

# บทที่ 1

## ภาคตัดขวางทางนิวเคลียร์

### วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้วจะสามารถ

1. หาค่าภาคตัดขวางทั้งหมดที่แต่ละพลังงานได้
2. หาปฏิกิริยาการชนที่เกิดขึ้นในเป้าได้
3. หาความเข้มของลำแสงที่ผ่านออกมาจากวัสดุที่นำมากั้นลำแสงได้

## 1.1 แนวคิดสำหรับความน่าจะเป็น

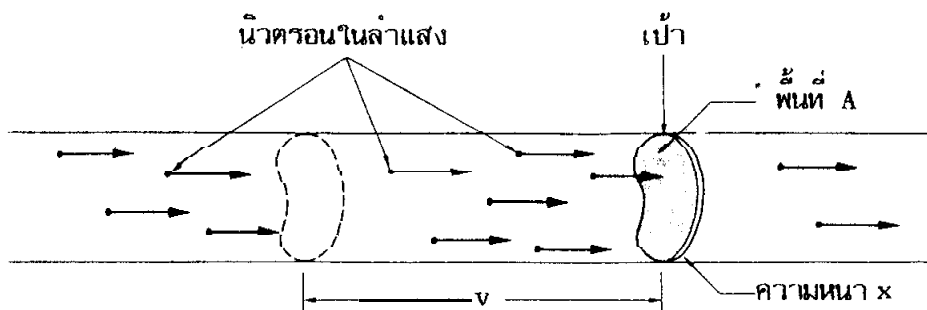
ความน่าจะเป็นของการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ มีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับภาคตัดขวาง ซึ่งเป็นมิติของพื้นที่ โดยมีต้นกำเนิดมาจากความจริงที่ว่า ความน่าจะเป็นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่เข้าชนกับนิวเคลียสของเป้า เป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ภาคตัดขวางของนิวเคลียสของเป้า

เมื่อนำนิวคลีไอของธาตุอวรัมรังสีด้วยลำแสงนิวตรอน อัตราการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์จะขึ้นกับ จำนวนนิวตรอน, ความเร็ว, และธรรมชาติของนิวคลีไอนั้น ภาคตัดขวางสำหรับนิวเคลียสของเป้าสำหรับแต่ละปฏิกิริยา เป็นคุณสมบัติเฉพาะของนิวเคลียสและพลังงานของนิวตรอน

## 1.2 ภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์

การศึกษาปฏิกิริยานิวเคลียร์ ต้องทราบถึงปริมาณที่ใช้วัดความน่าจะเป็นที่จะเกิดปฏิกิริยา เป็นปริมาณที่วัดได้จากการทดลอง และสามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทฤษฎี ปริมาณที่มักใช้กัน คือ ภาคตัดขวาง (cross section) ของนิวเคลียส สำหรับแต่ละปฏิกิริยา มักใช้สัญลักษณ์  $\sigma$  และมีอักษรข้างท้ายเพื่อแสดงว่าเป็นค่าภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยานิวเคลียร์ชนิดใด

พิจารณาลำแสงนิวตรอนพลังงานเดี่ยว วิ่งเข้าชนเป้าบาง (thin target) ความหนา  $x$ , พื้นที่หน้าตัด  $A$ , ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของเป้า ลำแสงส่วนหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาในเป้า ส่วนที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาจะผ่านออกมา ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงลำแสงนิวตรอนวิ่งเข้าชนเป้า

ถ้า  $n$  คือจำนวนนิวตรอนในลำแสง มีหน่วยเป็น นิวตรอน/เซนติเมตร<sup>3</sup>  
 $v$  คือความเร็วของนิวตรอน มีหน่วยเป็น เซนติเมตร/วินาที  
 และ  $I$  คือความเข้มของลำแสง มีหน่วยเป็น นิวตรอน/เซนติเมตร<sup>2</sup>/วินาที

ปริมาณความเข้มของลำแสง  $I = nv$  ..... (1.1)

เนื่องจาก นิวตรอนเคลื่อนที่ได้ระยะทาง  $v$  เซนติเมตร ในเวลา 1 วินาที  
 ทุกนิวตรอนในปริมาตร  $vA$  ซม.<sup>3</sup> ที่อยู่ด้านหน้าของเป้า จะเข้าชนเป้าในเวลา 1 วินาที

$nvA$  คือจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่วิ่งเข้าชนเป้าต่อวินาที =  $I A$

$I$  จึงเป็นจำนวนนิวตรอน ที่เข้าชนเป้า 1 หน่วยพื้นที่ในเวลา 1 วินาที

เนื่องจากนิวคลีไอมีขนาดเล็ก, และสมมุติว่าเป้าบาง นิวตรอนส่วนมากจะชนเป้า แล้ว  
 ผ่านออกไปโดยไม่ได้ทำปฏิกิริยากับนิวคลีไอ จากการทดลองพบว่า จำนวนการชนเป็นปฏิ  
 ภาคกับความเข้มของลำแสง, ความหนาแน่นอะตอมของเป้า, พื้นที่ของเป้า และความหนา  
 ของเป้า

ดังนั้น

ถ้า  $N =$  จำนวนอะตอมของเป้า/เซนติเมตร<sup>3</sup>  
 $A =$  พื้นที่ของเป้าส่วนที่ลำแสงตกกระทบ  
 $x =$  ความหนาของเป้า

จำนวนการชนในเป้าต่อวินาที จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของลำแสง,  
 ความหนาแน่นอะตอมของเป้า,  
 พื้นที่ของเป้า  
 และความหนาของเป้า

จากข้อมูลเหล่านี้เพื่อที่จะสรุปได้ตั้งสมการ

จำนวนการชนในเป้าต่อวินาที =  $\sigma I N A x$  ..... (1.2)

เมื่อ  $\sigma =$  พื้นที่ภาคตัดขวางของเป้า เรียกภาคตัดขวางจุลภาค (microscopic cross section)

สรุปได้ว่า ภาคตัดขวางจุลภาคของเป้าเป็นพื้นที่ของเป้าส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อ 1  
 นิวเคลียส มีหน่วยเป็น เซนติเมตร<sup>2</sup> ภาคตัดขวางขึ้นกับพลังงานของอนุภาคที่เข้าชน, นิวเคลียส  
 ของเป้า, และชนิดของปฏิกิริยานิวเคลียร์ สมการ (1.2) แสดงว่า ใน 1 วินาทีมีนิวตรอนเข้า  
 ชนเป้า =  $\sigma I N A x$  นิวตรอน

(ถ้าเป็นการวัดความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นสำหรับทุกๆปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะแทน  $\sigma$  ด้วย  $\sigma_i$ )

เมื่อ  $A x$  คือปริมาตรของเป้า (ซม.<sup>3</sup>) และ

$F$  คือจำนวนการชนในเป้า/ซม.<sup>3</sup>/วินาที

$F = \Sigma I$  ..... (1.3)

การชนเป้า/ซม.<sup>3</sup>/วินาที สำหรับทุกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น =  $\Sigma_i I$  ..... (1.4)

เมื่อ  $\Sigma_t$  คือภาคตัดขวางมหัพภาคทั้งหมด (total macroscopic cross section)

### 1.3 ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนในลำแสงเข้าชนนิวเคลียสของเป้า

$$\begin{aligned} \text{นิวตรอนทั้งหมดที่วิ่งเข้าชนเป้าต่อวินาที} &= IA \\ \text{นิวตรอนที่ทำปฏิกิริยากับเป้า ต่อวินาที} &= \sigma I \\ \text{ดังนั้น} \quad \frac{\sigma I}{IA} &= \frac{\sigma}{A} \quad \dots (1.5) \end{aligned}$$

สมการ (1.5) คือความน่าจะเป็นที่นิวตรอนในลำแสงเข้าชนนิวเคลียสของเป้าแล้วเกิดปฏิกิริยา

$\sigma$  จะเป็นพื้นที่ภาคตัดขวางที่แท้จริง (effective cross-sectional area) ของนิวเคลียส

### 1.4 หน่วยของภาคตัดขวาง

หน่วยที่ใช้ในการคำนวณคือ เซนติเมตร<sup>2</sup> แต่มักพบเสมอในหน่วย บาร์น (barns) ใช้สัญลักษณ์ "b" โดยกำหนดว่า

$$1 \text{ บาร์น} = 10^{-24} \text{ เซนติเมตร}^2$$

หน่วยที่เล็กลงไปคือ มิลลิบาร์น,

$$1 \text{ มิลลิบาร์น} = 10^{-27} \text{ เซนติเมตร}^2$$

### 1.5 ภาคตัดขวางสำหรับแต่ละปฏิกิริยา

ปฏิกิริยานิวเคลียร์เกิดขึ้นจากการชนของอนุภาคกับนิวเคลียสของเป้าทำให้เกิดปฏิกิริยาชนิดต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาการชนแล้วกระเจิง, อาจเป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น หรือการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น เรียกภาคตัดขวางสำหรับการกระเจิงแบบยืดหยุ่น คือ  $\sigma_{se}$  และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นคือ  $\sigma_{si}$ , ปฏิกิริยา การจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา (radiative capture) คือ  $(n, \gamma)$  ใช้ภาคตัดขวางของการจับนิวตรอน (capture cross section) คือ  $\sigma_c$ , ปฏิกิริยาการแบ่งแยกตัว ใช้ภาคตัดขวางสำหรับการแบ่งแยกตัว  $\sigma_f$  และปฏิกิริยาอื่นๆ ก็จะใช้อักษรใส่ไว้ด้านล่างเพื่อแสดงว่าเป็นภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยานั้น ผลรวมของค่าภาคตัดขวางสำหรับทุกปฏิกิริยาเรียกว่า ภาคตัดขวางทั้งหมด ใช้สัญลักษณ์  $\sigma_t$  เขียนได้ว่า

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s \quad \dots (1.6)$$

เมื่อ  $\sigma_s = \sigma_{se} + \sigma_{si} \quad \dots (1.7)$

และ  $\sigma_a = \sigma_r + \sigma_f + \sigma_p + \sigma_\alpha + \dots \quad \dots (1.8)$

$\sigma_p$  และ  $\sigma_\alpha$  เป็นภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา  $(n, p)$  และ  $(n, \alpha)$

### 1.6 การคำนวณหาค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนที่พลังงานใด ๆ กับนิวเคลียสของเป้า

จำนวนการชนในเป้าต่อวินาที  $= \sigma_t I N A x$

ตามรูปที่ 1.1 นั้น ลำแสงนิวตรอนเข้าชนเป้าทั้งหมด แต่มีหลายการทดลองที่ลำแสงนิวตรอน มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเป้า กรณีนี้ยังคงใช้สมการ (1.2) แต่พื้นที่  $A$  จะใช้พื้นที่ของลำแสงแทนพื้นที่ของเป้า

จากสมการ (1.2)

จำนวนการชนในเป้า ต่อวินาที  $= I N \sigma_t \cdot A x$  ..... (1.9)

เมื่อ  $\sigma_t$  เป็นภาคตัดขวางที่วัดความน่าจะเป็นของการเกิดการชนทุกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น  $Ax$  เป็นปริมาตรทั้งหมดของเป้า

จำนวนการชนในเป้า/เซนติเมตร<sup>3</sup>/วินาที  $= I N \sigma_t$  ..... (1.10)

สมการ (1.10) เรียกว่า ความหนาแน่นของการชน (collision density) ใช้สัญลักษณ์  $F$  ผลคูณของความหนาแน่นอะตอม  $N$  กับภาคตัดขวาง  $\sigma_t$  มักพบบ่อยในการคำนวณทางนิวเคลียร์ ใช้แทนด้วยสัญลักษณ์  $\Sigma_t$  เรียก ภาคตัดขวางมหัพภาคทั้งหมด

$$\Sigma_t = N\sigma_t \quad \dots (1.11)$$

สำหรับการกระเจิง ใช้  $N\sigma_s$  เรียก ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการกระเจิง

(macroscopic scattering cross section)

เนื่องจาก $N$ มีหน่วย อะตอม/ซม. <sup>3</sup>	และ
$\sigma$ มีหน่วยเป็น	ซม. <sup>2</sup> /อะตอม
ดังนั้น $\Sigma$ จึงมีหน่วยเป็น	ซม. <sup>-1</sup>

ความหนาแน่นของการชน จึงเขียนได้ว่า

$$F = \Sigma_t I \quad \dots (1.12)$$

### 1.7 การคำนวณหาภาคตัดขวางมหัพภาค

จากสมการ (1.11),  $\Sigma_t = N\sigma_t$  ซม.<sup>-1</sup>

ถ้าเป้าเป็นธาตุที่มีมวลอะตอม  $= A$

ความหนาแน่น  $= \rho$  กรัม/ซม.<sup>3</sup>

จำนวนกรัมอะตอม/ซม.<sup>3</sup>  $= \frac{\rho}{A}$

$$\text{จำนวนนิวคลีไอ/ซม.}^3 \text{ คือ } N = \rho \frac{N_A}{A} \quad \dots (1.13)$$

$N_A$  คือ เลขอาโวกาโดร =  $0.602 \times 10^{24}$  อะตอม ต่อกรัมอะตอม

สมการ (1.11) อาจเขียนได้ คือ

$$\Sigma_i = \frac{\rho N_A}{A} \cdot \sigma_i \quad \dots (1.14)$$

ภาคตัดขวางจุลภาคมีหน่วยเป็น บาร์น เป็นหน่วยที่ต้องคูณด้วย  $10^{-24}$  เพื่อให้มีหน่วยเป็น เซนติเมตร<sup>2</sup>

$N$  เป็นตัวเลข ที่ต้องคูณด้วย  $10^{24}$  สังเกตว่า กำลัง  $10^{-24}$  ในภาคตัดขวาง กับ  $10^{24}$  ในความหนาแน่นอะตอมจะตัดกันหมดไป

สำหรับสารประกอบ น้ำหนักโมเลกุล  $M$ , ความหนาแน่น  $\rho$  กรัม/ซม.<sup>3</sup>

จำนวนอะตอมของธาตุที่  $i$  ที่มีอยู่ในสารประกอบ =  $N_i$  อะตอม/ซม.<sup>3</sup>

จะเขียนสมการ (1.13) ได้ คือ

$$N_i = \rho \frac{N_A}{M} v_i$$

เมื่อ  $v_i$  คือ จำนวนอะตอมชนิดที่  $i$  ใน 1 โมเลกุลของสารประกอบนั้น

$M$  คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบ

ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับแต่ละธาตุในสารประกอบ คือ

$$\Sigma_i = N_i \sigma_i = \rho \frac{N_A}{M} v_i \sigma_i$$

เมื่อ  $\sigma_i$  คือภาคตัดขวางจุลภาคของธาตุที่  $i$

สำหรับสารประกอบ, ค่าภาคตัดขวางมหัพภาค คือ

$$\begin{aligned} \Sigma &= N_1 \sigma_1 + N_2 \sigma_2 + \dots + N_i \sigma_i + \dots \\ &= \rho \frac{N_A}{M} (v_1 \sigma_1 + v_2 \sigma_2 + v_3 \sigma_3 + \dots + v_i \sigma_i) \end{aligned}$$

(1.15)

### ตัวอย่างที่ 1.1

ลำแสงนิวตรอน พลังงาน 1 เอ็มอีวี ความเข้ม  $5 \times 10^8$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เข้าชนเป้าบาง พื้นที่ของเป้า 0.5 ซม.<sup>2</sup> หนา 0.05 ซม. ลำแสงมีพื้นที่ภาคตัดขวาง 0.1 ซม.<sup>2</sup> พบอัตราการเกิดปฏิกิริยาในเป้า =  $5.2 \times 10^5$  นิวตรอนต่อวินาที จงหา

(ก) ภาคตัดขวางทั้งหมดของนิวตรอนพลังงาน 1 เอ็มอีวีกับเป้า

(ข) ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนในลำแสงจะชนกับเป้า

กำหนด ความหนาแน่นอะตอมของเป้า =  $0.0803 \times 10^{24}$  อะตอม/ซม.<sup>3</sup>

(ก) ปฏิริยาการชนที่เกิดขึ้นในเป้า =  $\sigma I N A x$  นิวตรอน/วินาที

$$\sigma = \frac{\text{ปฏิริยาการชนที่เกิดขึ้นในเป้า}}{I N A x}$$

แทนค่า  $I = 5 \times 10^8$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที,  $N = 0.0803 \times 10^{24}$  อะตอม/ซม.<sup>3</sup>

$A = 0.1$  ซม.<sup>2</sup>,  $x = 0.05$  ซม.

$$\sigma = \frac{5.21 \times 10^5}{5 \times 10^8 \times 0.0803 \times 10^{24} \times 0.1 \times 0.05}$$

$$= 2.6 \times 10^{-24} \quad \text{ซม.}^2$$

$$= 2.6 \quad \text{บาร์น}$$

(ข) นิวตรอนชนเป้าทั้งหมด =  $IA = 5 \times 10^8 \times 0.1 = 5 \times 10^7$  นิวตรอน/วินาที

นิวตรอนชนเป้าแล้วเกิดปฏิริยา =  $5.21 \times 10^5$  นิวตรอน/วินาที

(การชนจะเกิดขึ้นบริเวณที่ลำแสงนิวตรอนชนเป้าเท่านั้น)

$$\text{ความน่าจะเป็นที่นิวตรอนในลำแสงจะชนเป้า} = \frac{5.21 \times 10^5}{5 \times 10^7}$$

$$= 1.04 \times 10^{-2}$$

แสดงว่ามีนิวตรอนเพียง 1 ตัวใน 100 ตัวเท่านั้น ที่จะเกิดการชนเมื่อวิ่งผ่านเป้า

### ตัวอย่างที่ 1.2

ปฏิริยา ( $n, \gamma$ ) และ ( $n, f$ ) เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนมีพลังงาน 0.0253 อีวี เข้าชนกับยูเรเนียม-235 ภาคตัดขวางของปฏิริยา คือ 99 บาร์น และ 582 บาร์น ตามลำดับ จงหาความน่าจะเป็นของการเกิดการแบ่งแยกตัวเมื่อนิวตรอนถูกดูดกลืนโดยยูเรเนียม-235

เนื่องจาก  $\sigma_f$  และ  $\sigma_a$  เป็นปฏิภาคกับความน่าจะเป็นของการจับนิวตรอน แล้วเกิดรังสีแกมมา และการเกิดการแบ่งแยกตัว

ความน่าจะเป็นของการเกิดการแบ่งแยกตัว คือ

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a} &= \frac{\sigma_f}{\sigma_a} \\ &= \frac{582}{681} = 85.5 \text{ เปอร์เซ็นต์} \end{aligned}$$

### ตัวอย่างที่ 1.3

ลำแสงนิวตรอนความเข้ม  $5 \times 10^8$  นิวตรอน/ซม.<sup>2</sup>/วินาที เข้าชนเป้าทำด้วยกราไฟท์  
จงหา

(ก) ภาคตัดขวางมหัพภาคทั้งหมดของกราไฟท์

(ข) ความหนาแน่นของการชนในเป้า

กำหนด ความหนาแน่นอะตอมของกราไฟท์ =  $0.0803 \times 10^{24}$  อะตอม/ซม.<sup>3</sup>

ภาคตัดขวางจุลภาคทั้งหมด =  $2.6 \times 10^{-24}$  ซม.<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} \text{(ก)} \quad \Sigma_t &= N \sigma_t \\ &= 0.0803 \times 10^{24} \times 2.6 \times 10^{-24} \\ &= 0.21 \quad \text{ซม.}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(ข)} \quad F &= \Sigma I \\ &= 0.21 \times 5 \times 10^8 \\ &= 1.05 \times 10^8 \quad \text{นิวตรอน/ซม.}^3/\text{วินาที} \end{aligned}$$

### ตัวอย่างที่ 1.4

ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับการจับเทอร์มาลนิวตรอนโดยไฮโดรเจน คือ 0.33 บาร์น, สำหรับ ออกซิเจน คือ  $2 \times 10^{-4}$  บาร์น จงคำนวณหา ภาคตัดขวางมหัพภาคสำหรับการจับเทอร์มาลนิวตรอนของน้ำ

น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ  $M = 18$

ความหนาแน่นของน้ำ  $\rho = 1.0$  กรัม/ซม.<sup>3</sup>

1 โมเลกุลของน้ำประกอบด้วย ไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม จากสมการ (1.15)

$$\Sigma = \frac{\rho N_A}{M} (v_1 \sigma_1 + v_2 \sigma_2)$$

$$\begin{aligned} \Sigma_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{1 \times N_A}{18} (2 \sigma_H + \sigma_O) \\ &= \frac{0.602 \times 10^{24}}{18} (2 \times 0.33 + 2 \times 10^{-4}) 10^{-24} \\ &= 0.022 \quad \text{ซม.}^{-1} \end{aligned}$$



$$\frac{19.0 \times 0.602 \times 10^{24}}{238}$$

$$N^{235} = \frac{0.72}{100} \left( \frac{19.0 \times 0.602 \times 10^{24}}{235} \right)$$

$$= 3.5 \times 10^{20} \quad \text{อะตอม/ซม.}^3$$

$$\begin{aligned} \Sigma (\text{ยูเรเนียมธรรมชาติ}) &= N^{238} \sigma_a^{238} + N^{235} \sigma_a^{235} \\ &= (4.77 \times 10^{22}) (2.71 \times 10^{-24}) + \\ &\quad (3.5 \times 10^{20}) (683 \times 10^{-24}) \\ &= 0.368 \quad \text{ซม.}^{-1} \end{aligned}$$





















