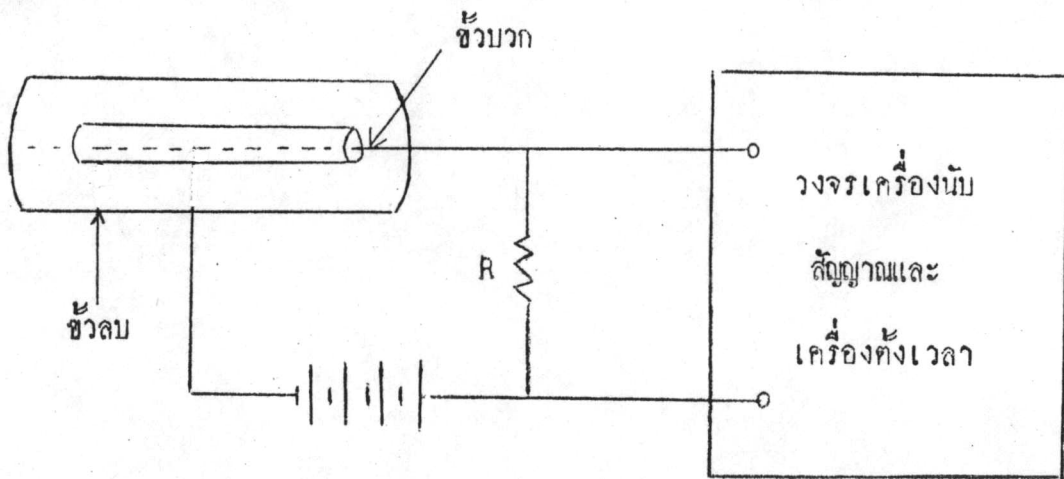


เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและการดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องนับไกเกอร์ (Geiger Counter)

เครื่องนับนิวตริคัลได้ทั้งรังสีเบตาและแกมมา แต่ประสิทธิภาพในการวัดรังสีเบตาจะสูงกว่า หลักการทำงานของเครื่องนับนี้ แสดงอยู่ในรูปที่ 3-1 ซึ่งประกอบด้วยกระบอกโลหะวิหิตกัไฟฟ้าเป็นลบ ทรงแท่งกลางมีเส้นลวดเล็ก ๆ ซึ่งขนาบมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ทั้งกระบอกโลหะและเส้นลวดอยู่ในหลอดแก้วบาง ๆ ภายในหลอดบรรจุอากาศอาร์กอน 90 % โดยน้ำหนัก และไฮสาร



รูปที่ 3-1 แสดงแผนภาพของเครื่องนับไกเกอร์

- ประกอบอินทรีย์บางชนิด 10 % โดยน้ำหนัก ความกดกันในหลอดประมาณ 10 เซนติเมตรปรอท เมื่อรังสีผ่านเข้ามาในหลอดจะไอออนไนซ์ (ionize) อะตอมของก๊าซในหลอดเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังแกนกลางและเนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าบวกและลบมีมาก ความเข้มของสนามไฟฟ้าในหลอดจึงมีค่าสูง ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงและไปไอออนไนซ์อะตอมตัวอื่น ๆ ต่อไปอีก ทำให้เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากวิ่งไปยังขั้วไฟฟ้าบวก ขบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ก๊าซมัลติพลีเคชัน (gas multiplication) ซึ่งเกิดขึ้นรวดเร็วมาก ดังนั้นจึงมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทาน R เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าขึ้นที่ R แล้วถูกส่งต่อไปยังเครื่องขยายและเครื่องนับ

### 3.2 การหาปริมาณยูเรเนียมโดยใช้เครื่องนับไกเกอร์

#### 3.2.1 โดยวิธีวัดกัมมันตภาพรังสีที่แผ่จากแร่ตัวอย่างและสารมาตรฐานเทียบกัน

ในการวัดรังสีธรรมชาติด้วยเครื่องนับไกเกอร์นี้ รังสีส่วนใหญ่ที่ถูกนับจะเป็นเบตา และจากการวิเคราะห์โดยวิธีใน 3.5 , 3.7 และจากการวิเคราะห์หาปริมาณขอเรียมในตัวอย่งแร่โคลัมไบท์ทั้ง 7 นี้ โดยคุณสุนันทา ภักธราคร แห่งกองฟิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ พบว่าในตัวอย่งแร่ทั้ง 7 นี้มีปริมาณขอเรียมน้อยมาก (มีอยู่ไม่ถึง 0.001 %) ดังนั้นในการวัดกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติของแร่ตัวอย่างเหล่านี้ จึงแน่ใจว่าเป็นรังสีที่แผ่จากราตุในอนุกรมยูเรเนียม

สารมาตรฐานที่ใช้ คือ ยูเรนิไนท์ (Uraninite) เป็นสารมาตรฐานที่ได้มาจาก IAEA (International Atomic Energy Agency) มีลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อนข้างคำ มี  $U_3O_8$  อยู่ 0.375 %

#### วิธีดำเนินการวิเคราะห์

- 1 ทักแร่ตัวอย่างทั้ง 7 ซึ่งบคเป็นผงแล้ว ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว สูง 0.25 นิ้ว ตัวอย่างละ 1 ถ้วยเต็ม ปากพื้นผิวหน้าสารตัวอย่างให้เรียบ
- 2 ทักสารมาตรฐานยูเรนิไนท์ ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียมเช่นเดียวกับในข้อ 1
- 3 ตั้ง H.V. (High voltage) = 900 โวลต์ ตั้งวัดครั้งละ 40 นาที
  - ก วัดแบคกราวด์ (background)
  - ข วัดโคลัมไบท์หมายเลข 8

ค วิทยุเรณีไนท์

แล้วทำซ้ำจาก ก ถึง ค อีก 6 ครั้ง โดยเปลี่ยนโคลัมไบท์หมายเลข 8 เป็น 9,

10, 11, 12, 13, และ 14

4 ทำซ้ำในข้อ 3 แต่ตั้งเวลาวิทยุครั้งละ 20 นาที

5 ทำซ้ำในข้อ 3 แต่ตั้งเวลาวิทยุครั้งละ 10 นาที

6 ทำซ้ำในข้อ 3 แต่ตั้งเวลาวิทยุครั้งละ 8 นาที

7 ทำซ้ำในข้อ 3 แต่ตั้งเวลาวิทยุครั้งละ 4 นาที

จากข้อ 1 ถึง 3 เราได้ค่าจำนวนนับของแมคกราวน์ จำนวนนับของแร่ตัวอย่างแต่ละ  
ตัวอย่าง จำนวนนับของสารมาทรฐาน นำค่าต่าง ๆ เหล่านี้มาใช้คำนวณหาปริมาณยูเรเนียมออกไซด์  
ในแร่ตัวอย่างได้ โดยการเทียบตรง ๆ จะได้

เปอร์เซ็นต์ยูเรเนียมออกไซด์ในแร่ตัวอย่าง =

$$\frac{\text{จำนวนนับสุทธิของแร่ตัวอย่าง}}{\text{จำนวนนับสุทธิของสารมาทรฐาน}} \cdot \text{เปอร์เซ็นต์ยูเรเนียมออกไซด์ในสารมาทรฐาน} \quad (3-1)$$

จำนวนนับสุทธิของแร่ตัวอย่าง = จำนวนนับของแร่ตัวอย่าง - จำนวนนับของแมคกราวน์

จำนวนนับสุทธิของสารมาทรฐาน = จำนวนนับของสารมาทรฐาน - จำนวนนับของแมคกราวน์

ข้อมูลและผลการคำนวณที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4-1 และ 4-2 ในบทที่ 4

### 3.2.2 โดยวิธีแอดดิชัน (Addition Method)

1 ชั่งน้ำหนักแร่ตัวอย่างใส่ถ้วยอลูมิเนียมกลมแบบที่กล่าวมาแล้วใน 3.2.1 แต่ไม่ต้องเพิ่ม  
ถ้วย ใส่ลงพอเกลี่ยให้กระจายเต็มฐานของถ้วยเท่านั้น โดย 1 แร่ตัวอย่างต่อ 1 ถ้วย

2 ชั่งน้ำหนักยูเรณีไนท์ สำหรับเติมในแต่ละแร่ตัวอย่าง โดยชั่งให้ไม่เกินเปอร์เซ็นต์ของ  
ยูเรเนียมออกไซด์ในแร่ตัวอย่างที่วัดได้จากวิธีการวัดรังสีธรรมชาติโดยแกมมาสเปคโตรมิเตอร์ ซึ่งได้  
บนแผนกระดาษ เอามีคเกอร์ใบเล็ก ๆ ครอบไว้

3 ตั้งวิทยุครั้งละ 40 นาที

4 เมื่อวัดตัวอย่างแร่ 1 ตัวอย่างเสร็จ ก็เอายูเรณีไนท์ที่ชั่งเตรียมไว้สำหรับตัวอย่างนั้นเท

ใส่ลงไปในตัวอย่าง เอาช้อนตักสารเคมีอันเล็ก ๆ (spatula) ค่อย ๆ กวนให้สารผสมกันให้ตัวอย่างสม่ำเสมอ แล้วเอาไปตั้งวัด

5 เมื่อวัดในข้อ 4 เสร็จแล้ว ให้กวนสารในถ้วยนั้นซ้ำอีกพอควร แล้วเอาไปตั้งวัดอีกครั้ง คว้าไคค่าจำนวนนับใกล้เคียงกับในข้อ 4 หรือไม่ ถ้าได้เท่าหรือใกล้เคียงก็เลือกใช้ค่าใดค่าหนึ่งหรือค่าเฉลี่ย ถ้าไม่เท่าแต่ต่างกันค่อนข้างมาก ให้เอาสารมากวนอีกแล้ววัดใหม่จนได้ค่าใกล้เคียง

6 ทำข้อ 3 ถึง 5 ซ้ำจนครบทั้ง 7 ตัวอย่าง

7 ทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้ง 7 ตัวอย่างโดยวัดครั้งละ 15 นาที

วิธีนี้จะคำนวณหาปริมาณยูเรเนียมออกไซด์ได้จากสูตรที่ได้มาจากการคิดว่ ในช่วงช่วงหนึ่ง จะมีความสัมพันธ์อย่างตรง ๆ (linear) ระหว่างจำนวนนับกับปริมาณของสารที่อยู่ในสารตัวอย่าง

$$I_x = Kx \quad (3-2)$$

$$I'_{x+y} = K'(x+y) \quad (3-3)$$

$$x' = xD \quad (3-4)$$

$x$  = ปริมาณของสารกัมมันตรังสีในสารตัวอย่างก่อนเติม

$D$  = ไคคูณแฟกเตอร์

006699

=  $\frac{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง} + \text{น้ำหนักของสารที่เติม}}$

$y$  = ปริมาณของสารกัมมันตรังสีที่เติมให้กับสารตัวอย่าง

$I_x$  = จำนวนนับของสารตัวอย่างก่อนเติม

$I'_{x+y}$  = จำนวนนับของสารตัวอย่างเมื่อเติมปริมาณสาร  $y$  แล้ว

$K$  และ  $K'$  เป็นค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับสภาพการทดลอง ในกรณี

$$\lim_{y \rightarrow 0} \frac{K'}{y} = K$$

เอาสมการ (3-2) หาค่าย (3-3) จะได้

$$x = \frac{(I_x/I'_{x+y})y}{1 - [(I_x/I'_{x+y})D]} \quad (3-5)$$



วิธีนี้ใช้ได้ผลดีเมื่อปริมาณธาตุที่ต้องการวิเคราะห์มีปริมาณค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 5 % เพราะ  
ว่าในช่วงนี้จะมีความสัมพันธ์กันตรง ๆ (linear relationship) ระหว่างจำนวนนับกับปริมาณ  
ของสารกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในตัวอย่าง ทำให้ไม่ของแกคตาต่าง ๆ ยุ่งยาก

ในกรณีที่ไมแน่ใจว่าจะมีความสัมพันธ์แบบตรง ๆ หรือไม่ ก็อาจตรวจสอบดูได้โดยเอาสาร  
ตัวอย่างจำนวนหนึ่งตั้งวัด แล้วเติมสารกัมมันตรังสีปริมาณหนึ่ง ทำแบบในข้อ 4 และ 5 ตั้งวัด  
จนจำนวนนับไว้ แล้วเติมสารกัมมันตรังสีปริมาณเท่าที่เติมครั้งแรกลงไปอีก ทำซ้ำแบบข้อ 4 และ 5  
แล้วตั้งวัด คว้าจำนวนนับเพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนนับที่เพิ่มขึ้นเมื่อเติมครั้งแรกหรือไม่ ถ้าเท่าหรือใกล้  
เคียง แสดงว่าการทดลองนี้ยังอยู่ในช่วงที่มีความสัมพันธ์กันแบบตรง ๆ

ข้อมูลและผลการคำนวณที่ได้จากวิธีนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 4-3 และ 4-4 ในบทที่ 4

### 3.3 การวัดพลังงานรังสีแกมมา

เราไม่สามารถวัดพลังงานของรังสีแกมมาได้โดยตรง ทั้งนี้เพราะรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็ก  
ไฟฟ้าที่มีความถี่สูง ดังนั้น จึงต้องวัดทางอ้อม โดยอาศัยปฏิกิริยาที่รังสีแกมมามีต่อวัตถุ ซึ่งมี 3 แบบ  
ด้วยกัน คือ

1 โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric Effect) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อรังสี  
แกมมาเข้าไปในวัตถุ แล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียส โดยเฉพาะ  
อย่างยิ่งอิเล็กตรอนในวง K และ L ทำให้อิเล็กตรอนหลุดไปภายนอกอะตอม เรียกโฟโตอิเล็กตรอน  
โดย

พลังงานรังสีแกมมา = พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน + พลังงานของอิเล็กตรอนขณะที่อยู่ทั่วรอบ  
นิวเคลียส

หรือ

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + w \quad (3-6)$$

ขบวนการโฟโตอิเล็กทริกเกิดได้ง่ายจากรังสีแกมมาที่มีพลังงานค่าและธาตุหนัก ๆ เพราะโอกาสใน  
การเกิดแปรตามค่า เลขอะตอม ยกกำลังสี่ และแปรผกผันกับพลังงานรังสีแกมมา ยกกำลังสาม

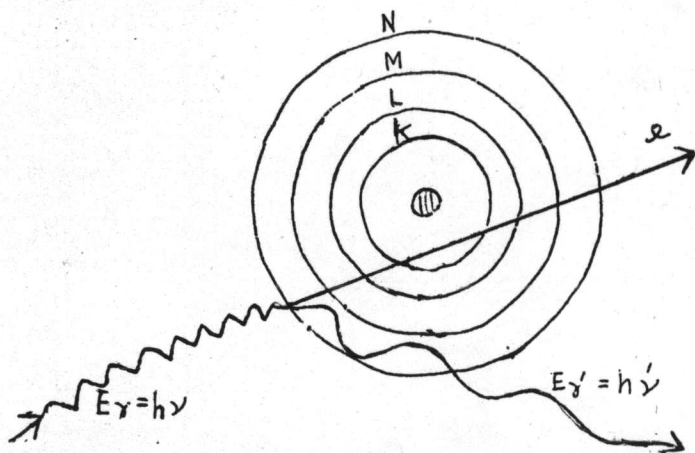
2 คอมพตันเอฟเฟกต์ (Compton Effect) เกิดจากรังสีแกมมาเข้าไปในวัตถุ

แล้วรังสีบางส่วนเท่านั้นถ่ายพลังงานให้อิเล็กตรอน รังสีแกมมาที่เหลือจะออกมาโดยมีพลังงานน้อยลง เขียนเป็นสมการไค้ดังนี้

$$h\nu = h\nu' + \frac{1}{2}mv^2 + W$$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1-\cos\theta)}$$

- โดย
- $h\nu$  = พลังงานเดิมของรังสีแกมมา
  - $h\nu'$  = พลังงานของรังสีแกมมาที่กลับออกมา
  - $\theta$  = มุมที่รังสีแกมมาเบนไปจากแนวเดิมที่เข้ามา
  - $m_0$  = มวลของอิเล็กตรอนในสภาพนิ่ง
  - $c$  = ความเร็วแสง



รูปที่ 3-2  
แสดงการเกิดปฏิกิริยาคอมพตัน

อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานแล้วหลุดออกมา จะมีพลังงาน

$$E_e = \frac{h\nu}{1 + (m_0c^2/2h\nu)} \tag{3-8}$$

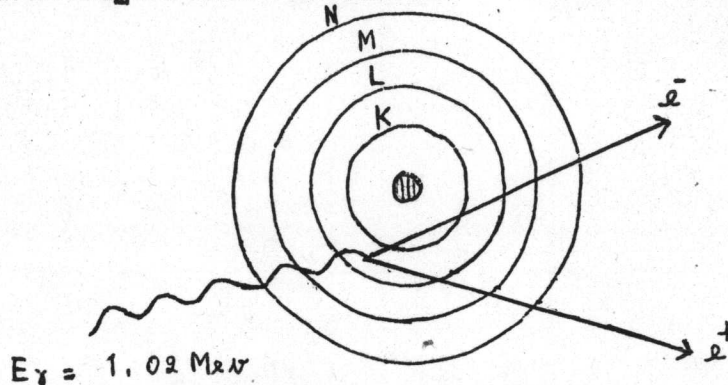
โอกาสการเกิดปฏิกิริยานี้แปรผกผันกับพลังงานรังสีแกมมา

3 ปฏิกิริยาอิเล็กตรอนคู่ (Pair Production)

เป็นปฏิกิริยาที่พลังงานของรังสีแกมมา

เปลี่ยนไปเป็นมวล เกิดได้เมื่อแกมมามีพลังงานอย่างน้อยสุด 1.02 MeV (threshold energy)

เข้าไปในอะตอมของธาตุแล้วหายไป เกิดอิเล็กตรอนและโพสิตรอนขึ้นต่างก็มีพลังงาน  $0.51 \text{ MeV}$  ถ้าพลังงานแกมมาที่เข้าไปเกิน  $1.02 \text{ MeV}$  พลังงานที่เกินนี้จะกลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนที่เกิดขึ้น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเสถียร ส่วนโพสิตรอนที่เกิดขึ้นเมื่ออายุสั้น มันจะวิ่งไปรวมกับอิเล็กตรอน (ซึ่งมีอยู่ทั่วไป) กลายเป็นรังสีแกมมาที่มีพลังงาน  $1.02 \text{ MeV}$  เป็นอย่างน้อย ตามขบวนการที่เรียกว่าแอนนิฮิเลชัน (annihilation) โอกาสในการเกิดปฏิยานี้แปรตาม เลขอะตอม ยกกำลังสองและมักเกิดกับธาตุหนัก ๆ



รูปที่ 3-3 แสดงปฏิยานิวเคลียร์แบบอิเล็กตรอนคู่

### 3.4 เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบซินทิลเลชัน (Gamma Scintillation Spectrometer)

เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบซินทิลเลชันที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นแบบที่มีหัววัดเป็นผลึก

NaI(Tl)

ขนาดของหัววัดเป็นทรงกระบอกตัน มีเส้นผ่าศูนย์กลาง

3 นิ้ว สูง 3 นิ้ว ลักษณะของสเปกโตรมิเตอร์แสดงด้วยแผนภาพ อยู่ในรูปที่ 3-4

ส่วน High voltage เป็นของ Baird Atomic 312 A

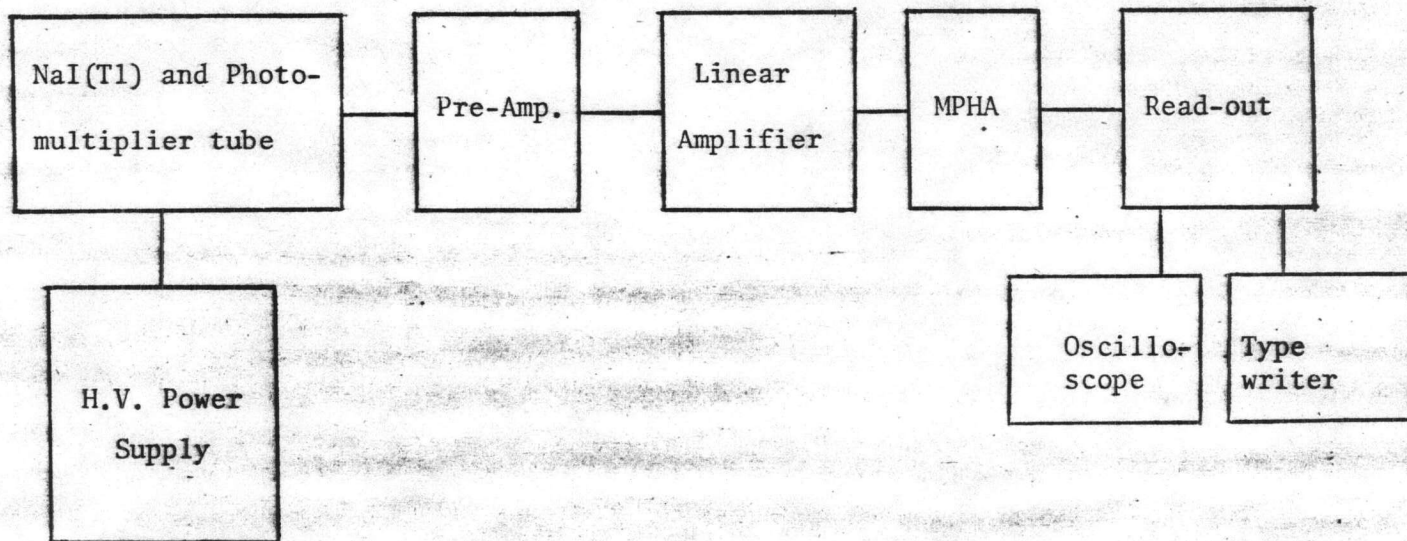
ใช้ high voltage supply 1000 volts

ทรงรูปสี่เหลี่ยมที่เขียน MPHA นั้นคือ มัลติแชนเนล พัลส์ ไฮท์ อแนลไลเซอร์ ซึ่งมี 128 ช่อง (channel)

หลักการทํางานของเครื่องมือชนิดนี้ อธิบายได้ว่า เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้ามาในผลึก

NaI(Tl) จะเกิดปฏิยานิวเคลียร์กับ NaI(Tl) แบบ





รูปที่ 3-4 แสดงแผนภาพของเครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบชนิดหลอด



ก ไฟโทอิเล็กทริก

ข คอมพิวเตอร์

ค อิเล็กตรอนคู่

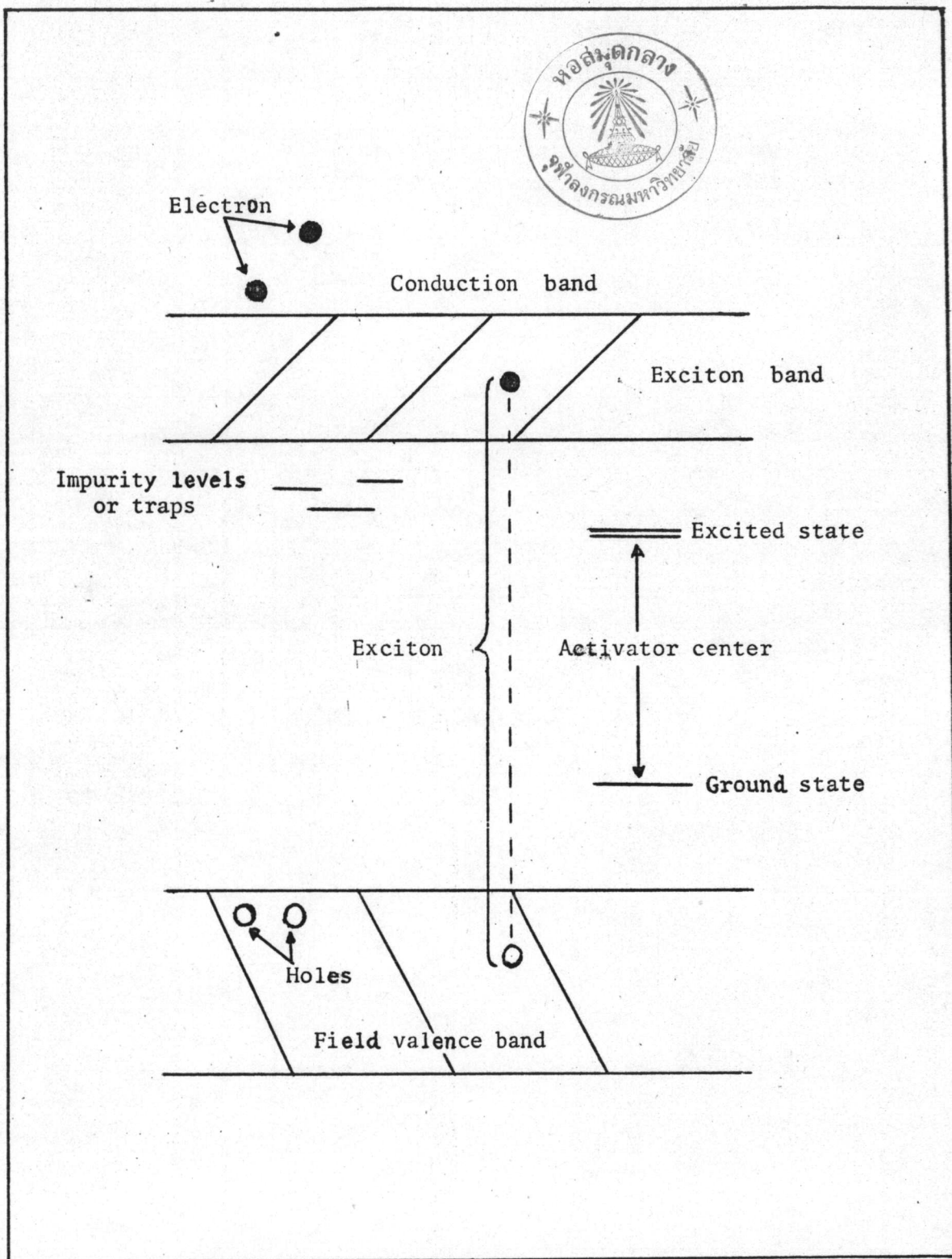
ดังที่กล่าวไว้แล้วใน 3.3 ในการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้จะทำให้ได้อิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้มีพลังงานจลน์และวิ่งไปในผลึก NaI(Tl) ทำให้เกิดขบวนการไอออไนซ์เซชัน (ionization) และเอกไซเซชัน (excitation) แล้วทำให้ได้ประกายแสงออกมา ดังจะอธิบายขบวนการที่ทำให้เกิดแสงได้ดังนี้

ทฤษฎีเกี่ยวกับซินทิลเลเตอร์ (scintillator) ที่เป็นผลึกของสารอนินทรีย์ พวกซินทิลเลเตอร์ที่เป็นสารอนินทรีย์นั้นเป็นผลึกของเกลือของพวกสารอนินทรีย์ โดยทั่วไปจะเป็นพวกเกลือฮาไลด์ของพวกแอลคาไล (alkali halides) ซึ่งมีสารเจือปน (impurity) ปริมาณเล็กน้อยเป็นแอคติเวเตอร์ (activator) ในขบวนการทำให้เกิดแสง กลไกในการเกิดแสงประกายนี้จะอธิบายได้ที่ดีที่สุดในรูปแบบของแบนด์ของของแข็ง (band picture of solid)

ในทฤษฎีเกี่ยวกับแบนด์ (band theory) จะแทนพวกผลึกแอลคาไล-ฮาไลด์ที่มีบริสุทธิ์กว่าเลนซ์แบนด์ที่มีพลังงานซึ่งโดยปกติแล้วจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มทั่วไป และคอนดักชันแบนด์ที่มีพลังงานซึ่งโดยปกติแล้วจะว่างเปล่า แบนด์หลังนี้จะอยู่เหนือแบนด์แรก โดยมีช่องว่างคั่นอยู่ เรียกช่องว่างนี้ว่าฟอร์บิเดนแบนด์ (forbidden band)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุและมีพลังงานเพียงพอ (เช่นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์) วิ่งเข้าไปในผลึก จะสามารถย้ายอิเล็กตรอนจากตำแหน่งแลตทิซ (lattice) ของมันไปยังคอนดักชันแบนด์ได้ ขบวนการนี้เรียกไอออไนซ์เซชัน ที่ที่ขาดอิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์เรียกว่าโฮล (hole) อิเล็กตรอนในคอนดักชันแบนด์และโฮลในวาเลนซ์แบนด์ต่างก็เคลื่อนที่ไปในผลึกได้อย่างอิสระ โดยไม่ทองขึ้นแก่กัน

อีกขบวนการหนึ่งที่เกิดขึ้น คือ เอกไซเซชัน ซึ่งก็มีผลทำให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮลคู่ ซึ่งเรียกว่าเอกไซทอน (exciton) คู่นี้จะอยู่ด้วยกันในแบบที่คล้ายอะตอมของไฮโดรเจนและเคลื่อนที่ไปในผลึกได้ และก่อให้เกิดเอกไซทอนแบนด์ (กรุ๊ปที่ 3-5) ซึ่งมีขอบล่างสุดของแบนด์เป็นระดับที่มีพลังงานต่ำสุดของเอกไซทอน (exciton ground state) และขอบบนสุดเป็นขอบล่างของคอนดักชันแบนด์ อันนี้จะแทนไอออไนซ์เซชันของเอกไซทอน



รูปที่ 3-5 แสดงลักษณะของแบนด์ของฉนวนพวกแอลคาไล-ฮาไลด์ พร้อมทั้งศูนย์  
 แอคติเวเตอร์และระดับ สารเจือปน

เมื่อมีอะตอมอื่นที่ไม่ใช่ของผลึกปนเข้าไปในผลึกในปริมาณเล็กน้อย หรือมีที่ว่างของตำแหน่งแลตทิซในผลึก สิ่งเหล่านี้จะก่อให้เกิดระดับพลังงานในแถบที่คองห้ามมีลักษณะเป็นจุดโคก ๆ รูปที่ 3-5 เป็น แผนภาพ ของระดับพลังงานในผลึกของพวกแอลคาไล-ฮาไลด์ รวมทั้งตำแหน่งโคก ๆ ในแถบที่คองห้ามที่เรียกว่าตำแหน่งแอกติเวเตอร์ (activator) และแทรพ (trap)

พวกเอกไซทอน โสไล และอิเล็กตรอนจะวิ่งไปในผลึกจนกระทั่งถูกจับที่ตำแหน่งแอกติเวเตอร์ หรือแทรพ โดยขบวนการของการจับเอกไซทอน หรือการจับอิเล็กตรอนและโซไล แล้วตำแหน่งศูนย์อิมเพียวริตี้จะขึ้นไปอยู่ในสภาวะเอกไซเทค (excited state) ถ้าพอคทำให้เกิดทรานซิชัน (transition) โค้ระหว่างเอกไซเทคสเตทและกราวด์สเตทก็จะปล่อยโฟตอนออกมาในเวลา  $10^{-8}$  วินาที

จากขบวนการทั้งหมดที่กล่าวมา จะเห็นว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคที่มีประจุซึ่งวิ่งไปในผลึก จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแสง

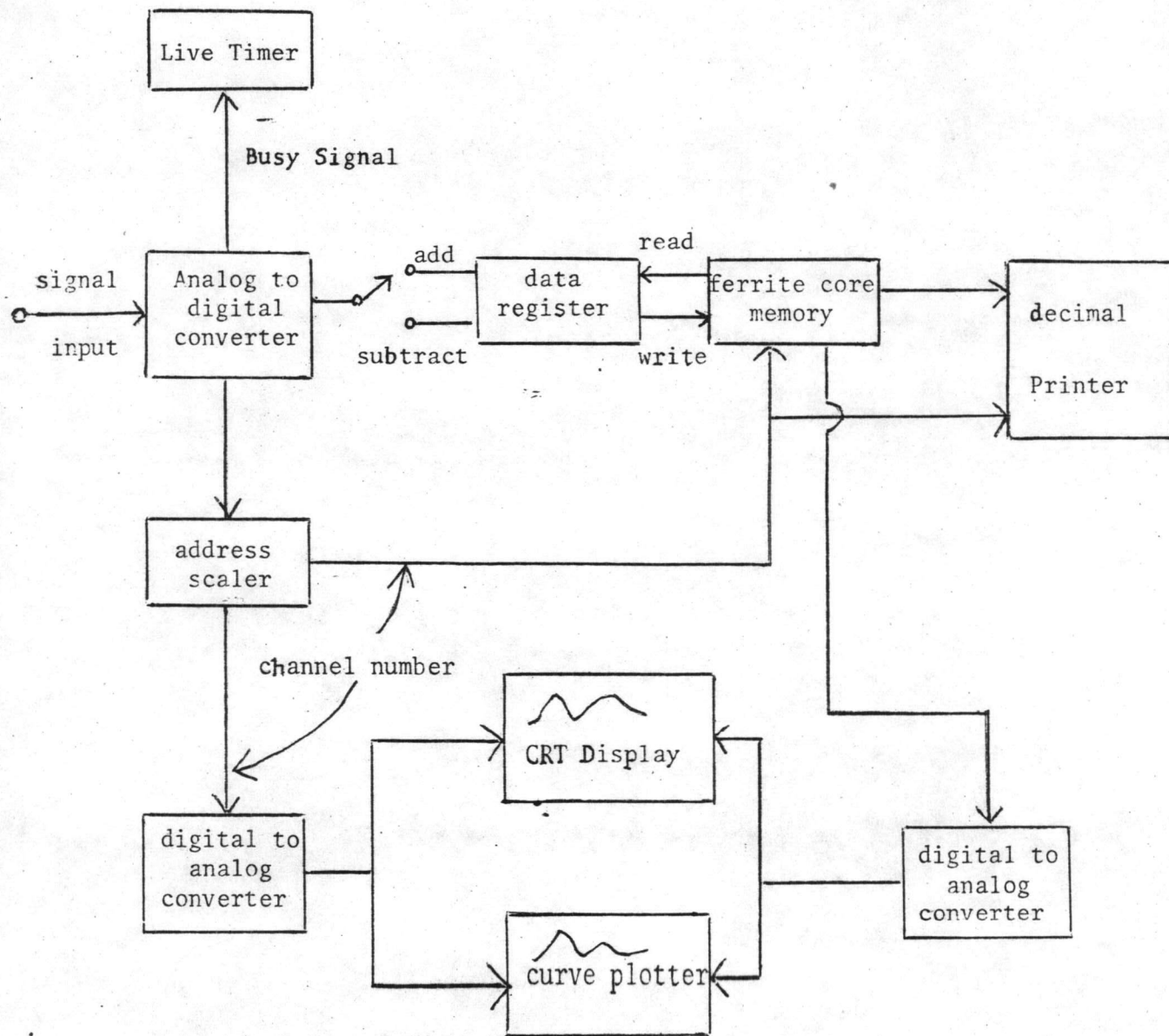
การเพิ่มอะตอมของสารเจือปนที่เหมาะสมจำนวนเล็กน้อยเข้าไปในผลึก จะทำให้เกิดศูนย์ของแสงสว่างขึ้น พวกสารเจือปนนี้เรียกแอกติเวเตอร์ พวกซิมิลเลเตอร์ที่เป็นสารอนินทรีย์พร้อมทั้งแอกติเวเตอร์ ก็เช่น NaI กับ Tl

โฟตอนของแสงที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยนด้วยหลอดโฟโตแคโทด (photocathod) ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ผ่านเข้าไปในทรานซิมิเตอร์แอมพลิไฟเออร์ ซึ่งจะเกิดการรบกวนต่าง ๆ แล้วผ่านต่อไปยังเครื่องขยายสัญญาณ แล้วผ่านเข้าไปในเครื่องมัลติแชนเนล พัลส์ ไฮท์ อแนลไลเซอร์

มัลติแชนเนล เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมมากในการใช้งานด้านวิเคราะห์หาค่ากัมมันตรังสี โดยเฉพาะพวกสารกัมมันตรังสีที่มีอายุสั้น ซึ่งวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบซิงเกิลแชนเนล (single channel) ไม่ได้ หรือไม่ได้ผลก็ ดังนั้น เครื่องมัลติแชนเนลจึงเป็นเครื่องมือที่เพิ่มความสะดวกเร็วในการทำงานด้านนี้ ทำให้อ่านค่าต่าง ๆ ได้แม่นยำแน่นอน หลักการทำงานของมัลติแชนเนลแสดงเป็น แผนภาพ อยู่ในรูปที่ 3-6

ส่วนสำคัญของเครื่องมัลติแชนเนล คือส่วนเปลี่ยนอนาลอกเป็นดิจิทัล (analog to digital converter) เขียนย่อว่า ADC ซึ่งจะเปลี่ยนความสูงของสัญญาณ (pulse height) ออกมาเป็นสัญญาณ (pulse) กาง ๆ แล้วถูกเก็บตามหมายเลขของ (channel number) กาง ๆ address scaler จะมีสัญญาณในหมายเลขเหล่านั้น เหตุการณ์ต่าง ๆ ทั้งหมดถูกเก็บใน memory





รูปที่ 3-6 แสดงหลักการทำงานของมัลติแชนเนล



unit ผลจำนวนนับที่บันทึกไว้ในแต่ละช่องจะถูกฉายงานออกมาทางเครื่องพิมพ์คิกโดยพิมพ์ออกมาเป็นตัวเลข ในแผ่นตัวเลขนั้น จะบอกเวลาที่ใช้ในการวัดอยู่ที่ตำแหน่งช่องแรก ถัด ๆ ไปก็เป็นจำนวนนับที่มีไคของแต่ละช่อง พวกเกี่ยวกับตัวเลขนี้อาจเปลี่ยนเป็นอานาลอกโวลท์เทจ (analog voltage) ซึ่งแสดงเป็นสเปกตรัมบนจอของหลอดคาโทด (cathode tube) การทำงานของเครื่องอาศัยหลักการของคอมพิวเทอร์ จึงสามารถลบกันได้ เช่นเกี่ยวกับการบวกของผลต่าง ๆ ที่บันทึกได้ จึงใช้เครื่องหักแบคกราวนของสเปกตรัมไค ขณะกำลังวัดให้เปิดส่วน live time ซึ่งเป็นนาฬิกาอิเล็กทรอนิกส์ จำนวนนับที่ไคคือ live time หมายถึงระยะเวลาระหว่างที่เครื่องนับสัญญาณที่กำลังเข้ามาเท่านั้น โดยวิธีนี้จำนวนนับที่ไคจึงไม่ต้องแก้ dead time

### 3.5 การดำเนินการวิจัยโดยใช้เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบซินทิลเลชัน

ภาชนะที่ใช้ใส่สารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ใช้ด้วยพลาสติกทรงกระบอกสี่เหลี่ยมมีปริมาตรของภาชนะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. สูง 5 ซม.

เนื่องจากแร่โคล์มไบท์หมายเลขต่าง ๆ มีปริมาณอยู่ไม่เท่ากัน และในการวัดรังสีที่แผ่ออกโดยธรรมชาตินี้ ถ้ามีปริมาณสารที่จะวัดยิ่งมากก็ยิ่งดี ดังนั้นจึงแบ่งสารตัวอย่างเป็นกลุ่มทั้งหมด 3 กลุ่ม ตามปริมาณสารที่มีอยู่ เลือกพวกที่มีปริมาณใกล้เคียงกันอยู่ด้วยกัน .

1 ซึ่งสารกลุ่มที่ 1 มีโคล์มไบท์หมายเลข 8, 9, 12 ซึ่งบคเป็นผงแล้วใส่ในภาชนะพลาสติกกึ่งที่ไคกล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ให้สารสูงประมาณ 2.5 ซม. แล้วซึ่งสารยูเรนิไนท์ ใส่ลงในภาชนะพลาสติกแบบเดียวกัน และให้สูง 2.5 ซม. เช่นกัน เขียนตัว B ไว้ที่ภาชนะที่ใส่ยูเรนิไนท์

2 ซึ่งสารกลุ่มที่ 2 มีโคล์มไบท์เบอร์ 10, 11 และสารมาตรฐานทอร์เบอร์ไนท์ (Torbernite) ใส่ในภาชนะพลาสติกให้สูง 2 ซม. สารทอร์เบอร์ไนท์นี้ให้เครื่องหมาย T ไว้ สารมาตรฐานทอร์เบอร์ไนท์ ได้มาจาก IAEA มี  $U_3O_8$  .313 % มีลักษณะเป็นผงสีอิฐ (ส้มอมแดง)

3 ซึ่งสารกลุ่มที่ 3 มีตัวอย่างสารโคล์มไบท์หมายเลข 13, 14 และซึ่งสารทอร์เบอร์ไนท์ ซึ่งให้เครื่องหมาย  $T_1$  ใส่ในภาชนะพลาสติก ให้สารสูง 1.5 ซม.

4 ทำกราฟมาตรฐานสำหรับเทียบหาค่าพลังงาน ข้อมูลและกราฟที่ไคแสดงอยู่ในตารางที่ 4-5 และรูปที่ 4-1

5 เอกสารที่สั่งไว้ไปตั้งไว้ โดย

ก วัคซีนคางคก

ข วัคซีนคาวอย่าง

ค วัคซีนมาตรฐานที่เตรียมให้ มีรูปร่าง

เหมือนสารคาวอย่าง

ในการฉีดแต่ละครั้งใช้เวลาไว้ 40 นาที ทั้งนี้เพื่อให้ไก่ค้ำที่แม่นยำ

แล้ว วัคซีนนี้ไปจนครบเจ็ดคาวอย่าง

6 ทำซ้ำในข้อ 5 แต่ละเวลาในการฉีดวัคซีนแต่ละตัวเหลือ 20 นาที

" " " " " 10 "

" " " " " 8 "

การทำซ้ำโดยลดเวลาลงเรื่อย ๆ เช่นนี้ ก็เพื่อที่จะใช้เวลาฉีดน้อยที่สุดเท่าไรจึงยังคงให้ผลได้เท่าหรือใกล้เคียงกับที่ฉีดวัคซีนละ 40 นาที

7 สเปกตรัมของสารที่วัดได้จะปรากฏออกมาบนจอออสซิลโลสโคป (oscilloscope)

ส่วนข้อมูลที่เป็นตัวเลขแสดงจำนวนนับของแต่ละช่องจะพิมพ์ออกมาทางเครื่องพิมพ์ที่ซึ่งมีทั้งหมด 128 จำนวนตามจำนวนของ นำข้อมูลตัวเลขนี้มาตรวจหาที่ค และหาค่าพลังงานของพีคโดยเทียบจากกราฟมาตรฐานสำหรับเทียบหาพลังงานที่ทำไว้ในข้อ 4 แล้วตรวจหาว่าจุดยอดกราฟที่มีค่าพลังงานค่าหนึ่งนั้นเป็นสเปกตรัมของธาตุอะไร โดยดูจากตารางที่แสดงค่าพลังงานของไอโซโทปธาตุต่าง ๆ ในหนังสือ Die - Linien der Radionuklide von G. Erdtmann und W. Soyka ซึ่งมีทั้งหมด 3 เล่ม เล่มที่ 1 หน้าหนังสือจะเรียงตามเลขมวล ของไอโซโทปต่าง ๆ จากน้อยไปหามาก เมื่อต้องการหาไอโซโทปตัวไหนก็เปิดไปที่ไอโซโทปตัวนั้น ดูตารางไอโซโทปตัวนั้น มีสเปกตรัมที่มีพลังงานค่าอะไรบ้าง ส่วนเล่มที่ 2 และ 3 หน้าหนังสือจะเรียงตามค่าพลังงานจากน้อยไปหามาก เมื่อต้องการหาว่าพีคที่มีค่าพลังงานค่าหนึ่งนั้น เป็นธาตุอะไร ก็เปิดไปที่มีค่าพลังงานแค่นั้นมีธาตุอะไรบ้างที่มีสเปกตรัมให้พลังงานแค่นั้น โดยดูความเหมาะสมกับอันอื่น ๆ ด้วย เช่น ปฏิริยาในการเกิด เป็นต้น

ข้อมูลจำนวนนับนี้ เมื่อนำมา เขียน เป็นกราฟก็จะได้สเปกตรัมรังสีที่ปรากฏบนจอ  
 ออสซิลโลสโคป ทั้งแสดงอยู่ในรูปที่ 4-2, 4-3

8 จากสเปกตรัมที่เห็นและตัวเลขที่พิมพ์ออกมา ให้เลือกพีคที่เด่น คือมีความเข้มสูง ไม่มี  
 พีคอื่นแทรกซ้อนหรืออยู่ชิดเกินไป (ในกรณีที่เลือกได้) ในที่นี้เมื่ออยู่ในสเปกตรัมของสารตัวอย่างแล้ว  
 จึงเลือกพีค .61 MeV ซึ่งเป็นพีคของ  $\text{Bi}^{214}$  นับพื้นที่ใต้พีคนี้ให้เป็น  $C_x$  แล้วนับพื้นที่ใต้พีคนี้ของ  
 สารมาตรฐานซึ่งเกิดที่ช่องหมายเลขเดียวกัน ได้เป็น  $C_s$  จากการเทียบตรง ๆ เราจะได้ว่า

$$\text{เปอร์เซ็นต์ยูเรเนียมออกไซด์ในสารตัวอย่าง} = \frac{C_x}{C_s} \cdot \frac{\text{เปอร์เซ็นต์ยูเรเนียมออกไซด์ในสารมาตรฐาน}}{\text{น้ำหนักสารมาตรฐาน}} \quad (3-7)$$

น้ำหนักสารตัวอย่าง

9 นอกจากเลือกพีค .61 MeV ของ  $\text{Bi}^{214}$  มาใช้ในการคำนวณแล้ว ยังได้เลือก  
 พีค .18 MeV ของ  $\text{Ra}^{226}$  มาคำนวณอีกด้วย เพื่อตรวจสอบผลที่ได้ว่าใกล้เคียงกันหรือไม่  
 เหตุที่เลือกพีค .18 MeV ทั้ง ๆ ที่เป็นพีคเล็ก ก็เพราะว่าพีค .18 MeV ของ  $\text{Ra}^{226}$  นี้  
 ยังไม่ผ่านสเกท  $\text{Rn}$  ซึ่งเป็นก๊าซในอนุกรมยูเรเนียม ทั้งนี้การเลือกพีคนี้มาคิดจึงอาจป้องกันความ  
 คลาดเคลื่อนที่มาจากกาการสลายตัวของ  $\text{Rn}$  บางส่วนได้

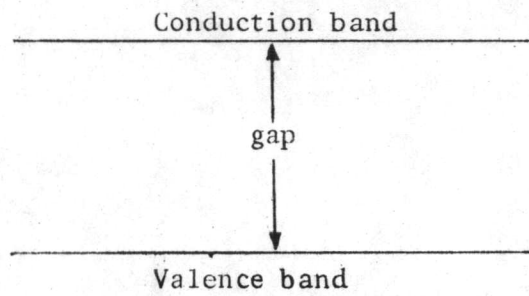
10 ข้อมูลและผลที่คำนวณได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4-9, 4-10 และ 4-4

### 3.6 เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบโลหะกึ่งตัวนำ

#### 3.6.1 โลหะกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

โลหะกึ่งตัวนำได้แก่ธาตุซิลิกอน (silicon, สัญลักษณ์ Si) และธาตุเจอร์มาเนียม  
 (germanium, สัญลักษณ์ Ge) ธาตุพวกนี้มีวาเลนซ์ 4 การจับของบอนด์ (bond) เป็นแบบ  
 โคววาเลนต์ (covalent) ไม่แสดงคุณสมบัติ เป็นตัวนำหรือฉนวนที่ดี โดยปกติแถบพลังงานของธาตุ  
 พวกนี้ แสดงไว้ที่รูปที่ 3-7

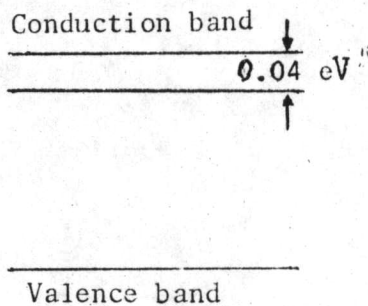




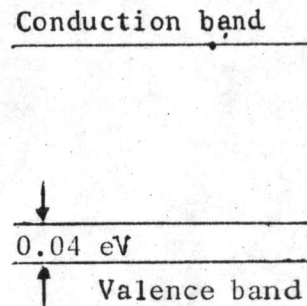
รูปที่ 3-7 แสดงแถบพลังงานปกติของสารกึ่งตัวนำ  
เขียนตามแกนของพลังงานของอิเล็กตรอน

ช่วงพลังงานตรงช่องว่าง (gap) มีค่าเท่ากับ  $1.1\text{eV}$  สำหรับซิลิกอน และเท่ากับ  $0.66\text{eV}$  สำหรับเจอร์มาเนียม

ถ้านำธาตุที่มีวาเลนซ์ 5 (เช่น อาเซนิก, แอนติโมนี และฟอสฟอรัส เป็นต้น) จำนวนน้อย ๆ เติมหรือแทรกเข้าไประหว่างอะตอมของสารกึ่งตัวนำ จะมีอิเล็กตรอนที่หลุดจากการจับคู่อยู่ 1 ตัว ทำให้สารกึ่งตัวนำนี้เป็นตัวนำให้อิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น ช่องว่างระหว่างคอนดักชันแบนด์กับวาเลนซ์แบนด์จะลดลงเหลือ  $0.04\text{eV}$  สำหรับซิลิกอน และ  $0.01\text{eV}$  สำหรับเจอร์มาเนียม



ก. n-type



ข. p-type

รูปที่ 3-8 แสดง n-type และ p-type ของพวกโลหะกึ่งตัวนำ

ซิลิกอนที่มีอิเล็กตรอนเหลือนี้เรียกเป็นพวกที่ให้อิเล็กตรอน (donor) หรือ n-type semiconductor  
ดังรูปที่ 3-8 ก.

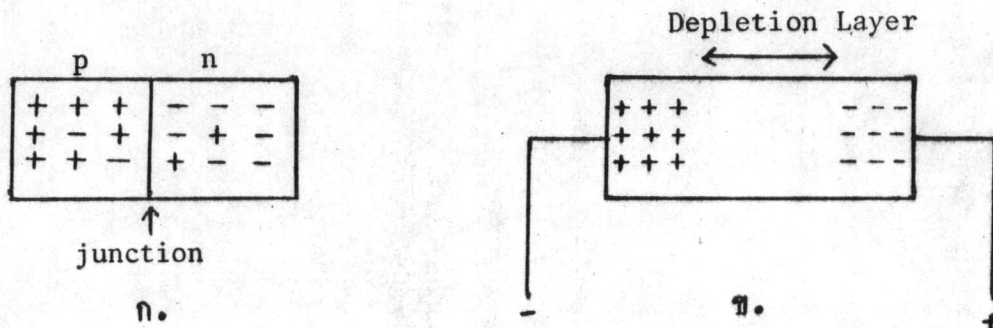
ในอีกแบบหนึ่ง ถ้าเติมธาตุที่มีวาเลนซ์ 3 (เช่น โบรอน, แกลเลียม) ลงไปในผลึกธาตุ



ซิลิกอนเล็กน้อย ก็จะทำให้ผลึกขาดอิเล็กตรอน ทำให้เป็นพวกที่รับอิเล็กตรอนได้ (accepter) ความสามารถรับอิเล็กตรอนนี้เรียกว่า โฮล (hole) ซึ่งคล้ายกับประจุไฟฟ้าบวก พวกซิลิกอนแบบนี้ เรียก p-type semiconductor มีช่องว่าง 0.04eV ถัดจากวาเลนซ์ แบนด์ขึ้นมาสำหรับซิลิกอน และ .01 eV สำหรับเจอร์มาเนียม

3.6.2 หลักการวัดรังสีของผลึกของธาตุพวกโลหะกึ่งตัวนำ

เมื่อเอาผลึก n-type และ p-type ก่อกันดังรูปที่ 3-9 จะมีการกระจายของอิเล็กตรอน และโฮลบางส่วนผ่านรอยต่อ (junction)



รูปที่ 3-9 แสดง p-n type ของโลหะกึ่งตัวนำ

ถ้าต่อสติกคาไฟฟ้าบวกเข้ากับปลาย n-type และสติกคาไฟฟ้าลบเข้ากับปลาย p-type อิเล็กตรอนและโฮลจะไปออกกันอยู่ที่ปลาย n-type และ p-type ตามลำดับ ทำให้มีช่องว่างตรงรอยต่อ เรียก กิเพลทรีนเลเยอร์ (depletion layer) ทำหน้าที่คล้ายกับฉนวน เมื่อรังสีเข้ามาที่กิเพลทรีนเลเยอร์ จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล แล้วต่างวิ่งไปที่โฮลและอิเล็กตรอนออกอยู่ ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าตามขนาดรังสี แล้วส่งเป็นสัญญาณต่อไปยังเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นส่วนช่วยต่อไป

3.6.3 ข้อดีของหัววัดแบบโลหะกึ่งตัวนำ

หัววัดแบบนี้ดีกว่าหัววัดแบบอื่น ๆ อยู่หลายประการ คือ

1. วัคไคละเอียดมาก ในการทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้น ใช้พลังงานเพียง 3.5

eV/pairs เท่านั้น เมื่อเทียบกับกาซึ่งต้องใช้ถึง 36 eV/pairs

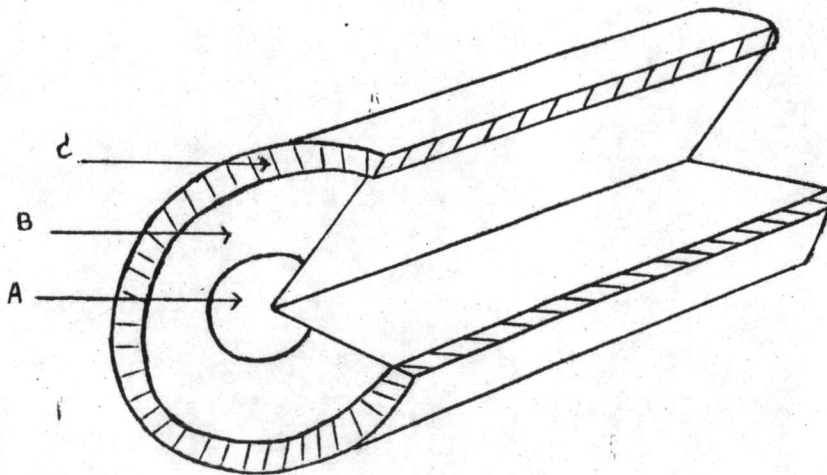
2 มีความไวในการวัดสูง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในหัววัดนั้นประมาณ 1500 ซม.<sup>2</sup> ต่อโวลต์ต่อวินาที และของโฮลมีความไว 500 ซม.<sup>2</sup> ต่อโวลต์ต่อวินาที เวลาที่วิ่งในหัววัดเพียง  $10^{-8}$  วินาทีต่อการวัดครั้งหนึ่ง ๆ

3 มีกำลังแยกช่วงพลังงาน (Energy Resolution) สูง สามารถแยกพลังงานรังสีแกมมาใกล้เคียงมาก

4 หัววัดมีขนาดเล็ก

#### 3.6.4 หัววัด Ge(Li) [Lithium Drifted Germanium Detector]

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้นี้ มีหัววัดเป็นผลึกของโลหะกึ่งตัวนำของ Ge(Li) ซึ่งเป็นแบบ p-i-n junction ทำจาก p-type ของเจอร์มาเนียมที่มีคุณภาพสูงมาก และมี n-type เป็นลิเทียมซึมผ่านเข้าไปจากส่วนนอกของผลึก p-type เข้าไปหาแกนกลางของผลึกโดยการใช้นาฬิกาไฟฟ้าสูง ๆ ส่วนข้างในของหัววัดแสดงไว้ในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 ภาพที่แสดงให้เห็นข้างในของหัววัด Ge(Li).

A เป็นสารชนิด p-type ของเจอร์มาเนียมซึ่งเป็นแกนกลาง

B เป็นบริเวณที่เรียกว่า intrinsic region ซึ่งเป็น Li compensator

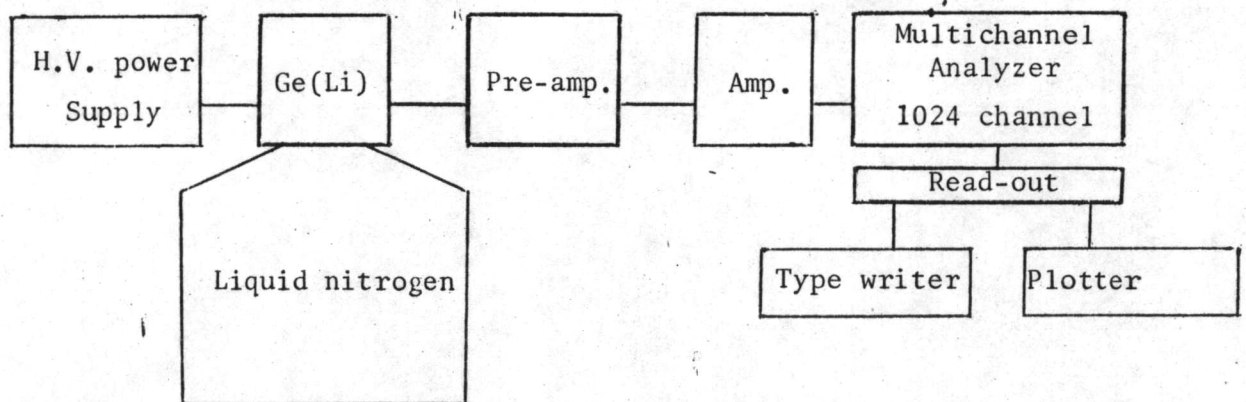
C เป็นส่วนผิวนอก เป็นสารพวก n-type ซึ่งเป็นส่วนที่ลิเทียมจะซึมเข้าไป (Li diffused)

โครงสร้างของอะตอมของอินทรีนสิคเจอร์มาเนียม (intrinsic germanium) ต้องการอุณหภูมิค่า ๆ เพื่อที่จะรักษาให้อะตอมของลิเทียมอยู่ที่  $-196^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงมีระบบทำความเย็น (cryostat) และถังเก็บไนโตรเจนเหลว เพื่อหล่อเลี้ยงให้ผลึกหัววัดอยู่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวคือ  $-196^{\circ}\text{C}$

หัววัด Ge(Li) ที่ใช้นี้ ผลิตโดยบริษัทออร์เทค (Ortec) ขนาด 26 มม.<sup>3</sup> เป็นแบบทรงกระบอกแกนร่วม (cylinder coaxial) มีค่า FWHM=2.2KeV ที่ 1.33 MeV ของ Co-60 หัววัดนี้ได้ออกแบบและประกอบอยู่ในเครื่องกำบังรังสีเพื่อลดปริมาณรังสีจากภายนอกรอบ ๆ หัววัด โดยใช้เหล็กหนา 15 มม. เป็นรูปทรงกระบอก ชั้นถัดเข้าไปเป็นตะกั่วหนา 0.5 มม. ชั้นที่ 3 เป็นแผ่นทองแดงและแคดเมียม เพื่อกันรังสีเอกซ์อันเกิดจากรังสีแกมมาชนกับตะกั่ว

### 3.6.5 เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ของหัววัด Ge(Li)

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ก็คล้ายคลึงกับเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบซินทิลเลชั่น ดังแผนภาพของระบบเครื่องที่แสดงในรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 แผนภาพของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบโลหะกึ่งตัวนำ



มัลติแชนแนลมี 1024 ช่อง ส่วนนี้จะให้ผลการวัดรังสีแกมมาเป็นสเปกตรัมปรากฏให้เห็นบนจอ ออสซิลโลสโคป ของเครื่อง และต่อเข้ากับเครื่องพิมพ์ดีด เพื่อพิมพ์ผลการนับรังสีออกมา โดยพิมพ์ตัวเลขเป็นแถว ๆ แถวหนึ่ง ๆ มี 10 ช่อง จำนวนแรกของแต่ละแถวในแถวแรกบอกค่าเวลาที่ใช้วัด ส่วนจำนวนแรกของแต่ละแถวถัดลงไปบอกว่าเป็นช่องที่เท่าไร

เครื่องวาคกราฟ เป็นเครื่องวาคกราฟแบบสเปกตรัมที่ได้จากการวัดรังสี โดยวาคกราฟออกมาเหมือนกับรูปสเปกตรัมที่ปรากฏบนจอ ออสซิลโลสโคป

### 3.7 การดำเนินการวิจัยโดยใช้เครื่องแกมมาสเปกโตรมิเตอร์แบบโลหะกึ่งตัวนำ

การดำเนินการวิจัยเหมือนในหัวข้อ 3.5 ซึ่งเป็นการวัดกัมมันตรังสีที่แผ่จากสารตัวอย่างเทียบกับที่แผ่จากสารมาตรฐาน โดยใช้สารชุดเดียวกันกับที่ไคซิงไว้แล้วในหัวข้อ 3.5 ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบดูว่า จากการวัดด้วยหัววัดคนละแบบจะให้ผลตรงกัน หรือแตกต่างกันมากน้อยเพียงไร

ข้อมูลและผลการคำนวณที่ได้ แสดงอยู่ในตารางที่ 4-15, 4-16 และ 4-17 ในบทที่ 4 ส่วนตัวอย่างของสเปกตรัม ของแร่ตัวอย่างโคลัมไบต์หมายเลข 8 และยูเรเนียมที่เขียนด้วยเครื่องวาคกราฟนั้น แสดงอยู่ในรูปที่ 4-5 และ 4-6 ในบทที่ 4

### 3.8 ทฤษฎีการเรืองรังสีเอกซ์

#### 3.8.1 การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence)

ขบวนการเรืองรังสีเอกซ์ เกิดจากการที่รังสีเอกซ์ หรือแกมมา หรืออนุภาคต่าง ๆ เช่น อิเล็กตรอน เบตา และอัลฟา ซึ่งมีพลังงานสูงวิ่งไปกระทบสารตัวอย่าง และสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งให้แก่อิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุในสารตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนหลุดไปจากอะตอม หรือย้ายจากชั้นพลังงานหนึ่งไปยังอีกชั้นพลังงานหนึ่ง อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นพลังงานตกไปจะย้ายลงมาแทนที่ พร้อมกับคายพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteris-



tic X-ray) หรือ รังสีเอกซ์เรือง (fluorescent X-ray) ปรากฏแต่ละชนิดจะ  
ให้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานหรือความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นกับ เลขอะตอม ของธาตุนั้น ๆ  
พลังงานรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นธาตุที่มี เลขอะตอม สูงจะมากกว่าที่เกิดจากการกระตุ้น  
ธาตุที่มี เลขอะตอม ต่ำ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ให้ออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีที่  
ใช้กระตุ้น และขึ้นกับพลังงานของรังสีที่ใช้กระตุ้นด้วย ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้น  
ธาตุที่เราต้องการวัดจะสูงที่สุดถ้ารังสีที่ใช้ในการกระตุ้นมีพลังงานมากกว่าเคแอมซอร์พชันเอจจ์  
(K absorption edge) ของธาตุนั้นเพียงเล็กน้อย

โดยปกติการทำให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์มี 2 วิธี คือ

1 ให้อิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง ตกกระทบธาตุนิวเคลียสทำให้เป็นเป้า ขบวนการนี้เองที่เกิด  
อยู่ในหลอดรังสีเอกซ์ วิธีนี้นอกจากจะได้ รังสีเอกซ์เฉพาะตัว แล้ว ยังได้สเปกตรัมต่อเนื่อง  
(continuous spectrum or white radiation) เนื่องจากการสูญเสียพลังงานจลน์ของ  
อิเล็กตรอน

2 ใช้รังสีเอกซ์เป็นตัวกระตุ้น รังสีเอกซ์นี้อาจได้จากหลอดรังสีเอกซ์ หรือจากสารไอโซโทป  
ก็ได้ แต่ต้องมีพลังงานสูงกว่า คริตติคาล เอกไซเตชัน โปเทนเชียล (critical excitation  
potential) ของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่ถูกกระตุ้น โดยวิธีนี้จะได้รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุ  
ที่ถูกกระตุ้น โดยมีสเปกตรัมต่อเนื่องน้อยมาก ฎรูปที่ 3-12

สัมประสิทธิ์ของการกุกกลืน (absorption coefficient) เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบ  
สาร มีบางส่วนของรังสีเอกซ์นั้นจะผ่านสารไปได้ และบางส่วนของรังสีเอกซ์นั้นจะถูกกุกกลืนไว้ การกุกกลืนเป็นไป  
ตามความสัมพันธ์

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (3-10)$$

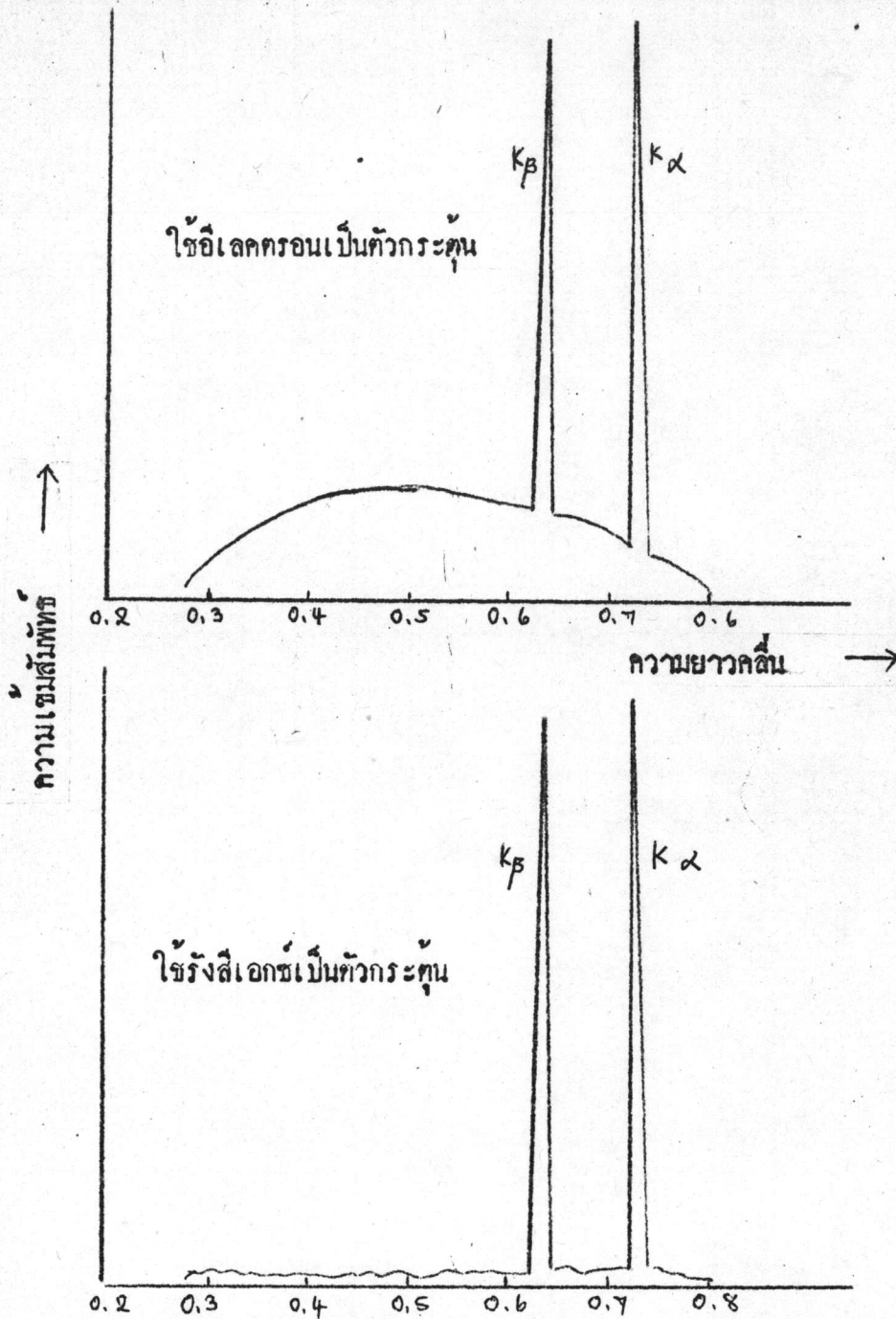
โดย  $I =$  ความเข้มของรังสีที่ผ่านไปได้

$I_0 =$  รังสีที่ตกกระทบ

$\mu =$  สัมประสิทธิ์ของการกุกกลืน

$t =$  ความหนาของสาร

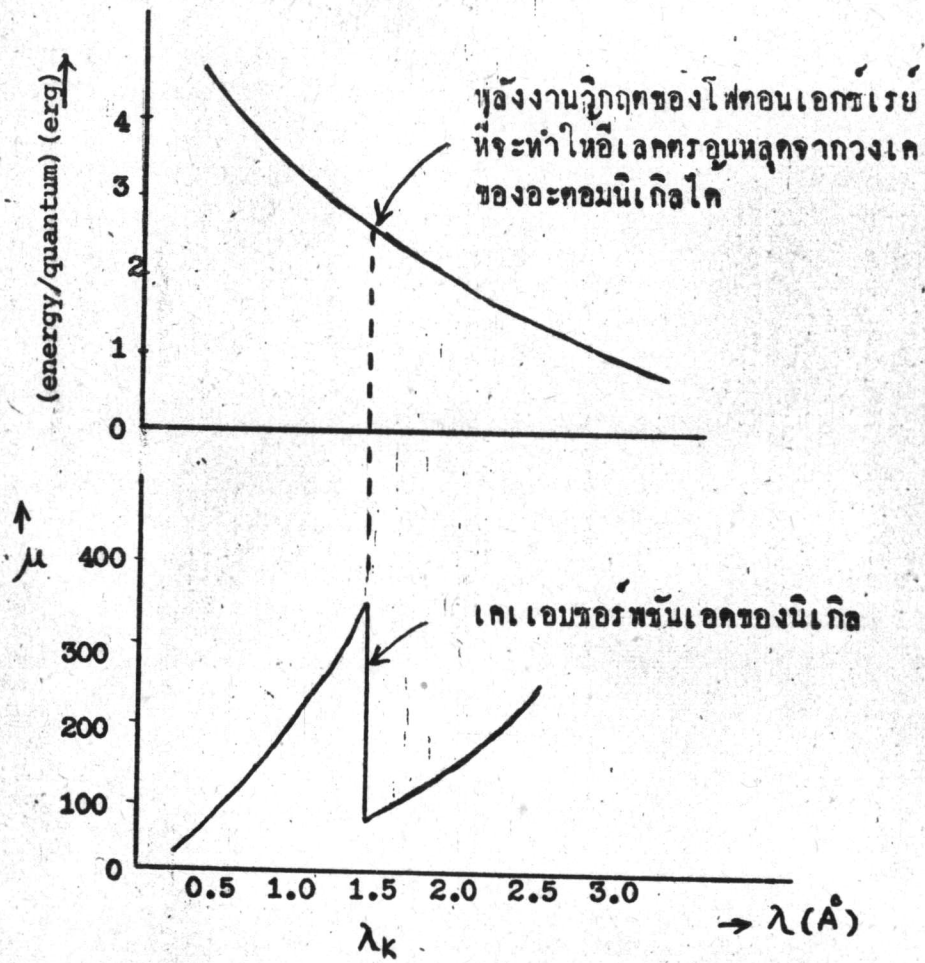
ในขบวนการเรืองรังสีเอกซ์ ทั้งรังสีที่เป็นตัวกระตุ้น และรังสีที่เกิดจากการถูกกระตุ้น  
จะถูกกุกกลืน และเนื่องจากพลังงานของรังสีทั้งสองนี้ไม่เท่ากัน สัมประสิทธิ์ของการกุกกลืนจะต่าง  
กันไปด้วย



รูปที่ 3-12 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ของธาตุโมลิบดีนัม<sup>1</sup> เมื่อใช้อิเลคตรอนและรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเท่ากันเป็นตัวกระตุ้น ความเข้มของสเปกตรัมต่อเนื่องของทั้งสองแบบจะแตกต่างกัน

<sup>1</sup> H.A. Liebhafsky, et.al.; X-ray Absorption and Emission in Analytical Chemistry; New York, John Wiley & Sons, Inc.; P 27 (1960)





รูปที่ 3-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานวิกฤตกับเค.เอ.เอ.ของนิกเกิล<sup>2</sup>

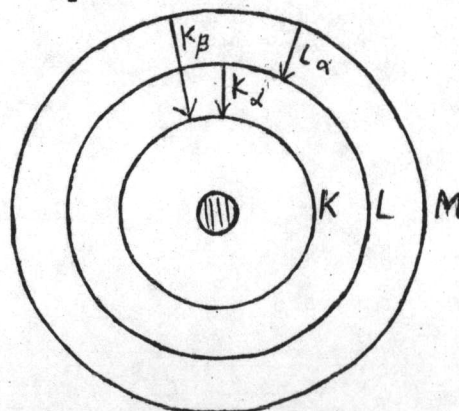


แอมซอร์พชันเอจ (absorption edge) ของรังสีเอกซ์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน ( $\mu$ ) ของสารแต่ละชนิดไม่เปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตามขนาดความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ ถ้าเอาค่า ( $\mu$ ) ของธาตุและความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบมาเขียนกราฟ ตัวอย่างเช่น ของธาตุนิเกิล จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3-13

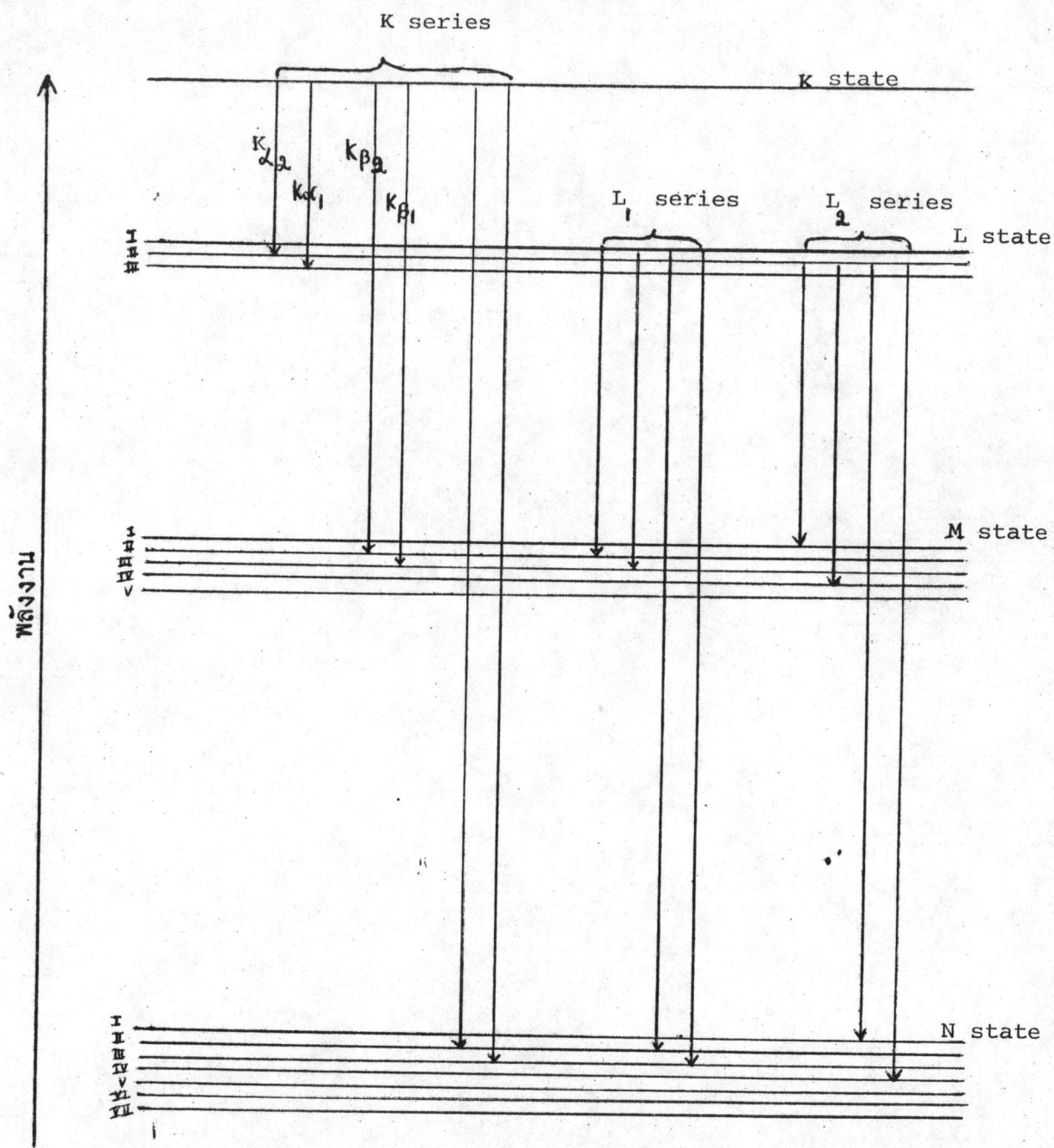
ในรูปที่ 3-13 เมื่อความยาวคลื่นลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งก็คือพลังงานรังสีเอกซ์เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ค่า  $\mu$  ก็ลดลงเรื่อย ๆ จนถึงที่ความยาวคลื่นเฉพาะค่าหนึ่ง คือ  $1.488 \text{ \AA}$  ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน จะเพิ่มขึ้นโดยทันทีทันใด ทำให้เส้นกราฟไม่ต่อเนื่องที่ตรงนั้น ตรงตำแหน่งไม่ต่อเนื่องนี้เองเป็นแอมซอร์พชันเอจของนิเกิล ความยาวคลื่นที่ตรงเกิดแอมซอร์พชันเอจนี้เรียก  $\lambda_K$  เหตุที่เกิดเช่นนี้ เพราะที่  $\lambda_K$  มีการดูดกลืนมาก รังสีเอกซ์จะถูกดูดกลืนหายหมด กลายเป็นพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงเค (K-shell) ของอะตอมของนิเกิล (อิเล็กตรอนจากชั้นอื่นที่ย้ายลงมาที่วงเค จะคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์เค ) เมื่อความยาวคลื่นลดลงไปอีกจนต่ำกว่า  $\lambda_K$  ค่า  $\mu$  ก็จะเริ่มลด แม้ว่ารังสีเอกซ์เคจะยังคงเกิดอยู่เรื่อย ๆ ก็ตาม เช่นที่  $1.0 \text{ \AA}$  (รูป 3-13) ซึ่งรังสีเอกซ์มีพลังงานมากกว่าที่จะใช้ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวงเคเสียอีก แต่ยิ่งรังสีเอกซ์มีพลังงานมากขึ้น ก็ยังมีอำนาจทะลุลงสารมากขึ้นตามไปด้วย

ถ้าลากเส้นกราฟในรูป 3-13 ออกออกไปทางขวามือ ก็จะพบแอมซอร์พชันเอจ ซึ่งแยกเป็น  $L_I, L_{II}, L_{III}$  คือแยกเป็นกราฟไม่ต่อเนื่อง 3 เส้น และถ้าลากกราฟต่อไปอีกก็จะพบแอมซอร์พชันเอจ ซึ่งมี 5 เส้น และยิ่งจะพบอีกต่อไปเรื่อย ๆ

เพื่อให้เข้าใจง่ายและเร็ว จะเขียนรูป ตารางและ แผนภาพ แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว และ แอมซอร์พชันเอจ ดังรูปที่ 3-14 , ตารางที่ 3-1 และรูปที่ 3-15



รูปที่ 3-14 แสดงสัญลักษณ์ของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว



รูปที่ 3-15 แสดง แผนภาพ ของระดับพลังงาน

n	K		L			M				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l = 0 \rightarrow n-1$	0	0	1	1	1	2	2	3	3	4
$j = l \pm m_s$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$
		I	II	III						
$m = -j \rightarrow j$	$\pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{3}{2}, \pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{3}{2}, \pm \frac{1}{2}$	$\pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}$	$\pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}$	$\pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}$
	2	2	2	4	2	2	4	4	6	6
	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$		$3s^2$		$3p^6$			$3d^{10}$

ตารางที่ 3-1 แสดง ภาวะ (state) ต่าง ๆ ของอิเล็กตรอน

n = Principal quantum number

l = Orbital angular momentum quantum number ,  $m_s$  = Spin quantum number ,

j = Total angular momentum quantum number , m = Magnetic quantum number



การที่อิเล็กตรอนจะย้ายจาก ภาวะหนึ่งไปยังอีก ภาวะหนึ่งได้นั้น จะต้องเป็นไปตามกฎควันตัมที่เรียกว่ากฎเลือกชั้น (selection rule) คือ

$$\left. \begin{aligned} \Delta l &= \pm 1 \\ \Delta j &= 0 \quad \text{หรือ} \quad \pm 1 \end{aligned} \right\} (3-11)$$

ในการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว เมื่ออิเล็กตรอนในวงเคถูกชนหลุดไปแล้ว อิเล็กตรอนในวงแอลวิ่งเข้ามาแทนที่ พร้อมทั้งคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เราเรียกรังสีเอกซ์เฉพาะตัวนี้ว่าเคแอลฟา ( $K_{\alpha}$ ) จากตารางที่ 3-1 และรูปที่ 3-15 จะเห็นว่าเคแอลฟา เกิดได้ 2 ความยาวคลื่น คือ เคแอลฟาหนึ่ง ( $K_{\alpha 1}$ ) และเคแอลฟาสอง ( $K_{\alpha 2}$ ) ส่วนเคแอลฟาสาม ( $K_{\alpha 3}$ ) เกิดไม่ได้ ซึ่งเป็นไปตามกฎเลือกชั้นข้างบน เพราะในการที่อิเล็กตรอนจะย้ายจาก I (ดูตารางที่ 3-1) ไปยังวงเคนั้น ค่า  $\Delta l = 0$  เพราะฉะนั้นจึงเกิดไม่ได้

ถ้าอิเล็กตรอนที่วิ่งมายังวงเคนี้มาจากวงเอ็ม (M) เราเรียกรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นว่าเป็นเคเบตา ( $K_{\beta}$ ) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากวงดิค ๆ ไปมายังวงเค ก็เรียกรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นว่าเคแกมมา และเคตอ ๆ ไปตามลำดับ

ถ้าอิเล็กตรอนในวงแอลถูกชนออกไป แล้วอิเล็กตรอนในวงอื่น ๆ วิ่งลงมาแทนที่ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้น เรียกรังสีเอกซ์แอล (L X-ray) และในทำนองเดียวกันก็มีรังสีเอกซ์ เอ็ม, เอ็น, ... ไปได้เรื่อย ๆ

3.8.2 การวิเคราะห์ธาตุทั้งทางด้านคุณภาพและปริมาณโดยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์

จากหลักการเรืองรังสีเอกซ์ที่กล่าวมาแล้ว ถ้าเราเอาสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ไปถูกกระตุ้นโดยรังสี แล้ววัดพลังงานหรือความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ออกมา ก็จะบอกได้ว่ามีธาตุอะไรอยู่ในสารนั้นบ้าง ทั้งนี้เพราะรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดจะมีค่าพลังงานหรือความยาวคลื่นที่แน่นอน และโดยการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นก็จะสามารถบอกปริมาณของธาตุนั้น ๆ ได้ ทั้งนี้เพราะปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ที่ออกมาจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้น

การวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ อาจแบ่งกว้าง ๆ ได้เป็น 2 แบบ คือ

1 การวิเคราะห์โดยอาศัยรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นตัวกระตุ้น วิธีนี้เหมาะสำหรับใช้ในห้องทดลอง รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ออกมาจะผ่านโซลเลอร์ คอลลิเมเตอร์ (soller collimator) ไปกระทบกับผลึกเดี่ยว (single crystal) แล้วกระจายออกมาตามมุมต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับค่าความยาวคลื่น รังสีที่วัดได้จะน้อยกว่ารังสีที่เกิดจากสารตัวอย่างมาก ทั้งนี้เพราะลักษณะของจีโอเมทรี (geometry) และประสิทธิภาพในการกระจายของผลึกเดี่ยวนั้นต่ำมาก ดังนั้นหลักการนี้จึงใช้แยกพลังงานของรังสีที่เกิดจากตัวกระตุ้นของรังสีเอกซ์จากหลอดเอกซ์เรย์เท่านั้น ข้อดีของเครื่องมือนี้ก็คือสามารถแยกความยาวคลื่นของรังสีได้ดีมาก

2 การวิเคราะห์โดยอาศัยรังสีจากไอโซโทปเป็นตัวกระตุ้น อาจใช้ไอโซโทปที่ให้ อัลฟา เบตา แกมมา หรือรังสีเอกซ์ก็ได้ รังสีอัลฟาจากโปโลเนียม 210 หรือยูเรเนียม 242 จะกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำ ๆ สำหรับเบตานั้น โยปทกจะทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบเบรมสตราลุง (bremsstrahlung) ซึ่งมีพลังงานแบบสเปกตรัมต่อเนื่องกับ รังสีเอกซ์ เฉพาะตัวจากเป้าที่เหมาะสม รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นนี้จะไปกระตุ้นสารตัวอย่างทำให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์อีกต่อหนึ่ง แหล่งกำเนิดรังสีชนิดนี้ ทำโดยใช้สารกัมมันตรังสีที่ให้เบตา เช่น โปรมิเทียม 147 เคลือบเป็นชั้นบาง ๆ บนเป้า หรืออาจอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี หรือของผสมระหว่างสารกัมมันตรังสีกับธาตุที่ใช้เป็นเป้าก็ได้ แหล่งกำเนิดรังสีบางชนิดจะสลายตัวแบบ การจับอิเล็กตรอน (electron capture) เช่น แคลเซียม 109 สลายตัวเป็นเงิน 109 โดยให้แกมมาพลังงานต่ำออกมาสำหรับใช้กระตุ้นสารตัวอย่างให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์ขึ้น รูปร่างของแหล่งกำเนิดรังสีนิยมใช้กัน 2 แบบ คือเป็นแผ่นวงกลมและแผ่นวงแหวน ซึ่งจะวางไว้ระหว่างหัววัดรังสีกับสารตัวอย่าง เนื่องจากรังสีที่ใช้กระตุ้นมีความเข้มไม่สูงนัก จึงใช้วิธีที่มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีได้สูง คือใช้แผ่นกรองรังสีกั้นระหว่างสารตัวอย่างกับหัววัด หรือใช้เครื่องวัดรังสีชนิดที่ให้สัญญาณไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ต้องการวัด หรืออาจใช้ 2 วิธีประกอบกัน

### 3.9 เครื่องวัดการเรืองรังสีเอกซ์

เครื่องวัดการเรืองรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ

ก เครื่องวัดรังสีเอกซ์ มีส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

1 Ortec 7000 Series Si(Li) X-Rays Detector ซึ่งประกอบด้วย

1.1 Lithium-drifted Silicon diode 6 mm. X 5.15 mm.

1.2 Low noise cryogenic preamplifier

1.3 Cryostat

1.4 Liquid Nitrogen reservoir dewar

2 Power supply Ortec model 450

3 Amplifier Ortec model 451

4 1024-channel pulse height analyzer

5 Oscilloscope

6 Typewriter and Plotter

ใช้ high voltage supply 1500 volts

แผนภาพ ของเครื่องวัดรังสีเอกซ์นี้แสดงอยู่ในรูปที่ 3-16

การทดลองทดลองด้วยเครื่องนี้ ได้ใช้ coarse gain ของแอมพลิไฟ=20, fine gain = 0

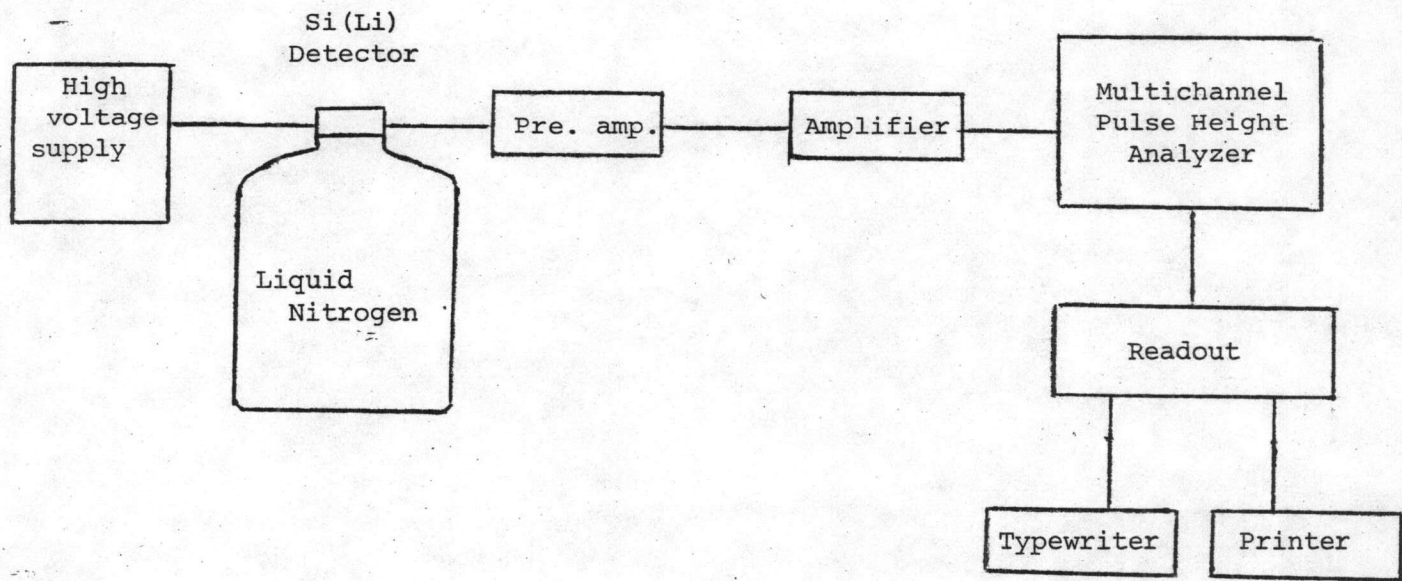
Upper level discriminator ของมัลติแชนเนล = 400

Lower level discriminator ของมัลติแชนเนล = 160

หัววัดรังสีเป็นสารกึ่งตัวนำ Si(Li) ซึ่งเป็นลิเทียมกริฟเทคซิลิกอน (Lithium drifted silicon) มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำ หรือในช่วงรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุ ช่วงที่ใช้วัดได้ที่ดีที่สุด คือช่วงพลังงาน 1-60 KeV (หรือความยาวคลื่น 12.4-0.21 Å)

ส่วนประกอบที่สำคัญ คือผลึกของลิเทียมกริฟเทคซิลิกอนโคโอก มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. สูง 5.5 มม. ท่อกับ field effect transistor ซึ่งเป็นส่วนแรก ของ preamplifier บรรจุอยู่ใน cryostat และรักษาให้อุณหภูมิอยู่ในระดับอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) คือ 77° K หรือ -196° C เพื่อให้หัววัดทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุด





รูปที่ 3-16 แผนภาพของเครื่องวัด Si(Li)

หน้าตาขั้วรับรังสีเบอริลเลียม มีความหนา 0.025 มม. ระยะห่างจากหน้าตาขั้วรับรังสีถึงผิวหน้าผลึก Si(Li) มีระยะ 7 มม.

ถังบรรจุไนโตรเจนเหลว มีความจุ 30 ลิตร

ข ต้นกำเนิดรังสี (source) ที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ โปรมิเทียม  $^{147}\text{Pm}/\text{Al}$  ซึ่งเป็นไอโซโทปที่ให้รังสีเบตา แล้วไปกระทบเป้าอลูมิเนียมทำให้ได้สเปกตรัมแบบเบรมชतालงออกมา เบรมชतालงนี้จะใช้เป็นตัวกระตุ้นสารตัวอย่างที่ต้องการจะวิเคราะห์ ทำให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์ขึ้น

$^{147}\text{Pm}/\text{Al}$  ที่ใช้นี้ มีความแรง 500 มิลลิวูร์ ผลิตเมื่อต้นปี 1974 ส่งมาเมื่อวันที่ 26 มกราคม 1974 มีค่าครึ่งชีวิต 2.62 ปี ค่าพลังงานอยู่ในช่วง 10-100 KeV

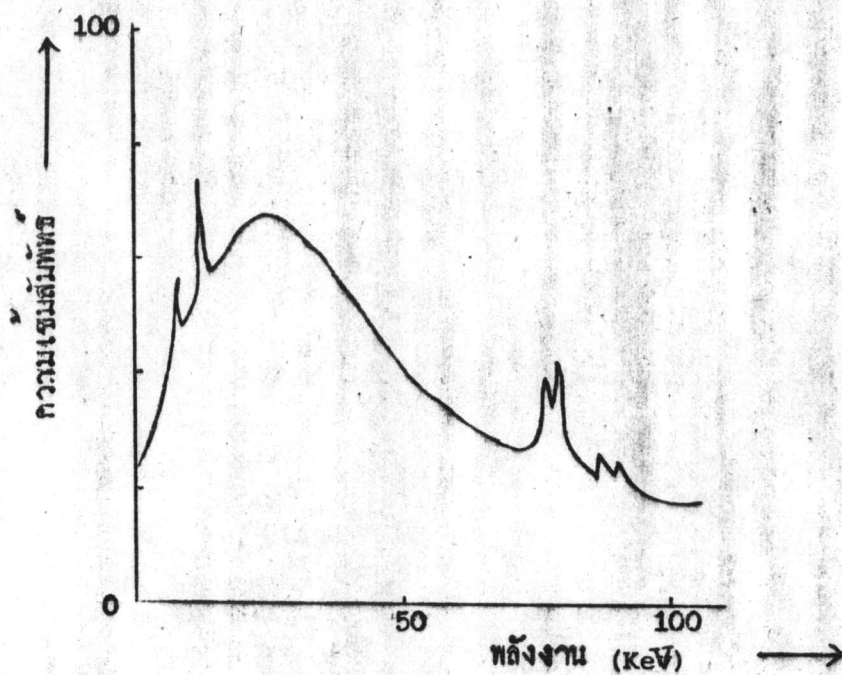
ลักษณะของตัวต้นกำเนิดรังสี  $^{147}\text{Pm}/\text{Al}$  เป็นรูปวงแหวน มีเส้นผ่าศูนย์กลางวงนอก 3.8 ซม. วงใน 2.2 ซม. มีความหนา 0.6 ซม.

สเปกตรัมของเบรมชतालงที่ได้จาก  $^{147}\text{Pm}/\text{Al}$  แสดงอยู่ในรูปที่ 3-17

### 3.10 การดำเนินการวิจัยที่ใช้วิธีการเรืองรังสีเอกซ์

#### 3.10.1 โดยเทียบกับสารมาตรฐาน

1. เสาที่ไว้วัดแบบอื่น ๆ มาแล้วทั้งหมด (ยกเว้นเสาที่วัดด้วยเครื่องนับไกเกอร์แบบแอคทีฟ) ลงในภาชนะบรรจุสารตามเดิม แล้วเตรียมภาชนะใหม่สำหรับใส่สารเพื่อตั้งวัดด้วยเครื่องวัดการเรืองรังสีเอกซ์ ภาชนะที่ใช้นี้เป็นวงพลาสติกรูปทรงกระบอกกลวง 2 อัน อันหนึ่งสูง 2.5 ซม. และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.6 ซม. อีกอันหนึ่งสูง 1.5 ซม. และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. ซึ่งวงพลาสติกอันแรกจะกดซ้อนลงในวงพลาสติกอันหลังได้พอดีเครือ ๆ ตัดกระดาษแก้วรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ยาวด้านละ 8 ซม. วางบนปากของวงพลาสติกอันหลังซึ่งเป็นอันที่ใหญ่กว่า แล้วเอาวงพลาสติกอันแรกวางบนกระดาษแก้วให้จุดศูนย์กลางของวงพลาสติกทั้งสองตรงกัน กดวงพลาสติกที่อยู่บนกระดาษแก้วลงไปตรง ๆ ให้ซ้อนลงไปในวงพลาสติกอันกว้างกว่าที่อยู่ใต้กระดาษแก้ว กดลงไปจนสุด กระดาษแก้วจะถูกขึงตึงเป็นฐานของภาชนะพลาสติกสำหรับรองรับสารที่ใส่ลงในภาชนะนี้ กระดาษแก้วนี้จะเปลี่ยนทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนสาร และทำความสะอาดวงพลาสติกทุกครั้งด้วย การที่เลือกใช้แผ่นกระดาษแก้ว



รูปที่ 3-17 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากต้นกำเนิด  $Pm^{147}/Al$



เพราะว่ามีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์ที่จับว่าบางพอควร และเทได้ง่าย มีการกुकกลืนรังสีเอกซ์ เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นน้อยมาก มีความเหนียวพอประมาณ สามารถรับน้ำหนักได้ไม่น้อยกว่า 50 กรัม

2 นำต้นกำเนิดรังสี  $Pm^{147}/Al$  ออกจากกระปุกตะกั่ว วางลงบนที่สำหรับวางซึ่งอยู่เหนือหัววัด  $Si(Li)$  ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี, ผลึก  $Si(Li)$  และสารที่ตั้งวัด จะอยู่ในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3-18

โดยปกติ ขณะที่ทำการวัดอยู่ หรือยังไม่ได้อัด แต่วางต้นกำเนิดรังสีไว้แล้ว จะใช้ฝาครอบรูปทรงกระบอกครอบสารต้นกำเนิดรังสีไว้ ดังแสดงด้วยลูกโซ่ปลาในรูปที่ 3-18

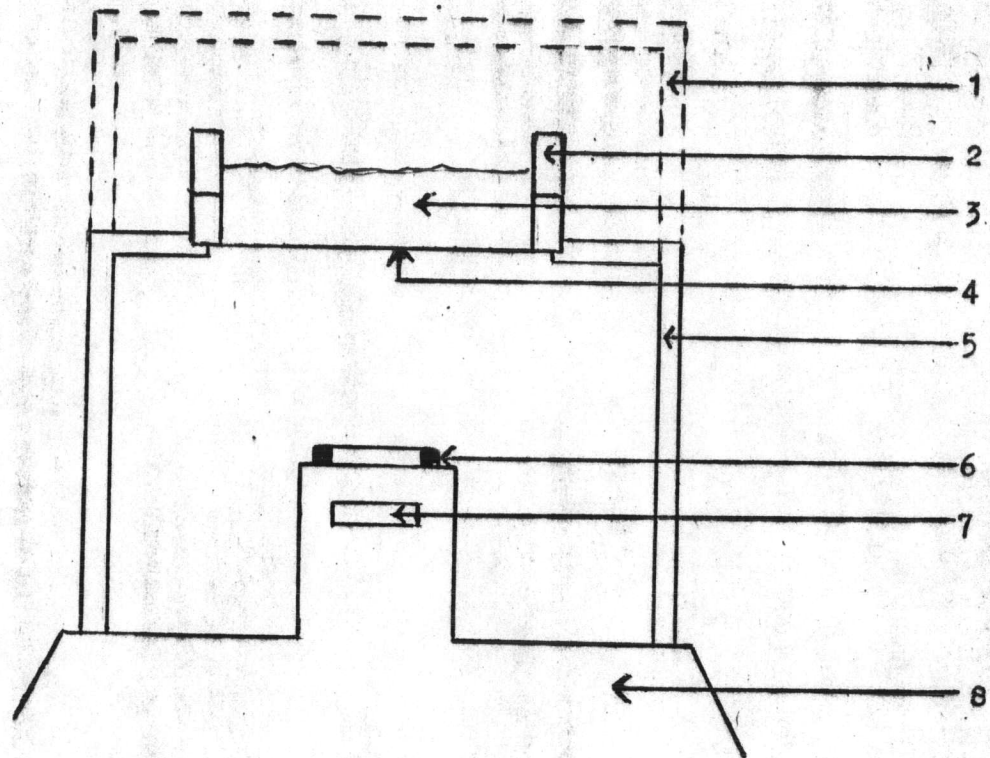
ที่ตั้งสารตัวอย่างและฝาครอบเป็นพวกเหล็ก ไร้สนิม มีความหนา

0.3 มม.

3 ทำกราฟมาตรฐานระหว่างค่าพลังงานกับค่าหมายเลขของช่อง โดยเอาธาตุบริสุทธิ์มา ตั้งวัดตัวละ 100 วินาที ธาตุบริสุทธิ์ที่ใช้ได้แก่  $Mo, Ag, Ba, Tb, Cu$  และ  $Rb$  ข้อมูลและกราฟที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4-18 และรูปที่ 4-6

4 เนื่องจากว่า ในการวัดสารโดยใช้รังสีเป็นตัวกระตุ้นนี้ เมื่อเพิ่มความหนาของสารไปเรื่อย ๆ ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ออกมาจะเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 3-19 กล่าวคือในช่วงหมายเลข 1 เป็นช่วงที่สารมีขนาดบาง จึงไม่มีผลจากการกุก-เสริมของรังสีเอกซ์ หากให้ความหนาของสารมีความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ออกมา ในช่วงหมายเลข 2 ความหนาของสารมีผลต่อการกุกกลืนรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำ ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลงไปจากที่ควรเป็น และเมื่อยังเพิ่มความหนาของสารต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดหนึ่ง คือที่จุด  $t_{\infty}$  ค่าปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์จะคงที่ไม่ว่าจะเพิ่มความหนาของสารขึ้นไปอีกเท่าใดก็ตาม เรียกค่า  $t_{\infty}$  นี้ว่า ความหนาวิกฤต (critical thickness) ดังนั้น ในการทดลองนี้ จึงเตรียมสารตัวอย่างลงในภาชนะพลาสติกให้สูง 1 ซม. แล้วตั้งวัด 400 วินาที จากนั้นจึงเติมสารตัวอย่างลงไปอีกรวมสูง 1.3 ซม. แล้วตั้งวัด 400 วินาที ปรากฏว่าจำนวนนับที่ได้ทั้ง 2 ครั้งเกือบเท่ากัน แสดงว่าความหนาของสารที่ใช้ถือว่ายู่ในช่วงที่จำนวนนับคงที่ ซึ่งในการคำนวณไม่ต้องใช้น้ำหนักของสารเข้ามาเกี่ยว ดังนั้นตลอดการทดลองนี้จึงใช้สารตัวอย่างต่าง ๆ ให้มีความหนา 1.3 ซม.

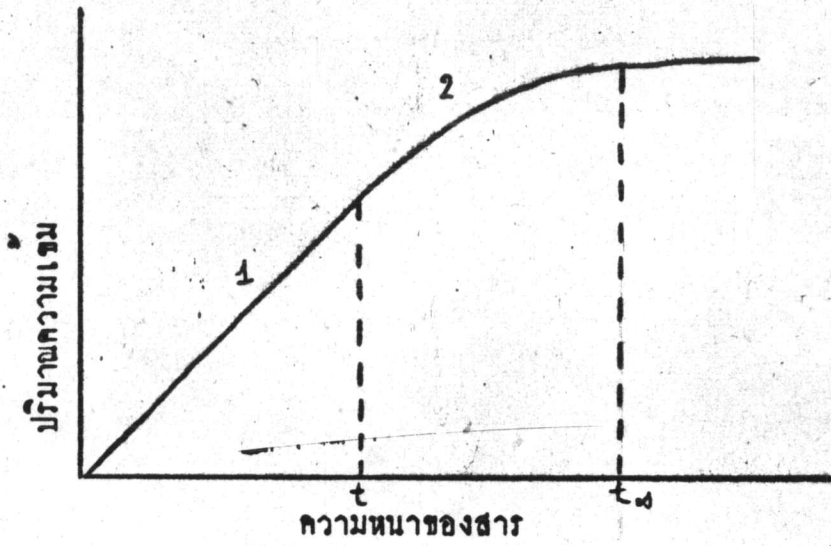
5 วัดสเปกตรัมของแร่ตัวอย่างออกมา นำมาตรวจหาพีค แล้วเทียบหาพลังงานของพีค เหล่านี้จากกราฟมาตรฐานที่ทำไว้ในข้อ 3 แล้วไปเทียบหาว่าค่าพลังงานของแต่ละพีคนั้นเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุอะไร โดยดูจากตารางที่แสดงค่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุต่าง ๆ ในหนังสือ



รูปที่ 3-18 แสดงการกึ่งสารสำหรับวิถักด้วยวิถัก

- 1 คือฝาครอบ
- 2 คือถ้วยพลาสติกใส่สารตัวอย่าง
- 3 คือสารตัวอย่าง
- 4 คือแผ่นกระดาษแก้ว
- 5 คือที่กึ่งสารตัวอย่าง
- 6 คือถาดกำเนิดรังสี
- 7 คือผลึก  $LiCl$
- 8 คือถังใส่ไนโตรเจนเหลว





รูปที่ 3-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของสารกับความชื้นของ  
รังสีเอกซ์เฉพาะตัว



คู่มือของเครื่องวัด Si(Li) ของ Ortec ในการเทียบหาว่าพีคต่าง ๆ เป็นของธาตุอะไรนั้น บางทีก็ตัดสินใจได้ยากกว่าเป็นธาตุอะไรแน่ เพราะธาตุเหล่านั้นมีค่าพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ใกล้เคียงกันมาก มีทางแก้ที่ช่วยให้ตัดสินใจได้โดยเอาธาตุบริสุทธิ์ของธาตุที่ไม่แน่นอนนั้นไปตั้งวัด แล้วตรวจพีคของธาตุบริสุทธิ์นั้นว่าอยู่ในช่องหมายเลขไหน ก็จะทำให้ตัดสินใจได้ว่าพีคของสารตัวอย่างที่ปรากฏที่ช่องหมายเลขนั้นควรเป็นธาตุอะไร ที่กล่าวมานี้เป็นการวิเคราะห์ทางคุณภาพ ทำให้ทราบว่าในแร่ตัวอย่างมีธาตุอะไรบ้าง

6 เตรียมสารมาตรฐาน ให้มีชนิดของธาตุและปริมาณของธาตุแต่ละชนิดนั้นให้เหมือนกับในสารตัวอย่าง หรือให้ใกล้เคียงกันในสารตัวอย่างให้มากที่สุด ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเตรียมได้ยาก และใช้เวลาในการเตรียมมากกว่าจะให้ใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง

เตรียมสารมาตรฐาน $S_1$ และ $S_2$			
ส่วนผสมของ $S_1$ มี	$U_3O_8$	.5	%
	$Ta_2O_5$	12	%
	$Nb_2O_5$	10	%
	$Sn_2O_3$	2	%
	$SiO_2$	75.5	%
ส่วนผสมของ $S_2$ มี	$U_3O_8$	1	%
	$Ta_2O_5$	12	%
	$Nb_2O_5$	10	%
	$Sn_2O_3$	2	%
	$SiO_2$	75	%

ในการเตรียม  $S_1, S_2$  นี้ ใส่แคชชาตุที่ทำให้เกิดพีคที่มีความเข้มสูงในสเปกตรัมของสารตัวอย่าง ส่วนปริมาณธาตุจะมีเท่าไรนั้น ต้องประมาณเอาก่อนว่าให้มีกี่เปอร์เซ็นต์ ยังมีพวกแรเอิร์ท (rare earth) อีกหลายธาตุอยู่ในสารตัวอย่าง โดยมีอยู่ธาตุละเล็กน้อยซึ่งคัดทิ้งไป ไม่ได้ผสมลงไปในการมาตรฐาน เมื่อได้สารมาตรฐานแล้วใช้ช้อน ตักสารเคมีอันเล็ก ๆ กวนสารมาตรฐาน เพื่อให้ธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่นั้น ผสมอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วถึงกัน ซึ่งตรวจสอบได้โดยกวนเสร็จแล้ว เอาไปตั้งวัด แล้วเอาลงมากวนอีกหรือกลับอีกค้ำหนึ่ง ไปตั้งวัดใหม่ในเวลาเท่ากับที่วัดครั้งแรก ถ้าจำนวนนับในการวัดทั้งสองครั้งเท่ากัน หรือเกือบเท่ากัน ก็แสดงว่าส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ ใน

สารมาตรฐานนั้นกระจายผสมอยู่ทั่วไปโดยสม่ำเสมอแล้วเอาสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไปวัด  
โดย

ก. วัดสารตัวอย่างโคลัมไบต์ หมายเลข 8

ข. วัดสารมาตรฐาน  $S_1$

ค. วัดสารมาตรฐาน  $S_2$



โดยวัดตัวอย่างละ 2000 วินาที

แล้วทำซ้ำจาก ก ถึง ค โดยเปลี่ยนสารตัวอย่างเป็นโคลัมไบต์หมายเลข 9, 10, 11, 12,  
13 และ 14

การคำนวณหาปริมาณยูเรเนียมในสารตัวอย่าง

เปอร์เซ็นต์ของ  $U_3O_8$  ในสารตัวอย่าง

$$= \frac{\text{จำนวนนับของสารตัวอย่าง}}{\text{จำนวนนับของสารมาตรฐาน}} \cdot \text{เปอร์เซ็นต์ } U_3O_8 \text{ ในสารมาตรฐาน (3-12)}$$

ในการคำนวณหาปริมาณ  $U_3O_8$  นี้ คิคจากพีคที่มีพลังงาน 13.613 KeV ของ  $L\alpha_1$  ของยูเรเนียม  
ผลการคำนวณที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4-19 เนื่องจากค่าที่ได้นั้นต่ำมากเมื่อเทียบกับผลที่  
ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดไกเกอร์, ตรวจจับ  $NaI(Tl), Ge(Li)$  เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีความผิดพลาด  
ที่เกิดจากการซิงสารที่เอามาผสม จึงเตรียมสารมาตรฐาน  $S_3$  โดยมีส่วนผสมเหมือน  $S_2$   
และเมื่อวัดออกมาแล้ว ก็ได้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับที่ได้จาก  $S_1$  และ  $S_2$  ทั้งแสดงในตารางที่  
4-19

7. เตรียมสารมาตรฐาน  $S_4$  โดยเพิ่มธาตุอื่น ๆ เข้าไปในส่วนผสม และลองลคปริมาณ  
 $Ta_2O_5$  กับ  $Nb_2O_5$  ลง

สารมาตรฐาน $S_4$ มีส่วนผสมดังนี้ :	$U_3O_8$	1	%
	$Ta_2O_5$	11	%
	$Nb_2O_5$	5	%
	$Sn_2O_3$	2	%

$\text{Bi}_2\text{O}_3$  .5 %

$\text{Y}_2\text{O}_3$  .5 %

$\text{WO}_3$  2 %

$\text{SiO}_2$  78 %

ผลที่ได้จากการวัดโคยเทียบกับ  $S_4$  แสดงอยู่ในตารางที่ 4-19

8 เตรียมสารมาตรฐาน  $S_5$  และ  $S_6$  ให้มีส่วนผสมเหมือน  $S_4$  เพียงแต่เปลี่ยนปริมาณ  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  เป็น 7.5% และ 10% ตามลำดับ แล้ววัดแร่ตัวอย่างโคดัมไบท์เทียบกับ  $S_4, S_5$  และ  $S_6$  ผลที่คำนวณได้ แสดงอยู่ในตารางที่ 4-20

### 3.10.2 โคยวิธีแยกกิกซ์

1 ชั่งน้ำหนักแร่ตัวอย่าง ใส่ในภาชนะพลาสติกที่มีฐานเป็นกระดาษแก้วแบบที่ถล่มมาแล้ว ในข้อ 1 ของ 3.9.1 โดยให้สารหนาน้อยสุดให้พอดีเกลี่ยไถกระจายทั่วผิวของกระดาษแก้วเท่านั้น โดย 1 แร่ตัวอย่างต่อ 1 ภาชนะ

2 ชั่งน้ำหนัก  $\text{U}_3\text{O}_8$  ซึ่งบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99.97% สำหรับเติมในแต่ละสารตัวอย่าง เตรียมไว้

3 เมื่อวัดตัวอย่างแร่ 1 ตัวอย่างเสร็จ เอา  $\text{U}_3\text{O}_8$  ที่ซึ่งเตรียมไว้สำหรับตัวอย่างนั้น ใส่ลงไป เอา ช้อนตักสารเคมี อันเล็ก ๆ ค่อย ๆ กวนให้สารผสมกันทั่ว ๆ อย่างสม่ำเสมอ แล้วเอาไปตั้งวัด

4 เมื่อวัดในข้อ 3 เสร็จ ให้กวนสารในด้วยนิ้วชี้อีกพอควร แล้วตั้งวัดใหม่ ถ้าจำนวนนับในข้อ 3 และ 4 ใกล้เคียงกัน ก็แสดงว่าได้กวนสารให้กระจายผสมกันอย่างสม่ำเสมอแล้ว ให้ใช้ค่าเฉลี่ยของจำนวนนับทั้งสองเป็นจำนวนนับที่เติม  $\text{U}_3\text{O}_8$  แล้ว

5 ทำข้อ 3 และ 4 ซ้ำจนครบ 7 ตัวอย่าง

6 ในการตั้งวัดมาทั้งหมดนี้ วัดครั้งละ 2000 วินาที

7 ทำการทดลองซ้ำใหม่ทั้ง 7 ตัวอย่าง แต่ใช้เวลาวัดครั้งละ 800 วินาที

" " " " " 400 "



ส่วนทฤษฎีและวิธีการคำนวณเกี่ยวกับวิธีแยกกันนี้ เหมือนกับที่กล่าวมาแล้วใน 3.2.2  
การคำนวณใช้สมการ (3-4) แล้วมาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์  
ข้อมูลและผลการคำนวณที่ได้จากวิธีนี้ แสดงอยู่ในตารางที่ 4-23 และ 4-24