

神岡実験の将来計画

中畑 雅行

ICRR神岡メンバー

- 神岡実験将来計画の概要
- ニュートリノ研究の将来
 - 大気ニュートリノ研究
 - 太陽ニュートリノ研究
 - 長基線人工ニュートリノによる研究
- 陽子崩壊探索の将来
- 天体ニュートリノ観測の将来
 - 超新星爆発ニュートリノ
 - 超新星背景ニュートリノの探索
- 大型装置のための新たな光検出器開発

スーパーカミオカンデ実験計画



大気、太陽ニュートリノの精密観測
陽子崩壊探索
超新星ニュートリノ

衝撃波防止ケース
(アクリル+FRP)

50,000トン全質量, 22,500トン有効質量
1000m 地下, 水チェレンコフ実験装置

内水槽増倍管数(光電面被覆率), チェレンコフ光量

SK-I: 11,146 (40%)
~6 p.e./MeV

SK-II: 5,182 (19%)
~2.8 p.e./MeV

SK-III: 11,146 (40%)
~6 p.e./MeV

水チェレンコフ実験装置の長期的展望

1980年代

1990年代

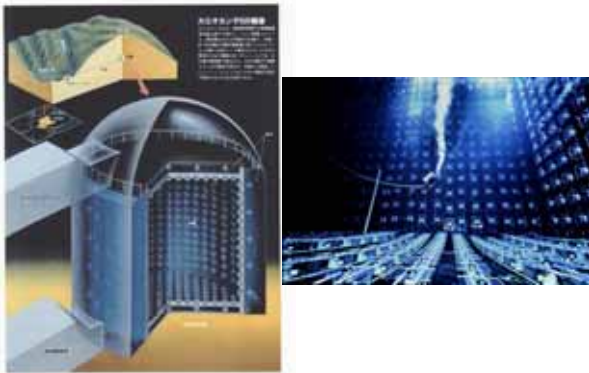
2000年代

2010年代

2020年代

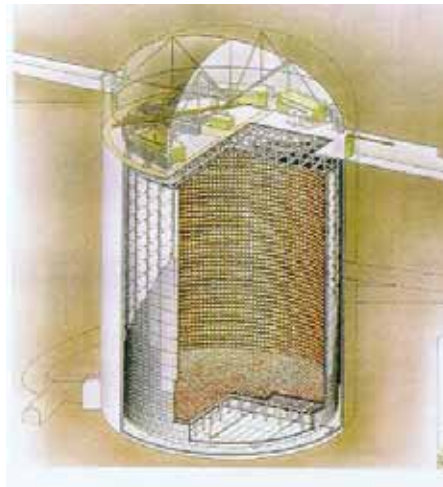
数千トンクラス実験装置 カミオカンデ、IMB

- 超新星ニュートリノの観測
- 大気ニュートリノ異常のヒント
- 太陽ニュートリノの観測



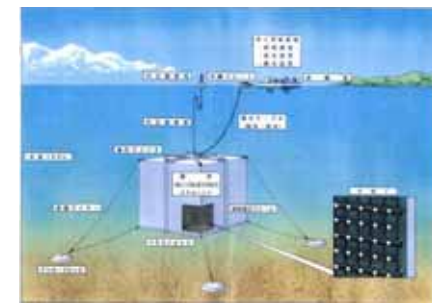
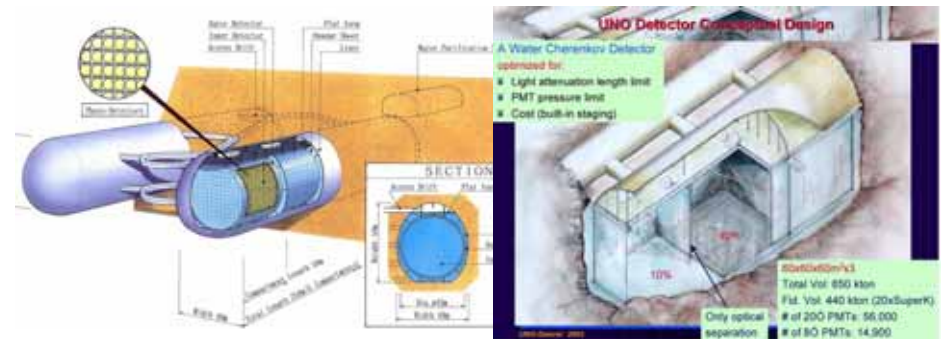
5万トンの実験装置 スーパーカミオカンデ

- 大気ニュートリノ振動の発見
- 太陽ニュートリノ振動の発見
- 人工ニュートリノによる振動の確認



メガトンクラスの実験装置

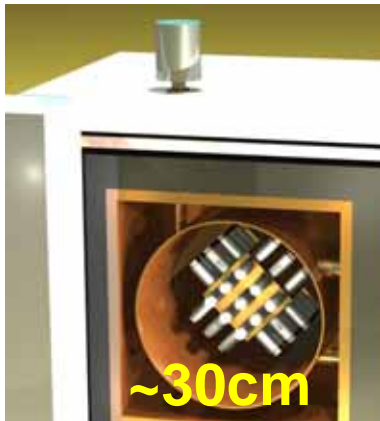
- 陽子崩壊の発見
- ニュートリノ振動の精密研究
(人工、大気、太陽 ν による)
- 超新星爆発のメカニズムの解明
- 超新星背景ニュートリノの観測



神岡実験のもうひとつの流れ

液体キセノンを用いた低エネルギー、低バックグラウンド実験
(X M A S S)

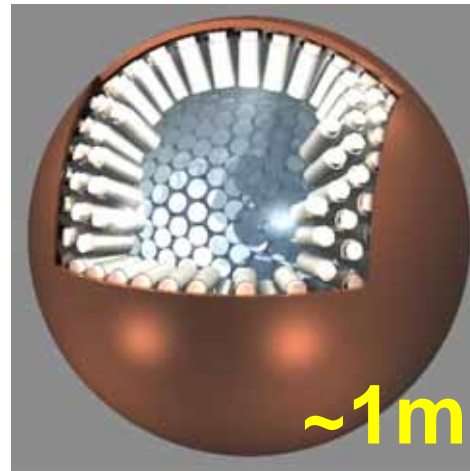
現在



プロトタイプ検出器
(FV 3kg) R&D

実験の実現可能性の
デモンストレーション

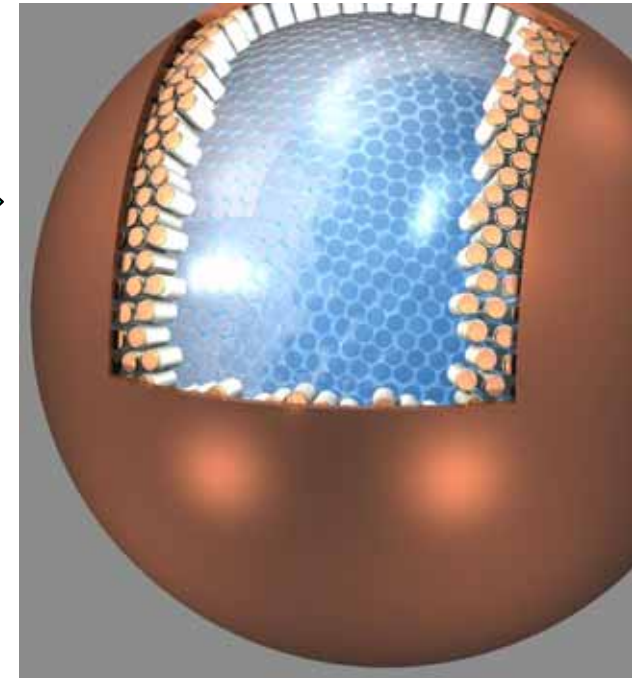
次期計画



800kg検出器
(FV 100kg)

暗黒物質を今までの
実験の100倍の感
度で探索

長期的展望



数10トン-数100
トンクラスの検出器

低エネルギー事象の多目的研究
太陽ニュートリノ(pp, ${}^7\text{Be}$)
超高感度暗黒物質探索 (観測)
二重ベータ崩壊の探索

暗黒物質探索については次の森山の話

ニュートリノ研究の現状と今後

ニュートリノ混合行列

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

現状

$$\begin{pmatrix} 0.79\sim 0.88 & 0.47\sim 0.61 & <0.20 \\ 0.19\sim 0.52 & 0.42\sim 0.73 & 0.58\sim 0.82 \\ 0.20\sim 0.53 & 0.44\sim 0.74 & 0.56\sim 0.81 \end{pmatrix}$$

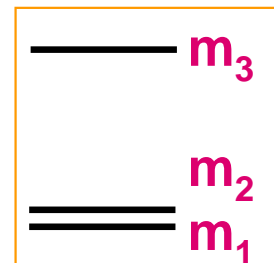
クォーク:

$$\begin{pmatrix} 0.974\sim 0.976 & 0.219\sim 0.226 & 0.002\sim 0.005 \\ 0.219\sim 0.225 & 0.973\sim 0.975 & 0.037\sim 0.043 \\ 0.004\sim 0.014 & 0.035\sim 0.043 & 0.999\sim 0.999 \end{pmatrix}$$

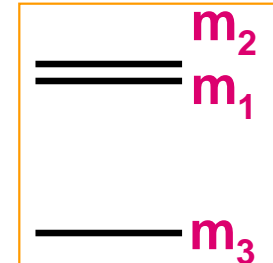
M.C.Gonzalez-Garcia (hep-ph/0410030)

今後の課題

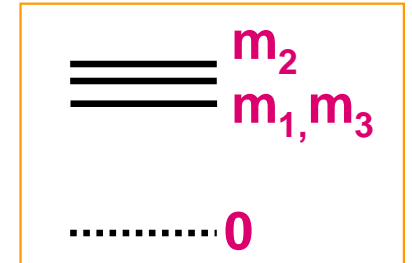
- U_{e3} は有限値を持つのか？
- CP phaseはあるか？
- パラメータの精密決定。特に θ_{23} は full mixingに近いのか？
- 質量の階層性は？
- 質量の絶対値は？
- ニュートリノはマヨラナ粒子か？



normal ?



inverted ?



degenerate ?

ニュートリノ混合行列

Maki-Nakagawa-Sakata(MNS) Matrix

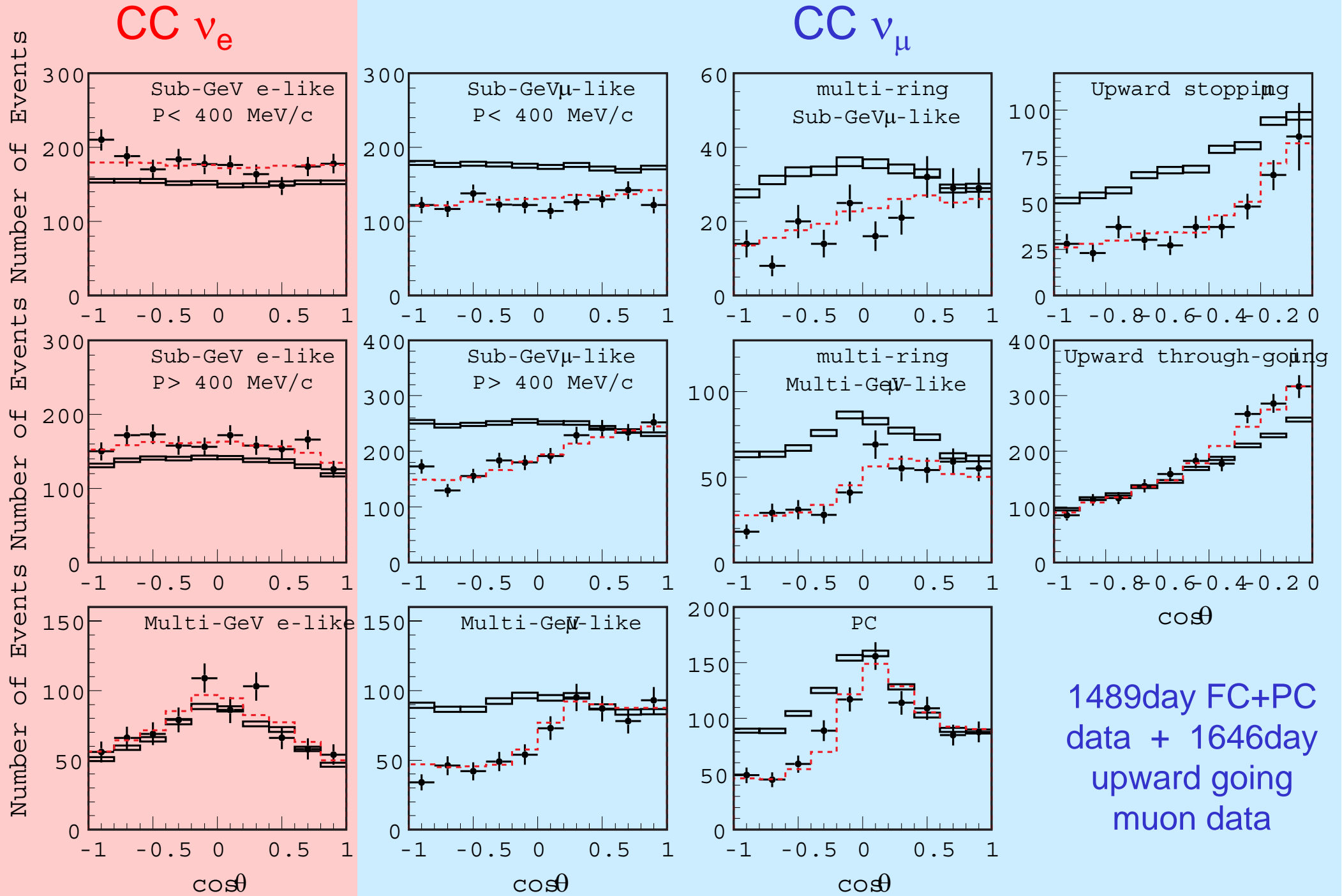
$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23}-c_{12}s_{13}s_{23}e^{-i\delta} & c_{12}c_{23}-s_{12}s_{13}s_{23}e^{-i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23}-c_{12}s_{13}c_{23}e^{-i\delta} & -c_{12}s_{23}-s_{12}s_{13}c_{23}e^{-i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin\theta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos\theta_{ij}$$

	Δm_{12}^2	Δm_{23}^2	θ_{12}	θ_{23}	θ_{13}	δ	$ m $
太陽、原子炉 ν	○		○		⊙		
現在の大气、長基線人工 ν		○		○			
将来の大气、長基線人工 ν		○ (精密、符号)		○	○	○	
2重ベータ崩壊実験							○

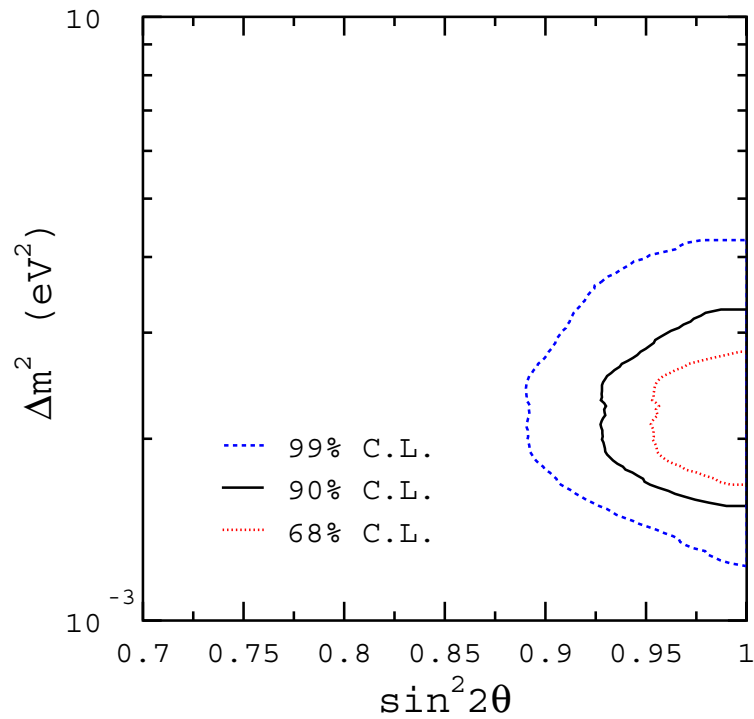
大気ニュートリノ

SK-I atmospheric neutrino data



SK-I大気ニュートリノデータによって得られた振動パラメータ

天頂角分布を使った従来の方法

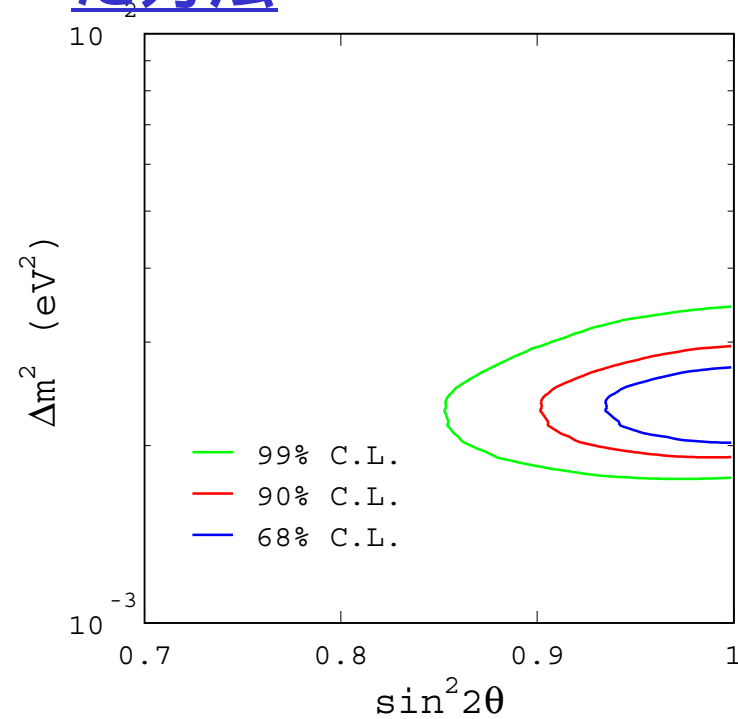


90% C.L.

$$\begin{cases} 1.5 < \Delta m_{23}^2 < 3.4 \times 10^{-3} \text{ (eV}^2\text{)} \\ \sin^2 2\theta_{23} > 0.92 \end{cases}$$

L/Eサンプルを使用した方法

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



$$\begin{aligned} 1.9 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ 0.90 < \sin^2 2\theta_{23} < 1.00 \quad (90\% \text{ C.L.}) \end{aligned}$$

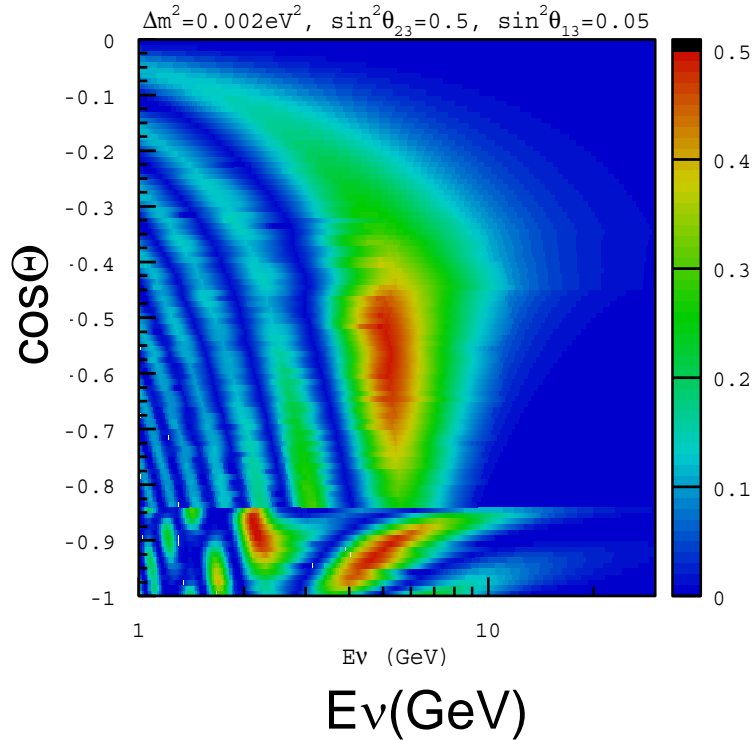
→ Δm^2 の精度向上

Search for non-zero θ_{13}

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

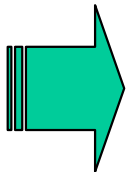
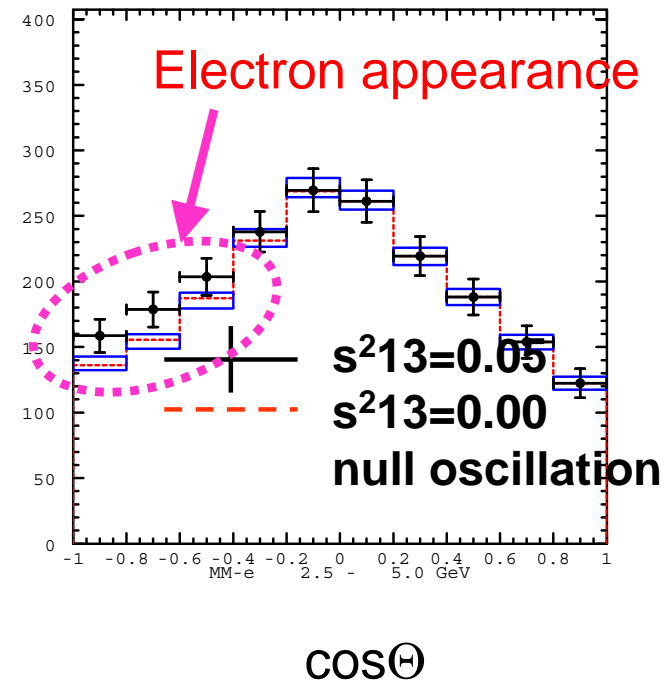
Matter effect

$$\frac{P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)}{P(\nu_e \rightarrow \nu_{\mu})}$$



MC, SK 20yrs

1+multi-ring, e-like,
2.5 - 5 GeV

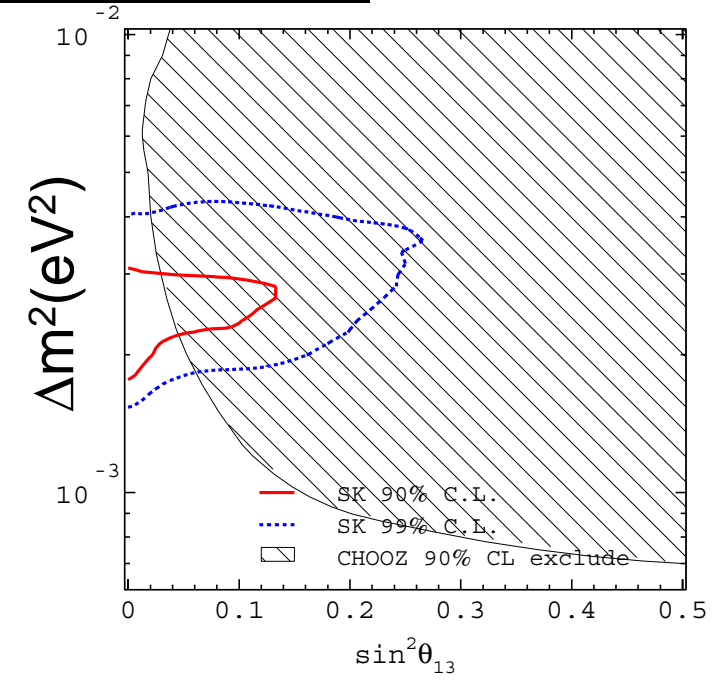
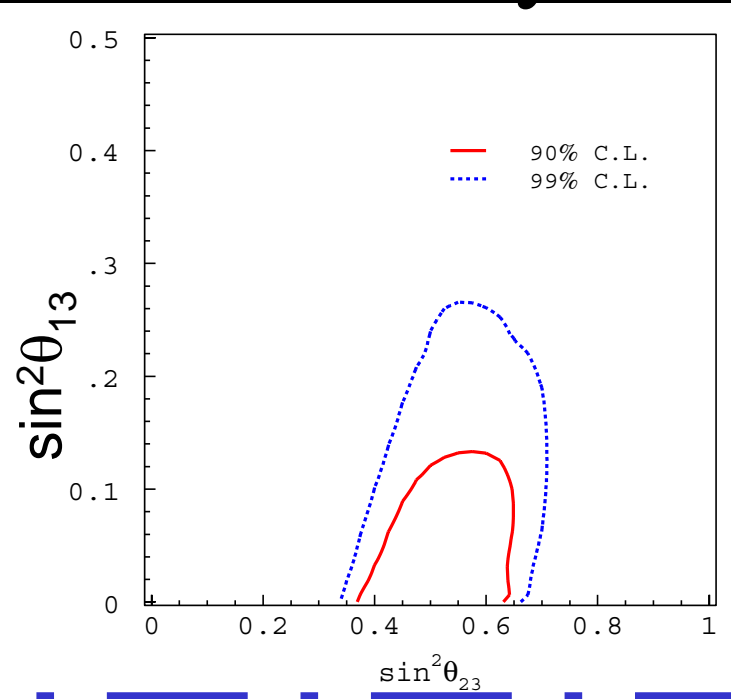
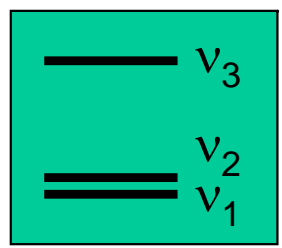


Electron appearance in the 5 – 10GeV upward going events.

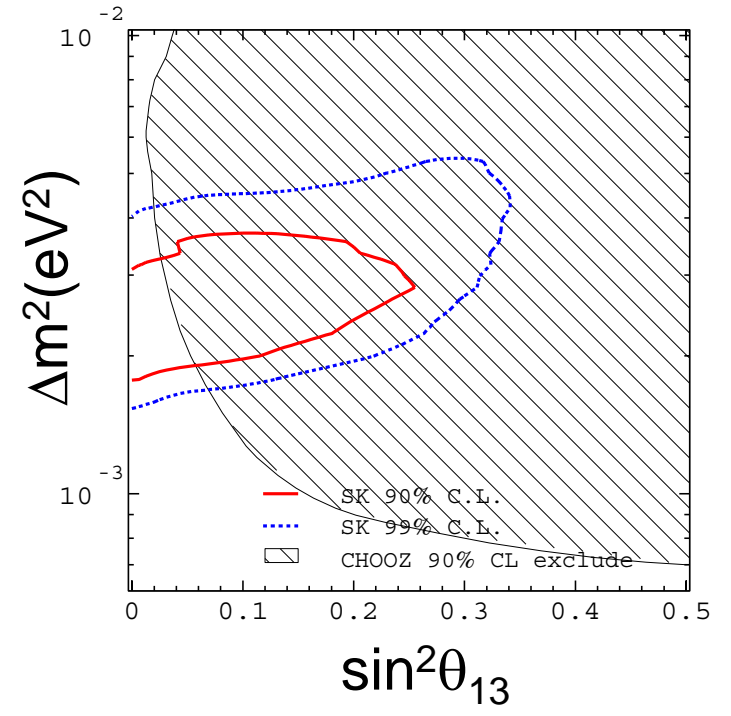
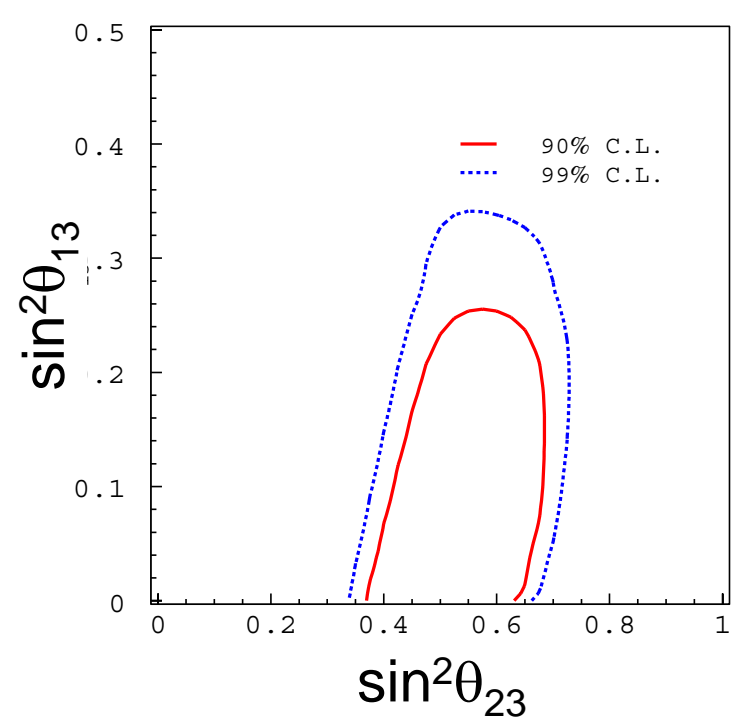
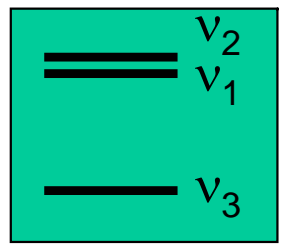
3 flavor analysis from SK-I

prelim.

Normal



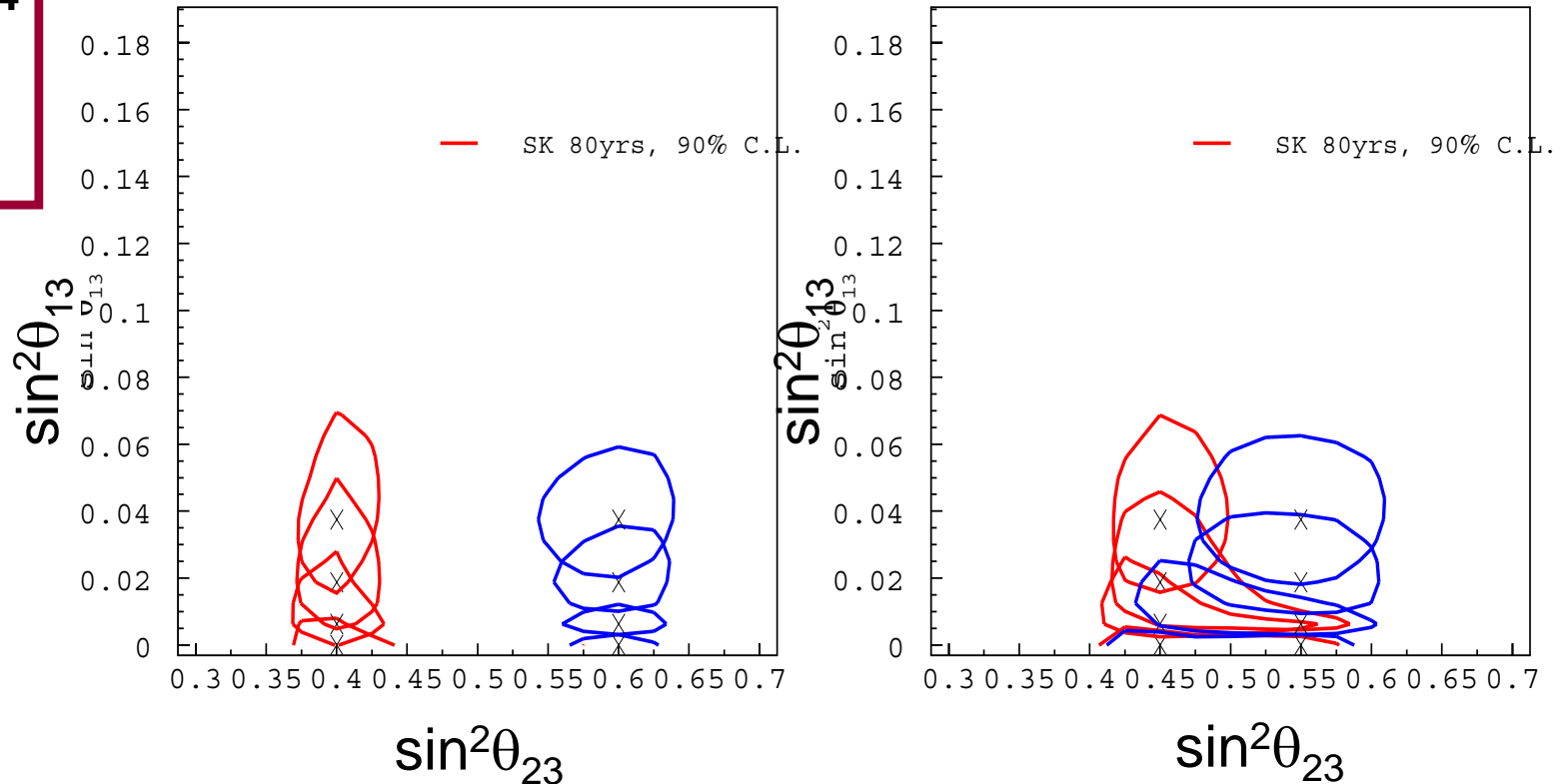
Inverted



Discrimination of θ_{23} octant and θ_{13}

80yrs SK ~ 4yrs 0.5 mega-ton

$s^2 2\theta_{12} = 0.825$
 $s^2 \theta_{23} = 0.40 \sim 0.60$
 $s^2 \theta_{13} = 0.00 \sim 0.04$
 $\delta_{cp} = 45^\circ$
 $\Delta m^2_{12} = 8.3e-5$
 $\Delta m^2_{23} = 2.5e-3$



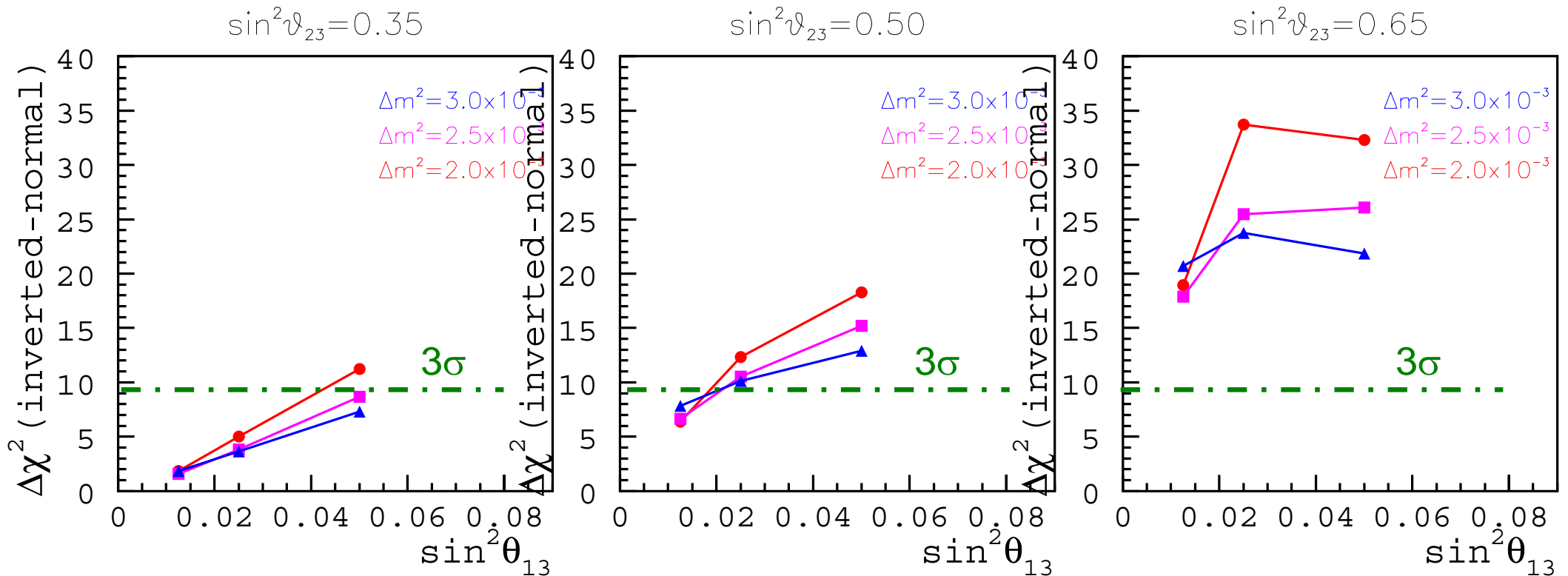
80年SK(4年0.5メガトン装置)により、 $\theta_{23} > 45^\circ, < 45^\circ$ を定められる可能性がある。

Invertedかnormalかの識別

True= **normal** mass hierarchy assumed.

Δm^2 : fixed, θ_{23} : free, θ_{13} : free

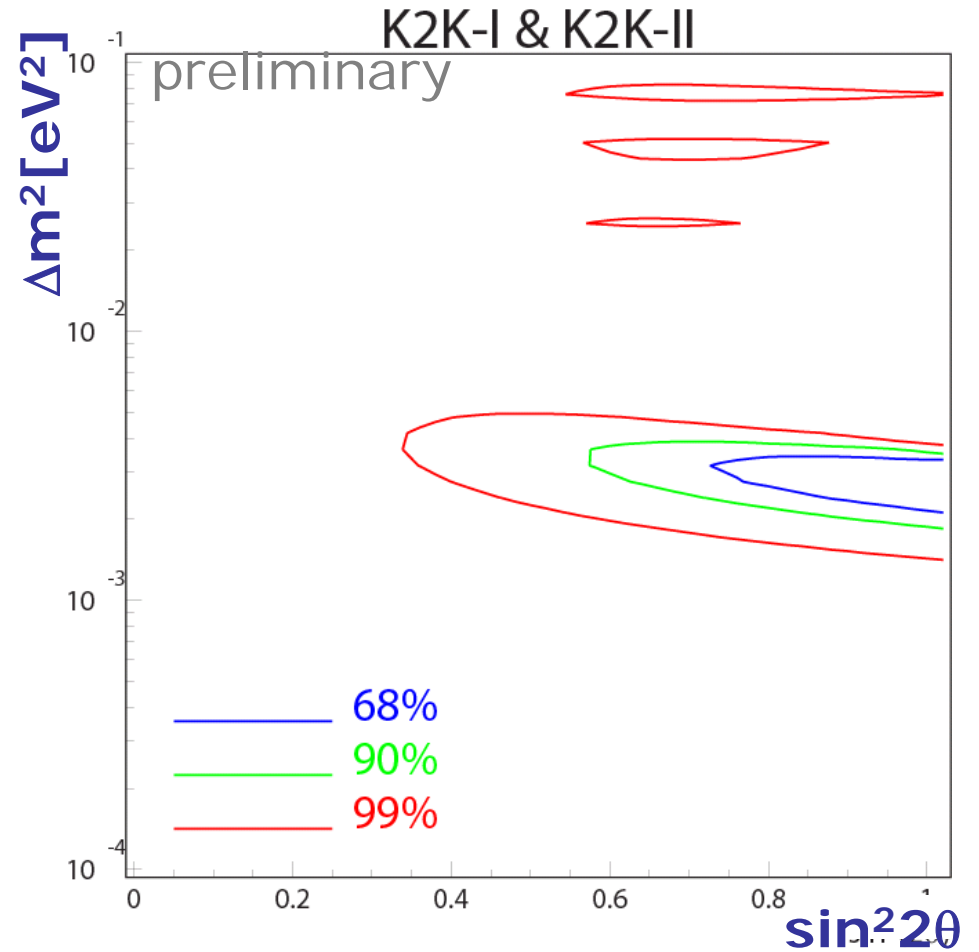
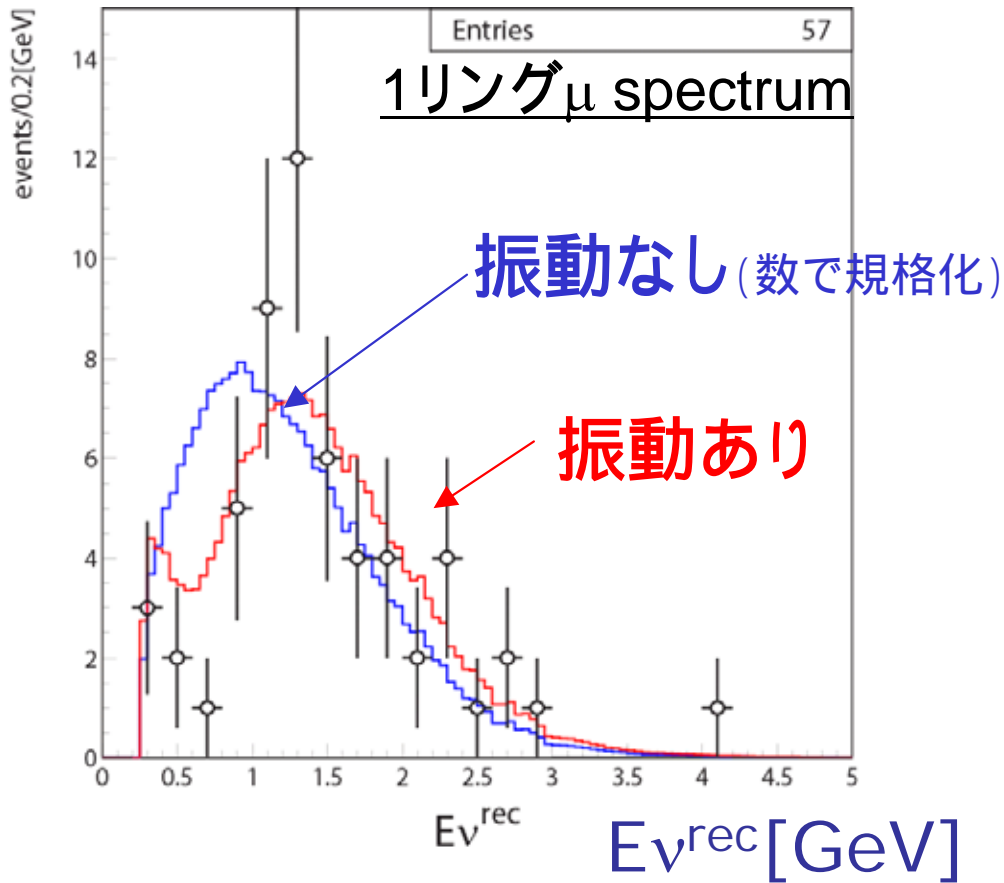
Exposure: 1.8Mtonyr
(SK 80yr or 0.5mega-ton ~ 4 yr)



長基線加速器ニュートリノ

K2K実験 イベント数、スペクトル、振動解析

- 観測数 : 107
- 期待値(振動なし) : $150.9^{+11.5}_{-10.1}$



ニュートリノ振動を確認。
大気ニュートリノの結果とconsistent.

T2K実験(2009年スタート)

Long baseline neutrino oscillation experiment
from Tokai to Kamioka.

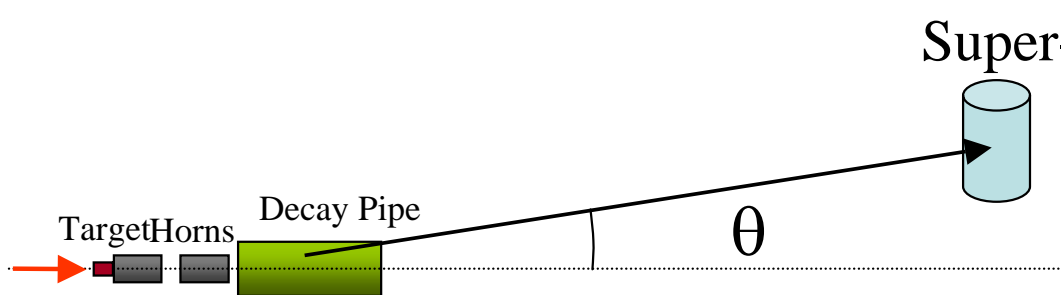


実験の目的:

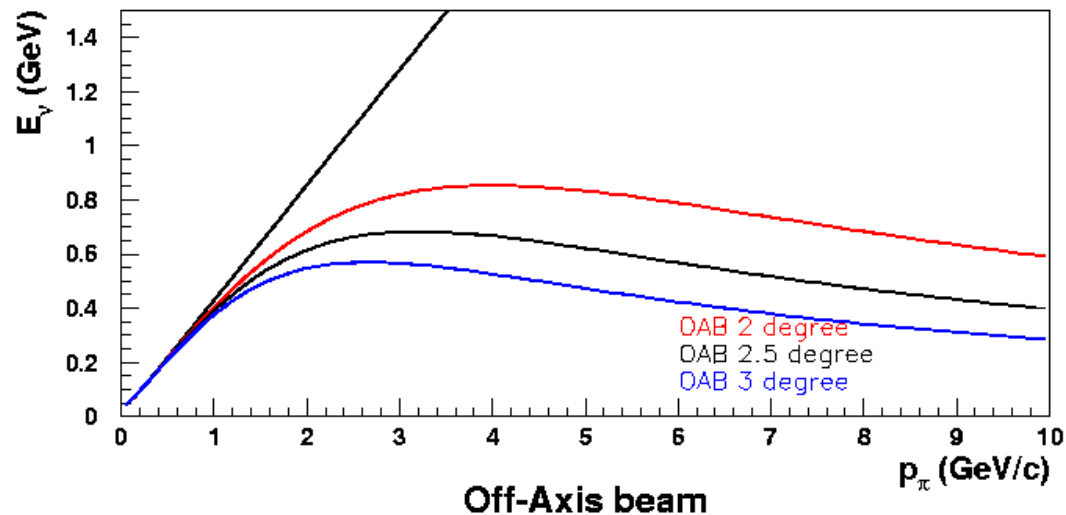
- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ 振動の発見 (有限の θ_{13})
- Δm_{23} , θ_{23} の精密測定
- CP violationの探索 (Phase2)

T2K beam: Off Axis Beam

(Ref: BNL-E889 Proposal)

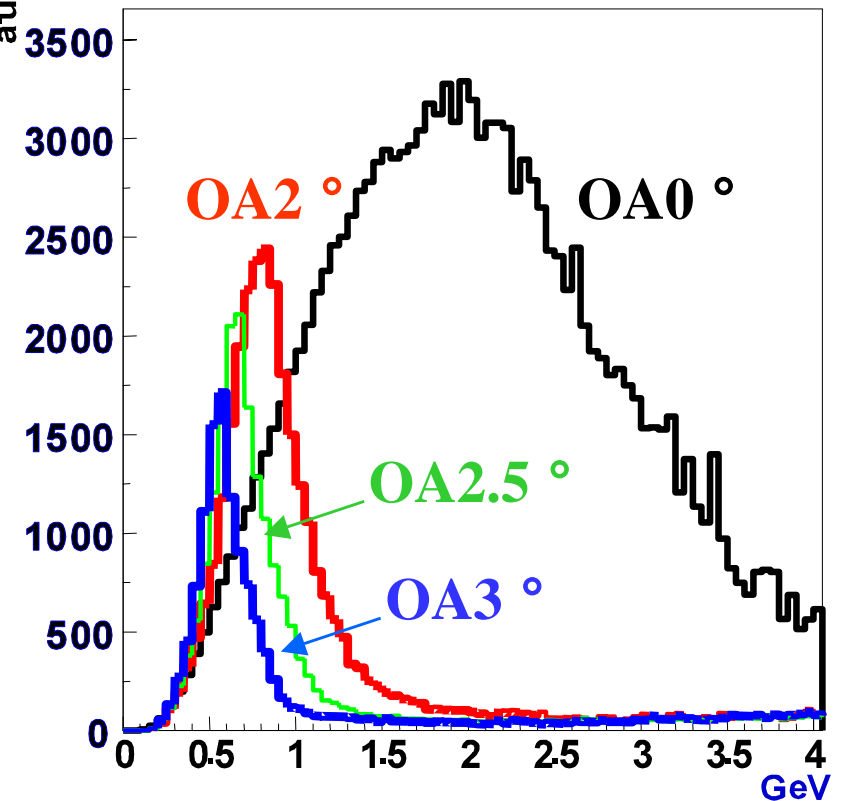


Decay Kinematics



- ◆ Quasi Monochromatic Beam
- ◆ x 2~3 intense than NBB

Tuned at oscillation maximum



Statistics at SK

(OAB 2.5 deg, 1 yr, 22.5 kt)

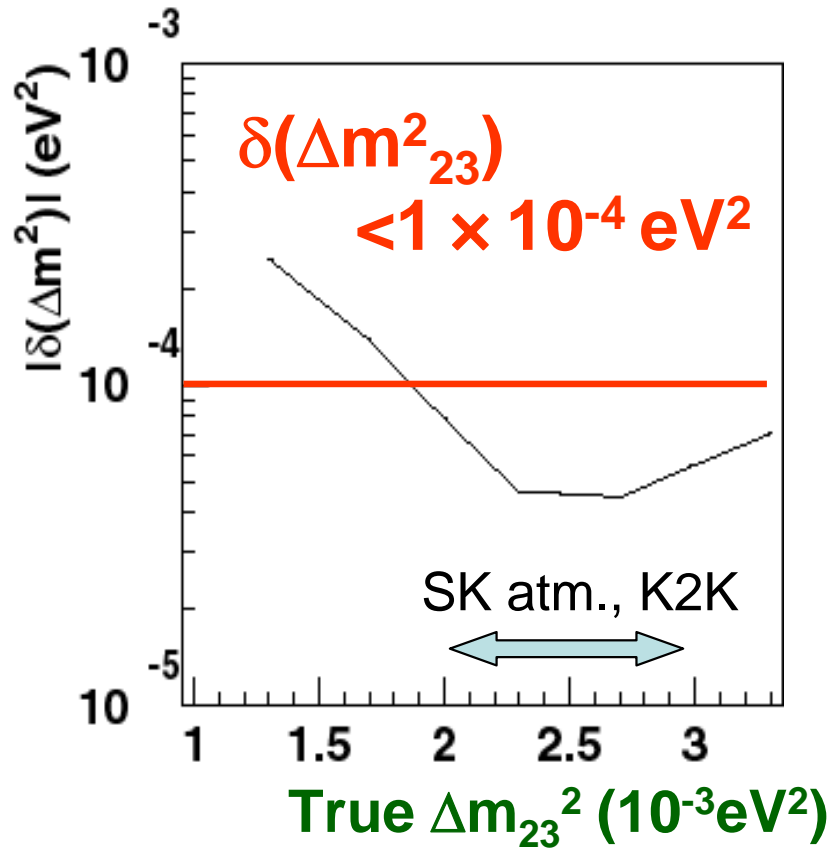
~ 2200 ν_μ tot

~ 1600 ν_μ CC

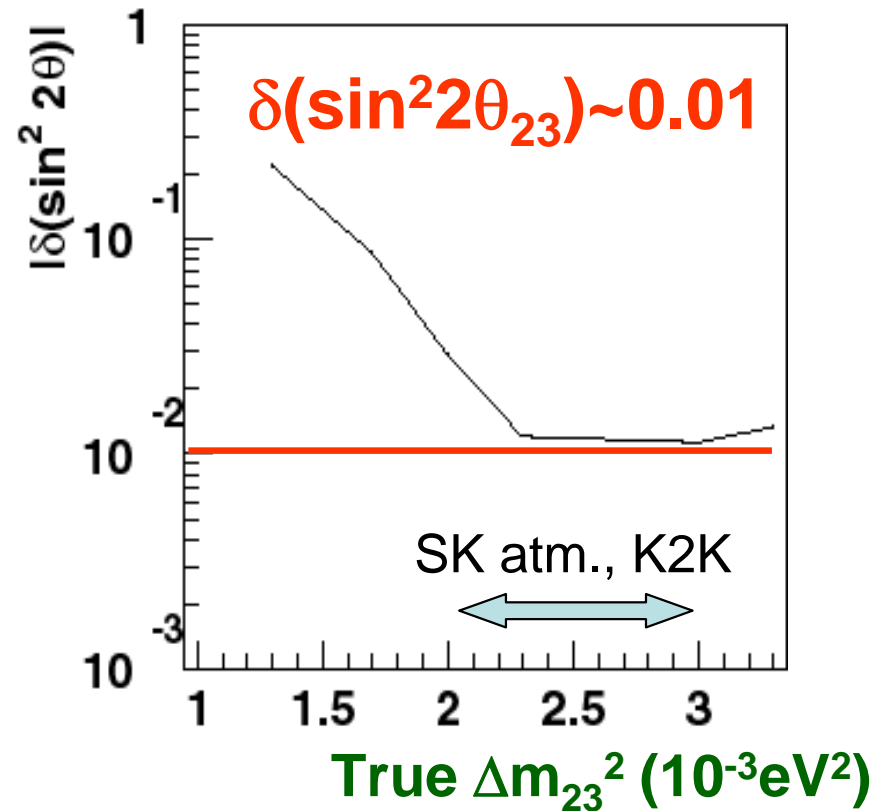
ν_e ~0.4% at ν_μ peak

θ_{23} , Δm_{23}^2 の測定精度

系統誤差とphase Iでの統計を考慮して

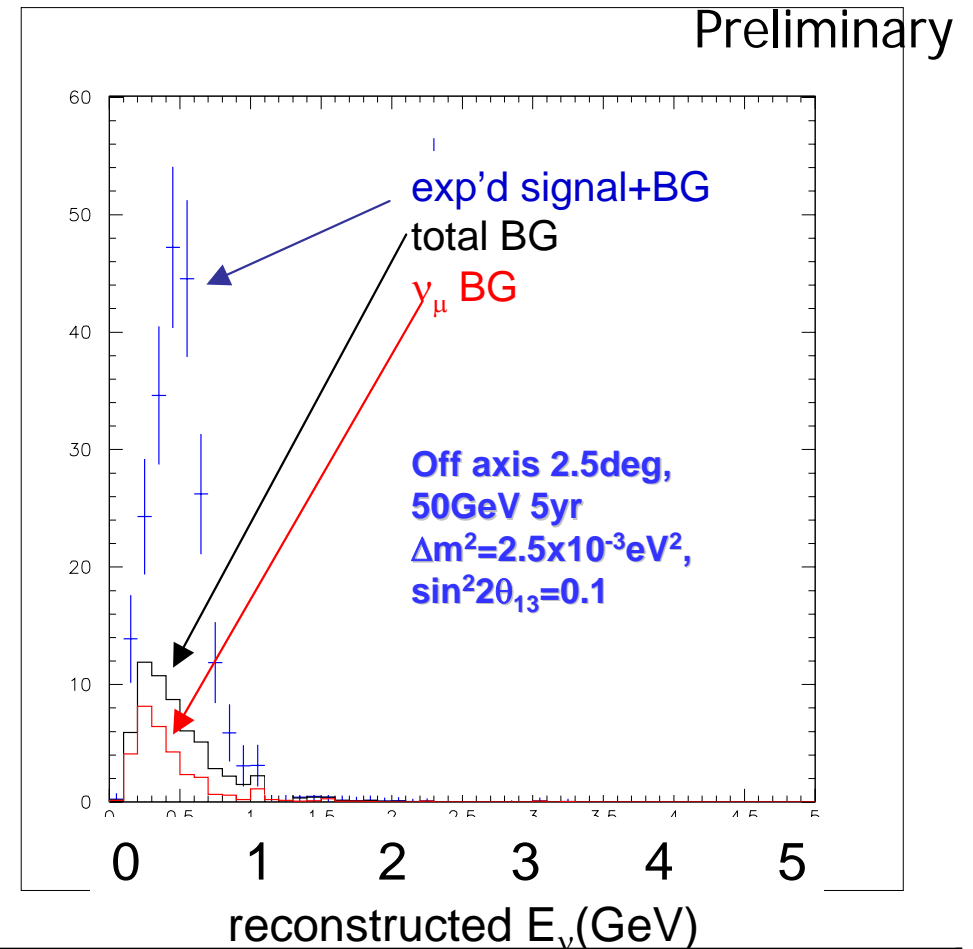
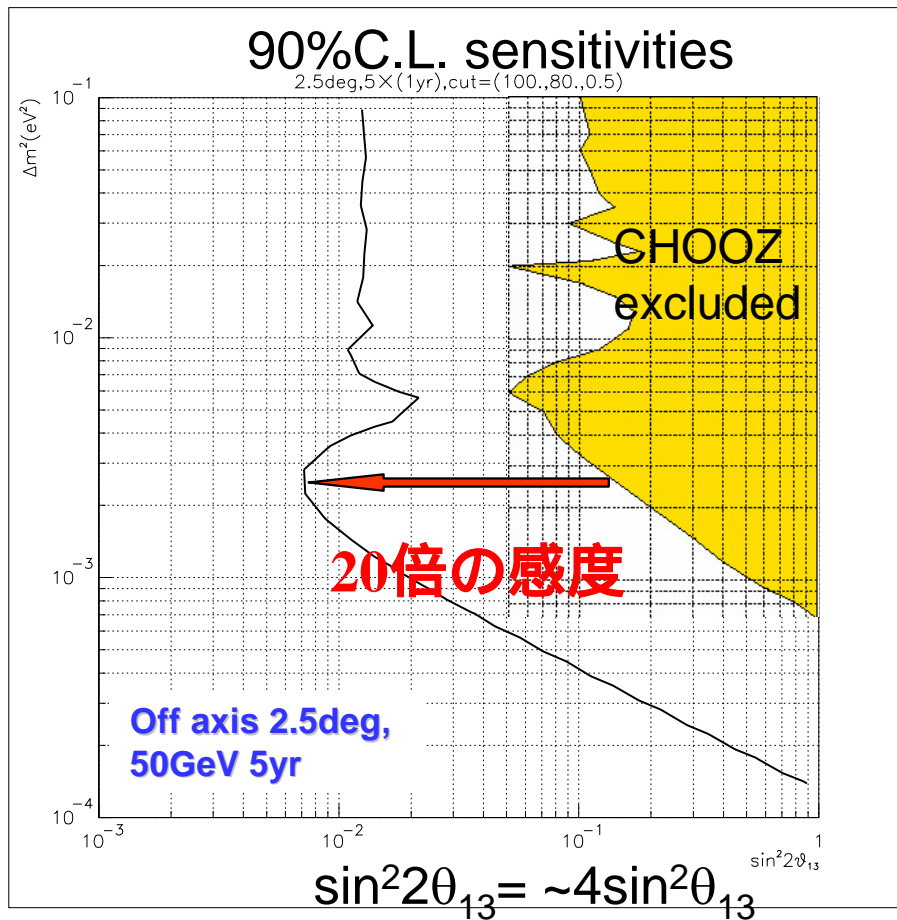


現在: $\delta(\Delta m_{23}^2) \sim 1 \times 10^{-3} \text{eV}^2$



現在: $\delta(\sin^2 2\theta) \sim 0.1$

θ_{13} に対する感度 (T2K 1st phase)



$\sin^2 2\theta_{13}$	μ (CC+NC)	Beam e	Osc'd e	Signal+BG
0.1	12	16	122	150
0.01	12	16	12	40

(OA 2.5deg, 50GeV 5yr)

CP phaseに対する感度 (T2K 2nd phase)

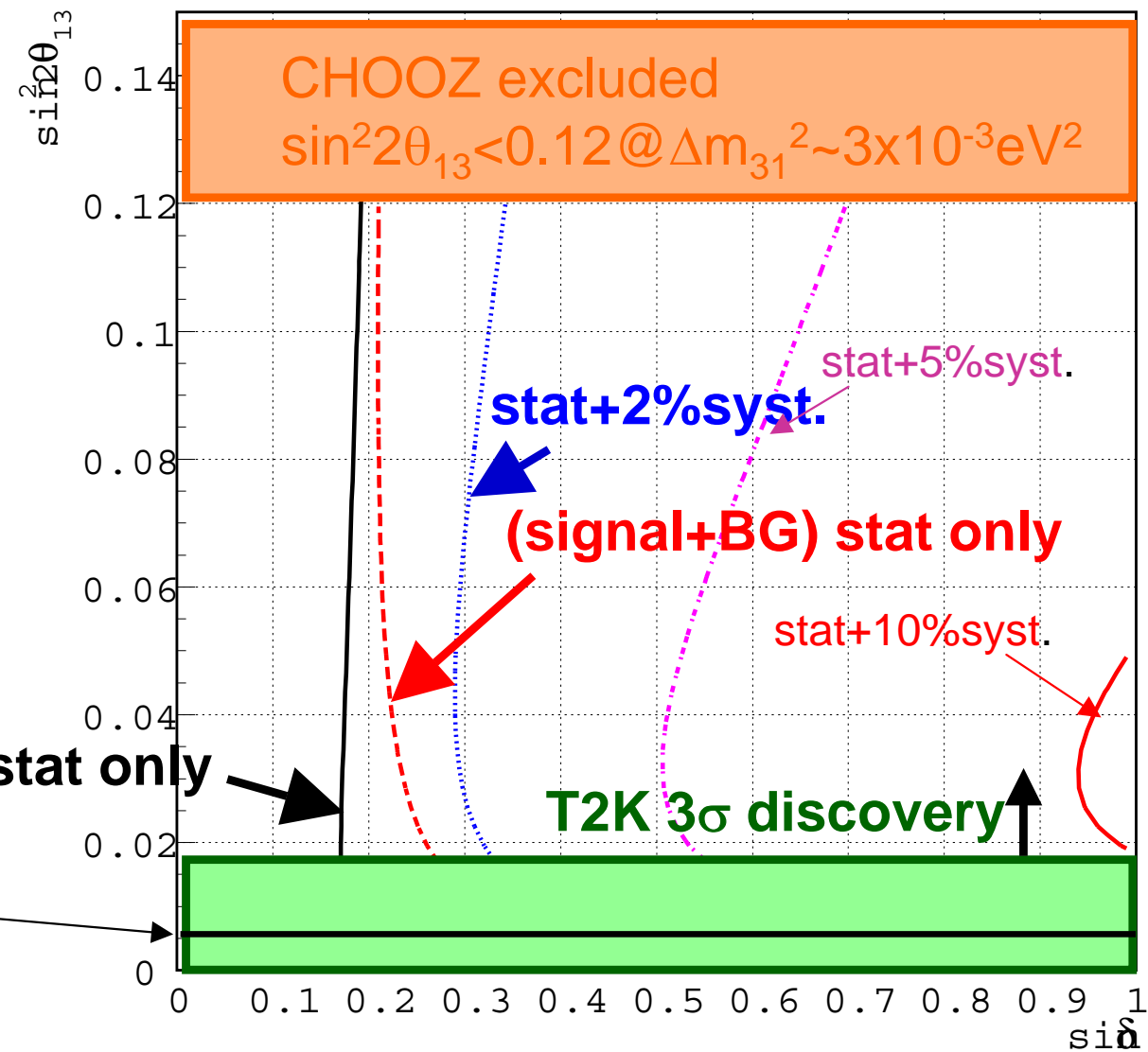
4MW, 540kt
 2yr for ν_μ
 6~7yr for $\bar{\nu}_\mu$

$\Delta m_{21}^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
 $\Delta m_{32}^2 = 2.8 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
 $\theta_{12} = 0.594$
 $\theta_{23} = \pi/4$

$$A_{CP} \approx \frac{\Delta m_{12}^2}{4E_\nu} \cdot \frac{\sin 2\theta_{12}}{\sin \theta_{13}} \cdot \sin \delta$$

no BG
 signal stat only
 T2K-I 90%

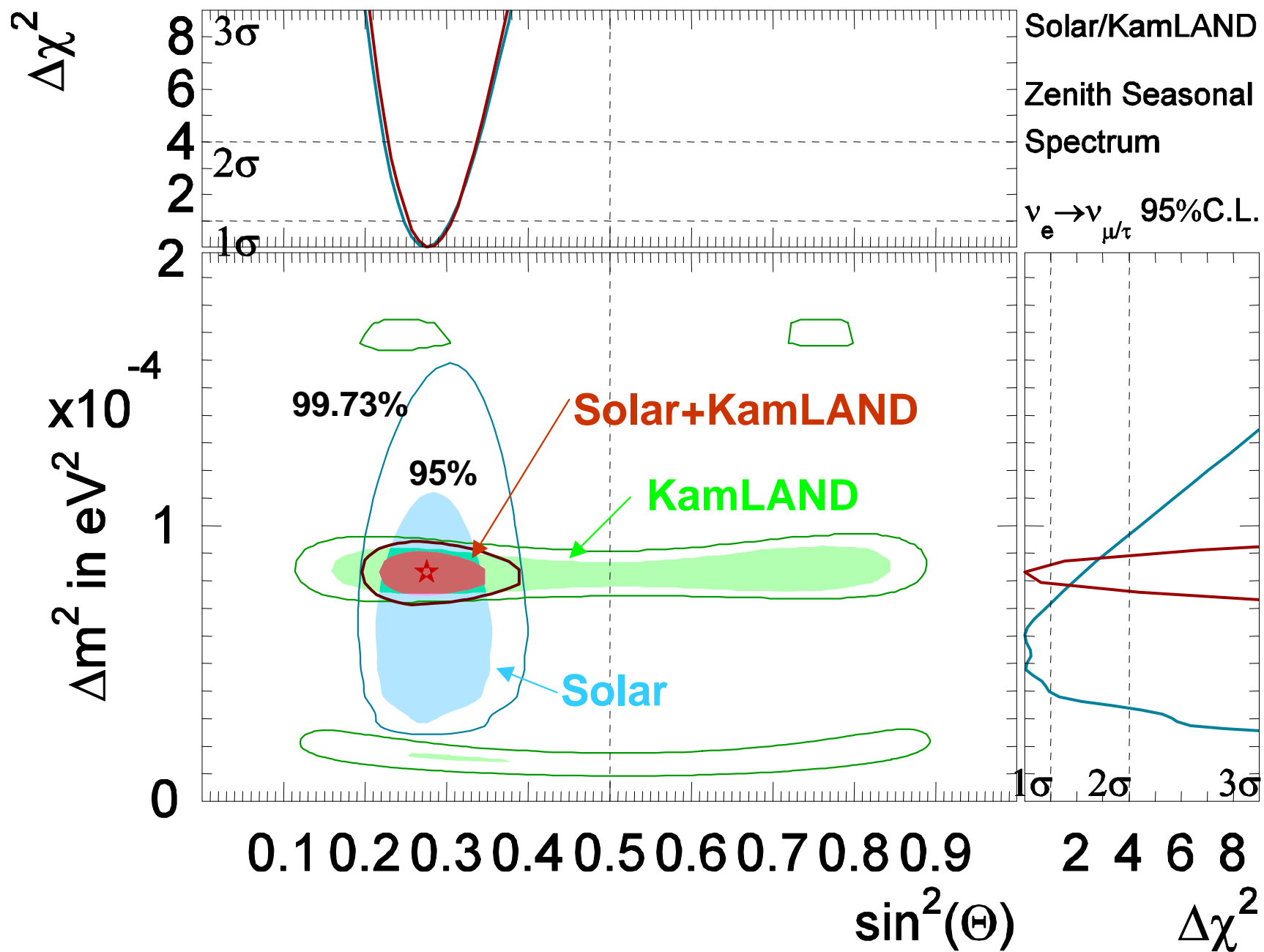
JHF-HK CPV Sensitivity



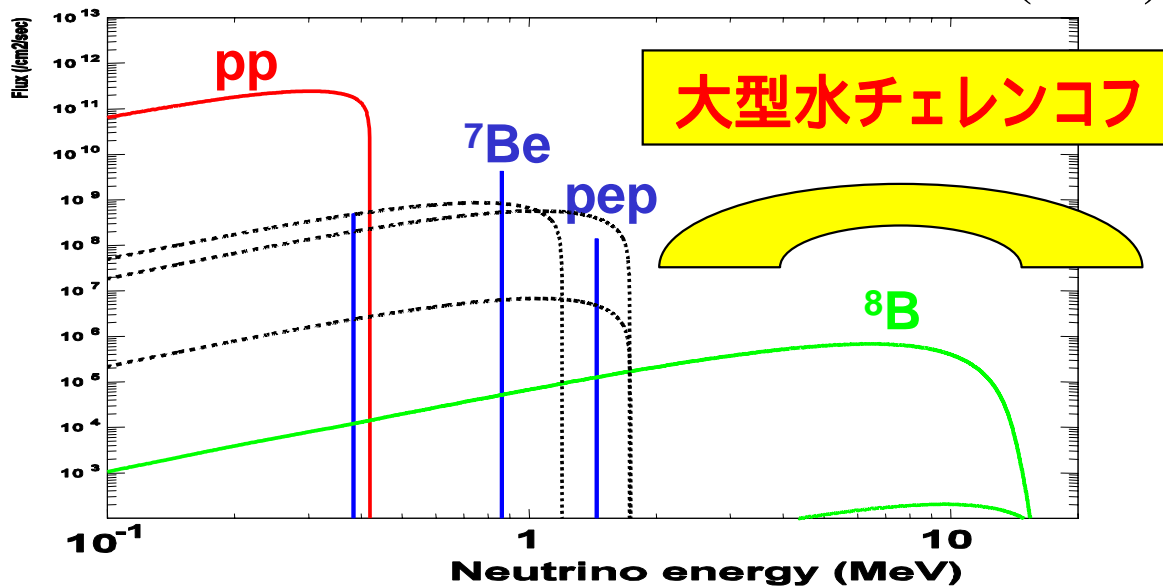
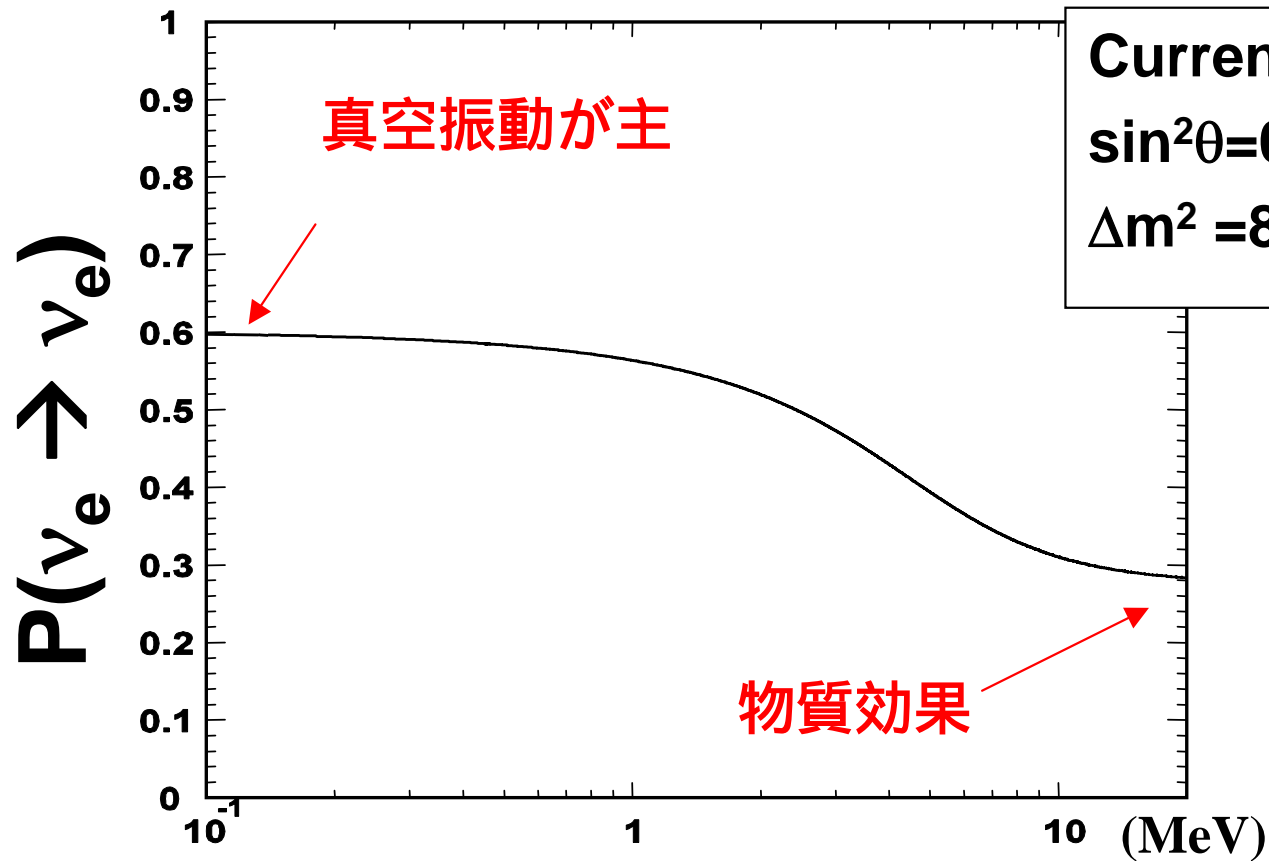
3σ CP sensitivity : $|\delta| > 20^\circ$ for $\sin^2 2\theta_{13} > 0.01$ with 2% syst.

太陽ニュートリノ

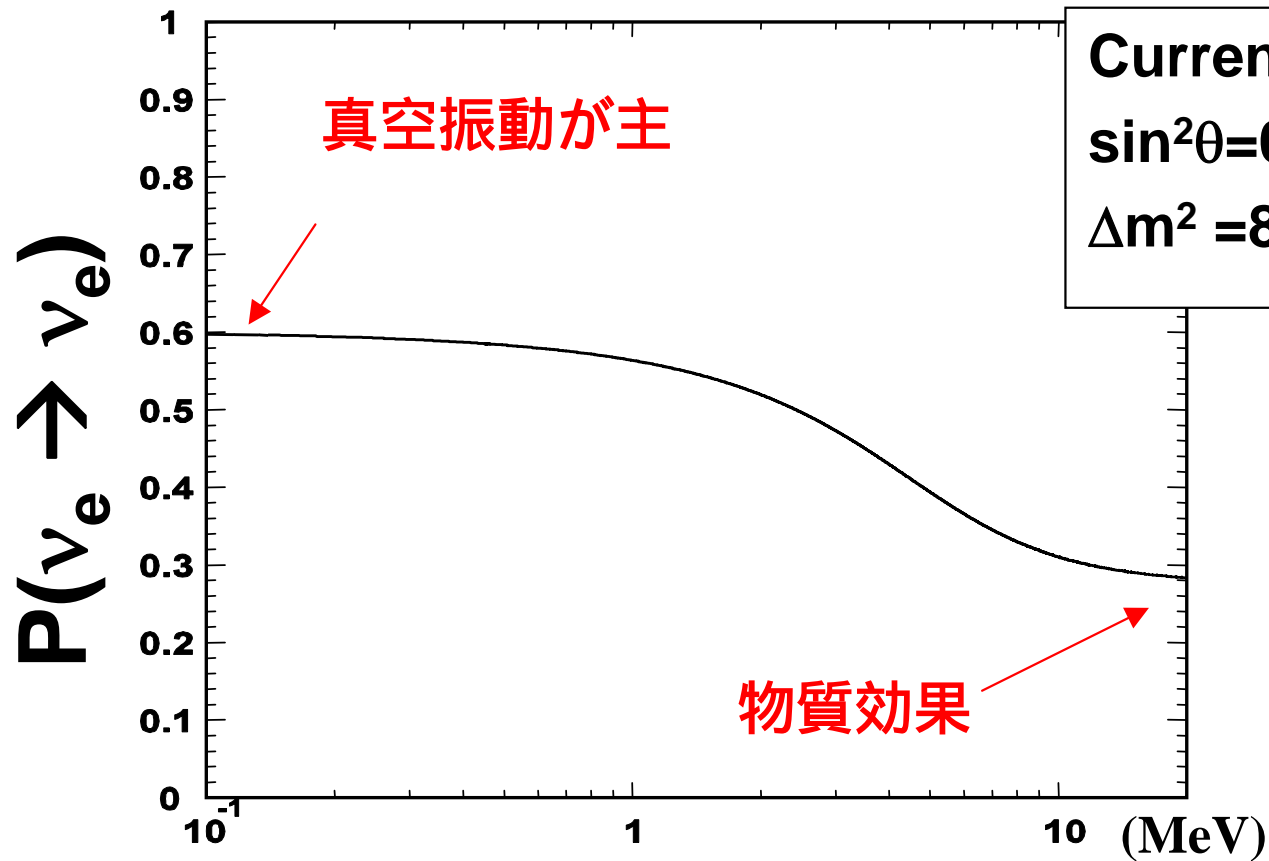
太陽ニュートリノ実験とカムランドによる θ_{12} , Δm_{12}^2



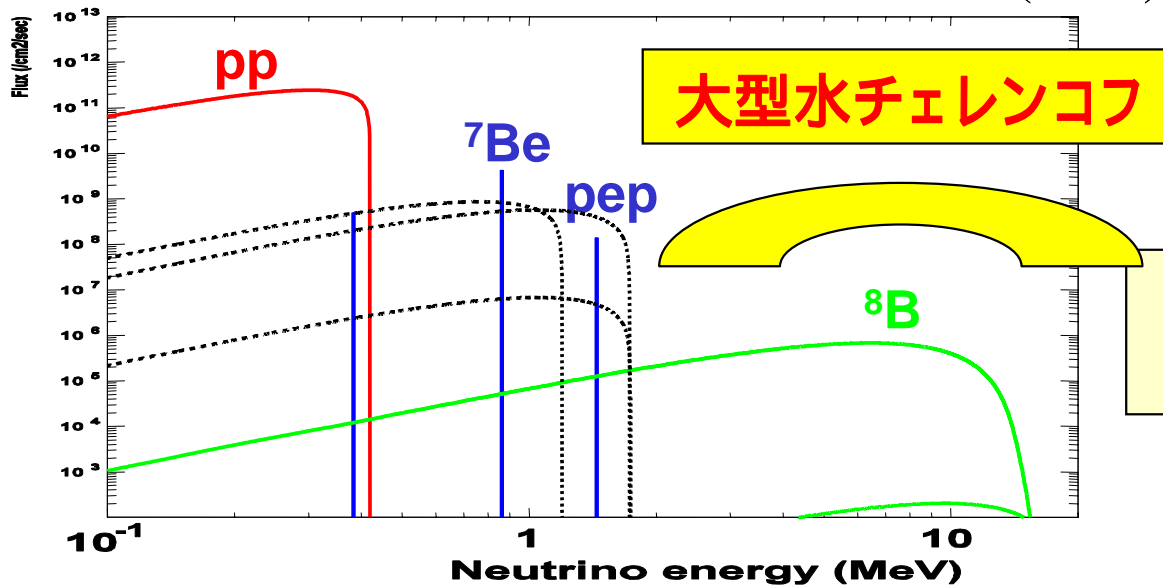
解のパラメータでの ν_e 生存確率



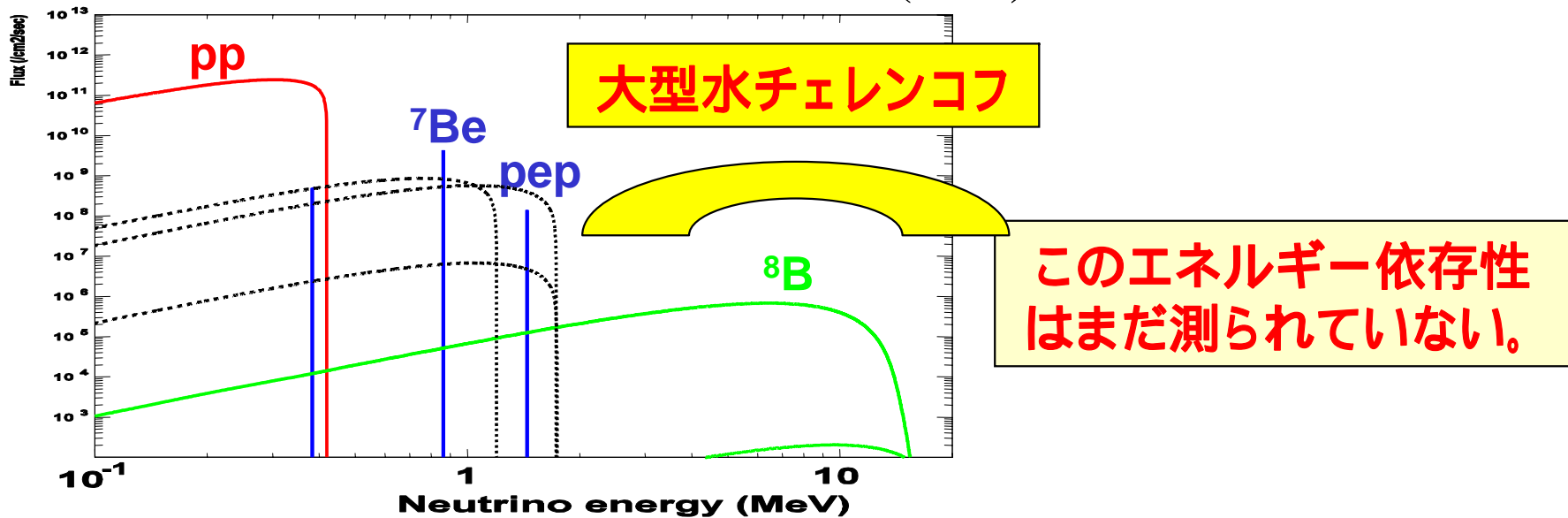
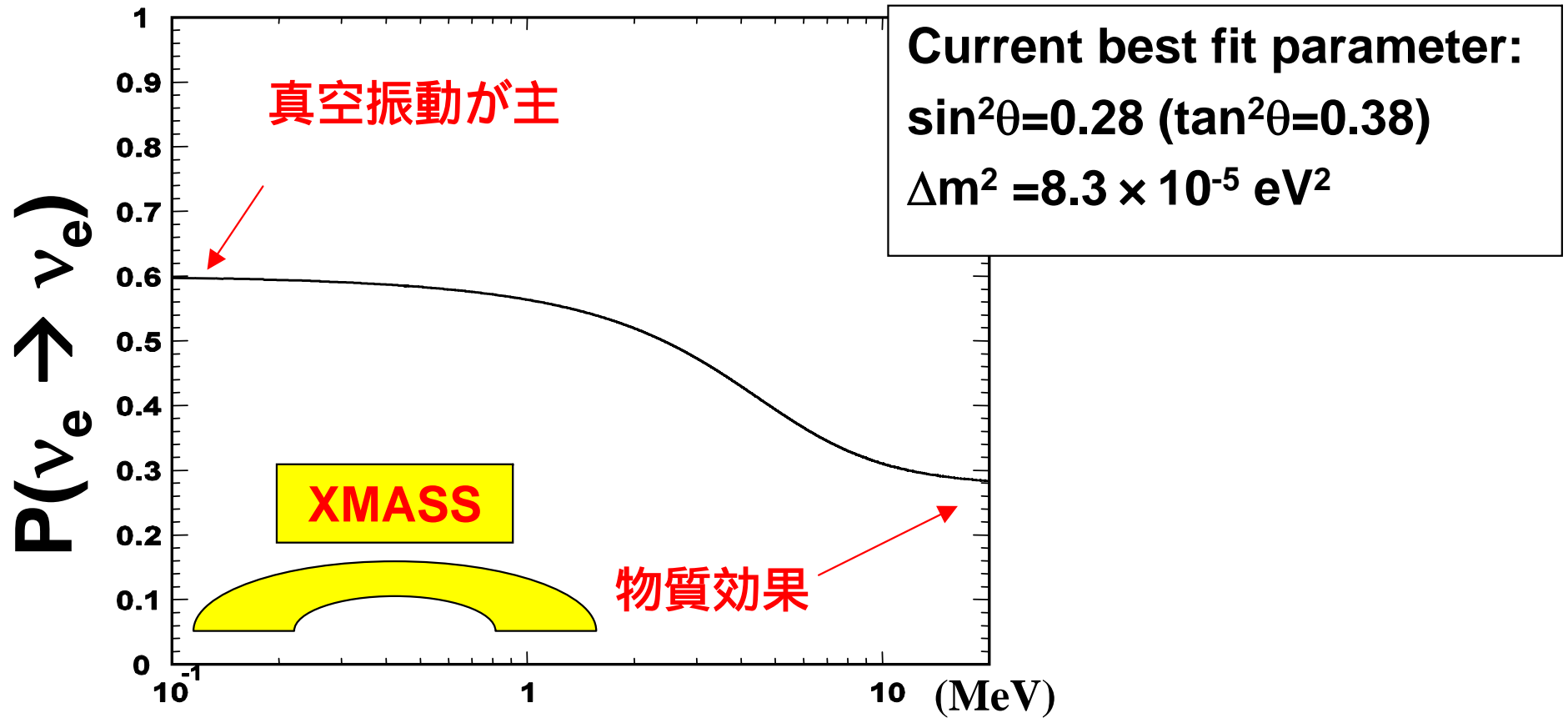
解のパラメータでの ν_e 生存確率



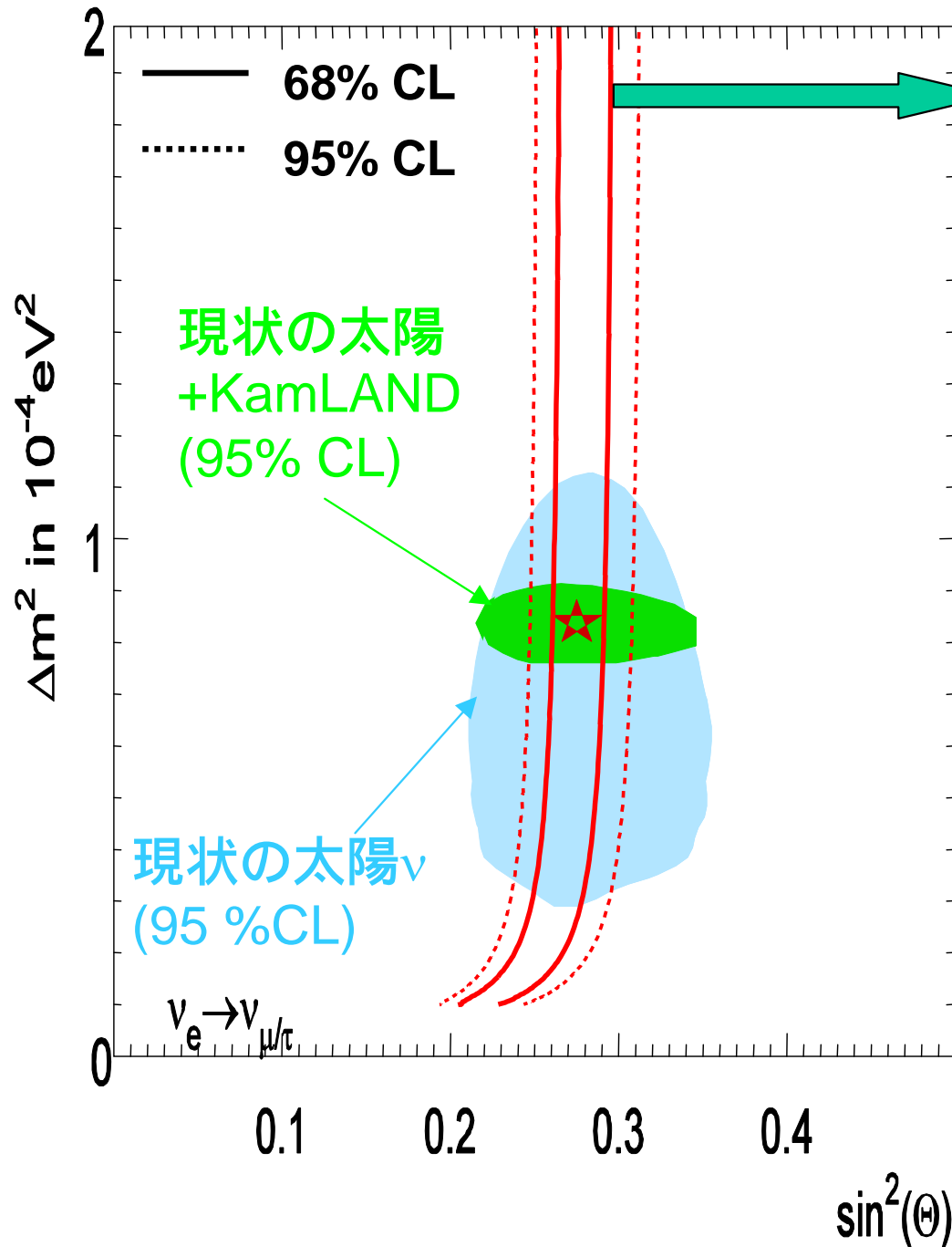
Current best fit parameter:
 $\sin^2\theta=0.28$ ($\tan^2\theta=0.38$)
 $\Delta m^2 = 8.3 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$



解のパラメータでの ν_e 生存確率

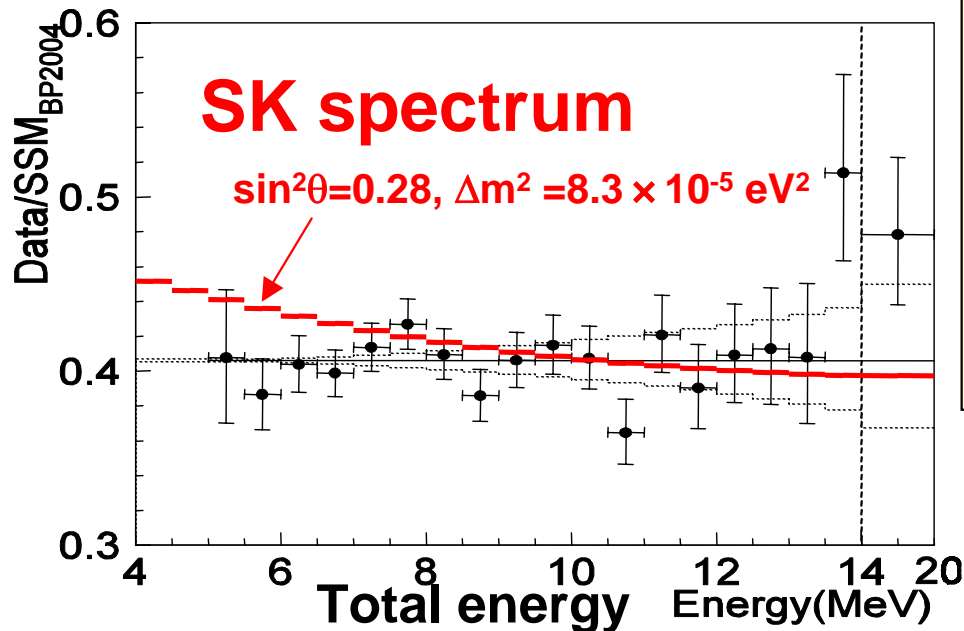
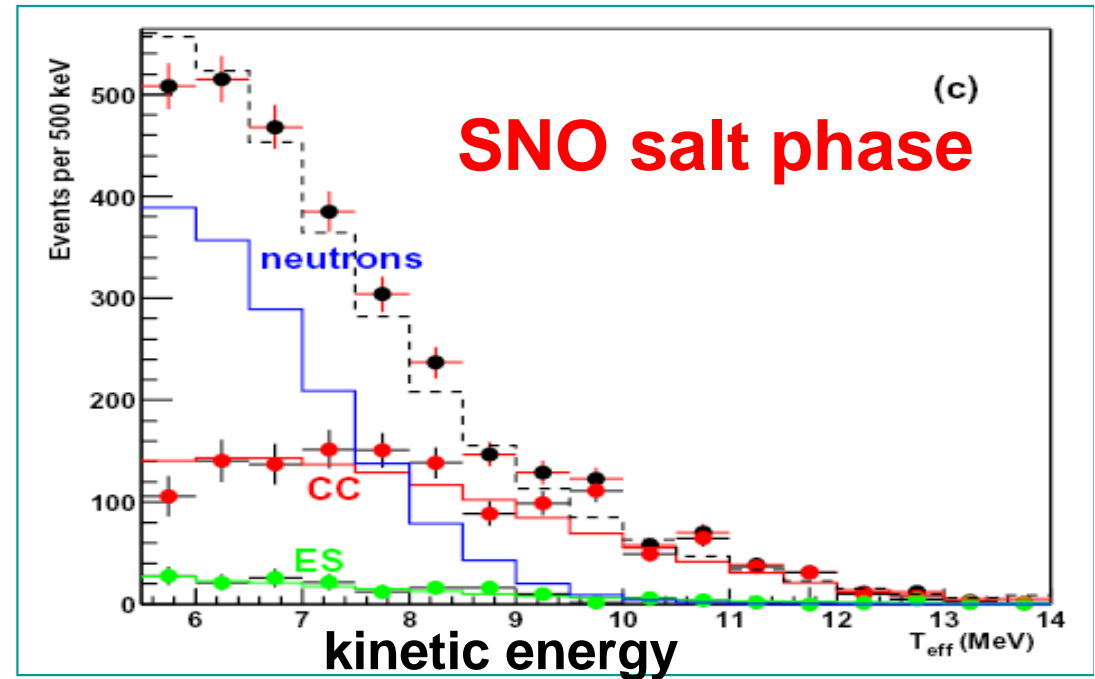
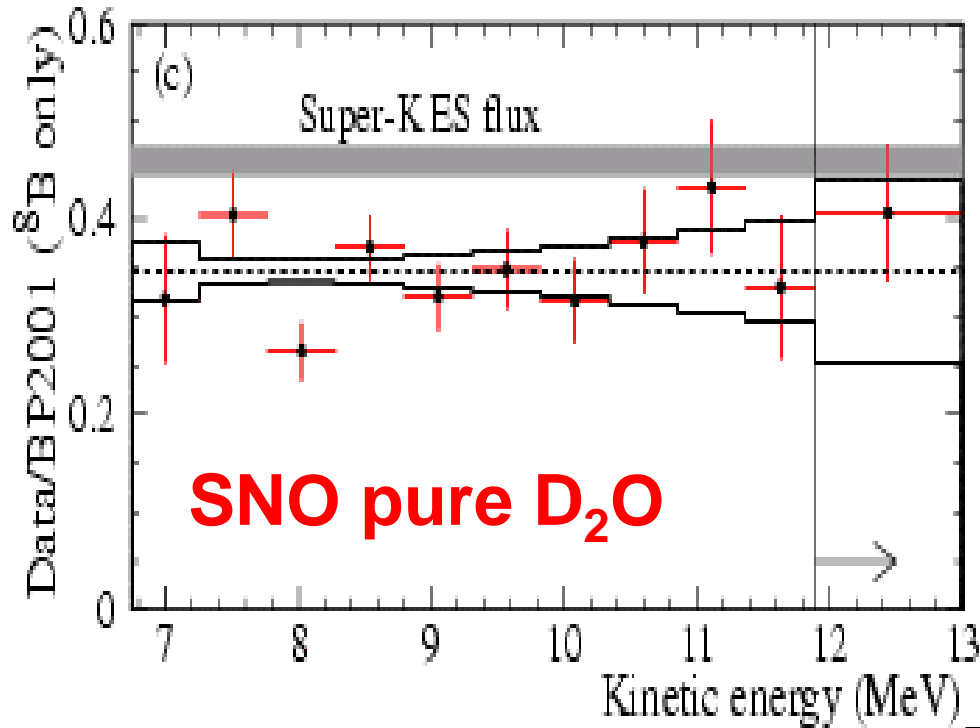


pp太陽ニュートリノ実験による混合角(θ_{12})測定のご感度



- **XMASS 10 ton装置の感度:**
 - 5年間に約12000現象の ν_e 散乱
 - 太陽モデルの誤差は1%
- **混合角決定精度:**
 $\sin^2\theta = 0.28 \pm 0.015$ (stat.+SSM)

SK、SNOのスペクトル(現状)



スペクトルの歪みはまだ見えていない。

系統誤差のためか？

統計が足りないためか？

混合角が大きく、 Δm^2 が小さい解か？

カムランドと違う解？

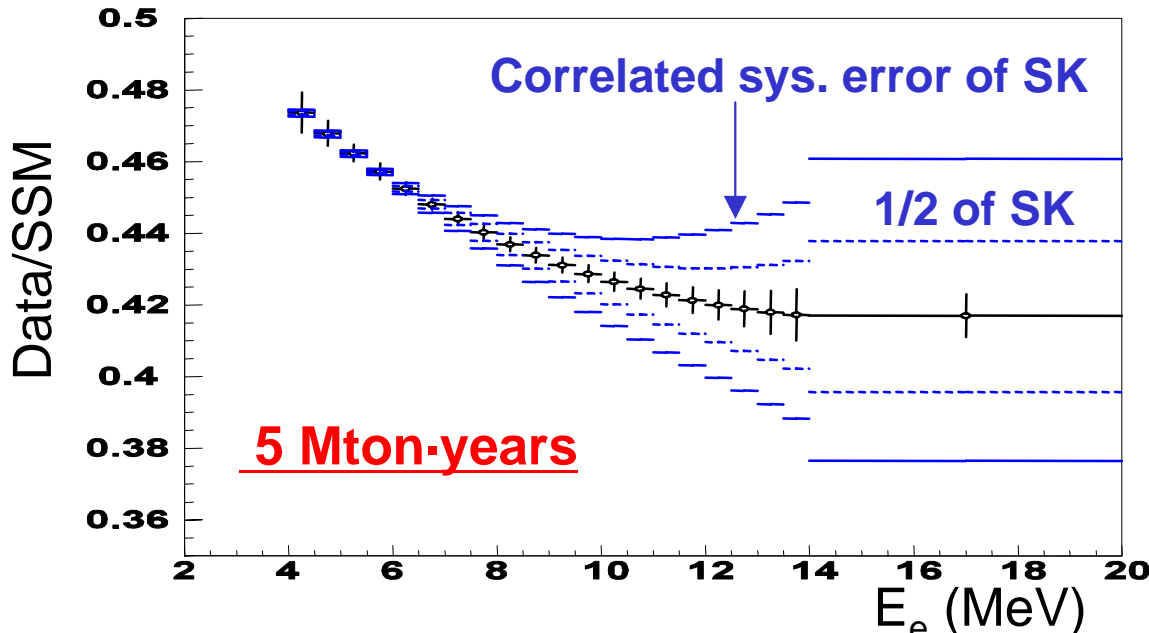
多くの統計が必要。

系統誤差を下げる必要がある。

メガトンクラス実験装置の感度(スペクトル)

^8B スペクトルの歪み

$$\sin^2\theta=0.28, \Delta m^2 = 8.3 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

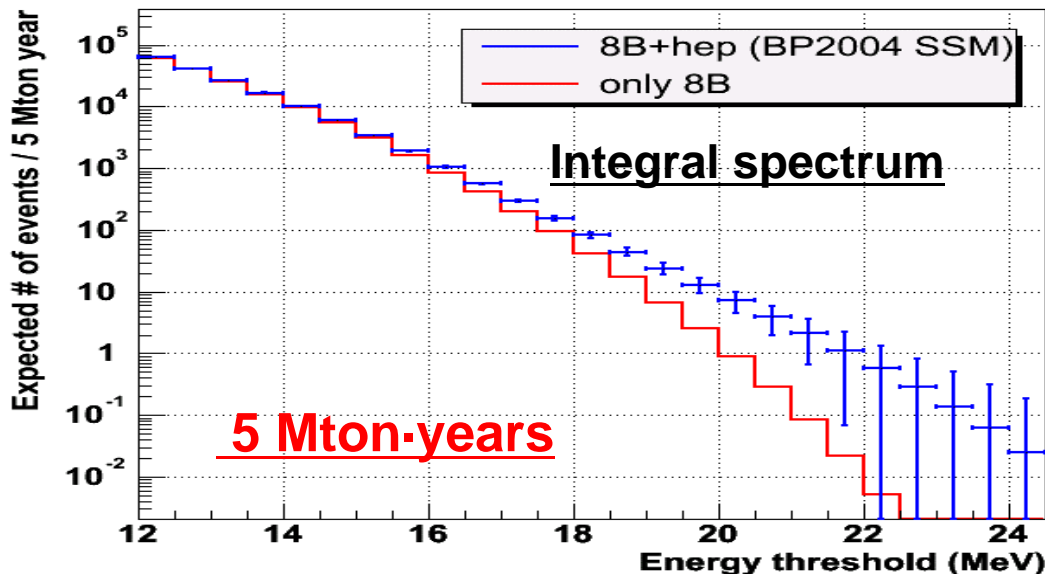


歪みを見るのに十分な統計。

ただし、エネルギー較正は
0.3%程度の精度が必要。

(*)バックグラウンドについて、5.5MeV以上はSKレベル、5.5MeV以下は70%減ることを想定。

Hepニュートリノ観測の可能性



SSM(BP2004) flux:

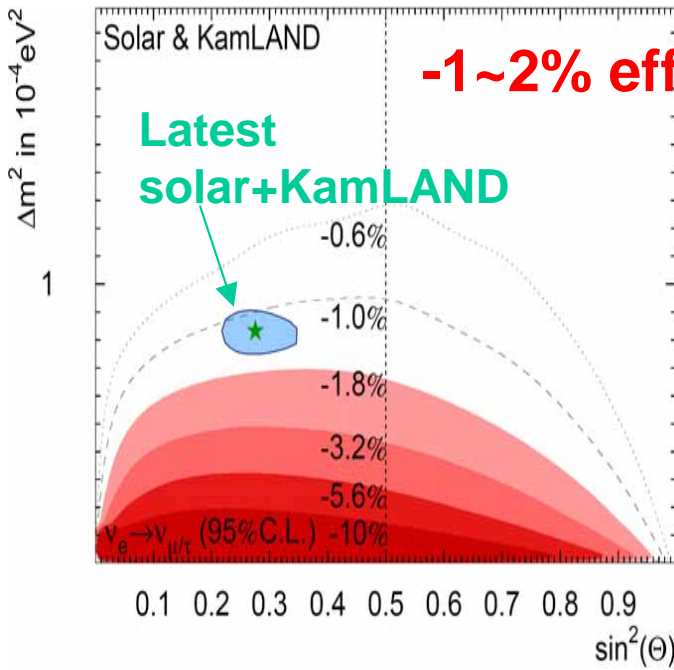
$$\text{hep: } 7.88(1 \pm 0.16) \times 10^3 \text{ /cm}^2\text{/sec}$$

$$= \sim 1/700 \text{ of } ^8\text{B}$$

統計的に測定可能。

エネルギー分解能の精密較正
が必要。

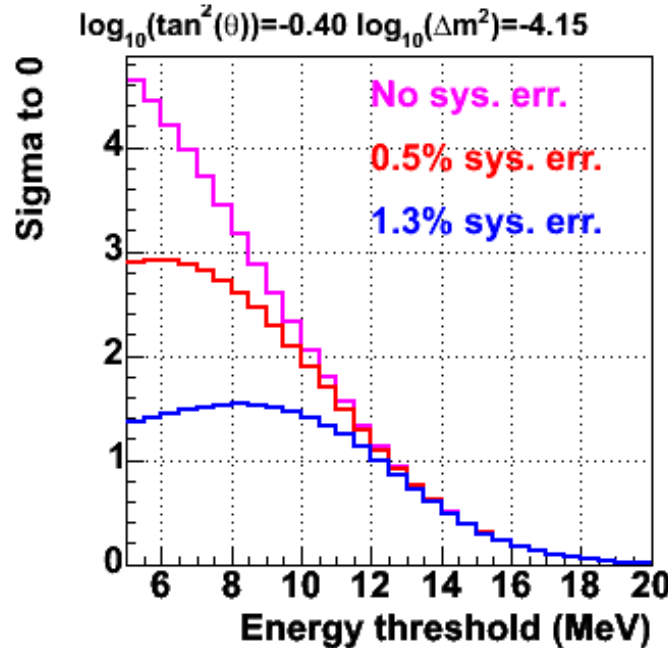
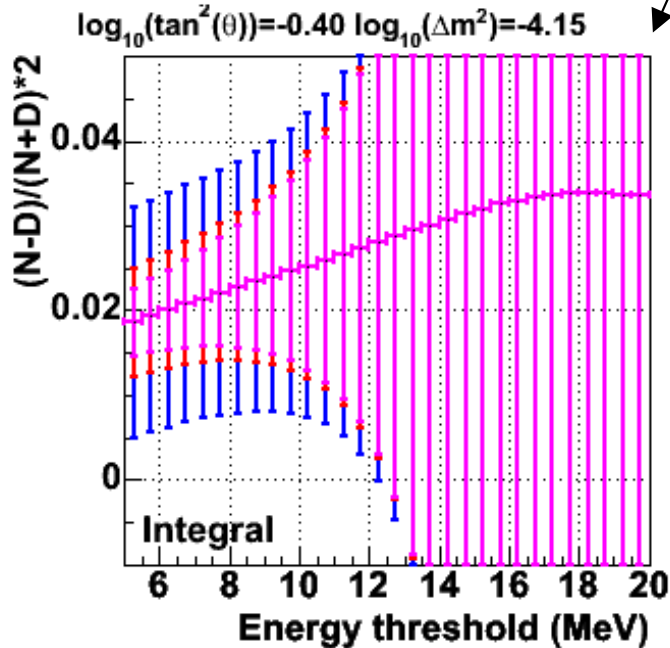
メガトンクラス実験装置の感度 (夜昼の違い)



$$\frac{(\text{夜}-\text{昼})}{1/2(\text{夜}+\text{昼})} \times 100\%$$

ベストパラメータでの夜昼の違い

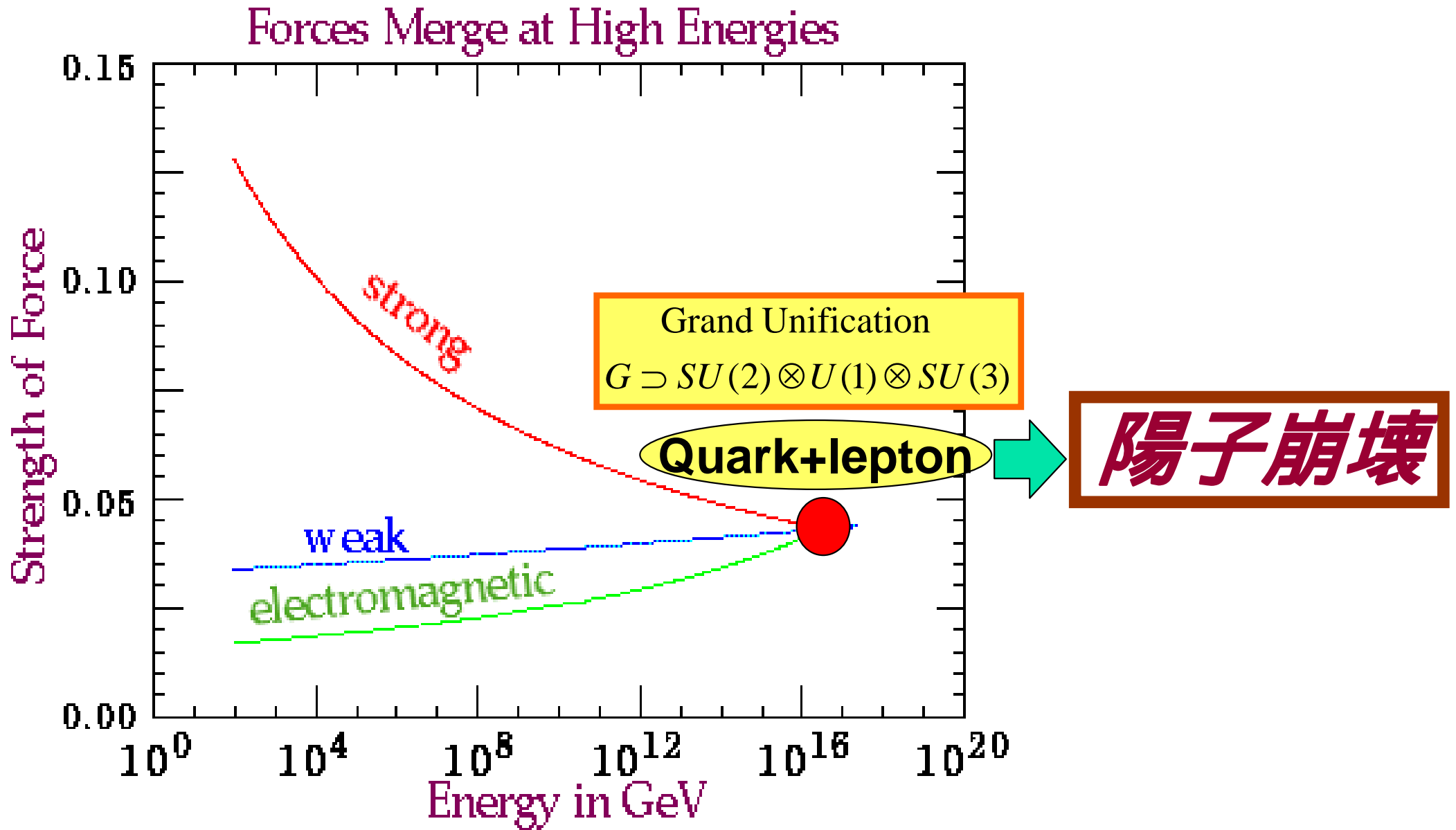
統計的有意性



1 Mton year
(0.5 Day & 0.5 Night)
で3σレベル (0.5%
系統誤差として)

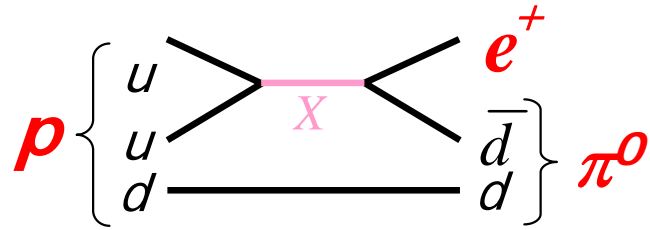
陽子崩壞

GUTスケール、プランクスケールを直接探る実験



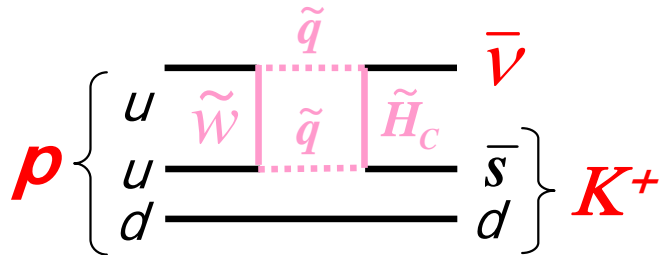
陽子の寿命の理論的予想

■ Dimension=6 (2 fermion – 2 fermion)

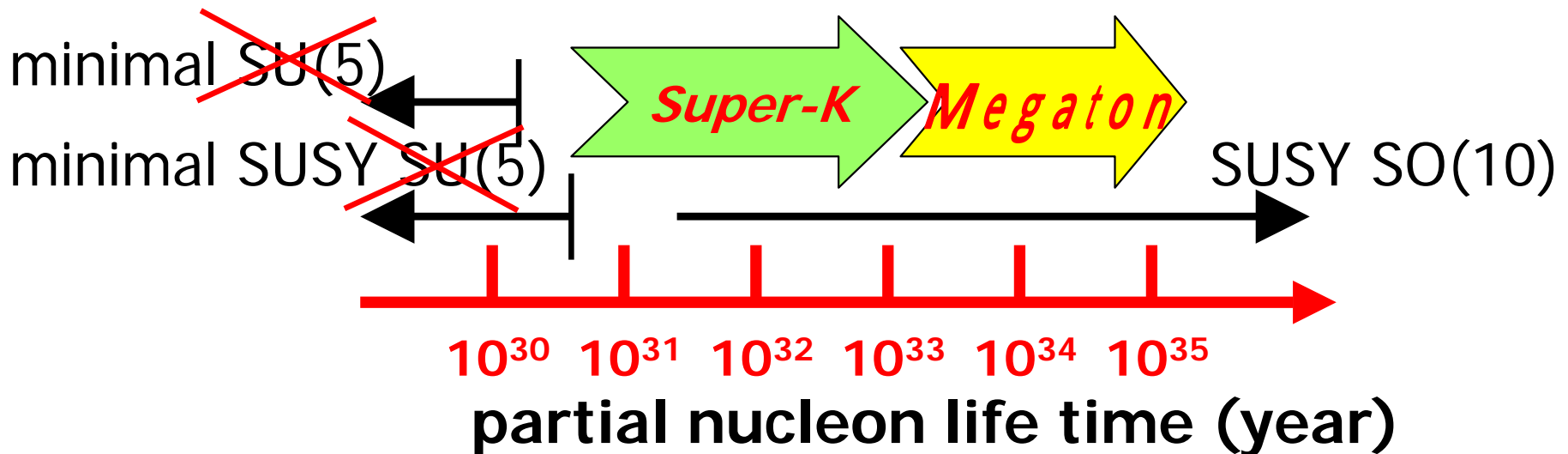


$$\Gamma = \frac{g^4 m^5 p}{M_X^4} \quad : \tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) = 10^{\sim 35?} \text{ years}$$

■ Dimension=5 (2 fermion - 2 sfermion)

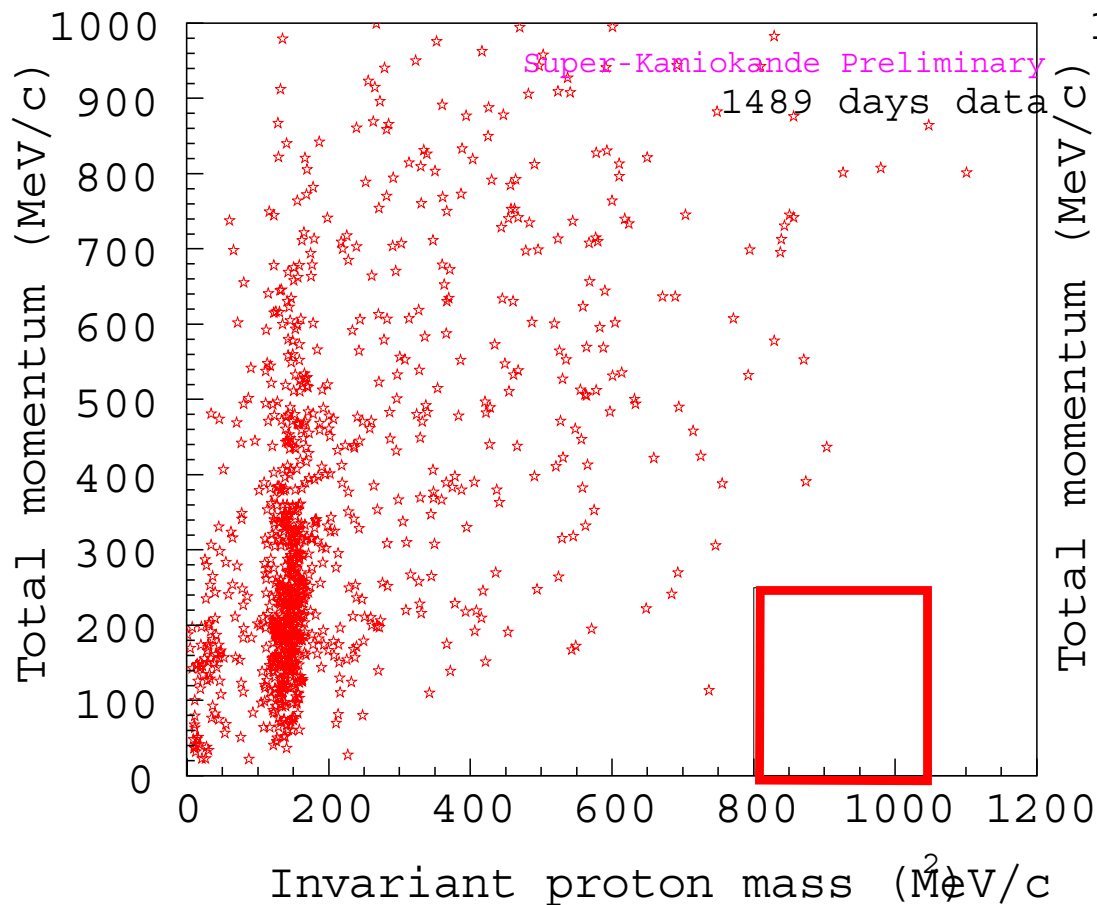


$$\Gamma = \frac{h^4 m^5 p}{M_{Hc}^2 M_X^2} \quad : \tau(p \rightarrow \nu K^+) = 10^{29 \sim 39?} \text{ years}$$



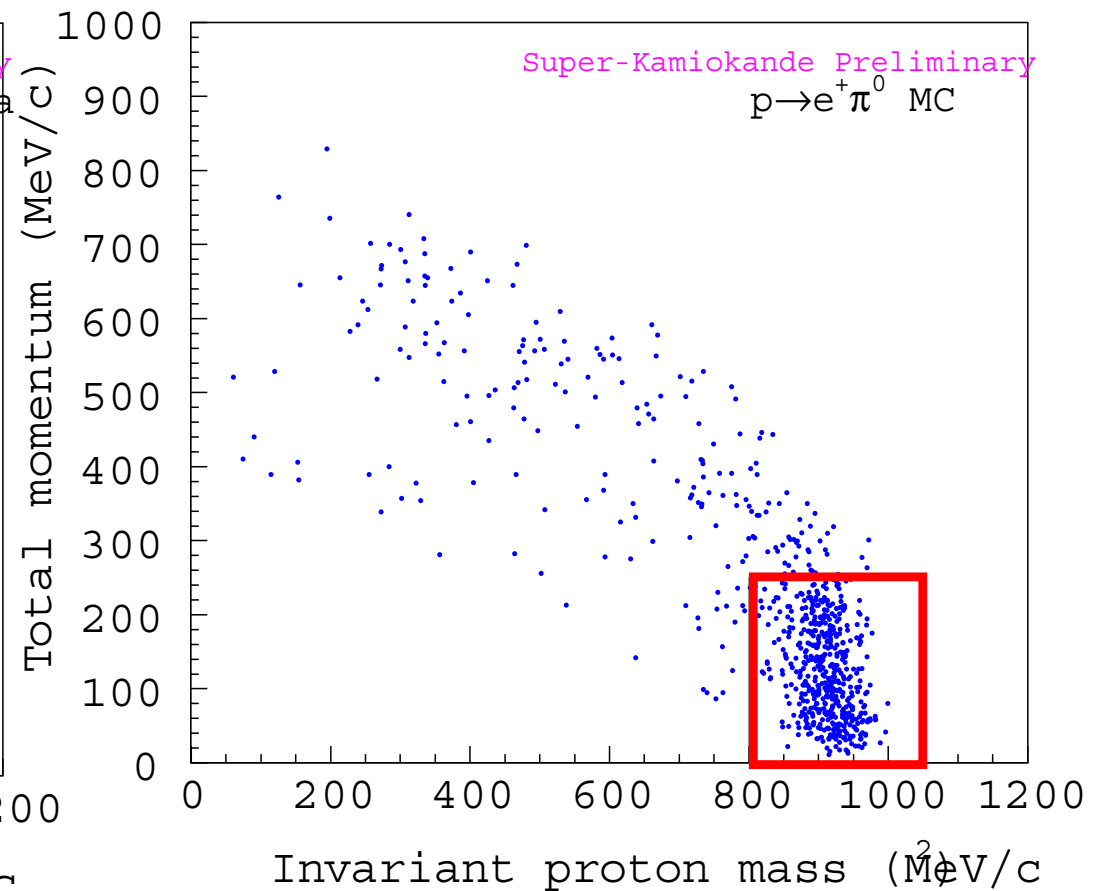
$p \rightarrow e^+ \pi^0$ @SK-I

data



0 candidate

$p \rightarrow e^+ \pi^0$ MC

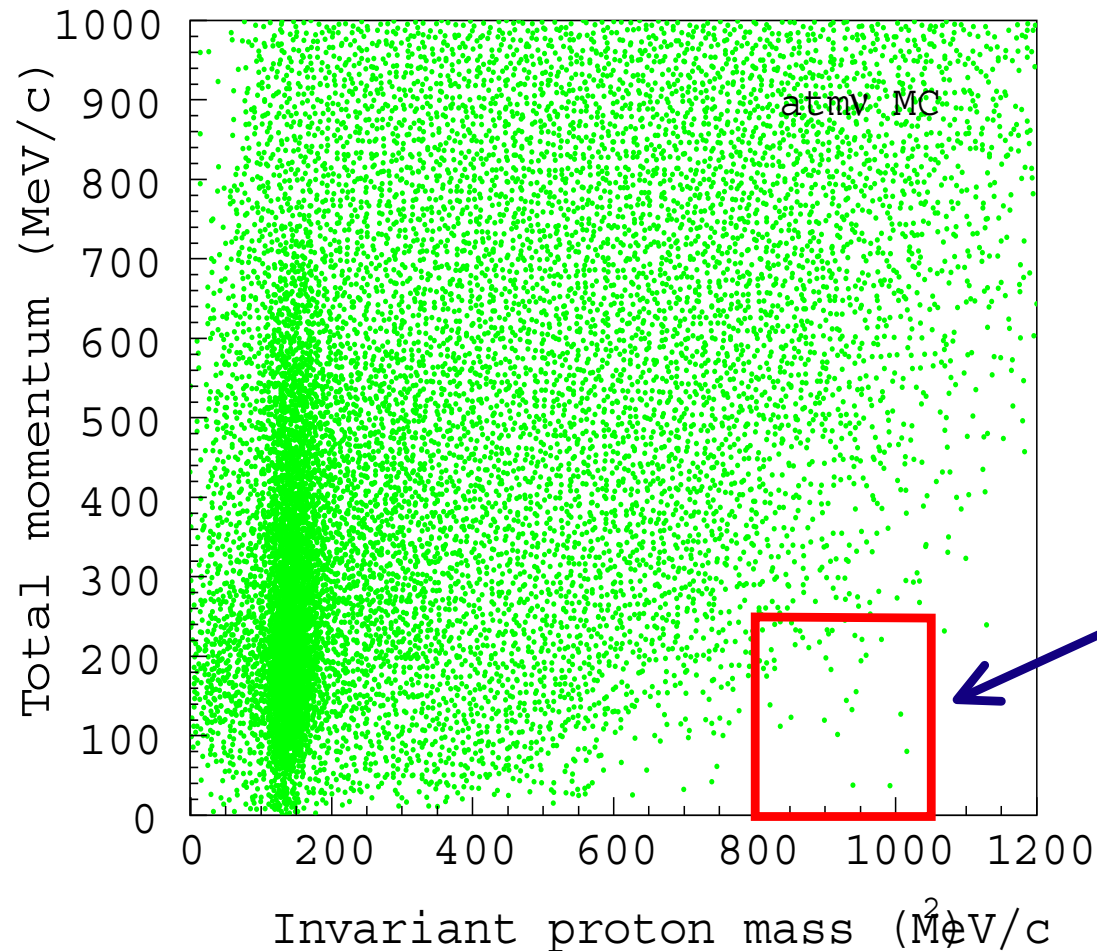


$\epsilon = 40 \%$

$\tau_p / B(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 5.4 \times 10^{33}$ years (90% CL)

Background sample for $p \rightarrow e^+ \pi^0$

20 Mton·yr atm BG MC



- Use established tools
 - neut (interaction simulator)
 - SK detector simulator
- pre-reductions
 - CC quasi-elastic
 - μ CC
 - μ PID rejection $\sim 98\%$
 - decay electron $\sim 70\%$

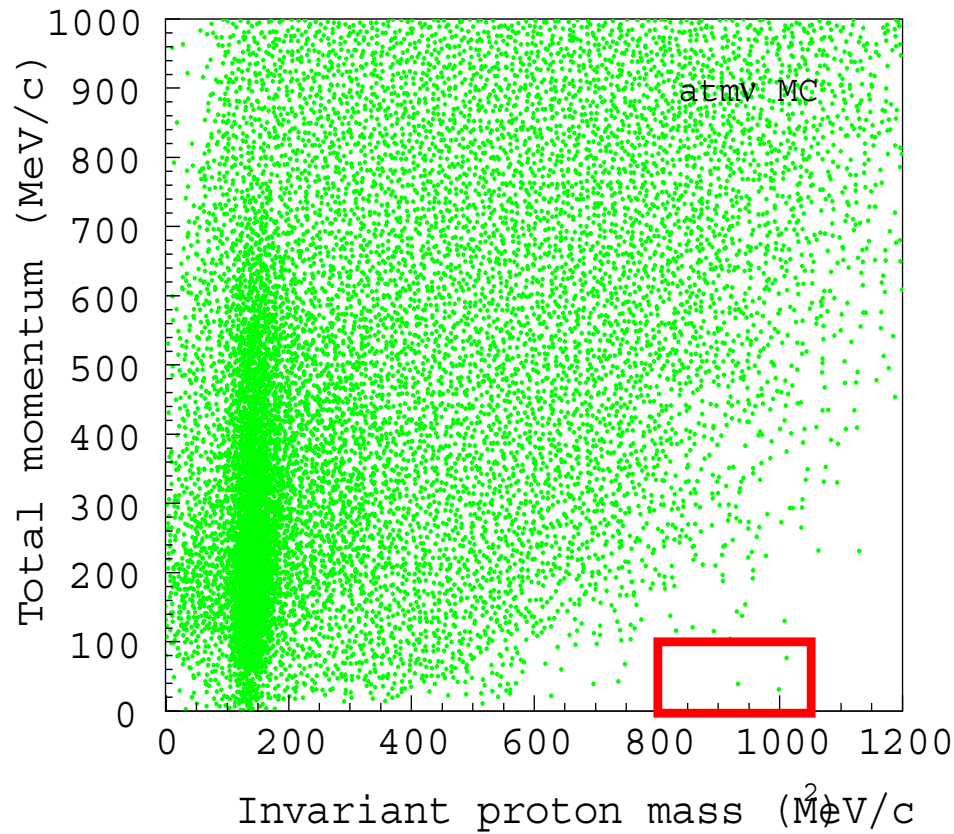
BG events in signal box
45 events/20 Mton·yr



~ 2.2 events/Mton·yr

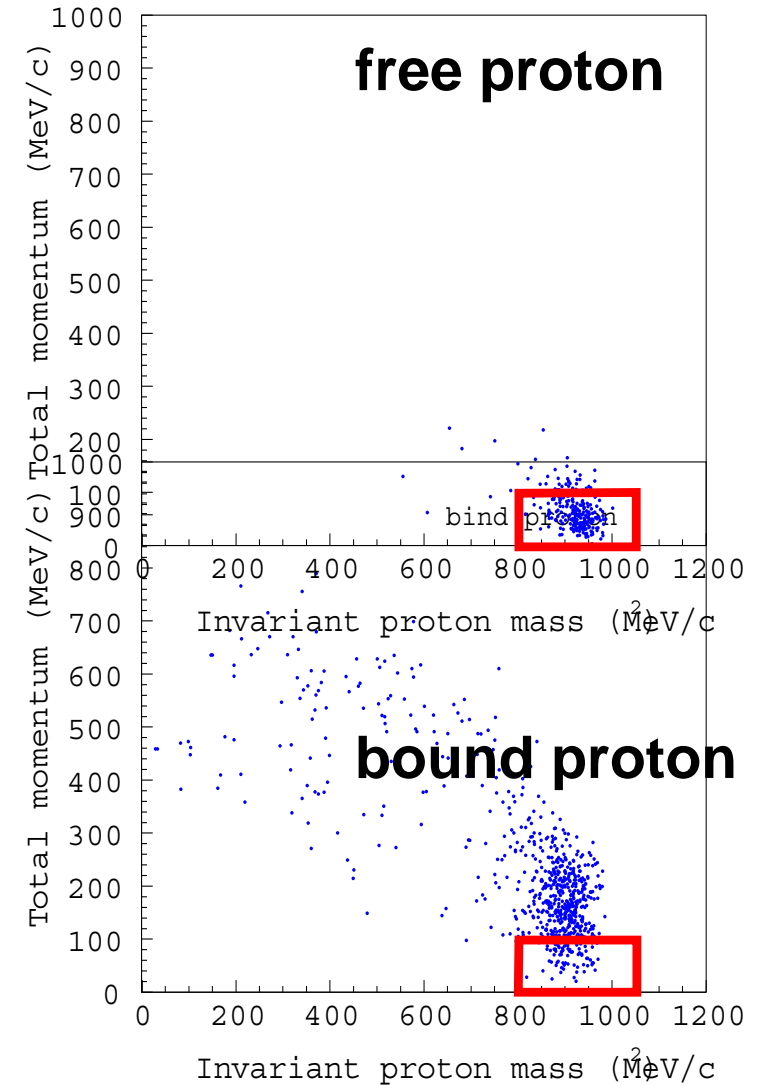
更なるバックグラウンド除去 (for $p \rightarrow e^+ \gamma$)

Tight momentum cut to reduce BG target is mainly free protons



BG = ~0.15 events/Mtonyr
Eff = 17.4%

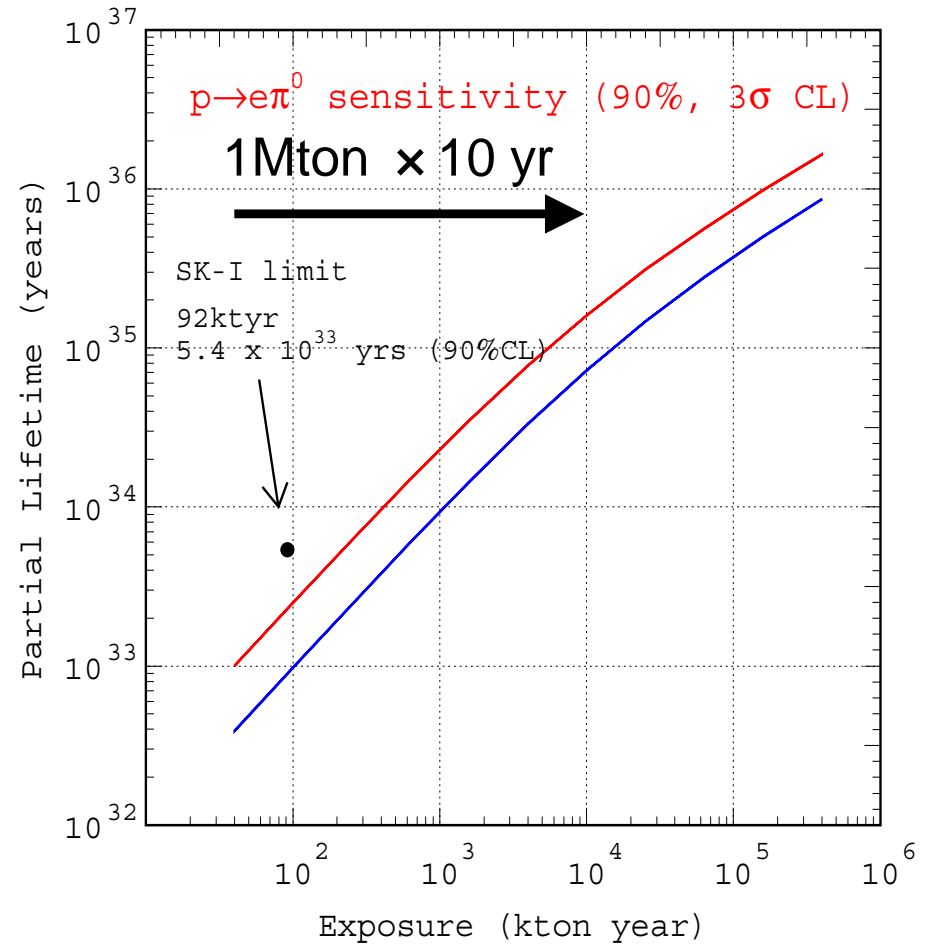
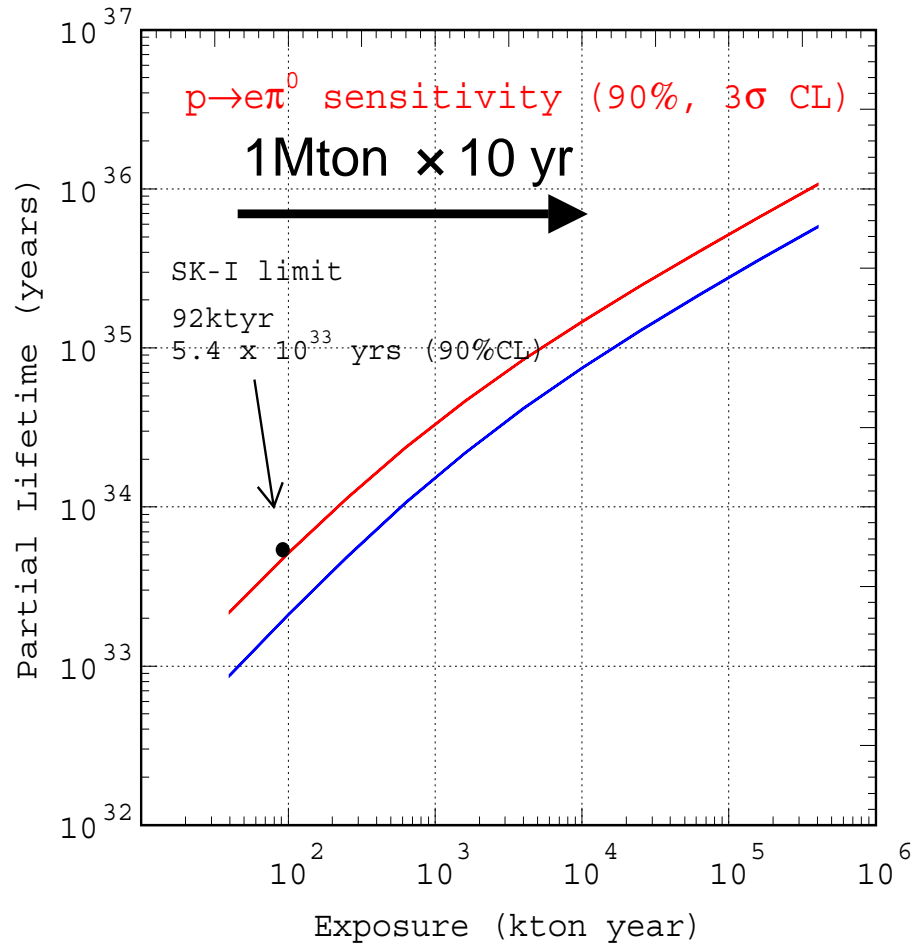
**BG free はまだ可能。
→ 発見の可能性あり!**



$e^+\pi^0$ に対する感度

SK cut

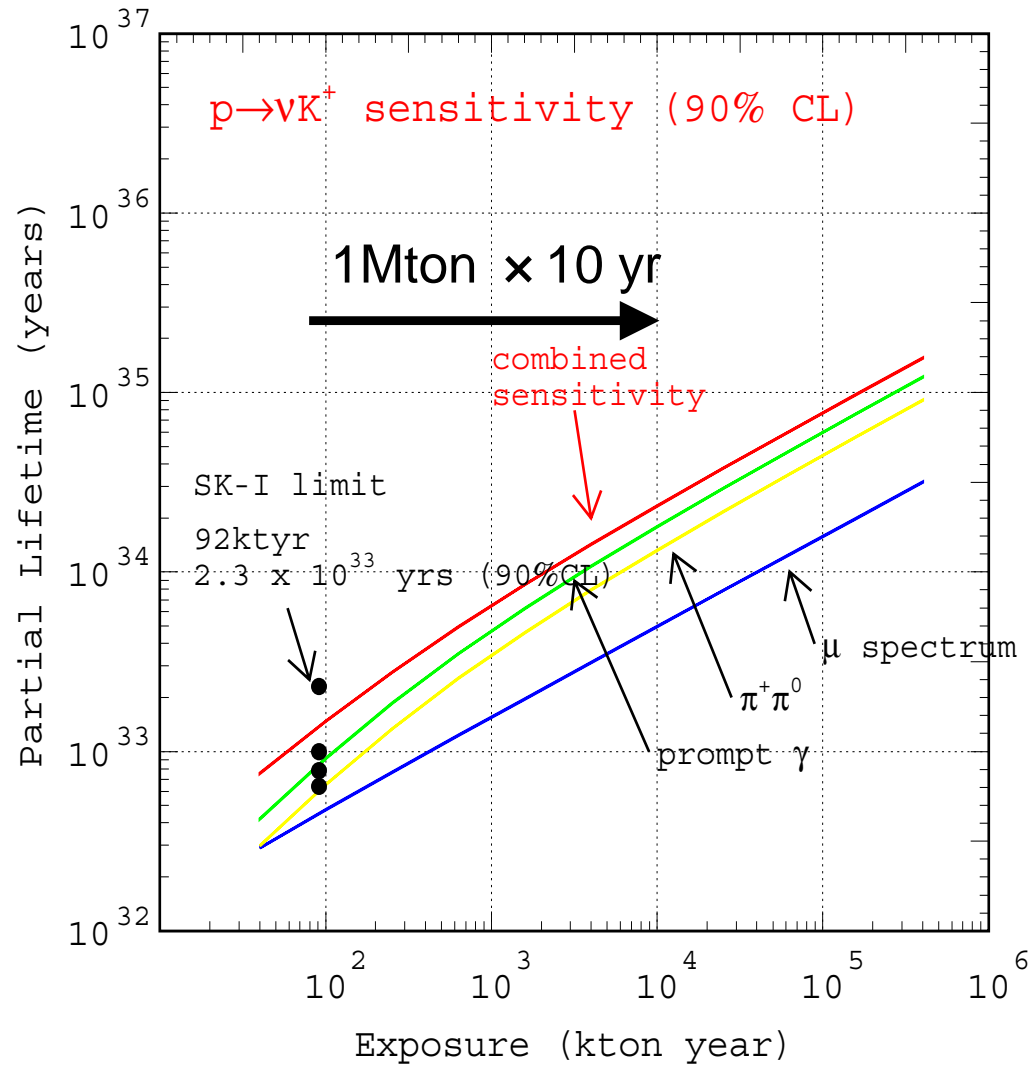
Tight momentum cut



$\tau/B > 2 \times 10^{35}$ yr (10Mton \cdot yrs, 90%CL)

νK^+ に対する感度

SK cut



$$/B > 3 \times 10^{34} \text{ yr (10Mton} \cdot \text{yrs, 90\%CL)}$$

超新星ニュートリノ

超新星ニュートリノ (Livermore simulation)

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

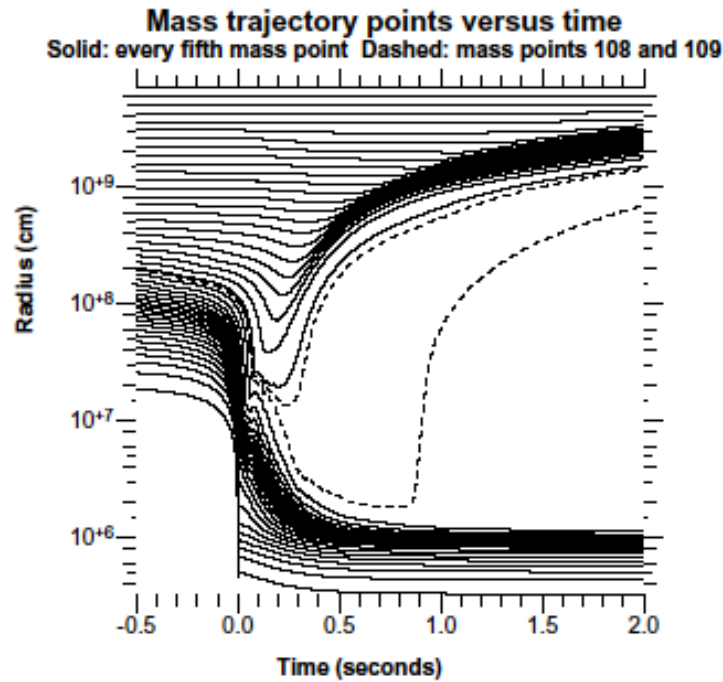
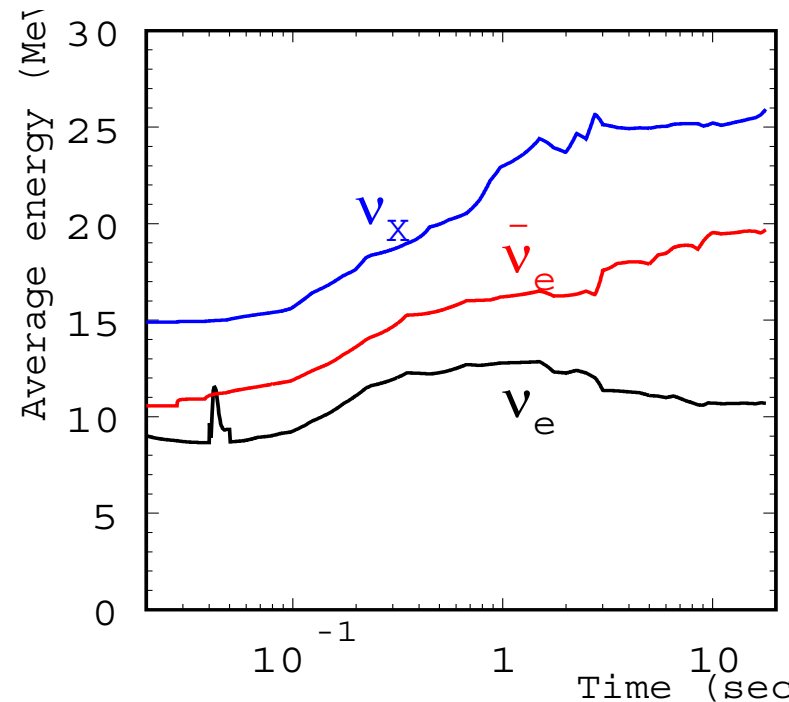
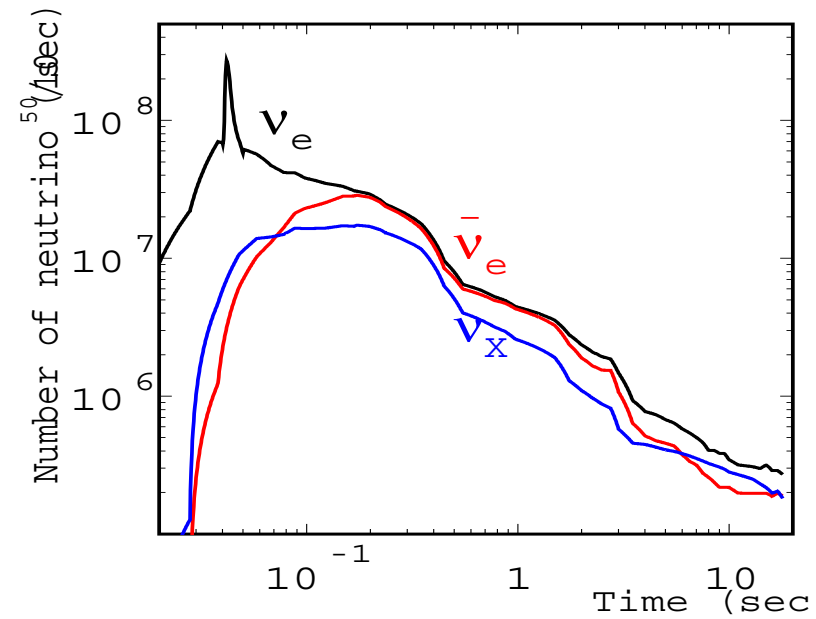


FIG. 3.—Radius as a function of time for selected mass points of the numerical supernova model used in this paper. Solid lines are drawn for every fifth mass point, while the dashed lines are for two succeeding mass points near the edge of the nascent neutron star and ejected matter.



超新星爆発のモデルは信頼できるものができておらず、実験による詳しいデータのinputが必要。

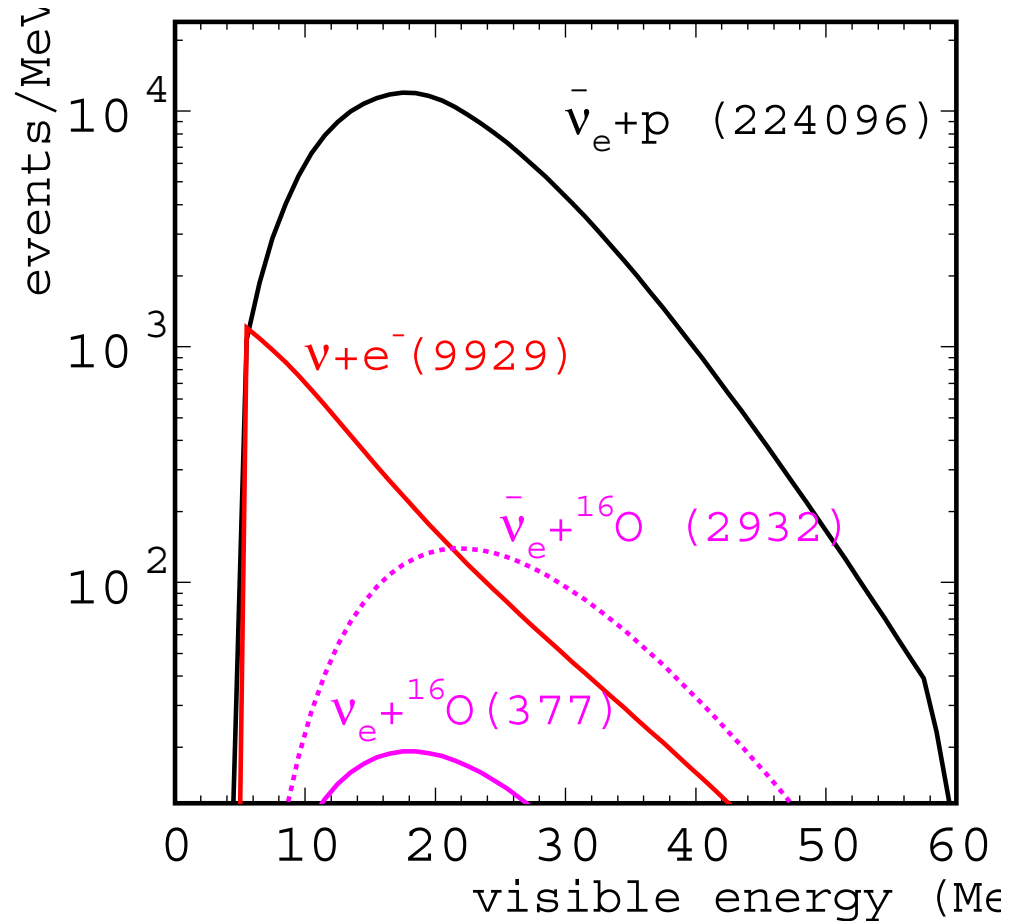
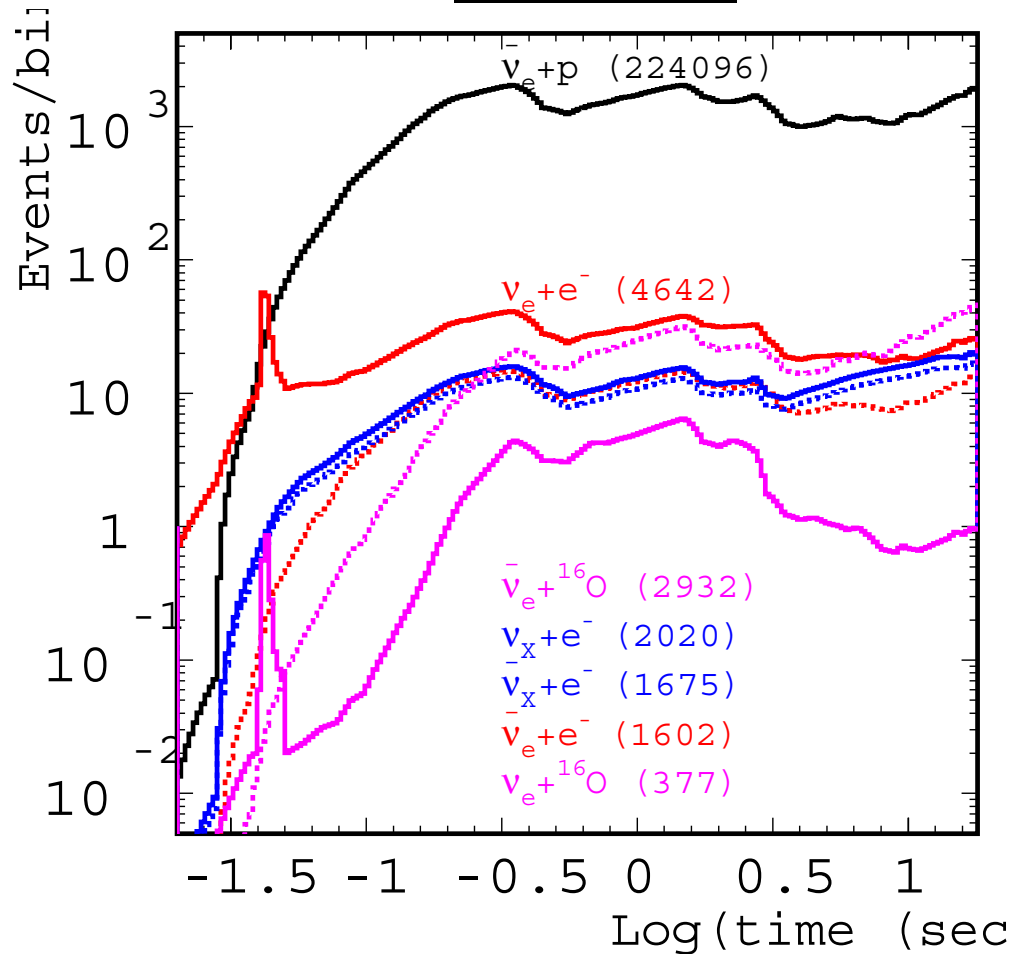
期待される超新星ニュートリノイベント数

括弧内は総イベント数

SN at 10kpc, 1mega-ton (1.8kpc,SK)

時間変化

エネルギースペクトル



10kpc (1.8kpc) の距離でおきれば1メガトン装置で(SKで)24万イベント近い数が期待される。

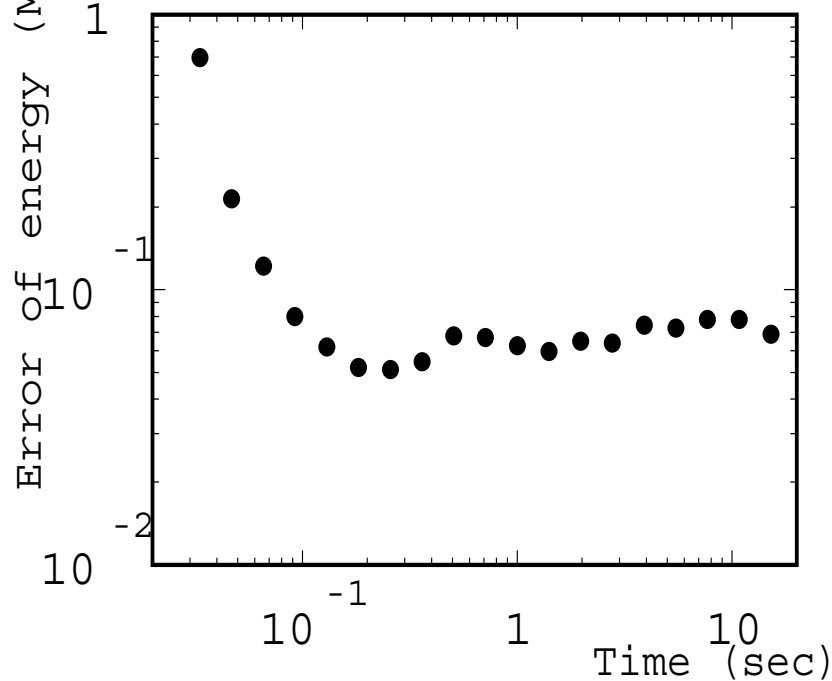
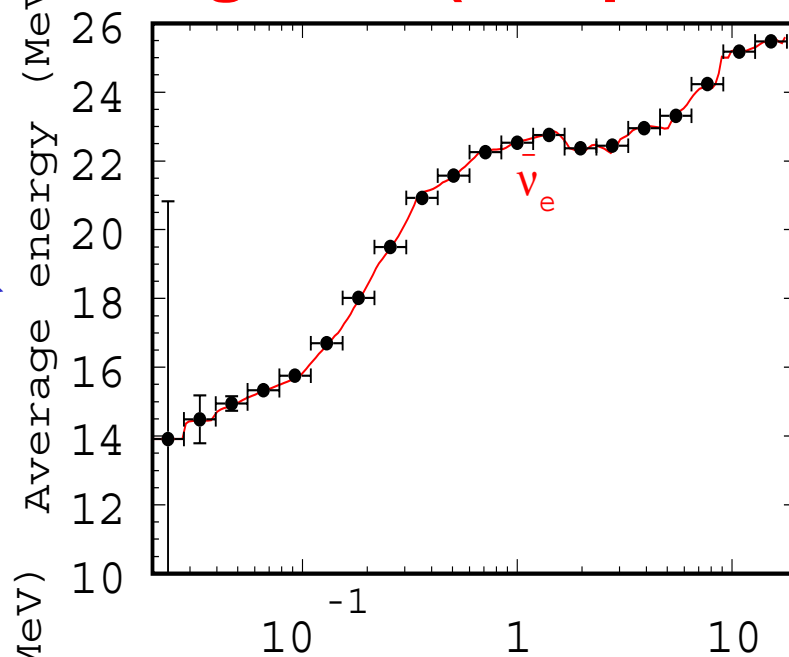
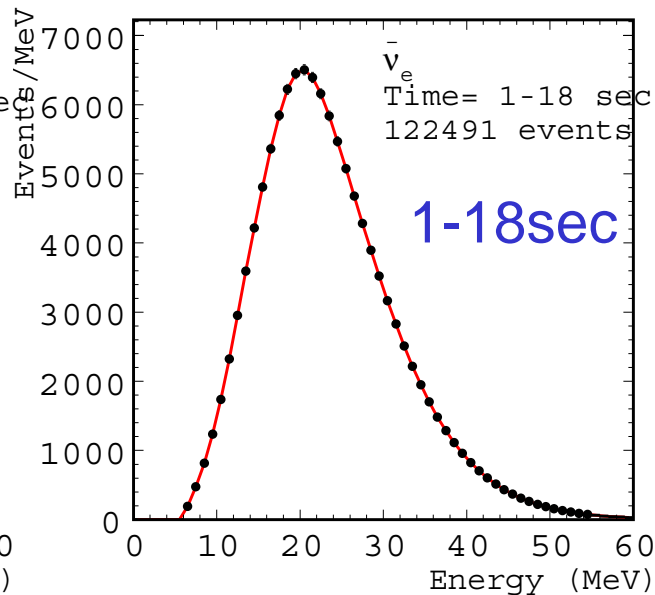
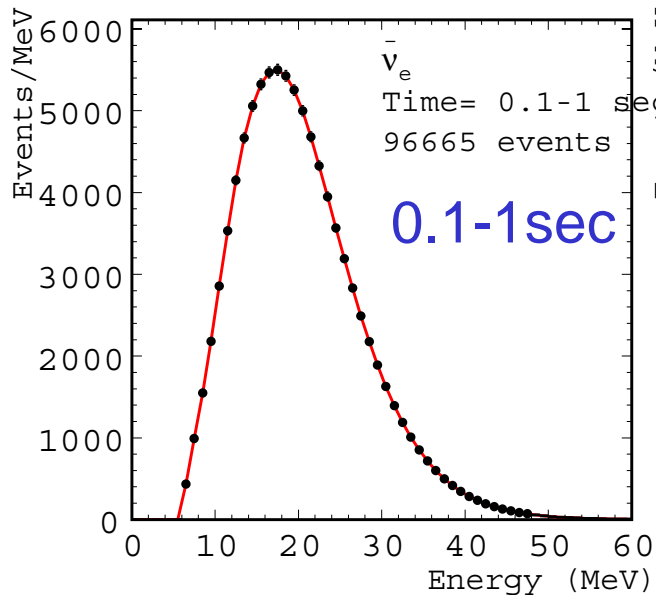
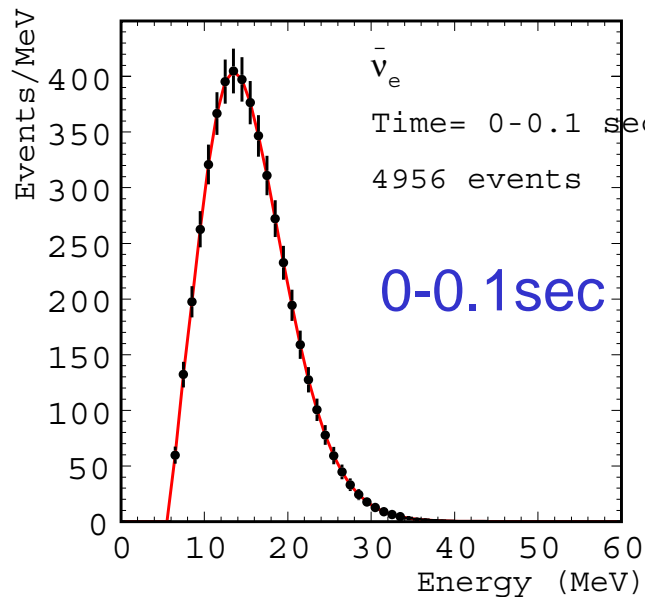
ve散乱イベントも1万イベントぐらい期待される。

$\bar{\nu}_e$ エネルギースペクトル

各時間レンジのスペクトル

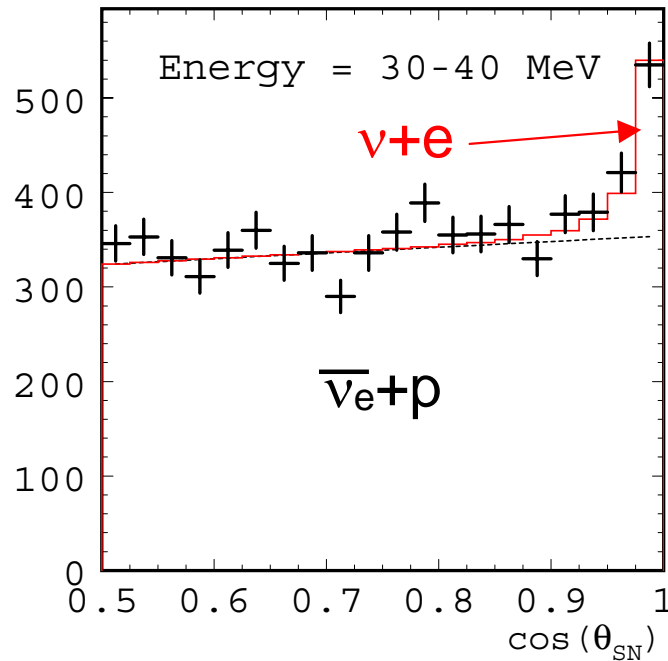
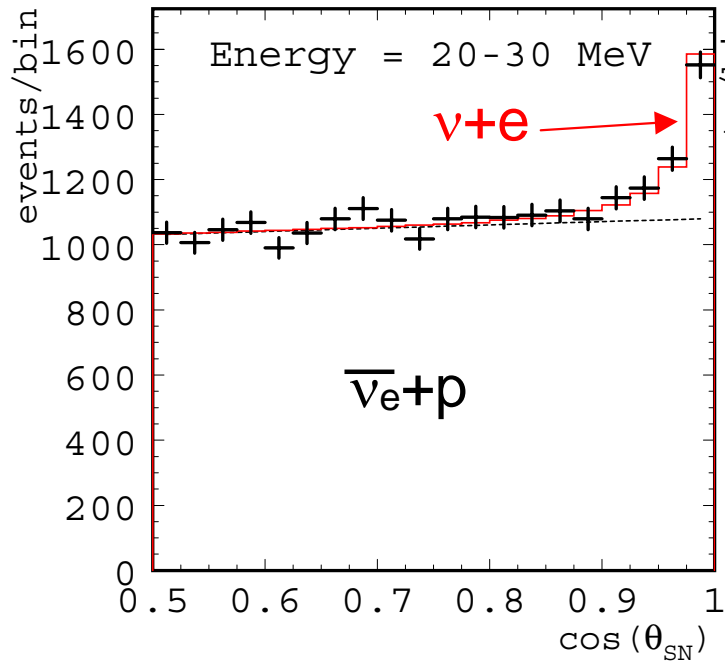
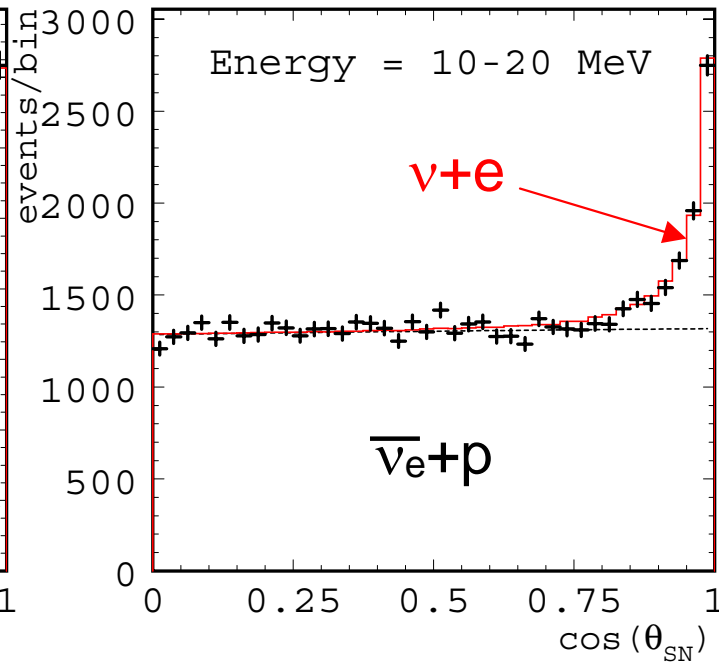
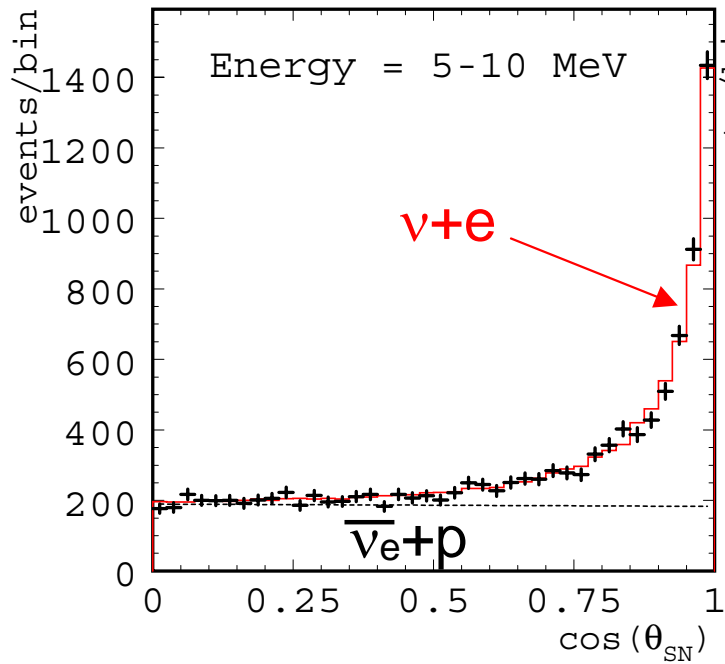
SN at 10kpc, 1mega-ton (1.8kpc,SK)

平均エネルギーの時間 変化の精密観測



電子散乱現象の識別(超新星との方向分布)

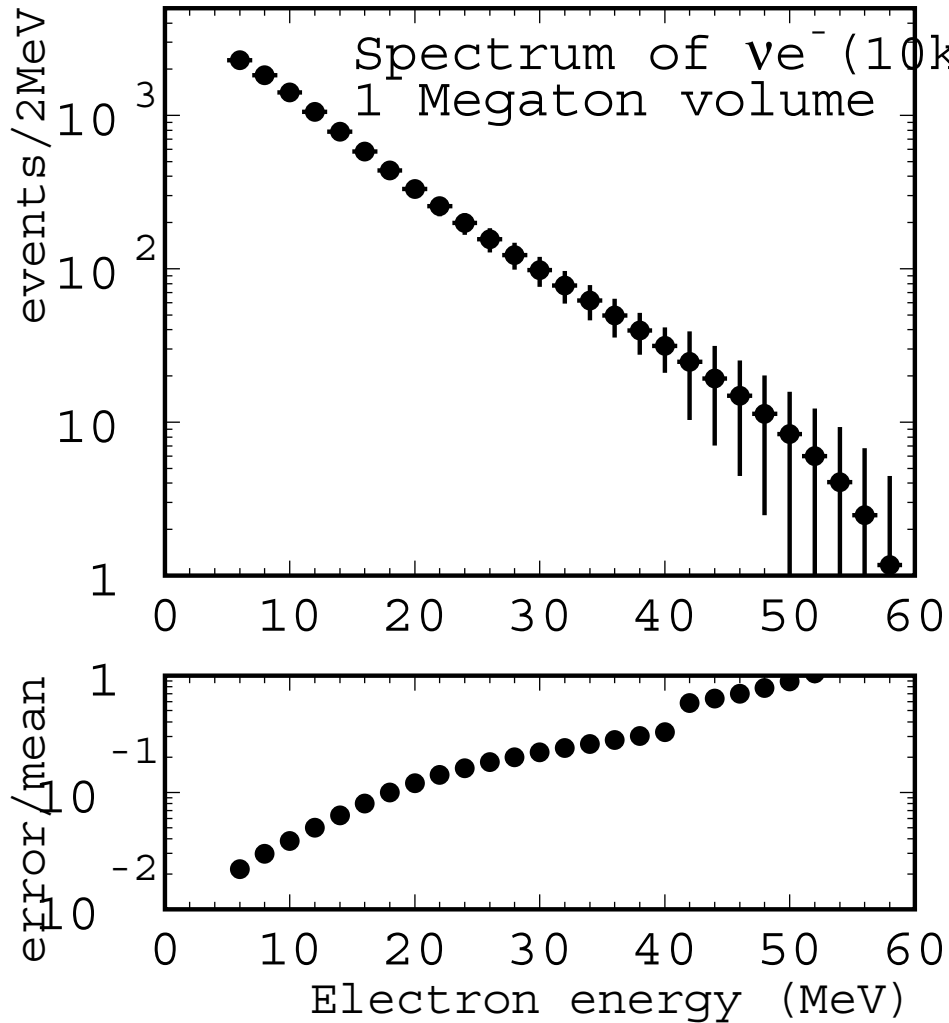
SN at 10kpc, 1mega-ton (1.8kpc,SK)



超新星との方向分布
により、電子散乱事象
を選び出せる。

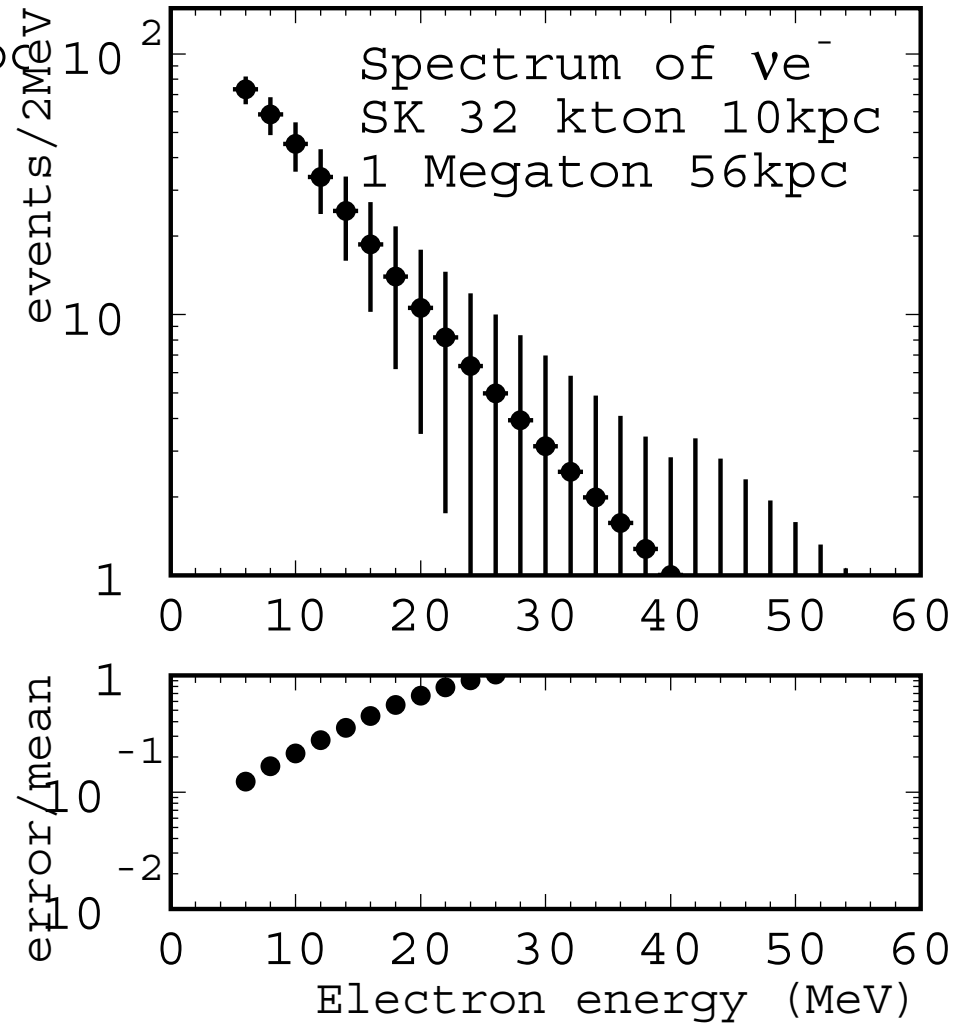
電子散乱を使って $\nu_e + \nu_x$ のスペクトル観測

10kpc, 1 Mega-ton
(1.7kpc, SK)



40MeVくらいまで測定可能

56kpc, 1 Mega-ton
(10kpc, SK)

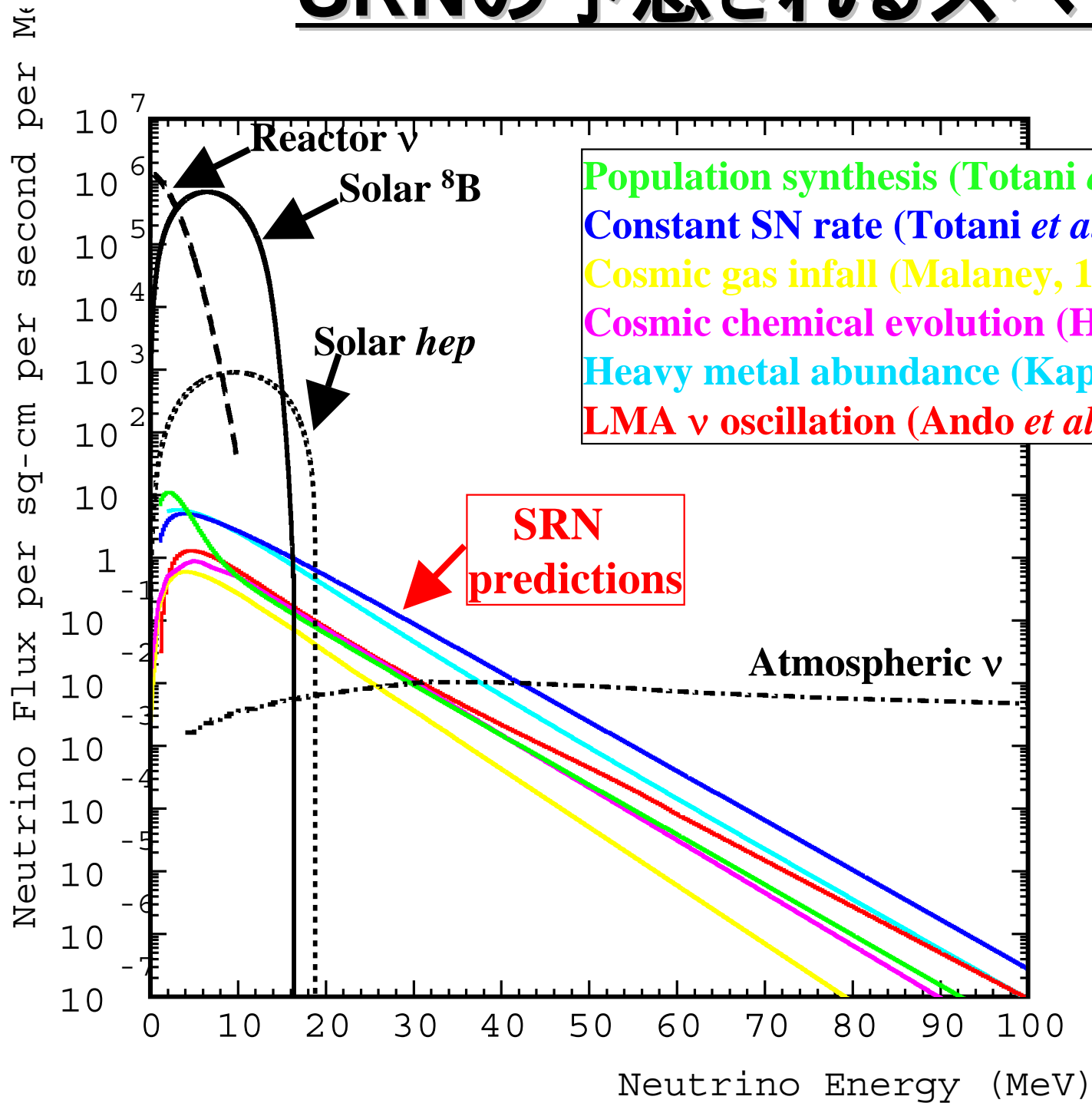


20MeVくらいまで測定可能

超新星背景ニュートリノ

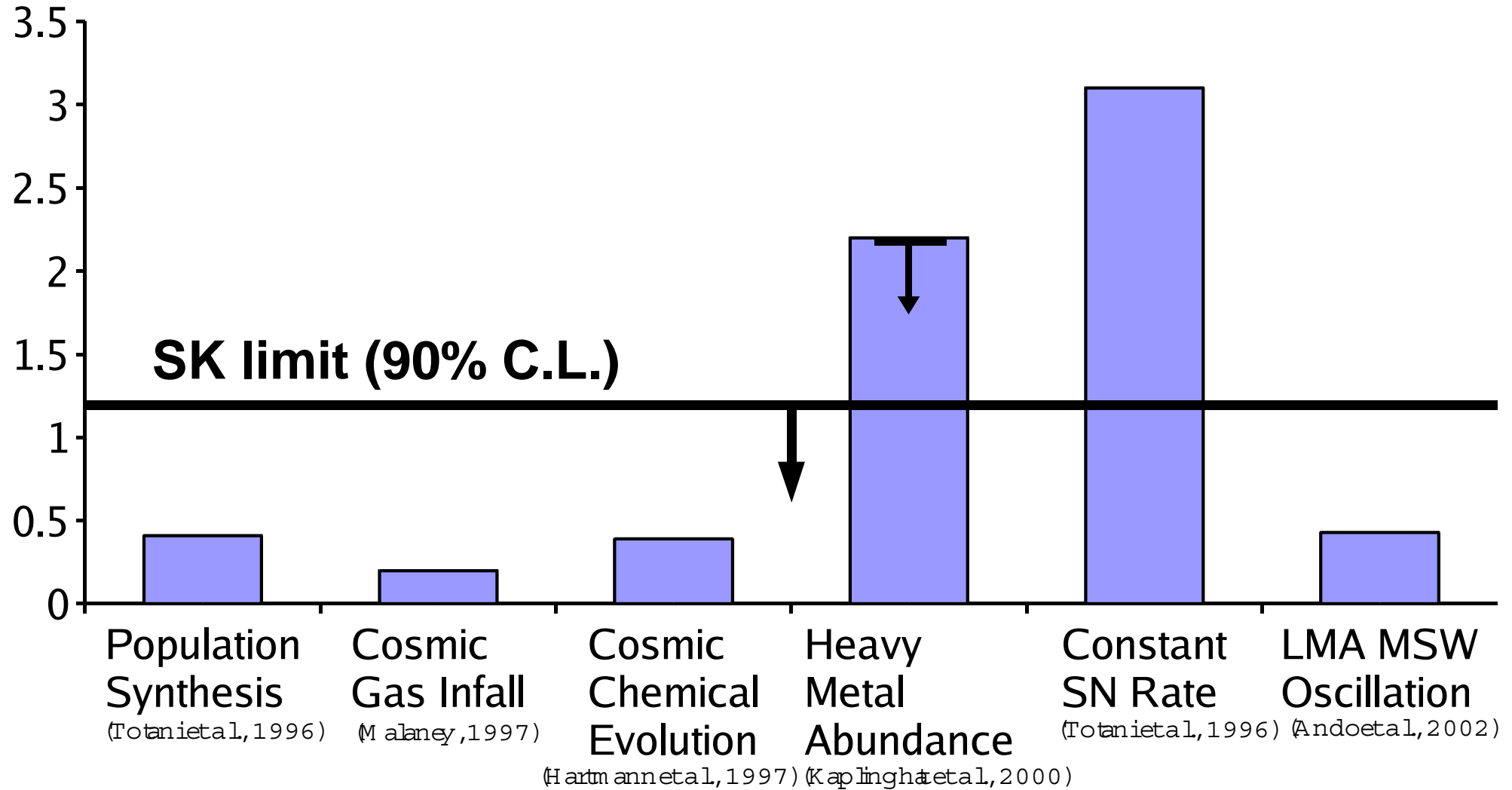
Supernova Relic Neutrinos(SRN)

SRNの予想されるスペクトル



SK SRN Flux Limits vs. Theoretical Predictions ($E > 19.3$ MeV)

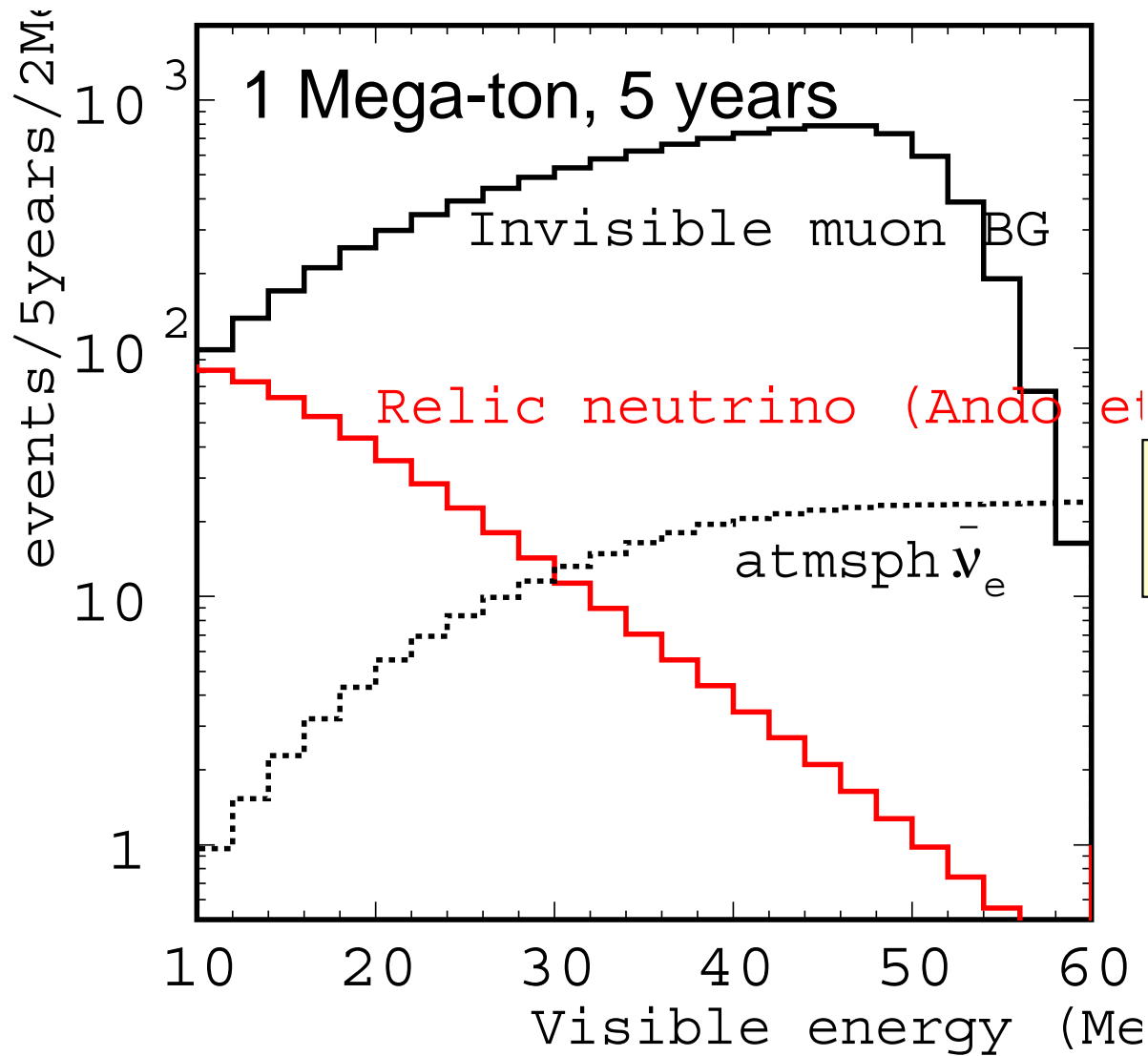
Flux (/cm²/sec)



Predicted SRN Flux ($E > 19.3$ MeV)
 SK SRN Limit (90% C.L.)

メガトン装置でのSRN観測可能性

Relic model: S.Ando, K.Sato, and T.Totani, Astropart.Phys.18, 307(2003).



15-30 MeVの範囲:

信号: 246

Invisible muon BGを落とす
努力が必要。

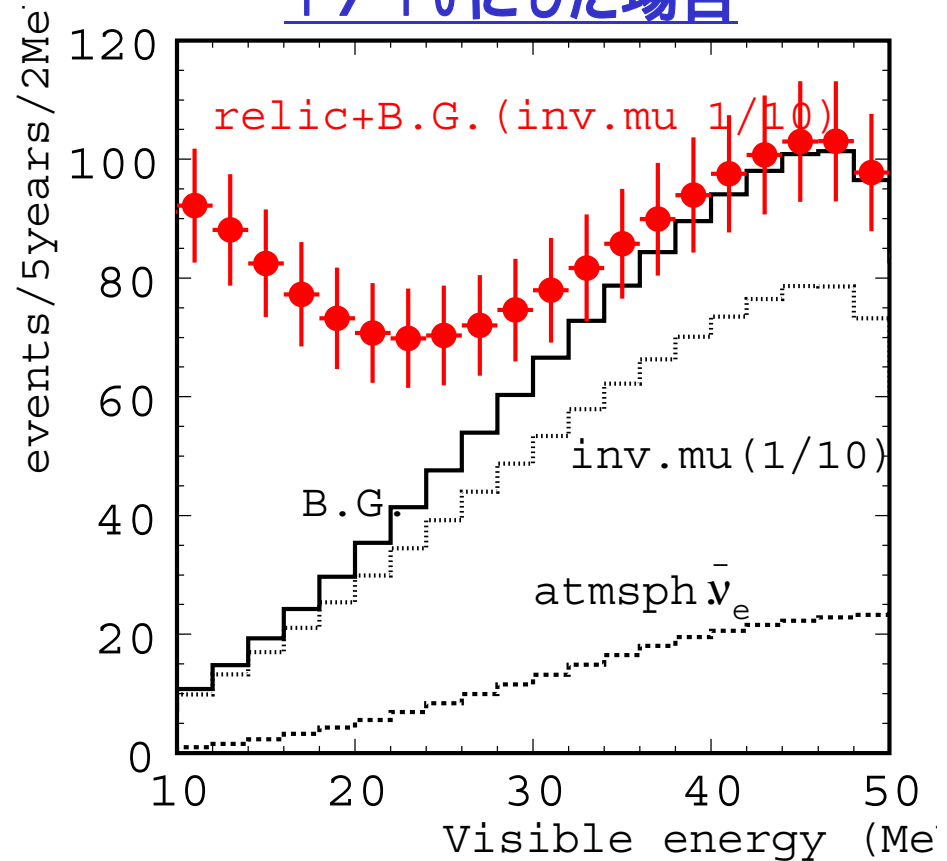
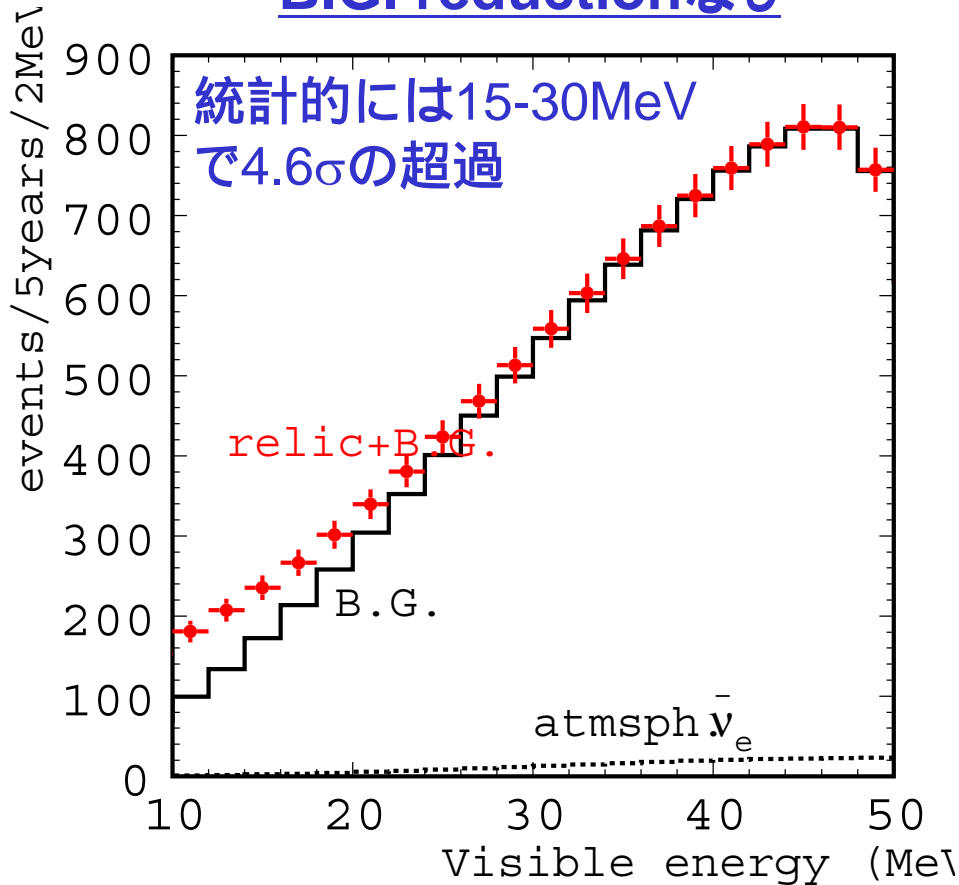
メガトン装置でのSRN観測可能性

Relic model: S.Ando, K.Sato, and T.Totani, Astropart.Phys.18, 307(2003).

1 Mega-ton, 5 years

NeutronをタグしてB.G.を
1 / 10にした場合

B.G. reductionなし



Neutronタグ: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



$n + p \rightarrow d + 2.2\text{MeV } \gamma$ の可能性。

次世代ニュートリノ・陽子崩壊実験装置に
向けての新たな光検出器開発

現20インチ光電子増倍管の問題点

- コストが高い。

$36\text{man} \cdot \text{yen}(\text{PMT} + \text{case}) \times 200,000(\text{e.g. HK design}) = 720 \text{ oku} \cdot \text{yen}$

- 10 - 20万本といった数の大量生産に向かない。

~3000PMT/year → 20万本に7年

- 大型非球形真空管は十分な防爆対策が必要。

衝撃波防止ケースに入れる必要があり、アSEMBル等の作業を伴う。

- ガラス中の放射性バックグラウンドが多い。

U: ~0.5ppm, Th: ~0.5ppm, ^{40}K : 0.08ppm

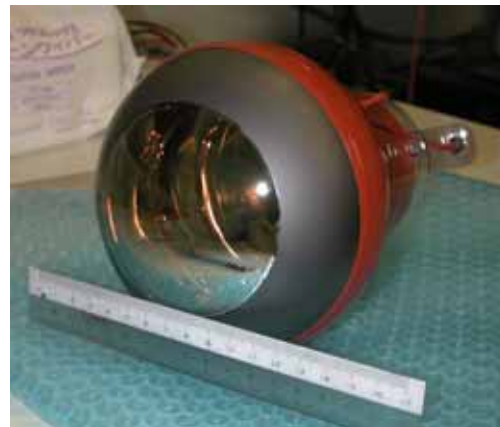
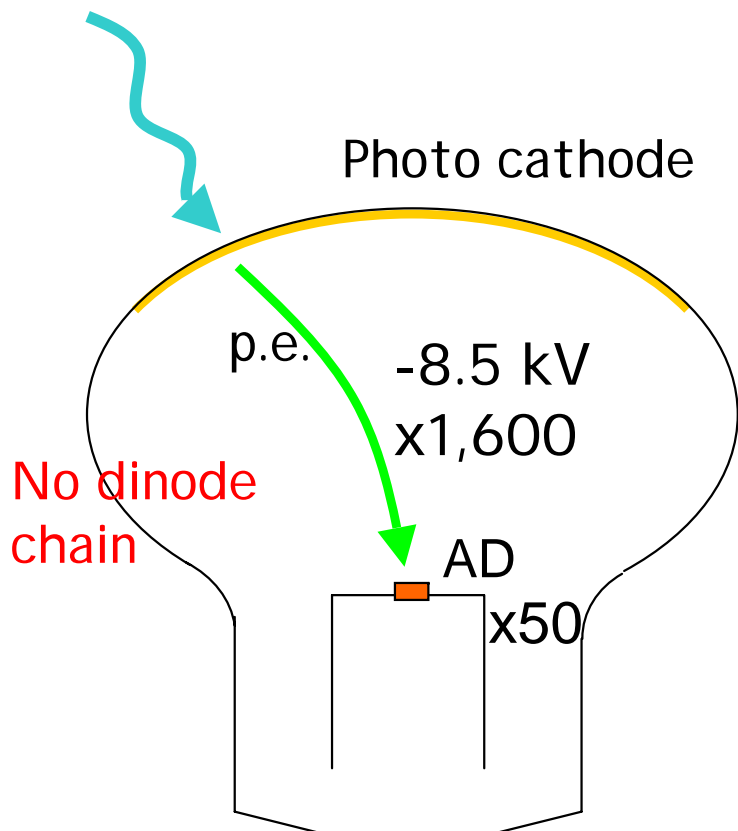
太陽ニュートリノ観測に対する主要なバックグラウンド

新たな光検出器の可能性-1

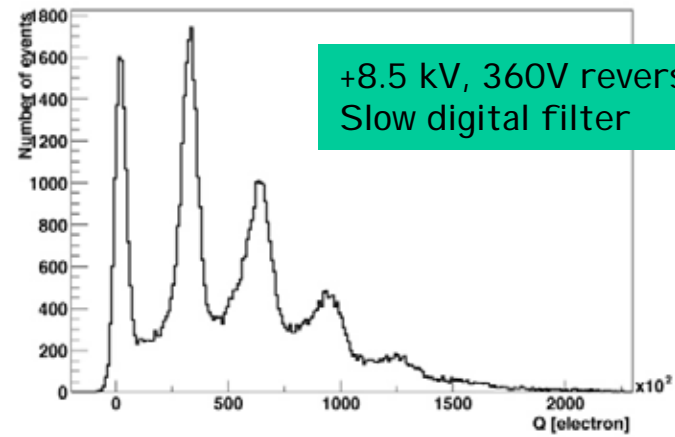
HPD (Hybrid Photo-detector)

A.Kusaka and H.Aihara (Univ. of Tokyo),
M.Shiozawa (ICRR, Univ. of Tokyo),
M.Tanaka (KEK), and
HPK Electron Tube Center

5-inch & 13-inch prototypes



Pulse height distribution of 13" HPD



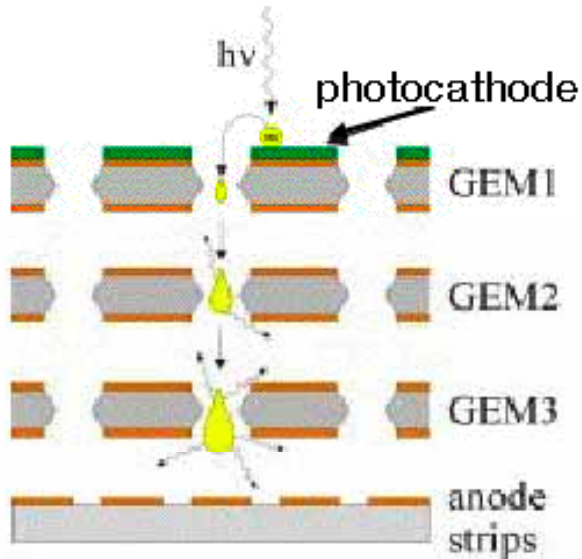
新たな光検出器の可能性-2

GEMを用いたガス増幅型

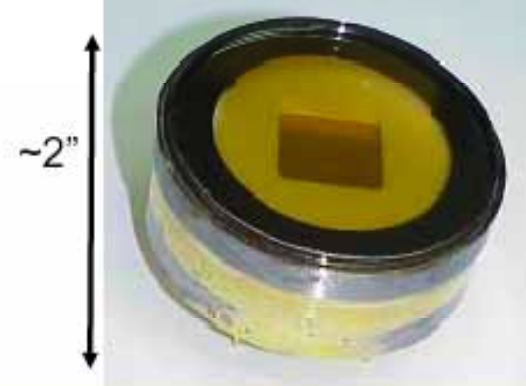
M.Balcerzyk, D.Mormann et al.

GPMT for visible light sealed 3 Kapton-GEMs & KCsSb PC

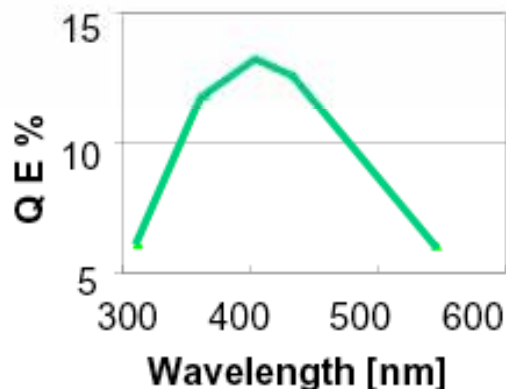
Sealing technique in gas: In/Sn; 130-150°C



Sealed detector package with semitransparent K-Cs-Sb PC



Best sealed GPMT: QE = 6% @ 365nm
stable for 1 month



13%=best QE ;
measured
after sealing.
2 weeks
stability

QE in Ar/CH₄ (95/5) ~ 70% of QE in
vacuum (backscattering)
=> best ~20% @360-400 nm

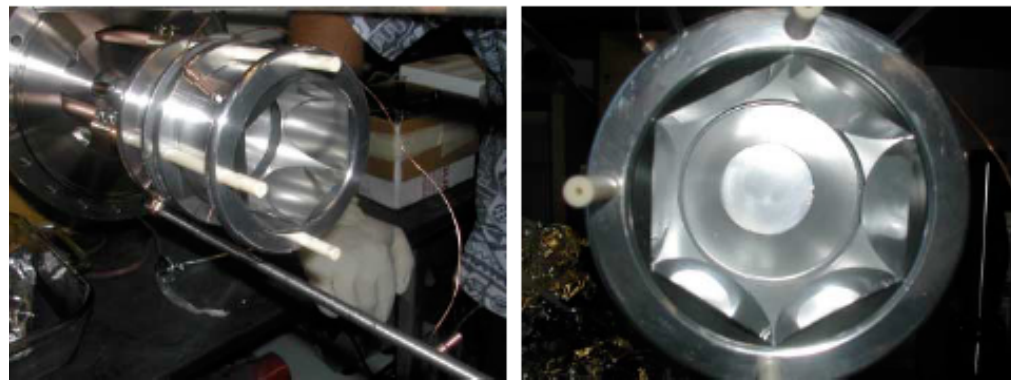
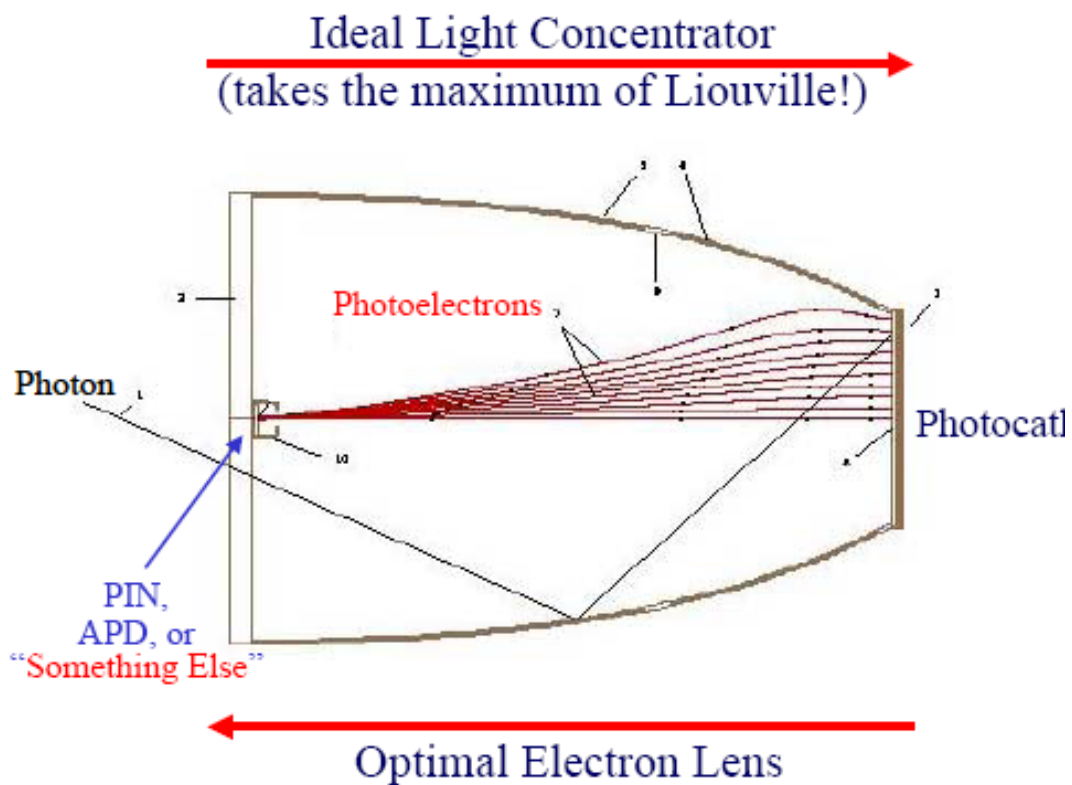


新たな光検出器の可能性-3

集光型

D.Ferenc (UC Davis)

ReFERENCE Prototype



3" diameter, single pixel

まとめ(神岡実験の将来計画)

- SKは2005年度に再建を行い、40%photo-coverageの装置でニュートリノ観測、陽子崩壊探索を継続する。
- 2009年からはJ-PARCからの大強度ニュートリノビームを用い、高統計のニュートリノ振動研究を行う。
- ニュートリノ研究の更なる推進、陽子崩壊の発見を目指すためには、メガトンクラスの水チェレンコフ装置が必要である。
- 暗黒物質探索、低エネルギー太陽ニュートリノ、2重ベータ崩壊を目指す液体キセノン実験も推進していく。
- メガトンクラスの装置のための光検出器開発を早急に行う必要がある。