중성미자 물리학의 근황과 전망

DOI: 10.3938/PhiT.19.052

김 정 옥

Neutrino Physics: Present and Future

Chung Wook KIM

After a brief history of three neutrinos, the past measurements of neutrino mass in the laboratory are summarized. Some selected results and their implications of the past and current neutrino oscillation experiments are elucidated, with short comments on the future directions of neutrino physics and astrophysics.

역 사

Beta 붕괴 과정에서 암시된 에너지와 스핀통계 보존의 문제를 해결하기 위하여 Pauli가 1930년 중성미자의 존재 가능성을 Tübingen 학회 참석자들에게 유명한 “Dear Radioactive Ladies and Gentlemen”로 시작하는 편지로 호소한 지 벌써 80년이 지났다. 그러나 지금까지 알려진 우주구성입자 중에서 광자 다음으로 수가 많은 중성미자는 아직도 가장 신비로운 입자라는 영광스러운(?) 자리를 차지하고 있다. 그 이유는 모든 입자에 영향을 미치는 중력을 제외하면 중성미자는 약 상호작용만을 하는 유일한 입자이기 때문이다. 그래서 겨우 존재하는 입자라는 애칭도 갖게 되었다. Pauli는 처음 이 입자를 중성자(neutron)라고 불렀으나 1932년에 Chadwick이 우리가 알고 있는 중성자를 발견하자 Fermi는 1933년에 neutrino(중성이고 아주 미세한 입자)라고 이름을 고치게 된다. 이 해에 Pauli도 확신이 있어 Solvay 학회에서 정식으로 중성미자에 관한 발표를 하고 천재인 Fermi는 바로 중성미자의 중요성을 인식하여 1934년에 지금도 사용되는 Fermi의 약 상호작용 이론을 발표하게 된다. 그러나 바로 Bethe와 Peierls는 Fermi의 이론을 사용하여 중성미자는 거의 관측이 불가능하다는 비관적인 논문을 발표한다.

저자약력

김정옥 교수는 인디애나대학교 박사(1963)로 현재 미국 Johns Hopkins대와 고등과학원의 명예교수이며 1997년부터 2004년까지 고등과학원 원장을 역임하였다. (cwkim@kias.re.kr)

이때부터 20년이라는 세월이 흐른 뒤에야 비로소 Reines와 Cowan이 10톤이나 되는, 그 당시로서는 어마어마한 검출기를 제작하여 원자로에서 나오는 반전자중성미자($\bar{\nu}_e$) 관측에 성공하게 되어 1956년 6월 Pauli에게 성공의 전보를 보낸다. (처음에는 원자탄의 폭발에서 나오는 중성미자를 사용할 계획도 있었다고 한다.) 이것이 중성미자 물리 실험의 시초가 되겠다. 그러나 Reines(Cowan은 이미 사망)는 40년 후인 1995년에 치매에 걸린 상태에서 노벨상을 받게 되는 비운을 겪는다.

1950년도의 수수께끼 중 하나는, 중성미자가 한 가지만 있다면 $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ 붕괴가 일어날 수 있고 그 당시 실험수준으로 측정이 충분히 가능했음에도 불구하고, 전혀 감지되지 않았다는 것이다. 이 문제를 해결하기 위하여 두 번째의 중성미자인 뮤온 중성미자(ν_μ)를 도입하면 이 붕괴를 억제할 수 있다. 즉 ν_μ 는 ν_e 와 다르기 때문에 (다른 flavor를 가짐) $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n$ 과 같은 반응이(flavor 양자수 보존법칙에 의하여) 불가능하게 된다. 1962년 Brookhaven National Laboratory에서 이 반응이 실제로 억제되어 있다는 사실이 확인됨으로써 ν_μ 의 존재가 확립되었다. 이 업적에 대한 노벨상은 20년 후인 1988년에 Lederman 등에게 주어진다. 첫 번째 중성미자 발견보다 두 번째 중성미자 발견이 먼저 노벨상을 받게 된 데에는 여기서 이야기할 수 없는 숨은 이유가 있다. 한편 1974년에는, 이미 알려진 u, d, s quark 이외에 charm(c) quark가 극적으로 발견되어 quark와 lepton의 1세대(u, d와 e, ν_e)와 2세대(c, s와 μ , ν_μ)가 확립된다. 그러나 이 두 세대의 존재이유는 큰 수수께끼가 되었다. (Rabi의 유명한 “Who ordered that?”은 이때 나온 말이다.)

바로 그 이듬해인 1975년 Perl이 Stanford Linear Accelerator Center에서 세 번째 charged lepton인 τ 를 발견하여 quark와 lepton의 3세대의 존재를 암시하였다. (Perl은 Reines와 같이 1995년 노벨상) 바로 이어 b와 t quark가 발견되고 ν_τ 는 확인되지는 않았지만 그 존재는 아무도 의심하지 않았다. 그 후 25년이 지난 2000년에서야 Fermilab에서 ν_τ 가 τ 를 만들어내는 반응을 관측함으로써 quark와 lepton의 3세대가 완성된다. 과연 3세대에서 끝이 나는 것일까? 중성미자의 세대수 즉 flavor 수는 여러 가지 방법으로 알아낼 수 있으나 가장 정확한 방법은 약한 상호작용을 매개하는 Z 입자의 붕괴과정을 조사하는

일이다. 이중 $\nu + \bar{\nu}$ 로 붕괴되어 관측이 불가능한 과정을 간접으로 측정할 수 있는데, 이로부터 중성미자의 종류가 몇 개인지 확인할 수 있다. 1996년 CERN의 LEP에서 발표된 중성미자 flavor 수는 $N_\nu = 2.9840 \pm 0.0082$ 로서 질량이 4.5 GeV 이하인 중성미자는 정확히 ν_e , ν_μ 그리고 ν_τ 밖에 없다는 것이다. 왜 3세대에서 끝이 나는지는 여전히 수수께끼다.

중성미자의 질량

중성미자가 질량을 가지고 있는지를 가리는 일도 예상과 달리 복잡한 과정을 거치게 된다. Pauli가 처음 도입했을 때는 ν 의 질량은 전자의 질량 정도라고 하였으나 1933년 Solvay Conference에서는 질량이 없을 수도 있다고 했다. 그 후 수십 년에 걸친 실험에서는 주로 에너지 방출량이 가장 적은 beta 붕괴인 ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$ 의 전자의 에너지 스펙트럼을 사용하여 ν_e 의 질량을 측정하였다. 지금까지의 실험들을 종합한 결과는 $m(\nu_e) < 2 \sim 3$ eV로서 질량의 상한치만 알려져 있다. 그러나 지금은 측정 장치와 피할 수 없는 체계적인 오차들의 한도에 도달하여, 상한치를 더 내리기 위해서는 획기적으로 새로운 장치와 idea가 필요시 되고 있다. 거대한 Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment(KATRIN)이 한 예로서 상한치를 10분의 1까지 줄일 수 있다고 하나 여러 가지로 어려움이 많다고 한다. 한편 π 와 τ 의 붕괴에서 관측된 질량의 상한치는 각각 $m(\nu_\mu) < 0.17$ MeV와 $m(\nu_\tau) < 18.2$ MeV로서 매우 높고 앞으로의 전망도 그리 밝지는 않다. 이런 붕괴에서 생성되는 중성미자는 모두 에너지가 커서 질량 측정에는 한계가 있는 것이다.

한편 중성미자의 질량 유무를 확인하는 다른 방법은 $\beta\beta$ 붕괴를 관측하는 일이다. 여러 원자핵 중 ${}^{76}\text{Ge}$, ${}^{100}\text{M}$, ${}^{36}\text{Xe}$ 등은 몹시 드물지만 ν 없이 전자 두 개만 방출되는 가능성이 있다. (이 붕괴과정의 반감기는 약 10^{20-22} years로 추정됨) 이것이 neutrinoless double beta-decay이며 이 붕괴는 중성미자 자기 자신이 반입자인(self-conjugated) Majorana 입자일 때에만 가능하다. 아주 어려운 실험으로 지금까지 이 붕괴는 관측되지 않았으며 그 결과로 얻어진 질량의 상한치는 $m(\nu: \beta\beta) < 0.3 \sim 1.0$ eV로 표시된다. 원자핵구조의 복잡성과 붕괴의 희귀성 때문에 신뢰성이 좀 떨어지기는 하나 앞으로 기대되는 분야이며 많은 실험들이 현재 진행 중이다. 우리나라에서도 이 실험을 곧 시작할 예정이다.

위에서 언급한 모든 질량 값들은 중성미자 고유질량인 m_1 , m_2 , m_3 들이 아니고 이들의 복잡한 합성으로 주어지며, 고유질량 값들은 자세히 분석한 후에야 제값을 알 수 있게 된다. 중성미자의 질량은 초신성 폭발과 우주론에도 영향을 미친다. 초신

성 폭발(1987A)에서 나온 중성미자 관측으로부터도 질량의 상한치가 얻어지는데 아직 상한치는 $5 \sim 10$ eV 정도이며, 우주론에서의 질량 측정은 앞으로도 전망이 밝다. 이는 태초에 생성된 “relic neutrino”가 우주와 은하들의 생성과정에 미치는 영향을 연구하는 것으로 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe(WMAP) 등의 최근 결과에 의하면 세 개의 중성미자 질량의 합은 $\sum_{i=1,2,3} \nu_i \lesssim 0.6$ eV이다. (즉, 이 값을 증가하면 천문관측과 모순이 된다는 것이다.) 1990년대부터 시작된 실험인데 벌써 실험실에서 얻어진 측정치를 증가한다. 중성미자 질량에 대한 가장 중요한 결과는 다음에 기술하는 neutrino oscillations에서 얻어지는데, 이는 지금까지 상한치만을 제공하는 실험들과는 완전히 다른 물리현상이다.

중성미자의 진동 (Neutrino Oscillation)

중성미자의 진동 혹은 탈바꿈은 flavor 양자수를 바꾸는 현상으로 $K^0 - \bar{K}^0$ 의 strangeness 양자수의 진동에서 잘 알려진 바와 같은 양자역학적 현상이다. 이러한 진동은 quark들이 약한 상호작용을 할 때 나타나는 flavor 고유상태가 질량 고유상태의 혼합으로 되어 있어서 일어나는 현상이다. 중성미자들에게도 같은 현상이 일어날 수 있다는 가정 하에 1960년대부터 Pontecorvo, Maki, Nakagawa와 Sakata가 선두가 되어 중성미자 진동 연구가 시작되었다. (새로운 현상의 개념은 처음에는 언제나 어려운 것이다. 이들도 처음에는 몹시 혼동이 되었던 것 같다. 우리가 지금 쓰고 있는 간단한 양자역학의 공식도 몇 년의 세월이 흐른 뒤에서야 유도되었음) 입자 중에서 중력을 제외한 약 상호작용만을 하는 입자는 중성미자 밖에 없다. 즉, 생성이나 검출 과정이 오로지 약 상호작용만으로 이루어진다. 예를 들어 ν_μ 가 π 의 붕괴에서 생성될 때에 상호작용이 약 상호작용이기 때문에 definite flavor를 가진 ν_μ 가 나오게 된다. 이 flavor 고유상태는 특정한 질량, m_1 , m_2 , m_3 을 가진 mass 고유상태 ν_1 , ν_2 , ν_3 의 선형합성이다. 이렇게 생성된 중성미자는 특정한 질량이 없고, ν_μ 가 움직일 때는 하나의 운동방정식으로 기술되지 못한다. 가장 가벼운 ν_1 은 ν_2 보다 빨리 움직이고, 가장 무거운 ν_3 은 가장 늦게 움직이게 되어 검출기에 도달할 때는 위상차가 생긴다. 따라서 ν_μ 가 검출기에 도달할 때는 원래의 ν_μ 가 아니고 전혀 다른 ν_1 , ν_2 , ν_3 의 합성으로 ν_μ 이외에 ν_e 와 ν_τ 의 성분도 포함된다. 중성미자가 탈바꿈하는 필요충분조건은 1. 적어도 한 중성미자는 질량이 있어야 하며, 2. 특정 flavor를 가진 중성미자는 mass 고유상태의 선형합성이어야 한다.(즉 mixing이 있어야 한다.)

예를 들어 ν_μ 가 생성되어 거리 L 에 있는 검출기에서 ν_e 를 측정한다고 하자. (간단히 ν_μ 와 ν_e 만 있는 두 세대의 경우를

생각하자.) 검출기는 ν_1 과 ν_2 의 차이에서 생기는 phase 때문에 $(E_1 - E_2)$ 를 감지한다. 중성미자의 질량은 p 에 비하면 극소치이기 때문에 $E_i \simeq E + \frac{m_i^2}{2p}$ 이고 $E_2 - E_1 \simeq \frac{m_2^2 - m_1^2}{2p} \simeq \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E}$ 가 되어 탈바꿈의 정도는 이 값의 함수가 된다. 그리고 물론 거리 L 과 혼합각(mixing angle)도 들어가게 된다. 간단한 계산에 의하면 ν_μ 가 생성되어 거리 L 에 있는 검출기에서 ν_e 로서 감지되는 확률은 $P(\nu_\tau \rightarrow \nu_e) = \sin^2(2\theta_{e\mu})\sin^2(\Delta m_{21}^2 L/4E)$ 이 된다. 여기서 $\Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$. 이 공식에 의하면 우선 $\sin(\theta_{e\mu})$ 가 어느 정도 커야 하며 $(\Delta m_{21}^2 L/4E)$ 의 값이 $\frac{\pi}{2}$ 에 가까울수록 관측이 용이하다. 지난 수십 년 동안 수많은 실험이 이루어졌으나 1998년까지 아무도 관측에 성공하지 못했다. 문제는 E 와 L 의 값은 실험환경에서 주어지지만 어느 환경이 좋은지 알 길이 없었고, $\theta_{e\mu}$ 와 Δm_{21}^2 에 대해서는 전혀 알지 못해 장님이 코끼리 만지는 격이었기 때문이다. 돌이켜 보건데 거의 대부분의 실험이 (너무 많아 여기에 열거하지도 못할 정도) 거리 L 이 너무 짧았다.

지금까지 중성미자 진동을 관측하는데 성공한 실험들은 다음과 같다. 첫째 실험은 1998년 일본 Kamioka에 위치한 거대한 Water Cerenkov Detector인 Kamiokande(Kamioka Nucleon Decay Experiment)와 Super-Kamiokande(Kamiokande의 열 배 크기)에서 관측된 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 의 진동이다. 우주선의 양성자가 대기에 들어와 공기와 충돌하여 생성되는 pion들이 자연 붕괴되어 부산물로 ν 들이 생성된다. 이것이 대기 중성미자다. 이때 생성되는 ν_μ 와 ν_e 의 기대치는 약 2:1, 에너지는 100 MeV부터 100 GeV까지. 이 중성미자는 1960년도부터 인도의 Kolar 금광과 South Africa에 있는 금광에서 관측되었으며, 1980년도에는 Kamiokande와 IMB(Irvine, Michigan, Brookhaven) 등의 실험 장치에서도 관측되기 시작한다. 이들 검출기들은 원래 양성자의 stability를 연구하는 nucleon decay detector였다. 1987년 기대하지 않았던 초신성 1987A의 폭발이 있었고, 이로부터 나온 중성미자가 Kamiokande와 IMB 등에서 관측되고 Kamiokande의 설계자인 Koshiba가 후에 태양 중성미자 관측의 성공과 더불어 2002년에 Neutrino Telescope의 창시자로 노벨상을 받게 된다. Kamiokande와 Super-Kamiokande에서 1990년도에 진행된 대기 중성미자 실험에서는 예상치보다 적은 ν_μ 와 예상치와 같은 ν_e 의 수가 관측이 되어 중성미자의 진동의 실마리를 보였다. 가장 결정적인 실험은 Super-Kamiokande의 실험으로, 대기에서 생성되어 바로 위에서 내려오는 ν_μ 와 지구 반대쪽에서 생성되어 아래로부터 올라오는 ν_μ 의 비대칭을 측정하는 것으로 중성미자 ν_μ 가 지구를 통과하여 검출기에 도달하는 동안 ν_τ 로 탈바꿈하여 ν_μ 의 개수가 감소한다는 것을 확

인하고 중성미자의 진동과 중성미자의 질량 존재를 입증하는 실험이다. (ν_e 는 이 조건에서는 진동을 거의 안함) 이 실험의 결과는 다음과 같다.

$$\Delta m_{32}^2 \equiv m_3^2 - m_2^2 \simeq 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(\theta_{\mu\tau}) = 0.5$$

이 결과에 일조를 한 실험은 K2K(KEK to Kamioka)로서 Tsukuba에 있는 KEK에서 만들어진 평균 에너지가 1.3 GeV인 ν_μ 를 250 km 떨어진 Super-Kamiokande로 보내는 실험이며 대기 중성미자 실험의 환경을 인공적으로 일부 재현한 것이다. (실험결과는 위의 값에 반영됨) 이 실험은 가속기에서 생성된 중성미자의 진동을 처음 관측한 실험이다. Fermilab에서 만들어진 ν_μ 를 730 km 떨어진 Soudan, Minnesota에 있는 MINOS(Main Injector Neutrino Oscillation Search)에서 감지하는 실험도 일조를 한다. 위 결과의 중요한 점은 중성미자가 확실히 진동하고 있으며, 따라서 질량이 있다는 것이 확인된 것이다. (그러나 질량의 절대 값은 구할 수 없다.) 질량의 존재 때문에 지금까지 찬란한 성공을 자랑했던 표준모델은 수정이 불가피하다. 이 모델은 중성미자의 질량이 없다고 가정한 것이기 때문에 상당한 수정이 필요하다. 그리고 놀라운 사실은 $\theta_{\mu\tau}$ 의 값이 거의 45°이기 때문에 ν_μ 와 ν_τ 는 최대로 혼합되어 있다는 것이다. 이것은 quark의 mixing과는 전혀 다르다, 그 이유는 무엇일까?

두 번째 실험은 역사적으로 더 오래된 실험이며 태양의 중심핵에서 일어나는 핵융합 반응으로 생성되는 중성미자(ν_e)의 관측이다. 1970년 Bahcall은 태양에서 만들어진 중성미자의 개수를 계산하였고, 그의 권유로 Davis는 미국 Idaho의 Homestake 금광 속에 615 ton의 Cl_2Cl_4 (흔히 쓰는 세탁제)가 들어있는 Cl detector를 설치하여 태양 중성미자를 측정하기 시작했다. 초기에는 외롭고 힘든 실험이었으며, 다른 물리학자들의 관심도 끌지 못했다. (Davis는 화학자) 오랜 관측에도 실험치는 언제나 Bahcall의 이론치의 30%에 불과했다. 사용된 반응은 $\nu_e + \text{Cl} \rightarrow \text{Ar} + e^-$ 로서 excited state에 있는 radioactive Ar을 조심스럽게 하나씩 추출하였다. (event는 겨우 이틀에 한 개 정도) 이것이 유명한 태양 중성미자 수수께끼이며 후에 많은 사람들이 band wagon을 타게 된다. 이 공로로 Davis는 2002년에 Koshiba와 함께 노벨상을 받는다. Kamiokande(water)는 1980년도 후반에 가세하고 실험치는 계산치의 약 40%라는 결과를 얻는다. 뒤를 이어 60 ton의 Ga를 사용한 Soviet(former)-America Gallium Experiment (SAGE)가 1990년도에 Baksan에 설치된다. 여기서의 실험치는 이론치의 약 50%에 불과했다. 조금 후에 Italy의 Gran Sasso Tunnel 속에 GALLEX(Gallium Experiment)가 설치되어 이 결과를 확

인한다. Borexino와 GNO에 이어 마지막으로 2000년도에 등장하는 실험은 Canada의 Sudbury Neutrino Observatory (SNO). 이 검출기는 Kamioka의 물 대신 1 kiloton의 pure isotope, D₂O를 사용한다. 그 이유는 중성미자가 충돌하는 물질이 중양자(deuteron)이어서 다른 곳에서는 측정할 수 없는 서로 다른 3가지의 ν_e 반응을 더 검출할 수 있기 때문이다. 이 실험은 결국 태양 중성미자의 수수께끼를 푸는데 결정적인 역할을 하게 된다. 여기서도 반응에 따라 다르나 역시 계산치의 30 – 80% 정도만 검출되었다. 그렇다면 태양 중성미자 수수께끼가 더 미궁으로 빠지는 것 같이 보인다. 해답은 detector들이 모두 태양 중성미자 에너지 스펙트럼의 다른 부분을 측정하고 있다는 사실과 중성미자가 태양을 탈출하기 전에 MSW effect 때문에 탈바꿈을 한다는 사실이다. 이 이론은 1970 – 80년에 Mikheyev, Smirnov와 Wolfenstein이 정리한 것으로 (이 현상도 처음에는 모두, sign의 잘못으로 혼동이 있었음) 중성미자는 물질과 상호작용이 매우 약하지만 태양 속 같이 밀도가 높은 곳을 장거리 통과할 때는 중성미자의 혼합성질 때문에 일종의 공명이 일어난다. 이 공명의 크기는 에너지에 민감한 함수다. 이 이론 때문에 모든 수수께끼가 해결되고 SNO의 측정결과 때문에 Bahcall의 계산에 의존하지 않고 중성미자의 태양 속에서의 탈바꿈이 확고하게 입증된다. 그 결과는 다음과 같다.

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(\theta_{e\mu}) = 0.32$$

위 결과는 최근 일본의 KamLAND(Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector) 장치에서 얻은 결과를 포함하고 있다. 이 실험은 수십 개의 원자로에서 생성되는 중성미자 $\bar{\nu}_e$ 가 $\bar{\nu}_\mu$ 로 탈바꿈한다는 사실을 처음 측정한 실험이 된다. 위 결과에 의하면 $\theta_{e\mu}$ 도 약 35°로 상당한 혼합이 있다.

대기 중성미자 실험 결과와 태양 중성미자 실험 결과를 결합하면 (세 개의 미지수에 방정식은 두 개) Fig. 1에 보인 바와 같이 m_3 와 m_2 를 m_1 의 함수로 나타낼 수 있다. 즉, m_1 을 알면 m_2 와 m_3 는 자동적으로 정해진다. 중요한 결과는 m_1 은 하한치가 없어 zero일 수도 있으나, $m_2 > 8 \times 10^{-3} \text{ eV}$, $m_3 > 5 \times 10^{-2} \text{ eV}$ 이기 때문에 m_2 와 m_3 는 하한치가 있다. 다시 말해, 두 개의 중성미자의 질량은 $8 \times 10^{-3} \text{ eV}$ 보다 커야 한다는 놀라운 결과가 나온다. 즉, m_2 와 m_3 는 $8 \times 10^{-2} \text{ eV}$ 에서 약 1 eV 사이에 있을 가능성이 크게 보인다. 그리고 최근(2010년) KamLAND 실험 결과의 해석에 따르면 $\sin^2(\theta_{e\tau}) = 0.020 \pm 0.016$ 라고 한다. 즉 혼합각 $\theta_{e\tau}$ 가 8°이기 때문에 ν_e 와 ν_τ 의 혼합은 미소하다는 것이다. 다른 실험들과 같이 해석(global analysis)을 하면 $\sin^2(\theta_{e\tau}) = 0.017 + 0.010 - 0.009$ 로 되어 93% CL에서 영이 아니라고 한다. 그러나 이 정도의 정확성으로는 결론을 내릴 수 없다.

Fig. 1. Values of neutrino masses as functions of the lightest mass m_1 . Solid lines correspond to the best-fitted values obtained from two Δm^2 values. Dashed lines enclose 3 sigma ranges.

이 혼합 각이 중요한 이유는 약 상호작용에서 CP 대칭이 과연 quark sector와 같이 깨진다면 진동을 표현하는 공식에 새로운 항이 나타나는데 이 항의 크기는 바로 위의 변수에 비례하기 때문에 아주 중요한 수치다. 지금 건설 중인 한국의 Reactor Experiment for Neutrino Oscillation(RENO)가 이 문제 해결에 결정적인 역할을 할 것이다. RENO는 전남 영광 원자로를 이용하는 실험으로 KamLAND와 달리 근거리(292 m)와 장거리(1380 m)에 동일한 검출기가 있어 더 정확한 실험을 할 수 있는 매우 유리한 조건을 가지고 있다. 그러나 비슷한 조건을 가진 France의 Double-CHOOZ와 중국의 Daya Bay Reactor Experiment가 원자로 실험의 경쟁자들이다. 이것이 RENO가 앞서 가야 하는 중요한 이유다.

전 망

현재 우리가 풀어야 할 큰 숙제들은 당연히 질량의 절대치, $\theta_{e\tau}$ 의 정확한 값, 그리고 CP 대칭의 유무 관측들이다. 좀 더 기술적인 문제로서 소위 sterile neutrinos의 존재 가능성 그리고 중성미자의 질량의 계층성(mass hierarchy) 문제인데 물리학은 실험과학이기 때문에 깊고 넘어가야 할 것 같다. Sterile neutrino는 우리가 잘 아는 중성미자와 달리 약 상호작용마저도 없는 유령 같은 입자다. 이는 아직도 객관적으로 재확인 안 되긴 했지만, 1995년부터 몇 년 계속된 LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) 실험이, 질량이 약 1 eV 정도인 네 번째의 중성미자 비슷한 입자의 존재 가능성을 제시하면서 시작이 됐다. 물론 우리가 아는 보통의 중성미자가 하나 더 있다는 것은 절대 아니다. 상상이 앞서있는 이론에서는 얼마든지 있을 수 있으나 아직도 존재가 확인이 되지 않은 유령 입자다. 1997년에 시작한 Fermilab의 MiniBooster

Neutrino Experiment(MiniBooNE)가 최근 관측한 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 진동의 결과가 LSND 결과와 비슷하게 나왔다고 한다. 그러나 한편 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 에서는 LSND에서 관측되었다는 진동 현상이 없는 것으로 확인되어 이해하기 힘든 결과다. 만약 위의 결과가 사실이라면 입자현상을 기술하는 양자장론의 대 전제인 CTP가 깨져 있다는 중대한 결과가 나온다. 과연 그럴까? CTP 붕괴는 이렇게 크게 나타날 수가 없다. 앞으로 실험치가 정확해지면 자연히 해결될 문제라고 생각한다.

대기중성미자 실험에서는 이론공식의 성질상 실험치로부터 Δm_{32}^2 의 부호를 알아낼 길이 없다. (언제나 이 양의 제공성이 들어가기 때문) 따라서 위에서 가정한 계층성 $m_1 < m_2 < m_3$ 이외에 $m_3 < m_2 < m_1$ 등이 가능하며 전자는 normal hierarchy 후자는 inverted hierarchy라 불린다. 후자의 경우에는 Fig. 1도 약간 달라진다. 정밀실험에서 곧 가려지겠지만 필자의 의견은 inverted hierarchy는 조악하고 물리적 동기가 전혀 없는 것 같고, 조물주가 이렇게 중성미자를 가지고 장난을 칠 것 같지 않다.

앞으로의 전망은 먼저 위에서 언급한 Long-baseline Reactor 실험들이 $\theta_{e\tau}$ 의 값을 알아낼 것이며 다음에 나열하는, 진행 중이거나 건설 또는 꿈의 단계의 Long-baseline accelerator 실험들이 질량의 절대치 이외의 parameter들을 성공적으로 관측하리라고 믿고 싶다.

대부분 실험들이 1000 km에 가까운 거리를 택한 이유는 진동의 모습을 가장 잘 관찰할 수 있고 CP 대칭을 깨는 항에 민감하기 때문이다. T2KK는, 일본 도카이무라의 J-Park에서 생성된 중성미자들이 Super-K를 통과한 후 한국의 경주와 대구 근처를 지나가게 되는데, 한국에서 관측하면 진동실험으로서는 조건이 이상적인 실험이다. 이를 위해서는 한국에 초대형 검출기 건설이 요구되며 지금까지 한국과 일본의 관련 학자들이 세 번에 걸쳐 T2KK workshop을 가졌다. 꿈은 이루어지나?

마지막으로 언급할 것은 중성미자 질량의 절대치 문제다. 앞에서 언급한 바와 같이 기존의 β 붕괴의 스펙트럼을 분석하는 Kurie plot 방법은 KATRIN이 성공하지 않는 한 커다란 벽에 부딪힐 것 같다. 그렇다면 Neutrinoless double beta decay에 희망을 걸 수밖에 없다. 이는 질량측정 이외에도 중성미자가 Dirac형(반중성미자는 중성미자와 다름)이나 Majorana형(반중성미자는 중성미자 그 자신)이나를 판가름하는 중요한 실험이다. 측정이 되면 중성미자는 Majorana형이며 우리가 알고 있는 fermion 중에서 유일한 Majorana형 입자가 된다. 과연 중성미자는 특별한 입자인가? 대부분의 이론이 Majorana형을 예측을 하나 우리의 편리대로 되는 게 자연이 아니기 때문에 이를 규명하기 위하여 이 실험은 계속 되어야 한다.

중성미자는 우주, 은하, 별 진화에 큰 역할을 한다. 우주론에서 처음으로 나온 $\sum_i m_i$ 의 상한치는 1972년에는 13 eV이었다.

Table 1. Long-baseline Accelerator Experiments.

Name	Beam	Detector	Distance
T2K	J-Park Tokaimura	Super-K	295 km
MINOS	Neutrino Main Injector Fermilab	MINOS Soudan Minnesota	730 km
POPERA	CNGS Gran Sasso	OPERA	730 km
ICARUS	CNGS	ICARUS	730 km
DUSEL	NuMI	DUSEL Homestake South Dakota	1000 km
NOvA	MuMI	NOvA US-Canada Border Northern Minnesota	810 km
T2KK	J-Park	S-K, Korea	~1000 km

이 값보다 크면 우리 우주는 알려진 대로 평평한 우주가 아니라 닫힌 우주가 되기 때문이다. 특히 최근에 완료된 WMAP 실험 7년 동안의 데이터에 의하면, 다른 실험들(BOA, 초신성 관측 등)의 약간의 도움으로, 이 상한치는 0.6 eV까지 내려간다. 이 결과는 우주를 구성하는 물질 중 중성미자의 양, 은하계 형성과정, 그리고 우주질량 분포를 나타내는 mass power spectrum을 분석하는 방법으로 얻어지는데, 이는 우주론의 중요한 분야로 등장하여 급성장을 하고 있다. 지금은 은퇴체도에서 외로이 돌고만 있는 WMAP를 대신하여 작년에 발사된 유럽의 인공위성 망원경인 Planck는 WMAP보다 high frequency도 관측하며 데이터는 2011년부터 나올 예정이다. 보다 더 정확한 관측결과가 기대되며, 입자물리학에 앞서 천체물리학이 먼저 질량의 절대치를 찾아내지 않을까 하는 생각도 든다. (지금은 이 두 분야의 구분이 좀 애매모호하게 됐지만)

앞에서 언급한 바와 같이 m_1, m_2, m_3 미지수 세 개를 찾고자 하는데, 물리학이 이미 두 개의 constraints(관계식)를 제공하였고, 마지막 하나를 천체물리학이 찾아내면 질량의 절대치를 알게 된다. 물론 혼합각과 CP (그리고 CTP) 깨짐 등은 입자물리학의 몫이 되겠다.

언젠가 우리 은하계 안에서 중성미자 방출을 동반하는 Type II 초신성이 폭발한다면 1987년에 비하면 지금은 고도로 발달된 검출기가 많이 가동되고 있기 때문에 중성미자의 성질을 지금보다 좀 더 자세히 알게 될 것으로 기대된다.

RENO의 조기 성공을 기대하면서...

REFERENCES

References for these subjects are too numerous to be listed here. For an overview as well as details, see, for example, *Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics*, by Carlo Giunti and Chung Wook Kim (Oxford University Press, 2007).