입자천체 물리학 극저온 입자검출기

DOI: 10.3938/PhiT.23.033

김 용 함

Low-temperature Detectors for Particle Astrophysics

Yong-Hamb KIM

Low temperature detectors (LTDs) have been developed in response to the need for detectors with superior energy resolution and ultra-low thresholds in nuclear and particle physics. Recent developments of these detectors have demonstrated performance levels for resolution and threshold that exceed the extreme limits of conventional semiconductor-based detectors. The cryogenic detection technique has been adapted in rare-event searches and has become an important measurement tool in many other applications. In this report, we review the general detection principle of LTDs. We also introduce the detectors that have been developed for the AMoRE and the KIMS-LT experiments.

저온검출기관?

방사선과 방사능의 발견 이후 지난 세기에 개발된 여러 종류의 방사선 검출기는 핵물리학과 입자물리학의 태동과 비약적인 발전에 지대한 역할을 하였다. 이는 방사선의 종류와 에너지의 측정 정확도를 높임으로써 물질의 근본적인 구조를 예측 가능하게 하고, 새로운 입자의 발견도 가능하게 하였다. 이에 정립된 핵 및 소립자에 대한 이해를 바탕으로 20세기 후반부터는 우주의 생성과 진화에 대한 구체적인 연구가 가능하게 되었다. 위성을 이용한 우주선 측정, 심층 지하 실험 및 여러

종류의 지상 정밀 측정은 새로운 검출기 기술과 해석기술을 바탕으로 획기적인 발전을 하였고, 핵 및 소립자 물리학 연구로 우주와 천체를 이해하는 입자천체물리학을 태동하게 하였다.

1987년 독일 테게른제(Tegernsee)의 링베르그 성(Ringberg Castle)에서는 중성미자와 암흑물질 연구를 위한 저온검출기(Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter)라는 워크숍^[1]이 열렸다. 이름에서도 나타나듯이 이 LTD 워크숍은 극저온에서 일어나는 물리현상을 이용한 측정기술을 발전시켜 중성미자 연구와 암흑물질 탐색에 활용한다는 선구자적인 내용의 발표가 있었다. 초전도성질 같이 저온에서 나타나는 양자 역학적 또는 극한 물성 변화를 정밀 측정하여 검출기에 응용한다는 개념으로 시작되었고, 이 분야에 선구자적인 융합기술을 발전시키는 계기가 되었다. 현재 이 LTD는 상용화된 반도체 또는 섬광 검출기의 이론적 한계보다 뛰어난 에너지 분해능과 문턱에너지 측정이 가능하여, 현재 입자천체물리학 분야를 비롯한 많은 기초 및 응용연구에 사용되고 있다.

우주배경복사를 정밀 측정하여 우주론 연구에 지대한 역할을 하고 있는 Planck^[2](유럽우주국 미션) 실험은 LTD의 일종인 neutron transmutation doped(NTD) germanium thermistor^[3]를 핵심 센서로 사용하였다. 또한 최근 중력파에 의한 B-mode polarization을 측정하였다고 주장하는 BICEP2^[4] 실험은 남극에 위치하는 지상실험이나 측정감도를 높이기 위해서 초전도상전이센서(Transition edge sensor, TES)^[2]를 사용하고 있다. 지하실험으로는 WIMP(Weakly Interaction Massive Particle) 암흑물질을 찾고 있는 CDMS,^[5] CRESST,^[6] EDELWEISS^[7] 실험

REFERENCES

- [1] K. Pretzl, N. Schmitz and L. Stodolsky (ed.), *Low Temperature Detectors* (Springer-Verlag, 1987).
- [2] <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>.
- [3] C. Enss(ed.), *Cryogenic Particle Detection* (Springer, 2005).
- [4] <http://bicepkeck.org/>.
- [5] <http://ppd.fnal.gov/experiments/cdms/>.
- [6] <http://www.cresst.de>.
- [7] <http://edelweiss.in2p3.fr/>.

저자약력

김용함 교수는 브라운대학교 이학박사(2003)로서 브라운대학교 박사후연구원을 거쳐, 현재 한국표준과학연구원(2005-) 양자측정센터 책임연구원, 과학기술연합대학원대학교(2011-) 나노계측과학 교수, 기초과학연구원(2013-) 지하실험연구단 그룹리더로 재직 중이다. (yhk@ibs.re.kr)

힘들이 LTD를 사용한 극저온 입자검출기이다. 중성미자의 절대 질량 측정 및 기본 성질을 결정할 수 있는 중성미자 미방출 이중베타붕괴 실험으로는 CUORE^[8] 실험과 AMORE^[9] 실험 등이 있다.

일반적인 입자검출기는 검출기를 구성하는 물질(흡수체)이 측정하려는 입자와 반응하여 이온화되는 현상을 이용한다. 반도체 흡수체인 경우 전기장을 걸어주어 하전입자(charged particles)인 전자와 양공으로 발생하는 전하를 측정한다. 흡수체가 섬광(scintillation) 성질이 있는 경우 발생하는 빛을 광배전관(photomultiplier tubes)이나 광다이오드(photo-diodes) 등으로 측정한다. 하지만 흡수체에 전달된 에너지의 작은 일부만 전자양공 쌍 또는 섬광으로 변환되며, 대부분의 에너지는 격자 진동인 포논(phonon) 형태로 변환되어 온도변화를 유발한다. 금속 흡수체인 경우는 격자진동과 함께 자유전자도 온도변화에 관여한다. 따라서 온도 변화를 정밀 측정하는 것은 전하 또는 섬광측정보다 효율적인 측정이 가능하게 한다. 반도체 또는 섬광 결정을 흡수체로 사용하는 경우엔 전하 또는 섬광 측정과 동시에 포논 측정을 같이 할 수 있는 장점이 있다.

하지만 에너지 흡수에 의해 발생한 포논을 측정하는 것은 쉽지만은 않다. 모든 응집물질(condensed matter)에선 온도에 따르는 통계적 포논의 분포가 자연적으로 존재한다. 흡수체가 열용량이 큰 열 저장고와 연결되어 있으면 흡수체의 열에너지가 일정하지 않고 변하게 되고, 포논의 분포 역시 시간에 따라 변하게 된다. 상온에서는 이 열적 요동(thermal fluctuations)이 입자 검출에 생기는 포논보다 더 많은 양일 수 있다. 그런데 극저온에서는 온도에 따른 열에너지의 양(열용량, heat capacity)과 열적 요동 역시 아주 작아질 수 있다. 게다가 열용량이 작아지므로 같은 에너지에 대해 변화되는 온도가 커지게 되므로 온도 또는 포논 측정을 위해서는 낮은 온도에서의 측정이 훨씬 유리하다고 볼 수 있다.

온도 측정을 통한 검출기의 분해능 한계는 열적 요동의 세기가 중요 역할을 한다. 반도체 또는 섬광 검출기에서는 전자양공 한 쌍이나 하나의 섬광을 만들기 위해서는 수 eV에서 10 eV 정도의 에너지가 필요하다. 하지만 포논 측정의 경우에는 어떤 온도(T)에서의 평균 포논 에너지는 약 $k_B T$ 로 정해지고, 10 mK에서는 이 값은 10^{-6} eV에 가깝다. 여기서 k_B 는 볼츠만 상수이다. 만약 검출기의 열용량이 C 이고 전체 열에너지를 CT 로 근사한다면, 평균 에너지 양자의 개수는 $N \approx CT/k_B T$ 가 된다. 즉 열적 요동에 기인하는 통계적 잡음 또는 검출기의 분해능의 한계는 $(\delta E)_{rms} \approx k_B T(N)^{1/2} = (k_B T^2 C)^{1/2}$ 로 표현될 수 있다. 1 kg의 CaMoO_4 검출기를 $T=10$ mK에 놓으면, 열적 요동에 의한 분해능 한계는 20 eV Full Width of Half Maximum(FWHM)으로 작아지게 된다.

Fig. 1. (A) A simplified concept for detection principle of low temperature detectors. (B) Heat flow diagram. (C) Temperature response caused by a particle detection.

측정 원리와 검출기 성능

저온검출기에서는 검출하는 에너지를 열에너지로 변환하여 수반된 온도변화를 측정하는 개념인 calorimetric detection을 기본원리로 한다. 에너지를 측정하는 의미로 입자물리에 일반적으로 사용되는 칼로리미터(calorimeter)의 일종으로 볼 수도 있다.

일반적으로 저온검출기는 그림 1(A)와 같이 흡수체와 온도계로 구성되며 1 K 이하의 저온환경에 열접촉 시킨다. 검출하고자 하는 입자(엑스선, 감마선, 전자, 암흑물질 등)가 흡수체와 반응으로 에너지(E)를 전달하면 순간적인 온도 변화가 유발되고 이를 온도계로 정밀 측정한다(그림 1(B)). 즉, 시간에 따른 온도변화(ΔT)를 정밀 측정함으로써 전달된 에너지를 알아낼 수 있다. 여기서 시상수(τ)는 C/G (C : 열용량, G : 외부로의 열전도도)로 결정된다(그림 1(C)). 이때 온도변화에 민감한 저항 또는 자화(magnetization) 등의 성질을 갖는 물질을 온도계 센서로 사용한다. NTD와 TES가 저항 온도계의 대표적인 예이고, 자기양자센서(Metallic Magnetic Calorimeter, MMC)^[2]는 자기적 성질을 이용한 온도계이다. TES와 MMC는 초전도 양자간섭장치(superconducting quantum interference device,

REFERENCES

- [8] <http://crio.mib.infn.it/wigmi/pages/cuore.php>.
- [9] http://cupweb.ibs.re.kr/html/cup_en/research/research_0302.html.

Fig. 2. Energy spectrum of an ^{241}Am source measured with an MMC sensor at KRISS. The detector resolution was 1.2 keV FWHM for 5.5 MeV alpha particles and 0.40 keV FWHM for 60 keV gamma-rays.^[10]

SQUID)를 이용하여 신호측정의 정밀도를 향상시킨다.

정밀 온도계 역할을 하는 이 LTD 센서의 성능은 일반적으로 금속 박막을 흡수체로 사용하여 측정한다. 현재 5.9 keV 엑스선에 대해 1.6 eV FWHM 분해능이 TES와 MMC를 사용하여 측정되었다. 고 분해능 알파선 분광 역시 TES와 MMC를 사용하여 연구되고 있고 5 MeV 영역에서 약 1 keV FWHM 분해능이 보고되고 있다. 그림 2는 한국표준과학연구원(KRISS)에서 제작된 MMC를 사용하여 ^{241}Am 선원의 알파 입자와 낮은 에너지 방사선에 대한 측정결과이다. 수 keV에서부터 수 MeV 영역까지 한 개의 검출기를 사용하여 측정 가능하고 에너지 분해능 역시 기존 반도체 검출기보다 뛰어나다.

희귀 반응 측정 지하실험

WIMP 신호측정과 중성미자 미방출 이중베타붕괴 측정 같은 매우 드문 반응을 측정하기 위해서는 우주선으로부터의 간섭이 적은 심층지하실험이 필수적이다. 희귀신호의 측정감도를 높이기 위해 검출기의 에너지 분해능을 극대화하고, 검출기 내부와 외부 방사능에서의 간섭을 최소화하는 노력 역시 필요하다. 극저온 입자검출기는 극한의 에너지 분해능을 제공하고, 측정하려는 신호와 내·외부간섭신호를 효과적으로 구별해내는 방법도 다음과 같이 제공한다.

반도체 또는 섬광 결정을 흡수체로 사용하는 경우, 전자 및 섬광 측정과 동시에 온도변화까지 측정할 수 있게 된다. 여기서의 온도는 흡수체 결정의 포논 분포로 정의되고, 포논을 측정하여 흡수체에 전달된 열에너지를 측정하게 된다. 각각의 측

Fig. 3. Underground experiments in LTD measurement concept using light, charge and phonon measurement chains.

정 이벤트는 섬광과 포논 신호 또는 전자와 포논 신호의 2개의 측정 수단(measurement chain)을 사용할 수 있다. 측정 입자의 종류에 따라 측정 수단의 상대 비율이 다르게 측정될 수 있는데 이것은 측정하고자 하는 신호와 배경잡음 신호를 구별하는데 도움이 된다. WIMP 신호는 흡수체의 핵 되튕김(nuclear recoil) 신호를 측정하는 것으로 전자 되튕김이 배경잡음을 준다. 반면 이중베타 붕괴신호는 전자 신호를 측정하는 것으로, 여기서는 전자신호를 알파신호 배경잡음에서 구별해 내야 한다.

그림 3은 가능한 측정 수단과 실제 사용하고 있는 지하실험의 예를 도식적으로 보이고 있다. CDMS와 EDELWEISS는 Si와 Ge 반도체 흡수체를 사용하여, 전자와 포논 신호를 동시에 측정한다. 전자/포논 신호 비율이 전자 되튕김이 핵 되튕김에 비해 상대적으로 큰 성질을 이용하여 각각의 신호의 종류를 구별해 내고 있다. CRESST는 섬광 결정인 CaWO_4 를 흡수체로 사용하고 섬광과 포논을 동시에 측정한다. 이 실험에도 전자 되튕김 신호가 섬광/포논 크기가 WIMP가 만들 수 있는 핵 되튕김 신호보다 더 큰 성질을 이용하고 있다.

중성미자 미방출 이중베타붕괴실험인 AMoRE 실험은 ^{100}Mo 의 이중베타붕괴 스펙트럼의 끝점(end point, Q value)인 3.04 MeV에 중성미자에 의한 에너지 감소 없이 두 개 전자의 에너지가 모두 흡수체에 전달되는 신호 측정을 목표로 CaMoO_4 섬광 결정을 흡수체로 사용한다. 즉, 전자 신호가 측정하고자 하는 신호이다. 이 관심에너지 영역(Region of interest, ROI)에서는 자연 방사능에 의한 전자 배경잡음은 거의 없으나, 알파선에 의한 에너지는 이 영역에 배경잡음으로 신호를 줄 수 있다. AMoRE 실험에서는 전자신호를 섬광과 포논신호를 동시 측정하여 내·외부 알파신호 배경잡음을 구별해 내고 있다.^[11]

REFERENCES

- [10] W. S. Yoon, *et al.*, accepted in Nucl. Instr. Meth. A (2014).
- [11] Y. H. Kim, "The AMoRE project", presented in TAUP2013.

이탈리아 LNGS 지하실험실에 건설되고 있는 CUORE^[8] 실험은 20년 동안 연구하고 있는 저온검출기를 이용한 중성미자 미방출 이중베타붕괴 탐색연구이다. TeO₂ 결정을 이용하여 ¹³⁰Te의 중성미자 미방출 이중베타붕괴 신호를 측정하는 것을 목표로 하고 있고, 현재 760 kg 검출기가 완성단계에 있다. 앞으로 수년 동안 이 희귀 반응 측정의 측정 감도가 가장 높을 것으로 예상되고 있다. 하지만, CUORE 검출기는 포논만을 측정하고 있으므로 알파 배경잡음을 구별하기 어려운 단점과 Q value가 상대적으로 낮아 자연방사능에 의한 전자 배경잡음도 무시할 수 없는 단점이 있다.

AMoRE 검출기

CaMoO₄ 결정에 있는 ¹⁰⁰Mo이 이중베타 붕괴 또는 중성미자 미방출 이중베타붕괴를 하면 전자 두 개의 운동에너지가 결정에 흡수된다. 검출기 자체가 소스(source)를 포함하고 있어 소스 = 검출기(source = detector) 검출개념으로도 알려져 있다. CaMoO₄는 섬광성질이 있으므로 흡수된 일부 에너지는 섬광으로 방출되고 나머지는 열에너지 성격의 포논으로 변환된다. CaMoO₄ 결정의 Debye 온도(T_D)가 430 K^[12]로 $(T/T_D)^3$ 비례하는 열용량(C)이 낮은 온도에서 아주 작아지게 된다. 따라서 에너지 흡수에 따른 온도변화($\Delta T = E/C$)가 커지게 된다. 뿐만 아니라, Mo를 포함하는 섬광결정 중 가장 빛을 많이 내는 결정으로 알려져 있어 섬광 측정에도 효율적이다.

포논 신호와 섬광 신호를 동시 측정한 결과는 그림 4(upper)를 통해 확인할 수 있다. 두 신호의 비율을 비교하면 내·외부 방사성 소스로부터 기인하는 전자 신호와 뮤온이 결정을 통과하며 에너지를 전달하는 신호가 같이 전자신호 밴드를 구성하고 있다. 한편 결정 내부에서 알파붕괴에 의한 신호가 전자 신호 밴드에서 떨어져서 분포하는 것이 보인다. 예측한 대로 알파 흡수에 대한 빛 신호가 작게 측정되었다. 두 신호의 구별 정도는 약 8 σ 정도가 측정되었다.

그림 4(lower)에서 보이듯이 포논 신호의 시간 특성이 신호의 종류(전자 또는 알파)에 따라 다르게 측정되었다.^[13] 전자 신호가 알파 신호보다 더 느린 rise-time과 decay-time의 특성을 보여 mean-time을 이용한 PSD parameter로 사용하였다. 포논 신호 하나만을 이용하여도 알파 배경잡음이 구별이 가능하다는 결과를 보이고 있다. 최근 결과를 보면 15 σ 이상의 신호 구별 능력을 보여주고 있다. PSD가 포논 센서 하나로도 잘 될 수 있으므로, 이중베타붕괴 연구를 위해서는 섬광을 따로 측정할 필요가 없을 수 있으나, 이 검출기를 사용해서 낮은 에너지 WIMP 신호 측정에 활용하기 위해서는 좋은 성능의 섬광 검출기가 필요하다.

Fig. 4. Separation of alpha and electron events absorbed in a CaMoO₄ crystal. Light(photon)/Heat(phonon) ratio of the signal size provided clear separation for electron and alpha induced events (upper). Unambiguous pulse shape discrimination was demonstrated using pulse-shape parameter (mean-time) with phonon measurement only (lower).^[13] These measurements were performed in an over-ground lab.

이 결과들은 뮤온 신호가 많은 지상실험실에서 측정된 것으로 전자와 알파 신호 밴드 밖의 신호도 줄 수 있다. 앞으로 계획하고 있는 지하실험(양양양수발전소 내)을 수행하면 더 깨끗한 신호 구별이 가능해질 것으로 기대한다.

에너지 분해능 측정은 외부 ²⁰⁸Tl 소스를 사용하였고, 2.6 MeV full peak에 대해 약 8 keV FWHM의 분해능을 나타내었다. 또한 낮은 에너지 영역에선 8 keV Cu x-ray fluorescence 피크를 확실히 구별해 내었다. 10 mK 측정에서의 문턱에너지(threshold)는 약 1 keV 정도로 측정되었다. 낮은 에너지 결과는 CaMoO₄ 결정과 MMC를 이용한 LTD 측정으로 WIMP 연구가 가능하다는 것을 보여 앞으로 계획하는 KIMS-LT(저온 암흑물질탐색) 연구에 중요한 시작점이 될 수 있다.

REFERENCES

- [12] S. J. Lee *et al.*, *Astroparticle Physics* **34**, 732 (2011).
- [13] G. B. Kim *et al.*, accepted in *Adv. High Energy Phys.* (2014).

맺음말

Fig. 5. LTD detector setup of an AMoRE detector cell and AMoRE-200.

AMoRE 검출기는 궁극적으로 200 kg의 결정을 사용할 예정이다. 검출기 타워의 모식도가 그림 5에 나타나 있다. 각각의 검출기 셀은 포논 센서(MMC와 phonon collector film)와 섬광 검출기로 구성된다. 섬광 검출기 역시 MMC 센서 기반으로 Ge 웨이퍼를 빛 신호 흡수체로 사용하는 LTD 형식의 검출기를 사용할 예정이다.

극저온 입자검출기는 극저온에서 일어나는 초전도 현상을 비롯한 양자현상을 이용하여 신호를 측정하는 검출기로, 극한의 에너지 분해능이 구현될 수 있다. 또한 측정하려는 신호와 내·외부 간섭신호를 매우 효과적으로 구별해 내는 성능도 증명되었다.

AMoRE 연구에서는 극저온 검출기를 이용하여 ROI 영역에 방해신호가 전무한 무배경잡음 환경에서 측정을 수행하려 한다. 200 kg 검출기가 완성되는 2019년에는 세계최고의 측정감도를 가진 AMoRE-200 검출기가 구동될 예정이다. 최초로 중성미자 미방출 이중베타붕괴 신호를 측정하여 현대 물리의 최대 문제를 해결하고 새로운 연구의 장을 여는 때를 예상해 본다. 또한 측정 가능 영역의 한계를 확장시키는 검출기를 개발하여 암흑물질의 가장 강력한 후보인 WIMP 탐색의 세계 최고 감도의 실험을 구현하는 것도 기대해 본다.

극한 측정 기술의 발전은 보지 못한 새로운 현상을 측정가능하게 하여 새로운 과학의 장을 열게도 해준다. 과학사에서 새로운 패러다임을 만든 과학과 기술은 측정기술의 발전에 의존해 왔다. 극한 온도에서 초정밀 측정을 하는 극저온 입자검출기를 발전시켜 목표하는 입자천체물리학의 새로운 발견과 측정에 이바지하고, 파급되는 기술의 발전으로 과학의 여러 분야에 미칠 많은 효과를 기대해 본다.