

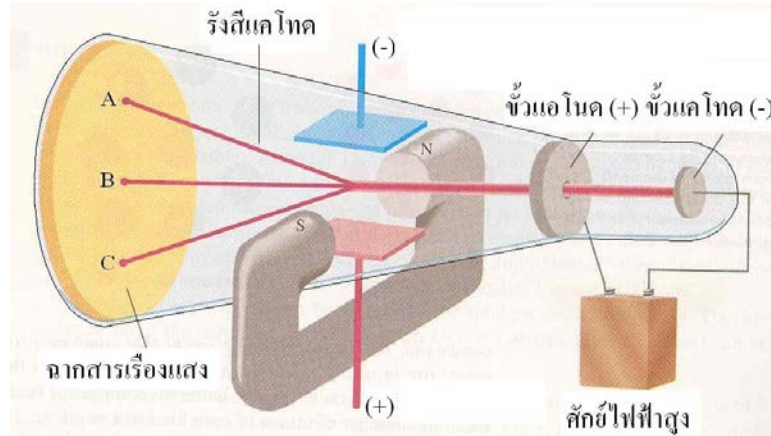
บทที่ 2

โครงสร้างอะตอม

ก่อนคริสต์ศักราช 384-322 ปี อริสโตเติล (Aristotle) ได้กล่าวไว้ว่า “สารทุกชนิดมีความต่อเนื่องกัน แบ่งแยกไปได้เรื่อย ๆ ทุกสารประกอบด้วยอนุภาคชนิดเดียวกัน ลักษณะ 4 ประการที่ต่างกันเป็นคู่ ๆ คือ แห้ง เปียก ร้อน เย็น เช่น ไฟ (ร้อน-แห้ง) น้ำ (เย็น-เปียก) ทำให้เริ่มมีการศึกษาองค์ประกอบของสารมากขึ้น ต้นศตวรรษที่ 19 จอห์น ดาลตัน (John Dalton) ได้กล่าวว่า “อะตอม มีขนาดเล็กมาก ไม่สามารถแบ่งแยกต่อไปได้ อะตอมของธาตุชนิดเดียวกันเหมือนกัน และแตกต่างจากอะตอมของธาตุอื่น และสารเกิดจากการรวมกันทางเคมีของอะตอมที่มีค่าคงตัว นอกจากนี้ยังมีการศึกษา ค้นคว้าโครงสร้างของอะตอมเกิดขึ้นอีกมากมายดังต่อไปนี้

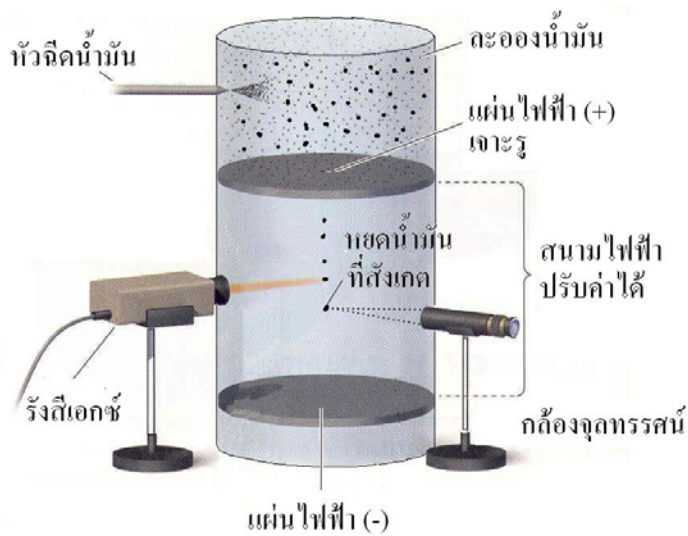
2.1 อิเล็กตรอน

ค.ศ.1833 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการแยกสลายด้วยไฟฟ้า (electrolysis) โดยผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลาย ซึ่งให้เห็นว่าสารต่าง ๆ ประกอบด้วยอะตอม เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า จะทำให้อะตอมบางส่วนหลุดออกมา ซึ่งเป็นอนุภาคไฟฟ้า ดังนั้น โครงสร้างภายในของอะตอมจะต้องเกี่ยวข้องกับกลุ่มอนุภาคไฟฟ้า ซึ่งต่อมา เจ เจ ทอมสัน (J. J. Thomson) ได้ใช้หลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube) ซึ่งเป็นหลอดแก้วภายในบรรจุแก๊สความดันต่ำ ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำด้วยโลหะเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงๆ เข้าไป จะสังเกตเห็นว่ามีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยมีทิศทางในการไหลจากขั้วแคโทด(ขั้วลบ) แล้วทะลุผ่านรูของขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ไปกระทบกับ ฉากที่เคลือบด้วยสารเรืองแสง ทำให้เห็นเป็นจุดสว่างเกิดขึ้น เรียกรังสีที่เกิดขึ้นนี้ว่า รังสีแคโทด (cathode ray) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หลอดรังสีแคโทด
ที่มา (Chang, 1998, p. 40)

นอกจากนี้ทอมสัน ยังพบว่ารังสีแคโทดสามารถเบี่ยงเบนได้ในสนามไฟฟ้าและในสนามแม่เหล็ก โดยลำรังสีนี้จะเบนเข้าหาขั้วไฟฟ้าบวก ทอมสันจึงสรุปว่าลำรังสีแคโทดเป็นอนุภาคประจุลบ เรียกอนุภาคนี้ว่า อิเล็กตรอน และสามารถคำนวณหาอัตราส่วนของประจุมวล (e/m) ของอิเล็กตรอนได้เท่ากับ 1.78×10^8 คูลอมป์ต่อกรัม โดยอาศัยการวัดความโค้งของลำรังสีแคโทด ต่อมาในปี ค.ศ. 1908 อาร์ เอ มิลลิแกน (R. A. Millikan) ได้ทำการทดลองหาประจุของอิเล็กตรอน โดยใช้หยดน้ำมัน (oil drop experiment) สามารถหาค่าประจุของอิเล็กตรอนได้เท่ากับ 1.60×10^{-19} คูลอมป์ และสามารถคำนวณหามวลของอิเล็กตรอนได้เท่ากับ 9.11×10^{-31} กิโลกรัม ดังภาพที่ 2.2



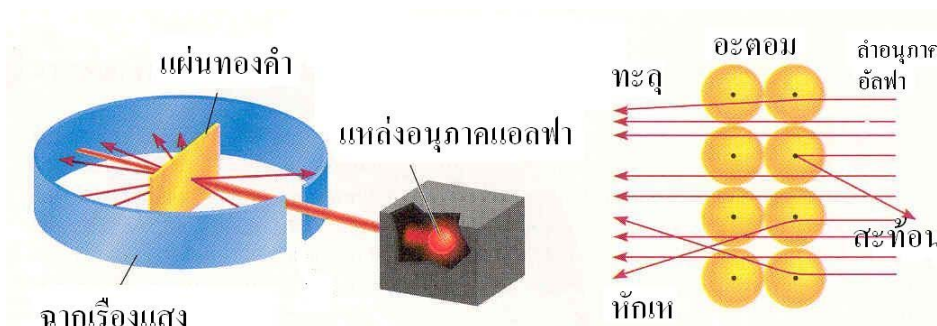
ภาพที่ 2.2 การทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน
ที่มา (Moore, Stanitski & Jurs, 2002, p.44)

2.2 โปรตอน

จากการค้นพบอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่เป็นลบ ประกอบกับสารในสถานะแก๊ส จะมีสมบัติที่เป็นกลางทางไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าจะมีอนุภาคที่เป็นบวกรวมอยู่ในอะตอมด้วยซึ่งก็เป็นความจริง เพราะนอกจากจะพบรังสีแคโทดในหลอดรังสีแคโทดแล้ว ยังพบว่ามียูบควอดทางด้านหลังของขั้วแคโทดอีกด้วย เรียกรังสีขั้วบวกนี้ว่า **รังสีแคแนล (canal ray)** โดยเรียกอนุภาคที่เป็นบวกว่า **โปรตอน (proton)** จากการค้นพบอิเล็กตรอนและโปรตอน ทำให้ทอมสันสรุปเกี่ยวกับโครงสร้างอะตอมว่า อะตอม ประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นลบ เรียกว่า อิเล็กตรอน และ อนุภาคที่เป็นบวกเรียกว่า โปรตอน กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ

2.3 นิวเคลียส

อี อาร์ รัทเทอร์ฟอร์ด (E. R. Rutherford) ได้ทำการทดลองโดยยิงอนุภาคแอลฟา (อนุภาคบวก) เข้าไปในแผ่นทองคำที่บาง ดังภาพที่ 2.3 พบว่า อนุภาคแอลฟาสามารถทะลุผ่านแผ่นทองคำได้เป็นส่วนใหญ่ บางส่วนเกิดการหักเห ส่วนน้อยเกิดการสะท้อนกลับ ทำให้อธิบายได้ว่า บริเวณใจกลางเป็นที่รวมของอนุภาคประจุบวก(โปรตอน) เรียกว่า **นิวเคลียส (nucleus)** มีความหนาแน่นมากทำให้มีขนาดเล็กและมีมวลเกือบเท่ามวลของอะตอม ทำให้อนุภาคแอลฟาหักเหหรือสะท้อนกลับ ส่วนบริเวณรอบ ๆ ที่เบาบาง เป็นอนุภาคประจุลบหรืออิเล็กตรอน ซึ่งอนุภาคแอลฟาทะลุผ่านได้ โดยในอะตอมจำนวนอนุภาคประจุบวกและอนุภาคประจุลบจะเท่ากัน



ภาพที่ 2.3 การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด

ทีมา (Chang, 1998, p.43)

2.4 นิวตรอน

หลังจากการค้นพบอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวเคลียส แล้วยัง พบว่าประมาณครึ่งหนึ่งของมวลนิวเคลียส เป็นโปรตอน เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยมาก ดังนั้นภายในนิวเคลียสจะต้องมีอนุภาคอื่นอีก ที่มีประจุเป็นศูนย์ และมีมวลเกือบเท่ามวลของโปรตอน ในปี ค.ศ. 1932 เจ.แชดวิก (J. Chadwick) ได้ทำการทดลองยิง (bombard) ธาตุเบริลเลียม (beryllium, Be) ด้วยอนุภาคแอลฟา พบว่า มีอนุภาคที่มีพลังงานสูงแต่ไม่มีประจุถูกปลดปล่อยออกมา และเรียกอนุภาคนี้อีกว่า นิวตรอน (neutron)

จากการค้นพบอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน ดังนั้น จึงได้ข้อสรุปว่า อะตอมประกอบด้วย อนุภาคพื้นฐาน 3 อย่าง คือ อิเล็กตรอน (e) โปรตอน (p) และนิวตรอน (n) สมบัติดังตารางที่ 2.1 โดยบริเวณใจกลางเป็นนิวเคลียสที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากภายในมีโปรตอน และนิวตรอนมีมวลเกือบเท่ามวลของอะตอม ส่วนรอบๆ นิวเคลียสจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่รอบๆ โดยนิวเคลียสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 10^{-13} เซนติเมตร ขณะที่อะตอมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10^{-8} เซนติเมตร

ตารางที่ 2.1 สมบัติของอนุภาคโปรตอน นิวตรอน และอิเล็กตรอน

อนุภาค	สัญลักษณ์	ประจุ	มวล (กรัม)	มวลสัมพัทธ์
อิเล็กตรอน	${}^0_{-1}e$ หรือ e^-	-1	9.109382×10^{-28}	0.0005485799
โปรตอน	1_1p หรือ p^+	+1	1.672622×10^{-24}	1.007276
นิวตรอน	1_0n หรือ n^0	0	1.674927×10^{-24}	1.008665

ที่มา (Kotz, Treichel & Harman, 2003, p.53)

2.5 อนุภาคพื้นฐานของอะตอม

อะตอมของธาตุต่างๆ จะประกอบด้วยอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวตรอน (ยกเว้นอะตอมของธาตุไฮโดรเจน ที่ไม่มีนิวตรอน) ซึ่งมีจำนวนแตกต่างกันไป เลขที่แสดงจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสของอะตอม เรียกว่า เลขอะตอม (atomic number ; Z) เลขอะตอมจะเป็นค่าเฉพาะของธาตุ ธาตุชนิดเดียวกันจะมีเลขอะตอมเท่ากันเสมอ ซึ่งที่สภาวะปกติจะมีจำนวนโปรตอนและอิเล็กตรอน เท่ากัน ส่วนเลขที่แสดงจำนวนผลบวกของโปรตอนและจำนวนนิวตรอน เรียกว่า เลขมวล (mass number ; A) ซึ่งในนิวเคลียสของอะตอม เลขมวลจะมีค่าใกล้เคียงกับมวลของอะตอม โดยผลต่างของเลขมวล กับ เลขอะตอม จะเท่ากับจำนวนนิวตรอน โดยสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์นิวเคลียร์ ได้ดังนี้



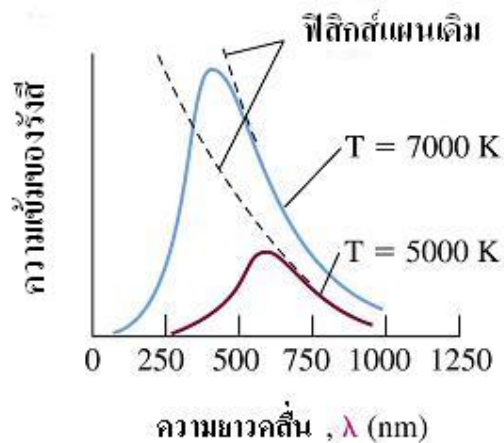
เมื่อ X หมายถึง สัญลักษณ์ของธาตุ Z หมายถึง เลขอะตอม และ A หมายถึง เลขมวล

2.6 ทฤษฎีควอนตัม

นักฟิสิกส์พยายามนำความรู้จากฟิสิกส์แบบดั้งเดิม (classical physics) เชื่อว่าพลังงานคงอยู่แบบต่อเนื่องกัน หลังจากที่ได้อ่านหนังสือเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้า โดย เจ ซี แมกเวลล์ (J. C. Maxwell) ในปี ค.ศ.1900 ที่สรุปว่า แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สั่นสะเทือนในทิศทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน และพลังงานของแสงขึ้นอยู่กับแอมพลิจูด (amplitude) ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การศึกษาการแผ่รังสีของวัตถุดำ (black body) และ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เป็นต้น ซึ่งนำไปสู่ทฤษฎีควอนตัม (quantum theory) เป็นฟิสิกส์แบบใหม่ โดยเสนอใหม่ว่า พลังงานไม่ได้คงอยู่แบบต่อเนื่องกัน แต่อยู่เป็นกลุ่มพลังงาน มีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 การแผ่รังสีของวัตถุดำ วัตถุดำ หมายถึง วัตถุใดๆ ที่สามารถดูดกลืนและคายพลังงานที่มากกระทบได้ทั้งหมด ซึ่งในความจริงไม่มีวัตถุดำที่สมบูรณ์ แต่วัตถุใดๆ ที่มีช่องว่างของรูเล็กในผนังที่เป็นฉนวนมาก ๆ ที่ถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิคงที่สูง ๆ พอจะอนุโลมเป็นวัตถุดำได้ จากการศึกษาถึงการแผ่รังสีของวัตถุดำ (black body radiation) พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดำมากขึ้น ทำให้การเปล่งรังสีมากขึ้น ความเข้มของรังสีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุ และ

สีของรังสีที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่แผ่ออกมากับความยาวคลื่นของพลังงาน จะได้กราฟดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุดำ
ที่หมา (Petrucci, Harwood & Herring, 2002 , p.306)

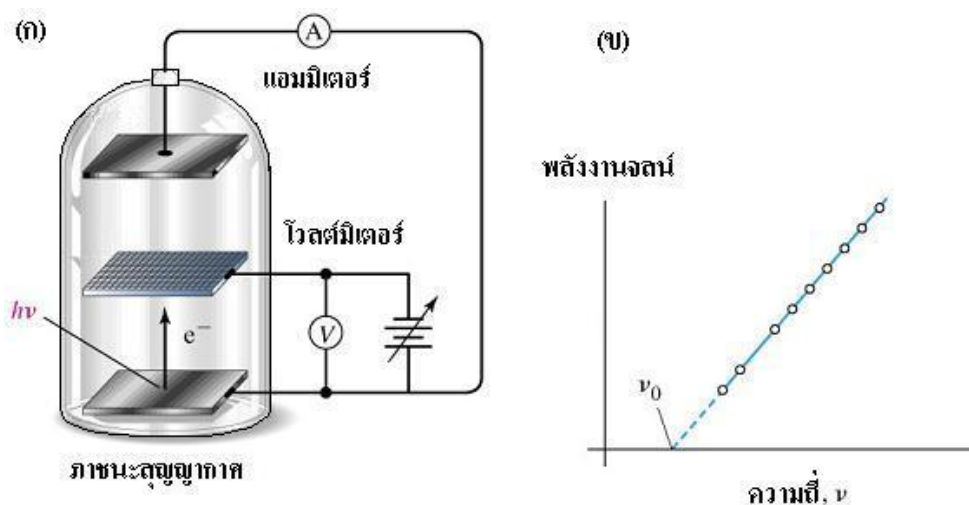
2.6.2. ทฤษฎีควอนตัมของพลังค์ ในปี ค.ศ. 1901 แมกซ์ พลังค์ (Max Planck) ได้ทำการศึกษาการแผ่รังสีของวัตถุดำแล้วนำเสนอใหม่ว่าพลังงานไม่ได้คงอยู่แบบต่อเนื่อง พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมานั้น มีลักษณะเป็นกลุ่ม ๆ เรียกว่า พลังงานควอนตัม (quantum energy) พลังงานของแสงชนิดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความถี่ของแสงนั้น

$$E = h\nu \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ E หมายถึง ค่าพลังงาน h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.62×10^{-34} J.s และ ν คือ ความถี่ของคลื่น

2.6.3 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก จากการทดลองฉายแสงที่มีความยาวคลื่นที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ลงไปยังผิวโลหะภายในภาชนะสุญญากาศ จะทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะหลุดออกไป กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ เรียกว่า **โฟโตอิเล็กตรอน** (photoelectron) ที่มีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก** (photoelectric effect) ดังภาพที่ 2.5 ก ซึ่งพอจะสรุปได้ว่า

- 1) อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะ จะหลุดออกมาต่อเมื่อความถี่ของแสงที่ฉายไปยังผิวโลหะมีค่ามากกว่าความถี่ต่ำสุดค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า **ความถี่ขีดเริ่ม** (threshold frequency, ν_0)
- 2) จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง
- 3) พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน ขึ้นอยู่กับความถี่ของแสง ไม่ขึ้นกับความเข้มของแสง เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์กับความถี่ของแสงจะได้ดังภาพที่ 2.5 ข



ภาพที่ 2.5 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ที่มา (Petrucci, Harwood & Herring, 2002, p.307)

ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1905 'ไอน์สไตน์' ได้เสนอกำหนดให้ แสง เป็น อนุภาค เรียกว่า **โฟตอน** (photon) โดยโฟตอน 1 ตัว มีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ หรือ 1 ควอนตัม ซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้

1) การดึงอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ จะใช้พลังงานอย่างน้อยที่สุดเท่ากับแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส ซึ่งเรียกว่า **ฟังก์ชันงาน** (work function , w) โดยมีค่าเท่ากับ $h\nu_0$

2) ความเข้มของแสงมากทำให้มีจำนวนโฟตอนตกกระทบผิวโลหะมาก ทำให้จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น

3) พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ พลังงานแสง - $h\nu_0$

2.7 ทฤษฎีอะตอมของโบร์

จากการให้ความร้อนแก่อะตอมไฮโดรเจน จนสามารถเปล่งแสงสีแดงออกมา แต่เมื่อแสงสีแดงผ่านปริซึมหรือแผ่นเกรตติง (grating) พบว่า แสงสีแดงจะกระจายออกมีลักษณะความถี่เรียงตัวอย่างมีระเบียบ ต่อมา นีล โบร์ (Neil Bohr) ได้พิจารณาโครงสร้างอะตอมตามแนวคิดของรัทเทอร์ฟอร์ด ร่วมกับทฤษฎีควอนตัม ทำให้โบร์ได้เสนอความคิดใหม่ดังนี้

2.7.1 อิเล็กตรอนวิ่งรอบนิวเคลียสเป็นวงกลมโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานจึงไม่วิ่งเข้าชนนิวเคลียส ซึ่งเรียกว่า **สถานะคงตัว** (stationary state) โมเมนตัมเชิงมุมของวงโคจรจะมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของ $\frac{nh}{2\pi}$ ซึ่งเขียนได้ว่า

$$L = m_e v r = \frac{nh}{2\pi} \quad \dots (2.2)$$

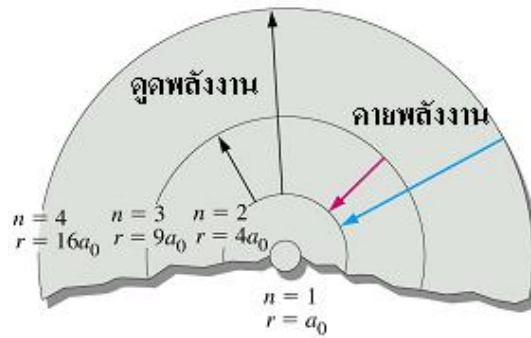
เมื่อ L คือ ค่าโมเมนตัมเชิงมุม m คือ มวลของอิเล็กตรอน v คือ ความเร็ว r รัศมีของวงโคจร h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ และ n เป็น จำนวนเต็ม 1, 2, 3,...(เลขควอนตัม)

2.7.2 อิเล็กตรอนสามารถจะรับหรือปลดปล่อยพลังงานได้เมื่อมีการเปลี่ยนวงโคจร โดยค่าพลังงานจะเท่ากับ ค่าพลังงานที่แตกต่างกันของพลังงานของวงโคจรทั้งสอง

$$\Delta E = h\nu \quad \dots (2.3)$$

โดยอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนจากวงโคจรจากวงในไปสู่วงนอก จะได้รับพลังงานจากภายนอก ในทางทิศทางกลับกัน อิเล็กตรอนจะคายพลังงานเมื่อเปลี่ยนวงโคจรจากวงนอกเข้ามาสู่วงใน

ดั่งภาพที่ 2.6 สถานะของอิเล็กตรอนก่อนที่จะมีการเปลี่ยนวงโคจร เรียกว่า **สถานะพื้น** (ground state) และเรียกสถานะที่มีการเปลี่ยนวงโคจร ว่า **สถานะกระตุ้น** (excited state)



ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงวงโคจรและการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอิเล็กตรอน
ที่มา (Petrucci, Harwood & Herring, 2002, p.311)

2.8 ทฤษฎีควอนตัมใหม่

จากทฤษฎีของโบร์ สามารถใช้อธิบายสเปกตรัมของอะตอมที่มีจำนวนอิเล็กตรอนไม่มากนัก เช่น อะตอมของไฮโดรเจนและอะตอมอื่นที่เหมือนไฮโดรเจน แต่ไม่สามารถอธิบายสเปกตรัมของอะตอมที่ซับซ้อนซึ่งมีอิเล็กตรอนมากกว่าหนึ่งอิเล็กตรอนได้ แต่ต่อมาได้เกิดทฤษฎีใหม่ขึ้นหลายทฤษฎี ซึ่งนำมาใช้ในการอธิบายโครงสร้างของอะตอมที่ซับซ้อนได้ ได้แก่ ทฤษฎีคลื่นสสารของเดอบรอย (Louis De Broglie) หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก (Heisenberg's uncertainty principle) และสมการคลื่นอิเล็กตรอนของชเรอดิงเงอร์ (Schrödinger's wave equation) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

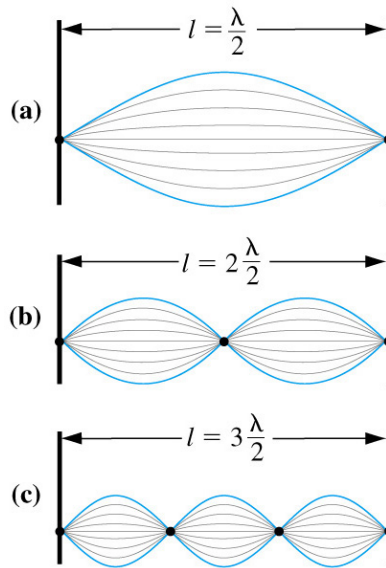
2.8.1 คลื่นสสาร (matter waves) ค.ศ. 1924 เดอบรอย ได้ตั้งสมมติฐาน ขึ้นโดยนำแนวความคิดจากสมการคลื่นของพลังค์ ($\Delta E = h\nu$) และสมการสัมพันธภาพของอนุภาคของไอน์สไตน์ ($\Delta E = mc^2$) มารวมกัน จะได้ว่า

$$h\nu = mc^2 \quad \dots (2.4)$$

จาก $\nu = \frac{c}{\lambda}$ และความเร็วของอนุภาค แทนด้วย v จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \dots (2.5)$$

โดยกล่าวว่า สารรวมทั้งอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียส มีสมบัติเป็นทั้งอนุภาคและคลื่น โดย มีคุณสมบัติเป็นคลื่นนิ่ง (standing wave) โดยความยาวเส้นรอบวงของวงโคจร จะมีค่าเท่ากับ จำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับคลื่นนิ่งที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ที่ เกิดขึ้นเนื่องจากการติดสายกีตาร์ที่มีความยาวคงตัว (l) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 คลื่นนิ่งที่มีความยาวคลื่นต่างๆ

ที่มา (Petrucci, Harwood & Herring, 2002, p.321)

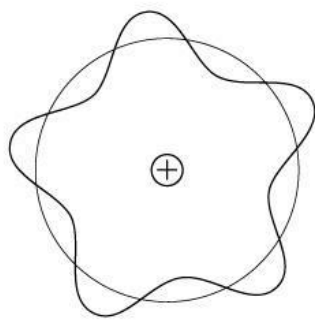
จากความคิดนี้ทำให้ เดอเบรย อธิบายถึงสถานะควอนตัมของโบร์ที่เกี่ยวกับโมเมนตัมเชิงมุม กล่าวคือในวงโคจรของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะแสดงตัวเป็นคลื่นซึ่งจะมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมค่าหนึ่ง โดยที่ความยาวของเส้นรอบวงโคจร ($2\pi r$) จะมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน ($n\lambda$) ดังภาพที่ 2.8

$$\text{จาก} \quad 2\pi r = n\lambda \quad \dots (2.6)$$

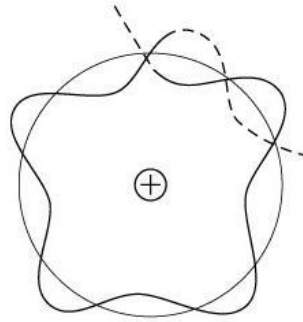
$$\text{ซึ่งจะได้ว่า} \quad 2\pi r = n \frac{h}{mv} \quad \dots (2.7)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad mvr = \frac{nh}{2\pi} \quad \dots (2.8)$$

จะเห็นว่า สมการ 2.8 สอดคล้องกับสมมติฐานของโบร์



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.8 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในลักษณะคลื่นนิ่ง

ที่มา (Petrucci, Harwood & Herring, 2002, p.320)

จากภาพที่ 2.8 (ก) แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรที่เป็นคลื่นนิ่งอิเล็กตรอนที่คงอยู่ได้ ส่วนภาพที่ 2.8 (ข) เป็นคลื่นอิเล็กตรอนที่คงอยู่ไม่ได้

2.8.2 หลักของความไม่แน่นอน (uncertainty principle) สำหรับวัตถุขนาดใหญ่

จะมีคลื่นสสารสั้นมากจนเราอาจจะไม่ให้ความสนใจได้ แต่สำหรับสิ่งที่มีขนาดเล็กมากๆ เช่น อิเล็กตรอนนั้นเราไม่อาจจะความสนใจอันนี้ได้ จากหลักพื้นฐานทางกลศาสตร์ดั้งเดิมนั้นสามารถวัดหาได้ทั้งตำแหน่งและโมเมนตัมของวัตถุ แต่การที่อนุภาคที่แสดงสมบัติของคลื่นอยู่ด้วยนั้นเราไม่อาจจะกระทำได้ ในปี ค.ศ.1927 ไฮเซนเบิร์ก (W. Heisenberg) เสนอหลักของความไม่แน่นอน กล่าวว่า เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก เคลื่อนที่ได้รวดเร็วและยังแสดงสมบัติเป็นอนุภาคและคลื่นไปพร้อมๆ กัน ดังนั้น เราไม่สามารถบอกตำแหน่ง และโมเมนตัมของอิเล็กตรอนได้อย่างเที่ยงตรงในเวลาเดียวกันได้ หากสามารถวัดหรือบอกค่าใดได้อย่างแน่นอน แต่อีกอย่างหนึ่งจะไม่สามารถบอกได้แน่นอน หลักของความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก สามารถเขียนได้ว่า

$$\Delta P \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \quad \dots (2.9)$$

ให้ Δx เป็นความไม่แน่นอนในการวัดหาตำแหน่ง ΔP เป็นความไม่แน่นอนในการวัดหาโมเมนตัม และ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์

2.8.3. สมการคลื่นของชเรอดิงเงอร์ ค.ศ.1826 ชเรอดิงเงอร์ (Erwin Schrödinger) ได้สร้างสมการคลื่น (wave equation) สำหรับอิเล็กตรอนขึ้นมา โดยแสดงสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของอนุภาคระบบ กับ ตำแหน่งหรือโคออร์ดิเนต 3 มิติของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V)\psi = 0 \quad \dots (2.10)$$

หรือ

$$\mathcal{H}\psi = E\psi \quad \dots (2.11)$$

เมื่อ ψ เป็นฟังก์ชันคลื่น (wave function) x , y และ z เป็นระบบพิกัดฉากของอนุภาค m คือ มวล E คือ พลังงานรวม และ V เป็นพลังงานศักย์ ส่วน \mathcal{H} (Hamiltonian) เป็นตัวบอกลักษณะแวกต์ลอมและพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของอิเล็กตรอน ดังนั้น \mathcal{H} จึงเป็นผลบวกของพลังงานศักย์กับพลังงานจลน์ $E\psi$ เป็นพลังงานทั้งหมดของอะตอม และ $|\psi|^2$ เป็นความน่าจะเป็น (probability) ในการพบอนุภาคที่โคออร์ดิเนต x , y และ z

2.9 เลขควอนตัม

ถ้ากล่าวโดยสรุปแล้ว เมื่อแก้สมการของชเรอดิงเงอร์ จะพบว่าตำแหน่งและพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม จะเกี่ยวข้องกับเลขควอนตัม (quantum number) 3 แบบ ดังนี้

2.9.1 เลขควอนตัมหลัก (principal quantum number, n) เลขที่แสดงระดับพลังงานหลัก หรือแสดงถึงระยะห่างจากนิวเคลียสและระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (หรือเรียกว่า shell) โดย n มีค่า 1, 2, 3, ... โดยถ้า $n=1$ จะอยู่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุด และมีพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งก็สอดคล้องกับ n ตามทฤษฎีของโบร์

2.9.2 เลขควอนตัมเชิงมุม (angular momentum quantum number, ℓ) หรือ เลขควอนตัมแอสิมูท (azimuthal quantum number) เลขควอนตัมนี้จะสัมพันธ์อยู่กับโมเมนตัมเชิงมุมหรือ รูปร่างวงโคจรของอิเล็กตรอน หรือบริเวณที่จะพบอิเล็กตรอน หรือออร์บิทัล (orbital) โดย ℓ จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง $n-1$ โดยค่า ℓ สูงจะมีโมเมนตัมเชิงมุม และพลังงานสูง

$l = 0$ เรียกว่า s (sharp)

$l = 1$ เรียกว่า p (principle)

$l = 2$ เรียกว่า d (diffuse)

$l = 3$ เรียกว่า f (fundamental)

2.9.3 เลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number, m_l) เป็นเลขควอนตัมที่สัมพันธ์กับทิศทางของออร์บิทัล ในช่วงว่าง ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดย m_l จะมีค่าตั้งแต่ $-l$ ถึง $+l$ หรือ $2l+1$ ค่า ซึ่งมีระดับพลังงานเท่ากัน เรียกว่า **สภาพซ้อนสถานะ (degeneracy)**

$l = 0$ เรียกว่า เอส-ออร์บิทัล โดย m_l จะมี 1 ค่า คือ 0

$l = 1$ เรียกว่า พี-ออร์บิทัล โดย m_l จะมี 3 ค่า คือ $-1, 0, 1$

$l = 2$ เรียกว่า ดี-ออร์บิทัล โดย m_l จะมี 5 ค่า คือ $-2, -1, 0, 1, 2$

$l = 3$ เรียกว่า เอฟ-ออร์บิทัล โดย m_l จะมี 7 ค่า คือ $-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างเลขควอนตัมและออร์บิทัล

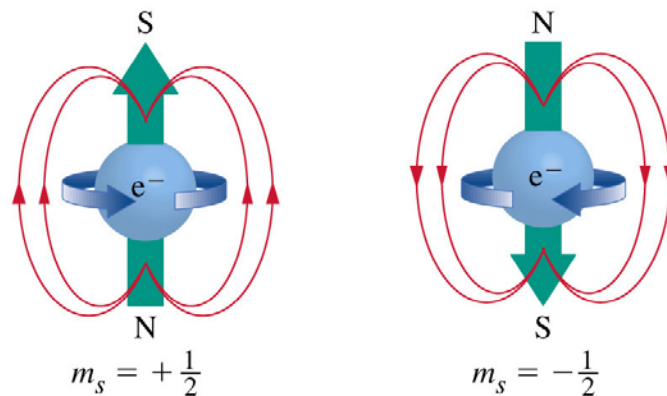
n	$l = n - 1$	ชื่อออร์บิทัล	$m = 2l+1$	ชื่อเต็มของออร์บิทัล
1	0	1s	1	1s
2	0	2s	1	2s
	1	2p	3	$2p_x, 2p_y, 2p_z$
3	0	3s	1	3s
	1	3p	3	$3p_x, 3p_y, 3p_z$
	2	3d	5	$3d_{xy}, 3d_{xz}, 3d_{yz}, 3d_{x^2-y^2}, 3d_z^2$
4	0	4s	1	4s
	1	4p	3	$4p_x, 4p_y, 4p_z$
	2	4d	5	$4d_{xy}, 4d_{xz}, 4d_{yz}, 4d_{x^2-y^2}, 3d_z^2$
	3	4f	7	$4f_{5z^3-3zr^2}, 4f_{5xz^2-xr^2}, 4f_{5yz^3-yr^2}, 4f_y^3-3yx^2, 4f_x^3-3xy^2, 4f_{xyz}, 4f_{zx^2-zy^2}$

ที่มา (Toon, Ellis, Doyle, Ivancic & Percival, 1990, p. 34)

นอกจากเลขควอนตัมทั้ง 3 ในตารางที่ 2.1 แล้ว พอล ดิเรก (Paul Dirac) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจนสามารถสรุปได้ว่า เลขควอนตัมที่เกี่ยวข้องควรมีทั้งหมด 4 ชนิด คือ จะต้องมี เลขควอนตัมสปิน (spin quantum number) ด้วย

2.9.4 เลขควอนตัมสปิน (spin quantum number, m_s) เนื่องจากอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้า เมื่อหมุนรอบตัวเองจะมีพฤติกรรมเหมือนเป็นแท่งแม่เหล็กเล็กๆ ๆ ซึ่งมีปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กด้วย มี 2 แบบ คือ $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$ ดังภาพที่ 2.9 โดยมีลักษณะการหมุนดังนี้

- 1) หมุนทวนเข็มนาฬิกา(ทิศทางเดียวกับสนามแม่เหล็ก)
- 2) หมุนตามเข็มนาฬิกา(สวนทางกับสนามแม่เหล็ก)

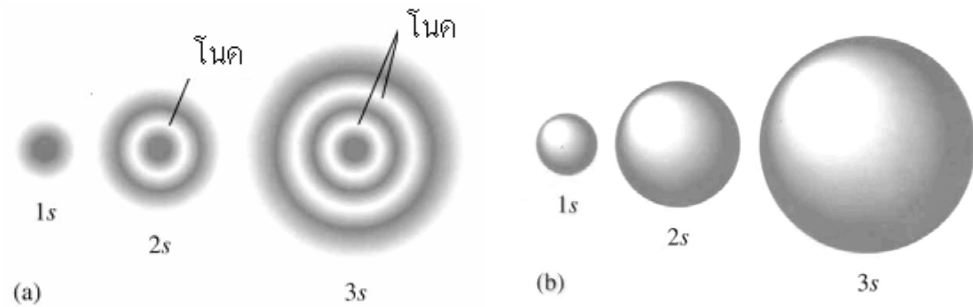


ภาพที่ 2.9 การสปินของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก
ที่มา (Petrucci, Harwood & Herring, 2002, p.333)

2.10 ออร์บิทัลเชิงอะตอม

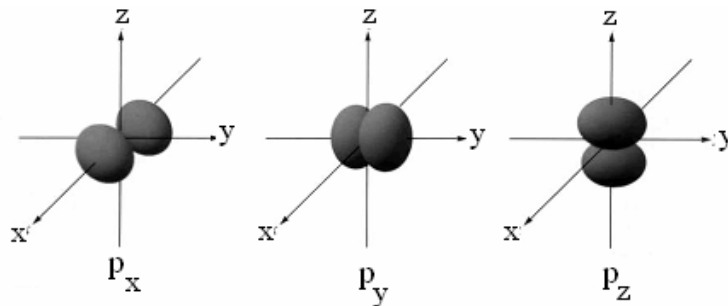
จากตารางที่ 2.2 ซึ่งแสดงเลขควอนตัมของอิเล็กตรอน และออร์บิทัล แล้วนั้น ซึ่งโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอน หรือออร์บิทัลที่จะพบภายในอะตอม หรือออร์บิทัลเชิงอะตอม (atomic orbital) สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

2.10.1 เอส-ออร์บิทัล เป็นออร์บิทัล ที่มีค่า l เท่ากับ 0 แสดงว่าการกระจายของอิเล็กตรอนไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง จึงมีลักษณะเป็นทรงกลม ดังภาพที่ 2.10



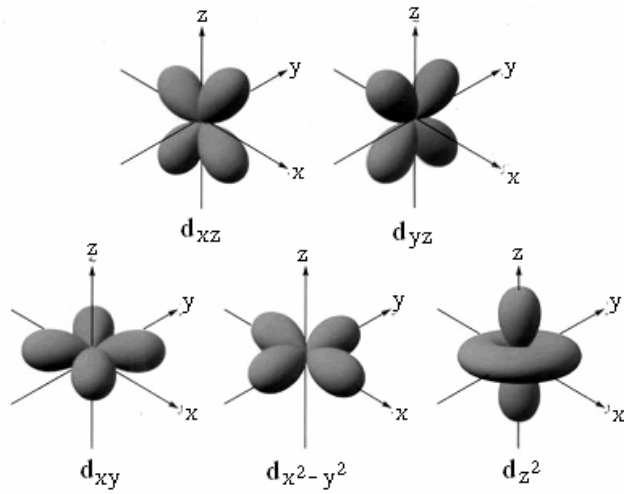
ภาพที่ 2.10 การกระจายตัวของอิเล็กตรอนสำหรับ เอส-ออร์บิทัล
 ที่มา (Zumdahl, 1986, p.256)

2.10.2 พี-ออร์บิทัล เป็น ออร์บิทัล ที่มีค่า $l = 1$, $m_l = -1, 0, 1$ มี 3 ทิศทาง ได้
 ได้แก่ p_x , p_y และ p_z โดยการกระจายของอิเล็กตรอนจะมีลักษณะเป็นก้อนกลม 2 ก้อนข้าง
 นิวเคลียส (lobe) ลักษณะคล้ายคัมเบล (dumbbells) ดังภาพที่ 2.11



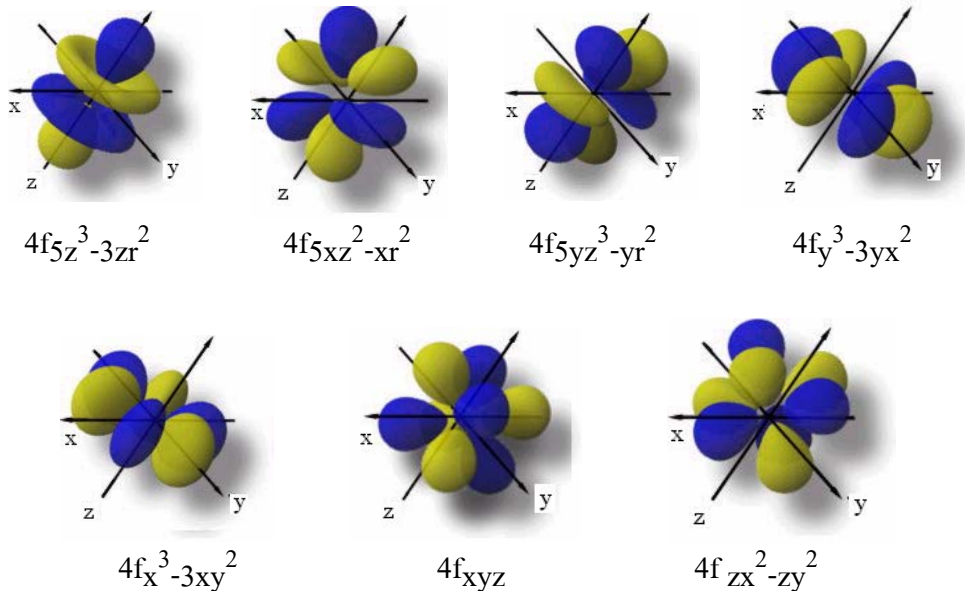
ภาพที่ 2.11 การกระจายตัวของอิเล็กตรอนสำหรับ พี-ออร์บิทัล
 ที่มา (Zumdahl, 1986, p. 256)

2.10.3 ดี-ออร์บิทัล เป็นออร์บิทัลที่มีค่า $l = 2$, $m_l = -2, -1, 0, 1, 2$ มี 5 ทิศทาง
 ทิศทาง ได้แก่ d_{xy} , d_{xz} , d_{yz} , $d_{x^2-y^2}$ และ d_{z^2} ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การกระจายตัวของออร์บิทัล d สำหรับ ดี-ออร์บิทัล
ที่มา (Zumdahl, 1986, p. 257)

2.10.4 เอฟ-ออร์บิทัล เป็นออร์บิทัล ที่ $\ell = 3$, $m_\ell = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ มี 7 ทิศทาง ได้แก่ $4f_{5z^3-3zr^2}$, $4f_{5xz^2-xr^2}$, $4f_{5yz^3-yr^2}$, $4f_{y^3-3yx^2}$, $4f_{x^3-3xy^2}$, $4f_{xyz}$ และ $4f_{zx^2-zy^2}$ ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 การกระจายตัวของออร์บิทัล f สำหรับ เอฟ-ออร์บิทัล
ที่มา (Shriver & Atkins, 1999, p. 16)

2.11 โครงแบบอิเล็กตรอน

ในการบรรจุอิเล็กตรอนหรือการจัดเรียงอิเล็กตรอนลงในออร์บิทัลจะต้องยึดหลักในการบรรจุอิเล็กตรอนของอะตอมหนึ่ง ๆ ลงในออร์บิทัลที่เหมาะสม ตามหลักดังต่อไปนี้

2.11.1 หลักของเพาลี (Pauli exclusion principle) กล่าวว่า ไม่มีอิเล็กตรอนคู่หนึ่งคู่ใดในอะตอมที่มีเลขควอนตัมทั้งสี่เหมือนกันทุกประการ นั่นคืออิเล็กตรอนคู่หนึ่งในออร์บิทัลจะมีค่า n l m เหมือนกันได้ แต่จะต่างกันที่สปิน

2.11.2 หลักของเอาฟ์เบา (Aufbau principle) มีวิธีการดังนี้

1) ใช้หลักของเพาลี ในการบรรจุอิเล็กตรอน โดยใช้สัญลักษณ์ ดังนี้

วงกลม \bigcirc , \square หรือ $_$ แทน ออร์บิทัล

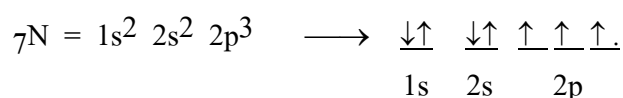
ลูกศร \downarrow, \uparrow แทน อิเล็กตรอน 1 ตัว ที่สปินลง-ขึ้น

$\downarrow\uparrow$ เรียกว่า อิเล็กตรอนคู่ (paired electron)

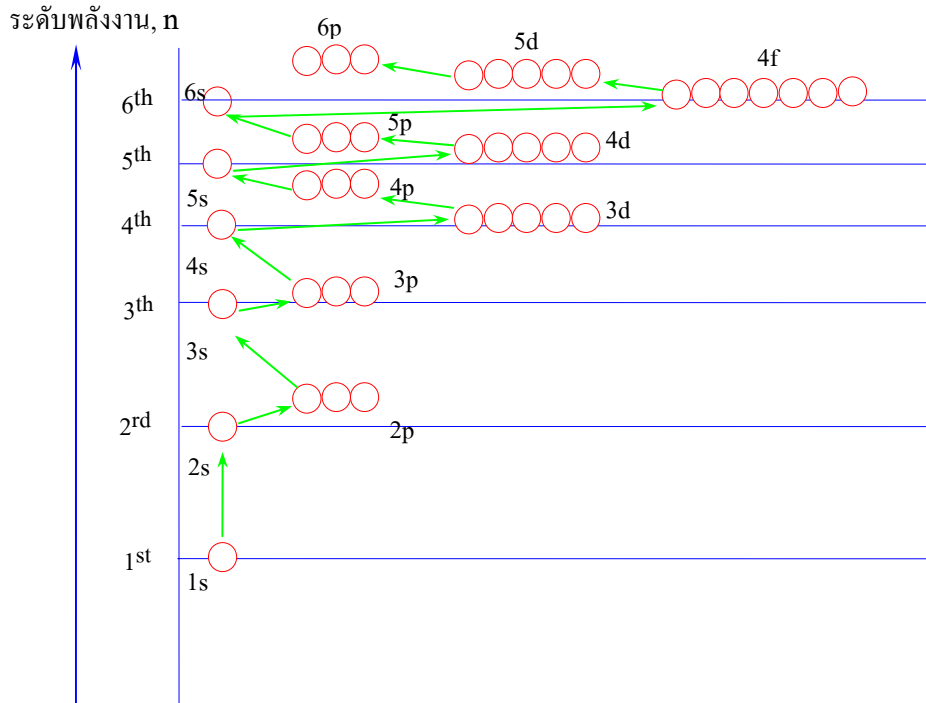
\downarrow เรียกว่า อิเล็กตรอนเดี่ยว (single electron)

2) บรรจุอิเล็กตรอนเข้าไปในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานต่ำ จนครบจำนวนก่อน ดังภาพที่ 2.14

2.11.3 กฎของฮุนด์ (Hund's rule) กล่าวว่า การบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากัน (degenerate orbitals) จะบรรจุในลักษณะที่ทำให้มีอิเล็กตรอนเดี่ยวมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากันมากกว่า 1 เช่น ออร์บิทัล p และ d เป็นต้น

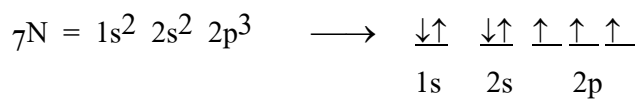


2.11.4 การบรรจุเต็ม (filled configuration) เป็นการบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากัน แบบเต็ม ครบ 2 ตัว ส่วนการบรรจุครึ่ง (half-filled configuration) เป็นการบรรจุอิเล็กตรอนลงในออร์บิทัลแบบครึ่งหรือเพียง 1 ตัว เท่านั้น ซึ่งการบรรจุทั้งสองแบบ (ของเวเลนซ์อิเล็กตรอน) จะทำให้อะตอมมีความเสถียรมากกว่า

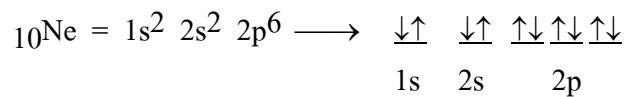


ภาพที่ 2.14 ระดับพลังงานของอะตอมที่มีหลายอิเล็กตรอน
ที่มา (Wolfe, 1988, p. 115)

ตัวอย่างการบรรจุครึ่ง เช่น



ตัวอย่างการบรรจุเต็ม เช่น



ตัวอย่างการจัดโครงสร้างแบบอิเล็กตรอนของธาตุที่ 1-36 โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์แสดง
ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 โครงแบบอิเล็กตรอน (แบบสัญลักษณ์) ของธาตุ 1-36

สัญลักษณ์	เลขอะตอม	โครงแบบอิเล็กตรอน							
		1s	2s	2p	3s	3p	4s	3d	4p
H	1	↑							
He	2	↑↓							
Li	3	↑↓	↑						
Be	4	↑↓	↑↓						
B	5	↑↓	↑↓	↑ _ _					
C	6	↑↓	↑↓	↑ ↑ _					
N	7	↑↓	↑↓	↑ ↑ ↑ _					
O	8	↑↓	↑↓	↑↓ ↑ ↑					
F	9	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑					
Ne	10	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓					
Na	11	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑				
Mg	12	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓				
Al	13	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ _ _			
Si	14	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ ↑ _			
P	15	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ ↑ ↑			
S	16	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑ ↑			
Cl	17	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑			
Ar	18	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓			
K	19	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑		
Ca	20	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓		
Sc	21	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑ _ _ _ _	
Ti	22	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑. ↑. _ _ _	
V	23	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑. ↑. ↑. _ _	
Cr	24	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑. ↑. ↑. ↑. _	

ตารางที่ 2.3 โครงแบบอิเล็กตรอน (แบบสัญลักษณ์) ของธาตุ 1-36 (ต่อ)

สัญลักษณ์	เลขอะตอม	โครงแบบอิเล็กตรอน							
		1s	2s	2p	3s	3p	4s	3d	4p
Mn	25	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑. ↑. ↑. ↑. ↑.	
Fe	26	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑. ↑. ↑. ↑.	
Co	27	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑. ↑. ↑.	
Ni	28	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑. ↑.	
Cu	29	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑.	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	
Zn	30	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	
Ga	31	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑ _ _
Ge	32	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑ ↑ _
As	33	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑ ↑ ↑.
Se	34	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓ ↑ ↑.
Br	35	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓ ↑↓ ↑.
Kr	36	↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓	↑↓ ↑↓ ↑↓

ที่มา : (Toon, Ellis , Doyle , Ivanco & Percival , 1990, p. 39)

2.12 สรุป

โครงสร้างภายในของอะตอมประกอบด้วย อิเล็กตรอน (ประจุลบ) โปรตอน (ประจุบวก) และนิวตรอน (ไม่ประจุ) เนื่องจากอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก และเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้การศึกษาสมบัติของอะตอม หรือการสร้างแบบจำลองของอะตอม จำเป็นต้องมีการศึกษาค้นคว้าทดลอง เป็นระยะเวลานาน ใช้ทฤษฎีต่างๆ มาอธิบายมากมาย เช่น ทฤษฎีควอนตัม การแผ่รังสีของวัตถุดำ ปรัชญาการณโพนโตอิเล็กทริก ทฤษฎีอะตอมของโบร์ ทฤษฎีควอนตัมใหม่ กลิ่นสาร หลักของความไม่แน่นอน และ สมการชเรอดิงเงอร์ เป็นต้น จนในที่สุดทำให้เราทราบว่า แบบจำลองอะตอมในปัจจุบันมีลักษณะเป็นกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud) คือมีนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง มีอิเล็กตรอนโคจรอยู่รอบๆ ในลักษณะเป็นกลุ่มหมอก ที่ไม่สามารถที่จะบอกตำแหน่งและระดับพลังงานได้แน่นอนพร้อมกัน อาจบอกตำแหน่งได้แก่เพียง

บริเวณที่มีโอกาสจะพบอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่าออร์บิทัลเท่านั้น ซึ่งกำหนดด้วยเลขควอนตัม ทั้ง 4 นอกจากนี้หากในอะตอมที่มีอิเล็กตรอนมากกว่า 1 ตัว ก็จำเป็นต้องมีการจัดเรียง อิเล็กตรอนหรือโครงสร้างอิเล็กตรอน ซึ่งจะต้องใช้หลักของเพาลี ซึ่งกล่าวว่า ไม่มีอิเล็กตรอนคู่ หนึ่งคู่ใดในอะตอมที่มีเลขควอนตัมทั้งสี่เหมือนกันทุกประการ หลักของเอาฟบาว ที่จะต้อง บรรจุอิเล็กตรอนเข้าไปในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานต่ำจนครบจำนวนก่อน และกฎของฮุนด์ กล่าวว่า การบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานเท่ากัน จะบรรจุในลักษณะที่ทำให้มี อิเล็กตรอนเดี่ยวมากที่สุดเท่าที่จะมากได้อีกด้วย

2.13 คำถามท้ายบท

2.13.1 จงอธิบายความหมายของ หลอดรังสีแคโทด ความถี่ขีดเริ่ม สภาวะเร้า อนุภาคพื้นฐานของ อะตอม เลขมวล และ โฟตอน

2.13.2 จงอธิบายความแตกต่างแบบจำลองอะตอมของดาลตัน ทอมสัน และ รัทเทอร์ฟอร์ด

2.13.3 การทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด ทำให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับ โครงสร้างอะตอมว่า อย่างไร

2.13.4 จงอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

2.13.5 ทำไมอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสสามารถคงตำแหน่งเดิมไว้ได้ โดยไม่ถูกดูดเข้าหรือหลุดออกไปจากนิวเคลียสที่สภาวะปกติ

2.13.6 หลักของความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก กล่าวไว้ว่าอย่างไร

2.13.7 เลขควอนตัม คืออะไร จงอธิบายมาให้เข้าใจ

2.13.8 แสงที่มีความถี่ 6.0×10^4 Hz จะมีความยาวคลื่น และพลังงานกี่จูล

(ตอบ 5.0×10^{12} nm, 4.0×10^{-29} J)

2.13.9 จงเขียนโครงสร้างอิเล็กตรอนของธาตุ C Ne N Cl และ Zn

2.13.10 จงยกตัวอย่างธาตุ ที่มีการบรรจุเต็ม และการบรรจุครึ่ง พร้อมเขียน โครงสร้างอิเล็กตรอนแบบสัญลักษณ์

2.13.11 หลักของเพาลี หลักของเอาฟบาว และกฎของฮุนด์ กล่าวไว้ว่าอย่างไร

2.13.12 จงวาดภาพแสดงออร์บิทัล s p และ d ทั้งหมด

เอกสารอ้างอิง

- Chang, R. (1998). **Chemistry** (6th ed.). Boston: McGraw-Hill.
- Kotz, J. C. , Treichel, P. M. & Harman, P. A. (2003). **Chemistry & Chemical Reactivity** (5th ed.). New York: Thomson Learning.
- Moore, J.W. , Stanitski, C.L & Jurs, P.C. (2002). **CHEMISTRY-The Molecular Science**. Fort Worth: Harcourt college.
- Petrucci, R. H., Harwood, W. S. & Herring, F. G. (2002). **General chemistry-principles and modern applications** (8th ed.). N.J.: Prentice Hall.
- Shriver. D. F. & Atkins, P. W. (1999). **Inorganic Chemistry** (3rd ed.). Oxford: Oxford University.
- Toon, E. R., Ellis, G. L., Doyle, L. Ivanco, J. & Percival S. (1990). **Fundamental of Chemistry** (2nd ed.). Toronto: Rinehart and Winston.
- Wolfe, D. H. (1988). **Introduction to College Chemistry** (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Zumdahl, S. S. (1986). **Chemistry** (4th ed.). Lexington: D.C. Heath.