

# ทบทวนความรู้ฟิสิกส์ สำหรับเตรียมความพร้อมในการเรียนวิชา อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

สรุปจาก Sears & Zemansky's University Physics, Young and Freedman, 12th Edition, 2006

## ภาค ฟิสิกส์ยุคใหม่ (Modern Physics)

บทที่ 37 สัมพัทธภาพ (Relativity)

บทที่ 38 โฟตอน อิเล็กตรอน และ อะตอม (Photons, Electrons, and Atoms)

บทที่ 39 ความเป็นคลื่นของอนุภาค (The Wave Nature of Particles)

บทที่ 40 กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics)

บทที่ 41 โครงสร้างอะตอม (Atomic Structure)

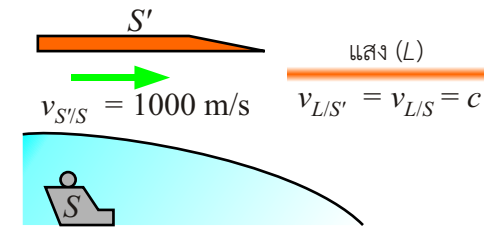
บทที่ 42 โมเลกุล และ สสารควบแน่น (Molecules and Condensed Matter)

บทที่ 43 ฟิสิกส์นิวเคลียร์ (Nuclear Physics)

บทที่ 44 ฟิสิกส์อนุภาค และ จักรวาลวิทยา (Particle Physics and Cosmology)

## บทที่ 37 สัมพัทธภาพ (Relativity)

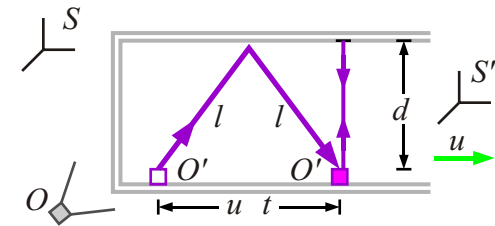
**ความไม่แปรเปลี่ยนของกฎทางฟิสิกส์ และ ความเป็นเวลาเดียวกัน:** กฎพื้นฐานทางฟิสิกส์มีรูปแบบเดียวกันบนทุกกรอบอ้างอิงเฉื่อย ความเร็วแสงในสุญญากาศจะมีค่าคงที่ในทุกกรอบเฉื่อย และไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของแหล่งกำเนิด ความเป็นเวลาเดียวกันไม่ใช่แนวคิดที่สมบูรณ์ เหตุการณ์หนึ่งที่เกิดขึ้นที่เวลาเดียวกันบนกรอบอ้างอิงหนึ่ง ไม่จำเป็นต้องเกิดที่เวลาเดียวกันในอีกกรอบอ้างอิงหนึ่งที่เคลื่อนที่อยู่เมื่อเทียบกับกรอบแรก



**การขยายตัวของเวลา:** ถ้าสองเหตุการณ์เกิดขึ้นที่จุดเดียวกันในอวกาศ ในกรอบอ้างอิงหนึ่ง ช่วงเวลา  $t_0$  ระหว่างเหตุการณ์สองเหตุการณ์ ที่วัดในกรอบนั้นจะถูกเรียกว่า ช่วงเวลาที่เป็นไปตามธรรมชาติ ถ้ากรอบอ้างอิงนี้ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่  $u$  เมื่อเทียบกับอีกกรอบอ้างอิงหนึ่ง ช่วงเวลา  $t$  ระหว่างเหตุการณ์ที่สังเกตจากจากกรอบอ้างอิงที่สองนี้จะมีค่ามากกว่า  $t_0$  สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การขยายตัวของเวลา (time dilation)

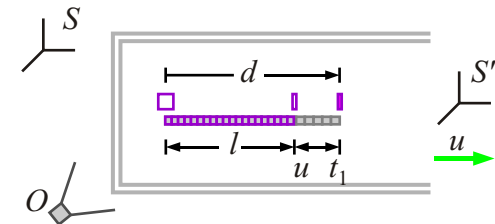
$$t = \frac{t_0}{1 - u^2/c^2} = \gamma t_0$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$



**การหดตัวของความยาว:** ถ้าจุดสองจุดอยู่หนึ่งในกรอบอ้างอิงหนึ่งมีระยะห่างที่วัดได้ในกรอบอ้างอิงนั้นเท่ากับ  $l_0$  เราเรียกระยะห่างนี้ว่า ความยาวที่เป็นไปตามธรรมชาติ ถ้ากรอบนี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่  $u$  เทียบกับกรอบอ้างอิงที่สอง และ ระยะห่างนั้นถูกวัดขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ ระยะห่าง  $l$  ระหว่างจุดที่วัดในกรอบอ้างอิงที่สองนี้จะสั้นกว่า  $l_0$  สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การหดตัวของความยาว (length contraction)

$$l = l_0 \sqrt{1 - u^2/c^2} = \frac{l_0}{\gamma}$$



## บทที่ 37 สัมพัทธภาพ (Relativity)

**การแปลงแบบลอเรนตซ์ (Lorentz transformation):** การแปลงตำแหน่งแบบลอเรนตซ์เชื่อมโยงตำแหน่งและเวลาของเหตุการณ์บนกรอบเฉื่อย  $S$  กับตำแหน่งและเวลาของเหตุการณ์บนกรอบที่สอง  $S'$  ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $u$  เทียบกับกรอบแรก ในการเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ ความเร็วอนุภาค  $v_x$  ใน  $S$  และ  $v'_x$  ใน  $S'$  จะเชื่อมโยงกันโดย

การแปลงความเร็วแบบลอเรนตซ์

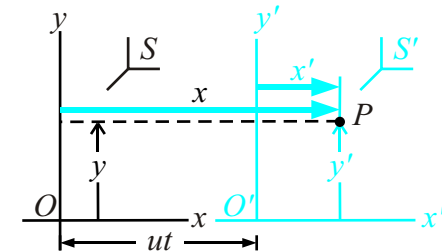
$$x' = \frac{x - ut}{1 - u^2/c^2} = x - ut$$

$$y' = y \quad z' = z$$

$$t' = \frac{t - ux/c^2}{1 - u^2/c^2} = t - ux/c^2$$

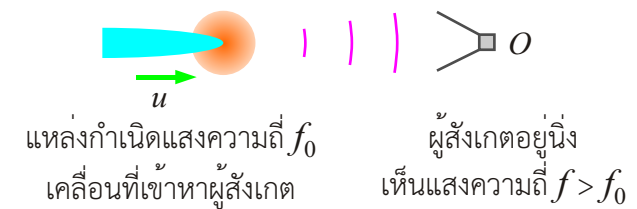
$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2}$$

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + uv'_x/c^2}$$



**ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า:** คือการเคลื่อนของความถี่ในแสงจากแหล่งกำเนิดที่เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับผู้สังเกต สำหรับกรณีที่แหล่งกำเนิดกำลังเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกต ด้วยความเร็ว  $u$  ความถี่ที่ผู้สังเกตเห็น  $f$  จะสัมพันธ์กับความถี่ที่ถูกส่งออกมา  $f_0$  ตามสมการ

$$f = \sqrt{\frac{c+u}{c-u}} f_0$$



## บทที่ 37 สัมพัทธภาพ (Relativity)

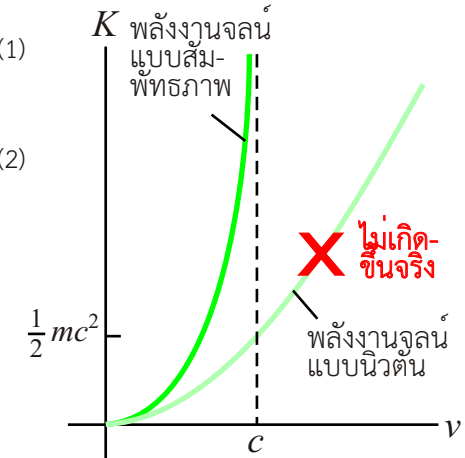
โมเมนตัมและพลังงานแบบสัมพัทธภาพ: สำหรับอนุภาคที่มีมวลนิ่ง  $m$  และเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  โมเมนตัม  $\vec{p}$  และพลังงานจลน์  $K$  จะเป็นไปตามสมการ (1) และ (2) พลังงานรวม  $E$  จะเป็นผลรวมของพลังงานจลน์และพลังงานนิ่ง  $mc^2$  โดยพลังงานรวมนี้อาจสามารถเขียนได้ในรูปของขนาดของโมเมนตัม  $p$  และมวลนิ่ง  $m$

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{1 - v^2/c^2} = m\vec{v} \quad (1)$$

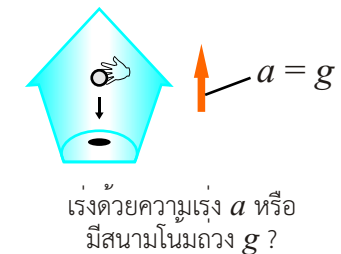
$$K = \frac{mc^2}{1 - v^2/c^2} - mc^2 \quad mc^2 \quad (2)$$

$$E = K + mc^2 = \frac{mc^2}{1 - v^2/c^2} = mc^2$$

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$



กลศาสตร์แบบนิวตัน และ ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษและทั่วไป: ทฤษฎีสัมพัทธภาพพิเศษเป็นรูปแบบทั่วไปของกลศาสตร์แบบนิวตัน หลักการทุกอย่างในกลศาสตร์แบบนิวตันเป็นกรณีที่ความเร็วทุกอย่างน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า  $c$  การทำให้ทั่วไปเพิ่มขึ้นโดยการพิจารณากรอบอ้างอิงที่ไม่เฉื่อยและความสัมพันธ์ของมันกับสนามโน้มถ่วงนำไปสู่ทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป



## บทที่ 38 โฟตอน อิเล็กตรอน และ อะตอม (Photons, Electrons, and Atoms)

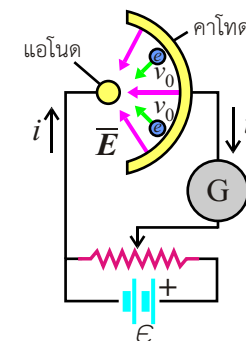
**โฟตอน (photon):** การแผ่กระจายของแม่เหล็กไฟฟ้าประพัตต์เป็นทั้งคลื่นและอนุภาค หน่วยของพลังงานในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเรียกว่า โฟตอน พลังงาน  $E$  ของโฟตอนหนึ่งตัวเป็นส่วนสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น  $f$  และ แปรผกผันกับความยาวคลื่น โดยมีค่าคงที่สากล  $h$  เรียกว่าค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) เป็นตัวคูณ โมเมนตัมของโฟตอนมีขนาดเป็น  $E/c$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

**ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก:** ผิวสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยการดูดซับโฟตอนที่มีพลังงาน  $hf$  มากกว่าหรือเท่ากับ ฟังก์ชันงาน (work function) ของสารนั้น ศักย์ที่ใช้หยุด  $V_0$  คือ แรงดันที่ต้องการในการทำให้กระแสของอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาหยุดไหลจากแอโนด

$$eV_0 = hf$$

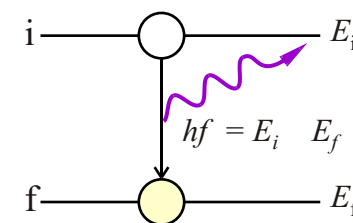


**เส้นสเปกตรัมของอะตอมและระดับพลังงาน:** เมื่ออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ  $E_i$  ไปสู่ระดับที่ต่ำกว่า  $E_f$  พลังงานของโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับ  $E_i - E_f$  ระดับพลังงานของอะตอมไฮโดรเจนเป็นไปตามสมการ (1) โดยที่  $R$  คือ ค่าคงที่ของไรด์เบิร์ก (Rydberg) ชุดสเปกตรัมของไฮโดรเจนนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยระดับพลังงานของมัน

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = E_i - E_f \quad (1)$$

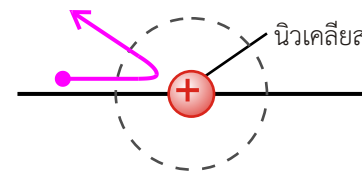
$$hf = -\frac{hcR}{n^2} = -\frac{13.60 \text{ eV}}{n^2}$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$



## บทที่ 38 โฟตอน อิเล็กตรอน และ อะตอม (Photons, Electrons, and Atoms)

**อะตอมที่มีเพียงนิวเคลียส:** การทดลองการกระเจิงของรัทเทอร์ฟอร์ดแสดงให้เห็นว่ากึ่งกลางอะตอมเป็นนิวเคลียสความหนาแน่นสูง และมีขนาดเล็กกว่าขนาดของอะตอม และมีประจุบวก



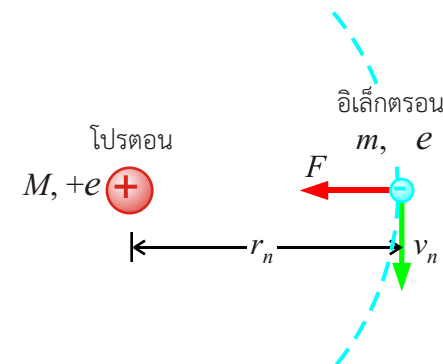
**โมเดลของบอร์:** ในโมเดลของบอร์ของอะตอมไฮโดรเจน ค่าที่เป็นไปได้ของโมเมนตัมเชิงมุมคือจำนวนเต็มของค่า  $h/2\pi$  ค่าจำนวนเต็ม  $n$  เป็นตัวเลขความถี่หลัก (principal quantum number) สำหรับระดับพลังงาน ค่ารัศมีวงโคจรจะแปรผันตรงกับ  $n^2$  และ ความเร็วการโคจรจะแปรผันตรงกับ  $1/n$

$$L_n = mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

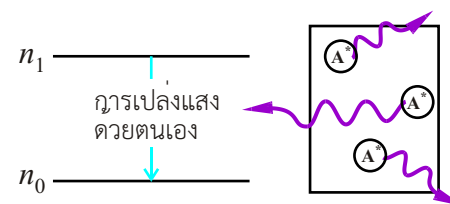
$$n =$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2} = n^2 a_0$$
$$= n^2 (5.29 \times 10^{-11} \text{ m})$$

$$v_n = \frac{1}{n} \frac{e^2}{2\pi\hbar} = \frac{2.19 \times 10^6 \text{ m/s}}{n}$$



**เลเซอร์:** เลเซอร์ทำงานโดยใช้หลักการของการเปล่งแสงโดยการถูกกระตุ้น (stimulated emission) ซึ่งทำให้ได้ โฟตอนจำนวนมากที่มีความยาวคลื่นเดียวกันและเฟสเดียวกัน เปล่งออกมา การทำงานของเลเซอร์ต้องมีสถานะไม่สมดุล เรียกว่า สถานะประชากรผกผัน (population inversion) ซึ่งจะมีอะตอมที่อยู่สถานะระดับพลังงานสูงมากกว่าอะตอมในสถานะพลังงานต่ำ

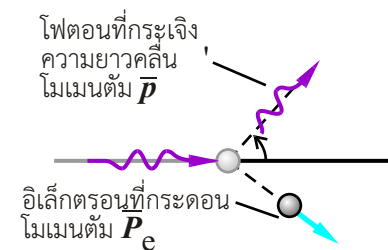


## บทที่ 38 โฟตอน อิเล็กตรอน และ อะตอม (Photons, Electrons, and Atoms)

**การสร้างรังสีเอ็กซ์ และการกระเจิง:** รังสีเอ็กซ์สร้างได้จากการนำอิเล็กตรอนไปชนเป้าหมาย ถ้าอิเล็กตรอนนั้นถูกเร่งให้มีศักย์เพิ่มขึ้น  $V_{AC}$  ความถี่สูงสุดและความยาวคลื่นต่ำที่สุดที่จะสร้างได้จะเป็นไปตามสมการ การกระเจิงแบบคอมป์ตันคือการกระเจิงของโฟตอนในย่านรังสีเอ็กซ์ ด้วยอิเล็กตรอน สำหรับอิเล็กตรอน (มวล  $m$ ) ความยาวคลื่นของโฟตอนที่กระทบ และ กระเจิงจะสัมพันธ์กับมุมที่โฟตอนกระเจิง

$$eV_{AC} = hf_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}}$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$



**การแผ่รังสีของวัตถุดำ:** ความเข้มของการแผ่รังสีรวม (ค่ากำลังเฉลี่ยต่อพื้นที่) จากผิวของวัตถุดำ จะแปรผันตรงกับ กำลังสี่ของค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ ค่า  $\frac{W}{m^2 K^4}$  เรียกว่า ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ ค่าความยาวคลื่น  $\lambda_m$  ที่วัตถุดำเปล่งรังสีออกมาเข้มที่สุดจะแปรผกผันกับ  $T$  กฎการแผ่รังสีของพลังค์บอกค่าการเปล่งแสงที่ขึ้นกับความยาวคลื่น  $I(\lambda)$  (ความเข้มแสงต่อช่วงความยาวคลื่นในการแผ่รังสีของวัตถุดำ)

$$I = \sigma T^4$$

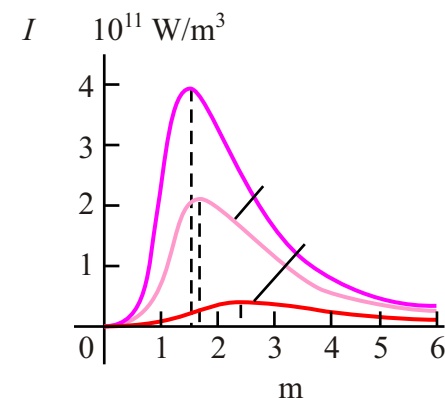
(กฎสเตฟาน-โบลทซ์มันน์)

$$\lambda_m T = b$$

(กฎการขจัดของวิน)

$$I(\lambda) = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

(กฎการแผ่รังสีของพลังค์)



## บทที่ 39 ความเป็นคลื่นของอนุภาค (The Wave Nature of Particles)

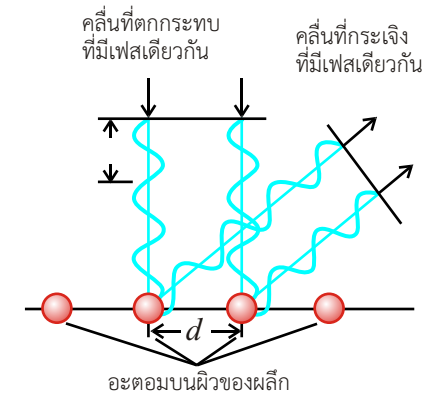
**คลื่นของเดอบรีย (de Broglie wave):** อิเล็กตรอนและอนุภาคอื่น ๆ จะมีคุณสมบัติความเป็นคลื่น ความยาวคลื่นของคลื่น ขึ้นกับโมเมนตัมของอนุภาคในลักษณะเดียวกับโฟตอน สถานะของอนุภาคนั้น จะถูกอธิบายฟังก์ชันคลื่น(มิใช่ด้วย ตำแหน่งและความเร็ว) โดยฟังก์ชันคลื่นนี้จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง ใน 3 ทิศทางและเวลา

$$= \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

$$E = hf$$

**การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน:** การเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนจากผิวของผลึกโลหะ เป็นการยืนยันโดยตรงของความเป็นคลื่นของอนุภาค ถ้าอิเล็กตรอน (ที่เคลื่อนที่ไม่เร็วมาก) ถูกเร่งจากหยุดนิ่ง ด้วยความต่างศักย์  $V_{ba}$  คา-ความยาวคลื่นของมันจะเป็นไปตามสมการ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ความยาวคลื่นเล็ก ๆ ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เร็วนี้ ในการสร้างภาพด้วยความละเอียดหลายพันเท่าเมื่อเทียบกับกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงในย่านที่ตามองเห็น

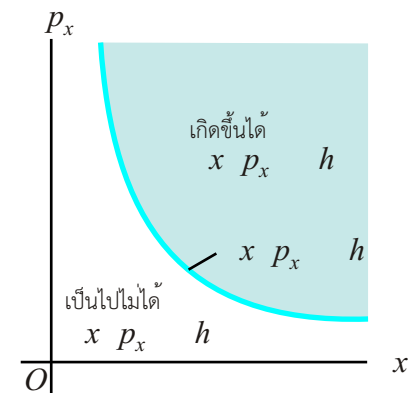
$$= \frac{h}{p} = \frac{h}{2mV_{ba}}$$



**หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก:** บอกว่า มันเป็นไปได้ที่จะบอกค่าตำแหน่งและโมเมนตัมอย่างแม่นยำในเวลาเดียวกัน ความถูกต้องของการวัดปริมาณในแนวแกน  $x$  จะจำกัดด้วยหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก ความสัมพันธ์เดียวกันนี้ใช้ได้กับปริมาณในแนวแกน  $y$  และ  $z$  ค่าความไม่แน่นอนในระดับพลังงาน  $E$  ของสถานะที่ถูกยึดครองในช่วงระยะเวลา  $t$  จะเป็นไปตามสมการในอสมการนี้  $\hbar$  คือ  $h/2$

$x \quad p_x \quad \hbar$   
(หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก สำหรับตำแหน่งและโมเมนตัม)

$E \quad t \quad \hbar$   
(หลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก สำหรับพลังงานและเวลา)





## บทที่ 39 ความเป็นคลื่นของอนุภาค (The Wave Nature of Particles)

**ฟังก์ชันคลื่น:** ฟังก์ชันคลื่น  $(x, y, z, t)$  สำหรับอนุภาค จะมีข้อมูลทั้งหมด

เกี่ยวกับอนุภาค ปริมาณ  $(x, y, z, t)$  คือฟังก์ชันการกระจายของ

ความน่าจะเป็น และ ใช้ในการบอกความน่าจะเป็นในการพบอนุภาค

ในตำแหน่ง และ เวลา นั้น ๆ ถ้าอนุภาคอยู่ในสถานะที่มีพลังงานจำกัด

ที่เรียกว่าสถานะหยุดนิ่ง  $(x, y, z, t)$  จะเป็นผลคูณของฟังก์ชัน ที่

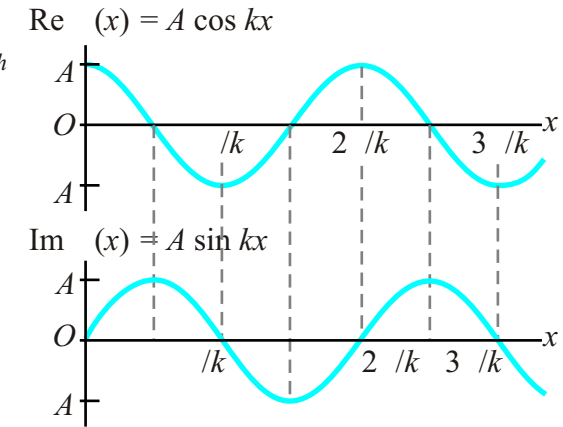
ขึ้นกับตำแหน่งเท่านั้น และ ฟังก์ชัน  $e^{-iEt/\hbar}$  ที่ขึ้นกับเวลาเท่านั้น

สำหรับสถานะหยุดนิ่งนี้ ฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็นจะไม่ขึ้น

กับเวลา

$$(x, y, z, t) = (x, y, z) e^{-iEt/\hbar}$$

(สถานะหยุดนิ่ง)



**สมการชโรดิงเงอร์ (The Schrödinger's equation):** สำหรับ

อนุภาคหนึ่งที่เคลื่อนที่ในหนึ่งมิติในที่ที่มีฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้า  $U(x)$

ฟังก์ชันคลื่นสำหรับสถานะหยุดนิ่งของพลังงาน  $E$  จะสอดคล้องกับ

สมการชโรดิงเงอร์ ฟังก์ชันคลื่นที่ซับซ้อนขึ้นนั้นสามารถสร้างได้จาก

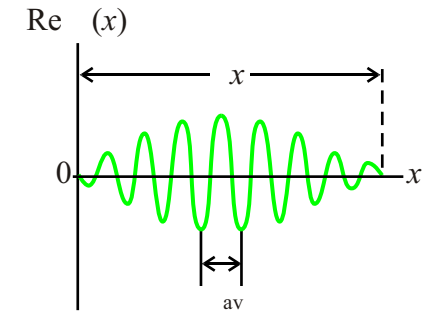
การซ้อนทับฟังก์ชันคลื่นในสถานะหยุดนิ่ง และมันสามารถนำมาใช้

แสดงอนุภาคที่จำกัดอยู่ในมี्यानหนึ่ง และ ยังคงมีคุณสมบัติ ความ-

เป็นคลื่นอยู่ด้วย

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + U(x) \psi(x) = E \psi(x)$$

(สมการชโรดิงเงอร์หนึ่งมิติ)



## บทที่ 40 กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics)

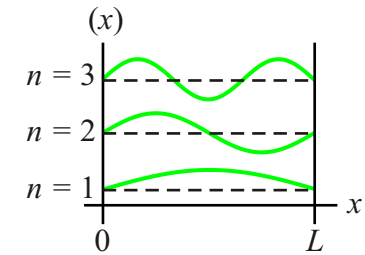
**อนุภาคในกล่อง:** อนุภาคมวล  $m$  ในกล่อง (บ่อศักย์ลึกอนันต์) ที่กว้าง  $L$  จะมีระดับพลังงานตามสมการ (1) ฟังก์ชันคลื่นแบบมาตรฐานจะเป็นไปตามสมการ (2)

$$E_n = \frac{p_n^2}{m} = \frac{n^2 h^2}{8mL^2} = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \quad (1)$$

$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (2)$$

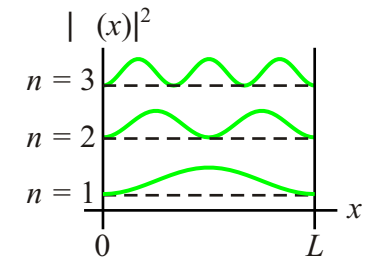
$$(n = 1, 2, 3, \dots)$$



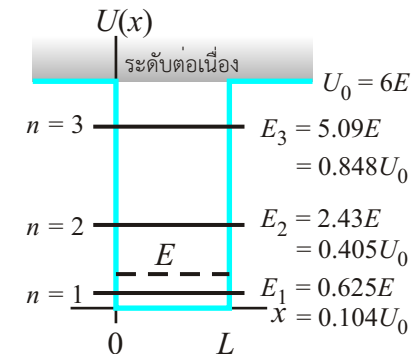
**ฟังก์ชันคลื่นและการทำให้เป็นมาตรฐาน:** ผลเฉลยของสมการชโรดิงเงอร์จะต้องมีความต่อเนื่องทั้งตัวฟังก์ชันคลื่น  $\psi(x)$  และอนุพันธ์ของมัน  $d\psi(x)/dx$  ในทุกจุด ยกเว้นที่จุดที่ฟังก์ชันพลังงานศักย์ไม่ต่อเนื่องไปสู่ค่าอนันต์ ปกติเราจะทำให้ฟังก์ชันคลื่นเป็นค่ามาตรฐาน เพื่อให้ได้ผลรวมของความน่าจะเป็นในการพบอนุภาค ณ จุดใด ๆ เป็นหนึ่ง

$$\int_0^L |\psi(x)|^2 dx = 1$$

(เงื่อนไขการทำให้เป็นค่ามาตรฐาน)

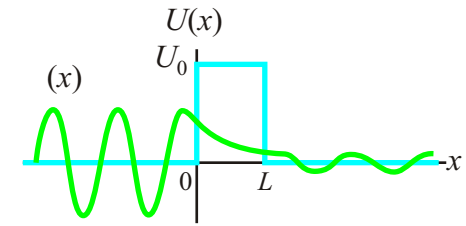


**บ่อศักย์จำกัด:** ในบ่อศักย์ที่มีความลึก  $U_0$  ระดับพลังงานที่มีจะต่ำกว่ากรณีบ่อลึกอนันต์ หากมันมีความกว้างบ่อเท่ากัน จำนวนระดับพลังงานที่เป็นสถานะผูกพันจะมีอยู่อย่างจำกัด ระดับพลังงานนี้จะสามารถหาได้จากการหาฟังก์ชันคลื่นที่มีความต่อเนื่องของทั้งตัวฟังก์ชันคลื่น  $\psi(x)$  และอนุพันธ์ของมัน  $d\psi(x)/dx$  ที่ขอบของบ่อ



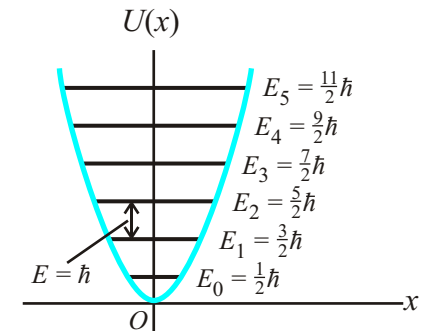
## บทที่ 40 กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics)

**กำแพงศักย์ และการทะลุผ่าน:** มันมีความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะทะลุผ่านกำแพงพลังงานศักย์ แม้ว่าพลังงานจลน์เริ่มต้นของมันจะต่ำกว่าค่าความสูงกำแพงศักย์ กระบวนการนี้เรียกว่า การทะลุผ่าน (tunneling)



**ตัวแกว่งแบบฮาร์มอนิกควอนตัม:** ระดับพลังงานของตัวแกว่งแบบฮาร์มอนิกที่มี  $U(x) = \frac{1}{2}k'x^2$  จะเป็นไปตามสมการ (1) ระยะระหว่างระดับพลังงานที่อยู่ติดกันคือ  $\hbar$  โดย  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  นี่คือการวัดความถี่ของการแกว่งของตัวแกว่งแบบฮาร์มอนิกของนิวตัน

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \sqrt{\frac{k'}{m}} \quad (1)$$
$$(n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$



**ปัญหาในสามมิติ:** สมการชโรดิงเงอร์สำหรับปัญหาสามมิติ แสดงดังสมการ (2)

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \psi(x,y,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi(x,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi(x,y,z)}{\partial z^2} \right) + U(x,y,z) \psi(x,y,z) = E \psi(x,y,z) \quad (2)$$

## บทที่ 41 โครงสร้างอะตอม (Atomic Structure)

**อะตอมไฮโดรเจน:** ระดับพลังงานที่หาได้จากการแก้สมการชโรดิงเงอร์สำหรับอะตอมไฮโดรเจนเหมือนกับโมเดลของบอร์ ถ้านิวเคลียสมีประจุ  $Ze$  เราก็จะมีเทอม  $Z^2$  อยู่บนสมการ (1) ค่าที่เป็นไปได้ของขนาดของโมเมนตัมเชิงมุมออร์บิทัล  $L$  จะเป็นไปตามสมการ (2) ค่าที่เป็นไปได้สำหรับขนาดตามแกน  $z$  ของโมเมนตัมเชิงมุมออร์บิทัล  $L_z$  จะเป็นไปตามสมการ (3)

ความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนในอะตอมที่ระยะระหว่าง  $r$  และ  $r+dr$  จากนิวเคลียส คือ  $P(r)dr$  จะเป็นไปตามสมการ (4) ปกติระยะอะตอมจะวัดในหน่วยของ  $a$  ซึ่งเป็นระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสในโมเดลของบอร์

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{m_e e^4}{2n^2 \hbar^2} = -\frac{13.60 \text{ eV}}{n^2}$$

(ระดับพลังงานของไฮโดรเจน) (1)

$$L = \sqrt{l(l+1)} \hbar$$

( $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ) (2)

$$L_z = m_l \hbar$$

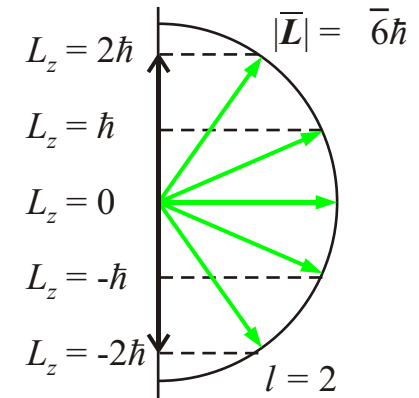
( $m_l = 0, 1, 2, \dots, l$ ) (3)

$$P(r)dr = |\psi|^2 dV = |\psi|^2 4\pi r^2 dr$$

(4)

$$a = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$$

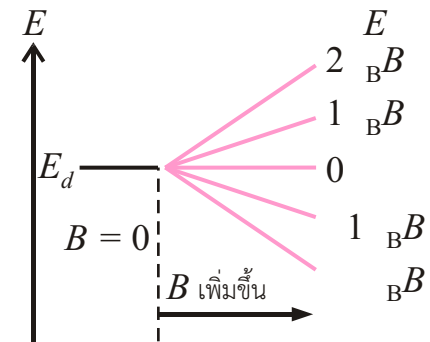
$= 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$



**ปรากฏการณ์ซีแมน (The Zeeman effect):** พลังงานที่ปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอน (มวล  $m$ ) ที่มีเลขควอนตัมแม่เหล็ก  $m_l$  ในสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ที่มีทิศทาง  $+z$  จะเป็นไปตามสมการ (5) โดยที่  $\mu_B = eh/2m$  นี้เรียกว่า แมกนีตอนของบอร์ (Bohr magneton)

$$U = \mu_B B = m_l \frac{eh}{2m} B = m_l \mu_B B$$

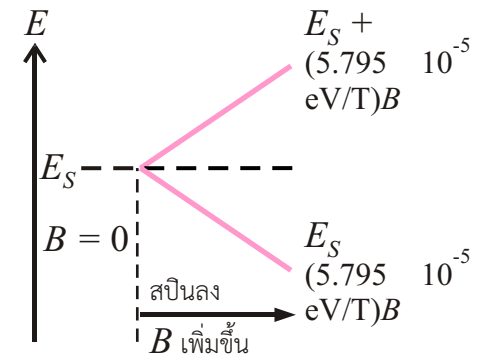
( $m_l = 0, 1, 2, \dots, l$ )



**สปินของอิเล็กตรอน:** อิเล็กตรอนมีโมเมนตัมเชิงมุมจากการสปินที่มีขนาด  $S$  เป็นไปตามสมการ (6) ค่าที่เป็นไปได้ของขนาดตามแกน  $z$  คือ  $S_z = m_s \hbar$  โดยที่  $m_s = \pm 1/2$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2} + 1\right)} \hbar = \sqrt{\frac{3}{4}} \hbar$$

$$S_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$$



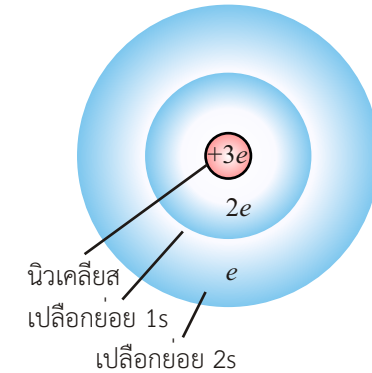
## บทที่ 41 โครงสร้างอะตอม (Atomic Structure)

**อะตอมที่มีหลายอิเล็กตรอน:** ในอะตอมไฮโดรเจน อิเล็กตรอนจะมีตัวเลขควอนตัม  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$ , และ  $m_s$  ที่เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (1) ในอะตอมที่มีหลายอิเล็กตรอน ตัวเลขควอนตัมสำหรับอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะเป็นไปตามกฎเดียวกัน แต่ระดับพลังงานจะขึ้นกับทั้ง  $n$  และ  $l$  เพราะการปิดกั้น (screening) ซึ่งเป็นการหักล้างของสนามจากนิวเคลียสจากอิเล็กตรอนวงใน ถ้าประจุประสิทธิผลที่ดึงดูดอิเล็กตรอน คือ  $Z_{\text{eff}}$  ระดับพลังงานจะประมาณได้ตามสมการ (2)

$$n = 1, 0, l = n - 1$$

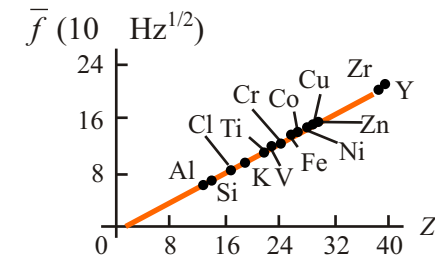
$$|m_l| = l, m_s = \pm \frac{1}{2}$$

$$E_n = -\frac{Z_{\text{eff}}^2}{n^2} (13.6 \text{ eV})$$



**สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์:** กฎของมอสลีย์ (Moseley's law) บอกว่าความถี่ของรังสีเอ็กซ์  $K$  จากเป้าที่มีเลขอะตอม  $Z$  จะเป็นไปตามสมการ (3) ลักษณะสมบัติของสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์เกิดจากการเปลี่ยนสถานะไปยังหลุมในระดับพลังงานวงใน ๆ ของอะตอม

$$f = (2.48 \times 10^{15} \text{ Hz})(Z - 1)^2$$



## บทที่ 42 โมเลกุล และ สสารควบแน่น (Molecules and Condensed Matter)

**พันธะโมเลกุลและสเปกตรัมของโมเลกุล:** พันธะโมเลกุลแบ่งได้

หลัก ๆ คือ ไอออนิก (ionic) โควาเลนต์ (covalent) วานเดอร์-วาลส์ (van der Waals) และ พันธะไฮโดรเจน

ในอะตอมโมเลกุลคู่ พลังงานการหมุนเขียนได้ดัง สมการ (1) โดยที่  $I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของโมเลกุล  $m_r$  คือ มวลลดรูป และ  $r_0$  คือ ระยะระหว่างอะตอมทั้งสอง

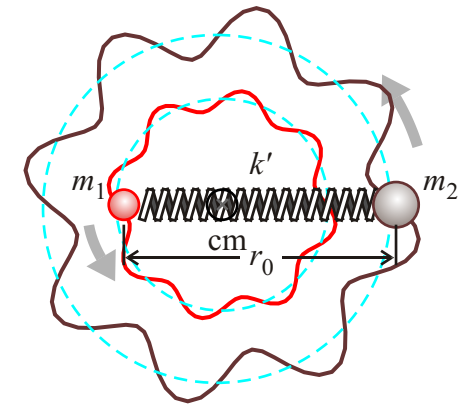
ระดับพลังงานการสั่นจะเป็นไปตามสมการ (2) โดยที่  $k'$  คือ ค่าคงที่แรงประสิทธิผลของแรงระหว่างอะตอม

$$E_l = l(l+1) \frac{\hbar^2}{2I} \quad (l = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$I = m_r r_0^2$$

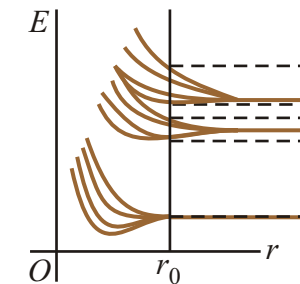
$$m_r = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \sqrt{\frac{k'}{m}} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$



**ของแข็งและแถบพลังงาน:** พันธะระหว่างอะตอมในของแข็งจะมีชนิดเหมือนกับชนิดของพันธะในโมเลกุลบวกกับ พันธะโลหะ การเชื่อมต่อส่วนประกอบหลัก (basis) ในแต่ละจุดโครงผลึกจะทำให้เกิดโครงสร้างผลึก

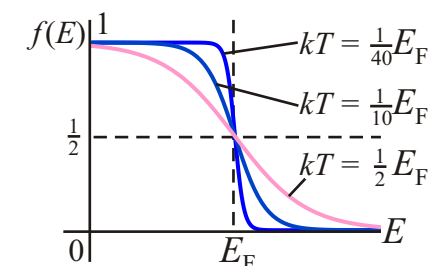
เมื่ออะตอมเชื่อมต่อกันในสสารควบแน่น ระดับพลังงานนอกสุดของมันจะแผ่กระจายออกและก่อให้เกิดแถบพลังงาน ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ฉนวน และ สารกึ่งตัวนำ จะมีแถบวาเลนซ์ที่เต็ม โดยมีช่องว่างพลังงาน (energy gap) ตัวนำรวมถึงโลหะจะมีแถบนำไฟฟ้าที่ถูกเติมเต็มบางส่วน



**โมเดลอิเล็กตรอนอิสระของโลหะ:** ในโมเดลนี้ เราจะเปรียบอิเล็กตรอนว่าเป็นอิสระในตัวนำ ความหนาแน่นสถานะ (density of states) จะเป็นไปตามสมการ (3) ความน่าจะเป็นที่สถานะของพลังงานที่พลังงาน  $E$  จะถูกครอบครองจะเป็นไปตาม การกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ซึ่งเป็นผลมาจากหลักการกีดกันออกไป (exclusion principle) โดย  $E_F$  คือพลังงานเฟอร์มิ

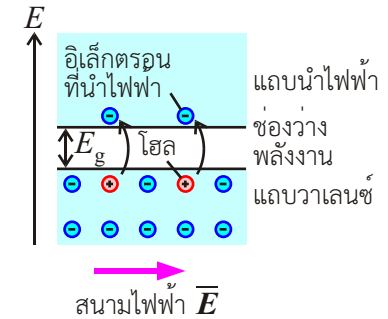
$$g(E) = \frac{(2m)^{3/2} V}{2 \pi^2 \hbar^3} E^{1/2} \quad (3)$$

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E - E_F)/kT} + 1}$$



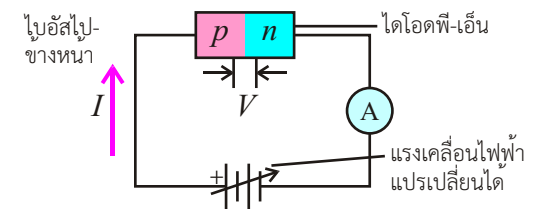
## บทที่ 42 โมเลกุล และ สสารควบแน่น (Molecules and Condensed Matter)

**สารกึ่งตัวนำ:** สารกึ่งตัวนำมีความกว้างช่องว่างพลังงานประมาณ 1 eV ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า คุณสมบัติทางไฟฟ้าของมันสามารถเปลี่ยนไปได้อย่างมากโดยการเพิ่มสารเจือปนลงไปเพียงเล็กน้อย หากสารเจือปนเป็นตัวให้ (donor) เราจะได้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือ หากสารเจือปนเป็นตัวรับ (acceptor) เราก็จะได้สารกึ่งตัวนำชนิดพี



**สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ:** สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมากมาย รวมทั้ง ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และ วงจรรวม จะมีรอยต่อพี-เอ็นหนึ่งหรือมากกว่านั้น ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันสำหรับไดโอดที่มีรอยต่อพี-เอ็นแบบอุดมคติจะเป็นไปตามสมการ (1)

$$I = I_s(e^{eV/kT} - 1) \quad (1)$$



## บทที่ 43 ฟิสิกส์นิวเคลียร์ (Nuclear Physics)

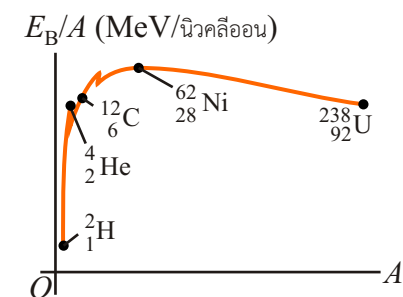
**คุณสมบัติทางนิวเคลียร์:** นิวเคลียสประกอบด้วย นิวคลีออน (nucleon)  $A$  ตัว (โปรตอน  $Z$  ตัว และ นิวตรอน  $N$  ตัว) ทุกนิวเคลียสมีความหนาแน่นประมาณได้เท่ากัน รัศมีของนิวเคลียสที่มีเลขมวล  $A$  จะประมาณได้ตามสมการ (1) ชนิดเดียว ๆ ของอนุภาคในนิวเคลียสที่มีโปรตอน  $Z$  ตัว และ นิวตรอน  $N$  ตัว เรียกว่า นิวคลีได (nuclide)

ไอโซโทปคือนิวคลีไดของธาตุเดียวกัน ( $Z$  เท่ากัน) ที่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน มวลของนิวเคลียสนี้วัดได้ในหน่วยของมวลอะตอม นิวคลีออนมีโมเมนต์และค่าโมเมนต์แม่เหล็ก

$$R = R_0 A^{1/3}$$
$$(R_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m})$$

**การผูกติดกันของนิวเคลียร์และโครงสร้าง:** มวลของนิวเคลียสจะน้อยกว่า ผลรวมมวลของโปรตอนและนิวตรอนภายในตัวมัน โดยผลต่างของมวลคูณด้วย  $c^2$  คือ พลังงานการผูกติดกัน  $E_B$  พลังงานการผูกติดกันของนิวคลีได จะกำหนดได้จากแรงนิวเคลียร์ซึ่งเป็นแรงระยะสั้นและเกิดกับคู่ของอนุภาค และ แรงผลักไฟฟ้าระหว่างโปรตอน นิวเคลียสที่ไม่เสถียรถ้า  $A$  หรือ  $Z$  มีค่ามากเกินไป หรือ อัตราส่วน  $N/Z$  นั้นผิด โมเดล 2 โมเดลที่มักนำมาใช้กับ นิวเคลียส คือโมเดลหยดของเหลว (liquid-drop model) และ โมเดลเปลือก (shell model) โดยโมเดลอย่างหลังจะเหมือนกันกับการประมาณสนามศูนย์กลาง (central-field approximation) สำหรับโครงสร้างอะตอม

$$E_n = (ZM_H + Nm_n - {}^A_ZM)c^2$$



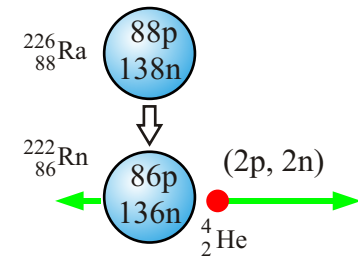


## บทที่ 43 ฟิสิกส์นิวเคลียร์ (Nuclear Physics)

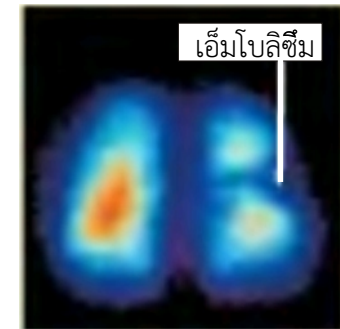
**การสลายกัมมันตรังสี:** นิวคลีไวด์ที่ไม่เสถียรจะปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา (นิวเคลียสของ  ${}^4_2\text{He}$ ) หรือ อนุภาคเบต้า (อิเล็กตรอน) ในกระบวนการการเปลี่ยนแปลงไปเป็นนิวคลีไวด์อีกตัวหนึ่ง บางครั้งอาจมีการปลดปล่อยโฟตอนในย่านรังสีแกมมา อัตราการสลายของนิวคลีไวด์ที่ไม่เสถียรจะบอกได้จากค่าคงที่ของการสลาย ค่าครึ่งชีวิต  $T_{1/2}$  หรือ ค่าเฉลี่ยช่วงชีวิต  $T_{\text{mean}}$  ถ้าจำนวนของนิวเคลียสที่เวลา  $t = 0$  คือ  $N_0$  และ ไม่มันเกิดขึ้นอีก จำนวนของนิวเคลียสที่เวลาใด ๆ จะเป็นไปตามสมการ (1)

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

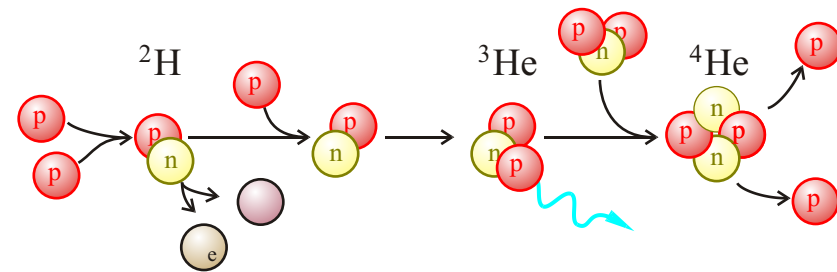
$$T_{\text{mean}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{T_{1/2}}{0.693}$$



**ผลกระทบทางชีววิทยาของการแผ่รังสี:** ผลกระทบทางชีววิทยาของการแผ่รังสีขึ้นกับผลคูณของพลังงานที่ดูดซับต่อหน่วยมวล และ ประสิทธิภาพทางชีววิทยาสัมพัทธ์ (relative biological effectiveness, RBE) ที่ต่างกัน สำหรับการแผ่รังสีที่ต่างกัน



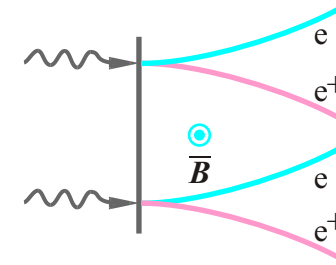
**การเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์:** ในปฏิกิริยานิวเคลียร์ นิวเคลียสสองนิวเคลียสหรืออนุภาคจะชนกันและเกิดนิวเคลียส หรือ อนุภาคใหม่สองอนุภาค ปฏิกิริยานี้สามารถเป็นแบบคาย (exoergic) หรือดูดซับพลังงาน (endoergic) กฎการอนุรักษ์ต่าง ๆ รวมทั้ง ประจุ พลังงาน โมเมนตัม โมเมนตัมเชิงมุม และจำนวนนิวคลีออน จะเป็นจริง พลังงานจะถูกปลดปล่อยจากการฟิชชันของนิวเคลียสมวลหนักไปเป็นนิวเคลียสสองนิวเคลียสที่เบากว่าและไม่เสถียร พลังงานจะถูกปลดปล่อยเช่นกันหากเกิดฟิวชันของนิวเคลียสเบาสองนิวเคลียสไปเป็นนิวเคลียสที่หนักกว่า



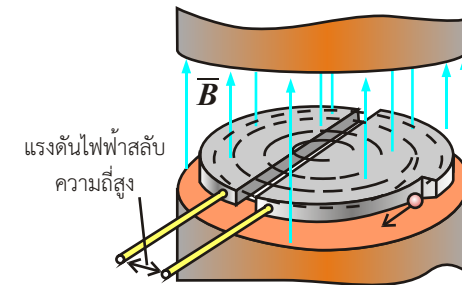
## บทที่ 44 ฟิสิกส์อนุภาค และ จักรวาลวิทยา (Particle Physics and Cosmology)

**อนุภาคมูลฐาน:** แต่ละอนุภาคจะมีปฏิอนุภาค อนุภาคบางตัว เป็นปฏิอนุภาคกับตัวมันเอง อนุภาคสามารถถูกสร้างหรือทำลายได้ อนุภาคบางตัว (รวมทั้งอิเล็กตรอนและโพสิตรอน) อยู่เป็นคู่ หรืออยู่รวมกับอนุภาคหรือปฏิอนุภาคอื่น ๆ

อนุภาคเป็นเสมือนตัวเชื่อมสำหรับปฏิสัมพันธ์พื้นฐาน โฟตอนเป็นตัวเชื่อมของการปฏิสัมพันธ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ยูกาวา (Yukawa) นำเสนอ การมีอยู่ของเมซอน เพื่อเป็นตัวเชื่อมของปฏิสัมพันธ์ทางนิวเคลียร์ อนุภาคที่เป็นตัวเชื่อมจะมีอยู่เพราะหลักความไม่แน่นอนสำหรับพลังงานนี้ เรียกว่า อนุภาคเสมือนจริง (virtual particle)



**เครื่องเร่งอนุภาคและตัวตรวจวัด:** ไซโคลตรอน (cyclotron) ซิงโครตรอน (synchrotron) และเครื่องเร่งเชิงเส้น ถูกนำมาใช้เร่งอนุภาคที่มีประจุให้มีพลังงานสูงสำหรับการทดลองเรื่องปฏิสัมพันธ์ของอนุภาค บางส่วนของพลังงานในลำอนุภาคทำให้เกิดปฏิกิริยากับเป้าหมายที่อยู่หนึ่ง

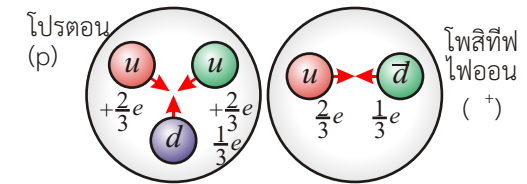


**อนุภาคและปฏิสัมพันธ์:** การปฏิสัมพันธ์พื้นฐาน 4 อย่างที่มีอยู่ในธรรมชาติ คือ การปฏิสัมพันธ์อย่างแรง การปฏิสัมพันธ์แม่เหล็กไฟฟ้า การปฏิสัมพันธ์อย่างอ่อน และ การปฏิสัมพันธ์ของแรงดึงดูด เราสามารถอธิบายอนุภาคในรูปแบบของปฏิสัมพันธ์ และ ในปริมาณที่อนุรักษ์ในทุกหรือในบางปฏิสัมพันธ์

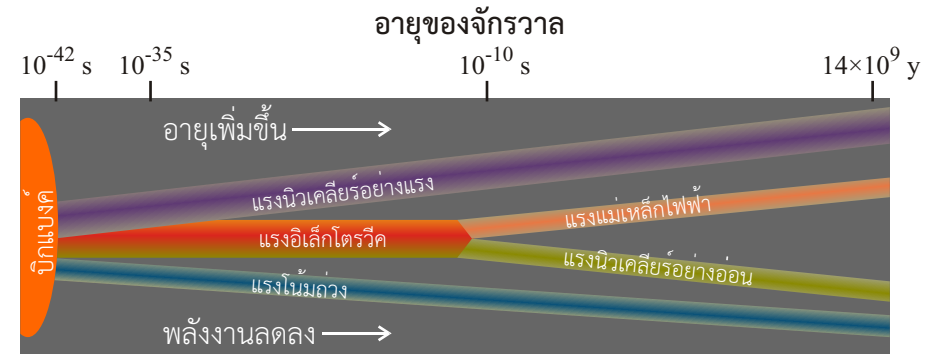
เฟอร์มิออน (fermion) มีสปินเป็นเลขจำนวนเต็ม บวกกับครึ่ง โบซอน (boson) มีสปินเป็นจำนวนเต็ม เลปตอน (lepton) เป็นเฟอร์มิออนที่ไม่มีปฏิสัมพันธ์อย่างแรง อนุภาคที่ปฏิสัมพันธ์อย่างแรงเรียกว่า ฮาดรอน (hadron) มันรวม เมซอน (meson) ที่เป็นโบซอน และ บาร์ยอน (baryon) ที่เป็นเฟอร์มิออน เรามีกฎการอนุรักษ์ต่าง ๆ สำหรับเลขเลปตอนและเลขบาร์ยอน เลขควอนตัมที่เพิ่มเติม (ความแปลก (strangeness) และ เชนท์ (charm)) ก็จะถูกอนุรักษ์ในบางปฏิสัมพันธ์

## บทที่ 44 ฟิสิกส์อนุภาค และ จักรวาลวิทยา (Particle Physics and Cosmology)

**ควาร์ก (quark):** ฮาตรอนประกอบด้วยควาร์ก ควาร์กมี 6 ชนิด ปฏิสัมพันธ์ระหว่างควาร์กนี้มีตัวเชื่อมคือ กลูออน (gluon) ควาร์กและกลูออนมีคุณลักษณะเพิ่มเติมคือ สี (color)



**ความสมมาตร และการรวมเป็นหนึ่งเดียวของการปฏิสัมพันธ์:** การพิจารณาความสมมาตรเป็นกุญแจหลัก ๆ ในทฤษฎีอนุภาคพื้นฐานทุก ทฤษฎีการปฏิสัมพันธ์แม่เหล็กไฟฟ้า และ การปฏิสัมพันธ์อย่างอ่อนนั้นถูกรวมกันที่พลังงานสูง ๆ และเรียกว่า การปฏิสัมพันธ์อิเล็กโตรวีค (electroweak interaction) ในทฤษฎีการรวมเป็นหนึ่งเดียวรวม (grand unified theory, GUT) การปฏิสัมพันธ์อย่างแรงถูกรวมเข้าด้วยกันกับการปฏิสัมพันธ์อื่น ๆ ที่พลังงานสูงมาก ๆ



**ประวัติศาสตร์ของจักรวาล:** ในแบบจำลองมาตรฐานของจักรวาล บิกแบงค์ ทำให้เกิดอนุภาคมูลฐานก่อน จากนั้นมันจะแปรรูปเป็นอะตอมที่เบาที่สุดในขณะที่จักรวาลขยายตัวออกและเย็นลง การแผ่รังสีคอสมิกพื้นหลังเป็นสิ่งสืบทอดจากตอนที่อะตอมก่อตัวขึ้น อนุภาคที่หนักขึ้นจะถูกสร้างที่เวลาหลัง ๆ จากปฏิกิริยาฟิวชั่นในดวงดาว

