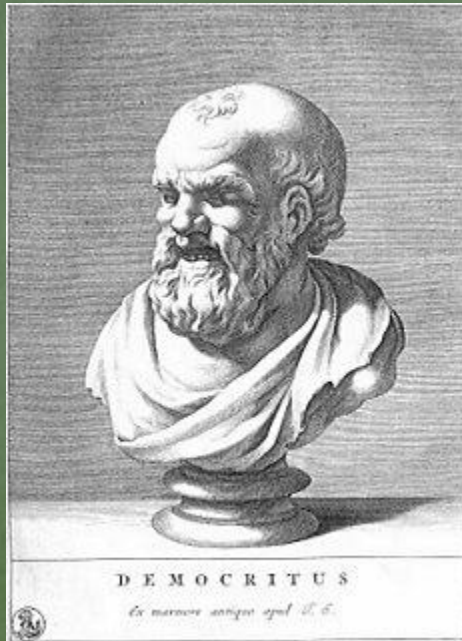


4장 물질의 입자성

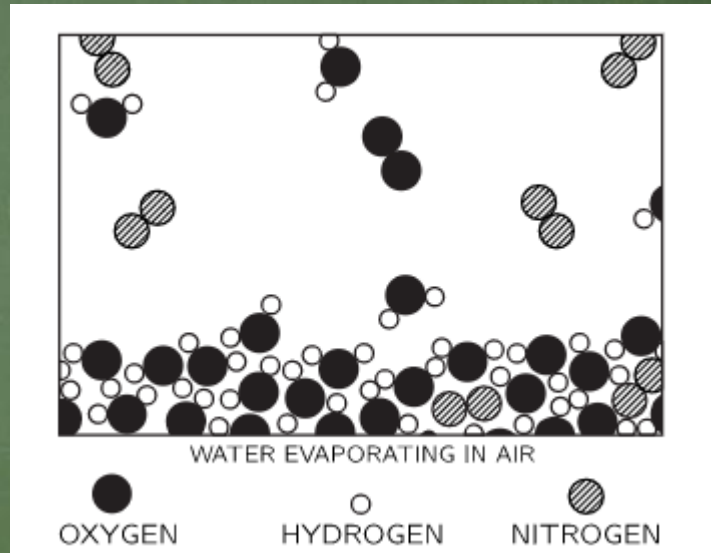


원자론



원자론은 만물이 더 이상 쪼개지지 않고 변하지 않는
원자로 구성되었다는 가설이다. 이 세상은 이러한 근본적인 원자들의
조합과 상호작용에 의해서 설명될 수 있다.

원자론



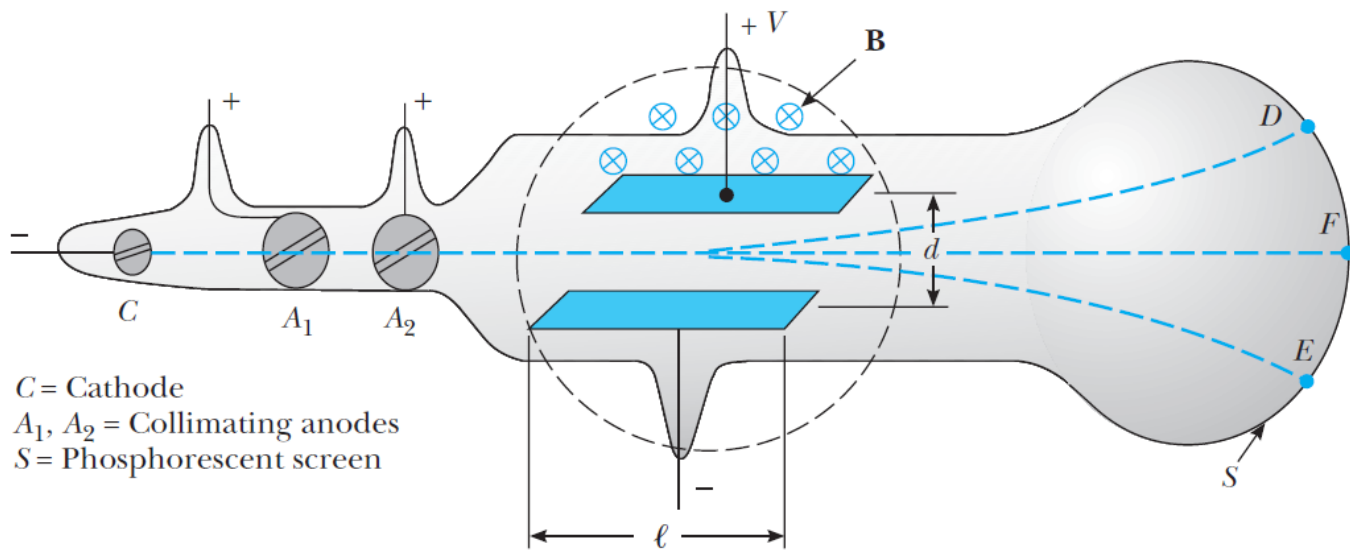
원자론은 자연을 이해하는 한 가지 근본적인 아이디어이며,
파인만은 그의 물리학 강의의 가장 첫 시간에 이 주제를 논의했다.

원자도 쪼개진다?



그러나 톰슨은 (정의상) 쪼개지지 않는 안되는 원자도
쪼개질 수 있다는 것을 처음으로 발견하게 되었다.

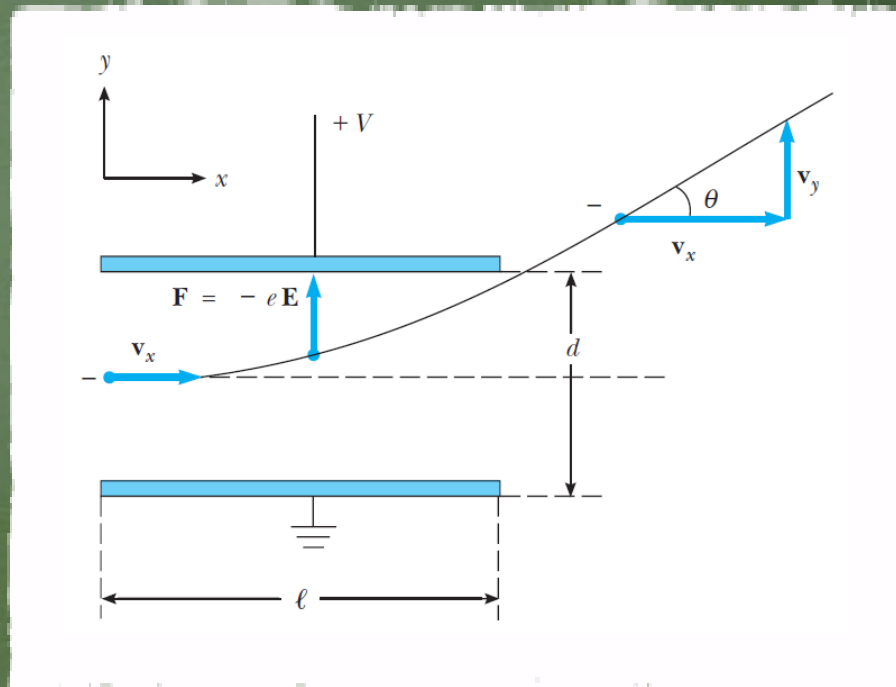
토슨의 실험



토슨은 음극선 cathode ray 의 성질을 연구하였다.

음극선을 전기장과 자기장이 교차된 영역에 통과하도록 하였다.

토션의 실험



음극선은 먼저 전기장에 의해 힘을 받아서 등가속도 운동을 하게 된다.

토션의 실험

$$v_y = a_y t$$

$$a_y = F/m_e = Ee/m_e = Ve/m_e d$$

$$t = \ell/v_x$$

$$v_y = \frac{V\ell e}{m_e v_x d}$$

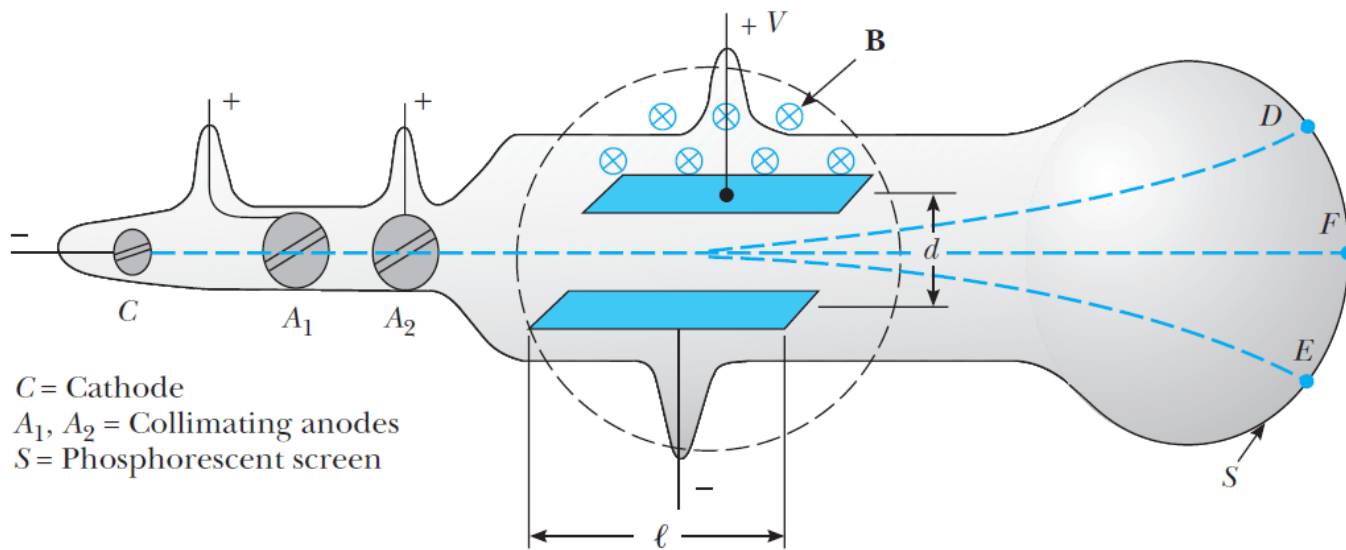
따라서 전기장 영역을 벗어날 때의 y-방향성의 속도는 위와 같다.

토션의 실험

$$\tan \theta = v_y / v_x = \frac{V\ell}{v_x^2 d} \left(\frac{e}{m_e} \right)$$
$$\approx \theta$$

따라서 속도의 비율과 **비밀 편향**에 대해 위와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$\frac{E}{h\nu}$ 의 실험



이제 빛 편향등이 사라질 때까지 자기장을 키워보자.

토션의 실험

$$qE = qv_x B$$

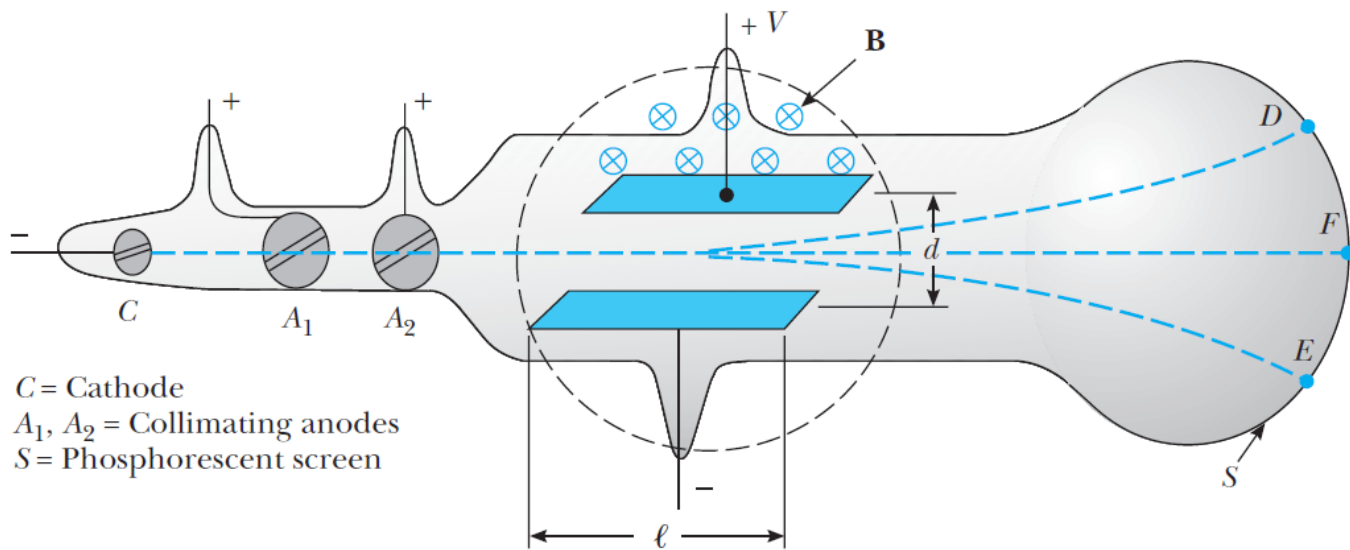
$$v_x = \frac{E}{B} = \frac{V}{Bd}$$

$$\frac{e}{m_e} = \frac{V\theta}{B^2 \ell d}$$

이 때의 조건은 위와 같다.

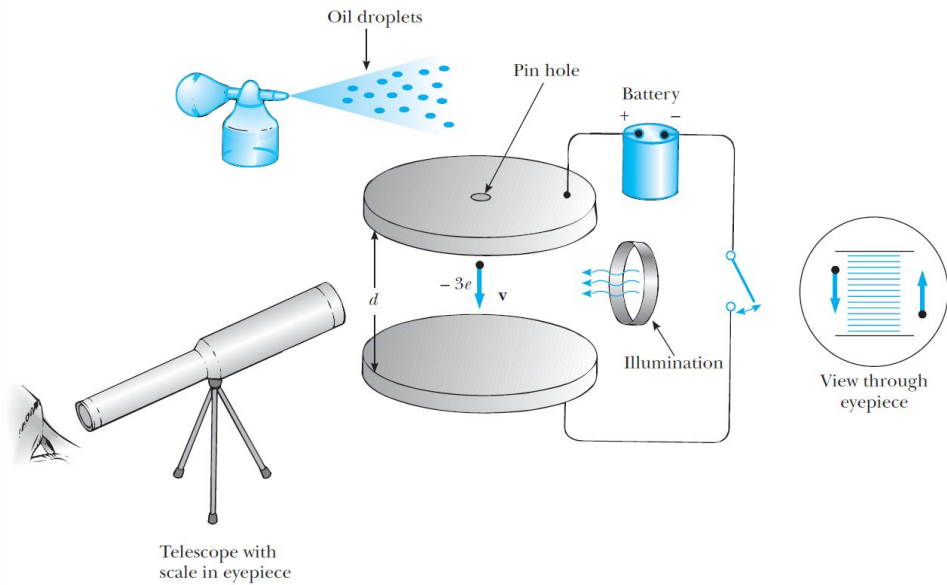
이것으로부터 전자의 비전하를 얻게 된다.

토슨의 실험



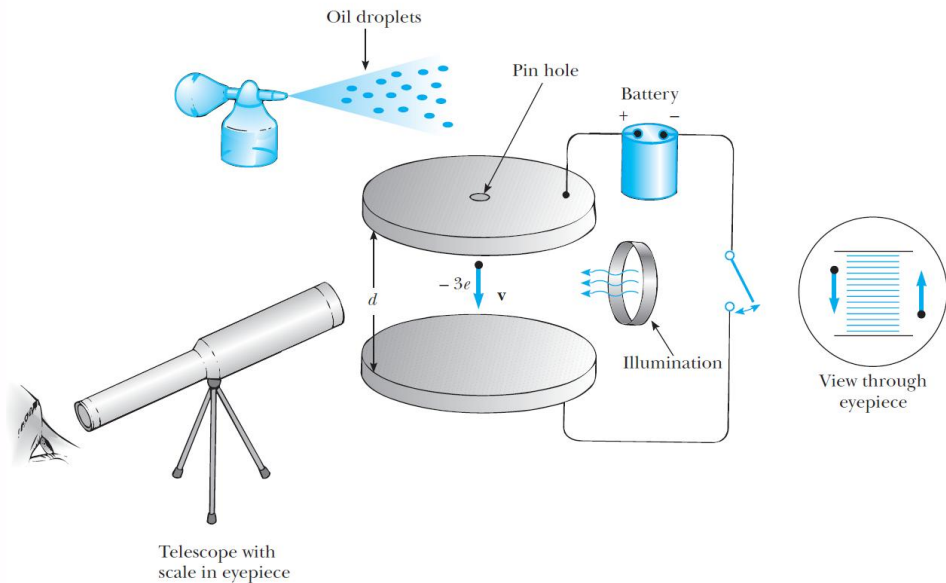
따라서 토슨은 **음극선(전자)**이 원자보다 더 작은 단위라는 것을 발견했고 원자는 나눌 수 있으며, 전자는 원자보다 더 근본적인 요소라고 생각하게 되었다.

밀리컨의 실험



전자의 비전하를 넘어서 전자의 전하량을 직접 측정하기 위해
밀리컨은 위와 같은 기름방울 실험을 고안하였다.

밀리컨의 실험

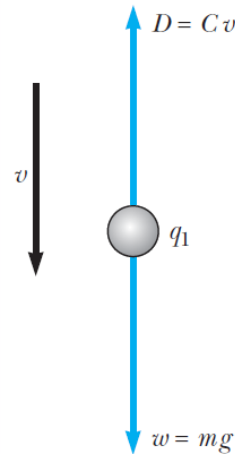


전하를 가진 기름 방울이 구멍을 통과하면, 중력에 의해 낙하한다.
 여기에 전기장을 걸어주면 역방향으로 서서히 올라가게 된다.
 이 때 우리는 기름방울의 움직임을 눈으로 확인할 수 있다.

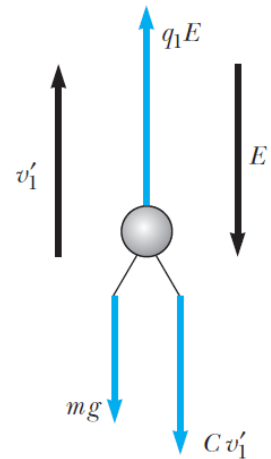
리얼리티의 실험

$$Cv - mg = 0 \quad (\text{field off})$$

$$q_1 E - mg - Cv'_1 = 0 \quad (\text{field on})$$



(a) Field off

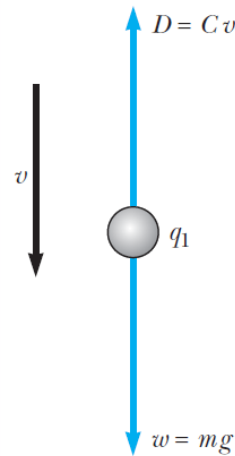


(b) Field on

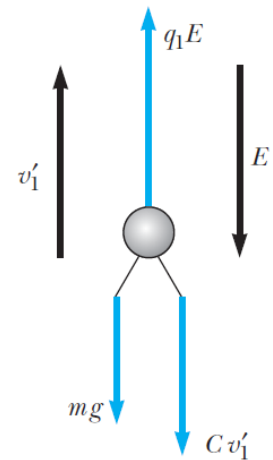
이 때 (외력장력이 없는 정상상태에서) 방정식은 위와 같이 적을 수 있다.
여기에서 우리는 기름방울이 속도에 비례하는 마찰력을 받는다고 가정한다.

리리건의 실험

$$q_1 = \frac{mg}{E} \left(\frac{v + v'_1}{v} \right)$$



(a) Field off



(b) Field on

이 식을 정리하면 다음과 같다.

리리건의 실험

$$q_1 = \frac{mg}{E} \left(\frac{v + v'_1}{v} \right)$$

$$q_2 = \frac{mg}{E} \left(\frac{v + v'_2}{v} \right)$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{v + v'_1}{v + v'_2}$$

여기에 만일 이 기름 방울의 속력이 **불연속적으로** 변한다면 다음과 같은 관계를 만족할 것이다. 이것은 **전하의 양자화**에 대한 강력한 근거가 된다.

리리건의 실험

$$q_1 = \frac{mg}{E} \left(\frac{v + v'_1}{v} \right)$$

$$Cv - mg = 0$$

$$Cv = 6\pi a\eta v$$

스토크스의 법칙

$$m = \rho \cdot \text{volume} = \rho \frac{4}{3} \pi a^3$$

전하량을 결정하기 위해서는 기름방울의 질량을 알아야 한다.

이것을 위해 공기의 점성에 대한 위의 관계들을 사용한다.

리리건의 실험

$$q_1 = \frac{mg}{E} \left(\frac{v + v'_1}{v} \right)$$

$$Cv - mg = 0$$

$$Cv = 6\pi a\eta v$$

스토크스의 법칙

$$m = \rho \cdot \text{volume} = \rho \frac{4}{3} \pi a^3$$

전하량의 값을 좀 더 정확히 결정하기 위해서는

공기의 점성에 대한 좀 더 자세한 보정이 이루어져야 한다.

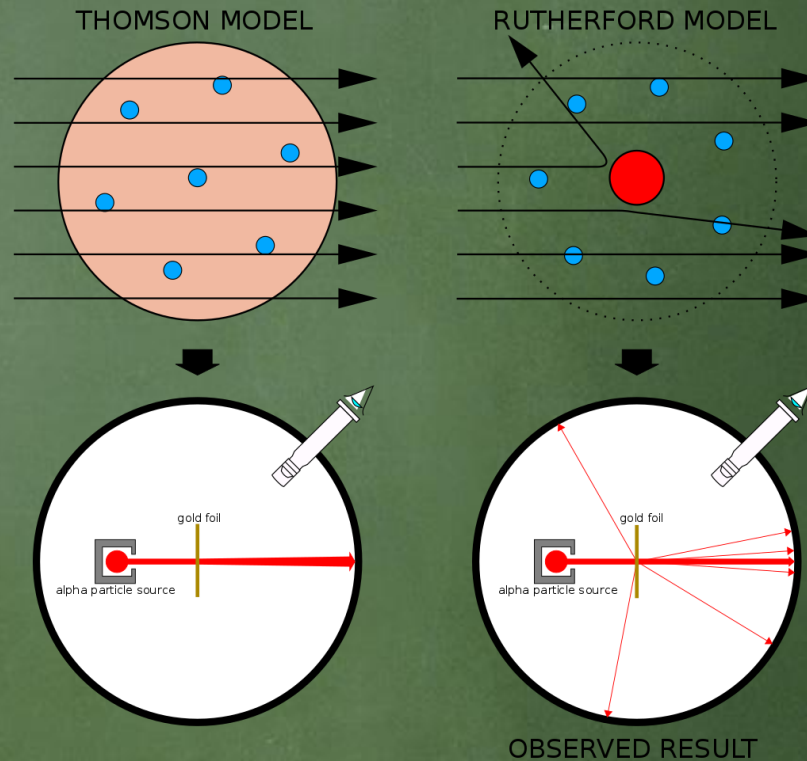
전자의 전하량



$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$$

현재 알려진 전자의 전하량은 다음과 같다.

러더퍼드의 산란실험



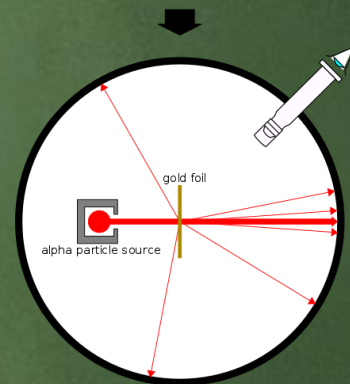
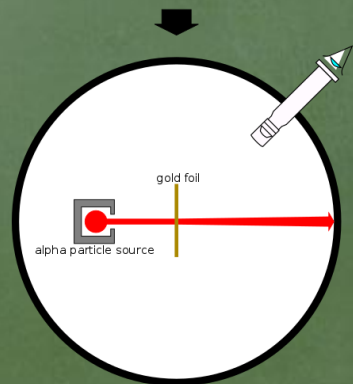
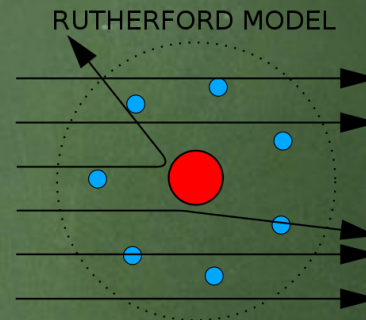
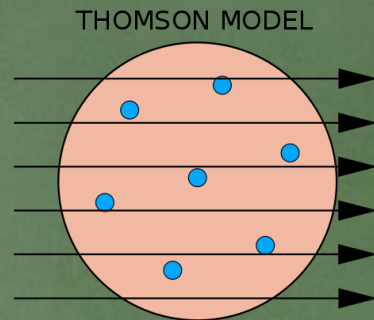
러더퍼드는 1911년 원자의 내부를 보기 위해 α 입자(헬륨 원자핵)를 금박에 산란시키는 실험을 수행했다.

라더퍼드의 산란 실험

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{(\sin \theta/2)^4}$$

미분 산란 단면적 differential scattering cross section

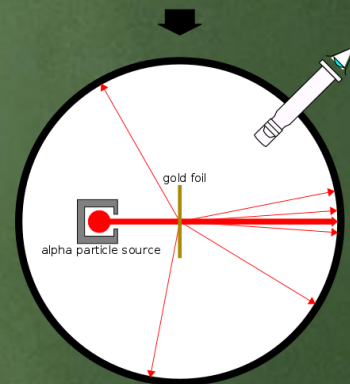
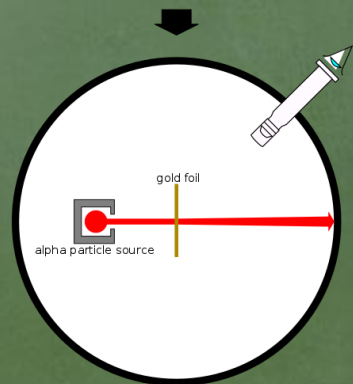
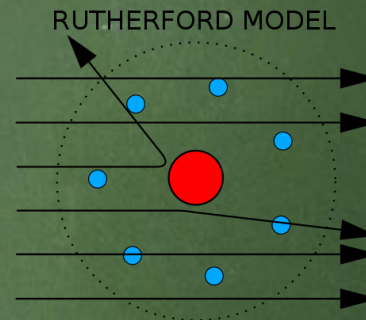
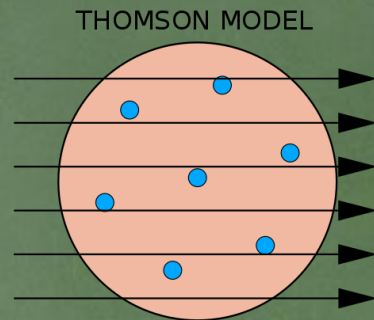
러더퍼드의 산란실험



OBSERVED RESULT

러더퍼드의 중요한 발견은
산란되는 입자가 작지만 존재한다는 것이었다.

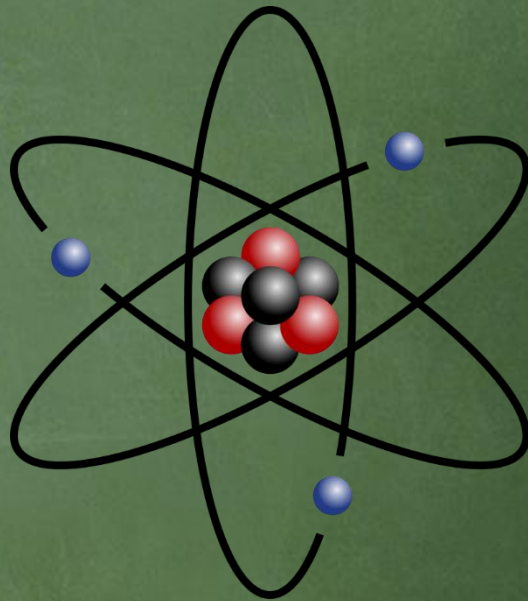
러더퍼드의 산란실험



OBSERVED RESULT

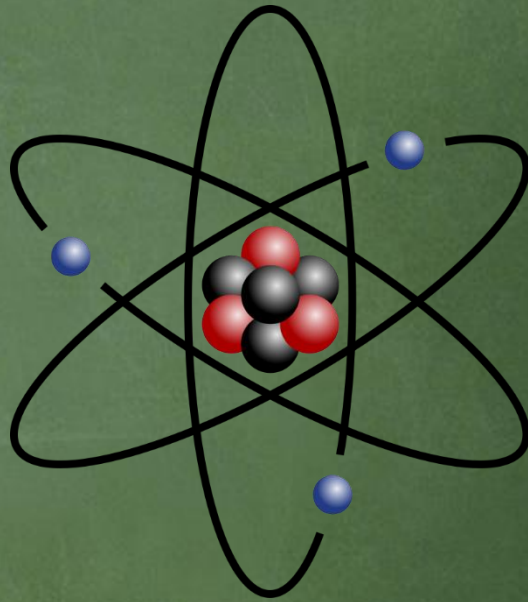
“이 현상은 화장지 조각에 15인치 포탄을 발사했는데
반사되어 돌아온 것만큼 놀라운 일입니다.”

러더퍼드의 산란실험



러더퍼드의 실험은 원자의 대부분은 질량은
양전하를 가지는 핵에 집중되어 있으며
이 핵의 크기는 원자의 크기에 비해 아주 작다는 것을 보여주었다.

러더퍼드의 산란실험



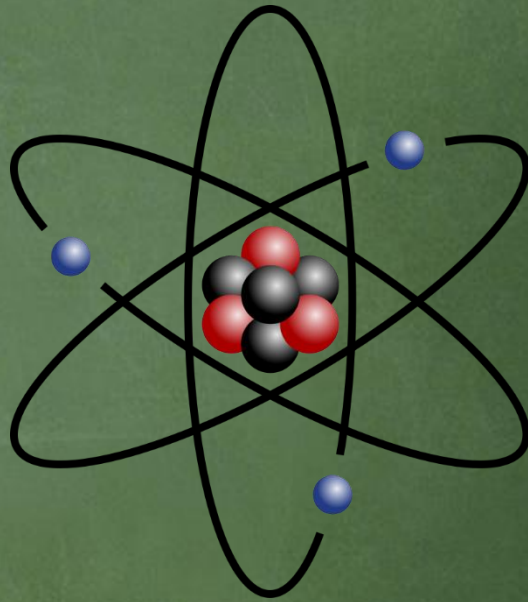
러더퍼드의 원자 모형: 원자핵과 궤도를 도는 전자

리터퍼드의 산란실험



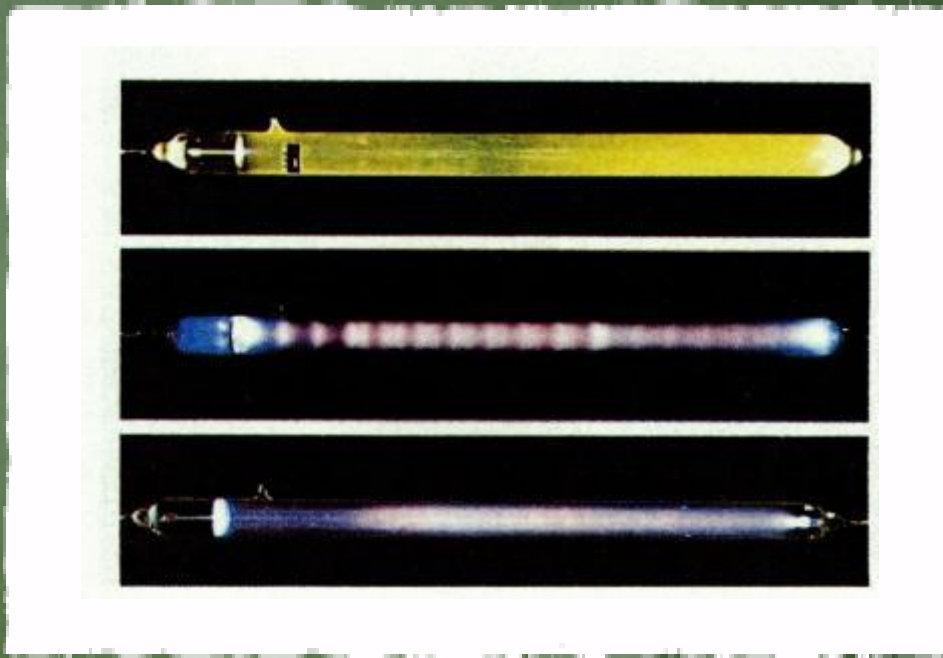
그런데 가속하는 전자는 반드시 에너지를 방출하게 되어
전자의 궤도가 안정적일 수 없게 된다.

러더퍼드의 산란실험



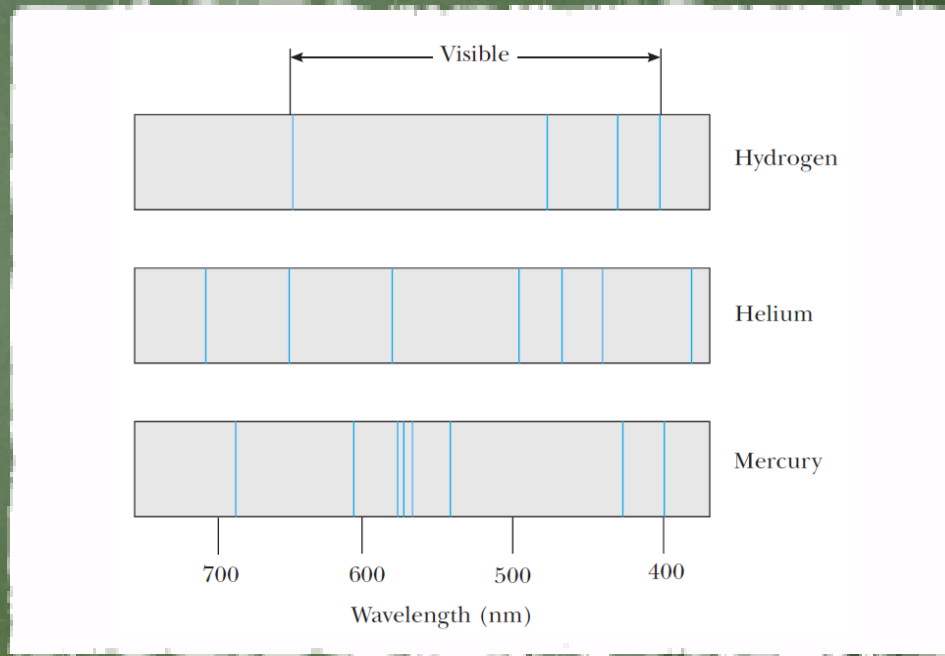
따라서 이 모델에 대한 보완적 설명이 필요하다.

분광학의 발달



기체 방전은 기체에 전압을 강하게 걸어서 전류가 흐르게 만드는 실험인데,
이것은 기체 원자에서 전자를 떼어내는 것과 같다.

분광학의 발달



흑체복사가 연속 스펙트럼을 나타내는 데 비해
낮은 압력에서 기체 방전으로부터 나오는 빛을 분광기로 분석해보면
불연속적인 스펙트럼이 나온다는 것이 알려지게 있다.

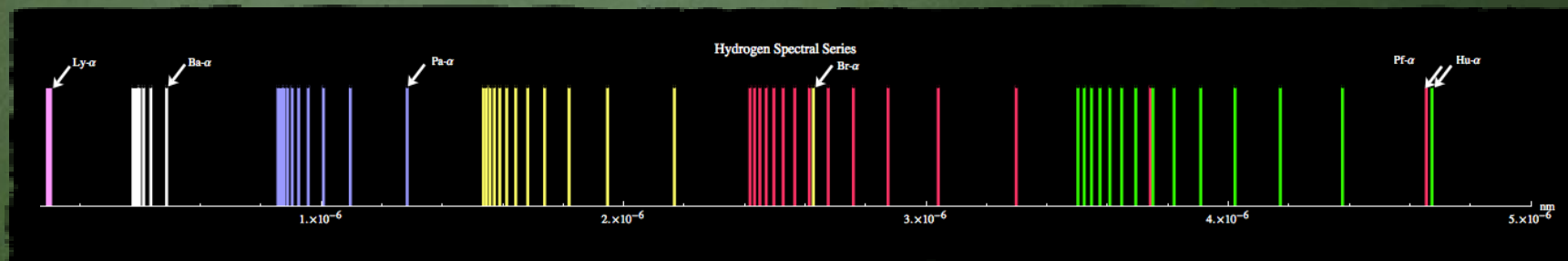
분광학의 발달

Lyman Series (uv)	$n_f = 1$	$n_i = 2, 3, 4, \dots$
Balmer Series (vis-uv)	$n_f = 2$	$n_i = 3, 4, 5, \dots$
Paschen Series (IR)	$n_f = 3$	$n_i = 4, 5, 6, \dots$
Brackett Series (IR)	$n_f = 4$	$n_i = 5, 6, 7, \dots$
Pfund Series (IR)	$n_f = 5$	$n_i = 6, 7, 8, \dots$

수 많은 자료가 분석이 되었었는데, 놀랍게도 이 자료들은
몇 개의 정수와 공통의 상수로 기술된다는 것을 알 수 있었다.

리드베리 공식

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

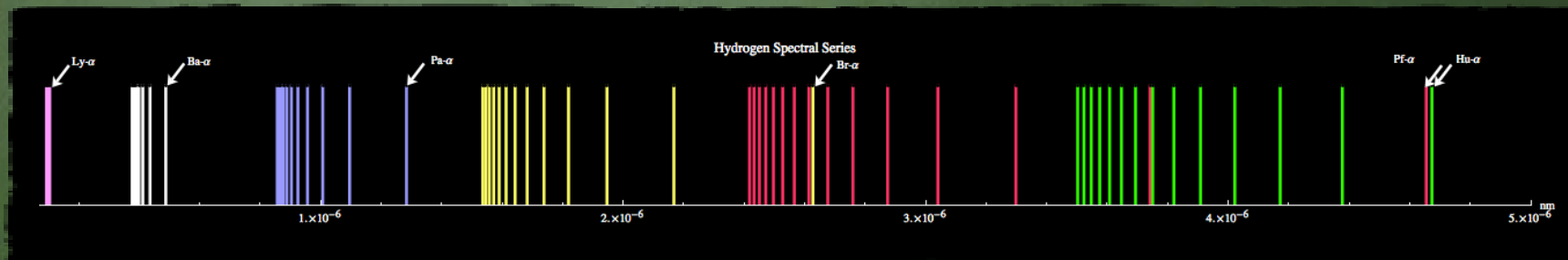


리드베리는 1888년, 원자에서 방출되는 빛의 파장이
다음과 같이 표현된다는 것을 확인했다.

리드베리 공식

manpa eller diffusa utv
under formen $\frac{R_0}{(m_1 + c_1)^2}$ fin

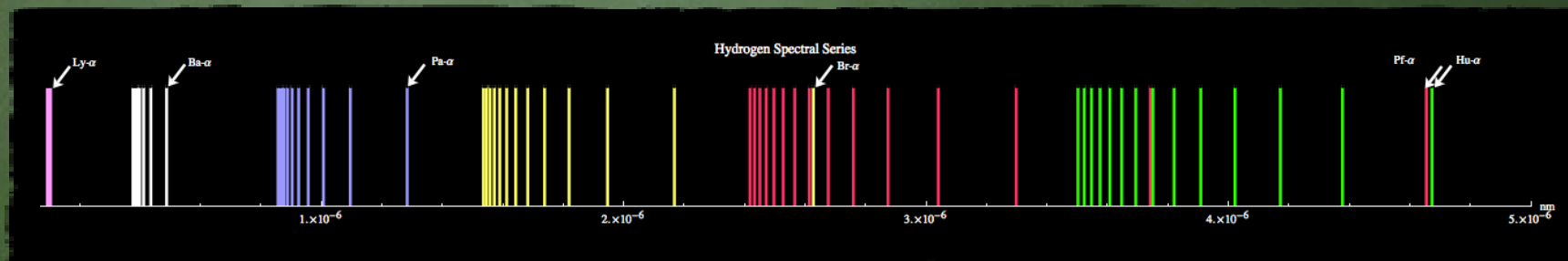
$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{(m_1 + c_1)^2} - \frac{1}{(m_2 + c_2)^2}$$



리드베리는 1888년, 원자에서 방출되는 빛의 파장이
다음과 같이 표현된다는 것을 확인했다.

리드베리 공식

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$



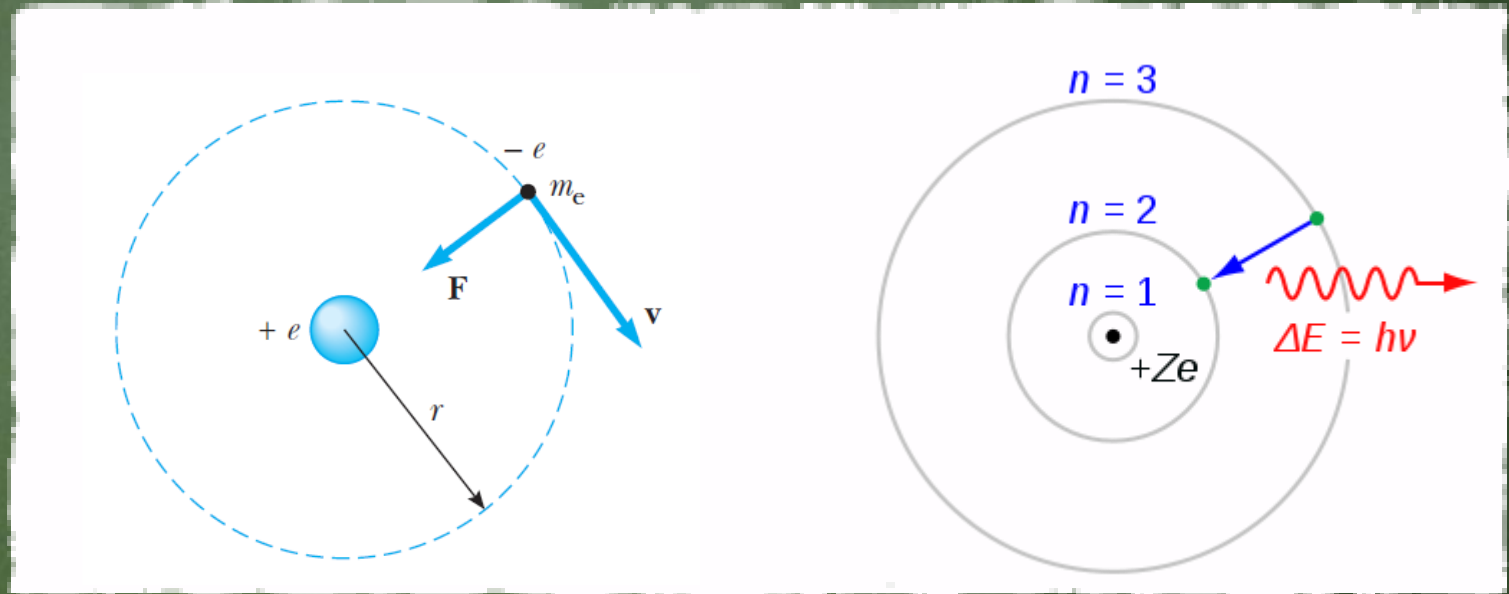
이 결과 역시 원자의 내부에는 우리가 아직 모르는
불연속적 구조가 존재한다는 것을 의미한다.



닐스 보어

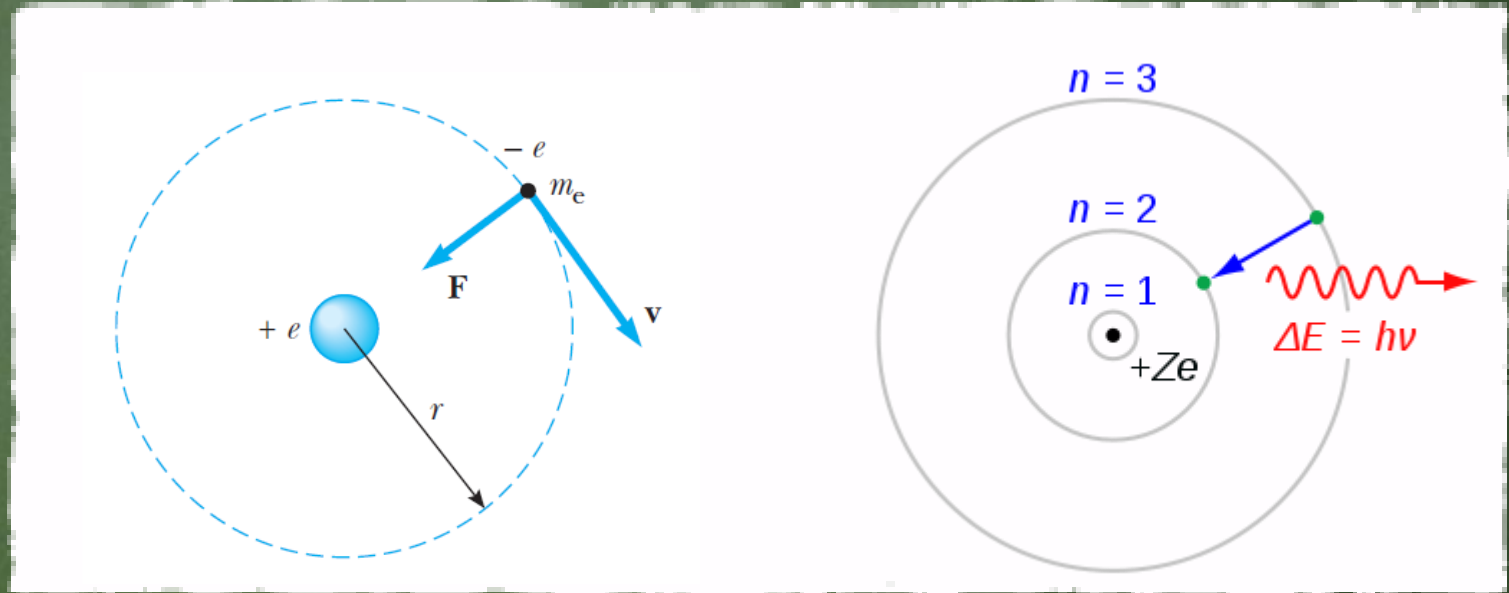


보어 모델



앞에서와 같은 현상을 설명하기 위해, 1913년 무렵
보어는 특별한 가정을 하였다.

보어 모델



전자는 쿨롱 힘에 의해 원궤도를 따라 도는 등속 원운동을 하지만,
이 때 허용되는 궤도는 다음과 같은 양자화 조건을 만족해야 한다고 주장했다.

보어 모델

$$L = mvr = n\hbar$$

보어의 양자화 가설: 각운동량의 양자화

보어 모델

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{Zke^2}{r^2} \quad v = \sqrt{\frac{Zke^2}{mr}}$$

전자의 속도

보어 모델

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{mZke^2}$$

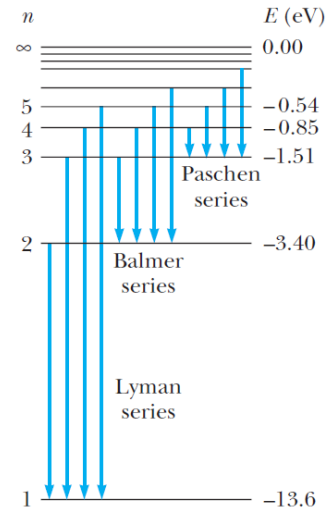
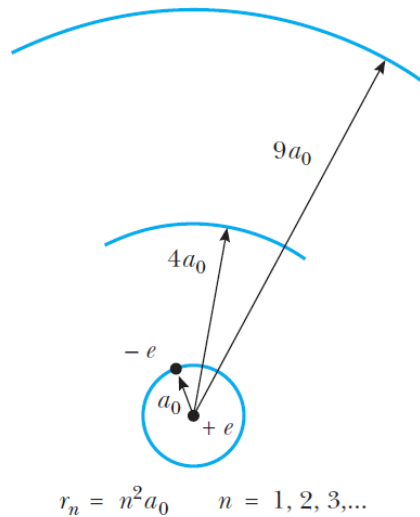
양자화된 궤도 반지름

보어 모델

$$E_n = -\frac{1}{2}mv_n^2 = -\frac{Zke^2}{2r_n}$$

양자화된 전자의 에너지

보어 모델



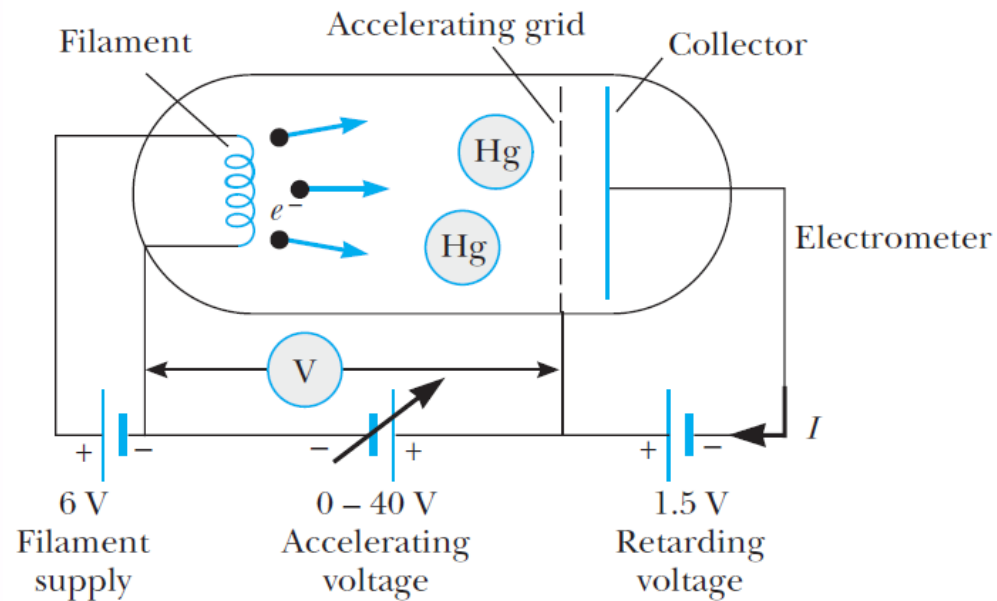
이제 보어는 허용된 궤도 사이를 전자가 이동할 때,
각 궤도의 에너지 차이를 광자로 흡수 또는 방출한다고 주장하였다.

보어 모델

$$E_n = - \frac{mZ^2 k^2 e^4}{2\hbar^2 n^2} = -R_E \frac{Z^2}{n^2}$$

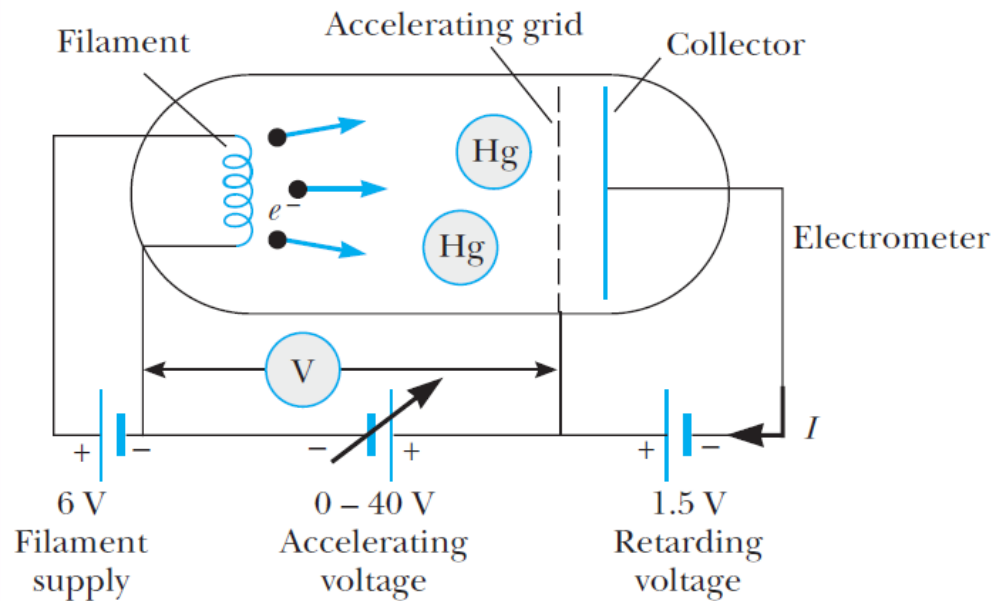
여기에서 리드베리 공식과 정확한 상수를
다시 유도할 수 있다. ($R = R_E/hc$)

프랑크-헤르츠 실험



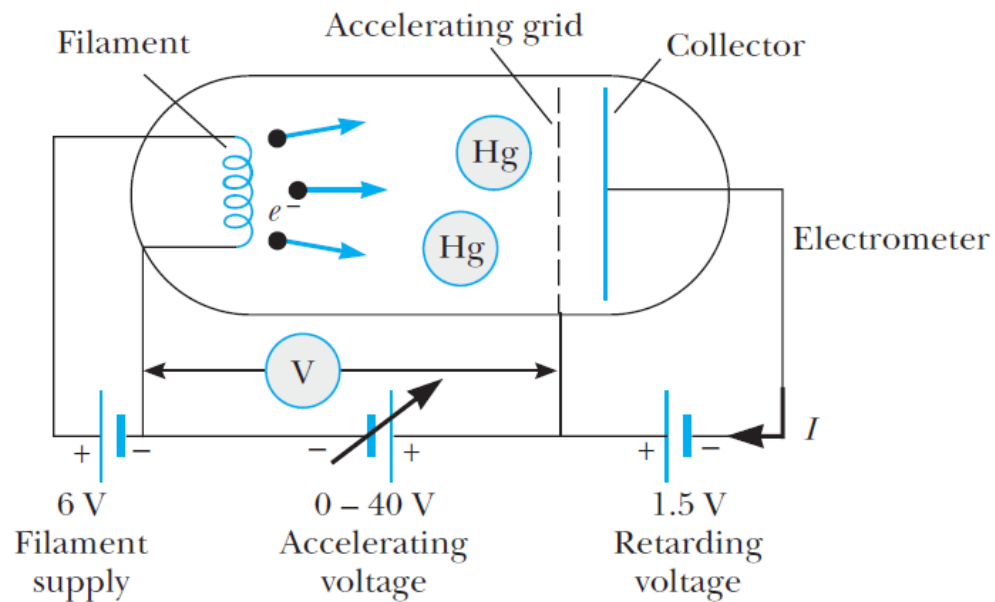
프랑크와 헤르츠는 에너지 준위의 존재를 입증하기 위한
위와 같은 실험을 수행하였다.

프랑크-헤르츠 실험



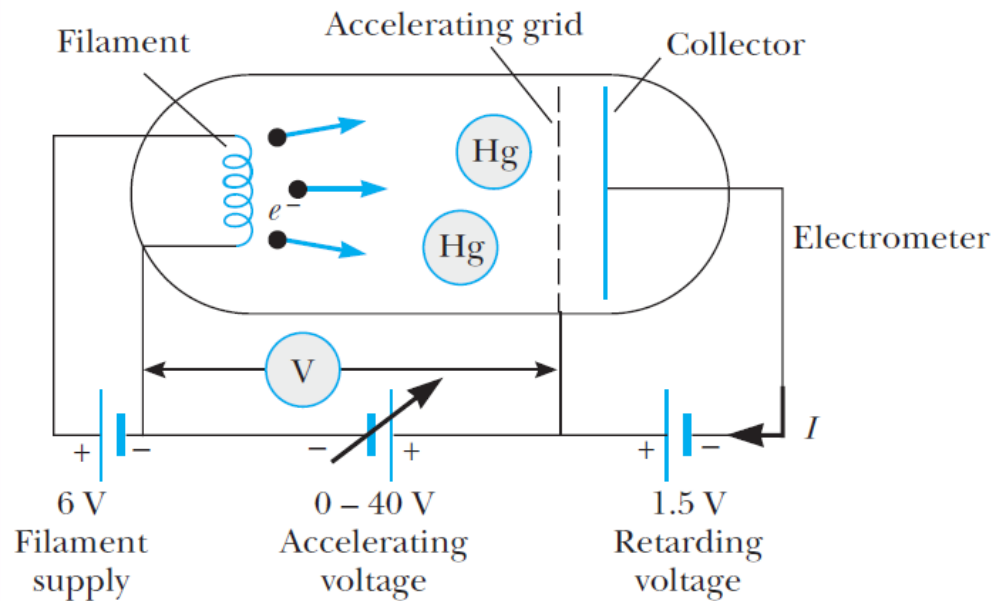
필라멘트에서 방출된 전자는 높은 온도 속에 있는 수은과 충돌하며,
전자는 수은에 에너지를 전달한다.

프랑크-헤르츠 실험



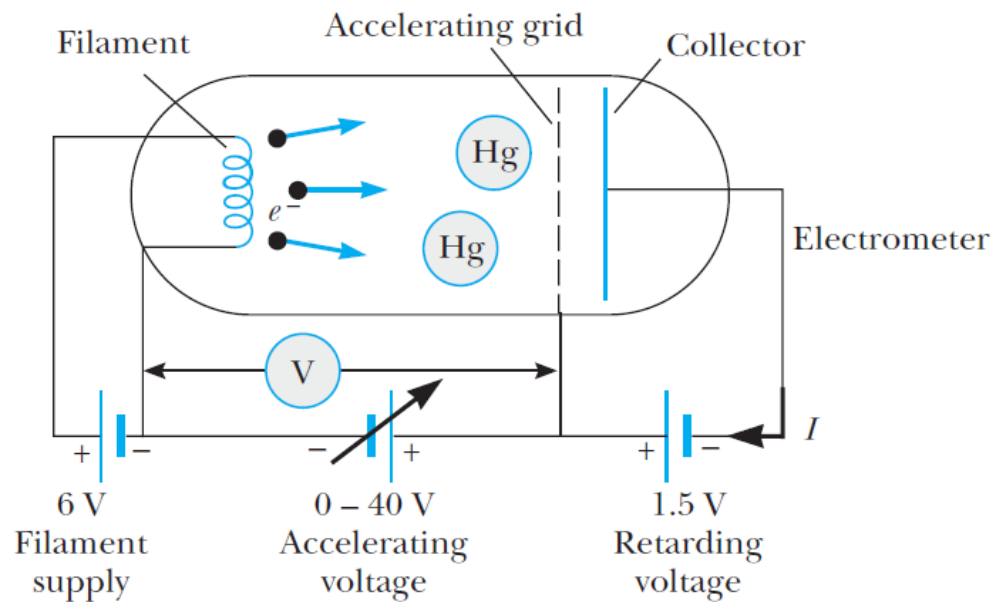
특정 전압에서 전자가 수은에 에너지를 다 전달하면 (비탄성 충돌)
전류계에서는 상대적으로 작은 전류가 흐르게 된다.

프랑크-헤르츠 실험



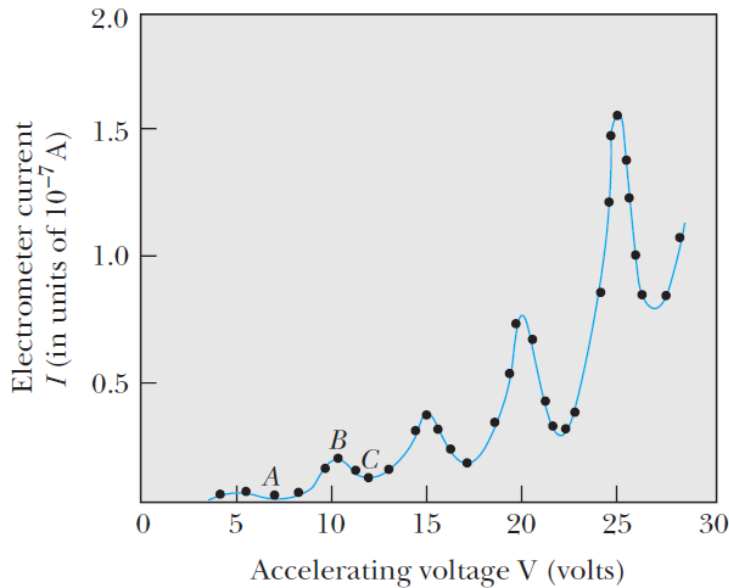
이 실험에서 전압을 더 높이면 다시 상대적으로 많은 전류가 흐르게 된다.

프랑크-헤르츠 실험



따라서 외부 전압을 높여갈 때, 수은이 에너지를 흡수할 수 있는 시점마다 전류가 감소하는 패턴을 보이게 될 것이다.

프랑크-헤르츠 실험



왼쪽 그림과 같은 실험 결과는 흡수할 수 있는 에너지가 불연속적임을 따라서 에너지 준위가 불연속적이라는 것을 보여준다.

원자의 구조에 대한 이러한 연구는
자연스럽게 **물질론**에 대한 개념을 도입하게 하였다.

따라서 물질의 **입자성**에 대한 연구로부터
물질의 **파동성**에 대한 발견으로 나아가게 된다.