2015년 노벨물리학상: 춤추는 중성미자

SNO 실험의 태양 중성미자 진동변환 관측

DOI: 10.3938/PhIT.24.055

주 경 광

Observation of Solar Neutrino Oscillation by the SNO Experiment

Kyung Kwang JOO

The Sudbury Neutrino Observatory (SNO) is a neutrino observatory located ~2000 m underground in Vale Inco's Creighton nickel mine in Sudbury, Ontario, Canada. The SNO used a heavy-water Cherenkov detector designed to detect neutrinos produced by nuclear fusion reactions in the sun. With the heavy water (D_2O), the SNO detector was able to observe separately the number of electron neutrinos and the number of all neutrinos. This allowed a determination of the probability for neutrino-flavor oscillations to occur. From the neutrino flux and the shape of the energy spectrum, the SNO showed how neutrino flavors could mix together and provided information on neutrino masses. The director of the SNO experiment, Art McDonald, was co-awarded the Nobel Prize in Physics in 2015 for the experiment's contribution to the discovery of neutrino oscillation and to demonstrating that neutrinos have mass.

태양 중성미자 진동변환

Sudbury Neutrino Observatory(SNO) 실험은 캐나다 온타리오주 서드베리 근처 지하 약 2100미터의 Vale INCO의

저자약력

주경광 교수는 캐나다 토론토대학에서 박사학위를 취득하고(1997), 일본 고에너지물리연구소(KEK), 스위스 CERN ATLAS 실험, 서울대 물리학과 박사후 연구원과 연구 조교수를 거쳐 2007년부터 전남대학교 물리학과에서 조교수를 역임하고 현재 부교수로 재직 중이다. (kkjoo@chonnam.ac.kr)

Creighton 니켈 광산에 위치한 중성미자 실험소이다.^[1] SNO 실험의 연구소장인 Art McDonald는 2015년에 중성미자 진동변환 발견과 중성미자가 질량을 가진다는 사실을 보여준 공로로 노벨 물리학상을 수상하였다.

태양 에너지의 발생 원인은 매우 복잡하지만 태양에서 일어나는 모든 과정을 수학적으로 다루고 설명하는 태양 표준 모형(standard solar model)으로 잘 설명되고 있는데 John Norris Bahcall(1934-2005)은 이러한 태양 표준모형에 대한 업적으로 매우 잘 알려져 있다.^[2] 태양 내부에서는 여러 순환과정의 핵융합 반응이 일어나는데, 수소 cycle(양성자-양성자 순환과정, PP-1), 탄소 cycle(탄소-탄소 순환과정, PP-2), ${}^4\text{Be}$ 이 전자를 포획하는 대신에 양성자를 흡수하는 PP-3 cycle로 구성되어 있다. 기본적으로 태양에서는 전자중성미자(electron-neutrino, ν_e)만 생성된다. 태양 내부에서 만들어진 중성미자는 다른 물질과 상호작용을 거의 하지 않으면서 태양 바깥쪽으로 빠져 나와 지구에 도달한다. 따라서 이런 중성미자를 지구에서 바로 관측할 수 있다면, 현재 태양 내부에서 어떤 일이 일어나고 있는지에 관한 많은 정보를 실시간으로 알 수 있는 것이다. 망원경을 사용하지 않고 태양 내부를 알 수 있다는 의미에서 중성미자 천문학(neutrino astronomy)의 탄생이라고 볼 수 있다.

1960년대에서부터 물리학자들은 태양에서 발생한 중성미자를 관측하려고 하였다. 한 예로, 2002년 노벨 물리학상을 수상한 원래 화학자인 Raymond Davis Jr.는 미국 South Dakota주 Homestake 금 광산에서 약 600톤 염화탄소(C_2Cl_4) 액체 검출기를 완성하여 태양 중성미자 관측을 제안하였고 시도하였다. 태양에서 날아온 중성미자가 반응을 하면 액체 속의 염소(${}^{37}\text{Cl}$) 원자가 아르곤 (Ar)으로 변화($\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$)가 되는데 이를 이용하여 마침내 태양 중성미자 관측에 성공하였

REFERENCES

- [1] SNO experiment web page. <http://www.sno.phy.queensu.ca/>.
- [2] J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault and S. Basu, *Astrophys. J.* **555**, 990 (2001).

Fig. 1. Comparison of solar neutrino capture rate as a function of time between theoretical prediction and data.

다.^[3] 그런데, 그림 1처럼 SNO 실험 이전 ~30년 이상 동안의 태양 중성미자 실험들은 태양 표준 모형 예상치보다 적은 수(약 $\sim 1/3$ 수준)의 태양 중성미자를 관측해 왔다.^[4] 이론에서 불확정성의 정도를 줄이고 실험의 정밀도를 높여도 어떻게 하든지 이 간격을 좁힐 수가 없었다. 그래서 대부분의 연구자들은 태양 표준모형과 데이비스 실험을 의심하기 시작하였는데 이것이 유명한 “태양 중성미자 문제 혹은 수수께끼(solar neutrino problem or puzzle)”이다. 이 문제로 인해 J. N. Bahcall의 태양 표준 모형에 대한 연구는 더욱더 정교하게 심화되었고 이론 정밀도에 대한 믿음도 크게 향상되었다. 한편 데이비스 실험에서 관측된 중성미자가 태양에서 온 것인지 혹은 검출기에 생성된 아르곤 추출 효율의 부정확성 때문인지에 대한 의문을 가지게 되었다. 데이비스는 이를 테스트하기 위해서 500개의 아르곤 원자를 검출기에 투입하여 과연 몇 개나 추출할 수 있는지에 대한 실험을 하였는데, 놀랍게도 거의 다 추출하는데 성공하여 실험에 대한 신뢰도 역시 높일 수 있었다.^[5]

1987년부터 일본 Kamiokande 실험에서 태양 중성미자 관측을 시작하였는데 예상값의 $\sim 1/2$ 정도만 측정하여 데이비스의 태양 중성미자 부족함을 다시 한 번 확인하였다. 이 당시에는 중성미자가 물질과 매우 미약하게 상호작용하여 중성미자의 질량이나 여러 성질에 대해 잘 모르고 있었기 때문에 태양 중성미자 문제는 실험의 문제가 아니라 이론적 결함이나 중성미

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000

Fig. 2. Solar neutrino rate released by SNO using heavy water. It was found that about $\sim 35\%$ of the arriving solar neutrinos are electron-neutrinos and all types of neutrinos are comparable between theory and experiments. (© Photo courtesy of SNO)

자 특성에 기인한다고 생각하게 되었다. 그리하여 여러 실험들이 이 수수께끼를 풀기 위해 계획되고 수행되었다. 1990년대 이태리 Gran Sasso 국립연구소(LNGS)에 위치한 GALLEX/GNO 검출기와 러시아 Baksan 중성미자 관측소(BNO)에 설치된 SAGE 검출기는 갈륨(gallium) 원소를 사용한 radio-chemical 실험들로서 $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$ 반응을 이용하여 측정을 하였는데 이론적 예상값의 $\sim 50\%$ 에 해당하는 중성미자를 검출하였다.^[6-8]

하지만 그림 2처럼 2001년경에 SNO 실험은 30년 이상을 지속해온 태양 중성미자 문제가 드디어 해결되었다고 놀라운 결과를 발표하였다.^[9,10] 태양 중성미자 문제는 중성미자에 대한 근본적인 이해를 넓힘으로써 해결할 수 있었다. 입자물리학의 근간을 이루는 표준 모형(standard model)에 의하면 중성미자는 질량을 가지지 않으며 3가지(전자중성미자, 뮤온중성미자, 타우중성미자) 종류가 있고 이들은 결코 변하지 않는다. 그러

REFERENCES

- [3] R. Davis, D. S. Harmer and K. C. Hoffman, Phys. Rev. Lett. **20**, 1205 (1968).
- [4] B. T. Cleveland *et al.*, Astrophys. J. **496**, 505 (1998).
- [5] R. Davis, Prog. Part. Nucl. Phys. **32**, 13 (1994).
- [6] W. Hampel *et al.* (GALLEX collaboration), Phys. Lett. **B447**, 127 (1999).
- [7] M. Altmann *et al.* (GNO collaboration), Phys. Lett. **B616**, 174 (2005).
- [8] A. I. Abazov *et al.* (SAGA collaboration), Phys. Rev. Lett. **67**, 3332 (1991).
- [9] Q. R. Ahmad *et al.* (SNO collaboration), Phys. Rev. Lett. **87**, 071301 (2001).
- [10] Q. R. Ahmad *et al.* (SNO collaboration), Phys. Rev. Lett. **92**, 181301 (2004).

Fig. 3. Neutrino oscillation. Three types of neutrinos exist & mixing among them. One type of neutrino can change into another type.

나 그림 3처럼 1968년 Pontecorvo가 중성미자가 질량을 가진다면 한 종류에서 다른 종류로 변환할 수 있다고 가정을 하였다.^[11] 태양에서 방출된 전자중성미자가 진동변환에 의해 날아오면서 다른 종류(뮤온중성미자, 타우중성미자)로 변환되면 당시 전자중성미자 정도만 측정할 수 있었기 때문에 예측값보다 적게 관측한다는 것이다. 또한 물질(matter) 내에서 진동변환은 진공에서와는 다른 MSW(Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein) 효과를 생각할 수 있는데, 데이비스, 카이오칸데, GALLEX, GNO, SAGE 및 Borexino 실험 등이 이런 효과에 대한 증거를 제공하였다.^[12,13]

1987년 마젤란 대성운에 있는 초신성(1987A)이 폭발할 때 방출된 중성미자가 Kamiokande와 IMB 실험에서 검출되었고 중성미자가 질량을 가질 수도 있다라는 것을 암시하였다. 카이오칸데 검출기는 약 10초 동안 12개를, IMB 검출기는 약 6초 동안 8개를 관측하였다.^[14,15] 검출된 개수가 적어서 결론을 낼 수 없었지만 초신성 중심부가 수축하면서 중성미자를 방출한다는 이론적 예측을 잘 설명할 수 있었고 별의 진화나 초신성 폭발 이론 검증에 대한 인류의 최초 시도에 큰 의미를 부여할 수 있다.

그런데 중성미자 진동변환의 최초의 증거는 1998년 일본 Super-Kamiokande(SK) 실험 결과에서 나왔는데, 카이오칸데 실험의 성공으로 검출기에 5만 톤의 물을 채워 체렌코프 방사선(Cherenkov radiation)을 이용한 슈퍼-카이오칸데 실험을 건설하였다. 지구 밖에서 날아온 우주선(cosmic ray)이 지구 대기에 있는 입자들과 충돌하면 중성미자가 생성되는데 모든 방향에서 생성된 중성미자가 SK 검출기에 도달한다. 검출기 바로 위 대기에서 생성된 중성미자는 20~30 km 정도를 날아오

Fig. 4. Angular distribution of neutrino events having energy of 5-20 MeV with respect to the Sun at Super-Kamiokande. The angle, θ_{sun} , is calculated between the direction of observed electron and the direction from the Sun. (© Photo courtesy of SK)

고, 지구 반대편 대기에서 생성된 중성미자는 약 1만 3천 km 정도를 날아온다. 대기 위쪽에서 날아온 경우는 중성미자가 진동하지 않았을 때 예측값과 비슷하였고, 지구 반대편에서 날아온 경우는 예측값의 절반만이 관측되었는데, 이것은 중성미자가 날아오는 거리에 따라 진동변환 세기가 달라진다는 결과와 일치하는 획기적인 것이었다.^[16] 이것은 중성미자 진동변환을 처음으로 보여준 결과이며 중성미자 질량 존재를 입증하는 매우 의미가 큰 결과이다. 그림 4는 체렌코프 방사선 신호의 경우 중성미자가 날아온 방향성과 에너지에 대한 정보를 실시간으로 잘 재구성할 수 있음을 보여준다.

SK 검출기에서도 태양 중성미자를 검출하였는데 하루에 ~15개 정도를 측정하였고, 이것은 태양 표준 모형이 예측하는 ~40% 정도에 해당하는 것이었다. 태양 중심부에서 생성된 전자중성미자가 태양을 통과한 후 지구까지 날아오면서 뮤온중성미자와 타우중성미자로 변환하는 것을 나타내는 것이라고 볼 수 있다. 하지만 이 결과로 태양 중성미자의 진동변환이 입증되었다고 확신할 수는 없었다. 여전히 태양 표준 모형의 오류나 중성미

REFERENCES

- [11] V. N. Gribov and B. Pontecorvo, Phys. Lett. B28, 493 (1969); S. M. Bilenky and B. Pontecorvo, Phys. Rep. 41, 225 (1978).
- [12] L. Wolfenstein, Phys. Rev. D 17, 2369 (1978).
- [13] S. P. Mikheev and A. Y. Smirnov, Sov. J. Nucl. Phys. 42, 913 (1985).
- [14] K. Hirata *et al.* (Kamiokande-II collaboration), Phys. Rev. Lett. 58, 1490 (1987).
- [15] R. M. Bionta *et al.* (IMB collaboration), Phys. Rev. Lett. 58, 1494 (1987).
- [16] S. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. 81, 1158 (1998); S. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. 86, 5651 (2001).

Fig. 5. The image of Sun through neutrino events detected at the Super-Kamiokande. Due to the angular resolution of the SK detector, the Sun does not look point-like. However, the central pixels of the image are much brighter than the others. (© Photo courtesy of SK)

Fig. 6. The seasonal variation of the solar neutrino flux measured at Super-Kamiokande. The solid line is the prediction based on the eccentricity of the Earth's orbit. (© Photo courtesy of SK)

자의 진동 변환이 아닌 다른 이유 때문에 중성미자의 양이 줄어 들 수 있다는 가능성을 완전히 배제할 수는 없었기 때문이었다. 하지만 1998년 대기 중성미자의 진동 변환 발견으로 인해 태양 중성미자 문제도 진동 변환에 의한 것으로 간주되는 분위기가 조성되었다.

관측된 태양 중성미자를 날아온 방향에 따라 픽셀을 나누고 각 픽셀마다 측정된 태양 중성미자의 양을 색깔을 도입해서

Fig. 7. The KamLAND detector. Outer layer consists of an 18 meter-diameter stainless steel containment vessel with an inner lining of 1,879 PMTs, each 50 centimeters in diameter. Inner layer consists of a 13 m-diameter nylon balloon filled with a liquid scintillator. A 3.2 kiloton cylindrical water Cherenkov detector surrounds the containment vessel. (© Photo courtesy of KamLAND)

그림 5처럼 그릴 수 있다. 수퍼-카미오칸데 검출기의 각도 분해능 때문에 비교적 넓게 보여, 실제 태양 모습보다 크게 보이지만 육안이나 천체 망원경으로 관측하는 태양 빛은 표면에서 방출되는 것에 비해 중성미자는 태양 내부의 핵융합 반응에 의한 것이므로 태양 내부의 모습을 실시간으로 볼 수 있다는 것은 매우 놀라운 사실이다. 그림 6은 계절에 따른 태양 중성미자 측정량을 보여준다. 지구는 태양을 중심으로 타원 궤도를 공전하고 있는데 지구와 태양의 거리(L)가 약 1.7% 정도 변화하므로 태양 중성미자 관측량이 $1/L^2$ 에 비례하여 최대 ~7% 변화할 것이라는 예상과 일치한다.^[17]

드디어 마침내 태양 중성미자 진동변환의 명확한 결과는 2001년에 SNO에서 발표를 하였다.^[9,10] 관측된 중성미자를 자세히 조사한 결과 ~35%가 전자중성미자였고 나머지는 뮤온 중성미자와 타우중성미자였다. 이것은 태양 내부의 핵융합 과정에 기초한 태양 표준 모형이 예측한 결과와 매우 잘 맞는 것이었고 중성미자는 질량이 없다는 기존 표준 모형의 수정을 알리는 것이었다.

태양 중성미자 진동 변환은 KamLAND(Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) 실험에 의해 검증되었다. 그림 7처럼 KamLAND 검출기는 일본 Toyama 근처 Kamioka 광산 관측소에 위치하며 1000톤의 액체섬광검출용액(liquid scintillator)을 사용하여 역 베타 붕괴 반응(inverse beta de-

REFERENCES

- [17] Y. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande collaboration), Phys. Rev. Lett. **82**, 2430 (1999).

Fig. 8. SNO detector. SNO used 1000 tones of ultra-pure heavy water contained in a 12 meter diameter acrylic sphere vessel. The volume was monitored by 9,500, 20 cm in diameter, photo-multiplier tubes mounted on a geodesic support structure. The detector is immersed in light normal water within a 30 meter barrel-shaped cavity excavated from the rock. (© Photo courtesy of SNO)

cay, IBD, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)에 의한 반전자중성미자(antielectron-neutrino)를 ~1990여 개의 PMT를 사용하여 검출하려는 목적을 가지고 있다. 일본에 있는 ~50여 개의 원자력 발전소에서 방출하는 중성미자가 평균적으로 약 ~180 km 떨어진 곳에 위치한 KamLAND 검출기로 날아올 때 진동 변환의 유무를 자세히 조사하였다. 그 결과 태양 중성미자 진동 변환 현상과 정확히 일치하는 진동 변환 상수를 측정하였다.^[18,19]

Sudbury Neutrino Observatory(SNO) 검출기

SNO 검출기는 그림 8처럼 지름이 12미터가 되는 아크릴 통에 중성미자 검출 물질로 1000톤의 중수(heavy water, D_2O)가 채워져 있다. 중성미자가 중수와 충돌해서 체렌코프 방사선(Cherenkov radiation) 신호를 발생하는데 주위를 둘러싸고 있는 9660여 개의 광증폭관(photomultiplier tube, PMT)에 의해 검출된다. 검출기는 배경사건(background)을 줄이기 위해 매우 깨끗한 환경에서 작동을 하며 외부에서 오는 우주선(cosmic rays)을 차폐하기 위해 광산의 깊은 곳에 위치한다.

SNO 실험은 경수(light water, H_2O , 물)를 사용한 SK 실험과는 달리 중수를 사용하고 있는데, 중수는 양성자와 중성자가 모여 핵을 이루는 중수소(Deuterium, 2H 또는 D) 원자로 이루

Fig. 9. Charged-current reaction. A neutrino converts the neutron in a deuteron to a proton. The neutrino is absorbed in the reaction and an electron is produced. The electron will emit Cherenkov radiation.

어져 있다. 따라서 중성미자의 종류에 관계없이 양성자와 중성자의 결합에너지(binding energy)보다 큰 에너지를 가진 중성미자가 입사하면 양성자와 중성자로 쪼갤 수가 있다. 이때 생성된 중성자가 다른 원자에 포획(capture)되면서 방출하는 빛(gamma ray)을 검출하면, 모든 종류의 중성미자를 관측할 수 있는 장점을 지닌다. 1999년부터 2006년까지 데이터를 수집하였고, 지하 실험실은 SNOLAB로 확대되었고, SNO 실험은 SNO+ 실험으로 모든 시스템을 개선하고 중수 대신 선형알킬벤젠(linear alkyl benzene, LAB, $C_nH_{2n+1}-C_6H_5$, $n=10\sim13$) 기반 액체섬광검출용액을 사용해서 진행될 예정이다.^[20]

중성미자 반응

SNO 검출기에서 일어나는 중성미자 반응은 크게 세 가지로 분류할 수 있다.

1. 하전류 반응(charged-current reaction)

그림 9처럼 중성미자가 입사해서 중수소(deuteron)와 충돌한다. 이 과정에서 게이지 보손(W^+) 입자를 주고받으며 중성자는 양성자로 중성미자는 전자로 변환된다. 태양 중성미자의 에너지는 뮤온이나 타우입자의 질량보다 적기 때문에 오직 전자중성미자만 반응에 참여한다고 볼 수 있다. 반응 후 양성자는 상대적으로 무겁기 때문에 입사된 중성미자 에너지의 대부분을 전자가 가지고 간다. 생성된 전자는 그림 10처럼 체렌코프 방사선을 방출하는데 이 신호가 PMT에 도달하고 증폭된다. 체렌코프 방사선은 사방으로 방출되지만, 사건을 잘 재구성하면 중

REFERENCES

- [18] K. Eguchi *et al.* (KamLAND collaboration), Phys. Rev. Lett. **90**, 021802 (2003).
- [19] T. Araki *et al.* (KamLAND collaboration), Phys. Rev. Lett. **94**, 081801 (2005).
- [20] SNOLAB experiment web page. <https://www.snolab.ca/>.

Fig. 10. SNO solar neutrino event. When a neutrino strikes the heavy water of the SNO detector, Cherenkov radiation is emitted and makes a cone surround the spherical vessel of heavy water. (© Photo courtesy of SNO)

Fig. 11. Neutral-current reaction. The neutral Z^0 boson is a mediator. The interaction breaks the deuterium nucleus and liberates the proton and the neutron.

성미자가 들어오는 방향성에 대한 정보도 알 수 있는 장점을 지닌다.

2. 중성류 반응(neutral-current reaction)

그림 11처럼 입사된 중성미자가 중수소를 해체시켜 완전히 양성자와 중성자로 분리시켜 버리는 과정으로 Z^0 게이지 보손이 이 반응에 관여한다. 이 반응에서는 세 종류의 모든 중성미자가 민감하고 동등하게 관여하는 것에 주목해야 한다. 생성된 중성자는 중수와 충돌하면서 에너지를 점점 잃게 되면서 열중성자(thermal neutron)화 되고 결국 중수소 핵(deuterium nucleus)에 포획될 때 약 ~ 6 MeV에 해당하는 빛의 형태로 에너지 방출한다. 만약에 경수에 포획되면 ~ 2 MeV의 에너지를 방출하지만 이것은 6 MeV에 해당하는 문턱에너지(threshold energy)를 넘지 못하기 때문에 검출이 되지 않는다. 방출된 빛은 전자와 충돌해서 콤프톤(Compton scattering) 산란을 일으키고 가속된 전자는 체렌코프 방사선을 통해 최종 검출되는 과정을 거친다.

Fig. 12. Electron scattering reaction. All three neutrinos can participate in this reaction through the exchange of the neutral Z^0 boson and electron-neutrinos can also participate with the exchange of a charged W boson.

3. 전자 산란 반응(electron scattering reaction)

그림 12처럼 중성미자가 원자 내의 전자와 충돌해서 에너지를 전달하는 과정이다. Z^0 게이지 보손 교환을 통해 세 종류 모든 중성미자가 반응에 관여한다. 또한 전자중성미자의 경우는 W 게이지 보손을 통해서도 반응할 수 있어 전자중성미자 반응 확률이 상대적으로 높다고 볼 수 있다. 생성된 전자의 방향은 태양에서 진행해온 중성미자 입사 방향성과 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 유용한 정보를 제공한다.

실험 결과 및 해석

중수를 사용한 SNO 검출기는 세 종류의 중성미자를 다 검출할 수 있고, 특히 전자중성미자에 대한 정보를 잘 재구성할 수 있다. 그래서 중성미자에 대한 선속(flux)과 에너지 스펙트럼 측정을 통해 중성미자들 사이에 변환 정도를 알아낼 수 있다. 2001년경에 SNO 실험 최초의 결과가 발표되었는데, 이론에서 예측한 값과 실험 측정값이 매우 잘 일치하는 것과 태양 중성미자 진동변환에 대한 최초의 명백한 증거를 보여주었고 이것은 중성미자가 질량을 가지고 있다는 것을 암시하는 것이었다.^[9,10] 물론 1998년에 Super-Kamiokande 실험에서 진동변환에 대한 결과를 이야기는 하였지만, 확실하게 결론을 맺지는 못했고, 태양 중성미자에 대한 결과도 아니었다.^[16] 2001년 발표된 논문은 현재 2100회 이상의 인용횟수를 기록하고 있고, 2004년 논문도 1000회를 넘는 인용횟수를 가지고 있다.

- Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory (2001).^[9]

2015년 노벨물리학상: 춤추는 중성미자

- Measurement of the total active ^8B solar neutrino flux at the Sudbury Neutrino Observatory with enhanced neutral current sensitivity (2004).^[10]

Art McDonald (1943~현재)

2015년 일본 동경대 ICRR 연구소 Takaaki Kajita 교수와 노벨 물리학상을 공동수상한 Art McDonald의 약력을 간단히 소개하면 다음과 같다.

- 캐나다 Nova Scotia 주에 있는 Dalhousie 대학 학부(1964), 석사(1965) 졸업 후 미국 Caltech(1969) 박사 졸업하고 Princeton 대학을 거친 후 1989년부터 캐나다 Kingston에 있는 Queen's University에 재직 후 현재는 명예교수이다.
- 1989년부터 현재까지 SNO director로 주도적으로 실험을 이끌어 왔으며 태양에서 날아온 전자중성미자가 뮤온중성미자 혹은 타우중성미자로 변환하는지 직접 관측 시작했고, 2001년 기념비적인 논문을 발표하였다.

- 중성미자 진동변환과 중성미자가 질량을 가진다는 사실을 보인 공로로 2015년 노벨 물리학상을 수상하였다.
- 태양 중성미자 문제를 해결한 선도적인 연구자로 기억하면 될 것 같다.

맺는말

30년 이상 풀리지 않았던 태양 중성미자 문제를 해결한 SNO 실험은 중성미자의 진동 변환과 질량 존재를 직접적으로 입증하는 첫 번째로 실험 결과라고 볼 수 있다. 중성미자의 질량이 존재한다는 SNO 및 기타 다른 실험 결과로 인해 중성미자의 질량이 없음을 가정한 기존 입자 물리학의 표준 모형은 수정되어야 하고 대통일 이론과 같은 새로운 소립자 물리학 존재를 시사하며 실험적으로 검증할 수 있는 기회를 제공하였다는 점은 매우 의미가 크다고 볼 수 있다. 뿐만 아니라, 중성미자 질량 존재는 우주 팽창과 암흑물질의 한 후보로서도 중요성을 가진다.