DUNE, 진동하는 중성미자 그 이상을 찾아서...

DOI: 10.3938/PhiT.26.016

김 시 연

DUNE, Beyond Neutrino Oscillation

Kim SIYEON

The Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) is an oscillation experiment with two detectors, one at the Sanford Underground Research Facility in South Dakota and the other at Fermilab near the source of the neutrino beam. A high-intensity beam flows along the 1300-km-long baseline, expecting that solutions to the problems of mass hierarchy and CP violation in the three-neutrino model can be found at some stage of the experiment. At an Intensity frontier, the DUNE project features high-power beam, liquid-argon time-projection-chamber detectors, and pattern-recognition data analyses using Convolutional Neural Network. The physical targets overcome the framework of three-neutrino oscillation, aiming for ground-breaking discoveries. The far detector will be patiently waiting for neutrinos from a core-collapse supernova in our galaxy and proton decays inside the detector. The near detector, in scanning the high-density beam, helps in understanding neutrino interactions exclusively. In this article, the potential and the current progress of the DUNE are briefly discussed.

중성미자의 질량과 진동실험의 남은 숙제

전자중성미자, 뮤온중성미자, 타우중성미자는 표준모형의 입자이다. 짝을 이루는 경입자들과 약하게 결합하거나, 스스로 중성적 커플링을 하는 정도로 표준모형이 예측하는 반응과정들에서 일관적으로 나타난다. 약한 상호작용에 근거한 반응에서 어떠한 기여를 하는가 계산하고 확인은 가능했으나, 입자의 존재자체를 표현할

정보는 표준모형의 범주에서 구하지 못했다. 중성미자의 질량을 정의할 수 없고 오른손지기(right-handed helicity)가 없다는 비대칭성은, 충돌실험에서 획득한 성공적 정확성에도 불구하고, 표준모형이 여전히 도전해야 할 제한적 유효성을 가지고 있음을 의미했다.

쿼크의 질량을 물리학적으로 표현하기 위해서 약한상호작용하는 쿼크로부터 살짝 변환시켜야 하는데, 이 변환 장치를 CKM¹⁾ 행렬이라고 한다. 즉, 상호작용으로부터 만들어진 쿼크는 바로 질량이 얼마라고 말할 수 없는 양자역학적 사정이 있어서, 변환을 시킨 고유상태들에서 질량을 정의할 수 있다. 물론 이들도 쿼크는 쿼크이다. 같은 논리로, 질량을 정의할 수 있는 중성미자와 상호작용 중성미자는 동일하지 않고, 변환시켜 표현할 수 있다. 중성미자의 변환행렬은 PMNS²⁾라고 부른다. 그런데, 이렇게 질량을 특정할 수 있는 1번, 2번, 3번 중성미자는 더 이상 표준모형의 입자가 아니다. 표준모형은, 오른손지기 중성미자가 없다면 질량이 있을 수 없다는 이론이기 때문이다.

실험을 통해서 중성미자 질량을 확인한다는 것은 표준모형의 범주를 벗어나 새로운 기본입자 세계의 발견을 의미한다. 표준모형에서 탈피하는 현상인 중성미자의 질량을 확인하고 현대물리학에 근거하여 이해한 것은 태양중성미자 검출실험 SNO³⁾와 대기중성미자 검출실험 SK⁴⁾에서 시작되었다. SNO 실험은 태양핵융합의 결과물인 전자중성미자가 태양모델의 예측에 비해 검출량이 많이 부족하다는 미스터리를 풀었다. 태양에서 만들어지지 않은 뮤온중성미자와 타우중성미자도 함께 검출하여, 중성미자의 총량을 고려하면 이론적으로 예측된 중성미자의 입사량과 같고, 종류에 국한하면 3분의 1 정도만 전자중성미자라는 사실을 확인하였다. SK 실험은 우주선(cosmic rays)의 붕괴 결과 지구에 입사하는 대기중성미자를 검출하였다. 파이온이 붕괴하는 과정에서 뮤온 중성미자와 전자 중성미자의 비율이 정해져 있는데, 지구를 관통하기 전후 비율이 달라진 것을 확인한 실험이다.

위와 같은 종류의 실험으로 중성미자의 질량을 이해하는 방법은 다음과 같다. 예를 들면, 태양에서 방출되는 전자중성미자는 질량 1, 2번 중성미자의 혼합상태이다. 앞서 말한 변환에 따르면

저자약력

김시연 교수는 미국 Indiana University, Bloomington(2002)에서 박사 학위를 취득하고 대만 Academia Sinica 국립물리연구소 연구원(2002-2003)을 거쳐 2003년부터 현재 중앙대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 현재 DUNE collaboration의 한국 대표(2016-)를 맡고 있다. (siyeon@cau.ac.kr)

- 1) CKM: Cabbibo-Kobayashi-Maskawa
- 2) PMNS: Potecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata
- 3) SNO: Sudbury Neutrino Observatory
- 4) SK: Super Kamiokande

Fig. 1. Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF). The facilities for the Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) at Fermilab in Batavia, IL and at Sanford Underground Research Facility (SURF) in Lead, SD. ©DUNE

전자중성미자는 질량 1번이 될 수도 질량 2번이 될 수도 있는데, 이 혼합의 정보를 담고 있는 것이 PMNS 행렬이다. 중성미자는 검출장치에 도달할 때까지 두 상태에서 진동을 하며 이동하고, 거리와 에너지에 따라 달라지는 진동위상에 따라서 전자중성미자 검출량에 변화를 주게 된다. 중성미자의 진동은 양자역학에서 배웠던, 다른 에너지 값 때문에 시간의존도가 다른 두 상태의 확률간섭에 해당하는 내용으로서, 에너지 대신에 질량, 시간 대신에 이동거리로 중성미자 진동확률을 설명할 수 있다. 즉, 이동하는 중성미자는 두 질량 상태에서 오락가락하는 진동양상을 보이는데, 진동하는 규칙성은 질량으로 표현된다. 결과적으로 SNO 실험은 $m_2^2 - m_1^2$ 을, SK 실험은 $|m_3^2 - m_1^2|$ 을 측정하였고, 진동의 진폭에 해당하는 PMNS 변환행렬의 두 혼합각을 얻어내었다.

지난 20여 년은 질량을 가진 세 개의 중성미자가 존재한다는 확신을 가지고, 필수적인 질량값 3개, PMNS 행렬의 혼합각 3개와 CP 비대칭 위상을 찾기 위한 다양한 중성미자 진동실험이 진행되었다. 태양중성미자와 대기중성미자의 진동 외의 진동실험의 전형으로서 원자로 핵분열 연쇄반응에서 방출되는 반전자중성미자를 검출하는 원자로 중성미자 실험이 있다. 현재까지 결정된 중성미자 질량관련 물리량을 전형적인 실험의 종류와 함께 정리하면 다음과 같다.^[1]

- $\sin^2 2\theta_{23} \approx 0.50$, $|m_3^2 - m_2^2| \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$,
대기 중성미자 진동실험 (예, SK)
- $\sin^2 2\theta_{12} \approx 0.30$, $m_2^2 - m_1^2 \approx 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$,
태양 중성미자 진동실험 (예, SNO)

- $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0.0023$, 원자로 중성미자 진동실험
(예, Daya Bay, RENO,⁵⁾ Double Chooz)

가속된 양성자가 충돌로 파이온을 생성시키고, 파이온 붕괴 과정에서 만들어진 중성미자 빔을 먼 거리에서 검출하는 소위 장거리(long-baseline) 중성미자 진동 실험들도 질량과 혼합각을 결정하는데 성공적인 기여를 했는데, 위의 세 가지 전형과 달리 중성미자의 에너지, 지구매질의 효과와 비행거리를 물리학적 목표에 따라 선택하여 실험할 수 있는 장점이 있다. T2K⁶⁾와 MINOS⁷⁾는 원자로 중성미자 실험의 성공 전에 혼합각 θ_{13} 를 구하도록 최적화되었던 실험이었는데, 원자로 진동실험 결과와 잘 부합하는 측정에 성공하였다.

마지막 혼합각 θ_{13} 의 측정 이후, 질량을 가진 세 가지 중성미자에 대하여 아직 구하지 못한 물리량은 ① 질량의 절대값 m_1 , ② m_3 와 m_2 의 대소관계(위계 hierarchy라고도 함), ③ CP 비보존 위상이다. 질량제공의 차만 얻을 수 있는 진동실험으로는 ① 질량의 절대값 m_1 을 얻을 수 없다. KATRIN⁸⁾이라는 트리튬 베타붕괴 실험이 질량의 절대값을 측정하기 위해 진행 중이다. ②와 ③ 두 가지 문제는 지구매질효과를 극대화시키는 장거리 가속기 중성미자 진동실험으로 결정할 수 있을 것으로 기대되는데, 차세대 진동 실험들은 자연스럽게 이 문제해결을 최우선과제로 삼는다. 다만, 최근 신뢰도 비교상 정상위계($m_3 > m_2$)가 선호되고, CP 보존은 2σ 수준에서 위배된다는 결과가 NOVA⁹⁾와 SK 실험에서 보고되었다. 새로운 차세대 실험 전이라도, 기존 중성미자 실험의 지속만으로 더 신뢰할 만한 수준으로 개선될 여지도 있다.

향후 20-30여 년의 입자물리학의 패러다임을 겨냥한 차세대 장거리 중성미자 진동 실험으로는 가속기 위치별로, 일본 J-PARC¹⁰⁾에서 만든 중성미자 빔을 이용하는 HK¹¹⁾가 추진 중이고, 미국 페르미 연구소 시설 LBNF¹²⁾ 빔을 이용하는 Deep

REFERENCES

- [1] G. L. Fogli *et al.*, Phys. Rev. D **86**, 013012 (2012).

5) RENO: Reacor Experiment for Neutrino Oscillation
6) T2K: Tokai to Kamioka
7) MINOS: Main Injector Neutrino Oscillation Search
8) KATRIN: KArlsruhe TRItium Neutrino experiment
9) NOVA: NuMI Off-Axis ν_e Appearance
10) J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex
11) HK: Hyper Kamiokande
12) LBNF: Long-Baseline Neutrino Facility

Underground Neutrino Experiment(DUNE)은 이미 승인을 받고 진행 중인 것으로 2015년부터 프로토타입 검출기 제작과 시설구축을 시작하였고, 2028년 주검출기의 데이터 획득을 목표로 하고 있다. 이 실험으로 3가지 중성미자에 관한 한 질량과 모든 변환상수의 규명은 완료되리라 예상한다. 그런데, 2030년 이후의 입자물리학 패러다임을 예상할 때, 그보다 더 기대되는 것이 있다. 탈표준모형의 중성미자 상호작용과 양성자 붕괴, 또한 현재 예측조차 할 수 없는 풍요로운 현상들의 물리학이 숨겨져 있다면, 이러한 수수께끼를 풀어내는데 가능한 입자의 검출방식을 DUNE이 선택하였다는 점이다.

DUNE: Intensity Frontier^[2]

몇 년간의 시간을 두고 대형시설을 가동하여 입자물리학 실험 하나가 종료되면, 그 다음 단계 실험은 새로운 영역을 개척하는 최전선이 된다. 현재 입자물리학이 추진하는 프런티어 방향은 크게 세 가지로 나눌 수 있는데, energy frontier, cosmic frontier, intensity frontier이다. 첫 번째, energy frontier는 Tevatron이나 LHC^[13]와 같은 충돌 실험에서 입자들의 운동에너지 높이는 방향으로 실험이 업그레이드되는 것을 말한다. 두 번째 cosmic frontier는 우주 자체가 실험 환경으로 확대되는 경우를 말하는데, 태양 같은 별이나 은하에서 방출하는 우주선, 감마선, 중성미자들을 검출하는 관측실험들을 가리킨다. 마지막 intensity frontier란 최근 진행 중이거나 추진되는 차세대 중성미자 실험에서 고밀도 고출력 빔을 입사시켜서 신뢰도를 증강시키고 새로운 입자 현상을 탐색하는 도전을 가리킨다.

1. Neutrino Beamline

DUNE은 전 세계 중성미자물리학 연구자들이 중성미자 관련 과학과 양성자 붕괴 연구 등 공동의 목표를 위해 추진하는 입자물리학 최전선 실험이다. DUNE 실험을 위해 마련되는 시설을 특별히 Long-Baseline Neutrino Facility(LBNF)라고 부르는데(그림 1), DUNE을 지원하지만 그 자체로도 독립적 국제 협업 실험이다.^[3] 페르미연구소에서 세계에서 가장 높은 강도의 중성미자 빔을 보내고, 1300킬로미터 떨어진 대형 저온 검출기를 설치할 샌포드 연구소의 지하실험시설 인프라와 페르미연구소 근처에 근거리 검출기를 위한 시설을 구축한다. 원거리와 근거리 검출기로 계획하고 있는 고밀도 고출력 강력 중성미자 빔을 보내

Fig. 2. (top) Far site facility 3D perspective. Buildings, infrastructure, and other experiments ©DUNE. (bottom) DUNE detector chamber with cryostat. Far detector consists of 4 caverns, with 2 chambers per cavern. ©Matt Sawtell at LBNF

기 위해, 페르미연구소 가속기시설에 NuMI^[14]와 PIP-II^[15]를 더해 LBNF 빔라인을 구축한다. 양성자 빔의 출력은 1.2 MW로 DUNE 실험을 착수시키고, 2.4 MW까지 업그레이드할 예정이다.

2. Far Detector at SURF^[16]

샌포드 지하실험 연구시설에 설치될 대형 중성미자 검출기는 최첨단 기술의 액체아르곤 시간반영 검출기(Liquid Argon Time-Projection Chamber: LArTPC)이다.^[4] 이미 ArgoNeuT라는 프로토타입과 MicroBooNE^[17]이라는 선행 중성미자실험에서 입자의 궤적을 그리는데 성공한 기술이다. 상온에서 기체인 아르곤은 영하 186도 아래에서 액화되는데, 바로 액체 아르곤이 입자 검출기의 표적물질이 된다. SURF 원거리 검출기는 4개의 저온장치에 68000톤의 액체아르곤을 담고 있는 챔버이다(그림 2). 그림과 같은 인공동굴, 또는 캐번이라고 부르는 연구실을 1.5킬로미터 지하에 만들어서 지표면으로 떨어지는 우주선(cosmic rays) 뮤온을 차폐한다. 지표면에서 1초에 하나씩

13) LHC: Large Hadron Collider

14) NuMI: Neutrinos at Main Injector

15) PIP-II: Proton Improvement Plan-II

16) SURF: Sanford Underground Research Facility

17) MicroBooNE: Micro Booster Neutrino Experiment

REFERENCES

- [2] <http://www.dunescience.org>.
- [3] DUNE Collaboration ArXiv:1512.06148.
- [4] DUNE Collaboration ArXiv:1601.02984.

Fig. 3. (top) Schematic of Liquid Argon Time-Projection Chamber. © ArgoNeuT (bottom) Neutrino events in Liquid Argon. One of the first neutrino events by the MicroBooNE Collaboration using a LArTPC © MicroBooNE.

손바닥을 통과하는 뮤온을 지층 암석이 대부분 흡수하게 된다.

챔버의 벽은 고전압 전기장이 흐르는 전선들로 구성된 양극판과 음극판의 배열이다. 검출기에서 중성미자의 상호작용으로 전하를 가진 입자들이 만들어지면, 23.6 eV의 문턱을 넘어서 발생한 이온화 전자들이 표류하여, 양극판의 전선번호로 입자들의 좌표를 찍게 된다(그림 3). 양극판은 와이어의 배열 방향에 따라서 U, V, Y 세 가지 판으로 되어 있는데, 각기 다른 판으로 추적한 입자의 궤적을 조합하여 2차원 궤적을 그리고, 입자가 표류하는 시간을 측정하여 3차원 입자궤적을 완성할 수 있다. 바로 Time-Projection Chamber라고 부르는 이유이다. LAr TPC는 거품상자 수준의 입자 궤적 이미지를 보여준다. DUNE의 데이터 분석에 Deep Learning을 이용하기로 하였다. 인간의 시각이 이미지를 인식하는 신경망의 기작을 차용했다는 Convolution Neural Network라는 기계학습을 이용하여 패턴을 인식하고 분류하게 된다. 중성미자 이벤트를 선별하여 집합을 만들고, 궤적의 이미지에 따른 입자를 인식하는 이 분석은 TPC 검출기라서 가능하다.

3. Near Detector at Fermilab

근거리 검출기는 아직 R&D 중이다. 원거리 검출기에 비하여

Fig. 4. DUNE Collaboration. As of May 2017, 964 collaborators from 164 institutions in 30 nations. ©DUNE

크기가 작고 페르미 연구소 영역 내에 설치될 예정인데, 물리학적 목표에 따라 기저거리와 검출기타입을 결정해야 한다. 과거의 진동미자 진동 실험에서와 같이, 원거리 검출기에서 나타나는 전자중성미자/반전자중성미자 신호의 계통오차를 줄이는 것이 근거리 검출기의 최우선 목표이다. 그런데, 고밀도 고출력 중성미자 빔을 근거리에서 검출할 때, 각도변경과 같은 기하학적 요인의 조정이 가능하고, 전기장 외에 자기장도 이용할 수 있고, 다른 타입의 검출기를 병합하여 설치할 수 있다는 선택적 용이성 때문에, 오히려 더 풍요롭고 다양한 물리학적 결과를 탐색할 것으로 기대하고 있다. 즉, inclusive or exclusive CC (Charged Current) interaction, 저에너지 중성미자의 스펙트럼, 중성미자-전자의 탄성충돌과 그 외 여러 가지 중성미자 상호작용의 직접적인 탐색이 가능하게 된다. 근거리 검출기 후보군으로 LArTPC나, 자기장을 이용하는 Fine-Grained Tracker, 아르곤기체를 사용하는 High-Pressure Time-Projection Chamber 등 알려진 검출기를 이용할 수도 있고, 여러 가지 목적에 부합하는 복합형 검출기를 새로 디자인할 수도 있다. 이정표에 따르면, 2017년에 근거리 검출기의 구상을 마무리한다는 계획이다. 세계 여러 연구팀이 자신들이 디자인하는 근거리 검출기가 채택될 수 있도록, 성취할 수 있는 물리학적 영향력을 호소하며 경쟁 중이다.

진동실험에서 중성미자의 생존확률을 구하거나 전이확률을 구할 때 원거리 검출기와 근거리 검출기의 역할은 분리되지 않는다. 함께 진동곡선을 완성하고 계통오차를 극적으로 감소시키는 보완적 관계이다. 이제 DUNE의 두 검출기는 중성미자의 진동 외에, 각자의 물리적 목표도 가지고 있다. 원거리 검출기는 초신성과 같은 천체 폭발에서 분출되는 중성미자의 검출과 중성자-반중성자 혼합이나 양성자 붕괴와 같은 rare decay를 통한 탈표준모형의 검증을 수행할 것이고, 근거리 검출기는 지금까지의 진동실험에서 탐색하지 못한 중성미자의 상호작용에 초점을 맞추고 있다.

Fig. 5. The construction of two new experiment halls located on Fermilab's Neutrino Campus. ICARUS T600 detector will serve as the SBN far detector. Booster Neutrino Beam starts at MiniBooNE Target Hall. ©C. James at SBN

International collaboration for a mega-science project

2015년이 되기 전에, 미국 Fermilab과 유럽 CERN은 각각 독립적으로 intensity frontier 장거리 중성미자 실험을 계획하고 준비하였다. CERN의 프로젝트는 스위스 제네바에서 핀란드까지 2300 킬로미터 진동거리로 중성미자빔을 보내는 LBNO¹⁸⁾와 LAGUNA¹⁹⁾이고, Fermilab의 프로젝트는 DUNE의 전신인 LBNE²⁰⁾와 UNO²¹⁾가 있었다. 2015년 두 연구 집단은 계획을 수정하여 공동의 목표를 위해 “깊은 땅속 중성미자 실험 - Deep Underground Neutrino Experiment Collaboration”이라는 이름의 국제적 연구협업조직을 구성하였다.

DUNE 출범 후 만 2년이 지나고, 2017년 5월 현재 Collaboration 참여인원은 30여 개 국가 1000여 명에 이른다(그림 4). 이전에는 유럽입자물리연구소 CERN²²⁾이 유럽 이외의 지역에서의 실험에 투자하거나 참가한 적이 없었는데, 이제는 미국의 Fermilab과 함께 주관 기관으로 궁극적인 중성미자 실험인 DUNE을 이끌고 있다. 대형 원거리 검출기의 건설과 그 구성요소를 테스트하는데 필수적인 시제품을 CERN Neutrino Platform에서 제작하여, 2019년까지 시험가동을 마칠 것이다. DUNE의 프로토타입이라는 의미로 ProtoDUNE Single Phase(SP)와 ProtoDUNE Double Phase(DP) 두 가지 시제품을 테스트한다. ProtoDUNE SP는 ICARUS²³⁾와 MicroBooNE에서 사용한 방식의 액체아르곤 TPC 검출기인데, CERN 가속기 시설에서 나오는 저출력 입자 빔으로

시험할 것이다. ProtoDUNE DP는 원거리 검출기의 네 개의 모듈로 들어갈 두 번째 기술인데, 표적물질인 액체아르곤 위에 기체가 흐른 층을 두어 시그널을 증폭시키는 장점이 있다.

SURF에 주 검출기가 설치되고 LBNF가 고밀도 고출력 중성미자 빔을 쏘아 데이터를 받게 되는 2028년이 되기 전에 선행되는 실험이 또 있다. 세 개의 LAr TPC 검출기를 배열해 놓고, 비활성(sterile) 중성미자 탐색을 위한 단거리 중성미자 실험(Short-Baseline Neutrino program, SBN^[5])을 한다. 중성미자 부스터로부터 100미터 거리에 새로 제작하는 근거리 검출기, 470미터 거리에 MicroBooNE 검출기, 600미터 거리에 SBN 원거리 검출기를 설치한다(그림 5). 원거리 검출기는 원래 이탈리아 그랑사쑈 연구소에서 사용하던 액체아르곤 760톤짜리 ICARUS 검출기였다. 현재는 CERN에서 정비를 하고, SBN에 사용하기 위해 페르미 연구소로 이동할 것이다.

DUNE은 고출력 빔, 최종입자들의 궤적을 그리는 TPC 검출기, 그리고 이미지를 인식하는 데이터분석 등 최첨단 과학과 기술을 이용하여, 중성미자와 관련한 모든 입자물리학의 문제 해결에 접근하려는 실험이다. 중성미자의 문제는 표준모형과 탈표준모형 사이의 명확한 구별이 있는 것이 아니라, 둘 사이의 통로로서의 잠재성을 가지고 있기 때문에, 향후 30여 년의 암흑물질을 포함하는 입자물리학과 우주론의 패러다임에 가장 큰 영향력을 끼칠 수 있다. 그래서 현재 전 세계의 중성미자 물리학자들은 바쁘다. 아직 한국에서는 중앙대학교만 collaboration에 공식적으로 참여하고 있고, 합류를 준비하고 있는 몇몇 대학과 연구소가 더 있다. 세계 공동체가 물리학적 성과를 공유하고자 하는 DUNE 프로젝트에 더 많은 한국 물리학자들의 관심과 참여가 있기를 colleague들이 기다리고 있다.

18) LBNO: Long Baseline Neutrino Oscillation

19) LAGUNA: Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics

20) LBNE: Long Baseline Neutrino Experiment

21) UNO: Underground Nucleon decay and Neutrino Observatory

22) CERN: European Organization for Nuclear Research

23) ICARUS: Imaging Cosmic And Rare Underground Signals.

REFERENCES

- [5] SBN Collaboration arXiv: 1503.01520.