

암흑 물질(Dark Matter) : 암흑을 붙잡기 위한 경주

암흑 물질은 그 자신의 중력을 통해 은하들을 함께 붙들어 두는 역할을 한다. 암흑 물질의 정체에 대해서는 수 십 년간 이론적인 고찰이 계속되었다. 이제 입자물리학자들이 암흑 물질의 구성요소를 밝혀내기 위해 경쟁적으로 연구하고 있다.

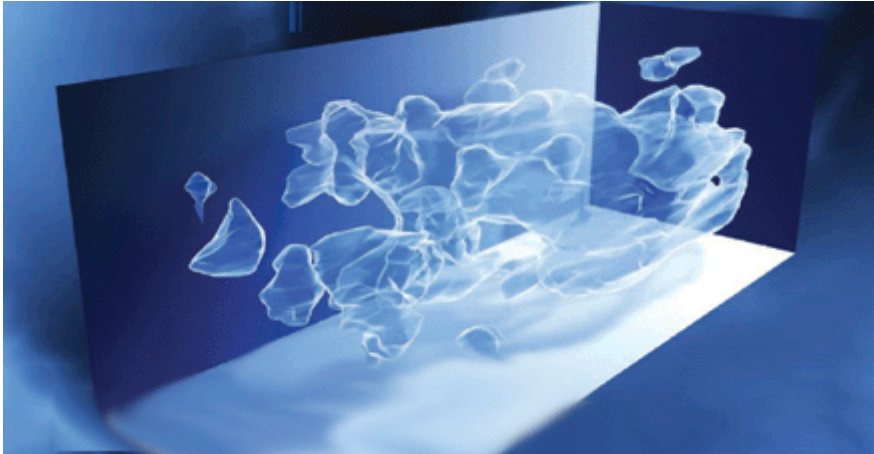


그림 1. 보이지 않는 구름들 - 천문학자들은 암흑 물질이 우주의 어디에 있는지 추론할 수 있지만, 누구도 그것이 무엇인지 모른다.

한국의 양양군과 미국 일리노이 주 바타비아 - 점봉산 안쪽 깊은 곳, 섬뜩한 붉은 빛으로 가득 찬 지하실에서, 거대한 검은 입방체가 열리기 시작한다. 두꺼운 납과 광물기름으로 채워진 벽과 바닥, 그리고 나머지 구조물에서 몇 인치 떨어진 곳에, 희미하게 빛나는 좀 더 작은 구리로 된 입방체가 보인다. 한 젊은 남자가 올라서서 쇠사슬을 두 손으로 번갈아 잡아당기자, 강철의 덜컹거리는 소리가 들리는 가운데, 구리 입방체의 모습이 나타난다. 진귀한 주화나 성자의 유품들이 이 거룩함과 조화될 수 있겠지만, 이곳, 한국 북동부 수력 발전소를 위해 깊게 파인 터널 안의 한 결방에 있는, 이 보물은 오직 입자 물리학자에게만 소중할 뿐이다. 구리 입방체 안에는 탈륨이 첨가된 다수의 요오드화세슘 결정들이 놓여 있고, 이들은 결정 안에서 생성된 가장 미세한 섬광이라도 기록할 전자 장치로 배선되어 있다. 연구자들은 이들을 다시 봉인하고 초속적(超俗的)인 탐구를 시작하기 전에, 결정 배열에 몇 가지의 마지막 조정을 가하고 있었다.

검은 입방체 안의 15센티미터의 감마선 차단 납판과 중성자 차단 광물기름, 납판으로부터의 X선을 흡수하는 10센티미터의 구리판, 구리 상자 안의 질소 파이프, 붉은 빛, 그리고 지하실과 외부 사이의 700미터의 바위는 모두 단 하나의 목적을 가진다. 결정체 안의 '가짜 섬광'의 수를 최소화하는 것이다. 이곳 '킴스(KIMS : Korea

Invisible Mass Search)’ 실험 장치에서, 연구자들은 그 동안 아무도 확실히 보지 못한 암흑 물질 입자를 최초로 목격하기를 희망하고 있다.

수년간에 걸친 준비 후에, 서울대 물리학자 김선기 교수와 그의 ‘킴스(KIMS)’ 동료들은 이곳에서 지난달 100킬로그램의 결정 배열을 갖고 데이터를 수집하기 시작했다. 매일 그들은, 세슘과 요오드 핵을 건드림으로써 빛을 내보내는 한두 개의 ‘웬프(WIMP : Weakly Interacting Massive Particle) - 암흑 물질의 제 1후보’신호를 기록하기를 희망한다. 이는 수많은 모델들이 예측하듯이, 암흑 입자들이 일반 입자들과 반응한다고 가정을 하고 있는 것이다. 김선기 교수는, “만약 그들이 물질과 상호작용하지 않는다면, 우리는 그들을 찾을 희망이 없다.”고 말한다.

‘킴스’ 실험은 암흑 물질 입자들을 찾기 위해 경주하는 몇몇의 실험들 중 하나이다. 김선기 교수의 팀처럼, 여러 나라의 그룹들이 이른바 직접 탐색에 나서고 있으며, 일반 원자핵을 밀치는 암흑 입자들을 목격하기 위해 노력하고 있다. 다른 그룹들은 하늘로 향한 간접 탐색에서, 은하의 중심에서 암흑 물질들이 서로 소멸하는 신호들을 찾고 있다. 한편, 세상에서 가장 강력한 입자 가속기인, 스위스 제네바 부근 LHC(Large Hadron Collider)에서는 다음 봄에 가동하는 대로, 암흑 물질을 만들어 낼 가능성도 있다.

10년 간 암흑 물질을 추적해 온, CDMS(Cryogenic Dark Matter Search) 프로젝트의 공동 대변인인, 미국 캘리포니아 주 Palo Alto에 있는 스탠포드 대학의 Blas Cabrera는, “이것은 주요한 이론적인 예측이 드디어 엄밀히 탐구되는 신기원입니다.”고 말한다. “최고의 추측이 가까이에 있습니다.” 이러한 전망은 연구자들을 전율시키고 있다. 미국 일리노이 주 바타비아의 페르미 연구소(Fermilab - Fermi National Accelerator Laboratory)의 최근의 한 워크샵에서, 170명의 참석자 중 절반 이상이 5년 안에 암흑 물질 입자가 발견된다는 쪽에 내기를 걸었다.

하지만 발견은 보장되지 않는다. 호의적인 이론적인 모형들은 실험가들이 곧 암흑 물질을 손아귀에 넣을 것이라고 제안하지만, 다른 이들은 그 유령 같은 입자들이 너무 잡히기 힘들어서 연구자들이 그들을 손에 넣기를 희망할 수 없다고 예측한다. 이것은 성공이냐 실패이냐의 상황으로, 미국 일리노이 주의 시카고 대학의 우주학자 Rocky Kolb는, “5년 안에 우리가 암흑 물질이 무엇인지를 알던지, 혹은 우리가 절대로 알지 못할 것인지 중 하나이다.”고 말했다.

웬프(WIMP) 기적

천문학자들은 암흑 물질의 그림자 같은 존재를 70년보다 더 이전에 처음으로 느꼈다. 1933년, 미국 Pasadena에 있는 캘리포니아 공과대학의 Fritz Zwicky는, 머리털자리 은하단(Coma Cluster of galaxies)이 눈에 보이는 물질들을 함께 붙들어두기에는 너무 적은 양을 포함하고 있다는 계산을 했다. 그는 그 은하단이 우주로 흩어지지 않도록 여분의 중력을 만들어주는 어떤 눈에 보이지 않는 물질이 있다고 추론했다. 이러한 이단적인 생각은 약 40년 후, 천문학자들이 개개의 은하들이 별들을 은하 내에 가두어 두기에는 빛을 내는 물질만으로는 충분하지 않다는 사실을 또한 발견하고, 각각의 은하가 암흑 물질로 이루어진 광대한 덩어리, 혹은 헤일로(halo)에 파묻혀 있다고 제안함으로써 신임을 얻게 되었다.

증거는 계속 늘어나고 있다. 2003년, 연구자들은 궤도를 돌고 있는 NASA의 WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)을 통해 빅뱅의 잔광(우주 배경 복사, 하늘을 가로질러 매우 약하게 변화하는 온도)을 측정하였다(Science, 14 February 2003, p. 991). 뜨겁고 차가운 지점들의 패턴이 우주가 어떻게 진화했는지를 밝혀주는데, 연구자들은 만약 우주가 5%의 일반 물질, 22%의 암흑 물질, 그리고 공간을 뺀어나가는 기묘한 73%의 ‘암흑 에너지’로 구성되고, 모두 중력을 통해 상호작용할 때, 관측된 패턴을 설명할 수 있다는 사실을 발견했다.

하지만 연구자들은 암흑 물질의 아주 작은 조각마저도 잡아내지 못했다. 우주의 ‘체셔 고양이(Cheshire Cat)’처럼, 그것은 평범한 시야에 숨어 있으면서, 추측컨대 우리 은하와 태양계를 떠돌면서 그것의 중력만을 ‘체셔 고양이의 웃음’으로서 보여주고 있다. 이러한 암흑 물질의 수줍음은, 암흑 물질이 입자들로 이루어져 있어야 한다고 가정하는 물리학자들을 성가시게 하고 있다. “이것이 새로운 물리학에 대해 우리가 갖고 있는 최선의 증거이다.”라고 미국 Irvine의 캘리포니아 대학의 이론물리학자 Jonathan Feng이 말했다. “암흑 물질이 있다는 것은 정말로 사실이고, 우리는 그것이 무엇인지 모른다.” 이론가들은 수많은 가능성들을 문득문득 생각해 왔다. 암흑 물질은 우주가 아주 작은 별도의 차원을 가질 때 존재할 수 있는 입자들일지도 모른다. 혹은 암흑 물질은 핵을 묶어주는 강한 핵력의 이론에서 개념적인 구멍을 메워주는 것으로 가정된 ‘액시온(axion)’이라는 입자들일지도 모른다.

가장 가능성 있는 설명은, 암흑 물질은 초대칭 이론 – 모든 알려진 입자들을 어떤 무겁고 알려지지 않은 ‘초대칭 짝(superpartner)’과 짝을 짓는 이론적인 도식 – 으로부터 예측된 입자들로 구성되어 있을 것이라는 생각일 것이다. 양성자보다 수백 배 무거울 것으로 기대되는 가장 가벼운 초대칭 짝이 오랫동안 추구해 온 ‘웜프’일 수 있다. 그리고 만약 기대했던 것처럼 그것이 일반 물질과 상호작용한다면, 간단한 계산이 대략 알맞은 양의 ‘웜프’ 암흑 물질이 빅뱅으로부터 남아 있다는 것을

보인다. 이러한 기묘한 일치, 혹은 ‘WIMP 기적’은 초대칭 이론이 또 다른 어림짐작이 아니라는 것을 시사한다고 Feng은 말한다.



그림 2. 어두움의 갈망 - 김선기 교수는 그의 요오드화세슘 배열이 매일 한두 개의 ‘웬프’를 기록하기를 바라고 있다.

발견해 내는 것이 믿는 것이다.

그 증거는 입자들에게 있다. 암흑 물질을 발견하는 가장 분명한 방법은 일반 물질과 충돌하는 그들을 잡아내는 것이고, ‘킴스’ 실험은 훨씬 높아진 민감도로 그 충돌을 추적하고, 신호라고 주장된 하나를 포함하는, 수십 개 이상의 실험들에 참가하고 있다. 하지만 암흑 물질을 탐지하는 것은, 말하기는 쉽지만 실제로는 어렵다. 암흑 물질 입자들은 방해 없이 지구를 통과하여 나아갈 수 있는 중성미자보다, 훨씬 미약한 정도로 일반 물질과 상호작용한다. 연구자들은 또한 탐지기들을 우주선(宇宙線) 및 다른 일반 입자들로부터 보호하여, 일반 충돌들의 소음 가운데 암흑 물질의 조용한 외침을 감지할 수 있어야만 한다.

암흑을 붙잡기 위한 경주에서, 지난 수 년 간의 선두 주자는 미국 북부 미네소타 주의 Soudan 광산에서 가동되는 CDMS라는 실험 장치였다. CDMS의 5킬로그램의 극저온 탐지기는 절대 0도에서 단지 몇 분의 일 이내로 냉각된 게르마늄과 실리콘 웨이퍼 더미로 이루어져 있다. 만약 ‘웬프’가 핵과 충돌하면, 그것은 몇 개의 자유 전자들과 부딪치게 되고, 미세한 열 진동을 생성한다. 전하와 열 신호를 함께 분석함으로써, 연구자들은 암흑 물질을 찾아내고 중성자들이나 다른 방해 물질들을 추려낼 수 있다.

현재에는, 또 다른 실험이 민감도에서 선두를 잡았다. 이태리 Gran Sasso의 지하도 안의 XENON10 실험 장치는 15킬로그램의 액체 제논으로 채워진 탱크로 구성되어 있다. 만약 ‘웜프’가 충돌하면, 제논 핵은 액체 속을 되튀면서 빛을 발산하고 소량의 자유 전자들과 부딪친다. 4월에, 콜롬비아 대학의 Elena Aprile가 이끈 XENON10 팀은, CDMS의 5배에 달하는 민감도로 탐색했지만, 아무 것도 찾지 못했다고 보고했다.

이러한 노력들과 경쟁하며 나아가는데 있어, ‘킴스’ 팀은 영점에서부터 출발해야 했다. 10년 전, 한국은 입자 물리 연구 시설을 갖고 있지 않았다. “우리는 항상 연구와 교육을 위해 해외로 나가야만 했다.”고, 1980년대 일본의 Tsukuba에 있는 KEK 가속기 연구실에서 경험을 쌓은 김선기 교수가 말했다. 한국 과학기술부가 1997년 창의적 연구 진흥 사업을 시작했을 때, 김선기 교수와 그의 동료인 김홍주(경북대) 교수와 김영덕(세종대) 교수는 급하게 뛰어 들었다. 세 번이나 김 3인조는 적절히 이름을 붙인 ‘킴스(KIMS)’ 제안을 제출했으나, 세 번 모두 실패하였다. 마침내, 2000년에 그들은 새로운 요오드화세슘 탐지기로 선정되었고, 연구비를 제공받았다. 그들은 양양 양수식 발전소 건설 도중에 두 번째의 행운을 잡았는데, 한 터널에서 떨어진 작은 구역이 사고로 함몰되었고, 발전소 임원들은 실험을 진행하는데 장소를 제공할 수 있었다. “우리는 굉장히 운이 좋았다.”고 김선기 교수는 말한다. “그 붕괴가 실험에 딱 맞는 충분한 공간을 만들어주었다.”

그때부터, 가장 힘든 작업은 미량의 방사성 동위원소가 거의 없는 탐지기를 개발하는 것이었다. ‘킴스’ 팀은 또한 대기에서 충돌하는 중성자들의 연쇄 반응으로 인한 배경 잡음을 일으키는 감마선 및 산재하는 우주선(宇宙線)들의 섬광 신호를 연구하는데 3년의 시간을 보내왔다. “중성자 신호는 우리가 웜프 신호일 것이라고 기대하는 것과 흡사하다.”고 김선기 교수는 설명한다. 그래서 연구자들은 그것을 가려내기 위한 방법을 찾아야만 한다. 김선기 교수는 연구를 통해 그것을 99.999%만큼 감소시켰다고 말한다.

‘킴스’는 전반적인 민감도에서 지금 당장 CDMS, XENON10과 경쟁하기는 쉽지 않다. 하지만 ‘킴스’는 한 가지 중요한 점에서 뛰어나다. 만약 ‘웜프’와 핵의 상호작용이 각 입자의 스핀이 어떠한지에 달려 있다면, ‘킴스’는 그 효과를 관측하는데 더 좋은 기회를 갖게 된다. “이것이 ‘킴스(KIMS)’가 CDMS, XENON10을 보완하게 만들어 준다.”고 김선기 교수는 말한다.

‘킴스’는 또한 최근의 물리학에서의 극적인 주장들 중 하나를 테스트할 수 있다.

1997년, 그리고 2000년에 다시, 연구자들은 이태리 Gran Sasso의 DAMA 실험 장치의 100킬로그램짜리 요오드화나트륨 결정 배열에서 ‘웬프’의 증거를 보고하였다 (Science, 3 March 2000, p. 1570). 그 팀들은 성광의 비율이 계절이 따라 오르내린다는 사실을 발견했다. 이것은 만약 은하가 ‘웬프’ 구름에서 회전하기 때문에 태양계가 ‘웬프’ 바람을 맞는다고 하면 이치에 맞다. 지구가 태양 주위를 공전하기 때문에, 지구는 교대로 ‘웬프’ 바람에 돌진해 들어가거나 멀어지고, 이것이 총돌률의 증가와 감소를 야기한다.

하지만 다른 어떤 실험도 DAMA 신호를 재관측하지 못했고, 대부분의 물리학자들은 그 관측을 잊어가고 있다. ‘킴스’가 (요오드화나트륨 대신 요오드화세슘을 사용하여) DAMA와 유사한 탐지기 배열을 사용하고 있기 때문에, 많은 전문가들은 이것이 DAMA 결과의 명확한 테스트를 제공할 수 있으리라고 말한다. 하지만 DAMA 그룹의 리더인 Rita Bernabei(Rome Tor Vergata 대학, 물리학자)는 이에 동의하지 않는다. “어떤 직접적인 비교도 가능하지 않다.”고 그녀는 주장하는데, 요오드화세슘이 DAMA의 탐지기보다 저(低)질량 암흑 물질 입자에 덜 민감하기 때문이라고 한다. 2003년에, Bernabei 그룹은 DAMA/LIBRA라고 불리는 업그레이드된 250킬로그램짜리 탐지기에 열광했다. 이 탐지기의 최초 발견은 내년에 공개될 예정이다.

암흑 물질 실험에 대한 경쟁은 뜨겁게 달아오르고 있다. CDMS 팀은 이미 이번 여름에 민감도의 선두를 되찾기 위한 충분한 데이터를 모았다. 그 동안, 북미, 유럽, 아시아의 연구자들은 800킬로그램의 구형 액체 제논 탐지기인 XMASS(올해 자금 지원을 받고, 내년에 일본 Kamioka에 건설될 예정)를 포함하여, 보다 야심적인 탐지기들을 배치하거나 계획하고 있는 중이다. “처음으로, 직접 탐지 실험들이 이론가들이 예측한 무언가를 관측하기를 기대할 만한 체제들로 움직이고 있다.”라고 미국 오하이오 주 Cleveland의 Case Western Reserve 대학의 이론 물리학자 Lawrence Krauss가 말한다.

고양이의 가족을 벗기는 다른 방법들

한편, 천문학자들은 하늘에서 암흑 물질의 신호들을 찾고 있다. 두 개의 ‘웬프’가 은하의 헤일로에서 충돌하면, 그들은 쌍소멸하여 고에너지 감마선 광자들이나 일반 입자들을 내놓는다고 한다. 최근에 생겨나고 있는 감마선 망원경의 시대가 이러한 신호들을 찾는 데 적합할 것이다. 2004년부터, 유럽의 지원을 받은 아프리카 나미비아의 HESS(High Energy Stereoscopic System)가 4개의 탐지기를 사용하여, 대기에서 감마선이 충돌하여 입자들의 전자 사태(avalanche)가 촉발되어 생성된 빛들을 탐색하고 있다. 이와 유사하게, 미국 아리조나 주 Mount Hopkins에 기지를 둔

VERITAS(Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System)가 올해 초 데이터들을 수집하기 시작했다. “감마선 관측이 헤일로 분포를 측정하고 이들을 함께 묶어두는 정말로 유일한 방법이다.”라고 VERITAS에서 일하는, 미국 미주리 주 St. Louis의 워싱턴 대학의 천문학자 James Buckley가 말한다.

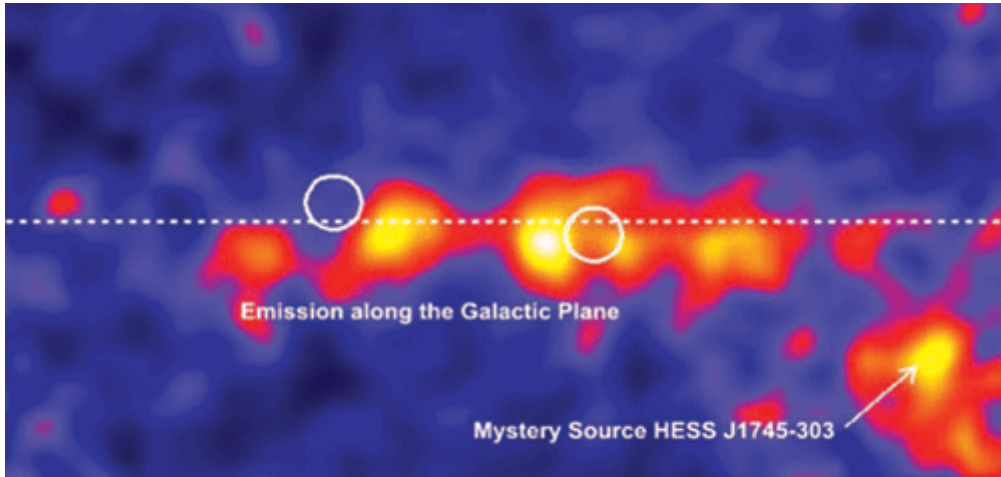


그림 3. 너무 밝게 빛난다? – HESS의 우리 은하 중심부의 감마선 지도는 섬광 속에서 잃은 암흑 물질의 단서를 남길 수도 있다.

HESS는 암흑 물질을 찾아볼 가장 명백한 장소인, 우리 은하(Milky Way galaxy)의 중심부로부터 나오는 감마선 발광을 이미 지도로 만들었다. 불행히도, 이러한 감마선은 뜨거운 가스처럼 보다 흔한 출처로부터 나오는 경우가 압도적이다. 그래서 연구자들은 중심부의 섬광으로부터 눈을 돌려, 우리 은하 주위에 궤도를 그리며 돌고 있는 이른바 ‘왜소 구형 은하(dwarf spheroidal galaxy)’를 바라보아야 한다. 이 은하들은 아마도 이르면 이번 겨울에 쏘아 올릴, NASA의 GLAST(Gamma-ray Large Area Space Telescope)가 궤도에 오르면 보다 완전한 시야에 들어올 것이다.

암흑 물질의 소멸은 또한 다른 입자들을 생성한다. 러시아와 이태리의 인공위성인 PAMELA는 소멸 과정에서 생겨난 반양성자와 다른 반입자들을 찾고 있다. 그리고 IceCube라는, 남극의 얼음 속으로 내려간 4200개의 빛 감지기 배열이 태양에서의 소멸로 생긴 중성미자들을 감지할 수 있다. 어마어마한 에너지로 나아가고, 수십억 전자볼트, 혹은 기가 전자 볼트(GeV) 단위로 측정되기에, 몇 개의 중성미자들은 얼음과 상호작용하여 빛을 발산할 것이다. 태양으로부터 나오는 천억전자볼트의 중성미자 흐름이 그곳에 모여든 암흑 물질의 확실한 신호가 될 수 있을 것이라고, Madison에 있는 위스콘신 대학의 물리학자 Francis Halzen가 말한다. 그는 “만약 그렇지 않다면, 어떻게 태양으로부터 천억전자볼트의 중성미자를 얻을 수 있겠는가?”라고 말했다.

연구자들이 암흑 물질 입자들을 찾기 전에, 암흑 물질을 만들어낼 수도 있을 것이다. 유럽의 LHC에서는 이전의 어떤 충돌보다도 7배 더 큰 에너지로 양성자들을 서로 충돌시켜, 수십억 개의 작은 폭발에서, 빅뱅 이후 한 번도 존재하지 않았던 조건들을 다시 창조해낼 예정이다. 만약 초대칭짝(superpartners)이 존재한다면, 그것들을 수천 개씩 만들어낼 수 있을 것이라고, LHC 입자 감지기에서 일하는 미국 텍사스 주 Houston의 라이스 대학의 Alex Tumanov가 말한다. “대다수의 모형들은 우리가 1~2년 안에 암흑 물질을 찾아내거나 혹은 배제시킬 것이라고 추측한다.”라고 말한다. “이것이 모든 사람들이 흥분해 있는 이유이다. 우리는 바로 문 앞에 와 있다.”

하지만 LHC가 새로운 입자들을 토해낸다고 할지라도, 그것이 초대칭성에 대한 수많은 설명들 중에 자연이 어떤 것을 갖고 놀이하는지를 확실케 할 만큼 충분한 내용을 밝히지는 못할 것이라고, 미국 일리노이 주 Evanston의 노스웨스턴 대학의 Michael Schmitt가 말한다. 그것은 입자들을 보다 상세히 연구할 수 있는, 40킬로미터 길이의 계획된 국제 선형 가속기와 같은 다른 가속기를 필요로 할 것이다.

모든 것을 함께 놓기

궁극적으로, 모든 세 가지 방법들 - 직접 탐지기, 망원경, 입자 가속기 - 은 과학자들이 암흑 물질이 무엇이라고 말할 수 있기 전에 그것을 찾는데 성공해야 할 것이다. “우리가 우리의 은하에서 입자들을 발견하고, 실험실에서 생산하고, 그리고 그들이 동일한 것이라는 것을 확신하는 것이 정말 필요해질 것이다.”라고 스탠포드 대학의 이론가 Edward Baltz가 말한다. 암흑 물질을 발견하기 위한 경주에서, 그는 “모두가 완료하기 전에는 누구도 이길 수 없다.”고 말한다.

물론 그 노력들이 조화롭게 이루어지지는 않는다. 직접 탐색에서는 LHC가 생성하지 못하는 무거운 입자들을 발견할 수 있다. 혹은 ‘웜프 기적’에도 불구하고, 암흑 물질은 몇 개의 다른 유형의 입자들로 이루어져 있을지도 모른다. 연구자들은 또한 그들이 무언가를 보았을 때, 심리적인 도전을 받게 된다. “가장 먼저 ‘그것이 사실인가?’를 묻게 될 것이다.”라고, Case Western의 CDMS 팀 구성원인 Daniel Akerib가 말한다. “연구자가 가장 먼저 해야 할 것은, 그것이 가짜 신호였음을 증명하는 것일 것이다.”라고 그가 말한다. 이것은 까다로울 수 있는데, 왜냐하면 일반 입자가 ‘웜프’와 유사할 수도 있는 모든 가능한 방식을 확인하는 것이 요구되기 때문이다.

그럼에도 불구하고, 김선기 교수를 포함한 대부분의 연구자들은 그런 문제를 가져보고 싶어한다. 김선기 교수는 1년 안에, 그의 팀 구성원들이 한국의 지하실에서

납득할 만한 ‘웜프’ 신호를 밝혀내기에 충분한 축적된 데이터를 갖기를 희망한다. ‘체셔 고양이의 웃음’ 뒤의 ‘웜프’의 형태는 또 다른 문제이다. “우리는 ‘웜프’가 어떤 형태일지 알지 못한다.”고 김선기 교수는 말한다. 그들은 곧 발견해 내고, 물리학의 중대한 비밀 중 하나를 풀 수 있을 것이다.