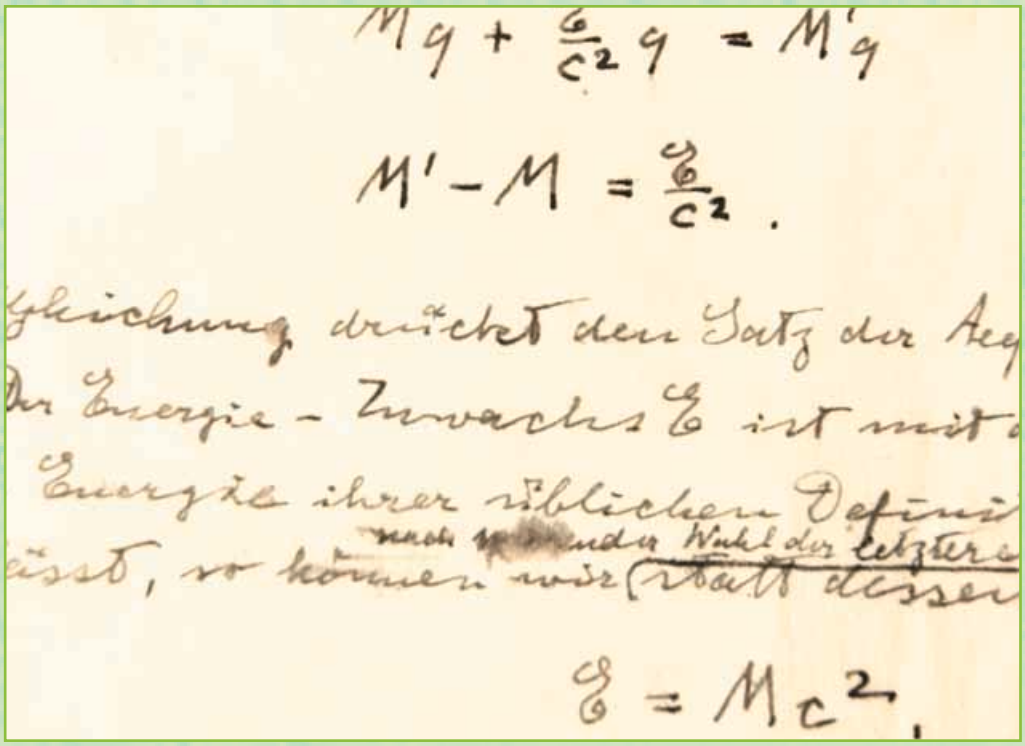

연합포토

2 특수상대성이론

"모든 물체의 움직임은 상대적"

글_이철훈 한양대 물리학과 교수 chulhoon@hanyang.ac.kr

'상대'는 '절대'와 대비되는 말이다. 물리학에서 상대성이란 말은 어떤 물리량이 물리적으로 절대적인 의미를 가질 수 없고 오직 상대적인 의미만 가능한 경우에 사용된다. 뉴턴의 운동법칙에서도 우리는 상대성이라는 말이 적용될 수 있는 상황을 본다. 뉴턴의 운동법칙은 세 개로 구성되어 있는데, 제1법칙은 물체에 힘이 가해지지 않으면, 또는 가해지는 힘들의 벡터 합이 영이면 그 물체는 등속도 운동을 한다는 것, 제2법칙은 물체에 힘이 가해지면 그 물체는 가속도 운동을 하는데 그 가속도의 방향은 힘의 방향과 일치하고 크기는 힘의 크기에 비례한다는 것, 제3법칙은 두 물체가 서로 힘을 가할 때 그 두 힘은 크기가 같고 방향이 서로 반대라는 것이다.

뉴턴의 운동법칙에도 '상대성' 적용

제1법칙을 보면 이는 제2법칙의 특수한 경우, 즉 힘과 가속도가 영인 경우에 해당함을 알 수 있다. 그렇다면 제1법칙은 따로 내세울 필요가 없는 것이 아닐까? 그래서 제1법칙을 삭제해 보자. 그러면 제2법칙은 일반적으로는 성립되지 않음을 볼 수 있다.

예를 들어 방 안에 고정된 기준좌표계를 사용하여 물체의 운동을 기술하면 그 운동은 제2법칙을 엄밀히 만족시키지 않는다. 이 기준계는 지구자전을 따라 회전하고 있기 때문이다. 제2법칙은 임의의 기준계에서 성립하는 것이 아니라 어떤 특수한 기준계에서만 성립하는 것이고 그 특수한 기준계를 규정하는 것이 제1법칙이다. 제1법칙이 만족되는 기준계를 관성계라 부르며 제2법칙은 관성계에서만 성립하는 것이다. 따라서 제1법칙은 법칙이라기보다는 관성계의 정의이다.

관성계는 특수한 기준계이지만 유일하지는 않다. 어느 한 관성계에 대해서 등속도 운동을 하는 모든 다른 기준계가 다 관성계이며 이 모든 계에서 뉴턴의 운동법칙은 똑 같은 꼴로 성립한

다. 따라서 어느 한 관성계를 다른 관성계들로부터 구분지어 낼 기준이 없고 어느 한 관성계가 정지해 있고 다른 관성계들은 움직이고 있다고 말할 근거도 없다. 즉 절대정지좌표계의 개념은 성립하지 않는다.

속도라는 것은 무엇을 기준으로 측정하느냐에 따라 다르게 나타나는데 절대적인 기준이 존재하지 않으므로 오직 상대적인 개념만이 물리적으로 의미 있는 것으로 남는다. 이것이 속도의 상대성이다. 이를 달리 표현하면 공간상의 위치의 상대성이다. 기준이 주어지지 않은 상태에서 공간상의 위치의 개념은 물리적으로 의미가 없는 것이다.

19세기말 완성된 전자기이론 실증 못해

19세기 후반에 전자기 이론이 완성되면서 사정이 달라진다. 절대정지좌표계의 개념이 물리적으로 의미를 가질 수 있는 가능성이 제기된 것이다. 전자기 법칙들을 정리하여 기술한 맥스웰 방정식에 의하면 전자기파가 존재하고 그 파의 진공 중에서의 전파속도는 파원의 운동 상태에 관계없이 모든 방향으로 똑 같은 값(초당 30만 ㎞)을 갖는다.

고전물리학적인 시간과 공간의 개념을 그대로 적용하면 서로 상대운동을 하는 관측자들에게는 속도는 다르게 나타나야 된다. 따라서 맥스웰 방정식이 적용되는 기준계는 단 하나만 존재할 수 있고 우리는 이 기준계를 절대정지좌표계로 지정할 수 있다.

이 기준계는 여타 기준계와는 물리적으로 구별이 되므로 절대적인 의미를 갖는다. 마이켈슨과 몰리가 1880년대에 행한 실험은 지구의 운동방향과 그에 수직한 방향 사이의 빛(전자기파의 일종)의 전파속도의 차이를 확인하고자 하는 시도였는데 끝내 그 차이를 확인하지 못하였다. 이 실험 결과를 설명하기 위한 여러 시도가 있었지만 궁극적인 해답은 1905년에 아인슈타인이 발표한 특수상대성 이론[‘Zur Elektrodynamik bewegter Körper(On the Electrodynamics of Moving Bodies)’, Annalen der Physik 17, 981 (1905)]에 의해서 주어졌다.

아인슈타인은 전자기파의 전파속도가 어느 기준계에서나 똑 같이 나타난다는 것을 기본원리로 받아들이고 이를 위해서는 서로 상대운동을 하는 두 기준계 사이의 좌표변환이 고전적인 갈릴레이의 변환이 아니라 로렌츠 변환이 되어야 한다는 것을 유도하였다. 로렌츠 변환식에 기초한 상대론적 운동학의 핵심은 동시(同時)라는 개념의 절대성을 부정하는 것이다. 어느 두 사건이 공간상의 서로 다른 위치에서 발생하였을 때 한 기준계에서는 그 두 사건이 동시에 발생한 것으로 나타나더라도 상대 운동하는 다른 기준계에서는 서로 다른 순간에 발생한 것으로 나타난다는 것이다.

아인슈타인, “전자기파의 전파속도는 모두 똑같다”

관측자 A와 그에 대해서 오른쪽으로 일정한 속도로 움직이는 관측자 B를 생각해 보자. 그들의 위치가 일치된 순간에 그 위치에서 전자기파가 발생하였다고 하자. 관측자 A가 잠시 후 어느 순간에 파의 진행을 정지시켰다면 파면은 A를 중심으로 하는 구면으로 나타날 것이다. 관측자 B에게는 파면이 어떻게 나타날 것인가?

고전적인 갈릴레이 좌표변환식에 의하면 관측자 B에게는 파면의 오른쪽이 왼쪽보다 가깝게 나타나야 한다. 하지만 로렌츠 좌표변환식에 의하면 이것은 관측자 B의 입장에서는 파의 오른쪽과 왼쪽이 서로 다른 순간에 정지된 결과이다. 관측자 B가 자신의 입장에서 어느 순간에 파를 정지시켰다면 파면은 역시 자신을 중심으로 하는 구면으로 나타난다.

관측자 A와 B가 각각 똑 같은 시계를 갖고 있다면 A의 입장에서는 B의 시계가 자기 시계보다 느리며 B의 입장에서는 A의 시계가 자기의 시계보다 더 느리다. 어떻게 이것이 가능한가? 역시 그 둘 각각의 입장에서의 동시가 서로 다르기 때문이다.

이와 관련되어 많이 거론되는 것이 소위 쌍둥이 역설이다. A와 B가 쌍둥이이고 그 둘이 수년간의 우주여행을 통하여 서로 멀어지다가 다시 되돌아와 한 자리에서 만났다고 하자. 각자는 항상 상대방이 움직이고 있었으므로 자기보다 덜 늙어가고 있다고 볼 것인데, 그들이 서로 멀어지고 있는 동안에는 그럴 수 있다 하더라도 한 자리에 만나서까지 서로 상대방이 덜 늙은 것으로 본다는 것은 모순 아닌가? 이것은 로렌츠 좌표변환식을 그 적용범위 밖에까지 확대 적용한 오류로 발생한 잘못된 결론이다.

로렌츠 변환식은 서로 등속도 상대 운동하는 두 관성계간에 적용되는 식이며 특수상대성 이론은 관성계 안에서만 성립하는 이론이다. 위의 쌍둥이의 경우 그들이 서로 멀어지다가 다시 만나려면 적어도 한 명은 어느 기간 가속도 운동을 하여야 한다. 예를 들어 A는 계속 관성계에 있고 B는 A에 대해서 오른쪽으로

등속도로 멀어지다가 어느 기간 왼쪽으로 가속도를 받아 방향을 바꾸어 왼쪽 방향의 속도를 얻은 뒤 그 속도로 계속 A에 다가갔다고 하자. A는 계속 관성계에 있었으므로 특수상대성 이론이 전기간 적용되어 B가 계속 자기보다 덜 늙어서 다시 만났을 때도 덜 늙어 있다고 보는 것이 옳다.

B는 등속도로 A로부터 멀어지거나 다가가는 동안에는 A가 자기보다 덜 늙는다고 본다는 것이 옳지만 왼쪽으로 가속되는 동안에는 특수상대성 이론이 적용되지 않으므로 A가 자기보다 덜 늙는다고 본다는 것은 옳지 않고 이 기간에 B에게는 A가 자기보다 빨리 늙는 것으로 나타난다. 결과적으로 그 둘이 다시 만났을 때 B가 A보다 더 늙어 있는 것이 옳다.

뉴턴의 "시간과 공간은 독립된 절대적 존재" 뒤엎어

뉴턴 역학으로 대변되는 고전물리학 체계 안에서는 시간이 공간으로부터 독립된 절대적인 의미의 존재인데 비하여 아인슈타인의 특수상대성 이론에서는 한 기준계에서 순전히 공간 간격만 가지는 두 사건이 다른 기준계에서는 공간 간격과 시간 간격을 함께 가지는 것으로 나타날 수 있다. 공간의 길이가 시간으로 시간이 공간의 길이로 변환되는 것이다. 두 사건이 동시에 발생하였느냐는 질문에 대한 답은 어느 기준계에서 보느냐에 따라 다르다. 즉 동시 개념의 상대성이다. 일반적인 속도의 개념은 여전히 상대적이나 빛의 속도만은 절대적인 의미를 갖는다.

맥스웰 방정식은 로렌츠 변환에 대해서 불변이다. 로렌츠 변환으로 연결되는 모든 관성계에서 맥스웰 방정식은 똑 같은 꼴로 적용되며 따라서 모든 관성계는 동등한 자격이고 절대정지좌표계의 개념은 성립되지 않는다. 문제는 뉴턴의 운동방정식이 갈릴레이 변환에 대해서 불변이고 로렌츠 변환에 대해서는 꼴이 바뀐다는 것이다.

상대성 원리를 유지하자면 뉴턴의 운동방정식을 로렌츠 변환에 대해서 불변인 꼴로 수정할 필요가 있다. 아인슈타인이 이러한 작업을 통하여 얻어낸 것이 특수상대론적 운동방정식이다. 이 방정식에 의하면 물체의 운동에너지가 증가할수록 관성이 커져서 가속에 필요한 에너지가 점점 더 커지고 극한적으로 물체를 빛의 속도에 이르도록 가속하기 위해서는 무한대의 에너지가 필요하다. 따라서 어떤 물체도 빛의 속도를 추월할 수 없다. 그리고 질량은 에너지로 에너지는 질량으로 전환될 수 있고 그들 간의 관계를 나타내는 공식이 유명한 $E=mc^2$이다.

"어떤 물체도 빛의 속도를 추월할 수 없다"

특수상대성 이론을 발표한 후 곧 이어 아인슈타인은 특수상대성 이론의 틀에 부합되는 중력이론을 찾는 작업에 착수하였다. 당시에 관측 가능한 범위내의 모든 중력현상은 뉴턴의 중력이론으로 잘 설명되었다. 하지만 뉴턴의 중력법칙은 로렌츠 변환에 대해서 그 꼴이 바뀌므로 상대성 원리에 저촉되고 따라서 수정이 필요하다는 논리이다.

그 작업은 예상 밖으로 험난하였으며 약 10년의 각고 끝에 도달한 결과는 처음에 목표로 하였던 것이 아니라 중력에 대한 완전히 새로운 해석이었다. 최종 결론까지의 과정에서 결정적인 징검다리 역할을 한 것이 1907년에 발표한 등가원리이다['Über das Relativiätsprinzip und die aus demselben gezoggenen Folgerungen', Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4, 411 (1907)].

등가원리의 대략적인 내용은 중력의 효과와 관측자 자신의 가속도 운동의 효과를 물리적으로 식별할 수 없다는 것이다. 이것은 관성질량과 중력질량의 동등성으로부터 연유한다. 우리는 서로 다른 두 상황에서 질량이라는 한 단어를 보통 구분하지 않고 사용하는데, 그 하나는 물체가 현재의 운동 상태를 유지하려는 경향의 정도를 나타낼 때이고 다른 하나는 중력 원천으로서의 세기를 나타낼 때다.

굳이 구분하자면 전자의 경우에는 관성질량, 후자의 경우에는 중력질량이라는 단어를 사용한다. 모든 물체에 대해서 그 두 양이 서로(또는 그 두 양의 비가) 같다는 것은 실험적으로 상당히 정밀하게 확인되고 있다. 이 사실은 단순한 우연으로 간과할 수 없고 물리이론 안에 반영되어야 할 것이다.

등가원리에 의하면, 만약 중력장이 전공간에서 균일하다면 그 효과를 기준계의 가속도의 효과로 완전히 대치할 수 있다. 그 중력장에 대해서 자유낙하하는 기준계에서는 중력장의 효과는 사라지고 특수상대성 이론을 적용할 수 있다. 그러나 일반적으로 중력장은 공간적으로, 그리고 시간적으로 변한다. 그러므로 한 기준계가 가속도 운동을 통하여 중력장의 효과를 모두 없앨 수는 없다. 단지 시공간상의 한 점 주위의 충분히 작은 영역내에서의 현상만 고려한다면 적당한 좌표계를 선정하여 중력의 효과를

모두 제거할 수 있다. 이러한 좌표계를 그 점에 대한 국소관성좌표계라고 부른다.

"중력의 효과는 시공간의 만곡으로 나타난다"

이 좌표계는 다른 점에 대해서는 일반적으로 관성좌표계가 아니다. 균일하지 않은 중력장이 존재하는 경우, 시공간의 모든 점에 대한 관성좌표계는 존재하지 않는다. 우리가 하나의 좌표계를 사용한다면 각 점마다의 국소관성좌표계들은 이 좌표계와 다른 관계를 가지고 연결될 것이다. 이 연결 관계들이 어떻게 서로 다른가가 결국 시공간의 기하를 결정하게 되는 것이다.

수학자 마르셀 그로스만과의 공동연구 등을 통하여 아인슈타인은 1913년에 이르러 중력의 효과는 시공간의 만곡으로 나타난다는 관점에 도달하였다. 이 때부터 그는 리만 기하학을 사용하여서 자신의 중력이론을 구성하여 논문을 발표하였고 그것들을 취합하여 1916년에 최종 결과를 발표하였다['Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (The Foundation of the General Theory of Relativity)', Annalen der Physik 49, 769 (1916)].

특수상대성 이론에서는 관성계라는 특수한 기준계내에서 물리법칙들을 기술하는데 비하여 여기서는 전시공간에 대하여 적용되는 관성계라는 것은 존재하지도 않고, 따라서 임의의 좌표계가 모두 대등하게 사용될 수 있으므로 일반상대성 이론이라는 이름이 붙여졌을 것이다. 하지만 일반상대성 이론은 특수상대성 이론의 단순한 확장이 아니라 특수상대성 이론에서는 전혀 다루지 않는 중력을 설명하는 이론이다.

아인슈타인은 1916년의 논문에서 자신의 이론을 검증할 수 있는 현상 세 개를 제시하였는데, 그들은 수성 궤도가 1세기에 43초만큼 세차운동을 한다는 것, 멀리 있는 천체로부터 오는 빛이 태양 주위를 지나올 때 휘어온다는 것, 천체의 표면으로부터 오는 빛의 적색편이가 일어난다는 것 등이다. 특히 태양 주위를 지나오는 빛이 휘는 현상은 제1차 세계대전 직후인 1919년에 일식에 맞추어 아프리카와 남미에 파견된 에딩턴이 주도하는 영국의 관측대에 의해 처음으로 관측되었다. 관측결과는 오차가 커서 논란의 여지가 있었지만 에딩턴은 아인슈타인의 예언이 확증되었다고 발표하였다. 이것이 일반상대성 이론이 받아들여지고 자리를 잡는데 촉진제 역할을 하였다고 볼 수 있다.

우주공간은 모든 물질이 균일하게 분포된 '3차원의 구'

아인슈타인은 1916년에 일반상대성 이론을 발표한 후 곧 바로 자신의 이론을 우주론에 적용하는 연구를 하였다. 그 이듬해인 1917년에 발표한 논문에서 아인슈타인은 우주 공간은 물질이 거의 균일하게 분포되어 있는 3차원의 구라는 모형을 제시하였다['Kosmologische Betrachtungen zür allgemeinen Relativitätstheorie (Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity)', Sitzungsberichte der Preussischen Akas. d. Wissenschaften, 142 (1917)].

3차원 구는 경계가 없으면서 크기가 유한한 공간이며 특별히 중심이라고 할 만한 위치가 따로 없는, 또는 모든 위치가 다 중심이 될 수 있는 공간이다. 이 3차원 구의 반경이 우주의 크기를 결정한다. 이 모형을 아인슈타인 장방정식에 대입하였을 때 3차원 구의 반경이 불변으로 유지되기 위해서는 물질의 압력이 음이어야 한다는 결론이 나온다. 당시로서는 바람직하지 않다고 여겨진 이 결론을 피하기 위해 아인슈타인은 자신의 장방정식에 '우주론적 항'이라는 항을 하나 삽입하는 수정을 가하였다. 그러나 허블의 관측 등을 통하여 우주 공간은 팽창하고 있다는 사실이 확립되었고, 그렇다면 우주론적 항 없이도 물질의 압력이 음이라는 결론은 피할 수 있게 된다.

1931년에 이르러 아인슈타인은 자신의 장방정식으로부터 우주론적 항을 삭제한다고 선언하였다. 이 과정을 아인슈타인은 자신의 일생일대의 큰 실수라고 술회하였다고 한다. 하여간 일반상대성 이론에 의하여 우주론은 진정한 의미의 과학적 연구대상이 되었고, 이를 바탕으로 표준모형 우주론이 확립되었다.

일반상대성 이론은 고전적 중력장 이론이다. 여기서 고전적이라는 표현은 양자적이라는 것과 대비해서 사용하였다. 우주의 대폭발과 같은 극한적인 상황에 접근하면 일반상대성 이론은 어떤 양자중력장 이론으로 대치되어야 할 것으로 여겨진다. 아직은 그러한 양자중력장으로서 확립된 것이 없는 상황이고 앞으로의 연구결과가 기대되는 분야이다. ST

글쓴이는 서울대 물리학과를 졸업 후, 노터데임대학에서 박사학위를 받았다. 이탈리아 국제이론물리연구소, 일본 도쿄대 기초물리연구소, 국방과학연구소 선임연구원을 역임했다.