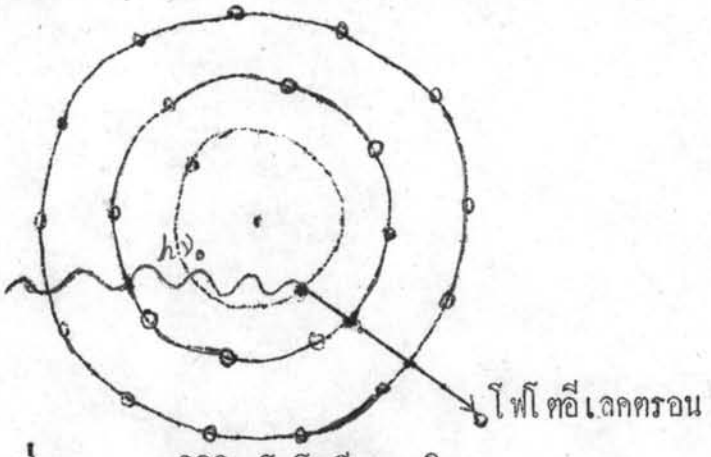
บทที่ 2

ทฤษฎี

รังสีแกมม่าเมื่อกระทบกับสสาร จะเกิดปฏิกิริยา 3 แบบคือ

2.1 ปฏิกิริยาโฟโตอีเลคตริก (Photoelectric Effect)



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาโฟโตอีเลคตริก

เมื่อรังสีแกมม่าซึ่งมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของอีเลคตรอนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียสมาทำปฏิกิริยากับอีเลคตรอน พลังงานทั้งหมดของรังสีแกมม่าจะถ่ายทอดให้กับอีเลคตรอน ซึ่งจะกระเด็นออกไปจากอะตอม

ถ้า E เป็นพลังงานของรังสีแกมม่า

B เป็นพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอีเลคตรอน

E-B จะเป็นพลังงานจลน์ของอีเลคตรอนที่กระเด็นออกไป

เราเรียกอีเลคตรอนตัวนี้ว่า โฟโตอีเลคตรอน ซึ่งจะประพฤติตัวเช่นเดียวกับรังสีเบต้าที่มีพลังงานเท่ากันในการผ่านวัตถุ สำหรับรังสีแกมม่าที่มีพลังงานสูงมาก โฟโตอีเลคตรอนส่วนมากจะถูกขับไปในทิศทางด้านหน้า นั่นคือ ทิศทางเดียวกับรังสีแกมม่าที่ตกลงมา แต่สำหรับรังสีแกมม่าที่มี-

พลังงานต่ำ ทิศทางของโฟโตอีเลคตรอนส่วนมากจะอยู่ในแนวมุมฉากกับทิศทางของรังสีแกมม่า

ถ้าให้ η_a เป็นพื้นที่หน้าตัดการดูดกลืนโฟโตอีเลคตริก/อะตอม (1)

$$\eta_a = \phi_0 Z^5 \left(\frac{1}{137}\right)^4 4\sqrt{2}\left(\frac{M_0c^2}{h\nu}\right)^{7/2} \quad ..(2.1.1)$$

เมื่อ $\phi_0 = \frac{8\pi}{3}\left(\frac{e^2}{M_0c^2}\right)^2$

$= 6.651 \times 10^{-25}$ ซม^2

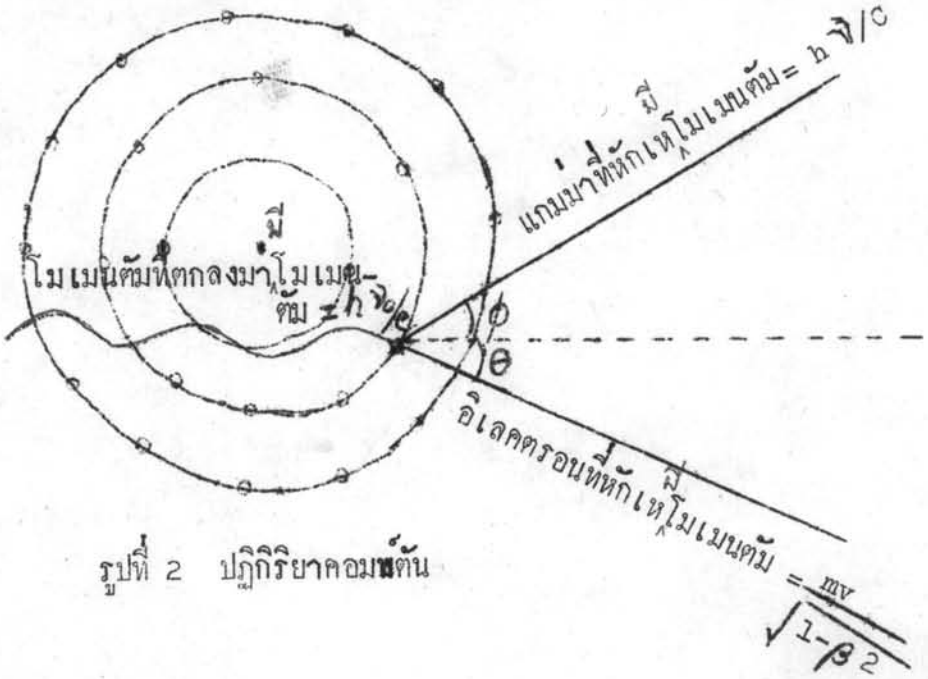
เมื่อ $h\nu$ เป็นพลังงานของโฟตอนที่ตกลงมา

M_0c^2 เป็นพลังงานหยุดนิ่งของอีเลคตรอน

Z เป็นเลขอะตอมของวัตถุที่ดูดกลืน

สมการ (2.1.1) นี้ ใช้กับการหลุดของอีเลคตรอนจากวงจรชั้นที่ k ของอะตอม ซึ่งมีอยู่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของปรากฏการณ์แบบนี้

2.2 ปฏิกิริยาคอมพ์ตัน (Compton Effect)



รูปที่ 2 ปฏิกิริยาคอมพ์ตัน

ในปฏิกิริยานี้ รังสีแกมม่าที่เป็นโฟตอนจะทำปฏิกิริยาแบบการเบน (scattering) แบบอีลาสติคกับอีเลคตรอน ซึ่งประพฤติตัวเกือบเหมือนกับอีเลคตรอนอิสระ เมื่อพลังงานของโฟตอนมากกว่า พลังงานยึดเหนี่ยวมาก บางส่วนของพลังงานของโฟตอนที่ตกลงมาจะแบ่งไปให้แก่อีเลคตรอน และในขณะเดียวกัน โฟตอนจะเบนไปจากทิศเดิม

ข้อแตกต่างที่พึงสังเกตได้ระหว่างปฏิกิริยาโฟโตอีเลคตริก และคอมพ์ตัน คือ ปฏิกิริยาโฟโตอีเลคตริกนั้น โฟตอนจะถูกดูดกลืน แต่ปฏิกิริยาทางคอมพ์ตันนั้น โฟตอนจะถูกลดพลังงานลง และจำนวนที่ลดลงนี้จะมากขึ้น ๆ อยู่กับพลังงานเดิม และมุมที่ใหญ่ขึ้น และโฟตอนที่เบนยังอยู่ในปฏิกิริยาคอมพ์ตันจะยังอยู่ในมีเดียม ถึงแม้ว่า จะมีพลังงานลดลง และเคลื่อนไหวในทิศทางที่แตกต่างไป โฟตอนเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาคอมพ์ตันอีกในมีเดียมที่หนาพอ เรียกว่า เกิดการหักเหหลายครั้ง (multiple scattering) และถ้าไม่หลุดไป โฟตอนที่หักเหนี้ จะจบสิ้นลงเมื่อถูกดูดกลืน เป็นปฏิกิริยาโฟโตอีเลคตริก ซึ่งจะมีโอกาสมากขึ้น เมื่อพลังงานลดน้อยลง

Compton สมมติว่า การหักเหนี้ถือว่า เป็นการหักเหแบบอีลาสติคระหว่างโฟตอนและอีเลคตรอนอิสระ ซึ่งจะมีทั้งการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัม[1]

จากความหมายของคำว่า การอนุรักษ์พลังงาน จะได้

$$h\nu_0 = h\nu + M_0c^2\left[\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1\right] \quad \ldots\ldots(2.2.1)$$

เมื่อ ν_0 เป็นความถี่ของแกมม่าที่ตกลงมา

ν เป็นความถี่ของแกมม่าที่หักเหโดยอีเลคตรอน

v เป็นความเร็วของอีเลคตรอนที่หักเห

และจากความหมายของคำว่า การอนุรักษ์โมเมนตัม จะได้

ในแกน X $$\frac{h\nu_0}{c} = \frac{h\nu}{c}\cos\phi + \frac{M_0v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\cos\theta \quad \ldots(2.2.2)$$

ในแกน Y, $0 = \frac{h\nu}{c}\sin\phi - \frac{M_o v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\sin\theta$ ...(2.2.3)

จะได้ว่า $h\nu = \frac{h\nu_o}{1 + \frac{h\nu_o}{M_o c^2}(1-\cos\phi)}$ ...(2.2.4)

พลังงานจลน์ของอีเลคตรอนที่เบน จะได้เป็น

$$T = h\nu_o - h\nu$$

$$= \frac{(1-\cos\phi)\, h\nu_o / M_o c^2}{1 + \frac{h\nu_o}{M_o c^2}(1-\cos\phi)} \quad \text{...(2.2.5)}$$

พลังงานจลน์นี้ จะมีค่าสูงสุด เมื่อ $\cos\phi = -1$ หรือ $= 180^\circ$ และโฟตอนจะสะท้อนกลับ พลังงานจลน์จะมีค่าเป็น

$$T_{\text{สูงสุด}} = \frac{h\nu_o}{1 + \left(\frac{M_o c^2}{2h\nu_o}\right)} \quad \text{...(2.2.6)}$$

ถ้าให้ ${}_e\sigma$ เป็นพื้นที่หน้าตัดต่ออีเลคตรอนในการเคลื่อนย้ายโฟตอนจากลำแสงเดิมโดยการเบน

$${}_e\sigma = \frac{3}{4}\phi_o\left\{\frac{1+\alpha}{2}\left\{\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha}\ln(1+2\alpha)\right\} + \frac{1}{2}\ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2}\right\} \quad \text{...(2.2.7)}$$

$$\alpha = \frac{h\nu_o}{M_o c^2} \quad \text{... (2.2.8)}$$

2.3 ปฏิกิริยาอีเลคตรอนคู่ (Pair Production)

เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 1.02 Mev ผ่านเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอมหนึ่ง ๆ โฟตอนนั้นจะหายไปในสนามไฟฟ้าที่แรงพร้อมกับการเกิดของอีเลคตรอนและโปสิตรอน ในเมื่อพลังงานที่ได้จากอีเลคตรอนและโปสิตรอนมีค่าเท่ากับ 1.02 Mev คือพลังงานที่มีค่าน้อยสุดที่จะทำให้เกิดอีเลคตรอนและโปสิตรอนได้

ถ้าพลังงานของโฟตอนมีค่าเกินกว่า 1.02 Mev จะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอีเลคตรอนและโปสิตรอน และมีพลังงานส่วนน้อยให้กับนิวเคลียส และอนุภาคที่เกิดขึ้น จะมีทิศทางไปทางข้างหน้า และผลที่เกิดจะชัดขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนมากขึ้น

ถ้าให้ $_{\alpha}K$ เป็นพื้นที่หน้าตัดต่ออะตอมของปฏิกิริยาอีเลคตรอนคู่ ค่านี้จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อโฟตอนมีพลังงานน้อยกว่า 1.02 Mev สำหรับพลังงานนี้มีค่ามากขึ้น $_{\alpha}K$ จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในตอนแรก และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว $_{\alpha}K$ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ Z^2 ดังนั้น ที่ค่าพลังงานของโฟตอนหนึ่ง ๆ $_{\alpha}K$ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปกับค่า Z^2 ค่า $_{\alpha}K$ นี้มักนิยมเขียนในรูปของ

(1) $$\bar{\phi} = \frac{Z^2}{137}\left(\frac{e^2}{M_o c^2}\right)^2$$

$$= Z^2 \times 5.796 \times 10^{-28} \text{ (ซม.)}^2$$

มีเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $_{\alpha}K/\bar{\phi}$ กับ $\lambda (=h\nu/mc^2)$ สำหรับอากาศและตะกั่ว นอกจากนี้ ยังมีตารางแสดงค่า $_{\alpha}K/\bar{\phi}$ และค่า $_{\alpha}K/Z^2$ สำหรับอลูมิเนียม และตะกั่วสำหรับค่าพลังงานโฟตอนต่าง ๆ

2.4 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนทั้งหมดต่ออะตอม (τ_a) มีค่า (1)

$$_a\tau = {}_a\eta + {}_a\sigma + \alpha^K$$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนในหน่วยของ ซม^2/กรัม มีค่า

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{N}{A}\left({}_a\eta + {}_a\sigma + \alpha^K\right)$$

และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนในหน่วยของ ซม$^{-1}$ มีค่าเป็น

$$\tau = \frac{\rho N}{A}\left({}_a\eta + {}_a\sigma + \alpha^K\right)$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของวัตถุที่ขวางกั้น มีหน่วยเป็น กรัม/ซม^2

A = น้ำหนักอะตอมของวัตถุนั้น

N = จำนวนอะโวกาโดร์

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืน 3 แบบดังกล่าวกับพลังงานของรังสีแกมม่า (Mev) ได้แสดงในรูป 2.3

2.5 <u>คุณสมบัติบางประการของผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)</u> (2)

โซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) เป็นผลึกที่ดูดความชื้นได้ดีมาก และมีความหนาแน่น 3.67 กรัม/ลบ.ซม. และเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 4200 อังสตรอม มีทัลเลียมผสมอยู่ 10^{-3} ต่อ 1 ส่วน มีดัชนีการหักเห (ที่ 4200 อังสตรอม) เป็น 1.85

2.6 <u>หลักการทำงานของระบบซินทิเลชั่น</u> (2)

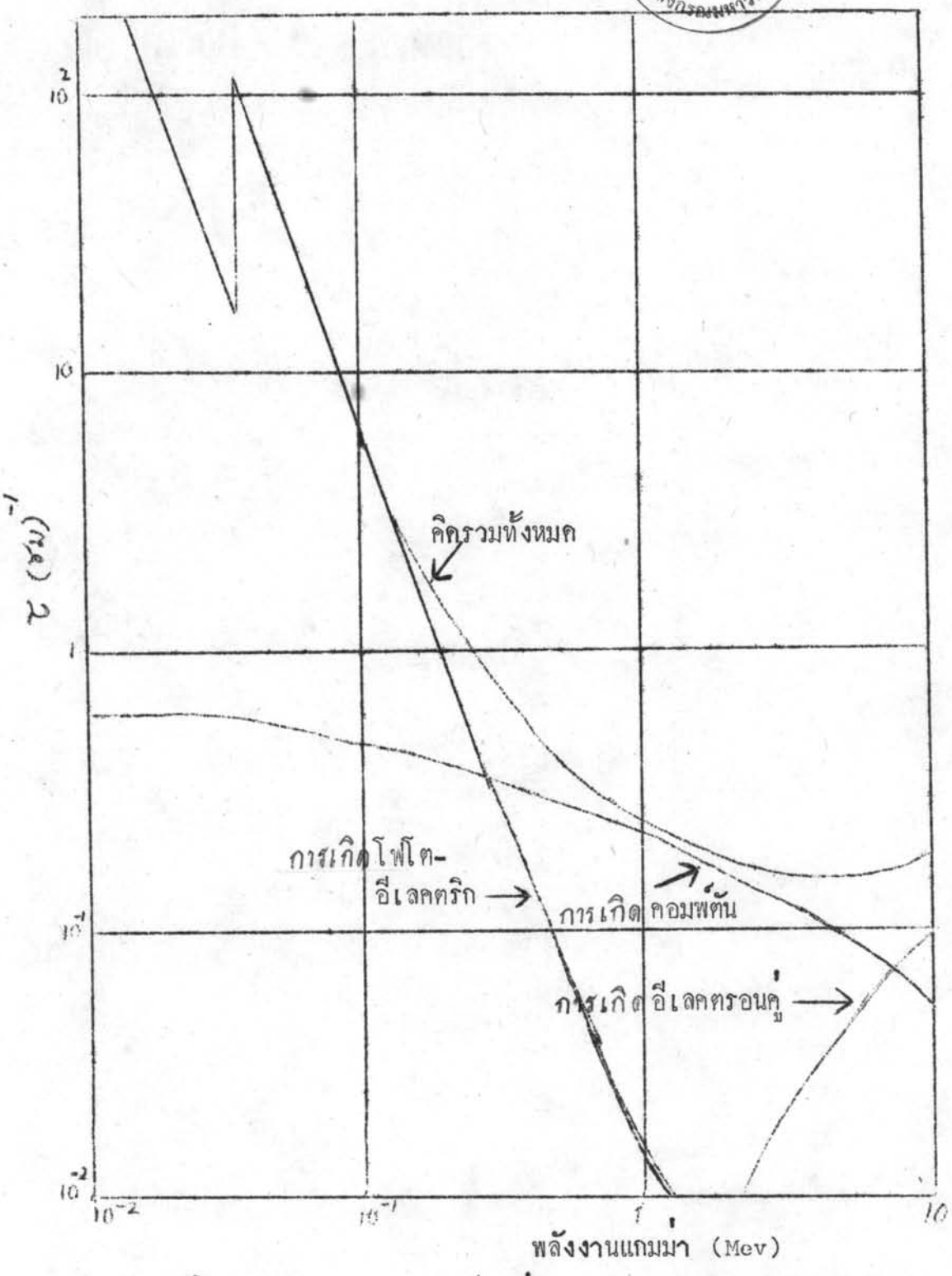
แบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอนดังนี้คือ

2.6.1 การดูดกลืนของการแผ่รังสีในซินทิเลเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดการกระตุ้น และการแตกเป็นไอออนภายในซินทิเลเตอร์นั้น

2.6.2 การเปลี่ยนพลังงานในซินทิเลเตอร์เป็นแสง

2.6.3 การเดินทางของโฟตอนแสงไปยังโฟโตแคโทดของหลอดโฟโต-มัลติพลาย

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

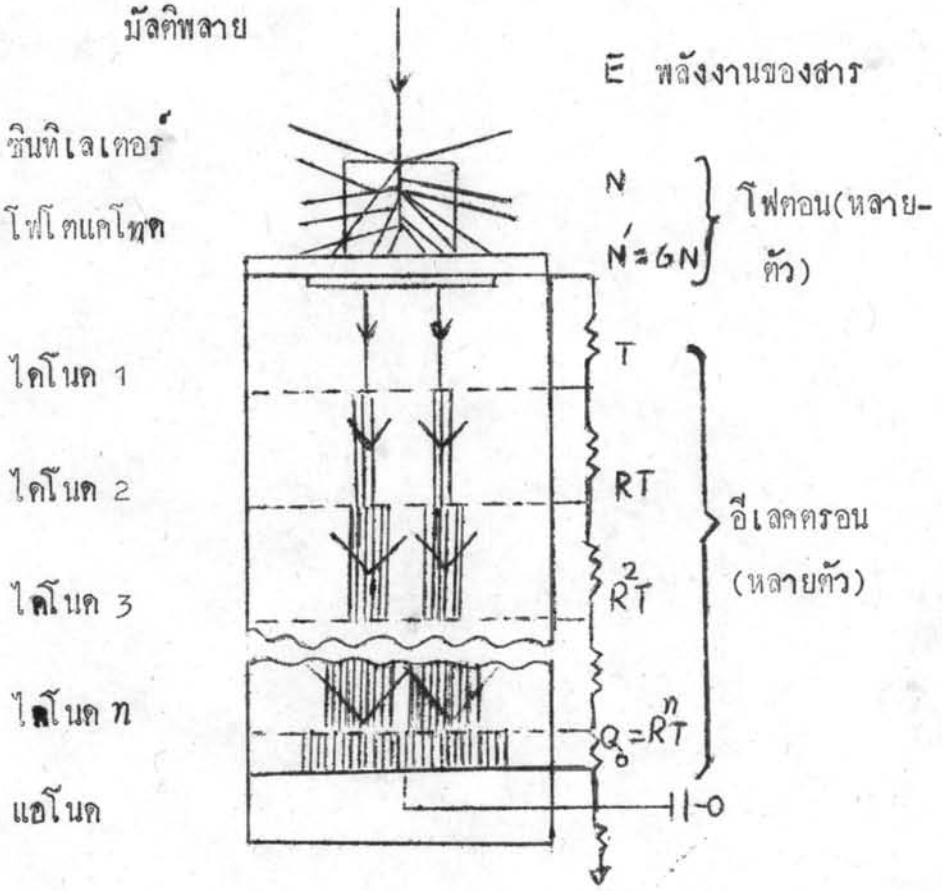


รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแกมมา (Mev) กับสัมประสิทธิภาพของการดูดกลืนทุกชนิดต่อหน่วยความยาวของทางเดินของโฟตอนสำหรับโซเดียมไอโอไดด์

2.6.4 มีการดูดกลืนของโฟตอนแสงที่โฟโตแคโทด และเกิดเป็นโฟโต-อีเลคตรอน

2.6.5 การเพิ่มของอีเลคตรอนในหลอดโฟโตมัลติพลาย

2.6.6 การเกิดสัญญาณไฟฟ้าเนื่องจากกระแสอีเลคตรอนในหลอดโฟโต-มัลติพลาย



รูปที่ 2.4 รูปแสดงเครื่องวัดโฟโตมัลติพลายซินทิเลชั่น เป็นรูปไดอาแกรมแสดงปรากฏการณ์เป็นขั้นตอน

รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของหลอดโฟโตมัลติพลาย และซินทิเลเตอร์ และปรากฏการณ์ขั้นมูลฐานเกี่ยวกับการจับและการวัดของสารที่แตกตัว (ionizing particle)

เมื่อรังสีแกมม่าที่มีพลังงาน E Mev ตกลงมายังซินทิเลเตอร์ มันจะสูญเสียพลังงานไปในการแตกเป็นไอออนหรือการกระตุ้นของโมเลกุล และเกิดโฟตอนแสง ซึ่งกระจายไปทั่วทุกทิศทาง โดยปกติแล้ว จะมีตัวสะท้อนแสงล้อมรอบตัวซินทิเลเตอร์อยู่ เพื่อให้โฟตอนตกลงบนโฟโตแคโทดมากที่สุด และส่วนหนึ่งของโฟตอนเหล่านี้ จะทำให้เกิดโฟโตอีเลคตรอนจากแคโทด และจะถูกเร่งโดยความต่างศักย์ระหว่างแคโทดและอีเลคโทรดตัวแรก (หรือไดโนด) ของหลอด

T ซึ่งเป็นโฟโตอีเลคตรอนจะกระทบไดโนดตัวแรก และแต่ละตัวจะทำให้เกิดอีเลคตรอนตัวต่อไปจากการเกิดครั้งที่สอง

ถ้า R (~ 3 ถึง 5) เป็นจำนวนเฉลี่ยของอีเลคตรอนครั้งที่สองต่ออีเลคตรอนที่ตกลงมากระทบ ซึ่งถูกผลักจากไดโนด และเก็บอยู่ที่ไดโนดตัวต่อไป

RT จะเป็นจำนวนอีเลคตรอนที่ตกลงบนไดโนดตัวที่สอง

ถ้ามีไดโนดอยู่ n ตัว จำนวนอีเลคตรอนสุดท้ายที่ไดโนดตัวสุดท้าย และเก็บสะสมไว้ที่แอโนดจะเป็น Q_0

$$Q_0 = R^n T$$

ซึ่ง R^n มีค่าระหว่าง 10^5 ถึง 10^8 อีเลคตรอนกลุ่มนี้จะทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าผ่านออสซิลโลสโคปหรือเครื่องขยายไปยังลิเนียพัลส์แอมพลิฟาย

2.7 ประสิทธิภาพของเครื่องวัด

ประสิทธิภาพที่ใช้กับโซเดียมไอโอไดด์ ในการวัดรังสีแกมม่า มี 2 อย่าง คือ ประสิทธิภาพทั้งหมด (total efficiency) และประสิทธิ-

ภาพที่จุดยอด (peak efficiency)

2.7.1 <u>ประสิทธิภาพทั้งหมด</u> [3],[4]

โอกาสที่เกิดปฏิกิริยาของโฟตอนขณะกระทบกับผิวของหัววัดจะแตกต่างกันได้เนื่องมาจากความแตกต่างของทางเดินของโฟตอนในผลึก โอกาสที่โฟตอนเดินทางเป็นระยะทาง x ในผลึก โดยไม่มีปฏิกิริยาจะเป็น $e^{-\tau x}$ ดังนั้น $(1-e^{-\tau x})$ จะเป็นโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยา ซึ่ง τ เป็นสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนทั้งหมดในหน่วย ซม$^{-1}$

ค่าประสิทธิภาพทั้งหมดที่ตกลงบนหัววัดจากสารรังสีที่เป็นจุดนั้นจะหาได้จากสมการ

$$E = \frac{\Omega}{4\pi}\left\{\frac{1}{\Omega}\int_{\text{ผลึก}}\left[1-e^{-\tau x}\right]d\Omega\right\} \quad \text{.....(2.6.1)}$$

$$d\Omega = 2\pi \sin\theta \, d\theta$$

$$\therefore E = \frac{1}{2}\int_{0}^{\theta_2}\left[1-e^{-\tau x}\right]\sin\theta \, d\theta \quad \text{...(2.6.2)}$$

x เป็นระยะทางที่ผลึก ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าได้ แล้วแต่โฟตอนเข้ามาในทิศทางใด

Ω เป็นมุมตัน (solid angle) ซึ่งหน้าผลึกทำกับสารกัมมันตรังสี

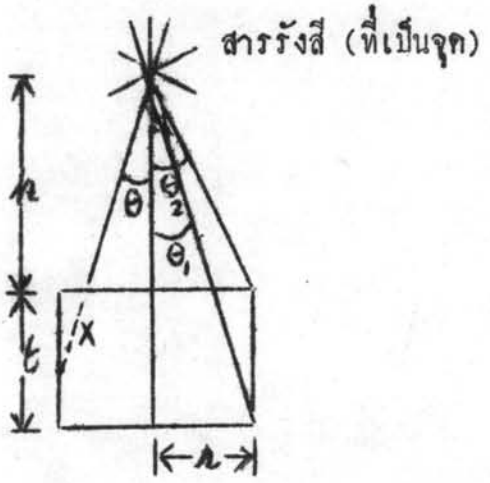
$d\Omega$ คือมุมตันเล็ก ๆ

h เป็นระยะทางจากสารรังสีถึงหน้าผลึก

t เป็นความหนาของผลึก

θ เป็นรัศมีของแท่งผลึก

ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงไดอาแกรมและค่าต่าง ๆ สำหรับหาค่าประสิทธิภาพของผลึกโซเดียมไอโอไดด์จากสารรังสี (ที่เป็นจุด)

ตัวแปรค่า x อาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนจะสัมพันธ์กับมุม θ ดังนี้

ในช่วง $0^\circ \rightarrow \theta_1^\circ$

$$X_1 = \left[\frac{h}{\cos\theta} + \frac{t}{\cos\theta}\right] - \frac{h}{\cos\theta}$$

$$= \frac{t}{\cos\theta}$$

ในช่วง $\theta_1^\circ \rightarrow \theta_2^\circ$

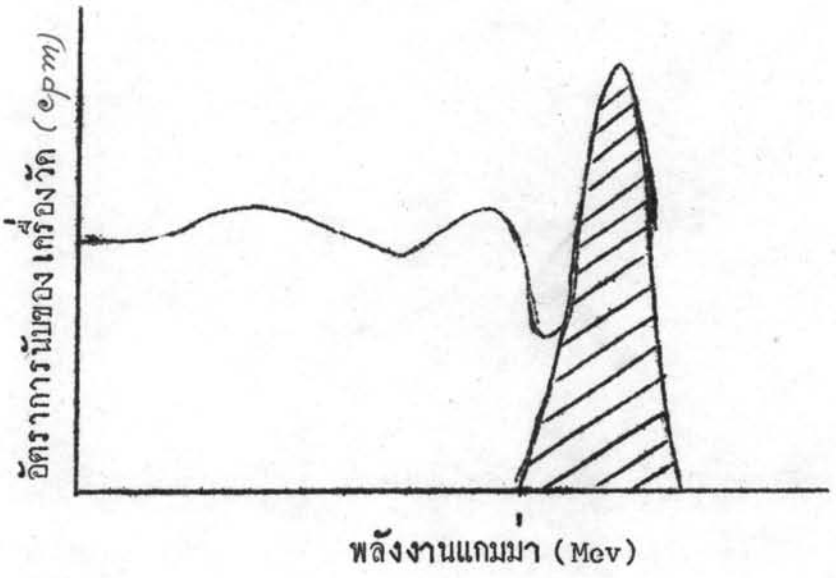
$$X_2 = \frac{r}{\sin\theta} - \frac{h}{\cos\theta}$$

$$\text{และ} \quad \theta_1 = \tan^{-1} \frac{\ell}{h + t}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\ell}{h}$$

$$\therefore E = \frac{1}{2} \left\{ \int_0^{\theta_1} \left[1 - e^{\frac{-\tau t}{\cos\theta}} \right] \sin\theta \, d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[1 - e^{-\tau \left(\frac{\ell}{\sin\theta} - \frac{h}{\cos\theta} \right)} \right] \sin\theta \, d\theta \right\} \quad \ldots.(2.6.3)$$

2.7.2 ประสิทธิภาพที่จุดยอด



รูปที่ 2.6 แสดงถึงสเปคตรัมของสารรังสีแกมม่าและพื้นที่ใต้ยอด

รังสีแกมม่าเมื่อตกกระทบที่ผลึกโซเดียมไอโอไดด์ที่ต่อกับระบบโฟโตมัลติพลายเออร์ จะถูกบันทึกออกมาเป็นสเปคตรัม ดังในรูป 2.6

จุดยอด (photo peak) ทางขวามือสุดในรูป 2.6 เกิดจากสูญเสียพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมม่า จากปฏิกิริยาโฟโตอีเลคตริก หรือปฏิกิริยาคอมพ์ตันหลาย ๆ ครั้ง ส่วนซ้ายของสเปคตรัมเกิดจากรังสีแกมม่าคายพลังงานเพียงส่วนเดียวให้แก่หัววัด เนื่องจากปฏิกิริยาคอมพ์ตัน ซึ่งเมื่อเกิด 1 ครั้งแล้ว รังสีแกมม่าก็ออกจากหัววัด

ในการใช้ประโยชน์ของสเปคตรัม ในการวัดความแรงของสารกัมมันตรังสี อาจใช้ได้ 2 วิธี คือ (ก) อาศัยพื้นที่ทั้งหมดภายใต้สเปคตรัม ซึ่งหมายถึงอัตราการนับทั้งหมด ในหน่วย cpm (counts per min.) โดยต้องทราบค่าประสิทธิภาพทั้งหมดของหัววัด (ข) อาศัยพื้นที่เฉพาะใต้จุดยอด ดังแสดงไว้ในรูป 2.6 และต้องทราบค่าประสิทธิภาพใต้ยอดของหัววัด

005093

ประสิทธิภาพใต้ยอด มีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพทั้งหมด ดังนั้นการวัดโดยอาศัยพื้นที่ทั้งหมด จะมีความไวสูงกว่า แต่ก็มีผู้นิยมใช้พื้นที่ใต้ยอด ซึ่งมีผลดีกว่าบางประการ เช่น ในกรณีที่มีรังสีแกมม่าพลังงานต่าง ๆ กัน ปะปนกันเข้ามา อาจวัดความแรงของรังสีตัวที่มีพลังงานสูงสุด (ยอดอยู่ขวาสุด) ได้โดยใช้พื้นที่ใต้ยอด แต่ไม่อาจวัดได้โดยใช้พื้นที่ทั้งหมด

การคำนวณในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการคำนวณประสิทธิภาพทั้งหมดจากค่าประสิทธิภาพทั้งหมด จะหาค่าประสิทธิภาพใต้จุดยอดได้ โดยทดลองวัดสารกัมมันตรังสี เพื่อหาอัตราส่วนพื้นที่ใต้จุดยอด ต่อพื้นที่ทั้งหมด นำอัตราส่วนนี้ไปคูณกับประสิทธิภาพทั้งหมดจะได้ประสิทธิภาพที่จุดยอด

2.8 นิวตรอน

2.8.1 ชนิดของนิวตรอน (5)

นิวตรอนเมื่ออยู่ในสภาพอิสระ ซึ่งเกิดจากการกระเด็นจากนิวเคลียสของอะตอม มักจะมีพลังงานสูง 1-10 Mev

17564451

มีความเร็ว 10^9 ซม/วินาที นิวตรอนเหล่านี้เรียกว่า นิวตรอนเร็ว

เทอร์มัลนิวตรอน คือ นิวตรอนที่มีพลังงานดังนี้

พลังงาน — ของเทอร์มัลนิวตรอน = 8.6×10^{-5} Tk ev.

$= 4.8 \times 10^{-5}$ Tr ev.

เมื่อ Tk และ Tr เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ของตัวกลางที่สะท้อน ในมาตราเคลวินและแรงคิน (Kelvin and Rankine) ตามลำดับ ดังนั้น ณ อุณหภูมิธรรมดา คือ ที่ $22^{\circ}C$ หรือ $295^{\circ}K$ ($72^{\circ}F$ หรือ $532^{\circ}R$)

พลังงานของเทอร์มัลนิวตรอนมีค่าประมาณ 0.025 ev.

ความเร็ว — ของเทอร์มัลนิวตรอน = $1.3 \times 10^4 \sqrt{Tk}$ ซม./วินาที

$= 0.97 \times 10^4 \sqrt{Tr}$ ซม./วินาที

ดังนั้น ที่อุณหภูมิธรรมดา เทอร์มัลนิวตรอนมีความเร็ว 2.2×10^5 ซม./วินาที

ในงานที่เกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู นิวตรอนเร็วหมายถึงนิวตรอนที่มีพลังงาน 0.1 Mev หรือมากกว่านั้น และนิวตรอนที่มีพลังงานระหว่าง 0.1 Mev ถึง 1 ev. เรียกว่า อินเทอร์มีเดียทนิวตรอน และนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่า 1 ev. เรียกว่า นิวตรอนช้า เทอร์มัลนิวตรอนคือ นิวตรอนช้าที่มี thermal equilibrium กับสิ่งแวดล้อม นิวตรอนซึ่งมีพลังงานเหนือกว่าเทอร์มัลนิวตรอนเล็กน้อยหรือเรียกว่า อยู่ในช่วงของขั้นต่ำของอินเทอร์มีเดียทนิวตรอน เรียกว่า อีพิเทอร์มัลนิวตรอน

(6)

2.8.2 นิวตรอนฟลักซ์

พิจารณาถึงนิวตรอนที่เป็นลำแสงมาณทิศทางเดียว มีความเร็ว v กระทบกับพื้นที่หน้าตัด 1 ตร.ซม. ซึ่งตั้งฉากกับลำแสงของนิวตรอนนั้น

ถ้า n เป็นจำนวนนิวตรอนต่อบริมาตรนั้น

ดังนั้น nv เป็นจำนวนนิวตรอนที่ผ่านต่อหน่วยพื้นที่ ต่อวินาที

ถ้า N เป็นจำนวนนิวเคลียส ต่อหน่วยบริมาตร

σ เป็นพื้นที่หน้าตัดของนิวเคลียส หน่วยเป็น ตร.ซม.

$N\sigma$ จะเป็นพื้นที่หน้าตัดแบบแมคโครสโครปิค $= \Sigma$ $(ซม)^{-1}$

ถ้า R เป็นจำนวนนิวเคลียสที่ตกกระทบต่อลูกบาศก์ ซม.

$= nv\Sigma$ ต่อวินาที

ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งมีจำนวนนิวตรอน n ตัวต่อลูกบาศก์ซม. ซึ่งมีความเร็ว v มาทุกทิศทาง อัตราการเกิดปฏิกิริยาในกรณีนี้ จะเป็นแบบเดียวกับกรณีที่เป็นลำแสงดังกล่าวแล้ว คือ $R = nv\Sigma$ ทิศทางจะไม่มีความหมายในเรื่องของนิวตรอน นิยามของคำว่า ฟลักซ์ ในตัวกลางจะเป็น

$$\phi = nv$$

$$= \frac{R}{\Sigma}$$

$$= \frac{\text{อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อลูกบาศก์ซม.}}{\text{พื้นที่หน้าตัดแบบแมคโครสโครปิค}}$$

(7)

2.8.3 การหาเทอร์มัลฟลักซ์โดยแผ่นทอง

ในการวัดฟลักซ์ ถ้าใช้โลหะเปล่า ๆ ใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู อาจเขียนอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ออะตอมว่า

$$A_b = \phi_o \sigma_o + I \sigma_r$$

A_b = อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ออะตอม

ϕ_o = ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน

σ_o = microscopic thermal cross section

I = flux per unit lethargy

σ_r = resonance integral

แต่ถ้าหุ้มด้วยแคดเมียม จะได้

$$A_c = I \sigma_r$$

เพราะเทอร์มัลนิวตรอน ไม่สามารถทะลุแผ่นแคดเมียมเข้าไปได้

$\frac{A_b}{A_c}$ เรียก แคดเมียมเรโช หรือ CdR

$$(CdR-1) = \frac{\phi_o \sigma_o}{I \sigma_r}$$

ในการทดลองหา CdR มักจะต้องแก้ไขเรื่อง perturbation และ self-shielding

ถ้าให้ CdR_o และ CdR เป็นค่าที่ถูกต้องและค่าจากการทดลองตามลำดับ

$$\therefore (CdR_o-1) = \frac{G_r}{G_{th}} (CdR-1)$$

สำหรับแผ่นทอง, G_r และ G_{th} อาจหาได้จากตาราง 2.1

เมื่อ σ_r = ค่าคงตัว แก้ self-shielding effect ของอีพิเทอร์มัลนิวตรอน

σ_{th} = ค่าคงตัว แก้ self-shielding effect ของเทอร์มัลนิวตรอน

มิลลิกรัม/ตร.ซม.	G_λ (7)	G_{th} (7)
11.0	0.62	0.99
16.7	0.53	0.98
33.8	0.40	0.97
47.9	0.34	0.962
53.7	0.325	0.96
70.5	0.29	0.95
113.7	0.24	0.92

ตารางที่ 2.1 แสดงว่า G_λ และ G_{th} ของทอง

ถ้าให้ C_o เป็นจำนวนนับสุทธิทั้งหมดของแผ่นทองเปล่าต่อหน่วยวินาที

C_{cd} " " " หุ้มด้วยแคดเมียมต่อหน่วยวินาที

$$\therefore \quad CdR = \frac{C_o}{C_{cd}}$$

อัตราการนับต่อวินาทีของแผ่นทอง-198 เนื่องจากเทอร์มัลนิวตรอน = $C_o - C_{cd}$

E = ประสิทธิภาพของเครื่องวัดที่พลังงานของทอง-198 (0.412 Mev)

$$\therefore \quad \text{อัตราการแผ่รังสีต่อวินาทีของทอง-198 (dps)} = \frac{C_o - C_{cd}}{E \times f}$$

สำหรับทอง-198 $f = 1$

$$= \frac{dps}{1-e^{-\lambda T}}$$

$$(dps)_{sat}$$

เมื่อ T = เวลาที่แผ่นทองถูกอาบด้วยนิวตรอน

$T_{1/2}$ = ชีวิตครึ่งของทอง-198

ถ้า T มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ $T_{1/2}$ (หน่วยเวลาเดียวกัน)

$$\therefore \quad e^{-\lambda T} \doteq 1-\lambda T$$

$$\therefore \quad (dps)_{sat} = \frac{dps}{\lambda T}$$

อัตราการแผ่รังสีต่อวินาที $(dps)_{sat} = N\sigma\phi FG_{th}$

N = จำนวนอะตอมของทอง-197

$$= \frac{\text{น้ำหนักเป็นกรัมของทอง} \times \text{จำนวนอะโวการ์โด}}{\text{น.น.อะตอมของทอง-197}}$$

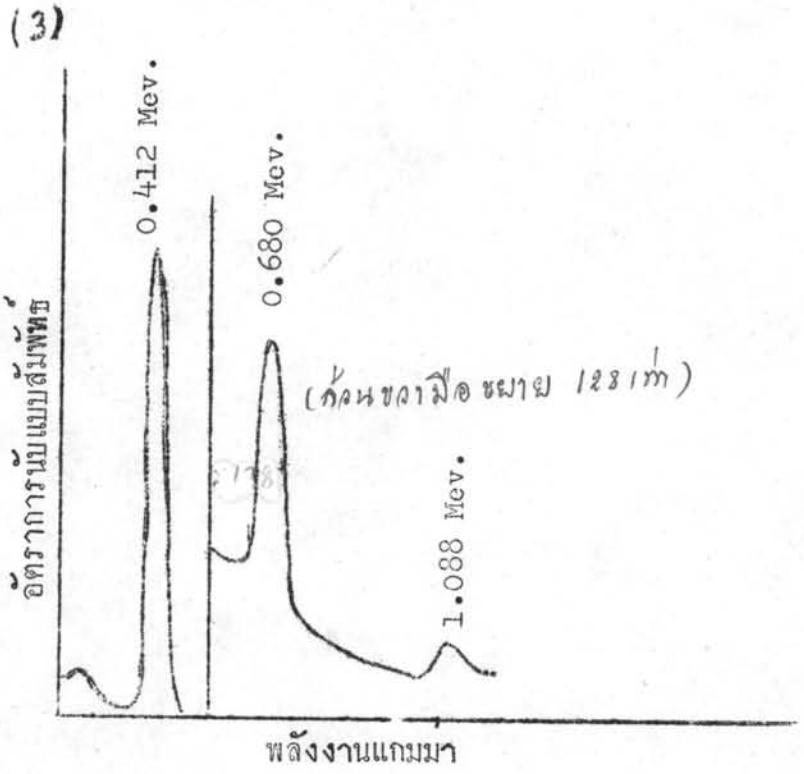
σ = thermal neutron absorption cross section

ϕ = เทอร์มัลฟลักซ์ มีหน่วยเป็น นิวตรอน/ตร.ซม.-วินาที

F = จำนวนทอง-197 ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

= 100 %

G_{th} = ค่าคงตัว แก้ self-shielding effect ของเทอร์มัลนิวตรอน ดังแสดงค่าในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.7 แสดงสเปคตรัมของทอง-198

2.8.4 การหาเทอร์มัลฟลักซ์โดยผงโซเดียมคาร์บอเนต

การใช้โซเดียมคาร์บอเนต มีความสะดวกตรงที่ใช้อาบนิวตรอนครั้งเดียวโดยไม่ต้องมีแคดเมียมหุ้ม ทั้งนี้ เป็นเพราะภาคตัดขวางของโซเดียมจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อนิวตรอนมีพลังงานสูงขึ้น โอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนที่ไม่เป็นเทอร์มัลนิวตรอน มีน้อยเมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยากับเทอร์มัลนิวตรอน และถือว่า ตัดทิ้งไปได้

แต่ในการใช้ทอง ปรากฏว่า ภาคตัดขวางของทองมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมาก ในเมื่อนิวตรอนมีพลังงานสูงกว่าเทอร์มัลนิวตรอน จึงต้องมีการแก้ไขโดยใช้แคดเมียม

โดยใช้สูตรและวิธีการดังนี้

$$C_o = Ce^{\lambda t}$$

เมื่อ C_o เป็นจำนวนนับของโซเดียม-24 ขณะที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

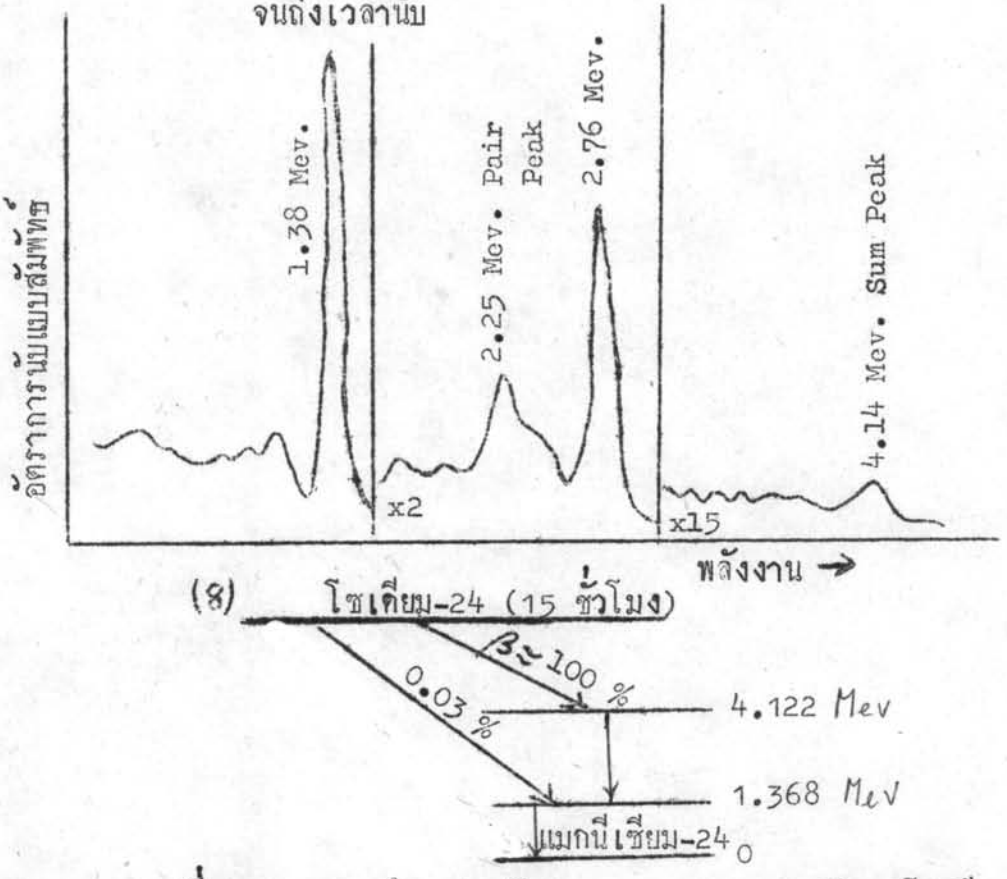
C " " เข้าเครื่องวัดรังสี

λ เป็นอัตราการสลายตัวของโซเดียม-24

$$= \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$T_{1/2}$ = 15 ชั่วโมง สำหรับโซเดียม-24

t เวลาที่โซเดียม-24 หลังจากนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จนถึงเวลานับ



รูปที่ 2.8 แสดงถึงสเปคตรัมและแผนภาพการสลายตัวของโซเดียม-24

ถ้าให้ X เป็นจำนวนนับทั้งหมดของสเปคตรัมที่มีประสิทธิภาพสัมบูรณ์ E_x

Y " " E_y

จะได้ $X+Y = C_o$ .....(2.8.1)

$$\frac{X}{E_x} = \frac{Y}{E_y} \quad \text{.....(2.8.2)}$$

E_x, E_y เป็นประสิทธิภาพสัมบูรณ์ ณ พลังงาน 1.38 และ 2.76 Mev ณ ระยะทาง 10 ซม. (9)

$$dpm = \frac{X}{E_x}$$

$$(dpm)_{sat} = \frac{(dpm)}{\lambda T}$$

$$(dps)_{sat} = 6 N \phi F \quad \text{----------(2.8.3)}$$