

บทที่ 2

ทฤษฎี



2.1 แหล่งกำเนิดของกัมมันตภาพรังสี

ถ้าแบ่งแหล่งกำเนิดของกัมมันตภาพรังสีที่มีอยู่ในบรรยากาศออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ เรา
ก็สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.1.1 แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติของกัมมันตภาพรังสี กัมมันตภาพรังสีในอากาศส่วนมากที่
มนุษย์ได้รับมาจากสารกัมมันตรังสีใน 2 อนุกรม คือ uranium series (เริ่มมาจาก U-238)
และ thorium series (เริ่มมาจาก Th-232) สารกัมมันตรังสีต่าง ๆ ที่อยู่ในอนุกรม
เหล่านี้พร้อมทั้งคุณสมบัติได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-1 และ 2-2

ก. อนุกรมยูเรเนียม สารกัมมันตรังสียูเรเนียมพบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ ประกอบด้วย 3 ไอโซโทป ได้แก่ U-234, U-235 และ U-238 ซึ่งเป็นต้นตระกูลของอนุกรม
ยูเรเนียมมีอยู่ประมาณ 99.28 % ส่วน U-234 และ U-235 มีอยู่ประมาณ 0.0058 % ,
0.71 % ตามลำดับ จากตารางที่ 2-1 และรูปที่ 2.1 เราจะทราบว่า U-234 ซึ่งมี
ครึ่งชีวิตเท่ากับ 2.5×10^5 ปี เมื่อสลายตัวโดยให้รังสีแอลฟาจะกลายเป็น Th-230 ซึ่งมี
ครึ่งชีวิต 80,000 ปี ต่อจากนั้น Th-230 ก็จะสลายตัวไปโดยให้รังสีแอลฟาเป็น Ra-226
ซึ่งมีครึ่งชีวิต 1622 ปี และเราจะพบว่า Ra-226 เป็นไอโซโทปที่สลายตัวให้รังสีแอลฟา
เป็นส่วนมากและกลายเป็น radon-222 ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีที่มีสถานะเป็นก๊าซ จากการ
สลายตัวของก๊าซ radon-222 (ครึ่งชีวิต 3.825 วัน) จะได้รังสีแอลฟาและเบตา หลังจาก
การสลายตัวไป 6 ลำดับคือ ซึ่งไอโซโทปต่าง ๆ ในช่วงนี้จะมีครึ่งชีวิตอยู่ระหว่าง 1.5×10^{-4}
วินาที ถึง 26.8 นาที (ดูรูปที่ 2.1) แล้วก็จะได้อิโซโทป lead-210 (RaD) มีครึ่งชีวิต
22 ปี แม้รังสีเบตา มีผลต่อปริมาณกัมมันตภาพรังสีในบรรยากาศ

ข. อนุกรมธอเรียม Th-232 (1.39×10^{10} ปี , α 3.98, γ 0.005) เป็นต้นตระกูลของอนุกรมธอเรียมเมื่อแผ่รังสีแอลฟาจะกลายเป็น Ra-228 (MsThI) ต่อจากนั้นจะมีการสลายตัวไปอีก 3 ขั้นตอน (ดูรูป 2.2) ก็จะได้สารกัมมันตรังสี Ra-224 (ThX) ซึ่งมีครึ่งชีวิต 3.64 วัน และเมื่อ Ra-224 แผ่รังสีแอลฟาก็จะได้ Rn-220 (ครึ่งชีวิต 54.5วินาที) ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีที่มีสถานะเป็นก๊าซ

ค. เรดอนและโธรอนพร้อมทั้งสารกัมมันตรังสีที่ได้จากการสลายตัวของก๊าซทั้งสอง

เมื่อ radium-226 แผ่รังสีแอลฟาจะเปลี่ยนไปเป็น radon-222 ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซเฉื่อย (ครึ่งชีวิตเท่ากับ 3.825 วัน) ในลักษณะเดียวกัน radium-224 (thorium X) ก็จะไปเปลี่ยนไปเป็น radon-220 หรือที่มีชื่อเรียกกันโดยทั่วไปว่าก๊าซโธรอน (thoron) ก๊าซทั้งสองนี้จะฟุ้งกระจายไปในบรรยากาศ แต่ก๊าซเรดอนจะมีอยู่ในบรรยากาศมากกว่าก๊าซโธรอน เพราะว่าก๊าซเรดอนมีครึ่งชีวิตถึง 3.825 วัน ส่วนก๊าซโธรอนมีครึ่งชีวิตเพียง 54.5 วินาที ปริมาณของก๊าซทั้งสองที่อยู่ในบรรยากาศนั้นจะมากหรือน้อยยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น สภาพภูมิประเทศและทางด้านอุตุนิยม การที่ก๊าซทั้งสองมีผลต่อปริมาณกัมมันตภาพรังสีในบรรยากาศก็ เพราะว่าเมื่อมันสลายตัวก็จะทำให้ตัวมันเองมีอำนาจไฟฟ้าสถิต ซึ่งจะไปติดกับฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศ เมื่อก๊าซเรดอนสลายตัวไปกลายเป็น Pb-210 ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น และให้กัมมันตภาพรังสีประเภทอายุยาว ในอนุกรมธอเรียมหลังจากการสลายของก๊าซโธรอน (Rn-220) ไปเป็น daughter ในขั้นต่าง ๆ จะมีครึ่งชีวิตสั้น ๆ ทั้งสิ้น จนกระทั่งเสถียร ฉะนั้นจึงไม่มีผลต่อปริมาณกัมมันตภาพรังสีประเภทอายุยาวในบรรยากาศ

2.1.2 แหล่งกำเนิดกัมมันตภาพรังสีอีกประเภทหนึ่งคือ แหล่งกำเนิดซึ่งมาจากการใช้สารกัมมันตรังสี เช่น การทำเหมืองยูเรเนียมเพื่อนำมาทำเชื้อเพลิง , เตาปฏิกรณ์ปรมาณู , ระเบิดนิวเคลียร์ , การแพทย์และการทดลองทางด้านวิทยาศาสตร์ทั่วไป รวมทั้งการขจัดกาก ซึ่งมีผลทำให้เกิดกัมมันตภาพรังสีในบรรยากาศได้ แต่การทดลองระเบิดนิวเคลียร์ในอากาศเป็น

ส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดกัมมันตภาพรังสีในบรรยากาศได้มาก การทดลองระเบิดนิวเคลียร์ในบรรยากาศนั้นจะทำให้เกิด fission product และ fusion product ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า fallout, จากการระเบิดของระเบิดนิวเคลียร์จะได้นิวไคลด์ที่สำคัญซึ่งเป็นพวก long-lived nuclei ได้แก่ strontium-90, strontium-89, cesium-137, plutonium-239 และ C-14 นี้จะมาจากปฏิกิริยา fusion เป็นส่วนมาก ดูตารางที่ 2-4

และยังมีสารกัมมันตภาพรังสีซึ่งเกิดขึ้นในดินและบรรยากาศบริเวณที่มีการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ โดยการทำปฏิกิริยากับ slow-neutron (ดูตารางที่ 2-5 และ 2-6) ได้แก่ H-3, C-14, A-39 และ Na-24, p-32, K-42, Ca-45, Mo-56, Fe-55, Fe-59 ตามลำดับ

ตาราง 2-1 ไอโซโทปของอนุกรมยูเรเนียม

Isotope	Relative isotopic abundance, %	$T_{1/2}$	Radiation	Energy, Mev	% Yield	
U^{238} (U_I)	99.28	4.49×10^9 yr	α	4.18	100	
			γ	0.048	23	
Th^{234} (UX_1)		24.10 day	β^-	0.192	56	
				0.104	44	
			γ	0.090	20	
Pa^{234} (UX_2)		1.175 min	β^- (99+ %)	2.32	80	
				1.50	13	
				0.60	~7	
			γ (0.15%)	0.394	0.15	
U^{234} (U_{II})	0.0058	2.5×10^5 yr	β^-	0.817	4	
			α	4.763	100	
			γ	0.053	26	
				0.093	~5	
Th^{230} (Io)		8.0×10^4 yr	α	0.118	10	
				4.682	~75	
				4.613	~25	
				4.51(?)	Weak	
			γ	0.068	0.5	
Ra^{226}		1,622 yr	α	0.2	0.3	
				4.777	94.3	
			γ	4.589	5.7	
Rn^{222} Po^{218} (RaA)		3.825 day	α	~0.19	5.7	
			3.05 min	α (99+%)	5.486	100
				β^- (0.03%)	5.998	99+
						0.03
Pb^{214} (RaB)		26.8 min	β^-	0.72	100	
				0.05323	1.6	
				0.24192		
				0.29522		
				0.35199		
(At^{218})		1.5 to 2.0 sec	α (99+%)	6.7	99+	
			β^- (0.1%)		0.1	

* Lowder & Solon (1956).

ตาราง 2-1 ไอโซโทปของอนุกรมยูเรเนียม (ต่อ)

Isotope	Relative isotopic abundance, %	$T_{1/2}$	Radiation	Energy, Mev	% Yield	
Bi^{214} (RaC)		19.7 min	β^- (99+%)	3.17	~23	
				1.65	~77	
				α (0.04%)	5.52	~ 0.01
				5.47	~ 0.02	
				5.33	~ 0.01	
Po^{214} (RaC')		1.637×10^{-4} sec	α	7.683	100	
Tl^{210} (RaC'')		1.5 min	β^-	1.9	100	
Pb^{210} (RaD)		22 yr	β^-	0.018	≤ 90	
				0.056	≥ 10	
				0.0467	> 98	
Bi^{210} (RaE)		5.02 day	β^- (99+%)	1.17	$99+$	
				α (5×10^{-5} %)	5.06 (?)	5×10^{-5}
Po^{210}		138.3 day	α	5.298	~ 100	
				~4.5	$\sim 10^{-3}$	
				γ	0.80	$\sim 10^{-3}$
(Tl^{206})		4.19 min	β^-	1.51	100	
Pb^{206}	23.6	Stable				

* Lowder & Solon (1956).

ตาราง 2-2 ไอโซโทปของอนุกรมธอเรียม

Isotope	Relative isotopic abundance, %	$T_{1/2}$	Radiation	Energy, Mev	% Yield
Th ²³²	100	1.39x10 ¹⁰ yr	α	3.98	100
			γ	~0.055	24
Ra ²²⁸ (MsTh ₁)		6.7 yr	β^-	~0.012 (?)	
			γ	0.053 ~0.03	
Ac ²²⁸ (MsTh ₂)		6.13 hr	β^-	2.18	10
				1.85	9
				1.72	7
				1.15	53
				0.66	8
			γ	0.46	13
				0.063	
				0.146	
				0.186	
				0.338	
Th ²²⁸ (RdTh)		1.90 yr	α	5.423	72
				5.338	28
			γ	0.083	2.1
Ra ²²⁴ (ThX)		3.64 day	α	5.681	95
				5.448	4.6
			γ	5.194 0.241	0.4
Rn ²²⁰ (Tn)		54.5 sec	α	6.282	100
Po ²¹⁶ (ThA)		0.158 sec	α (99+%) β^- (0.014%)	6.774	99+

* Lowder & Solon (1956).

ตาราง 2-2 ไอโซโทปของอนุกรมธอเรียม (ต่อ)

Isotope	Relative isotopic abundance, %	$T_{1/2}$	Radiation	Energy, Mev	% Yield
Pb ²¹² (ThB)		10.6 hr	β^-	0.331	.88
				0.569	.12
			γ	0.115	.2
				0.176	.1
				0.238	.40
				0.249	Weak
				0.300	.4
(At ²¹⁶)	$\sim 3 \times 10^{-4}$ sec		7.79	100	
Bi ²¹² (ThC)		60.5 min	β^- (66.3%)	2.25	66.3
				γ (66.3%)	2.20
			α (33.7%)	1.81	.45
				1.61	.45
				1.34	.33
				1.03	.2
				0.83	.13
				0.72	.13
				6.086	9.2
				6.047	23.6
				5.765	0.6
				5.622	0.5
			5.603	0.37	
			γ (33.7%)	5.481	0.05
				0.040	Strong
				0.144	
				0.164	
0.288					
	0.328				
	0.432				
	0.452				
	0.472				
Po ²¹² (ThC')		3.04×10^{-7} sec	α	10.536	0.017
				10.417	0.002
				9.489	0.004
				8.776	99+

* Lowder & Solon (1956).

ตาราง 2-2 ไอโซโทปของอนุกรมทอเรียม (ต่อ)

Isotope	Relative isotopic abundance, %	$T_{1/2}$	Radiation	Energy, Mev	% Yield
Tl ²⁰⁸ (ThC")		3.1 min	β^- γ	1.792	99+
				2.62	~100
				0.859	~15
				0.582	~80
				0.510	~25
Pb ²⁰⁸	52.3	Stable		0.277	~10

* Lowder & Solon (1956).

ตารางที่ 2-3 ไอโซโทปของสารกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาของรังสีคอสมิกจาก
การวิเคราะห์น้ำฝน

Isotope	$T_{1/2}$	d.p.m.per liter rain	Atoms per cm^3 rain
T	12.3 years	5-100	$50,000-10^6$
Be ⁷	53 days	10-60	2,000-6,000
Be ¹⁰	$<2.7 \times 10^6$ years	In deep-sea sediments	
C ¹⁴	5,570 years	Spec.mod.carbon activity 14.7 ± 9.5 d/m	
Na ²²	<2.6 years	.0.2	.40
P ³²	14.5 days	.1	.40
P ³³	<25 days	.0.5	.30
S ³⁵	<87 days	.2	.400
Cl ³⁹	<55 mo	50	2.5

*H.E. Suess (1958).

ตารางที่ 2-4 ไอโซโทปของสารกัมมันตรังสีที่สำคัญจากระเบิดนิวเคลียร์
(nuclear explosion)

Nuclide	Half-life	Ci/megaton
Pu-239	24,000 yr.	3.6×10^3
Sr - 90	28 yr.	1.0×10^5
Sr - 89	51 days	17×10^6
Cs - 137	27 yr	1.4×10^5
I - 131	8 days	73×10^6
C - 14	5,600 yr.	2.2×10^3

ตารางที่ 2-5 ไอโซโทปของสารกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยานิวตรอนช้าของ
ระเบิดนิวเคลียร์ (nuclear explosion) ในอากาศ

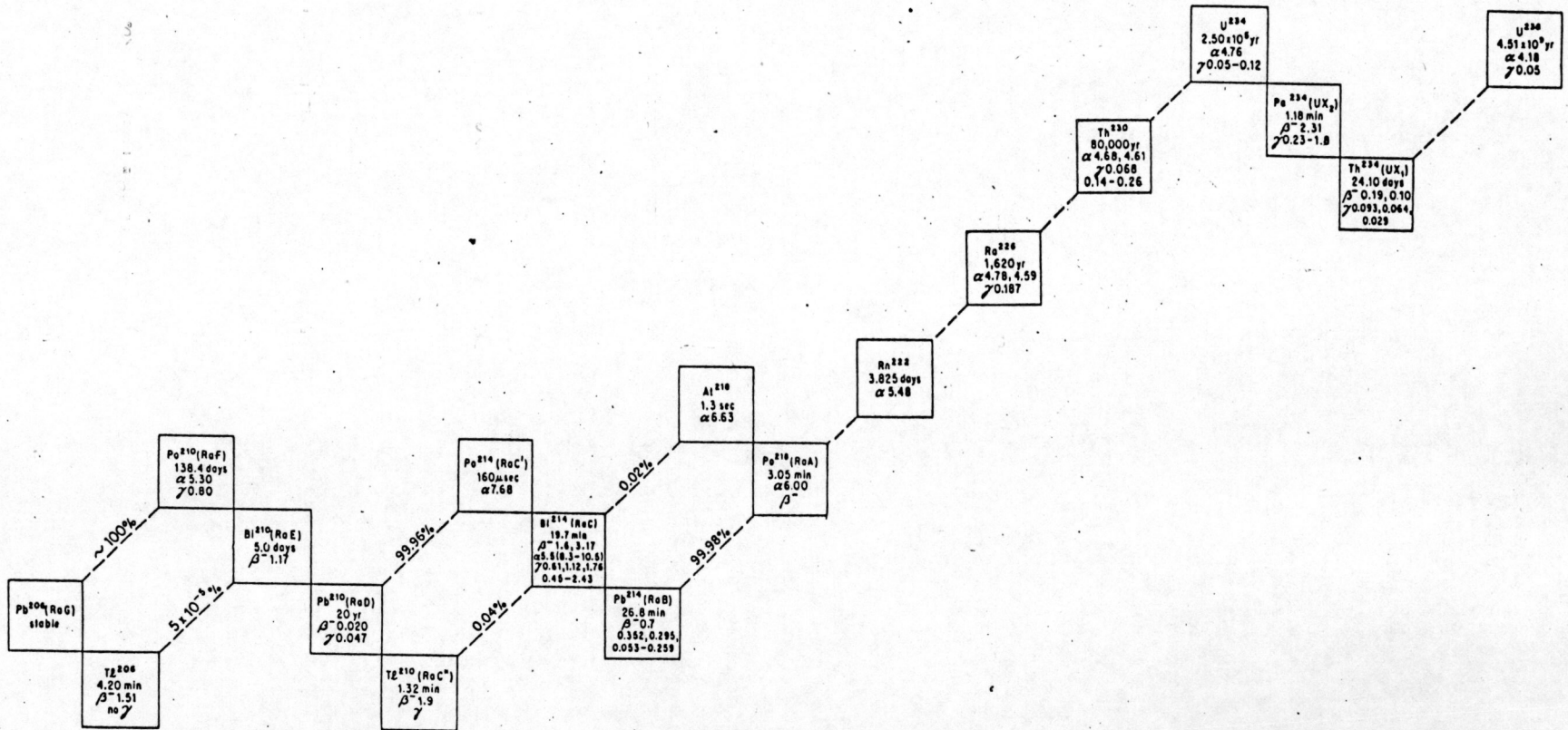
Isotope	Half-life, yr	Ci/megaton
H-3	12.3	<1
C-14	5,600	3.4×10^4
A-39	~260	59

Adopted from Klement (1959)

ตารางที่ 2-6 ไอโซโทปของสารกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาของนิวตรอนช้า
ของระเบิดนิวเคลียร์ในดิน

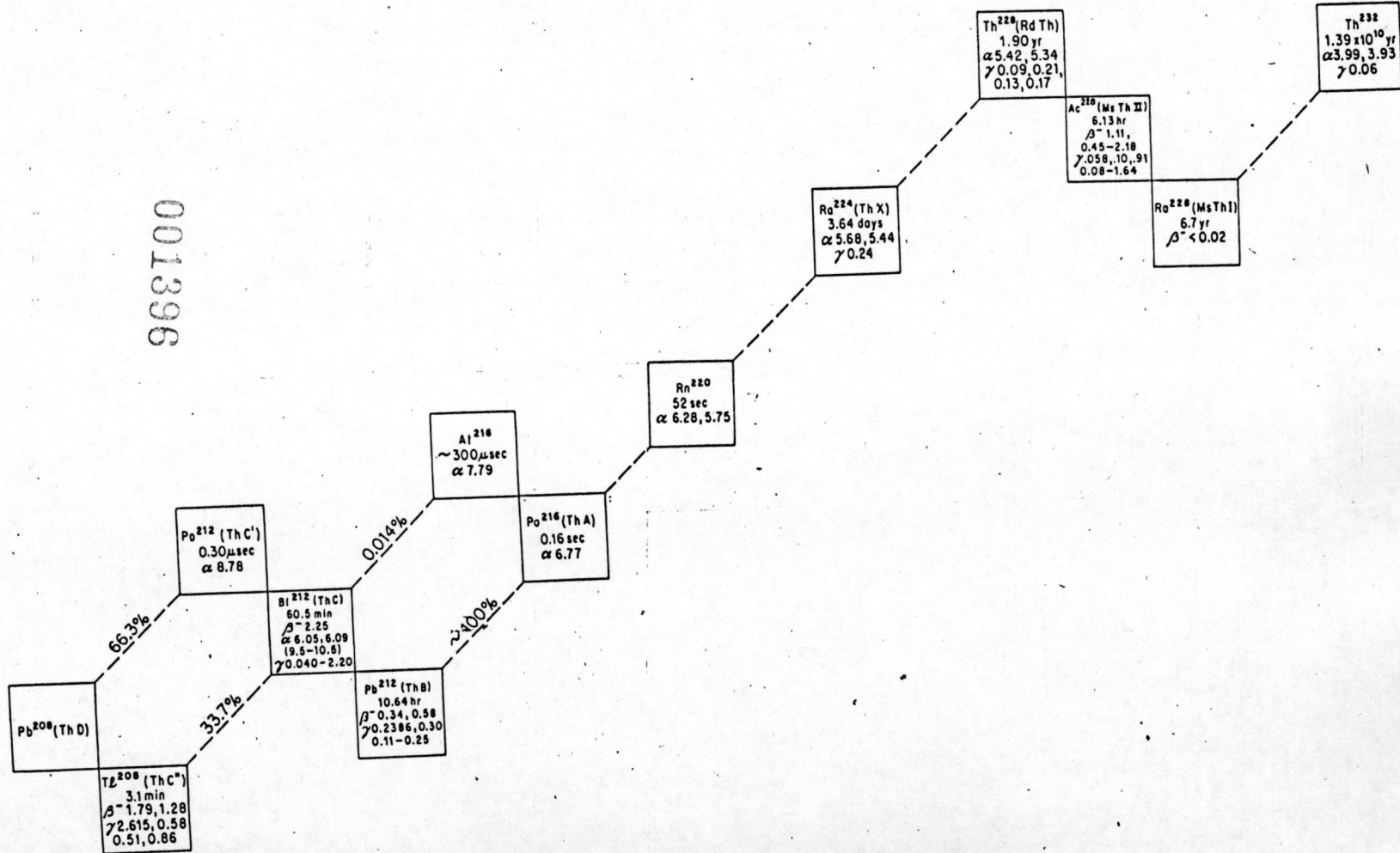
Isotope	Half-life	Ci/megaton
Na-24	15 hr	2.8×10^{11}
P-32	14 days	1.92×10^8
K-42	12 hr	3×10^{10}
Ca-45	152 days	4.7×10^7
Mo-56	2.6 hr	3.4×10^{11}
Fe-55	2.9 yr	1.7×10^7
Fe-59	46 days	2.2×10^6

Adopted from Klement (1959).



รูปที่ 2.1 แผนภาพการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม (จาก Eisenbud, Merrill. Environmental Radioactivity หน้า 146, 147)

001396



รูปที่ 2-2 แผนภาพการสลายตัวของอนุกรมธอเรียม (จาก Eisenbud, Merril. Environmental Radioactivity หน้า 150, 151)

2.2 ทฤษฎีเบื้องต้น ตามธรรมชาติโดยทั่วไปอะตอมของธาตุต่าง ๆ จะมีสถานะทางไฟฟ้าเป็นกลาง จากคุณสมบัติของ สารกัมมันตรังสีจะต้องมีการแผ่รังสีเพื่อให้นิวเคลียสอยู่ในภาวะเสถียร (stable) การแผ่รังสีแอลฟาและรังสีเบตาของสารกัมมันตรังสีนี้ทำให้อะตอมของสารเหล่านี้แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจะดูกับฝุ่นละอองหรือสารอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้ในบรรยากาศ ทำให้สามารถกักเก็บได้โดยการดูดอากาศผ่านกระดาษกรองและนำมาวัดหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีได้

2.3 กฎการสลายตัว

จากการศึกษาของ Rutherford และ Soddy เกี่ยวกับธาตุกัมมันตรังสีจะพบว่า เมื่อปล่อยทิ้งไว้กัมมันตภาพ (activity) จะลดลงเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันจะมีธาตุใหม่เกิดขึ้น ธาตุที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นธาตุกัมมันตรังสีก็ได้ กล่าวคือ กัมมันตภาพนี้สามารถแสดงในรูปของสมการที่เป็นฟังก์ชันของเวลา หรือถ้านำกัมมันตภาพ และเวลา มาเขียนกราฟจะได้กราฟรูป exponential เสมอ

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad 2.1$$

เมื่อ A_0 คือ กัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสีเมื่อเริ่มต้น ($t = 0$)

A_t คือ กัมมันตภาพของธาตุกัมมันตรังสีเมื่อเวลา t

λ คือ ค่าคงตัวของ การสลายตัว ซึ่งเป็นค่าทางสถิติที่มีความน่าจะเป็น (probability) อยู่มากในค่านี้

สำหรับการเกิดธาตุใหม่หลังจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีเดิมนั้น เมื่อนำมาเขียนกราฟแล้วสามารถที่จะแสดงในรูปของสมการ

$$A_t = A_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad 2.2$$

จากการศึกษาและทดลองบุคคลทั้งสอง ได้สร้างทฤษฎีเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของธาตุกัมมันตรังสี คือ อะตอมของธาตุกัมมันตรังสีจะสลายตัวอยู่ตลอดเวลา โดยการส่งอนุภาคแอลฟาหรือเบตา แล้วก็จะได้อะตอมของธาตุใหม่ ดังนั้น กัมมันตภาพจึงเป็นสัดส่วนกับจำนวนอะตอมที่สลายได้ใน 1 หน่วยเวลา ดังนั้นกัมมันตภาพ A ก็ย่อมขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอม N คือ $A = \lambda N$ จากสมการ 2.1 เราจะได้

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad 2.3$$

ซึ่งเป็นสมการที่หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอะตอมกับเวลา เมื่อ differentiate ทั้งสองข้างของสมการ 2.3 จะได้ว่า

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N \quad 2.4$$

เครื่องหมายลบ หมายความว่า จำนวนอะตอมจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อเวลาผ่านไป

สำหรับค่าครึ่งชีวิต (half life = $t_{1/2}$) นั้น หมายถึง ระยะเวลาที่อะตอมของสารกัมมันตรังสีใช้ในการสลายจนมีปริมาณเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณเดิม เมื่อเวลาผ่านไป 1 half life $\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{2}$ จากสมการ 2.3 จะได้

$$\frac{1}{2} = \exp(-\lambda t_{1/2})$$

$$\log 2 = 0.4343 \lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad 2.5$$

2.3.1 การหาค่า mean life หรือ average life ของสารกัมมันตรังสี (τ)

mean life หาได้จากผลรวมของเวลาที่ทุก ๆ อะตอมที่มีชีวิตอยู่หารด้วยจำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิม

จำนวนอะตอมที่สลายไปในระหว่างเวลา t จนถึง $t + dt$ คือ

$$dN = -\lambda N dt$$

จำนวนอะตอมที่ยังมีชีวิตอยู่เมื่อเวลา t คือ

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

ดังนั้น $dN = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$

เนื่องจากกระบวนการสลายเป็นลักษณะทางสถิติแต่ละอะตอมอาจมีชีวิตอยู่ได้นานจาก 0 จนถึง ∞ ดังนั้น mean life จะหาได้โดย

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} N_0 \lambda t e^{-\lambda t} dt$$

$$= \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

2.6

ดังนั้น mean life จึงเป็นส่วนกลับของ disintegration constant และอาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง mean life และ half life ได้คือ

คูณด้วย $e^{\lambda_2 t}$

$$e^{\lambda_2 t} \frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

หรือ $\frac{d}{dt} (N_2 e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$

เมื่อ integrate จะได้

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C$$

คูณตลอดด้วย $e^{-\lambda_2 t}$ จะได้

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} + C e^{-\lambda_2 t} \quad 2.11$$

ค่า C หาได้จากเงื่อนไขที่ว่าเมื่อเริ่มพิจารณา $t = 0$, $N_2(0) = N_2^0$ เมื่อ N_2^0 คือจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีเดิมของกัมมันตรังสีชนิดที่ 2 ก่อนที่จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการสลายของ N_1^0

แทนค่าตามเงื่อนไขดังกล่าวในสมการ 2.11

$$C = N_2^0 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0$$

แทนค่า C ลงในสมการ 2.11 และจัดสมการใหม่จะได้ N_2 เป็นฟังก์ชันของเวลา

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad 2.12$$

โดยการแทนค่า N_2 ลงในสมการ (2.8.3) จะหาจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีชนิดที่ 3 ได้

$$N_3 = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 - N_2^0 \right) e^{-\lambda_2 t} - \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) N_1^0 e^{-\lambda_1 t} + D \quad 2.13$$

เมื่อ D เป็นค่าคงที่ในการอินทิเกรต จะหาได้โดยกำหนดว่า เมื่อ $t = 0$, $N_3 = N_3^0$ จากเงื่อนไขนี้จะได้

$$D = N_3^0 + N_2^0 + N_1^0$$

แทนค่า D ลงในสมการ 2.13 จะได้

$$N_3 = N_3^0 + N_2^0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_1^0 \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad 2.14$$

กรณีที่พบบ่อย ๆ คือ เมื่อเริ่มต้น ($t = 0$) มีแต่อะตอมของธาตุแรกที่จะสลายไปเป็นอะตอมของธาตุที่ 2 และที่ 3 เท่านั้น นั่นคือ

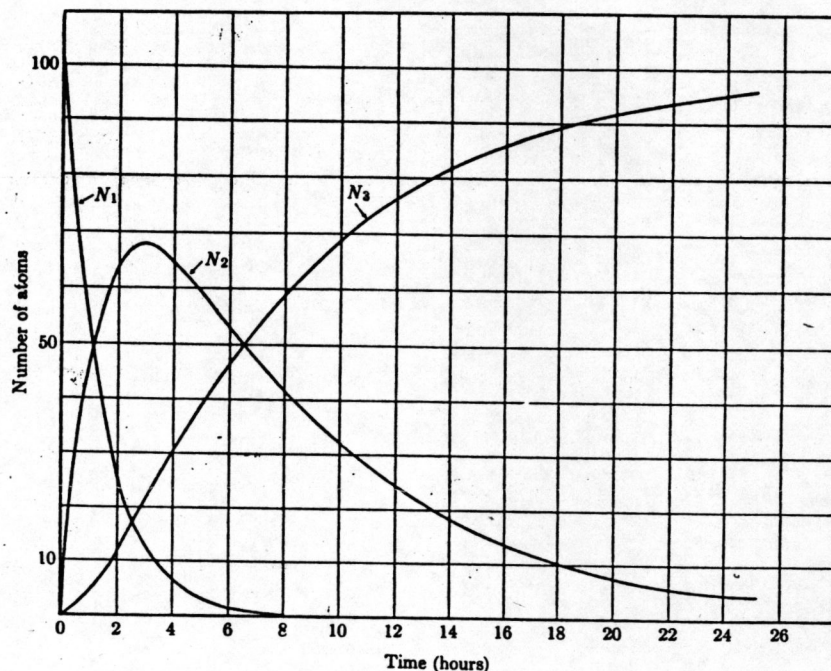
$$N_2^0 = N_3^0 = 0$$

กรณีนี้สูตรที่ใช้ในการคำนวณจึงเหลือเพียง

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad 2.15$$

$$N_3 = N_1^0 \left(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) \quad 2.16$$

สมการ 2.9, 2.15, 2.16 แสดงได้ด้วยกราฟรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สารกัมมันตรังสีที่มีการสลายจาก $N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3$ เมื่อเริ่มต้น กำหนดให้มี N_1 (parent) อยู่ธาตุเดียวมีค่าครึ่งชีวิต 1 ชั่วโมง ต่อมา N_2 (daughter) เกิดขึ้นมีค่าครึ่งชีวิต 5 ชั่วโมง และ N_3 เป็นธาตุที่เสถียร (stable) (จาก Kaplan, Irving. Nuclear Physics 2nd ed. หน้า 242)

Bateman ได้ตั้งสูตรการคำนวณหาจำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น โดยตั้งเงื่อนไขว่า เมื่อเริ่มต้นมีแต่อะตอมของ parent เท่านั้น

$$\text{นั่นคือ } t = 0, N_1 = N_1^0, N_2 = N_3 = \dots = N_n = 0 \quad 2.17$$

จำนวนอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีที่ n ที่เกิดขึ้นคือ

$$N_n(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + C_3 e^{-\lambda_3 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad 2.18$$

โดยมี

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} \cdot N_1^0$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} \cdot N_1^0$$

$$C_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \cdot N_1^0$$

2.19

2.3.3 การสมดุลของธาตุกัมมันตรังสี การสมดุล (equilibrium) หมายถึง ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีที่สลายไปและที่เกิดขึ้นใหม่มีจำนวนเท่ากัน ทำให้ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีนั้นคงที่ แต่ยังคงครอบคลุมกรณีอื่น ๆ ไม่หมด เช่น

ก. Secular equilibrium หมายถึงกรณีธาตุ parent มีการสลายเข้ามาหรือครึ่งชีวิตของ parent นานกว่าครึ่งชีวิตของ daughter มาก ตัวอย่างเช่น U-238 สลายโดยมีครึ่งชีวิต 4.5×10^9 ปี โดยการสลายให้อนุภาคแอลฟา แล้วเกิดเป็น ${}_{90}\text{Th}^{234}$ ธาตุใหม่นี้จะสลายต่อไปโดยการส่งรังสีเบตาที่มีครึ่งชีวิต 24.1 วัน กรณีนี้อาจถือว่าเป็นอะตอม N_1 มีจำนวนคงที่ เพราะ $\lambda_1 \ll \lambda_2$ สมการ (2.15) จะประมาณได้ว่า เมื่อมีการสมดุล

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots \lambda_n N_n \quad 2.20$$

ในกรณีที่ parent มีครึ่งชีวิตนานมาก ($t_{1/2} \approx \infty$) และ daughter มีครึ่งชีวิตสั้นมาก จะคิดว่า daughter ที่แยกออกจาก parent เป็นธาตุนิวคลีอิด จึงหาจำนวนอะตอมของ parent และ daughter ได้จากสมการ (2.3) และ (2.15) จะสังเกตว่า $\lambda_1 \approx 0$ เมื่อเทียบกับ λ_2 ดังนั้น

$$e^{-\lambda_1 t} \approx 1 \quad \text{และ}$$

สมการ (2.3) ก็คือ $N_1(t) \approx N_1^0$ 2.21

สมการ (2.15) $N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t})$ 2.22

หรือ $\lambda_2 N_2 \approx \lambda_1 N_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t})$ 2.23

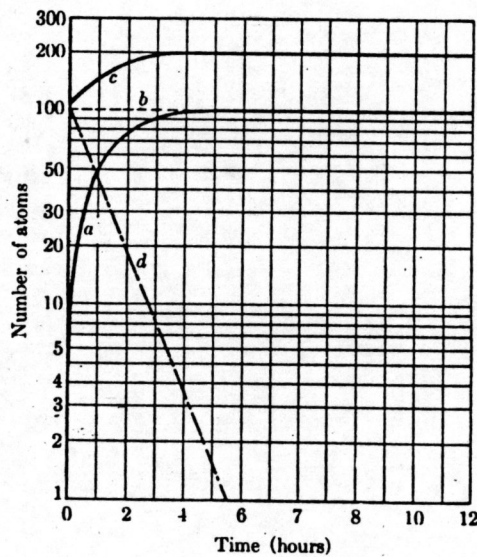
สมการ (2.23) แสดงกัมมันตภาพของ daughter เป็นฟังก์ชันของเวลาในเทอมของกัมมันตภาพของ parent ที่มีค่าคงที่

$$A_{\text{total}} = \lambda_1 N_1^0 + \lambda_2 N_2$$

$$\approx 2\lambda_1 N_1^0 - \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_2 t}$$

2.24

สมการ (2.23) แสดงว่าเมื่อเวลานานขึ้น กัมมันตภาพของ daughter จะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปหลาย ๆ ครั้งชีวิต $\lambda_2 N_2$ จะมีค่าใกล้กับ $\lambda_1 N_1^0$ ตามสภาวะของ secular equilibrium



รูปที่ 2.4 แสดง Secular equilibrium (จาก Kaplan, Irving. Nuclear Physics. 2nd ed. หน้า 246)



ข. Transient equilibrium

กรณีที่ parent มีครึ่งชีวิตนานกว่าครึ่งชีวิตของ daughter ($\lambda_1 < \lambda_2$) แต่ไม่นานมากกว่ากันมากนักจะประมาณว่า $\lambda_1 = 0$ ไม่ได้ เพราะถ้าแยก parent และ daughter ออกจากกันจะประมาณว่า parent บริสุทธิ์ จำนวนอะตอมจะหาได้จาก สมการ (2.3) และ (2.15)

เมื่อเวลานาน $e^{-\lambda_2 t}$ อาจจะตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับ $e^{-\lambda_1 t}$ ดังนั้น จำนวนอะตอมของ daughter ก็คือ

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad 2.25$$

จากสมการ (2.25) แสดงว่า daughter มีการสลายด้วยครึ่งชีวิตเหมือนกับ parent

เนื่องจาก $N_1^0 e^{-\lambda_1 t} = N_1$

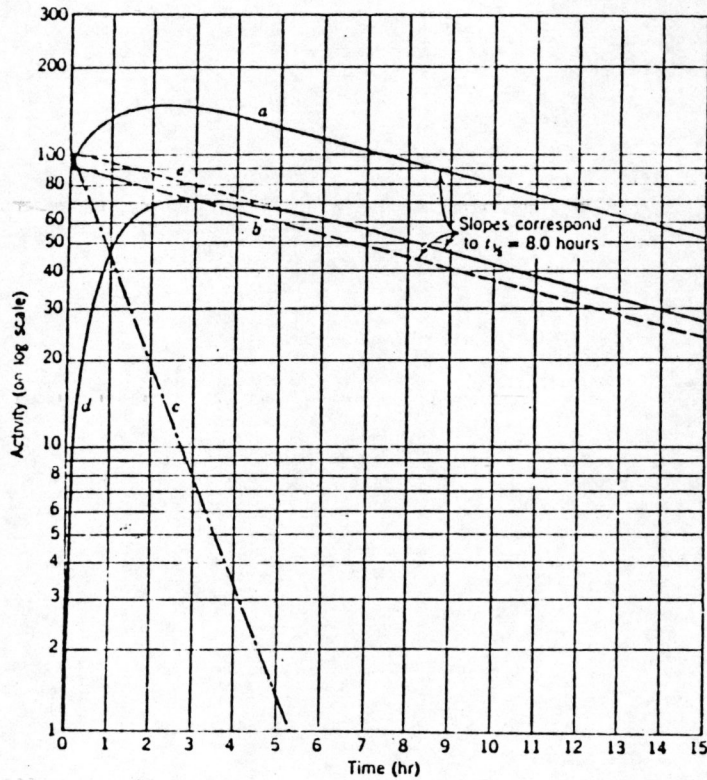
สมการ (2.25) เขียนได้ว่า

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} \quad 2.26$$

อัตราส่วนของ กัมมันตภาพขณะที่อยู่ในลักษณะสมดุลคือ

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2 N_2} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} \quad 2.27$$

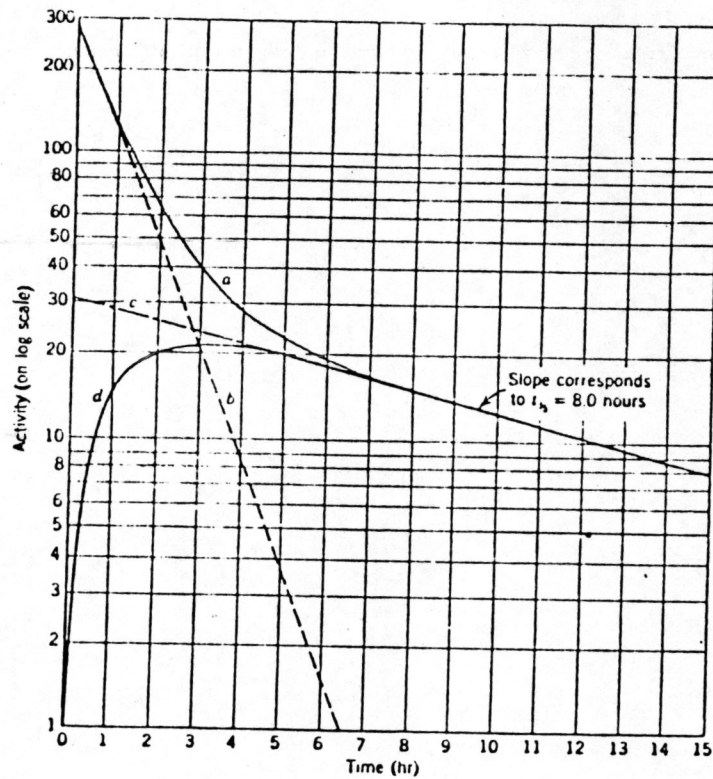
กัมมันตภาพของ daughter จะมากกว่า กัมมันตภาพของ parent ด้วยจำนวน $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ ลักษณะ transient equilibrium แทนได้ด้วยกราฟที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดง transient equilibrium (จาก Kaplan, Irving, Nuclear Physics 2nd. ed. หน้า 247)

ค. ไม่มีการสมดุล (No equilibrium)

กรณีที่ไม่มีการสมดุลเกิดขึ้นเนื่องจากครึ่งชีวิตของ parent สั้นกว่าครึ่งชีวิตของ daughter ($\lambda_1 > \lambda_2$) เมื่อแยกจากกันแล้ว parent จะสลายหมดไปก่อนเหลือแต่ daughter อะตอมจะมีการสลายด้วยครึ่งชีวิตของ daughter เพียงอย่างเดียว



รูป 2.6 กราฟที่ไม่มีภาวะสมดุล (No equilibrium) (จาก Kaplan, Irving. Nuclear Physics. 2nd ed. หน้า 238)

2.4 การดูดกลืนรังสี

เมื่อแกมมาฟลักซ์ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจะมีการสูญเสียพลังงานไปด้วยวิธีต่าง ๆ และเมื่อพลังงานของรังสีนั้น ๆ หมดไป รังสีหรืออนุภาคเหล่านั้นจะหยุดเคลื่อนที่และถูกจับไว้ในเนื้อสารซึ่งเรียกว่าถูกดูดกลืน สารที่ดูดกลืนรังสีนั้นไว้ก็เป็นตัวดูดกลืน ถ้าเป็นในกรณีที่สารที่เป็นตัวดูดกลืนนั้นเป็นสารชนิดเดียวกับกับสารที่แผ่รังสีนั้น ๆ ออกมา เราก็มักเรียกดูดกลืนนั้นว่า "การดูดกลืนด้วยตนเอง" ซึ่งการดูดกลืนด้วยตนเองนี้จะเกิดกับการแผ่รังสีแอลฟา, เบตา ของสารนั้นเป็นส่วนใหญ่

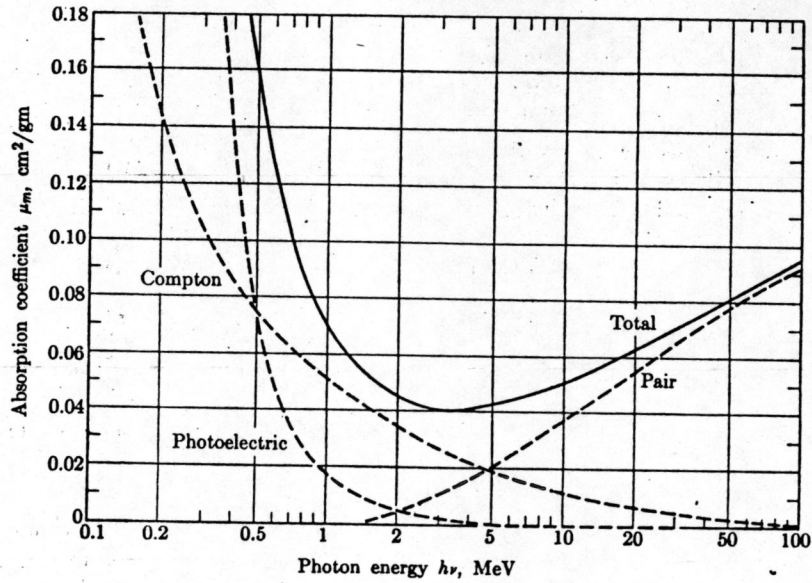
2.4.1 ปฏิกริยาระหว่างรังสีกับวัตถุ เมื่อรังสีผ่านวัตถุจะเกิดปฏิกริยาชนกัน (collision process) ระหว่างรังสีกับอะตอมของวัตถุนั้น การชนกันนี้อาจจะไม่กระทบกัน เพียงแต่ส่งพลังงานให้กันก็ได้ ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีหรืออนุภาคนั้นกับชนิดของนิวเคลียสของวัตถุที่รังสีหรืออนุภาคนั้นผ่านไป สำหรับรังสีหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะเกิดปฏิกริยา excitation และ ionization ส่วนรังสีหรืออนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าจะไม่มีปฏิกริยากับแรงคูลอมบ์ (Coulomb's force) ที่อยู่รอบ ๆ อะตอม แต่จะเกิดปฏิกริยาโดยตรงกับนิวเคลียสของอะตอมของตัวดูดกลืน ซึ่งได้แก่ปฏิกริยา Scattering ซึ่งประกอบด้วย Inelastic scattering และ Elastic scattering, Capture ซึ่งประกอบด้วย Radiative Capture และ Fission Capture

โดยเฉพาะอย่างยิ่งปฏิกริยาของรังสีเอ็กซ์ (x-rays) และแกมมา ซึ่งเป็นรังสีหรืออนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้าที่มีต่อวัตถุนั้น จะเกิดปฏิกริยาที่แตกต่างไปจากรังสีหรืออนุภาคที่มีประจุคือ แอลฟา หรือ เบตา ฉะนั้นการสูญเสียพลังงานของรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมาโดยปฏิกริยาดังต่อไปนี้คือ

ก. Photoelectric effect รังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ที่เป็นอนุภาคโฟตอนพลังงานต่ำจะคายพลังงานให้อิเล็กตรอนรอบ ๆ นิวเคลียสของตัวดูดกลืนทั้งหมดและผลักให้อิเล็กตรอนหลุดออกไป

ข. Compton Scattering มักจะเกิดกับรังสีแกมมา พลังงานขนาดระหว่าง 0.5 - 1.0 Mev โดยโฟตอนถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนรอบ ๆ นิวเคลียสของตัวดูดกลืนเกือบหมด ทำให้โฟตอนมีพลังงานลดลงและเปลี่ยนทิศทางไปจากเดิม

ค. Pair Production เกิดเฉพาะรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 1.02 Mev การเกิดก็คือรังสีแกมมาซึ่งเป็นอนุภาคโฟตอนจะกลายเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอนคู่หนึ่ง



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตะกั่ว ได้แก่ photoelectric absorption, Compton scattering และ pair production (จาก Enge, Herald. Introduction to Nuclear Physics หน้า 193)

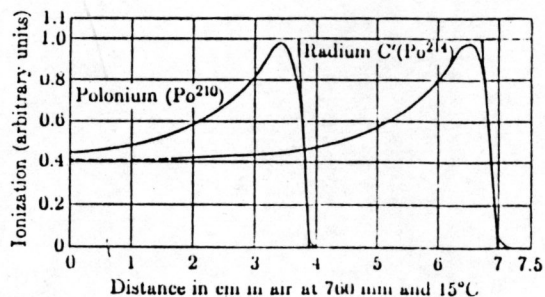
2.4.2 อันตรกิริยา (interaction) ที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคแอลฟาและอนุภาคเบตา ผ่านอะตอมของสสาร

อนุภาคแอลฟาเป็นรังสีที่ทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเรียก ionizing radiation เพราะเมื่ออนุภาคแอลฟาผ่านเข้าไปในอะตอมของสสารจะเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้า (Electrical interaction) โดยการถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุด ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจรเกิดเป็น ion pairs ตามทางที่อนุภาครุ่งผ่าน

ความสามารถที่อนุภาคจะทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออนนี้มีค่าที่จะพิจารณาถึง ซึ่งได้แก่ "Specific ionization" หมายถึงจำนวน ion pairs ที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาครุ่งผ่านสารนั้นเป็นระยะทางหนึ่งหน่วย สำหรับอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากันค่า specific

ionization ขึ้นกับมวลของอนุภาค อนุภาคหนักจะเคลื่อนที่ช้าใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านอะตอมของสาร จึงมีโอกาสทำให้อะตอมของสารแตกตัวเป็นไอออนได้มาก เช่นค่า specific ionization ที่เกิดจากอนุภาคแอลฟามวล 4 amu. จะมีค่ามากกว่าที่เกิดจากอนุภาคเบต้ามวล 0.00055 amu. ที่มีพลังงานเดียวกัน ในกรณีที่อนุภาคมีมวลเท่ากัน ค่า specific ionization ขึ้นกับประจุของอนุภาค นอกจากนี้ค่า specific ionization ยังขึ้นกับคุณสมบัติของสารตัวกลางที่อนุภาครังผ่าน

2.4.3 การดูดกลืนรังสีแอลฟา รังสีแอลฟาเป็นรังสีที่ถูกดูดกลืนได้ง่าย เช่น เมื่อนำกระดาษแผ่นบาง ๆ หรือแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนาเพียง 0.004 เซนติเมตร มากั้นก็จะถูกดูดกลืนจนหมด ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเมื่อรังสีแอลฟาผ่านอะตอมของสารก็จะสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมของสารนั้น ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ที่สูญเสียไปนี้เนื่องจากปฏิกิริยา ionization จะทำให้เกิด ion pairs ขึ้นมากมาย จากการทดลองหาค่า ionization ต่อระยะทาง 1 มิลลิเมตรของอนุภาคแอลฟาที่ได้จาก RaC' (Po - 214) พบว่าเมื่ออนุภาคเริ่มต้นผ่านเข้าไปในอากาศจะให้ ion pairs ประมาณ 2200 ion pairs ต่อมิลลิเมตร ค่า specific ionization จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่ออนุภาคแอลฟาเริ่มสูญเสียพลังงานและจะให้ ion pairs ประมาณ 2700 ions pairs/มิลลิเมตร ในระยะที่ห่างจากจุดเริ่มต้น 3 เซนติเมตร และเมื่อถึงระยะ 4 - 5 เซนติเมตร ค่า specific ionization จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าประมาณ 7,000 ion pairs/มิลลิเมตร รูปที่ 2.



รูปที่ 2.8 Specific ionization ของล้าอนุภาคแอลฟา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะทางจากแหล่งกำเนิดอนุภาค (จาก Kaplan, Irving. Nuclear Physics 2nd ed. หน้า 311)

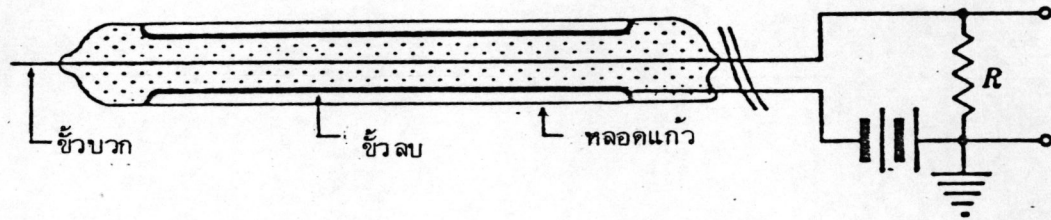
เมื่อพลังงานของรังสีแอลฟาตกลงในที่สุดก็จะจับอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นอะตอมของฮีเลียม ซึ่งไม่สามารถทำให้เกิดไอออนได้อีก ระยะทางตั้งแต่รังสีวิ่งออกมาจนกระทั่งถูกดูดกลืนหายไป เรียกว่า "range" ของรังสีแอลฟา

2.4.4 การดูดกลืนรังสีเบตา พลังงานของอนุภาค เบตาสามารถที่จะวัดได้ด้วยการดูดกลืนของสารซึ่งเหมือนกันกับกรณีของอนุภาคแอลฟา อนุภาคเบตามีอำนาจทะลุทะลวงมากกว่ารังสีแอลฟา คือในขณะที่รังสีแอลฟาที่มีพลังงานจลน์ 3 Mev จะมี range ในอากาศประมาณ 2.8 เซนติเมตร และจะทำให้เกิดไอออนประมาณ 4,000 ion pairs/mm ของระยะทางที่ผ่านในอากาศ แต่รังสีเบตาที่มีพลังงาน 3 Mev จะมี range ในอากาศประมาณ 1000 เซนติเมตรและจะทำให้เกิดไอออนได้ประมาณ 4 ion pairs/mm. ของระยะทางที่ผ่าน ซึ่งแสดงว่าค่า specific ionization ของรังสีแอลฟามีค่ามากกว่าอนุภาคเบตา

รังสีเบตาที่ส่งออกมาจากสารกัมมันตรังสีมีลักษณะการกระจายแบบต่อเนื่อง (continuous distribution of energy) เป็น continuous energy spectrum มีพลังงานสูงสุดเป็นค่าเฉพาะของแต่ละตัวกำเนิด การที่นิวไคลด์ส่งรังสีเบตาออกมา เชื่อว่ามีอนุภาคนิวตริโน (neutrino) เกิดขึ้น พลังงานทั้งหมดจึงต้องแบ่งกันระหว่างรังสีเบตากับนิวตริโน โดยที่รังสีเบตาได้รับไปส่วนหนึ่ง ส่วนนิวตริโนจะพาพลังงานส่วนที่เหลือทั้งหมดออกไป

2.5 ส่วนประกอบและการทำงานของหลอดวัดรังสีแบบไกเกอร์-มูลเลอร์

หลอดไกเกอร์-มูลเลอร์หรือเรียกว่า หลอด G.M. มีรูปแบบหลายอย่าง แต่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งประกอบด้วยกระบอกโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบ ส่วนแกนกลางซึ่งทำด้วยเส้นลวดทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวก



รูป 2.9 โครงสร้างคร่าว ๆ ของหลอดไกเกอร์ (จาก Kaplan, Irving. Nuclear Physics. 2nd ed., หน้า 43)

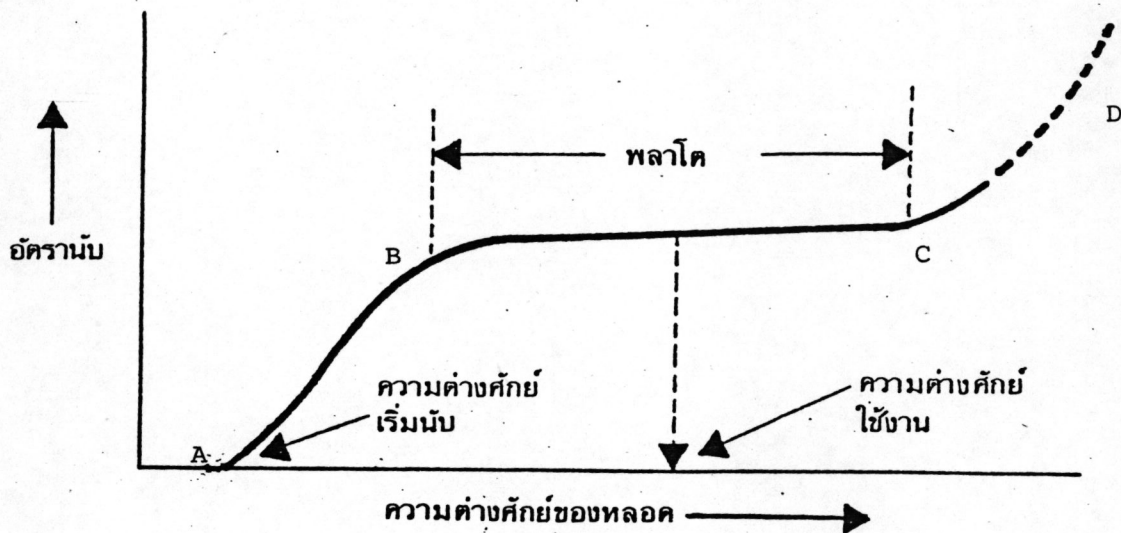
ลักษณะสำคัญของทรงกระบอกขั้วไฟฟ้าลบก็คือควรจะทำจากสารที่มี work function สูงเพื่อลด Photoelectron ที่เกิดจากแสงสว่างเนื่องจากปฏิกิริยา Photoelectric effect หลอดไกเกอร์ที่ไวต่อแสงสว่างเรียกว่า Photosensitive Detector เมื่อนำมาใช้งานควรป้องกันแสงสว่างด้วย

ส่วน เส้นลวดกลางนั้นทำด้วยโลหะโดยทั่วไปมักจะทำด้วยโลหะทั้งสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0025 ถึง 0.025 ซม. ภายในหลอดบรรจุด้วยก๊าซเฉื่อยพวก Noble Gas ได้แก่ ก๊าซ อาร์กอนหรือกาซีนอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยมีค่า Specific Ionization สูง ผสมกับไออัลกอฮอล์หรือกาซมีเทนประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์เพื่อช่วย Quenching ความดันของก๊าซภายในหลอดไกเกอร์นั้นส่วนมากจะเป็นความดันต่ำระหว่าง 7 - 20 เซนติเมตรของปรอท ทั้งนี้เพื่อเพิ่มค่า Mean Free Path ของอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น

2.5.1 ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาครังสีกับหลอดไกเกอร์ เมื่อมีอนุภาครังสีวิ่งผ่านเข้ามาในหลอดไกเกอร์ อนุภาคนี้จะไปทำให้ก๊าซที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าของหลอดไกเกอร์แตกเป็นไอออนสำหรับรังสีแอลฟาและเบตานั้น เมื่อผ่านเข้าไปก็จะทำให้ก๊าซแตกเป็นไอออนได้โดยตรง ส่วนรังสีที่ไม่มีประจุเช่น รังสีแกมมา , รังสีเอ็กซ์จะต้องเกิดปฏิกิริยา Photoelectric effect หรือ

Compton scattering ก่อนแล้วอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยานี้ได้อันหนึ่งที่กล่าวข้างต้นนี้ จะไปทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนขึ้นอีกทีหนึ่ง เนื่องจากข้อของหลอดไกเกอร์มีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงมาก จึงทำให้เกิดขบวนการ Gas Multiplication หรือ Electron Avalance จากกระบวนการนี้เองทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในช่วงสั้น ๆ จึงเป็นเหตุให้ความต่างศักย์ของหลอดไกเกอร์ลดลง ซึ่งเมื่อดูจากจอของออสซิลโลสโคปจะเห็นเป็นสัญญาณพัลส์ทางลบ หรือต่อเข้ากับวงจรของแคโรซีนับก็จะนับได้ 1 ตัว

2.5.2 กราฟประจำตัวของหลอดไกเกอร์ หมายถึงกราฟระหว่างจำนวนสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลากับความต่างศักย์ของหลอด



รูปที่ 2.10 กราฟประจำตัวของหลอดไกเกอร์

จากรูป 2.10 ช่วง AB เรียกว่า Region of Proportional Counting ขนาดของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคที่ผ่านเข้ามา ถ้าเพิ่มความต่างศักย์มากขึ้น จะทำให้อัตราการนับเพิ่มขึ้นเนื่องจากช่วงพลังงานของอนุภาคที่นับได้เพิ่มขึ้น ส่วนช่วง BC เป็นช่วงที่เรียกว่า Geiger region ในช่วงนี้อนุภาคทุกตัวที่ผ่านหลอดจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์เท่ากันหมดและนับได้หมดทุกตัวเนื่องจาก Gas-Multiplication Factor มีค่าคงที่ตลอดช่วงนี้ซึ่งมีชื่อเรียกว่า "พลาโต" สำหรับการใช้นั้นมักจะเลือกความต่างศักย์อยู่ที่กึ่งกลางของพลาโตเพื่อว่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าที่ใช้งานมีการเปลี่ยนแปลงบ้างจะไม่ทำให้อัตราการนับเปลี่ยนไปด้วย ต่อไปเป็นช่วง CD ซึ่งเรียกว่า Region of Continuous Discharge ในช่วงนี้เมื่อเกิดการ discharge เริ่มต้นเพียงหนึ่งครั้ง ก็จะทำให้เกิดการ discharge ติดตามมาอีกหลายครั้งหรืออนุภาคเพียง 1 ตัว ทำให้เกิดพัลส์ได้จำนวนหลายพัลส์ ซึ่งทำให้การนับผิดพลาดหมด

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ความต่างศักย์ของหลอด ไทเกอร์-มูลเลอร์ที่ 970 โวลต์