

# 10

## 초기 원자모형

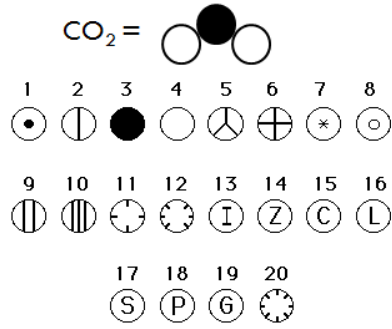
논리학은 당신을 A에서 B로 이끌어줄 것이다.  
그러나 상상력은 당신을 어느 곳이든 갈 수 있게 해 줄 것이다.  
- 알베르트 아인슈타인 -

### ■ 초기의 원자모형

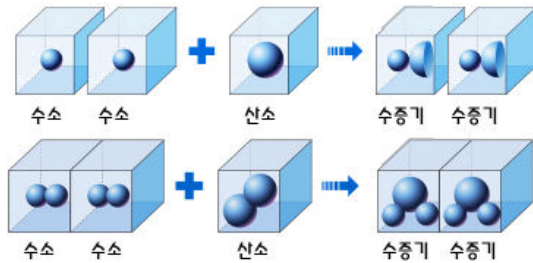
원자를 쉽게 이해하기 위해 눈으로 볼 수 없는 원자를 볼 수 있는 대상으로 나타낸 원자모형(atomic model)이라고 한다. 1808년 돌턴(John Dalton, 1766-1844)은 모든 화학원소는 변하지 않고 파괴할 수 없는 한 종류의 원소들로 구성되고 그것들이 결합하여 더 복잡한 화합물을 만든다는 원자모형을 제안하였다. 돌턴 모델의 특징은 물질을 계속 쪼개어서 더 이상 쪼갤 수 없는 가장 작은 입자를 원자라고 하는 것이었다. 그의 법칙은 1779년 라부아지에(Antoine Lavoisier, 1743-1794)가 공식화한 질량 보존의 법칙을 만족하고, 따라서 원자라는 물질은 근본적으로 부술 수 없다고 생각했다. 또한 1799년 프루스트(Joseph Proust, 1754-1826)가 증명한 일정 성분비의 법칙을 바탕으로 돌턴 모델이 만들어졌다.

돌턴은 수소를 기본 단위로 삼아 물질이 수소와 결합되는 질량비율에 따라 원자량을 결정하였다. 그러나 순수한 산소(O<sub>2</sub>) 같은 원소는 분자상태로 존재한다는 것을 생각하지 못하였다. 그리고 모든

- 1 H
- 2 N
- 3 C
- 4 O
- 5 P
- 6 S
- 13 Fe
- 14 Zn
- 15 Cu
- 16 Pb
- 17 Ag
- 18 Pt
- 19 Au
- 20 Hg



**|돌턴의 기본원자|**



**|돌턴과 아보가드로의 분자 설명|**

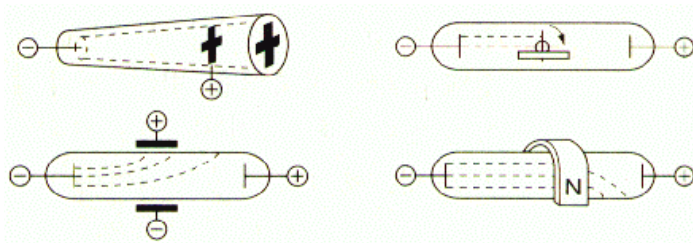
하기 위해서는 산소(O)라고

생각한 원소를 쪼개야 되는 상황이었다. 이러한 문제점은 1811년 아보가드로(Amedeo Avogadro, 1776-1856)에 의해서 수정되었다. 같은 온도, 압력, 부피 조건에서 모든 기체는 같은 수의 분자를 가진다는 아보가드로 분자설을 제안하고, 1몰에 해당하는 입자의 개수인 아보가드로 수(N<sub>A</sub>=6.02×10<sup>23</sup>)를 제안하였다. 그의 제안으로 원자와 분자를 정확히 구분할 수 있게 되었고, 기본적인 돌턴의 원자설에도 어긋나지 않았다.

이상의 생각들은 원자라는 것을 하나의 입자로 파악하고 있다는 것이었다. 고전물리학에서 빛(전자기파)은 파동으로 생각했지만, 원자는 입자로 간주하였다. 양자역학에서는 이들을 명확히 입자다 파

동이다 말하기 어렵다는 것을 알게 된다. 더 이상 쪼개지지 않을 것 같은 돌턴의 원자는 전자를 발견하고서 그 모델이 제한적일 수밖에 없다는 것을 알게 된다. 이에 새로운 원자 모델이 등장한다.

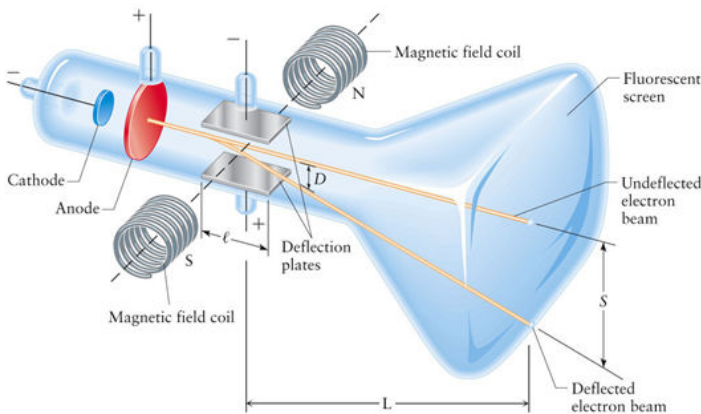
## ■ 전자의 발견



음극선의 기본적인 성질

톰슨은 1897년에 음극선(cathode ray)에 관한 4개월간의 실험 결과를 발표하였다. 고진공관에

관한 연구를 수행한 크룩스(William Crookes, 1832-1919)의 이름을 따서 만든 크룩스관(Crookes tube)은 0.1 mmHg 이하의 진공도를 가진



음극선 실험장치

방전관으로 음극에서 나온다고 생각되는 방사선인 음극선을 방출할 수 있는 장치이다. 음극선은 직진성과 입자성을

지녀서 그림자를 만들거나 바람개비를 회전시킬 수 있다. 또한 금속 판에 부딪히면 x-선을 발생하기도 한다. 그는 전기장 또는 자기장에 의해 음극선이 양극 쪽으로 휘는 현상을 바탕으로 원자 질량 보다 작 으며 음의 전하를 지니는 미립자(corpuscle)를 발견했다고 보고했다. 원자를 중성으로 보자면 음의 전기를 띠는 입자이외에 양의 전기를 띠는 입자가 존재해야 한다는 예측까지 낳게 하였다. 그의 실험에서 는 금속판이나 기체를 바꾸더라도 음극선 물질의 전하량과 질량의 비 ( $e/m_e$ )가 일정하다는 결론을 얻어서, 모든 물질내에는 같은 물질이 포 함되어 있다고 보았다. 이는 훗날 전자(electron)라고 칭하게 되었다. 톰슨의 실험을 통해 우리는 오늘날 전자의 존재를 알게 되었다.

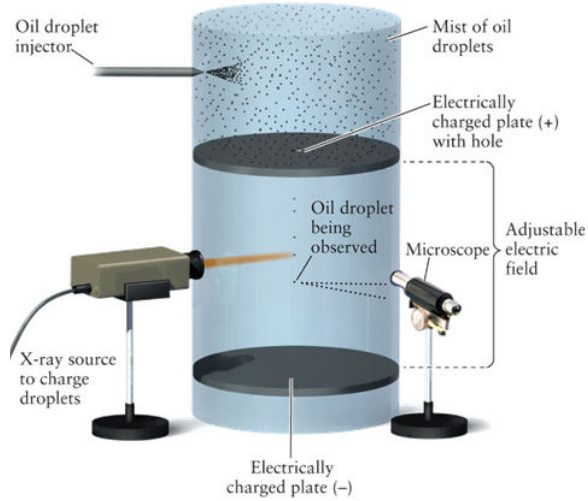
전자의 비전하는 서로 수직인 전기장(E)과 자기장(B)의 크기를 잘 조절하면 전자가 직진하도록 할 수 있는데, 이때의 크기를 이용하여 측정할 수 있다. 즉, 자기력(Bev)과 전기력(eE)이 같아지고 곧 전자의 속도(v)는 E/B로 정의된다. 이때 전기장을 걸지 않고 자기장만 가하면 전자는 자기력이 구심력으로 작용하여 휘어지는 원궤도의 반지름이 r인 원운동을 하게 된다. 따라서 자기력(Bev)과 구심력( $m_e v^2/r$ )가 같아져, 비전하( $e/m_e=v/Br$ )는  $1.76 \times 10^{11}$  C/kg가 된다.

이후 1909년에 밀리컨(Millikan)은 대전된 유적(oil drop)을 이용한 실험을 통해 전자의 전하량(e 또는 q)를 측정하는데 성공한다. 대전된 기름 방울이 두 개의 금속판 사이를 통과할 때, 적절한 전기장을 걸어주면 중력( $m_e g$ )과 전기력(qE)이 같아지게 된다. 이때 두 힘의 균형으로 기름 방울이 공중에 뜨게 되고, 전하량( $q=mg/E$ )은 6.41, 8.01, 9.65,  $11.23 \times 10^{-19}$  C로 모두  $1.602 \times 10^{-19}$  C의 정수배가 된다는 것을 알게 되었다. 따라서 최소값을 전자의 기본전하량(e)이라고 확인하

였고, 톰슨의 비전하 ( $e/m_e$ )를 이용하여 전자의 질량( $m_e$ )가  $9.11 \times 10^{-28}$  g이라는 것을 알게 되었다.

톰슨과 밀리컨의 실험으로 전자의 질량은 전체 질량에 비해 대단히 작다는 것을 알아냄으로써 전자는 원자

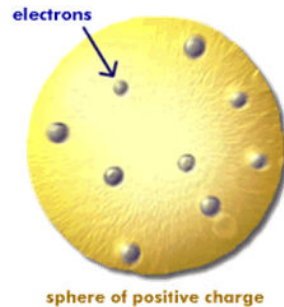
의 한 부분으로 원자를 구성하는 기본적인 입자라는 것이 밝혀졌다. 이는 돌턴의 원자론인 더 이상 나눌 수 없다는 원자에 대한 관념을 깨는 내용으로 새로운 원자모형을 필요로 했다.



**[전자질량 측정 실험 장치]**

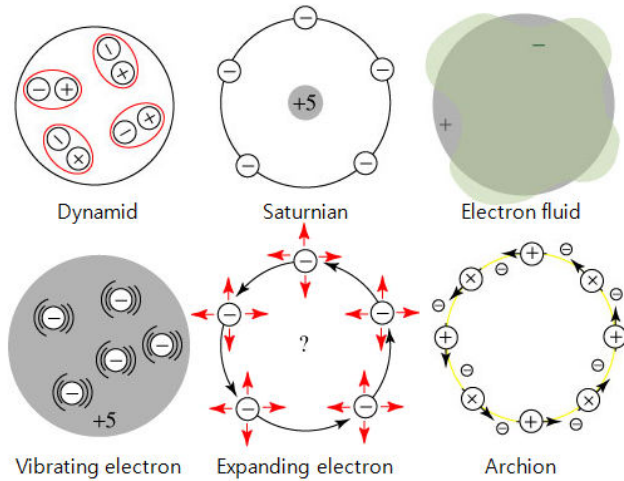
## ■ 톰슨 원자모델

톰슨은 본인의 음극선 실험을 통해 음전하를 띤 미립자의 존재를 알게 되어 돌턴의 원자모델을 변형해야 하는 필요성을 느끼게 되었다. 이에 1904년에 원자 안에 미립자(전자)가 박혀 있는 형태를 제안했고, 원자는 전기적으로 중성이어야 하므로 같은 양의 양전하가



**[톰슨 모델]**

있도록 하였다. 건포도가 박힌 푸딩(plum pudding) 모델로 주로 설명을 하여 고정된 전자처럼 보이지만, 실제로는 원자내 전자는 상호간의 반발력으로 일정거리를 유지한 채로 움직일 수 있다.



[보어 이전의 다양한 원자모델]

단 양전하를 띄는 물질은 원자크기만큼 팽창하여 원자크기를 나타낸다.

원자모형에 관한 과학사에는 잘 등장하지는 않지만 톰슨의 모델 다음으로 제시된 모델은 일본인인 나가오카(Hantaro Nagaoka, 1865-1950)가 제안하였다. 톰슨과 같은해에 그는 토성모델(saturnian model)이라고 불리우는 행성모델을 제안하였다. 토성 고리의 안정성 설명(공전 궤도 중심에 매우 큰 질량을 지닌 토성이 자리하고 있어서 그 주변을 도는 고리가 안정하게 유지된다)과 유사하게 원자내 전자운동의 안정성을 설명하였다. 즉, 상대적으로 매우 큰 질량을 갖는 양전하가 중심에 모여 있고 정전기력에 의해 그 주변을 도는 전자들의 형상을 제안하였다.

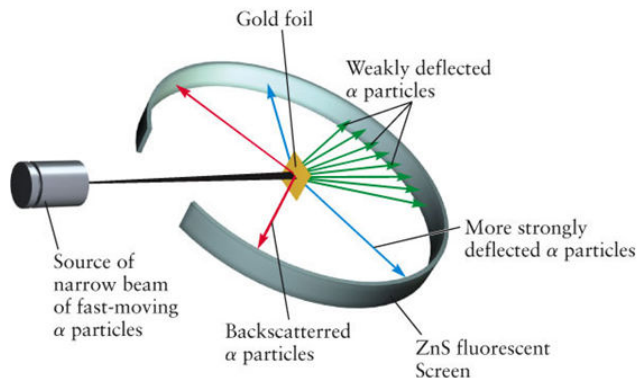
사실 톰슨과 나가오카가 제시한 모델 이전에 레너드(Lenard)의 다이너미드 모델(1903, dynamid model)이 있었으며, 1904년 이후에는 레일리(Rayleigh)의 전자유체 모델(1906, electron fluid model),

진(Jeans)의 진동전자 모델(1906, vibrating electron model), 스콧 (George Schott, 1868-1937)의 팽창전자 모델(1906, expanding electron model), 슈타르크(Johannes Stark, 1874-1957)의 아키온 모델 (1910, archion model) 등의 비주류 모델이 있었다.

### ■ 러더퍼드의 실험

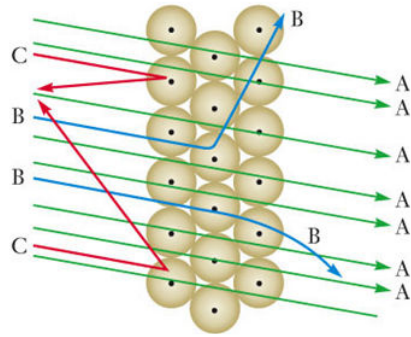
톰슨의 제자인 러더퍼드(Ernest Rutherford, 1871-1937)는 스승의 원자 모델을 증명하기 위하여 그의 동료들인 가이거(Hans Geiger, 1882-1945)와 마즈덴(Ernest Marsden, 1889-1970)과 함께 금박(gold foil) 실험을 진행하였다. 전자의 무게에 약 7300배고 +2e의 전하를 가지고 있는 알파입자( $\alpha$  particle)를 얇은 금박에 조사하여 형광 스크린에 맞게 하여, 알파입자가 통과하는지 관찰하고자 하였다. 알파입자는 많은 방사성 물질로부터 수 MeV의 에너지를 가지고 자연적으로 방출된다. 톰슨의 모델

에 의하면 금박을 이루고 있는 전자는 운동량이 큰 알파입자보다 훨씬 가볍고 양전하는 넓게 퍼져 분포하기 때문에 알파입자의 진행에 장애



|러더퍼드 알파입자 산란 실험|

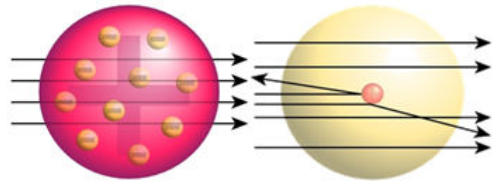
가 되지 않고 금박을 통과하여 직진할 것으로 생각했다. 그러나 놀랍게도 상당수의 알파입자는 진행방향에서  $10^\circ$ 이내에서 약간씩 휘거나 심지어는  $1/20,000$ 의 확률로 후방산란도 관찰되었다. 이에 관해 러더퍼드는 15인치 포탄을 얇은 종이에 쏘았을 때 포탄이 되튀겨 나온다는 것과 같다고 설명했다.



**|투과(A), 전방산란(B), 후방산란(C)|**

튠슨 모델에서 전자는 알파입자의 진행에 영향을 주지 않을 것이기에 산란은 양전하에 의한 것으로 판단되었다. 이에 러더퍼드는 양전하의 대부분은 어느 한곳에 밀집되어 있어야 하고 그것도 원자의 중심에 집중되어 있을 것으로 간주하였다. 중심에 밀집된 양전하를 추후에 원자핵으로 불렀으며, 그는 원자핵 주변으로 전자가 돌고 있고 원자는 대부분은 비어 있는

행성모델을 제시하였다. 나가오카의 토성모델과 비슷할 수 있으나, 차이점은 개별 전자가 개별적으로 핵주변에서 공전한다



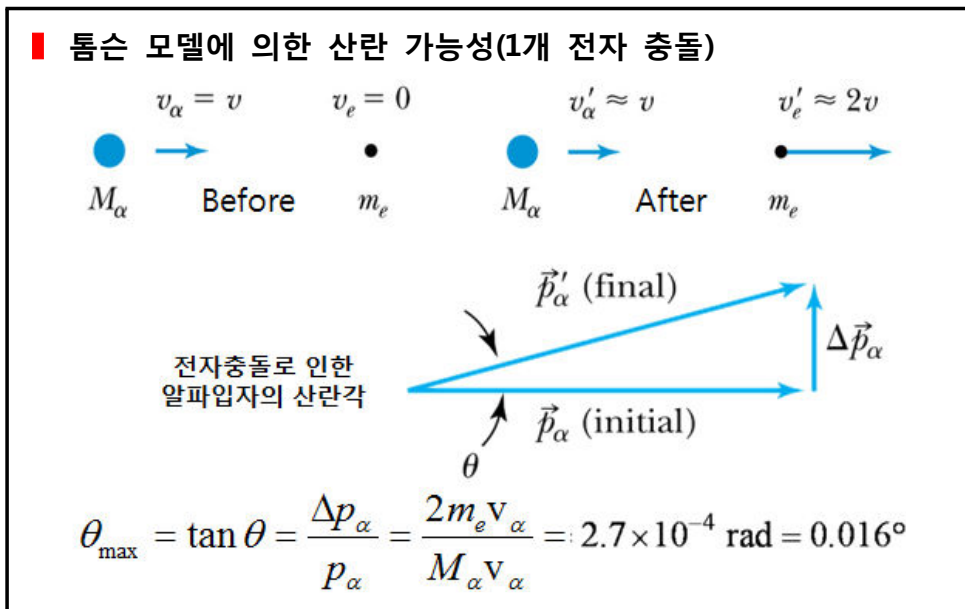
**|스승과 제자의 원자 모델|**

는 점에서 차별화 된다. 러더퍼드의 모델은 이후 보어에게 영감을 주어 고전물리학에 의한 원자모델의 결정판인 보어(Bohr) 원자모델에 이르게 된다.



## ■ 전방산란만 가능한 톰슨 모델

톰슨 모델에 의하면 알파입자는 전자와 충돌하여 산란된다고 보아야 한다. 알파입자의 운동량과 속도를  $M_\alpha, v$ 라고 했을 때, 전자와 충돌 전후의 최대속도차( $\Delta v$ )는  $v$ 라고 볼 수 있다. 이때 충돌로 인해 운동량의 미미한 변화가 발생할 것이고, 알파입자의 산란각 변화가 발생한다. 따라서 1개의 전자로 인하여 최대로 산란할 수 있는 알파입자의 산란각은 약  $0.016^\circ$ 가 된다.



금박막의 두께( $t$ )를  $6 \times 10^{-7}$  m라고 할 때, 금박막을 가로지르는 알파입자가  $N$ 개의 전자와 충돌하여 산란된다면, 전체 산란각의 변화는 1개 전자 충돌최대각에 전자의 개수를 곱한 값인  $\theta N^{1/2}$ 가 된

다. 이때 전자의 개수는 충돌과정에서 면적을 고려하여 루트를 적용한다. 금박막의 단위 부피당 존재하는 원자의 개수는 아보가드로수와 밀도를 고려하여 구할 수 있고, 총 원자의 수는  $5.9 \times 10^{28}$  atoms/m<sup>3</sup>이 된다. 원자간의 거리(d)의 3제곱근을 n개 원자의 부피라고 보면, d는  $2.6 \times 10^{-10}$  m가 된다. 따라서 두께와 원자간의 거리를 고려하면 박막을 가로지르는 동안 만나는 전자의 개수는 2300개가 되며, 총산란각은 0.8°가 된다. 여전히 작은 각으로, 금(<sup>79</sup>Au<sub>197</sub>)이 가지고 있는 전자 79개를 모두 충돌한다고 가정하면  $63.2^\circ (79 \times 0.8^\circ)$ 가 된다. 알파입자가 진행시에 모든 전자와 충돌할 가능성은 전혀 없기 때문에 톰슨 모델에 의한 최대 산란각은 63° 이내로 전방산란만 발생해야 한다.

■ 박막내 전자들과 충돌후 총 산란각

$$n = \frac{\text{Number of molecules}}{\text{cm}^3} = [\text{Avogadro's no. (molecules/mol)}]$$

$$\times \left[ \frac{1}{\text{gram - molecular weight} \left( \frac{\text{mol}}{\text{g}} \right)} \right] \left[ \text{density} \left( \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \right]$$

$$= \left( 6.02 \times 10^{23} \frac{\text{molecules}}{\text{mol}} \right) \left( \frac{1 \text{ mol}}{197 \text{ g}} \right) \left( 19.3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$= 5.9 \times 10^{22} \frac{\text{molecules}}{\text{cm}^3} = 5.9 \times 10^{28} \frac{\text{atoms}}{\text{m}^3}$$

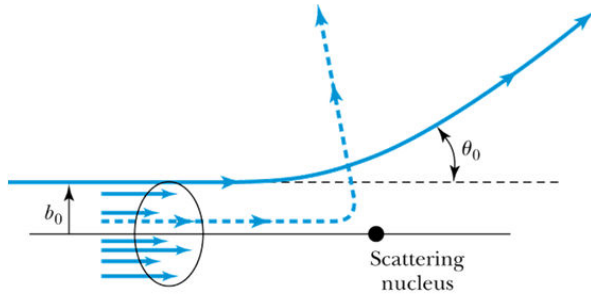
Distance between atoms,

$$d = n^{-1/3} = (5.9 \times 10^{28})^{-1/3} \text{ m} = 2.6 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$N = t/d = \frac{6 \times 10^{-7} \text{ m}}{2.6 \times 10^{-10} \text{ m}} = 2300 \text{ atoms}$$

$$\langle \theta \rangle_{\text{total}} \approx \sqrt{N} \theta = \sqrt{2300} (0.016^\circ) = 0.8^\circ$$

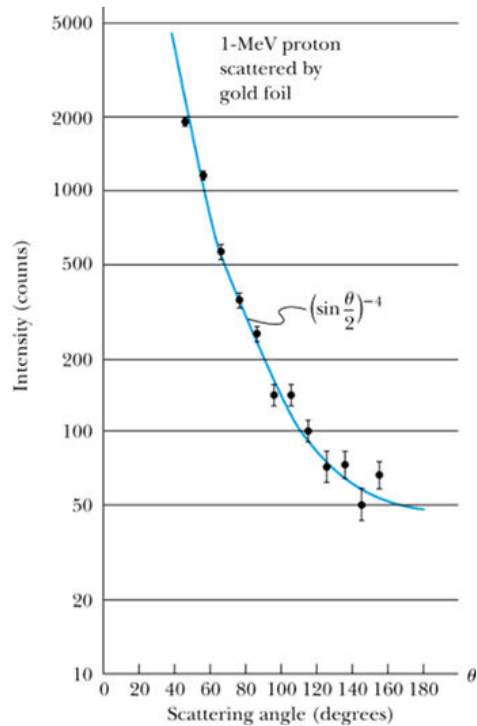
가이거-마르텐의 실험에서는 90° 이상의 후방산란도 자주 발생한다는 것을 확인한 러더퍼드는 스승의 모델이 틀림을 확신하고, 알파입자와 충돌하는 대상



[러더퍼드에 의한 후방산란 가능성 검토]

은 전자보다 훨씬 무거운 대상으로 양전하를 지닌 물체가 한곳에 모여 있어야 한다고 주장하였다.

러더퍼드는 산란 영향지수(impact parameter,  $b$ )를 고려하여 후방산란이 발생한다는 것을 자신의 원자모델로 설명하였다. 입사되는 영역이 원자핵에 가까운 지점이면 쿨롱힘(Coulomb force)이 증가하게 되어 산란각이 커지고, 결국 후방산란도 발생할 수 있다는 것이다. 즉, 핵 근처로 비행하는 알파입자는 많이 휘게 되고, 핵에서 멀리 떨어져 비행하는 입자는 산란각이 작게 된다.



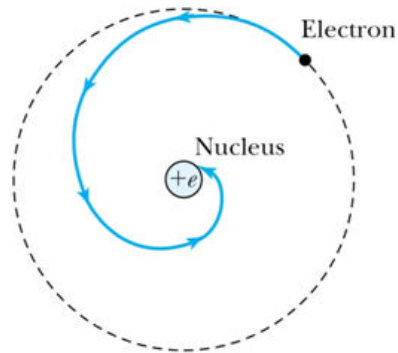
[산란각에 따른 알파입자 발견수]

러더퍼드의 핵 모델(nuclear model)은 그의 실험으로 증명되어, 원자모델의 완성판처럼 인식되었다. 핵 모델은 원자핵(양전하를

지닌 입자) 주변으로 전자가 회전하고 있는 형태를 지닌다고 가정하였다. 그러나 그의 모델에도 치명적인 약점이 있었으며, 이는 맥스웰의 전자기학에 위배되는 몇가지 사실들 때문에 야기되었다.

### ■ 러더퍼드 모델의 문제점

맥스웰의 전자기학에 의하면, 회전(진동)하는 대상(전자)는 전자기파(빛)를 발생하며, 발생된 빛과 함께 대상(전자)이 지니고 있는 에너지는 손실된다는 것이다. 즉 물위에 떠있는 공을 놀렸을 때 발생하는 수면파는 공의 상하진동에 의해 발생하는 것으로 무한히 지속되지 않고 수면파의 진행과 함께



러더퍼드 모델의 문제점

상하진동이 사라지게 된다. 회전스펙트럼은 전자회전시에 정해진 진동수에 따라서 나타난다는 맥스웰의 전자기학 해석에 준하면, 빛 발생과 함께 전자의 회전운동에너지가 손실되고 이는 원심력의 감소와 함께 회전 반경 감소를 야기하게 된다. 결국은 원자크기가 점점 줄어들어 결국에는 전자는 원자핵에 붙잡히게 된다는 것이다.

이러한 치명적인 문제를 해결하기 위해 그의 제자인 보어가 등장한다. 보어는 전자가 공전을 하되 빛을 발생시키지 않는다는 가정을 입증할 수 있다면 전자의 궤도 유지를 이룰 수 있다고 생각하였

다. 즉 보어는 전자가 일정한 위치에도 공전할 수 있는 에너지 궤도라는 개념을 도입하였다.

## ■ 등장인물 살펴보기



### 존 돌턴(John Dalton, 1766-1844)

영국의 화학자, 지질학자, 물리학자이다. 현대 원자모델 발전에 선구자이며, 색맹에 관한 연구(Daltonism)도 수행하였다. 열역학분야에서는 기체의 압력에 따른 성분의 압력인 부분압력에 관한 법칙을 발견하였다. 모든 물질을 작은 입자의 결합으로 이루어진다고 설명하였다.



### 앙투안 라부아지에(Antoine Lavoisier, 1743-1794)

프랑스의 화학자이다. 근대 화학의 아버지라고 불리며, 뛰어난 실험가였다. 연소에 관한 새로운 이론을 주장하며 화학을 크게 발전시켰으며, 산화과정에서의 산소의 역할을 규명하였다. 또한 화학 반응에서의 질량 보존의 법칙을 확립하여, 근대 화합물 명명법의 기초를 마련하였다.



### 조제프 프루스트(Joseph Proust, 1754-1826)

프랑스의 화학자이다. 1808년 순수한 화합물의 구성원소들의 상대적인 양은 화합물의 출처에 관계없이 일정하다는 것을 입증하였다. 화합물의 일정성분비의 법칙으로 돌턴의 원자모델을 뒷받침하게 된다. 매우 다양한 화학물질의 원소 조성을 정량적으로 결정하기도 하였다.



### 아마데오 아보가드로(Amedeo Avogadro, 1776-1856)

이탈리아의 물리학자, 화학자이다. 전기, 액체의 종류, 비열, 모세관, 원자의 부피에 관한 많은 논문을 썼다. 그는 아보가드로의 법칙으로 가장 널리 알려져 있으며, 기체의 종류와 무관하게 온도와 압력이 같다면 일정 부피 안에 들어 있는 입자수는 같다는 법칙을 발견하였다.



**윌리엄 크룩스(William Crookes, 1832-1919)**

영국의 화학자, 물리학자이다. 크룩스관을 개발하여 양극선(canal ray)에 관한 연구를 수행하였다. 1861년에는 미확인 물질이었던 탈륨(Tl)을 규명하여 명명하기도 하였다. 또한 관 내부의 압력이 낮을수록 음의 전극에서 음극선(cathode ray)이 방출되는 것도 발견하였다.



**한타로 나가오카(Hantaro Nagaoka, 1865-1950)**

일본의 물리학자이다. 도쿄대학 교수와 이화학연구소 물리학부장을 지냈으며 오사카 대학 초대 총장을 역임했다. 지구물리학, 유체역학, 광학 등에 많은 업적을 남겼다. 1903년에 유핵(有核)원자모형의 이론으로 양성자의 존재를 예언하였다.



**조지 스콧(George Schott, 1868-1937)**

영국의 수학자이다. 전자가 빛의 속도로 움직이면 빛이 발생한다는 이론을 주장한 것으로 유명하다. 타원 편광(elliptic polarization)을 일으키는 표면에 관한 연구를 수행하였으며, 전하(electric charge)의 움직임에 따른 전자기파의 발생에 관한 연구도 수행하였다.



**요하네스 슈타르크(Johannes Stark, 1874-1957)**

독일의 물리학자이다. 복사하고 있는 원자, 이온, 분자들에 강한 전기장이 가해졌을 때, 스펙트럼선이 분리되는 현상인 슈타르크 효과(자기장에 의해 생기는 제만효과와 대응되는 효과)를 발견한 것으로 유명하며, 1919년 노벨물리학상을 받았다.



### **어니스트 러더퍼드(Ernest Rutherford, 1871-1937)**

뉴질랜드의 핵물리학자이다. 핵물리학의 아버지로 불리우며, 우라늄과 같은 방사성 원소에서 알파선, 베타선, 감마선의 3가지 방사선이 나옴을 밝혔다. 또한 방사성 원소는 자꾸 변화하여 다른 원소가 된다는 것을 발견하였다. 이에 관한 공로로 1908년 노벨 화학상을 수상하였다.



### **한스 가이거(Hans Geiger, 1882-1945)**

독일의 물리학자이다. 알파입자와 다른 이온화 방사선을 추적할 수 있는 최초의 검출기(가이거 계수기)를 개발하였다. 방사선검출기를 이용한 실험에서 헬륨 원자의 핵이 알파입자와 동일하다는 것을 밝혀, 러더퍼드의 원자모델의 실험적 증거를 마련하였다.



### **어니스트 마즈덴(Ernest Marsden, 1889-1970)**

영국계 뉴질랜드 물리학자이다. 맨체스터 대학에서 러더퍼드를 만나 가이거와 함께 금박막의 알파입자 충돌실험을 주관한다. 1915년에는 러더퍼드의 추천으로 뉴질랜드에서 교수생활을 시작하였다. 2차 세계대전 동안에는 레이더에 관한 연구를 수행하였다.