หอสมุดกลาง
จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและหลักการการทดลอง
(Instruments and Experimental Principles)

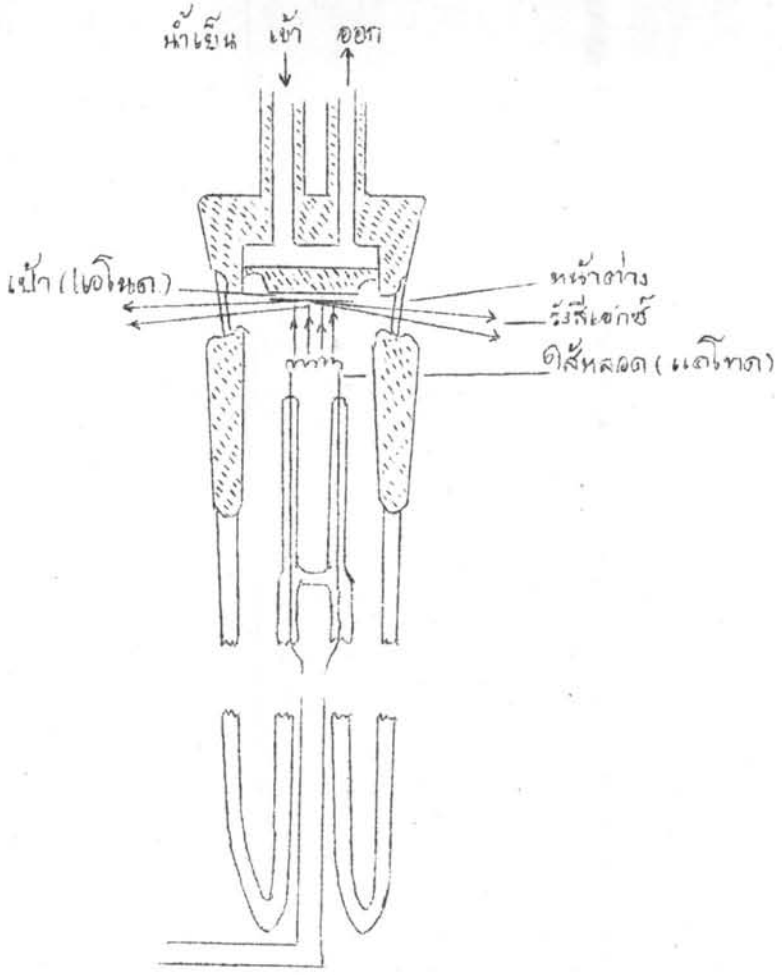
หลักการการทดลองเป็นการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากผลึกเดี่ยว (single crystal) ของ NbNiP การถ่ายภาพมีหลายแบบซึ่งจะกล่าวในตอนต่อ ๆ ไป เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นของห้องปฏิบัติการรังสีเอกซ์ แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

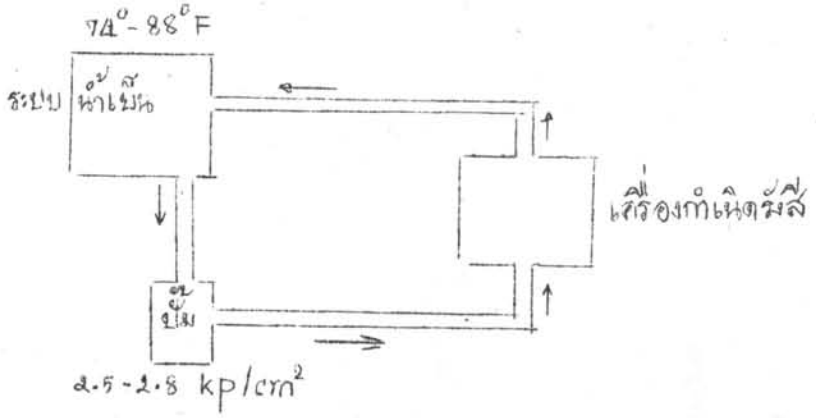
ประกอบด้วย

(1) เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้เป็นเครื่อง ฟิลิปส์แบบ PW 1010/80 ใช้หลอดรังสีเอกซ์ (x-ray tube) มีโลหะโมลิบเดนัม (molybdenum) เป็นแอโนด (anode) ทำหน้าที่เป็นเป้าของอีเลกตรอนที่เคลื่อนที่เป็นลำจากใส้หลอดที่ทำหน้าที่เป็นแคโทด (cathode) ของหลอด รังสีเอกซ์ที่ได้จากหลอดรังสีเป็นรังสีแบบ $K\alpha$ มีความยาวคลื่น 0.7107 แองสเทริม ในระหว่างที่กำลังเดินเครื่องกำเนิดรังสีมีระบบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นที่เป้าด้วยระบบการหมุนเวียนน้ำเย็น เพราะการกำเนิดรังสีทำให้เกิดความร้อน ซึ่งถ้าร้อนจัดจะทำให้หลอดรังสีเอกซ์ไหม้ได้ ลักษณะหลอดรังสีเอกซ์และระบบการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำเย็น แสดงดังรูป 3.1 (a) และ 3.1 (b)



รูป 3.1 (a) ลักษณะหลอดรังสีเอกซ์



รูป 3.1 (b) แผนผังระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเย็น

(2) <u>หัวโกนิออมมิเทอร์</u> (Goniometer Head)

เป็นอุปกรณ์สำหรับติดตั้งผลึก ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ซึ่งแสดงลักษณะของหัวโกนิออมมิเทอร์ และส่วนประกอบดังรูป 3.2 (a)

A และ B เป็นอาร์คมีขนาดเล็กและใหญ่ตามลำดับอยู่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน อาร์คทั้งสองสามารถปรับให้เอียงได้ $\pm$ 20 องศา เพื่อปรับให้แกนผลึกอยู่ในแนวเดียวกับแกนของหัวโกนิออมมิเทอร์ บนแต่ละอาร์คมีสเกลเวอร์เนียร์ (vernier scale) ซึ่งทำให้ปรับมุมได้ละเอียดถึง $\pm$ 20 ลิบดา

C และ D เป็นฐานที่เชื่อมโยงกับอาร์ค A และ B ฐานแต่ละอันปรับได้เพื่อเลื่อนให้อาร์คแต่ละอันอยู่ที่ศูนย์กลาง ซึ่งทำให้การหมุนของผลึกไม่มีอาการส่าย

(3) <u>กล้องไวซเซนเบอร์ก</u> (Weissenberg Camera)

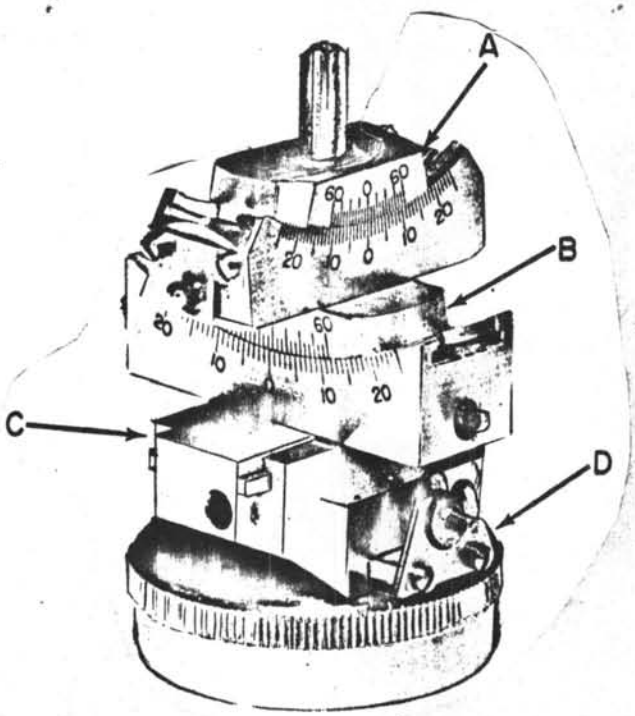
ลักษณะของกล้องไวซเซนเบอร์กแสดงในรูป 3.2 (b) ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังนี้

A เป็นฐานที่อยู่กับที่รองรับส่วนอื่น ๆ ของกล้อง มีขาหยั่งแบบสกรู 3 ขา แต่ละขาหมุนปรับให้ฐาน A สูงต่ำได้

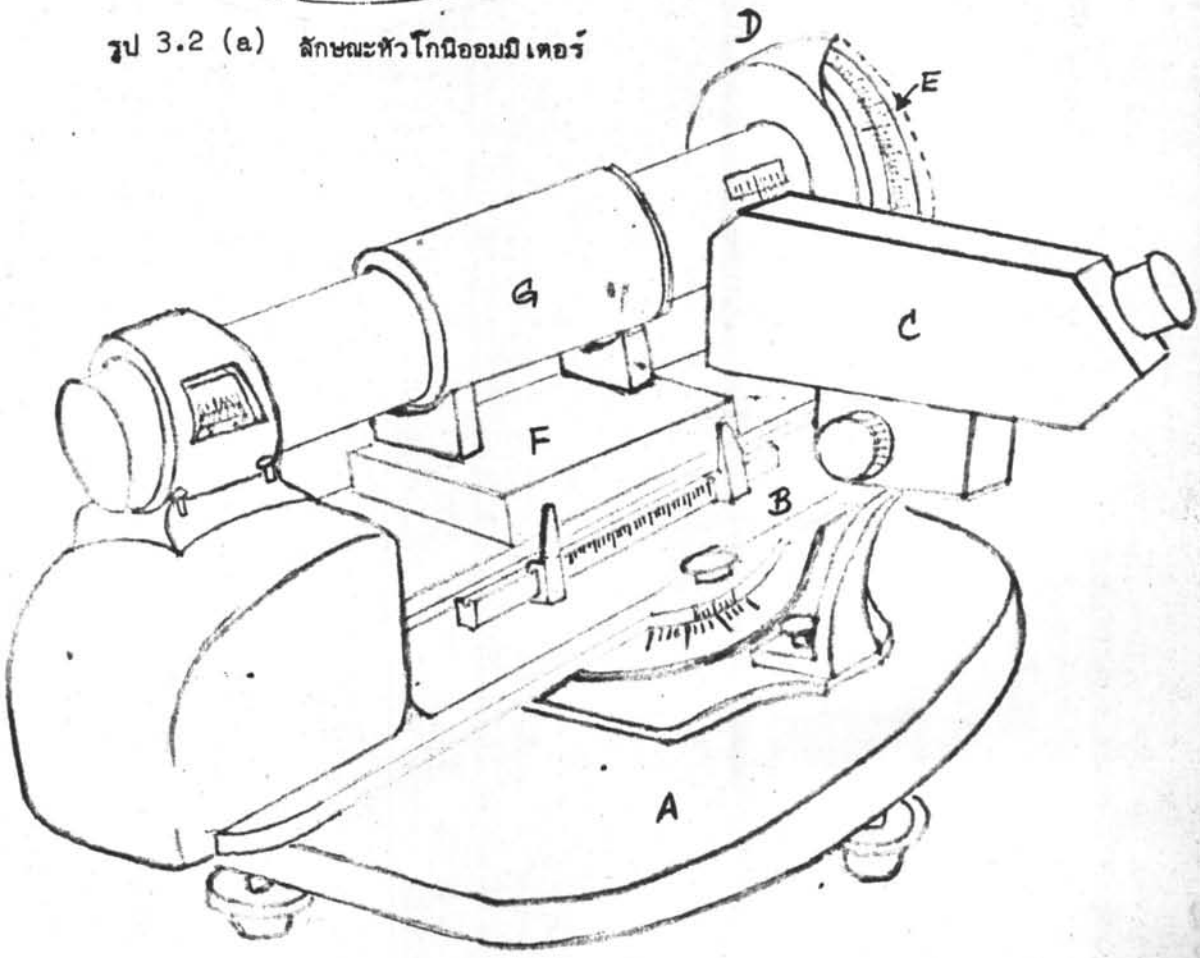
B เป็นฐานของตัวกล้องสามารถปรับให้หมุนได้ถึง 30 องศารอบจุดตรึงเมื่อเวลาต้องการถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเลย์เออร์ไลนสูง ๆ (upper layer line)

C เป็นกล้องสำหรับส่องดูผลึก

D เป็นส่วนประกอบของมอเตอร์ เกียร์ และกลไกต่าง ๆ เพื่อควบคุมให้ฐานรองรับกลักฟิล์ม (film cassete holder) เลื่อนไปมาทางซ้ายและขวา



รูป 3.2 (a) ลักษณะหัวโกนิออมมิเตอร์



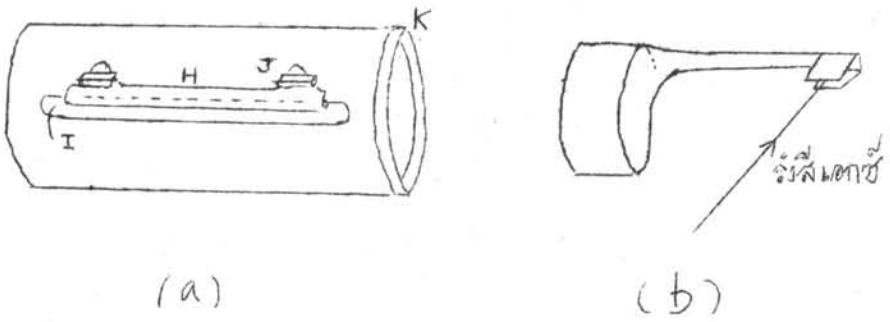
รูป 3.2 (b) ลักษณะกล้องไวซเซนเบอร์กและส่วนประกอบที่สำคัญ

พร้อมกับการหมุนของผลึก

E เป็นแป้นสเกลเป็นรูปวงแหวน ซึ่งบอกค่ามุมที่ผลึกหมุน

F เป็นฐานรองรับกลักฟิล์ม ซึ่งสามารถอ่านตำแหน่งของกล้องได้จากสเกลที่อยู่ด้านข้างของตัวรางเลื่อนกล้อง

G เป็นกลักฟิล์ม (film cassete) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 57.3 ม.ม. มีช่องตามแนวยาวให้ท่อนำรังสี (collimator) สอดเข้าได้ ฟิล์มที่ใส่เข้าในกลักฟิล์มขดเป็นรูปทรงกระบอกและถือว่ามีรัศมีเท่ากับกลักฟิล์ม ลักษณะของกลักฟิล์มแสดงดังรูป 3.3 (a)



รูป 3.3 (a) แสดงลักษณะกลักฟิล์ม และ (b) แสดงลักษณะที่กั้นรังสี

H เป็นสปริงยึด (spring clip) เพื่อรัดฟิล์มให้แนบกับผนังด้านในของกลักฟิล์ม

I เป็นช่องสำหรับสอดท่อนำรังสี

J สลักยึดสปริง H

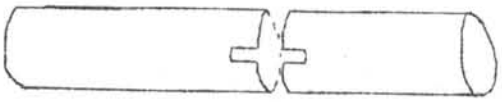
K เป็นฝาปิด

(4) <u>ที่กั้นรังสีตรง</u> (Beam Stop)

ใช้กั้นรังสีตรง (direct beam) เพื่อป้องกันมิให้จุดสะท้อนถูกกลืน เนื่องจากความเข้มของจุดสะท้อนน้อยกว่าความเข้มของรังสีตรง ส่วนที่กั้นรังสีได้ทำเป็นรูปซอง เป็นตะกั่ว ซึ่งแสดงลักษณะดังรูป 3.3 (b)

(5) <u>ที่กั้นเลย์เออร์ไลน์</u> (layer line screen)

เป็นทรงกระบอกโลหะกลวงแบ่งเป็น 2 ส่วน สั้นและยาว มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 51 ม.ม. ใช้สำหรับกั้นรังสีเลี้ยวเบนจากระนาบอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการถ่ายภาพมิให้ตกลงบนฟิล์ม ลักษณะของที่กั้นเลย์เออร์ไลน์แสดงดังรูป 3.4 เมื่อประกอบเข้ากับตัวกล้องมีลักษณะดังรูป 3.2 (b) และอ่านค่าที่ต้องการเลื่อนที่กั้นเลย์เออร์ไลน์แต่ละส่วนได้จากสเกล

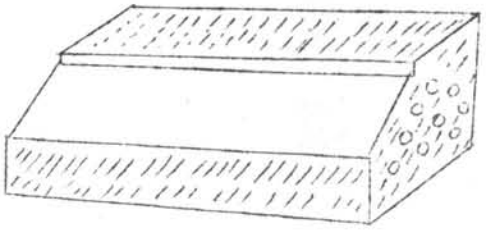


รูป 3.4 ลักษณะที่กั้นเลย์เออร์ไลน์

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

(6) <u>กล่องส่องฟิล์ม</u> (light-box)

ใช้สำหรับส่องฟิล์มเพื่อวัดความเข้มและหาดัชนีมิลเลอร์ของจุดสะท้อนแต่ละจุด โดยทาบฟิล์มบนกระจกของกล่องส่องฟิล์ม ลักษณะของกล่องส่องฟิล์มแสดงดังรูป 3.5 ข้างในมีไฟส่องให้ความสว่างบนกระจกอย่างสม่ำเสมอ



รูป 3.5 ลักษณะกล่องส่องฟิล์ม

(7) <u>กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดาและแบบโพลาไรซ</u>

(Microscope and Polarizing Microscope)

ใช้สำหรับเลือกผลึกเดี่ยวและวัดขนาดของผลึก

(8) คาลิเปอร์ (caliper)

ใช้สำหรับวัดระยะระหว่างเลย์เออร์ไลน์ที่ปรากฏบนฟิล์มที่ถ่ายแบบออสซิลเลเชิน (oscillation) เพื่อคำนวณแกนหมุน

(9) ฟิล์มและน้ำยาล้างฟิล์ม

ฟิล์มที่ใช้ถ่ายภาพเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มี 2 ชนิดคือ

(i) ฟิล์มของบริษัท CEAVERKEN AB ของสวีเดนแบบ TEST-XH ใช้ถ่ายภาพเพื่อวิเคราะห์ ทดสอบผลึกและตรวจสอบหมู่สมมาตรของผลึก (space group)

(ii) ฟิล์มของบริษัทโกดักแบบ NS 54 T ใช้ถ่ายภาพเพื่อเก็บข้อมูลความเข้มของจุดสะท้อนเพื่อนำไปคำนวณโครงสร้าง

ฟิล์มทั้งสองชนิดที่ใช้ต่างมีขนาด 5 x 7 นิ้วเท่ากัน

การล้างฟิล์มใช้สารละลายสามชนิดคือ น้ำยาล้างรูป (developer) สทอพบาธ (stop bath) และฟิกเซอร์ (fixer) การเตรียมน้ำยากล่าวตามแต่กรณีดังนี้

(i) น้ำยาล้างรูป สารละลายนี้ประกอบด้วย

สารละลาย A (Kodak liquid x-ray developer and replenisher solution A) 1 ส่วน

น้ำ 3 ส่วน

สารละลาย B (Kodak liquid x-ray developer and replenisher solution B) $\frac{1}{5}$ ส่วน

- เทียบกับที่เหลือข้างบน

(ii) สท้อพบาธ เป็นส่วนผสมน้ำสะอาดกับกรดเออซีทิค (acetic acid) เข้มข้น 2 %

(iii) ฟิกเซอร์ ประกอบด้วยส่วนผสมของน้ำสะอาด สารละลาย A (Kodak liquid--x-ray fixer and replenisher solution A) สารละลาย B (Kodak hardener solution B) โดยใช้อัตราส่วนเช่นเดียวกับน้ำยาล้างรูป

3.2 หลักการการทดลอง

การถ่ายภาพเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ประกอบด้วยการถ่ายภาพแบบออสซิลเซิน ไวซเซนเบอร์ก และแบบลาวอี แต่ละแบบมีหลักการต่างกันกล่าวเป็นกรณี ๆ ดังนี้

3.2.1 การถ่ายภาพออสซิลเลเซิน (Oscillation Photographing)

การถ่ายภาพออสซิลเลเซินมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความยาวของแกนหมุนศึกษาสมมาตร (symmetry) ของผลึก ตลอดจนเพื่อเตรียมการถ่ายภาพแบบไวซเซนเบอร์กต่อไป วิธีดำเนินการถ่ายภาพกระทำดังนี้ ให้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นค่าเดียว (monochromatic x-rays) ตกกระทบตั้งฉากกับแกนหมุนของผลึก ในขณะที่ถ่ายภาพให้ผลึกหมุนกลับไปมา (oscillate) ด้วยมุม ± 90 องศา และกล้องฟิล์มอยู่กับที่ ทำให้ระนาบแลททิส (lattice plane) ที่ประกอบด้วยแกนอื่น ๆ ของผลึกถูกหมุนเข้าไปตัดกับทรงกลมการสะท้อน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนรังสีตามแนวระหว่างศูนย์กลางของทรงกลมกับจุดตัดของจุดแลททิส (lattice point) บนผิวทรงกลม เช่นในกรณีที่ผลึกมีแกนหมุนเป็น c ดังรูป 3.6(a) เมื่อผลึกหมุน ระนาบแลททิสถูกหมุนเข้าไปตัดกับทรงกลม ทำให้ได้รังสีเลี้ยวเบนแสดงดังรูป มีลักษณะเป็นกรวย และเนื่องด้วยฟิล์มเป็นรูปทรงกระบอก รังสีเลี้ยวเบนเนื่องจากระนาบแลททิสของแต่ละเลย์เออร์ตกเป็นวงกลมรอบฟิล์มดังรูป 3.6 (b) ฉะนั้นเมื่อแผ่ฟิล์มออกจะปรากฏเป็นเส้นตรงแต่ละเส้นเรียกว่าเลย์เออร์ไลน์ดังรูป 3.6 (c)

การคำนวณความยาวแกนหมุนของผลึก พิจารณาจากรูป 3.6 (b) ได้ว่า

$$\sin \nu_1 = AB/_{OA} \qquad \text{.....(3.1)}$$

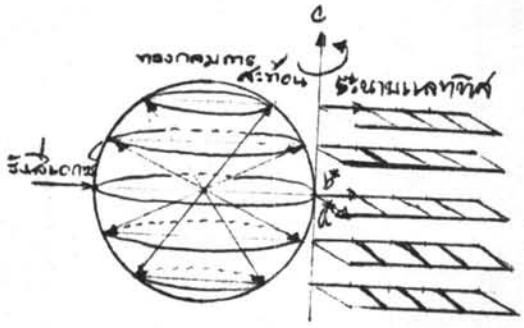
เมื่อ ν_1 เป็นมุมเลี้ยวเบนรังสีของเลย์เออร์ไลน์ที่ 1 OA เป็นรัศมีของทรงกลมการสะท้อนมีค่าเป็น 1 อาร์. แอล. ยู (r.l.u = reciprocal lattice unit) และ AB เป็นระยะระหว่างเลย์เออร์ที่ศูนย์กับเลย์เออร์ที่ 1 มีค่าเป็น ξ_1

$$\xi_1 = \lambda/c \qquad \text{.....(3.2)}$$

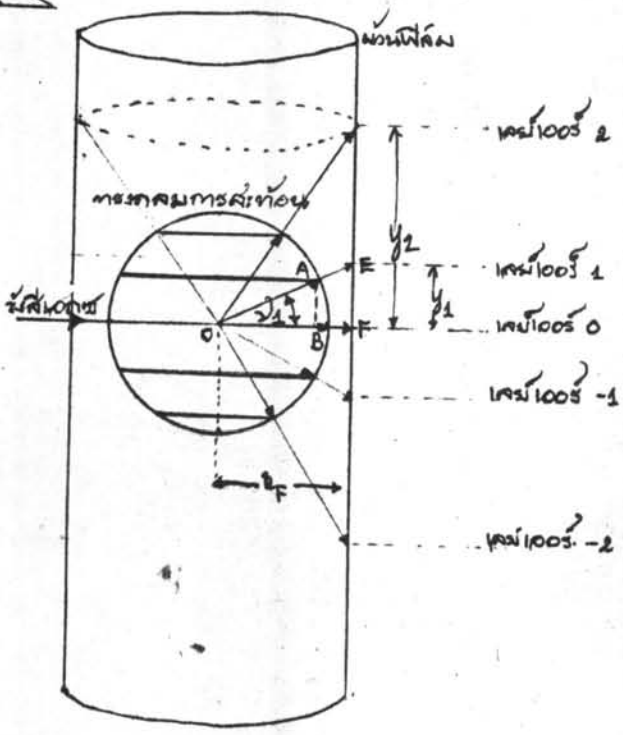
นั่นคือ

$$\sin \nu_1 = \lambda/c \qquad \text{.....(3.3)}$$

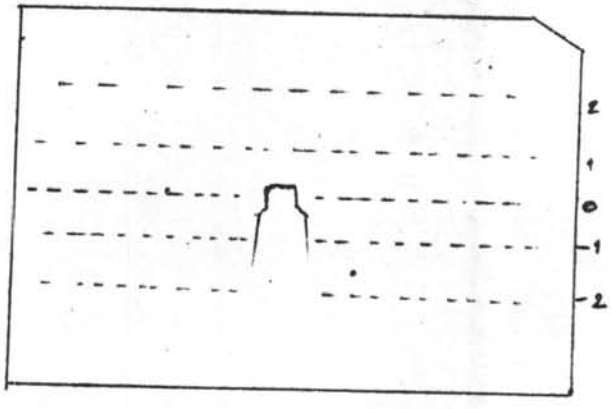
$$c = \frac{\lambda}{\sin \nu_1} \qquad \text{.....(3.4)}$$



รูป 3.6 (a) แสดงการหมุนผลึกนำระนาบแลททิสตัดกับทรงกลมการสะท้อน



รูป 3.6 (b) แสดงแนวรังสีตกบนฟิล์ม



รูป 3.6 (c) แสดงเลย์เออร์ไลน์

โดยทำนองเดียวกันสำหรับเลย์เออร์ที่ n ค่า c มีค่าเป็น

$$c = \frac{n\lambda}{\sin \gamma_n} \qquad \text{.....(3.5)}$$

พิจารณาจาก Δ OEF

$$\tan \gamma_1 = \frac{y_1}{r_F} \quad \text{และ} \quad \tan \gamma_n = \frac{y_n}{r_F}$$

ฉะนั้นความยาวของแกน c มีค่าเป็น

$$c = \frac{n\lambda}{\sin(\tan^{-1} \frac{y_n}{r_F})} \qquad \text{.....(3.6)}$$

โดยที่ n = ลำดับของเลย์เออร์ไลน์

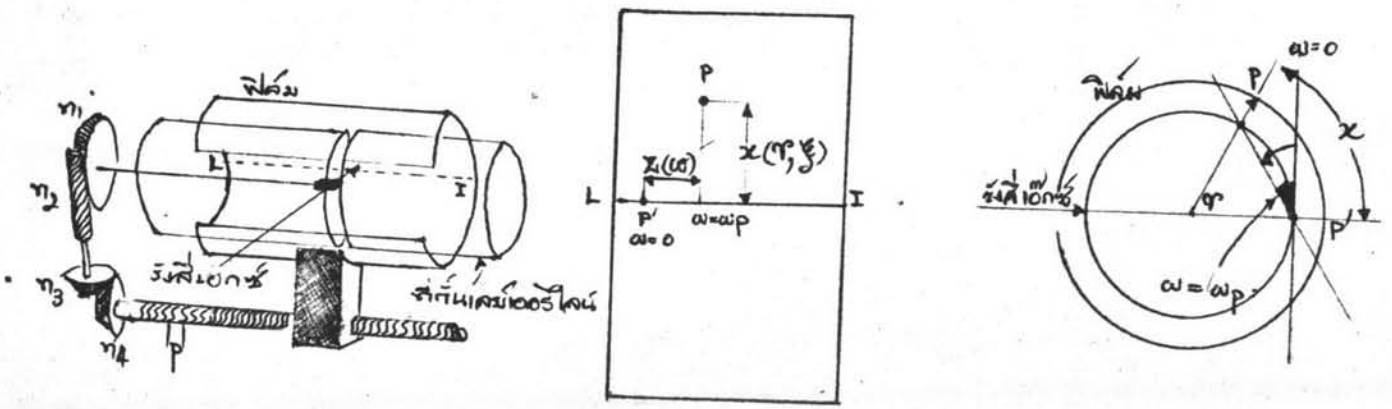
λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

y_n = ระยะระหว่างเลย์เออร์ที่ n กับเลย์เออร์ที่ 0 ที่ปรากฏบนฟิล์ม

r_F = รัศมีของฟิล์มปกติมีค่าเป็น $\frac{57.3}{2}$ ม.ม.

3.2.2 <u>การถ่ายภาพไวซเซนเบอร์ก</u> (Weissenberg Photographing)

การถ่ายภาพไวซเซนเบอร์กมีวิธีที่คล้ายกับแบบออสซิลเลเชินตรงที่ให้ผลึกหมุนกลับไปมา ต่างกันตรงที่ขณะถ่ายภาพให้ฟิล์มเคลื่อนที่ไปมาพร้อมกับการหมุนผลึก และที่สำคัญสำหรับการถ่ายภาพนี้ให้รังสีเลี้ยวเบนของเลย์เออร์ไลน์ใดเลย์เออร์ไลน์หนึ่งเท่านั้นตกลงบนฟิล์ม ด้วยการใช้ที่กั้นเลย์เออร์ไลน์บังรังสีเลี้ยวเบนของเลย์เออร์ไลน์ที่ไม่ต้องการออกไปเสีย เหตุจำเป็นที่ต้องถ่ายภาพไวซเซนเบอร์ก เพราะข้อมูลจากภาพถ่ายออสซิลเลเชินไม่ช่วยให้การคำนวณโครงสร้างผลึกสะดวกขึ้นเลย เพราะหาดัชนีมิลเลอร์ของจุดสะท้อนแต่ละจุดได้ลำบากมาก ผลของการให้ฟิล์มเลื่อนไปมา ทำให้จุดสะท้อนปรากฏกระจายบนแผ่นฟิล์ม แทนที่จะเป็นเส้นตรงอย่างภาพถ่ายออสซิลเลเชิน การจัดเครื่องมือถ่ายภาพไวซเซนเบอร์กแสดงดังรูป 3.7 (a) โดยช่องระหว่างที่กั้นเลย์เออร์ไลน์ที่ให้รังสีเลี้ยวเบนลอดออกมาตกบนฟิล์มกว้างประมาณ 2 ม.ม. บอกตำแหน่งจุดสะท้อนด้วยค่า $x(Y, \xi)$ เป็นระยะระหว่างจุดสะท้อนกับเส้นแบ่งครึ่งของฟิล์ม และค่า z(w) ระยะระหว่างจุดเริ่มต้นที่ผลึกยังไม่หมุน (w = 0) ไปยังจุดที่แนวของจุดสะท้อนตัดตั้งฉากกับเส้นแบ่งครึ่งของฟิล์ม ดังแสดงในรูป 3.7 (b) และ 3.7 (c)



รูป 3.7

(a) แสดงการจัดเครื่องมือ

(b) การปรากฏจุดสะท้อนบนแผ่นฟิล์ม เมื่อคลี่ออก

(c) แสดงความสัมพันธ์ γ กับ x เมื่อฟิล์มม้วน

ค่า $x(Y, \xi)$ วัดตามแนวดิ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมเลี้ยวเบนของรังสี พิจารณาจากรูป 3.7 (C) จุดสะท้อนปรากฏที่ P ห่างจาก P′ เป็นระยะ x ฉะนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง x กับ Y เป็น

$$Y = C_1 x$$

$$Y = \left(\frac{360}{2\pi r_F}\right) x \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.7)$$

โดยที่ค่า C_1 เป็นค่าคงที่ของเครื่องมือ (instrumental constant) สามารถเลือกได้โดยพิจารณาเลือก ๆ r_F ซึ่งเป็นรัศมีของฟิล์มที่ถือว่าเท่ากับรัศมีของกลักฟิล์ม สำหรับในการทดลองใช้กลักฟิล์มรัศมี $\frac{57.3}{2}$ ม.ม. ทำให้ได้ค่า $C_1 = 2$ นั่นคือ x กับ Y มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$x = \frac{Y}{2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.8)$$

และเมื่อเปรียบเทียบรูป 3.7 (c) กับรูป 2.5 (b) ได้ว่า $Y = 2\theta$

ค่า z(w) วัดในแนวขนานกับแกนหมุนของผลึก โดยที่ฟิล์มเลื่อนไปมาขณะที่ผลึกหมุน ค่า z(w) มีความสัมพันธ์กับมุม w ที่ผลึกหมุนไปด้วย ค่าคงที่ของเครื่องมือ C_2

$$w = C_2 z$$

โดยที่

$$C_2 = \frac{360}{1} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_4}{n_3} \cdot \frac{1}{P} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.9)$$

ขณะที่ n_1, n_2, n_3 และ n_4 เป็นจำนวนเกลียวของฟันเฟือง และ p เป็นระยะพิทช์ (pitch) ของสกรู แสดงดังรูป 3.7 (a) เป็นกลไกควบคุมการเลื่อนของฟิล์มที่ได้สัดส่วนกับการหมุนของผลึก เพื่อมิให้ค่าสเกลผิดกันในแต่ละทิศทางเลือกค่า $C_2 = C_1 = 2$ ฉะนั้น

$$w = 2z \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.10)$$

แสดงว่าฟิล์มเลื่อนไป 1 ม.ม. เท่ากับผลึกหมุนไป 2 องศา

การถ่ายภาพไวซเซนเบอร์กกระทำได้ 2 วิธีคือ

(i) แบบรังสีตั้งฉากกับแกนหมุน (normal beam method)

(ii) แบบรังสีทำมุมกับแนวรังสีเดิมที่ตั้งฉากกับแกนหมุน (equi-inclination method)

การถ่ายภาพแบบรังสีตั้งฉากกับแกนหมุนใช้สำหรับถ่ายภาพไวซเซนเบอร์กของเลย์เออร์ไลน์ที่ 0 และแบบรังสีทำมุมกับแนวรังสีเดิมที่ตั้งฉากกับแกนหมุน ใช้สำหรับเลย์เออร์ไลน์สูงกว่า 0 ขึ้นไป การถ่ายภาพแบบที่สองจึงต้องเอียงกล้องด้วยมุม μ ทั้งนี้ถ้าใช้วิธีรังสีตั้งฉากกับแกนหมุน จะทำให้ได้จุดสะท้อนไม่มากเท่าที่ควร เพราะมีบางส่วนของระนาบแลททิสที่จะไม่มีโอกาสได้ตัดกับทรงกลมการสะท้อน แสดงในรูป 3.8 (a) เรียกว่ามี ย่านบอด (blind region) สำหรับการถ่ายภาพแบบที่สองนั้นทำได้โดยหาค่ามุม μ ที่จะเอียงกล้องได้จากรูป 3.8 (b)

$$\sin \mu_n = \frac{\xi_n}{2} \qquad \text{.....(3.11)}$$

โดยที่ค่า ξ_n หาได้จากภาพถ่ายออสซิลเลเซิน และจากรูป 3.7 (a)

$$\sin \nu_n = \frac{\xi_n}{1} \qquad \text{.....(3.12)}$$

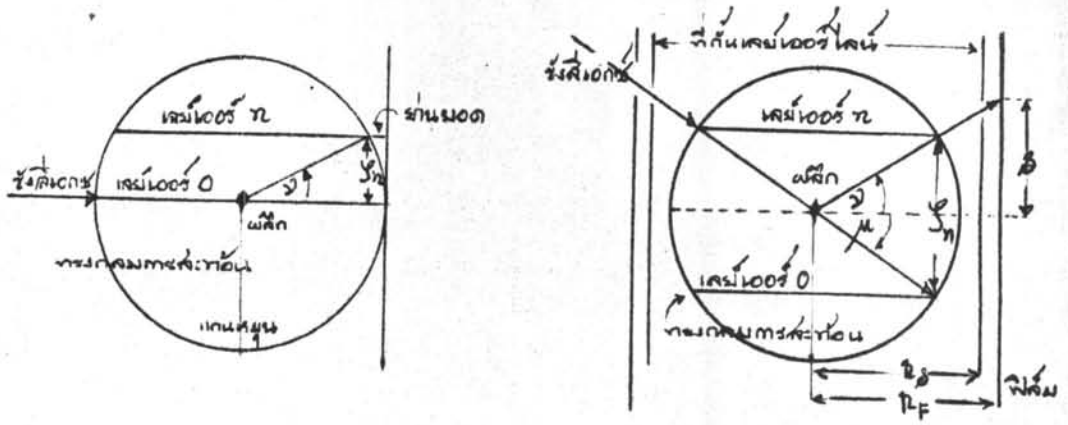
$$\sin(\tan^{-1} \frac{y_n}{r_F}) = \xi_n \qquad \text{.....(3.13)}$$

$$\mu = \sin^{-1}\left[\frac{\sin \tan^{-1} \frac{y_n}{r_F}}{2}\right] \qquad \text{.....(3.14)}$$

และที่กันเลย์เออร์ไลน์เลื่อนจากตำแหน่งเดิมสำหรับเลย์เออร์ที่ 0 ไปเป็นระยะ s

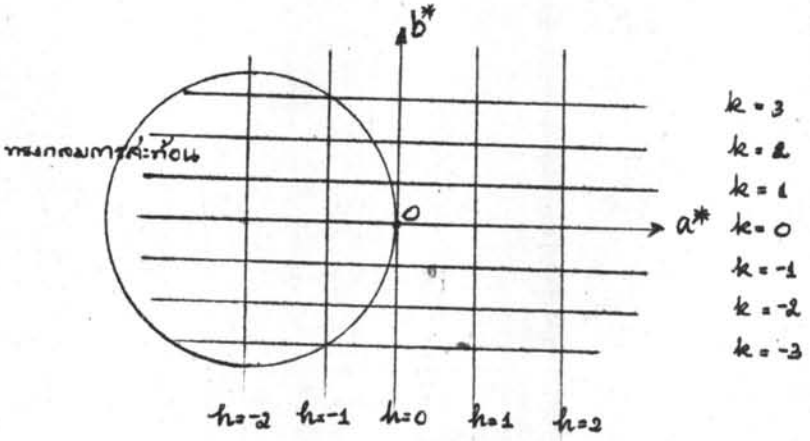
$$s = r_s \tan \mu \qquad \text{.....(3.15)}$$

โดยที่ r_s เป็นรัศมีของที่กันเลย์เออร์ไลน์มีค่าเท่ากับ $\frac{51}{2}$ ม.ม.



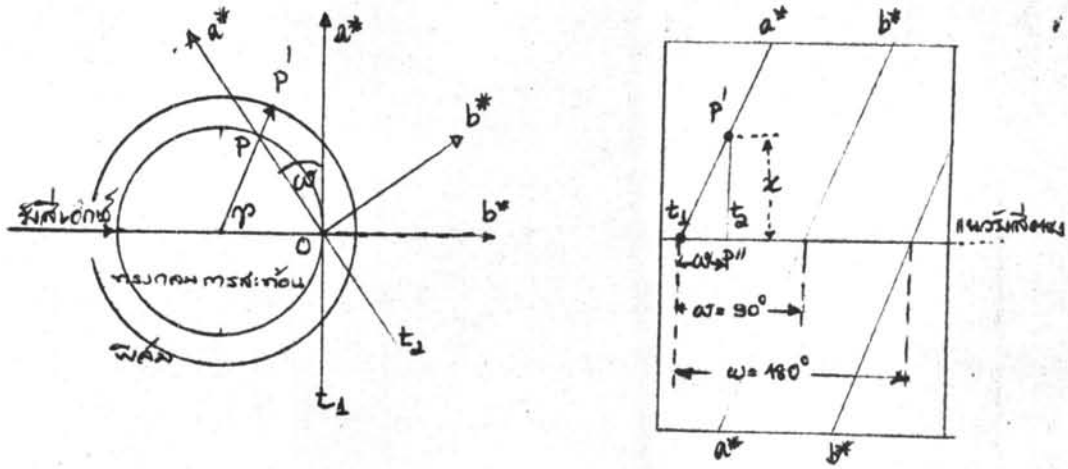
รูป 3.8 แสดงลักษณะทางเรขาคณิตของการถ่ายภาพไวซเซนเบอร์ก

(a) แบบรังสีตั้งฉากกับแกนหมุน และ (b) แบบรังสีทำมุมกับแนวรังสีเดิมที่ตั้งฉากกับแกนหมุน



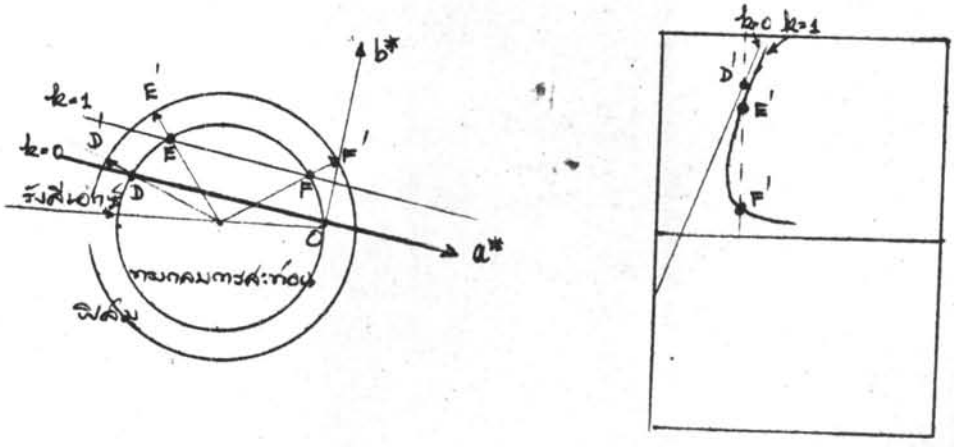
รูป 3.9 แสดงประเภทริซิพเรอเดิลแลททิสแบบผ่านจุดศูนย์กลาง

และแบบไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง



(a) (b)

รูป 3.10 แสดงแนวจุดสะท้อนของริซิพเรอเดิลที่ผ่านจุดศูนย์กลางของแลททิส (สำหรับเลย์เออร์ที่ 0)



รูป 3.11 แสดงแนวจุดสะท้อนของริซิพเรอเดิลแลททิสทั้งสองแบบ

การอธิบายการเกิดจุดสะท้อนบนฟิล์มอธิบายจากการหมุนของผลึกนำแนวริซิพเรอเคิลแลททิส (reciprocallattice row) เข้าไปตัดกับทรงกลมการสะท้อน ซึ่งแนวริซิพเรอเคิลแลททิสแบ่งออกเป็น 2 พวก คือ พวกที่ผ่านจุดศูนย์กลางของแลททิส (central lattice row) และพวกที่ขนานกับพวกแรกแต่ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางของแลททิส (noncentral lattice row) ฉะนั้นจุดสะท้อนที่เกิดบนฟิล์มก็เนื่องจากผลึกหมุนนำแนวริซิพเรอเคิลแลททิสทั้งสองพวกเข้าไปตัดกับทรงกลมการสะท้อน พิจารณาจากรูป 3.9 ถ้าแกนหมุนผลึกเป็นแกน C ตามรูปอยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบของกระดาษ จากรูป O เป็นจุดศูนย์กลางของแลททิส แนวริซิพเรอเคิลแลททิสที่มีค่า h และ k เป็นศูนย์เป็นพวกที่ผ่านจุดศูนย์กลางของแลททิส ส่วนแนวริซิพเรอเคิลแลททิสที่มีค่า h = $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ และ k = $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \ldots$ ต่างก็เป็นพวกที่ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางของแลททิส

เมื่อผลึกหมุนทำให้ริซิพเรอเคิลแลททิสที่ผ่านจุดศูนย์กลางของแลททิส และที่ขนานกับมันแต่ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางหมุนเข้าไปตัดกับทรงกลมการสะท้อน ทำให้รังสีเลี้ยวเบนออกตามแนวระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมกับจุดตัดบนผิวทรงกลมตกลงบนฟิล์ม พิจารณาจากรูป 3.10 (a) และ 3.10 (b) ที่เวลาเริ่มต้น t_1 ริซิพเรอเคิลแลททิส $\vec{a}^*(k = 0)$ เริ่มหมุนเข้าตัดกับทรงกลมการสะท้อน เมื่อผลึกหมุนไปด้วยมุม ω $\vec{a}^*$ ตัดกับทรงกลมที่ P เมื่อเวลา t_2 จุดสะท้อนปรากฏบนฟิล์มที่ P' โดยอยู่สูงจากแนวรังสีตรงที่ปรากฏบนฟิล์มคือ เส้นแบ่งครึ่งของฟิล์ม เป็นระยะ x ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Υ ตามความสัมพันธ์ในสมการ (3.8) และจากรูปเห็นได้ว่า $\Upsilon = 2\omega$ และระยะห่างของจุดซึ่งได้จากรังสีตรงบนฟิล์มที่เวลา t_1 กับจุด P'' ซึ่งเทียบได้กับมุม ω ฉะนั้นจุดสะท้อนของริซิพเรอเคิลแลททิสที่ผ่านจุดศูนย์กลางแลททิสเป็นแนวเส้นตรงมีความชัน (slope) เป็น 2 เท่ากับเอียงเป็นมุม $63^\circ\ 21'$ จากรูป 3.10 (a) ถ้าผลึกหมุนในช่วงมุม $0^\circ - 90^\circ$ จุดสะท้อนจะปรากฏที่ส่วนบนของฟิล์มและหมุนในช่วงมุม $90^\circ - 180^\circ$ จุดสะท้อนจะปรากฏที่ส่วนล่างของฟิล์ม และเมื่อแกน $\vec{a}^*$ หมุนครบ 90° แกน $\vec{b}^*$ จะเริ่มเข้าตัดกับทรงกลม จึงเกิดการเลี้ยวเบนรังสีในลักษณะเดียวกับแกน $\vec{a}^*$ ดังแสดงในรูป (3.10 (b)

สำหรับจุดสะท้อนเนื่องจากริซิพเรอเดิลแลททิสที่ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางแลททิสนั้นปรากฏเป็นแนวของเส้นโค้งทั้งนี้เพราะว่าขณะใดขณะหนึ่งที่ริซิพเรอเดิลแลททิสที่ไม่ผ่านจุดศูนย์กลางของแลททิสตัดกับทรงกลมการสะท้อนได้ 2 ตำแหน่ง ทำให้มีรังสีเลี้ยวเบน 2 ทางปรากฏจุดสะท้อน 2 จุด บนฟิล์ม พิจารณาจากรูป 3.11 (a) และ 3.11 (b) ริซิพเรอเดิลแลททิส $k = 1$ ตัดกับทรงกลมได้ 2 จุด จึงปรากฏจุดสะท้อน 2 จุดบนฟิล์ม แนวของจุดสะท้อนปรากฏเป็นเส้นโค้ง

3.2.3 <u>การถ่ายภาพลาวอี</u> (Laue Photographing)

ในการวิจัยนี้ภาพลาวอีใช้เพื่อศึกษาสมมาตรของจุดสะท้อนตามแกนใดแกนหนึ่งโดยเฉพาะ วิธีการถ่ายภาพลาวอีกระทำดังนี้ ใช้รังสีมีความยาวคลื่นหลายค่ารวมกัน (white radiation) ขณะที่ดำเนินการถ่ายภาพทั้งผลึกและฟิล์มอยู่กับที่ วิธีที่ถ่ายภาพลาวอีศึกษาสมมาตรตามแกนนั้นกระทำได้ไม่ยากโดยใช้กล้องไวซเซนเบอร์กหลังจากถ่ายภาพเลเยอร์ที่ 0 แล้ว ทั้งนี้จากภาพถ่ายไวซเซนเบอร์ก ทำให้ทราบตำแหน่งของแกนจากการพิจารณาการหมุนของผลึก เช่น ต้องการดูสมมาตรตามแกน a และจากภาพไวซเซนเบอร์กทราบว่าแกน a อยู่ในแนวขนานกับรังสีเอกซ์เมื่อแกนที่สรวมหัวโกนิออมมิเทอร์อ่านค่าที่ตำแหน่ง 48° เมื่อต้องการถ่ายภาพลาวอีให้หมุนแกนที่สรวมหัวโกนิออมมิเทอร์อยู่ที่มุม 48° แล้วจึงดำเนินการถ่ายภาพ

การที่จำเป็นต้องใช้รังสีที่มีความยาวคลื่นหลายค่ารวมกัน เพราะการสะท้อนของระนาบแต่ละระนาบนั้นต่างเหมาะสมกับความยาวคลื่นของรังสีแต่ละค่า ทั้งนี้เนื่องจากผลึกอยู่นิ่งค่ามุม θ ในสมการแบรกก์มีค่าคงที่และระยะระหว่างระนาบคงที่ด้วย