



## อนุภาคอัลฟาและทฤษฎีแทรค-เอทซ์

### 2.1 อันตรกิริยาของอนุภาคอัลฟา ( interaction of alpha particle)

เมื่ออนุภาคอัลฟาเคลื่อนที่ไปในตัวกลางใด ๆ จะสูญเสียพลังงานเกือบทั้งหมดในการชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมของตัวกลาง ซึ่งจะทำให้เกิดไอออนไนเซชัน (ionization) และเอกซ์ไซเทชัน (excitation) ในอะตอมของตัวกลางนั้น ๆ การสูญเสียพลังงานดังกล่าวเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้อนุภาคอัลฟาลดความเร็วลงจนหยุดลงในระยะทางสั้น ๆ จึงมีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ จากนั้นอนุภาคอัลฟาจะรวมกับอิเล็กตรอน กลายเป็นอะตอมของฮีเลียมที่เป็นกลางในที่สุด

เนื่องจากอนุภาคอัลฟามีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน (มวลของอนุภาคอัลฟามีค่าประมาณ  $4.0015 \text{ amu}$  ส่วนมวลของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ  $0.00055 \text{ amu}$  เมื่อ  $\text{amu}$  คือ atomic mass unit มีค่าเท่ากับ  $1/12$  ของมวลอะตอมของ  $\text{C-12}$  ) และอนุภาคอัลฟาจัดเป็นอนุภาคหนักที่มีประจุ มีค่าประจุเท่ากับ  $+2e$  เมื่ออนุภาคอัลฟาเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางใด ๆ และชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมของตัวกลาง ทิศทางของอนุภาคอัลฟาจึงไม่เบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิมมากนัก และถือได้ว่าอนุภาคอัลฟามีทางเดินเป็นเส้นตรงในตัวกลางต่าง ๆ

### 2.2 อัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคหนักที่มีประจุ

การสูญเสียพลังงานของอนุภาคหนักที่มีประจุ เช่น อนุภาคอัลฟา ต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในตัวกลางที่อนุภาคหนักมีประจุเคลื่อนที่ไปนั้น เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า (5)  $\text{stopping power}$  ซึ่งเป็นไปตามสมการของเบเร-บลอค (Bethe-Bloch) คือ

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{m_0 c^2}{\beta^2} NZ \left[ \ln \frac{2m_0 c^2}{I} \beta^2 - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right] \dots 2.1$$

เมื่อ  $\frac{dE}{dx}$  = อัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคหนักที่มีประจุต่อหนึ่งหน่วย  
ระยะทางที่อนุภาคหนักมีประจุเคลื่อนที่ไปในตัวกลาง ( MeV/m )

$$r_0 = e^2/m_0 c^2 = 2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$$

= classical electron radius

$$m_0 c^2 = \text{rest mass energy ของอิเล็กตรอน} = 0.511 \text{ MeV}$$

$$\beta = v/c$$

$$v = \text{ความเร็วของอนุภาคหนักมีประจุ ( m/s )}$$

$$c = \text{ความเร็วของแสง} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$N = \text{ความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง ( atoms/m^3 )}$$

$$Z = \text{เลขอะตอมของตัวกลาง}$$

$$z = \text{ขนาดประจุของอนุภาค ( esu ; ในกรณีของอนุภาคอัลฟา } z \text{ จะมีค่าเท่ากับ } 2 \text{ )}$$

$I$  = excitation potential เฉลี่ยของตัวกลาง ซึ่งมีค่าแตกต่างกันในตัวกลางแต่ละชนิด ดังแสดงในตาราง 2.1 และค่าโดยประมาณของ  $I$  (หน่วย eV) เป็นไปตามสมการ 2.2 ซึ่งสมการดังกล่าวจะให้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นเมื่อ  $Z > 12$

$$I = (9.76 + 58.8Z^{-1.19})Z \dots 2.2$$

เมื่อแทนค่า  $r_0 = e^2/m_0 c^2$  และ  $\beta = v/c$  ลงในสมการ 2.1 จะ

ได้สมการของ  $\frac{dE}{dx}$  ดังสมการ 2.3

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi \frac{e^4 z^2}{m_0 v^2} NZ \left[ \ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right] \dots 2.3$$

$$\text{เมื่อ } e = \text{ประจุของอิเล็กตรอน} = 1.6021917 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_0 = \text{มวลนิ่ง ( rest mass ) ของอิเล็กตรอน ( e )}$$

(5)  
 ตาราง 2.1 ค่า excitation potential เดี่ยว ( I ) ของตัวกลางบางชนิด

ตัวกลาง	I (eV)	ตัวกลาง	I (eV)
C	78	Ag	469
N	85	Au	771
O	89	Pb	773
Mg	156	U	839
Al	160	H <sub>2</sub> O	65.1
Cr	258	CO <sub>2</sub>	85.9
Mn	273	NaI	433
Fe	281	Lucite	65.6
Ni	303	Methane	44.6
Cu	321	Muscle	66.2
Zn	323	Air	86.8

สำหรับอนุภาคอัลฟาพลังงานจลน์ E MeV ค่า  $dE/dx$  หาได้จากสมการ 2.4

$$\frac{dE}{dx} = 3.79 \times 10^{19} \frac{NZ}{E} \left[ \ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \dots 2.4$$

### 2.3 พิสัยของอนุภาคอัลฟา (Alpha Range )

พิสัยของอนุภาคอัลฟา คือระยะทางไกลที่สุดที่อนุภาคอัลฟาสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในตัวกลางใด ๆ พิสัยของอนุภาคอัลฟาจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานจลน์ของอนุภาคอัลฟานั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยของอนุภาคอัลฟาในตัวกลางใด ๆ กับในอากาศแห้ง อุณหภูมิ 15 °C ความดัน 1 บรรยากาศ เป็นไปตามกฎ แบร็ก-คลีแมน (Bragg-Kleeman

(10)  
Rule)  $\rho$  ดังนี้

$$R = 3.20 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{A}}{\rho} R_a \quad \dots 2.5$$

เมื่อ  $R$  = พิสัยของอนุภาคอัลฟาในตัวกลางใด ๆ ที่มีความหนาแน่น  
 $\rho$  ( $\text{g/cm}^3$ ) และน้ำหนักอะตอม  $A$  หน่วยของ  $R$  คือ  $\text{cm}$

$R_a$  = พิสัยของอนุภาคอัลฟาในอากาศแห้งที่อุณหภูมิ  $15^\circ\text{C}$  ความดัน  
1 บรรยากาศ หน่วยของ  $R_a$  คือ  $\text{cm}$

ค่าของ  $R_a$  สามารถอ่านได้จากรูป 2.3 หรือหาได้จากสมการ 2.6 (10)

$$R_a = 0.309 E^{3/2} \quad \text{cm} \quad \dots 2.6$$

เมื่อ  $E$  คือพลังงานของอนุภาคอัลฟา ( $\text{MeV}$ )

ค่าของ  $R$  ในหน่วยของ  $\text{mg/cm}^2$  หาได้จากสมการ 2.7 (10)

$$R = 0.173 E^{3/2} A^{1/3} \quad \dots 2.7$$

เมื่ออนุภาคอัลฟาวิ่งผ่านอากาศหรือเนื้อเยื่อเยื่ออ่อน จะสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ย  
 $35 \text{ eV}$  ต่อการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน 1 คู่ การที่อนุภาคอัลฟามีประจุไฟฟ้าสูง  
แต่ความเร็วต่ำเมื่อเทียบกับมวล ดังนั้นการเกิดไอออนจำเพาะของอนุภาคอัลฟาจะสูงมาก  
ในรูปที่ 2.1 นั้นแสดงลักษณะกราฟของแบรกก์ (Bragg) ซึ่งแสดงการเกิดไอออนจำเพาะ  
โดยอนุภาคอัลฟาในอากาศที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ในรูปที่ 2.2 แสดงการสูญเสีย  
พลังงานของอนุภาคอัลฟาในเซลล์โลสไนเทรท รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลัง-  
งานของอนุภาคอัลฟา กับ พิสัยในอากาศแห้ง ที่อุณหภูมิ  $15^\circ\text{C}$  ความดัน 1 บรรยากาศ  
รูปที่ 2.4 แสดงพิสัยของอนุภาคอัลฟาในเซลล์โลสไนเทรท และรูปที่ 2.5 แสดงพิสัยของ  
 $^3\text{He}$  และ  $^4\text{He}$  ในเซลล์โลสไนเทรท

ในกรณีของอากาศแห้งอุณหภูมิ  $T$  เคลวิน ความดัน 1 บรรยากาศ จะ  
หาค่าของพิสัยของอนุภาคอัลฟาในอากาศ  $R_{a,T}$  ได้ดังสมการ 2.8 (10)

$$R_{a_T} = \frac{T}{288} R_a \quad \dots 2.8$$

เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิของอากาศแห้ง (เคลวิน)

ในกรณีที่ตัวกลางเป็นของผสม ค่า  $\sqrt{A}$  ในสมการ 2.5 จะแทนด้วย  $\sqrt{A_{\text{eff}}}$   
 ดังสมการ 2.9<sup>(10)</sup>

$$A_{\text{eff}} = \left( \sum_i^L \frac{w_i}{\sqrt{A_i}} \right)^{-1} \quad \dots 2.9$$

เมื่อ  $A_{\text{eff}}$  = ค่า effective molecular weight

$A_i$  = น้ำหนักอะตอมของธาตุที่  $i$  ในของผสม

$L$  = จำนวนของธาตุในของผสม

$w_i$  = weight fraction ของธาตุที่  $i$  ในของผสม

$$= \frac{N_i A_i}{M}$$

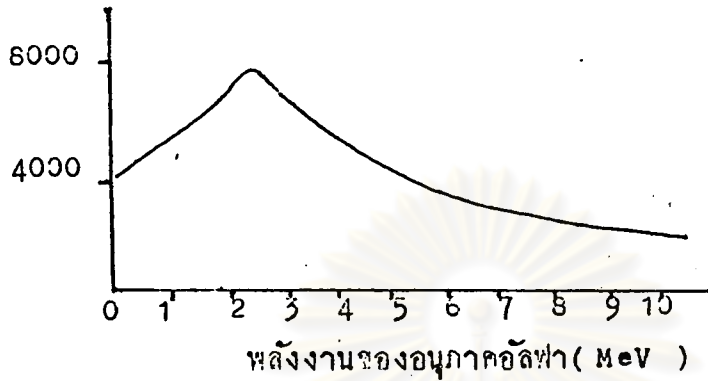
$M$  = น้ำหนักโมเลกุลของของผสม

$N_i$  = ความหนาแน่นอะตอมของธาตุที่  $i$  ในของผสม

เมื่อรู้ค่าพิสัย  $R_1$  ในตัวกลางที่มีความหนาแน่น  $\rho_1$  และน้ำหนักอะตอม  $A_1$   
 จะสามารถหาพิสัย  $R_2$  ในตัวกลางที่มีความหนาแน่น  $\rho_2$  และน้ำหนักอะตอม  $A_2$  ได้ดัง  
 สมการ 2.10<sup>(10)</sup>

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2 \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_2}} \quad \dots 2.10$$

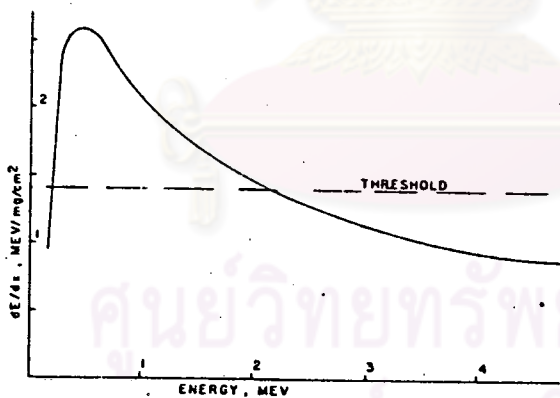
ไอออนแอมป์/มิลลิเมตรของอากาศ



(4)

รูปที่ 2.1 กราฟของแบร็ก (Bragg) แสดงการเกิดไอออนจำเพาะโดยอนุภาคอัลฟาในอากาศ ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน

อัตราการสูญเสียพลังงาน ( $\text{MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2$ )

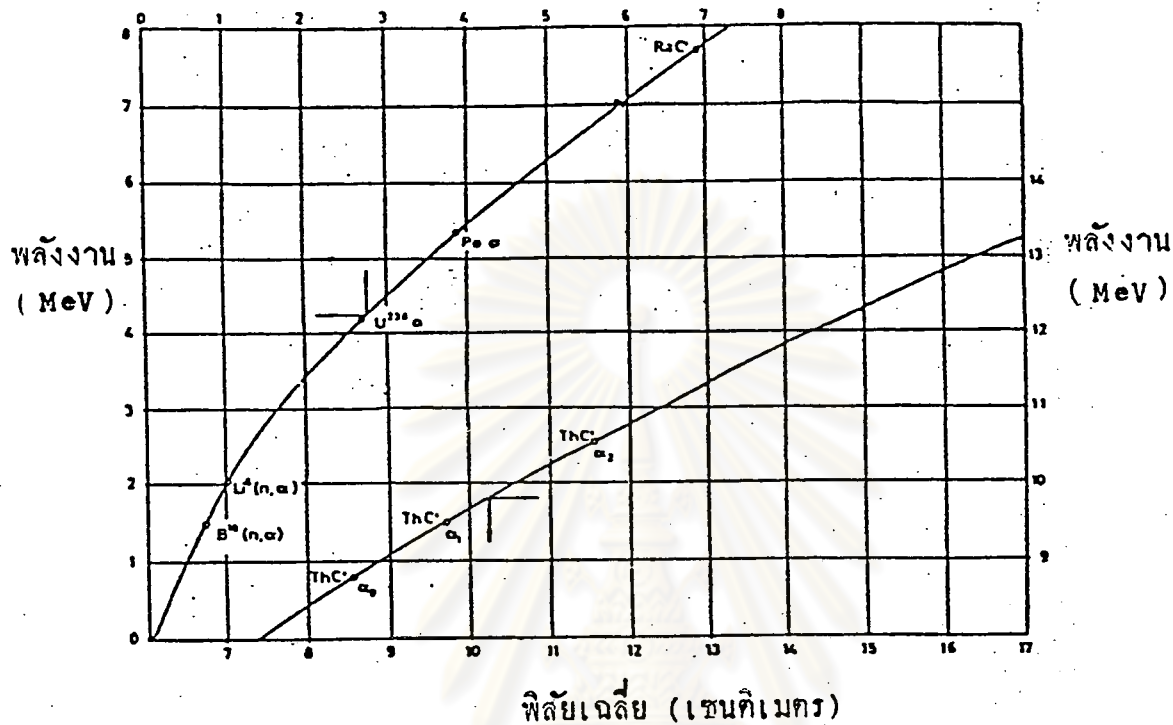


พลังงาน (MeV)

(34)

รูปที่ 2.2 แสดงอัตราการสูญเสียพลังงานของอนุภาคอัลฟาในซิลิคอนเทรท

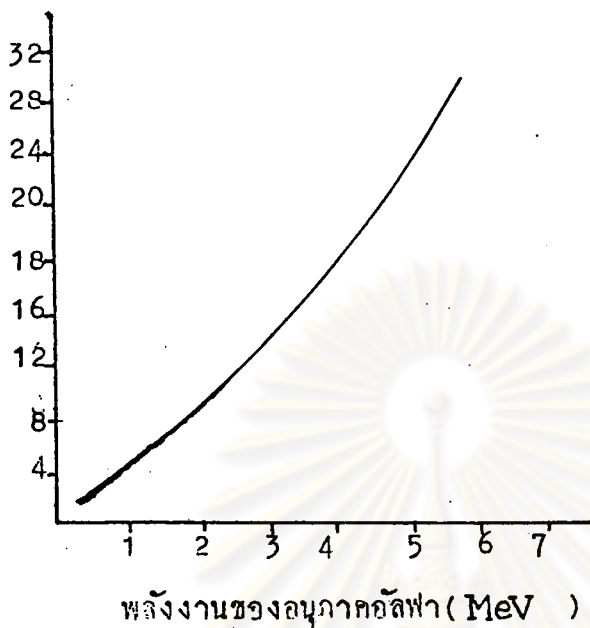
พิสัยเฉลี่ย (เซนติเมตร)



รูปที่ 2.3<sup>(29)</sup> ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของอนุภาคอัลฟา กับ พิสัยในอากาศแห้ง ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ

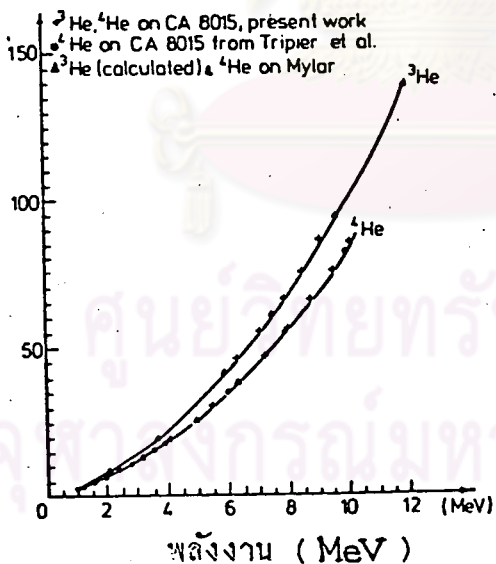
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิสัย (ไมครอน)



รูปที่ 2.4 (35) พิสัยของอนุภาคอัลฟาในเซลลูโลสในเทรท

พิสัย (ไมครอน)



รูปที่ 2.5 (4) พิสัยของ <sup>3</sup>He และ <sup>4</sup>He ในเซลลูโลสในเทรท CA 80-15 และ มายลาร์(mylar)



## 2.4 ประวัติการค้นพบเกี่ยวกับแทรค-เอทซ์

ในราวปี ค.ศ.1962 ได้มีการค้นพบเรื่องราวเกี่ยวกับรอยของฟิชชันแฟร็กเมนต์ ( fission fragment ) ที่ก่อให้เกิดรอย ( tracks ) ระหว่างที่เดินทางผ่านเข้าไปในฉนวนที่เป็นของแข็ง เช่น ไมกา ( mica ) โดย E.C.H. Silks และ R.S. Barns รอยนี้มีขนาดเล็กมากต้องส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงจะมองเห็น ต่อมา D.A. Young เป็นคนแรกที่อธิบายถึงเทคนิคในการกัดขยายรอยเหล่านี้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถมองเห็นได้เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา แต่ผลงานของเขาไม่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายเท่ากับ P.B.Price, R.L.Fleischer และ R.M.Walker ซึ่งได้อธิบายเรื่องราวเกี่ยวกับการกัดขยายรอย เช่นเดียวกัน และยังได้พบว่าฉนวนที่เป็นของแข็งทุกชนิดจะแสดงคุณสมบัติข้อนี้ นอกจากนี้ยังพบขีดจำกัดพลังงานที่จะก่อให้เกิดรอยได้ กับพบรอยอนุภาคในหินธรรมชาติที่มีแร่ยูเรเนียมปนอยู่ด้วย

การค้นพบนี้ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการศึกษาวิชานิวเคลียร์ฟิสิกส์ (Nuclear Physics ) โซลิดสเตทฟิสิกส์ (Solid-state Physics) รังสีคอสมิก (Cosmic ray ) ธรณีวิทยา ฯลฯ และได้มีการศึกษาเรื่องทฤษฎีแทรค-เอทซ์กันอย่างกว้างขวาง

## 2.5 กลไกในการเกิดรอย (Track mechanism )

เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในของแข็งที่เป็นฉนวน โครงสร้างของของแข็งนี้จะเปลี่ยนไปตามทางที่อนุภาคนั้นวิ่งผ่าน การเปลี่ยนไปนั้นอาจเนื่องมาจากกระบวนการเกิดไอออน (ionization process ) หรือเกิดจากการที่อนุภาคมีประจุวิ่งชนกับอะตอมของของแข็งนั้น ทำให้อะตอมนั้นถูกไล่ออกไปจากตำแหน่งเดิม ทำให้เกิดลักษณะที่เรียกว่ารอยของอนุภาค (particle tracks )

นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ให้คำอธิบายเกี่ยวกับกลไกการเกิดรอยไว้มากมาย แต่คำอธิบายที่สมบูรณ์ ชัดเจน และเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป คือคำอธิบายของ ฟลีสเชอร์, ไพรซ์ และ วอล์คเกอร์ (Fleischer, Price and Walker ) ซึ่งเรียกว่ากระบวนการไอออนเอกซ์โพลชัน สไปค์ (ion explosion spike ) ซึ่งสรุปได้ว่าเมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านตัวกลาง จะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมหลุดออกไป

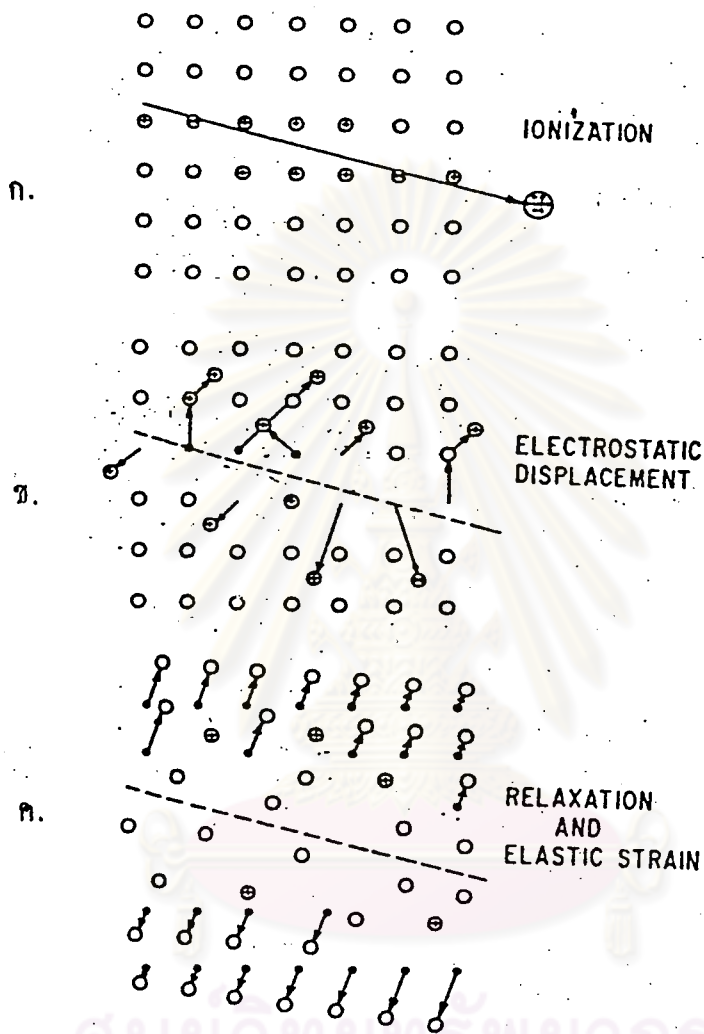
ทำให้เกิดอะตอมที่แสดงอำนาจไฟฟ้าบวกขึ้นรอบ ๆ แนวทางที่อนุภาคมีประจุนั้นวิ่งผ่าน อะตอมดังกล่าวนี้จะผลักซึ่งกันและกัน เนื่องจากมีประจุบวกเหมือนกัน และจะมีการจัดเรียงอะตอมใหม่เพื่อให้มีสมดุลง่าย จึงทำให้มีช่องว่างขึ้นในบริเวณที่อนุภาคมีประจุวิ่งผ่าน ช่องว่างนี้ก็คือ รอยของอนุภาคนั้นเอง ถ้าอนุภาคมีประจุนี้คืออนุภาคอัลฟา รอยดังกล่าวก็คือ รอยของอนุภาคอัลฟานั้นเอง รอยของอนุภาคนี้สามารถมองเห็นได้เมื่อส่องด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กลไกการเกิดรอยแสดงดังรูปที่ 2.6

ในตัวกลางที่เป็นฉนวน รอยของอนุภาคจะดูอย่างถาวร ส่วนในตัวกลางกึ่งตัวนำ ( semiconductor ) และตัวกลางที่เป็นตัวนำ ( conductor ) อะตอมที่ขาดอิเล็กตรอนสามารถจับอิเล็กตรอนข้างเคียงเข้าไปรวมอย่างรวดเร็วก่อนที่จะมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ ดังนั้นจึงไม่มีช่องว่างให้เห็นเหมือนในตัวกลางที่เป็นฉนวน ดังนั้น รอยของอนุภาคจึงเกิดในเฉพาะตัวกลางที่เป็นฉนวนเป็นส่วนใหญ่

อนุภาคมีประจุจะต้องถ่ายเทพลังงานให้แก่วัสดุตัวกลางนั้นมากกว่าค่าพลังงานวิกฤต ( critical energy ) ของวัสดุนั้น ๆ จึงจะปรากฏรอยขึ้น ดังนั้นการจะเกิดรอยได้หรือไม่จึงขึ้นอยู่กับ ชนิด และ พลังงานของอนุภาคมีประจุ และ ชนิดของวัสดุตัวกลาง ซึ่งจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม

ในสารพอลิเมอร์ ( polymer ) จะเกิดรอยได้ง่าย โดยเพียงแต่อนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในพอลิเมอร์ แล้วกระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น ก็จะเป็นการทำลาย แชน ( bond ) ระหว่างโครงสร้างของพอลิเมอร์นั้น และจะปรากฏรอยขึ้น เช่น เซลลูโลสไนเตรท ( cellulose nitrate ) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

สำหรับอนุภาคอัลฟาที่ผ่านเข้าไปในเซลลูโลสไนเตรท การสูญเสียพลังงานของอนุภาคอัลฟาต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง (  $ae/ax$  ) จะมีค่าสูงสุดเมื่ออนุภาคอัลฟาเคลื่อนที่ไปได้เกือบสุดทางเดินของมัน คือเมื่อพลังงานลดลงเหลือประมาณ 0.6 MeV ดังนั้นรอยที่ปรากฏในเซลลูโลสไนเตรทเนื่องจากอนุภาคอัลฟาพลังงานต่ำ จึงปรากฏอยู่ใกล้ผิวที่อนุภาคตกกระทบมากกว่ารอยของอนุภาคอัลฟาที่มีพลังงานสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.8

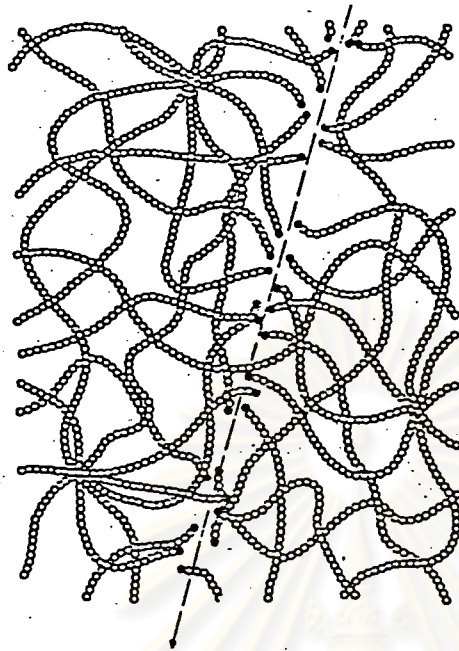


รูปที่ 2.6 (11) แสดงการเกิดรอยอนุภาคในของแข็งอินทรีย์ ตามกระบวนการไอออนเอกซ์ไพลัน สไปค์

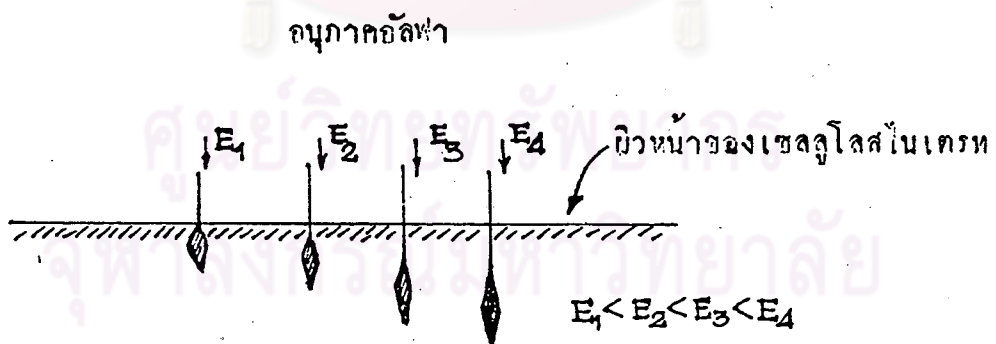
รูป ก. เมื่อมีอนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในของแข็ง ทำให้เกิดไอออน

รูป ข. เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากวงโคจรของอะตอม ทำให้เกิดช่องว่าง

รูป ค. ช่องว่างนี้จะยังคงปรากฏอยู่ทำให้เกิดเป็นรอยของอนุภาค



รูปที่ 2.7<sup>(11)</sup> แสดงกลไกการเกิดรอยของอนุภาคอัลฟาในโพลีเมอร์เมื่อมีอนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในโพลีเมอร์ อนุภาคดังกล่าวจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น และจะไปทำลายพันธะ (bond) ระหว่างโครงสร้างของโพลีเมอร์นั้น ทำให้ปรากฏเป็นรอยเกิดขึ้น



รูปที่ 2.8 แสดงรอยของอนุภาคอัลฟาในเซลลูโลสในเทรทเมื่ออนุภาคอัลฟาให้พลังงานต่างกัน

## 2.6 การกัดขยายรอย ( Etching )

เมื่ออนุภาคอัลฟาวิ่งผ่านเข้าไปในทวิกลางที่เป็นฉนวนบางชนิด เช่น แก้ว มายลาร์ (mylar) ไมลา และพลาสติก จะเกิดรอยเล็ก ๆ ขึ้นตามทางที่อนุภาคนั้นวิ่งผ่าน รอยเล็ก ๆ เหล่านี้มีขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูจึงจะมองเห็น แต่เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีราคาสูงมาก จึงจำเป็นที่จะต้องทำการกัดขยายรอยเหล่านี้ด้วยสารละลายเคมีที่เหมาะสม (etchant) เพื่อให้สามารถมองเห็นได้เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา บริเวณช่องว่างที่เกิดขึ้นตามทางที่อนุภาคอัลฟาวิ่งผ่าน จะถูกสารละลายเคมีกัดละลายออกมาได้เร็วกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้รอยเหล่านี้ปรากฏโตขึ้นจนมองเห็นได้เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา การที่รอยเหล่านี้จะชัดเจนเพียงไรนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารละลายเคมี อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายเคมี และระยะเวลาในการกัดขยายรอยเป็นสำคัญ

### 2.6.1<sup>(11)</sup> แทรคจีโอมิตรี ( Track geometry) สำหรับค่าที่คงที่ของความเร็วของการกัดขยายรอยตามรอยอนุภาค

เมื่อความเร็วของการกัดขยายรอยตามรอยอนุภาค  $v_T$  มีค่าคงที่ และความเร็วของการกัดขยายรอยบริเวณทั่วไป  $v_G$  มีค่าคงที่ และน้อยกว่า จากรูป 2.9 จะเห็นว่าสารเคมีได้กัดขยายรอยให้เกิดเป็นรูปกรวย โดยมีแกนของกรวยเป็นทางเดินของอนุภาค (particle incident) ในทวิกลางนั้นเอง เมื่ออนุภาคว่า  $v_G/v_T$  คงที่ตลอดระยะทางของการกัดขยายรอย โดย  $t$  คือระยะเวลาในการกัดขยายรอย ในกรณีที่รอยทางเดินของอนุภาคตั้งฉากกับผิวของทวิกลาง ตามรูป 2.9ก. ผิวหน้าของวัสดุจะถูกกัดออกในช่วงเวลาเดียวกับที่รอยของอนุภาคถูกกัดขยายจนทำให้เกิดรอยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  และความยาวหรือความลึกเป็น  $l$  ซึ่งค่าทั้งสองมีค่าน้อย ยิ่งถ้า  $v_T$  มีค่าน้อยกว่า  $v_G$  มุมกรวย  $\theta$  (cone angle) ก็จะมีค่ามากขึ้น ( $\theta = \arcsin v_G/v_T$ ) สำหรับค่าที่วัดได้ (measurable quantities) ของ  $l$  และ  $D$  ในเทอมของพารามิเตอร์ของการกัดขยายรอย (etching parameter) คือ

$$l = (v_T - v_G)t \quad \dots 2.11$$

$$D = 2v_G t \sqrt{(v_T - v_G)/(v_T + v_G)} \quad \dots 2.12$$

ห้ค่า  $l$  และ  $D$  จะหายไปเมื่อ  $v_G = v_T$

สมการ(2.11) ใช้เมื่อ  $v_T t$  มีค่าน้อยกว่ารัศมี  $R$  เมื่อ  $\theta$  มีค่าคงที่ และสมการ(2.12) ใช้เมื่อ  $t$  มีค่ามากขึ้น ซึ่งกำหนดโดย

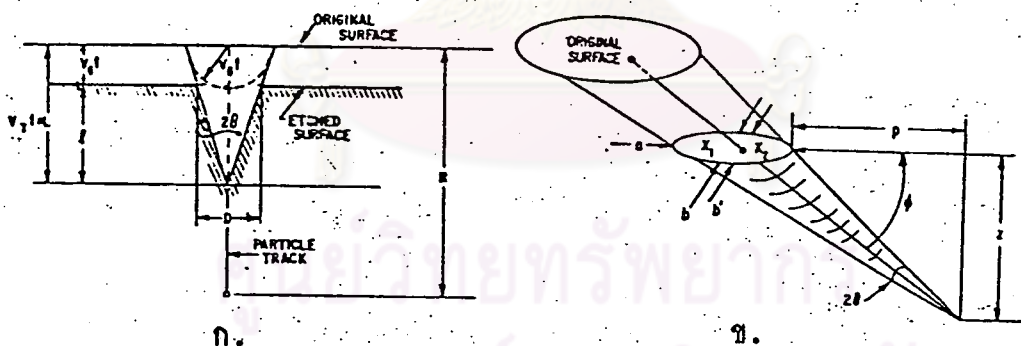
$$t < (R/v_G) \left\{ 1 + \left[ (1 - \sin\theta)(\cos\theta/2 + \sin\theta/2) / (\cos\theta/2 - \sin\theta/2) \cos\theta \right] \right\}$$

เราสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของการกักขายรอยในเทอมของค่าที่วัดได้ คือ

$$v_T/v_G = \frac{2}{D} \sqrt{(D/2)^2 + l^2} = \csc \theta$$

$$v_G t = (D/2)(D/2l + \sqrt{(D/2)^2 + l^2} / l) = (D/2)(\tan\theta + \sec\theta)$$

$$v_T t = \sqrt{(D/2)^2 + l^2} (D/2l + \sqrt{(D/2)^2 + l^2} / l) = D \csc\theta (\tan\theta + \sec\theta) / 2$$



(11)  
รูปที่ 2.9 แสดงแตรกจีโอเมทรีของการกักขายรอยเมื่อความเร็วของการกักขายรอยตามรอยอนุภาค  $v_T$  และความเร็วของการกักขายรอยบริเวณทั่วไป  $v_G$  มีค่าคงที่ ( ก ) เมื่ออนุภาคตกกระทบในแนวตั้งฉาก และ ( ข ) เมื่ออนุภาคตกกระทบเป็นมุมเอียง ( dip angle)

ในรูปที่ 2.9 ข เมื่ออนุภาคตกกระทบกับผิวของวัสดุเป็นมุมเอียง  $\phi$  ส่วน  
 ทัดของรอยอนุภาคที่เป็นกรวยกับผิวที่ถูกกัดของวัสดุบันทึกรอยจะมีรูปเป็นรีลิไลส์(ellipse)  
 และตำแหน่งของรอยอนุภาคจะเลื่อนไปจากศูนย์กลาง

(11)

### 2.6.2 ประสิทธิภาพของการกัดขยายรอย ( Etching efficiency )

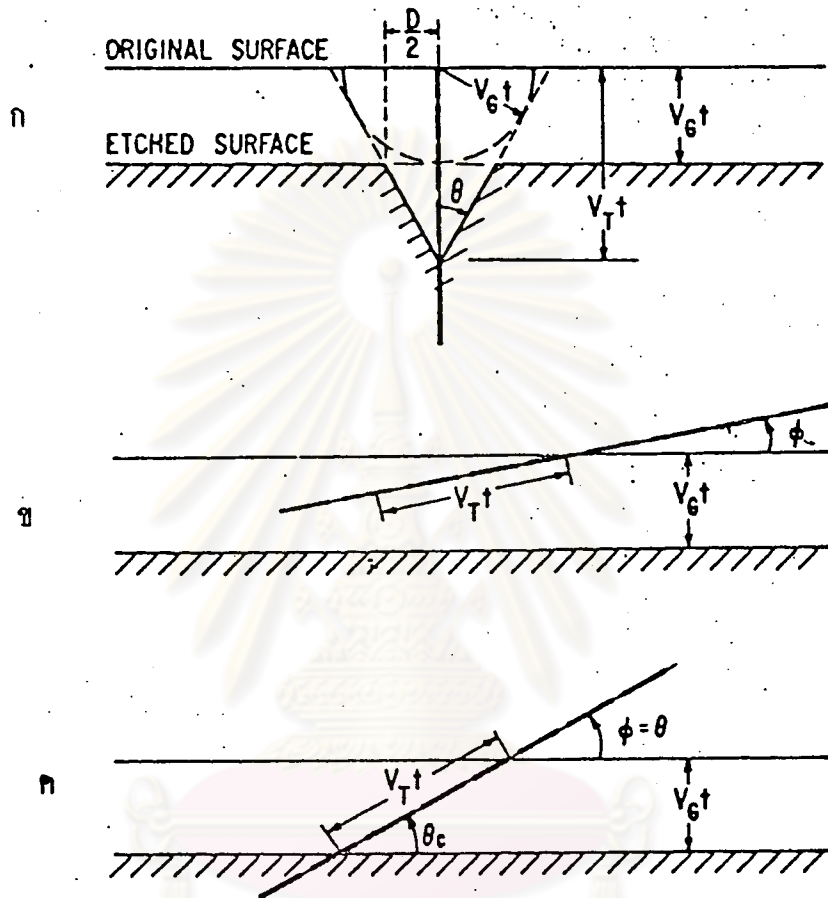
รอยอนุภาคที่ตกกระทบกับผิวของวัสดุบันทึกรอยด้วยมุมตกกระทบที่มีค่าน้อย  
 กว่ามุมกรวย  $\theta$  รอยนั้นจะไม่ถูกกัดขยายรอย โดยพิจารณาค่าประสิทธิภาพของการกัด  
 ขยายรอย  $\eta$  ซึ่งนิยามว่า  $\eta$  คือ สัดส่วนของรอยอนุภาคบนวัสดุบันทึกรอยซึ่ง  
 ถูกกัดขยายรอยภายใต้สภาวะของการกัดขยายรอยที่เหมาะสม เมื่อมีอนุภาคตกกระทบกับ  
 ผิวของวัสดุบันทึกรอยนั้น ความหมายของ  $\eta$  นี้ แตกต่างจากความหมายของประสิทธิ-  
 ภาพของการบันทึกรอย (Registration efficiency )  $\eta$  หมายถึงสัดส่วน  
 ของอนุภาคที่ผ่านเข้าไปในผิวของวัสดุบันทึกรอยซึ่งทำให้เกิดรอยของอนุภาค ด้วยค่าการ  
 กัดขยายรอยคงที่ และ ความเร็วในการกัดขยายรอยตามรอยอนุภาค  $V_T$  มีค่ามากกว่า  
 ความเร็วในการกัดขยายรอยบริเวณทั่วไป  $V_G$

เพื่อที่จะให้เข้าใจว่าทำไมรอยที่มีมุมตกกระทบน้อยกว่า  $\theta$  จึงไม่ปรากฏ  
 เมื่อทำการกัดขยายรอย พิจารณาจากรูป 2.10 ก ค่าของมุม  $\theta$  ขึ้นอยู่กับค่า  $V_T$  และ  $V_G$   
 จากรูป 2.10 ข แสดงว่าถ้าค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับแนวตั้งฉากกับผิววัสดุที่ถูกกัด ( $V_T \sin \phi$ )  
 มีค่าน้อยกว่า  $V_G$  รอยจะไม่ปรากฏ รูป 2.10 ค แสดงสภาวะวิกฤต (critical  
 condition ) เมื่อ  $\phi = \theta$  รอยจะเริ่มปรากฏขึ้นในสภาวะดังกล่าว

## 2.7 การนับรอย

การนับรอยของอนุภาคบนวัสดุบันทึกรอยนั้น อาจต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็ก-  
 ตรอน แต่เนื่องจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีราคาสูงมาก จึงอาจใช้วิธีกัดขยายรอยด้วย  
 สารละลายเคมีที่เหมาะสม ภายใต้สภาวะของการกัดขยายรอยที่เหมาะสม แล้วส่องดูด้วย  
 กล้องจุลทรรศน์ธรรมดา เพื่อนับจำนวนรอยที่ปรากฏเห็นได้ในพื้นที่คงที่ค่าหนึ่งของวัสดุบันทึก  
 รอยเมื่อมองผ่านกรอบสี่เหลี่ยมแผ่นกระจกบาง ๆ ที่ติดอยู่ใกล้เลนส์ใกล้ตา (รูปที่ 3.1)  
 ทำการนับจำนวนรอยต่อพื้นที่หลาย ๆ ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นรอยอนุภาคที่  
 ปรากฏบนวัสดุบันทึกรอยนั้น

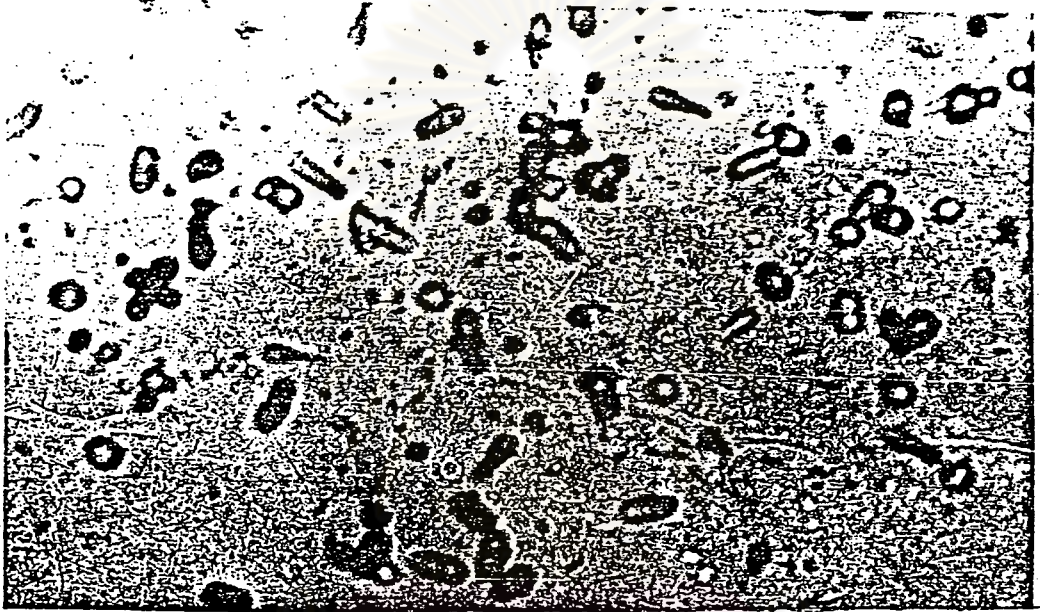
ลักษณะของรอยอนุภาคอัลฟามบนฟิล์มเซลล์โลสในเครื่องแสดงรังสีรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 (11) แสดงขบวนการบันทึกรอย

- (ก.) รอยอนุภาคเกิดขึ้น โดยพิจารณาจากค่า  $V_G$  และ  $V_T$
- (ข.) ถ้ามุมที่อนุภาคตกกระทบผิวของวัสดุบันทึกรอยมีค่าน้อยกว่า  $\arcsin (V_G/V_T)$  ผิวของวัสดุบันทึกรอยจะถูกกัดด้วยอัตราเร็วที่มากกว่า  $V_T$  ในแนวตั้งฉาก ดังนั้นจึงไม่มีรอยเกิดขึ้น
- (ค.) เมื่อ  $\arcsin (V_G/V_T)$  เป็นค่ามุมวิกฤต  $\theta_c$  รอยจะเริ่มปรากฏ





รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะรอยอนุภาคอัลฟาบนฟิล์มเซลลูโลสในเทรท

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย