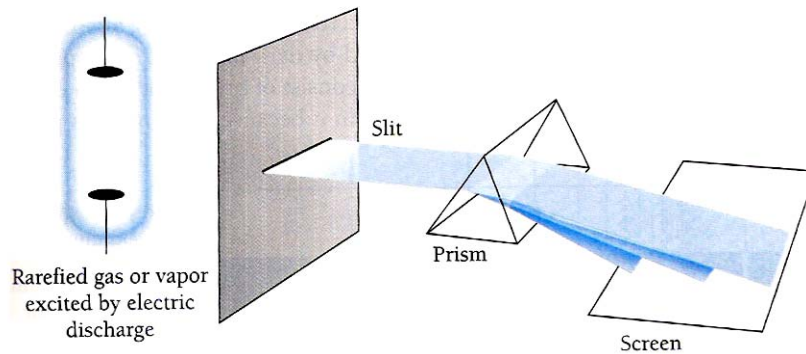


## แบบจำลองอะตอมของบอร์

### 1. สเปกตรัมของอะตอม

การศึกษาสเปกตรัมของอะตอมเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวัดความยาวคลื่นและความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อะตอมปล่อยออกมาหรือดูดกลืนเข้าไป นักวิทยาศาสตร์ได้อาศัยผลการทดลองเกี่ยวกับสเปกตรัมของอะตอมเพื่อเป็นแนวทางสำหรับสร้างทฤษฎีขึ้นมาอธิบายการจัดตัวของอิเล็กตรอนในอะตอม



รูปที่ 1 การจัดเครื่องมือการทดลองเพื่อสังเกตสเปกตรัมของอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 1 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อใช้สังเกตสเปกตรัมของอะตอม แหล่งกำเนิดแสงเกิดจากก๊าซอะตอมเดี่ยวหรือไอของอะตอมถูกกระตุ้น เช่นด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้า จากขบวนการนี้ อะตอมจะถูกทำให้อยู่ในสถานะซึ่งมีพลังงานสูงกว่า (กล่าวคืออยู่ในสถานะถูกกระตุ้น) เมื่อมันอยู่ในสถานะปกติหรือสถานะพื้น อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะไม่สามารถอยู่ในสถานะนี้ได้เกินกว่า  $10^{-8}$  วินาที ก่อนที่มันจะกลับลงสู่สถานะปกติ ระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพลังงานสูงกว่ามายังสถานะพลังงานต่ำกว่า อะตอมจะปล่อยพลังงานส่วนที่เหลือออกมาในรูปของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รังสีนี้จะถูกผ่านไปยังระบบของช่องแคบ และตกลงบนปริซึม (หรือเกรตติง) ปริซึมจะทำหน้าที่กระจายรังสีนี้ทำให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไปรวมกันที่จุดต่างๆ บนแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะปรากฏให้เห็นเป็นเส้นสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่ต่างกัน สเปกตรัมที่ได้นี้มีชื่อเรียกว่า เส้นสเปกตรัม (line spectrum)

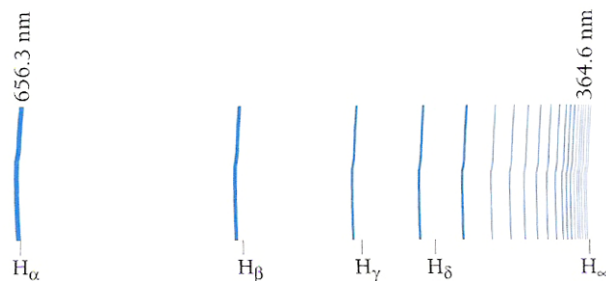
สเปกตรัมของสารต่างๆ ประกอบด้วยเส้นสเปกตรัม ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของแต่ละอะตอม ดังนั้นสเปกตรัมจึงเป็นลักษณะเฉพาะตัวของอะตอมแต่ละชนิด (ลักษณะนี้ต่างจากสเปกตรัมต่อเนื่องของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากผิวของวัตถุร้อนเช่นในกรณีของวัตถุดำ) เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสเปกตรัมของอะตอมเรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์ (spectrometer)

ในครั้งหลังของศตวรรษที่ 19 นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการวัดความยาวคลื่นเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ สเปกตรัมของอะตอมกลายเป็นสิ่งที่มีประโยชน์เพราะสามารถบ่งชี้ธาตุได้โดยอาศัยลักษณะเฉพาะของเส้นสเปกตรัม นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นสเปกตรัมมีลักษณะที่เป็นระเบียบและแบ่งแยกออกเป็นอนุกรม (series) โดยที่ในแต่ละอนุกรมนั้นระยะระหว่างเส้นสเปกตรัมจะลดลงเรื่อยๆ เมื่ออนุกรมนี้เข้าใกล้ขีดจำกัด

ของมัน เช่นอนุกรมสเปกตรัมกลุ่มแรกที่สังเกตโดย เจ.เจ.บาลเมอร์ (J.J.Balmer) ในปี ค.ศ. 1885 จากสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน ความถี่ของเส้นสเปกตรัมในอนุกรมนี้เรียกว่าอนุกรมบาลเมอร์ ซึ่งอยู่ในช่วงที่มองเห็นได้ บาลเมอร์ได้แสดงความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมในอนุกรมนี้ ด้วยสมการ

$$\lambda = (3645.6) \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad \text{เมื่อ } n = 3, 4, 5, 6, \dots \quad (1)$$

$\lambda$  เป็นความยาวคลื่นในหน่วยอังสตรอม สำหรับ  $n = 3$   $\lambda = 6562.08$  อังสตรอม เรียกว่าเส้น  $H_\alpha$  สำหรับ  $n = 4$   $\lambda = 4860.80$  อังสตรอม เรียกว่าเส้น  $H_\beta$  ในทำนองเดียวกัน  $n = 5, 6, \dots$  ให้เส้น  $H_\gamma, H_\delta, \dots$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อ  $n$  เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นจะมีค่าใกล้กันมากขึ้นๆ จนกระทั่ง  $n = \infty$   $\lambda = 3645.6$  ซึ่งเรียกว่าขีดจำกัดของอนุกรม



รูปที่ 2 แสดงเส้นสเปกตรัมของอนุกรมบาลเมอร์ของอะตอมไฮโดรเจน

ในปี ค.ศ. 1897 เจ.อาร์. ริดเบิร์ก (J.R. Rydberg) ได้เขียนสมการของอนุกรมบาลเมอร์ ในรูปที่สะดวกกว่า โดยการใช้ส่วนกลับของความยาวคลื่น

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{เมื่อ } n = 3, 4, 5, \dots \quad (2)$$

$R_H$  คือค่าคงที่ของริดเบิร์ก,  $R_H = 109677.576 \pm 0.012 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับอนุกรมอื่นสามารถสังเกตได้ภายหลังจากที่บอร์ได้เสนอทฤษฎีอะตอมไฮโดรเจน ในปี ค.ศ. 1913

## 2. ทฤษฎีอะตอมของบอร์

ในปี ค.ศ. 1913 นีลบอร์ (Neil Bohr) ได้เสนอทฤษฎีอะตอมของไฮโดรเจนขึ้นซึ่งสามารถอธิบายสเปกตรัมที่สังเกตเห็นได้ ทฤษฎีอะตอมของบอร์เป็นการรวมฟิสิกส์ยุคเก่าและแนวความคิดของการควอนไทซ์พลังงานที่เสนอขึ้นมาโดยแพลงค์ นั่นคือทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีความถี่ของอะตอมไฮโดรเจน

### 2.1 สมมติฐานเบื้องต้น

สมมติฐาน 3 ข้อของบอร์มีดังต่อไปนี้

สมมติฐาน 1 อิเล็กตรอนในอะตอมสามารถเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสได้ในวงโคจรวงกลมที่แน่นอนโดยไม่มีการแผ่รังสีออกมา สถานะเหล่านี้เรียกว่าสถานะนิ่งของอะตอม (หรือของระบบ) และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสถานะนิ่งนี้ จะเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของกลศาสตร์ยุคเก่า

สมมติฐาน 2 สถานะนิ่งที่ยอมให้อิเล็กตรอนอยู่ได้นี้เป็นสถานะซึ่งโมเมนตัมเชิงมุมออร์บิทัล (orbital angular momentum)  $L = mvr$  ของอิเล็กตรอน เป็นจำนวนเต็มเท่าของ  $\hbar$  กล่าวคือ

$$L = mvr = n\hbar \quad (3)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$  และ  $n$  เรียกว่าเลขควอนตัมหลัก (principal quantum number)

สมมติฐาน 3 การปล่อยหรือดูดกลืนรังสีเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดจากสถานะนิ่งหนึ่งไปยังอีกสถานะนิ่งหนึ่ง เรียกว่าอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะ (transition) การเปลี่ยนสถานะสถานะนี้จะทำให้อะตอมปล่อยหรือดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (หรือโฟตอน) ที่มีพลังงาน

$$h\nu = E_i - E_f \quad (4)$$

สำหรับสมมติฐาน 3 มีเหตุผลที่สนับสนุนจากสมมติฐานควอนตัมของแพลงค์ แต่เหตุผลที่สนับสนุนสมมติฐาน 2 มีขึ้นหลังจากที่บอร์ได้ตั้งสมมติฐานแล้วเป็นเวลาหลายปี กล่าวคือจากสมมติฐานของเดอบรอยล์ (ปี ค.ศ. 1926) ซึ่งเกี่ยวกับคุณสมบัติคลื่นของสสาร เดอบรอยล์คิดว่ามีคลื่นอิเล็กตรอนที่ล้อมรอบนิวเคลียสอยู่แทนที่จะเป็นอนุภาคอิเล็กตรอน และวงโคจรของบอร์แต่ละวงโคจรจะต้องประกอบด้วยจำนวนเต็มของอิเล็กตรอนเดอบรอยล์ วงโคจรวงแรกมีเส้นรอบวงเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่นอิเล็กตรอน วงที่สองมีเส้นรอบวงเท่ากับสองความยาวคลื่น และวงโคจรต่อไปแต่ละวงมีความยาวของเส้นรอบวงต่างจากวงถัดไปหนึ่งความยาวคลื่นเสมอ ดังนั้น

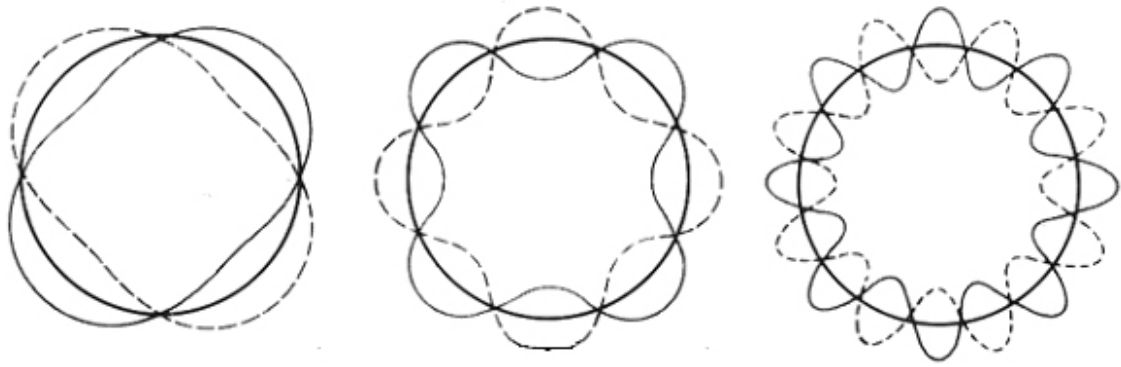
$$2\pi r = n\lambda \quad (5)$$

จากสมมติฐานของเดอบรอยล์

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (6)$$

แทนค่าสมการ (6) ลงในสมการ (5) จะได้

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad (7)$$



รูปที่ 3 แสดงวงโคจรที่เป็นสถานะนิ่ง ซึ่งมีความยาวคลื่นของวงโคจรเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นเดอบรอยล์

ซึ่งก็คือ สมมติฐาน 2 นั้นเอง ดังนั้นสมมติฐานของเดอบรอยล์จึงสามารถอธิบายสมการควอนไทซ์ของบอร์ได้ เราอาจกล่าวว่วงโคจรที่เป็นสถานะนิ่งของอะตอมประกอบด้วยจำนวนเต็มของความยาวคลื่นเดอบรอยล์ของอิเล็กตรอน

## 2.2 ระดับพลังงาน

สมมติว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในวงโคจรวงกลมที่เป็นสถานะนิ่ง มีรัศมี  $r_n$  ด้วยความเร็ว  $v_n$  ดังนั้นแรงสู่ศูนย์กลางเท่ากับแรงสู่ศูนย์กลาง

$$\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{Ke^2}{r_n^2} \quad (8)$$

แต่  $v_n$  จากสมมติฐานข้อที่ 2 หรือจากสมการที่ (7) คือ

$$v_n = \frac{n\hbar}{mr_n} \quad (9)$$

แทนค่า  $v_n$  จากสมการ (9) ลงในสมการที่ (8) จะได้สมการของรัศมีของวงโคจรของอิเล็กตรอนเป็น

$$r_n = \frac{n^2\hbar^2}{Kme^2} = n^2r_1 \quad (10)$$

เมื่อ  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$  และ  $r_1 = \frac{\hbar^2}{Kme^2}$  เป็นรัศมีวงโคจรแรกของบอร์สำหรับอะตอมไฮโดรเจน

$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$  แทนค่า  $\hbar, K, m, e^2$  จะได้  $r_1 = 0.53$  อังสตรอม ซึ่งสอดคล้องกับ

ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ดังนั้นตามทฤษฎีของบอร์ อิเล็กตรอนจะอยู่ได้เฉพาะวงโคจรที่กำหนดให้ดังนี้

$$r_n = r_1, 4r_1, 9r_1, 16r_1, \dots \quad (11)$$

เราสามารถหาความเร็วของอิเล็กตรอนในวงโคจรเหล่านี้ได้โดยแทนค่า  $r_n$  จากสมการ (10) ลงในสมการ(9)

$$v_n = \frac{1}{n} \frac{Ke^2}{\hbar} = \frac{v_1}{n} \quad (12)$$

เมื่อ  $v_1 = \frac{\hbar}{mr_1} = \frac{Ke^2}{\hbar}$

พลังงานรวม  $E_n$  ของอิเล็กตรอนในวงโคจรที่  $n$  เป็นผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ กล่าวคือ

$$E_n = \frac{1}{2}mv_n^2 + \left(-\frac{Ke^2}{r_n}\right) \quad (13)$$

แทนค่า  $v_n$  จากสมการ (9) และ  $r_n$  จากสมการ (10) ลงในสมการที่ (13) จะได้

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \left(\frac{K^2 e^4 m}{2\hbar^2}\right) \quad n=1,2,3,\dots \quad (14)$$

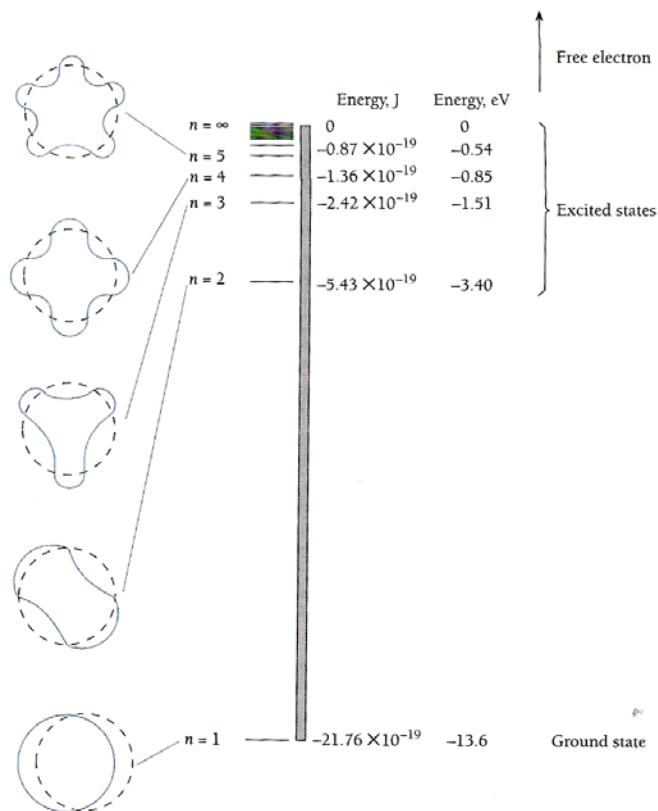
หรือ

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad (15)$$

เมื่อ

$$E_1 = -\frac{K^2 e^4 m}{2\hbar^2} = -13.58 \text{ eV} \quad (16)$$

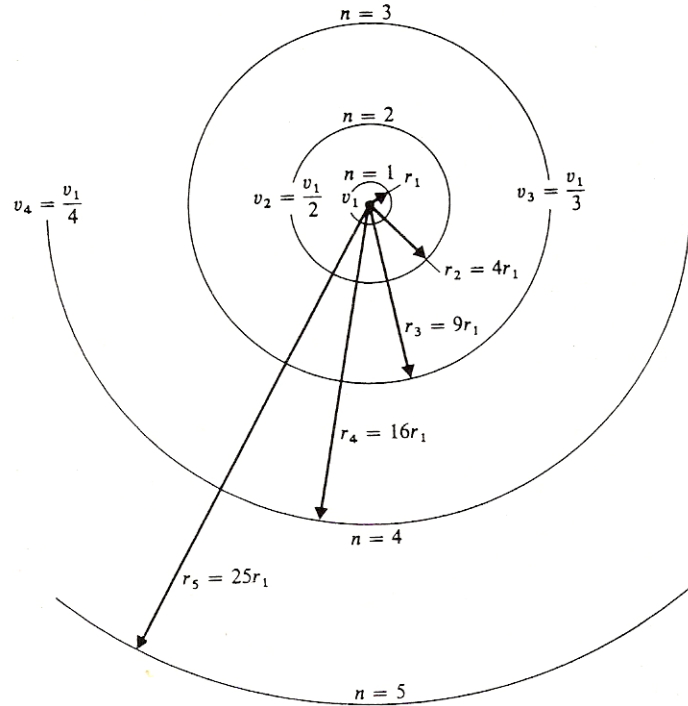
โดยที่  $E_1$  เป็นพลังงานของอิเล็กตรอนในวงโคจรวงแรกของบอร์สำหรับอะตอมไฮโดรเจน



รูปที่ 4 แสดงระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจนที่สอดคล้องกับเลขควอนตัมค่าต่างๆ กัน

ดังนั้นสำหรับ  $n = 1$ ,  $E_1 = -13.58 \text{ eV}$  ซึ่งเป็นค่าตรงกับผลการทดลองของการวัดพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจน สำหรับ  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$  ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจนคือ

$$E_n = E_1, \frac{E_1}{4}, \frac{E_1}{9}, \frac{E_1}{16}, \dots \quad (17)$$



รูปที่ 5 แสดงขนาดวงโคจรวงกลมสัมพัทธ์ของอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ในสถานะต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงระดับพลังงานเหล่านี้ โดยปกติแล้วอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนจะอยู่ในสถานะพลังงานต่ำสุดเสมอ (ในกรณีนี้คือวงโคจรแรกของบอร์  $n = 1$ ) สถานะพลังงานนี้เรียกว่าสถานะพื้น (ground state) หรือสถานะปกติ (normal state) ของอะตอมไฮโดรเจน พลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมเท่ากับขนาด  $E_1$  (+13.58 eV) ของพลังงานสถานะพื้น ซึ่งเรียกว่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (ionization energy) ถ้าอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะที่มีพลังงานมากกว่าสถานะพื้น อิเล็กตรอนและอะตอมนั้นอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะอิเล็กตรอนจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น  $E_n$  คือ  $(E_n - E_1)$  และเรียกว่าพลังงานการกระตุ้น (excitation energy)

**ตัวอย่าง** อิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่รอบอะตอมไฮโดรเจนในระดับพลังงานสถานะพื้น และถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในสถานะพลังงานสูงขึ้นไป  $n = 3$  พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะนี้มีค่าเท่าใด

**ตัวอย่าง** อะตอมไฮโดรเจนในสถานะที่มีเลขควอนตัมหลักสูง สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการหรืออาจพบได้ในอวกาศซึ่งถูกเรียกว่า อะตอมริดเบอร์ก ก) จงหาเลขควอนตัมหลักของรัศมีวงโคจรของบอร์ของอะตอมไฮโดรเจนซึ่งมีรัศมี 0.0100 mm ข) พลังงานของอะตอมไฮโดรเจนในสถานะนี้มีค่าเท่าใด

### 2.3 สเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน

เราสามารถใช้สมมติฐานข้อ 3 คำนวณหาพลังงานและความถี่ที่เป็นไปได้ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะ ถ้าอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะเริ่มต้นด้วยพลังงาน  $E_i$  (ที่มากกว่าสถานะพื้น) แล้วเปลี่ยนสถานะไปยังระดับพลังงาน  $E_f$  ที่ต่ำกว่า พลังงาน  $h\nu$  ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาคือ

$$h\nu = E_i - E_f \quad (18)$$

จากสมการ (15)

$$E_i = \frac{E_1}{n_i^2} \quad \text{และ} \quad E_f = \frac{E_1}{n_f^2} \quad (19)$$

แทนค่าสมการ (19) ลงในสมการที่ (18)

$$\nu = \frac{E_i}{h} - \frac{E_f}{h} = \frac{E_1}{h} \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (20)$$

แทนค่า  $E_1$  จากสมการ (16) ลงในสมการ (20)

$$\nu = \frac{K^2 e^4 m}{4\pi\hbar^3} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (21)$$

หรือ

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{K^2 e^4 m}{4\pi\hbar^3 c} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (22)$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (23)$$

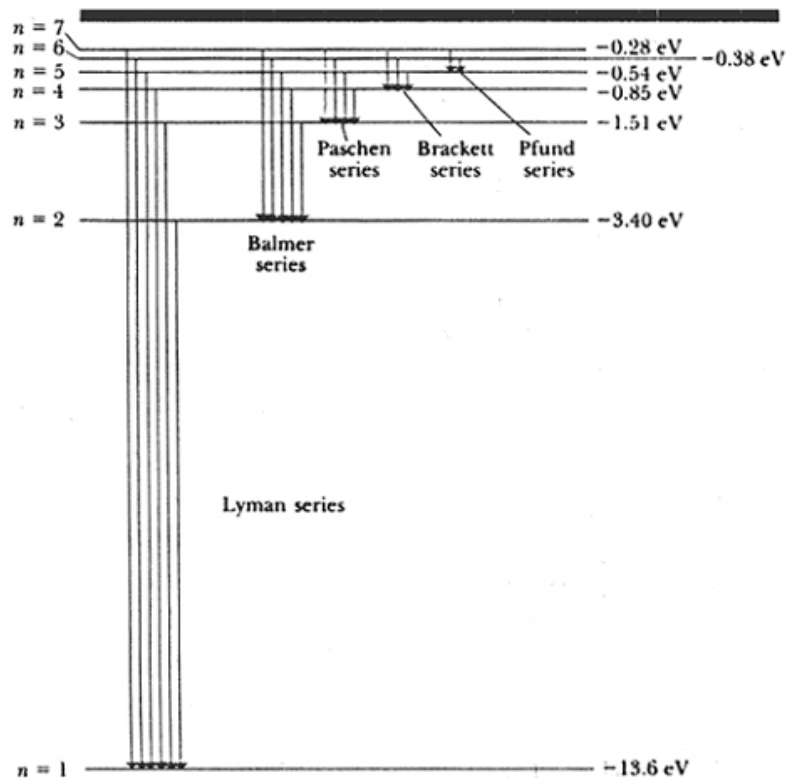
เมื่อ  $R$  คือค่าคงที่ของริดเบอร์ก

$$R = \frac{K^2 e^4 m}{4\pi\hbar^3 c} = 109740 \text{ cm}^{-1} \quad (24)$$

ค่า  $R$  จากการทดลอง  $R_{\text{exp}} = 109677 \pm 0.012 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่ง  $R$  ที่ได้จากสมการ (24) ให้ค่าตรงกับ  $R$  ที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นสมการ (22) คือสมการของริดเบิร์กสำหรับอนุกรมบาลเมอร์เมื่อแทน  $n_f = 2$  และ  $n_i = n$  จากการแทนค่า  $n_i = 3, 4, 5, 6, \dots$  เราจะได้เส้นสเปกตรัมทั้งหมดในอนุกรมบาลเมอร์ ทฤษฎีของบอร์ไม่เพียงอธิบายอนุกรมของบาลเมอร์ได้ แต่ยังใช้กับอนุกรมอื่นๆ ที่สอดคล้องกับ  $n_f$  ต่างๆ กัน อนุกรมเหล่านี้มีชื่อเรียกตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์ที่ค้นพบ ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 1 แสดงชื่ออนุกรมและสูตรสำหรับเส้นสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน

ชื่ออนุกรม	สูตรสำหรับอนุกรม
Lyman series	$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ เมื่อ $n = 2, 3, 4, \dots$
Balmer series	$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ เมื่อ $n = 3, 4, 5, \dots$
Paschen series	$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ เมื่อ $n = 4, 5, 6, \dots$
Brackett series	$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ เมื่อ $n = 5, 6, 7, \dots$
Pfund series	$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ เมื่อ $n = 6, 7, 8, \dots$



รูปที่ 6 แสดงไดอะแกรมของระดับพลังงานอะตอมไฮโดรเจน และการเปลี่ยนแปลงสถานะที่สอดคล้องกับอนุกรมต่างๆ

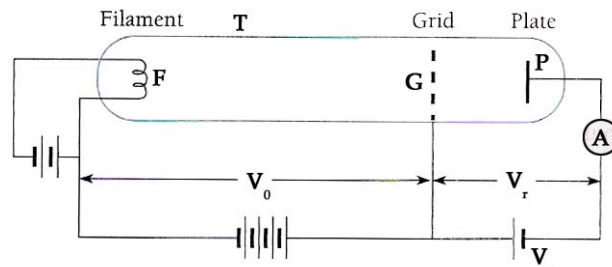


ข้อสังเกต เฉพาะอนุกรมของบาลเมอร์เท่านั้นที่สเปกตรัมอยู่ในช่วงมองเห็นได้ ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งที่ว่าทำไมอนุกรมอื่นๆ จึงถูกค้นพบหลังจากการทำนายโดยทฤษฎีของบอร์

สรุป ทฤษฎีของบอร์ประสบความสำเร็จในการอธิบายสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน

### 3. การทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์

ในปี ค.ศ. 1914 ได้มีการทดลองแสดงให้เห็นว่าสถานะหนึ่งที่เป็นค่า ๆ ของอิเล็กตรอนในอะตอม (ตามสมมติฐานของบอร์) นั้นมีอยู่จริง จากการทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์ รูปที่ 7 แสดงการจัดเครื่องมือการทดลอง



รูปที่ 7 การจัดเครื่องมือทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์

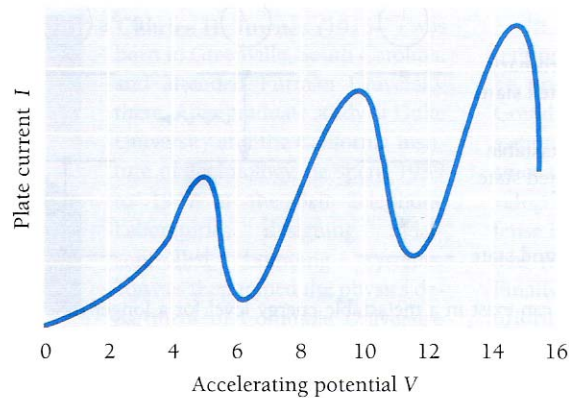
เมื่ออิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาจากไส้หลอดที่ร้อน F จะเคลื่อนที่ไปยังแผ่น P ระหว่าง F และ P มีกริด G กั้นอยู่ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จาก F ไป G จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์  $V_0$  แต่เมื่อเคลื่อนที่จาก G ไป P มีศักย์หน่วง (retarding potential)  $V_r$  ซึ่งมีค่าเพียงเล็กน้อย อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก F ไป P ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล  $I_p$  วัดได้ด้วยแอมมิเตอร์ A

ความเร็วของอิเล็กตรอนหลังจากถูกปล่อยออกมาจาก F และเคลื่อนที่มาถึง G คือ

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV_0 \quad (25)$$

เมื่อ  $V_0$  มีค่าเพิ่มขึ้นความเร็วของอิเล็กตรอนมากขึ้นด้วย ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จาก F ไปยัง P จะมีการชนกับอะตอมของธาตุที่อยู่ในสภาพเป็นไอ ซึ่งบรรจุไว้ในหลอดทดลอง ถ้าความเร็วของอิเล็กตรอนต่ำ การชนกันจะไม่สามารถกระตุ้นอะตอมได้ และอิเล็กตรอนเพียงแต่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่เท่านั้น ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มาถึง G จึงมีพลังงานเหลือมากพอที่จะผ่านศักย์หน่วง  $V_r$  ไปยัง P ได้ เมื่อ  $V_0$  เพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปถึง P ได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มกระแส  $I_p$  ดังแสดงในรูป 8 และต่อมาเพื่อเพิ่ม  $V_0$  จนกระทั่งถึงค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะชนกับอะตอมแล้วอะตอมถูกกระตุ้นในกรณีนี้ อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานเกือบทั้งหมด เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปถึง G แล้วจะไม่มีพลังงานพอที่จะผ่านศักย์หน่วง  $V_r$  ดังนั้นกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และต่อมาเมื่อ  $V_0$  เพิ่มขึ้นอีก กระแส  $I_p$  จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

รูปที่ 8 เป็นกราฟระหว่าง  $I_p$  กับ  $V_0$  สำหรับปรอท ผลต่างระหว่างสถานะกระตุ้นสถานะแรกของปรอทกับสถานะพื้นคือ 4.9 eV ดังนั้นกรณีปรอทเราสามารถคาดคะเนได้ว่ายอดแหลมของกระแส  $I_p$  อยู่ที่ 4.9 โวลต์  $2 \times 4.9 = 9.8$  โวลต์  $3 \times 4.9 = 14.7$  โวลต์ เป็นต้น ซึ่งเราจะเห็นว่าตรงกับผลการทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 8 ความต่างศักย์ที่คล้องจองกับยอดแหลมของกระแสเรียกว่าศักย์การกระตุ้น (excitation potential)



รูปที่ 8 กราฟระหว่างกระแส  $I_p$  และความต่างศักย์  $V_0$

การทดลองดังกล่าวข้างต้นถึงแม้ค่อนข้างหยาบ แต่แสดงว่าสถานะหนึ่งเป็นค่าๆ ของอิเล็กตรอนในอะตอมมีอยู่จริง

**ตัวอย่าง** ในอะตอมโซเดียม ความยาวคลื่นซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นสถานะแรกไปยังสถานะพื้น คือ 5896 อังสตรอม ที่ความต่างศักย์ค่าใดบ้าง ในการทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์ที่กระแส  $I_p$  มีค่าลดลง

#### 4. ความไม่สมบูรณ์ของทฤษฎีอะตอมของบอร์

ความสำเร็จของแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของบอร์

- สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใดอิเล็กตรอนในอะตอมจึงอยู่ได้โดยไม่ถูกดูดเข้าไปหานิวเคลียส
- สามารถอธิบายการเกิดสเปกตรัมได้สอดคล้องกับการทดลอง

ข้อจำกัดของแบบจำลองอะตอมไฮโดรเจนของบอร์

- ไม่สามารถนำไปอธิบายอะตอมที่มีอิเล็กตรอนหลายตัวได้
- ไม่สามารถอธิบายได้ว่าทำไมเส้นสเปกตรัมของไฮโดรเจนเมื่อใช้สเปกโตรมิเตอร์ที่มีกำลังขยายสูงพบว่าแต่ละเส้นยังมีเส้นย่อยเล็ก ๆ อยู่ชิดกันมาก

## 5. แบบจำลองอะตอมตามกลศาสตร์ควอนตัม

เพื่อจัดข้อบกพร่องของแบบจำลองอะตอมของบอร์ จึงใช้ทฤษฎีควอนตัม โดยนำสมการชเรอดิงเงอร์หาฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจน

$$\frac{P^2}{2m} + V(r) = E \quad (26)$$

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (27)$$

ให้  $\psi$  คือฟังก์ชันของอิเล็กตรอน แทน P ด้วยตัวปฏิบัติการ  $-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m}$  จะได้สมการชเรอดิงเงอร์ในแกนพิกัดทรงกลม คือ

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin^2 \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} \right] + V(r, \theta, \phi) \psi = E \psi$$

ผลเฉลยของสมการด้านบนจะทำให้ได้เลขควอนตัม 3 แบบ ดังนี้

1. เลขควอนตัม  $n$  เรียกว่า เลขควอนตัมสำคัญ (Principal quantum number) มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็มบวก ใช้อธิบายระดับพลังงานเช่นเดียวกับแบบจำลองอะตอมของบอร์ นั่นคือ

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \quad (28)$$

2. เลขควอนตัม  $l$  เรียกว่า เลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม (Orbital quantum number หรือ angular momentum quantum number) ค่าที่จะเป็นไปได้ของ  $l$  จะต้องสอดคล้องกับค่า  $n$  โดย  $l$  จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง  $n - 1$

จากสมมติฐานของบอร์ โมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับเลขควอนตัมสำคัญ  $\left( L = \frac{nh}{2\pi} \right)$

แต่จากการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้ทฤษฎีควอนตัม พบว่า

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi} \quad (29)$$

ที่สถานะพื้นฐาน  $n = 1$  จะได้  $l = 0$  โมเมนตัมเชิงมุมมีค่าเพียงค่าเดียวคือศูนย์

ที่สถานะกระตุ้น  $n = 2$  จะได้  $l = 0, 1$  โมเมนตัมเชิงมุมมี 2 ค่า คือ  $0, \frac{\sqrt{2}h}{2\pi}$

ที่สถานะกระตุ้น  $n = 3$  จะได้  $l = 0, 1, 2$  โมเมนตัมเชิงมุมมี 3 ค่า คือ  $0, \frac{\sqrt{2}h}{2\pi}, \frac{\sqrt{6}h}{2\pi}$

ที่ระดับพลังงาน  $n$  เดียวกัน แต่อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานเดียวกันนี้ มีโมเมนตัมเชิงมุมต่างกัน เรียกสภาพเช่นนี้ว่าเป็น **degeneracy** เช่น  $n = 3$  จะมี 3 degeneracy

3. เลขควอนตัม  $m_l$  เรียกว่าเลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number) ค่าที่เป็นไปได้ของ  $m_l$  ถูกกำหนดโดยค่า  $l$  โดย  $m_l$  จะมีค่าตั้งแต่  $-l, -(l-1), \dots, 0, (l-1), l$  รวมทั้งสิ้น  $2l+1$  ค่า

ค.ศ. 1925 กูดสมิท (S.A. Goudsmit) และอะลีนเบ็ค (G.E. Uhlenbeck) พบว่าอิเล็กตรอนมีโมเมนตัมเชิงมุมอีก 1 ค่า นอกเหนือไปจากโมเมนตัมเชิงมุมที่เกิดจากการโคจรรอบนิวเคลียส โมเมนตัมเชิงมุมนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง เรียกสั้น ๆ ว่า สปิน (spin) เรียกชื่อโมเมนตัมเชิงมุมนี้ว่า โมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนรอบตัวเอง (spin angular momentum,  $\vec{S}$ ) เป็นปริมาณเวกเตอร์ และมีสภาพควอนไทซ์ (quantize) เลขควอนตัม  $s$  เรียกว่าเลขควอนตัมของการหมุน (spin quantum number) มีค่าเพียงค่าเดียวคือ  $1/2$

โมเมนตัมเชิงมุมของการหมุน ( $\vec{S}$ ) หาได้จาก

$$\vec{S} = \sqrt{s(s+1)} \frac{h}{2\pi}$$

เมื่อ  $s = \frac{1}{2}$  จะได้

$$\vec{S} = \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{h}{2\pi}$$

เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายนอกผ่านในอะตอมพบว่าเวกเตอร์ของโมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนสามารถจัดตัวได้สองลักษณะ คือขนานและสวนกับทิศทางของสนามแม่เหล็กภายนอก จะได้เลขควอนตัมแม่เหล็กของการหมุน ( $m_s$ , spin magnetic quantum number) จึงมี 2 ค่าคือ  $+\frac{1}{2}$  และ  $-\frac{1}{2}$

มาถึงจุดนี้จะเห็นว่าการอธิบายอิเล็กตรอนในอะตอม ไม่สามารถใช้เลขควอนตัม  $n$  เพียงตัวเดียวเหมือนกับแบบจำลองของบอร์ได้อีกต่อไป การบอกสถานะของอิเล็กตรอนในอะตอมซึ่งมีพฤติกรรมเป็นแบบคลื่นนั้นต้องใช้เลขควอนตัม 4 ตัว คือ  $n, l, m_l$  และ  $m_s$

ตารางที่ 2 เลขควอนตัมที่เกี่ยวข้องกับการบอกสถานะของอิเล็กตรอน

เลขควอนตัม	เกี่ยวข้องกับ	ค่าที่เป็นไปได้
$n$	พลังงาน	1, 2, 3, ..... $\infty$
$l$	โมเมนตัมเชิงมุม	0, 1, 2, ... $n-1$
$m_l$	โมเมนตัมเชิงมุมในแนวสนามแม่เหล็ก	$-l$ ถึง $l$
$m_s$	โมเมนตัมเชิงมุมของการหมุนรอบตัวเองในแนวสนามแม่เหล็ก	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

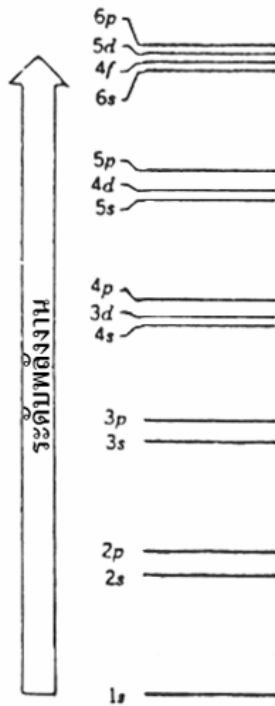
อะตอมของไฮโดรเจนเป็นอะตอมที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด อะตอมของธาตุอื่น ๆ จะมีอิเล็กตรอนตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปในอะตอม โครงรูปของอิเล็กตรอน (configuration) ในอะตอมเช่นนี้จะมีลักษณะอย่างไร ทำไมธาตุที่มีอิเล็กตรอนต่างกันเพียง 1 ตัว สมบัติทางเคมีของธาตุคู่กันจึงต่างกัน เช่น แก๊สเฉื่อย (เลขอะตอม = 10) และโลหะโซเดียม (เลขอะตอม = 11) แก๊สเฉื่อยเป็นธาตุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุใด ๆ ขณะที่โซเดียมไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอื่น

ผู้ที่ศึกษาการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมเป็นโครงสร้างที่ชัดเจนคือเพาลี (Wolfgang Pauli) เมื่อ ค.ศ. 1925 ตั้งเป็นกฎเรียกว่า หลักการกีดกันของเพาลี (Pauli's exclusion principle) กล่าวว่าในอะตอมหนึ่ง ๆ อิเล็กตรอนของอะตอมนั้นจะมีเลขควอนตัม  $n, l, m_l$  และ  $m_s$  ชุดเดียวกันนี้ได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น

- เลขควอนตัม  $n$  จะบอกชั้น (shell) จะแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ K, L, M, N, O และ P แทนชั้นที่ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 ตามลำดับโดยนับเริ่มต้นจากวงในสุด
- เลขควอนตัม  $l$  แต่ละค่าจะบอกถึงชั้นย่อย (subshells) จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็ก s, p, d, f, g, h และ i แทนชั้นย่อย  $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  และ 6 ตามลำดับ จำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในแต่ละชั้นย่อยเท่ากับ  $2(2l + 1)$  จำนวน 2 มาจากอิเล็กตรอนสามารถมีค่า  $m_s$  ได้ 2 ค่า คือ  $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

ตารางที่ 3 แสดงจำนวนอิเล็กตรอนในแต่ละชั้น

$n$	ชั้น	$l$	ชั้นย่อย	จำนวนอิเล็กตรอน ในชั้นย่อย $2(2l + 1)$	จำนวนอิเล็กตรอน ทั้งหมด $2n^2$
1	K	0	1s	2	2
2	L	0	2s	2	8
		1	2p	6	
3	M	0	3s	2	18
		1	3p	6	
		2	3d	10	
4	N	0	4s	2	32
		1	4p	6	
		2	4d	10	
		3	4f	14	



อะตอมที่มีอิเล็กตรอนหลายตัวจนอิเล็กตรอนสามารถยึดครองได้ถึงระดับพลังงานที่  $n = 3$  ขึ้นไป การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนจะไม่เรียงลำดับตามตาราง ชั้นย่อย 4s อาจล้าเข้าไปใกล้กับวงเคลียสมากกว่าชั้นย่อย 3d ระดับพลังงานย่อยจะเหลื่อมกัน

รูปที่ 9 ระดับพลังงานของชั้นย่อยของอะตอมเรียงตามลำดับระดับพลังงาน

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของธาตุต่างๆ

ธาตุ	สัญลักษณ์	เลขอะตอม (Z)	การจัดเรียงอิเล็กตรอน
Hydrogen	H	1	1s
Helium	He	2	1s <sup>2</sup>
Lithium	Li	3	1s <sup>2</sup> 2s
Beryllium	Be	4	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup>
Boron	B	5	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p
Carbon	C	6	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>
Nitrogen	N	7	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>

จากตารางเริ่มต้นธาตุไฮโดรเจน มีอิเล็กตรอน 1 ตัว เขียนได้เป็น 1s หมายถึงมีอิเล็กตรอน 1 ตัว อยู่ที่สถานะพื้นฐานมีเลขควอนตัม  $n = 1$ ,  $l = 0$ ,  $m_l = 0$ ,  $m_s = +1/2$

ธาตุฮีเลียม ( $Z = 2$ ) มีอิเล็กตรอน 2 ตัว อยู่ในชั้นที่ 1 มีเลขควอนตัม  $n = 1$ ,  $l = 0$ ,  $m_l = 0$  เหมือนกัน แต่มีสปินตรงข้ามกัน คือ  $m_s = 1/2$  และ  $m_s = -1/2$  อะตอมของฮีเลียมมีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่ 1 เต็มพิกัด

## 6. เลเซอร์เบื้องต้น

เลเซอร์ (Laser) และ เมเซอร์ (Maser) เป็นคลื่นแสงและคลื่นไมโครเวฟ ที่ได้จากการขยายทางฟิสิกส์ ที่เรียกว่า Light Amplification by Stimulated Emission Radiation นำตัวอักษรตัวหน้าของแต่ละคำมารวมกันเป็น LASER สำหรับเมเซอร์เปลี่ยนจากคำว่า Light เป็น Microwave ถ้าจะแปลตามศัพท์ในประโยคภาษาอังกฤษ หมายถึงการขยายแสงหรือไมโครเวฟ โดยการกระตุ้นให้ปลดปล่อยรังสีออกมา เลเซอร์และเมเซอร์จึงมีหลักการทำงานเหมือนกัน ต่างกันตรงช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น

เมเซอร์ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ.1954 ต่อมาในปี ค.ศ. 1958 ทาวน์และชอโลว์ (C.H. Townes and A.L. Schawlow) ได้เสนอว่าหลักการที่ทำให้เกิดเมเซอร์ น่าจะนำมาใช้กับคลื่นแสงได้ ค.ศ. 1960 ไมแมน (Theodore Maiman) ได้ผลิตแสงเลเซอร์จากผลึกทับทิมได้สำเร็จเป็นครั้งแรก จัดเป็นเลเซอร์แบบของแข็ง (solid state laser) ให้แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 694.3 นาโนเมตร ค.ศ. 1961 แจแวน, เบนเนตต์ และเฮอเรียท (Javan, Bennett and Herriot) สร้างเลเซอร์แก๊ส(Gas laser)ทำจากแก๊สฮีเลียม - นีออน เป็นครั้งแรก โดยให้เลเซอร์ซึ่งเป็นแสงอินฟราเรด มีความยาวคลื่น 1.15 ไมโครเมตร ค.ศ. 1962 ริจเดน และไวท์ (Rigden and White) สามารถสร้างเลเซอร์สีแดงที่ส่งออกมาอย่างต่อเนื่องจากแก๊สฮีเลียม-นีออน มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร นำมาใช้งานมากที่สุดในห้องปฏิบัติการ

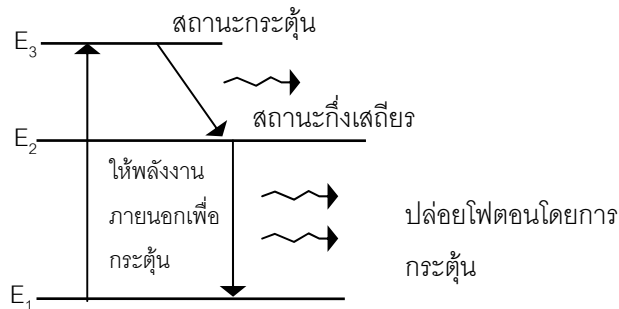
ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1962 เป็นต้นมา การพัฒนาการสร้างเลเซอร์แบบต่าง ๆ ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันมีเลเซอร์ที่ทำจากของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ให้เลเซอร์ตั้งแบบคลื่นต่อเนื่อง และคลื่นดล (pulse) พื้นฐานการสร้างเลเซอร์เหล่านี้เกิดจากการที่นักวิทยาศาสตร์มีความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอมของธาตุต่าง ๆ ได้ลึกซึ้งนั่นเอง

สมบัติของเลเซอร์ต่างจากคลื่นแสงทั่ว ๆ ไป คือ เลเซอร์เป็นแสงที่มีความบริสุทธิ์ทางแสง (spectral purity) มากที่สุดเท่าที่นักวิทยาศาสตร์ทำได้ เป็นแสงที่มีความถี่เดียว เลเซอร์ทุกขบวนจะมีเฟสที่ตรงกัน ที่เรียกกันว่าเป็นคลื่นอาพันธ์ (coherent) สามารถปรับโฟกัสให้เป็นจุดเล็กที่สุดได้ง่าย เพราะไม่มีแสงความถี่อื่นเจือปน จุดโฟกัสทำให้เล็กได้ถึงขนาด 1-2 ไมครอน ลำแสงเลเซอร์จะมีลักษณะขนานกันไปตลอดระยะทางไกล ๆ ไม่บานปลายออก ทำให้ความเข้มของแสงที่ปลายทางกับต้นทางต่างกันไม่มากนัก นักวิทยาศาสตร์สามารถสร้างเลเซอร์ให้มีความเข้มสูงมากเป็นพิเศษ เช่น สามารถสร้างเลเซอร์จากผลึกทับทิม ให้มีความสว่างถึง 100 วัตต์/เซนติเมตร<sup>2</sup> - สเตอเรเดียน (ความสว่างของแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 130 วัตต์/เซนติเมตร<sup>2</sup> - สเตอเรเดียน)

### 6.1 หลักการทำให้เกิดแสงเลเซอร์

โดยปกติอิเล็กตรอนในอะตอมจะอยู่ในสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานต่ำสุด ถ้ากระตุ้นอะตอมโดยใช้พลังงานจากภายนอก (เช่น กระตุ้นด้วยโฟตอน, หรือชนด้วยอิเล็กตรอนจากอะตอมอื่น) ทำให้อะตอมไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น โดยทั่วไปอะตอมจะอยู่ที่สถานะกระตุ้นได้ไม่เกิน  $10^{-8}$  วินาที จะกลับไปสู่สถานะพื้นทันที แต่บางครั้งอะตอมจะไปอยู่สถานะกระตุ้นที่ต่ำกว่า และสามารถอยู่ในสถานะนี้ได้นานถึง  $10^{-3}$  วินาที

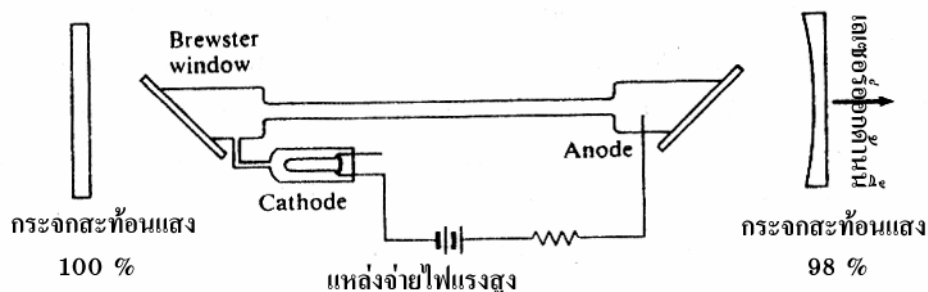
หรือมากกว่า เราเรียกสถานะนี้ว่า เป็นสถานะเสถียรชั่วคราว (metastable state) ก่อนที่จะกระจายโฟตอนออกมาแล้วกลับมาอยู่ที่สถานะพื้น



รูป 10 ระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเลเซอร์

การทำให้เกิดเลเซอร์จึงต้องเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานอย่างน้อย 3 ระดับ จากรูป 10 ให้  $E_1$  เป็นระดับพลังงานสถานะพื้น  $E_2$  และ  $E_3$  เป็นระดับพลังงานของสถานะกระตุ้น  $E_2$  จะเป็นสถานะเสถียรชั่วคราว การทำงานของเลเซอร์เริ่มต้นด้วยการกระตุ้นให้อะตอมจากสถานะพื้น  $E_1$  ไปสู่สถานะกระตุ้น  $E_3$  อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานมาอยู่ที่สถานะเสถียรชั่วคราว  $E_2$  อะตอมจะสะสมอยู่ที่ระดับ  $E_2$  นี้มากขึ้น เรียกว่าเกิด population inversion เพราะแทนที่อะตอมจะกลับมาสู่สถานะพื้นทันทีกลับผกผันมาอยู่ที่สถานะกระตุ้นชั่วคราว แต่ถ้าอะตอมที่ระดับพลังงาน  $E_2$  นี้ถูกกระตุ้น ซึ่งอาจเกิดจากอะตอมตัวใดตัวหนึ่งปล่อยโฟตอนออกมา ก่อน และโฟตอนที่ปล่อยออกมานี้ไปกระตุ้นให้อะตอมอื่น ๆ ปลดปล่อยโฟตอนออกมาพร้อม ๆ กัน จะได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เสริมกัน ถ้ามีอะตอมที่  $E_2$  นี้เป็นล้านล้านตัว จะได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกัน ความเข้มของคลื่นจะมากกว่าปกติ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้นี้คือเลเซอร์นั่นเอง เลเซอร์ที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 3 ระดับ ได้แก่ เลเซอร์จากผลึกทับทิม

เลเซอร์ที่ได้จากแก๊สฮีเลียม-นีออน จะเกิด population inversion ต่างจากที่เกิดในเลเซอร์ทับทิม ต้องใช้ระดับพลังงานถึง 4 ระดับ ลักษณะของหลอดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน แสดงไว้ในรูปที่ 9.8



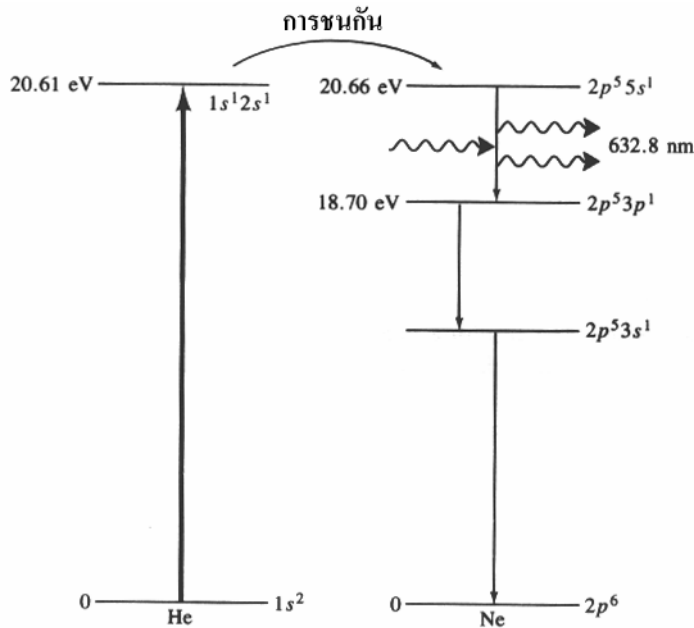
รูปที่ 11 ส่วนประกอบของหลอดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์



หลอดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30-40 มิลลิเมตร ภายในมีหลอดแก้วรูปแคบ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5-3 มิลลิเมตร ภายในหลอดแก้วรูปแคบนี้ บรรจุแก๊สฮีเลียม-นีออน อัตราส่วนจำนวนอะตอมฮีเลียมมากกว่าจำนวนอะตอมนีออน เป็นอัตราส่วน 5:1, 7:1 หรือ 10:1 ความดันอากาศภายในหลอดแก้วรูปแคบประมาณ 1 มิลลิเมตรปรอท ปลายหลอดทั้งสองมีกระจกขนาน ด้านหนึ่งสะท้อนแสงได้ 100% อีกด้านหนึ่งสะท้อนแสงได้ประมาณ 98% แสงเลเซอร์จะออกทางด้านนี้ ระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสองเป็นเลขจำนวนเต็มของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเลเซอร์ที่ต้องการ ความต่างศักย์ที่ขั้วของหลอดประมาณ 1.5 kV ถึง 4 kV ขึ้นอยู่กับความยาวของหลอด กำลังที่ได้จากหลอดเลเซอร์อยู่ในช่วง 1-5 มิลลิวัตต์ ขึ้นอยู่กับขนาดของหลอดเลเซอร์

เมื่อจ่ายไฟให้หลอดเลเซอร์ทำงาน อิเล็กตรอนจากแคโทดจะไปกระตุ้นอะตอมของแก๊สผสมอะตอมฮีเลียมจะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าอะตอมนีออน อะตอมของฮีเลียมจะถูกกระตุ้นจากระดับพลังงาน 1s ไปสู่สถานะกระตุ้น 2s ระดับพลังงานนี้มีค่าเท่ากับ 20.61 eV อะตอมฮีเลียมที่ถูกกระตุ้นบางอะตอมเมื่อชนกับอะตอมนีออนจะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมนีออน ทำให้อิเล็กตรอนของนีออนที่ระดับพลังงาน 3p ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน 4s หรือ 5s ซึ่งมีค่าพลังงาน 19.78 eV และ 20.66 eV ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะระดับพลังงานทั้งสองค่านี้มีค่าใกล้กับระดับพลังงาน 5s บางตัวจะตกมาอยู่ชั้น 4p แล้วคายพลังงานในรูปแสงที่มีความยาวคลื่น 3391 nm และบางตัวจะตกมาอยู่ที่ระดับพลังงาน 3p ให้แสงสีแดง ความยาวคลื่น 632.8 nm อะตอมนีออนที่ระดับพลังงาน 4s จะกลับมาสู่ระดับพลังงาน 3p จะให้แสงที่มีความยาวคลื่น 1152 nm และ 1118 nm

อะตอมของฮีเลียมมีจำนวนมากกว่าอะตอมของนีออน และเมื่ออะตอมฮีเลียมซึ่งถูกกระตุ้นมีมาก การชนกับอะตอมนีออนทำให้อะตอมของนีออนไปอยู่ที่ระดับพลังงาน 4s และ 5s มีมากกว่าอะตอมนีออนที่สถานะปกติ และจะยังคงอยู่ที่สถานะกระตุ้น 4s และ 5s นานกว่าปกติ จึงเรียกระดับพลังงาน 4s และ 5s ว่าเป็นสถานะเสถียรชั่วคราว (metastable states) การที่อะตอมนีออนไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นเป็นจำนวนมากนี้ เรียกว่าเกิด population inversion เมื่ออะตอมนีออนถูกกระตุ้นให้คายพลังงานเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ และมีทิศทางต่าง ๆ กัน แสงที่อยู่ในแนวแกนของหลอดเลเซอร์เท่านั้นที่จะสะท้อนที่กระจกที่ปลายทั้งสอง แล้วบางส่วนย้อนกลับเข้ามาใหม่ ซึ่งจะกระตุ้นให้อะตอมนีออนตัวอื่นคายพลังงานออกมาด้วย แสงส่วนที่ไม่อยู่ในแนวแกนจะผ่านข้างหลอดแก้วเป็นแสงธรรมดา เราสามารถเลือกความยาวของคลื่นแสงเลเซอร์ที่ต้องการ โดยเคลือบกระจกสำหรับความยาวคลื่นแสงที่ต้องการให้ผ่านเท่านั้น เนื่องจากมีอิเล็กตรอนกระตุ้นอะตอมฮีเลียมตลอดเวลา ทำให้หลอดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนทำงานต่อเนื่องกัน แสงเลเซอร์ที่ได้จึงเป็นคลื่นต่อเนื่อง เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนนี้นิยมใช้ในการสาธิตเกี่ยวกับสมบัติของแสงในห้องทดลอง



รูปที่ 12 แผนภาพระดับพลังงานของการเกิดเลเซอร์แบบฮีเลียม-นีออน

## 6.2 ประโยชน์ของเลเซอร์

เลเซอร์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. **ด้านการแพทย์** นำเลเซอร์ไปใช้งานด้านศัลยกรรมต่าง ๆ เช่น ศัลยกรรมตกแต่ง ใช้ผ่าตัดไฟ ขจัดปานดำ ตกแต่งผิวหนัง หรือหน้าอกหย่อนยาน ใช้ในการผ่าตัดกระดูกและข้อต่อ ทำลายก้อนเนื้องอกและมะเร็ง ใช้ในงานผ่าตัดเล็ก ๆ ที่ต้องการความละเอียดมาก ๆ เช่น ผ่าตัดนัยน์ตา ผ่าตัดระบบประสาท สมอง แสงเลเซอร์สามารถโฟกัสได้เป็นบริเวณเล็ก ๆ ดีกว่าคมมีดผ่าตัด แสงเลเซอร์จะทำให้เส้นโลหิตและเม็ดโลหิตปิดตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่ต้องเสียเลือดมาก การผ่าตัดจึงสะอาด ลดการติดเชื้อได้มาก

2. **ด้านอุตสาหกรรม** ในงานโลหะ ใช้เลเซอร์ตัดหรือเจาะชิ้นงาน สามารถตัดได้คงที่ทุกทิศทาง ไม่ต้องเริ่มต้นจากขอบชิ้นงาน แนวการตัดจะเป็นรอยเล็กมาก ผิวที่ตัดจะเรียบไม่ขรุขระเหมือนตัดด้วยแก๊สทั่วไป เลเซอร์ที่นิยมใช้คือ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเลเซอร์  $\text{CO}_2$  ขนาด 2 กิโลวัตต์ สามารถตัดเหล็กสแตนเลสหนา 6.3 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ตัดทองเหลืองหนา 3.2 มิลลิเมตร ด้วยความเร็ว 3 มิลลิเมตร/วินาที ในงานอิเล็กทรอนิกส์ใช้เลเซอร์ในการเชื่อมอุปกรณ์ขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถเชื่อมได้ด้วยหัวแรงธรรมดา เช่น การเชื่อมตัวเก็บประจุลงบนแผ่นซิลิคอน การบัดกรีในวงจรไอซี ใช้เลเซอร์ตัดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ขนาด  $2 \times 3$  มิลลิเมตร เพื่อทำตัวต้านทานแบบฟิล์มบาง ใช้ในการขีดแผ่น semiconductor wafer ให้เป็นรอยโดยปราศจากฝุ่นผงรบกวน

3. ด้านคอมพิวเตอร์ สามารถใช้เลเซอร์บันทึกสัญญาณดิจิทัลลงบนแผ่นซีดี (compact disk, CD) ขณะเดียวกันก็ยังสามารถอ่านข้อมูล แผ่นซีดีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร สามารถจุข้อมูลได้ถึง 600 MB (หรือบันทึกตัวอักษรได้ 2 แสนหน้ากระดาษ)

แผ่น laser videodisk มีขนาดใหญ่ประมาณ 12-14 นิ้ว อ่านได้อย่างเดียว สามารถจุข้อมูลได้ 1000 ถึง 4000 MB หรือมากกว่านี้ การใช้แผ่นซีดีเก็บบันทึกข้อมูล เป็นตัวกระตุ้นให้มีการพัฒนาตัวรับและส่งแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ไดโอด ปัจจุบันเราสามารถสร้างแผ่นซีดีที่สามารถอ่านและเขียนได้ คาดกันว่าระบบนี้จะเข้ามาแทนที่ไมโครฟิล์ม เพราะสามารถที่จะจัดเก็บเอกสารและรูปภาพได้มากกว่าและละเอียดกว่า

4. ด้านโทรคมนาคม ใช้แสงเลเซอร์ในการส่งข้อมูลแทนไมโครเวฟ โดยผ่านทางเส้นใยนำแสง (Fibre optics) สามารถส่งได้ไกลหลายร้อยกิโลเมตร ข้อมูลที่ส่งได้มีทั้งเสียง, ภาพเคลื่อนไหว และตัวอักษร ในอนาคตโทรศัพท์ที่ใช้งานในปัจจุบันจะมีจอภาพมองเห็นตัวผู้พูดด้วย

5. ด้านการค้าขาย ศูนย์การค้าบางแห่งจะใช้บาร์โคด (barcode) ติดไว้ที่สินค้า บาร์โคดนี้จะบอกราคา รหัสสินค้า ประเภทสินค้า สามารถอ่านบาร์โคดนี้ด้วยเครื่องอ่านที่ใช้แสงเลเซอร์ตรวจจับแถบของบาร์โคด แล้วนำมาแปลความหมาย ทำให้คิดราคาสินค้าได้รวดเร็ว สามารถเก็บข้อมูลที่อ่านได้จากการขายสินค้าส่งไปยังคลังสินค้าเพื่อตรวจสอบสต็อก

6. ด้านงานวิจัยวิทยาศาสตร์ ใช้ในการกำหนดค่ามาตรฐานของความยาว วัดระดับพลังงานของอะตอมและโมเลกุล การสร้างภาพโฮโลกราฟี (Holography) ใช้เลเซอร์ในขบวนการแยกไอโซโทป และขบวนการปฏิกิริยาเคมี

นอกจากนี้ ยังนำไปใช้ในด้านพลังงาน โดยการโฟกัสแสงเลเซอร์ให้เป็นจุดเล็ก ๆ ทำให้บริเวณที่โฟกัสมีพลังงานสูงมาก มีอุณหภูมิถึง  $10^8 - 10^9$  เคลวิน นำความร้อนนี้ไปใช้ในงานวิจัย ทำให้เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์แบบฟิวชัน (Thermonuclear fusion) ที่สามารถควบคุมได้ ด้านการทหาร ใช้เลเซอร์พลังงานสูงเป็นอาวุธทำลายรถถังและจรวดนำวิถี ใช้เป็นอาวุธในสงครามอวกาศในโครงการ “สตาวอร์ (starwar)”