

# 아인슈타인 光量子說로 새地平

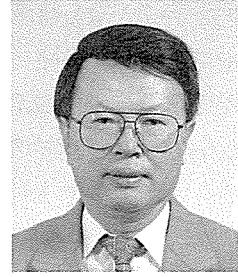
「양자론」이 완성되었다.

모든 존재는 입자와 파동인 이중성을 지니고 있다는

그후 1926년에 이르러 여러 천재들에 의해 빛과 전파를 포함해

「빛의 粒子」라는 光量子說을 세상에 선보였다.

「빛의 파동이다」라고 기존학설을 뒤집고



金濟琬

〈서울대 명예교수·물리학/과학문화진흥회장〉

## 특허국의 방석

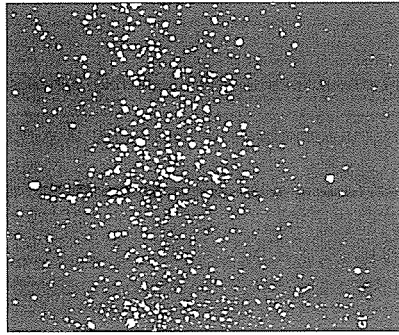
1907년 11월 어느 한가한 늦가을에 젊은 아인슈타인은 베른 특허국사 무실 창가에 서서 무심히 창밖을 내다보고 있었다. 바쁘게 지나가는 사람들 또 그리고 연인들의 모습을 아무 생각없이 보던 그는 제자리로 돌아왔다. 그는 자기 의자에 놓아두었던 두꺼운 방석을 그날 따라 치워버린 사실을 까마득히 잊어버리고 덩석 주저앉았다. 아마 경험한 사람들이라면 방석이 있다고 생각했는데 없으면 마치 계단에서 발을 헛디뎠을 때 느끼는 것처럼 허공에 등실 뜨는 허탈감으로 자기자신의 체중을 잠시 느끼지 못하는 그런 감각을 이해하리라 믿는다.

아인슈타인의 머리 속에서는 번개 같은 영감이 떠올랐다. 만약 사람이 공중에서 떨어져서 자유낙하를 한다면 무게를 느낄 수 없을 것이라는 생각이 문득 뇌리를 스쳐갔다. 아인슈타인은 이 간단한 생각에 잠시 정신을 잃고 가만히 앉아 있었다. 뒷날 아인슈타인의 일반 상대성원리의 발판이 된 등가원리(Equivalence Principle)로 알려진 이 생각은 자신의 일생 중 가장 획기적인 사고의 전

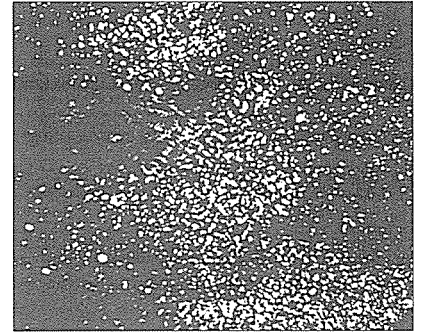
환이었다고 주위사람들에게 말하곤 했다고 한다. 아인슈타인은 등가원리를 이용하면 중력을 가속도로 대치할 수 있고 가속도란 순전히 시공의 성질이 자유낙하를 하는 물체가 사람이든 공이든 빛이든 아무런 상관없이므로 대상의 성분에 관계없고 이는 시공의 기하학적인 성질이라고 생각하기에 이른다.

아인슈타인은 중력을 휘어진 시공의 기하학으로 대치하는 '일반상대론'을 만들어 낸 것이다. 중력을 기하학적인 휘어진 시공으로 대치한 아인슈타인은 중력이 큰 태양을 스쳐서 지나오는 별빛은 휘어진 공간을 따라서 지나오게 되므로 휘어진다는 예언을 하였고 1920년대 영국인 과학자 에딩턴에 의하여 실제로 관측되므로써 아인슈타인은 주부들에게까지 알려진 유명한 과학자가 된 것이다.

아인슈타인이 시공의 개념을 송두리째 뜯어고치는 작업을 하면서 그는 또 다른 자연의 모습에 흥미를 가지고 있었다. 잘 알려진 것처럼 빛은 전기와 자기의 파동이다. 파장이 긴 전기와 자기의 파동을 전파라고 하며 라디오의 FM은 메가헤르츠의 전기와 자기의 파동이고 빛은 이보다도 진동수가 거의 백만배가 되는 전파이다. 그런데 20세기 초에 빛을 금속표면에 쬐이면 전자가 튀어나오는 광전효과라는 현상이 알려져 있었다. 정해진 색깔의 강한 빛을 쬐이면 같은 에너지를 가진 전자가 많이 튀어나오고 같은 색깔의 약한 빛을 쬐이면 튀어나오는 전자 하나 하나의 에너지는 강한 빛일 때와 같지만 튀어나오는 전자의 개수가 강한 빛일 때보다 적었다.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

<그림 1> (a) 3, 000개 광양자, (b) 12, 000개, (c) 93, 000개  
(d) 760, 000개, (e) 3, 600, 000개, (f) 28, 000, 000개

또 빛의 색깔, 즉 진동수(빛은 전자파이고 그 색깔은 진동수에 따라 달라진다.)를 바꾸면 튀어나오는 전자 하나 하나의 에너지가 달라진다. 다시 되풀이해서 말하면 전자 하나 하나의 에너지는 진동수에 따라 결정되고 튀어나오는 전자의 개수는 빛의 강약에 따르지 진동수와는 상관이 없다는 것을 알았다. 이는 빛이 파동이

라면서 설명이 되지 않는다. 빛이 파동이라면 그 강약은 파동의 진폭(파도의 높이)에 의하여 결정된다. 강한 파동이 금속 표면에 닿으면 금속표면에 있는 전자를 세계 흔들어서 금속으로부터 떨어져 나오게 하므로 나오는 전자는 큰 에너지를 가지고 나와야 한다. 그런데 같은 빛깔이라도 빛이 파동이라면 빛의 강도를 더 높이면

면 더 세계 흔들어 전자를 떼어냄으로써 더 큰 에너지의 전자가 나와야 하는데 관측된 현상은 그렇지 않고 단지 같은 에너지의 더 많은 전자가 나온다. 빛이 파동이라면 사실과 맞지 않으므로 설명이 되지 않는다.

그런데 빛이 입자라면 사정은 달라진다. 아인슈타인은 얼마 전에 독일 베를린대학의 석학인 프랑크교수가 주장한 ‘양자가설’이란 새로운 학설이 생각났다. 그는 빛의 강도는 띄엄띄엄 변하고 빛의 에너지는 크기가  $6.63 \times 10^{-34}$ (줄/초)로 알려진 프랑크 상수  $h$ 와 진동수  $f$ 를 곱한 값의 정수 배라는 색다르고 엉뚱한 학설을 주장한 것이다.

프랑크 상수는 지극히 작아서 빛이  $h$ 의 정수 배라도 마치 연속적으로 보인다는 것이다. ( $h$ 는 지극히 작은 양으로 10억배의 10억배의 10억배의 또 10억배의  $h$ 가 있어야만 30와트 짜리 전등을 1초동안 켤 수 있는 지극히 작은 양이다.) 아인슈타인은 빛은 사실상 광양자(光量子)라는 지극히 미미하고 작은 빛의 알갱이로 이루어져 있고 이 광양자의 에너지는 프랑크 상수  $h$ 와 빛의 진동수  $f$ 를 곱한  $hf$ 라는 가설을 세워보았다.

파동일 때와는 달리 빛이 입자라면 빛이 강하다는 말은 빛의 입자인 ‘광양자’가 많다는 말이 되겠고 진동수가 크다는 말은 광양자 하나 하나의 에너지가 크다는 말이 되겠다. 금속 표면에 더 강한 빛을 쬐어준다는 것은 더 많은 ‘광양자’를 보낸다는 말이 되겠고 더 많은 ‘광양자’가 금속 표면에 부딪쳐서 마치 당구공이 튕겨나가듯 더 많은 전자를 튕겨나가게 할 것이다. 그렇지만 ‘광양자’ 하나

하나의 에너지는  $hf$ 이므로 같은 진동수일 때는 튕겨나오는 전자의 에너지도 이를 받아서 나오기에 일정할 것이다.

이처럼 ‘광전효과’는 빛이 입자라면 깨끗이 설명되므로 아인슈타인은 빛은 입자라고 주장하고 광양자설을 이 세상에 선보인다. 프랑크의 ‘양자가설’과 아인슈타인의 ‘광양자’설이 맞다는 증거를 <그림 1>을 통해서 보도록 하자. 그림 왼쪽 상단은 3천개의 광양자로 비춰본 여인의 얼굴이고 아래쪽 끝은 2천8백만개의 광양자로 본 여인의 얼굴이다. 에너지 뭉치인 광양자가 잘 보이는 사진이라 할 수 있다.

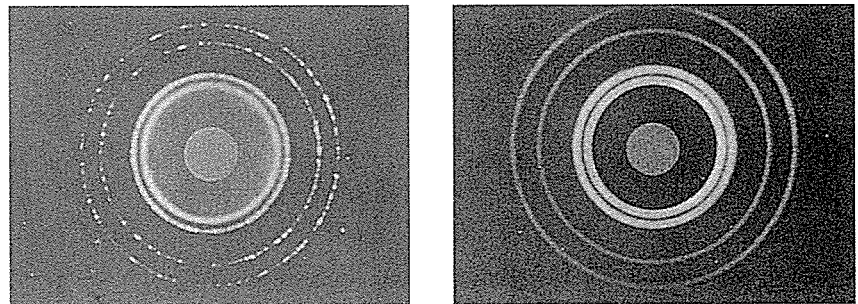
### 새로운 존재의 모습

빛은 파동처럼 행동도 하고 또한 입자처럼 보인다는 결론이다. 도대체 어떻게 된 것인가? 이러한 혼돈의 실마리가 풀리기는 커녕 더더욱 이해하기 어려운 사실이 생겼다.

미국의 두 물리학자 저머와 데이비드슨은 다음과 같은 생각을 하게 되었다. 파동이라고 믿어오던 빛이 입자처럼 행동한다면 입자인 전자도 파동처럼 행동하고 있는 일면이 있지 않을까? 그들은 그들의 생각이 맞는

지 틀리는지를 곧 실험해 보기로 했다. 그들은 얇은 금속막에 전자선을 쬐어서 그 뒤에 형광판을 놓고 사진을 찍었다(<그림 2 참조>).

빛은 작은 바늘구멍을 지나오면 회절무늬를 일으키나 전자는 바늘구멍보다 작은 원자들의 배열에 의하여 회절하리라는 것이 그들의 기대였다. 아니나 다를까, 아름다운 회절무늬를 얻게 되었으며 빛의 회절무늬와 비교할 때 전자 또한 파동이라는 데는 의심할 여지가 없게 되었다. 어떻게 된 영문일까? 옛날의 과학은 상식에서 오는 판단으로 설명이 가능한 경우가 많았다. 그러나 점점 폭 넓고 깊이 있는 실험사실이 축적됨으로써 상식으로는 이해할 수 없는 현상이 생기고 이를 설명하려면 상식으로는 추리도 할 수 없는 이론이 생긴다. 빛, 전자, 혹은 다른 모든 작은 입자의 세계에 적용되는 이 이중성의 근본적인 해결은 1926년에 이르러 여러 천재들의 힘에 의하여 이루어졌으며 이 이론을 양자론(quantum theory)이라고 한다. 양자론이란 무엇일까? 그 설명을 필자가 독자적으로 하는 대신 저 유명한 화인만교수가 한 강연 중에서 양자역학적인 자연관을 소개하는 것으로서 시작하겠다. (화인만교수



(a) 빛

(b) 전자

<그림 2> 빛과 전자에서 생기는 회절무늬

는 노벨 물리학상을 받은 바 있으며 그에 관한 여러 책이 번역되어 있다.)

역사적으로 과학적인 관측 결과는 간단한 상식에 의하여 처음에는 설명되었고 또한 이해되어 왔다. 그러나 더 많은 현상과 그 종류의 폭이 넓어짐으로써 상식에 의한 간단한 설명이 아니고, 소위 법칙이 된다. 이에 따라서 법칙도 상식의 범위를 벗어나 점점 어려워지고 상상하지 못할 결론들이 나오곤 한다. 예를 들어서 상대론에서는 두 개의 현상이 동시에 일어난다는 것이 주관적이라고 한다. 즉 다른 좌표계에 있는 사람은 다른 결론을 얻을 수 있다. 이것은 우리들의 일상생활에서 볼 때 상식에서 벗어나지만 또한 당연하기도 하다. 왜냐하면 우리들 일상생활에서 경험하는 것은 빛의 속도에 비하면 굉장히 느리게 움직이고 있는 대상에서 얻어지는 것이고 이것은 우주에서 일어나고 있는 일들의 극히 일부분에 지나지 않는다. 경험하지 못한 세상의 일을 이해하려면 지극히 조심스러운 관찰과 추리를 통하여 추측해 나가야 한다. 과학추리소설처럼 실제로는 일어나고 있지 않은 일들을 상상하는 것이 아니라 실제로 존재하고 있는 일들을 이해하려는 것이다.

빛과 전자의 경우만 해도 그렇다. 만약 전자가 입자처럼 행동한다고 해도 틀리는 말이 되겠고, 파동처럼 행동만 해도 역시 틀리는 말이 되겠다. 구태여 표현한다면 양자역학적으로 행동한다고 할 수밖에 없겠다. 다만 한가지 분명한 것은 빛이나 전자가 같은 행동을 하며 둘다 괴상한 행동을 한다는 것이다. 어떻게 행동하는

가를 감상하려면 뛰어난 상상력이 필요하다. 왜냐하면 이들은 여러분이 알고 있는 어떤 것과도 달리 상상 이외의 행동을 하기 때문이다. 이해하기가 어려울 줄 믿는다. 그러나 어려움은 주로 심리적인 갈등이며 어떻게 그럴 수가 있을까라는 반박에 뿌리를 두고 있다. 누구나가 자기가 잘 아는 경험을 토대로 다른 일을 판정하고 있으며 이러한 고집으로 인하여 사물을 자기가 생각하는 방향으로 이끌어간다. 여러분이 쉽게 알 수 있는 예를 들어본다면 다음과 같다.

지난날 신문들이 전 세계에서 열두 사람만이 상대성이론을 이해하고 있다고 보도한 적이 있다. 그러한 때는 물론 없었다. 아인슈타인이 그의 유명한 논문을 발표하기 전에는 단 한 사람, 즉 아인슈타인만이 상대론을 이해했겠지만 논문을 읽고 난 다음에는 많은 사람이 그 이론을 이해했으며 확실한 것은 열두사람을 훨씬 넘는다는 것이다. 그러나 양자론의 이론체계인 양자역학을 완전히 이해하는 사람은 하나도 없다고 해도 좋다. 그러니 내가 이야기할 양자역학을 완전히 이해하려고 애쓰지 말고 편안한 자세로 그냥 들어주기 바란다. 따라서 여러분의 동감을 얻는 것보다는 단순히 '자연'이 어떻게 행동하는가를 여러분들에게 이야기하겠다. 여러분이 자연의 행동을 그대로 받아들이면 자연이 얼마나 멋있고 근사한지를 보게 될 것이다. 거듭 이야기하겠는데 어떻게 그럴 수가 있을 까라고 자기자신에게 묻지 말아야 한다. 왜냐하면 아무도 왜 그런한지 모를 뿐만 아니라 물어본다 해도 점점 더 모르게 되는 것 이외에는 아무런 소득이

없기 때문이다(좀더 상세한 것을 알고 싶으면 확인만이 쓴 「자연법칙의 특성」을 보라).

우선 우리들이 입자라고 생각했던 전자나 양성자 등이 파동의 성질을 가지고 우리가 파동이라고 알고 있던 전파는 작은 알갱이인 입자가 있는 것이 아니라 파자(波子; wacle 즉 파동과 입자를 겹쳐서 줄여 만든 조어임)가 있다는 것을 받아들여야 한다. 모든 존재는 입자와 파동인 이중성을 지니고 있고 우리는 '파자'가 어느 곳에서 존재하는가를 확인하면 파동의 특성을 못보고 파동의 특성인 방향과 그 운동량을 확실하게 측정하면 입자의 특성인 한 장소에만 존재하는 그 지점을 모르게 된다. 거시적인 입자는 여기에 있으며 동시에 저기에 있을 수 없다. 왕십리에 있는 김서방이 동시에 종로에도 있을 수는 없다. 그런데 양자역학에 의하면 미시적인 세계에서는 관측하지 않으면 여기와 저기에 동시에 있을 수 있지만 확인할 수는 없다는 것이다. 우리들은 지금까지 여기에 있으며 동시에 저기에 있을 확률은 0이고 저기에 있으며 동시에 여기에 있을 확률은 0이라고 생각했지만 실제로 자연은 그렇지 않다. 자연은 여기와 저기에 동시에 존재하는 확률이 각각 50%인 그런 존재를 허용하고 있다. 실제로 미시적인 세상에서는 여기와 저기에 동시에 있는 존재가 오히려 상식이다. 물리학자들은 어떻게 여기와 저기에 존재하는가를 나타내는 '파동함수'라는 것을 어려운 방정식을 풀어서 얻어내고 이를 토대로 여러 가지 일들을 알아낸다. 어떤 것들일까? ⑤7

(다음호에 계속)