초광속 중성미자의 속도 측정과 아인슈타인의 상대성 이론

DOI: 10.3938/PhiT.20.059

윤천실·박성찬

Measurement of Superluminal Neutrinos and Einstein's Relativity

Chun Sil YOON and Seongchan PARK

We review the recent observational evidence for the superluminal neutrino reported by the Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus(OPERA) collaboration and its theoretical implications to the theory of relativity.

오페라 실험과 초광속 중성미자

지난 9월 23일 OPERA(Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) 실험에서 중성미자의 속력이 광속보다 빠르다는 실험결과를 발표했다.^[1] 스위스 CERN의 양성자 가속기 SPS를 사용하여 만들어진 뮤온 중성미자 빔이 730 km 떨어진 이탈리아의 그란사소 지하실험실(LNGS)에 있는 검출기에 도달하는 시간을 측정한 결과, 이 거리를 빛이 도달하는 시간보다 약 60 ns 빠르다는 결론을 얻었다. 이 실험에서 중성미자의 비행시간을 10 ns 정도까지 정밀하게 측정하였으며, 거리 측정의 오차는 20 cm 정도였다. 이번 측정에는 스위스의 METAS, 독일의 PTB, 로마 사피엔자 대학의 측지학 그룹, 그리고 CERN의 CNGS 빔 그룹과 같은 전문기관들이 참여하였다.

1. OPERA 실험

OPERA 실험의 원래 목적은 뮤온 중성미자가 타우 중성미자로 변환하는 현상(neutrino oscillation)을 직접 관측하려는 것이다. CERN에서 만들어진 뮤온 중성미자 빔이 그림 1과

저자약력

윤천실 박사는 고려대학교 물리학과를 졸업하고 경상대학교 이학박사 학위 취득 후 OPERA 실험 한국측 대표로 있다. (chunsil.yoon@gmail.com)

박성찬 교수는 서울대학교 물리학과 PhD로서 고등과학원(KIAS), 미국 코넬대학교, 서울대학교 물리학과 연구원, 동경대학교 IPMU 특임 연구원을 거쳐 현재 전남대학교 교수로 재직 중이다. 2010년 일본소립자론 위원회가 수여하는 젊은이론입자물리학자상을 수상하였다. (seongchan.park@gmail.com)

Fig. 1. The CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) beam.

Fig. 2. The OPERA ECC and detector.

같이 730 km의 거리를 땅속으로 진행하다가 변환된 타우 중성미자를 LNGS에 있는 OPERA 검출기로 검출하는 실험이다. 타우 중성미자 반응의 특징은 타우입자(tau lepton)를 발생시킨다는 점인데, 이 입자는 질량이 비교적 무겁기 때문에 고에너지 중성미자 빔이 필요하다. 또한 타우 입자는 매우 짧은 수명을 가지므로 원자핵건판(Nuclear emulsion)과 같은 공간분해능이 매우 뛰어난 검출기가 필요하며, 많은 중성미자 반응을 만들기 위해서는 대형의 표적이 요구된다. 따라서 OPERA 실험에서는 평균에너지가 약 17 GeV인 고에너지 뮤온 중성미자 빔을 사용하며, 표적 및 검출기로 핵건판과 납을

REFERENCES

- [1] OPERA Collaboration, T. Adam *et al.*, "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam," arXiv:1109.4897 [hep-ex] (Sep. 23, 2011).

Fig. 3. The tau neutrino interaction

Fig. 4. The structure of the proton beam in time domain.

교대로 배치한 ECC(Emulsion cloud chamber)를 쓴다. 그림 2에 보이는 ECC 표적들은 총 15만여 개이며, 무게는 1250 t 정도가 된다. 이 실험에서 2010년에 첫 번째 타우 중성미자 반응이 발견된 적이 있으며,^[2] 그림 3에 그 반응의 모습이 나타나 있다.

2. CNGS 중성미자 빔

OPERA 실험에서 중성미자 빔을 만드는 방법은 다음과 같다. CERN의 SPS에서 가속된 400 GeV 양성자 빔을 2 m 길이의 흑연표적에 충돌시켜 π , K 중간자들을 발생시킨다. 이 중간자들은 길이 992 m인 붕괴터널을 지나가면서 뮤온과 뮤온 중성미자로 붕괴하게 된다.

따라서 이 실험에서는 뮤온 중성미자가 만들어지는 정확한 지점을 알지 못한다. 따라서 시간 측정의 시작점은 중성미자가 만들어지는 지점이 아니라, 양성자 빔의 시간구조(time-structure) 형상을 측정하는 fast BCT(Beam Current Transformer) 검출기가 있는 곳이다. 이로 인한 중성미자 비행시간의 부정확성인 0.2 ns를 중성미자 속력의 측정값에 대한 계

Fig. 5. The common view mode of the receiving signatures from a single GPS satellite at the two different places.

통오차(systematic error)에 포함시켰다.

그림 4에서 보는 바와 같이, SPS에서 가속된 양성자 빔은 한 cycle 당 2번의 빠른 빔 사출(fast beam extraction)을 하는데, fast BCT 검출기에 의해서 측정된 양성자 빔 사출에 대한 시간구조 형상의 폭은 약 10.5 μ s 정도이며, 빔과 빔의 간격은 50 ms이다. 그리고 시간 측정의 끝점은 LNGS 지하 실험실에 있는 TT 검출기에서의 중성미자 반응에 의한 첫 번째 hit이다.

3. 동시성 확립과 거리 측정

중성미자 속력측정에 있어서 가장 중요한 점들 중의 하나는 중성미자 빔이 만들어지는 CERN과 OPERA 검출기가 있는 LNGS 사이의 동시성의 확립이다. 두 지역의 동시성을 측정하는 데 일반적인 GPS 수신기를 사용하면 약 100 ns 정도의 정밀도를 가지므로 불충분하다. 따라서 이 실험에서는 “Common-view mode”로 운용되는 GPS 수신기 Septentrio PolaRx2e와 세슘 원자시계 Symmetricom Cs4000으로 구성되어 있는 두 개의 시스템을 CERN과 OPERA 검출기에 똑같이 설치함으로써(twin system) $\sim$ ns 정도의 동시성을 확립하였다. 보통의 위성 항법장치의 경우에는 4대 정도의 GPS 인공위성 신호를 사용하여 한 지역의 위치를 측정하지만, 그림 5에서 보는 바와 같이 Common-view mode는 한 대의 GPS 인공위성의 신호를 두 지역에서 동시에 수신함으로써

REFERENCES

- [2] OPERA Collaboration, N. Agafonova *et al.*, Phys. Lett. B **691**, 138 (2010).

두 지역의 시간을 비교한다.

OPERA 실험에서는 2006년 CNGS 빔이 가동되기 시작할 때부터 중성미자 반응을 우주선에 의한 배경반응과 구별하기 위해서 GPS 위성을 사용하여 왔다. 그 후 2008년에 중성미자 속력측정을 위해서 위에서 언급한 twin system을 설치하여 1PPS(One Pulse Per Second) 신호와 CGGTS 형식의 데이터를 사용하는 Common-view mode를 적용하였으며, 그 결과 움직이는 GPS 위성 기준틀이 아닌 지상의 기준틀에서 CERN과 LNGS 두 지역 간에 2 ns 정도의 정밀도로 시간 연결(time link)을 할 수 있었다. 이때 시간의 측정값들은 GPS 위성의 움직임에 의한 영향은 받지 않는다.

그리고 거리 측정은 양성자 빔의 시간구조 형상을 측정하는 fast BTC에서 OPERA 검출기까지 측정하였는데, 그 결과 (731278 ± 0.2) m을 얻었다. 측정오차는 주로 바깥의 GPS 위치 측정점(benchmark)과 지하의 위치 측정점 사이의 오차에 기인한다. 또한 CNGS 빔라인의 요소들의 상대적인 위치는 수 mm 정도의 정확성으로 측정할 수 있으며, 유럽측량기준인 ETRF2000으로 변환하면 2 cm 이하의 정확성으로 환산된다.

PolaRx2e GPS 수신기로 계속적으로 모니터링을 하면 1년에 1 cm 정도의 대륙 이동을 감지할 수 있으며, 2009년에 그란사소 지역에 일어난 지진으로 7 cm 정도의 위치가 어긋난 것을 확인하였다. 조석력의 효과(tidal effect)에 의한 영향은 1 cm 이하였다.

4. 중성미자 속력 측정

OPERA 실험에서 중성미자의 속력을 개별적으로 측정할 수는 없다. 그 대신, 그림 4와 같은 양성자 빔의 시간적인 구조형상을 사용하여 얻어진 PDF(probability density function)와 실제로 TT(Target Tracker) 검출기에 의해 측정된 중성미자 반응들의 시간적 분포를 비교하여 구한다. ECC 표적 바로 뒤에 붙어있는 TT 검출기는 주로 총 길이가 2 km 정도 되는 WLS Kuraray Y11 광섬유로 구성되어 있으며, 중성미자 반응의 위치와 도달시간을 측정하는 데 사용된다.

빛과 중성미자의 비행시간 차이는 $\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu$ 로 정의되며, 만일 중성미자의 속력이 더 빠를 경우에 이 값은 양수가 된다. 이 δt 값을 구하기 위해서 우선 검출기들의 반응시간 및 지연(delay) 등을 고려한 세밀한 교정(calibration)을 하기 전인 2006년도의 실험 장치로 블라인드 분석(blind analysis)을 수행한 다음에, 세밀한 교정을 한 후의 최종적인 결과와 비교한다.

그림 6에 나타나 있는 바와 같이, 먼저 3년 동안(2009-2011) 조사한 양성자 빔들의 시간적 구조형상들을 다 합하여

Fig. 6. The structure of the proton beam in time domain and the measured time structure of the neutrino interactions by Target Tracker (TT).

규격화한 PDF를 만들고 난 후, 실제 TT 검출기에 의해 측정된 중성미자 반응들이 도달한 시간들과 비교한 결과 δt (blind) = $(1043.4 \pm 7.8(\text{stat.}))$ ns를 얻었다. 하지만 이 값은 정확한 보정들을 하기 전 결과이기 때문에 최종적으로 정밀한 보정을 한 값들을 다시 고려해주어야 한다. CERN의 fast BCT의 위치에서 OPERA 검출기 사이의 거리인 베이스라인 보정(798.7 ns)과 TT 검출기의 반응시간 보정(59.6 ns) 등을 고려한 최종적인 분석결과를 보니, 블라인드 결과와 985.6 ns의 차이가 났다(표 1 참조). 여기서 베이스라인 보정은 fast BCT의 위치를 다르게 하여 측정한 것이다.

따라서 묶은 중성미자와 빛이 730 km 거리를 달려온 비행시간의 차이는 $\delta t = 1043.4 \text{ ns} - 985.6 \text{ ns} = (57.8 \pm 7.8(\text{stat.})_{-5.9}^{+8.3}(\text{sys.}))$ ns로 측정되었으며, 계통오차의 자세한 내용은 표 2에 나와 있다. 그리고 $(v-c)/c = (2.37 \pm 0.32(\text{stat.})_{-0.24}^{+0.34}(\text{sys.})) \times 10^{-5}$ 가 되었다 (6.2σ). 이 계산에서 베이스라인은 π , K 중간자들의 붕괴점들의 평균위치로부터 OPERA 검출기까지의 거리인 730.085 km를 사용하였다.^[3]

5. 수정 사항과 추가 테스트 실험

Ref. [1]이 발표되고 난 후, 여러 비판적인 논의들이 있었는데

REFERENCES

- [3] OPERA Collaboration, T. Adam *et al.*, submitted to JHEP (Nov. 11, 2011).

Table 1. The correction considering the difference of the blind analysis and the final analysis.

	Blind 2006	Final analysis	Correction (ns)
Baseline (ns)	2440079.6	2439280.9	
Earth rotation (ns)		2.2	
Correction baseline			-796.5
CNGS DELAYS :			
UTC calibration (ns)	10092.2	10085	
Correction UTC			-7.2
WFD (ns)	0	30	
Correction WFD			30
BCT (ns)	0	-580	
Correction BCT			-580
OPERA DELAYS :			
TT response (ns)	0	59.6	
FPGA (ns)	0	-24.5	
DAQ clock (ns)	-4245.2	-4262.9	
Correction TT+FPGA+DAQ			17.4
GPS synchronization (ns)	-353	0	
Time-link (ns)	0	-2.3	
Correction GPS			350.7
Total			-985.6

Table 2. The systematic uncertainties in the measurement of the δt .

Systematic uncertainties	ns	Error distribution
Baseline (20 cm)	0.67	Gaussian
Decay point	0.2	Exponential (1 side)
Interaction point	2.0	Flat (1 side)
UTC delay	2.0	Gaussian
LNGS fibres	1.0	Gaussian
DAQ clock transmission	1.0	Gaussian
FPGA calibration	1.0	Gaussian
FWD trigger delay	1.0	Gaussian
CNGS-OPERA GPS synchronisation	1.7	Gaussian
MC simulation for TT timing	3.0	Gaussian
TT time response	2.3	Gaussian
BCT calibration	5.0	Gaussian
Total systematic uncertainty	-5.9, +8.3	

데, 이러한 의견들을 고려하여 이 논문을 부분적으로 수정 보완하였다. 그 중에서 지구 자전 효과에 의한 광속의 보정(Sagnac effect)이 2.2 ns 정도 되었으며, 지구 자전과 은하속에서 태양계의 운동에 의한 효과는 거의 무시할 정도로 작았다. 그 밖에 지역에 따른 지구 중력장의 일반상대론적인 효과도 매우 작았다.

그리고 원래 16,111개의 중성미자 반응을 사용하였지만, 다시 반응을 엄밀히 선별하여 최종적으로 사용된 중성미자 반응수는 15,223개였다. 이 중에서 7,235개는 검출기 속에서

Fig. 7. The bunch beam with the 3 ns spreading in time domain.

일어난 내부반응이며, 7,988개는 중성미자 반응이 검출기 전방의 암석 등에서 일어난 외부반응이다(rock muon). 외부반응의 경우 검출기에 도달하는 시간이 내부반응과 약 2 ns 차이가 나며, 이 값은 원래부터 계통오차에 포함되었었다.

끝으로 시간폭이 10.5 μ s인 양성자 빔의 PDF를 사용하여 중성미자 속력을 구한 위의 통계적인 분석방법이 타당한지를 검증하기 위해서, 그림 7과 같이 시간폭(FWHM)이 3 ns이고, 빔과 빔 사이의 간격이 524 ns인 번치빔(bunched beam)을 사용하여 테스트 실험을 수행하였다(2011. 10. 22 - 11. 7). 이러한 시간폭이 매우 좁은 빔을 사용하면 δt 를 구하는 데 있어 여러 계통적인 오차들을 줄일 수가 있다. 이 테스트 실험에서 얻은 중성미자 반응수는 20개였으며, δt 를 구한 결과 (62.1 ± 3.7) ns로 나와서 앞의 결과와 일치함을 보였다.^[3]

현재 OPERA 실험에서는 여전히 알려지지 않은 계통오차들을 찾는 데 노력을 기울이고 있으며, 내년에 더욱 업그레이드된 검출기들과 분석방법을 사용하여 재실험을 할 예정으로 있다. 그리고 앞으로 수행될 미국 페르미가속기연구소의 MINOS와 같은 다른 실험에서 이 결과를 검증해줄 것으로 기대하고 있다.

[윤철실 박사(chunsil.yoon@ymail.com)]

오페라 실험이 던져준 화두: 아인슈타인은 틀렸나?

20세기 초반 청년 아인슈타인에 의해 밝혀진 시공간의 진정한 모습은 뉴턴 이후 자리 잡았던 물리학적 지식 체계를 뒤엎들어 놓았다. 상대성이론에 따르면 시간과 공간은 따로 존재할 수 없으며 오직 그 둘의 정합적인 결합인 시공간(spacetime)만이 물리적인 실재로 떠오를 수 있다.

아인슈타인은 상대 운동을 하고 있는 모든 관성 좌표계의 동등성을 나타내는 '상대성 원리'와 맥스웰이 전자기학의 결과인 '진공에서 빛의 진행 속도는 관성 좌표계의 운동과 무관하게 일정하다'는 '광속도 불변의 원리'라는 두 가지 가정 하에 시공간이라는 완전히 새로운 개념에 도달하게 되는데, 이로부

물리학과 첨단기술의 세계

터 유도된 상대성 이론에 따르면 질량을 가진 어떤 물체도 진공에서의 빛의 속도에 이르지 못한다. 결국 초광속 입자(superluminal particle)는 존재할 수 없다는 것이다. 만약 실험적으로 완벽하게 검증된 초광속 입자가 발견된다면 상대성 이론은 심각한 도전을 받게 될 것이다.

첫 번째 놀라운 뉴스는 2007년 미노스(MINOS) 연구팀으로부터 전해졌다. 미노스 실험은 시카고 근교에 위치한 페르미 국립 연구소(Fermi National Laboratory)에서 생성된 중성미자를 미네소타 수단(Soudan) 광산에 위치한 정밀한 장치를 통해 잡아내는 것을 목표로 수행된 실험이다. 놀랍게도 미노스의 검출기에 기록된 데이터는 중성미자가 빛의 속도보다 대략 수십만 분의 일 가량 빠르게 전파했을 가능성을 제시하고 있었다. 하지만 당시 데이터는 충분치 못했고, 많은 전문가들은 실험 결과가 단순한 통계적 요동에 기인했을 것으로 보았다. 마치 제5의 힘, 자기 홀극(magnetic monopole), 상온 핵융합 발견 등 과거의 해프닝이 사그러졌듯 미노스의 결과도 더 많은 데이터가 모아지면 사라질 것으로 예측했다.

하지만 최근 오페라 공동 실험팀(OPERA collaboration)이 또다시 초광속 중성미자의 실험적 증거를 제시하면서 이 문제는 새로운 국면을 맞이하게 되었다. 특히 이번에는 훨씬 많은 데이터에 기반을 두고 있는 만큼 통계적 신뢰도가 대단히 높아졌다. 더구나 오페라 측이 제시한 결과는 미노스 결과와도 합치하는 결과로 미노스 실험을 재확인하는 결과로 볼 수도 있기에 학계의 관심이 더욱 커지게 되었다.

하지만 중성미자 전문가들은 미노스의 결과와 마찬가지로 오페라의 결과도 대단히 신중하게 바라보고 있다. 비록 초기에 제기되었던 많은 오해와 잘못된 해석 그리고 가능한 실험 오류에 대한 추측은 오페라 측의 추가 실험과 더욱 심도 깊은 검토를 통해 이미 폐기되었지만 여전히 오페라의 초광속 중성미자 결과를 그대로 받아들일 수 없는 이론적, 실험적 난점들이 존재한다.

첫 번째 난점은 초신성으로부터 왔다. 중성미자 천문학의 시작을 알리기도 한 유명한 초신성 1987A로부터 날아온 중성미자의 전파 속도에 대한 관측 결과는 중성미자가 빛의 속도에 대단히 근접해 있다고 말해준다. 만약 오페라 실험에서 말하는 정도의 크기 차이로 중성미자 속도가 빨랐다면 초신성 관측결과에 그 효과가 보여야 한다. 물론 이 난점은 중성미자의 전파속도가 에너지에 따라 크게 변화한다고 가정하면 해결할 수 있다. 실제로 초신성에서 기인한 중성미자는 대략 10 MeV 정도의 에너지를 가지는 반면, 오페라에서 측정된 중성미자는 대략 17 GeV 정도의 에너지를 가지고 있다. 만약 큰 에너지를 가진 중성미자가 더 큰 속도를 가진다고 생각하면 초신성에서 얻은 데이터와 오페라 데이터를 모순 없

Fig. 8. A model of superluminal neutrino using extra dimensions (from the recent paper by S.S.Gubser, arXiv:1109.5687).

이 이해할 수 있다.

두 번째 난점은 노벨상 수상자인 글라쇼우(S. L. Glashow)와 코헨(A. Cohen)이 제시한 초광속 중성미자에서 방출될 것으로 생각되는 입자 방출 신호(CG 복사)의 부재다. 실제로 전자가 물속에서 빛보다 더 빠르게 나아갈 때 체렌코프 복사로 불리는 충격파에 해당하는 에너지 방출이 초광속 중성미자에서도 기대된다. 하지만 오페라에서 관측한 중성미자는 이런 부가적 에너지 방출 신호를 전혀 내보내지 않았다. 특히 오페라에 이웃한 이카루스(ICARUS) 중성미자 검출기는 충분히 정밀하게 CG 복사를 검출할 정밀도를 갖고 있음에도 신호를 찾아내지 못했다. 하지만 이 난점 또한 피할 수 있는 여러 가지 이론적 아이디어들이 제시되고 있어 한마디로 결론을 내리기 힘든 상황이다.

현재 상황에서 일단의 이론가들은 다양한 방법으로 오페라의 초광속 중성미자를 이해하려 노력하고 있다. 한편으로는 실험 오류의 근원을 밝히기 위해서 노력하고 또 한편으로 현재까지의 이론 틀을 수정하는 것을 심각하게 고려하고 있다.

예를 들어 초광속 중성미자를 여분의 차원을 통해 전파되는 입자로 볼 수 있지 않을까하는 제안이 있다. 프린스턴 대학교의 이론가 겔서(S.S. Gubser)는 이를 구현할 수 있는 모형을 제시했는데 위 그림(그림 8)과 같다. 위 그림에서 평평한 면은 우리가 살고 있는 우주로 빛과 전자를 비롯한 일반적인 물질들이 속해있지만 중성미자만은 이 면에 수직인 방향, 즉 여분 차원 방향으로 전파할 수 있고 여분 차원에서 더 큰 속도의 전파가 가능한 기하학적 구조로 인해 결국 초광속 중성미자가 가능해진다는 것이다. 대단히 파격적인 생각이지만 끈이론에 따르면 이러한 구조의 여분차원이 쉽게 나타날 수 있다.

오페라 실험이 결국 옳다고 판명될지 아니면 또 하나의 해프닝으로 끝날지 아무도 모른다. 하지만 이를 기회로 아인슈타인의 이론에 대해 더욱 깊은 이해에 도달할 수 있길 바란다. 아인슈타인의 상대성 이론도 처음에는 쉽게 받아들여지지 않았지만 어느덧 물리학의 상식이 되어버렸다는 것을 기억하자. 물리학은 늘 진화하고 있다.

[박성찬 교수(seongchan.park@gmail.com)]