

Neutrino Oscillation Experiments to Search for Sterile Neutrinos

Kim SIYEON*

Department of Physics, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

(Received 4 July 2016 : revised 14 July 2016 : accepted 17 July 2016)

Sterile neutrinos, which are neutral under the weak interaction, are new fermions beyond the standard model. Although experimental anomalies hinted at their existence, their interactions are still completely unknown, and they belong to the class of dark matter. On the other hand, they can mix with weak-interaction-active neutrinos, and their masses are assumed to be heavier than three generations of neutrinos, so their presence should be revealed in the form of probability oscillations with active neutrinos. We review various neutrino oscillation experiments that can verify the existence of light sterile neutrinos, focusing on the differences and the similarities between reactor neutrino experiments and accelerator neutrino experiments. The number of sterile neutrinos can be more than one. As a canonical approach, in this review, only the three-plus-one scheme is adopted to make prediction for future experiments.

PACS numbers: 13.15.+g, 14.60.Pq, 14.60.St

Keywords: Sterile neutrino, Mixing angle, Neutrino oscillation, Reactor antineutrino

중성미자 진동실험과 비활성 중성미자

김시연*

중앙대학교 자연과학대학 물리학과, 서울 06974, 대한민국

(2016년 7월 4일 받음, 2016년 7월 14일 수정본 받음, 2016년 7월 17일 게재 확정)

약한상호작용을 하지 않는 비활성 중성미자는 몇몇 비정상현상을 보인 실험결과에 근거하여 존재할 것이라고 소개된 새로운 페르미온이다. 비활성 중성미자의 상호작용은 전혀 알려져 있지 않기 때문에, 여전히 암흑물질의 범위에 속한다. 한편, 약한상호작용의 활성 중성미자와 혼합할 수 있고, 그것들보다 더 큰 질량을 가질 것으로 예측되므로, 활성 중성미자와의 확률진동의 형태로 그 존재가 드러날 수 밖에 없다. 비활성 중성미자의 존재를 검증할 수 있는 중성미자 진동실험의 원리와 실험을 원자로중성미자 실험과 가속기중성미자 실험의 차이와 보완적 역할을 비교하여 검토한다. 비활성 중성미자의 개수가 하나보다 많을 수 있지만, 이 리뷰에서는 기본적인 접근방법으로 활성 세 개와 비활성 한 개의 모델만 채택하여 향후 실험의 예측을 이끌어 낼 것이다.

PACS numbers: 13.15.+g, 14.60.Pq, 14.60.St

Keywords: 비활성중성미자, 혼합각, 중성미자진동, 원자로 반중성미자

*E-mail: siyeon@cau.ac.kr



I. 비활성 중성미자

표준모형에서 약한상호작용을 하는 중성미자는 3종류(flavor; 맛깔) 밖에 없다는 것을 Z 보손의 비가시성 붕괴 폭에서 알아내었다. 전자중성미자(ν_e), 뮤온중성미자(ν_μ), 타우중성미자(ν_τ)가 경입자 양자수 1을 가지며 음전하경입자인 전자, 뮤온, 타우입자들과 경입자양자수를 보전하는 약한상호작용을 한다. 표준모형은 중성미자의 질량이 없다고 예측하였지만, 중성미자가 운동할 때 종류를 바꾸는 확률이 영이 아니라는 진동실험의 결과 중성미자는 실험적으로 질량을 가진 입자임이 확인되었다.

입자물리학에서 암흑물질은 표준모형에서 기술하는 강력, 약력, 전자기력으로 확인할 수 없는 새로운 입자들로 설명된다. 모든 물리적 성질이 중성미자와 같지만, 표준모형의 약한상호작용을 하지 않는 입자를 현상론적으로 소개할 수 있는데, 약력에 감응하는 표준모형 활성중성미자에 대비하여, 비활성 중성미자(sterile neutrino)라고 부를 수 있다. 표준모형의 입자목록에 딱 하나의 입자를 추가하는 최소확장모델은 오른손지기 중성미자를 포함하는 것이다. 오른손 중성미자는 다른 표준모형 오른손 쿼크나 오른손 경입자처럼 아이소스핀 단일항이므로, 약한상호작용을 하지 않는 비활성 중성미자이다.

오른손지기 비활성 중성미자가 존재한다면, 다른 기본 입자들처럼 게이지입자에 의한 상호작용을 할 수 없으나, 힉스와 같은 스핀-0 스칼라입자와 왼손지기 중성미자와 유가와 결합에 기반한 상호작용을 할 수 있다. 유가와 결합이 확인되면, 중성미자도 다른 페르미온처럼 디랙질량을 가질 수도 있고, 경입자 양자수가 보존되지 않는 마요라나 질량을 가질 수도 있다. 중성미자와 반중성미자가 동일하고 경입자 양자수보존법칙을 깨는 마요라나 타입 페르미온임을 확인하는 것도 중성미자 물리학에서 가장 시급한 문제로서 가장 유력한 접근방법은 반중성미자가 딸입자에 포함되지 않는 이중베타붕괴를 검출하는 것이다.

비활성 중성미자는 다양한 현상론에서 폭넓은 질량스케일로 소개되었는데, 시소메카니즘의 무거운 중성미자인 오른손지기 중성미자는 $10^{10} \sim 10^{15}$ GeV 수준으로, 역시소메카니즘의 오른손지기이자 암흑물질모형으로 주로 언급되는 keV-스케일 수준의 중성미자로 소개되었다. 이 논문에서 고려하는 비활성 중성미자는 질량 1 eV 정도이거나 약간 작은 값으로서 대기중성미자 질량제공차와 구별이 될 정도이다. 앞에서 언급한 매우 큰 스케일의 질량과 대비하여, ‘가벼운 비활성 중성미자(light sterile neutrino)’라고 불리는 이들은 다음과 같은 비정상현상(anomalies)을 보게 된 실험적 근거에서 존재의 신뢰성을 얻게 되었다. (1) LSND 실험 [1,2]: $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 에서 3족 중성미자 모델

예측보다 많은 이벤트 검출, (2) GALLEX [3] 와 SAGE [4] 실험에서 나타난 근거리에서의 ν_e 가 손실되는 비정상 Gallium 중성미자 비정상 현상, (3) 원자로 전자 반중성미자가 근거리에서 손실되는 원자로 중성미자 비정상 현상 등이다 [5-7].

이 논문은 제 4의 중성미자, 즉 비활성 중성미자의 질량이 eV 스케일이라는 가정하에, 비활성 중성미자를 찾는 실험들을 리뷰한다. 1장 비활성 중성미자에 대한 서론에 이어, 2장은 원자로 중성미자의 비정상현상을 확인하면서 비활성중성미자를 찾으려고 추진중인 실험들을 다루고, 3장은 가속기 빔을 이용하여 찾으려는 탐색실험들을 다루고 두 타입의 특징과 보완적 성격을 논의할 것이다.

II. 사라진 원자로 반중성미자

원자로는 1 MeV ~ 8 MeV의 운동에너지를 가진 전자-반중성미자($\bar{\nu}_e$)의 좋은 발생원이다. 약 1.5 km 의 거리에서 질량제공차 $\Delta m_{31}^2 = 0.0024$ eV²에 해당하는 진동이 극대화되기 때문에, RENO [8]와 Daya Bay [9]가 소위 원거리 검출기를 그 거리에 설치하고 진동실험을 하여 성공적으로 변환각 θ_{13} 를 측정하였다. 검출방법은 액체섬광체에서 일어나는 역베타붕괴, 다시 말해 양성자의 반중성미자 포획($\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$)에서 나오는 양전자와 중성자가 만드는 시그널 조합을 분석하여 중성미자의 이벤트로 의미를 부여한다.

원자로에서 베타붕괴 사슬과정 중에 방출되는 반중성미자 검출 실험결과들이 1980년대부터 축적되어 있는데 [10-19], 2011년 이들을 재해석하였다. 원자로 중성미자의 스펙트럼과 검출과정 역베타붕괴 미분단면적을 수정하고 재해석한 결과는 3-중성미자 프레임에서 전자반중성미자의 손실을 제대로 설명할 수 없었다. 이 현상을 원자로 반중성미자 비정상현상(reactor antineutrino anomaly)이라고 불렀고, 3종류 중성미자만으로 설명하기에는 확률의 합이 1이 되어야 한다는 조건에 5 ~ 6% 부족했다. 다수의 실험결과를 종합하여 구한 최적치는 네번째 중성미자의 질량이 1.2 eV 이라고 예측했다 [5-7].

원자로 중성미자 스펙트럼에 대한 모델들을 이용, 검출이 예측되는 중성미자 이벤트수를 구하여 분모에 취하고, 검출과 분석결과 측정한 이벤트수를 구하여 분자에 취하면, 원자로 중심에서 발생한 전자-반중성미자가 1.5 km 밖에서 얼마나 남아있는지 가리키는 생존확률(survival probability)을 얻게 된다. 중성미자의 이동거리가 100 m 미만일 때, 확률진동이 없다면 생존확률은 1이 되어야 하지만, Fig. 1에서 보듯이, 수정된 예측값과 비교한 과거 실험결과들은 약

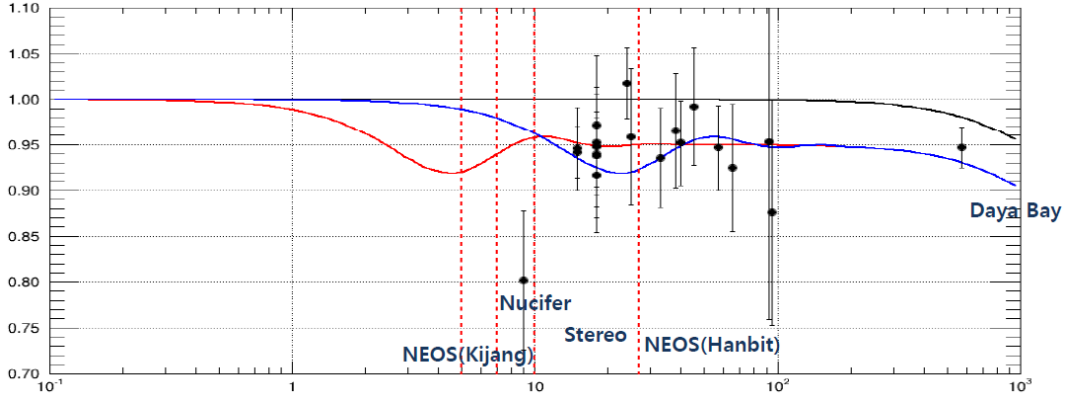


Fig. 1. (Color online) Survival probability of reactor electron antineutrinos and its dependency on the mass of the fourth neutrino. The red, blue, and black curves represent the cases $\Delta m^2_{41} = 1 \text{ eV}^2$, $\Delta m^2_{41} = 0.2 \text{ eV}^2$, and $\Delta m^2_{41} = 0 \text{ eV}^2$, respectively.

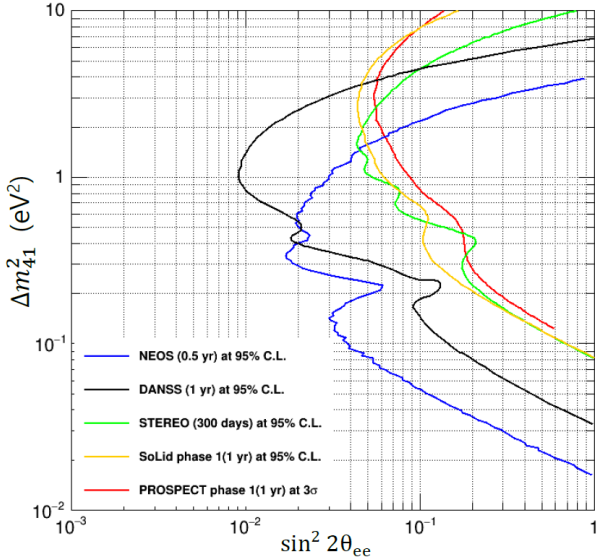


Fig. 2. (Color online) Comparison of the detection sensitivities in the plane of future short-baseline sterile neutrino searches [21–26].

5% 정도의 결손을 나타내었다. 위 그림에 포함된 과거 원자로 실험들은 Bugey-3 [10], Bugey-4 [11], Rovno91 [12], Gosgen [13], ILL [14], Krasnoyarsk [15], Rovno88 [16], SRP [17], Chooz [18], Palo Verde [19] 등이다. 이러한 결손의 존재는 3개의 중성미자만 존재한다고 할 때, 확률의 합이 1이 되지 않는다는 양자역학의 기본원리에 위배된다. 추가로 제4의 중성미자가 존재하여 이 결손부분은 10 m 정도의 거리에서 확률진동에 의해 생긴 것이라는 해석이 수용되었고, 이러한 진동실험을 통하여 비활성 중성미자의 탐색이 활발히 이루어지고 있다.

Fig. 1에서 제4중성미자의 질량에 따른 전자-반중성미자의 생존진동 데이터 포인트와 에러바는 1980년대에 실

행된 근거리 원자로 중성미자실험의 결과이다. 붉은 색 세로 점선은 비활성 중성미자 검색을 목표로 추진 중인 근거리 중성미자 진동실험들과 기저선 거리를 표시한 것이다. 왼쪽에서부터 순서대로 NEOS(KIjang), Nucifer, Stereo, NEOS(Hanbit) 실험의 기저선 거리이다. 현재 가동중이거나 준비중인 근거리 비활성중성미자탐색 실험들은 다음과 같다. 프랑스의 Nucifer [20]와 Stereo [21], 러시아의 DANSS [22], 벨기에의 SoLid [23], 미국의 PROSPECT [24], 한국의 NEOS [25] 등이다. Fig. 2는 원자로 전자-반중성미자 $\bar{\nu}_e$ 손실로 비활성중성미자의 존재를 확인하려는 대표적인 근거리 진동실험의 민감도 분석 결과를 함께 보인 것이다.

III. 가속기 빔으로 생성시킨 중성미자의 근거리 진동

가장 간단한 접근방법으로 3개 약력중성미자와 1개 비활성중성미자의 3+1 모델을 고려하면, 근거리 실험에서의 중성미자 변환 확률은

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4|U_{\alpha 4}|^2 (\delta_{\alpha\beta} - |U_{\beta 4}|^2) \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2_{41} L}{4E} \right)$$

으로 주어진다. 여기서 U 는 4×4 유니타리 행렬로서 3×3 PMNS 변환행렬을 포함하고 있다. 이 경우 PMNS는 유니타리 행렬이 아니다. L 은 기저선 거리, E 는 중성미자 에너지이고, $\Delta m^2_{41} = m_4^2 - m_1^2$ 인데 근사적으로 $\Delta m^2_{41} \approx m_4^2 \sim 1 \text{ eV}^2$ 라고 쓸 수 있다. 위의 유효확률식은 반중성미자에 대하여도 동일하게 성립하는 식이다.

LSND 비정상현상에서 보았듯이, 가속된 양성자에서 비롯된 파이온의 붕괴에서 발생한 ν_μ 의 생존확률이나 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

로 변환되는 확률도 근거리에서 비활성중성미자의 탐색을 위해 고려되고 있다. 위의 식에서 알 수 있듯이 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 변환실험을 해서 진폭 $\sin^2 2\theta_{\mu e} = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu 4}|^2$ 를 결정할 수 있고, ν_e 생존실험으로 진폭 $\sin^2 2\theta_{ee} = 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2)$ 를 구하고, ν_μ 생존실험으로 진폭 $\sim^2 2\theta_{\mu\mu} = 4|U_{\mu 4}|^2(1 - |U_{\mu 4}|^2)$ 를 구한다. Fig. 2의 민감도 곡선을 표현한 물리변수 공간은 바로 이 진동진폭과 질량제곱차로 주어진다.

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 변환실험과 ν_μ 생존실험은 가속기 빔으로 발생시킨 중성미자로 실험을 하고, 현재 추진중인 실험에는 미국의 SBND(short-baseline near detector) 실험이 있다. 페르미연구소에 있는 BNB(booster neutrino beam) 안에 세계의 액체아르곤 중성미자 검출기를 놓고 하는 실험이다. 또한 최근에 MINOS와 MINOS+에서 비표준모형의 비활성중성미자탐색을 추진하고 있는데, 이러한 가속기 기반 중성미자실험은 $\sin^2 2\theta_{\mu e}$ 나 $\sin^2 2\theta_{\mu\mu}$ 의 진폭측정으로 원자로 중성미자에서 측정이 가능했던 변환각 θ_{14} 가 아닌 새로운 변환각 θ_{24} 에 대한 측정으로 비활성중성미자의 존재를 탐색할 수 있다 [27].

표준모형의 활성 중성미자 3종류(맛깔)만 고려할 때 마요라나 입자로서 추가되는 변수를 제외하더라도, 세계의 질량, 세계의 변환각, 한개의 디락타입 CP 위상으로 모두 7개의 질량관련 물리변수를 찾고 있다. 비활성중성미자를 포함하는 3+1 또는 3+2 모형이론이 활발히 논의되고 있는데, 최소확장모델로 하나만 추가하여도 질량값은 3+1, 변환각은 3+3, CP 위상은 1+2로서 물리변수의 수가 13개로 증가한다. 원자로와 가속기 실험의 보완적 역할로 변환각 θ_{14} 와 변환각 θ_{24} 에 대한 측정이 이루어진다면, 비활성중성미자의 규명과 더불어 비표준모형의 모습을 구체화할 수 있는 조건을 제공할 것이다.

IV. 맺음말

힉스입자의 발견으로 유효이론으로서의 표준모형은 충분히 검증되었다. 처음 발견된 비표준모형의 입자인 중성미자의 상호작용과 물리적 성격을 알아내는 것은 암흑물질이나 초고에너지 천체입자 등, 입자물리학과 핵물리학, 천체물리학 등이 공동으로 해결해야 할 수수께끼를 푸는데 결정적인 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 활성중성미자와 확률의 진동으로 그 존재를 확인할 수 있는 비활성중성미자의 규명은 암흑물질 연구의 신뢰성 있는 출발점이기도 하다. 다양한 기저선 거리에 대한 진동실험들이 추진되고, 가능할 것으로 예측되는 가벼운 비활성중성미자의 질량값이 가까운 미래에 거의 검증을 마칠 것으로 보인다. 활성중성미자와의 변환각 θ_{14} 와 변환각 θ_{24} 까지 측정을 하면, 비표준모형 암흑세계에 대한 새로운 창이 열릴 것이다.

REFERENCES

- [1] C. Athanassopoulos *et al.* [LSND Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2650 (1995).
- [2] A. Aguilar-Arevalo *et al.* [LSND Collaboration], *Phys. Rev. D* **64**, 112007 (2001).
- [3] F. Kaether, W. Hampel, G. Heusser, J. Kiko and T. Kirsten, *Phys. Lett. B* **685**, 47 (2010).
- [4] J. N. Abdurashitov, *textit et al.* [SAGE Collaboration], *Phys. Rev. C* **80**, 015807 (2009).
- [5] G. Mention, M. Fechner, Th. Lasserre, Th. A. Mueller and D. Lhuillier *et al.* *Phys. Rev. D* **83**, 073006 (2011).
- [6] Th. A. Mueller, D. Lhuillier, M. Fallot, A. Letourneau and S. Cormon *et al.* *Phys. Rev. C* **83**, 054615 (2011).
- [7] P. Huber, *Phys. Rev. C* **84**, 024617 (2011). Erratum: *Phys. Rev. C* **85**, 029901 (2012).
- [8] J. K. Ahn *et al.* [RENO Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **108**, 191802 (2012).
- [9] F. P. An *et al.* [Daya Bay Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **108**, 171803 (2012).
- [10] B. Achkar, R. Aleksan, M. Avenier, G. Bagieu and J. Bouchez *et al.*, *Nucl. Phys. B* **434**, 503 (1995).
- [11] Y. Declais, H. de Kerret, B. Lefèvre, M. Obolensky and A. Etenko *et al.*, *Phys. Lett. B* **338**, 383 (1994).
- [12] A. A. Kuvshinnikov, L. A. Mikaelyan, S. V. Nikolaev, M. D. Skorokhvatov and A. V. Etenko, *JETP Lett.* **54**, 253 (1991).
- [13] G. Zacek, F. v. Feilitzsch, R. L. Mössbauer, L. Oberauer and V. Zacek *et al.* [CALTECH-SIN-TUM Collaboration], *Phys. Rev. D* **34**, 2621 (1986).
- [14] A. Hoummada and S. L. Mikou, *Appl. Radiat. Isotopes* **46**, 449 (1995).
- [15] G. S. Vidyakin *et al.*, *Sov. Phys. JETP* **71**, 424 (1990).
- [16] A. I. Afonin *et al.*, *Sov. Phys. JETP* **67**, 213 (1988).
- [17] Z. D. Greenwood, W. R. Kropp, M. A. Mandelkern, S. Nakamura and E. L. Pasierb-Love *et al.* *Phys. Rev. D* **53**, 6054 (1996).
- [18] M. Apollonio, A. Baldini, C. Bemporad, E. Caffau and F. Ci *et al.* [CHOOZ Collaboration], *Eur. Phys. J. C* **27**, 331 (2003).
- [19] F. Boehm, J. Busenitz, B. Cook, G. Gratta and H. Henrikson *et al.* *Phys. Rev. D* **64**, 112001 (2001).

- [20] G. Boireau *et al.* [NUCIFER Collaboration], [Phys. Rev. D **93**, 112006 \(2016\)](#).
- [21] M. Pequignot *et al.* [Stereo Collaboration], [Nucl. Part. Phys. Proc. **265-266**, 126 \(2015\)](#).
- [22] M. Danilov *et al.* [DANSS Collaboration], [arXiv:1412.0817 \[physics.ins-det\]](#)
- [23] N. Ryder *et al.* [SoLid Collaboration], [PoS EPS-HEP2015, 071 \(2015\)](#), [arXiv:1510.07835 \[hep-ex\]](#)
- [24] J. Ashenfelter *et al.* [PROSPECT Collaboration], [arXiv:1512.02202 \[physics.ins-det\]](#)
- [25] B. Kim *et al.* [NEOS Collaboration], [arXiv:1511.05551 \[physics.ins-det\]](#)
- [26] C. Giunti, [Nucl. Phys. B **908**, 336 \(2016\)](#).
- [27] P. Adamson *et al.* [Daya Bay, MINOS Collaborations], [arXiv:1607.01188\[hep-ex\]](#)