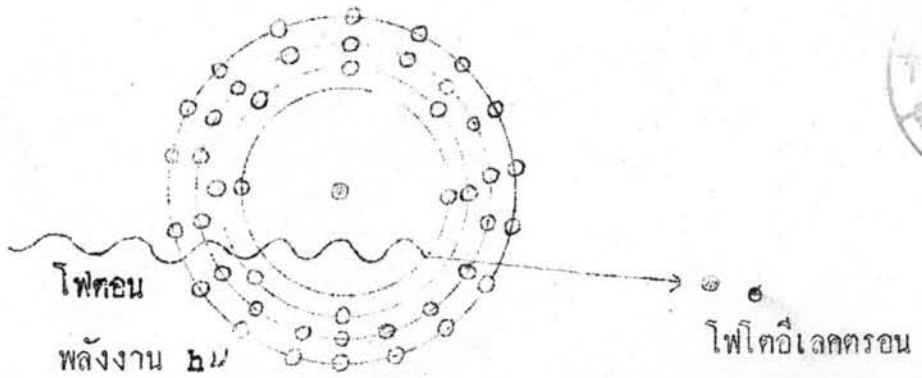
บทที่ 2

ปฏิกิริยาระหว่างรังสีแกมม่ากับสารและเครื่องมือวัดรังสีแกมม่า

เมื่อรังสีแกมม่าปะทะกับสสารจะเกิดปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ ซึ่งปฏิกิริยาแต่ละแบบจะเกิดขึ้นแล้วแต่ขนาดพลังงานของโฟตอน (photon) และชนิดของสสาร

2.1 ปฏิกิริยาแบบโฟโตอีเลคตริก (Photoelectric effect)

เมื่อโฟตอนซึ่งมีพลังงานไม่มากนักปะทะกับอะตอมของสสาร โฟตอนจะชนกับอีเลคตรอนในวงโคจรรอบ ๆ นิวเคลียสและถ่ายเทพลังงานให้แก่อีเลคตรอนถ้าโฟตอนที่มาชนมีพลังงานสูงเกินพอที่จะให้อีเลคตรอนหลุดออกจากวงโคจรได้อีเลคตรอนก็จะหลุดออกจากวงโคจรจากอะตอมมีพลังงานจลน์ติดตัวออกไปอีเลคตรอนที่หลุดออกมาจากอะตอมนี้เรียกโฟโตอีเลคตรอน (photoelectron)



รูปที่ 2-1 ปฏิกิริยาแบบโฟโตอีเลคตริก

การเกิดปฏิกิริยาแบบนี้สอดคล้องกับสมการของไอน์สไตน์ (Einstein)

$$h\nu = S + T$$

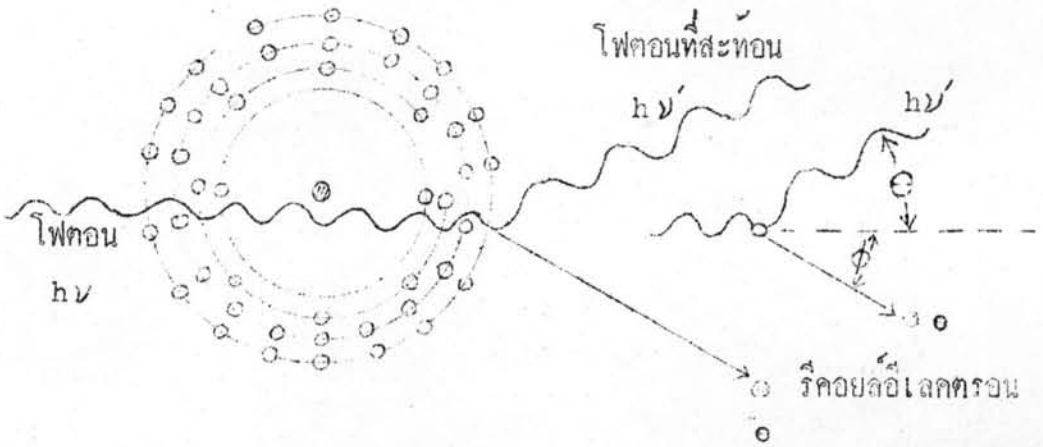
$h\nu$ คือพลังงานทั้งหมดของโฟตอนที่มาชน

S คือพลังงานที่ใช้เพื่อให้อิเลคตรอนหลุดออกจากอะตอมได้

T คือพลังงานจลน์ของอิเลคตรอนที่หลุดออกมา

2.2 การชนแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering)

ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนบางส่วนถูกใช้ไปในปฏิกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริกแต่เป็นส่วนน้อยที่ถูกนำไปเป็นพลังงานจลน์ของโฟโตอิเลคตรอน จึงยังมีพลังงานของโฟตอนเหลืออยู่เปรียบเหมือนเป็นโฟตอนตัวใหม่ซึ่งมีพลังงานน้อยกว่าตัวเริ่มต้นเข้ามาชน สำหรับอิเลคตรอนที่หลุดออกมาจากอะตอมโดยการแบ่งเอาพลังงานมาจากโฟตอนเรียก รีคอยล์อิเลคตรอน **(recoil electron)**



รูปที่ 2-2 การชนแบบคอมพ์ตัน

เมื่อมีการชนแบบคอมพ์ตันเป็นการชนแบบอีลาสติค (elastic collision) โฟตอนที่ตกระทบมีพลังงานลดลงและเกิดการเปลี่ยนทิศทางขึ้นกลายเป็นโฟตอนที่สะท้อน (scattered photon) และพลังงานที่ลดไปนั้นทำให้อิเลคตรอนหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งจะหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เมื่อ มวลของอนุภาค $= m = h\nu / c^2$

โมเมนตัม $= p = h\nu /c$

ตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\begin{cases} \frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos\theta + p\cos\phi \quad ...(2.2.1) \\ \frac{h\nu}{c} \sin\theta = p \sin\phi \quad ...(2.2.2) \end{cases}$$

กฎการอนุรักษ์พลังงาน $h\nu = h\nu' + T$ ....(2.2.3)

จากสมการ (2.2.1) และ (2.2.2) จะได้

$$p^2 = \frac{h^2}{c^2} (\nu^2 - 2\nu\nu' \cos\theta + \nu'^2) \quad ....(2.2.4)$$

เนื่องจากอิเลคตรอนมีความเร็วมากจึงใช้ทฤษฎีสัมพันธภาพ $T = mc^2 \sqrt{1 + \frac{p^2}{(mc)^2}} - mc^2$ และ (2.2.3) จะได้

$$h\nu - h\nu' = m_o c^2 \sqrt{1 + \frac{p^2}{(m_o c)^2}} - m_o c^2 \quad .....(2.2.5)$$

แทนค่า (2.2.4) ใน (2.2.5) ได้

$$\frac{\nu - \nu'}{\nu\nu'} = \frac{h}{m_o c^2} (1-\cos\theta) \quad .....(2.2.6)$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_o c^2} (1-\cos\theta) = 0.0242(1-\cos\theta) \text{ A} .....(2.2.7)$$

$\Delta\lambda$ คือ Compton **shift**

จากสมการ (2.2.7) พบว่าการเปลี่ยนความยาวคลื่นขึ้นอยู่เพียงมุมที่สะท้อนและไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นเริ่มต้นหรือสสารที่เป็นตัวดูดกลืนพลังงาน การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโฟตอนที่ตกกระทบและโฟตอนที่สะท้อนหาได้จากสมการ (2.2.8)

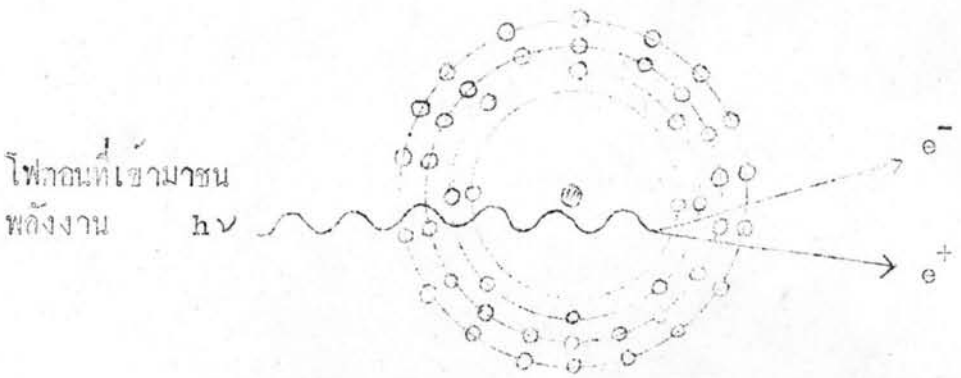
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1-\cos\Theta)} \qquad \ldots\ldots(2.2.8)$$

และสำหรับอิเลกตรอน

$$T = \frac{h\nu\,(h\nu/m_0c^2)(1-\cos\Theta)}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1-\cos\Theta)}$$

2.3 <u>การเกิดอิเลกตรอนคู่</u> (Pair production)

โฟตอนที่จะทำให้เกิดอิเลกตรอนคู่ได้ต้องมีพลังงานอย่างต่ำ 1.02 MeV ขึ้นไป



รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดอิเลกตรอนคู่

ดูรูปที่ 2-3 โฟตอนเคลื่อนที่ในสนามของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าแล้วทำให้เกิดโปซิตรอน

อีเลคตรอนคู่ ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV และจะเกิดขึ้นมากถ้าโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้น เมื่อโฟตอนตัวหนึ่งเข้ามาในสนามของอนุภาคที่มีประจุพลังงานจะเปลี่ยนไปเป็นโปซิตรอนและอีเลคตรอนคู่หนึ่งปฏิกิริยาเกิดกับสนามของนิวเคลียสแต่กับวงโคจรของอีเลคตรอนก็เกิดได้ การเกิดอีเลคตรอนและโปซิตรอนไม่ใช่เป็นการแตกตัวของอะตอมหรืออีเลคตรอนหลุดจากวงโคจร แต่เกิดมีมวลของโปซิตรอนและอีเลคตรอนขึ้นจากพลังงานของโฟตอนซึ่งไม่มีมวล โฟตอนที่เข้ามาทุก ๆ ตัวจะทำให้เกิดอีเลคตรอนและโปซิตรอนเป็นคู่ ๆ ไป ซึ่งหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$h\nu \longrightarrow e^{+} + e^{-} + 2T$$

โดยที่โปซิตรอนและอีเลคตรอนมีพลังงานเท่า ๆ กันคือ ถ้าโฟตอนมีพลังงานเข้ามา 1.02 MeV (ซึ่งเป็นพลังงานต่ำสุดที่จะทำให้เกิดอีเลคตรอน-โปซิตรอน ได้) แต่ละตัวจะมีพลังงาน 0.51 MeV ถ้าพลังงานของโฟตอนเข้ามาเกิน อนุภาคทั้งคู่จะเฉลี่ยพลังงานไปเท่า ๆ กัน

การที่จะเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ขึ้นอยู่กับครอสเสคชั่นของการเกิดอีเลคตรอน-โปซิตรอน และช่วงพลังงานของโฟตอนที่เข้ามา ซึ่ง Bethe[1] ได้หาไว้คือ

$$\sigma_{pair} = \frac{Z^2}{137}\left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_o m_o c^2}\right)^2\left(\frac{28}{9}\ln\frac{2h\nu}{m_o c^2} - \frac{218}{27}\right)$$

สมการนี้ใช้กับโฟตอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 1.02 MeV ถึง 15 MeV ในสารที่มีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนได้ดีเช่นตะกั่วและต่อไปถึง 30 MeV ในสารที่มีอะตอมมิคนัมเบอร์ต่ำ

2.4 หน่วยของรังสีแกมมาที่ผ่านสสาร[2]

เรินท์เกน (Roentgen) เป็นหน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสีที่แผ่ออกมารอบตัว (exposure dose) ในอากาศ

---

[1] H.A. Bethe and J. Ashkin, Experimental Nuclear Physics (New York:John Wiley & Sons, Inc.,1953),Vol 1,p.337.

[2] Lapp and Andrews, Nuclear Radiation Physics (New Jersey: Prentice-Hall, Inc.,1972), p.250-251.

1 เรินท์เกน (Roentgen) หมายถึงปริมาณรังสีแกมม่าหรือสังสี เอ็กซ์ที่ทำให้อากาศ แห้ง 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (หนัก 0.001293 กรัม) ที่ 0° c และความดัน 760 มิลลิเมตร ของปรอท ไอออไนส์ (ionize) เกิดประจุบวกหรือลบ 1 อี.เอส.ยู

แรด (Rad) เป็นหน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสีแกมม่าที่ผ่านเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต หน่วย นี้เป็นการหาค่าเฉลี่ยของพลังงานที่สิ่งมีชีวิตซึ่งมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำจะได้รับต่อกรัม

1 แรด = 100 ergs/gm. (biological matter)

นอกจากนี้ยังมีหน่วยวัดรังสีแบบอื่น ๆ อีกซึ่งจะไม่ขอกล่าวในที่นี้

2.5 <u>เครื่องมือวัดรังสีแกมม่า</u>

เครื่องมือวัดรังสีแกมม่ามีหลายชนิด ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะที่เกี่ยวกับวิจัยนี้เท่านั้น

2.5.1 <u>เครื่องมือวัดรังสีแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนท์</u> (Thermoluminescent dosimeter)[3]

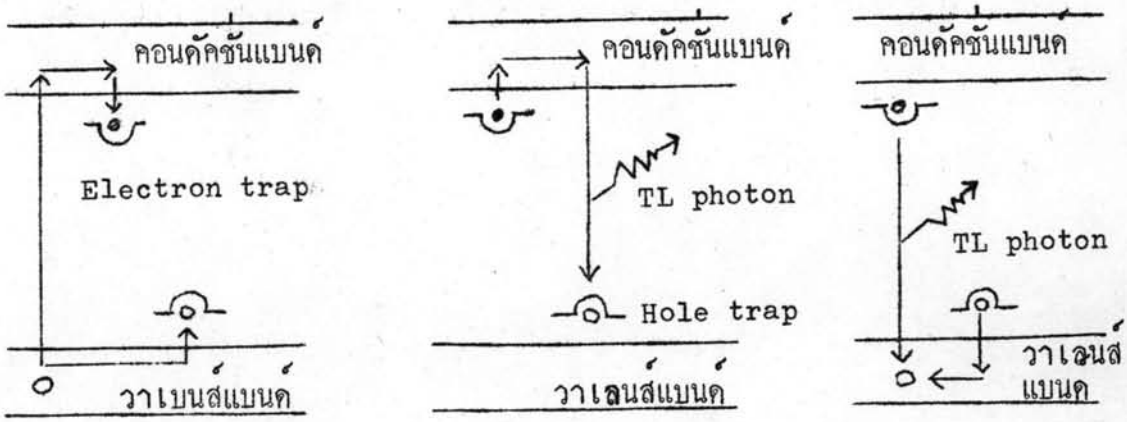
เครื่องมือนี้ใช้สารบางชนิดที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถเก็บพลังงานของรังสีที่ผ่านเข้ามาไว้ได้ และจะคายเป็นแสงออกมาเมื่อสารนั้นถูกทำให้ร้อน ปรากฏการณ์แบบนี้เรียกเทอร์โมลูมิเนสเซนท์ (thermoluminescence)

เมื่อรังสีเข้าไปในผลึก พลังงานบางส่วนหรือทั้งหมดจะถูกดูดกลืนไว้และทำให้อิเลคตรอนที่อยู่ในวงโคจร (orbit) ระดับต่าง ๆ รอบ ๆ นิวเคลียสเกิดการตื่นตัวและกระโดดจากระดับพลังงานปกติในวาเลนส์แบนด์ (valence band) ไปสู่คอนดัคชั่นแบนด์ (conduction band)

---

[3] J.R. Cameron, <u>Thermoluminescent Dosimetry</u> (University of Wisconsin press, Madison., 1968)

โดยปกติอีเลคตรอนจะกระโดดกลับมาสู่วาเลนส์แบนด์ตามเดิมโดยการคายพลังงานเป็นแสงออกมา แต่สารพิเศษที่ใช้ใน TLD เป็นผลึกแต่มีอะตอมของสารอสุทธิ (impurities) มาผสมอยู่ทั่วไปในแลททิช (lattice) ของผลึก จึงทำให้เกิดระดับของพลังงานขึ้นระหว่างวาเลนส์แบนด์และคอนดัคชั่นแบนด์ซึ่งเรียกว่าแทรบ (traps) ซึ่งจะกั้นไม่ให้อีเลคตรอนกระโดดกลับเข้าสู่วาเลนส์แบนด์ได้ เครื่องมือ TLD ใช้ประโยชน์ของผลึกที่มีจำนวนแทรบที่สร้างขึ้นมากมาย การทำให้เกิดแทรบในผลึกทำได้โดยการใส่สารอสุทธิเข้าไปในผลึกเล็กน้อย เช่นใส่แมงกานีสลงในแคลเซียมฟลูออไรด์ (Calcium fluoride) แล้วหลอมเข้าด้วยกันพร้อมกับควบคุมการเย็นตัวกลับเป็นผลึกใหม่ให้ดี



ก. เมื่อเอาสารอาบรังสี

ข. เมื่อให้ความร้อน อีเลคตรอนแทรบเสถียรน้อยกว่า

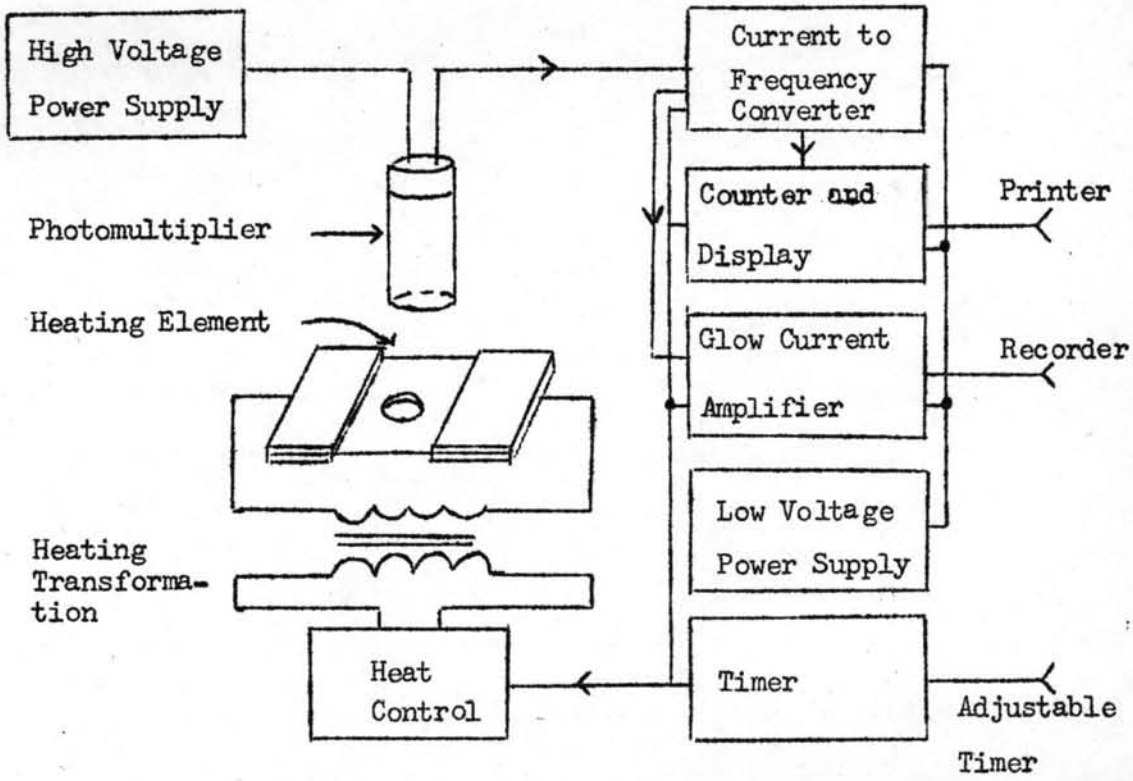
ค. เมื่อให้ความร้อน โฮลแทรบเสถียรน้อยกว่า

รูปที่ 2-4 แสดงระดับพลังงานของอะตอมในผลึกและการปล่อยแสง (photon) ออกมาเมื่อให้ความร้อน

ตามรูปที่ 2-4 เป็นแบบที่สร้างขึ้นเพื่ออธิบายว่าเมื่อผลึกที่เป็นฉนวนเก็บรังสีที่เข้ามาและคายออกเมื่อรับความร้อน รูป ก. เมื่อเอาสารไปอาบรังสี รังสีที่สามารถทำให้เกิดไอออนได้ทำให้อีเลคตรอนกระโดดจากวาเลนส์แบนด์ไปยังคอนดัคชั่นแบนด์ ทำให้เกิดหลุมในวาเลนส์แบนด์ ทั้งอีเลคตรอนและหลุมก็จะเคลื่อนที่ไปในผลึกจนกระทั่งรวมกันใหม่หรือจนกระทั่งถูกจับ (trapped) ในเมทาสเตบิ้ลสเตท (metastable state) ดังรูป ก. จำนวนอีเลคตรอนที่กระโดดลงไปในแทรบจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ผลึกได้รับ ซึ่งเมทาสเตเบิ้ลสเตทเหล่านี้เกิดขึ้นจากสารอสุทธิที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงมีโอกาสที่เป็นไปได้ 2 ทางที่ TL photon จะคายออกมาดังรูป ข และ ค เช่น รูป ข. เมื่อผลึกได้รับความร้อนที่เพียงพอก็จะทำให้อีเลคตรอนกระโดดขึ้นสู่คอนดัคชั่นแบนด์ ซึ่งพลังงานที่ต้องการเรียก energy gap E ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ต้องใส่เข้าไปเพื่อให้อีเลคตรอนกระโดดสู่คอนดัคชั่นแบนด์และกลับสู่วาเลนส์แบนด์โดยการปล่อยแสงออกมา ในเครื่องมือก็จะมีหลอดโฟโตมัลติไพเออร์ (photomultiplier tube) วัดแสงที่ออกมาได้ แสงที่ออกมาจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ได้รับ

รายละเอียดของเครื่องมือมีดังนี้

มียี่ห้อเต็มตามบริษัทที่สร้างว่า Teledyne Isotopes Thormoluminescence Dosimetry System Model 7100 Readout Instrument ของ Teledyne Company เครื่องมือนี้อยู่ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ



รูปที่ 2-5 บลอกไดอะแกรมของเครื่องมือวัดรังสีแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนท์

เครื่องมือนี้ตามปกติในการวัดรังสีแกมม่าใช้สารลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ซึ่งเป็นผงสีขาวใส่หลอดเล็ก ๆ ทำด้วย polypropylene ซึ่งมีขนาดยาว 1 นิ้ว เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3/16 นิ้ว บรรจุผง LiF ประมาณ 100 มิลลิกรัม นำไปอาบรังสีแกมม่า ณ ระยะต่าง ๆ ในห้องที่ทำการทดลอง ใช้เวลาอาบ 5 นาที หรือ 10 นาที แล้วแต่ต้องการ แล้วนำสารที่อาบรังสีเข้าเครื่องเพื่อวัดพลังงาน (แสง) ที่ออกมาตามปกติใช้ไฟฟ้า 500 volt D.C., Heat control ใช้ไฟฟ้า 0.58 แอมแปร์ (A.C)

2.5.2 ฟริคโดสซิเมเตอร์ (Fricke Dosimeter)[4]

เครื่องมือแบบนี้ใช้วัดปริมาณรังสีที่ผ่านเนื้อเยื่อเช่นน้ำ (เป็นการวัด Absorbed dose) ของรังสีแกมม่าโดยวิธีเคมี การวัดปริมาณรังสีแกมม่านั้นมีวิธีต่าง ๆ แต่โดยมากเป็นการวัดโดยใช้การเปรียบเทียบ เช่น TLD วัดรังสีแกมม่าโดยใช้การเปรียบเทียบ คือมี Standard source ตัวหนึ่งจะได้กราฟมาตรฐานชุดหนึ่งไว้ จากนั้นหาค่าความแรงของรังสีที่ต้องการทราบปริมาณรังสีโดยการเปรียบเทียบตัวเลขที่ได้จากเครื่องมือ TLD แต่สำหรับวิธีฟริคโดสซิเมเตอร์นั้น ค่าที่อ่านออกมาจากเครื่องวัดจะคำนวณหาปริมาณรังสีได้โดยตรง

หลักการอย่างย่อ ๆ มีดังนี้

เมื่อรังสีแกมม่าถูก ferrous ions (Fe^{++}) ในน้ำยากรดซัลฟูริก (Sulphuric acid solution) จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation) คือ

$$Fe^{++} \xrightarrow{\sim\sim} Fe^{+++}$$

ปริมาณ absorbed dose หาได้จากความเข้มข้นของเฟอริคไอออน (ferric ions) ที่เกิดขึ้น ปริมาณรังสีที่วัดด้วยวิธีนี้ได้ผลดีในช่วง 4×10^3 ถึง 4×10^4 แรด

การเตรียมสารเพื่อทำการทดลอง

เตรียมน้ำยาละลาย 2 กรัมของ $Fe(NH_4)_2 (SO_4)_2 , 6H_2O$ (หรือใช้ 1.4 กรัมของ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) + 0.38 กรัม NaCl + 110 มิลลิลิตร 95-98% H_2SO_4 โดยใช้ NaCl 0.001 molar เอาทั้งหมดนี้ละลายในน้ำกลั่นให้ได้สารละลายเป็น 5 ลิตร ส่วนผสมทุกอย่างใช้ Analytical grade น้ำกลั่นต้องเป็นน้ำกลั่นที่สะอาดจริง ๆ ควรเก็บสารละลายไว้ในที่มืดเพื่อไม่ให้แสงสว่างเข้าไป

---

[4] J. Wiss, A.D. Allen, and H.A. Schwarz, Use of the Fricke Ferrous Sulphate Desimeter for Gamma-ray Dose in the Range 4 to 40 Kr. (Genera:1955).

ทำให้เกิดออกซิเดชั่นได้ นำสารละลายนี้ใส่หลอดแก้วทดลองซึ่งมีฝาปิดเรียบร้อยนำไปอาบรังสีที่ต้องการหา dose rate เพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนยิ่งขึ้นแต่ละจุดที่ทดลองใช้สัก 3 หลอด อาบโดยใช้เวลา 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ นำสารละลายที่อาบรังสีแล้วนี้ไปวัดออฟติคอลเดนซิตี้ (optical density) โดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมีเตอร์ (Spectrophotometer) เทียบกับสารละลายที่ไม่ได้อาบรังสี เมื่อได้ออฟติคอลเดนซิตี้ แล้วก็นำเอาค่ามาคำนวณหาปริมาณรังสี

ในสูตร

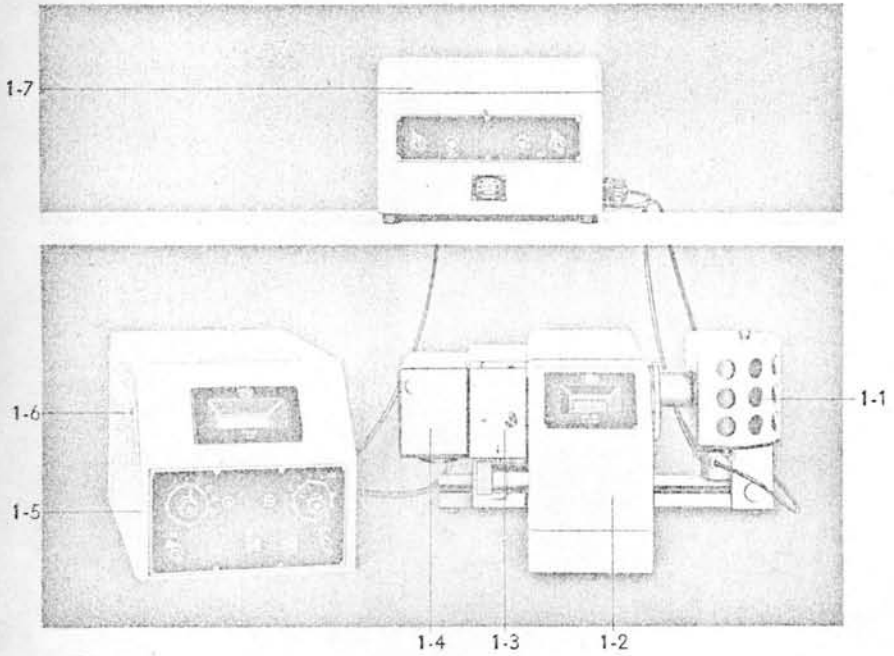
$$D = 2.74 \times 10^{4} \times O.D \qquad \text{rads}$$

เมื่อ

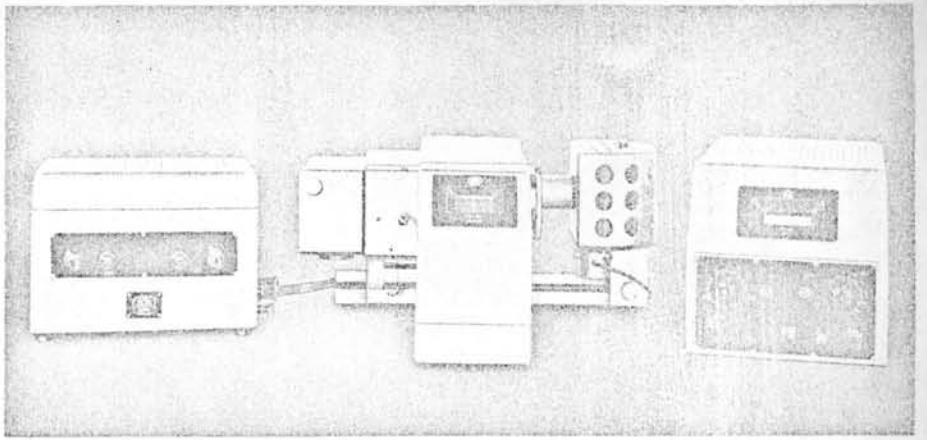
D คือปริมาณรังสีเป็น rad

O.D คือออฟติคอลเดนซิตี้ ที่ 25°C วัดที่ความยาวคลื่นของแสง 305 mμ (มิลลิไมครอน)

แล้วนำค่าที่คำนวณได้ไปหาค่าเฉลี่ยต่อเวลาที่ต้องการ ค่าที่วัดได้นี้จะถูกต้องดีในช่วงปริมาณรังสี 4×10^{3} - 4×10^{4} แรด สำหรับสเปคโตรโฟโตมีเตอร์ที่ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 2-6



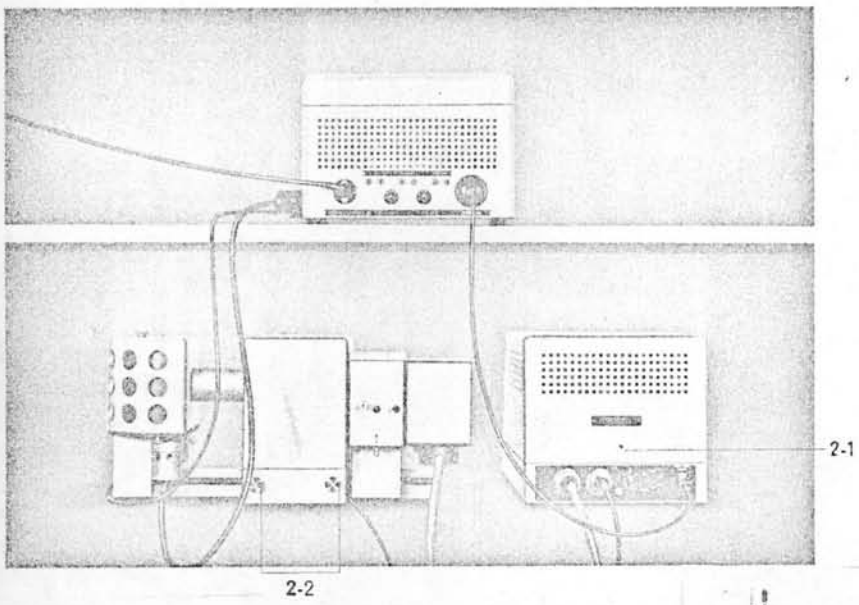
General view, Indicating instrument on the left



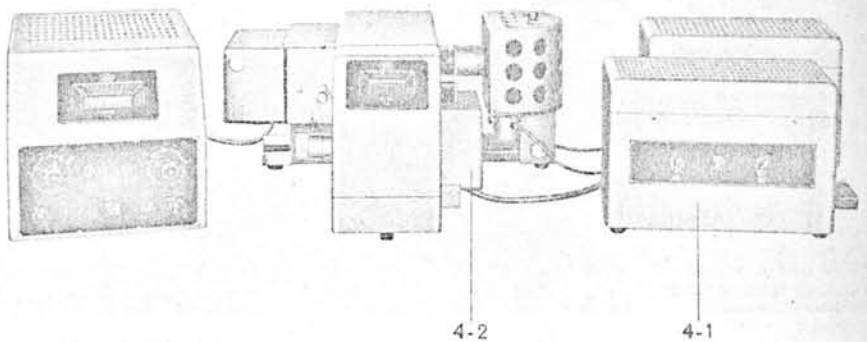
General view, indicating instrument on the right

1 - 1 Illuminator
1 - 2 Monochromator
1 - 3 Sample changer
1 - 4 Detector housing
1 - 5 Indicating instrument
1 - 6 Mechanical zero point corrector
1 - 7 Power supply unit for the lamps

2 - 1 Access to the height correction of the reading scale
2 - 2 Knurled screws for rigidly connecting the monochromator housing with the optical bench



Rear view, arrangement of cables



Instrument with **100-point automatic device**

4 - 1 Amplifier for the automatic device
4 - 2 Slit control group

รูปที่ 2.6 สเปคโตรโฟโตมีเตอร์