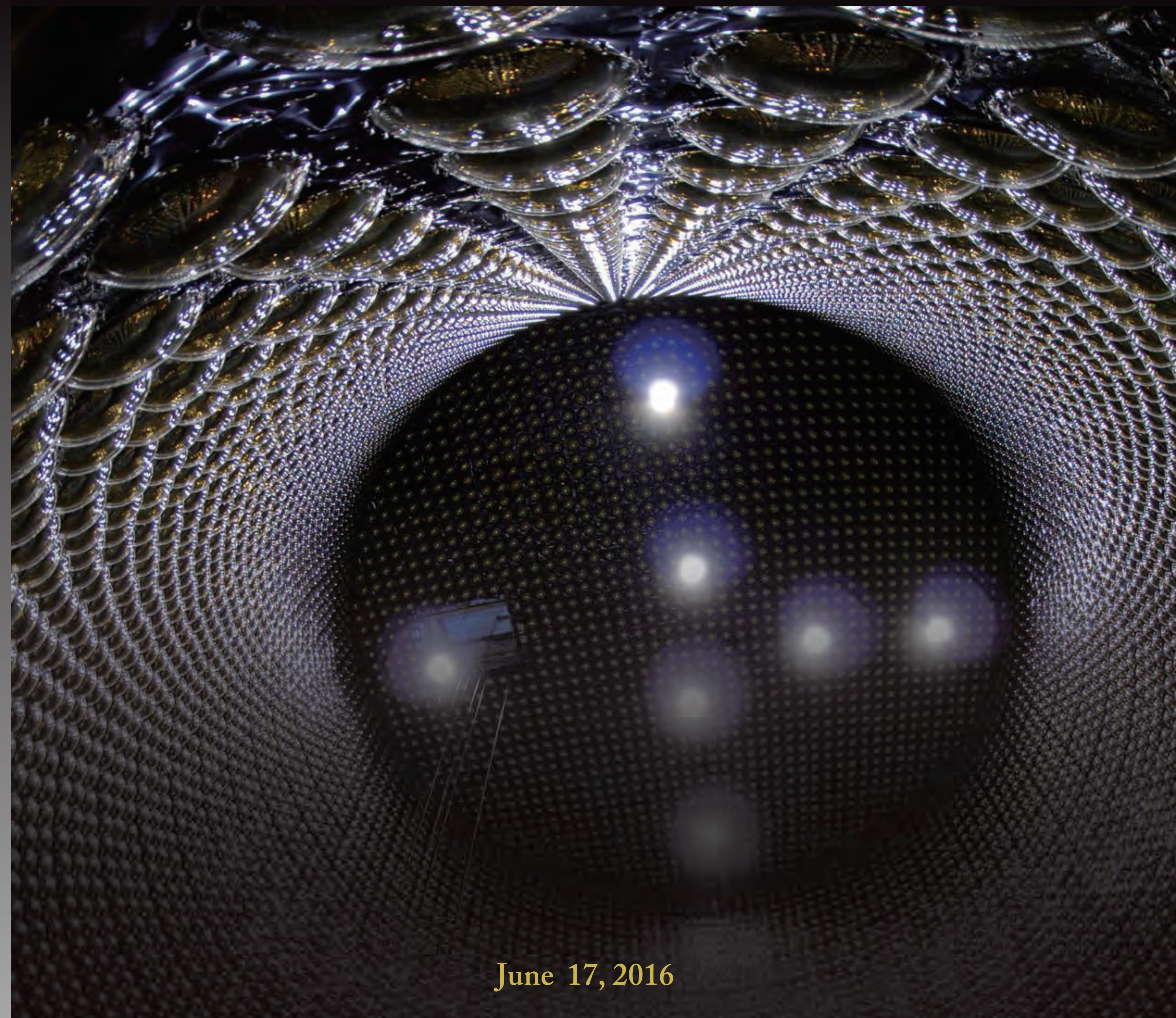
Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo
Super-Kamiokande Collaboration

# 20th Anniversary of Super-Kamiokande



June 17, 2016

Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo
Super-Kamiokande Collaboration

# Contents / 目次

## Contents



## 目次



# Preface / はじめに

Twenty years have passed since we started the Super-Kamiokande (SK) experiment on April 1st, 1996. There have been several phases of the experiment and many discoveries over those 20 years. At the time SK started, the solar neutrino puzzle as seen by Homestake and Kamiokande and the atmospheric neutrino anomaly as seen by Kamiokande and IMB were important unresolved problems in particle physics. In 1998, SK discovered that the atmospheric neutrino anomaly was due to muon-neutrino oscillations. Then, in 2001, by comparing SK solar neutrino data with that of the SNO experiment in Canada, it was shown that the solar neutrino problem was due to electron-neutrino oscillations. Around the same time the world's first long-baseline accelerator neutrino experiment, which centered on Super-Kamiokande, was started. The K2K (KEK to Kamioka) experiment began in 1999 and in 2004 confirmed the existence of atmospheric neutrino oscillations using manmade neutrinos. Later, the T2K (Tokai to Kamioka) experiment, which began in 2009, discovered the electron-neutrino appearance phenomenon in 2011, thereby establishing the third type of neutrino oscillation, using a manmade muon-neutrino beam. Recently, the oscillation-induced appearance of tau-neutrinos has been observed in Super-Kamiokande using atmospheric neutrino events collected over many years. In addition, extended observation of solar neutrinos has established a difference in the daytime and nighttime solar neutrino fluxes due to the effects of the Earth's matter. For these reasons it would be no exaggeration to say that these 20 years were a period in which Super-Kamiokande spearheaded the elucidation of neutrino oscillations.

Up until this point, research at SK has been mainly focused on the investigation of the nature of the neutrino as an elementary particle. However, SK is also sensitive to astrophysical neutrinos and though there has not been a supernova explosion within our galaxy in the last 20 years, if one were to occur, SK would detect many thousands of neutrino events and would be able to reveal the details of the star's explosion mechanism. Through future improvements to the detector we also plan to observe neutrinos created by supernovae explosions that have occurred throughout the history of the universe. Further, the T2K experiment plans to investigate the difference between neutrino and anti-neutrino oscillations, which may provide insight into the evolution of the universe. Thus essential research at SK continues.

We are greatly indebted to the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), the University of Tokyo, the U.S. Department of Energy (DOE), the U.S. National Science Foundation (NSF), Gifu-prefecture, Hida city, the residents of Mozumi, and SK collaborating institutes for their support and understanding. In addition, we owe a debt of gratitude to the Kamioka Mining and Smelting Company as well as several other companies. Super-Kamiokande was constructed and operated under the strong leadership of Professor Yoji Totsuka and it successfully recovered from an accident in 2001 because of his self-sacrificing efforts. Further research at SK will continue. We would appreciate your continued support and cooperation.

June 17, 2016

Director, Kamioka Observatory, ICRR, The University of Tokyo
Spokesperson, Super-Kamiokande Collaboration
Masayuki Nakahata

スーパーカミオカンデ(SK)は、1996年4月1日に実験を開始してから今年で20年になります。この間、いくつもの発見があり、また実験の多様なフェーズもあり、活気にあふれた20年間でした。実験開始当時は、ホームステイク実験、カミオカンデ実験が示した「太陽ニュートリノ問題」、カミオカンデ実験、IMB実験が示した「大気ニュートリノ異常」が素粒子物理学の重要な問題となっていました。1998年にSKは、「大気ニュートリノ異常」の原因がミューニュートリノの振動であることを示しました。2001年には、SKのデータとカナダのSNO実験のデータを比較することによって、「太陽ニュートリノ問題」の原因が電子ニュートリノの振動であることを示しました。SKは世界に先駆けて、加速器で人工的に作ったニュートリノを長距離飛ばして行う実験も推進しました。1999年にスタートしたK2K(KEK to Kamioka)実験は2004年に大気ニュートリノ異常に関係する振動を人工ニュートリノによって確認しました。そして、2009年にスタートしたT2K(Tokai to Kamioka)実験では、2011年にミューニュートリノビームから電子ニュートリノが出現する事象を発見し、第3の振動モードの存在を示しました。近年では、長年取り溜めた大気ニュートリノからタウニュートリノが実際に出現している事象を検出し、太陽ニュートリノの長期観測から地球の物質効果によって昼夜の強度が異なることも観測しました。このように、この20年間はSKが世界の先陣を切ってニュートリノ振動の全貌を解明してきた期間と言っても過言ではありません。

これまでの研究は、「ニュートリノという素粒子」の性質を解明する研究が主であったと思います。SKは宇宙観測にも高い感度をもつ実験装置です。この20年間には起きませんでしたが、我々の銀河系で超新星爆発がおこれば何千もの事象が観測され、詳しい爆発メカニズムが解明されるはずです。また、今後は装置を高度化することによって、宇宙の初めから起きてきた超新星爆発からのニュートリノもとらえたいと考えています。T2K実験では今後、ニュートリノと反ニュートリノの違いを探ろうとしています。このようにSKではこれからも活気ある研究が期待されます。

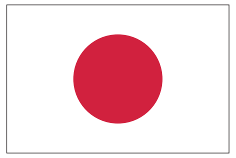
今日までSKが研究を続けて来られたのは、文部科学省、東京大学、米国DOE, 米国NSF, 地元岐阜県、飛騨市、茂住の方々、共同研究の各研究機関のご支援、ご協力があってのことであります。また、神岡鉱業株式会社様をはじめとして多くの企業様に支えていただきました。この場をお借りして、深く御礼申し上げます。SKは故戸塚洋二氏の強いリーダーシップの下で建設・運転が進められ、2001年の事故も乗り越えることができました。あらためてご冥福をお祈り申し上げます。SKはこれからも研究に邁進してまいります。今後ともご指導・ご協力の程、よろしくお願い申し上げます。

2016年6月17日

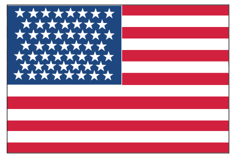
東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設長
スーパーカミオカンデ実験責任者
中畑雅行

The international collaboration of the Super-Kamiokande experiment was started when the Kamiokande and IMB groups united in 1992. In the 20 years since then a total of 51 institutes and approximately 400 researchers have participated in the experiment. At present the collaboration is composed of about 120 people and 36 institutes from Japan, the United States, Poland, South Korea, China, Spain, Canada and the United Kingdom.

スーパーカミオカンデ実験の国際協力体制は、1992年にカミオカンデグループとIMBグループが共同して実験を進めることに合意したところから始まりました。この20年間にのべ51の研究機関、約400名の研究者が実験に参加しました。現在は日本、アメリカ、ポーランド、韓国、中国、スペイン、カナダ、イギリスの36機関約120名により研究が進められています。

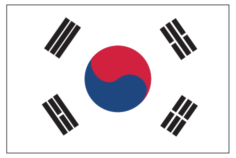


Japan

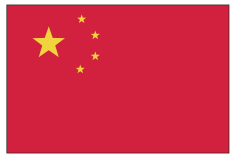


United States

Poland
From 1992



South Korea
From 1998



China
From 2005

Spain
From 2008

Canada
From 2011

United Kingdom
From 2016

## Collaboration Institutes

Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo
University Autonoma Madrid
University of British Columbia
University of California, Irvine
Chonnam National University
Junior College, Fukuoka Institute of Technology
Gifu University
University of Hawaii
Indiana University
KEK
Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe
University of Liverpool
University of Maryland
University of Minnesota Duluth
Nagoya University
Niigata University
Okayama University
University of Oxford
University of Regina
University of Sheffield
State University of New York at Stony Brook
Tohoku University
Tokyo Institute for Technology
University of Toronto
Tsinghua University
University of Washington
Research Center for Cosmic Neutrinos, Institute for Cosmic Ray Research,The University of Tokyo
Boston University
Brookhaven National Laboratory
California State University
Duke University
George Mason University
Gwangju Insititute of Science and Technorogy
Imperial College London
Kanagawa University
Kobe University
Kyoto University
Louisiana State University
Massachusetts Institute of Technology
Miyagi University of Education
National Centre For Nuclear Research
Institute for Nuclear Study, The University of Tokyo
Osaka University
Queen Mary University of London
Seoul National University
Shizuoka University of Welfare
Sungkyunkwan University
Tokai University
The University of Tokyo
TRIUMF
Warsaw University

## Members

K. Abe
M. Ackermann
T. Akiri
R. Akutsu
J. B. Albert
J. Amey
L. Anthony
Y. Ashie
T. Barszczak
K. Bays
S. Berkman
H. G. Berns
F. Blaszczyk
E. Blaufuss
S. C. Boyd
C. Bronner
R. G. Calland
S. V. Cao
G. Carminati
D. Casper
V. Chaloupka
M. Chen
S. Chen
S. H. Cho
K. Choi
Y. Choi
S. Clark
K. McConnel
Z. Conner
K. Connolly
J. Cooley
J. P. Cravens
S. Dazeley
P. de Perio
Z. Deng
S. Desai
F. Di Lodovico
W. Doki
R. Doyle
F. Dufour
J. Dunmore
S. Dye
M. Dziomba
M. Earl
S. Echigo
R. W. Ellsworth
M. Elnimr
M. Etoh
M. Fechner
P. Fernandez
J. Flanagan
K. Frankiewicz
M. Friend
K. Fujita
H. Fujiyasu
D. Fukuda
S. Fukuda
Y. Fukuda
Y. Furuse
T. Futagami
W. Gajewski
Y. Gando
K. S. Ganezer
J. S. George
J. Glassman
F. Goebel
M. Goldhaber
U. Golebiewska
J. A. Goodman
R. Gran
J. Griskevich
G. Guillian
J. Gustafson
A. Habig
Y. Haga
T. J. Haines
P. Halverson
T. Harada
B. L. Hartfiel
M. Hartz
A. Hasegawa
M. Hasegawa
T. Hasegawa
T. Hashimoto
S. Hatakeyama
Y. Hatakeyama
T. Hayakawa
K. Hayashi
T. Hayashino
Y. Hayato
S. Hazama
Y. Heng
C. A. Herfurth
J. Hignight
I. Higuchi
K. Higuchi
J. Hill
A. Himmel
K. Hiraide
T. Hiraki
S. Hirota
J. Hong
N. Hong
T. Horiuchi
J. Hosaka
J. Hsu
K. Huang
H. K. Seo
E. Ichihara
A. K. Ichikawa
Y. Ichikawa
Y. Idehara
K. Ieki
T. Iida
M. Ikeda
J. Imber
S. Inaba
T. Inagaki
K. Inoue
T. Irvine

## Members

T. Ishida
C. Ishihara
K. Ishihara
H. Ishii
J. Ishii
T. Ishii
H. Ishino
M. Ishitsuka
T. Ishizuka
K. Ito
Y. Itow
T. Iwamoto
T. Iwashita
K. Iyogi
J. S. Jang
I. S. Jeong
M. Jiang
S. Joko
C. K. Jung
C. Kachulis
H. Kaji
T. Kajita
Y. Kajiyama
J. Kameda
I. Kametani
Y. Kanaya
K. Kaneyuki
J. Kanzaki
S. Kasuga
I. Kato
T. Kato
T. Kayano
E. Kearns
W. E. Keig
D. Kerr
A. Kibayashi
D. Kielczewska
T. Kikawa
B. K. Kim
D. J. Kim
H. I. Kim
J. Y. Kim
S. B. Kim
T. Kinebuchi
M. Kirisawa
Y. Kishimoto
Y. Kitaguchi
K. Kobayashi
T. Kobayashi
Y. Kobayashi
H. Koga
M. Koga
M. Kohama
M. Koike
T. Koike
A. Konaka
M. Koshiba
Y. Koshio
Y Kozuma
W. R. Kropp
H. Kubo
T. Kumita
Y. Kuno
A. Kusano
L. Labarga
A. Laing
J. G. Learned
K. B. Lee
K. P. Lee
X. Li
Ze. Li
Zh. Li
S. Likhoded
I. T. Lim
P. Litchfield
M. Litos
D. W. Liu
J. Liu
Y. Liu
G. D. Lopez
M. Sugihara
W. Ma
H. Maesaka
M. Malek
K. Martens
Ll. Marti
J. F. Martin
T. Maruyama
T. Maruyama
M. Masuzawa
S. Matsuno
K. Matsuoka
C. Mauger
N. McCauley
C. D. McGrew
T. McLachlan
M. D. Messier
P. Mijakowski
A. Minamino
S. Mine
S. Mino
C. Mitsuda
G. Mitsuka
M. Miura
M. Miyake
S. Miyamoto
K. Miyano
M. Mori
M. Morii
T. Morita
S. Moriyama
T. Mori
A. Murakami
F. Muto
Y. Nagashima
H. Nagata
T. Nakadaira
M. Nakahata
T. Nakajima
Yu. Nakajima
Y. Nakajima
K. Nakamura
M. Nakamura
T. Nakamura
Y. Nakano
T. Nakaya
S. Nakayama
T. Namba
R. Nambu
C. M. Nantais
M. Nemoto
K. Nishijima
K. Nishikawa
R. Nishimura
Y. Nishimura
H. Nishino
I. Nishiyama
K. Nitta
Y. Obayashi
H. Ogawa
M. Ohta
A. Okada
Y. Okajima
H. Okazawa
M. Oketa
K. Okumura
T. Ooyabu
A. Orii
E. O'Sullivan
M. Otani
Y. Oyama
J. G. Plomino
R. G. Park
N. D. Patel
J. Prendki
L. Price
A. Pritchard
B. Quilain
J. L. Raaf
C. Regis
F. Reines
A. Renshaw
E. Richard
B. Richards
M. Rosen
M. Saito
Y. Saito
C. Saji
A. Sakai
K. Sakashita
M. Sakuda
N. Sakurai
R. Sanford
G. Santucci
A. Sarrat
O. Sasaki
T. Sasaki
H. Sato
T. Sato
K. Scholberg
J. Schuemann
T. Sekiguchi
H. Sekiya
E. Sharkey
T. Shibata
Y. Shimizu
M. Shiozawa
J. Shirai
K. K. Shiraishi
C. Simon
C. Simpson
S. N. Smith
M. B. Smy
H. W. Sobel
Y. Sonoda
A. Stachyra
V. Stenger
C. W. Sterner
J. L. Stone
Y. Suda
H. Sui
L. R. Sulak
G. W. Sullivan
A. Suzuki
A. T. Suzuki
K. Suzuki
Ta. Suzuki
T. Suzuki
Y. Suzuki
R. Svoboda
M. Swanson
R. Tacik
M. Takahashi
S. Takahashi
M. Takahata
A. Takeda
D. Takemori
Y. Takenaga
H. Takeuchi
J. Takeuchi
Y. Takeuchi
V. Takhistov
K. Taki
M. Takita
N. Tamura
H. A. Tanaka
H. K. Tanaka
T. Tanaka
N. Tanimoto
S. Tasaka
K. Tateishi
I. Taylor
R. Terri
L. Thompson
E. Thrane
S. Tobayama
T. Tomoeda
T. Tomura
T. Toshito
Y. Totsuka
H. Toyota
K. M. Tsui
T. Tsukamoto
F. Tsushima
D. Turcan
Y. Uchida
S. Ueda
K. Ueno
K. Ueshima
M. Vagins
C. Vilela
B. Viren
L. L. Wai
C. W. Walter
L. Wan
W. Wang
D. Wark
M. Wascko
K. Washburn
H. Watanabe
Y. Watanabe
P. Weatherly
R. A. Wendell
R. J. Wilkes
M. J. Wilking
T. Wongjirad
C. Xu
Sa. Yamada
Sh. Yamada
Y. Yamada
R. Yamaguchi
T. Yamaguchi
S. Yamamoto
C. Yanagisawa
B. S. Yang
Z. Yang
T. Yano
Y. Yokosawa
M. Yokoyama
T. Yokozawa
J. Yoo
M. Yoshida
K. K. Young
J. Zalipska
H. Zhang
Y. Zhang

## 2016

1 Real-Time Supernova Neutrino Burst Monitor at Super-Kamiokande,
Astropart. Phys. 81, 39 (2016), arXiv: astro-ph/1601.04778

2 First measurement of radioactive isotope production through cosmic-ray muon spallation in Super-Kamiokande IV,
Phys. Rev. D 93, 012004 (2016), arXiv: hep-ex/1509.08168

## 2015

3 Search for Nucleon and DiNucleon Decays with an Invisible Particle and a Charged Lepton in the Final State at the Super-Kamiokande Experiment,
Phys. Rev. Lett. 115, 121803 (2015), arXiv: hep-ex/1508.05530

4 Search for dinucleon decay into pions at Super-Kamiokande,
Phys. Rev. D 91, 072009 (2015), arXiv: hep-ex/1504.01041

5 Search for n-nbar oscillation in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. D 91, 072006 (2015), arXiv: hep-ex/1109.4227

6 Search for Neutrinos from Annihilation of Captured Low-Mass Dark Matter Particles in the Sun by Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett. 114, 141301 (2015), arXiv: hep-ex/1503.04858

7 Limits on sterile neutrino mixing using atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. D 91, 052019 (2015), arXiv: hep-ex/1410.2008v2

8 Test of Lorentz invariance with atmospheric neutrinos,
Phys. Rev. D 91, 052003 (2015), arXiv: hep-ex/1410.4267

9 Supernova Relic Neutrino Search with Neutron Tagging at Super-Kamiokande-IV,
Astropart. Phys. 60, 41 (2015), arXiv: hep-ex/1311.3738

## 2014

10 Search for proton decay via $p \to \nu K^+$ using 260 kiloton·year data of Super-Kamiokande,
Phys. Rev. D 90, 072005 (2014), arXiv: hep-ex/1408.1195

11 Search for Trilepton Nucleon Decay via $p \to e^+ \nu \nu$ and $p \to \mu^+ \nu \nu$ in the Super-Kamiokande Experiment,
Phys. Rev. Lett. 113, 101801 (2014), arXiv: hep-ex/1409.1947

12 Search for Nucleon Decay via $n \to \nu \pi^0$ and $p \to \nu \pi^0$ in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett. 113, 121802 (2014), arXiv: hep-ex/1305.4391

13 Search for Dinucleon Decay into Kaons in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett. 112 (2014), 131803 (2014)

14 First Indication of Terrestrial Matter Effects on Solar Neutrino Oscillation,
Phys. Rev. Lett. 112, 091805 (2014), arXiv: hep-ex/1312.5176

15 Calibration of the Super-Kamiokande Detector,
Nucl. Instr. & Meth, A 737C (2014), arXiv: physics.ins-det/1307.0162

## 2013

16 Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett. 110, 181802 (2013), arXiv: hep-ex/1206.0328
**Number of citations: 64**

## 2012

17 Search for Nucleon Decay into Charged Anti-lepton plus Meson in Super-Kamiokande I and II,
Phys. Rev. D, 85 112001 (2012), arXiv: hep-ex/1203.4030
**Number of citations: 87**

18 Search for proton decay via $p \to \mu^+ K^0$ in Super-Kamiokande I, II, and III,
Phys. Rev. D 86, 012006 (2012), arXiv: hep-ex/1205.6538

19 Search for GUT monopoles at Super-Kamiokande
Astropart. Phys. 36, 131-136 (2012), arXiv: hep-ex/1203.0940

20 Supernova relic neutrino search at Super-Kamiokande.
Phys. Rev. D 85, 052007 (2012), arXiv: hep-ex/1111.5031
**Number of citations: 58**

## 2011

21 Search for Differences in Oscillation Parameters for Atmospheric Neutrinos and Antineutrinos at Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett. 107, 241801 (2011), arXiv: hep-ex/1109.1621
**Number of citations: 64**

22 An Indirect Search for WIMPs in the Sun using 3109.6 days of upward-going muons in Super-Kamiokande,
Astrophys. J. 742, 78 (2011) arXiv: astro-ph/1108.3384
**Number of citations: 130**

23 Study of Non-Standard Neutrino Interactions with Atmospheric Neutrino Data in Super-Kamiokande I and II,
Phys. Rev. D84 (2011) 113008, arXiv: hep-ex/1109.1889

24 Solar neutrino results in Super-Kamiokande-III,
Phys. Rev. D 83, 052010 (2011), arXiv: hep-ex/1010.0118
**Number of citations: 249**

## 2010

25 Atmospheric neutrino oscillation analysis with sub-leading effects in Super-Kamiokande I, II and III,
Phys. Rev. D 81, 092004 (2010), arXiv: hep-ex/1002.3471
**Number of citations: 253**

## 2009

26 High-speed charge-to-time converter ASIC for the Super-Kamiokande detector,
Nucl. Instrum. Meth. A 610 (2009) 710-717, arXiv: physics.ins-det/0911.0986

27 Search for Astrophysical Neutrino Point Sources at Super-Kamiokande,
Astrophys. J. 704 (2009) 503-512, arXiv: astro-ph/0907.1594

28 Search for Neutrinos from GRB 080319B at Super-Kamiokande,
Astophys. J. 697, 730-734 (2009), arXiv: astro-ph/0903.0624

29 Kinematic reconstruction of atmospheric neutrino events in a large water Cherenkov detector with proton identification,
Phys. Rev. D 79 (2009) 112010, arXiv: hep-ex/0901.1645

30 Search for Proton Decay via $p \to e^+ \pi^0$ and $p \to \mu^+ \pi^0$ in a Large Water Cherenkov Detector,
Phys. Rev. Lett. 102, 141801 (2009), arXiv: astro-ph/0903.0676
**Number of citations: 149**

31 First Study of Neutron Tagging with a Water Cherenkov Detector,
Astropart. Phys. 31, 320-328 (2009), arXiv: hep-ex/0811.0735
**Number of citations: 52**

## 2008

32 Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-II,
Phys. Rev. D 78, 032002 (2008), arXiv: hep-ex/0803.4312
**Number of citations: 241**

33 Search for Matter-Dependent Atmospheric Neutrino Oscillations in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. D 77, 052001 (2008), arXiv: hep-ex/0801.0776

34 Study of TeV Neutrinos with Upward Showering Muons in Super-Kamiokande,
Astropart. Phys. 29, 42 (2008), arXiv: hep-ex/0711.0053v1
**Number of citations: 63**

## 2007

35 Search for Supernova Neutrino Bursts at Super-Kamiokande,
Astrophys J. 669 (2007) 519, arXiv: astro-ph/0706.2283
**Number of citations: 78**

36 Search for Neutral Q-balls in Super-Kamiokande II,
Phys. Lett. B 647 18-22 (2007), arXiv: hep-ex/06008057

## 2006

37 Measurement of Atmospheric Neutrino Flux Consistent with Tau Neutrino Appearance,
Phys. Rev. Lett. 97, 171801 (2006), arXiv: hep-ex/06007059
**Number of citations: 149**

38 High energy neutrino astronomy using upward-going muons in Super-Kamiokande-I,
Astrophys. J. 652 (2006) 198, arXiv: astro-ph/0606413

39 Search for Diffuse Astrophysical Neutrino Flux Using Ultra-High Energy Upward-Going Muons in Super-Kamiokande I,
Astrophys. J. 652 (2006) 206-215, arXiv: astro-ph/0606126

## 2006

40 Three flavor neutrino oscillation analysis of atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. D 74, 032002 (2006), arXiv: hep-ex/0604011
**Number of citations: 22**

41 Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I,
Phys. Rev. D 73, 112001 (2006), arXiv: hep-ex/0508053
**Number of citations: 474**

## 2005

42 Observation of the Anisotropy of 10 TeV Primary Cosmic Ray Nuclei Flux with the Super-Kamiokande-I Detector,
Phys.Rev. D 75, 062003 (2007), arXiv: astro-ph/0508468
**Number of citations: 110**

43 Search for nucleon decay via modes favored by supersymmetric grand unification models in Super-Kamiokande-I,
Phys. Rev. D 72, 052007 (2005), arXiv: hep-ex/0502026
**Number of citations: 127**

44 Measurement of Atmospheric Neutrino Oscillation Parameters by Super-Kamiokande I,
Phys. Rev. D 71, 112005 (2005), arXiv: hep-ex/0501064
**Number of citations: 958**

## 2004

45 Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation,
Phys. Rev. Lett. 93, 101801 (2004), arXiv: hep-ex/0404034
**Number of citations: 827**

46 Search for Dark Matter WIMPs using Upward Through-going Muons in Super-Kamiokande,
Phys. Rev. D 70, 083523 (2004), arXiv: hep-ex/0404025
**Number of citations: 350**

47 Limit on the Neutrino Magnetic Moment Using 1496 Days of Super-Kamiokande-I Solar Neutrino Data,
Phys. Rev. Lett. 93, 021802 (2004), arXiv: hep-ex/0402015
**Number of citations: 68**

48 Precise Measurement of the Solar Neutrino Day/Night and Seasonal Variation in Super-Kamiokande-I,
Phys. Rev. D 69 (2004) 011104, arXiv: hep-ex/0309011
**Number of citations: 261**

## 2003

49 A search for periodic modulations of the solar neutrino flux in Super-Kamiokande-I,
Phys. Rev. D 68 (2003) 092002, arXiv: hep-ex/0307070
**Number of citations: 62**

50 The Super-Kamiokande Detector,
Nucl. Instrum. Meth. A501 (2003) 418-462
**Number of citations: 448**

51 Search for anti-electron-neutrinos from the Sun at Super-Kamiokande-I,
Phys. Rev. Lett. 90 (2003)171302, arXiv: hep-ex/0212067
**Number of citations: 61**

52 Search for Supernova Relic Neutrinos at Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett 90, 061101 (2003), arXiv: hep-ex/0209028
**Number of citations: 205**

## 2002

53 Search for neutrinos from Gamma-Ray Bursts using Super-Kamiokande,
ApJ 578 (2002) 317-324, arXiv: astro-ph/0205304

54 Determination of Solar Neutrino Oscillation Parameters using 1496 Days of Super-Kamiokande-I Data,
Phys. Lett. B539 (2002) 179-187, arXiv: hep-ex/0205075
**Number of citations: 935**

## 2001

55 Constraints on Neutrino Oscillations Using 1258 Days of Super-Kamiokande Solar Neutrino Data,
Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5656-5660, arXiv: hep-ex/0103033
**Number of citations: 778**

56 Solar $^{8}$B and hep Neutrino Measurements from 1258 Days of Super-Kamiokande Data,
Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5651-5655, arXiv: hep-ex/0103032
**Number of citations: 1196**

## 2001

57 $^{16}$N as a calibration source for Super-Kamiokande,
Nucl. Instr. & Meth. A 458 (2001) 636-647, arXiv: hep-ex/0005014

## 2000

58 Tau neutrino favored over sterile neutrinos in atmospheric muon neutrino oscillations,
Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 3999-4003, arXiv: hep-ex/0009001
**Number of citations: 904**

## 1999

59 Neutrino-induced upward stopping muons in Super-Kamiokande,
Phys. Lett. B467 (1999) 185, arXiv: hep-ex/9908049
**Number of citations: 287**

60 Search for proton decay through $p \to \bar{\nu} + K^{+}$ in a large water Cherenkov Detector,
Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 1529, arXiv: hep-ex/9904020
**Number of citations: 160**

61 Observation of the East-West Anisotropy of the Atmospheric Neutrino Flux,
Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 5194, arXiv: hep-ex/9901039
**Number of citations: 107**

62 Measurement of radon concentrations at Super-Kamiokande,
Phys. Lett. B452 (1999) 418-422, arXiv: hep-ex/9903006

63 Constraints on neutrino oscillation parameters from the measurement of day-night solar neutrino fluxes at Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 1810-1814, arXiv: hep-ex/9812009
**Number of citations: 495**

64 Measurement of the flux and zenith-angle distribution of upward through-going muons by Super-Kamiokande,
Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2644, arXiv: hep-ex/9812014
**Number of citations: 775**

65 Measurement of the Solar Neutrino Energy Spectrum Using Neutrino-Electron Scattering,
Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2430, arXiv: hep-ex/9812011
**Number of citations: 491**

66 Calibration of Super-Kamiokande using an electron LINAC,
Nucl. Instr. Meth. A421 (1999) 113-129, arXiv: hep-ex/9807027
**Number of citations: 144**

## 1998

67 Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos,
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1562-1567, arXiv: hep-ex/9807003
**Number of citations: 4785**

68 Measurements of the Solar Neutrino Flux from Super-Kamiokande's First 300 Days,
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1158-1162, arXiv: hep-ex/9805021
**Number of citations: 827**

69 Search for Proton Decay via $p \to e^{+} \pi^{0}$ in a Large Water Cherenkov Detector,
Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 3319, arXiv: hep-ex/9806014
**Number of citations: 168**

70 Study of the atmospheric neutrino flux in the multi-GeV energy range,
Phys. Lett. B436 (1998) 33-41, arXiv: hep-ex/9805006
**Number of citations: 850**

71 Measurement of a small atmospheric $\nu_{\mu} / \nu_{e}$ ratio,
Phys. Lett. B433 (1998) 9-18, arXiv: hep-ex/9803006
**Number of citations: 902**

## Before 1998

72 Improvement of 20 in. diameter photomultiplier tubes,
Nucl. Instrum. Meth. A 329, 299 (1993)

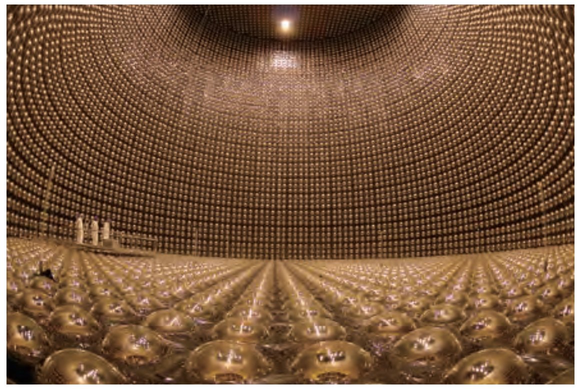
73 Front of hybrid circuit for Super-Kamiokande,
Nucl. Instrum. Meth. A 320, 310 (1992)

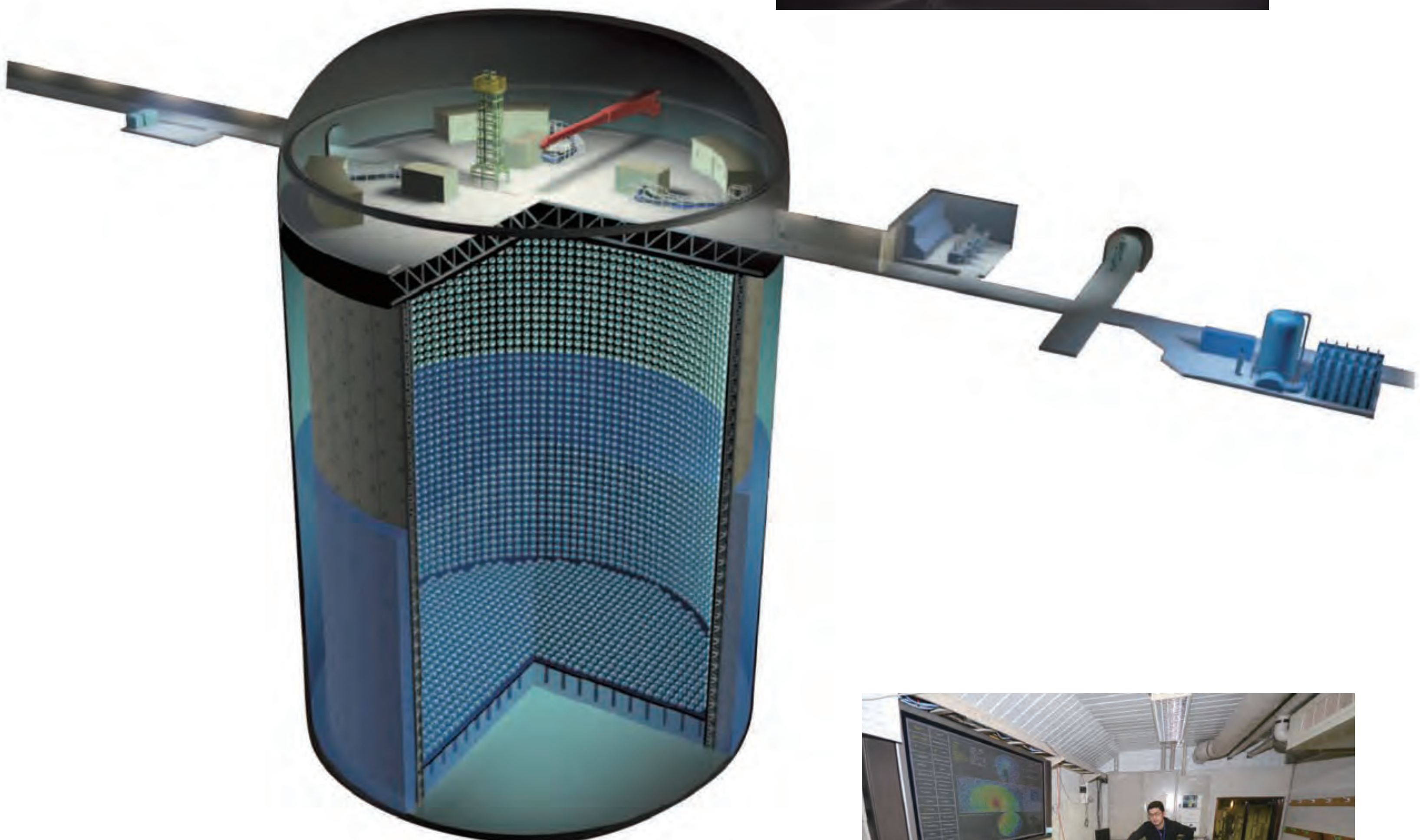
Following a five year constructions period the 50 kiloton Super-Kamiokande water Cherenkov detector began observations in April 1996. The experiment is led by the University of Tokyo, Institute of Cosmic Ray Research and its research is conducted in cooperation with 36 collaborating institutes from Japan, the United States, Poland, South Korea, China, Spain, Canada, and the United Kingdom.

One focus of Super-Kamiokande's research is the study of the neutrino, an elementary particle produced at the center of the sun, in the atmosphere, and during supernova explosions. If neutrinos are massive we can expect them to oscillate, or change, from one type to another. In 1998 observations of atmospheric neutrinos in Super-Kamokande showed for the first time that neutrinos do indeed oscillate and therefore have mass. Later, in 2001, the oscillations of solar neutrinos were discovered. These discoveries indicate that the Standard Model of particle physics, which assumes neutrinos are massless, is imperfect and thereby point to the existence of new, more complete theories. Super-Kamiokande observes about 3,500 atmospheric neutrino events and about 7,000 solar neutrino events per year. As a result, the detector has accumulated large atmospheric and solar neutrino data sets over the history of its operation and these have enabled precision studies of neutrino oscillations.

While neutrino oscillations were discovered using neutrinos produced in nature, research using neutrinos produced in particle accelerators has been essential to their study. The first long-baseline neutrino experiment in the world, the K2K experiment, was conducted from 1999 to 2004 and it sent a beam of neutrinos produced at the KEK proton accelerator to Super-Kamiokande, located 250 km away. In 2004, K2K confirmed the existence of neutrino oscillations using these manmade neutrinos. Similarly, the T2K experiment, which uses neutrinos produced with the high intensity proton beam at J-PARC, has been sending a neutrino beam over a distance of 295 km to Kamioka since 2009. During its operation T2K has not only discovered a third neutrino oscillation mode but has made precise measurements of neutrino oscillation parameters.

Super-Kamiokande is also searching for evidence of proton decay, a phenomenon in which a proton spontaneously converts into a set of lighter particles. Though the proton is considered to be stable in the Standard Model, its decay is both possible and necessary in Grand Unified Theories. In the same manner as the discovery of the neutrino's finite mass, an observation of proton decay would lead to dramatic advances in our understanding of the fundamental particles.





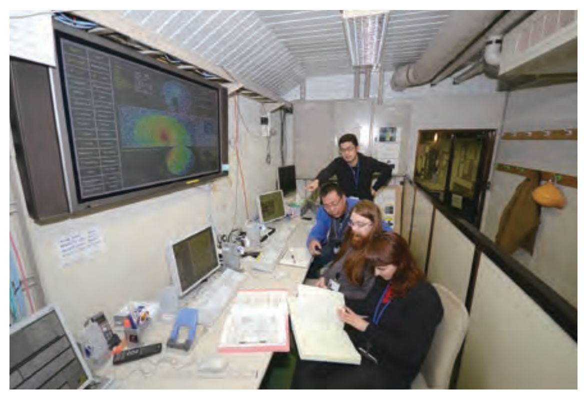
5万トン大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置スーパーカミオカンデは、1991年に建設が始まり、5年間にわたる建設期間を経た後、1996年4月より観測を開始しました。スーパーカミオカンデ実験は、東京大学宇宙線研究所を中心に、日本、米国、ポーランド、韓国、中国、スペイン、カナダ、イギリスからの36の大学・研究機関との共同研究で行われています。

本実験における研究目的の一つは、宇宙から飛来する素粒子ニュートリノを観測することです。スーパーカミオカンデは太陽中心部や地球大気中、また超新星爆発の時などに作られたニュートリノを観測することができます。この観測により、光では観測不可能な星の中心部等を直接研究することができます。

ニュートリノに質量があると、3種類あるニュートリノの間を振動することが期待されます。大気ニュートリノの観測によって、ニュートリノの振動が実際に観測され、1998年に初めてニュートリノに質量があることを示すことが出来ました。2001年には太陽ニュートリノも振動していることが分かりました。ニュートリノに質量があることは、素粒子の標準模型が完璧ではなく、それを超えた理論があることを示唆しています。スーパーカミオカンデは年間に大気ニュートリノを約3500事象、太陽ニュートリノを約7000事象観測することができ、長年取り溜めたデータを使って精密なニュートリノ振動研究を行っています。

ニュートリノ振動の最初の発見は自然界にある大気中や太陽からのニュートリノによってなされましたが、その後、加速器で人工的に作ったニュートリノも使って研究が進められてきました。1999年から2004年まではつくばの高エネルギー加速器研究機構の陽子加速器で作ったニュートリノを250km飛ばしてスーパーカミオカンデで受ける実験（K2K実験）が行われ、ミューニュートリノが振動によって消失することを確認しました。そして、2009年からは東海村の大強度陽子加速器施設（J-PARC）で生成されたニュートリノを295km飛ばしてスーパーカミオカンデで受ける実験（T2K実験）が進められており、第3のニュートリノ振動モードの発見、ニュートリノ振動パラメータの精密測定といった成果が上がってきています。

スーパーカミオカンデのもう一つの目的は、水分子中の陽子が崩壊する現象、「陽子崩壊」を探索することです。陽子崩壊は素粒子物理学における大統一理論により予言されており、この現象が発見されれば、ニュートリノの有限質量の発見と同様に、素粒子の理論が飛躍的に進展することが期待できます。



Spokespersons　実験代表者

| | |
|---|---|
| — 2002.4 | Y. Totsuka |
| 2002.4 — 2014.5 | Y. Suzuki |
| 2014.5 — | M. Nakahata |

# Atmospheric neutrinos
## 大気ニュートリノ

Atmospheric neutrinos are produced from the collisions of cosmic rays with nuclei in the atmosphere and come predominantly in two flavors, electron neutrinos and muon neutrinos. Since neutrinos only rarely interact with matter, they pass easily through the Earth, making it possible for Super-Kamiokande to detect atmospheric neutrinos created on the opposite side of the planet. After two years of observation it became clear in 1998 that while the number of such electron neutrinos agreed well with model predictions, the number of muon neutrinos was much smaller than expected.

After careful analysis of the observed data, Super-Kamiokande collaborators concluded that the deficit could be best explained by "neutrino oscillations," a phenomenon in which neutrinos change their type during flight (Figure 1). In this scenario nearly half of the atmospheric muon neutrinos created on the opposite side of the Earth change (oscillate) into another type of neutrino not observed in the detector. This discovery of neutrino oscillations established that neutrinos have mass, thereby providing definitive evidence for physics beyond the Standard Model, which assumes neutrinos are massless.

While it was clear that the observed atmospheric neutrino disappearance favored the oscillation interpretation, further analysis was needed to fully describe the phenomenon. In the year 2000 Super-Kamiokande determined that the oscillations were most likely from muon to tau neutrinos and four years later demonstrated that the data follow the oscillatory behavior expected from neutrino oscillations (Figure 2). In 2013, Super-Kamiokande made the first observation of oscillation-induced tau neutrinos (Figure 3), providing final confirmation of the oscillation discovery. Ultimately this work culminated in the 2015 Nobel Prize in Physics.

Super-Kamiokande's atmospheric neutrino data have also been used to search for dark matter annihilation in the center of celestial objects, to measure the atmospheric neutrino flux itself, and to test a variety exotic physics models. In addition, atmospheric neutrinos are now being used to study  particle-antiparticle symmetries in nature, a topic central to the formation of the universe, and to determine the ordering of the neutrino masses. Finally, as the dominant background to searches for proton decay, precision atmospheric neutrino research at Super-Kamiokande will be essential to the discovery of new phenomenon in the future.

大気ニュートリノは、陽子などの宇宙線が地球の大気と衝突して生成されるニュートリノで、主に二種類のニュートリノ(電子ニュートリノとミューニュートリノ)があります。 ニュートリノは物質とほとんど相互作用をしないため、 大気ニュートリノは簡単に地球を通り抜け、スーパーカミオカンデ検出器では地球の反対側から到来するニュートリノも観測可能です。実験開始から2年間経た1998年、ミューニュートリノの観測事象数が理論計算による期待値より大きく欠損していることが明らかになりました。

詳細なデータ解析により、「ニュートリノ振動」というニュートリノの種類を変える現象によって説明可能であり、地球の反対側で作られたミューニュートリノのうち約半数が、長い距離を飛行する間に検出器で観測されない別種のニュートリノに変化したことを示しました(図1参照)。スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見は、それまで質量を持たないと考えられていたニュートリノが有限の質量を持つ決定的な証拠となり、素粒子標準理論を超える現象として、全世界に大きなインパクトを与えました。

また、その後の研究により、2000年にはミューニュートリノがタウニュートリノへ変化しているらしいこと、その4年後には、ミューニュートリノにおける種別の変化が波のように「振動」していること(図2参照)、そして2013年には、ミューニュートリノから変化して出現したタウニュートリノを直接検出し(図3参照)、これら一連の観測結果により、大気ニュートリノでのニュートリノ振動がより強く確かめられ、2015年のノーベル物理学賞受賞へと繋がりました。

さらに、スーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノのデータは、ニュートリノ振動以外の研究にも応用されています。例えば、ステライルニュートリノやローレンツ変換の破れなど非標準理論モデルの検証、太陽や地球などの天体中心に集まった暗黒物質による崩壊事象の探索、大気ニュートリノのエネルギースペクトルや地磁気効果の測定、が挙げられます。

実験開始から20年間で、スーパーカミオカンデでの大気ニュートリノ研究は素粒子物理学に多大な貢献をしましたが、今後もこの分野において重要な役割を果たすと考えられています。特に、物質優勢宇宙の謎を解く鍵となるレプトンでの荷電パリティ対称性(CP対称性)、また、ニュートリノ質量の階層性など、残された重要な課題を解明すべく、現在も大気ニュートリノを用いた研究が行われています。また、陽子崩壊など、スーパーカミオカンデで未知の現象を探索するためにも、今後も大気ニュートリノの詳細な研究が必要となるでしょう。

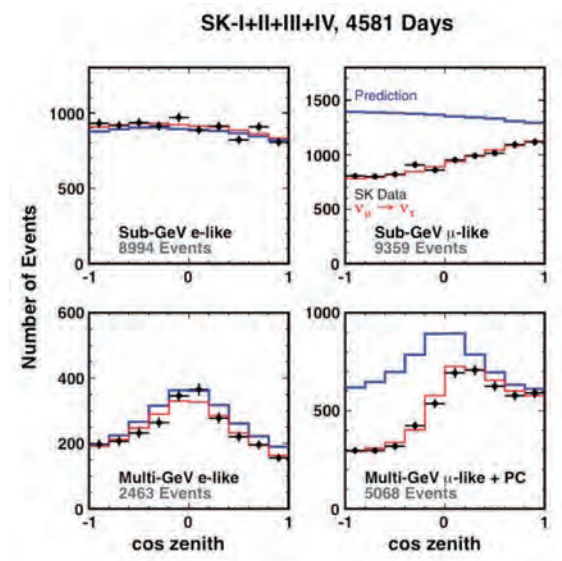



Figure 1: Zenith angle distribution of atmospheric neutrino data (black points), the expectation without oscillations (blue), and the expectation with oscillations (red). Primarily electron neutrino data appears in the left two plots, while muon neutrino data appears in the right two. Upward-going (downward-going) events are shown in the left (right) side of each plot.

図1：スーパーカミオカンデにより観測された大気ニュートリノの天頂角分布。図の横軸で「cosΘ=1」は下向き（上空で生成されたニュートリノ）を、「−1」は上向き（地球の反対側から到来したニュートリノ）を示す。図中の黒点は実際に観測されたデータ、青線はニュートリノ振動がない場合の期待値、赤線がニュートリノ振動を考慮した期待値を示す。

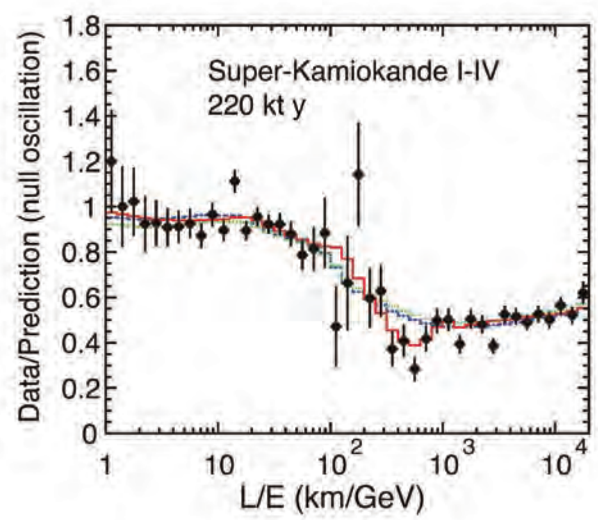



Figure 2： Muon neutrino survival probability as a function of the oscillation phase, defined by the ratio of the neutrino path length divided by its energy, L/E. Black dots show atmospheric muon neutrino events observed in Super-Kamiokande, while the red lines shows the expectation from neutrino oscillations. The data agree well with the oscillation hypothesis in the "dip" region around L/E = 500 km/GeV, excluding alternative models shown in green and blue.

図2：ミューニュートリノの残存確率を、ニュートリノ振動の位相（距離（L)/ エネルギー（E)）で示した図。赤線はニュートリノ振動の場合の期待値で、振動以外の理論モデルは青や緑の点線で示されている。観測データは、位相が500 km/GeV 付近でニュートリノ振動の特徴である「窪み」と一致し、他の理論を排除している。

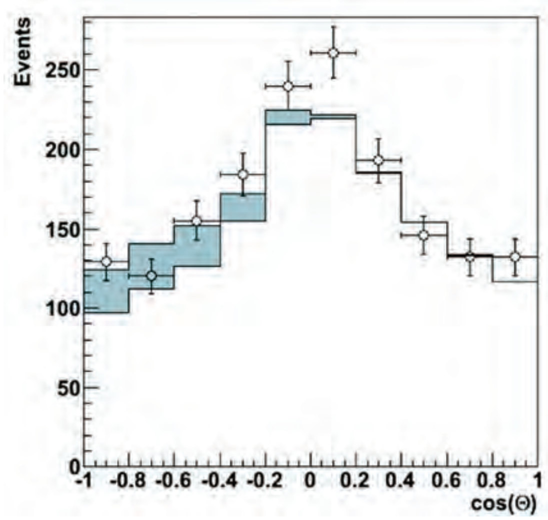



Figure 3: Zenith angle distribution of events consistent with the interaction of a tau neutrino inside of Super-Kamiokande. The data (circles) agree well with the model expectation (open histogram) only when a contribution from muon neutrino oscillation-induced tau neutrinos (shaded) is added. Note that the tau neutrinos appear in the same upward-going region as the muon neutrino data is seen disappearing (c.f. Figure 1).

図3：スーパーカミオカンデの観測データ解析により、ミューニュートリノからタウニュートリノへの出現を示した図。図の横軸は天頂角を示し、図1と同じように左端が上向き事象を示す。ニューラルネットワーク・アルゴリズムによる「タウニュートリノらしい」事象を選別された事象数を天頂角ごとに示しており、灰色の部分がタウニュートリノによる寄与を示す。ミューニュートリノ欠損とタウニュートリノ出現が同じ上向き事象で観測されている。

# Solar neutrinos
## 太陽ニュートリノ

The Sun is the most powerful neutrino source in our vicinity; the fusion processes in the solar core produce vast numbers of electron-type neutrinos. Several experiments have measured solar neutrinos, but have consistently seen less than predicted. In 2001, solar neutrino data from Super-Kamiokande (SK) and the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) clearly showed that the reason for the solar neutrino deficit is the change of electron-type neutrinos into neutrinos of a different type. Today, the theory of neutrino oscillation is widely accepted.

SK continues to study solar neutrinos and by now has observed more than 77,000 solar neutrinos over 4869 live days. Figure 1 shows the measured solar neutrino flux in each year since 1996. The SK solar rate measurements are fully consistent with a constant solar neutrino flux emitted by the Sun. Since the $^8$B flux to which SK is primarily sensitive strongly depends on the temperature of the solar core, the absence of rate variation implies that the solar core temperature is stable within $\pm0.5\%$. To infer the value of that temperature it is necessary to determine the $^8$B flux from all neutrino types, not just electron-neutrinos. SK and SNO data measure the solar $^8$B flux to be $(5.29\pm0.15)\times10^6$ neutrinos/cm$^2$/s which includes all uncertainties introduced by neutrino oscillations. This flux implies a solar core temperature of $(15.60\pm0.15)\times10^6$ K. Optical measurements can only measure the surface temperature of the Sun, which is about 6,000 K.

SK measures the energy of neutrino interactions: Figure 2 shows a comparison of this measured energy and theoretical expectations, which depend on neutrino oscillations. SK also studies possible solar neutrino flux differences between day-time and night-time due to the matter effect of the Earth. In 2014, we reported the first indication of this terrestrial matter effect on solar neutrino oscillations. Based on energy and day/night flux variation, SK precisely measures the neutrino oscillation parameters. Figure 3 shows our current global neutrino oscillation analysis on solar neutrinos. The oscillation of neutrinos and anti-neutrinos ought to be described by the same oscillation parameters, but at present, there is a slight tension between solar neutrino and reactor anti-neutrino measurements by KamLAND. Therefore more precise solar neutrino data are needed.

In May 2015, we lowered our energy threshold to 3.5 MeV (kinetic). We will continue to reveal solar neutrino physics with precise measurements.

太陽の中心核では核融合反応により膨大な数の電子型ニュートリノが生成されており、我々の身の回りで最も強力なニュートリノ発生源になっています。これまで複数の実験で太陽ニュートリノが観測されてきましたが、観測されたニュートリノ強度はいずれも理論で予測された値より有意に少ないものでした。2001年に、スーパーカミオカンデ(SK)とサドバリーニュートリノ観測所(SNO)での太陽ニュートリノ観測データから、観測される太陽ニュートリノ強度が少ない原因が、電子型から他の種類のニュートリノへの変化によるものであることがはっきり示されました。現在では、ニュートリノ振動の理論は広く受け入れられています。

SKでは太陽ニュートリノ観測を継続的に行っており、現在までに4869日の有効観測時間で77,000以上の太陽ニュートリノ事象の観測を行っています。図1は、SKで観測された太陽ニュートリノ強度を、SK実験開始の1996年から、1年毎に示したものです。観測された太陽ニュートリノ強度は、常に同じ強度でニュートリノが放出されているとする仮定とよく一致します。SKで最も感度良く観測されるのは$^8$B太陽ニュートリノですが、$^8$B太陽ニュートリノの強度は太陽中心核の温度にとても敏感です。SKで太陽ニュートリノ強度の有意な変動が観測されなかった事から、太陽中心核の温度は$\pm0.5\%$の範囲で一定であることがわかりました。この温度を求めるためには、電子型ニュートリノのみではなく全ての種類のニュートリノから$^8$B太陽ニュートリノの強度を測定することが必要です。SKとSNOの観測データから、$^8$B太陽ニュートリノの強度はニュートリノ振動の全ての不定性を含めて$(5.29\pm0.15)\times10^6$/cm$^2$/秒になります。この強度から、太陽中心核の温度が、$(15.60\pm0.15)\times10^6$ Kである事がわかります。光学的な観測では太陽表面の温度(約6,000 K)しか測定できません。

ニュートリノ振動パラメータはエネルギーに依存しますが、SKはニュートリノ反応のエネルギーを測定できます。図2は、観測された太陽ニュートリノ事象のエネルギー分布とニュートリノ振動理論の予測値を示したものです。ニュートリノ振動では、地球内部の物質による影響で、昼間と夜間に観測される太陽ニュートリノ強度に差が生じることが予測されていますが、SKではこの研究も可能です。2014年には、地球内部の物質が太陽ニュートリノ振動に影響を与えていることを初めて示唆しました。このような昼夜変動やエネルギー分布の観測データから、SKはニュートリノ振動パラメータを精密に求めています。図3に現在の太陽ニュートリノ振動の総合的な解析結果を示します。ニュートリノと反ニュートリノの振動パラメータは同じはずですが、太陽ニュートリノ測定の結果とカムランドによる原子炉からの反ニュートリノの測定の間にはわずかなずれがみられます。より詳細に研究を進めるためには、より多くの太陽ニュートリノ観測データが必要です。

2015年5月には、データ解析のエネルギーしきい値を3.5MeV(kinetic)に引き下げました。今後も精密な観測によって、太陽ニュートリノの物理を追究していきます。

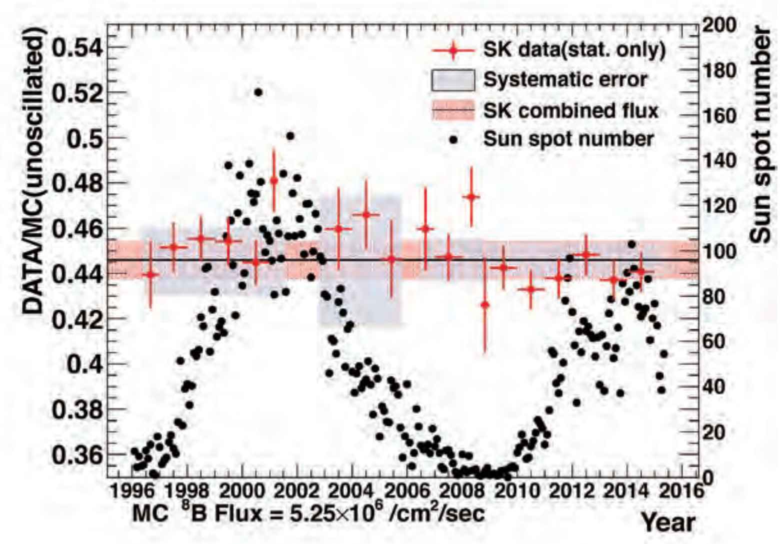



Figure 1: Measured solar neutrino flux in each year compared with number of sun spots. The vertical axis is normalized by the expected flux from the standard solar model without neutrino oscillation.

図1：観測された1年毎の太陽ニュートリノ強度。縦軸は、ニュートリノ振動がない場合に太陽標準模型から予測される強度で規格化した。黒点数の変動を比較のために示した。

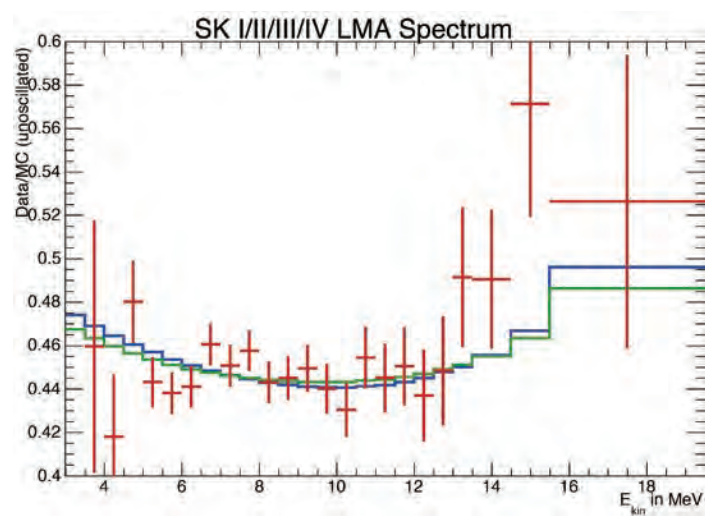



Figure 2: The energy spectrum of solar neutrinos obtained by SK (red) and expectations at best-fit points (green: SK only, blue: solar+KamLAND). In this plot, no oscillation would appear as a flat line.

図2：SKで観測された太陽ニュートリノ反応のエネルギー分布(赤)と、最適解での予測値(緑：SKのみ、青：Solar+KamLAND)この図では、ニュートリノ振動がない場合には分布は水平になる。

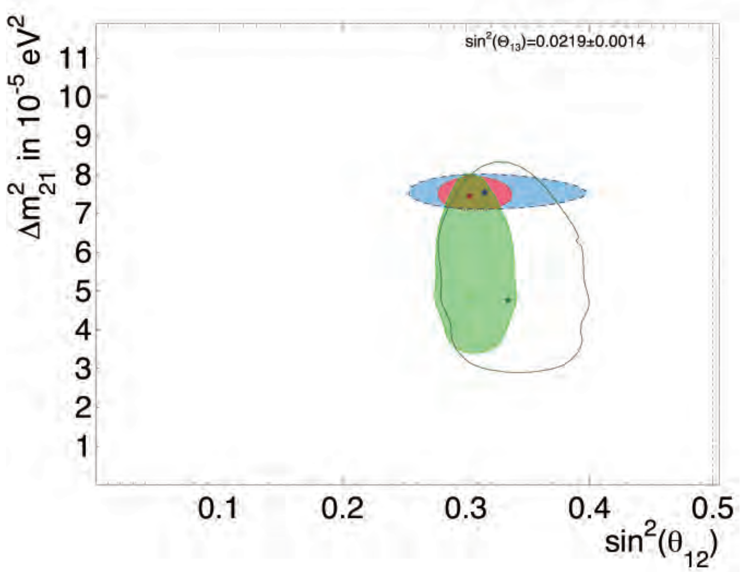



Figure 3: Allowed contours of $\Delta m^2_{21}$ vs. $\sin^2\theta_{12}$ from solar neutrino data (green filled: all solar data, green line: SK only) and KamLAND reactor data (blue). Also shown is the combined result in red. The best-fit points are indicated as stars.

図3：$\Delta m^2_{21}$と$\sin^2\theta_{12}$　振動パラメータの許される範囲(緑塗り：全太陽ニュートリノ実験、緑線：SKのみ、青：KamLANDのみ、赤：Solar+KamLAND)。各最適解は、星印で示した。

# Proton decay
## 陽子崩壊

Protons are one of the fundamental constituents of matter and are found in all nuclei throughout the universe. Though it seems possible for protons decay into other particles such an event has never been observed. As a result, they are stable in the Standard Model. However, processes like proton decay are thought to have played an essential role in the formation of the universe. Grand Unified Theories (GUTs) not only address deficiencies in the Standard Model, but they also predict the unification of the fundamental forces of nature as well as proton decay. For these reasons they may provide insight into the early universe and accordingly, the search for proton decay is a main line of research at Super-Kamiokande.

Among the proton decay modes predicted by GUT models, decay into a positron, the antiparticle of the electron, and a neutral pion is often the most probable. Super-Kamiokande has an exceptional ability to detect such proton decay events among atmospheric neutrino backgrounds as shown in Figure 1. In 1998, after only two years of running, Super-Kamiokande released results from its first search for proton decay in this channel. Though no evidence for a signal was found, the resulting lower limit on the proton's lifetime, $1.6 \times 10^{33}$ years, was a factor of three times stronger than previous limits. In the intervening 18 years there has been no indication of a signal and Super-Kamiokande's current limit, $1.7 \times 10^{34}$ years, is the world's most constraining.

In 1999 Super-Kamiokande published its second proton decay result, finding no evidence for decays into a neutrino and a charged kaon, thereby establishing the world's most stringent lifetime limit for this mode. Since then the search for proton decay has expanded to include analysis of more than 20 modes, all of which resulted in world-leading limits (Figure 2). These limits have ruled out GUT models and are constraining several others.

A few analyses have even yielded candidate events, but as they cannot currently be distinguished from atmospheric neutrino interactions they do not yet constitute evidence for proton decay. As a result, though Super-Kamiokande has already provided stringent limits on the proton's lifetime, work is ongoing to further remove backgrounds and extract a signal that may be waiting just around the corner.

陽子は万物を構成する基本粒子であり、星や惑星、地球上のすべての生物など、宇宙にあるすべての物質の素となっています。陽子は3つのクォークで構成されていますが、他の重い粒子とは異なり、陽子がより軽い粒子へと崩壊する「陽子崩壊」現象は現在まで観測されていません。そのため、素粒子物理学の標準理論では、陽子は崩壊しない安定した粒子とされています。しかしながら、陽子崩壊など、バリオン数を保存しない基本相互作用は、初期の宇宙進化の過程に必要であり、標準理論では不十分であると考えられています。大統一理論（Grand Unified Theory, GUTs）は、自然界の基本的な"力"を統一して記述しようとする理論であり、さらに陽子（および中性子）がバリオン数保存則を破って崩壊することを予言しています。そのため、初期宇宙進化の謎を解明する手がかりを与える可能性があり、陽子崩壊はスーパーカミオカンデや他の実験で重要な研究対象として位置付けられてきました。

大統一理論では様々な陽子崩壊の過程（モード）がありますが、その中でも、陽電子（電子の反粒子）と中性パイ中間子へ崩壊するモードが、最も可能性が高いとされています。スーパーカミオカンデ検出器は大気ニュートリノによるノイズ事象の中から、この陽子崩壊事象を検出する優れた性能があります（図１参照）。実験開始から２年後の１９９８年、この崩壊モードにおいて最初の研究結果を発表し、残念ながら候補事象は観測されませんでしたが、それまでの実験より3倍以上も向上した陽子寿命の下限値を与えました。その後も観測は続けられ、１８年経過した現在も候補事象は見つかっておりません。しかしながら、スーパーカミオカンデによる$1.7 \times 10^{34}$年という下限値は、全世界で最も厳しい制限となっています。

１９９９年には、２番目の陽子崩壊の研究結果として、ニュートリノと荷電ケイ中間子への崩壊モードで最も厳しい下限値を与えました。その後も２０以上の崩壊モードで探索し、陽子崩壊の研究において世界をリードしています（図２参照）。スーパーカミオカンデの測定結果は、数ある大統一理論モデルの一部について、排除または制限を付けることに役立っています。

実際に、いくつかの崩壊モードでの解析では、陽子崩壊の候補事象が残っていますが、これらは大気ニュートリノによるノイズ事象と区別する手段がなく、陽子崩壊の証拠には不十分です。スーパーカミオカンデでは陽子の寿命に強い制限を与えてきましたが、すぐそこに起こるかも知れない陽子崩壊事象の発見に向けて、さらなるノイズ除去や検出手法の改良が続けられています。

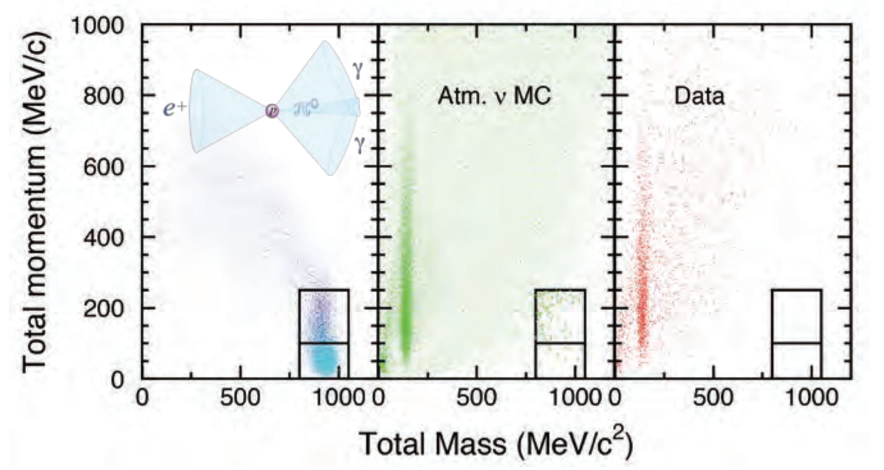



Fig.1: The search for proton decay into a positron a neutral pion at Super-Kamiokande. Black boxes in each panel indicate the search region, which contains much of the expected signal (left panel), a small amount of expected background events (middle panel), and no data events.

図1： 陽子が陽電子と中性パイ中間子に崩壊するモードの探索。各図右下の枠内は、陽子崩壊事象の信号領域を示しており、陽子崩壊シミュレーション事象（左図）では多くの事象がこの領域で観測される一方、大気ニュートリノのノイズ（中図）は僅かである。実際の観測データ（右図）では、候補事象は観測されていない。

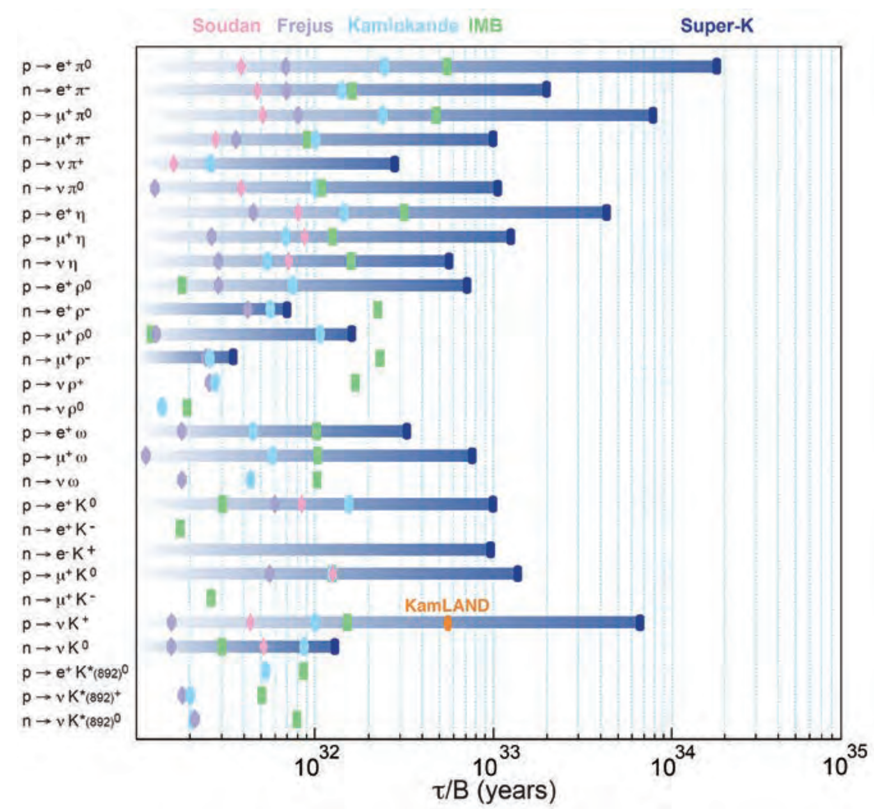



Fig.2: Super-Kamiokande's proton lifetime lower limits compared to other experiments for a variety of decay modes. After 20 years of operation Super-Kamiokande provides the most stringent limits by an order of magnitude or more in many channels.

図2： スーパーカミオカンデおよび他実験で得られた、様々な崩壊モードでの陽子寿命の下限値の比較。スーパーカミオカンデの20年間の観測結果は、多くの崩壊モードで他実験の制限値より一桁以上更新している。

# K2K/T2K long-baseline neutrino oscillation experiments
## K2K/T2K 長基線ニュートリノ振動実験

Accelerator-based long-baseline neutrino experiments are well suited to detailed neutrino oscillation studies because in these experiments not only can the neutrino energy and flight distance be optimized to observe a particular effect, but the neutrino beam can also be measured precisely before any oscillations occur.

K2K (KEK-to-Kamioka), the world's first long-baseline neutrino oscillation experiment, collected beam neutrino data from 1999 to 2004. The beam neutrinos were produced by the proton accelerator at KEK in Tsukuba and were observed 250 km away in Super-Kamiokande. Using these neutrinos K2K definitively confirmed (>99.99%) the existence of neutrino oscillations.

Following the success of K2K, the T2K (Tokai-to-Kamioka) experiment started taking physics data in 2010 with an intent to further understand neutrino oscillations using a more powerful neutrino beam. T2K is the world's first off-axis long-baseline neutrino experiment; an intense neutrino beam is produced using a series of world-class proton accelerators at J-PARC in Tokai and its axis directed 2.5 degrees away from Super-Kamiokande, located 295 km away. This configuration produces a neutrino beam at Super-K which is enhanced in a narrow range of energies where the neutrino oscillation effect is maximal.

The primary aim of T2K was the discovery of the appearance of electron neutrinos in a muon neutrino beam, a phenomenon which is driven by the then unknown mixing between the first and third generations of neutrinos. T2K first observed a clear indication of electron neutrino appearance in 2011 and later fully established it in 2013 (Figure 1). This was an unprecedented achievement as it was the first time a transition between neutrino flavors had been confirmed where both the initial and final flavors were observed in the experiment.

T2K's discovery of electron neutrino appearance has opened the door to searches for possible differences in the oscillations of neutrinos and antineutrinos, an effect called "neutrino CP violation," which could be the key to explain why our present universe is made of only matter and no antimatter. Currently, when combined with the results from other experiments, T2K's data show a faint hint of this CP violation (Figure 2). To further study CP violation in neutrino oscillations, T2K started to take data with an antineutrino-enhanced beam in 2014. So far the experiment has measured the disappearance of muon-antineutrinos with world-class precision (Figure 3), but whether there are differences between neutrino and antineutrino oscillations remains to be seen.

加速器を用いて人工的に生成したニュートリノビームを使用する長基線実験は、ニュートリノのエネルギーや観測地点までの飛行距離を選んだ設計が可能なうえ、変化する前のニュートリノの情報も正確に把握できるため、ニュートリノ振動現象を精密に調べるのに適しています。

世界初の長基線ニュートリノ振動実験であるK2K(KEK to Kamioka)実験は、1999年から2004年にかけてデータを収集しました。つくば市にある高エネルギー加速器研究機構の陽子加速器で作り出したニュートリノビームを250km離れたスーパーカミオカンデでとらえるこの実験により、ニュートリノ振動が起こっている確率は99.99%以上、という確定的な結果が得られました。

K2K実験の成功をうけ、さらに強力かつ高品質なビームを用いてニュートリノ振動をより精密に研究する長基線実験として、T2K(Tokai to Kamioka)実験が2010年にデータ収集を開始しました。東海村のJ-PARC大強度陽子加速器を用いて生成した強力なニュートリノビームを295km離れたスーパーカミオカンデで観測するこの実験では、長基線実験として世界で初めてオフアクシスビーム法を採用しています。具体的には、ビームの中心をスーパーカミオカンデから2.5°ずらすことで、スーパーカミオカンデの方向には、振動の効果が最大となるあたりのエネルギーに限定したニュートリノをより多く飛ばしています。

T2K実験の第一の目的は、唯一未発見であった第1ー第3世代間のニュートリノ混合によって引き起こされる、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動現象を発見することでした。T2K実験は、世界に先駆けて2011年にその兆候をとらえ、2013年にはその存在を確実なものとしました（図1）。ある種類のニュートリノが別の種類のニュートリノに変化することを、出現現象という明確な形で初めて確認したという意味でも、非常に大きな発見でした。また、T2K実験は、第2ー第3世代間の振動パラメータを世界最高精度で測定しています。

T2K実験による電子ニュートリノ出現現象の発見は、現在の宇宙が反物質ではなく物質からできていることを説明する鍵の一つとされる「ニュートリノのCP対称性の破れ（粒子と反粒子の違い）」の解明への扉を開きました。これまでのT2K実験の結果を他の実験の結果と組み合わせると、CP対称性の破れの兆候がわずかに見えてきています（図2）。これをさらに深く調べるため、T2K実験では反ニュートリノビームのデータ収集を2014年に開始しました。反ミューニュートリノの消失を世界最高水準の精度で測定しましたが（図3）、ニュートリノと反ニュートリノの振動の違いはまだ見えてきていません。T2K実験では、ビーム強度の増強などの改良を重ねながら、今後もニュートリノ振動のさらなる解明に取り組んでいきます。

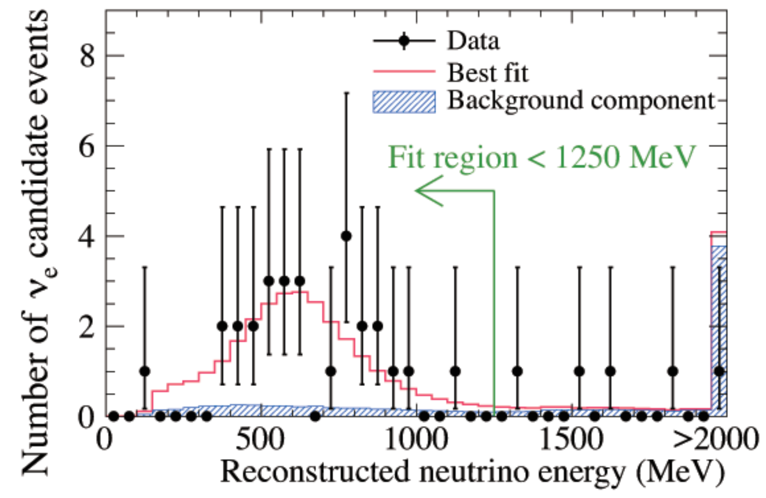



Figure 1: Energy spectrum of electron neutrino events observed by T2K. The red and blue histograms show the expectation with and without electron neutrino appearance.

図1：T2K実験で観測された電子ニュートリノ候補事象のエネルギー分布。赤線がミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動がある場合の予測で、振動がない場合の予測はおおよそ青の分布のとおり。

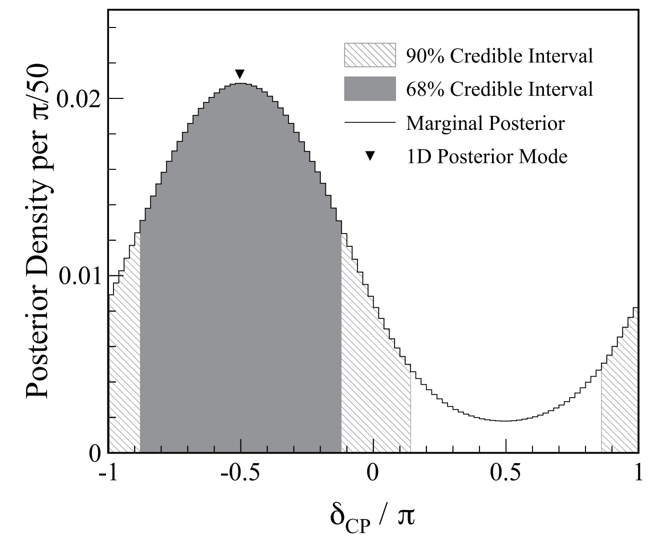



Figure 2: Posterior probability for $\delta_{CP}$ (a parameter indicating the violation of CP symmetry) obtained by T2K in combination with results from other experiments. The hatched ranges show 68% and 90% credible intervals. The most preferred value of $\delta_{CP}$ is $-\pi/2$, where CP symmetry is maximally violated.

図2：他実験の結果も入れたT2K実験のデータ解析で得られた、CP位相 $\delta_{CP}$（CP対称性の破れ具合を表すパラメータ）の事後確率分布。ハッチがかかっている部分が68%および90%信頼水準での許容範囲を示す。データからは、CP対称性が最大に破れる $\delta_{CP} = -\pi/2$ が最も好まれている。

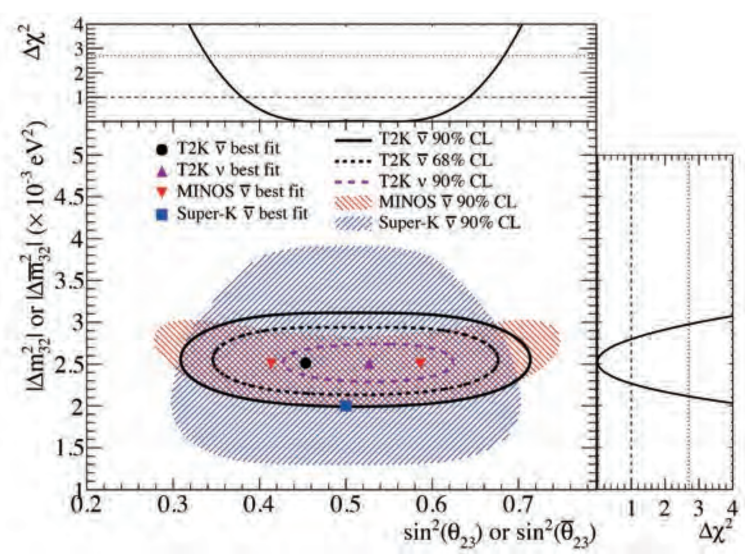



Figure 3: Allowed antineutrino oscillation parameter regions from T2K's muon-antineutrino disappearance measurement. The black dashed (solid) line shows the 68% (90%) confidence level. Colored regions show results from other experiments. The purple dashed line shows the allowed oscillation parameter region obtained from T2K's muon neutrino disappearance measurement.

図3：T2K実験の反ミューニュートリノ消失観測で許容される振動パラメータ領域（黒点線68%信頼水準、黒実線90%信頼水準）。色のついた領域は他の実験で得られた許容領域を表している。紫の点線は、比較のためにT2K実験のミューニュートリノ消失観測の結果を示したものである。

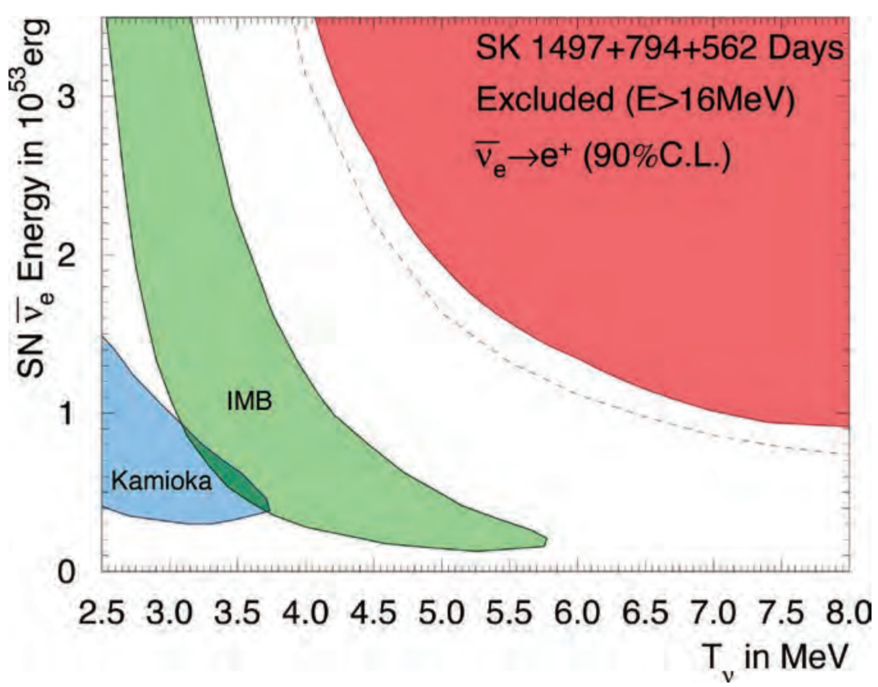
# Supernova neutrinos
## 超新星ニュートリノ

Stars with at least eight times more mass than our Sun will eventually collapse under their own weight. When that happens, most of the gravitational energy of the star is shed in the form of neutrinos, and the star explodes. Even though the resulting light from such a supernova explosion is brighter than an entire galaxy, the neutrinos carry more than 99% of the total energy, about $10^{46}$J, more than a billion times a billion times the energy output of the Sun. If a supernova was to occur at the center of our galaxy, Super-Kamiokande would record about 10,000 neutrinos over the course of just ten seconds. Not only would these neutrinos offer new insights into the dynamics of the explosion, but the high intensity of neutrinos inside the exploding star will test our understanding of neutrino interactions with other neutrinos.

Such supernovae in our own galaxy are rare, about a few per century, but they are frequent in the entire universe (one per second). Due to the large distances to other galaxies, Super-Kamiokande expects to see neutrinos from these far supernovae only a few times per year. From about ten years of Super-Kamiokande data, the supernova neutrino flux above 17.3 MeV of neutrino energy must be less than about three neutrinos /cm$^2$/s.

太陽の8倍以上の質量の星は、最終的に自分自身の重さでつぶれます。この時、星のほとんど全ての重力エネルギーはニュートリノに与えられて、星は爆発します。これを超新星爆発と呼びます。その時、発せられる光は銀河全体より明るくみえますが、ニュートリノはエネルギー全体の99%を持ち去ります。その量は約$10^{46}$ジュールで、太陽が放出しているエネルギーの10億倍のさらに10億倍に相当します。もし超新星爆発が銀河系の中心で発生した場合、スーパーカミオカンデでは、約10,000のニュートリノ事象が10秒程度の間に観測されるはずです。これらのニュートリノからは、爆発時の星が崩壊する動きの情報のみでなく、ニュートリノ同士の相互作用の特性など通常では観測が難しい物理情報も得られるでしょう。

このような超新星爆発は我々の銀河系内ではまれで、1世紀の間に2〜3回程度と見積もられています。しかし、宇宙全体で見れば、超新星爆発は1秒に1回程度という高い頻度で発生しています。他の銀河までは距離が遠いので、スーパーカミオカンデで観測できる遠くの銀河からの超新星ニュートリノは、年に2〜3事象程度と見積もられています。約10年間のスーパーカミオカンデの観測データから、17.3MeV以上の超新星ニュートリノの強度は、毎秒1cm$^2$あたり約3事象より少ないことがわかりました。




An exclusion contour from SK data in Supernova (SN) neutrino luminosity vs neutrino temperature parameter space (red). The Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB) and Kamiokande allowed areas for supernova 1987A are also shown (originally from Phys. Rev. D 85, 052007 (2012)).

超新星(SN)ニュートリノの明るさと温度のパラメータ範囲で、SKの観測により排除された領域(赤)。アーバイン・ミシガン・ブルックヘブン(IMB)実験とカミオカンデ実験の、超新星1987Aの観測データから許容される領域も示した。(元図:Phys. Rev. D 85, 052007 (2012))。


# Gadolinium loading : Super-Kamiokande's future
## スーパーカミオカンデの将来計画：SK-Gd

Super-Kamiokande (SK) has enjoyed a remarkably successful two decades of operation. But what does the future hold, and with twenty years of data already collected, how can our famous detector continue to produce new and interesting results well into the future? First proposed in an article in Physical Review Letters (93:171101 [2004]), the answer comes in the form of loading 100 tons of a soluble gadolinium (Gd) salt into the water of SK. By adding gadolinium sulfate to the SK water, the dissolved gadolinium, which has a tremendous affinity for absorbing thermal neutrons and emits a large flash of light when it does so, will allow us to efficiently see and positively identify these previously hard-to-detect neutral particles.

Gadolinium will greatly reduce limiting backgrounds to many of our existing studies, such as proton decay searches and solar neutrino measurements. It will improve neutrino-antineutrino discrimination for atmospheric and long-baseline oscillation studies. It will enable SK to measure antineutrinos from nuclear reactors located both inside and outside Japan. In the case of a galactic supernova explosion it will allow the flavors of the SN neutrinos to be separated, doubling SK's pointing accuracy back to the exploding star. Perhaps most significantly, within a few years of enriching the SK water, Gd's efficient neutron detection will allow us to make the world's first observation of the diffuse supernova neutrino background flux, the neutrinos emitted by all historical supernova explosions since the onset of stellar formation in the early universe.

Since 2009 Gd loading has been demonstrated in a dedicated underground laboratory near SK called EGADS – Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems. It contains a 200-ton scale model of SK, as well as custom-built water filtration and measuring equipment, and can be seen in Figures 1 and 2. The extremely promising results obtained in EGADS led to the SK and T2K Collaborations formally endorsing the plan to add Gd to SK, officially known as SK-Gd. Preparatory work is already underway; a large new experiment hall ("Hall G") has been excavated near SK to contain the required new water handling equipment. It can be seen in Figure 3.

Adding gadolinium to SK will rapidly produce many new and improved kinds of data. As a result, following twenty years of great success, Super-Kamiokande's future looks bright indeed.

スーパーカミオカンデ(SK)は、この20年間にわたり様々な成果をあげてきました。それでは、今後はどのような物理の成果をあげることができるでしょうか。その答えとして最初に提案されたのは、2004年にフィジカルレビューレター誌(93:171101 [2004])に投稿された100トンのガドリニウム(Gd)塩をSKに溶かすというアイデアでした。質量比で0.2%の硫酸ガドリニウムをSKの水に溶かすことにより熱中性子の捕獲効率が劇的に向上し、さらにその際には光が放出されます。その光を捉えることにより、これまでは困難であった中性子の識別を効率的に行なうことが可能になります。

ガドリニウムの導入により、陽子崩壊探索、太陽ニュートリノ観測など現在我々が行っている多くの研究で、雑音事象を減らすことが可能になります。またニュートリノ信号と反ニュートリノ信号の識別性能が向上することにより、大気ニュートリノ観測や長基線ニュートリノ実験におけるニュートリノ振動解析の感度向上が期待できます。さらに国内外にある原子炉からの反ニュートリノの観測も可能になりますし、銀河系内における超新星爆発ニュートリノの方向決定精度も倍に向上します。しかし期待される物理成果のうち最も重要であると考えられるのは、過去に起こった超新星爆発により発生したニュートリノ(超新星背景ニュートリノ)を世界で初めて観測することです。その観測により宇宙初期における星形成の歴史に迫ることが可能になります。GdをSKに添加することで、超新星背景ニュートリノ探索における信号と雑音の比を1万倍向上させ、宇宙全体に漂っていると考えられている超新星背景ニュートリノの観測が可能になります。

2009年よりSKの近くの地下施設でEGADSとよばれるガドリニウムを導入するテスト実験がおこなわれています。図1および2にあるような水の純化装置や様々な測定機器を備えたSKを模擬した200トンのタンクを建設しました。EGADSのテスト結果により、SKにGdを導入することが共同研究者により正式に認められ、このプロジェクトはSK-Gdと名付けられました。現在、準備は着々と進行しており、一例として純水製造装置の設置を目的として、SK近くに新たな空洞が完成しました。(図3)

SKにガドリニウムを添加することで全く新たな高質のデータが取得でき、その結果、これまでの20年のように、これからもスーパーカミオカンデから優れた物理成果が出せると期待しています。

Figure 1: The EGADS facility. The 200-ton scale model of SK is in the back of the image, with the water filtration system in the foreground.

図1:EGADS検出器。一番奥にあるのがSKを模擬した200トンタンク。手前には水の純化システムなど様々な装置が設置されている。

Figure 2: Inside the EGADS 200-ton tank during its construction. It is now operating as the world's first Gd-loaded water Cherenkov supernova neutrino detector.

図2:200トンタンクの内部の様子。現在では世界初のガドリニウム溶解水チェレンコフ超新星ニュートリノ検出器として稼働している。

Figure 3: The new Hall G in the Kamioka mine. About 12 kilotons of rock were removed to make room for the new Gd-capable water systems.

図3:神岡地下施設に設けられた空洞(ホールG)。約12キロトンの岩が新たなGd水システムを設置するために掘削された。

## The Nobel Prize in Physics 2015
## Professor Takaaki Kajita, ICRR, The University of Tokyo

## 2015年ノーベル物理学賞受賞
## ICRR 梶田隆章教授

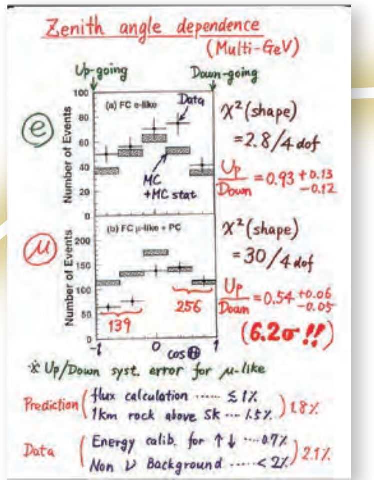
Professor Kajita was awarded the 2015 Nobel Prize in Physics for the discovery of neutrino oscillations. The observation of atmospheric neutrino oscillation was published in 1998 by the Super-Kamiokande collaboration.

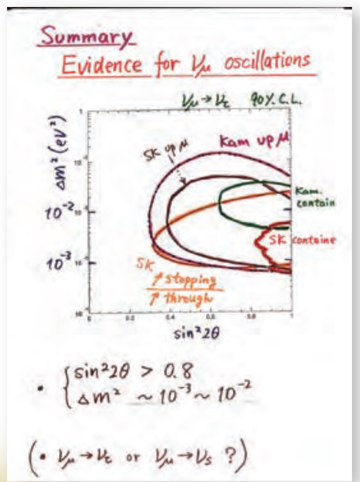
In 1998 at the Neutrino International Conference held in Takayama, Gifu, Professor Kajita showed the analysis results that compared the number of atmospheric neutrinos coming downward from about 30 km in the sky above the detector to the number of neutrinos coming upward through the earth from about 10,000 km away. The number of atmospheric neutrinos coming upward was reduced by about one half, which provided strong evidence for atmospheric neutrino oscillations. When finished, Professor Kajita received a standing ovation from the international researchers gathered in the hall.

Neutrino oscillations can only occur if neutrinos have mass. For this reason the observation of neutrino oscillations became conclusive evidence that the neutrino's mass is non-zero. The discovery of atmospheric neutrino oscillations revolutionized the theory of elementary particles and opened the door to new physics.The atmospheric neutrino oscillation analysis was published after 2 years of data taking, since Super-Kamiokande started operation in 1996. Professor Kajita, as one of the leaders of analysis group, led the Super-Kamiokande collaboration to reach the scientific conclusion about neutrino oscillation.

梶田教授は1998年にスーパーカミオカンデグループが発表した大気ニュートリノ振動の発見により、2015年ノーベル物理学賞を受賞されました。
1998年の高山で行われたニュートリノ国際会議において、梶田教授は上空からくる下向きのミューニュートリノに比べて、地球の裏側から飛んで来る上向きのミューニュートリノの数が半分に減っていることを明確に示し、それがニュートリノ振動の確実な証拠であると発表しました。会場の研究者からはスタンディングオベーションが起こり、この結果が認められました。

ニュートリノ振動はニュートリノが質量を持つために起こる現象です。したがって、ニュートリノ振動の発見はニュートリノが質量を持つ決定的な証拠となるのです。それまでの素粒子標準理論では、ニュートリノの質量がゼロとされてきたので、ニュートリノ質量の発見は新たな素粒子物理の歴史が開かれたきっかけになるものでした。受賞理由となった大気ニュートリノ振動の解析結果は、スーパーカミオカンデ実験が1996年にスタートしてわずか2年で発表されたものです。梶田教授は解析グループ代表の1人として、研究者を指揮して最終的な結論へまとめ上げました。




The slides used to present the analysis results at the Neutrino International Conference in 1998
1998年ニュートリノ国際会議の発表で使用されたスライド

Prof. Kajita giving a talk at the Neutrino International Conference held in Takayama, 1998
1998年ニュートリノ国際会議で発表する梶田教授

## 2016 Breakthrough Prize in Fundamental Physics

Prof. Yoichiro Suzuki, Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe
Prof. Takaaki Kajita, ICRR, The University of Tokyo and the Super-Kamiokande Collaboration
Prof. Koichiro Nishikawa, High Energy Accelerator Research Organization and the K2K and T2K Collaboration

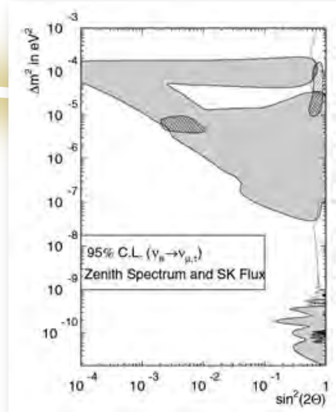
## 2016年基礎物理学ブレークスルー賞受賞
## Kavli IPMU 鈴木洋一郎特任教授、ICRR 梶田隆章教授
## およびスーパーカミオカンデ共同研究者グループ
## KEK 西川公一郎名誉教授および K2K・T2K 共同研究者グループ

The 2016 Breakthrough Prize in Fundamental Physics was awarded "for the fundamental discovery of neutrino oscillations, revealing a new frontier beyond, and possibly far beyond, the standard model of particle physics" The prize is shared among five international experimental collaborations studying neutrino oscillations: Super-Kamiokande, K2K/T2K, SNO, KamLAND and Daya Bay.

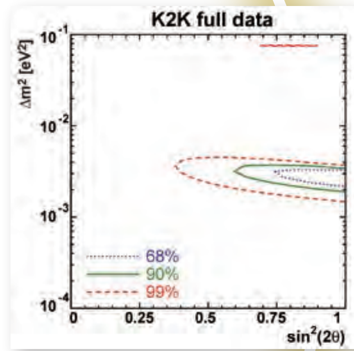
Professor Suzuki led the solar neutrino studies in Super-Kamiokande and in 2001 published detailed studies of electron neutrinos produced in the Sun, which indicated the solar neutrino oscillations. Professor Suzuki was the spokesperson of Super-Kamiokande for 12 years from 2002 to 2014. Professor Nishikawa promoted the K2K and T2K experiments, which are neutrino oscillation experiments shooting the neutrino beam generated by the accelerators toward Super-Kamiokande. Professor Nishikawa and K2K collaborators performed the first long base line neutrino oscillation experiment in the world and established the atmospheric neutrino oscillation. Professor Nishikawa and the T2K collaboration then discovered electron neutrino appearance from muon neutrino. The Breakthrough Prize was awarded to each collaborator to recognize the achievements as a team.

スーパーカミオカンデに関連する3つの大きな発見に対し、2016年基礎物理学ブレークスルー賞が授与されました。受賞理由は、「ニュートリノ振動という本質的な発見をし、素粒子物理学の標準理論を遥かに越える新しいフロンティアを開拓した実績」であり、ニュートリノ振動に関わった5つの実験(Super-Kamiokande,K2K/T2K,SNO,KamLAND,Daya Bay)の共同受賞です。

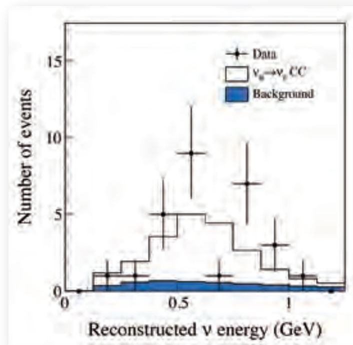
鈴木洋一郎特任教授は、スーパーカミオカンデ実験において太陽ニュートリノ研究を主導し、2001年には太陽ニュートリノ振動の証拠となる観測データを示しました。また、2002年から12年間に渡ってスーパーカミオカンデ実験代表者としてグループを牽引されました。西川公一郎名誉教授は、加速器で作り出した人工ニュートリノビームをスーパーカミオカンデに打ち込んでニュートリノ振動を研究するK2K実験とT2K実験を代表者として推進されました。K2K実験では世界初の長基線ニュートリノ振動実験を成功させ、大気ニュートリノ振動を確実のものとし、T2K実験では、未発見であったミューニュートリノから電子ニュートリノへの出現事象の発見に成功しました。ブレークスルー賞は当時の共同研究者1人1人にも与えられ、実験グループ全体としての実績が認められています。




The result of solar nerutino oscillation analysis published in 2001
2001年太陽ニュートリノ振動解析の結果




The result of K2K experiment published in 2006
2006年K2K実験
ニュートリノ振動解析の結果




The result of T2K experiment published in 2013
2013年T2K実験
ニュートリノ振動解析の結果

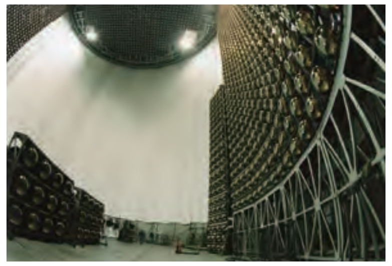
## 1991.12
Start of excavation of the cavity
空洞掘削開始


Excavating hard rock, Hida gneiss, using a blasting method
飛騨片麻岩の硬い岩盤を掘り進む掘削作業


Collaboration agreement signed connecting the Kamiokande and IMB groups to collaborate on Super-K (1992.10)
カミオカンデとIMBグループがスーパーカミオカンデ共同研究グループを結成

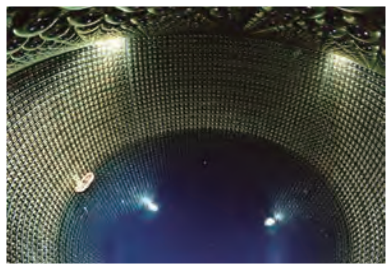
## 1994.6
Completion of excavation of the cavity and start of detector construction
空洞掘削完了、検出器の建設開始


Completion of excavation a large cavity with 40m in diameter and 58m in hight
Construction of a stainless tank by attaching stainless plates on the wall of the cavity
直径40m 高さ58m の巨大空洞が完成
この後空洞の壁面にステンレス板が取り付けられた


Installation of PMTs in module units on the inner detector wall
モジュール化された光電子増倍管の内壁への取り付け作業

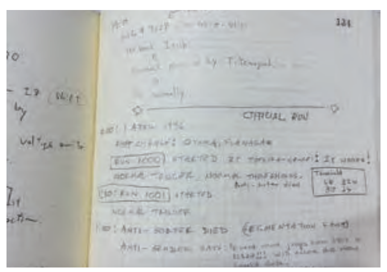
## 1996.1
Filling the SK detector with pure water
給水開始


Taking two months to fill up SK detector with 50,000 ton of pure water
5万トンのタンクを満たすのに2ヶ月かかります


Inside the detector during filling water
給水中の検出器内部

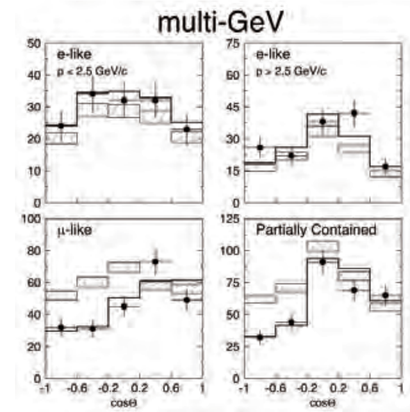
## 1996.4
The first operation of Super-Kamiokande detector at 0:00AM, which was started by the first spokesperson, Prof. Yoji Totsuka.
午前0:00 観測開始。 初代SK代表者である
戸塚洋二教授が運転開始のボタンを押しました


Collaborators surrounding Prof. Totsuka in the control room in the Kamioka mine
坑内のコントロールルームで戸塚教授を囲む研究者

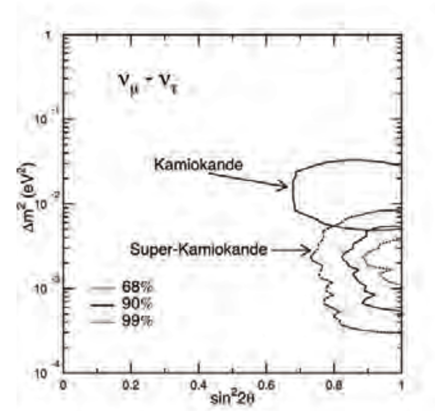

The logbook of the first official run.
"Run1000 Started by Totsuka-san! It works!"
観測開始時のログノート
「戸塚先生がデータ取得をスタートした！動いた！」

## 1998.6
Discovery of atmospheric neutrino oscillation
大気ニュートリノ振動の発見

## 1999.1
Asahi Prize to Super-K collaborators
朝日賞受賞



Zenith angle distributions of atmospheric neutrinos appeared in the paper for the discovery of neutrino oscillation
大気ニュートリノ振動発見の論文に掲載された大気ニュートリノの天頂角分布



Allowed region of oscillation parameters for the neutrino oscillation in the same paper
大気ニュートリノ振動発見の論文に掲載された
大気ニュートリノパラメーターの許容領域

## 1999.6
Start of the K2K experiment
K2K 実験開始

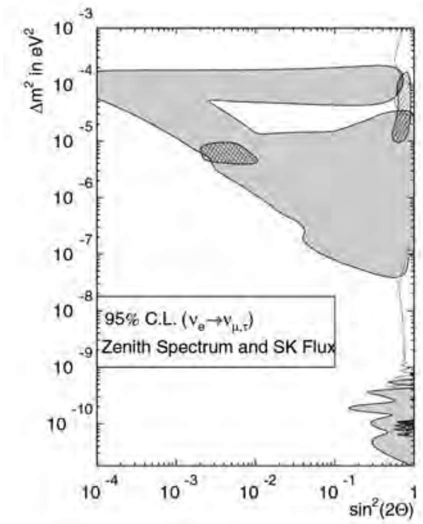
## 2001.6
Discovery of solar neutrino oscillation
太陽ニュートリノ振動の発見

Neutrino beam line at KEK
KEK ニュートリノビームライン

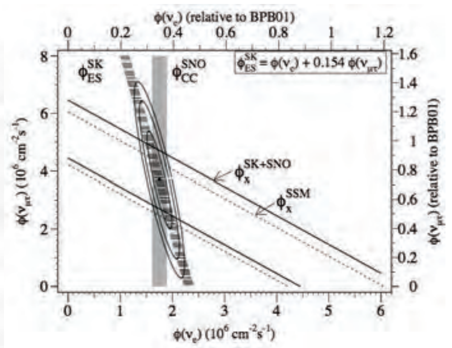

1kton front detector at KEK
1kt 前置検出器

## 2001.7
Work to replace malfunctioning PMTs
PMT 交換開始

## 2001.11
An accident damages half of the Super-K PMTs. Professor Totsuka: "We will rebuild the detector. There is no question."
PMT の半数を破損する事故が発生
戸塚先生「我々は検出器を再建する。
疑問の余地はない。」



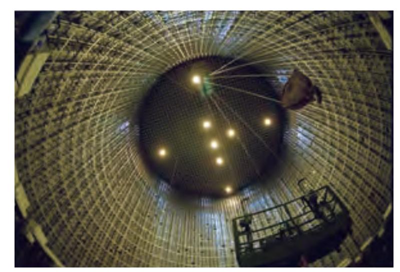
Super-K favors result favor the LMA solution to the solar neutrino puzzle.
太陽ニュートリノ振動パラメーターの許容領域
ニュートリノ混合の割合が大きいことを示した



Super-K solar neutrino flux, used in conjunction with direct evidence from SNO, provides evidence that neutrino oscillation is the cause of the solar neutrino deficit.
カナダのSNO 実験の結果と合わせて太陽ニュートリノの欠損がニュートリノ振動に起因することを示した

## 2002.4
Restoration work from the accident
事故からの復活（部分再建作業開始）

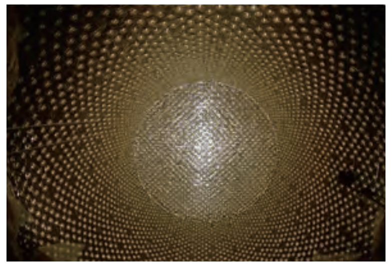
## 2002.12
The 2002 Nobel Prize in Physics awarded to Prof. Masatoshi Koshiba.
小柴先生ノーベル物理学賞受賞


Inner detector after removing all PMTs after the accident
PMT 破損事故後全ての光電子増倍管が取り除かれた検出器内部

## 2002.12

Restart as SK-II with a half density of PMTs
約半数の光電子増倍管でSK-II として運転再開

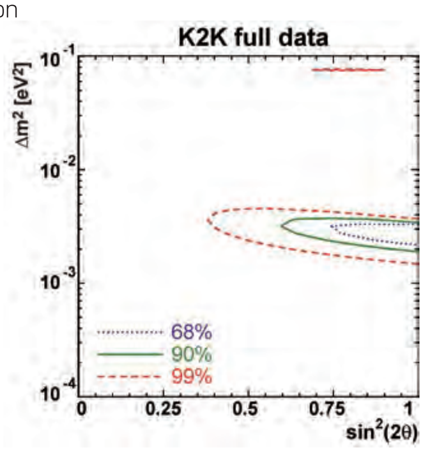
Working members when PMT mounting were almost done
光電子増倍管の取り付けがほぼ終了したときの作業メンバー



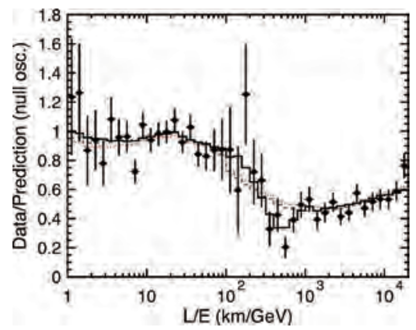
Inside the inner detector with a half density of PMTs
約半数の光電子増倍管が取り付けられた検出器内部

## 2004.6

Confirmation of atmospheric neutrino oscillation by the K2K experiment using beam neutrinos
K2K 実験スーパーカミオカンデで発見された
大気ニュートリノ振動を確認




Allowed region of neutrino oscillation parameters observed by K2K experiment
K2K　実験で測定されたニュートリノ振動パラメーター許容領域



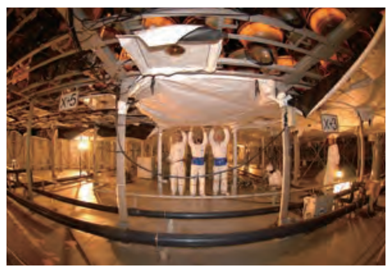

Evidence of a dip structure (black dot) expected for the neutrino oscillation
ニュートリノ振動だと期待される凹み（黒丸）の証拠が得られた

## 2004.7

Direct observation of an oscillatory signature in the atmospheric neutirno samples
大気ニュートリノ中の振動パターンの直接観測

## 2005.10

Reconstruction work for full recovery of the PMT density
光電子増倍管の数を元に戻す完全再建作業開始

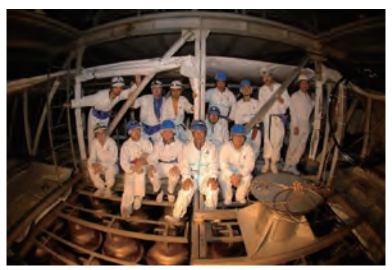


Installation of reflective Tybek sheets in the outer-detector region
外水槽の反射シート取り付けの様子

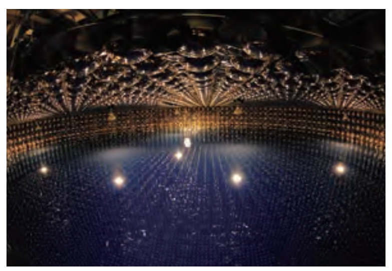
Installation of inner detector PMTs
内水槽の光電子増倍管取り付けの様子

## 2006.7

Completion of full reconstruction and the start of SK-III
完全再建作業完了、全ての光電子増倍管で観測再開



Shift members just after the installation of the last PMTs
最後の光電子増倍管の取り付け作業が終わったところ



Water surface close to the topmost PMTs
満水間近の検出器内部

## 2008.9

Replacement of front-end electronics and data aquisition system (DAQ)
データ収集システムの一新

## 2009.4

Start of the T2K (Tokai to Kamioka) experiment, the first off-axis neutrino oscillation experiment
T2K 実験開始

Installation work of new front-end electronics
データ収集システムの入れ替え作業

New electronics connected to new DAQ system
新しいデータ収集システム

## 2010.6

Launching a test facility for the SK-Gd project
SK-Gd 計画に向けて実証実験開始

## 2011.6

Discovery of electron neutrino appearance in the T2K experiment
T2K 実験で電子ニュートリノ出現事象の発見


Japan Proton Acceerator Research Complex in Tokai-mura, Ibaraki, 295km away from Kamioka
茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子加速器施設

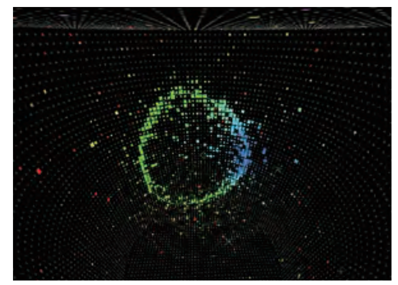
Inside the 200ton tank of the test facility for SK-Gd project
SK-Gd計画の実証実験のための200トンテストタンク

## 2012.7

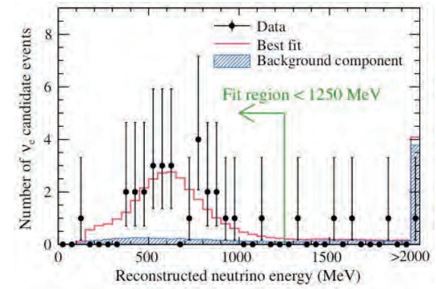
Proton decay $p \to e^+\pi^0$ lifetime limit published by SK exceeds $10^{34}$ years.
スーパーカミオカンデで観測された陽子崩壊の寿命が$10^{34}$年を超えた

## 2013.7

Measurement of electron neutrino appearance in the T2K experiment
T2K 実験で電子ニュートリノ出現事象の観測と測定



One of the T2K electron neutrino events
2013年に観測された電子ニュートリノ出現事象



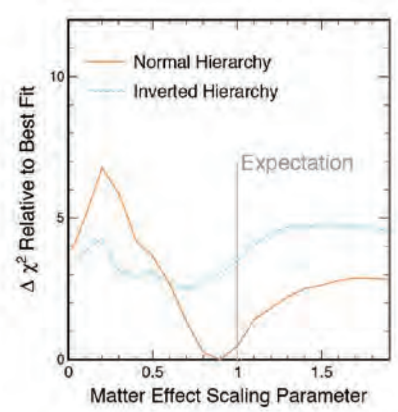

Energy spectrum of electron neutrino events observed by T2K (2013)
T2K 実験においてスーパーカミオカンデで観測された電子ニュートリノ出現事象のエネルギー分布

## 2015.11

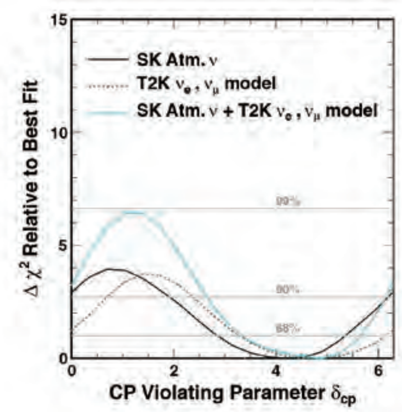
2016 Breakthrough Prize in Fundamental Physics awarded to Prof. Yoichiro Suzuki, Prof. Takaaki Kajita and SK Collaborators, and Prof. Koichiro Nishikawa and K2K/T2K Collaborators
Breakthrough賞受賞

## 2015.12

The 2015 Nobel Prize in Physics awarded to Prof. Takaaki Kajita
梶田教授ノーベル物理学賞受賞




Constraints on the Earth's matter effect and the neutrino mass hierarchy from atmospheric neutrino oscillations
ニュートリノ振動における地球の物質効果と質量階層性に関する制限




Constraints on the charge-parity (CP) violation parameter in neutrino oscillations
ニュートリノ振動における電荷とパリティの破れのパラメータに関する制限