

# 기적의 해(1905년)

주 승 환\*  
고려공업검사(주) 연구소장



글머리

과학자들은 1905년을 ‘기적의 해’라 부른다. 우리 역사에서는 「을사늑약(1905년)」이 있었던 심히 부끄러운 해이기도 하다. 아인슈타인은 그 해 스물여섯 살 나이로 한 해 동안에 4편의 논문들을 발표한다. 그것들은 하나같이 20세기 과학기술의 기본 바탕을 이룬

업적들로서, 모두가 물리학계를 놀라게 했다.

이번 글을 통해 130년 전, ‘기적의 해(annus mirabilis)’에 그가 쓴 논문들의 기본 원리들에 담겼던 개념들을 되새겨 본다.

그의 첫 논문은 그해 초순경에 발표한 ‘광전 효과’, 둘째는 ‘브라운 운동’, 셋째-넷째는 그해 9월에 발표한 ‘특수 상대성 이론’에 관한 업적들이다. 넷째의 것이 바로 질량-에너지 등가식인  $E = mc^2$ 이다.

그 공식은 세 번째 논문의 부록에 대수롭지 않게 끼여 있었다, 발표될 땐, 아인슈타인 자신뿐만 아니라 다른 물리학자들도 별로 주의를 기울이지 않았다(처음엔 그때의 관행에 따라,  $L = MV^2$ 으로 쓰임).

근 삼십삼 년 동안 그 논문은 문서 목록 속에 그대로 끼여져 있었다. 1938년, 핵분열을 처음으로 발견한 세 사람들 중 이론물리학자 리제 마이트너(Lise Meitner) 여사가 그 공식을 써서 원자핵의 분열에서 생겨날 가공할 핵력을 셈하면서 그 식의 진가를 알게 된다.

필자는 전호(<원자력산업> 300호, 87쪽)에서 과학사를 들춰내 운동 에너지의 개념을 밝혀놓은 것은 이 글을 쓰려고 준비해놓은 사전 작업이었다.

## 고전-현대 물리학의 분수령

아인슈타인의 위대한 업적들을 곱씹어보기에 앞서, 먼저 ‘기적의 해’ 이전, 과학사에 나타난 물리학의 발전 배경을 잠시 더듬어보자.

\* 한양대 원자력공학과 졸업, 한양대 산업대학원 금속공학과 석사, 한양대 대학원 원자력공학과 박사, 과학기술처 국립지질조사소 광업연구사, 미국지질조사소 암석년령측정기술 연수(텐버), 서독연방지구과학연구소 객원연구원(하노버), 한국자원연구소(현 한국지질자원연구원) 책임연구원, (주)세안기술 연구소장, 고려공업검사(주) 연구소장(1999~)

고전 물리학 그리고 현대 물리학을 가르치는 분수령이 1900년부터인 것은 그때 막스 플랑크가 ‘양자론’을 주창했던 시점이기도 하다. 쉽게 보자면, 플랑크가 발견한 그 유명한 ‘플랑크 상수(h)’가, 비록 나중에 정밀하게 측정된 값이긴 해도, 물리학계를 고전과 현대로 갈라놓았다.

그 해는 20세기가 막 시작되던 해이다. ‘양자론’, ‘상대성 이론’, ‘핵물리학’, 그리고 ‘대폭발 우주론’ 들로 이어지면서 이들은 20세기 물리학을 이끌어왔다.

그 이전엔 빛, 소리, 탄성과, 열, 역학, 그리고 열역학 등이 고전 물리학의 주제들이었다. 빌 헬름홀츠(1847년)는 고전 중에서도 고전이던 ‘에너지 보존 법칙(열역학 제1법칙)’을 완벽하게 증명하는 논문을 발표한다. 루트비히 볼츠만(Boltzmann)이 태어나서 몇 년 지나서이다.

에너지 보존 법칙은 헬름홀츠 이전부터 전해져 오던 법칙이었다. 맥스웰(1846년)의 전자기학 이론도 헬름홀츠보다 한해 앞서 발표되었다.

1865년, 클라우지우스는 ‘엔트로피(열역학 제2법칙)’를 제안한다. 3년이 지나서야 볼츠만은 맥스웰—볼츠만 식의 주제이던 가스 운동론(1868년)으로부터 그 법칙을 증명하게 된다. 그리고 깁스(1902년)는 통계역학의 기초가 된 ‘자유 에너지’를 주창하게 된다.

이런 일련의 열역학의 발달 과

정을 엮다보면 뉴턴(1642~1727) 역학을 빼고는, 대부분의 고전 물리학의 중요한 발견들은 19세기 후반인 50년 동안에 이뤄졌다.

플랑크의 ‘양자론’ 이후, 베르너 하이젠베르크(1926년)의 ‘불확정성 원리’, 그리고 ‘양자역학’(수리 물리학의 한 분야 또는 파동역학 문제들을 다룸)이란 분야가 새롭게 떠오르면서 현대 물리학의 시대가 열리게 된다.

뉴턴 역학은 소우주인 원자의 물질계엔 적합지 않았다. 그보다 훨씬 큰 태양계의 행성과 달, 지구 주위에서 움직이는 만유인력 장에서 이뤄진 법칙들을 다룸에서 뉴턴 역학은 잘 들어맞았다.

1913년까지만 하더라도, 뉴턴 역학은 원자의 모델을 설명하는 데 통했던 것으로 알려진다. 그때 닐스 보어는 ‘보어 원자 모델’이란 원자 모양새를 발표한다.

그는 플랑크의 양자론에 바탕을 두고 현재 쓰고 있는 원자의 모양새(원자핵이 중심에 자리하고, 궤도 전자들이 원자핵을 동심원으로 돌고 있는, 마치 양파껍질 모양으로 겹겹이 둘러싸인 원자 모양새)를 그려내긴 했었지만, 사실은 그의 원자 모델에서 궤도 전자들의 운동 에너지들의 썸은 뉴턴 역학에 그 바탕을 둔 것으로 알려진다.

보어는 한 원자에 붙어 돌고 있는 궤도 전자들의 운동 에너지를 고전 역학의 도구로써 썸을 해냈다. 그런 그의 해석은 성공적이었던 것으로 기록된다.

### 양자역학 등장

하지만 1926년 하이젠베르크(1926년)의 ‘불확정성 원리’(예컨대, 원자핵 주위를 빛의 속도로 돌고 있는 한 전자의 위치 그리고 그 지점을 통과할 전자의 속도 양쪽을 같은 시간에 함께 정확히 측정할 없다는 자연법칙의 하나임. 그 위치를 정확히 측정한다면, 움직이는 물체의 속도는 이미 그 위치를 잘나에 통과해 버렸기 때문에 두 쪽의 물리적 상황들을 함께 정확히 측정할 수 없게 됨)가 발표되면서 뉴턴 역학에 문제점이 드러나기 시작했다.

소우주인 원자의 세계에서 일어날 운동 에너지를 다루기엔 우주를 다루던 뉴턴 역학으로서는 아귀가 잘 맞아떨어지지 않았다. 원자들의 구성 요소들이 빛의 속도로 움직일 운동 에너지를 해석할 새로운 도구로써 양자역학이 등장하게 된다.

어떤 연구 대상을 다룰 때, 물리적으로 해석하는 방식에서 양자 역학은 고전 역학과는 크게 다르다. 하지만 서로 보완적인 관계를 유지하게 되는 경우가 많다.

이런 사실들은 19세기의 광학에서도 잘 나타난다. 빛의 성질을 거시적으로 다룬 연구에선 뉴턴 역학이 잘 들어맞는다. 하지만 플랑크의 양자론 이후로 빛을 한 알갱이(광자=양자)로 다루게 되면 얘기는 달라진다.

현대 물리학은 연구 대상을 원자나 소립자들의 거동이나 운동 에



Newton, Sir Isaac

너지를 주제로 삼는다. 양자 역학이란 그런 연구의 한 도구이다. 원자를 이룬 알갱이들 혹은 빛의 성질을 띤 방사선들의 운동을 다루기에는 뉴턴 역학의 도구들로서는 거의 쓸모가 없게 된다.

예컨대, TV 브라운관 속에서 빛의 속도로 움직일 전자들의 운동을 다룬다거나, 포항공대 광과속기 속에서 움직일 빛의 운동 에너지를 다룰 경우, 앞으로 경주에 세워질 양성자 가속기 속에서 움직일 양성자들의 운동 에너지를 다루는 도구로서는 양자 역학이 주된 도구로 쓰인다. 양자 역학의 밑바탕엔 아인슈타인의 상대성 이론이 버티고 있다.

**광전 효과**

**1. 막스 플랑크가 본 복사광의 마술**

체철소의 용광로에서 녹은 쇠물의 빛깔은 열을 높임에 따라 처음

붉은색을 띠우다가 점점 오렌지색으로 바뀌고, 끝내 푸른빛을 띠게 된다. 그 까닭은 무엇일까? 과학자의 눈엔 예사롭게 보이질 않던 한 자연 현상이었다.

빛의 색깔은 프리즘을 통해 보면, 빛의 파장 길이가 색깔별로 서로 다른 것임을 알게 된다. 호랑나비의 날개깃, 공작새의 깃털 그리고 무지개의 색깔 들은 우리 주변에서 흔히 관찰되는 황홀한 빛의 요술인 자연 현상들이다.

1890년대 말쯤에는 이미 50 여년 전에 영국 맥스웰이 열 그리고 빛은 여러 파장들로 이뤄진 전자기파의 진동으로 생겨나는 에너지란 사실을 밝혀놓은 뒤였다.

고전 열역학의 이론에 따르면, 외부에서 한 가마솥의 텅 빈 공간 속을 열로 가열하면 할수록 그 속의 에너지의 양은 한없이 쌓여지면서 치솟아야 올바르다. 사이즈가 정해진, 한 가마솥의 벽에 부딪치는 원자들은 가열되는 열로 전자기파의 진동을 일으키게 된다. 가열하면 할수록 그 진동의 주파수들은 무한대에 이르기까지 여러 층들로 고루 나타나야 한다.

실제로, 실험에서는 그런 현상이 나타나지 않는다. 플랑크를 포함한 일부 물리학자들은 수도 없이 같은 실험을 되풀이하였지만 그 까닭을 밝혀내지 못한다.

용광로 속에 점점 열을 높여가면서 온도 대역별로 그 속 벽의 온도를 순서대로 올바르게 재고, 그리고 온대역에서 나오는 빛의

주파수(빛깔)도 함께 측정하면서 둘 사이의 비례 관계를 밝혀내려고 무던히도 애를 태웠다.

그런 실험들은 번번이 실패한다. 언제나 푸른색 끝자리에 놓일 자외선(짧은 파장) 쪽일 때, 그의 에너지는 엄청나게 높게 나타났고, 붉은색 끝자리인 적외선(긴 파장) 쪽일 땐 측정기의 고장이라 의심날 만큼 낮았다.

실험학자들은 용광로 속의 온도 폭을 더욱 조밀하게 좁혀가면서, 개별 온도 대역별로 나타날 빛의 스펙트럼을 분광계를 써서 그때그때의 파장 길이를 아주 정밀하게 측정해낼 수는 있었다. 하지만, 이론물리학자들은 실험학자들이 측정해낸 값들을 고전 열역학의 이론에 끼어 맞춰 봐야 논리적으로 설명해낼 도리를 찾을 수 없었다.

플랑크는 그 틈새를 노렸다. 그가 의아스럽게 생각한 것은 바로 복사광(輻射光; 어떤 물체를 높은 온도로 높일 때, 생겨나는 한 전자기파의 빛. 예컨대 시뻘겋게 달군 쇠덩이의 빛)에서 나타나는 이상야릇한 스펙트럼의 불균형에 관한 문제였다. 1890년대 말쯤, 어느 날 플랑크의 머릿속엔 번개처럼 스쳐간 볼츠만이 발견했던 엔트로피의 공식( $S = k \log W$ )이 떠올랐다.

**2. 볼츠만의 패러독스**

1877년, 볼츠만은 그의 엔트로피 공식을 유도해낼 때, ‘비둘기집의 원리(Pigeonhole's Principle)’

를 이용했다. 베를린 대학의 물리학과 교수이던 플랑크는 1897년 볼츠만이 가스 운동론을 설명할 때 썼던, 그 비둘기집의 패러독스를 떠올렸다. 사실 플랑크는 그때까지도 볼츠만의 그 같은 착상을 쌍수를 들고 비판하면서 다녔다. 그러던 그가 갑자기 변심하게 된 것이다.

볼츠만은 가스 운동론의 논리를 가상적인 비둘기 집을 예로 들고 설명한다. 그는 원자들이 가진 운동 에너지를 머릿속에서 그리면서 그것을 수많게 작은 에너지 단위로 나누고, 원자들의 분포할 확률을 셈했던 바탕 논리가 바로 그 패러독스였다. 플랑크의 생각은 볼츠만의 ‘원자’ 대신, ‘전자기 파동’을 볼츠만의 원자 자리에 그대로 끼워 맞춰 양자론에 무임승차했던 것이다.

흔히 양자론의 아버지는 플랑크, 양자론의 할아버지는 볼츠만이란 소리가 그래서 생겨났다. 플랑크는 세상을 뜨기 전까지 그 말에 귀를 막고 살았다고 한다. 남의 작품에 아이디어만을 따로 접목시키는 일은 식은 죽 먹기와 다름없다. 시쳇말로, 아이디어를 ‘표절’한 것일 수도 있다. 표절 때문에 많은 이들이 곤욕을 치루기도 했다.

어쨌든, 1900년에 발표된 그의 ‘양자론’은 에너지를 잘게 나눈 ‘에너지 단위’로써 주어진 온도에서 나오는 빛의 스펙트럼을 셈할 방법을 발견해낸 것이다. 그 논문은 물리학사에 가장 유명한 논문의

자리를 차지하고 있다.

### 3. 양자론의 탄생

1897년, 플랑크는 그 까닭을 찾기 시작한다. 3년 동안 열심히 연구했다. 그 결과는 마침내 1900년 10월 19일, 베를린 물리학회에서 발표된다. 그의 동료들은 그날 밤을 새워가며 플랑크의 새로운 공식을 써서 그들의 측정한 실험값들을 확인했다. 정확히 플랑크가 일반화시킨 그 공식에 맞추구두처럼 꼭 들어맞았다.

플랑크의 처음 생각은 한 물체에서 진동하는 알갱이들이 어떤 특정한 에너지에서만 복사광을 내보낸다고 가정했다. 복사를 일으킬 에너지는 새로운 수, ‘하나의 우주 상수’로 결정된다.

“나는 이 수를  $h$  (‘h 바’라 읽음. 나중에  $h$ 로 편하게 쓰이고 있음’)라 이름 지었다. 이것은 작용(에너지×시간)의 물리량을 가지므로, 나는 이것을 ‘기본 작용 양자(quantum, 라틴어의 quantus이며 ‘얼마나 크느냐’를 뜻한다)’라고 부르게 되었다.”

복사광은  $h$ 의 정수배(플랑크의  $h \times$  주파수  $\nu$ )가 될 어떤 한정된 에너지만 복사한다고 주장했다. 여기서  $h$ 는 나중에 “플랑크 상수”로 알려지게 된다.

### 4. 아인슈타인의 광전 효과

플랑크는 새로운 복사 공식으로



Jules Henri Poincaré

생길 미래 과학기술의 대변혁까지는 미처 생각하지 못했다. 그는 다만 열역학 법칙을 알리고 복사 공식을 유도해낸 거였다.

플랑크가 그의 새로운 복사 공식으로 고전 물리학의 고질적인 이슈를 해결한 것에 만족하고 도취돼 있을 즈음, 그 틈새를 아인슈타인이 헤집고 들어갔다. 그밖에도, 플랑크의 복사 공식은 닐스 보어가 처음으로 원자 모델을 그려내는 데도 크게 영향을 미쳤던 것으로 알려진다.

‘기적의 해’에 그가 발표한 ‘광전 효과’는 플랑크의 양자론의 바탕인 복사광 공식을 산업적으로 쓰일 수 있게 새로 디자인 한 거였다.

금속 표면에 빛을 비추게 되면, 금속을 이루고 있는 원자들에 느슨하게 달라붙어 있던 전자들은 들어온 빛 에너지가 그들을 밀어내면서 원자 밖으로 튀겨져 나온다. 자유롭게 된 전자들의 수량은 빛의 세기와는 전혀 관계가 없었고, 다만 빛의 색깔(즉 빛의 주파수에 따라

색깔이 변함)에 따라 많고 적은 차  
이가 생겼다.

아인슈타인은 이런 양자(복사  
광)가 생겨날 물리적인 조건을 발  
견해 플랑크의 양자론을 리모델링  
한 것이다.

오래 동안 과학자들은 빛이 파  
동으로 전파되는 하나의 연속적인  
에너지로 알고 있었다. 하지만 아  
인슈타인의 생각은 그들과는 달랐  
다.

실제로 빛은 작은 알갱이 들이  
헤일 수 없이 수많은 묶음들로 모  
여진 것이라 제안을 하게 된다. 그  
는 그 빛의 가장 작은 묶음 단위를  
'에너지의 양자'라고 불렀다. 이것  
이 오늘의 '광자(光子)'이다.

여기서 기억해야 될 중요한 개  
념이 따로 있다. 태양빛은 무지개  
의 색깔처럼 빛의 일정한 성분들  
(파장들)이 이미 고정돼 있다. 프  
리즘으로 빛의 파장들(스펙트럼)  
을 나눈다면 보라색의 끝에 우리  
눈에 띄지 않을 자외선의 대역(帶  
域)이 있다.

자외선의 파장을 경계로 그보다  
주파수가 큰 쪽으로 가면 갈수록  
자유전자의 수효가 기하급수적으  
로 많이 생겨난다. 그런 전자들의  
수량을 저울질하는 뒷박 구실이 바  
로 플랑크의 상수이다. 빛의 세기  
와는 전혀 다른 빛의 색깔(주파수)  
로 구분된다.

광전 효과의 쓰임은 현대 문화  
생활의 기본이다. 지금의 가전제품  
대부분에 한 소자로, 자동문의 개  
폐 신호에, 현관에 달린 등의 자동

스위치에... 헤아릴 수 없이 우리  
주변에 널려져 있다. 우주선은 광  
전 효과로 태양빛을 전력으로 쓴  
다. 미래 대체 에너지를 생산할 주  
력 발전소는 광전 효과로 발전을  
하게 된다.

기름값이 천정부지로 뛰고 있  
다. 앞으로 미래형 자동차는 태양  
빛을 연료로 쓰게 된다. 광전 효과  
의 위력은 지난 20세기 한 세기 동  
안 과학계를 지배했고, 새 천년에  
도 그 위세는 꺾이질 않을 것이다.

**브라운 운동(Brownian Movement)**

**1. 로버트 브라운  
(Robert Brown), 식물학자**

'기적의 해' 5월, 아인슈타인은  
두 번째 논문을 세상에 내놓았다.  
'맥스웰-볼츠만의 공식'을 써서  
'브라운 운동'을 물리적 논리로 증  
명했다.

로버트 브라운은 식물학자였다.  
겉씨식물(예; 소나무, 소철 등)에  
서 화분들의 수정을 관찰하려다  
그들이 끊임없이 뒤섞이고 이리저  
리 몰려다녀 그의 실험을 가로막  
았다.

바로 그 '방해 효과'가 나중에  
유명한 '브라운 운동'으로 알려진  
다. 20세기 원자의 세계를 펼치  
는데, 그 운동은 중요한 물리학 현  
상을 밝히는 데 요긴한 도구가 된다.

그는 스코틀랜드 출신의 한 식  
물학자였다. 현미경으로 꽃가루를  
관찰하다가 1827년 6월 어느 날,



Boltzmann, Ludwig Eduard

우연히도 수십 배 확대된 꽃가루들  
이 현미경 대물렌즈 속에서 마치  
살아있는 생물이 사방으로 이리저  
리 기어 다니는 듯한 모양새를 발  
견하게 된다.

사실, 지금 많은 식물학자들은  
그때 그런 작은 움직임에 관찰할  
현미경이 개발된 적이 없었다는 주  
장들을 한다. 분명한 것은 대부분  
의 학자들이 브라운이 가지고 실험  
했다던 현미경을 대체로 인정하지  
않고 있다는 사실이다.

그의 실험 장비에 관한 의아심  
은 그리 중요하진 않을 것이다. 그  
의 인물됨, 그리고 그의 처신으로  
남긴 그의 족적은 인류를 위한 위  
대한 과학적 유물로서 대영박물관  
에 길이 보존될 것이다.

1773년 12월 21일, 로버트 브  
라운은 스코틀랜드 몬트로스  
(Montrose)에서 태어나 수도 예  
든버러 대학 (University of  
Edinburgh)에서 약학을 전공했다.  
21세 때인 1795년, 방위군에 입대  
하여 아일랜드로 배치된다. 군대



Curie, Marie

생활에서 여분의 시간 동안 밤낮을 가리지 않고 열심히 연구했다.

1798년 군을 제대하면서 런던으로 온 그는 저명한 식물학자 요셉 뱅크스경(Sir Joseph Banks)이 기획한 2년간의 오스트레일리아 탐험 항해 대원으로 참가했다. 그 때 그의 총액 보수는 £420였다.

1801년 12월 8일, 오스트레일리아에 도착해서 3주간, 500여 개 종의 식물표본을 채집했다. 대부분은 유럽에 알려지지 않았던 식물들이다. 13개월 동안 이동하면서 시료를 채집하였고, 1805년 10월 4,000여 점(새로운 종 140점)의 식물 표본들과 현장 기록물을 들고 영국으로 돌아왔다.

1806~1822년 그는 런던 리네학회(Linnean Society) 소속인 도서관 관리인으로 활동한다. 1820년 요셉 뱅크스경이 죽고 난 후, 평생을 그의 집과 소장품의 관리인으로, 그리고 자신이 죽으면, 영국의 새 국립박물관에 그 유품들을

헌납한다는 규약을 맺었다. 하지만 1827년, 그는 생전에 그의 표본들을 설립된 대영박물관에 모두 기증하였고, 일생 동안 거기 관장이 된다. 그는 1858년 6월 10일에 유명을 달리했다.

그런 처신으로 과학사에 남긴 그의 족적은 정말 훌륭했다. 대영박물관의 전시물에서 식물의 분류학 체계는 그의 소장품들로부터 기록된 것이다. 대영박물관은 세계적인 인류 문화 유산이다. 거기엔 브라운과 같은 과학자의 양심이 살아 숨쉬고 있음을 배워야 한다.

## 2. 맥스웰-볼츠만 공식

‘맥스웰-볼츠만 공식’은 아인슈타인이 ‘브라운 운동’의 메커니즘을 밝히는 데 쓰인 바탕 이론이다. 맥스웰은 스코틀랜드에서 태어나 ‘전자기 이론’을 세상에 처음 내놓은 과학자이면서, ‘가스 운동론’에서도 큰 업적을 남겼다.

맥스웰보다 13살 아래인 볼츠만은 오스트리아 빈에서 태어나 평생 동안 ‘가스 운동론’을 완성시켰다. ‘가스 운동론’은 원자의 실체를 처음으로 밝혀낸 이론이다.

전호에서 워터스톤의 얘기(<원자력산업> 300호)를 했다. 그는 열이 공기를 이룬 원자나 가스분자들의 운동으로 생겨남을 처음으로 세상에 알렸지만, 운 나쁘게 그의 논문은 서류 창고에 들어갔다. 그의 논문에서 원자 알갱이들의 운동 에너지를 나타낼 원자의 ‘평균 속

력’이란 낱말을 처음으로 쓴다.

맥스웰은 워터스톤의 평균 속력을 수학적으로 분석했다. 원자들의 운동 속력이 평균보다 느리거나 빠른 것에 대한 속도의 분포 그림을 그렸다. 맥스웰의 정규 분포 공식은 그래서 세상에 알려졌다.

그는 워터스톤의 ‘평균 속력’에다 ‘속력 분포’란 새 개념을 하나 더 보탠 것일 뿐이다. 지금 통계학의 바탕을 이룬 정규 분포의 바탕 이론이다. 여기에다 볼츠만은 원자 알갱이들의 수효를 셀 수 있는 개념을 더 보탰다. 맥스웰-볼츠만의 공식은 그런 과정을 총정리한 수학식이다.

독자의 이해를 돕기 위해 설명을 덧붙인다. 워터스톤은 원자 알갱이들의 운동 에너지를 나타내려고 그 알갱이들의 운동 소력을 뭉뚱그려 ‘평균 속력’으로 묶었다. 맥스웰은 그의 개별 속력의 성분들을 하나하나 따졌다.

예컨대, 같은 또래 장병들의 키 크기를 따져보자. 키 큰 사람, 작은 사람들이 섞여있을 때, 키의 평균에 가까운 인원 수효가 가장 많을 것이고, 나머지의 수효들은 점점 적게 될 것이다.

그래프의 가로(X-축)에 키의 크기순으로, 그리고 세로(Y-축)에 그 빈도수를 나타낼 한 그래프를 그리면, 반듯한 종 모양새의 그림을 그릴 수 있다. 그가 그린 정규 분포 그림은 알갱이들의 ‘평균 속력 제곱’이래야 정규 분포를 이룬다는 사실도 확인했다. 볼츠만은



Planck, Max Karl Ernst Ludwig

그 그림에다 원자들의 수효 개념을 접목시켰다.

높은 산에 오를수록 기압은 낮아진다. 기압은 바로 공기에 섞인 가스 알갱이들의 운동으로 생겨날 운동 에너지이다. 기압이 낮다는 것은 공기 속에 들어있는 원자나 분자들의 알갱이들 수효가 적다는 뜻이다. 중력이 작용하므로 산에 높이 오를수록 지구의 인력은 공기 알갱이들을 끌어당겨 공기의 밀도는 높이 오를수록 점점 희박해져 산소 결핍으로 호흡이 어려워진다.

볼츠만은 그런 현상을 바탕으로 공기에 섞인 원자들의 알갱이 수효를 잴 수 있는 근거를 마련했던 것이다.

### 3. 아인슈타인의 ‘브라운 운동’ 증명

아인슈타인은 ‘기적의 해’ 5월, 7, 80년 동안 과학자들이 이상하다고 여겨오던 ‘브라운 운동(최근 물리학자들이 붙인 이름; Brow-

nian Motion)’을 물리적으로 입증하는 논문을 발표한다.

거기서 그는 맥스웰-볼츠만 공식을 들이대고, 논란의 여지없이 화분들의 요상한 요동(처음 이름; Brownian Movement)을 설명하는 물리적 현상을 밝혀낸다. 그때는 무기물질이 그런 운동을 하는 것을 물리 이론으로 설명할 수 없었을 때이다.

애초에 로버트 브라운은 화분들의 그런 요동들이 마치 동물처럼, 화분 알갱이들이 종족 보존의 원리에 따라 수정되기 위한 욕구로 움직이는 것으로 의심한다. 그는 관찰에 쓰이던 화분들을 알코올에 11개월이나 담가놔다가 끄집어내 관찰해도 화분들의 요동엔 달라진 것은 없었다. 그 요동은 무기물질의 자발적인 운동임엔 의심의 의지가 없었다.

우린 꽃가루 몇 알갱이들이 큰 나뭇잎에 사뿐히 날아와 앉았다 해도 당연히 나뭇잎이 요동치 않음을 알고 있다. 아인슈타인의 생각은 우리와는 달랐다. 꽃가루에 수많은 원자 알갱이들이 충돌한다면, 꽃가루 알갱이들을 움직이게 할 수 있다는 생각을 하게 된다. 한 꽃가루 알갱이의 한쪽에 부딪치는 원자들의 수효가 반대쪽보다 많다면 적은 쪽으로 알갱이들은 밀려나게 된다. 꽃가루의 요동이 원자 알갱이들의 운동임을 알아낸 것이다.

그뿐만 아니다. 그는 맥스웰-볼츠만 공식에 그의 생각을 접목시켰다. 원자 알갱이들의 요동 효과

는 바로 원자 알갱이들의 수효 그리고 그 크기를 잴 수 있는 한 도구이기도 하다.

아인슈타인의 ‘브라운 운동’은 한 원자 알갱이의 크기 그리고 그 수효를 알 수 있는 수단이 된다. 아인슈타인의 ‘브라운 운동’은 오랫동안 원자의 존재를 의심해오던 물리학계의 논쟁을 잠재운 쾌도난마(快刀亂麻) 구실을 했다는 데 그 뜻이 담겨있다.

## 상대성 이론

### 1. 과학자들의 첫 반응

앙리 푸앵카레(Henri Poincaré: 최초 카오스 이론을 글로 씀)는 프랑스 제3공화국에서 이름을 날리던 수학자였다. 1904년 세인트루이스(미국 미주리 주에 위치, 프랑스 그리고 스페인 나라들이 통치한 적도 있음. 루이 9세, 14세의 이름을 딴 도시 이름)에서 개최된 세계박람회에서 ‘상대성 이론’이란 강연을 했다. 기적의 해보다도 한 해 앞섰다. 그의 강연 내용은 아인슈타인의 ‘상대성 이론’에 견줘 그 변두리 정도만을 다룬 것으로 알려진다.

그때 푸앵카레는 50대 중년이였다. 대체로 중년 과학자는 신선한 아이디어를 내놓을 총명함은 발달할지라도 그것을 발전시킬 기력은 많이 떨어지는 연령대이다. 필자의 체험으로 그렇다. 새로운 세계에 대한 도전보다는 두려움이 앞을 가

로막아 심약해진다.

푸앵카레는 아인슈타인처럼 상대성 이론을 연구할 기회를 먼저 잡긴 했었지만, 세인트루이스 쪽에서 제공한 일정에 밀려 더 이상 상대성 이론을 연구할 여가도 없었다고 한다.

‘기적의 해’에 아인슈타인의 특수 상대성 공식이 발표되자 푸앵카레는 1906년 초에 뒤늦게 그 논문 발표 소식을 듣고는 냉담했다. 사실 그 공식은 자신의 의붓자식인 셈이다. 하지만 그는 그 논문 내용을 거들떠보지도 않았고, 거기에 대해 어떤 말도 하지 않았다. 심지어 아인슈타인이란 이름까지도 부르기를 꺼렸다.

그 시대의 많은 과학자들도 그의 공식에 거부감을 나타냈다. 그 공식에서 왜 빛의 속도(c)를 그렇게 돋보이게 한 것인지 물리 현상의 논리적 배경에 대해 의아했다. 그때 아인슈타인에겐 변변한 실험실도 전혀 없었다. 그런 그가 지금까지 아무도 몰랐던 과학적 발견을 한 것에 대한 물리학자들의 의구심은 어찌면, 당연했을 것이다.

그의 공식은 실험으로부터 얻어진 결과물은 아니다. 많은 과학자들은 그가 순 이론적인 설명으로 끼워 맞춘 것으로 이해했다. 그들은 고도의 이론적 추측일 뿐이라고 여겼다.

세세히 따져보자면, 아인슈타인의 아이디어는 이미 여러 과학자들이 오랫동안 생각해오던 문제였다고 한들 무방할 것으로 보인다. 그

는 그런 생각들에 바탕을 두고, 남이 하지 않았던 논문을 발표했다. 그는 다만 빛, 빛의 속도, 그리고 이 우주를 논리적으로 설명할 수 있는 길을 찾아내려고 궁리했을 뿐이다. 그래서 다른 이가 보기엔, 어쩌면 그는 한 몽상가로 보였을 것이다.

## 2. 상대성 이론의 개념

아인슈타인은 스위스 특허국에서 일을 하면서 틈틈이 깊은 사색에 빠져든다. 신은 인간을 지구라는 작은 놀이기구 안에 가둬놓고, 거기서 관찰되는 모든 것을 실체라고 믿게 한다고 여겼다. 우리 곁에 있는 것들을 더 깊이 들여다보면, 우리의 직관으로 보이질 않을 세계가 따로 마련돼 있을 것이라 생각했다. 신은 우리가 이해 못할 부분들을 지구 안에 만들어놓고, 오로지 순수 이성만이 거기서 어떤 일이 일어나는지를 이해할 수 있게 인도하는 것으로 여겼다.

상대성 이론은 아인슈타인의 말처럼, ‘신이 인도하는 세계’를 다룬 이론이므로 지금도 보통 사람들은 그의 개념을 쉽게 꿰뚫을 순 없을 것이다. 보통 이들로선 복잡한 과학 이론의 개념들이 쉽게 이해되지 않을 수도 있을 것이다.

“질량 그리고 에너지는 하나다.”란 아이디어는 아인슈타인의 특수 상대성 이론의 뼈대이다. 그뎨 누구에게나 영똥한 망상이었을 것이다. 어릴 적부터 아인슈타인은 인

간으로선 아무도 빛의 속력을 따라잡을 수 없다는 생각을 해왔다. ‘기적의 해’에도 그의 생각은 변함없었다. 바로 그게 논리의 바탕을 이루게 되고, ‘상대성 이론’으로 구체화된 것이다.

예컨대, 한쪽에서 움직이는 물체에다 에너지를 무한정 쏟아 붓는다면, 그 물체와 따로 떨어진 관찰자 쪽은 쏟아 붓는 에너지의 양을 알지 못하므로 그 물체의 질량이 무한정 무거워지는 것으로 느껴진다. 이 말을 뒤집자면, 물체의 질량이란 적당한 조건을 거기에 주게 되면 에너지로 바뀐다는 얘기가 된다.

1898년 마리 퀴리는 우라늄에서 나오는 복사광(혹은 반사광)을 ‘방사선’이라 이름을 붙였다. 그녀는 그 빛이 라듐 원자핵의 물질(핵자)의 조각이 아주 잘게 쪼개져 나온다는 사실을 알지 못했다. 한 흔적에도 미치지 못할만한 분진이 거기서 튀겨져 나오므로 지금 개발된 초현대적인 정밀한 저울로도 잴 수 없는 양이었다. 마치 일 톤(1t)의 쌀(13가마, 약 5천8백만개 낱알들)에서 쌀알 하나가 샌다고 그 무게가 달라질 수 없듯 말이다.

한 사람이 자전거를 타고 멈췄을 때의 질량을 총 50kg(정지 질량)이라고 하자. 하지만 페달을 밟고 시속 32km로 달린다면(외부에서 물체에 에너지를 투입), 그런 속도를 유지하는 동안 그 무게는 약 100kg 정도로 불어나게 된다고 한다. 페달 밟기를 멈춘다면, 도로 50kg으로 돌아오게 된다. 자전



거의 속도가 올라갈수록 그 무게는 속도의 제곱의 어떤 비율로 늘어나게 되는 이치다.

또 다른 예를 보자. 한 보행자가 자기를 향해 달려오는 차를 바라보고 걷는다고 하자. 달려오는 차이므로 움직이는 물체에 닿을 빛의 뒤틀림 현상이 차나에 일어나게 된다. 그 때문에 그에겐 그 차의 크기는 실물보다는 '상대적으로' 더욱 짧게 보이게 될 것이다. 차가 멈춰선다면, 원래의 모습으로 보이게 된다.

달리는 차 안의 시간도 보행자가 느끼기엔 '상대적으로' 천천히 흐르듯이 보일 것이다. 달리는 차에서 운전자가 CD 플레이어를 돌릴 손놀림을 유심히 바라자보면, 그의 손동작이 아주 느림을 느낄 것이다. 그 CD에서 울리는 노래 소리도 아주 느리게 들릴 것이다.

이런 눈으로 우주를 바라본다면, 빛의 뒤틀림 현상 때문에 관찰자의 시야를 혼란스럽게 하여 관심 포인트를 정확히 찾아낼 수 없게 될 것이다. 움직일 물체의 속도가 빠를수록 착시 현상은 더 심하게 나타나게 될 것이다.

"상대성 이론은 다음과 같이 요약된다. 점점 멀어지는 어떤 물체를 보는 사람에게 그 물체는 질량 증가와 길이 변화, 시간 지체를 겪고 있는 것으로 보인다는 것이다. 구경꾼들은 그러한 현상을 차 안에서 볼 것이고, 뒤를 돌아보는 그 차의 운전사는 구경꾼들에게서 보게 될 것이다."

—『E =mc<sup>2</sup>』, 119쪽, 데이비드 보더니스 지음, 김인희 옮김

### 3. 특수 상대성 이론의 쓰임새

위의 현상들은 TV 제작 기술자들의 일상적인 업무에서도 부닥뜨리게 될 것이다. TV 브라운관에 전자들을 쏘아 모니터 화면에 한 그림을 그려낼 때, 전자들이 빠른 속력으로 움직이므로 실제보다 전자들은 더 크게 보이게 된다. 이것을 조정해 줄 자력장을 만들어낼 자석의 설계 기술은 아인슈타인의 특수 상대성 이론이 그 밑바탕에 깔려 있다.

요즘 대부분의 선박이나 차량들은 항법 장치(GPS)를 달고 있다. 휴대폰도, 그리고 여러 곳에서 실시간으로 이뤄질 금융 결제를 해줄 규모가 큰 GPS 탐지기도 모두가 인공위성에서 쏘아주는 위치 신호를 이용한다.

인공위성의 속력은 아주 빠르다. 거기서 쏘는 신호의 빠르기는 땅 위에 있는 사람들에게겐 느리게 전달된다. 이런 시차의 보정은 전자 회로로 이뤄진다. 그 원리는 두 말 할 나위 없이 아인슈타인의 상대성 이론 공식을 그대로 활용한다고 알고 있다.

질량은 변하지 않을 것이며, 시간도 누구에게나 같은 속도로 흐른다는 개념은 지구 위에 살고 있는 이들에게겐 진리처럼 여겨진다. 하지만 광활한 우주에서나 또는 소우주인 원자의 세계에서는 전혀

통하지 않는 개념이다. 거기엔 질량도 시간도 절대적이 아닌 상대적인 것이다.

지난해 우리도 우주인 후보자를 공모해서 9월 5일, 고산 씨 단 한 사람을 뽑았다. 무려 3만6천대 1의 경쟁을 뚫고 뽑혔다. 그는 금년 4월 8일 카자흐스탄 바이코누르 우주기지에서 러시아 소유스호를 타고 국제우주정거장에 올라가 우주탐사를 할 스케줄이 잡혀있다. 최근 뉴스는 그가 우주에서 수행할 18가지 우주과학실험 외 우리의 55 가지의 물품을 가져간다고 발표했다(《중앙일보》2008/02/21, 12쪽)그 때 그는 아인슈타인의 상대성 이론의 실체를 경험하게 될 것이다.(교육과학기술부는 3월 10일 한국의 첫 탑승 우주인 후보를 고산씨에서 이소연씨로 교체한다고 밝혔다. - 편집자 주)

### 4. 유명 인사가 된 아인슈타인

'기적의 해'에 발표했던 아인슈타인의 특수 상대성 이론은 그로부터 10년 후인 1915년 다시 리모델링하게 된다. 거기서 그는 "마침내 일반 상대성 이론은 하나의 논리적 구조로 결말을 보게 됐다."라고 썼다. 그의 논문 제목은 '중력장 방정식'이며, 1915년 11월 25일, 베를린에 있던 프러시아 과학원에 제출했다.

핵심 내용은 태양의 일식을 상대성 이론에 따라 정확히 예측해낸 한 수학적 모델이다. 관측을 하게

된다면, 실제로 증명할 수 있었다. 그는 수성 궤도의 근점이각(한 천체의 궤도 위에 그것이 움직일 위치를 나타내는 데 쓰인 낱말임)을 다뤘다. 그는 별빛이 태양처럼 무거운 천체 주위를 지날 때, 뉴턴 이론이 예측했던 값보다 2배의 각도로 빛이 휘어진다고 새로이 주장했다.

아인슈타인의 주장을 실제로 관측할 실험은 제1차 세계대전으로 미뤄졌고, 1919년 5월 29일에 있을 개기일식이 그의 새로운 이론을 최초로 관측할 기회가 된다. 그의 이론에 따라 수성의 근점이각을 측정할 두 지점들을 미리 정하여 관측 팀들을 현지에 파견했다. 케임브리지 대학 팀은 서아프리카 프린시피 섬, 다른 그리니치 천문대 팀은 브라질 소브랄에서 각각 개기일식 장면을 관측했다.

그해 11월 6일, 런던의 별링턴 하우스에서 열린 영국 왕립학회와 왕립천문학회의 공동 학술에서 두 팀이 관측한 결과가 보고된다. 아인슈타인의 주장이 뉴턴의 예측값보다 더 정확했다.

톰슨은 각계 명사들이 모인 발표장에서, “인류 사고의 역사에서 가장 훌륭한 업적 중의 하나이다. 이것은 외떨어진 섬이 아니라 새로운 과학적 사고의 전 대륙을 발견한 것이다.”라고 칭송했다. 그 사실은 뉴스거리였다.

영국의 <더 타임스>는 ‘과학의 혁명’이란 헤드라인으로 기사를 썼다. 소문은 소문을 타고 전 지구



“... 전에는 우주에서 모든 물질이 사라져 버린다면 시간과 공간이 남을 것이라고 생각했습니다. 그러나 상대성 이론에 의하면 시간과 공간도 물질과 함께 없어져 버립니다.” - 아인슈타인

로 퍼져나갔다.

후속 논문이 우주를 대상으로 삼은 거대한 스케일에 견준다면, ‘기적의 해’에 발표된 질량-에너지 등가 식( $E = mc^2$ )은 그 범위가 좁았다. 그때는 마치 애들 소꿉놀이로 치부할 수준이었다. 하지만 20세기 한해를 열광케 한 기적의 해는 바로 그 질량-에너지 공식을 두고 이르는 말이다. 그는 노년기에 접어들면서  $E = mc^2$  공식을 다시 한 번 간결하게 손질하게 된다.

유럽 물리학자들은 ‘기적의 해’로부터 10여년이 지나서야 아인슈타인의 공식을 받아들였다. 그들은 물질 속에 얼어붙은 에너지를 밖으로 끄집어낼 수 있는 바탕 공식임을 인정은 하였지만, 구체적으로

그런 방법을 몰랐다.

앞서 얘기처럼, 물리학자 리체 마이트너 여사가 최초로 그 공식에 담겨진 가공할 에너지를 썬해 내면서 핵물리학이란 분야가 새로 생겨났다. 원자력의 시대가 온 것이다.

1919년 이후, 아인슈타인은 갑자기 세계적인 과학자로 등장한다. 1921년 그가 뉴욕을 첫 방문했다. 기자들은 그를 둘러싸고 그의 상대성 이론에 대하여 질문했다.

“... 전에는 우주에서 모든 물질이 사라져 버린다면 시간과 공간이 남을 것이라고 생각했습니다. 그러나 상대성 이론에 의하면 시간과 공간도 물질과 함께 없어져 버립니다.” 