

บทที่ 2

ทฤษฎี



2.1 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (3)

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมต่าง ๆ ทั้ง 3 อนุกรมจะ เริ่มจากธาตุที่เป็น ต้นตระกูล (parent) สลายตัวให้รังสีกับธาตุใหม่ (daughter) ธาตุใหม่ซึ่งยังไม่อยู่ตัว ก็จะมีการสลายตัวเรื่อย ๆ จนกระทั่งอยู่ตัว (stable) การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี เป็น ขบวนการแบบลุ่ม (random process) คือถ้ามีอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีอยู่ N อะตอม เราไม่สามารถจะบอกได้ว่าอะตอมไหนบ้างที่จะสลายตัว แต่พบว่าอัตราการสลายตัวแปรผันโดยตรง กับจำนวนอะตอมที่มีอยู่ ถ้าให้ ΔN เป็นจำนวนนิวเคลียสที่สลายตัวในช่วงเวลา Δt สามารถ เขียนเป็นสมการได้

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad 2.11$$

โดยที่ λ คือค่าคงที่การสลายตัวของธาตุใดธาตุหนึ่ง สำหรับเครื่องหมายลบ แสดงว่า การสลายตัวนี้ทำให้จำนวนอะตอมลดลง ถ้าพิจารณาในช่วงเวลา (Δt) น้อย ๆ สามารถ จะเขียนสมการ 2.11 ให้อยู่ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลได้

$$dN = -\lambda N dt \quad 2.12$$

อินทิเกรตสมการ 2.12 จะได้

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad 2.13$$

เมื่อ N_0 เท่ากับจำนวนอะตอมเริ่มต้นก่อนเวลา t

2.2 การสลายตัวที่เป็นอนุกรม⁽³⁾

จากการสลายตัวของธาตุต้นตระกูลไปเป็นธาตุใหม่แล้วมีการสลายตัวต่อไปเรื่อย ๆ นั้น ปริมาณของธาตุตัวใดตัวหนึ่งในตระกูลจะขึ้นอยู่กับค่าการสลายตัวของสมาชิกที่อยู่ข้างหน้าและอัตราการสลายตัวของมันเอง ถ้ากำหนดให้

- N_1 เป็นจำนวนอะตอมของธาตุที่ 1 (parent) ซึ่งมีค่าคงที่ในการสลายตัว λ_1
- N_2 เป็นจำนวนอะตอมของธาตุที่ 2 (daughter I) ซึ่งมีค่าคงที่ในการสลายตัว λ_2
- N_3 เป็นจำนวนอะตอมของธาตุที่ 3 (daughter II) ซึ่งมีค่าคงที่ในการสลายตัว λ_3
- N_n เป็นจำนวนอะตอมของธาตุที่ n (daughter n-1) ซึ่งมีค่าคงที่ในการสลายตัว λ_{n-1}

สามารถจะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนอะตอมที่สลายตัวต่อเนื่องกันได้คือ

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n$$

ถ้ากำหนดเงื่อนไขเมื่อเวลา $t = 0$, $N_1 = N_1^0$, $N_2 = N_3 = \dots = N_n^0 = 0$

สามารถคำนวณหาจำนวนนิวเคลียสได้คือ

$$N_n(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + C_3 e^{-\lambda_3 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad 2.22$$

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

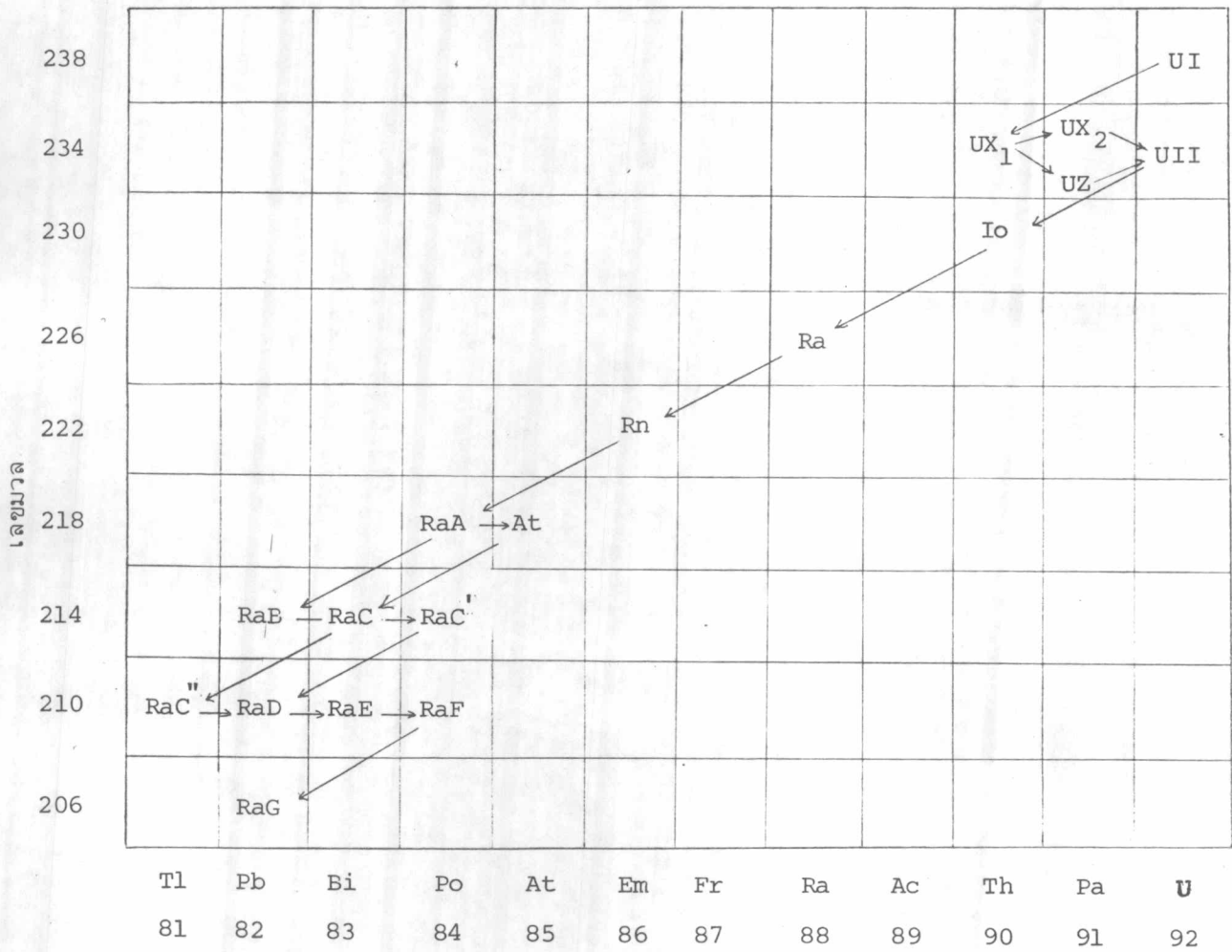
$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_1^0$$

2.23

$$C_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3) \dots (\lambda_n - \lambda_3)} N_1^0$$

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

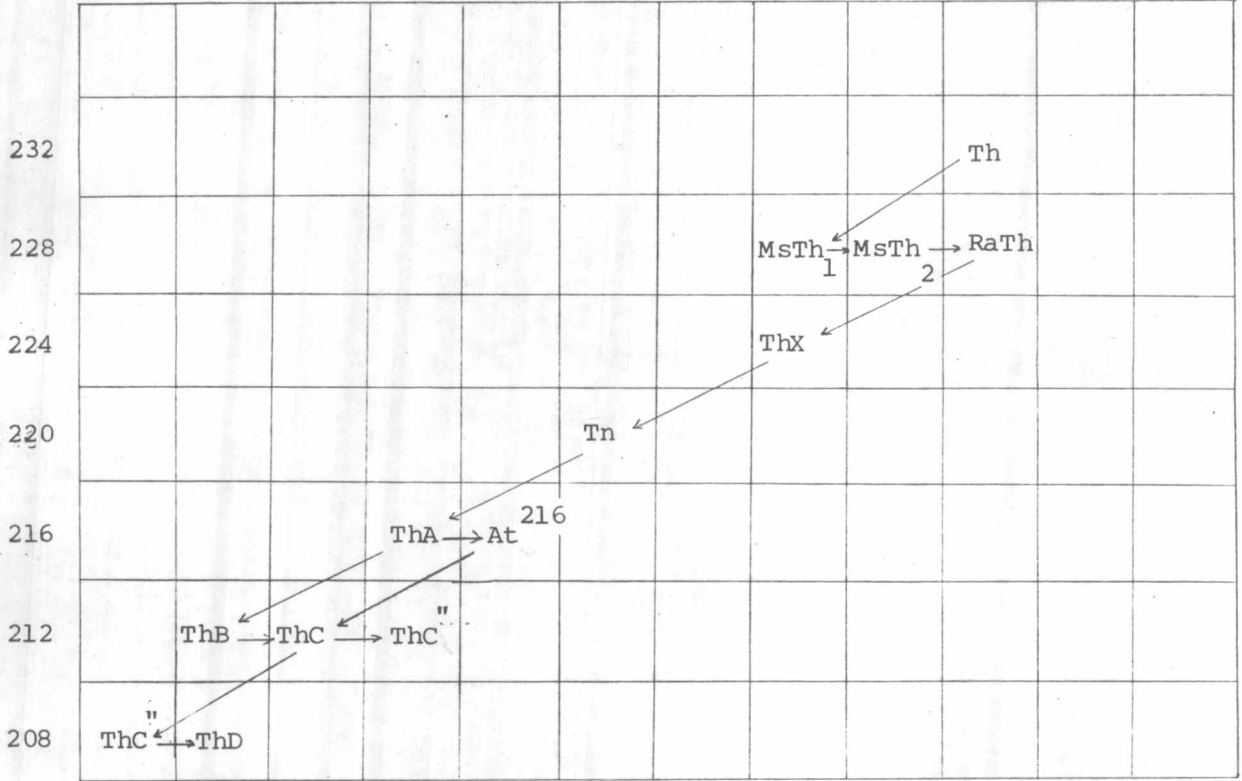
สมการที่ 2.21, 2.22 และ 2.23 เรียกว่าสมการเบตมาน (bateman equation) (3)



เลขอะตอม

รูปที่ 2-1⁽³⁾ แสดงโคจรอนุกรมยูเรเนียม (4n + 2)

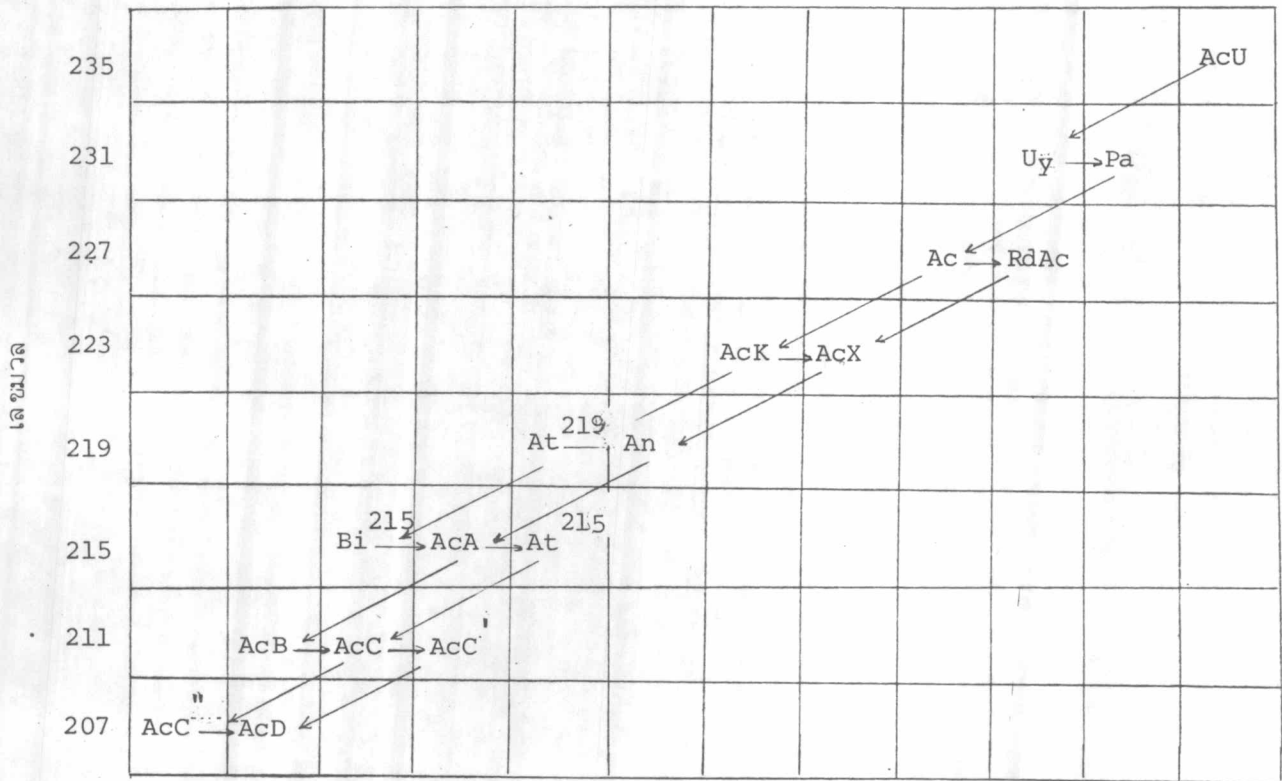
เลขมวล



Tl	Pb	Bi	Po	At	Em	Fr	Ra	Ac	Th	Ra	U
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92

เลขอะตอม

รูปที่ 2-2⁽³⁾ แสดงไดอะแกรมอนุกรมทอเรียม (4n)



Tl	Pb	Bi	Po	At	Em	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92

เลขอะตอม

(3)
 รูปที่ 2-3 แสดงโคจรแกมมอนุกรมแอกติเนียม (4n + 3)

2.3 การเกิดรอย (Track Formation) (2, 6, 7, 9)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุบวก เช่น อนุภาคอัลฟา หรือนิวเคลียสของธาตุวิ่งผ่านเข้าไปในของแข็งที่เป็นฉนวน มันจะคายพลังงานให้แก่อะตอมของวัตถุตามทางที่เคลื่อนที่ไป ทำให้โครงสร้างของวัตถุในบริเวณที่อนุภาคผ่านได้รับความเสียหายเกิดเป็นรอยขึ้นมา สำหรับวัตถุที่เป็นฉนวนจะปรากฏรอยอย่างถาวร แต่รอยนี้จะเกิดได้ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียพลังงาน $(\frac{dE}{dx})$ ของอนุภาคมีค่ามากกว่าอัตราการสูญเสียพลังงานวิกฤติ (critical energy loss) $(\frac{dE}{dx})_c$ เท่านั้น ของแข็งแต่ละชนิดมีค่าพลังงานวิกฤติที่แตกต่างกัน จากการทดลองของอาร์ แอล ฟลิสเชอร์ (R.L. Fleischer) โดยการให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในของแข็งชนิดต่าง ๆ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการเกิดรอย (track registration efficiency) ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 (7) แสดงค่า $(\frac{dE}{dx})_c$ ของแผ่นบันทึกรอยที่เป็นวัตถุชนิดต่าง ๆ

Material	Critical rate of energy loss* $(\frac{dE}{dx})_c$ ($10^7 \text{ MeV} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	Lightest detectable ion	Atomic no. Z
Procene	20	Ca	20
Zircon	19	Ca	
Tektite glass	15	S	16
Quartz	15	S	
Mica	13	Si	14
Polyester resin	4	O	8
Polycarbonate	4	C	6
Cellulose acetate buty rate	2	He	2
Cellulose nitrate	2	H	1

2.4 การเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้ากับสสาร (Interaction of charge particle with matter)

ขณะที่อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลาง พลังงานจลน์ของอนุภาคจะลดลง เนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาคกับอะตอมของตัวกลาง เป็นผลให้เกิดไอออนและความโลด (Ionization and excitation) เมื่ออนุภาคสูญเสียพลังงานไป ความเร็วก็จะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งหยุดนิ่ง ในปี 1930 เบเท (Bethe) ได้ทำการคำนวณอัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคต่อระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในตัวกลาง $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้ (2, 4, 5, 8)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 NZ}{mv^2} \left[\ln \frac{2mv^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad 2.41$$

เมื่อ $-\frac{dE}{dx}$ = อัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง (MeV.m²/kg)

e = ประจุของอิเล็กตรอน (-1.6×10^{-19} coulomb)

z = จำนวนประจุของอนุภาคที่เข้ามา

m = มวลของอิเล็กตรอนที่หยุดนิ่ง (กิโลกรัม)

N = ความหนาแน่นของอะตอมของตัวกลาง (ต่อลูกบาศก์เมตร)

Z = เลขอะตอมของตัวกลาง

v = ความเร็วของอนุภาค (เมตร/วินาที)

β = $\frac{v}{c}$

c = ความเร็วของแสง (เมตร/วินาที)

I = ค่าศักย์ของความโลดเฉลี่ย (mean excitation potential) (MeV)



โดยที่ค่า $\frac{dE}{dx}$ กำหนดเป็นค่าอำนาจในการหยุดยั้ง (stopping power) ของอนุภาค ซึ่ง
มีผลทำให้เกิดไอออนปฐมภูมิ ปริมาณของไอออนปฐมภูมิ $\left(\frac{dJ}{dx}\right)$ สามารถคำนวณได้^(2, 8, 10)

$$\frac{dJ}{dx} = \left(\frac{\alpha Z e^2}{I_0 \beta^2} \right) \left[\ln \left(\frac{2mc^2 \beta^2}{(1-\beta^2) I_0} \right) - \beta^2 + 3.04 \right] \quad 2.42$$

เมื่อ α = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของสสารที่อนุภาค เคลื่อนที่

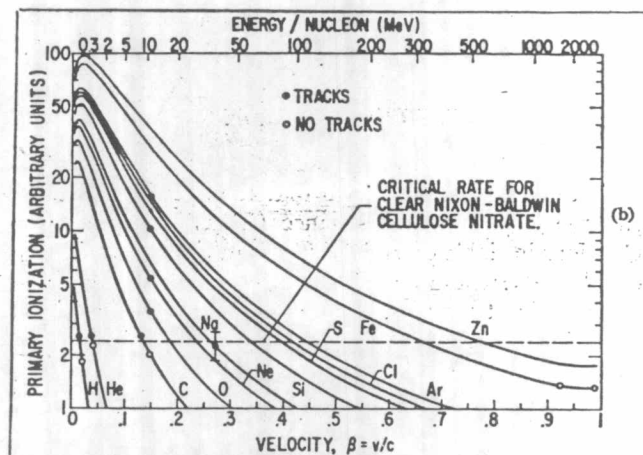
I_0 = พลังงานที่ทำให้ไอออนแตกตัวเป็นไอออนในสสาร (MeV)

Z_e = คือประจักษ์ผล (effective charge) ของอนุภาค (คูโลมบ์)

ซึ่งสามารถจะคำนวณหาค่า Z_e ได้

$$Z_e = Z \left(1 - e^{-125\beta/Z^3} \right) \quad 2.43$$

เมื่อ Z = ขนาดของประจุของอนุภาค

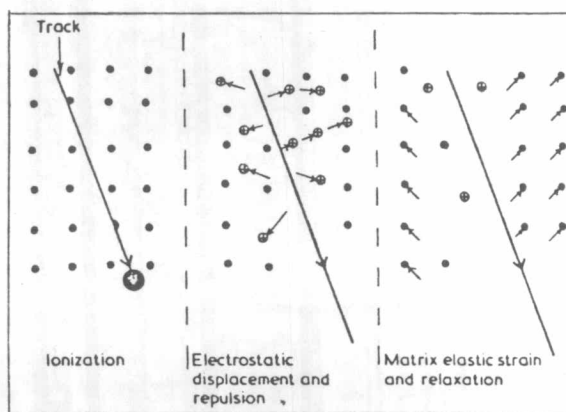


(8)
รูปที่ 2-4 แสดงการเกิดไอออน เมื่ออนุภาคชนิดต่าง ๆ เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปใน
เซลลูโลสไนเตรท

2.4.1 การเกิดรอยในสารอนินทรีย์ (Track Formation in Inorganic Detectors)

วิธีที่จะอธิบายถึงกลไกการเกิดรอยในแผ่นบันทึกชนิดที่เป็นผลึกสารอนินทรีย์มีหลายวิธีด้วยกัน แต่การอธิบายที่สมบูรณ์แบบมากที่สุดคือ การระเบิดของไอออน^(2, 7) (ion explosion spike) | ซึ่งมีขบวนการเกิดแบ่งเป็นขั้นตอนได้คือ

1. การเกิดเป็นไอออน (ionizations) เมื่ออนุภาคที่มีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในของแข็งจะทำให้เกิดอันตรกิริยา (interaction) กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนเกิดความโลด (excitation) หรือหลุดออกไปจากอะตอม เรียกว่าการเกิดไอออนปฐมภูมิ (primary ionizations) อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่ารังสีเดลตา (delta rays) รังสีเดลตานี้ถ้าหากมีพลังงานมากพอก็จะไปกระทำต่ออะตอมอื่น ๆ ต่อไป ทำให้เกิดไอออนทุติยภูมิ (secondary ionizations)
2. เกิดการขจัดทางไฟฟ้า (electrostatic displacement) เมื่อเกิดไอออนบวกขึ้นจากตอนที่ 1 แล้วไอออนบวกเหล่านี้จะผลักรันด้วยแรงคูลอมบ์ ทำให้อิออนเคลื่อนที่ไปเบียดกับผลึกที่ติดไปเกิดเป็นความเครียดขึ้น
3. เกิดการผ่อนคลายความเครียด (relaxation and elastic strain) ความเครียดจากตอนที่ 2 จะแผ่กระจายไปยังผลึกต่อ ๆ ไปทุกทิศทาง และทั้งร่องรอยถูกทำลายให้ปรากฏอยู่

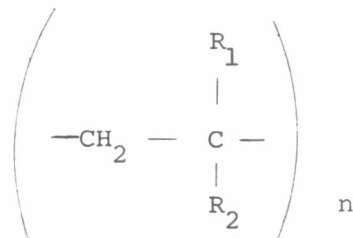


รูปที่ 2-5 แสดงการเกิดรอยของสารอนินทรีย์ตามขั้นตอนต่าง ๆ

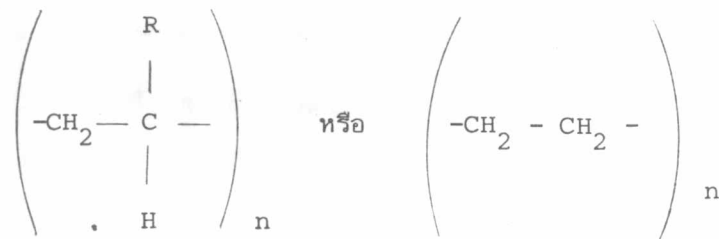
2.4.2 การเกิดรอยในสารโพลิเมอร์ (Track Formation in Polymer Detectors) (2, 7)

โดยทั่ว ๆ ไปแล้วสารที่เป็นโพลิเมอร์ สามารถจะบันทึก รอยของอนุภาค ได้ดีกว่าสารพวกอนินทรีย์ รอยที่เกิดในสารพวกนี้นอกจากเกิดจากการระเบิดของไอออนแล้วรังสีเตลต่ายังเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดรอยขึ้นมาอีกด้วย กล่าวคือ ในขณะที่อนุภาค เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปทำให้เกิดไอออนปฐมภูมิและรังสีเตลตา รังสีเตลต่ายจะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (radiochemical damage) ทำให้อะตอมเกิดการขจัด (atomic displacements) ดังนั้นบริเวณที่อนุภาค เคลื่อนที่ผ่าน ไปจึงถูกทำลายมากขึ้น จากการคำนวณประมาณได้ว่า สำหรับอนุภาคอัลฟาที่มีพลังงานในหน่วย MeV เส้นผ่าศูนย์กลางของรอยที่ถูกทำลายมีค่า 100 ถึง 200 นาโนเมตร

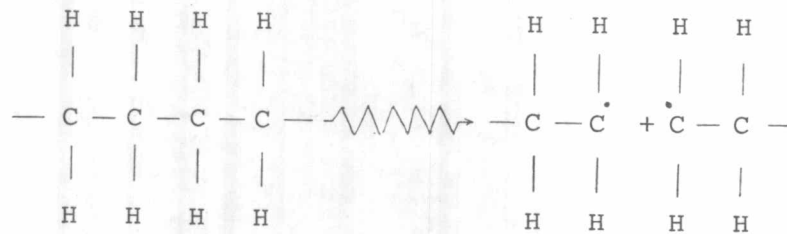
ขบวนการที่โครงสร้างของโพลิเมอร์ถูกทำลายด้วยรังสีเตลตา อธิบายได้โดยการตัด (scission) หรือการต่อ (cross - linking) แขนของโมเลกุล กฏอันนิ่งมูลเลอร์ (Muller) ได้ทำนายเอาไว้ เรียกว่า กฏเอ็มไพริคัล (empirical rule) และได้เขียนโครงสร้างทั่ว ๆ ไปของโมเลกุลโพลิเมอร์สำหรับการตัด (chain scission) เป็น



ขณะที่โครงสร้างสำหรับการต่อเป็น

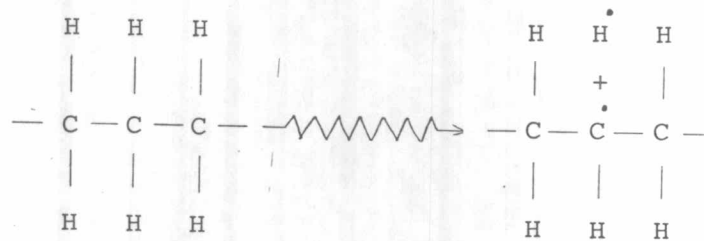


เช่นตัวอย่างของสารโพลีเอทเทอลิน (polyethylene) รังสีเตลตาจะทำลายแขนของโมเลกุล ระหว่าง คาร์บอน (C - C backbone bonds) ทำให้เกิดเรดิคัลอิสระ (free radical) ขึ้นมา



003947

หรือโดยการตัดแขนของโมเลกุลระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน (C - H)



ขณะที่ C^\cdot คือ คาร์บอนเรดิคัล (carbone radical) H^\cdot คือไฮโดรเจนเรดิคัล (hydrogen radical)

2.5 การกัดรอย (Track Etching) ^(2, 6, 7)

รอยของอนุภาคที่ปรากฏในวัตถุจะมองเห็นได้ก็ต่อเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเท่านั้น แต่มีวิธีที่จะขยายรอยให้มีขนาดโตขึ้นจนสามารถจะมองเห็นได้โดยการใช้อัลตร้าไมครอนมิเตอร์ใช้แสงธรรมดา การขยายรอยนี้ทำได้โดยนำแผ่นบันทึกรอยไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิดที่เหมาะสม เรียกว่าการนำไปกัดรอย (etching) เงื่อนไขในการกัดรอยโดยใช้สารละลายเคมีนั้นขึ้นกับแฟกเตอร์ (factors) ที่สำคัญ 3 อย่างคือ

1. ความเข้มข้นของสารละลายเคมี
2. อุณหภูมิของสารละลายเคมี
3. เวลาในการกัศรอย

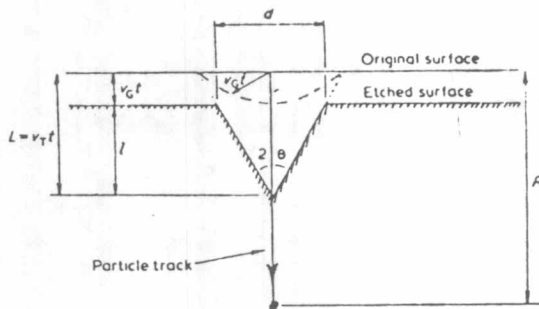
ตารางที่ 2-2⁽⁷⁾ แสดงเงื่อนไขในการกัดรอยในสารชนิดต่าง ๆ

Material	Etching conditions
Feldspar (Albite, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)	3g NaOH:4g H_2O , 85 min, boiling
Feldspar (Anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)	3g NaOH:4g H_2O , 14 min, boiling
Feldspar (Microcline, Orthoclase, KAlSi_3O_8)	5g KOH:1g H_2O , 80 min, 190°C
Fluorite (CaF_2)	98% H_2SO_4 , 10 min, 23°C
Autunite ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_2\text{P}_2\text{O}_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)	10% HCl, 10-30 sec, 23°C
Mica (Biotite, $\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	20% HF, 1-2 min, 23°C
Mica (Lepidolite; Zinnwaldite, $\text{K}_2\text{Li}_3\text{Al}_4\text{Si}_7\text{O}_{21}(\text{OH}, \text{F})_3$)	48% HF, 3-70 sec, 23°C
Mica (Muscovite, $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	48% HF, 10-40 min, 23°C
Mica (Phlogopite; Lepidomelane, $\text{KMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$)	48% HF, 1-5 min, 23°C
Quartz (SiO_2)	KOH(aq), 3h, 150°C , or 48% HF, 24h, 23°C
Lead phosphate glass	1ml 70% HNO_3 :3ml H_2O , 2-20 min
Phosphate glass	48% HF, 5-20 min
Silica glass (fused quartz; Vycor; Libyan Desert Glass)	48% HF, 1 min



Soda-lime (microscope slide; cover slip; window glass)	48%HF, 5 sec (better: 5% HF, 2min) 24% HBF_4 :5% HNO_3 :0.5% acetic acid, 1h
Cellulose acetate (Kodacel; Triafol T; Cellit)	1 ml 15% NaClO:2ml 6.25N NaOH, 1 h, 40°C 25 g NaOH:20 g KOH:4.5 g KMnO_4 : 90 g H_2O , 2-30 min, 50°C 6.25 N NaOH, 12 min, 70°C 6.25 NaOH, 2-4 h, 23°C
Cellulose acetate butyrate	
Cellulose nitrate (Diacell; Nixon-Baldwin)	
Cellulose triacetate (Kodacel TA 401, unplasticized; Bayer TN) HBpaIT (Polyester, $\text{C}_{17}\text{H}_{19}\text{O}_2$) Ionomeric polyethylene (Surlyn)	1 ml 15% NaClO:2 ml 6.25 N NaOH, 1 h, 40°C 6.25 N NaOH, 8 min, 70°C 10 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:35 ml 30% H_2SO_4 1h, 50°C KMnO_4 (25%, aq), 1.5 h, 100°C 6N NaOH solution
Polyamide (H-film)	
Polyimide	KMnO_4 in H_2O
Polycarbonate (Lexan; Makrofol; Merlon; Kimfol)	6.25 N NaOH, 20 min, 50°C 6.25 N NaOH + 0.4% Benax, 20 min, 70°C
Polyethylene terephthalate (Mylar, Chronar, Melinex, Terphane)	6.25N NaOH, 10 min, 70°C KMnO_4 (25%, aq), 1h, 55°C
Polystyrene	sat. KMnO_4 , 2.5 h, 85°C 10 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 35 ml, 30% H_2SO_4 3h, 85°C
Silicone-polycarbonate copolymer	6.25 N NaOH, 20 min, 50°C

สารละลายเคมีที่จะใช้ในการกัดรอยนั้นต้องมีคุณสมบัติในการกัดรอยตามแนวลึก (linear etching) เร็วกว่าตามแนวแผ่ (bulk etching) จึงทำให้สามารถปรากฏรอยอยู่ได้



รูปที่ 2-6 รูปทรงเรขาคณิตของรอยที่เกิดในแนวตั้งฉากกับผิวที่ผ่านการกัดรอยแล้ว

ในกรณีที่อนุภาคผ่านเข้าไปตามแนวตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นบันทึก สามารถอธิบายการกัดขยายของรอยได้คือ รอยที่ถูกขยายนั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขของตัวแปรต่าง ๆ โดยถ้ากำหนดให้

- v_T = ความเร็วของการกัดรอยของสารเคมีตามแนวลึก
- v_G = ความเร็วของการกัดรอยของสารเคมีตามแนวแผ่
- l = ระยะความลึกของผิวหน้าที่ถูกกัดแล้ว ถึงที่กัดลึกลงไป
- L = ระยะความลึกของผิวหน้าเดิม
- R = ระยะความลึกของผิวหน้าถึงตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ลงไปถึง

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของรอย

t = เวลาของการกักรอย

ถ้า v_T เป็นค่าคงที่ตลอดตามแนวสีกกลงไป

v_G เป็นค่าคงที่ทุกทิศทาง (constant and isotropic) จะได้

$$\frac{v_T}{v_G} = \text{ค่าคงที่}$$

$$l = (v_T - v_G)t \quad 2.41$$

$$d = 2v_G t \left[\frac{v_T - v_G}{v_T + v_G} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2.42$$

จากสมการที่ 2.41 พบว่า ถ้า v_T เท่ากับ v_G แล้ว ทั้ง l และ d จะมีค่าเป็นศูนย์ คือในเงื่อนไขเช่นนี้จะไม่เกิดรอย จากรูปที่ 2.6 สามารถที่จะหาค่ามุม θ (cone angle) ได้คือ

$$\theta = \sin^{-1} (v_G/v_T) \quad 2.43$$

สำหรับกรณีทั่ว ๆ ไป ถ้าอนุภาคมีทิศทางทำมุม ϕ กับผิวของแผ่นวัด ลักษณะของรอยรูปกรวย จะเป็นแบบวงรี (ellipse) ด้วยค่า a เป็นแกนเอก (major axis) และ b เป็นแกนโท (minor axis) จะได้

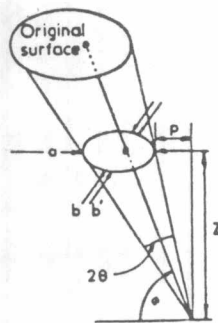
$$\theta = \left[-\arctan(Z/a + P) + \arctan(Z/P) \right] / 2$$

$$\phi = \left[\arctan(Z/a + P) + \arctan(Z/P) \right] / 2$$

$$L = (Z + v_G t) / \sin \phi$$

$$a = 2v_G t (\sin \phi - \sin \theta) \cos \theta$$

$$b = 2v_G t (\sin \phi - \sin \theta) (\sin \phi + \sin \theta)^{1/2}$$



รูปที่ 2-7 รูปทรงเรขาคณิตของรอยที่เกิดในแนวทำมุม ϕ กับพื้นผิวที่ผ่านการกัดรอยแล้ว