บทที่ 2

การศึกษาความกว้างเฉลี่ยของรอย

2.1 การเกิดรอยในนิวเคลียร์อิมัลชัน [1]

เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าไปในนิวเคลียร์อิมัลชัน จะมีการสูญเสียพลังงาน พลังงานนี้จะถ่ายเทให้โมเลกุลของเงินโบรไมด์ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดรอยขึ้น

สำหรับอนุภาคที่มีพลังงานสูง เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสสารจะมีการสูญเสียพลังงาน Bethe ได้หาอัตราการสูญเสียพลังงาน โดยสมมุติว่ามีการชน (collision) ระหว่างอนุภาคและอิเล็คตรอนของอะตอม ซึ่งในการนี้อนุภาคจะถ่ายเทพลังงานจำนวนหนึ่งให้แก่อิเล็คตรอนของอะตอม พลังงานจำนวนนี้หาได้จากอันตรกริยาคูลอมบ์ (coulomb interaction) โดยสมมุติคลื่นเป็นคลื่นระนาบ (plane wave) และหาพลังงานที่สูญเสียไปต่อหน่วยระยะทางได้ดังนี้

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_o Z z^2 e^4}{mv^2 A}\left[\ln\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2\right] \qquad (2.1)$$

เมื่อ N_o = เลขอะโวกาโดร (avogadro number)

Z = เลขอะตอมของสสาร

z = เลขอะตอมของอนุภาคที่เข้ามา

e = ประจุของอิเล็คตรอน

m = มวลของอิเล็คตรอน

v = ความเร็วของอนุภาคที่เข้ามา

A = เลขมวลของสสาร (mass number)

β = $\frac{v}{c}$

I = ไอออนไนเซชั่นโปเทนเชียลของตัวกลาง

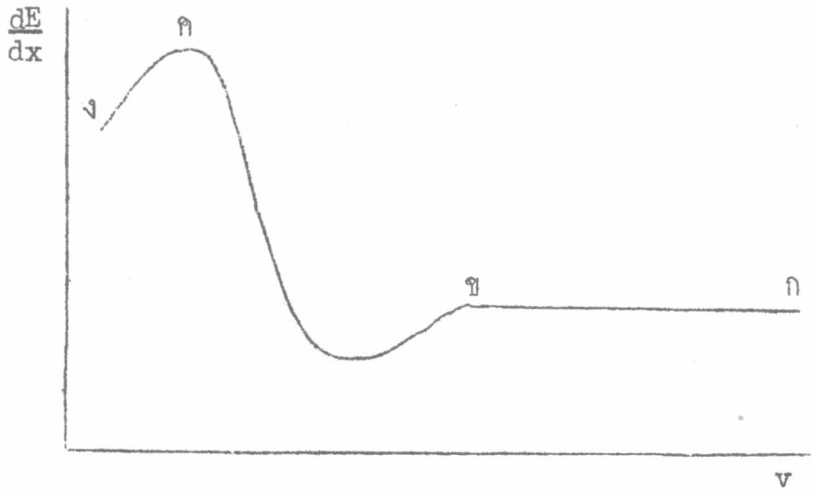
---

[1] E. Segrè, Experimental Nuclear Physics, Vol.I (New York, 1953), pp 166-200

สำหรับอนุภาคพลังงานต่ำ β จะมีค่าน้อย สูตรของ Bethe จะเขียนได้เป็น

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_o Z z^2 e^4}{mv^2 A} \ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right) \qquad (2.2)$$

เมื่อความเร็วของอนุภาคลดลงจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วของอิเล็คตรอนในชั้นที่เค (K-shell) จะเกิดการจับกับอิเล็คตรอน (electron capture) ทำให้ประจุลดลง อัตราการสูญเสียพลังงานจะลดลง ทำให้ความกว้างของรอยลดลงไปเป็นลำดับจนกระทั่งมันหยุด อัตราการสูญเสียพลังงานในช่วงนี้จะไม่เป็นไปตามสูตรของ Bethe ในสมการ (2.2) เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางกับความเร็วของอนุภาค จะได้เป็นดังแสดงในรูปนี้



ในช่วง กข เป็นช่วงที่มีความเร็วสูง เส้นกราฟจะเกือบขนานกับแกนของความเร็ว แสดงว่าที่ความเร็วสูงๆอนุภาคที่มีประจุจะเสียพลังงานน้อย ในช่วง ขค เมื่อความเร็วลดลง มีการสูญเสียพลังงานมากขึ้น เส้นกราฟจะชันขึ้นเป็นลำดับ ที่ตำแหน่ง ค จะมีการสูญเสียพลังงานมากที่สุด การสูญเสียพลังงานจะไม่เป็นไปตามสูตรของ Bethe เพราะในช่วงนี้มีการสูญเสียพลังงานให้กับสสารซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว อิเล็คตรอนในอะตอมของสสารได้รับพลังงานสูงจะพุ่งออกมารอบๆแกนตัน [2](solid core) ในแนวตั้งฉากกับแกน อิเล็คตรอน

---

[2] Robert Katz and J.J. Buths, "On the Width of Heavy Ion Tracks in Emulsion", รายงานของ CERN, 1964

เหล่านี้มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้สสาร เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้อีกครั้งหนึ่ง เรียกว่าการ เกิดไอออนทุติยภูมิ (secondary ionization) ทำให้มีรอยสั้นๆเป็นจำนวนมากเกิดข้างๆรอยเดิม เรียกว่า รังสีเดลต้า(δ- rays) รังสีเดลต้าเหล่านี้จะแออัดกันจนเม็ดเงินอยู่ชิดกัน โดยเฉพาะในอิมัลชันที่ไวต่ออิเล็คตรอน และใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง สามารถที่จะสังเกตรอยของรังสีเดลต้าได้ เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกระบอกที่เกิดเป็นรังสีเดลต้าเหล่านี้ ก็คือความกว้างของรอย

ในช่วง คง เป็นช่วงที่เกิดการจับอิเล็คตรอนไว้ ทำให้ประจุภายในอนุภาคลดลง ผลก็คือมีการ เกิดไอออนลดลงด้วย ดังนั้นความกว้างของรอยที่อนุภาคผ่านไปจะลดน้อยลง เกิดเป็นการตีบของรอย (thining-down of track)

2.2 <u>การศึกษาความกว้างของรอย</u> [3]

ความกว้างของรอยขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้วัด และขึ้นกับคุณสมบัติของอิมัลชันตลอดจนวิธีการล้างอิมัลชัน นอกจากนี้ยังขึ้นกับความเร็วและประจุของอนุภาคอีกด้วย

ในปี 1954 Lonchamp[4] ได้ศึกษากรรมวิธีการบันทึกรอยของอนุภาคในนิวเคลียร์อิมัลชัน พบว่ารังสีเดลต้ามีส่วนช่วยทำให้รอยมีความกว้างมากขึ้น

ต่อมา Alvial[5] กับผู้ร่วมงาน ได้ศึกษาความกว้างของรอยโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่ติดกับเลนส์ใกล้ตาของกล้องจุลทรรศน์ (eyepiece micrometer) ในการวัดนี้เขาได้แบ่งพิสัยออกเป็นช่วงๆ แต่ละช่วงยาว 0.25 ไมครอน เขาพบว่าในการวัดนั้นมีเงื่อนไขหลายประการซึ่งมีความจำเป็นต้องระมัดระวัง อันมีความเข้มของแสงและความเมื่อยล้าของผู้วัด และจะต้องมีการควบคุมการล้างและความลึกในอิมัลชันอย่างใกล้ชิด นอกจากนี้เขายังพบว่ารอยจะกว้างเมื่อจำนวนเม็ดเงินเพิ่มขึ้นทำให้กระจายบริเวณออกไป ซึ่งเป็นผลจากการเกิดไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้ปริมาณรังสีเดลต้ามีมากขึ้น การกระจายก็มากขึ้นจึงทำให้เส้นผ่าศูนย์กลาง

---

[3] W.H. Barkas, <u>op.cit.</u>, pp. 405-413

[4] Lonchamp, Jean-pierre, 1954. Thèses présentées A La Faculté des Sciences de L'Université de Strasbourg pour obtenir Le Grade de Docteur és Sciences Physiques.

[5] W.H. Barkas, <u>op.cit.</u>,pp. 405-413

ของแกนตันมากขึ้น รอยก็ปรากฏกว้างขึ้น

W.F. Fry[6] ได้ใช้ไมโครมิเตอร์ที่ติดกับเลนส์โกล้ตาของกล้องจุลทรรศน์วัดความกว้างของรอยของโปรตอนโดยวัดตรงปลายรอย เพราะเป็นช่วงที่เม็ดเงินอยู่ติดกัน เขาพบว่าความกว้างจะขึ้นอยู่กับวิธีการล้างอิมัลชัน ดังนั้นนอกจากความกว้างของรอยจะขึ้นกับความเร็วและประจุของอนุภาคแล้ว มันยังขึ้นกับความไว ขนาดของเม็ดเงินและวิธีการล้างอิมัลชัน

Della Corte[7] ได้พบว่าความกว้างของรอยจะขึ้นกับวิธีล้างอิมัลชัน แต่สิ่งสำคัญที่สุดที่มีผลต่อความกว้างของรอยคือ ความเร็วและประจุ นอกจากนั้นเขายังพบว่าความแตกต่างของความกว้างของรอยระหว่างอนุภาคอัลฟ่ากับคาร์บอนไอออนในอิมัลชันเดียวกันจะขึ้นอยู่กับวิธีการล้างที่ต่างกัน

Gégaulf[8] ได้ศึกษาวิธีการล้างอิมัลชัน โดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ล้าง พบว่าความกว้างของรอยของอนุภาคอัลฟ่าในอิมัลชัน จี 5 จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้

S.O.Sörensen[9] ได้ใช้แหล่งกำเนิดแสงพิเศษ ฉายภาพของรอยไปบนกระดาษโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 6000 เท่า และตัดกระดาษตามความกว้างของรอย ซึ่งสามารถวัดหาพื้นที่ของรอยได้โดยใช้พลานิมิเตอร์ (Planimeter) พื้นที่หารด้วยความยาวของรอยก็จะเป็นความกว้างเฉลี่ยของรอย ซึ่งโดยวิธีนี้เขาสามารถแยกอนุภาคที่มีเลขอะตอมต่างกันออกจากกันได้

Nakagawa[10] ได้วัดรอยซึ่งออกจากจุดดาวและจบในอิมัลชัน จี 5 ด้วยไมโครมิเตอร์ที่ติดกับเลนส์โกล้ตาของกล้องจุลทรรศน์โดยวัดไปตามความยาวของรอย ในการนี้เขาแบ่ง

6,7 Loc.cit.

8 Gégaulf, Christiane, 1960. Thèses présentées A La Faculté des Sciences de L'Université de Strasbourg pour obtenir Le Grade de Docteur ès Sciences Physiques.

9 W.H. Barkas, op.cit., pp. 405-413

10 Shigeo Nakagawa, Eiji Tamai, Huniaki and Kiyoaki Okudaira, "On the Analysis of the Slow Particles Emitted from Cosmic-Ray Stars", Journal of the Physical Society of Japan, 11(1956), 191

ความยาวของรอยออกเป็นช่วง และได้วัดทุกๆความยาว 6 ไมครอนติดต่อกัน โดยเริ่มจากปลายรอย ปรากฏว่าความกว้างของรอยสามารถแยกออกเป็น 6 กลุ่มที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 1 ถึง 6

ถ้าให้ $\bar{e}$ แทนความกว้างเฉลี่ยของรอย

Z แทนเลขอะตอมของอนุภาค

เขาพบว่า

$$\bar{e} \propto \sqrt{Z} \qquad (2.3)$$

Skjeggestad[11] ได้วัดรอยโดยการฉายภาพของรอยไปบนกระดาษแล้วคำนวณหาพื้นที่ต่อระยะทางเป็นความกว้างของรอยเช่นเดียวกับ Sörensen และพบว่าความกว้างของรอยที่พบในอิมัลชันแยกออกได้เป็น 5 กลุ่ม มีเลขอะตอมตั้งแต่ 1 ถึง 5

ถ้าให้ $\bar{e}$ แทนความกว้างเฉลี่ยของรอยเป็นไมครอน จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\bar{e} = K(\bar{w} - 1) + Q(Z,R) \qquad (2.4)$$

เมื่อ K เป็นตัวคงที่

Q เป็นฟังก์ชั่นของประจุและพิสัย

$\bar{w}$ เป็นพลังงานของอนุภาค

ซึ่งเขาพบว่า ความกว้างไม่เปลี่ยนแปลงตามพิสัยของรอย แต่จะเปลี่ยนไปตามประจุของอนุภาค ซึ่งทำให้สมการ (2.4) กลายเป็น

$$\bar{e} = K(\bar{w} - 1) + cZ^{x} \qquad (2.5)$$

เมื่อ c, x เป็นตัวคงที่

ในการหาค่าตัวคงที่ เขาได้วัดความกว้างของรอยของคาร์บอนไอออน ออกซิเจนไอออนและบอรอนไอออน และพบว่า

$$\bar{e} = 0.09(\bar{w} - 1) + 0.20Z^{0.63} \qquad (2.6)$$

---

[11] O. Skjeggestad, "The Nature of the Tapey Tracks of Heavy Ions in Nuclear Emulsions", Il Nuovo Cimento, 8(1958), 927

จากสมการ (2.5) เทอมที่เป็นพลังงานจะมีผลต่อความกว้างของรอยน้อยมาก สำหรับนิวเคลียสของธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ ดังนั้น ถ้าเป็นอนุภาคที่มีเลขอะตอมต่ำแล้ว สามารถเขียนความกว้างเฉลี่ยของรอยได้ดังนี้

$$\bar{e} = qZ^{x} \qquad (2.7)$$

จากการศึกษาความกว้างของรอยจะเห็นว่า องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดที่ทำให้ความกว้างของรอยเปลี่ยนแปลงคือ ประจุของอนุภาค (หรือเลขอะตอม) ส่วนตัวแปรอื่นๆมีผลน้อย ดังนั้น ถ้าสามารถวัดความกว้างของรอยได้ ก็จะทำให้ทราบเลขอะตอมของอนุภาคต่างๆที่ปรากฏรอยบนนิวเคลียร์อิมัลชันได้

2.3 การศึกษาระยะตีบของรอย

ที่ปลายของรอยขณะที่อนุภาคใกล้จะหยุดในอิมัลชัน ความกว้างจะลดลงเนื่องจากการลดความเร็วของอนุภาค ทำให้อนุภาคจับอิเล็คตรอนไว้ ในขณะเดียวกัน ประจุภายในอนุภาคจะลดลง Freier[12] ค้นพบว่า ระยะตีบของรอยเป็นฟังก์ชั่นของเลขอะตอม เพราะว่า รอยจะเริ่มตีบเมื่ออิเล็คตรอนในชั้นที่เคถูกจับไว้ ความเร็วของอิเล็คตรอนเคเป็นสัดส่วนตรงกับเลขอะตอม การคำนวณเลขอะตอมโดยประมาณจากระยะตีบ สามารถทำได้โดยใช้ทฤษฎีของบอห์ร (Bohr model) และสมมุติว่า การจับอิเล็คตรอนเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของนิวเคลียสเท่ากับความเร็วของอิเล็คตรอนในชั้นต่างๆ โดยที่มวลของนิวเคลียสหนัก (heavy nucleus) ที่เสถียรเป็น 2Z เท่าของมวลของโปรตอน ที่พลังงานต่ำประจุของอนุภาคขณะนั้นกับพลังงานในขณะนั้นสามารถเขียนได้เป็นความสัมพันธ์ดังนี้

$$E = 0.05Zz^{2} \quad \text{Mev} \qquad (2.8)$$

เมื่อ z เป็นประจุของนิวเคลียสที่พลังงาน E

Z เป็นประจุของนิวเคลียส (nuclear charge) เดิม

---

[12] P. Freier, E.J. Hofgren, E.P. Ney and F. Oppenheimer, "The Heavy Component of Primary Cosmic Rays," Physical Review, 74. (1948) pp. 1818-1828

ระยะทึบของรอยหาได้จาก

$$L = \int_0^Z (dE/dz)/(dE/dx)dz \qquad (2.9)$$

เมื่อ $\frac{dE}{dz}$ หาได้จากสมการ (2.8)

$\frac{dE}{dx}$ สำหรับอนุภาคที่มีประจุ z จะเท่ากับ z^2 คูณกับ $\frac{dE}{dx}$ ของโปรตอนที่ความเร็วเดียวกัน

สมการ (2.9) สามารถแก้ได้โดยใช้ numerical integration ซึ่งจะได้

$$L = cZ^2 \qquad (2.10)$$

Perkins[13] ได้ให้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทึบและเลขอะตอมเช่นเดียวกับสมการ (2.10) โดยได้ค่าคงที่ C เป็น 0.7 นอกจากนี้เขายังกล่าวว่า การทดลองวัดค่าระยะทึบค่อนข้างยาก เพราะไม่สามารถบอกได้อย่างถูกต้องแน่นอนว่าระยะทึบจริงๆนั้น เริ่มต้นที่จุดใด แต่จะมีขีดจำกัดอันหนึ่ง คือ ระยะทึบจะน้อยกว่า 70 ไมครอน สำหรับ Z น้อยกว่า 10

Perkins ใช้อิมัลชัน ชี 2 ซึ่งไม่ปรากฏรอยของอนุภาคที่มีประจุสูง ดังนั้น จึงตรวจไม่ได้ว่าสมการ (2.10) เป็นไปได้แค่ไหน จากการวัดรอยรูปฆ้อน (hammer track) ซึ่งเกิดจากนิวเคลียสของลิเทียมจำนวน 5 ตัว ได้ค่าระยะทึบเฉลี่ยประมาณ 5 ไมครอน ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการ (2.10) แล้วก็อยู่ในขอบข่ายที่ใช้ได้ ส่วนวิธีการวัดนั้นเขาใช้ฟิลม์เนกกะทีฟแล้วฉายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบฉาย(Projective micrometer) ซึ่งมีกำลังขยาย 9000 เท่า และแบ่งรอยออกเป็นช่วงสั้นๆ วัดพื้นที่ของรอยโดยพลานิมิเตอร์แล้ว คำนวณระยะทึบ เขาสรุปว่า รอยที่จะใช้คำนวณหาเลขอะตอมนั้นต้องมีความยาวมากกว่าสองเท่าของระยะทึบ และความยาวของรอยที่จะใช้ศึกษาระยะทึบจะต้องมากกว่า 30 ไมครอน

---

[13] D.H. Perkins, " Emission of Heavy Fragment in Nuclear Explosions", Proceedings of the Royal Society, 203 (1950), p 403