

④ LHC와 암흑물질

우주의 암흑물질 · 에너지 구성성분 밝힌다

글 | 고병원 _ 고등과학원 물리학부 교수 pko@kias.re.kr

인류는 오래 전부터 우주 만물이 무엇으로 이루어져 있는지에 대해 궁금해했으며 각 시대마다 그리고 각 문화권마다 나름대로의 이론을 가지고 있었다. 고대 그리스인들은 물, 불, 흙, 공기의 4원소가 모든 물질을 구성한다고 생각하였으며 중국에서는 양과 음, 그리고 물, 나무, 불, 흙, 쇠의 5가지가 우주 만물의 변화를 설명한다는 음양오행설이 기본 철학이었다. 이러한 철학들은 당시 사람들이 경험하는 만물의 변화를 인지가능해지면서 가장 간단한 원리로 설명하려 했던 것으로 이해할 수 있다. 그런 점에서 고대 그리스의 철학자 데모크리토스의 원자론은 당시로서는 매우 추상적이고 출중한 아이디어라고 할 수 있으며 현대의 원자론과 일맥상통한다고 하겠다.

19세기 초에 제창되었던 돌턴의 원자설은 많은 실험들, 그리고 양자역학의 발견과 발전에 힘입어 20세기 전반부에 완전히 입증되었다. 이에 따르면 모든 원자들은 음전하를 지니는 전자와 양전하를 지닌 핵으로 되어있으며 원자핵은 다시 양성자와 중성자로 이루어져 있다. 양성자나 중성자는 기본 입자가 아니라 쿼크와 글루온이라는 기본입자들이 강한 상호작용으로 만들어낸 복합입자이다.

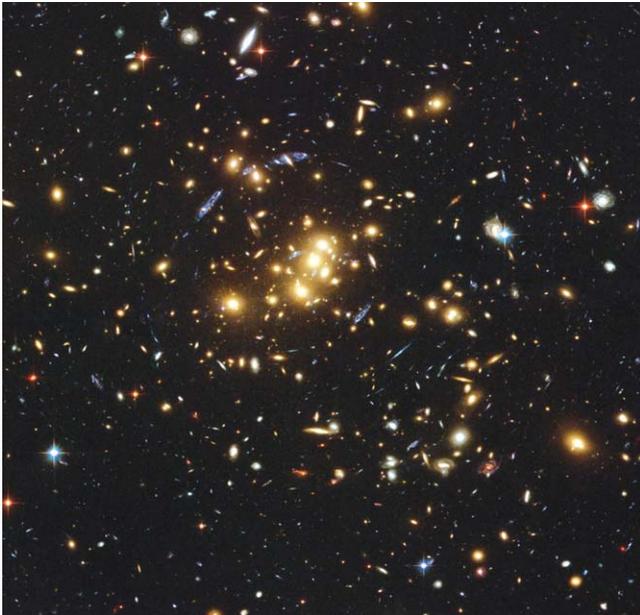
우주에너지 대부분을 차지하고 있는 암흑물질

현재 입자물리학의 패러다임인 표준모형에 따르면 만물을 구성하는 기본입자들은 스핀이 1/2인 쿼크, 그리고 전자와 중성미자와 같은 경입자로 되어 있다. 이들 기본입자들은 광자(전자기력) W^\pm , Z 입자(약한 핵력), 글루온(강한 핵력), 그래비톤(중력)을 주고받으

면서 다른 기본입자들과 상호작용을 하게 된다. 그래비톤은 스핀이 2이고 나머지 게이지 입자들은 모두 스핀이 1인 보손들이다. 그리고 표준모형에서 모든 입자들의 질량을 생성하는데 관여하는 힉스 입자(스핀이 영인 스칼라 입자)가 있다. 힉스입자는 아직 발견이 되지 않았으며 표준모형이 맞다면 LHC에서는 틀림없이 발견될 것이다. 표준모형은 200GeV 에너지 스케일(약 10^{-16} m)까지 잘 맞는 놀라운 이론이다.

우주가 무엇으로 되어있느냐라는 오랜 질문에 대한 과학적인 해답은 최근 들어서야 가능해졌다. 현대 물리학과 기술의 발전으로 인류는 우주의 에너지밀도를 아주 정밀하게 측정할 수 있게 되었는데 $1m^3$ 부피의 공간에 수소 원자가 하나 정도 있는 것에 해당한다. 물론 우리가 일상생활에서 접하는 물체들은 아보가드로 수(6×10^{23} 개) 정도의 원자 또는 분자들로 이루어져 있지만 우주의 광활한 공간들을 고려하면 우주의 평균 에너지밀도가 그 정도가 된다는 것이다.

우주의 에너지밀도를 측정한 것도 대단한 일이지만 더 놀라운 사실은 우리가 우주의 에너지 밀도뿐만 아니라 우주의 에너지가 어떤 성분으로 구성되어 있는지도 잘 알고 있다는 것이다. 이는 마치 소설 및 영화 '항수'에서 주인공이 어떤 항수의 냄새만 맡고도 그 항수에 어떠한 성분이 얼마나 들어가 있는지 정확히 알아내는 것과 마찬가지로 할 수 있다. 실제로 우리가 물질의 근본단위라고 생각해 온 원자는 전체 우주에너지의 4.6% 정도 밖에 차지하지 않고 대부분의 우주에너지는 그 정체가 전혀 알려지지 않은 암흑물질과 암



우주는 암흑물질과 암흑에너지가 대부분을 차지하고 있다.

흑에너지로 이루어져 있다. 암흑물질은 보통 물질과 똑같은 상태방정식을 만족하지만, 핵자나 전자 등 우리가 현재까지 알고 있는 입자와는 그 성질이 완전히 다르며 특히 전기적으로 중성이어야 한다. 현재의 표준모형 내에는 암흑물질이 될 수 있는 입자가 없기 때문에 우주의 암흑물질을 설명하기 위해서는 표준모형을 확장해야 한다.

물론 암흑물질의 필요성은 이미 1933년 스위스 태생의 천체물리학자 츠뵈키에 의해서 처음 제기되었다. 츠뵈키는 은하들의 회전속도를 연구하다가 성단의 중심에서 아주 멀리 떨어진 은하의 속력이 거의 일정하게 유지된다는 것을 알게 되었다. 이를 설명하기 위해서 츠뵈키는 성단의 주위에 빛을 내지 않는 암흑물질이 차있다고 가정했다. 츠뵈키의 암흑물질 가설은 금세기 들어서야 비로소 WMAP을 비롯한 여러 관측에 의해서 완전히 검증되었다. 남은 작업은 이 암흑물질의 정체가 과연 무엇인가를 밝히는 일이며 이를 위해서는 질량과 스핀, 그리고 다른 양자수들을 가속기를 비롯한 다른 실험으로부터 결정해야 한다. 우주의 가장 큰 에너지 구성원인 암흑에너지는 암흑물질과는 또 다른 새로운 형태의 에너지인데 암흑에너지와 LHC 물리학과는 연관성이 없다.

암흑물질의 유력한 후보입자···뉴트랄리노 LSP, 액시온

그럼 어떤 입자들이 우주의 암흑물질이 될 수 있을지 알아보자.

우선 암흑물질은 빛을 내거나 흡수하지 않아야 하므로 전기 전하가 영이어야 하며, 그 수명이 우주의 나이 이상이거나 전혀 붕괴되지 않는 안정된 입자여야 한다. 현재까지 연구된 입자물리에서의 암흑물질 후보입자들은 수십 가지에 이르는데 그 중에서도 비교적 상세히 연구되어온 몇 가지 암흑물질들을 소개해보자.

우선 현재 입자물리학에서 가장 각광을 받고 많이 연구되고 있는 초대칭 표준모형에서의 암흑물질을 살펴보자. 초대칭성이란 페르미온과 보손 사이의 대칭성으로서 스핀이 1/2만큼 차이가 나는 입자들 사이에 작용하는 시공간 대칭성의 일종이다. 초대칭 이론에 따르면 스핀 1/2인 전자는 스핀이 0인 스칼라 전자라는 초대칭짝을 가지고 있고, 스핀이 1인 광자는 스핀이 1/2인 포티노라는 초대칭짝을 가진다. 만일 초대칭성이 자연계의 정확한 대칭성이라면 입자와 초대칭짝은 같은 질량을 지녀야 한다. 하지만 자연계에서 질량이 영인 포티노라든지 전자와 질량이 같은 스칼라 전자가 발견되지 않았으므로 초대칭성은 깨어져야 하며 이를 통해서 하나의 입자와 그 초대칭짝은 다른 질량을 가질 수 있게 된다. 중력이 약한 핵력보다 왜 훨씬 약한지를 이해하려는 노력이 바로 게이지 계층성 문제인데 이를 해결하기 위해서는 초대칭 입자들의 질량이 대략 전자기 약작용 스케일인 250GeV 와 같은 정도의 크기(1/10~10배 정도)가 되어야 한다. 만일 수십에서 수백GeV 정도의 질량을 가지는 초대칭 입자들이 존재한다면 표준모형과는 달리 게이지 결합상수가 약 2×10^{16} GeV 정도에서 만나게 되어 대통일 이론이 가능해진다는 장점이 있다.

하지만 가장 일반적인 초대칭 모형에서는 양성자가 빨리 붕괴되는 문제점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 소위 R-패리티라는 양자수를 도입하는데 표준모형에 등장하는 입자들은 +1, 그리고 그들의 초대칭짝 입자들은 -1의 R-패리티를 지닌다. 이렇게 되면 가장 가벼운 초대칭 입자(LSP)는 더 이상 붕괴되지 않기 때문에 우주의 암흑물질의 훌륭한 후보 입자가 된다. 그리고 많은 경우에 가장 가벼운 중성 뉴트랄리노 또는 그라비티노(그라비톤의 초대칭짝으로 스핀 3/2)가 가장 가벼운 초대칭 입자가 된다. 우주론에서는 빅뱅 이후에 살아남은 이들 암흑물질의 양을 계산할 수 있는데 초대칭 모형에서 가장 가벼운 뉴트랄리노는 현재 남아있는 암흑물질의 양을 매우 자연스럽게 설명할 수 있다는 장점이 있다.

가장 가벼운 뉴트랄리노 LSP는 LHC와 같은 가속기에서도 쉽게 만들어진다. 왜냐 하면 초대칭 입자가 쌍으로 생긴 후 각각의 초대칭 입자가 붕괴될 때 제일 마지막에 남는 것이 LSP 이기 때문

이다. 즉 LHC에서 초대칭 입자가 생길 때마다 뉴트랄리노 암흑물질이 만들어진다고 볼 수 있다. 그래비티노가 LSP인 경우도 우주의 암흑물질이 될 수 있는데 이 경우에는 LHC에서 두 번째로 가벼운 초대칭 입자(NLSP)가 먼저 만들어진 후 그 입자가 검출기를 빠져나가기 전에 그래비티노 LSP와 광자 또는 타우 입자로 붕괴되면 쉽게 암흑물질 생성을 확인할 수 있다. 만일 NLSP가 수명이 너무 길어서 검출기 안에서 붕괴되지 않으면 초대칭입자 및 암흑물질 연구가 어려워지는데 이를 부분적으로 해결할 수 있다는 제안들도 있다.

또 다른 암흑물질의 훌륭한 후보로 액시온이라는 아주 가벼운 입자가 있다. 액시온은 강한 핵력을 기술하는 양자색소역학에서의 강한 CP 문제를 자연스럽게 풀기 위해 도입된 입자이다. 지금까지 알려진 바로는 액시온이 존재한다면 그 질량이 아주 가벼워야 하고 물질과의 결합세기도 매우 미약해야 한다. 초대칭 이론에서는 액시온의 초대칭짝의 하나인 액시노가 암흑물질이 될 수 있다.

액시온이나 초대칭 입자인 뉴트랄리노 LSP는 애당초 우주의 암흑물질을 설명하기 위해서 도입된 입자들이 아니라 입자물리학의 다른 자연성 문제를 풀기 위해 도입되었으며 이들이 암흑물질이 될 수 있다는 것은 일종의 보너스 효과라 할 수 있다. 그런 점에서 많은 입자물리학자들이 액시온이나 LSP를 암흑물질의 훌륭한 후보 입자로 간주하고 있다.

가장 가벼운 칼루자-클라인 입자도 암흑물질 후보

초대칭 암흑물질이나 액시온과는 달리 입자물리의 자연성 문제와 상관없이 표준모형에 최소한의 입자들만 더해서 암흑물질을 설명하는 모형들도 있다. 가장 간단한 예가 표준모형에 중성 스칼라 입자를 하나 도입하는 것인데 이 경우 R-패리티와 비슷한 대칭성을 도입해서 중성 스칼라 입자가 안정되게 만들어 암흑물질이 되도록 한다. 이 경우에도 비교적 쉽게 현재 우주의 암흑물질 양을 설명할 수 있으며 힉스 입자가 암흑물질 쌍으로 붕괴하는 것이 가능해지기 때문에 LHC 등의 가속기에서 힉스 입자를 발견하는 것이 힘들어진다.

1920년대에 칼루자와 클라인이 독립적으로 아인슈타인의 일반 상대론을 부가차원이 있는 시공간에 적용해서 중력과 전자기력을 동시에 기하학적으로 설명한 이래 부가차원은 입자물리의 중요한 주제가 되어왔다. 특히 초끈이론의 발전에 힘입어 최근 부가차원이 있는 모형들이 상당히 구체적인 단계로까지 연구되고 있다. 만일

표준모형 내에서 물질을 이루고 있는 기본입자 및 그들 사이의 상호작용을 매개하는 힘의 전달자

	종류	이름	전기 전하	스핀	
물질	쿼크	up (u), charm (c), top (t)	+2/3	1/2	페르미온 (fermion)
		down (d), strange (s), bottom (b)	-1/3	1/2	
	경입자		-1	1/2	
힘	전자기력	(광자)	0	1	보손 (boson)
	전달자				
	강력 전달자	(글루온)	0	1	
	약력 전달자			1	
	중력 전달자	그래비톤	0	2	
	질량 생성	힉스 입자	0	0	

전자기 작용 등 게이지 상호작용이 5차원이나 그 이상의 차원에까지 전파될 수 있다고 가정하면 가장 가벼운 칼루자-클라인 입자가 암흑물질의 좋은 후보가 된다는 것이 최근 수년 사이에 밝혀졌다. 부가차원의 기하학적 모양이 어떤가에 따라서 암흑물질의 구체적인 성질이 달라지는데 부가차원이 편평하다면 초대칭 모형의 뉴트랄리노 LSP와는 달리 스핀이 1인 벡터 보손이 암흑물질 후보가 된다. 하지만 가속기에서의 신호는 초대칭 모형에서의 뉴트랄리노 LSP와 비슷하며 스핀 결정을 통해서만 암흑물질이 초대칭 입자인지 부가차원을 지닌 모형에 등장하는 입자인지 알 수 있다.

마지막으로 우리가 아는 입자들과는 지금까지 알려진 게이지 상호작용을 하지 않는 숨겨진 부분을 상정하는 이론들이 있다. 이들 입자들은 우리의 우주를 이루고 있는 전자나 쿼크와 중력 또는 새로운 게이지 상호작용이나 중성 스칼라 입자 등에 의해서 상호작용을 할 수 있으며, 숨겨진 부분의 가장 가벼운 입자들은 자연스러운 암흑물질 후보입자가 된다. 이들의 신호는 초대칭 모형이나 부가차원이 있는 모형에서의 암흑물질 신호와는 완전히 다르고 오히려 중성 스칼라 암흑물질의 경우와 비슷하다.

이 경우에도 힉스 입자가 숨겨진 부분의 암흑물질 두 개로 붕괴될 수 있으므로 힉스 입자가 검출기에 흔적을 남길 확률이 줄어들게 된다. 이렇게 되면 힉스입자가 LHC 등의 가속기에서 생성되더라도 발견하기가 힘들어지는 문제가 있다.

입자물리학에서 예측되는 주요 암흑물질의 후보입자들과 그들의 스핀 양자수, 그리고 LHC 가속기에서의 생성여부 및 직접탐색 실험에서의 발견가능성

암흑물질의 후보입자	스핀	LHC에서의 생성 가능성	직접탐색실험에서의 발견가능성	비고
뉴트랄리노 LSP	1/2	있음	있음	게이지 계층성 문제 해결, 통일장 이론 가능
그래비티노 LSP	3/2	둘 다 가능	없음	상동
엑시온	0	없음	없음	강한 CP 문제 해결
엑시노	1/2	둘 다 가능	없음	엑시온 + 초대칭성
가장 가벼운 칼루자-클라인 입자	1	있음	있음	보편적인 부가차원을 가진 모형의 일종
중성 스칼라 암흑물질	0	있음	있음	암흑물질을 설명하는 표준모형의 가장 간단한 확장
숨겨진 부분에 있는 암흑물질	0, 1/2, 1	있음	있음	지금까지의 실험 사실과 쉽게 부합

LHC 암흑물질 연구로 우주 암흑물질 정체 이해

이렇게 많은 입자들 중에서 어떤 입자가 우주의 암흑물질을 이루고 있는지는 이론적으로 결정할 수 없다. 하지만 운이 좋으면 거대 강입자 가속기(LHC)와 같은 입자가속기에서 암흑물질을 생성시켜 질량이나 스핀, 그리고 다른 성질들을 측정함으로써 후보입자 중 LHC에서 만들어진 암흑물질과 우주를 이루고 있는 암흑물질의 정체를 이해하는데 도움이 될 수 있다. 그리고 LHC에서 얻어진 정보들을 이용하면 빅뱅 이후에 생성된 암흑물질들이 현재 얼마나 남아있을지 계산해낼 수 있다. 그 수치를 WMAP 등에서 관측한 값과 비교함으로써 LHC에서 생성된 암흑물질이 현재 우주에너지의 23%를 차지하는 암흑물질인지 아니면 엑시온이나 숨겨진 부분의 암흑물질 등 새로운 암흑물질이 우주의 암흑물질에 중요한 부분이 되는지 등을 간접적으로 알 수 있게 된다. 즉 LHC에서 암흑물질의 성질을 잘 이해함으로써 우주의 암흑물질의 구성성분에 대해서 좀 더 정확한 이해가 가능해진다는 것이다. 실제로는 LHC보다 국제 선형가속기(ILC)에서 필요한 정보를 더 많이 얻을 수 있지만 ILC가 언제 건설될지는 아직 불투명하다.

만일 뉴트랄리노라든지 그래비티노, 엑시노, 가장 가벼운 칼루자-클라인 입자, 또는 숨겨진 부분의 가장 가벼운 중간자나 배리온이 암흑물질이라면 이들 암흑물질 후보입자들은 LHC에서 만들어질 가능성이 매우 높다. 하지만 이들 입자는 중성미자와 마찬가지로 검출기에 흔적을 거의 남기지 않기 때문에 오로지 부족한 수직 운동량과 에너지에 의해서만 그 존재를 간접적으로 알 수 있다. 가벼운 그래비티노 또는 엑시온이 LSP인 경우에는 LHC에서 만들어

진 NLSP가 LSP와 광자 또는 LSP와 타우 경입자로 붕괴하면서 그래비티노나 엑시노 암흑물질 생성이 가능해진다. 반면에 엑시온은 전자나 핵자와의 상호작용이 너무 약하기 때문에 LHC에서 이들을 직접 생성할 수 없다.

암흑물질은 LHC와 같은 가속기에서만 탐색할 수 있는 것이 아니며, LHC와는 완전히 독립적으로 지구 근처를 떠돌고 있는 암흑물질을 지하에서 직접적으로 탐색하는 실험들이 현재 지구 곳곳에서 진행되고 있다. 지구 주위의 암흑물질들은 검출기를 이루고 있는 원자핵과의 상호작용이 매우 미약하기 때문에 대부분은 그냥 통과해 버리지만 가끔씩 원자핵과 충돌해서 검출기에 흔적을 남기게 되므로 이를 관측함으로써 암흑물질을 직접 탐색할 수 있다. 이로써 LHC에서의 암흑물질 연구와 지하에서의 직접탐색 실험이 상호보완적인 측면이 있음을 알 수 있다.

지금까지 암흑물질의 발견과 입자물리학자들이 제안한 가능한 암흑물질의 종류, 그리고 그들 암흑물질들이 LHC에서 생성될 수 있는 가능성을 살펴보았다. 물론 LHC에서 암흑물질이 생성될 수 있다면 매우 다행스러운 일로서 가속기 물리학과 우주론의 시너지 효과를 볼 수 있을 것이다. 자연이 우리에게 충분히 친절해서 LHC에서 힉스 입자뿐만 아니라 현재 우주를 이루고 있는 중요한 요소인 암흑물질을 발견할 수 있게 되길 기대해본다. 



글쓴이는 서울대학교 물리학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 시카고대학교에서 박사학위를 받았으며, 홍익대학교 기초과학과 조교수, 한국과학기술원 물리학과 부교수, 교수 등을 지냈다.