중성미자 미방출 이중베타붕괴 실험: AMoRE

DOI: 10.3938/PhiT.23.032

김홍주·박향규

Neutrinoless Double Beta Decay Experiment: AMoRE (Advanced Mo-based Rare-process Experiment)

Hongjoo KIM and Hyangkyu PARK

The recent discovery of neutrino oscillations clearly indicates that neutrinos do have mass, which is compelling evidence of physics beyond the standard model of particle physics. However, while those observations provide information about the differences in the neutrino masses, they do not provide a direct measurement of the absolute mass scale and they leave unanswered questions about the properties of neutrinos. To answer to those questions, the AMoRE (Advanced Mo-based Rare-process Experiment) will conduct one of the most sensitive searches for “neutrinoless double beta decay” in which only two electrons emerge from nuclear-beta decays, by using $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ crystal scintillators at cryogenic temperature. If such decays were observed, it would be a clear signal that neutrinos have a different mass structure than other elementary particles and would provide a measurement of the absolute neutrino mass scale and give a clue for explaining the large baryon asymmetry in our universe, called the leptogenesis theory.

들어가는 글

중성미자는 태초에 우주 생성에 관여하고, 밤하늘에 빛나는

저자약력

김홍주 교수는 고려대학교 이학박사(1989)로서 루이지애나 대학교 박사후 연구원 및 연구교수를 거쳐 2004년부터 경북대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (hjkim@knu.ac.kr)

박향규 박사는 카네기멜론 이학박사(1998)로서 페르미연구소 및 미시간 대학 연구원을 거쳐 2013년부터 기초과학연구원 지하실험연구단의 연구위원 및 UST 교수로 재직 중이다. (hkpark@ibs.re.kr)

별의 생성 및 소멸에도 관여한다. 우주의 상당한 부분은 중성미자로 채워져 있고, 현재 우리가 살고 있는 우주는 중성미자가 없다면 존재하지 않을지도 모른다. 중성미자는 우리의 눈으로 볼 수 없지만, 지금 이 순간에도 우주로부터 초당 1조 (10^{12})개의 중성미자가 우리 앞으로 지나간다. 또한 중성미자는 왜 태양이 밝게 빛나는지를 설명해 주므로, 중성미자가 없다면 인간은 아마도 존재할 수 없을 것이다. 우주의 구조와 진화를 이해하기 위하여 천문, 천체물리, 핵 및 입자물리 학자들이 많은 연구를 하여 괄목할 만한 성과를 내고 있다. 또한 미시 세계에서 연구되는 핵 및 기본 입자에 대한 연구가 거시세계의 우주를 이해하는데 있어 아주 밀접한 관련성이 있다는 것이 밝혀지고 있다.^[1] 중성미자 연구를 통하여 소립자의 기본 성질의 이해와 근본 이론을 구축할 수 있을 것이며, 초기 우주에서 중성미자의 역할 및 은하계 및 별의 진화에 대한 이해를 할 수 있을 것이다. 하지만 중성미자의 기본성질에 대한 연구는 아직도 진행 중이다.

입자물리 표준모형의 기본입자 중의 하나인 중성미자의 절대 질량과 중성미자의 본질^[2]에 관해서 물리적으로 확실히 밝혀진 것이 없다. 이러한 이유로 중성미자의 질량문제는 Discover 잡지에서 “Do neutrinos have mass?”라는 질문으로 현대 물리학에서 풀어야 할 11개의 문제 중에서 하나로 선정되었다.^[3]

이중베타붕괴 현상의 중요성

그림 1 좌측 하단 예에서 볼 수 있듯이 에너지 보존법칙에 의하여 ^{100}Mo 핵은 Q값이 높은 ^{100}Tc 핵으로 베타 붕괴할 수가 없다. 하지만 극히 드문 현상으로 ^{100}Ru 핵으로 붕괴하게 되는

REFERENCES

- [1] Committee on the Physics of the Universe Board, Connecting Quarks with the Cosmos (National Academy Press, Washington D.C., 2001).
- [2] We mean that whether neutrinos are Dirac- or Majorana-particle.
- [3] Discover Magazine Feb. (2002).

Fig. 1. Two neutrino and neutrinoless double beta decay processes.

데, 왼쪽 그림에서 볼 수 있듯이 2개의 중성미자와 전자를 방출하는 이중베타($2\nu\beta\beta$) 붕괴를 하게 된다. $2\nu\beta\beta$ 붕괴는 두 개의 중성미자가 방출되므로, 붕괴로부터 방출된 두 개의 전자 에너지합의 분포는 0에서 ^{100}Mo 핵과 ^{100}Ru 핵의 질량 차에 걸쳐 분포한다.

^{100}Mo 에 대한 이중베타붕괴 반감기는 NEMO-3 그룹에 의하여 7.1×10^{18} 년으로 측정되었다.^[4] 두 개의 중성미자방출 이중베타붕괴현상은 반감기가 10^{18} 년보다 길고, 희귀 핵 현상을 연구하는 핵물리에서 중요한 연구 중의 하나이다. 만일 중성미자가 질량이 있고, 중성미자 자신이 입자(또는 중성미자)이면서 반입자(또는 반중성미자)가 되는 마요라나(Majorana) 입자의 경우에는, 오른쪽 그림과 같이 “중성미자 미방출 이중베타($0\nu\beta\beta$) 붕괴”(neutrinoless double beta decay)를 할 수 있다. 이러한 경우에는 $2\nu\beta\beta$ 붕괴와는 달리, 방출된 두 개의 전자 에너지 합은 ^{100}Mo 핵과 ^{100}Ru 핵의 질량 차(Q 값)에 의해서 결정된다. $2\nu\beta\beta$ 붕괴와 $0\nu\beta\beta$ 붕괴는 방출된 두 개의 전자 에너지 합의 분포로써 구별할 수 있다.

만일 입자 물리 표준모형에서 일어날 수 없는, 경입자수를 위배하는(Lepton number violation) 새로운 현상이 있을 경우에 $0\nu\beta\beta$ 붕괴가 일어날 수도 있다고 알려졌다.^[5] 따라서 $0\nu\beta\beta$ 붕괴의 탐색을 통해서 새로운 물리 현상을 연구할 수도 있다. 중성미자가 마요라나 입자이고 질량을 가지면, $0\nu\beta\beta$ 붕괴의 반감기를 측정함으로써 중성미자의 절대 질량을 측정할 수 있다.

현재까지 b-쿼크에서 정밀하게 측정된 CP 비대칭성의 크기는 현재 우리가 살고 있는 우주의 입자-반입자 비대칭성을 설명하기에는 부족하다. 우주의 입자-반입자 비대칭성이 주로 경입자의 CP 비대칭성에 기인한다는 Leptogenesis^[6]와 같은 이론으로 설명할 수 있다고 알려졌다. 이 이론에 의하면 중성미자가 마요라나 입자이어야 하고, 중성미자가 CP 대칭성을 보

존하지 않는 상호작용을 해야 한다.

중성미자 진동현상과 천문학적 관측 결과들을 종합했을 때, 중성미자의 절대 질량이 0.05 eV보다 크고 1.7 eV보다 작을 것이라고 예측하고 있다.^[3] $0\nu\beta\beta$ 붕괴 현상은 중성미자가 질량을 갖고, 마요라나 입자이면 이론적으로 가능하다고만 알려져 있다. 과거 60년 동안 많은 사람들에 의해서 이 현상을 찾으려고 노력을 하였지만, 아직까지 실험적으로 검증이 안 된 현상이다. 따라서 $0\nu\beta\beta$ 붕괴 연구는 중성미자 절대 질량 측정 및 중성미자가 디랙(Dirac) 입자인지 마요라나 입자인지를 알 수 있는 중요한 실험이어서, 현재 세계 각국에서 연구를 진행하고 있다.

이중베타붕괴 탐색 세계적 동향

효율적인 이중베타붕괴실험을 위해서는 다음의 사항이 고려되어야 한다.

- $0\nu\beta\beta$ 붕괴 가능성이 큰 원소 선택: 핵 이론의 계산을 통하여 $0\nu\beta\beta$ 붕괴가 일어나는 반감기를 계산할 수 있는데, 같은 중성미자 질량의 경우 Matrix element가 큰 핵종을 갖는 원소가 선호된다. 또한 이론적으로 계산 불확정성이 크므로 다양한 원소에 대한 연구가 진행되어야 한다.
- 검출효율 및 $0\nu\beta\beta$ 붕괴가 가능한 원소 농축도: 검출 효율과 원소 농축도는 반감기 계산에 비례한다. 따라서 검출 효율이 100%가 선호되고, 원소의 농축도가 높은 것을 선호한다.
- 에너지 분해능, 백그라운드 및 $0\nu\beta\beta$ 붕괴가 가능한 원소의 총 질량: 이들 값은 반감기 계산에 1/2승에 비례하지만, 검출기 에너지 분해능을 높이는 것은 백그라운드 효과를 줄이는데 중요하고, 차폐를 통한 외부 백그라운드 제거 및 초순수화를 통한 내부 백그라운드를 줄이는 데 필요하다. 원소의 총 질량을 늘리는 것이 한 가지 방법이지만, 검출기 제작비용이 질량에 비례한다는 것을 염두에 두어야 한다.
- 검출기 제작비용의 최적화: 효율적인 연구를 위해서는 실험 방법이 우수해야 할 뿐만 아니라 실험을 위한 검출기 비용을 감당할 수 있어야 한다. 금속 포일을 사용하는 간접방법과 섬

REFERENCES

- [4] R. Arnold *et al.*, Phys. Rev. D **89**, 111101(R) (2014).
- [5] M. Doi *et al.*, Theor. Phys. **69**, 602 (1983); K. Babu and R. Mohapatra, Phys. Rev. Lett. **75**, 2276 (1995); G. Bhattacharyya *et al.*, Phys. Rev. D **67**, 113001 (2003).
- [6] M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B **174**, 45 (1986).

Fig. 2. Evidence of neutrinoless double beta decay signal by H. V. Klapdor.

광결정 검출기는 상대적으로 비용이 저렴하다. 또한 이중베타 붕괴원소를 농축하는 비용이 고가이므로, 상대적으로 비용이 저렴한 원소의 사용이 선호된다. $2\nu\beta\beta$ 붕괴는 ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd 및 ^{150}Nd 에서 관측되었고, 반감기는 약 $10^{18}\sim 10^{21}$ 년에 해당된다. $0\nu\beta\beta$ 붕괴 반감기에 대한 하한 값은 ^{100}Mo , ^{116}Cd 및 ^{130}Te , ^{136}Xe 이 $10^{22}\sim 10^{25}$ 년^[7]이고, 이에 대응하는 중성미자 질량의 상한 값은 190 meV~5 eV에 해당한다.

2001년부터 H. V. Klapdor 등은 게르마늄 검출기를 써서 ^{76}Ge 의 $0\nu\beta\beta$ 붕괴에 대한 증거를 보았다고 하였다.^[8] 이 결과에 대한 논쟁이 많아 이 실험에 대한 검증이 절대적으로 필요하다(그림 2 참조). H. V. Klapdor 등이 옳다면, ^{76}Ge 의 반감기 및 중성미자 질량은 10^{25} 년과 0.3~0.6 eV 정도이다. 지금 진행하고 있거나 앞으로 진행할 실험은, ^{76}Ge 이온 검출기, TeO_2 극저온 검출기, 제논(xenon) 가스가 섞인 액체 섬광 검출기와 같이 검출기 내에서 이중베타붕괴가 일어나는 형태의 실험과 NEMO-4와 MOON처럼 이중베타붕괴 핵을 포함하는 얇은 포일을 둘러싸는 가스 트랙 검출기와 플라스틱 섬광물질 검출기를 통해 방출 전자의 에너지를 측정하는 형태의 실험이 있다. 섬광 결정을 이용한 실험은 일본에서 CaF_2 섬광결정을 이용하는 CANDLE 실험이 건설 중이고, Ukraine 그룹이 조그마한 300 g의 농축된 ^{116}Cd 을 넣은 CdWO_4 결정 섬광 검출기를 써서 반감기를 7×10^{22} 년의 하한 값을 얻었고, 이중베타 붕괴 실험 중 결정 섬광 검출기의 우수성을 입증한 실험이다.^[9]

국내에서는 양양 지하 실험실의 극저 HPGc 검출기를 이용하여 처음으로 이중베타붕괴실험을 시작하였는데, ^{124}Sn 딸핵의 0^- , 2^- 들뜬 상태로 전이하는 상태에 대한 연구 및 ^{64}Zn 핵으로의 β^+/EC 이중베타붕괴시 방출되는 511 keV 감마선 검출에 대한 연구를 수행하였고,^[10] Sn을 넣은 액체섬광 검출기를 사용한 이중베타 붕괴 실험을 수행하였다.^[11]

Fig. 3. The developed natural CMO crystals.

CaMoO₄ 섬광결정을 이용한 이중베타붕괴 탐색 연구

$0\nu\beta\beta$ 붕괴 연구 중 세계적 프론티어 연구그룹인 우크라이나 그룹의 연구는 상대적으로 저렴한 가격으로 실험이 가능하고 그 결과가 뛰어나지만, CdWO_4 섬광결정 검출기 대형생장이 어렵고, Q값이 2.8 MeV 밖에 되지 않으며, $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 의 백그라운드 문제가 알려져 있다.^[12] 또한 ^{116}Cd 의 가격이 ^{100}Mo 보다 월등히 고가이다. ^{100}Mo 의 경우에 이론적으로 붕괴시간 상수가 ^{76}Ge 보다 10배 정도 예측되고, Q값이 3.03 MeV로 높아 일본의 MOON 실험 및 프랑스그룹을 중심으로 한 국제공동연구 그룹인 NEMO 실험에서 수행하고 있으나, 이 그룹들은 얇은 Mo 포일을 사용하는 간접 방법을 사용하기 때문에 백그라운드를 줄일 수 있는 장점은 있으나, 에너지 분해능이 10% 이상으로 나빠고, 검출효율이 10% 미만으로 떨어지는 단점을 지니고 있다.

이러한 문제를 극복하기 위하여 여러 섬광결정 검출기에 대한 연구를 하던 중, 2002년에 본 연구진이 감쇠 시간(decay time)이 길어 방사선 검출용으로는 부적합하지만, 이중베타 붕괴 실험으로는 적합한 $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ (CMO) 섬광결정을 처음으로 주목하여, ^{100}Mo 의 중성미자 미방출 이중베타 붕괴연구의 R&D를 시작하였다. CMO 섬광결정을 처음에는 국내의 부산대

REFERENCES

- [7] Neutrinoless Double-Beta Decay, <http://www.nu.to.infn.it/exp/bb>.
- [8] H. V. Klapdor *et al.*, Mod. Phys. Lett. A **27**, 2409 (2001).
- [9] F. A. Danevich *et al.*, Phys. Rev. D **68**, 035501 (2003).
- [10] H. J. Kim *et al.*, "Double Beta Decay Experiment with HPGe and CsI(Tl) detectors", KEK Proc. 2003-6, Proceeding of APPI, 205 (2003), Nuclear Physics A. (2006).
- [11] H. J. Kim, "Liquid Scintillator for Double Beta Decay", Workshop on Underground Experiments and Astrophysics (2003); M. J. Hwang *et al.*, Nuclear Instrument Methods A **570**, 454 (2007).
- [12] V. I. Tretyak, Y. G. Zdesenko, Atomic data and Nuclear Data Tables **80**, 83 (2002).

Fig. 4. The conceptual diagram of a low temperature detector using a metallic magnetic calorimeter as a sensor (top) and discrimination method for alpha particle from beta and gamma particle (bottom).

학교 단결정은 행연구소에서 성장을 하였고, 러시아에서 성능이 향상된 섬광결정을 받아 연구를 수행하였다. 연구의 결과, 감쇄시간은 16 μ s로 길고, 상온에서 8,000 광자/MeV로 측정되었고, 알파입자와 베타 입자의 펄스구별이 가능함을 보였으며, 이 연구는 2004년 베트남에서 열린 “New Views in Particle Physics” 국제학회에서 본 연구진이 처음으로 발표하였다.

러시아 및 우크라이나 공동 연구진을 통해 내부 백그라운드가 낮은 CMO 섬광 결정 개발을 꾸준히 수행해 왔으며(그림 3 참조), 개발과정에서 성장시킨 섬광 결정은 섬광특성 연구 및 내부 백그라운드 이해를 위해 활용되었다. CMO 섬광결정의 경우 검출기의 용량을 증가시킬 때 ^{48}Ca 의 $2\nu\beta\beta$ 붕괴에 의한 백그라운드가 문제이다. 이를 극복하기 위하여 다양한 R&D가 수행되었고, 최근에 ^{48}Ca 를 제거한 ^{40}Ca 의 구입처를 러시아 그룹에서 발굴하여 사용함으로써 이러한 문제를 해결하였다. 이러한 선행 연구를 통해 높은 내부 백그라운드로 작용이 되는 ^{48}Ca 를 제거하고, 해당 현상에 대한 검출 효율을 높이기 위해 ^{100}Mo 동위원소가 96% 이상 농축된 형태의 CMO 결정 섬광 검출기의 개발이 최근 러시아 연구팀에 의해 성공하였다. 본 연구진은 해당 섬광 결정을 제공받아 양양 지하 실험실에 설치된 감마 검출기 시스템을 통해 그 섬광 특성을 조사하였다. 그 중 가장 섬광 특성이 좋은 것을 선별하여 장기간 백그라운드를 측정함으로써, 해당 섬광 결정의 내부 백그라운드를 이해하였다. 다양한 분석법을 적용함으로써 보다 향상된 실험 결과를 얻기 위한 연구가 수행되었으며, 3개월간의 측정 결과를 분석함으로써 섬광 결정 내부의 $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 백그라운드 레

Fig. 5. The conceptual picture of AMoRE detector. The CMO represents for the crystals with phonon detectors. The crystals are inside a cryostat. The hatched area with green color shows the lead shielding with 1500 mm thickness.

벨을 결정하였고, 그 결과를 2011년 SCINT 학회에서 발표하였다.^[13]

상온에서 광증폭관(Photomultiplier Tube)을 이용하여 실험을 수행할 경우 3 MeV에서 에너지 분해능은 약 5%이다. 2007년부터 한국표준연구원의 김용환 박사그룹이 CMO 섬광결정으로 극저온(약 10 mK)에서 포논(phonon)을 검출하는 연구를 시작하였다. 일반적으로 입자의 에너지를 섬광결정으로 검출할 경우, 그 에너지의 약 10%는 빛(섬광)으로 변환되고, 90%는 물질의 온도를 높이는데 이용되므로, 포논을 검출하는 것이 에너지 분해능을 높이는 데에는 더 효과적이다. 포논을 검출하는 극저온 실험의 경우 에너지 분해능이 5-10 keV로 훨씬 향상될 뿐만 아니라, 알파 입자와 베타입자를 펄스 모양 또는 빛의 양과 포논의 양의 비율로 완벽하게 구별할 수 있다(그림 4 참조). 이에 대한 연구는 성공적이었으며, 이에 관한 연구는 본지의 “입자천체 물리학 극저온 입자검출기”에서 소개가 될 것이다.

AMoRE 실험 개요

2009년에 본격적으로 ^{100}Mo 핵의 중성미자 미방출 이중베타붕괴를 측정하기 위한 AMoRE(Advanced Mo-based Rare-

REFERENCES

- [13] H. J. Kim, 10th International Conference on Inorganic Scintillators and their Applications (SCINT 2009), Jeju, Korea, June 8-12 (2009).

Fig. 6. The green and red area show allowed mass regions of electron type neutrino from neutrino oscillation results. The violet (yellow) area represents the search region for AMoRE-10 (AMoRE-200).

process Experiment) 프로젝트가 시작되었으며, 현재 한국, 독일, 러시아, 우크라이나, 중국, 파키스탄 및 태국, 7개국의 약 90여 명이 참여하는 국제공동연구 실험이다.

AMoRE 실험은 CMO 섬광결정을 이용하여 ^{100}Mo 의 $0\nu\beta\beta$ 붕괴에 관한 연구를 수행하고자 하는 실험이다. 에너지 분해능이 아주 우수(약 0.1%)하고 펄스 모양으로 알파 입자와 같은 백그라운드를 제거할 수 있는 극저온 검출기를 이용할 계획이다. 실험의 최종 목표는 200 kg의 CMO 저온 결정 검출기를 개발하고, 3년간의 지속적인 데이터를 획득하여 3.03 MeV인 신호 영역에서 “0-백그라운드”를 검출하는 것을 목표로 하고 있다. 2015년부터 현재 보유하고 있는 약 1 kg의 CMO 섬광 결정들을 가지고, 양양 지하실험실에서 극저온 검출기를 이용

한 실험을 시작할 예정이다(그림 5 참조). 1년의 데이터를 이용하여 NEMO 그룹에서 측정한 현재 ^{100}Mo 의 $0\nu\beta\beta$ 붕괴 최대 하한치값인 1.1×10^{24} 년보다 낮은 반감기를 측정할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 3년 이내에 CMO 섬광결정의 질량을 10 kg으로 증가시켜서 AMoRE-10 실험을 시작할 계획을 가지고 있다. AMoRE-10 실험에서 얻은 경험과 획득한 데이터를 이용하여, 200 kg의 CMO 섬광 결정을 이용시 신호 영역에 어느 정도의 백그라운드가 생기는지도 연구할 계획이며, “0-백그라운드” 실험이 가능하다는 결론을 얻으면, 200 kg의 CMO 섬광결정을 이용하는 AMoRE-200 실험을 추진할 계획이다. AMoRE-200 실험은 ^{100}Mo $0\nu\beta\beta$ 붕괴 반감기를 약 10^{27} 년 또는 중성미자 절대 질량을 20-40 meV까지 탐구할 수 있을 것으로 기대된다(그림 6 참조).

맺음말

중성미자는 1932년에 볼프강 파울리(Wolfgang Pauli)에 의해서 제안되었다. 중성미자의 검출, 절대 질량 및 성질을 규명하기 위해 과거 80여 년 동안 많은 우수한 아이디어로 실험을 수행하였지만, 우리는 아직도 중성미자에 대해 잘 알지 못한다. 중성미자가 질량이 있다는 실험적 증거는 최근 10여 년간의 중성미자 진동 실험을 통해서 밝혀졌다. 중성미자의 정확한 절대 질량 측정 및 중성미자가 마요라나 입자인지 디랙 입자인지를 규명하는 것은, 오랫동안 입자 물리뿐만 아니라 우주 천체물리 분야에서 꼭 해결해야 하는 숙제이다. 특히 중성미자가 마요라나 입자이면 우주 생성시 대부분의 반물질이 어떠한 메커니즘으로 없어졌는지에 대해 설명할 것으로 기대한다. 이러한 의미에서 AMoRE 실험 결과의 파급효과는 아주 크다고 할 수 있다.