암흑물질은 어디에서 오는가?

- 윌프 방향성 측정실험 NEWSdm

DOI: 10.3938/PhiT.26.041

윤천실 · 이강영

Where Does the Dark Matter Come from?

- WIMP Directional Measurement Experiment NEWSdm

Chun Sil YOON and Kang Young LEE

Nowadays direct searches of dark matter are one of the most exciting research topics with many experimental efforts. The scattering of Weakly Interactive Massive Particles (WIMPs) into the detector induces nuclear recoils and detectable signals. NEWSdm is the new dark matter search experiment with the nuclear emulsion detector which is able to reconstruct the direction of the nucleus recoiling against the scattering WIMP. Exploiting directionality would also prove the galactic origin of Dark Matter with an unambiguous signal-to-background separation. Here we explain the NEWSdm detector and present the discovery potential of a directional experiment based on the use of a solid target made of newly developed nuclear emulsions.

암흑물질을 직접 검출하는 일은 최근 가장 많은 관심을 끌고 있는 실험 주제다. 지난 수십 년 동안 은하의 회전 속도 분포 곡선, 중력 렌즈 현상, 은하단의 속도 분포 등의 천체 현상으로부터 암흑물질이 존재한다는 증거들이 축적되었고, 우주 배경복사 등의 관측 결과를 통해 암흑물질이 우리 우주에서 차지하는 양이 추산되었다. 현재 표준적인 빅뱅우주론에서 암흑물질은 우주거대구조를 형성하는 데 중요한 역할을 하는 구

성요소다. 그런데 지금까지 천체 현상을 통해 드러난 암흑물질의 증거는 모두 중력이 예상과는 다르게 나타나는 현상이고, 암흑물질의 물성에 대해서는 아무 것도 말해주지 않는다. 그러므로 어떤 방법으로 암흑물질을 발견해야 하는지 아무도 알지 못하며, 따라서 암흑물질을 검출하기 위한 실험을 설계할 때에는 먼저 어떤 암흑물질을 검출하려고 하는지를 결정해야 한다.

가장 많은 관심을 끌고 있는 암흑물질의 형태는 WIMP(Weakly Interacting Massive Particles)다. WIMP는 전자기약작용 스케일인 수십 GeV 정도의 질량을 가지면서 보통의 물질과는 상호작용이 극히 작아서 보이지 않는 가상의 입자를 총칭하는 이름이다. 빅뱅 우주론에 따르면 암흑물질은 밀도의 섭동을 통해 초기 우주에서 우주의 거대구조를 형성하는 데 핵심적인 역할을 하므로, 충분한 섭동을 만들 수 있도록 비상대론적인 상태에 있어야 하고 지금까지 살아남을 만큼 수명이 충분히 길어야 한다. 우주 배경복사의 온도 비등방성 관측 결과에 의하면 현재 우주의 에너지 밀도 중에서 암흑물질이 차지하는 비중은 약 25% 가량이다. WIMP는 이러한 조건을 매우 잘 만족하며, 또한 초대칭 이론이나 덧차원 이론 등의 이론적 모형에서 WIMP가 될 수 있는 입자가 비교적 자연스럽게 나타나기 때문에 현재 논의되는 암흑물질의 형태 중에서 가장 널리 연구되고 있다.

현재 WIMP를 찾기 위한 실험은 LHC와 같은 고에너지 가속기에서 WIMP를 직접 생성하는 방법과, WIMP가 높은 밀도로 존재할 때 쌍생성을 통해 내놓는 감마선 등의 신호를 검출하는 방법, 그리고 WIMP와 검출기 물질의 원자핵 등이 상호작용하는 신호를 직접 검출하는 방법 등을 이용하고 있다.

이 중 WIMP를 직접 검출하는 실험은 주로 지구와 WIMP의 상대운동을 이용한다. 암흑물질은 우리 은하에 구형으로 분포할 것으로 여겨지고, 에너지 밀도는 은하 중심으로부터의 거리의 제곱에 반비례하는데 태양계 주변에서는 약 0.3 GeV/cm^3 정도라고 추정된다. 태양계는 우리 은하와 함께 암흑물질 속을 회전하고 있다. 암흑물질은 우리 은하를 이루는 물질과는 거의 상호작용하지 않으므로 함께 회전하지 않을 것이다. 따라서 태양계가 움직이는 효과는 반대 방향에서 암흑물질의 바람이 불어오는 것과 같다. 이러한 상대속도는 수백 km/s 정도가 되고, 따라서 100 GeV의 WIMP인 경우 운동에너지는 수십 keV 정도가 된다. 이렇게 날아온 WIMP가 검출기 물질의 원자핵과

저자약력

윤천실 박사는 고려대학교 물리학과에서 학부, 석사를 마치고, 경상대학교에서 박사학위를 받았다. 수십 년 동안 경상대학교에서 원자핵실험 실험에 종사하고 있으며, 현재 OPERA, SHiP, 그리고 NEWSdm 실험의 한국 측 대표로 있다.(chunsil.yoon@gmail.com)

이강영 박사는 KAIST에서 입자물리학 이론으로 박사학위를 받고, 서울대학교, KAIST, 연세대학교, 고등과학원 연구원과 KAIST, 고려대학교, 건국대학교 연구교수를 거쳐 2012년부터 경상대학교 사범대학 물리교육과 부교수로 재직하고 있다. 현재 SHiP과 NEWSdm 실험에 참가하고 있다.(kylee.phys@gnu.ac.kr)

Fig. 1. WIMP wind by the motion of the solar system (a), Nuclear emulsion film parallel to the dark matter wind (b).

탄성충돌을 하면 에너지를 전달받은 원자핵은 광자를 방출하게 되는데, 이 신호를 검출한다.

NEWSdm(Nuclear Emulsions for WIMP Search - directional measurement)은 원자핵건판을 이용해서 WIMP를 직접 검출할 뿐 아니라, 표적핵이 만드는 되튐 비적(recoil track)을 검출하여 WIMP 바람의 방향성까지 확인하려는 실험이다. 원자핵건판은 검출기 중에서 가장 공간분해능이 좋은 검출기다. 특히 이 실험에서 사용할 예정인 NIT(Nano Imaging Tracker) 검출기는 공간분해능을 더욱 향상시킨 검출기로, 본 실험에서는 이것을 이용해서 WIMP와 상호작용을 한 원자핵의 되튐 비적을 직접 검출하고자 한다.

앞에서 말한 바와 같이 지구는 태양계의 움직임에 따라 WIMP와 상대운동을 하고 있다. 이때 그림 1과 같이 NIT 검출기의 원자핵건판 표면을 WIMP가 오는 방향과 나란하게 두면, WIMP가 원자핵건판 속의 표적핵과 충돌할 때 원자핵의 되튐으로 생기는 비적을 건판에 형성하게 되고, 이를 보고 WIMP가 온 방향을 알 수 있다. 이때 WIMP의 방향과 NIT 검출기의 방향이 항상 일정하게 유지되어야 하므로, 그림 2와 같이 검출기는 적도의(equatorial mount)에 장착되어 있다. 이에 따라 지구가 회전하는 효과가 상쇄되고 검출기는 언제나 태양계가 향하고 있는 방향인 백조자리(Cygnus)를 향하게 된다. 한편 검출기는 외부에서 오는 배경입자로부터 차폐되어야 하는데, 이 실험에서는 현재 2가지 방법을 고려하고 있다. 하나는 그림 2의 왼쪽과 같이 안쪽은 플렉시 글라스로 바깥쪽은 폴리에틸렌으로 차폐하는 방법

Fig. 2. NIT detector on the equatorial mount with shielding of plexiglass for inner sphere and polyethylene for outer sphere (left) and water shielding option (right).

Fig. 3. Tracks of Kr ion beams with 200 keV and 400 keV energies in the NIT (left) and development of AgBr crystal (right).

며, 다른 하나는 오른쪽 그림과 같이 물로 차폐하는 방법이다.

이 실험에서 사용될 NIT 검출기는 나고야 대학이 최근에 개발한 특수한 원자핵건판이다. 원자핵건판은 하전입자에 민감한 일종의 사진건판으로 주로 브롬화 은(AgBr) 결정과 젤라틴으로 구성된다. 하전 입자가 AgBr 결정을 통과하면 잠상 이미지(latent image)가 형성되며, 이를 현상하는 과정에서 Ag 필라멘트가 50 nm - 1 μm 정도로 자라게 되는데, 이것을 은알갱이(Ag grain)라고 한다. 은알갱이의 개수는 하전입자들의 거리당 에너지 손실(dE/dx)에 의존하며, 이에 따라 원자핵건판의 공간분해능이 결정된다. NIT는 나고야대학이 십수 년의 노력으로 개발한 특수한 원자핵건판으로, AgBr 결정의 크기가 약 35 nm로 기존의 원자핵건판보다 훨씬 미세하고 선밀도가 약 11 AgBr/μm 정도로서 공간분해능이 수백 nm에 달하는, 현존하는 검출기 중에서 공간분해능이 가장 정밀한 검출기이다. 그림 3의 오른쪽 사진은 계속적으로 개발 중인 미세한 브롬화는 결정의 알갱이를 단계적으로 보여주고 있다.

그림 4에서 보듯 WIMP의 질량이 100 GeV/c² 정도일 때, WIMP가 원자핵건판 속의 핵과 충돌하여 만드는 되튐 비적의 길이는 수백 nm 정도로 예상된다. 그림 3의 왼쪽 사진은 NIT 검

Fig. 4. Track lengths with WIMP masses in NIT.

출기의 테스트 실험 결과인데, Kr 이온빔 200 keV와 400 keV 이 NIT에 남긴 비적을 주사 전자현미경(SEM)으로 본 모습이다. 이러한 에너지를 가진 Kr 이온 빔은 각각 680 km/s와 930 km/s 속도를 가진 비교적 느린 입자들로서 수백 나노미터의 비적을 가진다. 따라서 만일 WIMP에 의한 되튐 비적의 길이가 수백 nm 정도라면 우리는 NIT에서 비적을 볼 수 있을 것이다.

대부분의 방향성 측정 실험에서는 TPC(Time Projection Chamber)나 드리프트 챔버(drift chamber)와 같은 기체 검출기를 사용한다. 하지만 암흑물질과 같이 산란단면적이 매우 작은 입자를 검출하기 위해서는 검출기의 질량이 클 것이 요구되는데, 기체 검출기는 규모를 크게 만들기 어렵다. 또한 기체 검출기는 확산(diffusion) 효과로 인해서 비적의 방향을 정확하게 결정하기 어렵다는 문제도 있다. 따라서 본 실험과 같은 방향성 검출실험에는 고체검출기가 더 적합하다. NIT 검출기는 밀도가 $3 \sim 4 \text{ g/cm}^3$ 인 고체검출기로서 이러한 단점들을 극복할 수 있다. 만일 WIMP의 산란단면적이 $\sigma = 10^{-42} \text{ cm}^2$ 인 경우 10 kg의 NIT 검출기에서의 충돌빈도는 1 event/day 정도로 예상된다.

이 실험과 같이 산란단면적이 작은 실험에서는 배경입자를 처리하는 문제가 매우 중요하다. NEWSdm은 이탈리아의 그랑 사소 지하실험 국립연구소에 설치되어 있는데, 이 연구소는 지하 1,400 m에 위치하고 있으므로 우주선에 의한 배경입자를 백만분의 1로 줄일 정도로 매우 잘 차폐시킨다. 그 밖에 바깥 쪽에서 오는 주된 배경입자는 중성입자로서, 중성자 및 중성미자이다. 이들은 앞에 보인 적절한 차폐와 원자핵건판 재료의 선택, 그리고 비적의 방향성 등으로 제거할 수 있다. 예를 들어, 태양으로부터 오는 중성미자는 WIMP 바람의 방향과 다르므로 제거할 수 있다.

내부의 배경입자로는 NIT 내부의 젤라틴(gelatin) 속에 포함되어있는 방사성 동위원소들에 의한 방사선들을 들 수 있다. 그중에서 ^{14}C 동위원소에 의한 베타선과 감마선이 가장 큰 배

Fig. 5. Sensitivity of the NEWSdm experiment. (90% C.L.)

경입자다. 이것은 젤라틴을 합성폴리머로 바꾸는 경우 대부분 줄일 수 있으며 이에 대해서는 계속 연구 중에 있다.

WIMP의 되튐 비적을 스캐닝할 때는 우선 광학현미경으로 1 차 스캐닝을 한 후에, WIMP 후보 반응들에 대해서 해상도가 더 좋은 X-ray 현미경이나 편광(polarized light) 현미경을 사용하여 자세히 관찰한다. 현재 이러한 목적에 부합하는 스캐닝 시스템을 개발 중에 있다.

그림 5에는 이 실험의 민감도(sensitivity)를 나타내었는데 (90% C.L.), 녹색 선은 10 kg, 청색 선은 100 kg 표적의 경우이고, 실선과 점선은 각각 100 nm, 50 nm 해상도의 경우이다. 이 실험을 통해서 DAMA/LIBRA 실험의 영역(보라색)까지 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

올해 봄에 NEWSdm 그룹은 기술적인 테스트를 수행하고 배경입자를 측정하기 위해서 그랑 사소 지하에서 약 10 g 정도의 NIT를 가지고 테스트 실험을 수행하였다. 올해 말에 LNGS에 TDR을 제출하고, NIT 수백 kg 스케일의 실험을 수행할 예정으로 있다. 만일 이러한 연구로 WIMP 바람의 방향을 측정할 수 있다면 이것은 암흑물질의 존재를 직접 확인할 수 있는 새로운 방법으로 입자물리나 천체물리 분야에 있어서 매우 중요한 발견이 될 것이다.

REFERENCES

- [1] A. Aleksandrov *et al.*, NEWS Collaboration, "NEWS: Nuclear Emulsions for WIMP Search, Letter of Intent", arXiv:1604.04199 [astro-ph].
- [2] N. Agafonova *et al.*, NEWS Collaboration, "Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions", arXiv:1705.00613 [astro-ph].
- [3] <http://news-dm.lngs.infn.it/>.