

スーパーカミオカンデにおける 最新結果(太陽ニュートリノ、SK-Gd等)

神戸大学 理学研究科
中野佑樹

2016年12月9日(金)

平成28年度

東京大学宇宙線研

共同利用研究成果発表会

@柏図書館メディアホール



講演の内容

- 今年の成果(天体起源ニュートリノ)
- 太陽ニュートリノ観測
 - SKでの太陽ニュートリノ観測
 - 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
 - 振動解析結果
- SK-Gdの現状
- まとめ

今年の成果(天体起源ニュートリノ)

- 太陽ニュートリノ

- *Phys. Rev. D* 94 (2016) 052010.
- 本講演では、アップデートした結果を発表

- 超新星爆発ニュートリノ

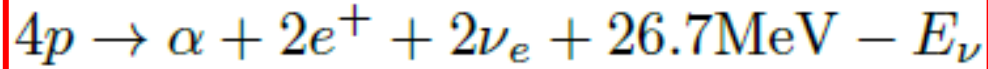
- Real-time monitor: *Astropart. Phys.* 81 (2016) 39-48.
- ${}^9\text{Li}$ Background study: *Phys. Rev. D* 93 (2016) 012004.
- 本公演では、SK-Gd projectの現状を報告

- 重力波イベントと相関のあるニュートリノ

- *Astrophys. J. Lett.* 830 (2016) 1.
 - GW150914の ± 500 secを解析: 結果4event残った
 - バックグラウンドとconsistent.

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

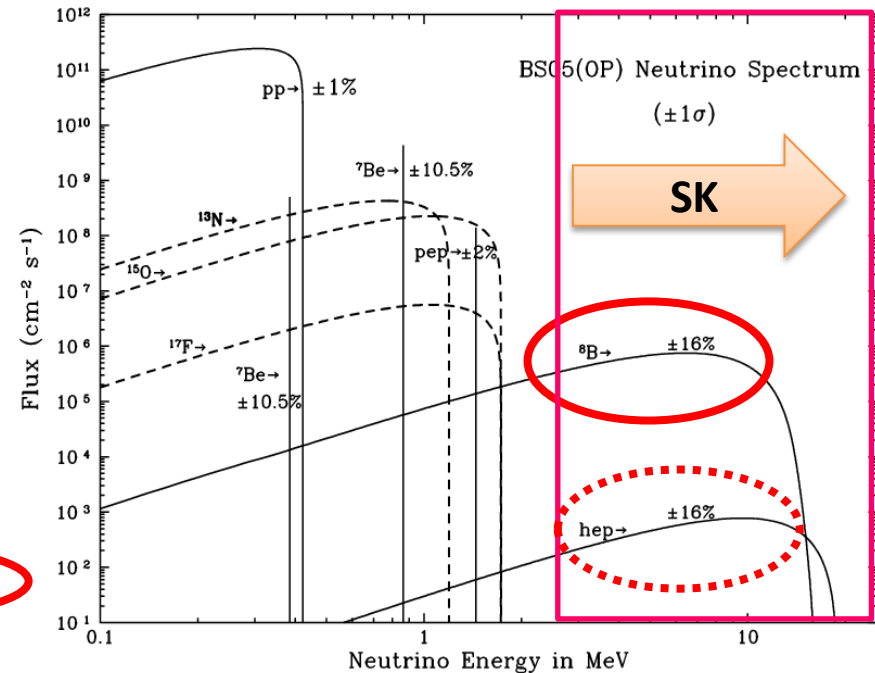
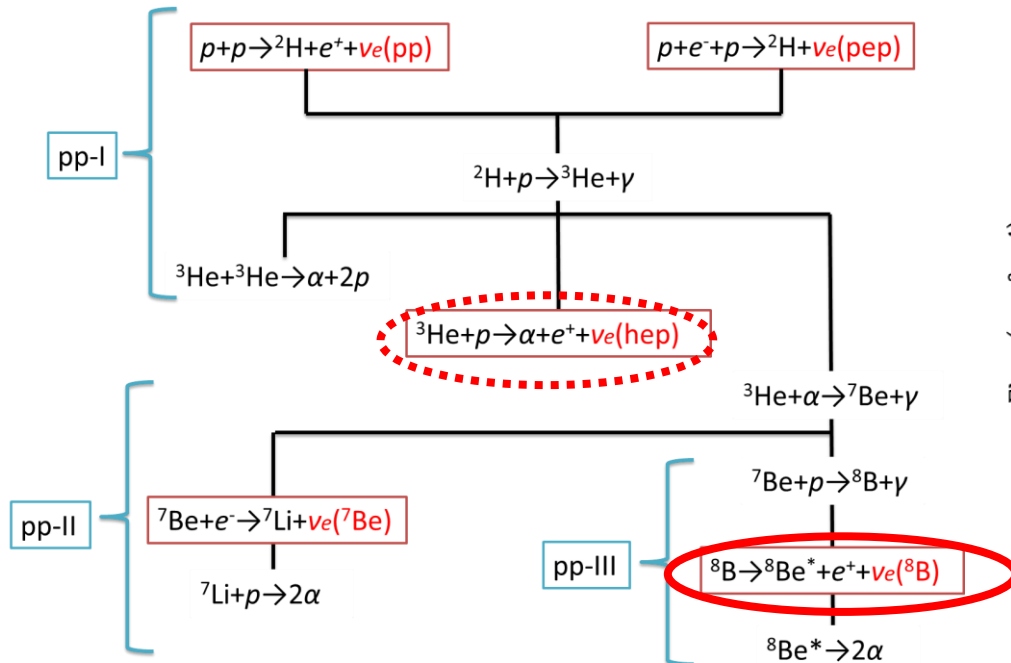


ニュートリノを放出する反応は5種類(CNOを含めるともう少しある)

→ 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。

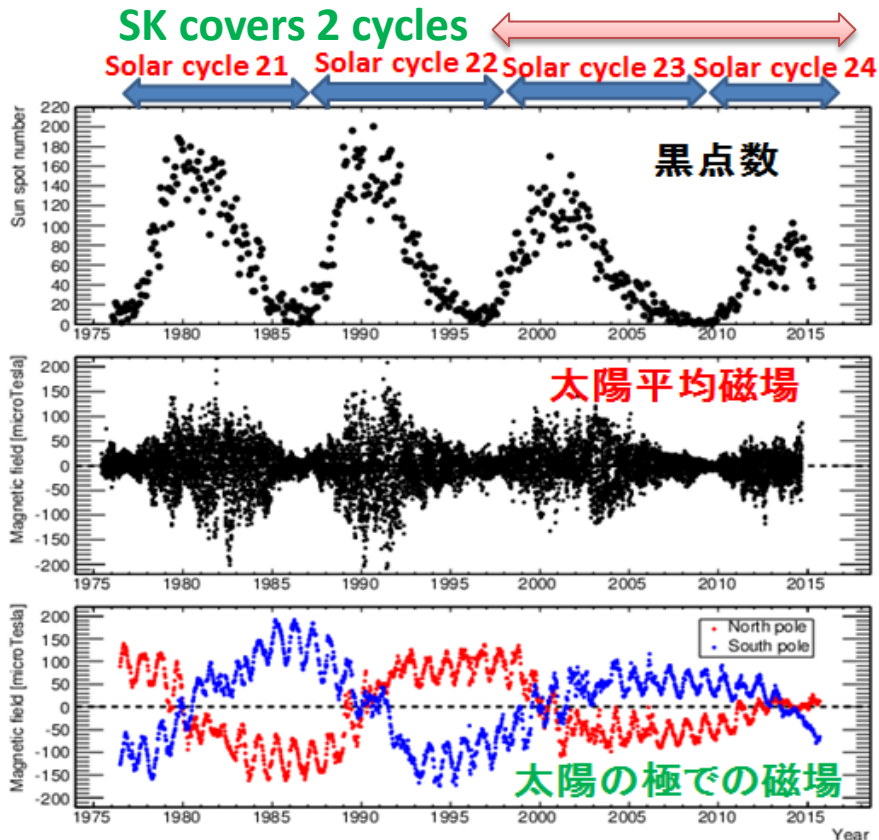
スーパーカミオカンデでは ${}^8\text{B}$ (hep) ニュートリノに感度がある。



太陽ニュートリノ観測

◆太陽活動との相関

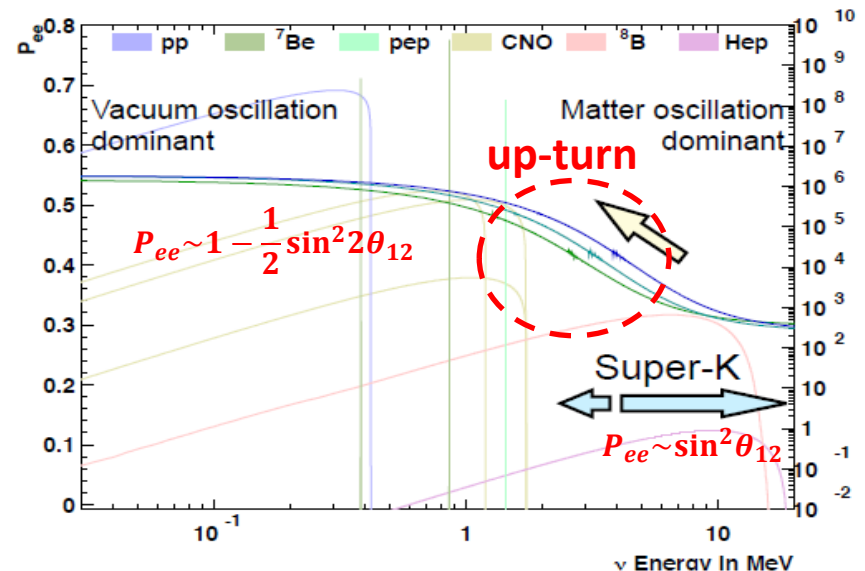
太陽表面の黒点数は11年周期で変動。
太陽磁場の強度は相関している。
太陽ニュートリノはどうか?(右巻ν??)



◆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。

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



SKにおける⁸B太陽ニュートリノ観測

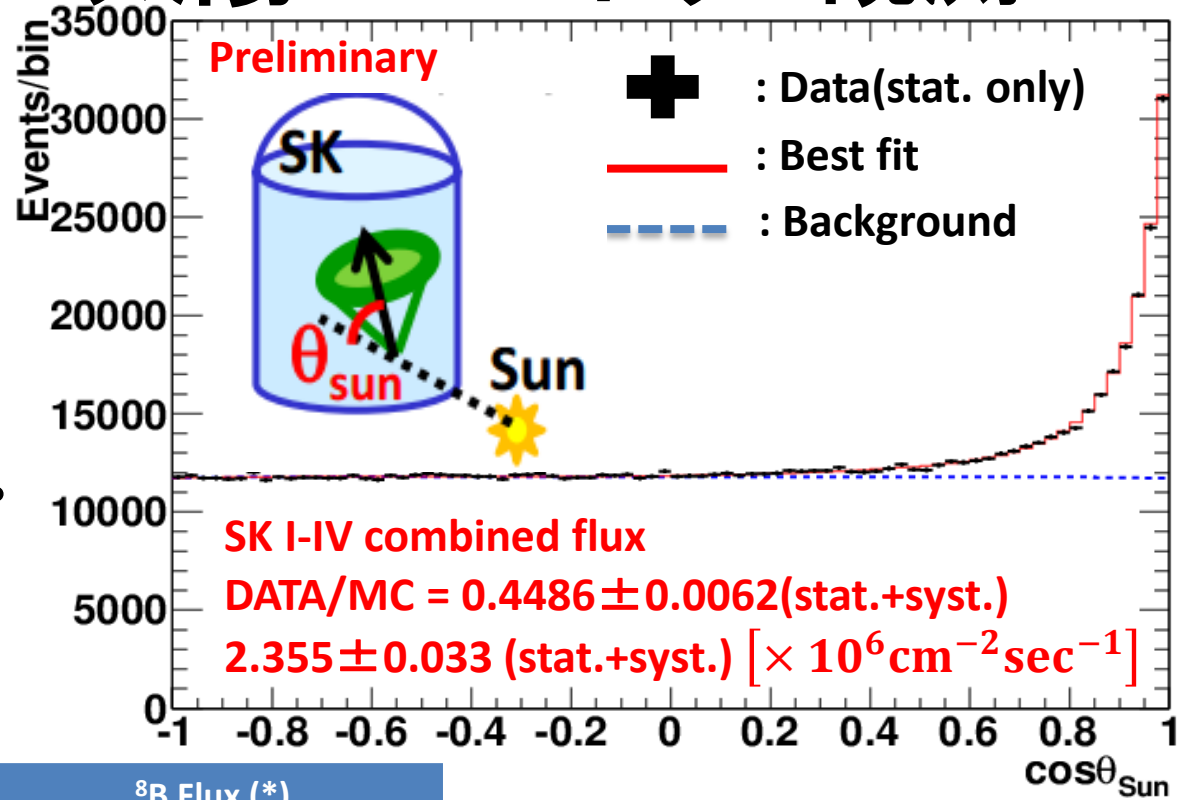
◆⁸B太陽ニュートリノ観測

太陽ニュートリノと電子の弾性散乱

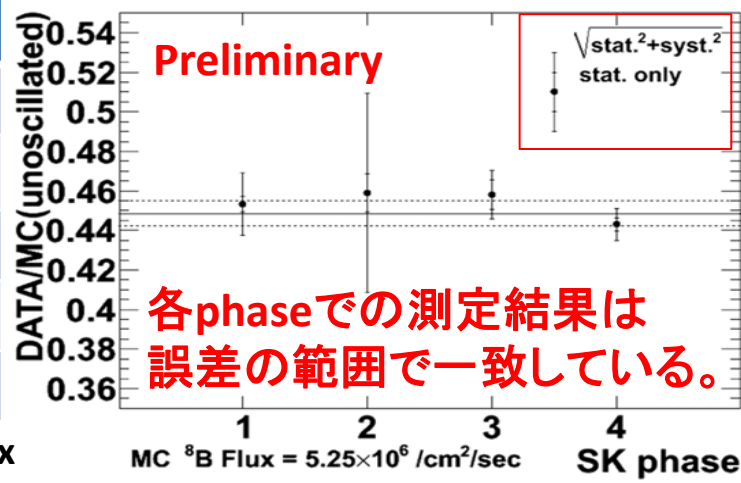
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$

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

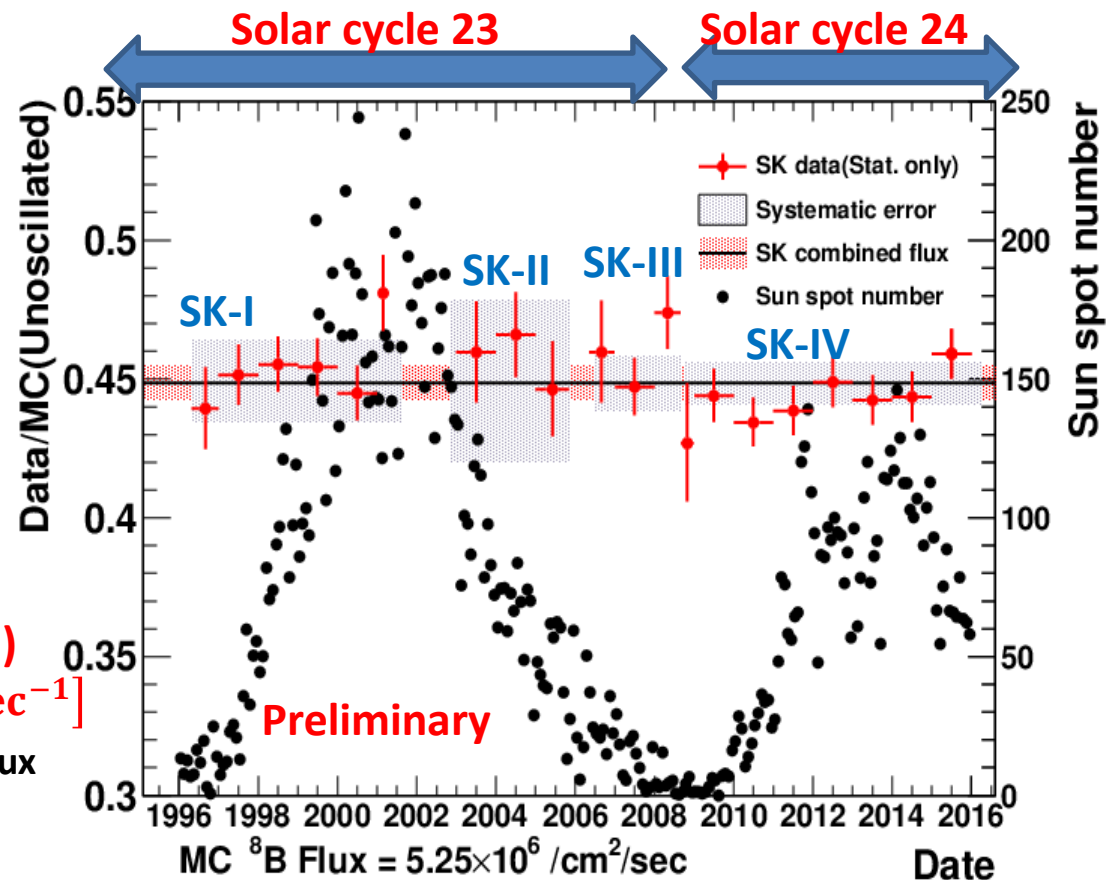
◆解析データの期間

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.) [× 10⁶ cm⁻² 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

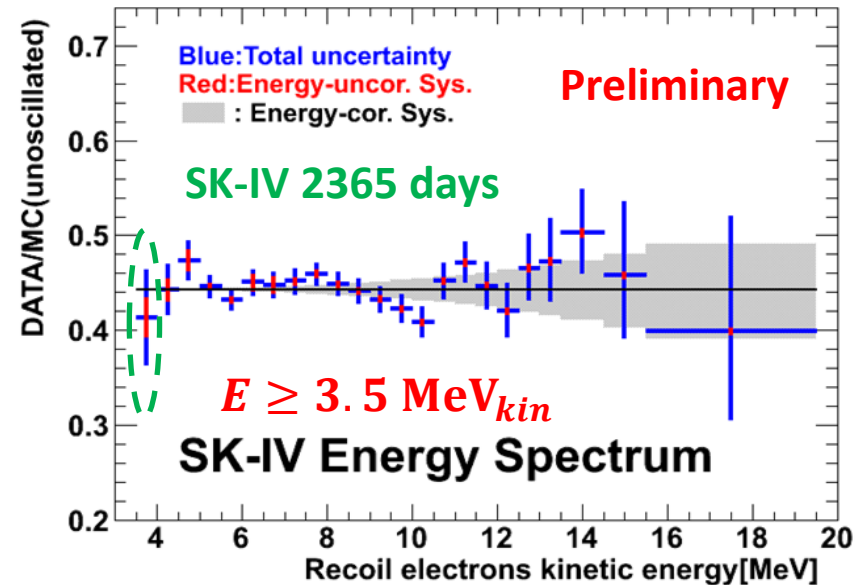
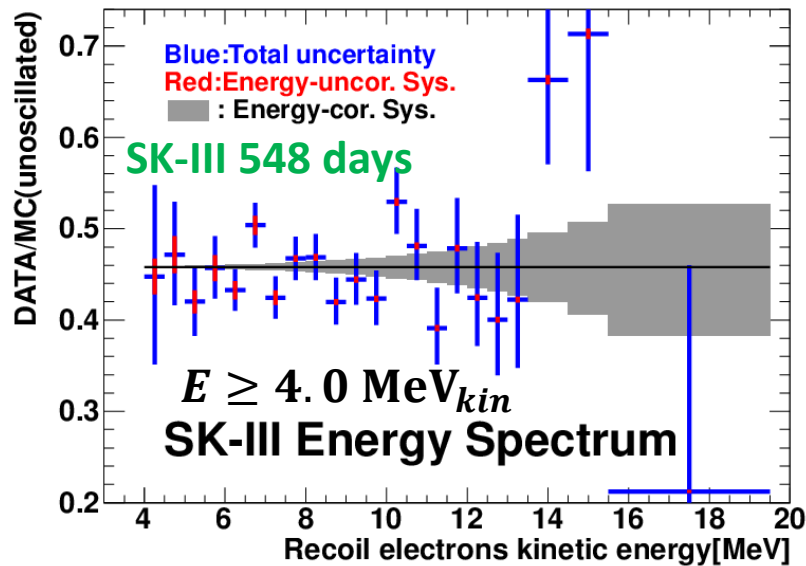
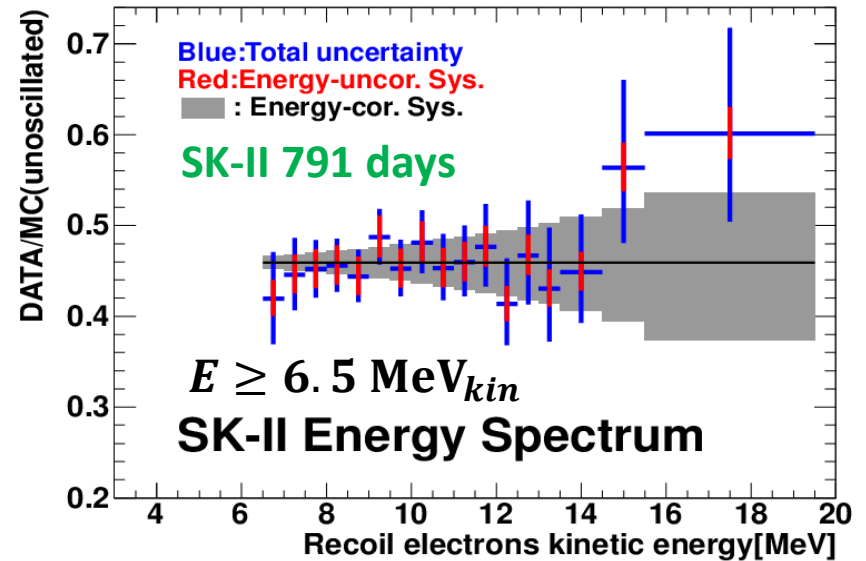
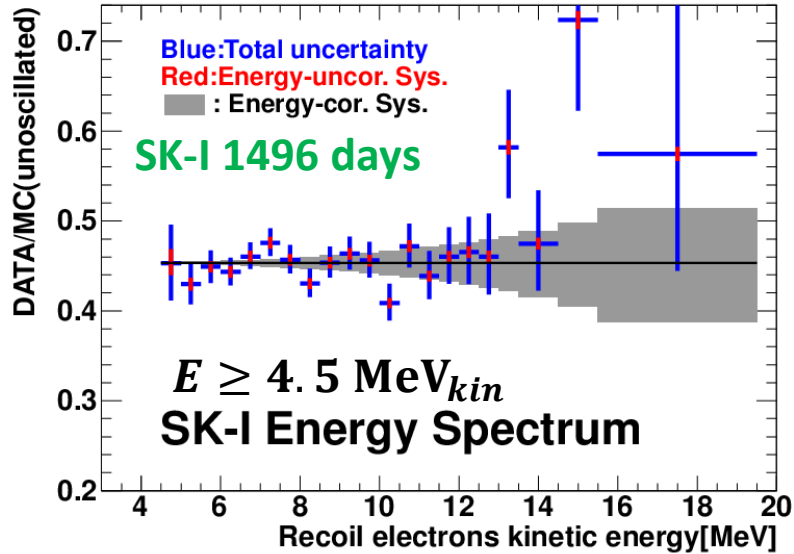


SNO: NC current, Phys. Rev. C88 (2013) 025501.

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

Sun spot number: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
Source: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels.

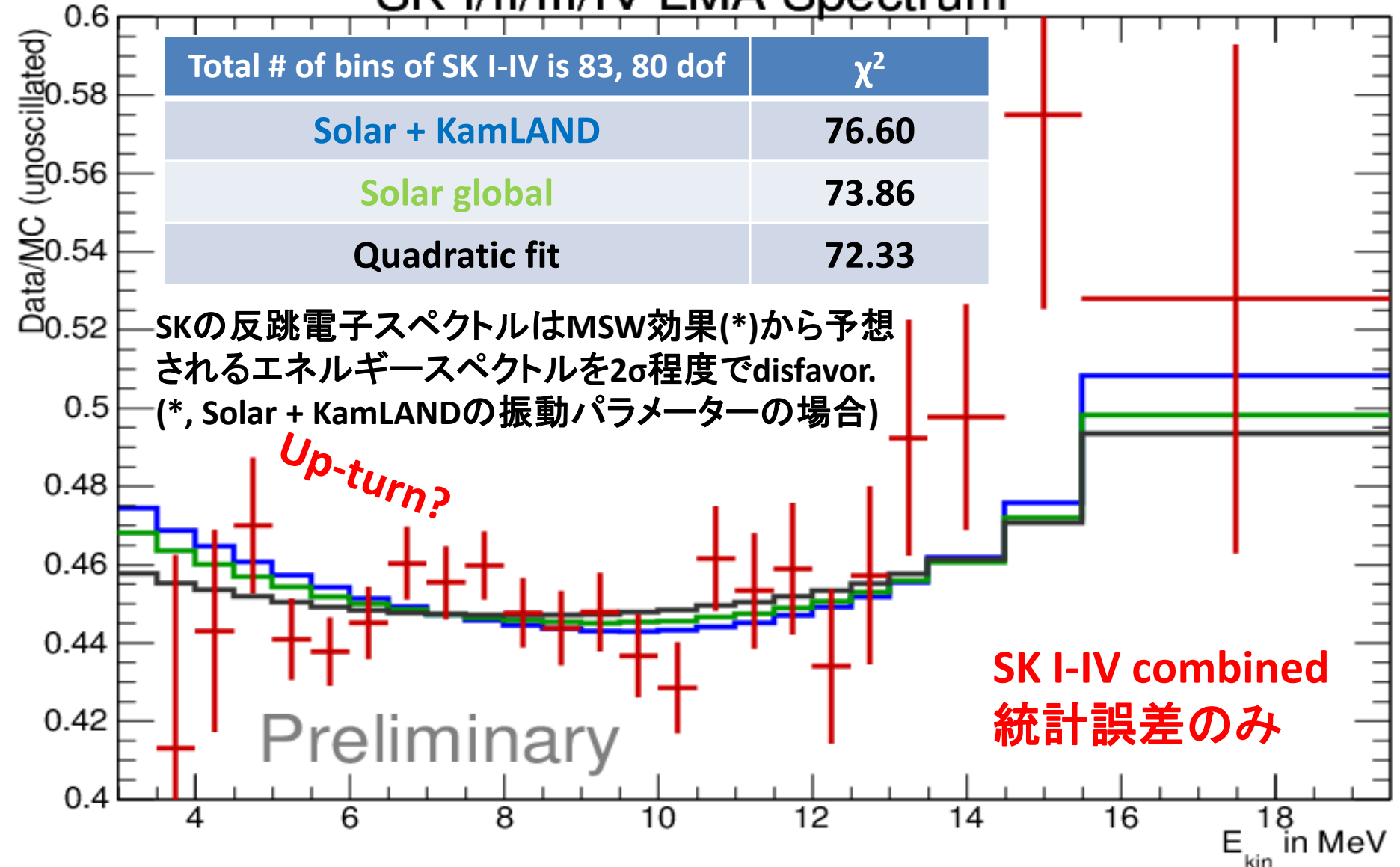
反跳電子のエネルギースペクトル (各phase)



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

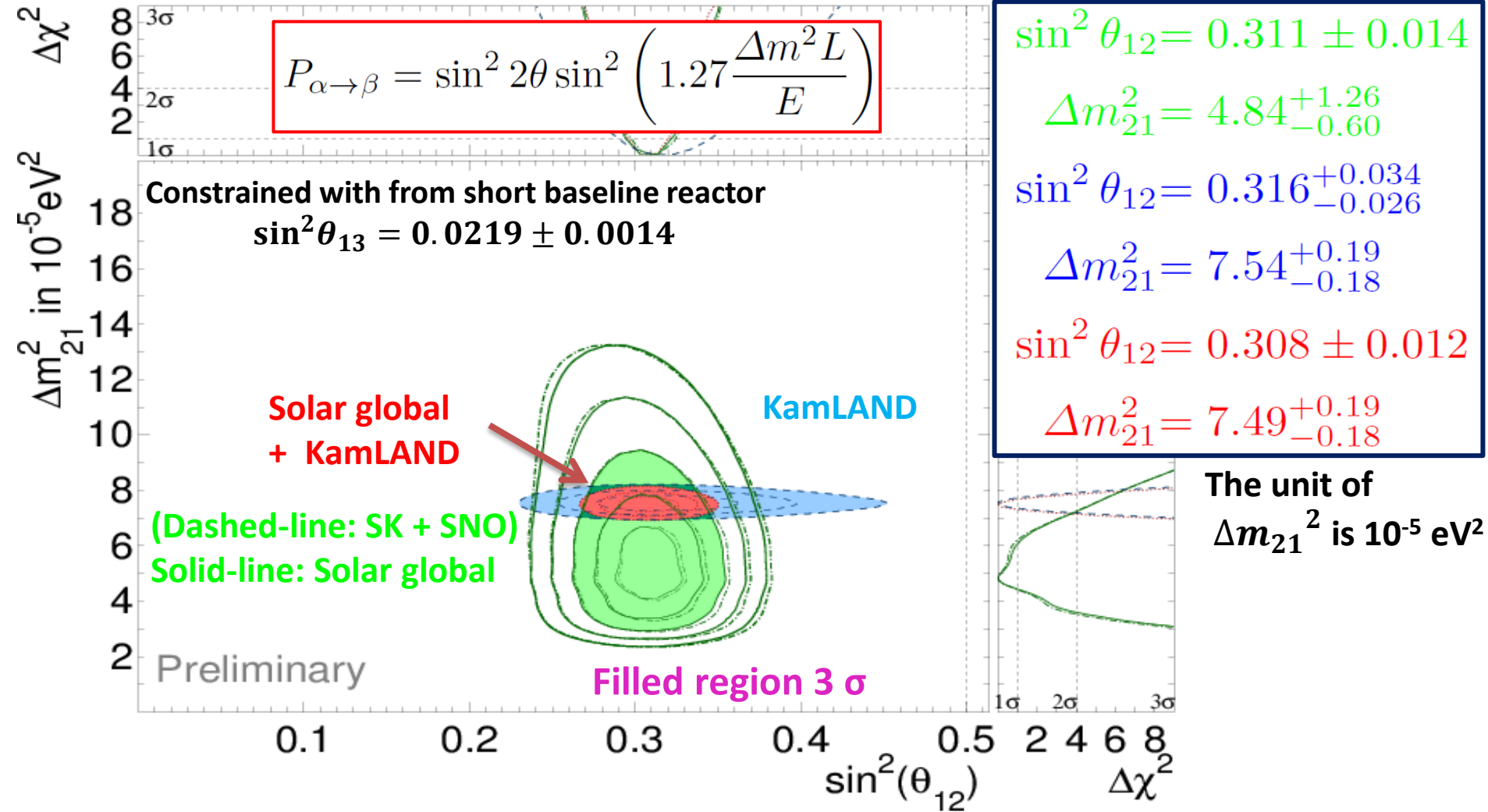
エネルギースペクトル解析結果(SK I-V combined)

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.)

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。

Supernova relic neutrino (SRN)

過去の超新星爆発で放出され、宇宙空間に一様に分布するニュートリノ

様々なニュートリノが観測されている。
10-30 MeV程度に原子炉、太陽、大気
にかからないwindowがある。

理論予想に迫っているが、
あと1桁の改良が必要。
バックグラウンドの理解が必要。

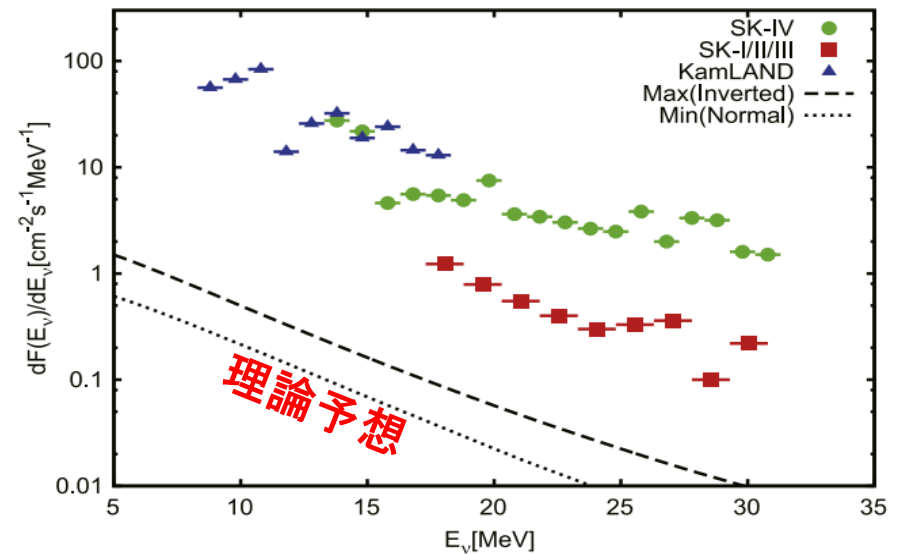
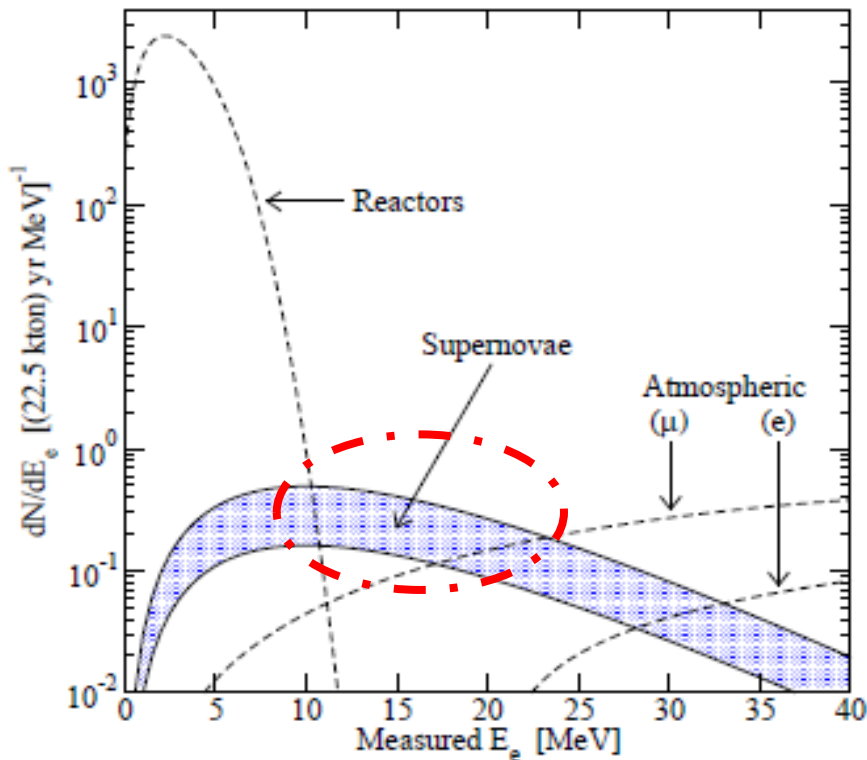


Figure 1. 90% C.L. differential upper limits on $\bar{\nu}_e$ flux of SRNs. The squares, circles and triangles are results for Super-Kamiokande (SK-I/II/III, Bays et al. 2012), Super-Kamiokande with a neutron-tagging (SK-IV, Zhang et al. 2015) and KamLAND (Gando et al. 2012). Dashed and dotted lines correspond to our theoretical models with maximum and minimum values of SRN event rate, respectively (see also Table 3).

Phys. Rev. Lett. 93 (2014) 171101.

Astrophys. J. 804 (2015) 75.

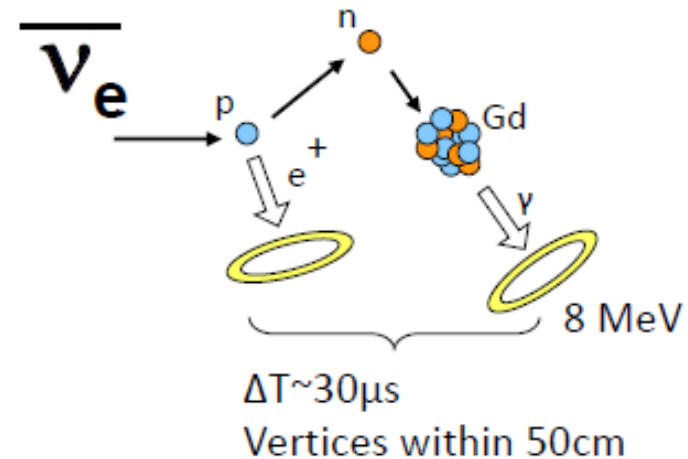
SK-Gd の目指す物理

SK検出器に0.1%(0.2%)のGd ($Gd_2(SO_4)_3$)を添加

→ 中性子tagによる遅延同時計測

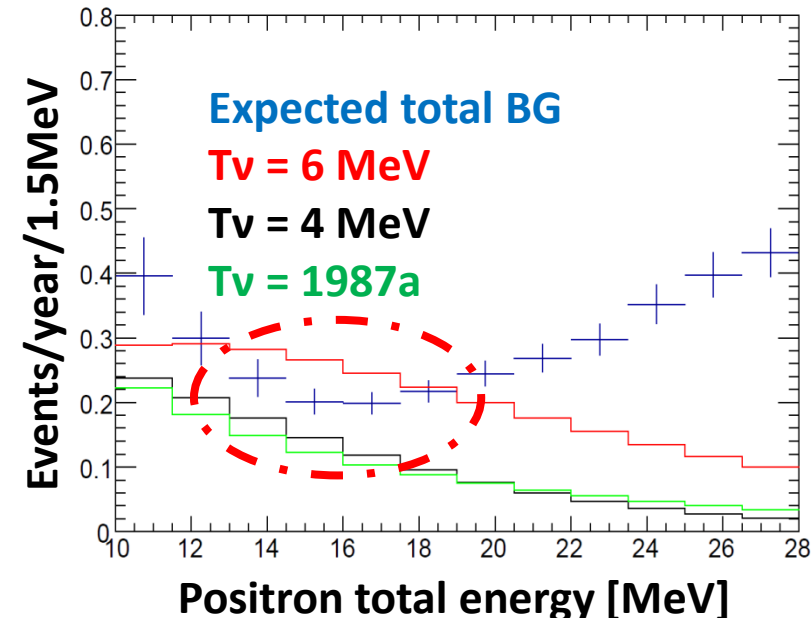
(中性子tagの効率: 20%以下 → 90%以上)

→ 反電子ニュートリノの同定



バックグラウンドの大幅な低減が期待

世界初の背景超新星爆発ニュートリノの発見を目指している。

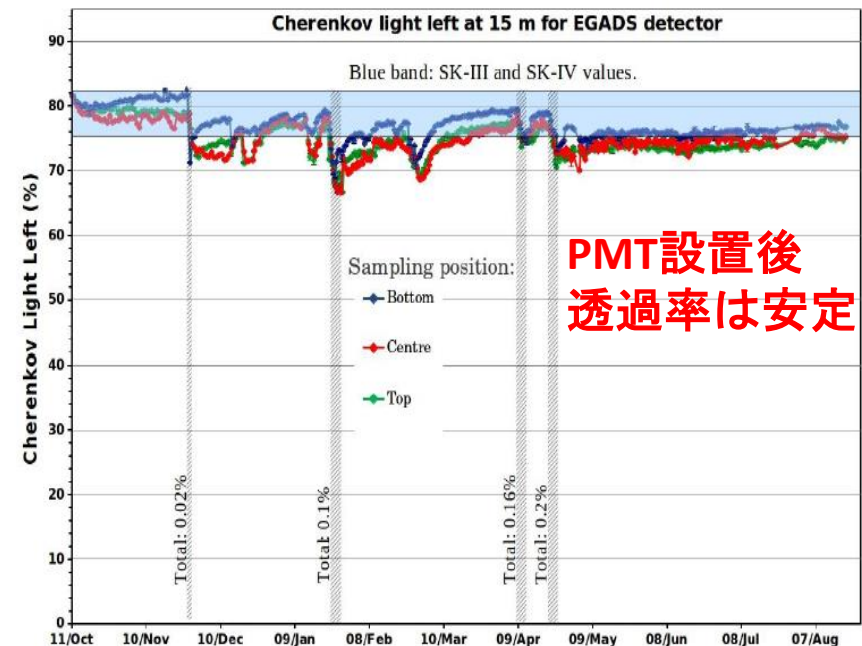
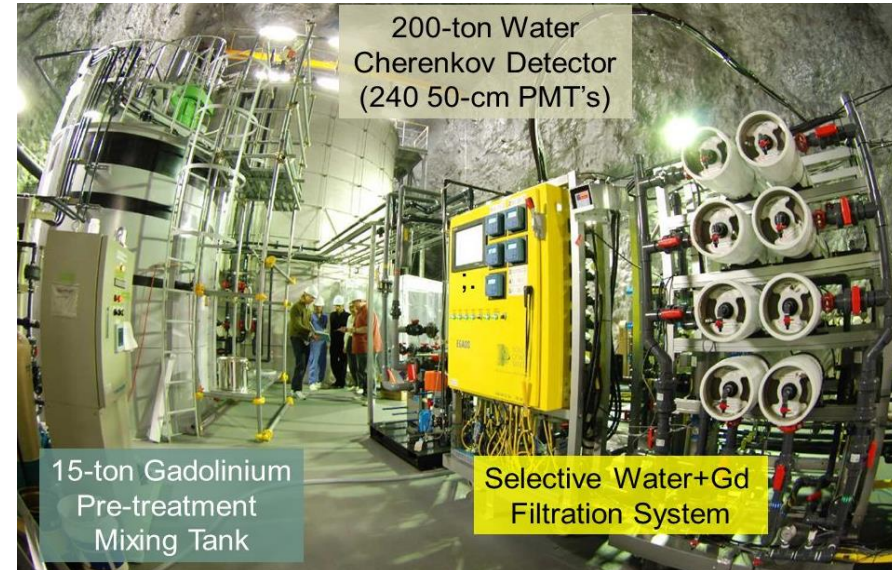


Model T_v	10-16MeV Eve/10yrs	16-28MeV Eve/10yrs	Total (10-28MeV)	Significance 2 energy bin
8 MeV	11.3	19.9	31.2	5.3σ
6 MeV	11.3	13.5	24.8	4.3σ
4 MeV	7.7	4.8	12.5	2.5σ
1987a	5.1	6.8	11.9	2.1σ
BG	10	24	34	---

Model: Phys. Rev. D 79 (2009) 083013.

SK-Gdの現状報告

- EGADS検出器によるR&D
 - 純水(+Gd)製造装置
 - 透過率の安定性
 - Gd水への溶出試験
- 解析手法の改良
- Gd粉末の純化
- SK-Gd用の純水製造装置
(今回の報告)



添加用Gd粉末の純化

SK-Gd開始後も現在のSKと同程度のバックグラウンドレベルを維持
→現在と同程度の感度で太陽ニュートリノ観測を行いたい

純水に添加するGd粉末の純度を上げる研究を企業と進めている。
→ 企業から提供されたGd粉末を神岡施設のICPMSとGe検出器で測定

	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra
要求値	< 5 mBq/kg	< 0.1 mBq/kg	< 0.05 mBq/kg
企業A	3.4 ± 0.7	0.29 ± 0.06	< 8.8
企業B	3.1 ± 0.8	0.33 ± 0.06	< 0.6
企業C	3.4 ± 0.7	0.77 ± 0.15	< 0.6
測定手法	ICPMS	ICPMS	Ge検出器

各放射性不純物に関して、もう少しの純化が必要だが、**おおむね良好**。
企業の方に、さらなる純化を進めてもらっている。

企業の方はマスプロも対応できそう。

地下実験室 Lab-G

SK実験エリア付近にGd添加純水製造室を準備

実験エリアの掘削は終了

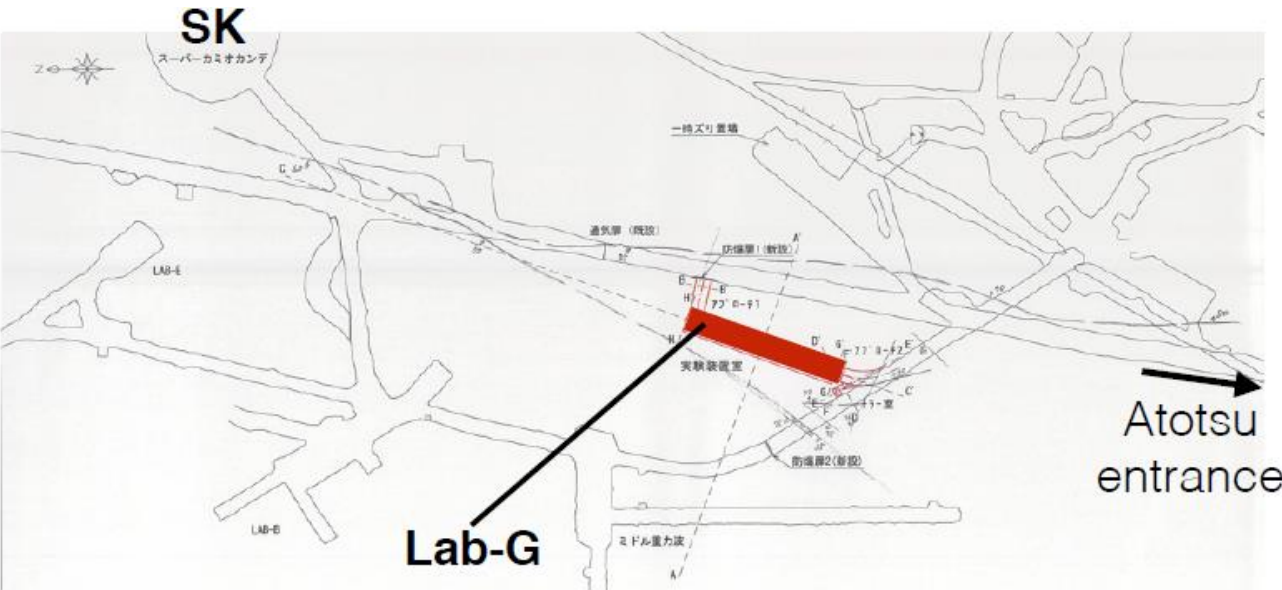
2016年10月から各種システムの設置を開始

(1)左:樹脂用タンク, 右: Gd添加水用タンク

(2) システム全体のコントローラー

(3)Gd溶解用システム

配管の接続作業は2016年11月から開始



配管の接続作業の現状

配管作業は
順調に進んでいる



まとめ

- **本年度の成果**
 - 論文4本
 - Real-time SN monitor: *Astropart. Phys.* 81 (2016) 39-48.
 - ${}^9\text{Li}$ background: *Phys. Rev. D* 93 (2016) 012004.
 - 太陽ニュートリノ: *Phys. Rev. D* 94 (2016) 052010.
 - 重力波イベントとの相関: *Astrophys. J. Lett.* 830 (2016) 1.
- **太陽ニュートリノ**
 - 太陽ニュートリノFlux測定
 - 各phaseでconsistentな結果を得た: $2.355 \pm 0.033 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$.
 - 太陽活動との相関: 黒点の変動との間に顕著な相関は見られなかった。
 - スペクトラム測定、振動解析
 - MSW効果から予測されるスペクトラムを 2σ 程度でdisfavor.
 - $\sin^2 \theta_{12} = 0.308 \pm 0.012, \Delta m_{21}^2 = 7.49_{-0.18}^{+0.19} \text{ eV}^{-2}$
- **SK-Gdの現状報告**
 - 順調に進んでいる。
 - Gd粉末の純化にめどが立った。
 - Gd添加水用の純水装置の設置を進めている。

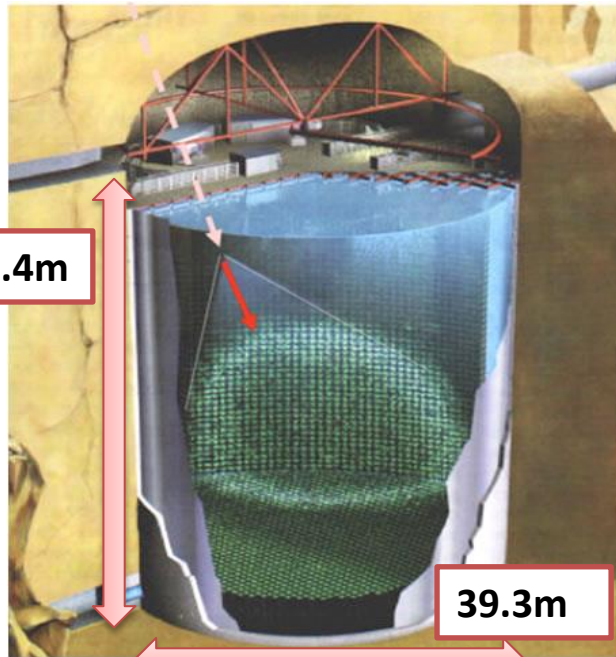
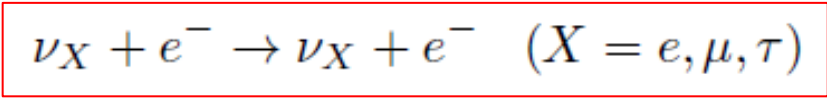
Back

up

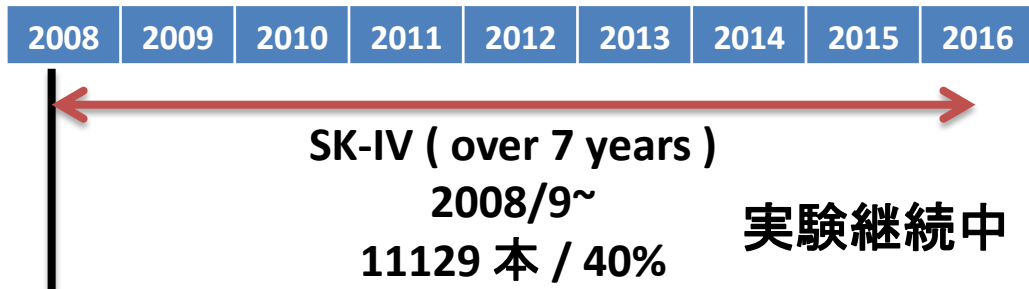
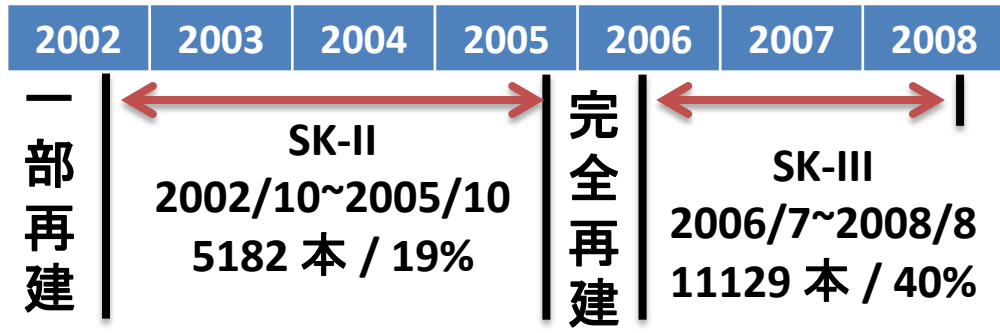
Super Kamiokande 検出器

◆ 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



事故



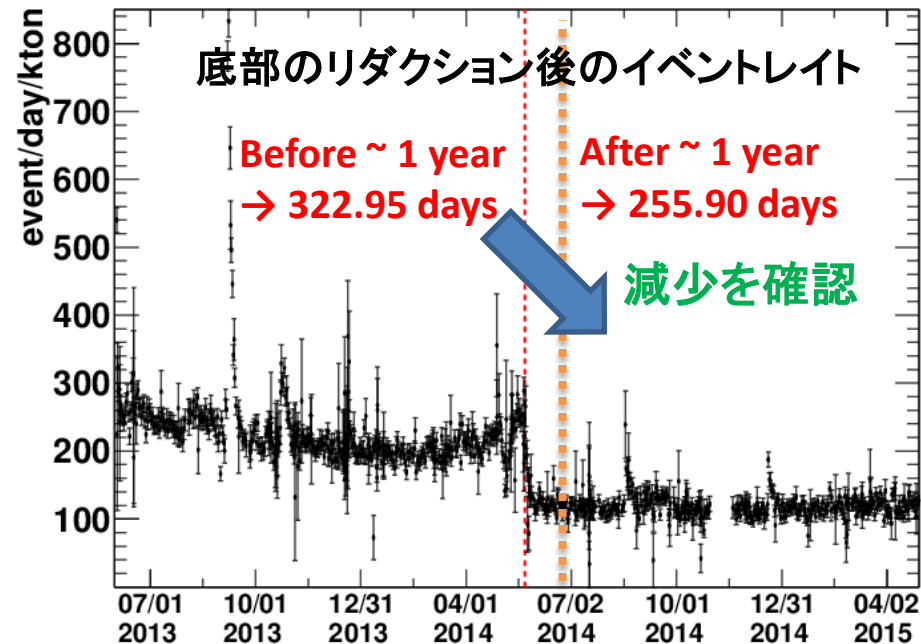
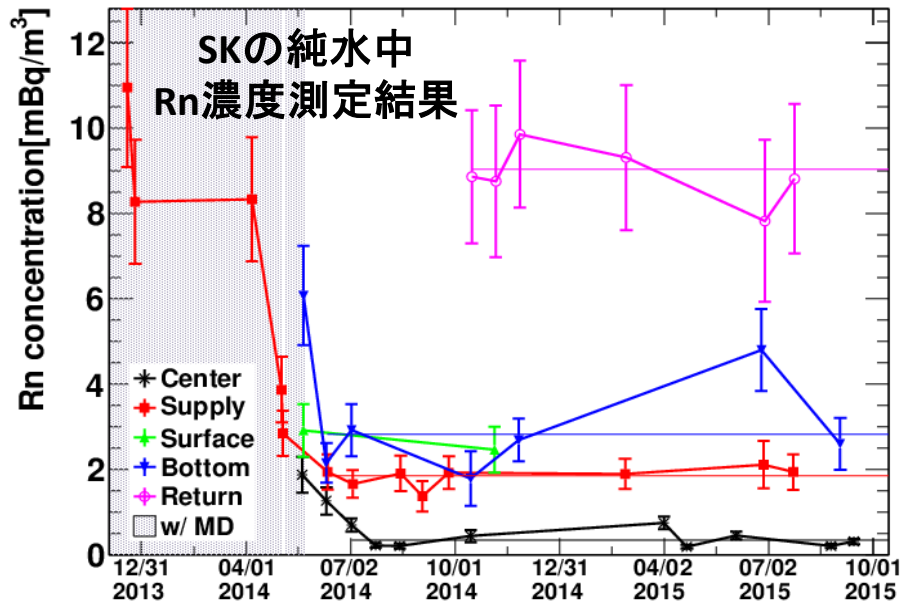
実験継続中

新エレクトロニクスを導入



最近のSK太陽解析の進展

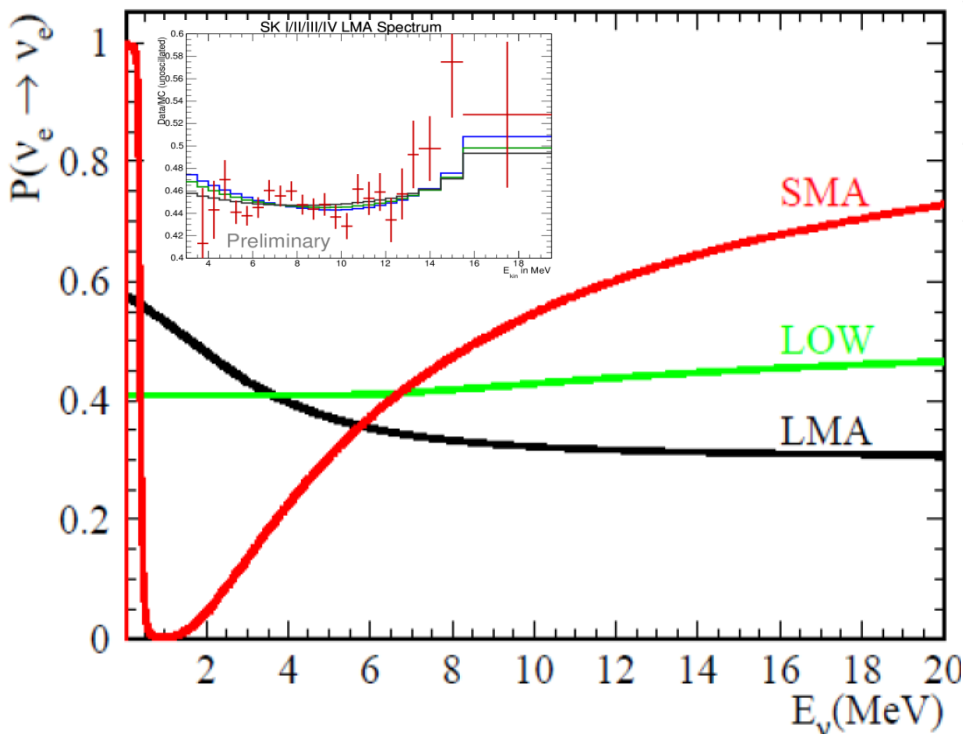
- 低エネルギー領域でのBGの理解
 - 純水中に含まれるラドンを定量的に評価
 - 純水中のラドンを減らした→イベントレイトが減った。
- 低エネルギー領域のデータ取得の閾値を下げた。
 - ~86% → 99%以上のデータ取得効率 (3.5-4.0 MeV)



生存確率と振動解

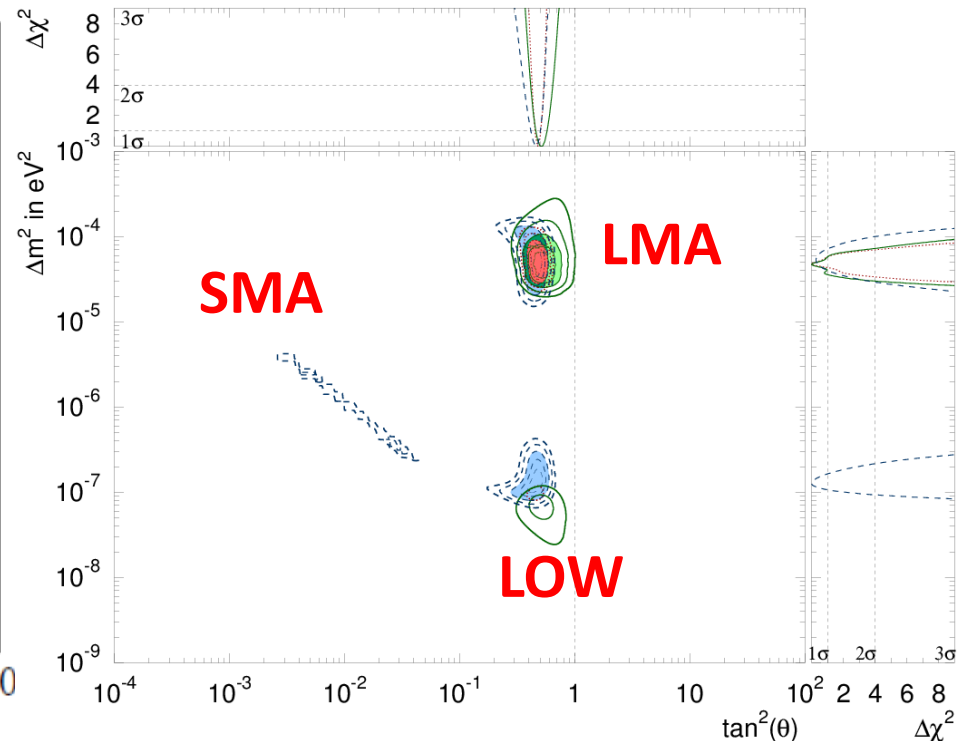
◆生存確率

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。

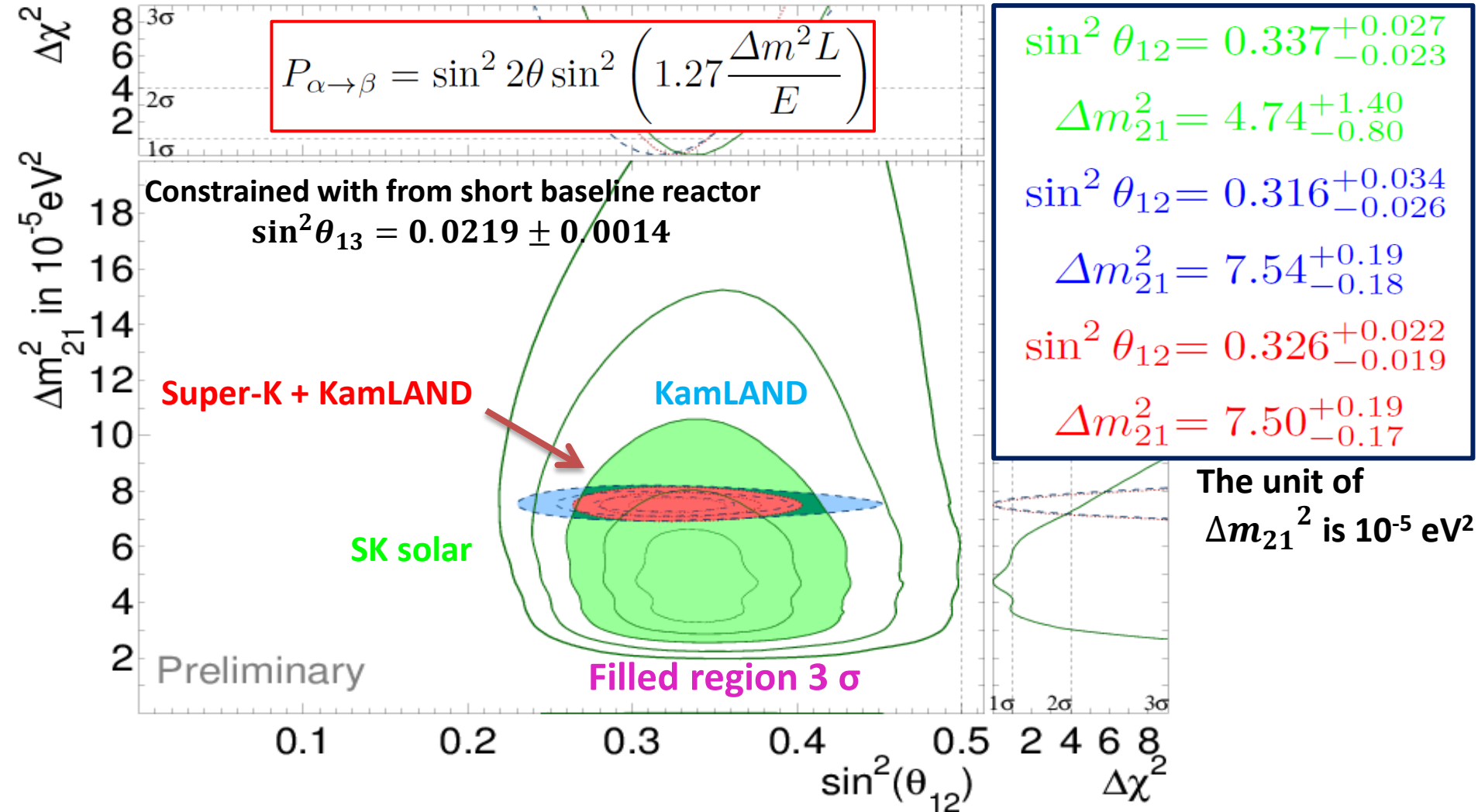


◆振動パラメータの領域

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。



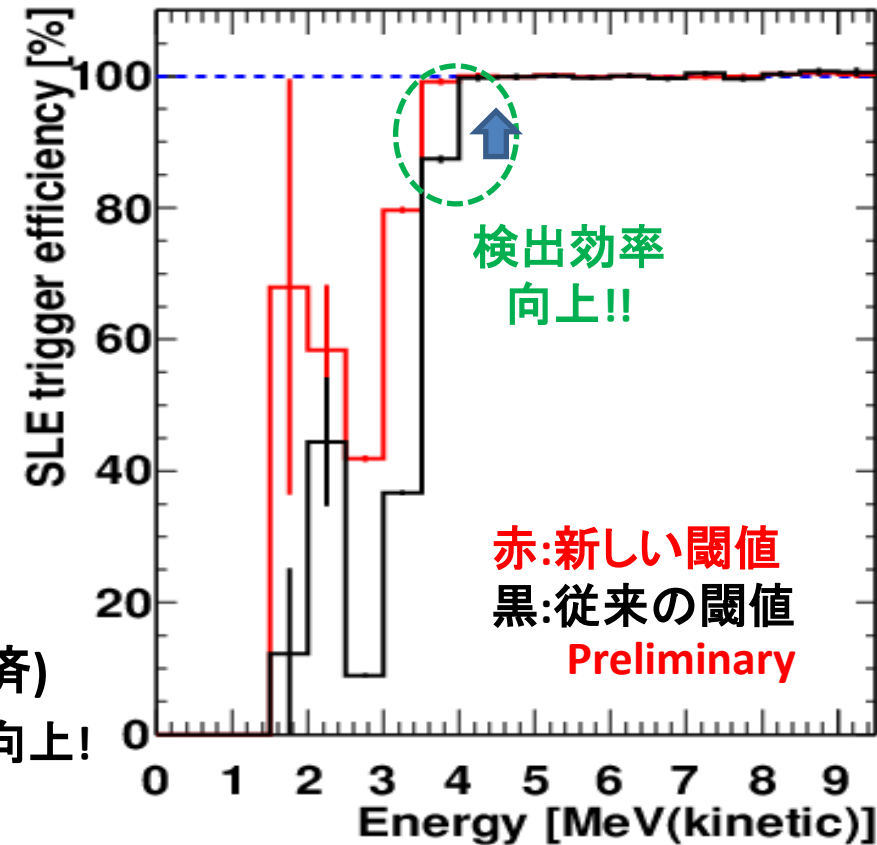
Super-K vs. KamLAND



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。

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%



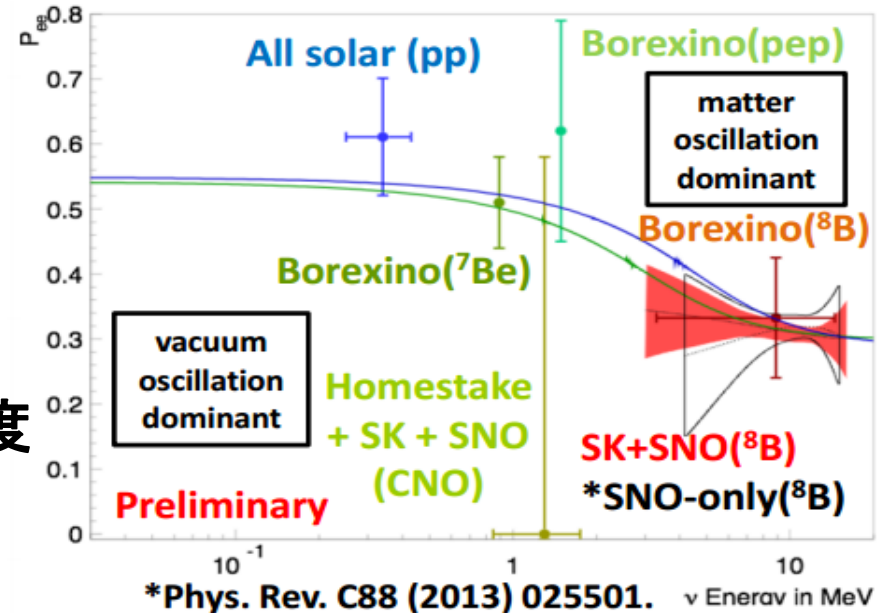
スペクトル解析の今後の展望

◆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、

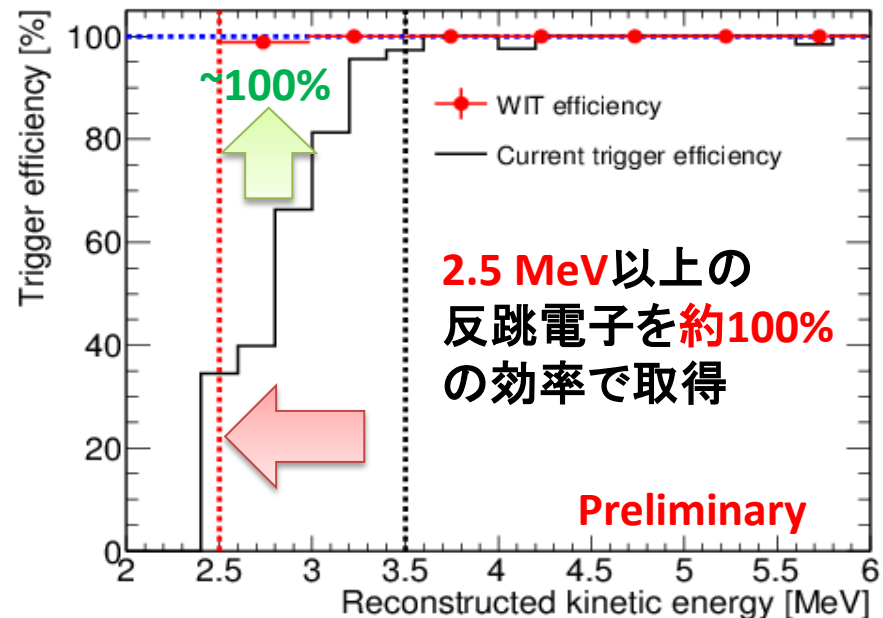
(1) **統計**を増やす+解析の系統誤差を小さく。

→ 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

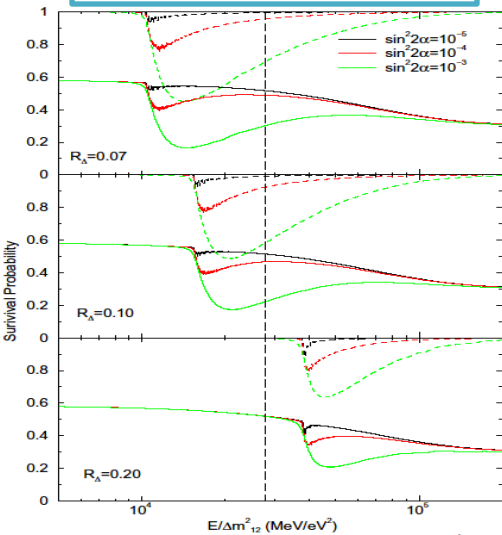
→ 横軸方向への感度の向上

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。

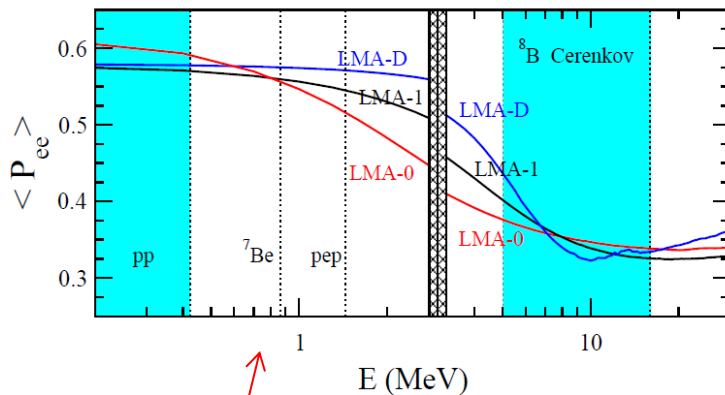


Non-standard models to predict flat spectrum

Sterile neutrino



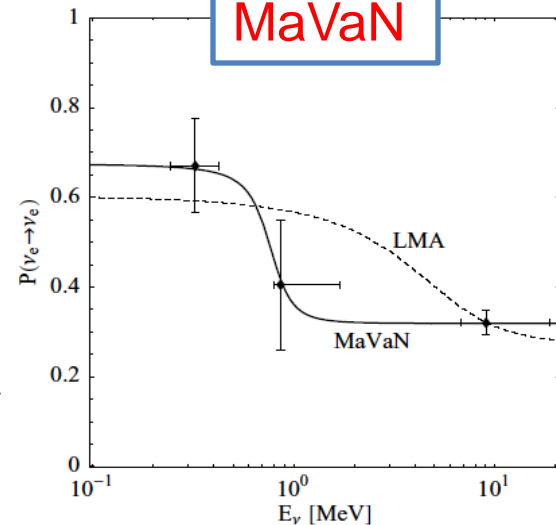
$R_\Delta \equiv \frac{\Delta m_{01}^2}{\Delta m_{21}^2}$ Holanda and Smirnov, Phys.Rev.D69(2004)113002. (hep-ph/0307266)



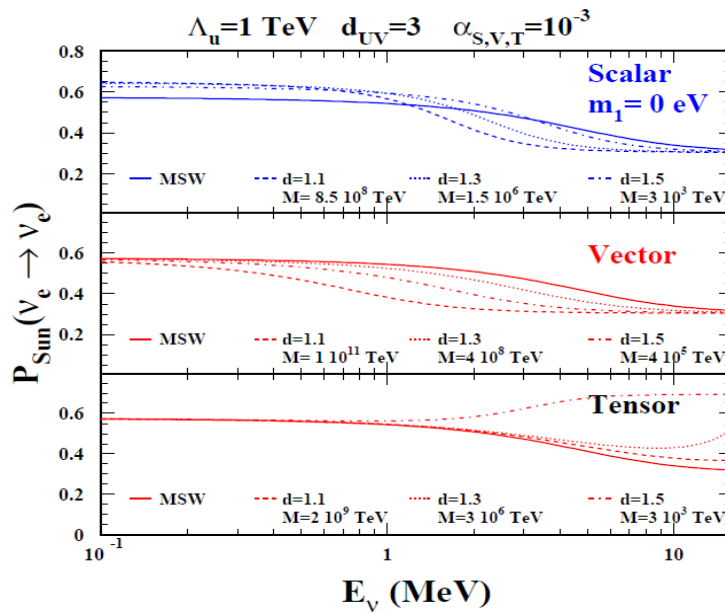
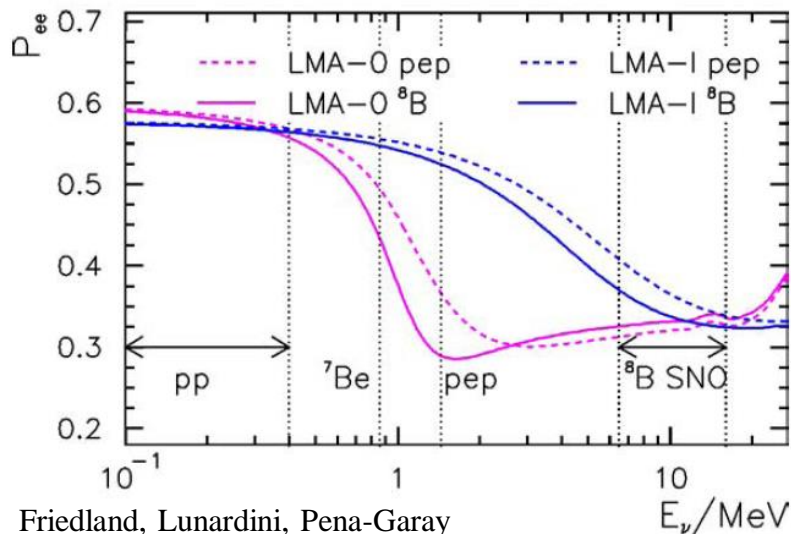
Miranda, Tortola and Valle, JHEP 0610:008,2006. (hep-ph/0406280)

Non standard Interaction

MaVaN



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



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

Unparticle

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

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. 27

◆ 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) : $E_{kin} \geq 4.5\text{MeV}$
arXiv: 1606.07538.

◆ SNO

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

Updated from PRL 112 (2014) 091805.

The same method is applied to both SK and SNO with a0 and a1 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

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

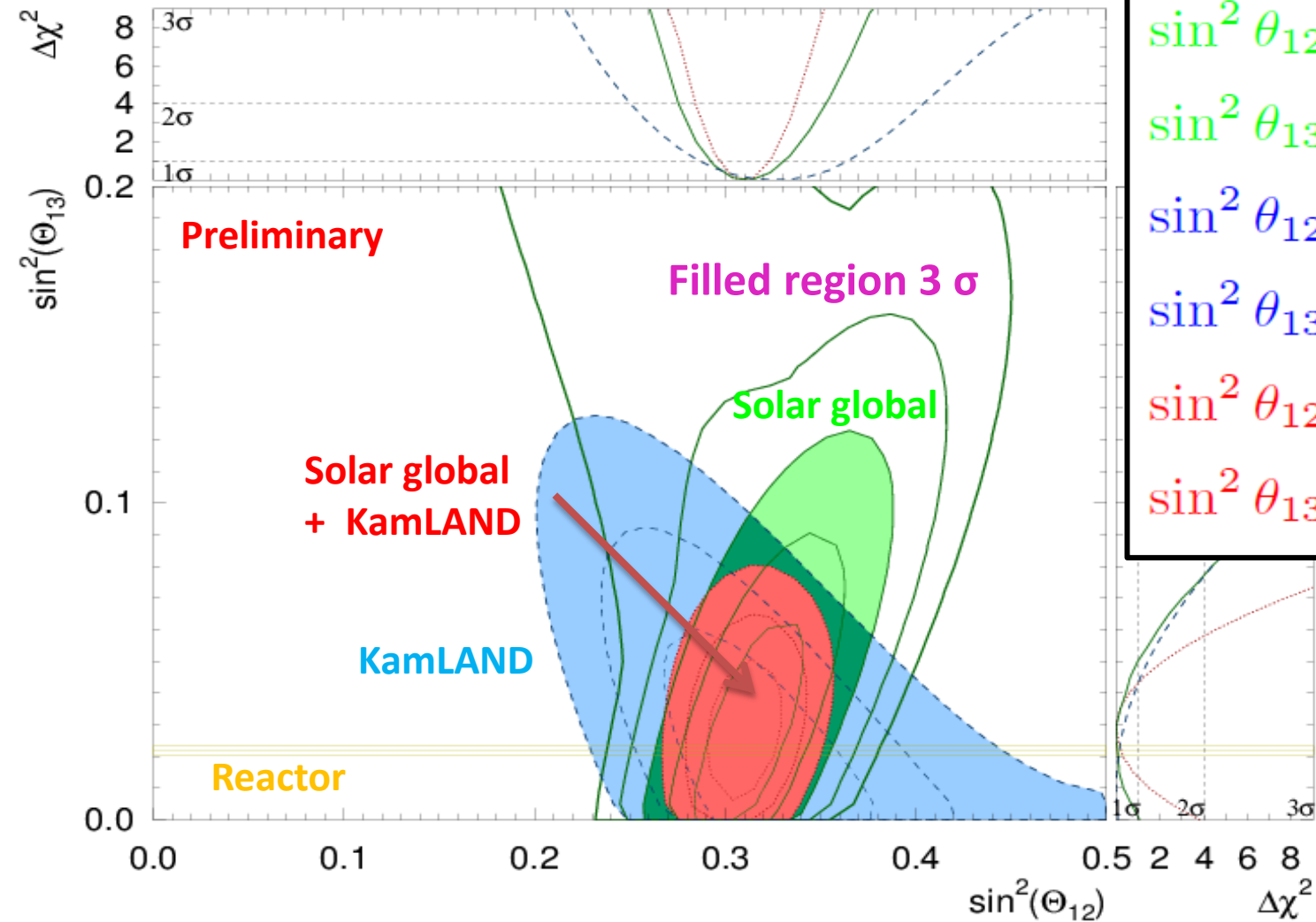
◆ KamLAND reactor

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

◆ ${}^8\text{B}$ spectrum

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

3-flavor oscillation analysis



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

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

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

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

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

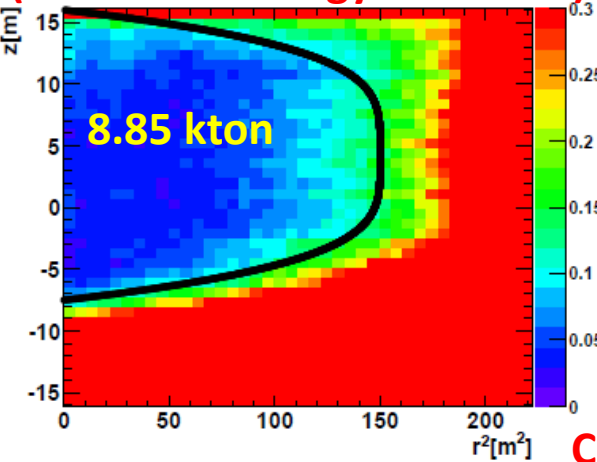
$$\sin^2 \theta_{13} = 0.029^{+0.014}_{-0.015}$$

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

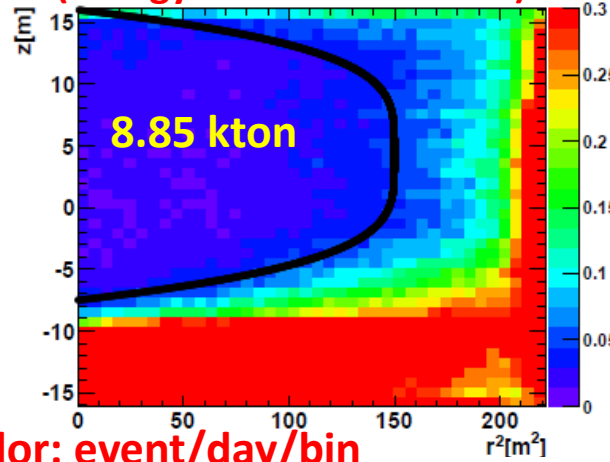
3.5-4.0 MeV

(SK-IV new energy threshold)



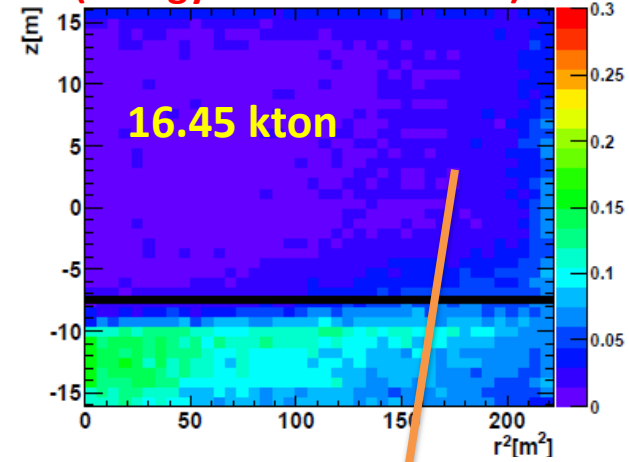
4.0-4.5 MeV

(energy threshold in SK-III)



4.5-5.0 MeV

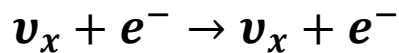
(energy threshold in SK-I)



Color: event/day/bin

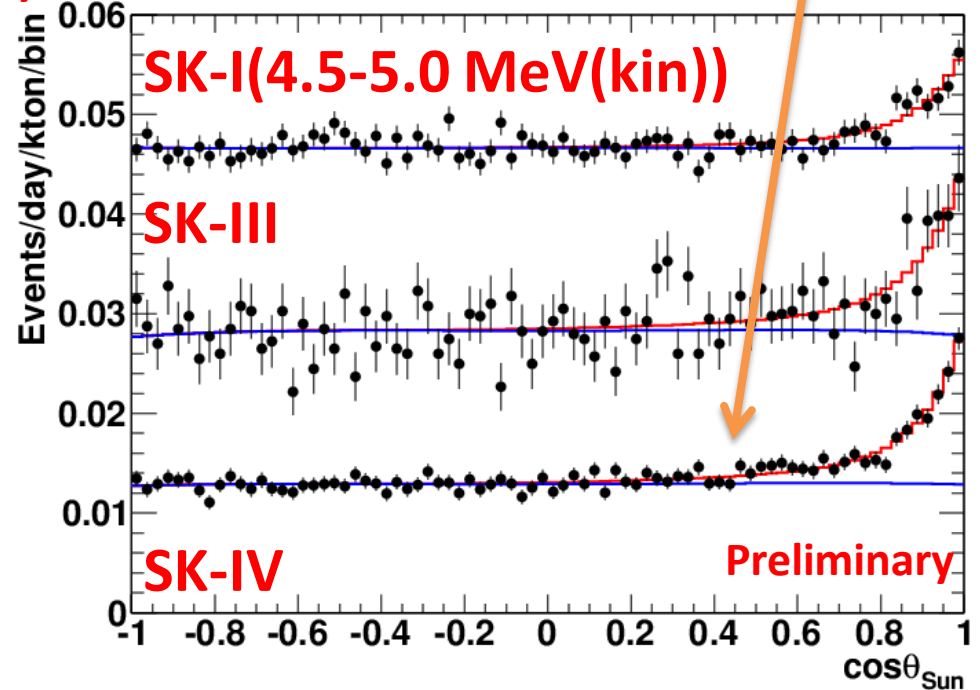
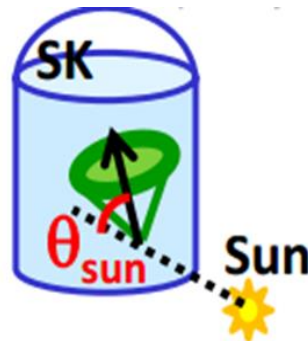
◆ solar ν observation

Elastic scattering



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

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



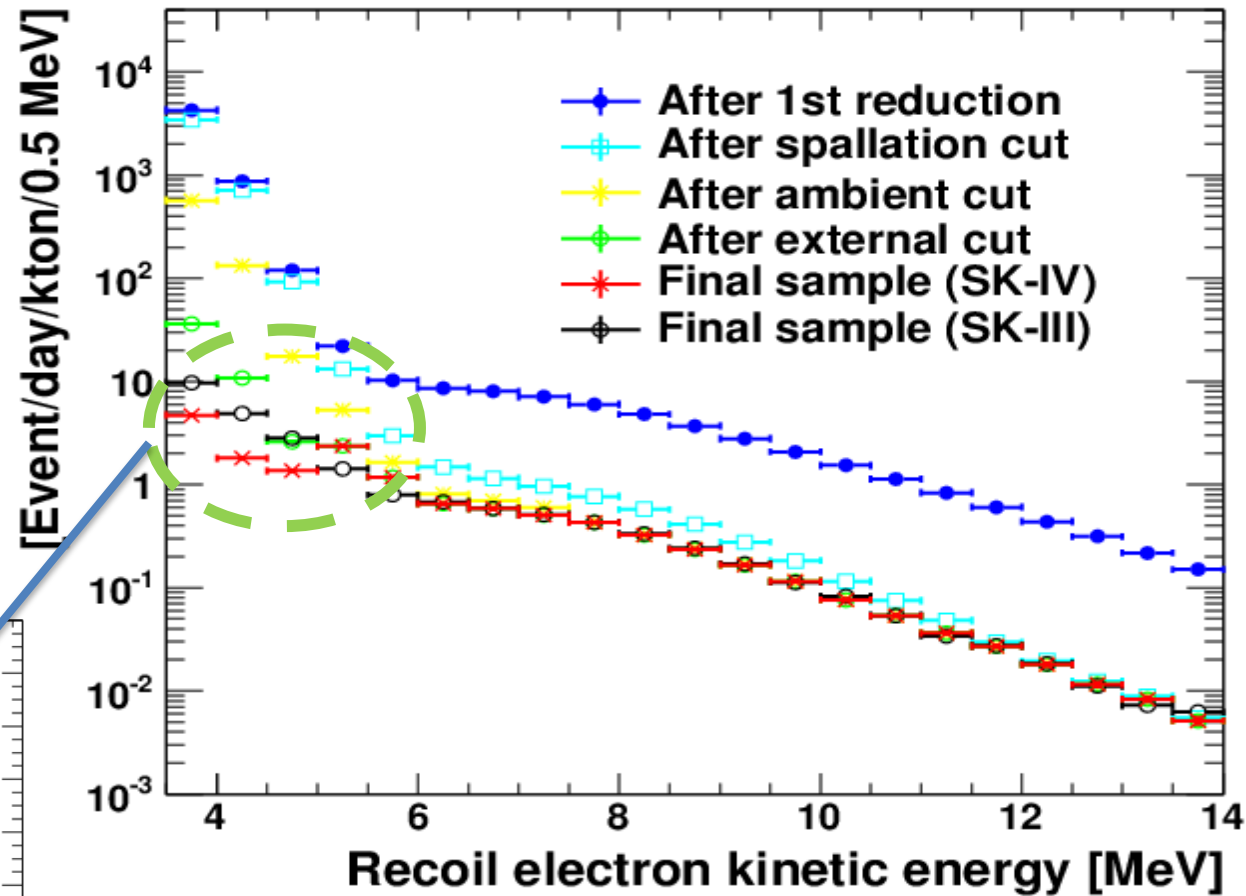
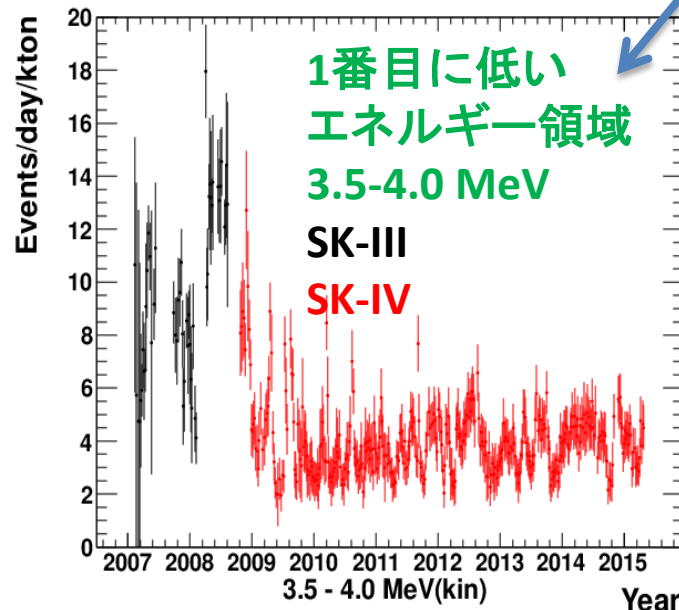
データリダクション後のイベント数

◆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。

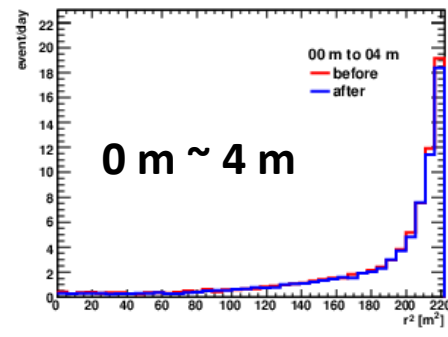
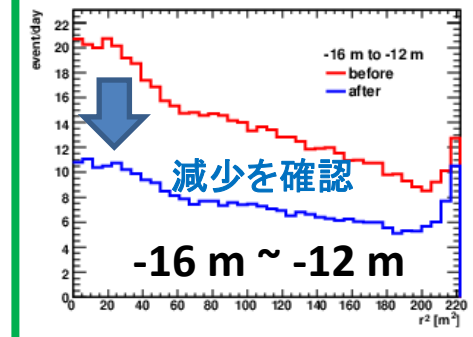
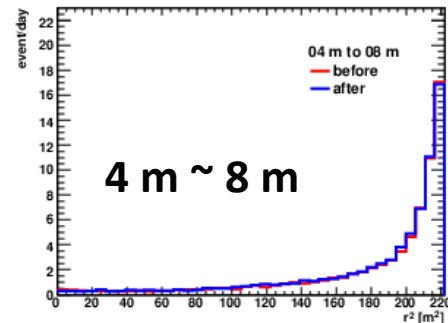
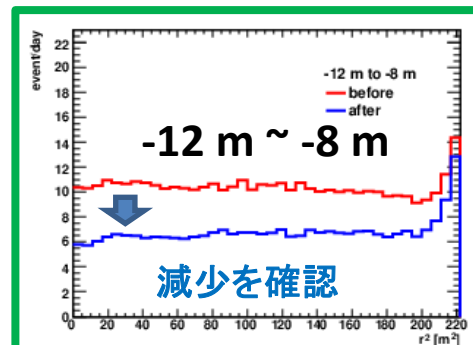
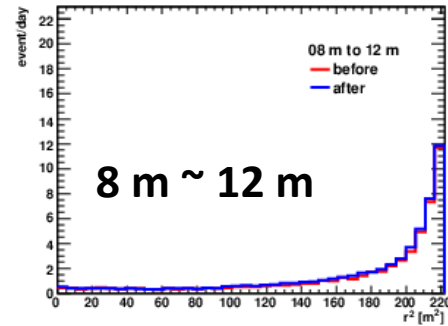
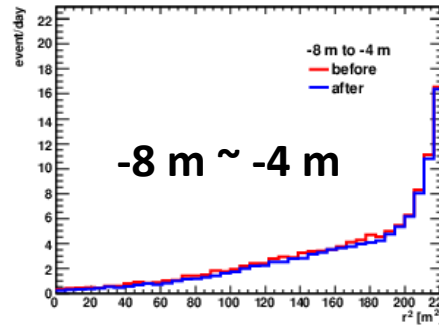
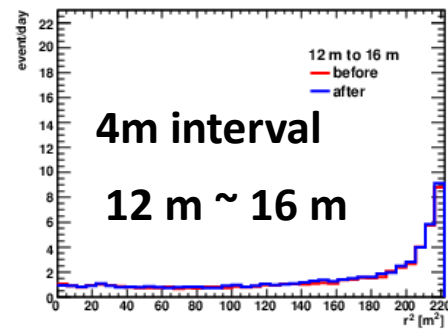
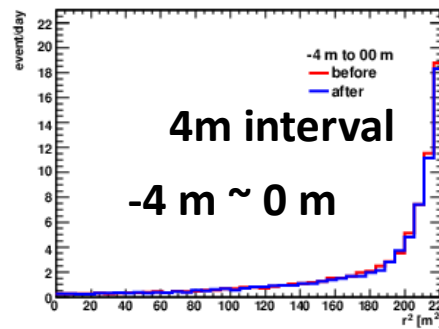
赤色 : Bypass前のイベント分布
青色 : Bypass後のイベント分布

$z < -8\text{m}$ 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

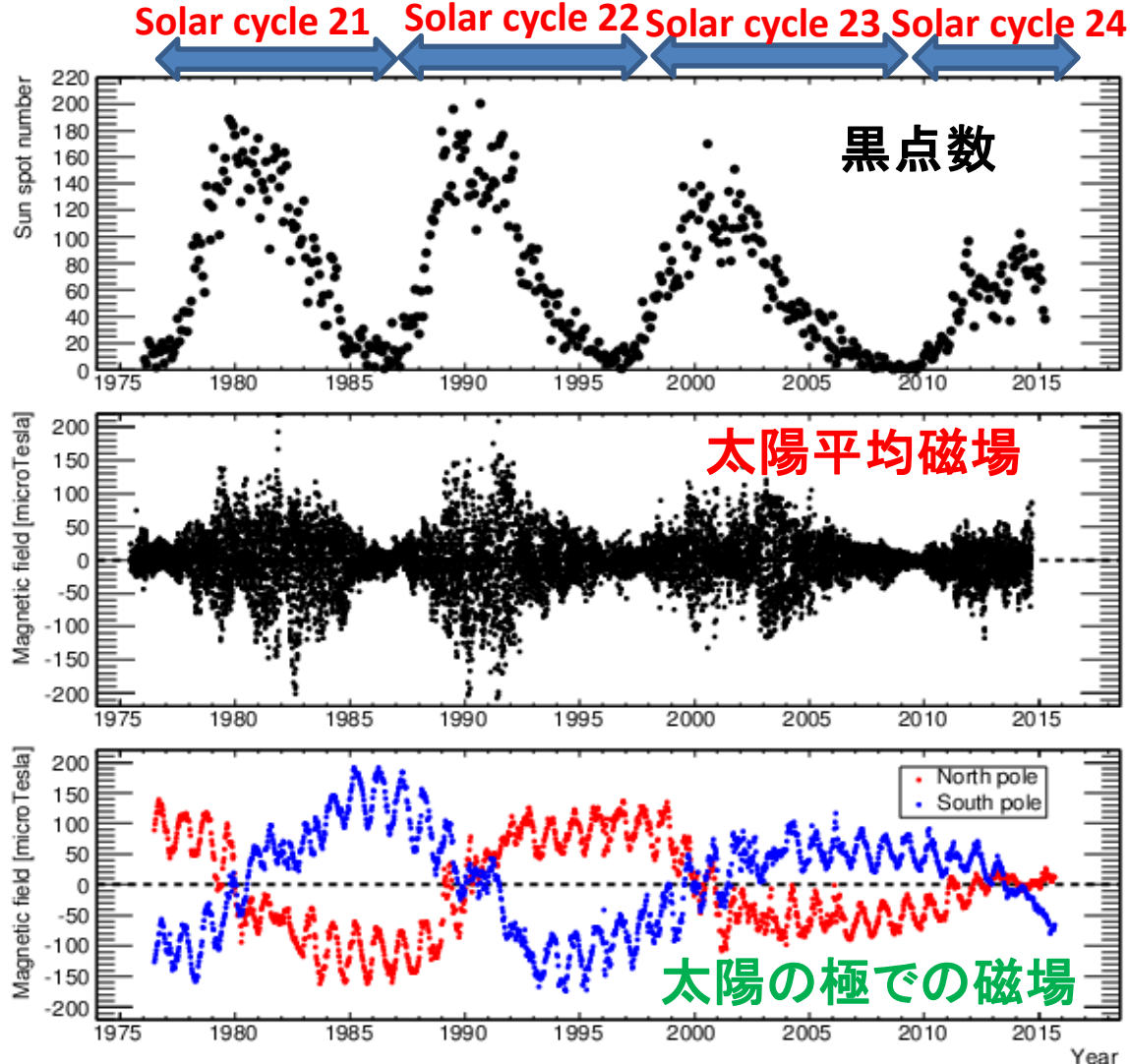
太陽活動は約11年周期をもつ。
 現在は Solar cycle 24 の途中。
 Solar cycle 24 は活発ではない。
 →表面の黒点数が少ない。

◆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>

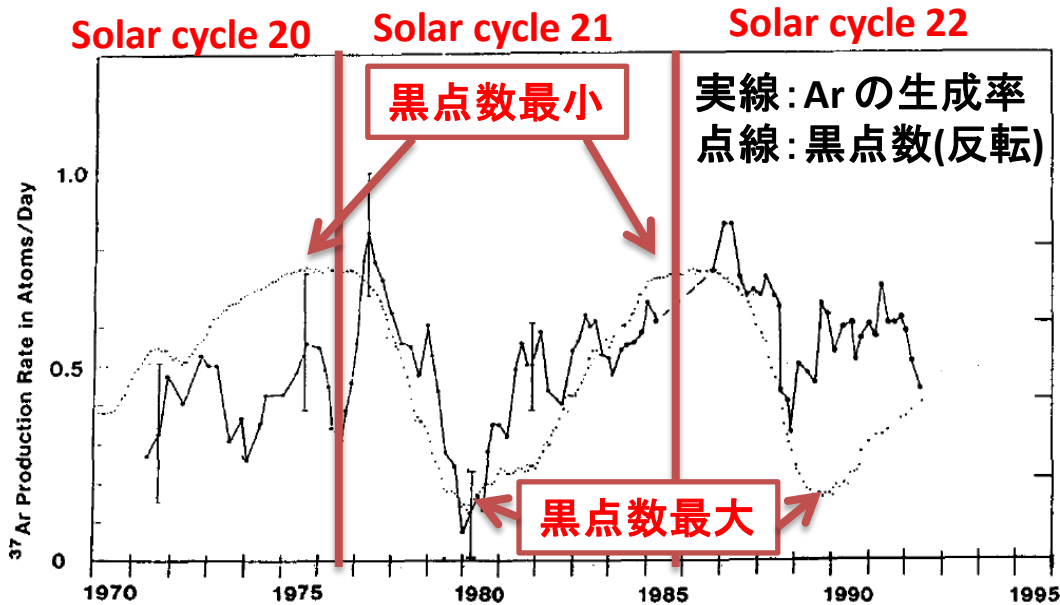
過去の実験結果

◆ 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)。

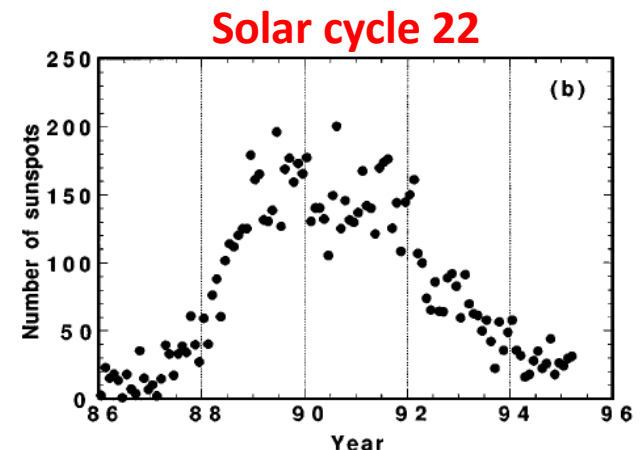
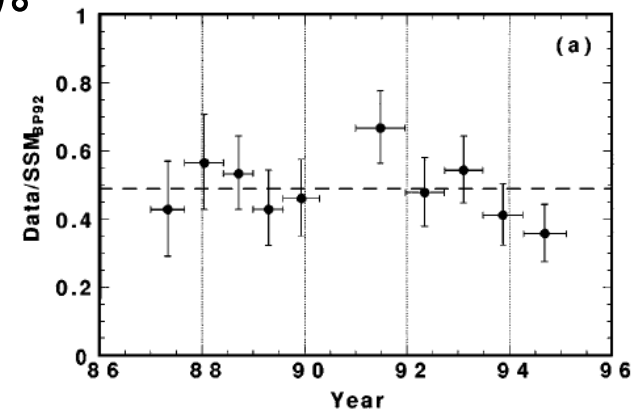
◆ KAMIOKANDE 実験

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 \rightarrow 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GEMAA実験により、以下のような制限がつけられている。

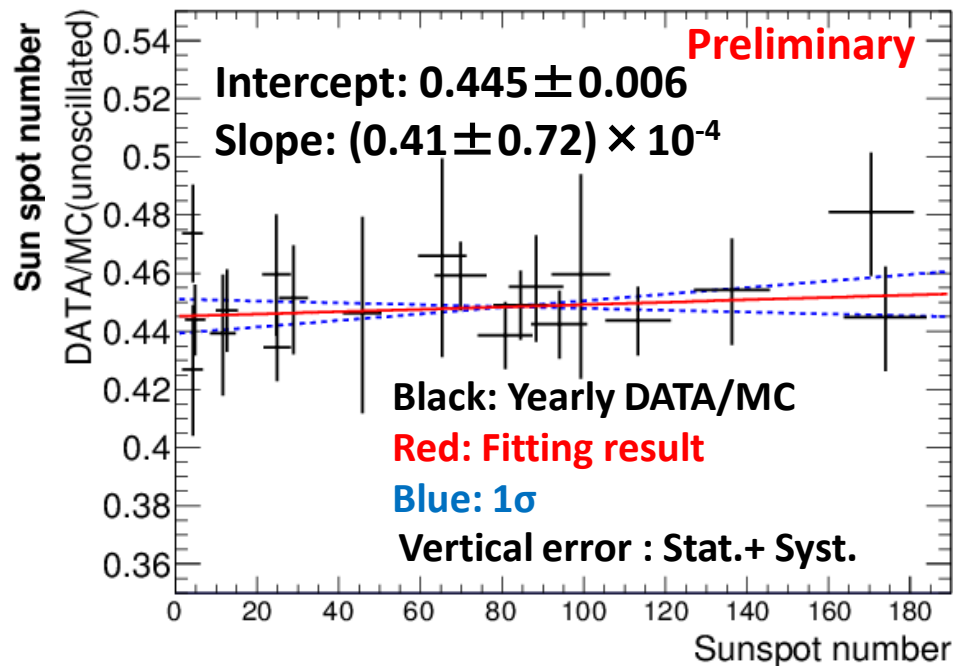
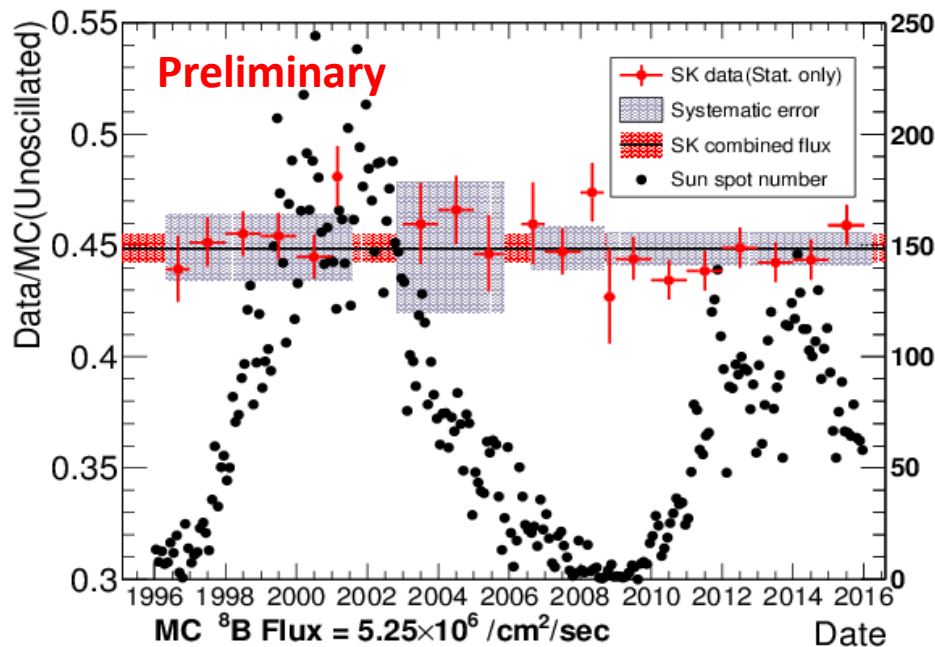
$$\mu_{\nu} < 2.9 \times 10^{-11} \mu_B \text{ (90\% C.L.)}$$

☆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)

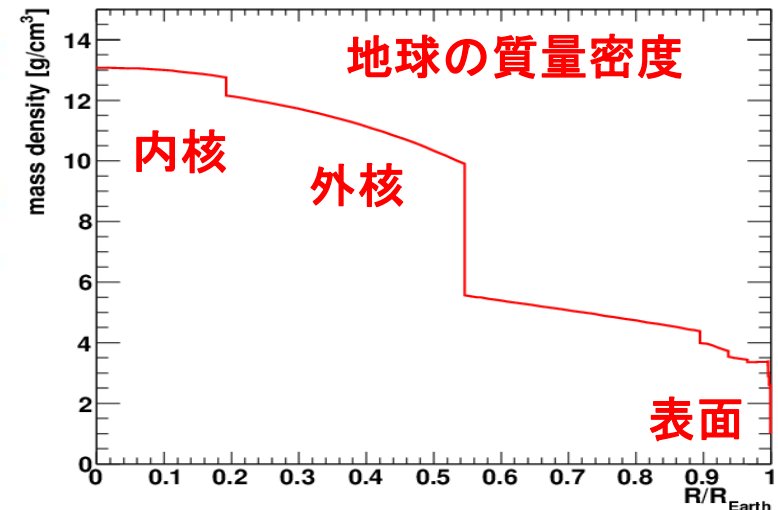
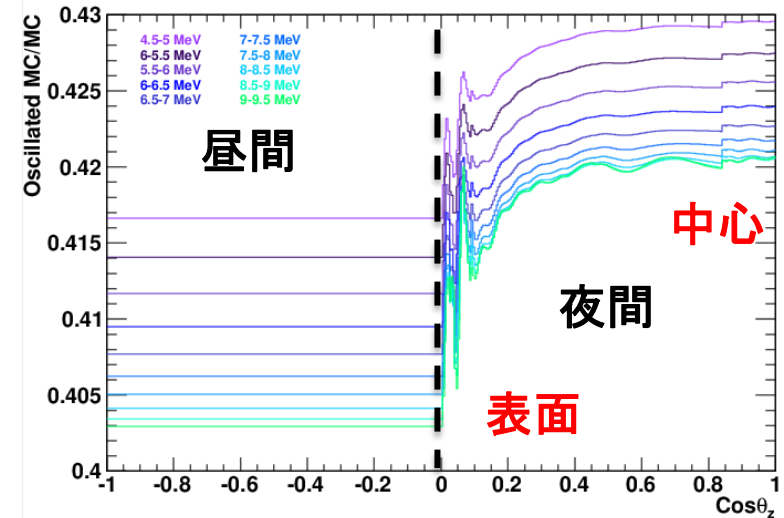
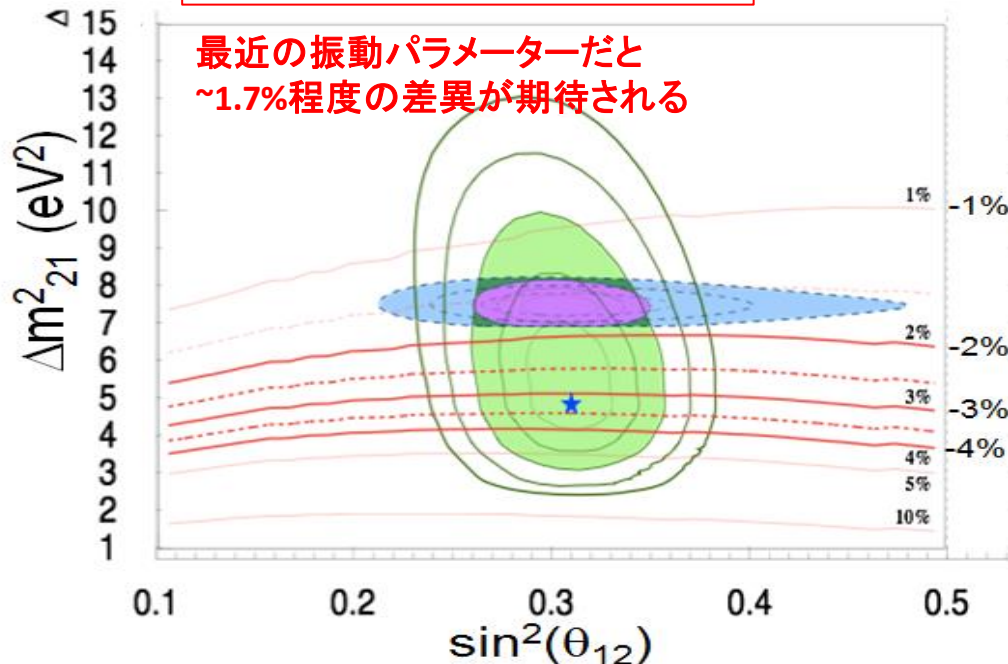
◆物質効果の直接観測

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

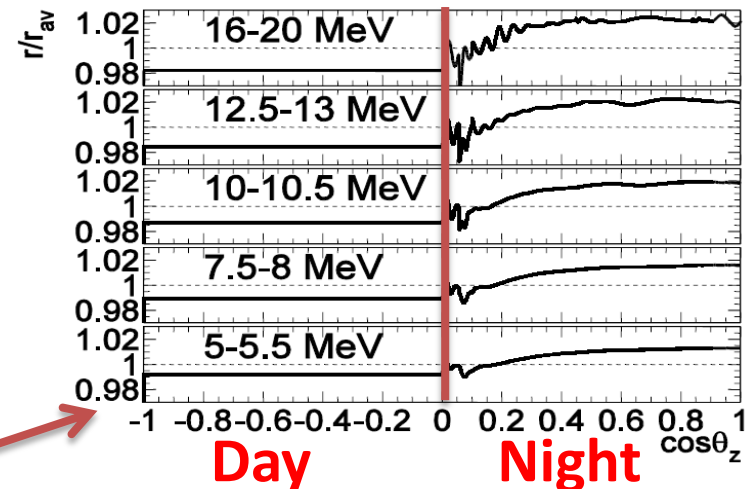
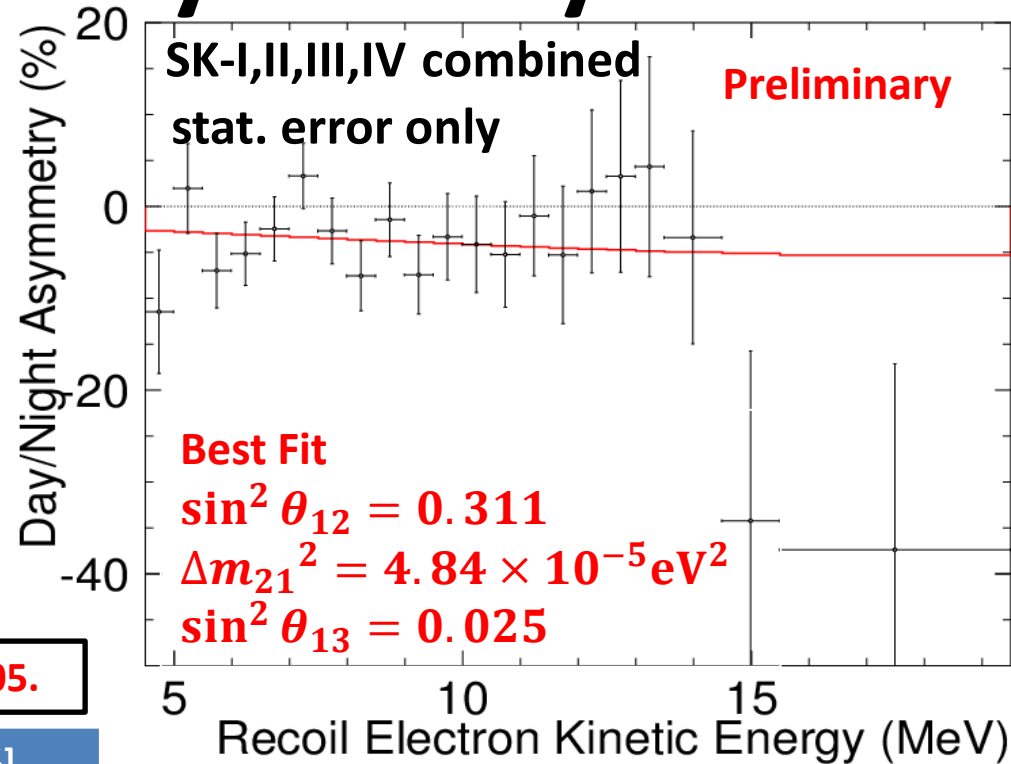
Day-Night asymmetry is expected to be $\sim 3\%$ in the SK energy region.

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

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	$-3.3 \pm 1.0 \pm 0.5$ (3.0 σ from zero)	$-4.1 \pm 1.2 \pm 0.8$ (2.8 σ from zero)



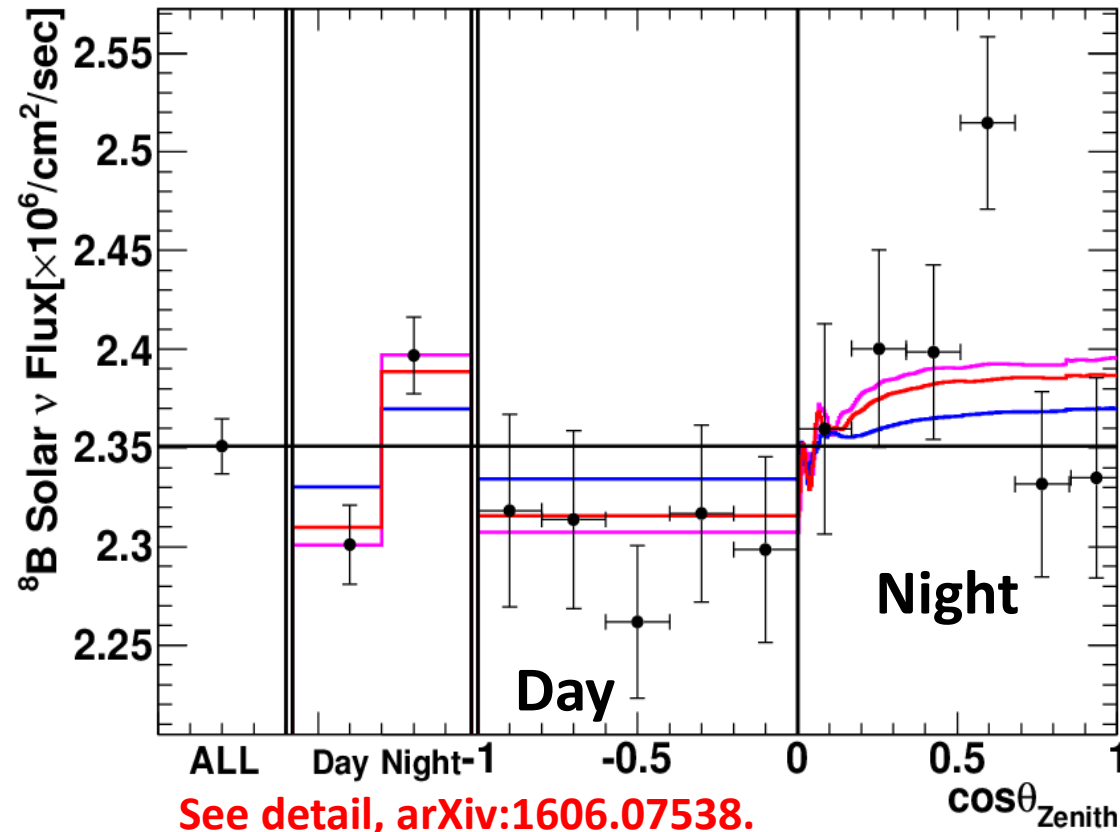
Expected time variation as a function of $\cos \theta_z$

Day/Night asymmetry

◆ zenith angle distribution

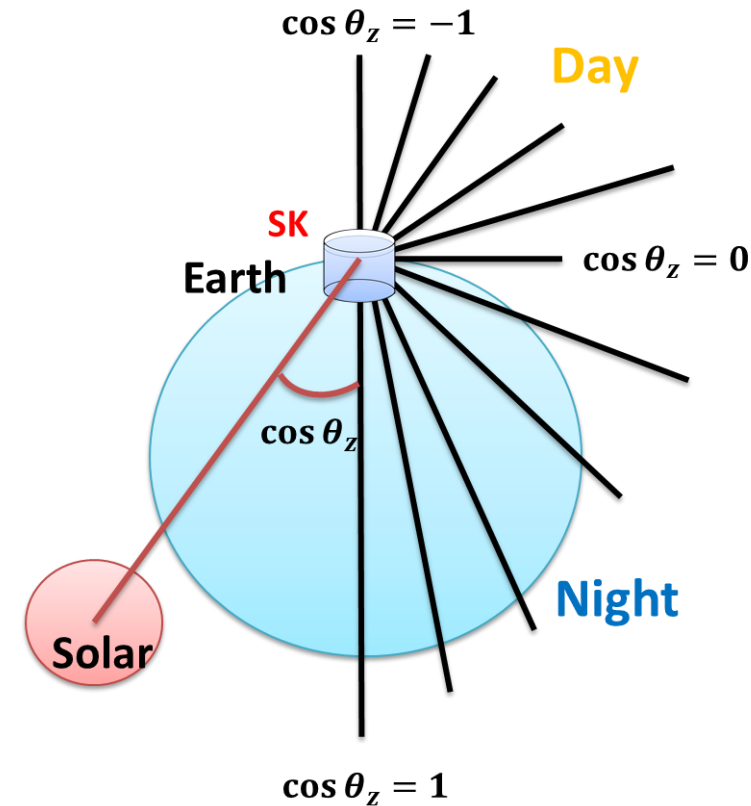
Clear flux difference between day-time and night-time.

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



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

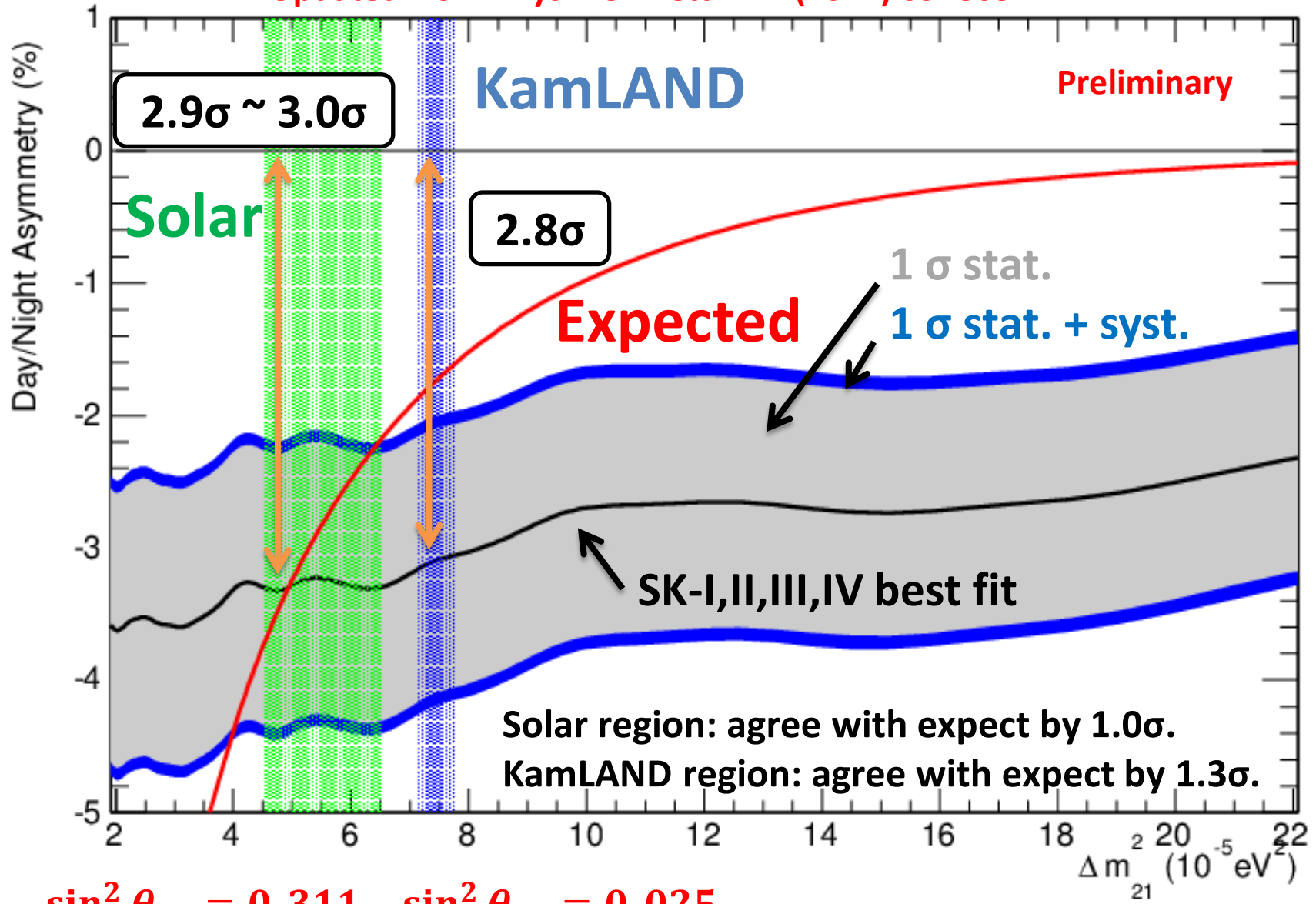
Updated from Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 091805.



SK - I,II,III,IV combined

Δm_{21}^2 vs Day/Night Asymmetry

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



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