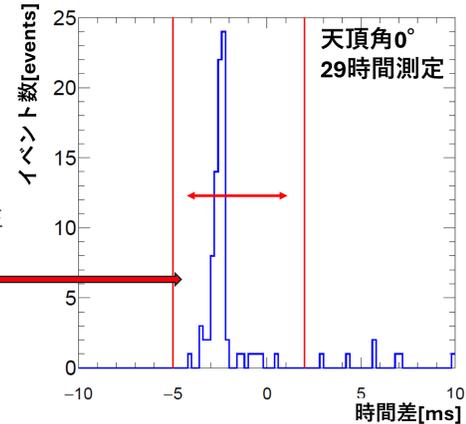
検出器A: 267.0 ± 3.0 events/hour
検出器B: 252.8 ± 2.9 events/hour



ミュオン事象を観測できているとして天頂角分布測定へ移った

5.測定結果

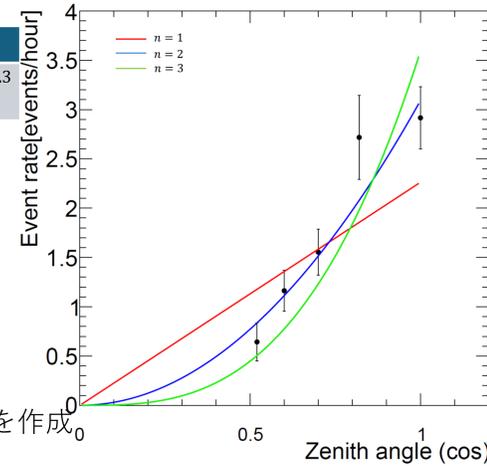
- 時間差分布
 - コインシデンス事象の候補の時間差
 - 時間差は[-5 ms, 2 ms]に集中
 - 期待される時間差ではない
 - NTPによる時刻同期精度が悪い可能性



- イベントレートの天頂角分布
 - $0^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 53^\circ, 59^\circ$ の5点で測定
 - 各点で15 ~ 30時間の測定

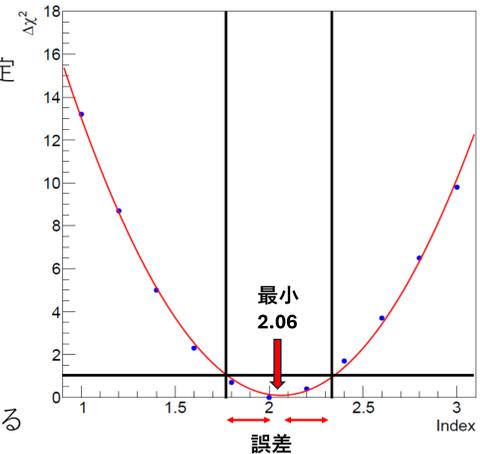
天頂角 $\cos\theta$	0.52	0.60	0.70	0.82	1.00
イベントレート [events/hour]	0.6 ± 0.2	1.2 ± 0.2	1.6 ± 0.2	2.7 ± 0.4	2.9 ± 0.3

- 鉛直方向で最大
- 天頂角の増加に伴って単調減少



- $\cos^n\theta$ でのフィット
 - n を1~3の範囲でフィット
 - 各 n について χ^2 を計算
 - $n=2$ で $\chi^2 = 3.6$
 - これを基準に $\Delta\chi^2 = \chi^2 - 3.6$ の分布を作成

- $\Delta\chi^2$ 分布
 - 二次関数でフィットし最小位置を決定
 - 天頂角依存性は $n = 2.06 \pm 0.28$
 - $\chi^2_{\min}/\text{ndf} = 3.6/4 = 0.9$
 - $\cos^n\theta$ で測定結果を説明できている



- 教材としての利用可能性
 - 測定: 1週間程度で完了
 - 作業: アルミラックを傾ける ← 簡単
 - 解釈: イベントレートの比較 ← 単純
 - 簡単な測定で物理的な結果が得られる

6.まとめと今後の展望

まとめ

OSECHIを用いてミュオンフラックスの天頂角依存性を測定した

- 2台のOSECHIで1台ごとのイベントレートを測定した
 - 1台では約260 events/hourであった
- 2台のOSECHIを用いて5つの天頂角でイベントレートを測定した
 - 2台では天頂角によって0.5 ~ 3.0 events/hourであった
 - フラックスの天頂角依存性は $n = 2.06 \pm 0.28$ と決まった
- 中高生に向けたアウトリーチの教材としての利用可能性を検討した
 - 「OSECHIを用いたミュオンフラックスの天頂角依存性測定」は、OSECHIを傾けるという作業の簡単さ、イベントレートの比較という解釈の単純さから教材に適していると考えられる

今後の展望

- 正確なコインシデンス事象の選別を行うため、GNSS受信機を導入して時刻同期の精度向上を実現する。
- 再現性・安定性のある天頂角の設定を行うため、治具を開発する。
- 系統誤差の評価を行う。

参考文献

- [1] R. J. R. Judge and W. F. Nash. Il Nuovo Cimento. 35, 4, 999 (1965)
- [2] Pham Ngoc Dinh et al. Nuclear Physics B. 661, 1-2, 3 (2003)
- [3] K. Ueno et al. PoS(EPS-HEP2025). 485, 612