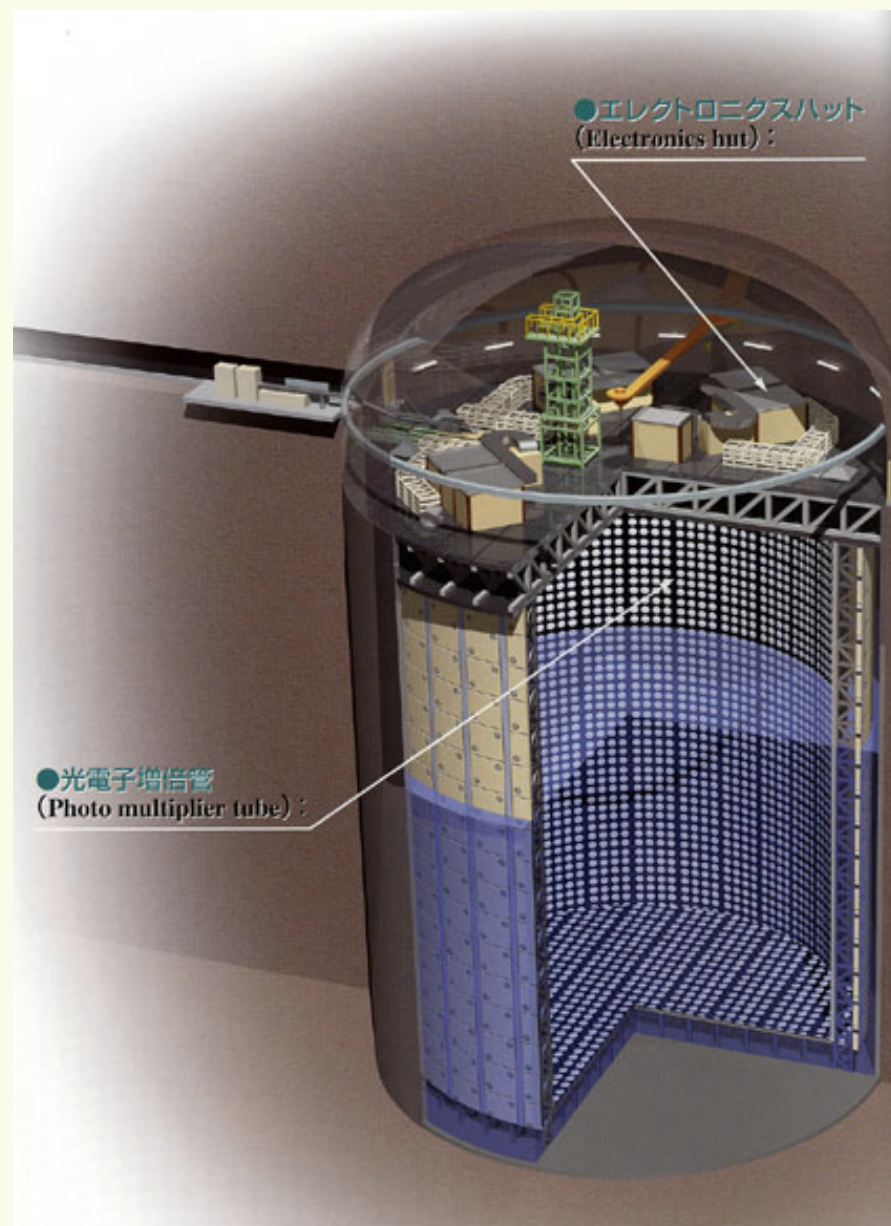


スーパーカミオカンデ

(太陽ニュートリノ・超新星ニュートリノ)



小汐由介

宇宙線研究所共同利用研究成果発表会

2014年12月12日

岡山大学

目次

✓ 太陽ニュートリノ観測

- フラックス／昼夜変動／エネルギースペクトル
- ニュートリノ振動解析

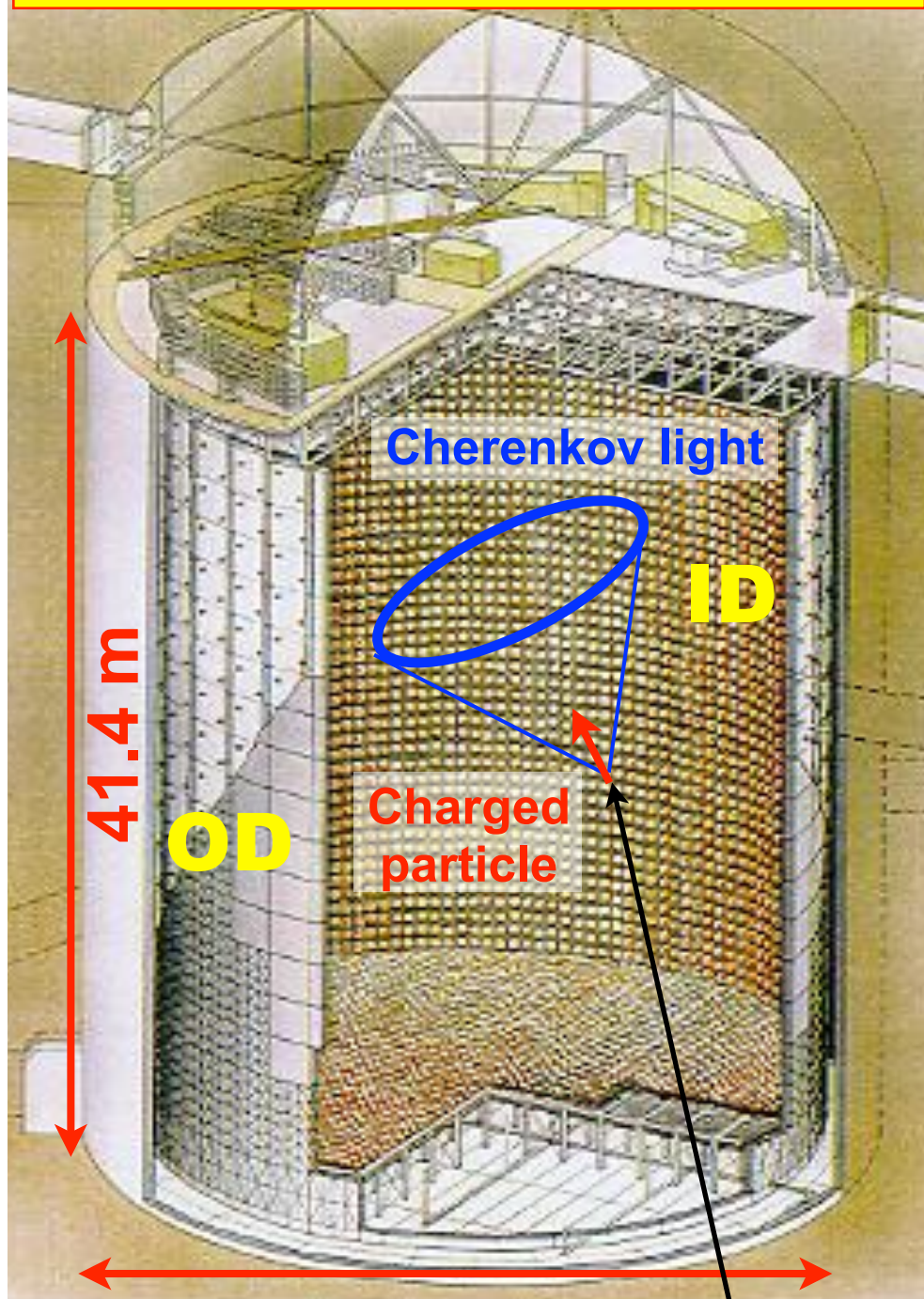
✓ 超新星ニュートリノ観測

- 超新星爆発ニュートリノ
- 超新星背景ニュートリノ探索
 - ガドリニウムテスト実験EGADSの現状

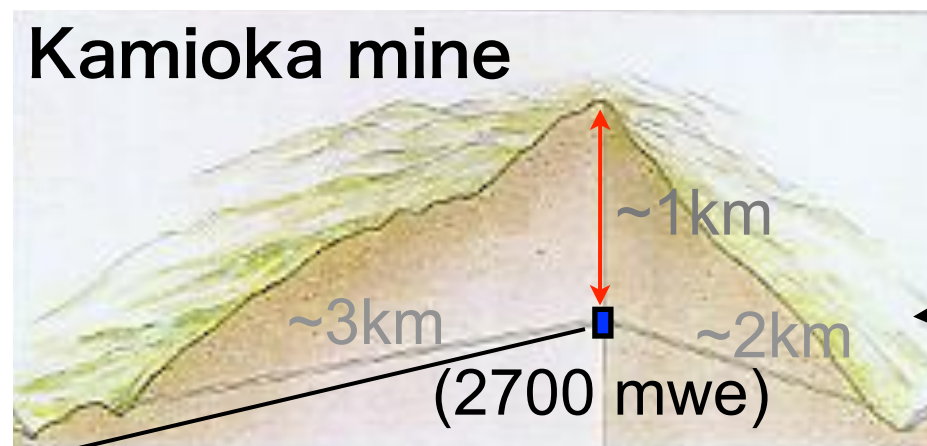
太陽ニュートリノ

スーパーカミオカンデ (SK)

50000トン水チェレンコフ検出器



Kamioka mine



(For Solar neutrino analysis)

Phase	Period	Livetime (days)	Fiducial vol. (kton)	# of PMTs	Energy thr.(MeV)
SK-I	1996.4 ~ 2001.7	1496	22.5	11146 (40%)	4.5
SK-II	2002.10 ~ 2005.10	791		5182 (20%)	6.5
SK-III	2006.7 ~ 2008.8	548	22.5 (>5.5MeV) 13.3 (<5.5MeV)	11129 (40%)	4.5
SK-IV	2008.9 ~	1669	22.5 (>5.5MeV) 13.3 (4.5<E<5.5) 8.8 (<4.5MeV)		3.5

total **4504** days

(coverage) (Kinetic energy)

2014年12月12日

39.3 m

Neutrino

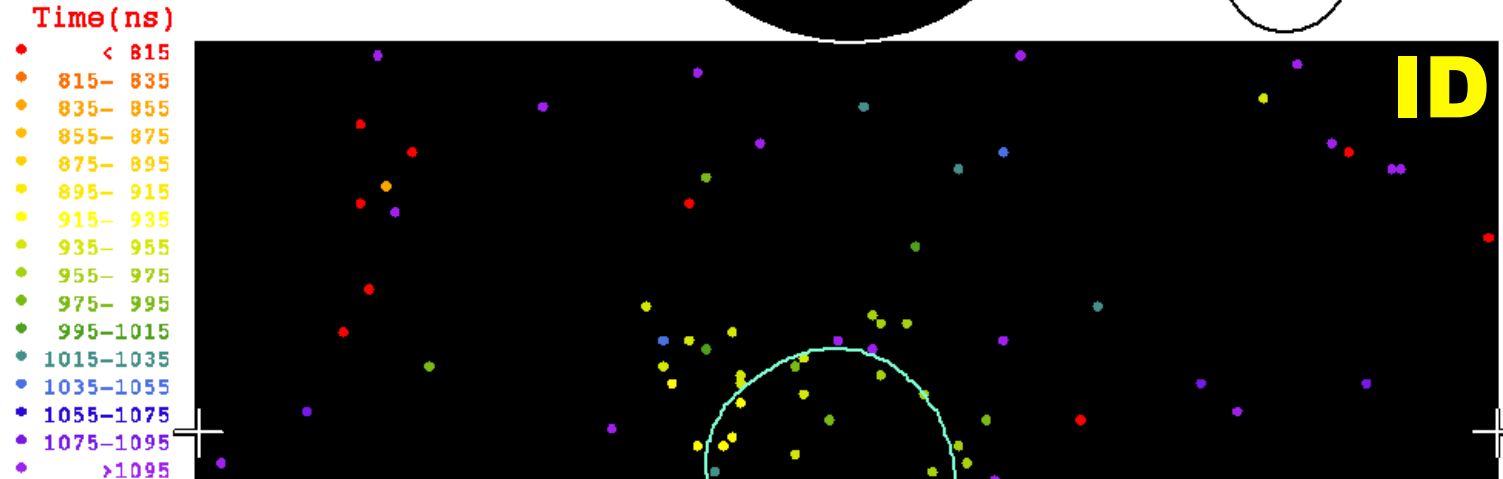
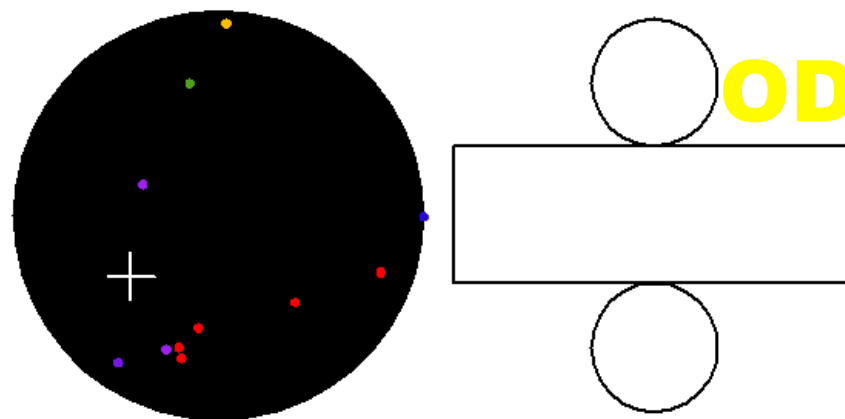
宇宙線研共同利用成果発表会

SKでの太陽ニュートリノ観測

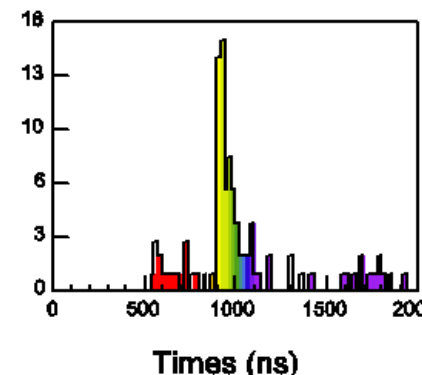
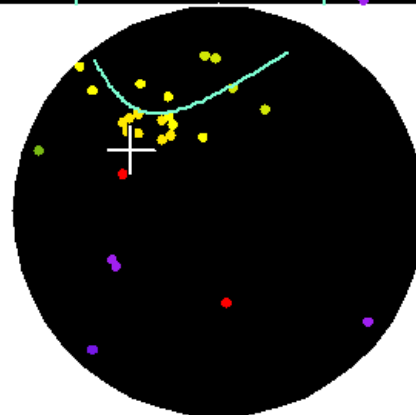
Typical event

Super-Kamioke

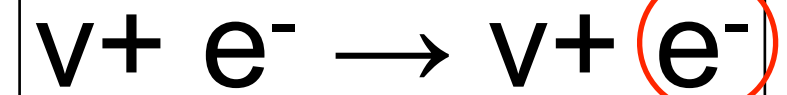
Run 1742 Event 102496
96-05-31:07:13:23
Inner: 103 hits, 123 pE
Outer: -1 hits, 0 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
E= 9.086 GDN=0.77 COSSUN= 0.949
Solar Neutrino



$E_e = 8.6 \text{ MeV (kin.)}$
 $\cos\theta_{\text{sun}} = 0.95$



電子との弾性散乱



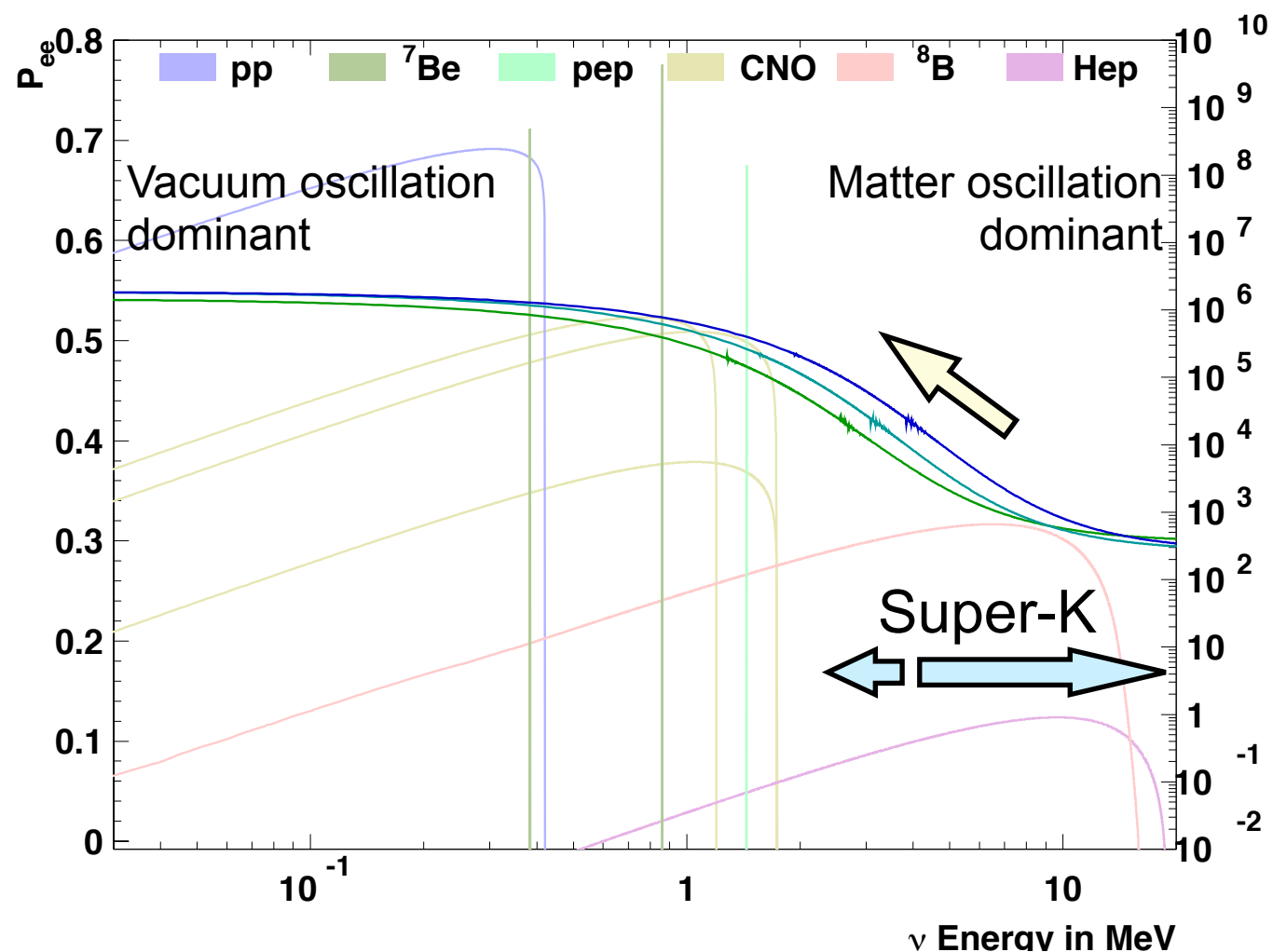
- ✓ 太陽方向が観測可能
- ✓ 時間変動が観測可能
 - 昼夜での変動
 - 季節での変動
- ✓ エネルギースペクトルの精密測定

全てのニュートリノと反応
 $\nu_e + 0.154(\nu_\mu + \nu_\tau)$

Physics motivation

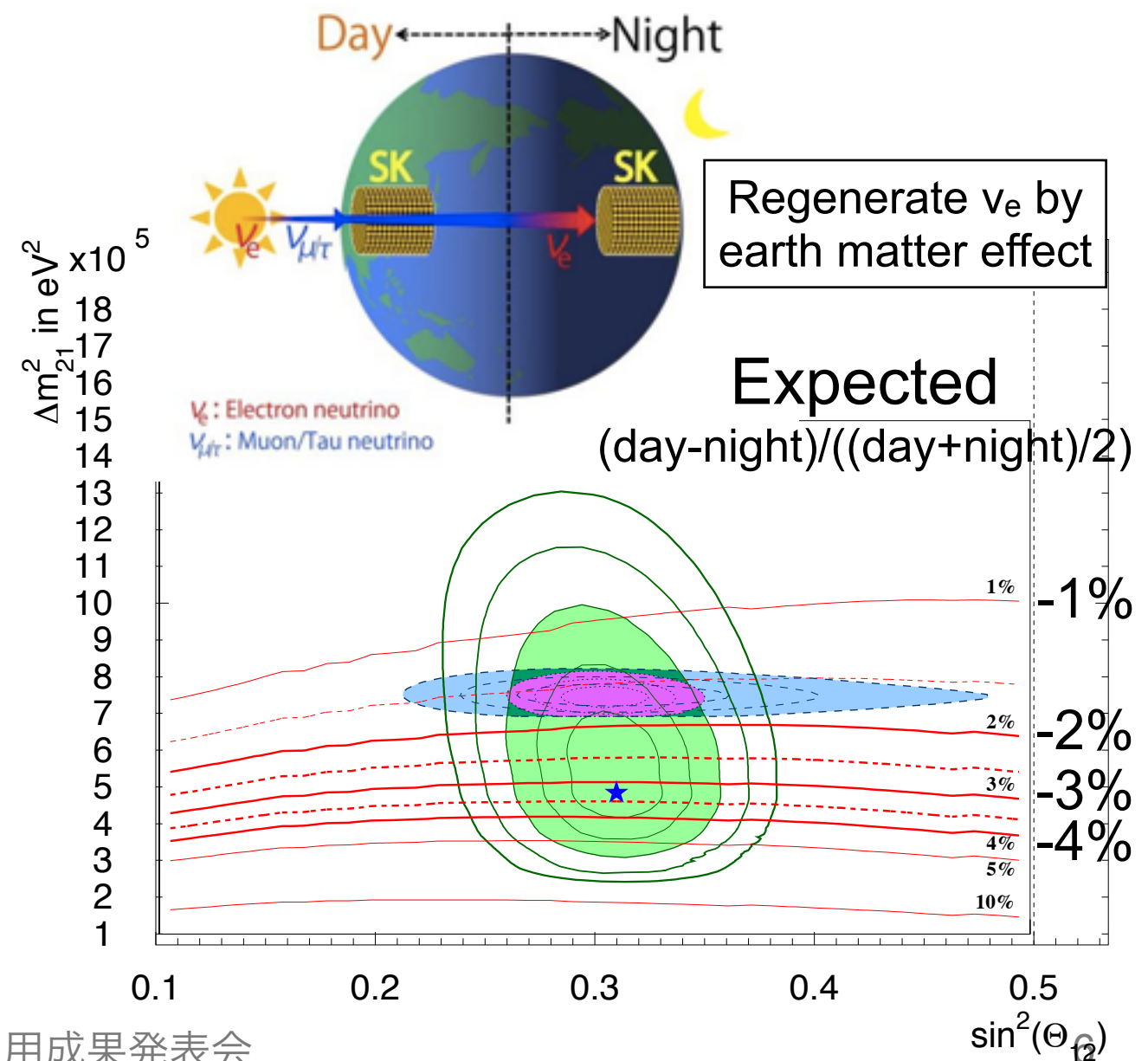
MSW 効果を直接見る

エネルギースペクトルの歪み



Super-K can search for the spectrum "upturn" expected by neutrino oscillation MSW effect

フラックスの昼夜変動



最新結果

発表論文

PRL **112**, 091805 (2014)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
7 MARCH 2014

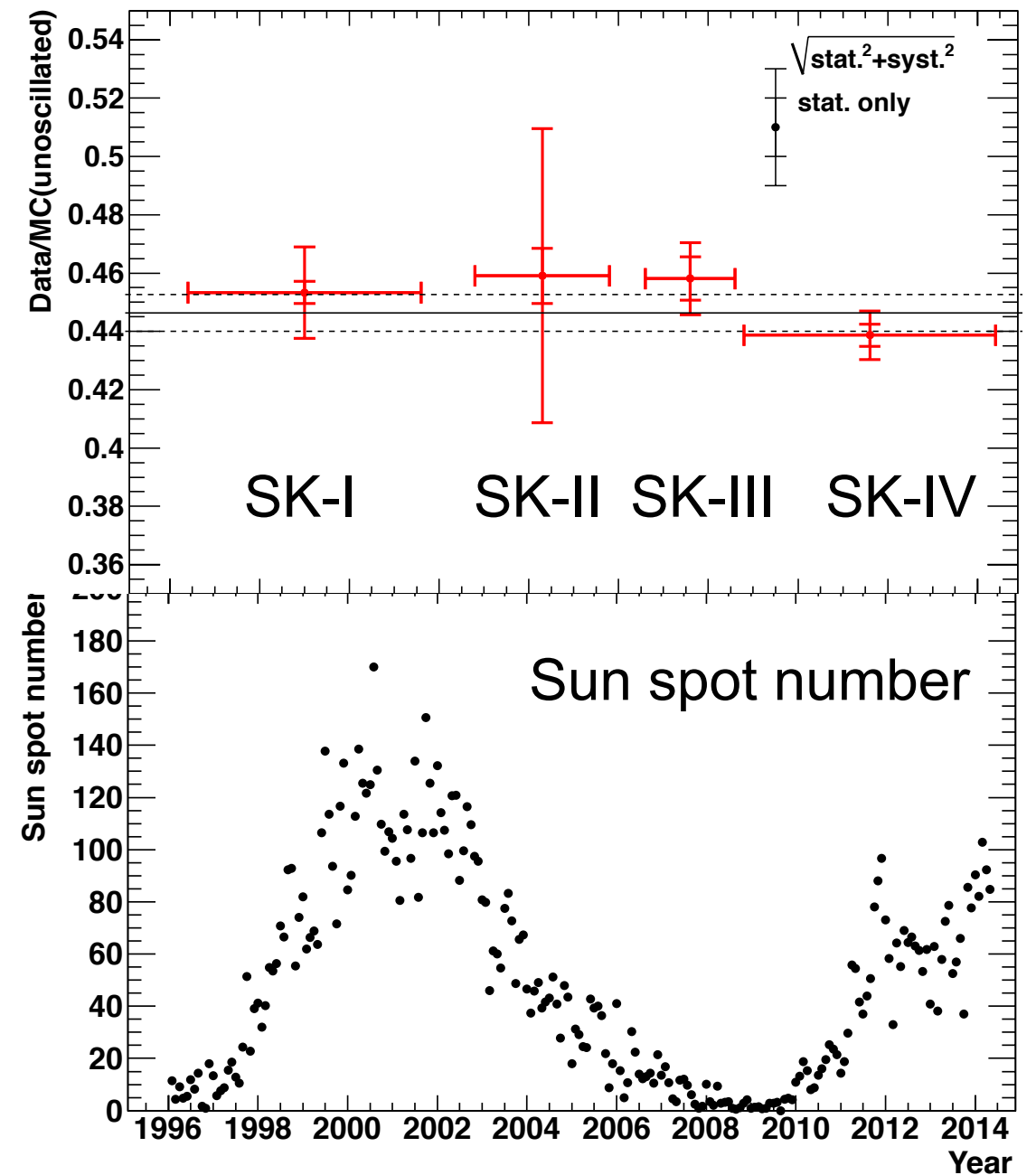
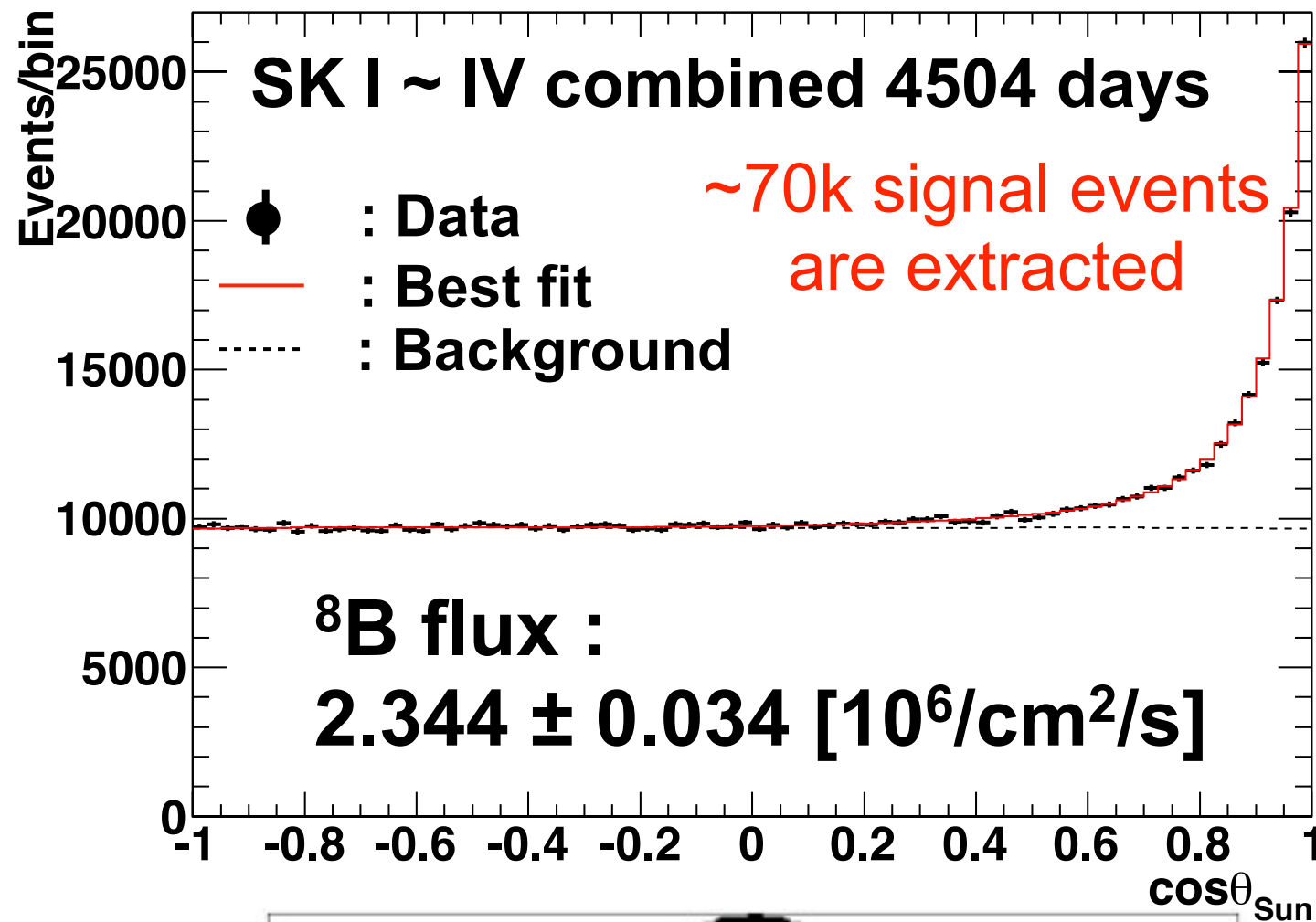


First Indication of Terrestrial Matter Effects on Solar Neutrino Oscillation

A. Renshaw,^{7,†} K. Abe,^{1,29} Y. Hayato,^{1,29} K. Iyogi,¹ J. Kameda,^{1,29} Y. Kishimoto,^{1,29} M. Miura,^{1,29} S. Moriyama,^{1,29} M. Nakahata,^{1,29} Y. Nakano,¹ S. Nakayama,^{1,29} H. Sekiya,^{1,29} M. Shiozawa,^{1,29} Y. Suzuki,^{1,29} A. Takeda,^{1,29} Y. Takenaga,¹ T. Tomura,^{1,29} K. Ueno,¹ T. Yokozawa,¹ R. A. Wendell,^{1,29} T. Irvine,² T. Kajita,^{2,29} K. Kaneyuki,^{2,29,*} K. P. Lee,² Y. Nishimura,² K. Okumura,^{2,29} T. McLachlan,² L. Labarga,³ S. Berkman,⁴ H. A. Tanaka,^{4,31} S. Tobayama,⁴ E. Kearns,^{5,29} J. L. Raaf,⁵ J. L. Stone,^{5,29} L. R. Sulak,⁵ M. Goldhabar,^{6,*} K. Bays,⁷ G. Carminati,⁷ W. R. Kropp,⁷ S. Mine,⁷ M. B. Smy,^{7,29} H. W. Sobel,^{7,29} K. S. Ganezer,⁸ J. Hill,⁸ W. E. Keig,⁸ N. Hong,⁹ J. Y. Kim,⁹ I. T. Lim,⁹ T. Akiri,¹⁰ A. Himmel,¹⁰ K. Scholberg,^{10,29} C. W. Walter,^{10,29} T. Wongjirad,¹⁰ T. Ishizuka,¹¹ S. Tasaka,¹² J. S. Jang,¹³ J. G. Learned,¹⁴ S. Matsuno,¹⁴ S. N. Smith,¹⁴ T. Hasegawa,¹⁵ T. Ishida,¹⁵ T. Ishii,¹⁵ T. Kobayashi,¹⁵ T. Nakadaira,¹⁵ K. Nakamura,^{15,29} Y. Oyama,¹⁵ K. Sakashita,¹⁵ T. Sekiguchi,¹⁵ T. Tsukamoto,¹⁵ A. T. Suzuki,¹⁶ Y. Takeuchi,¹⁶ C. Bronner,¹⁷ S. Hirota,¹⁷ K. Huang,¹⁷ K. Ieki,¹⁷ M. Ikeda,¹⁷ T. Kikawa,¹⁷ A. Minamino,¹⁷ T. Nakaya,^{17,29} K. Suzuki,¹⁷ S. Takahashi,¹⁷ Y. Fukuda,¹⁸ K. Choi,¹⁹ Y. Itow,¹⁹ G. Mitsuka,¹⁹ P. Mijakowski,³⁵ J. Hignight,²⁰ J. Imber,²⁰ C. K. Jung,²⁰ C. Yanagisawa,²⁰ H. Ishino,²¹ A. Kibayashi,²¹ Y. Koshio,²¹ T. Mori,²¹ M. Sakuda,²¹ T. Yano,²¹ Y. Kuno,²² R. Tacik,^{23,32} S. B. Kim,²⁴ H. Okazawa,²⁵ Y. Choi,²⁶ K. Nishijima,²⁷ M. Koshihara,²⁸ Y. Totsuka,^{28,*} M. Yokoyama,^{28,29} K. Martens,²⁹ L. L. Marti,²⁹ M. R. Vagins,^{29,7} J. F. Martin,³⁰ P. de Perio,³⁰ A. Konaka,³² M. J. Wilking,³² S. Chen,³³ Y. Zhang,³³ and R. J. Wilkes³⁴

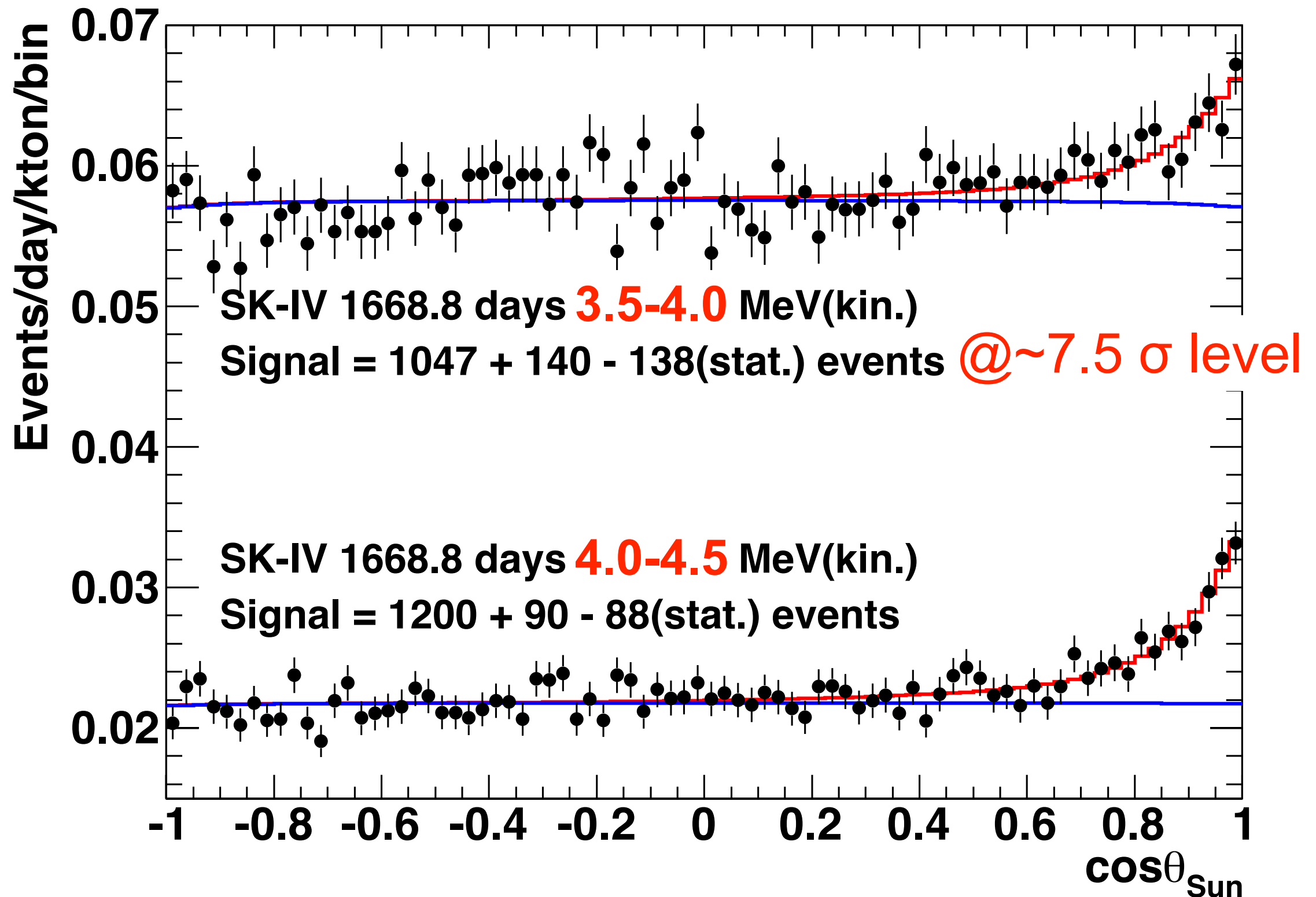
(The Super-Kamiokande Collaboration)

太陽ニュートリノフラックス

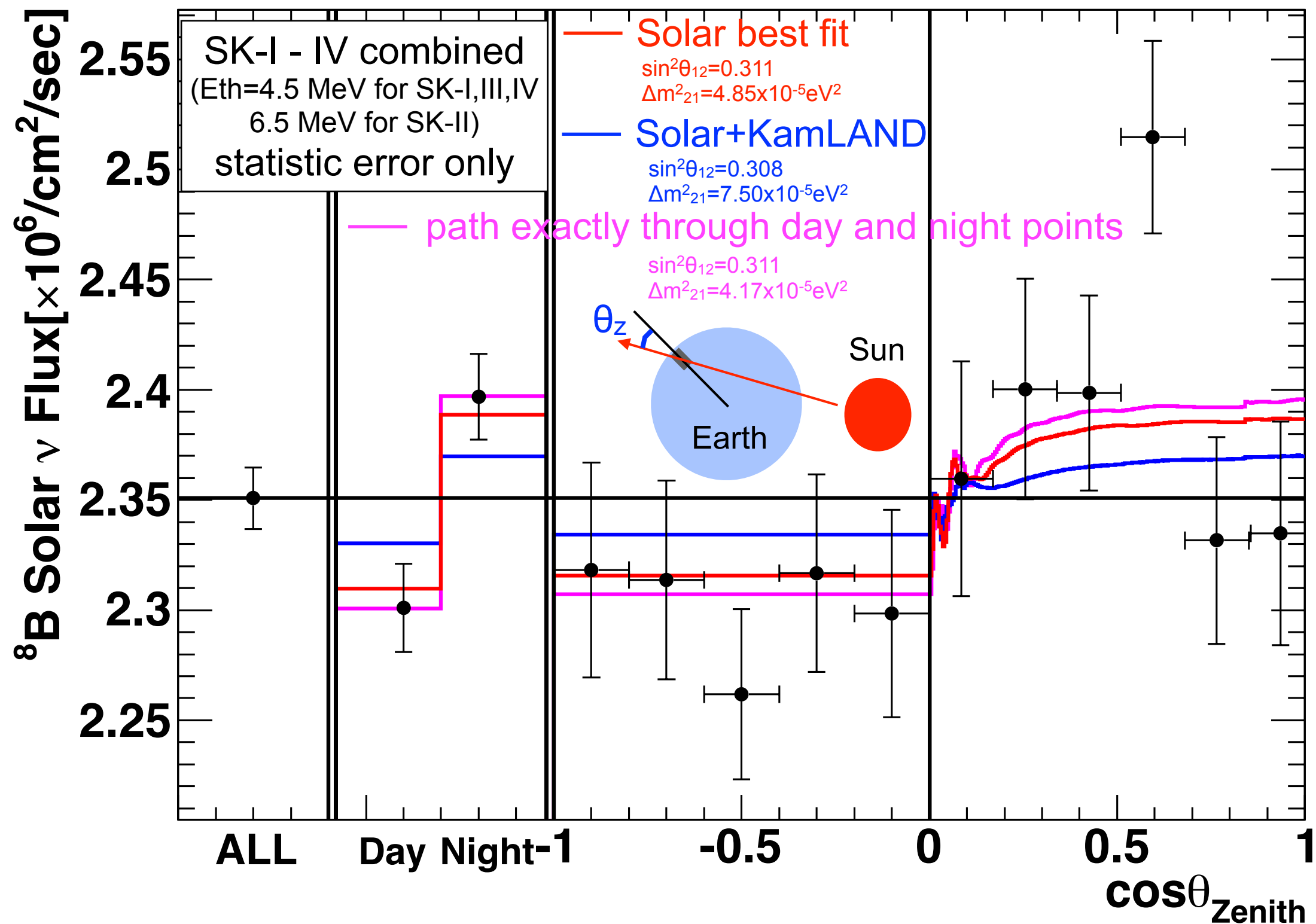


太陽活動との相関は見られない

3.5MeV解析閾値の実現



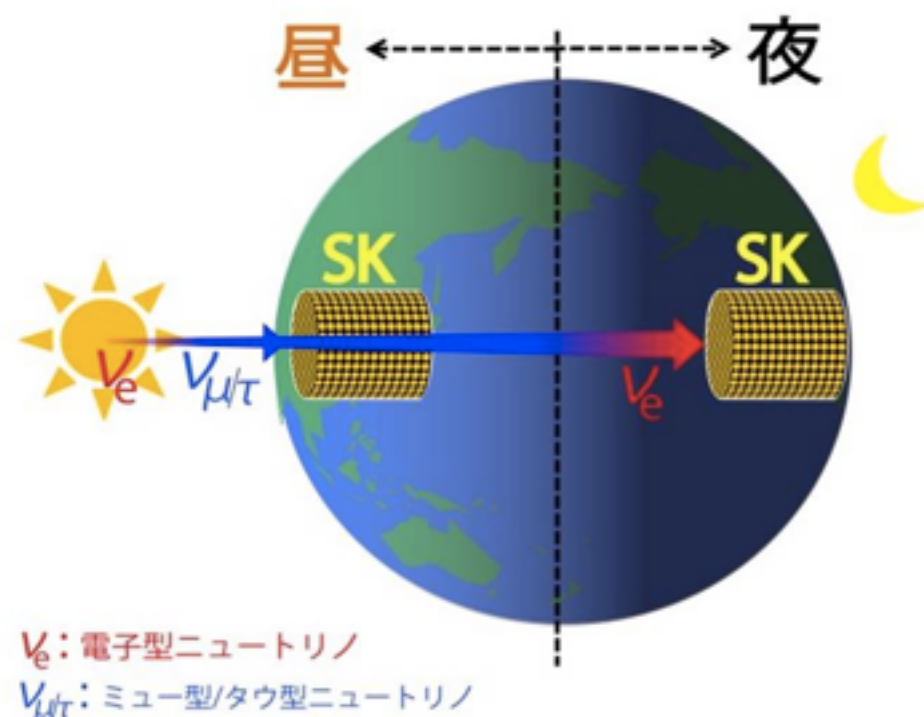
フラックスの昼夜変動



フラックスの昼夜変動

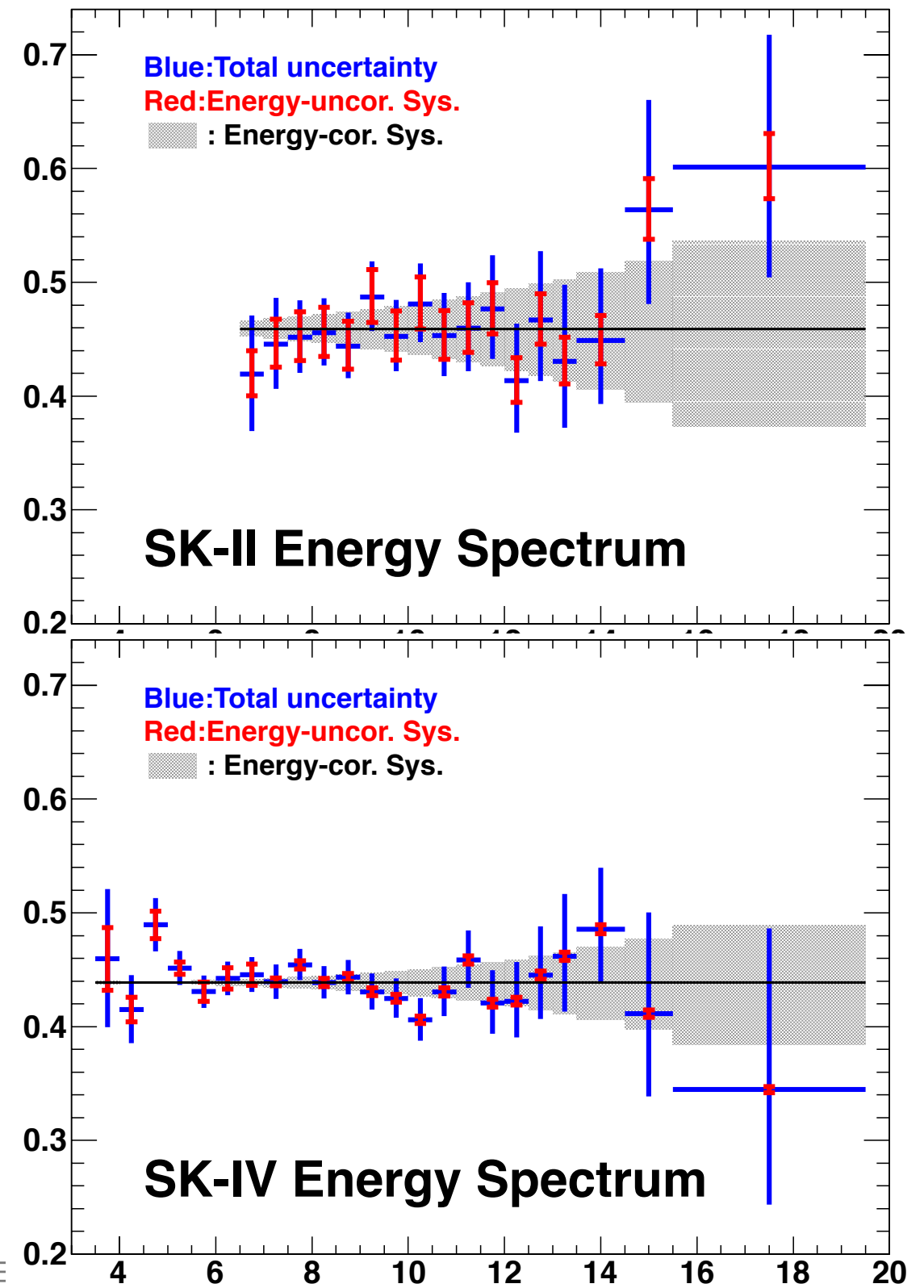
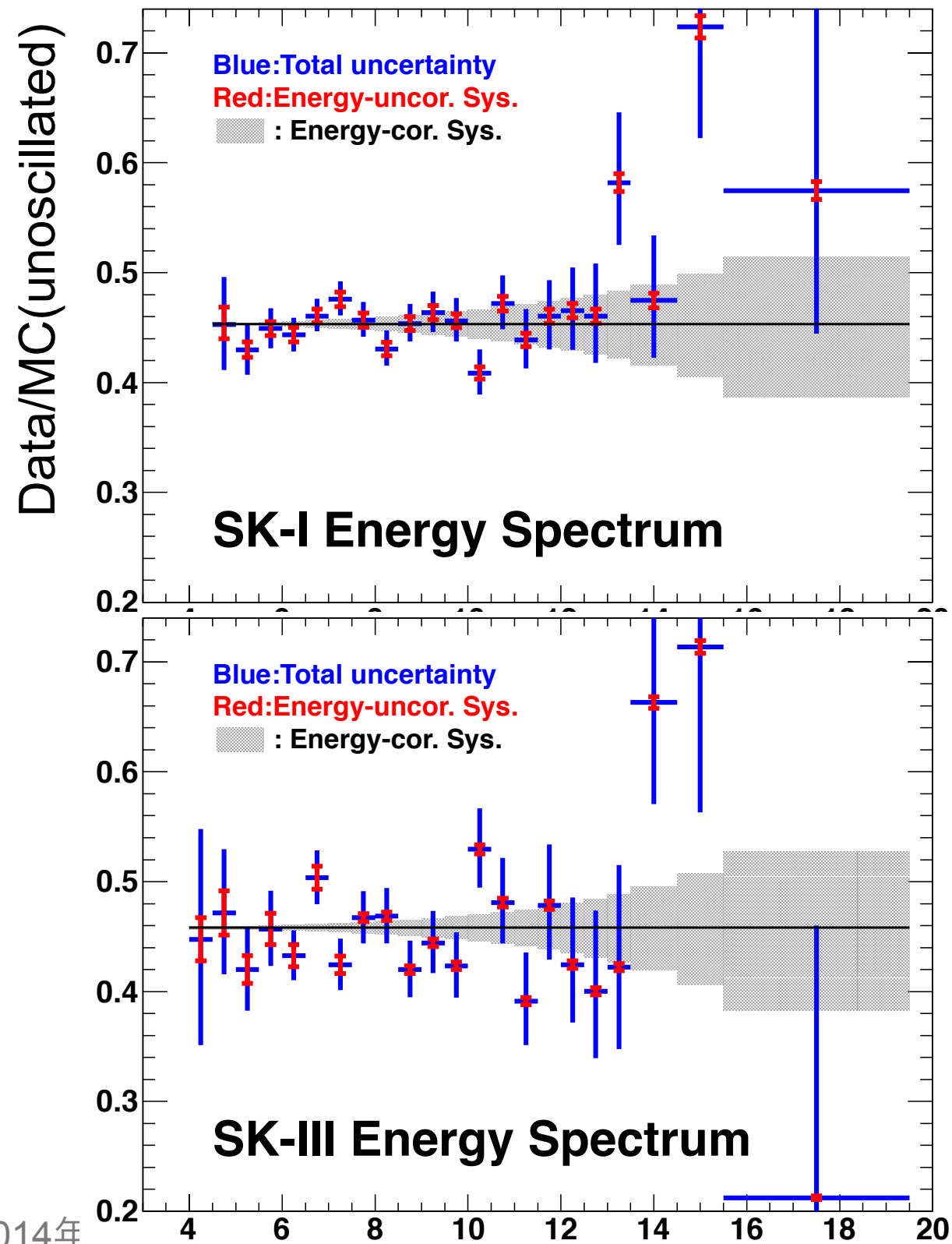
	Amplitude fit		Straight calc. (D-N)/((D+N)/2)
	$\Delta m^2_{21}=4.84 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	$\Delta m^2_{21}=7.50 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	
SK-I	$-2.0 \pm 1.8 \pm 1.0\%$	$-1.9 \pm 1.7 \pm 1.0\%$	$-2.1 \pm 2.0 \pm 1.3\%$
SK-II	$-4.4 \pm 3.8 \pm 1.0\%$	$-4.4 \pm 3.6 \pm 1.0\%$	$-5.5 \pm 4.2 \pm 3.7\%$
SK-III	$-4.2 \pm 2.7 \pm 0.7\%$	$-3.8 \pm 2.6 \pm 0.7\%$	$-5.9 \pm 3.2 \pm 1.3\%$
SK-IV	$-3.6 \pm 1.6 \pm 0.6\%$	$-3.3 \pm 1.5 \pm 0.6\%$	$-4.9 \pm 1.8 \pm 1.4\%$
combined	$-3.3 \pm 1.0 \pm 0.5\%$	$-3.1 \pm 1.0 \pm 0.5\%$	$-4.1 \pm 1.2 \pm 0.8\%$
non-zero significance	3.0σ	2.8σ	2.8σ

($\sin^2\theta_{12}=0.311$, $\sin^2\theta_{13}=0.025$)

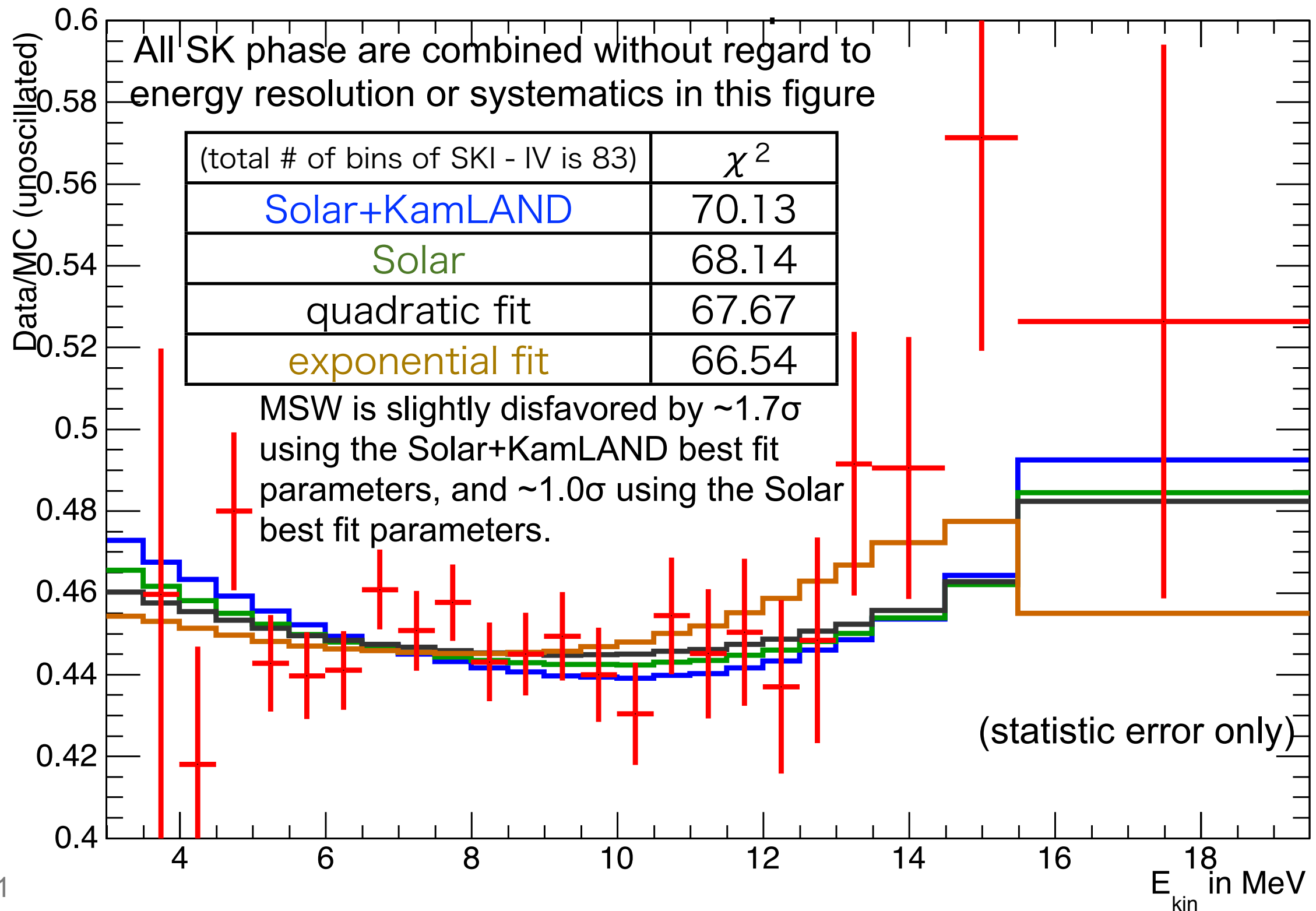


ニュートリノ振動の物質効果
(地球内部の物質) を初めて
直接的に捉えた。

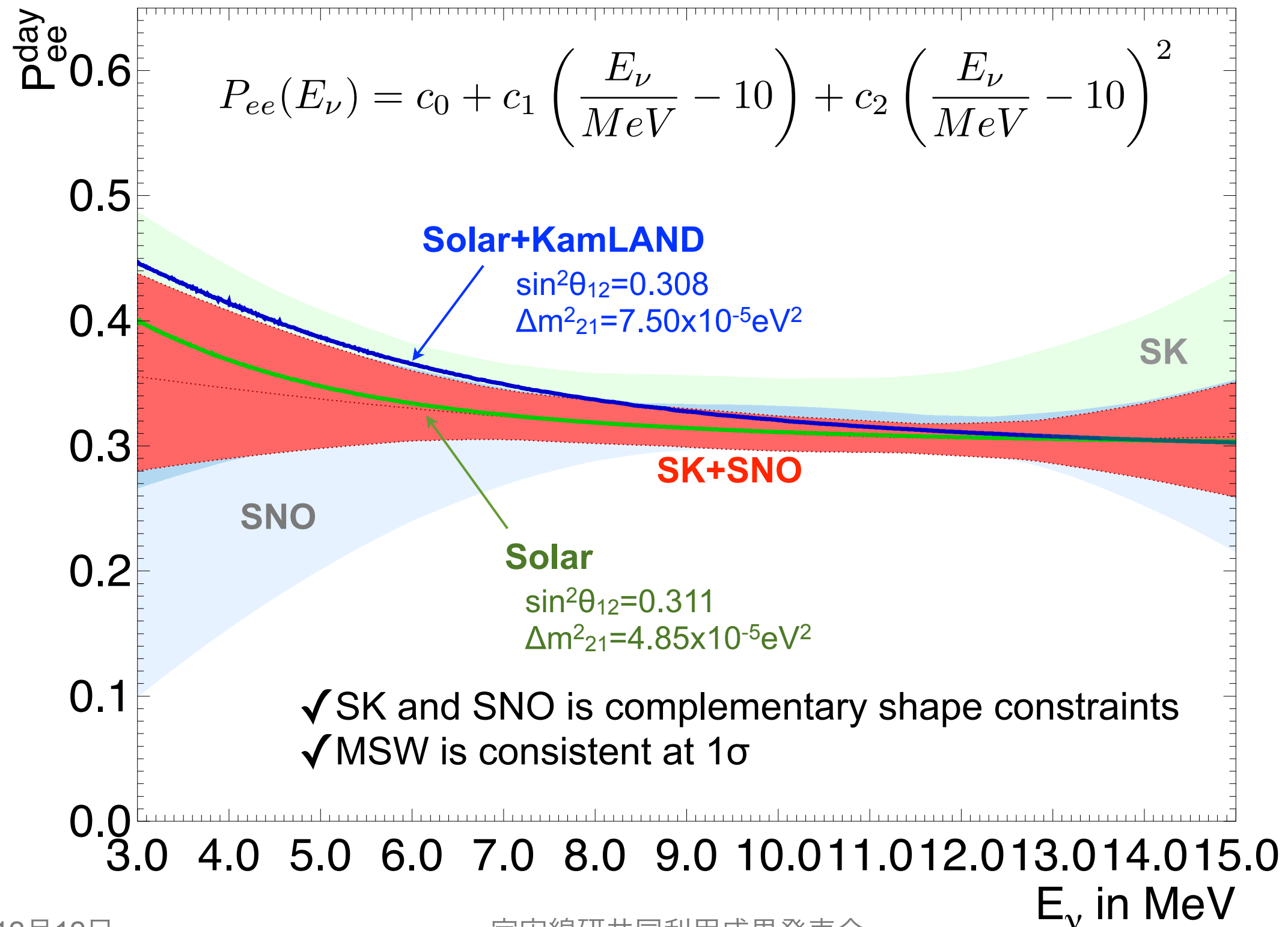
エネルギースペクトル



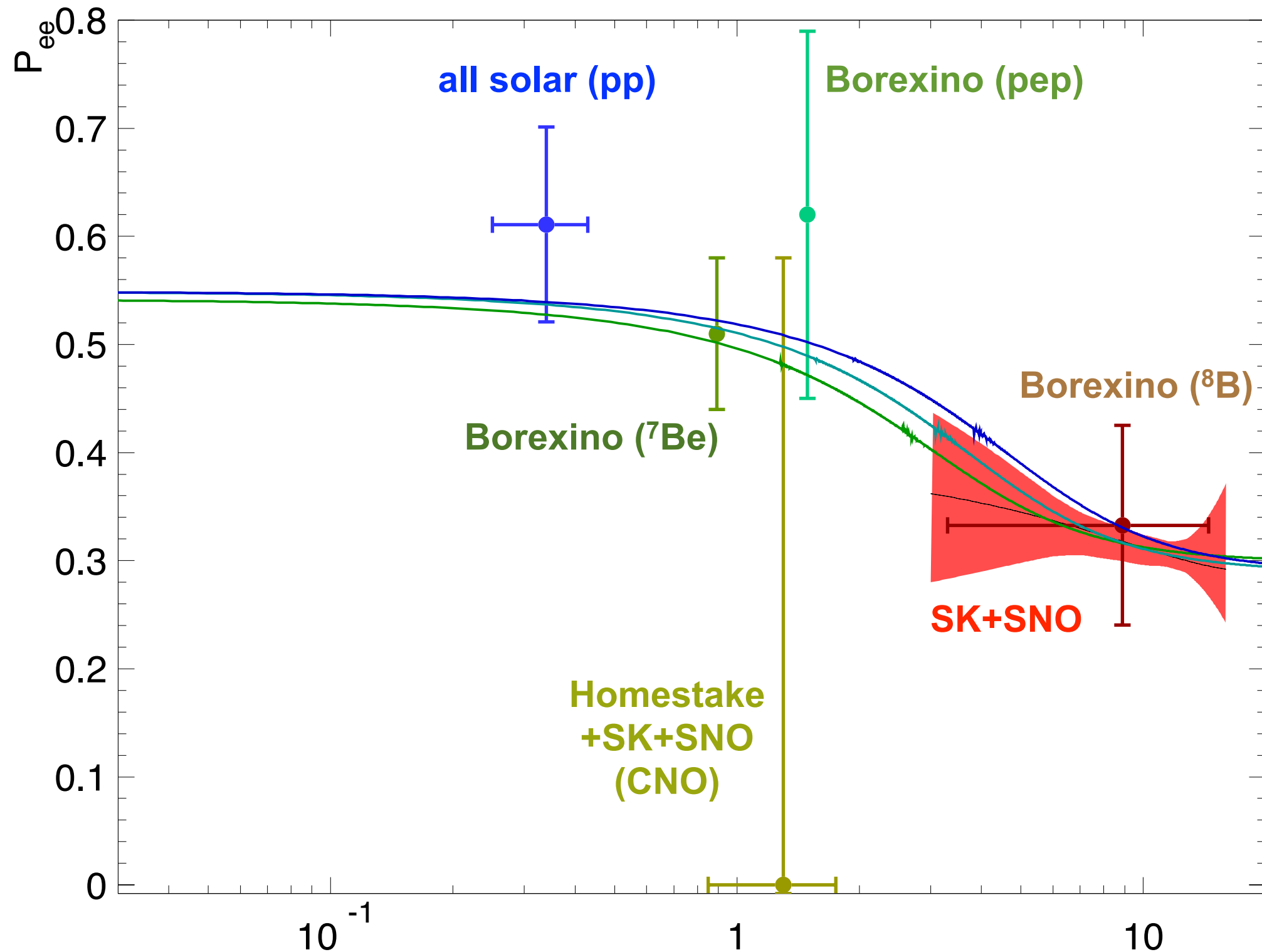
エネルギースペクトル



ν_e の生存確率

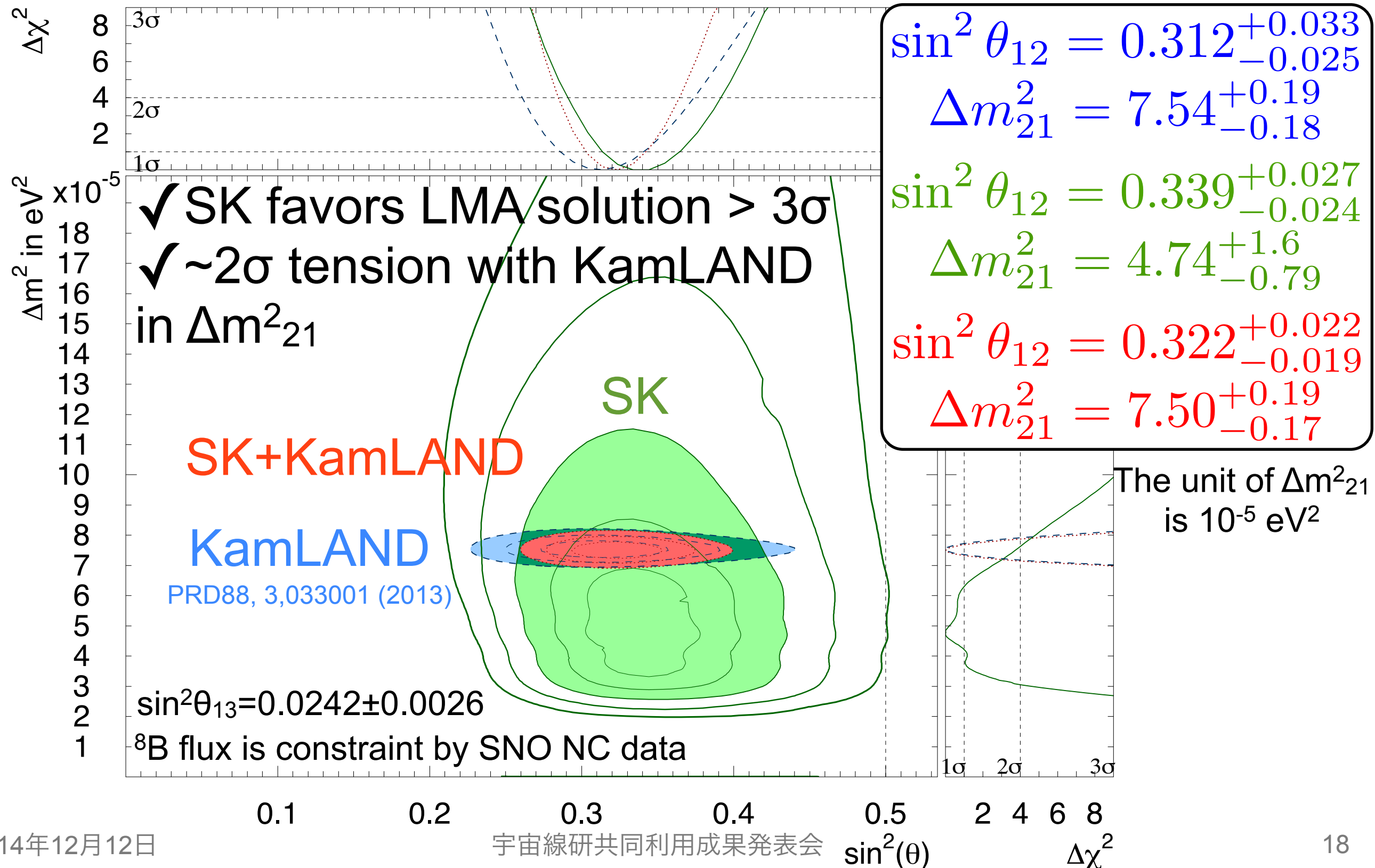


ν_e の生存確率

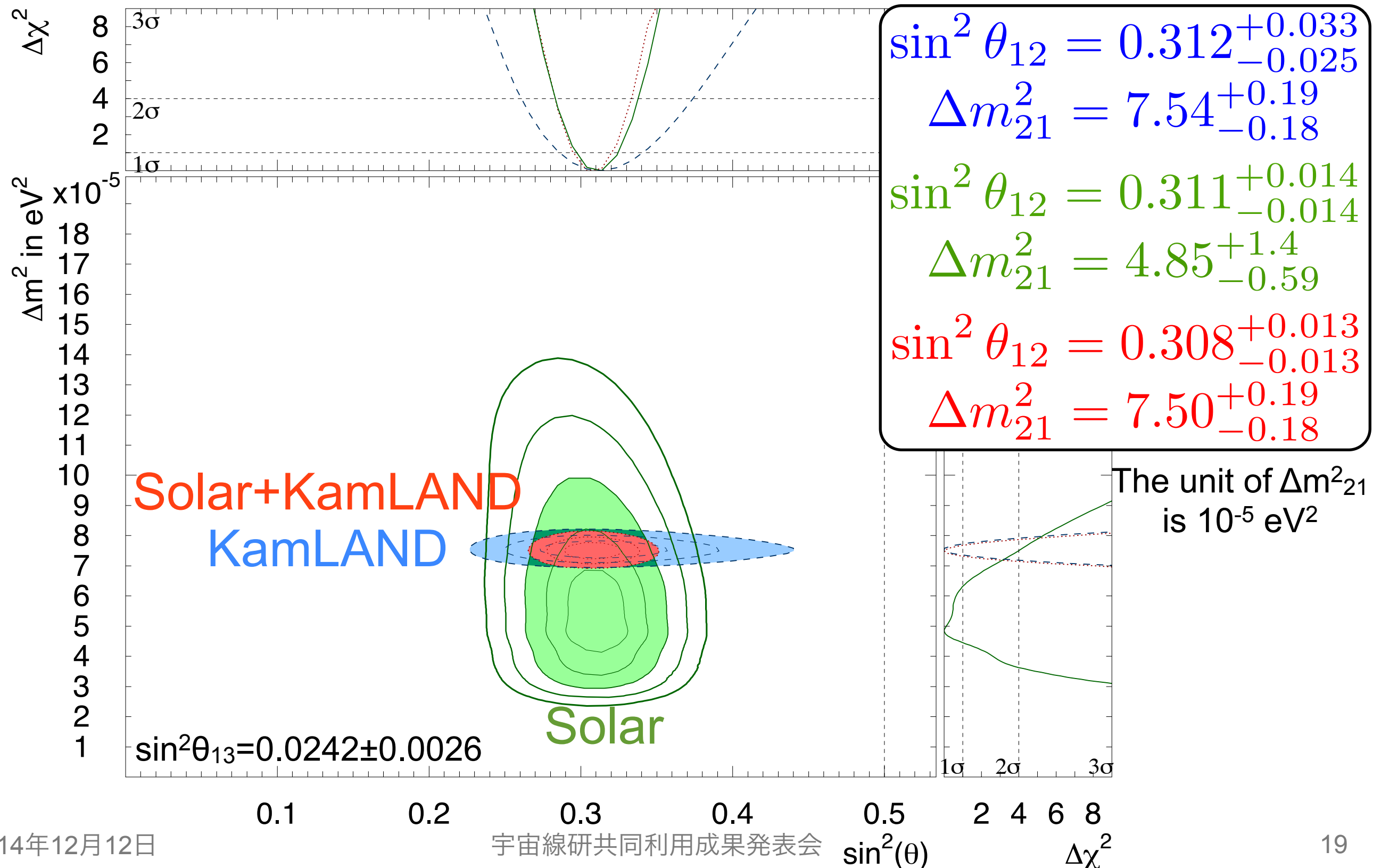


ニュートリノ振動解析

SKのみ



全太陽ニュートリノデータ



超新星ニュートリノ

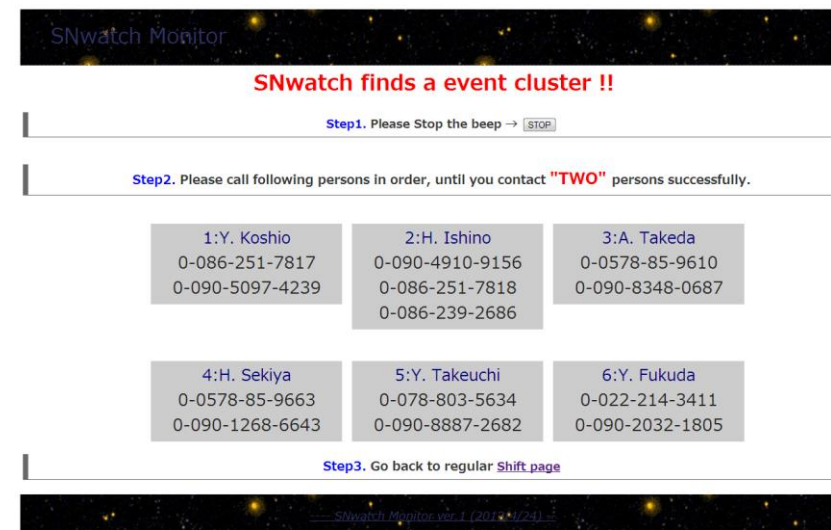
超新星爆発ニュートリノ

No detection

超新星爆発ニュートリノアラーム

昨年の成果発表会（池田）

- アラームメールがエキスパートに送られる
- シフトはDAQや作業の現状を確認
- シフトは確認事項をエキスパートに連絡
- アラームから15分以内にエキスパート会議
 - SNであることを確認
- コラボレータに報告
- 世界に情報を発信



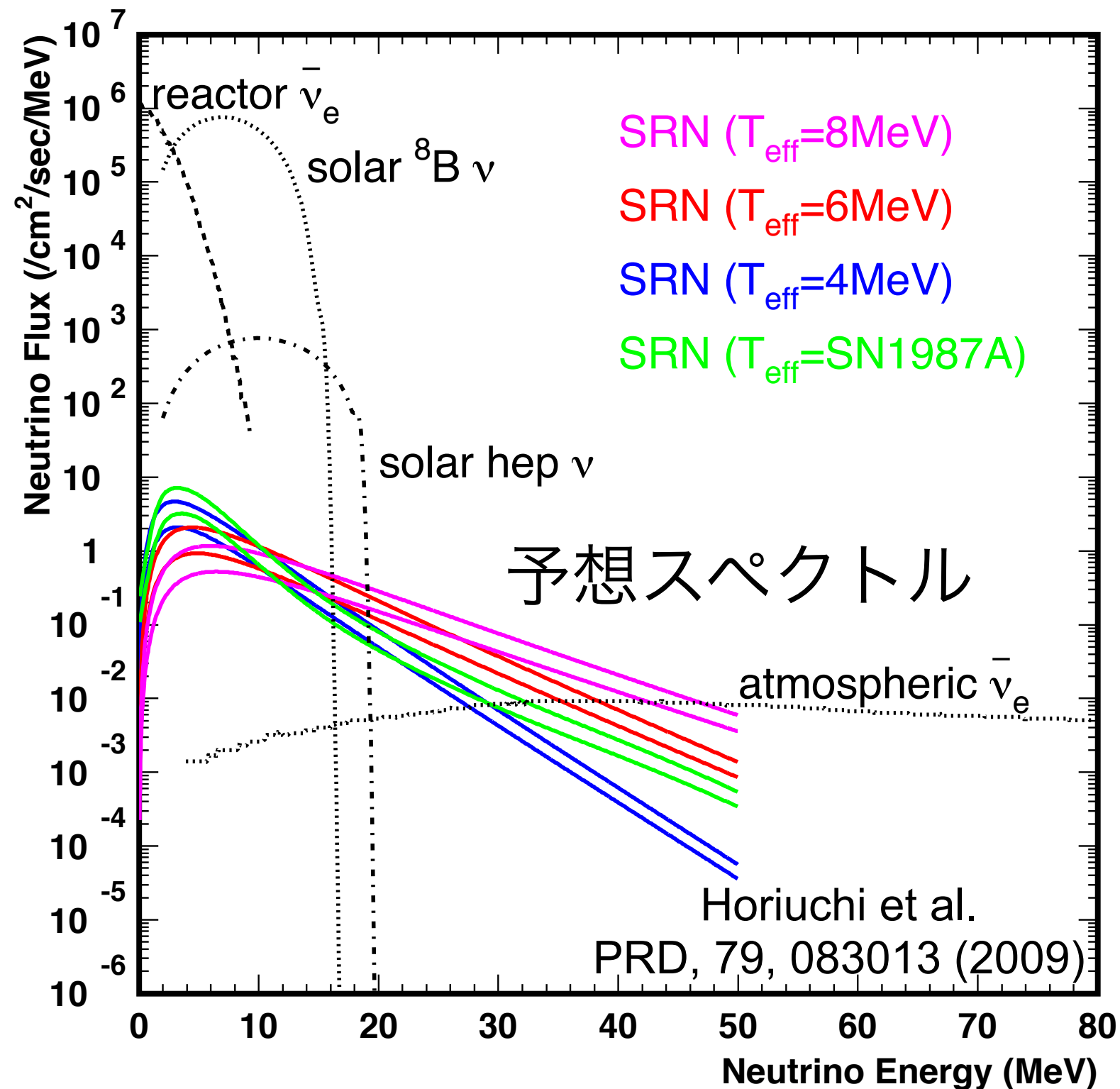
シフトへのアラーム画面

情報を世界に発信し、
光学観測につなげるには、
1分、1秒の短縮でも重要

発生後 1 時間以内に情報発信可能

安定して稼働中

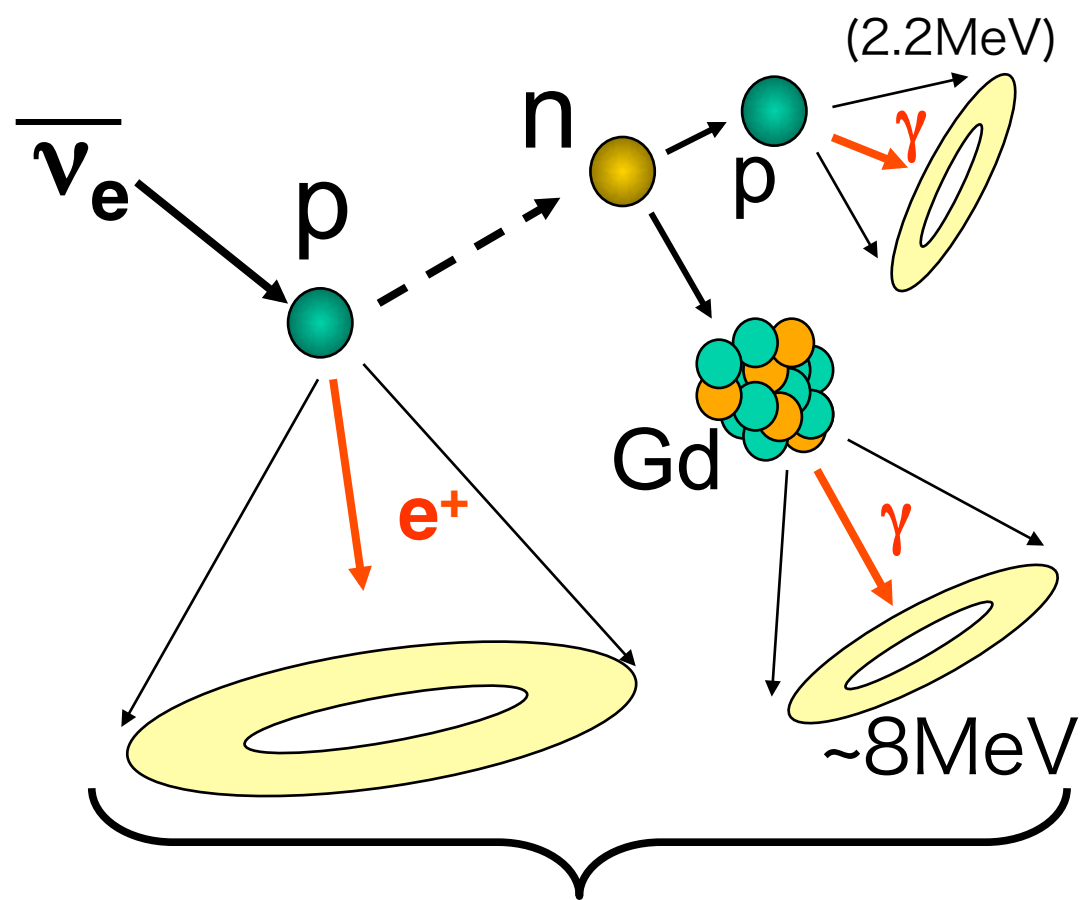
超新星背景ニュートリノ探索



GADZOOKS!

(Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande Super!)

Inverse beta decay

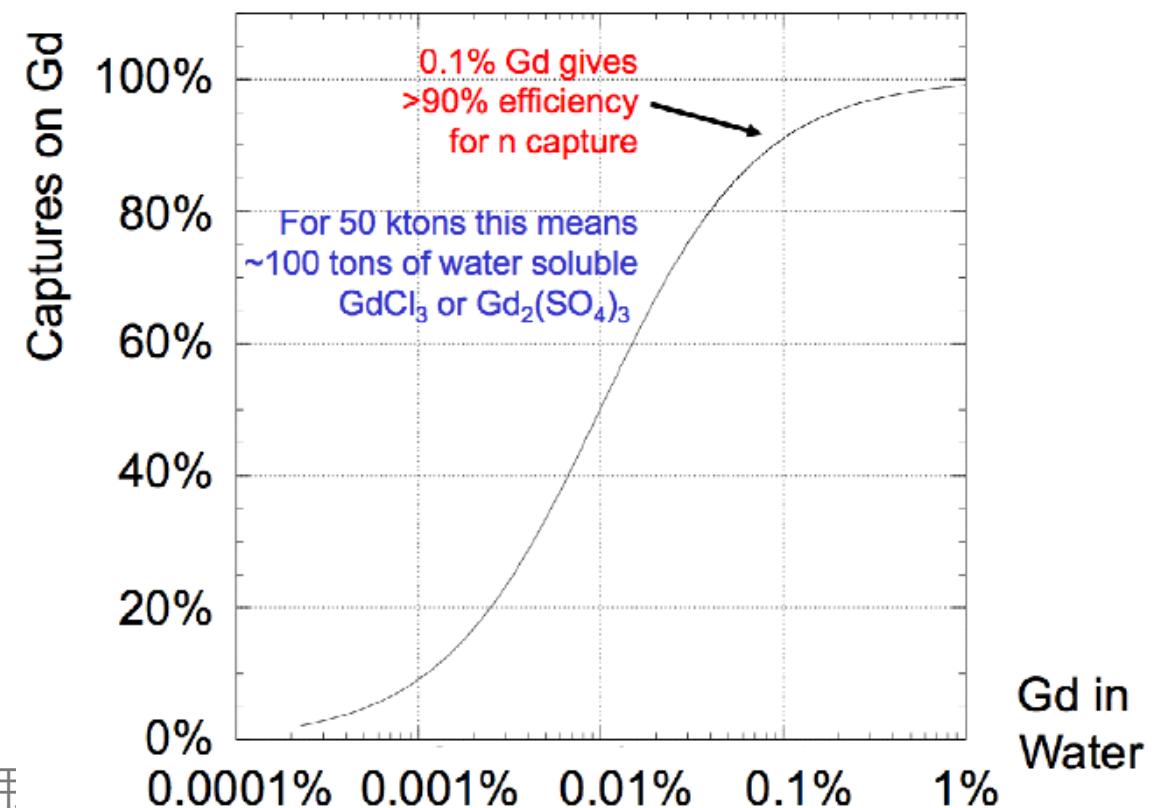


- $\Delta T \sim 30 \mu\text{sec}$
- Vertices within $\sim 50\text{cm}$

- Gd を SK に溶かす。

J.Beacom and M.Vagins,
[Phys.Rev.Lett.93\(2004\)171101](#)

- Gdに中性子が捕獲されるとガンマ線 (計8MeV)が放出される。
- 陽電子とガンマ線の同時遅延計測で反電子ニュートリノ事象を同定。



Gdテスト 実証実験 EGADS

(Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems)

神岡地下施設

目的

- ✓ Gd溶解水の透過率
 - ✓ Gd溶解水の純化
 - ✓ Gdと純水の混合
 - ✓ Gdの検出器への影響
 - ✓ 環境中性子の影響
- 等を調べる。



これまでの経緯

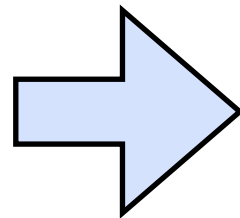
- 2009年7～12月 穴掘り
- 2010年6月 200トンタンク完成
- 2011年2月 Gd水循環装置設置
- 2011年7月 光電子増倍管（240本）の校正
- 2013年8月 光センサーの取り付け

EGADS実験の現状

昨年の成果発表会（池田）

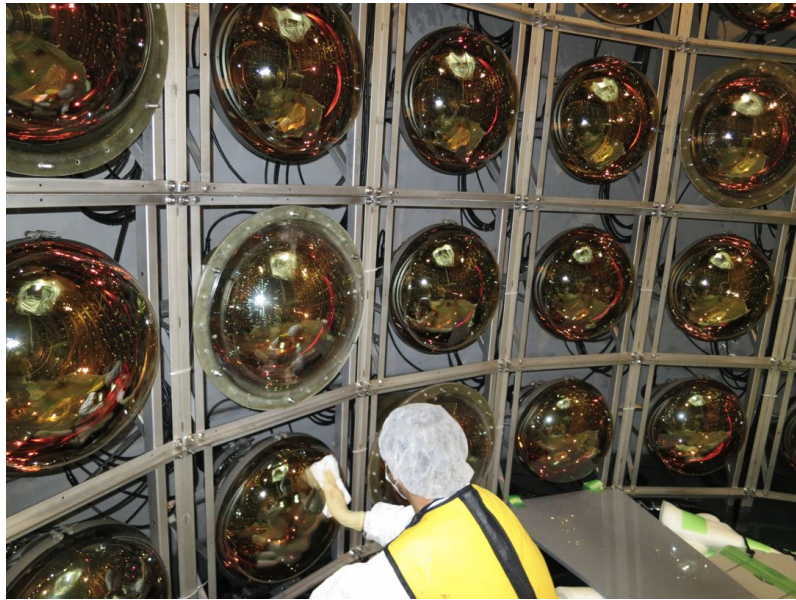
現状と予定

- 現在は、純水
 - 透過率測定
 - 検出器キャリブレーション
- 1月中旬から2月にかけてガドリニウム導入。
 - 透過率変化
 - 中性子捕獲率
 - などなど
- 5月には結果をまとめる。



- 純水においてもGd溶液においても予測以上の透過率低下を観測
- タンク内調査によりブラックシート固定用のワイヤに錆を発見
 - ✓ この材料は亜鉛メッキした鉄のワイヤだと後に判明。（業者からはSUSとして購入）
 - ✓ SK検出器内部には使用されていない部材
- ワイヤを取り除き、検出器内の洗浄を行なった。

EGADS実験の現状

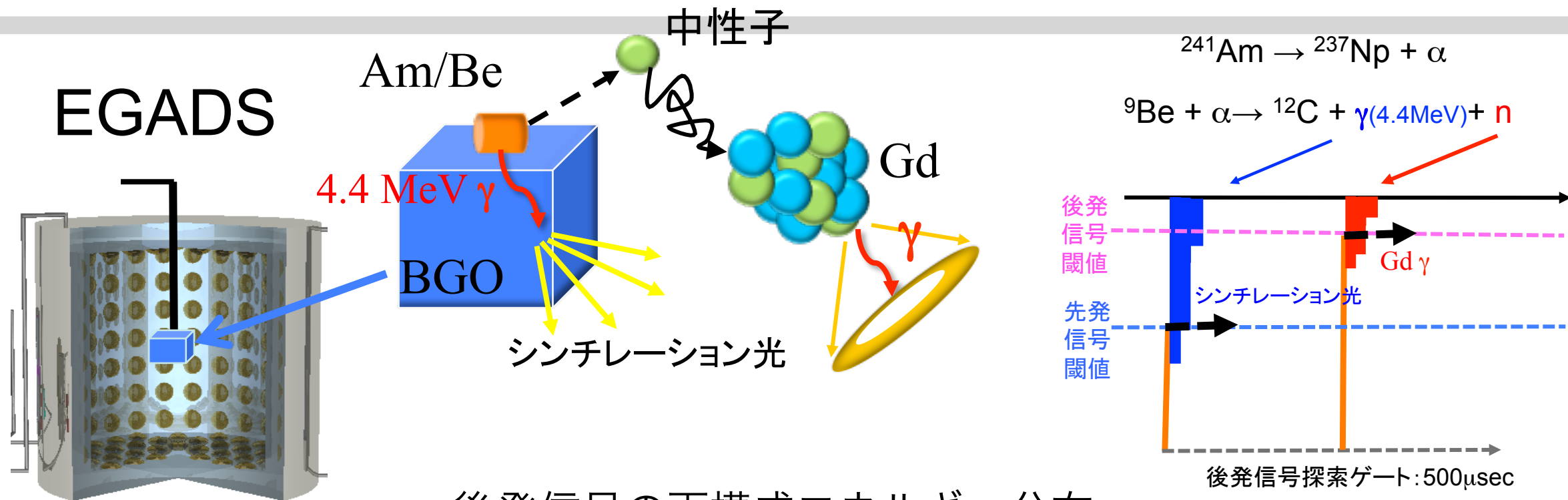


- ✓ 取替・洗浄作業（～9月）
- ✓ 純水で循環（10-11月） 透過率は安定
- ✓ Gd（最終目標の約1/10）を導入（11月27日）

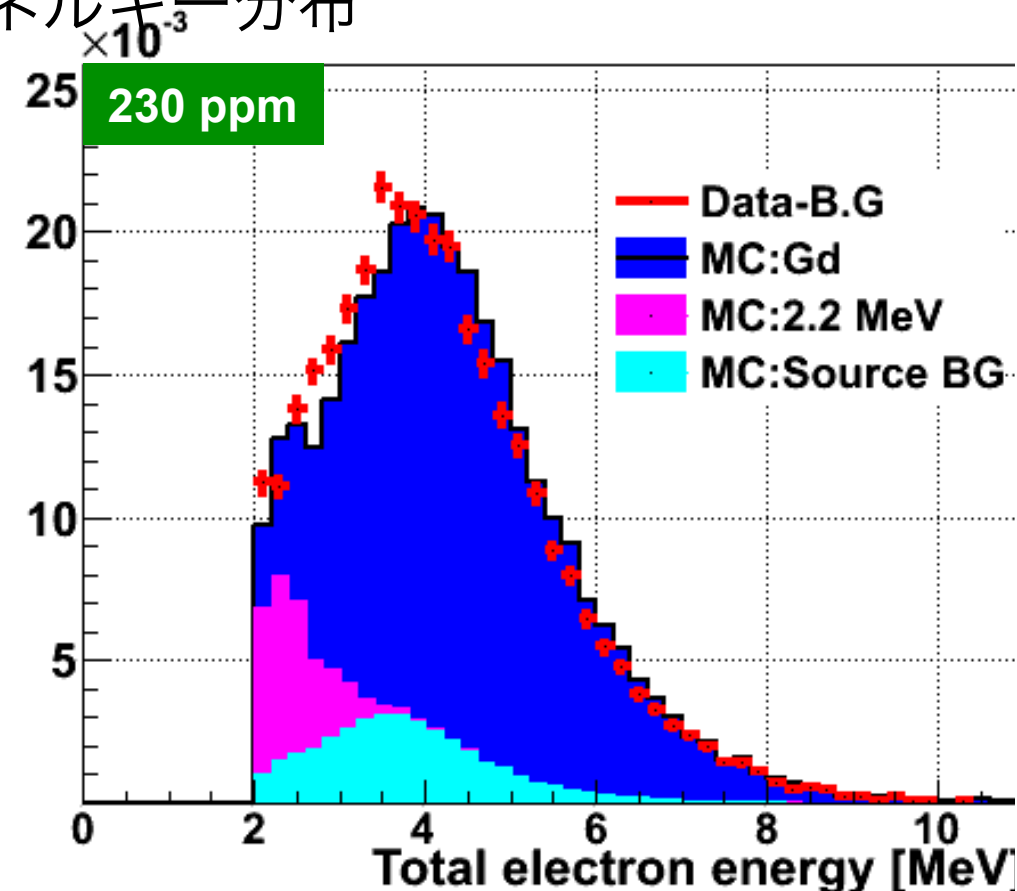
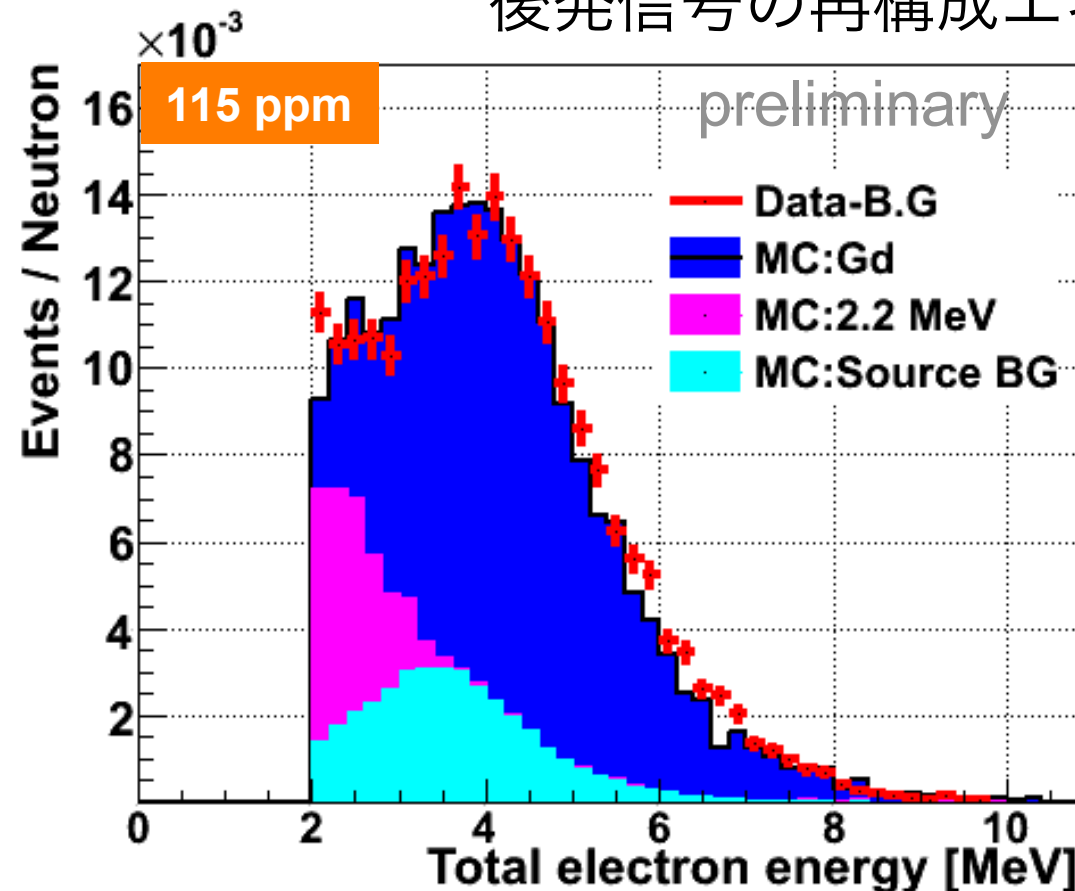
今後は徐々にGdを増やしていき

透過率変化や中性子捕獲率の見積などを進めて行く

中性子線源によるGd γ 測定



後発信号の再構成エネルギー分布



まとめ

- 太陽ニュートリノ観測
 - ✓ 約4500日のデータ解析を行なった。特にSK-IV ではバックグラウンドの削減により3.5MeVエネルギー閾値を達成。
 - ✓ 有意な時期変動は見られない。
 - ✓ 昼夜のフラックスの違いを約3.0シグマレベルで観測した。
ニュートリノ振動における地球物質効果を初めて観測。
 - ✓ 有意なスペクトルの歪みは見られない。
 - ✓ ニュートリノ振動解析では Δm^2 において KamLAND と太陽ニュートリノの最適解では2シグマ程度の離れが見られる。

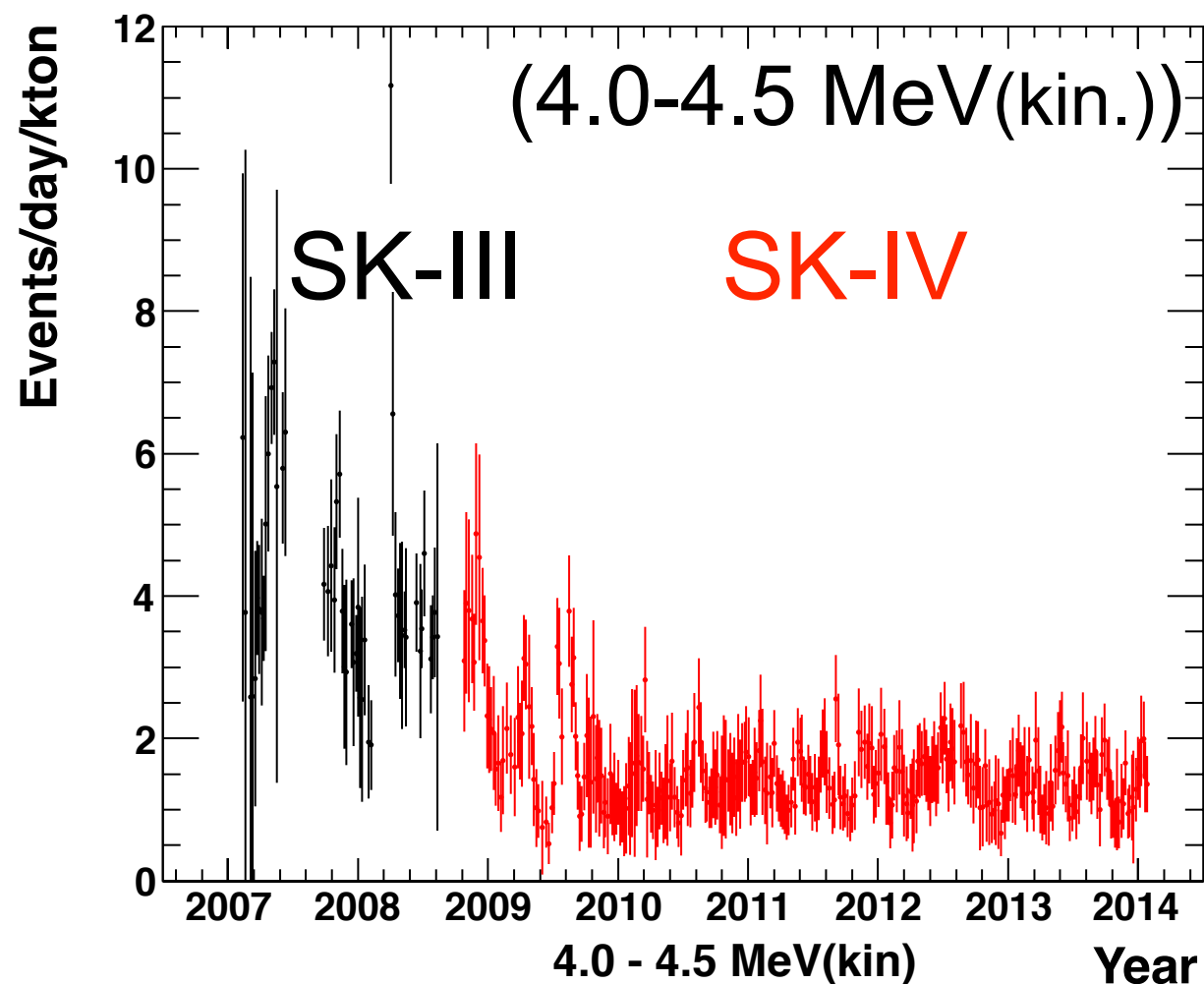
まとめ

- 超新星ニュートリノ観測
 - ✓ 超新星爆発ニュートリノは観測されていない。超新星アラームは安定して稼働中。
 - ✓ 将来、超新星背景ニュートリノ探索計画 GADZOOKS!に向けた実証実験 EGADSを進めている。
 - 改修作業を行なった。Gdもすでに導入済み。今後、実証実験を進めていく。
 - 中性子捕獲によるガンマ線スペクトル較正データはシミュレーションを再現している。

バックアップ

SK-IVにおける改善

低バックグラウンドの実現



水システムの改良によりバックグラウンドを
低くキープすることに成功した

系統誤差の削減

Source	SK-IV flux (3.5-19.5MeV)	SK-III flux (4.5-19.5MeV)
energy scale	+1.14, -1.16%	±1.4%
energy resolution	+0.14, -0.08%	±0.2%
B8 spectrum	+0.33, -0.37%	±0.2%
trigger efficiency	±0.1%	±0.5%
angular resolution	+0.32, -0.25%	±0.67%
vertex shift	±0.18%	±0.54%
BG event cut	±0.36%	±0.4%
hit pattern cut	±0.27%	±0.25%
another vertex cut	removed	±0.45%
spallation cut	±0.2%	±0.2%
gamma cut	±0.26%	±0.25%
cluster hit cut	+0.45, -0.44%	±0.5%
BG shape	±0.1%	±0.1%
signal extraction	±0.7%	±0.7%
cross section	±0.5%	±0.5%

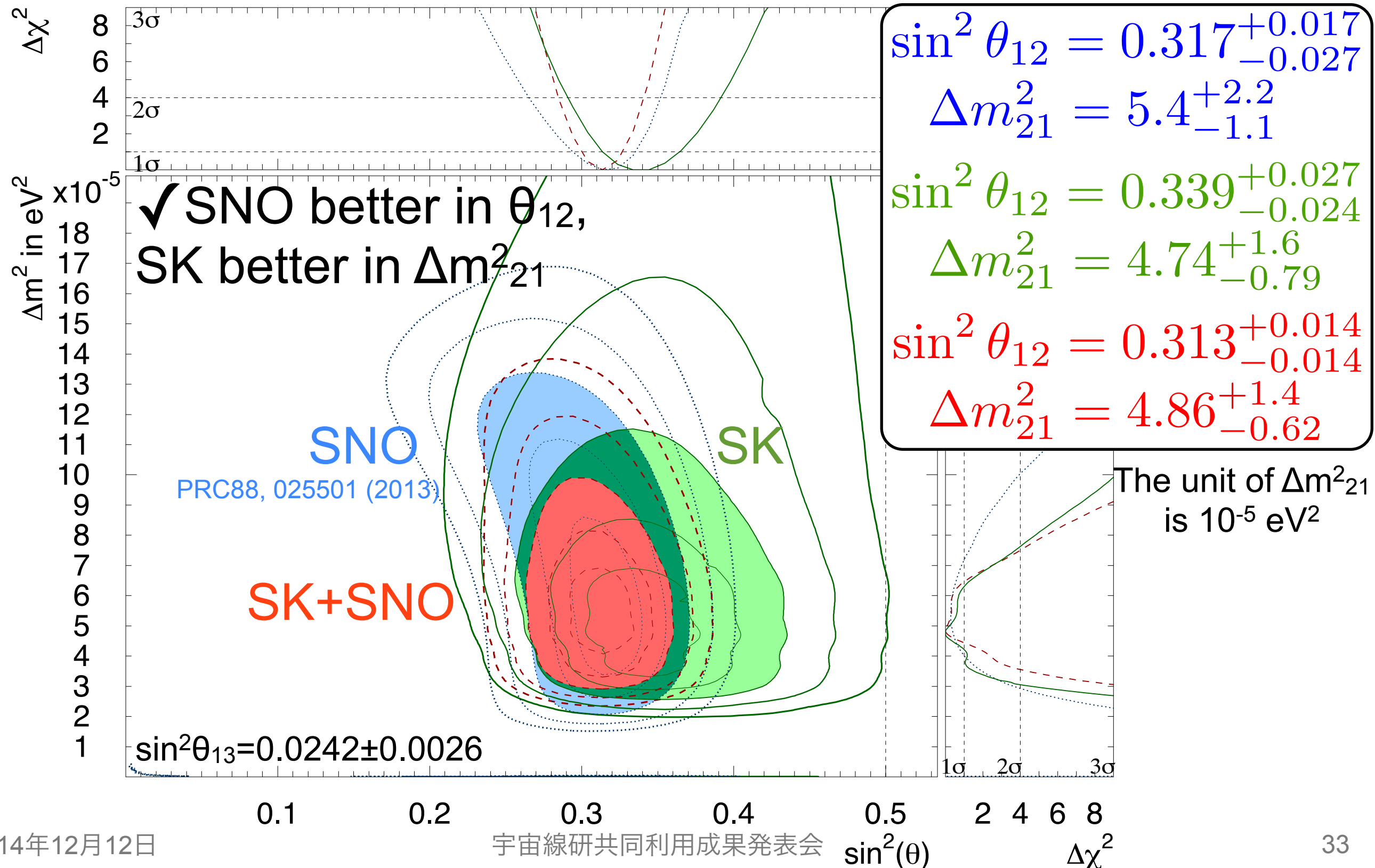
Total

1.7 %

2.1 %

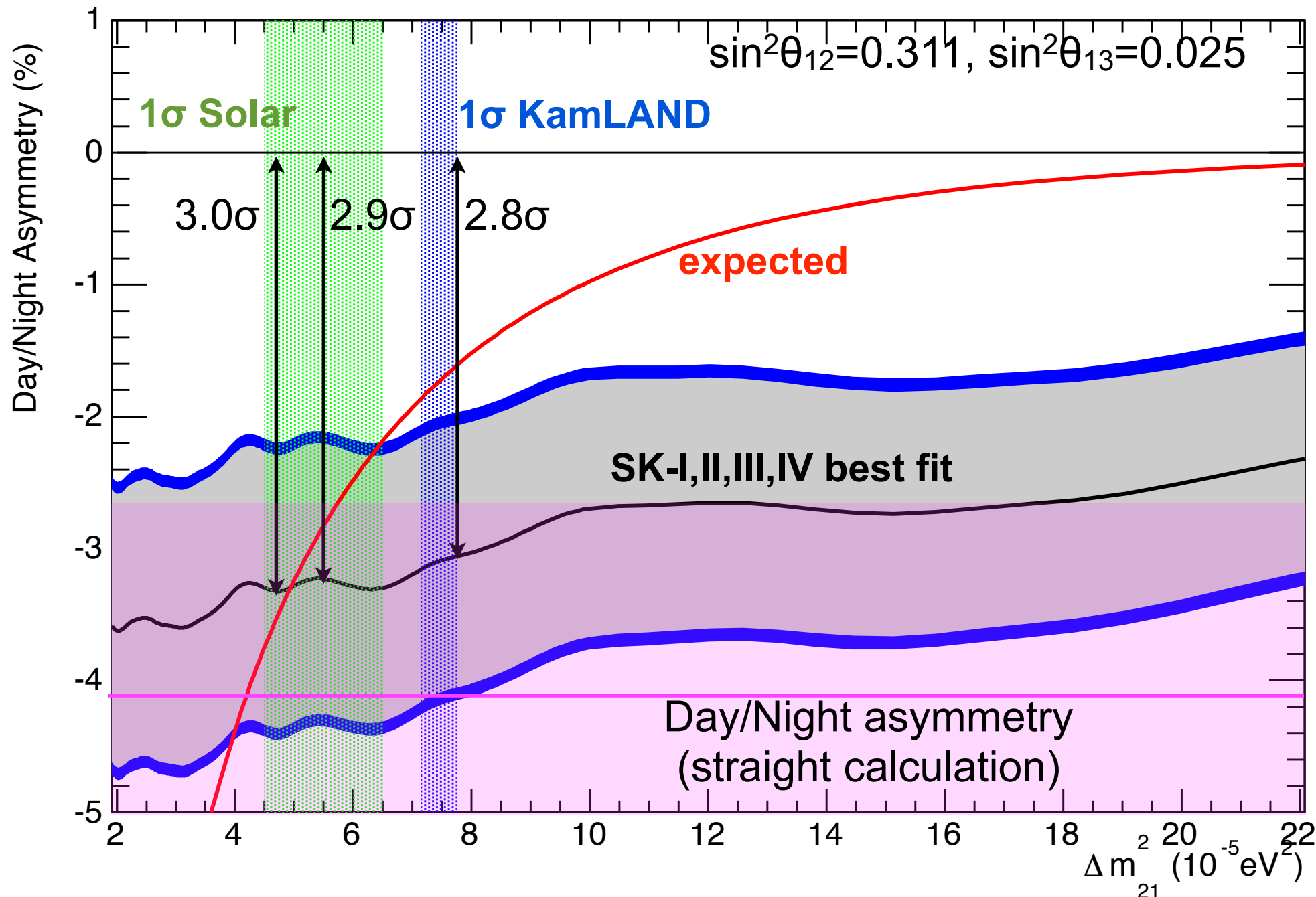
(+3.5, -3.2 % for SK-I)

SKとSNO



昼夜変動の Δm^2_{21} 依存性

SK-I/II/III/IV Combine Day/Night Asymmetry



Solar region

- ✓ differ from zero by 2.9~3.0σ
- ✓ agree with expect by 1.0σ

KamLAND region

- ✓ differ from zero by more than 2.8σ
- ✓ agree with expect by 1.3σ

Data set for global solar analysis

The most up-to-date data are used

✓ SK:

- SK-I 1496 days, spectrum 4.5-19.5 MeV(kin.)+D/N: $E_{\text{kin}} > 4.5$ MeV
- SK-II 791 days, spectrum 6.5-19.5 MeV(kin.)+D/N: $E_{\text{kin}} > 7.0$ MeV
- SK-III 548 days, spectrum 4.0-19.5 MeV(kin.)+D/N: $E_{\text{kin}} > 4.5$ MeV
- SK-IV 1669 days, spectrum 3.5-19.5 MeV(kin.)+D/N: $E_{\text{kin}} > 4.5$ MeV

✓ SNO:

- Parameterized analysis (c_0, c_1, c_2, a_0, a_1) of all SNO phased. (PRC88, 025501 (2013))

(Note: the same method is applied to both SK and SNO with a_0 and a_1 to LMA expectation.)

✓ Radiochemical: Cl, Ga

- Ga rate: 66.1 ± 3.1 SNU (All Ga global) (PRC80, 015807 (2009))
- Cl rate: 2.56 ± 0.23 SNU (Astrophys. J. 496, 505 (1998))

✓ Borexino: Latest ^7Be flux (PRL 107, 141302 (2011))

✓ KamLAND reactor : Latest (3-flavor) analysis (PRD88, 3, 033001 (2013))

✓ ^8B spectrum: Winter 2006 (PRC73, 73, 025503 (2006))

✓ ^8B and hep flux free, if not mentioned.