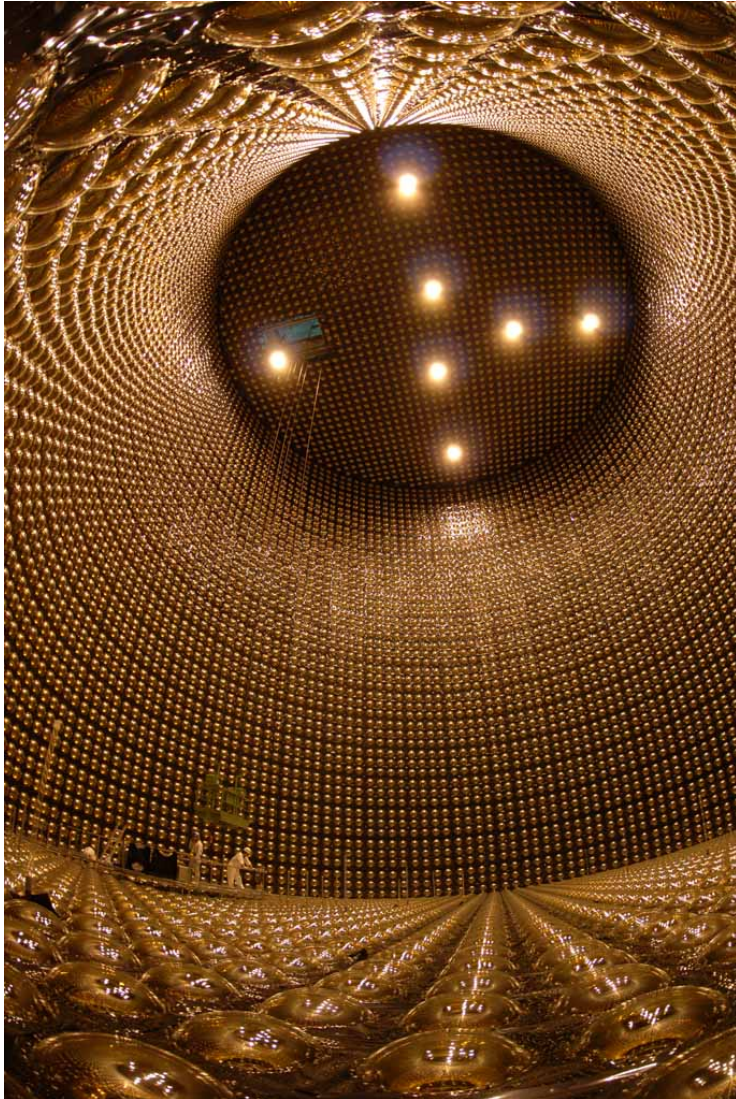


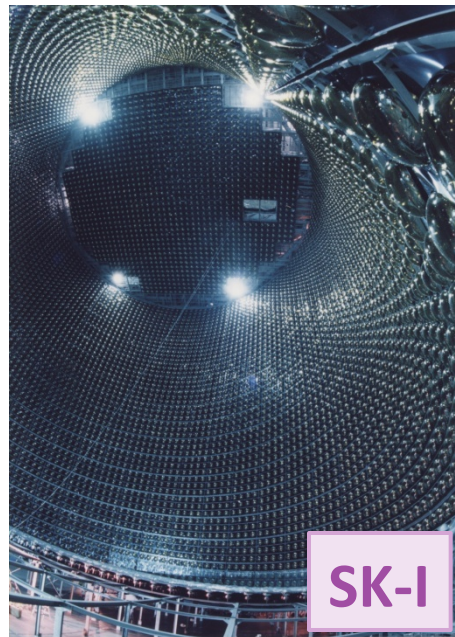
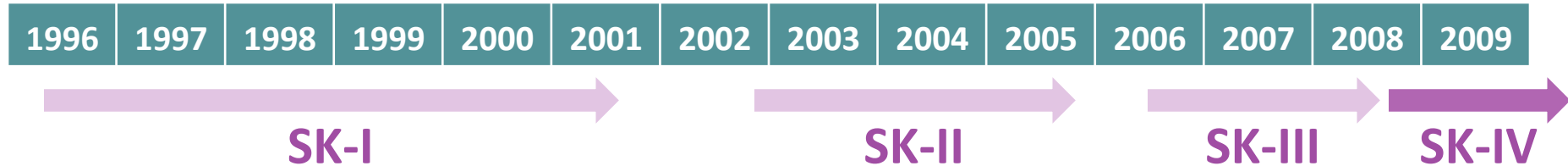
# SK future 大気 $\nu$ 、太陽 $\nu$ 、Gd



中畑 雅行

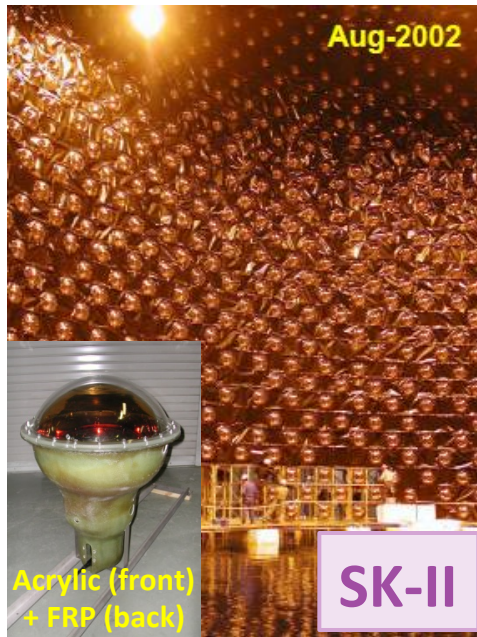
神岡宇宙素粒子研究施設/  
数物連携宇宙研究機構

# Super-Kamiokandeの歴史



11146 ID PMTs  
(40% coverage)

Energy  
Threshold **5.0 MeV**  
(total electron energy)



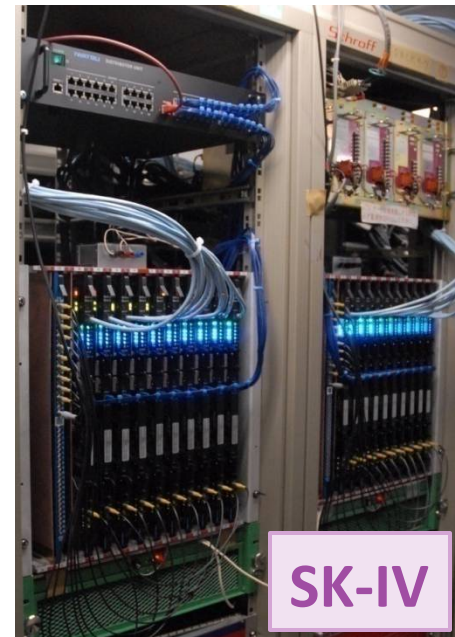
5182 ID PMTs  
(19% coverage)

**7.0 MeV**



11129 ID PMTs  
(40% coverage)

**4.5 MeV**  
work in progress



Electronics  
Upgrade

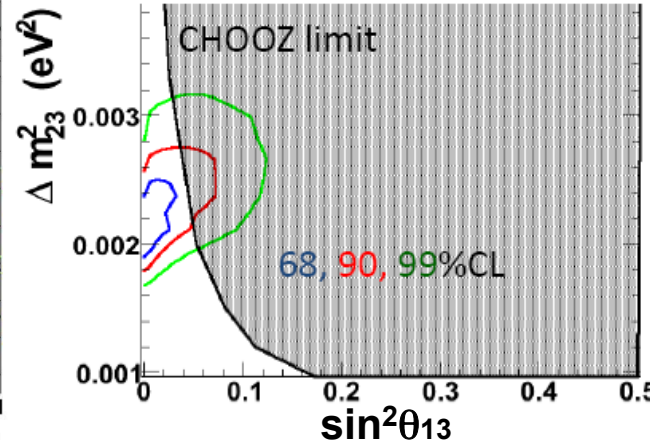
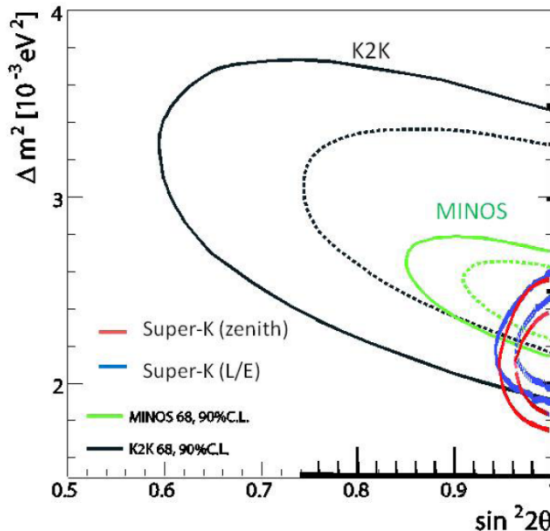
**< 4.0 MeV**  
target



# 大気ν: 現状のまとめ

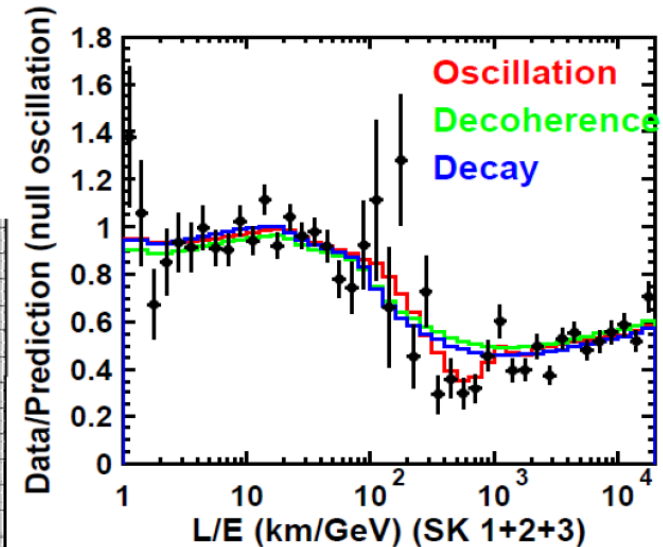
## ニュートリノ振動解析

- SK-IIIを追加。
  - 2806days (173ktonyr) for FC+PC
  - 3109days for up-mu
- $\sin^2 2\theta > 0.95$ ,  $0.0017 < |\Delta m^2| < 0.0026 \text{ eV}^2$  (90% CL)
- 加速器実験 (MINOS,  $\sin^2 2\theta > 0.85$ ,  $0.0021 < |\Delta m^2| < 0.0027 \text{ eV}^2$ ) と相補的。混合角はSKから強い制限。
- $\sin^2 \theta_{13} < 0.07$  (3世代解析、90%CL)
- 今後full振動解析 (3つの混合角とCP $\delta$ 全てを考慮) を行う予定。



## Exotic Modelの検証

- ν Decoherence  $5.4\sigma$
- ν Decay  $4.4\sigma$
- $\nu\mu \rightarrow \nu s$   $7.3\sigma$
- MaVaN models  $3.5\text{--}3.8\sigma$
- Flavor Changing NC  $< 6.5 \times 10^{-3}$
- lepton universality  $< 5.0 \times 10^{-2}$



## WIMP起源のμ flux上限値:

- $< 4.1\text{--}8.8 \times 10^{-15} / \text{cm}^2 / \text{sec}$  ( $M_{\text{WIMP}} = 10 \text{ GeV}$ )
- $< 2.7\text{--}4.1 \times 10^{-15} / \text{cm}^2 / \text{sec}$  ( $M_{\text{WIMP}} = 10 \text{ TeV}$ )

• GRB080319B **APJ 697 (2009) 730**

# 大気ν将来: 有限の $\theta_{13}$ の探索

One mass scale dominance approx.

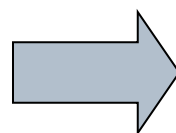
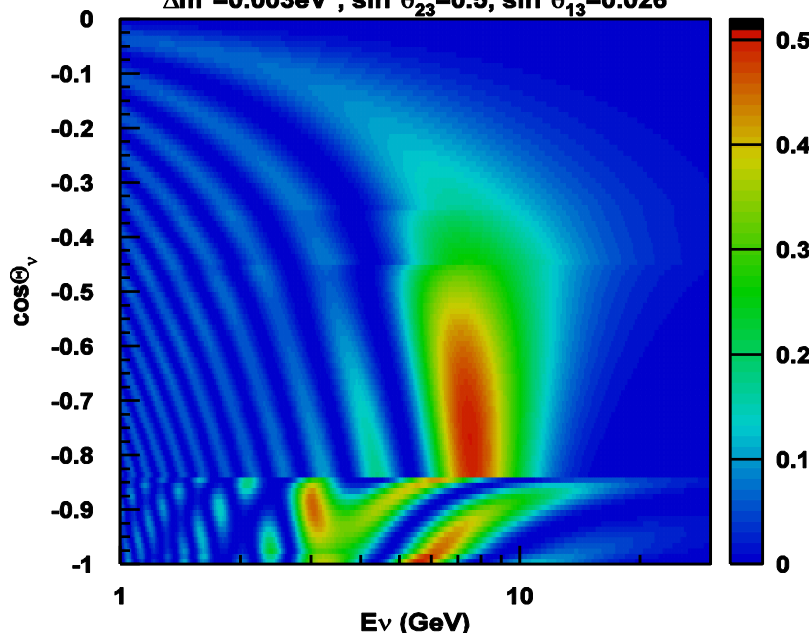
$$\Delta m_{12}^2 \sim 0, \Delta m_{13}^2 \sim \Delta m_{23}^2 = \Delta m^2$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 \theta_{23} \cdot \sin^2 2\theta_{13} \cdot \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 L}{E} \right)$$

only 3 parameters

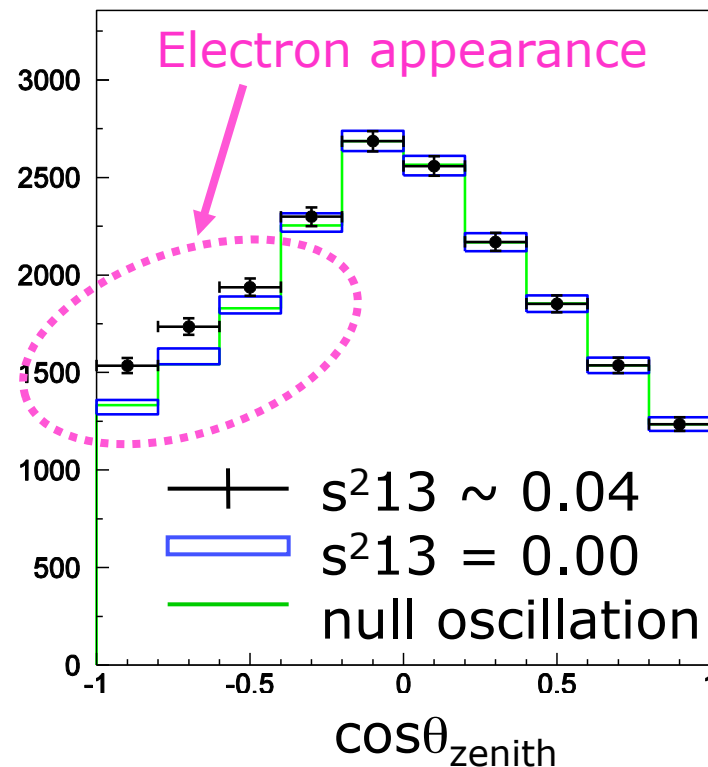
$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  at SK

$\Delta m^2 = 0.003 \text{ eV}^2, \sin^2 \theta_{23} = 0.5, \sin^2 \theta_{13} = 0.026$



Simulation (4.5 Mton·yr)

1+multi-ring, e-like, 2.5~5 GeV/c

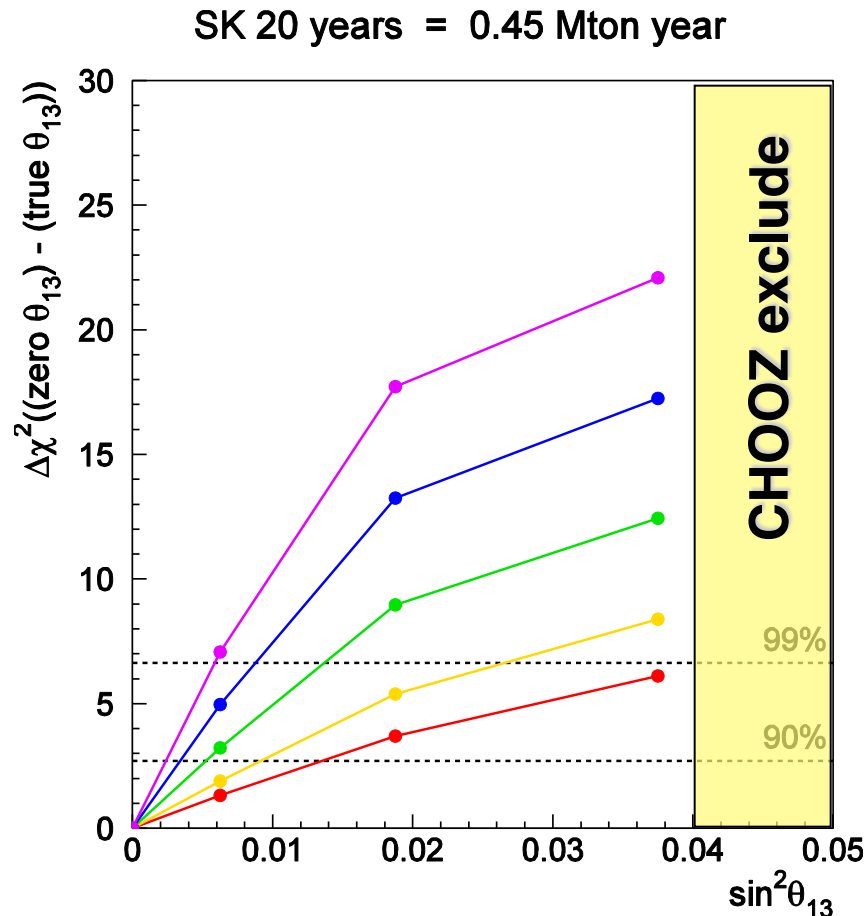


Several GeVのニュートリノで物質効果による $\nu_e$ の増加が期待できる。

# 大気ν将来： $\theta_{13}$ の感度

## Sensitivity of 20 years' SK data

$s^2 2\theta_{12} = 0.825$   
 $s^2 \theta_{23} = 0.4 \sim 0.6$   
 $s^2 \theta_{13} = 0.00 \sim 0.04$   
 $\delta_{CP} = 45^\circ$   
 $\Delta m^2_{12} = 8.3e-5$   
 $\Delta m^2_{23} = 2.5e-3$



$\sin^2 \theta_{23} =$

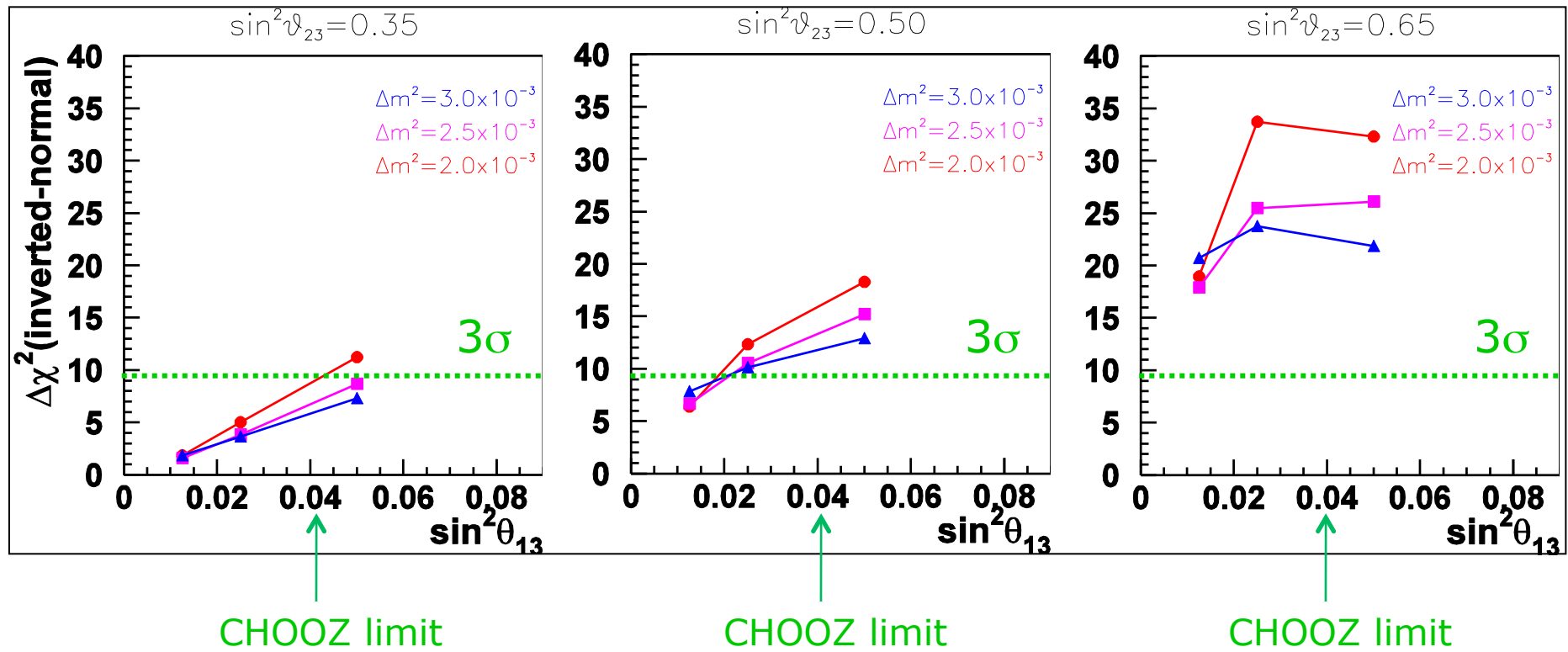
- 0.60
- 0.55
- 0.50
- 0.45
- 0.40

もし $\theta_{13}$ がCHOOZ limitの近くにあれば, 有限の $\theta_{13}$  がSKの大気ニュートリノで観測できる可能性がある。

# 質量階層性への感度(1)

1.8 Mton·yr = 3.3yr HK  
(SK80年分に相当。20年分だと統計1/4で有意性は1/2)

答えが正の階層性の場合

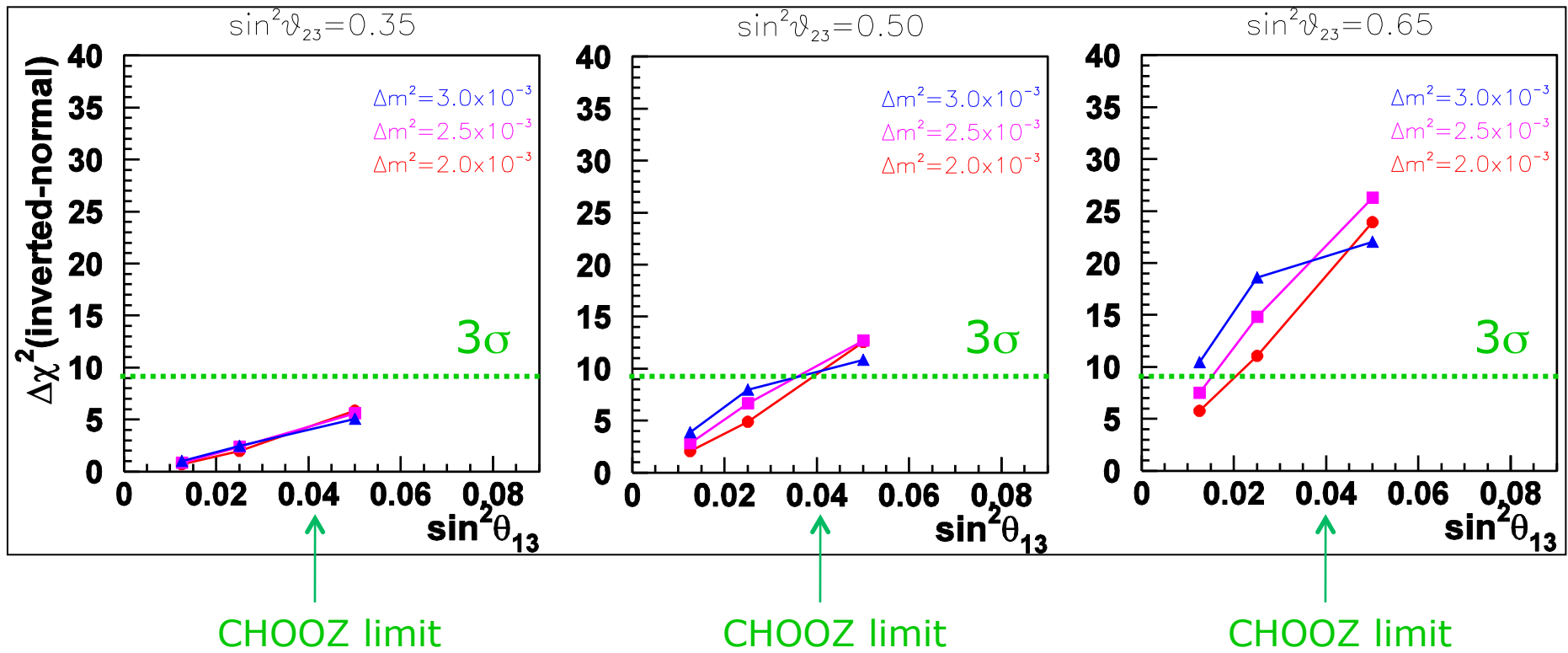


SK 20年分のデータの場合は、 $3\sigma \diamond 1.5\sigma$

# 質量階層性への感度(2)

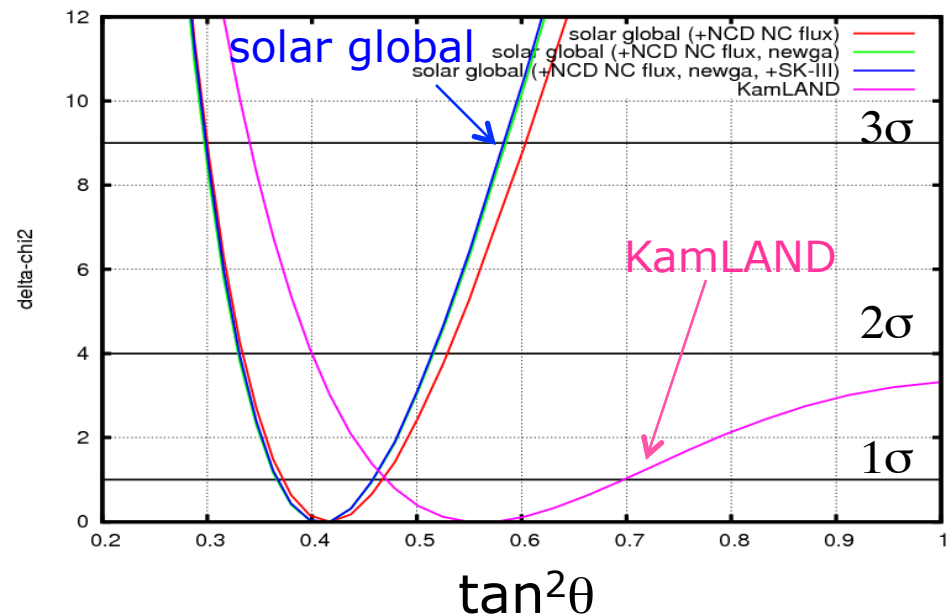
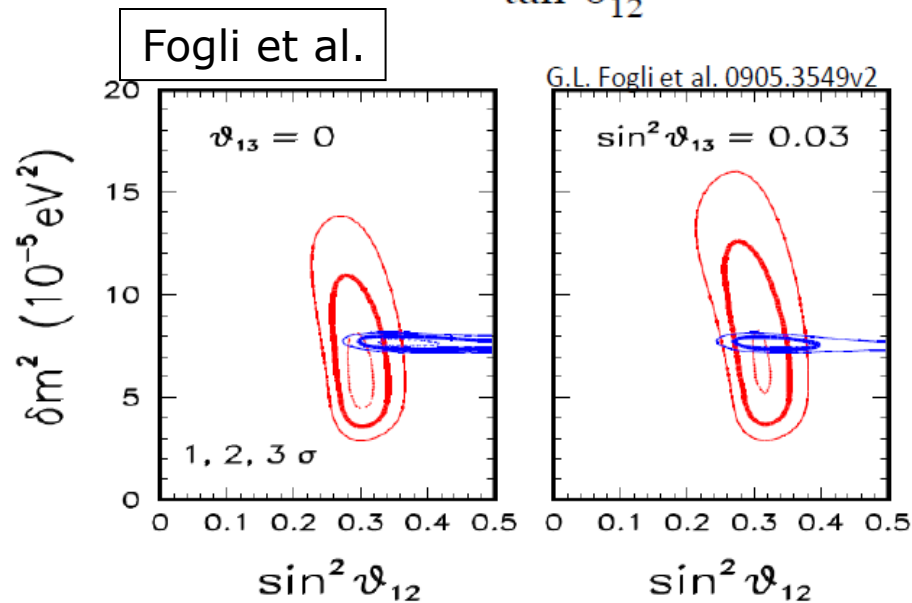
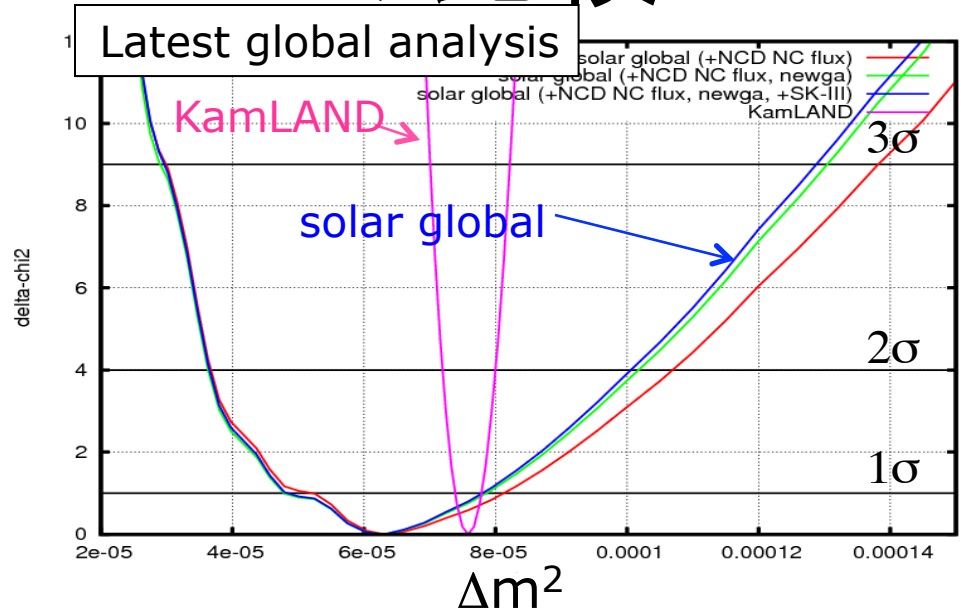
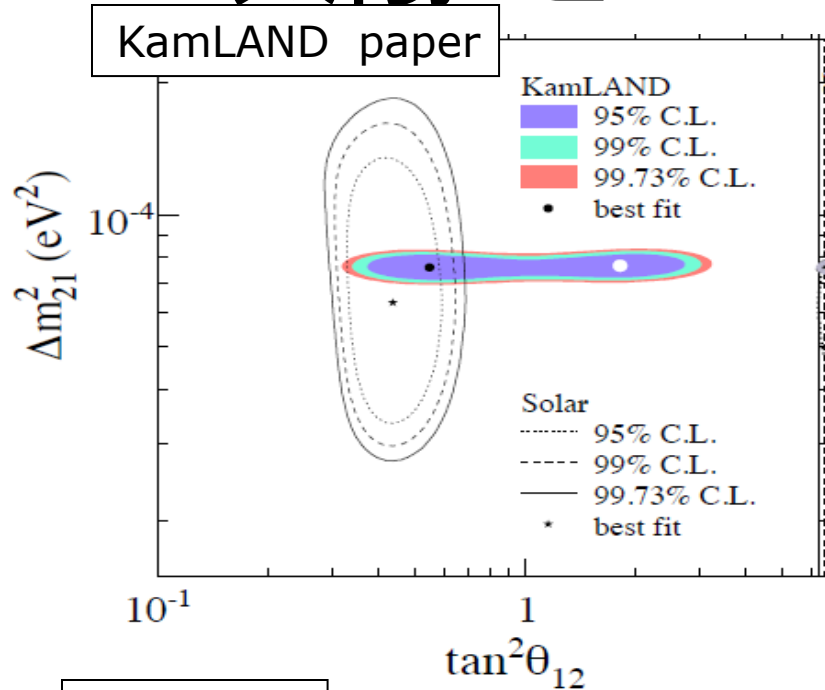
1.8 Mton·yr = 3.3yr HK  
(SK80年分に相当。20年分だと統計1/4で有意性は1/2)

答えが負の階層性の場合



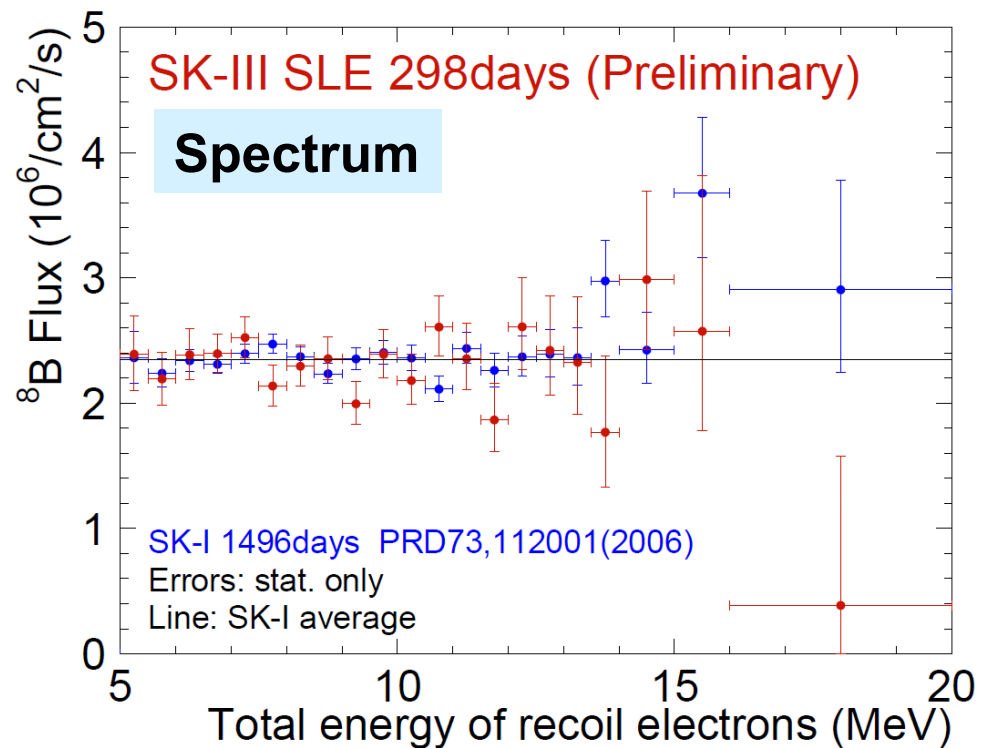
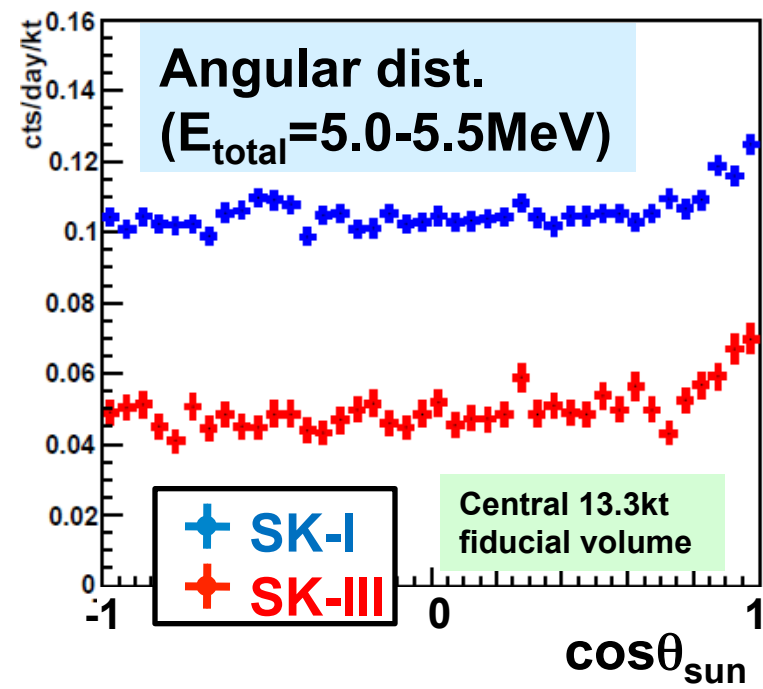
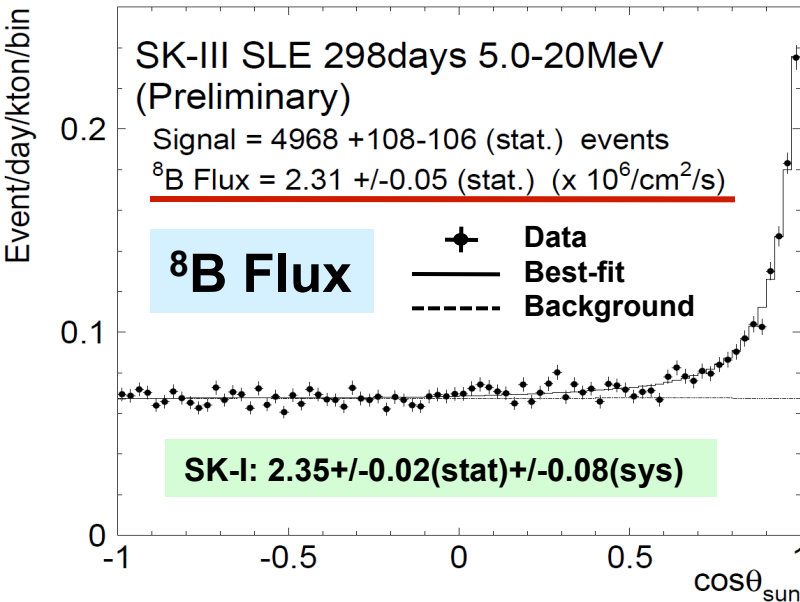
SK 20年分のデータの場合は、 $3\sigma \diamond 1.5\sigma$

# 太陽νとKamLANDの比較





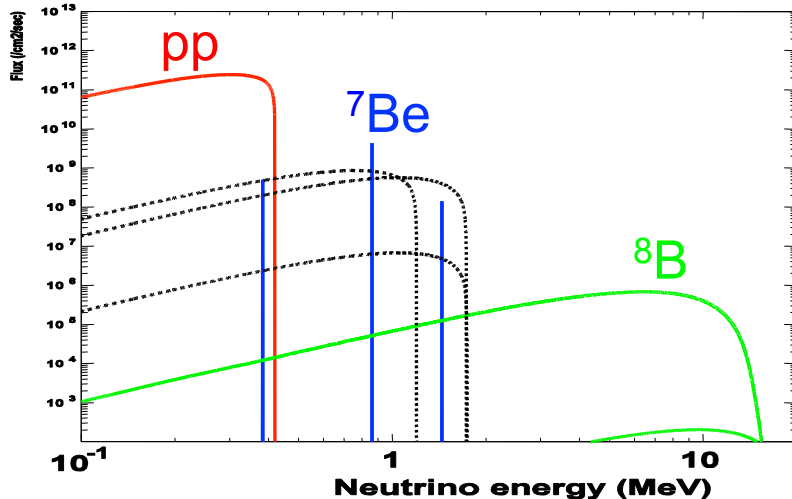
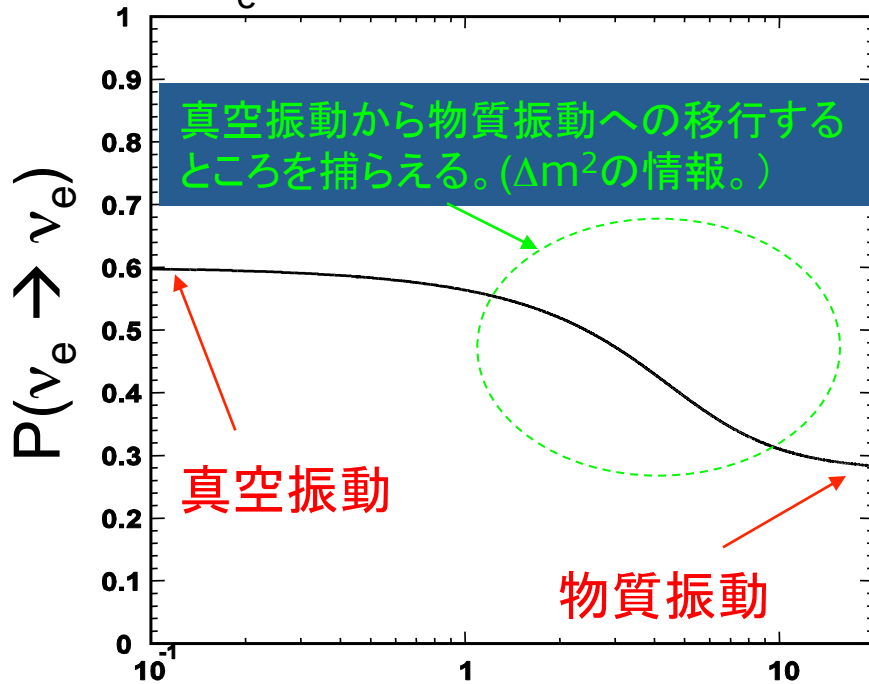
# 太陽ν: 最新の結果 (SK-IIIでの観測)



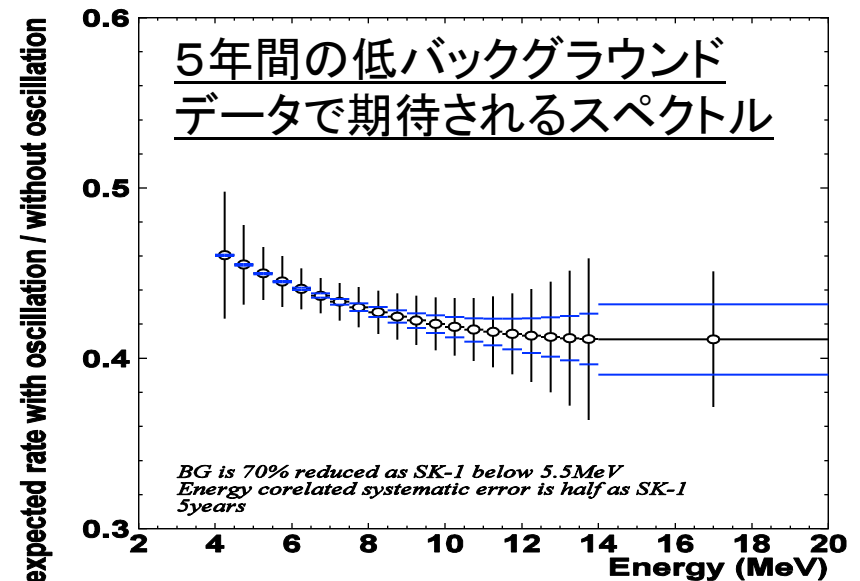
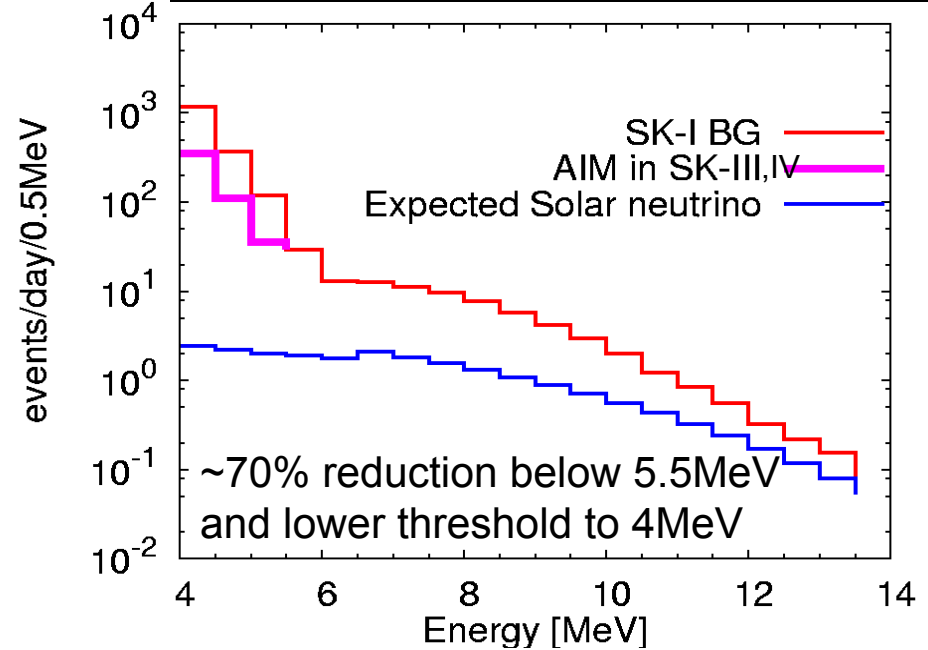
- 再構成プログラム、データ解析プログラムの調整がほぼ終わった。
- 改良した再構成プログラムでは角度分解能がSK-IIに比べて10%よくなった。
- 低エネルギー領域において、SK-IIIはSK-Iよりもバックグラウンドレベルが低い。

# 太陽ν: 将来展望

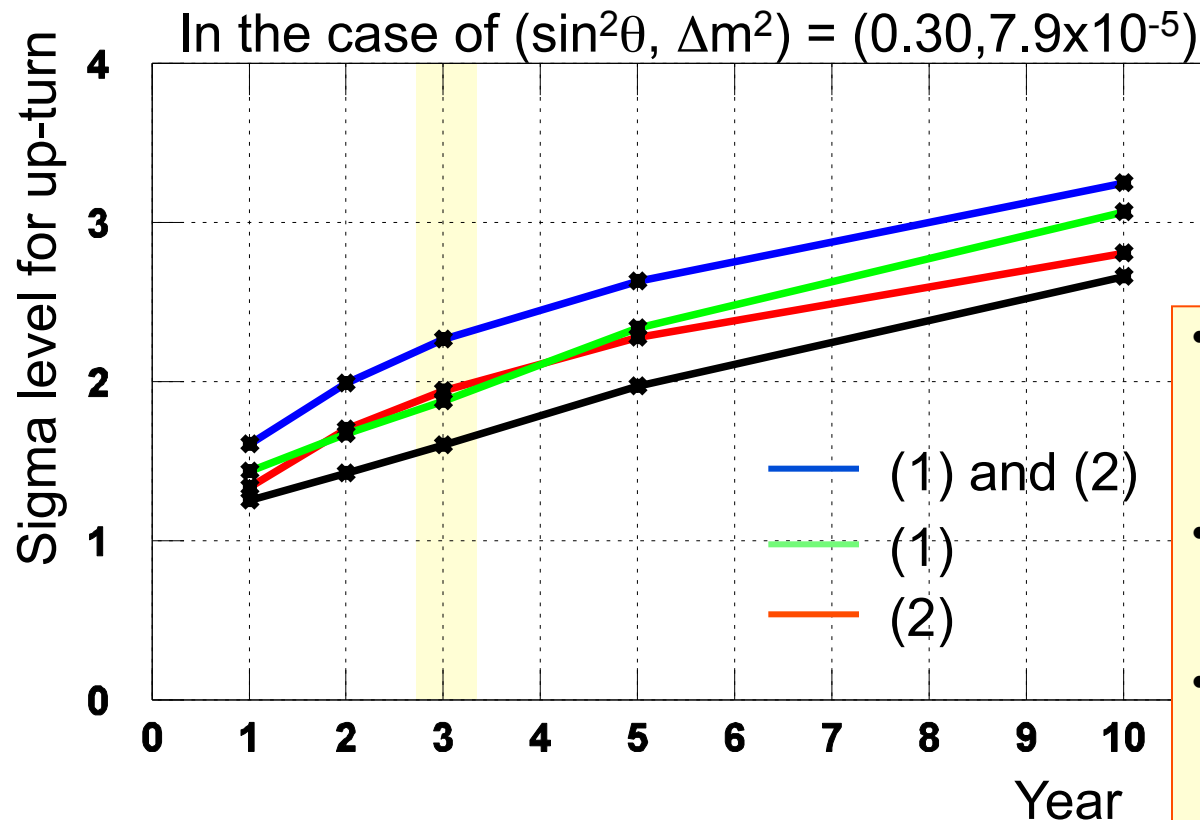
$\nu_e$  生存確率



SK-III, IVでバックグラウンドを低減する



# Sensitivity of the upturn measurement



- First target : 2 sigma level up-tern discovery for 3 years observation. (or exclude the up-tern)
- Need to enlarge fiducial volume with low BG as large as possible
- Also the reduction of the energy correlated systematic error is important.

(1) Enlarge fiducial volume to 22.5kton with low B.G.

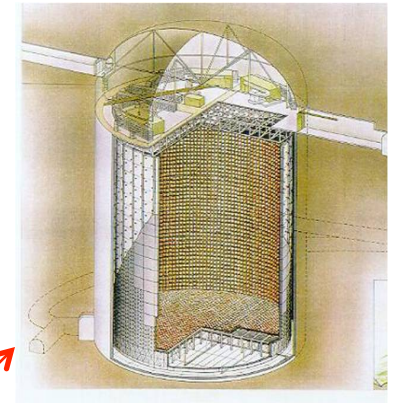
(2) Half energy correlated systematic error as SK-1.

The black line shows the 13.3kton ( $<5.5\text{MeV}$ ), 22.5kton ( $>5.5\text{MeV}$ ) fiducial volume with the same energy correlated error as SK-1

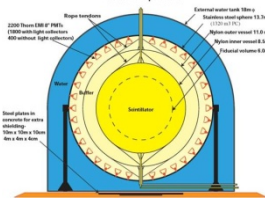
# 世界の超新星ニュートリノ観測装置

(現在走っている物、或いは建設中)

Super-K



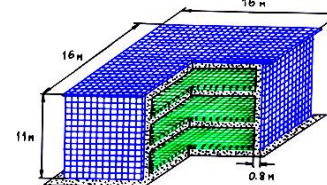
Borexino



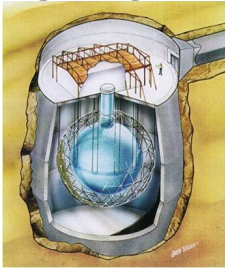
LVD



Baksan

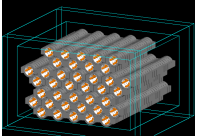


SNO+



(建設開始)

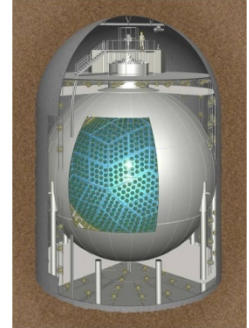
HALO



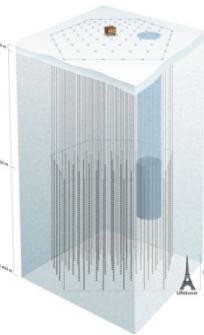
(建設中)



KamLAND



IceCube





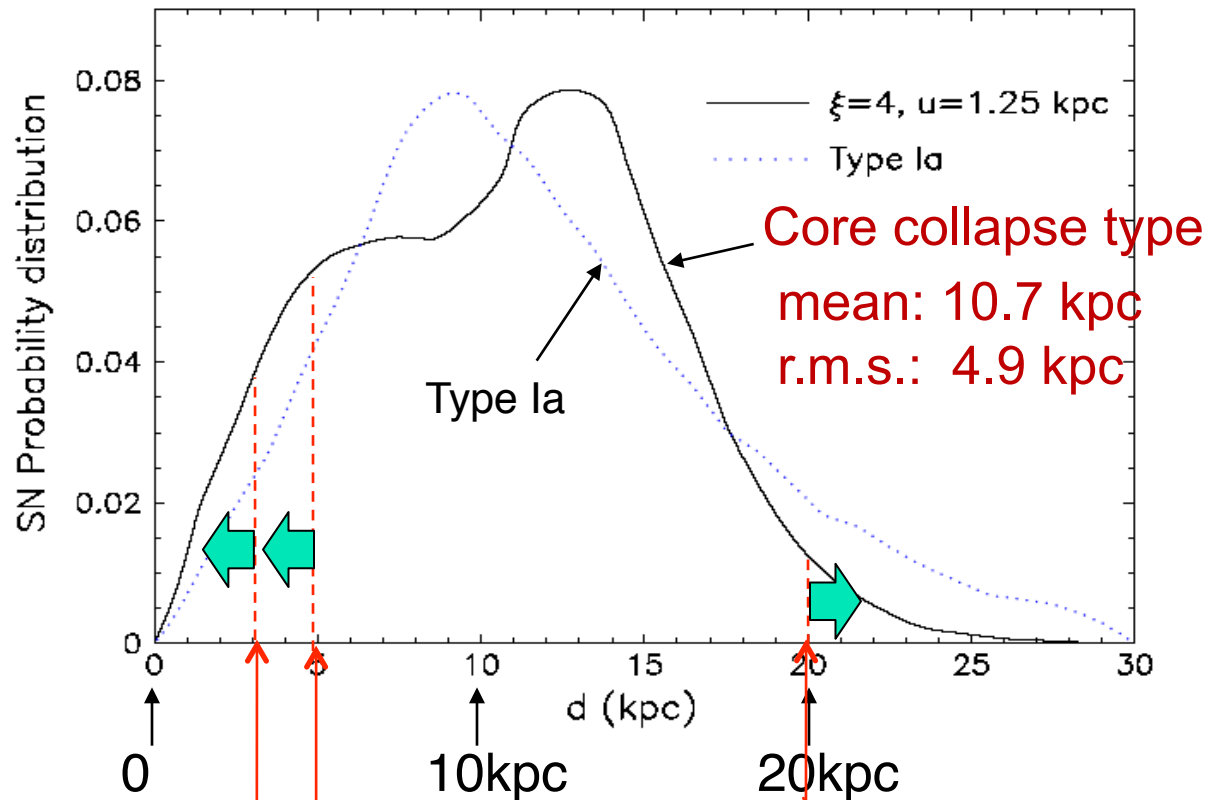
# 我々の銀河で超新星爆発が起きた場合

|                  |                                                                                                                                                                                                  | # of events are for 10kpc SN<br>assuming Livermore spectrum. |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Super-Kamiokande | 32,000 tons of water target.<br>~7300 $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ , ~300 $\nu_e \rightarrow \nu_e$ 散乱事象<br>精密な $\bar{\nu}_e$ スペクトルと $\nu_e$ 散乱事象による方向性                                     |                                                              |
| LVD              | 1000 ton liquid scintillator. 840 counters 1.5m <sup>3</sup> each. 4 MeV thres., ~50% eff. for tagging decayed signal.<br>~300 $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$ 事象.                             |                                                              |
| KamLAND, SNO+    | 1000 ton liquid scintillator, single volume. ~300 $\bar{\nu}_e p$ , several 10 CC on <sup>12</sup> C, ~60 NC $\gamma$ , ~300 $\nu p \rightarrow \nu p$ NC事象. $\nu p$ NCイベントによる元の $\nu_x$ 温度の見積もり |                                                              |
| BOREXINO         | 300 ton liquid scintillator, single volume. ~100 $\bar{\nu}_e p$ , ~10 CC on <sup>12</sup> C, ~20 NC $\gamma$ , ~100 $\nu p \rightarrow \nu p$ NC evts.<br>$\nu p$ NCイベントによる元の $\nu_x$ 温度の見積もり   |                                                              |
| ICECUBE          | Gigaton ice target. PMTノイズレートが一斉にあがる。<br>~0.75% statistical error at 0.5s and 100ms bin for 10kpc SN.                                                                                            |                                                              |

# 我々の銀河内での超新星までの距離

Mirizzi, Raffelt and Serpico, JCAP 0605,012(2006),  
astro-ph/0604300

Based on birth location of neutron stars



7% probability  
< 3.16 kpc  
> x10 statistics

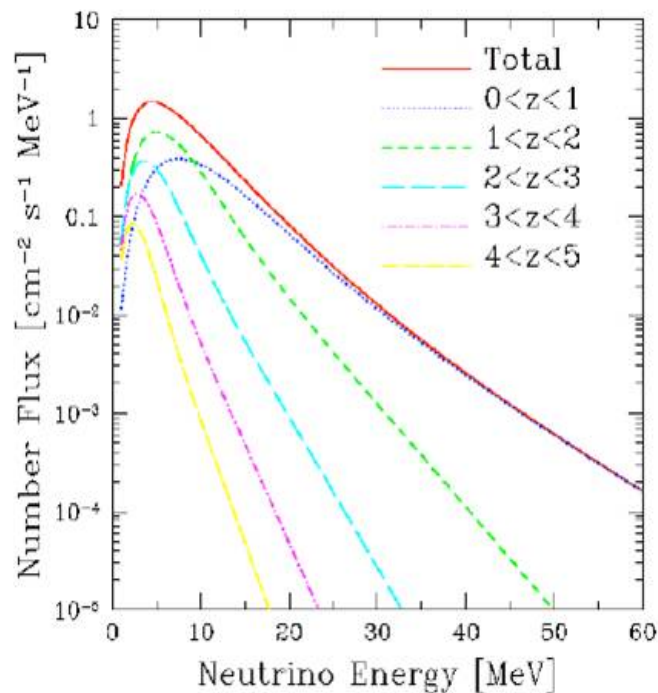
16% probability  
< 5 kpc  
> x 4 statistics

3% probability  
> 20 kpc  
< 1/4 statistics

# 超新星背景ニュートリノ

宇宙には $10^{20}$ 個の恒星がある。 $(10^9$ 個の銀河、 $10^{11}$ 星/銀河)  
全恒星の約0.3%が超新星爆発に至る。

したがって、宇宙の開闢から今までに約 $10^{17}$ 回の超新星爆発がおきてきたことになる。それにとまなうニュートリノ(超新星背景ニュートリノ)は宇宙に満ちている。

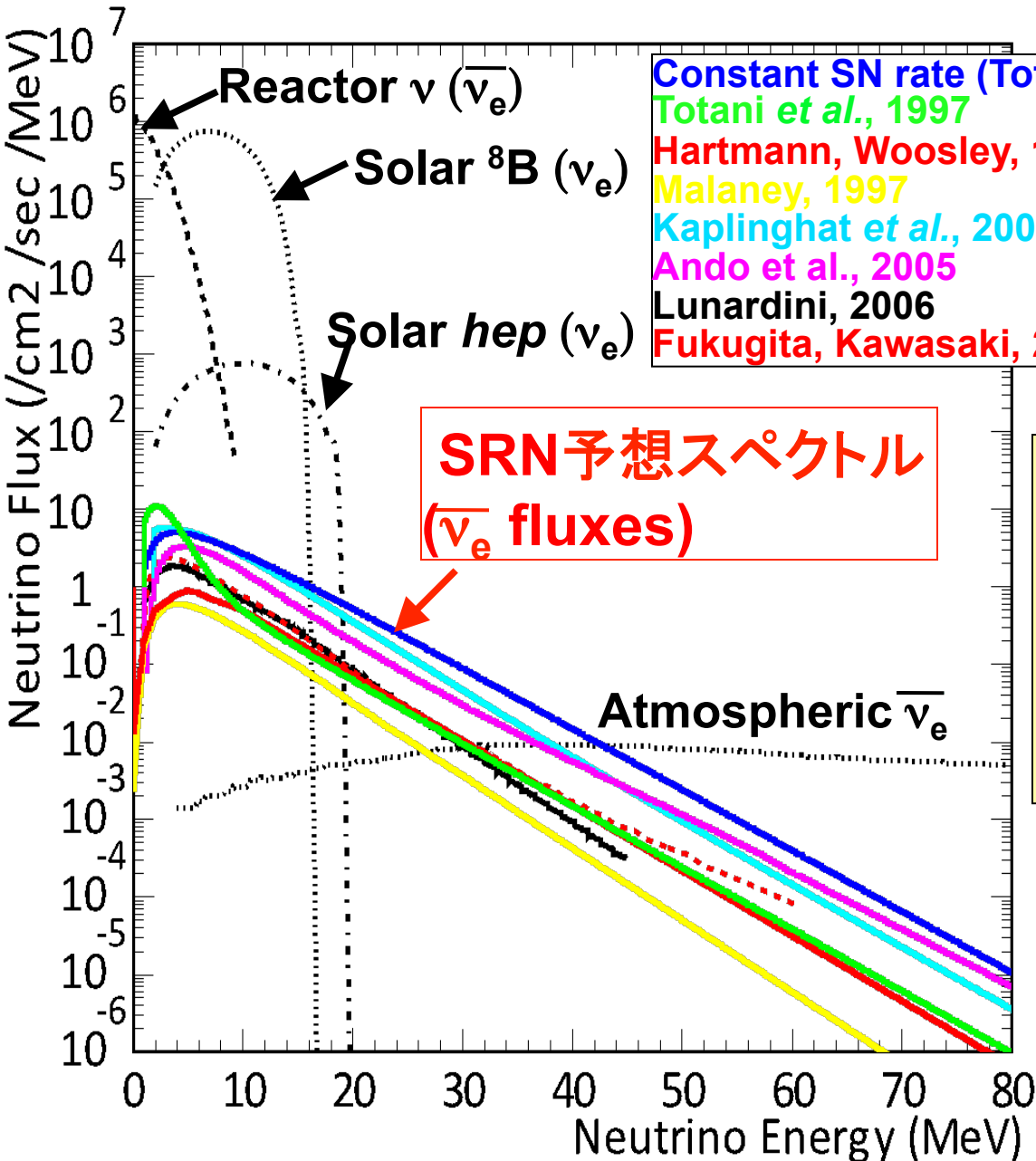


## 超新星背景ニュートリノのスペクトル (理論的な計算)

$z$ はビッグバンからの時間をあらわし、大きいほど宇宙の初期をあらわす。

超新星背景ニュートリノ(Supernova Relic Neutrino(SRN))が観測されれば、宇宙の初めからの重元素合成の歴史を探ることができる。

# 超新星背景ニュートリノ(SRN)のスペクトル



期待されるSRN信号の数  
0.8 -5.0 events/year/22.5kton  
(10-30MeV)

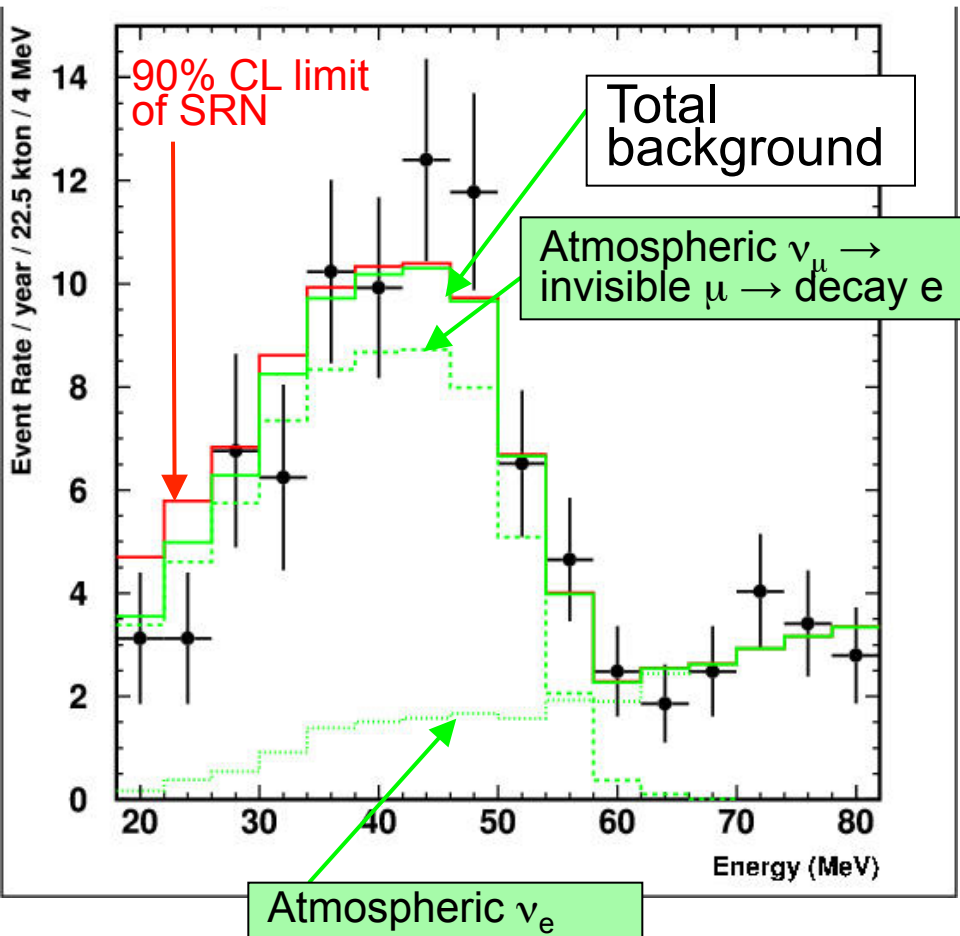
0.3 -1.9 events/year/22.5kton  
(18-30MeV)

大きなターゲット質量と高いバックグラウンド除去能力が必要とされる。

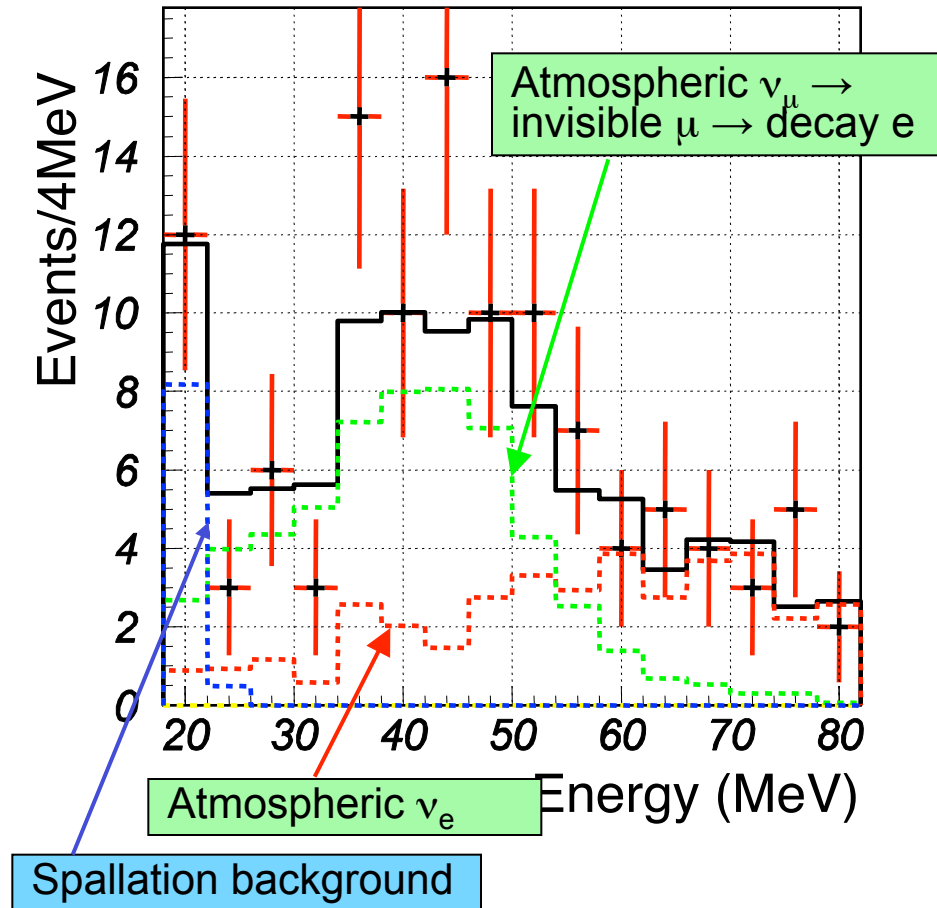


# SK-I、SK-IIのエネルギースペクトル (>18MeV)

SK-I (1496days)



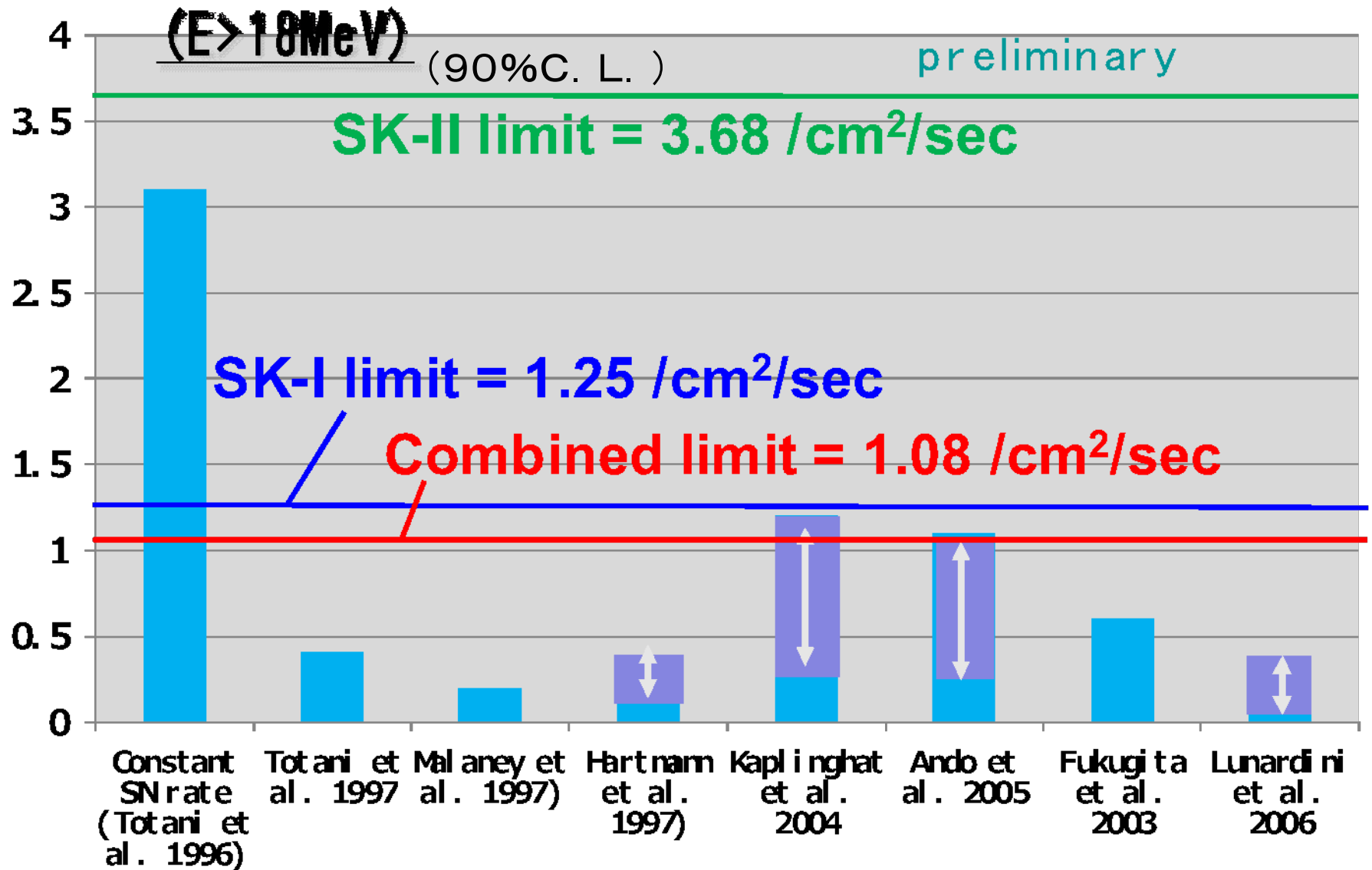
SK-II(791 days)



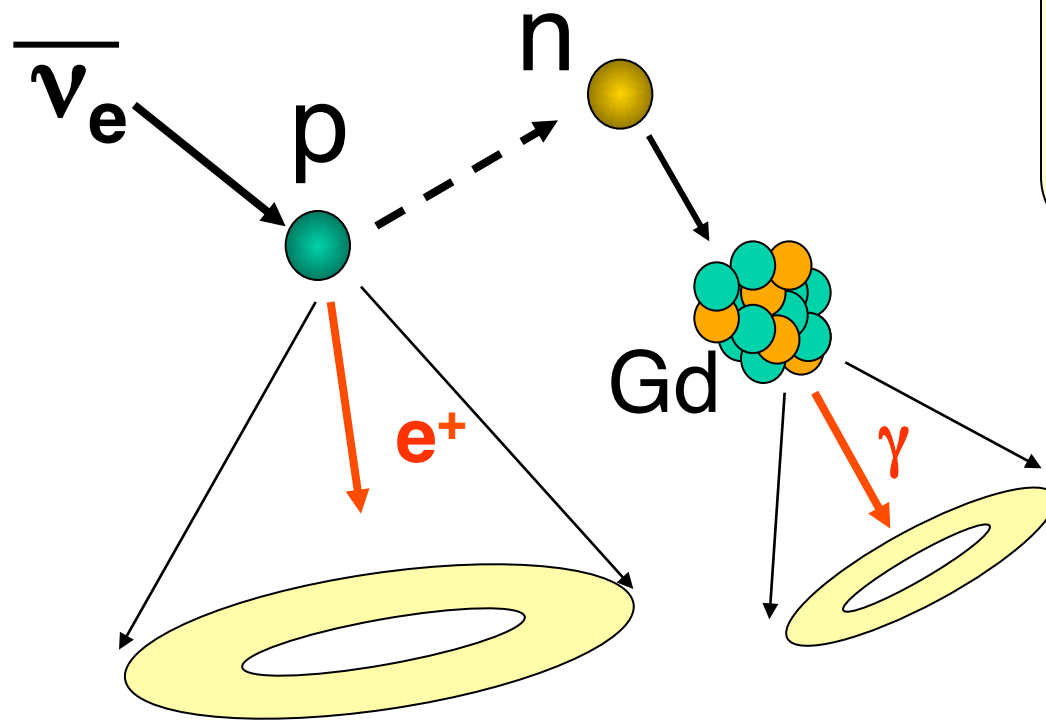
観測されたスペクトルは期待されるバックグラウンドスペクトルを良くあっている。

# Super-Kのこれまでの結果

## 強度上限値とモデル予想との比較



# ガドリニウムによる中性子タグ



$$n + \text{Gd} \rightarrow \sim 8 \text{ MeV } \gamma$$

$$\Delta T = \sim 20 \text{ } \mu\text{sec}$$

0.2% Gd化合物を純水に加える。  
(M.Vagins and J.Beacom)

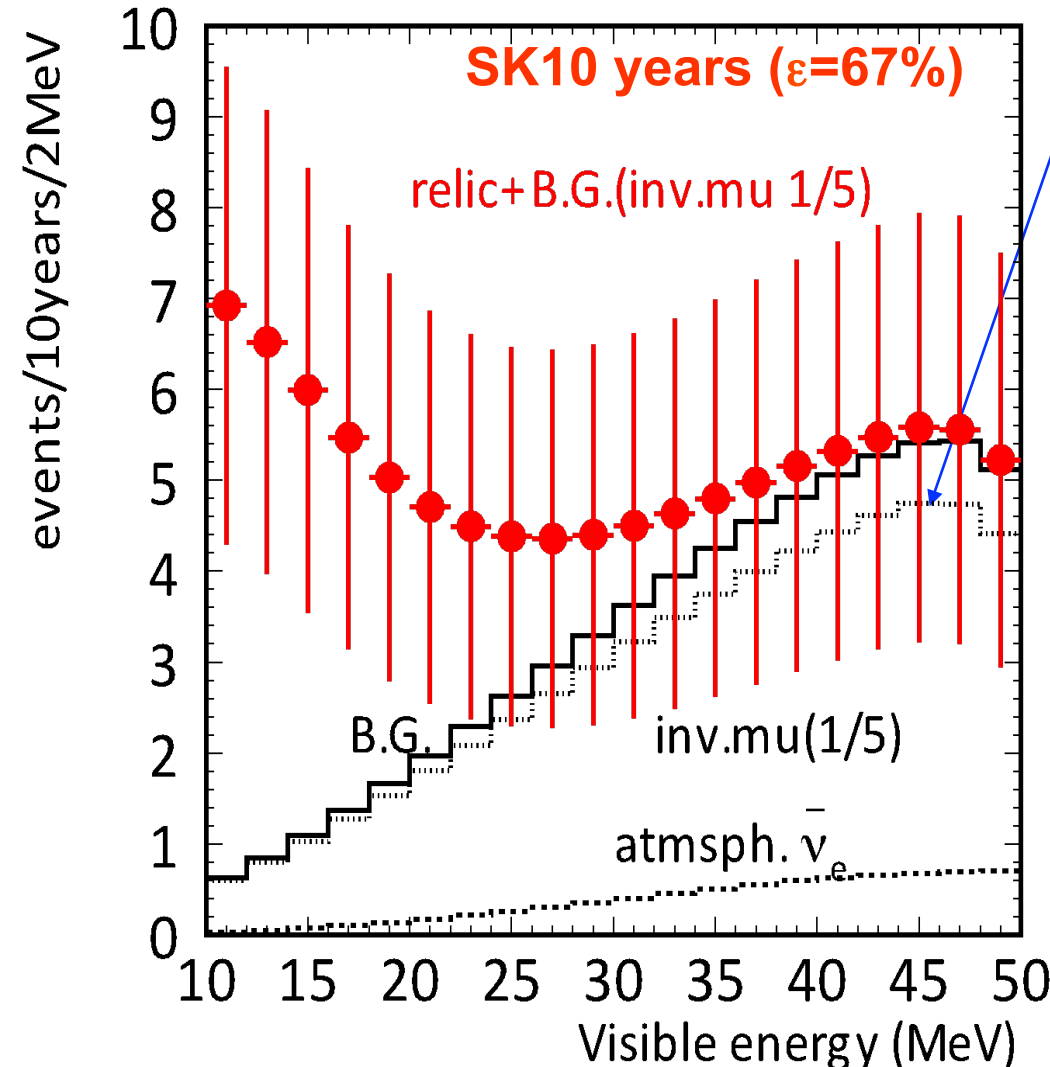
ポジトロンと中性子起源のガンマ  
線との距離は $\sim 50\text{cm}$ 。

$\bar{\nu}_e$  を中性子との同時計測で同定し、バックグラウンドを落とす。

# SRN観測の可能性

Relic model: S.Ando, K.Sato, and T.Totani, Astropart.Phys.18, 307(2003) with flux revise in NNN05.

もし、invisible muon バックグラウンドが中性子タグで落とせれば、



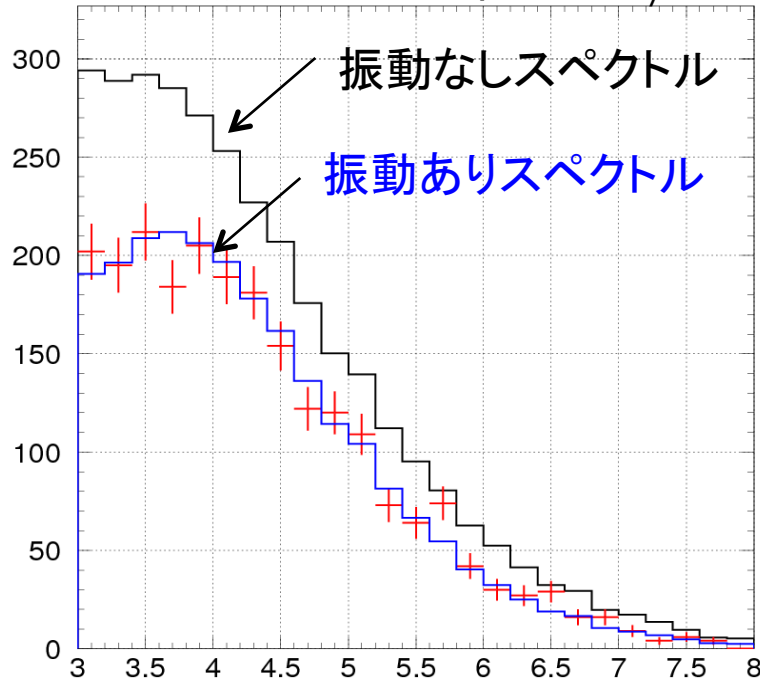
invisible muon B.G. が中性子タグで1/5になったと仮定。(この数字が正しいかどうかは、SK-IVで2.2MeVガンマ線を使って試験する。)

67% の信号検出効率を仮定。

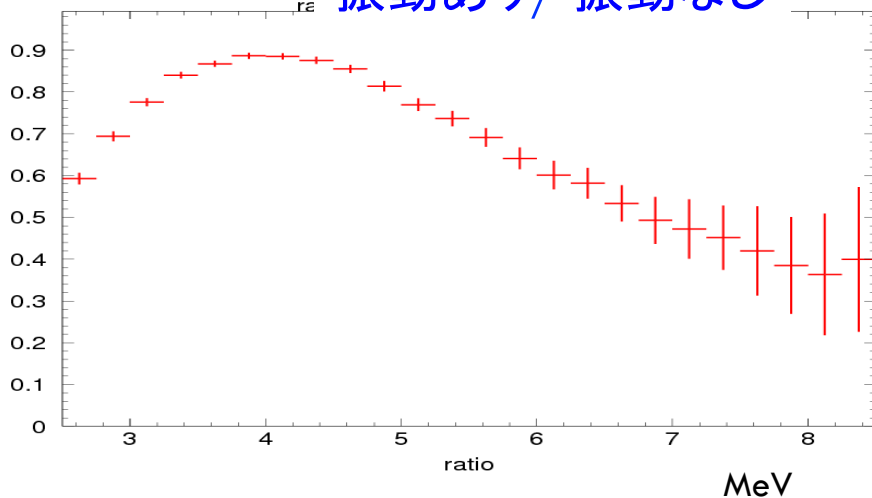
10年のSKデータで  
信号: 33, B.G. 27  
4 $\sigma$ レベルの信号  
( $E_{\text{vis}} = 10\text{-}30 \text{ MeV}$ )

# Gd中性子タグを用いた原子炉ニュートリノ

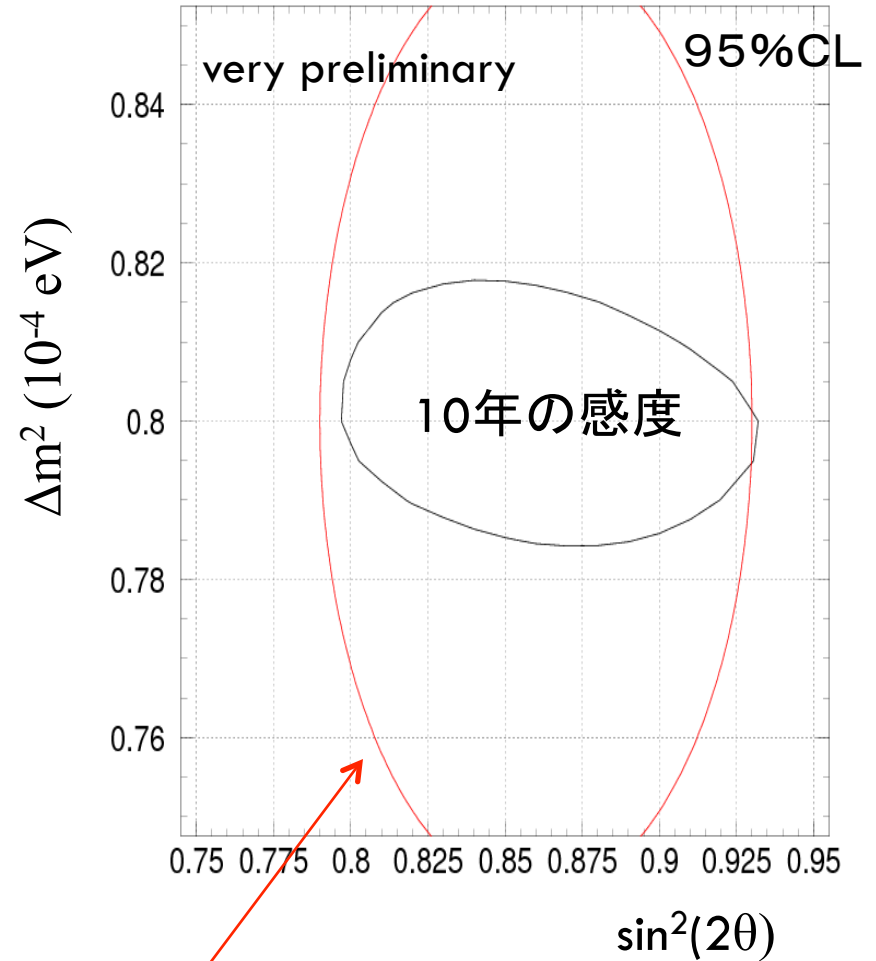
SK 1年分のデータ(約3000/年)



振動あり/ 振動なし



振動パラメータの測定感度(10年データ)



現在のsolar+KamLANDのerror size



# SKへGdを入れるための準備

## ◆水の透過率に与える影響をスタディ

SKでの他の物理に影響を与えないように透過率は十分長くないといけない。

## ◆純水装置の改造

現純水装置ではイオンを取り除いてしまうので、ガドリニウムをとらずに水を純化できるように純水装置を改造しなければならない。

## ◆Gd化合物による腐食

Gd化合物がタンク構造体、PMT材料を腐食させないか確認。

## ◆Gdの導入方法/除去方法のスタディ

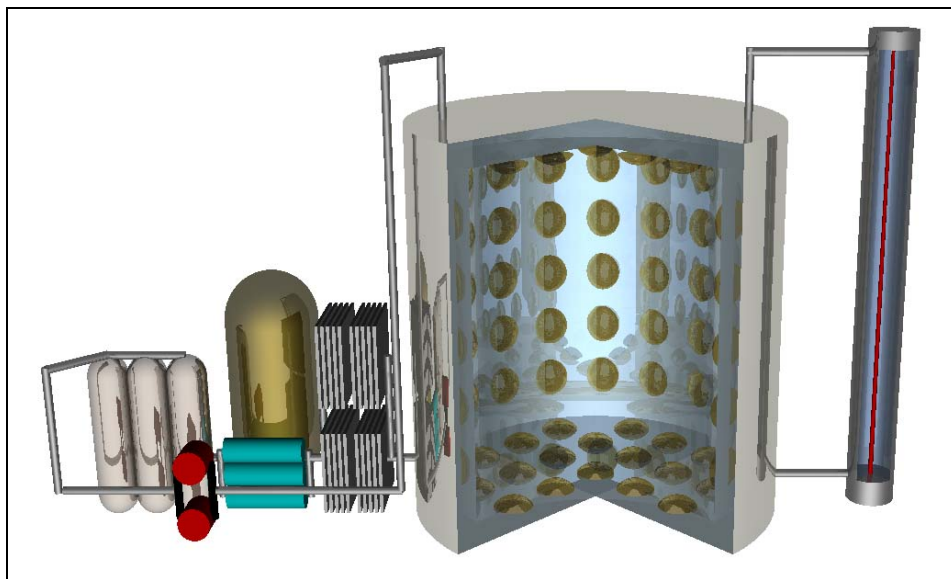
タンク内に一様に混合させる方法は？ タンクから出す場合にどうすれば、迅速に、経済的に取り除くことができるか？

## ◆環境の中性子線が多数のイベントを作ることはないか？

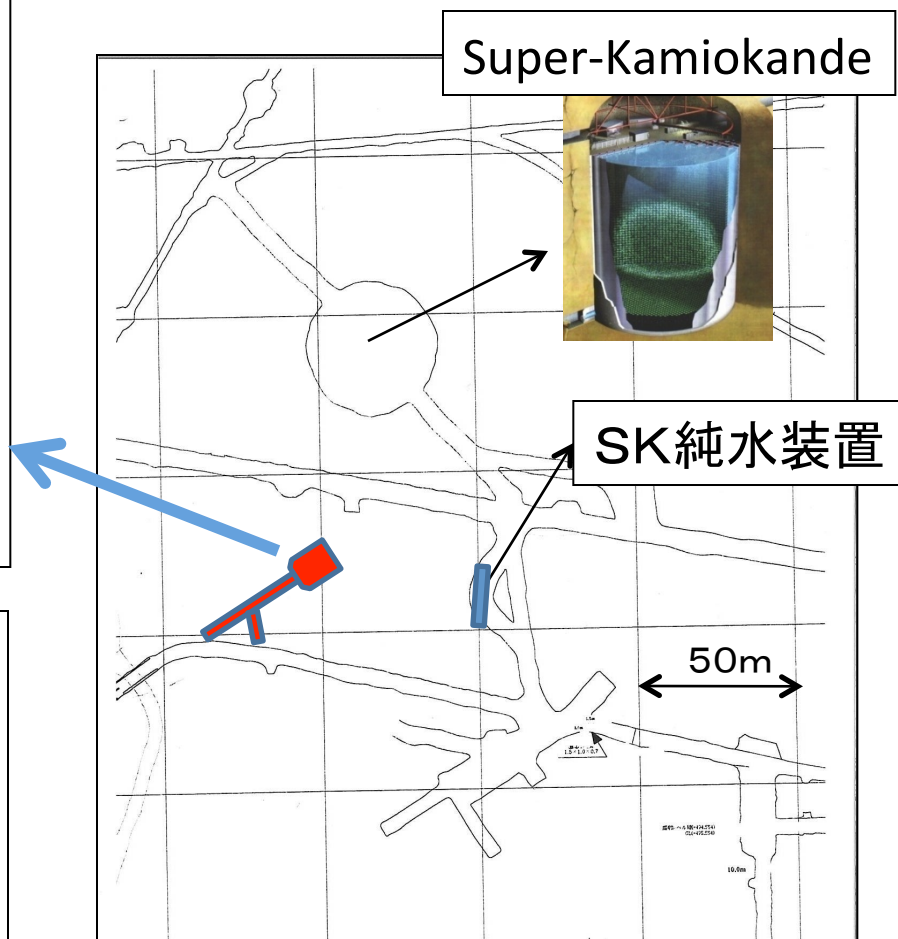
環境中性子線の現象が太陽ニュートリノ観測などに影響を与えないか？

直径6mぐらいのテスト水タンクを作って以上のことをスタディする。

# ガドリニウムテスト用のタンク



- テストタンク用の空洞を掘削(2009年9ー12月)
- 直径、高さ約6mのタンク(200トン)を作り、PMTも取り付けてガドリニウムの試験を行う。
- 具体的な試験は、透過率の測定、純化方法の検討、腐食の有無など。



地下の坑道図

# まとめ

- 大気ニュートリノ

- $\theta_{13}$ の探索。
- もし、 $\theta_{13}$ が非常に大きければ、階層性に対するヒントも？

- 太陽ニュートリノ

- 振動パラメータの精密測定。原子炉 $\nu$ との比較。
- 物質効果によるスペクトルの歪みを測定。

- 超新星爆発ニュートリノ

- 銀河系内で起きてくれば、高統計観測。

- 超新星背景ニュートリノ

- もし、観測できれば星形成の歴史を探ることができる。
- 期待されるニュートリノ強度が弱いため、SKクラスの質量と中性子をタグする技術が必要。
- SKにGdを入れるG&Dが進んでいる。



# SK-IVでインストールされた新電子回路, QBEE

Network Interface Card

QTC-Based Electronics with Ethernet  
(QBEE)

→  
PMT  
signal

Ethernet Readout

60MHz Clock  
TDC Trigger

Calibration Pulser

QTC

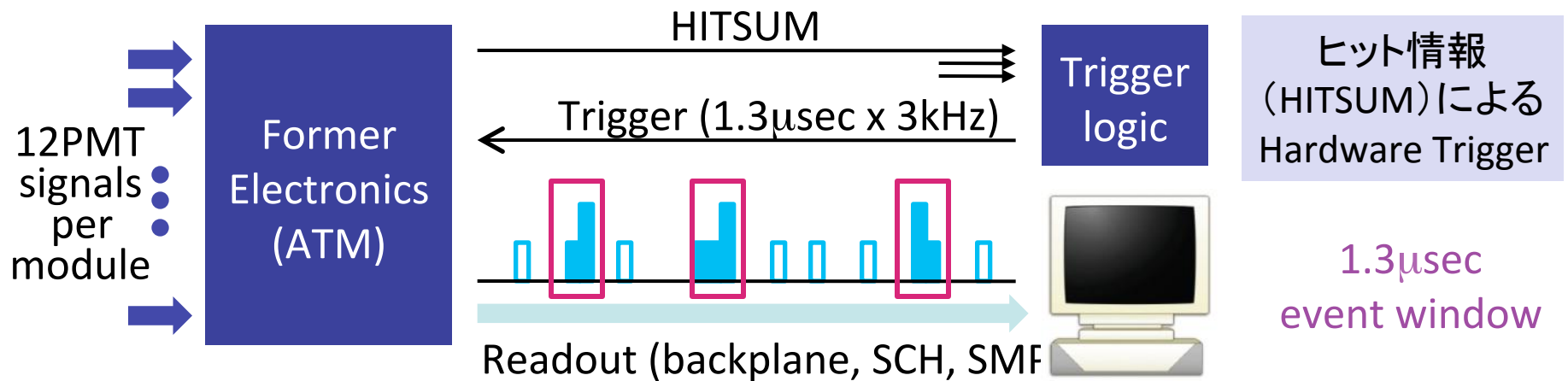
TDC

FPGA

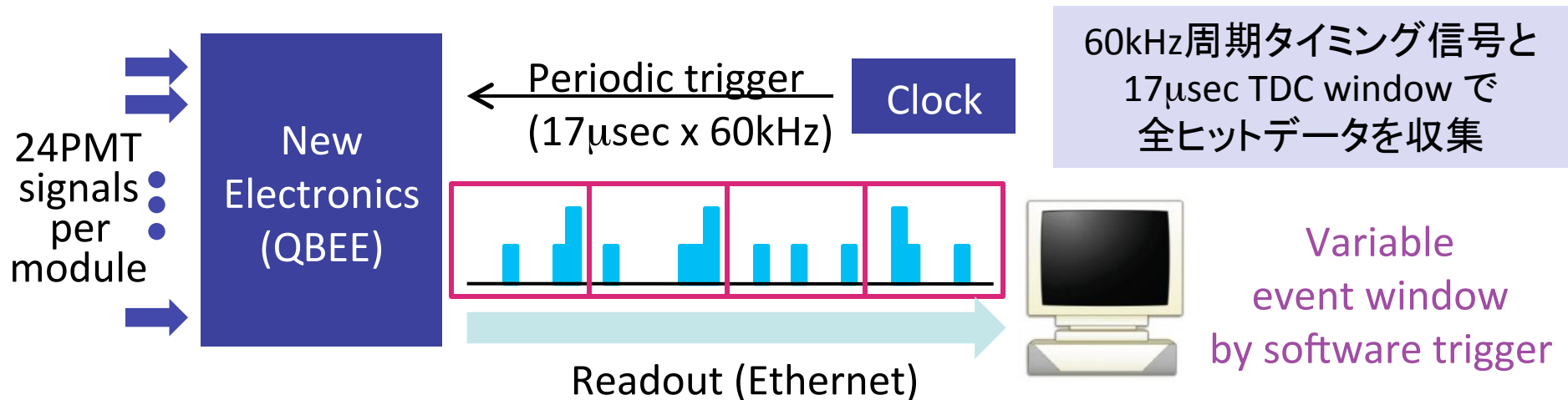
- ☐ 24 channel input
- ☐ QTC (custom ASIC)
  - 3 gain stages
  - Wide dynamic range(>2000pC)  
factor 5 larger than old electronics
- ☐ Pipe line processing
  - multi-hit TDC (AMT3)
  - FPGA
- ☐ Ethernet Readout
- ☐ 60MHz common system clock
- ☐ Internal calibration pulser
- ☐ Low power consumption  
( < 1W/ch )

# 新電子回路のデータ収集システム(旧システムとの違い)

## 旧システム: ハードウェアトリガー → データ取り込み

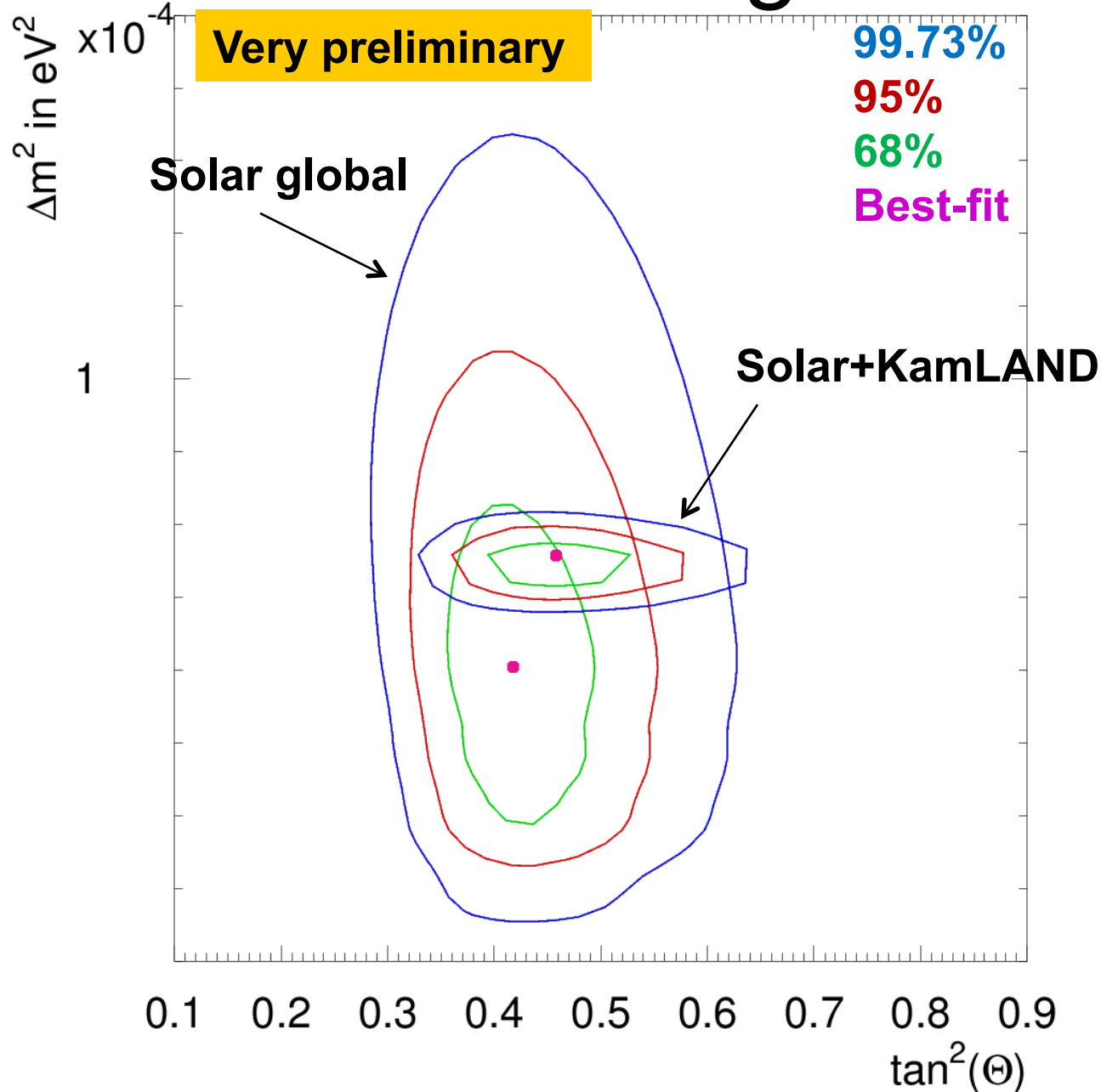


## 新システム: 全データ取り込み → ソフトウェアトリガー





# 太陽ν: 最新のglobal analysis



**Solar global  
+KamLAND**

SK-I un-binned day/night  
SK-II un-binned day/night  
SK-I spectrum  
SK-II spectrum  
SK-III spectrum (298days)  
SNO pure D2O CC/NC ratio  
SNO pure D2O CC day/night  
SNO Salt CC flux  
SNO Salt NC flux  
SNO NCD NC flux  
SAGE, GALLEX/GNO  
Homestake

+KamLAND

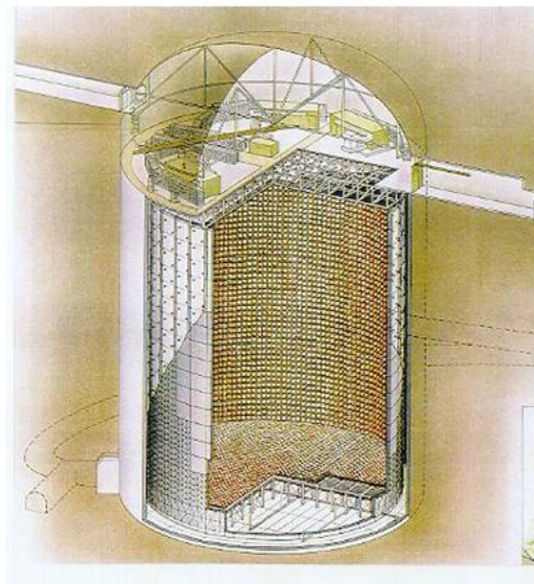
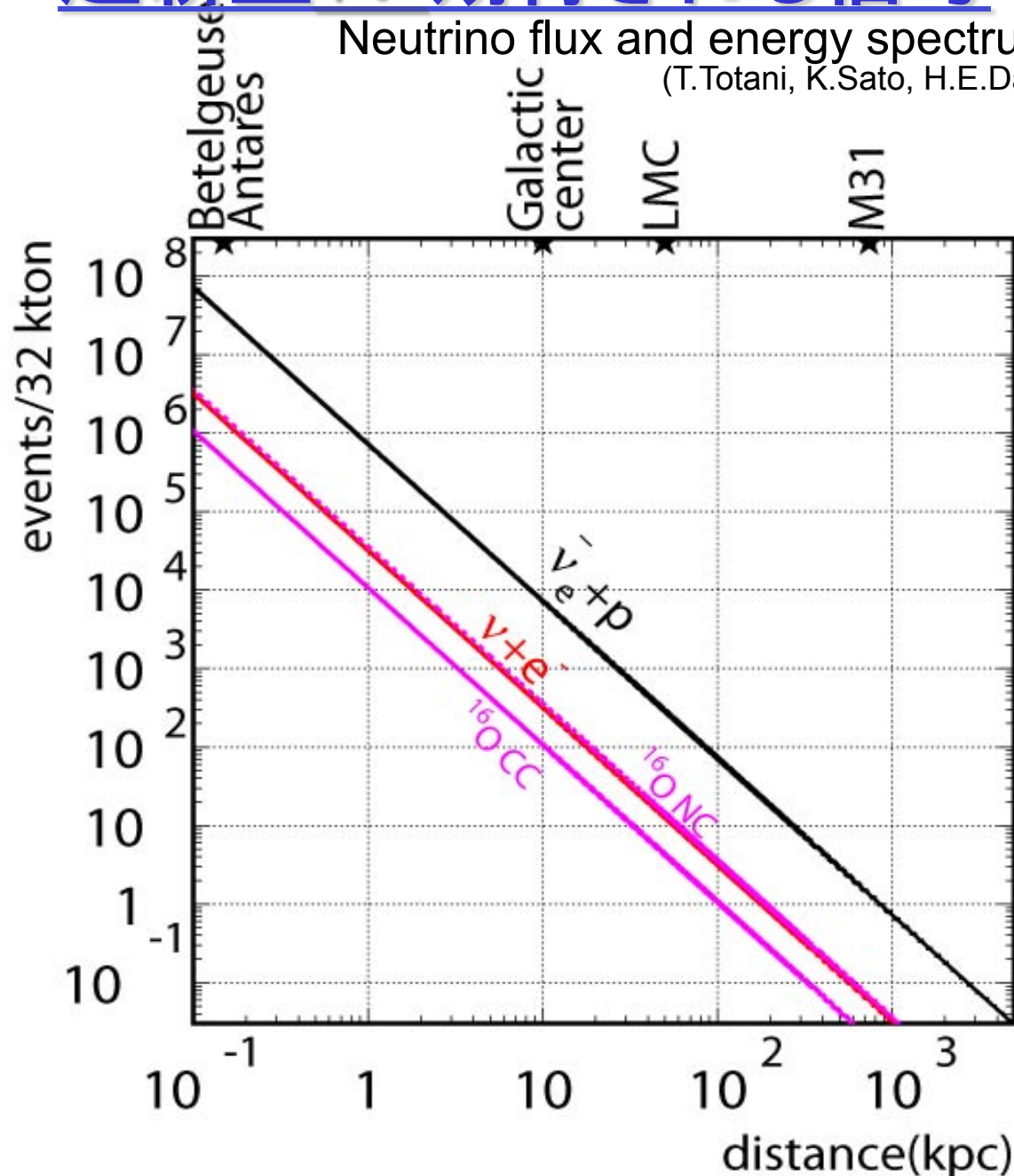
**Best-fit:  
(Solar+KamLAND)**

$\Delta m^2 = 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$   
 $\tan^2 \theta = 0.46$

# 超新星 $\nu$ : 期待される信号

Neutrino flux and energy spectrum from Livermore simulation

(T.Totani, K.Sato, H.E.Dalhed and J.R.Wilson, ApJ.496,216(1998))



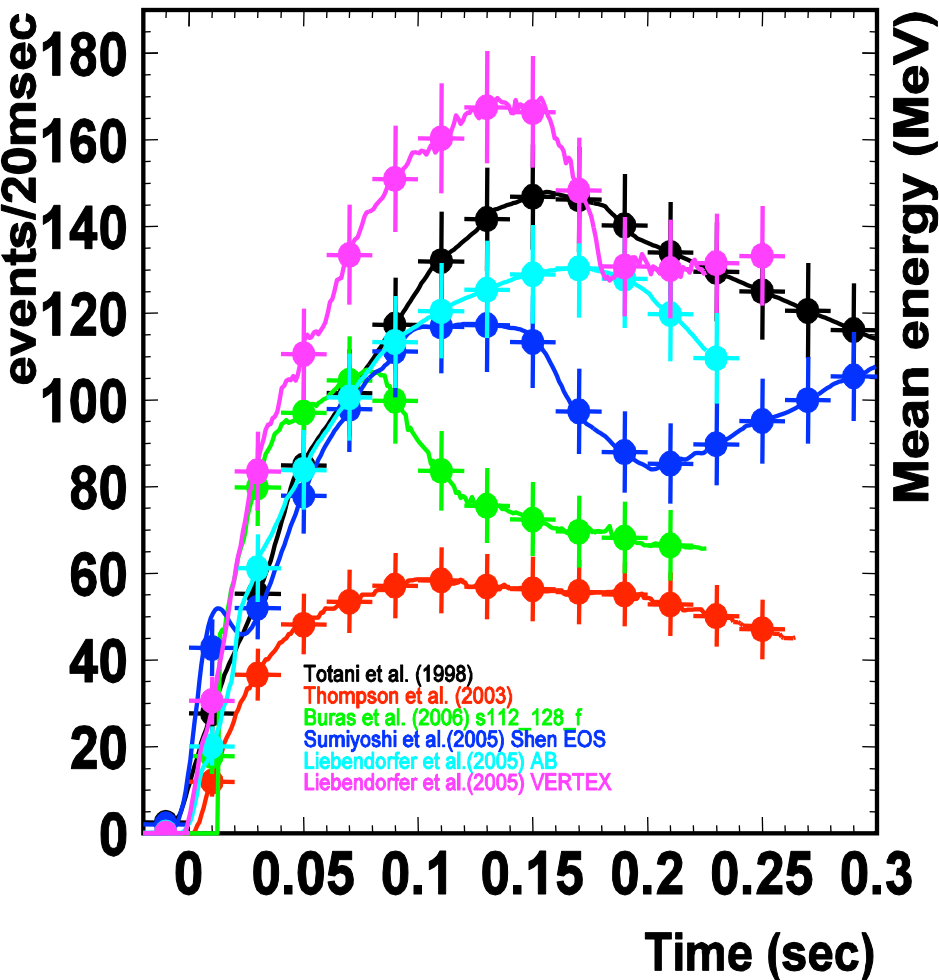
~7,300  $\bar{\nu}_e + p$  events  
 ~300  $\nu + e$  events  
 ~360  $^{16}\text{O NC } \gamma$  events  
 ~100  $^{16}\text{O CC}$  events  
 (with 5MeV thr.)

for 10 kpc supernova

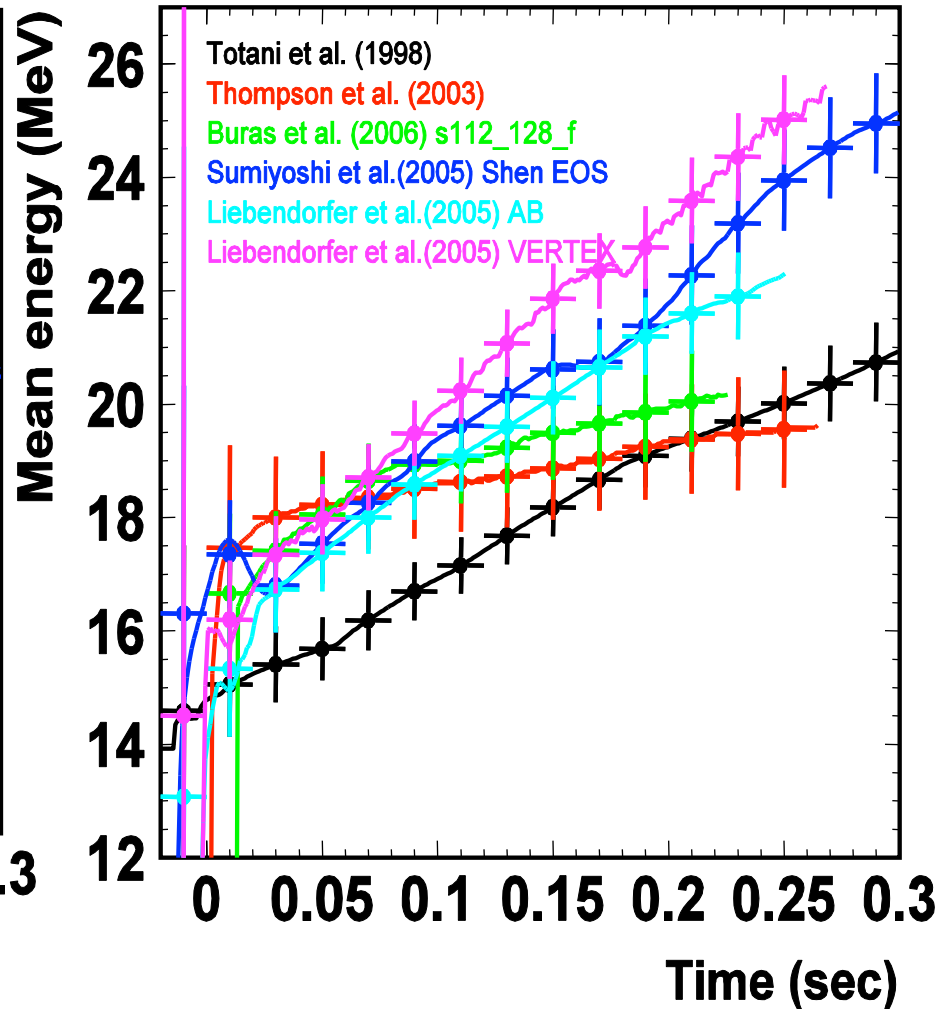
# モデルの違いに対するSKデータの感度

10kpcでの超新星を過程。

イベント頻度の時間発展

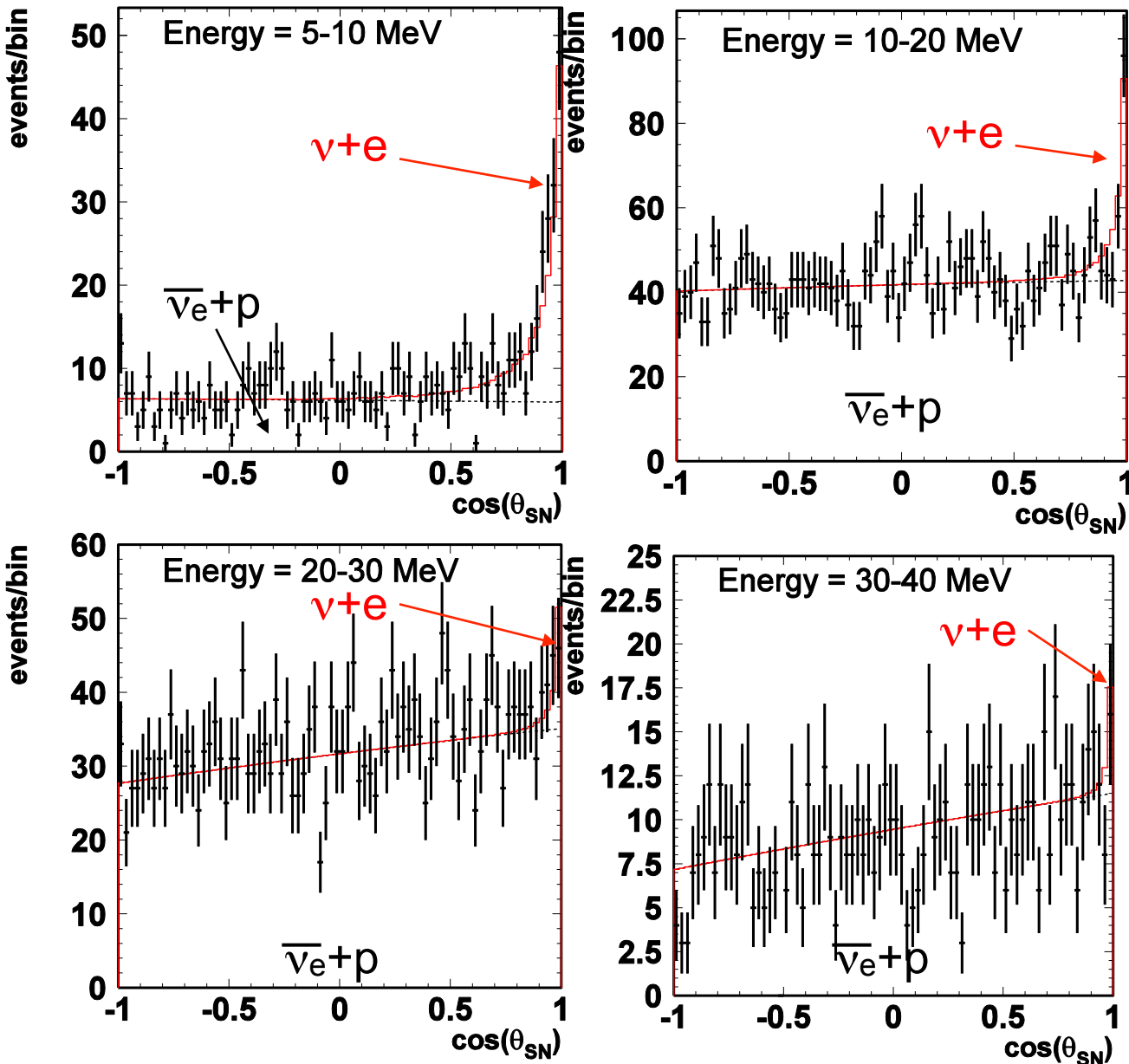


平均エネルギーの時間発展



モデルの識別ができるほどの高統計

# 超新星と方向分布による電子散乱事象の選別



SN at 10kpc

電子散乱事象を使うこと  
によって超新星の方向  
を  $\sim 5$ 度の精度で決  
定できる。

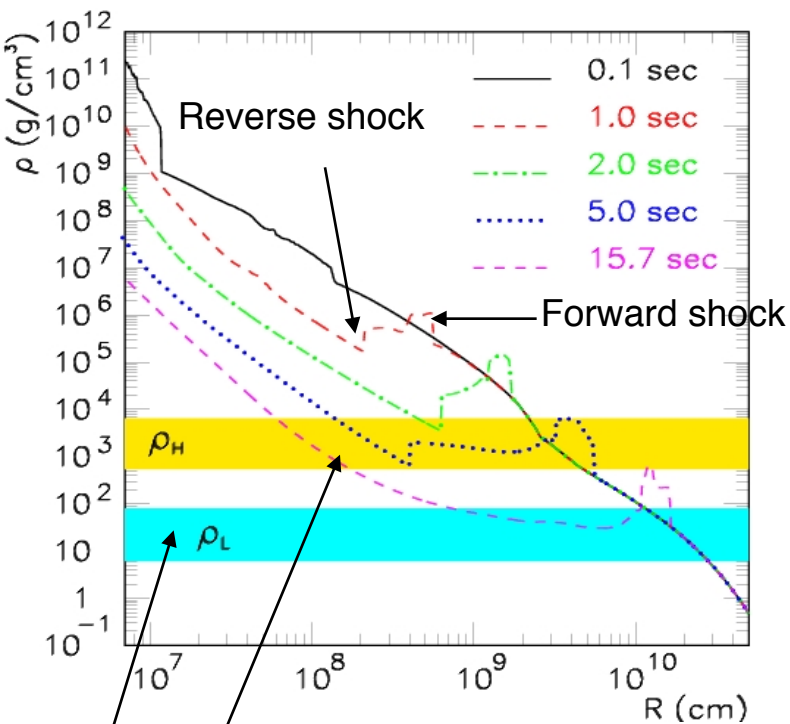
電子散乱事象を角度分  
布から統計的に選り出  
すことができる。

Neutrino flux and spectrum  
from Livermore simulation

# 平均エネルギー測定によるニュートリノ振動 未知パラメータ決定の可能性

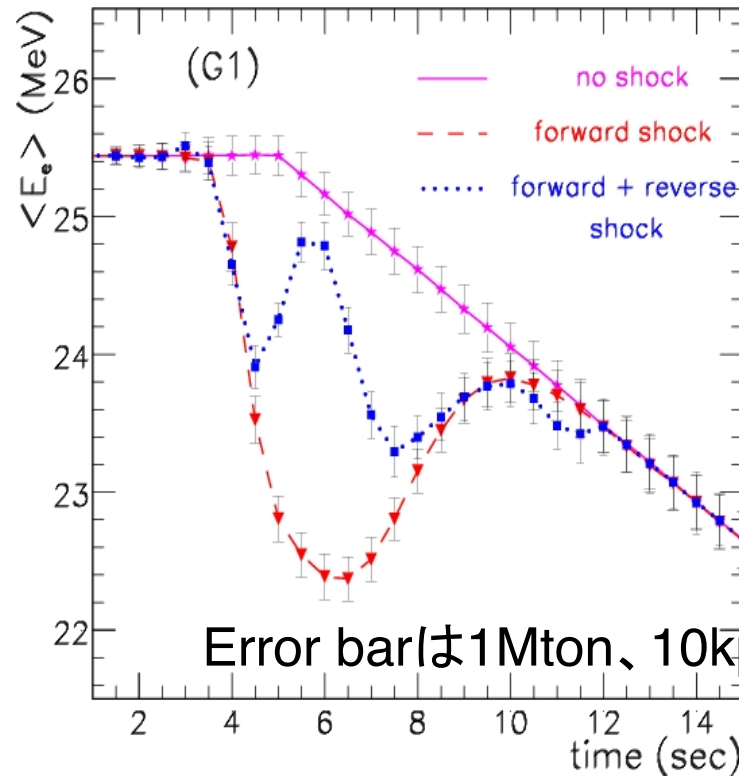
R. Tomas, et al., JCAP 0409, 015 2004  
平均エネルギー変化

## 爆発後の密度変化



$\Delta m^2_{32}$  の resonance region

$\Delta m^2_{21}$  の resonance region



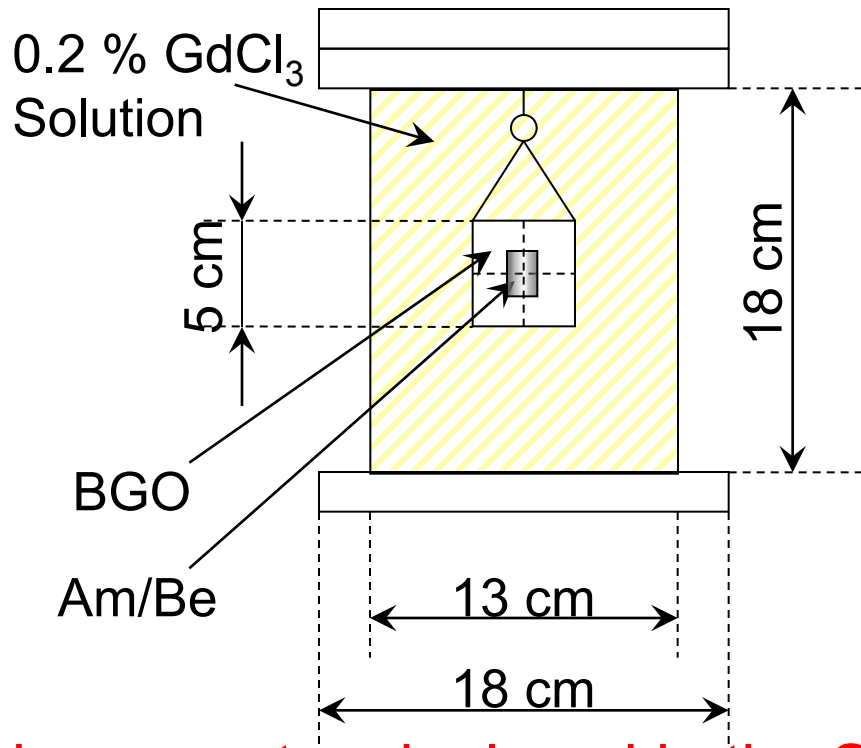
Error barは1Mton、10kpcの場合

Inverted hierarchy,  $\sin^2\theta_{13}=10^{-2}$ を仮定  
( $\sin^2\theta_{13}=\sim 5\times 10^{-5}$ まで影響が現れる。)

これが爆発機構によるのか、ニュートリノ振動によるのかは、  
中性カレントガンマ線事象などを使って切り分けができる。

# Test neutron tagging at Super-K

## GdCl<sub>3</sub> test vessel

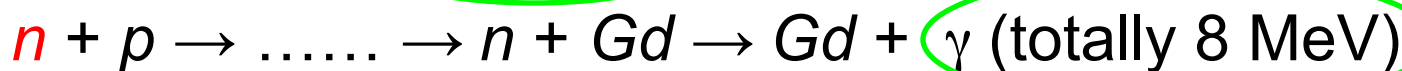
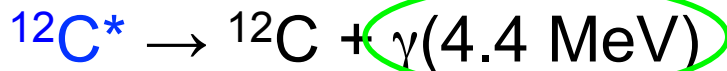
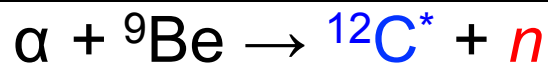


BGO



This apparatus deployed in the SK tank.

BGO signal (prompt signal (large and long time pulse))

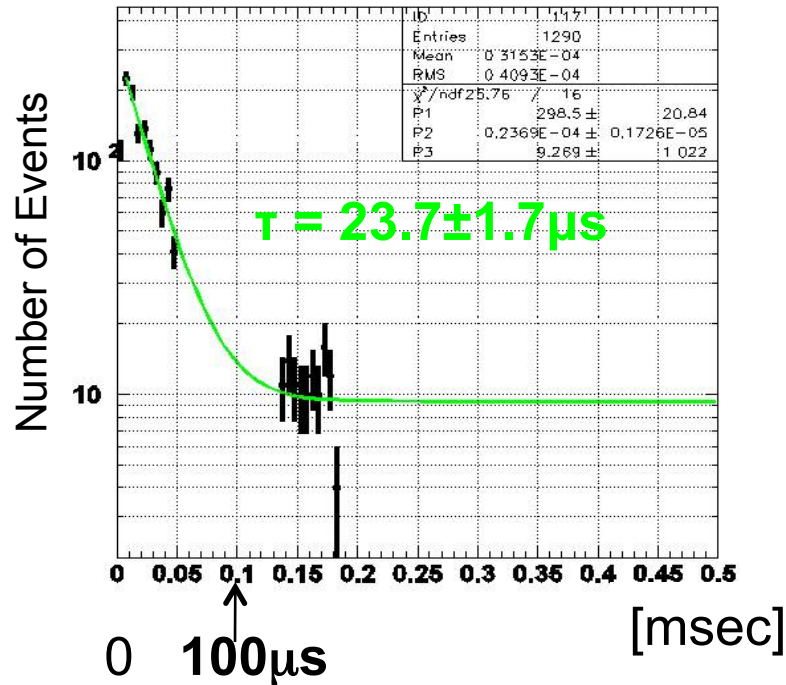


Look for Cherenkov signal (delayed signal)

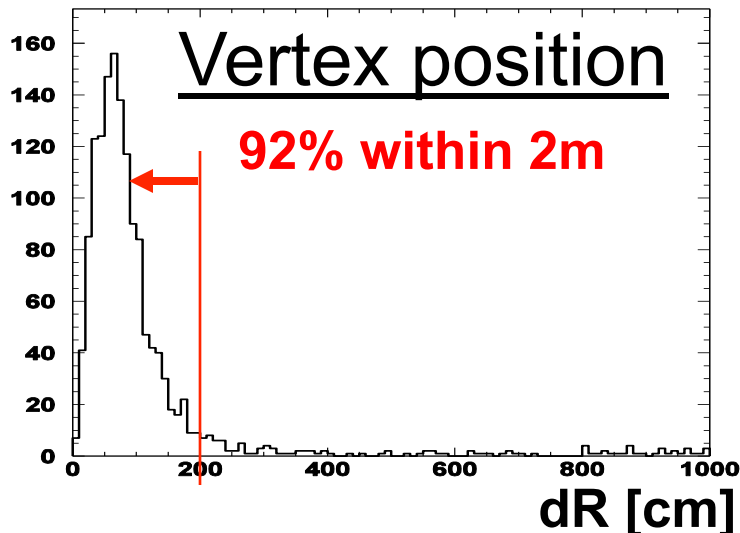
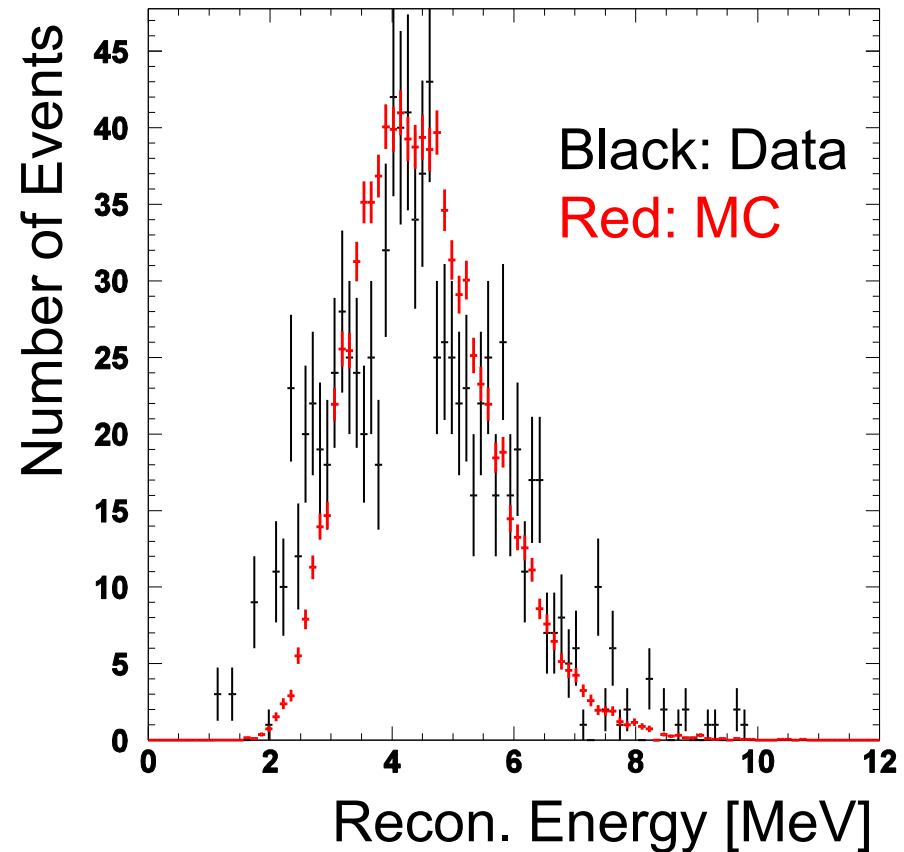


# Cherenkov signal of Gd gamma rays

## Time from prompt



## Energy spectrum



Measured time, vertex and energy distributions are as expected from the MC simulation.

# Tagging efficiency and BG reduction

Selection criteria of delayed signal:

- (1) Vertex position within 2m
- (2) Energy of delayed signal > 3MeV
- (3) Time after the prompt within 60 $\mu$ sec.
- (4) Ring pattern cuts

Selection efficiency is ~74%.

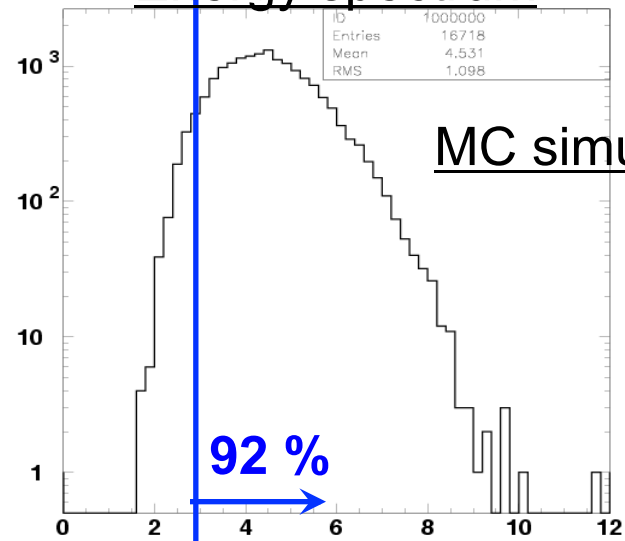
With 90% capture eff. by 0.2% Gd,

→ Tagging efficiency is 67%

While the chance coincidence prob. is estimated to be  $\sim 2 \times 10^{-4}$

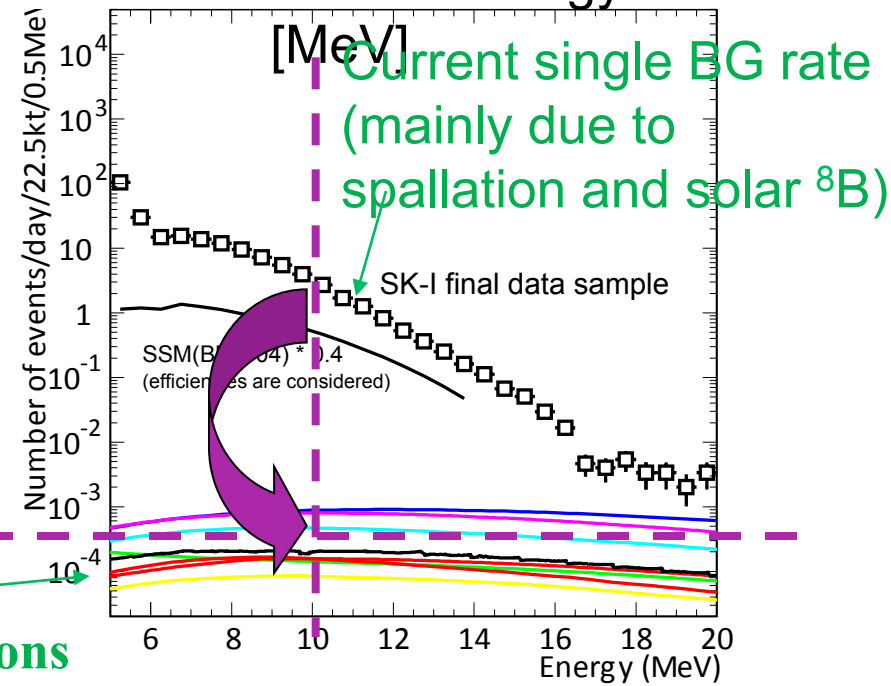
It almost satisfy the requirement to remove remaining spallation background at 10 MeV.

Energy spectrum



MC simulation

Recon. Energy



SRN  
predictions