

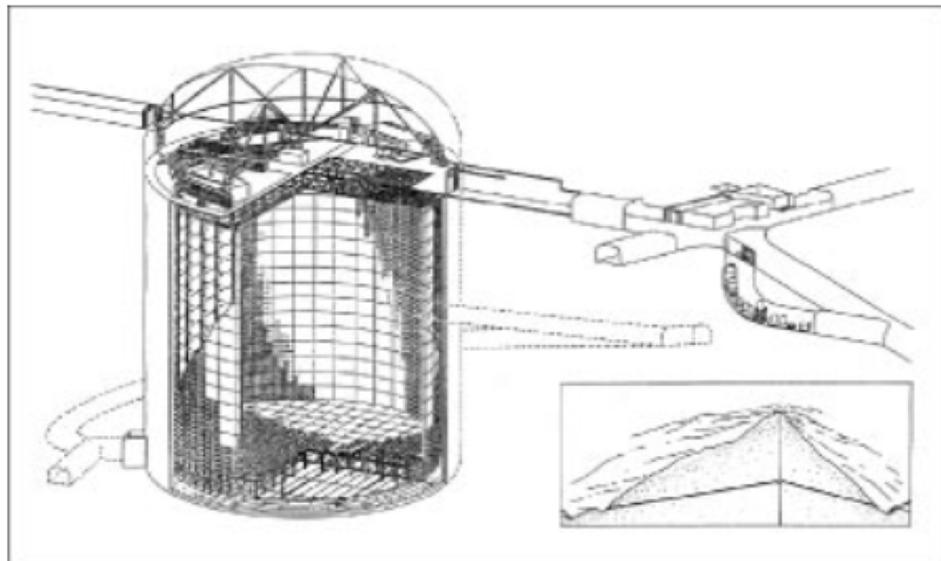
スーパーカミオカンデガドリニウム実験のための Nitrogen-16を用いたエネルギースケール評価

第28回ICEPPシンポジウム

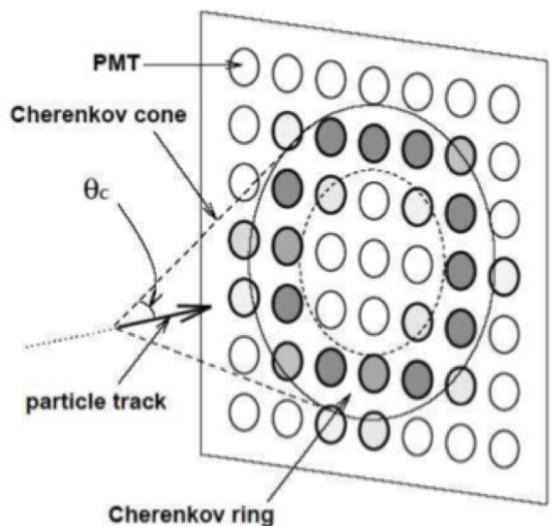
@志賀レークホテル

ICRR 兼村 侑希

スーパーカミオカンデ検出器(SK検出器)



- 岐阜県飛騨市池の山の地下1000mに位置する $50\text{k} \cdot \text{m}^3$ の水チェレンコフ検出器である。
- 直径39.3m、高さ41.4mの円筒型ステンレス製の水槽である。
- 内検出器(ID: $22.5\text{k} \cdot \text{m}^3$)と外検出器(OD)の2層式で、ID壁面に光電子増倍管(20-inchの11129本)が設置されている。
- **検出器中でニュートリノ反応由来の荷電粒子が作り出すチェレンコフ光を検出する。**

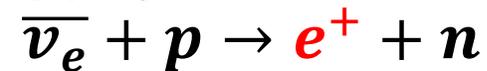


超新星背景ニュートリノ (SRN, DSNB)

- ニュートリノ放出を伴う超新星爆発の平均的な仕組み、宇宙初期における星形成や重元素の合成の歴史を探る。

$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{max}} R_{\{SN\}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$
$$E'_\nu = (1+z)E_\nu$$

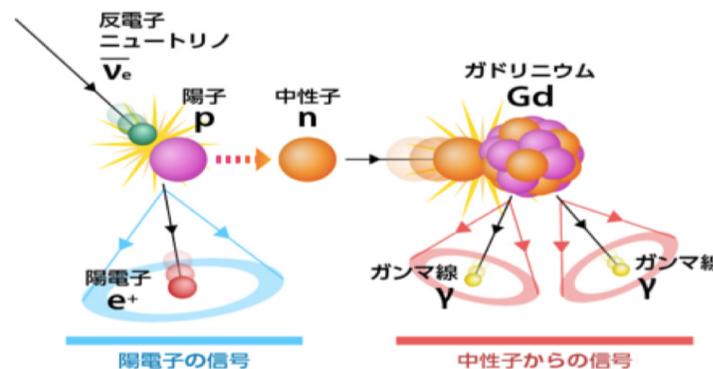
- SRNの反電子ニュートリノの探索を目指す。



- 2020年7月 SK-VI開始。

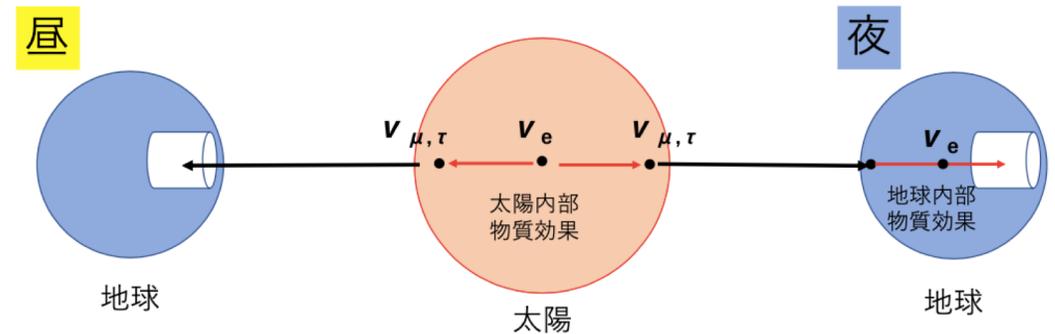
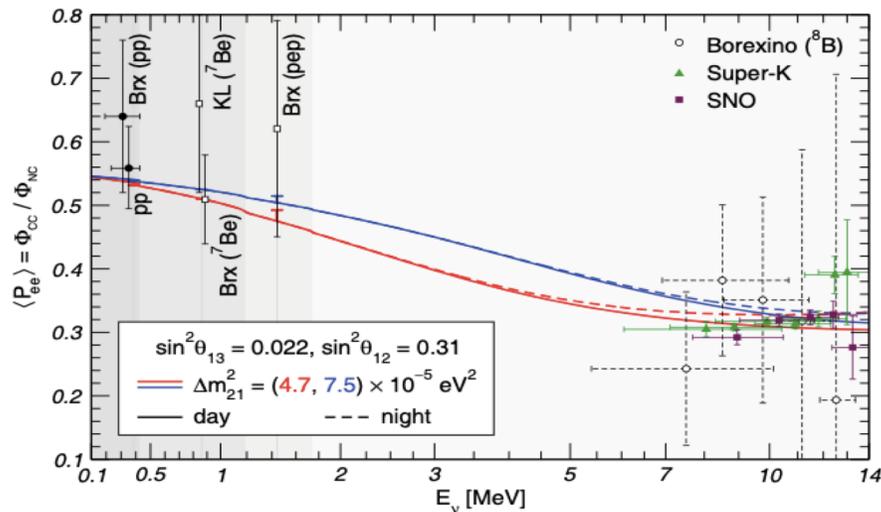
→ SK検出器に硫酸ガドリニウム・8水和物13tonの導入により純水からGd水(Gd濃度0.011%)へ

→ 反電子ニュートリノの検出感度を高めて、超新星背景ニュートリノ探索の向上を目指している。



太陽ニュートリノ (^8B ニュートリノ)

- 太陽ニュートリノの1つである ^8B ニュートリノの観測において、 ν_e と電子の弾性散乱の反応事象から、反跳電子のスペクトルを求める。
- ニュートリノ振動の物質効果の影響によるエネルギーごとの ν_e の生存確率や、フラックスの変動を調べることを物理目標とする。
 - 太陽内部での ν 振動の物質効果による太陽ニュートリノFluxの「Up-turn」現象
 - 地球内部での ν 振動の物質効果による太陽ニュートリノFluxの昼夜変動



太陽ニュートリノフラックスの昼夜変動

◎本修論の目的

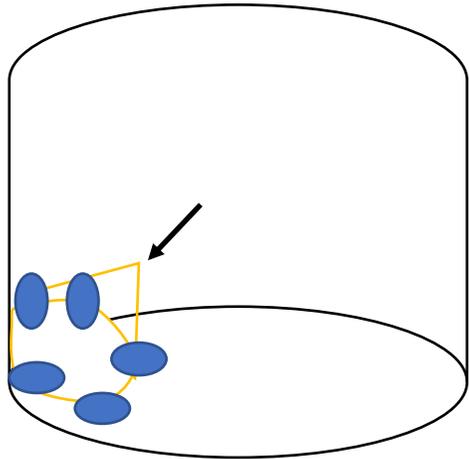
- 4.5MeVから20MeV領域のエネルギースケールの評価

SKの低エネルギー領域でのエネルギー再構成の方法

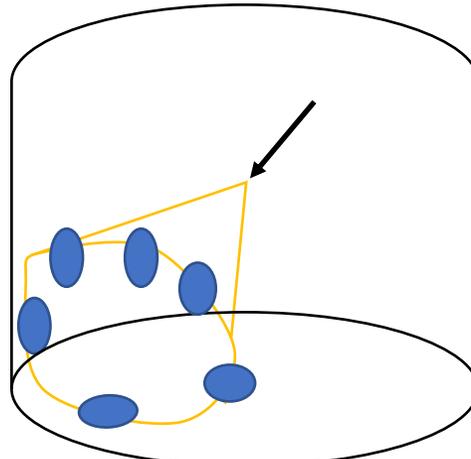
- チェレンコフ光がヒットしたPMTの本数から荷電粒子(電子)のもつTotal energyに変換している。

N50 → **有効ヒット数** → **Total energy (1MeV~6hit)**

N50: 50nsの時間幅にPMTがヒットした本数。→1hitあたり1光電子の検出



検出器壁際でPMTがヒットした場合



検出器中心側でPMTがヒットした場合

→同じエネルギーを持った荷電粒子でも再構成の場所が検出器の中心側の場合と壁際の場合とでN50は変わってしまう。

他にもDark rateやチェレンコフ光子の反射や散乱など、PMTや水の状況によって影響を受けるのでそれらを補正して、有効ヒット数(以下、Neff)を計算する。

→ **N50**→**Neff**の変換を¹⁶N崩壊事象由来のβ線γ線を用いて評価する。

研究目標&研究内容

◎研究目標

- ・ 太陽ニュートリノ観測のエネルギー領域である4.5~20MeVにおけるエネルギースケールをGd導入前と後で比較する。

◎ 研究内容

- ・ Gd導入前SK-IV(2008年10月~2018年5月),SK-V(2019年2月~2020年7月)と Gd導入後SK-VI(2020年7月~2021年9月)の期間におけるエネルギースケールの時間変化を確かめる。

^{16}N 崩壊事象を用いたエネルギースケール評価

- 半減期7.13sで等方的に崩壊する。

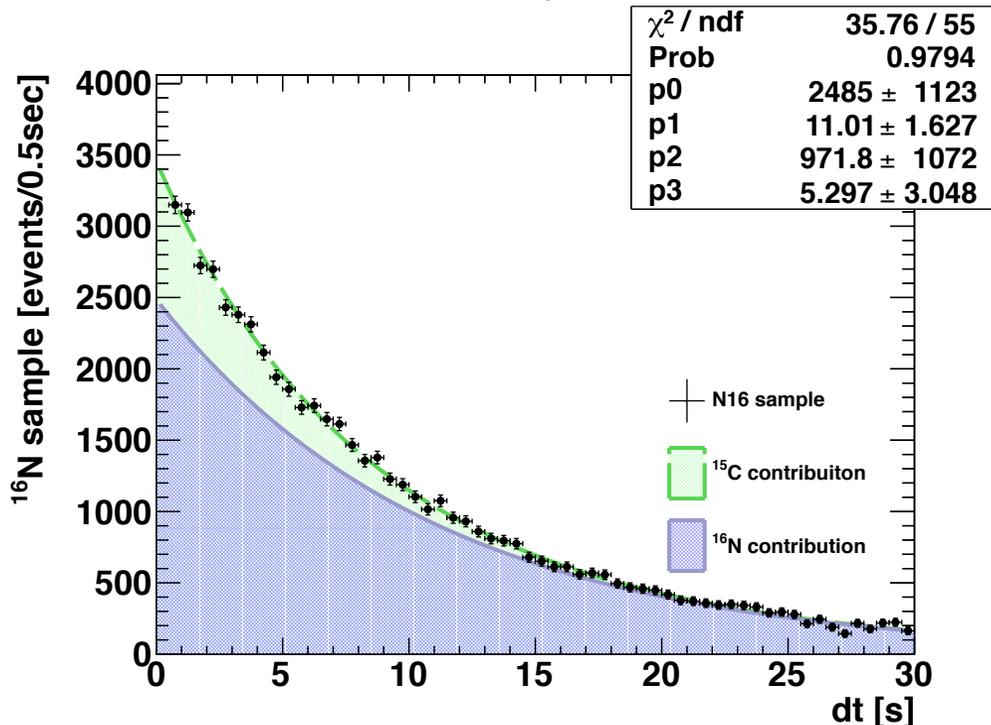
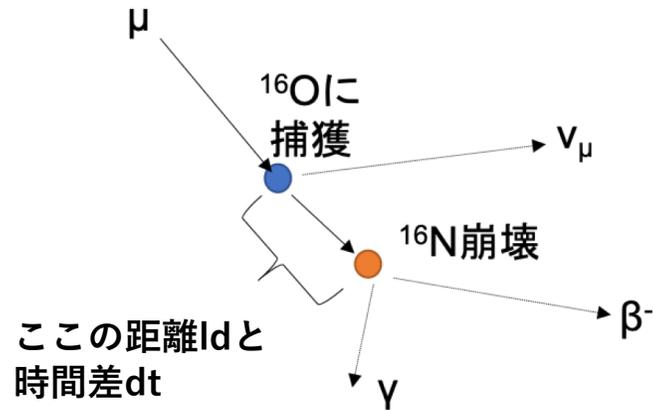


(1)宇宙線 μ^- が ^{16}O によって捕獲されることで生成される(^{16}N 解析)。



→ 統計が限られてしまいが、SK全期間、全領域にてエネルギースケール評価が可能。

^{16}N 崩壊事象の選択



- dt の条件 $0.1 \leq dt < 30.0 \text{ s}$ として、
Total sample (^{16}N 崩壊事象 + BG事象)を集める。
→ $100.1 \leq dt < 130.0 \text{ s}$ の選択条件を変えて、
BG sampleも一緒に集める。
→ この時にsignificanceが最も大きくなる ld の条件が
 $ld < 150 \text{ cm}$ だった。

- N16 sampleに ^{16}N 崩壊事象が入っているか確認する。
→ dt の分布から ^{16}N のdecay curveを確認する。

結果

$[p0] \exp\left(-\frac{dt}{[p1]}\right) + [p2] \exp\left(-\frac{dt}{[p3]}\right)$ でFittingを行なったところ、 $[p1] = 11.01 \pm 1.63 \text{ s}$ となり、 ^{16}N の崩壊時定数 10.3 s と一致。

→ 選択条件は ^{16}N 崩壊事象を適切に選択できている。

→ $[p3] = 5.30 \pm 3.05 \text{ s}$ となり、 ^{15}C の崩壊時定数 3.53 s と一致。
($^{16}\text{N}^* \rightarrow ^{15}\text{C} + p$)

定めた選択条件による統計への影響

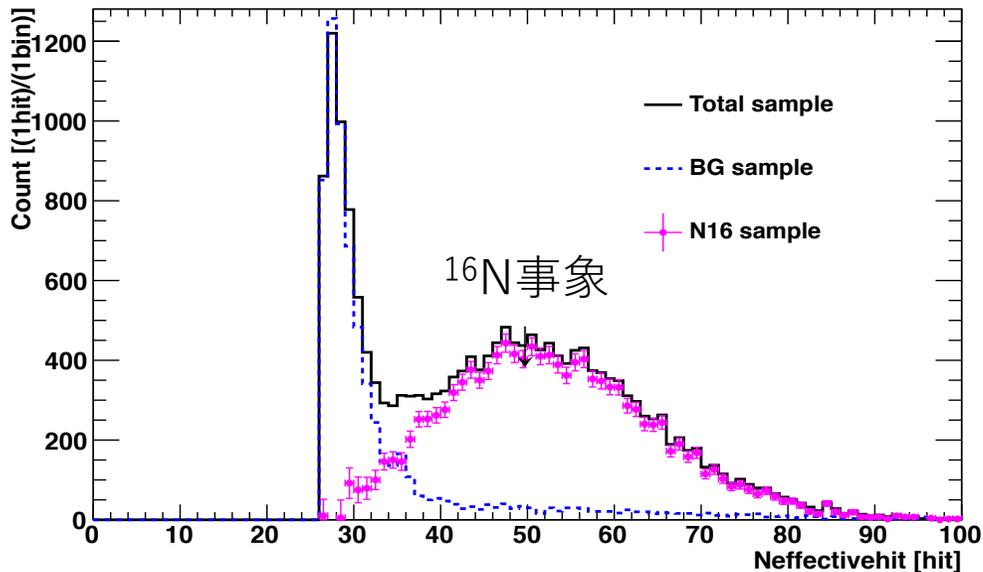
- 1日あたりN16のイベントが20.45eventとなる。

time	observed N16 event	statistical relative error[%]
1日	20.45	22.11
1ヶ月	613.53	4.04
6ヶ月	3732.34	1.64
1年	7464.67	1.16
2年	14929.35	0.82
3年	22394.02	0.67

- SK- IV(2008年10月~2018年5月) → **2年ごとの時間変化の解析。**
- SK- V(2019年2月~2020年7月), SK-VI(2020年7月~2021年9月)
→ **半年ごとの時間変化の解析。**

^{16}N 崩壊事象を用いたエネルギースケール評価方法

2011_2012



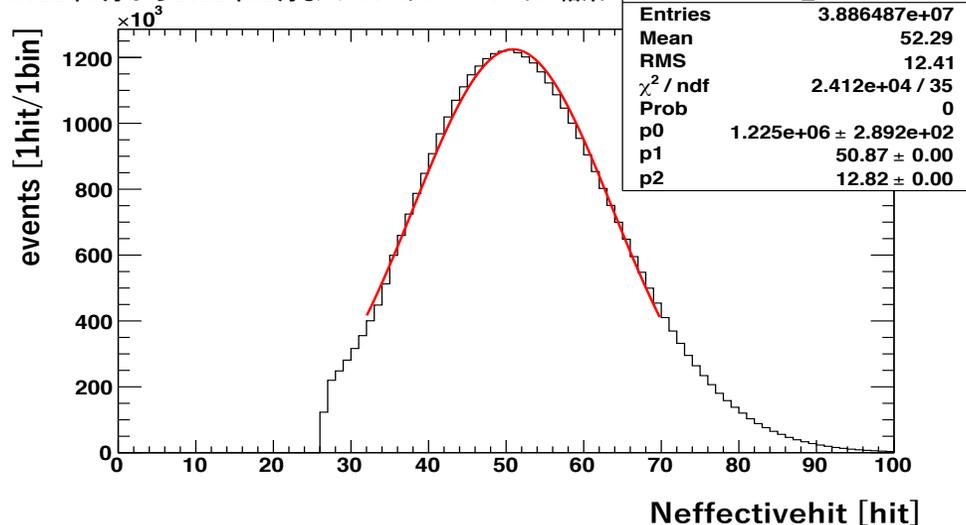
• SKData

(1) ^{16}N 崩壊のsignalとBG事象が混在した Total sampleとBG sampleのNeff分布をそれぞれplotする。

(2) 出来上がったヒストグラムを差し引く。

(3) ガウシアンFitでNeffのpeak値を求める。

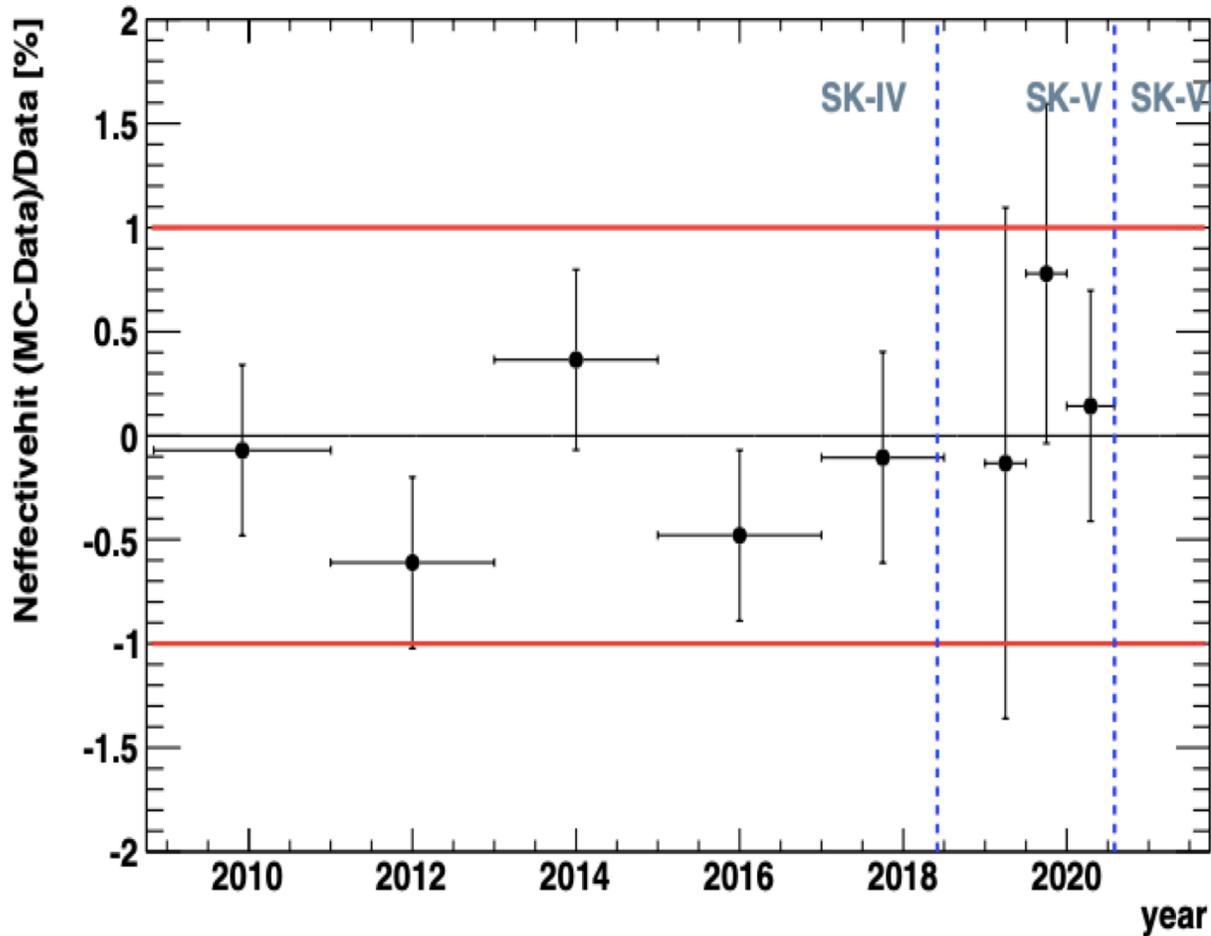
2011年1月から2012年12月までのシミュレーション結果



• MC(SK-IV, SK-Vのみ)

• 当時のSKの状況に合わせて、SK検出器中に一様に ^{16}N を分布し、崩壊させるシミュレーションを行った。

^{16}N 解析によるエネルギースケールの時間変化(Gd導入前)



- Neffのpeak値のMCとDataの差の割合 $\frac{MC-Data}{Data} \times 100[\%]$ の時間変化を確かめた。

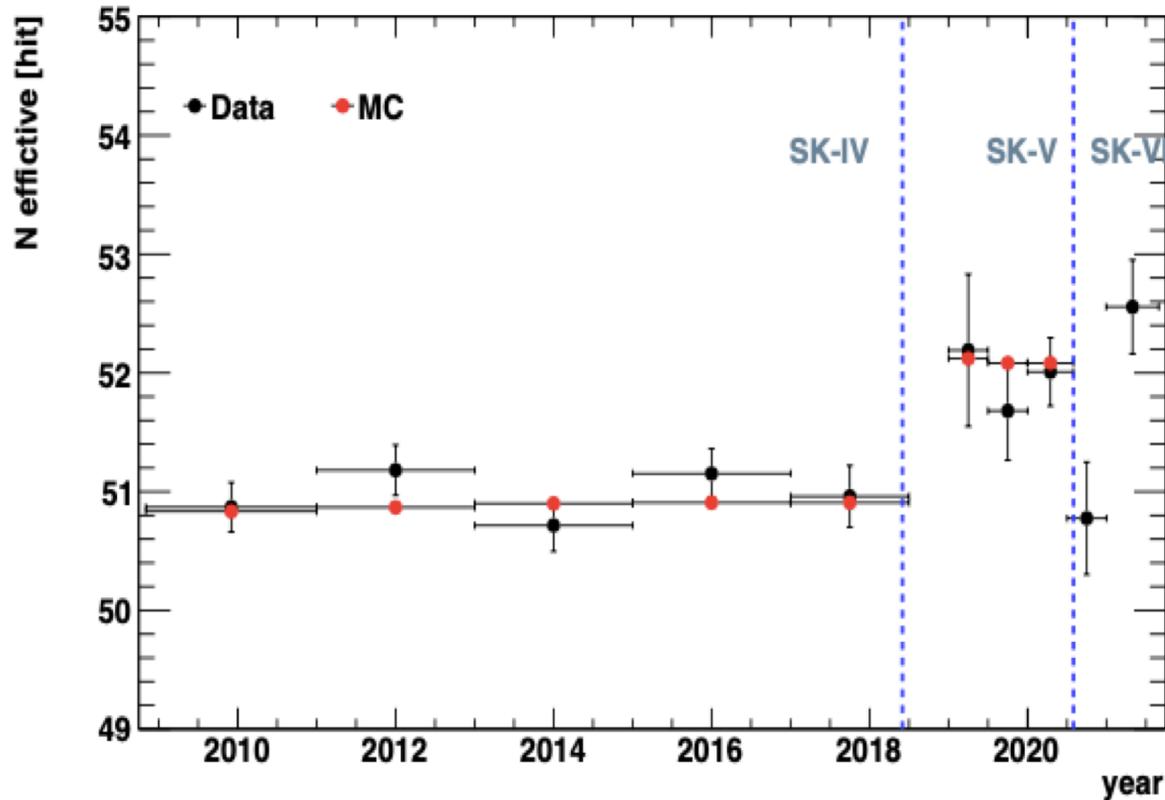
• 結果

SK-IV: 差の割合が、全期間において統計誤差($\sim 0.4\%$)の範囲内で0と一致している。

SK-V: 差の割合が、全期間において統計誤差($\sim 1.0\%$)の範囲内で0と一致している。

→ ^{16}N 解析によるSK-IVとSK-Vのエネルギースケール評価を正しく評価できている。

SKフェーズ間の ^{16}N 解析でのエネルギースケールの比較



- Neffのpeak値をDataとMC分けてplotした(SK-IVはDataのみ)。

- **結果**

SK-VIで観測されたNeffのpeak値も、統計誤差(0.4hit程度)の範囲内で、SK-VIとSK-Vの結果と一致。

→ Gdが導入後も、統計誤差0.4hitの範囲内でエネルギースケールは安定しており、同様なエネルギースケールで太陽ニュートリノ観測を継続できることを確認した。

まとめ

- 太陽ニュートリノフラックスの太陽内部での物質効果によるUp-Turn現象の観測と地球内部での物質効果による太陽ニュートリノフラックスの昼夜変動の観測を目指す。
 - 宇宙線 μ -捕獲由来の ^{16}N 崩壊事象を用いたエネルギースケール評価を行い、Gd導入後のNeffのpeak値がGd導入前のNeffのpeak値と統計誤差0.4hitの範囲内で一致していた。
- **Gd導入以後も太陽ニュートリノ観測領域であるエネルギースケールと同等であることを確認した。**
- **SK-VI以降におけるSK検出器全域での低エネルギー領域でのエネルギースケール評価を行なったのは、 ^{16}N 解析が唯一となっている。**

Back up

太陽ニュートリノフラックスの昼夜変動

Phys. Rev. Lett. 112, 091805(2014)

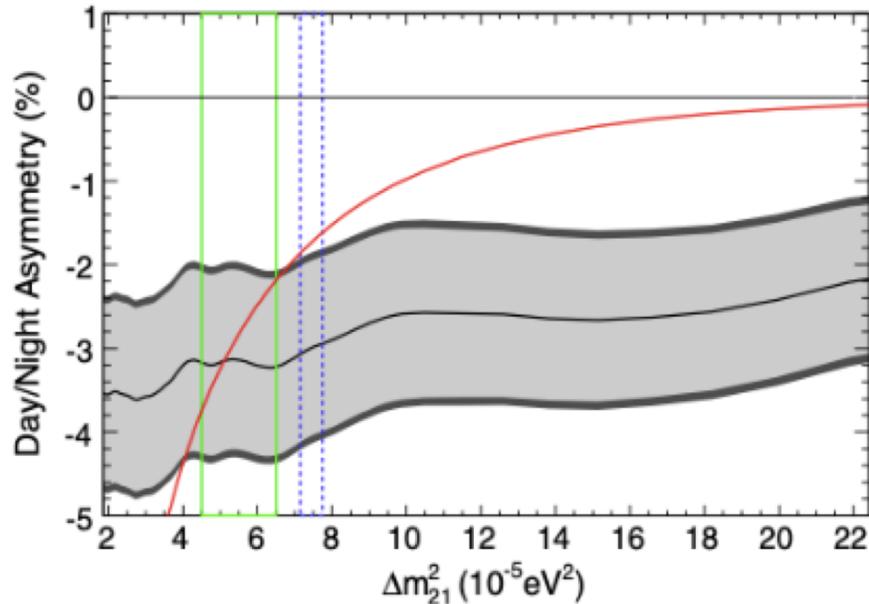


Fig.2.37 振動パラメータ Δm_{12}^2 に対する昼夜変動による太陽ニュートリノのフラックスの違いの割合の依存性: ニュートリノ振動の振幅 $\sin^2 \theta_{12} = 0.314$, $\sin^2 \theta_{13} = 0.025$ とした時の変化を示している。赤線が予測されるフラックスの違いの割合の予測、細い黒線が実験データ、灰色のバンドは 1σ の統計誤差の領域を示す。緑の実線で囲まれている領域はグローバル analysis で明らかにされた Δm_{12}^2 の値 (1σ の統計誤差つき)、青の点線で囲まれている領域は KamLAND の実験で明らかにされている Δm_{12}^2 の値 (1σ の統計誤差つき) を表す。

- 昼夜変動による flux の変動割合

$$A_{DN} = \frac{\Phi_{day} - \Phi_{night}}{0.5(\Phi_{day} + \Phi_{night})}$$

- 現在求められている太陽ニュートリノ振動パラメータによると、 $A_{DN} = -0.15 \sim -0.2\%$ になることが予想。
 - 実験結果: $A_{DN} \sim -0.32 \pm 0.11(stat) \pm 0.05(syst) \%$
 - KamLAND の結果と Δm_{12}^2 の結果が 2σ ぐらい離れている(論文ではここまで紹介)。
- 最近の研究では $A_{DN} \sim -0.21 \pm 0.11\%$ 、KamLAND の結果と Δm_{12}^2 の結果が 1.4σ ぐらい離れている。

Neffの補正

$$N_{eff} = \sum_{i=0}^{N_{50}} \left[(X_i + \epsilon_{tail} - \epsilon_{dark,i}) C_i \frac{N_{all}}{N_{alive}} \frac{S(0,0)}{S(\theta_i, \varphi_i)} \exp\left(\frac{r_i}{\lambda_{eff}(t)}\right) \frac{1}{QE_i} \right]$$

壊れていない
個々のPMTの
Dark rateの
補正項

壊れていない
PMTの数補正

水透過率の補正
 r_i = 再構成vertexから
 i 番目のPMTの距離
 $\lambda_{eff}(t)$: 水による減衰
波長

複数光電子
補正:
隣り合う
PMTの数8
個中何個hit
しているか
で変わる。

チェレンコフ
光子の反射・
散乱の補正:
トリガーか
かってから
100ns中後半
50nsにhitした
数

個々のPMTの
ゲイン補正
(SK-IVのみ)

PMTの光電面への
入射角補正:
チェレンコフ光の
入射角の違いで
PMTが検出する光
電子の数が異なる。

量子効率補正
 i 番目のPMTの
チェレンコフ光
子検出効率補正

スーパーカミオカンデ(SK)のエネルギー毎の物理観測対象とキャリブレーションの種類

SKではさまざまな物理観測対象を持ち、それぞれのエネルギー毎に利用されるキャリブレーションが異なっている。

Energy	3.5MeV~	10MeV~	20MeV~	100MeV~TeV
	← 太陽ニュートリノ →		← 超新星ニュートリノ →	
	← SRN →			← 大気ニュートリノ →
				← 陽子崩壊 →
キャリブレーション				
LINAC	5,8MeV	12,15,18MeV		
DTcalib, ¹⁶N崩壊	○	○		
Ni	○			
Decay e	○	○	50MeVまで	

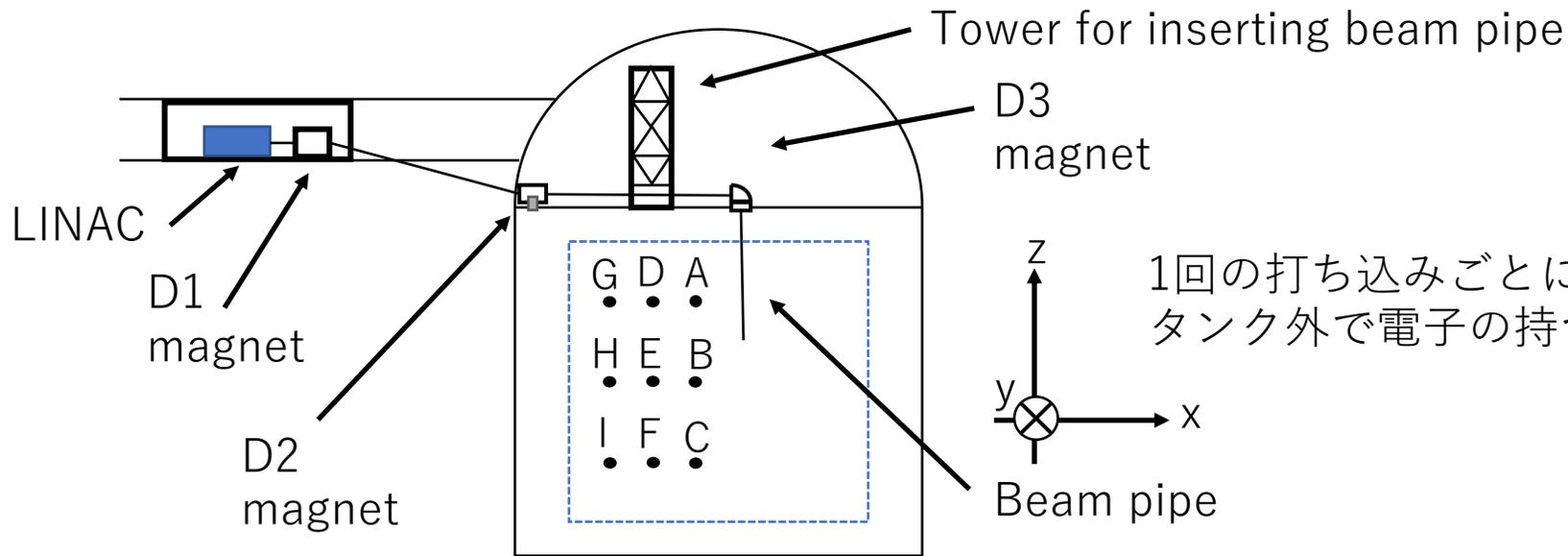
今回は¹⁶N崩壊を使用!

SKのエネルギースケール決定方法

LINAC(Linear Accelerator)キャリブレーション

- 5~16MeVの電子1つを直線型加速器でSKタンク内の特定のpositionに打ち込む。

良い点 ・ 単一エネルギーの電子を入射することができる。



1回の打ち込みごとにヒットしたPMTの数をSKで計測した後、タンク外で電子の持つ正確なエネルギー値をGe検出器で測定。

悪い点 ・ 実質計9箇所しか電子を打ち込むことができない。

- かなりの多くの人手が必要。

- 連続的にモニタリングができない。(年に1回が限界)

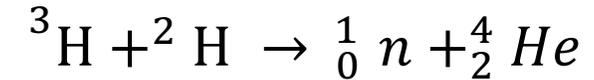
Calibration dataとの比較



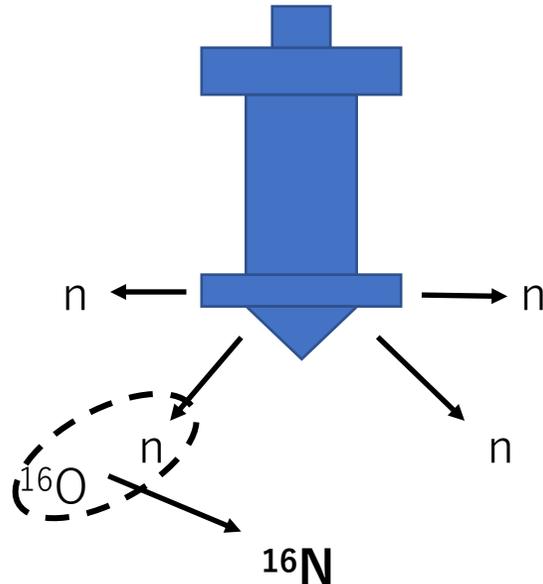
DTG
(Deuterium-Tritium
neutron Generator)

◎DT calibration

- 以下の反応を利用して**14.2MeV**の中性子を生成する。



- この中性子をタンク内で放射させてその場で ${}^{16}\text{N}$ を生成することができる。
- LINACと違ってportable製なので、比較的広い場所でスケール評価ができる。



Idのcut条件の決定する方法

- Idの条件を以下の9種類に設定して、それぞれのSK-4のN16のrootfileを totalevent用と BGsample用2つずつ用意する。

50,100,150,200,250,300,335,400,500cm

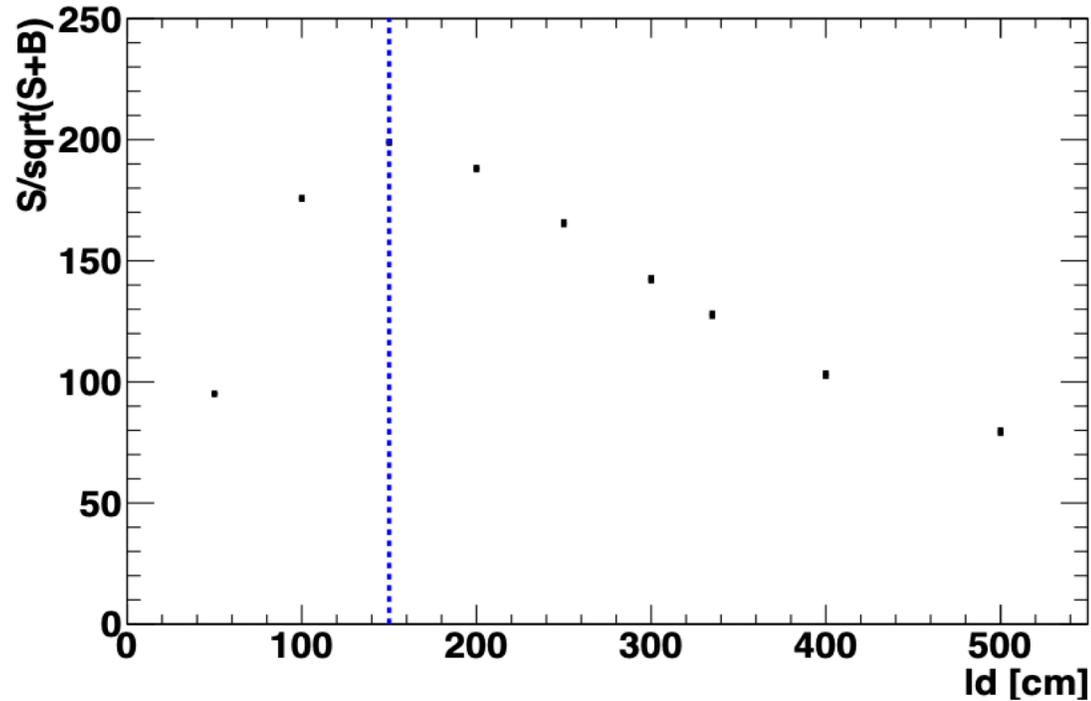
- それぞれのIdの条件を満たすevent数とBG数それぞれの積分値を解析して、

$significance = \frac{totalevent - totalbg}{\sqrt{totalevent}}$ の分布で最大となる点、

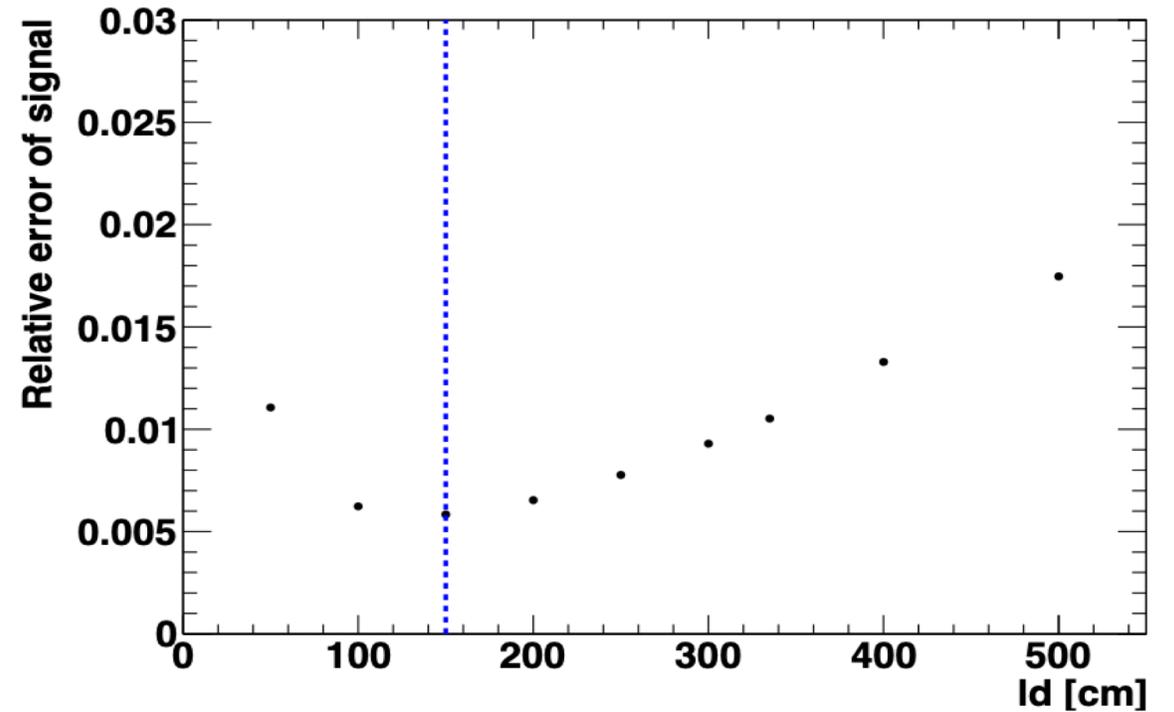
signalの $relative\ error = \frac{\sqrt{totalevent + totalbg}}{totalevent - totalbg}$ が最小となる点を調べる。

結果

Significance



Signal relative error



significanceで最大値、signalの相対誤差の最小値を取る l_d の条件は**共に150cm**となっている。