

20세기의 科學革命

朴 星 來
(韓國外國語大教授)

不確定性的 원리

양자가설이 점차 확립되어 가면서 과학자들은 원자속의 세계라는 微視的 세계속에 성립하는 새로운 자연법칙을 찾아내려고 힘을 기울리기 시작했다. 에너지가 원자처럼 덩어리로 뭉쳐 움직인다거나, 빛이란 파동이면서 입자이기도 하다는 관점을 좀더 확대해보면 당연히 생각할 수 있는 것이 물질은 즉 파동일지도 모른다는 생각이다. 이생각을 실제로 주장하고 나선 것이 프랑스의 드·브로이(Louis de Broglie, 1892-)였다. 1923년 그는 電子도 파동과 같은 성질을 가졌을 것을 이론적으로 예상했고, 5년 내에 그의 생각이 옳바르다는 사실이 증명되었다. 그는 전자나 소립자뿐이 아니라 모든 질문에 파동의 성질이 있음을 자장하기에 이르렀고 이를 物質波(material wave)라 부른다. 드·브로이의 물질파 이론은 오늘날 미세한 세계를 관찰하게 해주는 電子현미경의 발달로 실용화되고 있다.

이와같은 물질파의 개념을 이용하여 오스트리아의 슈뢰딩어(Erwin Schrödinger, 1887-1961)는 1926년 원자내의 전자가 어떻게 움직이는가를 설명하기 위한 방정식을 고안해 내어 波動力學을 시작했다. 여기서 분명해지기 시작한 사실이 원자핵 둘레의 전자란 그 위치를 확실히 알아낼 수 없고 다만 그 확률만을 알 수 있을 뿐이라는 것이었다. 몇몇 학자들은 원자핵과 전자가 어떤 구체적인 모양을 하고 있다는 원자모형을 송두리채 집어던지고 이를 수학적(통계와 확률)으로만 이해하려고까지 하게 되었다. 이처럼 미시적인 세계에 있어서 모든 물

질을 파동과 같은 것으로 보고 거기에 일어나는 사건의 확률을 연구하는 부문이 量子力學(quantum mechanics)이라고 불리는 현대물리학의 한 부분이다. 19세기까지 인간이 갖고 있던 자연 인식의 바탕은 양자역학적 세계관의 출현으로 크게 뒤흔들렸다. 원자·전자 등 미시적인 세계에서는 입자와 파동이 같은 것이 된다는 양자론적인 입장은 뉴턴물리학과는 전혀 다른 세계의 문을 열어준 것이었다. 19세기의 물리학이 상식의 물리학이었다면 20세기의 양자역학은 상식을 초월하는 물리학의 혁명을 가져온 것이다.

특히 이와같은 상식의 거부는 1927년 독일의 하이젠베르크(Werner Heisenberg, 1901-1976)가 “不確定性 原理”(Principle of Uncertainty)를 제창함으로써 그 결정을 이루었다. 이미 양자역학의 밑바닥에 흐르고 있던 생각을 그는 보다 확실한 원리로서 제시했던 것이다. 전자처럼 어떤 입자가 양자상태에 있을 때 그것의 위치와 속도를 동시에 정확히 알아낼 수는 없다는 것이다. 하이젠베르크에 의하면 위치측정에 따르는 부정확의 정도와 속도측정에 따르는 부정확의 정도 사이에는 반비례의 관계가 있어서 이를 식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$[\text{위치의 부정확 범위}] \times [\text{속도의 부정확 범위}] \geq \text{일정값}$$

여기 일정값은 플랑크상수 (h) 정도의 것이다. 그러면 왜 이런 불확정성이 존재하는 것일까? 예를 들어 날으는 야구공을 우리가 본다는 것은 그 공에 光量子가 충돌하여 반사하여 우리 눈에 들어오기 때문이라 할 수 있다. 이 경우 야구공을 점점작은 것으로 생각하여 電子같은 작은 것으로 만들어 보자. 야구공일 때는 빛

이 부딪쳐 반사한다고 공의 위치가 바뀔 정도는 아니던 것이 전자라면 광량자의 충돌을 받으면 크게 동요를 받을 것이 명백하다. 즉 미시적인 세계가 들어가면 측정의 수단이 측정대상에 큰 충격을 주기 때문에 위치와 속도를 알아내는 데에는 스스로 한계가 있게 된다는 것이다. 태양계 같은 대우주에서는 뉴턴역학이 그대로 성립한다. 여기서는 화성·금성 등의 위치와 속도를 정확히 측정할 수 있고 거기 근거하여 화성·금성의 과거의 위치와 속도는 물론 먼 미래의 그것까지 정확히 알 수가 있다. 그러나 원자라는 소우주 속에서는 이런 확실성은 사라져버리고 뉴턴역학은 쓸모가 없어져 버린다.

양자학역적 세계상은 여기서 중요한 철학적인 의미를 제시한다. 20세기를 “불확실성의 시대”라 부르게 된 것은 바로 이러한 새로운 자연과학적 세계상에 영향을 받은 때문이다. 또 그 철학적 의미에 대해서는 서로 반대되는 생각들이 지금까지 이렇다할 해결을 보지 못한 채 대립하고 있다.

아인슈타인 같은 사람들은 비록 인간의 관측에는 한계가 있을지라도 소립자의 세계는 객관적으로 실재하며 뉴턴역학적인 因果律은 그대로 성립하리라고 믿는다. 반대로 보어나 하이젠베르크 등은 인간이 관측할 수 있는 것 이외에는 어떤 실체도 존재할 수 없다고 믿고, 오직 보고 관측할 수 있는 것만이 중요하다고 주장한다. 파동과 입자가 배타적이 아니라 하나라는 양자론적 세계에서는 이들 대립되는 의견도 실은 서로 상반되는 것이 아니라 상보적인 것일지도 모른다.

相对性原理

1900년에 영국의 대표적 물리학자 켈빈경은 물리학계를 어렵게 해주는 두 개의 검은 그림자로 에터문제와 빛의 복사문제를 꼽은 적이 있다. 아닌게 아니라 이들 두 가지는 20세기의 시작과 함께 19세기 과학체계를 송두리채 뒤흔들며 버리게 되었으니 앞의 것은 아인슈타인의 상

대성 이론을 낳았고 뒤의 것은 막스·플랑크 이후의 양자역학을 낳았다. 흥미있는 사실은 두 가지가 모두 빛의 본질에 대한 연구에 연결되어 있다는 점이다.

에터의 존재문제는 19세기동안에 확립된 빛의 파동설을 바탕으로 한 것이었다. 빛이 파동 형태로 전파되는 것이라면 그 파동을 전달해주는 매질이 있을 것이고 그것이 에터라고 알려진 것이다. 이 에터의 존재가 빛의 전달 속도에 어떤 영향을 주는가를 실험해 본 것이 역사상 상대성 이론의 근거를 제공하게 된 중대한 사건이 되었다. 미국의 마이클슨(Albert Michelson, 1852-1931)과 몰리(Edward Morley, 1838-1923)는 여러개의 거울과 광원과 렌즈를 결합시켜 교묘한 간섭장치를 만들어 빛의 속도가 에터때문에 어떤 영향을 받는지를 검사해 보았다. 1887년까지 약 5년동안에 걸친 반복된 실험은 근본적으로 흐르는 강물에서 헤엄치는 사람의 경우와 비슷한 착상에서 수행된 것이다.

같은 거리를 수영할 경우 흐르는 물을 따라갈 때가 거슬러 올라갈 때보다 더 빨리 같은 거리를 주파할 수 있을 것을 당연한 일이다. 지구는 태양의 둘레를 약 29km/sec라는 무서운 속도로 공전하고 있다. 지구가 에터속을 헤엄친다고 생각할 때 빛을 에터의 흐름에 따라 혹은 그 흐름에 직각으로 같은 거리를 왕복시키면 거기에는 시간의 차이가 있을 것이다. 놀랍게도 아무리 실험을 반복해도 에터의 흐름같은 것은 관측되지 않았다. <마이클슨-몰리의 실험>으로 알려진 이 실험결과가 의미하는 것은 에터란 존재하지 않는다는 것일 수밖에 없었다. 또 에터라는 매질도 없이 전파되는 것이 빛이라면 빛의 성격도 보통 인간이 생각할 수 있는 그런 파동과는 다르다는 것을 생각할 수 있었다.

몇 학자들의 의견이 발표된 뒤인 1905년 아인슈타인은 빛이란 光源이나 관측자의 운동과 상관없이 항상 똑같은 속도로 전파된다는 주장을 하고 나섰다. 등속운동을 하고 있는 관측자에게는 누구에게나 빛의 속도는 똑같이 1초에 3억m로 관측될 것이며 모든 운동법칙은 어느

관측자에게나 공평하게 적용될 것이라고 아인슈타인은 생각한 것이다. 그렇다면 누구에게도 이 세상에는 빛보다 빨리 움직이는 물체란 존재할 수 없고, 설령 빛의 속도보다 빨리 움직이는 물체가 있다고 하더라도 그것은 인간의 눈에는 보일 까닭이 없을 것이다. 이와같은 아인슈타인의 광속도 불변의 원리는 다음과 같은 사고실험을 가능하게 해준다. 만일 어떤 물체에 힘을 자꾸만 가해준다면 그것은 점점 더 가속되어 빛의 속도에 접근해 갈 것이다. 이 경우 그것은 광속 이상으로 움직일 수는 없다고 그는 말한다.

그러므로 광속에 가까워진 물체에 힘이 작용하면 그 힘은 물체의 속도를 증가시키는데 쓰이지 못하고 그대신 질량을 증가시켜는 준다는 것이다. 어느쪽이건 지속적인 힘은 운동에너지를 계속 증가시켜 줄 것이기 때문이다. 여기서 이끌어 낼 수 있는 것이 에너지와 질량의 등가성이고 그것은 유명한 식($E=mc^2$)으로 표현되어 있다. 이 식이 의미하는 바는 조그만 질량이라도 그것이 에너지로 바뀌면 막대한 양이 된다는 것이며 이 사실은 원자탄이나 태양에서 일어나고 있는 핵융합과 그것을 본뜬 수소폭탄 등으로 충분히 증명되고 있다.

독일 태생의 유대인으로서 스위스에서 공부한 아인슈타인은 지도교수가 중요하다고 생각하는 것보다 자기가 중요하다고 생각한 것을 더 열심히 공부하는 그런 사나이였다. 그 바람에 이학박사 학위를 어렵게 받은 다음 특허심사원으로 취직을 했다. 이 직장은 아인슈타인에게 넉넉한 시간적 여유를 주어 자기 하고 싶은 연구를 할 수 있었고 그 결과가 1905년 세계의 논문으로 발표된 것이다. 이 세 논문은 모두 훌륭한 것이지만 그중에도 光量子說을 도입한 광전 효과에 관한 논문은 뒤에 노벨상을 받게 해주었고, 또 한 가지가 바로 위에 설명한 〈特殊相對性理論〉(Special theory of relativity)이다. 이 이론에 의하면 움직이는 로키트속의 시계는 정지하고 있는 사람이 차고 있는 시계보다 늦게 가며, 물체의 길이는 짧아져 보인다고 한다. 그런데 특수상대성 이론이 가르치는 바에 의하면

등속운동을 하는 두 개의 系에서는 어느 쪽이 다른 쪽보다 절대기준을 제공하는 것이 아니다. 따라서 시간이나 길이의 단축현상은 어느 쪽을 정지하고 있다고 보느냐에 따라 양쪽에 있는 관측자는 서로 상대방에게서 일어나고 있다고 생각할 것이다. 다시 말하면 시간이나 공간은 절대적인 것이 아니다. 1908년 아인슈타인의 스승이었던 수학자 민코우스키(Hermann Minkowski, 1864 - 1909)는 시간과 공간을 별개의 것으로 다루지 말고 하나로 연속된 절대량으로 만들 수가 있음을 수학적으로 증명해 주었다. 시간과 공간의 연속체라는 4次元의 세계가 탄생한 것이다.

빛의 운동을 문제로 삼고 시작한 특수상대성이론이 발표된지 10년뒤인 1915년 아인슈타인은 〈一般相對性理論〉(General theory of relativity)을 완성했다. 여기서 그는 특수상대성이론에서 얻은 4차원의 개념을 이용하여 重力이라는 문제를 설명하려 하고 있다. 그에 따르면 4차원의 우주는 유클리드 기하학이 가르치듯 그렇게 반듯반듯이 생겨있지 않다는 것이다. 우주속에는 여기 저기 굽적한 천체가 있고 그것들이 만드는 重力場은 모두 우주의 모양을 휘어주고 있다. 그 휘어진 모양은 19세기의 수학자 리만(Bernard Riemann, 1826 - 1866)이 생각해 낸 비유클리드기하학에서 힌트를 얻어 낼 수 있었다. 이리하여 아인슈타인은 일반상대성이론의 증거로서 태양 근처를 통과해오는 항성으로 부터의 빛은 태양의 중력때문에 휘어질 것을 예언했고 그의 예언은 1919년이래 몇 차례의 일식때에 적중됨이 증명되었다. 이 이론에 의하면 달이 지구둘레를 도는 이유는 지구둘레가 그렇게 휘어진 4차원 공간이기 때문이라고 대답할 수도 있게 된 셈이다. 이렇게 볼 때 그리이스 사람들이 갖고 있던 생각, 즉 달이 지구둘레를 빙빙도는 것은 그것이 자연스러운 까닭이라던 주장은 새삼 20세기의 우주관에 가깝게 되어버리는 것이다. 물론 그리이스의 우주관은 여러가지 잘못된 자연관의 일부 이었고, 오늘의 그것은 고도로 발달된 수학과 과학의 뒷받침을 받고 있다는 큰 차이가 있지만——