

Super-Kamiokande検出器を用いた 太陽ニュートリノ解析の最新結果

神戸大学 理学研究科
中野佑樹



2016年10月30日(日)
第1回 宇宙素粒子若手の会
秋の研究会

@東大宇宙線研究所

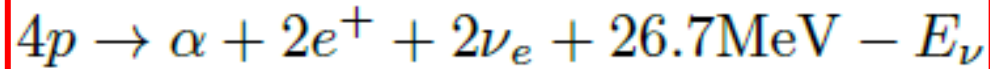


講演の内容

- 太陽ニュートリノ
- Super-Kamiokande検出器(SK)
- SKでの太陽ニュートリノ観測
- 太陽解析での最近の改良
- 太陽ニュートリノフラックス測定結果
- エネルギースペクトル解析結果
- 今後の展望とまとめ

太陽ニュートリノ

太陽の核(中心)で起こる核反応によって生成されるニュートリノ

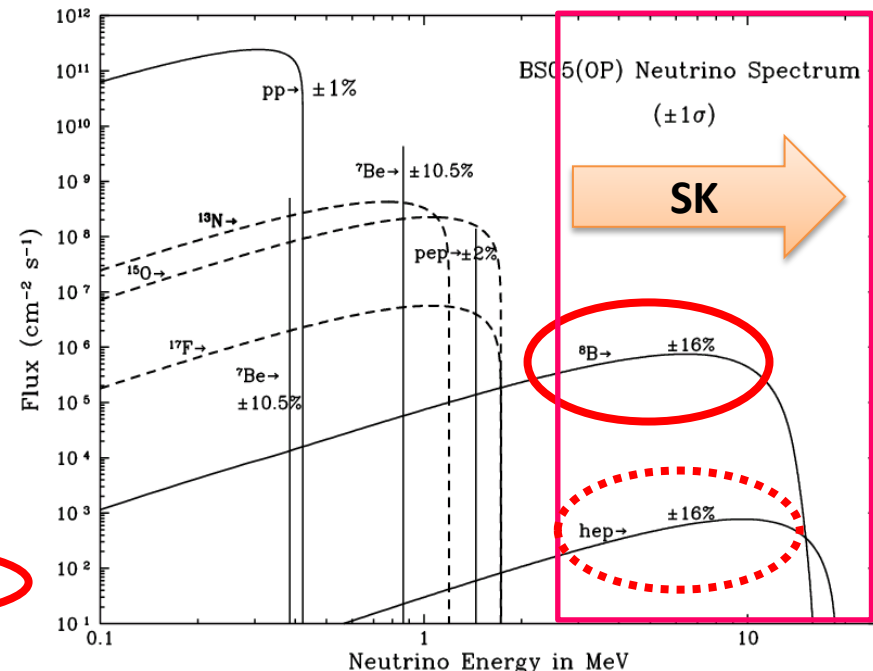
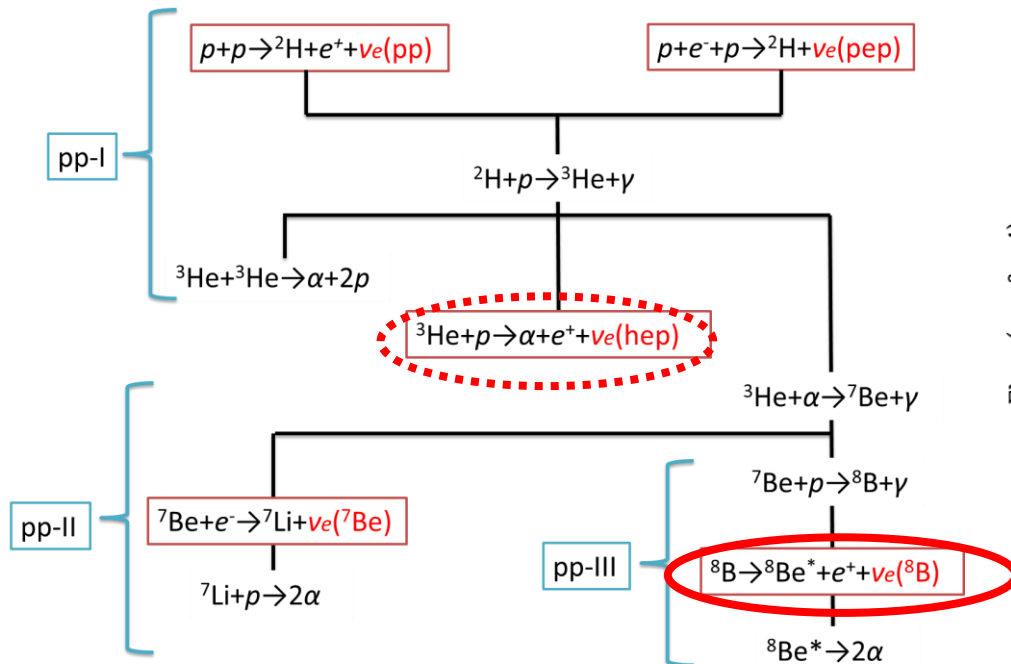


ニュートリノを放出する反応は5種類(CNOを含めるともう少しある)

→ pp, pep, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$, hep

太陽標準模型(SSM)によって、各反応に関するフラックスが予言。

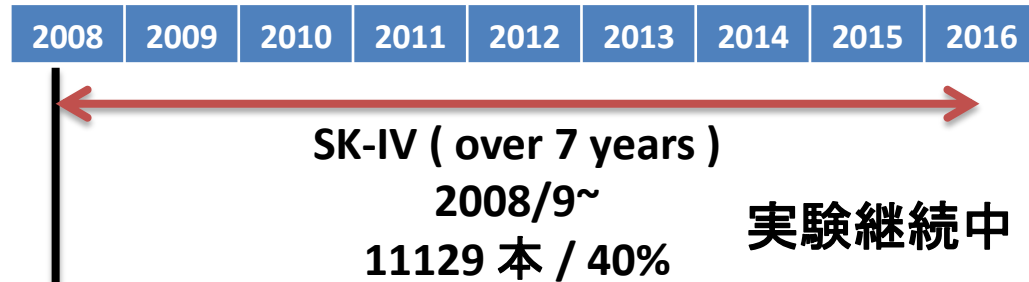
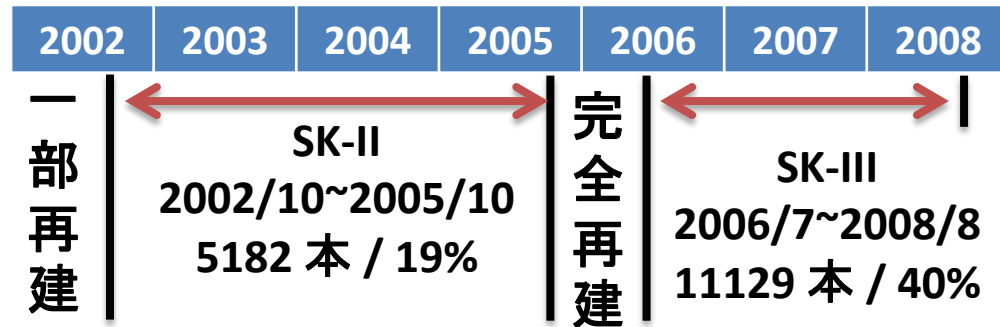
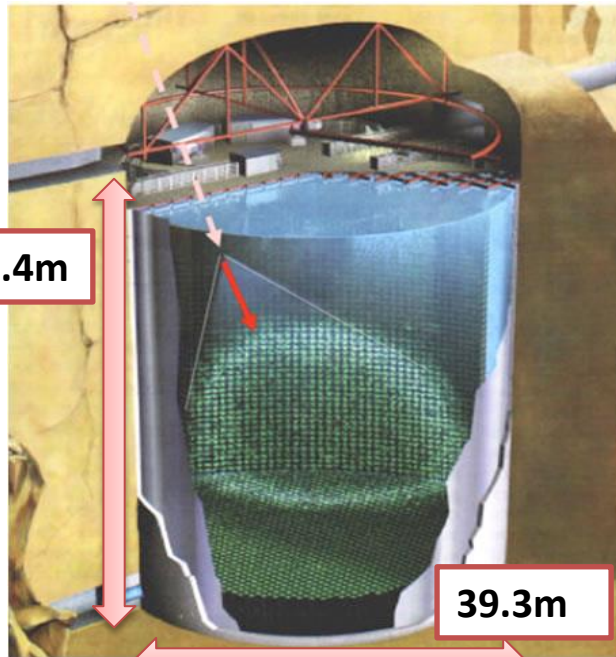
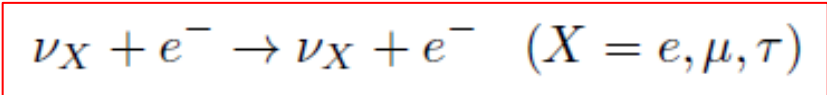
スーパーカミオカンデでは ${}^8\text{B}$ (hep) ニュートリノに感度がある。



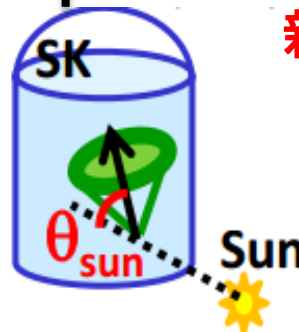
Super Kamiokande 検出器

◆ Super Kamiokande 検出器

- (1) 水チェレンコフ型検出器
→ 50000トンの超純水+13000本のPMT
- (2) 1996年から観測を開始
→ 現在SK-IVとして観測を継続中
- (3) 太陽で生成されたニュートリノと純水中の電子との弾性散乱



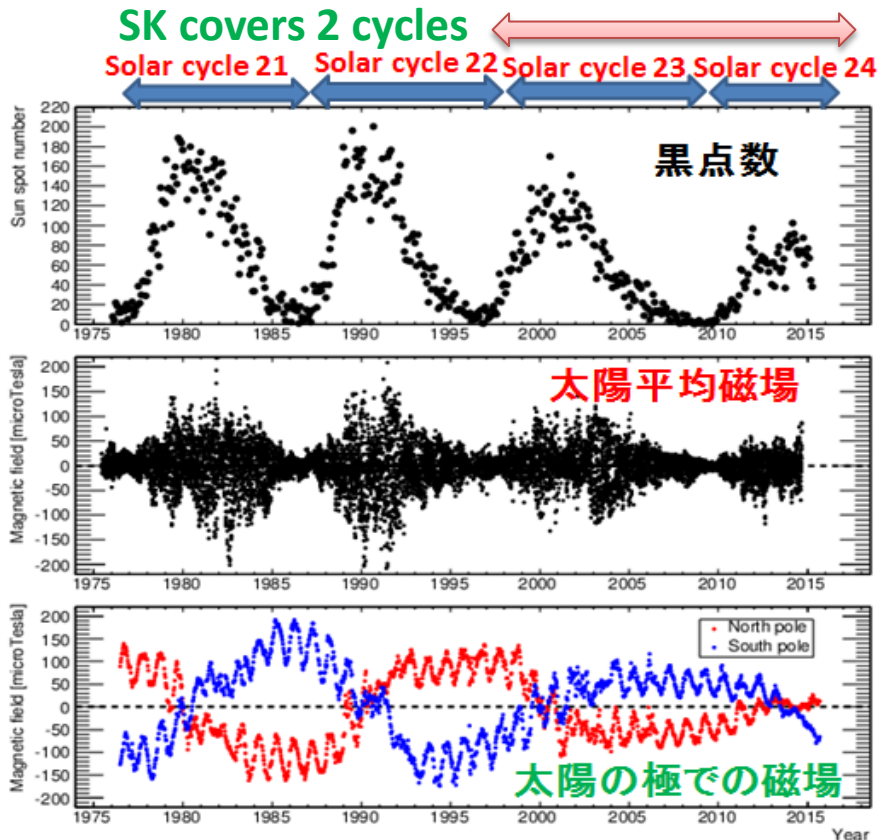
新エレクトロニクスを導入



太陽ニュートリノ観測

◆太陽活動との相関

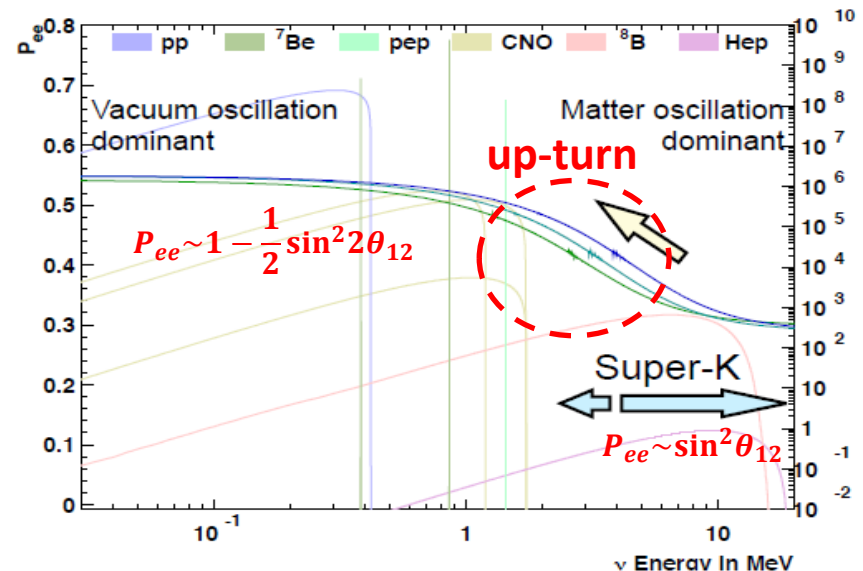
太陽表面の黒点数は11年周期で変動。
太陽磁場の強度は相関している。
太陽ニュートリノはどうか?(右巻ν??)



◆エネルギースペクトラムの歪み

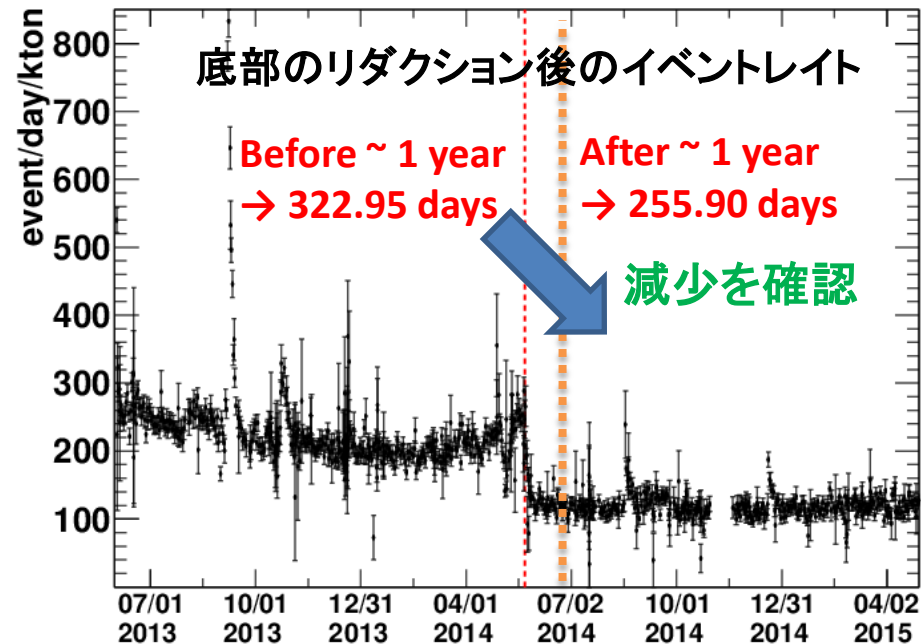
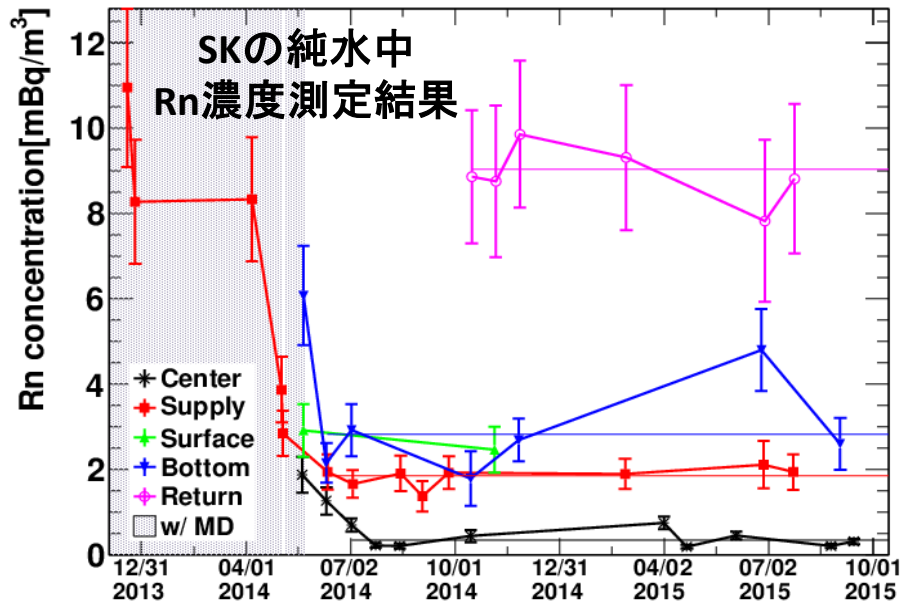
太陽内部の**物質効果**(MSW効果)により、エネルギースペクトルの”**up-turn**”が期待。高エネルギー領域では、電子νの生存確率が減少する。反跳電子の**エネルギー**スペクトル測定→生存確率を反映。

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta + \sqrt{2} G_F N_e & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta & \frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$



最近のSK太陽解析の進展

- 低エネルギー領域でのBGの理解
 - 純水中に含まれるラドンを定量的に評価
 - 純水中のラドンを減らした→イベントレイトが減った。
- 低エネルギー領域のデータ取得の閾値を下げた。
 - ~86% → 99%以上のデータ取得効率 (3.5-4.0 MeV)



SKにおける⁸B太陽ニュートリノ観測

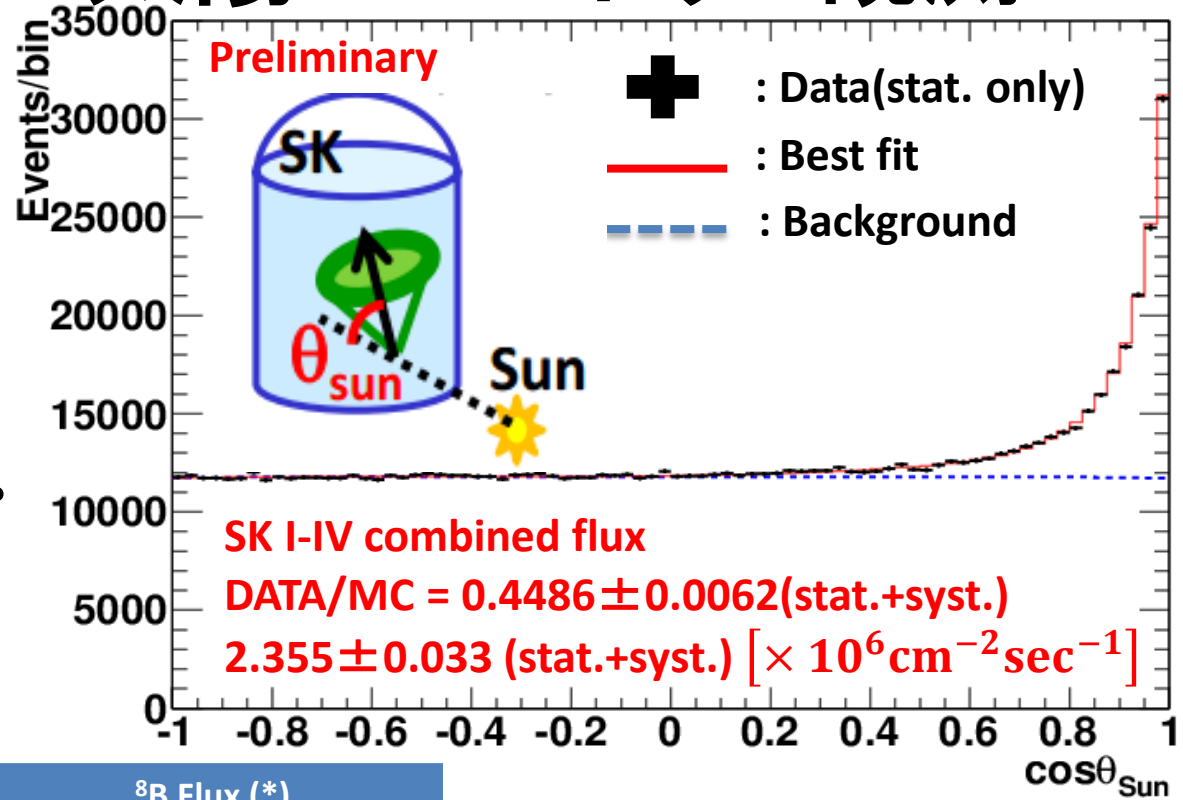
◆⁸B太陽ニュートリノ観測

太陽ニュートリノと電子の弾性散乱

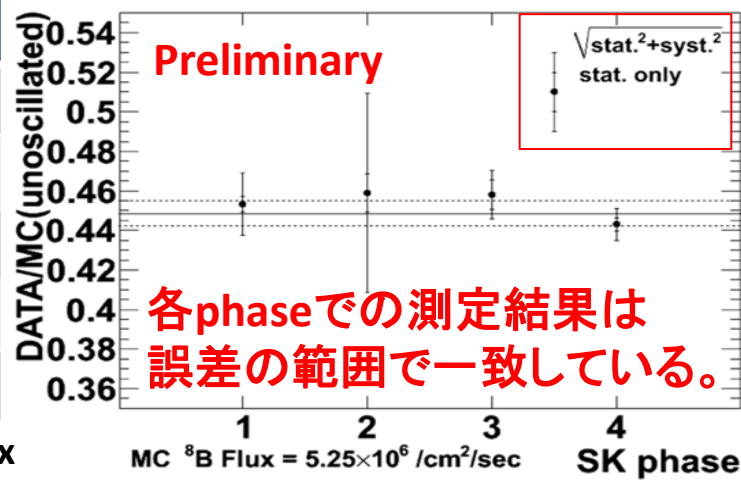
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$

SK-IからSK-IVで継続的に観測。
 これまでに**5200日(約20年)**で、
約84000個のニュートリノを観測。

各フェーズで得られた⁸B Fluxは
 誤差の範囲で一致している。



SK phase	Energy threshold [MeV(kin)]	Live time [day]	⁸ B Flux (*) [× 10 ⁶ /cm ² /sec]
SK I	4.5-19.5	1496	2.38 ± 0.02 ± 0.08
SK II	6.5-19.5	791	2.41 ± 0.05 ^{+0.16} _{-0.15}
SK III	4.0-19.5	548	2.40 ± 0.04 ± 0.05
SK IV	3.5-19.5	2365	2.32 ± 0.02 ± 0.04
Total	-	5200	2.355 ± 0.033 (stat.+syst.)



(*)ニュートリノ振動がないと仮定した場合のFlux

^8B 太陽 ν 観測結果の年次変動

◆解析データの期間

SK稼働後 全5200日

→ 1996年から2015年

(2016年は3ヶ月分しかないので解析に含めず)

→ 1.5 Solar cycle 以上 (23, 24)

◆太陽活動との相関

Flux の測定結果(4.5-19.5 MeV)

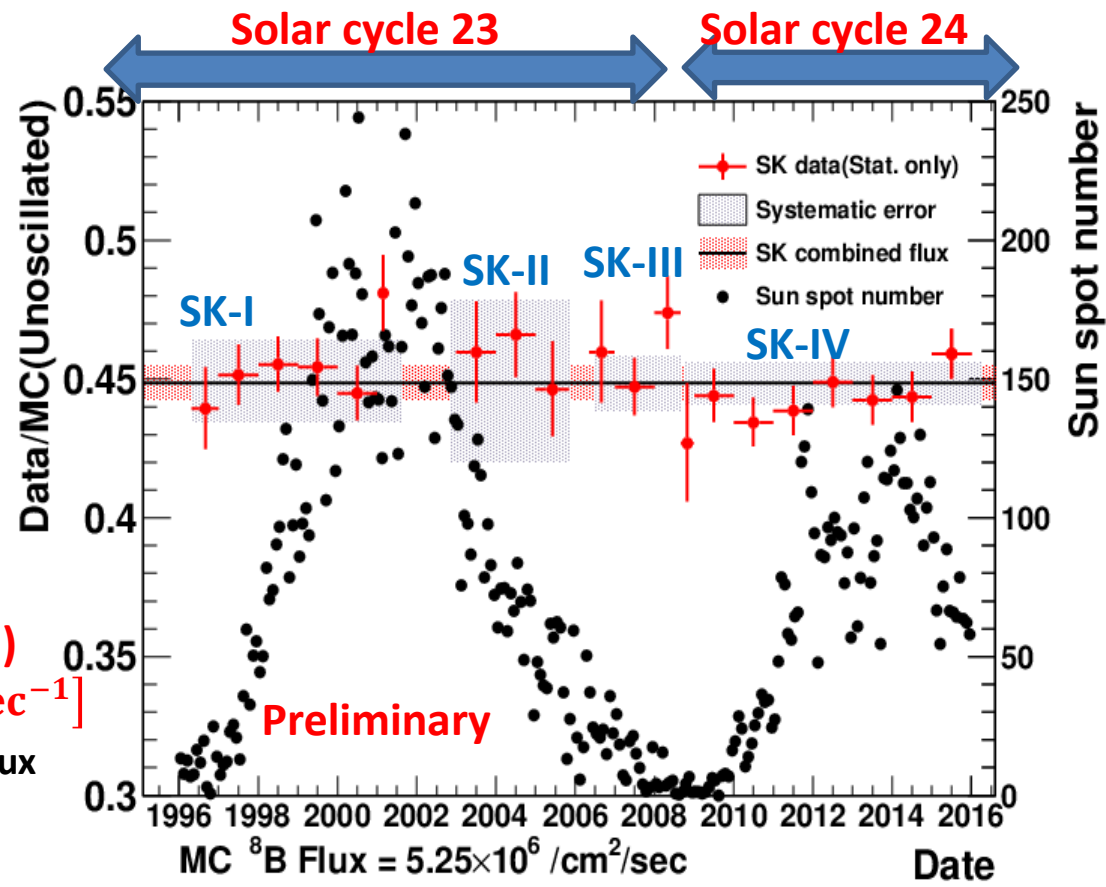
DATA/MC = 0.4486 ± 0.0062 (stat.+syst.)

(*) 2.355 ± 0.033 (stat.+syst.) [$\times 10^6 \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$]

(*)ニュートリノ振動がないと仮定した場合のFlux

$\chi^2 = 15.52/19$ (D. O. F)

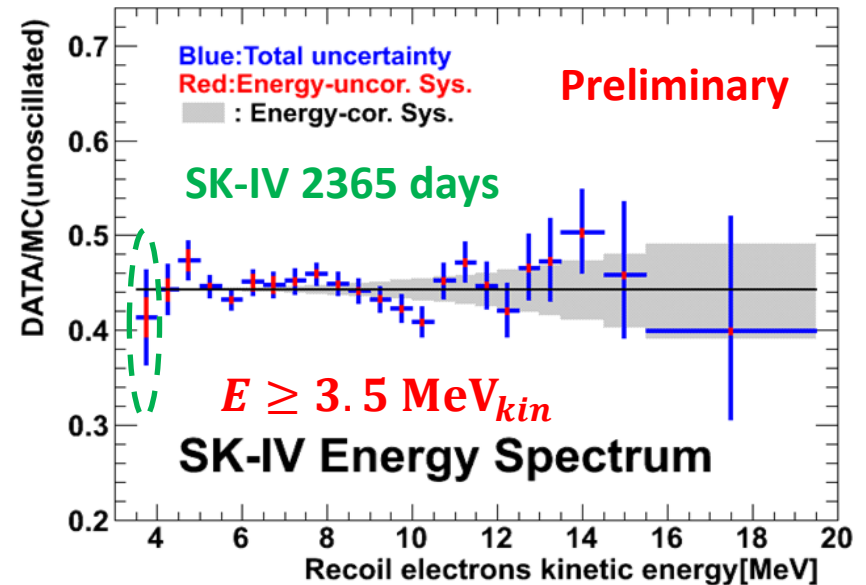
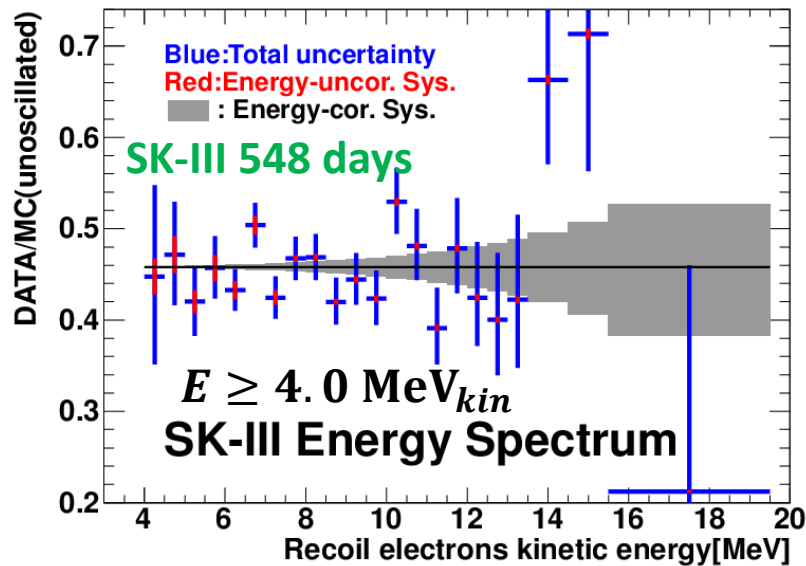
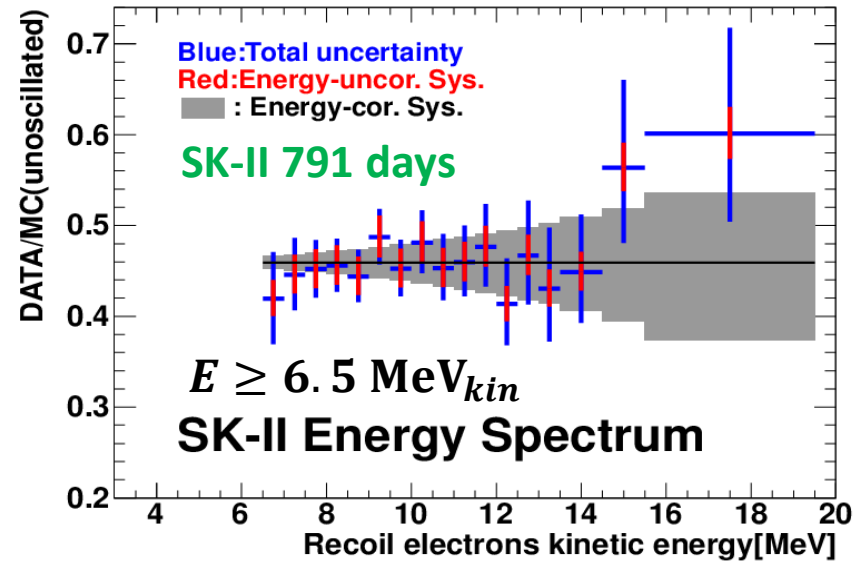
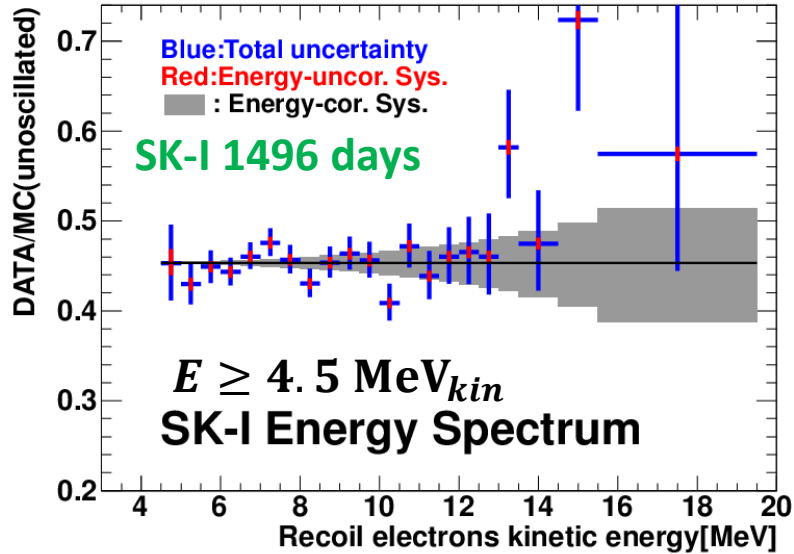
Prob. = 68.9 % Preliminary



SNO: NC current, Phys. Rev. C88 (2013) 025501.

Super-K solar rate measurements are fully consistent with a constant solar neutrino flux emitted by the Sun.

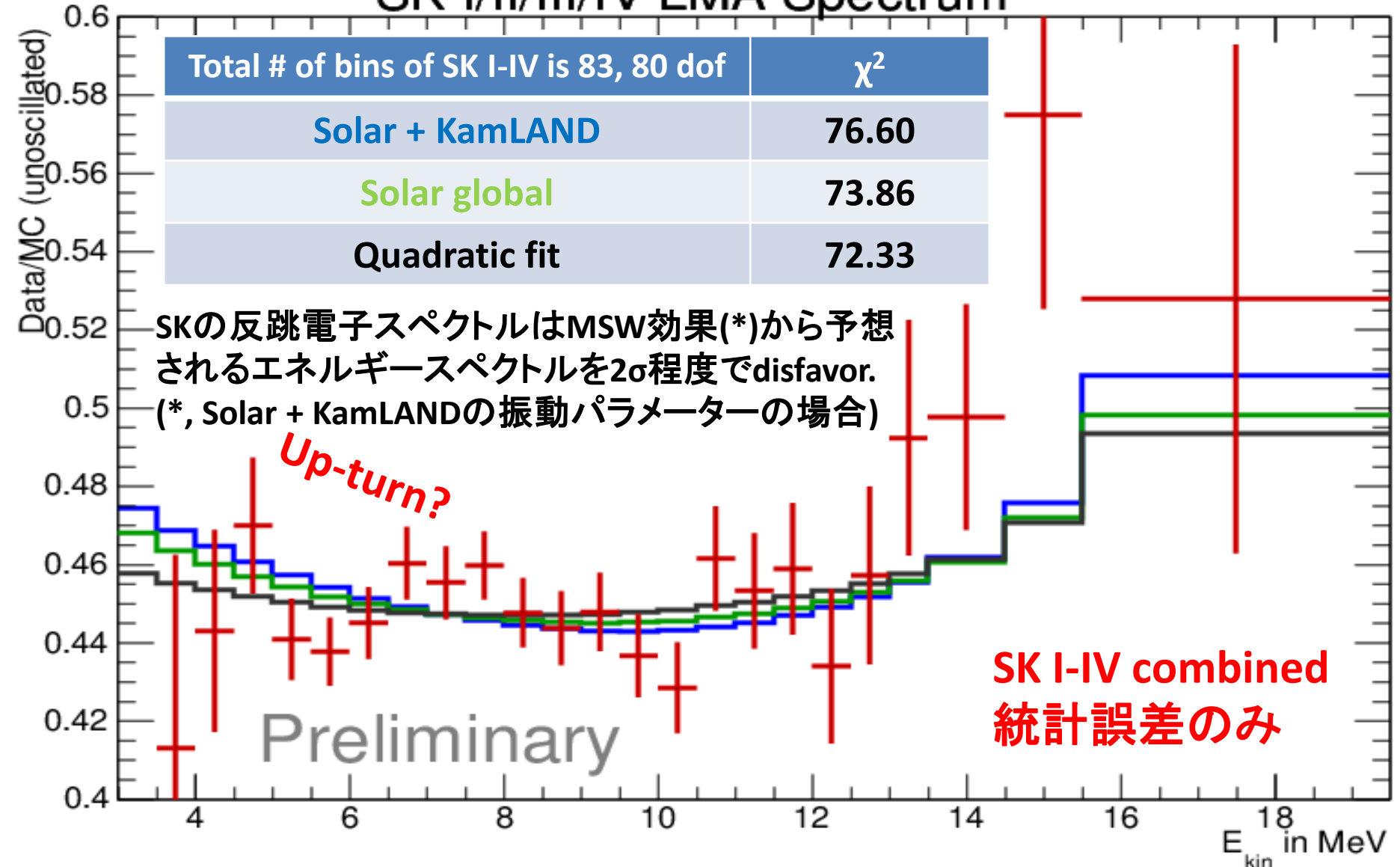
反跳電子のエネルギースペクトル (各phase)



MC: $5.25 \times 10^6 / \text{cm}^2 / \text{sec}$ (SNO: NC current, Phys. Rev. C88 (2013) 025501.)

エネルギースペクトル解析結果(SK I-V combined)

SK I/II/III/IV LMA Spectrum

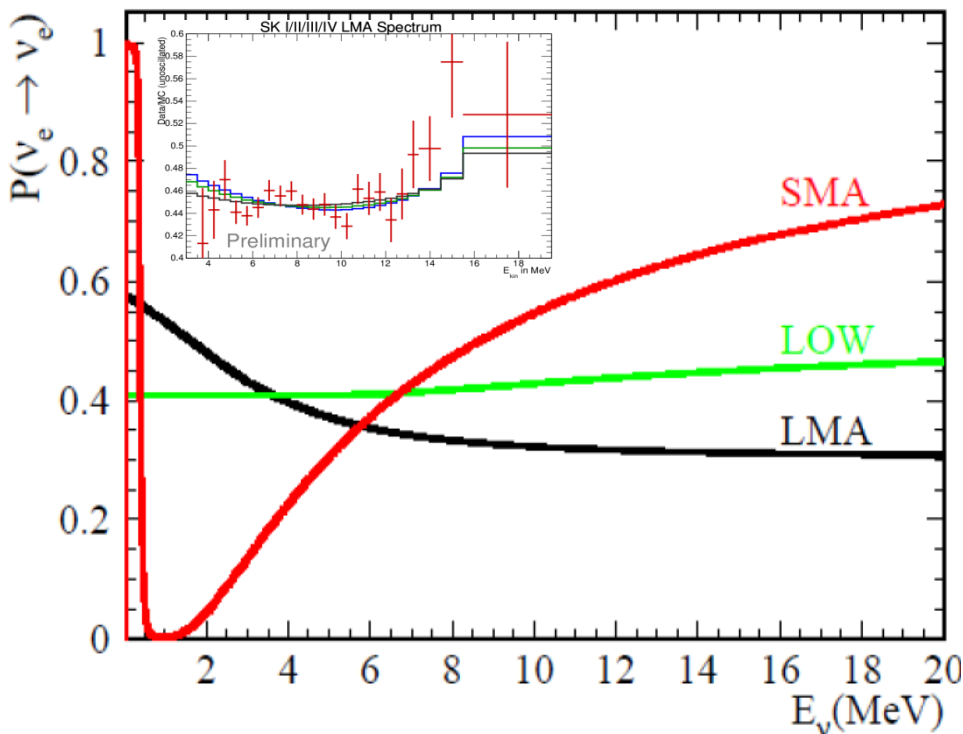


MC: $5.25 \times 10^6/\text{cm}^2/\text{sec}$ (SNO: NC current, Phys. Rev. C88 (2013) 025501.)

生存確率と振動解

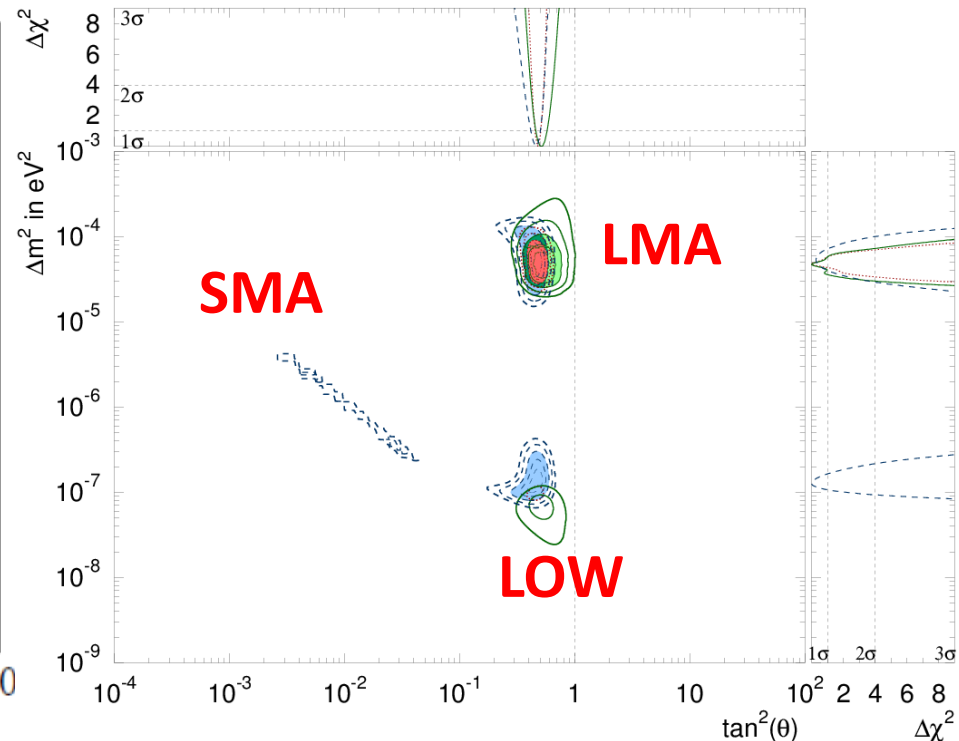
◆生存確率

振動パラメータによって、生存確率(エネルギースペクトラム)の形が異なる。
SMAは特徴的な形を持つので判別が容易だが、LMAと**LOW**は低い領域で誤差を小さくしないと、わかりにくい。

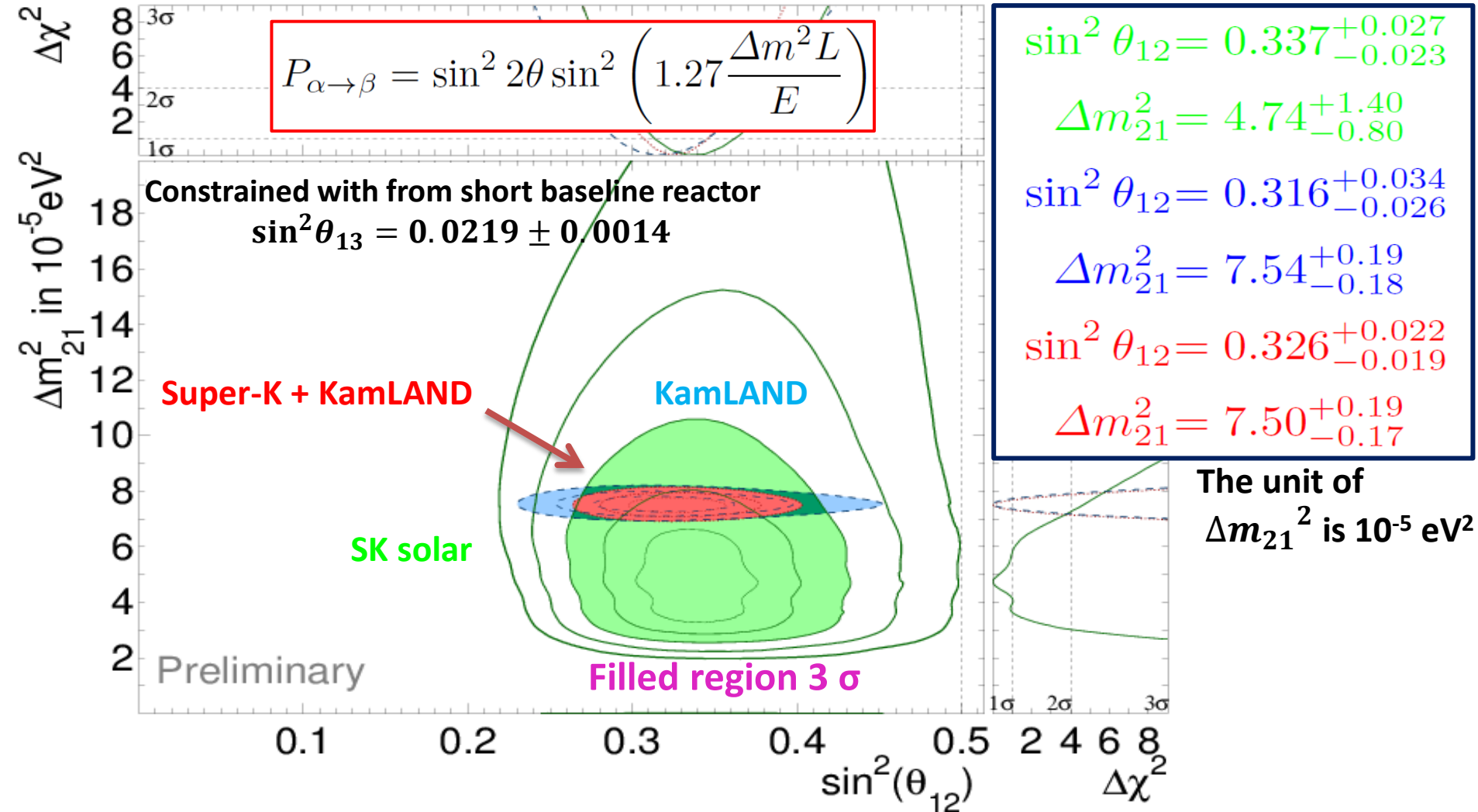


◆振動パラメータの領域

SK(緑)は 3σ でLMA解を選択。
 LOW解は 4σ 以上ではまだ生きている。
SNO実験(青)はSMA解も含めて3種類の解を選べる。

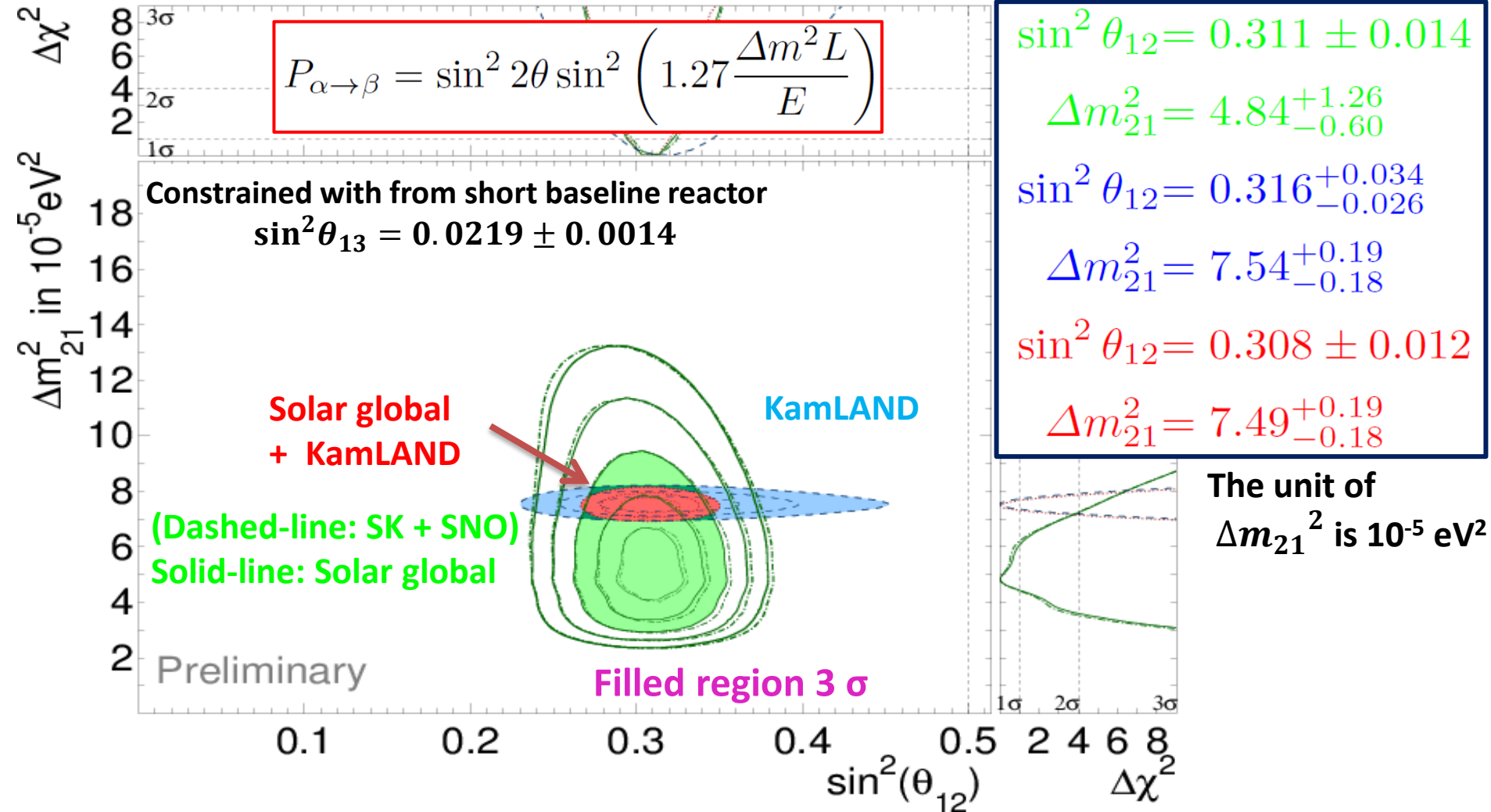


Super-K vs. KamLAND



SKの解析結果→Large Mixing Angle 領域を3 σ 以上で選択。
 ニュートリノ振動の混合角($\sin^2 \theta_{12}$)の決定に大きな貢献。

Solar global vs. KamLAND



電子ニュートリノ(太陽ニュートリノ(緑)) vs. 反電子ニュートリノ(原子炉ニュートリノ(青))
 混合角は良く一致。しかし、質量(2乗)差は2 σ 程度離れている。
 これが合わないと、CPT対称性が破れる。さらなる観測が必要。

まとめ

- 太陽ニュートリノは恒星を知る上で重要な研究課題
- 太陽ニュートリノFluxの測定結果
 - SKの各phase でconsistentな値を得た。
• **Combined result: 2.355 ± 0.033 (stat.+syst.) $\times 10^6$ cm⁻² sec⁻¹.**
 - 太陽表面の黒点変動と太陽内部で生成される電子ニュートリノのFlux測定結果との間を相関を調べた。
 - 両者の間に顕著な相関は見られなかった。
 - **$\chi^2 = 15.52/19$ (D.O.F), Prob = 68.9%.**
- エネルギースペクトラム解析の結果
 - これまでで、最も低いエネルギー領域(3.5-4.0 MeV)の測定を開始した。
 - MSW効果から予測されるスペクトルを**2 σ 程度でdisfavor**。
- 振動解析結果
 - 混合角($\sin^2 \theta_{12}$)の決定に大きく貢献している。
 - $\sin^2 \theta_{12} = 0.308 \pm 0.012$, $\Delta m_{21}^2 = 7.49_{-0.18}^{+0.19}$ eV⁻²を得た。

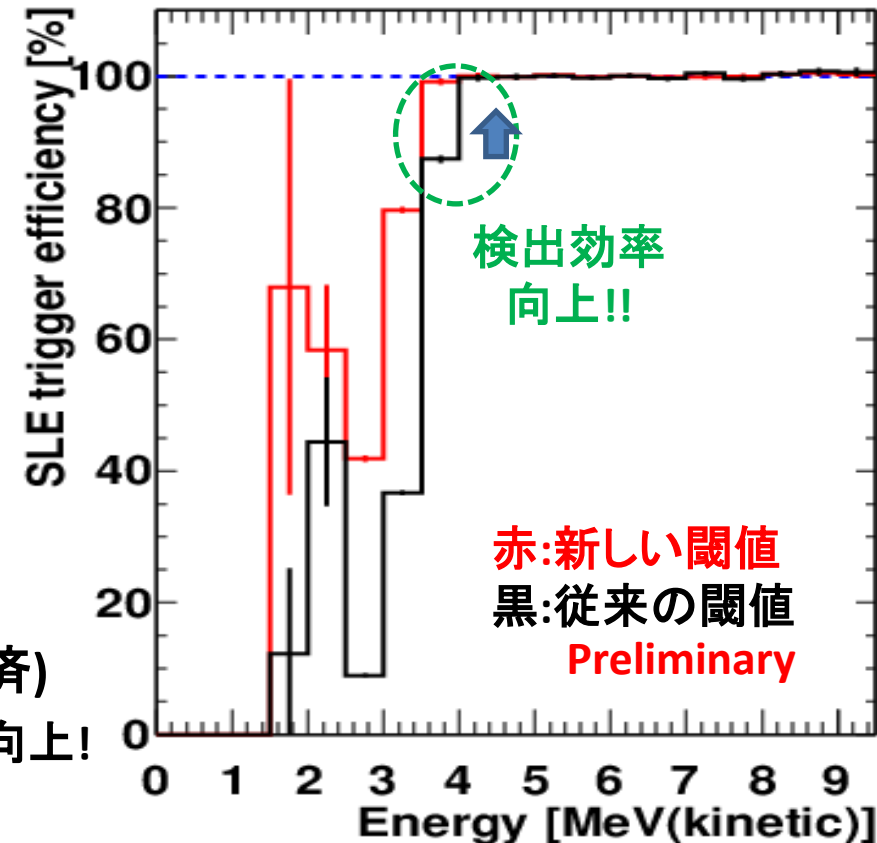
ニュートリノ振動がない
と仮定した場合のFlux

Back

up

SKにおける太陽ニュートリノ解析

- 最近、arXivにpre-printを公表 (Phys. Rev. Dにaccept済)
 - arXiv: 1606.07538 (SK-IV: 1664 days data sample)
- 論文の結果をupdateした内容について報告
 - SK-IV: 2365 days data (2016年3月末まで)
 - ^8B 太陽ニュートリノFlux観測
 - エネルギースペクトル解析
 - 振動解析(時間が無いのでBackup)
- 最近の太陽 ν 解析の進展
 - 太陽活動との相関を見るため
 ^8B flux観測結果の年次変動
 - 2015年5月にイベント取得トリガーの閾値を下げた(2015年秋季学会報告済)
 - 3.5-4.0 MeV_{kin}の領域で検出効率の向上!
~84%→ ~99%



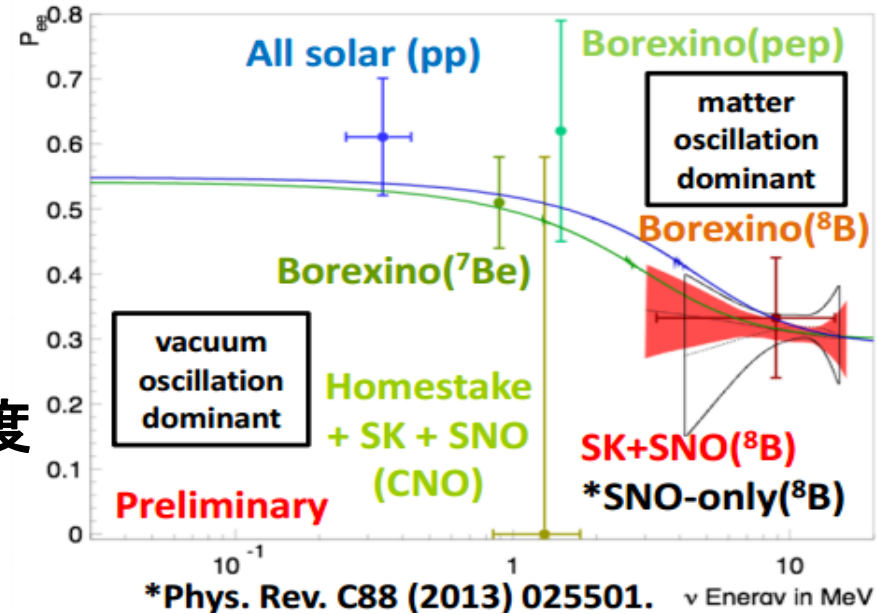
スペクトル解析の今後の展望

◆電子 ν の生存確率

反跳電子のエネルギースペクトルから、
電子ニュートリノの生存確率を求めた。

→遷移領域では**生存確率に関して最も強い制限**を得た。

しかし、MSW効果を確認するほどの精度には足りていない。



◆今後どうするか

測定の精度を向上させるため、

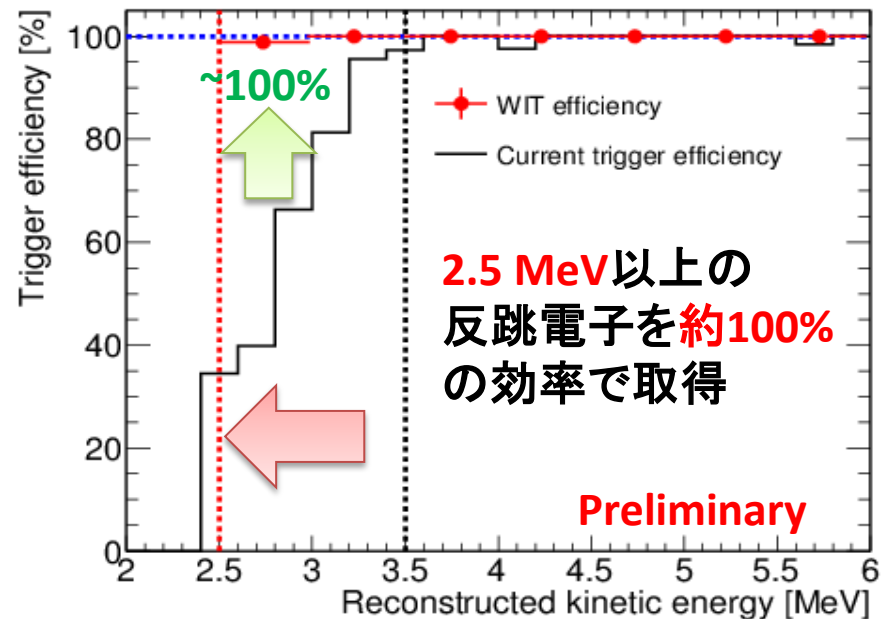
(1) **統計**を増やす+解析の系統誤差を小さく。

→ 縦軸方向への感度の向上

(2) イベントの**エネルギー閾値**を下げる

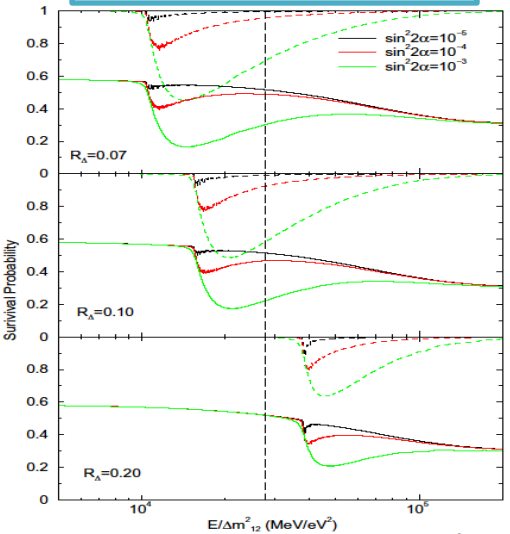
→ 横軸方向への感度の向上

WIT (Wide-Intelligent-Trigger) systemを導入
エネルギー閾値**2.5 MeV**で**観測**を開始した!
世界最高感度でMSW効果の探索を行う。

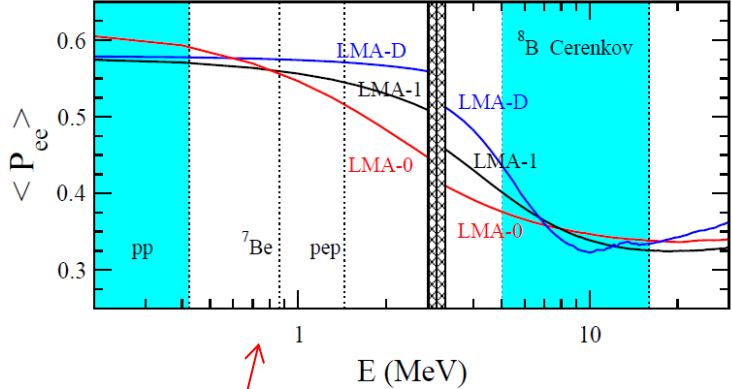


Non-standard models to predict flat spectrum

Sterile neutrino



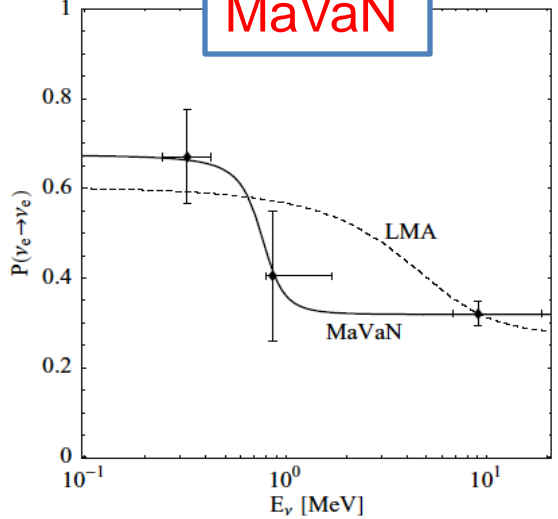
$R_{\Delta} \equiv \frac{\Delta m_{01}^2}{\Delta m_{21}^2}$ Holanda and Smirnov, Phys.Rev.D69(2004)113002. (hep-ph/0307266)



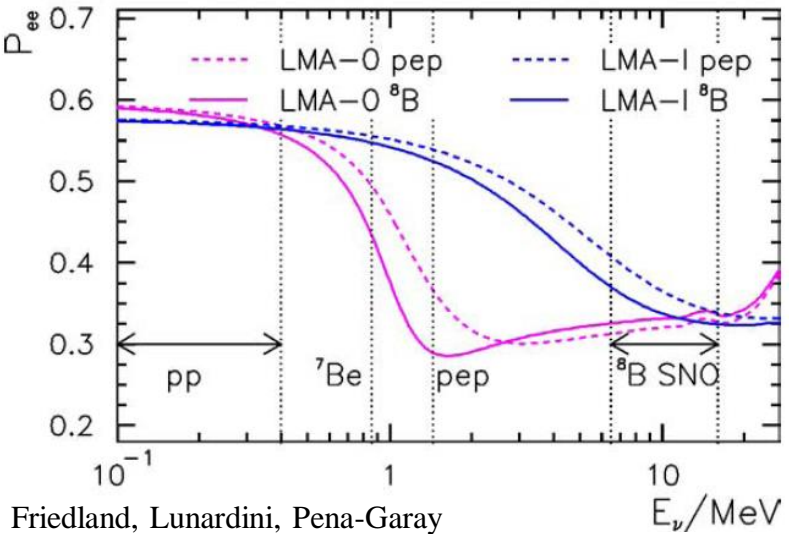
Miranda, Tortola and Valle, JHEP 0610:008,2006. (hep-ph/0406280)

Non standard Interaction

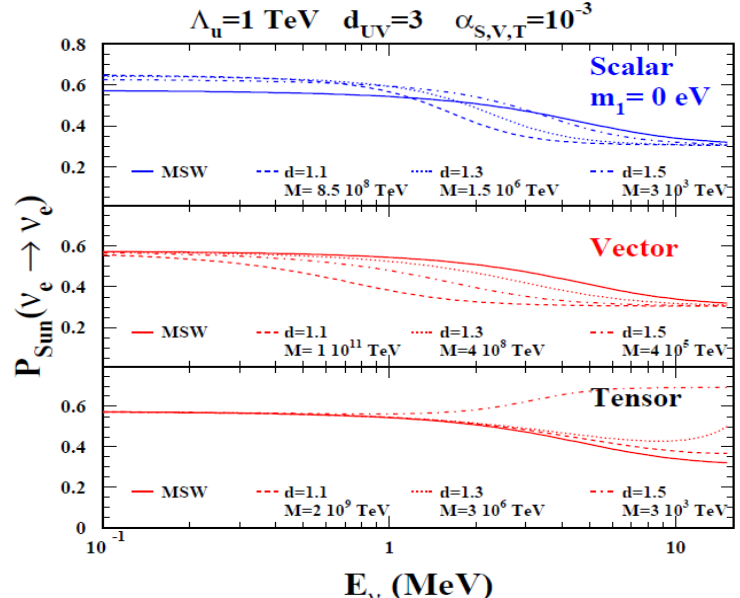
MaVaN



Barger, Huber and Marfatia, Phys.Rev.Lett.95:211802,2005 (hep-ph/0502196)



Friedland, Lunardini, Pena-Garay PLB594(2004)347(hep-ph/0402266)



Gonzalez-Garcia, Holanda, Zukano vich, Funchal, JCAP 0806:019,2008. (hep-ph/0803.1180)

Unparticle

振動解析

◆SKにおける χ^2 の定義

SKの4つのphaseで独立に計算。

(1)スペクトルによるfit

統計+(エネルギー-相関のない)系統誤差 エネルギー-相関のある系統誤差

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{bin}}} [d_i - (\beta b_i + \eta h_i)] \times \frac{f(E_i, \delta_B, \delta_S, \delta_R)}{\sigma_i^2} + \delta_B^2 + \delta_S^2 + \delta_R^2$$

$$d_i = \frac{D_i}{B_i + H_i}$$

$$b_i = \frac{B_i^{\text{osc}}}{B_i + H_i}$$

$$h_i = \frac{H_i^{\text{osc}}}{B_i + H_i}$$

ニュートリノシグナル

^8B 振動有/振動無 ν シグナル

Hep振動有/振動無 ν シグナル

B: ^8B ν のスペクトラムの形

S: E scale

R: E resolution

それぞれに関連する関数

(2)時間変動による χ^2 の補正

$$\Delta\chi_{\text{time}}^2 = -2(\log \mathcal{L} - \log \mathcal{L}_{\text{time}})$$

太陽 ν シグナルを
抽出するlikelihoodに
時間的な変動を考慮。

(3)Fluxに関する χ^2 の補正

$$\frac{(\beta - 1)^2}{\sigma_{\Phi_{^8\text{B}}}} + \frac{(\eta - 1)^2}{\sigma_{\Phi_{\text{hep}}}}$$

β : ^8B SNO NCの結果で制限
 η : hepをSSM04の予想で制限

フリーパラメーター

$$\beta, \eta, \delta_x \quad (x = B, S, R)$$

Global oscillation analysis input Page. 20

◆ SK

- SK-I 1496 days, Spectrum : 4.5-19.5MeV(kin.) + D/N : $E_{kin} \geq 4.5\text{MeV}$
- SK-II 791 days, Spectrum : 6.5-19.5MeV(kin.) + D/N : $E_{kin} \geq 7.0\text{MeV}$
- SK-III 548 days, Spectrum : 4.0-19.5MeV(kin.) + D/N : $E_{kin} \geq 4.5\text{MeV}$
- SK-IV 2365 days, Spectrum : 3.5-19.5MeV(kin.) + D/N (1664 days) : $E_{kin} \geq 4.5\text{MeV}$

◆ SNO

- Parameterized analysis (c0,c1,c2,a0,a1) of all SNO phased published in Phys. Rev. C88 (2013) 025501.

arXiv: 1606.07538.

Updated from PRL 112 (2014) 091805.

The same method is applied to both SK and SNO with a_0 and a_1 to LMA expectation.

◆ Radiochemical (Ga, Cl)

- Ga rate 66.1 ± 3.1 SNU (All Ga global), Phys. Rev. C80 (2009) 015807.
- Cl rate 2.56 ± 0.23 SNU, Astrophys. J. 496 (1988) 505.

◆ Borexino

- ^7Be flux, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 141302. Does NOT include Borexino pp 2014. Nature 512 (2014) 383.

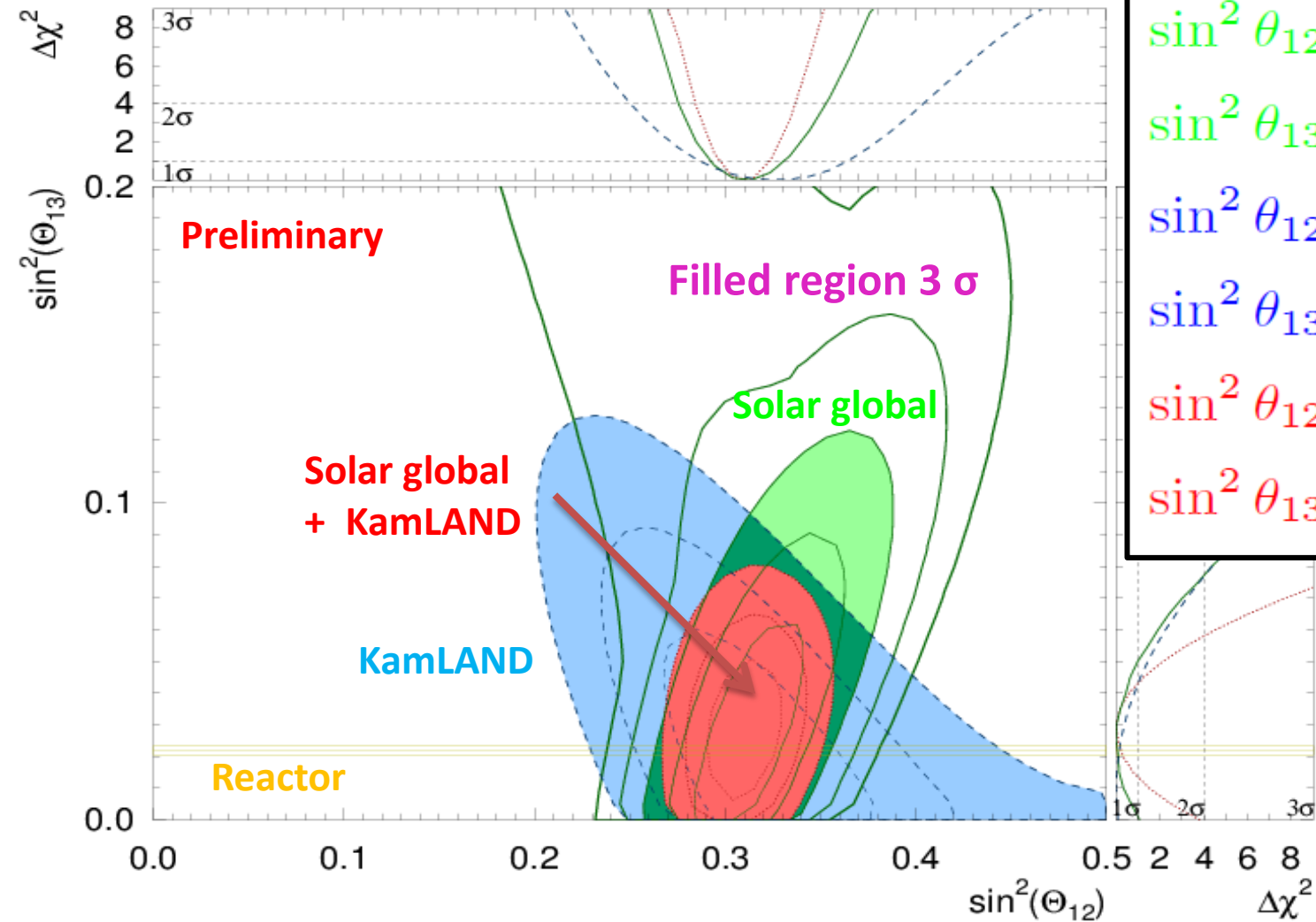
◆ KamLAND reactor

- 3-flavor analysis , Phys. Rev. D88 (2013) 033001.

◆ ^8B spectrum

- Winter 2006, Phys. Rev. C73 (2006) 025503.

3-flavor oscillation analysis



$$\sin^2 \theta_{12} = 0.311^{+0.022}_{-0.017}$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.027^{+0.025}_{-0.027}$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.316^{+0.034}_{-0.026}$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.010^{+0.033}_{-0.034}$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.310^{+0.014}_{-0.013}$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.029^{+0.014}_{-0.015}$$

これまで原子炉(short-base line)による混合角($\sin^2 \theta_{13}$)を制限して解析をしたが、この制限を除くと3-flavor振動解析も行える。2 σ 程度でnon-zeroの値を得た。

Tight Fiducial volume

3.5-4.0 MeV

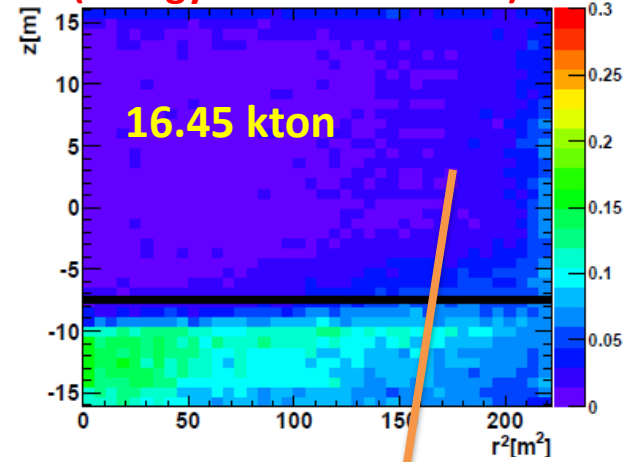
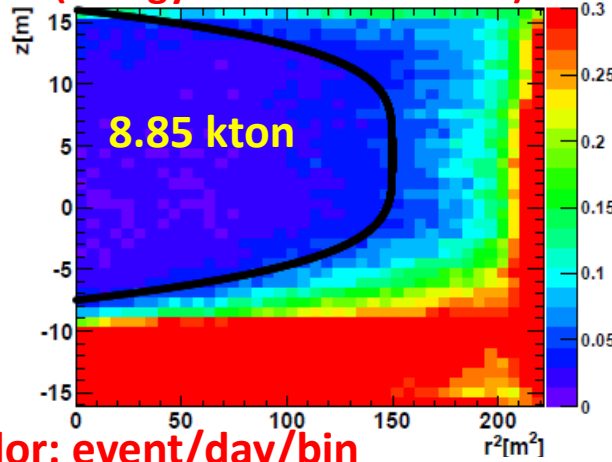
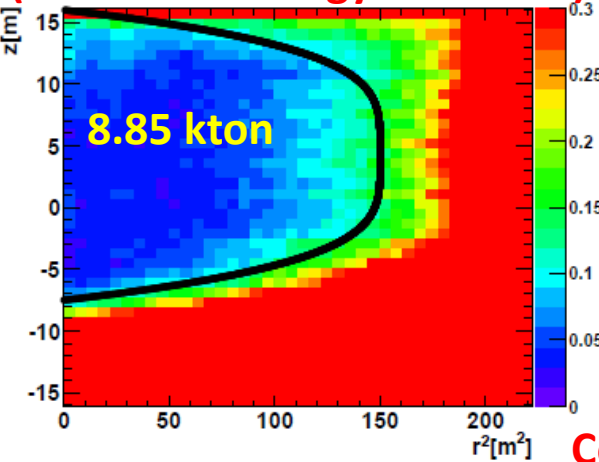
4.0-4.5 MeV

4.5-5.0 MeV

(SK-IV new energy threshold)

(energy threshold in SK-III)

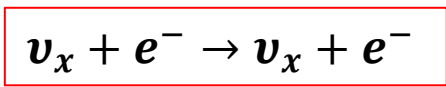
(energy threshold in SK-I)



Color: event/day/bin

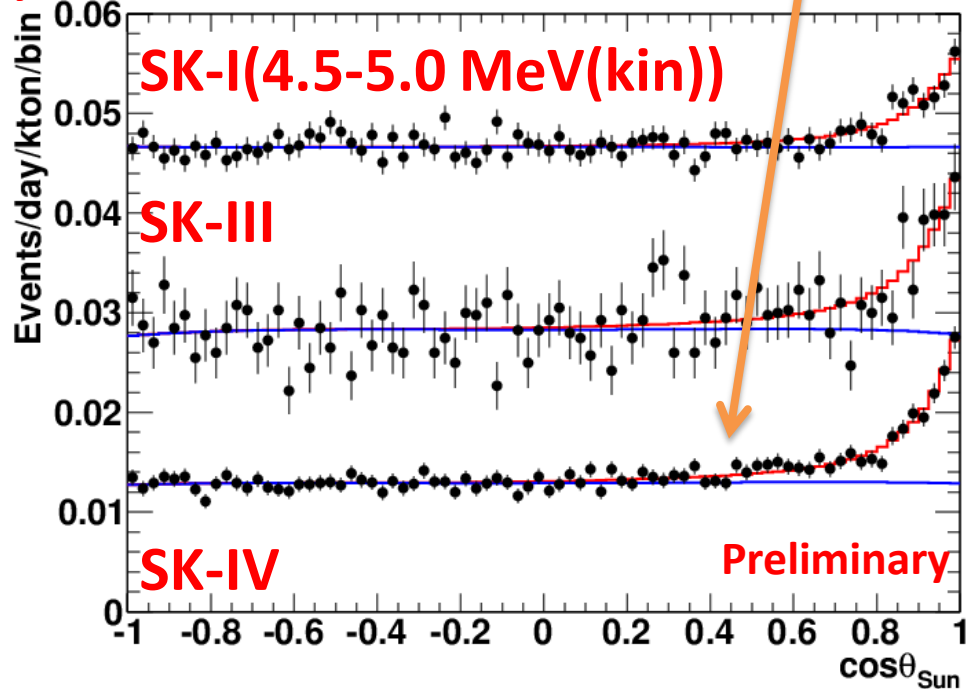
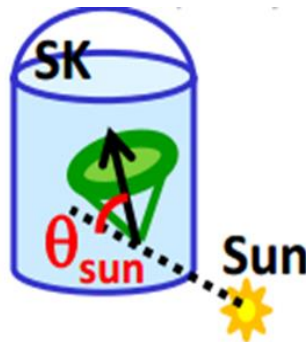
◆ solar ν observation

Elastic scattering



Solar neutrino signals are seen around $\cos\Theta_{\text{sun}} = 1$.

Background event → Other direction ($\cos\Theta_{\text{sun}} < 0$)



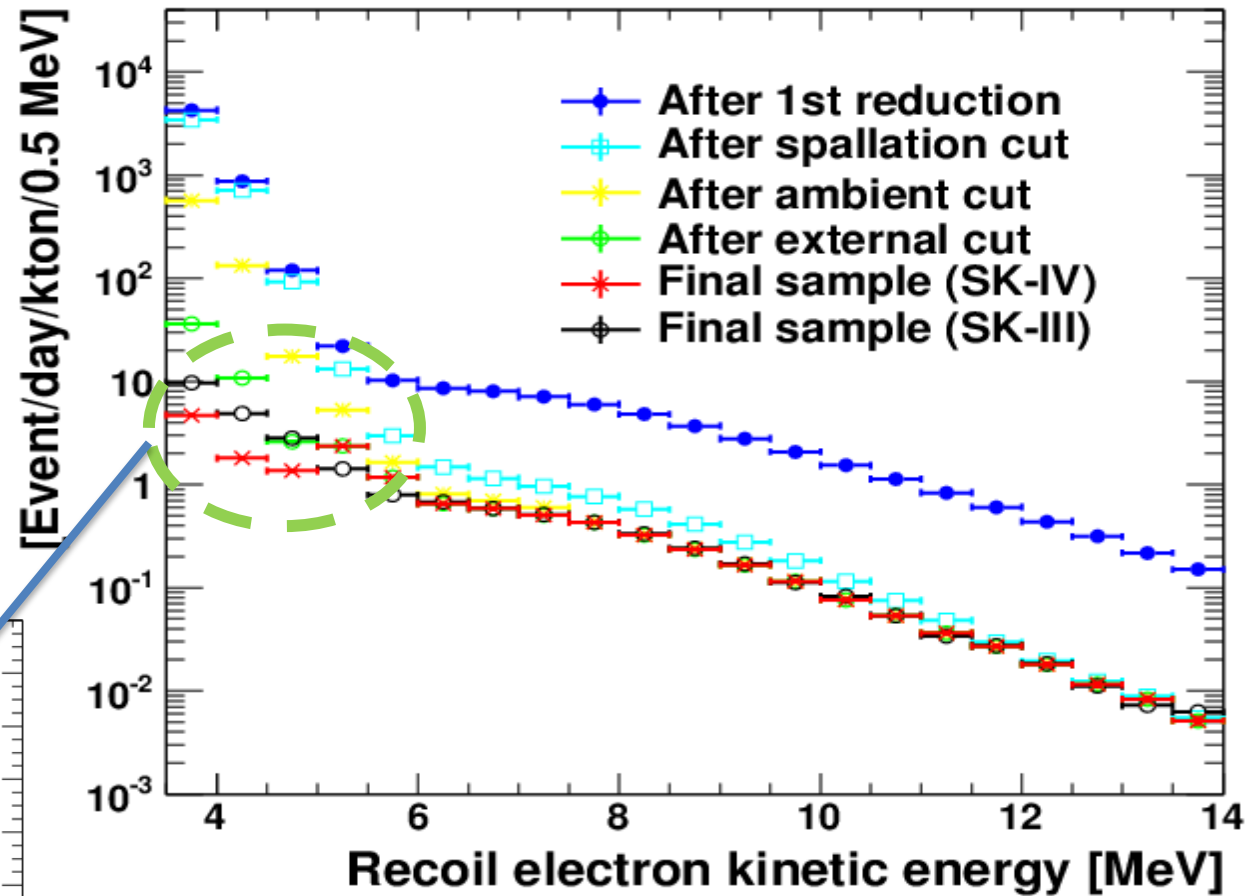
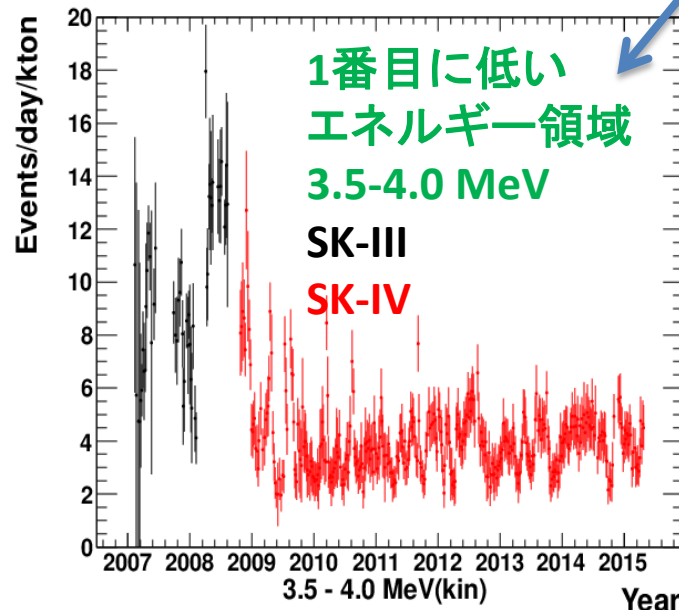
データリダクション後のイベント数

◆SK-IVでの進展

低エネルギー領域で、
BGを抑えることに成功

結果的に、イベント数は
1/2 ~ 1/3 程度まで抑えた。

各カットによる系統誤差は
MCを用いて見積もった。



1st reduction: 基本的なカット

Spallation: 宇宙線ミュオンによる核破碎のBGをカット

Ambient: fitting のqualityやringのパターンによるカット

External: 外部放射線によるBGをカット

Final sample: Tight FV 後の最終的な太陽イベントサンプル

Bypass前後の変化

◆ r^2 分布

底部のイベントレイトは減少。
 r^2 分布でイベントレイトの変化をみた。

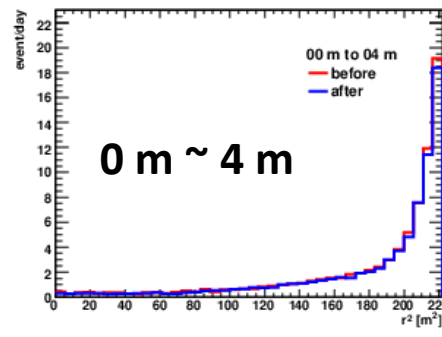
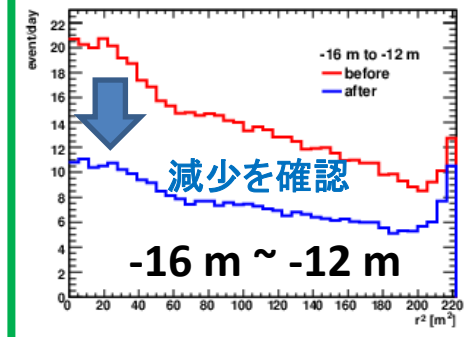
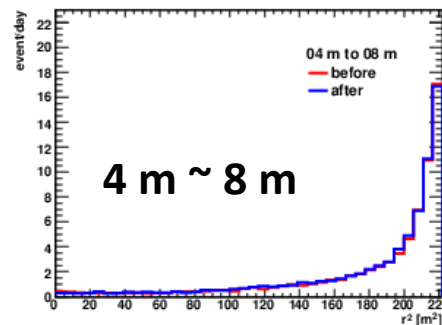
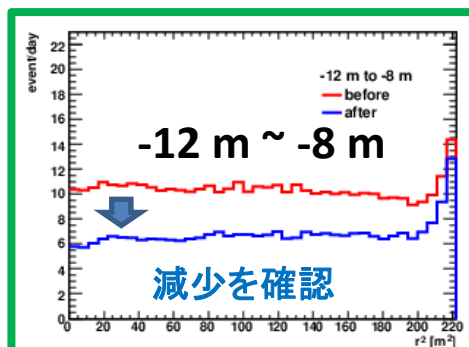
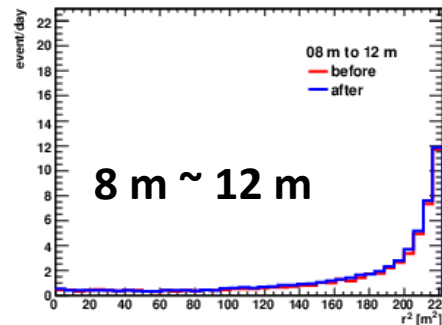
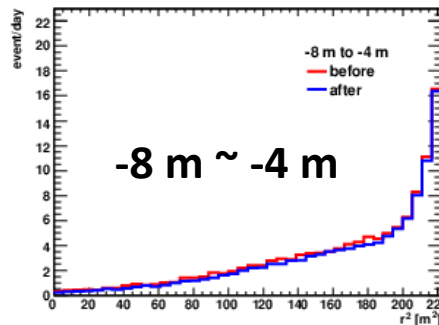
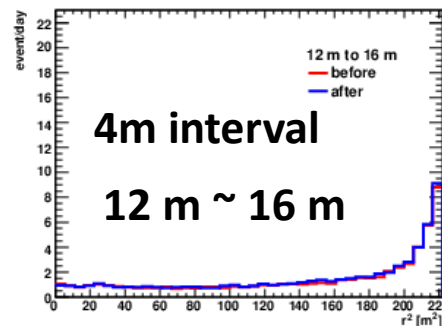
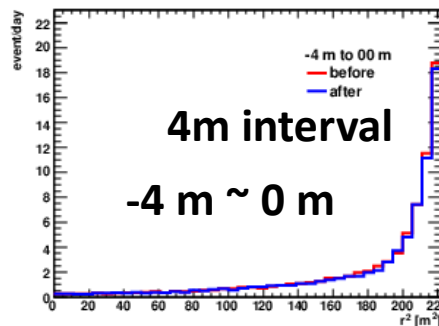
赤色 : Bypass前のイベント分布
青色 : Bypass後のイベント分布

$z < -8\text{m}$ の領域では、
イベント分布に大きな違いあり。
 $z > -8\text{m}$ の領域では、
イベント分布に変化なし
→送水起源の R_n は崩壊している...

◆壁際での超過

$r^2 > 140$ ($r > \sim 12\text{m}$)の領域(壁付近)
→ 明らかな超過が見える。

SKの構造体(PMT, FRP)起源のラドン?



太陽活動

◆太陽活動の周期的な変動

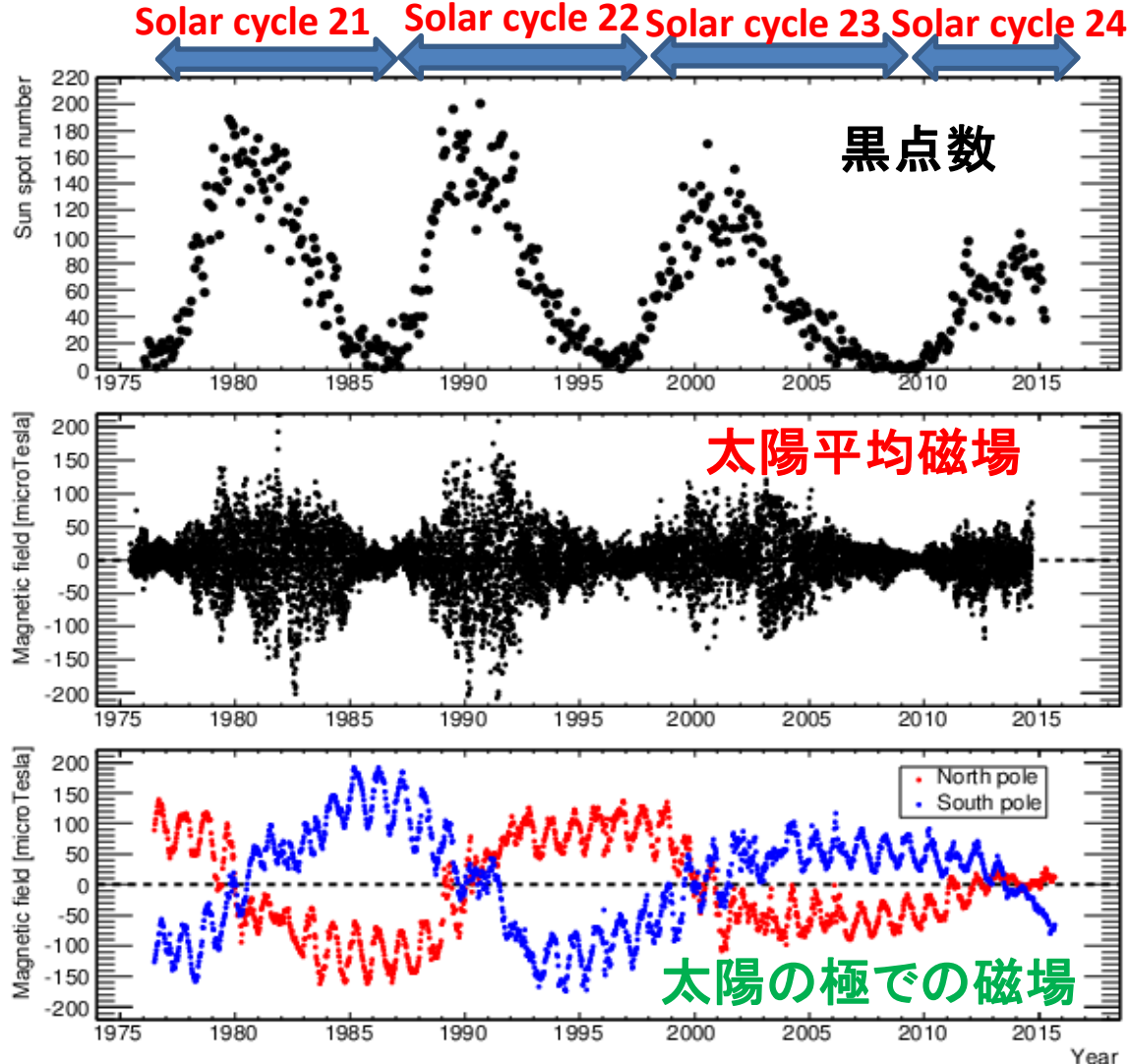
太陽活動は約11年周期をもつ。
 現在は Solar cycle 24 の途中。
 Solar cycle 24 は活発ではない。
 →表面の黒点数が少ない。

◆黒点数と磁場の相関

黒点は太陽表面で局所的に
 強磁場 (~ 0.3 T) を発生。

黒点数が最大になるときに、
 太陽の平均磁場も最大。
 → 強い相関を持つ。

太陽ニュートリノ Flux は
 太陽活動と相関を持つか？



http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt

http://wso.stanford.edu/meanfld/MF_timeseries.txt

<http://wso.stanford.edu/Polar.html>

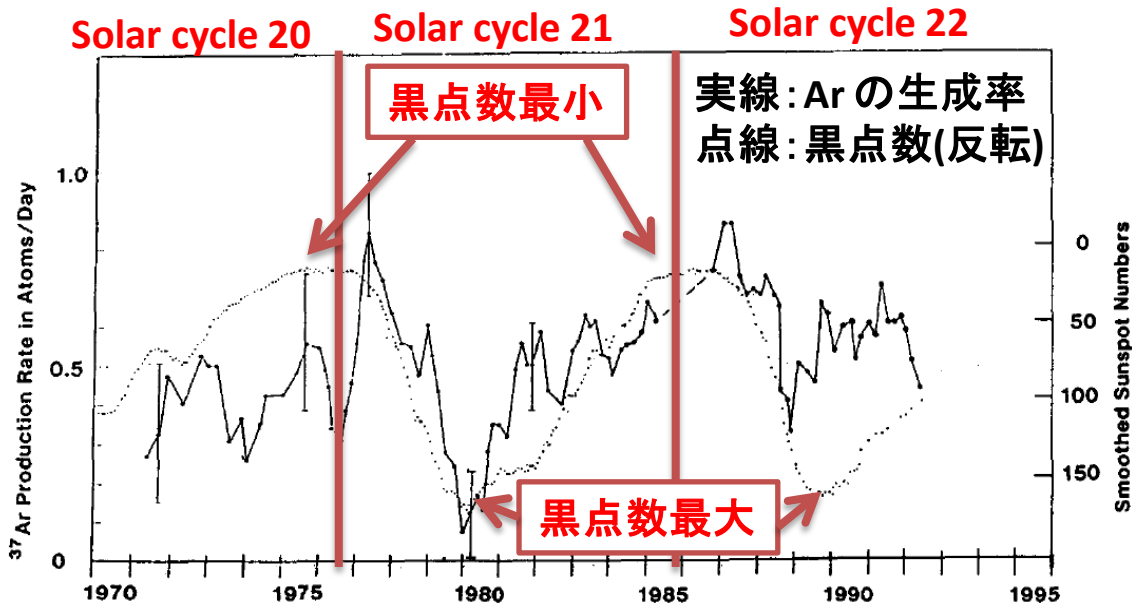
過去の実験結果

◆Homestake実験

Ar の生成率が黒点数と**反相関**を持っていると報告。
 黒点数が最小の時に、Ar の生成率が最大。
 その傾向を約 3 cycle の期間で確認 (cycle 20, 21, 22)。

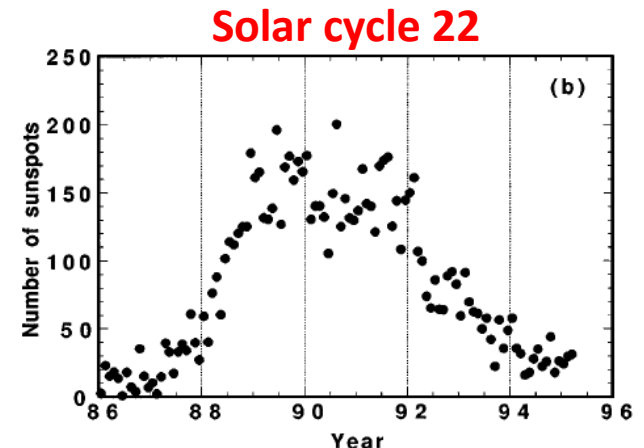
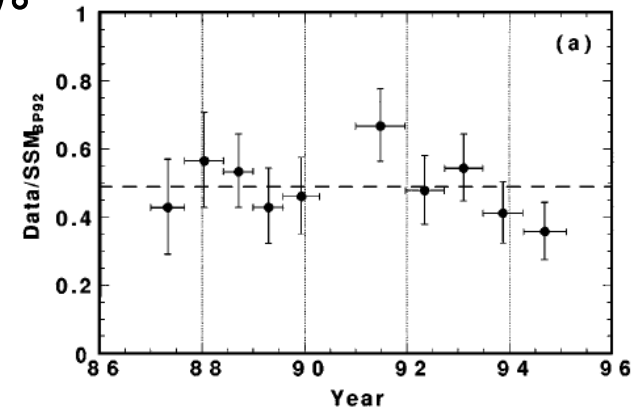
◆KAMIOKANDE実験

Solar cycle 22 の期間に観測→相関は無い。



R. Davis *et al.* Prog. Nucl. Part. Phys.,
 32 (1994) 13

KAMIOKANDE結果



Y. Fukuda *et al.* Phys. Rev. Lett.,
 77 (1996) 1683

理論的な背景

◆歴史的な経緯

Homestake 実験の結果を説明するために、いくつかのモデルが提案。

☆A. Cisneros, *Astrophys. Sp. Sci.* 10, 87 (1971)

☆M.B. Voloshin, M.I. Vysotskii, L.B. Okun, *Sov. Phys. JETP* 64, 446 (1986)

◆ニュートリノの磁気能率

(Dirac 型) 左巻きニュートリノ → 右巻きニュートリノ の spin flip。

$$P(\nu_L \rightarrow \nu_R) = \sin^2(\mu_{\nu_e} B L \sin \phi)$$

大きな磁気能率を持つと、Homestake 実験の結果を説明できる。

$$\mu_{\nu_e} \sim 1 \times 10^{-10} \mu_B$$

実験的にはGEMMA実験により、以下のような制限がつけられている。

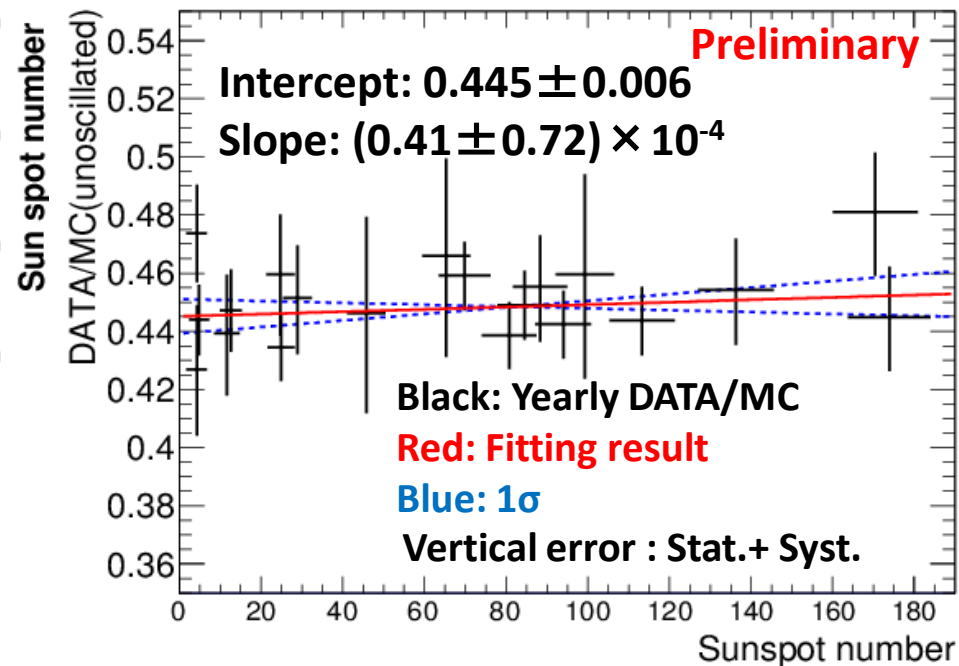
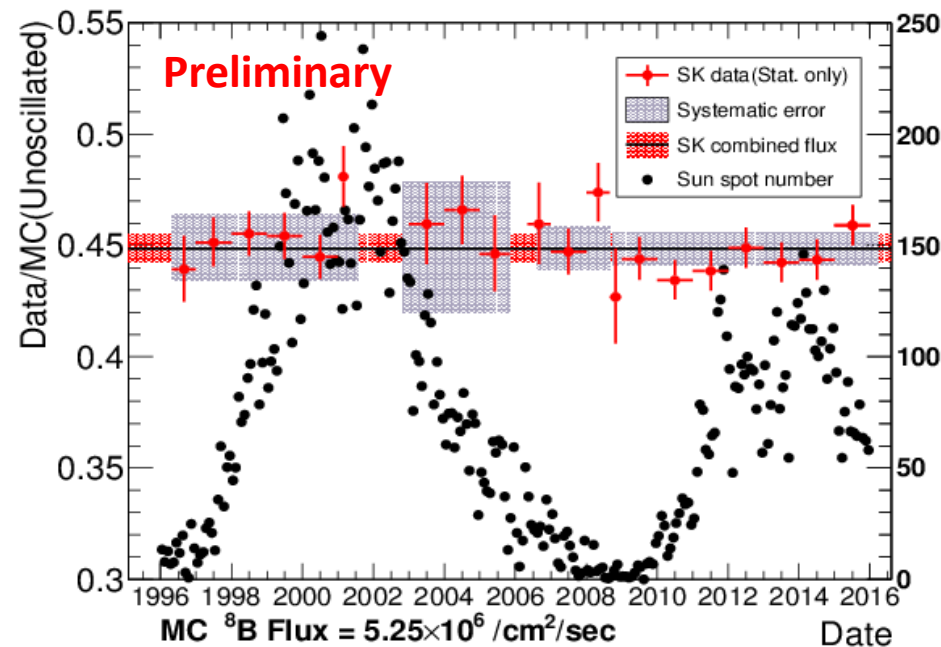
$$\mu_{\nu} < 2.9 \times 10^{-11} \mu_B \text{ (90\% C.L.)}$$

☆A.G. Beda et al., *Adv.High Energy Phys.* 2012 (2012) 350150

Does sunspot number affect the solar ^8B flux?

To check the stability of the observed ^8B solar neutrino flux,
The flux vs the sun spot number is evaluated.

Since the value of slope is consistent with 0,
no significant correlation is observed using 20-years SK data.



New : <http://www.sidc.be/silso/datafiles>

Sun spot number, Source: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels

研究の流れ(Day/Night flux asymmetry)

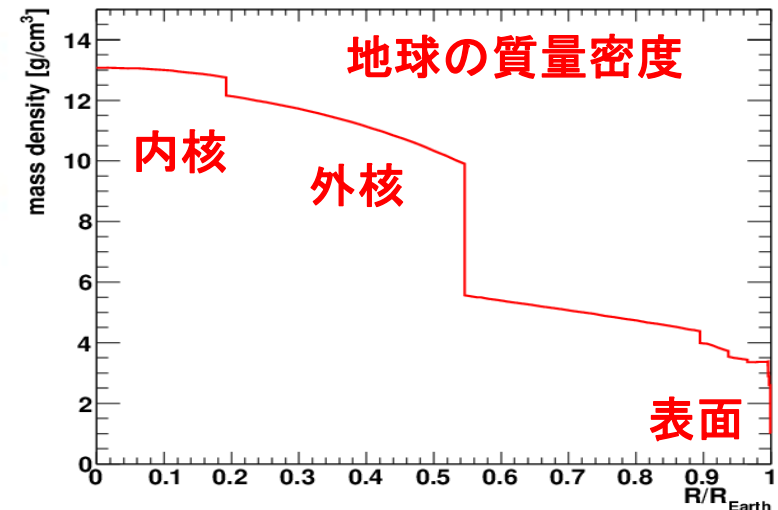
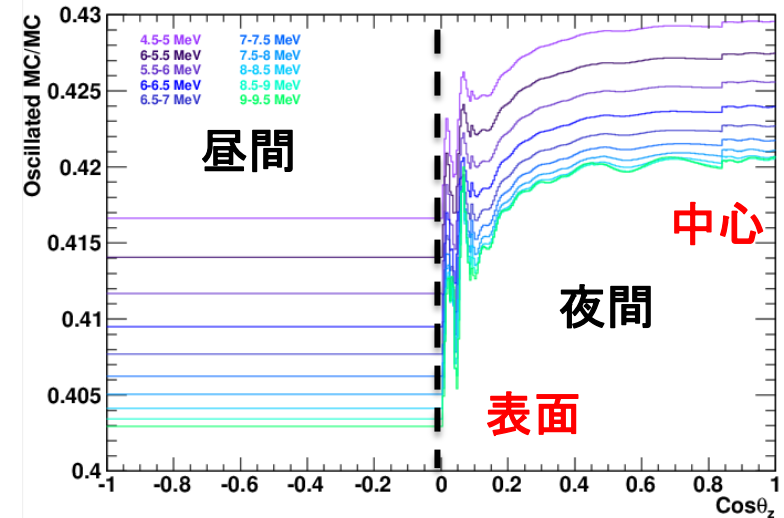
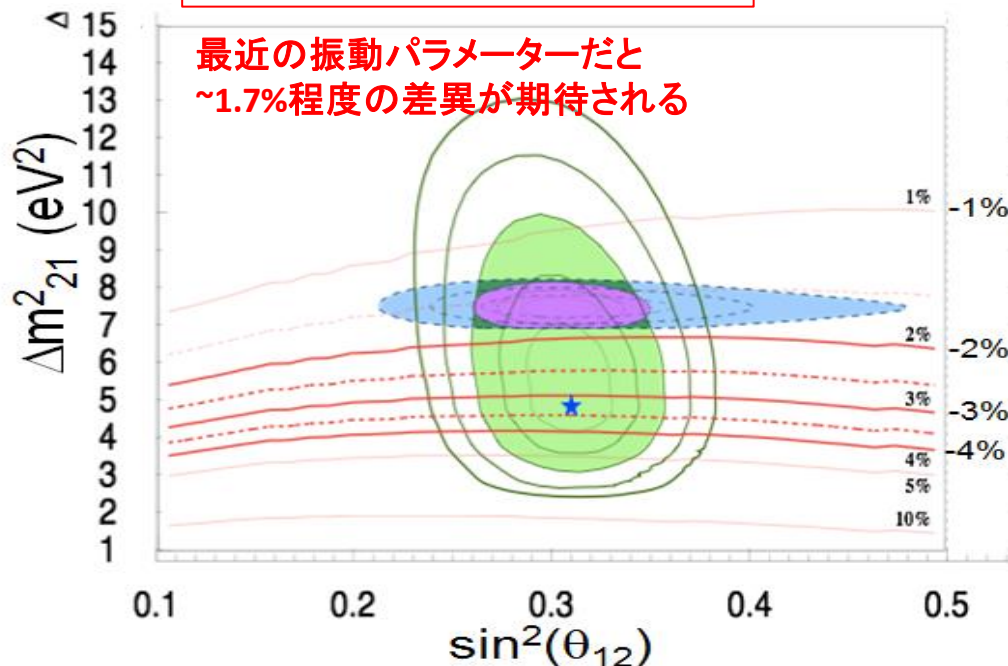
◆物質効果の直接観測

物質効果によって期待される「太陽νフラックスの昼夜変動」

昼は真空(宇宙空間)中を伝搬

夜は地球の電子密度で、
物質効果の影響を受ける。

$$A_{\text{DN}} = \frac{\Psi^{\text{day}} - \Psi^{\text{night}}}{(\Psi^{\text{day}} + \Psi^{\text{night}})/2}$$



Day-Night Asymmetry

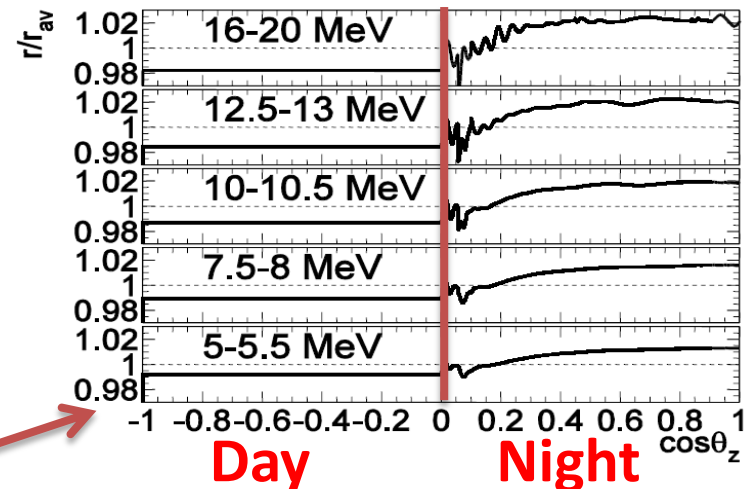
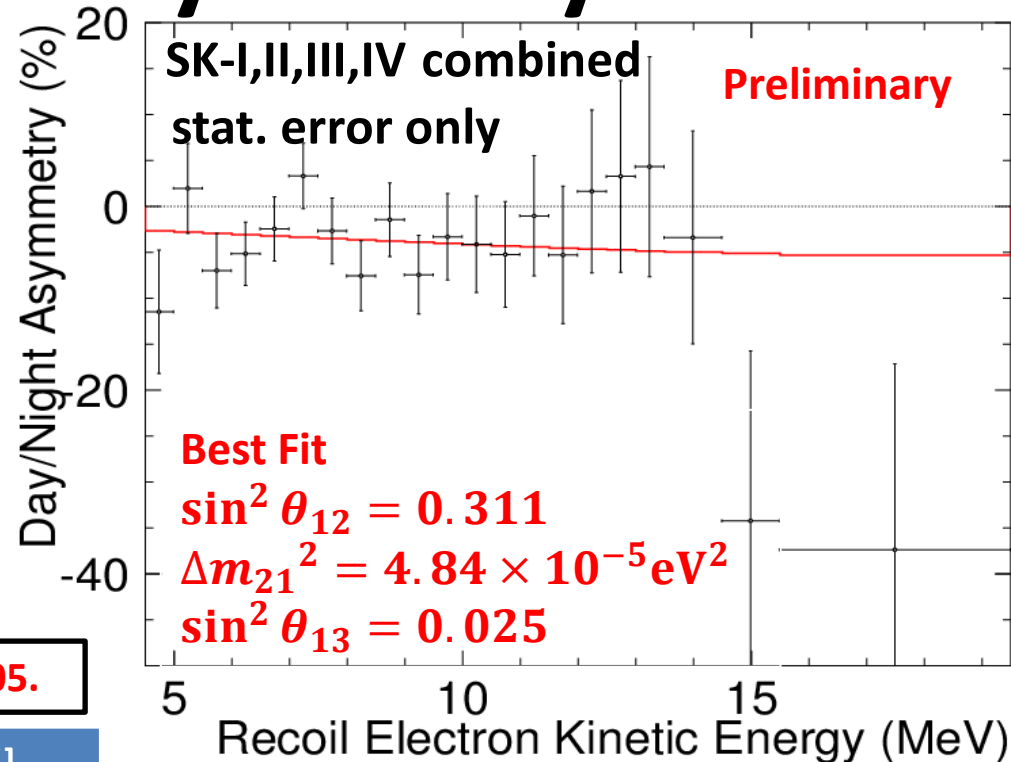
Day-Night asymmetry is expected to be $\sim 3\%$ in the SK energy region.

$$A_{\text{DN}} = \frac{\Psi_{\text{day}} - \Psi_{\text{night}}}{(\Psi_{\text{day}} + \Psi_{\text{night}})/2}$$

SK confirms a higher solar neutrino flux at night than during the day. This is a **“direct” indication** for matter enhanced neutrino oscillation.

Updated from Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 091805.

SK-phase	Amplitude fit [%]	Straight calc. [%]
SK-I	$-2.0 \pm 1.8 \pm 1.0$	$-2.1 \pm 2.0 \pm 1.3$
SK-II	$-4.3 \pm 3.8 \pm 1.0$	$-5.5 \pm 4.2 \pm 3.7$
SK-III	$-4.2 \pm 2.7 \pm 0.7$	$-5.9 \pm 3.2 \pm 1.3$
SK-IV	$-3.6 \pm 1.6 \pm 0.6$	$-4.9 \pm 1.8 \pm 1.4$
Combined	$-3.3 \pm 1.0 \pm 0.5$ (3.0σ from zero)	$-4.1 \pm 1.2 \pm 0.8$ (2.8σ from zero)



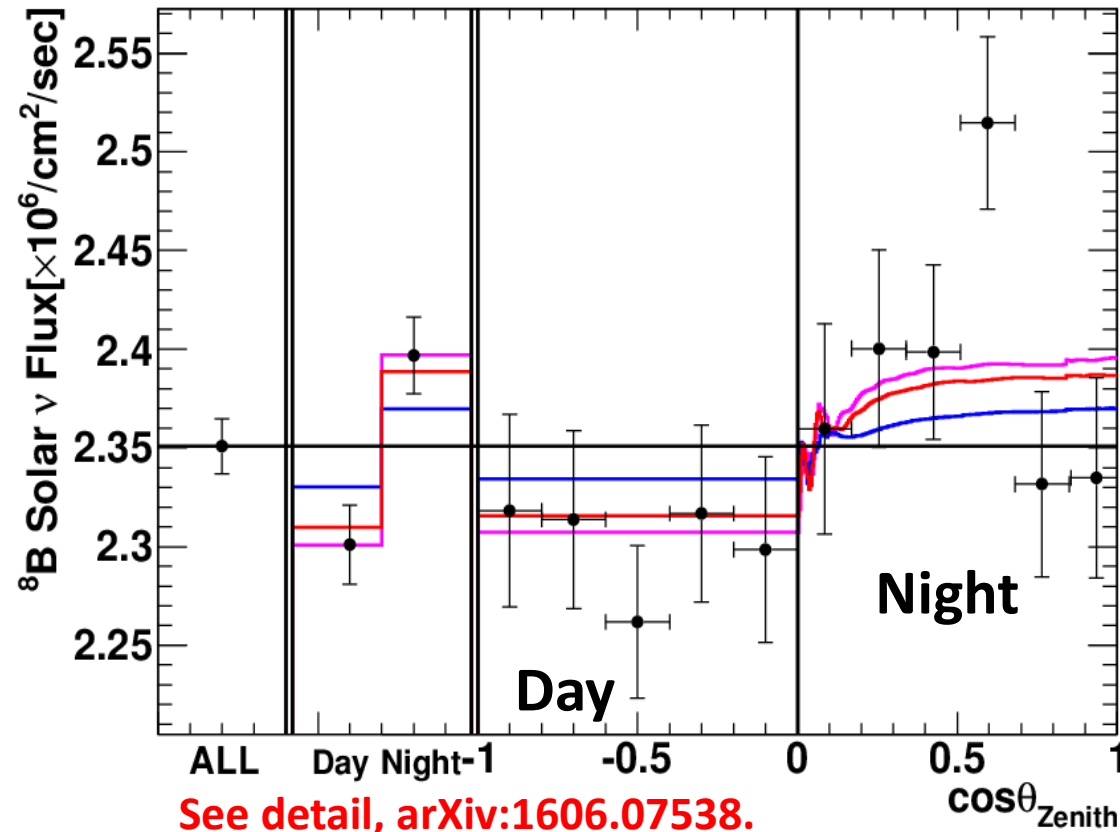
Expected time variation as a function of $\cos \theta_z$

Day/Night asymmetry

◆ zenith angle distribution

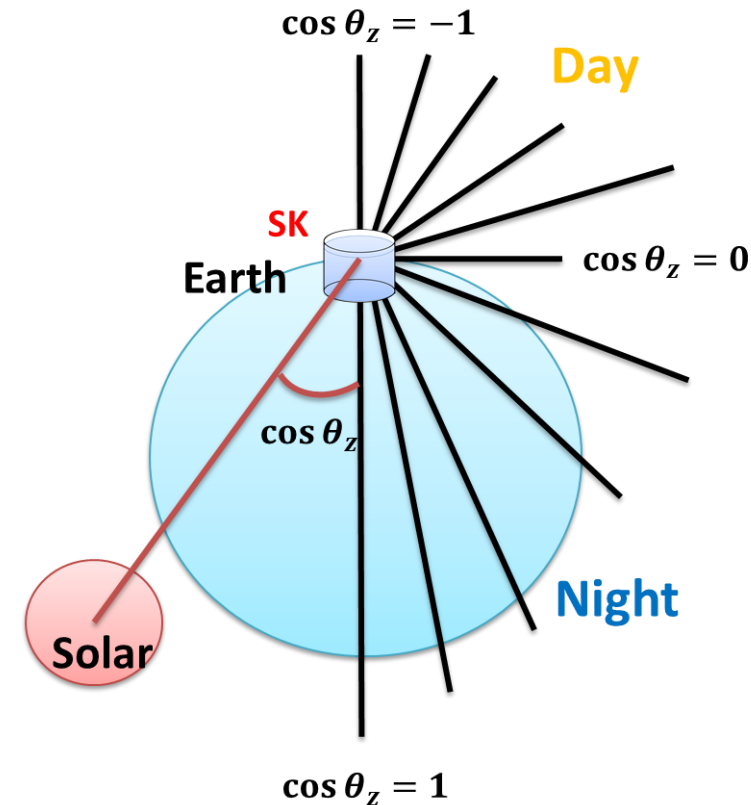
Clear flux difference between day-time and night-time.

Solar neutrino flux during night-time is higher than day-time.



See detail, [arXiv:1606.07538](https://arxiv.org/abs/1606.07538).

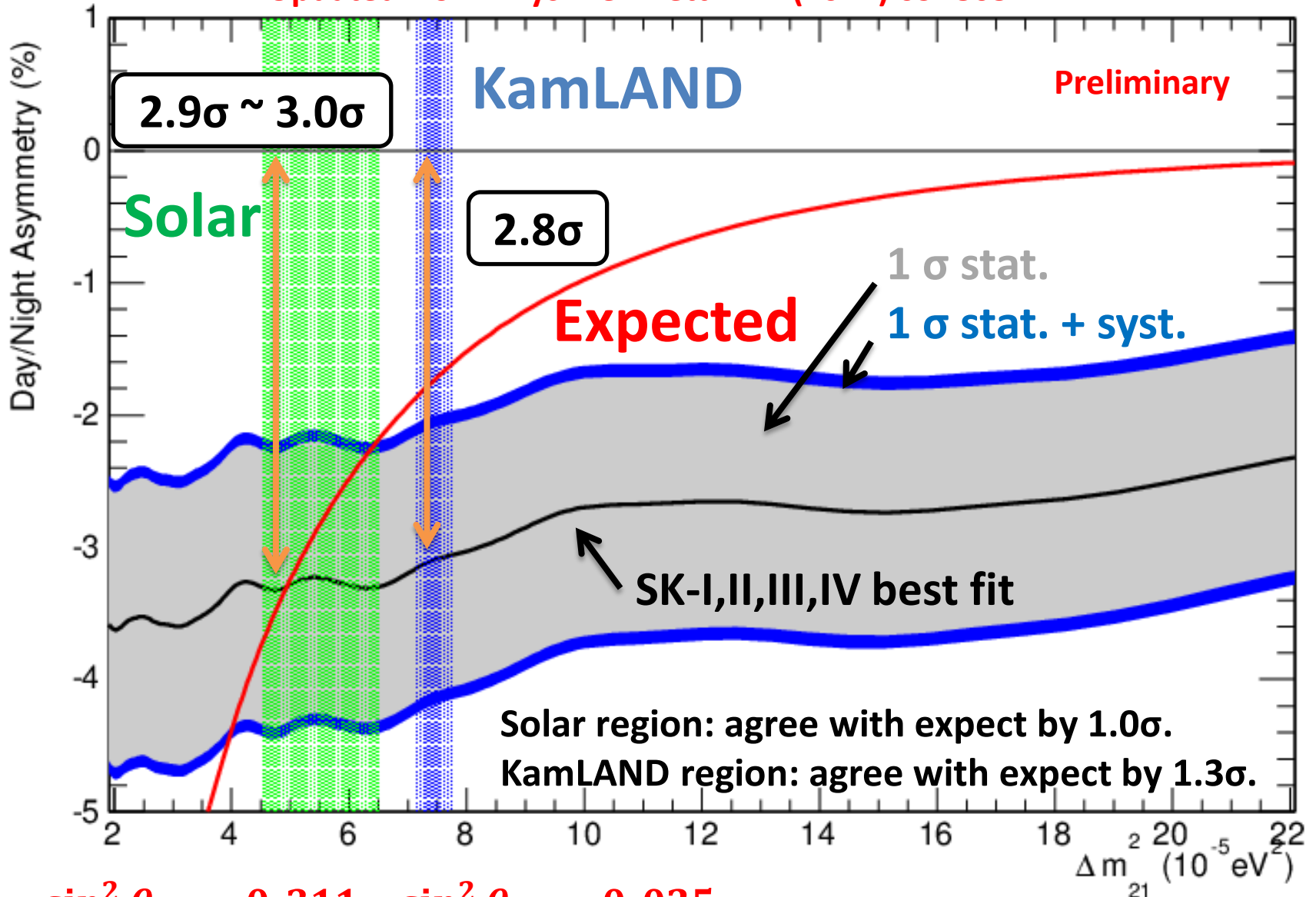
Updated from Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 091805.



SK - I,II,III,IV combined

Δm_{21}^2 vs Day/Night Asymmetry

Updated from Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 091805.



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