

③ 새로운 물리학 이론의 탐색 : 여분 차원과 블랙홀

미니 블랙홀 생겨도 순식간에 입자방출 후 소멸

글 | 박성찬 _ 서울대학교 물리학과 연구원 spark@phya.snu.ac.kr

20세기 초 아인슈타인은 상대성이론을 통해 우리가 살고 있는 우주가 17세기 뉴턴이 기술한 바 있는 '절대 공간'과 '절대 시간'의 단순한 조합이 아니라 이 둘의 뗄 수 없는 단일 복합체인 '시공간'이라는 것을 말해 주었다. 그리고 시공간의 구조를 4개의 독립적인 방향을 가진 4차원 기하학으로 기술함으로써 중력에 대한 고전 역학적 이론인 일반상대성 이론에 도달할 수 있었다. 몇 년 후 태양 주변을 지나가는 별빛이 정확히 상대성 이론이 예측한 대로 휘어진다는 것이 실험적으로 검증됨으로써 그 확고한 지위를 차지하게 되었음도 잘 알려진 사실이다.

21세기 초 이론물리학자들은 지난 세기 아인슈타인으로부터 비롯된 '시공간 이해의 혁명'이 또 다른 형태로 이루어질 가능성에 대해 매우 진지하게 논의하고 있다. 바로 인류역사상 최대의 실험장치인 거대 강입자 가속기(LHC)를 통해 4차원과 따로 존재하는 여분 차원의 증거가 포착될 수도 있기 때문이다. 우리의 가장 본질적인 시공간의 이해에 또 한번 큰 도약이 있을 것인가?

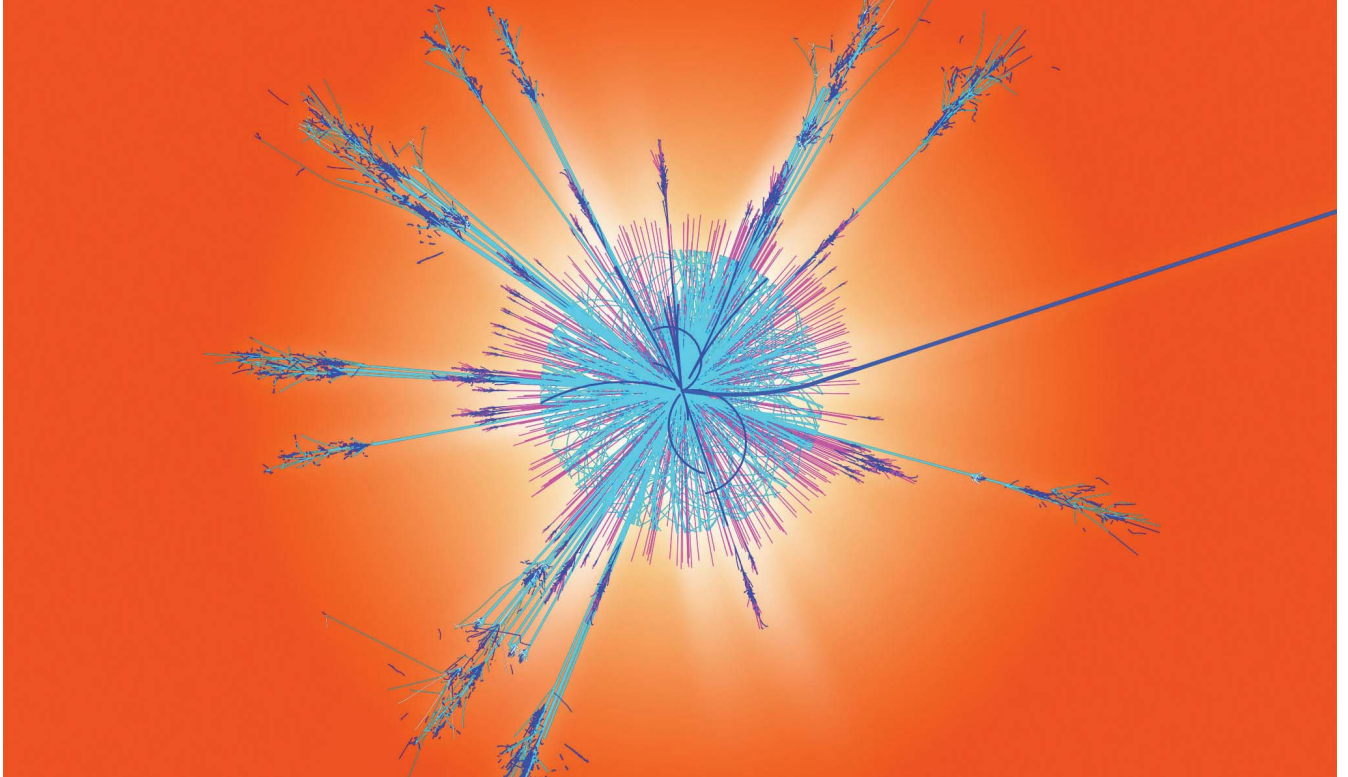
여분 차원 6~7개 더 있어야 이론적으로 완벽

공간 상의 위치를 표시하려면 몇 개의 좌표가 필요할까? 예를 들어 우주선의 위치를 나타내려면 위도, 경도 그리고 고도를 합해 누구나 '3'이라고 대답할 것이다. 이렇게 세 개의 숫자를 써서 공간 위치를 나타낼 수 있는 공간을 3차원 공간이라고 한다. 3차원 공간에서 물체는 세 방향으로 움직일 수 있다. 4차원 시공간에서

라면 정해진 관찰자에 대해 우주선의 공간 상의 위치와 더불어 관측한 시간을 더해서 4개의 좌표를 이용하여 시공간 상의 위치를 정할 수 있을 것이다.

그런데 물리학자들은 과연 우리가 살고 있는 물리 세계의 시공간 차원이 4차원뿐일 것인지 매우 오래 전부터 의심해왔다. 1921년 독일의 물리학자 테오도르 칼루자는 아인슈타인의 4차원에 더해 새로운 여분의 공간 차원을 한 개 도입한 5차원 시공간을 생각해냈다. 그리고 이 5차원의 중력이론을 통해 4차원의 중력과 전자기력이 멋지게 통일될 수 있음을 발견했다. 고차원 공간의 아이디어는 현재 중력의 가장 정확한 양자역학적 이론으로 각광받는 초끈이론에 그대로 이어졌다. 초끈 이론에 따르면 시공간의 전체 차원 수는 4차원이 아니라 10차원 혹은 11차원일 때 비로소 그 이론적 모순이 사라진 정합적인 이론이 될 수 있다. 즉, 여분 차원이 6개 또는 7개 더 있을 때에야 비로소 문제없는 이론이 될 수 있다는 뜻이다. 이처럼 이론 물리학에서 여분 차원의 존재는 여러 가지 다른 맥락에서 등장하고 있다.

그런데 여분 차원이 과연 무엇일까? 쉽게 생각해서 시공간의 위치를 표시하는 또 하나의 좌표라고 생각할 수 있다. 예를 들어 5차원 공간을 날아가는 비행기의 위치를 표시하기 위해서는 시간, 위도, 경도, 고도 이외의 또 하나의 방향이 있어야 한다. 물론 3차원 공간에 적용하여 진화한 인간의 인식 구조의 한계로 그것을 직관적으로 이해하기는 어렵지만, 위치를 표시하기 위한 좌표가 잘 알

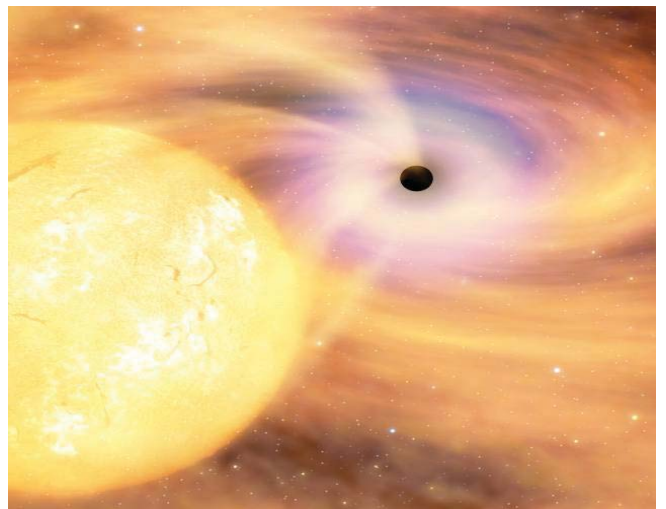


ATLAS에서 두개의 양성자가 충돌하는 순간의 시뮬레이션

러진 x, y, z 축 3개가 아니라 이와 독립적인 방향이 필요한 고차원 공간에 관한 기하학과 물리학은 오래 전부터 연구되어왔다.

‘칼루자-클라인 입자’로 여분 차원 실체 확인

여분 차원이 존재한다면 물체는 우리가 잘 알고 있는 세 방향뿐 아니라 여분 차원의 방향으로도 움직일 수 있을 것이다. 따라서 운동량 벡터도 4차원의 경우와 달리 더 많은 컴포넌트를 가지게 된다. 그런데 만약 여분 차원의 크기가 매우 작다면 어떤 일이 벌어질까? 답은 간단하다. 여분 차원의 방향으로 나아가는 운동을 우리의 감각기관 혹은 실험장비가 감지하기가 매우 어려울 것이다. 실은 이것이 우리가 일상에서 세 개의 공간 축으로도 충분히 정확하게 비행기의 위치를 나타낼 수 있는 이유가 된다. 이처럼 공간이 매우 작게 ‘접혀져’ 그 효과가 보이지 않게 되는 것을 ‘압축화’라는 물리학 용어로 기술하게 된다. 여분 차원은 그 크기가 너무나 작아 그 효과를 알아채기 어려우며, 실제로 지금까지 알려진 어떠한 미세 범위의 실험에서도 여분 차원의 존재가 드러난 적이 없다. 이론적으로는 그것이 존재한다고 여겨지지만 실험적으로 증명된 적은 없는 셈이다.



블랙홀

LHC는 우리에게 새로운 가능성을 보여준다. 이 새로운 가속기는 지금까지 어떤 실험보다도 더 정밀하게 더 작은 영역에서 일어나는 물리학을 탐구할 수 있게 해줄 것이기 때문이다. LHC에서도 달 가능한 에너지 영역은 대략 테라전자볼트, 즉 양성자 질량의 대략 1천배에 달하는 에너지 영역에 해당한다. 이를 통해 우리는 현

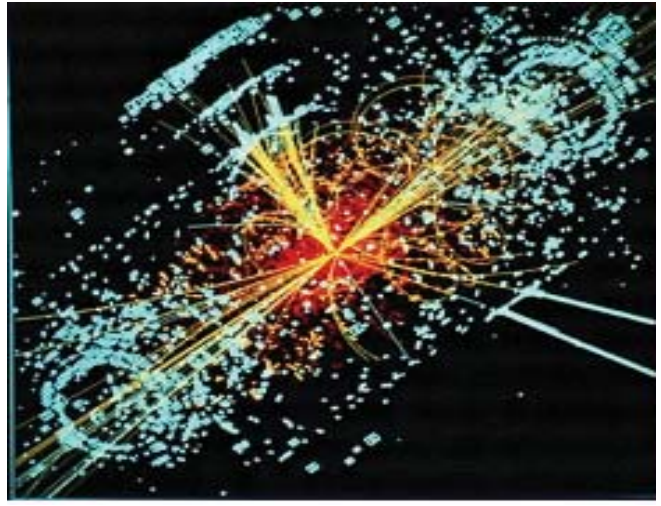


CMS 모습

재 기술적 프론티어인 나노미터에 비해 대략 100억 배 더 작은 영역을 들여다 볼 수 있게 된다는 뜻이다. 바로 이 강력한 실험 장치를 통해 여분 차원의 방향으로 움직이는 입자의 모습이 드러날 가능성이 있다. 그런데 압축화된 여분 차원 방향의 운동량은 양자화 되는데 그 크기는 여분 차원 크기에 반비례하다. 따라서 여분 차원의 방향으로 움직이는 입자는 여분 차원의 크기에 반비례하는 질량을 가진 입자로 해석되며, 그 질량은 여분 차원이 작으면 작을수록 더 커진다. 물리학자들은 여분 차원을 처음으로 도입했던 칼루자와 그 이론을 발전시킨 오스카 클라인의 이름을 따서 '칼루자-클라인 입자'라고 부른다. 거대강입자가속기에서 칼루자-클라인 입자를 발견했다는 뉴스가 들려온다면, 이는 곧 여분 차원을 발견했다는 이야기임을 기억해두자!

양성자 충돌시 미니 블랙홀 생성 가능성 커

칼루자-클라인 입자의 발견 뿐 아니라 LHC를 통해 우리가 접할 가능성이 있는 가장 흥미로운 현상은 바로 블랙홀 생성이다. 블랙홀은 중력이 너무나 강해 아무 것도 빠져나올 수 없는 시공간을 말한다. 천문학에서 블랙홀은 별이 거대 중력 때문에 수축할 때 만들어진다고 보며, 발달한 관측 기술 덕분에 우리 은하 중심의 거대한 블랙홀, 쌍성을 통해 그 존재를 드러내는 블랙홀, 큰 감마레이를 내놓는 블랙홀 등 다양한 천체 물리학적 블랙홀들이 이미 관측을 통해 알려진 것은 사실이다. 그러나 역시 인간이 만든 실험실에서 직접 블랙홀을 생성시킬 수 있다는 가능성은 분명 흥분할만하다. 더구나 LHC에서 생성될 가능성이 있는 '미니' 블랙홀의 경우 천체



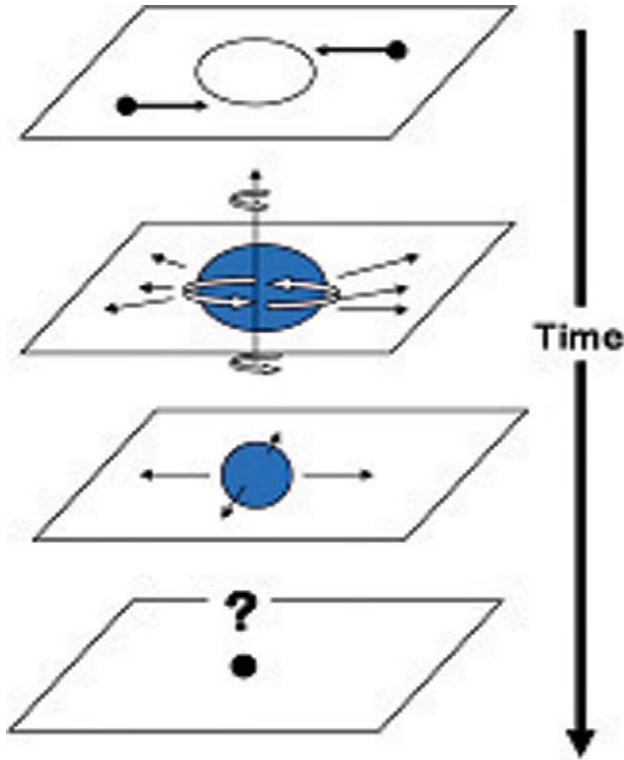
두 양성자충돌을 통한 블랙홀 생성 시뮬레이션

의 거대한 블랙홀을 통해 결코 제공받지 못할 블랙홀의 양자역학적 현상에 대한 정보를 제공해 줄 수 있기 때문에 물리학자들은 더욱 큰 관심을 가지고 있다.

물리학자들은 LHC를 통해 원자 크기의 1억분의 1보다 작은 '미니 블랙홀'이 지구상에서 생성될 가능성을 타진하고 있다. 강입자가속기에서는 원자핵을 이루는 양성자가 거의 빛의 속도에 근접할 정도로 가속된 뒤 반대편으로 가속돼 날아온 다른 양성자와 충돌하다. 그런데 양성자를 이루고 있는 소립자들 사이에 작용하는 중력이 충돌의 순간 충분히 강해진다면 블랙홀이 생성될 수 있다. 물리학자 킵 손에 따르면 주어진 에너지에 해당하는 슈바르츠실트 반경을 가진 홀라후프로 그 에너지 전체를 둘러쌀 수 있다면 블랙홀이 만들어지는데, 충돌의 순간 큰 에너지가 매우 작은 공간에 집적된다는 것을 기억하면 왜 블랙홀 생성 가능성이 커지는지 이해할 수 있게 된다.

얼마나 '충분히' 중력이 강해져야 블랙홀이 생성될까? 4차원에서 성립된 기존 이론에 따르면, 강한 중력을 만들기 위해서는 필요한 에너지는 이른바 '플랑크 에너지'라고 불리는 큰 에너지다. 그 에너지는 양성자 질량의 1억 배의 1억 배의 1천 배(10의 19승)에 달하는 큰 에너지다.

그런데 여분 차원이 있다면 얘기가 달라진다. 여분 차원이 존재한다면 중력은 본질적으로 고차원의 속성을 지니게 된다. 왜냐하면 중력 자체가 시공간의 기하학을 결정짓기 때문이다. 이 경우 우리가 관측하는 중력은 진짜 중력 전체가 아니라 여분 차원의 방향으로 빠져나가고 남아 '약해진 중력'일 뿐인 것이다. 만약 매우 작



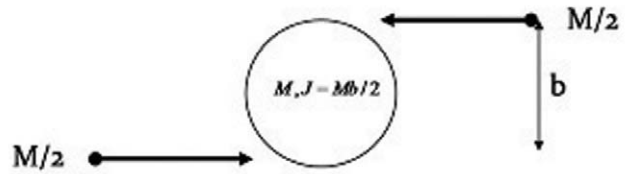
입자충돌을 통해 생성된 블랙홀이 호킹복사과정을 통해 에너지를 내놓고 붕괴되는 과정

은 영역의 물리학이 중요해지는 가속기 실험에서 중력의 본래 세기가 그대로 드러날 가능성이 있고, 따라서 비교적 낮은 에너지로도 충분히 블랙홀이 생성될 수 있다는 이야기가 된다. 최근 제기되어 학계의 큰 관심을 받고 있는 ‘큰 여분 차원 이론’이나 ‘크게 굽어진 여분 차원 이론’에 따르면, 중력이 본질적으로 강해지는 에너지는 양성자 질량의 대략 1천 배에 해당한다. 강입자가속기가 도달하는 에너지가 양성자 질량의 대략 1만4천배에 달한다는 점을 생각해보면, 충분히 블랙홀이 만들어 질 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

생성된 미니 블랙홀이 지구 삼킬 가능성 없어

블랙홀 생성 가능성이 제기되자, 엉뚱하게도 일부 아마추어 물리학자들은 지구 전체가 미니 블랙홀 속으로 빨려 들어가 버릴지도 모른다는 주장을 펴고 있다. 실제로 미국 하와이법원에 거대강입자가속기 가동 중단을 요청하는 소송사건이 발생하기도 했다.

하지만 미니 블랙홀이 지구를 삼켜버릴 가능성은 거의 없다. 우선 지구 대기권으로 쏟아져 들어오는 우주 입자들이 대기 중의 공기 분자와 충돌할 때도 똑같이 미니 블랙홀이 생성될 수 있다. 그런데 우리 지구는 수십 억년 이상 견재하다. 우리가 지금 물리학을 애



충돌에너지 M, 임팩트된 파라미터 b로 충돌하는 두 입자를 통한 블랙홀 생성

기하고 있다는 사실 자체가 재앙 발생이 없을 것이라는 것을 말해주고 있는 것이다. 실제로 블랙홀은 ‘사건의 지평선’의 반지름에 반비례하여 소위 ‘호킹 온도’라고 불리는 온도를 가지게 된다는 사실이 1975년 스티븐 호킹 박사에 의해 밝혀졌는데, 미니 블랙홀의 경우 크기가 매우 작기 때문에 해당 온도는 엄청나게 높아 태양 표면 온도의 1조배에 달할 것으로 예상된다. 따라서 순식간에 많은 입자를 방출하고 증발할 것이다. 미니 블랙홀에서 방산돼 나올 입자들은 고차원 시공간의 차원 개수와 구체적 모양에 대한 귀중한 정보를 우리에게 보여줄 것이다.

일단 생성된 블랙홀은 호킹 복사 과정을 통해 각운동량과 에너지를 잃어버리게 되는데 먼저 각운동량을 완전히 잃어버리는 소위 스핀-다운을 겪은 다음, 스핀이 없는 슈바르츠실트 타입의 블랙홀이 되어 남은 에너지를 완전히 잃어버릴 때까지 붕괴하게 된다. 이 과정에서 많은 입자를 호킹 복사로 내놓게 되며 방출된 입자들은 LHC의 입자 검출 장치를 통해 검출할 수 있으므로 이를 통해 블랙홀에 대한 정보를 찾을 수 있을 것으로 기대한다.

블랙홀 이벤트에서 가장 눈에 띄는 것은 ‘다수성’이다. 이는 블랙홀이 높은 엔트로피를 가지는 물체로 일반적인 기본입자의 그것과는 다르다는 것을 확실히 보여줄 수 있다. 다수의 제트가 포함되는 이벤트가 예측되며, 이는 제트의 개수가 높아짐에 따라 확연히 이벤트 개수가 줄어드는 게이지 상호작용의 그것과 구별된다. 참고로 고차원 블랙홀의 붕괴 과정을 정확히 기술하기 위해 필요한 ‘회색 계수’ 계산은 2003년~2006년에 걸쳐 필자와 일본인 동료인 이다, 오다 등에 의해 최초로 수행되었으며, 그 결과가 현재 가장 정확한 LHC에서의 블랙홀 이벤트 시뮬레이션 코드인 블랙맥스 등에 사용되고 있다. ㉔



글쓴이는 서울대학교 물리학과에서 박사학위를 받았다. 고등과학원 연구원, 미국 코넬대학교 리서치 펠로 등을 지냈다.