

## บทที่ 19 ฟิสิกส์อะตอม

### 19.1 อะตอม

#### แนวความคิดเกี่ยวกับโครงสร้างของสสารในสมัยกรีกโบราณ

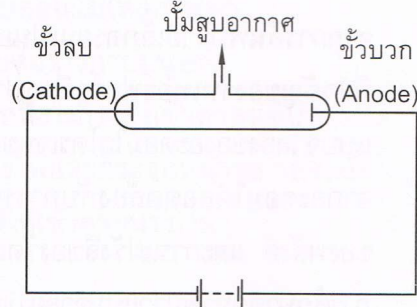
**ดีโมคริตุส** (ประมาณ พ.ศ. 83 – 173) นักปราชญ์ ชาวกรีก เสนอแนวคิดกับเรื่องโครงสร้างสสารว่าโลกประกอบด้วยสสารและที่ว่าง สสารประกอบด้วยอะตอมซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุด และแบ่งแยกต่อไปอีกไม่ได้ สสารแต่ละชนิดประกอบด้วยอะตอมที่มีเนื้อเหมือนกัน แต่มีขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวต่างกันจึงทำให้เกิดสสารต่างชนิดกัน การเปลี่ยนแปลงของสสารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอม

**อาริโตเติล** (ประมาณ พ.ศ. 159 – 221) ยอมรับแนวคิดของเอมเพโดคลีส เขาได้อธิบายโครงสร้างของสสารว่า สสารทุกชนิดมีเนื้อต่อเนื่อง ไม่มีช่องว่าง ไม่มีเนื้อสสารและสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นเล็กๆเท่าใดก็ได้ ไม่จำกัด นั่นคือ ไม่มีอะตอม เขาเชื่อว่าสรรพสิ่งทั้งหลายในโลก ประกอบด้วยสารมูลฐาน 4 อย่าง คือ ดิน น้ำ ลม ไฟ สสารชนิดเดียวกันจะประกอบด้วยองค์ประกอบมูลฐานเหมือนกัน การเปลี่ยนแปลงของสสารเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบมูลฐาน

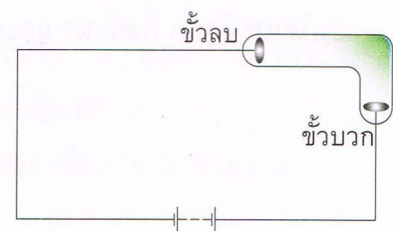
**ทฤษฎีอะตอมของดอลตัน** อธิบายว่า สสารประกอบด้วยอะตอมซึ่งเป็นหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดและแบ่งแยกอีกต่อไปไม่ได้ ธาตุเดียวกันประกอบด้วยอะตอมชนิดเดียวกัน ธาตุต่างชนิดกันประกอบด้วยอะตอมที่ต่างกัน อะตอมของธาตุแต่ละชนิดจะมีรูปร่างและน้ำหนักเฉพาะตัว อะตอมชนิดหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นอะตอมชนิดอื่นไม่ได้ อะตอมของธาตุนั้นๆ อาจรวมกับอะตอมธาตุนั้นได้ในสัดส่วนคงตัว

### 19.2 การค้นพบอิเล็กตรอน

**เซอร์ วิลเลียม ครูกส์** (Sir Williams Crookes) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ (ในช่วงปี พ.ศ. 2375 – 2462) ทำการทดลองการนำกระแสไฟฟ้าในหลอดแก้วสุญญากาศที่โค้งงอเป็นมุมฉากพบว่าเกิดสารเรืองแสงสีเขียวที่ผนังหลอดด้านในตรงข้ามกับขั้วแคโทดซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าลบแสดงว่าเกิดรังสีออกมาจากขั้วแคโทด จึงเรียกว่า **รังสีแคโทด (Cathode Ray)**

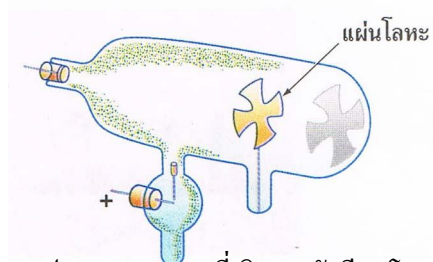


รูป 19.1 วงจรไฟฟ้าหลอดรังสีแคโทด



รูป 19.2 วงจรไฟฟ้าแบบครูกส์

ในเวลาต่อมาได้ศึกษาถึงธรรมชาติของรังสีแคโทด โดยใช้แผ่นโลหะบาง ๆ กันรังสีแคโทด ทำให้เกิดเงาของแผ่นโลหะบนผนังหลอดดังรูป 19.3 พบว่าปกติรังสีแคโทดเคลื่อนเป็นเส้นตรง แต่จะเบี่ยงเบนทิศทางสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก



รูป 19.3 แสดงเงาที่เกิดจากรังสีแคโทด

### 19.2.1 การค้นพบอิเล็กตรอนโดยการทดลองของทอมสัน

เจ เจ ทอมสัน (J.J. Thomson) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ในปี พ.ศ. 2440 ใช้หลอดรังสีแคโทดหาอัตราส่วนประจุต่อมวล ( $q/m$ ) ของอนุภาคได้เท่ากับ  $1.76 \times 10^{11}$  คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม ซึ่งการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า รังสีแคโทดประกอบด้วยอนุภาคที่มีมวลและอิเล็กตรอน คือ ส่วนประกอบที่สำคัญของอะตอม

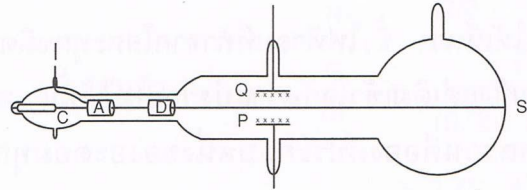
#### สรุปผลการทดลองของ Thomson

1. ทอมสันได้ทำการทดลองโดยจัดขนาดและทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้เท่ากัน จนกระทั่งรังสีแคโทดวิ่งเป็นเส้นตรง ดังรูป 19.4

$$F_E = F_B$$

$$qE = qvB$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{V}{dB}$$



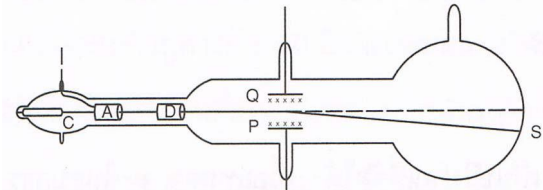
รูป 19.4 แนวทางการเคลื่อนที่ของอนุภาครังสีแคโทดในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเท่ากัน

2. ทอมสันตัดสนามไฟฟ้าออกเหลือแต่สนามแม่เหล็กปรากฏว่ารังสีแคโทดวิ่งเป็นเส้นโค้งรัศมี  $R$  ดังรูป 19.5

$$F_B = F_C$$

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR} = \frac{E}{B^2 R}$$



รูป 19.5 แนวทางการเคลื่อนที่ของอนุภาครังสีแคโทดในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก

ถ้ามีการเร่งประจุด้วยความต่างศักย์ หาประจุต่อมวลจาก

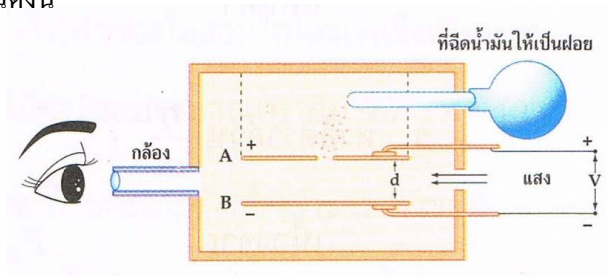
$$E_k = E_p$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

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

### 19.2.2 การหาประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนโดยการทดลองของมิลลิแกน

โรเบิร์ต เอ มิลลิแกน ทำการทดลองและหาประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนได้สำเร็จ โดยการวัดปริมาณประจุไฟฟ้าบนหยดน้ำมันดังนี้

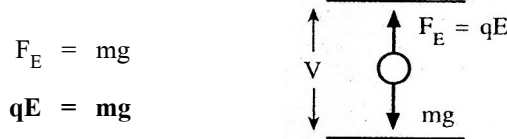


รูป 19.6 เครื่องมือทดลองของมิลลิแกน

### สรุปสาระสำคัญของการทดลองของมิลลิแกน

1. มิลลิแกนใช้กระบอกฉีดน้ำมัน โดยที่ปากกระบอกมีรูเล็ก หยคน้ำมันเล็กๆ ๆ ที่ถูกฉีดออกมา พบว่ามีประจุไฟฟ้า เพราะว่าเกิดการเสียดสีกับปากกระบอกฉีด หรือเสียดสีกับอากาศขณะเคลื่อนที่ บางหยดมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกเพราะเสียดสีอิเล็กตรอนไป บางหยดมีประจุไฟฟ้าเป็นลบเพราะได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามา

2. จากการทดลองกำจัดความต่างศักย์ไฟฟ้าให้เหมาะสมจะมีหยคน้ำมันบางหยดลอยนิ่งอยู่กับที่แสดงว่าแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าเท่ากับแรงโน้มถ่วงของโลก



เมื่อ  $q$  คือปริมาณประจุไฟฟ้าบนหยคน้ำมัน (C)       $E$  คือขนาดของสนามไฟฟ้า (V/m)

$g$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )       $m$  คือมวลของหยคน้ำมัน (kg)

จากการทดลองหยคน้ำมันของมิลลิแกนพบว่าปริมาณประจุที่วัดได้บนหยคน้ำมันเป็นจำนวนเท่าของค่าคงที่คือ  $1.6 \times 10^{-19}$  เสมอ จากการทดลองมิลลิแกนสรุปว่าบนหยคน้ำมันแต่ละหยดที่มีประจุไฟฟ้าลบนั้นได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มเป็นจำนวนเท่าของ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์ เช่น ประจุ 2 ตัว มีประจุเท่ากับ  $3.2 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์ โดยประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนหนึ่งตัวมีค่าเท่ากับ  $-1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์ และนิยมใช้สัญลักษณ์ ( $e$ ) แทนประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

### แบบฝึกหัดที่ 19.1-2

- ในปัจจุบันใช้ธาตุอะไรเป็นมาตรฐานสำหรับการกำหนดหน่วยทางมวลของอะตอม
  - ออกซิเจน
  - คาร์บอน**
  - ไฮโดรเจน
  - ยูเรเนียม
- องค์ประกอบอันดับแรกของอะตอมที่มนุษย์รู้จักคือข้อใด
  - โปรตอน
  - นิวตรอน
  - นิวเคลียส
  - อิเล็กตรอน**
- ในการทดลองหาค่าประจุต่อมวลของทอมสันโดยใช้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้ม 0.002 T ถ้าความต่างศักย์ระหว่างแผ่นขนานสองแผ่นห่างกัน 2 cm มีค่า 80 V ความเร็วของอิเล็กตรอนขณะเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะนี้มีค่าเท่าไร
  - $2 \times 10^6$  m/s**
  - $4 \times 10^6$  m/s
  - $6 \times 10^6$  m/s
  - $8 \times 10^6$  m/s
- ในการทดลองหาค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอนโดยใช้หลอดคาทอด ได้จัดค่าความต่างศักย์ระหว่างแคโทดกับแอโนดรูปก้นกระทะเท่ากับ 180 V ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดโซลินอยด์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก  $5 \times 10^{-3}$  T และทราบว่ามีอิเล็กตรอนมีประจุ  $-1.6 \times 10^{-19}$  C และมีมวล  $9 \times 10^{-31}$  kg อัตราเร็วของอิเล็กตรอนขณะวิ่งถึงแอโนดเป็นเท่าไร
  - $2 \times 10^6$  m/s
  - $4 \times 10^6$  m/s
  - $6 \times 10^6$  m/s
  - $8 \times 10^6$  m/s**
- จากโจทย์ข้อที่ 4. ขณะถึงแอโนดอิเล็กตรอนจะวิ่งด้วยรัศมีมีความโค้งเท่าไร
  - $3 \times 10^{-3}$  m
  - $5 \times 10^{-3}$  m
  - $7 \times 10^{-3}$  m
  - $9 \times 10^{-3}$  m**



13. หยคน้ำมันมีมวล  $1.92 \times 10^{-30}$  กิโลกรัม และมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่จำนวนหนึ่งลอยนิ่งอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำขนาดที่มีสนามไฟฟ้าความเข้ม  $6 \times 10^{-14}$  นิวตัน/คูลอมบ์ ทิศแนวตั้ง มีอิเล็กตรอนอิสระที่ตัวอยู่บนหยคน้ำมันดังกล่าว กำหนดประจุอิเล็กตรอนเป็น  $-1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์
- ก. 250 ตัว                      ข. 500 ตัว                      ค. 1,000 ตัว                      ง. 2,000 ตัว
14. ในการทดลองเรื่องหยคน้ำมันของมิลลิแกน พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์จนถึงค่าสูงสุดของเครื่องมือแล้วไม่สามารถทำให้หยคน้ำมันหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับเมื่อยังไม่ให้ค่าความต่างศักย์แสดงว่า
- ก. หยคน้ำมันมีประจุชนิดที่ทำให้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามีทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลก  
 ข. สนามไฟฟ้ามีค่าน้อยเกินไป  
 ค. หยคน้ำมันมีมวลมากเกินไป  
 ง. ถูกทุกข้อ
15. ในการทดลองหยคน้ำมันของมิลลิแกน ปรากฏว่า เมื่อยังไม่ใส่สนามไฟฟ้าเข้าไป หยคน้ำมันจะตกลงด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปเพื่อจะให้หยคน้ำมันลอยนิ่งอยู่กับที่กลับปรากฏว่าหยคน้ำมันกลับตกลงด้วยความเร็วสูงกว่าเดิม เหตุผลต่อไปนี้ข้อใดถูกต้อง
- ก. หยคน้ำมันมีประจุลบ                      ข. ความเข้มของสนามไฟฟ้าต่ำเกินไป  
 ค. ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงเกินไป                      ง. ทิศทางของสนามไฟฟ้าสลับกันกับที่ควรจะเป็น

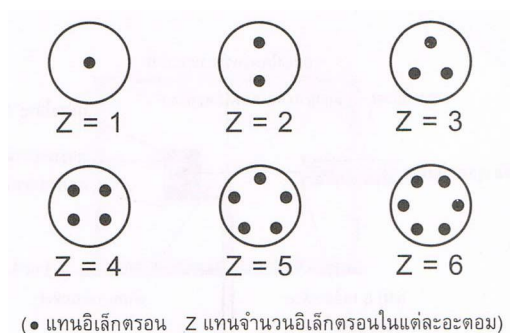
### 19.3 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

ในปี พ.ศ. 2447 ทอมสัน เสนอว่า อะตอมมีรูปร่างเหมือนทรงกลม มีประจุบวกกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วอะตอม โดยอิเล็กตรอน(ประจุลบ)คละอยู่ด้วย และมีจำนวนเท่ากับประจุบวก อะตอมเป็นกลางทางไฟฟ้าอะตอมแต่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเพราะอิเล็กตรอนสั่นแบบซิมเปิลฮาร์มอนิก

ข้อสังเกต ที่แบบจำลองอะตอมของทอมสันตอบไม่ได้ คือ

- ทำไมประจุบวกรวมกันเป็นเนื้ออะตอมได้ทั้งที่ประจุบวกต้องออกแรงผลักกัน
- ถ้าอิเล็กตรอนสั่นแบบซิมเปิลฮาร์มอนิกจะให้สเปกตรัมแบบต่อเนื่องแต่จากการทดลอง พบว่า

อะตอมให้สเปกตรัมแบบเส้น

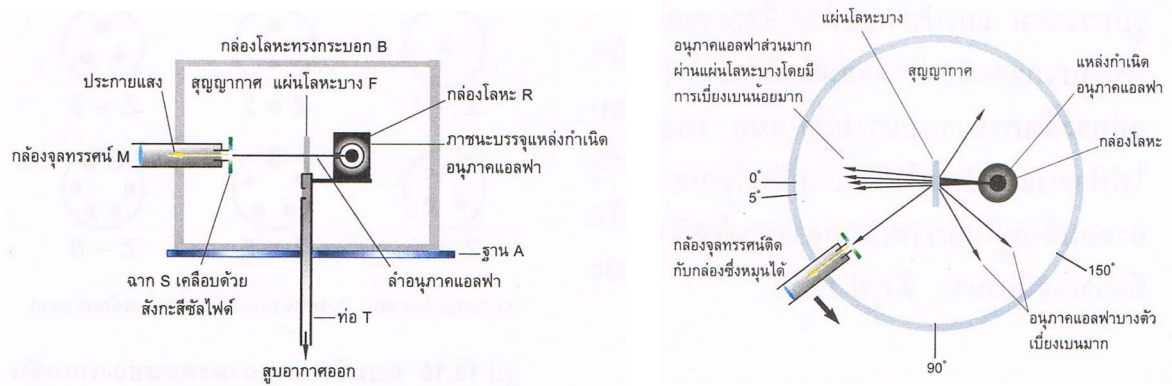


(● แทนอิเล็กตรอน Z แทนจำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละอะตอม)

รูป 19.7 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

### 19.4 แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด

รัทเทอร์ฟอร์ด ทำการทดลองยิงรังสีแอลฟา ให้ทะลุผ่านแผ่นทองคำเปลว แล้ววัดการกระเจิงของรังสีแอลฟา พบว่าอนุภาครังสีแอลฟาเกือบทั้งหมดทะลุผ่านแผ่นทองคำเปลว โดยมีการเบี่ยงเบนน้อยมากมีอนุภาคส่วนน้อยที่เบนไปและเบนไปเป็นมุมได้ถึงขนาด 90 องศาหรือมากกว่า 90 องศา



รูป 19.8 เครื่องมือที่ไคเกอร์และมาร์สเดนใช้ตรวจสอบแนวคิดของรัทเทอร์ฟอร์ด

#### สรุปแบบจำลองรัทเทอร์ฟอร์ด

1. อะตอมเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยที่มีประจุบวกอัดแน่นอยู่ตรงกลางเรียกว่านิวเคลียส และมีประจุลบคืออิเล็กตรอนวิ่งอยู่รอบ ๆ นิวเคลียสและห่างจากนิวเคลียสมาก
2. รัทเทอร์ฟอร์ดคำนวณพบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของนิวเคลียสมีค่าประมาณ  $10^{-15} - 10^{-14}$  เมตร แต่อะตอมมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ  $10^{-10}$  เมตร แสดงว่าอะตอมมีขนาดใหญ่กว่านิวเคลียสมาก
3. รัทเทอร์ฟอร์ดทดลองยิงอนุภาคแอลฟาเข้าไปตรง ๆ กับนิวเคลียสของทองคำพบว่าเกิดการสะท้อนกลับเป็นเส้นตรงแสดงว่าพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานศักย์ไฟฟ้า

$$E_K = E_p$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{kQ_1Q_2}{R}$$

#### ปัญหาที่เกิดกับแบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด

1. เหตุใดอิเล็กตรอนจึงวนรอบนิวเคลียสได้โดยไม่สูญเสียพลังงาน
2. เหตุใดประจุไฟฟ้าบวกหลายประจุมันกันอยู่ภายในนิวเคลียสได้ทั้งที่มีแรงผลักระหว่างประจุ

#### แบบฝึกหัด 19.4

1. การที่รัทเทอร์ฟอร์ด ทำการทดลองยิงอนุภาคแอลฟาไปยังแผ่นทองคำบาง แล้วพบว่าโครงสร้างของอะตอมไม่เป็นไปตามแบบของทอมสัน เนื่องจากรัทเทอร์ฟอร์ด พบว่า
  - ก. อนุภาคแอลฟาเบนไปจากแนวเดิมทุกทิศทางเท่า ๆ กัน
  - ข. อนุภาคแอลฟาทั้งหมดวิ่งทะลุผ่านแผ่นทองคำไปในแนวเกือบเป็นเส้นตรง
  - ค. อนุภาคแอลฟาบางส่วนเบนไปจากแนวเดิมเป็นมุมใด ๆ ทั้งที่ส่วนใหญ่ผ่านไปแนวตรง
  - ง. อนุภาคแอลฟาเกือบทั้งหมดเบนไปจากแนวเดิมเป็นมุมใด ๆ และบางที่มีการสะท้อนกลับ



ความยาวคลื่นของสเปกตรัมของแก๊สไฮโดรเจนร้อนมี 5 อนุกรม โดยมีชื่อเรียกตามนักวิทยาศาสตร์ที่ค้นพบสเปกตรัมแต่ละเส้นในอนุกรมนั้น และสามารถคำนวณหาค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมแต่ละเส้นในอนุกรมต่างๆ ได้โดยใช้สมการ

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

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของสเปกตรัม (m)

$R_H$  คือค่าคงที่ของริดเบิร์ก =  $1.1 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

$n_f$  คือตัวเลขจำนวนเต็มเท่ากับ 2

$n_i$  คือตัวเลขจำนวนเต็มเริ่มตั้งแต่ 3, 4, 5,....

ตารางที่ 19.1 แสดงอนุกรมของสเปกตรัมชุดต่างๆ ของไฮโดรเจน

ชื่ออนุกรม	ปีที่ค้นพบ	ส่วนกลับของความยาวคลื่น	$n_f$	$n_i$	ช่วงของรังสี
ไลมาน (Lyman)	1906-1914	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$	1	2, 3, 4,...	อัลตราไวโอเลต (UV)
บัลเมอร์ (Balmer)	1885	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$	2	3, 4, 5,...	แสงที่ตามองเห็นถึง UV
พาสเชน (Paschen)	1908	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$	3	4, 5, 6,...	อินฟราเรด (IR)
แบรคเกต (Brackett)	1922	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$	4	5, 6, 7,...	
พุนด์ (Pfund)	1924	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$	5	6, 7, 8,...	

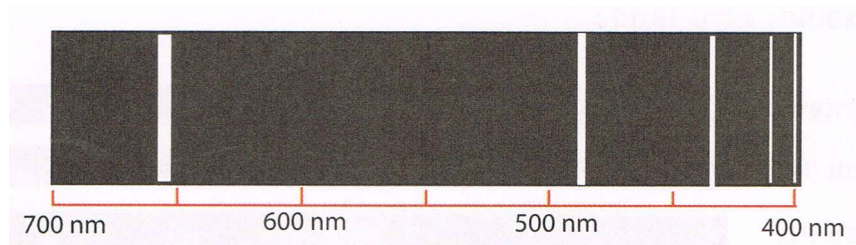
จากสมการของบัลเมอร์ เมื่อเราแทนค่า  $n_f = 2$

$n_i = 3$  จะได้  $\lambda = 6,562.8 \text{ \AA}$  เป็นความยาวคลื่นของแสงสีแดง

$n_i = 4$  จะได้  $\lambda = 4,861.3 \text{ \AA}$  เป็นความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน

$n_i = 5$  จะได้  $\lambda = 4,340.5 \text{ \AA}$  เป็นความยาวคลื่นของแสงสีม่วง

$n_i = 6$  จะได้  $\lambda = 4,101.7 \text{ \AA}$  เป็นความยาวคลื่นของแสงสีเหนือม่วง



รูป 19.10 สเปกตรัมเส้นสว่างในอนุกรมบัลเมอร์ของอะตอมไฮโดรเจน



### 19.5.2 การแผ่รังสีของวัตถุดำ

วัตถุทุกชนิดไม่ว่าจะร้อนหรือเย็นจะมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา โดยทั่วไปเราเข้าใจว่าวัตถุร้อนเท่านั้นที่จะแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เพราะเรามักจะพบคลื่นแสงแผ่ออกมาจากวัตถุที่ร้อน เช่น แสงจากดวงอาทิตย์ แสงจากการเผาถ่านไม้ หรือแสงจากไส้หลอดทั้งสแตน เป็นต้น แต่ความเป็นจริงแล้ววัตถุที่เย็นก็มีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเช่นกัน เพียงแต่ความถี่ของคลื่นอยู่ในช่วงของแสงน้อยมาก ส่วนใหญ่จะอยู่ในย่านความถี่ของคลื่นอินฟราเรด หากเราเย็นอยู่ในห้องมีร่างกายเรามีอุณหภูมิประมาณ 310 เคลวิน จะแผ่รังสีของแสงมาน้อยไม่สามารถทำให้ห้องสว่างได้เพราะคลื่นที่แผ่ออกมาโดยส่วนใหญ่อยู่ในย่านอินฟราเรด เราเรียกวัตถุที่มีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ว่า **วัตถุดำ (Black Body)**

ปี ค.ศ. 1900 พลังก็ได้สร้างภาพจำลองในการแผ่รังสีของวัตถุดำโดยถือว่าวัตถุดำประกอบด้วยอะตอมกลุ่มมากมายและอะตอมทุกคู่จะมีการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ เช่นเดียวกับการสั่นของมวลผูกปลายสปริง จึงทำให้มีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา โดยพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดการสั่นของอะตอม จำนวนอะตอมในวัตถุ โดยมีขนาดของพลังงานเป็น  $E = hf, 2hf, 3hf, \dots$  ซึ่งเราสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$E = n(hf)$$

$n$  คือเป็นตัวเลขจำนวนเต็มบวก โดย  $n = 1, 2, 3, \dots$

$f$  คือความถี่ธรรมชาติการสั่นของอะตอมคู่ (Hz)

$h$  คือค่าคงที่ของพลังค์ ( $h = 6.63 \times 10^{-34}$  J.s)

ดังนั้น ปริมาณ  $hf$  จึงหมายถึง 1 ก้อนพลังงานแสง ซึ่งเรียกว่า 1 ควอนตัม หรือ 1 โฟตอน (1 เม็ดแสง)

**อิเล็กตรอนโวลต์ (eV)** เป็นหน่วยวัดพลังงานสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก โดย  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$  จูล

พลังงาน 1 eV. จะเป็นพลังงานที่ได้จากการเร่งอิเล็กตรอนผ่านความต่างศักย์ 1 โวลต์ (เร่งอิเล็กตรอนผ่านความต่างศักย์  $V$  โวลต์ จะทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเป็น  $V$  อิเล็กตรอนโวลต์)

#### แบบฝึกหัด 19.5

1. (ม.เชิงใหม่)จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของธาตุไฮโดรเจน พบว่าชุดความถี่ของเส้นสเปกตรัมในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่านั้นมีชื่อเรียกว่า

ก. Lyman series      ข. **Balmer series**      ค. Paschen series      ง. Brackett series

2. (เอ็นทรานซ์) ในช่วงระดับพลังงานต่ำสุดสามระดับแรกของอะตอมไฮโดรเจน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ควรพบจะอยู่ในชุดความถี่ที่เรียกว่า

ก. **ชุดไลมานและชุดบาล์มเมอร์**      ข. ชุดไลมานและชุดพาเชน  
ค. ชุดบาล์มเมอร์และชุดพาเชน      ง. ชุดไลมาน ชุดบาล์มเมอร์ และชุดพาเชน

3. (เอ็นทรานซ์) ความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมของไฮโดรเจนเส้นแรก (ที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด) ในอนุกรมบัลเมอร์คือ 656 nm โฟตอนที่สามสามารถทำให้อะตอมไฮโดรเจน จากสถานะพื้นแตกตัวเป็นไอออนได้พอดี ควรจะต้องมีความยาวคลื่นเท่าใด

ก. 151 nm      ข. 121 nm      **ค. 91 nm**      ง. 71 nm

4. (เอ็นทรานซ์) อะตอมไฮโดรเจนเปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n=2$  ไป  $n=1$  ความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมาเป็นกี่เท่าของในกรณีที่เปลี่ยนระดับพลังงานจาก  $n=4$  ถึง  $n=2$
- ก.  $\frac{1}{4}$  เท่า                      ข.  $\frac{1}{2}$  เท่า                      ค. 2 เท่า                      ง. 4 เท่า
5. (เอ็นทรานซ์) สเปกตรัมเส้นสว่างของอะตอมไฮโดรเจน เส้นสว่างลำดับแรกที่เรามองเห็นชัดเจนมีความยาวคลื่นมากที่สุดคือ 656 nm ในอนุกรมบัลเมอร์เส้นสว่างลำดับที่สองจะมีความยาวคลื่นเท่าใด
- ก. 356 nm                      ข. 386 nm                      ค. 456 nm                      ง. 486 nm
6. (เอ็นทรานซ์) ในอนุกรมบัลเมอร์ สเปกตรัมเส้นสว่างของอะตอมไฮโดรเจนเส้นแรกคือ 657 nm อยากทราบว่า โฟตอนที่จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนจากสถานะ  $n=2$  หลุดออกจากอะตอมได้พอดีมีค่าความยาวคลื่นเท่าใด
- ก. 265 nm                      ข. 365 nm                      ค. 465 nm                      ง. 565 nm

### 19.6 ทฤษฎีอะตอมของโบร์

ก. อิเล็กตรอนมีวงโคจรรอบนิวเคลียสเป็นชั้นๆ โดยในแต่ละวงโคจรจะมี

โมเมนตัมเชิงมุม ; 
$$mvR = n\hbar$$
      เมื่อ      
$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

ข. เมื่ออิเล็กตรอนเปลี่ยนวงโคจรจะคายหรือดูดพลังงาน เป็น 1 ควอนตัม

$$\Delta E = |E_{n_i} - E_{n_f}| = hf$$

เมื่อ  $E_{n_i}$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรก่อนเปลี่ยนแปลง

$E_{n_f}$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรหลังเปลี่ยนแปลง

$\Delta E$  คือ พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับ ( $\Delta E$  เป็นลบ เปลี่ยนวงโคจรจากวงในไปวงนอก)

พลังงานที่อิเล็กตรอนปล่อยออกมา ( $\Delta E$  เป็นบวก เปลี่ยนวงโคจรจากวงนอกไปวงใน)

จากทฤษฎีของโบร์ทำให้แสดงได้ว่า อะตอมไฮโดรเจน จะมี

1. รัศมีอะตอม ; 
$$R_n = \frac{n^2 \hbar^2}{mke^2} = n^2 (5.3 \times 10^{-11}) \text{m}$$

2. อัตราเร็วของอิเล็กตรอน ; 
$$v_n = \frac{ke^2}{n\hbar} = \frac{2.2 \times 10^6}{n} \text{ m/s}$$

3. พลังงานของอะตอม ; 
$$E_n = -\frac{mk^2e^4}{2n^2\hbar^2} = \frac{-21.76 \times 10^{-19}}{n^2} \text{ จูล}$$
  

$$= -\frac{13.6}{n^2} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$



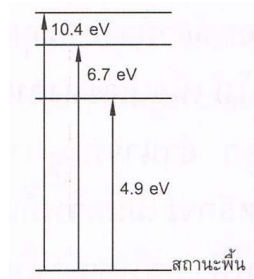


3.2 เมื่อเพิ่มพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเป็น 4.9 eV ทำให้อะตอมของปรอทเปลี่ยนระดับพลังงานจาก Ground State ( $E_1$ ) ไปยัง Excited State ( $E_2$ ) ครั้งแรกสุดของการกระตุ้นได้

3.3 ถ้าเพิ่มพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนขึ้นไปอีก ก็จะกระตุ้นอะตอมของปรอทอะตอมที่สอง และอะตอมที่สามได้อีกเรื่อยๆ แต่ทุกอะตอมของปรอทยังคงต้องการพลังงานจลน์ 4.9 eV เหมือนเดิม

3.4 ถ้าอะตอมของปรอทที่ถูกกระตุ้นไปอยู่ในระดับพลังงาน  $E_2$  และจะเปลี่ยนระดับพลังงานเข้าสู่ระดับพลังงาน Ground State ( $E_1$ ) จะต้องปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า Photon มีพลังงานเท่ากับ 4.9 eV

3.5 ฟรังค์และเฮิร์ตซ์ สรุปการทดลองว่า ในการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมจะดูดกลืนพลังงานได้เพียงบางจำนวนเท่านั้นซึ่งชี้ให้เห็นว่าระดับพลังงานของอะตอมไม่ต่อเนื่อง กันเป็นไปตามทฤษฎีของโบร์ คือ 4.9, 6.7, และ 10.4 eV ดังรูป 19.11



รูป 19.11 การรับพลังงานของอะตอมของปรอท

## 19.8 รังสีเอ็กซ์ (X-ray)

เรินต์เกน (Wilhelm Konrad Roentgen) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้พบรังสีเอ็กซ์ โดยบังเอิญ ในปี พ.ศ. 2438 (ค.ศ. 1895) ในขณะที่กำลังทดลองเกี่ยวกับรังสีแคโทด เรินท์เกน คลุมหลอดทดลองด้วยกระดาษดำในห้องทดลองที่มืด ขณะที่ประจุเคลื่อนที่ในหลอด เขาสังเกตเห็นแสงเรืองขึ้นบริเวณโต๊ะที่ทำการทดลอง แสดงว่าจำเป็นต้องมีรังสีบางชนิดที่มองไม่เห็นและสามารถทะลุออกมาจากหลอดแคโทด ซึ่งแสดงว่ามีอำนาจทะลุทะลวงสูง รังสีนี้เขาตั้งชื่อว่า X-ray

### คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์

1. ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า
2. เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก
3. มีอำนาจทะลุทะลวงสูง
4. ทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนได้
5. ทำให้สารเรืองแสงเกิดสารเรืองแสงได้
6. ทำปฏิกิริยากับแผ่นฟิล์ม
7. รังสีเอ็กซ์มีอันตรายและทำลายเซลล์ของสิ่งมีชีวิตได้
8. เมื่อรังสีเอ็กซ์ กระแทบบนแผ่นโลหะสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้

### การเกิดรังสีเอกซ์

การเกิดรังสีเอกซ์เกิดจากอิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนอะตอมของเป้าทั้งสเดนแล้วหยุด จะปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงสุด หรือเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ช้าลงจะปลดปล่อยพลังงานค่าต่างๆ เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนอะตอมของเป้าแล้วหยุด พลังงานทั้งหมดของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของรังสีเอกซ์ ดังนั้น

$$E_{k_{\max}} = eV = hf_{\max}$$

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

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} \quad \text{หรือ} \quad \lambda_{\min} = \frac{1240}{V} \text{ nm}$$

เมื่อ  $\lambda_{\min}$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (m)

$h$  = ค่าคงตั้งของพลังค์ =  $6.6 \times 10^{-34}$  J/s

$e$  = ประจุของอิเล็กตรอน =  $1.6 \times 10^{-19}$  C

$V$  = ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งประจุ (V)

$c$  = ความเร็วแสง =  $3.0 \times 10^8$  m/s

### แบบฝึกหัด 19.7 - 8

- (เอ็นทรานซ์) การทดลองของฟรังและเฮิร์ตซ์ ให้ผลสรุปที่สำคัญ ข้อใด
  - อิเล็กตรอนชนกับอะตอมแบบยึดหยุ่นเป็นส่วนใหญ่
  - อิเล็กตรอนชนกับอะตอมแบบไม่ยึดหยุ่น
  - อะตอมมีระดับพลังงานเป็นขั้น ๆ
  - กระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซที่ความดันต่ำได้
- (เอ็นทรานซ์) ตามการทดลองของฟรังและเฮิร์ตซ์ ข้อสรุปใด ไม่จริง
  - อิเล็กตรอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 4.9 eV จะมีการชนแบบยึดหยุ่นกับอะตอมของไอปรอท
  - อิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 4.9 eV จะสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอะตอมของไอปรอท
  - อะตอมของไอปรอทมีค่าพลังงานระดับพื้นเท่ากับ 4.9 eV
  - อะตอมของไอปรอทมีค่าพลังงานเป็นขั้น ๆ ไม่ต่อเนื่อง
- (ม.เชียงใหม่) เมื่อผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในสนามแม่เหล็ก หรือสนามไฟฟ้าแล้ว รังสีเอกซ์
  - ไม่มีการเบี่ยงเบนในทิศทางใด ๆ ในสนามนั้น ๆ
  - เบี่ยงเบนเข้าหาขั้วบวกของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้านั้น
  - เบี่ยงเบนเข้าหาขั้วลบของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้านั้น
  - มีการเคลื่อนที่เป็นรูปคลื่นไซน์

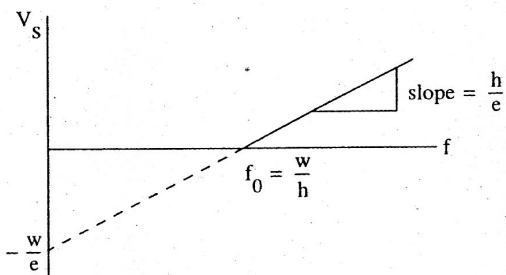


สมการของพลังงานโฟโตอิเล็กตรอนจึงเขียนได้เป็น

$E_{k_{\max}} = eV_s = hf - W$
$eV_s = hf - hf_0$
$V_s = \left(\frac{h}{e}\right)f - \left(\frac{h}{e}\right)f_0$
$V_s = \left(\frac{h}{e}\right)f - \frac{W}{e}$

เมื่อ  $W = hf_0$

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



จะได้ ความชันกราฟ =  $\frac{h}{e}$

จุดตัดแกนนอน =  $f_0$  (ความถี่ขีดเริ่ม)

จุดตัดแกนตั้ง =  $-\frac{W}{e}$

หมายเหตุ กรณีต้องการหาจำนวนของโฟตอนจะหาได้จาก

$E = n(hf)$

### แบบฝึกหัด 19.9

1. (เอ็นทรานซ์) จากการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ข้อสรุปต่อไปนี้ข้อใดถูกต้อง
  1. พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงเท่านั้น
  2. สำหรับแสงที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ขีดเริ่ม จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนจะเพิ่มมากขึ้นเป็นปฏิกากับความถี่ที่เพิ่มขึ้น
  3. เนื่องจากแสงมีสมบัติเป็นคลื่นเมื่อมีความเข้มสูงก็จะมีพลังงานมาก ทำให้โฟโตอิเล็กตรอนมีพลังงานมากด้วย
  4. เมื่อแสงที่ตกกระทบโลหะมีความถี่สูงกว่าความถี่ขีดเริ่มจะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้น

ก. ข้อ 1 และ 3      ข. ข้อ 2 และ 4      **ค. ข้อ 4 เท่านั้น**      ง. คำตอบเป็นอย่างอื่น
2. (ม.เชียงใหม่) จากการศึกษารายการปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก สรุปได้ว่า
  - ก. เมื่อแสงมีความถี่เท่ากับความถี่ขีดเริ่ม ตกกระทบที่ผิวโลหะ จะไม่มีอิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะ
  - ข. แสงที่มีความถี่ค่าเดียวตกกระทบผิวโลหะต่างชนิดกัน จะให้โฟโตอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงสุดเท่ากัน
  - ค. เมื่อเพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบผิวโลหะ กระแสโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้น**
  - ง. เมื่อเพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบผิวโลหะ จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนจะเท่าเดิมแต่มีพลังงานสูงขึ้น
3. (ม.ขอนแก่น) เป็นที่ทราบกันแล้วว่า อิเล็กตรอนในโลหะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และมักจะพบเสมอว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อยู่ตามบริเวณผิวของโลหะ เหตุที่อิเล็กตรอนไม่เคลื่อนที่ออกไปในอากาศเพื่อหนีออกจากโลหะเพราะ
  - ก. อากาศไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า
  - ข. อิเล็กตรอนมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของโลหะ**
  - ค. อากาศมีแรงเสียดทานมาก
  - ง. อิเล็กตรอนถูกอะตอมของโลหะยึดจับไว้

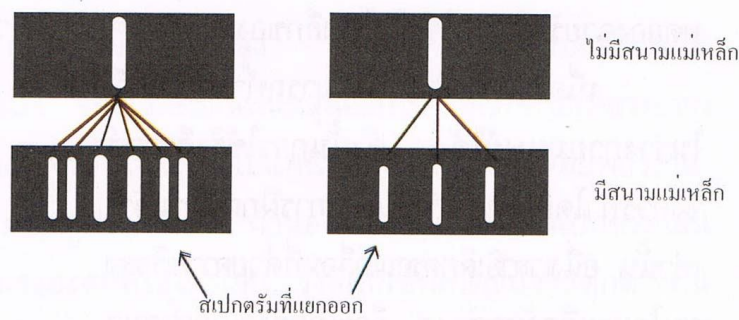


4. (ม.เชียงใหม่) พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนนั้น
  - ก. ไม่ขึ้นกับความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ
  - ข. ขึ้นกับกำลังหนึ่งของความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ
  - ค. ขึ้นกับกำลังสองของความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ
  - ง. ขึ้นกับรากที่สองของความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ
5. (ม.เชียงใหม่) กำหนดให้ฟังก์ชันงานของแท่นทาลัมและทองคำเป็น 4.2 eV และ 4.8 eV ตามลำดับอยากทราบว่าต้องการฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 270 nm ลงไปบนวัตถุใดจึงจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
  - ก. ไม่เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
  - ข. แท่นทาลัม
  - ค. ทองคำ
  - ง. แท่นทาลัมและทองคำ
6. (เอ็นทรานซ์) โลหะสามชนิดประกอบด้วย ซีเซียม (Cs) แบเรียม (Ba) และแคลเซียม (Ca) มีฟังก์ชันงานเป็น 1.8 , 2.5 และ 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ถ้ามีแสงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ตกกระทบบนโลหะทั้งสาม โลหะชนิดใดจะแสดงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
  - ก. Cs
  - ข. Cs และ Ba
  - ค. Cs , Ba และ Ca
  - ง. ไม่เกิดเลย
7. จงหาค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการหยุดโฟโตอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงสุดจากแผ่นโลหะแบเรียมเมื่อมีแสงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ตกกระทบ กำหนดให้ฟังก์ชันงานของแบเรียมเป็น 2.5 อิเล็กตรอนโวลต์ และผลคูณระหว่างค่าคงตัวพลังค์กับความเร็วแสงในสุญญากาศ 1240 eV·nm
  - ก. 0.6 โวลต์
  - ข. 2.5 โวลต์
  - ค. 3.1 โวลต์
  - ง. 5.6 โวลต์
8. (เอ็นทรานซ์) เมื่อฉายรังสีอุลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ไปที่ผิวโลหะชนิดหนึ่งที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยว 1.8 eV โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวโลหะจะมีพลังงานจลน์เท่าใด
  - ก. 0 eV
  - ข. 0.5 eV
  - ค. 1.3 eV
  - ง. 1.8 eV
9. (เอ็นทรานซ์) โลหะชนิดหนึ่งมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ 2.0 eV ถ้ามีแสงที่มีความยาวคลื่น 100 nm มากระทบ พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอนที่ออกมาจะมีค่าเท่าใด
  - ก. 6.4 eV
  - ข. 10.4 eV
  - ค. 14.4 eV
  - ง. 18.4 eV
10. (เอ็นทรานซ์) ในการทดลองเรื่องปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ใช้แสงความถี่  $7 \times 10^{14}$  Hz ตกกระทบผิวโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 2.3 eV จงหาความต่างศักย์หยุดยั้งของโฟโตอิเล็กตรอนนี้
  - ก. 0.6 โวลต์
  - ข. 2.3 โวลต์
  - ค. 2.9 โวลต์
  - ง. 5.2 โวลต์
11. (เอ็นทรานซ์) เมื่อให้แสงที่มีความยาวคลื่น 450 nm ตกกระทบผิวโลหะชนิดหนึ่ง ปรากฏว่าต้องใช้ความต่างศักย์ในการหยุดยั้งโฟโตอิเล็กตรอนเท่ากับ 1.5 โวลต์ ถ้าต้องการให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะได้พอดี ต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นเท่าใด
  - ก. 330 nm
  - ข. 660 nm
  - ค. 990 nm
  - ง. 1,220 nm
12. (เอ็นทรานซ์) กำหนดให้ฟังก์ชันงานของโลหะชนิดหนึ่ง 4.80 eV จะต้องฉายแสงที่มีความยาวคลื่นเท่าใดจึงจะทำให้โฟโตอิเล็กตรอนหลุดจากขั้วแคโทด ที่ทำจากโลหะดังกล่าวแล้วสามารถไปถึงขั้วแอโนดได้พอดี เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่แอโนดต่ำกว่าแคโทดเท่ากับ 1.80 โวลต์
  - ก. 125.50 nm
  - ข. 156.50 nm
  - ค. 167.50 nm
  - ง. 187.50 nm

13. (เอ็นทรานซ์) ลวดแมกนีเซียมมีพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอน 3.79 eV ถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งมีความยาวคลื่น 300 nm โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีพลังงานจลน์มากที่สุดเท่าใด (กำหนดค่าให้  $h = 6.64 \times 10^{-34}$  J.s)
- ก. 0.29 eV                      ข. 0.36 eV                      ค. 0.48 eV                      ง. 0.62 eV

### 19.10 ความไม่สมบูรณ์ของทฤษฎีอะตอมของโบว์

1. ทฤษฎีอะตอมของโบว์สามารถอธิบายถึงการจัดเรียงอิเล็กตรอนและสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจนได้ แต่ไม่สามารถอธิบายการจัดเรียงอิเล็กตรอนและสเปกตรัมของอะตอมอื่นๆ ได้
2. ทฤษฎีอะตอมของโบว์ไม่สามารถอธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสด้วยความเร่ง เพราะสาเหตุใดไม่แผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา
3. ทฤษฎีอะตอมของโบว์ไม่สามารถอธิบายได้ว่า เพราะสาเหตุใดอะตอมที่อยู่ในสนามแม่เหล็กเส้นสเปกตรัมเส้นหนึ่งๆ แยกออกเป็นหลายเส้นได้ดังรูป



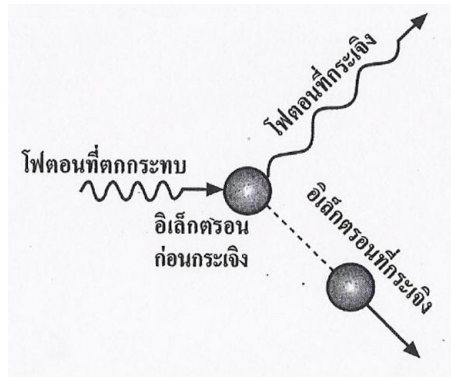
รูป 19.12 สเปกตรัมเส้นเมื่ออะตอมอยู่ในสนามแม่เหล็ก

### 19.11 ทวิภาพของคลื่นและอนุภาค (Wave-Particle duality)

1. เราทราบว่าแสงแสดงคุณสมบัติเป็นคลื่นเพราะ แสดงการเลี้ยวเบนและการแทรกสอด
2. จากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ไอน์สไตน์คิดว่า โฟตอนเป็นอนุภาค
3. มิลลิแกนทดลองและสรุปว่า แสงเป็นอนุภาค
4. เดอ บรอยล์ (de Broglie) ให้แนวคิดว่า “ถ้าแสงแสดงคุณสมบัติคู่เป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่นแล้ว สสารทั้งหลายแสดงคุณสมบัติของคลื่นได้เนื่องจากสสารประกอบด้วยอนุภาค”

#### 19.11.1 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน

คอมป์ตัน ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และขนาดของมุมการกระเจิงกับความยาวคลื่นกระเจิงของรังสีเอกซ์ จากการฉายรังสีเอกซ์ให้ไปกระทบกับอิเล็กตรอนของแท่งแกรไฟต์ พบว่า ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาแปรผันกับมุมที่กระเจิง แต่ไม่ขึ้นกับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่กระทบกับอิเล็กตรอน



รูป 19.13 ปฏิกิริยาการกระเจิงคอมป์ตัน

จากปรากฏการณ์อธิบายโดยอาศัยหลักแนวคิดของไอน์สไตน์ได้อย่างเดียวว่าการชนระหว่างรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนของแกรไฟต์เป็นการชนระหว่างอนุภาคกับอนุภาค โดยเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงานและกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังนี้

1. รังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาโดยมีความยาวคลื่นเท่าเดิม แสดงว่าโฟตอนของรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนของแท่งแกรไฟต์ชนกันแบบยืดหยุ่น
2. รังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาโดยมีความยาวคลื่นไม่เท่าเดิม แสดงว่า โฟตอนของรังสีเอกซ์กับอิเล็กตรอนของแท่งแกรไฟต์ชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น

### 19.11.2 สมมติฐานของเดอ บรอยล์

ในปี ค.ศ. 1924 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อหลุยส์ เดอ บรอยล์ (Louis de Broglie) ได้ให้ความเห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นแสงและอนุภาค กล่าวคือในกรณีที่แสงมีการเลี้ยวเบนและการสอดแทรก แสดงว่าขณะนั้นแสงประพฤติตัวเป็นคลื่น สำหรับกรณีแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก แสดงว่าแสงเป็นอนุภาค ฉะนั้นสารทั่วไปที่มีคุณสมบัติเป็นอนุภาคก็น่าจะมีคุณสมบัติทางด้านคลื่นด้วย เดอ บรอยล์ได้พยายามหาความยาวคลื่นของคลื่นมวลสาร โดยทั่วไปเริ่มจากความยาวคลื่นของแสงก่อน ดังต่อไปนี้

ถ้าแสงมีความถี่  $f$  จะให้พลังงานออกมาเป็นอนุภาคเรียกว่าโฟตอนซึ่งมีขนาด

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับมวลของไอน์สไตน์

$$E = mc^2 \text{ และ } E = hf$$

เดอ บรอยล์ หาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมและความยาวคลื่นของแสงได้ดังนี้

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

เมื่อ  $p$  คือ โมเมนตัมของโฟตอน (N.s)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของโฟตอน (m)

จะได้ว่า

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

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของอนุภาค (m)

$m$  คือ มวลของอนุภาค (kg)

$p$  คือ โมเมนตัมของอนุภาค (N.s)

$v$  คือ ความเร็วของอนุภาค (m/s)

ความยาวคลื่นของอนุภาคหรือความยาวคลื่นสสารนี้ เรียกว่า ความยาวคลื่น เดอ บรอยล์ นั่นเอง

## แบบฝึกหัด 19.11

- (เอ็นทรานซ์) รถยนต์คันหนึ่งมีมวล 1,000 กิโลกรัม แล่นด้วยความเร็ว 72 กม./ชม. ถ้าคิดว่ารถยนต์คันนี้เป็นคลื่นจะมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เท่าใด (กำหนดค่าคงตัวของพลังค์เท่ากับ  $6.6 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที)
 

ก.  $0.92 \times 10^{-38}$  m      ข.  $3.3 \times 10^{-38}$  m      ค.  $0.33 \times 10^{38}$  m      ง.  $1.1 \times 10^{38}$  m
- (เอ็นทรานซ์) อิเล็กตรอนซึ่งมีมวลประมาณ  $9 \times 10^{-31}$  kg เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $3 \times 10^6$  m/s วัสดุในข้อใดเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน
 

ก. ผลึกซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบประมาณ  $10^{-10}$  เมตร

ข. เกรตติงซึ่งมีระยะห่างระหว่างช่องประมาณ  $10^{-6}$  เมตร

ค. แผ่นโลหะบางเจาะรูให้มีช่องคู่ห่างกันประมาณ  $10^{-3}$  เมตร

ง. สลิตเดี่ยวที่มีความกว้างของช่องประมาณ  $10^{-2}$  เมตร
- (เอ็นทรานซ์) อิเล็กตรอนตัวหนึ่งจะต้องเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่าใด จึงจะมีโมเมนตัม เป็นหนึ่งในสิบของโมเมนตัมของโฟตอนของแสงความถี่  $4.5 \times 10^{14}$  เฮิรตซ์ (มวลอิเล็กตรอน =  $9 \times 10^{-31}$  kg)
 

ก. 100 m/s      ข. 110 m/s      ค. 130 m/s      ง. 150 m/s
- (เอ็นทรานซ์) จงหาความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยพลังงาน 5 อิเล็กตรอนโวลต์
 

ก. 0.55 nm      ข. 0.85 nm      ค. 0.95 nm      ง. 1.10 nm
- (เอ็นทรานซ์) ความยาวคลื่นของเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.10 นาโนเมตร พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าเท่าไร
 

ก.  $2.4 \times 10^{-17}$  J      ข.  $4.8 \times 10^{-17}$  J      ค.  $2.0 \times 10^{-16}$  J      ง.  $1.0 \times 10^{-15}$  J
- (เอ็นทรานซ์) อนุภาคมวล m มีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าของพลังงานจลน์เดิม ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอนุภาคนี้ในครั้งหลังจะเป็นกี่เท่าของความยาวคลื่นเดอบรอยล์ครั้งแรก
 

ก.  $\frac{1}{2}$  เท่า      ข. 2 เท่า      ค. 4 เท่า      ง. 8 เท่า
- (เอ็นทรานซ์) ไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) และฮีเลียมไอออน ( $He^+$ ) ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า  $10^6$  โวลต์ ไฮโดรเจนไอออนจะมีความยาวคลื่นเดอบรอยล์เป็นกี่เท่าของฮีเลียมไอออน
 

ก.  $\sqrt{2}$  เท่า      ข.  $\frac{1}{2}$  เท่า      ค. 2 เท่า      ง. 4 เท่า
- (เอ็นทรานซ์) ถ้ามวลของอนุภาค A เป็นครึ่งหนึ่งของมวลอนุภาค B เมื่ออนุภาคทั้งสองมีพลังงานเท่ากัน อนุภาค A จะประพฤติตัวเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นเป็นกี่เท่าของอนุภาค B
 

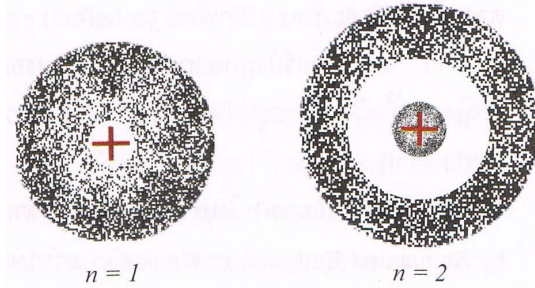
ก.  $\frac{1}{2}$  เท่า      ข.  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  เท่า      ค.  $\sqrt{2}$  เท่า      ง. 2 เท่า
- (เอ็นทรานซ์) อนุภาค A มีมวลเป็น  $\frac{1}{4}$  เท่าของอนุภาค B ถ้าอนุภาคทั้งสองมีพลังงานจลน์เท่ากัน ความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอนุภาค A เป็นกี่เท่าของอนุภาค B
 

ก.  $\frac{1}{4}$  เท่า      ข.  $\frac{1}{2}$  เท่า      ค. 2 เท่า      ง. 4 เท่า



### 19.12.2 โครงสร้างอะตอมตามทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม

ตามหลักความไม่แน่นอน เราไม่สามารถระบุได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสอยู่ในตำแหน่งใดได้แน่นอน เราบอกได้เพียงแต่โอกาสจะพบอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่งต่างๆ ว่าเป็นเท่าใดเท่านั้น ดังนั้นโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอน ณ ตำแหน่งต่างๆ ว่าเป็นเท่าใดเท่านั้น ดังนั้นโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสจึงมีลักษณะเป็นกลุ่มหมอกทรงกลมห่อหุ้มนิวเคลียสในระดับชั้นพลังงานต่างๆ ดังรูป 19.14



รูป 19.14 ภาพแสดงกลุ่มหมอกของอะตอมไฮโดรเจนที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

แนวคิดของกลศาสตร์ควอนตัมที่มีโอกาสจะพบอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสมีลักษณะเป็นกลุ่มหมอกสามารถอธิบายความไม่สมบูรณ์ของทฤษฎีของโบว์ ถึงการแยกเส้นสเปกตรัมหนึ่งเส้นเป็นหลายเส้น เมื่ออะตอมอยู่ในสนามแม่เหล็กได้

จะเห็นได้ว่าระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนในระดับต่างๆ จะได้จากกลศาสตร์ควอนตัมสอดคล้องกับทฤษฎีของโบว์ แต่อะตอมใหญ่ ๆ ระดับพลังงานที่ได้จากทฤษฎีทั้งสองต่างกัน แต่ผลที่ได้จากกลศาสตร์ควอนตัมถูกต้องกว่า

#### แบบฝึกหัด 19.12

- (เอ็นทรานซ์) หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก กล่าวว่า ผลคูณระหว่างความไม่แน่นอนทางตำแหน่งกับความไม่แน่นอนทางโมเมนตัม จะมีค่าอย่างไร
  - น้อยกว่าค่านิจของแพลังก์หารด้วย  $2\pi$
  - เท่ากับค่านิจของแพลังก์หารด้วย  $2\pi$
  - มากกว่าค่านิจของแพลังก์หารด้วย  $2\pi$
  - มากกว่าหรือเท่ากับค่านิจของแพลังก์หารด้วย  $2\pi$
- นิวเคลียสของอะตอมรัศมีประมาณ  $10^{-14}$  เมตร ถ้า  $e$  อยู่ในนิวเคลียสได้ความไม่แน่นอนในการวัดตำแหน่งของอิเล็กตรอน  $x$  ไม่ควรมีค่าเกิน  $10^{-14}$  เมตร จากหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก โมเมนตัมของ  $e$  อย่างน้อยที่สุดมีค่าเท่าใด
 

ก. $1.05 \times 10^{-14}$ kg. m/s	ข. $1.05 \times 10^{-16}$ kg. m/s
ค. $1.05 \times 10^{-18}$ kg. m/s	ง. $1.05 \times 10^{-20}$ kg. m/s
- ถ้ามวล 0.001 กรัม อยู่ในเขต 0.01 มิลลิเมตร จงหาความไม่แน่นอนของความเร็วของวัตถุนี้
 

ก. $1.05 \times 10^{-18}$ m/s	ข. $1.05 \times 10^{-20}$ m/s
ค. $1.05 \times 10^{-23}$ m/s	ง. $1.05 \times 10^{-25}$ m/s

### 19.13 เลเซอร์ (LASER)

เลเซอร์ เป็นแสงความเข้มสูงที่มีความถี่เดียวและเฟสเดียวกัน

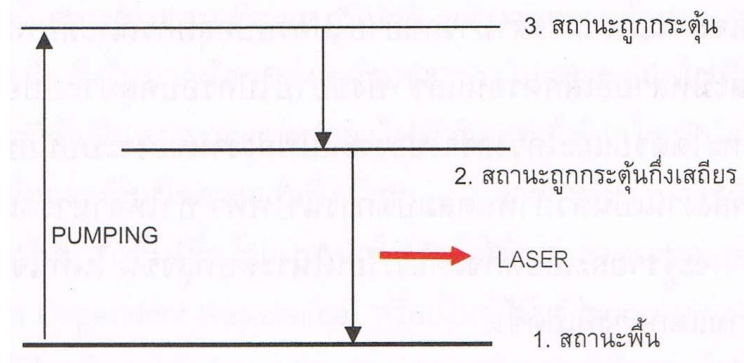
หลักการการทำงานของเลเซอร์

1. ให้อะตอมของสารถูกกระตุ้นโดยพลังงานภายนอก เช่น แสง ไฟฟ้า ให้พลังงานสูงขึ้นไปยังสถานะถูกกระตุ้นที่ไม่เสถียร (3)

2. อิเล็กตรอนปลดปล่อยพลังงานทันทีในรูปพลังงานแสงที่ไม่เป็นแสงอาพันธ์ แล้วตกลงมาสู่สถานะถูกกระตุ้น (2) เรียกว่าสถานะกึ่งเสถียร (meta-stable state)

3. อิเล็กตรอนจากสถานะถูกกระตุ้น (2) ใช้เวลาพอประมาณ กลับมาที่สถานะ (1) พร้อมกับปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงอาพันธ์

กลไกในเครื่องเลเซอร์ประกอบด้วยกระจกพิเศษ 2 บาน (บานหนึ่งสะท้อน 100% อีกบานหนึ่งสะท้อนไม่ถึง 100% โดยให้แสงทะลุผ่านได้บ้าง) ทำการสะท้อนแสงกลับไปมาในเครื่อง กระตุ้นให้อะตอมอื่นที่อยู่ในสถานะ (2) ปลดปล่อยแสงอาพันธ์ออกมาเสริมกันในทิศทางเดียวกันที่มีความเข้มสูง เรียกว่า เลเซอร์ (LASER)



รูป 19.15 สถานะทั้งสามที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเลเซอร์

คลื่นเลเซอร์ที่เกิดขึ้นจะมีหลายชนิดและหลายแบบ เช่น คลื่นเลเซอร์จากก๊าซผสมของฮีเลียมกับนีออนคลื่นเลเซอร์จากไอออนของก๊าซอาร์กอน คลื่นเลเซอร์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยทั่วไปคลื่นเลเซอร์จะมีกำลังอยู่ในช่วงตั้งแต่  $10^{-3}$  -  $10^6$  วัตต์ เราจึงใช้คลื่นเลเซอร์เพื่อประโยชน์ในหลายๆด้านด้วยกัน เช่น ใช้ในด้านดนตรีได้แก่แผ่นเลเซอร์ดิสก์, ใช้คลื่นเลเซอร์ในการเชื่อมโครงรถยนต์ ใช้แสงเลเซอร์ในการวัดระยะทางในงานสำรวจจะให้ค่าที่มีความแม่นยำสูง ใช้คลื่นเลเซอร์ในการสื่อสารทางโทรศัพท์ระยะไกลๆ ใช้คลื่นเลเซอร์ในการศึกษาโครงสร้างอะตอมของธาตุต่างๆ ในการแพทย์ใช้แสงเลเซอร์ในการรักษาโรคระดูก ในการอุดฟัน และในการรักษาตาทำให้คนสายตาวัวและสายตาสั้นไม่ต้องใส่แว่น