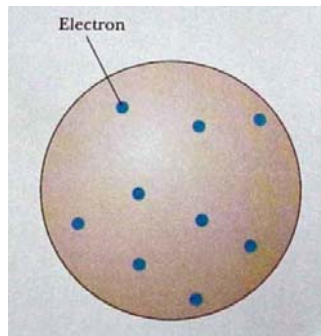


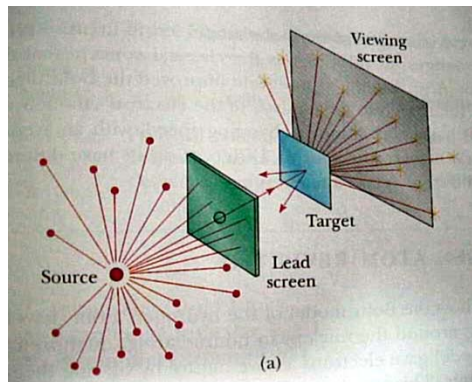
อะตอมคือ หน่วยที่เล็กที่สุดของสสารที่ยังคงสภาพความเป็นสสารอยู่ได้ แนวความคิดของอะตอมในสมัยนิวตัน คือ อะตอมเป็นหน่วยเล็กที่สุดที่ไม่สามารถแบ่งได้ มีลักษณะเล็ก แข็ง จนกระทั่ง เจ เจ ทอมสัน ค้นพบอิเล็กตรอนและได้เสนอว่า อะตอมประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุลบฝังอยู่ในเนื้อประจุบวก (คล้ายแตงโม)



ภาพที่ 19-1 แบบจำลองอะตอมของทอมสัน

19.1 แบบจำลองอะตอมของรัทเธอร์ฟอร์ด

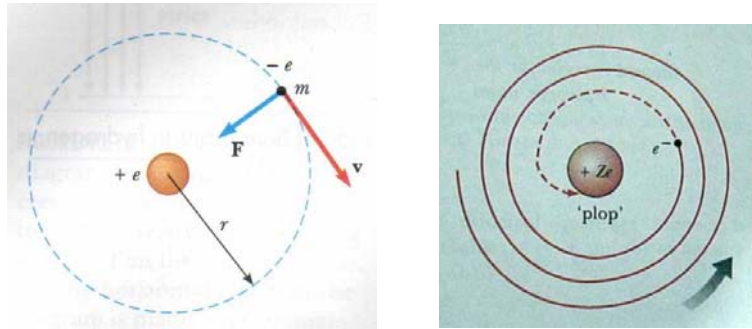
ในปี ค.ศ.1911 รัทเธอร์ฟอร์ดและนักศึกษาของเขา คือ โกลิเยอร์ และ มาร์สเดน ทำการทดลองที่พิสูจน์ว่าโมเดลอะตอมของ ทอมสัน ไม่ถูกต้อง นำไปสู่การคิดโครงสร้างอะตอมแบบใหม่



ภาพที่ 19-2 การทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ด

การทดลองของรัทเธอร์ฟอร์ดแสดงดังภาพที่ 19-2 คือ มีแหล่งกำเนิดรังสีอัลฟา ยิงอนุภาคอัลฟาใส่แผ่นฟอยล์ 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

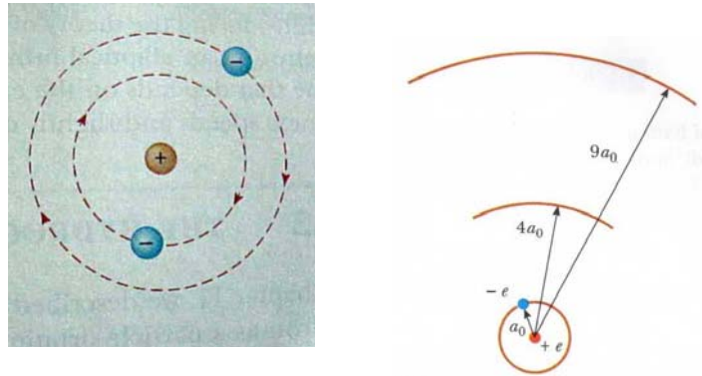
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (19-4)$$

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

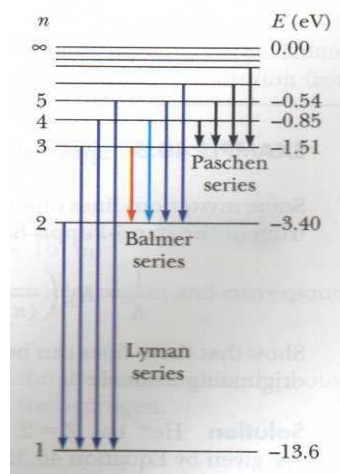


ภาพที่ 19-4 แบบจำลองอะตอมของบอร์ มีอิเล็กตรอนอยู่ในวงโคจรบางวงที่เสถียร

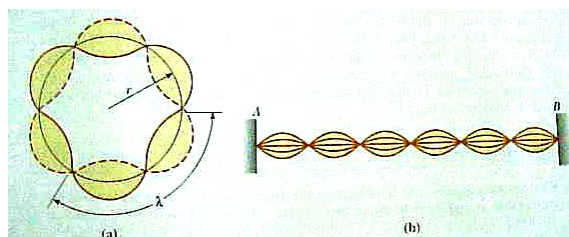
การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนกระโดด เปลี่ยนวงโคจรสู่ที่ระดับต่ำกว่า $E_i - E_f = hf$ (ความต่างระหว่างพลังงานสถานะต้นกับสถานะปลาย) สเปกตรัมที่เกิดขึ้นทุกชุดสามารถทำนายได้ด้วย สูตรจากแบบจำลองอะตอมของบอร์ ซึ่งสอดคล้องกับสูตรจากการทดลองทุกสูตรข้างต้น

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

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

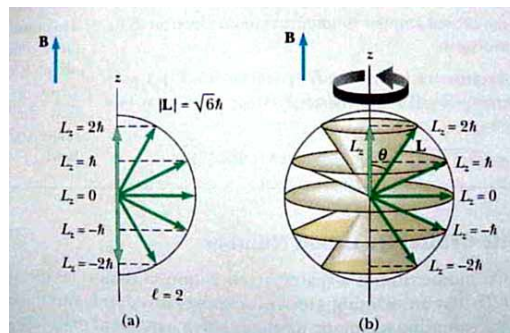
- Orbital Quantum Number (l โดยที่ l มีได้จำนวน n ค่าที่ไม่ต่อเนื่องกัน: $l=0,1,2,3,\dots,n-1$) เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นวงโคจร (Orbit) รอบ ๆ นิวเคลียส เลขควอนตัม l เป็นตัวกำหนดโมเมนตัมเชิงมุมของการโคจร (Orbital Angular Momentum)

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

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)

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



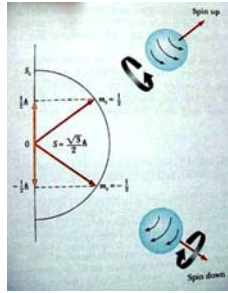
ภาพที่ 19-7 กรณีเลขควอนตัม l เป็น 2 การควรรอบสนามแม่เหล็กเกิดได้ 5 กรณี เลขควอนตัม m_l มีได้ 5 ค่า

นอกจากเลขควอนตัมทั้งสามที่เป็นผลจากการแก้สมการชโรดิงเงอร์แล้ว การค้นพบว่าอนุภาค เช่นอิเล็กตรอน นอกจากจะมีประจุแล้ว ยังมีสมบัติที่เรียกว่า สปิน (ประจุ เป็นต้นกำเนิดของไฟฟ้า, สปิน เป็นต้นกำเนิดของแม่เหล็ก) อีกด้วย จากการทดลองพบว่าสเปกตรัมของสารโซเดียม 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)

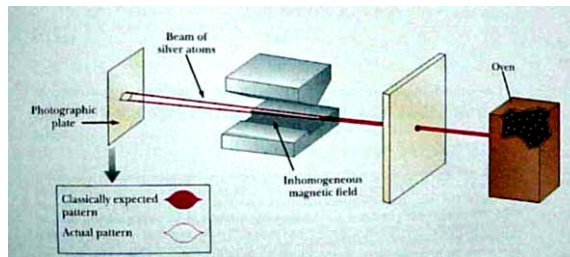
$$S_z = m_s \hbar \quad (19-20)$$

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 กับการหมุนรอบตัวเองที่ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กการมีอยู่จริงของสปินได้รับการพิสูจน์ยืนยันโดยการทดลองของสเติร์นและเจอร์ลาร์ช (ค.ศ. 1921) ที่ทำการยิงอะตอมของเงินในสภาวะก๊าซ ผ่านสนามแม่เหล็ก และพบว่าลักษณะอะตอมที่ชนฉากรับจะแยกเป็นแถบบนและล่าง (ไม่ได้เป็นปื้น) นั่นคือสนามแม่เหล็กช่วยให้สามารถสังเกตได้ว่าอนุภาคมีสมบัติเรียกว่าสปินที่มี 2 สถานะ นั่นคือ สปินอัฟ และสปินดาวน์



ภาพที่ 19-9 การทดลองของสเติร์นและเจอร์ลาร์ช

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

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

เมื่อทำการสร้างกราฟใน 3 มิติจะได้เป็นทรงกลม ดังแสดงในภาพที่ 19-11 (a)

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

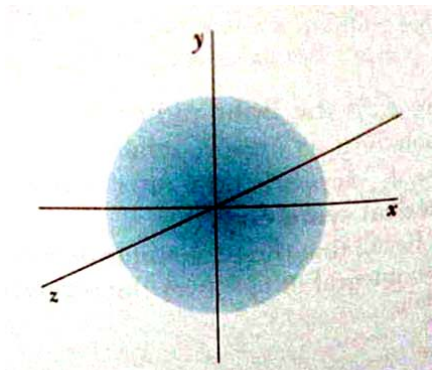
- Orbital 2p คือสถานะที่ระดับ n เป็น 2 และ $l=1$ สำหรับค่า $l=1$ ค่า m_l มีได้ 3 ค่าคือ +1, 0, -1

จากการแก้สมการชโรดิงเจอร์ ฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) อยู่ในรูป

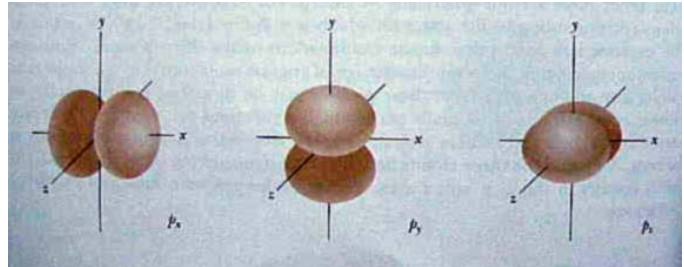
$$\psi_{2p} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \cos \theta \tag{19-22}$$

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

เมื่อทำการสร้างกราฟใน 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 19-10 (b)



(a)



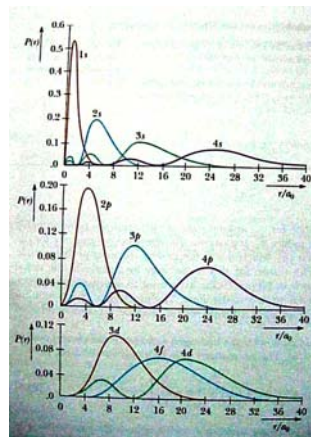
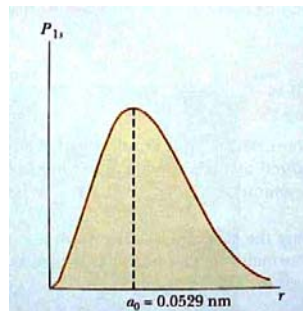
(b)

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

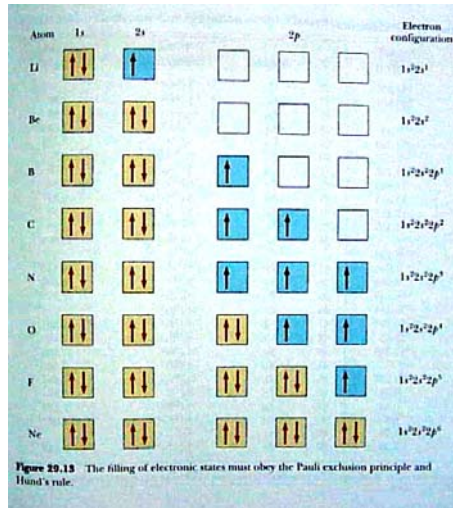


ภาพที่ 19-11 ความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนที่ระยะต่าง ๆ จากศูนย์กลางอะตอม

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 ($m_s = -1/2$)



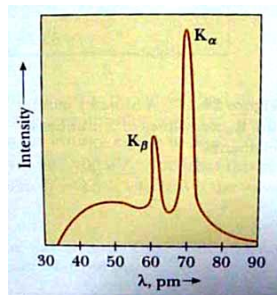
ภาพที่ 19-12 ตัวอย่างการเรียงอิเล็กตรอนในแผนภาพออร์บิทัล

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	-1	-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

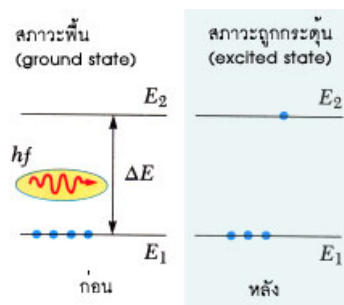
- เป็นแสงเอกกรงค์ (Monochromatic) มีความถี่เดียว สีเดียว
- เป็นแสงอาพันธ์ (Coherent) มีเฟสตรงกัน
- สามารถโฟกัสให้เป็นลำแสงขนาดเล็กมาก ลำแสงไม่บานออกเหมือนแสงทั่วไป

การที่เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์และมีลำแสงขนาดเล็ก จึงให้ความเข้มสูง สามารถประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้มากมาย เลเซอร์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอม โดยกระบวนการ Stimulated Emission

19.6.1 กระบวนการดูดและคายพลังงาน

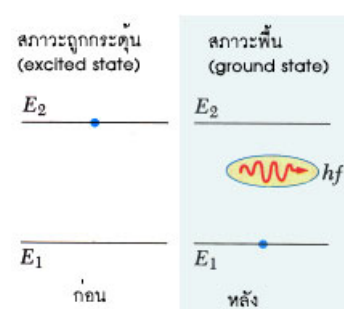
จากทฤษฎีควอนตัม เมื่ออะตอมดูดกลืนหรือคายพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นอนุภาคโฟตอน อิเล็กตรอนในอะตอมจะมีการเปลี่ยนระดับพลังงาน กระบวนการดูดและคายพลังงาน มีได้หลายกรณีดังนี้

- **Stimulated Absorption** เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมดูดกลืนพลังงาน hf อิเล็กตรอนจากสถานะพื้นขึ้นไปอยู่ที่สถานะถูกกระตุ้น



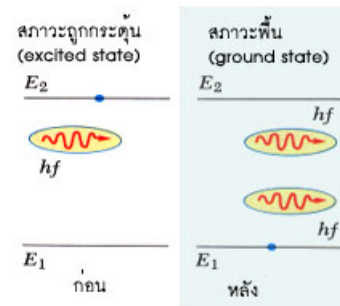
ภาพที่ 19-15 กระบวนการ Stimulated Absorption

- **Spontaneous Emission** อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ต้องกลับคืนสู่สถานะพื้น โดยการคายโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสอง



ภาพที่ 19-16 กระบวนการ Spontaneous Emission

- **Stimulated Emission** เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น แล้วมีโฟตอนภายนอกมากระตุ้นเข้า อิเล็กตรอนสามารถคายโฟตอนแล้วกลับสู่สถานะพื้น ได้โฟตอนเพิ่มขึ้นเป็นแสงอาพันธ์

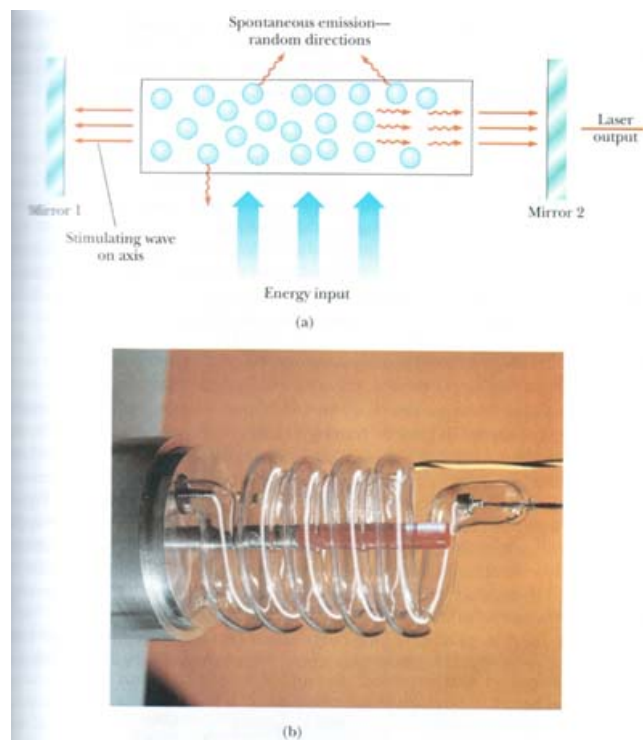


ภาพที่ 19-17 กระบวนการ Stimulated Emission

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	

