บทที่2

ทฤษฎี

2.1 Threshold detectors

threshold detectrors คือ ธาตุซึ่งเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนแล้วให้ไอโซโทปกัมมันตรังสี เมื่อนิวตรอนที่เข้าทำอันตรกิริยานั้น มีพลังงานจลน์อย่างน้อยเท่ากับ หรือสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการเกิดปฏิกิริยาเหล่านั้น ถ้าพิจารณาในแง่ของความน่าจะเป็นในการเกิดปฏิกิริยา หรือค่า cross section ของการเกิดปฏิกิริยาแล้วจะได้ว่า

$$\sigma_{E_n} \geq 0 \qquad E_n \geq E_{Th}$$
$$\sigma_{E_n} \approx 0 \qquad E_n < E_{Th}$$

โดยที่ค่า cross section ของการเกิดปฏิกิริยา มีค่าขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของนิวตรอนที่ตกกระทบนั่นคือ เมื่อพลังงานจลน์ของนิวตรอนมีค่าเปลี่ยนไป ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาจะมีขนาดเปลี่ยนไปด้วยโดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้

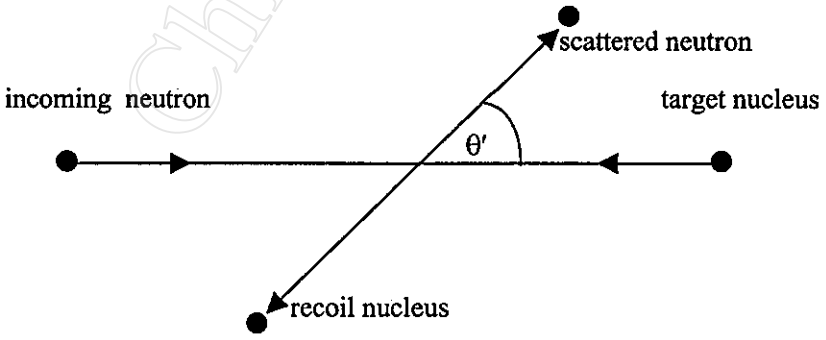
2.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่แสดงสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากมันไม่มีประจุจึงสามารถทะลุเข้าไปในนิวเคลียสของธาตุต่าง ๆ ที่มันเคลื่อนที่ผ่านไปได้ไม่ยาก ถึงแม้ว่ามันจะเป็นนิวตรอนพลังงานต่ำเพราะสามารถฝ่าศักย์ขวางกั้นคูลอมบ์ได้ โดยอันตรกิริยาที่เกิดจากการที่นิวตรอนวิ่งเข้าชนนิวเคลียสเป้า A นั้นอาจเกิดการกระเจิง (scatter) ยังผลให้มีการปล่อยนิวตรอนอีกตัวหนึ่งออกมาหรืออาจได้นิวเคลียสเชิงประกอบ C ซึ่งมีค่าพลังงานอยู่ในสภาวะโลด (excited energy) โดยนิวเคลียสเชิงประกอบที่ฟอร์มขึ้นนี้อาจสลายตัวได้หลายรูปแบบ สามารถจำแนกอันตรกิริยาที่รังสีนิวตรอนกระทำกับธาตุเป้า A ได้ดังนี้ (Vilaithong et al.,1991)

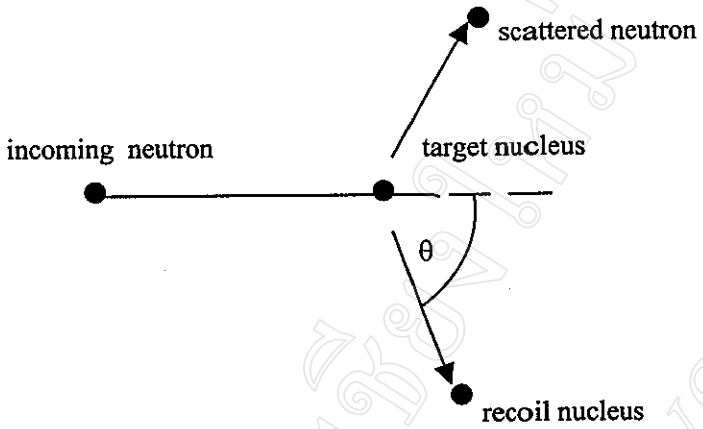
$$A + n \longrightarrow C^* \longrightarrow \begin{cases} A + n & \text{elastic scattering} \\ A^* + n & \text{inelastic scattering} \\ C + \gamma & \text{capture} \\ A^*_1 + A^*_2 & \text{fission} \\ D^* + p & \text{(n,p) reaction} \\ E^* + \alpha & \text{(n, } \alpha\text{) reaction} \end{cases}$$

วิธีการหนึ่งซึ่งใช้ในการตรวจวัดนิวตรอน ได้ในหลายช่วงพลังงาน คือ การวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ติดตามการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสีซึ่งเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีนิวตรอน เช่น ปฏิกิริยา $^{115}In(n,n')^{115m}In$, $^{58}Ni(n,p)^{58}Co$ หรือ $^{27}Al(n,\alpha)^{24}Na$ ซึ่งมีค่า cross section ของการเกิดปฏิกิริยาสูง

ในการหาสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนในตัวกลางน้ำนั้น อันตรกิริยาสำคัญ ที่รังสีนิวตรอนกระทำกับโมเลกุลของน้ำซึ่งมีองค์ประกอบเป็นธาตุ H (hydrogen) และ O (oxygen) ซึ่งจัดว่าเป็นนิวเคลียสเบา (light nucleus) คือการเกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) มีผลให้นิวตรอนถ่ายเทพลังงานให้กับนิวเคลียสเบาเหล่านั้นเกิด recoil nucleus ขึ้นดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 (Knoll,1989) โดยพลังงานที่นิวตรอนถ่ายเทให้กับนิวเคลียสเบานั้น ขึ้นอยู่กับมุมของการกระเจิงดังสมการที่ 2.1 (Knoll,1989) เช่น ถ้าเกิดการชนกันแบบ head on กับไฮโดรเจน จะทำให้นิวตรอนถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับไฮโดรเจน ($\theta \approx 0^\circ$) จากรูปที่ 2.3 และ 2.4 จะเห็นว่าค่า cross section ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของไฮโดรเจนและ ออกซิเจน มีค่าสูงมากนั้นคือน้ำเป็นตัว moderator ที่ดี



รูปที่ 2.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่นในระบบ center of mass

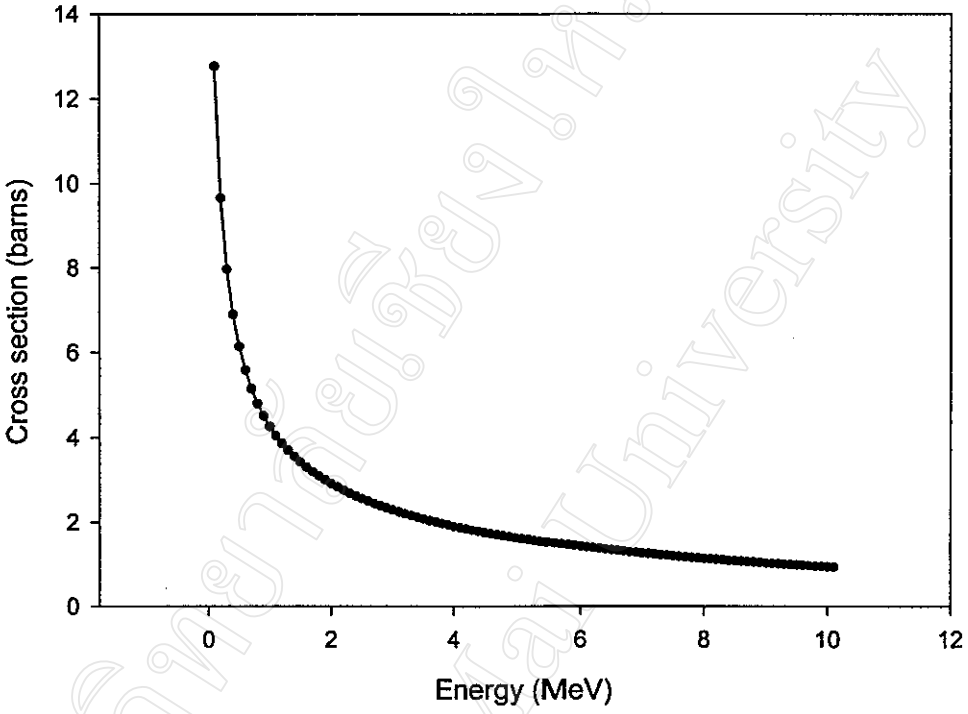


รูปที่ 2.2 การกระเจิงแบบยืดหยุ่นในระบบ laboratory

$$E_R = \frac{4A}{(1-A)^2}(\cos^2\theta)E_n \qquad (2.1)$$

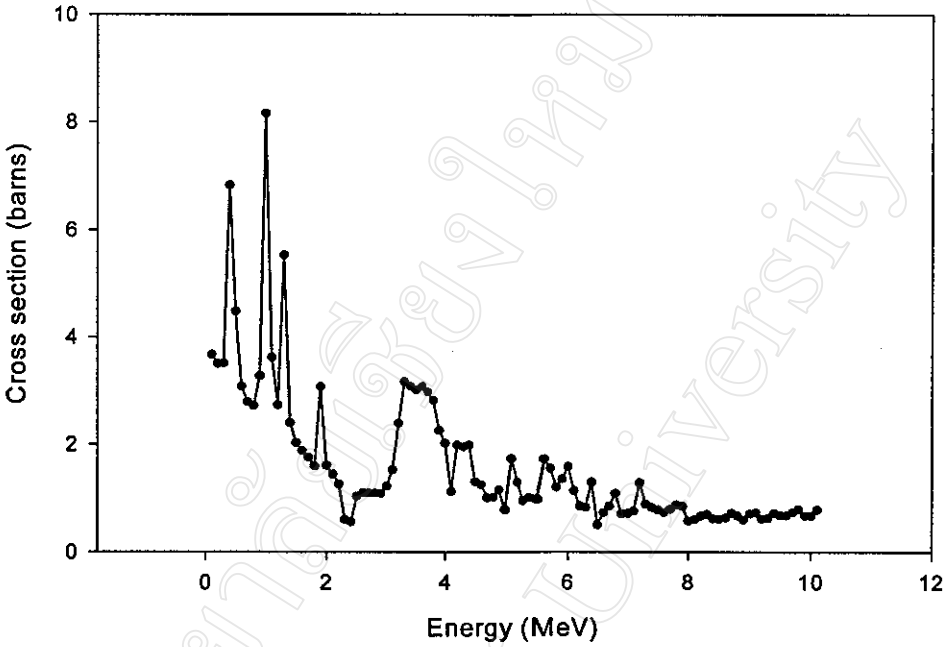
เมื่อ

A	คือ มวลนิวเคลียสของธาตุเป้า/มวลนิวเคลียสของนิวตรอน
E_n	พลังงานจลน์ของรังสีนิวตรอนก่อนการกระเจิง (laboratory system)
E_R	พลังงานของ recoil nucleus (laboratory system)
θ'	มุมในการกระเจิงของนิวตรอน(center of mass system)
θ	มุมในการกระเจิงของ recoil nucleus (laboratory system)



รูปที่ 2.3 ค่า cross section ในการกระเจิงแบบยืดหยุ่น
ของธาตุไฮโดรเจน (ENDF/B-VI)

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University



รูปที่ 2.4 ค่า cross section ในการกระเจิงแบบยืดหยุ่น
ของธาตุออกซิเจน (ENDF/B-VI)

2.3 ค่าครึ่งชีวิตและค่าคงที่การสลายตัว

ค่าครึ่งชีวิตคือช่วงเวลาที่นิวเคลียสกัมมันตรังสีสลายตัวเหลือเพียงครึ่งหนึ่ง ของปริมาณเดิม พิจารณาสมการการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \tag{2.2}$$

เมื่อ

N_0 คือจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี ณ. เวลา $t=t_0$

N คือจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี ณ. เวลา t ใด ๆ หลังจากหยุดอาบรังสีนิวตรอน

t คือเวลาในการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี

λ คือค่าคงที่การสลายตัวหรือความน่าจะเป็นในการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสีหนึ่งนิวเคลียสต่อวินาที

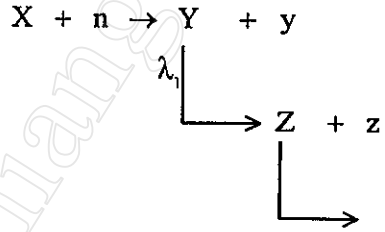
จากสมการ (2.2) ถ้าให้ t_a เป็นเวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอน (activation time) จำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี N_0 ณ. $t=t_a$ สลายตัวไปจนเหลือจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี $N = N_0/2$ ณ.เวลา $t = t_{1/2}$ ดังนั้นค่าครึ่งชีวิตของการนิวเคลียสกัมมันตรังสี นั้นค่าครึ่งชีวิตของการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสีมีค่าดังสมการที่ (2.3)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \tag{2.3}$$

เมื่อ $T_{1/2}$ คือค่าครึ่งชีวิตของการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี

2.4 อัตราการเกิดนิวเคลียสกัมมันตรังสี

พิจารณาการใช้อนุภาคนิวตรอน ซึ่งมีพลังงานจลน์สูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม ไปเหนี่ยวนำนิวเคลียสของธาตุเป้า X ให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ชนิดต่าง ๆ เช่น (n,p) , (n,α) , (n,n'γ) ทำให้นิวเคลียสของธาตุเป้า X เปลี่ยนไปเป็นนิวเคลียสกัมมันตรังสี ซึ่งเรียกว่า parent nucleus Y และอนุภาค y โดยนิวเคลียสกัมมันตรังสี Y ซึ่งไม่เสถียรจะสลายตัวต่อไปด้วยค่าคงที่การสลายตัว λ_1 กลายเป็น daughter nucleus Z ซึ่งถ้า daughter nucleus ยังไม่เสถียรมันก็จะสลายตัวต่อไปอีกจนกว่าจะได้นิวเคลียสเสถียรดังรูป



รูปที่ 2.5 แผนภูมิการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี

ถ้าให้อัตราการเกิดนิวเคลียสกัมมันตรังสี Y (Kaplan,1969) ในช่วงเวลาของการอาบรังสี t เมื่อ $0 < t < t_a$ มีค่าดังสมการ (2.4)

$$R = N_T \int_{E=0}^{E=\infty} \sigma_E \phi_E dE \tag{2.4}$$

เมื่อ

A คืออัตราการเกิดนิวเคลียสกัมมันตรังสี

N_T คือจำนวนนิวเคลียสเสถียรทั้งหมดของเป้า

σ คือค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาเมื่อนิวตรอนมีพลังงาน E (barn)

ϕ คือฟลักซ์ของนิวตรอนเมื่อนิวตรอนมีพลังงาน E ($neutron / cm^2 - sec$)

E คือพลังงานของนิวตรอน (eV)

และนิวเคลียสกัมมันตรังสี Y ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาของการอาบรังสีนิวตรอน จะมีอัตราการสลายตัวไปเป็นนิวเคลียส Z เป็นสัดส่วนกับจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$\text{อัตราการสลายตัว} = \lambda N \tag{2.5}$$

เมื่อ

N คือจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น

λ คือค่าคงที่ในการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี

ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสกัมมันตรังสี ในช่วงเวลาของการอาบรังสี t เมื่อ $0 < t < t_a$ แสดงได้ด้วยสมการ

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N \tag{2.6}$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (2.6) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตของการอินทิเกรต ณ. เวลาเริ่มต้นของการอาบรังสี $t=0$ มีจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี $N=0$ ดังนั้นจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีทั้งหมดที่เกิดขึ้น ณ. เวลา t ใด ๆ เมื่อ $t < t_a$ มีค่าดังสมการ

$$N = \frac{R}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t})$$

$$= \frac{N_T}{\lambda} \int_{E=0}^{E=\infty} \sigma_E \phi_E dE \; (1 - e^{-\lambda t}) \tag{2.7}$$

จากสมการที่ (2.7) จำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีสุทธิที่เกิดขึ้น ณ. เวลา $t = t_a$ มีค่าดังสมการ

$$N_0 = \frac{N_T}{\lambda} \int_{E=0}^{\infty} \sigma_E \phi_E dE \ (1 - e^{-\lambda t_a}) \qquad (2.8)$$

ภายหลังสิ้นสุดการอาบรังสีนิวตรอน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จะมีแต่การสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี Y ไปเป็นนิวเคลียส Z ด้วยค่าคงที่ของการสลายตัว λ เพียงอย่างเดียวเท่านั้น เรียกอัตราการสลายตัวนี้ว่ากัมมันตภาพ (activity) แทนด้วย A_0 มีค่าดังสมการที่ (2.9)

$$\begin{aligned} A_0 &= \lambda N \\ &= R\left(1 - e^{-\lambda t_a}\right) \end{aligned} \qquad (2.9)$$

อาจเขียนสมการที่ (2.9) ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียน โดยเครื่องหมายลบแสดงถึงการลดลงของนิวเคลียสกัมมันตรังสีดังนี้

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad (2.10)$$

ดังนั้นจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีหรือค่ากัมมันตภาพที่เหลือ ณ. เวลา t ใด ๆ ภายหลังจากการอาบรังสีเป็นเวลา $t = t_a$ สามารถหาได้โดยทำการอินทิเกรต สมการที่ (2.10) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขตที่ว่านิวเคลียสกัมมันตรังสี ณ. เวลา $t = 0$ มีค่าเป็น N_0 และจำนวนนิวเคลียสที่เหลือ ณ. เวลา $t > t_a$ ใด ๆ มีค่าเท่ากับ N มีค่าดังสมการที่ (2.11)

$$A_{(t)} = A_0 e^{-\lambda t} \qquad (2.11)$$

ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดปริมาณนิวเคลียสกัมมันตรังสีได้ โดยการตรวจวัดรังสีแกมมาหรืออนุภาคที่ปล่อยออกมาเมื่อนิวเคลียสกัมมันตรังสีมีการสลายตัว จากสมการที่ (2.11) ถ้าให้ t_1 เป็นช่วงเวลาตั้งแต่หยุดอาบรังสีจนถึงเวลาเริ่มวัด และ t_2 เป็นช่วงเวลาตั้งแต่หยุดอาบรังสี จนถึงเวลาสิ้นสุดการวัดดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่สลายตัวไปในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าดังสมการที่ (2.12)

$$\Delta N = \int_{t=t_1}^{t_2} A_{(t)} dt \qquad (2.12)$$

แทนค่า $A_{(t)}$ จากสมการที่ (2.11) ลงในสมการที่ (2.12)

$$\Delta N = \frac{A_0}{\lambda}(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \qquad (2.13)$$

แทนค่า A_0 จากสมการที่ (2.9) ลงในสมการที่ (2.13)

$$\Delta N = \frac{R}{\lambda}(1-e^{-\lambda t_a})(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \qquad (2.14)$$

จากรูปที่ 2.6 จะได้ว่า t_1 คือช่วงเวลาที่นิวเคลียสกัมมันตรังสี N_0 ใช้ในการสลายตัวก่อนจะทำการวัดหรือ decay time แทนด้วย t_d และช่วงเวลา t_2 คือผลรวมของช่วงเวลาการสลายตัวก่อนจะทำการวัดและช่วงเวลาในการวัดหรือ counting time ซึ่งแทนด้วย t_c นั่นคือ $t_2 = t_d + t_c$ เขียนสมการที่ (2.14) ใหม่ได้ว่า

$$\Delta N = \frac{R}{\lambda}(1-e^{-\lambda t_a})e^{-\lambda t_d}(1-e^{-\lambda t_c}) \qquad (2.15)$$

แทนค่า R จากสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.15) จะได้ว่า

$$\Delta N = \frac{N_T \int_{E=0}^{\infty} \sigma_{(E)}\, \phi_{(E)} dE}{\lambda}(1-e^{-\lambda t_a})e^{-\lambda t_d}(1-e^{-\lambda t_c}) \qquad (2.16)$$

เมื่อ

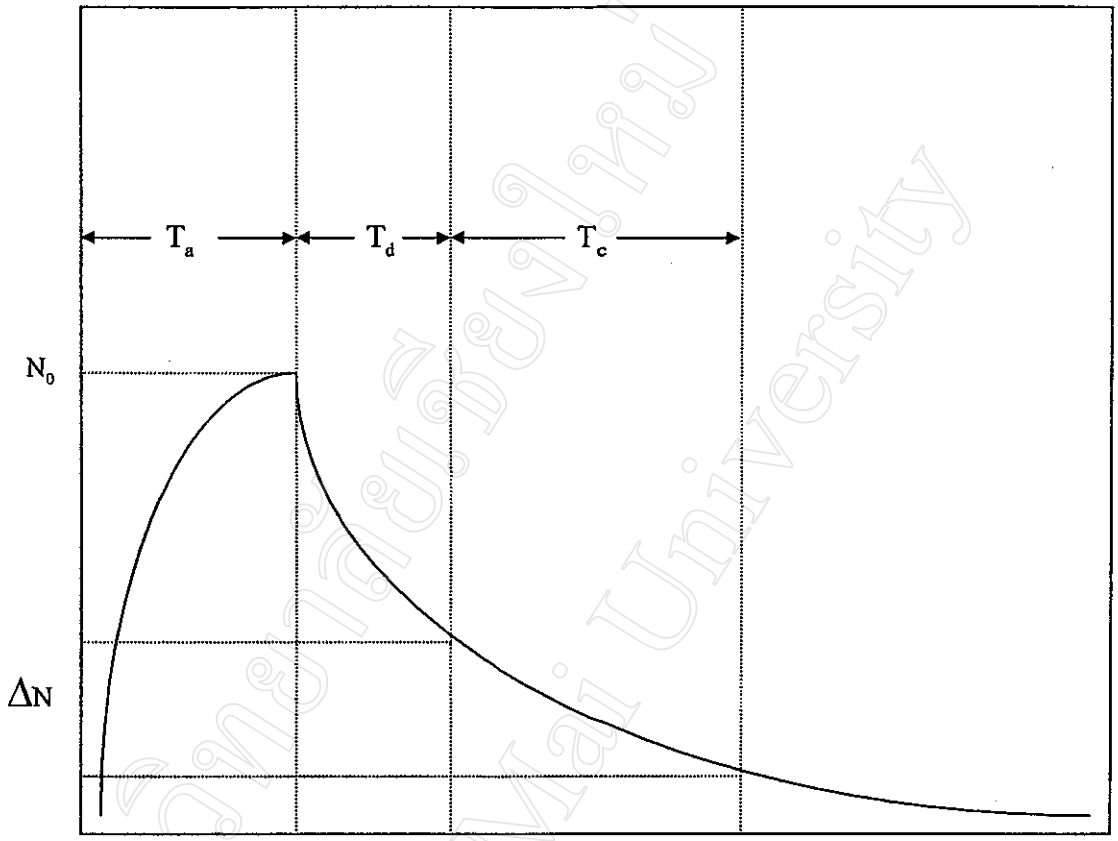
t_a คือช่วงเวลาการอาบรังสีนิวตรอน

t_d คือช่วงเวลาในการสลายตัวของรังสีนิวตรอนก่อนการวัด

t_c คือช่วงเวลาในการวัด

N_0 คือจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี ณ.เวลา $t = t_a$

ΔN คือจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่วัดได้ในช่วงเวลา t_c



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดและการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี (Knoll,1989)

โดยที่

$$N_T = \frac{m}{M} N_A B P \qquad (2.17)$$

เมื่อ

N_A คือ Avogadro's Number (6.02×10^{23} mol^{-1})

m คือมวลของธาตุ (g)

M คือน้ำหนักอะตอม (atomic weight)

B คือค่า percentage abundance

P คือค่า purity ของ detector

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.16) ใหม่ดังนี้

$$\Delta N = \frac{mBPN_A \int_{E=0}^{\infty} \sigma_{(E)}\, \phi_{(E)} dE}{M\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c}) \qquad (2.18)$$

ในการตรวจวัดการสลายตัวของนิวเคลียสกัมมันตรังสี นิยมวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ติดตามการสลายตัวในรูปแบบต่าง ๆ ของนิวเคลียสกัมมันตรังสีโดยปริมาณรังสีแกมมาที่ตกกระทบหัววัดมีค่าดังสมการที่ (2.19)

$$C = \varepsilon\, I_g \Delta N \qquad (2.19)$$

เมื่อ

C คือปริมาณรังสีแกมมาที่ตรวจวัดได้ (counts)

ε คือค่าประสิทธิภาพของหัววัด

I_g คือค่า gamma fraction

แทนค่าสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.19)

$$C = \frac{mI_g BP\varepsilon\, N_A \int_{E=0}^{\infty} \sigma_{(E)}\, \phi_{(E)} dE}{M\lambda} (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c}) \qquad (2.20)$$

จัดรูปสมการที่ (2.20)ใหม่โดยเพิ่มตัวแปรซึ่งใช้เป็น correction factor ของมุมตัน (solid angle) K_Ω สำหรับ point source ที่ใช้ในการหา absolute photo peak efficiency และ แผ่น detectors ซึ่งเป็น source ที่มีขนาด

$$\int_{E=0}^{\infty} \sigma_{(E)} \phi_{(E)} dE = \frac{CM\lambda}{mI_g BP\varepsilon\, K_\Omega N_A (1 - e^{-\lambda t_a}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c})} \qquad (2.21)$$

จัดรูปสมการที่ (2.21) ใหม่จะได้ว่า

$$A_i = \frac{C_0 M\lambda}{mI_g BP\varepsilon K_\Omega N_A (1-e^{-\lambda t_a})(1-e^{-\lambda t_c})} \qquad (2.22)$$

เมื่อ

A_i คือค่า saturated activity ณ. เวลา t_a ใด ๆ ที่ได้จากการทดลอง

C_0 คือค่า counts ณ.เวลาหยุดอาบรังสี

K_Ω คือค่า correction factor ของมุมตัน

ดังนั้นค่า saturated activity ณ.เวลา $t = t_a$ จะมีค่าดังสมการที่ (2.22) ซึ่งจะเป็น input ค่าหนึ่งในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

2.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II

ในปัจจุบันการวัดสเปกตรัมของรังสีนิวตรอน โดยวิธีการก่อกัมมันต์ในแผ่นโลหะเป็นที่นิยมโดยทั่วไปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II ออกแบบมาให้คำนวณหาสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจากปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะทำการวัดสเปกตรัมของรังสีนิวตรอนจากไอโซโทป ^{252}Cf ตั้งแต่ในระดับพลังงานต่ำจนถึงระดับพลังงานสูงประมาณ 8 MeV สำหรับวิธีการคำนวณประกอบด้วยการเลือกรูปแบบของเส้นสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นสเปกตรัมของธาตุที่เราสนใจเพื่อใช้เป็นเส้นสเปกตรัมเริ่มแรก (the initial spectrum) และทำการแบ่งช่วงพลังงานของนิวตรอนออกเป็น 77 ช่วงพลังงาน จากนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II จะทำการคำนวณแบบ iteration เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไขค่า saturated activity ที่ได้จากการคำนวณ ให้มีค่าสอดคล้องกับค่า saturated activity ที่ได้จากการทดลองโดยถ้าเราให้ (Oak Ridge National Laboratory ,1969)

A_i คือค่า saturated activity ที่ได้จากการทดลองจากการวัดปฏิกิริยาที่ i

$A_i^{(k)}$ คือค่า saturated activity ที่ได้จากการคำนวณสำหรับปฏิกิริยาที่ i จากการคำนวณแบบ iteration ครั้งที่ k

$\varphi_E^{(k)}$ คือค่า differential flux จากการคำนวณแบบ iteration ครั้งที่ k

E_j คือพลังงานค่าที่ j ของรังสีนิวตรอน

$\phi_j^{(k)}$ คือค่า integral flux ของรังสีนิวตรอนในช่วงพลังงานที่ j ระหว่าง

$\sigma_i^{(E)}$ คือค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาที่ I เมื่อรังสีนิวตรอนมีพลังงาน E

$A_{ij}^{(k)}$ คือค่า saturated activity ที่ได้จากการคำนวณแบบ iteration ครั้งที่ k เมื่อรังสีนิวตรอนมีพลังงานอยู่ในช่วง E_j ถึง E_{j+1} ของปฏิกิริยาที่ i

$j = 1,2,...,m$ คือดัชนีบอกช่วงพลังงาน

$i = 1,2,...,n$ คือดัชนีบอกชนิดของปฏิกิริยา

$k = 1,2,...$ คือดัชนีบอกจำนวนรอบของการคำนวณแบบ iteration

ถ้าเราให้ค่าภาคตัดขวางเฉลี่ยของการเกิดปฏิกิริยาที่ i ในช่วงพลังงาน E_j ถึง E_{j+1} ของรังสีนิวตรอนมีค่าดังสมการที่ (2.23)

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{\int_{E_j}^{E_{j+1}} \sigma_i^{(E)} dE}{\int_{E_j}^{E_{j+1}} dE} \qquad (2.23)$$

และกำหนดให้ผลรวมฟลักซ์ของรังสีนิวตรอนในช่วงพลังงานที่ j สำหรับการคำนวณแบบ iteration ครั้งที่ k มีค่าดังสมการ (2.24)

$$\phi_j^{(k)} = \int_{E_j}^{E_{j+1}} \varphi_E^{(k)} dE \qquad (2.24)$$

ใช้สเปกตรัมเริ่มแรกในการคำนวณแบบ Maxwellian ซึ่งมีค่า Maxwellian temperature 1.42 MeV ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\phi_j^0 = (1.0E+10)\sqrt{E_j}\, e^{-E_j/1.42} \qquad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.24) และ (2.25) จะได้ค่า saturated activity เริ่มแรกที่ได้จากการคำนวณของปฏิกิริยาที่ i ช่วงพลังงานที่ j สำหรับการคำนวณแบบ iteration รอบที่ k มีค่าดังสมการที่ (2.26)

$$A_{ij}^{(k)} = \bar{\sigma}_{ij} \phi_j^{(k)} \qquad (2.26)$$

นั่นคือค่า saturated activity เริ่มแรกจากการคำนวณของปฏิกิริยาที่ i สำหรับการคำนวณแบบ iteration รอบที่ k มีค่าดังสมการที่ (2.27)

$$A_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{m} A_{ij}^{(k)} \tag{2.27}$$

ถ้าให้ $W_{ij}^{(k)}$ คือค่าถ่วงน้ำหนักกัมมันตภาพ (the activity - weighting) มีค่าดังสมการ (2.28)

$$W_{ij}^{(k)} = \frac{A_{i,j}^{(k)}}{A_i^{(k)}} \tag{2.28}$$

โดยการกำหนดให้ $R_i^{(k)}$ คือสัดส่วนของค่า saturated activity ที่ได้จากการวัดต่อค่า saturated activity ที่ได้จากการคำนวณ

$$R_i^{(k)} = \frac{A_i}{A_i^{(k)}} \tag{2.29}$$

จากสมการที่ (2.28) และ (2.29) จะได้ค่า activity - weighting correction term ในรูปของค่าลอการิธึมส์ $R_i^{(k)}$ ดังนี้

$$C_j^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_{ij}^{(k)} \ln R_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^{n} W_{ij}^{(k)}} \tag{2.30}$$

ดังนั้นฟลักซ์ของรังสีนิวตรอนที่ได้จากการคำนวณแบบ iteration รอบที่ $k+1$ จะมีค่าดังสมการที่ (2.31)

$$\varphi_i^{(k+1)} = \varphi_j^{(k)} e^{(c_j^k)} \tag{2.31}$$

การคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SAND II นี้จะทำการคำนวณจนกว่าจะครบรอบที่เราต้องการหรือให้ค่า $R_i^{(k)}$ เข้าใกล้หนึ่ง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

2.6 ข้อแนะนำในการคัดเลือก threshold detector

ในการคัดเลือก threshold detector ได้ใช้เงื่อนไขต่อไปนี้มาประกอบการพิจารณา

(ก) ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ควรมีค่าที่แน่นอนเชื่อถือได้ครอบคลุมช่วงพลังงานของรังสีนิวตรอนที่สนใจ และควรมีค่าสูงพอที่จะทำให้ ค่ากัมมันตภาพใน detectors ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากพอที่จะให้ผลการวัดที่ดี

(ข) ค่า gamma ray abundance ของไอโซโทปกัมมันตรังสี ควรมีค่าสูงเพื่อให้ผลการวัดรังสีแกมมาที่มีค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติต่ำ

(ค) ต้องทราบค่าที่แน่นอนของค่าครึ่งชีวิตของนิวเคลียสกัมมันตรังสี ซึ่งไม่ควรคลาดเคลื่อนเกิน 2 เปอร์เซ็นต์ และค่าครึ่งชีวิตควรมีความยาวนานในระดับ 10 นาที จนถึงระดับหลาย ๆ สัปดาห์โดยค่าครึ่งชีวิตไม่ควรสั้นเกินไป เพราะถ้าฟลักซ์ของรังสีนิวตรอนมีค่าไม่คงที่ตลอดเวลาในการอาบรังสีจะทำให้เราได้ค่ากัมมันตภาพซึ่งเกิดขึ้นในช่วงปลายของการอาบรังสีเท่านั้น

(ง) detectors ที่ใช้ควรมีความบริสุทธิ์สูง (high purity) เพื่อลดการรบกวนอันเนื่องมาจากรังสีแกมมาที่เกิดจากธาตุอื่น ๆ ที่เจือปนอยู่ในแผ่นโลหะ ซึ่งอาจมีพลังงานใกล้เคียงหรือพลังงานเดียวกันกับรังสีแกมมาที่เราสนใจ

(จ) detectors ที่ใช้ควรทราบค่าเปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ที่แน่นอน ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณจำนวนอะตอมใน detectors ได้อย่างถูกต้อง