2015년 노벨물리학상: 춤추는 중성미자

슈퍼카미오칸데 실험의 중성미자 진동변환 발견

DOI: 10.3938/PhiT.24.054

김 재 료

Discovery of Neutrino Oscillations in the Super-Kamiokande Experiment

Jae Yool KIM

The 2015 Nobel prize in physics was given for the discovery of neutrino oscillations, which showed that neutrinos had mass. The first measurement of an atmospheric neutrino oscillation in the Super-Kamiokande experiment confirmed a smaller atmospheric ν_μ/ν_e ratio than predicted. In 1998, the paper "Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos" was published. From astronomy and astrophysics to the observation of the neutrino mass by using neutrinos from the atmosphere and the sun, Super-Kamiokande has had a major impact on particle physics. We present a review of the atmospheric neutrino results of the Super-Kamiokande observatory, which unambiguously showed that neutrinos changed their flavor between their production in the atmosphere and their observation on the earth. Also, we briefly show that the evidence for neutrino mass was confirmed by the K2K and the T2K long-baseline neutrino experiments.

서 론

국내 연구진과 수년전부터 현재까지 국제공동연구로 수행 중인 일본의 슈퍼카미오칸데(Super-Kamiokande) 실험그룹의 일원인 동경대 카지타 다카아키(Takaaki Kajita) 교수는 SNO (Sudbury Neutrino Observatory) 실험의 아서 맥도널드(Arthur

B. McDonald) 명예교수와 함께 2015년 노벨 물리학상 수상자로 선정되었다. 이번 노벨상의 의미는 중성미자에 관심 있는 모든 연구자들이 많은 기쁨과 자긍심을 갖게 된 역사적인 순간이 되었다. 수상자들의 주요 업적은 "중성미자가 질량을 가진다는 사실을 제시한 중성미자 진동의 발견"으로 보고되었다.

1930년 Pauli가 β 붕괴에서 에너지, 운동량 및 각운동량이 보존이 되지 않음을 설명하기 위해 중성미자를 예언한 후 1934년 Fermi가 약한 상호작용 이론을 발표하고, 1956년 Reines와 Cowan이 원자로에서 나온 반전자중성미자($\bar{\nu}_e$) 관측에 성공하는데 무려 4반세기가 걸렸다.^[1] 3종류의 중성미자는 전자중성미자(ν_e), 뮤온중성미자(ν_μ) 및 타우중성미자(ν_τ)로 분류되고, 전하도 없고, 질량도 거의 없으며, 우주의 기본입자 중에 광자 다음으로 수가 많은 입자로 알려져 있다. 또한 중성미자는 약한 상호작용만을 하는 입자이기 때문에 물질들과 거의 반응을 하지 않으므로 관측하기가 아주 어려운 입자로 알려져 있다.

중성미자의 질량 유무를 직접 확인하려는 실험은 삼중수소의 β 붕괴에서 전자의 스펙트럼을 사용하여 ν_e 의 질량을 측정하고, 또 다른 방법으로는 이중베타($\beta\beta$)붕괴를 탐색하는 일인데, 지금까지 여러 실험들을 종합한 결과는 중성미자질량의 상한치만 겨우 알려져 있을 뿐이다. 그러나 중성미자의 질량을 측정하지 못하더라도 질량차이를 측정하고, 질량존재를 입증하는 방법이 제시되었다. 만약 중성미자의 질량이 존재한다면, 시간이 흐름에 따라 서로 다른 flavor를 띤 3종류의 중성미자들 사이에 일어나는 중성미자진동(neutrino oscillation) 현상이 가능하다고 1957년 Pontecorvo가 예측하였다.^[2] 이러한 진동은 쿼크들이 약한 상호작용을 할 때 나타나는 flavor 고유상태가 질량고유상태의 혼합으로 되어 일어나는 것과 비슷한 현상인데, 중성미

저자약력

김재료를 교수는 고려대학교 이학박사(1984)로서 전남대학교 물리학과 교수(1979-2014)를 역임한 후 현재 연구 석좌교수로 재직 중이며, RENO 실험과 일본 Super-Kamiokande 실험을 수행 중이다. (yoolkim@chonnam.ac.kr)

REFERENCES

- [1] C. L. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse and A. D. McGuire, Science **124**, 103 (1956).
- [2] B. Pontecorvo, J. Exptl. Theoret. Phys. **34**, 247 (1958); [Sov. Phys. JETP **7**, 172 (1958)].

자들에게도 같은 현상이 일어날 수 있다는 가정 하에 중성미자 진동 연구가 시작되었다. 중성미자진동은 기존의 상한치만 알 수 있는 실험과는 전혀 다른 물리현상이다.

중성미자진동의 관측실험은 대기 중에서 양성자가 공기와 충돌하여 생성되는 파이온(pion)과 뮤온(muon)이 붕괴하여 생성되는 중성미자와 태양의 중심핵에서 일어나는 핵융합 반응으로 생성되는 중성미자들을 측정함으로써 이뤄진다. 또한 원자로에서 나오는 반전자중성미자와 고 에너지 인공 입자가속기에서 만들어진 중성미자 빔을 이용하여 중성미자진동 실험을 하기도 한다. 중성미자진동($\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$)을 최초로 성공한 실험은 1998년 물 체렌코프 광을 이용한 일본의 슈퍼카미오칸데이다.^[3]

슈퍼카미오칸데 실험에서 대기중성미자가 생성되는 지점부터 검출기까지 날아오는 거리에 따라 측정된 중성미자의 양이 흥미롭게도 서로 다르다는 것이 관측되었다. 즉, 대기에서 생성되어 바로 위에서 내려오는 뮤온중성미자는 이동거리가 짧기 때문에 변환을 하지 못해 진동이 없는 경우의 예측 값과 비슷하였고, 반면에 지구 반대쪽에서 생성되어 아래로부터 올라오는 뮤온중성미자는 여러 번 변환을 거치면서 다른 중성미자로 바뀌고 거의 절반 정도만이 관측됨으로 슈퍼카미오칸데에서는 대기 중성미자가 진동한다는 확실한 증거를 얻게 되었다. 그 후 대기 중성미자의 진동변환은 미국의 Soudan 2실험^[4]과 이탈리아의 MACRO실험^[5]에서도 관측되었고 슈퍼카미오칸데의 실험결과와 잘 일치하였다.

태양 중성미자의 진동 변환은 2002년에 캐나다의 서드베리의 지하 광산에 위치한 SNO검출기에 의해 밝혀졌다.^[6] SNO 검출기는 슈퍼카미오칸데의 순수한 물 대신 1 K톤의 중수(D_2O)를 사용하여 태양으로부터 오는 전자중성미자가 중양자와 충돌하기 때문에 다른 곳에서는 측정할 수 없는 전자중성미자의 새로운 반응들을 더 관측가능하다는 것이다. SNO 실험은 그동안 반응에 따라 다르나 계산치의 30~80% 정도만 검출되었던 태양 중성미자를 이론치에 맞게 최초로 측정하여 기존의 태양 중성미자 수수께끼를 푸는데 결정적인 역할을 하게 되었다. 또한 카미오카 광산에 위치한 KamLand 검출기는 원자로에서 생성되는 반전자중성미자가 반뮤온중성미자로 변환된다는 사실을 최초로 관측하여 태양 중성미자의 진동변환을 검증하였다.^[7]

자연에서 생성되는 대기 중성미자와 태양 중성미자의 진동변환과 질량존재가 밝혀지면서 가속기 빔을 사용하여 대기 중성미자 실험의 환경을 인공적으로 일부 재현하는 실험의 검증이 요구되었다. K2K(KEK to Kamioka) 실험은 1999년에 일본 츠크바에 위치한 고에너지연구소(KEK)의 양성자가속기에서 만들어진 1.3 GeV 뮤온중성미자 빔을 250 km 떨어진 슈퍼카미오칸데로 보내는 도중에 중성미자 진동변환이 일어나는가를 확

인하는 세계 최초의 장거리(long baseline) 중성미자 진동실험이다.

K2K 실험은 국내 연구진이 참여한 국제공동연구로써 1999년 4월부터 2004년 5월까지 수집된 데이터를 분석한 결과, 중성미자의 진동 변환이 없다면 슈퍼카미오칸데에서 151개의 중성미자 충돌이 예상됐지만 실제로 관측된 것은 107개의 중성미자만을 관측하여 도중에 중성미자의 진동변환이 일어난 것을 확실히 입증하였다.^[8]

그 후 MINOS 실험은 Fermilab에서 730 km 떨어진 Soudan 검출기에 뮤온 중성미자를 보내어 관측한 결과 K2K 실험의 측정치와 일치하였다.^[9] 이제 중성미자가 확실히 진동하고 있으며 질량을 가지고 있다는 것이 입증됨에 따라 지금까지 성공적인 입자물리학의 표준모델은 중성미자의 질량이 0으로 가정했기 때문에 수정이 불가피하게 되었다.

중성미자의 진동변환상수를 좀 더 정밀하게 측정하고, 경입자의 CP 대칭성 깨짐에 대한 연구를 수행하기 위하여 K2K 실험 다음으로 국내 연구진도 함께 참여한 T2K(Tokai to Kamioka) 실험이 시작되었다. 일본의 31 GeV 양성자가속기(J-PARC; Japan Proton Accelerator Facility)에 의해 생성되는 뮤온중성미자를 295 km 떨어진 슈퍼카미오칸데로 쏘아 보냄으로써 중성미자의 진동변환을 관측하는 실험이다. T2K 실험은 2011년 3월에 일본을 강타했던 진도 9의 후쿠시마 대지진 때문에 실험이 일시적으로 중단되었으나, 2011년 6월에 J-PARC에서 생성된 반뮤온중성미자의 빔을 원거리의 슈퍼카미오칸데로 보냈는데 3개의 반전자중성미자 후보가 슈퍼카미오칸데에서 처음 관측되어 반뮤온중성미자의 진동변환을 입증하였다.^[10]

그간 국내 연구진은 대기 중성미자의 진동변환과 질량존재를 처음으로 입증한 슈퍼카미오칸데 실험과 인위적인 가속기 빔을 사용한 장거리 중성미자의 진동변환 실험인 K2K 실험과 T2K

REFERENCES

- [3] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).
- [4] W. W. M. Allison *et al.* (Soudan 2 collaboration), Phys. Rev. D **72**, 052005 (2005).
- [5] M. Ambrosio *et al.* (MACRO collaboration), Phys. Lett. B **566**, 35 (2003).
- [6] Q. R. Ahmad *et al.* (SNO collaboration), Phys. Rev. Lett. **87**, 071301 (2001).
- [7] K. Eguchi *et al.* (KamLAND collaboration), Phys. Rev. Lett. **90**, 021802 (2003).
- [8] M. H. Ahn *et al.* (K2K collaboration), Phys. Rev. Lett. **90**, 041801 (2003).
- [9] D. G. Michael *et al.* (MINOS collaboration), Phys. Rev. Lett. **97**, 191801 (2006).
- [10] K. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 041801 (2011).

Fig. 1. Atmospheric neutrino production, from Los Alamos Science No. 25 (1997).

실험에서 국제공동연구를 함께 수행하면서 많은 기여를 하여왔다. 여기서는 2015년 노벨물리학상을 수상한 대기 중성미자진동을 발견한 실험에 관하여 중점적으로 자세히 살펴보고, 또한 슈퍼카미오칸데 실험결과와 검증에 일조한 K2K 실험과 T2K 실험도 간단히 설명하고자 한다.

슈퍼카미오칸데에서 대기 중성미자의 진동 연구

1. 대기중성미자의 진동

대기 중성미자는 우주선이 대기 상층부의 핵과 충돌하여 발생하는 파이온의 붕괴로 생성된다. 고 에너지 우주선이 대기로 입사하게 되면 파이온을 포함하는 하드론 샤워(hadron shower)가 생성되는데 이중에서 대부분은 파이온이다[그림 1]. 파이온은 뮤온과 뮤온중성미자($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$)로 그리고 뮤온은 전자와 뮤온중성미자 그리고 전자중성미자($\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$, $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$)로 붕괴된다. 이 연쇄반응을 통해 지상에서 측정되는 뮤온중성미자와 전자중성미자의 플럭스(flux) 비(ν_μ/ν_e)가 2:1이 되는 것을 간단히 예상할 수 있다. ν_μ/ν_e 는 우주선으로 인해 대기 중에서 일어나는 하드론 샤워의 결과와 대기에 입사되는 우주선 플럭스의 오차 등을 감안하더라도 5% 오차 내에서 계산될 수 있다.^[11,12]

중성미자 실험은 지하 깊은 곳에서 이루어진다. 검출기를 지하 깊은 곳에 설치하여 대기 중에서 생성된 우주선 뮤온과 전

자를 충분히 차단한다. 중성미자가 검출기의 핵과 충돌한 후 생성되는 경입자를 관측하여 어떤 중성미자로 인하여 생긴 반응인지를 확인한다($\nu + N \rightarrow l + X$). 검출기에서 관측된 μ -like 신호는 뮤온중성미자 반응의 후보로, e -like 신호는 전자중성미자 반응의 후보가 된다.

이렇게 측정된 ν_μ/ν_e 는 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 계산된 값과 비교해서 해석할 수 있다. 몬테카를로가 ν_μ/ν_e 를 완벽하게 재현했다면, $R = (\mu/e)_{data}/(\mu/e)_{MC}$ (μ : μ -like 신호의 수, e : e -like 신호의 수) 값은 1이 될 수 있었으나 Kamiokande,^[13,14] IMB,^[15] Super-Kamiokande,^[16,17] Soudan-2^[4] 등의 실험에서 확실히 1보다 작은 값을 측정하였고, 이것은 중성미자 진동을 가정했을 때에 예측되는 결과와 일치하였다. 여기서 중성미자 진동이란 두 종류의 중성미자만을 가정할 때, 처음 a 상태의 중성미자가 진공상태의 거리 L을 지난 후 b 중성미자로 바뀔 수 있다는 것이다. 이러한 변환은 이동거리 L과 중성미자의 에너지 E_ν 의 비, L/E_ν 에 따라 주기적으로 변하기 때문에 중성미자 진동이라고 한다.

이러한 중성미자 진동이 일어나는 것은 중성미자 질량상태와 중성미자의 종류가 다르기 때문이다. 여기서 질량상태는 중성미자를 질량 크기로 구분하는 것이고, 중성미자 종류는 중성미자가 만들어지거나 없어질 때를 측정함으로써 중성미자를 구분하는 것이다. 일반적으로 입자들은 입자의 질량들과 종류가 정확히 일대일로 대응하지만, 중성미자는 질량들과 종류가 정확히 일대일로 대응하지 않다고 가정하는 것이다. 즉, 중성미자는 질량으로 표현되기도 하고 종류로 표현되기도 한다. 예를 들면, 직각 좌표계의 회전축과 고정 축과의 관계에서 고정 축을 중성미자 종류, 회전축을 중성미자 질량상태로 비유할 수 있다. 그리고 직각 좌표계에서 고정 축은 회전 좌표계 성분들의 혼합으로 표현되듯이 어느 한 종류의 중성미자는 서로 다른 질량 상태들의 중성미자들로 섞여있다. 이를 중성미자 혼합

REFERENCES

- [11] G. Barr *et al.*, Phys. Rev. D **39**, 3532 (1998); V. Agrawal *et al.*, Phys. Rev. D **53**, 1314 (1996); T. K. Gaisser and T. Stanev, in *Proceedings of the International Cosmic Ray Conference*, Rome, Italy, 1995 (Arti Grafiche, Urbino, 1995), Vol. 1, p. 694.
- [12] M. Honda *et al.*, Phys. Lett. B **248**, 193 (1990); M. Honda *et al.*, Phys. Rev. D **52**, 4985 (1995).
- [13] K. S. Hirata *et al.*, Phys. Lett. B **205**, 416 (1988); K. S. Hirata *et al.*, Phys. Lett. B **280**, 146 (1992).
- [14] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. B **335**, 237 (1994).
- [15] D. Casper *et al.*, Phys. Rev. Lett. **66**, 2561 (1991); R. Becker-Szendy *et al.*, Phys. Rev. D **46**, 3720 (1992).
- [16] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Lett. B **433**, 9 (1998).
- [17] Y. Fukuda, *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Lett. B **436**, 33 (1998).

Fig. 2. Atmospheric neutrinos are generated uniformly on the earth.

(neutrino mixing) 혹은 진동이라고 한다.

중성미자 진동을 관측하기 위해서는 중성미자 이동 경로 상에서 L만큼 떨어진 두 개의 검출기가 필요하다. 두 검출기에서 관측된 특정 중성미자의 수를 비교하면 중성미자의 변환 즉, 중성미자 진동을 확인할 수 있다. 대기 중성미자를 이용하면 두 개의 검출기가 필요 없다. 검출기 상단 약 15 km 위의 대기에서 생성된 중성미자가 검출기 하단을 향해 이동하기도 하지만 지구반대쪽 대기에서 생성된 중성미자 역시, 어떤 반응도 하지 않은 상태로 최대 약 13,000 km를 이동하여 검출기 하단으로 입사하므로 한 개의 검출기에서 서로 다른 비행거리를 갖는 두 중성미자를 검출할 수 있다. 또한 중성미자의 비행거리 L은 천정각(zenith angle)에 따라 달라지기 때문에 진동확률은 천정각의 함수가 된다(그림 2).

2. 슈퍼카미오칸데 검출기

슈퍼카미오칸데는 일본 기후현 히다시 카미오카에 위치한 세계 최대의 거대한 물 체렌코프(water cherenkov) 검출기이다. 카미오카 광산의 지하 1,000 m에 위치하며 직경 39.3 m, 높이 41.4 m인 원통형 스테인리스 수조에 순수한 물 5만 톤이 채워져 있고, 직경 50 cm의 광전자증배관(PMT: photomultiplier tube) 11,129개로 하전 입자가 진공이 아닌 온도 14 °C, 굴절율 1.34인 물속에서 빛보다 빠르게 움직이는 경우 나오는 체렌코프 빛을 관측하여 중성미자를 관측하고 양성자 붕괴를 탐색하고 있다.

슈퍼카미오칸데의 거대한 공동(空洞)의 굴착은 1991년 12월에 시작되었고, 5만 톤의 수조는 1995년 중반 경에 완성하였다. 1995년 12월 PMT 부착작업이 완성되고, 5만 톤 수조를 채울 때까지 2개월 이상 걸렸다. 1996년 4월 1일 0시에 드디

어 슈퍼카미오칸데 운전이 시작되었다. 1998년에는 지구의 반대 측에서 날아오는 대기 중성미자 숫자가 적음을 나타내고 중성미자 진동의 확실한 증거를 세계에 알렸다.

그 후 5년간 관측 뒤에 2001년 7월에 고장 난 PMT가 늘어나서 수조 물을 배출하고 교환하는 작업이 이루어졌다. PMT 작업이 끝나고 순수 물을 넣은 도중에 2001년 11월에 대형사고 일어났다. 아래 면에 있는 PMT가 깨져버렸고, PMT 내부 진공이기 때문에 파손에 의한 커다란 충격파가 일어나 이것이 물에 전달되어 다른 수조의 반 이상의 안쪽 PMT 6,777개와 바깥 쪽 수조의 PMT 1,100개가 파괴되어 버렸다. 실망과 슬픔으로 망연자실하는 연구자들은 필사적으로 원인분석을 한 결과, 파손을 면한 5,182개의 PMT를 한 개씩 건너뛰어 배치를 다시 해, FRP와 아크릴로 만든 충격파방지 케이스를 부착하는 것으로 복구 작업을 끝내고 2002년 10월에 관측을 재개하였다.

이러한 대형사고로부터 1년이 못되어 복구할 수 있었던 것은 슈퍼카미오칸데의 공동연구자들의 노력의 결과였고, 특히 한국그룹은 시작부터 마지막까지 헌신적으로 복구 작업에 참여하여 모든 실험그룹의 연구자들에게 귀감이 되었다.

〈Water Scattering 측정〉

거대한 물 체렌코프 검출기 내의 순수한 물속에서 레이저 빔을 사용하여 산란과 감소 확률(scattering and attenuation probability)을 측정하는 실험장비의 설치 및 분석은 아주 중요한 일이다. 정밀한 데이터를 얻기 위해서는 물의 특성이 균일해야 하고 여러 파장의 빛에 대하여 투명해야 하며 물의 상태를 실시간으로 모니터링하는 것이 필수적이다. 그리고 문제점이 발생되면 빠른 시간에 해결하기 위해서는 물의 특성을 잘 이해하고 있어야 한다. 그간 한국 그룹은 슈퍼카미오칸데에서 레이저를 이용한 water scattering 실험 장비를 직접 설치하여 주도적으로 운영하고 분석방법도 고안하여 실험을 진행하고 있다.

거대한 물 체렌코프 검출기에서 사용되는 물은 매우 높은 정도의 투명도를 유지하기 위해서는 주기적으로 순환시키면서 여러 단계의 필터링과 살균시스템을 거치면서 오염된 물을 정수한다. 그림 3처럼 New top, B1, B2, B3, B4, B5 및 Bottom 위치에 설치된 레이저 발사장치를 통해서 4개 파장(337, 371, 400, 420 nm)의 레이저가 순차적으로 검출기 내 물속으로 발사된다. 이중 337 nm 레이저는 질소레이저에서 생성되고 나머지는 dye laser를 사용하여 만들어지는데 이중 371, 400, 420 nm 파장의 dye laser는 2010년 2월 NIM 모듈에서 나오는 375, 405, 445, 473 nm 반도체 레이저로 교체되었다. 이들 레이저의 상태는 검출기에 입사되기 전에 위치

Fig. 3. Schematic diagram of laser system in Super-Kamiokande.

한 모니터링 PMT를 통해 실시간으로 모니터링 된다.

또한 물속에서 레이저 광의 흡수, 대칭 산란과 비대칭산란을 실시간으로 측정하여 물의 투명도를 정밀하게 측정함으로써 검출기에서 측정된 하전입자의 에너지 및 운동량을 결정하는데 오차를 크게 줄일 수 있다.

3. 슈퍼카미오칸데에서 대기 중성미자의 측정

1998년 슈퍼카미오칸데는 22.5 kton의 유효체적(fiducial volume)에서 반응한 대기 중성미자를 535일 동안 관측하여 중요한 결과를 발표하였다. 전 에너지 영역에서 1보다 작은 $R=(\mu/e)_{data}/(\mu/e)_{MC}$ 값이 측정되었으며, 더불어 천정각에 따른 μ -like 신호의 감소가 확실하게 관측되었다. 알고 있는 모든 실험적 오차를 고려하여도 그 감소를 설명할 수 없었으나 두 개의 중성미자 진동 모델 즉, ν_{μ} 가 ν_{τ} 혹은 $\nu_{sterile}$ 로 변환되는 모델을 사용하여 완벽하게 설명할 수 있었다.

슈퍼카미오칸데는 1996년 4월부터 2001년 7월까지 11,146개의 50 cm PMT가 설치된 5만 톤의 물 체렌코프 검출기로 SK-I 실험이 처음 시작되었고, 2006년 11,129개의 PMT로 수정되어 현재 SK-IV 실험이 진행 중이다. 유효 체적은 22.5 kton이고 검출기 내부는 초 순수 물로 채워져 있다. 모든 분석은 기본적으로 각 PMT에서 나오는 신호의 전하량과 시간 정보로 수행된다. 검출기 외부에는 본 검출기를 감싸는 약 2 m 두께의 또 다른 검출기(외부검출기로 명칭)가 있어서 백그라운드 입자를 차단하기도 하고 1,885개의 20 cm PMT를 이용하여 중성미자 반응으로 생성된 경입자의 이동방향을 확인하는데 사용되었다.

어떤 중성미자에 의한 반응인지는 최대 가능도 방법(maximum likelihood method)을 사용하여 측정된 PMT신호의 전하와 시간분포를 뮤온 혹은 전자에서 기대되는 분포와 비교해 구별한다. 그림 4는 슈퍼카미오칸데와 검출된 뮤온과 전자의 신호이다. 뮤온중성미자가 검출기 유효 체적 안의 물 핵자와 반

Fig. 4. (up) A sketch of the Super-Kamiokande detector site under Mt. Ikenoyama, and (down) event display of muon (left) and electron (right) in the Super-Kamiokande detector.

응하여 생성된 뮤온은 뚜렷한 체렌코프 링을 남기는 반면, 전자중성미자에 의해 방출된 전자는 전자기샤워(electromagnetic shower)를 일으켜 상대적으로 뚜렷하지 않은 체렌코프 링을 남긴다.

슈퍼카미오칸데에서 중성미자 반응으로 생성되는 경입자의 트랙은 검출기 안에 온전히 존재(fully contained: FC)하거나 혹은 그 트랙의 일부만 존재(partially contained: PC)하게 된다. 대기 중성미자의 진동 연구는 중성미자 에너지를 비교적 잘 측정할 수 있는 FC 이벤트(event)만 선별하여 진행된다. 중성미자가 검출기의 유효체적 안에서 물 핵자와 반응하여 FC 이벤트로 구분된 경우는 경입자의 체렌코프 광을 검출기에서 모두 수집하여 중성미자 에너지로 온전히 변환할 수 있으며 경입자의 이동 방향인 체렌코프 링의 방향으로 검출기에 입사되는 중성미자의 방향을 추정할 수 있다. 고에너지 입자의 경우 중성미자와 경입자의 방향이 15도 이내에서 일치한다. 더불어 중성미자 에너지가 1 GeV 이상인 경우에 주로 관측되는 2개 이상의 체렌코프 링을 갖는 이벤트는 제외하고 중성미자 종류를 비교적 정확히 판정할 수 있는 단일 체렌코프 링 이벤트를만 선택하여 분석에 사용한다.

표 1은 슈퍼카미오칸데에서 측정된 μ -like와 e -like 이벤트의 개수를 몬테카를로로 예측된 개수와 비교하였다. 검출기에서 체렌코프 광으로 측정된 입자의 에너지가 1,330 MeV(운동

Table 1. Summary of the sub-GeV, multi-GeV, and PC event samples compared with the Monte Carlo prediction based on the neutrino flux calculation of Ref. [12].

	Data	Monte Carlo
Sub-GeV		
Single-ring	2389	2622.6
e -like	1231	1049.1
μ -like	1158	1573.6
Multi-ring	911	980.7
Total	3300	3603.3
$R = 0.63 \pm 0.03(stat.) \pm 0.05(syst.)$		
Multi-GeV		
Single-ring	520	531.7
e -like	290	236.0
μ -like	230	295.7
Multi-ring	533	560.1
Total	1053	1091.8
Partially contained	301	371.6
$R_{FC+PC} = 0.65 \pm 0.05(stat.) \pm 0.08(syst.)$		

량 ~ 1400 MeV/c에 해당) 이하이면 sub-GeV, 그 이상이면 multi-GeV 이벤트로 구분하였다. 실험결과, sub-GeV, multi-GeV 영역 모두에서 R 값이 확실히 1보다 작게 측정되었다. 백그라운드 신호를 포함한 실험의 불확정도가 이 결과에 얼마나 영향을 주는지 확인해 보아야 할 것이다. 첫 번째로, 검출기 주위를 둘러싸고 있는 바위에서 생성되거나 우주선의 충돌로 만들어진 중성자는 전자로 붕괴되는데, 이 신호가 e -like 데이터에 포함될 가능성을 생각해 볼 수 있다.^[18] 하지만 슈퍼카미오칸데는 4.7 m 두께의 물이 유효체적을 둘러싸고 있고 이는 5배의 강한 상호작용거리(hadronic interaction length) 혹은 13배의 방사선 거리(radiation length)에 해당하기 때문에 결과에 큰 영향을 주지 못한다.^[19] 또한 결과에 영향을 줄 수 있는 것은 ν_μ/ν_e 의 예측 값이다. 우주선이 대기에 입사하여 발생하는 하드론 샤워가 예측 값의 주요한 오차 요인이 되나, 이는 R값에 5 % 이하의 영향밖에 주지 못한다. 중성미자 플럭스 모델에 따라 중성미자의 플럭스가 약 20% 변하기는 하나 이때 R값 역시 크게 변하지 않는다.^[20] 뮤온과 전자중성미자의 산란 단면적 차이에서 오는 오차 역시 미미하다.^[21] μ -like와 e -like 반응을 잘못 판단하여 문제가 될 확률은 몬테카를로에 의하면 2% 이하이다. 이 결과는 잘 알고 있는 캘리브레이션 소스(source)로도 확인되었다.^[16] 관측된 입자가 뮤온인지 전자인지를 판단하는 프로그램은 KEK에서 나오는 뮤온과 전자빔을 이용하여 테스트되었고,^[22] 서로 다른 두 연구 그룹에 의해서 독립적으로 시험한 결과 R 값에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.^[16,17] 관측된 μ/e 비가 통계적 요동(stat-

Fig. 5. The $(U-D)/(U+D)$ asymmetry as a function of momentum for FC e -like and μ -like events and PC events. While it is not possible to assign a momentum to a PC event, the PC sample is estimated to have a mean neutrino energy of 15 GeV. The Monte Carlo expectation without neutrino oscillations is shown in the hatched region with statistical and systematic errors added in quadrature. The dashed line for μ -like is the expectation for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with $(\sin^2 2\theta = 1.0, \Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3} eV^2)$.^[3]

istical fluctuation) 때문에 1보다 작게 나올 확률은 sub-GeV 영역에서는 0.001%보다 작고 multi-GeV 영역에서는 1%보다 작게 계산되었다. 이처럼 예측치보다 30% 이상 작게 측정된 ν_μ/ν_e 에 영향을 줄 만한 실험적 오차는 확인할 수 없었다.

슈퍼카미오칸데는 위의 관측결과가 중성미자 진동에 의한 것이라는 것을 뒷받침할 만한 또 다른 증거를 제시했다. 슈퍼카미오칸데에서 관측된 μ -like 신호는 천정각(θ)에 대해 비대칭성을 갖는데 비하여 e -like 신호에서는 심각한 비대칭성이 발견되지 않았다. 이러한 비대칭성은 $A = \frac{(U-D)}{(U+D)}$ 로 정의하였다. U는 upward-going 이벤트($-1 < \cos\theta < -0.2$)로 지구 반대편 대기에서 생성된 중성미자가 날아와 검출기 아래에서 입사된 경우이고, D는 downward-going 이벤트($0.2 < \cos\theta < 1$)로 검출기 위쪽 대기에서 생성된 중성미자가 검출기 위 방향에서 입사되는 경우이다. 중성미자 에너지가 1 GeV 이상의 영역(우주선에 대해 지구 자기장 효과가 적은 영역)에서는 중성미자 플럭스 모델과 관계없이 비대칭성은 거의 없다고 예측된

REFERENCES

- [18] O. G. Ryazhskaya, JETP Lett. **60**, 617 (1994); JETP Lett. **61**, 237 (1995).
- [19] Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. B **388**, 397 (1996).
- [20] T. K. Gaisser *et al.*, Phys. Rev. D **54**, 5578 (1996).
- [21] J. Engel *et al.*, Phys. Rev. D **48**, 3048 (1993).
- [22] S. Kasuga *et al.*, Phys. Lett. B **374**, 238 (1996).

다.^[11,12] 몬테카를로에 의하면 지구자기효과로 인한 A의 오차는 sub-GeV 영역에서는 ± 0.02 정도이고 multi-GeV 영역에서는 ± 0.01 이하이다. 검출기에서 체렌코프 광을 검출할 때 상하 비대칭성이 있는지도 확인해 보았으나 일정한 에너지를 갖는 캘리브레이션 소스로 확인한 검출기의 상하 비대칭성은 $\pm 0.6\%$ 로 upward-going 이벤트와 downward-going 이벤트의 검출에 큰 차이를 보이지 않았다.^[23]

그림 5는 e -like와 μ -like 신호의 운동량에 대한 비대칭도 A 값이다. e -like 신호의 A값은 몬테카를로 예측과 거의 일치하는 반면, μ -like 신호는 높은 운동량 영역에서 중성미자가 진동이 없다는 예측과 많이 차이가 난다. 즉 0에서 많이 벗어난 A값은 중성미자의 진동이 있다는 결과(그림 5의 점선)와 일치한다. 또한 운동량이 400 MeV/c인 경우는 중성미자가 입사된 방향과 그로부터 발생하는 경입자의 사잇각은 평균 55도이며, 1.5 GeV/c인 경우는 약 20도로 낮은 운동량 영역에서는 서로 상쇄되어 A값은 거의 0에 가깝다. 따라서 e -like 신호와 μ -like 신호가 차이가 나는 것은 어떠한 검출기의 오차로서도 설명할 수 없고 오직 중성미자의 진동변환의 가정에서만 설명이 가능하다.^[17]

4. 대기중성미자 진동변환($\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$)의 확인

이상의 결과들이 어떤 중성미자 진동에 의한 것인가를 확인하기 위해 χ^2 방법으로 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ 와 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 진동모델의 적합성을 테스트해 보았다. 실험적, 이론적으로 가능한 오차를 모두 고려하여 확인한 결과, $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 진동의 경우 $\chi^2_{\min}=65.2/67$ DOF($\sin^2 2\theta=1.0$, $\Delta m^2=2.2 \times 10^{-3} eV^2$)로 상당히 신뢰할 만한 결과를 얻은데 반해, $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ 진동에 대해서는 $\chi^2_{\min}=87.8/67$ DOF($\sin^2 2\theta=0.93$, $\Delta m^2=3.2 \times 10^{-3} eV^2$)로 상대적으로 좋지 않은 결과를 얻었다. 또 진동이 없는 상황($\sin^2 2\theta=0$, $\Delta m^2=0$)을 적용해 보았을 때는 $\chi^2_{\min}=135/67$ DOF를 얻어 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 진동의 가능성을 확인하였다.

그림 6은 슈퍼카미오칸테의 FC 데이터와 PC 데이터에 대한 천정각 분포를 몬테카를로 시뮬레이션한 결과와 비교한 것이다. 데이터는 진동이 없는 몬테카를로 결과와 큰 차이를 보이거나 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 진동을 가정한 몬테카를로 결과와 상당히 일치한 것을 확인할 수 있다.

그림 7의 위 그림은 묶은 중성미자의 변환을 재확인하기 위해서 데이터와 몬테카를로의 비(Data/Monte Carlo)를 진동확률의 중요한 변수인 L/E_ν 에 대해 살펴보았다. 중성미자의 에너지 E_ν 는 중성미자 반응 후에 발생하는 경입자의 운동량을 토대로 계산되었고, 중성미자의 비행거리 L 은 중성미자 에너지와 경입자의 운동방향 그리고 그 종류를 토대로 계산되었다.^[24] 운동량이 400 MeV/c 이상인 FC 이벤트와 몬테카를로

Fig. 6. Zenith angle distributions of μ -like and e -like events for sub-GeV and multi-GeV data sets. Upward-going particles have $\cos\theta < 0$ and downward-going particles have $\cos\theta > 0$. Sub-GeV data are shown separately for $p < 400$ MeV/c and $p > 400$ MeV/c. Multi-GeV e -like distributions are shown for $p < 2.5$ GeV and $p > 2.5$ GeV and the multi-GeV μ -like are shown separately for FC and PC events. The hatched region shows the Monte Carlo expectation for no oscillations normalized to the data live time with statistical errors. The bold line is the best-fit expectation for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with the overall flux normalization fitted as a free parameter.^[3]

의 비율 L/E_ν 에 대해서 살펴보면, e -like 신호는 L/E_ν 의 변화에도 큰 차이를 보이지 않은 반면, μ -like 신호는 L/E_ν 값이 커짐에 따라 데이터의 양이 현저히 줄어들어 큰 L/E_ν 영역에서는 약 절반가량 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한 슈퍼카미오칸테에서 획득한 $R=(\mu/e)_{\text{data}}/(\mu/e)_{\text{MC}}$ 값과 천정각 분포를 이용한 진동상수는 $\sin^2 2\theta=1.0$ 일 때 $\Delta m^2=2.2 \times 10^{-3} eV^2$ (90% 신뢰수준)로 측정되었다.

REFERENCES

- [23] This represents an improvement from Refs. [16,17] due to improved calibration.
- [24] T. K. Gaisser and T. Stanev, Phys. Rev. D 57, 1977 (1998).

Fig. 7. (up) The ratio of the number of FC data events to FC Monte Carlo events versus reconstructed L/E_ν . The points show the ratio of observed data to MC expectation in the absence of oscillations. The dashed lines show the expected shape for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ at $\Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ and $\sin^2 2\theta = 1.0$. The slight L/E_ν dependence for e -like events is due to contamination (2-7%) of ν_μ CC interactions. (down) The 68%, 90%, and 99% confidence intervals are shown for $\sin^2 2\theta$ and Δm^2 for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ two-neutrino oscillations based on 33.0 kton yr of Super-Kamiokande data. The 90% confidence interval obtained by the Kamiokande experiment is also shown.^[3]

그림 7의 아래 그림은 슈퍼카미오칸데에서 측정한 진동상수 Δm^2 와 $\sin^2 2\theta$ 이다. 카미오칸데의 결과보다 더 낮은 영역에서 Δm^2 가 측정되기는 하였으나 90% 신뢰수준에서 그 영역이 일부 일치함을 보여주고 있다.

이상에서 보여준 슈퍼카미오칸데의 결과들 즉, 천정각에 대한 μ -like 신호의 결과와 측정된 ν_μ/ν_e 값은 중성미자 진동이 없다고 가정한 결과와는 큰 차이를 보였다. 대기 중성미자의 플럭스, 산란단면적 그리고 확인 가능한 실험적 오차를 모두 고려하여도 그 차이를 해석할 수 없었으나 $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau (\sin^2 2\theta > 0.82, 5 \times 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ 진동의 결과와 아주 잘 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 슈퍼카미오칸데 데이터는 중

Fig 8. The K2K collaboration.

성미자 진동의 확실한 증거를 제시한 것이다.

K2K 실험

1980년부터 1990년 초기까지 묶은 중성미자가 전자중성미자 혹은 타우 중성미자로 진동한다는 사실이 IMB^[12]와 Kamiokande^[15] 실험에서 밝혀지기 시작하였다. 위 실험에서 사용된 중성미자는 생성되는 곳이 태양이나 지상 수십 킬로미터 위의 대기권이다. 하지만 태양에서 중성미자가 만들어지는 과정이나 대기권에서 중성미자가 만들어지는 과정은 직접 측정하지는 못하기 때문에 이에 대한 오차가 크다. 이를 극복하기 위한 방편으로 1995년 인공가속기를 사용하여 중성미자를 만들어 실험하자는 제안이 일본에서 있었다. 그래서 일본 KEK의 12 GeV 가속기를 사용하여 우리가 원하는 에너지와 중성미자를 직접 만들어 중성미자 진동을 관측하는 실험이 K2K 실험이다.

국내 연구진은 1999년 미국, 일본 등과 함께 국제 공동연구로서 실험을 시작하고, 2002년부터 캐나다와 유럽 몇 개국이 합류하여 대형 국제공동연구로 발전하였다(그림 8). 한국그룹은 K2K 실험이 끝날 때까지 묶은 검출기와 K2K SciFi 검출기 운영에 참여하였고, 특히 SciFi 검출기의 Front End Board는 전부 한국그룹에서 설계, 제작해서 데이터 분석을 하는 결정적 역할을 담당하여 K2K 실험에 크게 기여하였다.

K2K 실험은 KEK-PS(KEK 양성자 가속기) 12 GeV 양성자 빔을 알루미늄 표적에 쏘여 발생된 많은 수의 파이온들이 자기장(horn)을 지나면서 평행하게 된 후 붕괴터널(decay tunnel)에서 파이온이 묶은과 중성미자로 붕괴되고, 이중 묶은은 무겁고 두꺼운 벽에 의해서 차단된다. 중성미자는 300 m 떨어진 근거리 검출기와 250 km 떨어져있는 원거리 검출기를 통과하게 된다. 이렇게 통과된 중성미자 빔의 98%가 묶은중성미자이고 이중 타우중성미자로 바뀌는 스펙트럼이 어떻게 되는지를 근거리 검출기에서 보는 것이다.

그림 9에서처럼 K2K 근거리 검출기의 구조는 중성미자 빔

Fig. 9. The layout of the K2K near detector. It consists of a 1-kt water, a scintillating fiber detector, a hodoscope of plastic scintillation counters, a lead glass detector, and a muon range detector.

의 제일 첫 부분에 1 kton의 물 체렌코프 검출기가 설치되어 있다. 이는 원거리 검출기인 슈퍼카미오칸데 검출기와 같은 구조이다. 다음은 SciFi 검출기로 입자 궤적을 측정하는데 사용된다. 납유리(lead glass) 검출기는 1999년부터 2001년 7월까지 사용되다가 SciBar 검출기로 대체되었다.^[25] 이 SciBar 검출기는 15,000개의 채널을 가지고 있어서 매우 짧은 궤적을 갖는 입자를 잘 검출할 수 있었고 양성자와 파이온을 잘 판별할 수 있어서 2개 궤적을 갖는 하전전류 준탄성반응(charged current quasi-elastic event: CCQE)을 찾는데 매우 효율적이었다. 다음은 muon range detector로서 뮤온을 검출하고 이들의 궤적 길이를 측정하는데 사용된다.

중성미자 진동이 있다고 했을 때 원거리 검출기의 μ -like 반응에 대한 에너지 분포에서 예측된 중성미자 반응의 수와 측정된 스펙트럼이 잘 일치하였다. 만일 중성미자 진동이 없을 때 이 결과를 설명할 확률은 겨우 0.0050%이다.^[10] 따라서 K2K 실험은 중성미자의 진동변환과 질량 존재를 확고히 입증하였다.

이제 태양중성미자 실험, 대기중성미자 실험, 그리고 K2K가 속기 실험의 결과로 중성미자 질량이 있다는 것과 이로 인하여 중성미자 진동 현상이 있다는 것은 많은 공감대가 이루어졌다. 이후부터는 여러 측정값들의 정밀 실험이 이루어졌는데 이들 중 K2K와 비슷한 가속기와 검출기를 사용한 실험인 T2K 실험이다. 아울러 K2K 실험에서 확인하지 못한 뮤온중성미자의 전자중성미자로의 변환도 주된 관심사 중의 하나였다.

T2K 실험

T2K 실험은 일본 토카이(Tokai)에 있는 31 GeV 양성자 가속기로부터 295 km 떨어져 있는 원거리 검출기인 슈퍼카미오

Fig. 10. The T2K collaboration.

칸데로 뮤온중성미자를 보내는 것이다. 특히 중성미자 빔은 중심축으로부터 2.5도 떨어진 중성미자 빔을 사용하여 off-axis빔이라고 불리는데 이는 파이온입자가 붕괴할 때 off-axis에서 발생하는 중성미자 에너지 범위가 매우 좁기 때문이다. 이렇게 좁은 범위의 에너지를 갖는 중성미자 빔은 뮤온 중성미자가 전자중성미자로 변환되는 증거를 찾는데 매우 효과적이다.

국내 연구진은 가속기 Beam Monitor의 전자 장비를 한국에서 직접 설계, 제작하고 설치하여 T2K 국제공동연구(그림 10)에 크게 기여하였다. T2K 검출기는 근거리 검출기와 원거리 검출기로 구성되는데 근거리 검출기는 진동효과가 거의 없는 280 m 떨어진 곳에 빔 방향의 INGRID 검출기와 off-axis 방향의 ND280 검출기로 구성된다. INGRID 검출기에서는 중성미자 빔의 특성을 측정하고 ND280 검출기로는 중성미자 빔 구성 성분과 에너지 스펙트럼을 측정한다.

ND280 검출기는 그림 11에서처럼 0.2 T의 자기장으로 둘러싸여 있고, 내부에는 옆에서 오는 뮤온의 움직인 총 거리를 측정하는 side muon range detector(SMRD), 전자기 에너지를 측정하는 electromagnetic calorimeter(ECAL), π^0 를 측정하는 POD, 하전(charged particle) 입자들의 움직인 자국을 측정하는 tracking detector 등이 있다. 이 tracking detector는 3개의 가스 시간 투사체임버(gaseous time projection chambers: TPCs)와 이들 사이에 있는 두 개의 섬광바 검출기(fine-grained detectors with scintillation bar: FGDs)로 구성된다.

가까운 검출기(ND280)에서 측정된 데이터는 몬테카를로와 비교하면 거의 같게 나올 정도로 정밀하게($R_{ND}^{\mu, Data} / R_{ND}^{\mu, MC} = 1.036 \pm 0.028(stat)^{+0.044}_{-0.037}(det. syst) \pm 0.038(phys. syst)$) 뮤온중성

REFERENCES

- [25] B. J. Kim *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **497**, 450 (2003).

Fig. 11. (a) An overview of the T2K detector site. (b) The 280 m off-axis detector layout.

미자 에너지 스펙트럼을 잘 측정하였다. 이제 원거리 검출기인 슈퍼카미오칸데 검출기에서 얼마나 뮤온중성미자가 전자중성미자로 변환되었는지를 측정해야 하는데 중요한 것은 전자중성미자로 오인할 백그라운드를 제거하는 것이다. 주된 백그라운드 중의 하나는 뮤온 중성미자 빔 속에 섞여있는 전자중성미자이고, 이들을 제거하고 남은 전자중성미자는 총 6개이다. 이 값은 뮤온 중성미자가 전자중성미자로 변환이 없다고 가정할 때 6개 데이터를 얻게 될 확률은 7×10^{-3} 만큼 작다.^[10] 따라서 T2K 실험은 뮤온중성미자가 전자중성미자로 변환한다는 것을 입증하였다.

최근 2015년 5월 18일 KEK 세미나에서 2014년 5월부터 2015년 3월까지 얻어진 데이터 분석결과로써 반뮤온중성미자의 소멸(disappearance)을 정식으로 공표하였다. 이는 반중성미자의 진동변환이 일어나지 않았을 경우 T2K 실험의 원거리 슈퍼카미오칸데 검출기에서 59.8개의 중성미자 검출을 예상했는데, 실제로 17개의 중성미자만을 관측하여 도중에 반뮤온중성미자가 반타우중성미자로 탈바꿈하여 반뮤온중성미자 개수가

감소한다는 것을 확인하고 반뮤온중성미자의 진동과 질량존재를 입증하였다.

결론

원자핵보다 더 작은 하층구조를 이해하는데 지금까지 성공적인 입자물리학의 표준모형은 모든 기본입자의 상호작용을 정확히 잘 기술하고 있지만 현재까지 맞지 않은 것은 오직 중성미자 질량에 관련된 부분뿐으로 알려져 있다. 중성미자는 워낙 관측하기가 어려워서 지금까지도 흥미롭고 신비스러운 입자로 알려져 있고, 중성미자의 질량을 측정하려는 실험은 앞으로도 계속될 것으로 생각된다. 이제 중성미자의 진동변환이 관측되어 중성미자의 질량이 존재한다고 입증됨에 따라 표준모형은 수정되어야 하고, 아직도 해결해야 할 의문점들이 남아있다. 즉 중성미자질량의 절대치 문제, 약한 상호작용도 없고 물질과 상호작용이 없는 그냥 유령입자로 알려진 sterile 중성미자의 존재 가능성, 중성미자의 질량 순위(mass hierarchy), 경입자의 CP violation, 정확한 중성미자의 혼합각 측정 및 중성미자가 Dirac 입자 혹은 Majorana 입자이냐를 판단하는 일이고, 기타 중성미자의 물리적 성질들을 다방면으로 연구하는 일들일 것이다.

이와 같은 문제들을 해결하고 명쾌히 설명하기 위해 여러 실험이 진행되고 있고 특히 장거리 가속기 및 원자로 실험들이 최근 들어 계획되고 건설 중에 있다. 국내에서도 현재 수행 중인 RENO 실험 다음으로 RENO-50이 추진 중이고, Super-Kamiokande의 약 20배로 설계된 초대형 Hyper-Kamiokande 실험에도 이미 국내 연구진들이 참여하고 있다.

현재 국내 연구진과 Super-Kamiokande에서 함께 일하는 동료교수가 영광스러운 2015년 노벨물리학상을 받으니 기쁘고 축하를 보내면서, 반면에 노벨상도 이제 그리 멀리 있지 않고 가까이 있다고 생각도 해 본다.