ฟิสิกส์อะตอม
(Atomic Physics)

ครูพิพัฒน์ เชื้อเมืองพาน

PHYSICS PCC

ฟิสิกส์อะตอม
(Atomic Physics)

ทฤษฎีอะตอม (Atomic Theory)

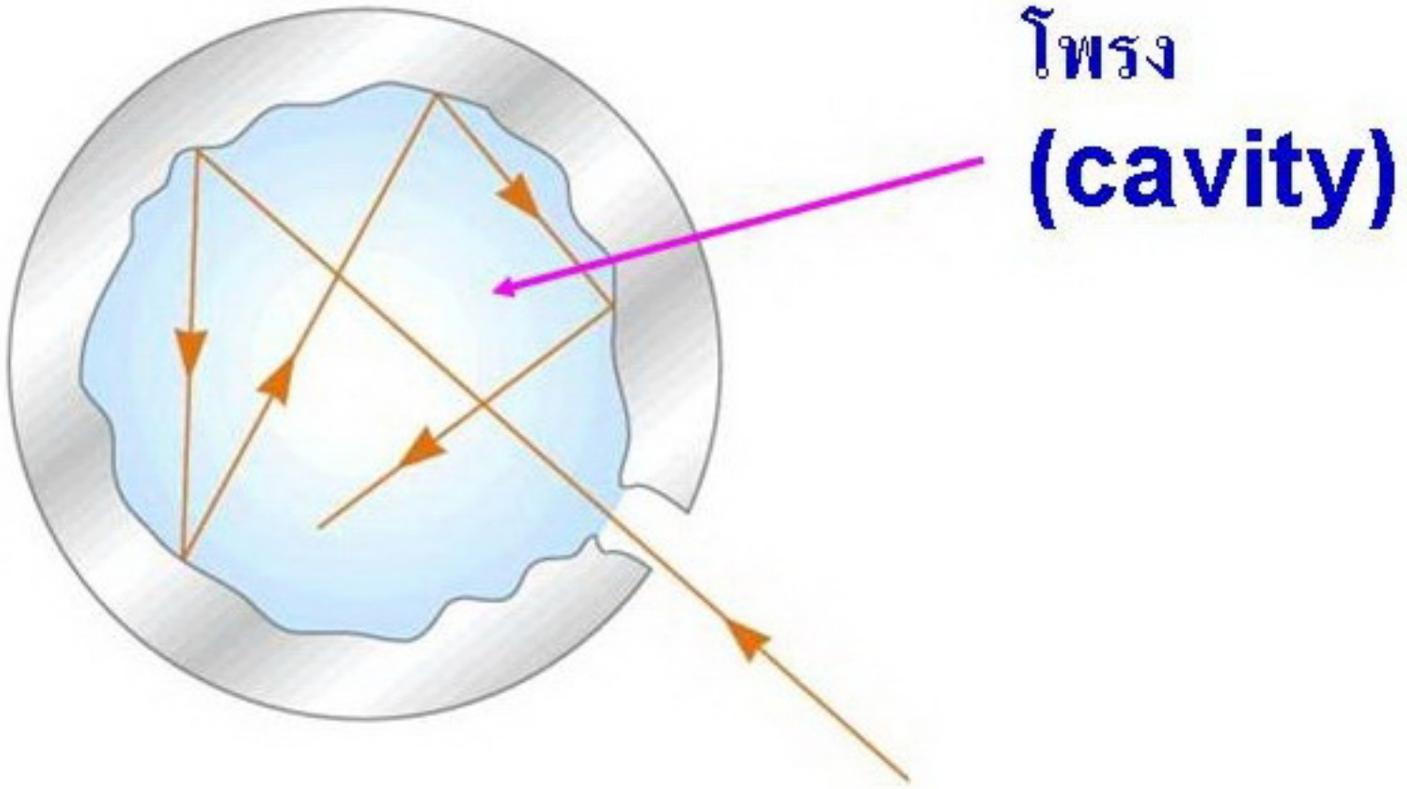
- ผู้เสนอคนแรก คือ **ดีโมคริตุส (Democritus)** กล่าวว่า สสารทั้งหลายประกอบด้วยหน่วยที่เล็กที่สุด เรียกว่า **อะตอม (Atom)** แปลว่า ไม่สามารถแบ่งแยกได้

- **สเปกตรัมต่อเนื่อง (Continuous Spectrum)** คือ แถบสีต่าง ๆ ของแสงที่เมื่อใช้เกรตติงหรือปริซึมแยกแสงสีต่าง ๆ ออกมาให้เห็น เช่น แสงจากไส้หลอดไฟฟ้าที่ร้อนจัด โลหะร้อนหรือของแข็งที่ร้อนจัด
- **สเปกตรัมเส้นสว่าง (Line Spectrum)** คือ เส้นสีต่าง ๆ ของแสงที่เมื่อใช้เกรตติงหรือปริซึมแยกเส้นแสงสีต่าง ๆ ออกมาให้เห็น เช่น แสงจากหลอดบรรจุแก๊สร้อนชนิดต่าง ๆ
- **สเปกตรัมเส้นมืด (Dark Spectrum)** คือ เส้นสีดำที่ปรากฏบนแถบสีของสเปกตรัมต่อเนื่อง เมื่อฉายแสงผ่านสารชนิดต่าง ๆ แล้วส่องดูด้วยเกรตติงหรือปริซึม

- ผู้คัดค้านทฤษฎีอะตอมของดีโมคริตุส คือ **อริสโตเติล (Aristotle)** เสนอว่า สสารทุกอย่างแบ่งได้ไม่มีที่สิ้นสุด ประกอบด้วยธาตุแท้ 4 อย่าง คือ **ดิน น้ำ ลม ไฟ** และไม่มีที่ว่าง

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

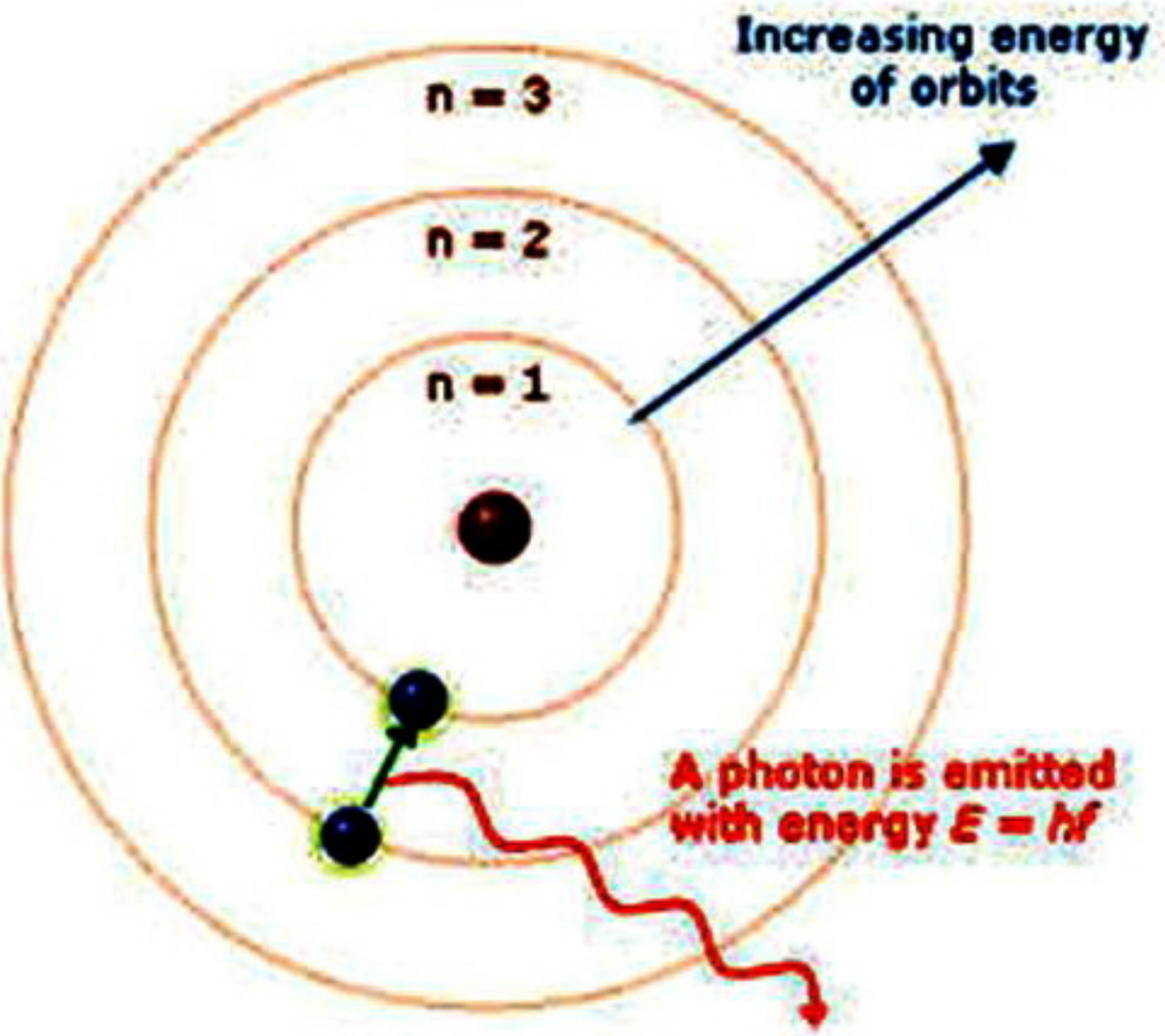
- วัตถุดำ **(Black body)** คือ วัตถุที่มีการแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์ (เป็นวัตถุในอุดมคติ)



จอห์น ดาลตัน (John Dalton)

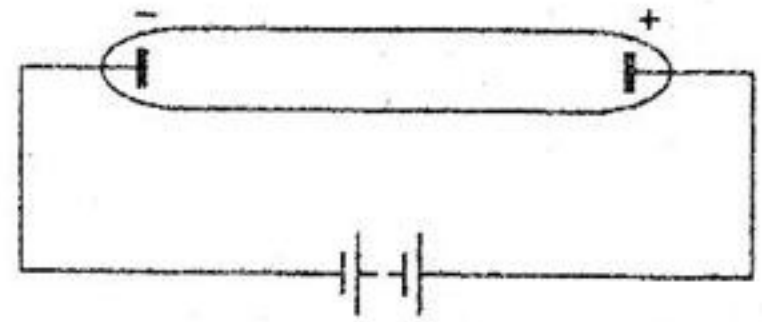
สนับสนุนแนวความคิดของ ดีโมคริตุส

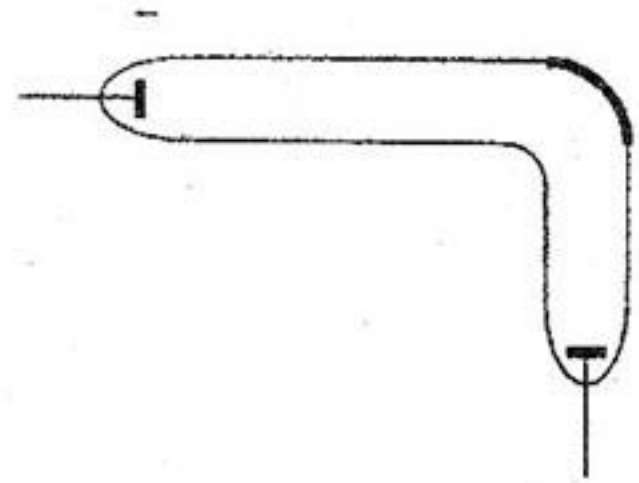
แบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนตามทฤษฎีอะตอมของโบร์

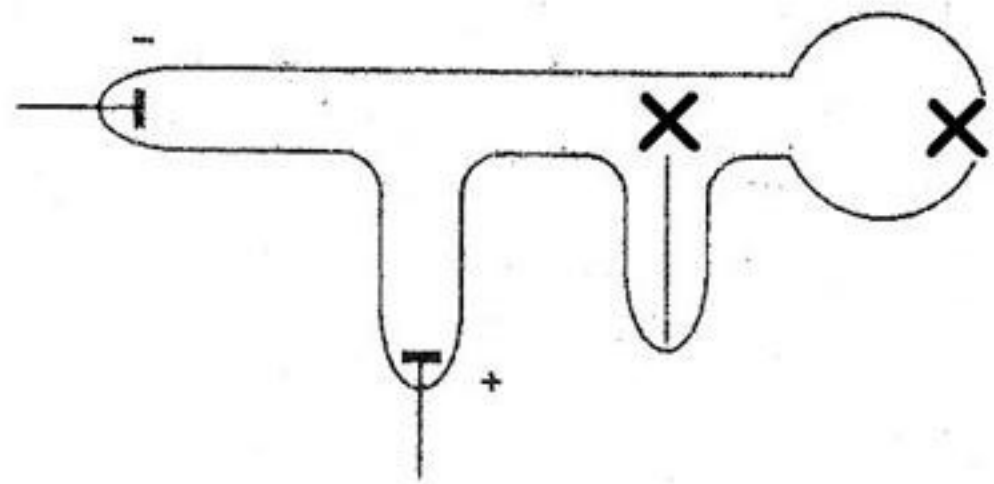


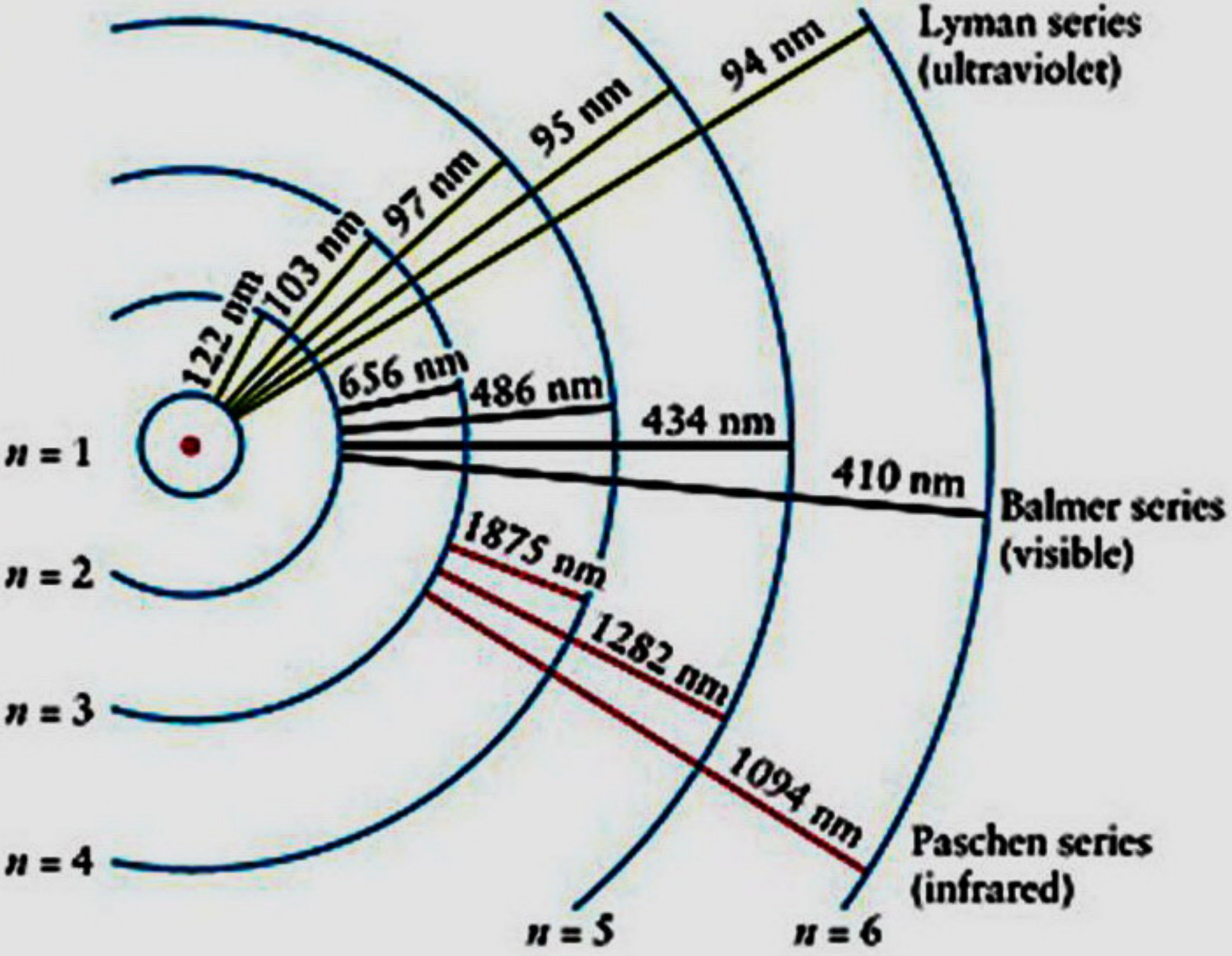
การค้นพบอิเล็กตรอน

- ไกสเลอร์ ประดิษฐ์ **เครื่องสูบอากาศ** (ทำหลอดสุญญากาศได้)
- ครูกส์ **(Sir William Crookes)** ค้นพบ **รังสีแคโทด (Cathode Ray)** สามารถเบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กได้ด้วย

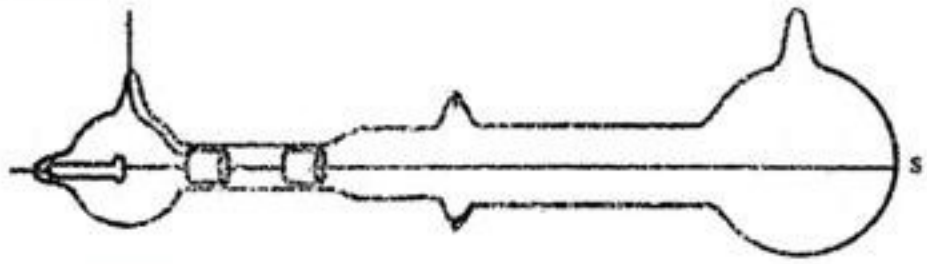


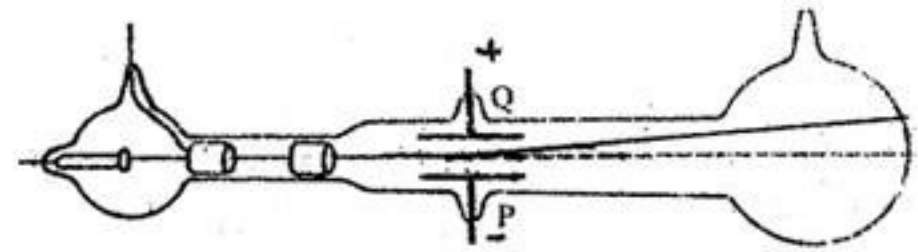




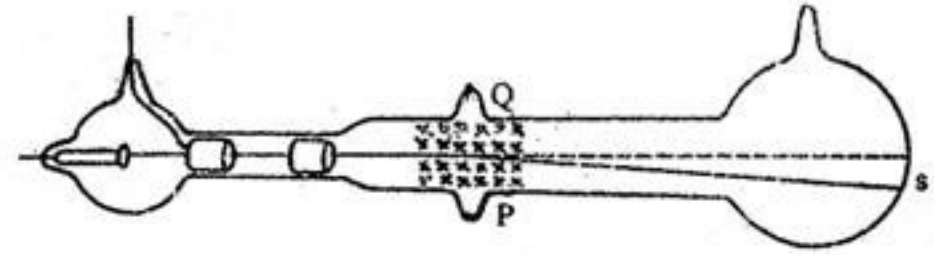

Lyman series
(ultraviolet)
94 nm
95 nm
97 nm
103 nm
122 nm
656 nm
486 nm
434 nm
410 nm
Balmer series
(visible)
1875 nm
1282 nm
1094 nm
Paschen series
(infrared)
n = 1
n = 2
n = 3
n = 4
n = 5
n = 6

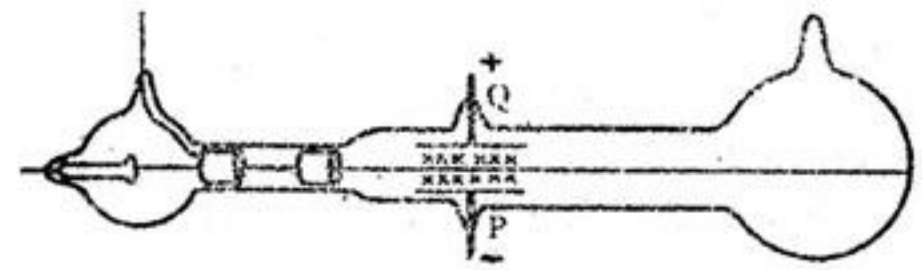
การทดลองของทอมสัน

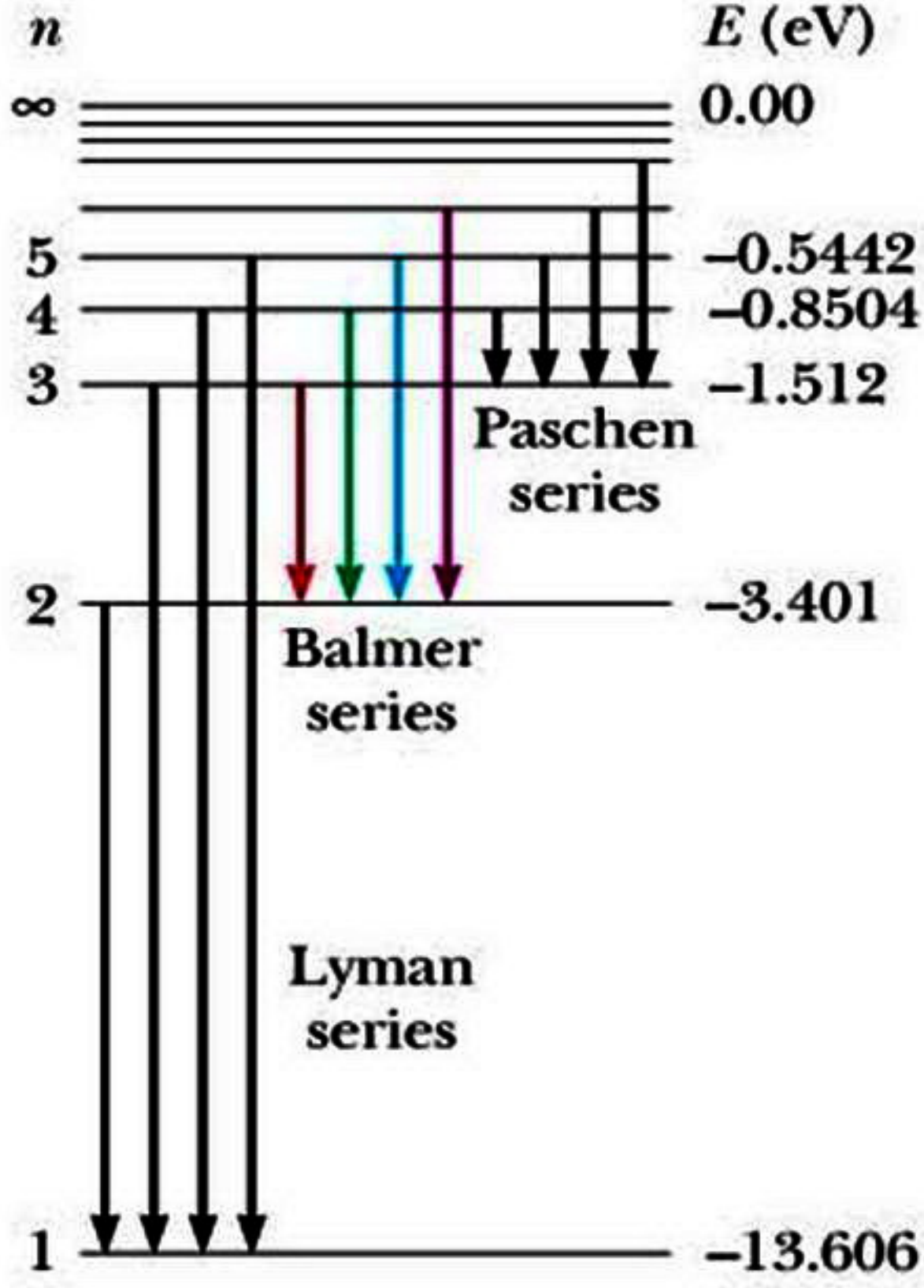




$$\frac{q}{m} = \frac{V}{B^2 R}$$

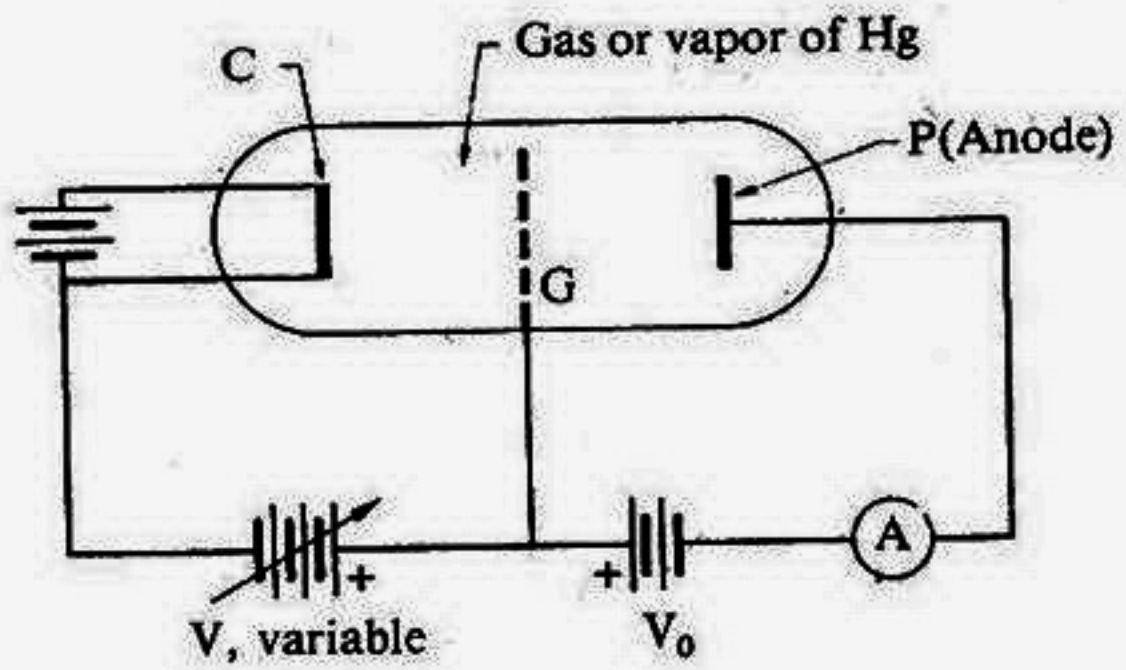


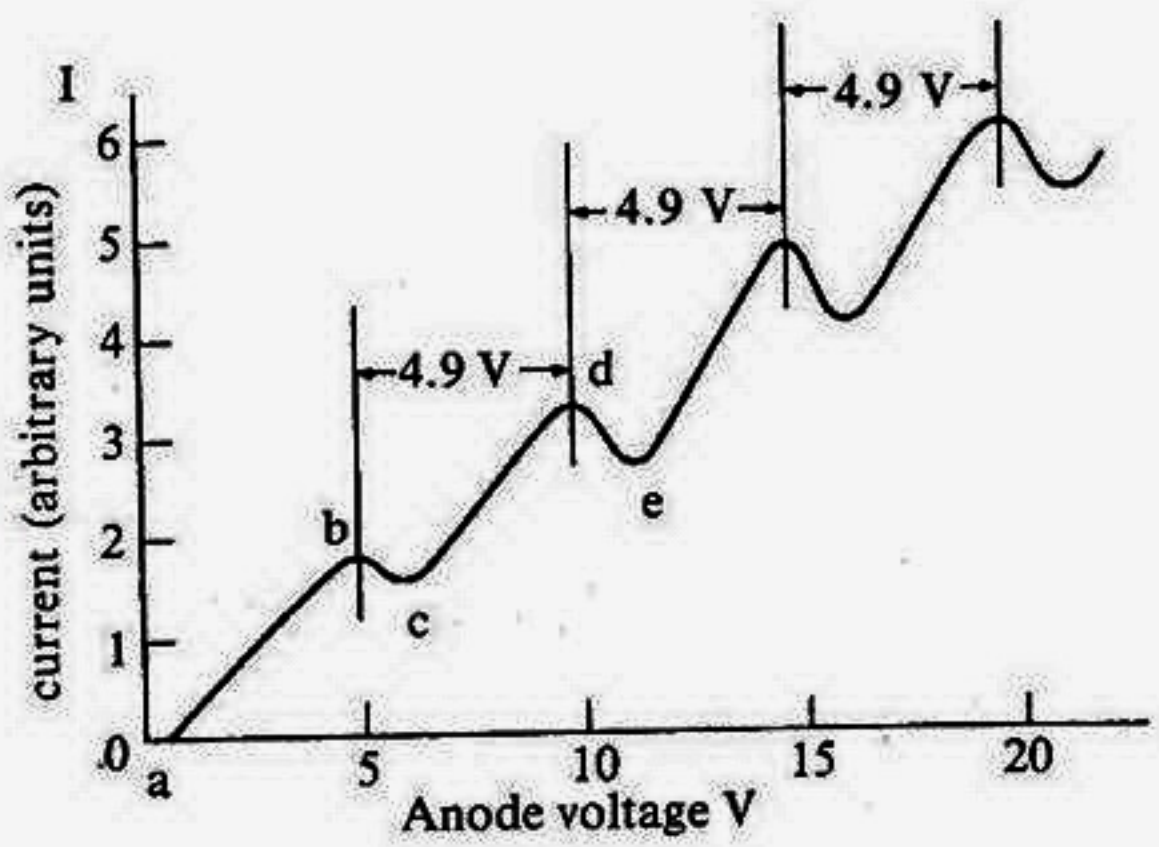



n
E (eV)
∞
0.00
5
–0.5442
4
–0.8504
3
–1.512
Paschen
series
2
–3.401
Balmer
series
Lyman
series
1
–13.606

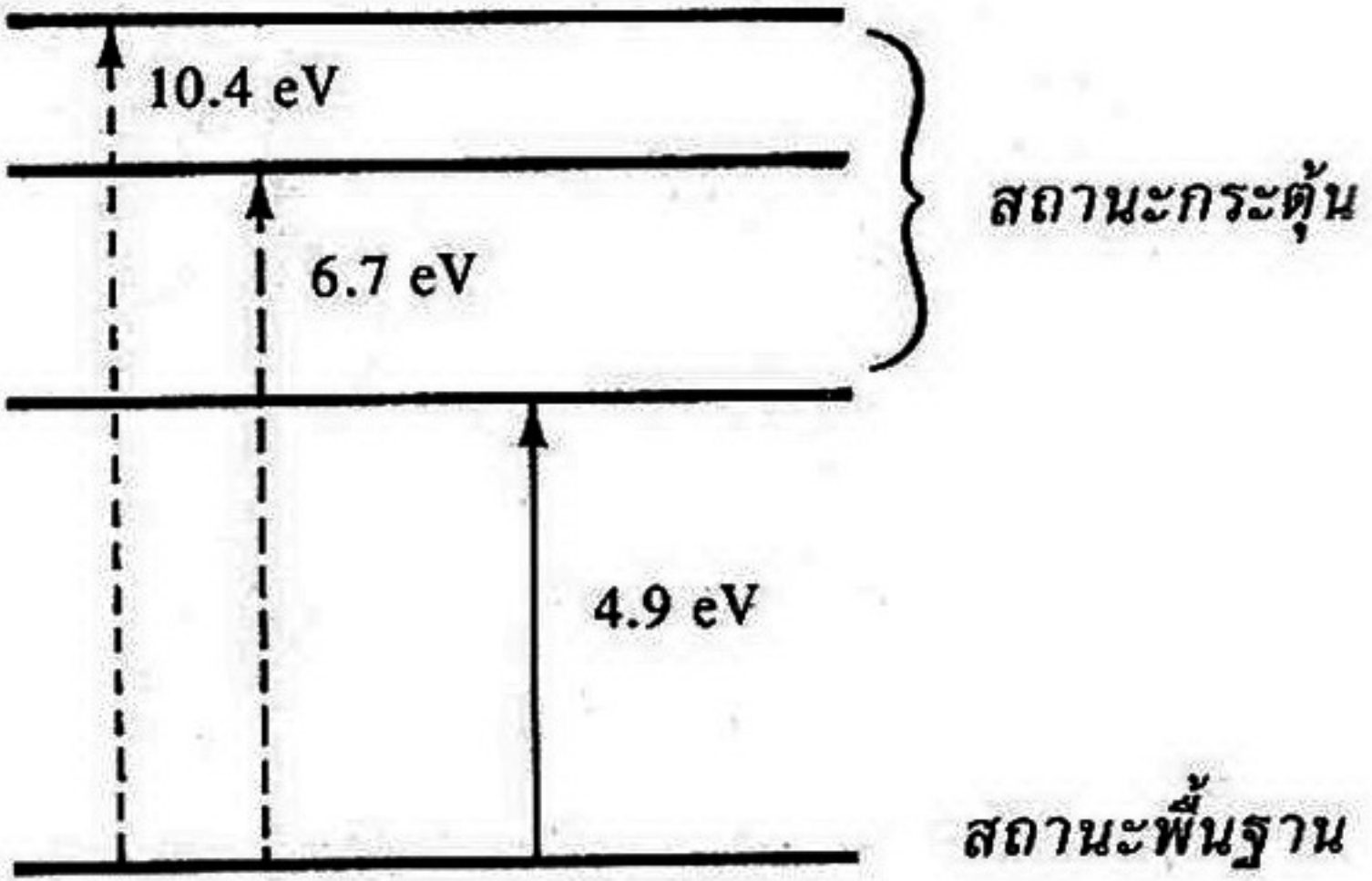
ทอมสัน (Sir Joseph John Thomson) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ทดลองพิสูจน์ว่า

- รังสีแคโทดเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ (เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าได้)
- ค่าประจุต่อมวลของรังสีแคโทด **(q/m)** มีค่าเท่ากับ 1.76×10^{11} C/kg
- ค่าประจุต่อมวลของไฮโดรเจน **(q/m)** มีค่าเท่ากับ 9.57×10^{7} C/kg


C
Gas or vapor of Hg
P(Anode)
G
A
+
+
V, variable
V_0


I
current (arbitrary units)
6
5
4
3
2
1
0
a
b
c
d
e
4.9 V
4.9 V
4.9 V
5
10
15
20
Anode voltage V

- มวลของไฮโดรเจนอิออนมากกว่ามวลของอนุภาครังสีแคโทด **1840** เท่า
- รังสีแคโทด ต่อมาเรียกว่า **อิเล็กตรอน (Electron)**

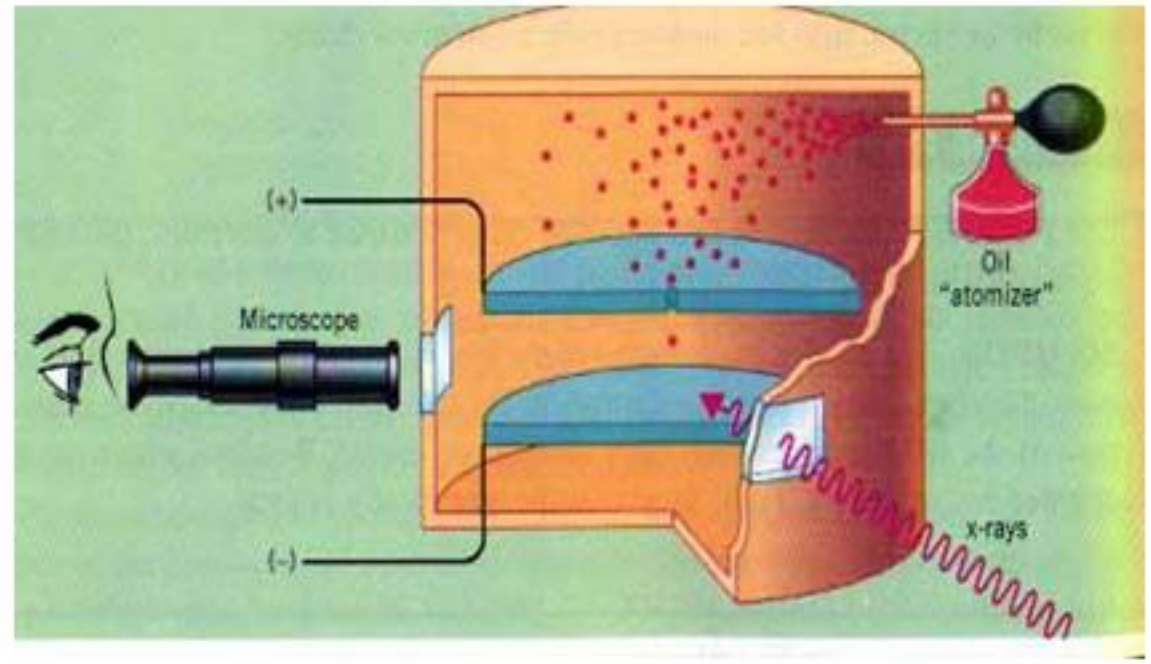


ระดับพลังงานของปรอท

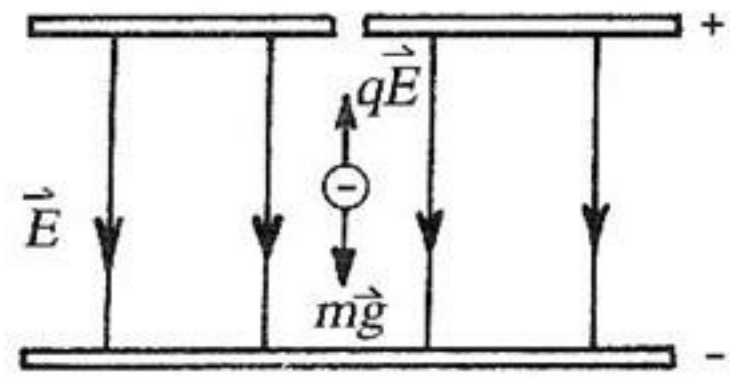
(Millikan's oil drop experiment)

- มิลลิแกน (Robert Andrews Millikan)
  นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน

- ทดลองหาค่าประจุของอิเล็กตรอนและคำนวณหาค่ามวลอิเล็กตรอน

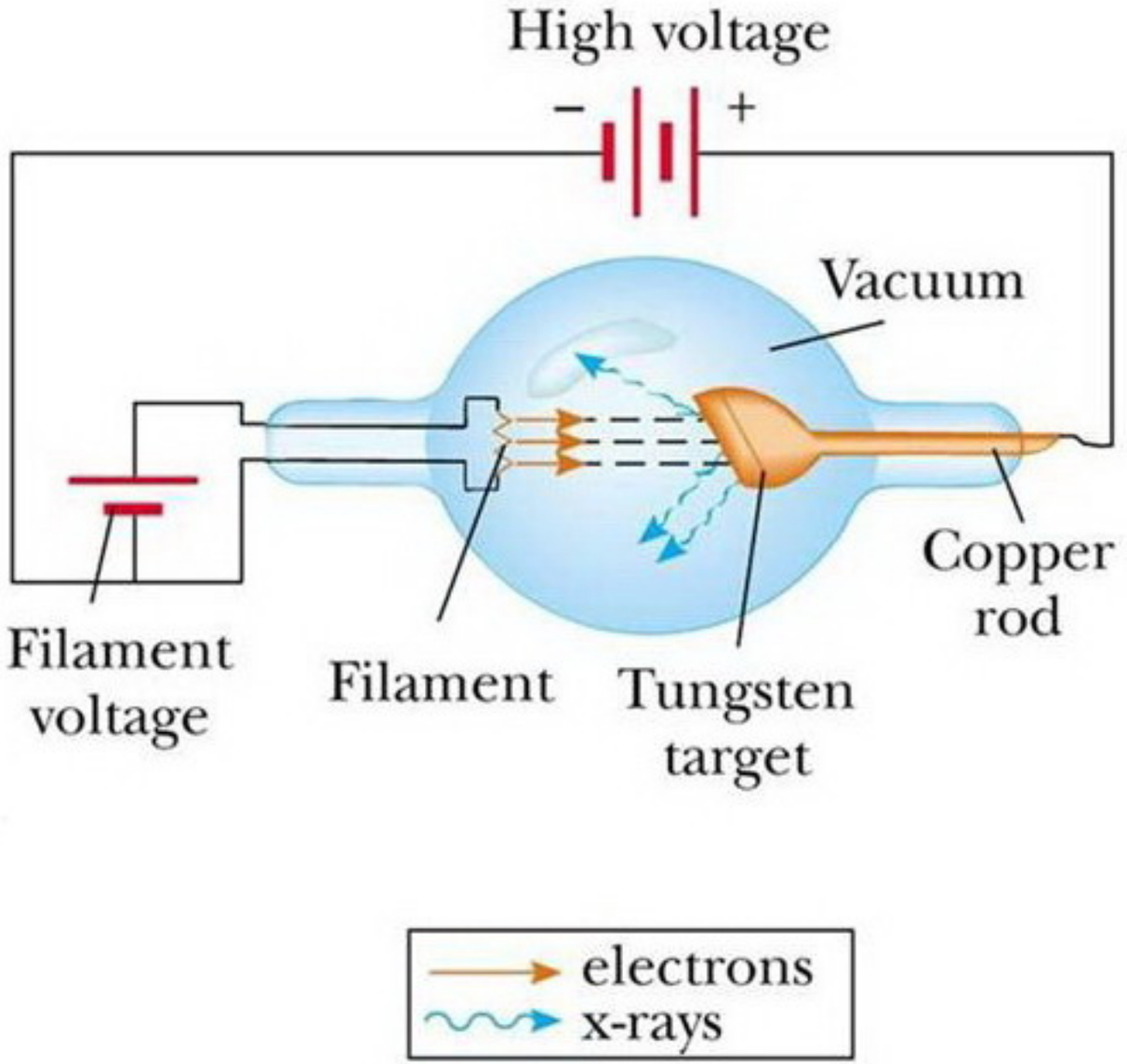


$$q = \frac{\pi \rho g d \bar{a}^3}{6V}$$

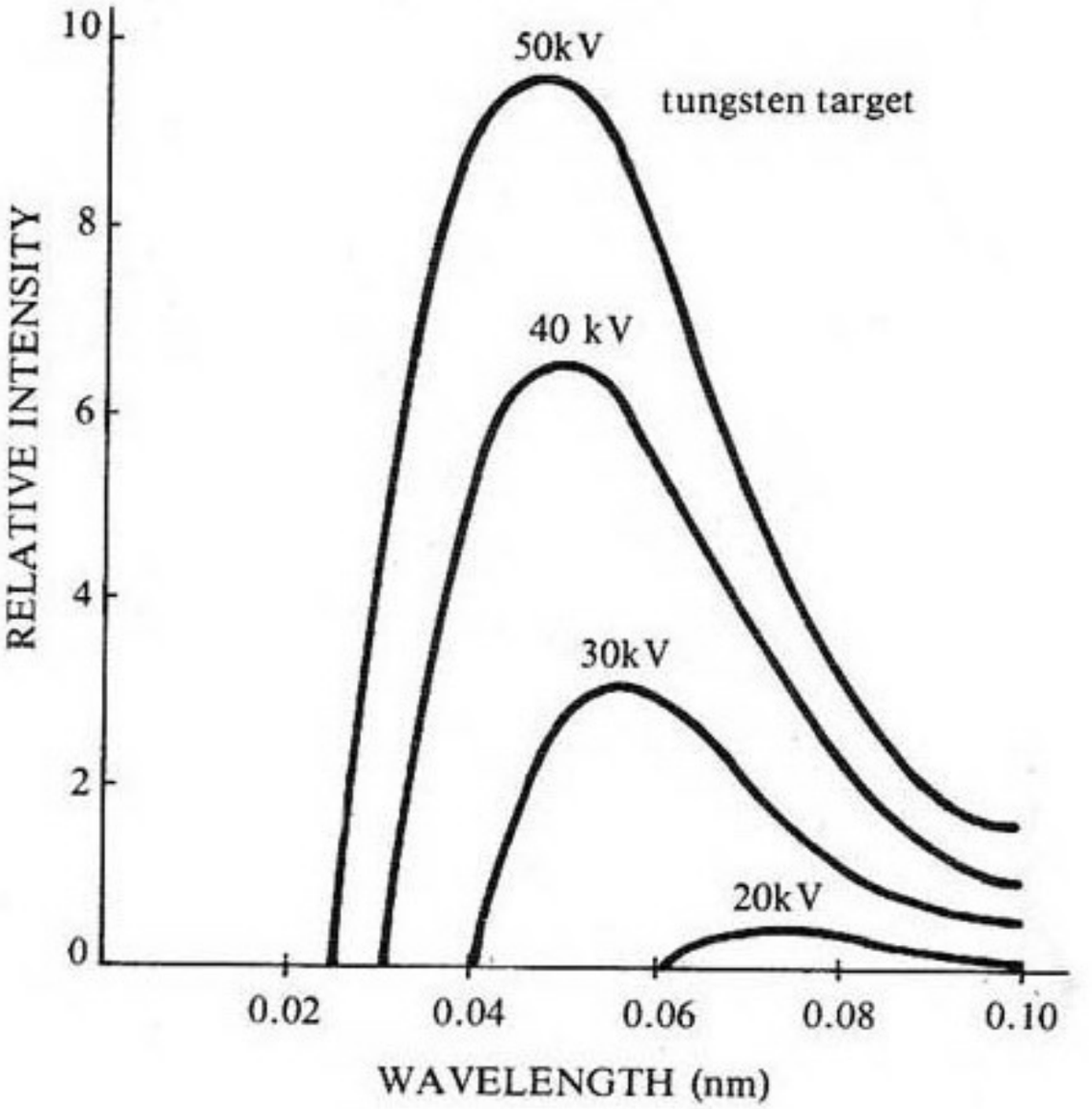


- **รังสีเอกซ์มี 2 ชนิด** คือ

1. รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-rays)



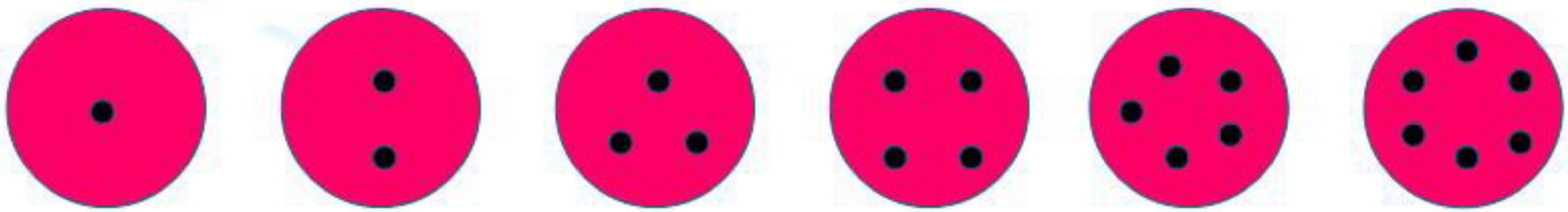
- ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน 1 ตัว มีค่าเท่ากับ -1.6×10^{-19} คูลอมบ์
- มวลของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 9.1×10^{-31} กิโลกรัม



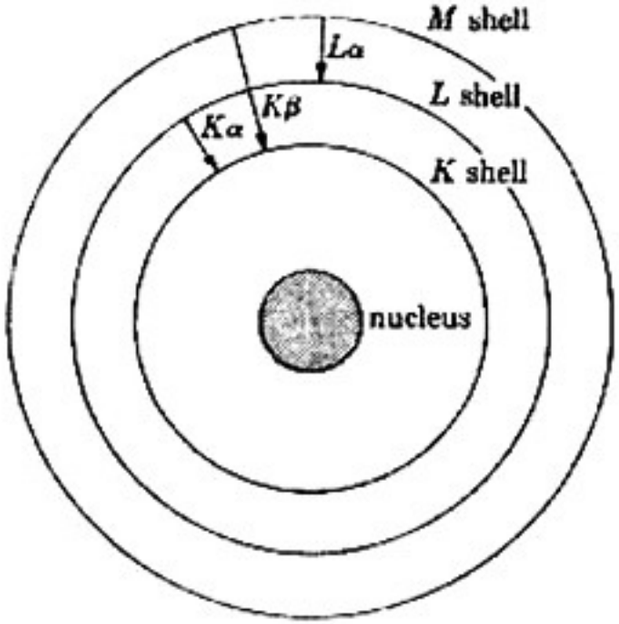
$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV_0}$$

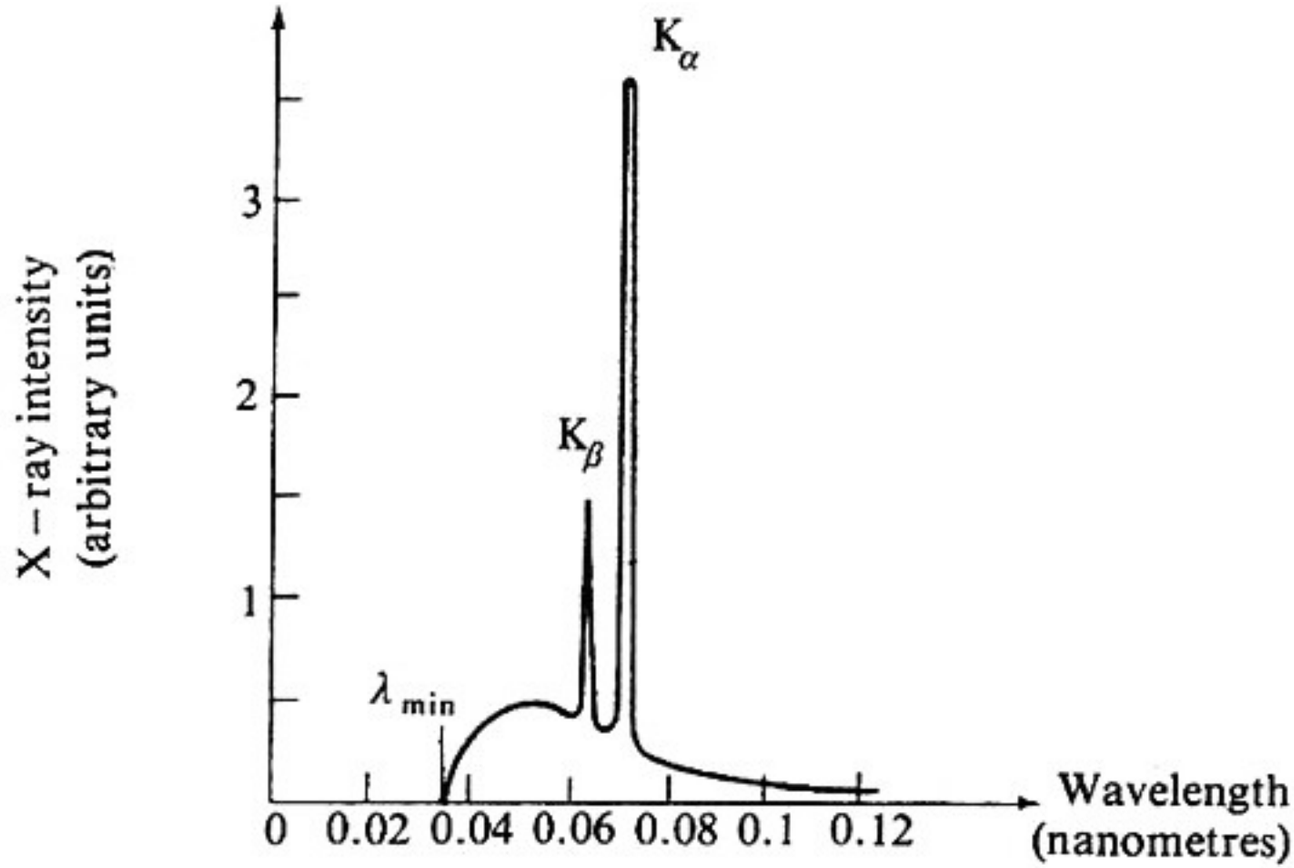
แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

- อะตอมเป็นรูปทรงกลม (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10^{-10} เมตร)
- เนื้ออะตอมมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก
- อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอภายในอะตอม (จัดเรียงตัวให้มีเสถียรภาพมากที่สุด)
- ประจุไฟฟ้าบวกเท่ากับประจุไฟฟ้าลบ (เป็นกลางทางไฟฟ้า)



2. รังสีเอกซ์แบบเส้นหรือแบบเฉพาะ (Characteristic X-rays)





การเกิดรังสีเอกซ์แบบเส้นเป็นการยืนยันความถูกต้องของทฤษฎีอะตอมของโบร์ คือ อะตอมมีระดับพลังงานเป็นชั้น ๆ

การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด

- **รัทเทอร์ฟอร์ด (Sir Ernest Rutherford)** นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ(นิวซีแลนด์) ลูกศิษย์ของทอมสัน พบว่า

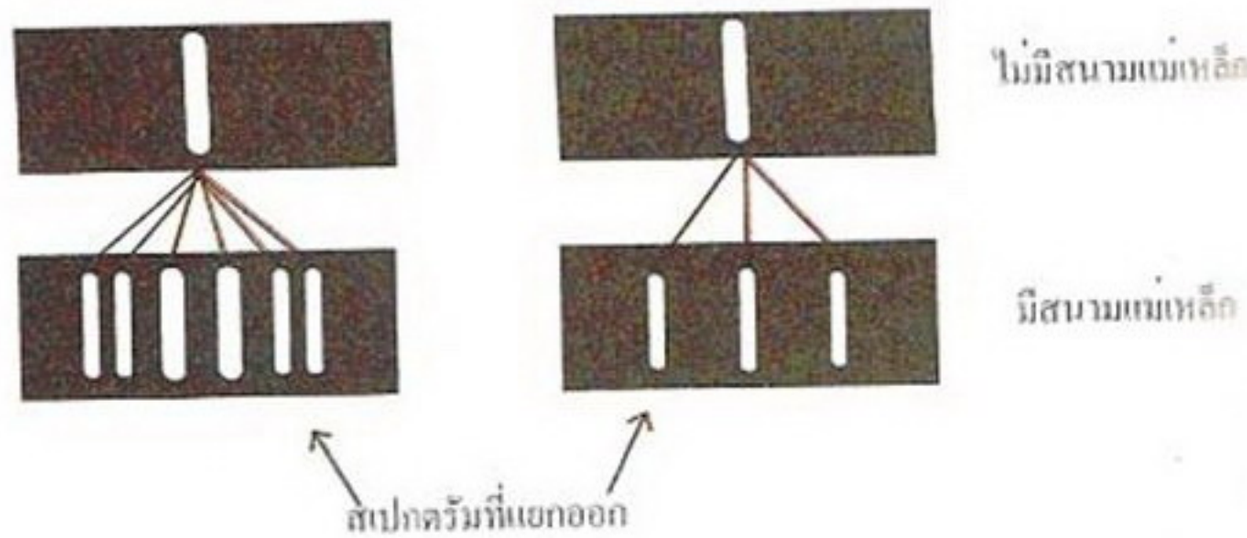
➢ ในการยิงอนุภาคแอลฟาไปยังแผ่นไมกาบาง ๆ อนุภาคแอลฟาสามารถทะลุผ่านแผ่นไมกาไปได้ โดยไม่ปรากฏรูบนแผ่นไมกาเลย

➢ อนุภาคแอลฟามีการกระเจิง **(scattering)** น้อยมาก (2-3 ตัว)

➢ เสนอแนวคิดเกี่ยวกับอะตอมว่า "อะตอมมีแกนกลางที่มีขนาดเล็กมาก แต่มีประจุไฟฟ้าบวกอยู่เป็นจำนวนมาก"

ความไม่สมบูรณ์ของทฤษฎีอะตอมของโบร์

- ทฤษฎีอะตอมของโบร์อธิบายสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจนได้เป็นอย่างดี แต่ไม่สามารถอธิบายสเปกตรัมของอะตอมอื่น ๆ ได้ดี
- ไม่สามารถอธิบายสเปกตรัมของอะตอมที่อยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ สเปกตรัมเส้นหนึ่ง ๆ จะแยกออกเป็นสเปกตรัมหลายเส้น เมื่ออะตอมอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก



ไกเกอร์ **(Hans W. Geiger)** และ มาร์สเดน **(Ernest Marsden)** นักวิจัยผู้ช่วยรัทเทอร์ฟอร์ด ได้ออกแบบทดลองเพื่อทดสอบแนวคิดของรัทเทอร์ฟอร์ด

ทวิภาพของคลื่นและอนุภาค
(Duality of wave and particle)

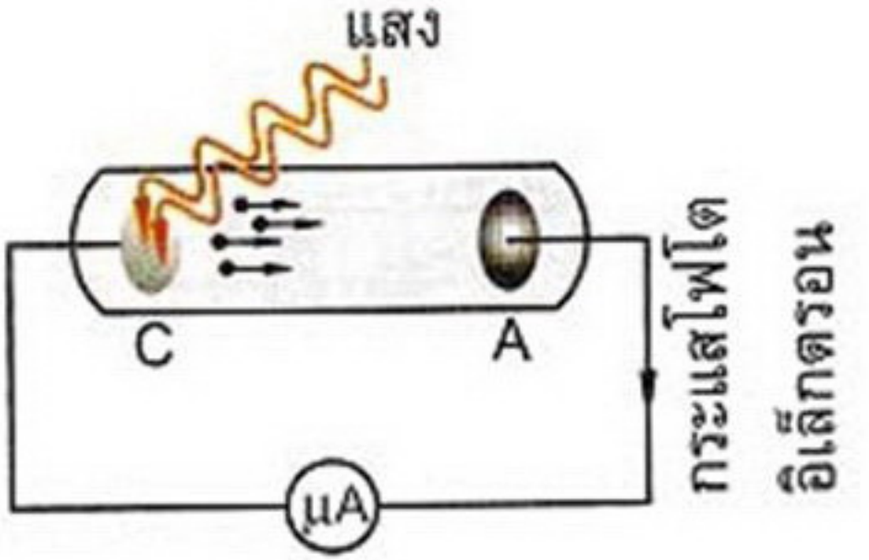
- ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

เฮิรตซ์ (Heinrich R. Hertz) พบว่า เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นหรือมีความถี่สูงตกกระทบผิวโลหะ ทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าหลุดออกมาจากโลหะได้ เรียกว่า **“ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก”**

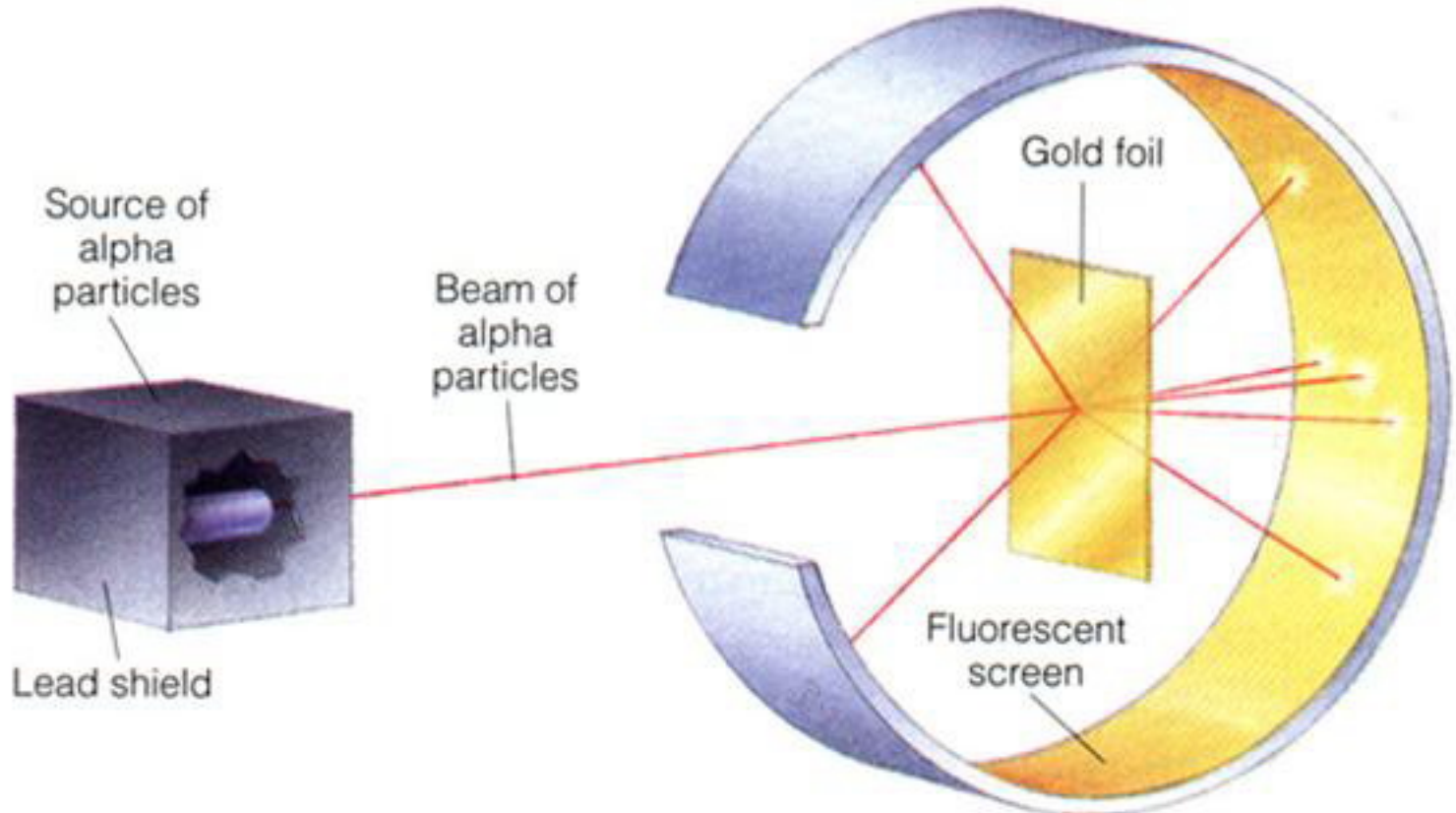
การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด

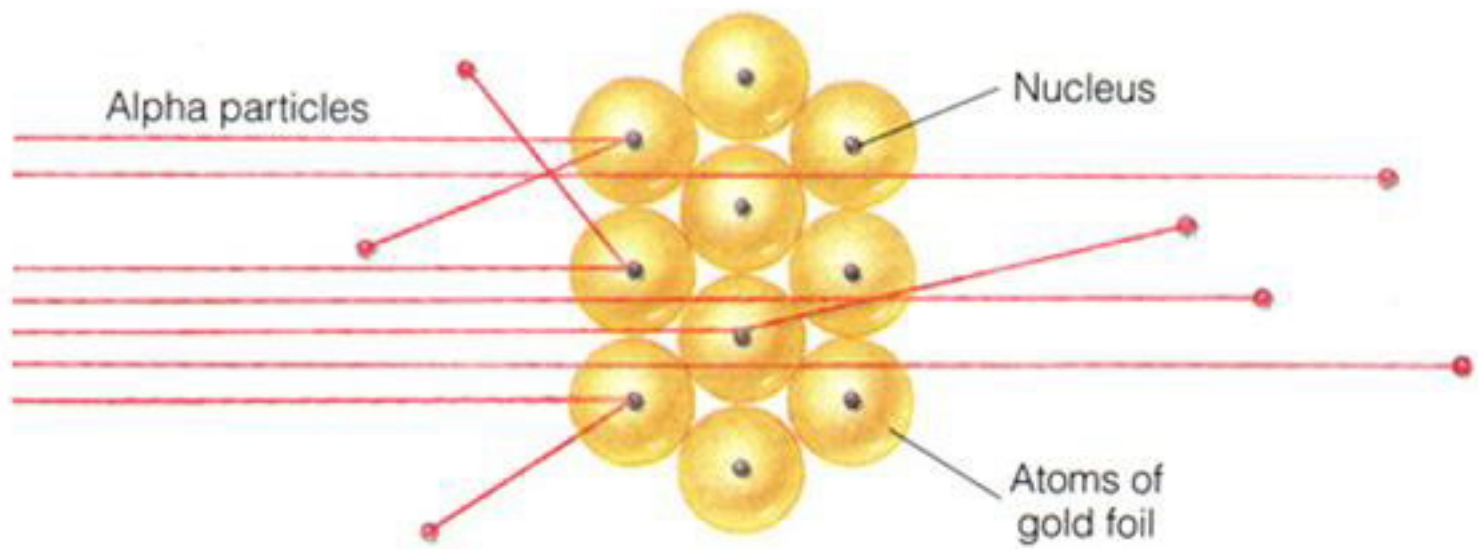
Rutherford Experiment:
Nuclear Atom

- ต่อมา **ทอมสัน** ได้วัดอัตราส่วนประจุต่อมวลของอนุภาคที่หลุดออกมาจากโลหะ พบว่า มีค่าเดียวกับรังสีแคโทด จึงเชื่อว่าอนุภาคที่หลุดออกมาจากโลหะเป็นอิเล็กตรอน เรียกว่า **"โฟโต-อิเล็กตรอน (Photoelectron)"** และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโฟโตอิเล็กตรอนนี้ว่า **"กระแสโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron current)"**



การเกิดกระแสโฟโตอิเล็กตรอน


Source of alpha particles
Beam of alpha particles
Gold foil
Lead shield
Fluorescent screen

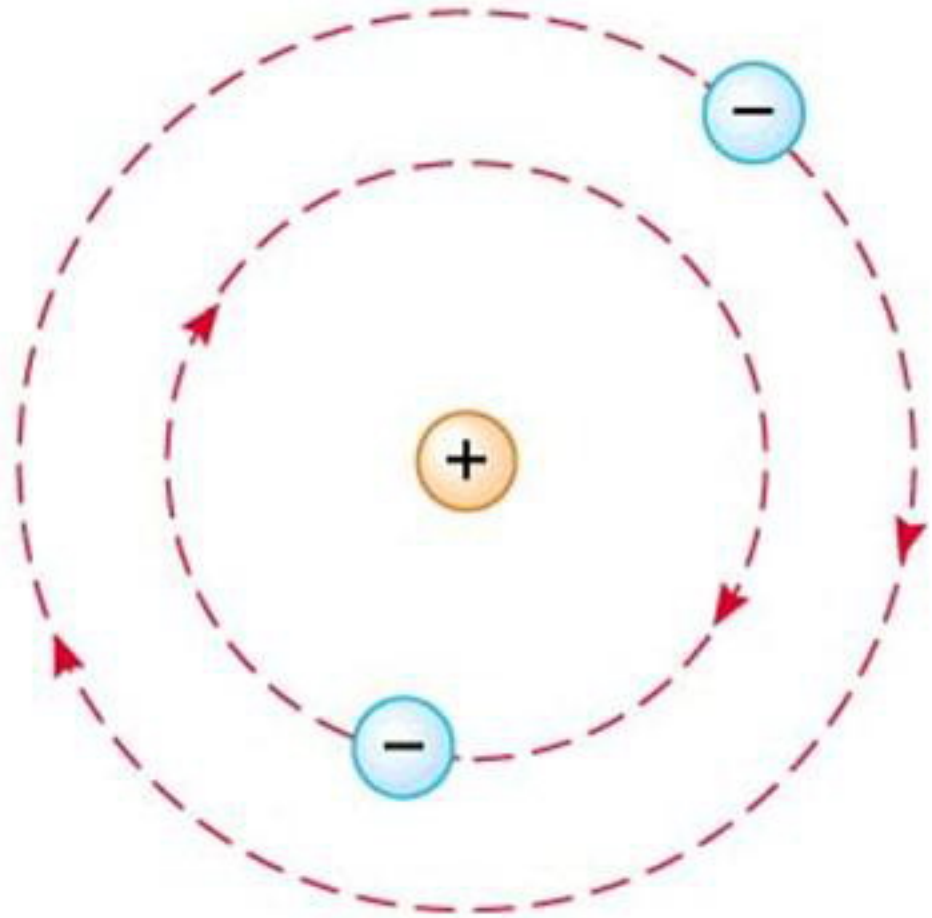

Alpha particles
Nucleus
Atoms of gold foil

กระแสโฟโต อิเล็กตรอน

ไม่มีกระแส โฟโตอิเล็กตรอน

ปรับความต่างศักย์

รัทเทอร์ฟอร์ดเสนอแบบจำลองอะตอมขึ้นมาใหม่ว่า “อะตอมประกอบด้วยประจุไฟฟ้าบวกที่รวมกันอัดแน่นอยู่ที่ศูนย์กลางของอะตอม เรียกว่า **นิวเคลียส** (เป็นที่รวมของมวลเกือบทั้งหมดของอะตอม) โดยมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบ ๆ นิวเคลียสที่ระยะห่างจากนิวเคลียสมาก”



แสง
C
A
P
-
+
กระแสโฟโต
อิเล็กตรอน

แสง
C
A
P
-
+
กระแสโฟโต
อิเล็กตรอน

i
I_2
I_1
V_s
0

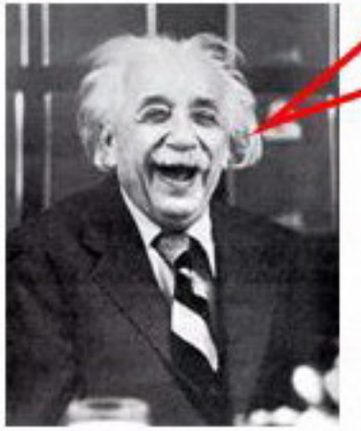
- นิวเคลียสของอะตอมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10^{-15} — 10^{-14} เมตร
- อะตอมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10^{-10} เมตร
- ขนาดของอะตอมมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของนิวเคลียสประมาณ 10^{4} — 10^{5} หรือ 1 หมื่น ถึง 1 แสนเท่า

“แสงเป็นก้อนของพลังงาน”

ควอนตัมของพลังงาน

พลังค์

โฟตอน (Photon)



ไอน์สไตน์

$$hf - hf_0 = E_{Kmax}$$

- **ปัญหาของแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด**

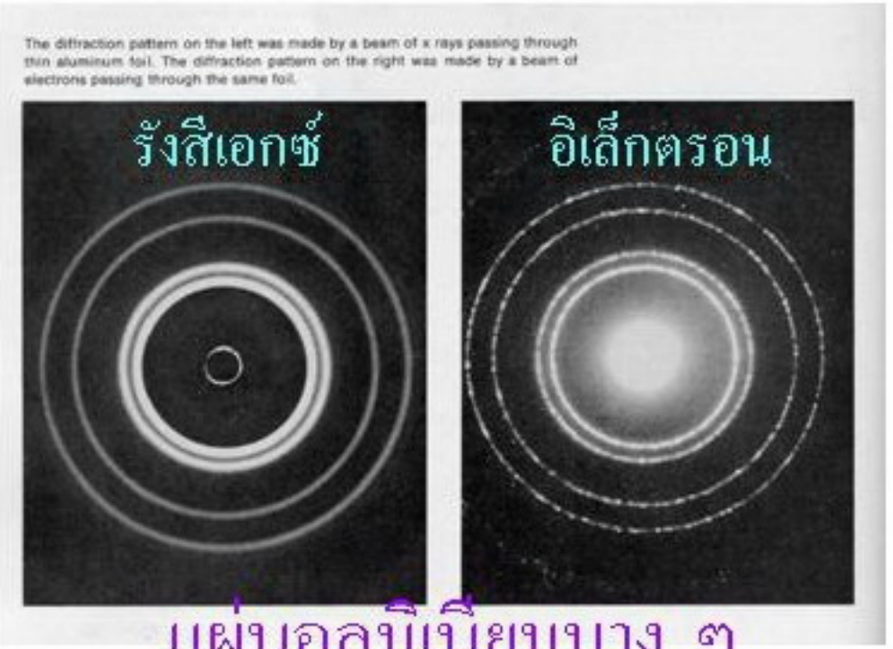
➢ เหตุใดอิเล็กตรอนที่วิ่งวนรอบนิวเคียสจึงไม่สูญเสียพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (อะตอมมีเสถียรภาพ)

➢ อะตอมที่มีอิเล็กตรอนจำนวนมากมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนกันอย่างไร

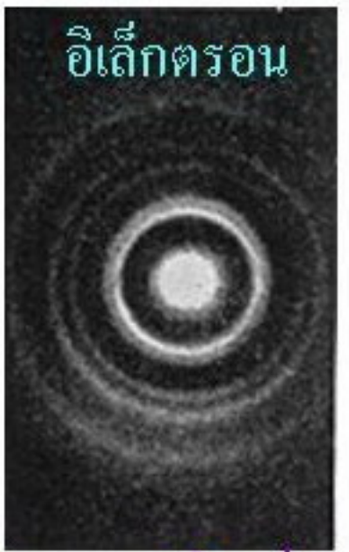
➢ เหตุใดประจุไฟฟ้าบวกหลาย ๆ ประจุจึงอยู่รวมกันภายในนิวเคลียสได้ ทั้ง ๆ ที่มีแรงผลักทางไฟฟ้า

การทดลองของจี พี ทอมสัน (George P. Thomson)

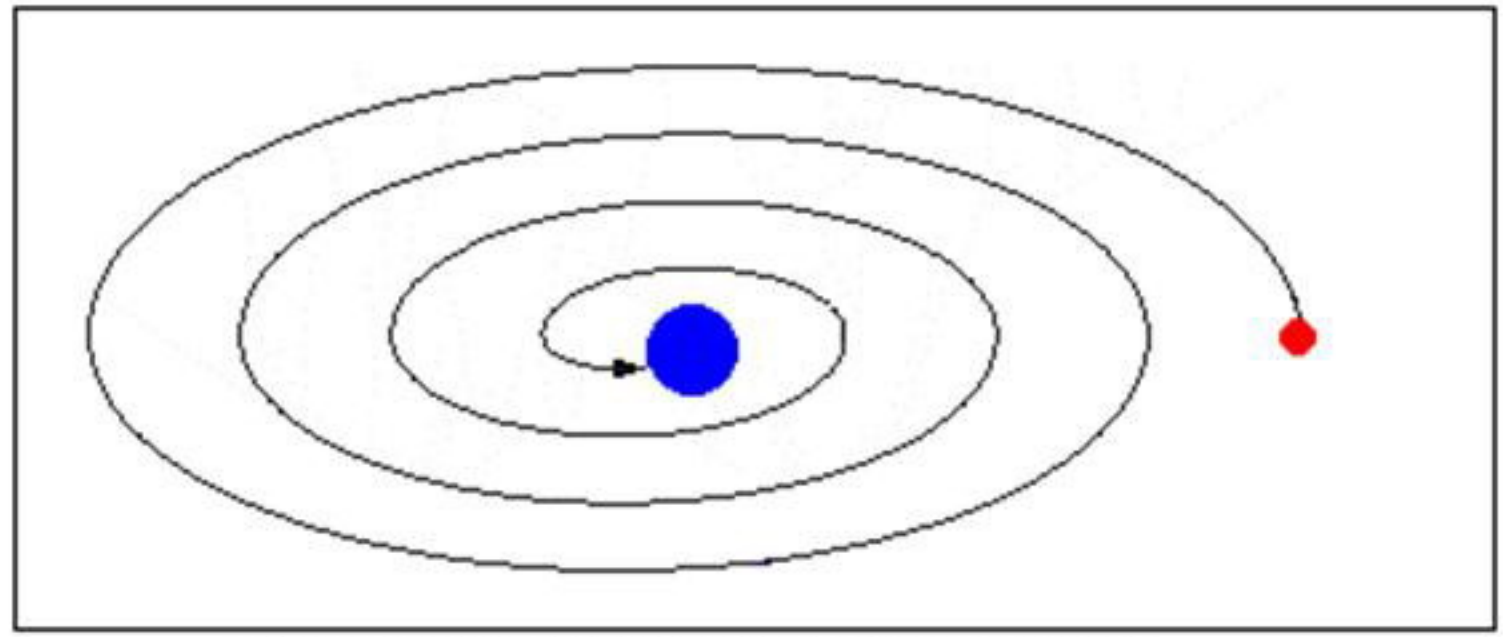
- ทดลองยิงอิเล็กตรอนความเร็วสูงหรือรังสีแคโทดผ่านแผ่นโลหะบาง เช่น อลูมิเนียม เงิน และทองคำ ปรากฏว่า อิเล็กตรอนเลี้ยวเบนผ่านผลึกโลหะไปแทรกสอดบนฟิล์มได้เหมือนกับรังสีเอกซ์



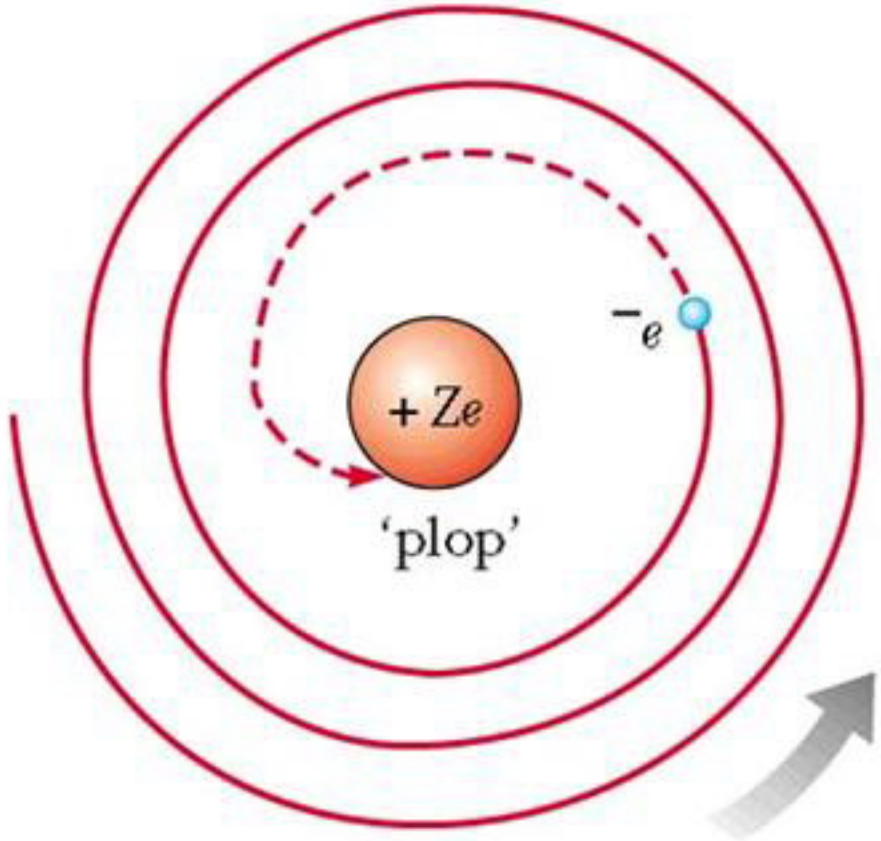
แผ่นอลูมิเนียมบาง ๆ



แผ่นทองคำเปลว



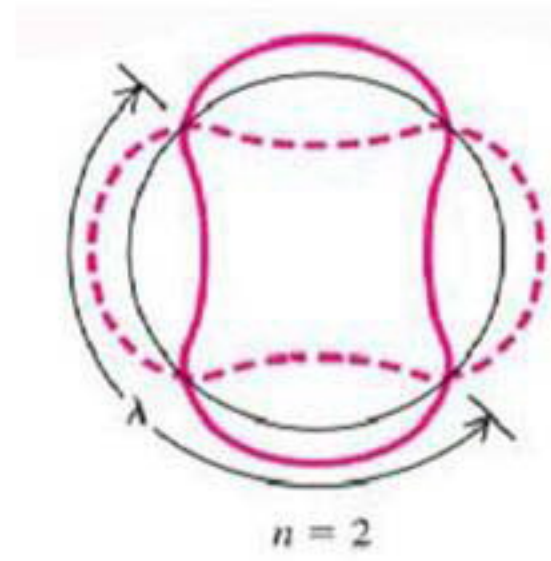
The electron should fall on the nucleus.



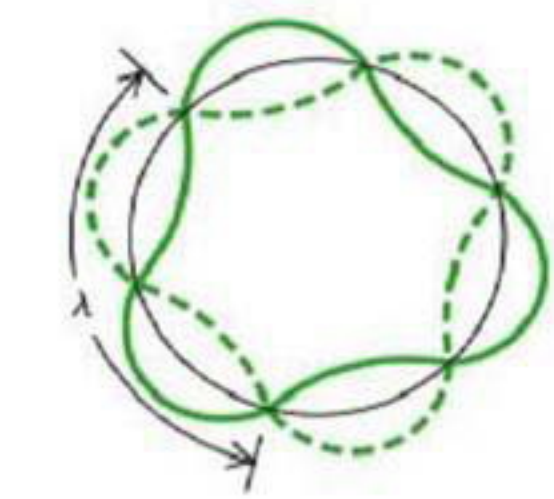
อธิบายสมมติฐานของโบร์

"อิเล็กตรอนที่วิ่งวนอยู่รอบ ๆ นิวเคลียส จะประพฤติตัวเป็นคลื่นนิ่ง" โดยมีความยาวเส้นรอบวงของวงโคจรพิเศษเท่ากับจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นอิเล็กตรอน

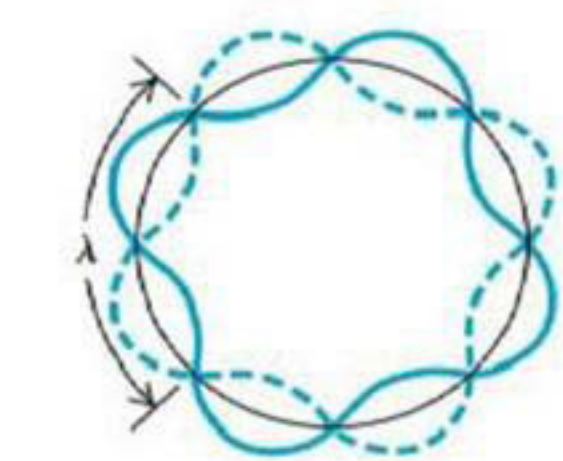
$$2\pi r_n = n\lambda$$



$n = 2$

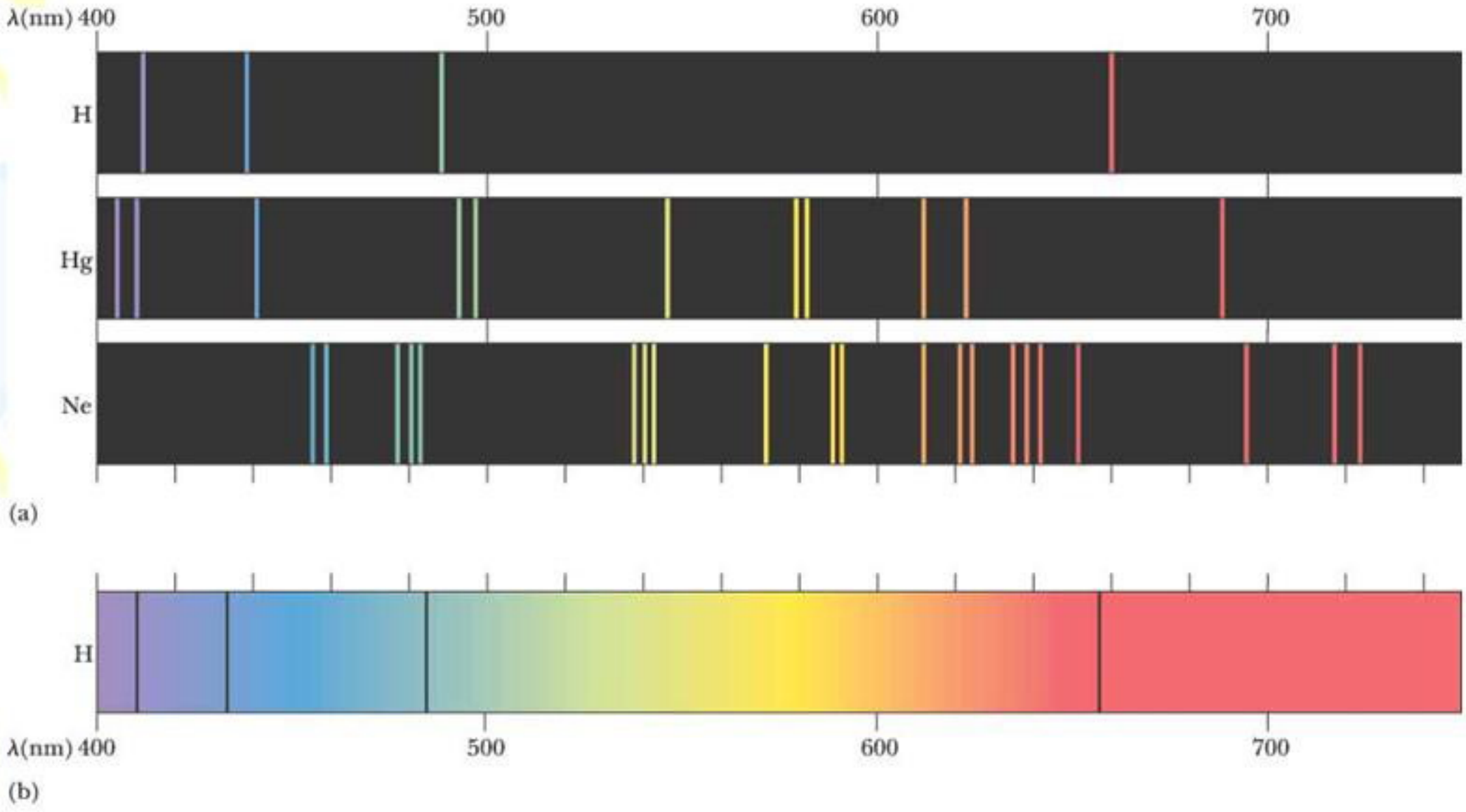


$n = 3$



$n = 4$

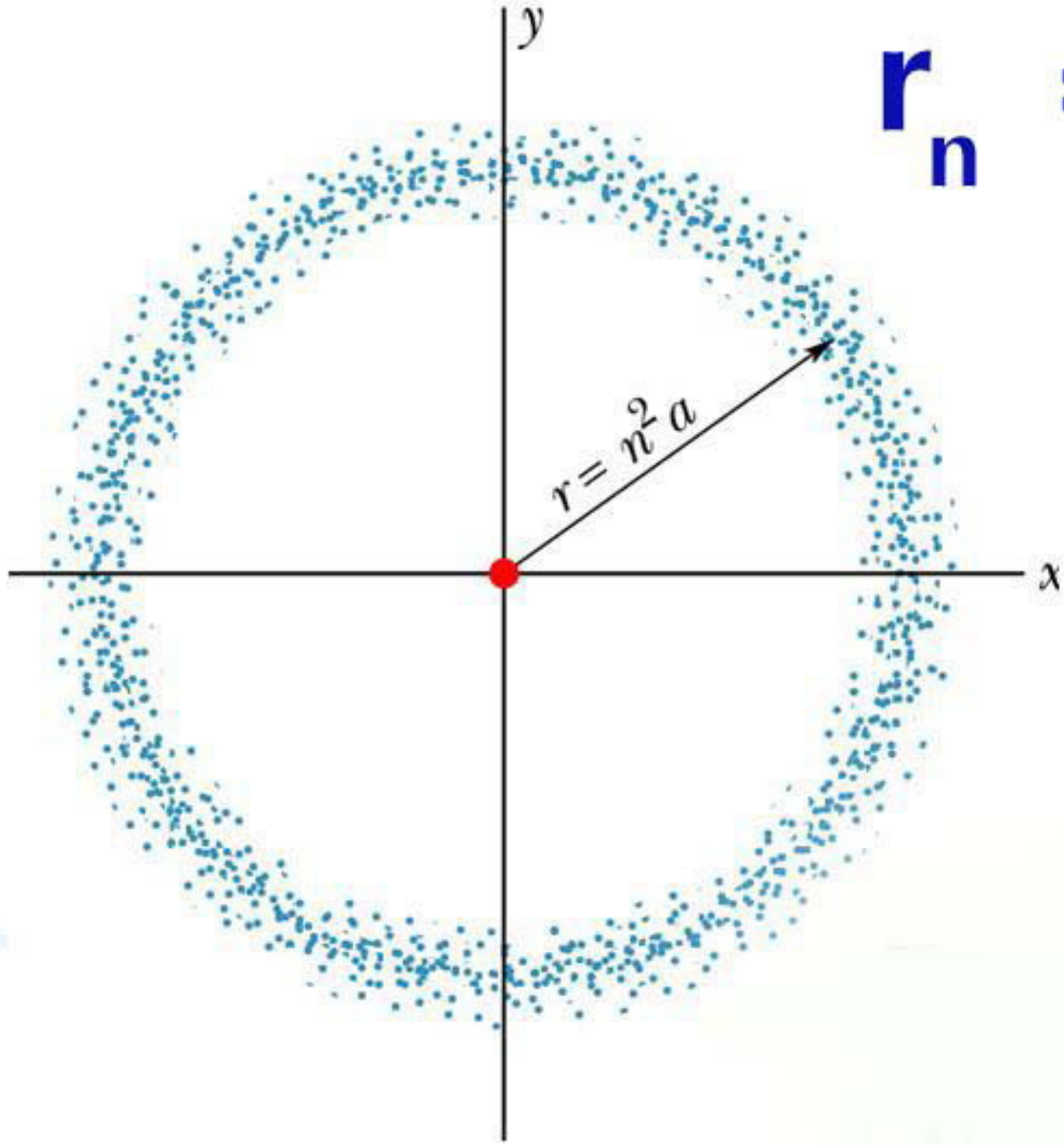
สเปกตรัมของอะตอม (Atomic Spectrum)



©2004 Thomson - Brooks/Cole

โอกาสพบอิเล็กตรอน

$$r_n = a_0 n^2$$



- **สเปกตรัมต่อเนื่อง (Continuous Spectrum)** คือ แถบสีต่าง ๆ ของแสงที่เมื่อใช้เกรตติงหรือปริซึมแยกแสงสีต่าง ๆ ออกมาให้เห็น เช่น แสงจากไส้หลอดไฟฟ้าที่ร้อนจัด โลหะร้อนหรือของแข็งที่ร้อนจัด
- **สเปกตรัมเส้นสว่าง (Line Spectrum)** คือ เส้นสีต่าง ๆ ของแสงที่เมื่อใช้เกรตติงหรือปริซึมแยกเส้นแสงสีต่าง ๆ ออกมาให้เห็น เช่น แสงจากหลอดบรรจุแก๊สร้อนชนิดต่าง ๆ
- **สเปกตรัมเส้นมืด (Dark Spectrum)** คือ เส้นสีดำที่ปรากฏบนแถบสีของสเปกตรัมต่อเนื่อง เมื่อฉายแสงผ่านสารชนิดต่าง ๆ แล้วส่องดูด้วยเกรตติงหรือปริซึม

- ธาตุต่างชนิดกันจะให้ชุดเส้นสเปกตรัมหรืออนุกรม (series) ของสเปกตรัมที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละธาตุนั้น ๆ
- อนุกรมของสเปกตรัม คือ ความยาวคลื่นแสงที่เรียงกันเป็นชุดอย่างมีระเบียบและมีความสัมพันธ์กัน

- ธาตุต่างชนิดกันจะให้ชุดเส้นสเปกตรัมหรืออนุกรม (series) ของสเปกตรัมที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละธาตุนั้น ๆ
- อนุกรมของสเปกตรัม คือ ความยาวคลื่นแสงที่เรียงกันเป็นชุดอย่างมีระเบียบและมีความสัมพันธ์กัน

- **อนุกรมบาลเมอร์ (Balmer series)**

  บาลเมอร์ (Johann Jacob Balmer) เป็นครูมัธยมโรงเรียนสตรีแห่งหนึ่งในสวิสเซอร์แลนด์ สามารถหาสูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณหาความยาวคลื่นของสเปกตรัมเส้นสว่างของอะตอมไฮโดรเจนในช่วงที่มองด้วยตาเปล่าเห็นได้ เรียกว่า **"อนุกรมบาลเมอร์"** มีทั้งหมด 4 เส้น คือ

$$\lambda = 3645.6 \times 10^{-9}\left(\frac{n^2}{n^2-2^2}\right)$$

เมื่อ n=3, 4, 5, . . .

- เมื่อแทนค่า n=3, 4, 5 และ 6 ลงในสมการอนุกรมบาลเมอร์ ได้ความยาวคลื่นของสเปกตรัมเส้นสว่างของไฮโดรเจนในช่วงที่ตามองเห็น ดังตาราง

เส้นที่	สีของเส้นสเปกตรัม	n	ความยาวคลื่น (nm)
1	แดง	3	656.2
2	เขียว	4	486.1
3	น้ำเงิน	5	434.0
4	ม่วง	6	410.1

- ริดเบิร์ก **(Johannes R. Rydberg)** เขียนสูตรอนุกรมบาลเมอร์ขึ้นมาใหม่ คือ

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

เมื่อ R_H คือ ค่าคงที่ริดเบิร์ก **(Rydberg constant)**

มีค่าเท่ากับ 1.09737×10^7 m^{-1}

n คือ เลขจำนวนเต็มที่มีค่ามากกว่า 2

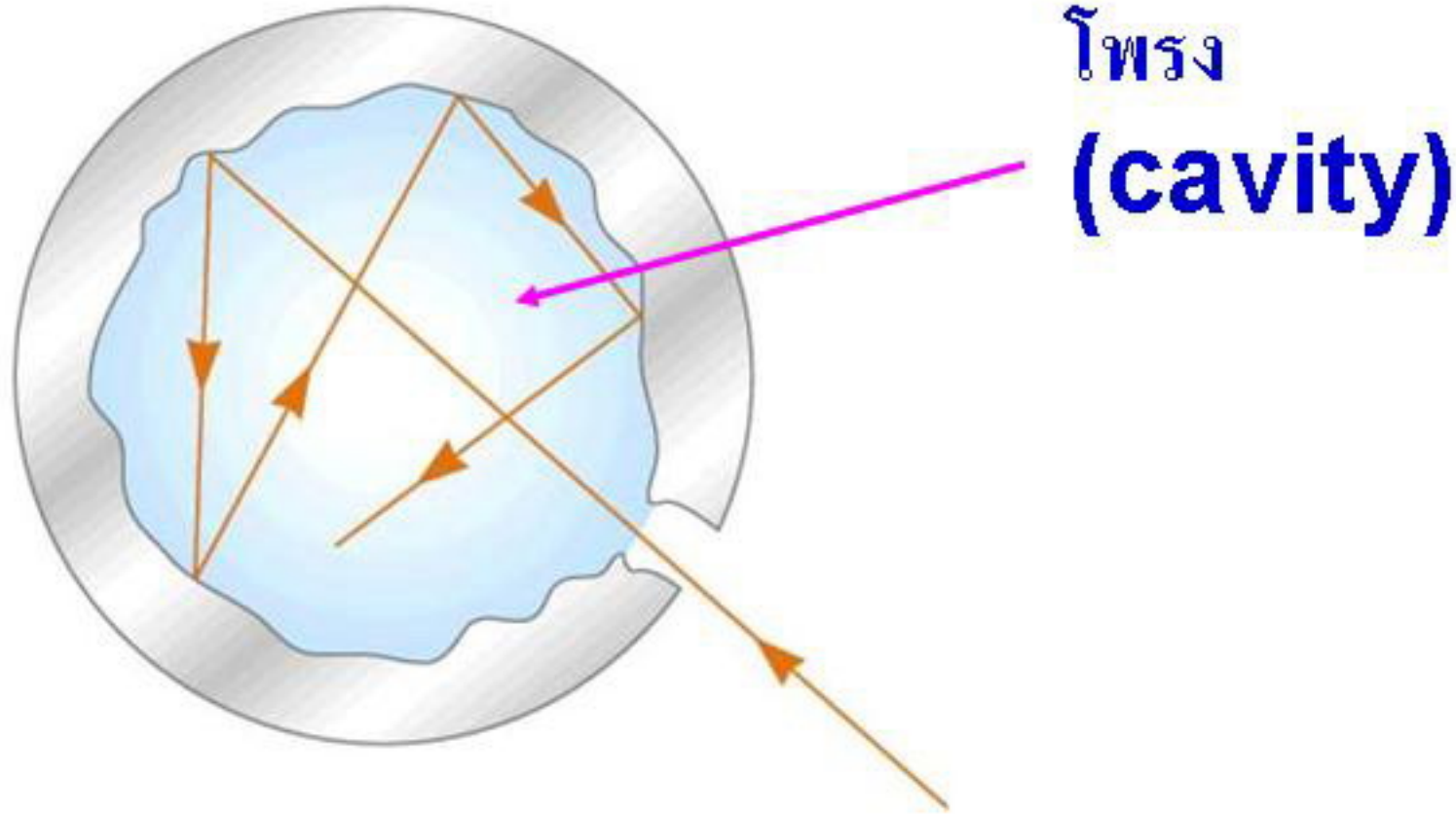
- ภายหลังได้มีการค้นพบสเปกตรัมชุดอื่น ๆ ของไฮโดรเจนอีกเป็น 5 อนุกรม ดังนี้

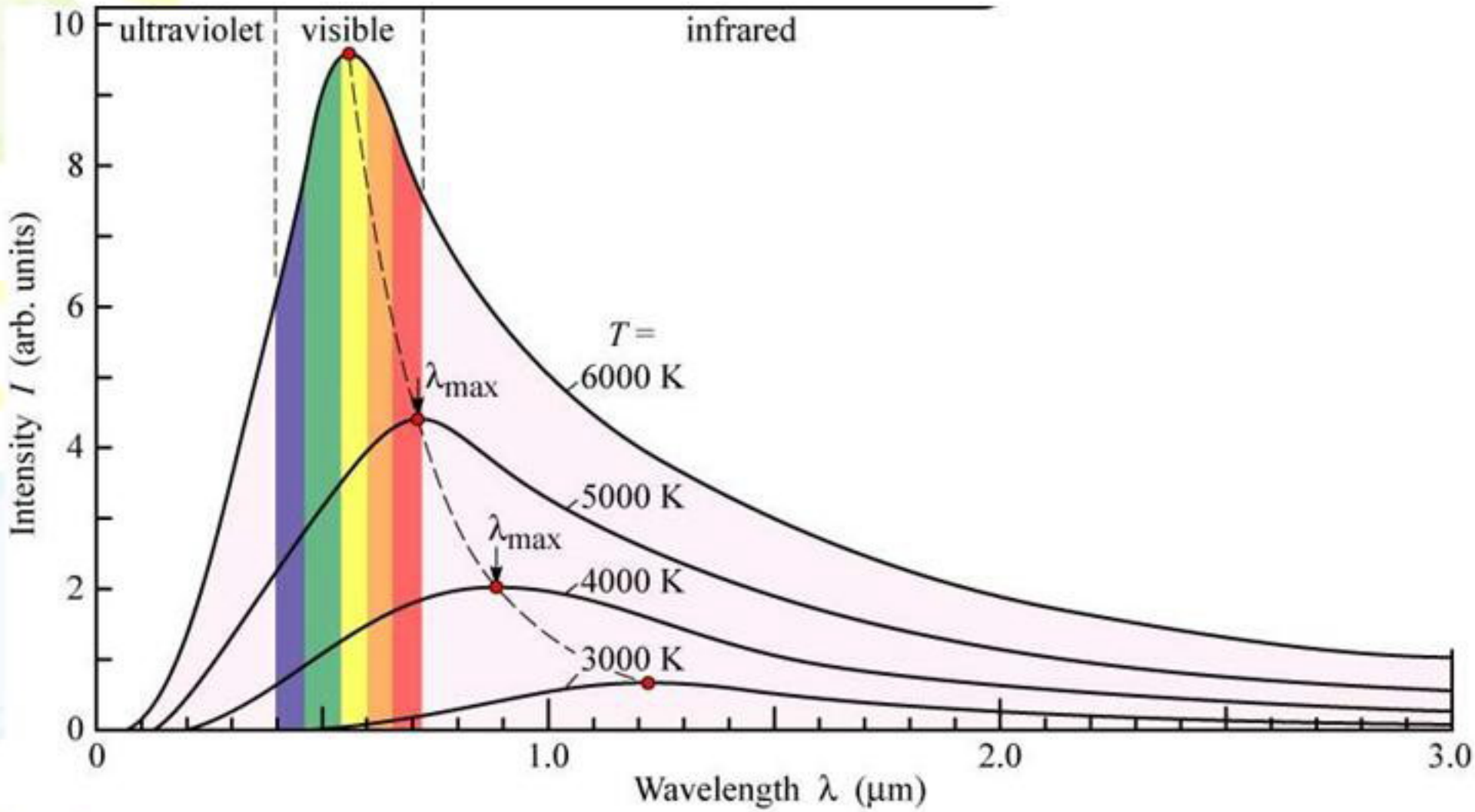
$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

อนุกรม	n_f	n_i	ช่วงของรังสี
ไลมาน (Lymann)	1	2, 3, 4, . . .	UV
บาลเมอร์ (Balmer)	2	3, 4, 5, . . .	Visible, UV
พาสเชน (Paschen)	3	4, 5, 6, . . .	IR
แบรกเกต (Bracket)	4	5, 6, 7, . . .	IR
พฟันด์ (Pfund)	5	6, 7, 8, . . .	IR

การแผ่รังสีของวัตถุดำ

- วัตถุดำ **(Black body)** คือ วัตถุที่มีการแผ่รังสีและดูดกลืนรังสีได้อย่างสมบูรณ์ (เป็นวัตถุในอุดมคติ)





พบว่า

1. สเปกตรัมการแผ่รังสีของวัตถุดำมีการกระจายของอัตราการแผ่พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ในแต่ละความยาวคลื่นแตกต่างกันและไม่ขึ้นกับชนิดของวัตถุที่ใช้ทำวัตถุดำ

2. อัตราการแผ่พลังงานทั้งหมดของวัตถุดำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

กฎของสเตฟาน (Stefan's law)

$$I = e\sigma T^4$$

I คือ อัตราการแผ่พลังงานต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมดหรือความเข้มแสง ($J/m^2.s$)

e คือ สภาพการเปล่ง (emissivity) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1

(สำหรับวัตถุดำมีค่าเท่ากับ 1)

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลซ์มานน์ มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} $W/m^2.K^4$

T คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)

3. ความยาวคลื่นที่มีอัตราการแผ่พลังงานต่อหน่วยพื้นที่มากสุดมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม

กฎการขจัดของวีน (Wien's displacement law)

$$\lambda_{max} T = 2898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

4. ที่อุณหภูมิ T ใด ๆ พลังงานการแผ่รังสี $E_T d\lambda$ ที่เปล่งในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง λ กับ $\lambda+d\lambda$ ในตอนแรกค่าพลังงานรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มหรือตามความยาวคลื่นที่ลดลง จนถึงค่าสูงสุด ต่อจากนั้นค่าพลังงานรังสีลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง

กฎของเรย์เลย์และจีนส์ (Rayleigh-Jeans law)

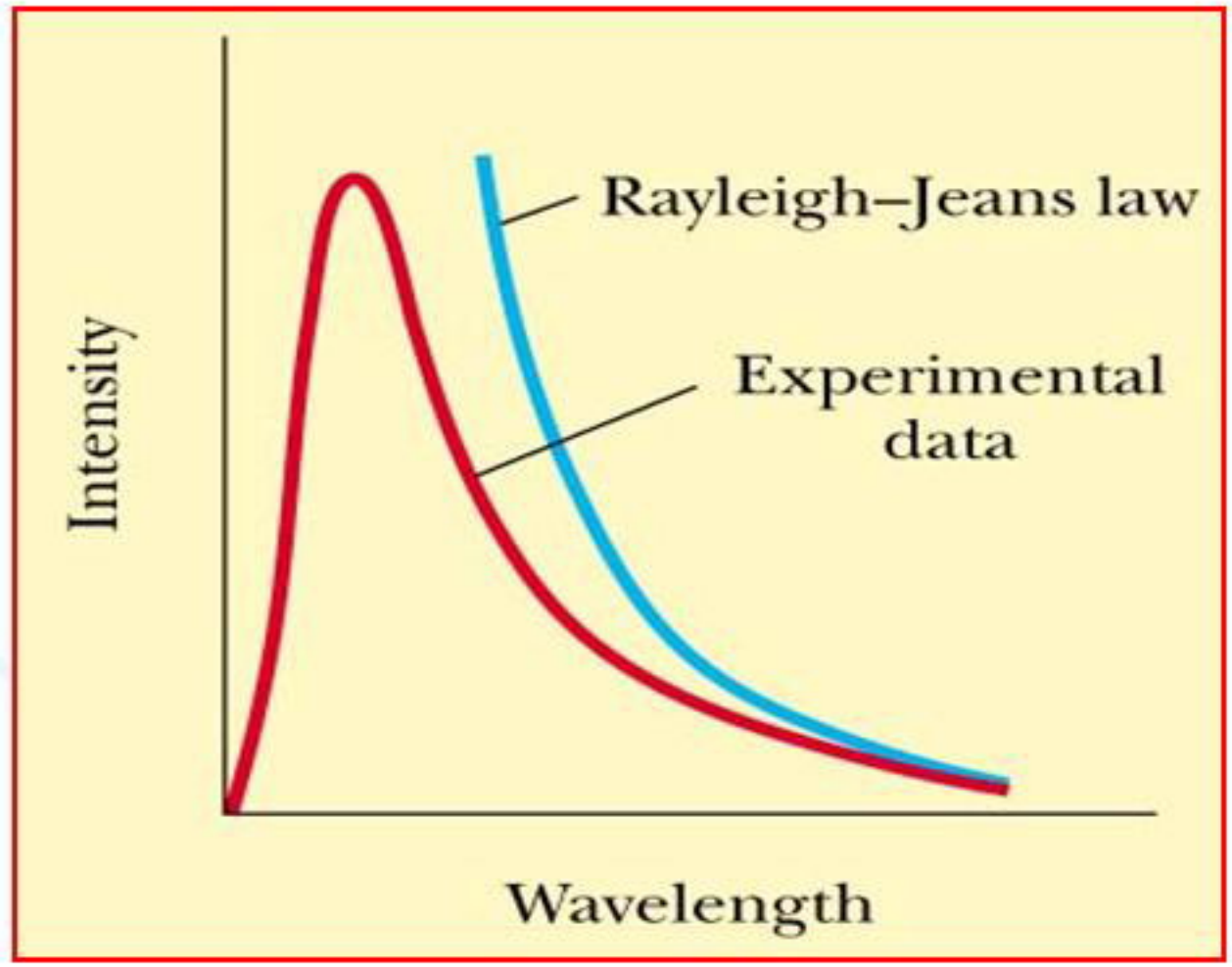
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c k_B T}{\lambda^4}$$

k_B คือ ค่าคงที่โบลซ์มานน์ เท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

- อธิบายโดยใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวล ซึ่งถือว่าเป็นทฤษฎีฟิสิกส์ดั้งเดิม **(classical physics theory)**
- อะตอมจะสั่นเมื่อดูดกลืนหรือแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่ใด ๆ ก็ได้

ปัญหาของกฎของเรย์เลย์และจีนส์

ผลการคำนวณตรงกับผลการทดลองเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นมาก ๆ เท่านั้น ที่ความยาวคลื่นสั้น เช่น แสงสีม่วงและรังสีเหนือม่วง ได้ผลการคำนวณไม่ตรงกับผลการทดลอง



สมมติฐานของพลังค์ (Planck's hypothesis)

"พลังงานที่วัตถุดำรับเข้าไปหรือปล่อยออกมามีค่าได้เฉพาะบางค่าเท่านั้น" และค่านี้จะเป็นจำนวนเท่าของ **hf** ซึ่งเรียกว่า **"ควอนตัมของพลังงาน (quantum of energy)"**

$$E = nhf$$

n คือ เลขจำนวนเต็มบวก

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ เท่ากับ 6.63×10^{-34} **J.s**

กฎการแผ่รังสีของพลังค์ (Planck's distribution function)

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)}$$

หรือ

$$I(f, T) = \frac{2\pi hf^3}{c^2 (e^{hf/k_B T} - 1)}$$

พบว่า ผลการคำนวณตรงกับผลการทดลองทุก ๆ ค่าความยาวคลื่นของรังสีที่เปล่งออกมาจากวัตถุดำ

สมมติฐานของโบร์ (Bohr's hypothesis)

1. อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบนิวเคลียสจะมีวงโคจรพิเศษบางวงที่อิเล็กตรอนไม่แผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาและมีโมเมนตัมเชิงมุมคงตัว ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่ามูลฐานค่าหนึ่ง คือ

$$\eta = \frac{h}{2\pi}$$

$$L = mvr = n\eta$$

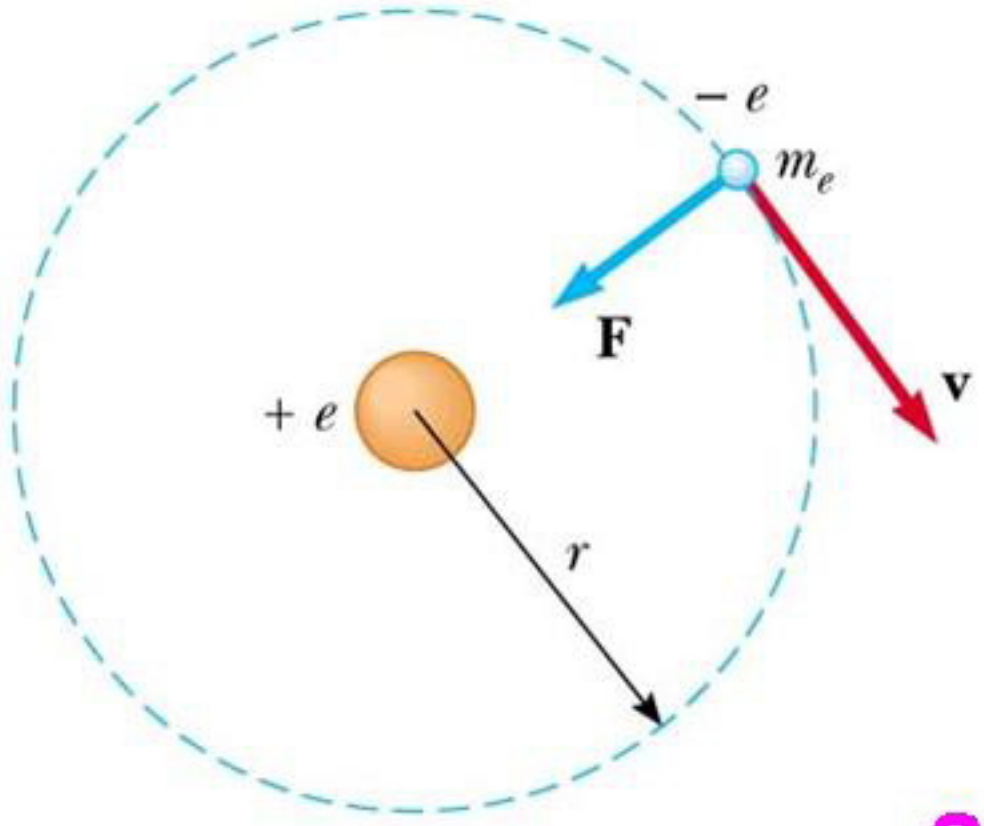
2. อิเล็กตรอนจะรับหรือปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนวงโคจร ซึ่งมีค่าตามสมมติฐานของพลังค์ คือ

$$\Delta E = E_{ni} - E_{nf}$$

หรือ

$$hf = |\Delta E| = |E_{ni} - E_{nf}|$$

ทฤษฎีอะตอมของโบร์



รัศมีวงโคจรพิเศษ

$$r_n = \left(\frac{\eta^2}{mke^2}\right)n^2$$

$$r_n = a_0 n^2$$

a_0 คือ รัศมีโบร์ (Bohr radius) เท่ากับ

5.3×10^{-11} m

ความเร็วของอิเล็กตรอนในวงโคจรพิเศษ

$$v_n = \left(\frac{ke^2}{\eta}\right)\frac{1}{n}$$

$$v_n = \frac{v_1}{n}$$

v_1 เท่ากับ 2.18×10^6 m/s

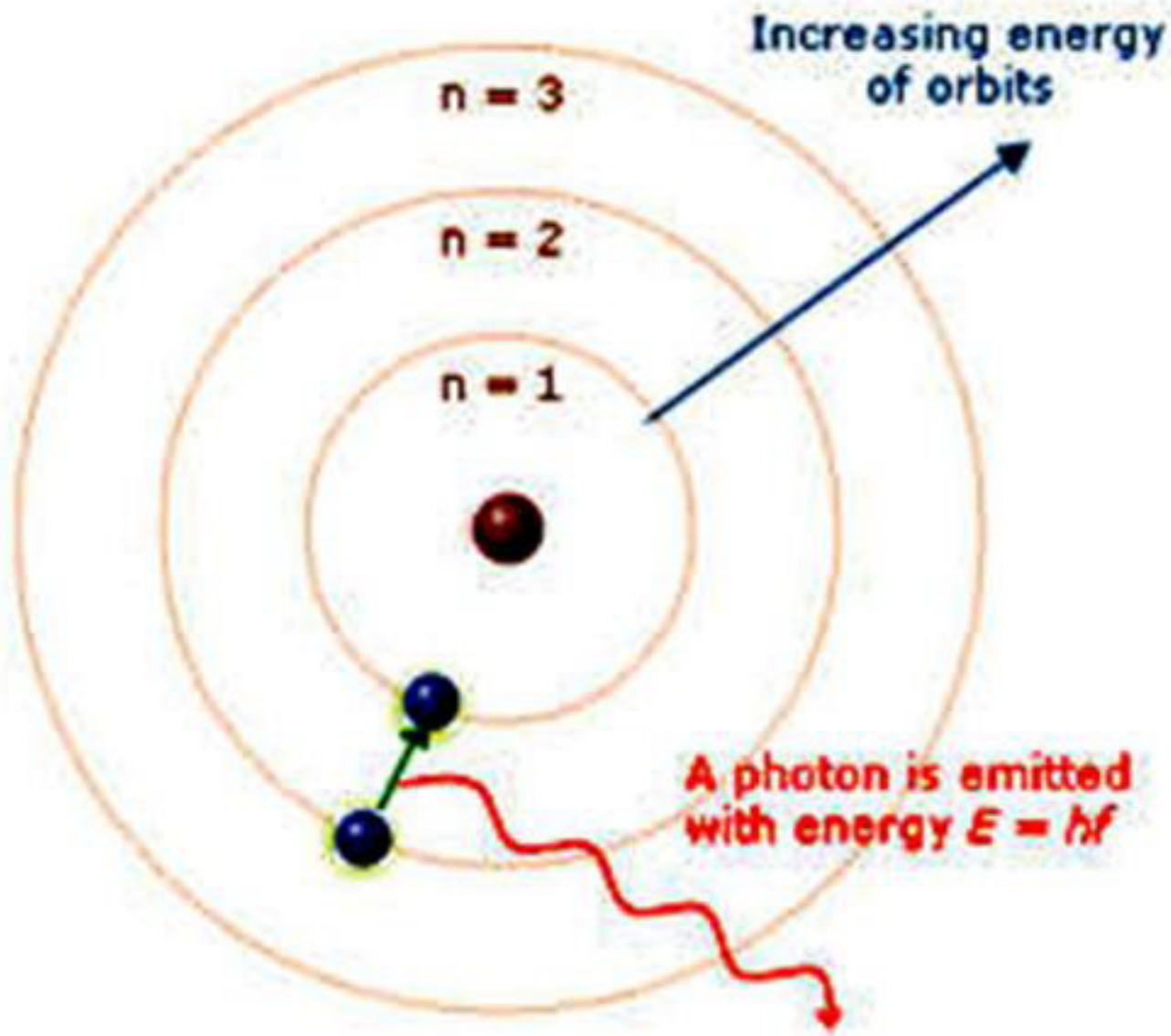
พลังงานรวมของอิเล็กตรอนในวงโคจรพิเศษ

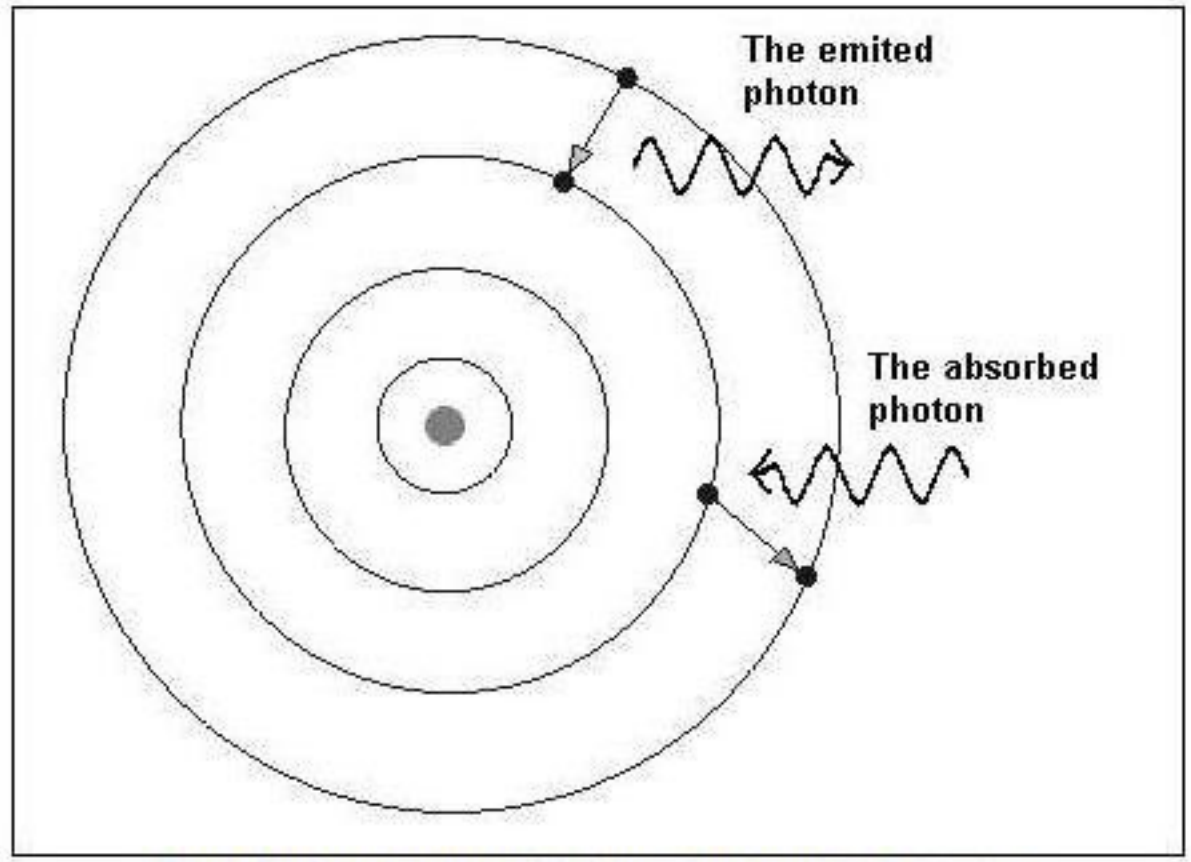
$$E_n = -\frac{1}{2}\left(\frac{mk^2e^4}{\eta^2}\right)\frac{1}{n^2}$$

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

E_1 เท่ากับ -21.76×10^{-19} J หรือ -13.60 eV

แบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนตามทฤษฎีอะตอมของโบร์

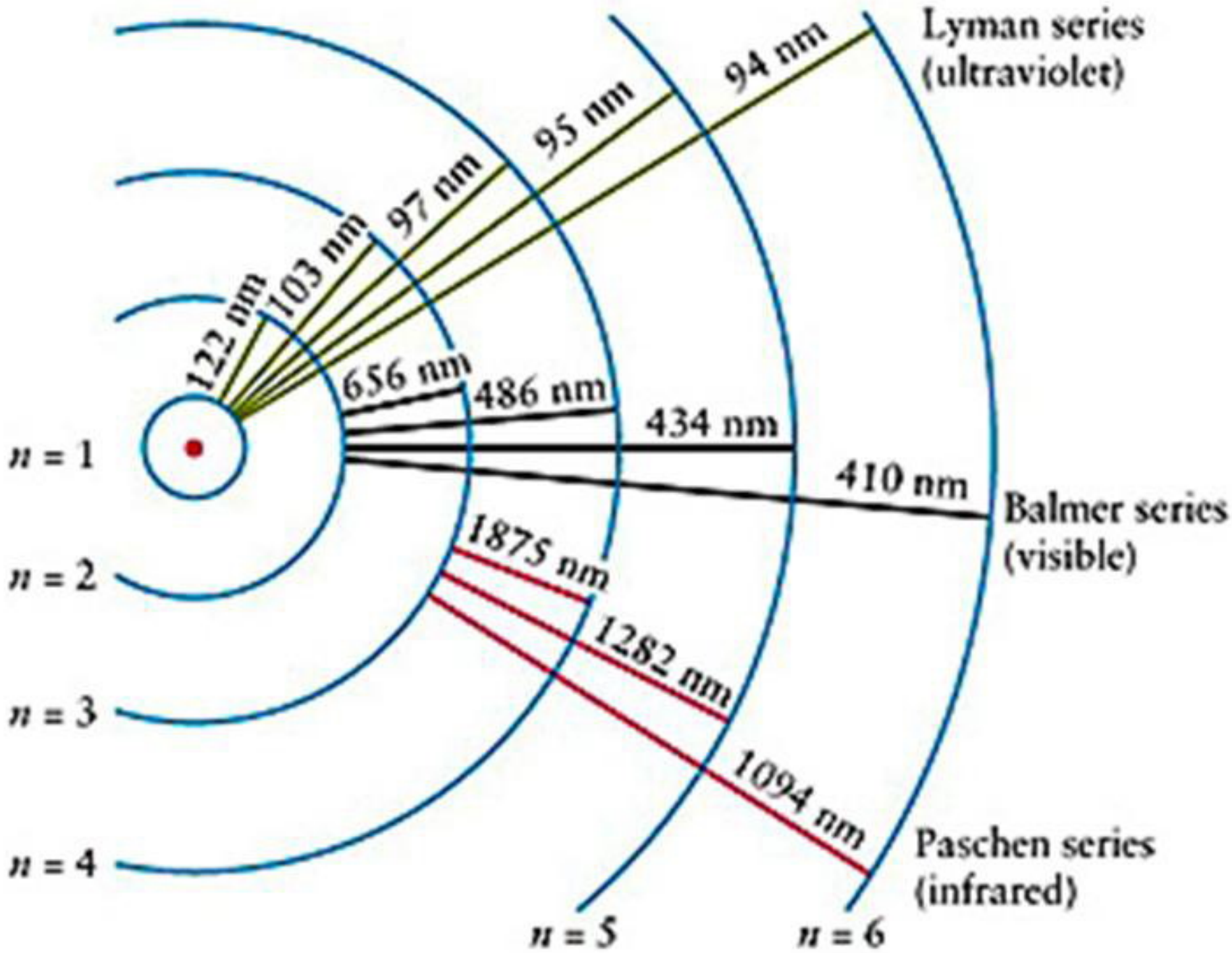


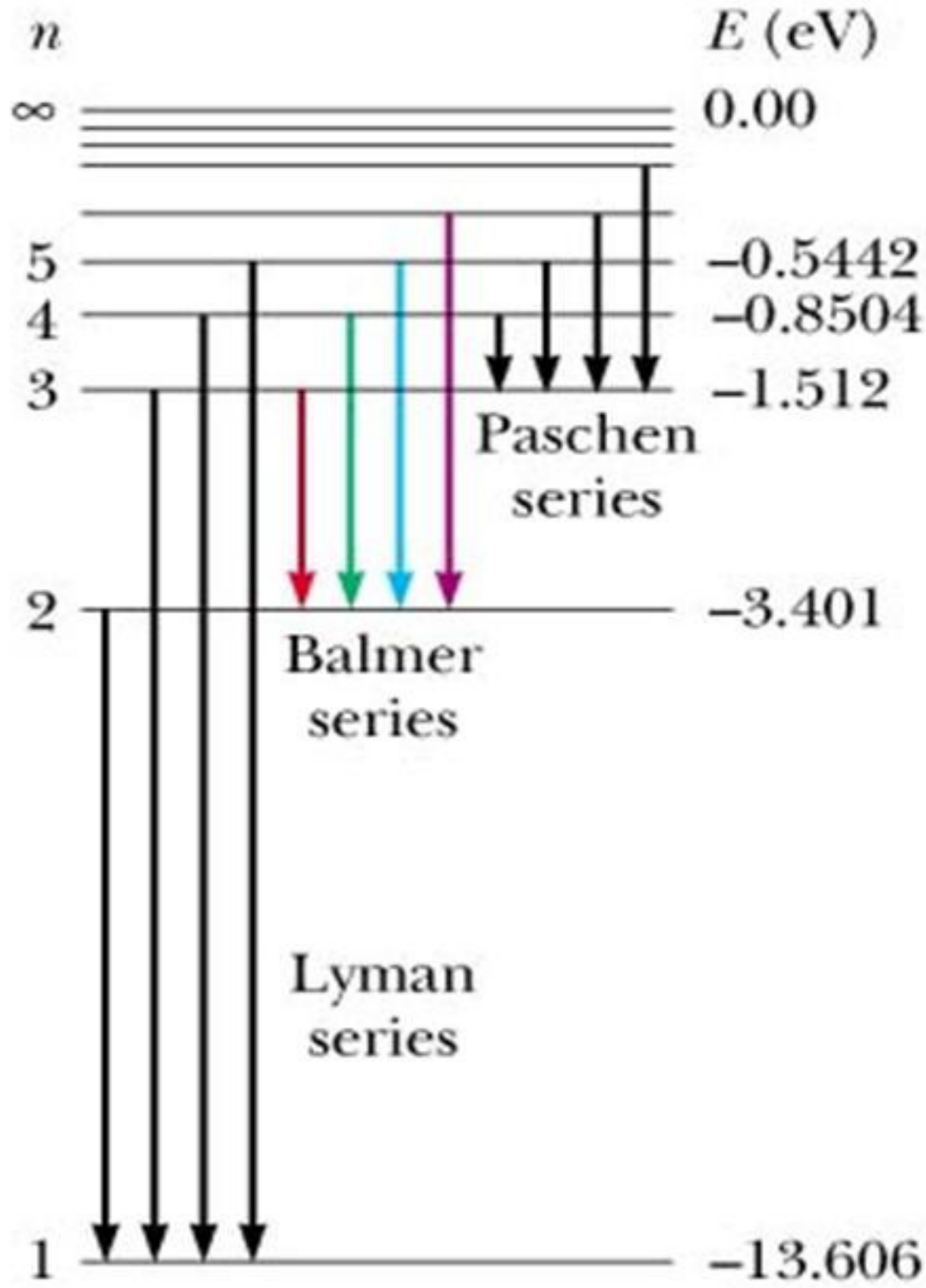


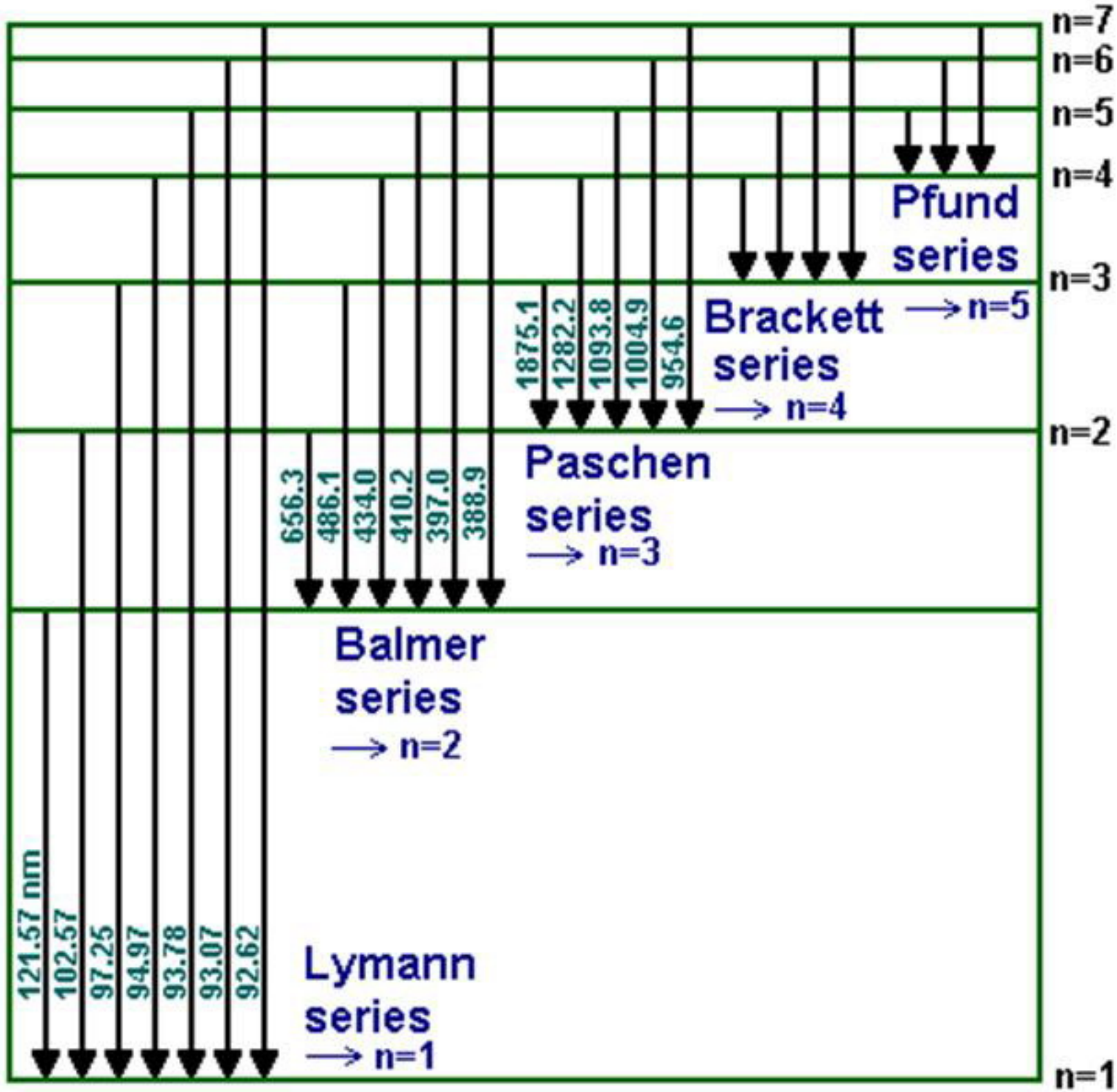
The electron emits or absorbs the energy changing the orbits.

สถานะพื้น (ground state) คือ สภาวะของอะตอมที่อิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานต่ำสุด (มีเสถียรภาพมากที่สุด)

สถานะกระตุ้น (excited state) คือ สภาวะของอะตอมที่อิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าสถานะพื้น เมื่อได้รับพลังงาน


Lyman series
(ultraviolet)
94 nm
95 nm
97 nm
103 nm
122 nm
656 nm
486 nm
434 nm
410 nm
Balmer series
(visible)
1875 nm
1282 nm
1094 nm
Paschen series
(infrared)
n = 1
n = 2
n = 3
n = 4
n = 5
n = 6


n
E (eV)
∞
0.00
5
−0.5442
4
−0.8504
3
−1.512
Paschen
series
2
−3.401
Balmer
series
Lyman
series
1
−13.606

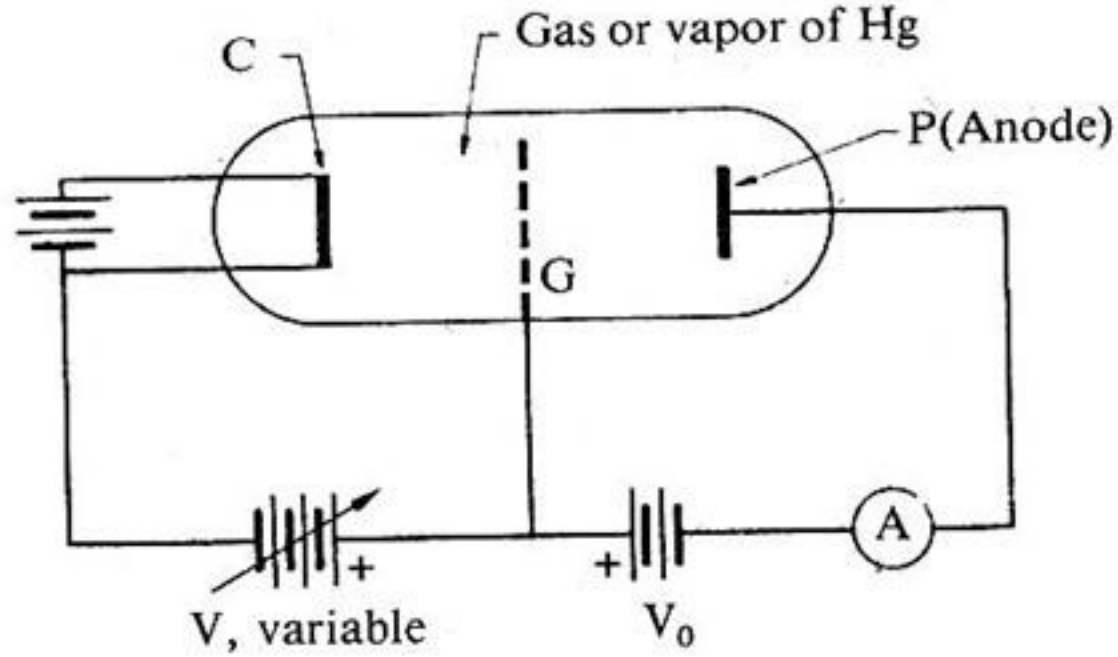

n=7
n=6
n=5
n=4
n=3
n=2
n=1
Pfund
series
Brackett
series
→ n=5
→ n=4
1875.1
1282.2
1093.8
1004.9
954.6
Paschen
series
→ n=3
656.3
486.1
434.0
410.2
397.0
388.9
Balmer
series
→ n=2
121.57 nm
102.57
97.25
94.97
93.78
93.07
92.62
Lymann
series
→ n=1

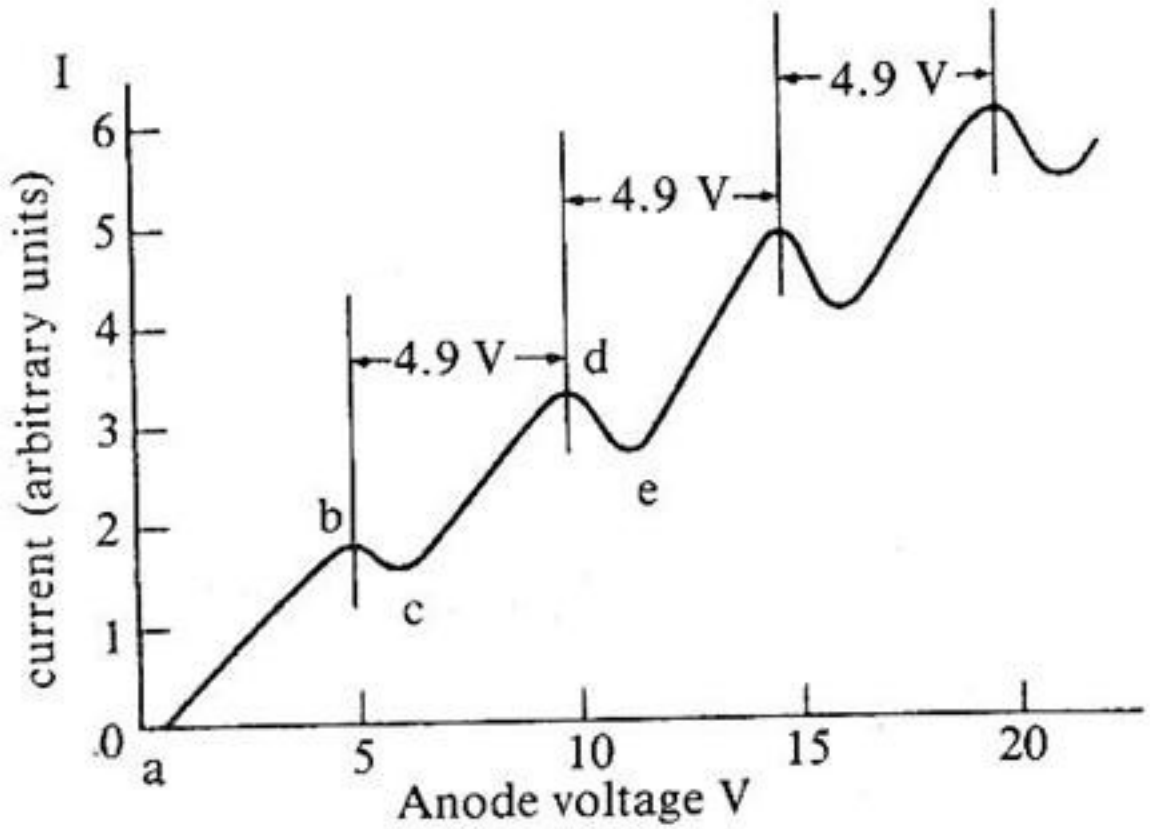
การทดลองของฟรังค์และเฮิรตซ์

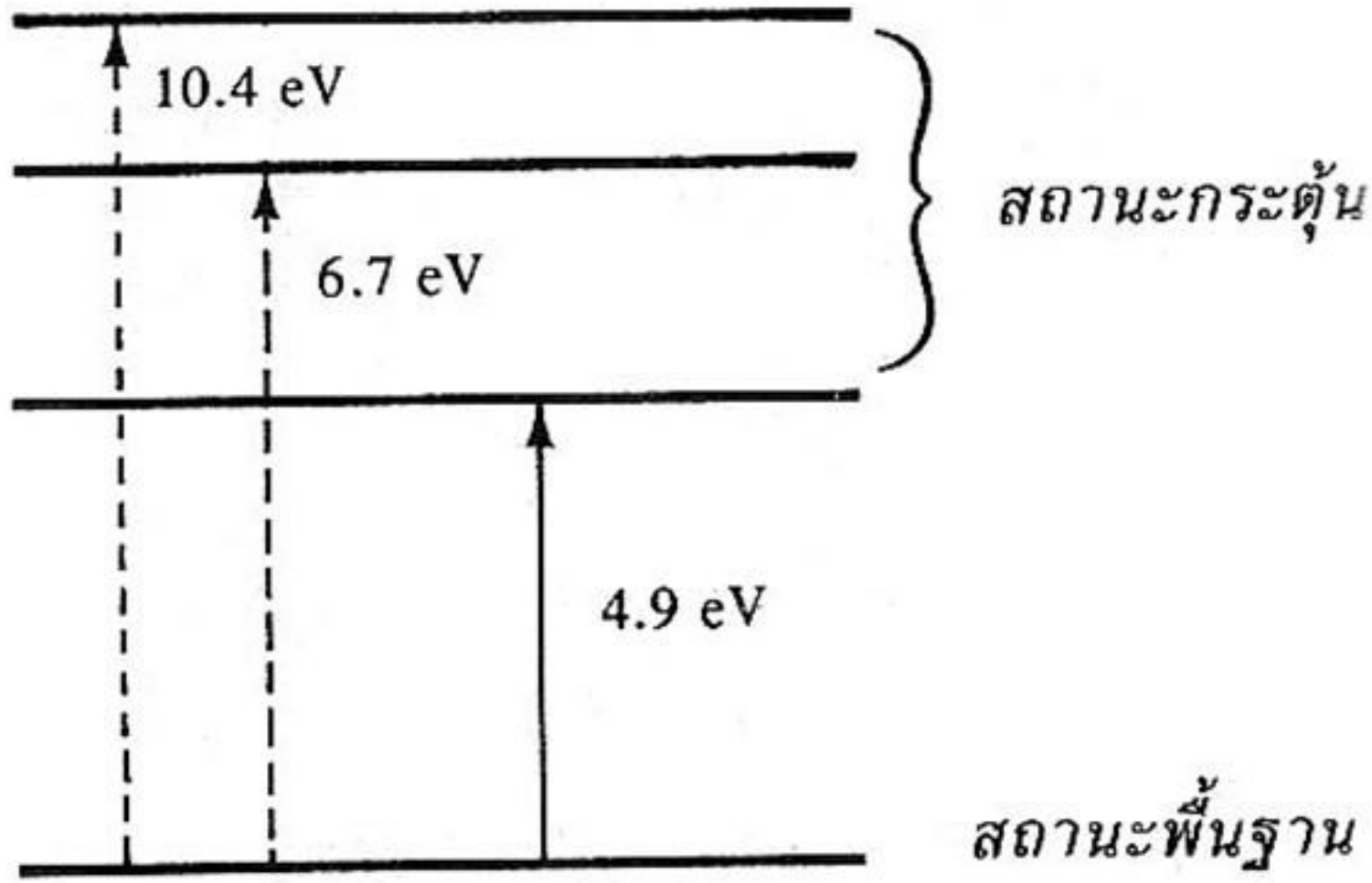
ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีของโบร์ที่ว่า **“อะตอมมีระดับพลังงานเป็นชั้น ๆ”** โดยศึกษาระดับพลังงานของอะตอมของ**ไอปรอท**

การทดลองของฟรังค์และเฮิรตซ์

ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์ทฤษฎีของโบร์ที่ว่า **“อะตอมมีระดับพลังงานเป็นชั้น ๆ”** โดยศึกษาระดับพลังงานของอะตอมของ**ไอปรอท**


C
Gas or vapor of Hg
P(Anode)
G
A
+
+
V, variable
V_0


I
current (arbitrary units)
6
5
4
3
2
1
0
4.9 V
4.9 V
4.9 V
a
b
c
d
e
5
10
15
20
Anode voltage V

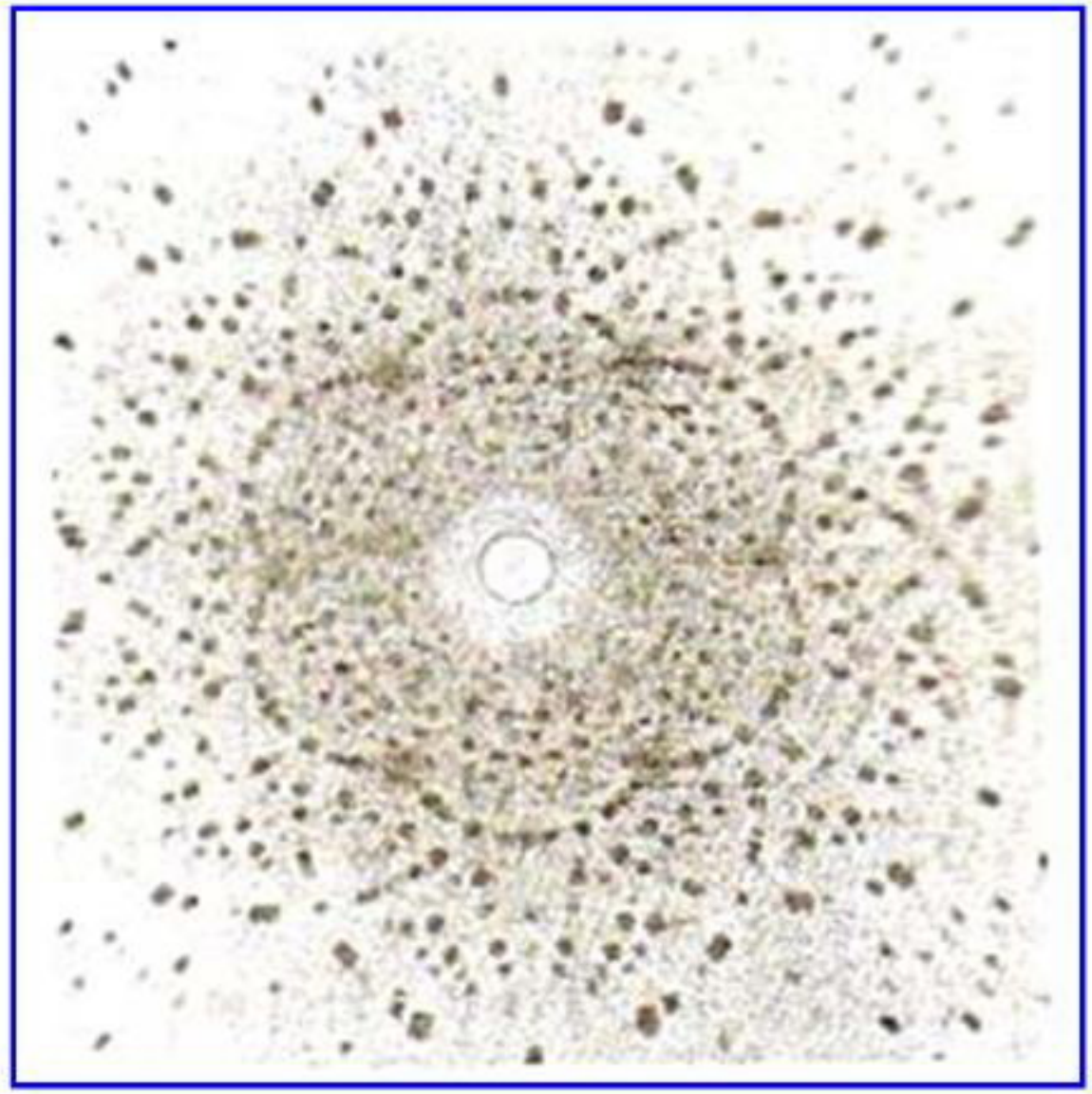


ระดับพลังงานของปรอท

รังสีเอกซ์ (X-ray)

- **เรินต์เกน (Wilhelm K. Roentgen)** ค้นพบโดยบังเอิญขณะทดลองรังสีแคโทด
- **สมบัติของรังสีเอกซ์**

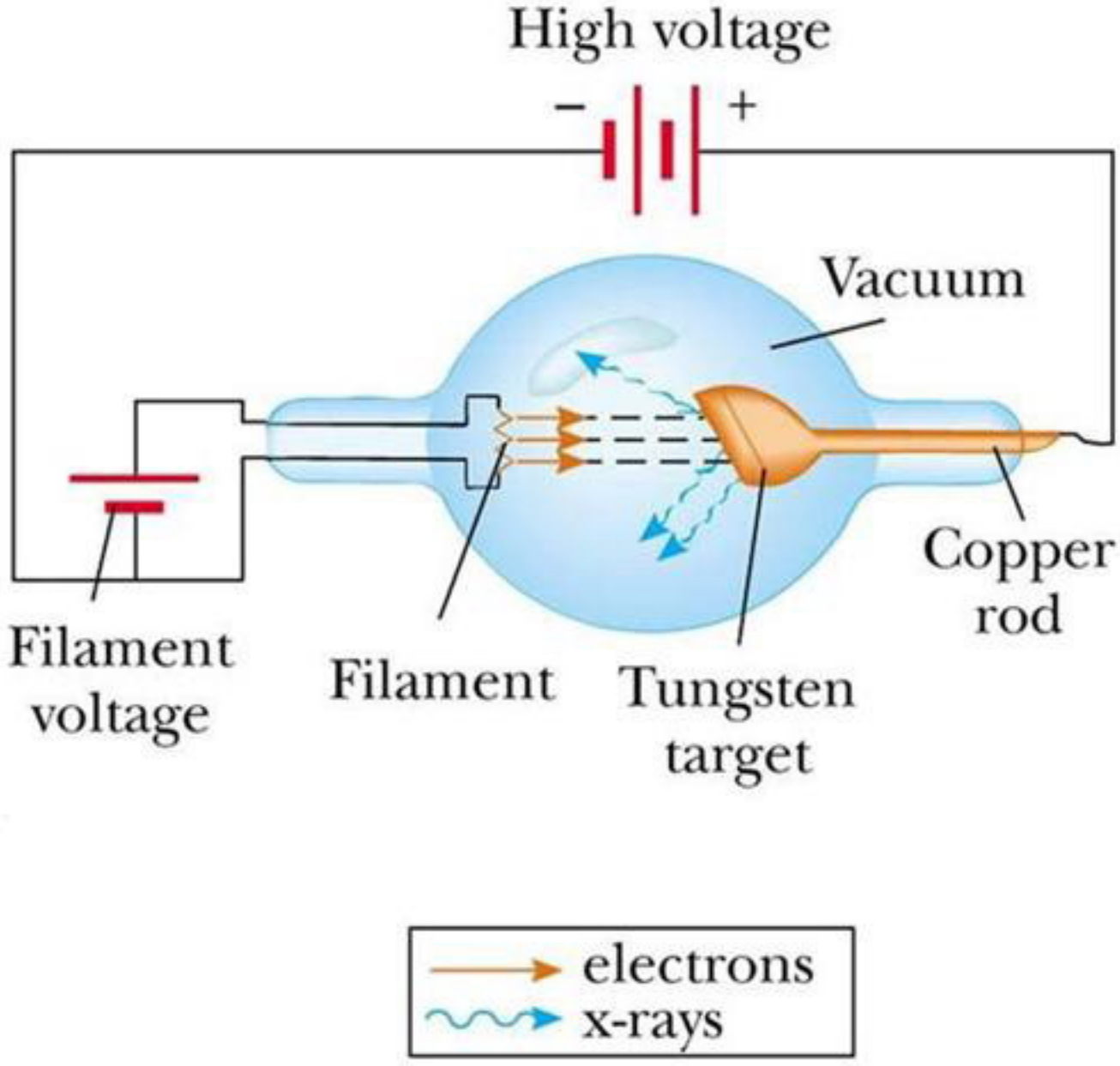
1. เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง
2. มีอำนาจทะลุทะลวงสูง
3. ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
4. ทำปฏิกิริยากับฟิล์มถ่ายรูป
5. เลี้ยวเบนได้เมื่อผ่านเข้าไปในผลึก



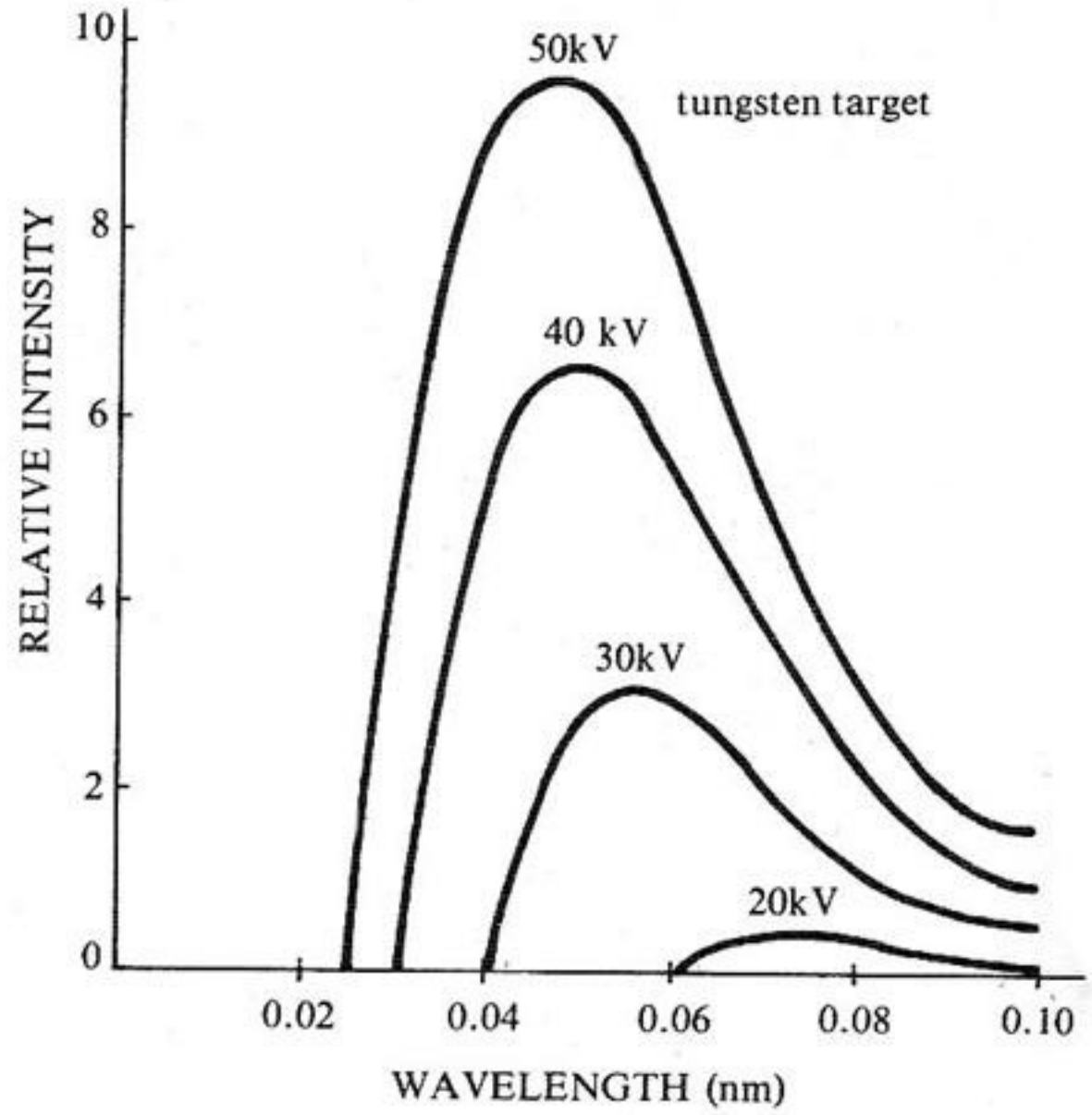
การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อผ่านเข้าไปในโครงสร้างผลึก

- **รังสีเอกซ์มี 2 ชนิด** คือ

1. รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (Continuous X-rays)

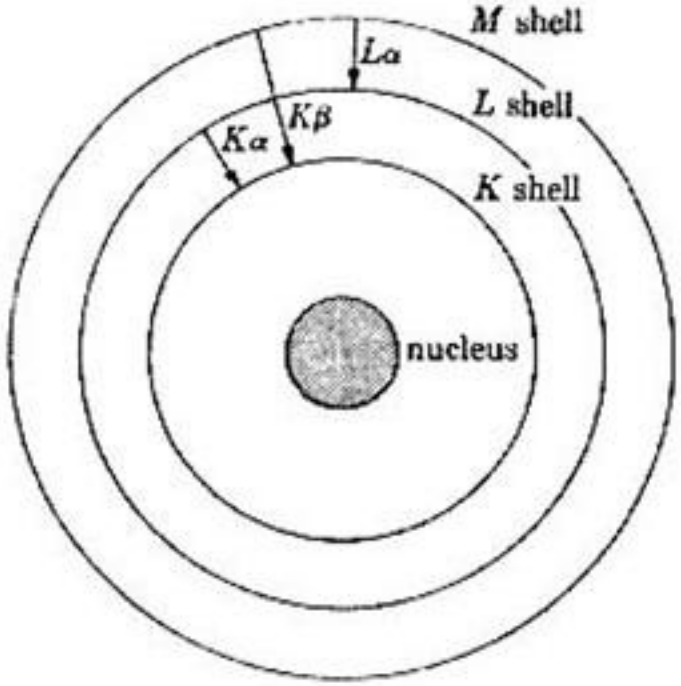


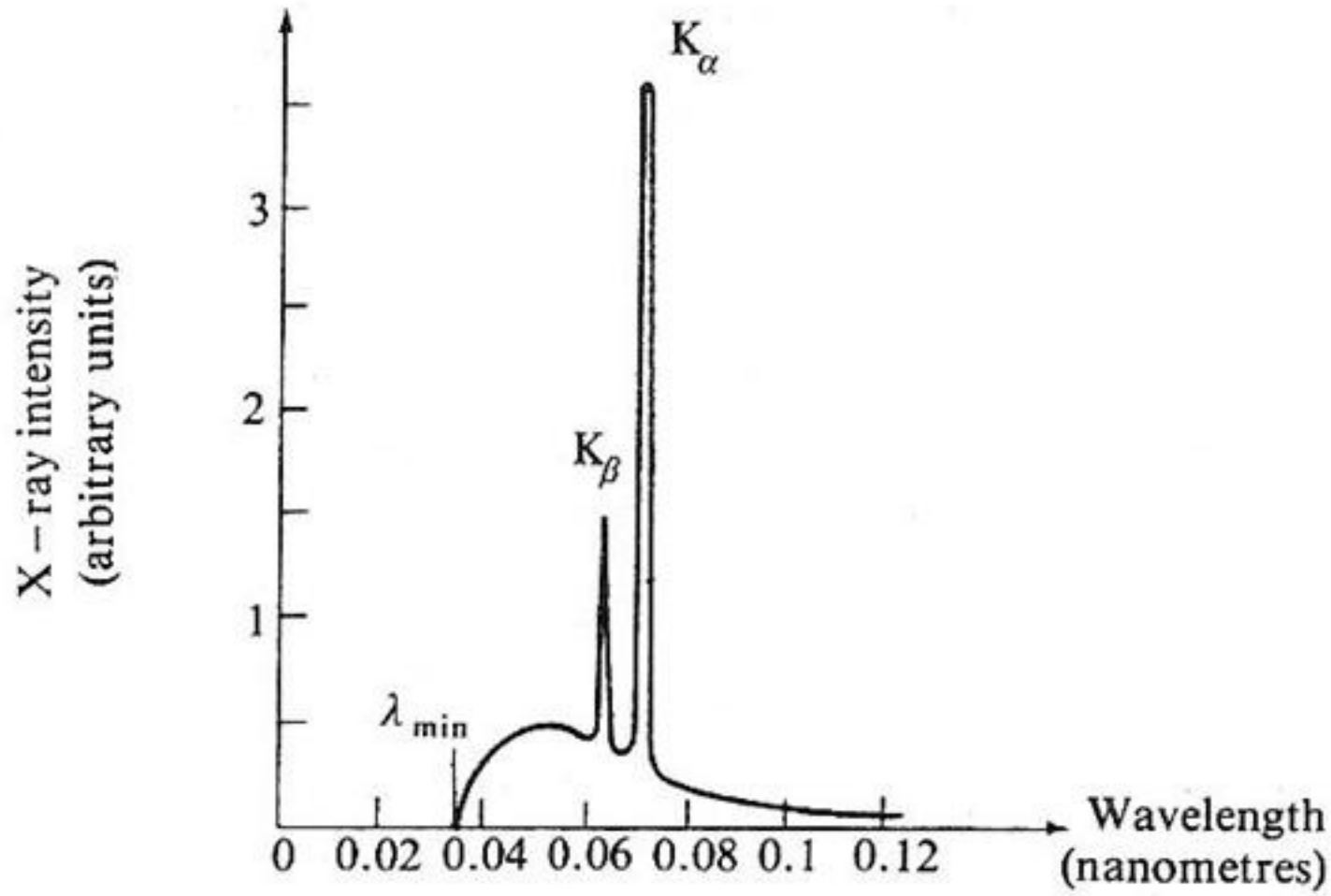
© 2003 Thomson - Brooks Cole



$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV}$$

2. รังสีเอกซ์แบบเส้นหรือแบบเฉพาะ (Characteristic X-rays)

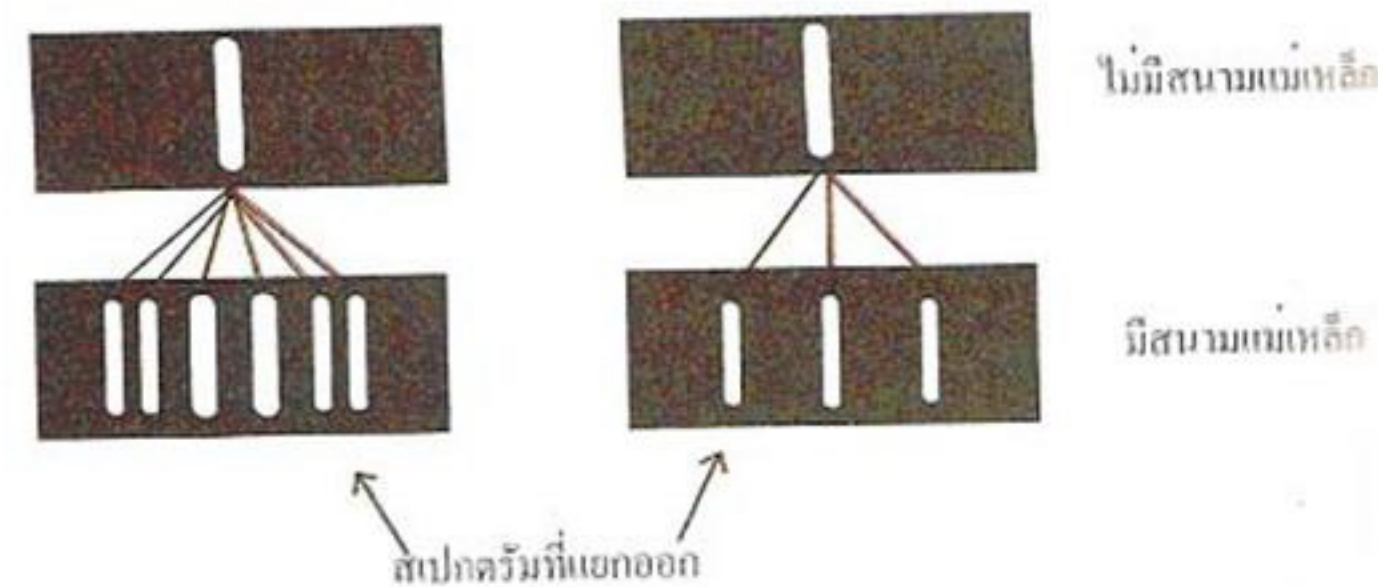




การเกิดรังสีเอกซ์แบบเส้นเป็นการยืนยันความถูกต้องของทฤษฎี
อะตอมของโบร์ คือ อะตอมมีระดับพลังงานเป็นชั้น ๆ

ความไม่สมบูรณ์ของทฤษฎีอะตอมของโบร์

- ทฤษฎีอะตอมของโบร์อธิบายสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจนได้เป็นอย่างดี แต่ไม่สามารถอธิบายสเปกตรัมของอะตอมอื่น ๆ ได้ดี
- ไม่สามารถอธิบายสเปกตรัมของอะตอมที่อยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ สเปกตรัมเส้นหนึ่ง ๆ จะแยกออกเป็นสเปกตรัมหลายเส้น เมื่ออะตอมอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก

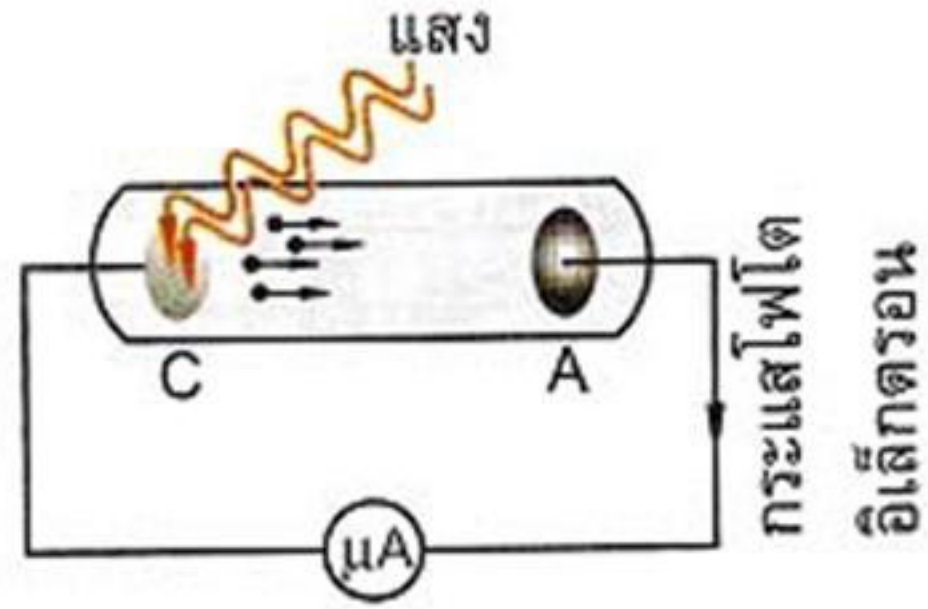


ทวิภาพของคลื่นและอนุภาค
(Duality of wave and particle)

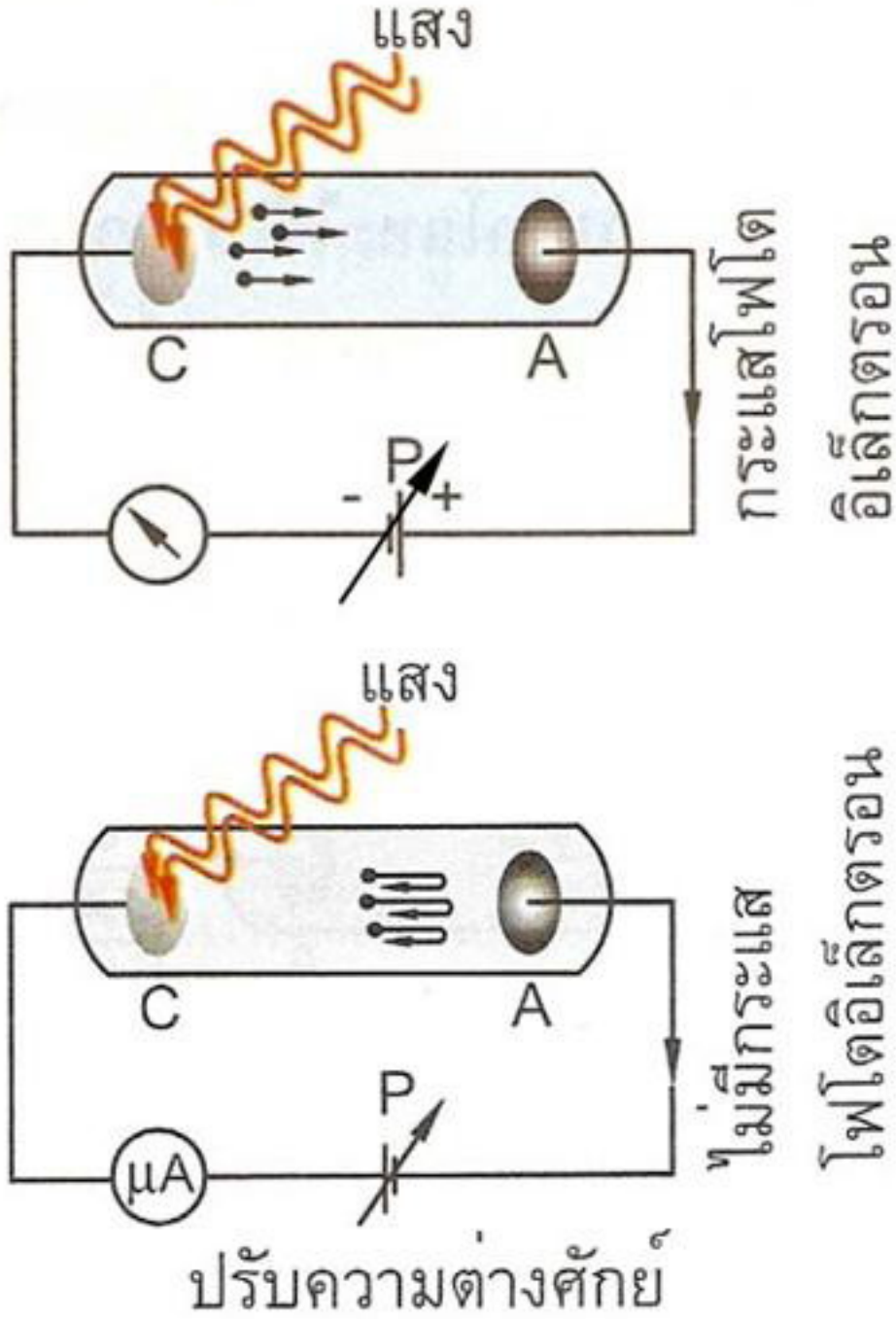
- ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

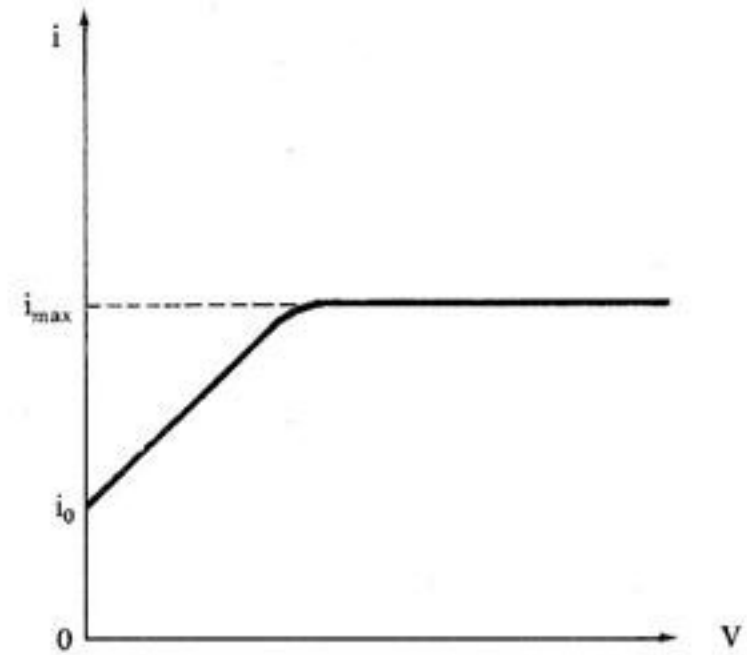
เฮิรตซ์ (Heinrich R. Hertz) พบว่า เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นหรือมีความถี่สูงตกกระทบผิวโลหะ ทำให้อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าหลุดออกมาจากโลหะได้ เรียกว่า **“ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก”**

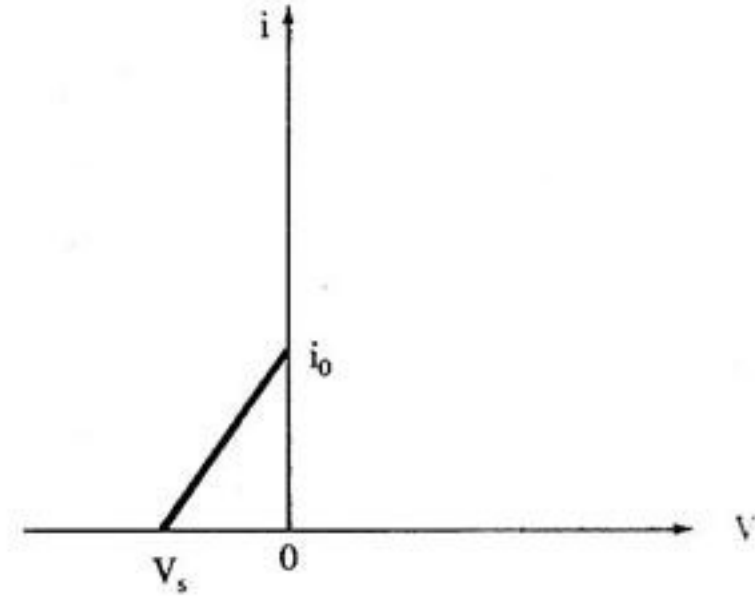
- ต่อมา **ทอมสัน** ได้วัดอัตราส่วนประจุต่อมวลของอนุภาคที่หลุดออกมาจากโลหะ พบว่า มีค่าเดียวกับรังสีแคโทด จึงเชื่อว่าอนุภาคที่หลุดออกมาจากโลหะเป็นอิเล็กตรอน เรียกว่า **"โฟโต-อิเล็กตรอน (Photoelectron)"** และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากโฟโตอิเล็กตรอนนี้ว่า **"กระแสโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron current)"**

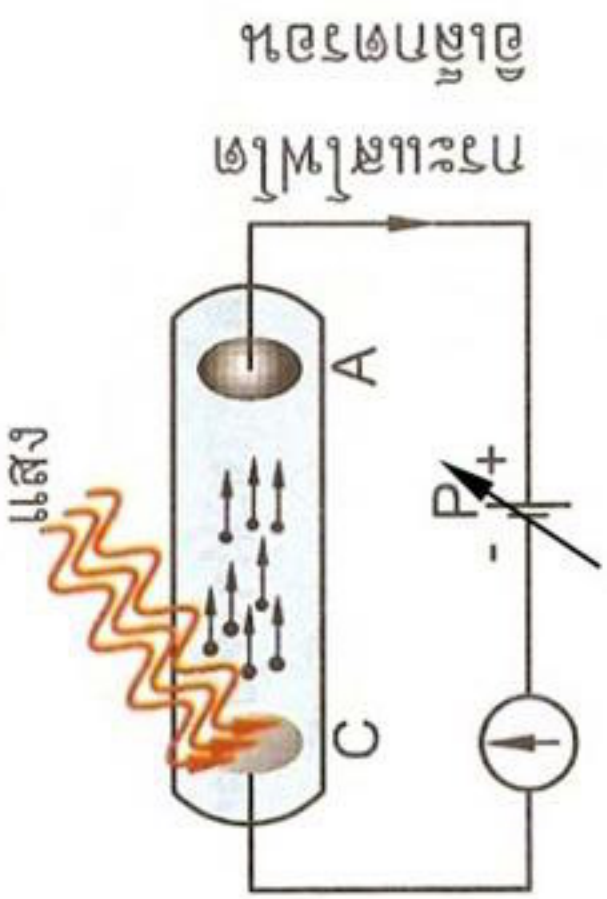


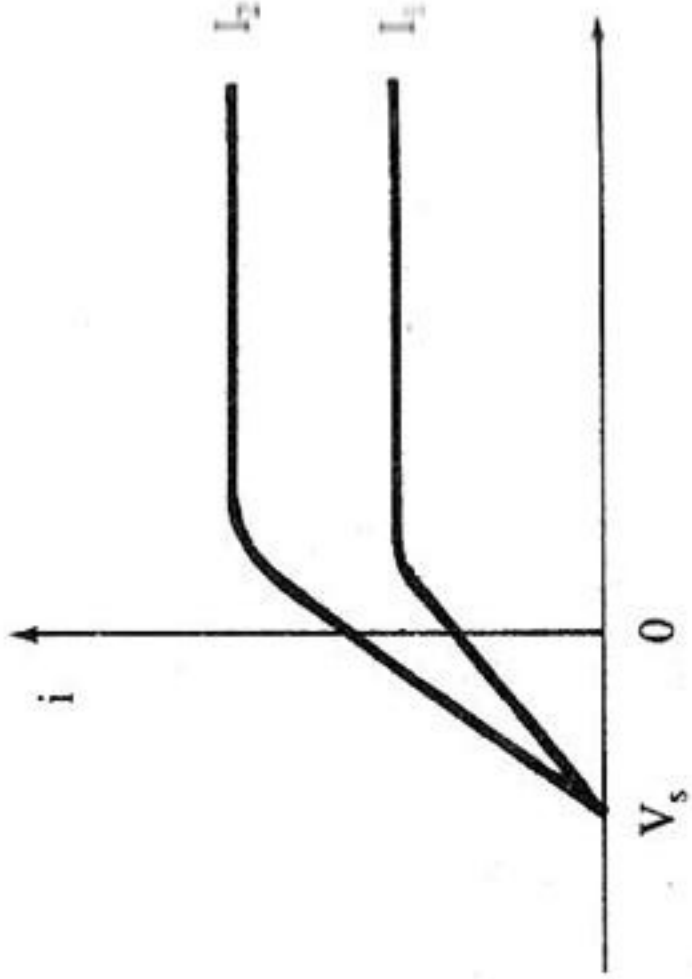
การเกิดกระแสโฟโตอิเล็กตรอน

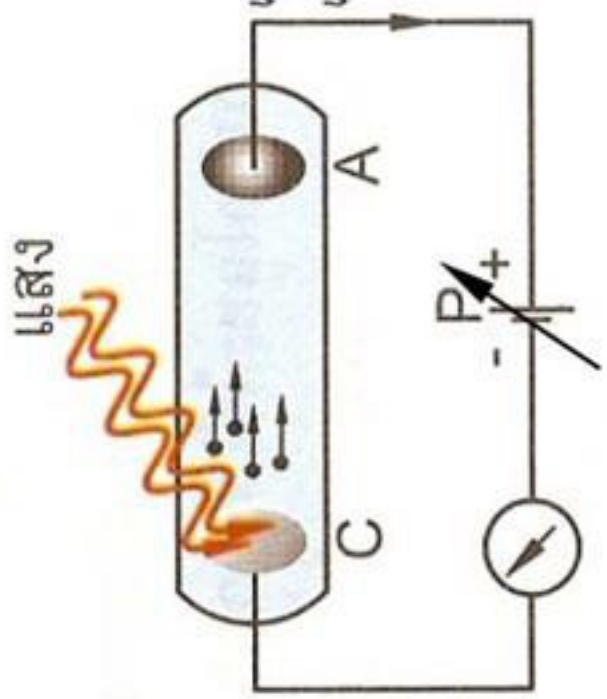

แสง
C
A
P
- +
กระแสโฟโต
อิเล็กตรอน
แสง
ไม่มีกระแส
โฟโตอิเล็กตรอน
μA
ปรับความต่างศักย์

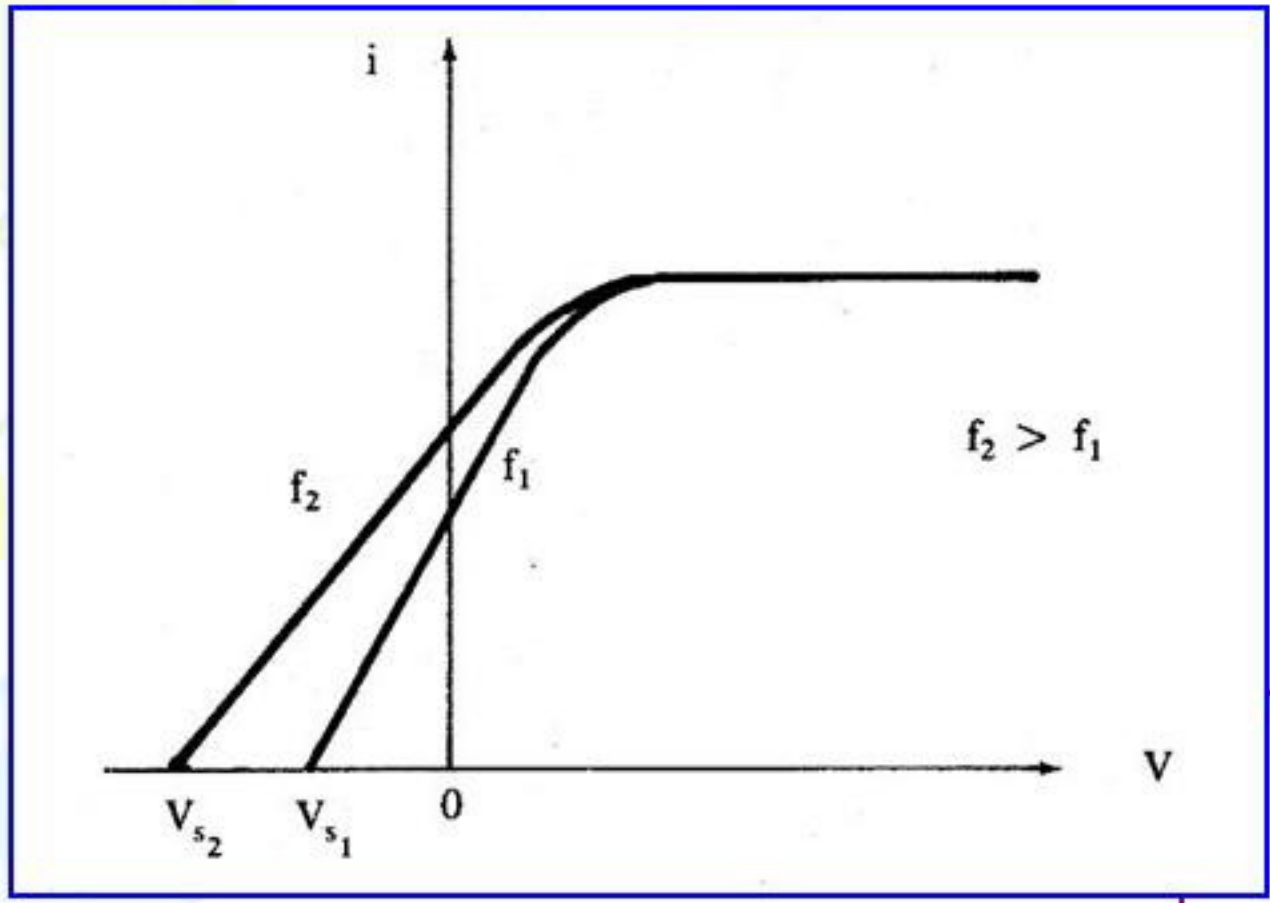

i
i_{max}
i_0
0
V


i
i_0
V_s
0
V


แสง
A
C
P
+
-
กระแสโฟโต
ดีเทคเตอร์


i
0
V_s


แสง
A
C
P
+
-
กระแสโฟโต
ดีเทคเตอร์

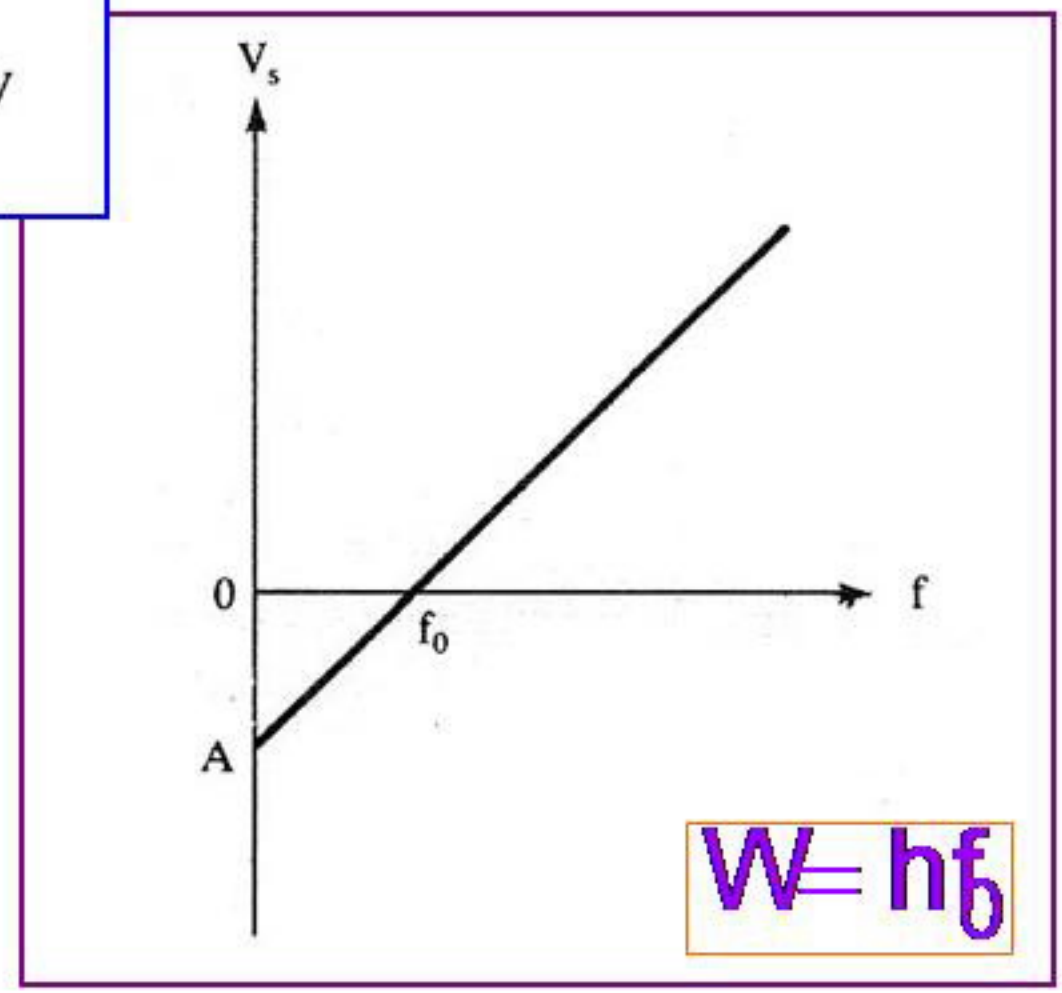


$$E_{Kmax} = eV_s$$

$$hf - W = E_{Kmax}$$

$$hf - W = eV_s$$

$$V_s = \left(\frac{h}{e}\right)f - \frac{W}{e}$$



$$W = hf_0$$

สรุปผลการศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

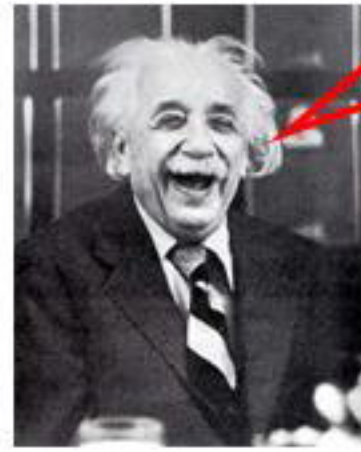
1. โฟโตเล็กตรอนจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อแสงที่ตกกระทบโลหะมีความถี่อย่างน้อยเท่ากับความถี่ขีดเริ่ม (f_0) และเกิดขึ้นทันทีที่แสงตกกระทบผิวโลหะ
2. โฟโตอิเล็กตรอนมีจำนวนมากขึ้น เมื่อความเข้มแสงมากขึ้น
3. พลังงานจลน์สูงสุด (E_{Kmax}) ของโฟโตอิเล็กตรอนไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสง หากแต่ขึ้นอยู่กับความถี่แสงที่ตกกระทบผิวโลหะ

“แสงเป็นก้อนของพลังงาน”

ควอนตัมของพลังงาน

พลังค์

โฟตอน (Photon)



ไอน์สไตน์

$$hf - hf_0 = E_{Kmax}$$

พลังงานยึดเหนี่ยวหรือฟังก์ชันงาน (work function : $W = hf_0$)

โลหะ	สัญลักษณ์	ฟังก์ชันงาน (eV)
ซีเซียม	Cs	1.8
โพแทสเซียม	K	2.2
โซเดียม	Na	2.3
แบเรียม	Ba	2.5
แคลเซียม	Ca	3.2
อะลูมิเนียม	Al	4.2
ทองแดง	Cu	4.5
เงิน	Ag	4.7
ทองคำ	Au	4.8
แพลทินัม	Pt	5.6

สมมติฐานของเดอ บรอยล์ (De Broglie's hypothesis)

กล่าวว่า "ถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงสมบัติของอนุภาคได้ อนุภาคก็แสดงสมบัติของคลื่นได้เช่นเดียวกัน"

- สมบัติความเป็นอนุภาคของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ **โมเมนตัม (p)**

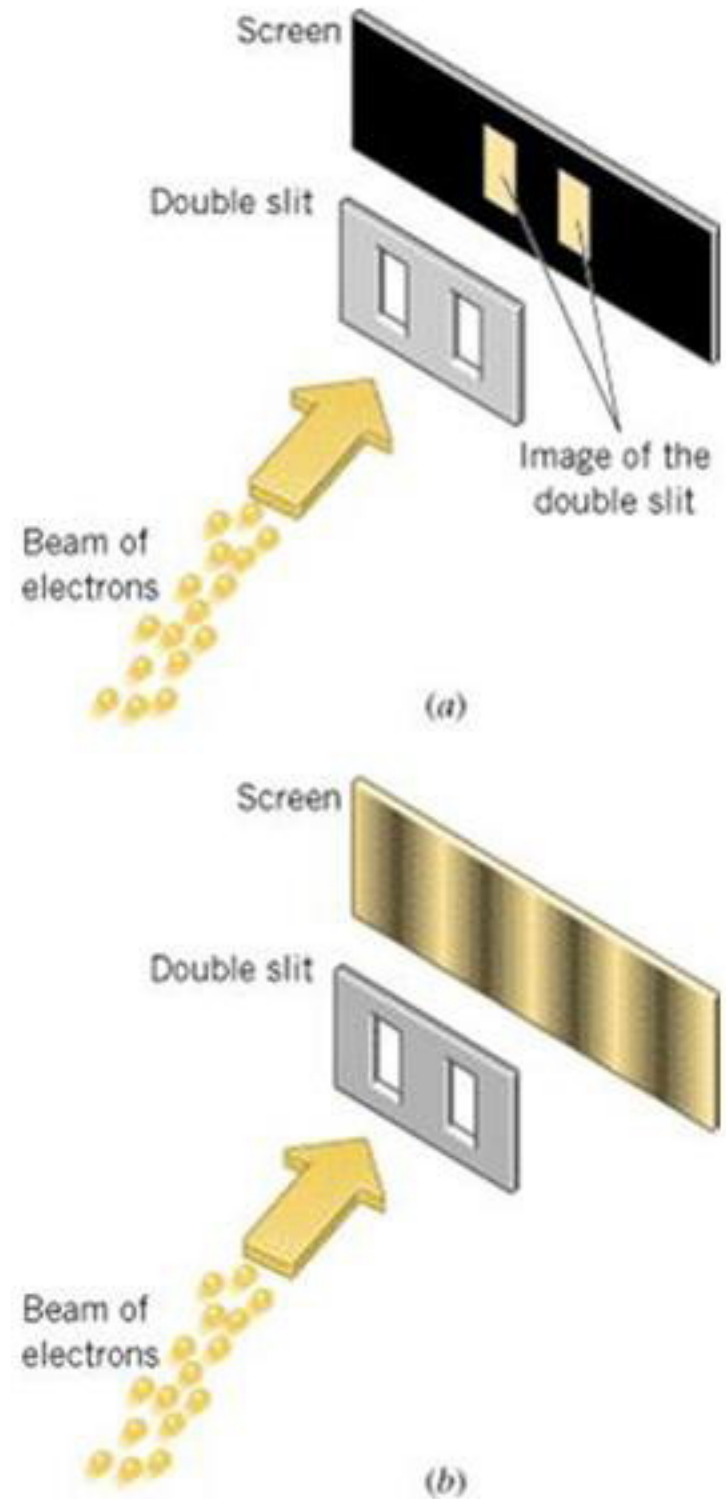
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

- สมบัติความเป็นคลื่นของอนุภาคหรือคลื่นสสาร(Matter wave) คือ **ความยาวคลื่น (λ)**

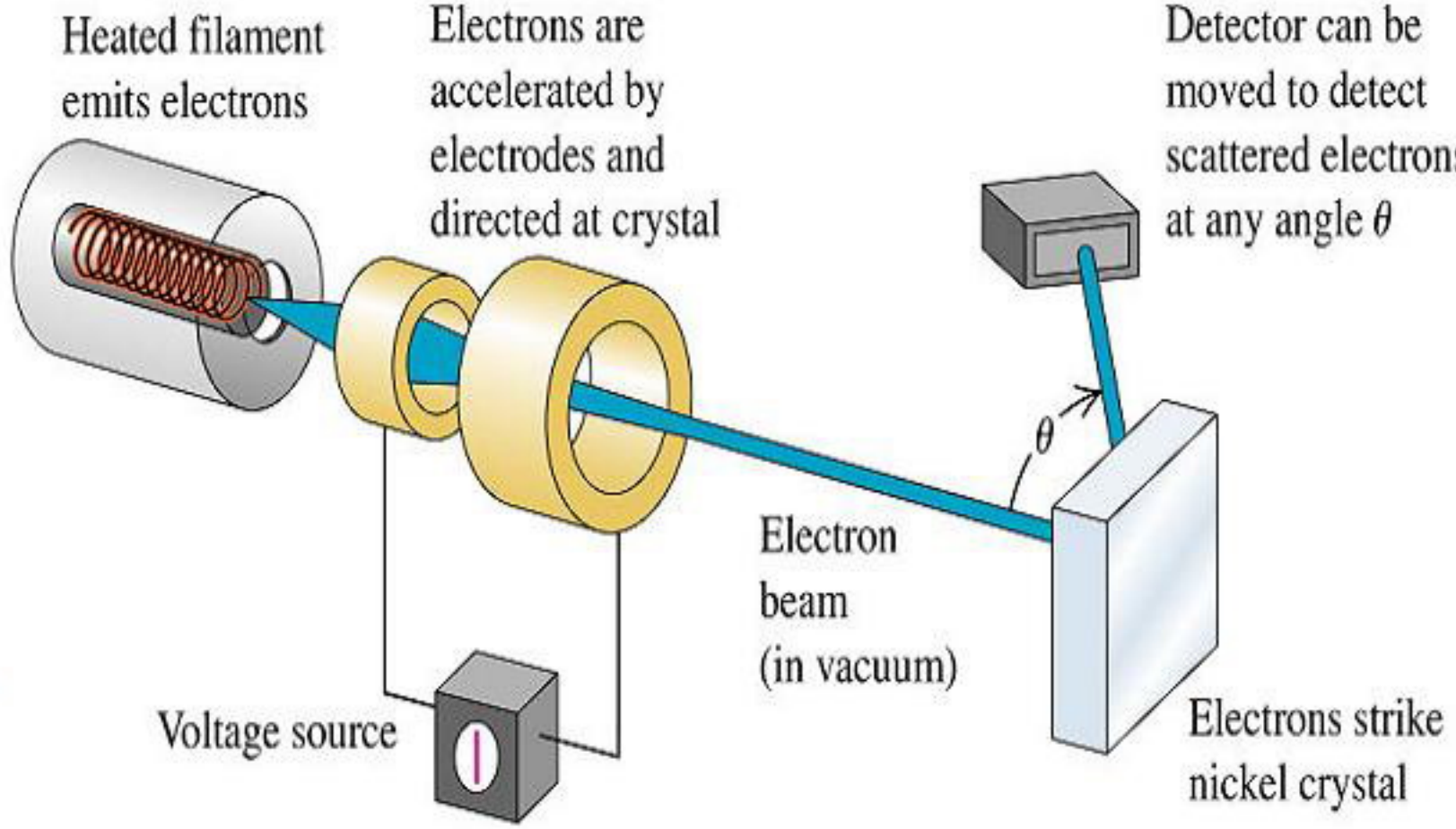
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

⇨⇨⇨ ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ (De Broglie wavelenght)

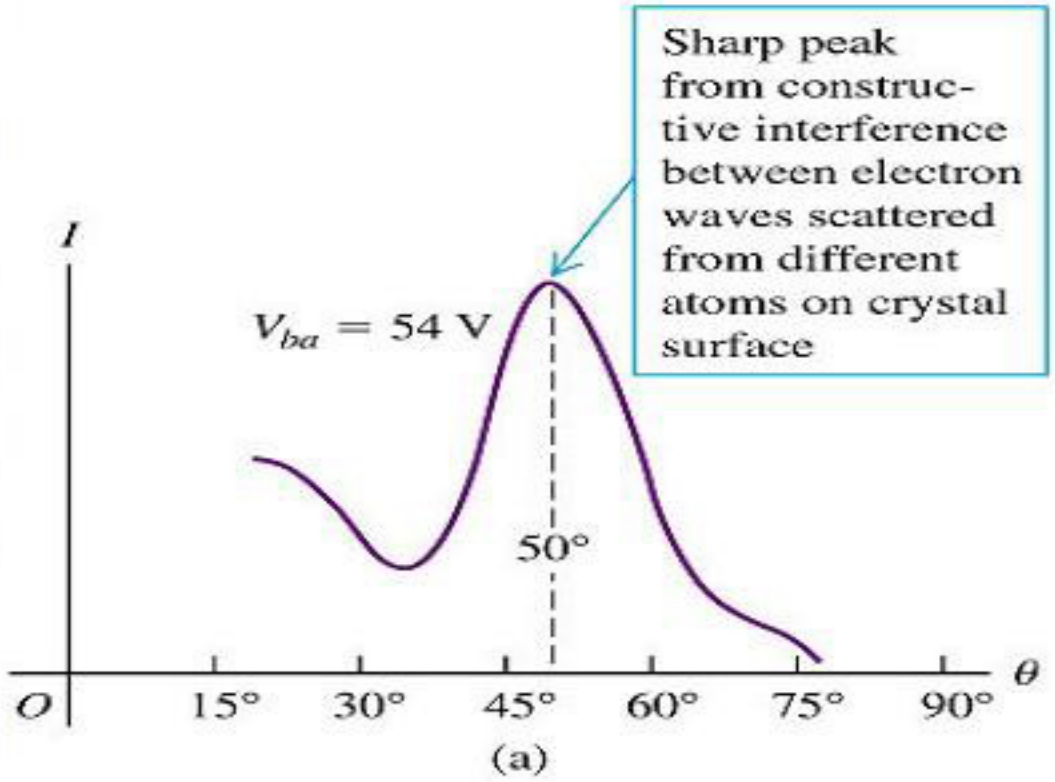
ถ้าอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคประพฤติตัวเป็นคลื่นแล้ว ควรจะมีการเลี้ยวเบนและมีการแทรกสอดได้เช่นเดียวกับรังสีเอกซ์ (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน)



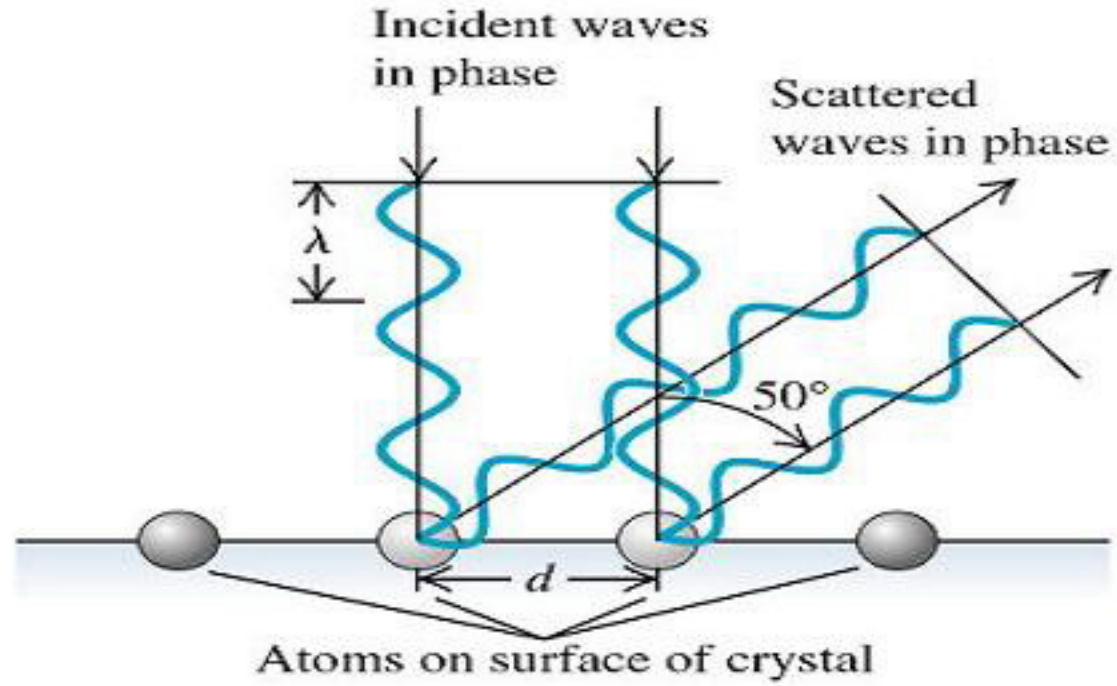
การทดลองของเดวิสสัน (Clinton J. Davisson) และเกอร์เมอร์ (Lester A. Germer)



ผลการทดลองของเดวิสสันและเกอร์เมอร์



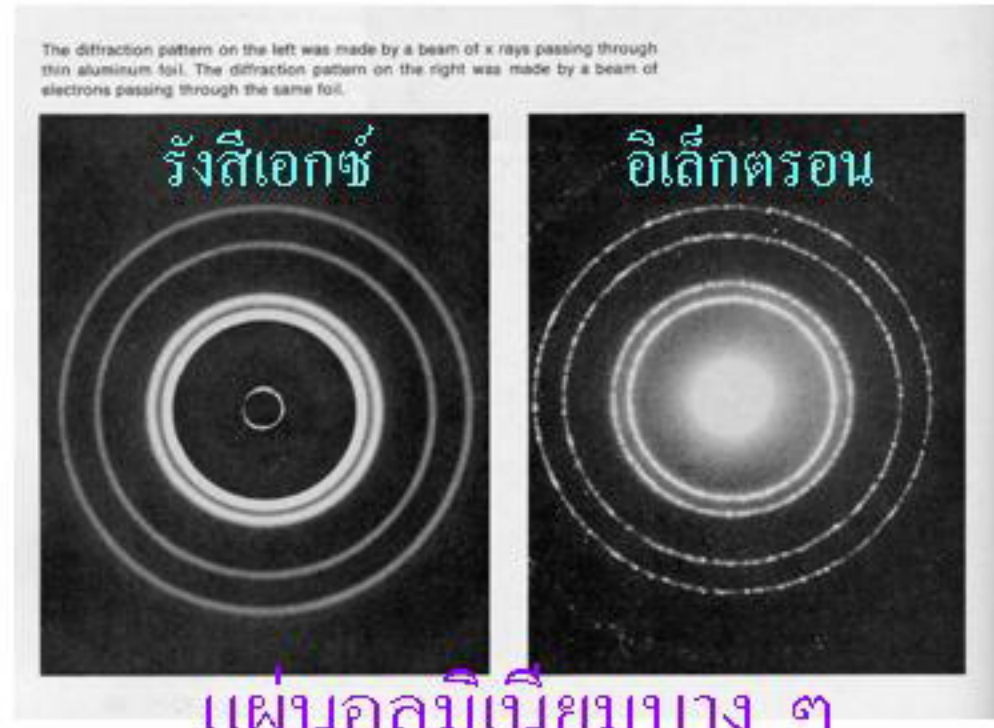
(a)



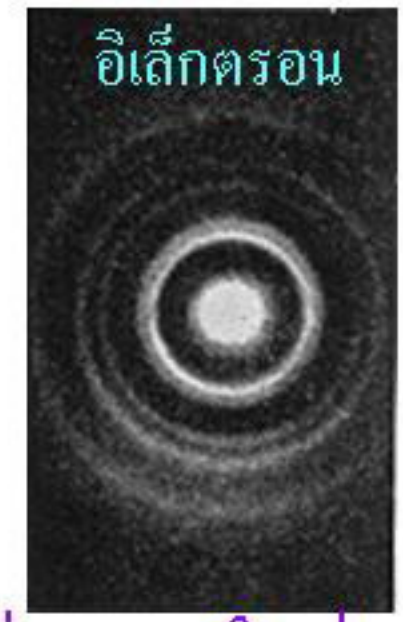
(b)

การทดลองของจี พี ทอมสัน (George P. Thomson)

- ทดลองยิงอิเล็กตรอนความเร็วสูงหรือรังสีแคโทดผ่านแผ่นโลหะบาง เช่น อลูมิเนียม เงิน และทองคำ ปรากฏว่าอิเล็กตรอนเลี้ยวเบนผ่านผลึกโลหะไปแทรกสอดบนฟิล์มได้เหมือนกับรังสีเอกซ์



แผ่นอลูมิเนียมบาง ๆ

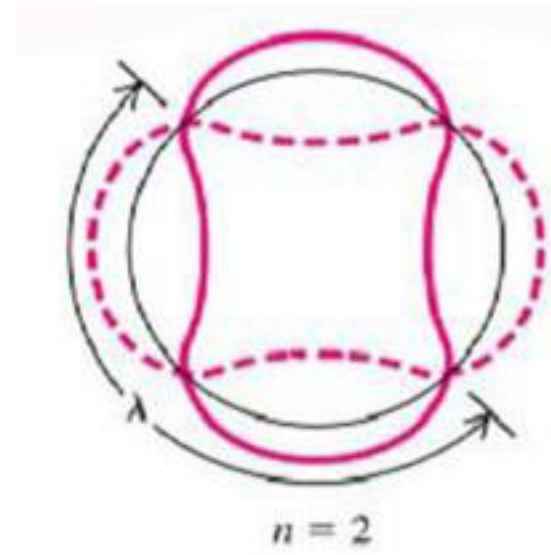


แผ่นทองคำเปลว

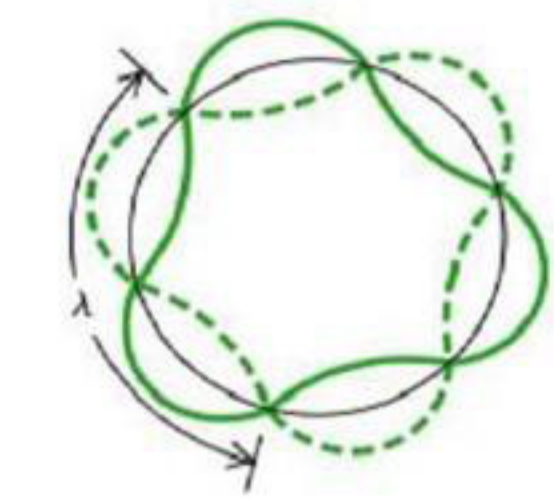
อธิบายสมมติฐานของโบร์

"อิเล็กตรอนที่วิ่งวนอยู่รอบ ๆ นิวเคลียส จะประพฤติตัวเป็นคลื่นนิ่ง" โดยมีความยาวเส้นรอบวงของวงโคจรพิเศษเท่ากับจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นอิเล็กตรอน

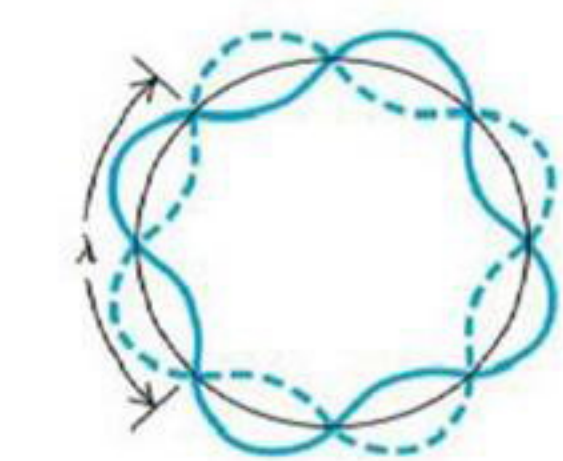
$$2\pi r_n = n\lambda$$



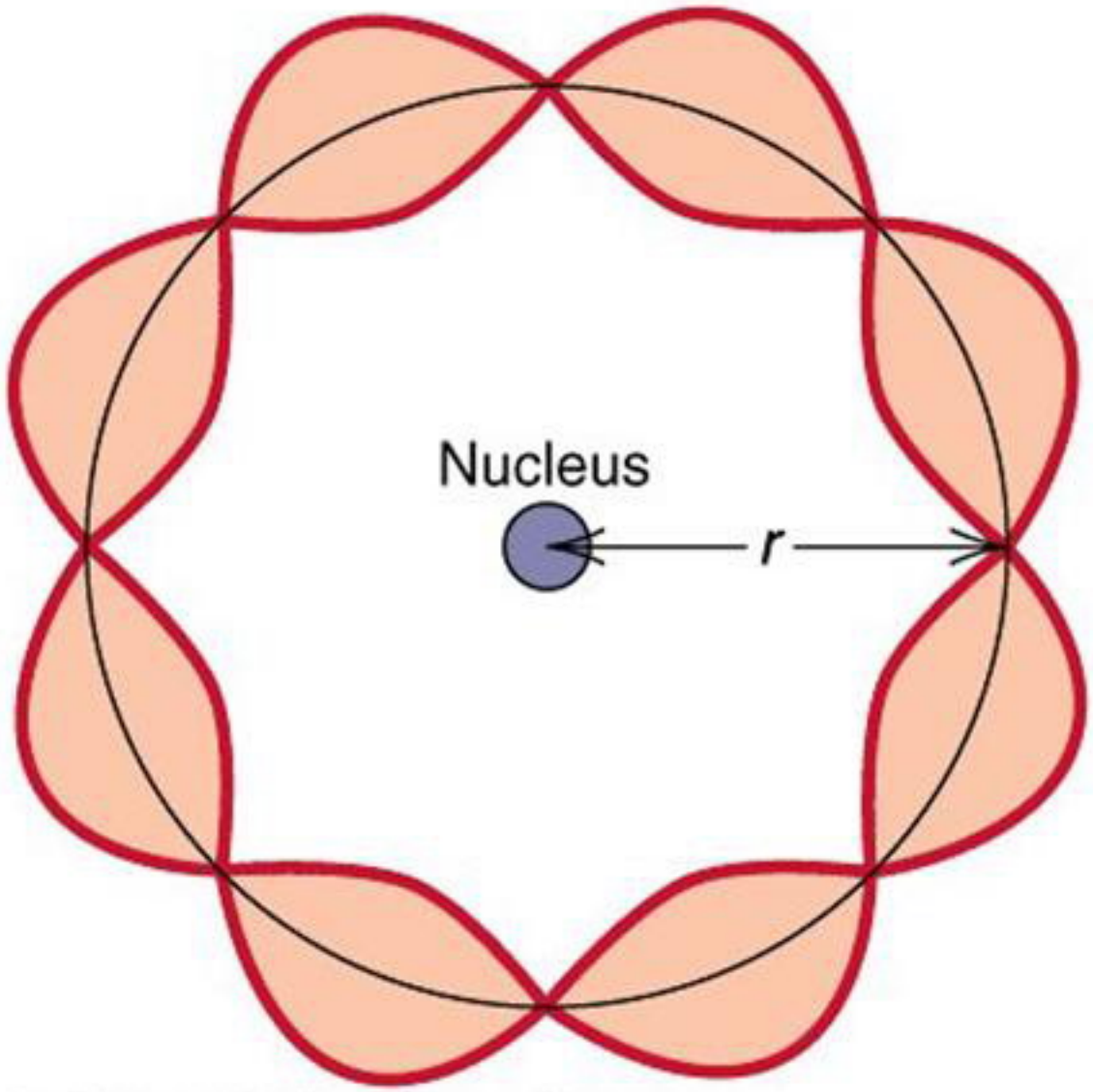
$n = 2$



$n = 3$



$n = 4$



Copyright 1998 by John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

$$2\pi r_n = n\lambda$$

$$2\pi r_n = n\frac{h}{m\gamma v}$$

$$m\gamma v r_n = n\frac{h}{2\pi}$$

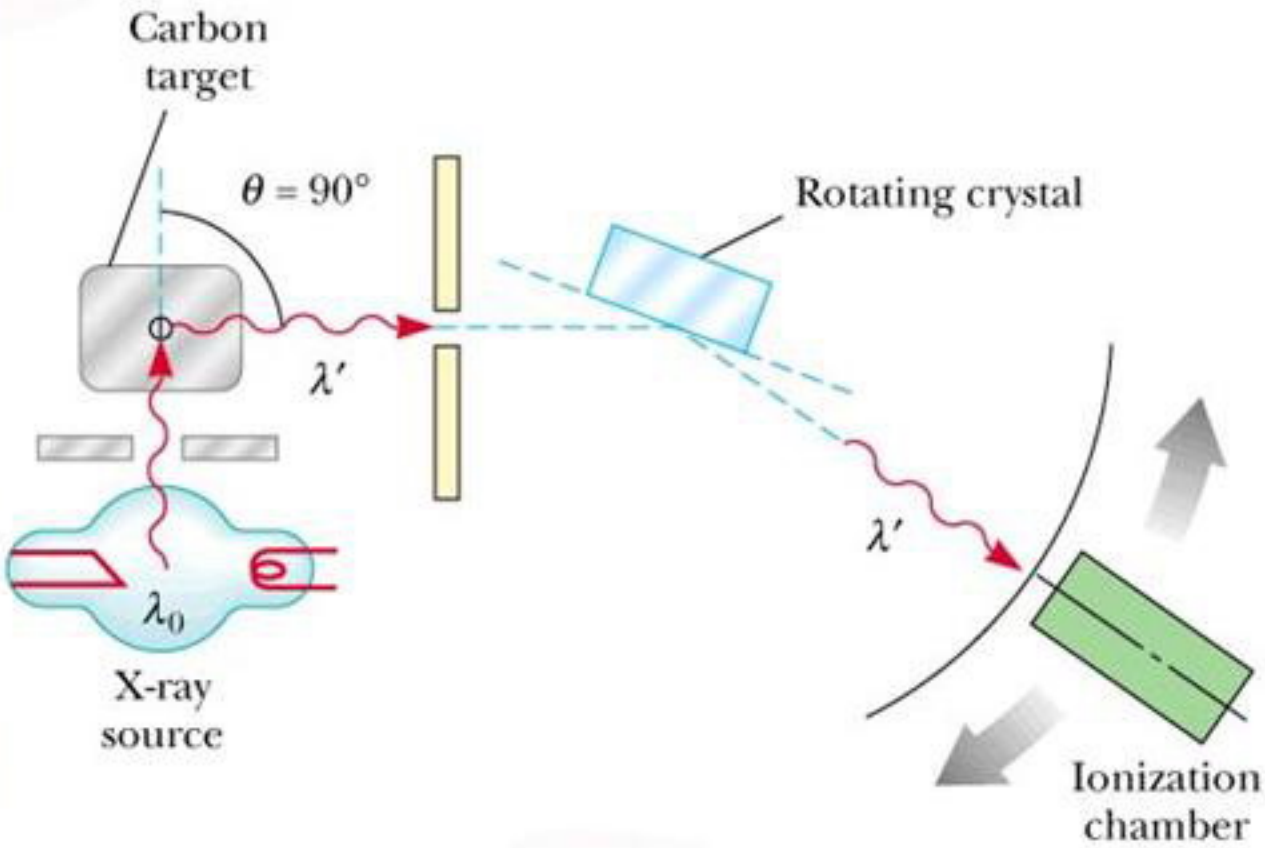
$$\boxed{m\gamma v r_n = n\hbar}$$

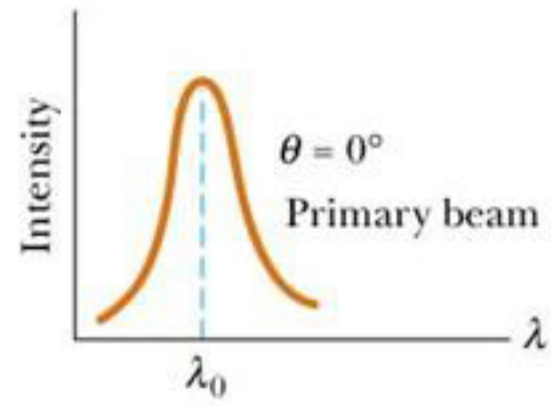
ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)

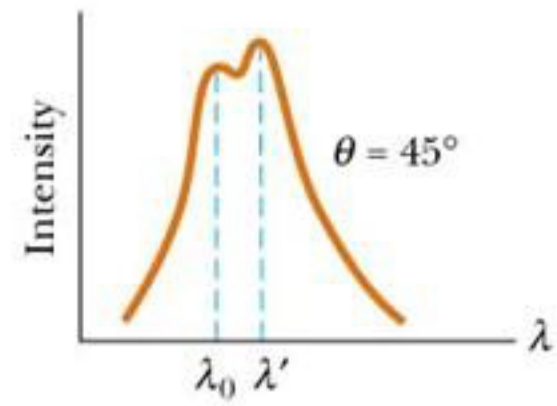
- คอมป์ตัน (Arthur H. Compton) และดีบาย (Peter Debye) ทดลองฉายรังสีเอกซ์กระทบกับอิเล็กตรอนในแท่งแกรไฟต์ ปรากฏว่า มีอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์กระเจิงออกมา

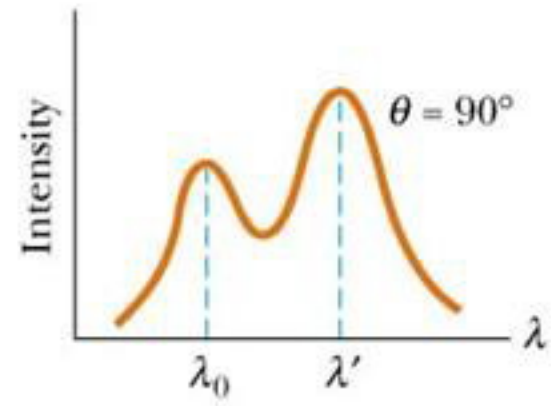
ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)

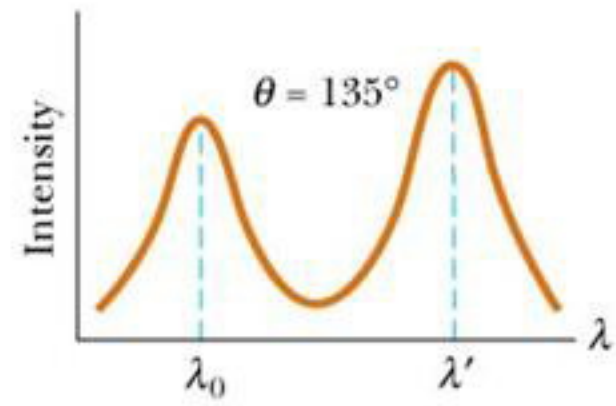
- คอมป์ตัน (Arthur H. Compton) และดีบาย (Peter Debye) ทดลองฉายรังสีเอกซ์กระทบกับอิเล็กตรอนในแท่งแกรไฟต์ ปรากฏว่า มีอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์กระเจิงออกมา

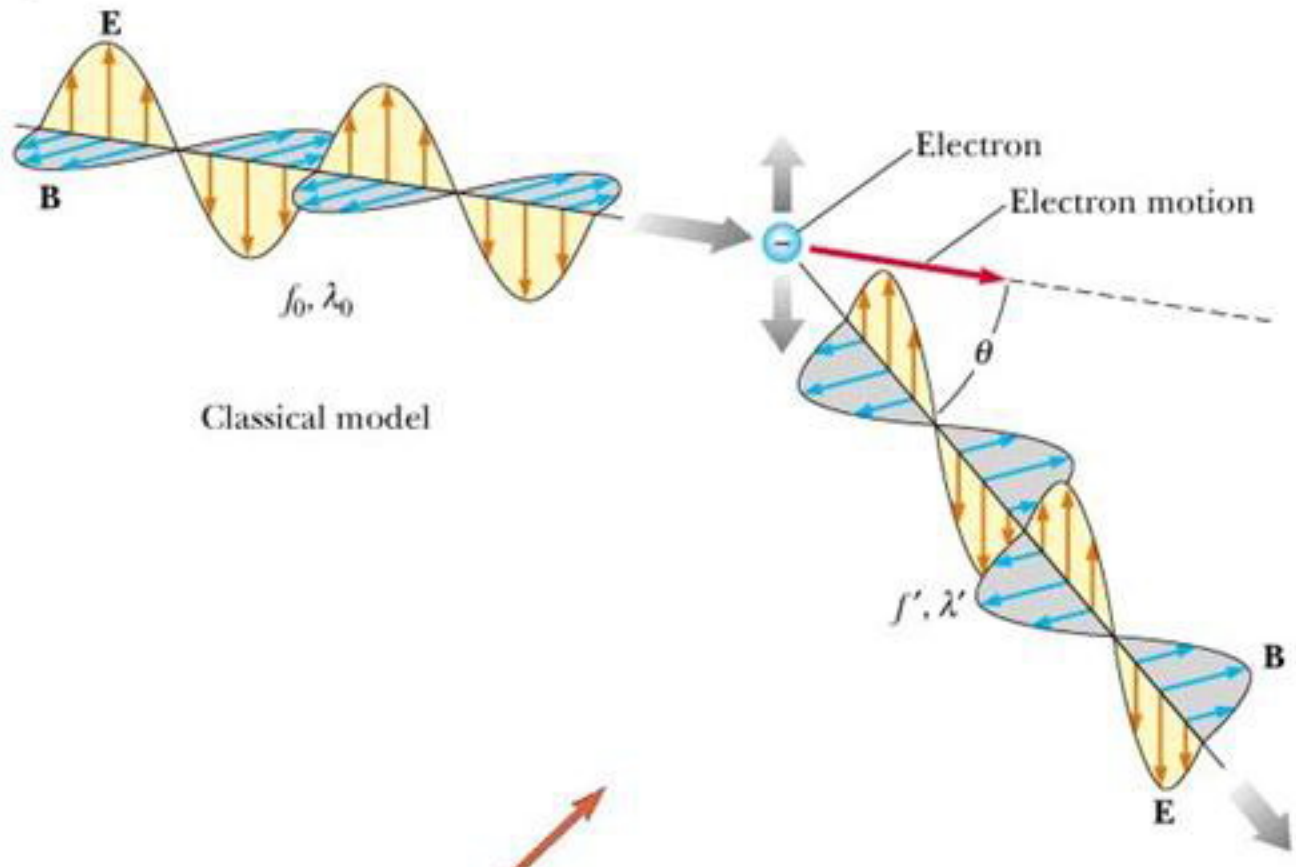

Carbon target
θ = 90°
Rotating crystal
λ′
λ′
λ0
X-ray source
Ionization chamber


Intensity
θ = 0°
Primary beam
λ
λ0

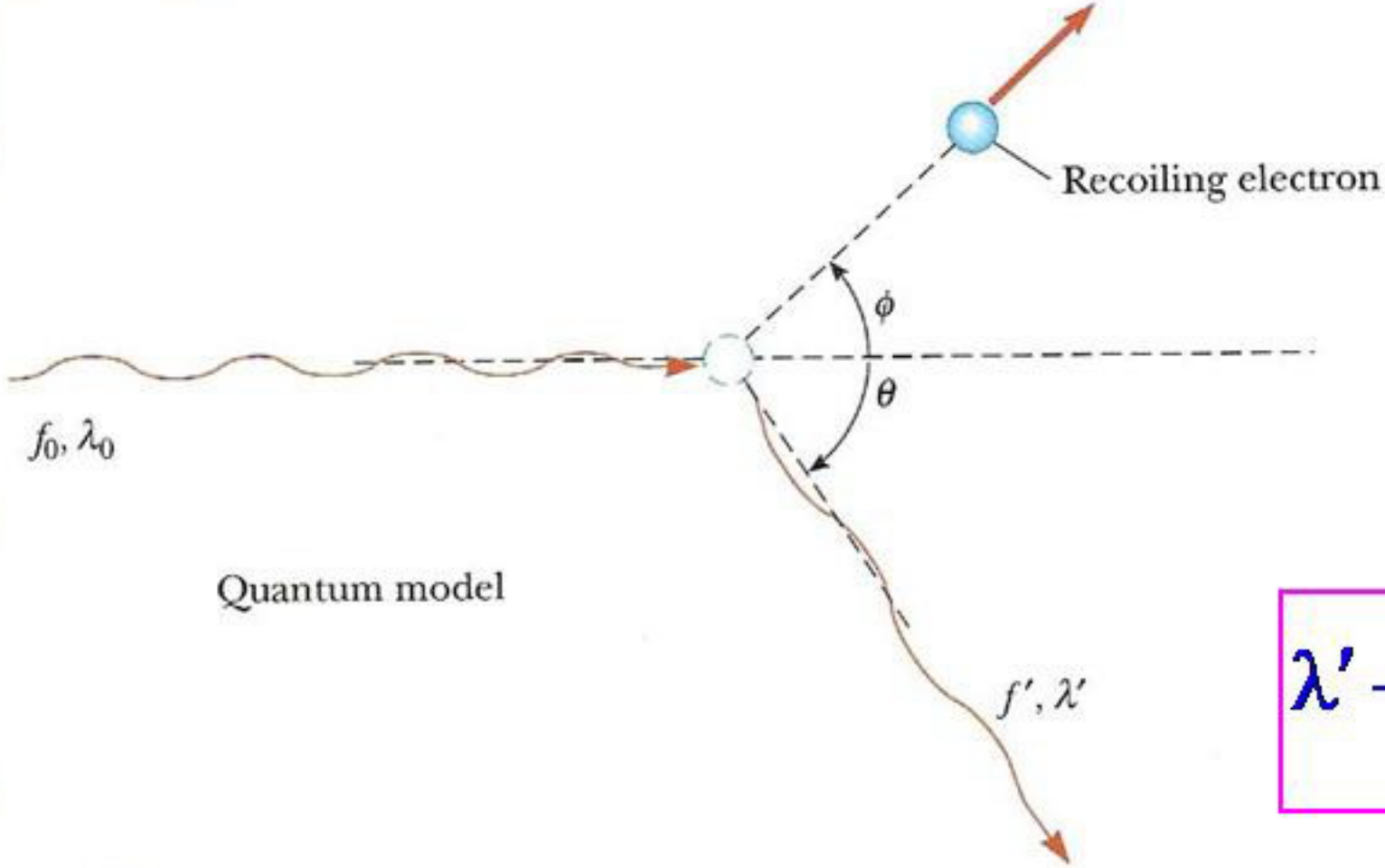

Intensity
θ = 45°
λ
λ0 λ′


Intensity
θ = 90°
λ
λ0
λ′


Intensity
θ = 135°
λ
λ0
λ′



Classical model



Quantum model

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum mechanics)

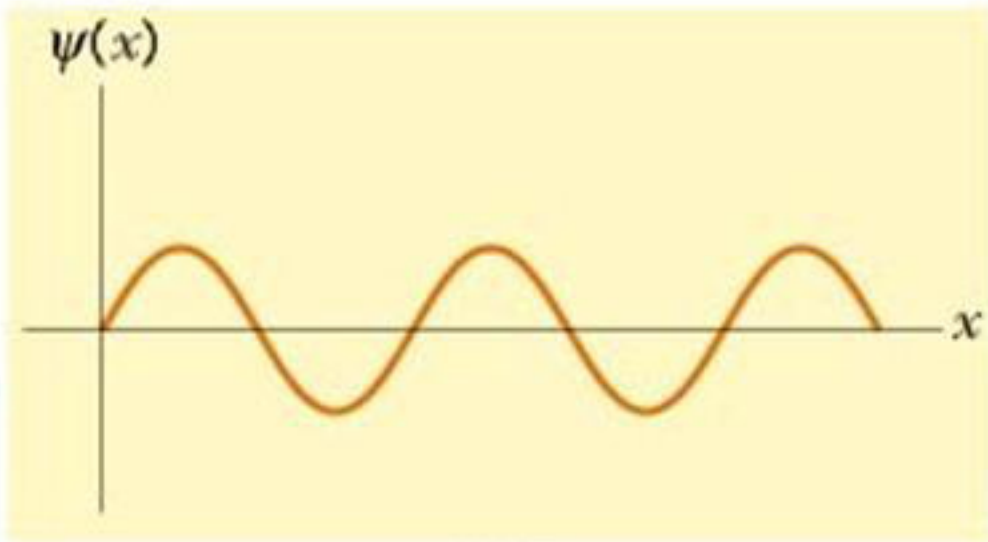
- มี 2 ลักษณะ ตามแบบวิธีทางคณิตศาสตร์ คือ

  1. กลศาสตร์ควอนตัมแบบชเรอดิงเงอร์ (Erwin Schrodinger)

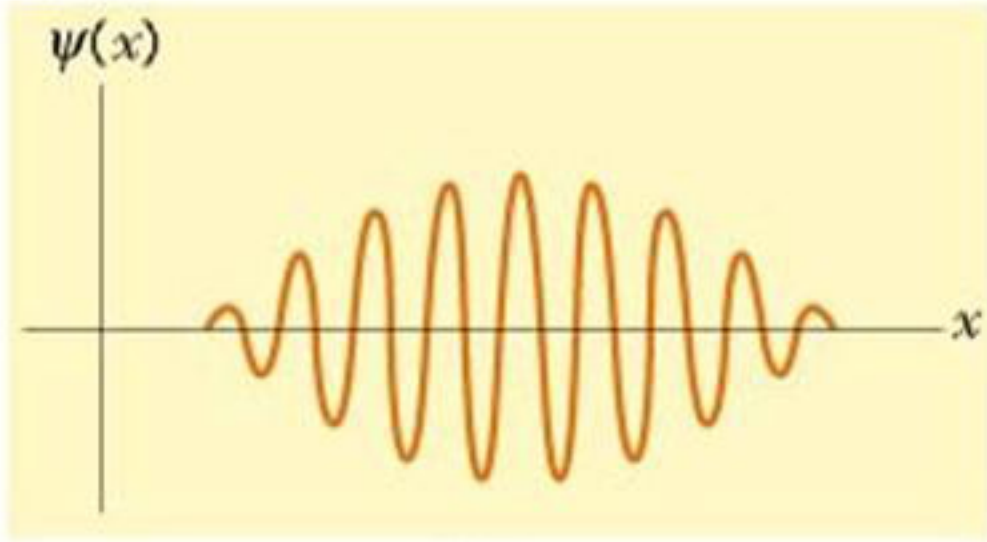
  หรือกลศาสตร์คลื่น (Wave mechanics)

มีรากฐานแนวความคิดจากสมมติฐานของเดอ บรอยล์ คือ อนุภาคแสดงสมบัติของคลื่นได้ กล่าวคือ

"ถ้าอิเล็กตรอนเป็นอนุภาค แต่ประพฤติตัวแบบคลื่นได้ ก็ควรจะมีสมการการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับคลื่น"



(a)



(b)

คลื่นต่อเนื่อง

กลุ่มคลื่น

โดยแทนอิเล็กตรอนด้วย กลุ่มคลื่น (Wave packet) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วกลุ่ม (Group velocity) เท่ากับความเร็วของอนุภาค

สมการคลื่นโดยทั่วไป

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}$$

และ

$$\psi = \psi_0 \sin\omega t$$

ดังนั้น

$$\boxed{\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = -\frac{\omega^2}{v^2}\psi}$$

เมื่อ ψ คือ คลื่นสสารของเดอ บรอยล์

v คือ ความเร็วกลุ่ม

จาก $$\omega = \frac{2\pi v}{\lambda}$$

และ $$\lambda = \frac{h}{p}$$

โดย $$E = U + \frac{1}{2}mv^2 = U + \frac{p^2}{2m}$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = -\frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - U)\psi$$

$$\boxed{-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + U\psi = E\psi}$$

สมการชเรอดิงเงอร์

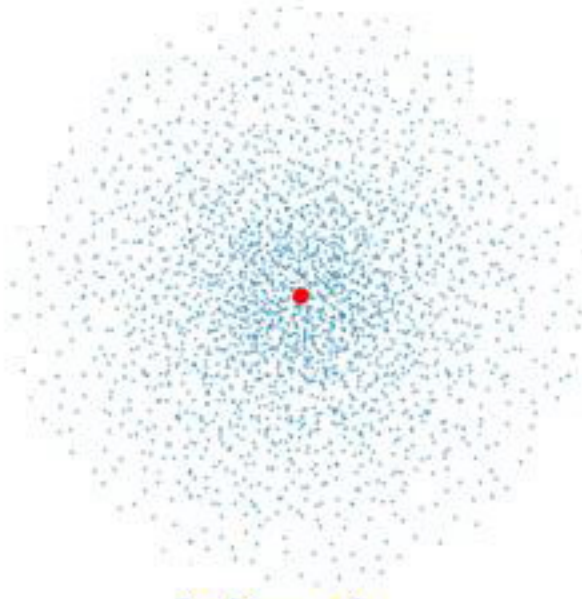
2. กลศาสตร์ควอนตัมแบบไฮเซนเบิร์ก (Werner Karl Heisenberg) หรือกลศาสตร์แมทริกซ์ (Matrix mechanics)

หลักความไม่แน่นอน (Uncertainty principle)

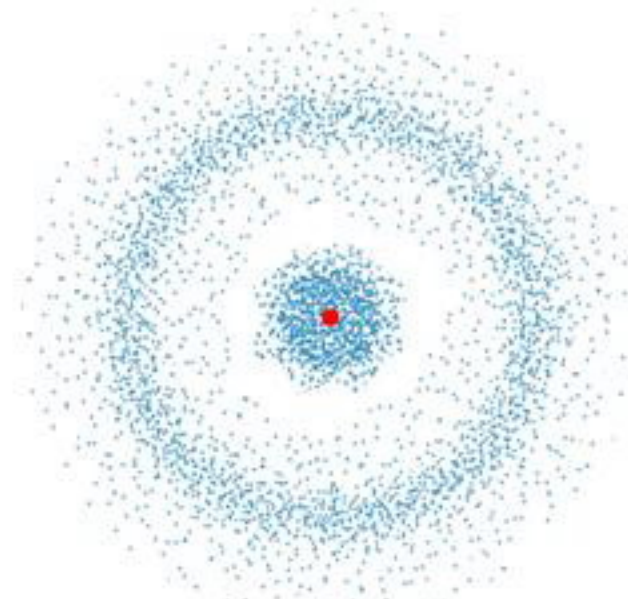
"เราไม่สามารถรู้ถึงตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคได้ในเวลาเดียวกันได้อย่างแม่นยำ" นั่นคือ ผลคูณระหว่างความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง (Δx) กับความคลาดเคลื่อนของโมเมนตัม (Δp) มีค่าไม่น้อยกว่า

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

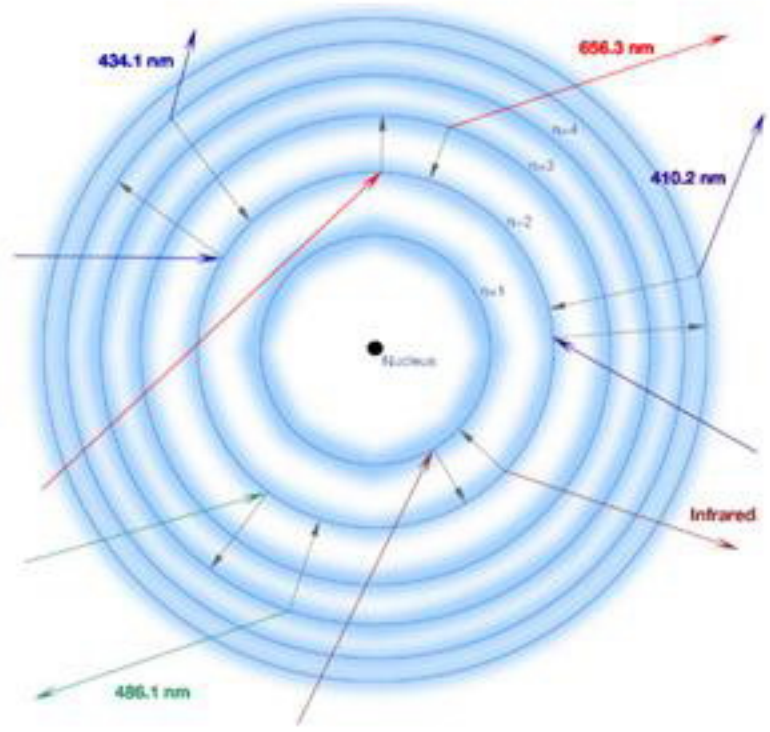
โครงสร้างอะตอมตามทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม



N=1

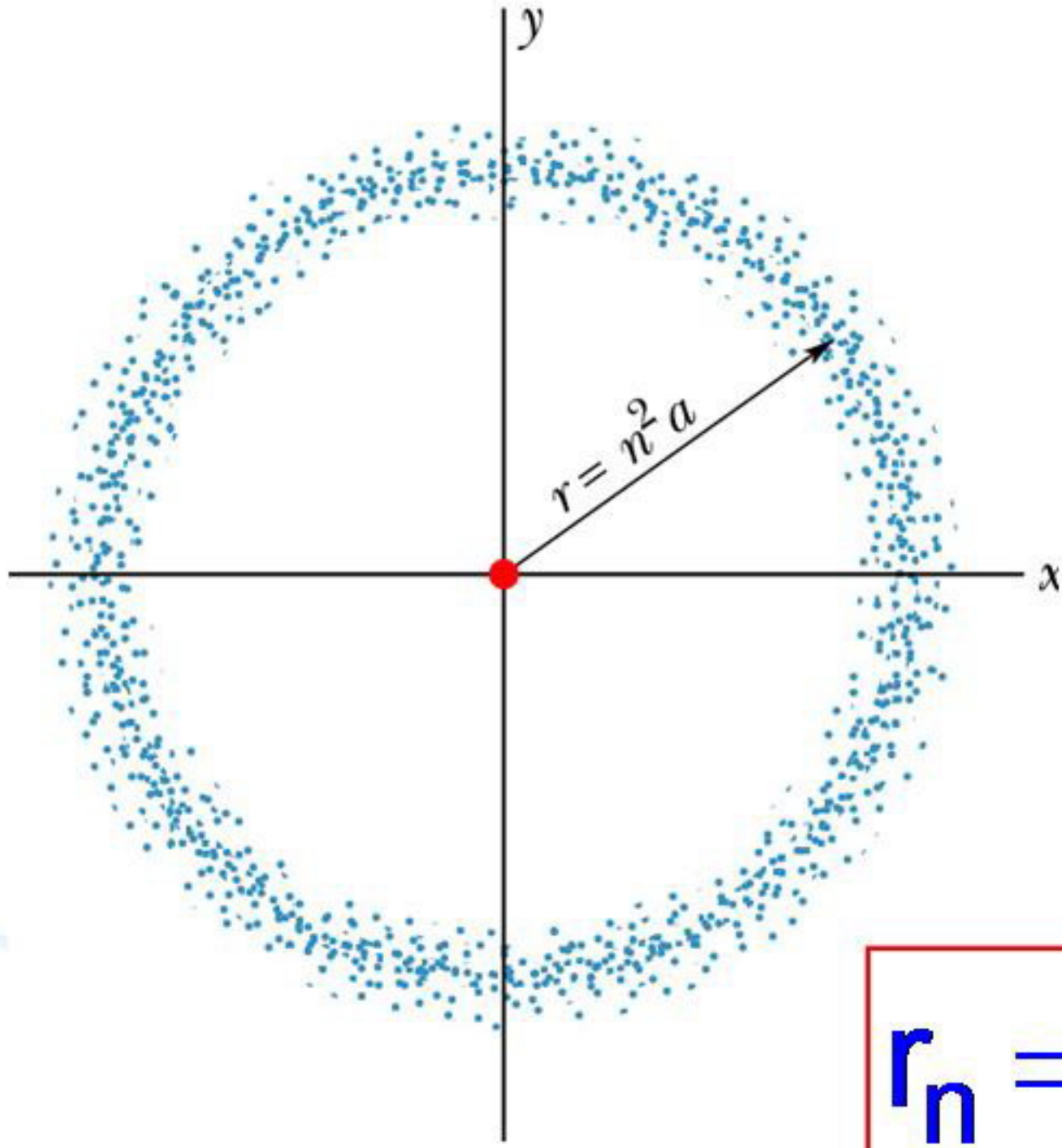


N=2



The Hydrogen Atom

N=6



$$r_n = a_0 n^2$$

การจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอม

สถานะของอิเล็กตรอนถูกกำหนดโดยเลขควอนตัมทั้ง 4 ตัว คือ

1. เลขควอนตัมหลัก (principal quantum number ; n) มีค่าอยู่ในช่วง

   n = 1, 2, 3, ..., ∞ เรียกว่าเชล (shell) K, L, M, N, O, P, ... ตามลำดับ กำหนดค่าพลังงานและรัศมีวงโคจรของอิเล็กตรอน

2. เลขควอนตัมวงโคจร (orbital quantum number ; λ) มีค่าอยู่ในช่วง

   λ = 0, 1, 2, 3, ..., (n-1) จำนวน n ค่า เรียกว่าเชลย่อย (subshell)

   s, p, d, f, g, h, ... ตามลำดับ กำหนดรูปร่างวงโคจรและขนาดโมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอน

3. เลขควอนตัมแม่เหล็กของวงโคจร (orbital magnetic quantum number ; m_λ) มีค่าอยู่ในช่วง $-\lambda$, $-\lambda+1$, ..., -2, -1, 0, 1, 2, ..., λ-1, λ จำนวน $2\lambda+1$ ค่า กำหนดทิศทางการวางตัวของระนาบวงโคจรของอิเล็กตรอน

Atom	1s	2s	2p			Electronic configuration
Li	↑↓	↑				$1s^2 2s^1$
Be	↑↓	↑↓				$1s^2 2s^2$
B	↑↓	↑↓	↑			$1s^2 2s^2 2p^1$
C	↑↓	↑↓	↑	↑		$1s^2 2s^2 2p^2$
N	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	$1s^2 2s^2 2p^3$
O	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	$1s^2 2s^2 2p^4$
F	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	$1s^2 2s^2 2p^5$
Ne	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	$1s^2 2s^2 2p^6$