

① 표준모형 및 초대칭 모형의 힉스 입자 탐색

새로운 물리학의 세계로 안내하는 '신의 입자'

글 | 이재식 _ 대만 국립청화대학 연구학자 jslee@phys.cts.nthu.edu.tw

입자물리학이란 무엇을 위한 학문일까? 이는 아마도 '우리를 둘러싸고 있는 세계는 어떤 물질로 구성되어 있을까?', '무엇이 그 물질들로부터 현재 우리가 바라보고 있는 우주를 만드는가?'와 같은 물음들에 대한 해답을 얻기 위한 것일 것이다. 현 시점에서, 부분적으로나마 이 질문에 대해 입자물리학의 소위 표준모형은 '이 세계는 쿼크와 렙톤이라는 입자들로 구성되어 있으며 그들은 광자, 글루온, ZW 보손을 주고받으면서 상호작용을 하고 있다'는 해답을 주고 있다.

LHC 실험으로 질량 근원 밝힐 '힉스 입자' 생성

지금까지 알려진 바에 의하면 광자와 글루온을 뺀 모든 입자들, 즉 쿼크와 렙톤, 그리고 ZW 보손은 모두 질량을 갖는다. 그렇다면 이들은 어떻게 질량을 얻게 되는 것일까? 이에 대해 표준모형은 우주가 진공, 즉 텅 비어 있는 것이 아니라 힉스라고 불리는 스칼라입자장이 균일한 세기로 빈틈 없이 채워져 있으며 여러 입자들은 이 힉스 입자와의 상호작용을 통해 질량을 얻게 된다고 설명한다. 비유를 해 보자면, 이는 마치 물이 가득 차 있는 수영장에서 여러 사람들이 여러 가지 옷을 입고 수영을 하는 것과 같다. 수영을 하는 동안, 선수용 수영복을 입은 사람은 바지와 셔츠를 입은 사람보다 '가볍다'고 느낄 것이며, 두꺼운 겨울옷을 입고 수영하는 사람은 바지와 셔츠를 입은 사람에 비해 매우 '무겁게' 느낄 것이다.

올해 2008년, 입자물리학자들의 마음이 들뜨고 있다. 이는 스위스 제네바에 위치한 CERN 연구소에서 가동될 거대 강입자 가속기

(LHC) 때문이다. 우리 나라에서도 두 개의 주 실험인 ATLAS와 CMS 중 CMS 실험에 많은 실험 물리학자들이 직접 기여하고 있다. 입자물리학자들은 이 LHC를 이용하여 지금까지 인류가 한 번도 경험해 보지 못한 양성자 질량의 1만4천 배에 달하는 높은 에너지 영역을 탐색할 것이다. 많은 새로운 물리 현상들이 발견될 것으로 기대되며, 그 발견현상들은 아마도 노벨상으로 이어질 것이다. 그렇다면 그 첫 번째 신호탄은 무엇이 될까? 바로 질량의 근원을 밝혀 줄 힉스 입자일 것이다.

힉스 입자 탐색에 있어서 가장 먼저 물어 보아야 할 질문은 바로 이 입자가 몇 개나 있고 그 질량은 도대체 얼마나 될까 하는 것이다. 이 질문은 고려되고 있는 모형에 강하게 의존하기 때문에 사실 한마디로 답하기가 그리 쉽지는 않다. 우선 힉스 입자가 하나인 표준모형을 생각해 보자.

현재까지 행해진 실험들에서 힉스 입자가 발견되지 않은 사실을 통해 우리는 표준모형의 힉스 입자가 양성자보다 100배 이상 무겁다는 사실을 알고 있다. 그렇다면 표준모형의 힉스 입자는 그 무게에 한계가 없이 한없이 무거울 수 있는 걸까? 이론적으로 그럴 수 없다는 것이 답이다.

현대 입자 물리 실험을 통해 증명된 바와 같이 상호작용의 크기를 나타내는 커플링은 에너지 스케일에 따라 달라진다. 만약 힉스 입자가 양성자를 200개쯤 합쳐 놓은 것보다 무겁다면, 중력이 간섭하여 이를 바꾸기도 전에 힉스 포텐셜의 상호작용 커플링이 무한대로 발산해 버리게 된다. 즉 표준모형 내에서 이 커플링의 발산문



CMS

지난 4월 LHC 가속기 터널을 방문한 힉스 교수

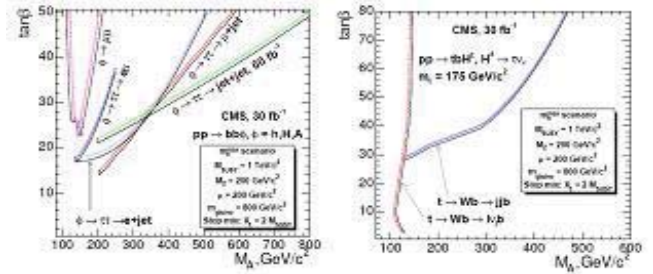
제를 피하기 위해서는 힉스입자가 양성자보다 200배 이상 무거울 수 없고, 따라서 양성자 1만4천개에 달하는 에너지를 갖는 LHC에서 이 힉스 입자를 생성하고 그 붕괴과정을 자세히 연구함으로써 질량의 근원에 얽힌 비밀들을 탐구하는 데에 큰 어려움이 없어보인다. 그렇다면 도대체 왜 사람들은 이 힉스입자 때문에 표준모형을 뛰어 넘는 새로운 물리가 있어야 한다고 하는 것일까?

최소 초대칭표준모형에서 힉스 입자 최소 5개 존재

모든 문제는 질량의 근원을 설명하기 위해 도입된 힉스입자가 스핀-0인 기본 입자라는 데에 있다. 게이지 대칭성에 의해 그 질량이 양자고리효과로부터 보호받는 스핀-1인 광자, 글루온, WZ 입자나 소위 카이랄 대칭성에 의해 그 질량이 보호받는 스핀-1/2인 물질 입자와는 다르게, 스핀-0인 입자는 양자고리효과에 의해 그 질량이 매우 불안정한 것으로 악명이 높다. 이 문제는 소위 '계층 문제' 혹은 '자연스러움의 문제'로 알려져 있으며, 이 문제를 푸는 가장 잘 알려진 방법 중의 하나가 바로 초대칭을 도입하는 것이다. 초대칭에 대한 자세한 내용은 본 특집 중 다음 글을 참조하길 바라며, 여기서는 간단히 초대칭성은 스핀-0인 입자의 질량을 양자고리효과로부터 안정적으로 만드는 대칭성이라는 사실만을 짚고 넘어가기로 한다.

그렇다면 초대칭이 도입되었을 때 힉스입자의 개수와 질량은 어떻게 될까? 초대칭 모형의 힉스섹터는 스칼라 입자가 단 하나 뿐인 표준모형에 비해 좀 더 복잡한 양상을 띠게 된다. 이는 스핀이 1/2인 힉스입자의 초대칭짝 때문에 발생하는 소위 게이지 아노말리를 상쇄하기 위함이다. 최소초대칭표준모형(MSSM)을 예로 들자면, 5개의 힉스입자가 존재하는데, 이 중 3개는 전기적으로 중성이며, 나머지 2개는 ±1의 전하를 띤다. 즉 초대칭의 존재 하에서는 적어도 5개의 힉스 입자가 존재하며 그 중 둘은 반드시 전하를 띠어야 한다.

그렇다면 질량은 어떻게 될까? 초대칭 모형에서는 힉스 포텐셜의 커플링이 임의적인 표준모형에 비해 그 커플링이 전자기 및 약



전기적중성 및 전하를 띤 MSSM 힉스입자와 LHC실험에서 탐색가능한 영역의 상호작용 게이지 커플링으로 주어지기 때문에 가장 가벼운 힉스입자의 질량이 거의 정해진다는 사실을 놓쳐서는 안 된다. 예를 들어 MSSM의 가장 가벼운 힉스입자는 양성자를 140개 정도 합쳐놓은 것보다 더 무거울 수 없다. 이 사실은 확장된 초대칭 모형에서도 크게 변하지는 않는다. 즉 초대칭은 적어도 하나의 상당히 가벼운 힉스입자의 존재를 보장하고 있는 것이다.

그렇다면 다른 무거운 힉스입자들도 발견할 수 있을까? 현재로서는 이에 대해서 그렇다고도 아니라고도 답하기가 어렵다. 분명한 것은 2개 이상의 중성 힉스입자나 전하를 띤 힉스입자의 발견은 초대칭 입자들의 직접적 발견만큼이나 수십 년 간 많은 입자물리학자들이 목매달아 기다려온 표준모형을 뛰어넘는 새로운 물리의 확실한 실험적 증거가 될 것이다.

힉스 입자는 특별하다. 힉스 입자는 표준모형을 구성하는 입자들 중에서 실험가들의 눈을 빠져나간 유일한 입자이다. 또한 이 힉스 입자는 우주 전체에 걸쳐 남겨진 그 존재의 흔적을 통해 다른 표준모형 입자들에게 질량을 부여하는 특별한 역할을 한다. 이런 이유 때문에서인지 이 힉스입자는 '신의 입자'라는 거창한 별명도 지니고 있다.

힉스 입자는 특별하다. 왜냐 하면 현재까지의 입자물리학이 예견한 많은 입자들 중에 스핀이 0이면서 양자고리효과로부터 안정된 기본 입자는 단 하나도 없기 때문이다. 그리하여 힉스 입자는 우리를 표준모형에는 포함되어 있지 않은 새로운 물리의 세계로 안내하고 있다. 우리는 지금 LHC와 함께 이 힉스 입자를 맞이하려고 있다. **ST**

〈편집자주〉 본문내용 중 일부는 물리학과 첨단기술 2008년 5월 제17권 5호의 'LHC의 물리학' 특집 중, 필자가 최수용 성균관대 교수와 함께 쓴 '힉스 입자탐색' 과 중복됨을 밝힙니다.



글쓰이는 한국과학기술원 물리학과에서 박사학위를 받았다. 한국과학기술원과 한국고등과학원 연구원, 일본 고에너지연구소(KEK)의 JSPS 펠로, 영국 맨체스터대학 천체물리학과 연구원, 서울대학교 이론물리 연구센터 브레인폴 과학자, 일본 고에너지연구소 외국인방문과학자, 대안 국립중앙대학교 물리학과 방문교수 등을 지냈다.