บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การวิเคราะห์โดยวิธีนิวตรอนแอกติเวชัน

เมื่อนำสารไปอาบนิวตรอน เพื่อให้เป็นสารกัมมันตรังสี ไอโซโทปของธาตุในสารนั้นจะทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอนด้วยอัตราการเกิดปฏิกิริยาตามสมการ 2.1

$$R = N\phi\sigma \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.1$$

เมื่อ R = อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่อวินาที

ϕ = นิวตรอนฟลักซ์ มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

σ = ภาคตัดขวาง (cross section) ของนิวตรอนมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

N = จำนวนอะตอมของไอโซโทปของธาตุนั้น โดยที่ $N = \frac{mNof}{AX100}$

A = น้ำหนักอะตอมของธาตุ

m = น้ำหนักเป็นกรัมของธาตุในสาร

N_o = เลขของอะโวการโดร

f = ร้อยละของไอโซโทปของธาตุนั้น (abundance)

ในขณะที่อะตอมบางส่วนกำลังกลายเป็นสารกัมมันตรังสี อะตอมส่วนที่เป็นกัมมันตรังสีแล้ว จะเริ่มสลายตัว ดังนั้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารกัมมันตรังสี = อัตราการเกิดปฏิกิริยา − อัตราการสลายตัว

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.2$$

เมื่อ N = จำนวนอะตอมของสารกัมมันตรังสีเมื่อเวลา

λ = ค่าคงตัวของการสลาย (decay constant)

ถ้าเวลาที่ใช้อาบนิวตรอนมากพอ อัตราการเกิดสารกัมมันตรังสีจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดสมดุลย์กับอัตราการสลายตัว เรียกว่าถึงจุดอิ่มตัว (saturation activity) แม้จะอาบนิวตรอนต่อไปอีก อะตอมกัมมันตรังสีก็ไม่เพิ่มขึ้นถ้าฟลักซ์ของนิวตรอนยังเท่าเดิม นั่นคือถ้าเวลาอาบนิวตรอนเป็น ∞

$$R = \lambda N \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.3$$

$$A_o^{\infty} = N\phi\sigma \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.4$$

เมื่อ A_o^{∞} = กัมมันตภาพ (activity) เมื่อเวลารอคอยเป็น o และเวลาอาบนิวตรอนเป็น ∞

แต่ถ้าเวลาอาบนิวตรอนไม่นานพอที่จะถึงจุดอิ่มตัว กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการ 2.5[3]

$$A_o^{ti} = N\phi\sigma\,(1 - e^{-\lambda ti}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.5$$

หรือ $$A_o^{ti} = A_o^{\infty}\,(1 - e^{-\lambda ti}) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.6$$

เมื่อ A_o^{ti} = กัมมันตภาพเมื่อเวลารอคอยเป็น o และเวลาอาบนิวตรอนเป็น ti

เทอมในวงเล็บมีค่าระหว่าง o – 1 เมื่อเวลาอาบนิวตรอนมีค่าระหว่าง o – ∞ ถ้าเวลาที่ใช้อาบนิวตรอนเป็น 1, 2, 3, 4 เท่าของครึ่งชีวิต เทอมในวงเล็บจะมีค่าเป็น $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{7}{8}$, $\frac{15}{16}$ ตามลำดับ ซึ่งเข้าสู่จุดอิ่มตัว ดังนั้นในทางปฏิบัตินิยมอาบนิวตรอนเพียง 2 – 3 เท่าของครึ่งชีวิตเท่านั้น

---

[3] ผองศรี เอี่ยวฉาย, "เทคนิคบางประการในการศึกษาวิเคราะห์ธาตุโดยการอาบรังสีนิวตรอน" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, 2510 จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย, หน้า 4.

2.1.1 ปฏิกิริยาของเทอร์มอลนิวตรอน (thermal neutron reaction)

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ของเทอร์มอลนิวตรอนกับวัตถุส่วนใหญ่จะเป็นแบบนิวตรอนแคปเจอร์ (neutron capture) ที่ให้รังสีแกมมาออกมา ตามสมการ 2.7

$$ {}_{z}X^{A} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{z}X^{A+1} + \sigma \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2.7 $$

เมื่อ ${}_{z}X^{A}$ = นิวเคลียสของธาตุที่อาบนิวตรอนมีน้ำหนักอะตอม A และประจุ z

${}_{z}X^{A+1}$ = นิวเคลียสของธาตุที่อาบนิวตรอนมีน้ำหนักอะตอม A+1 และประจุ z

σ = รังสีแกมมาที่ปล่อยออกมาเมื่อเกิดปฏิกิริยา

2.1.2 การสลายตัวหลังการอาบนิวตรอน

หลังการอาบนิวตรอน อะตอมกัมมันตรังสีจะสลายตัวตามสมการ 2.8

$$ A_{t}^{ti} = A_{o}^{ti}\, e^{-\lambda t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.8 $$

เมื่อ A_{t}^{ti} = กัมมันตภาพเมื่อเวลารอคอย t และเวลาอาบนิวตรอนเป็น ti

ดังนั้นจากสมการ 2.6 และ 2.8 ได้

$$ A_{t}^{ti} = A_{o}^{\infty}\, (1 - e^{-\lambda ti})\, e^{-\lambda t} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2.9 $$

$$ A_{o}^{\infty} = \frac{A_{t}^{ti}}{(1-e^{-\lambda ti})\, e^{-\lambda t}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2.10 $$

สมการ 2.10 มีประโยชน์ในการเปรียบเทียบความแรงของกัมมันตภาพของสารเมื่อเวลาที่ใช้อาบนิวตรอน และเวลารอคอยไม่เท่ากัน

2.1.3 การหาปริมาณธาตุโดยการเปรียบเทียบ

เมื่อทราบกัมมันตภาพของสารตัวอย่างและสารมาตราฐานที่ได้จากการอาบนิวตรอนฟลักซ์ค่าเดียวกัน และสภาพการณ์อื่น ๆ อย่างเดียวกัน ก็สามารถทราบปริมาณธาตุในสารตัวอย่างได้จากสมการ 2.11

$$\frac{A_s}{A_x} = \frac{m_s}{m_x} \qquad \text{..... 2.11}$$

เมื่อ A_s = กัมมันตภาพของสารมาตราฐาน

A_x = กัมมันตภาพของสารตัวอย่าง

m_s = น้ำหนักของธาตุในสารมาตราฐาน

m_x = น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง

หรืออาจเปรียบเทียบอัตราการนับตามสมการ 2.12 ก็ได้

$$\frac{C_s}{C_x} = \frac{m_s}{m_x} \qquad \text{..... 2.12}$$

C_s = อัตราการนับของสารมาตราฐาน

C_x = อัตราการนับของสารตัวอย่าง

ในกรณีที่เวลารอคอยและเวลาอาบนิวตรอนของสารมาตราฐานและสารตัวอย่างไม่เท่ากัน ในการเปรียบเทียบต้องหากัมมันตภาพที่เวลารอคอยเป็น 0 และเวลาอาบนิวตรอนเป็น ∞

2.2 การขวางกั้นรังสีแกมมา

เมื่อรังสีแกมมาผ่านวัตถุมันจะถูกดูดกลืน การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีจะเป็นไปตามสมการ 2.13

$$\Delta I = -\mu I \Delta x \qquad \text{..... 2.13}$$

เมื่อ ΔI = ความเข้มรังสีที่เปลี่ยนแปลงไป

μ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) มีค่าคงที่สำหรับรังสีเอกพันธ์ (homogeneous energy) และขึ้นกับชนิดของวัตถุที่รังสีผ่าน

I = ความเข้มของรังสีตกกระทบ

Δx = ความหนาของวัตถุ

ถ้ารังสีที่ผ่านวัตถุเป็นรังสีเอกพันธ์ จากสมการ 2.13 ได้

$$I = I_o e^{-\mu x} \qquad \text{..... 2.14}$$

เมื่อ I = ความเข้มรังสีหลังจากผ่านวัตถุ

I_o = ความเข้มรังสีก่อนผ่านวัตถุ

x = ความหนาของวัตถุ

แต่ความเข้มของรังสีสามารถเขียนอีกรูปหนึ่ง ได้ตามสมการ 2.15

$$I = h\nu\phi \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.15$$

เมื่อ $h\nu$ = พลังงานของรังสี 1 โฟตอน

ϕ = โฟตอนฟลักซ์ มีหน่วยเป็นจำนวนโฟตอนต่อพื้นที่ต่อวินาที

ดังนั้นจากสมการ 2.14 และ 2.15 ได้สมการ 2.16

$$\phi = \phi_o e^{-\mu x} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.16$$

เมื่อ ϕ = โฟตอนฟลักซ์หลังจากผ่านวัตถุ

ϕ_o = โฟตอนฟลักซ์ก่อนผ่านวัตถุ

ค่า μ เรียกว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบเส้นตรง (linear absorption coefficient) มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของอะตอม (atomic absorption coefficient) ตามสมการ 2.18[4]

$$\mu = \rho \frac{N_{oa}\mu}{A} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.17$$

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของวัตถุมีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$a\mu$ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของอะตอมมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่ออะตอม

ถ้าใช้ $a\mu$ ในสมการ 2.16 x จะต้องมีหน่วยเป็นอะตอมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อให้ $a\mu x$ ไม่มีหน่วย

ถ้ารังสีตกกระทบประกอบด้วยพลังงานต่าง ๆ กันหลายค่า การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์หลังจากผ่านวัตถุจะเป็นไปตามสมการ 2.18

---

[4] Atam P. Arya, Fundamental of Nuclear Physics (Boston: Allyn and Bacon, Inc., 1966) P.289.

$$\phi = \phi_{o1} e^{-\mu_1 x} + \phi_{o2} e^{-\mu_2 x} + \phi_{o3} e^{-\mu_3 x} + \ldots\ldots \quad 2.18$$

เมื่อ $\phi_{o1}, \phi_{o2}, \phi_{o3}$ และ μ_1, μ_2, μ_3 เป็นโฟตอนพลังงานที่ตกกระทบและสัมประสิทธิ์การถูกกลืนที่สมนัยกับโฟตอนพลังงานค่าต่าง ๆ ตามลำดับ

2.2.1 ปฏิกิริยาของรังสีแกมมากับวัตถุ

การดูดกลืนรังสีแกมมาโดยวัตถุมี 3 อย่างที่สำคัญ คือ

ก. โฟโตอีเล็กตริกเอฟเฟค (Photoelectric effect)

ข. คอมพ์ตันเอฟเฟค (Compton effect)

ค. การเกิดอนุภาคคู่ (Pair production)

การดูดกลืนทั้ง 3 ขบวนการนี้เกิดในช่วงพลังงานของรังสีแกมมาต่างกัน กล่าวคือ โฟโตอีเล็กตริกเอฟเฟคเกิดเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานประมาณ 0.01 MeV. ถึง 0.5 MeV. คอมพ์ตันเอฟเฟคเกิดในช่วงประมาณ 0.1 MeV. ถึง 10 MeV. ส่วนการเกิดอนุภาคคู่นั้นเกิดเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานตั้งแต่ 1.02 MeV. ขึ้นไป และทั้ง 3 ขบวนการต่างก็เกิดเป็นอิสระแก่กัน ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบเส้นตรงลัพธ์กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบเส้นตรงย่อย เป็นไปตามสมการ 2.19

$$\mu = \mu_\tau + \mu_\sigma + \mu_\kappa \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2.19$$

เมื่อ $\mu_\tau, \mu_\sigma, \mu_\kappa$ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบเส้นตรงของโฟโตอีเล็กตริกเอฟเฟค คอมพ์ตันเอฟเฟค และการเกิดอนุภาคคู่ ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน สัมประสิทธิ์การดูดกลืนลัพธ์ของอะตอมก็มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนย่อยของอะตอมตามสมการ 2.20

$$a\mu = a\tau + a\sigma + aK \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2.20$$

เมื่อ $a\tau, a\sigma, aK$ เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของอะตอมหรือภาคตัดขวางสำหรับการเกิดโฟโตอีเล็กตริกเอฟเฟค คอมพ์ตันเอฟเฟค และการเกิดอนุภาคคู่ ตามลำดับ

เนื่องจากภาคตัดขวางของโฟโตอีเล็กตริกเอฟเฟคเปลี่ยนแปลงกับ Z^5 ภาคตัดขวางของธาตุหนักจึงสูงกว่าภาคตัดขวางของธาตุเบามาก ขบวนการนี้จึงเหมาะที่จะใช้วิเคราะห์ปริมาณธาตุหนักที่ปนอยู่ในธาตุเบา ส่วนคอมพ์ตันเอฟเฟค และการเกิดอนุภาคคู่นั้น ภาคตัดขวาง--

เปลี่ยนแปลงกับ Z และ Z^2 ตามลำดับ

2.2.2. โฟโตอีเล็กตริคเอฟเฟค

เป็นปรากฏการณ์ที่โฟตอนมอบพลังงานทั้งหมดให้แก่อีเล็กตรอนในอะตอม แล้วโฟตอนหายไป และอีเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ตามสมการ 2.21

$$K_e = h\nu - E_B \quad \text{..... 2.21}$$

เมื่อ K_e = พลังงานจลน์ของอีเล็กตรอน

E_B = พลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของอีเล็กตรอนในอะตอม

W. Heitler[5] ได้หาภาคตัดขวางของการเกิดโฟโตอีเล็กตริคเอฟเฟคใน-เค - อีเล็กตรอน (K - electron) สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานระหว่าง 0.1 ถึง 0.3 MeV. ได้ความสัมพันธ์ตามสมการ 2.22

$$_a\tau_K = \phi_o Z^5 \left(\frac{1}{137}\right)^4 4\sqrt{2}\, n^{7/2} \quad \text{..... 2.22}$$

เมื่อ $_a\tau_K$ = ภาคตัดขวางของโฟโตอีเล็กตริคเอฟเฟคของ เค - อีเล็กตรอน

$$\phi_o = \left(\frac{8}{3}\pi\right)\left(\frac{e^2}{m_o c^2}\right)^2$$

$$= 6.651 \times 10^{-5} \text{ (บ.ม.)}^2$$

Z = เลขอะตอม

$$n = \frac{m_o c^2}{h\nu}$$

$m_o c^2$ = พลังงานหยุดนิ่ง (rest mass erergy) ของอีเล็กตรอน

---

[5] ibid., p. 290.

อีเล็กตรอนที่ถูกยึดแน่นที่สุด จะมีภาคตัดขวางของการเกิดโฟโตอีเล็กตริคเอฟเฟค มากที่สุด กล่าวคือ ประมาณร้อยละ 80 ของการเกิดโฟโตอีเล็กตริคเอฟเฟค เกิดกับ เค – อีเล็กตรอน จึงเขียนได้ว่า

$$a_{\tau} \propto \frac{Z^5}{(\bar{h}\nu)^{7/2}} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots 2.23$$

ในกรณีที่พลังงานของรังสีแกมมาแตกต่างไปจากช่วง 0.1 – 0.35 MeV. กำลังของ Z อาจเปลี่ยนไปจาก 5 บ้างเล็กน้อย ดังนั้นการดูดกลืนรังสีแกมมาของธาตุหนัก จึงมากกว่าธาตุเบามาก

2.2.3 สารผสมขวางกั้นรังสีเอกพันธ์

ในกรณีที่รังสีเอกพันธ์ผ่านวัตถุที่เป็นสารผสมที่ประกอบด้วยธาตุหนักและธาตุเบา การลดของฟลักซ์ของรังสีแกมมาเป็นไปตามสมการ 2.24[6]

$$\phi = \phi_o e^{-(f_1 \mu_1 + f_2 \mu_2 + \ldots)x} \qquad \ldots\ldots 2.24$$

เมื่อ f_1, f_2 เป็นสัดส่วนโดยปริมาตรของธาตุหนักและธาตุเบา μ_1 , μ_2 เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของธาตุหนักและธาตุเบา ตามลำดับ

แต่ $d_i = \frac{m_i}{f_i V}$ 2.25

เมื่อ d_i = ความหนาแน่นของธาตุใด ๆ ในสารผสม

m_i = มวลของธาตุใด ๆ ในสารผสม

f_i = สัดส่วนโดยปริมาตรของธาตุใด ๆ ในสารผสม

V = ปริมาตรของสารผสม

---

6 Samuel Glasstone, Nuclear Reactor Engineering (London:Macmillan and Co. Ltd., 1956), p. 53.

เพราะฉะนั้น $\phi = \phi_o e^{-\left(\frac{m_1 \mu_1}{d_1 v} + \frac{m_2 \mu_2}{d_2 v} + \ldots\right) X}$ 2.26

เมื่อ m_1, μ_1, d_1 เป็นมวล สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และความหนาแน่นของธาตุหนัก m_2, μ_2, d_2 เป็นมวลสัมประสิทธิ์การดูดกลืน และความหนาแน่นของธาตุเบา ตามลำดับ

สมมุติว่าในสารผสมชนิดหนึ่ง มวลของธาตุหนักและธาตุเบาเกือบเท่ากัน ถึงแม้ว่า $d_1 > d_2$ ก็ตาม แต่ $\mu_1 >>> \mu_2$ การลดความเข้มของรังสีจึงเกิดจากธาตุหนักเป็นส่วนใหญ่ เช่น ทังสะเตนซึ่งมีเลขอะตอม 74 ปนอยู่ในซิลิคอนซึ่งมีเลขอะตอม 14 และทังสะเตนมีความหนาแน่นมากกว่าซิลิคอนประมาณ 5 เท่า ดังนั้น

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \left(\frac{74}{14}\right)^5 \simeq 4200 \quad \ldots\ldots\ldots 2.27$$

$$\frac{d_1}{d_2} \simeq 5 \quad \ldots\ldots\ldots 2.28$$

เมื่อ μ_1 = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของทังสะเตน

μ_2 = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของซิลิคอน

d_1 = ความหนาแน่นของทังสะเตน

d_2 = ความหนาแน่นของซิลิคอน

แต่ $\frac{m_1}{V} \simeq \frac{m_2}{V}$ 2.29

เพราะฉะนั้น $\frac{\mu_1 m_1}{d_1 V} \simeq \frac{4200}{5} \frac{\mu_2 m_2}{d_2 V}$ 2.30

นั่นคือ $\frac{\mu_1 m_1}{d_1 V} >>> \frac{\mu_2 m_2}{d_2 V}$

สมการ 2.26 จึงกลายเป็น

$$\phi = \phi_o e^{-\frac{m_1 \mu_1}{d_1 V} X} \quad \ldots\ldots\ldots 2.31$$

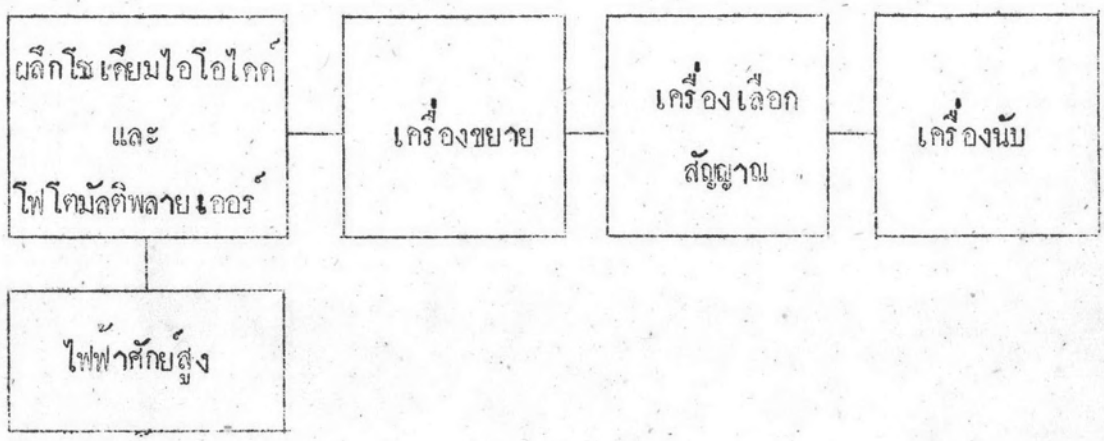
แสดงว่าการลดของฟลักซ์ของรังสีเกิดจากทังสะเตนเท่านั้น ซิลิคอนไม่มีผลในการกันรังสี

2.2.4 สารกัมมันตรังสี

ในการทดลองใช้ อเมริเซียม – 241 1 ไมโครคูรี ซึ่งให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.059 MeV. และ 0.026 MeV. มีครึ่งชีวิต 480 ปี แต่อาจถือได้ว่ามีพลังงานค่าเดียว คือ 0.059 MeV. เพราะเปลือกโลหะหุ้มหัววัดโซเดียมไอโอไดด์มีความหนาจึงกันรังสีพลังงาน 0.026 MeV. ไม่ให้เกิดการนับได้

2.3 เครื่องวัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลเตอร์

เครื่องวัดรังสีแบบนี้ประกอบด้วยหัววัดรังสีเป็นผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (NaI – crystal) เรียกว่าซินทิลเลเตอร์ต่ออยู่กับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube) โดยมีไฟฟ้าศักย์สูงช่วย (high voltage power supply) ทั้งหมดต่อไปยังเครื่องขยาย (amplifier) เครื่องเลือกสัญญาณ (discriminator) และเครื่องนับ (scaler) ตามแผนภาพ



รูป 2 – 1

แผนภาพเครื่องวัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลเตอร์

การทำงานของเครื่องมือชนิดนี้ก็คือเมื่อรังสีแกมมาเข้าทำปฏิกิริยากับอะตอมของโซเดียมไอโอไดด์ แล้วจะถูกดูดกลืนตามขบวนการทั้ง 3 คือโฟโตอีเล็กตริคเอฟเฟค คอมพ์ตันเอฟเฟค และการเกิดอนุภากคู่ พลังงานของรังสีแกมมาจะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอีเล็กตรอนในอะตอมของโซเดียมไอโอไดด์ซึ่งเป็นสารเรืองแสง และอีเล็กตรอนจะเสียพลังงานนั้นในผลึกโดยเปลี่ยนเป็นพลังงานแสง

พลังงานแสงที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์และขยายสัญญาณให้โตขึ้นโดยเครื่องขยาย สัญญาณที่ขยายแล้วจะถูกส่งเข้าเครื่องเลือกสัญญาณและเครื่องนับตามลำดับ อ่านความแรงของรังสีแกมมาจากอัตราการนับของเครื่องนับ.