

スーパーカミオカンデにおける 太陽ニュートリノの研究

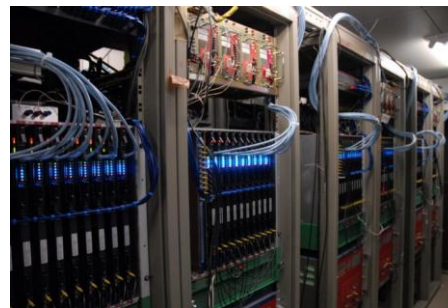
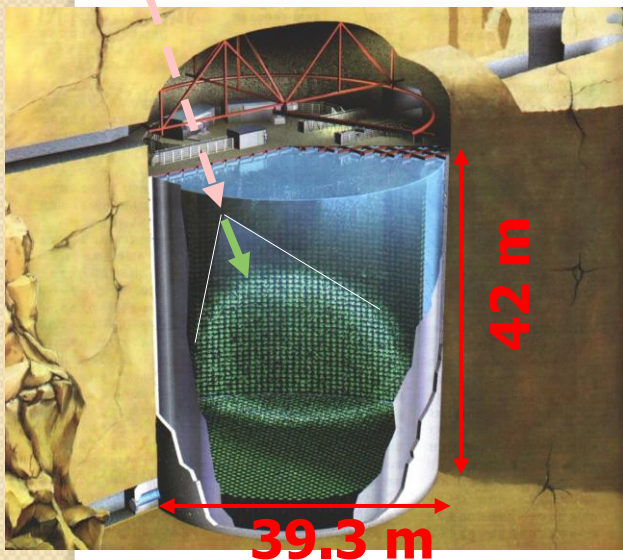
「グローバルな宇宙天文観測」研究会
国立天文台三鷹 解析研究棟 大セミナー室
2012年2月20日
東大宇宙線研 横澤孝章

目次

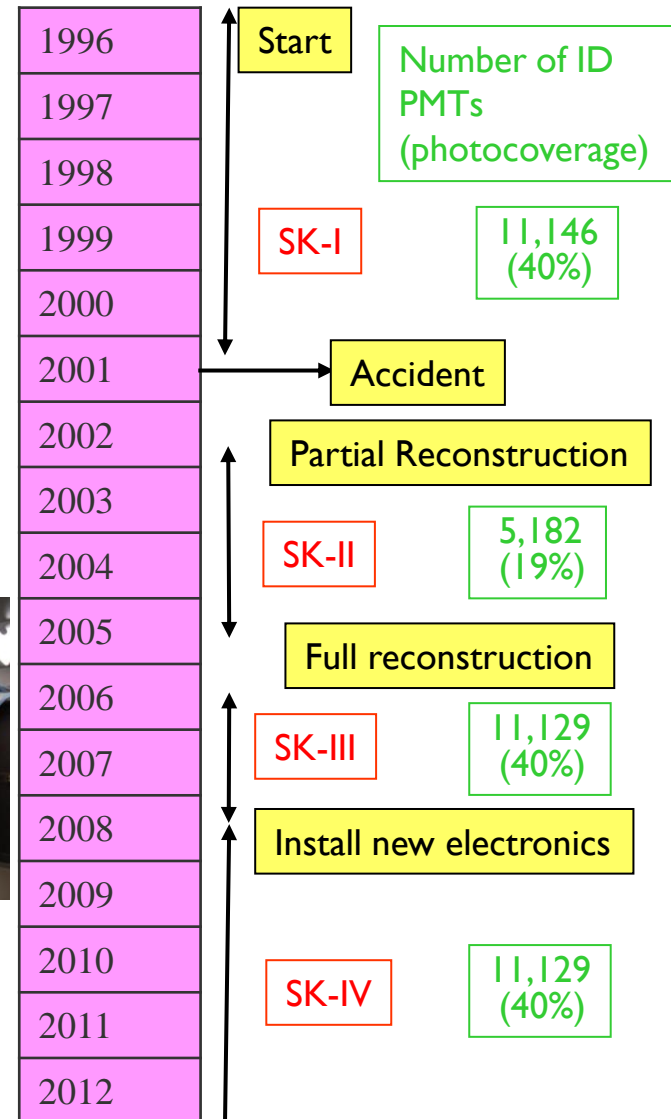
1. Super-Kamiokande検出器
2. 太陽ニュートリノ解析の目的
3. SK-IV 太陽ニュートリノ解析
4. まとめと今後の展望

Super-Kamiokande検出器

- 岐阜県飛騨市神岡町に設置された巨大水チェレンコフ検出器
- 50,000トンの純水、~13000個の光電子増倍管
- 1996年より観測開始
- 2008年、新フロントエンドエレクトロニクスの導入、SK-IVフェーズとしての観測を継続
- 太陽から発生したニュートリノと水中の電子との弾性散乱 $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ を観測(~15 neutrino/day)



新エレクトロニクス
QBe

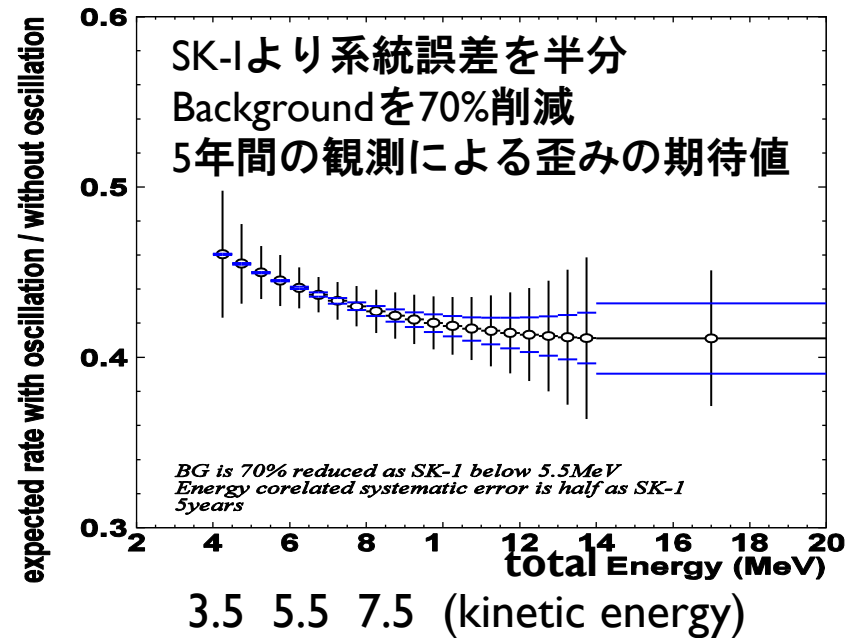
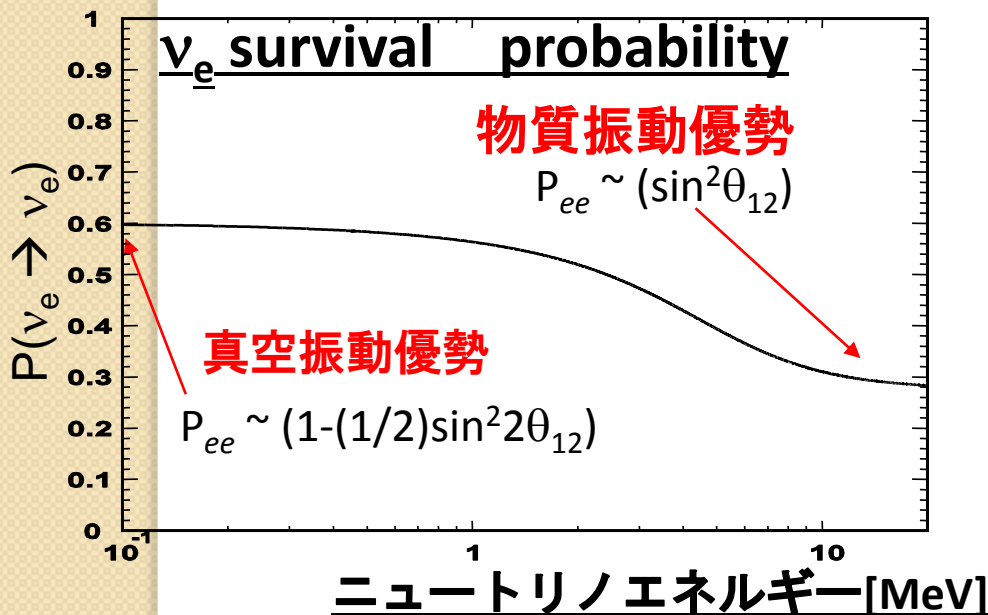


SK-IV 太陽ニュートリノ観測の目的

- これまでの研究によって太陽ニュートリノの振動が確立
- **MSW効果**(ニュートリノ振動の物質効果)の直接観測

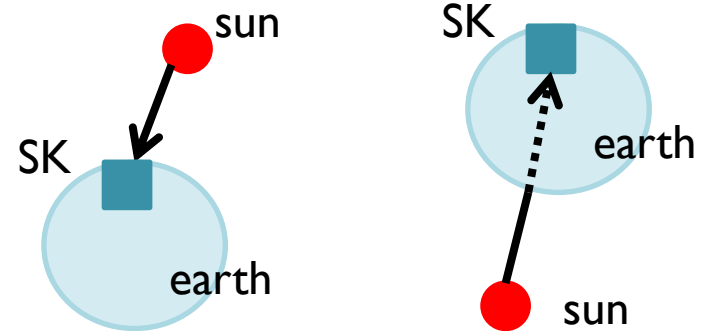
① 太陽内部の物質効果によるエネルギースペクトルの歪み

- 低エネルギー領域のバックグラウンドを抑えエネルギー閾値を下げる($\sim 3.5\text{MeV}$ (kinetic energy))
- 系統誤差を少なくする



SK-IV 太陽ニュートリノ観測の目的

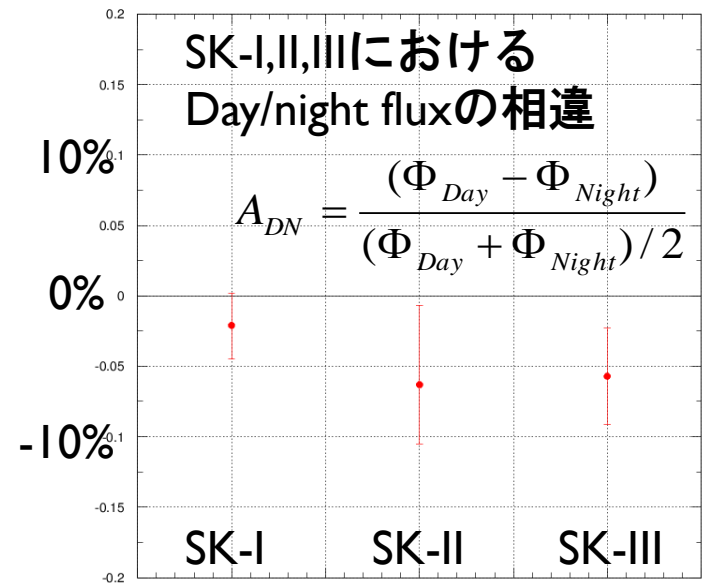
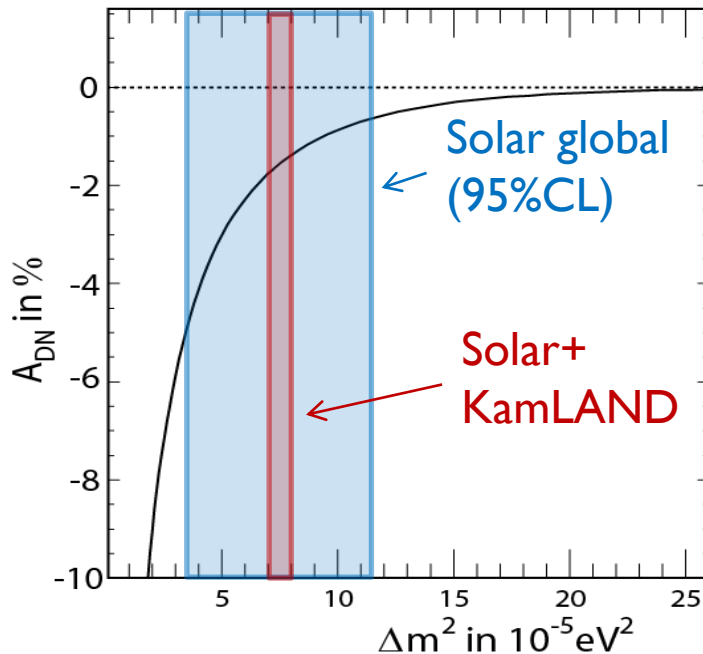
- ②地球内部の物質効果による
day/night neutrino fluxの相違
- 大統計(SK-I~IVのcombine)
 - エネルギー系統誤差の削減



Solar neutrinos observed in day

Solar neutrinos observed in night

期待されるDay/night fluxの相違



SKでのMSW効果の観測に向けて

➤ 低バックグラウンド化

➤ 効率的なreductionの研究(S/N比の向上)

➤ 水循環システムの改良による低バックグラウンド化

➤ 系統誤差の削減

➤ 検出器較正・事象再構成の精度向上。

➤ detector simulation(MC)における時間変動を考慮した水状態の再現

低バックグラウンド化の実現

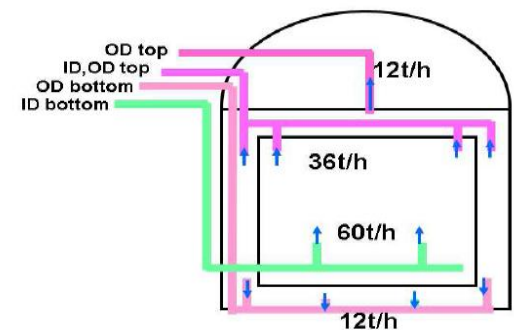
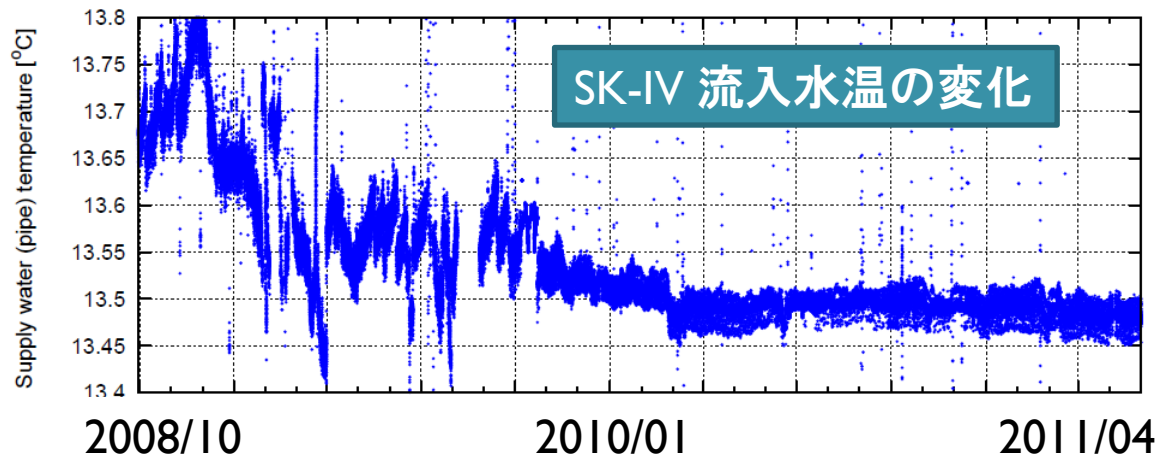
純水装置システムの改良

- タンク中央部の低バックグラウンド化

- タンク壁際で発生したバックグラウンド源を中央部に流入しないような循環システムの確立(SK-III)

- 流入水温のコントロール

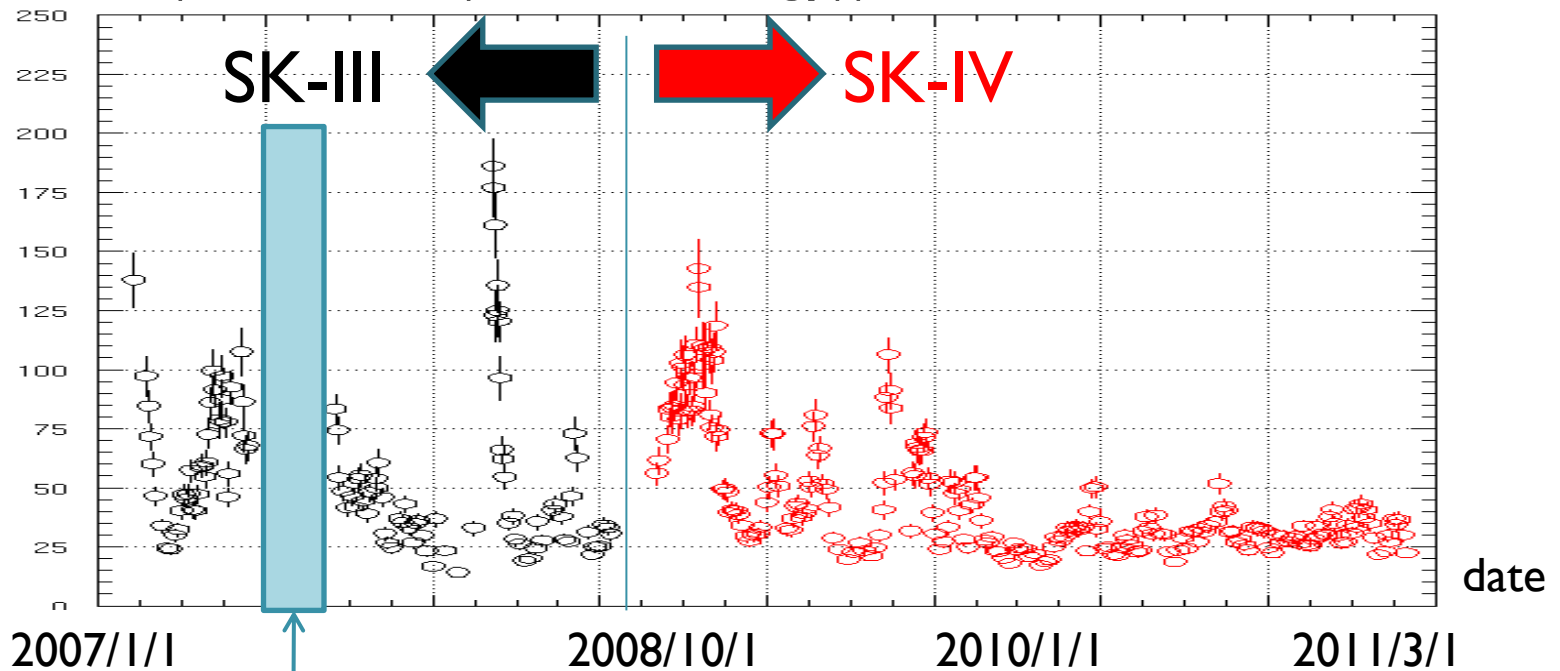
- 手動にて行っていた入水温度管理を自動で行うシステムの導入(2010年1月)
 - 流入水温の変化によりタンク内で対流、タンク中央部のバックグラウンドレートが上昇



SKにおける水循環システム

低バックグラウンド化の実現 純水装置システムの改良

Event/day (4-4.5MeV (kinetic energy))

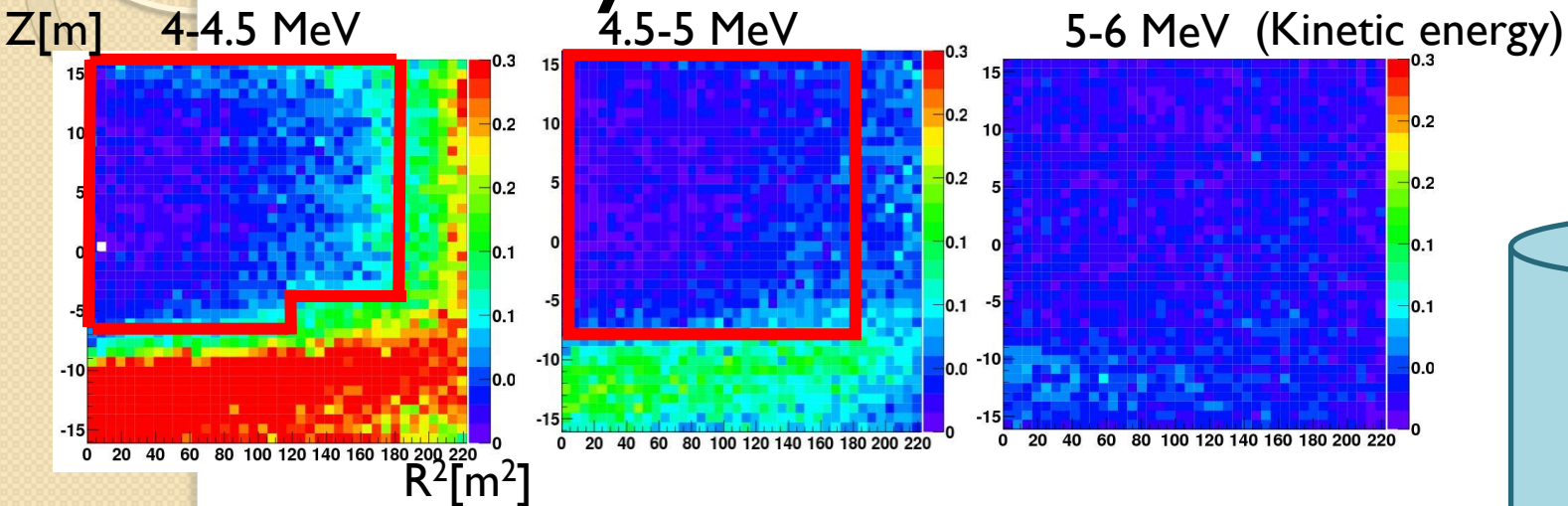


Background rateが高く解析に使用できなかった

- 2010年1月以降、特に安定した低バックグラウンドデータの取得に成功

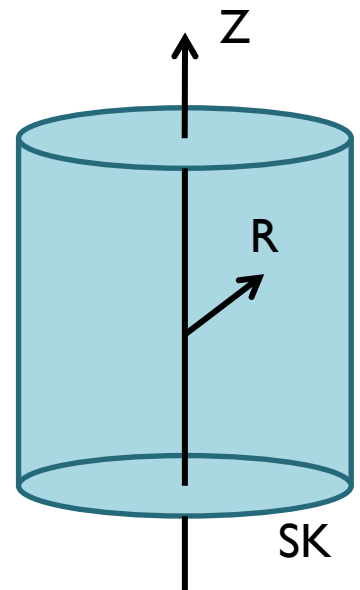
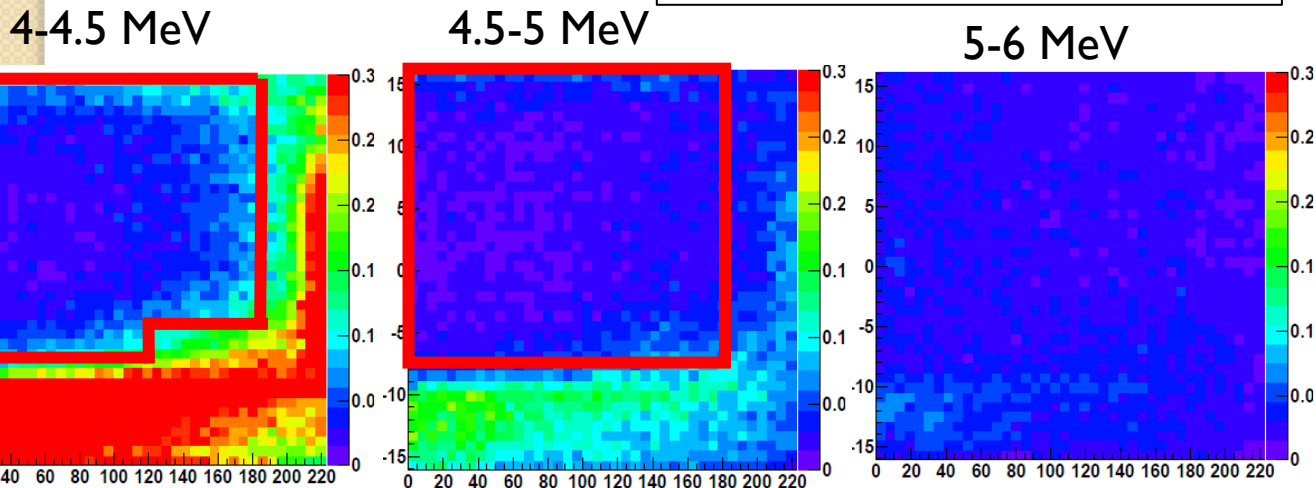
タンク内におけるバックグラウンド ドレイト

SK3 : 298 days



SK4: 754 days

Color : Events/bin/day 低→高



MCにおけるSK検出器の水質

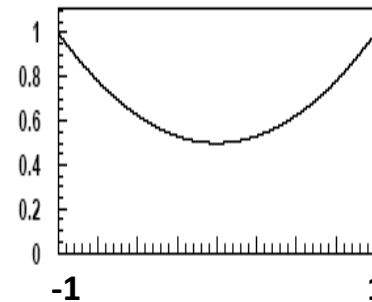
$$WT(\lambda) = \frac{1}{\alpha_{abs}(\lambda) + \alpha_{sym}(\lambda) + \alpha_{asym}(\lambda)}$$

$\alpha_{abs}(\lambda)$ (Absorption)

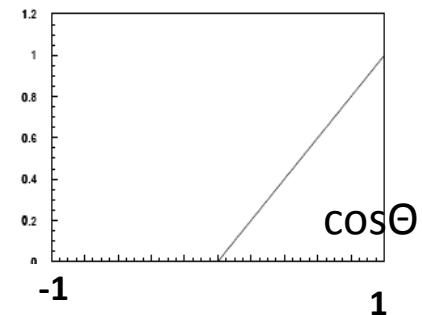
$\alpha_{sym}(\lambda)$ (Symmetric scattering)

$\alpha_{asym}(\lambda)$ (Asymmetric scattering)

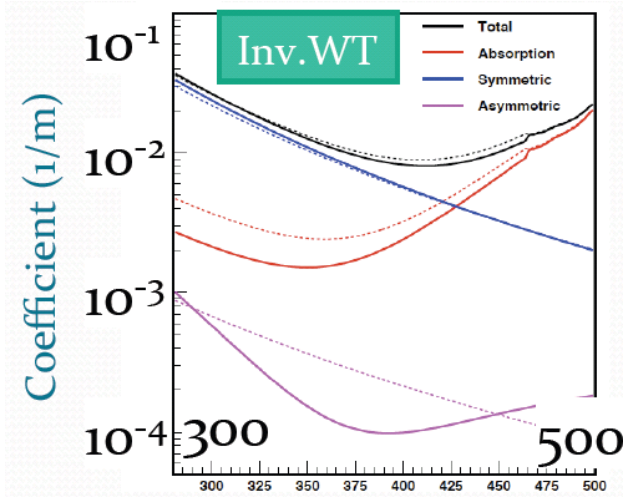
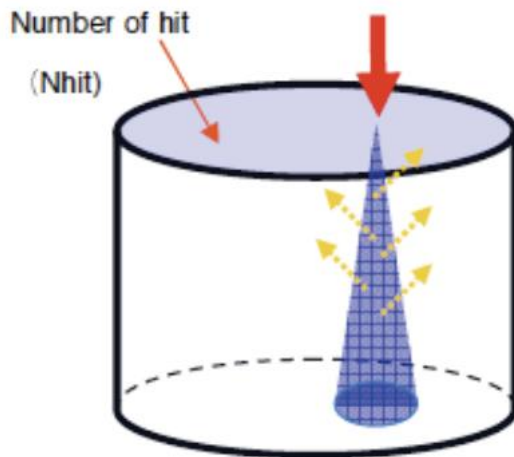
Sym.scattering



Asym.scattering

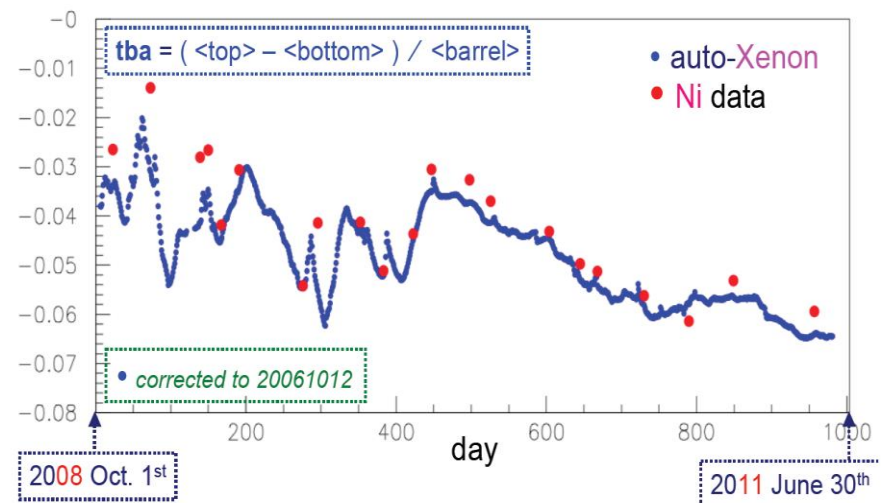
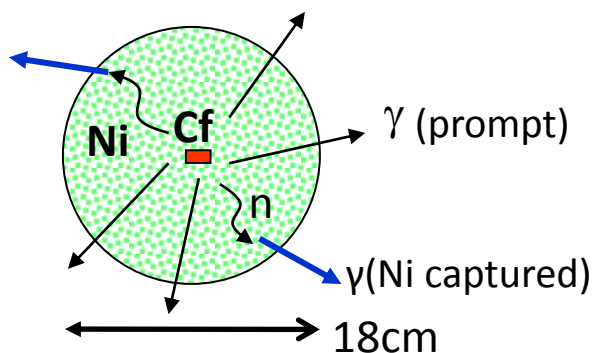


- 散乱パラメータの時間変動は観測誤差範囲内で一致
- 吸収パラメータのみをday by dayにて時間変動



MCにおけるSK検出器の水質の改良

- 検出器には水質の場所依存性が存在
 - 下から純水を入れ上で回収する循環システム
 - 上下非対称性パラメータ (Top bottom asymmetry; TBA)
- TBAの時間変化の測定
 - Xeランプ光源による常時観測 (1 event/min)
 - 一様方向に γ 線を放出する線源 (Ni線源) による月1回のデータ取得
($^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$) で生じる γ 線 (~9 MeV) を使用
- $WT(\lambda) = 1 / (\alpha_{\text{abs}}(1 + \beta * z) + \alpha_{\text{sca}} + \alpha_{\text{asca}})$ とし、MCへの導入
 - β : 水質の上下非対称性の度合いを表すパラメータ
 - Ni線源によるPMTヒットパターン解析で β とTBAの関係式を導出



エネルギー系統誤差の削減

- SKのエネルギースケールと系統誤差の評価
 - 電子線形加速器(Linac)でエネルギースケール
 - DT generatorで系統誤差を評価

Linac :

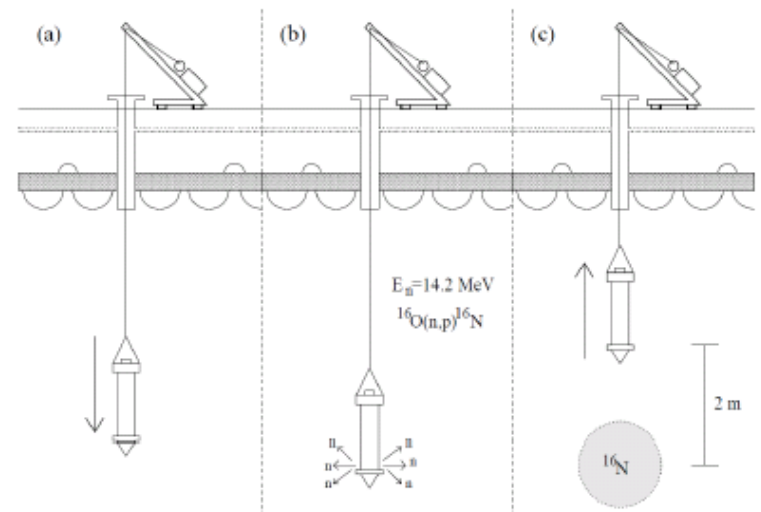
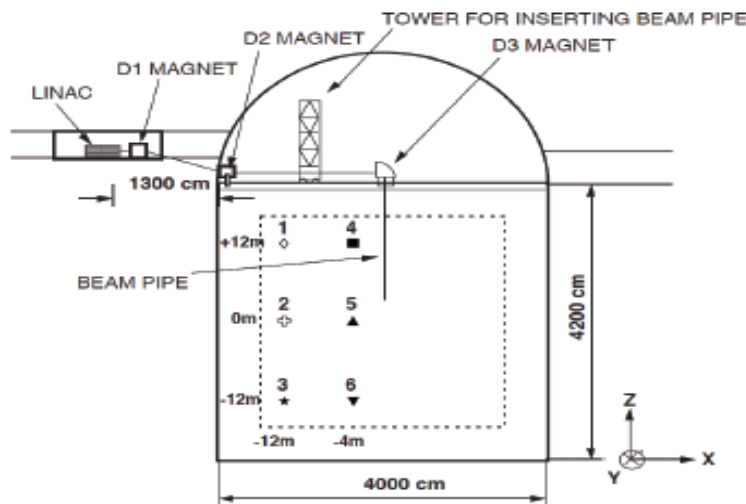
0.2%の精度で電子を加速
4.4MeV-18MeVの電子を生成
検出器下方向へ電子を放出

DT generator :

Deuterium-Tritium Generator

$3\text{H} + 2\text{H} \rightarrow 4\text{He} + \text{n}$, $^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{16}\text{N}$

^{16}N の崩壊で $\gamma(6.1\text{MeV}) + \text{e}^-(4.3\text{MeV})(66\%)$
 $\text{e}^-(10.41\text{MeV})(28\%)$

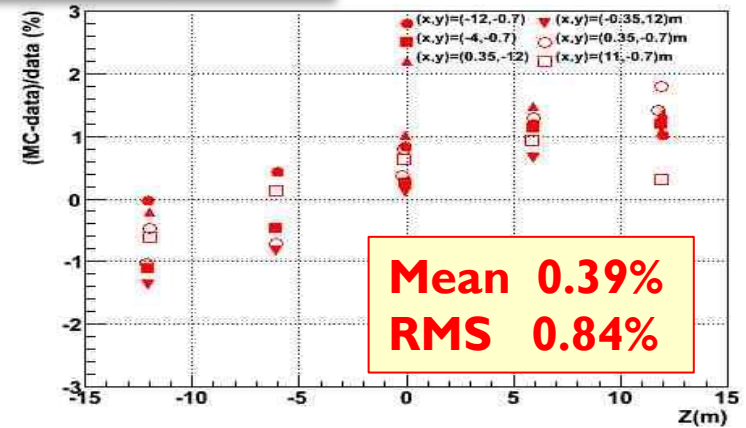
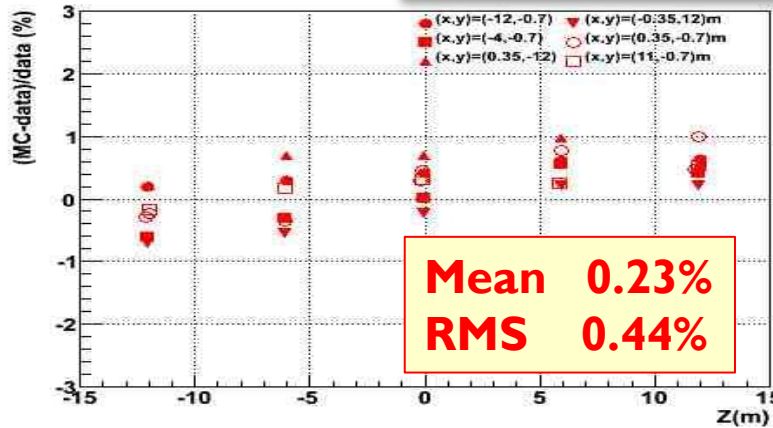


エネルギーシステム誤差の削減

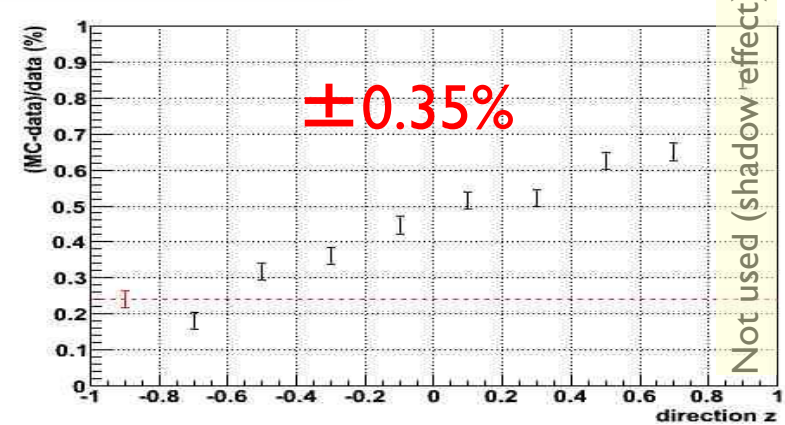
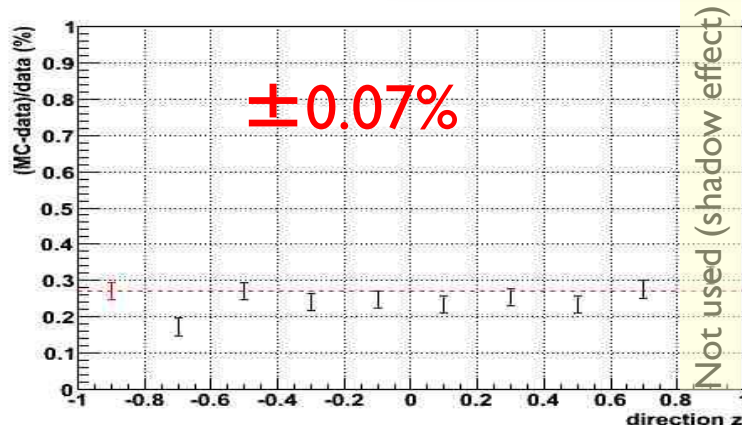
With TBA in MC

Without TBA in MC

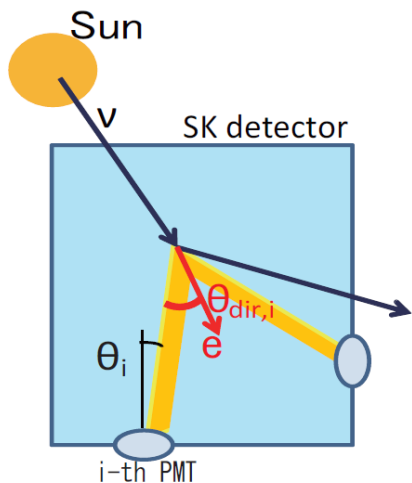
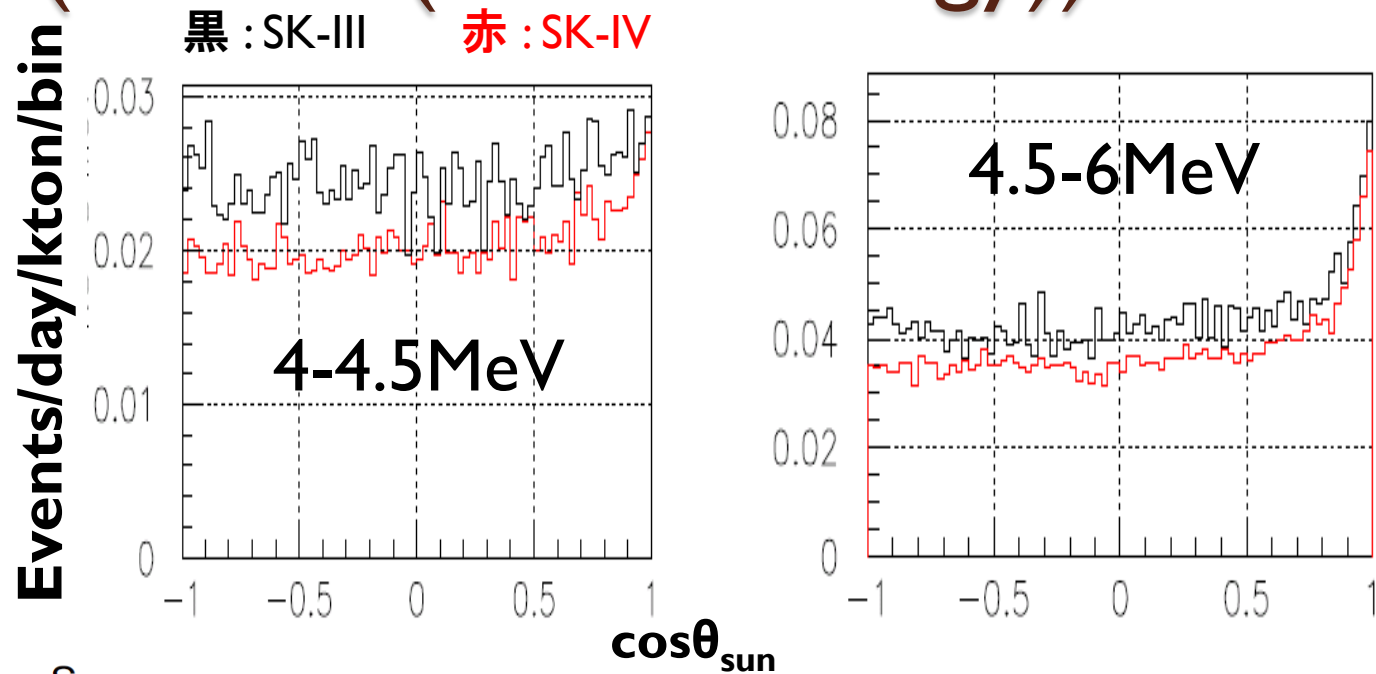
position dependence of energy scale



direction dependence of energy scale

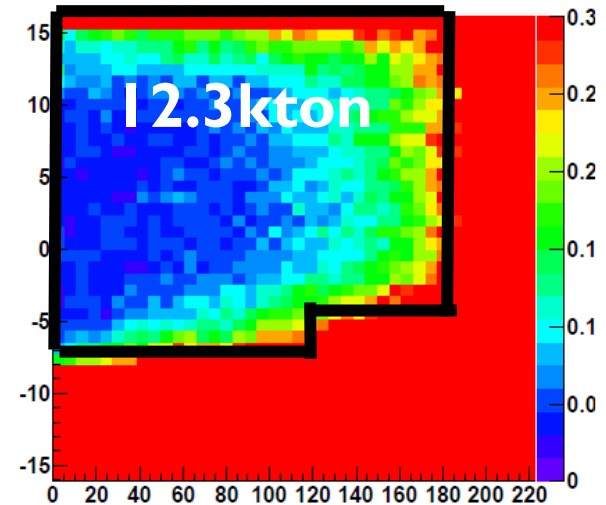
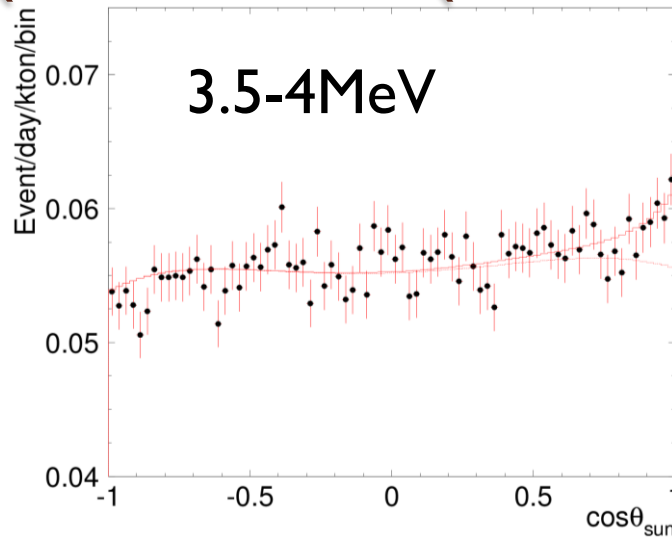


太陽方向分布 (4-6MeV(kinetic energy))



- 観測時間754daysにおける太陽方向分布
(SK-IV ; 2008/10 – 2011/3)
- background levelの低減に成功
- 4-4.5MeVの太陽方向分布において有意な太陽方向の信号を確認

太陽方向分布 (3.5-4MeV(kinetic energy))



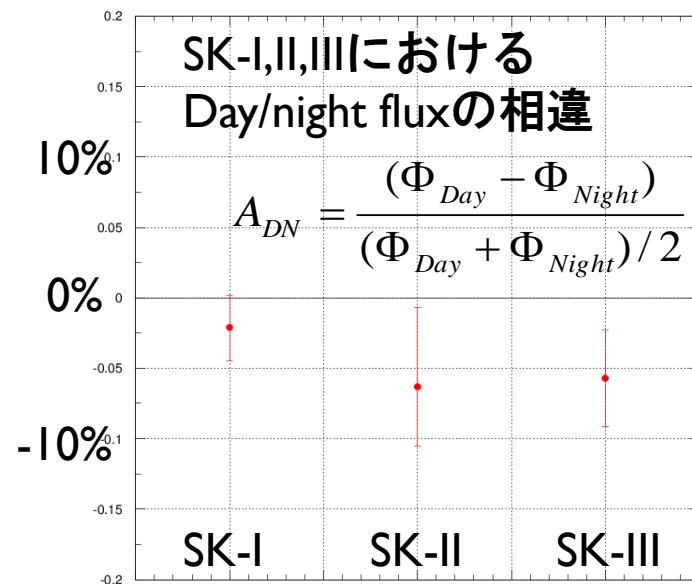
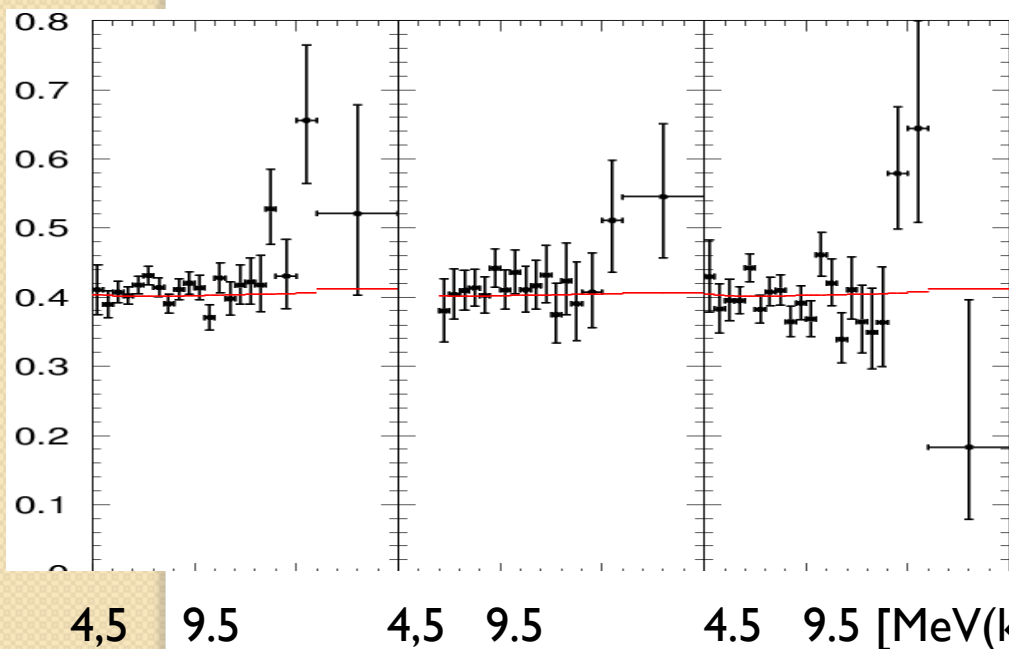
- 3.5-4MeVにおける太陽方向分布
 - 太陽方向の信号が見え始めている
- 今後の改良点
 - Signal/Background比の向上
 - 残っているbackgroundの効率的な除去
 - Fiducial volumeの再設定
 - Trigger効率の向上
 - 3.5-4MeVのtrigger効率86%→triggerシステムの改良により~100%にする予定

まとめと今後の展望

- 太陽ニュートリノ観測によるMSW効果の発見をするために、低バックグラウンド化・系統誤差の削減を行った。
- 純水システムの改良により安定した低バックグラウンドデータの取得に成功している。
- 水質の場所依存性をMCに導入することによりエネルギー系統誤差の削減に成功した。
- 太陽方向分布において低エネルギー領域のバックグラウンドが下がり、3.5-4MeVでも太陽方向の信号が確認できた。

まとめと今後の展望

- 太陽方向分布よりニュートリノフラックスの見積もり、エネルギースペクトル・昼夜のフラックスの違いによるMSWの観測を目指す。
- SK-I~IVの結果をcombineする。



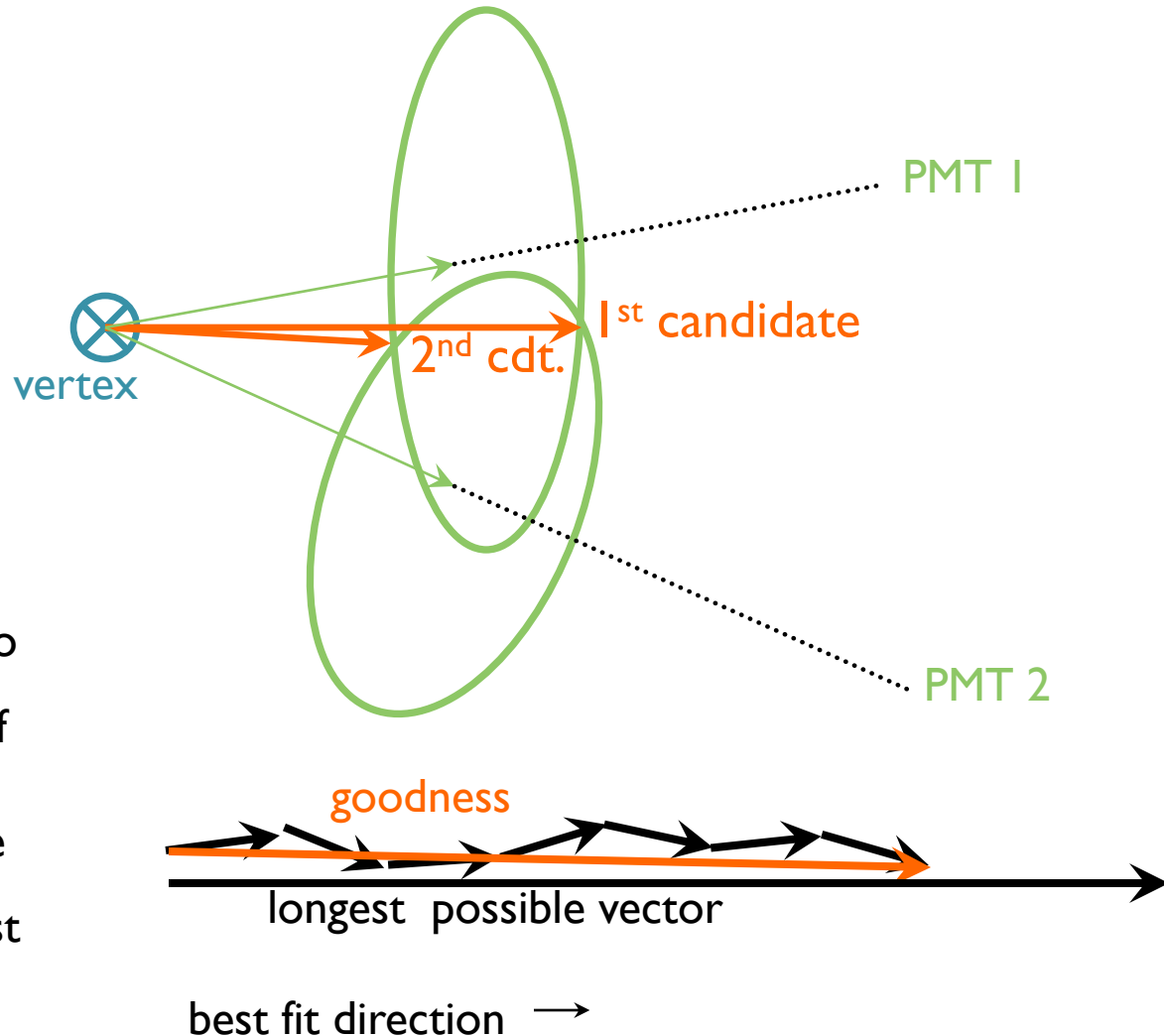


backpus

Ariadne Goodness

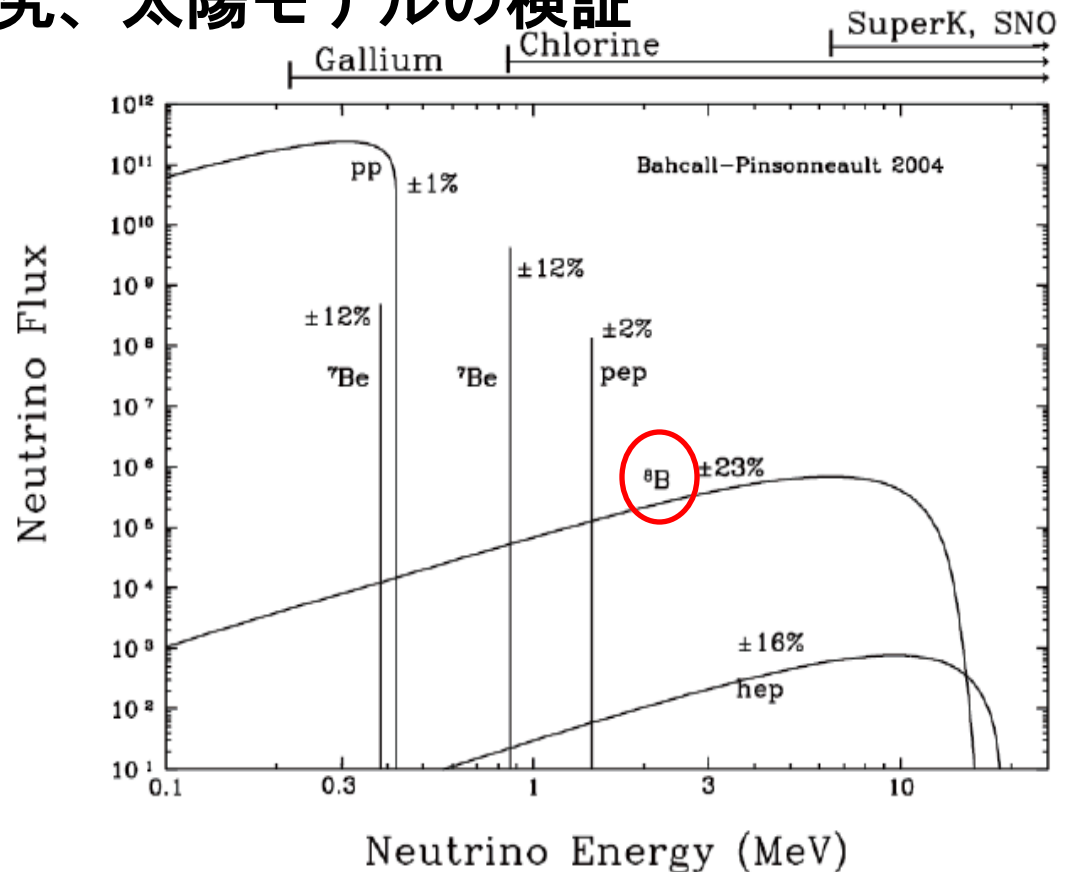
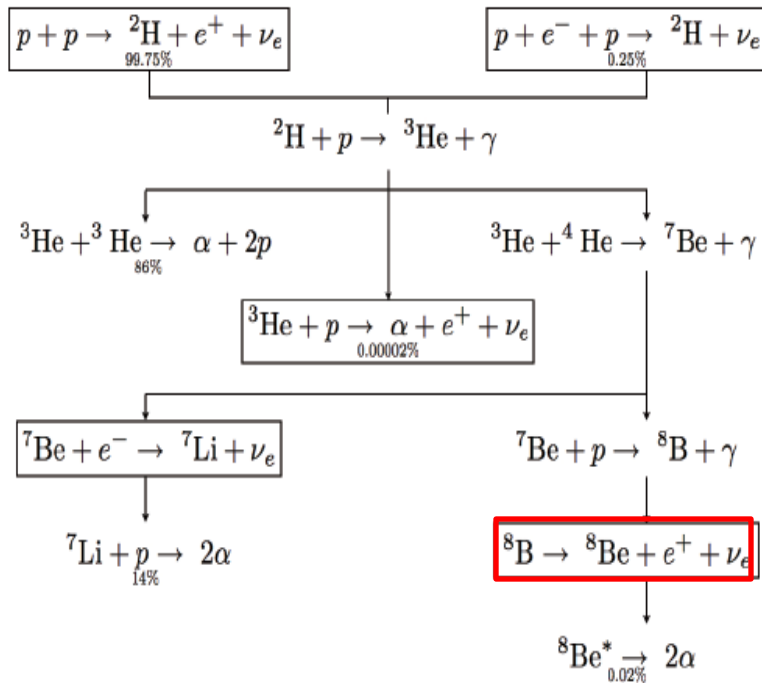
Hough transformation for PMT pairs:

1. assign a unit direction vector to each PMT hit
2. Draw cone around each vector with the Cherenkov angle as the opening angle
3. the cone intersections are candidates for particle direction: each pair typically contributes two
4. define “goodness” as the length of the vector sum of all candidates within a maximum deviation angle
5. normalize goodness by the longest possible vector sum



太陽ニュートリノ

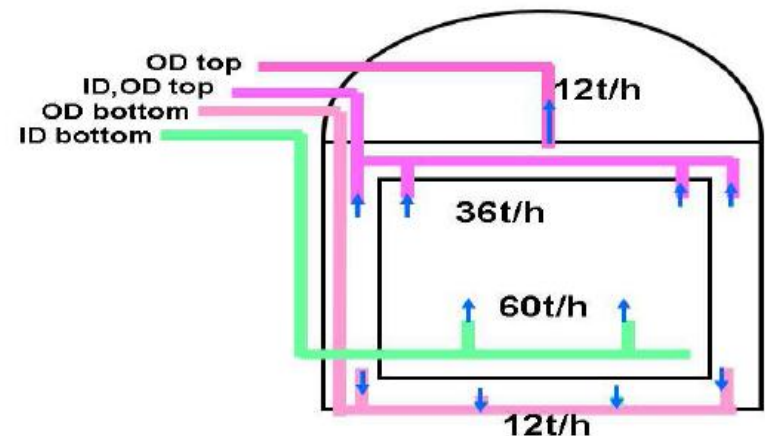
- 太陽内部の核融合反応の際に放出されるニュートリノ。
- 全体としては4つの陽子が1つの α と2つの陽電子と ν_e になる反応。
- フラックスは地上で660億個 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 太陽は巨大なニュートリノ源である
- ニュートリノ振動の研究、太陽モデルの検証



Improvement of water supply system

● タンク中央部の低バックグラウンド化

- タンク壁際で発生したバックグラウンド源を中央部に流入しないような循環システムの確立(SK-III)



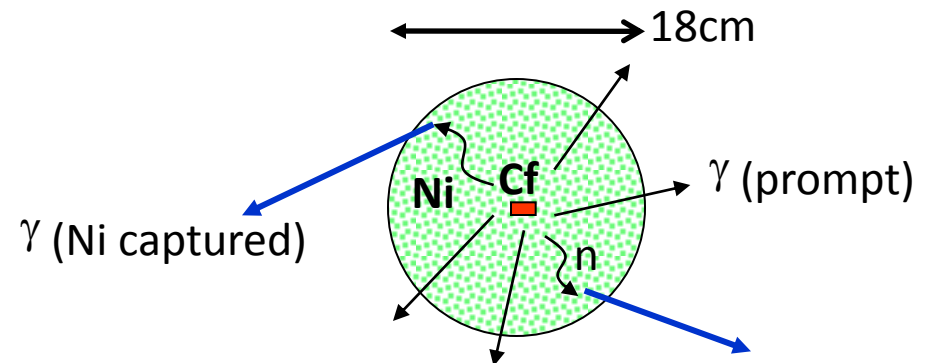
Improvement of water supply system

- 冷却水の流量を変えることにより水の温度を調整。
- 0.01°C でのコントロールが必要なため、クーラー等での直接的な温度管理では調整不能。
- 手動時は、数日に一回冷却水流量を調整していたのを30分に1回程度調整するようにした。

Ni線源とは

- Niが熱中性子を吸収する際に発生するガンマ線(~9 MeV)を利用する。 (例: $^{58}\text{Ni}(n,\gamma)^{59}\text{Ni}$)
- 中性子線源として ^{252}Cf を使用している。 ^{252}Cf は97%が α 崩壊をし、3%が自発核分裂をする。その自発核分裂の際に~3.8個の中性子が放出される。
- SK内での線源の移動が容易なため、さまざまな位置でのデータ取得が可能である。

NiO:35%(質量比)
ポリエチレン:65%
でできた直径18cm
の化合物



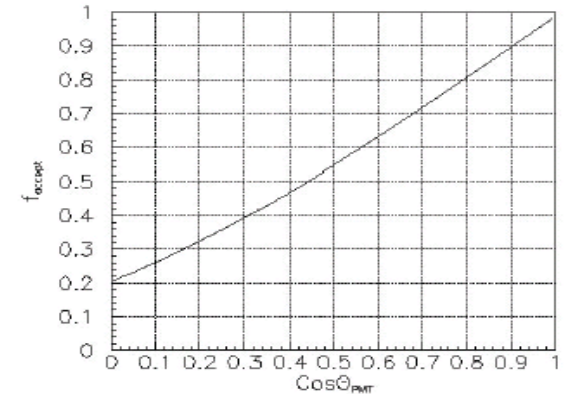
Ni線源によるhitrate解析

hitrateの解析を行う際、光は距離の2乗に比例して拡散をする、Ni線源と各PMTの見込み角によって有感面積が変化していることを考慮しなくてはならない。よって、幾何学的補正を加えた以下の式をhitrateとして定義している。

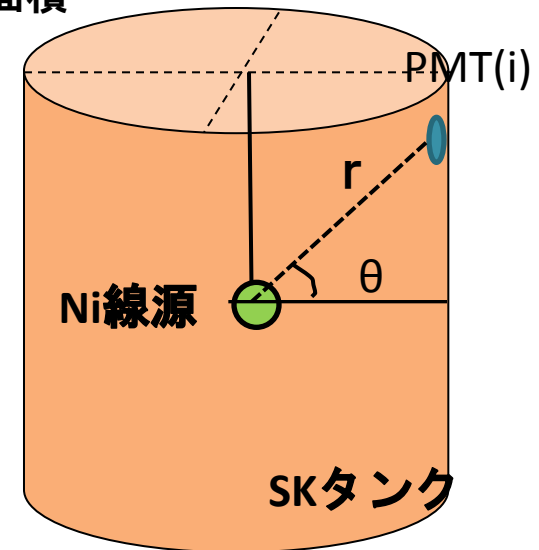
$$\text{hitrate}(i) = \frac{(\text{number of hits}(i)) \times r(i)^2 / F(\theta)}{(\text{average of each PMT})}$$

$r(i)$ = distance between Ni source and eachPMT(i)

$$F(\theta) = 0.205 + 0.524 \times \cos\theta + 0.390 \times \cos^2\theta - 0.132 \times \cos^3\theta$$



PMTの見込み角に対する有感面積



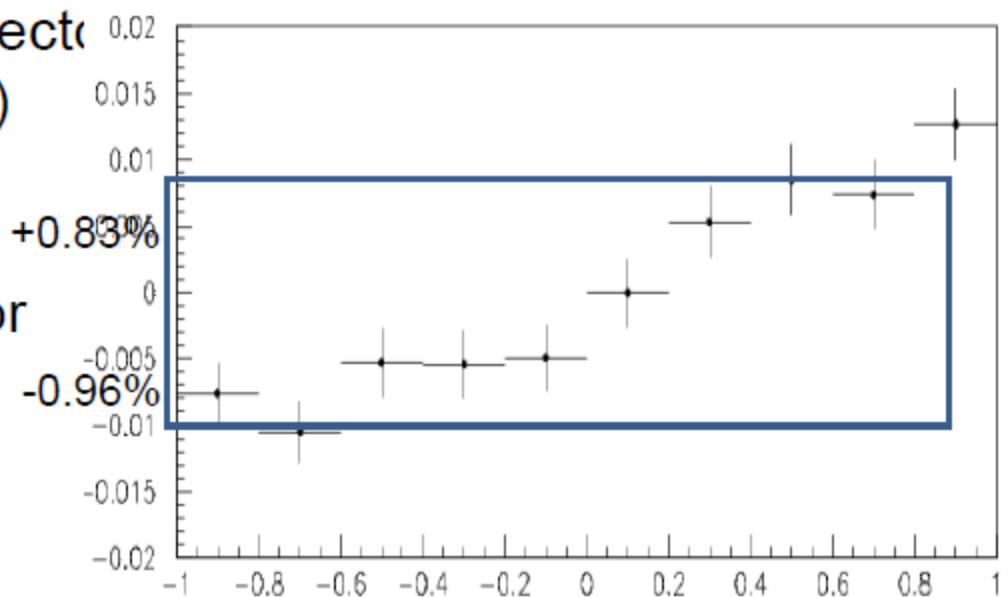
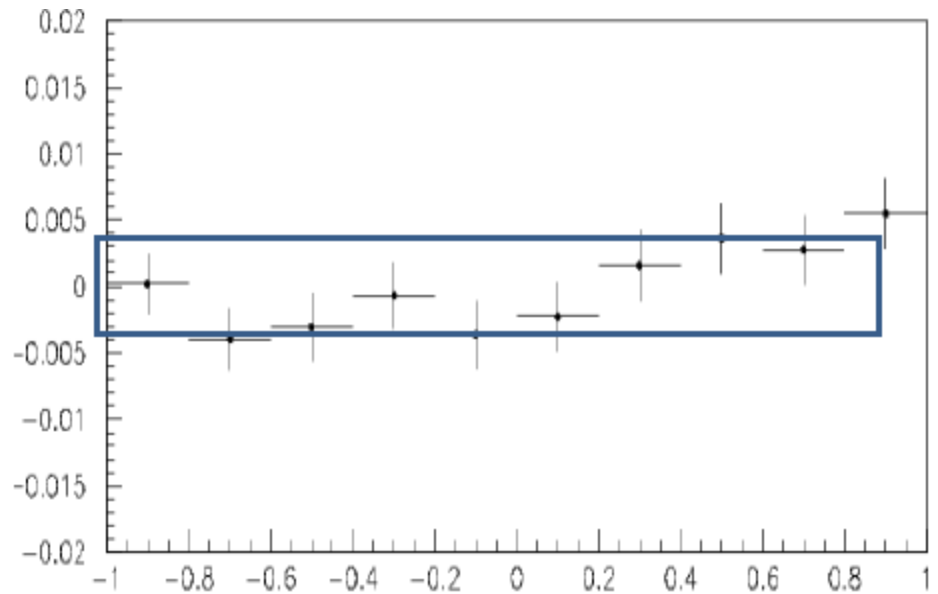
direction dep.

2008 Aug data +0.35%

top with TBA -0.37%
bot without TBA

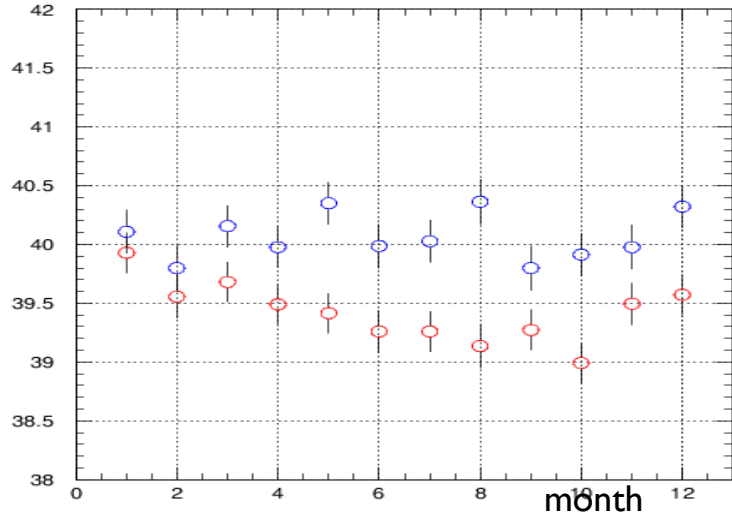
Difference between
Linac direction(down ward)
and average of other direct
($0.9 > \cos z$ was not used)
is 0.02%

→ conservatively,
let's take the size of error
as dir-dep.
0.25%



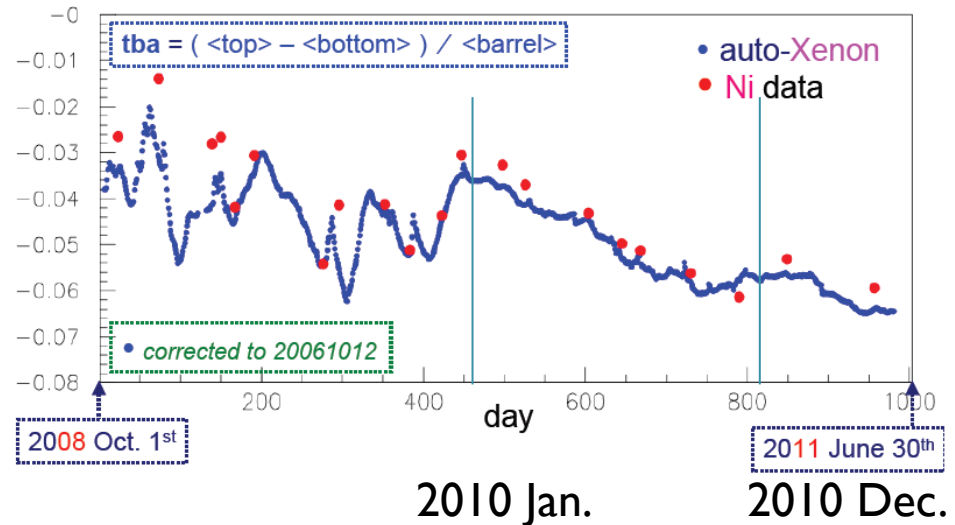
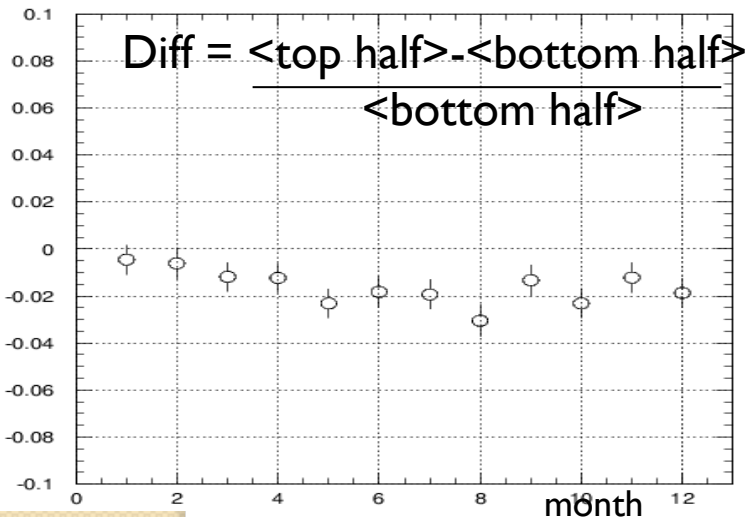
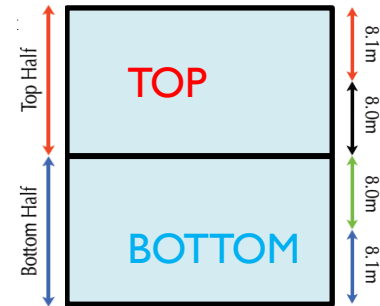
Z-dependent MC from decay-e

Total energy



Add error bars from last meeting.
Trend seems similar between diff and TBA of Auto-Xenon and Nickel.

Value = mean of energy spectrum
Error = RMS/sqrt(events)



Modify z-dependence of TBA parameter

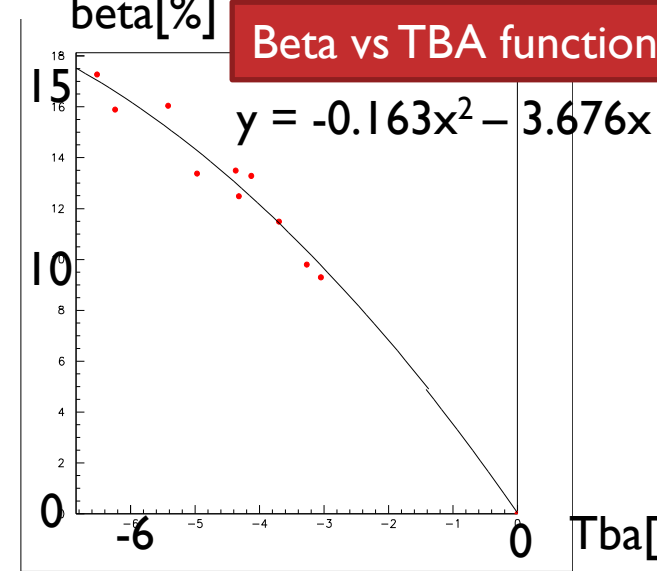
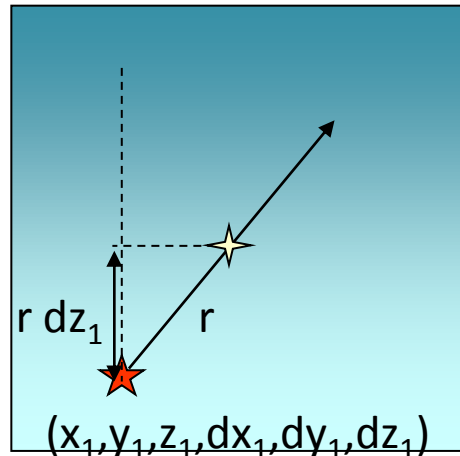
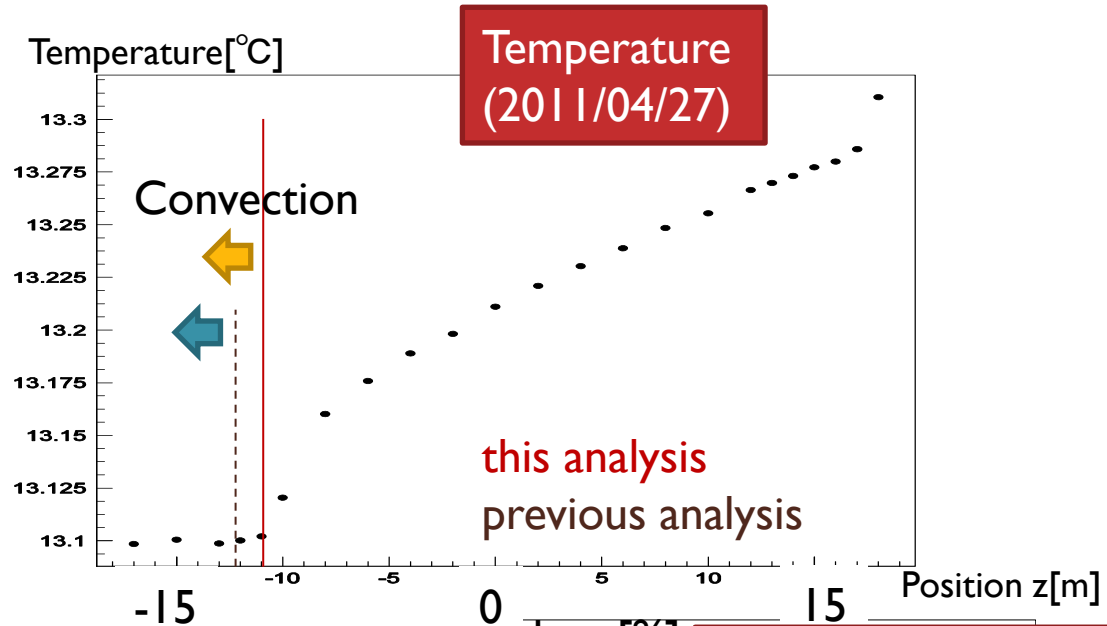
On 2011/04/27, measuring water temperature at each z position at center hole. From this figure, I change the convection point from $z=-12\text{m}$ to $z=-11\text{m}$.

Consider position dependence of QE.

And remake Ni MC for each month and tune the z-dependent parameter (beta-parameter)

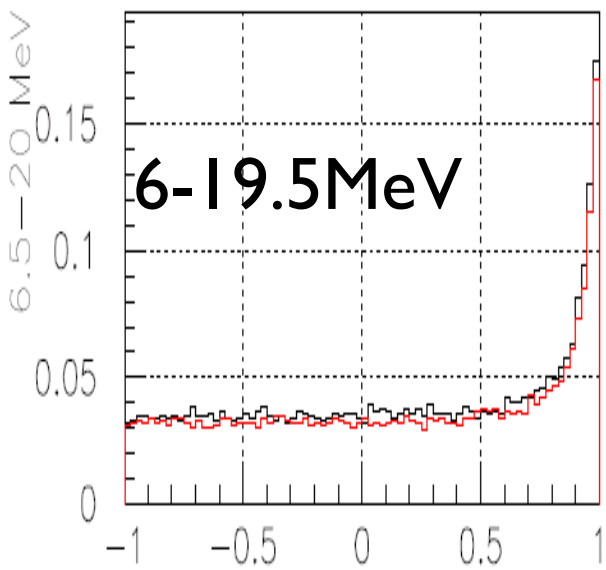
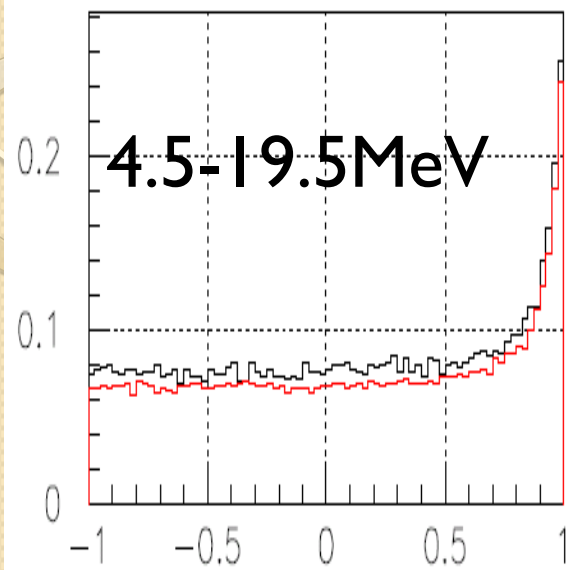
$$WT(\lambda) = 1 / (\alpha_{\text{abs}}(1 + \beta * z) + \alpha_{\text{sca}} + \alpha_{\text{asca}})$$

$$TBA = \frac{\langle \text{top} \rangle - \langle \text{bottom} \rangle}{\langle \text{barrel} \rangle}$$

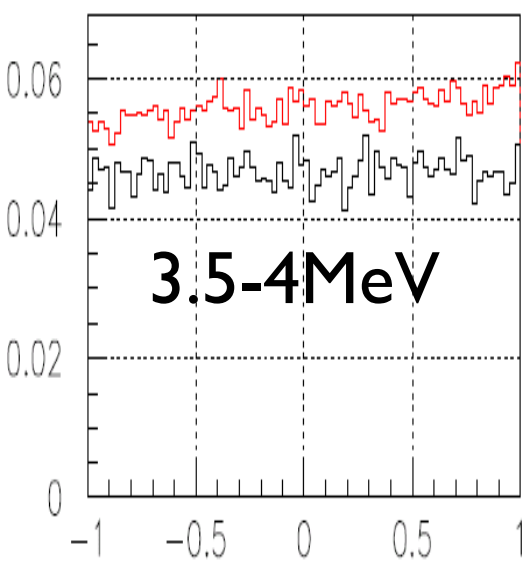
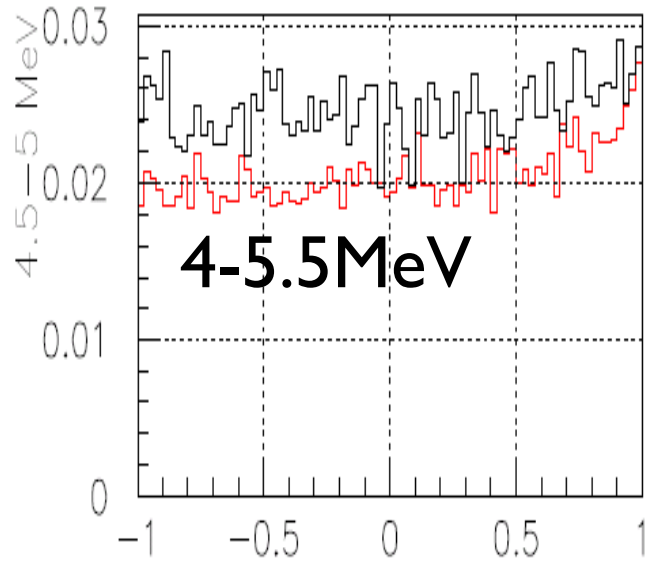
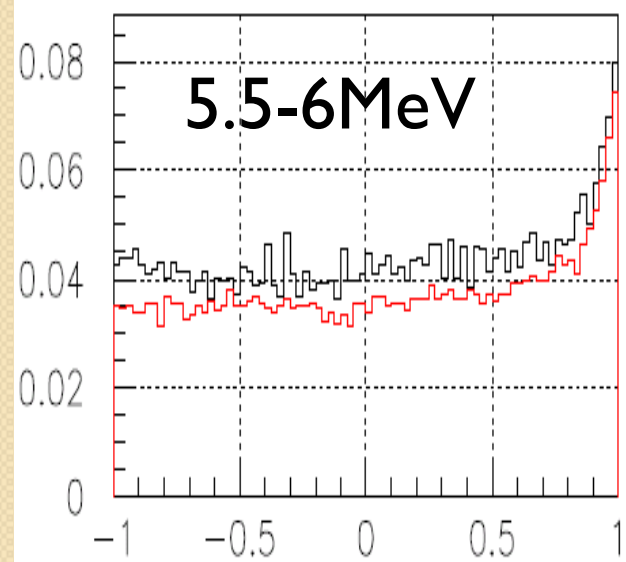


Solar angle distributions

Events/day/kton/bin



BLACK: SK3
RED : SK4



歪みのモデル依存

