

อันตรกิริยาของรังสีกับสสาร



3.1 อันตรกิริยาของอนุภาคอัลฟากับสสาร

อนุภาคอัลฟาเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าขนาดใหญ่ เมื่อเคลื่อนที่ไปในตัวกลางใด ๆ จะสูญเสียพลังงานไปในการไอออนไนซ์อะตอมของตัวกลาง เป็นส่วนใหญ่ อัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง แสดงได้โดยสูตรของเบเชและบลอค (Bethe - Bloch Formula)

$$-\frac{dE}{dX} = 0.306\rho(Z/A)z^2\beta^{-2} \left[ \ln \frac{2m_0 V^2}{I} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right] \quad (1),(33),(34)$$

(3.1)

เมื่อ  $-\frac{dE}{dX}$  = อัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง

Z = เลขอะตอมของตัวกลาง

A = น้ำหนักอะตอมของตัวกลาง

z = จำนวนอนุภาคที่มีประจุในอนุภาคอัลฟา  
= 2

$\beta$  =  $V/c$

V = ความเร็วของอนุภาคอัลฟา

c = ความเร็วแสงในสุญญากาศ

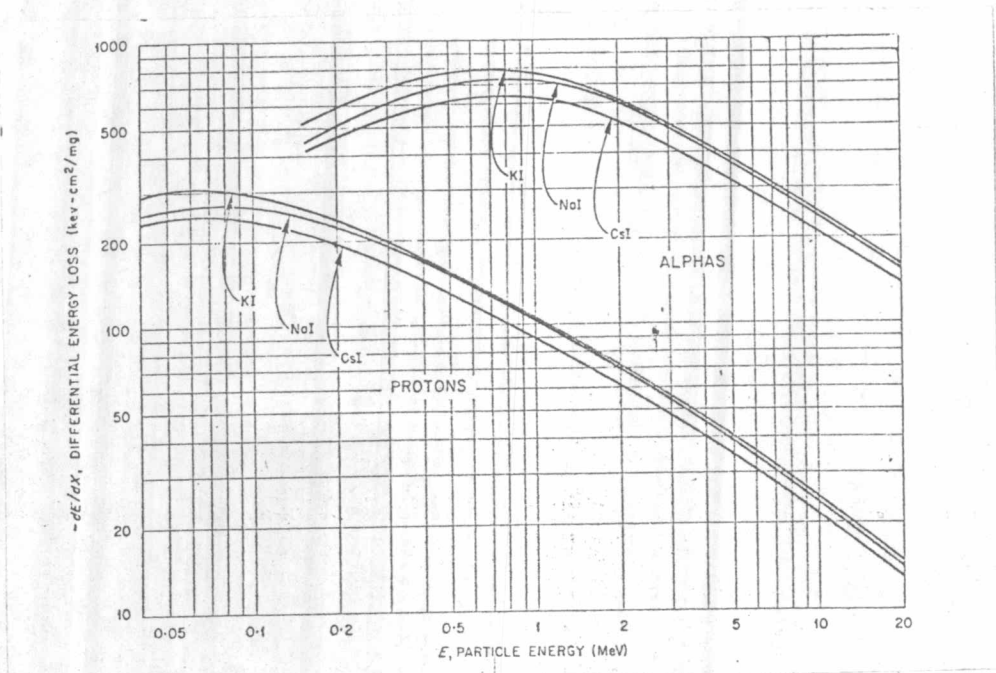
I = mean excitation potential ของตัวกลาง ซึ่งจะอ่านได้จาก

ตารางที่ 3.1

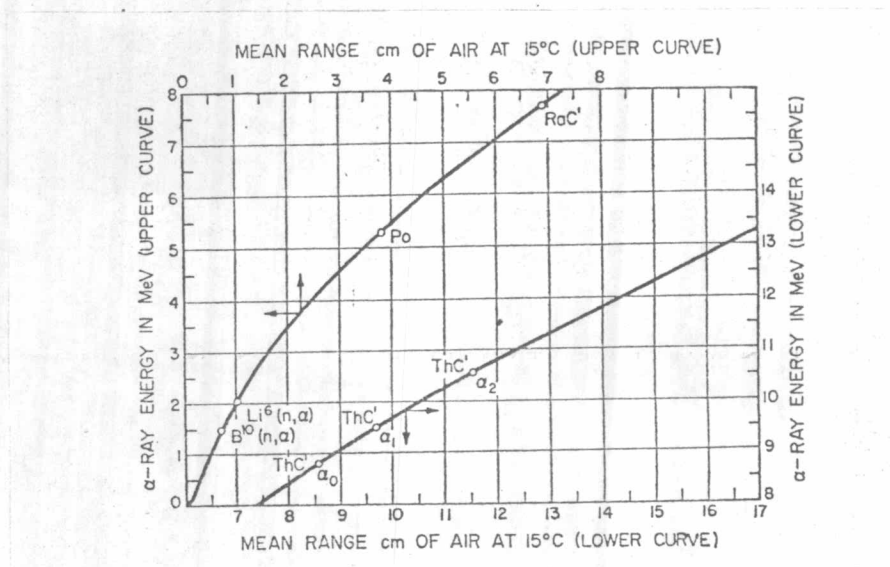
ตารางที่ 3.1<sup>(34)</sup>

ค่า mean excitation potential ของก๊าซบางชนิด

Gas	$\bar{Z}$	I (eV)	$I/\bar{Z}$
He	2	36.0	18.0
Ne	10	125	12.5
A	18	198	11.0
Kr	36	396	11.0
Xe	54	529	9.8
air	7.22	80.1	11.1
H <sub>2</sub>	1	16.5	16.5
N <sub>2</sub>	7	81.2	11.6
O <sub>2</sub>	8	91.2	11.4
CO	7	81.2	11.6
CO <sub>2</sub>	7.35	118	16.0
CH <sub>4</sub>	2	41.6	20.8
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	2.25	45.9	20.6
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.36	48.0	20.3
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.43	45.5	18.7



รูป 3.1<sup>(1)</sup> อัตราการสูญเสียพลังงานของโปรตอนและอนุภาคอัลฟาใน KI, NaI และ CsI ตามลำดับ



รูป 3.2<sup>(1)</sup> ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยและพลังงานสูงสุดของอนุภาคอัลฟาในอากาศแห้ง ที่ 15°c ความดัน 1 บรรยากาศ

ระยะทางไกลสุดที่อนุภาคอัลฟาเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางเรียกพิสัยสูงสุด (maximum range) สำหรับในอากาศความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 15 °C ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัย (range) และพลังงานของอนุภาคอัลฟาอ่านได้จากกราฟในรูป 3.2

ในตัวกลางอื่น ๆ

$$R = 3.20 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{A}}{\rho} R_{\text{air}} \quad (1), (3.2)$$

เมื่อ  $A$  = เลขมวลของตัวกลาง

$\rho$  = ความหนาแน่นของตัวกลาง

ในกรณีที่ตัวกลางเป็นของผสมจะต้องใช้  $A_{\text{eff}}$  แทน  $A$  โดยที่

$$\sqrt{A_{\text{eff}}} = \frac{n_1 A_1 + n_2 A_2 + \dots}{n_1 \sqrt{A_1} + n_2 \sqrt{A_2} + \dots} \quad (1)$$

เมื่อ  $n$  = fraction ของธาตุที่มีอยู่ในของผสม

$A$  = เลขมวลของธาตุที่มีอยู่ในของผสม

### 3.2 อันตรกิริยา ของอิเล็กตรอนกับสสาร

เมื่ออิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานค่าเดียว (monoenergetic electron) รั้งผ่านแผ่นดูดกลืนรังสี อิเล็กตรอนจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่ง สเปกตรัมของอิเล็กตรอนจะกว้างขึ้นและไม่สมมาตร อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะสูญเสียพลังงานไปไม่เท่ากัน พลังงานที่อิเล็กตรอนสูญเสียไปอาจหาได้จากพลังงานเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนสูญเสียไป (mean energy loss)  $\overline{\Delta E}$  หรือพลังงานที่อิเล็กตรอนส่วนใหญ่สูญเสียไป (most probable energy loss)  $\Delta E_w$  ค่า  $\Delta E_w$  มีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนที่ยอดฟิคของ primary line กับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ยอดฟิคของสเปกตรัมหลังจากผ่านแผ่นดูดกลืนรังสีแล้ว

เบธและบลอค ประมาณค่าพลังงานเฉลี่ยที่อิเล็กตรอนสูญเสียไปต่อหน่วยระยะทาง

$$\frac{dE}{dx} \quad \text{ไว้ดังนี้}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{dE}{dX} &= 0.153\rho(Z/A)\beta^{-2} \left[ \frac{\ln E(E+m_0c^2)\beta^2}{2I^2m_0c^2} + (1-\beta^2) \right. \\
 &\quad \left. - \left\{ 2(1-\beta^2)^{\frac{1}{2}} - (1-\beta^2) \right\} \ln 2 + \frac{1}{8} \left\{ 1 - (1-\beta)^{\frac{1}{2}} \right\}^2 \right. \\
 &\quad \left. - \delta \right] \quad (33), (34)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

$\delta$  = density effect correction (33)

$$= -\ln(1-\beta^2) - \ln(I^2/h^2 v_p^2) - 1 \tag{3.5}$$

$v_p$  = plasma frequency ของอิเล็กตรอน (33)

$$= \left[ \rho N_0 (Z/A) e^2 x / \Pi m_0 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.6}$$

$N_0$  = Avogadro's number

$e$  = ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน       $X$  = ความหนาของแผ่นวัตถุ

สันเตา (33), (34) ทาพลังงานที่อิเล็กตรอนสูญเสียไปในรูปของ  $\Delta E_w$

$$\frac{\Delta E_w}{X} = a \left[ \ln \frac{m_0 v^2 a X}{I^2 (1-\beta^2)} - \beta^2 + K - \delta \right] \tag{3.7}$$

$$\text{โดยที่ } a = \frac{2\pi e^4 NZ}{m_0 v^2} = 0.153\rho (Z/A) \beta^{-2}$$

$$K = 1.12$$

จากการทดลองของวอซอว์และเซน (35) พบว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีของสันเตา

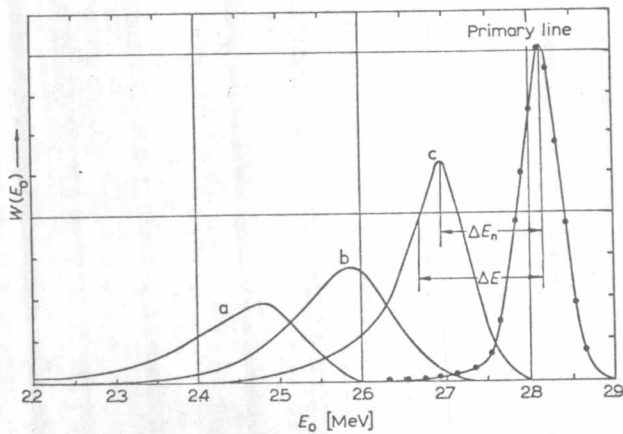
จากสมการ (3.7) เราสามารถเขียนเสียใหม่ได้ว่า

$$\frac{\Delta E_w}{X} = a \left[ \ln X + \ln X_0 - \ln X_0 + \ln \frac{m_0 v^2 a}{I^2 (1-\beta^2)} - \beta^2 + K - \delta \right]$$

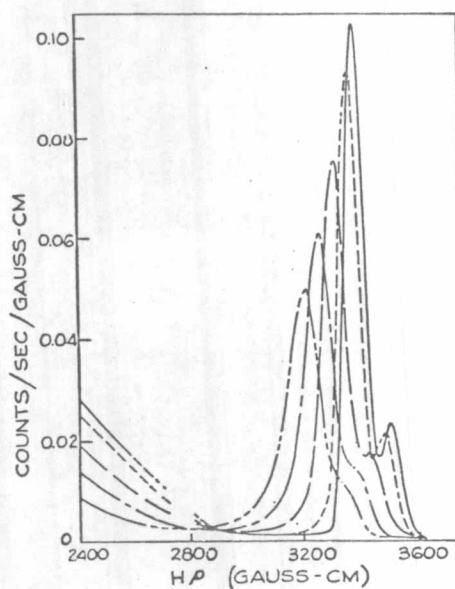
ตารางที่ 3.2<sup>(34)</sup>

ค่า mean excitation potential ของธาตุบางชนิด (I)

ธาตุ	Z	I (eV)	I/Z
Li	3	34.0	11.3
Be	4	60.4	15.1
C	6	76.4	27.1
Al	13	150	11.5
Fe	26	243	9.4
Cu	29	279	9.6
Ag	47	422	9.0
Sn	50	472	9.4
W	74	680	9.2
Pb	82	737	9.0
U	92	853	9.3



รูป 3.3<sup>(34)</sup> การกระจายพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากผ่านกราฟิตความหนาต่าง ๆ กัน a. 1.33 mm., b. 0.895 mm., c. 0.475 mm.



รูป 3.4<sup>(35)</sup> Spectrum shape ของ Conversion line จาก Ba<sup>137m</sup> หลังจากผ่าน Al absorber หนา 0, 5.2, 15.5, 25.8 และ 36.2 mg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

$$\frac{\Delta E}{X} = a \left[ \ln \frac{X}{X_0} \right] + a \left[ \ln \frac{m_0 v^2 a X_0}{I^2 (1-\beta^2)} - \beta^2 + K - \delta \right]$$

$$S = a \left[ \ln \frac{m_0 v^2 a X_0}{I^2 (1-\beta^2)} - \beta^2 + K - \delta \right] \quad (3.8)$$

= reduced stopping power

$$\text{จะได้ } \frac{\Delta E}{X} = a \ln (X/X_0) + S \quad (3.9)$$

$$X_0 = 1 \text{ cm.}$$

$$X = \text{ความหนาของแผ่นวัตถุเป็น cm.}$$

$$\beta^2 = 1 - \left[ \frac{T}{0.511} + 1 \right]^{-2} \quad (3.10)$$

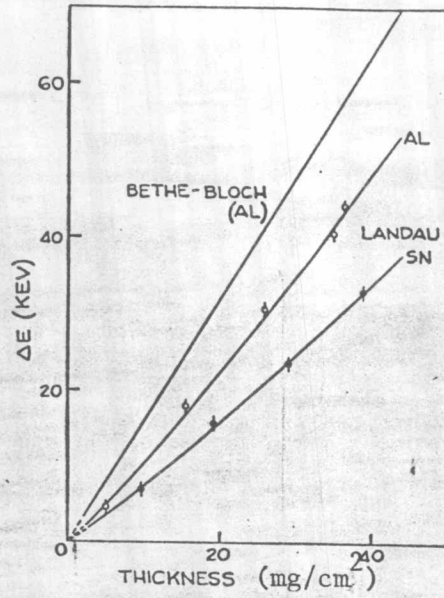
$$T = \text{พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน}$$

ค่า S อ่านได้จากกราฟในรูป (3.6)

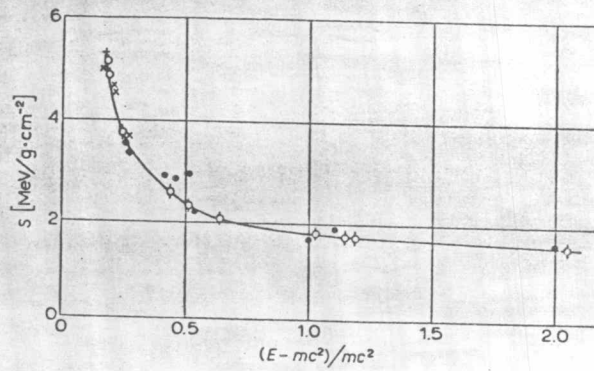
ในกรณีที่อิเล็กตรอนไม่ได้มีพลังงานเดียวแต่มีพลังงานต่อเนื่องมักจะวัดการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปของความหนาสูงสุดของแผ่นดูดกลืนรังสีที่กั้นอิเล็กตรอนได้หมดพอดี อิเล็กตรอนที่มีพลังงานแตกต่างกันจะวิ่งทะลุผ่านแผ่นดูดกลืนรังสีได้หนาแตกต่างกัน ได้มีผู้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนกับความหนาสูงสุดของแผ่นดูดกลืนรังสี ดังแสดงในตารางที่ 3.3

พลังงานที่สูญเสียและพิสัยของอิเล็กตรอนและโพซิตรอนในสารบางชนิดอาจอ่านได้โดยตรงจาก Tables of energy losses and ranges of electrons and positrons<sup>(36)</sup>





รูป 3.5<sup>(35)</sup> ค่า  $\Delta E_w$  จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่า  $-\frac{dE}{dX}$  ตามทฤษฎีของ เบเธและบลอค และค่า  $\Delta E_w$  ตามทฤษฎีของลันเดา



รูป 3.6<sup>(34)</sup> ค่า Reduced stopping power  $S$  ใน Al ค่า  $E - mc^2 = T$

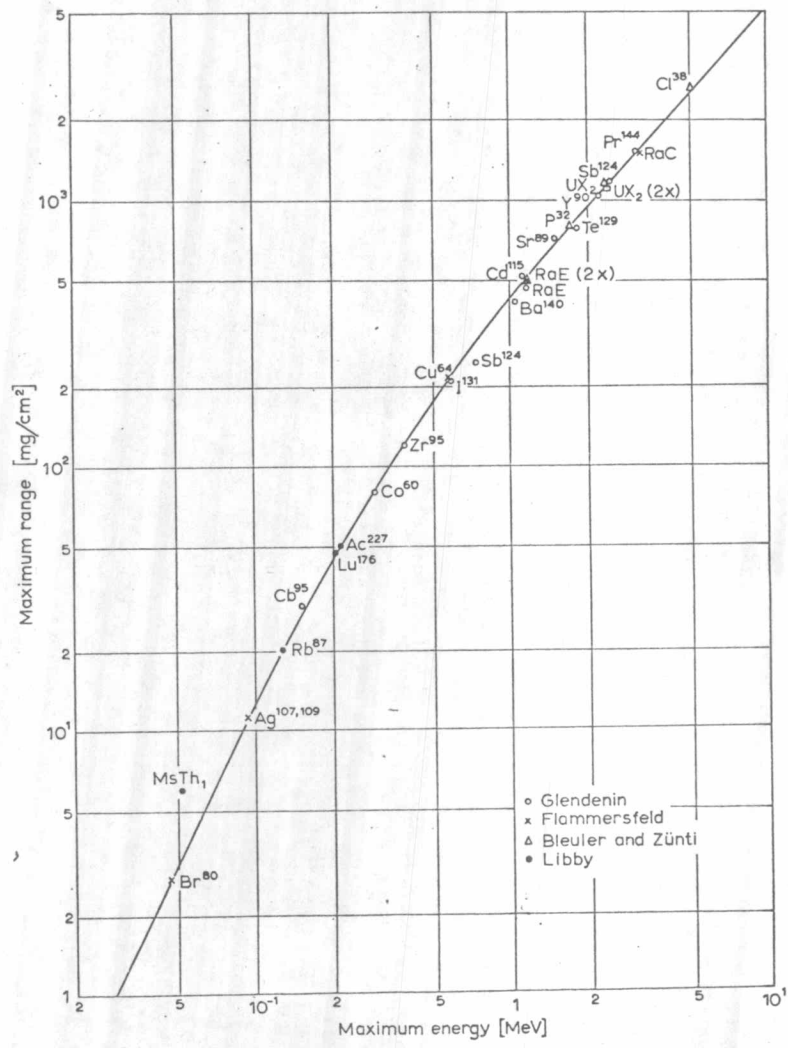
ตารางที่ 3.3<sup>(34)</sup>

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนกับความหนาของแผ่นดูดกลืนรังสี

ผู้ทดลอง	ความสัมพันธ์	เงื่อนไข
N. Feather	$R = 0.543 E_0 - 0.160$	$E_0 > 0.8 \text{ MeV.}$
L.E. Glendenin	$R = 0.542 E_0 - 0.133$ $R = 0.407 E_0^{1.38}$	$E_0 > 0.8 \text{ MeV.}$ $0.15 < E_0 < 0.8 \text{ MeV.}$
A. Flammersfeld	$R = 0.11(\sqrt{1 + 22.4 E_0^2} - 1)$	$0 < E_0 < 3 \text{ MeV.}$
E. Bleuler, W. Zünti	$R = 0.571 E_0 - 0.161$	$E_0 > 1 \text{ MeV.}$

 $E_0$  = พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอน

R = ความหนาสูงสุดของแผ่นดูดกลืนรังสีบางที่เรียกว่าฟิล์มสูงสุด



รูป 3.7<sup>(34)</sup> ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอน และความหนาสูงสุด (พิสัยสูงสุด) ของแผ่นดูดกลืนรังสีที่กั้นอิเล็กตรอนไว้ได้หมดพอดี

### 3.3 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับสสาร

อันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับสสาร จะทำให้เกิดผลขึ้น 3 แบบ คือ

3.3.1 โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) เกิดขึ้นจากการที่โฟตอนของรังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของอะตอมจนหมด โดยที่พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนหาได้จากสมการ

$$T_p = E - E_b \quad (3.11)$$

เมื่อ  $T_p$  = พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)

$E$  = พลังงานของรังสีแกมมา

$E_b$  = พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน

โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ  $E > E_b$  และประมาณ 80% จะเกิดกับ  
เค-อิเล็กตรอน<sup>(1)</sup>

photoelectric effect cross-section ( $\mu_a^T$ ) แสดงได้ด้วยสมการ

$$\mu_a^T = Q_a Z^5 / \alpha \quad \text{cm}^2/\text{atom}^{(1)} \quad (3.12)$$

$$\alpha = E/m_0 c^2 \quad (3.13)$$

$Q_a$  = ค่าคงที่อ่านได้จากตารางที่ 3.4

$Z$  = เลขอะตอมของแผ่นดูดกลืน

$E$  = พลังงานของรังสีแกมมา

$m_0$  = rest mass ของอิเล็กตรอน

$c$  = ความเร็วแสงในสุญญากาศ

photoelectric mass attenuation coefficient จะเป็น

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{N_0}{A} \cdot Q_a Z^5 / \alpha \quad \text{cm}^2/\text{g}^{(1)} \quad (3.14)$$

ตารางที่ 3.4<sup>(1)</sup>

ค่า  $Q_a = \tau \alpha / Z^5$  (ในหน่วย  $10^{-32}$ )

NUMERICAL VALUES OF  $Q_a = \tau \alpha / Z^5 n$  (UNITS OF  $10^{-32}$ )

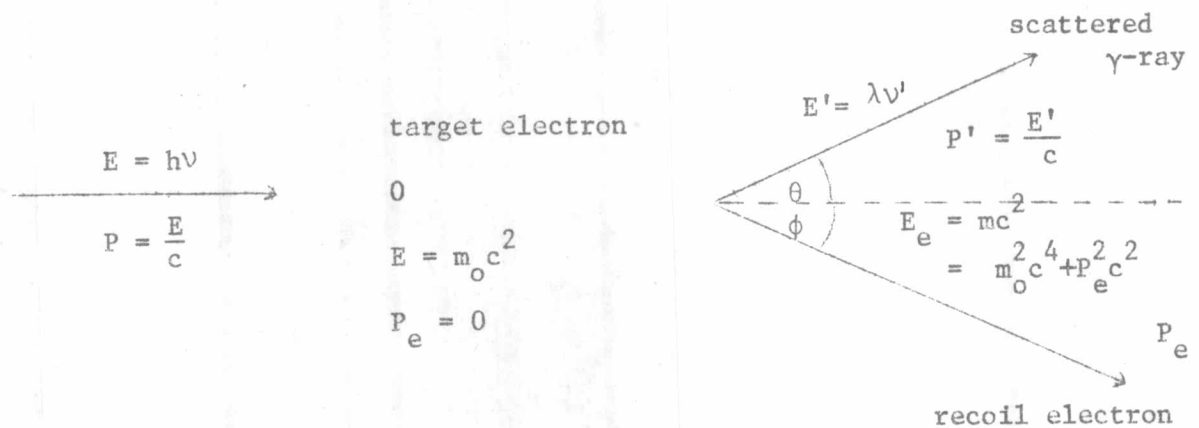
$n$ ( $1/\alpha$ )	$E$ (MeV)	$Z = 0$	$Z = 13$	$Z = 26$	$Z = 38$	$Z = 50$	$Z = 65$	$Z = 82$
0		0.353	0.275	0.228	0.203	0.188	0.166	0.159
0.1	5.108	0.436	0.343	0.289	0.255	0.230	0.206	0.182
0.125	4.086	0.453	0.362	0.306	0.272	0.247	0.216	0.188
0.194	2.633	0.524	0.412	0.347	0.302	0.270	0.237	0.205
0.25	2.043	0.581	0.447	0.375	0.331	0.290	0.259	0.225
0.375	1.362	0.740	0.556	0.462	0.403	0.366	0.319	0.278
0.50	1.022	0.956	0.694	0.575	0.500	0.440	0.397	0.341
0.75	0.681	1.528	1.162	0.947	0.781	0.690	0.600	0.522
1.0	0.511	2.375	1.862	1.506	1.237	1.038	0.878	0.747
1.25	0.409	3.578	2.756	2.188	1.815	1.512	1.262	1.031
1.5	0.341	5.30	3.834	3.062	2.528	2.116	1.750	1.362
2.0	0.255	9.48	7.46	5.34	4.24	3.55	2.96	2.17
3.0	0.170	24.3	17.61	12.44	(9.8)	7.88	6.25	4.18
4.0	0.128	46.8	33.1	22.8	(17.5)	14.2	10.5	6.64
5.0	0.102	79.9	53.4	(36.5)	(26.5)	21.6	15.6	9.61

$\rho$  = ความหนาแน่นของแผ่นดูดกลืนรังสี

$N_0$  = Avogadro's number

$A$  = น้ำหนักอะตอมของแผ่นดูดกลืนรังสี

3.3.2 คอมพิวเตอร์เอฟเฟกต์ (Compton effect) เกิดจากการที่รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิเล็กตรอนในแผ่นดูดกลืนรังสี แล้วทำให้อิเล็กตรอนนั้นมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น และรังสีแกมมานั้นมีพลังงานลดลงจากเดิม



แต่พลังงานและโมเมนตัมของระบบมีค่าคงที่

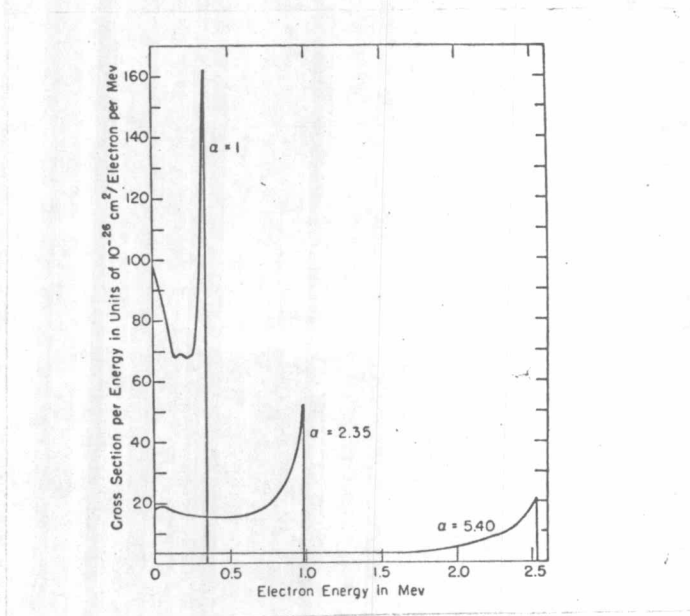
พลังงานของ scattered  $\gamma$ -ray จะเป็น

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0c^2}(1-\cos\theta)} = \frac{E}{1 + \alpha(1-\cos\theta)} \quad (3.15)$$

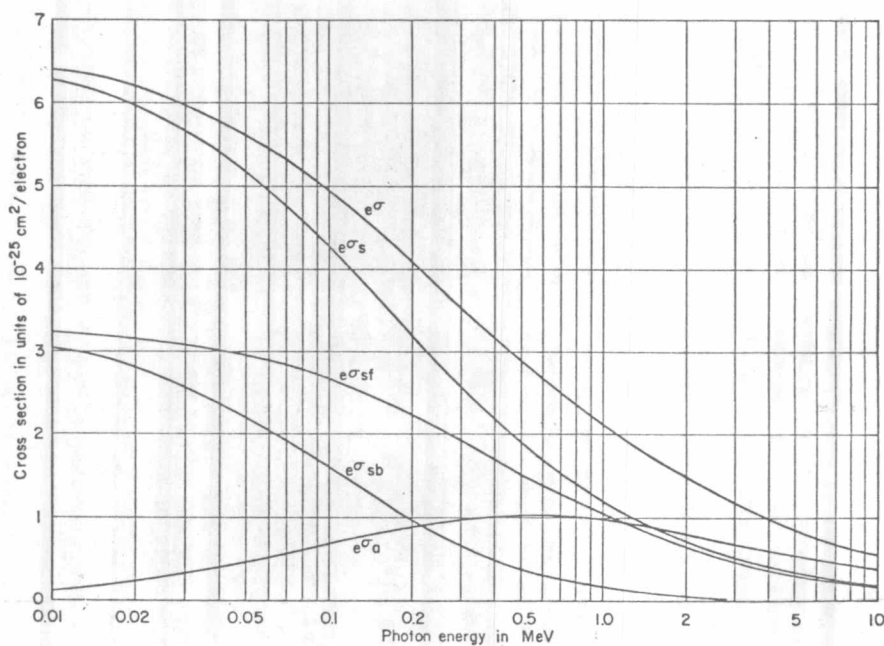
$$\alpha = \frac{E}{m_0c^2}$$

พลังงานจลน์ของรีคอยล์อิเล็กตรอนจะมีค่าเป็น

$$T = \frac{E\alpha(1-\cos\theta)}{1 + \alpha(1-\cos\theta)} \quad (3.16)$$



รูป 3.8<sup>(38)</sup> ค่า  $\sigma(T)$  เป็น function ของ  $T$  ที่  $\alpha = 1, 2.35$  และ  $5.40$



รูป 3.9<sup>(37),(38)</sup> ค่า  $\sigma$ ,  $\sigma_{ea}$ ,  $\sigma_{es}$ ,  $\sigma_{esf}$  และ  $\sigma_{esb}$  เป็น function ของ Photon energy

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $\theta = 180^\circ$  เราเรียกพลังงานค่านี้ว่า Compton edge energy ( $T_{ce}$ ) โดยที่

$$T_{ce} = \frac{2E\alpha}{1 + 2\alpha} \quad (3.17)$$

differential cross-section ต่ออิเล็กตรอนที่จะทำให้รัศยอิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์อยู่ในช่วงระหว่าง  $T$  และ  $T + dT$  จะเป็น

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dT} &= \sigma(T) \\ &= \frac{\pi r_o^2}{\alpha^2 m_o c^2} \left[ 2 + \left(\frac{T}{E-T}\right)^2 \left\{ \frac{1}{\alpha} + \frac{E-T}{E} - \frac{2}{\alpha} \left(\frac{E-T}{T}\right) \right\} \right] \quad (37) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$r_o$  = classical electron radius

ค่า  $\sigma(T)$  จะมีค่าสูงสุดที่  $T_{ce}$  ของ  $\gamma$ -energy แต่ค่าเมื่อ  $\gamma$ -energy เพิ่มขึ้น ค่า  $\sigma(T)$  จะลดลง

และ Compton total cross-section จะแทนได้ด้วยสมการ

$$\begin{aligned} e\sigma &= 2\pi r_o^2 \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\} \quad (37) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Compton mass attenuation coefficient แทนได้ด้วยสมการ

$$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{N_o}{A} e\sigma = \frac{N_o}{A} Z_e\sigma \quad (1) \quad (3.20)$$

3.3.3 ปฏิกิริยาอิเล็กตรอนคู่ (pair production) อันตรกิริยาระหว่างพลังงานของรังสีแกมมาที่มีค่าสูงกว่า  $2m_o c^2$  กับสนามของประจุไฟฟ้า (โดยปกติจะเป็นสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส)



ทำให้พลังงานของรังสีถูกดูดกลืนจนหมด และพลังงานจะถูกเปลี่ยนเป็น rest mass energy  $2m_0c^2$  และพลังงานจลน์ของคู่อิเล็กตรอนโพสิตรอน (electron-positron pair) ( $T_{pp}$ ) โดยที่

$$T_{pp} = E - 2m_0c^2 \quad (1) \quad (3.21)$$

ค่า pair production mass attenuation coefficient แทนได้ด้วยสมการ

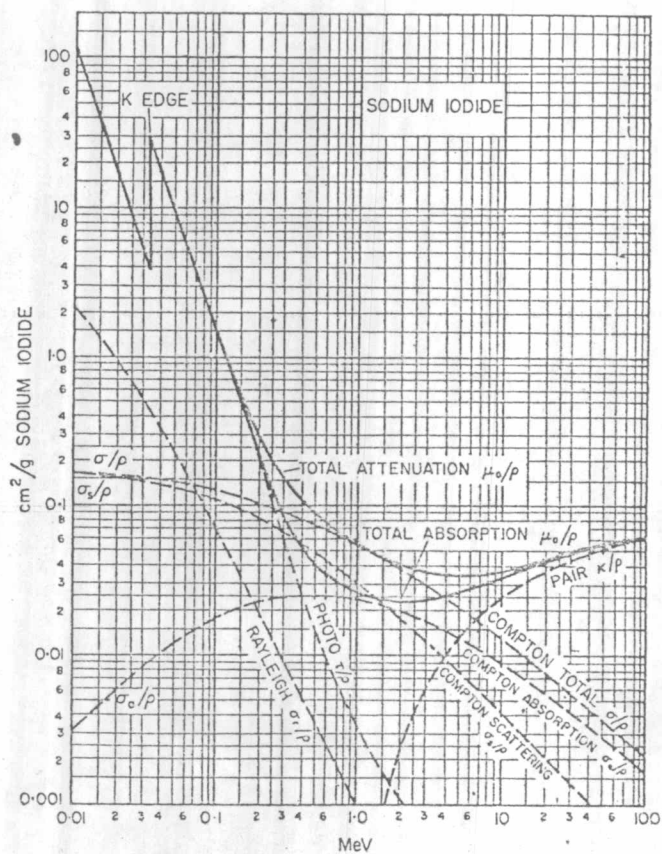
$$\begin{aligned} \kappa/\rho &= (\kappa/\rho)_{Pb} \frac{207.2}{A} \left(\frac{Z}{82}\right)^2 \\ &= 0.031 (\kappa/\rho)_{Pb} Z^2/A \quad \text{cm}^2/\text{g} \quad (1) \quad (3.22) \end{aligned}$$

เมื่อ  $(\kappa/\rho)_{Pb}$  = pair production mass attenuation coefficient ของตะกั่ว

ตารางที่ 3.5<sup>(1)</sup>

pair production mass attenuation coefficient สำหรับตะกั่ว

E(MeV)	$\kappa/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)
1.02	0.0000
1.53	0.0010
2.04	0.0037
3.06	0.0102
5.11	0.0255
7.66	0.0324
10.22	0.0407
17.0	0.0555



รูป 3.10<sup>(1)</sup> Mass attenuation coefficient ของ Sodium iodide