

힉스입자의 발견과 향후 과제

글_고병원·고등과학원 물리학부 교수

1. 표준모형에서의 힉스입자

힉스입자의 발견으로 S. Weinberg가 1967년에 제안한 표준모형은 마침내 완성단계에 도달했다고 할 수 있다(힉스입자를 포함한 표준모형에 등장하는 입자들은 <그림 1> 참조).

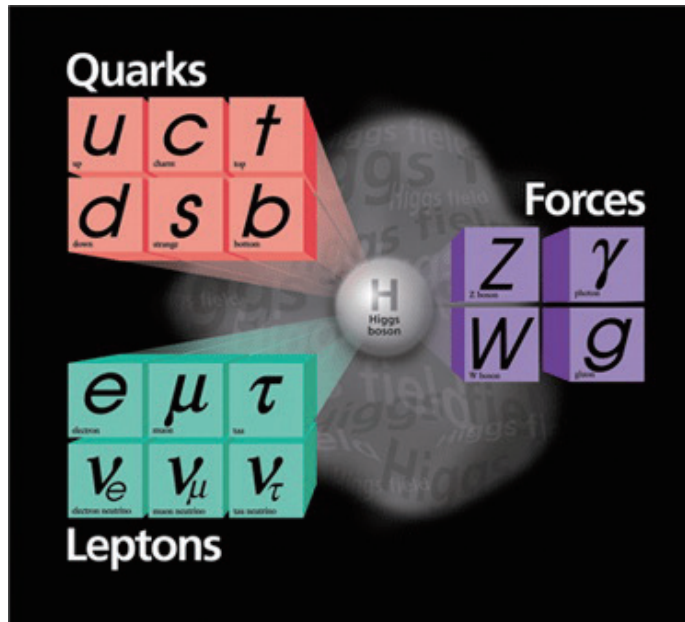
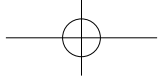


그림 1. 표준모형의 입자들

힉스입자는 표준모형 내의 여러 입자의 질량을 만들어내는 중요한 역할을 한다. 약한 상호작용을 전달하는 W, Z 입자의 질량이 소위 Higgs mechanism에 의해서 생성되며 약한 핵력이 미치는 힘의 범위가 핵자의 크기보다 훨씬 작고 중성자 붕괴를 일으키는 약한 핵력이 왜 약한지에 대한 해답을 제시해 준다. 아울러 전자를 비롯한 중성미자를 제외한 대부분 페르미온의 질량 역시 Higgs mechanism에 의해서 주어진다. 표준모형은 하나의 Higgs doublet을 통해서 페르미온과 약

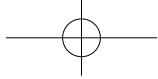


한 핵력의 전달자인 W, Z 입자의 질량을 동시에 설명하는 가장 경제적인 모형이며 입자물리의 기본이 된다. 따라서 이 표준모형을 모든 가능한 방법으로 완전히 검증하는 것이 절대적으로 필요하다. 현재 전자기 약작용의 정밀검증(electroweak precision tests)과 플레이버(flavor) 데이터로부터 표준모형은 양자고리 효과를 포함한 수준에서 매우 정확하게 검증되었다. 최근 힉스입자가 발견됨에 따라 앞으로 남은 과제는 힉스입자끼리의 결합 상수(self coupling)들을 측정하여 표준모형의 예측과 비교 검증하는 일이다. 이를 통해서 힉스 더블릿이 하나만 존재하는 표준모형이 맞는지 아니면 여러 개의 힉스입자들이 존재해야 하는지 알 수 있다. 이를 위해서는 좀 더 많은 실험연구가 필요하고 특히 고휘도의 전자-양전자 가속기 건설이 필수적이다.

역사적으로 Higgs mechanism은 초전도체계에서 처음 알려졌다. 1950년에 제안된 Ginzburg-Landau 이론은 대칭성의 자발적 붕괴라는 개념으로 초전도체가 자기장을 밀쳐내는 Meissner 효과를 설명해주며 1935년에 제안된 London 방정식이 자연스럽게 유도된다. Landau-Ginzburg 이론의 상대론적인 확장이 바로 표준모형에서의 Higgs mechanism에 해당한다. 한편 초전도체의 경우에는 Cooper pair의 형성여부로 초전도체로의 상전이 현상을 설명하는 소위 BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer, 1957) 이론이라는 미시적 이론이 존재한다. 따라서 초전도체에서의 BCS이론처럼 표준모형에서 Higgs mechanism을 일으키는 미시적인 이론이 존재하는지 여부가 입자물리학에서 매우 중요한 문제의 하나로 간주되어 왔으며 이에 대한 많은 이론이 제안되었다. BCS와 가장 유사한 이론이 Technicolor, Top condensate 모형들이라고 볼 수 있는데 이들 이론에서는 Higgs mechanism에 의해서 질량을 가지게 되는 종편극(longitudinally polarized)상태의 W, Z 게이지 입자들이 composite particle이 되므로 구조가 없는 횡편극 입자와는 그 성질이 다르게 된다. 아울러 미시적 이론의 종류에 따라서 힉스입자도 구조가 없는 기본입자가 아니라 composite 이거나 아예 존재하지 않을 수도 있다. 최근에 발견된 힉스입자의 성질이 표준모형의 힉스입자와 매우 흡사하기 때문에 composite Higgs 시나리오가 맞을 가능성은 점점 더 줄어들고 있다고 할 수 있다. 만일 힉스입자가 기본입자라면 이는 최초로 발견된 스핀이 영인 기본입자이다. 물론 파이 중간자처럼 스핀이 영인 입자가 발견되었지만, 이 입자는 $1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$ 정도의 크기를 가지는 쿼크와 그것의 반입자로 이루어진 composite 입자이다. 힉스입자가 과연 구조가 없는 기본입자일지는 좀 더 정밀한 실험이 이루어져야 하며 LHC@14 TeV 실험을 통해서 좀 더 확실한 답을 얻을 것으로 기대된다.

2. 새로운 물리법칙의 필요성

표준모형이 $\sim 1\text{ TeV}$ 이하에서 일어나는 대부분의 입자물리 현상들을 매우 잘 설명하고 있지만, 표준모형으로 설명되지 않는 몇 가지 현상들이 존재하기 때문에 표준모형을 포함하는 새로운 물리법칙을 구축하는 것이 필요하다. 표준모형을 포함하는 새로운 물리법칙(Beyond the Standard



Model)이 필요하다는 것에 대한 이유는 (i) 중성미자의 질량과 변환, (ii) 우주의 물질-반물질 비대칭성과 (iii) 암흑물질 및 (iv) 우주의 가속팽창 등이다. 이 네 가지 관측사실들을 설명하기 위해서는 표준모형을 반드시 확장해야 한다. (물론 muon 경입자의 비정상 쌍극자와 top quark의 전후방 비대칭성, $\sin^2\theta_w$ 등처럼 표준모형 내에서 이해하기 어려운 현상들이 몇 가지 있는데, 이들을 새로운 물리법칙에 대한 확실한 증거로 볼 수 있는지는 좀 더 두고 봐야 할 것이다.)

이 중에서 질량의 기원으로서의 힉스입자 발견과 관련된 문제로서 우주의 25%가량을 이루고 있는 암흑물질이 어떤 입자들로 이루어진 것인지, 그리고 암흑물질 입자의 질량이 어떻게 생성되는지가 향후 중요한 문제로 부각될 것이다.

3. 우주의 질량은 어디서 오는가?

흔히들 힉스입자의 발견으로 질량의 기원이 밝혀졌다고 이야기하지만 이는 표준모형에 등장하는 입자의 질량에만 해당하는 것으로 엄밀하게 정확한 이야기는 아니다. 우주 대부분은 우리가 그 정체를 알지 못하는 암흑물질 및 암흑에너지로 되어 있으며 암흑물질 입자의 정체와 그 질량의 기원에 대해서는 전혀 알려진 바가 없다. 다시 말해서 우리가 빛을 통해서 볼 수 있는 우주는 우주 전체의 5% 정도밖에 안 된다는 것이다. 표준모형 내의 입자들은 우주의 5% 정도만을 구성하고 있으며 우주의 25%는 암흑물질로, 그리고 나머지 70% 가량은 소위 암흑에너지로 구성되어 있다 (그림 2 참조).

그리고 그 5%가 우리가 보는 세계를 이루고 있는 원자들을 만드는데, 원자의 질량은 대부분 핵자로부터 오며 전자의 질량은 1/2000일 정도밖에 되지 않으므로 우주의 질량을 계산할 때 전

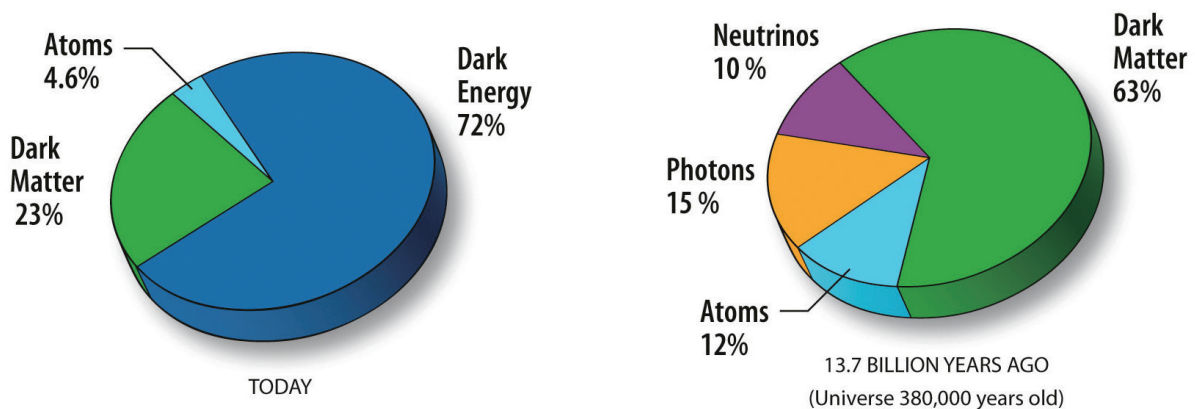
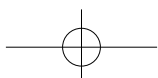
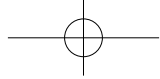


그림 2. 우주의 구성 성분: 현재 우주(왼쪽 그림), 137억 년 전의 우주(오른쪽 그림)



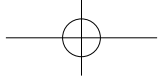


자의 기여는 무시할 수 있다. 그런데 전자의 질량이 Higgs mechanism에 의해서 주어지는 반면에 핵자의 질량은 대부분이 강한 핵력에 의해서 동역학적으로 생성된다. 물론 핵자는 질량이 있는 쿼크와 질량이 없는 글루온으로 되어 있고 쿼크의 질량은 전자의 질량과 마찬가지로 Higgs mechanism에 의해서 생성되지만, 쿼크의 질량이 워낙 작기 때문에 핵자의 질량에 미치는 영향은 매우 적다. 다시 말해서 힉스입자가 핵자의 질량에 미치는 영향은 무시할 수 있다. 요약하면 우리가 볼 수 있는 우주는 원자로 이루어져 있고 그 질량은 대부분 핵자에서 오는데, 핵자의 질량은 Higgs mechanism에 의해서 생성되는 것이 아니라 쿼크와 글루온의 강한 상호작용에 의해서 동역학적으로 생성된다. 이를 수학적으로 엄밀하게 증명하는 문제가 바로 Clay Mathematics Institute가 제안한 7개의 Millenium Prize Problems 중의 하나로서, 질량이 없는 양-밀스 비가환 게이지이론(Yang-Mills NonAbelian Gauge Theory)에서 질량간극(mass gap)이 어떻게 생기는지를 보이는 문제이며 바로 이 문제가 우리가 볼 수 있는 우주의 질량(즉 핵자의 질량)을 이해하는 것과 밀접하게 연결되어 있다. 물리학에서는 이 문제를 소위 격자게이지이론(lattice gauge theory)으로 다루고 있고 수학적 접근방법과는 독립적으로 지난 10여 년간 눈부시게 발전해 왔다. 이 문제는 앞으로도 많은 발전이 있을 것으로 기대된다.

4. 향후 과제 : 암흑물질 질량의 기원

암흑에너지가 이론물리학의 가장 어려운 분야인 양자중력과 연관성이 있을 것으로 여겨지는데 반하여 암흑물질은 우리가 잘 알고 있는 통상적인 양자장론 내에서 기술이 가능하다고 생각된다. 현재 암흑물질의 존재는 중력과 우주관측을 통해서만 알려져 있다. 현재 암흑물질 입자를 입자물리 실험의 방법론으로 발견하려는 연구가 세계 곳곳에서 진행 중이다. 이를 통해서 우주의 암흑물질 입자들의 질량과 스핀, 그리고 그들과 표준모형 입자들 사이의 상호작용을 밝혀내는 것이 향후 입자물리학과 우주론의 주요과제가 될 것이다. 이러한 연구를 통해서 암흑물질 입자의 성질들이 규명되고 나면 비로소 암흑물질 입자의 질량이 어떻게 생성되는가 하는 질문을 던질 수 있을 것이다. 암흑물질을 이해하는 것은 향후 입자물리의 주요 연구과제가 될 것이다.

암흑물질 입자 질량의 기원에 대해 (적어도 필자에게) 가장 매력적인 가능성은 강한 핵력이 핵자의 질량을 설명하듯이 새로운 강한 핵력이 암흑물질의 질량을 만들어내는 것이라고 생각된다. 이 경우 암흑물질의 질량은 핵자의 질량과 마찬가지로 양자효과에 의해서 동역학적으로 생성된다. 필자는 최근 암흑물질과 표준모형 내의 모든 입자들의 질량들이 모두 새로운 강한 핵력에 의해 생성될 수 있는 모형을 구축한 바 있다. 이러한 이론의 특징은 힉스입자와 성질이 비슷하고 전하가 영인 새로운 스칼라 입자가 하나 이상 더 있어야 한다는 것이다. 그리고 LHC에서 측정하는 힉스입자의 신호세기(signal strength)가 힉스입자의 생성과 붕괴모드에 상관없이 1 또는 1보다 작아야 한다는 것이다. 그리고 암흑물질과 핵자의 산란을 이용한 암흑물질 직접 탐색에서 이



들 암흑물질을 발견할 가능성이 있다. 이들 예측은 매우 간단하지만, 기존의 다른 모델들과는 정성적으로 매우 다른 예측이며, 향후 LHC 힉스입자 탐색 실험을 통해서 이 이론의 검증이 가능하다. 물론 표준모형 힉스입자와 새로운 스칼라 입자와의 섞임이 아주 작으면 이론을 검증하는 것이 쉽지는 않을 것이며 차세대 국제선형가속기가 더 많은 정보를 줄 것으로 기대된다.



고병원

고병원 교수는 서울대 물리학과를 졸업하고, 시카고대학교에서 입자물리학 이론으로 박사학위를 받았다. 미네소타대학교 박사 후 연구원(1991-1994), 홍익대 기초과학과 조교수(1994-1997), KAIST 물리학과 부교수와 교수(1997-2005)를 거쳐 2005년부터 KIAS 물리학부 교수로 재직 중이다.

