

"ไม่มีใครรู้ว่าถ้าไม่มี นีลส์ โบร์ แล้ว เราจะรู้เกี่ยวกับเรื่อง  
ของอะตอมได้อย่างไร" นี่คือนักกล่าวของอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์  
นักฟิสิกส์อันดับหนึ่งของโลกที่กล่าวถึงนักฟิสิกส์ผู้นี้ โบร์เป็นนัก  
ฟิสิกส์ที่เปิดเผยความลับของอะตอมผู้ที่อยู่ในยุคเดียวกับอัลเบิร์ต  
ไอน์สไตน์ และมีความเป็นอัจฉริยะไม่แพ้กันเลยแม้แต่น้อย อีกทั้ง  
โบร์ยังเป็นนักวิทยาศาสตร์ผู้หนึ่งที่ทำให้การสร้างระเบิดปรมาณู  
ประสบความสำเร็จ สิ่งที่เป็นที่ยืนยันได้ก็คือ รางวัลโนเบล  
สาขาฟิสิกส์ ที่เขาได้รับการจากการค้นพบทฤษฎีอะตอม ในปี ค.ศ.  
1922 นั้นเอง [อ่านต่อครับ](#) 🌟



### 14-1 โครงสร้างอะตอม

การศึกษาเรื่องอะตอมเริ่มมานานประมาณ 2500 ปี มาแล้ว โดยนักปราชญ์ชาวกรีก ชื่อ ลูซิปปัส (Leucippus) และดีโมคริตัส (Democritus) ได้เสนอแนวความคิดเห็นเกี่ยวกับทฤษฎีอะตอมของสสารขึ้นเป็นครั้งแรก โดยมีสาระที่สำคัญว่า สารมีอยู่เป็นชิ้น และประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ที่ไม่สามารถแบ่งแยกต่อไปได้อีก เรียกว่า อะตอม (atom) ซึ่งมีความหมายว่า ไม่สามารถตัดได้ (uncuttable) อะตอมทั้งหลายจะแตกต่างกันเฉพาะขนาดและรูปร่าง นอกจากนี้ อะตอมยังมีอยู่จริงในที่ว่าง และสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่หยุด

ต่อมา อริสโตเติล (Aristotle) เป็นผู้ไม่เห็นด้วยกับแนวความคิดเช่นนี้ เพราะเข้าใจยาก และได้วิจารณ์โต้ตอบว่า ไม่มีที่ว่างอยู่จริง ด้วยเหตุนี้ แนวความคิดเกี่ยวกับการเคลื่อนที่อย่างไม่หยุดของอะตอมควรตัดทิ้งไป แล้วอริสโตเติลก็ให้แนวความคิดเกี่ยวกับทฤษฎีของสสารว่า ธาตุมูลฐานมีอยู่ 4 อย่าง คือ ดิน น้ำ ลม และ ไฟ และอธิบายโดยเปรียบเทียบกับความรู้สึก 4 ประการ คือ หนาว ร้อน ชื้น และ แห้ง โดยแต่ละธาตุจะแสดงสมบัติ 2 ประการ เช่น ลมเป็นธาตุที่ชื้นและร้อน ไฟเป็นธาตุที่ร้อนและแห้ง

ความคิดของอริสโตเติลเป็นที่ยอมรับกันมากในสมัยนั้นจนลืมนึกถึงแนวความคิดเกี่ยวกับอะตอมจนหมดสิ้น เพราะ ความคิดของอริสโตเติลสอดคล้องกับสามัญสำนึก และสามารถเปรียบเทียบกับสิ่งที่ป็นจริงที่มนุษย์สัมผัสได้ จนกระทั่งถึงต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 นักเคมีชาวอังกฤษชื่อ จอห์น ดอลตัน (John Dalton) ได้นำเอาทฤษฎีอะตอมของสสารมาพิจารณาใหม่โดยรวมเอาความรู้ทางด้านเคมีไว้ด้วยแล้วให้ข้อสมมติดังนี้

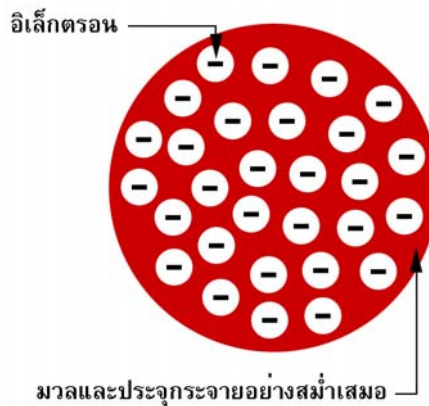
1. ธาตุประกอบด้วยอะตอมที่ไม่สามารถแยกต่อไปได้
2. แต่ละธาตุประกอบด้วยอะตอมที่เหมือนกัน และมีอะตอมอยู่หลายชนิด เช่นเดียวกับธาตุที่มีอยู่หลายชนิด
3. อะตอมไม่สามารถเปลี่ยนไปมาระหว่างกันได้
4. เมื่อธาตุต่างชนิดกันรวมกันเป็นสารประกอบ ส่วนที่เล็กที่สุดของสารประกอบย่อมประกอบด้วยกลุ่มอะตอมของธาตุที่จำกัด
5. ไม่มีอะตอมเกิดขึ้นใหม่ หรือถูกทำลายในปฏิกิริยาเคมี เพียงแต่มีการจัดระเบียบใหม่



### 14-2 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

ปี ค.ศ. 1897 เจ.เจ.ทอมสัน (J.J.Thomson) ได้พบอิเล็กตรอน โดยปกติแล้วอะตอมมีสภาพเป็นกลางถ้าอะตอมมีประจุลบ อะตอมนี้จะต้องมีประจุบวกเท่ากันด้วย นอกจากนี้ยังได้พบว่ามวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลของอะตอมที่เบาที่สุด (อะตอมไฮโดรเจน) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า มวลของอะตอมส่วนใหญ่เนื่องมาจากมวลของอนุภาคที่มีประจุบวก

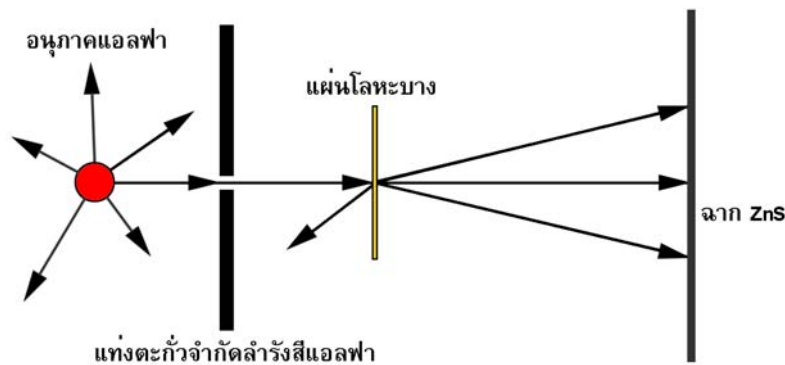
เจ.เจ.ทอมสันจึงได้เสนอแบบจำลองอะตอม ที่เรียกว่า แบบพลัม-พุดดิ้ง (plum-pudding) ดังแสดงในรูป 14-1 แบบจำลองนี้ประกอบด้วยประจุบวกกระจายกันทั่วไปในอะตอมและมีอิเล็กตรอนฝังกระจายอยู่เพื่อทำให้อะตอมเป็นกลาง ดังนั้นขนาดของอะตอมจึงเท่ากับทรงกลมที่บรรจุประจุบวกไว้ทั้งหมด ทอมสันได้พยายามจัดเรียงตัวอิเล็กตรอนเหล่านี้ในอะตอม เช่น มีลักษณะเป็นเชลของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่หมุนไป แต่ลักษณะต่างๆ เหล่านี้ไม่สามารถทำให้อะตอมอยู่ในสภาพสมดุลที่เสถียรได้ นอกจากนี้ไม่สามารถอธิบายความถี่ของสเปกตรัมออปติคัล (optical spectra) ที่อะตอมปล่อยออกมาว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร และประการสำคัญคือไม่สามารถอธิบายการกระเจิงของอนุภาคอัลฟาที่ยิงเข้าไปภายในอะตอมว่าทำไมอนุภาคนี้จึงถูกทำให้เบี่ยงเบนไปเป็นมุมมากกว่า 90 องศาจากการทดลองของไกเกอร์กับมาร์สเดน (Geiger and Marsden) ข้อบกพร่องดังกล่าวทำให้แบบอะตอมของทอมสันถูกล้มเลิกไป



รูป 14-1 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน [คลิกครับ](#)

### 14-3 แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด

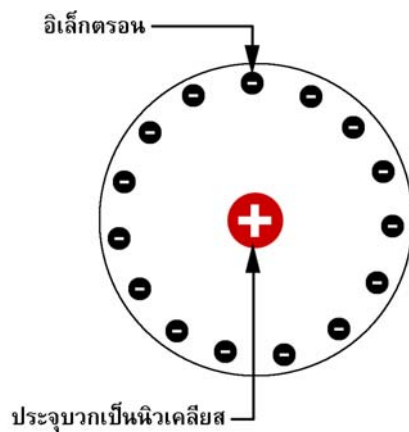
ในปี ค.ศ. 1911 เอิร์นเนสต์ รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) และผู้ร่วมงาน คือ ไกเกอร์กับมาร์สเดน ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติของอนุภาคแอลฟา โดยมุ่งสนใจอันตรกิริยาของอนุภาคแอลฟา เมื่อกระทบกับวัสดุต่างๆ การทดลองนี้มีชื่อเรียกต่อมาว่า การทดลองการกระเจิง (scattering experiment)



รูป 14-2 การทดลองการกระเจิงของรัทเทอร์ฟอร์ด [คลิกครับ](#)



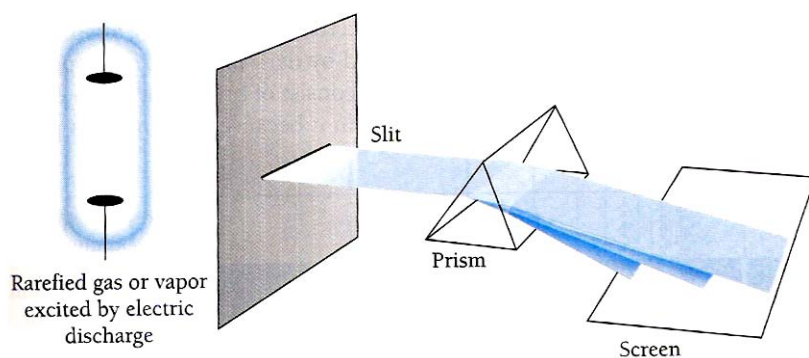
ในการทดลองนี้ อนุภาคแอลฟาจากสารกัมมันตรังสีจะผ่านเข้าชนกับแผ่นทองคำที่บางมาก โดยมีแผ่นสังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งเป็นสารเรืองแสงที่เคลื่อนที่ได้ คอยตรวจวัดการกระเจิงของอนุภาคแอลฟา อนุภาคแอลฟาเมื่อชนกับแผ่นทองคำแล้ว จะเกิดการกระเจิงทุกทิศทาง ถ้าอะตอมมีลักษณะเช่นทอมสันคิดไว้ อนุภาคควรจะผ่านอะตอมของแผ่นทองไปข้างหน้าแต่เพียงอย่างเดียวแต่ไม่ได้เป็นเช่นนั้นเพราะมีอนุภาคบางส่วนสะท้อนกลับมา รัทเทอร์ฟอร์ดจึงได้เสนอแบบจำลองอะตอม เรียกว่า แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด ซึ่งมีใจความว่า ประจุบวกของอะตอมรวมกันอยู่ที่นิวเคลียส โดยมีอิเล็กตรอนอยู่ไกลออกไปจากนิวเคลียส พื้นที่ส่วนใหญ่ของอะตอมเป็นที่ว่าง ดังนั้นอนุภาคแอลฟาส่วนใหญ่จึงทะลุผ่านแผ่นทองไปได้ อนุภาคใดที่ผ่านเข้าใกล้นิวเคลียสก็ถูกผลักให้เบี่ยงเบนออกไป แต่ถ้าตรงไปหานิวเคลียสก็จะโดนผลักสะท้อนออกมา เพราะสนามไฟฟ้าที่ผิวของนิวเคลียสสูงมาก



รูป 14-3 แบบจำลองอะตอมของรัทเทอร์ฟอร์ด

#### 14-4 สเปกตรัมของอะตอม

การศึกษาสเปกตรัมของอะตอมเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวัดความยาวคลื่นและความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อะตอมปล่อยออกมาหรือดูดกลืนเข้าไป นักวิทยาศาสตร์ได้อาศัยผลการทดลองเกี่ยวกับสเปกตรัมของอะตอมเพื่อเป็นแนวทางสำหรับสร้างทฤษฎีขึ้นมาอธิบายการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอม



รูป 14-4 การจัดเครื่องมือการทดลองเพื่อสังเกตสเปกตรัมของอะตอมต่างๆ

จากรูป 14-4 แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อใช้สังเกตสเปกตรัมของอะตอม แหล่งกำเนิดแสงเกิดจากก๊าซอะตอมเดี่ยวหรือไอของอะตอมที่ถูกกระตุ้น เช่นด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้า จากขบวนการนี้ อะตอมจะถูกทำ



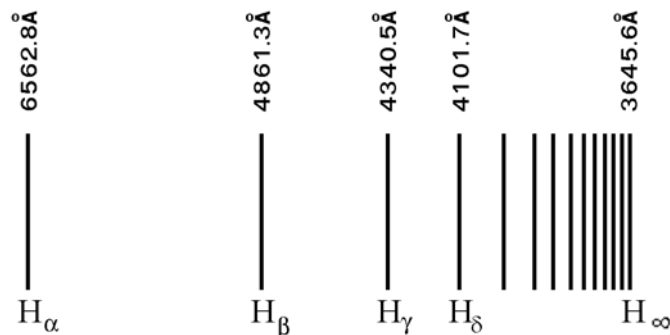
ให้อยู่ในสถานะซึ่งมีพลังงานสูงกว่า (กล่าวคืออยู่ในสถานะถูกกระตุ้น) เมื่อมันอยู่ในสถานะปกติหรือสถานะพื้น อะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะไม่สามารถอยู่ในสถานะนี้ได้เกินกว่า  $10^{-8}$  s ก่อนที่มันจะกลับลงสู่สถานะปกติ ระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพลังงานสูงกว่ามายังสถานะพลังงานต่ำกว่า อะตอมจะปล่อยพลังงานส่วนที่เหลือออกมาในรูปของการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รังสีนี้จะถูกส่งผ่านไปยังช่องแคบ และตกลงบนปริซึม (หรือเกรตติง) ปริซึมจะทำหน้าที่กระจายรังสีนี้ทำให้ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไปรวมกันที่จุดต่างๆ บนแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะปรากฏให้เห็นเป็นเส้นสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่ต่างกัน สเปกตรัมที่ได้นี้มีชื่อเรียกว่าเส้นสเปกตรัม (line spectrum)

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

ในครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19 นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการวัดความยาวคลื่นเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ สเปกตรัมของอะตอมกลายเป็นสิ่งที่มีประโยชน์เพราะสามารถบ่งชี้ธาตุได้โดยอาศัยลักษณะเฉพาะของเส้นสเปกตรัม นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นสเปกตรัมมีลักษณะที่เป็นระเบียบและแบ่งแยกออกเป็นอนุกรม (series) โดยที่ในแต่ละอนุกรมนั้นระยะระหว่างเส้นสเปกตรัมจะลดลงเรื่อยๆ เมื่ออนุกรมนี้เข้าใกล้ขีดจำกัดของมัน เช่นอนุกรมสเปกตรัมกลุ่มแรกที่สังเกตโดย เจ.เจ.บาลเมอร์ (J.J.Balmer) ในปี ค.ศ. 1885 จากสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน ความถี่ของเส้นสเปกตรัมในอนุกรมนี้เรียกว่าอนุกรมบาลเมอร์ ซึ่งอยู่ในช่วงที่มองเห็นได้ บาลเมอร์ได้แสดงความยาวคลื่นของเส้นสเปกตรัมในอนุกรมนี้ ด้วยสมการ

$$\lambda = (3645.6) \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad \text{เมื่อ } n = 3, 4, 5, 6, \dots \quad (14-1)$$

$\lambda$  เป็นความยาวคลื่นในหน่วยอังสตรอม สำหรับ  $n = 3$   $\lambda = 6562.8$  อังสตรอม เรียกว่าเส้น  $H_\alpha$  สำหรับ  $n = 4$   $\lambda = 4861.3$  อังสตรอม เรียกว่าเส้น  $H_\beta$  ในทำนองเดียวกัน  $n = 5, 6, \dots$  ให้เส้น  $H_\gamma, H_\delta, \dots$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อ  $n$  เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นจะมีค่าใกล้กันมากขึ้นๆ จนกระทั่ง  $n = \infty$   $\lambda = 3645.6$  อังสตรอม ซึ่งเรียกว่าขีดจำกัดของอนุกรม



รูป 14-5 แสดงเส้นสเปกตรัมของอนุกรมบาลเมอร์ของอะตอมไฮโดรเจน

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



$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ เมื่อ } n = 3, 4, 5, \dots \quad (14-2)$$

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

### 14-5 ทฤษฎีอะตอมของโบร์

ในปี ค.ศ. 1913 นีลส์ โบร์ (Neil Bohr) ได้เสนอทฤษฎีอะตอมของไฮโดรเจนขึ้นซึ่งสามารถอธิบายสเปกตรัมที่สังเกตเห็นได้ โบร์ได้นำหลักการของควอนตัม กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน และสมมติฐานของพลังค์เกี่ยวกับการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โบร์เสนอว่าอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่รอบนิวเคลียสนั้น เคลื่อนที่เป็นวงกลม และได้เสนอสมมติฐานเกี่ยวกับอะตอมดังนี้

1. อิเล็กตรอนโคจรรอบโปรตอน (ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน) ภายใต้อิทธิพลของแรงคูลอมบ์
2. จะมีวงโคจรพิเศษสำหรับอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน
3. การปลดปล่อยพลังงานของอิเล็กตรอนออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนวงโคจรจากระดับสูงมาสู่ระดับต่ำ ความถี่ของพลังงานที่ปล่อยออกมาสัมพันธ์กับความแตกต่างของระดับพลังงานทั้งสองดังสมการ

$$E_i - E_f = hv \quad (14-3)$$

$E_i$  คือ พลังงานของอะตอมไฮโดรเจนก่อนที่จะเปลี่ยนวงโคจร

$E_f$  คือ พลังงานของอะตอมไฮโดรเจนหลังจากเปลี่ยนวงโคจรโดยที่  $E_i > E_f$

4. เงื่อนไขสำหรับวงโคจรพิเศษถูกกำหนดโดยเงื่อนไขที่ว่า โมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนที่โคจรในวงโคจรนี้จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของค่า  $\hbar$  โดย  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

$$L = mvr = n\hbar = \frac{nh}{2\pi} \quad (14-4)$$

โดยที่  $n = 1, 2, 3, \dots$

$m$  คือ มวลของอิเล็กตรอน

$v$  คือ ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสกับอิเล็กตรอน

$r$  คือ รัศมีวงโคจร

จากแนวคิดทั้ง 4 ของโบร์ สามารถทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับระดับพลังงานของไฮโดรเจนอะตอมได้จากสมการ

$$mvr = n\hbar \quad (14-5)$$

$$v_n = \frac{n\hbar}{mr_n} \quad (14-6)$$

เมื่อ  $v_n$  เป็นความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสของวงโคจรรัศมี  $r_n$



ขณะที่อิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสจะมีแรงที่เกี่ยวข้อง 2 แรงคือ แรงเข้าสู่ศูนย์กลางและแรงคูลอมบ์

$$\begin{aligned} \text{แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง} &= \text{แรงคูลอมบ์} \\ \frac{mv_n^2}{r_n} &= \frac{ke^2}{r_n^2} \end{aligned} \quad (14-7)$$

แทนค่า  $v_n$  จากสมการที่ (14-6)

$$\begin{aligned} \frac{mn^2\hbar^2}{m^2r_n^3} &= \frac{ke^2}{r_n^2} \\ r_n &= \frac{n^2\hbar^2}{kme^2} \end{aligned} \quad (14-8)$$

สำหรับวงโคจรชั้นในสุด เมื่อ  $n = 1$  คือ

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{kme^2} \quad (14-9)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงไปในสมการ (14-9) จะได้ว่า

$$r_1 = 0.528 \text{ อังสตรอม}$$

วงโคจรนี้เรียกว่า รัศมีของโบร์ (Bohr radius) สำหรับวงโคจรถัดไปหาได้จาก

$$r_n = r_1 n^2 \quad (14-10)$$

พลังงานทั้งหมดของอะตอมไฮโดรเจนกับวงโคจรใดๆ เขียนได้เป็น

$$E_n = K + U \quad (14-11)$$

$$= \frac{1}{2}mv_n^2 + \left(-\frac{ke^2}{r_n}\right) \quad (14-12)$$

จากสมการ (14-7) จะได้  $v_n^2 = \frac{ke^2}{mr_n}$  แทนค่าลงในสมการ (14-12) จะได้

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{1}{2}m\left[\frac{ke^2}{mr_n}\right] - \frac{ke^2}{r_n} \\ E_n &= \frac{1}{2}\frac{ke^2}{r_n} - \frac{ke^2}{r_n} \\ E_n &= -\frac{1}{2}\frac{ke^2}{r_n} \end{aligned} \quad (14-13)$$

จากสมการ (14-8)  $r_n = \frac{n^2\hbar^2}{kme^2}$  แทนค่าลงในสมการที่ (14-13) จะได้

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\left[\frac{mk^2e^4}{2\hbar^2}\right] \quad (14-14)$$

สำหรับค่าพลังงานต่ำสุดในวงโคจรที่  $n = 1$  คือ

$$E_1 = -\frac{mk^2e^4}{2\hbar^2} \quad (14-15)$$



สมการ (14-15) เรียกว่าระดับพลังงาน (Energy level) ของอะตอมไฮโดรเจนสำหรับระดับพลังงานที่  $n = 1$  เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ จะได้

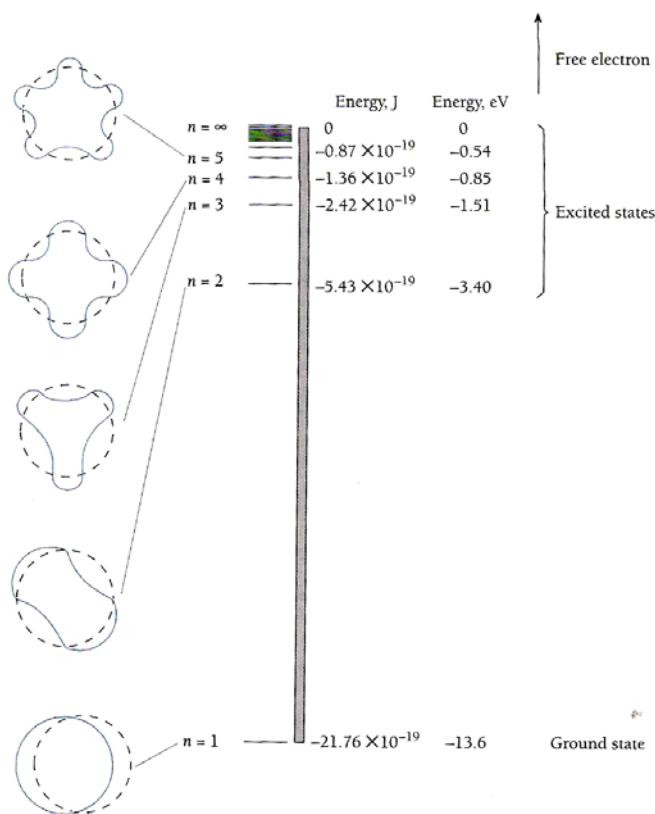
$$E_1 = -13.6 \text{ eV}$$

ซึ่งเป็นค่าพลังงานในระดับต่ำสุดของอะตอมไฮโดรเจน เขียนสมการ (14-14) ใหม่เป็น

$$E_n = -\frac{E_1}{n^2} \quad (14-16)$$

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \quad (14-17)$$

ค่าพลังงานของไฮโดรเจนอะตอมเมื่อ  $n = 1$  เป็นพลังงานในระดับต่ำสุดของระบบและเป็นพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) สูงสุดของอิเล็กตรอน ส่วนค่าพลังงานที่พอดีทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำสุดหลุดออกมาจากอะตอมเรียกว่า ionization energy และค่าของพลังงานที่แตกต่างกันในระดับต่างๆ แสดงดังรูป 14-6



รูป 14-6 แสดงระดับพลังงานของไฮโดรเจนอะตอม

**ตัวอย่าง 14-1** อะตอมไฮโดรเจนมีพลังงานที่สถานะพื้นฐาน  $-13.58 \text{ eV}$  ได้รับพลังงานจากโฟตอน  $12.2 \text{ eV}$  อิเล็กตรอนจะขึ้นไปอยู่ระดับพลังงานสถานะกระตุ้นที่เท่าใด

**หลักการคำนวณ**

พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากโฟตอน คือ  $= +12.2 - 13.58 = -1.38 \text{ eV}$

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



$$\begin{aligned} n^2 &= \frac{-E_1}{E_n} \\ &= \frac{-13.58}{-1.38} \\ n &= 3.14 \approx 3 \end{aligned}$$

อิเล็กตรอนจะขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้นที่ 3

**ตัวอย่าง 14-2** อะตอมไฮโดรเจนในสถานะที่มีเลขควอนตัมหลักสูง สามารถสร้างขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการหรืออาจพบได้ในอวกาศซึ่งถูกเรียกว่า อะตอมริดเบอร์ก

ก) จงหาเลขควอนตัมหลักของรัศมีวงโคจรของโบร์ของอะตอมไฮโดรเจนซึ่งมีรัศมี 0.0100mm

ข) พลังงานของอะตอมไฮโดรเจนในสถานะนี้มีค่าเท่าใด

**หลักการคำนวณ**

ก) จากสมการ (14-10) ซึ่ง  $r_n = 1.00 \times 10^{-5} \text{ m}$

$$\begin{aligned} n &= \sqrt{\frac{r_n}{r_1}} \\ &= \sqrt{\frac{1.00 \times 10^{-5} \text{ m}}{5.28 \times 10^{-11} \text{ m}}} \\ &= 435 \end{aligned}$$

ข) จากสมการ (14-16)

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{E_1}{n^2} \\ &= \frac{-13.6 \text{ eV}}{(435)^2} \\ &= -7.19 \times 10^{-5} \text{ eV} \end{aligned}$$

## 14-6 สเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน

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

$$h\nu = E_i - E_f \quad (14-17)$$

จากสมการ (14-16)

$$E_i = \frac{E_1}{n_i^2} \quad \text{และ} \quad E_f = \frac{E_1}{n_f^2} \quad (14-18)$$

แทนค่าสมการ (14-18) ลงในสมการที่ (14-17)

$$\nu = \frac{E_i}{h} - \frac{E_f}{h} = \frac{E_1}{h} \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (14-19)$$

แทนค่า  $E_1$  จากสมการ (14-15) ลงในสมการ (14-19)





$$\nu = \frac{k^2 e^4 m}{4\pi\hbar^3} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (14-20)$$

หรือ

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{k^2 e^4 m}{4\pi\hbar^3 c} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (14-21)$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (14-22)$$

เมื่อ  $R$  คือค่าคงที่ของริดเบอร์ก

$$R = \frac{K^2 e^4 m}{4\pi\hbar^3 c} = 109740 \text{ cm}^{-1} \quad (14-23)$$

ค่า  $R$  จากการทดลอง  $R_{\text{exp}} = 109677 \pm 0.012 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่ง  $R$  ที่ได้จากสมการ (14-2) ให้ค่าตรงกับ  $R$  ที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นสมการ (14-20) คือสมการของริดเบอร์กสำหรับอนุกรมบาลเมอร์เมื่อแทน  $n_f = 2$  และ  $n_i = n$  จากการแทนค่า  $n_i = 3, 4, 5, 6, \dots$  เราจะได้เส้นสเปกตรัมทั้งหมดในอนุกรมบาลเมอร์ ทฤษฎีของโบร์ไม่เพียงอธิบายอนุกรมของบาลเมอร์ได้ แต่ยังใช้กับอนุกรมอื่นๆ ที่สอดคล้องกับ  $n_f$  ต่างๆ กัน อนุกรมเหล่านี้มีชื่อเรียกตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์ที่ค้นพบ ดังแสดงในตาราง

ตาราง 14-1 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 $n = 6, 7, 8, \dots$

**ตัวอย่าง 14-3** อิเล็กตรอนที่วิ่งอยู่รอบอะตอมไฮโดรเจนในระดับพลังงานสถานะพื้น และถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในสถานะพลังงานสูงขึ้นไป  $n=3$  พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะนี้มีค่าเท่าใด

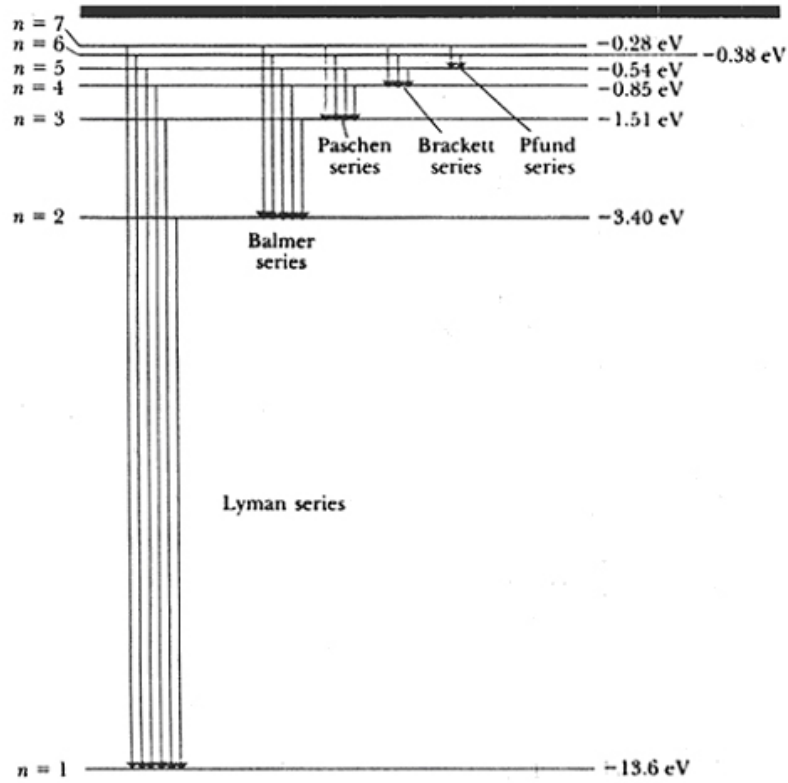
**หลักการคำนวณ** จากสมการ (14-17)

$$\begin{aligned}
 h\nu &= E_i - E_f \\
 &= \frac{E_1}{n_f^2} - \frac{E_1}{n_i^2} \\
 &= E_1 \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)
 \end{aligned}$$



$$= -13.6 \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{1^2} \right)$$

$$= 12.1 \text{ eV}$$

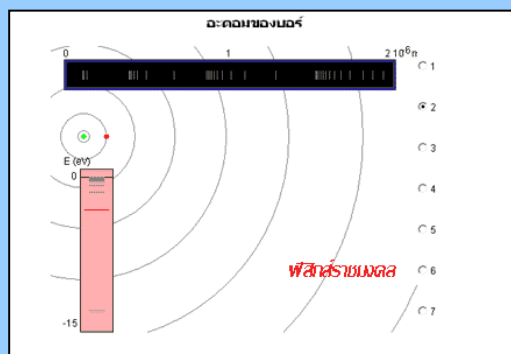


รูป 14-7 แสดงไดอะแกรมของระดับพลังงานอะตอมไฮโดรเจน และการเปลี่ยนแปลงสถานะที่สอดคล้องกับอนุกรมต่างๆ

ข้อสังเกต เฉพาะอนุกรมของบาลเมอร์เท่านั้นที่สเปกตรัมอยู่ในช่วงมองเห็นได้ ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งที่ว่าทำไมอนุกรมอื่นๆ จึงถูกค้นพบหลังจากการทำนายโดยทฤษฎีของโบร์

สรุป ทฤษฎีของโบร์ประสบความสำเร็จในการอธิบายสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน

### การทดลองเสมือนจริง

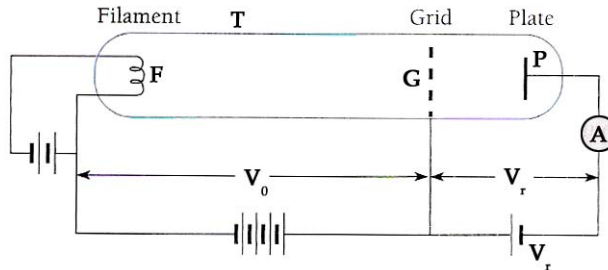


ในห้องทดลองนี้ คุณสามารถเรียนรู้ทำความเข้าใจ อะตอมของไฮโดรเจน โดยใช้ทฤษฎีของโบร์ [คลิกเข้าสู่การทดลองครับ](#) 🔴



### 14-7 การทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์

ในปี ค.ศ. 1914 ได้มีการทดลองแสดงให้เห็นว่าสถานะหนึ่งที่เป็นค่า ๆ ของอิเล็กตรอนในอะตอม (ตามสมมติฐานของโบร์) นั้นมีอยู่จริง จากการทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์ รูป 14-8 แสดงการจัดเครื่องมือการทดลอง



รูป 14-8 การจัดเครื่องมือทดลองของแฟรงค์และเฮิร์ตซ์

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

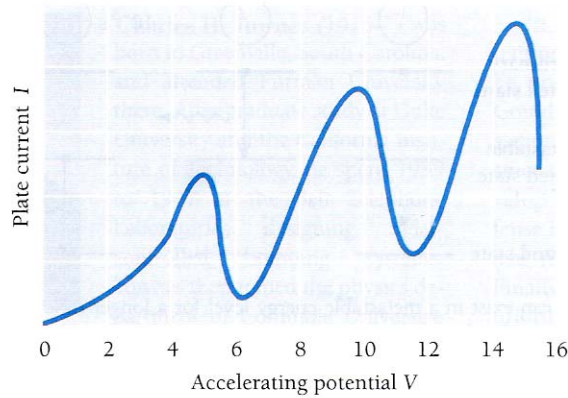
ความเร็วของอิเล็กตรอนหลังจากถูกปล่อยออกมาจาก F และเคลื่อนที่มาถึง G คือ

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV_0 \quad (14-24)$$

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 14-9 และต่อมาเพื่อเพิ่ม  $V_0$  จนกระทั่งถึงค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะชนกับอะตอมแล้วอะตอมจะถูกกระตุ้น ในกรณีนี้ อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานเกือบทั้งหมด เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปถึง G แล้วจะไม่มีพลังงานพอที่จะผ่านศักย์หน่วง  $V_r$  ดังนั้นกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และต่อมาเมื่อ  $V_0$  เพิ่มขึ้นอีก กระแส  $I_p$  จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

รูป 14-9 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 ซึ่งเราจะเห็นว่าตรงกับผลการทดลองของ แฟรงค์และเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูป 14-9 ความต่างศักย์ที่คล้องจองกับยอดแหลมของกระแสเรียกว่าศักย์การกระตุ้น (excitation potential)





รูป 14-9 กราฟระหว่างกระแส  $I_p$  และความต่างศักย์  $V_0$

การทดลองดังกล่าวข้างต้นถึงแม้ค่อนข้างหยาบ แต่แสดงว่าสถานะหนึ่งเป็นค่าๆ ของอิเล็กตรอนในอะตอมมีอยู่จริง

การทดลองเสมือนจริง

การทดลองของแฟรงค์และเฮิรตซ์ [คลิกครับ](#)

**ตัวอย่าง 14-4** ในอะตอมโซเดียม ความยาวคลื่นซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะกระตุ้นสถานะแรกไปยังสถานะพื้น คือ 5896 อังสตรอม ที่ความต่างศักย์ค่าใดบ้าง ในการทดลองของแฟรงค์และเฮิรตซ์ที่กระแส  $I_p$  มีค่าลดลง

**หลักการคำนวณ** ความต่างศักย์ที่ทำให้กระแส  $I_p$  มีค่าลดลงเกิดขึ้นเนื่องจากการกระตุ้นอะตอมโซเดียม กล่าวคือ

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

หรือ

$$V = \frac{hc}{e\lambda}$$

$$= \frac{(6.25 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(1.602 \times 10^{-19} \text{ C})(5896 \times 10^{-10} \text{ m})}$$

$$= 2.1 \text{ Volt}$$

ดังนั้นกระแส  $I_p$  มีค่าลดลงเมื่อความต่างศักย์เป็น 2.1, 4.2, 3.6, ... Volt



### 14-8 แบบจำลองอะตอมตามกลศาสตร์ควอนตัม

เพื่อจัดข้อบกพร่องของแบบจำลองอะตอมของโบร์ จึงใช้ทฤษฎีควอนตัม โดยนำสมการชเรอดิงเงอร์หาฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจน

$$\frac{P^2}{2m} + V(r) = E \quad (14-25)$$

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (14-26)$$

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

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

ผลเฉลยของสมการด้านบนจะทำให้ได้เลขควอนตัม 3 แบบ ดังนี้

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

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} \quad (14-27)$$

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

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

แต่จากการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์ โดยใช้ทฤษฎีควอนตัม พบว่า

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi} \quad (14-28)$$

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

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

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

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

ตาราง 14-2 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 โครงสร้างของอิเล็กตรอน (configuration) ในอะตอมเช่นนี้จะมีลักษณะอย่างไร ทำให้ธาตุที่มีอิเล็กตรอนต่างกันเพียง 1 ตัว สมบัติทางเคมีของธาตุคู่หนึ่งจึงต่างกัน เช่น แก๊สเฉื่อย (เลขอะตอม = 10) และโลหะโซเดียม (เลขอะตอม = 11) แก๊สเฉื่อยเป็นธาตุเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยากับธาตุใด ๆ ขณะที่โซเดียมไม่ต้องการทำปฏิกิริยากับสารอื่น

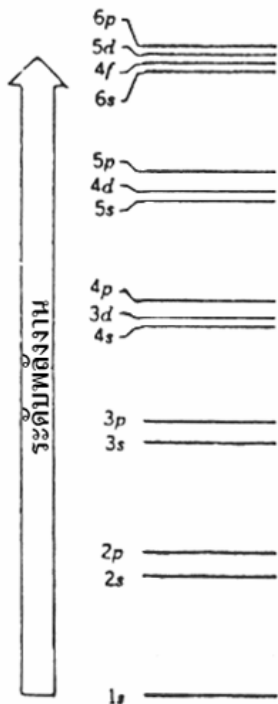


ผู้ที่ศึกษาการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมเป็นโครงสร้างที่ชัดเจนคือเพาลี (Wolfgang Pauli) เมื่อ ค.ศ. 1925 ตั้งเป็นกฎเรียกว่า **หลักการกีดกันของเพาลี (Pauli's exclusion principle)** กล่าวว่าในอะตอมหนึ่ง ๆ อิเล็กตรอนของอะตอมนั้นจะมีเลขควอนตัม  $n, l, m_l$  และ  $m_s$  ชุดเดียวกันนี้ได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น

- เลขควอนตัม  $n$  จะบอกชั้น (shell) และแทนด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ K, L, M, N, O และ P แทนชั้นที่ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 ตามลำดับโดยนับเริ่มต้นจากวงในสุด
- เลขควอนตัม  $l$  แต่ละค่าจะบอกถึงชั้นย่อย (subshells) และแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็ก 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  $+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

ตาราง 14-3 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 อาจล้าเข้าไปใกล้นิวเคลียสมากกว่าชั้นย่อย 3d ระดับพลังงานย่อยจะเหลื่อมกัน

รูป 14-10 ระดับพลังงานของชั้นย่อยของอะตอมเรียงตามลำดับระดับพลังงาน



ตาราง 14-4 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>

จากตารางเริ่มต้นที่ธาตุไฮโดรเจน 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

**การทดลองเสมือนจริง**

**การจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอม**

ในห้องทดลองเสมือนนี้ คุณสามารถจัดเรียงอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมได้ โดยเริ่มต้นที่ไฮโดรเจน [คลิกเข้าสู่การทดลองครับ](#)

### 14-9 เลเซอร์เบื้องต้น

เลเซอร์ (Laser) และ เมเซอร์ (Maser) เป็นคลื่นแสงและคลื่นไมโครเวฟ ที่ได้จากขบวนการทางฟิสิกส์ 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





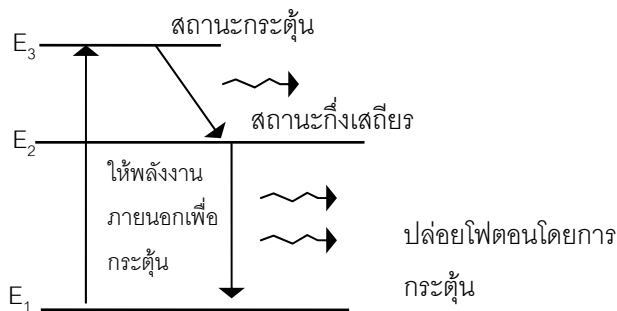
(Rigden and White) สามารถสร้างเลเซอร์สีแดงที่ส่งออกมาอย่างต่อเนื่องจากแก๊สฮีเลียม-นีออน มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร นำมาใช้งานมากที่สุดในห้องปฏิบัติการ

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1962 เป็นต้นมา การพัฒนาการสร้างเลเซอร์แบบต่าง ๆ ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ปัจจุบันมีเลเซอร์ที่ทำจากของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ให้เลเซอร์ทั้งแบบคลื่นต่อเนื่อง และคลื่นตล (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)

### 14-9-1 หลักการทำให้เกิดแสงเลเซอร์

โดยปกติอิเล็กตรอนในอะตอมจะอยู่ในสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานต่ำสุด ถ้ากระตุ้นอะตอมโดยใช้พลังงานจากภายนอก (เช่น กระตุ้นด้วยโฟตอน, หรือชนด้วยอิเล็กตรอนจากอะตอมอื่น) ทำให้อะตอมไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น โดยทั่วไปอะตอมจะอยู่ที่สถานะกระตุ้นได้ไม่เกิน  $10^{-8}$  วินาที จะกลับไปสู่สถานะพื้นทันที แต่บางครั้งอะตอมจะไปอยู่สถานะกระตุ้นที่ต่ำกว่า และสามารถอยู่ในสถานะนี้ได้ยาวนานถึง  $10^{-3}$  วินาที หรือมากกว่า เราเรียกสถานะนี้ว่า เป็นสถานะเสถียรชั่วคราว (metastable state) ก่อนที่จะกระจายโฟตอนออกมาแล้วกลับมายู่ที่สถานะพื้น



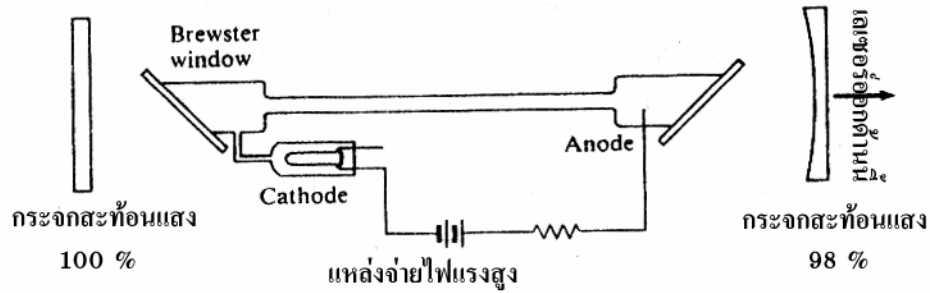
รูป 14-11 ระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเลเซอร์

การทำให้เกิดเลเซอร์จึงต้องเกี่ยวข้องกับระดับพลังงานอย่างน้อย 3 ระดับ จากรูป 14-11 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 เพราะแทนที่อะตอมจะกลับมายู่สถานะพื้นทันทีกลับผกผันมาอยู่ที่สถานะกระตุ้นชั่วคราว แต่ถ้าอะตอมที่ระดับพลังงาน  $E_2$  นี้ถูกกระตุ้น ซึ่งอาจเกิดจากอะตอมตัวใดตัวหนึ่งปล่อยโฟตอนออกมาก่อน และโฟตอนที่ปล่อยออกมาจะไปกระตุ้นให้อะตอมอื่น ๆ ปลดปล่อยโฟตอนออกมาพร้อม ๆ กันจะ



ได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เสริมกัน ถ้ามีอะตอมที่  $E_2$  นี้เป็นล้านล้านตัว จะได้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกัน ความเข้มของคลื่นจะมากกว่าปกติ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้นี้คือเลเซอร์นั่นเอง เลเซอร์ที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน 3 ระดับ ได้แก่ เลเซอร์จากผลึกทับทิม

เลเซอร์ที่ได้จากแก๊สฮีเลียม-นีออน จะเกิด population inversion ต่างจากที่เกิดในเลเซอร์ทับทิม ต้องใช้ระดับพลังงานถึง 4 ระดับ ลักษณะของหลอดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน แสดงไว้ในรูป 14-12



รูป 14-12 ส่วนประกอบของหลอดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์

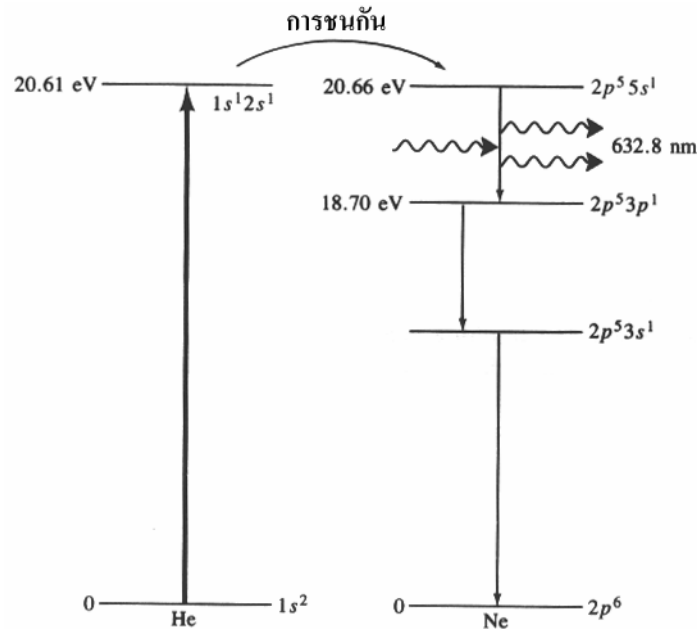
หลอดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30-40 mm ภายในมีหลอดแก้วรูแคบ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.5-3 mm ภายในหลอดแก้วรูแคบนี้ บรรจุแก๊สฮีเลียม-นีออน อัตราส่วนจำนวนอะตอมฮีเลียมมากกว่าจำนวนอะตอมนีออน เป็นอัตราส่วน 5:1, 7:1 หรือ 10:1 ความดันอากาศภายในหลอดแก้วรูแคบประมาณ 1 mmHg ปลายหลอดทั้งสองมีกระจกขนาน ด้านหนึ่งสะท้อนแสงได้ 100% อีกด้านหนึ่งสะท้อนแสงได้ประมาณ 98% แสงเลเซอร์จะออกทางด้านนี้ ระยะห่างระหว่างกระจกทั้งสองเป็นเลขจำนวนเต็มของครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเลเซอร์ที่ต้องการ ความต่างศักย์ที่ขั้วของหลอดประมาณ 1.5 kV ถึง 4 kV ขึ้นอยู่กับความยาวของหลอด กำลังที่ได้จากหลอดเลเซอร์อยู่ในช่วง 1-5 mW ขึ้นอยู่กับขนาดของหลอดเลเซอร์

เมื่อจ่ายไฟให้หลอดเลเซอร์ทำงาน อิเล็กตรอนจากแคโทดจะไปกระตุ้นอะตอมของแก๊สผสม อะตอมฮีเลียมจะถูกกระตุ้นได้ง่ายกว่าอะตอมนีออน ดังนั้นอะตอมของฮีเลียมจะถูกกระตุ้นจากระดับพลังงาน 1s ไปสู่สถานะกระตุ้น 2s ระดับพลังงานนี้มีค่าเท่ากับ 20.61 eV อะตอมฮีเลียมที่ถูกกระตุ้นบางอะตอมเมื่อชนกับอะตอมนีออนจะถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมนีออน ทำให้อิเล็กตรอนของนีออนที่ระดับพลังงาน 3p ถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงาน 4s หรือ 5s ซึ่งมีค่าพลังงาน 19.78 eV และ 20.66 eV ตามลำดับ ทั้งนี้ เพราะระดับพลังงานทั้งสองค่านี้มีค่าใกล้กับระดับพลังงาน 5s บางตัวจะตกมาอยู่ชั้น 4p แล้วคายพลังงานในรูปแบบแสงที่มีความยาวคลื่น 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 แสงที่อยู่ในแนวแกนของหลอดเลเซอร์เท่านั้นที่จะสะท้อนที่กระจกที่ปลายทั้ง



สอง แล้วบางส่วนย้อนกลับเข้ามาใหม่ ซึ่งจะกระตุ้นให้อะตอมนีออนตัวอื่นคายพลังงานออกมาด้วย แสงส่วนที่ไม่อยู่ในแนวแกนจะผ่านข้างหลอดแก้วเป็นแสงธรรมดา เราสามารถเลือกความยาวของคลื่นแสงเลเซอร์ที่ต้องการ โดยเคลือบกระจกสำหรับความยาวคลื่นแสงที่ต้องการให้ผ่านเท่านั้น เนื่องจากมีอิเล็กตรอนกระตุ้นอะตอมฮีเลียมตลอดเวลา ทำให้หลอดเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนทำงานต่อเนื่องกัน แสงเลเซอร์ที่ได้จึงเป็นคลื่นต่อเนื่อง เลเซอร์ฮีเลียม-นีออนนี้นิยมใช้ในการสาธิตเกี่ยวกับสมบัติของแสงในห้องทดลอง



รูป 14-13 แผนภาพระดับพลังงานของการเกิดเลเซอร์แบบฮีเลียม-นีออน

### 14-9-2 ประโยชน์ของเลเซอร์

เลเซอร์ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. **ด้านการแพทย์** นำเลเซอร์ไปใช้งานด้านศัลยกรรมต่าง ๆ เช่น ศัลยกรรมตกแต่ง ใช้ผ่าตัดไฟขจัดปานดำ ตกแต่งผิวหนัง หรือหน้าอกหย่อนยาน ใช้ในการผ่าตัดกระดูกและข้อต่อ ทำลายก้อนเนื้อออกและมะเร็ง ใช้ในงานผ่าตัดเล็ก ๆ ที่ต้องการความละเอียดมาก ๆ เช่น ผ่าตัดนัยน์ตา ผ่าตัดระบบประสาทสมอง แสงเลเซอร์สามารถโฟกัสได้เป็นบริเวณเล็ก ๆ ดีกว่าคมมีดผ่าตัด แสงเลเซอร์จะทำให้เส้นโลหิตและเม็ดโลหิตปิดตัวและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่ต้องเสียเลือดมาก การผ่าตัดจึงสะอาด ลดการติดเชื้อได้มาก

2. **ด้านอุตสาหกรรม** ในงานโลหะ ใช้เลเซอร์ตัดหรือเจาะชิ้นงาน สามารถตัดได้ คงที่ทุกทิศทาง ไม่ต้องเริ่มต้นจากขอบชิ้นงาน แนวการตัดจะเป็นรอยเล็กมาก ผิวที่ตัดจะเรียบไม่ขรุขระเหมือนตัดด้วยแก๊สทั่วไป เลเซอร์ที่นิยมใช้คือ เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเลเซอร์  $CO_2$  ขนาด 2 kW สามารถตัดเหล็กสแตนเลสหนา 6.3 mm ด้วยความเร็ว 4 mm/s ตัดทองเหลืองหนา 3.2 mm ด้วยความเร็ว 3 mm/s ในงานอิเล็กทรอนิกส์ใช้เลเซอร์ในการเชื่อมอุปกรณ์ขนาดเล็ก ซึ่งไม่สามารถเชื่อมได้ด้วยหัวแรงธรรมดา เช่น การเชื่อมตัวเก็บประจุลงบนแผ่นซิลิคอน การบัดกรีในวงจรไอซี ใช้เลเซอร์ตัดแผ่นฟิล์มบาง ๆ ขนาด  $2 \times 3$  mm เพื่อทำตัวต้านทานแบบฟิล์มบางใช้ในการขีดแผ่น semiconductor wafer ให้เป็นรอยโดยปราศจากฝุ่นผงรบกวน



3. **ด้านคอมพิวเตอร์** สามารถใช้เลเซอร์บันทึกสัญญาณดิจิทัลลงบนแผ่นซีดี (compact disk, CD) ขณะเดียวกันก็ยังสามารถอ่านข้อมูล แผ่นซีดีเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 cm 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** ศูนย์การค้าบางแห่งจะใช้บาร์โค้ด (barcode) ติดไว้ที่สินค้า บาร์โค้ดนี้จะบอกราคา รหัสสินค้า ประเภทสินค้า สามารถอ่านบาร์โค้ดนี้ด้วยเครื่องอ่านที่ใช้แสงเลเซอร์ตรวจจับแถบของบาร์โค้ด 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 "สตาร์วอร์ (starwar)"

**การทดลองเสมือนจริง**

			
<a href="#">แหล่งกำเนิดแสง</a>	<a href="#">อะตอมกับแสง</a>	<a href="#">การเกิดการกลับ ของประชากร</a>	<a href="#">การสร้างแสง เลเซอร์</a>



## วิดีโอเพื่อการศึกษา



### เลเซอร์

แสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่กำลังมาแรง และวิ่งเข้าสู่ชีวิตของเราแทบทุกทิศทุกทาง มันประกอบอยู่ในอุปกรณ์ที่เราคาดไม่ถึงไม่ถึง เช่น เครื่องเล่น ซีดี ดีวีดี เครื่องสแกนที่ร้านขายของและใช้แสงเลเซอร์ปรับแต่งเลนส์ตา เป็นต้น ย้อนหลังไปหลายสิบปีก่อน นักฟิสิกส์ นาย Charles Townes และเพื่อน ร่วมกันทำงานในห้องปฏิบัติการเบลล์ สามารถสร้างแสงเลเซอร์ขึ้นสำเร็จเป็นครั้งแรก ในวิดีโอคุณจะได้เห็น หลักการทำงานของแสงเลเซอร์ [คลิกครับ](#) 🌟

## บรรยายลงในกระดานฟิสิกส์ราชมงคล



ภาพอะตอมเดี่ยวภาพแรกของโลก เป็นจุดเล็กๆ สีน้ำเงินอยู่ตรงกลางสีดำ เป็นภาพอ็อนของแบเรียม ถูกทำให้หยุดลงด้วยแสงเลเซอร์ อ็อนกำลังปลดปล่อยคลื่นแสงออกมาที่ความยาวคลื่น 493 nm อยู่ในช่วงสีน้ำเงิน ให้นักศึกษาอธิบายโครงสร้างของอะตอม ลงใน [กระดานฟิสิกส์ราชมงคลใหม่](#) 🌟

## แบบฝึกหัดเรื่องฟิสิกส์อะตอม

1. จงคำนวณหาระดับพลังงานของอิเล็กตรอนของอะตอมไฮโดรเจนในวงที่ 2 [ตอบ 2.12 อังสตรอม]
2. อิเล็กตรอนในวงโคจรสถานะพื้นของอะตอมไฮโดรเจนของโบร์จะเคลื่อนที่รอบนิวเคลียสที่รอบ/วินาที และในวงโคจรที่สองความถี่ในการโคจรรอบนิวเคลียสจะเป็นกี่เท่าของวงแรก [ตอบ  $6.6 \times 10^{15}$  รอบ/วินาที, 1/8]
3. ถ้าอะตอมของธาตุหนึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่ที่วงโคจรรัศมี 1 มม. ที่วงนี้จะมีระดับพลังงานกี่อิเล็กตรอนโวลต์ กรณีนี้เกิดขึ้นได้จริงหรือไม่ [ตอบ  $n = 4347$ ,  $n$  มีค่ามาก ไม่มีธาตุใดที่มีระดับพลังงานถึงค่านี้]



4. กำหนดให้พลังงานระดับต่ำสุดของไฮโดรเจนเป็น 13.6 eV จงหาความยาวคลื่นของแสงที่ปลดปล่อยเมื่ออะตอมเปลี่ยนระดับจาก  $n = 3$  ไปยัง  $n = 2$  [ตอบ 658 nm]
5. โปตรอนและอิเล็กตรอนอยู่ห่างกันเป็นระยะอนันต์ ถ้าอนุภาคทั้งสองรวมกันเป็นอะตอมไฮโดรเจนที่สถานะพื้น จงหาความยาวคลื่นโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจากการรวมตัวนี้ [ตอบ 912 อังสตรอม]
6. จงคำนวณหาความถี่สูงสุดของโฟตอนที่ปล่อยออกจากอะตอมของไฮโดรเจน [ตอบ  $3.248 \times 10^{15}$  Hz]
7. อิเล็กตรอนพลังงาน 13 eV ชนกับก๊าซไฮโดรเจนจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในอนุกรมไอบ้าง [ตอบ ไลแมน, บาลเมอร์, พาสเชน]
8. อะตอมของไฮโดรเจนอยู่ที่สถานะกระตุ้นที่สอง (-3.4 eV) กระโดดสู่สถานะพื้น (-13.6 eV) จงหาพลังงานและความยาวคลื่นโฟตอนที่ปล่อยออกมา [ตอบ 10.2 eV, 1218 อังสตรอมเป็นรังสี UV]
9. จงคำนวณหาความถี่ 3 ค่าแรกของอนุกรมไลแมนในสเปกตรัมของอะตอมไฮโดรเจน [ตอบ  $(2.47, 2.92, 3.08) \times 10^{15}$  Hz]
10. จะต้องใช้อิเล็กตรอนจากภายนอกที่มีพลังงานจลน์เท่าใดยิงอะตอมไฮโดรเจนที่สถานะพื้น เพื่อกระตุ้นให้เกิดสเปกตรัมของอนุกรมไลแมนเส้นที่ 1 [ตอบ  $1.63 \times 10^{-18}$  J]
11. จงคำนวณหาความยาวคลื่นที่แตกต่างกันของสเปกตรัมเส้นแรกของอนุกรมบาล์มเมอร์ (อิเล็กตรอนกระโดดจาก  $n = 3$  ไปสู่  $n = 2$ ) ของธาตุไฮโดรเจน (มวล = 1.01 amu) และ ดิวเทอเรียม (มวล = 2.01 amu) [ตอบ 326.54 nm]
12. รังสีอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่น 1850 อังสตรอมส่องไปยังอะตอมไฮโดรเจน พลังงานจลน์ต่ำสุดของอิเล็กตรอนเมื่อหลุดจากอะตอมมีค่าเท่าใด [ตอบ 3.32 eV]
13. โมเมนตัมเชิงมุมรอบวงโคจรของอิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนมีค่าเท่าใดได้บ้าง เมื่อ  $n = 4$  (ตอบในหน่วย  $h/2\pi$ ) [ตอบ  $0, \sqrt{2}, \sqrt{6}, \sqrt{12}$ ]
14. อิเล็กตรอนในอะตอมไฮโดรเจนมีเลขควอนตัมโมเมนตัมเชิงมุม = 2 มีสนามแม่เหล็กภายนอกกระทำกับอะตอมนี้ จงหาทิศที่โมเมนตัมเชิงมุมกระทำกับสนามแม่เหล็ก [ตอบ 42, 68, 90, 112 และ 138 องศา]
15. อิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานที่ M
  - ก) จงคำนวณหาชั้นย่อย ( $l$ ) ที่มีได้ในชั้นนี้ [ตอบ 3]
  - ข)  $m_l$  มีกี่ค่า [ตอบ 9]
  - ค) อิเล็กตรอนมีสถานะต่างกันกี่ค่า [ตอบ 18]



หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(	ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(	แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุ(ไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(	คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

<b>● การเรียนการสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต ●</b>	
<b>1. การวัด</b>	<b>2. เวกเตอร์</b>
<b>3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ</b>	<b>4. การเคลื่อนที่บนระนาบ</b>
<b>5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน</b>	<b>6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน</b>
<b>7. งานและพลังงาน</b>	<b>8. การดลและโมเมนตัม</b>
<b>9. การหมุน</b>	<b>10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง</b>
<b>11. การเคลื่อนที่แบบคาบ</b>	<b>12. ความยืดหยุ่น</b>
<b>13. กลศาสตร์ของไหล</b>	<b>14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน</b>
<b>15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก</b>	<b>16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร</b>
<b>17. คลื่น</b>	<b>18. การสั่น และคลื่นเสียง</b>
<b>● การเรียนการสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต ●</b>	
<b>1. ไฟฟ้าสถิต</b>	<b>2. สนามไฟฟ้า</b>
<b>3. ความกว้างของสายฟ้า</b>	<b>4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน</b>
<b>5. ศักย์ไฟฟ้า</b>	<b>6. กระแสไฟฟ้า</b>
<b>7. สนามแม่เหล็ก</b>	<b>8. การเหนี่ยวนำ</b>
<b>9. ไฟฟ้ากระแสสลับ</b>	<b>10. ทรานซิสเตอร์</b>
<b>11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ</b>	<b>12. แสงและการมองเห็น</b>
<b>13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ</b>	<b>14. กลศาสตร์ควอนตัม</b>
<b>15. โครงสร้างของอะตอม</b>	<b>16. นิวเคลียร์</b>
<b>● การเรียนการสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต ●</b>	
<b>1. จลศาสตร์ (kinematic)</b>	<b>2. จลพลศาสตร์ (kinetics)</b>
<b>3. งานและโมเมนตัม</b>	<b>4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง</b>
<b>5. ของไหลกับความร้อน</b>	<b>6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า</b>
<b>7. แม่เหล็กไฟฟ้า</b>	<b>8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง</b>
<b>9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์</b>	

