บทที่ 3

วิธีการวัดและวิเคราะห์

3.1 รายละเอียดเกี่ยวกับนิวเคลียร์อิมัลชันที่ใช้

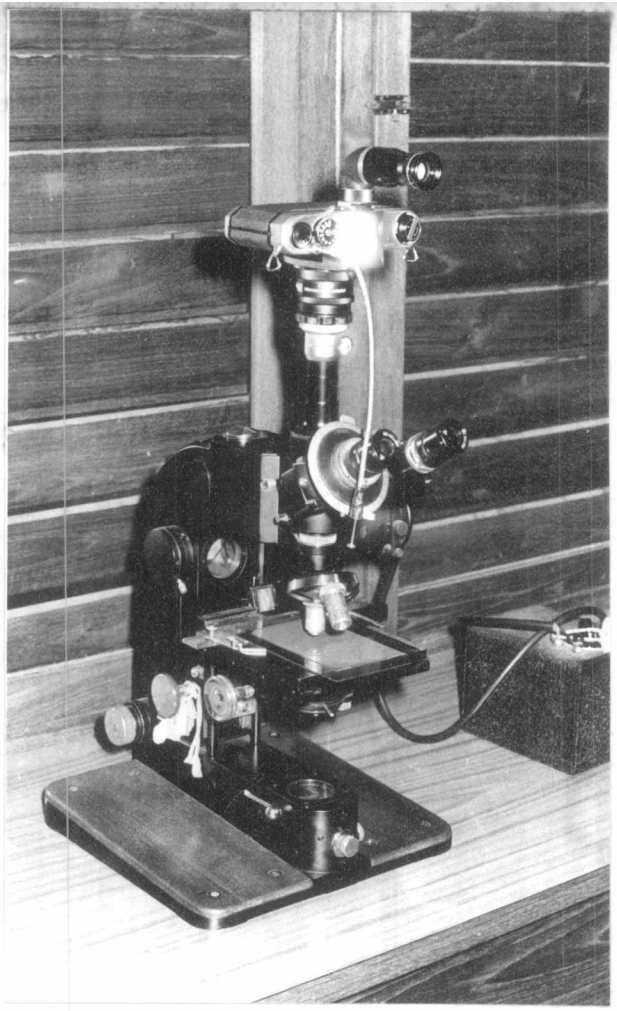
อิมัลชันชุด (stack emulsion) ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มี 3 ชุด คือ เค 5, เค 2 และ จี 5 ของบริษัทอิลฟอร์ด

เค 5 ได้มาจากศูนย์วิจัยนิวเคลียร์แห่งเมืองสตราบูรก ประเทศฝรั่งเศส แต่ละแผ่นมีขนาด 7.5 x 12 ตารางเซนติเมตร หนา 600 ไมครอนก่อนล้าง และได้ล้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทั้งหมดที่ใช้มี 42 แผ่น ได้ส่งอิมัลชันชุดนี้ขึ้นไปรับรังสีคอสมิคปฐมภูมิในแนวขนานกับผิวของอิมัลชันที่ความสูง 158 กิโลเมตร เหนือพื้นดินด้วยจรวด Véronique (V.47) ของฝรั่งเศส ที่สถานีส่ง Habagir (Colomb Bechar) ในอาฟริกา เมื่อวันที่ 18ตุลาคม พ.ศ. 2506 เวลาที่จรวดอยู่ในอากาศ (time of flight) ประมาณ 20 นาที สถานีนี้ตั้งอยู่ที่เส้นรุ้งที่ 2 องศาเหนือและเส้นแวงที่ 32 องศาตะวันออก

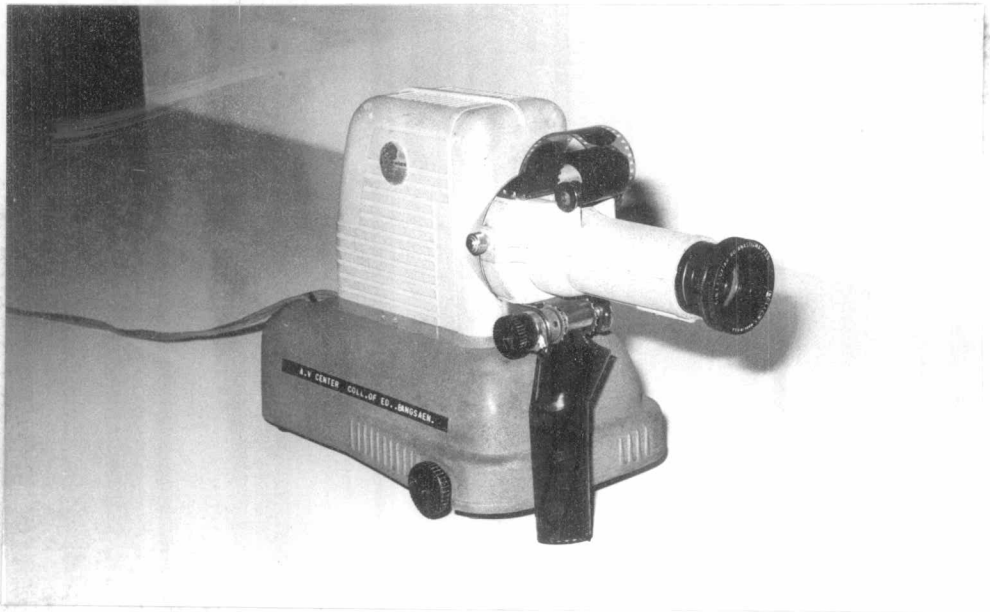
เค 2 แต่ละแผ่นมีขนาด 7.5 x 5.0 ตารางเซนติเมตร หนา 400 ไมครอน ก่อนล้าง ผึ่งรับรังสีที่ตึกฟิสิกส์หลัง 1 จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย เป็นเวลา 78 วัน ตั้งแต่วันที่ 29 มกราคม ถึง วันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2506 ภายใต้เครื่องกั้นตะกั่วที่มีความหนา 0,1,2,3,5 และ 10 เซนติเมตร อิมัลชันชุดนี้ทั้งหมดมี 18 แผ่น

จี 5 แต่ละแผ่นมีขนาด 10.0 x 7.5 ตารางเซนติเมตร หนา 300 ไมครอนก่อนล้าง ทั้งหมดมี 18 แผ่น ผึ่งรับรังสีที่ตึกฟิสิกส์หลัง 1 จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย เป็นเวลา 6 เดือน เมื่อปี พ.ศ. 2505 อิมัลชันวางรับรังสีในแนวตะวันออกตะวันตก

สำหรับการล้างอิมัลชันแต่ละชุดนั้นได้ใช้กรรมวิธีอย่างเดียวกันหมด โดยวิธีรักษาอุณหภูมิ



รูปที่ 3-1 แสดงกล้องถ่ายรูปสวมต่อกับกล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 3-2 เครื่องฉายภาพนิ่งแบบ Viewlex Model V-25

ให้ต่ำที่ 5° ซ. ตามวิธีของ Dilworth, Occhialini และ Payne [1] เวลาที่แช่อยู่ในน้ำยาสร้างภาพ (developer) ประมาณ 1 ชั่วโมง สำหรับอิมัลชั่นชุด เค 2 มีการควบคุมอุณหภูมิไม่ดีพอ ทำให้มีความเข้มไม่สม่ำเสมอไปบ้างเป็นบางแผ่น

3.2 การหาเวลาของการผึ่งรับแสงในการถ่ายภาพของรอย (exposure time)

ในการวัดความกว้างของรอยได้ใช้วิธีการถ่ายรูปปลายของรอยซึ่งออกจากจุดดาวและจบในอิมัลชั่น การถ่ายรูปของรอยนั้นใช้กล้องถ่ายรูป Pentax โดยถอดเลนส์ของกล้องออกแล้วนำกล้องไปสวมต่อกับกล้องจุลทรรศน์แบบ Cooke Troughton & Simms แบบ M40364 ดังแสดงในรูปที่ 3-1 ใช้ฟิล์มฮากุระ ASA 100

ในการให้ฟิล์มผึ่งรับแสงนั้น ได้ทดลองถ่ายภาพของรอยอันเดียวกัน ใช้เวลาต่างๆกัน โดยเริ่มตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 วินาที แล้วนำฟิล์มที่ผึ่งรับแสงแล้วไปล้าง โดยใช้เวลาล้างเท่ากันหมด 7 นาที ต่อจากนั้นก็นำมาเข้าเครื่องฉายไปบนจอ แล้วพิจารณาเลือกเอาภาพที่เห็นรอยของอนุภาคชัดที่สุด คือไม่ดำเกินไปและไม่ขาวจนเกินไป เพราะถ้าดำเกินไปทำให้มีความลำบากในการวัด แต่ถ้าขาวเกินไปขอบรอยจะกลมกลืนกับภูมิหลัง (back ground) ทำให้ยากแก่การวัดความกว้างเช่นกัน จากการพิจารณาเปรียบเทียบเวลาของการผึ่งรับแสงปรากฏว่าอิมัลชันชุด เค 5, เค 2 และ จี 5 ใช้เวลา 2.5, 1 และ 1 วินาทีตามลำดับ สำหรับภาพของรอยที่ใช้เวลาผึ่งรับแสงแตกต่างกันนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-3

3.3 การเลือกรอยและวิธีการวัดความกว้างของรอย

004781

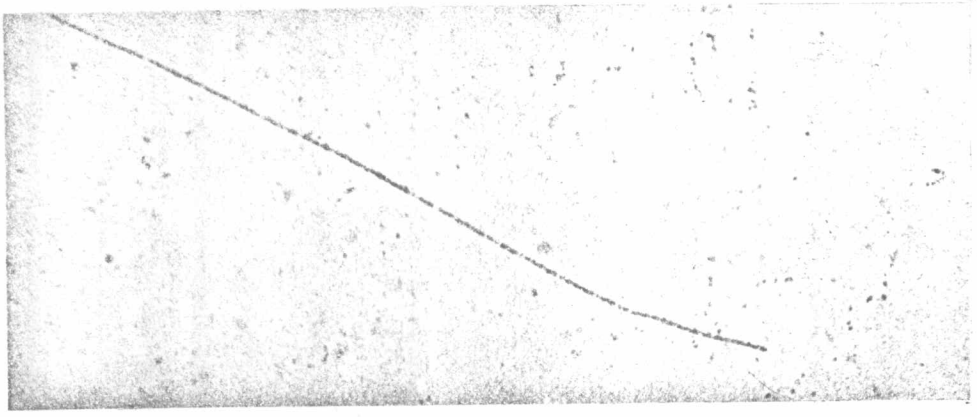
3.3.1 การเลือกรอย เนื่องจากว่ารอยที่ปรากฏในอิมัลชันมีหลายชนิด แต่รอยที่จะวัดนั้น ได้ใช้รอยที่เกิดจากจุดดาว เพราะรอยที่เกิดจากจุดดาวเป็นรอยของอนุภาคที่มีประจุต่างกันหลายชนิด รอยที่จะนำมาวัดนั้น นอกจากจะต้องจบในอิมัลชันแล้ว จะต้องทำมุม

---

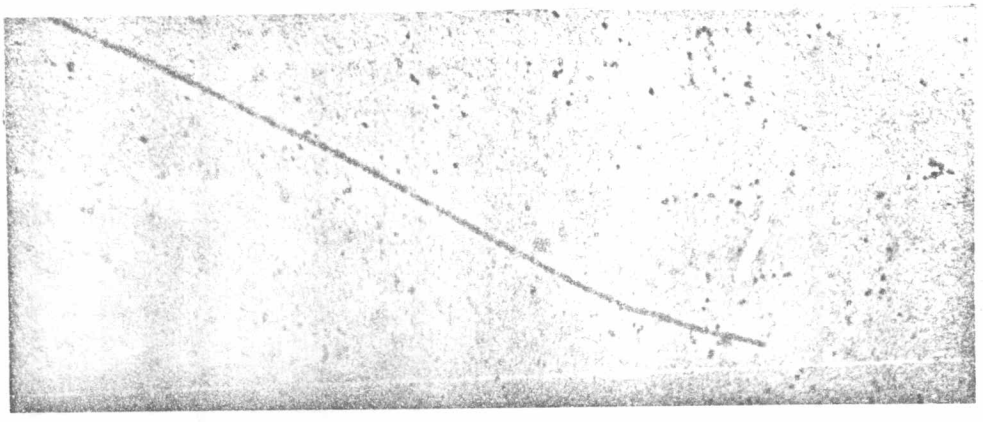
[1] Dilworth C.C., Occhialini P.S., and Payne R.M., Nature, 162(1948), p.102

17371910

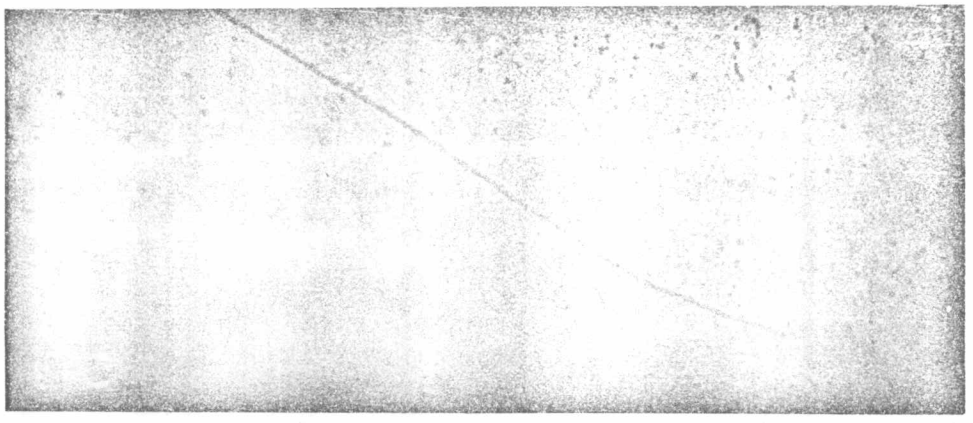
0.5 วินาที



1.0 วินาที

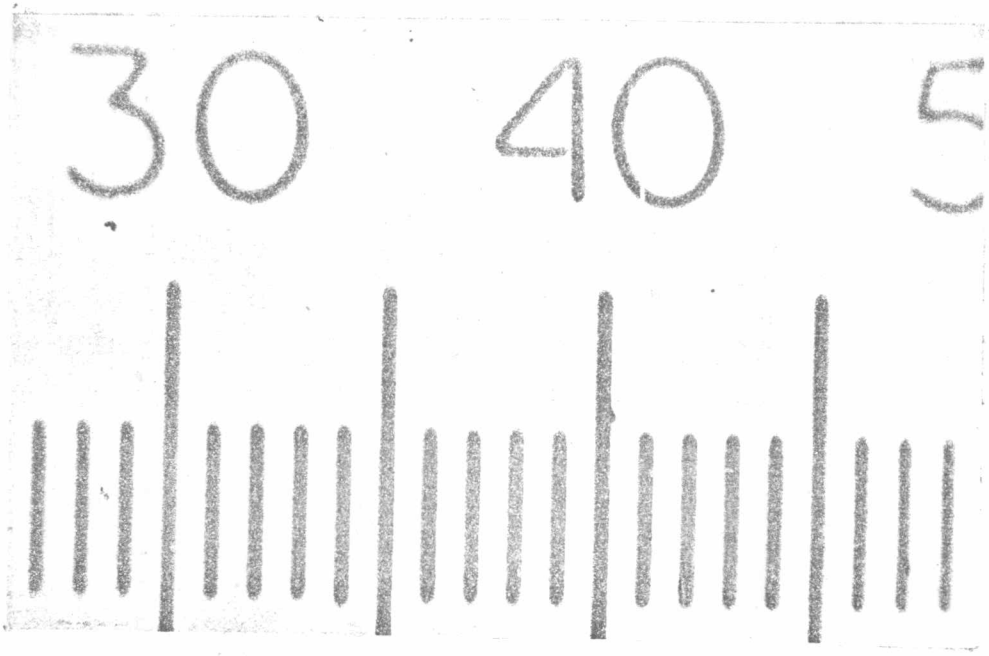


2.5 วินาที



5.0 วินาที

รูปที่ 3-3 แสดงภาพที่ใช้เวลาผึ่งรับแสงต่างๆกัน ตั้งแต่ 0.5 ถึง 5.0 วินาที



รูปที่ 3–4 แสดงสเกลที่ใช้เป็นมาตรวัดระยะ 1 ม.ม. แบ่งเป็น 100 ช่อง

รูปที่ 3–5 แสดงรอยที่มีความเหมาะสมจะใช้วัดความกว้าง

ไม่เกิน 15 องศากับผิวหน้าของอิมัลชัน ถ้ามีมุมมากกว่านี้จะทำให้ภาพถ่ายของความยาวของรอยแต่ละครั้งสั้น วัดลำบาก นอกจากนี้จะต้องเป็นรอยที่มีความหนาแน่นของเม็ดเงินสูงมาก (black tracks) ซึ่งรอยเหล่านี้จะเป็นรอยของอนุภาคที่มีเลขอะตอมตั้งแต่หนึ่งขึ้นไป

3.3.2 วิธีวัดความกว้างของรอย ในการค้นหารอยใช้เลนส์ใกล้ตาขนาด x15 และเลนส์ใกล้วัตถุขนาด x10 เมื่อพบรอยที่ต้องการแล้วในการถ่ายภาพของรอยได้ใช้เลนส์ใกล้วัตถุขนาด x45 เพื่อต้องการให้มีกำลังขยายสูง ได้มีการถ่ายสเกล 1 มิลลิเมตร ที่แบ่งเป็น 100 ช่องไว้ด้วยทุกครั้งที่เปลี่ยนฟิลม์ม้วนใหม่ เพื่อไว้สำหรับเป็นมาตรวัดระยะ แต่ละรอยจะได้รับการถ่ายภาพไว้สองครั้ง เพื่อว่าค่าที่วัดได้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ภาพของรอยที่เหมาะสมในการวัดและสเกลได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-4 และ 3-5

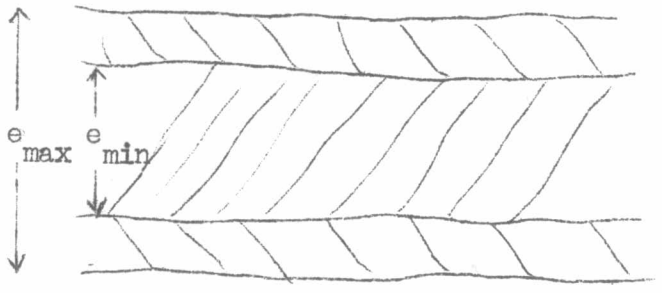
หลังจากล้างฟิลม์และตากให้แห้งแล้ว ได้นำฟิลม์ไปเข้าเครื่องฉายภาพนิ่ง (projector) แบบ Viewlex Model V-25 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3-2 แล้วฉายภาพไปบนจอ โดยฉายตัวสเกลไปบนจอก่อนเพื่อทำเป็นมาตรฐานไว้ ปรับให้กำลังขยายเป็น 4000 เท่า โดยมีระยะห่างระหว่างจอกับเครื่องฉาย 5 เมตร และได้กระทำในห้องมืด การขยายขนาดนี้จะทำให้วัดรอยได้ง่ายและสะดวกขึ้นมาก เพราะว่าความยาว 1 ไมครอน เมื่อฉายไปบนจอแล้วจะขยายได้เป็นระยะ 4 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถใช้คาลิปเปอร์เวอร์เนียร์ที่อ่านละเอียด 0.01 เซนติเมตรวัดได้ การวัดได้แบ่งความยาวของรอยออกเป็นช่วงๆโดยพยายามให้แต่ละช่วงเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยประมาณ ซึ่งความยาวแต่ละช่วงที่เหมาะสมนั้นเป็น 5 ไมครอน วิธีวัดช่วงแรกได้เริ่มวัดจากปลายของรอยเข้ามา 2.5 ไมครอน จากนั้นได้วัดความกว้างทุกๆ 5 ไมครอนติดต่อกันไป

ความกว้างของรอยที่วัดได้ ส่วนมากจะไม่ถึง 1 ไมครอน ดังนั้นเมื่อรอยถูกขยายขึ้นอย่างมากมาย เวลาฉายไปบนจอจะเกิดการเลี้ยวเบนของแสง (diffraction) เกิดเป็นเงามัวๆตรงขอบของรอย ทำให้วัดความกว้างได้ไม่แน่นอน การวัดได้วัดตามกรรมวิธีของ Gégaulf[2] ซึ่งได้แนะนำว่าจากผลของการเลี้ยวเบนของแสงที่ทำให้ภาพของรอยเกิดมีเงามืด

---

2 Gegaulf, loc. cit.

และเงามัวเช่นนี้ ให้วัดความกว้างของรอยทั้งสองส่วนแล้วนำไปหาค่าเฉลี่ยก็จะเป็นความกว้างเฉลี่ยดังแสดงในภาพที่ 3-6

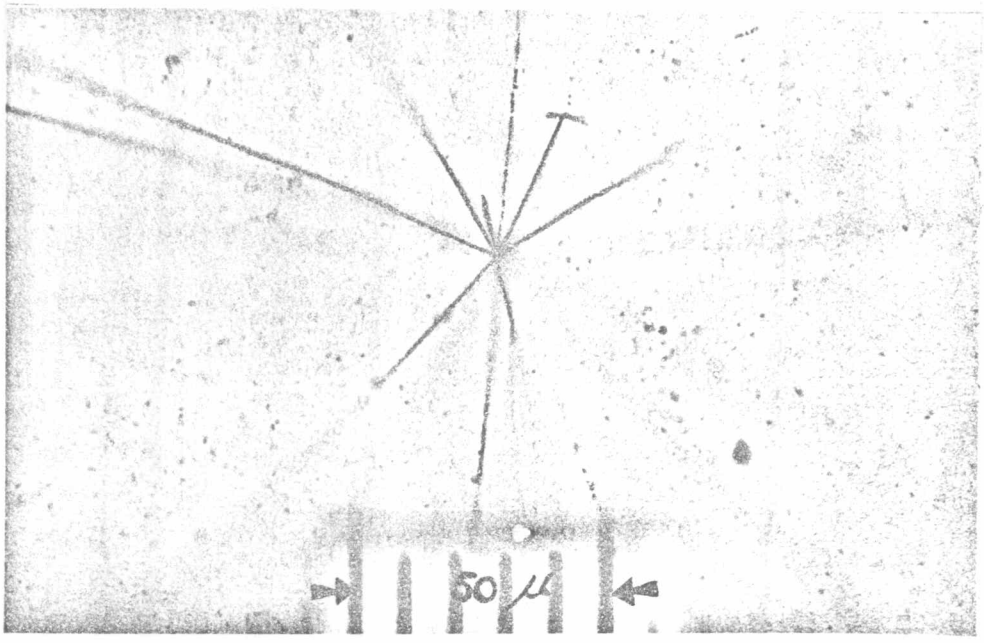


รูปที่ 3-6 ภาพแสดงรอยที่ฉายจากฟิลม์เนกกะติฟไปปรากฏบนจอ e_{max} คือความกว้างของรอยที่เป็นเงามัว e_{min} คือความกว้างของรอยที่สว่างมากที่สุด

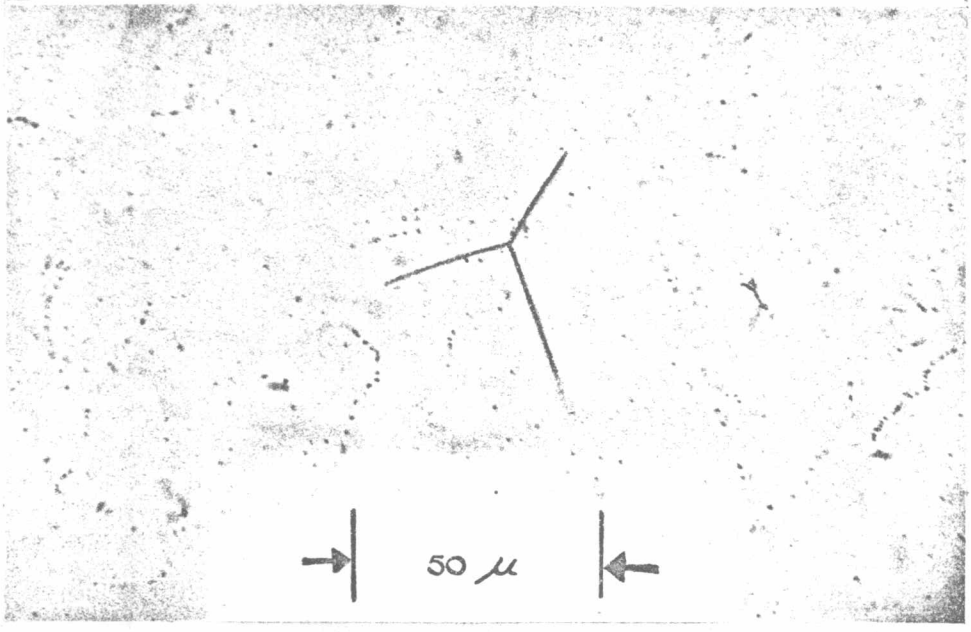
ความกว้างเฉลี่ย $$e_{av} = \frac{e_{max} + e_{min}}{2}$$

3.4 การวิเคราะห์ความกว้างของรอย

จำนวนรอยที่ใช้ในการวิเคราะห์ไม่เท่ากัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-1 จากความกว้างของรอยต่างๆที่วัดได้ นำไปเขียนกราฟระหว่างความกว้างและพิสัย ปรากฏว่ารอยทั้งหมดแยกออกเป็น 5 กลุ่ม อย่างเห็นได้ชัดเหมือนกันหมดในอิมัลชันทั้ง 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4-1, 4-2 และ 4-3 ย่อมแสดงว่าความกว้างของรอยที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันน่าจะเป็นรอยของอนุภาคชนิดเดียวกัน ซึ่งสามารถที่จะหาค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยได้ ดังแสดงในตารางที่ 4-3, 4-4 และ 4-5 สำหรับค่าเฉลี่ยในช่องสุดท้ายของตารางนั้นเฉลี่ยเฉพาะช่วงที่เลยระยะตีบไปแล้ว คือ กลุ่มที่ 2, 3, 4 และ 5 เฉลี่ยตั้งแต่พิสัย 12.5, 17.5, 22.5 และ 27.5 ไมครอน เป็นต้นไปตามลำดับ เหมือนกันทั้ง 3 ชุด ส่วนความคลาดเคลื่อนนั้นได้ใช้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 3–7 แสดงรอยรูปม้อน ในอิมัลชัน เค 5



รูปที่ 3–8 แสดงรอยของอนุภาคอัลฟ่า จากกัมมันตภาพรังสีธอเรียม

3.4.1 สำหรับรอยในอิมัลชันชุด เค 5 และ จี 5 ได้ใช้รอยที่เป็นมาตรฐานเหมือนกัน คือใช้รอยรูปฆ้อน (hammer track) ดังแสดงในรูปที่ 3-7 ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของรอยของนิวเคลียสของธาตุเบอร์ลีเลียมที่มีเลขอะตอมเป็น 4 เคลื่อนที่มาหยุดในอิมัลชันแล้วสลายตัวให้อนุภาคอัลฟ่า 2 ตัวในทิศทางตรงข้าม ตามสมการ

$$^{8}_{4}Be \longrightarrow 2\alpha \qquad (3.1)$$

ปรากฏว่าเมื่อเขียนกราฟระหว่างความกว้างของรอยรูปฆ้อนกับพิสัยจะอยู่ในกลุ่มที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4-1 และ 4-2 มาตรฐานอีกชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นรอยของอนุภาคอัลฟ่าจากแร่กัมมันตภาพรังสีธอเรียม (radiothorium) ซึ่งมีปนอยู่ทั่วไปในอิมัลชัน ภาพที่ปรากฏจะเป็นจุดดาวเล็กๆ ประกอบด้วยรอยสั้นๆ 3 รอยของอนุภาคอัลฟ่าออกจากจุดๆเดียวกัน ทำมุมเท่ากันอยู่ในระนาบเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3-8 จำนวนรอยของอนุภาคอัลฟ่าที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4-2 ส่วนความกว้างเฉลี่ยของรอยได้แสดงในตารางที่ 4-6 เมื่อเขียนกราฟระหว่างพิสัยกับความกว้างเฉลี่ยของรอยปรากฏว่าความกว้างของรอยอยู่ในกลุ่มที่ 2

3.4.2 รอยในอิมัลชันชุด เค 2 ได้ใช้รอยของอนุภาคอัลฟ่าจากกัมมันตภาพรังสีธอเรียมเช่นเดียวกับ 3.4.1 ความกว้างของรอยอยู่ในกลุ่มที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4-6 เช่นเดียวกัน

เนื่องจากไม่ปรากฏรอยที่แสดงคุณสมบัติเฉพาะที่พอจะทำเป็นมาตรฐานอีกตัวหนึ่งได้ในอิมัลชันชุด เค 2 ดังนั้นเพื่อจะให้ได้ตัวมาตรฐานอีก จึงต้องใช้การนับความหนาแน่นของเม็ดเงินของรอยที่ยาว ปรากฏอยู่ในกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 ซึ่งน่าจะเป็นโปรตอนและอนุภาคอัลฟ่าตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ให้แน่ว่าเป็นโปรตอนและอนุภาคอัลฟ่าโดยใช้การนับความหนาแน่นของเม็ดเงิน (grain counting method) ตามกรรมวิธีการนับของ Lattes[3] ในการนับให้นับเฉพาะช่วงที่อนุภาคเริ่มออกจากจุดดาว เพราะเป็นช่วงที่ความหนาแน่นของเม็ดเงินไม่มากนัก พอที่จะนับได้

---

[3] Lattes, Occhialini and Powell, Proceedings of The Physical Society, 61(1948), p.173

เนื่องจากว่าความหนาแน่นของเม็ดเงินแปรผันโดยตรงกับพลังงานที่อนุภาคถ่ายเท ให้กับอิมัลชัน ดังนั้น ถ้าให้ N เป็นความหนาแน่นของเม็ดเงิน และ $\frac{dE}{dx}$ เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง

$$N \propto \frac{dE}{dx}$$

และจากสมการ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$-\frac{dE}{dx} = z^2 f(v)$$

เมื่อ z เป็นเลขอะตอมของอนุภาค

v เป็นความเร็วของอนุภาค

ดังนั้น $N \propto z^2 f(v)$

สำหรับกลุ่มที่ 2 เป็นอนุภาคอัลฟ่า ซึ่งมีเลขอะตอมเป็น 2

$$N_\alpha \propto f(v)$$

กลุ่มที่ 1 เป็นอนุภาคโปรตอน จะมีเลขอะตอมเป็น 1

$$N_p \propto f(v)$$

หรือ $\frac{N_\alpha}{N_p} = 4$

แสดงว่าที่ความเร็วเท่ากันอนุภาคอัลฟ่าจะมีความหนาแน่นเม็ดเงินเป็น 4 เท่าของโปรตอน

เมื่ออนุภาคสองชนิด a และ b ที่มีความเร็วเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยของอนุภาคทั้งสอง R_a และ R_b จะเขียนได้เป็น[4]

$$R_a = \frac{m_a}{m_b}\left(\frac{Z_b}{Z_a}\right)^2 R_b + C(a,b) \qquad (3.2)$$

---

[4] Segrè E., op.cit., p.177

เมื่อ m_a และ m_b เป็นมวลของอนุภาคทั้งสอง Z_a และ Z_b เป็นเลขอะตอมของอนุภาคทั้งสองตามลำดับ $C(a,b)$ เป็นค่าคงที่ จะมีค่าน้อยๆสำหรับอนุภาคที่มีเลขอะตอมต่ำๆ เช่นโปรตอนและอนุภาคอัลฟ่า เป็นต้น

ถ้า a เป็นอนุภาคอัลฟ่า b เป็นโปรตอน

$$\frac{m_a}{m_b} = 4$$

$$\frac{Z_b}{Z_a} = \frac{1}{2}$$

จากสมการ (3.2) จะได้

$$R_a = R_b$$

แสดงว่าที่ความเร็วเท่ากัน โปรตอนและอนุภาคอัลฟ่าจะมีพิสัยเท่ากัน

ดังนั้นถ้าเขียนกราฟระหว่างความหนาแน่นเม็ดเงินและพิสัยบนสเกลธรรมดา กราฟที่ได้จะเป็นเส้นโค้ง แต่ถ้าเขียนกราฟระหว่าง log ของความหนาแน่นเม็ดเงิน และlog ของพิสัย กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรงซึ่งขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-7 อัตราส่วนของความหนาแน่นเม็ดเงินของอนุภาคอัลฟ่าและโปรตอนที่ความเร็วเท่ากันควรจะเท่ากับ 4 จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าได้เท่ากับ 3.81 ± 0.33 ดังแสดงในตารางที่ 4-7 ซึ่งใช้จำนวนของรอยในกลุ่มที่ 1 เท่ากับ 13 เส้น และในกลุ่มที่ 2 เท่ากับ 15 เส้น แสดงว่ารอยในกลุ่มที่ 1 และ 2 เป็นโปรตอนและอนุภาคอัลฟ่าตามลำดับ

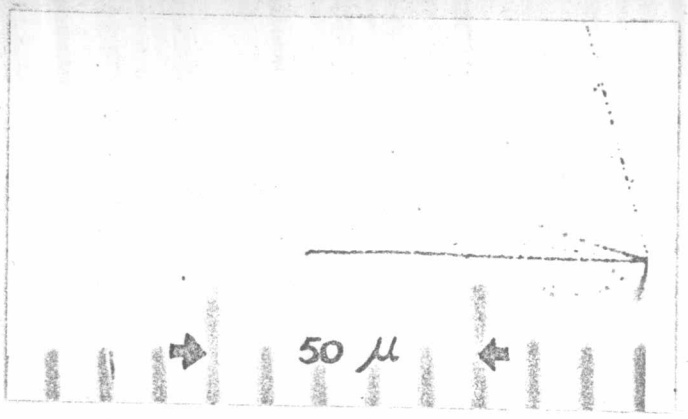
เมื่อทราบเลขอะตอมของรอย 2 กลุ่ม ก็สามารถที่จะใช้สมการ (2.7) หาค่าของ C และ x ได้ ดังตัวอย่างวิธีคำนวณในหน้า 40 ปรากฏว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างเฉลี่ยของรอยและเลขอะตอมจะเป็นดังนี้

อิมัลชันชุด เค 5

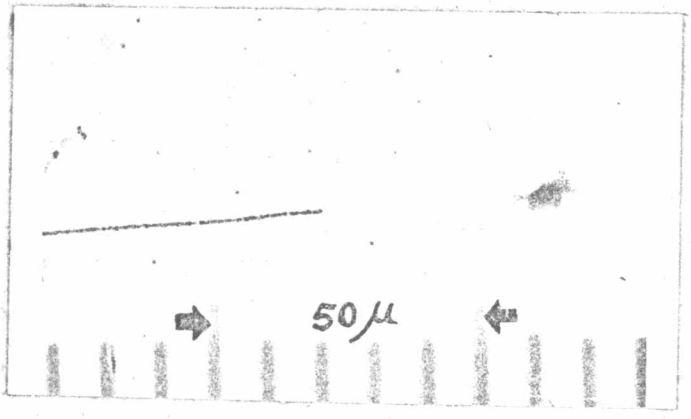
$$\bar{e} = 0.48\, Z^{0.42} \qquad (3.3)$$

อิมัลชันชุด เค 2

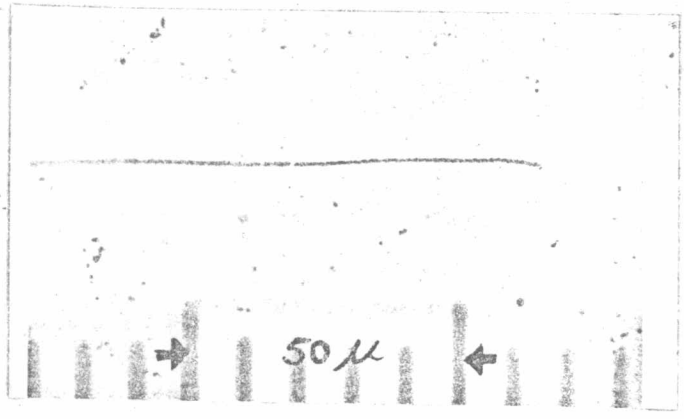
$$\bar{e} = 0.48\, Z^{0.53} \qquad (3.4)$$



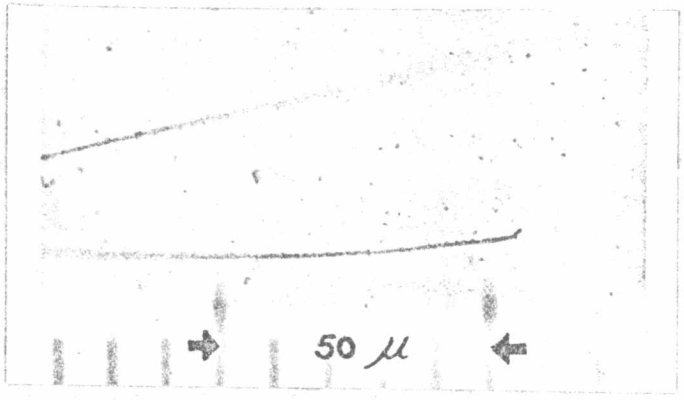
อนุภาคอัลฟ่า



ลิเทียม



เบอรีเลียม



บอรอน

รูปที่ 3–9 แสดงปลายของรอยของอนุภาคในซีมัลชัน เค 5

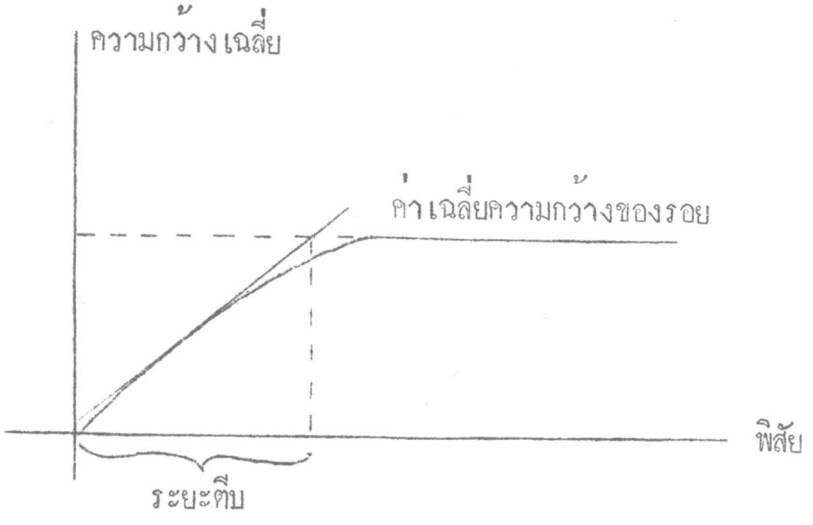
อิมัลชันชุด จี 5

$$\bar{e} = 0.53\, Z^{0.44} \qquad (3.5)$$

จากสมการทั้งสามข้างต้นสามารถนำไปวิเคราะห์รอยกลุ่มอื่นๆ เพื่อหาเลขอะตอมได้ ดังแสดงในตารางที่4-8

3.5 วิธีวิเคราะห์ระยะตีบ

เนื่องจากว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างเฉลี่ยและพิสัยจากรูปที่ 4-4 4-5 และ 4-6 สามารถแบ่งได้เป็นสองตอน ตอนแรกคือ ตอนที่แสดงค่าเฉลี่ยของความกว้าง ซึ่งตรงกับตอนที่อนุภาคยังมิได้มีการเสียประจุและมีการสูญเสียพลังงานสูง เมื่อความเร็วลดลง จนกระทั่งมีการจับกับอิเล็คตรอน ซึ่งความกว้างจะลดลงเป็นลำดับ การวัดระยะตีบวัดจากปลายพิสัยไปถึงจุดตัดระหว่างเส้นกราฟของช่วงที่เป็นระยะตีบและเส้นที่เป็นค่าเฉลี่ยความกว้างของรอย ดังแสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 แสดงวิธีวัดระยะตีบของรอย

ระยะตีบของรอยของอนุภาคต่างๆได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-9 โดยสมมุติว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะตีบและเลขอะตอมเป็น $L = cZ^a$ แล้วหาค่าตัวคงที่ c และ a

โดยใช้ลีสท์สแคว (least square) โดยใส่ log ทั้งสองข้าง เพื่อทำให้เป็นสมการเส้นตรง จะได้

$$\log L = \log c + a \log Z$$

จากค่า L และ Z ในตารางที่ 4-9 สามารถที่จะหาค่า a และ c ได้ โดยได้แสดงวิธีหาไว้ในหน้า 43 ซึ่งจะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะตีบและเลขอะตอมดังนี้

อิมัลชันชุด เค 5

$$L = 12.88\, Z^{0.64} \qquad (3.6)$$

อิมัลชันชุด เค 2

$$L = 13.13\, Z^{0.54} \qquad (3.7)$$

อิมัลชันชุด จี 5

$$L = 13.34\, Z^{0.51} \qquad (3.8)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง L และ Z ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-8, 4-9 และ4-10