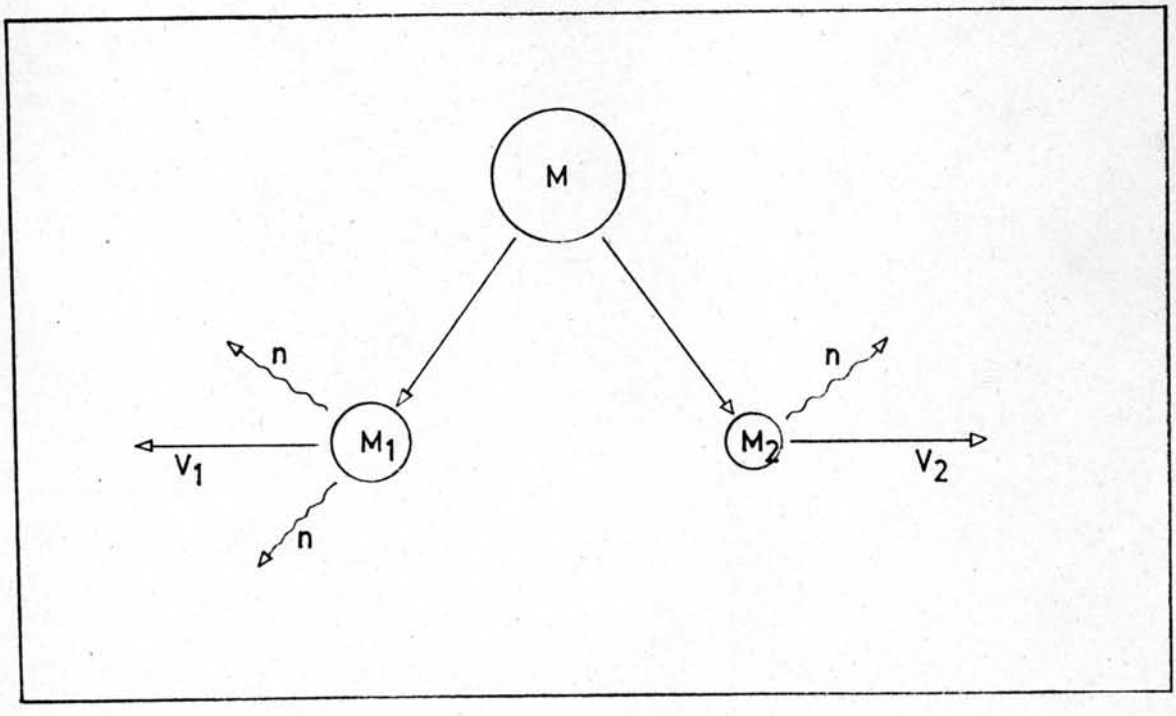
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

2.1 ทฤษฎีที่นำไปสู่การออกแบบวงจรอิเลกโทรนิคส์สำหรับวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์

เมื่อเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน นิวเคลียสของธาตุหนักจะแตกออกเป็น 2 แฟรกเมนต์ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วฟิชชันแฟรกเมนต์ทั้งสองจะมีมวลไม่เท่ากันและเคลื่อนที่แยกออกจากกันในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมดังแสดงในรูปที่ 2.1 M เป็นมวลของนิวเคลียสที่จะเกิดฟิชชันซึ่งสมมุติว่าอยู่ในสภาพนิ่ง เมื่อเกิดปฏิกิริยาฟิชชัน ซึ่งอาจจะเกิดจากการระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนหรือนิวเคลียสนั้นเกิดฟิชชันเองโดยธรรมชาติ



รูปที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่ของฟิชชันแฟรกเมนต์

นิวเคลียสนี้จะแตกออกเป็น 2 แฟรกเมนต์ซึ่งมีมวล M_1 และ M_2 เคลื่อนที่แยกออกจากกันในทิศทางตรงกันข้ามด้วยอัตราเร็ว V_1 และ V_2 ตามลำดับ ฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสถานะโลด (Exited state) และมีพลังงานมากพอที่จะเปล่งอนุภาคนิวตรอนจำนวนเล็กน้อยออกมา ถ้าละทิ้งมวลของอนุภาคนิวตรอนเหล่านี้ เราสามารถแสดงได้ว่า

$$M_1 V_1 = M_2 V_2 \qquad (2.1)$$

เมื่อยกกำลังสองแล้วคูณด้วย 1/2 ทั้งสองข้าง สมการที่ (2.1) กลายเป็น

$$M_1 E_1 = M_2 E_2 \qquad (2.2)$$

โดยที่ E_1 และ E_2 เป็นพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ทั้งสอง จากสมการที่ (2.2) สามารถแสดงได้ว่า

$$M_1 = (M_1 + M_2)\left(\frac{E_2}{E_1 + E_2}\right) \qquad (2.3)$$

ถ้าสมมุติว่าอนุภาคนิวตรอนที่เปล่งออกมามีจำนวนเท่ากันทุกครั้งที่เกิดฟิชชัน ผลบวกของมวลของแฟรกเมนต์ทั้งสองจะมีค่าเท่ากันทุกครั้งที่เกิดฟิชชันด้วย นั่นคือ

$$M_1 = K\left(\frac{E_2}{E_1 + E_2}\right) \qquad (2.4)$$

โดยที่ k เป็นค่าคงที่สำหรับนิวเคลียสหนักที่จะเกิดฟิชชันชนิดหนึ่ง ๆ

สมการที่ (2.4) นี้เป็นสมการที่นำไปสู่การสร้างอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ พลังงานจลน์ของแฟรกเมนต์ทั้งสองจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้หัววัดฟิชชันแฟรกเมนต์แบบวติผิวซิลิกอน (Silicon surface barrier detector) แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ สัญญาณไฟฟ้านี้จะผ่านไปสู่ภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์เพื่อทำให้สัญญาณคาย

(Output signal) เป็นไปตามสมการที่ (2.4) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าเป็นปฏิภาคโดยตรงกับมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์

2.2 <u>การแจกแจงพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์</u>

พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาฟิชชันแต่ละครั้งมีค่าประมาณ 200 เมกะอิเลกตรอนโวลท์[1] พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาแต่ละครั้งนี้คือผลบวกของพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ พลังงานจลน์ของอนุภาคนิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมา พลังงานของรังสีแกมมาและพลังงานทั้งหมดของขบวนการในการสลายตัวอื่น ๆ สำหรับปฏิกิริยาฟิชชันของยูเรเนียม-235 ซึ่งถูกระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำ พลังงานจลน์ทั้งหมดของฟิชชันแฟรกเมนต์มีค่า 167 เมกะอิเลกตรอนโวลท์ ความไม่แน่นอนของตัวเลขนี้มีค่าประมาณ 5 เมกะอิเลกตรอนโวลท์ ค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของอนุภาคนิวตรอนเท่ากับผลคูณของจำนวนอนุภาคนิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมาในแต่ละครั้งของการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันกับค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของอนุภาคนิวตรอน คือ 2.5 x 2.0 = 5 เมกะอิเลกตรอนโวลท์ พลังงานของรังสีแกมมา มีค่าอยู่ในช่วง 5 ถึง 8 เมกะอิเลกตรอนโวลท์ ค่าเฉลี่ยของพลังงานของขบวนการแผ่รังสีอื่น ๆ เท่ากับ 21 ± 3 เมกะอิเลกตรอนโวลท์

สำหรับคาลิฟอร์เนียม - 252 ซึ่งเป็นนิวเคลียสซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้เองโดยธรรมชาติ พบว่าพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของแฟรกเมนต์ที่มีมวลเบาและหนักซึ่งมีพลังงานจลน์ส่วนใหญ่ที่น่าจะเป็นไปได้ (Most probable energies) เป็น 104.7 ± 1 และ 79.8 ± 1 เมกะอิเลกตรอนโวลท์ ตามลำดับ และพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ประมาณ 50 ถึง 124 เมกะอิเลกตรอนโวลท์[2] รูปที่ 2.2 เป็นกราฟการแจกแจงพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์อันเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของคาลิฟอร์เนียม - 252 โดยวิธีวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ (Time of flight method) ของฟิชชันแฟรกเมนต์ รูปที่ 2.3 แสดงกราฟการแจกแจง

พลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์เมื่อใช้คาลิฟอร์เนียม-252 ที่บางมาก ๆ (**Infinitely Thin**) เป็นแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์และใช้เครื่องตรวจวัดอย่างดี พารามิเตอร์ (**Parameter**) ต่าง ๆ ของกราฟซึ่งเป็นที่ยอมรับจะต้องมีค่าดังนี้[3]

1. $\frac{N_L}{N_V} > 2.85$

2. $\frac{N_H}{N_V} \simeq 2.2$

3. $\frac{N_L}{N_H} \simeq 1.30$

4. $\frac{L}{(L-H)} < 0.38$

5. $\frac{H}{(L-H)} \lesssim 0.45$

6. $\frac{(H-HS)}{(L-H)} < 0.70$

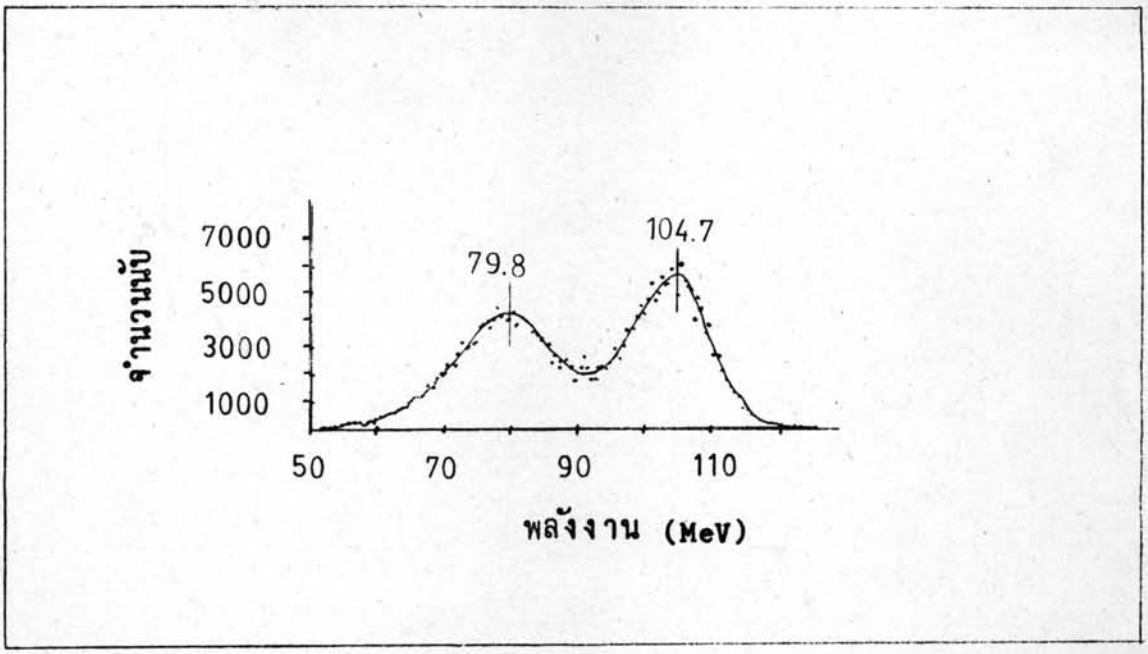
7. $\frac{(LS-L)}{(L-H)} \lesssim 0.49$

8. $\frac{(LS-HS)}{(L-H)} \lesssim 2.18$

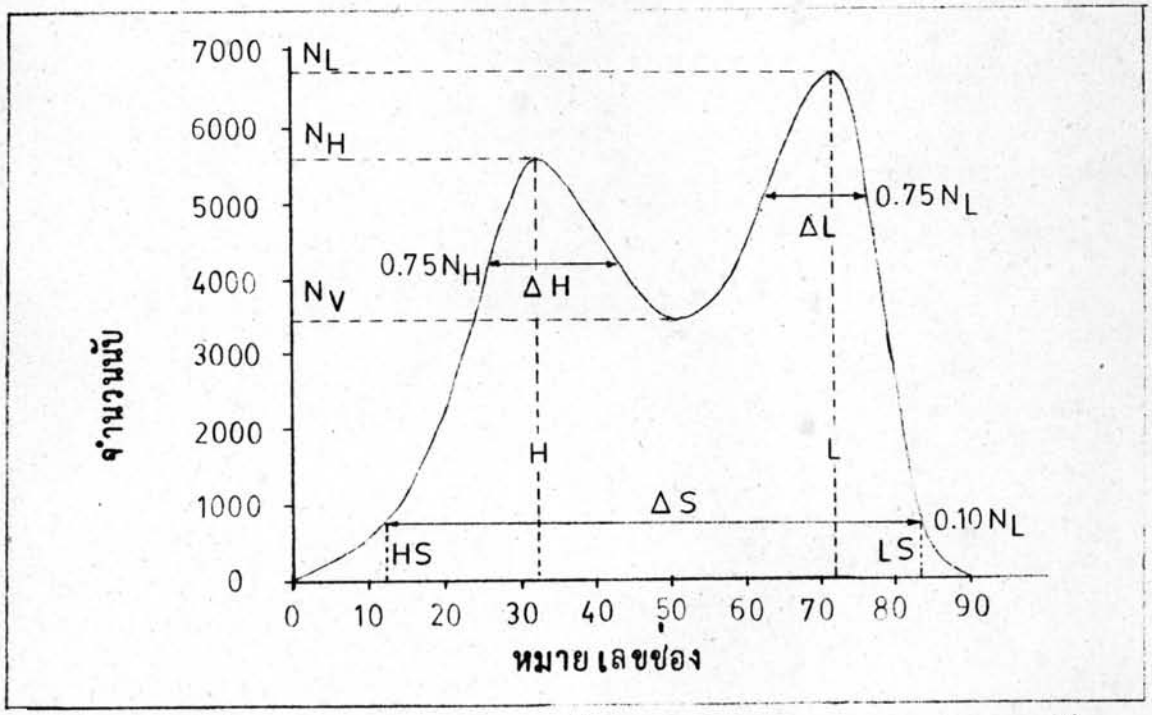
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่

N_L = จำนวนนับ ณ ตำแหน่งยอด (**Peak**) ของกลุ่มฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีมวลเบา



รูปที่ 2.2 แสดงสเปคตรัมพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของคาลิฟอร์เนียม-252



รูปที่ 2.3 แสดงพารามิเตอร์ของสเปคตรัมของฟิชชันแฟรกเมนต์ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของศาลิฟอร์เนียม-252

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

N_H = จำนวนนับ ณ ตำแหน่งยอดของกลุ่มของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีมวลหนัก

N_V = จำนวนนับ ณ ตำแหน่งต่ำสุดซึ่งอยู่ระหว่างยอดของกลุ่มฟิชชันแฟรกเมนต์ ที่มีมวลเบาและหนัก

ΔL = ความกว้างของกลุ่มของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีมวลเบา ณ $3/4\ N_L$

ΔH = ความกว้างของกลุ่มของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีมวลหนัก ณ $3/4\ N_H$

L = หมายเลขช่อง (**Channel number**) ของยอดของกลุ่มของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีมวลเบา

H = หมายเลขช่องของยอดของกลุ่มของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่มีมวลหนัก

LS = หมายเลขช่องซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ ΔS ตัดกับส่วนบนของสเปคตรัมของฟิชชันแฟรกเมนต์

HS = หมายเลขช่องซึ่งตรงกับตำแหน่งที่ ΔS ตัดกับส่วนล่างของสเปคตรัมของฟิชชันแฟรกเมนต์

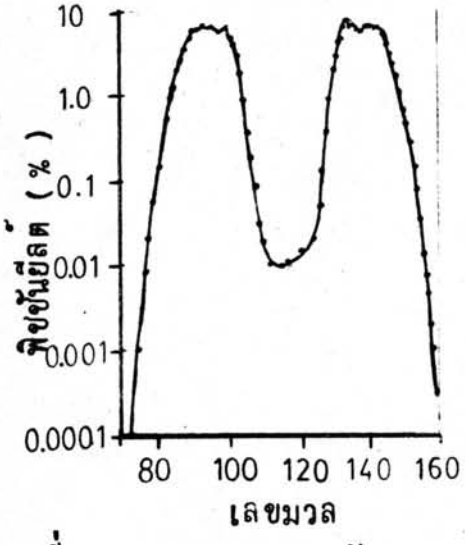
ΔS = ความกว้างของสเปคตรัมทั้งหมด ณ $1/10\ N_L$

2.3 การแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์

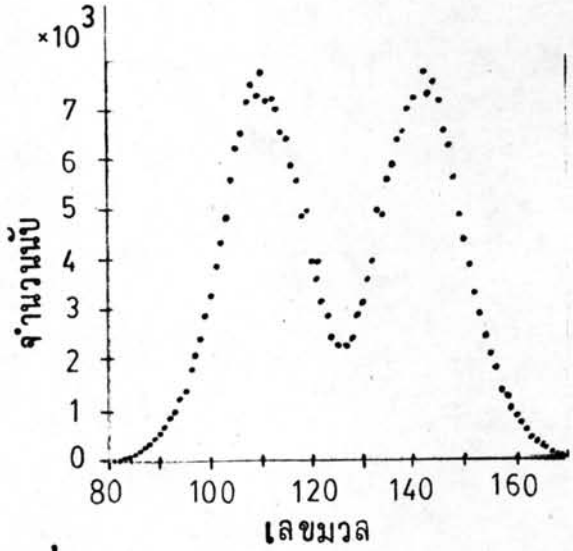
จากการสำรวจฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันของยูเรเนียม-235[1] พบว่าฟิชชันแฟรกเมนต์มีเลขมวลอยู่ในช่วงตั้งแต่ 72 (อาจจะเป็นไอโซโทบของธาตุสังกะสีซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 30) ถึง 158 (อาจจะเป็นไอโซโทบของธาตุยูโรเปียมซึ่งมีเลขอะตอมเท่ากับ 63) ประมาณ 97 เปอร์เซนต์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ทั้งหมด แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของฟิชชันแฟรกเมนต์เบา ซึ่งมีมวลตั้งแต่ 85 ถึง 104 และกลุ่มของฟิชชันแฟรกเมนต์หนักซึ่งมีมวลตั้งแต่ 130 ถึง 149 ฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดมากที่สุดมีประมาณ 7 เปอร์เซนต์ของฟิชชัน

แฟรกเมนต์ทั้งหมด ฟิชชันแฟรกเมนต์ที่เกิดมากที่สุดนี้มีเลขมวลเท่ากับ 95 และ 139 รูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ซึ่งเกิดจากการระดมยิงอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำไปยังนิวเคลียสของธาตุยูเรเนียม-235 ปฏิกิริยาฟิชชันซึ่งเกิดจากการระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำเป็นขบวนการอสมมาตร (Asymmetry) อันหมายถึงขบวนการฟิชชันที่ทำให้นิวเคลียสแตกออกเป็น 2 นิวเคลียสที่มีมวลไม่เท่ากัน เมื่อพลังงานของอนุภาคนิวตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น โอกาสที่จะเกิดขบวนการฟิชชันแบบสมมาตร (Symmetry) จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับปฏิกิริยาฟิชชันของยูเรเนียม-235 ซึ่งถูกระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนพลังงาน 14 เมกะอิเลกตรอนโวลท์ โอกาสในการแตกออกเป็น 2 นิวเคลียสที่มีมวลเท่ากันมีค่าเป็น 100 เท่า ของปฏิกิริยาฟิชชันเมื่อถูกระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำ

รูปที่ 2.5 เป็นกราฟแสดงการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ของคาลิฟอร์เนียม-252 ซึ่งใช้หัววัดแบบบวติผิวซิลิกอน[2] โดยทั่ว ๆ ไปแล้วการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์อันเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะมีลักษณะเช่นเดียวกับการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์อันเกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันโดยการระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน



รูปที่ 2.4 แสดงสเปคตรัมมวลของ U-235 เมื่อถูกระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำ



รูปที่ 2.5 แสดงสเปคตรัมมวลของ $Cf-252$

2.4 วิธีการวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์โดยสังเขป

การวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์สามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีใหญ่ ๆ ดังนี้

2.4.1 วิธีการทางเคมีรังสี[1] (**Radiochemical method**) เมื่อเกิดปฏิกิริยาฟิชชันจะมีฟิชชันแฟรกเมนต์ชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมาย ฟิชชันแฟรกเมนต์เหล่านี้เป็นธาตุกัมมันตรังสีและมีจำนวนน้อยมาก (ประมาณ 10^{-12} กรัม) การแยกธาตุกัมมันตรังสีซึ่งมีจำนวนน้อยมากเช่นนี้ไม่สามารถกระทำได้โดยใช้วิธีการทางเคมีธรรมดา วิธีการที่จะแยกธาตุกัมมันตรังสีออกจากธาตุอกัมมันตรังสีสามารถกระทำได้โดยการเติมสารพาหะ (**Carrier substance**) ลงในสารละลายที่มีธาตุกัมมันตรังสีที่ต้องการแยกอยู่ สารพาหะเป็นสารที่เสถียร (Stable) และมีสมบัติทางเคมีคล้ายกับธาตุกัมมันตรังสีที่ต้องการแยกนั้น โดยปกติสารพาหะและธาตุกัมมันตรังสีจะอยู่ในกลุ่มย่อย (**Subgroup**) เดียวกันของตารางธาตุ เมื่อเติมสารพาหะจำนวนพอเหมาะ (ประมาณ 10 ถึง 100 มิลลิกรัม) ลงในสารละลาย สารพาหะจะตกตะกอนในรูปของเกลือและจะทำให้ธาตุกัมมันตรังสีที่ต้องการแยกตกตะกอนตามลงมาด้วย ต่อจากนั้นสารพาหะและธาตุกัมมันตรังสีจะถูกนำไปแยกออกจากกันโดยวิธีการทางเคมีอื่น ๆ ต่อไป เมื่อได้ธาตุกัมมันตรังสีบริสุทธิ์แล้วก็จะนำไปทำการวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดและจำนวนของไอโซโทปชนิดนั้น ๆ โดยการวัดกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้น จากข้อมูลต่าง ๆ นี้ทำให้สามารถคำนวณฟิชชันยีลด์ได้ แต่มีข้อสังเกตว่าฟิชชันยีลด์ที่ได้โดยวิธีนี้เป็นยีลด์สะสม (**Cumulative yield**) ของไอโซโทปหนึ่งซึ่งรวมกับไอโซโทปที่มีการสลายตัวก่อนที่จะมาเป็นไอโซโทปนี้เนื่องจากช่วงเวลานับตั้งแต่เกิดปฏิกิริยาฟิชชันจนถึงเสร็จสิ้นการแยกธาตุกัมมันตรังสีมีค่ามาก

2.4.2 วิธีวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์โดยการวัดเวลาในการเคลื่อนที่ของฟิชชันแฟรกเมนต์[2] การวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของฟิชชันแฟรกเมนต์ กระทำได้โดยการวัดเวลาที่ฟิชชันแฟรกเมนต์ใช้ในการเคลื่อนที่ในระยะทางคงที่อันหนึ่งซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของ

ฟิชชันแฟรกเมนต์นั้นได้ ในการวิจัยจะต้องให้ฟิชชันแฟรกเมนต์เคลื่อนที่ในห้องสูญญากาศ เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันระหว่างฟิชชันแฟรกเมนต์กับโมเลกุลของอากาศ ซึ่งจะทำให้ฟิชชันแฟรกเมนต์สูญเสียอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไป ภายในห้องสูญญากาศประกอบด้วยแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์และหัววัดฟิชชันแฟรกเมนต์ 2 อันวางอยู่คนละด้านของแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์โดยมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์ไม่เท่ากัน หัววัดอันหนึ่งจะอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์มาก (ประมาณ 1 เซนติเมตร) สัญญาณไฟฟ้าซึ่งเกิดจากหัววัดนี้ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการนับเวลา ส่วนหัววัดอีกอันหนึ่งวางห่างจากแหล่งกำเนิดมาก (ประมาณ 300 ถึง 400 เซนติเมตร) สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากหัววัดนี้ถือว่าเป็นการสิ้นสุดของการนับเวลา สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากหัววัดทั้งสองจะปรากฏบนจอของออสซิลโลสโคบและถูกบันทึกไว้ซึ่งจะทำให้ทราบเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และสามารถคำนวณอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของฟิชชันแฟรกเมนต์นั้นได้ เมื่อนำอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของฟิชชันแฟรกเมนต์ต่าง ๆ ไปเขียนกราฟก็จะได้กราฟการแจกแจงอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของฟิชชันแฟรกเมนต์ โดยอาศัยกฎการอนุรักษ์มวลและโม-เมนตัมทำให้สามารถคำนวณมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ได้ การหามวลของฟิชชันแฟรกเมนต์โดยวิธีนี้เป็นวิธีที่ดีกว่าวิธีทางเคมีรังสีมาก เนื่องจากมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ที่ได้เป็นของแฟรกเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันทันทีทันใด

2.4.3 วิธีวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์โดยการวัดพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ การวัดพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์สามารถกระทำได้โดยการใช้หัววัดซึ่งผลิตจากสารกึ่งตัวนำเช่น ซิลิกอนหรือเยอรมันเนียม หัววัดแบบนี้มีขนาดกระทัดรัดและมีประสิทธิภาพสูง หัววัด 2 อันจะวางอยู่คนละด้านของแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์โดยมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์เท่า ๆ กัน ทั้งหัววัดและแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์จะวางอยู่ภายในห้องสูญญากาศ เมื่อฟิชชันแฟรกเมนต์วิ่งไปชนหัววัดจะมีสัญญาณไฟฟ้าเกิดขึ้น แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ เมื่อสัญญาณ

ไฟฟ้าเหล่านี้ผ่านเครื่องขยาย (Amplifier) และเครื่องวิเคราะห์สัญญาณก็จะได้กราฟการแจกแจงพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ โดยอาศัยกฎการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม หรือโดยการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์จะทำให้ได้กราฟการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์

สำหรับในการวิจัยนี้วิธีการวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์มีลักษณะคล้ายกับวิธีที่ 2.4.3 มาก สัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์และเกิดจากหัววัดแบบวติผิวซิลิกอน 2 อันจะผ่านเข้าสู่เครื่องขยายและผ่านเข้าสู่อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์เพื่อทำการคำนวณมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ และเมื่อผ่านสัญญาณคายจากอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์เข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณก็จะได้กราฟการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์