2015년 노벨물리학상: 춤추는 중성미자

국내 중성미자 진동변환 실험: RENO

DOI: 10.3938/PhiT.24.056

서 선 희

Reactor Experiment for Neutrino Oscillation in Korea

Seon-Hee SEO

RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) is designed to measure the smallest neutrino mixing angle θ_{13} by using reactor electron antineutrinos from the Hanbit nuclear power plant in Yonggwang, Korea. In 2012, RENO and Daya Bay independently measured that angle with a significance of about 5σ . This was one of the big breakthroughs in neutrino history and suggested a direction for future neutrino experiments. RENO has been taking data continuously since 2011 and plans to take a total of 5 years of data to reach the originally-planned precision of the measurement. Thanks to the success of RENO a future reactor neutrino experiment, RENO-50, with an 18-kton liquid scintillator detector could be launched in Korea to determine neutrino mass ordering and to perform other very interesting neutrino measurements.

저자약력

서선희 교수는 현재 서울대학교 BK 조교수로서 2014년부터 재직 중이며 RENO 실험에서 중성미자 연구를 주로하고 있으며 최근에 CMS 실험에도 참여하기 시작했다. 박사학위는 미국 미네소타대학교(Twin cities campus)에서 Fermilab fixed target 실험(E835)을 공동 수행하여 charmonium에 관한 연구로 2004년에 받았다. 이후 2004년부터 2007년까지는 박사후 연구원으로 펜실베이니아 주립대학교에서 남극에 기반을 둔 중성미자 천체실험인 IceCube에서 공동연구를 수행하였고, IceCube global trigger 책임자로 활동하였고 또한 우주에서 오는 타우 중성미자 탐색에 대한 연구를 IceCube 그룹 내에서 처음 개척하였다. 이후 2007년부터 2012년까지는 스웨덴 스톡홀름대학교 조교수로 역시 IceCube 실험을 다른 공동 연구원들과 함께 수행하였으며 타우 중성미자 탐색에 주력하였고 암흑물질 탐색에도 참여하였다. 2012년부터 2013년까지는 Brain Pool 초빙교수를 거쳐 한국중성미자 연구센터 연구부교수로서 RENO 중성미자실험에 공동 연구원으로 참여하여 왔다. (shseo@phy.snu.ac.kr)

서 론

입자물리학의 표준모형에 의하면 중성미자는 빛(광자)처럼 질량이 없다. 하지만 1957년 Bruno Pontecorvo는 중성미자가 질량을 가지고 있으며 이 증거로 중성미자가 진동변환을 한다고 처음으로 예측하였다.^[1] 이후 1962년에 일본의 Maki, Nakagawa, 그리고 Sakata 세 사람에게 의해 이것이 수학적으로 확립되었다.^[2] 입자물리학의 표준모형에 따르면 중성미자는 세 가지 종류(전자 중성미자, 뮤온 중성미자, 타우온 중성미자)가 있는데 이를 중성미자의 flavor라고 한다. 다른 입자와는 달리 중성미자의 mass eigenstate(m_1, m_2, m_3)는 위의 세 가지 flavor eigenstate와 일치하지 않아서 이 두 가지 eigenstate들을 연결해주는 matrix를 생각할 수 있는데, 위 네 명의 물리학자들에 의해 만들어진 PMNS matrix가 그것이다.^[2] 이 PMNS matrix를 구성하는 요소들이 중성미자의 진동변환 파라미터들, 즉, θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , Δm_{12}^2 , Δm_{23}^2 , 그리고 δ_{CP} (CP 대칭성 깨짐 상수)이고 그 값들을 측정하기 위해 여러 가지 실험들이 수행되어져 왔다.

1998년 일본의 Super-Kamiokande(Super-K) 실험은 우주선(cosmic ray)에 의해 대기에서 생성된 뮤온 중성미자가 예측된 것보다 적게 관측됨으로써 우연히 이 진동변환을 실험적으로 처음 발견하게 되었다.^[3] 이어 2003년에 캐나다 Sudbury Neutrino Observatory(SNO)에서는 태양에서 만들어지는 전자 중성미자가 지구에 도달할 때 다른 flavor로 바뀌는 것을 처음으로 측정하였다.^[4] 이로써 Super-K는 θ_{23} 진동변환각을 SNO

REFERENCES

- [1] B. Pontecorvo, Zh. Eksp. Theo. Fiz. **34**, 247 (1957) [Sov. Phys. JETP **7**, 172 (1958)].
- [2] Z. Maki, M. Nakagawa and S. Sakata, Prog. Theor. Phys. **28**, 870 (1962).
- [3] 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).
- [4] Q. R. Ahmad *et al.* (SNO collaboration), Phys. Rev. Lett. **87**, 071301 (2001); Q. R. Ahmad *et al.* (SNO collaboration), Phys. Rev. Lett. **92**, 181301 (2004).

는 θ_{12} 진동변환각을 측정하게 되었는데(이 두 실험들이 2015년 노벨물리학상 공동 수상), 나머지 하나 남은 진동변환각인 θ_{13} 는 그 값이 작아 측정이 어려워 2012년까지만 해도 측정되지 않았고 여러 가지 model들에 의존한 예측만이 난무하였다. 이 θ_{13} 는 원자로에서 만들어지는 전자 반중성미자에 의해 잘 측정될 수 있고, 마침내 2012년에 중국의 Daya Bay와 한국의 RENO(Reactor Experiment for Neutrino Oscillation) 실험들에 의해 각각 독립적으로 5σ 레벨에서 이 각을 처음 측정하게 되었다.^[5,6]

측정된 θ_{13} 값은 다른 진동변환각들보다는 훨씬 작지만 또한 너무 작지는 않아서 이 값과 연관된 중성미자 질량순서결정과 중성미자 CP 대칭성 깨짐 상수를 측정하는 것이 가능하게 되어 중성미자 분야의 새로운 도전적인 실험들의 서막을 여는 것이 가능하게 되었다. 따라서 θ_{13} 값의 측정은 그 자체로서의 의미뿐만 아니라 그 파급효과를 생각할 때 중성미자 분야의 커다란 쾌거가 아닐 수 없다.

아래에서는 중국과 거의 동시에 그러나 독립적으로 θ_{13} 를 측정한 한국의 RENO 실험을 소개하고 RENO에서 얻은 최신 결과를 논하며, 마지막으로 한국의 중성미자 분야가 나아가야 할 방향에 대해 기술하였다.

RENO 실험 소개

RENO는 현재 국내 11개 대학과 연구소(경북대, 경상대, 광주과학기술대, 동신대, 서영대, 서울대, 성균관대, 세종대, 중앙대, 전남대, IBS)에 소속된 약 30명 정도의 연구원들과 학생들로 구성된 공동 연구팀이고 2006년에 교육과학기술부로부터 116억 원의 연구비를 받아 전라남도 영광 한빛 원자로 근처에 중성미자 검출기를 건설하기 시작해 2011년 검출기를 완공하여 그 이후부터 현재까지 데이터를 계속 받아 분석해오고 있다. 경쟁상대인 중국의 Daya Bay가 약 250명으로 구성된 국제 연구팀이고 연구비 또한 우리의 약 6배가 많이 들었음을 고려할 때, RENO가 2012년에 Daya Bay와 거의 동시에 내 놓은 첫 결과는 그 자체만으로도 많은 의미를 던져주고 있다. 앞에서 언급한 바처럼 두 실험의 첫 결과들은 중성미자 분야에 큰 획을 긋는 사건이었으며 버클리 대학에서 2년마다 갱신하는 Particle Data Book에 RENO 결과가 실리는 영광을 누리게 되었다. 아래에서는 RENO 실험에 대해 좀 더 구체적으로 설명하고 데이터 분석 원리와 2015년 새 결과 및 미래 계획에 대해 얘기하고자 한다.

1. RENO 실험 장소

RENO 실험은 원자로에서 만들어지는 중성미자를 이용하기

Fig. 1. (Top) the six reactors (red dots) in the Hanbit nuclear power plant in Yonggwang, Korea, and the two identical RENO detectors (yellow dots) located in the near and far sites. (Bottom) side-view of the two detectors underneath of two hills with 70 and 200 m heights for the Near and Far detectors, respectively.^[7]

때문에 이 실험을 수행하기 위해서는 가동 중인 원자로가 필요하다. 한국에 네 군데의 원자력 발전소가 있는데 그 중에서도 전라남도 영광에 있는 한빛 원자력 발전소가 있는 곳이 RENO 검출기를 설치할 가장 좋은 지리적 조건을 충족하였기에 채택되었다. 한빛 원자력 발전소에는 총 6개의 원자로가 있고 이들은 약 260 m 간격으로 일렬로 배열되어 있다(그림 1 참조). 이 6개의 원자로가 모두 가동하면 총 생산되는 열적 파워는 약 16.8 기가와트(GW_{th})이며 원자로의 연료인 4개의 동위원소들(^{235}U , ^{239}Pu , ^{238}U , ^{241}Pu)이 핵분열을 해서 나오는 중성미자는 기가와트당 대략 총 2×10^{30} 개이다. 엄청난 개수의 중성미자가 원자로에서 만들어지지만 중성미자는 약한 상호작용을 하기 때문에 충돌 단면적 cross-section이 작아서 이들을 검출하기 위해서는 검출기가 클수록 좋고 또한 들어오는 중성미자 개수가 많을수록 좋다.

REFERENCES

- [5] F. P. An *et al.* (Daya Bay Collaboration), Phys. Rev. Lett. **108**, 131801 (2012).
- [6] J. K. Ahn *et al.* (RENO collaboration), Phys. Rev. Lett. **108**, 191802 (2012).
- [7] J. K. Ahn *et al.* (RENO collaboration), arXiv:1003.1391 (2010).

Fig. 2. (Top) schematic of the RENO detector with a side cross-sectional view.^[6] The detector is a cylindrical shape and consists of four different regions of enclosed cylinders like the Russian dolls. See text for the explanation of each region. (Bottom) photo of the RENO detector.

2. RENO 검출기

RENO 실험에서는 이러한 중성미자들을 검출하기 위해 총 2개의 검출기를 이용하는데 하나는 원자로에 가까운 곳(294 미터)에 그리고 나머지 하나는 멀리 떨어진 곳(1383 미터)에 위치해 있다. 이 두 개의 검출기들은 최대한 동일한 크기, 모양, 그리고 성질을 가지도록 제작되었다. 가까운 곳에 있는 검출기(근거리 검출기, near detector)는 원자로와 가까이 있어서 방출되는 중성미자의 flux를 정확하게 예측하는데 쓰이고, 먼 곳에 있는 검출기(원거리 검출기, far detector)는 중성미자가 먼 거리를 진행하는 동안에 진동을 하여 다른 중성미자로 변환되고 남은 것을 측정하는데 쓰인다. 두 검출기들 간의 거리를 정확히 측정하면 근거리 검출기에서 측정된 중성미자 개수로 중성미자의 진동변환이 없을 때 원거리 검출기에서 검출될 중성미자 개수를 정확히 예측할 수 있다. 근거리 검출기로부터

예측된 원거리 검출기상에서의 진동변환이 없을 때의 중성미자 개수와 실제로 진동변환이 일어나고 남은 중성미자의 측정된 개수 차이를 이용하여 중성미자 진동변환상수 θ_{13} 를 측정하게 된다. 이처럼 근거리 검출기를 이용하여 원거리 검출기의 진동변환을 예측하므로 두 검출기가 동일하면 할수록 측정의 오차는 더욱 상쇄되게 된다. RENO는 경쟁상대이던 중국의 Daya Bay와 프랑스의 Double Chooz 실험들보다 몇 년 늦게 후발 주자로 시작했지만 두 개의 동일한 검출기로 2011년 제일 먼저 데이터를 받아 세계를 깜짝 놀라게 만들었고 특히 가장 강력한 경쟁상대이던 중국의 Daya Bay 실험을 크게 자극하는 계기를 만들어 θ_{13} 측정값이 2012년에 보다 빨리 나올 수 있게 되었다.

그림 2(top)은 RENO 검출기의 측면도이고 그림 2(bottom)은 검출기 실물사진이다. RENO 검출기는 원통형이며 총 네 부분으로 이루어져 있다. 제일 안쪽부터 시작해서 타겟(target), 감마캐처(γ -catcher), 버퍼(buffer), 그리고 비토(veto) 영역으로 나뉜다. 타겟은 16톤의 섬광액체(liquid scintillator)로 채워져 있고 약 0.1% 정도의 Gadolinium(Gd)이 용해되어 있다. 감마캐처는 29톤의 섬광액체로 채워져 있고, 버퍼는 64톤의 미네랄 오일(mineral oil)로 채워져 있으며 비토 영역은 355톤의 정화된 물로 채워져 있다. 타겟과 감마캐처는 각각 아크릴 용기에 담겨 있으며 버퍼는 스테인리스스틸 용기에 담겨져 있고 비토는 콘크리트에 둘러싸여 있다. 버퍼의 스테인리스스틸 용기 벽에는 총 354개의 광센서 photo multiplier tube(PMT)가 장착되어 있어서 중성미자가 반응하여 내 놓는 입자들의 최종 반응 결과물인 감마선을 검출하는데 쓰인다. 비토영역에도 총 64개의 PMT가 있어서 비토영역을 지나는 백그라운드인 cosmogenic muon을 검출하는데 쓰인다. 검출기에 대한 더 자세한 사항들은 [7]을 참조하기 바란다.

3. 중성미자 반응

원자로에서 나오는 중성미자의 에너지는 [0, 12] MeV 영역에 걸쳐 분포를 가지고 있으며 4 MeV 부근에 가장 많은 중성미자가 있다. 이 중 1.02 MeV 이상의 에너지를 가지는 중성미자는 타겟에 있는 양성자와 역베타붕괴(inverse beta decay) (IBD; $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) 반응을 하게 되는데 이때 나오는 입자들은 양전자(e^+)와 중성자(n)이다. 이때 양전자는 중성미자 운동에너지의 거의 대부분을 가져가고 중성자는 O(10 keV)를 가져가므로 양전자의 운동에너지 측정은 중성미자의 에너지 측정을 대체할 수 있게 된다. 양전자는 타겟에 있는 전자와 즉시 쌍소멸하여 감마선(1.02 MeV+양전자 운동에너지)을 내놓고 중성미자는 양전자-전자 쌍소멸 후 평균 약 30 μ sec 후에 타겟에 0.1% 존재하는 Gd에 포획되면서 약 8 MeV의 감마선을 내놓게 된다. 양

전자-전자 쌍소멸시 나오는 감마선을 prompt signal(S1)이라 하고 중성자가 Gd에 포획되면서 나오는 8 MeV 감마선을 delayed signal(S2)이라 부른다. 따라서 S1과 S2 에너지에 해당하는 조건과 두 시그널들 간의 시간차를 조건으로 주면 중성미자 IBD 반응의 시그널을 잡아낼 수 있게 된다. S1과 S2 에너지는 각각 [0.75, 12] MeV와 [6, 12] MeV를 요구하고 시간차이는 [2, 100] μsec 를 충족하는 이벤트들만이 중성미자 시그널 후보로서 선택된다. 이 조건들을 적용하여 중성미자 시그널 후보를 선택하는 것을 IBD pairing이라고 한다.

4. 백그라운드

우리가 관심 있는 것은 중성미자 시그널의 검출이고 위에서 언급한 바처럼 IBD pairing 조건을 주고 이벤트를 선택하면 많은 백그라운드들을 걸러낼 수 있게 된다. 하지만 여전히 시그널 선택조건을 동시에 만족시키는 백그라운드 이벤트들이 남아있게 되는데, 정확한 θ_{13} 측정을 위해서는 조금 남아있는 백그라운드들일지라도 잘 제거하여야만 한다. 이 백그라운드에는 네 가지 종류가 있는데 accidental, fast neutron, $^9\text{Li}/^8\text{He}$ 백그라운드들과 ^{252}Cf 백그라운드가 그것들이다.

Accidental 백그라운드는 검출기나 그 주변에서 만들어진 radio-active 감마가 우연히 S1 에너지 조건을 만족시키고, 검출기나 그 주변에서 생성된 중성자가 S2 에너지 조건을 만족시키면서 동시에 S1, S2 간의 시간 차이가 우연히 [2, 100] μsec 를 만족시키는 이벤트들이다. 이 이벤트들의 에너지 분포는 accidental 이벤트들이 많은 control sample에서 얻게 되고 그 양은 S1과 S2간의 거리 분포를 통해 추정한다. 이 백그라운드의 대부분 이벤트들은 3 MeV 이하에 있다.

Fast neutron은 cosmogenic muon이 검출기 주변을 지나갈 때 검출기를 둘러싼 바위나 검출기 자체에서 만들어진이다. 이것이 검출기 안 타겟 내부에 들어오게 되면 양성자와 충돌하여 양성자가 recoil하여 나오는 감마가 S1 에너지 조건을 만족시키고, 충돌한 후 중성자가 thermalize 되면서 Gd에 포획되어 S2 시그널을 만들어낸다. 이 백그라운드는 S1의 에너지를 50 MeV까지 늘려 IBD pairing을 하고 중성미자 시그널이 없는 영역인 20 MeV부터 50 MeV까지의 에너지 분포를 flat하게 피팅하여 이 함수를 중성미자 시그널이 있는 낮은 에너지 영역으로 확장하여 그 안에 얼마만큼의 fast neutron 백그라운드가 있는지 추정해낸다.

$^9\text{Li}/^8\text{He}$ 은 showering muon이 타겟에 있는 섬광액체의 구성성분 중의 하나인 carbon을 때려 나오는 동위원소들이다. 이들은 불안정하여 붕괴하면서 곧 바로 (β, n)쌍을 내놓게 되면서 S1, S2 시그널을 만들어내게 된다. 이 백그라운드의 에너지 분포는 $^9\text{Li}/^8\text{He}$ 이 많은 control sample에서 얻고 그 양

Table 1. Summary table of the RENO 500 day data analysis. The units of all the rates are per day.

Detector	Near	Far
DAQ livetime	489.93 days	458.49 days
Accidental background rate	6.89 +/- 0.09	0.97 +/- 0.03
Fast neutron background rate	2.28 +/- 0.04	0.48 +/- 0.02
$^9\text{Li}/^8\text{He}$ background rate	8.36 +/- 0.82	1.54 +/- 0.23
^{252}Cf contamination rate	—	0.14 +/- 0.03
Total background rate	17.54 +/- 0.83	3.14 +/- 0.21
IBD candidate events	290775	31541
IBD rate after background subtraction	616.67 +/- 1.44	61.24 +/- 0.42 /day

은 중성미자 시그널이 적은 6 MeV 이상의 에너지 분포를 IBD 후보 이벤트들의 그것과 비교해 추정해 낸다.

RENO에서는 검출기의 에너지 calibration을 위해 radioactive 소스 데이터를 주기적으로 받는다. ^{252}Cf 도 그 radioactive 소스 중의 하나인데 2012년 9월경에 소스데이터를 받던 중 소스를 담고 있는 케이스의 O-ring이 헐거워져서 ^{252}Cf 의 아주 작은 양 일부가 검출기 안으로 새어나가게 되었다. ^{252}Cf 는 중성자를 만들어내는 소스라서 S1 에너지에 해당하는 accidental 이벤트가 이 중성자가 포획되기 전 100 μsec 내에 발생하게 되면 중성미자 시그널 이벤트로서 선택되게 되는 상황이 발생한다. 500일치 근거리 데이터는 ^{252}Cf 에 오염되지 않았고, 원거리 데이터도 아주 적은 양만이 오염되었다.

표 1에는 2011년 8월부터 2013년 초반까지 받은 데이터 중 분석에 쓸 수 있는 500일치의 데이터에 대한 시그널과 위에서 기술한 네 가지 백그라운드들이 정리되어 있다. 원, 근거리 모두 가장 많은 백그라운드는 $^9\text{Li}/^8\text{He}$ 이고 그 다음이 accidental 백그라운드이다.

그림 3은 S1 시그널의 에너지 분포(에러바가 있는 검은 히스토그램)를 근거리와 원거리 데이터에 대해 보여준다. 네 가지 백그라운드의 에너지 분포도 층으로 쌓아 올린 히스토그램으로 나타내져 있다. 그림 안쪽에 들어가 있는 작은 그림은 큰 그림의 y축을 로그 스케일로 바꾸어 그린 것이고, 이는 아주 적은 양의 백그라운드들을 잘 드러내 보이게 하기 위함이다. 근거리와 원거리 데이터의 백그라운드는 IBD 시그널 후보 이벤트의 각각 약 2.8+/-0.1%와 4.9+/-0.3% 들어있는 것으로 추정되었고 최종 데이터 분석을 위해 이들 백그라운드들은 각자 백그라운드의 에너지 분포에 따라 제거하게 된다. 그림 4는 백그라운드 제거 후 원거리 S1 시그널 에너지 분포(black dots with error bars), 역시 백그라운드를 제거한 근거리의 결과를 이용하여 원거리상에서 진동변환이 없을 때 예상되는 S1 시그널 에너지 분포(blue histogram), 그리고 백그라운드를

Fig. 3. (a) The energy distribution of the prompt, S1, signal in the near detector is represented as a black histogram with error bars. The four backgrounds are shown as stacked histograms. The inset plot is the corresponding log-scale plot to show the small amount of background better. (b) The same as the top plot but with far data.

제거한 근거리의 결과를 이용하여 원거리상에서 진동변환이 있을 때(바로 다음에 논의될 best fit 값 이용하여) 예상되는 S1 시그널 에너지 분포(yellow histogram)를 보여준다.

RENO 실험 결과

앞에서 얻은 중성미자 시그널과 백그라운드 측정값들을 이용해 θ_{13} 와 $|\Delta m_{ee}^2|$ 파라미터 스페이스에 있는 Monte Carlo 시뮬레이션 샘플들과 비교하여 χ^2 피팅을 통해 가장 작은 χ^2 값을 주는 θ_{13} 와 $|\Delta m_{ee}^2|$ 값들을 구해내게 된다. 데이터 분석은 두 가지 방법으로 할 수 있다. 한 가지는 시그널이벤트 개수만을 고려하는 rate-only analysis이고 다른 하나는 시그널이벤트 개수뿐만 아니라 중성미자 에너지 분포도 고려하는 rate+shape analysis이다. Rate-only analysis에서는 $|\Delta m_{ee}^2|$ 값을 이미 다른 실험에서 측정된 값으로 고정시킨 후 θ_{13} 값만을 구하는 반면에 rate+shape analysis에서는 시그널의 에너지 분포가 $|\Delta m_{ee}^2|$ 값에 대한 정보를 제공하기 때문에 θ_{13} 와 $|\Delta m_{ee}^2|$ 값 모두를 결정할 수 있게 된다.

Fig. 4. Top: the energy distribution of the prompt (S1) signal. The far data is represented as black dots with error bars, the prediction in the far with no oscillation (the best fit oscillation) using near data is represented as a blue (yellow) histogram. Bottom: the dots with error bars represent the ratio of the far data and the prediction in the far with no oscillation using near data in the top panel. The yellow line represents the ratio of the prediction in the far with the best fit oscillation and that with no oscillation.

RENO가 2012년에 첫 데이터 분석으로 얻은 결과는 rate-only analysis 방법을 이용한 것이고 그 때 얻은 값은 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.113 \pm 0.013(\text{stat.}) \pm 0.019(\text{syst.})$ 인데 이것은 총 220 일치 데이터 분석에 대한 결과이다.^[6] 아주 최근에(2015년 11월) RENO는 약 500일치 데이터를 가지고 데이터 분석을 다시 하였고 rate-only analysis에 대한 결과는 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.087 \pm 0.009(\text{stat.}) \pm 0.007(\text{syst.})$ 이고 rate+shape analysis에 대한 결과는 $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.082 \pm 0.009(\text{stat.}) \pm 0.006(\text{syst.})$ 와 $|\Delta m_{ee}^2| = (2.62 \pm 0.21 - 0.23(\text{stat.}) + 0.12 - 0.13(\text{syst.})) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 이다. 2012년 결과와 비교할 때 에러 범위 내에서 일치하고 또한 이번 새 결과에서는 2012년 결과에 비해 $\sin^2(2\theta_{13})$ 의 통계적 에러뿐만 아니라 systematic 에러가 특히 많이 향상되었음을 알 수 있다. 그림 5에서 $\sin^2(2\theta_{13})$ 과 $|\Delta m_{ee}^2|$ 2차원 공간상에서 χ^2 best fit value(dot)와 1σ , 2σ , 그리고 3σ 범위 내에서 허용된 범위를 나타내는 contour들을 볼 수 있다.

RENO 데이터분석 계획

RENO의 제일 첫 $\sin^2(2\theta_{13})$ 측정값은 약 220일 데이터를 이용하였고 이때 측정된 값의 precision은 20.4%였으며 이는 4.9 시그마에 해당한다. 이번엔 새로 약 500일치 데이터를 이용하여 업데이트한 $\sin^2(2\theta_{13})$ 측정값의 precision은 13.4%

Fig. 5. Contour plot in the 2-dimensional space of $\sin^2(2\theta_{13})$ and $|\Delta m_{ee}^2|$ using 500 days of RENO data. The best-fit value from the rate+shape (rate-only) analysis is represented as a dot (cross). The contours represent the allowed regions of oscillation parameters by 68.3%, 95.5%, and 99.7% C.L. in the order of the innermost to the outermost. The top pane is the $\Delta\chi^2$ distribution of the $\sin^2(2\theta_{13})$ and the right pane is the $\Delta\chi^2$ distribution of the $|\Delta m_{ee}^2|$. The vertical (horizontal) shade in the top (right) pane represents 1σ region.

(7.5σ)이고 $|\Delta m_{ee}^2|$ 측정값의 precision은 약 10%(10σ)이다. 이러한 측정값들의 에러를 줄여 precision을 좋게 하는 것은 중요한데 그 이유는 중성미자의 다른 진동변환 파라미터들을 좀 더 잘 측정하는데 도움을 줄 뿐만 아니라 중성미자 질량순서 그리고 중성미자 CP 대칭성 깨짐 상수를 측정하는데 도움을 주기 때문이다. RENO 실험의 궁극적 목표는 총 5년치 데이터를 받아 이를 이용하여 $\sin^2(2\theta_{13})$ 값의 precision을 약 5%로 낮추고 $|\Delta m_{ee}^2|$ 값의 precision은 약 4%로 낮추는 것이다. RENO는 2015년 11월 현재 총 약 1360일치(약 3.7년)의 데이터를 받았고 2016년 말이나 2017년 상반기까지 계속해서 데이터를 더 받을 예정이다.

RENO 실험을 넘어서

RENO는 한국 최초의 중성미자 검출기이고 장비의 설계부터 제작, 설치, 운영 및 데이터 분석을 모두 국내 물리학자들에 의해서 진행해온 실험으로서 전 세계 중성미자 분야에 커다란 획을 긋는 결과를 내놓았다. 앞에서 RENO와 Daya Bay 실험에 의한 θ_{13} 의 2012년 최초 측정이 중성미자 분야에 끼치는 영향에 대해서 얘기했는데 중성미자의 질량순서 결정과 중성미자 CP 대칭성 깨짐 상수의 측정이 가능하게 되었다는 것이 그것이다. 따라서 θ_{13} 의 최초 측정 이후부터 세계 중성미자 분야는 이 두 가지를 측정하기 위한 거대 실험들을 구상하고 준비하고 있다. 이 중에서 중성미자의 질량순서 결정은 원자로에서

Fig. 6. Possible neutrino mass orderings. Left (right) represents a normal (inverted) ordering where the ν_3 is the heaviest (lightest). Each mass eigenstate neutrino consists of mixture of three flavors of neutrinos represented as three colors.

나오는 중성미자들을 이용하여 실험을 할 수 있고 반면에 중성미자 CP 대칭성 깨짐 상수 측정은 가속기를 필요로 한다. 한국은 중성미자 실험을 수행할 만한 가속기는 없지만 원자력 발전소들이 이미 있기 때문에 중성미자의 질량순서 결정을 하는 실험을 하는 것이 가능하다. 그림 6은 중성미자 질량순서 결정이 무엇인지를 보여준다. 중성미자의 절대적 질량은 아직 측정되지 않았으나 중성미자들 간의 질량차이, 즉 Δm_{12}^2 와 $|\Delta m_{13}^2|$ 는 측정되었다. $|\Delta m_{13}^2|$ 에서 Δm_{13}^2 에 절대값이 붙는 이유는 ν_3 질량이 ν_1 질량보다 큰지 작은지 아직 모르기 때문이고 이것을 결정하는 것이 중성미자 질량순서 결정이다.

이 측정을 위해서는 검출기의 위치를 원자로에서 대략 50~60 km 떨어진 곳에 놓아야 하는데 이 거리에서는 중성미자 진동변환이 아주 많이 일어나고 또한 늘어난 거리만큼 중성미자의 flux도 $1/r^2$ 로 줄어들게 되어 검출기 크기를 상대적으로 크게 하여야만 한다. 이 새로운 미래 실험 프로젝트의 이름은 RENO-50이고 여기서 50은 50 km 정도 떨어진 지점에 검출기를 놓는다는 의미이며, 전라남도 나주의 금성산(해발 450 미터)이 한빛 원자로에서 약 47 km 지점에 떨어져 있어 이 산 아래에 검출기를 설치할 예정이다. 중성미자 검출기를 산 아래에 놓는 것이 중요한데, 그 이유는 산이 대기에서 생성된 뮌 백그라운드를 걸러주기 때문이다. 산이 높으면 높을수록 더 많은 뮌 백그라운드를 걸러주기 때문에 실험에 더 좋은 지리적 환경이 된다. 실험 장소에 마땅한 산이 없다면 땅 아래 깊숙이 터널을 만들어 지하공간을 만들어야 하는데 산 아래에 짓는 것보다 훨씬 많은 비용이 든다.

RENO의 타겟이 16톤인 반면에 RENO-50은 18,000톤으로

Fig. 7. A conceptual design of the RENO-50 detector. It has a cylindrical shape and consists of three enclosed cylinders. Unlike RENO there is no Gd in the target liquid scintillator. See text for more details.

계획하고 있는데 여기서 예상되는 중성미자 검출 개수는 진동 변환을 고려할 때 일 년에 약 10,000개인데 이는 RENO 원거리 검출기에서 일 년에 검출되는 개수의 약 반 정도보다 조금 작은 숫자에 해당한다. 그림 7은 RENO-50 검출기의 개념도를 보여주고 있는데 검출기는 지름과 높이가 동일한 실린더형이고

총 세 겹의 실린더들로 이루어져 있다. 제일 안쪽 실린더는 타겟이며 18,000톤의 섬광액체로 채워지며 중성미자의 IBD process가 일어나는 곳이다. 타겟 바로 바깥쪽은 버퍼영역이며 미네랄 오일로 채워질 것이며 여기에 총 15,000개의 PMT (하나당 20인치 크기)들이 버퍼의 벽에 달려 중성미자 시그널을 읽어낼 것이다. 제일 바깥쪽은 비토 영역이며 몇 번의 필터과정을 거쳐 깨끗이 정화된 물로 채워질 것인데 콘크리트벽에는 20인치 크기를 가진 1000개의 PMT들을 달아 검출기를 지나가는 뮤온 이벤트를 잡아낼 것이다.

RENO-50은 중성미자 질량순서 결정에 관한 측정뿐 아니라 중성미자 진동변환 파라미터들을 훨씬 더 정확히 측정할 것이며, 제 4의 중성미자 탐색, 태양 및 지구에서 나오는 중성미자 검출, 초신성 폭발시 나오는 중성미자 검출 등 다목적으로 쓰일 예정이다. 현재 삼성재단에서 받은 연구비로 RENO-50 실험을 향상시키기 위한 R&D를 시작하였고, 만약 이 실험에 필요한 전체 연구비를 정부가 지원한다면 내년부터 실험을 위한 공사가 시작될 수 있고 2021년부터는 실험데이터를 받을 수 있을 것으로 예상된다. RENO-50이 실현된다면 RENO에서 갖고 닦은 실력을 바탕으로 국제 학계에서 중성미자 분야를 통하여 한국의 기초과학이 한 번 더 크게 빛을 발할 수 있는 절호의 기회가 될 것이다.