

太陽g-mode振動による 太陽ニュートリノ強度の 周期的な変動探索

第3回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会
2018年10月6日 (土)

東京大学 宇宙線研究所
研究所研究員 中野 佑樹



Supported by Grant-in-Aid for
Young Scientists (B) 17K17880

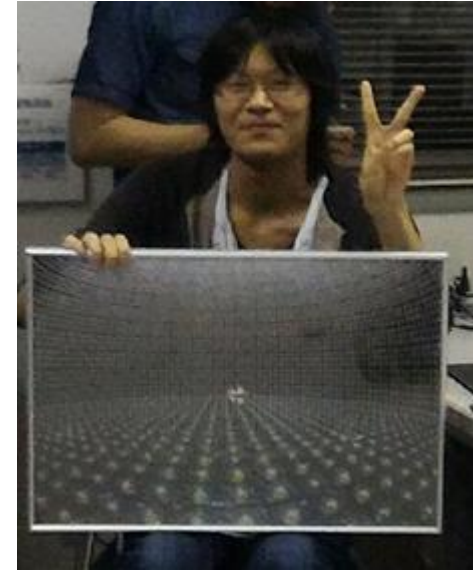


簡単な自己紹介

■ Profile

- 氏名: 中野 佑樹 (Yuuki Nakano)
- 職名: ポスドク
- 所属: 東京大学 宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設

HP: http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ynakano_s/



■ 研究分野

- **太陽ニュートリノ観測**
 - 博士論文 (エネルギースペクトルの測定)
 - その後, ニュートリノを用いて太陽g-mode振動の探索
- **天体現象由来のニュートリノ探索**
 - 超新星爆発, 太陽フレア, 重力波天体 (Multi-messenger)
- **低放射線分析 (^{222}Rn)**

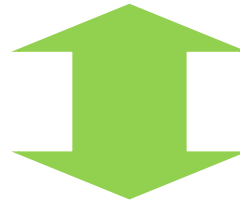


みんな、マルチメッセンジャーマルチメッセンジャー言っているけど、一番マルチに測定されてるの太陽だからな。

どうして太陽ニュートリノ??

■ 太陽(天体)としての興味

- どのようにして星は進化するのか.
 - **太陽標準模型** (今の太陽を説明する模型).
- 進化の過程でニュートリノはどんな役割を持つか.
 - 光は表面までに10-100万年程度, ニュートリノは2秒(+500秒).
 - **ニュートリノ生成と太陽活動**.



■ 素粒子物理としての興味

- 地球上で一番強いニュートリノビーム ($660 \text{ 億個/cm}^2/\text{sec}$).
 - **ニュートリノ振動**.
- 地球上では実現できない環境下でのニュートリノの振る舞い.
 - ニュートリノの**性質**, **物質中**でのニュートリノ振動.

講演の内容

- 太陽標準模型の太陽ニュートリノ
 - 太陽標準模型の概略
 - ニュートリノの生成

- Super-Kamiokande実験
 - 検出器の概略 (チェレンコフ光)
 - いくつかの最新の写真

- 太陽g-mode振動
 - 太陽における周期的な変動
 - g-mode振動によるニュートリノ強度変動

- まとめ

太陽標準模型 と 太陽ニュートリノ

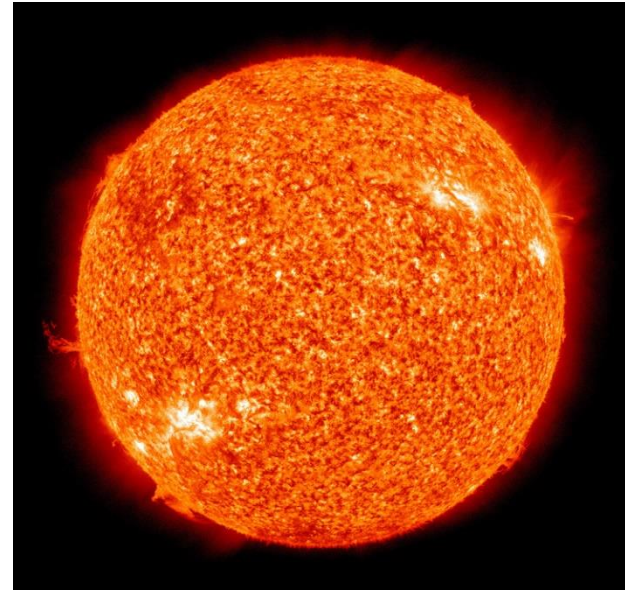
太陽標準模型

■ 概要

- 太陽(天体)の進化を説明する理論.
- 1960年代から模型構築が開始.
- 最近も細々した修正が行われている.

■ 模型の構築

- インプットと構築する際の仮定:
 - (1) 球対称性, 回転と磁場は無し.
 - (2) 質量の増減は無し, 化学組成は核融合により変化.
 - 初期状態: 現在の太陽質量, 一様な化学組成.
 - 重元素は, 現在の太陽表面の化学組成と同じ.
 - (3) エネルギーの生成: 太陽核領域の原子核反応.
 - (4) エネルギーの輸送: 光子のdiffusionと対流.
 - (5) 対流以外の運動は無し, 重力と熱輻射で安定.
- 現在の太陽 (45.7億年) を再現と比較: 光の強度, 半径, 化学組成...

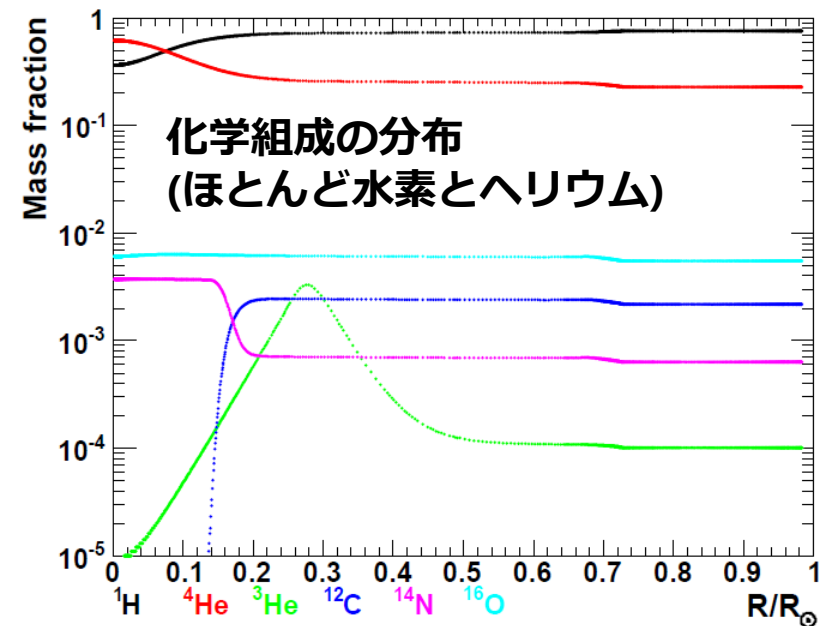
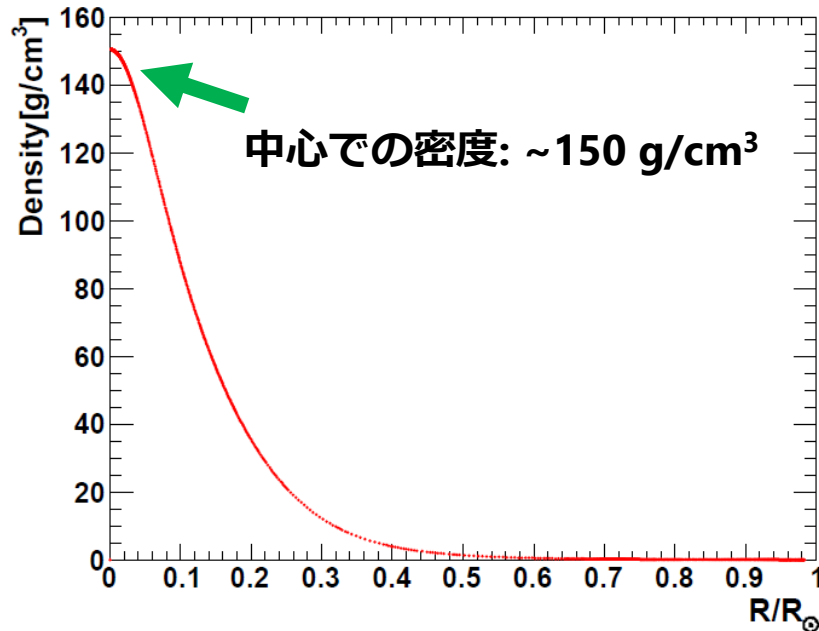
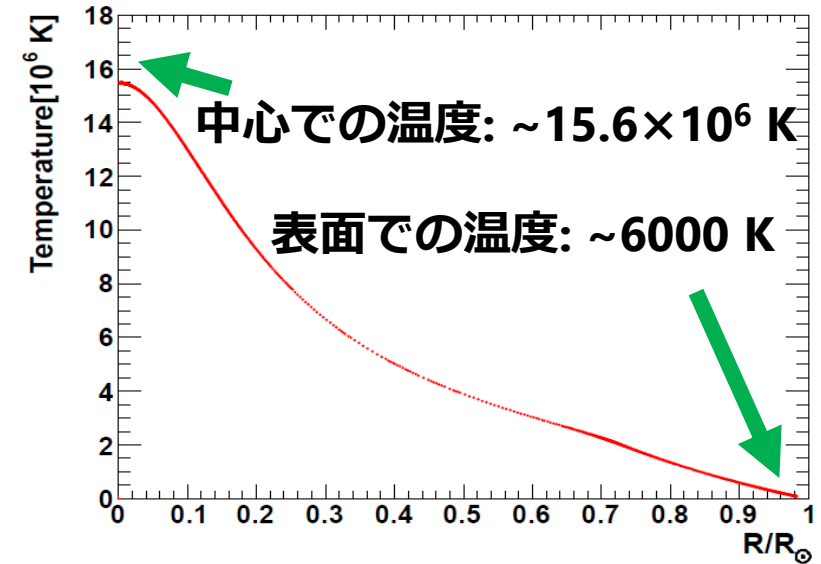


太陽標準模型からの予言

■ 予言できるパラメーター

- 内部構造:

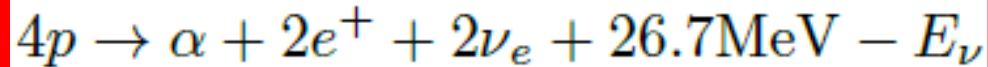
- (1) 温度
- (2) 電子密度 (圧力)
- (3) 化学組成の比率 など...



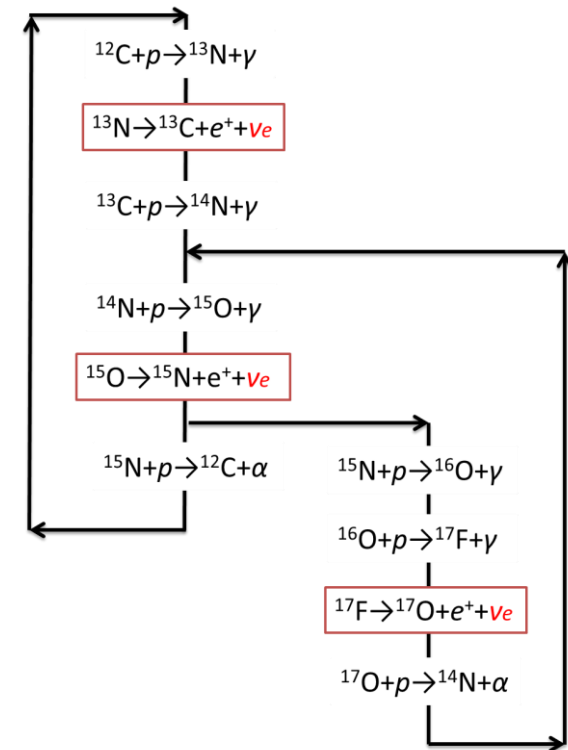
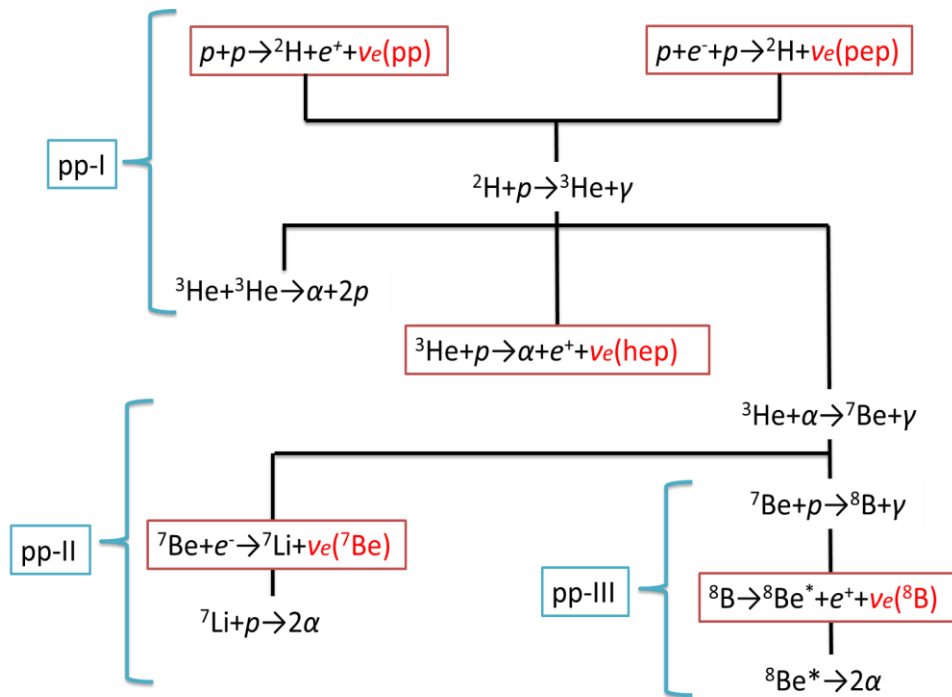
太陽ニュートリノの種類

■ 核融合反応

- 太陽核中心で太陽ニュートリノが生成.



→ pp-chain (98.8%), CNO-cycle (1.2%)



太陽ニュートリノの詳細

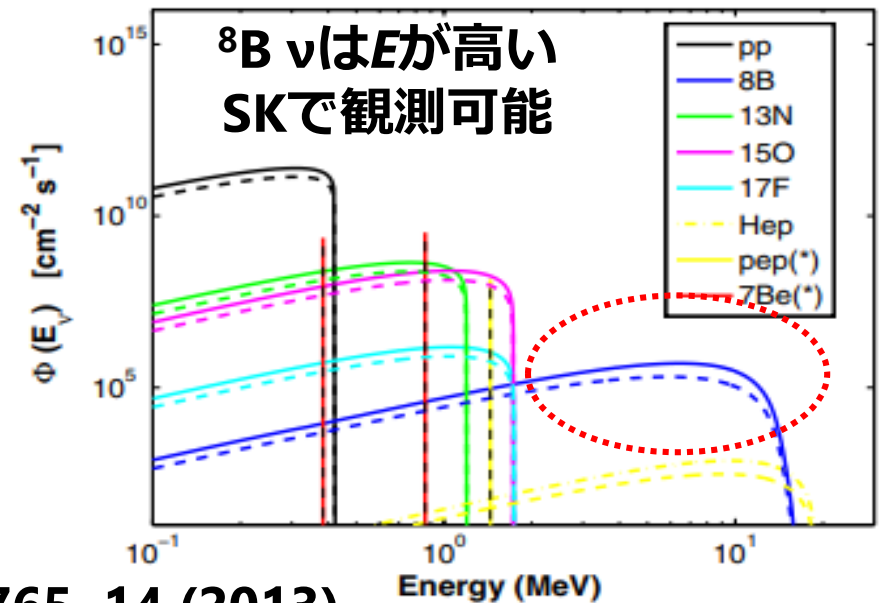
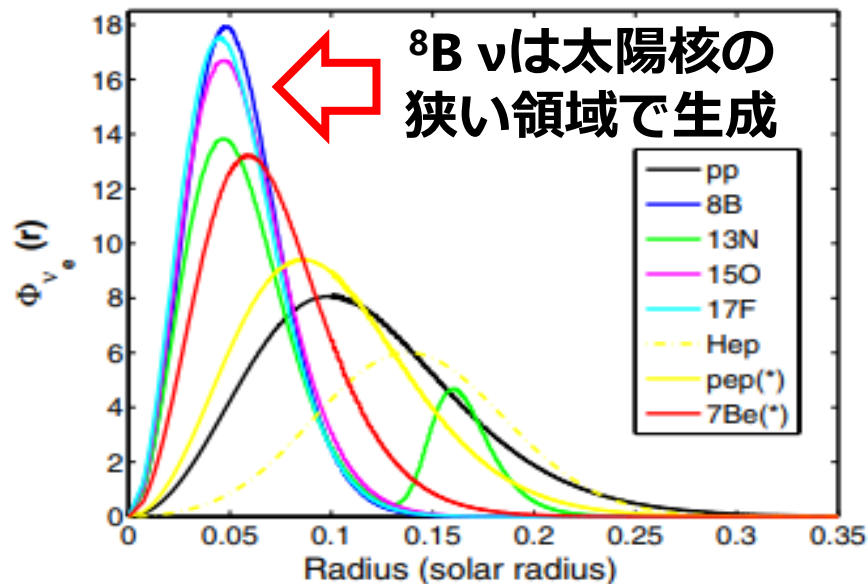
■ 太陽 ν の生成

- 太陽核領域での**核融合反応** (SKでは ${}^8\text{B}\nu$ を観測).

→ ${}^8\text{B}$ 生成率が核領域の

温度 T^{24-25} に比例 ($T \sim 10^6$ Kのオーダー).

Phys. Rev. D 53,
4202 (1996).



Astrophys. J. 765, 14 (2013).

Super-Kamiokande実験

Super-Kamiokande collaboration



Photo in 2015

Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan
 RCCN, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan
 University Autonoma Madrid, Spain
 University of British Columbia, Canada
 Boston University, USA
 University of California, Irvine, USA
 California State University, USA
 Chonnam National University, Korea
 Duke University, USA
 Fukuoka Institute of Technology, Japan
 Gifu University, Japan
 GIST, Korea
 University of Hawaii, USA
 Imperial College London, UK
 INFN Bari, Italy
 INFN Napoli, Italy

INFN Padova, Italy
 INFN Roma, Italy
 Kavli IPMU, The Univ. of Tokyo, Japan
 KEK, Japan
 Kobe University, Japan
 Kyoto University, Japan
 University of Liverpool, UK
 LLR, Ecole polytechnique, France
 Miyagi University of Education, Japan
 ISEE, Nagoya University, Japan
 NCBJ, Poland
 Okayama University, Japan
 Osaka University, Japan
 University of Oxford, UK
 Queen Mary University of London, UK
 Seoul National University, Korea

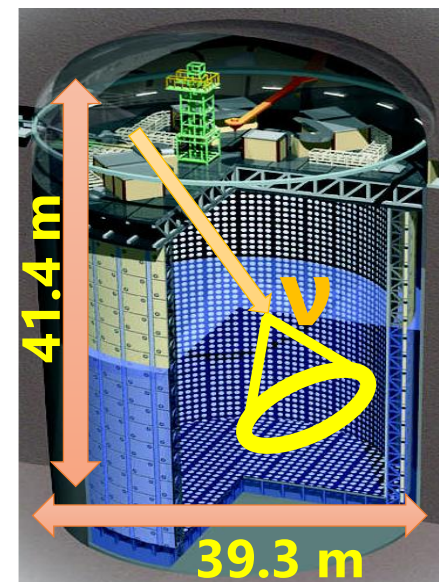
~165 people
45 institutes, 9 countries

University of Sheffield, UK
 Shizuoka University of Welfare, Japan
 Sungkyunkwan University, Korea
 Stony Brook University, USA
 Tokai University, Japan
 The University of Tokyo, Japan
 Tokyo Institute of Technology, Japan
 Tokyo University of Science, Japan
 University of Toronto, Canada
 TRIUMF, Canada
 Tsinghua University, Korea
 The University of Winnipeg, Canada
 Yokohama National University, Japan

Super-Kamiokande (SK)

■ 検出器の概略

- 岐阜県飛騨市神岡 (池ノ山の山頂から1000 m).
- 純水: 全部で**50 kton**の水槽.
 - 観測用の内水槽, 体積: 32.5 kton (22.5 kton).
 - 光センサー: 20-inchのPMT 11,129本.
- 観測手法: **水チェレンコフ光**.



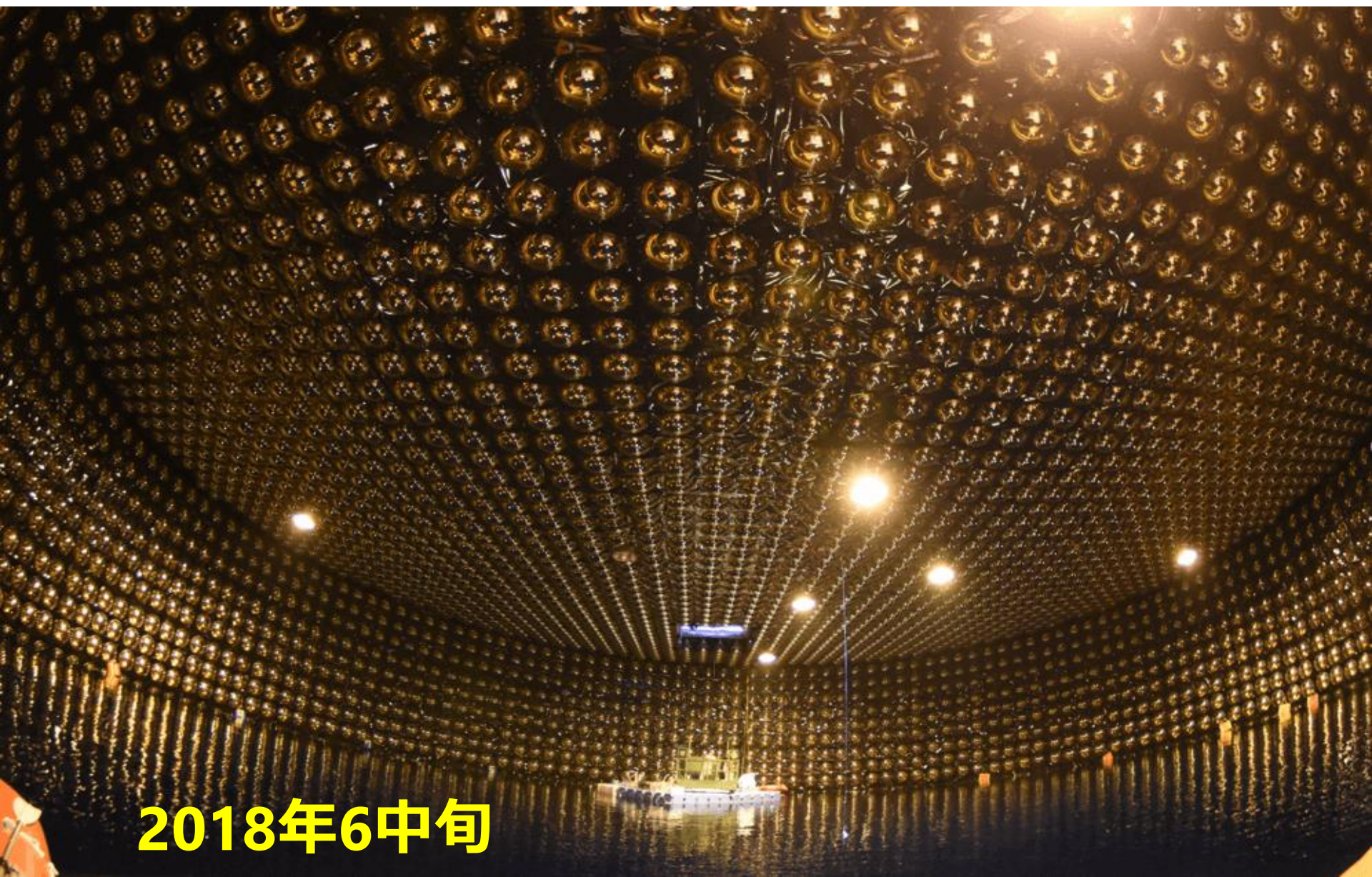
■ SK実験の歴史

- 1996年4月から観測を開始 (**~22年ほど**).
- 物理解析に利用できるLivetime: ~5500 days.
- 2018年5月30日: **将来計画 (SK-Gd)**へ補修工事.

96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SK-I						SK-II				SK-III			SK-IV										SK-Gd	
PMT 11,146 (40%*)						5,182 (19%*)				11,129 (40%*)										Nobel prize				
4.5 MeV**						6.5 MeV**				4.0 MeV**			3.5 MeV**											

* Photo coverage [%], ** Recoil electron kinetic energy [MeV].

SK検出器の内部の様子

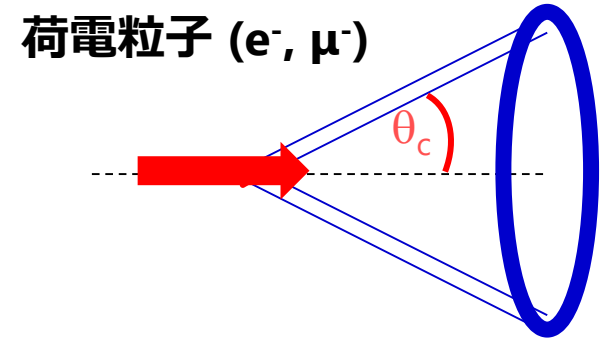


2018年6中旬

チェレンコフ光

■ 物理背景

- 真空中: **光子 (photon)**は**光速 (c)** で伝搬.
- 物質中: **屈折率 (n)** により速度が変化.



■ チェレンコフ放射の原理

- 物質中を**荷電粒子**が伝播すると, **周りの物質が分極**する.
- 分極状態から平衡状態に戻るときに, **電磁波を放射**.
- 速度が c/n を超えると, **電磁波が荷電粒子に追いつけず増幅**.
- 進行方向となす角: $\cos \theta = 1/n\beta$ ($\beta = v/c$).

追いつけない

物質中の光速(c/n)



荷電粒子の速度 (v/n)



真空中の光速 (c)



^8B 太陽ニュートリノ観測

■ ^8B 太陽ニュートリノの信号

- **弾性散乱** ($\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$) → 反跳電子が**太陽方向**の情報を持つ。
- (1) 時間情報 → 事象発生の**位置** & **real-time**での観測
- (2) リングのパターン → **入射ニュートリノの方向**に関する情報
- (3) PMTのヒット数 → エネルギー ($\sim 6 \text{ p.e./MeV}$)

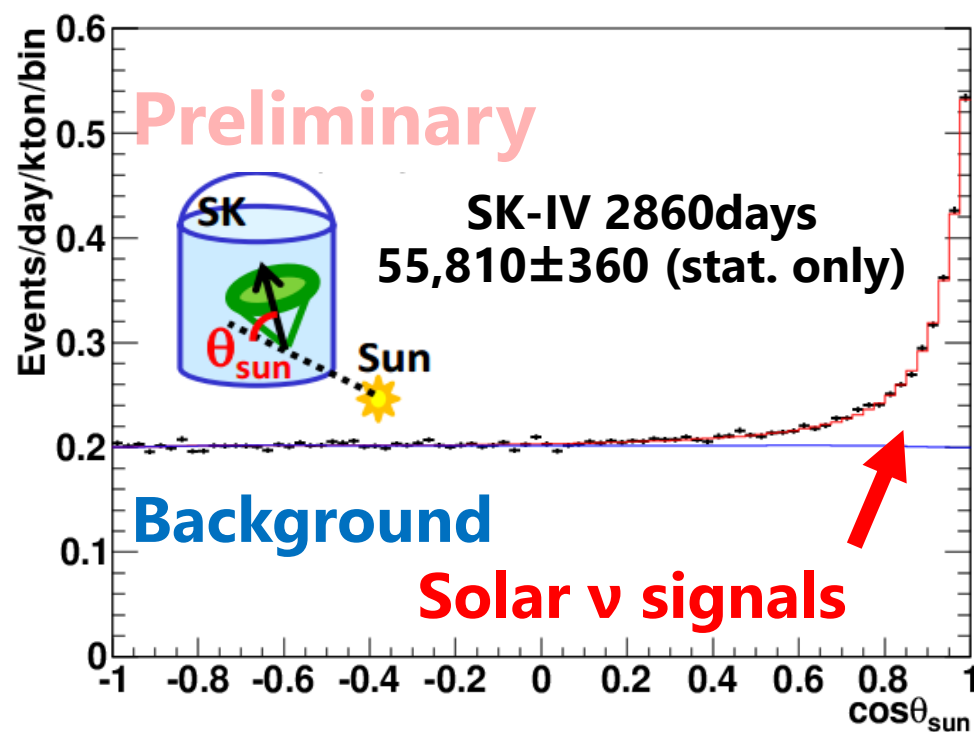
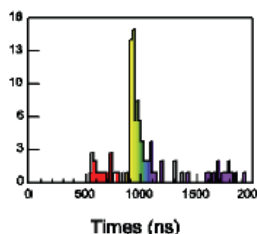
Super-Kamiokande

Run 1742 Event 102496
96-05-31:07:13:23
Inner: 193 hits, 123 pE
Outer: -1 hits, 0 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
E = 9.086 GeV=0.77 COS θ_{sun} = 0.945
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

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



太陽の周期的な変動 (特に太陽g-mode振動)

太陽活動とニュートリノ

■ 太陽活動

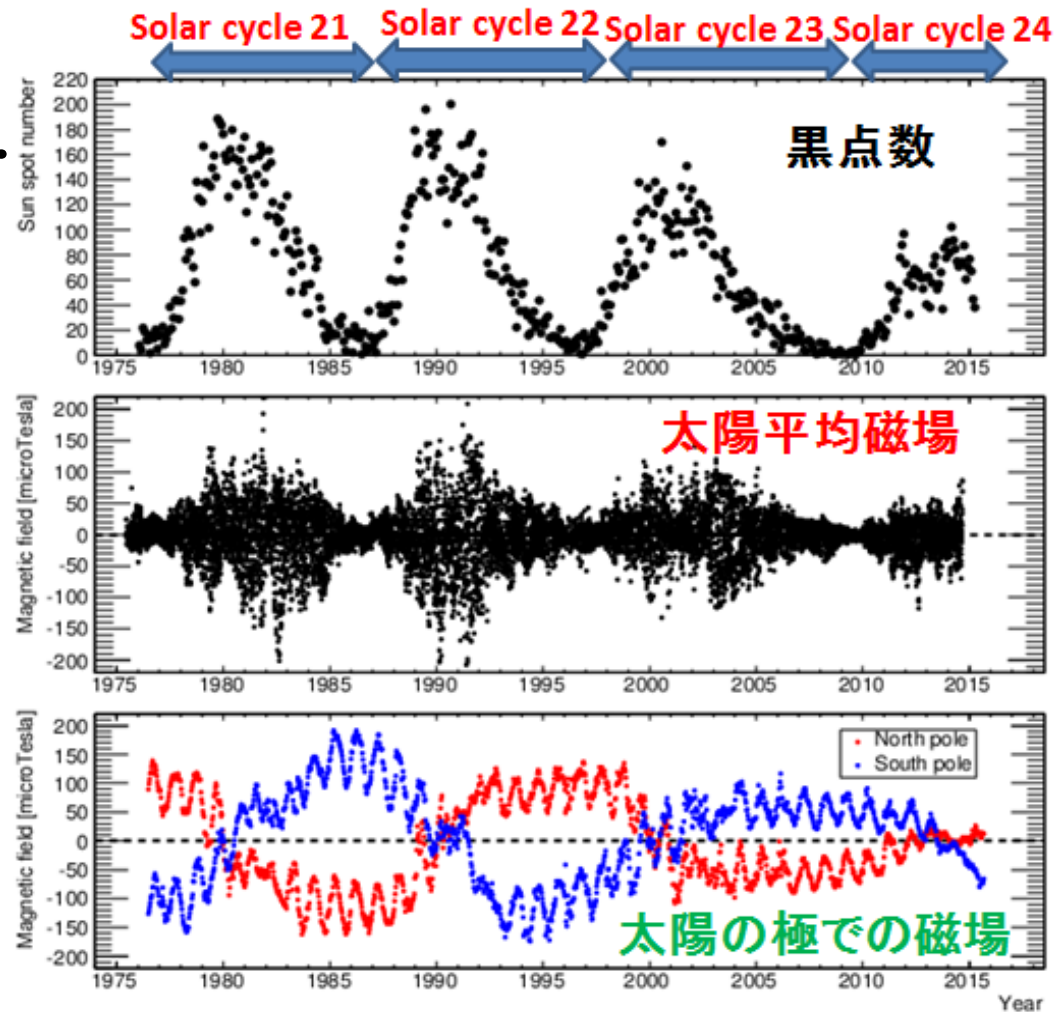
- **11年程度の周期**をもつ。
 - 太陽表面の**黒点数の増減**。
 - **太陽フレア**の発生頻度。
- ニュートリノはどうか？

■ 太陽(天体)としての興味

- ニュートリノ生成の周期性。
- 太陽標準模型の修正。
 - 磁場, 周期性, 回転が無い。
- (周期性の存在→修正)

■ 素粒子物理としての興味

- ニュートリノ磁気能率。
 - **右巻きニュートリノ**の存在？



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

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

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

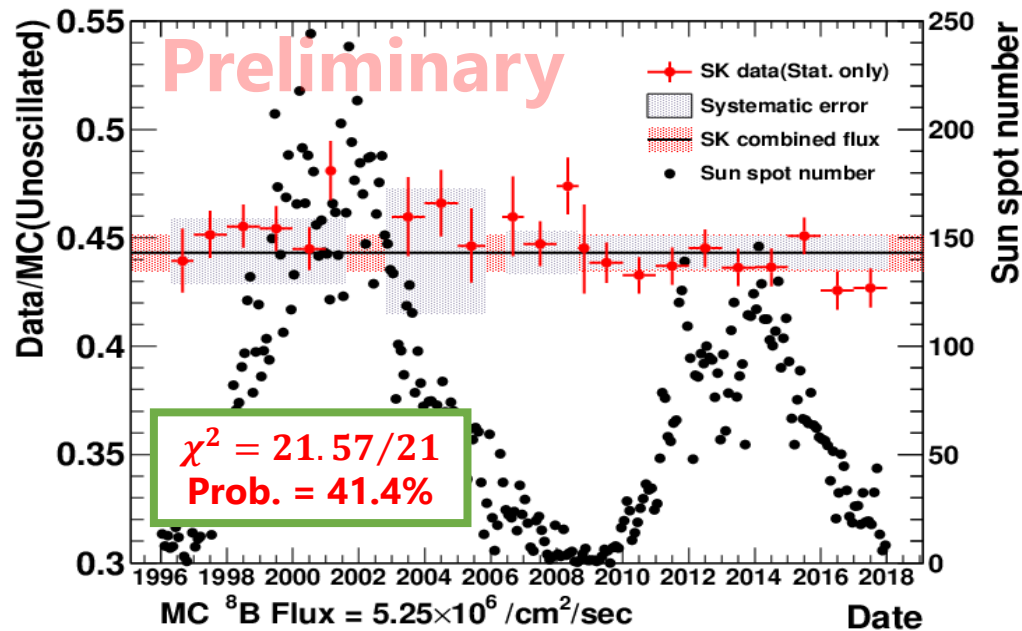
太陽活動(磁場)との相関

■ 磁場による影響

- ニュートリノが“大きな磁気能率”を持つと, 左巻 $\nu \rightarrow$ 右巻 ν .

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

- 磁場が強い (黒点数が多い)時に, ニュートリノが減るかも?
- SKの結果は安定しているように見える.
- 太陽内部の磁場情報がわかれば, さらに研究を進められるかも.



Sun spot number: <http://www.sidc.be/silso/datafiles>

Source: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels.

太陽g-mode振動

■ 太陽振動

平衡状態からの摂動により, **太陽自身が振動**.

→ 球面調和関数で記述.

(1) 音波による振動 (**p-mode**)

→ **圧力** (太陽での圧縮性).

(2) 重力による振動 (**g-mode**)

→ **浮力** (中心での浮力).

その他に, f-mode, r-modeがある.

振動の種類	伝搬する領域	典型的な振動数	
p-mode	太陽表面付近の対流層	A few mHz (~ 5分程度)	宇宙衛星 いわゆる星辰学
g-mode	太陽核, 放射層	100-300 μ Hz (数時間)	未検出

太陽ニュートリノへの影響

■ ニュートリノ Fluxへの影響

- g-mode振動により, **温度(電子密度)の増減**が期待.

→ **170倍**に増幅される.

Astrophys. J. Lett. 792, L35 (2014).

(^8B fluxは T^{24-25} に比例 ($T_{\text{core}} \sim 10^{6-7}$ K))

■ Energy spectrumへの影響

- 電子密度のふらつき → **物質効果 (MSW効果)**に影響.
- 振動パターンの変化により, Up-turnにも影響が出る.

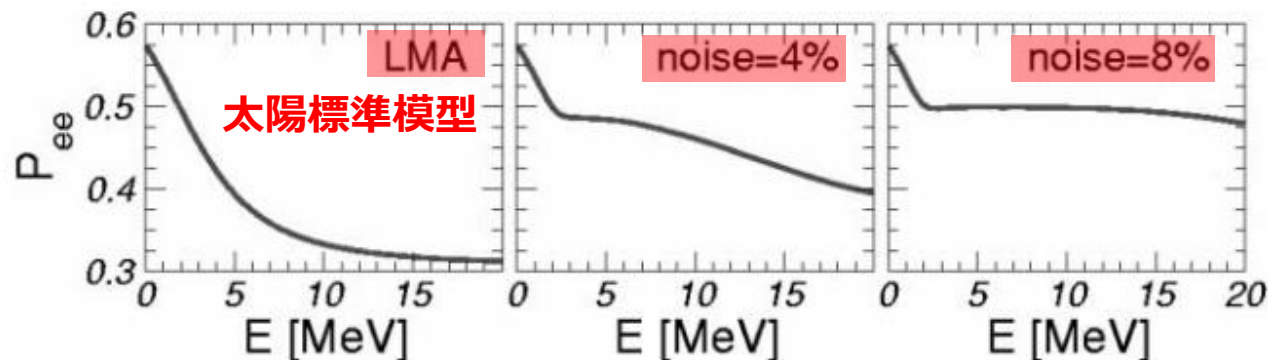


FIG. 1.—Survival probability of electron neutrinos for different levels of assumed random matter density perturbations on the LMA solution. The left panel is the noiseless case, and the middle and right panels correspond to $\xi = 4\%$ and $\xi = 8\%$, respectively.

Astrophys. J. 588, L65 (2003).

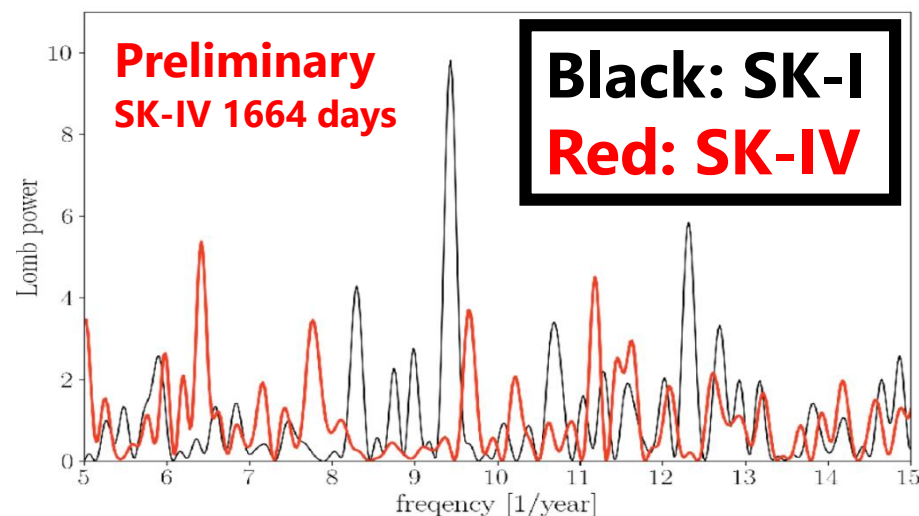
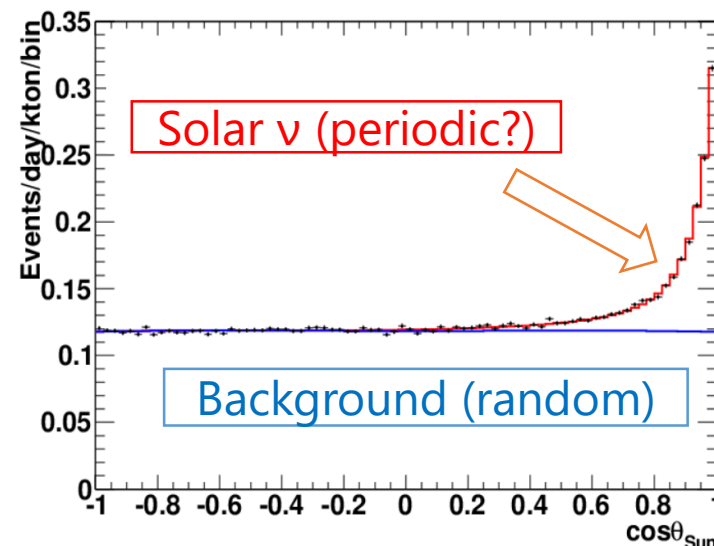
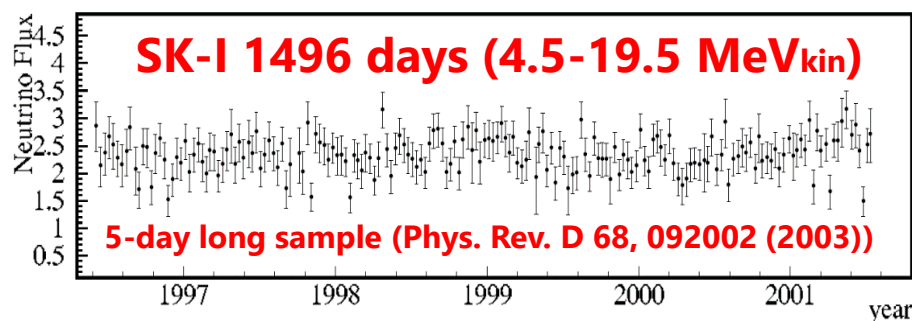
SKでの周期的な信号探索(の問題点)

■ 太陽 ν 観測の手法

- 電子とニュートリノの**弾性散乱**.
→ **前方に反跳**しやすい.
- **数日分**の積分からFluxを算出.

■ 周期解析

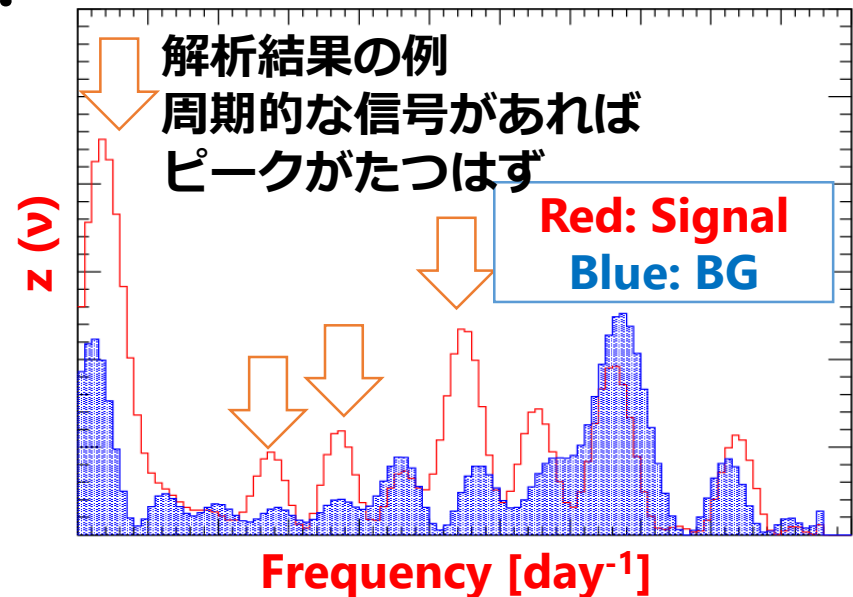
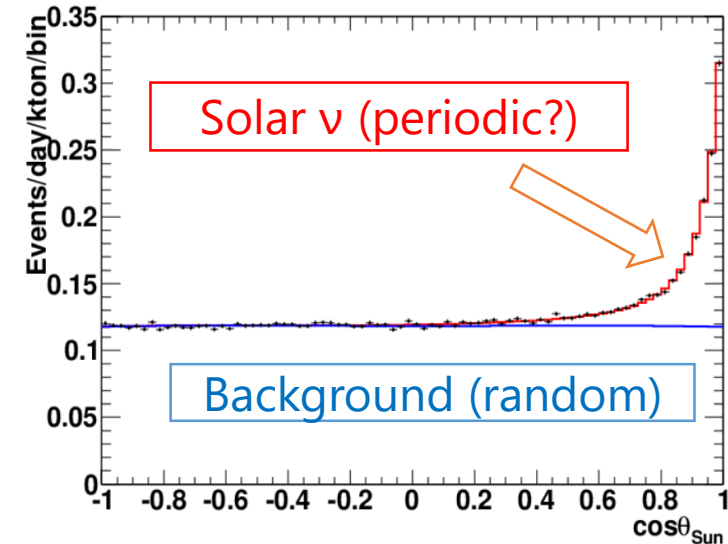
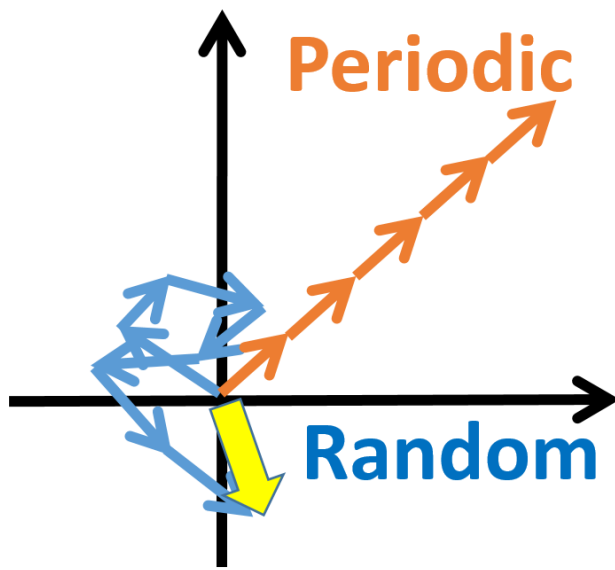
- Lomb-Scargle法 (Binned-method).
→ 広く利用されている.
binの分け方に依存 (困る).



Rayleigh power method (Unbinned)

■ 定義と利点

- $z(\nu) = \frac{1}{N} [(\sum \sin 2\pi \nu t_i)^2 + (\sum \cos 2\pi \nu t_i)^2]$
- N : 全イベント数, ν : 振動数, t_i : 時刻.
- 周期的 $\rightarrow z(\nu)$ が大きくなる.
- event by event で評価できる.
- $\cos\Theta_{\text{sun}} > 0$ で場合分けできそう.



まとめ

■ 太陽標準模型と太陽ニュートリノ

- 太陽標準模型の構築.
- 太陽ニュートリノ実験による成功, 太陽ニュートリノ振動.

■ Super-Kamiokande実験

- SKは幅広い物理を探索するmulti-purpose検出器.
- ^8B 太陽ニュートリノを観測, 強度とスペクトルを測定している.

■ 太陽g-mode振動

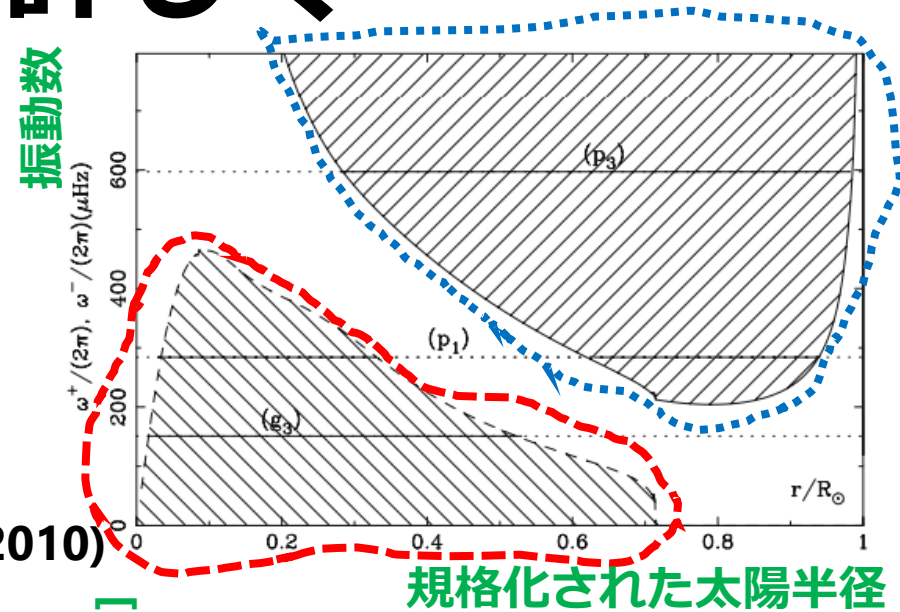
- 天体現象と太陽ニュートリノとの相関を調べている.
- 太陽磁場から右巻きニュートリノ.
- 太陽g-mode振動による周期的な信号を探索している.
- 今回は手法の提案を行った → 結果をお楽しみに.

もう少し詳しく

■ 太陽のどこにいる？

- g-mode振動は**中心**付近.
- p-mode振動は**表面**付近.
- 前ページで述べたように、
g-mode振動の方がゆっくり.

Astron. Astrophys. Rev. 18, 197 (2010)

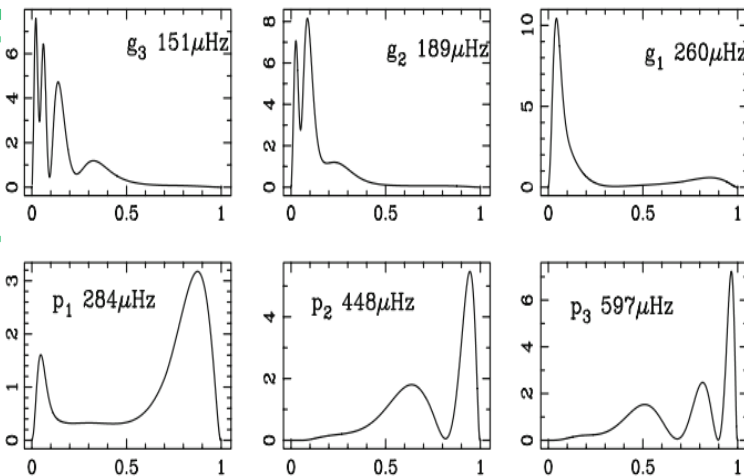


■ どれくらい震えてるん？

- 関数のパラメーターに依存.
- **数%**程度から, **10%**程度まで.

Astron. Astrophys. 335, 775 (2000)

運動エネルギー密度の
振幅の大きさ (規格化済) [%]



規格化された太陽半径

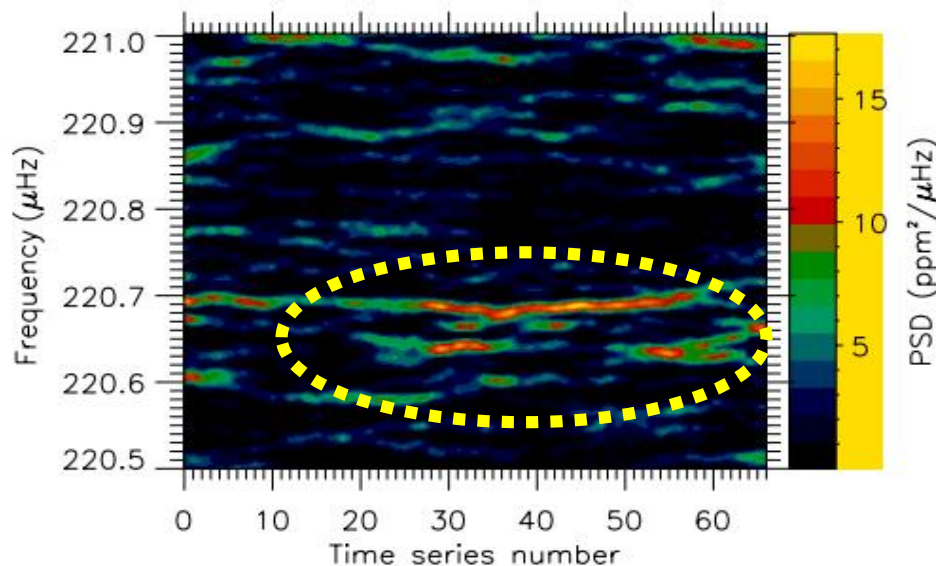
見つかってんのかいな？

■ 宇宙衛星, 重力波検出器での探索

- p-mode振動 (5分振動) は宇宙衛星で精密測定.
→ g-mode振動は... **未発見** (ということになっている).
- SOHO, GOLF, VIRGOなどが探索.
→ GOLF: **220.7 μHz** に優位信号が有るっぽい.
 $l=2, n=-3$ のモード (太陽表面で最大の振幅).

Astrophys. J. Supp. Ser.
184, 288 (2009)

Astron. Nachr.
329, 476 (2008)



横軸: 1996年から2007年まで

