



# Solar neutrino measurement in Super-Kamiokande-IV

Hasegawa, Makoto

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2019-03-25

(Date of Publication)

2024-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7435号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007435>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 要約

# Solar neutrino measurement in Super-Kamiokande-IV (スーパーカミオカンデIVにおける太陽ニュートリノ測定)

Department of Physics, Graduate School of Science, Kobe University

Hasegawa Makoto  
(長谷川 誠)

January, 2019

標準太陽模型 (Standard Solar Model : SSM) は太陽の構造や太陽内または周辺で起こっている反応をこれまでうまく記述していた。太陽ニュートリノの生成過程や地球上で観測されるニュートリノフラックスもまた SSM によって予想されていた。太陽ニュートリノは太陽の中心核における核融合反応によって生成された電子ニュートリノのことである。しかしながら、地球上における太陽ニュートリノ実験で観測されたそのニュートリノフラックスは SSM での予想値よりも少なく、太陽ニュートリノ問題と呼ばれた。それは素粒子物理学における標準模型でも説明できないものだった。

一方、その標準模型を超えた枠組みにより、その太陽ニュートリノフラックスの欠損が説明できると考えられた。それは太陽ニュートリノの場合、電子ニュートリノがミューニュートリノやタウニュートリノなど他のフレーバーのニュートリノへ遷移するニュートリノ振動によって説明できるというものである。その後、太陽ニュートリノにおけるニュートリノ振動は様々な太陽ニュートリノ観測実験によって実証され、さらに他のフレーバーのニュートリノにおいてもニュートリノ振動が確認された。

しかし、太陽ニュートリノ振動における物質効果 (MSW 効果) から予想されるスペクトラムの歪みは、まだ発見に至るまでの精度で観測されていない。MSW 効果とは、ニュートリノが太陽や地球など比較的高密度の物体の内部を通過する際、そこに含まれる電子から影響を受けることで真空中でのニュートリノ振動より強く振動することである。そのスペクトラムの歪みが有意に発見されなかった場合、物質効果は他の理論によって説明される可能性がある。また、振動パラメータの一つであるニュートリノの質量差 ( $\Delta m_{21}^2$ ) がニュートリノ実験と反ニュートリノ実験 (KamLAND 実験) の間で  $2\sigma$  程度の差 (tension) を持つことが懸念されている。反ニュートリノとニュートリノで振動パラメータが有意に異なる場合、CPT 対称性の破れなど新しい物理の発見に繋がる可能性がある。

これらの残存している問題は、スーパーカミオカンデ (SK) における太陽ニュートリノ観測の主な目的となっている。SK は純水を用いたチェレンコフ光検出器としては世界最大の 22.5k ton の有効体積を持ち、MeV 領域の太陽ニュートリノの検出において十分なエネルギー分解能と世界一の統計量を有する。SK は円筒型のタンク内に純水、壁面に約 11,100 個の光電子増倍管を設置した検出器である。SK は 1996 年 4 月以降、SK-I SK-IV まで 4 つの phase で実験を行っている。

本研究では、SK-IV で取得した 2008 年 10 月から 2017 年 12 月末までの約 2860 日分のデータを用いて太陽ニュートリノ解析を実施する際、MSW 効果の高精度な観測をするため、太陽ニュートリノ解析におけるエネルギースケールの改良と系統誤差の再見積もりをした。エネルギースケールの改良としては、PMT(光電子増倍管) ゲインやダークレートが増加することによるエネルギースケールの系統誤差の増加が懸念されたため、太陽ニュートリノ事象の再構成プログラムにそのゲイン補正を取り入れた。また、その改良した解析ソフトを用いて電子 LINAC (Linear accelerator) 較正試験によるエネルギースケールの確認をした。その結果、ニュートリノフラックスにおける総系統誤差は 1.6% と見積もることができた。

本論文では、その SK-IV で取得した 2,860 日分のデータを含めた全ての phase (5,695 日分) の SK データとその他の太陽ニュートリノ実験の結果を含めてニュートリノフラックスと振動パラメータの計算を行った。SK-IV のみのデータセットから得られたエネルギー領域 3.5 - 20.0 MeV におけるニュートリノ振動を仮定しない  $^8\text{B}$  太陽ニュートリノフラックスは  $(2.295 \pm 0.015 \text{ (stat.)} \pm 0.037 \text{ (syst.)}) \times 10^6 \text{ /cm}^2\text{/s}$  となり、SK の全ての phase で観測したデータから得られた  $^8\text{B}$  ニュートリノフラックスは  $(2.33 \pm 0.04) \times 10^6 \text{ /cm}^2\text{/s}$  となった。ニュートリノ振動パラメータは SK のデータセットのみでは  $\sin^2 \theta_{12, \text{SK}} = 0.332^{+0.027}_{-0.022}$  と  $\Delta m_{21, \text{SK}}^2 = (4.73^{+1.35}_{-0.80}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$  となった。また、全ての太陽ニュートリノ実験の結果と原子炉実験から、これらの振動パラメータは  $\sin^2 \theta_{12} = 0.310^{+0.013}_{-0.012}$  と  $\Delta m_{21}^2 = (7.49^{+0.19}_{-0.17}) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$  となった。本研究によって、スペクトラム歪みは前回の結果に対して significance が下がる結果となり、またニュートリノ実験と反ニュートリノ実験における  $\Delta m_{21}^2$  の tension は差がわずかに大きくなった。

Abstract

Solar neutrino measurement  
in Super-Kamiokande-IV  
(スーパーカミオカンデIVにおける太陽ニュートリノ測定)

Department of Physics, Graduate School of Science, Kobe University

Hasegawa Makoto  
(長谷川 誠)

January, 2019

Standard model is successful to describe particle physics based on gauge theory. On the other hand, a neutrino oscillation within the framework of a beyond standard model explains a deficit of solar neutrino fluxes, called solar neutrino problem. In the calculation of the solar neutrino oscillation, in general, an effect expected from matter is considered. However, a spectrum distortion expected from the matter effect have not observed clearly. Furthermore, it is concerned that the oscillation parameter,  $\Delta m_{21}^2$ , has a tension of  $\sim 2\sigma$  between neutrino and anti-neutrino experiments. These remaining problems are main motivations on the solar neutrino observation of Super-Kamiokande (SK). SK, a neutrino experiment using a water Cherenkov detector in Japan, have observed the solar neutrino since April, 1996. In this thesis, the solar neutrino flux and oscillation parameters are calculated using SK data of 5695 days and results by all solar experiments. Moreover, improved analyses, such as an energy scale and systematic uncertainties, are applied to phase IV of SK data (SK-IV) in this thesis. The observed  ${}^8\text{B}$  neutrino flux in combined SK is  $(2.33 \pm 0.04) \times 10^6$  /cm<sup>2</sup>/s assuming without the neutrino oscillation. The oscillation parameters obtained from the combined SK data are  $\sin^2 \theta_{12,\text{SK}} = 0.332^{+0.027}_{-0.022}$  and  $\Delta m_{21,\text{SK}}^2 = (4.73^{+1.35}_{-0.80}) \times 10^{-5}$  eV<sup>2</sup>. These parameters obtained from all solar neutrino experiments and a reactor neutrino experiment are  $\sin^2 \theta_{12} = 0.310^{+0.013}_{-0.012}$  and  $\Delta m_{21}^2 = (7.49^{+0.19}_{-0.17}) \times 10^{-5}$  eV<sup>2</sup>.