

การวัด และการวิเคราะห์



3.1 รายละเอียดเกี่ยวกับนิวเคลียร์อิมัลชันที่ใช้

อิมัลชันซุก (stack emulsion) ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นชนิด เก 5 ของอีลฟอร์ดโคมาจากศูนย์วิจัยนิวเคลียร์แห่งเมืองสตราบูร์ก ประเทศฝรั่งเศส แต่ละแผ่นมีขนาด $7.5 \times 12 \times 0.06$ ลูกบาศก์เซนติเมตรกอนล่าง และโคลงเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทั้งหมดที่ให้มี 42 แผ่น โคลงอิมัลชันซุกนี้ขึ้นไปรับรังสีคอสมิกปฐมภูมิในแนวขนานกับผิวของอิมัลชัน ที่ความสูง 158 กิโลเมตร เหนือพื้นดินด้วยจรวด Veronique (V.47) ของฝรั่งเศส ที่สถานีส่ง Habagir (Colomb Bechar) ในแอฟริกา เมื่อวันที่ 18 ตุลาคม พ.ศ. 2506 เวลาที่จรวดอยู่ในอากาศ (time of flight) ประมาณ 20 นาที สถานีนี้ตั้งอยู่ที่เส้นรุ้งที่ 2 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 32 องศาตะวันออก บริเวณนี้รังสีคอสมิกพุ่งเข้าสู่โลกด้วยความเร็วสูงมาก (relativistic velocity)

3.2 การหาจุดดาวในนิวเคลียร์อิมัลชัน

การหาจุดดาวที่เกิดในอิมัลชันใช้คู่ควบกล้องจุลทรรศน์แบบ Cooke Troughton & Simms แบบ M 40364 ใช้เลนส์ใกล้ตาขนาด $\times 15$ และเลนส์ใกล้วัตถุขนาด $\times 10$ ส่องดูตามแนวเส้น (lined scan) ห่างจากขอบของอิมัลชันเข้าไปประมาณ 1 เซนติเมตร ทั้งสี่ด้าน เมื่อพบทางเดินของอนุภาค ก็ติดตามทางเดินนั้นไปยังแผ่นอื่นต่อไป เพื่อดูตำแหน่งที่เกิดจุดดาว เมื่อพบจุดดาวก็บันทึกตำแหน่งเอาไว้ โดยจุดจากรางกริก (grid) ที่ติดไว้ใต้อิมัลชัน เพื่อให้การผิดพลาดน้อย จึงต้องใช้วิธีส่องดูตามแนวเส้นซ้ำ 2 ครั้ง จำนวนจุดดาวที่พบและใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดมี 35 จุดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-1 ส่วนการวิเคราะห์ทางเดินใช้กล้องแบบ M 40473 ซึ่งมีแท่นกลมขนาดใหญ่หมุนได้ (large rotating stage) และใช้เลนส์ใกล้วัตถุขนาด $\times 45$ และเลนส์ใกล้ตาขนาด $\times 15$

3.3 การหาทางเดินที่ใช้เป็นมาตรฐาน

อนุภาคที่ออกจากจุดดาวมีหลายชนิด เช่น อนุภาคเซาว์เวอร์ซึ่งมีพลังงานสูง มีทางเดินบางพองจะนับจำนวนเม็คเงินได้ แต่ทางเดินมักไม่จบในอิมัลชัน การวิเคราะห์

จึงใช้วิธีวัดการกระเจิงหลายหน และความหนาแน่นของเม็คเงินเท่านั้น โดยต้อง
มีอนุภาคที่ทราบชนิดเป็นตัวมาตรฐานในการเปรียบเทียบ อนุภาคที่ใช้เป็นตัว
มาตรฐานนั้น ไซ้ทางเดินของอนุภาคที่สังเกตคุณลักษณะว่าเป็นทางเดินของโปรตอน
คือไม่คดงอมากนักและยาวเกินกว่า 6 มิลลิเมตร วัดการกระเจิงหลายหนตามวิธี
ในข้อ 2.2.2 และคำนวณหาพลังงานโดยวิธีโอเวอร์แลปปีงเซลล์ของเฟว์เลอร์
และวิธี *méthode des sommes* เทียบค่าพลังงานที่คำนวณได้จากทั้งสองวิธีกับ
ค่าจากตารางระหว่างพลังงานและพิสัย (*range*) ของ C.N.R.S. de
Strasbourg-Cronenbourg¹ เพื่อให้แน่ใจได้ว่าเป็นโปรตอนจริง ในที่นี้ใช้
ทางเดินของโปรตอนที่จับในอิมัลชันแผ่นเดียวกัน 10 เส้น

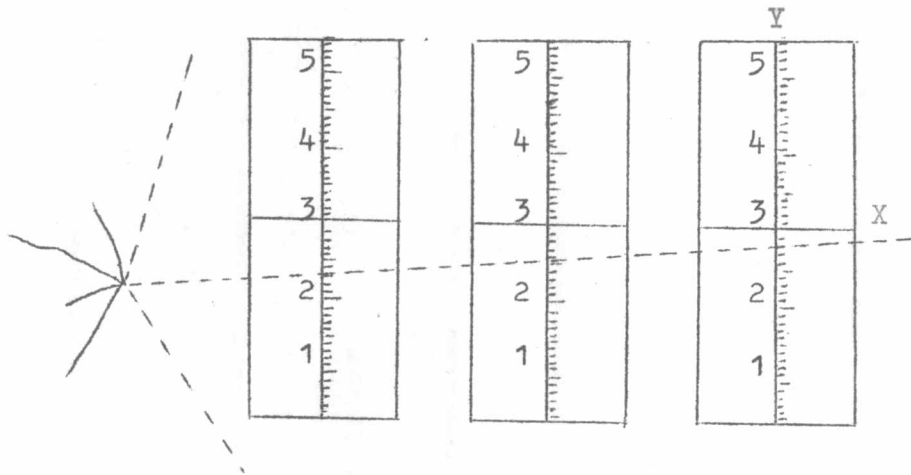
ตำแหน่งและพิสัยของโปรตอนที่จับในอิมัลชันทั้ง 10 เส้น ได้แสดงไว้ใน
ตารางที่ 4-2 ตัวอย่างการคำนวณหาพลังงานของโปรตอนที่จับในอิมัลชันโดยวิธี
ทั้งสองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-3 และหน้าที่ 26-27 และผลการคำนวณเทียบกับ
ค่าจากตารางได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4

3.4 การวัดการกระเจิงหลายหน และความหนาแน่นของเม็คเงินของทางเดิน ของอนุภาค

3.4.1 การหาช่วงความยาวที่เหมาะสม (*optimum cell length*)
เนื่องจากการวัดมุมที่เบี่ยงเบนในวงของทางเดินของอนุภาคมีข้อผิดพลาดต่าง ๆ
ดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 ข้อ 2.3 ในการวัด ถ้าแบ่งช่วงความยาวสั้นเกินไป
ข้อผิดพลาดจากการอ่านและการเลื่อนแทนจะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่าเบี่ยงเบนที่ได้
แต่ถ้าใช้ช่วงความยาวยาวเกินไป ค่าเบี่ยงเบนที่ได้ (ผลต่างครั้งที่สอง) จะมีจำนวน
น้อย ทำให้เกิดข้อผิดพลาดทางสถิติได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องหาช่วงความยาวที่เหมาะสม

¹J.P. Gerber and P. Volmer, Courbes Parcours Energie
des Noyaux Legers ($Z < 10$) Dans Les Emulsions Ionographiques,
(C.N.R.S. de Strasbourg-Cronenbourg, 1966)

เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า $\bar{d}_{100\mu}$ ต่อไป ในที่นี้หาจากทางเดินที่จบในอิมัลชันแผ่นเดียวกัน และยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ซึ่งทางเดินที่ยาวขนาดนี้จะเกือบขนานกับผิวของอิมัลชัน เป็นความยาวตามแนวราบที่มองจากกล้อง ซึ่งมีค่าเกือบเท่ากับความยาวจริงแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนเป็นความยาวจริง



รูปที่ 3-1 แสดงการอ่านจุดตัดบนแกน y ของทางเดินของอนุภาค

การวัดทำดังนี้ ตั้งทางเดินให้ขนานกับแกน x แล้วอ่านจุดตัดของทางเดินบนแกน y ที่ช่วงความยาวครึ่งละ 100 ไมครอน ติดต่อกันไป สมมุติว่าอ่านได้เป็น $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 3-1) คำนวณหาค่าผลต่างครั้งที่สอง (D) แล้วหาค่าเฉลี่ยของผลต่างครั้งที่สอง (\bar{D}) หาค่ามุมเบี่ยงเบนเฉลี่ย ($\bar{\alpha}$) ในช่วงความยาว 100, 200, 300 ถึง 800 ไมครอน ตามลำดับ โดยใช้สมการที่ (2.11) แล้วเปลี่ยนค่ามุมเบี่ยงเบนเฉลี่ยที่ความยาวต่าง ๆ เหล่านี้ เป็นมุมเบี่ยงเบนเฉลี่ยในช่วงความยาว 100 ไมครอน ($\bar{\alpha}_{100\mu}$) โดยใช้สมการที่ (2.8) จากผลการคำนวณ พบว่า ในช่วงความยาวระหว่าง 400 ถึง 600 ไมครอน ค่า $\bar{\alpha}_{100\mu}$ เกือบคงที่ ในที่นี้เลือกค่าตรงกลาง คือ 500 ไมครอน เป็นช่วงความยาวที่เหมาะสม แทนด้วย t ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4-5

3.4.2 การวัดการกระเจิงหลายหน และการคำนวณค่า $p\beta$ ของทางเดินของอนุภาค จากทางเดินของโปรตอนที่ยับในอิมัลชัน นับจำนวนเม็ดเงินจากปลายทางเดินของอนุภาคในช่วงความยาว 2 มิลลิเมตร แล้วหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของเม็ดเงินในช่วงความยาว 50 ไมครอน ($n_g/50\mu$) และในช่วงความยาวเดียวกันนี้ วัดการกระเจิงหลายหนโดยวิธีเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในข้อ 3.4.1 การใช้ช่วงความยาว 2 มิลลิเมตรนี้ แม้ว่าความเร็วของอนุภาคจะเปลี่ยนไปบ้าง แต่ในทางปฏิบัติอนุโลมให้ผิดได้ไม่เกิน 10 %

สำหรับความผิดพลาดทางสถิติของความหนาแน่นของเม็ดเงิน² หาได้จากสมการ

$$\Delta_g = \frac{0.70}{\sqrt{m}} \quad (3.1)$$

Δ_g = deviation in grain density, m = number of grains
 ค่า Δ_g ในตารางที่ 4-6 และ 4-7 นั้น คำนวณโดยการแทนค่า m ด้วย $n_g/50\mu$ เมื่อใช้ค่า $n_g/50\mu$ และ $\bar{d}_{100\mu}$ แล้ว คำนวณหา $p\beta$ จากวิธีของเฟัวร์เลอร์ และ $p\beta$ จากวิธี méthode des sommes โดยใช้สมการ (2.13) และค่า $(D_c^2)^{1/2}$ หาได้จากสมการ (2.16) จากนั้นก็วัดและคำนวณหาค่า $p\beta$ แบบเดียวกัน ในช่วงความยาวที่ถัดไปอีก 2 มิลลิเมตร ดังนี้เรื่อย ๆ ไป จนกระทั่งนับหาความหนาแน่นของเม็ดเงินไม่ได้

ผลการคำนวณจากทั้งสองวิธี ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-6

สำหรับอนุภาคที่ออกจากจุดดาว ก็วัดโดยวิธีเดียวกัน แต่ต้องเลือกทางเดินที่ยาวเกิน 2 มิลลิเมตร ในแต่ละแผ่น ถ้าทางเดินใดไปปรากฏในอิมัลชันแผ่นถัดไปอีก ก็ตามไปวัดแบบเดียวกัน แล้วคำนวณหาค่า $n_g/50\mu$ และ $p\beta$ ในแต่ละช่วงคือ 2 มิลลิเมตร โดยวิธีทั้งสอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7

² Daniel and Perkins, loc. cit.

3.4.3 การคำนวณหามวลของอนุภาค จากค่าที่ได้ ระหว่าง $n_{g/50\mu}$ กับ $p\beta$ ของโปรตอนที่ยับในอิมัลชัน จากตารางที่ 4-6 นำมาเขียนกราฟบนกราฟกึ่งสเกลล็อก แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่าง $n_{g/50\mu}$ กับ $p\beta$ (จากทั้งสองวิธี) โดยใช้สมการ (2.19) โดยวิธีสี่เหลี่ยมผืนผ้า (least square) จากสมการที่ได้ นำมาลากเส้นที่เหมาะสมที่สุด (best fit) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-1 และ 4-2 จากจุดเหล่านี้ นำไปคำนวณหามวลของโปรตอน ตามวิธีในข้อ 2.7 ผลการคำนวณการหามวลของโปรตอน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-8

สมการของโปรตอนที่ยับคำนวณได้ คือ

$$\text{(Fowler), } n_{g/50\mu} = -29.644 \ln p\beta + 186.233 \quad (3.2)$$

$$\text{(sommès), } n_{g/50\mu} = -29.291 \ln p\beta + 181.753 \quad (3.3)$$

จากค่า $n_{g/50\mu}$ และ $p\beta$ จากวิธีของเฟว์เลอร์ ของอนุภาคต่าง ๆ ที่ออกจากจุดควา นำมาเขียนกราฟแบบเดียวกันกับของโปรตอน แล้วเอาค่าต่าง ๆ ของโปรตอนเขียนทับลงไป เขียนเส้นตรงแทนตำแหน่งของ คิวทีรอน, ทริคอน, เค-เมซอน และพาย-เมซอน ที่ควรจะเป็นตามทฤษฎี โดยแทนค่ามวลของอนุภาคต่าง ๆ ในเทอมของมวลของอิเล็กตรอน³ ดังนี้

$$m_p = 1836 m_e, \quad m_D = 2(1836) m_e$$

$$m_T = 3(1836) m_e, \quad m_K = 1210 m_e$$

$$m_\pi = 276 m_e$$

จากสมการ (3.2) แทนค่า $n_{g/50\mu}$ (ที่ $y=0$) คำนวณหาค่า $p\beta$ ของโปรตอนได้เท่ากับ 534.2 Mev. และจากสมการ (2.20) ที่ $n_{g/50\mu} = 0$ นี้ ค่า $p\beta$ ของอนุภาคอื่น ๆ ที่มี $Z = 1$ จะคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{คิวทีรอน, } (p\beta)_D = \frac{m_D}{m_P} (p\beta)_P = \frac{2(1836) \times 534.2}{1836} = 1068.4 \text{ Mev.}$$

³B. Rossi, High-Energy Particles, (Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc., 1952).

ทริตอน, $(p\beta)_T = \frac{m_T}{m_P} (p\beta)_P = \frac{3(1836) \times 534.2}{1836} = 1602.4 \text{ Mev.}$

เค-เมซอน, $(p\beta)_K = \frac{m_K}{m_P} (p\beta)_P = \frac{1210 \times 534.2}{1836} = 352.04 \text{ Mev.}$

พายเม-ซอน, $(p\beta)_\pi = \frac{m_\pi}{m_P} (p\beta)_P = \frac{276 \times 534.2}{1836} = 80.29 \text{ Mev.}$

เขียนเส้นตรงขนานกับเส้นตรงของโปรตอน ให้ผ่านจุดต่าง ๆ บนแกน $p\beta$ ตามที่คำนวณได้ และจากค่า $n_g/50\mu$ และ $p\beta$ คำนวณจาก méthode des sommes ก็เขียนกราฟโดยวิธีเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-3 และ 4-4 แล้วคำนวณหามวลของอนุภาคเหล่านี้ ในเทอมของมวลของโปรตอน ผลการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-9

เขียนการกระจายของมวลของอนุภาคเหล่านี้ เทียบกับการกระจายของมวลของโปรตอนเป็นรูปกราฟแท่ง (histogram) ดังแสดงในรูปที่ 4-5 และ รูปที่ 4-6 ตามลำดับ