



บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ยูเรเนียม

ธาตุยูเรเนียมตามธรรมชาติมี 3 ไอโซโทปคือ ยูเรเนียม-234 ยูเรเนียม-235 และยูเรเนียม-238 ทุกไอโซโทปมีเลขอะตอมเท่ากับ 92 มีน้ำหนักอะตอมเฉลี่ย 238.03 ความถ่วงจำเพาะ 19.05 มีจุดหลอมเหลว 1133°C . จุดเดือดประมาณ 3927°C . วาเลนซ์ตามปกติของยูเรเนียมคือ +3 +4 และ+6 (11)

ทุกไอโซโทปของยูเรเนียมไม่เสถียร จะสลายตัวตามธรรมชาติตามค่าครึ่งชีวิตต่างๆ และมีปริมาณต่างๆ กันในธรรมชาติดังนี้ (12)

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณยูเรเนียมแต่ละไอโซโทปในธรรมชาติ ค่าครึ่งชีวิต และค่ามวล

ไอโซโทป	เปอร์เซ็นต์ในยูเรเนียมธรรมชาติ	ครึ่งชีวิต (ปี)	มวลไอโซโทป (amu)
U-234	0.0058	2.454×10^5	234.1141
U-235	0.711	7.037×10^8	235.1175
U-238	99.283	4.468×10^9	238.1252

อนุกรมยูเรเนียม แสดงชนิดและพลังงานรังสีของธาตุลูก ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การสลายตัวแบบลูกโซ่ของอนุกรมแอกทีเนียม

Parent Element	Nuclides		Particle Emitted	Particle Energy ^a (MeV)	Half-Life
	Parent	Daughter			
Uranium (actinouranium)	$^{235}_{92}\text{U}$	\longrightarrow $^{231}_{90}\text{Th}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	4.58	7.1×10^8 years
Thorium (U-Y)	$^{231}_{90}\text{Th}$	\longrightarrow $^{231}_{91}\text{Pa}$	$-^0_1e$ (β)	0.30	25.6 hr
Protactinium	$^{231}_{91}\text{Pa}$	\longrightarrow $^{227}_{89}\text{Ac}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	5.05	3.4×10^4 years
Actinium	$^{227}_{89}\text{Ac}$	$\xrightarrow{(98.8\%)} ^{227}_{90}\text{Th}$	$-^0_1e$ (β)	0.046	} 21.6 years
		$\xrightarrow{(1.2\%)} ^{223}_{87}\text{Fr}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	4.95	
Thorium (radioactinium)	$^{227}_{90}\text{Th}$	\longrightarrow $^{223}_{88}\text{Ra}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	6.04	18.2 days
Francium (actinium K)	$^{223}_{87}\text{Fr}$	$\xrightarrow{(99+\%)} ^{223}_{88}\text{Ra}$	$-^0_1e$ (β)	1.15	} 22 min
		$\xrightarrow{(4 \times 10^{-4}\%)} ^{219}_{85}\text{At}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	?	
Radium (Ac-X)	$^{223}_{88}\text{Ra}$	\longrightarrow $^{219}_{86}\text{Rn}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	5.75	11.4 day
Astatine	$^{219}_{85}\text{At}$	$\xrightarrow{(97\%)} ^{219}_{86}\text{Rn}$	$-^0_1e$ (β)	?	} 0.9 min
		$\xrightarrow{(3\%)} ^{215}_{83}\text{Bi}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	6.28	
Radon (Ac-emanation)	$^{219}_{86}\text{Rn}$	\longrightarrow $^{215}_{84}\text{Po}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	6.82	3.96 sec
Bismuth	$^{215}_{83}\text{Bi}$	\longrightarrow $^{215}_{84}\text{Po}$	$-^0_1e$ (β)	?	8 min
Polonium (Ac-A)	$^{215}_{84}\text{Po}$	$\xrightarrow{(99+\%)} ^{211}_{82}\text{Pb}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	7.38	} 1.8×10^{-4} sec
		$\xrightarrow{(5 \times 10^{-4}\%)} ^{215}_{85}\text{At}$	$-^0_1e$ (β)	?	
Astatine	$^{215}_{85}\text{At}$	\longrightarrow $^{211}_{83}\text{Bi}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	8.01	10^{-4} sec
Lead (Ac-B)	$^{211}_{82}\text{Pb}$	\longrightarrow $^{211}_{83}\text{Bi}$	$-^0_1e$ (β)	1.36	36.1 min
		\longrightarrow $^{211}_{83}\text{Bi}$	$-^0_1e$ (β)	1.36	36.1 min
Bismuth (Ac-C)	$^{211}_{83}\text{Bi}$	$\xrightarrow{(99+\%)} ^{207}_{81}\text{Tl}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	6.62	} 2.16 min
		$\xrightarrow{(0.3\%)} ^{211}_{84}\text{Po}$	$-^0_1e$ (β)	?	
Polonium (Ac-C')	$^{211}_{84}\text{Po}$	\longrightarrow $^{207}_{82}\text{Pb}$	$\frac{4}{2}\text{He}$ (α)	7.45	0.52 sec
Thallium (Ac-C'')	$^{207}_{81}\text{Tl}$	\longrightarrow $^{207}_{82}\text{Pb}$	$-^0_1e$ (β)	1.44	4.8 min
Lead (Ac-D)	$^{207}_{82}\text{Pb}$	Stable	---	---	Infinite

ตารางที่ 2.3 การสลายตัวแบบลูกโซ่ของอนุกรมยูเรเนียม

Parent Element	Nuclides		Particle Emitted	Particle Energy (MeV)	Half-Life
	Parent	Daughter			
Uranium (U-I)	$^{238}_{92}\text{U}$	\longrightarrow $^{234}_{90}\text{Th}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	4.20	4.51×10^8 years
Thorium (UX ₁)	$^{234}_{90}\text{Th}$	(99+%) \longrightarrow $^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	0.19	} 24.1 days
		(0.63%) \longrightarrow $^{234}_{91}\text{Pa}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	0.088	
Protactinium (UX ₂)	$^{234\text{m}}_{91}\text{Pa}$	\longrightarrow $^{234}_{92}\text{U}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	2.29	1.2 min
Protactinium (UZ)	$^{234}_{91}\text{Pa}$	\longrightarrow $^{234}_{92}\text{U}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	1.3	6.7 hr
Uranium (U-II)	$^{234}_{92}\text{U}$	\longrightarrow $^{230}_{90}\text{Th}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	4.77	2.47×10^5 years
Thorium (ionium)	$^{230}_{90}\text{Th}$	\longrightarrow $^{226}_{88}\text{Ra}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	4.68	8.0×10^4 years
Radium	$^{226}_{88}\text{Ra}$	\longrightarrow $^{222}_{86}\text{Rn}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	4.78	1.6×10^3 years
Radon (Ra-emanation)	$^{222}_{86}\text{Rn}$	\longrightarrow $^{218}_{84}\text{Po}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	5.49	3.8 days
Polonium (Ra-A)	$^{218}_{84}\text{Po}$	(99+%) \longrightarrow $^{214}_{82}\text{Pb}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	6.00	} 3.0 min
		(0.02%) \longrightarrow $^{218}_{85}\text{At}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	?	
Lead (Ra-B)	$^{214}_{82}\text{Pb}$	\longrightarrow $^{214}_{83}\text{Bi}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	1.03	26.8 min
Astatine	$^{218}_{85}\text{At}$	\longrightarrow $^{214}_{83}\text{Bi}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	6.70	2.0 sec
Bismuth (Ra-C)	$^{214}_{83}\text{Bi}$	(99+%) \longrightarrow $^{214}_{84}\text{Po}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	3.26	} 19.7 min
		(0.04%) \longrightarrow $^{210}_{81}\text{Tl}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	5.51	
Polonium (Ra-C')	$^{214}_{84}\text{Po}$	\longrightarrow $^{210}_{82}\text{Pb}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	7.68	1.6×10^{-4} sec
Thallium (Ra-C'')	$^{210}_{81}\text{Tl}$	\longrightarrow $^{210}_{82}\text{Pb}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	2.3	1.3 min
Lead (Ra-D)	$^{210}_{82}\text{Pb}$	\longrightarrow $^{210}_{83}\text{Bi}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	0.061	22 years
Bismuth (Ra-E)	$^{210}_{83}\text{Bi}$	(99+%) \longrightarrow $^{210}_{84}\text{Po}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	1.16	} 5.0 days
		(2×10^{-4} %) \longrightarrow $^{206}_{81}\text{Tl}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	4.69	
Polonium (Ra-F)	$^{210}_{84}\text{Po}$	\longrightarrow $^{206}_{82}\text{Pb}$	$\frac{1}{2}\text{He}$ (α)	5.30	138.4 min
Thallium	$^{206}_{81}\text{Tl}$	\longrightarrow $^{206}_{82}\text{Pb}$	$-^0_{-1}\text{e}$ (β)	1.52	4.2 min
Lead (Ra-G)	$^{206}_{82}\text{Pb}$	Stable	—	—	Infinite

2.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร (2)

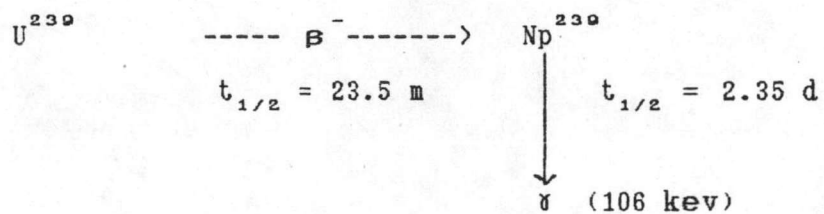
เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุ อาจเกิดอันตรกิริยาแบบต่างๆ ได้ดังนี้

2.2.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) เมื่อนิวตรอนชนนิวเคลียสแล้วนิวเคลียสยังคงอยู่ในภาวะพื้นฐาน (ground state) ส่วนนิวตรอนกระเจิงออกมาโดยที่ทิศทางและความเร็วจะเปลี่ยนไป

2.2.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) หรือ (n,n) นิวเคลียสเมื่อถูกนิวตรอนชนแล้วรวมกันเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ และมีนิวตรอนตัวหนึ่งถูกปล่อยออกมา โดยที่นิวเคลียสยังอยู่ในภาวะกระตุ้น (excited state) นิวเคลียสนี้จะปล่อยรังสีแกมมาออกมาก่อนลดพลังงานลงมาถึงภาวะพื้นฐาน (ground state)

2.2.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (neutron capture) หรือ (n,γ) นิวเคลียสจับนิวตรอนแล้วเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าภาวะพื้นฐาน (ground state) จะปล่อยรังสีแกมมาออกมาทันที รังสีแกมมานี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุได้ ถ้าทำการวัดรังสีแกมมาขณะที่อาบรังสีนิวตรอน อย่างไรก็ตามนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ไม่เสถียร จะสลายตัวให้รังสีชนิดต่างๆ รวมทั้งบางไอโซโทปให้รังสีแกมมาด้วยการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาภายหลังการอาบรังสีนิวตรอน เพื่อหรือนำไปวิเคราะห์ธาตุเป็นวิธีที่นิยมใช้ในเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

เช่นปฏิกิริยา



2.2.4 ปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) หรือ (n,f) นิวตรอนเมื่อชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบแล้วแตกตัวออกเป็น 2 ส่วน เรียกว่า ฟิชชันแฟกแมนต์ พร้อมกับให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัว นิวเคลียสที่สามารถเกิดปฏิกิริยาแตกตัวกับเทอร์มัลนิวตรอนได้ดี สามารถแสดงได้ด้วยค่าภาคตัดขวางของฟิชชันหน่วยเป็นบาร์น ดังตารางที่ 2.4 นี้

ตารางที่ 2.4 ค่าภาคตัดขวางต่างๆ สำหรับเทอร์มัลนิวตรอน (2200 m/s) กับนิวไคลด์บางชนิด

Cross Section (barn)			
นิวเคลียส	Fission	Radiative Capture	Total absorption
U-233	527	54	581
U-235	577	106	683
Pu-239	742	287	1029
U-238	-	2.71	2.71
Nat.U	4.2	3.50	7.70

จากการที่ U^{235} ปฏิกริยาแตกตัวได้ดี นิวชันแฟรกเมนต์ที่เกิดขึ้น เมื่อวิ่งผ่านวัสดุบางชนิดจะเกิดรอยที่มีลักษณะเฉพาะเกิดขึ้น การนับรอยนี้สามารถจะใช้วิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมได้ ซึ่งใช้ในเทคนิคนิวชันแทร็ก

2.2.5 ปฏิกริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (charged particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางตัวแล้ว อนุภาคมีประจุเช่น อนุภาคอัลฟา หรือโปรตอน ถูกขับออกจากนิวเคลียสเชิงประกอบ เมื่อมีพลังงานสูงกว่าแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic) และพลังงานศักย์คูลอมบ์ (coulomb potential)

สมการของการเกิดปฏิกริยา (n,p) เป็นดังนี้



และสมการของการเกิดปฏิกริยา (n,α)



เมื่อ ${}_Z X^A$ คือ ไอโซโทปเสถียรของธาตุ X มีเลขอะตอม Z และมีเลขมวล A

2.3 เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

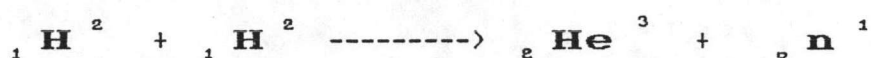
องค์ประกอบสำคัญในการวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอกติเวชัน (13,14)

2.3.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (neutron source) อนุภาคนิวตรอนอาจมาจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ดังนี้

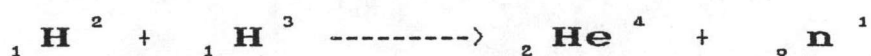
2.3.1.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทป (isotopic neutron source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ให้นิวตรอนออกมาโดยการแตกตัวด้วยตัวเอง เช่น Cf-252 หรือโดยปฏิกิริยา (α, n) เช่น Am-241/Be Pu-238/Be หรือจากปฏิกิริยา (γ, n) เช่น Sb-124/Be

2.3.1.2 เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) นิวตรอนที่ได้เกิดจากการเร่งอนุภาคโปรตอน หรือดิวเทรียม เข้าสู่นิวเคลียสของธาตุเบาเช่น

ปฏิกิริยา D - D จากสมการ



หรือปฏิกิริยา D - T จากสมการ



2.3.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) นิวตรอนที่ได้ได้จากปฏิกิริยาแตกตัว (fission reaction) ของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เช่น U-235 หรือ Pu-239

นิวตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดต่างๆนี้มีพลังงานต่างกัน การนำไปใช้งานส่วนใหญ่ นิวตรอนจะถูกทำให้ลดพลังงาน โดยใช้ตัวหน่วงนิวตรอน (neutron moderator) นิวตรอนสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มตามพลังงาน ได้ดังนี้

นิวตรอนพลังงานสูง (high energy neutron)	มีพลังงาน	> 10 MeV
นิวตรอนเร็ว (fast neutron)	มีพลังงาน	10 keV-10 MeV
นิวตรอนปานกลาง (intermediate neutron)	มีพลังงาน	100 eV-10 KeV
นิวตรอนช้า (slow neutron)	มีพลังงาน	0.03 eV-11 eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron)	มีพลังงาน	~ 1 eV
เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron)	มีพลังงาน	~ 0.025eV ที่ 20°C.
แคดเมียมนิวตรอน (cadmium neutron)	มีพลังงาน	< 1 eV

2.3.2 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ (nuclear reaction) ในการวิเคราะห์ทางนิวตรอนแอคติเวชัน ส่วนใหญ่ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้ คือปฏิกิริยา (n,n) , $(n,2n)$, (n,α) , (n,p) , (n,γ) ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เมื่อไอโซโทปที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นไอโซโทปรังสี การวัดรังสีก็สามารถนำไปสู่การหาชนิดและปริมาณของส่วนประกอบได้

อัตราการเกิดไอโซโทปรังสี หลังจากทำปฏิกิริยากับนิวตรอน ขึ้นกับจำนวนไอโซโทปของอะตอมของธาตุที่ถูกยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน รวมทั้งสัดส่วนของปริมาณของธาตุนั้นที่มีอยู่ในธรรมชาติ ความสามารถในการจับนิวตรอน และความเข้มข้นของนิวตรอนดังสมการ

$$P = N\sigma\phi \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

เมื่อ P คืออัตราการเกิดของเรดิโอไอโซโทป
 σ คือ ภาคตัดขวาง (Cross Section) ต่อนิวตรอนเป็น ตารางเซนติเมตร
 ϕ คือ นิวตรอนฟลักซ์ เป็น นิวตรอน/ตารางเซนติเมตร/วินาที
 N คือจำนวนอะตอมของไอโซโทปของธาตุที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์สามารถคำนวณได้จาก

$$N = \frac{N_0 W K}{M} \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

เมื่อ N_0 คือ Avogadro's number = 6.02×10^{23} โมเลกุล/กรัม-โมล
 W คือ น้ำหนักของธาตุเป็นกรัม
 K คือ ร้อยละของไอโซโทปเสถียรที่มีอยู่ในธรรมชาติ/100
 M คือ น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้นๆ

ถ้าอัตราการเกิดเรดิโอไอโซโทป (P) มีค่าคงที่ อัตราการเพิ่มของไอโซโทปรังสี (dN^*/dt) จะเท่ากับผลต่างระหว่างอัตราการเกิด และอัตราการสลายตัวของไอโซโทปรังสีดังสมการ

$$\frac{dN^*}{dt} = P - \lambda N^* \quad \text{-----} \quad (2.3)$$

เมื่อ λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว (decay constant) มีค่า = $0.693/t_{1/2}$
 $t_{1/2}$ คือ ค่าครึ่งชีวิต (half life)

จากสมการ (2.3) จะได้ความแรงรังสีของไอโซโทปที่มีอยู่เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา t

$$\lambda N^* = N_0 \phi (1 - e^{-\lambda t}) + N^*_0 e^{-\lambda t} \quad \text{----- (2.4)}$$

เมื่อเวลา $t = 0$, $N^*_0 = 0$ จะได้

$$\lambda N^* = N_0 \phi (1 - e^{-\lambda t}) \quad \text{----- (2.5)}$$

หลังจากอาบรังสีแล้วทิ้งไว้เวลา T โดยที่ λN^* คือความแรงรังสี (A_T) ของไอโซโทป รังสีที่เวลา T ในทุกภายหลังการแยกตัวเวชัน เป็นดังนี้

$$A_T = N_0 \phi (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda T} \quad \text{----- (2.6)}$$

ไอโซโทปรังสี ไม่เสถียรจะมีการสลายตัว เปลี่ยนแปลงจนกว่าจะเสถียร

2.3.2.1 รูปแบบของการสลายตัวของไอโซโทปรังสี

2.3.2.1.1 สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา (α -decay)

2.3.2.1.2 สลายตัวให้อนุภาคบีตา (β^- -decay)

2.3.2.1.3 สลายตัวให้อนุภาคโพซิตรอน (β^+ -decay)

2.3.2.1.4 การสลายตัวด้วยการจับอิเล็กตรอน (electron capture) กระบวนการเกิดเมื่อนิวเคลียสมีโปรตอนมากกว่านิวตรอน จึงจับเอาอิเล็กตรอน ในชั้น K หรือชั้น L เข้าไป แล้วจะได้รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) ตามมา จากการเปลี่ยนแปลงวงโคจรอิเล็กตรอน

2.3.2.1.5 การสลายตัวให้รังสีแกมมา (γ -decay) ขบวนการนี้เกิดตามมาหลังจากการสลายตัวให้อนุภาคอื่นที่กล่าวมาแล้ว การสลายตัวให้แกมมาแล้ว นิวเคลียสเข้าสู่สภาวะเสถียร หรือสภาวะพื้นฐาน

2.3.2.1.6 การสลายตัวในกระบวนการไอโซเมอร์ทรานซิชัน (Isomeric Transition) เป็นการสลายตัวให้รังสีแกมมาที่ตัวมันเองมีค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ค่ำย

2.3.3 การวัดรังสีแกมมา การสลายตัวของไอโซโทปรังสีส่วนใหญ่ ให้รังสีแกมมา ออกมาด้วย การวัดรังสีแกมมาจากไอโซโทปรังสี ที่เกิดจากทำปฏิกิริยากับนิวตรอนในเทคนิค นิวตรอนแอกติเวชัน สามารถใช้วิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณได้ การวัดรังสีแกมมามีหัววัด หลายแบบ หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำเป็นหัววัดที่นิยมมากชนิดหนึ่ง

สารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำหัววัดรังสีแกมมา ทำจากวัสดุเจอร์เมเนียมที่มีความบริสุทธิ์สูง (high purity germanium) มีสิ่งเจือปน (impurity) อยู่ประมาณ 10^{10} อะตอมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือประมาณ 1 ใน 10^{12} อะตอมของธาตุเจอร์เมเนียม ปัจจุบันได้รับการ พัฒนาจนสามารถใช้วัดรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานตั้งแต่ 3 keV ถึง 10 MeV (15)

ผลึกของเจอร์เมเนียมถูกทำให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type หรือ n-type จะมีรูปทรงแบบ planar หรือ coaxial นั้นขึ้นอยู่กับนำไปใช้วัดรังสีที่มีพลังงานอยู่ในช่วงใด เช่น ถ้าเป็นชนิด p-type ทำเป็นรูปทรง planar ก็จะใช้กับการวัดรังสีพลังงาน 30 keV ถึง 1 MeV หรือถ้าเป็น n-type และมีรูปทรงเป็น coaxial จะใช้สำหรับวัดรังสีในช่วงพลังงาน ตั้งแต่ 30 keV ถึง 10 MeV

ลักษณะของหัววัดรังสีกึ่งสารกึ่งตัวนำประกอบด้วยส่วนของ cryostat ซึ่งเป็นสุญญากาศ บรรจุผลึกเจอร์เมเนียม และ FET (field effect transistor) ของภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) ไว้ ขณะที่ใช้งานจะถูกหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว ที่บรรจุไว้ในส่วนของ ถังเก็บ (liquid nitrogen dewar)

การทำงานของหัววัดรังสี เมื่อรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปยังผลึกของ เจอร์เมเนียม รังสีจะถ่ายเทพลังงานให้ผลึก อันเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาทำให้เกิด อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น สำหรับเจอร์เมเนียมรังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์พลังงาน 2.96 eV. (ϵ) จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น 1 คู่ ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นจากรังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์พลังงาน E MeV ($E \times 10^6$ eV) สามารถหาได้จากสมการ

$$Q_D = \frac{Ee}{\epsilon} \quad \text{-----} \quad (2.7)$$

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมป์

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วศักดาไฟฟ้าเป็นบวก และโฮลจะเคลื่อนที่ไปยัง ขั้วศักดาไฟฟ้าที่เป็นลบ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้น ภายใน 10^{-10} วินาที หลังจากการเกิดอันตรกิริยาแต่ละครั้ง ปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสี แล้วถ่ายเทพลังงานให้

2.3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบหัววัด ในการวัดรังสี นอกจากหัววัดรังสีแกมมา แล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ ดังนี้

2.3.3.1.1 high voltage power supply เป็นแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแรงสูง ที่เป็นกระแสตรงให้กับหัววัดรังสี เพื่อใช้สร้างสนามไฟฟ้าแก่หัววัดรังสี และค่าศักดาไฟฟ้าให้แก่หัววัดรังสีจะต้องมีค่าหนึ่งที่เป็นแรงดันไฟฟ้าขณะใช้งาน (operating voltage)

2.3.3.1.2 preamplifier จะทำหน้าที่เปลี่ยนปริมาณของประจุจากหัววัดรังสีให้เป็น voltage pulse และตัดสัญญาณที่ไม่ต้องการ (noise) ออก ขนาดของ voltage pulse ที่เกิดขึ้น (V_o) แสดงได้ดังสมการ

$$V_o = \frac{Q_D}{C_f} \quad \text{-----} \quad (2.8)$$

C_f คือ feedback capacitance (pF)

2.3.3.1.3 amplifier จะรับสัญญาณที่ออกจาก preamplifier คือ V_o มาขยายให้ใหญ่ขึ้น และแต่งสัญญาณ (pulse shaping) เพื่อป้องกันการเหลื่อม (overlap) ของสัญญาณ และเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณที่ไม่ต้องการ

2.3.3.1.4 เครื่องวิเคราะห์ความสูงพัลส์แบบหลายช่อง (multichannel pulse height analyzer) สัญญาณที่ออกจาก amplifier เป็นสัญญาณอนาล็อก (analog) จะถูกส่งเข้าสู่ส่วนของ ADC (analog to digital converter) เพื่อเปลี่ยนขนาดความสูงของสัญญาณอนาล็อกให้กลายเป็นสัญญาณลอจิก (logic) เพื่อระบุตำแหน่งในระบบความจำ ซึ่งก็คือการระบุหมายเลขช่องนั่นเอง จำนวนครั้งของการนับจะถูกบันทึกไว้ในระบบความจำ โดยการจำแนกและเรียงลำดับตามช่วงพลังงาน แสดงผลออกทางจอเป็นสเปกตรัม (spectrum) ของรังสี

2.3.3.1.5 เครื่องพิมพ์หรือเครื่องเขียนกราฟ สำหรับพิมพ์ข้อมูล และเขียนกราฟสเปกตรัมของรังสี

2.3.3.2 ประสิทธิภาพของหัววัดรังสี (detector efficiency)

การสลายตัวโดยการแผ่รังสีของทุกไอโซโทป จะออกมาทุกทิศทางรอบๆ การวัดรังสีแกมมา ในเทคนิคนี้วัดรังสีจากทิศทางเดียวเท่านั้น ประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาของหัววัดรังสี ขึ้นกับพลังงานของรังสี ขนาดของหัววัดรังสี ระยะทางจากไอโซโทปรังสีถึงหัววัดรังสี และ

มุมของรังสีที่ตกกระทบซึ่งเป็นค่าเฉพาะ สามารถหาได้จากสมการ

$$\text{Eff} = \frac{\text{cps}}{\text{dps} \times f} \times 100 \quad \text{-----} \quad (2.9)$$

โดยที่	Eff	คือ ประสิทธิภาพของการวัดรังสี เป็นร้อยละ (%)
	cps	คือ อัตรานับ เป็นจำนวนนับ / วินาที
	dps	คือ ความแรงรังสี เป็นจำนวนการสลายตัว / วินาที
	f	คือ สัดส่วนของการสลายตัวให้รังสีที่ทำการวัด

การวิเคราะห์โดยเทคนิคแอกติเวชัน สามารถวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) จากพลังงานแกมมาที่มีค่าเฉพาะของแต่ละไอโซโทป และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (quantitative analysis) จากความแรงรังสีแกมมาของไอโซโทปนั้นๆ

2.3.4 วิธีการคำนวณหาปริมาณธาตุโดย เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันมี 2 วิธีคือ

2.3.4.1 absolute method เป็นวิธีการหาปริมาณธาตุจากการวัดความแรงรังสี แล้วคำนวณหาโดยอาศัยสมการ 2.8 และสมการ 2.9 จาก สมการ 2.9 เขียนใหม่ได้ว่า

$$\text{dps} = \frac{\text{cps}}{\text{Eff} \times f} \times 100 \quad \text{-----} \quad (2.10)$$

$$\text{โดยที่ } (\text{dps})_0 = A_0$$

แทนสมการ (2.10) ลงในสมการ (2.8) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{(\text{cps})_t \times 100}{\text{Eff} \times f} &= N_0 \phi (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t} \\ &= \frac{(6.02 \times 10^{23}) \times W \times K}{M} \phi (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t} \quad \text{-----} \quad (2.11) \end{aligned}$$

วิธีนี้มีโอกาสผิดพลาดได้มาก เพราะการหาค่าที่ถูกต้องของ Eff, ϕ , λ , และ t ได้ค่อนข้างยาก ข้อดีคือไม่ต้องมีสารมาตรฐาน (standard) ก็สามารถหาปริมาณของไอโซโทปเริ่มต้นได้ทุกตัวที่สามารถวัดความแรงรังสีของไอโซโทปรังสีที่เกิดจากไอโซโทปนั้นๆ ได้

2.3.4.2 relative method วิธีนี้ต้องมีสารมาตรฐานที่รู้ปริมาณธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ นำตัวอย่างและสารมาตรฐานที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปอาบรังสีนิวตรอนพร้อมกันที่ตำแหน่งและเวลาเท่ากัน จากนั้นจึงวัดความเข้มรังสี การคำนวณปริมาณธาตุในตัวอย่างจะคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\text{น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน}} = \frac{\text{ความเข้มรังสีของสารตัวอย่าง}}{\text{ความเข้มรังสีของสารมาตรฐาน}}$$

2.3.5 การวิเคราะห์โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน มี 2 แบบคือ (18)

2.3.5.1 การวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง nondestructive analysis หรือ Instrumental neutron activation analysis วิธีนี้เป็นวิธีที่นำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานไปอาบรังสีนิวตรอน แล้ววัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างและสารมาตรฐาน โดยที่ตัวอย่างและสารมาตรฐานไม่ถูกทำการเปลี่ยนแปลง โดยกระบวนการทางเคมีก่อนหรือหลังการอาบรังสี

2.3.5.2 การวิเคราะห์แบบทำลายตัวอย่าง (destructive analysis) การวิเคราะห์แบบนี้ยุ่งยากกว่าแบบแรก สารตัวอย่างหรือสารมาตรฐานจะผ่านกระบวนการทางเคมี ก่อนหรือหลังจากการอาบรังสีนิวตรอน แล้วจึงนำไปวัดความเข้มรังสี วิธีนี้จะใช้เมื่อไม่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยวิธีแรกได้

2.4 เทคนิคแทร็ก-เอทช์ และวิธีฟิชชันแทร็ก

เมื่อนิวคลีโอออนไคว่งผ่านวัสดุฉนวน จะเหนี่ยวนำให้เกิดการทำลายพันธะเคมีของวัสดุฉนวนนั้น ตามแนวที่วิ่งผ่าน เมื่อนำวัสดุนี้ไปทำการกัดรอยด้วยสารเคมีให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จะสามารถเห็นรอยที่เกิดจากอนุภาควิ่งผ่านได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา เทคนิคนี้เรียกว่า แทร็ก-เอทช์ (track-etch) (17,18)

ปี ค.ศ.1959 Silk และ Barner ได้ค้นพบการเกิดรอยลักษณะนี้เป็นคนแรก ซึ่งเป็นรอยที่เกิดจากฟิชชันแฟรกเมนต์ ซึ่งเรียกว่าฟิชชันแทร็ก (fission track) บนแผ่นไมกาเป็นคนแรก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จากนั้น Fleischer, Price และ Walker (19,20) ได้นำปรากฏการณ์ที่สำคัญนี้มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยสาขาต่างๆหลายแขนง เช่น นิวเคลียร์ฟิสิกส์ ธรณีฟิสิกส์ รังสีคอสมิก-ฟิสิกส์ เป็นต้น

เนื่องจากวัสดุฉนวนที่อนุภาควิ่งผ่านหรือเรียกว่าแผ่นบันทึกรอยนี้ จะเกิดรอยได้เฉพาะอนุภาควิ่งที่มีค่า energy-loss rate (dE/dx) มากกว่าค่า critical energy loss

rate $(dE/dx)_{cr.1e}$ ของแผ่นบันทึกรอย แผ่นบันทึกรอยแต่ละชนิดมีค่า $(dE/dx)_{cr.1e}$ เฉพาะ ช่วงแคบๆ ช่วงหนึ่ง และการเกิดรอยไม่ขึ้นกับจำนวนประจุของอิเล็กตรอน หรือแบบคร่าวๆ สักภาพใดๆ ดังนั้นการเลือกแผ่นบันทึกรอยที่เหมาะสม สามารถใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของอนุภาคที่วิ่งเข้าชนได้

อัตราการสูญเสียพลังงานอนุภาคมีประจุ (average energy loss) ต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของอนุภาคอิเล็กตรอนในแผ่นบันทึกรอย เท่ากับ

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 (Z_1^{eff})^2 NB}{mv^2} \quad \text{----- (2.12)}$$

- เมื่อ v คือ ความเร็วของอนุภาค
- m คือ มวลของอนุภาค
- e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน
- N คือ เลขอะตอมต่อหน่วยปริมาตรของแผ่นบันทึกรอย

สำหรับฟิซชันแฟรกเมนต์ ค่า Z_1^{eff} คำนวณได้จาก

$$Z_1^{eff} = Z_1^{1/3} (h / 2\pi e^2) \quad \text{----- (2.13)}$$

- เมื่อ Z_1 คือ เลขอะตอมของฟิซชันแฟรกเมนต์
- B คือ ค่า stopping number ของแผ่นบันทึกรอยซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$B = (4Z_2^{1/3} h) / (2\pi e^2) \quad \text{----- (2.14)}$$

- Z_2 คือ เลขอะตอมของแผ่นบันทึกรอย
- h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (21, 22)

กรณีฟิซชันแฟรกเมนต์ เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีเลขอะตอมเบาๆ ค่า B จะเท่ากับ

$$B = Z_2 \ln(1.123 mV^3 / W e^2 Z_1^{eff}) \quad \text{---- (2.15)}$$

W เป็นค่าเฉลี่ยของการสั่น (average oscillation frequency) ของอิเล็กตรอนในแผ่นบันทึกรอย

พหุคูณของฟิชชันแฟรกเมนต์คำนวณได้ โดย Bueygild (23) ให้มีค่า

$$R = \text{const } A^{-1/3} E^{1/2} \text{ ----- (2.16)}$$

const คือ ค่าคงที่ของตัวกลาง หรือแผ่นบันทึกรอย

A คือ เลขมวลของแฟรกเมนต์

E คือ พลังงานของแฟรกเมนต์นั้น

ในปฏิกิริยาฟิชชัน แฟรกเมนต์ที่ได้จะมีประจุเป็นสัดส่วนกับเลขมวลของแฟรกเมนต์ (A) จากกฎการทรงของโมเมนตัม (momentum conservation) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_L^* E_L^* = A_H^* E_H^*$$

และ

$$E_N / A_N = E_N^* / A_N^*$$

เมื่อ L และ H คือ แฟรกเมนต์ที่มีมวลเบา และหนักตามลำดับ

N หมายถึง L หรือ H อย่างใดอย่างหนึ่ง

* หมายถึง ปริมาณก่อนที่จะคายพรมบ์นิวตรอน นั้น คือ

$$A_N^* = A_N + (A_N^*) \text{ ----- (2.17)}$$

เมื่อ (A_N^*) = ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนที่คายออกจากแฟรกเมนต์ (A_N^*) จากความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ จะได้สัดส่วนของระยะทางของแฟรกเมนต์ ดังนี้

$$R_L / R_H = (A_L / A_H)^{1/3} (A_H^* / A_L^*) \text{ ----- (2.18)}$$

2.4.1 กลไกการเกิดรอยบนแผ่นบันทึกรอย

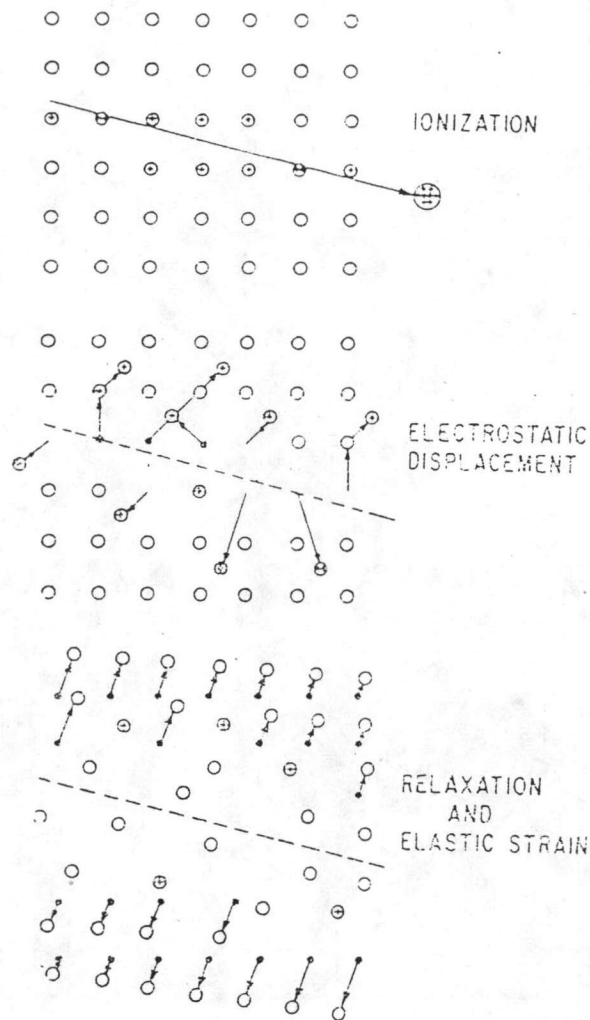
ขณะที่อนุภาคหรืออะตอมที่มีเลขอะตอม Z มีความเร็ว v ผ่านของแข็งหรือแผ่นบันทึกรอย อะตอมของแผ่นบันทึกรอยจะกลายเป็นไอออนอย่างรวดเร็ว โดยการหลุดไปของอิเล็กตรอนบางตัวที่อยู่รอบนอก การหลุดของอิเล็กตรอนนี้เป็นผลจากการกระทำ (interact) ระหว่างอิเล็กตรอนรอบๆ ของอะตอมที่วิ่งเข้ามากับอิเล็กตรอนของอะตอมแผ่นบันทึกรอย ผลที่ได้คืออนุภาคไอออนจะมีประจุบวกเท่ากับ Z^* Heckman (24) ให้ค่า Z^* นี้เท่ากับ

$$Z^* = Z[1 - \exp(-130\beta / Z^{2/3})] \text{ ----- (2.19)}$$

$$\beta = v / C$$

$$C = \text{คือ ความเร็วของแสง}$$

แรงที่สำคัญคือแรงไฟฟ้า (electrical force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างไอออนที่วิ่งเข้ามากับอิเล็กตรอนของอะตอมแผ่นบันทึกรอย ผลของแรงนี้อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า หรืออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ในสารโพลีเมอร์เกิดการเหนี่ยวนำการแตกของโมเลกุลเป็นลูกโซ่ และเกิดเรดิคอลอิสระ ส่วนในของแข็งทั่วไปอิเล็กตรอนที่หลุดไปซึ่งเรียกว่า รังสีเดลต้า (delta-ray) จะเหนี่ยวนำให้เกิดการไอออไนเซชัน และอิเล็กไซเตชันแบบปฐมภูมิและทุติยภูมิ จะเกิดที่ใกล้ๆ กับทางวิ่งของอนุภาคไอออนที่เข้ามา การเกิดไอออไนเซชันมากมายตลอดระยะทางที่อนุภาควิ่งผ่านนี้เรียกว่า ion explosion spike ส่วนอะตอมของแผ่นบันทึกรอยที่ติดกับวิถีของอนุภาคจะกระเด็นออกไปจากตำแหน่งเดิม รอยที่เกิดขึ้นสามารถเห็นได้จาก Transmission Electron Microscope

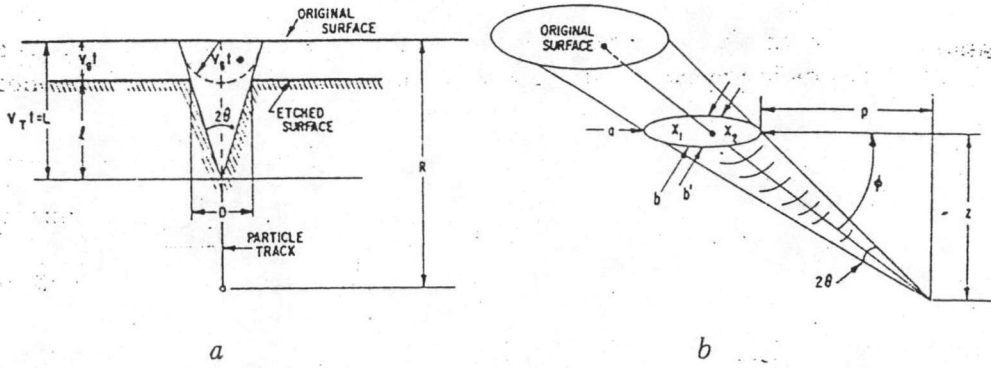


รูป 2.1 แสดงกลไกการเกิด ion explosion spike แล้วได้รอยบนแผ่นของเซมิคอนดักเตอร์

2.4.2 กระบวนการกัดรอย

เนื่องจากรอยบนแผ่นบันทึกรอยมีขนาดเล็กมากสามารถเห็นได้ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น การนำแผ่นบันทึกรอยมาทำการสัปดาห์เพื่อขยายรอยด้วยสารเคมี และเงื่อนไขที่เหมาะสม จะสามารถขยายรอยให้มีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณพันเท่า และสังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา (25, 26)

ลักษณะเรขาคณิตของรอยในการกัดรอยด้วยสารเคมี แผ่นบันทึกรอยทั้งชิ้นจะถูกสารเคมีกัดไปด้วยพร้อมกัน ไม่แต่เฉพาะรอยที่เกิดจากอนุภาควิ่งผ่านเท่านั้น แต่ว่าส่วนตรงรอยจะกัดต่อสารเคมี และถูกกัดได้เร็วกว่า ให้ความเร็วที่ส่วนนี้เป็น V_T และความเร็วในการทำปฏิกิริยาของส่วนที่ปรกติที่ไม่ถูกทำลายว่าเป็น V_0 ดังนั้น V_T จะมากกว่า V_0 เมื่อเรากัดด้วยเวลา T ซึ่งเป็นค่าคงที่ ความหนาที่ถูกสกัดออกไปของผิวแผ่นบันทึกรอยเท่ากับ $V_0 T$ และค่า V_T คงที่ ความลึกของรอยที่ถูกสกัดเท่ากับ $V_0 T$



รูป 2.2 แสดงลักษณะเรขาคณิตของรอยที่มีค่า V_T และ V_0 คงที่
 a) แสดงอนุภาคเข้าชนในแนวตั้ง
 b) อนุภาคเข้าชนด้วยมุมเอียงเท่ากับ ϕ

จากรูปรอยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง D และขนาดความลึกที่เห็นเท่ากับ l
 รอยมีลักษณะเป็นรูปกรวยที่มีมุมเท่ากับ ϕ
 จะได้

$$\begin{aligned}
 l &= (V_T - V_0)T \\
 \phi &= \arcsin (V_0 / V_T) \\
 D &= 2 V_0 T \sqrt{(V_T - V_0) / (V_T + V_0)}
 \end{aligned}$$

ทั้งค่า l และ D ติดอยู่ในเทอม V_0 และ V_T เราสามารถหาค่า $V_0 T$ และ $V_T T$ ในเทอมที่สามารถวัดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_T / V_0 &= 2\sqrt{(D / 2)^2 + l^2} / D \\
 &= \csc \theta \\
 V_0 T &= (D / 2)[D / 2l + \sqrt{(D / 2)^2 + l^2} / l] \\
 &= (D / 2)(\tan \theta + \sec \theta) \\
 V_T T &= \sqrt{(D / 2)^2 + l^2} (D/2l + \sqrt{(D / 2)^2 + l^2} / l) \\
 &= D \csc \theta (\tan \theta + \sec \theta) / 2
 \end{aligned}$$

ในรูป b อนุภาคเข้าชนด้วยมุม ϕ กับผิวแผ่นบันทึกรอย ดังนั้นรอยที่มีลักษณะรูปโค่น ส่วนที่ปากโค่น หรือที่ผิวแผ่นบันทึกรอยจะเป็นวงรีไม่ใช่นางกลมเหมือนที่อนุภาคเข้าชนในแนวตั้งตั้งฉากเราจะหาค่า ϕ , e , และ L ในเทอมที่วัดได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\phi &= [\arctan (Z / (a + p)) + \arctan (Z / p)] / 2 \\ &= \arcsin \left[\frac{\sqrt{Z^2 + p^2} \sqrt{(a + p)^2 + Z^2} - p^2 - ap + Z^2}{2\sqrt{Z^2 + p^2} \sqrt{(a + p)^2 + Z^2}} \right]^{1/2}\end{aligned}$$

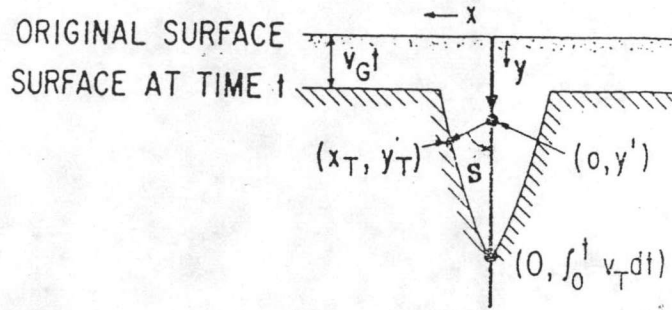
$$\begin{aligned}e &= [-\arctan (Z / (a + p)) + \arctan (Z / p)] / 2 \\ &= \arcsin \left[\frac{\sqrt{Z^2 + p^2} \sqrt{(a + p)^2 + Z^2} - p^2 - ap + Z^2}{2\sqrt{Z^2 + p^2} \sqrt{(a + p)^2 + Z^2}} \right]\end{aligned}$$

$$L = (Z + V_0 T) / \sin \phi \quad \text{----- (2.20)}$$

โดยความสัมพันธ์ของโคไซน์ชั้นต่างๆ ของวงรีที่เป็นปากของกรวยตรงผิวของแผ่นบันทึกรอยมีดังนี้

$$\begin{aligned}b'/b &= [1 - (\sin^2 e / \sin^2 \phi)] / (1 - \sin^2 e) \\ b &= 2 V_0 t (\sin \phi - \sin e) \sqrt{\sin \phi + \sin e} \\ a &= 2 V_0 t (\sin \phi - \sin e) \cos e / [\sin(\phi + e) \sin(\phi - e)] \\ x_2 &= V_0 t (1 - \sin e / \sin \phi) / \sin(\phi + e) \\ x_1 &= V_0 t (1 - \sin e / \sin \phi) / \sin(\phi - e) \\ b' &= 2 V_0 t (\sin \phi - \sin e) / \cos e \cdot \sin \phi\end{aligned}$$

ตามปรกติ V_T ไม่คงที่ และเพิ่มตามอัตราไอออนไนเซชัน แต่ถ้าเวลาที่กั้นน้อยมาก เราสามารถประมาณให้ v_T คงที่ได้ กรณีที่ V_T ไม่คงที่ รอยที่ได้ไม่เป็นรูปกรวยแต่จะคล้ายๆ ใบเรือดังนี้(24)



รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางของรอสบนแผ่นของแข็ง เมื่อ V_T ไม่คงที่

จากรูป ที่จุด $y_0(x_0)$ ได้ $V_c(y)$ แปรตามแนวแกน y และที่ x_0 จะได้ $y_0 = V_T T$ ได้เวลาในการสกัดขยายรอสถึงจุด (x_c, y_c) เท่ากับ

$$t = dy / V_c(y) + [(y_c - y')^2 + x_c^2]^{1/2} / V_T \text{ ----- (2.21)}$$

สมการนี้เทอมแรกคือ เวลาสกัดขยายรอสจาก $(0,0)$ ถึง $(0,y')$ ส่วนเทอมที่สองคือ เวลาสกัดขยายรอสจาก $(0,y')$ ถึง (x_c, y_c) จากระยะ $(0,0)$ ถึง (x_c, y_c) สัมพันธ์กับเวลาที่สั้นที่สุด โดยที่อนุพันธ์ของเวลาที่เกี่ยวกับ y' และให้มีค่าเท่ากับศูนย์จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$y' = (y_c - x_c) / [(V_c(y') / V_T)^2 - 1]^{1/2}$$

จากรูป (2.3) $S = \arctan [x_c / (y_c - y')]$

เราสามารถเขียนสมการ (2.21) ใหม่ได้ดังนี้

$$x_c = [(y_c - y')^2 + x_c^2]^{1/2} \sin(S)$$

$$y_c = y' + [(y_c - y')^2 + x_c^2]^{1/2} \cos(S)$$

หรือจะเขียนให้อยู่ในเทอม

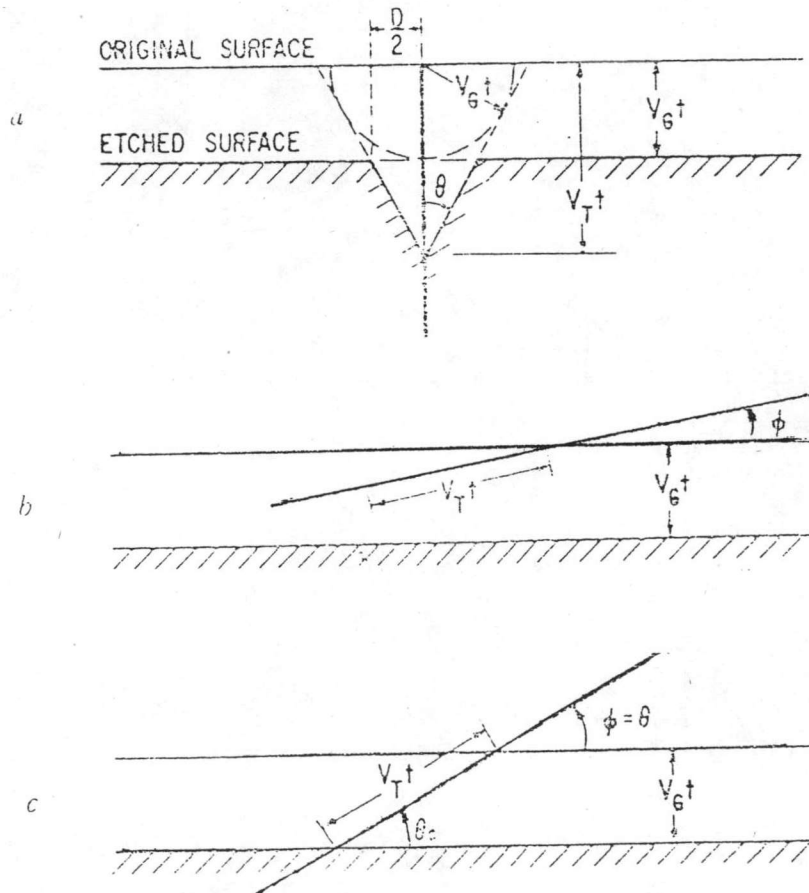
$$x_c = V_G [t - \int_0^{y'} dy / V_T(y)] [1 - V_G^2 / V_T^2(y')]^{1/2}$$

$$y_c = y' + V_G^2 / V_T(y') [t - \int_0^{y'} dy / V_T(y)]$$

ถ้าหากอนุภาคเข้าชนแผ่นบันทึกรอยด้วยมุมที่น้อยกว่ามุมกรวย θ แล้ว ในการก๊อจะไม่เห็นรอย เพราะถูกก๊อดอกจนหมดเสมอกับผิวแผ่นบันทึกรอย ดังนั้นมุมที่อนุภาควิ่งเข้าชนแผ่นบันทึกรอย (ϕ_c) จึงมีความสำคัญ เพราะบอกถึงประสิทธิภาพของการบันทึกรอย (registration efficiency) โดยประสิทธิภาพในการก๊อ (n) เท่ากับ

$$n = 1 - \sin \theta$$

ภาพข้างล่างนี้อธิบายถึงเหตุที่มุมตกกระทบที่น้อยกว่า θ ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยการก๊อ



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะมุมตกกระทบ (ϕ) ลักษณะต่างๆ

- จากรูป (a) แสดงให้เห็นมุมกรวย θ ขึ้นกับ V_T และ V_G
 (b) แสดงมุมตกกระทบ ϕ ที่น้อยกว่า $\arcsin(V_G / V_T)$
 (c) แสดง $\arcsin(V_G / V_T)$ เท่ากับมุมวิกฤต θ ที่รอยจะสามารถเห็นได้
 ถ้าหากมุม ϕ น้อยกว่า θ นี้แล้วรอยจะไม่สามารถเห็นได้ .

2.4.4 การคำนวณหาจำนวนรอย

เนื่องจากจำนวนรอยที่เกิดขึ้น สัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคที่วิ่งเข้าชนเช่นเดียวกับสารพิษชาย เช่น U-235 เมื่อแตกตัวให้นิวตรอนแฟรกเมนต์ 2 ตัวที่ทำให้เกิดรอยบนแผ่นบันทึกรอยได้ การนับจำนวนรอยจะสามารถคำนวณหาปริมาณยูเรเนียมได้ โดยการเปรียบเทียบจำนวนรอยจากสารมาตรฐานที่รู้ปริมาณยูเรเนียมแน่นอน อาบรังสีนิวตรอนในปริมาณเท่ากัน และทำการกัดรอยด้วยเงื่อนไขอันเดียวกัน

การนับจำนวนรอย จะนับจำนวนรอยในพื้นที่ที่แน่นอนขนาดหนึ่ง มาเทียบกับจำนวนรอยของสารมาตรฐานจากพื้นที่เท่ากัน จำนวนรอย (T) ที่ได้จากนิวตรอนแฟรกเมนต์นี้ มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$T = K n b \phi t$$

- เมื่อ K คือ ค่าคงที่ ขึ้นกับประสิทธิภาพในการบันทึกรอย
 n คือ จำนวนอะตอมพิษชายล์ (fissile)
 b คือ ค่าภาคตัดขวางของการแตกตัว (cm^2)
 ϕ คือ ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอน ($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{Sec}$)
 t คือ เวลาที่ใช้อาบรังสีเทอร์มัลนิวตรอน (Sec)

จะเห็นว่าในสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานที่อาบรังสีนิวตรอนพร้อมกันนั้น ค่า b, ϕ , t เป็นค่าคงที่ จำนวนรอยจะแปรตามปริมาณพิษชายล์อย่างเดียว (28,29)