บทที่ 2

ทฤษฎี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน[1]

หมายถึงตัวหรือแหล่งที่แผ่อนุภาคนิวตรอนออกมาได้ นิวตรอนที่เกิดขึ้นนั้นได้มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ปฏิกิริยาที่ให้นิวตรอนออกมามีหลายชนิดด้วยกัน เช่น ปฏิกิริยาแบบที่ใช้อนุภาคมีประจุเป็นตัวยิงเข้าไปยังธาตุแล้วเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ให้นิวตรอนออกมา (อนุภาคที่ใช้เป็นตัวยิงทำให้เกิดปฏิกิริยามีอนุภาคอัลฟา โปรตอน และดิวเทอรอนเป็นต้น) และปฏิกิริยาอีกชนิดหนึ่งที่ให้นิวตรอนก็คือปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้รังสีแกมมาเป็นตัวยิงเข้าไปในธาตุ

สำหรับแหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบ อะเมริเซียม-เบริลเลียม ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดที่มีอนุภาคอัลฟาเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา ทำได้โดยการผสมอะเมริเซียมปริมาณ 0.5 คูรี่ กับเบริลเลียม อะเมริเซียมกับเบริลเลียมเป็นโลหะผสม ($Am\ Be_{13}$) ธาตุอะเมริเซียมที่ใช้มีเลขมวล 241 มีครึ่งชีวิตประมาณ 470 ปี ในการสลายตัวจะได้อนุภาคอัลฟาที่มีพลังงานประมาณ 5.4 MeV นอกจากนี้ยังมีรังสีแกมมาแผ่

---

[1]ประสงค์ เกษราธิคุณ "การวัดนิวตรอนโดยวิธีเทอร์โมลูเนสเซนซ์" (วิทยานิพนธ์ ปริญญามหาบัณฑิต แผนกวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530), หน้า 4

ออกมาด้วย ซึ่งมีพลังงานประมาณ 0.04 - 0.06 MeV อนุภาคอัลฟาที่ได้จากการสลายตัวของอะเมริเซียมจะวิ่งไปชนกับเบริลเลียมทำให้เกิดนิวตรอนหลุดออกมาตามปฏิกิริยาดังนี้

$$_{4}Be^{9} + {}_{2}He^{4} \longrightarrow {}_{6}C^{12} + {}_{0}n^{1} + 5.7 \text{ MeV}$$

แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบอะเมริเซียม-เบริลเลียม ดังกล่าวนี้มีใช้กันแพร่หลายมาก เนื่องจากธาตุเบริลเลียมที่ใช้เป็นเป้านั้นเป็นธาตุที่ให้นิวตรอนออกมาเป็นจำนวนมากกว่าธาตุอื่น นิวตรอนที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแบบอะเมริเซียม-เบริลเลียม ส่วนมากมีพลังงานสูงตั้งแต่ 1-11 MeV แต่ก็อาจมีนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่นอกพิสัยนี้

สำหรับแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีรัศมีประมาณ 1 ซ.ม. สูงประมาณ 3 ซ.ม. ปลดปล่อยนิวตรอนออกมาประมาณ 1.15×10^{6} ตัว/วินาที

2.2 นิวตรอนเร็วและเรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance Neutron)[2]

นิวตรอนที่วิ่งออกจากแหล่งกำเนิดทั่ว ๆ ไป เป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูงอยู่ในช่วงของเมกกะอิเลกตรอนโวลต์ เราเรียกนิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 1 MeV ขึ้นไปว่า "นิวตรอนเร็ว" สำหรับแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ให้นิวตรอนเร็ววิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุลดความเร็วนิวตรอน นิวตรอนจะถูกทำให้ช้าลงอย่างรวดเร็ว เข้าสู่เขตการกระจาย

---

[2] Sudhiravuthe, "A study On Thermal Neutrons and Epithermal Neutrons in Thai Research Reactor" (published M.Sc. Thesis, Chulalongkorn University, March, 1966), p. 3.

พลังงานแบบ 1/E หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเขตเรโซแนนซ์ ซึ่งมีขอบเขตของพลังงานตั้งแต่ 1 eV ถึง 1 MeV ความสัมพันธ์ระหว่างนิวตรอนพลักซ์กับพลังงานของนิวตรอนแสดงดังรูปที่ 2.1

2.3 เทอร์มาลนิวตรอน (Thermal Neutron)[a]

หลังจากชนกับอะตอมของตัวลดความเร็วแล้วนิวตรอนจะถูกทำให้ช้าลงจนกระทั่งมีพลังงานจลน์เฉลี่ยเท่ากับพลังงานของตัวกลาง พลังงานจะขึ้นกับอุณหภูมิของตัวกลางเรียกนิวตรอนนี้ว่า "เทอร์มาลนิวตรอน"

พลังงานจลน์ของเทอร์มาลนิวตรอนจะมีการกระจายแบบสถิติ เป็นไปตามกฎการกระจายของ แมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ ซึ่งหามาจากทฤษฎีพลังงานจลน์ของแกส การกระจายตามแบบของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ ของความเร็วสำหรับความหนาแน่นของนิวตรอนทั้งหมดเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$dn = n(v)\,dv$$

$$= \{4n.\pi/(2\pi kT/m)\}^{3/2} v^2 \exp(-\tfrac{1}{2}mv^2/kT)\,dv$$

เมื่อ M = มวลโมเลกุลของนิวตรอน

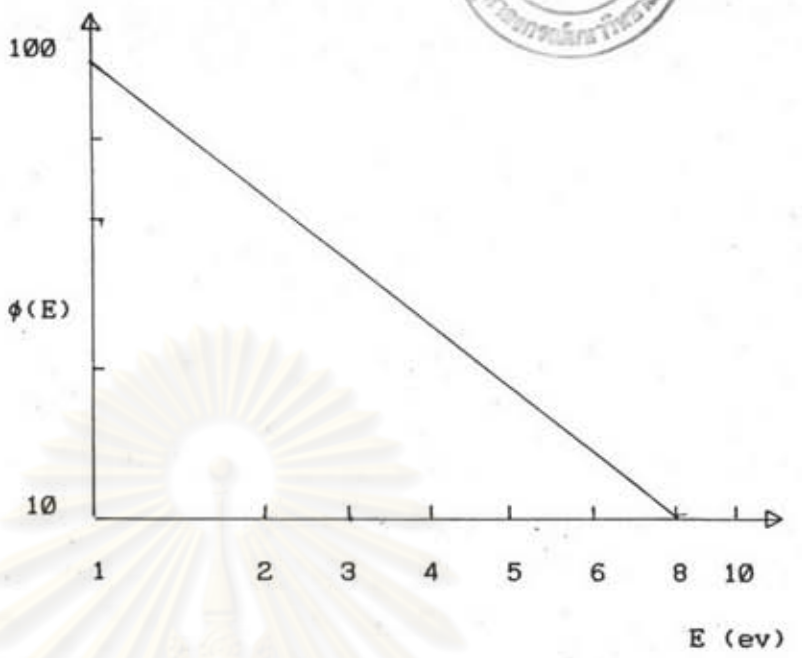
K = ค่าคงที่ของโบลซมานด์

T = อุณหภูมิของนิวตรอน (เคลวิน)

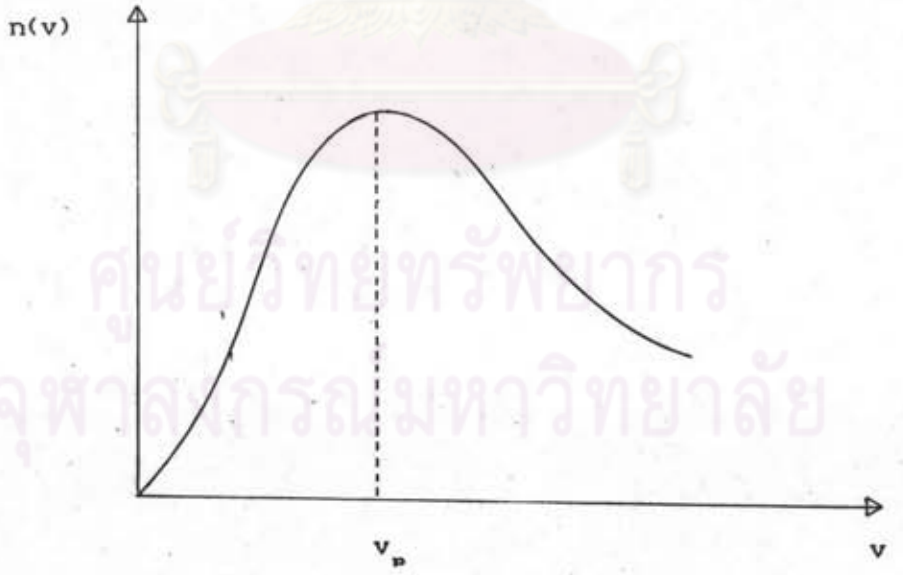
n. = ความหนาแน่นของนิวตรอนทั้งหมด

---

[a]K.H. Beckurts and K. Wirtz, Neutron Physics (New York : Springer-Verlag, 1964), PP. 98-99.



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมเขต 1/E



รูปที่ 2.2 แมกซ์เวลล์สเปกตรัมเขตเทอร์มาลนิวตรอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 2.2 ยอดของเส้นโค้งที่เกิดขึ้นคือจุดที่เรียกว่า " most probable velocity" v_p ซึ่งหาได้โดยการหาอนุพันธ์การกระจายความเร็วของนิวตรอนแล้วให้เท่ากับศูนย์ แก้สมการหาค่า v จะได้ว่า

$$v_p = (2kT/m)^{1/2}$$

$$= (1.648 \times 10^{8} T)^{1/2}$$

ที่อุณหภูมิ 20 °C v_p = 2200 เมตร/วินาที ตรงกับพลังงาน 0.025 eV ความเร็วเฉลี่ยของนิวตรอนหาได้จาก

$$\bar{v} = {}_0\int^{\infty} vn(v)dv / {}_0\int^{\infty} n(v)dv$$

จะได้ว่า $\bar{v} = (2/\sqrt{\pi})v_p$ .....(1)

2.4 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron Cross Section)[4]

การเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุนั้น จะเกิดได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับปฏิกิริยานั้น ๆ กับธาตุนั้น และยังขึ้นอยู่กับพลังงานของนิวตรอนด้วย ภาคตัดขวางแบ่งออกเป็น

1) ภาคตัดขวางจุลภาค (Microscopic Cross Section; σ)

หมายถึงพื้นที่สำหรับ 1 นิวเคลียสที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ส่วนมากมักใช้หน่วยเป็น "บาร์น" โดยกำหนดว่า 1 บาร์น = 10^{-24} ซ.ม.^{2} นอกจากนี้ยังมีหน่วยเป็นมิลลิบาร์น และไมโครบาร์น

---

[4] John R.Lamarsh " Introduction to Nuclear Engineering" (London : Addison - Wesley Publishing Company, 1975), pp. 23-25

2) ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic Cross Section ;Σ)

หมายถึงค่าภาคตัดขวางของนิวคลีไอทั้งหมดต่อ ซ.ม.^{3} โดยกำหนดว่าธาตุที่ใช้เป็นเป้ามีเลขมวล A ความหนาแน่น ρ กรัม/ซม.^{3} จำนวนอะตอม N จะมีค่าภาคตัดขวางมหภาคเป็น $N\sigma$

$$\Sigma = N\sigma = (\rho\ \sigma/A)(6.02\times10^{23})$$

เมื่อนิวตรอนชนกับนิวไคลด์ของเป้า จะเกิดปฏิกิริยาได้หลายอย่าง ขึ้นกับเหตุผลว่านิวคลิไอนั้นมีค่าภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยานั้นกับนิวเคลียสที่เป็นเป้าหรือไม่ ดังนั้นภาคตัดขวางจุลภาคที่เกิดจากปฏิกิริยาการกระจายใช้สัญญลักษณ์ σ_s ภาคตัดขวางจุลภาคสำหรับปฏิกิริยาการดูดกลืนใช้สัญลักษณ์ σ_a ภาคตัดขวางจุลภาคทั้งหมดใช้สัญลักษณ์ σ_t นั่นคือ

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$$

2.5 <u>ฟลักซ์นิวตรอน</u> (Neutron Flux)

ถ้านิวตรอนมีความเร็วเท่ากันหมดทุกตัวนิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของนิวตรอน ณ ตำแหน่งหนึ่งคูณด้วยความเร็วของนิวตรอน ค่าฟลักซ์อันนี้เรียกว่าฟลักซ์ทั้งหมด

ในกรณีที่นิวตรอนมีความเร็วไม่เท่ากันทุกตัว และ n(v) เป็นความหนาแน่นของนิวตรอนในหนึ่งช่วงความเร็วที่ v นิวตรอนฟลักซ์ในหนึ่งหน่วยช่วงความเร็วที่ v นั้นมีค่า

$$\phi(v) = n(v)v$$

ดังนั้น $\phi(v)dv$ จะเป็นฟลักซ์ของนิวตรอนที่มีความเร็วอยู่ในช่วง v และ v + dv ฟลักซ์ทั้งหมดของนิวตรอนที่มีความเร็วต่าง ๆ กันมีค่าเท่ากับ

$$\phi = \int_0^\infty \phi(v)dv$$
$$= n\bar{v}$$

เมื่อ $\bar{v} = \{\int_0^\infty vn(v)dv\}/\{\int_0^\infty n(v)dv\}$

ถ้า ϕ_p เป็นฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอนพลังงาน kT และ v_p เป็นความเร็วของนิวตรอนที่พลังงานนี้ จะได้ว่า

$$\phi_p = n(E)v_p$$

อาศัยสมการ (1) จะได้ $\phi_p = n(E)\frac{1}{2}\sqrt{\pi}\,\bar{v}$

$$\phi_p = \frac{1}{2}\sqrt{\pi}\,\phi \qquad \text{.....(2)}$$

n(E) หมายถึง n(E)dE เป็นจำนวนนิวตรอน / ซม.^{3} ที่มีพลังงานระหว่าง E และ E+dE

n เป็นความหนาแน่นนิวตรอนทั้งหมด

2.6 <u>ทฤษฎีเบื้องต้น</u>

เมื่อเอาสารตัวอย่างไปอาบนิวตรอนซึ่งมีฟลักซ์ ϕ ไอโซโทปแต่ละตัวที่อยู่ในสารนั้นจะเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน ดังสมการ

อัตราการเกิดปฏิกิริยา = $N\phi\sigma$ .....(3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในเมื่อ ϕ = ฟลักซ์ของนิวตรอน

N = จำนวนนิวเคลียสของธาตุ

σ = ภาคตัดขวาง

และ $N = (mN_o/A) \times$ % ของ abundance

เมื่อ m = น้ำหนักเป็นกรัมของธาตุในสาร

N_o = เลขอาร์โวกาโดร

A = น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น

2.7 ปฏิกิริยากับเทอร์มาลนิวตรอน (Thermal Neutron Reaction)

ปฏิกิริยาที่นิวเคลียสของธาตุทำกับเทอร์มาลนิวตรอนที่จะเกิดขึ้นได้ก็คือเกิดปฏิกิริยา (n,r) เมื่อเอาธาตุใดก็ตามไปอาบนิวตรอน นิวไคลด์ของธาตุนั้นจะจับนิวตรอนไว้กลายเป็น คอมปาวน์นิวเคลียส (compound nucleus) เลขอะตอมของนิวเคลียสจะไม่เปลี่ยน แต่เลขมวลจะเพิ่มขึ้น 1 สมการทั่วไปเป็นดังนี้

$$ {}_{z}X^{A} \; (n,r) \; {}_{z}X^{A+1} $$

หรือ $$ {}_{z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow [{}_{z}X^{A+1}]^{*} \longrightarrow {}_{z}X^{A+1} + \gamma $$

คอมปาวน์นิวเคลียสที่เกิดขึ้นอาจเป็นไอโซโทปอยู่ตัวหรือไอโซโทปกัมมันตรังสีซึ่งจะเปล่งรังสีออกมา อาจจะเป็นรังสีแกมมาอย่างเดียวหรือมีทั้งรังสีแกมมาและเบตาอย่างเดียวก็ได้ ถ้านิวไคลด์ที่เกิดใหม่ในกรณีที่กล่าวมาแล้วเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในขณะที่กำลังอาบรังสีอยู่นิวไคลด์บางตัวจะสลายตัวปล่อยรังสีออกมา ถ้าการอาบรังสียังคงมีต่อไปนาน ๆ อัตราการเกิดนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งอยู่ในภาวะที่เท่ากับอัตราการสลายตัวพอดี ภาวะเช่นนี้เรียกว่า "กัมมันตภาพรังสีถึงจุดอิ่มตัว" ถึงแม้จะอาบรังสีอีกนานเท่าใดก็ตามจะไม่เพิ่มกัมมันตภาพรังสีอีกถ้าฟลักซ์ของนิวตรอนยังคงมีค่าเท่าเดิม

อัตราการเกิดธาตุ = อัตราการสลาย .....(4)

ถ้ามี N อะตอมของธาตุอยู่ในนิวตรอน และเมื่ออาบนิวตรอนนานมากเกิด M. อะตอมของธาตุกัมมันตรังสี

จากสมการ (3) อัตราการเกิด $= N\phi\sigma$ วินาที$^{-1}$

อัตราการสลาย $= \lambda M_o$ วินาที$^{-1}$

$= A_o$ วินาที$^{-1}$

จากสมการ (4) จะได้ว่า $N\phi\sigma = A_o$ .....(5)

แต่ถ้าการอาบนิวตรอนไม่นานพอจนถึงขีดอิ่มตัว กัมมันตภาพที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ

$$A = A_o[1-\exp(-\lambda t_a)]$$

เมื่อ t_a คือเวลาที่อาบนิวตรอน A_o คือกัมมันตภาพเมื่ออาบถึงจุดอิ่มตัว

$$A_o = A/[1-\exp(-\lambda t_a)]$$

ให้ t_1 เป็นเวลาตั้งแต่เริ่มเอาสารตัวอย่างนี้ออกจากการอาบนิวตรอน และ t_2 เป็นเวลาที่นับเสร็จสิ้น และนับได้ D ครั้ง

อัตราการนับเมื่อเวลา t (นับจากเอาออก) $= C_o\exp[-\lambda(t_1+t)]$

เมื่อ C_o คืออัตราการนับเมื่อเริ่มเอาออกจากการอาบซึ่งต้องการหา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$D = \int_{t_1}^{t_2} C_o \exp[-\lambda(t_1+t)]dt$$

$$D = (C_o/\lambda)\exp(-\lambda t_1)[\exp(-\lambda t_1)-\exp(-\lambda t_2)]$$

$$C_o = \lambda D/\exp(-\lambda t_1)[\exp(-\lambda t_1)-\exp(-\lambda t_2)]$$

ดังนั้น

$$A = \lambda D/E_{ff}\exp(-\lambda t_1)[\exp(-\lambda t_1)-\exp(-\lambda t_2)]$$

$$\phi = (2/\sqrt{\pi})\lambda D/G_{th}N\sigma E_{ff}\exp(-\lambda t_1)[\exp(-\lambda t_1)-\exp(-\lambda t_2)][1-\exp(-\lambda t_m)] \quad .. \quad (6)$$

แฟกเตอร์ $2/\sqrt{\pi}$ มาจากการเปลี่ยนเทอร์มาลฟลักซ์ที่พลังงาน kT เป็นเทอร์มาลฟลักซ์ที่พลังงานในช่วง E ถึง E+dE โดยอาศัยสมการ (2) G_{th} คือแฟกเตอร์การบังตัวเอง (Self-Shielding Factor) E_{ff} คือประสิทธิภาพของหัววัด

ในการทดลองหาฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอนในครั้งนี้ทำได้โดย นำเอาแผ่นธาตุทองคำ 2 แผ่น ไปอาบนิวตรอน ซึ่งเกิดจากการนำเอาแหล่งกำเนิดนิวตรอน อะเมริเซียม-เบริลเลียมแช่ลงในน้ำ โดยแผ่นทองแผ่นหนึ่งหุ้มด้วยแคดเมียมอีกแผ่นไม่หุ้ม นำทั้งสองแผ่นไปอาบนิวตรอนในตำแหน่งที่ห่างจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนเท่ากัน แผ่นทองที่ไม่หุ้มแคดเมียมจะทำปฏิกิริยากับเทอร์มาลนิวตรอนและเรโซแนนซ์นิวตรอน ส่วนแผ่นที่หุ้มแคดเมียมจะทำปฏิกิริยากับเรโซแนนซ์นิวตรอนเท่านั้น ดังนั้นในการคำนวณหาเทอร์มาลฟลักซ์จึงต้องใช้แผ่นทองสองแผ่น อัตราการนับ (D) ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาเทอร์มาลฟลักซ์ได้จากการลบกันระหว่างอัตราการนับของแผ่นทองที่ไม่หุ้มแคดเมียมกับแผ่นทองที่หุ้มด้วยแคดเมียม แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาเทอร์มาลฟลักซ์โดยใช้สมการ (6)

การแช่แผ่นธาตุในตัวลดความเร็วที่มีปริมาตรมาก ๆ ในสนามนิวตรอน จะทำให้สนามนิวตรอนถูกรบกวน แฟกเตอร์การรบกวนฟลักซ์ ($\bar{\phi}/\phi$) นิยามมีค่าเท่ากับฟลักซ์เฉลี่ยที่

ถูกรบกวนหารด้วยฟลักซ์เฉลี่ยเมื่อไม่มีการรบกวน สำหรับแผ่นธาตุที่มีขนาดจำกัดอัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง เพราะผลอันเนื่องมาจากการป้องกันในแผ่นธาตุโดยผิวของแผ่นธาตุเอง ผลอันนี้ขึ้นอยู่กับภาคตัดขวางการดูดกลืนและขนาดของแผ่นธาตุ ซึ่งจะทำให้ฟลักซ์ในแผ่นธาตุเบาบางลงการคำนวณหาฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอนในแผ่นธาตุจะได้น้อยกว่าที่ผิว อัตราส่วนของฟลักซ์เฉลี่ยตลอดทั้งปริมาตรของแผ่นธาตุต่อฟลักซ์เฉลี่ยที่ตกกระทบของแผ่นธาตุจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง อัตราส่วนนี้เรียกว่า "แฟกเตอร์การบังตัวเอง"

การทดลองวัดฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอนโดยการเอาแผ่นธาตุไปอาบนิวตรอนนั้นจะมีการแก้ค่าแฟกเตอร์การบังตัวเองด้วย จึงจะได้เทอร์มาลฟลักซ์ที่ถูกต้อง แฟกเตอร์การบังตัวเองสำหรับเทอร์มาลนิวตรอนคำนวณได้จากสมการ[5]

$$G_{th} = [1+(\mu_a\delta/2)\{\ln(\mu_a\delta)-0.922784\}] \quad \ldots\ldots\ldots(7)$$

เมื่อ μ_a = สัมประสิทธิ์การดูดกลืน ($cm^2 gm^{-1}$)

δ = ความหนา ($gm\ cm^{-2}$)

แฟกเตอร์การบังตัวเองสำหรับเรโซแนนซ์นิวตรอนคำนวณได้จากสมการ[6]

$$G_r = 1/\sqrt{1+2\mu_{0r}\delta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(8)$$

เมื่อ μ_{0r} = ค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนที่ยอดของเรโซแนนซ์

δ = ความหนาในหน่วย ซม.

---

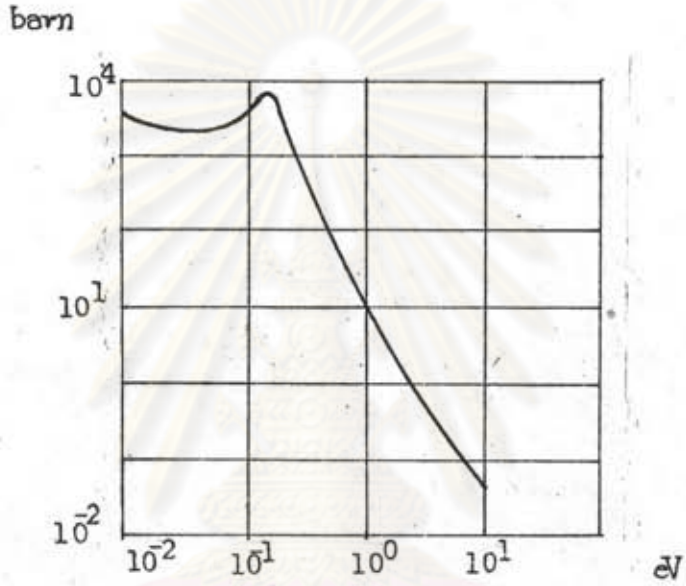
[5]K.H. Beckurts and K. Wirtz, Neutron Physics, pp.242-243

[6]Ibid, P.268

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 <u>แคดเมียมเรโช</u> (Cadmium Ratio)

แคดเมียมนิยมใช้ในการทดลองเกี่ยวกับการก่อกัมมันต์ โดยใช้เป็นตัวดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน เหตุผลก็คือแคดเมียมมีค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนสูงและมีการดูดกลืนเรโซแนนซ์ที่ 0.178 eV



รูปที่ 2.3 ภาคตัดขวางทั้งหมดของแคดเมียมกับพลังงานของนิวตรอน

รูปที่ 2.3 แสดงภาคตัดขวางการดูดกลืนทั้งหมดของแคดเมียมเป็นฟังก์ชันของพลังงานของนิวตรอนในช่วง 0.01-10 eV เห็นได้ชัดจากกราฟว่าแคดเมียมดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนได้ดีแต่ไม่ดูดกลืนนิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 0.4 eV

แคดเมียมเรโชคือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาของแผ่นธาตุต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของแผ่นธาตุที่หุ้มด้วยแคดเมียม แผ่นธาตุที่ไม่มีอะไรหุ้มจะทำปฏิกิริยากับ

013935

เรโซแนนซ์ฟลักซ์และเทอร์มาลฟลักซ์ขณะที่แผ่นธาตุที่หุ้มแคดเมียมจะมีปฏิกิริยากับเรโซแนนซ์ฟลักซ์เพียงอย่างเดียว เพราะแคดเมียมจะจับนิวตรอนไว้หมดแต่จะยอมให้นิวตรอนที่มีพลังงานมากกว่า 0.4 eV ผ่านไปได้ ดังนั้นแคดเมียมเรโซหาได้จากความสัมพันธ์[7]

$$CdR = R_b/R_c$$

หรือ $$CdR-1 = (R_b-R_c)/R_c \quad \text{.....(9)}$$

เมื่อ R_b และ R_c เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเมื่อไม่หุ้มแคดเมียมและเมื่อหุ้มแคดเมียมตามลำดับ

ค่า CdR ที่คำนวณได้จากสมการ (9) ไม่ใช่ค่าแคดเมียมเรโซที่แท้จริงเพราะจะต้องแก้ผลอันเนื่องมาจากการบังตัวเอง (Self-Shielding) เสียก่อน ค่าแคดเมียมเรโซที่ถูกต้องคือ CdR_o ซึ่งหาได้จากสมการ[8]

$$CdR_o-1 = (G_r/G_{th})(CdR-1) \quad \text{.....(10)}$$

ค่าแคดเมียมเรโซที่คำนวณได้นี้จะเป็นตัวเลขที่บ่งบอกว่าอัตราส่วนระหว่างเทอร์มาลนิวตรอนต่อเรโซแนนซ์นิวตรอนนั้นเป็นอย่างไร ทำให้ทราบว่าตัวลดความเร็วของ

---

[7] Akkaramus, Y., Neutron Measurement, (Published M.Sc.Thesis, Chulalongkorn University, April, 1968), p.10

[8] Ibid, P.26

นิวตรอนที่ใช้นั้นสามารถลดความเร็วของนิวตรอนจนกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนนั้นได้ดีเพียงไร ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการหาเรโซแนนซ์ฟลักซ์เมื่อรู้ค่าเทอร์มาลฟลักซ์แล้ว

2.9 วัสดุสำหรับลดความเร็ว

ในการลดความเร็วของนิวตรอนนั้นทำได้โดยนำเอาวัสดุมาขวางกั้นทางเดินของนิวตรอนหรือเอาตัวกำเนิดนิวตรอนไปวางไว้ในวัสดุที่จะใช้เป็นตัวลดความเร็วนิวตรอน วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดีได้แก่วัสดุที่ทำให้นิวตรอนวิ่งช้าลงอย่างรวดเร็ว โดยการชนกับนิวเคลียสของวัตถุนั้นเพียงไม่กี่ครั้ง ซึ่งได้แก่วัสดุพวกที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุที่มีเลขมวลน้อย ๆ และมีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอนน้อยด้วย วัสดุสำหรับลดความเร็วที่ดีได้แก่น้ำธรรมดา (H_2O) น้ำหนัก (D_2O) เบอริลเลียม คาร์บอน และพาราฟิน

น้ำหนักเป็นตัวลดความเร็วนิวตรอนที่ดีตัวหนึ่ง ประกอบขึ้นด้วยธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยมีปริมาณของอะตอมไฮโดรเจนมากกว่าออกซิเจนในอัตราส่วน 2/1 ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีเลขมวลน้อยมากเท่ากับ 1 เป็นตัวการสำคัญในการลดความเร็วของนิวตรอนเมื่อนิวตรอนวิ่งไปชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน นิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนจนเกือบหมดถ้าเกิดการชนกันอย่างจัง ส่วนการชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของออกซิเจนนั้นมีความสำคัญน้อยในการลดความเร็วของนิวตรอน เพราะว่าการชนแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานให้กับนิวเคลียสของออกซิเจนเป็นจำนวนน้อยมาก

2.10 สารตัวอย่าง

การทดลองตอนที่ 1 นั้นสารที่ใช้ก็คือ ทราย , กรดโบริก และเกลือ สาเหตุที่เลือกใช้กรดโบริกก็เพราะว่า กรดโบริกมีโบรอนซึ่งเป็นธาตุที่มีภาคตัดขวางการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนสูงมากเป็นองค์ประกอบ ควรจะให้ผลในการทดลองชัดเจนกว่าตัวอื่น ๆ ที่มีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนต่ำ และกรดโบริกยังหาได้ไม่ยากนัก เกลือก็เป็นสารที่มีโซเดียม

ซึ่งเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนค่อนข้างสูงเป็นองค์ประกอบ แต่ก็ยังต่ำกว่าโบรอน แต่เกลือนั้นเป็นสารที่หาได้ง่ายกว่ากรดโบริก สำหรับทรายนั้นเป็นเพียงสารที่นำมาผสมกับกรดโบริกหรือผสมกับเกลือเท่านั้น ที่เลือกใช้ทรายเพราะว่าทรายนั้นทำปฏิกิริยากับเทอร์มาลนิวตรอนได้ไม่ดี

ในการทดลองตอนที่ 2 สารที่ใช้ก็คือ เงินและทองแดง เงินที่ใช้นั้นก็มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ หนักประมาณ 550 มิลลิกรัม ทองที่ใช้ก็มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ เช่นกัน หนักประมาณ 98 มิลลิกรัม ทั้งเงินและทองเป็นธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอนสูงเหมาะที่จะใช้ในการทดลองเกี่ยวกับการหาฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอน ในการคำนวณหาฟลักซ์ของเทอร์มาลนิวตรอนนั้นใช้แผ่นทองในการทดลอง แผ่นทองที่ใช้มีความหนา 0.25 กรัม/ตร.ซม. ค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนเทอร์มาลนิวตรอน 98.6 บาร์น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน 0.3 ตร.ซม./กรัม ความหนาแน่น 19.32 กรัม/ลบ.ซม. ไอโซโทปกัมมันตรังสีมีเวลาครึ่งชีวิต 2.7 วัน ทองนั้นเหมาะมากที่จะนำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้เพราะว่าทองนั้นสามารถทำให้บางมาก ๆ ได้ คือสามารถทำให้บางได้ถึง 5 มก./ตร.ซม. ยิ่งแผ่นทองที่ใช้บางมากค่าแฟกเตอร์การรบกวนฟลักซ์โดยแผ่นทองซึ่งได้กล่าวมาแล้วนั้น ก็จะมีค่าเข้าใกล้ 1

ในการทดลองตอนที่ 3 สารที่ใช้ก็มี ทองแดง , อลูมินัม , เกลือ และแมงกานีส ซึ่งเป็นสารที่หาได้ง่ายในชีวิตประจำวัน

2.11 <u>ส่วนประกอบและหลักการทำงานของหลอดวัดรังสีแบบไกเกอร์-มูลเลอร์</u>[๑]

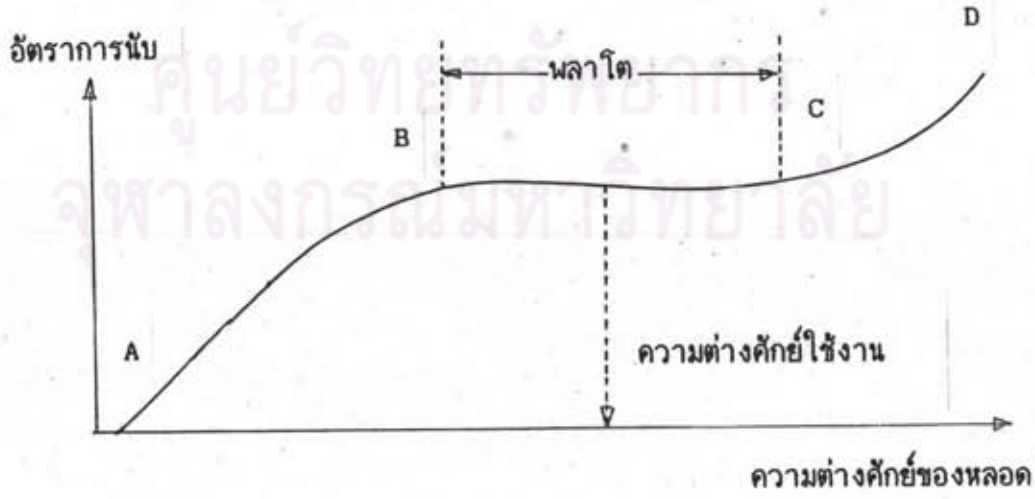
---

[๑] I.Kaplan, <u>Nuclear Physics</u>. (Addison-Wesley, Massachusetts, 1956), p.43

หลอดไกเกอร์-มูลเลอร์หรือที่เรียกว่าหลอด G.M. มีรูปแบบหลายอย่าง แต่ส่วนใหญ่เป็นทรงกระบอก ซึ่งประกอบด้วยกระบอกโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบ ส่วนแกนกลางซึ่งทำด้วยเส้นลวดทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก

เมื่อมีอนุภาครังสีวิ่งผ่านเข้ามาในหลอดไกเกอร์ อนุภาคนี้จะไปทำให้แกสซึ่งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าของหลอดไกเกอร์แตกเป็นอิออน สำหรับรังสีบีตาและแอลฟานั้นเมื่อผ่านเข้าไปก็จะทำให้แกสแตกตัวเป็นไอออนได้โดยตรง ส่วนรังสีที่ไม่มีประจุ เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ จะต้องเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเลกตริก หรือ ปรากฏการณ์คอมพ์ตันที่เปลือกนอก ก่อนแล้วอิเลกตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาอันใดอันหนึ่งที่กล่าวข้างต้นนี้จะไปทำให้แกสแตกตัวเป็นไอออนอีกที่หนึ่ง เนื่องจากขั้วของหลอดไกเกอร์มีความต่างศักย์สูงมากจึงทำให้เกิดขบวนการ Gas Multiplication หรือ Electron Avalance จากกระบวนการนี้เองทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในช่วงสั้น ๆ จึงเป็นเหตุให้ความต่างศักย์ของหลอดไกเกอร์ลดลง ซึ่งเมื่อดูจากจอของออสซิโลสโคปจะเห็นเป็นสัญญาณพัลส์ทางลบ หรือต่อเข้ากับวงจรของเครื่องนับก็จะนับได้ 1 ตัว

กราฟประจำตัวของหลอดไกเกอร์หมายถึงกราฟระหว่างจำนวนสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลากับความต่างศักย์ของหลอด



รูปที่ 2.4 กราฟประจำตัวของหลอดไกเกอร์

จากรูป 2.4 ช่วง AB เรียกว่า Region of Proportional Counting ขนาดของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคที่ผ่านเข้ามา ถ้าเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้นจะทำให้อัตราการนับเพิ่มขึ้นเนื่องจากช่วงพลังงานของอนุภาคที่นับได้เพิ่มขึ้น ส่วนช่วง BC เป็นช่วงที่เรียกว่า Geiger Region ในช่วงนี้อนุภาคทุกตัวที่ผ่านเข้ามาในหลอดจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์เท่ากันหมดและนับได้หมดทุกตัว ช่วงนี้มีชื่อเรียกว่า "พลาโต" สำหรับการใช้งานนั้นมักเลือกความต่างศักย์อยู่ที่กึ่งกลางของพลาโตเพื่อว่าความต่าง ๆ ศักย์ที่ใช้งานมีการเปลี่ยนแปลงบ้างก็จะไม่ทำให้อัตราการนับเปลี่ยนไปด้วย ต่อไปเป็นช่วง CD ซึ่งเรียกว่า Region of Continuous Discharge ในช่วงนี้เมื่อเกิดการ discharge เริ่มต้นเพียงหนึ่งครั้งก็จะทำให้เกิดการ discharge ติดตามมาอีกหลายครั้งหรืออนุภาคเพียงตัวเดียวทำให้เกิดพัลส์ได้หลายพัลส์ ซึ่งทำให้การนับผิดพลาด

2.12 ปฏิกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

สารกัมมันตรังสีที่ปล่อยรังสีแกมมา เมื่อไปปะทะกับสสารจะเกิดปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ ซึ่งแล้วแต่ขนาดของพลังงานรังสีแกมมา และชนิดของสสาร ปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น 3 พวกใหญ่ ๆ คือ

1) ปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเลกตริก (Photoelectric Effect) เป็นขบวนการที่โฟตอนเกิดปฏิกิริยากับอะตอมของวัตถุนั้น ๆ โดยถ่ายเทพลังให้แก่อิเลกตรอนในเชลใดเชลหนึ่งจนหมด แล้วอิเลกตรอนตัวนั้นก็หลุดออกจากวงจร โดยมีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานของรังสีแกมมานั้นลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของเชลที่อิเลกตรอนตัวนั้นอยู่ และเมื่ออิเลกตรอนในเชลหนึ่งหลุดไปอิเลกตรอนที่อยู่ในเชลถัดไปก็จะเคลื่อนเข้าแทนที่ต่อ ๆ กัน

2) ปฏิกิริยาแบบคอมพ์ตัน (Compton Scattering) ขบวนการนี้เหมือนกับการชนของลูกบิลเลียดคือ โฟตอนเกิดอันตรกิริยากับอิเลกตรอนอิสระที่อยู่ในวัตถุนั้น โดย

การชน แล้วถ่ายเทพลังงานให้อิเลกตรอนไม่หมด นั่นคือพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกถ่ายเทให้อิเลกตรอนตัวที่ถูกชนนั้นกระเด็นไป และพลังงานส่วนที่เหลือก็จะเป็นโฟตอนที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าเดิมพร้อมทั้งทิศทางก็จะเปลี่ยนไปจากเดิม

3) ปฏิกิริยาแบบอิเลกตรอนคู่ (Pair Production) ขบวนการนี้เกิดขึ้นในบริเวณสนามคูลอมบ์ (Coulomb Field) ของนิวเคลียส เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าใกล้นิวเคลียสใดจะเกิดปรากฏการณ์อย่างหนึ่ง คือรังสีแกมมานั้นหายไปแล้วเกิดอิเลกตรอนและโพซิตรอนขึ้นมาแทนคู่หนึ่ง โดยพลังงานของรังสีแกมมานั้นกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเลกตรอนและโพซิตรอนบวกกับมวลนิ่งของอนุภาคทั้งสองนี้ สำหรับโพซิตรอนที่เกิดขึ้นเมื่อวิ่งไปก็จะสูญเสียพลังงานทำให้ตัวเองวิ่งช้าลง ๆ จนในที่สุดเมื่อพบกับอิเลกตรอนก็จะรวมกันหายไปทั้งคู่กลายเป็นโฟตอนสองตัววิ่งออกจากกันในทิศทางตรงกันข้าม โดยแต่ละตัวมีพลังงานเท่ากัน คือ 0.51 MeV และเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบนี้เรียกว่า เกิดการประลัย (annihilation) ด้วยเหตุนี้จึงเป็นได้ว่าปฏิกิริยาแบบอิเลกตรอนคู่ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV

2.13 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบซิลทิลเลชั่น

เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบซิลทิลเลชั่นที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีส่วนประกอบใหญ่ ๆ 2 ส่วนด้วยกัน ดังรูปที่ 2.6 คือ

1) ส่วนที่เป็นหัววัด

หัววัดเป็นผลึก NaI(Tl) ขนาดของหัววัดเป็นทรงกระบอกตันมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูง 3 นิ้ว เมื่อรังสีผ่านเข้ามาในผลึก NaI(Tl) จะเกิดปฏิกิริยากับ NaI ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.12 ซึ่งจะทำให้ได้อิเลกตรอนเกิดขึ้น อิเลกตรอนจะไปกระตุ้นอะตอม

ของ NaI(Tl) ตามทางที่ผ่านไป อะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนเพื่อมาอยู่ในสถานะปกติ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าขบวนการเกิดสถานะกระตุ้น หรือ อิเลกตรอนที่เกิดขึ้นนี้อาจจะไปทำให้อะตอมของ NaI(Tl) เกิดแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า โดยทำให้อิเลกตรอนของอะตอม NaI(Tl) หลุดออกไปทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเลกตรอนตัวใหม่จะถูกจับเข้ามาแทนที่ เกิดการส่งผ่านประจุทำให้เกิดการลดพลังงานศักย์ พลังงานจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปโฟตอนเช่นกัน เรียกว่ากระบวนการการเกิดไอออน พลังงานในรูปของโฟตอนจาก 2 ปรากฏการณ์นี้จะถูกส่งผ่านไปยังทาลเลียม ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดแสง จะทำให้อะตอมของทาลเลียมได้รับการกระตุ้นแล้วคายพลังงานออกมาในรูปของแสงสีน้ำเงิน ซึ่งแสงเหล่านี้จะไปกระทบแผ่นโฟโตคาโธด (Photocathode) ซึ่งอยู่ระหว่างผลึก NaI(Tl) กับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier Tube) โฟโตคาโธดทำด้วยโลหะผสมระหว่างแคดเมียมกับแอนติโมนี มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำ เมื่อแสงไปกระทบจะให้อิเลกตรอนออกมาเป็นปริมาณโดยตรงกับความเข้มแสง อิเลกตรอนเหล่านี้จะถูกขยายในหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ โดยการเคลื่อนที่จากไดโนด (Dynode) หนึ่งไปยังอีกไดโนดหนึ่ง ซึ่งมีความต่างศักย์สูงกว่าอันแรก ความต่างศักย์ที่ใช้กับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ได้มาจากไฟฟ้าศักย์สูง ผลที่สุดอิเลกตรอนทั้งหมดจะเคลื่อนที่ไปที่อาโนด (Anode) ซึ่งเป็นขั้วสะสม จะได้สัญญาณซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ดูดกลืนในผลึก NaI(Tl) ออกมาทางเอาท์พุท (output) แล้วต่อเข้าวงจรขยายต่อไป

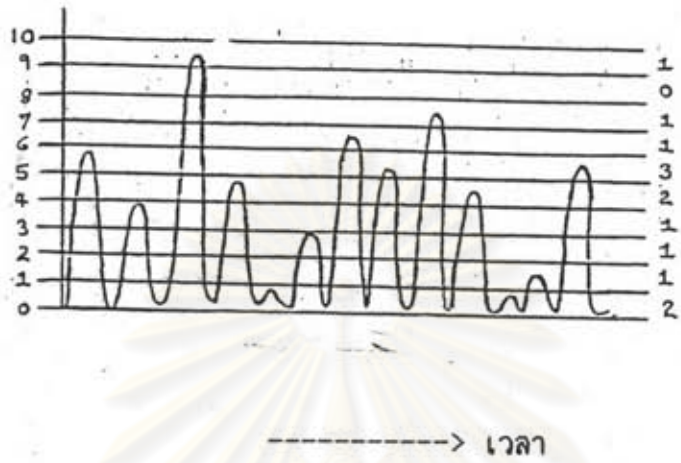
2) ส่วนที่เป็นเครื่องวิเคราะห์หลายช่อง (1024 ช่อง)

เมื่อสัญญาณจากชุดหัววัดรังสีป้อนผ่านวงจรขยายสัญญาณ จะได้สัญญาณที่มีขนาดความสูงเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีที่เข้ามาและถูกดูดกลืนโดยหัววัด วิธีการนับจำนวนสัญญาณโดยการใช้วิธีคัดเลือกความสูงที่อยู่ในช่วงขนาดเดียวกันให้นับรวมกันเรียกว่า ช่อง (Channel) ถ้าแบ่งจำนวนช่องนี้เป็นช่องเล็ก ๆ ก็สามารถวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณได้ละเอียดขึ้น ตัวอย่างเช่น สมมุติให้มีพัลส์เข้ามามีขนาดความสูงตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ และถ้าแบ่ง

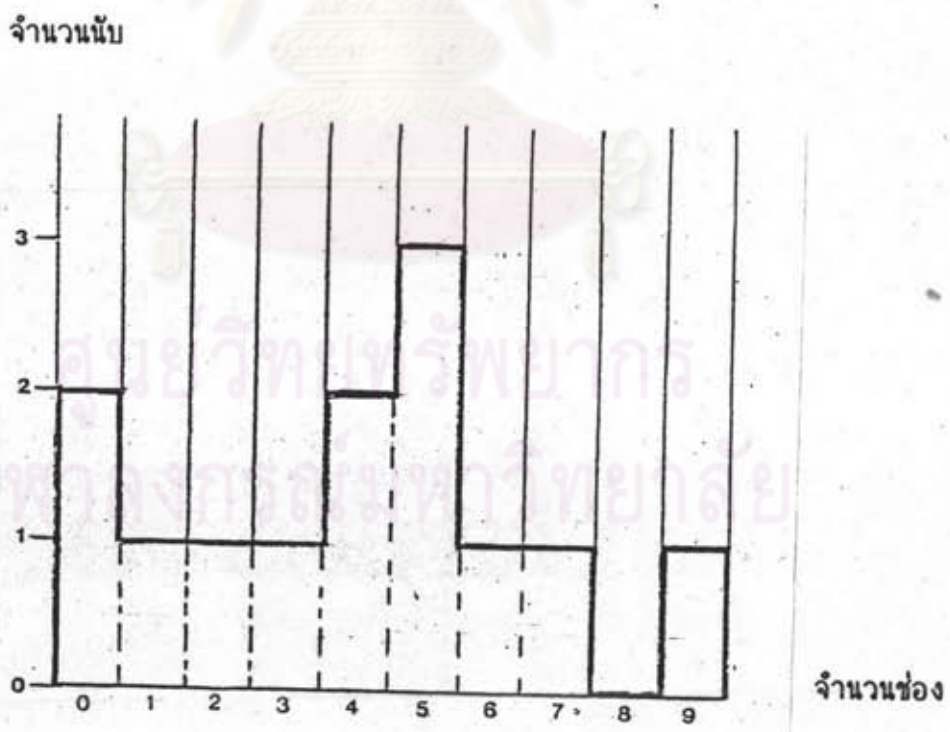
ความสูงของสัญญาณนี้โดยแบ่งจาก 10 โวลต์เป็นจำนวนช่อง 10 ช่อง เมื่อจำนวนพัลส์ที่มามีขนาดดังในรูปที่ 2.5 ก. ให้นับจำนวนพัลส์ที่มีความสูงอยู่ในช่องเดียวกันเข้าด้วยกัน เช่น ช่องที่ 5 นับพัลส์ที่มีความสูงเท่ากับหรือมากกว่า 5 โวลต์แต่ต้องน้อยกว่า 6 โวลต์ ซึ่งจะมีจำนวน 3 พัลส์ แล้วนำค่าที่ได้นี้ไปเขียนกราฟ โดยให้แกนนอนแบ่งออกเป็น 10 ช่อง ซึ่งตรงกับจำนวนช่องที่ความสูงของสัญญาณอยู่ ส่วนในแกนตั้งแทนจำนวนนับของพัลส์ที่มีความสูงอยู่ในช่องเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 ข.

ความละเอียดของการวิเคราะห์สเปกตรัมขึ้นอยู่กับการแบ่งจำนวนช่อง เช่นที่ขนาดความสูงของสัญญาณจาก 0 ถึง 10 โวลต์ อาจแบ่งเป็น $2^9 = 512$ ช่อง หรือแบ่งเป็น $2^{10} = 1024$ ช่อง การแบ่งช่องมากขึ้นจะได้รายละเอียดมากขึ้น แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของหัววัดรังสีที่จะสามารถแยกระดับพลังงานรังสี (Resolution) ด้วย สุดท้ายกราฟที่ได้จะแสดงบนจอของออสซิลโลสโคป ดังรูป 1.5 ค.

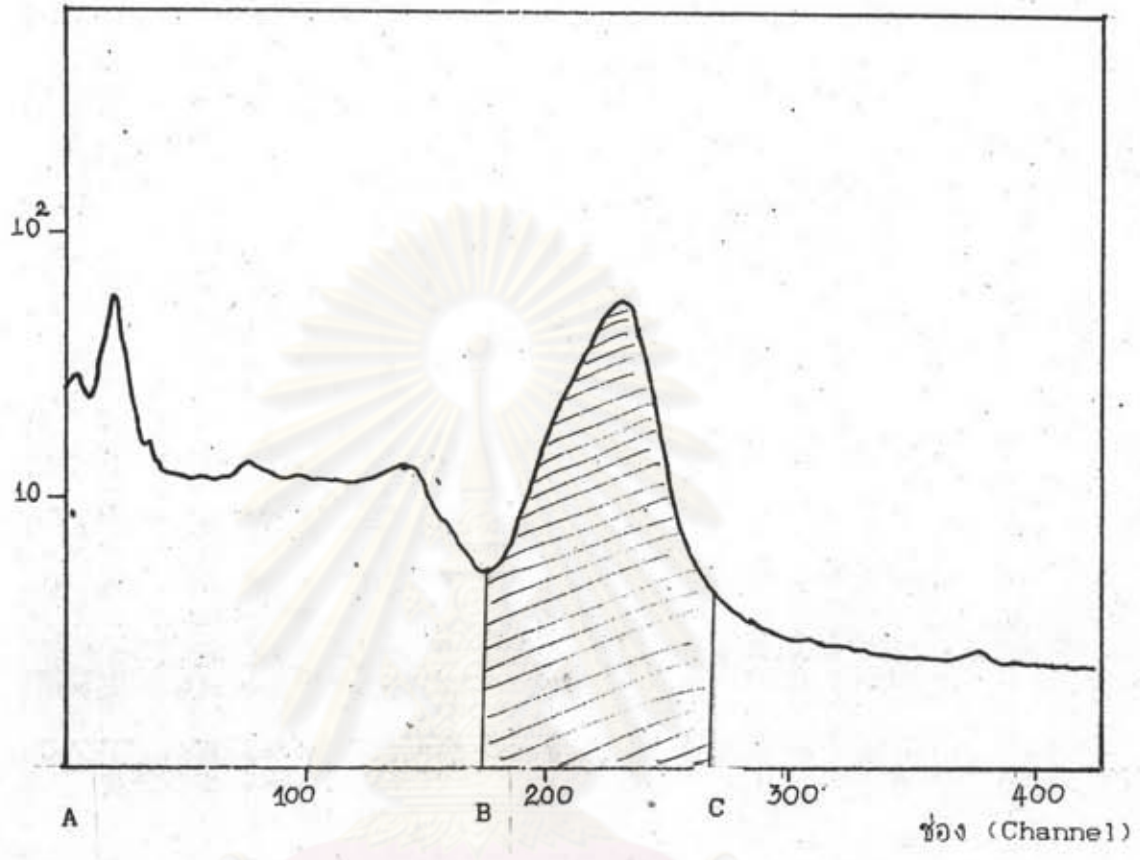
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ก. แสดงภาพของสัญญาณก่อนวิเคราะห์



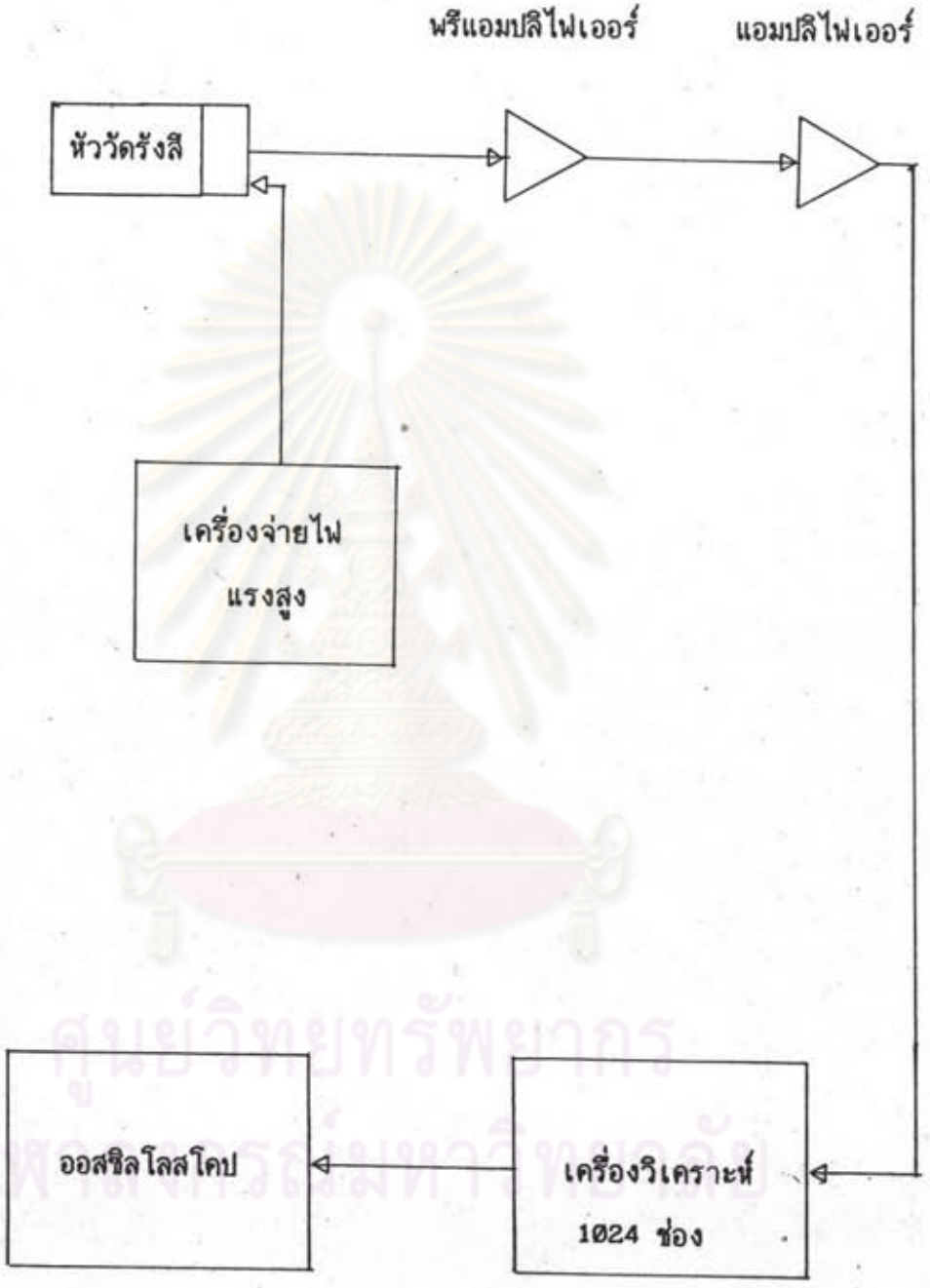
รูปที่ 2.5 ข. แสดงกราฟหลังจากวิเคราะห์สัญญาณแล้ว



รูปที่ 2.5 ค. แสดงแกมมาสเปกตรัมของซีเซียม -137

จากรูปที่ 2.5 ค. ส่วนที่แลเงาในรูปคืออัตราการนับที่นำไปใช้ในการคำนวณ เรียกว่าอัตราการนับใต้ยอด ซึ่งจะให้ผลที่ถูกต้องกว่าการใช้อัตราการนับใต้กราฟทั้งหมด

อัตราการนับจากช่อง B ถึงช่อง C นั้นได้มาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับผลึกโซเดียมไอโอไดด์แบบโฟโตอิเลกตริกหรือแบบคอมพ์ตัน ส่วนอัตราการนับจากช่อง A ถึงช่อง B นั้นได้มาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับผลึกโซเดียมไอโอไดด์แบบคอมพ์ตันเป็นส่วนใหญ่

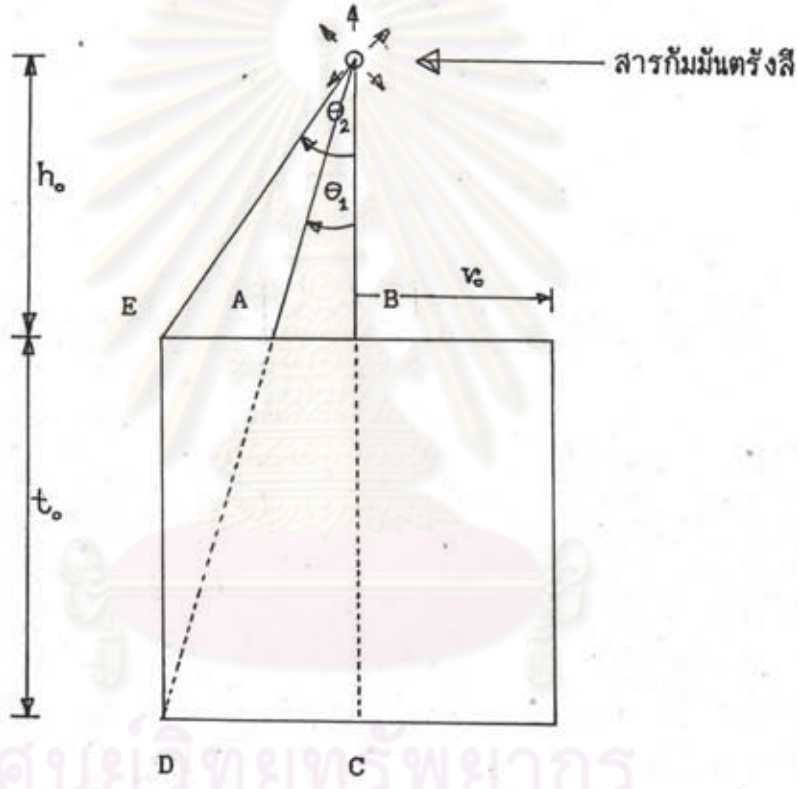


รูปที่ 2.6 แผนภาพของระบบเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ชนิด 1024 ช่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.14 ประสิทธิภาพของหัววัดโซเดียมไอโอไดด์รูปทรงกระบอกขนาด 3"x3"

สูตรในการคำนวณหาประสิทธิภาพทั้งหมดของหัววัดโซเดียมไอโอไดด์นั้นหาได้โดยนำสารกัมมันตรังสีที่มีขนาดเล็กเป็นจุดวางในตำแหน่งแนวแกนกลางของหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ในระยะที่ต้องการดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการกำหนดระยะต่าง ๆ ที่นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพทั้งหมด

โดยที่ t_o = ความหนาของหัววัดมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

r_o = รัศมีของหัววัดที่เป็นรูปทรงกระบอกมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

h_o = ระยะจากสารกัมมันตรังสีถึงหัววัดในแนวแกนของผลึก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 2.8 ระยะ X อาจแบ่งได้เป็น 2 ส่วนแต่ละส่วนจะสัมพันธ์กับมุม θ ดังนี้

ในช่วง 0 --> θ_1 , $X_1 = t_o/\cos\theta$

ในช่วง θ_1 --> θ_2 , $X_2 = r_o/\sin\theta - h_o/\cos\theta$,

$\theta_1 = \tan^{-1}[r_o/(h_o+t_o)]$,

$\theta_2 = \tan^{-1} r_o/h_o$

ดังนั้น ประสิทธิภาพทั้งหมด[10] ($T(E)$)

$$T(E) = \frac{1}{2}\{\int_0^{\theta_1}[1-\exp(-\mu t_o/\cos\theta)]\sin\theta d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2}[1-\exp(-\mu(r_o/\sin\theta - h_o/\cos\theta))]\sin\theta d$$

$$= \frac{1}{2}\{\int_0^{\tan^{-1} r_o/(h_o+t_o)}[1-\exp(-\mu t_o/\cos\theta)]\sin\theta d\theta + \int_0^{\tan^{-1} r_o/h_o}[1-\exp(-\mu(r_o/\sin\theta - h_o/\cos\theta))]\sin\theta d\theta\} \quad \ldots\ldots\ldots(12)$$

โดยอาศัยสมการ (12) สามารถหาค่าประสิทธิภาพทั้งหมดของหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ขนาด 3"x3" ได้ดังตารางที่ 2.1[11]

---

[10] R.L. Heath, Scintillation Spectrometry, Gamma-Ray Spectrum Catalog. IDO-16408 (Phillip Petroleum Company Atomic Energy Division, Idaho Operation Office U.S. AEC., 1964), p.21

[11] Ibid., pp.22-23

พลังงานรังสีแกมมา (MeV)	0.152	0.212	0.332	0.566	1.100
ประสิทธิภาพทั้งหมด (h.= 0)	0.49993	0.49412	0.45143	0.38131	0.31131

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าประสิทธิภาพทั้งหมดที่พลังงานต่าง ๆ ระยะติดหัววัด

การหาประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการคำนวณนั้นไม่นิยมใช้ค่าประสิทธิภาพทั้งหมด แต่นิยมใช้ค่าประสิทธิภาพเฉพาะยอด (Peak Efficiency) เพราะว่าค่าที่ได้จากการเกิดยอดแต่ละครั้งจะแน่นอนกว่าที่จะหารวมกันทั้งหมด ซึ่งค่าประสิทธิภาพเฉพาะยอดหาได้จากความสัมพันธ์

ประสิทธิภาพเฉพาะยอด = P(Peak to Total Ratio) x ประสิทธิภาพทั้งหมด ...(13)

ดังนั้นถ้าทราบค่า P ก็สามารถหาค่าประสิทธิภาพเฉพาะยอดได้ ค่า P นี้ถ้าเป็นสารชนิดเดียวกันจะให้ค่าคงที่ในแต่ละพลังงาน เช่น Au-198 พลังงานของรังสีแกมมา 0.4117 MeV ค่า P = 0.737[12]

2.15 <u>การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน</u>

ในการทดลองแต่ละครั้งย่อมต้องมีความคลาดเคลื่อนเสมอ อาจจะเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง หรือเกิดจากผู้ทำการทดลองเอง ฉนั้นในการบันทึกผลการทดลองจะต้องบอกความคลาดเคลื่อนไว้ด้วย โดยแบ่งออกเป็น

---

[12] Ibid., Appendix 3.

1) ความคลาดเคลื่อนจากการนับ

ถ้า A = ค่าที่นับได้

B = Back Ground

C = ค่าที่ใช้ในการคำนวณ

$C = (A-B) \pm \sqrt{A+B}$

2) ค่าความคลาดเคลื่อนในกรณีที่นำข้อมูลมาบวกลบกัน

จะนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละข้อมูลมายกกำลังสอง นำมาบวกกันแล้วถอดรากที่สอง

ถ้า $F_1 = A \pm a$ เป็นข้อมูลชุดที่ 1

$F_2 = B \pm b$ เป็นข้อมูลชุดที่ 2

$$F_1 \pm F_2 = (A \pm B) \pm \sqrt{a^2+b^2}$$

3) ค่าความคลาดเคลื่อนในกรณีที่นำข้อมูลมาคูณหารกัน

ในกรณีที่นำมาคูณกัน

$$F_1.F_2 = A.B \pm \sqrt{(Ab)^2+(Ba)^2}$$

ในกรณีที่นำมาหารกัน

$$F_2/F_1 = (B/A) \pm [\sqrt{(Ba/A)^2+b^2}]/A$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย