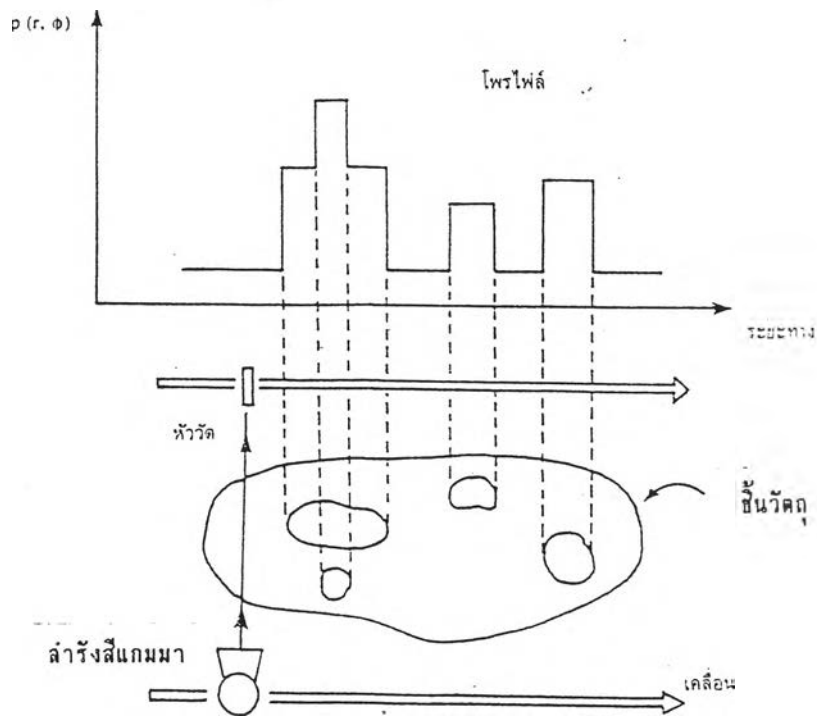


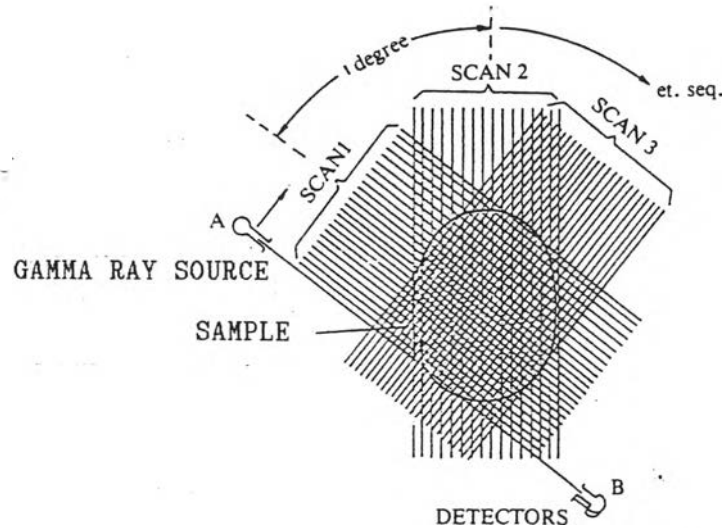
2.1 หลักการของ Computed Tomography (CT)

ตามทฤษฎีการสร้างภาพ CT ทำให้ทราบว่า ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสร้างภาพ คือ ค่าความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุออกมาในทิศทางต่าง ๆ จำนวนมาก หลักการทำงานของ CT คือ ปล่องลำรังสีลำแคบออกไปแล้วใช้หัววัดรังสี (Detector) ไปตั้งไว้ฝั่งตรงข้าม แล้วเคลื่อนลำรังสีและหัววัดรังสี โดยให้รังสีลำแคบตัดผ่านไปในระยะของวัตถุ ดังรูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงแบบนี้ 1 ครั้งจะได้ข้อมูล 1 โปรไฟล์



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงของรังสีลำแคบไปในระยะของวัตถุที่ต้องการดูทำให้ได้ 1 โปรไฟล์

ถ้าลำรังสีลำแคบนี้เคลื่อนเปลี่ยนมุมจากแนวเดิม แล้วเคลื่อนที่ตัดแนวเดิม การเคลื่อนที่จะกระทำจนครบ 180 องศา ดังรูปที่ 2.2 ข้อมูลความเข้มรังสีจำนวนทั้งหมด จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณสร้างภาพโดยโปรแกรมต่อไป



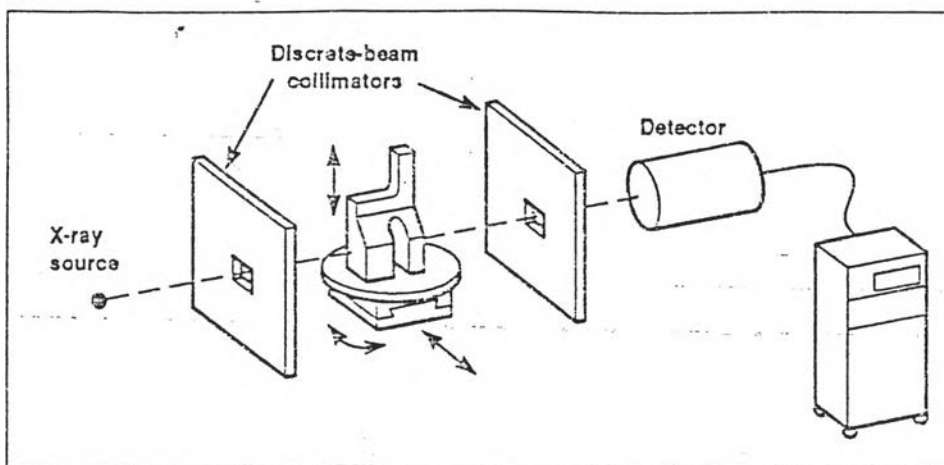
รูปที่ 2.2 รังสีแกมมาเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงที่มุมต่างๆกัน

วิวัฒนาการของระบบสร้างภาพโทโมกราฟีได้มีการพัฒนามาเป็นเวลานานมาแล้วจนกระทั่งในปัจจุบันได้มีการนำเอาระบบการสร้างภาพ CT มาประยุกต์ใช้ในกิจการแขนงต่าง ๆ เช่น ทางด้านการแพทย์ ทางด้านการอุตสาหกรรม สามารถแบ่งวิธีการเก็บข้อมูลออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ ได้แก่

#### 2.1.1 ระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ (single discrete beam)

ลักษณะการทำงาน ของระบบสแกนแบบนี้ คือ ใช้ลำรังสีแบบลำแคบหนึ่งลำ (single discrete beam) ใช้หัววัดรังสี 1 หัวในการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มรังสี เพื่อนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี หลักการทำงานของสแกนแบบนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบแรกให้วัตถุเคลื่อนที่ตัดลำรังสีในลักษณะที่วัตถุเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Translation) และการหมุน (Rotation) ประกอบกัน ส่วนแบบที่สองให้หัววัดรังสีเคลื่อนที่ไปพร้อมกับต้นกำเนิดรังสีโดยที่

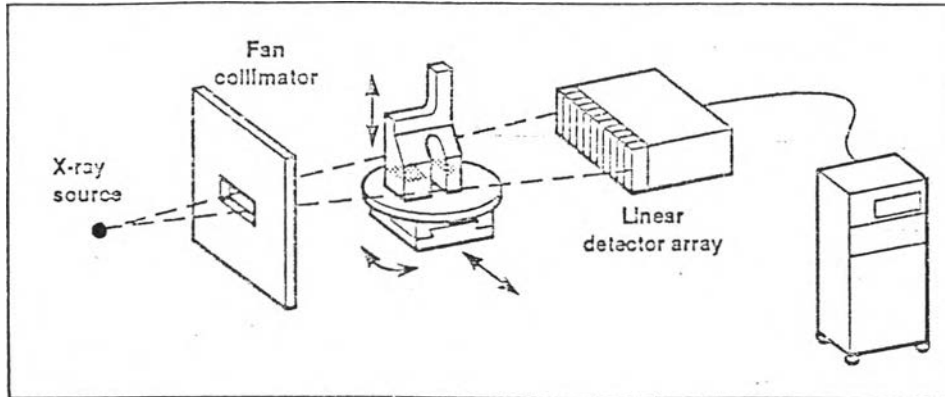
วัตถุตัวอย่างอยู่กับที่ ลักษณะการเคลื่อนที่แบบที่ส่องก็เช่นเดียวกับแบบแรกคือ เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงทีละ step หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การสแกน ระยะทางที่ได้จากการเคลื่อนที่แต่ละ step จะเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องรับรังสีของหัววัดนั้น เมื่อสิ้นสุดการสแกน 1 แถว จะได้ข้อมูลที่เรียกว่า "โพรไฟล์(Profile)" หรือ "โพรเจกชัน(Projection)" และหมุนไปเป็นมุมน้อย ๆ ทีละ 1 องศา หรือมากกว่า จึงเริ่มสแกนและได้ข้อมูลโพรไฟล์ใหม่จนครบ 180 องศา ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำหลักการของระบบสแกนแบบนี้มาใช้เก็บข้อมูลโพรไฟล์ เพื่อสร้างภาพโทโมกราฟี โดยให้หัววัดรังสีเคลื่อนที่ไปพร้อมกับต้นกำเนิดรังสี ส่วนวัตถุตัวอย่างนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การทำงานของระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ

### 2.1.2 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (fan beam)

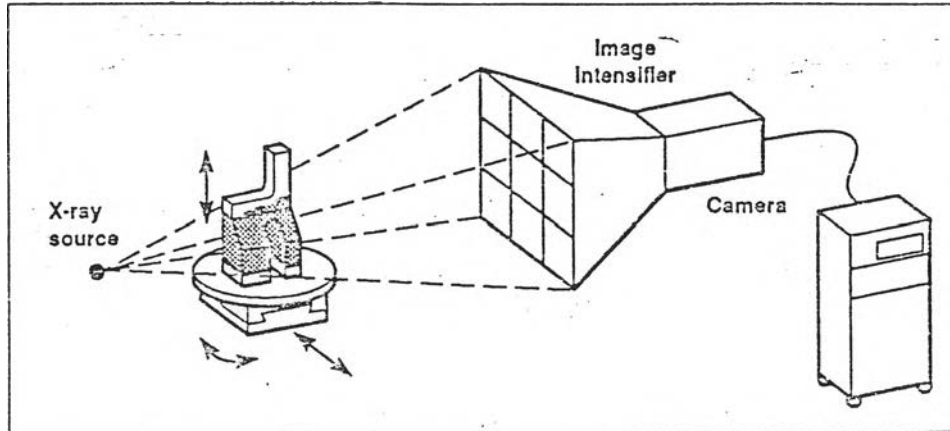
เนื่องจากระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีมาก จึงได้มีการพัฒนาระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัดขึ้นมา เพื่อลดเวลาในการเก็บข้อมูล โดยมีลำรังสีเป็นแบบพัด (fan beam) ใช้หัววัดรังสีแบบ Linear detector array หลักการทำงานจะคล้าย ๆ กับระบบสแกนแบบแรก จะต่างกันเมื่อหมุนไปแต่ละครั้งจะสามารถเก็บข้อมูลโพรไฟล์ โดยไม่ต้องสแกนเพราะสามารถเก็บข้อมูลทั้งชุดได้เลย จึงเป็นผลให้ระบบสแกนนี้ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนั้นน้อยลง ซึ่งการเก็บข้อมูลโพรไฟล์ สามารถที่จะออกแบบให้วัตถุตัวอย่างเคลื่อนที่ หรือออกแบบให้หัววัดเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กับต้นกำเนิดรังสีก็ได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การทำงานระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด

### 2.1.3 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (cone beam)

ระบบสแกนแบบนี้ถูกสร้างขึ้นสามารถสร้างรายละเอียดของภาพได้สองระนาบ (two dimension) คือระนาบในแนวแกนนอนกับระนาบในแนวแกนตั้ง โดยออกแบบให้ลำรังสีเป็นแบบรูปกรวย และใช้หัววัดรังสีแบบ (Cone Dimension Detector Array) ซึ่งจะมีหัววัดเรียงกันมากกว่า 1 แถว และในแต่ละแถวจะมีหัววัดรังสีอยู่หลายอัน หรืออาจใช้แผ่นเรืองแสงรับภาพ และมีกล้องโทรทัศน์จับภาพ โดยระบบสแกนแบบนี้จะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลโพรไฟล์น้อยกว่าทั้งสองระบบ ที่กล่าวมาดังรูปที่ 2.5 ซึ่งอาจเรียกระบบนี้ว่า "ระบบโทรทัศน์" (Television System) สำหรับขั้นตอนการเก็บข้อมูลโพรไฟล์นั้น จะต้องใช้เทคนิคทางอิเล็กทรอนิกส์ค่อนข้างสูงจึงจะได้ข้อมูลที่ให้ความละเอียดและชัดเจน



CT data-acquisition geometries used in NDE: (a) discrete-beam first-generation translate/rotate design; (b) well-collimated fan-beam design using a linear detector array; and (c) cone-beam design using a 2-D detector array.

## รูปที่ 2.5 การทำงานของระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย

### 2.2 ทฤษฎีการสร้างภาพโทโมกราฟี

เนื่องจากแนวความคิดที่ว่า สัมประสิทธิ์การลดลงของความเข้มของลำรังสีในวัตถุต่างชนิดกันในแนวระนาบใดระนาบหนึ่ง สามารถหาได้โดยวัดลำรังสีในทิศทางต่างๆที่วิ่งทะลุผ่านระนาบของวัตถุที่เราสนใจแล้วนำไปวิเคราะห์สร้างภาพได้อย่างไร ดังนั้นจึงจะได้กล่าวทฤษฎีการสร้างภาพ (Image Reconstruction) ของ ภาพโทโมกราฟี

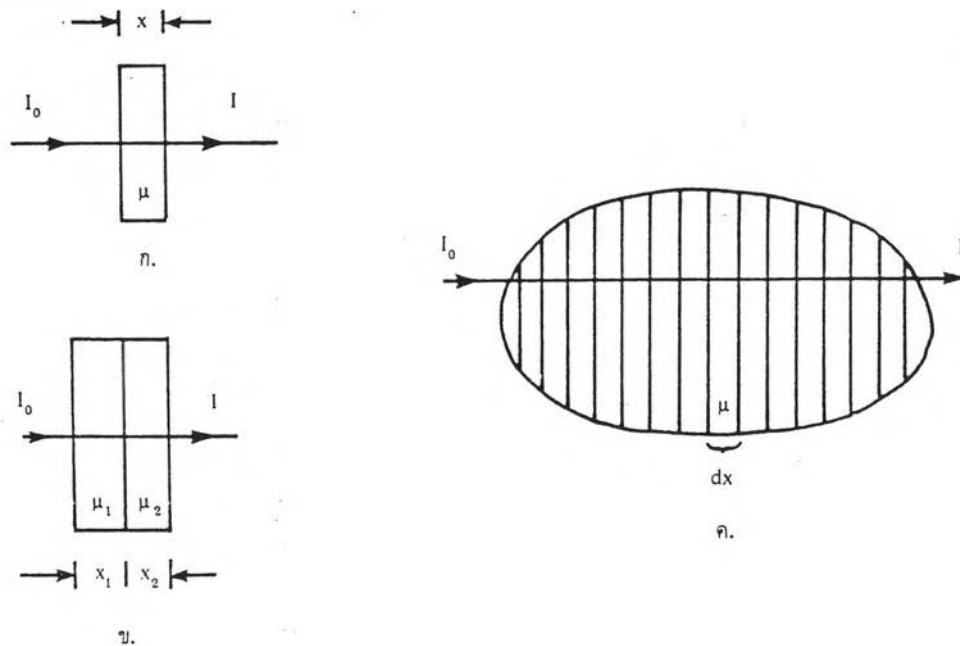
#### 2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่สูงสามารถทะลุทะลวงวัสดุต่างๆได้ ในขณะที่รังสีแกมมาเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางใดก็ตามจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับตัวกลางนั้น เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric effect) ปรากฏการณ์คอมตัน (Compton effect) และปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (Pair production) ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ มีผลให้รังสีแกมมาที่เดินทางผ่านตัวกลางนั้น ๆ ออกมาแล้วมีความเข้มลดลง ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.1

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$I_0$	คือ	ความเข้มของปริมาณรังสีแกมมาก่อนผ่านตัวกลาง
	$I$	คือ	ความเข้มของปริมาณรังสีแกมมาหลังผ่านตัวกลาง
	$\mu$	คือ	สัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของตัวกลาง
	$x$	คือ	ความหนาของตัวกลาง

จากความสัมพันธ์ จะเห็นว่า ปริมาณความเข้มของรังสีแกมมาที่เดินทางผ่านตัวกลางออกมาจะขึ้นกับพลังงานของต้นกำเนิดรังสี ความหนาและชนิดของตัวกลางนั้น ๆ ซึ่งแสดงการลดลงในเทอม  $e^{-\mu x}$  ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงเรขาคณิตของลำรังสีแกมมาที่เดินทางผ่านตัวกลาง 3 แบบ

- ก. ตัวกลางที่มีเนื้อเดียวตลอด
- ข. ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกันสองชนิด
- ค. ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกันหลายชนิด

กรณีที่ตัวกลางประกอบด้วยสารสองชนิด หนา  $X_1$  และ  $X_2$  ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีแกมมาของตัวกลางทั้งสองเป็น  $\mu_1$  และ  $\mu_2$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.6 (ข) จะได้

$$I = I_0 e^{-\mu_1 x_1 - \mu_2 x_2} \quad (2.2)$$

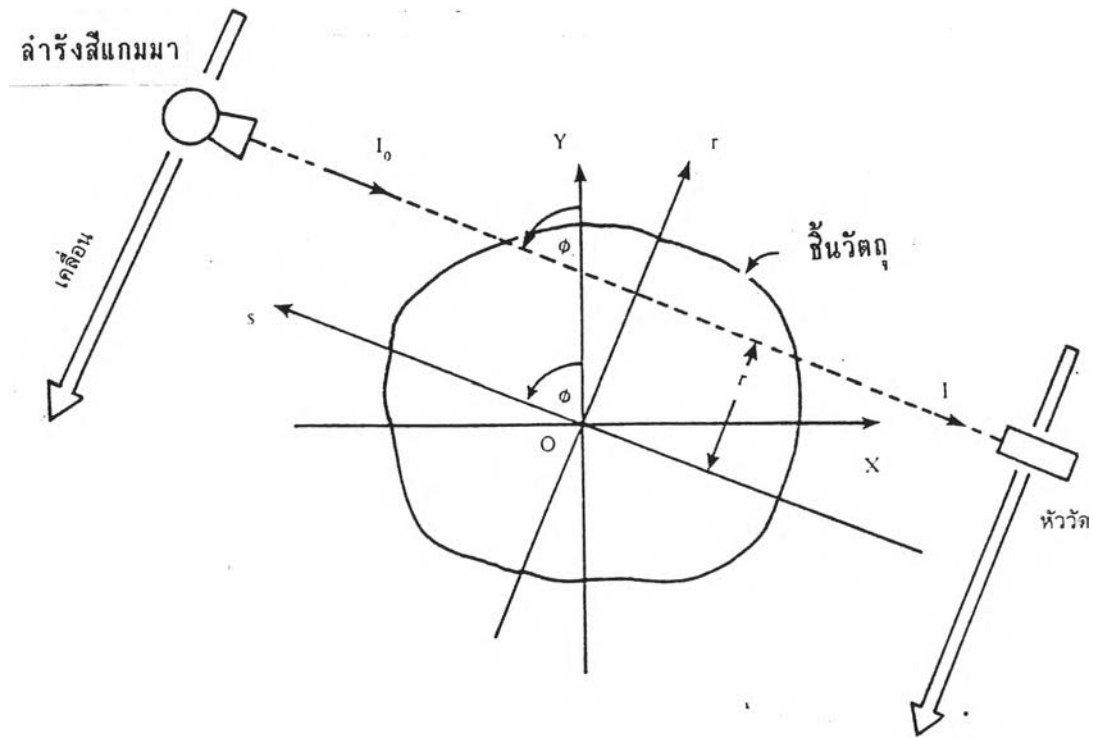
แต่ถ้าตัวกลางที่มีสารประกอบหลายชนิด ในการคิดการดูดกลืนรังสีจำเป็นต้องแบ่งตัวกลางออกเป็นแถบเล็ก ๆ ขนาดความหนา  $dx$  เท่า ๆ กัน จำนวนมากดังรูปที่ 2.6 (ค) ความหนาของแถบเล็ก ๆ นั้นเล็กจนกระทั่งสามารถคิดว่าแถบเล็ก ๆ นั้นประกอบด้วยสารเนื้อเดียวกัน การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $I, I_0, \mu$  และความหนา ( $X$ ) ของตัวกลางจะเป็นไปตามสมการ

$$I = I_0 \exp[-\int \mu dx] \quad (2.3)$$

หรือ 
$$I = I_0 e^{-\int \mu dx} \quad (2.4)$$

### 2.2.3 นิยามของเรย์ซึ่ม (Ray-Sum)

สมการ 2.3 เป็นสมการที่อธิบายความเข้มของรังสีแกมมา ที่ผ่านตัวกลางซึ่งประกอบด้วยสารหลายชนิด เทอมที่แสดงการลดลงของรังสีแกมมาเปลี่ยน จากการรวมกันแบบธรรมดาตามสมการ 2.1 มาเป็นการอินทิเกรตตามเส้นทางล่ำรังสีแกมมา (Line Integral) แต่จะเป็นจริงเฉพาะ รังสีแกมมาที่มีพลังงานเดียวเท่านั้นในทฤษฎีการสร้างภาพจะใช้สมการ 2.3 หรือ สมการ 2.4 และเพื่อความสะดวกจะกำหนดโคออร์ดิเนต (Coordinate) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพของการสร้างภาพโทโมกราฟี

จากรูปที่ 2.7 ทุกจุดบนเส้นระนาบเนื้ออธิบาย ด้วยโคออร์ดิเนต  $(x, y)$  รังสีลำแคบพุ่งออกทำมุม  $\phi$  กับแกน Y โดยให้ลำรังสีแทนด้วยโคออร์ดิเนต  $(r, s)$  และแต่ละลำของลำรังสีแทนด้วยโคออร์ดิเนต  $(r, \phi)$  ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะลำรังสีแกมมาลำแคบหนึ่ง ๆ เท่านั้น สมการที่สามารถอธิบายความเข้มที่ทะลุผ่านออกมาจะคล้ายกับสมการที่กล่าวมาแล้วโดยจะเป็น

$$I = I_0 \exp[-\int_{r..} \mu(x, y) dx] \quad (2.5)$$

โดยที่เทอมในวงเล็บ หมายถึง การอินทิเกรตตามเส้นทางที่ถูกกำหนดด้วยโคออร์ดิเนต  $(r, s)$  สำหรับ  $\phi$  ใด ๆ มุมหนึ่งเท่านั้น สมการ 2.5 อาจเขียนได้อีกเป็น

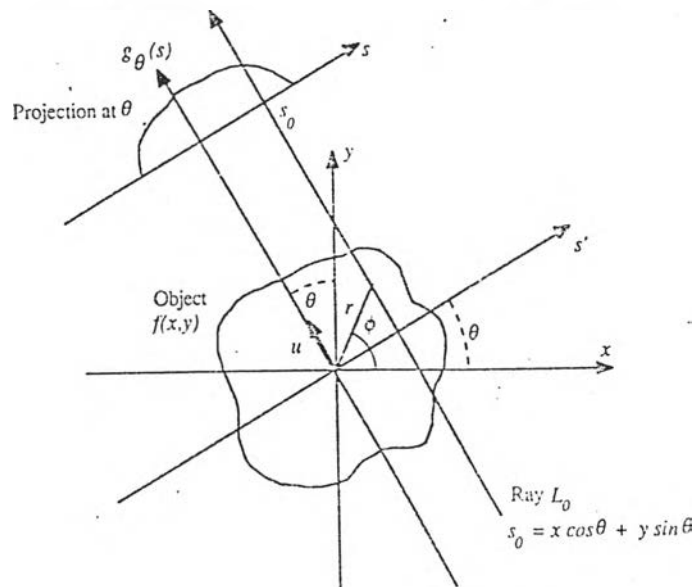
$$P(r, \phi) = \int \mu(x, y) ds \quad (2.6)$$

$$P(r, \phi) = -\ln(I_0/I) = \int_{r..} \mu(x, y) ds \quad (2.7)$$



เทอม  $P(r, \phi)$  คือ ข้อมูลโปรเจกชัน (Projection data) หรือข้อมูลโพรไฟล์ (Profile) เป็นเทอมที่ประกอบด้วย "เรย์ซัม (Ray-sum)" หลายๆ เรย์ซัม โดยแต่ละเรย์ซัมนิยามว่าเป็นการอินทิเกรต  $\mu(x, y)$  ตามเส้นทางของรังสีแกมมาลำแคบที่มีโคออร์ดิเนต  $(r, \phi)$  ซึ่ง  $\phi$  คือมุมที่เครื่องสแกนหมุน มีค่าระหว่าง  $0 < \phi < \pi$   $r$  คือ ray sum มีค่าระหว่าง  $-\alpha < r < \alpha$

ที่มุม  $\phi$  ใด ๆ การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรง (Translation) หมายถึง การเปลี่ยนค่า  $r$  จะได้อัลบั้มข้อมูลของเรย์ซัม สำหรับมุม  $\phi$  นั้น ดังรูปที่ 2.8



Coordinate systems for computed tomography. The reconstructed object cross section is defined by a single  $x$ - $y$  plane through the object at a fixed  $z$  ( $z$  is perpendicular to the page).

รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ตัดในแนวเส้นตรงของรังสีแกมมาลำแคบตัดผ่านในระนาบของวัตถุที่มีมุม  $\phi$  ใด ๆ หัววัดจะบันทึกข้อมูลไว้ 1 โพรไฟล์

ความสัมพันธ์ระหว่างโคออร์ดิเนต  $(x, y)$  และ  $(r, \phi)$  ดังสมการที่ 2.8

$$r = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (a) \quad x = r \cos \phi - s \sin \phi \quad (b)$$

(2.8)

$$s = -x \sin \phi + y \cos \phi \quad (c) \quad y = r \sin \phi + s \cos \phi \quad (d)$$

จากสมการ 2.7 เมื่อประยุกต์ใช้การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) และ ทฤษฎีคอนโวลูชัน (Convolution Theorem) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\mu(x,y) = 1/\pi \int_0^\pi P(x\cos\phi + y\sin\phi) d\phi \quad (2.9)$$

$$\text{โดย } P(x\cos\phi + y\sin\phi, \phi) = 1/2 \int_{-\infty}^{\infty} P(r, \phi) * h(r-r') dr' \quad (2.10)$$

เมื่อ  $h(r)$  คือ filter function ซึ่งในที่นี้สามารถเลือกใช้ทั้ง Shapp-Logan และ Ram-Lak filter function

ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีแกมมา  $[\mu(x,y)]$  เป็นค่าคงที่ของตัวกลางหนึ่ง ๆ ตรงจุด  $(x,y)$  ในระนาบที่สนใจ ถ้า  $\mu(x,y)$  มีค่าสูงแสดงว่าตัวกลางกลางมีความหนาแน่นมาก และสามารถดูดกลืนรังสีแกมมาได้ดี ในทำนองเดียวกันถ้า  $\mu(x,y)$  มีค่าต่ำแสดงว่าตัวกลางนั้นมีความหนาแน่นน้อยและดูดกลืนรังสีแกมมาได้น้อย ดังนั้นในระนาบใดๆ ของตัวกลางใดๆ ถ้าสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีแกมมาบนทุก ๆ จุดในระนาบนั้นได้ ก็ยังสามารถสร้างภาพด้วยการใช้ค่า  $\mu(x,y)$  ที่คำนวณได้มาเรียงตามตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งบนระนาบจริง ๆ ทฤษฎีการสร้างภาพได้มุ่งหาคำตอบของสมการ

$$P(r, \phi) = -\ln(I/I_0) = \int_{r_0}^r \mu(x,y) ds \quad (2.11)$$

คือ  $\mu(x,y)$  หรือการกระจายของสัมประสิทธิ์การลดลงของความเข้มรังสีแกมมา