암흑물질 탐색

DOI: 10.3938/PhiT.23.031

이현수·김남영·전은주

Dark Matter Search

Hyun Su LEE, Nam-Young KIM and Eunju JEON

Experiments for the direct detection of WIMP-type dark matter are a crucial component in the search for the Universe's missing matter. In this report, we briefly review the current status of experiments for the direct detection of WIMP-type dark matter. We then discuss the Korea invisible mass search (KIMS) experiment, its current status and future prospects.

암흑물질이란?

암흑물질의 존재는 1933년 Zwicky가 Coma 은하단에 속한 은하의 운동속도가 예상보다 매우 빠르다는 사실로부터 예측되었다.^[1] 그 후 1975년 Rubin이 은하 외각의 별들이 은하 중심 부를 공전하는 속도가 거리가 멀어져도 줄지 않는다는 점을 관측하여 더욱 확실시 되었다.^[2] 최근에는 매우 정밀하게 측정된 우주배경복사, 초신성 관측, 우주거대구조 관측 등을 통해 암흑물질이 우주 구성의 대략 24%를 차지하는 반면 눈에 보이는 일반 물질은 대략 4~5%에 불과하다고 이해되고 있다 (그림 1).

이렇듯 암흑물질의 존재는 매우 잘 알려져 있고, 또 이에 대해 의문을 가지는 과학자는 많지 않다. 하지만 그 정체가 무엇

Fig. 1. Composition of the Universe.

인지는 여전히 미스터리이다. 지금까지 다양한 암흑물질 후보들이 고려되고 탐색되어 왔으나 우주에 대한 정밀 관측 결과를 잘 설명할 수 있는 속도가 느리고 차가운 암흑물질 후보는 아직까지 관측되지 않았다. 따라서 암흑물질은 현재까지 알려지지 않은 새로운 소립자일 가능성이 매우 크다. 우주의 진화 이론과 정밀 우주 관측 결과를 잘 설명하는 암흑물질 후보로 김진의 교수가 제안한 Axion^[3]과 고 이휘소 박사의 아이디어에서 시작된 WIMP^[4]가 있다. 이 중 Axion은 기초과학연구원의 “액시온 및 극한상호작용 연구단”에서 그 탐색을 위한 준비를 진행하고 있다. WIMP는 약하게 상호작용을 하는 무거운 물질 (Weakly Interacting Massive Particle)의 통칭으로 초대칭 이론의 가장 가벼운 입자(LSP)가 가장 강력한 WIMP의 후보이다. 이 글에서는 지하실험연구단에서 활발하게 진행 중인 WIMP 탐색의 세계적 동향과 본 연구단의 연구내용에 대해 살펴보고자 한다.

저자약력

이현수 교수는 서울대학교 이학박사(2007)로서 시카고대학교 박사후연구원을 거쳐 2012년부터 이화여자대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (hyunsulee@ewha.ac.kr)

김남영 박사는 중앙대학교 이학박사(2009)로서 한국원자력연구원 박사후연구원, 세종대학교 연구원을 거쳐 2013년부터 기초과학연구원 지하실험연구단의 연구위원으로 재직 중이다. (nykim@ibs.re.kr)

전은주 박사는 일본 Graduate University for Advanced Studies에서 이학박사(2003)를 취득하고 서울대학교 연구원, 세종대학교 초빙교수를 거쳐 2013년부터 기초과학연구원 지하실험연구단의 연구위원으로 재직 중이다. (ejjeon@ibs.re.kr)

REFERENCES

- [1] F. Zwicky, *Helv. Phys. Acta* **6**, 110 (1933).
- [2] V. C. Rubin, W. K. Ford and N. Thonnard, *ApJ* **225**, L107 (1978).
- [3] J. E. Kim, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 103 (1979).
- [4] B. W. Lee and S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 165 (1977).

Fig. 2. Discrimination between nuclear recoil events and electron recoil events using typical CsI(Tl) scintillating crystal (up) and low temperature detector using CaWO₄ crystal (down).

WIMP 탐색 동향

WIMP 입자는 매우 드물지만 일반물질의 핵과 탄성충돌을 할 수 있다. 이때 되 튕겨진 핵이 여기될 때 발생하는 신호를 측정하면 WIMP 신호의 검출이 가능하다. WIMP 입자의 평균 속도는 은하 중심을 기준으로 했을 때 거의 영에 가까울 것으로 예상되나 태양계가 은하 중심에 대해 대략 230 km/s의 속도로 회전하여 관측이 가능한 에너지(< 100 keV)를 검출기에 전달할 수 있게 된다.^[5]

WIMP 입자와 일반 물질 사이의 반응은 매우 드물지만 이에 반해 상대적으로 매우 많은 배경 방사능이 우리 주변에 존재한다. 따라서 이를 효율적으로 줄이는 것이 WIMP 탐색의 가장 중요한 열쇠 중 하나이다. 따라서 한국에서 진행 중인 Korea Invisible Mass Search(KIMS) 실험을 비롯한 세계 유수의 WIMP 탐색 실험들은 이러한 배경방사능을 차폐하는 일에 매우 많은 노력을 기울이고 있다. 우주에서 날아오는 우주선으로부터 만들어진 뮤온 입자의 경우 에너지가 매우 높아 수십 미터의 차폐체를 쌓는다고 하더라도 모두 제거하는 것은 거의 불가능하다. 특히 뮤온이 차폐체와 반응하여 만들어지는

Fig. 3. Annual modulation amplitude observed by DAMA/LIBRA experiment.^[6]

중성자의 경우 검출기의 핵과 탄성 충돌하여 WIMP 신호와 구분이 매우 힘들기 때문에 더욱 문제가 된다. 이러한 뮤온의 제거를 위해서는 깊은 지하 (수백 미터~수천 미터) 실험실이 필수적으로 모든 WIMP 탐색 실험들이 깊은 지하 실험실에서 불순물이 매우 적은 차폐체와 실험 장비를 사용하여 WIMP 탐색을 진행하고 있다. 그러나 차폐체와 실험 장비 심지어 검출기 내부에 포함된 자연 방사능을 완전히 제거하는 것은 거의 불가능하다. 특히 반감기가 매우 긴 U, Th, K 등의 자연 방사능 물질로부터 발생하는 신호가 문제가 되어 WIMP 탐색을 어렵게 만든다. 이러한 원소에서 발생하는 알파입자의 경우 에너지가 매우 높아 상대적으로 큰 문제는 아니나 낮은 에너지의 신호를 발생시키는 베타(전자), 감마 신호는 문제가 된다. 다행히도 전자나 감마의 경우 핵과 충돌하기보다는 궤도전자와 반응하여 핵과 반응하는 WIMP 신호와 그림 2처럼 구분될 수 있다. 일반적인 섬광 검출기의 경우 섬광 신호의 시간 분포의 차이로부터 일정 정도 구분이 가능하다. 매우 민감한 온도 변화를 측정할 수 있는 극저온 검출기의 경우 온도 변화를 주는 포논 신호와 섬광 혹은 전자-양공쌍의 발생비율로부터 대부분의 전자 반응 신호를 구분해 제거할 수 있다.

배경 방사능으로부터 WIMP 신호를 구분하는 또 다른 방법으로 연간 변조신호(annual modulation signal)를 확인하는 방법이 있다. WIMP 신호의 검출이 가능한 이유는 태양이 은하 중심에 대해 대략 230 km/s의 속도로 회전하기 때문인데, 이때 지구는 태양을 약 30 km/s의 속도로 공전한다. 따라서 지구의 암흑물질에 대한 상대속도가 계절에 따라 약 60 km/s의 차이가 나고 이에 따라 WIMP 신호의 빈도수가 계절에 따라 변하는 현상이 일어나게 된다. DAMA/LIBRA 실험 팀은 NaI 섬광검출기를 사용해 지난 20년간 WIMP 탐색을 진행해 왔으며 그 결과 9.3 σ 신뢰도로 연간 변조 신호를 확인하였다고 발표하였다(그림 3). 최근 CoGent, CRESST, CDMS 실험에서도 WIMP 신호의 힌트(2-3 σ 신뢰도)를 얻었고, 이는 DAMA

REFERENCES

- [5] G. Bertone *et al.*, Physics Reports **405**, 279 (2005).
- [6] R. Bernabei *et al.*, Eur. Phys. J. C **73**, 2648 (2013).

Fig. 4. Spin-independent WIMP-nucleon cross section limits versus WIMP mass for direct detection experiments.^[7]

/LIBRA 실험과 같이 낮은 질량의 WIMP로 설명될 수 있어서 매우 흥미롭다. 그러나 KIMS 실험을 비롯하여 SuperCDMS, LUX, XENON 실험 등에서는 이와 상반되는 결과를 얻어 궁극증을 더하고 있다.^[7]

그림 4에서 보듯이 WIMP와 양성자 사이의 스핀에 의존하지 않는 반응만 고려한다면 DAMA/LIBRA 실험은 이미 다른 여러 실험과 상반된 결과로 벌써 배제되어야 마땅하다. 그러나 WIMP 탐색 실험들은 모두 WIMP와 검출기 핵 사이의 결합은 산란 반응을 관측하고 있고 이 결과를 WIMP와 양성자 사이의 반응으로 다시 계산하여 비교하고 있다. 이 과정에서 검출기의 핵 구성에 의존하는 여러 변수들이 존재한다. 예를 들면 검출기에 따라 핵이 여기할 때와 전자가 여기할 때 발생하는 신호가 다른데 이는 각 검출기마다 정밀한 측정이 진행되어야 한다. 그러나 낮은 질량의 WIMP 신호는 대부분 문턱 에너지 근처로 정확한 효율과 검출기에 대한 이해가 필요해 측정 결과 간에 상당한 차이를 보이고 있다. 또 대부분의 경우 WIMP와 양성자 사이의 스핀에 의존하지 않는 반응만을 고려하나, 실제로는 스핀에 의존하는 반응이 동시에 존재할 수 있고, 이때 스핀에 의존하는 핵 형태 인자(spin dependent nuclear form factor) 그리고, 스핀 인자 등을 정확하게 이해하여야 하는데 대부분의 경우 핵 이론 계산에 의존하여 상당한 오차가 존재한다. 뿐만 아니라 DAMA/LIBRA 실험이 연간변조신호 분석을 통해 WIMP 신호를 검증하였지만 다른 실험들은 WIMP와 핵 사이의 반응 신호 판별을 통해 평균 WIMP 신호 분석을 하였다. 두 가지 다른 신호의 비교를 위해 총 WIMP 신호 가운데 연간변조신호의 비율을 정확히 알아야 할 필요가 있는데 일반적으로 표준우주모형(standard halo model)과 초대칭이론의 LSP를 WIMP로 가정하여 비교하고 있다. 그러나 연간변조신호의 비율은 우주모형 혹은 WIMP 모델에 따라 달라질 수 있고,

Fig. 5. KIMS CsI detectors array.

이는 두 종류 실험의 직접적인 비교를 어렵게 만든다. 따라서 여전히 DAMA/LIBRA 실험의 WIMP 탐색 결과는 애매모호한 상태로 직접적인 비교가 가능한 다른 실험을 통해 증명되어야 할 필요가 있다.

한국의 WIMP 탐색

한국에서는 Korea Invisible Mass Search(KIMS) 실험이 한국수력원자력 주식회사의 특별한 배려로 강원도 양양의 양수 발전소 지하 약 700 m 깊이의 양양 지하 실험실을 구축하여 지난 15년간 WIMP 탐색에 매진해 오고 있다.^[8] KIMS 실험은 DAMA/LIBRA 실험에서 사용하는 NaI 결정과 매우 유사한 CsI 결정을 사용하며 WIMP와의 반응으로 발생하는 빛을 검출하는 실험으로 섬광 결정검출기 가운데 현재까지 민감도가 가장 뛰어난 실험이다. 700 m 지하 실험실에 납, 구리, 광물기름 등 약 40톤에 이르는 차폐체를 설치하고 내부 방사능을 극도로 줄인 순수한 CsI 결정 검출기를 개발하여 그림 5와 같이 설치하였다. 100 kg의 검출기를 장치하여 2009년부터 2012년까지 장기간 실험을 수행해 왔다. 지금은 CsI 검출기의 업그레이드와 NaI 결정 검출기 개발을 위해 잠시 운영을 중단한 상태이다.

섬광검출기의 경우 펄스모양분석(PSD) 방법을 통해 핵의 여

REFERENCES

- [7] P. Cushman *et al.*, arXiv:1310.8327; P. Gondolo, Presented in iCHEP2014.
- [8] H. J. Kim *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **457**, 471 (2001); H. S. Lee *et al.* (KIMS Collaboration), Phys. Lett. B **633**, 201 (2006); H. S. Lee *et al.*, (KIMS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **99**, 091301 (2007).

기 반응과 전자의 여기반응을 구분할 수 있다. 이때 CsI의 경우 NaI에 비해 훨씬 좋은 PSD 파워를 가지고 있음이 잘 알려져 있다. KIMS 실험은 초기 1년 데이터를 PSD 방법을 적용하여 WIMP 신호를 검출하는 데이터 분석을 진행하였고, 그 결과 WIMP 신호를 관측하지 못해 90% 신뢰 범위 한계선을 얻었다.^[9] 이 결과는 DAMA/LIBRA의 관측 결과 특히 WIMP 질량이 대략 100 GeV 근처의 높은 질량에 해당되는 WIMP와 Iodine 핵 사이의 반응 결과와는 모순된 결과로, KIMS 실험이 동일한 Iodine를 사용하고 있기 때문에 검출기에 의존하는 여러 요소와는 무관하게 비교가 가능하였다. 또한 3년간의 전체 데이터를 이용하여 연간변조신호 분석을 진행하였고, 그 결과 또한 동일하게 WIMP 신호를 관측하지 못하였다.^[10] 따라서 KIMS 실험을 통해 DAMA/LIBRA 신호를 WIMP와 Iodine 사이의 반응에 의한 결과로 해석하는 이론은 이견의 여지가 없이 제거되었다. 그러나 여전히 WIMP와 나트륨의 반응에 의한 신호, 즉 낮은 질량의 WIMP에 대한 해석은 충분히 가능성이 남아있고 이를 검증하는 것은 매우 중요한 문제이다.

KIMS-NaI 실험

본 연구단에서는 DAMA/LIBRA 실험의 이견 없는 증명을 위해 NaI 결정 검출기를 이용하는 KIMS-NaI 실험을 준비 중이다. DAMA/LIBRA 실험과 동일한 NaI 결정을 사용하여 동일한 연간변조신호를 분석한다면 모델 혹은 검출기에 따른 차이 없이 직접적인 비교가 가능하여 재론의 여지없는 증명이 가능할 것이다.

KIMS-NaI 실험 성공의 열쇠는 DAMA/LIBRA에서 사용하고 있는 NaI 결정검출기보다 더 성능이 좋은 검출기를 개발할 수 있는가에 달려있다. 이를 위해 NaI 검출기의 문턱에너지를 2 keV 아래로 줄이고 또, 백그라운드가 문턱에너지 근처에서 1 counts/kg/keV/day (CPD) 이하의 빈도를 가지는 검출기의 개발이 필요하다. 본 연구단에서는 미국 Alpha Spectra사를 통해 매우 순수한 NaI 결정 검출기 2개를 2013년 개발하여 검출기의 성능을 측정해오고 있다. 최근 개발된 Hamamatsu사의 고 양자 효율 광전자 증배기를 사용하였을 때 대략 1 keV의 에너지에 대해 15개의 광전자를 얻어 그 효율이 DAMA/LIBRA 검출기보다 대략 50% 이상 높았다. 문턱에너지는 광전자의 효율에 반비례하므로 더 낮은 문턱에너지의 검출기가 가능함을 증명하였다. 이 중 두 번째 만들어진 NaI 검출기의 경우 6 keV에서 3 CPD의 백그라운드 빈도로 DAMA/LIBRA 실험을 제외하고 가장 순수한 NaI 결정 검출기에 해당된다.^[11] 그림 6에서 보는 것과 같이 배경방사능 가운데 대략 절반 정도가 NaI 결정 내부의 ^{40}K 과 ^{210}Pb 의 방사능 물질에서

Fig. 6. The measured background level in a NaI crystal of KIMS-NaI experiment with simulations of backgrounds from internal contamination.^[11]

기여하고 나머지 절반은 NaI 결정이 한국으로 옮겨질 때 우주선으로부터 만들어진 짧은 반감기의 내부 방사능과 외부 실험 장치에서 발생하는 방사능이 기여한다고 생각된다.

NaI 결정의 순도를 높이기 위해 고순도의 NaI 파우더를 이용하여 Alpha Spectra사뿐만 아니라 중국의 Beijing Hamamatsu와 SCICCA사를 통해 새로운 NaI 결정을 제작하는 작업이 진행 중이다. 이 파우더를 사용했을 때 ^{40}K 과 ^{210}Pb 은 현재 생산된 NaI 결정의 1/4 수준 이하로 줄일 수 있을 것으로 기대되며 이 경우 내부 방사능이 기여하는 백그라운드의 빈도는 0.5 CPD 이하가 될 것이다. 또 외부 실험 장치에 의한 백그라운드를 줄이기 위해 액체 섬광 물질을 이용한 veto 시스템을 고려하고 있으며 이 경우 외부 방사능의 기여도 또한 현재의 1/3 수준으로 줄어든 것이다. 이를 모두 적용하면 NaI 결정 검출기의 배경 방사능은 1 CPD 아래로 DAMA/LIBRA보다 더 순도가 좋은 검출기를 개발할 수 있을 것으로 기대된다. KIMS-NaI 실험은 내년 말까지 약 200 kg의 고순도 NaI 결정검출기를 개발 생산하여 2-3년의 장기간 실험을 진행할 계획이다. 이 데이터를 이용하여 DAMA/LIBRA와 동일한 연간변조신호 분석한다면 의문의 여지없이 DAMA/LIBRA 실험을 증명할 수 있을 것이다.

KIMS-NaI 실험의 최종 목표는 200 kg 이상의 검출기를 사용하여 연간변조신호를 획득하는 것이지만 이 경우 최소 2년간의 안정적인 실험 운영이 필요하다. 그러나 CsI 결정 검출기와 마찬가지로 PSD 방법을 통해 WIMP와 핵 사이의 반응을

REFERENCES

- [9] S. C. Kim *et al.* (KIMS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **108**, 181301 (2012).
- [10] J. H. Choi *et al.*, Proceeding of 9th Patras Workshop 2013 on Axions, WIMPs and WISPs, p.185 (2013).
- [11] K. W. Kim *et al.*, arXiv:1407.1586.

Fig. 7. PSD of KIMS-NaI crystal at 5-6 keV (up). Projected limit of KIMS-NaI experiment with PSD analysis assuming 100 kg detector with 1 year operation (bottom).

구분할 수 있다면 초기 데이터 혹은 심지어 검출기 개발을 위한 데이터로부터도 WIMP 신호의 분석이 가능하므로 매우 유용하다. 비록 NaI 결정의 PSD 능력이 CsI보다 10배 정도 나쁘다고 알려져 있으나, 최근 개발된 NaI 결정의 광전자 효율이 이전 PSD 측정에 사용되었던 결정보다 70% 정도 높기 때문에 훨씬 좋은 PSD 능력이 예측되었다. 서울대에 설치되어 있는 Am/Be 중성자 소스를 이용하여 고순도 NaI 결정과 동일한 생산 과정에서 만들어진 테스트 결정의 PSD를 측정하였고, 그 결과 높은 광전자 효율로 인해 CsI 결정 검출기에 맞먹는 PSD 능력이 그림 7과 같이 확인되었다. 이를 이용하면 KIMS-NaI 실험의 감도를 계산할 수 있다. 100 kg의 NaI 결정을 이용해 초기 1년간 받은 신호 분석을 진행한다면 그림 7과 같이 표준우주모형의 가정 하에 DAMA/LIBRA 실험에 대한 검증이 가능할 것이다.

이미 KIMS-NaI 실험은 2개의 고순도 NaI 결정을 이용하여 두 달가량 테스트를 진행하였다. 이 데이터는 비록 DAMA/LIBRA 실험에 비해 백그라운드 빈도가 높고 데이터 양도 부족하지만 높은 PSD 능력을 이용한다면 DAMA/LIBRA의 신호 영역에 대한 탐색이 가능해 보인다. 이 경우 세계 최초로 동일한 NaI 결정을 이용하여 DAMA/LIBRA 신호 영역을 탐색하는 것으로

매우 흥미롭다. 현재 이 데이터에 대한 분석이 활발히 진행 중으로 올해 말까지 그 결과를 얻을 수 있을 것이다.

저온검출기

KIMS-NaI 실험이 DAMA/LIBRA의 결과를 검증하는 매우 중요한 실험이지만 표준적인 우주 모형과 WIMP 모델을 고려했을 때 WIMP 신호 검출에 대한 민감도는 다른 세계 유수의 실험들에 비해 떨어진다고 볼 수 있다. 그 이유는 고전적인 섬광검출기의 PSD 능력이 두 개의 다른 섬광 신호를 관측하는 액체 Xenon 검출기나 포논과 섬광 (혹은 전자-양공쌍)을 동시에 검출하는 저온검출기에 비해 매우 떨어지기 때문이다. 따라서 세계 유수의 WIMP 탐색 실험들과 경쟁하기 위해서는 WIMP 탐색에 특화된 새로운 검출기의 개발이 필수적이다.

본 연구단의 저온검출기 그룹은 중성미자 미방출 이중베타 실험을 위해 CaMoO_4 결정을 이용한 저온검출기의 개발을 활발히 진행하고 있다. 포논 센서와 빛 센서가 이미 개발되어 테스트되었고, 이를 이용한 WIMP 탐색 또한 앞으로 테스트 할 계획이다. 이 검출기가 구현되면 포논 신호와 빛 신호의 비율을 이용해 WIMP-핵 반응을 매우 높은 효율로 배경방사능과 구분할 수 있다. 이는 CaWO_4 결정을 저온 검출기로 사용하는 CRESST 실험과 유사한 개념으로 본 연구단에서는 그림 2와 같이 WIMP 신호의 구분이 가능하거나 혹은 더 성능 좋은 저온 검출기를 개발하기 위해 활발히 연구 중이다. 현재까지의 개발 현황을 볼 때 이는 2-3년 내에 충분히 달성될 것으로 기대된다. 이 실험이 성공적으로 진행된다면 세계 유수의 WIMP 탐색 실험과 경쟁이 가능하며 특히 낮은 질량의 WIMP 탐색에서 세계 최고 민감도의 검출기를 얻을 수 있을 것이다.

맺음말

암흑물질 특히 가장 강력한 후보인 WIMP 탐색은 세계 유수의 연구진이 경쟁적으로 뛰어 들어 규명하고자 하는 매우 흥미로운 연구 주제이다. 본 연구단의 다양한 암흑물질 탐색 프로그램을 통해 가깝게는 DAMA/LIBRA 실험 결과에 의문 없는 결론을 내리고, 길게는 낮은 질량 WIMP 탐색에서 세계 최고 감도의 실험을 구현하기 위해 노력을 경주하고 있다. 이를 통해 암흑물질의 비밀에 한 발 다가갈 수 있을 것으로 확신한다. 만약 암흑물질의 정체가 규명된다면 이는 단순한 과학적 발견만이 아니라 인류 사고에 획기적인 전환점을 가져올 수도 있는 위대한 업적이 될 것이다.