บทที่ 1

โครงสร้างอะตอม และพันธะระหว่างอะตอม

สมบัติบางประการของวัสดุของแข็งนั้น มีความสัมพันธ์กับการจัดเรียงตัวของอะตอมและแรงกระทำระหว่างกันของอะตอมหรือโมเลกุล บทนี้จะอธิบายความรู้พื้นฐานที่สำคัญของโครงสร้างอะตอม การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอม ตารางธาตุ และพันธะปฐมภูมิ พันธะทุติยภูมิต่าง ๆ ที่เชื่อมโยงอะตอมต่าง ๆ เข้าด้วยกันเป็นวัสดุของแข็ง

ในแต่ละอะตอมประกอบด้วยนิวเคลียสขนาดเล็กที่มีโปรตอนและนิวตรอนอยู่ ล้อมรอบด้วยวงโคจรของอิเล็กตรอน โปรตอนและอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคมีประจุ 1.6×10^{-19} C โดยที่โปรตอนมีประจุบวกและอิเล็กตรอนมีประจุลบ ส่วนนิวตรอนไม่มีประจุ มวลของอนุภาคเหล่านี้มีขนาดน้อยมาก โปรตอนและนิวตรอนมีมวลประมาณ 1.67×10^{-27} kg ซึ่งจะมากกว่ามวลของอิเล็กตรอนที่เท่ากับ 9.11×10^{-31} kg

ชนิดของธาตุถูกจำแนกตามจำนวนโปรตอนในนิวเคลียสโดยเรียกว่าเป็น **เลขอะตอม** (Z) สำหรับอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าจะมีจำนวนอิเล็กตรอนเท่ากับเลขอะตอม เลขอะตอมเริ่มตั้งแต่ 1 สำหรับไฮโดรเจนจนถึง 92 สำหรับยูเรเนียม ซึ่งเป็นธาตุที่เกิดตามธรรมชาติที่มีเลขอะตอมสูงสุด

มวลอะตอม (A) คือผลบวกของโปรตอนและนิวตรอนภายในนิวเคลียส อะตอมของธาตุเดียวกันจำเป็นต้องมีจำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่อาจมีจำนวนนิวตรอน (N) แตกต่างกัน อะตอมของบางธาตุจึงอาจมีมวลอะตอมได้หลายค่า เรียกว่าเป็น **ไอโซโทป** (isotope) ของธาตุนั้น ๆ **น้ำหนักอะตอม**ของธาตุคือ ค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักของไอโซโทปต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติของธาตุนั้น เราอาจจะใช้**หน่วยมวลอะตอม (amu)** เป็นตัวคำนวณน้ำหนักอะตอม โดยที่ 1 amu เท่ากับ 1/12 เท่าของไอโซโทปคาร์บอนที่พบมากที่สุด ซึ่งคือ คาร์บอน 12 (^{12}C) ($A = 12.00000$) ในการคิดแบบนี้จะทำให้ค่ามวลของโปรตอนและนิวตรอนมากกว่าหนึ่งอยู่เล็กน้อย และ

$$A \cong Z + N \tag{2.1}$$

น้ำหนักของอิเล็กตรอนหรือน้ำหนักของโมเลกุลของสารประกอบอาจบอกได้เป็นจำนวน amu ต่ออะตอม หรือมวลต่อหนึ่งโมล ปริมาณ 1 โมลเท่ากับ 6.02×10^{23} (เลขอาโวกาโดร) โดยความสัมพันธ์ระหว่างการแสดงค่าทั้ง 2 วิธีการนี้ คือ

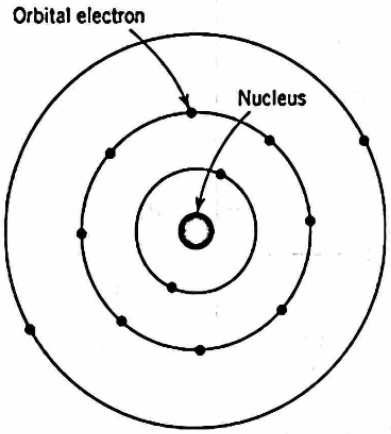
$$1 \text{ amu/atom (หรือโมเลกุล)} = 1 \text{ g/mol}$$

ตัวอย่างเช่น น้ำหนักอะตอมของเหล็กเท่ากับ 55.85 amu/atom หรือ 55.85 g/mol ความสะดวกในการใช้งานขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแต่ละกรณี ในหนังสือเล่มนี้จะใช้แบบ g/mol

แบบจำลองอะตอม

ในช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ 19 มีการค้นพบว่าปรากฏการณ์ระดับอิเล็กตรอนสามารถอธิบายได้ด้วยความรู้ทางกลศาสตร์แบบฉบับ (classical mechanics) หลังจากนั้นมีการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ที่อธิบายกฎเกณฑ์โครงสร้างอะตอมและระดับโครงสร้างย่อยของอะตอม เรียกว่า **กลศาสตร์ควอนตัม** (quantum mechanics) ซึ่งเป็นแนวความคิดที่ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของอิเล็กตรอนและโครงสร้างผลึกของของแข็ง อย่างไรก็ตาม เนื้อหาเหล่านั้นจะไม่กล่าวถึงในหนังสือเล่มนี้ เนื้อหาต่อไปนี้เป็นเพียงพื้นฐานอย่างง่ายในการอธิบายโครงสร้างอะตอมเท่านั้น

แบบจำลองอะตอมของบอห์รเป็นผลลัพธ์เบื้องต้นที่ได้จากกลศาสตร์ควอนตัม โดยมีสมมติฐานว่าอิเล็กตรอนมีวงโคจรและตำแหน่งที่แน่นอนอยู่รอบนิวเคลียส ดังแสดงในรูปที่ 2.1



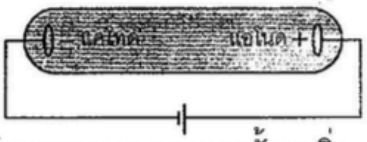
รูปที่ 2.1 ภาพวาดแสดงแบบจำลองอะตอมของบอห์ร

แบบจำลองอะตอมของ ดอลตัน

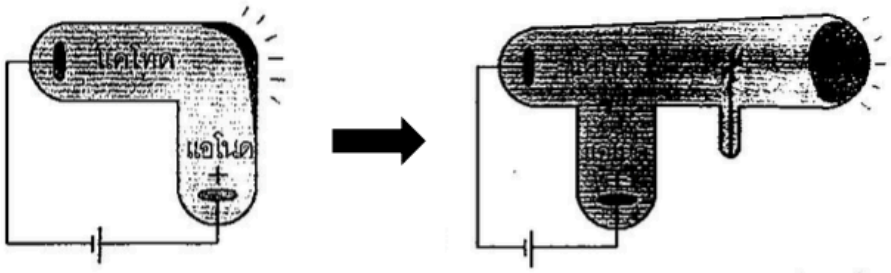
ก่อนหน้าดอลตันจะคิดแบบจำลองอะตอมขึ้นมา ตั้งแต่สมัยกรีกเป็นต้นมา คนส่วนใหญ่เค้านิยมเชื่อแนวคิดดินน้ำลมไฟกัน จนมาถึง ยุคของ โรเบิร์ต บอยล์ (ค.ศ.1627 – 1691) ที่เราคุ้นเคยกันดีในบทเรื่องของไหล ได้ทำการทดลองแยกสารโดยวิธีทางเคมีแล้วพบว่า สารต่างๆ มันไม่ได้ประกอบกันมาจากดินน้ำลมไฟนะ น่าจะประกอบมาจากการรวมตัวกันของอนุภาคซะมากกว่า อย่างการทดลองเกี่ยวกับแก๊ส ที่สรุปว่าแก๊สประกอบไปด้วยอนุภาคเล็กๆ จำนวนมากวิ่งชนผนังทำให้เกิดความดัน ก็ทำให้แนวคิดเรื่องอะตอมกลับมามีคนสนใจขึ้นอีกครั้ง ต่อมาในวิชาเคมีก็พัฒนาถึงขั้นแยกสารประกอบออกเป็นสารบริสุทธิ์ได้ และต่อมาก็พัฒนาถึงขั้นแยกสารบริสุทธิ์ออกเป็นธาตุได้ ความรู้ทางเคมีดังกล่าวทำให้จอห์น ดอลตัน (ค.ศ.1766–1844) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ได้รวบรวมความรู้พวกนี้สร้างเป็นแบบจำลองอะตอมขึ้นมา

แบบจำลองอะตอมของ ทอมสัน

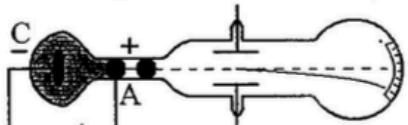
ก่อนหน้าทอมสันจะคิดแบบจำลองอะตอมขึ้นมา ตั้งแต่สมัยดอลตันเป็นต้นมาเค้ายังไม่รู้จักอิเล็กตรอนกัน จนมาถึงปี ค.ศ. 1855 มีนักฟิสิกส์ที่ชื่อว่าไกสเลอร์ ได้ทดลองทำหลอดแก้วให้เป็นสุญญากาศ ต่อขั้วไฟฟ้าบวกลบที่ปลายหลอด และต่อกับแหล่งจ่ายไฟที่มีความต่างศักย์สูง (**ขั้วบวก** มีชื่อว่า **"แอโนด"** , **ขั้วลบ** มีชื่อว่า **"แคโทด"**)

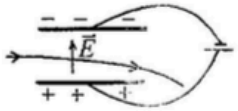


ปรากฏว่าที่ผิวด้านในหลอดแก้วเกิดการเรืองแสงสีเขียวออกมาทั่วทั้งหลอด (เรามารู้ภายหลังว่า การเรืองแสงเกิดจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากขั้วลบวิ่งกระจายทุกทิศทุกทางไปชนผนังแก้ว การที่แก้วถูกชน มันถูกกระตุ้น ก็เลยปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสีเขียวออกมา แต่ในตอนนั้นเค้ายังไม่รู้เหตุผล รู้แค่ว่าถ้าทำแบบนี้แล้วจะเรืองแสงแค่นั้น)

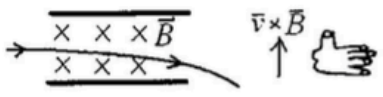


ต่อมาในปี ค.ศ.1897 เจเจ ทอมสัน (ค.ศ.1856 – 1940) นักฟิสิกส์ ชาวอังกฤษได้ออกแบบหลอดสุญญากาศ เป็นดังรูปขวามือ C เป็นขั้วแคโทดปล่อยรังสีแคโทดออกมา A เป็นขั้วแอโนดรูปทรงกระบอกมีรูตรงกลางเพื่อให้รังสีแคโทดวิ่งผ่านออกมาเป็นลำเล็กๆ ลำรังสีเล็กๆ นี้จะวิ่งผ่านแผ่นคู่ขนานเพื่อให้มีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับลำรังสี ลำรังสีจะได้โค้งเบน ส่วนที่ปลายหลอดแก้วก็จะมีสเกลดูว่าลำรังสีเบนไปจากเดิมมากน้อยแค่ไหน สมมุติว่าเราทำให้แผ่นคู่ขนานมีทิศ $\vec{E}$ ดังรูป ปรากฏว่าทิศของลำรังสีมันจะเบนในทิศตรงข้ามกับ $\vec{E}$ เสมอ แสดงว่า $\vec{F}$ มีทิศตรงข้ามกับ $\vec{E}$ ถ้าดูจากสมการ $\vec{F} = q\vec{E}$ ก็จะเห็นได้ว่าประจุ q ของรังสีแคโทดมันเป็นลบ



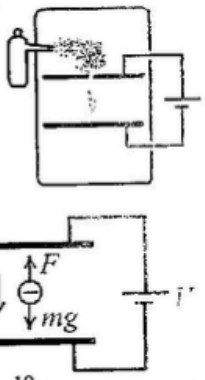


หลอดสุญญากาศของทอมสันยังมีอะไรสนุกๆ ให้เล่นอีก คือ เอาสนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ ใส่เข้าไปด้วย ดังรูปด้านล่าง เมื่อประจุวิ่งในสนามแม่เหล็กก็จะมีแรงกระทำเหมือนกัน ตามสมการ $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$



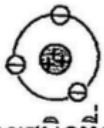
จะเห็นได้ว่าประจุ q ของรังสีแคโทดมันเป็นลบเหมือนกัน

ต่อมาไม่นาน ในปี ค.ศ.1911 **มิลลิแกน** นักฟิสิกส์ชาวอเมริกัน ได้ทดลองโดยการฉีดน้ำมันให้เป็นละออง ละอองแต่ละหยดอาจจะเสียดสีจนบางหยดเป็นประจุบวก บางหยดเป็นประจุลบ บางหยดเป็นกลาง (น้ำมันที่เขาฉีดไม่นำไฟฟ้า เมื่อเสียดสีจึงมีประจุ) เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับหยดน้ำมัน โดยใช้แผ่นตัวนำคู่ขนานดังรูป ปรากฏว่าจะมีหยดน้ำมันบางหยดที่อยู่ในภาวะสมดุล แรงขึ้น = แรงลง $\Rightarrow qE = mg \Rightarrow q = mg / E = mgd / V$



ทดลองได้ตัวเลขประจุ q หลายๆ ค่าเช่น 3.2×10^{-19}C, 4.8×10^{-19}C, 6.4×10^{-19}C, ... สังเกตว่าแต่ละค่ามันจะเป็นจำนวนเท่าของเลข 1.6×10^{-19}C คือหยดน้ำมัน 1 หยดอาจจะมีอิเล็กตรอนหลายตัว เค้าสรุปว่า อิเล็กตรอน 1 ตัวจะมีประจุ 1.6×10^{-19}C เนื่องจากเป็นตัวเลขเฉพาะ ประจุของอิเล็กตรอนก็เลยมีตัวแปรพิเศษให้มัน คือ $\boxed{e = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}}$ ก่อนหน้านี้ทอมสันได้หาค่า q/m ของอิเล็กตรอนไว้แล้ว ก็เลยได้รู้ค่ามวลอิเล็กตรอน (m_e) ไปพร้อมกันเลย คือ $\boxed{m_e = 9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg}}$

ในการทดลองหยดน้ำมันของมิลลิแกน พบว่าถ้าต้องการให้หยดน้ำมันซึ่งมีมวล 4.8×10^{-15} kg ลอยนิ่งอยู่ระหว่างแผ่นโลหะ 2 แผ่น ซึ่งวางขนานห่างกัน 1 cm ต้องใช้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะ 300 V ถ้าอิเล็กตรอนมีประจุ 1.6×10^{-19} C และความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 10 m/s^2 หยดน้ำมันหยดนี้จะมีอิเล็กตรอนเกาะอยู่กี่ตัว

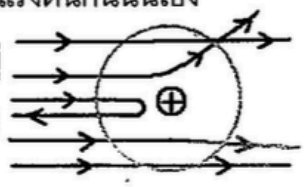
แบบจำลองอะตอมของ รัทเทอร์ฟอร์ด 

ในยุคของรัทเทอร์ฟอร์ดมี การค้นพบรังสีหลายชนิดที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุกัมมันตรังสี เช่น

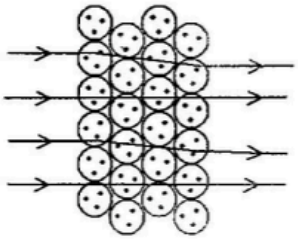
- รังสีแอลฟา (α)	มันก็คือ	ฮีเลียม $\left({}_{2}^{4}\mathrm{He}\right)$	นั่นเอง	เป็นประจุบวก	มวลเยอะ
- รังสีเบต้า (β)	มันก็คือ	อิเล็กตรอน $\left(e^{-}\right)$	นั่นเอง	เป็นประจุลบ	มวลน้อย
- รังสีแกมม่า (γ)	มันก็คือ	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	นั่นเอง	ไม่มีประจุ	ไม่มีมวล

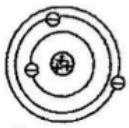
เอาอักษรกรีกมาตั้งชื่อเรียงตามลำดับก่อนหลังที่ค้นพบ

รัทเทอร์ฟอร์ดได้ทำการยิงอนุภาคแอลฟา $\left({}_{2}^{4}\mathrm{He}\right)$ ซึ่งเป็นประจุบวก เข้าไปที่แผ่นทองคำบางๆ พบว่าส่วนใหญ่จะเบนจากแนวเดิมน้อยมาก แต่จะมีไม่กี่ตัวที่เบนจากแนวเดิมเยอะหน่อย และมีบางตัวสะท้อนกลับ เหตุผลที่รังสีอนุภาคที่เป็นประจุบวกเกิดการเบนทิศทาง ก็น่าจะเกิดจากมันวิ่งเข้าไปใกล้ประจุบวกในอะตอม ก็เลยออกแรงดันกันนั่นเอง แสดงว่าประจุบวกในอะตอมมันน่าจะมีขนาดเล็กกว่าอะตอมและอยู่ตรงกลางอะตอมเรียกประจุบวกที่อยู่ตรงกลางอะตอมว่า นิวเคลียส โดยมีอิเล็กตรอนวนอยู่รอบๆ



แต่ถ้าคิดว่าแบบจำลองอะตอมเป็นแบบของทอมสัน รังสีแอลฟาที่ทะลุผ่านมันจะไม่เบนเหมือนการทดลองนี้ แสดงว่าแบบจำลองของทอมสันยังมีข้อบกพร่องอยู่

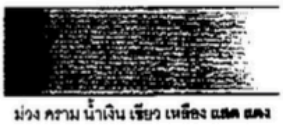


แบบจำลองอะตอมของ โบร์ 

ก่อนหน้าโบร์จะคิดแบบจำลองอะตอมขึ้นมา มีคนศึกษาเกี่ยวกับสเปกตรัมของแสงไว้มากมาย ตั้งแต่สมัยนิวตันใช้ปริซึมแยกแสงขาวออกเป็นสีต่างๆ ต่อมา ในปี ค.ศ. 1859 โรเบิร์ต บุนเซน และกุสตาฟ เคอรร์ซอฟฟ์

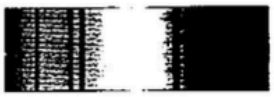
เขาได้ทำการทดลองแยกสเปกตรัมของ แสงอาทิตย์, แสงจากของแข็งที่ได้รับความร้อน. แสงจากแก๊สร้อน และแสงขาวที่วิ่งผ่านแก๊สไม่ร้อน (แก๊สเย็น) สรุปมาเป็นกฎ 3 ข้อ คือ

1. แสงอาทิตย์, แสงจากของแข็งที่ได้รับความร้อน เช่นหลอดไฟ จะได้สเปกตรัมต่อเนื่อง มีสีครบทุกสี ทุกความถี่ในช่วงแสง

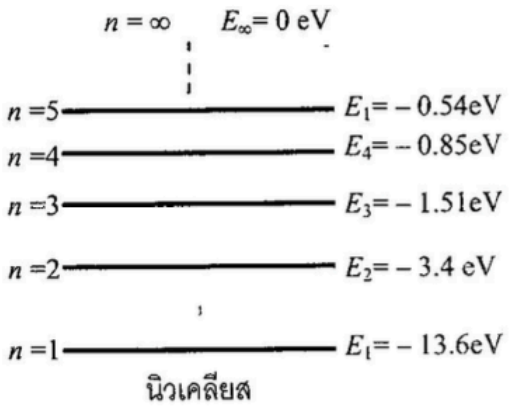


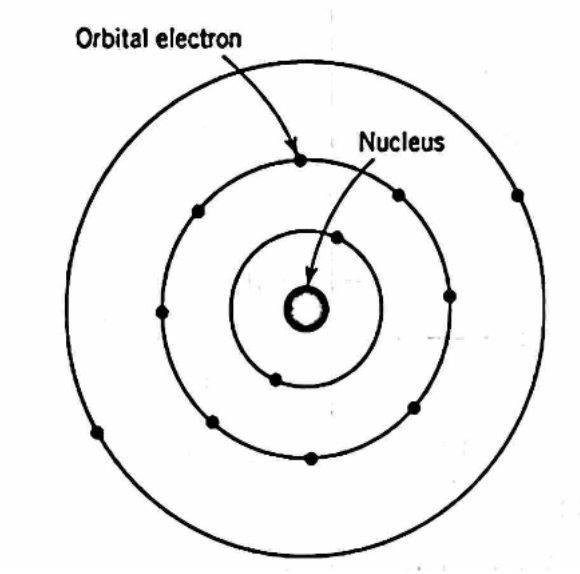
2. แสงจากแก๊สร้อน จะได้สเปกตรัมเป็นเส้นขีดเล็กๆ ไม่กี่เส้น ไม่กี่ความถี่ (โซนที่มืดๆ ในรูปคือไม่มีแสง)

3. แสงขาวที่วิ่งผ่านแก๊สไม่ร้อน (แก๊สเย็น) จะได้สเปกตรัมต่อเนื่องที่มีเส้นไม่กี่เส้นหายไป ความถี่บางความถี่หายไป



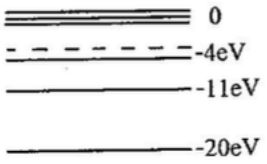
การเขียนแผนภาพ**ระดับชั้นพลังงาน** เค้านิยมที่จะเขียนเป็นขีดเส้นตรง ดังรูปขวามือ แทนที่จะเขียนเป็นวงรัศมี (เพราะเส้นตรงมันวาดง่ายกว่ามั๊ง) ตัวเลขที่จำเป็นต้องจำก็คือ $E_1 = -13.6\text{eV}$ ส่วนพลังงานของแต่ละชั้นเราไม่จำเป็นต้องจำ เราสามารถหาได้จากสมการ $\boxed{E_n = \frac{-13.6\text{ eV}}{n^2}}$



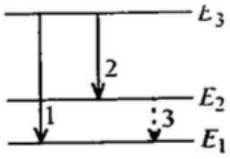


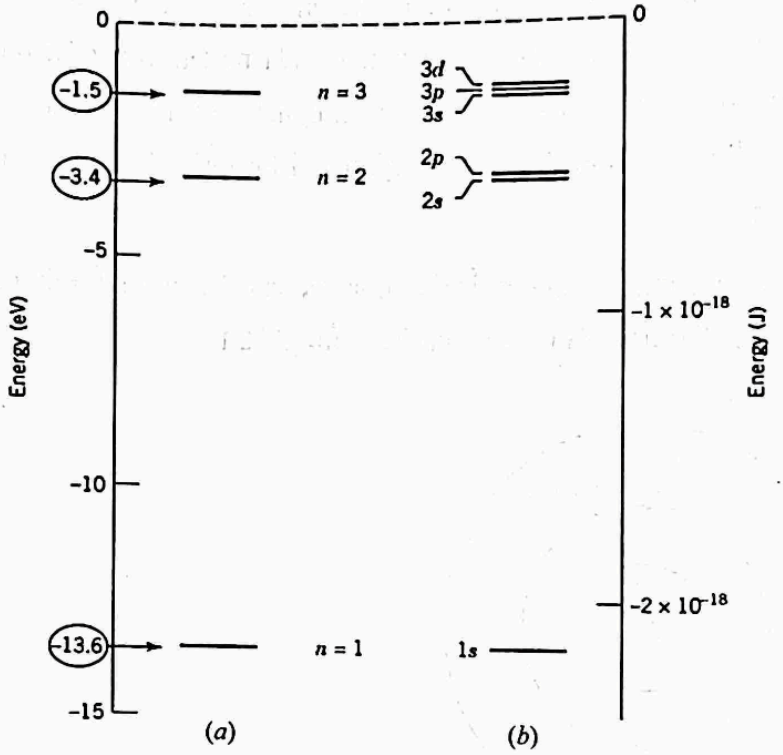
แบบจำลองของบอห์รเป็นความพยายามที่จะอธิบายตำแหน่งที่อยู่ของอิเล็กตรอนและพลังงานของมัน แต่ต่อมาก็มีการค้นพบว่าแบบจำลองนี้มีข้อจำกัดหลายประการที่ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของอิเล็กตรอนได้ จึงพัฒนาแบบจำลองใหม่เรียกว่า **แบบจำลองทางกลศาสตร์คลื่น** (wave-mechanical model) โดยที่อิเล็กตรอนถูกพิจารณาว่ามีสมบัติแบบคลื่นและแบบอนุภาคด้วยในเวลาเดียวกัน อิเล็กตรอนไม่ได้เป็นอนุภาคที่โคจรในตำแหน่งขั้นที่แน่นอนรอบ ๆ นิวเคลียส ตำแหน่งของอิเล็กตรอนไม่แน่นอน เราสามารถบอกได้เพียง

สมมุติว่าแผนภาพแสดงระดับพลังงานของอะตอมชนิดหนึ่งเป็นดังรูป ให้หาค่าความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะทำให้อะตอมในสถานะพื้นฐานแตกตัวเป็นไอออนได้พอดี



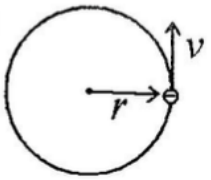
ในรูป แสดงแผนภาพของระดับพลังงานของอะตอมหนึ่ง พบว่าอะตอมจะแผ่รังสีที่ความยาวคลื่น 200 นาโนเมตร และ 300 นาโนเมตร เมื่อมีการเปลี่ยนระดับพลังงานตามเส้นทาง 1 และ 2 ตามลำดับ ถ้ามีการเปลี่ยนระดับพลังงานตามเส้นทาง 3 (เส้นประ) อะตอมนี้จะแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นเท่าใดออกมา





รูปที่ 2.2 (*a*) ระดับชั้นพลังงานสามระดับแรกของอะตอมไฮโดรเจน
(*b*) ระดับชั้นพลังงานย่อยในระดับชั้นพลังงานหลักสามชั้นแรกตามแบบจำลองทางกลศาสตร์คลื่น

หลายๆ คนอาจจะลืมปริมาณ**โมเมนตัมเชิงมุม (*L*)** ไปแล้ว ซึ่งอยู่ในเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลม โมเมนตัมเชิงมุม $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{P}$, $\vec{P} = m\vec{v}$ อิเล็กตรอนที่โคจรในชั้นต่างๆ ของอะตอมไฮโดรเจนก็มีโมเมนตัมเชิงมุมด้วยนะ ทิศของ $\vec{r}$ กับ $\vec{P}$ มันตั้งฉากกัน ดังนั้น $L = rP = mvr$ อันนี้เป็นความรู้เดิม



พันธะระหว่างอะตอมในของแข็ง

แรงและพลังงานพันธะ

สมบัติทางกายภาพของวัสดุสามารถถูกอธิบายได้โดยศึกษาแรงกระทำที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างอะตอม พันธะระหว่างอะตอมอาจจะอธิบายได้ง่ายที่สุดโดยพิจารณาอะตอม 2 ตัวที่เคลื่อนตัวมาอยู่ใกล้กันจากระยะอนันต์ (infinity) ณ ที่ระยะห่างกันมาก ๆ แรงกระทำระหว่างอะตอมจะมีน้อยมาก แต่เมื่ออะตอมทั้งสองเคลื่อนตัวเข้าหากัน แรงกระทำระหว่างอะตอมก็จะมีมากขึ้นเรื่อย ๆ แรงกระทำมี 2 แบบ คือ แรงดึงดูดและแรงผลัก และขนาดของแรงทั้งสองนั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่าง 2 อะตอม ชนิดของแรงดึงดูด (F_A) ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะและการเปลี่ยนแปลงขนาดตามที่แสดงในรูปที่ 2.8(a) เมื่อชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนของ 2 อะตอมเริ่มเหลื่อมซ้อนกัน แรงผลัก (F_R) ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ผลของแรงลัพธ์ (F_N) ระหว่างสองอะตอมคือผลบวกระหว่างแรงดึงดูดและแรงผลัก ดังสมการ

$$F_N = F_A + F_R \tag{2.2}$$

ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะระหว่างอะตอมดังแสดงในรูปที่ 2.8(a) เมื่อแรงดึงดูดสมดุลกับแรงผลัก ทำให้แรงลัพธ์เท่ากับศูนย์

$$F_A + F_R = 0 \tag{2.3}$$

ก็เกิดสภาวะสมดุลขึ้น ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของสองอะตอมเป็นระยะที่สมดุล r_0 ดังที่เขียนกำกับในรูปที่ 2.8(a) ส่วนใหญ่ระยะสมดุลจะมีค่าประมาณ 0.3 nm เมื่ออะตอมทั้งสองอยู่ในตำแหน่งที่มีระยะห่างนี้ มันจะไม่เคลื่อนตัวเข้าหากันอีกเนื่องจากถูกต้านโดยแรงผลัก และไม่แยกห่างออกจากกันเนื่องจากถูกต้านจากแรงดึงดูด

พิจารณาพลังงานศักย์ระหว่างสองอะตอม จะเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ว่า

$$E = \int F\,dr \tag{2.4}$$

หรือสำหรับระบบที่มีหลายอะตอมรวมอยู่ร่วมกัน

$$E_N = \int_{\infty} F_N\,dr \tag{2.5}$$

$$= \int_{\infty} F_A\,dr + \int_{\infty} F_R\,dr \tag{2.6}$$

$$= E_A + E_R \tag{2.7}$$

โดยที่ E_N E_A และ E_R คือ พลังงานลัพธ์ พลังงานดึงดูด และพลังงานผลักของสองอะตอมและที่เกิดกับอะตอมข้างเคียง

ต่อมาในปี ค.ศ. 1900 มีนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อว่า แมกซ์ พลังค์ ได้ทำการทดลองการแผ่รังสีต่อจากนักวิทยาศาสตร์รุ่นก่อนๆ เมื่อเค้าค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้กับวัตถุอย่างต่อเนื่อง แต่เค้าสังเกตว่าพลังงานที่ปล่อยออกมาจากการแผ่รังสี (พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) มีค่าไม่ต่อเนื่อง เหมือนว่าพลังงานหลุดออกมาเป็นก้อน เป็นก้อน ไม่ใช่ค่อยๆ แผ่ทีละนิดแบบต่อเนื่อง เค้าเรียกก้อนพลังงานแต่ละก้อนว่า "ควอนตัมของพลังงาน" (คำว่า "ควอนตัม" มาจากภาษาละตินแปลว่า "เท่าไร" แต่ต่อมาไอน์สไตน์เปลี่ยนคำเรียกใหม่ เรียกก้อนพลังงานแต่ละก้อนว่า **"โฟตอน"** ส่วนคำว่าควอนตัมเค้าเอาไปใช้เรียกชื่อ "ทฤษฎีควอนตัม" เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายอนุภาคขนาดเล็กๆ ได้) พลังค์ค้นพบว่า พลังงานแต่ละก้อนจะมีพลังงานเท่ากับ hf ท่องจำสมการนี้ไปเลย $\boxed{E = hf}$ เรียกว่า **"สมการของพลังค์"** และตัวแปร h เป็นค่าคงที่ที่พลังค์ตั้งขึ้นมาเรียกว่า **"ค่าคงที่ของพลังค์"** ซึ่ง $\boxed{h = 6.6\times10^{-34}\ \text{Js}}$ ถ้ามีพลังงานรวมหลายก้อน พลังงานรวมก็เท่ากับ จำนวนก้อน x พลังงาน 1 ก้อน $E_{\text{รวม}} = nhf$

เนื่องจากพลังงานในระดับเล็กๆ อย่างโฟตอนหรืออิเล็กตรอน ถ้าใช้ในหน่วย**จูล** (J) ตัวเลขมันจะน้อยมากๆ บางทีเค้าก็นิยมเป็นอีกหน่วย ชื่อว่า **"หน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)"** ที่มาของมันก็มาจาก $e = 1.6\times10^{-19}$ C คูณกับหน่วย V จะได้ $\text{eV} = 1.6\times10^{-19}$ CV ซึ่งหน่วย CV (คูลอมโวลต์) มันก็คือ J (จูล) นั่นเอง (งาน = ประจุ×ความต่างศักย์) ถ้าเราเข้าใจแบบนี้ ก็จะแปลงหน่วยได้อย่างง่ายดาย โดยใช้สมการแปลงหน่วยง่ายๆ คือ $\text{eV} = 1.6\times10^{-19}$ J

<u>ยกตัวอย่าง</u> แสงความยาวคลื่น 990 nm จำนวน 100 โฟตอน จะมีพลังงานกี่อิเล็กตรอนโวลต์

<u>วิธีทำ</u> จาก $v = f\lambda \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda}$, $E = nhf = nh\frac{v}{\lambda} = (100)\left(6.6\times10^{-34}\right)\frac{(3\times10^{8})}{(990\times10^{-9})}\ \text{J}$

$$E = (100)\left(6.6\times10^{-34}\right)\frac{(3\times10^{8})}{(990\times10^{-9})}\left(\frac{\text{eV}}{1.6\times10^{-19}}\right) = 125\ \text{eV}\ \#$$

แสงเลเซอร์กำลัง 0.6 มิลลิวัตต์ ให้แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร จงคำนวณหาจำนวนโฟตอนต่อวินาทีที่ถูกปล่อยออกมา (h = 6.6 x 10^{-34} Js)