

Indirect Detection of Dark Matter through Cosmic-Rays

Jong-Chul PARK*

Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

(Received 3 July 2016 : revised 14 July 2016 : accepted 14 July 2016)

The existence of dark matter has been confirmed by various observations based on gravitational interactions. Now, the widely-accepted compelling paradigm of dark matter is that it consists of massive, non-luminous, stable particles. However, the nature of dark matter still remains one of the fundamental problems that cannot be understood by using the standard model. Currently, precision cosmic-ray detection experiments are very actively being pursued due to the development of detection technology. Thus, high-energy cosmic-ray measurements will lead research in the field of particle physics in the 21st century. Moreover, products of dark matter annihilation or decay in our Galaxy and beyond will very likely be detected. In this article, we briefly review the current status of cosmic-ray detection experiments and discuss the relation between cosmic-ray signals from dark matter annihilation and cosmic-ray measurements.

PACS numbers: 95.35.+d, 96.50.S-, 12.60.-i

Keywords: Dark matter, Pair annihilation, Cosmic-ray

우주선을 통한 암흑 물질 간접 탐색

박종철*

충남대학교 물리학과, 대전 34134, 대한민국

(2016년 7월 3일 받음, 2016년 7월 14일 수정본 받음, 2016년 7월 14일 게재 확정)

암흑 물질의 존재는 중력을 통한 다양한 관측을 통하여 충분히 검증되었다. 현재 암흑 물질에 대해 널리 받아들여지는 특성은 암흑 물질이 질량을 가지는, 빛을 내지 않는, 안정적인 입자로 이루어졌다는 것이다. 하지만 아직도 그 성질은 표준 모형으로 설명이 불가능한 대표적인 문제 중의 하나로 남아있다. 관측 기술의 발전에 의해 정밀 우주선 관측 실험이 최근 활발하게 이루어지고 있기에, 고에너지 우주선 관측이 21세기 입자 물리학 분야를 주도할 가능성이 높아지고 있다. 또한 우주선 관측을 통해 우리 은하나 그 너머에 존재하는 암흑 물질의 쌍소멸이나 붕괴에 의한 부산물을 발견할 가능성도 커지고 있다. 본 논문에서는 우선 우주선 관측 실험의 현황에 대해 간략히 소개하고, 뒤를 이어 암흑 물질의 쌍소멸에 의한 우주선 신호 생성과 우주선 관측 결과의 관계에 대해 논의한다.

PACS numbers: 95.35.+d, 96.50.S-, 12.60.-i

Keywords: 암흑 물질, 쌍소멸, 우주선

*E-mail: jcpark@cnu.ac.kr



I. 서론

우리 은하에서 태양계 부근 천체들의 은하면에 대한 수직 운동 분석으로 진스 (Jams H. Jeans)가 1920년대 암흑 물질의 존재를 처음으로 추정하였고 [1], 1930년대 코마 클러스터에 대한 관측을 바탕으로 츠비키 (Fritz Zwicky)가 빛 (전자기파)과 상호작용을 하지 않는 암흑 물질을 제안하였다 [2]. 하지만 암흑 물질에 대한 본격적인 연구는 1970년 루빈 (Vera Rubin)이 은하계의 회전 속도 분포 곡선 (galactic rotation curve)에 대한 분석을 통해 암흑 물질의 존재를 재발견한 이후에야 시작되었다 [3].

현재 암흑 물질의 존재는 우주 배경 복사, 중력렌즈 효과, 총알 은하단 (bullet cluster) 등 다양한 관측을 통해서 충분히 검증이 되었다. 그 결과 암흑 물질의 존재는 현재 거의 정설로 인정되고 있으며, 빅뱅 이론을 바탕으로 한 우주론의 표준 모형인 Λ CDM의 핵심 요소를 차지하고 있다. 우주 배경 복사, Ia 종류의 (Type Ia) 초신성, 중입자 음향 진동 (baryonic acoustic oscillation) 관측 등을 통하여 암흑 물질이 현재 우주 전체 에너지-질량의 약 27%를 차지하는 우주의 주요 구성 성분임이 알려져 있다 [4].

입자 물리의 표준 모형은 힉스 (Higgs) 입자의 발견으로 모든 구성 요소가 확인되었지만, 암흑 물질에 대한 답을 제공해주지는 못하고 있다. 이에 따라 암흑 물질은 우주의 주요 구성 물질이라는 중요성에 비해 빛과 상호 작용을 하지 않는 질량을 가지는 안정적인 입자라는 것 이외의 특성은 거의 알려져 있지 않기에, 그 정체를 파악하는 것은 과학계, 특히 현대 물리학의 가장 중요한 과제 중 하나이다.

현재 세계적으로 암흑 물질의 질량, 상호 작용의 종류와 크기 같은 특성을 파악하기 위해서 [1. 암흑 물질과 표준 모형 입자의 충돌에 의한 신호 탐색, 2. 암흑 물질의 쌍소멸 (annihilation)이나 붕괴 (decay)에 의한 고에너지 우주선 (cosmic-ray) 탐색, 3. 입자 가속기를 이용한 암흑 물질의 직접 생성 및 그 신호 탐색]과 같은 다양한 방향의 실험적 접근이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 두 번째 방법인 우주선 관측을 통한 암흑 물질의 성질 탐색에 대하여 소개 하도록 하겠다.

II. 우주선 탐색 현황

20세기 초반까지 지난 몇 세기 동안 인류는 오로지 가시 광선을 통해서 관측한 정보로 우주에 대해 파악하기 위하여 노력해왔다. 하지만 수십 년 전부터 우주에서 오는 다양한 파장의 빛, 전자나 양전자처럼 전하를 가지는 입자, 중성미자 등의 우주선을 관측하여 우주에 대한 새로운 정보를

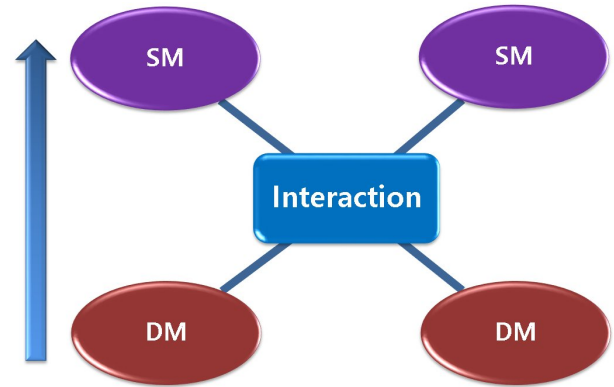


Fig. 1. (Color online) Production of standard model (SM) particles through dark matter (DM) annihilation.

얻을 수 있게 되었다. 이러한 우주선 관측은 지상에서 혹은 물이나 얼음 밑은 물론이고, 특히 최근 10여 년 동안에는 관측 장비의 소형화와 정밀화 기술의 발전 등에 힘입어 기구나 인공위성을 활용한 관측도 이루어지고 있다.

우주선 관측은 현재 가장 활발하게 연구가 이루어지는 분야 중 하나일 뿐만 아니라, 정밀 관측 기술의 발전에 따라 최근 들어 고해상도의 다양한 실험이 더욱 빠르게 진행되고 있다. 여러 실험들 중에서 지상에서 이루어지는 대표적인 실험으로는 감마선을 측정하는 MAGIC과 HESS 같은 실험이 있고, 지하나 얼음 밑에서 진행중인 실험으로는 Super-K와 IceCube가 대표적인데 이들 실험은 주로 중성미자의 탐색을 목표로 한다. 또한, 인공위성이나 국제 우주 정거장을 활용한 대표적인 실험들로는 엑스선을 측정하는 XMM-Newton, 감마선을 주로 측정하는 SPI/INTEGRAL과 Fermi-LAT, 전하를 띤 전자나 양전자 등을 탐색하는 AMS-02와 PAMELA가 있다. 이러한 우주선 탐색 실험은 현재도 실험이 새롭게 시작되고 있거나 곧 새로운 실험이 시작될 예정이다. 그 중 대표적인 것들로는 지상에 감마선을 탐색하려는 CTA, 지하에서 중성미자를 탐색하려는 DUNE와 Hyper-K, 얼음 밑에서 중성미자를 탐색하려는 PINGU, 인공위성을 활용하여 감마선이나 전하를 띤 입자를 탐색하려는 ASTROGAM, CALET, DAMPE, GAMMA-400 등이 있다.

III. 암흑 물질 쌍소멸과 우주선

초기 우주에서 주변의 복사 물질과의 열적 평형 상태에서 벗어나며 그 잔존 양 (relic abundance)이 정해진 이후로 암흑 물질의 총량은 크게 바뀌지 않는다. 하지만 현재 우주에서도 Fig. 1에 주어진 것과 같이 암흑 물질 사이의 쌍소멸이 적지만 일부 일어날 가능성이 있고, 특히 은하의

중심처럼 밀도가 큰 영역에서는 쌍소멸이 비교적 활발하게 일어날 수가 있다. 이러한 암흑 물질 쌍소멸의 결과로 감마선, 중성미자, 양전자, 반양성자와 같은 다양한 고에너지 우주선이 만들어질 수 있다. 암흑 물질 쌍소멸에 의해 생성된 입자들이 가질 수 있는 에너지는 최대 암흑 물질의 질량까지 가능하다.¹

암흑 물질 입자 χ 의 쌍소멸에 의해 발생하는 입자들의 흐름량(flux)는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_i(\mathbf{n}, E) = \frac{dN_i \langle \sigma_{\chi\bar{\chi}} v \rangle}{dE 8\pi m_\chi^2} \int_{l.o.s.} dl \rho_\chi^2[\mathbf{r}(l, \mathbf{n})]. \quad (1)$$

여기에서 i 는 쌍소멸에 의한 결과물로 발생한 입자(감마선, 중성미자 등)를 나타내고, 적분 변수 l 은 \mathbf{n} 방향으로의 시선 방향 경로 길이이다. 식의 첫째 요소인 dN_i/dE 는 쌍소멸로 발생한 i 입자의 에너지 스펙트럼 모양에 해당하고, m_χ 는 암흑 물질 입자의 질량, $\rho_\chi[\mathbf{r}(l, \mathbf{n})]$ 는 암흑 물질의 시선 방향에 따른 암흑 물질의 밀도, $\langle \sigma_{\chi\bar{\chi}} v \rangle$ 는 암흑 물질의 속도 분포를 반영한 평균적인 암흑 물질 쌍소멸 크기를 나타낸다. 스펙트럼의 규격화(normalization)는 식의 두번째 요소인 $\langle \sigma_{\chi\bar{\chi}} v \rangle$ 와 m_χ 에 의해 주로 결정되고, 관측 대상에 따라 달라지는 마지막의 $\rho_\chi[\mathbf{r}(l, \mathbf{n})]$ 도 일부 기여를 한다. $\rho_\chi[\mathbf{r}(l, \mathbf{n})]$ 의 경우는 쌍소멸에 의한 신호의 공간적인 분포 모양도 결정한다. 위 식에서 한가지 주의할 점은 위의 경우는 반입자가 자신과 같은 마조라나(Majorana) 타입의 암흑 물질 입자에 해당하고, 디랙(Dirac) 타입의 입자처럼 반입자가 자신과 다른 경우 1/2의 추가적인 인자가 필요하다.

IV. 우주선 관측 결과와 암흑 물질

다양한 파장 영역의 빛에 대한 그 동안의 관측을 통해 얻어진 데이터를 분석한 결과를 보면 표준 모형만을 가정하였을 때 예측되는 결과에서 벗어나 여러 특이한 현상이 발견되고 있다. 이들 중에서 특히 입자 물리와 천문학에서 큰 관심을 받았던 신호들과 그에 대한 대표적 실험은 다음과 같다.

- 주변 은하단과 안드로메다 은하에서 발견된 3.5 keV 엑스선 [5] (XMM-Newton)
- 은하 중심부에서 발견된 511 keV 감마선 [6] (SPI/INTEGRAL)
- 은하 중심부 부근에서 발견된 O(GeV) 감마선 연속 과잉 [7] (Fermi-LAT)

- 은하 중심부 부근에서 발견된 130 GeV 감마선 [8] (Fermi-LAT)

또한 전하를 띤 입자를 통한 관측, 그 중에서도 반물질 관측에서 발견된 대표적인 특이 신호는 PAMELA에서 처음 발견되고 이후 Fermi-LAT과 AMS-02에 의해서 그 발견이 다시 한번 확인된 [과도한 양전자/전자의 비율]이 있다 [9–11]. [과도한 양전자/전자의 비율] 신호에서 가장 특이한 점은 양전자/전자의 비율에서는 이론적으로 예측된 수치에 비해 큰 값이 측정된 것에 비해서 반양성자/양성자 비율에서는 이론적 예측 값에 비해 눈에 띄는 차이는 발견되지 않았다는 점이다 [12,13].

이와 같이 여러 우주선 관측을 통해 발견된 특이 신호들에 대해 펄서(pulsar)나 초신성과 같은 고에너지 입자를 만들어 낼 수 있는 것으로 알려진 특수한 천체를 통해서 설명하려는 천체 물리학적 관점의 시도가 있었다. 동시에 표준 모형을 확장한 이론 모형을 만들어 설명하려는 입자 물리학적 관점의 시도도 역시 활발하게 있었다. 특히 입자 물리학 쪽에서는 발견된 특이 신호들이 암흑 물질의 쌍소멸이나 붕괴의 흔적일 가능성이 제시되었고, 이러한 방향의 연구를 통해 여러 암흑 물질 모형이 제안되었다. 그에 따라, 앞서 언급된 우주선 관측에서 발견된 각각의 특이 신호에 대한 암흑 물질을 바탕으로 설명하려는 시도들도 활발하게 이루어지고 있다.: 3.5 keV 엑스선 [14,15], 511 keV 감마선 [16], O(GeV) 감마선 연속 과잉 [17,18], 130 GeV 감마선 [19,20], 과도한 양전자/전자의 비율 [21,22].

V. 결론

관측 기술 및 여건의 개선에 의해 21세기 들어 고에너지 우주선 관측은 가장 활발하게 연구가 이루어지는 분야 중 하나가 되었다. 정밀 관측 기술의 발전에 따라 최근 들어 AMS-02, ASTROGAM, CALET, CTA, DAMPE, DUNE, GAMMA-400, PINGU 와 같은 고정밀도의 다양한 실험이 아주 빠르게 진행되고 있거나 가까운 미래에 시작될 예정이다. 따라서 중력을 통한 여러 관측을 통해 우주에 충분히 존재한다는 사실이 확인이 된 암흑 물질이 은하의 중심처럼 그 밀도가 높다고 알려진 지점에서 쌍소멸이나 붕괴를 한다면 그 신호를 관측할 가능성이 높아지고 있다. 이를 통해 그 동안 입자적 특성에 대한 이해가 부족한 암흑 물질의 성질을 알게 될 가능성이 커지고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 연구비(NRF-2013R1A1A2061561, 2016R1C1B2015225)에 의해 지원되었습니다.

¹ 반면에 암흑 물질의 붕괴에 의해 생성된 입자들은 최대 암흑 물질의 질량의 1/2에 해당하는 에너지까지 가질 수 있다.

REFERENCES

- [1] J. H. Jeans, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **82**, 122 (1922).
- [2] F. Zwicky, *Phys. Rev.* **43**, 147 (1933).
- [3] V. C. Rubin and W. K. Ford, Jr., *Astrophys. J.* **159**, 379 (1970).
- [4] P. A. R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], arXiv:1502.01589 [astro-ph.CO].
- [5] E. Bulbul, M. Markevitch, A. Foster, R. K. Smith and M. Loewenstein *et al.*, *Astrophys. J.* **789**, 13 (2014).
- [6] P. Jean, J. Knödseder, V. Lonjou, M. Allain and J.-P. Roques *et al.*, *Astron. Astrophys.* **407**, L55 (2003).
- [7] L. Goodenough and D. Hooper, arXiv:0910.2998 [hep-ph].
- [8] C. Weniger, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **1208**, 007 (2012).
- [9] O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti and M. Boezio *et al.* [PAMELA Collaboration], *Nature* **458**, 607 (2009).
- [10] M. Ackermann *et al.* [Fermi-LAT Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **108**, 011103 (2012).
- [11] M. Aguilar *et al.* [AMS Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **110**, 141102 (2013).
- [12] O. Adriani *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 051101 (2009).
- [13] AMS-02 Collaboration, *Talks at the 'AMS Days at CERN'* (April 15-17, 2015).
- [14] J. C. Park, S. C. Park and K. Kong, *Phys. Lett. B* **733**, 217 (2014).
- [15] D. Kim and J. C. Park, *Phys. Lett. B* **750**, 552 (2015).
- [16] J. H. Huh, J. E. Kim, J. C. Park and S. C. Park, *Phys. Rev. D* **77**, 123503 (2008).
- [17] B. Kyae and J. C. Park, *Phys. Lett. B* **732**, 373 (2014).
- [18] D. Kim and J. C. Park, *Phys. Dark Univ.* **11**, 74 (2016).
- [19] B. Kyae and J. C. Park, *Phys. Lett. B* **718**, 1425 (2013).
- [20] J. C. Park and S. C. Park, *Phys. Lett. B* **718**, 1401 (2013).
- [21] E. J. Chun and J. C. Park, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **0902**, 026 (2009).
- [22] E. J. Chun, J. C. Park and S. Scopel, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **1002**, 015 (2010).