



12aU32-2

# スーパーカミオカンデ検出器における 太陽ニュートリノ解析の最新結果

(周期解析について)



平成29年度 若手研究 (B)  
課題番号: 17K17880

神戸大理 長谷川誠  
他Super-Kamiokande Collaboration  
2017年9月12日(火)

日本物理学会 2017年秋季大会 宇都宮大学

# スーパーカミオカンデ(SK) 実験

## SK検出器

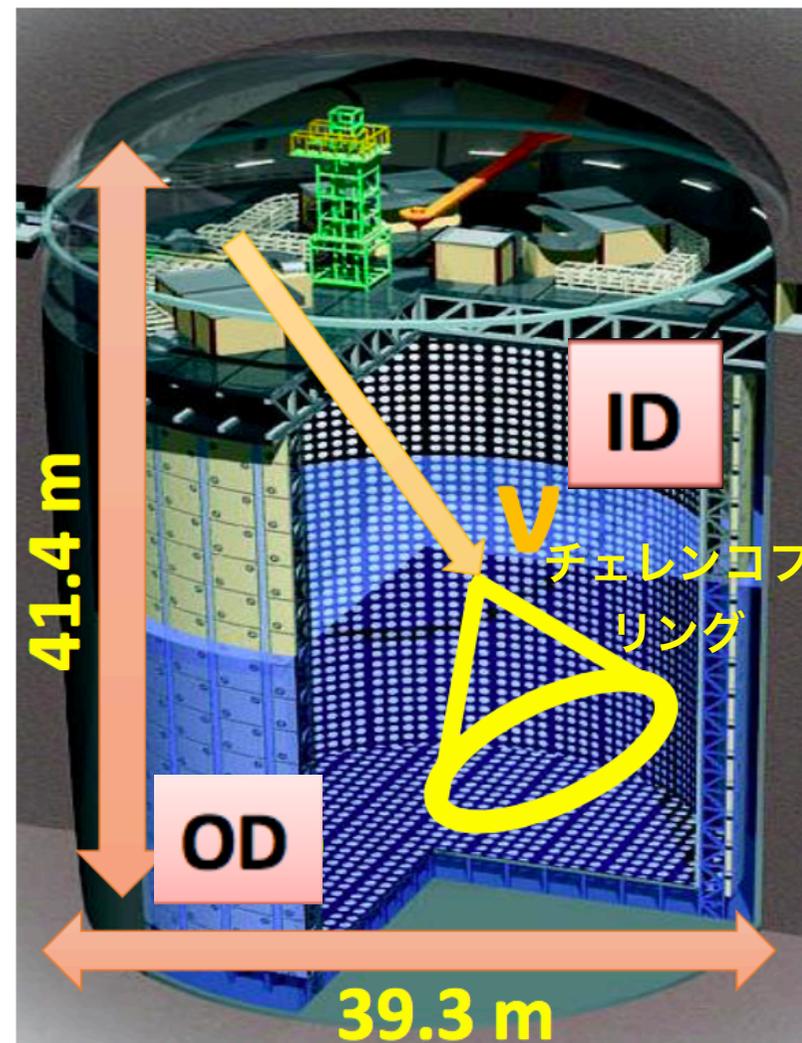
岐阜県飛騨市 池の山 地下1000 mに設置

## チェレンコフ検出器

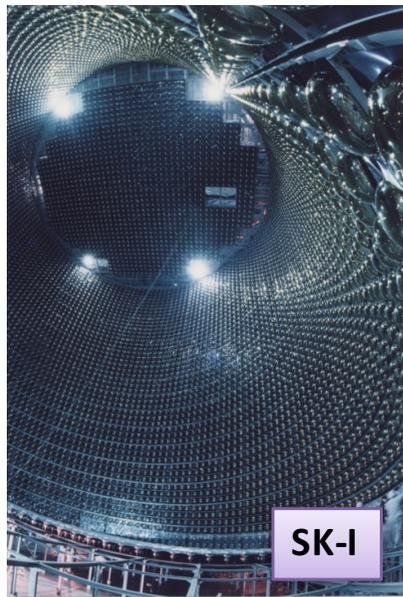
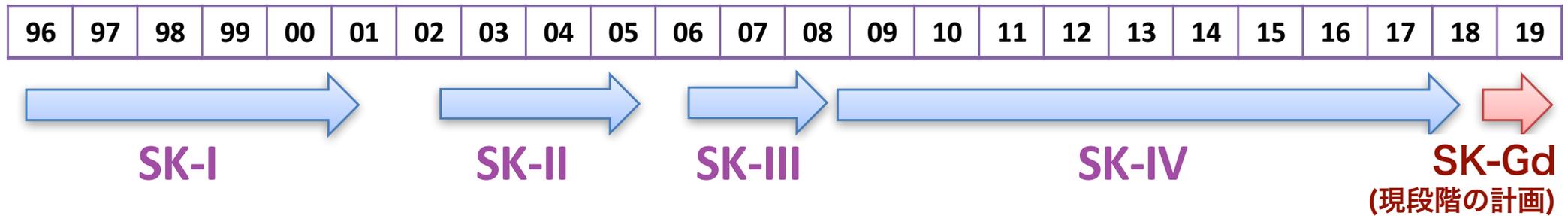
- ・ 純水 50.0 kton(有効体積22.5 kton)
- ・ Inner Detector (ID)の壁面に  
~11,000 個の20- inch 光電子増倍管
- ・ エネルギー、方向、Particle ID

## SK実験における主な研究内容

- ・ 太陽ニュートリノ観測
- ・ 超新星(背景)ニュートリノ観測
- ・ 陽子崩壊
- ・ 長基線ニュートリノ観測
- ・ 大気ニュートリノ観測



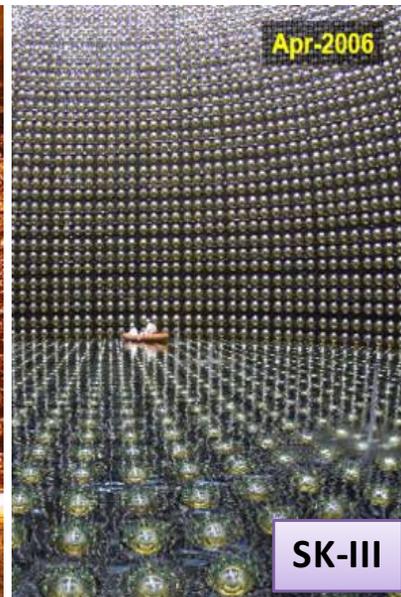
# SK実験期間



11146 ID PMTs  
(40% coverage)  
4.5 MeV



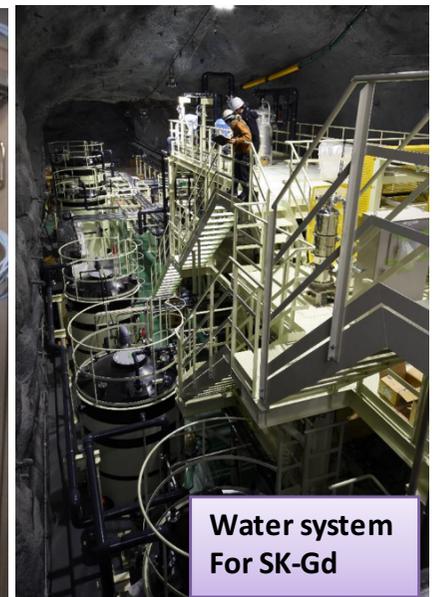
5182 ID PMTs  
(19% coverage)  
6.5MeV



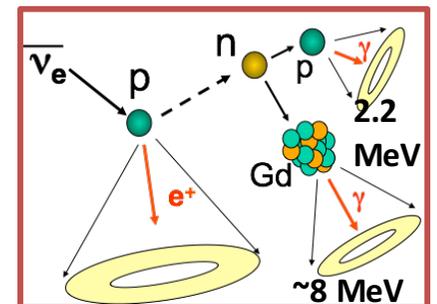
11129 ID PMTs  
(40% coverage)  
4.0-6.5 MeV



Electronics Upgrade  
3.5MeV



Gdを用いた Neutron tagging



\*エネルギー閾値 (反跳電子の運動エネルギー)

# 典型的な太陽ニュートリノイベント

ニュートリノと電子の弾性散乱



(太陽ニュートリノ解析の場合)

- タイミング情報  
➡ 反応点の位置
- チェレンコフリングパターン  
➡ 反跳電子の方向
- ヒットPMTの数  
➡ 反跳電子のエネルギー  
~6 hit/MeV (SK-I,III,IV)

## イベントディスプレイ

Super-Kamlokande

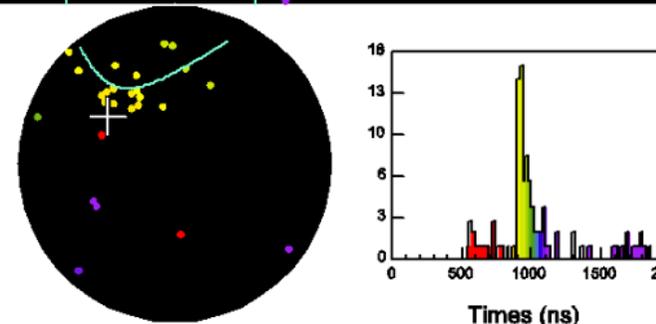
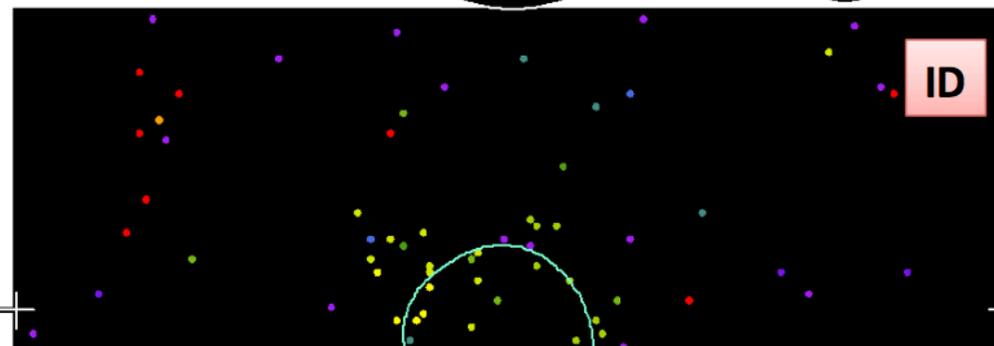
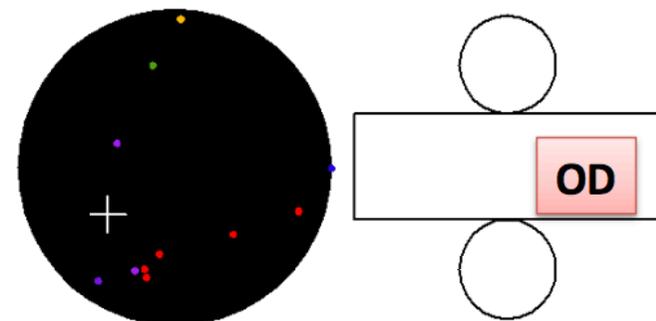
Run 1742 Event 102496  
96-05-31:07:13:23  
Inner: 103 hits, 123 pE  
Outer: -1 hits, 0 pE (in-time)  
Trigger ID: 0x03  
E= 9.086 GDN=0.77 COSSUN= 0.949  
Solar Neutrino

Time(ns)

• < 815  
• 815- 835  
• 835- 855  
• 855- 875  
• 875- 895  
• 895- 915  
• 915- 935  
• 935- 955  
• 955- 975  
• 975- 995  
• 995-1015  
• 1015-1035  
• 1035-1055  
• 1055-1075  
• 1075-1095  
• >1095

(color: time)

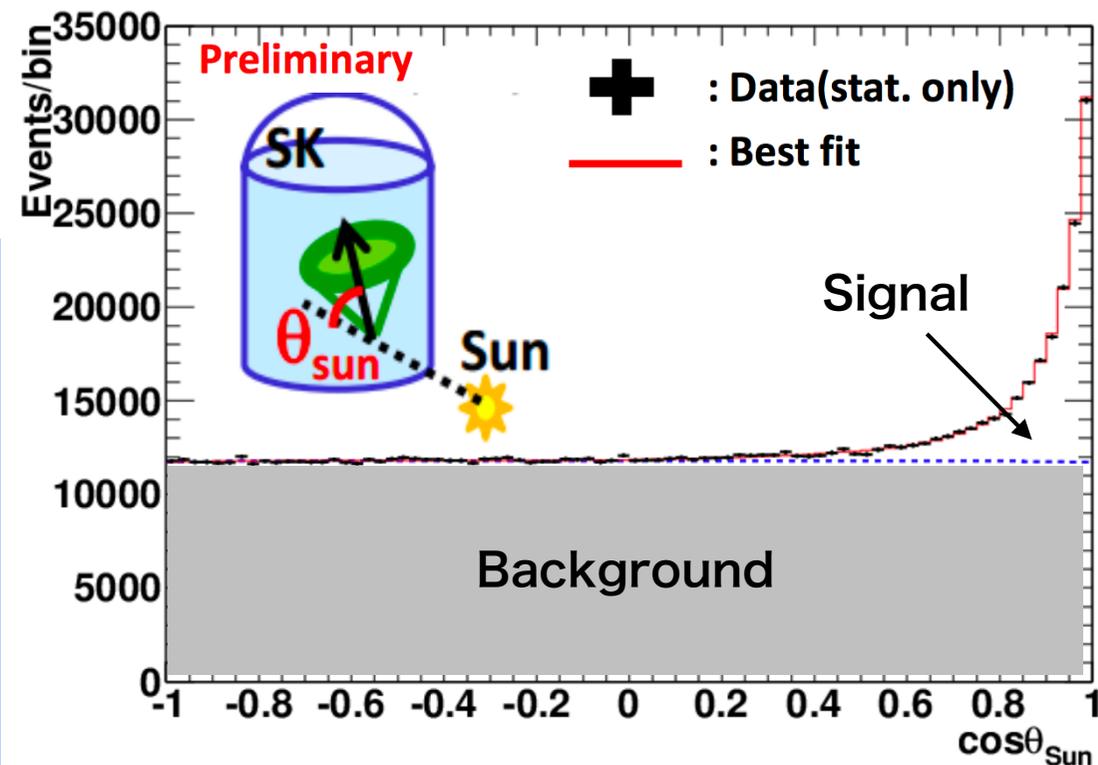
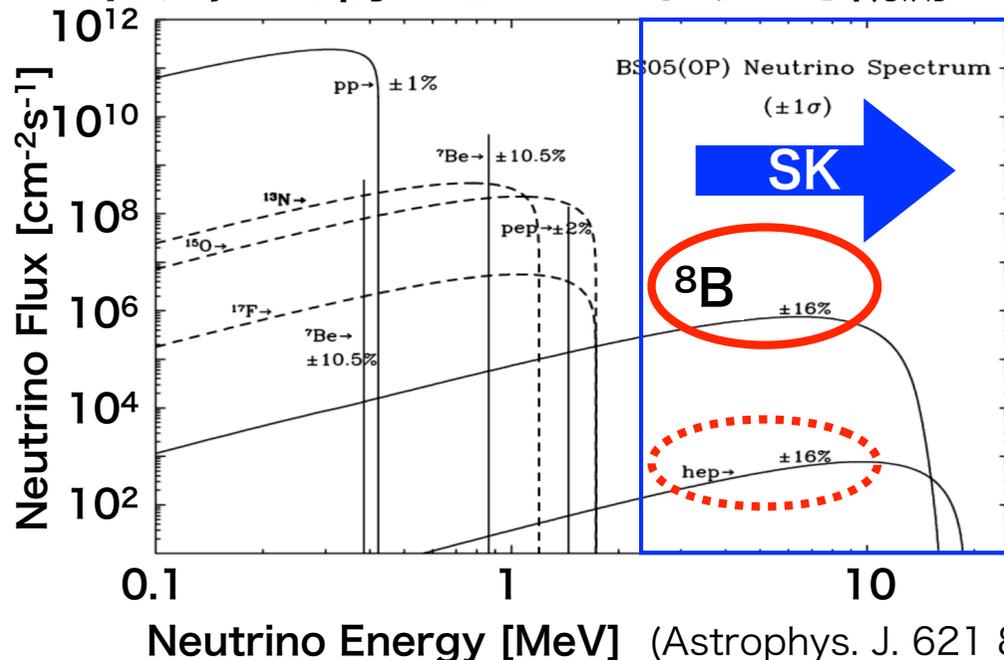
$E_{e,\text{total}} = 9.1 \text{ MeV}$   
 $\cos\theta_{\text{sun}} = 0.95$



# 太陽ニュートリノイベント

## 太陽ニュートリノ観測

太陽ニュートリノの中でも比較的  
エネルギーの高い<sup>8</sup>Bニュートリノを観測



SKで観測した  
太陽ニュートリノの総数  
~ 2016年3月末

**約84,000 events**

SK phase	Live time [日]	<sup>8</sup> B Flux [ $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ] (ニュートリノ振動を仮定しない場合)
SK-I	1496	$2.38 \pm 0.02 \pm 0.08$
SK-II	791	$2.41 \pm 0.05^{+0.16}_{-0.15}$
SK-III	548	$2.40 \pm 0.04 \pm 0.05$
SK-IV	2365	$2.32 \pm 0.02 \pm 0.04$ [preliminary]
<b>SK Combined</b>	<b>5200</b>	<b><math>2.36 \pm 0.03</math></b> (stat.+syst.) [preliminary]

➡ <sup>8</sup>Bニュートリノfluxは  
誤差の範囲内で一致

# 本研究の背景と目的

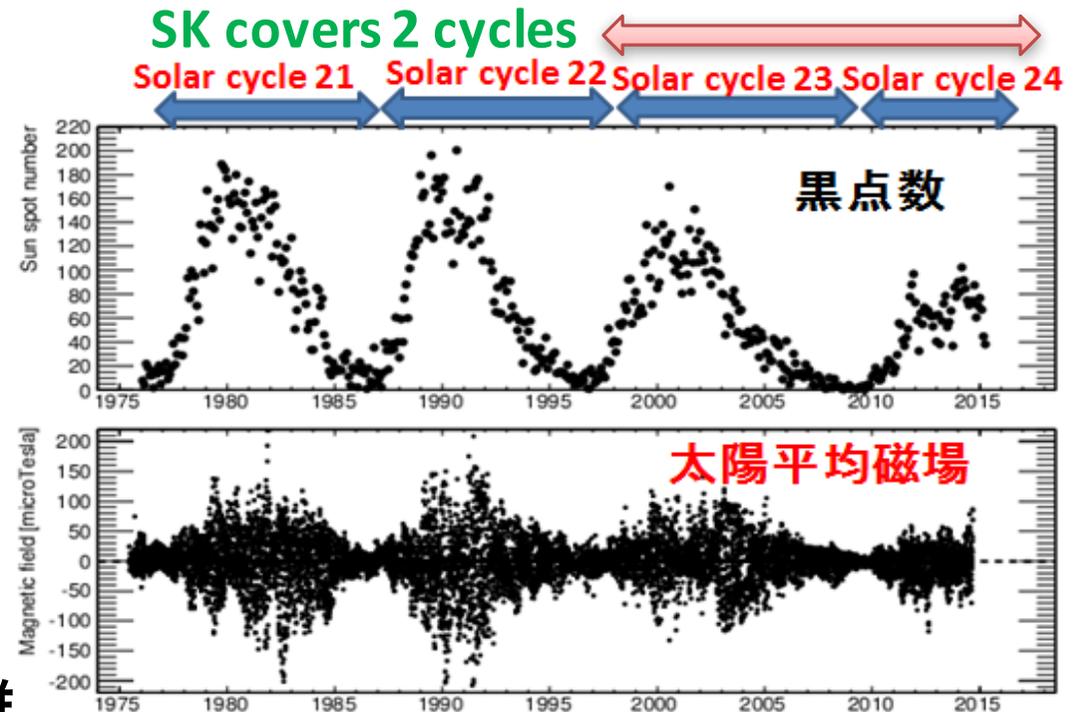
## 背景

光学的観測により太陽表面付近の活動の周期的変動を確認

例) 太陽表面の黒点数の変動、  
太陽平均磁場の変動 (約11年)

→ 太陽内部活動の観測は  
光学的方法では困難

→ **ニュートリノは透過性がよく**  
**リアルタイムに太陽内部の情報を得ることが可能**



上図: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot num.txt>

下図: [http://wso.stanford.edu/meand/MF\\_timeseries.txt](http://wso.stanford.edu/meand/MF_timeseries.txt)

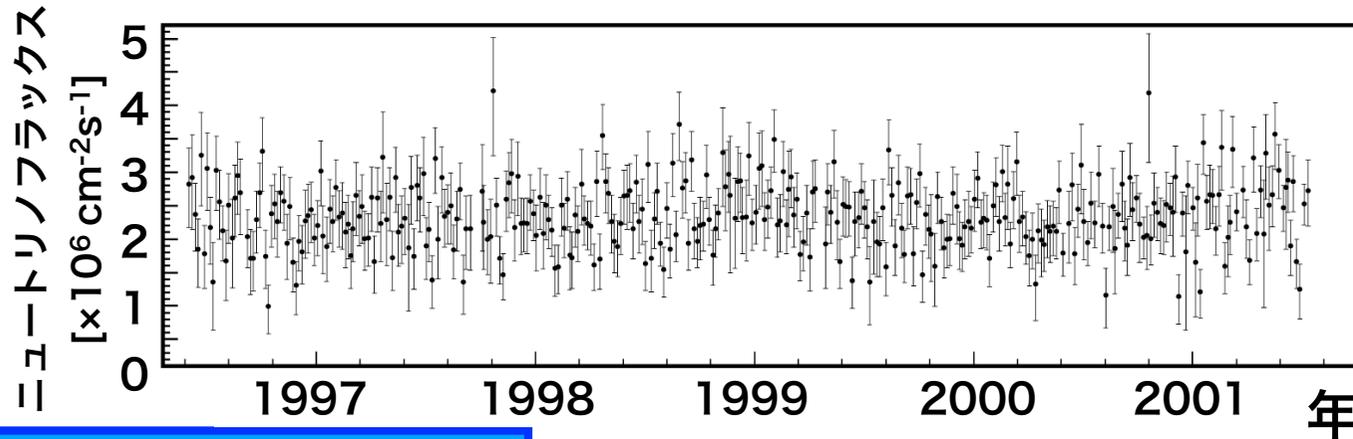
## 目的

SK実験における太陽ニュートリノフラックスの観測から太陽内部活動の周期的変動の有無を確認

# 太陽ニュートリノフラックス周期変動探索 <sup>7</sup>

**先行研究** SK-I [1996-2001年] において太陽ニュートリノフラックスに  
周期的な変動があるか探索 ( Phys. Rev. D 68, 092002 (2003) )

## 観測ニュートリノフラックス [ $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]



- SK-I 1496 日
- 4.5-19.5 MeV  
(反跳電子の運動エネルギー)
- 5日間隔サンプル

## Lomb-Scargle法

検出器の較正やアップグレード等のため、太陽ニュートリノ事象の観測時間は不連続  
そのような不連続データセットからスペクトラム解析をするための手法

$$\hat{p}(\omega) = \frac{1}{\sum_i y_i^2} \left\{ \frac{[\sum_i y_i \cos \omega(t_i - \hat{\tau})]^2}{\sum_i \cos^2 \omega(t_i - \hat{\tau})} + \frac{[\sum_i y_i \sin \omega(t_i - \hat{\tau})]^2}{\sum_i \sin^2 \omega(t_i - \hat{\tau})} \right\}$$

$y_j$ : j 番目ビンの測定フラックス

$t_j$ : j 番目ビンの測定時刻

$\omega$ : 角振動数(=  $2\pi f$ )

$\tau$ : オフセット

## SKにおける解析結果(LS法)

Lomb-Scargle(LS)法を使用

43.7 year<sup>-1</sup>周辺に最大ピーク

( Phys. Rev. D 68, 092002 (2003))

Confidence Level 63.1%で有意ではない

## 他研究者における解析結果

\*上記と同じデータセットを使用

Generalized Lomb-Scargle(GLS)法を使用

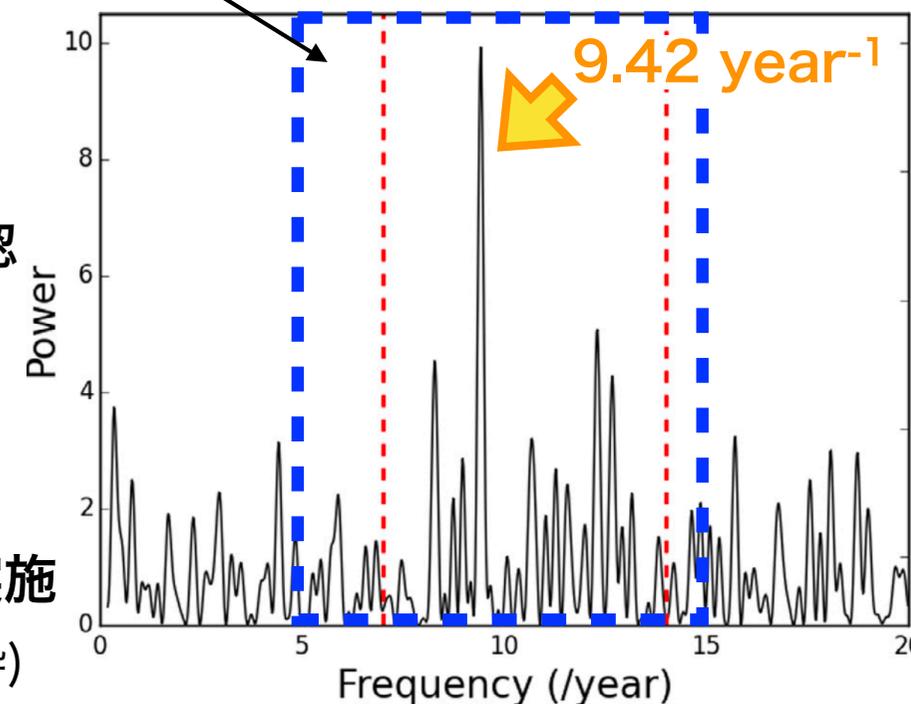
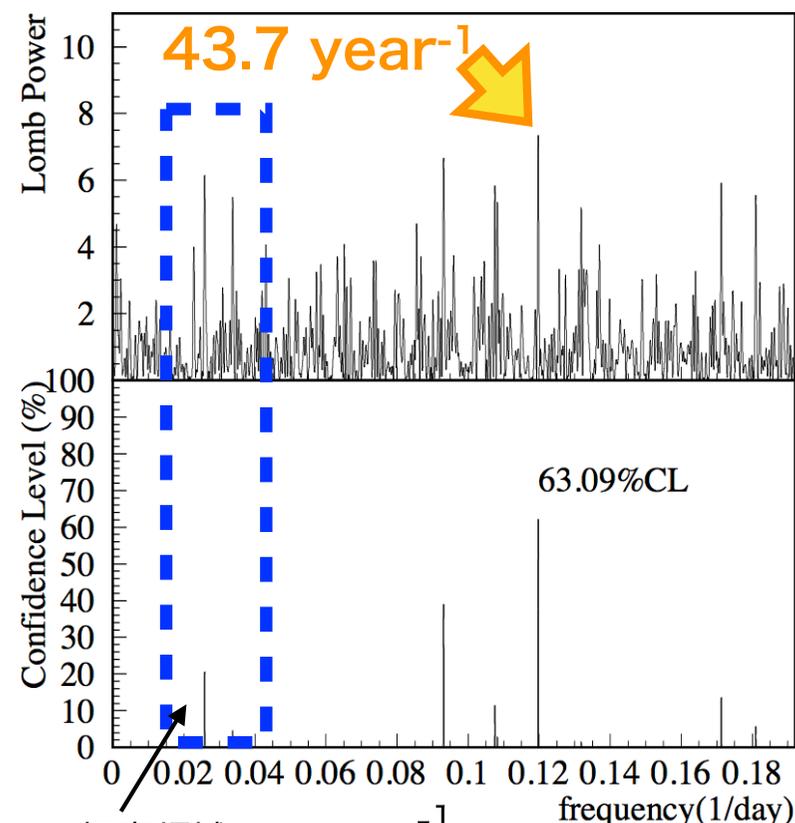
9.42 year<sup>-1</sup>周辺に最大ピーク

( Astropart.Phys.82,86-92(2016))

Confidence Level 98.5%で強い周期性を確認

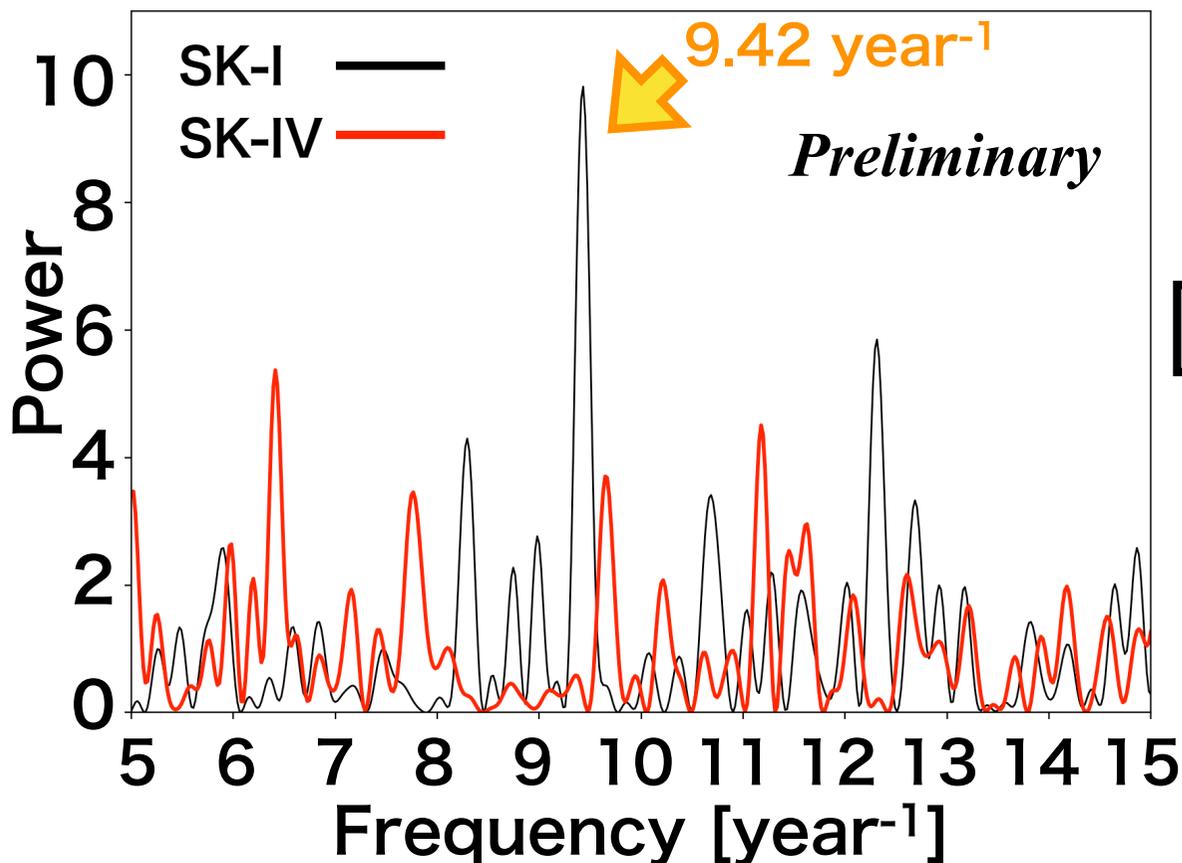
➡ SKと他研究者との解析結果に相違

1. GLS法を用いたSK-Iデータの再解析
  2. SK-IV(2008-2014年)の周期解析を実施
- 共に、探索領域を5-15 year<sup>-1</sup>に設定(青点線枠)



# SKにおける最新の解析結果 (GLS法)

	SK-I	SK-IV
Lifetime (Reference paper)	1496 日 (Phys. Rev. D 68, 092002(2003))	1664 日 (Phys. Rev. D 94, 052010 (2016))
運動エネルギー	4.5-19.5 MeV	
解析手法	Generalized Lomb-Scargle	
解析結果	9.42year <sup>-1</sup> にピークを確認 (他研究者の解析結果を再現)	9.42year <sup>-1</sup> にピークは 見られなかった



\*GLS法の解析にはastroML packageを使用

➡ SK-I(黒)とSK-IV(赤)で  
結果の相違が見られるか？

**今後**

- 他phase(SK-II,SK-III)の解析を実施
- 最新の観測データまで含めた解析
- 探索する周波数領域を拡張
- 周期解析における系統誤差の見積もり

# まとめ

- SK実験では $^8\text{B}$ ニュートリノを用いた太陽ニュートリノ観測を実施
- 光学的観測によって太陽表面付近の太陽活動の周期的変動の観測
- 太陽内部の観測は光学的方法では困難
- SKにおいてニュートリノフラックスにも周期的な変動が存在するかを研究
  - 先行研究の太陽ニュートリノフラックス解析では周期性は未発見
  - 新しいスペクトル解析方法により過去のデータ[1996年5月 - 2001年7月]から  $9.42 \text{ year}^{-1}$  周辺に強いピークを確認
  - 近年のデータ[2008年10月-2014年2月]からは  $9.42 \text{ year}^{-1}$  のピークは確認できず
  - 今後は、データ数を増やし周期変動に関する誤差を考慮した解析を予定