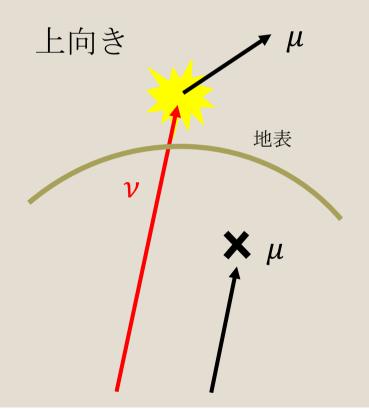


宮崎一慶 菅原滉平 三木信太郎 兼村侑希 中村妃南

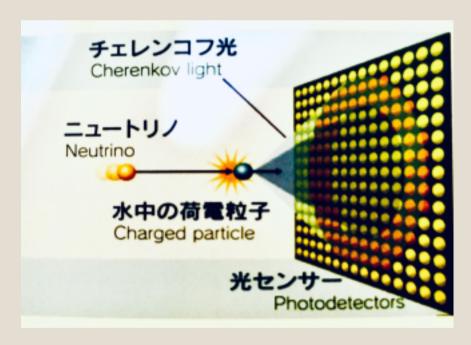
実験目的

地球の裏側からやってくるニュートリノを観測する!!

地表



ニュートリノの観測

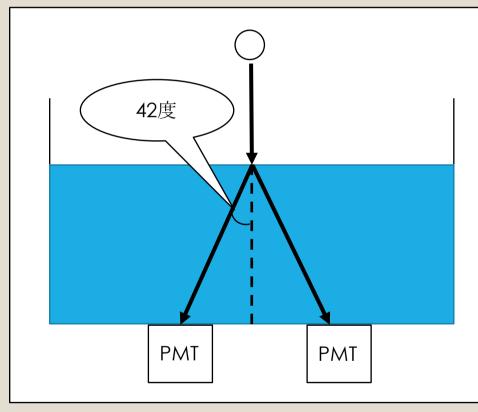


ニュートリノと水の反応

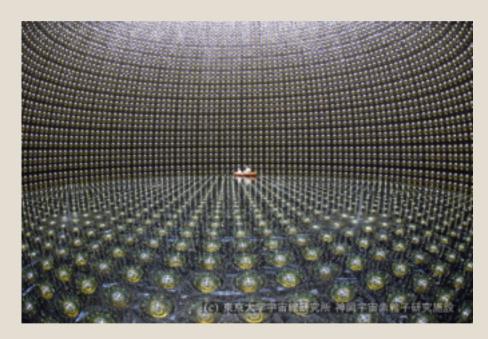
荷電粒子が、水中での光速を超 えた時にチェレンコフ光という 光を円錐状に放射する。

チェレンコフ光の放射角は**42°** であることが知られている。

実験装置の模式図

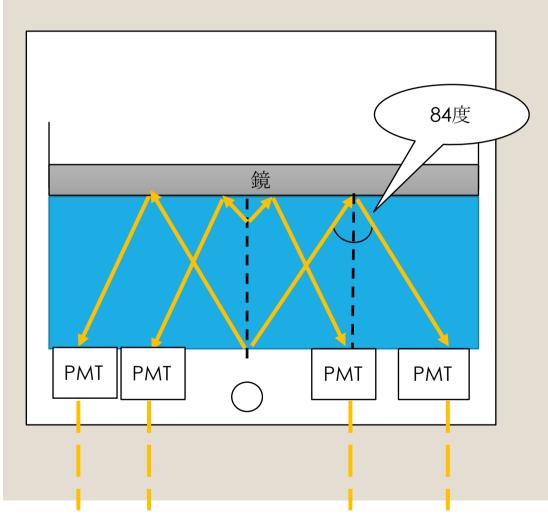


正面から見た装置の簡略図



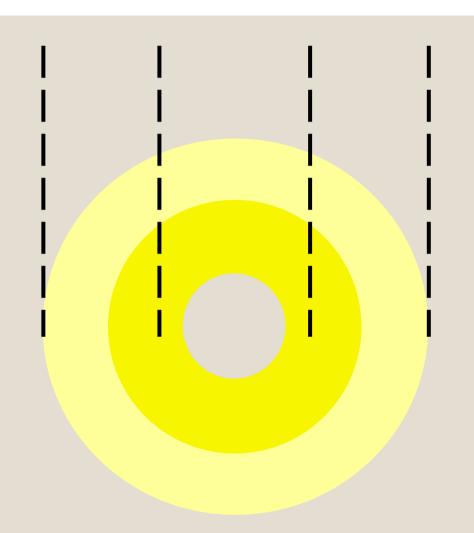
スーパーカミオカンデ(写真提供 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設)

上向きニュートリノの観測



チェレンコフ光を鏡で反射させて観測する。

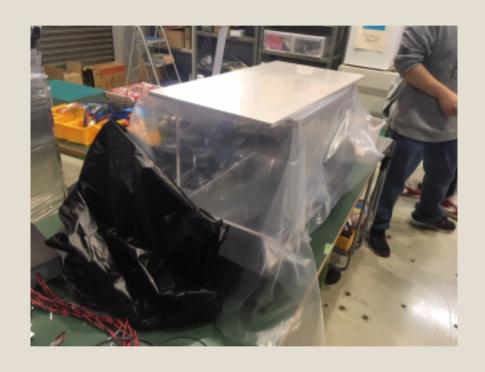
下向きのチェレンコフ光に 比べて光の広がりは大きく なる



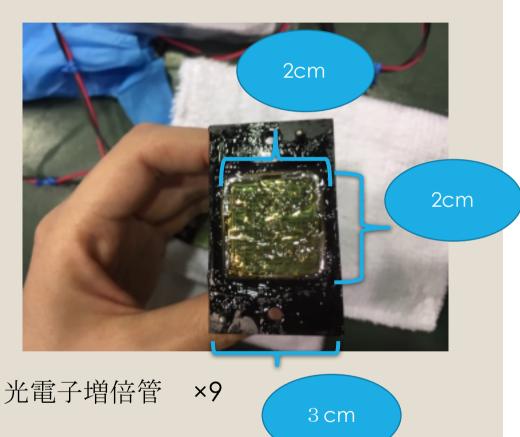
チェレンコフ光は同心円状に広がっていき、中心部は光があたらない。

チェレンコフ光の広がり

実験で使用した機材



水槽 30×45×30(cm³)



実験のフロー

。実験0(エネルギーの較正)

LEDを使って9つのPMT(光電子増倍管)から出力電荷量と受光量の関係をキャリブレーションする。

。実験1(チェレンコフ光の確認)

宇宙線によるチェレンコフ光の放射角をシミュレーションの結果と比較し、チェレンコフ光が観測できることを確認する。

。実験2(ニュートリノ観測)

上向きのニュートリノ起源のチェレンコフ光の観測することで、上向きの ニュートリノを観測する。

実験 0. キャリブレーション

 $N_{ADC} = C_{ADC} \cdot n_{pe}$

(N_{ADC}:パルスカウント数)

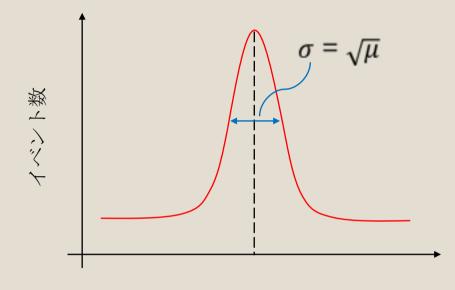
 $(n_{pe}: PMTに入ってきた光量)$

(C_{ADC}: 比例定数)

$$\sigma_{ADC} = C_{ADC} \cdot \sigma_{pe}$$



分布はポアソン分布になるので $\sigma_{pe} = \sqrt{\mu_{pe}}$



観測された光量

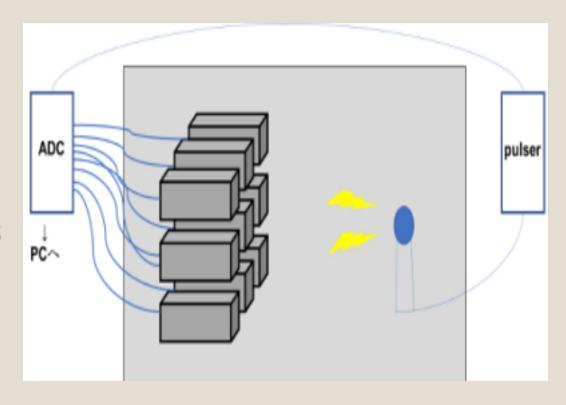
$$C_{ADC} = \frac{(\sigma_{ADC})^2}{\mu_{ADC}}$$

実験 0

~条件~

LEDにかけたパルス振動数:50Hz

PMTにかけたHV: -800V



実験0の装置図

実験0.結果

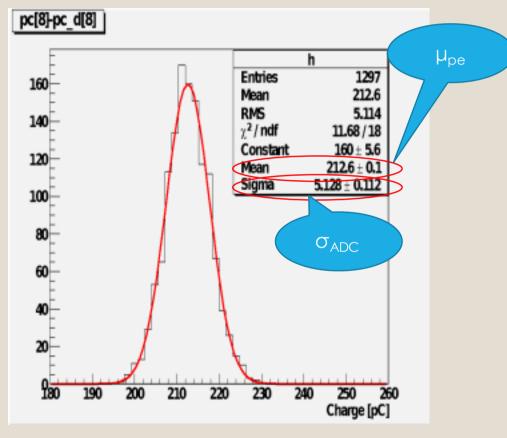
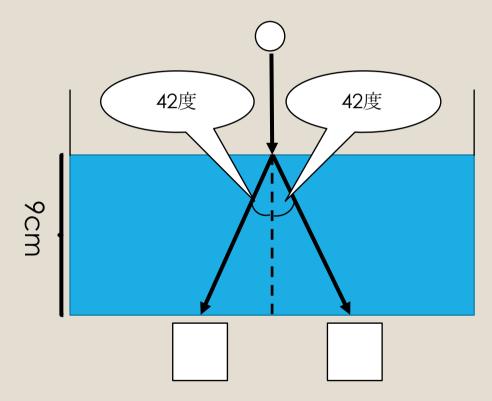


図 光量の度数分布とフィッティング

表 キャリブレーションの結果

PMT	σ_{ADC}	μ_{pe}	C_{ADC}
1	4.57	189.3	0.114
2	4.64	164.2	0.127
3	4.60	164.6	0.128
4	4.65	142.5	0.143
5	5.32	152.6	0.179
6	4.27	134.4	0.139
7	4.59	179.3	0.117
8	5.21	219.3	0.121
9	5.13	212.6	0.121

実験1.原理



正面から見た装置の簡略図

チェレンコフ光は荷電粒子が水中で光速を超えた時に円錐型に 発生する。

課題

- 水面の高さ*L*[cm]はどうする
 か?
- 1. 効率よくチェレンコフ光を集 めるにはPMTの配置をどうす るか?

実験1.実験方法

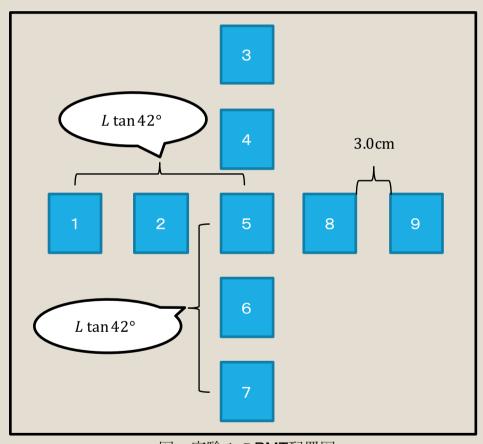
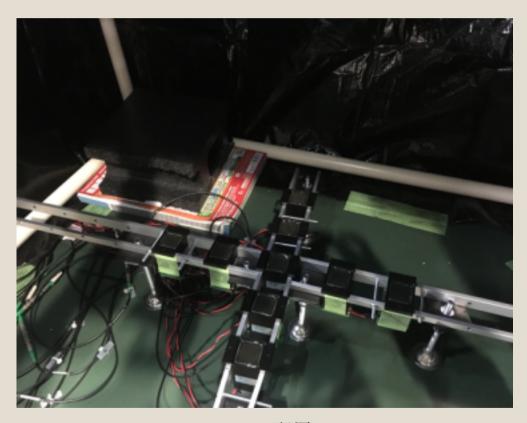


図 実験1のPMT配置図

- 。 PMTを十字型に配置。
- 。 PMT同士の間隔は 3.0cm
- 。 水面の高さ 9.0cm
- 。 複数のPMTが同じタイミングで 大きく反応するとき、チェレン コフ光である可能性が高い!

実験1.実験の写真



PMTの配置

Super Kashiwande Mini DX





実験1.実験方法

~条件~

PMTにかけたHV: -800V

水面の高さ: 9.0cm

PMT間の距離: 3.0cm

コインシデンスによって、パルスの 大きさが12mVを超えた信号が2本 以上の時にトリガー発生。

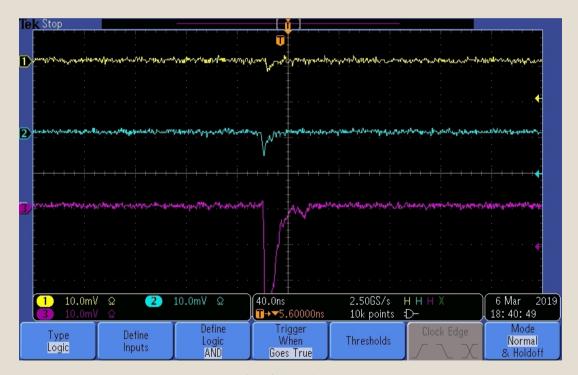
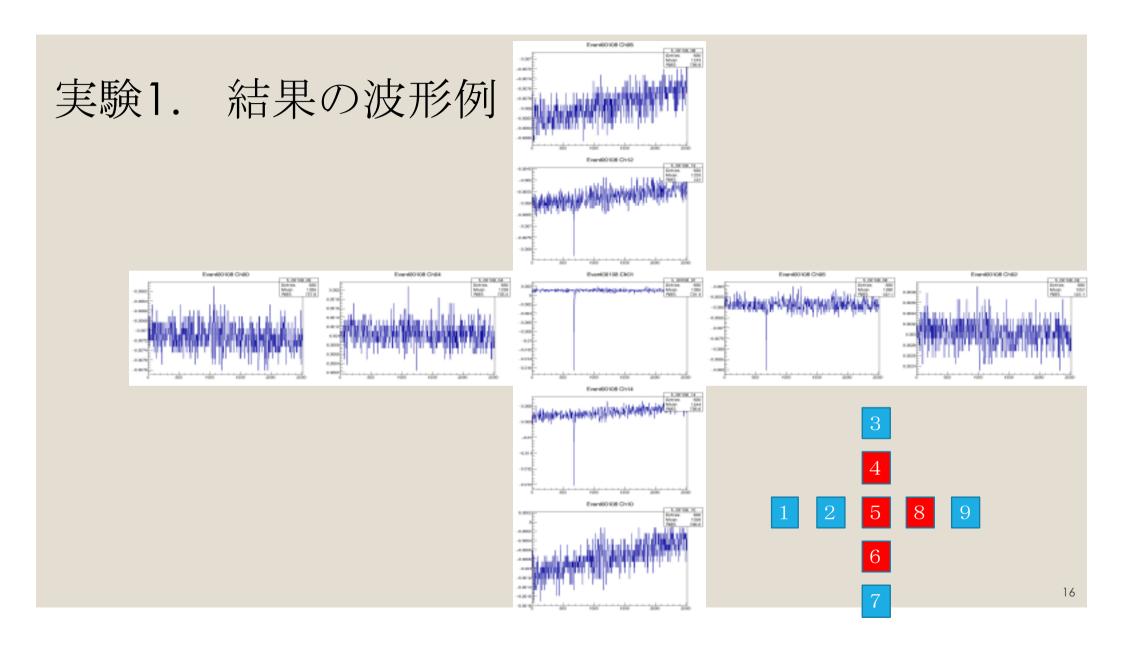


図 試運転の様子



解析方法

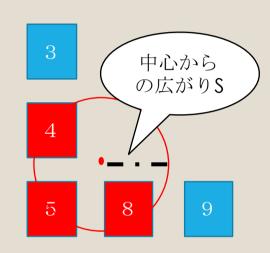
①チェレンコフ光が描く円の中心をPMTの 位置の 観測電荷量による重み付き平均Wとして 求める.

$$\boldsymbol{W} = \frac{\sum_{i} \boldsymbol{x}(i) * Q(i)}{\sum_{i} Q(i)}$$

②中心からの広がりをPMTの中心からの 距離の標準偏差として求める。

$$S^2 = \frac{\sum_i \ Q(i) * (\boldsymbol{x}(i) - \boldsymbol{W})^2}{\sum_i \ Q(i)}$$

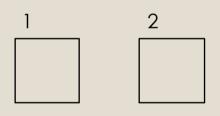
③放射角を様々に仮定したシミュレーションと 比較して、放射角を求める.



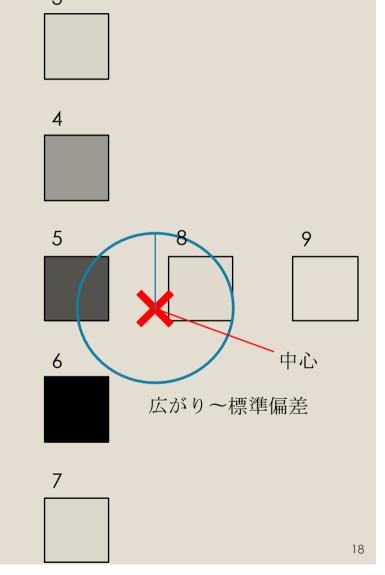
6

7

実験1. 解析結果



結果で波形を示したのと同じイベントについて 各PMTで観測された電荷量を色の濃さで表した.



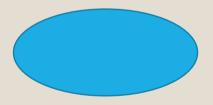
実験データと比較するシミュレーションデータは ミューオンが真上から飛来したときの観測電荷量を計算し作成.

ただし、シミュレーションでは真上から入射するミューオンのみ考慮 → 実際には斜めに入射するものもある.

入射角 φ のとき広がりの大きさを $\sqrt{(1/\cos\varphi)^2+1}$ / $\sqrt{2}$ 倍に補正する.



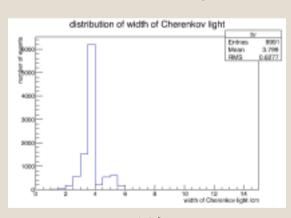
垂直入射



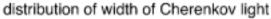
斜めに入射 \rightarrow 1方向にだけ $\frac{1}{\cos \varphi}$ 倍

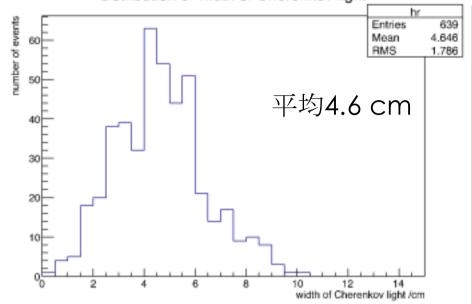
実験1. 解析結果

シミュレーションデータでの 円の広がりの分布↓

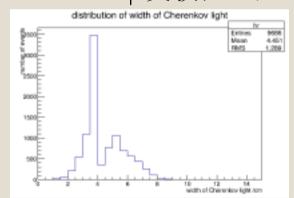


θ=30°: 平均 3.8 cm

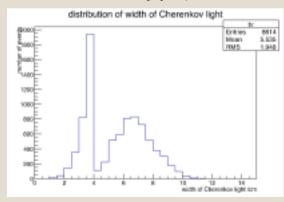




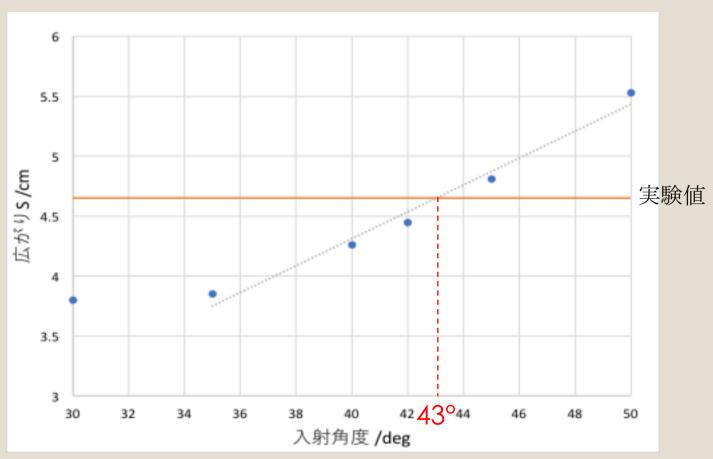
↑実験データでの円の広がりの分布



θ=42°: 平均 4.5 cm

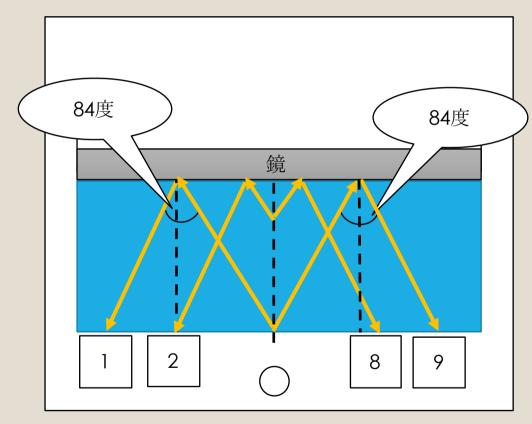


θ=50°: 平均 5.5 cm₂₀



シミュレーションと実験データでの広がりの大きさの比較

実験2. 実験の条件



実験2の装置図(横から見た図)

~条件~

PMTにかける電圧:-800V

水面からPMTまでの距離:

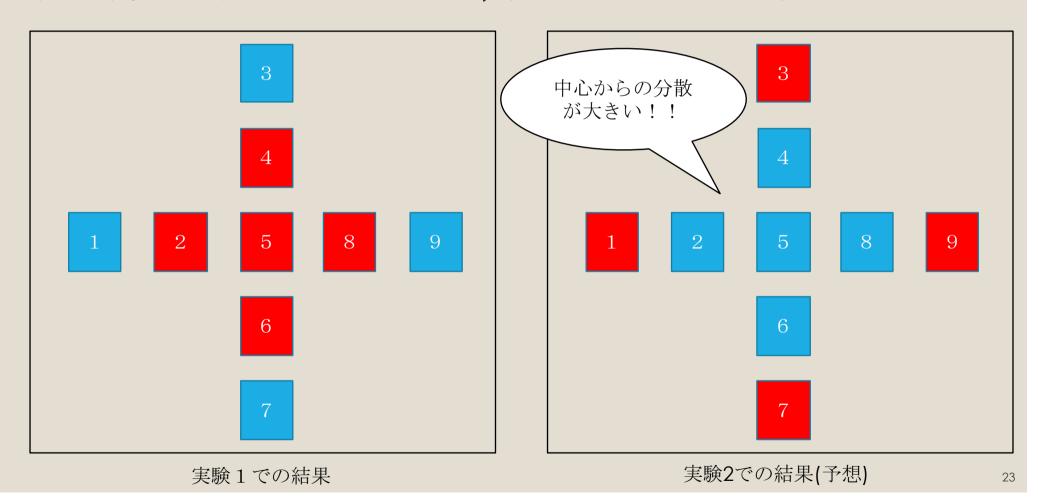
9.0cm

PMTから7cmのところに鏡がある様に設置。

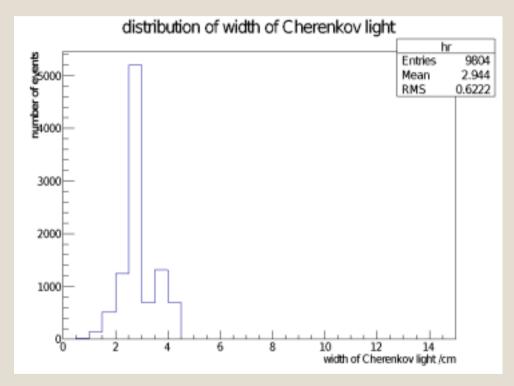
PMT間の距離:3.0cm

PMTの電圧が-12mVを超えたものが2本以上の時にトリガー発生させる。 (実験 1 と同じ)

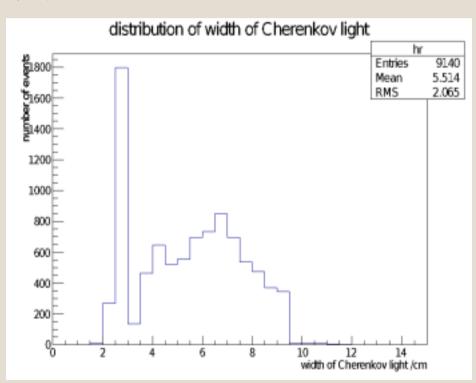
入射地点がPMT5番あたりの時...



シミュレーションで確認すると...

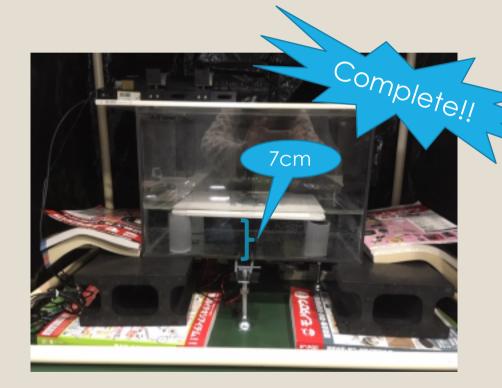


下向きチェレンコフ光の中心からの分散 (シミュレーション)



上向きチェレンコフ光の中心からの分散 (シミュレーション)

実験2. 実験方法



PMTの設置と水面の高さは実験1と同様にした。

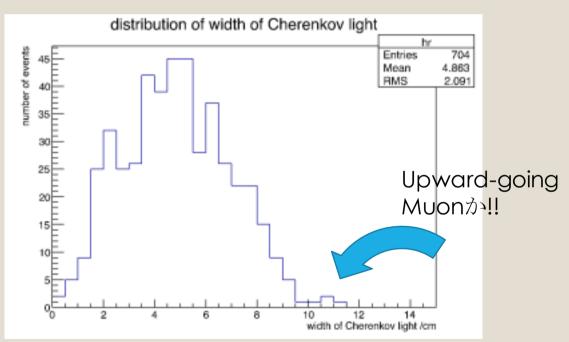
。鏡をPMT5番の真上約7cmにあるように設置した。

→遮光していざ実験開始!

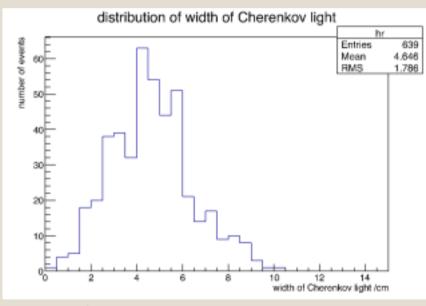
Super Kashiwande_up \(\mu \) DX

実験2. 解析

- 解析手法は実験1と同じ(中心, 広がりを計算).
- 上向きのミューオンでは広がりが2倍になるはず.



鏡を置いたときの広がりの分布

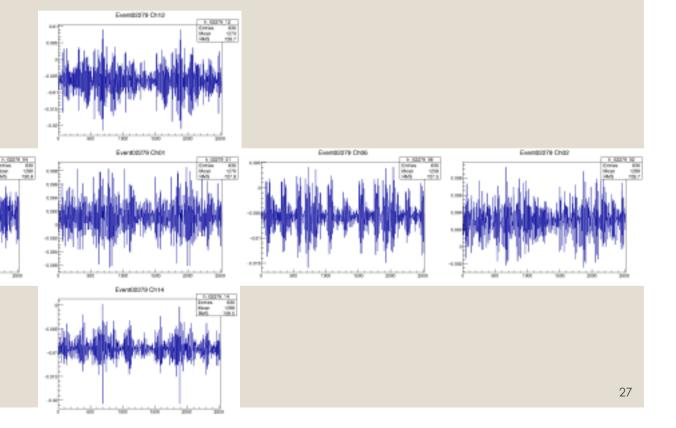


(再掲)鏡を置かないときの広がり

実験2. 解析

広がりの大きさが10 cm以上のイベントをチェック

→ ノイズだった...



考察:なぜ、Upward-Going Muonは観測できなかったか

⋄本実験からわかるUpward-Going Muonのfluxの上限値は

立体角: 2π

面積: 24×24 cm²

測定時間: 24時間= 8.64×105 s

とすれば

 $6.40 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Sr}^{-1}$

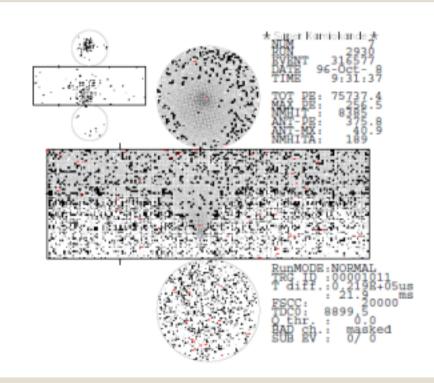
考察:なぜ、Upward-Going Muonは観測できなかったか

upward-going muonのfluxは
2.11×10⁻¹³cm⁻²s⁻¹Sr⁻¹
24×24cm²への下からの入射は
7.6×10⁻¹⁰ s⁻¹

つまり...

100年に1個

*参考: [1]" Study of upward-going muons in Super-Kamiokande Choji Saji, Niigata Univ.



The typical event for upward through-going muon event the larger display is inner-detector and the smaller display is outer-detector [1]

謝辞

本研究を進めるにあたってご指導いただいた Supervisiorの奥村公宏准教授に感謝いたします。 また、多くの知識や示唆をいただいたSupporterの XIA JunjieさんやWANG Ruさんに感謝いたします。

証明

$$(\mu_{ADC} \pm \sigma_{ADC}) = C_{ADC} \cdot (\mu_{pe} \pm \sigma_{pe})$$

$$-) \qquad \mu_{ADC} = C_{ADC} \cdot \mu_{pe}$$

$$\sigma_{ADC} = C_{ADC} \cdot \sigma_{pe}$$

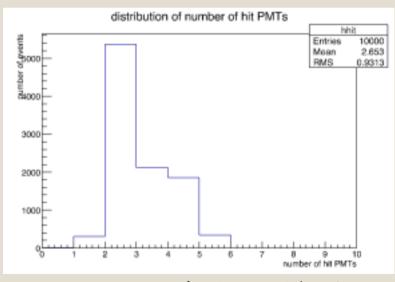
。
$$\mu_{ADC} = (\sigma_{ADC})^2$$
 (平均値は標準偏差の二乗)

$$C_{ADC} = \frac{N_{ADC}}{n_{pe}} = \frac{\mu_{ADC}}{\mu_{pe}} = \frac{(\sigma_{ADC})^2}{\mu_{pe}}$$

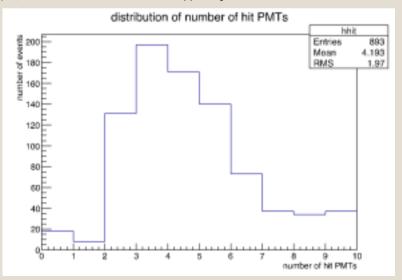
(附)イベントセレクション

- 。ノイズを取り除く.
 - 。PMT内の電気ノイズ \rightarrow 同時に反応するPMTは1個だけ.
 - 。チェレンコフ光以外の光 \rightarrow ほぼ全てのPMTが反応.
 - →反応したPMTの数が "多すぎず少なすぎない" イベントを選ぶ.

データより2~5個のイベントを信号とした.



シミュレーションデータでの反応したPMTの数



実験データでの反応したPMTの数