

การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

ภายหลังจากที่ เฮนรี เบคเคอเรล<sup>(5)</sup> พบสารกัมมันตรังสีในปี ค.ศ.1896 นักวิทยาศาสตร์อื่น ๆ อีกหลายท่าน เช่น แมรีและปีแอร์ คูรี, จี.ซี. ชมิดท์, ไอ คูรี, เอฟ. จูลิโอต, อี. เฟอร์มี ฯลฯ ได้ศึกษาการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี พบว่า สารรังสีส่วนใหญ่จะสลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีออกมา 3 แบบคือ

- สลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา
- - สลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตา
- สลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีแกมมา

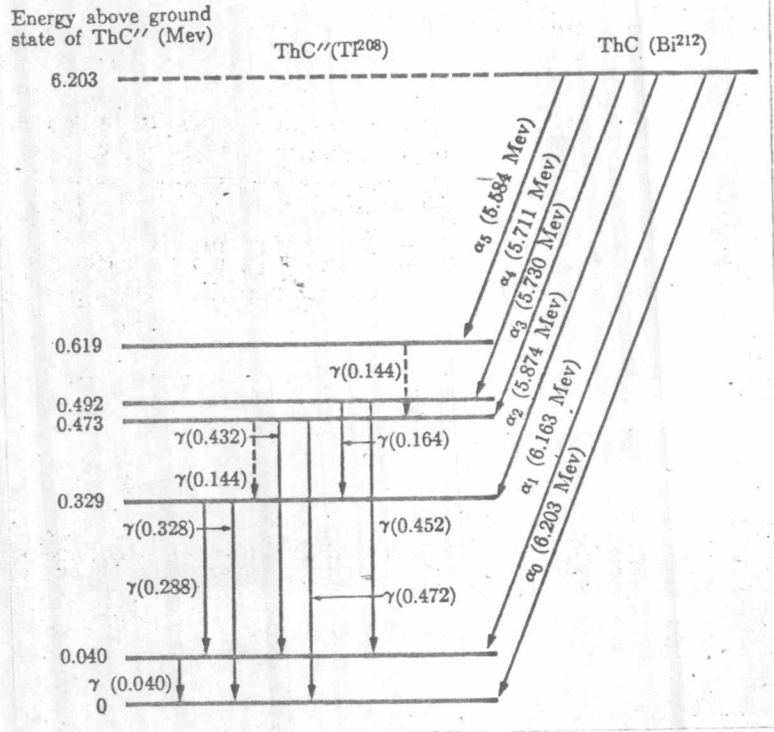
2.1 การสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา

การสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคอัลฟามักจะพบในธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่า 82 สเปกตรัมของอนุภาคอัลฟาประกอบด้วยอนุกรมของอัลฟาไลน์ ( $\alpha$ -line) ที่มีพลังงานต่าง ๆ กัน ซึ่งขึ้นอยู่กับ การสลายตัวจากนิวเคลียสแม่ (parent nucleus) ไปยังระดับพลังงานต่าง ๆ ของนิวเคลียสลูก (daughter nucleus) ระดับที่อยู่ในสภาวะเอกไซเตด (excited state) ของนิวเคลียสลูก จะกลับสู่สภาวะปกติ (ground state) โดยการปล่อยรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ กัน

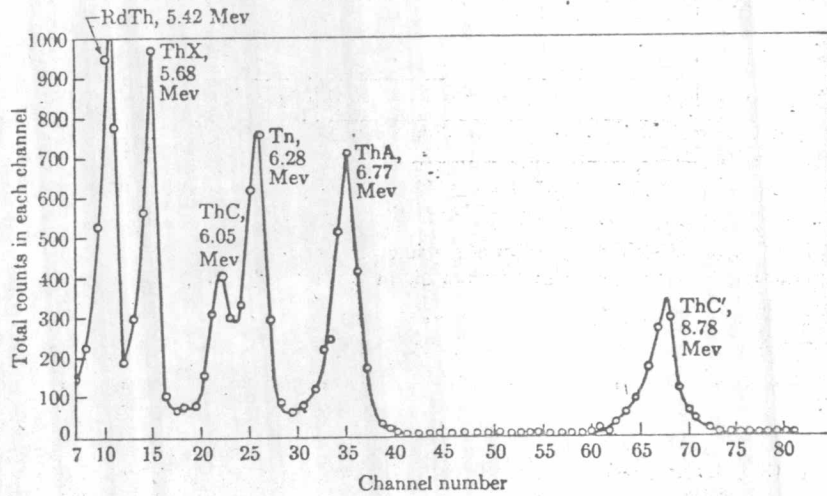
2.2 การสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตา

2.2.1 แบบของการสลายตัว

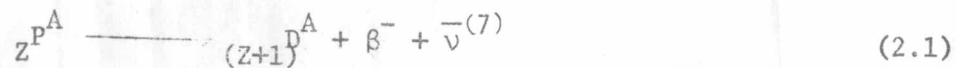
2.2.1.1 การสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตาลบ การสลายตัวแบบนี้จะพบในกลุ่มนิวไคลด์ที่มีนิวตรอนมากเกินไป (neutron excess) การสลายตัวแสดงได้ดังสมการ



รูป 2.1<sup>(6)</sup> ผังการสลายตัว (Decay scheme) ของ ThC (Bi<sup>212</sup>)



รูป 2.2<sup>(6)</sup> อัลฟาไลน์ จาก RdTh (Th<sup>228</sup>), ThX(Ra<sup>224</sup>), ThC (Bi<sup>212</sup>), Th(Rn<sup>220</sup>), ThA(Po<sup>216</sup>) และ ThC'(Po<sup>212</sup>)



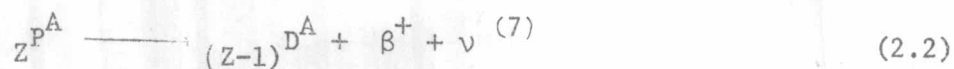
เมื่อ  $Z^P A$  หมายถึง นิวเคลียสแม่

$(Z+1)^D A$  หมายถึง นิวเคลียสลูก

$\beta^-$  หมายถึง อนุภาคเบตาลบ

$\bar{\nu}$  หมายถึง อนุภาคแอนตินิวตริโน (antineutrino)

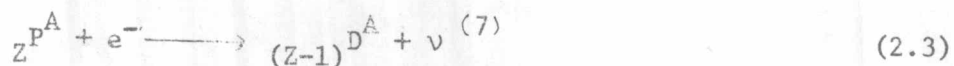
2.2.1.2 การสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตาบวก มักจะพบในกลุ่มนิวไคลด์ที่มีนิวตรอนน้อยเกินไป (neutron deficient) การสลายตัวแสดงได้ดังสมการ



เมื่อ  $\beta^+$  หมายถึง อนุภาคเบตาบวก

$\nu$  หมายถึง อนุภาคนิวตริโน (neutrino)

2.2.1.3 การสลายตัวแบบออร์บิทัลอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (orbital electron capture) นิวไคลด์ที่สลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตาบวก จะสามารถสลายตัวแบบออร์บิทัลอิเล็กตรอนแคปเจอร์ได้ด้วย การสลายตัวจะเป็นดังสมการ



เมื่อ  $e^-$  เป็นอิเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเค-อิเล็กตรอน

2.2.2 การสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตา ตามทฤษฎีของเฟอร์มี

2.2.2.1 สเปกตรัมของอนุภาคเบตาตามทฤษฎีของเฟอร์มี<sup>(5),(7)-(10)</sup> แทน

ได้ด้วยสมการ

$$P(\eta) d\eta = A_0 \eta^2 F(Z, \eta) (W_0 - W)^2 S_n(W) d\eta \quad (2.4A)$$

$$P(W) dW = A_0 \eta W F(Z, W) (W_0 - W)^2 S_n(W) dW \quad (2.4B)$$

เมื่อ  $P(\eta)$ ,  $P(W)$  = โอกาสที่อิเล็กตรอนที่มีโมเมนตัม ระหว่าง  $\eta$  และ  $\eta + d\eta$  หรือมีพลังงานรวมระหว่าง  $W$  และ  $W + dW$  ปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียสต่อหน่วยเวลา

$$A_0 = \text{amplitude factor} \\ = \frac{m_0^5 c^4 g^2}{2\pi^3 \hbar^7} |\psi_e(0)|^2 |\psi_v(0)|^2 |M_{if}|^2 \quad (2.5)$$

$g$  = ค่าคงตัวเฟอร์มี

$|\psi_e(0)|^2$ ,  $|\psi_v(0)|^2$  = โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนและนิวตริโนในนิวเคลียส

$M_{if}$  = แมทริกซ์อีเลเมนต์ (matrix element) ที่แสดงลักษณะสมบัติในการเปลี่ยนสภาวะทางนิวเคลียร์ของนิวเคลียส

$|M_{if}|^2$  = ปริมาณที่เชื่อมกันระหว่าง wave function ของสภาวะเริ่มต้น และสภาวะสุดท้ายของนิวเคลียส

$\eta$  = โมเมนตัมของอนุภาค เบตาในหน่วย  $m_0 c$

$W_0$  = พลังงานรวมสูงสุดของอนุภาค เบตาในหน่วย  $m_0 c^2$

$W$  = พลังงานรวมของอนุภาค เบตาในหน่วย  $m_0 c^2$   
 $= (\eta^2 + 1)^{\frac{1}{2}}$

โดยที่  $1 \leq W \leq W_0$

$F(Z, \eta)$ ,  $F(Z, W)$  = Coulomb correction factor

$Z$  = เลขอะตอมของนิวเคลียสลูก

$S_n(W)$  = shape factor



### 2.2.2.2 Fermi distribution function

จากสมการ 2.4A และ 2.4B เทอม  $\eta^2 F(Z, \eta)$  และ  $\eta WF(Z, W)$  เรียกว่า Fermi distribution function หรือ transition probability function

$$\text{ให้ } \eta^2 F(Z, \eta) = f(Z, \eta) \phi(Z) \quad (11) \quad (2.6)$$

ค่า  $f(Z, \eta)$  และ  $\phi(Z)$  อ่านได้จาก Tables for the Analysis of Beta Spectra <sup>(11)</sup>

$$\text{และ } \eta WF(Z, \eta) = W^2 G(Z, W) \quad (12) \quad (2.7)$$

$$\text{เมื่อ } G(Z, W) = \frac{\eta}{W} F(Z, W)$$

ค่า  $G(Z, W)$  อ่านได้จาก Tables of Fermi Functions <sup>(12)</sup>

### 2.2.2.3 comparative half life

สเปกตรัมของอนุภาคเบตาตามทฤษฎีเฟอร์มิ จากสมการ 2.4 จะเป็น

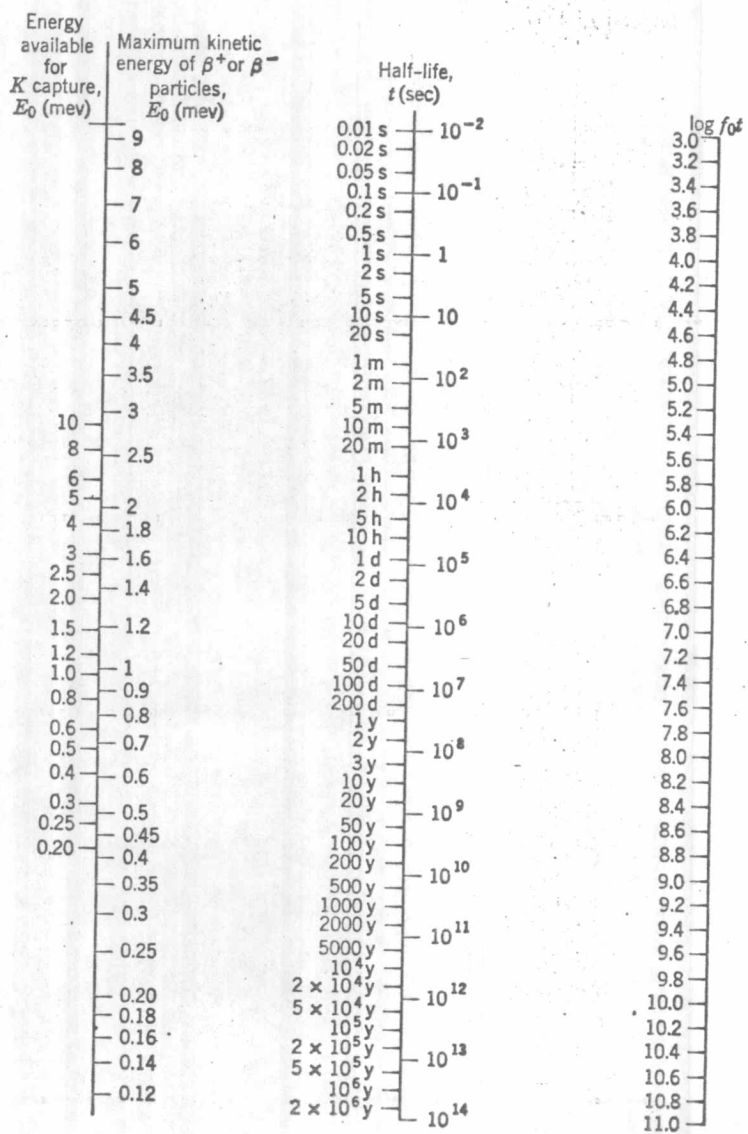
$$\begin{aligned} P(W) dW &= A_0 \eta WF(Z, W) (W_0 - W)^2 S_n(W) dW \\ &= A_0 (W^2 - 1)^{\frac{1}{2}} W (W_0 - W)^2 F(Z, W) S_n(W) dW \end{aligned}$$

ดังนั้น โอกาสที่อนุภาคเบตาจะถูกปลดปล่อยออกมาต่อหน่วยเวลาจะเป็น

$$\begin{aligned} \lambda &= \int_1^{W_0} P(W) dW \\ &= A_0 \int_1^{W_0} (W^2 - 1)^{\frac{1}{2}} W (W_0 - W)^2 F(Z, W) S_n(W) dW \quad (2.8) \end{aligned}$$

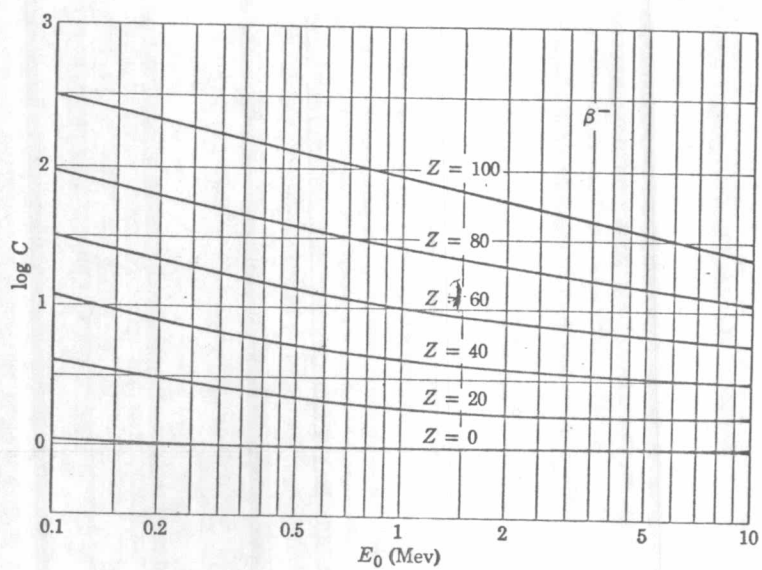
$$\text{ถ้าให้ } f = \int_1^{W_0} (W^2 - 1)^{\frac{1}{2}} W (W_0 - W)^2 F(Z, W) S_n(W) dW \quad (2.9)$$

$$\text{จะได้ } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} = A_0 f \quad (2.10)$$

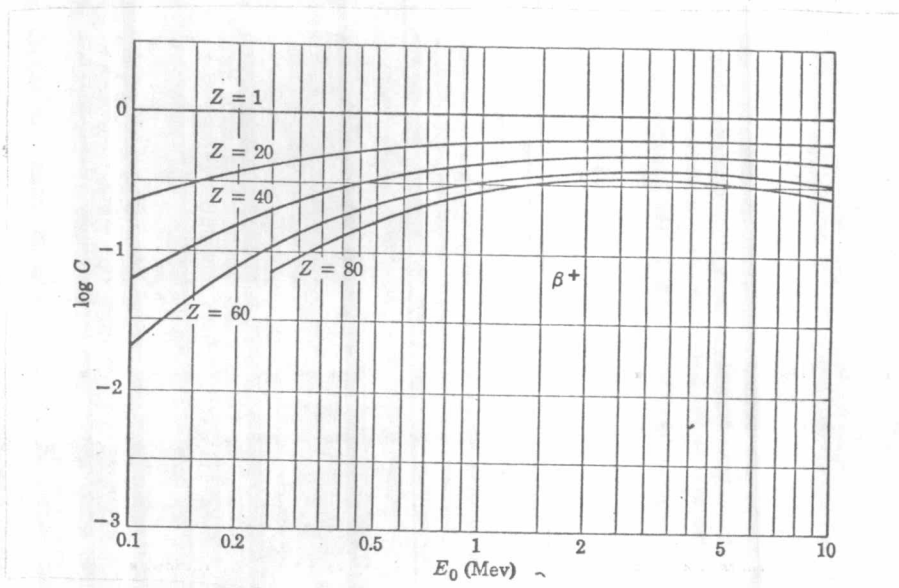


(a)

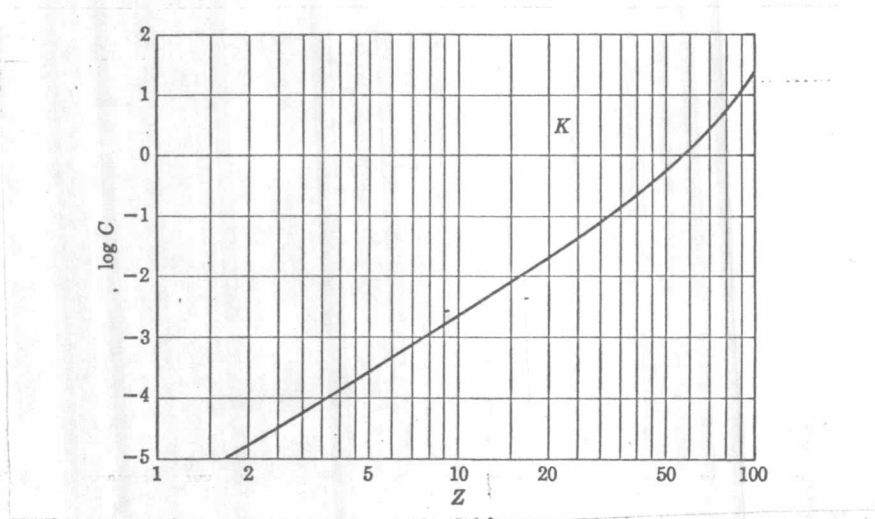
2.3a



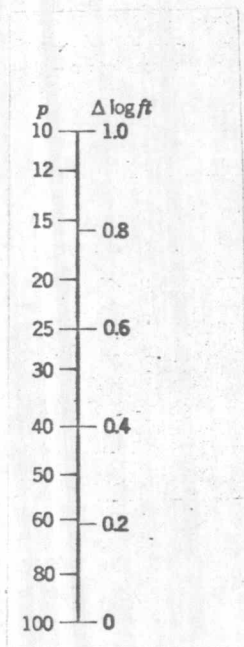
2.3b



2.3c



2.3d



2.3e

รูป 2.3 (7),(9),(13) Nomograph และ graphs สำหรับหาค่า  $\log ft$



ผลคูณระหว่าง  $f$  และ  $t^{1/2}$  เรียก comparative half life มักจะเขียนแทนด้วย  $ft$

ในกรณี allowed  $\beta$  - transition แทน  $f$  ด้วย  $f_0$ ,  $S_{\beta}(W) = 1$  และถ้าไม่คำนึงถึงผลจาก Coulomb field จะได้  $F(Z, W) = 1$  จะได้ว่า

$$f_0 = (W_0^2 - 1)^{1/2} \left( \frac{W_0^4}{30} - \frac{3W_0}{20} - \frac{2}{15} \right) + \frac{W_0}{4} \ln [ W_0 + (W_0^2 - 1)^{1/2} ] \quad (2.11)$$

ค่า  $f_0$  อ่านได้จาก nomograph และกราฟจากรูป 2.3

$E_0$  ในกรณี  $\beta^{\pm}$  decay = พลังงานจลน์สูงสุดของอนุภาค  $\beta^{\pm}$

$E_0$  ในกรณี เค-อีเลคตรอนแคปเจอร์

$$= E_0 \text{ ในกรณี } \beta^+ \text{ decay} + 1.02 \text{ MeV.}$$

$Z$  = เลขอะตอมของนิวเคลียสแม่

$t$  = total half life

$p$  = เปอร์เซ็นต์ branching decay ของส่วนที่กล่าวถึง

พิจารณาในกรณีที่ไม่มี branching decay  $p = 100$

วิธีใช้ nomograph

1. จากรูป 2.3a อ่านค่า  $E_0$  และ  $t$  ลากเส้นตรงผ่าน  $E_0$  และ  $t$  ไปยังคอลัมน์  $\log f_0 t$  อ่านค่า  $\log f_0 t$

2. อ่านค่า  $\log C$  สำหรับ  $\beta^-$ ,  $\beta^+$  หรือเค-อีเลคตรอนแคปเจอร์ จากรูป 2.3b, 2.3c หรือ 2.3d ตามลำดับ

3. อ่านค่า  $\Delta \log ft$  จากรูป 2.3e

$$4. \log ft = \log f_0 t + \log C + \Delta \log ft$$

ค่า  $\log ft$  ที่หาได้ด้วยวิธีนี้จะมีความถูกต้อง (accuracy)  $\pm 10\%$  ของค่าจริง ในกรณี  $\beta^{\pm}$  และ  $\pm 20\%$  ในกรณี เค-อีเลคตรอนแคปเจอร์

นอกจากนี้มีค่า  $\log ft$  อาจหาได้จาก  $\log f + \log t$  โดยค่า  $\log f$  อ่านได้จากกราฟในรูป 2.4

ในกรณี unique forbidden transition comparative half life เป็น  $f_n t$  โดยที่

$$f_n = \int_1^{W_0} S_n(W) F(Z,W) W(W^2-1)^{\frac{1}{2}} (W_0-W)^2 dW \quad (2.12)$$

ค่า  $S_n(W)$  สำหรับ unique forbidden transition อ่านได้จากตารางที่

2.5

ค่า  $f_n$  อาจหาได้โดยประมาณจาก

$$f_n = \bar{C}_n f_o^{(7), (15)} \quad (2.13)$$

ค่า  $f_o$  อ่านได้จากกราฟในรูปที่ 2.4

สำหรับ first forbidden

$$12\bar{C}_1(W_0) = \frac{6}{10} (W_0^2 - 1) - \frac{1}{5}(W_0 - 1) \quad (2.14)$$

สำหรับ second forbidden หาได้จาก

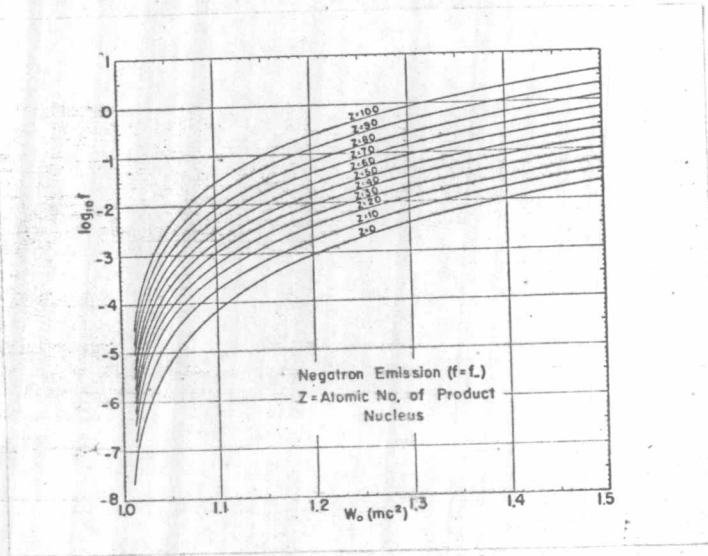
$$5 \times 6^3 \bar{C}_2(W_0) = \frac{3}{7}(W_0^2 - 1) - \frac{26}{105} (W_0^2 - 1)(W_0 - 1) - \frac{2}{105} (W_0 - 1)^2 \quad (2.15)$$

และสำหรับ third forbidden transition หาได้จาก

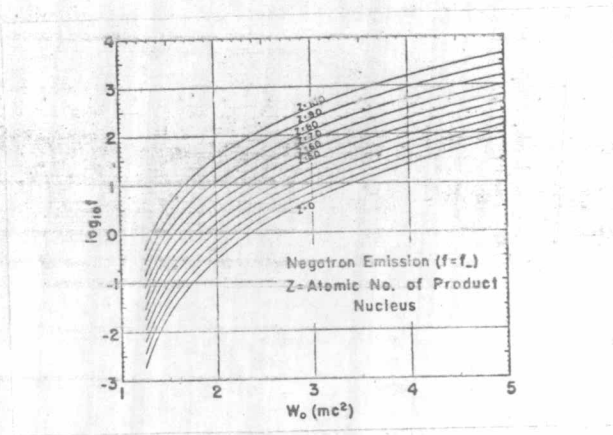
$$\begin{aligned} 70 \times 72^2 \bar{C}_3(W_0) &= \frac{1}{3}(W_0^2 - 1)^3 - \frac{9}{35} (W_0^2 - 1)^2 (W_0 - 1) \\ &\quad - \frac{2}{35} (W_0^2 - 1)(W_0 - 1)^2 + \frac{8}{105} (W_0 - 1)^3 \end{aligned} \quad (2.16)$$

แต่ค่า  $f_1$  จะหาจากสมการต่อไปนี้ได้ถูกต้องกว่า<sup>(7)(8)(15)</sup>

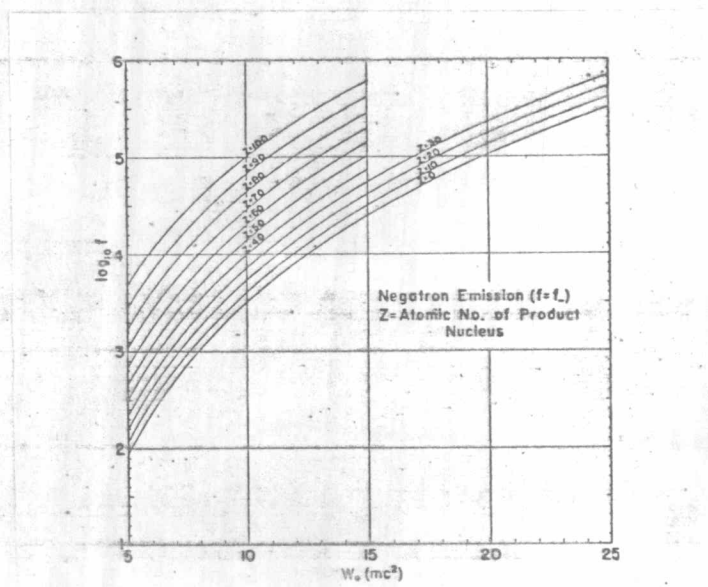
$$f_1 = f_o [ a(Z)(W_0^2 - 1) + b(Z)(W_0 - 1) ] \quad (2.17)$$



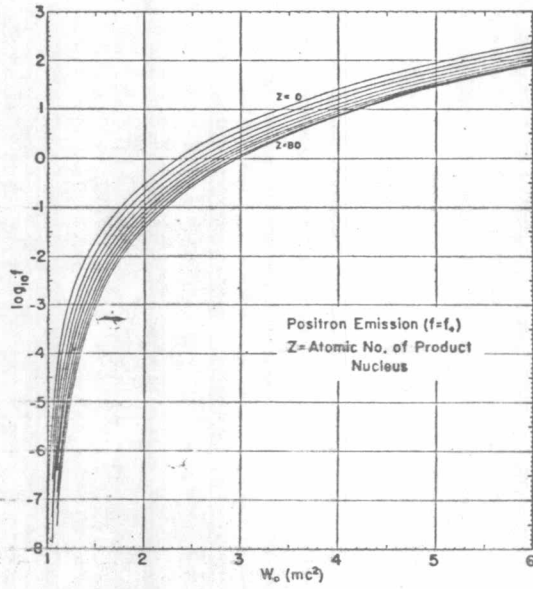
2.4a



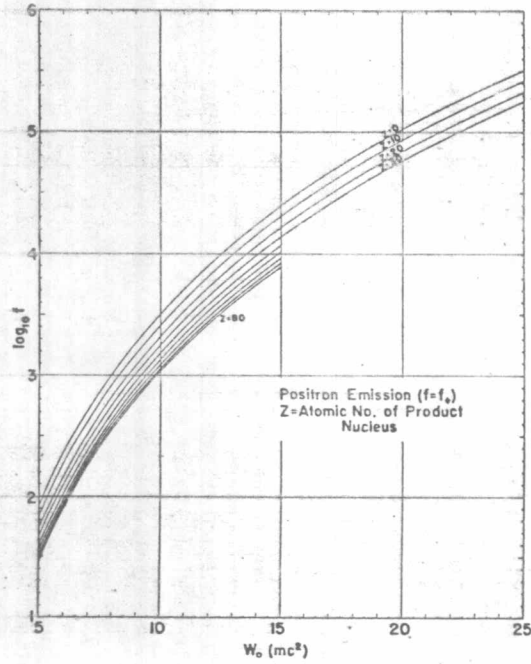
2.4b



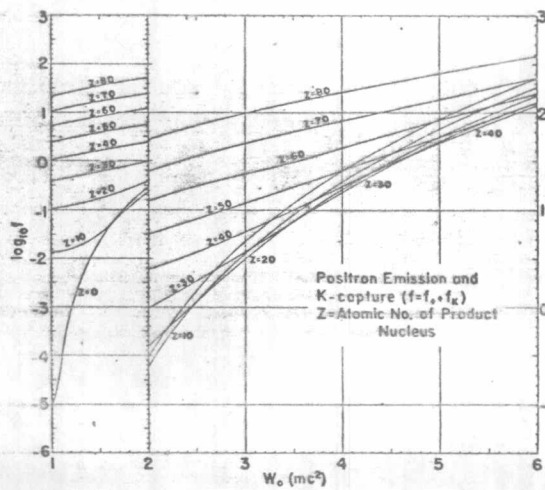
2.4c



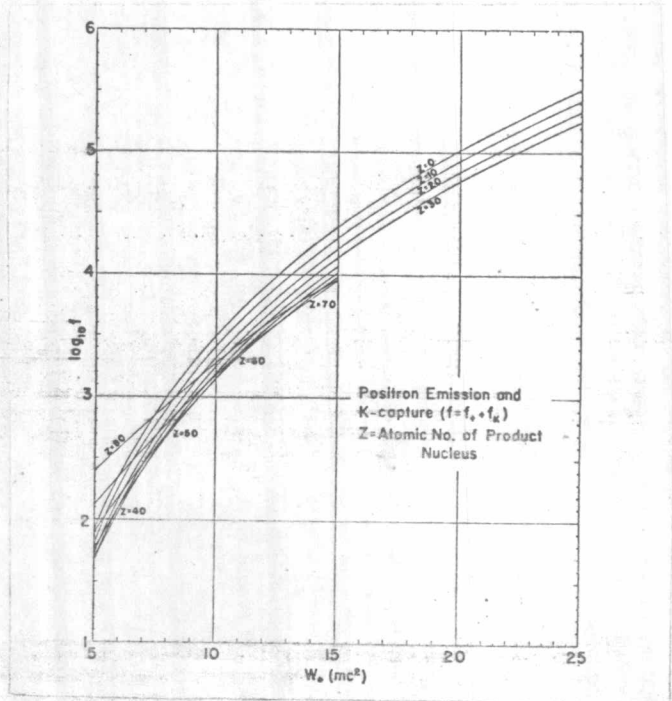
2.4d



2.4e

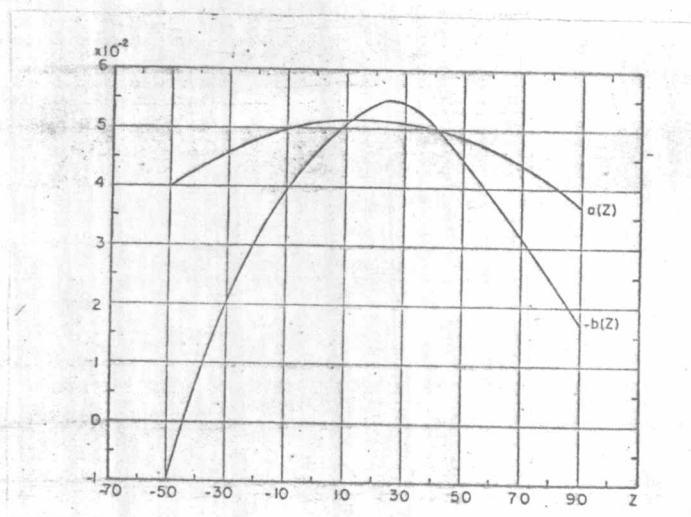


2.4f



2.4g

รูป 2.4<sup>(14)</sup> (a) (b) (c) เป็นค่า  $\log f$  สำหรับการปลดปล่อยอนุภาค  $\beta^-$   
 (d) และ (e) เป็นค่า  $\log f$  สำหรับการปลดปล่อยอนุภาค  $\beta^+$   
 (f) และ (g) เป็นค่า  $\log f$  สำหรับ เค-อีเลคตรอนแคปเจอร์  
 + การปลดปล่อยอนุภาค  $\beta^+$



รูป 2.5<sup>(15)</sup> ค่า  $a(Z)$  และ  $-b(Z)$  เป็นฟังก์ชันของ  $Z$  เมื่อ  

$$f_1 = f_0 [ a(Z)(W_0^2 - 1) + b(Z)(W_0 - 1) ]$$

ค่า  $a(Z)$  และ  $b(Z)$  อ่านได้จากกราฟในรูป 2.5<sup>(15)</sup>

ค่า  $f_{0t}$  และ  $f_{nt}$  ของ  $\beta$ -emitter ประเภทต่าง ๆ อ่านได้จากตารางที่ 2.2-2.4

2.2.2.4 กฎการเลือก (selection rule) ในการสลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตา

ในการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีโดยการปลดปล่อยอนุภาคเบตา สามารถจัดเป็นกลุ่มตามการเปลี่ยนแปลงสปินแองกูลาโมเมนตัม (spin angular momentum) และ parity ของ wave function ของสภาวะทางนิวเคลียร์ก่อนและหลังการสลายตัว<sup>(8),(9)</sup> ซึ่งสามารถจัดแบ่งได้ดังตารางที่ 2.1-2.4

2.2.2.5 shape factor

shape factor ตามที่ปรากฏในสมการ 2.4 จะแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของ  $\beta$ -transition

ในกรณี allowed transition, กลุ่มที่มี statistical shape ของ first parity forbidden transition และ fourth parity forbidden transition ค่า  $S_n(W) = 1$

สำหรับ unique forbidden transition ค่า shape factor จะแตกต่างกันตาม order ของ forbiddenness ดังในตารางที่ 2.5

ในกรณี second parity forbidden shape factor อาจอยู่ในรูป

$$S_2 = p^2 + Aq^2 \quad (7) \quad (2.18)$$

หรือ 
$$S_2 = q^2 + Bp^2 \quad (17) \quad (2.19)$$

ค่า A และ B จะแตกต่างกันแล้วแต่ต้นกำเนิดรังสีเบตาแต่ละตัว นอกจาก shape factor ในรูปดังกล่าวแล้ว อาจอยู่ในรูปของ

$$S_n(W) = 1 + aW + b/W + cW^2 \quad (18) \quad (2.20)$$

ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับแบบของการสลายตัว ค่าสัมประสิทธิ์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  จะแตกต่างกันแล้วแต่ต้นกำเนิดรังสีเบตา

ตารางที่ 2.1<sup>(7)</sup>Selection rule in  $\beta$ -decay

Type of transition	Spin change $\Delta I$ ( $\hbar$ )	Parity change
allowed	0, $\pm 1$	no
forbidden		
first parity forbidden	$\pm 1$	yes
unique first forbidden	$\pm 2$	yes
second parity forbidden	$\pm 2$	no
unique second forbidden	$\pm 3$	no
third parity forbidden	$\pm 3$	yes
unique third forbidden	$\pm 4$	yes
fourth parity forbidden	$\pm 4$	no



ตารางที่ 2.2 (5),(7),(9),(16)

การจัดประเภทของ  $\beta$ -transition

Type of transition	Selection rule $\Delta I$ , Parity change	$\log f_o t$	$\log f_n t$	$\log$ $(W_o^2 - 1)  \Delta I ^{-1} f_t$	example
<u>Allowed</u>					
allowed favored (super allowed)	0, $\pm 1$ , no	$3.5 \pm 0.2$			ดูตารางที่ 2.3
allowed unfavored	0, $\pm 1$ , no	$5.7 \pm 1.1$			S <sup>35</sup> , Zn <sup>69</sup> , C <sup>14</sup> , P <sup>32</sup> , Co <sup>60</sup>
<u>Forbidden</u>					
first forbidden	0, $\pm 1$ , yes	$7.5 \pm 1.5$			กลุ่มที่มี Statistical shape Ag <sup>111</sup> , Ce <sup>143</sup> , Rb <sup>86</sup> , Sb <sup>122</sup> , Ba <sup>139</sup> , Pr <sup>143</sup> , Pm <sup>147</sup> , Tm <sup>170</sup> , Re <sup>186</sup> , Au <sup>198</sup> , Ce <sup>141</sup> , Pr <sup>144</sup>
unique first forbidden'	$\pm 2$ , yes		$8.5 \pm 0.7$	$\sim 10$	กลุ่มที่มี shape เป็นอย่างอื่นได้แก่ Sb <sup>124</sup> , Bi <sup>210</sup> ดูตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

Type of transition	Selection rule $\Delta I$ , Parity change	$\log f_o t$	$\log f_n t$	$\log (W_o^2 - 1)  \Delta I ^{-1} ft$	example
second forbidden	$\pm 2$ , no	$12.1 \pm 1.0$			$Cl^{36}$ , $Sc^{46}$ , $Fe^{59}$ , $Co^{60}$ , $Tc^{99}$ , $I^{129}$ , $Cs^{135}$ , $Cs^{137}$
unique second forbidden	$\pm 3$ , no		$11.7 \pm 0.9$	$\sim 15$	ดูตารางที่ 2.4
third forbidden	$\pm 3$ , yes	$18.2 \pm 0.6$			$Rb^{87}$ , $Au^{198}$
unique third forbidden	$\pm 4$ , yes		15.2	$\sim 21$	ดูตารางที่ 2.4
fourth forbidden	4, no	22.7			$In^{115}$

ตารางที่ 2.3<sup>(7)</sup>

## ต้นกำเนิดรังสีเบตา ในกลุ่ม Superalloyed transitions

Nuclides	Spin	$t_{1/2}$ (sec)	$E_{max}$ (kev)	$ft$ (sec)
${}^0_1\text{N}^1 \rightarrow {}^1_1\text{H}^1$	$\frac{1}{2}$	$11.7 \pm 0.3$ min	$782 \pm 1$	$1187 \pm 35$
${}^1_1\text{H}^2 \rightarrow {}^2_2\text{He}^3$	$\frac{1}{2}$	$3.870 \times 10^8$	$18.65 \pm 0.2$	$1132 \pm 40$
${}^4_2\text{Be}^7 \rightarrow {}^3_3\text{Li}^7$	$\frac{3}{2}$	$53.38 \pm 0.13$ days	$863 \pm 2$ (87.7%)	$2300 \pm 78$
$\rightarrow {}^3_3\text{Li}^7$	$\frac{3}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$		$386 \pm 2$ (12.3%)	$3600 \pm 122$
${}^6_6\text{C}^{11} \rightarrow {}^5_5\text{B}^{11}$	$\frac{3}{2}$	$1224 \pm 6$	$968 \pm 8$	$4030 \pm 150$
${}^7_7\text{N}^{13} \rightarrow {}^6_6\text{C}^{13}$	$\frac{1}{2}$	$603 \pm 2$	$1202 \pm 5$	$4700 \pm 80$
${}^8_8\text{O}^{15} \rightarrow {}^7_7\text{N}^{15}$	$\frac{1}{2}$	$124.0 \pm 0.5$	$1739 \pm 2$	$4475 \pm 30$
${}^9_9\text{F}^{17} \rightarrow {}^8_8\text{O}^{17}$	$\frac{3}{2}$	$66.0 \pm 0.5$	$1748 \pm 6$	$2380 \pm 40$
${}^{10}_{10}\text{Ne}^{19} \rightarrow {}^9_9\text{F}^{19}$	$\frac{1}{2}$	$19.5 \pm 1.0$	$2240 \pm 10$	$1900 \pm 100$
${}^{11}_{11}\text{Na}^{21} \rightarrow {}^{10}_{10}\text{Ne}^{21}$	$(\frac{3}{2})$	$22.8 \pm 0.22$	$2508 \pm 17$	$3500 \pm 250$
${}^{12}_{12}\text{Mg}^{23} \rightarrow {}^{11}_{11}\text{Na}^{23}$	$\frac{3}{2}$	$12.04 \pm 0.09$	$3056 \pm 15$	$4480 \pm 200$
${}^{13}_{13}\text{Al}^{25} \rightarrow {}^{12}_{12}\text{Mg}^{25}$	$\frac{3}{2}$	$7.23 \pm 0.03$	$3239 \pm 6$	$4280 \pm 350$
${}^{14}_{14}\text{Si}^{27} \rightarrow {}^{13}_{13}\text{Al}^{27}$	$\frac{3}{2}$	$4.19 \pm 0.05$	$3793 \pm 8$	$4500 \pm 100$
${}^{15}_{15}\text{P}^{29} \rightarrow {}^{14}_{14}\text{Si}^{29}$	$(\frac{1}{2})$	$4.23 \pm 0.05$	$3926 \pm 9$	$4740 \pm 200$
${}^{16}_{16}\text{S}^{31} \rightarrow {}^{15}_{15}\text{P}^{31}$	$\frac{3}{2}$	$2.61 \pm 0.03$	$4428 \pm 17$	$4820 \pm 250$
${}^{17}_{17}\text{Cl}^{33} \rightarrow {}^{16}_{16}\text{S}^{33}$	$\frac{3}{2}$	$2.53 \pm 0.04$	$4553 \pm 12$	$6000 \pm 500$
${}^{18}_{18}\text{Ar}^{35} \rightarrow {}^{17}_{17}\text{Cl}^{35}$	$\frac{3}{2}$	$1.804 \pm 0.012$	$4948 \pm 30$	$5680 \pm 400$
${}^{19}_{19}\text{K}^{37} \rightarrow {}^{18}_{18}\text{Ar}^{37}$	$\frac{3}{2}$	$1.23 \pm 0.02$	$5128 \pm 30$	$4250 \pm 500$
${}^{20}_{20}\text{Ca}^{39} \rightarrow {}^{19}_{19}\text{K}^{39}$	$\frac{3}{2}$	$0.877 \pm 0.006$	$5468 \pm 40$	$4150 \pm 300$
${}^{21}_{21}\text{Sc}^{41} \rightarrow {}^{20}_{20}\text{Ca}^{41}$	$\frac{7}{2}$	$0.87 \pm 0.05$	$4940 \pm 50$	$2560 \pm 160$
${}^2_2\text{He}^6 \rightarrow {}^3_3\text{Li}^6$	$0 \rightarrow 1$	$0.813 \pm 0.007$	$3500 \pm 20$	$808 \pm 32$
${}^6_6\text{C}^{10} \rightarrow {}^5_5\text{B}^{10*}$	$0 \rightarrow 1$	$19.1 \pm 0.8$	$2100 \pm 100$	$1700 \pm 150$
${}^6_6\text{C}^{10} \rightarrow {}^5_5\text{B}^{10**}$	$0 \rightarrow 0$	$1160 \pm 150$	$1080 \pm 100$	$5900 \pm 2700$
${}^8_8\text{O}^{14} \rightarrow {}^7_7\text{N}^{14}$	$0 \rightarrow 0$	$71.36 \pm 0.09$	$1812.6 \pm 1.4$	$3066 \pm 10$
${}^9_9\text{F}^{18} \rightarrow {}^8_8\text{O}^{18}$	$1 \rightarrow 0$	$6660 \pm 60$	$649 \pm 9$	$4169 \pm 158$
${}^{10}_{10}\text{Ne}^{18} \rightarrow {}^9_9\text{F}^{18}$	$0 \rightarrow 1$	$1.6 \pm 0.2$	$3200 \pm 200$	$794.4 \pm 1.6$
${}^{13}_{13}\text{Al}^{26*} \rightarrow {}^{12}_{12}\text{Mg}^{26}$	$0 \rightarrow 0$	$6.374 \pm 0.016$	$3208.0 \pm 2.3$	$3015 \pm 12$
${}^{17}_{17}\text{Cl}^{34} \rightarrow {}^{16}_{16}\text{S}^{34}$	$0 \rightarrow 0$	$1.565 \pm 0.007$	$4460 \pm 4.5$	$3055 \pm 20$
${}^{19}_{19}\text{K}^{38} \rightarrow {}^{18}_{18}\text{Ar}^{38}$	$0 \rightarrow 0$	$0.946 \pm 0.005$	$5030 \pm 14$	$3140 \pm 400$
${}^{21}_{21}\text{Sc}^{42} \rightarrow {}^{20}_{20}\text{Ca}^{42}$	$0 \rightarrow 0$	$0.6830 \pm 0.0015$	$5409.0 \pm 2.3$	$3077 \pm 9$
${}^{23}_{23}\text{V}^{46} \rightarrow {}^{22}_{22}\text{Ti}^{46}$	$0 \rightarrow 0$	$0.4259 \pm 0.0008$	$6032.1 \pm 2.2$	$3088 \pm 8$
${}^{25}_{25}\text{Mn}^{50} \rightarrow {}^{24}_{24}\text{Cr}^{50}$	$0 \rightarrow 0$	$0.2857 \pm 0.0006$	$6609.0 \pm 2.6$	$3082 \pm 9$
${}^{27}_{27}\text{Co}^{54} \rightarrow {}^{26}_{26}\text{Fe}^{54}$	$0 \rightarrow 0$	$0.1937 \pm 0.0010$	$7229 \pm 5$	$2966 \pm 18$

ตารางที่ 2.4<sup>(8)</sup>

ต้นกำเนิดรังสีเบตา ในกลุ่ม Unique forbidden transitions

## First forbidden unique transitions

Odd A	$W_0$ (mc <sup>2</sup> )	$t_{1/2}$	$\log f_{01}$	$\log f_{n1}$
A <sup>39</sup>	2.11	265 y	9.85	9.03
A <sup>41</sup>	5.89	109 m (1%)	8.47	8.67
Kr <sup>85</sup>	2.36	9.4 y (99%)	9.09	8.30
Sr <sup>89</sup>	3.93	54 d	8.57	8.34
Sr <sup>91</sup>	6.22	9.7 h (26%)	7.91	8.16
Y <sup>91</sup>	4.02	61 d	8.52	8.37
Sn <sup>123m</sup>	3.78	136 d	8.88	8.60
Sn <sup>125m</sup>	5.57	9.4 d (95%)	8.86	8.96
Cs <sup>137</sup>	2.02	33 y (92%)	9.41	8.55

Even A	$W_0$ (mc <sup>2</sup> )	$t_{1/2}$	$\log f_{01}$	$\log f_{n1}$
Cl <sup>38</sup>	10.43	37.3 m (53%)	7.44	8.15
K <sup>42</sup>	8.02	12.44h (80%)	8.02	8.49
As <sup>72</sup>	7.54	26 h (19%)	8.21	8.63
As <sup>74</sup> ( $\beta^-$ )	3.66	17.5 d (27%)	8.29	8.04
As <sup>74</sup> ( $\beta^+$ )	3.99	17.5 d (5%)	8.44	8.28
As <sup>76</sup>	6.95	26.8 h (60%)	8.20	8.56
Rb <sup>84</sup>	4.19	34.0 d (7%)	8.64	8.56
Rb <sup>86</sup>	4.57	19.5 d (80%)	8.51	8.43
Rb <sup>88</sup>	11.37	17.8 m (78%)	7.25	8.04
Sr <sup>90</sup>	2.04	19.9 y	9.06	8.29
Y <sup>90</sup>	5.40	61 h	8.03	8.11
Y <sup>92</sup>	8.05	3.6 h	7.64	8.07
Sb <sup>122</sup>	4.795	2.8 d (25%)	8.28	8.30
I <sup>124</sup>	5.305	4.5 d (15%)	7.77	7.88
I <sup>126</sup>	3.482	13 d (27%)	8.58	8.22
Tl <sup>204</sup>	2.51	3.5 y	9.60	8.85
Pt <sup>242</sup>	5.21	19.2 h	7.39	7.42

## Twice forbidden unique transitions

Be <sup>10</sup>	2.10	2.5 × 10 <sup>6</sup> y	14.50	12.08
Na <sup>22</sup>	4.7	2.6 y (0.06%)	12.7	11.9

## Third forbidden unique transition

K <sup>40</sup>	3.64	1.3 × 10 <sup>9</sup> y	18.46	15.60
-----------------	------	-------------------------	-------	-------

ตารางที่ 2.5<sup>(7),(8)</sup>

Shape factor ของ unique forbidden transition

Type of unique transition	Shape factor
first forbidden	$p^2 + q^2$
second forbidden	$p^4 + \frac{10}{3} p^2 q^2 + q^4$
third forbidden	$p^6 + 7p^2 q^2 (p^2 + q^2) + q^6$

$p =$  โมเมนต์ของอนุภาคเบต้า

$q =$  โมเมนต์ของนิวตริโน

และ  $p \sim (W^2 - 1)^{\frac{1}{2}}$

$q \sim (W_0 - W)$



Shape factor ของต้นกำเนิดรังสีเบตาแต่ละตัวอ่านได้จากตารางที่แนบมา<sup>18</sup>  
รวบรวมไว้

### 2.2.2.6 Kurie plot

จากสมการ 2.4, 2.6 และ 2.7 ถ้าเราจัดรูปสมการเสียใหม่เป็นดังนี้

$$\left[ \frac{P(\eta)}{S_n(W) f(Z, \eta)} \right]^{1/2} = [A_0 \phi(Z)]^{1/2} (W_0 - W) \tag{2.21A}$$

หรือ 
$$\frac{1}{W} \left[ \frac{P(W)}{S_n(W) G(Z, W)} \right]^{1/2} = [A_0]^{1/2} (W_0 - W) \tag{2.21B}$$

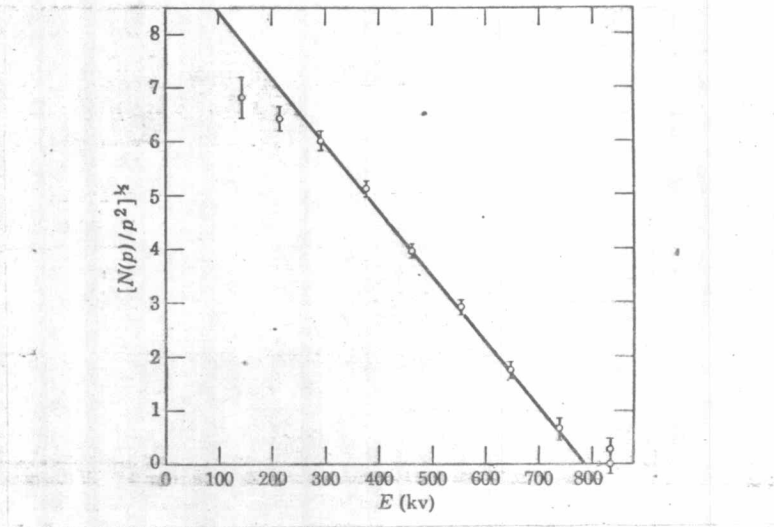
ถ้าเขียนกราฟระหว่าง  $\left[ \frac{P(\eta)}{S_n(W) f(Z, \eta)} \right]^{1/2}$  หรือ  $\frac{1}{W} \left[ \frac{P(W)}{S_n(W) G(Z, W)} \right]^{1/2}$

กับ W จะได้กราฟเส้นตรงตัดแกน W ที่  $W_0$  แต่ในทางปฏิบัติจะใช้ค่า  $N(\eta)$  แทน  $P(\eta)$  และ  $N(W)$  แทน  $P(W)$  เมื่อ  $N(\eta)$  และ  $N(W)$  เป็นจำนวนนับของอนุภาคเบตาที่มีโมเมนตัมระหว่าง  $\eta$  กับ  $\eta + d\eta$  และจำนวนนับของอนุภาคเบตาที่มีพลังงานรวมระหว่าง W กับ  $W + dW$  ตามลำดับ ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะสามารถทำให้หาพลังงานที่จุดตัด (end point energy) สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตาจากธาตุที่ต้องการได้ วิธีการเช่นนี้เรียกว่า Kurie plot หรือ Fermi-Kurie plot หรือ Fermi plot

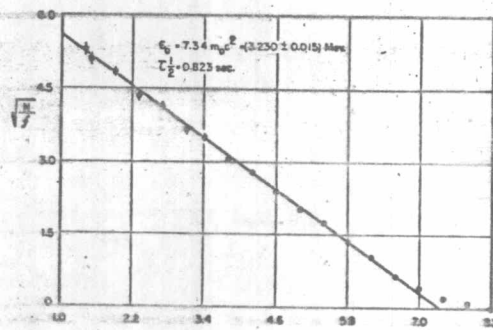
## 2.3 การสลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีแกมมา

### 2.3.1 แบบของการปล่อยรังสี

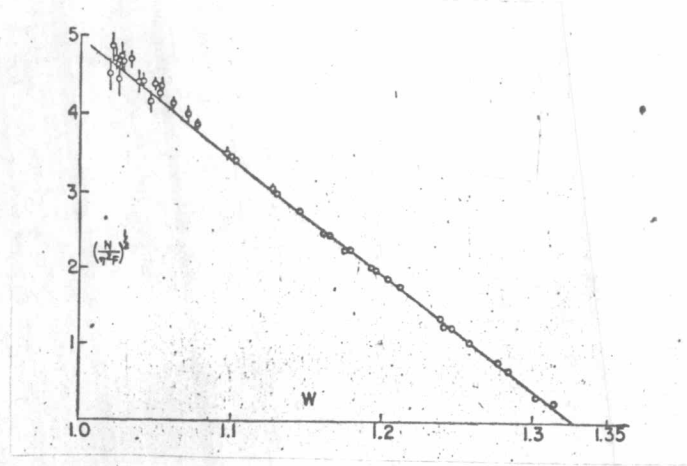
ภายหลังจากนิวเคลียสแม่สลายตัวโดยการปลดปล่อยอนุภาค  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$  หรือ สลายตัวแบบ เค-อีเลคตรอนแคปเจอร์แล้ว นิวเคลียสลูกส่วนหนึ่งจะอยู่ในสภาวะเอกไซเทต นิวเคลียสจะกลับสู่สภาวะปกติโดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาจำนวนหนึ่งซึ่งจะแตกต่างกันไป แล้วแต่ชนิดของนิวเคลียส การเปลี่ยนสภาวะทางนิวเคลียร์แบบนี้เรียกว่า Isomeric transition ซึ่งจะพบการเปลี่ยนสภาวะแบบนี้มีอยู่ 2 แบบ คือ



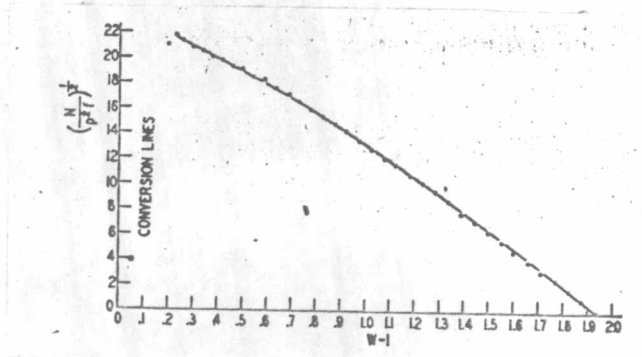
รูป 2.6<sup>9</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตา จากนิวตรอนอิสระ (free neutron)



รูป 2.7<sup>(19)</sup> Kurie plot สำหรับ Superallowed transition ของ He<sup>6</sup>

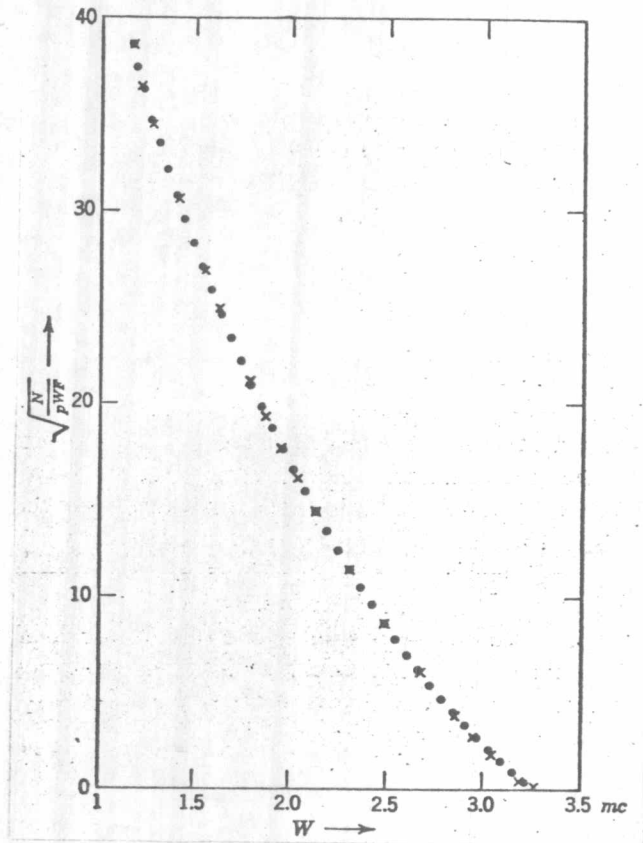


รูป 2.8<sup>(20)</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตา จาก  $S^{35}$   
(กลุ่ม allowed unfavored)

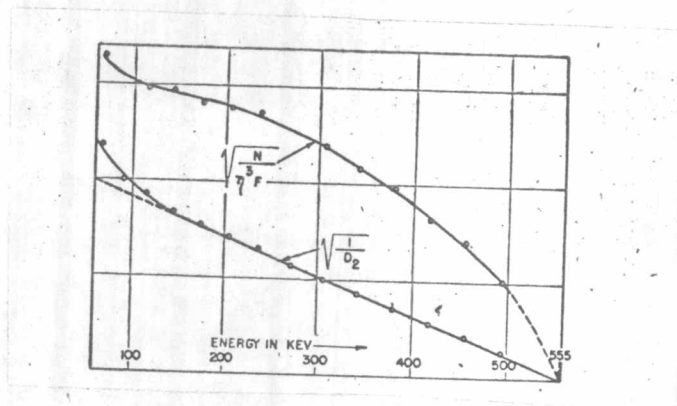


รูป 2.9<sup>(21)</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตา จาก  $Tm^{170}$   
(กลุ่ม Statistical shape ของ first parity forbidden transition)





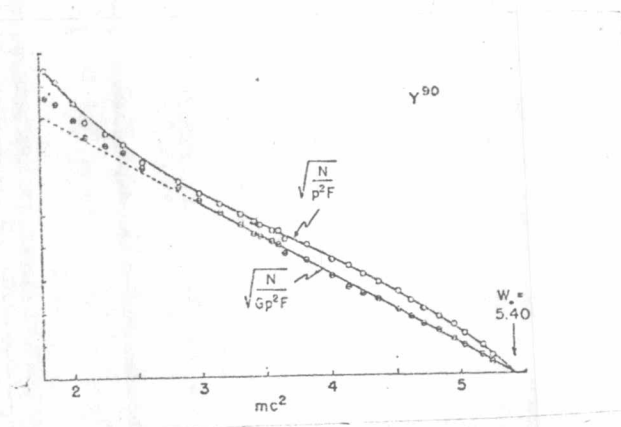
รูป 2.10<sup>(7)</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตา จาก RaE ( $\text{Bi}^{210}$ ) (กลุ่มที่มี shape ไม่นั่นอนของ first parity forbidden transition)



รูป 2.11<sup>(23)</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตา จาก  $\text{Be}^{10}$  (Unique second forbidden transition)

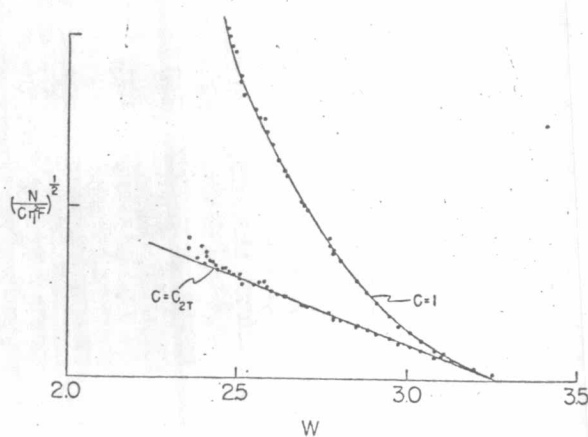
$$D_2 = S_2(W) = (W^2 - 1)^2 + \frac{10}{3}(W^2 - 1)(W_0 - W)^2 + (W_0 - W)^4$$





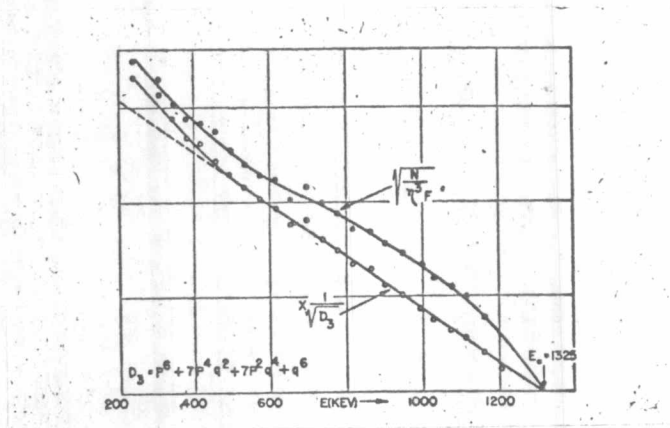
รูป 2.12<sup>(22)</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตา จาก  $Y^{90}$   
(Unique first forbidden transition)

$$G \approx (W^2 - 1) + (W_0 - W)^2$$



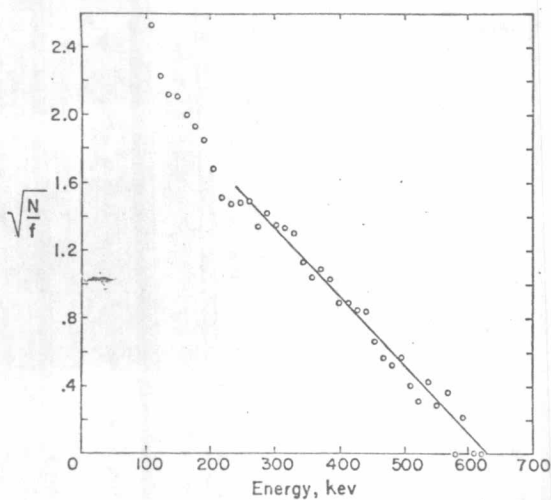
รูป 2.13<sup>(17)</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตาที่มีพลังงานสูง  
จาก  $Cs^{137}$  (Second parity forbidden transition)

$$C_{2T} \approx S_2(W) = (W_0 - W)^2 + 0.030(W^2 - 1)$$

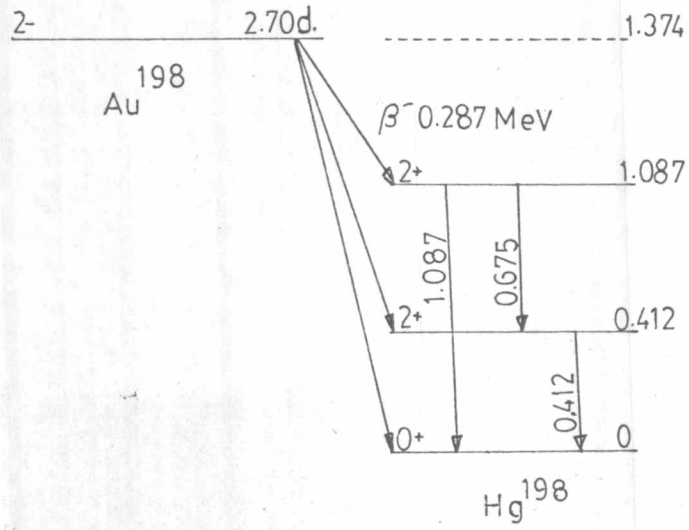


รูป 2.14<sup>(23)</sup> Kurie plot สำหรับสเปกตรัมของอนุภาคเบตา จาก  $K^{40}$   
(Unique third forbidden transition)

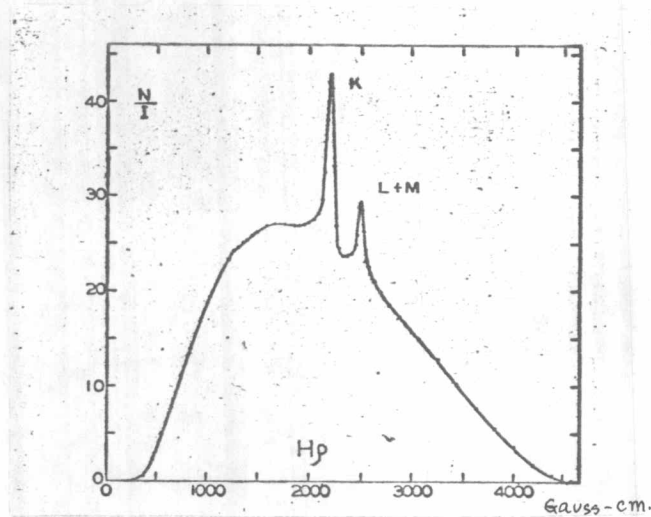
$$D_3 = S_3(W) ; p = (W^2 - 1)^{\frac{1}{2}} ; q = (W_0 - W)$$



รูป 2.15<sup>(24)</sup> Kurie plot สำหรับ fourth parity forbidden  
transition จาก  $In^{115}$



รูป 2.16<sup>(5)</sup> รังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจาก  $\text{Hg}^{198\text{m}}$



รูป 2.17<sup>(27)</sup> สเปกตรัมของอนุภาคเบตาและคอนเวอชัน อิเล็กตรอนจาก  $\text{Au}^{198}$  วัดโดยใช้เครื่องแยกด้วยระบบแม่เหล็ก

2.3.1.1 ปลดปล่อยออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานสูงคือรังสีแกมมา พลังงานของโฟตอนจะมีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนสภาวะ

2.3.1.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของนิวเคลียสที่อยู่ในสภาวะเอกไซเทต ถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมเชิงมุมให้กับอีเลคตรอนในอะตอม เมื่ออีเลคตรอนได้รับพลังงานและโมเมนตัมเชิงมุมแล้วจะหลุดออกไปจากอะตอม เรียกกระบวนการถ่ายเทพลังงานแบบนี้ว่าอินเทอนอลคอนเวชัน (internal conversion) อีเลคตรอนที่ได้รับพลังงานและโมเมนตัมเชิงมุมจากนิวเคลียสเรียกว่า คอนเวชันอีเลคตรอน พลังงานของคอนเวชันอีเลคตรอนหาได้จากสมการ

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.22)$$

เมื่อ  $E_e$  = พลังงานจลน์ของคอนเวชันอีเลคตรอน

$E_\gamma$  = ค่าพลังงานที่ต่างกันระหว่างระดับพลังงาน 2 ระดับ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

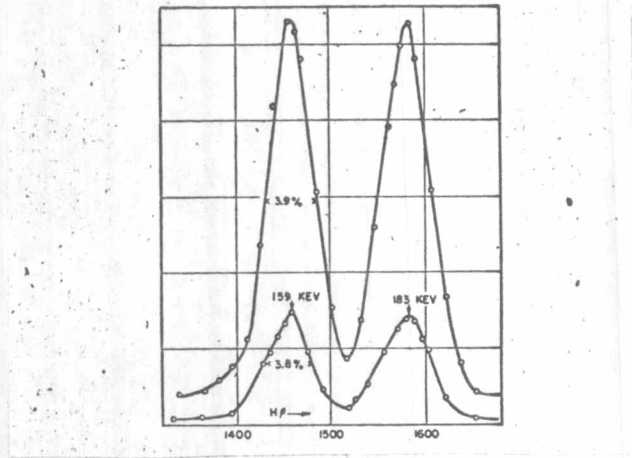
$E_b$  = ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอีเลคตรอนตัวที่หลุดออกไป

ค่า  $E_b$  ของอีเลคตรอนในอะตอมของธาตุต่าง ๆ ดูได้จาก Table of electron binding energy<sup>(25)</sup> และค่า  $E_e$  จะอ่านได้โดยตรงจาก Table of Isotopes<sup>(26)</sup>

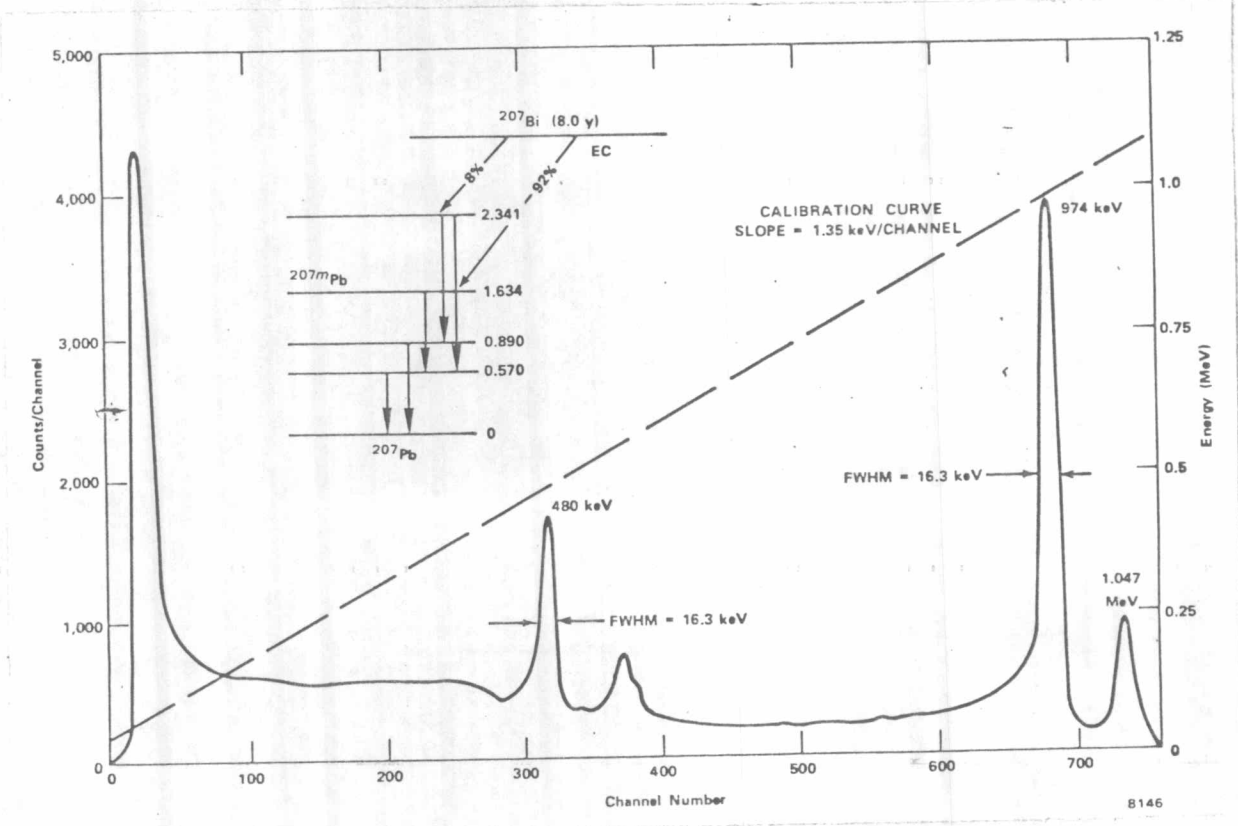
การถ่ายเทพลังงานจากนิวเคลียสที่อยู่ในสภาวะเอกไซเทตไม่ได้จำกัดอยู่ที่วิธีใดวิธีหนึ่ง แต่จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันทั้ง 2 แบบ อัตราส่วนระหว่างจำนวนคอนเวชันอีเลคตรอน และจำนวนโฟตอนของรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาในช่วงเวลาที่เท่ากันเรียกว่า คอนเวชันโคเอฟฟิเชียนท์ (conversion coefficient ( $\alpha$ ))

$$\alpha = \frac{\text{จำนวนคอนเวชันอีเลคตรอน}}{\text{จำนวนโฟตอนของรังสีแกมมา}} \quad (2.23)$$

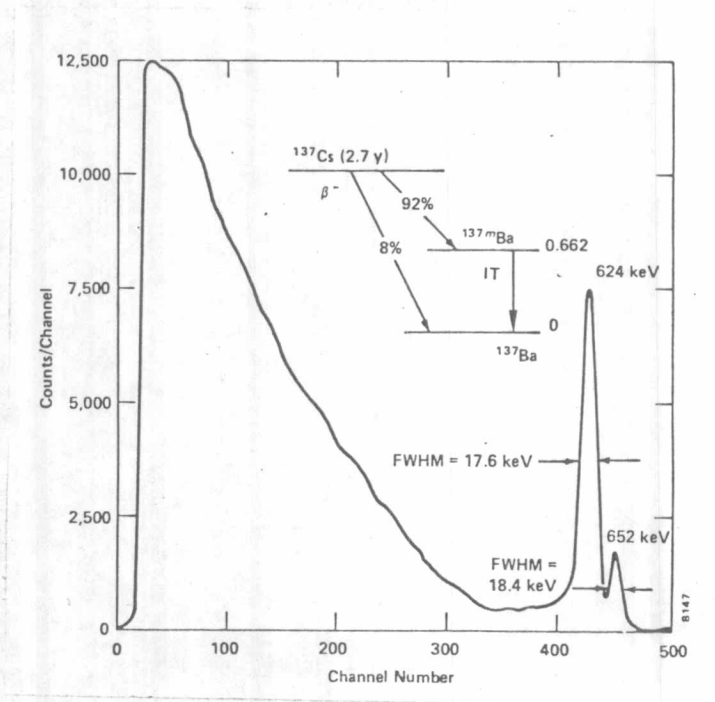
และคอนเวชันโคเอฟฟิเชียนท์ของอีเลคตรอนในชั้นเค (K-shell conversion coefficient) กำหนดจาก



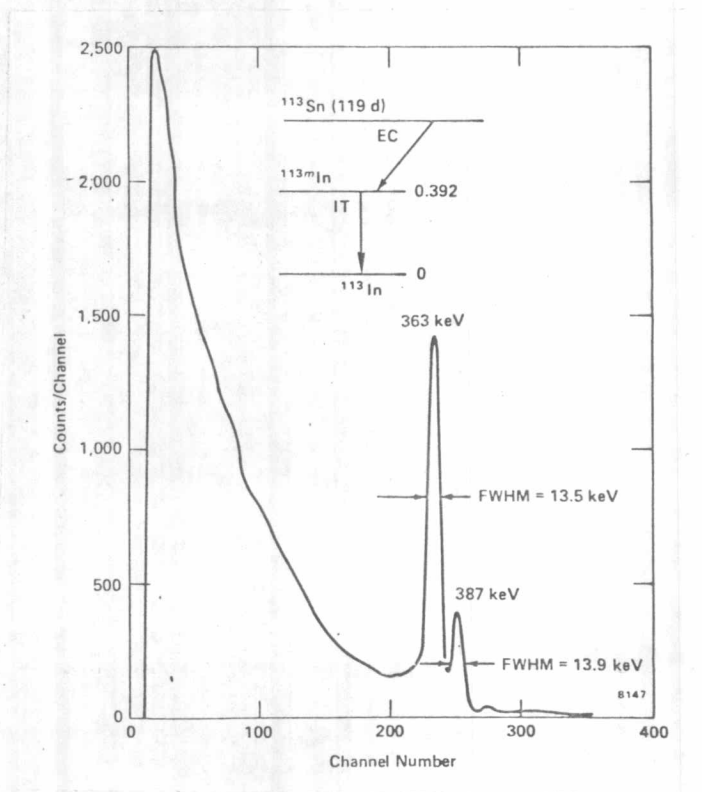
รูป 2.18<sup>(21)</sup> คอนเวชันอิเล็กตรอนไลน์ จาก  $In^{114}$  เปรียบเทียบผลการวัด จากเครื่องแยกตัวระบบแม่เหล็ก 2 ชนิด



รูป 2.19<sup>(28)</sup> คอนเวชันอิเล็กตรอนไลน์ จาก  $Bi^{207}$  วัดโดยใช้หัววัดแบบ โซลิดสเตต (Solid state detector)



รูป 2.20<sup>(28)</sup> สเปกตรัมของอนุภาคเบตาและคอนเวอชันอีเลคตรอน จาก  $^{137}\text{Cs}$



รูป 2.21<sup>(28)</sup> คอนเวอชันอีเลคตรอนไลน์ จาก  $^{113}\text{Sn}$

$$\alpha_K = \frac{\text{จำนวนคอนเวอชันอิเล็กตรอนจากชั้นเค}}{\text{จำนวนโฟตอนของรังสีแกมมา}} \quad (2.24)$$

คอนเวอชันโคเอฟฟิเชียนท์รวม (total conversion coefficient)

$\alpha$  จะมีค่า

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \dots \quad (2.25)$$

ในชั้นแอล (L - shell) และชั้นอื่น ๆ ค่า  $\alpha_L$  ยังแบ่งเป็น  $\alpha_{L_I}$  (2s electron),  $\alpha_{L_{II}}$  ( $2p_{1/2}$  electron),  $\alpha_{L_{III}}$  ( $2p_{3/2}$  electron), ..... ตามลำดับ  
ค่าอินเทอเนออลคอนเวอชันโคเอฟฟิเชียนท์ หาได้จากตารางของสลีฟและแบนด์ (29)  
หรือตารางของโรส (30)

### 2.3.2 กฎการเลือก

รังสีแกมมาเกิดขึ้นเนื่องจากผลทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic effect) ของนิวเคลียส โมเมนต์เชิงมุม L (ในหน่วย  $\hbar$ ) ที่โฟตอนของรังสีแกมมาพาออกไปจะเป็นสิ่งที่แสดงลักษณะสมบัติของการเปลี่ยนสถานะของนิวเคลียส เรียกโฟตอนของรังสีแกมมาที่พาโมเมนต์เชิงมุมออกไป 1, 2, 3, 4, 5, ... หน่วย  $\hbar$  ว่า การปล่อยรังสีแบบไดโพล (dipole), ควอดรูโพล (quadrupole), ออกตุโพล (octupole),  $2^4$  โพล ( $2^4$  pole),  $2^5$  โพล ( $2^5$  pole), ..... หรือเรียกอย่างสั้น ๆ ได้ดังนี้

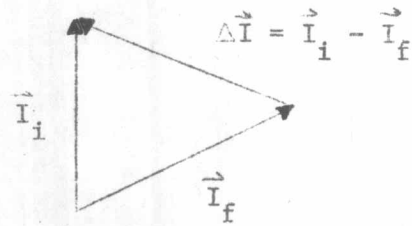
electric  $2^L$  - pole เรียก  $E_L$

magnetic  $2^L$  - pole เรียก  $M_L$

การปล่อยรังสีแบบ  $E_L$  และ  $M_L$  จะแตกต่างกันที่ parity โดยที่ parity ของการปล่อยรังสีแบบ  $E_L$  และ  $M_L$  จะเป็น  $(-1)^L$  และ  $(-1)^{L+1}$  ตามลำดับ ถ้าเทอม  $(-1)^L$  หรือ  $(-1)^{L+1}$  มีค่าเป็น -1 แสดงว่า parity ของ wave function ของสถานะทางนิวเคลียร์เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยที่เงื่อนไขของค่า L จะ เป็นไปตามสมการ

$$|\vec{I}_i - \vec{I}_f| \leq L \leq (I_i + I_f) \quad (5) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $I_i$  และ  $I_f$  เป็นสปินแองกูลาโมเมนต์ของสภาวะทางนิวเคลียร์ในตอนต้น และตอนท้ายของนิวเคลียส



$$|\vec{I}_i| = |\vec{I}_f| \quad ; \quad I_i - I_f = 0$$

$$|\vec{I}_i - \vec{I}_f| \neq 0$$

รูป 2.22 แผนภาพเวกเตอร์ (Vector diagram) แสดงผลต่างของสปิน-แองกูลาโมเมนต์

การเปลี่ยนสภาวะทางนิวเคลียร์จะเป็นแบบ forbidden transition ได้ 3 กรณี คือ

1. เมื่อ  $I_i = I_f = 0$
2.  $I_i = 0$  หรือ  $I_f = 0$  อย่างใดอย่างหนึ่ง แล้วขัดกับสมการ (2.12)
3. การเปลี่ยนสภาวะทางนิวเคลียร์ระหว่างสภาวะทางนิวเคลียร์ 2 สภาวะที่มี  $I = \frac{n}{2}$  เมื่อ  $n = 1, 2, 3, \dots$  ยกเว้นในกรณี  $M_1$

กฎการเลือกของการเปลี่ยนสภาวะทางนิวเคลียร์แบบ isomeric transition แสดงไว้ดังตารางที่ 2.6



ตารางที่ 2.6 (5), (31), (32)

กฎการเลือกในการเปลี่ยนแปลงแบบ Isomeric transition

		$\Delta I = 0$			$\Delta I = 1$			$\Delta I = 2$		
parity change	yes	$E_1$	$M_2$	$E_3 \dots$	$E_1$	$M_2$	$E_3 \dots$	$M_2$	$E_3$	$M_4 \dots$
	no ( $E_0$ )	$M_1$	$E_2$	$M_3 \dots$	$M_1$	$E_2$	$M_3 \dots$	$E_2$	$M_3$	$E_4 \dots$
forbidden transition		$0 \rightarrow 0$	$0 \rightarrow 0$	$0 \rightarrow 0 \dots$	$0 \nrightarrow 1$	$0 \nrightarrow 1 \dots$	$0 \nrightarrow 1 \dots$	$0 \nrightarrow 2$	$0 \nrightarrow 2 \dots$	$0 \nrightarrow 2 \dots$
			$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2} \dots$		$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{3}{2} \dots$	$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{3}{2} \dots$		$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{3}{2} \dots$	$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{3}{2} \dots$
				$1 \rightarrow 1 \dots$						
		$\Delta I = 3$			$\Delta I = 4$			$\Delta I = 5$		
parity change	yes	$E_3$	$M_4$	$E_5 \dots$	$M_4$	$E_5$	$M_6 \dots$	$E_5$	$M_6$	$E_7 \dots$
	no	$M_3$	$E_4$	$M_5 \dots$	$E_4$	$M_5$	$E_6 \dots$	$M_5$	$E_6$	$M_7 \dots$
forbidden transition			$0 \nrightarrow 3$	$0 \nrightarrow 3 \dots$	$0 \nrightarrow 4$	$0 \nrightarrow 4 \dots$	$0 \nrightarrow 4 \dots$	$0 \nrightarrow 5$	$0 \nrightarrow 5 \dots$	$0 \nrightarrow 5 \dots$
				$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{7}{2} \dots$		$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{9}{2} \dots$	$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{9}{2} \dots$		$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{11}{2} \dots$	$\frac{1}{2} \nrightarrow \frac{11}{2} \dots$

$E_0$  จะเกิดกับ Internal conversion เท่านั้น