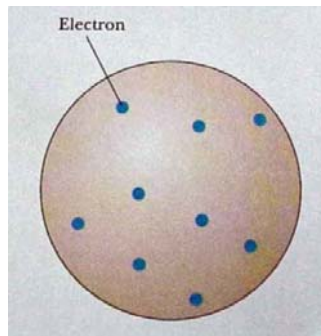


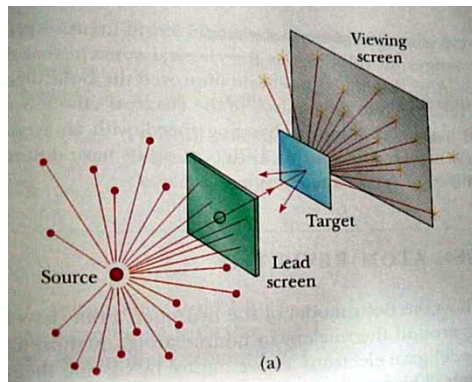
อะตอมคือ หน่วยที่เล็กที่สุดของสสารที่ยังคงสภาพความเป็นสสารอยู่ได้ แนวความคิดของอะตอมในสมัยนิวตัน คือ อะตอมเป็นหน่วยเล็กที่สุดที่ไม่สามารถแบ่งได้ มีลักษณะเล็ก แข็ง จนกระทั่ง เจ เจ ทอมสัน ค้นพบอิเล็กตรอนและได้เสนอว่า อะตอมประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุลบฝังอยู่ในเนื้อประจุบวก (คล้ายแตงโม)



ภาพที่ 19-1 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

19.1 แบบจำลองอะตอมของรัทเธอร์ฟอร์ด

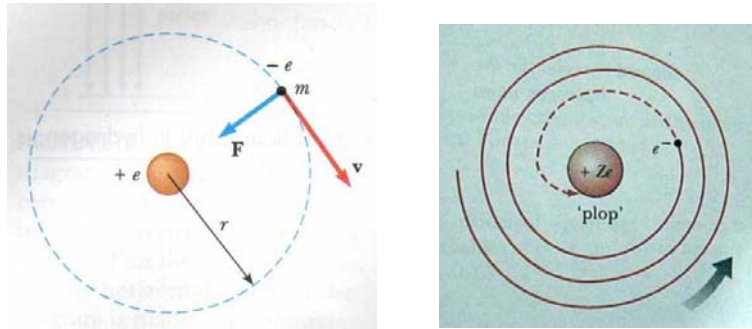
ในปี ค.ศ.1911 รัทเธอร์ฟอร์ดและนักศึกษาของเขา คือ โกลิเออร์ และ มาร์สเดน ทำการทดลองที่พิสูจน์ว่าโมเดลอะตอมของ ทอมสัน ไม่ถูกต้อง นำไปสู่การคิดโครงสร้างอะตอมแบบใหม่



ภาพที่ 19-2 การทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ด

การทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ดแสดงดังภาพที่ 19-2 คือ มีแหล่งกำเนิดรังสีอัลฟา ینگอนุภาคอัลฟาใส่แผ่นฟอยล์ ผลการทดลองพบว่า อนุภาคส่วนมากผ่านแผ่นฟอยล์ไปได้ โดยมีอนุภาคจำนวนน้อยมากที่สะท้อนกลับ

ผลการทดลองหมายความว่า อะตอมควรจะประกอบด้วยที่ว่างจำนวนมาก ต่างจากแบบจำลองของทอมสัน รัทเธอร์ฟอร์ด เสนอความคิดใหม่ว่าอะตอมน่าประกอบด้วย ส่วนของประจุบวกอัดแน่นอยู่ที่ใจกลางซึ่งกินที่ว่างน้อยมาก เรียกว่า **นิวเคลียส** และมีอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ



ภาพที่ 19-3 การโคจรของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสเป็นวงกลม จะเกิดการสูญเสียพลังงานไปเรื่อย ๆ ตามทฤษฎีคลาสสิก

อย่างไรก็ตาม มีสิ่งที่แบบจำลองนี้อธิบายไม่ได้ คือ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงกลมย่อมต้องมีความเร่ง และเมื่อมีความเร่ง อิเล็กตรอนจะต้องปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามทฤษฎีของ แมกซ์เวลล์ เป็นเหตุให้สูญเสียพลังงานไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง อิเล็กตรอนจะตกใส่นิวเคลียส เป็นจุดจบของอะตอม

19.2 แบบจำลองอะตอมของบอร์

นีล บอร์ เป็นคนแรกที่อธิบายว่าอิเล็กตรอนไม่แผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อโคจรรอบนิวเคลียส โดยเสนอว่า **อิเล็กตรอนสามารถโคจรแบบไม่ตกใส่นิวเคลียสได้ที่บางวงโคจร เป็นวงโคจรที่เสถียร ในกรณีที่มีการเปลี่ยนวงโคจรเท่านั้น จะมีการปล่อยพลังงานออกมา เป็นโฟตอน** (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นอนุภาค) ซึ่งเป็นที่มาของสเปกตรัมของธาตุต่าง ๆ สเปกตรัมของอะตอมนี้สามารถอธิบายได้อย่างดีโดยใช้แบบจำลองอะตอมของบอร์

เป็นที่ทราบกันก่อนยุคของบอร์ แล้วว่าเมื่อให้พลังงานกับสาร อะตอมแต่ละชนิดจะส่งเส้นแสงที่เป็นเอกลักษณ์ของอะตอมแต่ละชนิดออกมา เส้นแสงเหล่านี้เป็นชุดเรียกว่า **สเปกตรัม** ซึ่งจากการศึกษาโดยนักเคมีและนักฟิสิกส์ สรุปเป็นสมการที่ได้จากการทดลอง โดยเริ่มต้น ในปี 1885 บาล์มเมอร์ได้เสนอสูตรโดยประมวลจากข้อมูลการศึกษาสเปกตรัมไฮโดรเจน

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (19-1)$$

โดยที่ $n = 3, 4, 5, \dots$ และ $R_H = 1.0973732 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ (ค่าคงที่ของริดจ์เบิร์ก)

ภายหลังสูตรของบาล์มเมอร์ มีการเสนอสูตรของชุดสเปกตรัมอื่น ๆ

- ชุดของไลมาน

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (19-2)$$

- ชุดของพาสเชน

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (19-3)$$

- ชุดของแบร์เก็ทต์

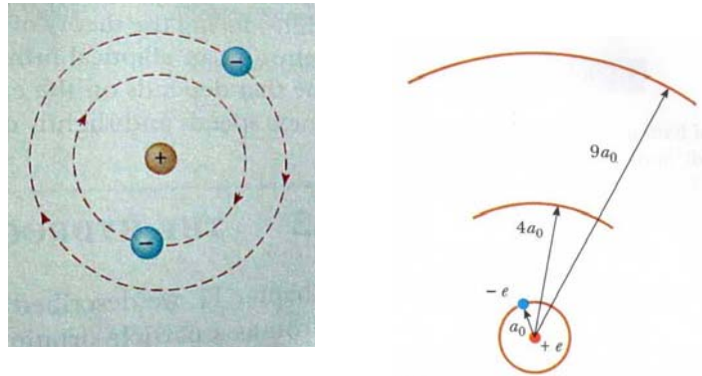
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (19-4)$$

บอร์ได้ใช้ทฤษฎีควอนตัมในการอธิบายสเปกตรัมที่เกิดจากอะตอมของไฮโดรเจน สมมติฐานของบอร์ คือ **อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงรอบโปรตรอน โดยมีเพียงบางวงโคจรเท่านั้นที่จะเสถียร พลังงานแต่ละระดับ (E_n) และรัศมีวงโคจร (r_n) มีค่า**

$$E_n = -\frac{k_e e^2}{2a_0} \frac{1}{n^2} \tag{19-5}$$

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{m k_e e^2} \tag{19-6}$$

โดยที่ $n = 1, 2, 3, \dots$ เมื่อ $n = 1$ วงโคจรมีขนาดเล็กที่สุด เรียกว่า รัศมีของบอร์ (Bohr Radius, a_0) มีค่า 0.0529 nm

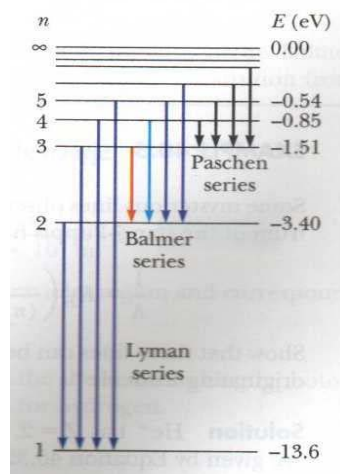


ภาพที่ 19-4 แบบจำลองอะตอมของบอร์ มีอิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรบางวงที่เสถียร

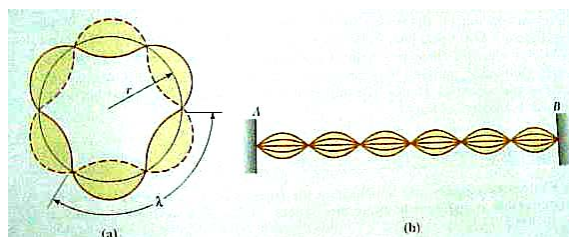
การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระโดด เปลี่ยนวงโคจรสู่ที่ระดับต่ำกว่า $E_i - E_f = hf$ (ความต่างระหว่างพลังงานสถานะต้นกับสถานะปลาย) สเปกตรัมที่เกิดขึ้นทุกชุดสามารถทำนายได้ด้วย สูตรจากแบบจำลองอะตอมของบอร์ ซึ่งสอดคล้องกับสูตรจากการทดลองทุกสูตรข้างต้น

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{k_e e^2}{2a_0 hc} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \tag{19-7}$$

โดยที่ $k_e e^2 / 2a_0 hc$ มีค่าเท่ากับ ค่าคงที่ของริดจ์เบิร์กที่ได้จากการทดลอง ($R_H = 1.0973732 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$)



ภาพที่ 19-5 สเปกตรัมชุดต่าง ๆ ของอะตอมไฮโดรเจน



ภาพที่ 19-6 คลื่นนิ่งของอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับคลื่นนิ่งในเส้นเชือก

ข้อบกพร่องของแบบจำลองอะตอมของบอร์คือ เขาตอบไม่ได้ว่าเหตุใดจึงมีบางวงโคจรที่เสถียร? จนกระทั่งเดอบรอยล์ ได้เสนอความคิดว่าอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสในแบบจำลองอะตอมของบอร์ มีพฤติกรรมเป็นคลื่นนิ่งที่มีความถี่ไม่ต่อเนื่อง (ดังกรณีคลื่นนิ่งในเส้นเชือก) คลื่นนิ่งของอิเล็กตรอน (เป็นวงปิดพอดี) จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$n\lambda = 2\pi r$$

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$
(19-8)

แทนค่าความยาวคลื่นอนุภาคตามที่เสนอโดยเดอบรอยล์

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$
(19-9)

เงื่อนไขนี้เป็นกรณีของวงโคจรที่เสถียร นั่นคือโมเมนตัมเชิงมุมในแบบจำลองของบอร์มีค่าไม่ต่อเนื่อง

แบบจำลองอะตอมของบอร์นี้อธิบายอะตอมได้ดีกว่ารัทเธอร์ฟอร์ด และสามารถอธิบายสเปกตรัมของอะตอมได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การใช้ทฤษฎีควอนตัมยังอธิบายสเปกตรัมของ X-ray ได้ด้วย

ในทฤษฎีควอนตัม อิเล็กตรอนเป็นคลื่นอนุภาค ดังนั้นแบบจำลองที่ใกล้เคียงความจริงที่สุด จะได้มาจากการแก้สมการชโรดิงเงอร์ เพื่ออธิบายอิเล็กตรอนในอะตอม การแก้สมการชโรดิงเงอร์ของอะตอมของไฮโดรเจนเป็นกรณีที่ยากที่สุด ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

19.3 ฟังก์ชันคลื่นและเลขควอนตัมของอิเล็กตรอนในอะตอม

การแก้สมการชโรดิงเงอร์ใน 3 มิติ จะระบุสถานะของอิเล็กตรอนในไฮโดรเจนอะตอม

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0$$
(19-10)

จากโมเดลอะตอมของรัทเธอร์ฟอร์ด สามารถเขียนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กตรอนได้ดังนี้

$$U(r) = -\frac{ke^2}{r}$$
(19-11)

และ Laplacian ใน Polar Coordinate จะมีรูปแบบเป็น

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$$
(19-12)

คำตอบของสมการนี้สามารถพิจารณาแยกออกมาได้เป็น 3 ส่วน คือ

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r) \cdot \Theta(\theta) \cdot \Phi(\phi)$$
(19-13)

โดยที่ $R(r)$ ส่วนของฟังก์ชันที่ขึ้นกับ r , $\Theta(\theta)$ ส่วนของฟังก์ชันที่ขึ้นกับ θ , $\Phi(\phi)$ ส่วนของฟังก์ชันที่ขึ้นกับ ϕ

แยกสมการเพื่อแก้หาคำตอบที่ละฟังก์ชัน

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR(r)}{dr} \right) + \left[\frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{Ke^2}{r} \right) - \frac{l(l+1)}{r^2} \right] R = 0$$
(19-14)

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} \right] \Theta = 0$$
(19-15)

$$\frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + m^2 \Phi = 0$$
(19-16)

ผลจากการแก้สมการ นำไปสู่เลขควอนตัม 3 ตัว ซึ่งเป็นตัวกำหนดสถานะของอิเล็กตรอนในอะตอม ดังต่อไปนี้

19.3.1 เลขควอนตัม

- Principal Quantum Number (n โดยที่ n มีได้จำนวนอนันต์ค่าที่ไม่ต่อเนื่องกัน: $n=1,2,3,4,\dots, \infty$) เลขควอนตัม n เป็นตัวกำหนดระดับพลังงานหลักของอะตอมนี้ ตามสมการที่สอดคล้องกับทฤษฎีของบอร์

$$E_n = -\left(\frac{ke^2}{2a_0}\right)\frac{1}{n^2} \text{ (unit in J)} \quad \text{หรือ} \quad E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ (unit in eV)} \quad (19-17)$$

โดยที่ $n=1,2,3,\dots$ สอดคล้องกับระดับพลังงานชั้น K,L,M,... ตามลำดับ

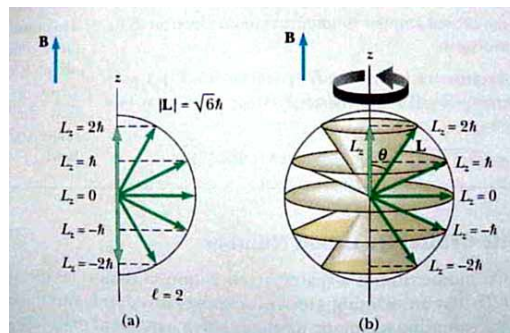
- Orbital Quantum Number (l โดยที่ l มีได้จำนวน n ค่าที่ไม่ต่อเนื่องกัน: $l=0,1,2,3,\dots,n-1$) เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นวงโคจร (Orbit) รอบ ๆ นิวเคลียส เลขควอนตัม l เป็นตัวกำหนดโมเมนตัมเชิงมุมของการโคจร (Orbital Angular Momentum)

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (19-18)$$

โดยที่ $l=0,1,2,3,\dots$ เรียกว่าออร์บิทัล s,p,d,f,... ตามลำดับ

- Orbital Magnetic Quantum Number (m_l โดยที่ m_l มีได้จำนวน $2l+1$ ค่าที่ไม่ต่อเนื่องกัน: $m_l = -l, -l+1, \dots, 0, \dots, l-1, l$) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการที่อะตอมอยู่ในสนามแม่เหล็ก แล้วโมเมนตัมเชิงมุมจะควรรอบแกนสนามแม่เหล็ก (มักกำหนดเป็นแกน Z) เลขควอนตัม m_l เป็นตัวกำหนดโมเมนตัมเชิงมุมในแนวแกน Z (L_z)

$$L_z = m_l \hbar \quad (19-19)$$



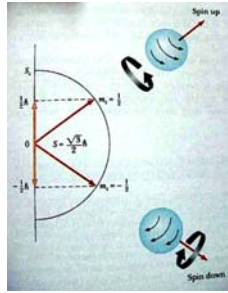
ภาพที่ 19-7 กรณีเลขควอนตัม l เป็น 2 การควรรอบสนามแม่เหล็กเกิดได้ 5 กรณี เลขควอนตัม m_l มีได้ 5 ค่า

นอกจากเลขควอนตัมทั้งสามที่เป็นผลจากการแก้สมการชโรดิงเงอร์แล้ว การค้นพบว่าอนุภาค เช่นอิเล็กตรอน นอกจากจะมีประจุแล้ว ยังมีสมบัติที่เรียกว่า สปิน (ประจุ เป็นต้นกำเนิดของไฟฟ้า, สปิน เป็นต้นกำเนิดของแม่เหล็ก) อีกด้วยจากการทดลองพบว่าสเปกตรัมของสารโซเดียม มีเส้นที่มีลักษณะเป็น doublet (คือเส้นหนึ่งประกอบด้วย 2 เส้นที่อยู่ชิดกันมาก) ส่งผลให้เลขควอนตัมสามตัวข้างต้นไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์นี้จึงได้มีการเสนอเลขควอนตัมตัวที่สี่ ในการบรรยายอิเล็กตรอนในอะตอมต้องใช้เลขควอนตัมสี่ตัว จึงระบุสถานะได้อย่างสมบูรณ์

- Spin Magnetic Quantum Number (m_s โดยที่ m_s มีได้ 2 ค่าที่ไม่ต่อเนื่องกัน: $m_s = -1/2$ หรือ $1/2$) เกี่ยวข้องกับโมเมนตัมเชิงมุมของการสปิน (Spin Angular Momentum)

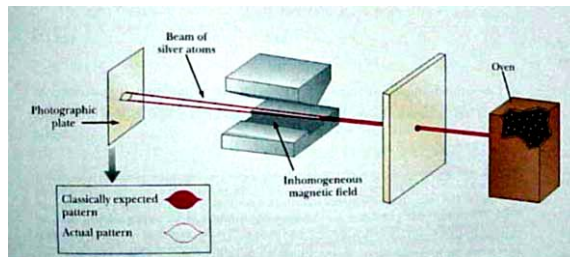
$$S_z = m_s \hbar \quad (19-20)$$

โดยที่ $m_s = 1/2$ และ $-1/2$ สอดคล้องกับสปินอัพ และสปินดาวน์ ตามลำดับ



ภาพที่ 19-8 สถานะการสปินมีได้ 2 กรณีคือ อัฟ และดาวน์ เลขควอนตัม m_s มีได้ 2 ค่า

สปินเป็นสมบัติทางควอนตัมที่เกิดจากคุณสมบัติเชิงสัมพัทธภาพของอนุภาค ไม่สามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน แต่อาจเปรียบเทียบได้คร่าว ๆ กับการหมุนรอบตัวเองที่ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กการมีอยู่จริงของสปินได้รับการพิสูจน์ยืนยันโดยการทดลองของสเติร์นและเจอร์ช (ค.ศ. 1921) ที่ทำการยิงอะตอมของเงินในสภาวะก๊าซ ผ่านสนามแม่เหล็ก และพบว่าลักษณะอะตอมที่ชนฉากรับจะแยกเป็นแถบบนและล่าง (ไม่ได้เป็นปื้น) นั่นคือสนามแม่เหล็กช่วยให้สามารถสังเกตได้ว่าอนุภาคมีสมบัติเรียกว่าสปินที่มี 2 สถานะ นั่นคือ สปินอัฟ และสปินดาวน์



ภาพที่ 19-9 การทดลองของสเติร์นและเจอร์ช

จากความรู้เรื่อง ฟังก์ชันคลื่นและเลขควอนตัมของอิเล็กตรอนในอะตอม ทำให้สามารถบรรยายสถานะของอะตอมได้ใกล้เคียงความจริงที่สุด ดังเช่นอะตอมไฮโดรเจนในตัวอย่างต่อไปนี้

19.3.2 ฟังก์ชันคลื่นของอะตอมไฮโดรเจน (The Wave Functions for Hydrogen Atom)

อะตอมไฮโดรเจนประกอบด้วยอิเล็กตรอน 1 ตัวที่อาจอยู่ในสถานะต่าง ๆ ได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับเลขควอนตัมทั้งสิ้น ในสภาวะปกติอิเล็กตรอนจะอยู่ที่สถานะพื้น (Ground State) ซึ่งหมายถึง Orbital 1s

- Orbital 1s ในระดับพลังงานนี้ $n = 1$, l และ m_l มีค่าเป็น 0

จากการแก้สมการชโรดิงเจอร์ ฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) อยู่ในรูป

$$\psi_{1s}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0} \quad (19-21)$$

เมื่อทำการสร้างกราฟใน 3 มิติจะได้เป็นทรงกลม ดังแสดงในภาพที่ 19-11 (a)

เมื่ออะตอมไฮโดรเจนได้รับพลังงาน อิเล็กตรอนสามารถอยู่ในสถานะอื่นได้ (เรียกว่าสถานะกระตุ้น) ซึ่งสอดคล้องกับออร์บิทัลอื่น ๆ เช่น 2p, 3s, 3p, 3d, 4s...

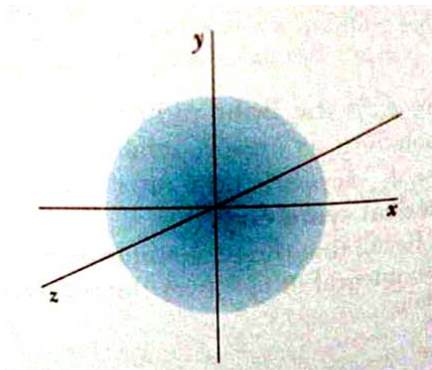
- Orbital 2p คือสถานะที่ระดับ n เป็น 2 และ $l = 1$ สำหรับค่า $l = 1$ ค่า m_l มีได้ 3 ค่าคือ +1, 0, -1

จากการแก้สมการชโรดิงเจอร์ ฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) อยู่ในรูป

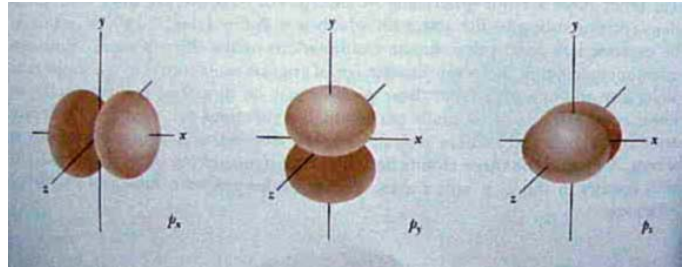
$$\psi_{2p} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \cos \theta \quad (19-22)$$

$$\Psi_{2p} = \frac{1}{8\sqrt{\pi}a_0^3} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \sin \theta e^{\pm i\phi} \quad (19-23)$$

เมื่อทำการสร้างกราฟใน 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 19-10 (b)



(a)



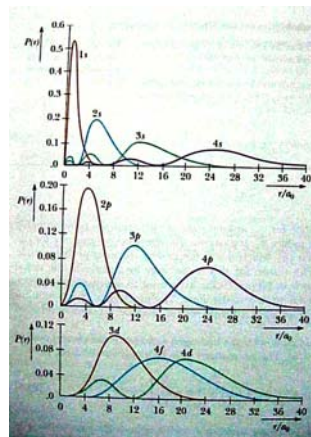
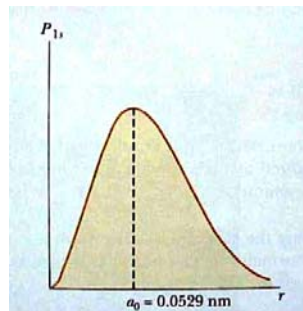
(b)

ภาพที่ 19-10 ตัวอย่างกราฟของออร์บิทัล (a) 1s และ (b) 2p

ค่าความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอน ซึ่งแปรตาม r (ระยะจากนิวเคลียส)

$$\begin{aligned} P_{1s}(r)dr &= \iint rd\theta \cdot r \sin \theta d\phi \cdot \\ &[\psi_1(r, \theta, \phi)]^* [\psi_1(r, \theta, \phi)] \\ &= r^2 |R^2| dr \end{aligned} \quad (19-24)$$

จากสมการ เขียนกราฟกรณีออร์บิทัลต่าง ๆ ได้ดังแสดงในภาพที่ 19-11

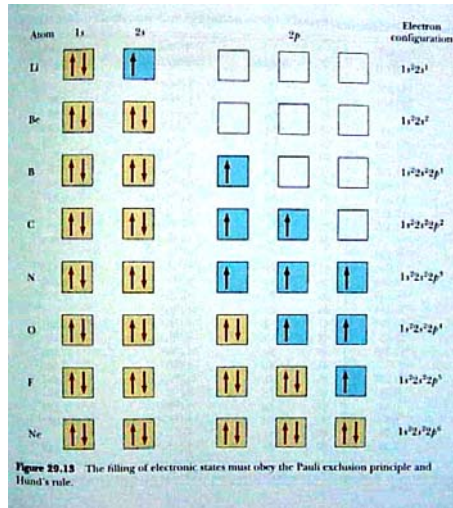


ภาพที่ 19-11 ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนที่ระยะต่าง ๆ จากศูนย์กลางอะตอม

19.4 หลักการกีดกันของเพาลี (The Exclusion Principle)

หลักการกีดกันกล่าวว่า อิเล็กตรอนสองตัวใด ๆ จะมีเลขควอนตัมทั้งสี่เหมือนกันทั้งหมดไม่ได้ (หรือกล่าวว่า ในอะตอม ณ สถานะทางควอนตัมหนึ่ง ๆ จะมีอิเล็กตรอนเกินหนึ่งตัวไม่ได้) ใช้อธิบายการจัดอิเล็กตรอนในอะตอม

ในออร์บิทัลใด ๆ ของอะตอม จะมีอิเล็กตรอนได้สูงสุด 2 ตัว อิเล็กตรอน 2 ตัวนี้จะมีเลขควอนตัม n, l, m_l เหมือนกัน ดังนั้นตามหลักกีดกัน อิเล็กตรอน 2 ตัวนี้ จะมีเลขควอนตัมตัวที่สี่คือ m_s ต่างกัน นั่นคือ ตัวหนึ่งจะมีสปินอัพ ($m_s = 1/2$) ส่วนอีกตัวหนึ่งจะมีสปินดาวน์ ($m_s = -1/2$)



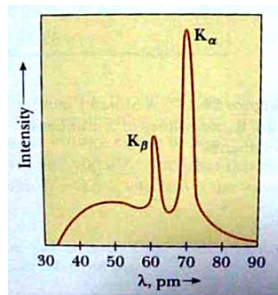
ภาพที่ 19-12 ตัวอย่างการเรียงอิเล็กตรอนในแผนภาพออร์บิทัล

TABLE 29.3 Allowed Quantum Numbers for an Atom up to $n = 3$

| n | 1 | | 2 | | | 3 | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| l | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | | |
| m_l | 0 | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | -1 | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 |
| m_s | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ |

ภาพที่ 19-13 ตัวอย่างการระบุเลขควอนตัม

19.5 เอ็กซ์เรย์ (X-ray)



ภาพที่ 19-14 ตัวอย่างสเปกตรัมของ X-ray

X-ray กำเนิดได้จากการระดมยิงอิเล็กตรอนพลังงานสูงเข้าไปที่เป้าโลหะ X-ray ที่ได้จะเป็นสเปกตรัมที่มีลักษณะดังภาพที่ 19-14 สามารถแยกได้เป็น 2 องค์ประกอบ คือ ส่วนที่เป็นพีค (Peak) และส่วนที่ต่อเนื่อง

- **ส่วนที่ต่อเนื่องของสเปกตรัม** ได้มาจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร่งเป็นลบ (ความเร็วลดลง) จึงมีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เรียกกระบวนการนี้ว่า Bremsstrahlung Radiation (หรือ Braking Radiation)
- **พีคของสเปกตรัม** เกิดขึ้นโดยอีกกระบวนการหนึ่ง เรียก X-ray ชนิดนี้ว่า Characteristic X-ray ซึ่งถูกค้นพบในปี 1908 ซึ่งพีคเหล่านี้ขึ้นกับชนิดของโลหะที่ใช้

การเกิด Characteristic X-ray สามารถอธิบายได้ภายหลังการพัฒนาทฤษฎีควอนตัม ว่า Characteristic X-ray เกิดจากกระบวนการ

1. อิเล็กตรอน (หรืออนุภาคประจุอื่น ๆ) ที่มีพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิเล็กตรอนในวงชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L

2. เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากการชนเกินพลังงานยึดเหนี่ยว จะหลุดออกจากอะตอมทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นใน
3. อิเล็กตรอนที่อยู่ในลำดับถัดไปจะลดระดับพลังงานลงมาแทนที่พร้อมกับปล่อยโฟตอนออกมา โดยพลังงานของโฟตอนจะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง

Characteristic X-ray แต่ละพีค จะมีชื่อตามระดับพลังงานที่เกี่ยวข้อง เช่น K alpha คือการกระโดดจากชั้น L, K beta คือการกระโดดจากชั้น M

19.6 เลเซอร์

LASER มาจากคำว่า Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation คุณลักษณะของเลเซอร์ คือ

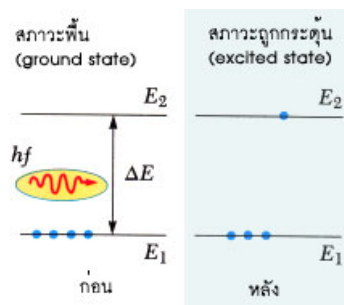
- เป็นแสงเอกกรงค์ (Monochromatic) มีความถี่เดียว สีเดียว
- เป็นแสงอาพันธ์ (Coherent) มีเฟสตรงกัน
- สามารถโฟกัสให้เป็นลำแสงขนาดเล็กมาก ลำแสงไม่บานออกเหมือนแสงทั่วไป

การที่เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์และมีลำแสงขนาดเล็ก จึงให้ความเข้มสูง สามารถประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้มากมาย เลเซอร์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม โดยกระบวนการ Stimulated Emission

19.6.1 กระบวนการดูดและคายพลังงาน

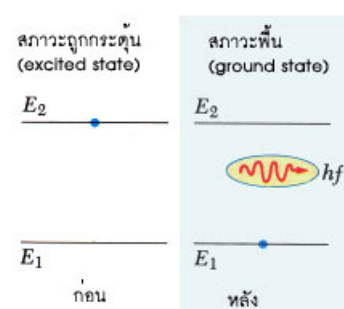
จากทฤษฎีควอนตัม เมื่ออะตอมดูดกลืนหรือคายพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอนุภาคโฟตอน อิเล็กตรอนในอะตอมจะมีการเปลี่ยนระดับพลังงาน กระบวนการดูดและคายพลังงาน มีได้หลายกรณีดังนี้

- **Stimulated Absorption** เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมดูดกลืนพลังงาน hf อิเล็กตรอนจากสถานะพื้นขึ้นไปอยู่ที่สถานะถูกกระตุ้น



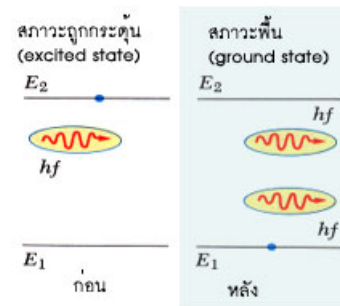
ภาพที่ 19-15 กระบวนการ Stimulated Absorption

- **Spontaneous Emission** อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ต้องกลับคืนสู่สถานะพื้น โดยการคายโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง



ภาพที่ 19-16 กระบวนการ Spontaneous Emission

- **Stimulated Emission** เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น แล้วมีโฟตอนภายนอกมากระตุ้นเข้า อิเล็กตรอนสามารถคายโฟตอนแล้วกลับสู่สถานะพื้น ได้โฟตอนเพิ่มขึ้นเป็นแสงอาพันธ์

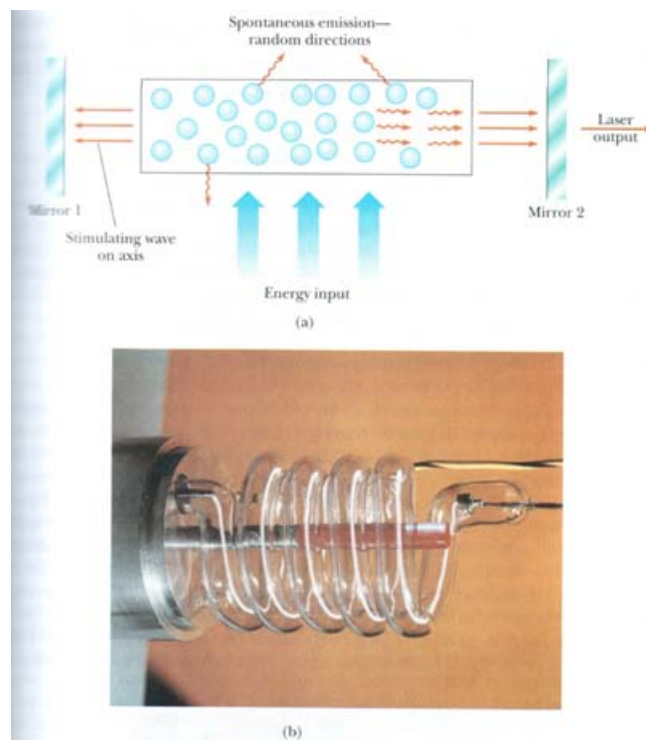


ภาพที่ 19-17 กระบวนการ Stimulated Emission

19.6.2 กระบวนการกำเนิดเลเซอร์

เลเซอร์มีหลายชนิด อาจจำแนกได้ตามชนิดของสารตัวกลางที่ใช้ผลิตเลเซอร์

- ตัวกลางของแข็ง เช่น Ruby laser, Nd-YAG laser, Diode laser
- ตัวกลางของเหลว เช่น Dye laser
- ตัวกลางก๊าซ เช่น He-Ne laser, CO_2 laser, Excimer laser, Argon laser



ภาพที่ 19-18 (a) แผนภาพกลไกกำเนิดเลเซอร์ในหลอด (b) ตัวอย่างหลอดเลเซอร์

เลเซอร์ทุกชนิดมีหลักการกำเนิดเหมือนกัน คือ

1. อะตอมของตัวกลาง ที่ใช้กำเนิดเลเซอร์ได้รับการกระตุ้นให้อยู่ในสภาวะประชากรผกผัน (Population Inversion) นั่นคือ มีอิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นมากกว่าที่อยู่ในสถานะพื้น และสถานะถูกกระตุ้นนี้จะต้องกึ่งเสถียร (Metastable) คือ อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้นานกว่าสถานะถูกกระตุ้นทั่ว ๆ ไป (เป็นเหตุให้มีตัวกลางบางชนิดเท่านั้นที่เหมาะสมในการใช้กำเนิดเลเซอร์)

2. เกิด Stimulated Emission โดยโฟตอนภายนอกเข้ามากระตุ้น อิเล็กตรอนจำนวนมากกลับสู่สถานะพื้นพร้อม ๆ กัน โฟตอนที่คายออกมาทำให้ได้แสงอาพันธ์ที่มีความเข้มสูง
3. เพื่อให้โฟตอนกลับไปทำให้เกิด Stimulated Emission ซ้ำ ๆ ต่อเนื่องกันไป ในการออกแบบหลอดเลเซอร์จึงใช้กระจกสะท้อนที่ปลายทั้งสองข้างของตัวกลางเลเซอร์ ด้านหนึ่งจะสะท้อนแสงทั้งหมด อีกด้านหนึ่งจะสะท้อนแสงกลับบางส่วน และยอมให้ผ่านได้บางส่วน ส่วนที่สะท้อนกลับจะเป็นโฟตอนที่ทำให้เกิด Stimulated Emission ต่อไป ส่วนที่ผ่านออกไปได้จะเป็นแสงที่นำไปใช้ประโยชน์

19.6.3 การประยุกต์ใช้เลเซอร์

- การบันทึกและอ่านข้อมูล เช่น เครื่องเล่น CD, VCD, DVD, เครื่องอ่านบาร์โค้ด เลเซอร์ที่ใช้คือ Diode laser
- การส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง และช่วงความถี่กว้าง ผ่านเส้นใยแก้วนำแสง เลเซอร์ที่ใช้คือ Diode laser
- การผ่าตัดทางการแพทย์ และการศัลยกรรมความงาม เช่น เลสิก, ตัดหูด, จี้ไฟ, กำจัดขนถาวร, กรีดตาสองชั้น, อุดฟัน เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ Nd-YAG laser, CO₂ laser, Excimer laser, Argon laser
- งานอุตสาหกรรม เช่น เชื่อม เจาะ ตัด ให้ความร้อน เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ Nd-YAG laser, CO₂ laser
- การทหาร เช่น อุปกรณ์วัดระยะทาง เล็งเป้าหมาย นำวิถีขีปนาวุธ เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ CO₂ laser, Nd-YAG laser
- การสำรวจ ตรวจสอบวัด และตรวจสอบสิ่งแวดล้อม เช่น การกำหนดตำแหน่ง ซึ่จุด ตรวจสอบมลภาวะในอากาศ วัดความลึก วัดระยะ วัดความเร็ว เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ Nd-YAG laser
- งานบันเทิงและศิลปะ เช่น ฉายแสงในงานแสดงแสงเสียง คอนเสิร์ต สถานบันเทิง ทำไฮโลแกรมวาดภาพแกะสลัก เลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ He-Ne laser, Argon laser

| 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 | |

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

