บทที่ 2

ทฤษฎี

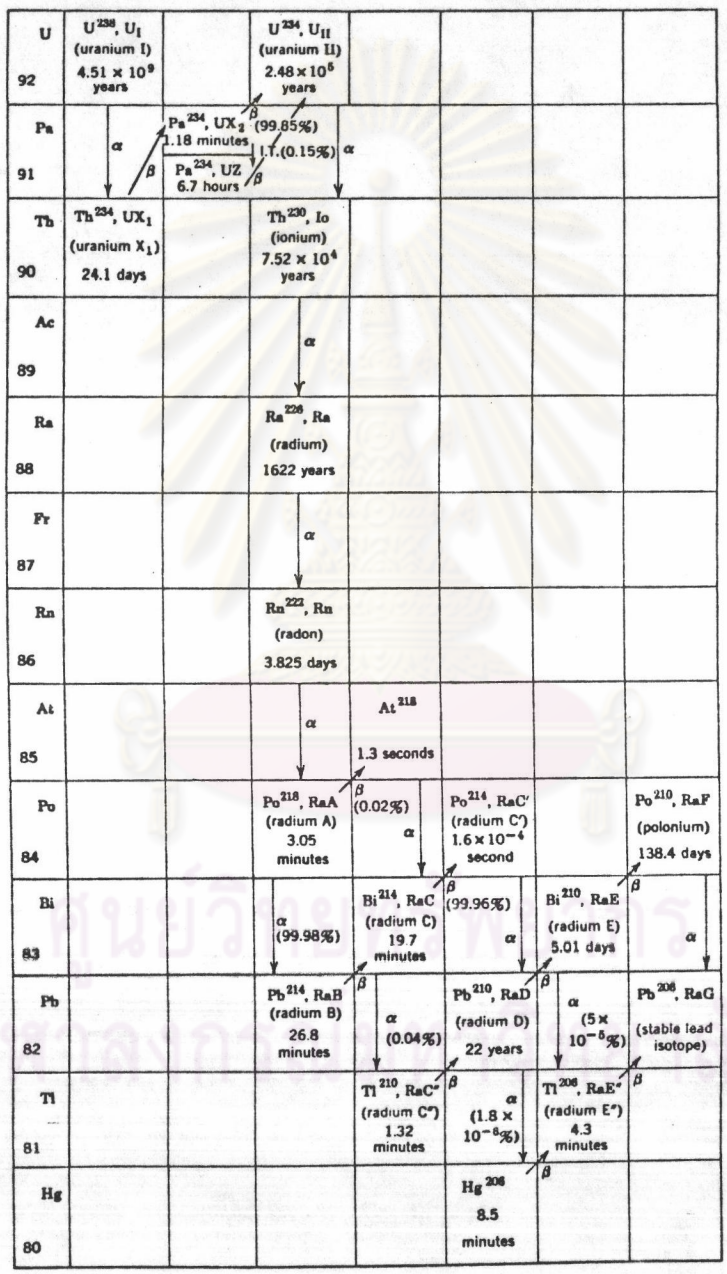
ในธรรมชาตินั้นประกอบด้วยธาตุต่างๆมากมาย ธาตุที่มีเลขอะตอม (atomic number)สูงกว่า 93 ขึ้นไป ล้วนแต่เป็นนิวไคลด์ของสารกัมมันตรังสีทั้งสิ้น ซึ่งมีการจัดจำพวกของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติไว้เป็น 3 พวกด้วยกัน ซึ่งแต่ละพวกจะมีลักษณะการสลายตัวเฉพาะและเป็นการสลายตัวต่อเนื่องกันไป อนุกรมทั้ง 3 ได้แก่ อนุกรมยูเรเนียม อนุกรมแอคทิเนียม อนุกรมทอเรียม

2.1 อนุกรมยูเรเนียม (uranium series)

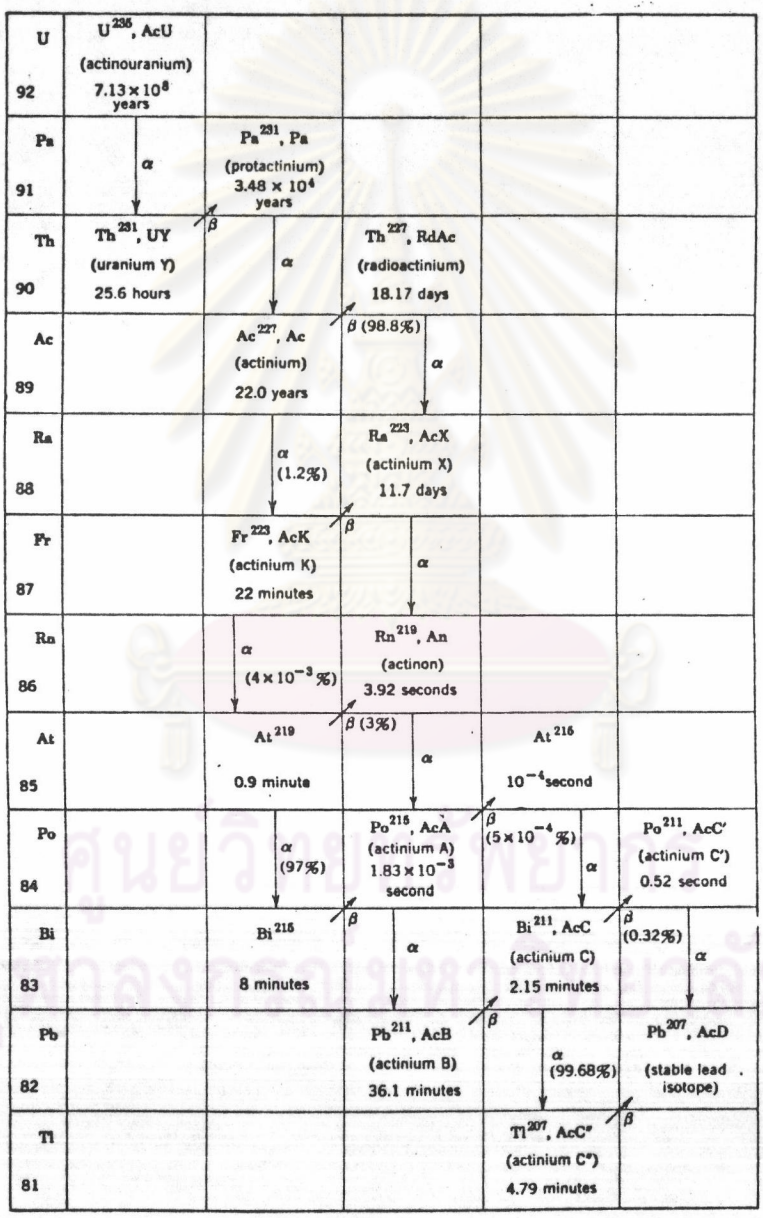
เป็นอนุกรมที่มีเลขมวลเป็น 4n+2 ซึ่ง n เป็นจำนวนเต็มบวก อนุกรมนี้จะเริ่มต้นจากยูเรเนียม-238 ซึ่งมีครึ่งชีวิต 4.50 x 10^{9} ปี สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา และอนุกรม นี้จะไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-206(^{206}Pb) ซึ่งเสถียร อนุกรมการสลายตัวของธาตุในอนุกรมนี้แสดง ดังรูปที่ 2.1

2.2 อนุกรมแอคทิเนียม (actinium series)

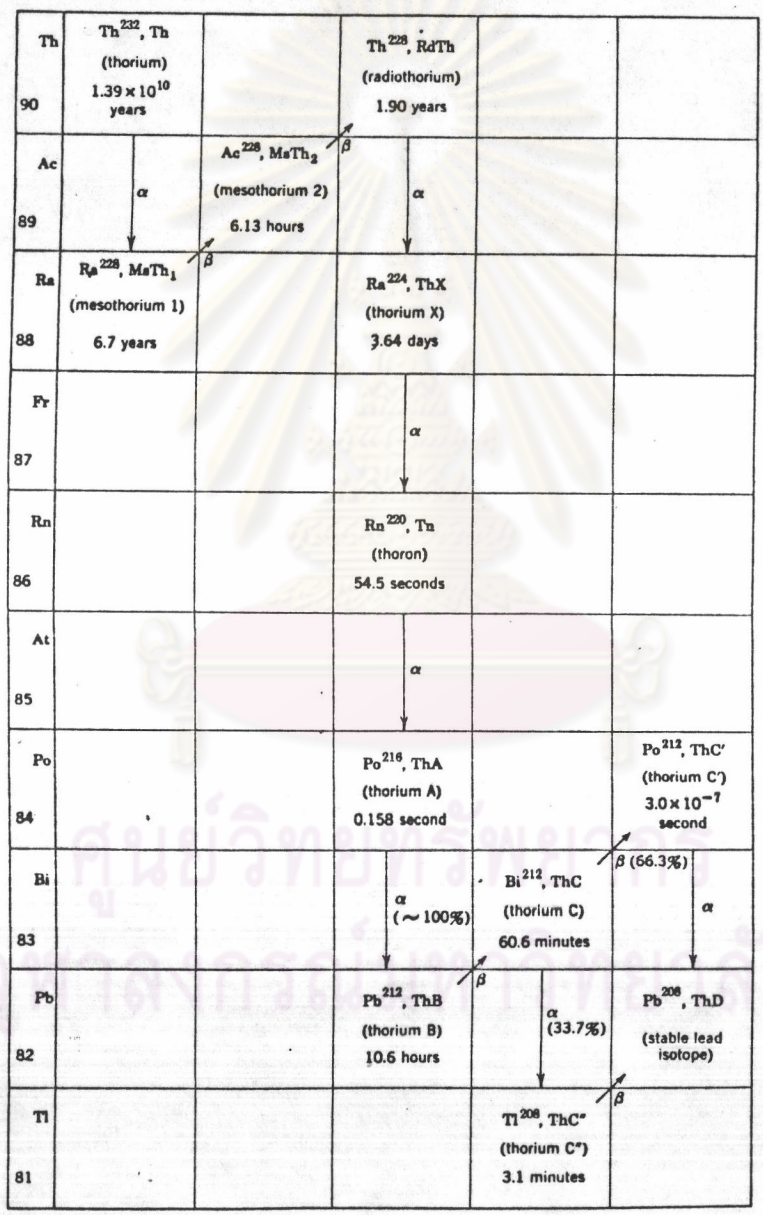
อนุกรมนี้บางทีก็เรียกว่าอนุกรมแอคทิโน-ยูเรเนียม มียูเรเนียม-235เป็นตัวเริ่มต้นของอนุกรม มีครึ่งชีวิต 7.10 x 10^{8} ปี สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา อนุกรมนี้จะไปสิ้นสุดที่ตะกั่ว-207 (^{207}Pb) ซึ่งเสถียร อนุกรมนี้มีเลขมวลเป็น 4n+3 อนุกรมการสลายตัวของธาตุในอนุกรมนี้แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 อนุกรมยูเรเนียม



รูปที่ 2.2 อนุกรมแอคทิเนียม



รูปที่ 2.3 อนุกรมทอเรียม

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 อนุกรมทอเรียม (thorium series)

อนุกรมนี้เป็นอนุกรมที่มีเลขมวลเป็น 4n มีธอเรียม-232(^{232}Th) เป็นตัวตั้งต้นของอนุกรม มีครึ่งชีวิต 1.39×10^{10} ปี สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา สำหรับอนุกรมนี้มีตะกั่ว-208 (^{208}Pb) เป็นธาตุตัวสุดท้ายของอนุกรม การสลายตัวของอนุกรมนี้แสดงดังรูปที่ 2.3

นิวไคลด์ของสารกัมมันตรังสีบางนิวไคลด์จะมีการสลายตัวเฉพาะของมันเอง เช่น อาจจะสลายตัวให้ทั้ง อนุภาคอัลฟาและอนุภาคเบตา และทำให้เกิดธาตุใหม่ที่มีคุณสมบัติต่างกันออกไป

2.4 การสลายตัวอย่างต่อเนื่องของสารกัมมันตรังสี

การสลายตัวอย่างต่อเนื่องของสารกัมมันตรังสีเป็นการสลายตัวต่อๆกันไป จากนิวเคลียส A สลายตัวเป็นนิวเคลียส B นิวเคลียส B สลายตัวเป็นนิวเคลียส C และนิวเคลียส C สลายตัวเป็นนิวเคลียส D เป็นเช่นนี้เรื่อยไปสุดท้ายจะได้นิวเคลียสที่เสถียรไม่สลายตัวต่อไปอีก

ในที่นี้จะพิจารณาการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง 2 ครั้ง จาก A เป็น B จาก B เป็น C โดย C เป็นนิวเคลียสที่เสถียร ดังรูปที่ 2.4

$$A \xrightarrow{\lambda_a} B \xrightarrow{\lambda_b} C$$

รูปที่ 2.4 แสดงการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

λ_a , λ_b เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวของนิวเคลียส A , B ตามลำดับ

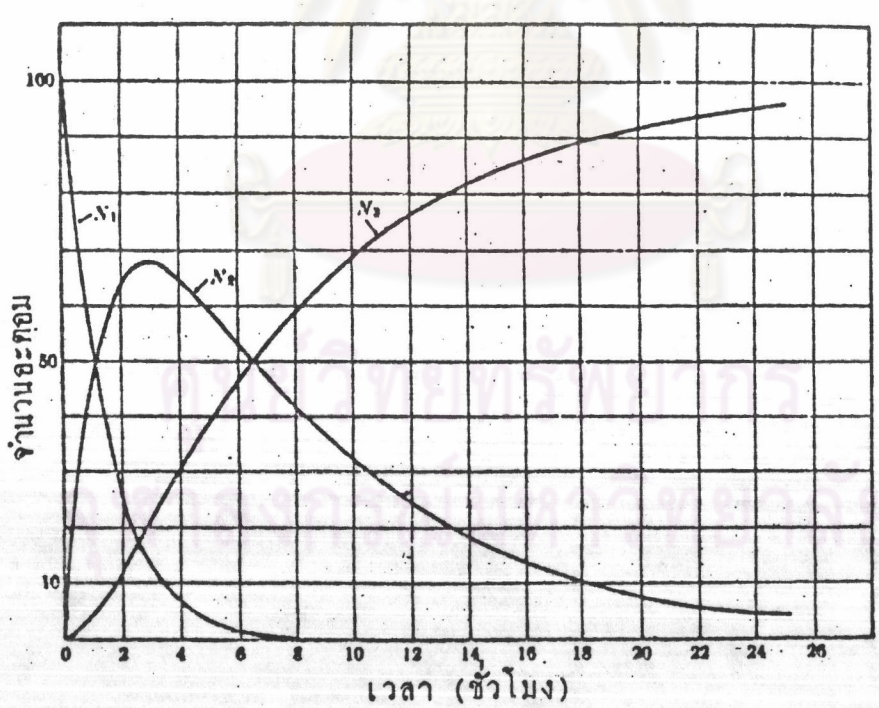
เมื่อเวลาเริ่มต้น(t=0) A มีจำนวนนิวเคลียสเป็น N_0 และยังไม่เกิดนิวเคลียส B และ C

เมื่อเวลาผ่านไป(t=t) A จะมีจำนวนนิวเคลียสเป็น N_a B จะมีจำนวนนิวเคลียสเป็น N_b C จะมีจำนวนนิวเคลียสเป็น N_c ซึ่งจะหาค่าของ N_a, N_b, N_c ได้ดังสมการ

$$N_a = N_o EXP(-\lambda_a t) \quad \text{.....(2.1)}$$

$$N_b = \lambda_a N_o [EXP(-\lambda_a t) - EXP(-\lambda_b t)]/(\lambda_b - \lambda_a) \quad \text{....(2.2)}$$

$$N_c = -N_o [1+\lambda_a (EXP(-\lambda_b t) - EXP(-\lambda_a t))/(\lambda_b - \lambda_a)] \quad \text{.(2.3)}$$



รูปที่ 2.5 แสดงการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

2.5 ภาวะสมดุล

สารกัมมันตรังสีซึ่งสลายตัวอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งอาจเกิดภาวะสมดุลขึ้นได้ซึ่งภาวะสมดุลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

2.5.1 ภาวะสมดุลทรานเซียนท์ (Transient equilibrium)

ภาวะสมดุลทรานเซียนท์ เกิดขึ้นเมื่อครึ่งชีวิตของธาตุ A $[(t_{1/2})_A]$ มากกว่าครึ่งชีวิตของธาตุ B $[(t_{1/2})_B]$ มาก นั่นคือค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร B มากกว่าค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร A มาก

เมื่อ $T_{1/2(A)} > T_{1/2(B)}$

ดังนั้น $\lambda_a < \lambda_b$

จาก $N_b = \lambda_a N_o [EXP(-\lambda_a t) - EXP(-\lambda_b t)]/(\lambda_b - \lambda_a)$

เมื่อ t มากค่า $EXP(-\lambda_b t) < EXP(-\lambda_a t)$ จนสามารถตัดทิ้งได้

ดังนั้น

$$N_b = \lambda_a N_o [EXP(-\lambda_a t)]/(\lambda_b - \lambda_a)$$

$$N_b = \lambda_a N_a/(\lambda_b - \lambda_a)$$

เอา λ_b คูณตลอด

$$\lambda_b N_b = \lambda_b \lambda_a N_a/(\lambda_b - \lambda_a)$$

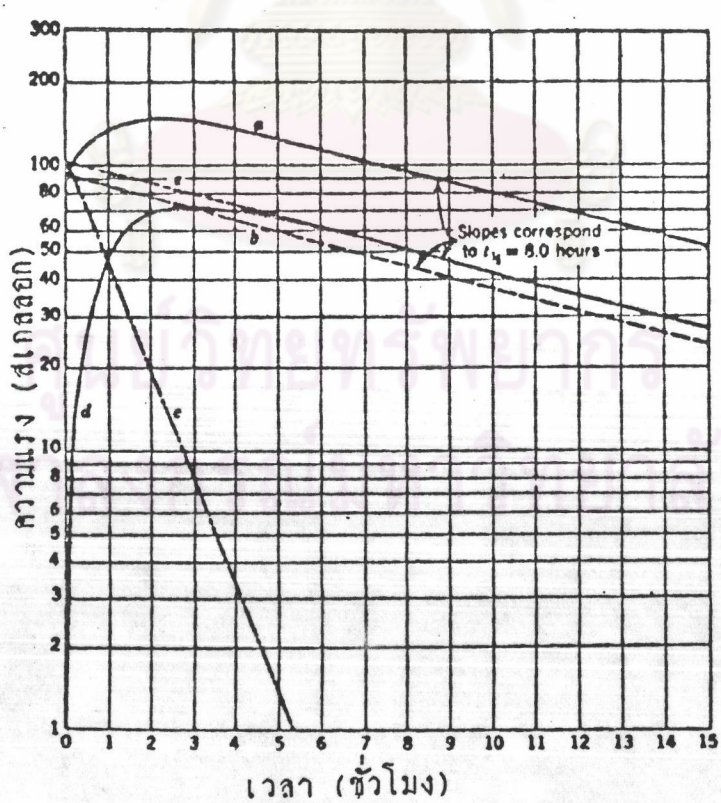
$$A_b = \lambda_b A_a/(\lambda_b - \lambda_a)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$A_a/A_b = 1 - \lambda_a/\lambda_b \quad \text{.....(2.4)}$$

เมื่อ A_a และ A_b คือกัมมันตภาพรังสีของ A และ B ตามลำดับ

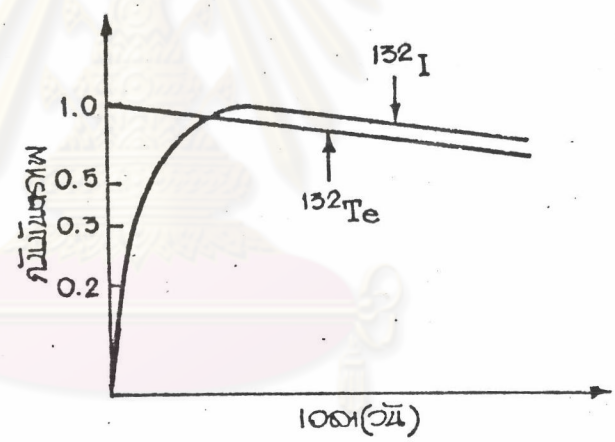
เนื่องจาก $\lambda_a < \lambda_b$ ดังนั้นเมื่อเกิดภาวะสมดุลทรานเซียนท์ขึ้น อัตราส่วนระหว่างกัมมันตภาพรังสีของสาร A กับสาร B จะน้อยกว่า 1เสมอ แต่มีค่าใกล้เคียงกัน ในภาวะนี้สาร B จะสลายตัวเหมือนกับว่ามีครึ่งชีวิตเท่ากับครึ่งชีวิตของสาร A เพราะว่า $A_a : A_b$ จะต้องเท่ากับ $1 - \lambda_a/\lambda_b$ เสมอ สาร B เกิดจากสาร A ตลอดเวลา จำนวนที่ลดลงจึงไม่เท่ากับเมื่อแยกสาร B ออกมาอย่างเดียวแล้วปล่อยให้สลายตัวไป



รูปที่ 2.6 การเกิดสมดุลทรานเซียนท์

จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง อัตราส่วนของ A และ B จะมีค่าคงที่เรียกช่วงเวลานี้ว่า สารทั้งสองเกิดภาวะสมดุลทรานเซียนท์

ตัวอย่างการสลายแบบนี้เช่น เทลลูเลียม-132 (^{132}Te) มีครึ่งชีวิต7.8 ชั่วโมง สลายตัวเป็นไอโอดีน-132(^{132}I) มีครึ่งชีวิต 2.3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สมดุลทรานเซียนท์ระหว่างเทลลูเลียม-132(^{132}Te) กับไอโอดีน-132(^{132}I)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.2 ภาวะสมดุลเชคิวลาร์ (Secular equilibrium)

ภาวะสมดุลเชคิวลาร์ เกิดขึ้นเมื่อครึ่งชีวิตของธาตุ A $[(t_{1/2})_A]$ มากกว่าครึ่งชีวิตของธาตุ B $[(t_{1/2})_B]$ มากมาก ดังนั้นค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร B มากกว่าค่าคงที่ของการสลายตัวของสาร A มากๆ

เมื่อ $T_{1/2(A)} >> T_{1/2(B)}$

ดังนั้น $\lambda_a << \lambda_b$

จะได้ $\lambda_b - \lambda_a = \lambda_b$

และ $EXP(-\lambda_b t) < EXP(-\lambda_a t)$ จนสามารถตัดทิ้งได้

จาก $N_b = \lambda_a N_o (EXP(-\lambda_a t) - EXP(-\lambda_b t))/(\lambda_b - \lambda_a)$

ดังนั้น

$$N_b = \lambda_a N_o (EXP(-\lambda_a t)/\lambda_b$$

$$N_b = \lambda_a N_a / \lambda_b$$

เอา L_b คูณตลอด

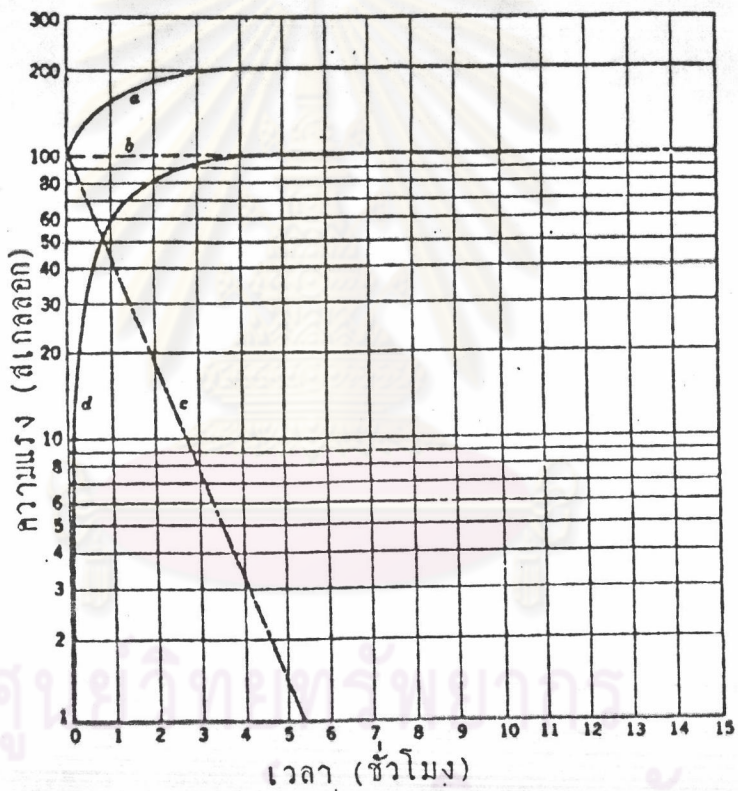
$$\lambda_b N_b = \lambda_a N_a$$

$$A_a = A_b \quad \text{.....(2.5)}$$

เมื่อเกิดภาวะสมดุลเชคิวลาร์ กัมมันตภาพรังสีของสาร A จะเท่ากับกัมมันตภาพรังสีของสาร B ในช่วงนี้เหมือนกับว่าสาร B สลายตัวโดยมีครึ่งชีวิตเท่ากับสาร A ดังรูปที่ 2.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

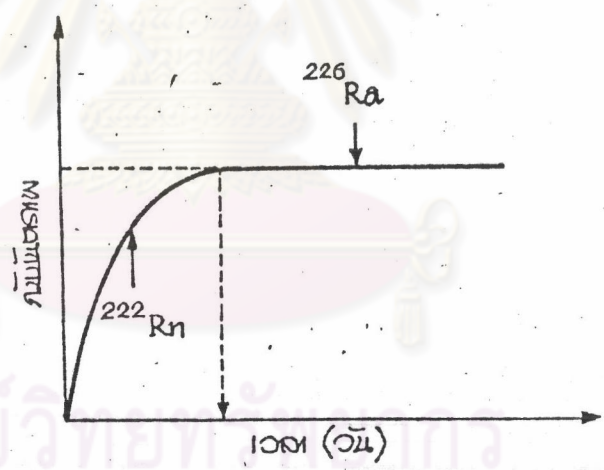
016536



รูปที่ 2.8 ภาวะสมดุลเซคิวลาร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างของการสลายตัวแบบสมดุลเชคิวลาร์ได้แก่เรเดียม-226 (^{226}Ra)มีครึ่งชีวิต 1620 ปี สลายตัวให้เรดอน-222(^{222}Rn)มีครึ่งชีวิต 3.8 วัน เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน จะเกิดภาวะสมดุลเชคิวลาร์ขึ้น และในช่วงนี้กัมมันตภาพรังสีของเรเดียม-226 เท่ากับ กัมมันตภาพรังสีของเรดอน-222ตลอด ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาวะสมดุลเชคิวลาร์ระหว่างเรเดียม-226กับของเรดอน-222

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6 สมการการสลายตัวอย่างต่อเนื่อง

ถ้าสารกัมมันตรังสีมีการสลาย n ครั้ง

$$A \xrightarrow{\lambda_a} B \xrightarrow{\lambda_b} C \xrightarrow{\lambda_c} \cdots \xrightarrow{\lambda_n} \text{stable}$$

เมื่อเวลาเริ่มต้น($t=0$), $N_a = N_o$, $N_b = N_c = \cdots\cdots = N_n = 0$

$$dN_a/dt = \lambda_a N_a \qquad \text{.....(2.6)}$$

$$dN_b/dt = \lambda_a N_a - \lambda_b N_b \qquad \text{.....(2.7)}$$

$$dN_c/dt = \lambda_b N_b - \lambda_c N_c \qquad \text{.....(2.8)}$$

$$dN_d/dt = \lambda_c N_c - \lambda_d N_d \qquad \text{.....(2.9)}$$

$$dN_n/dt = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \qquad \text{..(2.10)}$$

จาก (2.6) จะได้

$$N_a = N_o(\text{EXP}(-\lambda_a t) \qquad \text{.....(2.11)}$$

จาก (2.7) จะได้

$$N_b = \lambda_a N_o(\text{EXP}(-\lambda_a t) - \text{EXP}(-\lambda_b t))/(\lambda_b - \lambda_a) \text{...(2.12)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จาก (2.8) จะได้

$$N_c = \lambda_a\lambda_b N_o(EXP(-\lambda_b t)/(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_b)$$

$$+ \lambda_a\lambda_b N_o(EXP(-\lambda_a t)/(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a)$$

$$+ \lambda_a\lambda_b N_o(EXP(-\lambda_c t)/(\lambda_a - \lambda_c)(\lambda_b - \lambda_c) \quad ....(2.13)$$

และในทำนองเดียวกัน

$$N_n(t) = C_1(EXP(-\lambda_a t)+C_2(EXP(-\lambda_b t)+C_3(EXP(-\lambda_c t)+.....+C_n(EXP(-\lambda_n t) ..(2.1$$

เมื่อ

$$C_1 = \frac{\lambda_a\lambda_b\lambda_a.....\lambda_b \quad N_o}{(\lambda_b - \lambda_a)(\lambda_c - \lambda_a).....(\lambda_n - \lambda_a)}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_a\lambda_b\lambda_a.....\lambda_b \quad N_o}{(\lambda_a - \lambda_b)(\lambda_c - \lambda_a).....(\lambda_n - \lambda_b)}$$

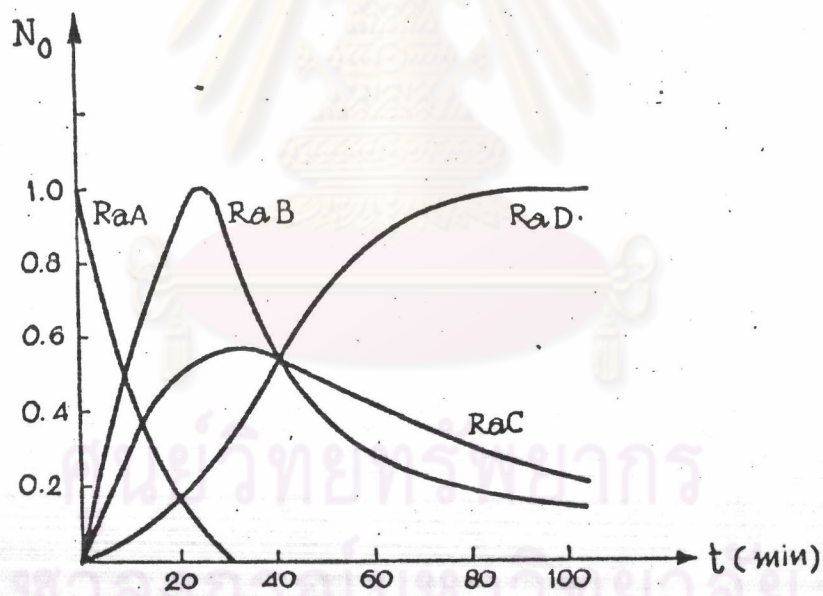
$$C_n = \frac{\lambda_a\lambda_b\lambda_a.....\lambda_b \quad N_o}{(\lambda_a - \lambda_n)(\lambda_b - \lambda_n).....(\lambda_{n-1} - \lambda_n)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการสลายตัว

RaA ——— RaB ——— RaC ——— RaD ถือว่า stable

(^{218}Po) (^{214}Pb) (^{214}Bi) (^{210}Pb)



รูปที่ 2.10 แสดงการสลายตัวของเรเดียม-226

2.7 หลักการทำงานของเครื่องวัดแกมมาสเปคโตรมิเตอร์

เครื่องมือวัดแกมมาสเปคโตรมิเตอร์หัววัดรังสีซึ่งในการทดลองนี้ใช้ หัววัดเรืองแสงแบบ NaI(Tl) และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง(multichannel analyzer)

เมื่อรังสีมาตกกระทบผลึกโซเดียมไอโอไดด์ จะก่อให้เกิดอันตรกิริยา (interaction) 3 อย่างได้แก่ อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริก (photoelectric effect) อันตรกิริยาแบบคอมป์ตัน (compton scattering) อันตรกิริยาแบบให้อิเล็กตรอนคู่(pair production)

2.7.1 อันตรกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริก เมื่อโฟตอนพลังงานต่ำวิ่งชนอะตอมจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาซึ่งเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน ซึ่งมีพลังงานเท่ากับพลังงานของโฟตอนลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจรนั้น เมื่ออิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจรอิเล็กตรอนในวงโคจรอื่นก็จะเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ขึ้นเรียกว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) ซึ่งมีพลังงานต่ำเมื่อเทียบกับพลังงานของรังสีแกมมาที่ผ่านเข้ามา

2.7.2 อันตรกิริยาแบบคอมป์ตัน เมื่อโฟตอนเข้าชนอะตอมของสารจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร โฟตอนจะเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรและโฟตอนใหม่จะมีพลังงานต่ำ มีความยาวคลื่นยาวขึ้น และทิศทางการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไปจากเดิม

2.7.3 อันตรกิริยาแบบให้อิเล็กตรอนคู่ เมื่อรังสีแกมมาวิ่งเข้ามาในสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอกของนิวเคลียส รังสีแกมมาจะหายไปโดยใช้พลังงานในการสร้างโพซิตรอนและอิเล็กตรอนขึ้นมาคู่หนึ่ง เมื่อโพซิตรอนและอิเล็กตรอนวิ่งไปจะสูญเสียพลังงานไป และในที่สุดเมื่อพบกับอิเล็กตรอนก็จะรวมตัวกันเกิดเป็นโฟตอน 2 โฟตอนซึ่งเรียกว่า "annihilation radiation" ซึ่งแต่ละตัวจะมีพลังงาน 0.511 MeV และวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน ปรากฏการณ์แบบนี้จะเกิดเมื่อรังสีแกมมามีพลังงาน

มากกว่า 1.02 MeV

เมื่ออิเล็กตรอนที่เกิดจากปรากฏการณ์ทั้ง 3 แบบ ผ่านเข้ามาในหลอดทวีคูณแสง (photomultiplier tube) จะเกิดการชนกับไดโนดทำให้เกิดอิเล็กตรอนมากมาย และสุดท้ายจะได้อิเล็กตรอนออกมา 10^6 ถึง 10^7 เท่า และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมารวมกันที่แอโนด และนำเข้าสู่วงจรนับสัญญาณต่อไป[6]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย