2015년 노벨물리학상: 춤추는 중성미자

중성미자 진동변환을 발견하다.

DOI: 10.3938/PhiT.24.053

김 수 봉

Discovery of Neutrino Oscillation

Soo-Bong KIM

A transformation among three kinds of neutrinos was discovered while detecting neutrinos produced by cosmic rays in Earth's atmosphere in 1998. The Super-Kamiokande experiment clearly found a reduction in the observed atmospheric neutrino flux during their flight. This observation was confirmed by accelerator-based neutrino beam experiments such as the K2K, T2K and MINOS experiments. In 2001, the neutrino oscillation was observed by the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) experiment while detecting neutrinos coming from the Sun. A deficit in the measured fluxes of the solar neutrinos was indicated. The so-called solar neutrino puzzle was believed to be due to neutrino oscillations. Using a heavy-water detector, the SNO experiment successfully observed all of the previously-undetected neutrinos that were transformed from solar neutrinos. The discovery of the neutrino oscillation indicates that neutrinos have mass. This requires a serious modification of the Standard Model in particle physics and demonstrates the existence of the Grand Unification Theory.

저자약력

김수봉 교수는 미국 펜실베이니아대학(U. of Pennsylvania) 이학박사(1989)로서 미시간대에서 연구원과 보스턴대학 연구조교수를 거쳐 1998년부터 서울대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. 슈퍼카미오칸데 실험에서 중성미자 변환을 발견하였고 가속기 중성미자 빔으로 중성미자 변환상수를 측정하였다. 박사학위 연구로서 태양에서 방출되는 중성미자를 관측하던 중 1987년 초신성폭발의 중성미자를 관측하였다. 국내에서 RENO 검출기를 건설하여 2012년 가장 약한 마지막 중성미자 변환세기를 측정하였다.(sbk@snu.ac.kr)

Fig. 1. Winners of 2015 Nobel Prize in Physics: Professor Takaaki Kajita at University of Tokyo, Japan (left), and Professor Arthur B. McDonald at Queen's University, Canada (right).

2015 노벨물리학상

올해 노벨물리학상 수상자 발표는 우리에게도 특별하다. 그들의 수상 업적이 중성미자 분야이고 필자와 서울대 연구진이 수상 업적의 연구 결과가 발표된 논문의 공동 저자로 참여했기 때문이다. 이번 노벨물리학상은 사실 학계에서 오랫동안 예견해왔던 중성미자 변환의 발견에 주어졌다. 중성미자와 관련된 업적에 네 번째의 노벨상이 주어지는 셈이다. 그림 1과 같이 올해 노벨물리학상은 대기에서 만들어진 중성미자가 진동변환 함을 발견한 일본 동경대학의 Takaaki Kajita 교수와 태양에서 날아오는 중성미자가 진동변환 함을 발견한 캐나다 퀸즈대학의 Arthur B. McDonald 교수에게 수여되었다. 필자는 수상자 선정 소식을 접하고 약 30년간 함께 연구한 Kajita 교수와 역시 친분이 있는 McDonald 교수에게 e-메일로 축하 메시지를 보냈다.

중성미자가 질량을 가지고 있는지 알아내는 것은 물리학계의 오랜 숙제였다. 중성미자 진동변환의 발견은 중성미자 질량의 유무에 대해 종지부를 찍은 셈이다. 중성미자 진동변환은 중성미자 질량이 서로 다른 경우에만 일어나는데 진동변환의 발견은 세 종류의 중성미자 질량이 적어도 하나는 존재해야 함을 증명한 것이다. 입자물리학의 표준모형은 중성미자가 질량이 없음을

전제로 만들어졌다. 표준모형은 우주와 물질의 근원이 되는 전자 기력, 약력, 강력의 3가지 기본 힘을 함께 기술하면서 소립자의 존재와 상호작용을 설명해 주는 이론이다. 중성미자의 질량 존재를 밝혀냄으로써 입자물리학의 표준모형은 보완이 불가피하게 되었고 중성미자의 매우 작은 질량은 대통일이론이라는 새로운 물리학이 존재할 가능성을 열어 놓았다.

유령입자인 중성미자

중성미자는 눈에 보이지 않으나 우주를 꽉 채우고 있을 정도로 빛 다음으로 그 개수가 많은 입자이다. 영문으로는 뉴트리노(neutrino)인 이 소립자는 유령입자로 알려질 만큼 물질과의 반응이 거의 없다. 그래서 오랫동안 실험학자들을 애먹인 입자로서 질량을 비롯해 아직도 측정하지 못한 것이 많다. 그러므로 중성미자의 성질이 하나씩 밝혀질 때마다 노벨상이 주어졌다고 할 수 있다.

우주를 이루는 12개의 기본입자 중 세 종류의 중성미자(전자, 뮤온, 그리고 타우 중성미자)가 존재한다. 우주가 탄생하면서 생겨난 중성미자는 우주 어디에나 퍼져 있으며, 현재도 태양의 핵융합이나 원자의 핵분열에서 생성되어 우주를 빛의 속도로 떠돌고 있다. 태양 중심부에서 핵융합 반응으로 방출되는 중성미자가 지구상에서는 매초 약 700억 개가 엄지 손톱 면적을 통과하고 있으나 우리는 전혀 느낄 수가 없다. 태양이 장구한 세월 동안 안정되게 빛날 수 있도록 하고 초신성과 같이 별이 폭발하는데도 없어서는 안 되는 입자이다. 아직도 측정되지 않을 정도로 작은 질량이지만 이번 노벨물리학상의 업적인 진동변환으로 질량의 차이는 측정할 수 있다.

중성미자는 핵붕괴에서 에너지와 운동량이 보존되지 않음을 설명하기 위해 1930년경 Wolfgang Pauli(1900-1958)가 가상으로 제안한 입자이다. 관측이 불가능하리라 여겼던 이 입자를 1956년 미국의 핵발전소 부근에서 Frederick Reines(1918-1998)가 발견하였고 1995년 노벨물리학상을 수상하였다. 1962년 또 다른 종류의 입자인 뮤온 중성미자를 발견하여 Leon M. Lederman, Melvin Schwartz(1932-2006), Jack Steinberger가 1988년 노벨상을 수상했다. Masatoshi Koshi바와 Raymond Davis Jr.(1914-2006)는 태양과 초신성에서 날아온 중성미자를 관측하여 인류가 우주를 보는 시야를 넓혔다는 업적으로 2002년 노벨물리학상을 받았다.^[1] 필자는 Koshi바 교수가 책 입자로 진행했던 카미오칸데 실험에서 태양 중성미자를 관측하여 펜실베이니아대학에서 박사학위를 받았고 Davis 교수는 박사 논문 심사위원 중의 한 분으로서 그들의 업적을 가까이에서 지켜보았다. 중성미자 물리학은 앞으로도 더 많은 노벨상 업적이 기대되는 업적과 난제들이 남아있다.

Fig. 2. Neutrino oscillation among three flavor eigenstates of ν_e , ν_μ , and ν_τ (left), and the neutrino mixing angles of θ_{12} , θ_{23} , and θ_{13} among three different mass eigenstates of ν_1 , ν_2 , and ν_3 (right).

중성미자 진동변환

원자의 핵을 구성하는 양성자와 중성자, 즉 핵자 속에는 쿼크라는 소립자가 존재하는데 이 쿼크들 사이의 변환이 일어나는 이미 알려졌다. 실험학자들은 세 종류의 중성미자들 사이에도 변환이 일어나는지를 오래전부터 탐색했다. 중성미자의 변환은 1950년대 말에 Bruno Pontecorvo(1913-1993)가 중성미자와 그것의 반입자인 반중성미자 사이의 변환으로 처음 제시하였다.^[2] 1962년 뮤온 중성미자가 발견된 후 물리학자들은 중성미자가 질량을 가지면서 서로 변환할 수 있다면 서로 다른 종류의 중성미자들 사이에 진동변환이 일어남을 알아내었다.^[3,4]

세 종류의 중성미자들 사이의 변환은 한 종류의 중성미자의 약력(weak interaction)에 대한 양자역학적 입자 종류 상태(flavor eigenstate)가 서로 다른 세 가지의 질량 상태(mass eigenstate)의 1차 혼합(linear combination)으로 되어 있음을 의미하며, 서로 다른 질량은 각 질량 상태가 시간에 지남에 따라 상태가 변하는(evolution) 정도가 달라서 결국 중성미자 종류가 바뀌는 파동의 성질에 의한 양자역학적 현상이다. 따라서 중성미자 진동변환 확률은 변환이 얼마나 강하게 일어나는지, 즉 양자역학적 상태들의 혼합각도(θ)로 표현하고, 진동변환 주기는 각 질량을 제곱한 값의 차이($\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$)와 진행한 거리, 그리고 중성미자 에너지에 의해 표현됨을 쉽게 보일 수 있다.

세 종류의 중성미자들 간의 진동변환은 세 혼합각도 θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} 와 CP 위상으로 표현됨을 Maki, Nakagawa, Sakata 그리고 Pontecorvo가 보였다.^[3,4] 그래서 각 중성미자의 종류

REFERENCES

- [1] Soo-Bong KIM, Phys. High Technol. 11(11), 8 (2002).
- [2] B. Pontecorvo, Sov. Phys. JETP 6, 429 (1957); B. Pontecorvo, Sov. Phys. JETP 7, 172 (1958).
- [3] Z. Maki, M. Nakagawa and S. Sakata, Prog. Theor. Phys. 28, 870 (1962).
- [4] B. Pontecorvo, Sov. Phys. JETP 26, 984 (1968).

Fig. 3. Super-Kamiokande detector consisting of 50 kt highly purified water viewed by 11146 20-inch PMTs. It is a cylindrical water Cherenkov detector of 42 m in height and 39 m in diameter.

상태(flavor eigenstate)를 세 종류의 질량 상태(mass eigenstate)의 혼합된 형태로 나타낼 때 PMNS 행렬을 사용한다.

1998년 수퍼카미오칸데 실험에서 우주선이 대기에서 만든 뮤온 중성미자가 날아오는 도중에 다른 종류의 중성미자로 변환이 일어남을 발견하였고 2001년 SNO 실험에서 태양에서 날아온 전자 중성미자가 다른 종류의 중성미자로 바뀐 것마저 측정해 냈으로써 중성미자의 진동변환이 일어남을 확실히 알게 되었다. 앞에서 말한 바와 같이 중성미자 질량이 서로 다르면 진동변환이 일어날 수 있는데 진동변환의 발견은 중성미자의 질량이 존재함을 입증한 것이다.

대기 중성미자의 진동 변환 발견

입자물리학의 대통일이론에서 예측한 양성자 붕괴를 찾기 위해 1983년 지어진, 약 3,000톤의 정제된 물을 사용한 카미오칸데 검출기를 1985년 동경대학교와 펜실베이니아대학이 협력으로

Fig. 4. Observation of atmospheric neutrino oscillation in the Super-Kamiokande experiment. Muon neutrinos(ν_μ) produced by cosmic rays in the Earth atmosphere are observed in the 50 kt water Cherenkov detector located in 1 km underground. A half of upward-going muon neutrinos passing through the Earth are observed while almost all of down-going muon neutrinos are observed. This indicates that muon neutrinos are oscillated into tau neutrinos that are hardly identified in the detector. (taken from "The Nobel Prize in Physics 2015", Nobelprize.org)

Fig. 5. Observed atmospheric neutrino events as a function of zenith angles of their flight direction. The cosine value of zenith angles equal to 1 corresponds to the downward-going neutrinos while the value of -1 to the upward-going neutrinos travelling the distance of roughly 12,000 km. While electron neutrinos are observed as expected (left), only a half of muon neutrinos coming from the opposite atmosphere of Kamioka are observed (right).

개조하여 태양 중성미자 관측을 시작하였다. 1987년 초신성으로 부터의 중성미자를 역사상 처음으로 관측했으며 1988년 태양 중성미자도 관측하였다.^[1] 이 무렵 동경대학 연구원이었던 Kajita 교수는 양성자 붕괴를 탐색하던 중 이것을 방해하는, 지구 대기에서 만들어진 뮤온 중성미자가 예상보다 줄어든 양으로 측정됨을 알게 되었다. 이 결과는 대기 중성미자가 지하 검출기로 날아오는 도중에 다른 종류의 중성미자로 변환했기 때문이라

Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos

Y. Fukuda,¹ T. Hayakawa,¹ E. Ichihara,¹ K. Inoue,¹ K. Ishihara,¹ H. Ishino,¹ Y. Itoh,¹ T. Kajita,¹ J. Kameda,¹ S. Kasuga,¹ K. Kobayashi,¹ Y. Kobayashi,¹ Y. Koshio,¹ M. Miura,¹ M. Nakahata,¹ S. Nakayama,¹ A. Okada,¹ K. Okumura,¹ N. Sakurai,¹ M. Shiozawa,¹ Y. Suzuki,¹ Y. Takeuchi,¹ Y. Totsuka,¹ S. Yamada,¹ M. Earl,² A. Habig,² E. Kearns,² M. D. Messier,² K. Scholberg,² J. L. Stone,² L. R. Sulak,² C. W. Walter,² M. Goldhaber,³ T. Barszczak,⁴ D. Casper,⁴ W. Gajewski,⁴ P. G. Halverson,⁴ J. Hsu,⁴ W. R. Kropp,⁴ L. R. Price,⁴ F. Reines,⁴ M. Smy,⁴ H. W. Sobel,⁴ M. R. Vagins,⁴ K. S. Ganezer,⁵ W. E. Keig,⁵ R. W. Ellsworth,⁶ S. Tasaka,⁷ J. W. Flanagan,⁸ A. Kibayashi,⁸ J. G. Learned,⁸ S. Matsumo,⁸ V. J. Stenger,⁸ D. Takemori,⁸ T. Ishii,⁹ J. Kanzaki,⁹ T. Kobayashi,⁹ S. Mine,⁹ K. Nakamura,⁹ K. Nishikawa,⁹ Y. Oyama,⁹ A. Sakai,⁹ M. Sakuda,⁹ O. Sasaki,⁹ S. Echigo,¹⁰ M. Kohama,¹⁰ A. T. Suzuki,¹⁰ T. J. Haines,^{11,4} E. Blaufuss,¹² B. K. Kim,¹² R. Sanford,¹² R. Svoboda,¹² M. L. Chen,¹³ Z. Conner,^{13,4} J. A. Goodman,¹³ G. W. Sullivan,¹³ J. Hill,¹⁴ C. K. Jung,¹⁴ K. Martens,¹⁴ C. Mauter,¹⁴ C. McGrew,¹⁴ E. Sharkey,¹⁴ B. Viren,¹⁴ C. Yanagisawa,¹⁴ W. Doki,¹⁵ K. Miyano,¹⁵ H. Okazawa,¹⁵ C. Saji,¹⁵ M. Takahata,¹⁵ Y. Nagashima,¹⁶ M. Takita,¹⁶ T. Yamaguchi,¹⁶ M. Yoshida,¹⁶ S. B. Kim,¹⁷ M. Ettoh,¹⁸ K. Fujita,¹⁸ A. Hasegawa,¹⁸ T. Hasegawa,¹⁸ S. Hatakeyama,¹⁸ T. Iwamoto,¹⁸ M. Koga,¹⁸ T. Maruyama,¹⁸ H. Ogawa,¹⁸ J. Shirai,¹⁸ A. Suzuki,¹⁸ F. Tsumura,¹⁸ M. Koshihara,¹⁹ M. Nemoto,²⁰ K. Nishijima,²⁰ T. Futagami,²¹ Y. Hayato,^{21,4} Y. Kanaya,²¹ K. Kaneyuki,²¹ Y. Watanabe,²¹ D. Kielczewska,^{22,4} R. A. Doyle,²³ J. S. George,²³ A. L. Stachyra,²³ L. L. Wai,^{23,1} R. J. Wilkes,²³ and K. K. Young²³

¹Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tanashi, Tokyo, 188-8502, Japan

²Department of Physics, Boston University, Boston, Massachusetts 02215

³Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973

⁴Department of Physics and Astronomy, University of California at Irvine, Irvine, California 92697-4575

⁵Department of Physics, California State University, Dominguez Hills, Carson, California 90747

⁶Department of Physics, George Mason University, Fairfax, Virginia 22030

⁷Department of Physics, Gifu University, Gifu, Gifu 501-1193, Japan

⁸Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822

⁹Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

¹⁰Department of Physics, Kobe University, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan

¹¹Physics Division, P-23, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87544

¹²Department of Physics and Astronomy, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 70803

¹³Department of Physics, University of Maryland, College Park, Maryland 20742

¹⁴Department of Physics and Astronomy, State University of New York, Stony Brook, New York 11794-3800

¹⁵Department of Physics, Niigata University, Niigata, Niigata 950-2181, Japan

¹⁶Department of Physics, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

¹⁷Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

¹⁸Department of Physics, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

¹⁹The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

²⁰Department of Physics, Tokai University, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

²¹Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan

²²Institute of Experimental Physics, Warsaw University, 00-681 Warsaw, Poland

²³Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195-1560

(Received 6 July 1998)

We present an analysis of atmospheric neutrino data from a 33.0 kton yr (535-day) exposure of the Super-Kamiokande detector. The data exhibit a zenith angle dependent deficit of muon neutrinos which is inconsistent with expectations based on calculations of the atmospheric neutrino flux. Experimental biases and uncertainties in the prediction of neutrino fluxes and cross sections are unable to explain our observation. The data are consistent, however, with two-flavor $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with $\sin^2 2\theta > 0.82$ and $5 \times 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ at 90% confidence level. [S0031-9007/98/06975-0]

PACS numbers: 14.60.Pg, 96.40.Tv

Atmospheric neutrinos are produced as decay products in hadronic showers resulting from collisions of cosmic rays with nuclei in the upper atmosphere. Production

of electron and muon neutrinos is dominated by the processes $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ followed by $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ (and their charge conjugates) giving an expected ratio

1562

0031-9007/98/81(8)/1562(6)\$15.00

© 1998 The American Physical Society

Fig. 6. The discovery of atmospheric neutrino oscillation by the Super-Kamiokande collaboration was published in the Physical Review Letters in 1998.^[5] The paper has been cited more than 3000 times. The author list includes members from Seoul National University.

고 생각했지만 중성미자 변환 이외의 다른 요인들도 그 가능성을 배제하지는 못했다. 그래서 지하 약 1 km에 순수하게 정제된 물 5만 톤과 1만 개 이상의 광센서를 장착한 슈퍼카미오칸데 검출기를 건설했으며 1996년부터 실험을 시작하였다. 그림 3과 같이 카미오칸데 검출기보다는 무려 20배가 더 큰 검출 장치로서 실험을 진행하여 1998년 대기 중성미자가 변환함을 명확히 밝혔다.

그림 4와 5에서와 같이 지하 검출기 바로 위쪽 대기에서 약 20~30 km의 비교적 짧은 거리를 날아왔을 때는 원래 예측한 뮤온 중성미자의 양만큼 그대로 측정하였고 지구 반대편 대기에서 지구를 관통해 날아온 뮤온 중성미자는 12,000 km의 먼 거리를 날아오면서 여러 번의 진동변환을 거치면서 원래보다 절반으로 줄어든 것을 알아내었다.

원래 대기 중성미자는 대통일이론이 예측한 양성자 붕괴 탐색의 방해가 되는 존재였는데 이것이 중성미자의 진동변환의 발견을 가져올 줄은 아무도 예측하지 못했을 것이다. 이렇듯 입자물

Fig. 7. Fluxes and spectra of solar neutrinos predicted by the Standard Solar Model.^[6] The energy ranges accessible to several experiments are indicated by arrows above the graph. [Taken from J. N. Bahcall's web site <http://www.sns.ias.edu/~jnb/>]

리학 실험이나 과학의 모든 실험 결과에서는 원래 예측하지 못했던 전혀 다른 결과가 나오는 경우가 가끔씩 있다. 새로운 발견은 이렇게 전혀 생각하지도 못한 곳에서 나오는 수가 있다. 물론 그런 것을 놓치지 않고 붙잡는 것이 쉽지는 않다. Kajita 교수는 아무도 관심을 두지 않았던 배경사건을 연구하다 뜻밖의 놀라운 사실을 알게 된 것이다.

이 당시 슈퍼카미오칸데 실험의 책임자는 동경대의 Yoji Totsuka 교수(1942-2008)로서 이 업적으로 노벨상 수상이 유력하였으나 안타깝게도 2008년 암으로 타계하셨다. 이 실험은 당시에 일본, 미국, 한국의 국제공동연구로 진행되었으며 지금은 더 많은 국가가 참여하여 연구를 수행 중이다. Kajita 교수의 노벨상 업적 논문은 3,000회 이상의 논문 인용횟수를 기록하고 있으며 그림 6에서 보는 바와 같이 필자와 서울대 연구진이 공동저자로 참여하였다. 현재는 국내에서 서울대뿐만 아니라 성균관대와 전남대가 참여하고 있다.

태양 중성미자의 진동 변환 발견

태양 중심부에서 일어나는 핵융합 반응에 의하여 열에너지와 중성미자가 방출된다. 대부분의 태양 중성미자는 수소 핵이 융합하여 헬륨 핵을 만들면서 질량 결손에 해당하는 에너지가 방출되면서 나온다. 핵융합 반응에 의하여 더 무거운 핵들도

REFERENCES

- [5] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).
- [6] J. N. Bahcall *et al.*, Astrophys. J. **621**, L85 (2005).

Fig. 8. Angular distribution of events with respect to the Sun at Kamiokande.^[7] The angle θ is calculated between the direction of observed electron and the direction from the Sun. The measured flux (open circle) is roughly a half of the prediction (curve).

만들어져 그것들이 베타붕괴를 하면서 10 MeV까지의 에너지를 가진 전자 중성미자가 나온다. John N. Bahcall 교수 (1934-2005)는 여러 연쇄적인 핵융합 반응과 태양 내부의 물질 분포 및 광학적 성질 등을 바탕으로 태양표준모형(Standard Solar Model)을 만들었다.^[6] 이것에 의하면 태양 중성미자의 에너지와 양을 예측하고 태양의 떨림까지도 상세하게 예측한다.

1968년부터 Davis 교수가 Homestake 금 광산에 염소 용액 약 600톤을 채운 검출장치로서 태양 중성미자를 관측하기 시작하였다. 염소(CI) 원자는 태양 중성미자와 반응하면 아르곤(Ar) 원자로 바뀌게 되는데 1~2개월마다 생성된 약 20개 정도의 아르곤 원자를 추출해내는 아주 힘든 측정이었다. 태양 중성미자를 최초로 측정하는데 성공한 이 실험의 결과는 측정된 양이 예측된 양의 1/3 정도 밖에 되지 않아 당시에는 ‘태양 중성미자 문제’라고 불렸다.^[1]

이 문제를 검증하고 Davis가 관측한 것이 태양에서 날아온 중성미자인지 확인하기 위해 원래 양성자 붕괴 탐색을 위한 카미오칸데 검출기를 개조하여 1985년부터 태양 중성미자를 관측하기 시작하였다. 필자는 당시 펜실베이니아대학의 학생으로서 박사학위 연구 주제로 태양 중성미자 측정을 수행하였다. 이 실험은 태양 중성미자 관측 중 1987년 초신성 폭발로 방출된 중성미자를 최초로 관측하였다. 이 실험의 책임자였던 Koshiba 교수는 Davis 교수와 함께 2002년 노벨물리학상을 수상하였다.^[1]

카미오칸데 검출기는 태양 중성미자가 물속의 전자와 탄성 충돌하여 전자를 방출하고 대부분의 운동 에너지를 전달받은 전자가 내놓는 체렌코프 빛을 관측한다. 이 원리로 Davis 실험과는 달리 그림 8에서 보는 바와 같이 실시간으로 태양 중성

Fig. 9. SNO detector consisting of 1,000 ton heavy water in an acrylic sphere and viewed by 9,500 8-inch photo sensors. All of three flavor neutrinos can break a deuterium in the heavy water into a proton and a neutron by the neutral current interaction. The SNO detector is thus sensitive to all flavor neutrinos.

미자의 날아온 방향과 에너지를 측정할 수 있었다.^[7] 1988년 이 실험은 태양 중성미자가 예측된 양의 1/2 정도로 측정하였고 태양 중성미자 문제가 사실임을 입증하였다. 뿐만 아니라 태양 중심부에서 중성미자가 핵융합 반응으로 방출됨을 처음으로 밝혀냈다. 이제 학계에서는 태양에서 날아오는 전자 중성미자가 다른 종류의 중성미자로 바뀌어 예상보다 줄어든 양으로 측정되었다고 추측하게 되었다.

McDonald 교수는 태양 중성미자 문제가 정말 진동변환 때문인지 밝혀내기 위해 흔히 존재하는 보통의 물(H_2O) 대신에 구하기 힘들고 비싼 중수(D_2O)를 정부로부터 빌려 사용하였다. 그는 약 1,000톤의 중수를 투명한 대형 아크릴 원통에 채우고 광센서를 주위에 설치한 서드베리 중성미자 관측소(SNO; Sudbury Neutrino Observatory)를 만들었다. 캐나다 서드베리에 위치한 탄광의 2.1 km 지하에 이 검출기를 설치하고 1999년부터 태양 중성미자 문제를 해결하는 실험을 시작했다. (그림 9 참조) 카미오칸데와 수퍼카미오칸데 실험에서는 태양

REFERENCES

[7] K. S. Hirata *et al.*, Phys. Rev. Lett. 63, 16 (1989).

Fig. 10. Observation of solar neutrino oscillation in the SNO experiment. Electron neutrinos (ν_e) are produced by nuclear fusion reactions in the Sun center. The SNO detector was sensitive to all flavor neutrinos due to the heavy water as a neutrino target, and detected muon or tau neutrinos that are converted from the solar electron neutrinos. The measured solar neutrino flux by the SNO experiment was consistent with the prediction from the Standard Solar Model. (taken from "The Nobel Prize in Physics 2015", Nobelprize.org)

중성미자가 물속의 전자와 반응해 신호를 내기 때문에 날아오는 도중에 뮤온 혹은 타우 중성미자로 바뀌었다면 상호작용이 약해 관측하기 힘들었다. 반면에 중수 속의 중수소 원자핵은 양성자와 중성자가 태양 중성미자의 운동에너지로서도 분리될 정도로 미약하게 결합되어 있기 때문에 SNO 검출기는 태양에서 발생한 전자 중성미자뿐만 아니라 날아오는 도중에 진동변환으로 생긴 뮤온과 타우 중성미자도 함께 관측할 수 있는 장점이 있다. 중성미자 문제를 풀기 위해 물 대신 중수를 사용하는 아이디어는 캘리포니아 어바인 대학의 Herbert H. Chen 교수(1942-1987)가 제안하였다. 그는 1984년 퀸즈대학의 G. Ewan 교수와 SNO 연구진을 구성하였으나 백혈병으로 1987년 타계하였다. McDonald 교수는 프린스턴대학에서 고국인 퀸즈대학으로 옮겨와 SNO 검출기를 본격적으로 건설하기 시작했다. McDonald 교수와 SNO 실험 연구진은 그림 10에서 설명한 바와 같이 2001년 태양표준모형이 예측한 태양 중성미자 양의 전부를 측정해냄으로써 태양에서 날아오는 도중에 중성미자 진동변환이 일어났음을 발견하였다.^[8]

캐나다 정부는 이 업적에 고무되어 'SNO 지하관측연구시설'을 구축하여 여러 지하 실험을 동시에 진행할 수 있도록 지원했다. 필자는 이 연구시설에서 진행되는 실험을 선정하고 평가하는 위원으로 3년간 활동할 때 McDonald 교수와 친분을 쌓게 되었다. 그는 우리나라와 공동연구를 희망했고 국내의 영광

원자력발전소 부근에 진행 중인 진동변환 측정 실험에 큰 관심을 보였다.

국내의 중성미자 진동변환 실험

세 종류의 중성미자들 사이에 일어나는 변환에는 세 종류의 변환 세기를 나타내는 상수가 존재한다. 이것들을 θ_{23} , θ_{12} , θ_{13} 라는 세 각도로 표시한다. 이번 노벨물리학상의 업적인 진동변환 발견을 통해 Kajita 교수는 θ_{23} , McDonald 교수는 θ_{12} 의 변환 세기를 측정하였다, 국내에서도 이 변환 세기를 측정하는 실험이 진행되고 있다. 국내 연구진은 이 중에서 가장 약한 변환 세기인 θ_{13} 를 측정해내고자 2006년부터 영광 원자력발전소 부근에 중성미자 검출시설을 만들기 시작해 2011년 완공하여 리노(RENO) 실험을 진행하였다. 한국 최초의 이 중성미자 검출장비는 그 동안 축적된 경험을 바탕으로 순수 국내 기술로 거대과학 장치를 설계에서부터 제작, 설치, 운영하는 것으로 큰 의의를 찾을 수 있다. 이 중성미자 검출시설은 우리나라도 국내 과학 기술력에 걸맞는 거대 물리학 실험을 시작한다는 상징적 의미를 가지며 국내 연구진이 세계적 연구결과를 선점할 수 있는 계기를 마련했다고 본다. 성공적으로 데이터 수집과 분석이 이루어져 2012년 중국의 다야베이(Daya Bay) 실험과 한 달 간격으로, 거의 동시에 원자로 중성미자의 변환을 측정해 θ_{13} 를 알아내었다.

이 변환 세기가 워낙 작아 측정하기 쉽지 않았지만 이것을 알아냄으로써 세 종류의 중성미자 변환에 대해 완성된 이해가 가능하게 되었다. 앞으로 해결해야 할 또 다른 난제들에 대한 연구 진행이 가능하도록 돌파구를 마련했다. 이 난제들 중에서 대표적인 것으로 우주에 물질만이 존재하고 반물질이 없어진 이유, 즉 CP 대칭성 깨짐의 측정과 비록 중성미자의 질량은 당분간 측정이 쉽지 않더라도 중성미자의 질량 순서를 결정하는 것이다. 이 가장 작은 변환 세기가 측정되기 전에는 논의만 되고 있던 여러 중성미자 실험들이 곧 추진될 수 있도록 계기를 마련한 셈이다. 우리도 중성미자의 질량 순서를 결정하는 실험을 계획 중에 있다.

이번 노벨물리학상이 중성미자 진동변환의 발견에 주어졌고 앞으로도 중성미자에 관련된 난제를 하나씩 풀어 나갈 때 또 다른 노벨상이 기대된다.

여기서 개략적으로 기술한 대기 중성미자와 태양 중성미자의 진동변환, 그리고 국내의 중성미자 진동변환 실험에 대해서는 뒤에 계속되는 원고에서 더 상세히 설명되어 있다.

REFERENCES

- [8] Q. R. Ahmad *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 071301 (2001).