スーパーカミオカンデ 観測10周年記念

10th anniversary of Super-Kamiokande

May 14, 2006

昨年10月から約6ヶ月の再建作業により、これまで 失われていた約6000本の光電子増倍管が取り付け られた。3年間にわたる光電子増倍管の製作を経て 実現されたものである。6月末には満水となり、ほぼ 元の性能に復帰し、スーパーカミオカンデは SK-III と して観測を再開する。

今年は、SK の観測開始から10年という節目でもあ る。1996年4月1日午前0時、スーパーカミオカンデ (SK)実験共同研究者か神岡鉱山茂住坑内にある実 験コントロールルームに集結した。実験責任者であっ た戸塚洋二氏がコンピューターのマウスをクリックして SK実験がはじまった。それまでの数日間、米国のコラ ボレータ達の血眼の追い込みが記憶に残っている。

SK は、実験開始後2年目に、大気ニュートリノ振動 の発見を公表した。また、その3年後の2001年には、 カナダの SNO 実験のデータとともに、太陽ニュートリノ 振動の確認を行っている。また、大気ニュートリノ振動 を確認すべく、人工ニュートリノを使った世界で初の長 基線ニュートリノ振動実験(K2K)の、遠方測定器とし て活躍、ニュートリノ振動の確認を行った。SK 実験の 成功は、日米を中心とした国際共同実験チームの強 い協力によって実現できたといってのよいであろう。

次のメガトンクラスの後継機は、予算措置されたと しても、その建設には10年近くかかるので、後継機が 観測を開始するまでには、最低でも今後10年、実際 は15年以上かかるかもしれない。その間、SK は運転 が継続されるだろう。

長期間にわたる、SK の運転に備え、今後1~2年 で電子回路を全く新しいものに更新する準備を進めて いる。これにより、高速のトリガーが可能になり、エネ ルギー閾値の低減が可能となる。また、中性子の積 極的同定により、反ニュートリノの観測をめざすプロジ ェクトも準備中である。

2009年には、JPARC からの大強度ニュートリノが SK に送られるはずである。これにより、未決定である 最後のニュートリノ振動混合角の決定を目指す。この 実験は、将来ニュートリノと反ニュートリノの振動の違 いなどの探索を目指し、それを糸口にして物質起源の 研究に向かうことができる。太陽ニュートリノスペクト ルの低エネルギー側の観測、大気ニュートリノデータ の更なる蓄積とあいまって、ニュートリノ振動は精密 実験の時代に突入する。

今後、新たな発見の期待も大きい。1987年のカミ オカンデによる超新星からのニュートリノバーストの観 測以来、ほぼ20年が経過している。次の超新星ニュ ートリノ観測の機は熟している。もし、超新星が我々の 銀河中心付近で起こったならば、約8000事象ものニ ュートリノが捉えられ、爆発の機構、中性子星やブラッ クホールの形成の様子が時々刻々ニュートリノにより 伝えられてくるであろう。

過去の超新星爆発からのニュートリノは、背景ニュ ートリノとして宇宙にただよっている。このニュートリノ を発見するために必要な感度のぎりぎり近くまで、現 在のSKは既に到達している。新たに中性子の同定が 可能になると、一気にこの感度をあげることが可能で あり、発見が期待される。

長年の夢でもある Proton Decay の候補が見つかる ことも期待したい。

事故直後には、復旧は困難であろうと思ったことも ありましたが、皆さんのご支援、そして当時のSK実験 責任者戸塚洋二氏の強力なリーダーシップにより、残 存増倍管を一様に配置し、1年後に部分復旧をするこ とができました。さらに、文部科学省、東京大学、米国 DOE、共同研究の各研究機関、地元岐阜県、神岡町、 茂住の方々、そして、納税者である国民の皆様のご 理解により、今日、全面復旧の日を迎えることができ ました。ここにSKの復旧を支援していただいたすべて の方々に謝意を表したいとおもいます。ありがとうござ いました。

平成18年5月14日

スーパーカミオカンデ実験責任者 鈴木洋一郎

スーパーカミオカンデ共同研究機関 及び研究者リスト

Super-Kamiokande Collaboration Institutes and Members

Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kamioka, Gifu, 506-1205, Japan

K.Abe, Y.Ashie,* S.Fukuda,* T.Hayakawa,* J.Hosaka,* Y.Hayato, T.Iida, K.Ishihara,* S.Joko,* J.Kameda, S.Kasuga,* Y.Kobayashi,* Y.Koshio, T.Kumita,* A.Minamino, C.Mitsuda,*
M.Miura, S.Moriyama, M.Nakahata, T.Namba,* R.Nambu,* Y.Obayashi, H.Ogawa, M.Ohta,*
M.Oketa,* N.Sakurai,* H.Sekiya, M.Shiozawa, Y.Suzuki, A.Takeda, H.Takeuchi,* Y.Takeuchi, K.Taki,* T.Tomoeda,* T.Toshito,* Y.Totsuka, K.Ueshima, H.Watanabe, and S.Yamada*

Research Center for Cosmic Neutrinos, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

I.Higuchi, C.Ishihara, M.Ishitsuka,^{*} T.Kajita, K.Kaneyuki, G.Mitsuka, S.Nakayama, H.Nishino, A.Okada,^{*} K.Okumura, T.Ooyabu,^{*} C.Saji, and Y.Takenaga

University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

M.Koshiba

Department of Physics, Boston University, Boston, MA 02215, USA

S.Clark, S.Desai, F.Dufour, M.Earl, * A.Herfurth, J.Hong, * E.Kearns, S.Likhoded, M.Litos, J.Raaf, J.L.Stone, L.R.Surak, and W.Wang

Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA

M.Goldhaber

Department of Physics and Astronomy, University of California, Irvine, Irvine, CA 92697-4575, USA

T.Barszczak,* D.Casper, J.P.Cravens, J.Dunmore, W.Gajewski,* J.Griskevich, P.Halverson,* J.Hsu,* W.R.Kropp, D.W.Liu, S.Mine, C.Regis, L.Price,* M.B.Smy, C.Simon, H.W.Sobel, C.W.Sterner,* and M.R.Vagins

Department of Physics, California State University, Dominguez Hills, Carson, CA 90747, USA

K.S.Ganezer, J.E.Hill, and W.E.Keig

Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

J.S.Jang, I.S.Jeong, J.Y.Kim, and I.T.Lim

Department of Physics, Duke University, Durham, NC 27708 USA

K.Scholberg, N.Tanimoto, C.W.Walter, and R.Wednell

Department of Physics, George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA*

R.W.Ellsworth

Department of Physics, Gifu University, Gifu, Gifu 501-1193, Japan

S.Tasaka

Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA

J.Flanagan,* G.Guillian, A.Kibayashi,* J.G.Learned, S.Matsuno, M.Rosen, V.Stenger,* and D.Takemori*

Department of Physics, Indiana University, Bloomington, IN 47405-7105, USA

M.D.Messier

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

A.K.Ichikawa,* T.Ishida, T.Ishii, T.Iwashita,* J.Kanzaki,* T.Kobayashi, T.Maruyama,* T.Nakadaira, K.Nakamura, K.Nishikawa, K.Nitta,* Y.Oyama, A.Sakai,* and O.Sasaki*

Department of Physics, Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

S.Echigo,* M.Kohama,* and A.T.Suzuki

Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

M.Hasegawa,* K.Hayashi,* K.Hiraide, T.Inagaki,* I.Kato,* H.Maesaka,* T.Morita,* T.Nakaya, T.Sasaki,* H.Sato,* H.Tanaka, S.Ueda,* S.Yamamoto, and M.Yokoyama

Physics Division, P-23, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87544, USA

T.J.Haines

Department of Physics and Astronomy, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA

S.Dazeley, S.Hatakeyama, B.K.Kim,* K.B.Lee,* R.Sanford,* and R.Svoboda

Department of Physics, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

E.Blaufuss,* M.Chen,* Z.Conner,* J.A.Goodman,* G.W.Sullivan,* and D.Turcan*

Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

J.Cooley,* K.McConnel,* and M.Swanson*

Department of Physics, University of Minnesota, Duluth, MN 55812-2496, USA

A.Habig

Department of Physics, Miyagi University of Education, Sendai, Miyagi 980-0845, Japan

Y.Fukuda and ${\rm T.Sato}^*$

Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

Y.Itow, T.Koike, and T.Tanaka

Department of Physics and Astronomy, State University of New York, Stony Brook, NY 11794-3800, USA

M.Ackermann,* F.Goebel,* C.K.Jung, T.Kato, D.Kerr,* K.Kobayashi, M.Malek,* K.Martens,* C.Mauger,* C.McGrew, A.Sarrat,* E.Sharkey,* R.Terri, B.Viren,* and C.Yanagisawa

Department of Physics, Niigata University, Niigata, Niigata 950-2181, Japan

W.Doki,* M.Kirisawa,* Y.Kitaguchi,* H.Koga,* S.Inaba,* K.Miyano,* T.Shibata,* M.Takahashi,* M.Takahata,* and N.Tamura

Department of Physics, Okayama University, Okayama, Okayama 700-8530, Japan

H.Idehara, M.Ikeda, M.Sakuda, and M.Sugihara

Department of Physics, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

K.Higuchi,* J.Ishii,* Y.Kajiyama,* Y.Kuno, A.Kusano,* Y.Nagashima,* M.Takita,* T.Yamaguchi,* and M.Yoshida

Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

 $\rm H.I.Kim,^*~S.B.Kim,~and~J.Yoo^*$

Department of Systems Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561, Japan

T.Ishizuka

Department of Informatics in Social Welfare, Shizuoka University of Welfare, Yaizu, Shizuoka 425-8611, Japan

H.Okazawa

Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

Y.Choi and H.K.Seo

Research Center for Neutrino Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

M.Etoh,* K.Fujita,* Y.Gando, A.Hasegawa,* T.Hasegawa, K.Inoue, T.Iwamoto,* T.Kinebuchi,* M.Koga,* I.Nishiyama,[†] M.Saito,* J.Shirai,* A.Suzuki,* and F.Tsushima*

Department of Physics, Tokai University, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

Y.Furuse, T.Hashimoto,^{*} Y.Hatakeyama,^{*} Y.Ichikawa,^{*} H.Ishii, M.Koike,^{*} Y.Nakajima,^{*} M.Nemoto,^{*} and K.Nishijima

Department of Physics, Tokyo Institute for Technology, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan

T.Futagami,* T.Harada,* H.Ishino,* M.Morii,* R.Nishimura,* T.Suzuki,* and Y.Watanabe

Center for High Energy Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

 $S.Chen,\ Z.Deng,\ and\ Y.Liu$

Institute of Experimental Physics, Warsaw University, 00-681 Warsaw, Poland

D.Kielczewska and J.Zalipska

Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195-1560, USA

^{*}Left Super-Kamiokande Collaboration †Deceased

発表論文リスト

Publication List

Publication list

- 1. Three flavor neutrino oscillation analysis of atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande, Submitted to Phys. Rev. D [arXiv:hep-ex/0604011]
- 2. Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I, Submitted to Phys. Rev. D [arXiv:hep-ex/0508053]
- 3. Observation of the anisotropy of 10TeV primary cosmic ray nuclei flux with the Super-Kamiokande-I detector, submitted to Phys. Rev. D [arXiv:hep-ex/0508468]
- 4. 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]
- 5. A measurement of atmospheric neutrino oscillation parameters by Super-Kamiokande I, Phys. Rev. D 71, 112005 (2005) [arXiv:hep-ex/0501064]
- 6. Search for dark matter WIMPs using upward through-going muons in Super-Kamiokande, Phys. Rev. D 70, 083523 (2004) [Erratum-ibid. D 70, 109901 (2004)] [arXiv:hep-ex/0404025]
- 7. Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation, Phys. Rev. Lett. 93, 101801 (2004) [arXiv:hep-ex/0404034]

Ranked 13th in 2005 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

- 8. 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]
- 9. Precise measurement of the solar neutrino day/night and seasonal variation in Super-Kamiokande-I, Phys. Rev. D 69, 011104 (2004) [arXiv:hep-ex/0309011]
- 10. A search for periodic modulations of the solar neutrino flux in Super-Kamiokande-I, Phys. Rev. D 68, 092002 (2003) [arXiv:hep-ex/0307070]
- 11. The Super-Kamiokande detector, Nucl. Instrum. Meth. A 501, 418 (2003)
- 12. Development of super-high sensitivity radon detector for the Super-Kamiokande detector, Nucl. Instrum. Meth. A 497, 414 (2003)
- 13. Search for $\bar{\nu_e}$ from the sun at Super-Kamiokande-I, Phys. Rev. Lett. 90, 171302 (2003) [arXiv:hep-ex/0212067]
- 14. Search for supernova relic neutrinos at Super-Kamiokande, Phys. Rev. Lett. 90, 061101 (2003) [arXiv:hep-ex/0209028]
- 15. Search for neutrinos from gamma-ray bursts using Super-Kamiokande, Astrophys. J. 578, 317 (2002) [arXiv:astro-ph/0205304]
- 16. Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of Super-Kamiokande-I data, Phys. Lett. B 539, 179 (2002) [arXiv:hep-ex/0205075]

Ranked 10th in 2003 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

17. Solar ⁸B and he p neutrino measurements from 1258 days of Super-Kamiokande data, Phys. Rev. Lett. 86, 5651 (2001) [arXiv:hep-ex/0103032]

Ranked 7th in 2001, 5th in 2002, and 8th in 2003 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

 Constraints on neutrino oscillations using 1258 days of Super-Kamiokande solar neutrino data, Phys. Rev. Lett. 86, 5656 (2001) [arXiv:hep-ex/0103033]

Ranked 9th in 2001, and 8th in 2002 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

19. Tau neutrinos favored over sterile neutrinos in atmospheric muon neutrino oscillations, Phys. Rev. Lett. 85, 3999 (2000) [arXiv:hep-ex/0009001]

Ranked 6th in 2001, and 7th in 2002 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

- 20. ¹⁶N as a calibration source for Super-Kamiokande, Nucl. Instrum. Meth. A 458, 638 (2001) [arXiv:hep-ex/0005014]
- 21. Neutrino-induced upward stopping muons in Super-Kamiokande, Phys. Lett. B 467, 185 (1999) [arXiv:hep-ex/9908049]
- 22. Search for proton decay through $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$ in a large water Cherenkov detector, Phys. Rev. Lett. 83, 1529 (1999) [arXiv:hep-ex/9904020]
- 23. Observation of the east-west anisotropy of the atmospheric neutrino flux, Phys. Rev. Lett. 82, 5194 (1999) [arXiv:hep-ex/9904020]
- 24. Measurement of radon concentrations at Super-Kamiokande, Phys. Lett. B 452, 418 (1999) [arXiv:hep-ex/9903006]
- 25. Constraints on neutrino oscillation parameters from the measurement of day-night solar neutrino fluxes at Super-Kamiokande, Phys. Rev. Lett. 82, 1810 (1999) [arXiv:hep-ex/9812009]
- 26. Measurement of the solar neutrino energy spectrum using neutrino electron scattering, Phys. Rev. Lett. 82, 2430 (1999) [arXiv:hep-ex/9812011]
- 27. Measurement of the flux and zenith-angle distribution of upward through-going muons by Super-Kamiokande, Phys. Rev. Lett. 82, 2644 (1999) [arXiv:hep-ex/9812014]

Ranked 7th in 2000 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

28. Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos, Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998) [arXiv:hep-ex/9807003]

Ranked 1st in 1998, 1999 and 2000, 2nd in 2001 and 2002, 3rd in 2003, 5th in 2004, and, 3rd in 2005 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

- 29. Calibration of Super-Kamiokande using an electron linac, Nucl. Instrum. Meth. A 421, 113 (1999) [arXiv:hep-ex/9807027]
- 30. Search for proton decay via $p \to e^+ \pi^0$ in a large water Cherenkov detector, Phys. Rev. Lett. 81, 3319 (1998) [arXiv:hep-ex/9806014]
- 31. Study of the atmospheric neutrino flux in the multi-GeV energy range, Phys. Lett. B 436, 33 (1998) [arXiv:hep-ex/9805006]

Ranked 4th in 1999, and 3rd in 2000 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

- 32. Measurements of the solar neutrino flux from Super-Kamiokande's first 300 days, Phys. Rev. Lett. 81, 1158 (1998) [Erratum-ibid. 81, 4279 (1998)] [arXiv:hep-ex/9805021]
- 33. Measurement of a small atmospheric ν_{μ}/ν_{e} ratio, Phys. Lett. B 433, 9 (1998) [arXiv:hep-ex/9803006]

Ranked 3rd in 1998 and 1999, and 2nd in 2000 top citation list in the SLAC HEP preprint database.¹

- 34. Improvement of 20 in. diameter photomultiplier tubes, Nucl. Instrum. Meth. A 329, 299 (1993)
- 35. Front end hybrid circuit for Super-Kamiokande, Nucl. Instrum. Meth. A 320, 310 (1992)

¹⁾ Ranking for experimental high energy physics and nuclear physics.

スーパーカミオカンデ実験と これまでの成果

The Super-Kamiokande Experiment and its Result

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 (Super-Kamiokande)

5 万トンの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、韓国、中国等からの 37 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。 ニュートリノに質量があると、これまで質量がゼ ロとされていた素粒子の標準模型は拡張しなくて はなりません。加えて、ニュートリノが反応を起 こす標的である純水が5万トンもあり、その結果 観測される事象が多いおかげで、精密なニュート リノ振動の研究が可能になりました。また、ニュ ートリノが振動する様子は、ニュートリノのエネ ルギーと発生源からの飛行距離に依存します。ス ーパーカミオカンデでは広い範囲のエネルギーや 飛行距離を持つニュートリノを観測できるので、 ニュートリノの性質を詳しく研究することができ ます。

この振動現象は、後に高エネルギー加速器研究 機構で生成されたニュートリノをスーパーカミオ カンデで観測するK2K実験によって確認されまし た。また、太陽から飛来するニュートリノも高い 精度で測定することができます。その観測の結果、 3種類のニュートリノの間に考えられる3種類の 振動現象のうち、2つめの振動現象も存在する確 実な証拠が得られました。次のフェーズのスーパ ーカミオカンデによって、3つ目の振動現象を発 見することは重要な課題となっています。

研究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。 Super-Kamiokande is a 50,000 ton water Cherenkov detector, which began observation in April, 1996 after 5 years of construction. The detector is used in cooperation with 37 collaborating institutes in Japan, the United States, Korea, and China.

Super-Kamiokande primarily observes the elementary particle known as the neutrino. Super-Kamiokande can observe neutrinos which are made in the center of the sun, in the Earth's atmosphere or during a supernova. Through the observation of neutrinos, we can directly examine what happens at the center of the sun.

There are three types of neutrinos. Theoretically, if neutrinos were to have mass, they would oscillate among the different type of neutrinos. In 1998 it was shown for the first time experimentally that neutrinos have mass by the observation of neutrino oscillation in the atmospheric neutrino data from Super-Kamiokande. We need to modify the Standard Model of particle physics which assumes zero neutrino Moreover, mass. since Super-Kamiokande contains 50,000 tons of pure water as a neutrino target, a large number of neutrino events can be observed. This makes it possible to study neutrino oscillations precisely. In addition, Super-Kamiokande can observe a wide range of neutrino energies and path lengths. This makes it possible to study many aspects of neutrino properties.

Neutrino oscillations were confirmed by an experiment using a manmade neutrino beam from KEK and the Super-Kamiokande detector.

We have also measured neutrinos from the sun precisely. Based on this measurement, we found evidence that a second mode of neutrino oscillation also exists among three possible modes of neutrino oscillations. It is an important task to observe this third mode of neutrino oscillations in the next phase of Super-Kamiokande. Another purpose of the experiment is to search for proton decay. While the proton is considered stable in the Standard Model of particle physics, its decay is necessary in Grand Unified Theories. 大気ニュートリノとは、陽子などの宇宙線が大気 と衝突して生成されるニュートリノで、電子ニュ ートリノとミューニュートリノが生成されます。

これらのニュートリノは地球大気のあらゆる場 所で生成され、しかも他の物質とほとんど相互作 用をしないので、地球にすらさえきられることな く 上空からくるものも、地球を通り抜けて下方向 からくるものも、 ニュートリノの数は同じになる と予想されます。ところが、スーパーカミオカン デを用いて、大気ニュートリノの数の天頂角分布 を調べると、図1に示したように、ミューニュー トリノによる上向き事象が下向き事象の約半分し か観測されないという驚くべき結果が得られまし た。これは地球の反対側からやって来るミューニ ュートリノが、長い距離を飛行する間に別種の二 ュートリノに振動しているために起こると考えら れ、ニュートリノに質量が存在している決定的な 証拠となりました。これらの大気ニュートリノの データを用いて2種類のニュートリノの質量の2 乗の差(Δm²)と混合角パラメータ (sin²20: θは2種 類のニュートリノ間の混合角)を求めると図2の ような結果が得られました。この大気ニュートリ ノ観測によるニュートリノ質量の発見は、素粒子 標準理論を超える最初の突破口を与えました。

また、 最近の詳しい解析ではニュートリノ振動 から 期待される「距離/エネルギー」の正弦関数的 な振る舞いも確認されました。図 3 がそのデータ です。ニュートリノ振動では、ミューニュートリ ノがまずタウニュートリノになり、その後またミ ューニュートリノに戻るということを波のように 繰り返します。図 3 は実際にミューニュートリノ が一度減ってまた現れることを示しています。こ れはニュートリノ振動以外では考えられず、ニュ ートリノ振動の証拠がより確実なものとなりまし た。

またこの分布からも 2 種類のニュートリノの質 量の 2 乗の差と混合角パラメータを測定すること が可能で、その結果も図 2 に示してあります。 Atmospheric neutrinos are generated by the interaction of cosmic rays in the atmosphere. Two types of neutrinos are produced; muon type and electron type. The number of upward-going and downward-going neutrinos is predicted to be the same.

However, Super-Kamiokande found that the number of muon type neutrinos which are detected going upward, thus originating on the other side of the Earth, is about half of the number detected going downward. Figure 1 shows the zenith angle distribution observed in Super-Kamiokande. This difference can only be explained by some of the muon type neutrinos changing into another type of neutrino which isn't observed. This is known as neutrino oscillation. For this oscillation to occur, neutrinos must have mass. From this data it is possible to estimate the neutrino mass squared difference (Δm^2) and the parameter related to the mixing angle among the two neutrinos (sin²20). Figure 2 shows the allowed region of the parameters. This discovery of finite neutrino mass was the first breakthrough in elementary particle physics beyond the standard model.

Furthermore, recent detailed analysis of atmospheric neutrinos shows a sinusoidal dependence of the event rate as a function of "Length/Energy", which further confirms that neutrinos oscillate. According to the theory of neutrino oscillations, muon neutrinos oscillate to tau neutrinos, then oscillate back to muon neutrinos forever and therefore the muon neutrino survival probability is expressed by a sinusoidal function. Figure 3 shows the observed muon neutrino survival probability as a function of "Length/Energy". A clear dip that corresponds to the first maximum $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation point is seen. Only neutrino oscillations can explain this data.

Finally, the neutrino oscillation parameters are also estimated using this plot. The result is also shown in Figure 2.



図1:スーパーカミオカンデで観測された大気ニュート リノの天頂角分布。観測されたエネルギーが1.3GeV以 上のミューニュートリノ事象のみを示す。cosΘ=1は下向 きを、-1は上向きを示す。図中赤線はニュートリノ振動 がない場合の期待値、緑線がニュートリノ振動を入れた 期待値。

Fig.1: Zenith angle distribution for multi-GeV atmospheric muon neutrino events observed in Super-Kamiokande. $\cos\Theta=1$ and -1 show downward-and upward-going. The green and red histograms show the predicted zenith angle distribution with and without neutrino oscillations.





図2:実線は大気ニュートリノの天頂角分布をもちいて もとめた2種類のニュートリノの質量の2乗の差 (Δm²)と混合角パラメータ(sin²20,0は2種類のニュ ートリノ間の混合角)に対する制限。68%(赤)90% (黒)99%(青)の信頼度を示す。点線は大気ニュー トリノの(距離/エネルギー)分布をもちいた解析の結 果。

Fig.2: Solid lines: 68%(red), 90%(black) and 99%(blue) confidence level allowed regions of neutrino oscillation parameters (Δm²: neutrino mass squared difference, and sin²20: neutrino mixing (θ) parameter) based on the zenith angle analysis of the atmospheric neutrino data. Dashed lines: constraint 1.0 on neutrino oscillation parameters based on the Length/Energy analysis.

図3:ミューニュートリノがミューニュートリノのまま でいる確率を(距離(L)/エネルギー(E))の値ごとに示し た図。黒の実線はニュートリノ振動の場合の計算値。デ ータは L/E=500km/GeV のあたりが低く、ニュートリ ノ振動の計算値とよくあっている。赤と青の点線は他の 理論での予言値。これらの理論はデータの L/E=500km/GeV あたりのへこみを説明できない。 Fig3: Muon neutrino survival probability as a function of L(neutrino path length) / E(neutrino energy) for muon neutrino events observed in Super-Kamiokande. Data shows a dip around L/E=500km/GeV and agree well with the prediction based on neutrino oscillation (black line). The red and blue dotted lines show the prediction based on other theories. Since these theories do not reproduce the dip around L/E = 500 km/GeV, they are excluded.

太陽ニュートリノの研究 (Study of solar neutrinos)

太陽の中心核では核融合反応によって電子ニュ ートリノが生まれています。太陽からのニュート リノ観測は 1970 年頃に始まったディビスらの実 験に始まり、1989 年頃にカミオカンデ、1990 年 代にガリウムを用いた SAGE、GALLEX という実 験が行われましたが、これらの実験で観測された ニュートリノ強度は標準太陽モデルからの予測に 比べて有意に小さいという結果が得られていまし た(太陽ニュートリノ問題)。その原因はニュート リノ振動ではないかと考えられていました。大気 ニュートリノの観測ではミューニュートリノの振 動が発見されましたが、太陽ニュートリノは電子 ニュートリノなので別途検証が必要でした。

スーパーカミオカンデ(SK)は今までにない 高い精度で太陽ニュートリノの強度、エネルギー スペクトル、強度の昼夜変化を測定することがで きます。2001年3月に1258日分の測定結果を基 にニュートリノ振動が生じていると仮定して解析 を行うと、「ニュートリノ同士の混合角が大きい」 ことを意味する「大角度(LMA)解」が好まれ ることが示されました(図4)

その直後、太陽ニュートリノ問題の原因がニュ ートリノ振動であるという確実な証拠がSKとカ ナダの SNO 実験の結果を比較することによって 与えられました(図5参照)。SKはニュートリノが 電子を散乱する反応を用いて⁸B 太陽ニュートリ ノの強度が(2.35 ± 0.02(統計誤差) ± 0.08(系統誤 差)) ×10⁶ /cm²/sec であるという結果を得ていまし た。SKが用いた電子の散乱反応では、電子ニュ ートリノのみならず、電子ニュートリノが振動し て生じるミューニュートリノやタウニュートリノ も寄与します。一方、1000 トンの重水を用いた SNO 実験は、重水素との荷電カレント反応を用い て地球に届く太陽ニュートリノのうち電子ニュー トリノのみを測定し、(1.75 ± 0.07(統計誤差) +0.12/-0.11(系統誤差)±0.05(理論計算の誤差)) ×10⁶ /cm²/sec という結果を 2001 年 6 月に発表し ました。二つの実験の測定値に有意な違いがある ことは、電子ニュートリノ以外のニュートリノが 生じていることを意味し、ニュートリノ振動の確 実な証拠と考えられたのです。

そして、2002年5月にはSKの結果と他の太陽 ニュートリノ実験の結果を統合して解析した結果、 2001年に示した結果である「大角度(LMA)解」が 正しいことを99%の確度で示しました。(図6参

Electron-type neutrinos are produced at the core of the sun. Solar neutrinos have been observed by various experiments beginning with the Homestake experiment in the 1970's, Kamiokande around 1989 and the SAGE and the GALLEX experiments in the 1990's. All these experiments claimed a deficit of solar neutrinos, a phenomenon that came to be called "The Solar Neutrino Problem". It was suggested that the solution of the solar neutrino problem is neutrino oscillations. Super-Kamiokande (SK) measured the solar neutrino flux, energy spectrum (Fig.4) and day/night variation with unprecedented precision. Those precise measurements constrained neutrino oscillation parameters. In March 2001, we wrote a paper using 1258 days of data leading us to conclude that "neutrino mixing is large".

The evidence for solar neutrino oscillations was obtained by SK and SNO in 2001. The ⁸B solar neutrino flux obtained by SK was (2.35 \pm 0.02(stat.) \pm 0.08(sys.)) $\times 10^{6}$ /cm²/sec. In June 2001, the SNO experiment presented the electron-neutrino flux measurement using charged current interactions of neutrinos with deuteron. The flux obtained by SNO was (1.75 \pm $0.07(stat.) + 0.12/-0.11 (sys.) \pm 0.05(theor.)) \times 10^{6}$ /cm²/sec. SK observes solar neutrinos by neutrino-electron scattering. In this interaction, not only do electron- neutrinos contribute, but also muon- neutrinos and tau-neutrinos. The difference between the flux significant measurements by SK and SNO is direct evidence for neutrino oscillations as shown in Fig.5.

In May 2002, by combining the precise measurements from SK with the results from other solar neutrino experiments, a single solution called "The Large Mixing Angle Solution" was determined with a 99% confidence level as shown in Fig.6.

After reconstruction, we can resume high sensitivity solar neutrino measurements. We will determine oscillation parameters more precisely by lowering the energy threshold. 照)

10

10

10

10

10

10 ⁻⁹

10⁻¹⁰

 10^{-11}

10⁻¹² 10⁻⁴

Ga+Cl+SK+SNO Rates

and SK Zen Sp $\nu_e {\rightarrow} \nu_{\mu/\tau}$

10⁻¹

10⁻³ 10⁻²

 Δm^2 in eV^2 10

今回の再建後、再び感度の高い太陽ニュートリ ノ観測を始めることができます。今後は低エネル ギー領域まで精度良くエネルギースペクトルを測 定し、振動パラメータをより正確に決定します。





(*

95%C.I

(⁸B, hep free)

10 tan²(Θ)

1

 10^{2}

図4:SK-Iで観測した太陽ニュートリノスペクトル。 縦軸は太陽モデルから予想されるスペクトルで規格化 してある。色線はニュートリノ振動のいくつかのパラ メータに対して予想されるスペクトルを示す。この結 果から「LMA 解」が好まれることが示された。 Fig.4: The energy spectrum of solar neutrinos obtained by SK-I. Vertical axis is normalized by the expected spectrum from the standard solar model. Expectations from neutrino oscillations are shown by colored histograms. The LMA solution is preferred based on this spectrum.

図 5:: 電子ニュートリノの強度(横軸)とミューニュー トリノ+タウニュートリノの強度(縦軸)の相関。緑 のバンドはSKの結果、ピンクのバンドは SNO の荷 電カレント(CC)の結果、赤の輪郭は両者を統合した 結果を示す。黒線は太陽モデルからの予想を示す。(二 ュートリノ振動を仮定)

Fig.5: Fluxes of v_e (horizontal axis) and $v_{\mu}+v_{\tau}$, (vertical axis). The green and pink bands show flux measurements by SK and SNO, respectively. The red contours show combined results of SK and SNO. The black band shows the expectation from the standard solar model assuming neutrino oscillations.



Fig.6: Allowed region of oscillation parameters obtained by a combined analysis of Super-Kamiokande results and flux measurements by other solar neutrino experiments.

超新星ニュートリノの研究 (Study of supernova neutrinos)

超新星爆発とは 太陽の 8 倍以上の質量を持つ 恒星が、その一生を終える時に起こす大爆発のこ とです。この超新星爆発の際、10⁵³erg ものエネル ギー(太陽が 45 億年間に放出する全エネルギーの 1000 倍に相当)が 10 秒ほどの間に放出されます。 このエネルギーの 99%はニュートリノによって星 から放出されます。

我々の銀河内でも、 10年から 50年位に一度程 度の割合で、超新星爆発が起きていると考えられ ています。スーパーカミオカンデでは、超新星爆 発が銀河中心で起こった場合、超新星ニュートリ ノを約 8000 例捕まえられると計算されています。 この期待される観測量は、世界中のニュートリノ 観測実験の中で圧倒的に多いものです。このニュ ートリノのエネルギーと到達時間を正確に観測す ることで、星の爆発のメカニズムを精度良く知る ことが可能になります。また、重い星の超新星爆 発の場合、ニュートリノの観測により、プラック ホールの形成を直接見ることも期待できます。

また、スーパーカミオカンデでは銀河の形成の 始まりからいろいろな銀河で起きた超新星爆発か らのニュートリノ(超新星背景ニュートリノ)を 観測することも目指しています。最初の5年間に 18MeV以上のエネルギー領域で探索を行い、 <1.2/cm²/secという上限値を得ました。この値は理 論的な予測のすぐ近くまで来ており、今後スーパ ーカミオカンデ-IIIにおいて、更に感度の良いデー タを取ることによって、発見できる可能性があり ます。 A supernova explosion happens when a star at least 8 times more massive than our sun collapses. An enormous amount of energy, about 10^{53} erg, is released (equivalent to 1000 times the energy released over the lifetime of the sun (4.5Gyears)) in about 10 seconds. 99% of this energy is transferred to neutrinos.

A supernova explosion is expected to occur inside our galaxy once every 10 to 50 years. If such an explosion were occur, Super-Kamiokande expects to detect about 8,000 neutrinos. From the energy and arrival time of these neutrinos, we will be able to determine the mechanism of supernova explosions.

We also plan to detect supernova relic neutrinos, which are the neutrinos from all past core-collapse supernovae. Using from the first five years of Super-Kamiokande data, an upper limit of $<1.2/\text{cm}^2/\text{sec}$ was obtained on the relic neutrino flux. This is very close to theoretical predictions. We hope to see real signals after reconstruction with improved sensitivity.



図 7:SK-I のデータから得られた超新星背景ニュートリノ の強度の上限値と各種モデルからの予想値との比較。 Fig.7: Comparison between the flux upper limit of supernova relic neutrinos obtained by SK-I data analysis and expectation from various modes.

陽子崩壊の研究 (Study of proton decay)

陽子は宇宙の万物を作る基本的な構成粒子の一 つであり、星や人間の体、水は陽子がなくては存 在できません。「陽子崩壊」とは、陽子がもっと軽 い素粒子(電子やミュー中間子、パイ中間子など) にひとりでに崩壊してしまう現象です。大統一理 論と呼ばれる素粒子理論では、陽子は有限な寿命 を持ち、いつかは崩壊することが予言されていま す。大統一理論とは、自然界に存在する 4 つの基 本的な力(重力、電磁気力、強い力、弱い力)のうち、 重力を除く 3 つの力を一つの理論で統一的に説明 しようとする理論で、1970年中頃から盛んに研究 され様々な理論があります。最も単純な理論は, すでにカミオカンデやアメリカの IMB 実験で陽子 崩壊が見つからなかったことにより否定されてい ます。現在でも実験に矛盾しない様々な理論モデ ルが存在しており、スーパーカミオカンデでの探 索結果により理論モデルの検証を行うことが期待 されています。

スーパーカミオカンデは世界最大の陽子崩壊実 験であり、純水中の陽子約7.5×10³³個を観測する 事によって、陽子崩壊現象を探索します。最初に 探索したのは、陽子が陽電子(電子の反粒子)と 中性パイ中間子に崩壊するモードです(図8)。こ の崩壊では、観測した2つまたは3つの粒子のエ ネルギーから元の崩壊粒子の質量を計算します。 もし本当の陽子崩壊信号の場合、観測した質量は 陽子の質量938MeV/c²に近くなると期待されます。 図9にスーパーカミオカンデで観測した質量分布 を示します。今のところ陽子の質量と矛盾しない 事象は1つも起きていません。1996年4月からの 約5年間の観測において、陽子の寿命は、陽子が 陽電子とパイ中間子に崩壊する場合に5×10³³年 以上であることが分かりました。

これ以外にも陽子のK中間子とニュートリノへ の崩壊等様々な崩壊モードを探索しましたが、陽 子崩壊の証拠を発見するには至っていません。そ して多くの崩壊モードについて、最も感度の良い 陽子の寿命の下限値が得られています(図 10)。

今後も陽子崩壊探索研究は引き続き行われます。 陽子が陽電子とパイ中間子に崩壊するモードは、 2007,8年までの観測データを用いて、10³⁴年の感 度に達すると期待されます。また、スーパーカミ オカンデで解析されていない他の多くの崩壊モー ドの研究や、各崩壊モードの感度の改善を行って いく予定です。

The proton is one of the elementary particles that compose all matter in the universe; stars, humans, water, and so on. In the Standard Model of particle physics, the proton, for no concrete reason, is assumed to be stable. However, Grand Unified Theories (GUTs), which are necessary to handle some of the shortcomings of the Standard Model and to unify the fundamental forces of nature, predict that the proton can, and in most cases must, decay. This decay would produce lighter, energetic, charged particles such as electrons, muons, pions or others which can be observed. Some of the simplest GUTs have already been completely ruled out by the IMB and Kamiokande experiments. The newest models predict that the proton will decay after even longer lifetimes and experimental tests of these models are necessary.

In order to measure such long lifetimes, many protons must be observed. Super-Kamiokande is the largest detector for the observation of proton decay in the world. It watches about 7.5×10^{33} protons. One of the first proton decay modes examined was a proton that decays into a positron (anti-particle of electron) and neutral pion (Figure 8). In Super-Kamiokande, the mass of the original decay particle can be reconstructed from the observed energy of two or three observed secondary particles. In the case of a proton decay signal, the reconstructed mass should be close to the proton mass of 938MeV/c². The reconstructed mass of events observed in Super-Kamiokande is shown in Figure 9. There are no candidate events in the signal region. After about 5 years of observation, Super-Kamiokande has found that the lifetime of the proton is more than 5×10^{33} years.

Super-Kamiokande has looked for other decay modes such as proton that decay into a Kaon and an anti-neutrino but no proton decay evidence has been found so far. From these studies, it has set the world's highest lower limits of proton lifetimes for many proton decay modes as is shown in Figure 10.

For the mode in which a proton decays into a positron and a neutral pion, Super-Kamiokande is expected to reach 10^{34} years lifetime sensitivity by combining data taken in 2006~2008 with existing data. In addition, it will also look for untested decay modes. Analysis improvements will also be necessary in the future.

図8:陽子が陽電子と中性パイ中間子に崩壊する様子。 パイ中間子は2つのガンマ粒子に崩壊するため、合計 で最大3つの粒子(チェレンコフリング)が観測され ると期待される。

Fig.8: Schematic view of proton decay into positron and neutral pion. Because the pion immediately decays into two gammas, three particles (Cherenkov rings) at most will be observed.



γ

図9:陽電子とパイ中間子への陽子崩壊探索において、 観測粒子から計算した崩壊粒子の質量分布。矢印で示 された信号領域には、1イベントも観測されなかった。 観測データ点はバックグラウンドの期待分布(実線) でよく説明できる。

Fig.9: Total reconstructed mass distribution for proton decay into a positron and a pion. There is no candidate event in the regions shown by arrows where we expect to observe proton decay signals. Data points are well reproduced by atmospheric neutrino Monte Carlo histogram.



図 10: スーパーカミオカンデ(赤い星印)と他の実験 で得られた、陽子寿命の下限値。多くの崩壊モードで 10³³年程度の最も良い制限値が得られている。

Fig.9: Lower limits on proton lifetime set by Super-Kamiokande (red stars) and other experiments. Super-Kamiokande has obtained the world's longest lifetime limits; around 10³³ years for many decay modes.

長基線ニュートリノ振動実験 (Long baseline neutrino oscillation experiment)

スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測 によりニュートリノ振動が発見されました。この ニュートリノ振動現象を別のニュートリノ源を用 いて検証するための実験が、1999年から行われま した。茨城県つくば市にある高エネルギー加速器 研究機構で人工的にニュートリノを作り、250km 離れたスーパーカミオカンデを遠方検出器として 用いてニュートリノを捉えようという K2K(KEK to Kamioka)実験です。K2K実験グループはヨー ロッパからの参加者を含む、スーパーカミオカン デ実験とは別な大きな実験組織ですが、多くのス ーパーカミオカンデ共同研究者が参加しています。 2004年の実験終了までに、スーパーカミオカン

デで 112 のニュートリノ事象が観測されました。 これに対しニュートリノ振動が無いとしたときの 期待値は 158.4+9.4・8.7 事象であり、明らかに観測 されたニュートリノの数は少なくなっていること がわかりました。この食い違いはニュートリノ振 動によりミューニュートリノがタウニュートリノ に変化したことを示しています。また、得られた ニュートリノのエネルギー分布もニュートリノ振 動から期待される分布によく一致しています(図 11)。このことから、ニュートリノ振動パラメータ の許される領域が得られました(図 12)。これらの 結果は、大気ニュートリノ解析から得られたニュ ートリノ振動の結果と良く一致しています。

加速器実験は、距離やエネルギーを設定するこ とが出来るため、高精度なニュートリノ振動実験 に適した研究方法です。

茨城県東海村に建設中の加速器を用いた T2K 実験(Tokai to Kamioka)が 2009 年より始まります。 K2K 実験の 50 倍以上の強度のニュートリノビームを用い、まだ観測されていないニュートリノ振動パラメータの探索や、より精度の高い測定をめ ざします。 The evidence of neutrino oscillation was obtained by the study of atmospheric neutrinos in 1998. K2K (KEK to Kamioka long baseline neutrino oscillation experiment) started in 1999 to confirm this observation. The artificial neutrino beams produced at the proton accelerator at KEK, National Laboratory in Japan, are detected by Super-Kamiokande, 250km away. This type of experiment is called a long baseline neutrino oscillation experiment. The K2K experiment is an independent experiment including collaborators from Europe and many Super-Kamiokande collaborators also take participate in it.

Until 2004 the experiment has detected 112 events, whereas the expected number of events without neutrino oscillation is 158.4+9.4.8.7. This deficit is consistent with the expectation from the atmospheric neutrino oscillation. The reconstructed neutrino energy spectrum agrees with expected spectrum with neutrino oscillation (Figure 11). From the deficit in the number of neutrino events and energy spectrum, we obtained the allowed region for the neutrino oscillation parameters (Figure 12). This confirms the neutrino oscillation results which was obtained by the atmospheric neutrino analysis.

An artificial beam is suitable for the study of neutrino oscillations since we can chose baseline and neutrino energy.

From 2009, the T2K (Tokai to Kamioka) experiment will start. The beam intensity of T2K is 50 times more than that of K2K. We will search the unknown oscillation parameter and determine the oscillation parameter precisely.



図 11: 再構成されたニュートリノのエネルギー分布。 黒丸がデータ、青がニュートリノ振動が無いときの期 待値、赤がニュートリノ振動があるときの期待値。 Fig.11: reconstructed neutrino energy distribution. Closed circle is observed data, blue and red histograms are expected spectra without and with neutrino oscillation, respectively.



図 12: ミューニュートリノとタウニュートリノ間のニ ュートリノ振動パラメータの信頼度 68%(青), 90%(緑), 99%(赤)で許される範囲。

Fig.12: Allowed region for muon neutrino and tau neutrino. Blue, green and red lines are 68%, 90% and 99% C.L. allowed region.

1994年8月 空洞掘削終了 Aug. 1994 After excavation



1995年9月 壁面に取り付けられる 光電子増倍管 Sep. 1995 Photo multiplier tubes are being mounted on wall







1996年2月 満水間近 Feb. 1996 Almost filled by water

1996年4月 実験スタート Apr. 1996 Run Start





観測されたニュートリノ反応 Observed neutrino interaction



2002年9月 スーパーカミオカンデII 光電子増倍管再配置完了 Sep. 2002 Mounting of Super-Kamiokande II PMT finished

池の山 Mt. Ikenoyama







2006年4月 完全再建 光電子増倍管取り付け完了 Apr. 2006 All PMTs are mounted