

231-501
1550
43

ภาคตัดขวาง เชิงอนุพันธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ณ 0.344 และ 1.408 MeV

ของรังสีแกมมาจากยูโรเพียม-152 โดยตะกั่ว

ปริญญานิพนธ์

ของ

กัมกิตา รัชฎาบรรณพงษ์

สำนักหอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท 23 พระโขนง กรุงเทพฯ 11 โทร. 3921575, 3915058

27 ก.ค. 2525

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประธานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

ธันวาคม 2524

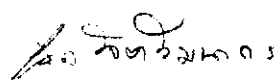
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

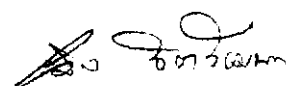
89640

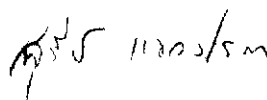
คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิสิตและคณะกรรมการสอบ ได้พิจารณาปัญหานี้
ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

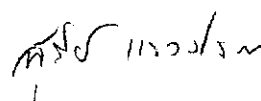
คณะกรรมการที่ปรึกษา

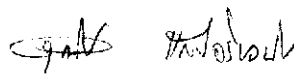
คณะกรรมการสอบ

 ประธาน

 ประธาน

 กรรมการ

 กรรมการ

 กรรมการ

ประกาศขอบคุณการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำอย่างดียิ่ง
จาก อาจารย์ วิมล ศิตวัฒนากร ประธานกรรมการที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยคณบดี อาจารย์
สุริย์ แสงวงโสภณ กรรมการที่ปรึกษา ทั้งยังได้รับความเชื่อถือจากภาควิชาวิศวกรรม
เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ให้ใช้เครื่องมือ และให้คำแนะนำ
ในการทำวิจัย โดยเฉพาะ อาจารย์ นเรศร์ ศังทรียว และ อาจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
นอกจากนี้ยังได้รับความช่วยเหลือในด้านการคำนวณจาก อาจารย์ วิทยา วีระวิทยากุล
ศูนย์บริการคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ กรมอุตุนิยมวิทยาเป็นอย่างดี
ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	ภูมิหลัง	1
	ความมุ่งหมายของการวิจัย	4
	ความสำคัญของการวิจัย	4
	ขอบเขตของการวิจัย	4
	คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ	5
2	ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
	การกระเจิงแบบเรเลย์	8
	การกระเจิงแบบทอมสัน	13
	การกระเจิงแบบเดลบรูก	16
	การกระเจิงแบบอภินาตนิวเคลียร์	18
	ภาคตัดขวาง เฮิงอนุพันธ์	19
3	เครื่องมือและวิธีดำเนินการทดลอง	24
	เครื่องมือ	24
	แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา	24
	เครื่องวัดรังสีแกมมา	29
	ฉากรับ	33
	วิธีดำเนินการทดลอง	34
	สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	39

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ ผลการทดลอง	40
การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี	40
การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทดลองอื่น ๆ	45
5 บทย่อ สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ	49
บทย่อ	49
สรุปผลการวิจัย	50
อภิปรายผลการวิจัย	52
ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	ภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์สำหรับตะกั่ว	21
2	ความเข้มในแต่ละพลังงานของรังสีแกมมาจาก ^{152}Eu	25
3	อัตราส่วนระหว่างพลังงานกับจำนวนช่อง	35
4	ตำแหน่งของการสัดวางเครื่องมือในการวัด	37
5	การเปรียบเทียบค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับทางทฤษฎี	42
6	เปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างระหว่างผลการทดลองนี้กับผลทางทฤษฎี	
	ลอคคอลลิ่ง	44
7	การเปรียบเทียบค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับผลการทดลองอื่น ๆ และแสดง	
	เป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่าง	46
8	การเปรียบเทียบผลการทดลอง $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ของพลังงาน 0.344 กับ 0.279 MeV	
	และ 1.408 กับ 1.33 MeV	47
9	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎีของ BR-FF(D)	
	ที่พลังงาน 1.408 MeV	50

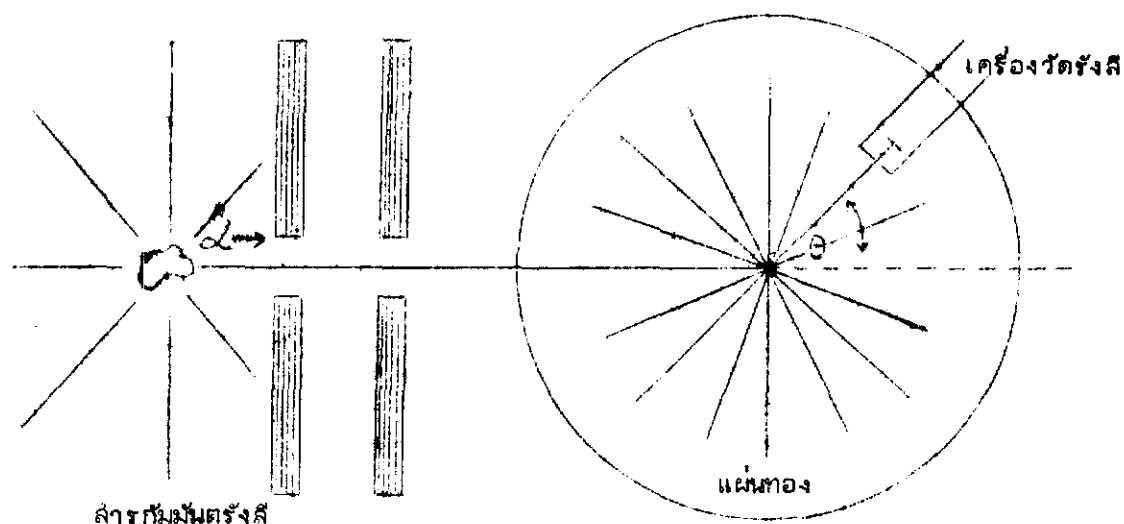
บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1	การกระเจิงของอนุภาค	2
2	ภาคตัดขวางของปฏิกิริยานิวเคลียร์	6
3	กราฟแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจาก ^{152}Eu	26
4	แสดงการปรับแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาให้อยู่ในแนวระดับ	28
5	เครื่องวัดรังสีแกมมาชนิด NaI(Tl)	31
6	วงจรของเครื่องวัดรังสีแกมมาแบบเรียงแสงต่อเข้ากับ MCA.	31
7	กราฟแสดงการหาค่า resolution	32
8	กราฟแสดงเส้นมาตรฐานของพลังงานกับจำนวนช่อง และแสดงตำแหน่งของ พลังงานของ ^{152}Eu 0.344 และ 1.408 MeV	36
9	แสดงการจัดวางอุปกรณ์ทั้งหมด	38
10	การเปรียบเทียบ $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี	43
11	การเปรียบเทียบ $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับผลการทดลองอื่น ๆ	48
12	การเปรียบเทียบ $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ของผลการทดลองนี้กับการคำนวณทางทฤษฎีของ BR-FF(D)	51

ภูมิหลัง

จากความต้องการที่จะศึกษาโครงสร้างภายในอะตอมของธาตุเป็นเหตุให้นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการทดลองค้นคว้า จนพบว่าวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาโครงสร้างภายในของอะตอม (ซึ่งเล็กมากจนไม่ว่าจะสังเกตได้ด้วยอุปกรณ์ใด ๆ) ได้ง่ายและสะดวก ทั้งยังได้ข้อมูลที่ถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงอีกด้วย วิธีการดังกล่าวนี้ก็คือ การกระเจิง (scattering) ของอนุภาคเมื่อวิ่งไปชนนิวเคลียสของธาตุใด ๆ กล่าวคือ เรายิงอนุภาคต่าง ๆ เช่น อัลฟา (α) เบตา (β) นิวตรอน (n) หรือโฟตอน เข้าไปยังนิวเคลียสของฉากกัน เมื่ออนุภาคหรือโฟตอนเหล่านี้ชนกับฉากกันแล้วอนุภาคหรือโฟตอนก็จะบ่ายเบนออกมาในทิศทางต่าง ๆ (โดยการใช้เครื่องวัดรังสีต่าง ๆ ไปวางใกล้ ๆ อนุภาคหรือโฟตอนที่บ่ายเบนก็จะไปเข้า เครื่องวัดซึ่งจะนับจำนวนรังสีที่บ่ายเบนในทิศทางนั้น ๆ) เครื่องวัดที่ใช้มีหลายชนิด เช่น ไกเกอร์-เคาน์เตอร์ คลาวด์-แชมเบอร์ หรือ ซินทิลเลชัน-เคาน์เตอร์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคหรือรังสีที่บ่ายเบนออกมา เพราะเครื่องมือเหล่านี้ออกแบบสร้างให้เหมาะกับการวัดอนุภาคหรือรังสีแต่ละชนิด

จากการทดลองของ ไกเกอร์ และ มาร์สเดน (Geiger and Marsden. 1913 : 604) ทั้งสองได้ศึกษาตามแนวความคิดของรัทเธอร์ฟอร์ด โดยให้อนุภาคอัลฟา (มีพลังงานในหน่วย MeV) จากสารกัมมันตรังสีวิ่งเข้าชนแผ่นทองคำเปลวบาง ๆ ที่มีความหนา 6×10^{-5} เซนติเมตร และโดยการใช้ ซินทิลเลชัน-เคาน์เตอร์ ซึ่งประกอบด้วยฉากที่ฉาบด้วยสารเรืองแสง จะเกิดประกายวาบขึ้นในทันทีที่อนุภาคมารกระทบ โดยสังเกตประกายนี้ได้จากกล้องจุลทรรศน์ กล้องดังกล่าวนี้สามารถปรับตำแหน่งตามเครื่องวัดอนุภาคได้รอบแผ่นทองคำเปลว ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 การกระเจิงของอนุภาค

จากผลการทดลองพบว่า มีอนุภาคอัลฟากระเจิงออกหลายทิศทาง เป็นเหตุให้ทราบถึงโครงสร้างของอะตอมว่า มวลเกือบทั้งหมดของอะตอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ใจกลางมีความหนาแน่นสูง และมีประจุบวก เรียกว่า นิวเคลียส ส่วนอิเล็กตรอนมีประจุลบเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ ในระยะห่างออกมา

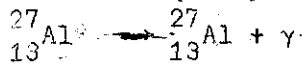
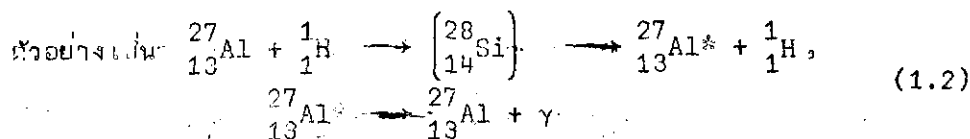
โดยทั่วไปแล้ว เราทราบสมบัติต่าง ๆ ของอนุภาคที่ใช้อย่างได้ เช่น โบรมเมตัม โพลาไรเซชัน หรือพลังงาน ตลอดจนสามารถกำหนดชนิดของนิวเคลียสที่ใช้เป็นฉากกันได้ ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยวิธีการกระเจิงจะสามารถช่วยให้ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคที่เข้าชน และฉากกันที่ถูกต้องได้ (Merzbacher, 1970 : 215)

ลักษณะการกระเจิงแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ

1. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)
2. การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

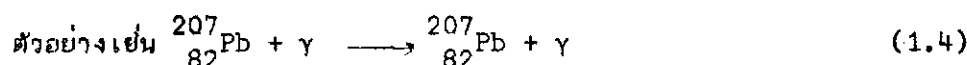
1. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น คือ การกระเจิงที่พลังงานจลน์ทั้งหมดก่อนและหลังปฏิกิริยาไม่เท่ากัน แต่โมเมนตัมเท่าเดิม และนิวเคลียสที่เกิดใหม่อยู่ในสถานะกระตุ้น ดังสมการ

$$x + X \longrightarrow X^* + x \quad (1.1)$$



2. การกระเจิงแบบยืดหยุ่น คือ การกระเจิงที่พลังงานจลน์ทั้งหมดเป็นไปตามหลักการคงตัวของพลังงาน คือ พลังงานจลน์ทั้งหมดก่อนปฏิกิริยาเท่ากับพลังงานจลน์ทั้งหมดของอนุภาคหลังปฏิกิริยานั้น ดังสมการ

$$x + X \longrightarrow X + x \quad (1.3)$$



ในความเป็นจริงแล้วอาจมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ภายในขณะเกิดปฏิกิริยาด้วย แต่ผลที่ออกมาก็ยังมีพลังงานจลน์เท่ากับเมื่อเริ่มต้น

ในการทดลองนี้ เรามุ่งที่จะศึกษาการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมา (elastic scattering of γ -rays) ที่ไปตกกระทบฉากกันทำด้วยตะกั่ว โดยทั่วไปการกระเจิงแบบยืดหยุ่นประกอบด้วยการกระเจิงย่อย ๆ สี่แบบดังนี้

1. การกระเจิงแบบเรเลย์ (Rayleigh scattering)
2. การกระเจิงแบบทอมสัน (Nuclear Thomson scattering)
3. การกระเจิงแบบเดลบรุค (Delbrück scattering)
4. การกระเจิงแบบอนินาทนิวเคลียร์ (Nuclear resonant scattering)

การกระเจิงแบบยืดหยุ่นทั้งสี่แบบนี้พบว่าเกิดอาพันธ์กัน (coherent) ซึ่งเป็นการยากที่จะแยกการกระเจิงแต่ละแบบออกมา (Bernstein and Mann. 1958 : 805) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ จะพิจารณาการกระเจิงแบบยืดหยุ่นในรูปผลรวมของทั้งสี่แบบนี้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาภาคตัดขวางของการกระเจิงเชิงอนุพันธ์ (differential scattering cross-section ; $\frac{d\sigma}{d\Omega}$) แบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมา ที่พลังงาน 0.344 MeV และ 1.408 MeV ณ มุมกระเจิงระหว่าง $15^\circ - 60^\circ$ ซึ่งเราแบ่งออกเป็นตำแหน่งดังนี้ 15° , 30° , 45° และ 60° โดยใช้ตะกั่วเป็นฉากกัน
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองหาค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ โดยวิธีคำนวณพื้นที่ภายใต้ยอดกราฟ (peak) กับผลการทดลองอื่น และผลจากทฤษฎี

ความสำคัญของการวิจัย

1. ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในการทำการศึกษาทดลองการกระเจิงแบบยืดหยุ่นโดยใช้รังสีแกมมาที่พลังงานแตกต่างกันออกไป และที่มุมกระเจิงต่าง ๆ กัน
2. เพื่อเป็นแนวทางสนับสนุนหรือเสนอแนะทฤษฎีต่าง ๆ ว่าน่าเชื่อถือ มีเหตุผล และควรเป็นที่ยอมรับได้หรือไม่เพียงใด
3. เพื่อเป็นแนวทางเสนอแนะเทคนิคต่าง ๆ ในการจัดการทดลองแบบนี้ในระดับอุดมศึกษา

ขอบเขตของการวิจัย

1. การทดลองครั้งนี้มุ่งที่จะศึกษาการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาที่พลังงาน 0.344 MeV และ 1.408 MeV โดยใช้ตะกั่วที่มีความหนา 0.33 เซนติเมตร เป็นฉากกันที่มุมกระเจิง 15° , 30° , 45° และ 60°
2. ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ คือ ยูโรเพียม (Europium; $^{152}_{63}\text{Eu}$) ขนาด 0.677 curie
3. ศึกษาและวัดรังสีแกมมาด้วยเครื่องวัด NaI(Tl)(Sodium Iodine) ขนาด $1'' \times 1''$
4. ทำการทดลองที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ แผนกนิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

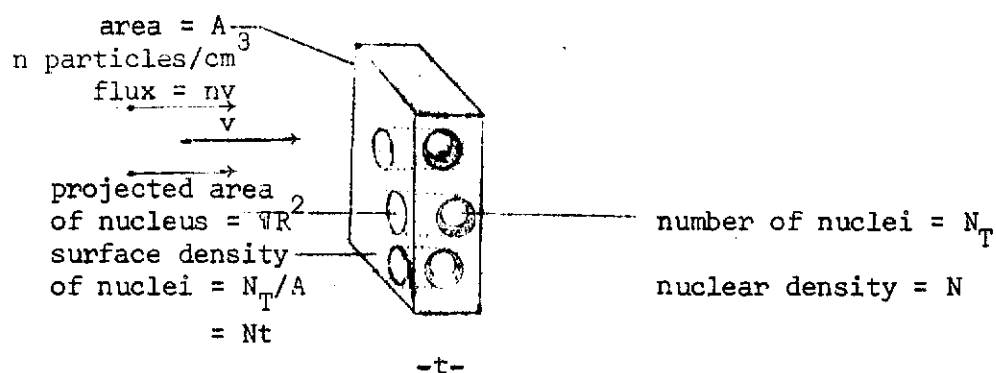
คำจำกัดความและศัพท์เฉพาะ

1. การกระเจิง (scattering) คือ การที่อนุภาคหรือรังสีวิ่งไปชนกับฉากกั้น แล้วมีอนุภาคหรือรังสีที่เหมือนหรือแตกต่างกันวิ่งเปี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม (Marzbacher, 1970 : 215)
2. การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) คือ การกระเจิงที่พลังงานจลน์ทั้งหมดก่อนและหลังปฏิกิริยาไม่เท่ากัน แต่โมเมนตัมเท่าเดิม และนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่จะอยู่ในสถานะกระตุ้น การกระเจิงแบบนี้ส่วนมากจะเกิดกับวัตถุหนัก (มีเลขมวลมาก) (The International Dictionary of Physics and Electronics, 1959 : 156)
3. การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) คือ การกระเจิงที่พลังงานจลน์ทั้งหมด ของทั้งก่อนและหลังปฏิกิริยาจะต้องคงเดิม และนิวเคลียสที่เกิดขึ้นใหม่จะต้องอยู่ในสถานะปกติ (The International Dictionary of Physics and Electronics, 1959 : 156)
4. มุมกระเจิง (scattering angle) คือ มุมในการกระเจิงของอนุภาคหรือรังสี ที่สะท้อนไปจากแนวตกกระทบเดิม (The International Dictionary of Physics and Electronics, 1959 : 802)
5. การกระเจิงอาพันธ์ (scattering coherent) คือ การกระเจิงของอนุภาคที่มีการแทรกสอดตามธรรมชาติระหว่างคลื่นกระเจิงสองคลื่นหักล้างหรือมากกว่าได้ ตัวอย่างเช่น การกระเจิงแบบเบรกก์ (Bragg scattering) คือ การกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และของนิวตรอนจากผลึก ซึ่งมีการแทรกสอดแบบเสริมสร้างที่มุมเล็ก ๆ เรียกว่า มุมเบรกก์ (Bragg angles) (The International Dictionary of Physics and Electronics, 1959 : 803)
6. ภาคตัดขวาง (cross section; σ) ค่าภาคตัดขวางในความหมายง่าย ๆ หมายถึง พื้นที่ภาคตัดขวางหรือพื้นที่ของฉากกั้นที่ถูกชนโดยรังสีแกมมา ค่าภาคตัดขวางนี้ขึ้นอยู่กับ

พลังงานของรังสีแกมมา ถ้านิวเคลียสแทนด้วยทรงกลมที่มีรัศมี R และอนุภาคที่ตกกระทบแทนตำแหน่งที่อิง (point projectiles) ดังนั้น พื้นที่ของฉากกันหรือค่าภาคตัดขวางของนิวเคลียสจะเป็นดังสมการ

$$\sigma = \pi R^2 \quad (\text{ซม.})^2 \quad (1.5)$$

อนุภาคตกกระทบในแนวตั้งฉากผ่านฉากกันบาง ๆ พื้นที่ A มีจำนวนนิวเคลียสทั้งหมด N_T ความน่าจะเป็นของอนุภาคที่ชนกับนิวเคลียส = $N_T \sigma / A$ (ดังภาพประกอบ 2)



ภาพประกอบ 2 ภาคตัดขวางของปฏิกิริยานิวเคลียร์

ปริมาณ N_T/A คือ จำนวนของนิวเคลียสต่อพื้นที่ หรือเรียกว่าความหนาแน่นบนพื้นผิวของนิวเคลียส (surface density of nuclei) ซึ่ง $N_T/A = Nt$

เมื่อ N คือ จำนวนนิวเคลียสต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

t คือ ความหนาของฉากกัน

รังสีตกกระทบฉากกันเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในอัตรา n อนุภาคต่อปริมาตร ฉะนั้น

$$\text{จำนวนอนุภาคที่ผ่านฉากกัน} = nv \text{ อนุภาค/}(\text{ซม.})^2\text{-วินาที} \quad (1.6)$$

nv นี้อาจเรียกว่าฟลักซ์ของอนุภาค (particle flux) ทำให้ได้อัตราของการชน

มีค่าดังนี้

$$\text{จำนวนครั้งที่ชน/ (ซม.)}^2 \cdot \text{วินาที} = \frac{nvN_T\sigma}{A} = nv\sigma Nt \quad (1.7)$$

และค่าภาคตัดขวางของการชน คือ σ จะมีค่าดังสมการ

$$\sigma = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ชน/ (ซม.)}^2 \cdot \text{วินาที}}{nvNt} \quad (1.8)$$

สมการ (1.8) แสดงค่าภาคตัดขวางของการชน คือ จำนวนครั้งที่ชนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อวินาที สำหรับหนึ่งหน่วยฟลักซ์ตกกระทบ และหนึ่งหน่วยความหนาแน่นนิวเคลียร์ (Hughes. 1953 : unpagged)

7. แอมพลิจูดของการกระเจิง (scattering amplitude)

คือ แอมพลิจูดของคลื่นที่เกิดจากการกระเจิงแล้ว ยกตัวอย่างเช่น

ถ้า e^{ikz} คือ คลื่นระนาบที่ตกกระทบ มี k เป็นเลขคลื่น (wave number)

ดังนั้น $\frac{Ae^{ikr}}{r}$ จะแทนคลื่นกระเจิง (scattering wave) ระยะทาง r จาก

ศูนย์กลางของการกระเจิง

โดยที่ A คือ แอมพลิจูดของการกระเจิง (The International Dictionary of Physics and Electronics. 1959 : 802)

ทฤษฎีและ เอกสารการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกระเจิงแบบยืดหยุ่น คือ การกระเจิงที่พลังงานจลน์ทั้งหมดเป็นไปตามหลักการคงตัวของพลังงาน คือพลังงานจลน์ของอนุภาคทั้งหมด ก่อนและหลังปฏิกิริยาเท่ากัน การกระเจิงแบบยืดหยุ่นนี้ แบ่งออกเป็นสี่แบบ คือ

1. การกระเจิงแบบเรเลย์ (Rayleigh scattering or scattering by bound electron)
2. การกระเจิงแบบทอมสัน (Nuclear Thomson scattering or scattering by nuclear charge)
3. การกระเจิงแบบเดลบรุค (Delbruck scattering or scattering by a nuclear coulomb field)
4. การกระเจิงแบบอินทราทิวเคสียร์ (Nuclear resonant scattering)

การกระเจิงแบบเรเลย์ (Rayleigh scattering)

การกระเจิงแบบเรเลย์ บางทีเรียกว่าการกระเจิงของอิเล็กตรอนอินทรา (electron resonance scattering) คือ โฟตอนที่ตกกระทบบนถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนซึ่งถูกยึดเหนี่ยว (bound electron) อยู่ในอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนมีระดับพลังงานสูงขึ้น และอยู่ในสถานะกระตุ้นซึ่งคายโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับโฟตอนที่ตกกระทบบน และกลับสู่สถานะปกติตามเดิม (Roy and Reed. 1968 : 240) เราสามารถแยกขบวนการในการกระเจิงนี้ออกได้สองตอนดังนี้ คือ

1. ขบวนการดูดกลืน เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอมดูดกลืนโฟตอนที่ตกกระทบบนเข้าไป ผลทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะกระตุ้น
2. ขบวนการคาย ในขณะที่เดียวกันกับที่โฟตอนซึ่งมีขนาดพลังงานเท่ากับพลังงานตกกระทบบนถูกคายออกมาและอิเล็กตรอนก็กลับเข้าสู่สถานะปกติ

การกระเจิงแบบเรเลย์จะมีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดขึ้นสูงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานอยู่ในช่วงต่ำกว่า 1 MeV. และมีมุมกระเจิงเล็ก ๆ (Roy and Reed. 1968 : 240) และการกระเจิงแบบเรเลย์เกิดอาพันธ์กับการกระเจิงแบบทอมสัน แต่การกระเจิงแบบเรเลย์จะเด่นชัดมากกว่าการกระเจิงแบบทอมสันมาก

การคำนวณค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ของรังสีแกมมาในช่วงมุมเล็ก ๆ ($\theta < 1.5^\circ$) ฟรานส์ (Franz. 1935 : 652; 1936 : 314) ได้ใช้หลักการประมาณของ ทอมสัน และ เฟอร์มี (Thomson and Fermi approximation) คำนวณหาค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบเรเลย์ (Rayleigh scattering cross-section; $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$) ของอิเล็กตรอน ภายใต้อะตอม ดังสมการ

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R = 8.67 \times 10^{-33} \left(\frac{E_0 Z}{h\nu}\right)^2 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2 \sin^3 \left[\frac{\theta}{2}\right]} \frac{\text{cm}^2}{\text{Sr.}} \quad \dots (2.1)$$

เมื่อ E_0 คือ พลังงานหยุดนิ่งของอิเล็กตรอน

$h\nu$ คือ พลังงานของโฟตอน

θ คือ มุมกระเจิง

Z คือ เลขอะตอม

มีหลายทฤษฎีที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบเรเลย์ส่วนใหญ่ได้มาจากอิเล็กตรอนชั้นในสุด คือ ชั้น K (Greiffinger, Levinger and Rohrlich. 1952 : 663) เป็นอันดับแรกแล้วตามด้วยชั้น L, M, N ตามลำดับ โดยทั่วไปการคำนวณ $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$ จะคำนวณได้จากอิเล็กตรอนในชั้น K และ L สำหรับ M, N, ... ซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์ของความสำคัญน้อยลงไปตามลำดับ

จากการทดลองหาค่า $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$ โดยใช้ บอร์นเอกซ์แพนชัน ในทรานสิชัน แมทริกซ์ (Born expansion in transition matrix) นั้น บราวน์ พิเออร์ลส์ และ วูดเวิร์ด (Brown, Peierls and Woodward. 1954 : 51) บราวน์ และ เมเบอร์ลีย์

(Brown and Mayers. 1956 : 387; 1957 : 89) ต่างพบเห็นเดียวกันว่า สำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 0.32, 0.64, 1.28 และ 2.56 Eo ค่า $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$ แปรผันกับ Z^2 ที่มุมกระเจิงเล็ก ๆ และจะแปรผันกับ Z^3 ที่มุมกระเจิงใหญ่ ๆ ทำให้ทราบความสำคัญของการกระเจิงแบบเรเลย์ว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อใช้ธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ๆ

เนื่องจากการกระเจิงแบบเรเลย์ ทอมสัน และเดลบรูก เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นที่เกิดอาพันธ์กัน ฉะนั้นจึงเป็นการยากที่จะแบ่งแยกการกระเจิงแบบทอมสันและเดลบรูกออกจากการกระเจิงแบบเรเลย์ แม้ว่าการกระเจิงแบบเรเลย์จะเกิดมากกว่าสองแบบแรก และถ้ารังสีแกมมามีพลังงาน ≈ 1 MeV แล้วจะปรากฏว่าการกระเจิงแบบคอมพัตัน ซึ่งเป็นการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดสูง (Roy and Reed. 1968 : 241) จึงต้องอาศัยเทคนิคทางการคำนวณที่สามารถแยกการกระเจิงแต่ละแบบออกจากกัน เทคนิคการคำนวณอย่างหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การศึกษาภาคตัดขวางในเทอมของแอมพลิจูด โดยไม่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีสัมพันธภาพเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่าการคำนวณแบบฟอร์มแฟกเตอร์ (form factor approximation)

(Franz. 1936 : 314) มีสาระสำคัญพอสรุปได้ดังนี้ คือ

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R \text{ ในเทอมของแอมพลิจูดมีสมการทั่วไปดังนี้}$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R = r_o^2 |A|^2 \quad (2.2)$$

เมื่อ r_o คือ classical electron radius

โดยที่ $r_o = \frac{e^2}{4\pi mc^2} = 2.818 \times 10^{-13} \text{ ซม.}$

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

$|A|$ คือ ขนาดของแอมพลิจูด ซึ่งมีสองแบบ คือ

1. แอมพลิจูดแบบหมุนกลับ (spinflip amplitude; A_{SF}) คือ แอมพลิจูดของการกระเจิงที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของโพลาไรเซชันแบบวง (circular polarization)

2. แอมพลิจูดแบบไม่หมุนกลับ (non spinflip amplitude; A_{NSF}) คือ แอมพลิจูดของการกระเจิงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันแบบวง

$|A|$ มีความสัมพันธ์กับ $|A_{SF}|$ และ $|A_{NSF}|$ ดังสมการ

$$|A| = |A_{SF}| + |A_{NSF}| \quad (2.3)$$

สมการ (2.2) อาจจะเขียนในรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R = r_0^2 \left[|A_{SF}|^2 + |A_{NSF}|^2 \right] \quad (2.4)$$

ค่าของ A_{SF} และ A_{NSF} สามารถหาได้จากสมการ (2.5) ดังนี้

$$\begin{aligned} A_{SF} &= A^R + Z^2 \frac{m}{M} \frac{1}{2} (\cos\theta + 1) \\ A_{NSF} &= A^R + Z^2 \frac{m}{M} \frac{1}{2} (\cos\theta - 1) \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ A^R คือ แอมพลิจูดรวมของการกระเจิงแบบเรเลย์จากชั้น K, L, M, N, ...

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

M คือ มวลของนิวเคลียส

แอมพลิจูดรวมจะมีค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับขนาดของพลังงานรังสีแกมมาที่ใช้ (Brown and Mayers. 1957 : 89) ถ้าเป็นรังสีแกมมา พลังงาน 1.308 MeV ภาคตัดขวางที่คำนวณได้มาจากแอมพลิจูดของ K และ L ประมาณ 95 เปอร์เซนต์ ส่วนในชั้น M, N จะมีเปอร์เซ็นต์ลดลงไปตามลำดับ

โดยอาศัยเทคนิคเกี่ยวกับการวัดซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องนับ เดอเบ และ ฟรานส์ (Debye. 1930 : 348; Franz. 1936 : 314) ได้สนับสนุนผลการคำนวณทางทฤษฎี แล้วสรุปเป็นสมการ ภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบเรเลย์ทั้งหมด (σ_R) ได้ดังนี้

$$\sigma_R = \frac{4\pi e^4 Z^2}{E_0^2} \left(\frac{\lambda}{b}\right)^2 \int_0^{\frac{b}{\lambda}} \left(\frac{A}{Z}\right)^2 u du \quad (2.6)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีแกมมา

b คือ ระยะทางที่รังสีแกมมาห่างจากแนวแกนของนิวเคลียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ $5.9 \times 10^{-8} Z^{-\frac{1}{3}}$ cm.

$$u = \frac{b}{\lambda} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

สมการ (2.6) นี้ เดอเบ ได้ศึกษาค่าของ u ในช่วง $0 \leq u \leq 2\pi$ และต่อมา ฟรานส์ ได้ปรับปรุงค่า u ภายใต้เครื่องหมายอินทิเกรต และพบว่าเมื่อ $0.8 - \frac{\pi\lambda}{2b}$ ฉะนั้น เราสามารถเขียนสมการ (2.6) ได้ใหม่ว่า

$$\sigma_R = \frac{4\pi e^4 Z^2}{E_0^2} \left(\frac{\lambda}{b}\right)^2 \left[0.8 - \frac{\pi\lambda}{2b}\right] \quad (2.7)$$

จากการทดลองของ เบลสกี และ สทาโรดubits (Bel'skii and Starodubtev. 1960 : 700) พบว่าในช่วงพลังงานของรังสีแกมมาสูง ≤ 5 MeV จะไม่มีโอกาสที่จะแยกการกระเจิงแบบคอมพ์ตันจากการกระเจิงแบบเรเลย์ได้เลย ด้วยเหตุนี้เมื่อเราจะศึกษาภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบเรเลย์จึงต้องหักลบออกจากภาคตัดขวางของการกระเจิงทั้งหมด และพบว่าได้ผลสอดคล้องกับสมการเดอเบ และ ฟรานส์ สำหรับมุมกระเจิงเล็ก ๆ นั่นคือ ภาคตัดขวางแบบเรเลย์จะแปรผันกับเลขอะตอมของฉากกั้นยกกำลังสอง

จากสมการ (2.1) มูน (Moon. 1950 : 1189) ได้หาค่าของ $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$ ขึ้นอยู่กับ Z^3 สโตรรัสท์ (Storruste. 1950 : 1197) ทดลองใช้รังสีแกมมาพลังงาน

0.411 MeV กระบจากกันทำด้วยตะกั่ว ทองแดง และอลูมิเนียม ในช่วงมุมกระเจิง 3° ถึง 40° เขาพบว่าสำหรับจากกันตะกั่ว และทองแดง ค่า $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$ ที่ได้นั้นนำไปสู่ผลการทำนายทางทฤษฎี แต่ในการศึกษาออลูมิเนียมเป็นจากกันจะไม่พบการกระเจิงแบบเรเลย์เลย กริฟิเตอร์ เล็งเจอร์ และ โรห์ริช (Greiffinger, Levinger and Rohrich. 1952 : 663) ได้ใช้เทคนิคแผนภาพของฟายน์แมน ในการคำนวณแอมพลิจูดของการกระเจิงของรังสีแกมมา พลังงาน 1.33 MeV โดยอิเล็กตรอนจากชั้น K ในจากกันตะกั่วที่มุมกระเจิง 180° และพบว่าขัดแย้งกับการคำนวณแบบฟอร์มแฟกเตอร์ของเบเตย์ (the form factor calculation of Bethe) (Levinger. 1952 : 656)

สโตรรัลท์ และ ทอม (Storruste and Tjom. 1958 : 151) อธิบายว่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ สำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV มีตะกั่วเป็นจากกันที่มุมกระเจิง 1° ถึง 8° ให้ผลสอดคล้องกับวิธีการแจกแจงอิเล็กตรอนของฮาร์ตทรี (Hartree electron distribution) จากนั้น เคนย์ และ ฮอลซ์วาร์ท (Kane and Holzwarth. 1976 : 1579) แสดงให้เห็นว่าการแจกแจงเชิงมุมของรังสีแกมมาพลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV ที่ช่วงมุมกระเจิง 2.43° และ 5.79° มีตะกั่วเป็นจากกัน จะสอดคล้องอย่างสมเหตุสมผลกับผลการทดลองของ สโตรรัลท์ และ ทอม

โจนาห์ และ เชง (Johnson and Cheng. 1976 : 692) ได้คำนวณแอมพลิจูดของการกระเจิงแบบเรเลย์ สำหรับวง K และวงอื่น ๆ โดยใช้รังสีแกมมาพลังงาน 0.1 - 1.0 MeV ใช้ธาตุที่มีเลขอะตอมในช่วง 30 ถึง 82 และช่วงมุมกระเจิง $0 - 150^\circ$ และสรุปว่าการคำนวณของเขาสอดคล้องกับการทดลอง เมื่อใช้รังสีแกมมาพลังงาน 0.279, 0.662 และ 0.889 MeV มีตะกั่วเป็นจากกัน ความแตกต่างระหว่างทฤษฎีกับการทดลองมีวงจาก 5 เปอร์เซ็นต์ที่พลังงาน 0.889 MeV ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ที่พลังงาน 0.279 MeV

การกระเจิงแบบทอมสัน (Nuclear Thomson scattering)

เมื่อรังสีแบบไมโครเวฟไปตกกระทบบนนิวเคลียสของจากกันแล้วประจุไฟฟ้าของ

นิวเคลียสจะแผ่รังสีออกมาทุกทิศทางบนระนาบของการกระเจิงนั้น ทำให้เราสามารถหาสัมภาระของภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ของทอมสัน $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T$ ในเทอมของมุมกระเจิง θ ได้ โดยสมการของ ดิกสัน และ สโตเรีย (Dixon and Storey. 1968 : 1153) ดังนี้ คือ

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T = \left(\frac{Z^2 e^2}{Mc^2}\right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อ Ze คือ ประจุของนิวเคลียส

นำสมการ (2.8) มาเขียนในเทอมของ r_0 ได้สมการใหม่ คือ

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T = Z^4 r_0^2 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2} \quad (2.9)$$

การกระเจิงแบบทอมสันเป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นที่มีการเกิดพร้อมกับการกระเจิงแบบเรเลย์ และการกระเจิงแบบเดลบรุค มูน (Moon. 1950 : 1189) พบว่าการกระเจิงแบบทอมสันมักจะเกิดอาหันธ์กับการกระเจิงแบบเรเลย์ โดย σ จะเกิดจากการกระเจิงแบบเรเลย์เป็นส่วนใหญ่และจากแบบทอมสันเป็นส่วนน้อย ๆ จึงทำให้เป็นการยากในการศึกษาค่าภาคตัดขวางแบบนี้

อย่างไรก็ตาม หากใช้รังสีแกมมาที่มีพลังงานน้อยกว่า 1 MeV จะพบว่า การกระเจิงแบบยืดหยุ่นนั้นจะมี σ ที่เกิดจากการกระเจิงทั้งแบบเรเลย์และทอมสัน หมายความว่า เมื่อใช้รังสีแกมมาพลังงานน้อย ๆ แล้วเราสามารถจะตัดการกระเจิงแบบอนินาทนิวเคลียร์ทิ้งไปได้ ทั้งนี้เพราะ σ ของเดลบรุค และอนินาทนิวเคลียร์มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับ σ ของเรเลย์และทอมสัน

การคำนวณหาค่า $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T$ ในเทอมของแอมพลิจูดจากสมการของฟรานส์ มีค่าดังนี้

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T = r_0^2 \sum_{\text{pol}} |A^T|^2$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T = r_o^2 \sum_{\text{pol}} \left| A_{\parallel}^T \right|^2 + \left| A_{\perp}^T \right|^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ $A_{\parallel}^T$ คือ แอมพลิจูดที่ขนานกับระนาบกระเจิง

$A_{\perp}^T$ คือ แอมพลิจูดที่ตั้งฉากกับระนาบกระเจิง

$$\text{โดยที่ } \left| A^T \right|^2 = \left| A_{\parallel}^T \right|^2 + \left| A_{\perp}^T \right|^2 \quad (2.11)$$

$$\left| A_{\parallel}^T \right| = - \left| Z \frac{2m}{M} \right| (\cos \theta) \quad (2.12)$$

$$\left| A_{\perp}^T \right| = - \left| Z \frac{2m}{M} \right|$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด A_{NSF}^T , A_{SF}^T และแอมพลิจูด $A_{\parallel}^T$, $A_{\perp}^T$ (Hardie, DeVries and Chwan-Kang. 1971 : 1287) มีดังนี้ คือ

$$A_{\text{NSF}}^T = \frac{1}{2} \left(A_{\parallel}^T + A_{\perp}^T \right) \quad (2.13)$$

$$A_{\text{SF}}^T = \frac{1}{2} \left(A_{\parallel}^T - A_{\perp}^T \right)$$

จะเห็น อาจเขียน $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T$ ให้อยู่ในเทอมของแอมพลิจูดในลักษณะแบบหมุนกลับ (A_{SF}^T) และไม่หมุนกลับ (A_{NSF}^T) แล้วดัดแปลงสมการ (2.5) จะได้สมการใหม่ดังนี้ (Dixon and Storey. 1968 : 1153)

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T = r_o^2 \sum_{\text{pol}} \left[\left(1 - \frac{Z^2 m}{M} \right) \left(\frac{\cos \theta - 1}{2} \right) \right]^2 + \left[\frac{-Z^2 m}{M} \left(\frac{\cos \theta + 1}{2} \right) \right]^2 \quad (2.14)$$

ในทางปฏิบัติจะพบว่าเป็นการยากที่จะใช้สมการ (2.14) ในการคำนวณเพราะไม่อาจจะวัดค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบทอมสันได้โดยตรง เพราะเกิดอาฟฟิกับการกระเจิงแบบเรเลย์ และนอกจากนี้ $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_T$ ยังมีค่าน้อย ๆ อีกด้วย

ถ้าใช้รังสีแกมมาพลังงาน 0.41, 2.8 MeV โดยมีตะกั่ว อลูมิเนียม ทองแดง เป็นฉากกัน มูน (Moon, 1950a : 76) ได้แสดงให้เห็นว่ามุมกระเจิง 115° จะเกิดการแทรกสอดระหว่างการกระเจิงแบบเรเลย์และทอมสัน นอกเหนือจากนี้ยังแสดงว่าการมีตะกั่วเป็นฉากก็การกระเจิงแบบทอมสันจะใหญ่กว่า ถ้าใช้รังสีแกมมาพลังงาน 1.33 MeV ที่มุมกระเจิง 40° เดวี (Davey, 1953 : 1059) วัดค่าภาคตัดขวางและพบว่าได้ผลตรงกับทางทฤษฎี (การกระเจิงแบบเรเลย์รวมกับทอมสัน) แต่ถ้ามุมกระเจิง 60° และ 75° ค่าภาคตัดขวางที่วัดได้จะใหญ่กว่าทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามเขาเชื่อว่าค่าภาคตัดขวางที่ได้จากการทดลองสูงเกินไป

จากการทดลองของ อัลวาเรส ครอว์ฟอร์ด และ ลีเวนสัน (Alvarez, Crawford and Stevenson, 1958 : 1267) ใช้รังสีแกมมาพลังงาน 1.6 MeV โดยใช้ลิเทียม (Li), คาร์บอน (C) และอลูมิเนียมที่มีมุมกระเจิง 124° พบว่า สำหรับการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์จำนวนมาก การกระเจิงแบบทอมสันมีอำนาจสูงที่สุด เบิร์นสไตน์ และ มานน์ (Bernstein and Mann, 1958 : 805) ได้ผลโดยใช้รังสีแกมมาพลังงาน 1.33 และ 2.62 MeV มีตะกั่ว ดีบุก และยูเรเนียม (U) เป็นฉากกัน สำหรับมุมกระเจิงในช่วง 15° ถึง 105° การมีรังสีแกมมาพลังงานน้อยกว่า 1 MeV การกระเจิงแบบยืดหยุ่นเกิดจากการกระเจิงแบบเรเลย์ และทอมสันเป็นส่วนใหญ่ สำหรับการกระเจิงแบบเดลบรูดตัดทิ้งได้

การกระเจิงแบบเดลบรูด

เป็นปรากฏการณ์การกระเจิงแบบยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นโดยสนามคูลอมบ์ (coulomb field) หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากนิวเคลียสไปทำให้โฟตอนกระเจิงออกมา จากทฤษฎีของเฟอร์รี (Furry, 1937 : 125) กล่าวว่า การกระเจิงแบบนี้อาจเป็นอันตรกิริยา

ขึ้นที่ช่อง ซึ่งเสมือนเป็นผลผลิตแบบคู่ (pair production) ในสนามนิวเคลียร์คู่ลบ เมื่อพิจารณาให้สนามนิวเคลียร์คู่ลบหยุดนิ่ง และการกระเจิงของโฟตอนเป็นแบบยืดหยุ่น แต่จะมีลักษณะอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับสนามศักย์ของนิวเคลียส

การกระเจิงแบบเดลบรูกจะเกิดในลักษณะอาพันธ์กับการกระเจิงแบบเรเลย์และทอมสัน แม้จะมีการศึกษาการกระเจิงแบบเดลบรูกมานานแล้วก็ไม่อาจจะวัดหรือสังเกตค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบเดลบรูก $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_D$ ได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เพราะว่ามีขนาดน้อย ๆ และขณะเดียวกันค่าภาคตัดขวางของเรเลย์และทอมสัน มีค่ามากกว่าทั้งยังเป็นส่วนเสริมที่สำคัญ (major contribution) ของแอมพลิจูดทั้งหมดด้วย จึงเป็นการยากที่จะแยกการกระเจิงแบบเดลบรูกออกจากการกระเจิงแบบยืดหยุ่นอื่น ๆ เมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าน้อย ๆ (Roy and Reed. 1968 : 246)

จากการทดลองส่วนมากพบว่าเมื่อใช้ช่วงพลังงานสูง ๆ การกระเจิงแบบเดลบรูก จะไม่มีปัญหาในการแยกค่าภาคตัดขวาง เมื่อให้มุมกระเจิงกว้าง ๆ เพราะการกระเจิงแบบเดลบรูกจะมีค่ามากกว่าการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นและยืดหยุ่นอื่น ๆ อย่างชัดเจน และถ้าใช้พลังงานของรังสีแกมมามีขนาดถึง GeV จะสามารถแยกการกระเจิงแบบเดลบรูกออกจากการกระเจิงแบบคอมพตันได้ เพราะการกระเจิงแบบเดลบรูกจะมีค่าเหนือการกระเจิงแบบคอมพตันมาก

จากการทดลองวัดค่า $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_D$ ของ วิลสัน (Wilson. 1953 : 720) ที่มุมแปรเปลี่ยนจาก 45° ถึง 135° โดยใช้รังสีแกมมาพลังงาน 1.33 และ 2.6 MeV กับจากกันหลาย ๆ ชนิด พบว่าผลรวมของการกระเจิงแบบเรเลย์และทอมสันมีค่าน้อยกว่า การทำนายทางทฤษฎี วิลสันจึงคาดว่า การกระเจิงแบบเดลบรูกอาจจะต่างเฟสกับการกระเจิงแบบเรเลย์และทอมสัน เป็นเหตุให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง และลดทอนค่าภาคตัดขวางนี้ กรณีที่รังสีแกมมาพลังงาน 1.17 MeV และจากกันเป็นตะกั่ว ตุ๊ก (Cook. 1955 : 1170) ได้ผลที่ยืนยันให้เห็นว่าการกระเจิงแบบเดลบรูกมีเฟสตรงข้ามกับการกระเจิงแบบเรเลย์และทอมสัน ยิ่งกว่านั้นการวัดของเบอร์นสไตน์ และ มานน์ (Bernstein and Mann. 1958 : 805) ยืนยันว่าที่มุม 0° การกระเจิงแบบเดลบรูกของรังสีแกมมาพลังงาน < 1 MeV สามารถตัดทิ้งได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การกระเจิงแบบเรเลย์

เบธ และ โรห์ลิช (Bethe and Rohrlich, 1951 : 10) แลตตันดิง และ โจวานโนวิช (Standing and Jovanovich, 1962 : 622) วัดค่าภาคตัดขวาง ระหว่างมุม 12° และ 150° สำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 1.33 MeV ตะกั่วเป็นฉากกัน เขา ไม่พบการกระเจิงแบบเดลบรูคปรากฏอยู่เลย

และในการทดลองนี้จะใช้รังสีแกมมาพลังงาน 0.344 และ 1.408 MeV ดังนั้น ค่าภาคตัดขวางของเดลบรูคก็จะมีเปอร์เซ็นต์น้อยมากในการหาค่าภาคตัดขวาง จึงไม่น่า พิจารณาในการคำนวณ

การกระเจิงแบบอนินาตนิวเคลียร์ (Nuclear resonant scattering)

เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นโดยนิวเคลียสดูดกลืนพลังงานเข้าไปทำให้ระดับ พลังงานของนิวเคลียสสูงขึ้นจากสถานะปกติกลายเป็นสถานะกระตุ้น แล้วนิวเคลียสต้องพยายาม ปรับให้กลับสู่สถานะปกติอีก ดังนั้น นิวเคลียสที่อยู่ในสถานะกระตุ้นนี้จะคายโฟตอน หรือรังสี แกมมาออกมาเพื่อกลับสู่สถานะปกติ โฟตอนที่คายออกมาจากนิวเคลียสนี้ เรียกว่า พลังงานอนินาต (resonant energy) การกระเจิงแบบอนินาตนิวเคลียร์นี้สามารถ แยกออกเป็นสองกรณี คือ

1. พลังงานของโฟตอนเข้าใกล้พลังงานอนินาตนิวเคลียร์ (photon energy near nuclear resonant energy) จะเกิดขึ้นในช่วงพลังงานต่ำ และเป็นการกระเจิง ที่สังเกตเห็นได้ยาก ทั้งนี้เพราะโอกาสที่จะทำให้พลังงานของโฟตอนเหมาะที่จะไปทำให้นิวเคลียส ไปสู่สถานะกระตุ้นและกลับสู่สถานะปกติอีก การกระเจิงนี้เกิดอาพันธ์กับการกระเจิงแบบเรเลย์ โดยทั่วไปการกระเจิงแบบยืดหยุ่นทั้งหมดนั้นประกอบด้วยการกระเจิงแบบเรเลย์เป็นหลักใหญ่ จึงเป็นเหตุหนึ่งที่ทำให้ยากในการแยกการกระเจิงที่มีขนาดเล็กอย่างการกระเจิงแบบอนินาต นิวเคลียร์ออกจากการกระเจิงแบบเรเลย์ (Moon, 1961 : 309)

2. พลังงานโฟตอนไกลจากพลังงานอนินาตนิวเคลียร์ (photon energy far from resonance) มีขบวนการเกือบเหมือนกับข้อ 1 เพียงแต่การกระเจิงนี้จะเกิดในช่วง ปลายของการกระเจิงแบบอนินาตนิวเคลียร์ทั้งหมด

จากการศึกษาการกระเจิงแบบยืดหยุ่น เลวีนเจอร์ (Levinger. 1951 : 523) พบว่า สำหรับรังสีแกมมาในช่วงพลังงานต่ำกว่า 1 MeV ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบอนินาทนิวเคลียร์จะมีค่าน้อย เราจึงไม่ต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณ แต่ถ้ารังสีแกมมาช่วงพลังงาน 3 - 20 MeV ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบอนินาทนิวเคลียร์จะเริ่มมีค่าเห็นได้ชัดขึ้น

ภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ (Differential cross-section)

การกระเจิงแบบยืดหยุ่นทั้งสี่ขบวนการนี้ เบิร์นสไตน์ และ มัณน์ (Bernstein and Mann. 1958 : 110) พบว่าเป็นขบวนการที่เกิดอาพันธ์กัน ดังนั้น ถ้าเราพิจารณาภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ในเทอมของแอมพลิจูดจะได้ว่า แอมพลิจูดทั้งหมดของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นแทนด้วยสัญลักษณ์ A แล้วจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแอมพลิจูดของการกระเจิงทั้งสี่แบบ คือ

$$A = A^R + A^T + A^D + A^N \quad (2.15)$$

เมื่อ A^R คือ แอมพลิจูดของการกระเจิงแบบเรเลย์

A^T คือ แอมพลิจูดของการกระเจิงแบบทอมสัน

A^D คือ แอมพลิจูดของการกระเจิงแบบเดลบรุค

A^N คือ แอมพลิจูดของการกระเจิงแบบอนินาทนิวเคลียร์

เมื่อตัดแอมพลิจูดของการกระเจิงแบบเดลบรุคและแบบอนินาทนิวเคลียร์ออกไปเพราะมีค่าน้อยมาก จะได้แอมพลิจูดรวมดังนี้

$$A = A^R + A^T \quad (2.16)$$

การคำนวณหาค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ในเทอมของแอมพลิจูดจากสมการของฟรานส์ จากสมการ (2.2) คือ

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_o^2 |A|^2$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_o^2 \frac{1}{2} \left(|A_{\parallel}|^2 + |A_{\perp}|^2 \right) \quad (2.17)$$

เมื่อ $A_{\parallel}$ คือ แอมพลิจูดที่ยานานกับระนาบกระเจิง

$A_{\perp}$ คือ แอมพลิจูดที่ตั้งฉากกับระนาบกระเจิง

ความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด $A_{NSF, SF}$ และแอมพลิจูด $A_{\parallel, \perp}$ (Hardie, DeVries and Chwen-Kang, 1971 : 1287) คือ

$$A_{NSF} = \frac{1}{2}(A_{\perp} + A_{\parallel}) \quad (2.18)$$

$$A_{SF} = \frac{1}{2}(A_{\perp} - A_{\parallel})$$

ฉะนั้น $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ในเทอมของแอมพลิจูดแบบไม่หมุนกลับ (A_{NSF}) และหมุนกลับ (A_{SF})

(Schumacher, 1969 : 7)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_o^2 \left(|A_{NSF}|^2 + |A_{SF}|^2 \right) \quad (2.19)$$

สำหรับพลังงาน 0.245, 0.344, 0.444, 0.779 และ 0.964 MeV ค่าภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ แสดงในตาราง 1 แสดงผลการกระเจิงแบบเรเลย์ร่วมกับทอมสัน โดยมีตะกั่วเป็นฉากกัน สำหรับการกระเจิงแบบเรเลย์สามชนิด คือ จอห์นสัน และ เชิง $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{JC}$ บราวน์ (K + L) รวมกับ ฟอรัมแฟคเตอร์ (M + N) ; $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{BR-FF}$ และ ฟอรัมแฟคเตอร์ (K + L + M + N) ; $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^{FF}$ ที่พลังงาน 1.086, 1.112, 1.408 MeV ค่าภาคตัดขวางที่แสดงในตาราง 1 คือ $\frac{d\sigma}{d\Omega}^{BR-FF}$, $\frac{d\sigma}{d\Omega}^{FF}$ แต่เฉพาะที่พลังงาน 1.408 MeV จะแสดงค่าภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ของการกระเจิงแบบเดลบรุกรวมอยู่ด้วย คือ $\frac{d\sigma}{d\Omega}_D^{BR-FF}$ และ $\frac{d\sigma}{d\Omega}_D^{FF}$ (Whittingham, 1978 : 18 - 19)

ตาราง 1 ภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์สำหรับตะกั่ว (mb sr⁻¹)

(ตัวเลขในวงเล็บแทนข้อผิดพลาด 10)

MeV	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$	15°	30°	45°	60°
0.245	JC		1.70(3)		1.77(2)
	BR-FF	1.26(4)	2.09(3)	7.35(2)	2.07(2)
	FF	1.04(4)	1.59(3)	6.03(2)	1.79(2)
0.334	JC		7.71(2)		6.70(1)
	BR-FF	4.13(3)	1.04(3)	1.89(2)	6.34(1)
	FF	3.48(3)	9.04(2)	1.70(2)	6.00(1)
0.444	JC		3.34(2)		3.04(1)
	BR-FF	2.16(3)	3.33(2)	6.80(1)	3.39(1)
	FF	1.91(3)	3.09(2)	6.52(1)	3.37(1)
0.779	JC		4.61(1)		5.46
	BR-FF	5.85(2)	5.07(1)	1.55(1)	5.78
	FF	5.68(2)	5.19(1)	1.83(1)	6.48
0.964	JC		3.68(1)		1.83
	BR-FF	2.34(2)	3.09(1)	6.68	1.77
	FF	2.31(2)	3.35(1)	8.60	2.56
1.086	JC	1.42(2)	2.24(1)	3.82	9.13(-1)
	BR-FF	1.43(2)	2.47(1)	5.22	1.47
1.112	BR-FF	1.31(2)	2.17(1)	3.34	8.04(-1)
	FF	1.31(2)	2.13(1)	4.69	1.30
1.408	BR-FF	6.62(1)	8.55	1.01	2.69(-1)
	FF	6.86(1)	1.02(1)	1.52	4.40(-1)
	BR-FF(D)	5.87(1)	7.00	7.55(-1)	2.31(-1)
	FF(D)	6.10(1)	8.49	1.18	3.66(-1)

จากการทดลองวัดค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ของจิตวัฒนากร (Chitwattanagorn. 1976 : 60 - 80) ที่มุม 10° , 20° และ 30° โดยใช้รังสีแกมมาจาก ^{152}Eu ที่พลังงาน 0.344 และ 1.408 มีตะกั่วเป็นฉากกัน พบว่า การทดลองนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับผลที่ได้ทางทฤษฎีในการกระเจิงแบบเรเลย์รวมกับแบบทอมสัน ที่พลังงาน 0.344 MeV จะได้ผลสอดคล้องกับการคำนวณของ จอห์นสัน และ เฮิง แต่ก็มีบางส่วนไม่สอดคล้องกันเมื่อเปรียบเทียบผล $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ของการคำนวณในชั้น K ของ บราวน์ และคนอื่น ๆ กับการคำนวณแบบฟอร์มแฟคเตอร์ของชั้นอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลของเฟียวฟอร์มแฟคเตอร์ (pure form factor) ด้วย และที่พลังงาน 1.408 MeV ผลการทดลองนี้จะสอดคล้องเป็นอย่างดีกับการคำนวณของ บราวน์ และคนอื่น ๆ และการคำนวณโดยใช้เฟียวฟอร์มแฟคเตอร์ โดยไม่รวมกรณีของชั้น L ที่ไม่หมุนกลับ (non spin-flip) มาคำนวณด้วย

เมื่อเร็ว ๆ นี้ เทียนสมประสงค์ (Teansomprasong. 1979 : 83 - 86) ได้ทำการทดลองหาค่าของ $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ โดยใช้รังสีแกมมาจาก ^{152}Eu ที่พลังงาน 0.344, 0.779, 0.964, 1.086, 1.112 และ 1.408 MeV ที่มุมกระเจิง 3° , 5° , 7° , 15° , 20° , 25° , 35° และ 45° โดยมีตะกั่วเป็นฉากกัน พบว่าผลการทดลองนี้สอดคล้องกับทางทฤษฎีเมื่อ $\theta \leq 15^\circ$ แต่ความสอดคล้องจะลดลงเมื่อ $\theta \geq 20^\circ$ และผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องอย่างดีกับผลการทดลองของผู้อื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับของ ดิกสัน และ สโทเรย์ (Dixan and Storey. 1968 : 1153) ชูมาเชอร์ (Schumacher. 1969 : 7) ฮาร์ดี้ เดวรีย์ และชวันกั้งเจียง (Hardie, De Vries and Chwan-Kang Chiang. 1971 : 1287) ชูมาเชอร์ สเมนด์ และ บอร์เชอร์ท (Schumacher, Smend and Borchert. 1973 : 531) และ สเมนด์ ชูมาเชอร์ และ บอร์เชอร์ท (Smend, Schumacher and Borchert. 1973 : 390)

จากการนำผลการทดลองของจิตวัฒนากร และคนอื่น ๆ (Chitwattanagorn and others. 1980 : 1147 - 1164) ที่พลังงาน 0.344 และ 1.408 MeV เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีของ จอห์นสัน และ เฮิง, บราวน์ ฟอรัมแฟคเตอร์ และ

เทียวยฟอร์มแฟคเตอร์ ที่มุมกระเ็จ $3^{\circ}, 5^{\circ}, 7^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ},$
 $35^{\circ}, 40^{\circ}$ และ 45° ซึ่งแสดงให้เห็ถึงวามล้ดคล้้ง และ วามล้มพันธ์ของ
ผลการทดลองได้ว้างชัดเจน

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีดำเนินการทดลอง

เครื่องมือ

การทดลองนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญ คือ

1. แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา (γ -source)
2. เครื่องวัดรังสีแกมมา (scintillation counter)
3. ฉากกัน (target)

แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา (γ -source)

แหล่งกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ^{152}Eu มีขนาดความแรง 0.677 คูรี เหตุผลที่ใช้ ^{152}Eu เป็นแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาเพราะ

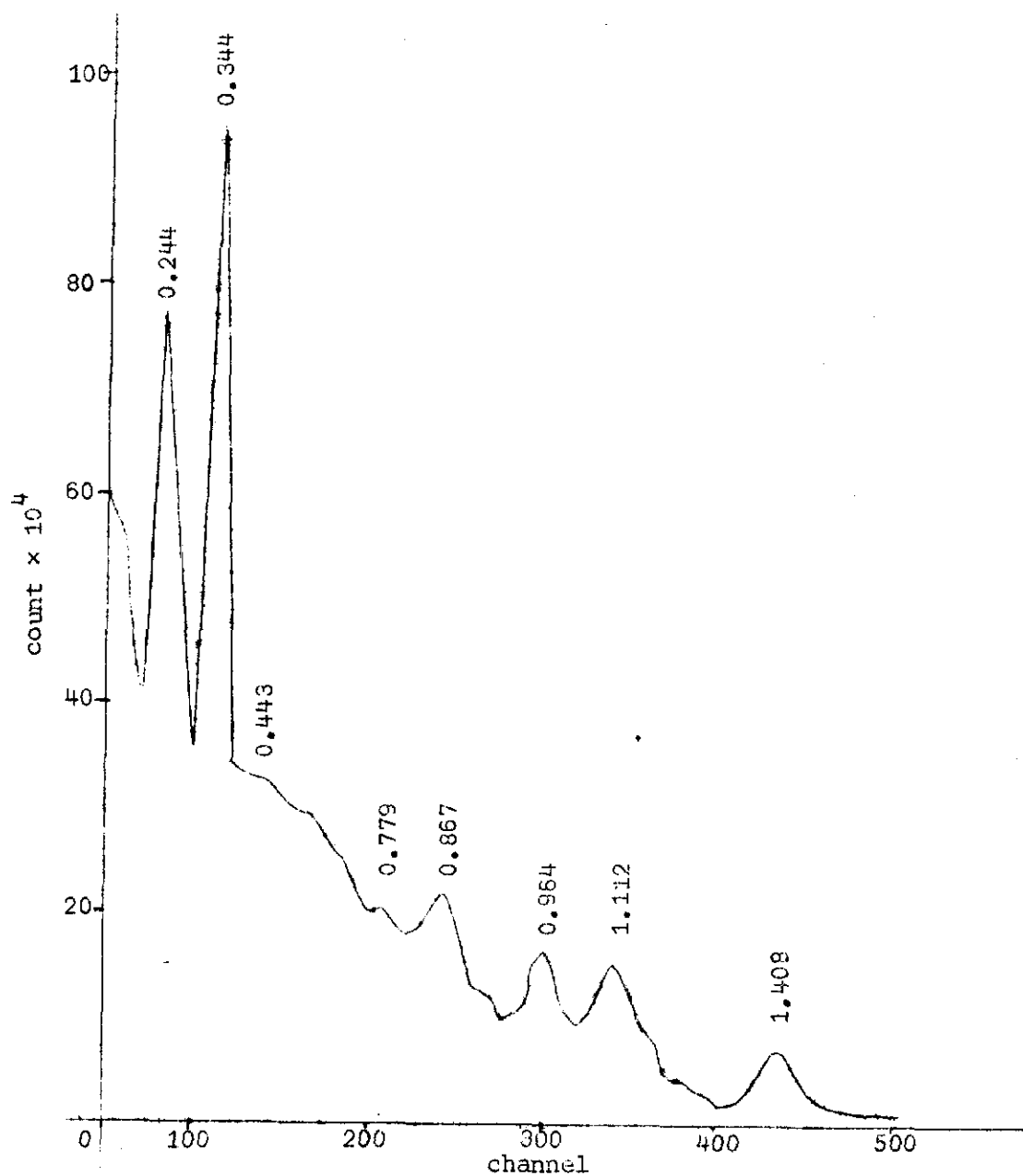
1. มีครึ่งชีวิตที่นานมากพอ คือ ประมาณ 12.4 ปี
2. ให้รังสีแกมมาที่มีความเข้มสูงอยู่หลายค่าตั้งแต่พลังงาน 0.244 ถึง 1.408 MeV และพลังงานที่จะศึกษาในการทดลองนี้ คือ 0.344 MeV และ 1.408 MeV เป็นพลังงานที่มีความเข้มสูงเป็นพิเศษ ดังแสดงในตาราง 2 และภาพประกอบ 3

ตาราง 2 ความเข้มในแต่ละพลังงานของรังสีแกมมาจาก ^{152}Eu (Weast. 1973 :
unpage)

^{152}Eu ($T_{1/2}$ 12.4 ปี)

γ -rays (MeV)	ความเข้ม %
0.244	7.6
0.344	28.5
0.411	2.8
0.443	3.6
0.779	14.5
0.867	4.4
0.964	16.2
1.086	11.8
1.112	15.4
1.408	22.9

*ค่านี้สำหรับจำนวนของ γ -rays/100 decays

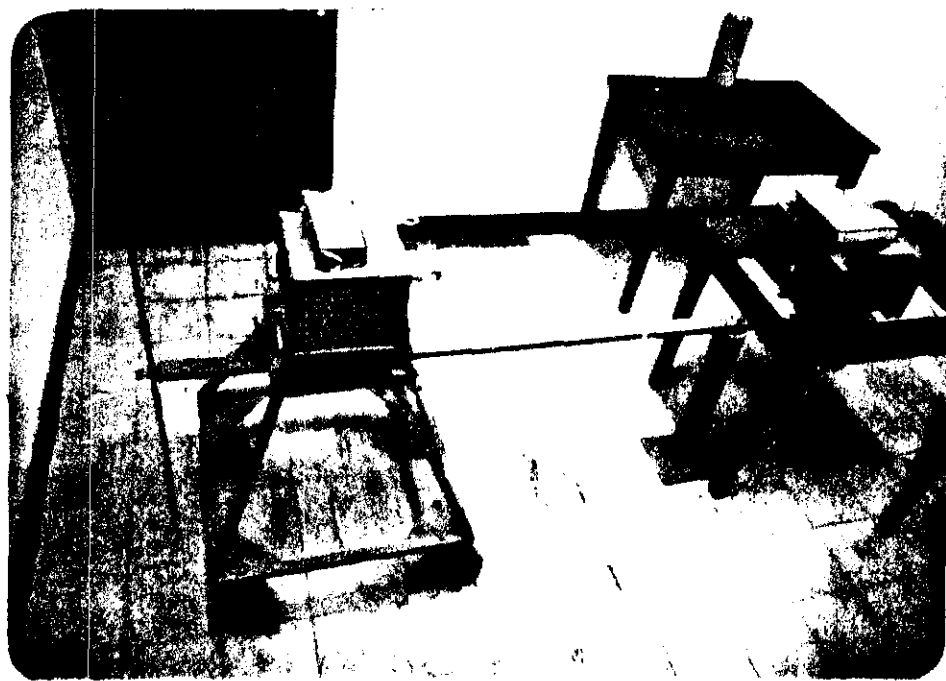
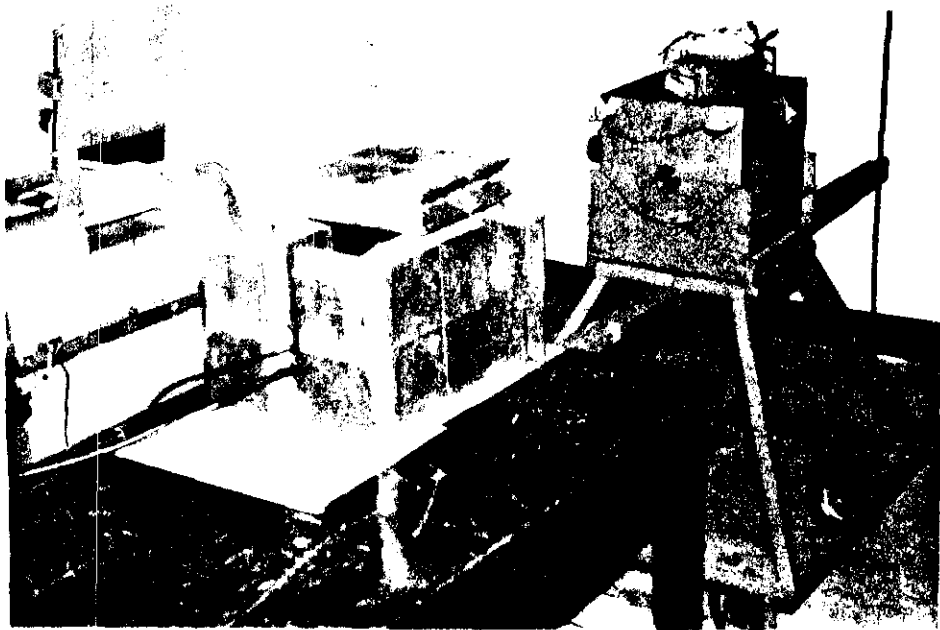


ภาพประกอบ 3 กราฟแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจาก ^{152}Eu

^{152}Eu นี้ทำขึ้นจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ประเทศออสเตรเลีย Australian Atomic Energy Commission โดยการอาบรังสีนิวตรอนไปบนยูโรเพียมออกไซด์ในธรรมชาติ (neutrons activation) ^{152}Eu นี้อยู่ในรูปของผงฝุ่นบรรจุอยู่ในขวด ซึ่งวางอยู่ในท่อโลหะผสม (alloy tube) และท่อนี้ถูกหุ้มด้วยตะกั่วหนาประมาณ 13 เซนติเมตร โดยรอบกันรังสีออกทางด้านอื่น ๆ เว้นไว้แต่ช่องเล็ก ๆ ขนาดสร้างสี่ทาง 1° หรือสร้างสี่ทาง 0.03 เมตรในระยะทาง 2 เมตร แล้วเคลือบด้วยเหล็กกล้าอีกชั้นหนึ่ง ขนาดภายนอก $26 \times 26 \times 26$ เซนติเมตร

ชุดของแหล่งกำเนิดรังสีนี้ติดตั้งอยู่บนรถล้อเลื่อนที่มีล้อหมุนได้รอบแกน แกนนี้ยึดติดกับพื้น และเป็นตำแหน่งที่วางฉากกัน สำหรับล้อเลื่อน เราสามารถใช้ปรับระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับฉากกันตามแนวระดับได้ ในการสร้าง ^{152}Eu ต้องวางให้ทั้งชุดศูนย์กลางของฉากกัน และชุดศูนย์กลางของเครื่องวัดมีระดับเดียวกันกับสร้างสี่ทางออกมาจากช่องเปิดของ ^{152}Eu เพื่อให้แน่ใจว่าสร้างสี่ทางออกมาอยู่นั้นอยู่ในแนวระดับนี้จริง ๆ เราสามารถตรวจสอบได้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ให้เครื่องวัดหันหน้าตัดของหัววัดมาทางแหล่งกำเนิด และวางให้อยู่ในแนวระดับเท่าที่จะสามารถทำได้ แล้ววัดรังสีที่ระดับนี้ไว้ ต่อไปเปลี่ยนระดับ ^{152}Eu ขึ้นหรือลง โดยการขึ้นลงให้ชุดแหล่งกำเนิดรังสี แล้วพิจารณาว่าระดับใดมีปริมาณรังสีมากที่สุด ก็จะเป็นแนวระดับที่ต้องการ ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 2) แสดงการปรับแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาให้อยู่ในแนวระดับ

เมื่อปรับลำรังสีของ ^{152}Eu อยู่ในแนวระดับแล้ว แต่ก็ยังไม่แน่ว่าแนวที่วางลำรังสี และ เครื่องวัดจะอยู่บนเส้นตรงเดียวกัน จึงต้องมีการปรับตำแหน่งไปทางซ้ายหรือทางขวาจาก ตำแหน่งศูนย์ ในแนวตั้งฉากที่มองด้วยสายตา เปิดเครื่อง วัดรังสีวัดอัตราการนับที่เปลี่ยนไป กับมุม และเวลาที่ใช้ เลื่อนล้อเลื่อนไปทางซ้าย 10 จุด ทางขวา 10 จุด แต่ละจุดห่างกัน เพียงเล็กน้อย เติวนไปมาจนพบตำแหน่งที่มีปริมาณรังสีมากที่สุด ตำแหน่งนั้นจะเป็นตำแหน่ง ศูนย์ที่ต้องการ

เมื่อหาตำแหน่งศูนย์ได้แล้วก็สร้างมาตราส่วนมุมเพียง เบนจากตำแหน่งศูนย์นี้เป็น $0^\circ - 90^\circ$ ในการทดลองที่มุม $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° โดยเราอยุ่ปรับล้อเลื่อน ให้อยู่ที่ตำแหน่ง $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ และ 60° ซึ่งก็คือ มุมกระเจิงที่เราต้องการศึกษา

เครื่องวัดรังสีแกมมา

เป็นเครื่องวัดรังสีแบบเรืองแสง (scintillation counter) ชนิดหนึ่ง ประกอบขึ้นด้วยผลึก NaI(Tl) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีแกมมาที่เข้าไปให้กลายเป็นแสงและ หลอดทวีคูณ (photomultiplier tube) ซึ่งทวีคูณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ที่เกิดจากแสงตกลง บนโฟโตคาโทด ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าที่ระบบคาย

เมื่อรังสีแกมมาวิ่งผ่านเข้าไปในผลึก NaI(Tl) จะทำให้อะตอมภายในผลึกถูก กระตุ้นแล้วกลับสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูป โฟตอน โฟตอนนี้จะวิ่งไปชนโฟโตคาโทดในหลอดทวีคูณ ซึ่งเป็นสารประเภทไวต่อแสงมาก ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาหนึ่งตัวต่อหนึ่งโฟตอนตามปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กตริก อิเล็กตรอนนี้ จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ประมาณ 100 โวลต์ เคลื่อนไปชนแผ่นโลหะที่ เรียกว่า ไดโนด แผ่นที่ 1 ทำให้มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาประมาณ 4 - 5 ตัว อิเล็กตรอน เหล่านี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าด้วยความต่างศักย์เท่าเดิม ทำให้วิ่งไปชนไดโนดแผ่นถัดไป และเกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น 4 - 5 เท่าทุกครั้ง หลังจากผ่านไดโนด 10 - 15 แผ่นแล้ว วิ่งเข้าแอดโนดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า (current pulse) ที่สามารถวัดได้ง่ายและสะดวก เพราะเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีความแรงพอสมควร

สัญญาณที่ได้นี้สามารถนำไปเข้าเครื่องวัดรังสีที่สามารถวิเคราะห์แยกแยะทั้งปริมาณและพลังงานของรังสีได้ คือ เครื่องวิเคราะห์รังสีแบบหลายช่อง (multichannel analyser, MCA) ดังภาพประกอบ 5 และ 6 (Crouthamel. 1979 : 38 - 51)

เครื่องวัดรังสีแบบรวมแบบเรียงแสงนี้ถูกกำบังด้วยถ้ำตะกั่วหนา 3 เซนติเมตร จะเปิดเฉพาะส่วนหน้าที่จะเจาะไว้พอดีกับส่วนหัวของเครื่องวัด ทั้งนี้ก็เพื่อกันรังสีที่สะท้อนมาจากทิศทางอื่นไม่ให้เข้าสู่ส่วนหัวของเครื่องวัด จะกัน รังสีแกมมาที่กระเจิงมาจากมุมอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ มีโอกาสน้อยที่จะสะท้อนผนังห้องและวัตถุต่าง ๆ แล้ววิ่งมาเข้าเครื่องได้ ทำให้สามารถวัดค่าจริงของรังสีแกมมาที่แผ่ออกมาจากการกระเจิงในมุมที่ต้องการได้ ถ้ำตะกั่วนี้มีความหนาพอที่จะดูดกลืนและกันรังสีแกมมาจากการสะท้อนให้เข้าเครื่องวัดได้น้อยที่สุด

เครื่องวัดนี้มี เรสโซลูชัน (resolution) 6.2% สำหรับรังสีแกมมาจากซีเซียม (^{137}Cs) ซึ่งมีพลังงาน 0.662 MeV โดยหาได้จากการนำข้อมูลของซีเซียมมากำหนดจุดลงบนกราฟ ดังภาพประกอบ 7 แล้วนำค่าของจุดยอดของเส้นกราฟ (210, 2849) มาคำนวณหาค่าเรสโซลูชัน ดังนี้

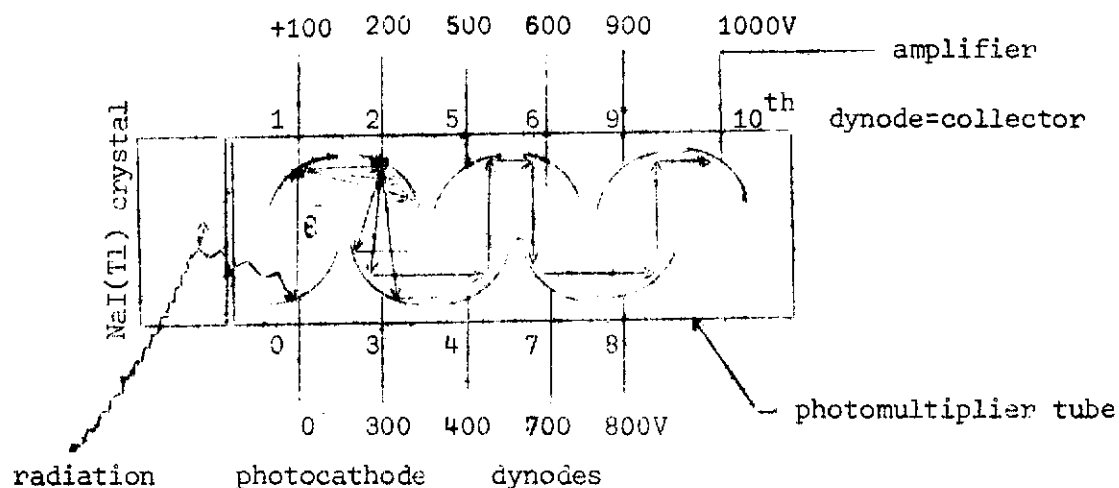
$$\text{Res} = \frac{\Delta E}{E} \times 100 \%$$

$$\Delta E \text{ คือ ค่าความกว้างของครึ่งหนึ่งของยอดกราฟ} = \frac{2849}{2} = 1\,424.5 \text{ จาก}$$

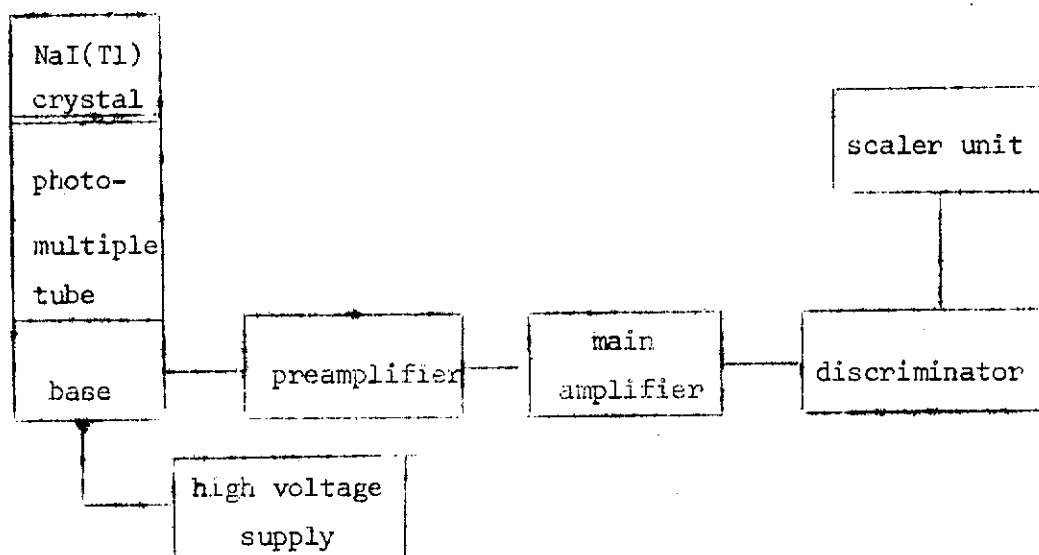
$$\text{แชนแนล (channel) } 203 - 216 = 13$$

$$E \text{ คือ พลังงานที่ตำแหน่งสูงที่สุดของเส้นกราฟอยู่ที่แชนแนล } 210$$

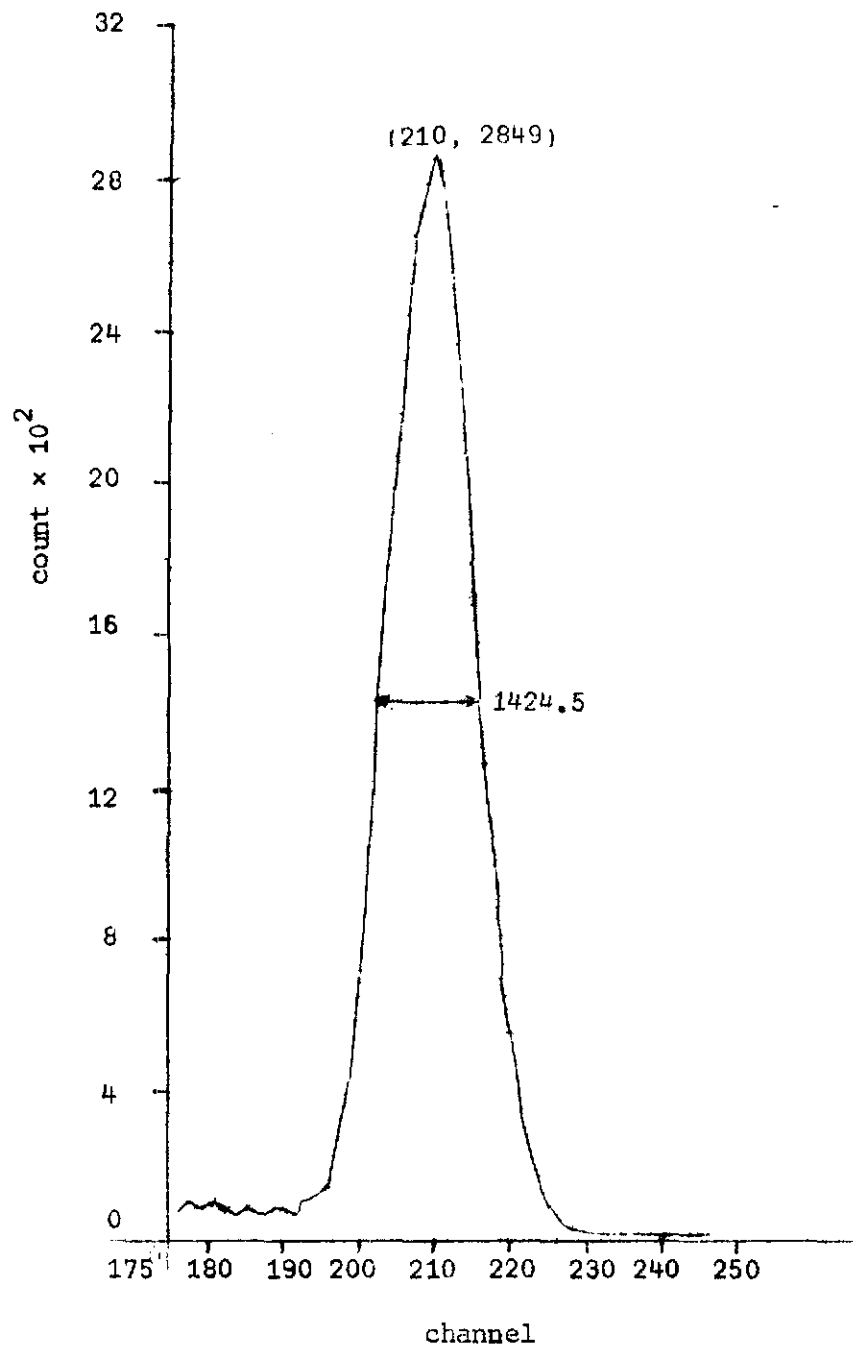
$$\text{Res} = \frac{13}{210} \times 100 = 6.2 \%$$



ภาพประกอบ 5 เครื่องวัดรังสีแกมมาชนิด NaI (Tl)



ภาพประกอบ 6 วงจรของเครื่องวัดรังสีแกมมาแบบเรืองแสงต่อเข้ากับ MCA.



ภาพประกอบ 7 กราฟแสดงการหาค่า resolution

ฉากกัน (target)

ฉากกันนี้วางอยู่บนแกนของ ^{152}Eu และกำหนดให้เป็นตำแหน่งคงที่ วางให้ระนาบของฉากกันขนานกับของ เครื่องวัดทุกครั้งที่ใช้ ฉากกันที่ใช้ในการทดลองนี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ตะกั่วบริสุทธิ์ 1 แผ่นขนาด 6×6 เซนติเมตร ความหนา 0.33 เซนติเมตร

2. อลูมิเนียมบริสุทธิ์ ขนาด 10×7 เซนติเมตร ความหนา 0.70 เซนติเมตร

การที่ต้องใช้ฉากกัน 2 ชนิดนี้เพราะ การทดลองนี้ต้องการศึกษาการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาจากตะกั่ว ซึ่งเวลาที่ไปตะกั่วเป็นฉากกันนั้น รังสีกระเจิงออกมาไม่ได้เพียงการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาเท่านั้น แต่ยังมีภูมิหลัง (back ground) และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (การกระเจิงแบบคอมพัตตันรวมอยู่ด้วย) จึงต้องใช้ฉากกัน อลูมิเนียม เพราะผลที่กระเจิงออกมาจากฉากกันอลูมิเนียมนี้จะมีแต่ภูมิหลังและการกระเจิงแบบคอมพัตตัน เมื่อหักล้างกันแล้วจะได้การกระเจิงแบบยืดหยุ่นตามต้องการ

เหตุที่ใช้ความหนาขนาดนี้เพราะองค์ประกอบสองประการ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการหาค่าภาคตัดขวางในการทดลอง องค์ประกอบแรกคือการกระเจิงของโฟตอนในฉากกัน องค์ประกอบที่สอง คือ การดูดกลืนของรังสีที่กระเจิงฉากกัน กับการดูดกลืนของโฟตอนที่กระเจิง ผลของการดูดกลืนสามารถคำนวณได้ และจะแสดงค่าความหนาที่ได้ผลดีที่สุดสำหรับค่าอัตรา การนับที่มากที่สุด โดยคำนวณจาก

$$I(\theta) = I_0 \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \int_0^t e^{-\mu x} e^{-\mu(t-x)\sec\theta} dx$$

$$= I_0 \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \frac{(e^{-\mu t \sec\theta} - e^{-\mu t})}{\mu(1 - \sec\theta)} \quad (3.1)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของโฟตอนที่ตกกระทบบนฉากกันที่หนา t

$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$ คือ ภาคตัดขวางของการกระเจิงเชิงอนุพันธ์ของฉากกันที่มุม θ

μ คือ สัมประสิทธิ์เชิงเส้นของการดูดกลืนรังสีแกมมา

ค่าสูงที่สุดของ $I(\theta)$ ขึ้นอยู่กับความหนา t หาได้จาก

$$\frac{\partial I}{\partial t}(\theta) = 0 \quad (3.2)$$

ค่าความหนาที่ต่ำที่สุดของฉากกั้นสามารถคำนวณจาก

$$e^{-\mu t(1 - \sec\theta)} = \cos\theta \quad (3.3)$$

จากการคำนวณแล้วพบว่า ตะกั่วในธรรมชาติที่ใช้เป็นฉากกั้นนั้นความหนาที่ต่ำที่สุดขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาที่มากหรือน้อย และในการทดลองนี้ตะกั่วควรจะมีความหนาอยู่ระหว่าง 0.33 - 0.67 เซนติเมตร และในกรณีของอูมิเนียมนั้นค่าการดูดกลืนสามารถละทิ้งได้ ถ้าใช้ฉากกั้นที่มีความหนาน้อยกว่า 1.17 เซนติเมตร

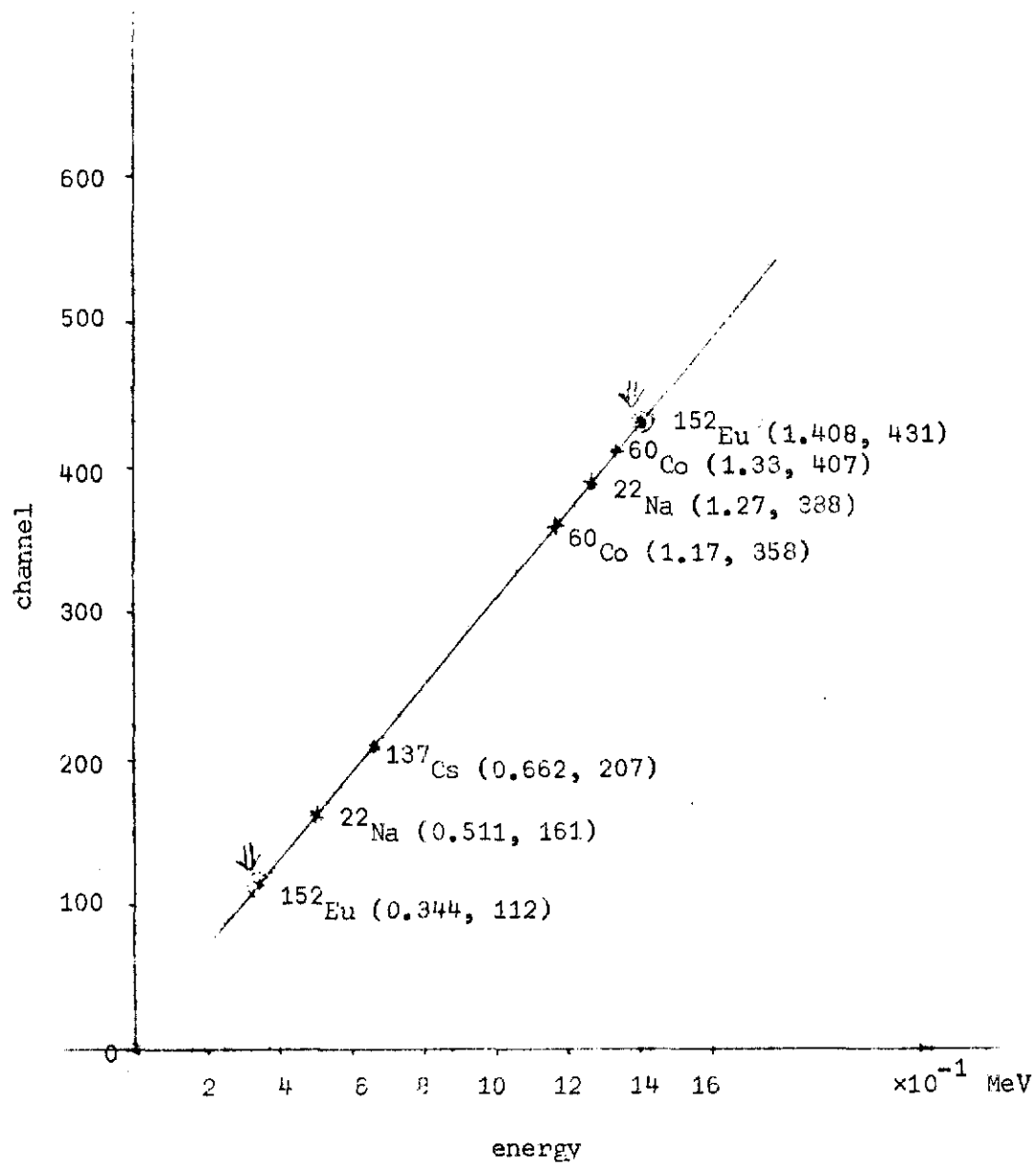
วิธีดำเนินการทดลอง

เมื่อสัณฐานเครื่องมือเรียบร้อยแล้วสิ่งแรกที่จะต้องทำ คือ การสร้างเส้นมาตรฐาน (calibration curve) เพื่อที่จะทราบว่าสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เครื่องวัดวัดได้ และปรากฏบนจอภาพนั้นถูกต้องตรงกับความจริง นั่นคือ พลังงานที่ต้องการอยู่ที่ช่องใด เส้นมาตรฐานนี้จึงเป็นเส้นที่บอกอัตราส่วนระหว่างพลังงานกับช่อง โดยสร้างขึ้นจากแหล่งกำเนิดมาตรฐานที่รู้พลังงานอย่างแน่ชัด แล้วนำมาวัดเพื่อให้ทราบว่าพลังงานนั้นตรงกับช่องใด แหล่งกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานที่ใช้ในการทดลองนี้ ดังตาราง 3

ตาราง 3 อัตราส่วนระหว่างพลังงานกับจำนวนช่อง

ธาตุ	พลังงาน (MeV)	แชนแนล
^{22}Na	0.511	161 ± 1
	1.27	388 ± 1
^{60}Co	1.17	358 ± 1
	1.33	407 ± 1
^{137}Cs	0.662	207 ± 1

นำค่าเหล่านี้มาเขียนกราฟ พลังงานอยู่ในแกนนอนและแชนแนลอยู่ในแกนตั้ง
ลากเส้นที่วัดได้โดยใช้วิธีการของลีสต์แควร์ส (the method of least squares)
ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงเส้นมาตรฐานของพลังงานกับจำนวนช่องและแสดงตำแหน่งพลังงานของ ^{152}Eu 0.344 และ 1.408 MeV

เส้นกราฟนี้จะแสดงค่าพลังงานต่าง ๆ ที่ผ่านเครื่องวัดนี้ว่าขนาดพลังงานนั้นอยู่ที่
ช่องใด และยังช่วยในการทดสอบเครื่องวัดทั้งก่อนและหลังการทดลอง ให้อยู่ในมาตรฐานนี้
โดยพลังงาน x ตรงช่อง y ก่อนการทดลองและหลังการทดลองก็ได้เช่นเดิม ทั้งนี้เพื่อให้
แน่ใจได้ว่าข้อมูลที่ได้นั้นไม่ได้มีการผิดพลาดจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ แสดงว่าการทำงานของ
เครื่องวัดถูกต้องตลอดการทดลอง

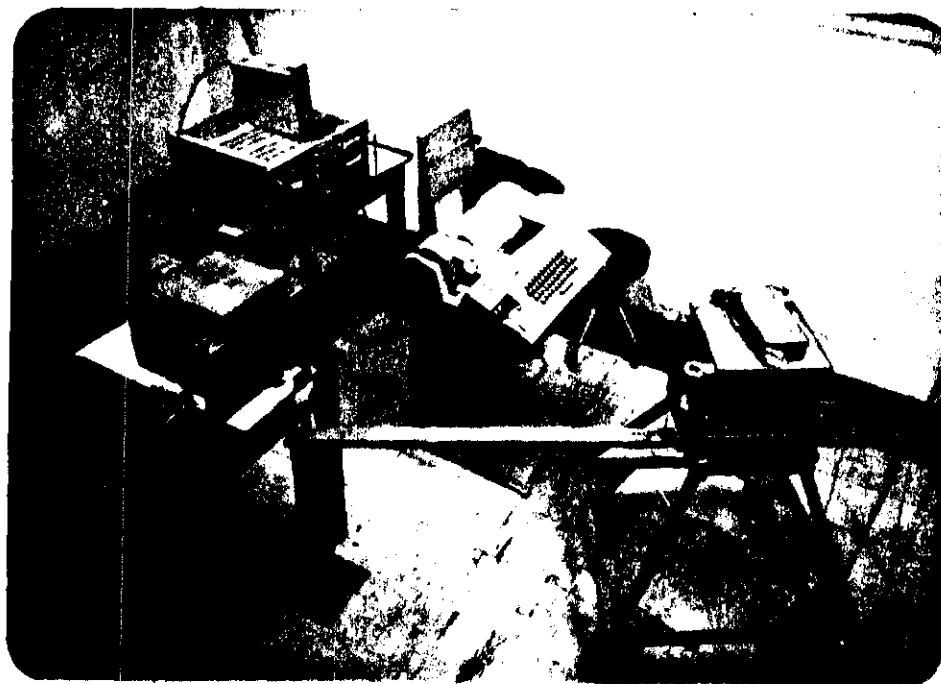
ในการวัดนี้จะมีการวัดมุมกระเจิง 4 มุม คือ 15° , 30° , 45° และ 60° และ
ในแต่ละมุมนี้จะต้องวัดค่าของสเปกตรัมสามชนิด คือ

1. สเปกตรัมจาก ^{152}Eu โดยตรง
2. สเปกตรัมจากฉากกันตะกั่วหนา 0.33 เซนติเมตร
3. สเปกตรัมจากฉากกันอลูมิเนียมหนา 0.70 เซนติเมตร

ในการวัดแต่ละมุมนั้น เราต้องตั้งระยะห่างของแหล่งกำเนิดรังสี ฉากกัน และ
เครื่องวัดให้เหมาะสมในแต่ละมุมดังตาราง 4 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตาราง 4 ตำแหน่งของการจัดวางเครื่องมือในการวัด

มุมกระเจิง	ระยะระหว่างแหล่งกำเนิด และฉากกัน	ระยะระหว่างฉากกัน และเครื่องวัด	เวลาที่ใช้ วินาที	dead time %
15°	39.5	10.8	5,000	25
30°	92	10.5	10,000	10
45°	124	11.0	20,000	5
60°	128	9.5	20,000	0



ภาพประกอบ 9 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด

รังสีที่เข้าสู่เครื่องวัดจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณเข้า เครื่องนับรังสี MCA. ปรากฏบนจอภาพในรูปสเปกตรัม และเปลี่ยนเป็นจำนวนนับต่อวินาที โดยคอมพิวเตอร์เป็นข้อมูลออกมาทางเครื่องพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังภาพประกอบ 9 ซึ่งข้อมูลนี้จะนำไปคำนวณหาค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ และค่าอื่น ๆ โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จล่องชุด คือ

1. BAKFIT ใช้คำนวณหาพื้นที่ใต้ยอดพลังงาน 0.344 และ 1.408 MeV 3 ชุด จากฉากกันตะกั่ว อลูมิเนียม และอูนิหลัง โดยวิธีการลิตัลแควล์

2. GAMMA นำผลการคำนวณจากโปรแกรม BAKFIT ทั้งหมดมาคำนวณหาค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$

ลัดเข้าไปในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. ใช้วิธีการของลิตทิลสแควร์ (the method of least squares) ในการลากเส้นผ่านจุดตัวแทนที่ดีที่สุด คำนวณได้จากสูตร (Freund. 1970 : 265 - 270)

$$Y = ax + b$$

$$a = \frac{(\Sigma y)(\Sigma x^2) - (\Sigma x)(\Sigma xy)}{n(\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2}$$

$$b = \frac{n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{n(\Sigma x^2) - (\Sigma x)^2}$$

เมื่อ Y คือ ตัวแปรตาม (dependent variable)

x แทนด้วยแชนแนล (channel)

X คือ ตัวแปรอิสระ (independent variable)

y แทนด้วยพลังงานของรังสีแกมมา

a คือ ความชัน (slope) ของเส้นสมการ

b คือ จุดที่สมการตัดแกน (intercept)

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณทางทฤษฎี

ได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าภาคตัดขวาง เชิงอนุพันธ์ของการกระเจิงทั้งสี่แบบยืดหยุ่นทางทฤษฎี ค่าภาคตัดขวางได้โดยใช้แอมพลิจูดของการกระเจิงแบบเรเดียร์ทั้งสามกลุ่มที่แตกต่างกันไป คือ ใช้ค่าภาคตัดขวาง เชิงอนุพันธ์ของจอห์นสันและเอ็ง บราวน์ฟอร์หมแฟคเตอร์ และเทียวฟอร์หมแฟคเตอร์ ได้้นี้มาจาก เทียนสมประสงค์ (Teansomprasong, 1979 : 71) ที่มุมกระเจิง 15° , 30° , 45° และจาก วิตทิงแฮม (Whittingham, 1978 : 32) ที่มุมกระเจิง 15° , 30° , 45° , 60° เพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ของ จอห์นสัน และ เอ็ง สำหรับพลังงานของรังสีแกมมา 0.344 MeV ที่มุม 45° นั้น ได้มาโดยการคำนวณของ วิตทิงแฮม การคำนวณจะไม่เป็นผลเมื่อมุมน้อยกว่า 30° เพราะค่าภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์จะเปลี่ยนไปอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ความคลาดเคลื่อนของวิตทิงแฮมประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และความคลาดเคลื่อนโดยการคำนวณน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่า ความคลาดเคลื่อนจะไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์

การคำนวณค่าภาคตัดขวาง เชิงอนุพันธ์ของวิตทิงแฮม โดยใช้บราวน์ฟอร์หมแฟคเตอร์สำหรับพลังงานของรังสีแกมมา 1.408 MeV ที่มุมกระเจิงระหว่าง 0° ถึง 15° จะมีค่าคลาดเคลื่อนถึง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่สำหรับมุมกระเจิงมากกว่า 15° ค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยกว่า 15 เปอร์เซ็นต์

ภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์สำหรับรังสีแกมมาที่พลังงาน 1.408 MeV นั้น คำนวณทั้งแบบรวมและไม่รวมการกระเจิงแบบเดลบรูค ผลการคำนวณทางทฤษฎีและผลของการทดลองครั้งนี้ปรากฏอยู่ในตาราง 5 และภาพประกอบ 10 การคำนวณทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ที่มุมกระเจิง 15° , 30° , 45° และ 60° แต่ผลการทดลองต่ำกว่าผลการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับรังสีแกมมาที่พลังงาน 0.344 MeV ที่มุมกระเจิงทั้งสี่

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองนี้มา เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับผลการคำนวณทางทฤษฎีแบบบราวน์ฟอร์หมแฟคเตอร์ที่รวมการกระเจิงแบบเคลบรุค {BR-PF(D)} พบว่าที่พลังงาน 1.408 MeV ทุกมุมกระเจิงค่าความแตกต่างน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ดังตาราง 6 ซึ่งนับได้ว่าผลการทดลองครั้งนี้สอดคล้อง เป็นอย่างดีกับการคำนวณแบบบราวน์ฟอร์หมแฟคเตอร์ที่รวมการกระเจิงแบบเคลบรุคไว้ด้วย

ส่วนที่พลังงาน 0.344 MeV นั้น ผลการทดลองที่ได้ไม่ก้อยสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีนัก เพราะค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าจากทางทฤษฎีมาก และเมื่อนำมา เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่ใกล้เคียงที่สุดแล้ว พบว่าผลการทดลองนี้แตกต่างจากผลการคำนวณทางทฤษฎีแบบเพียวฟอร์หมแฟคเตอร์สูงถึงประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์ ที่มุม 45° 83 เปอร์เซ็นต์ ที่มุม 15° , 52 เปอร์เซ็นต์ ที่มุม 30° และ 59 เปอร์เซ็นต์ ที่มุม 60° ดังตาราง 6

ตาราง 5 การเปรียบเทียบค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับทางทฤษฎี (mb - sr⁻¹)

(ตัวเลขในวงเล็บแทนค่าของ 10)

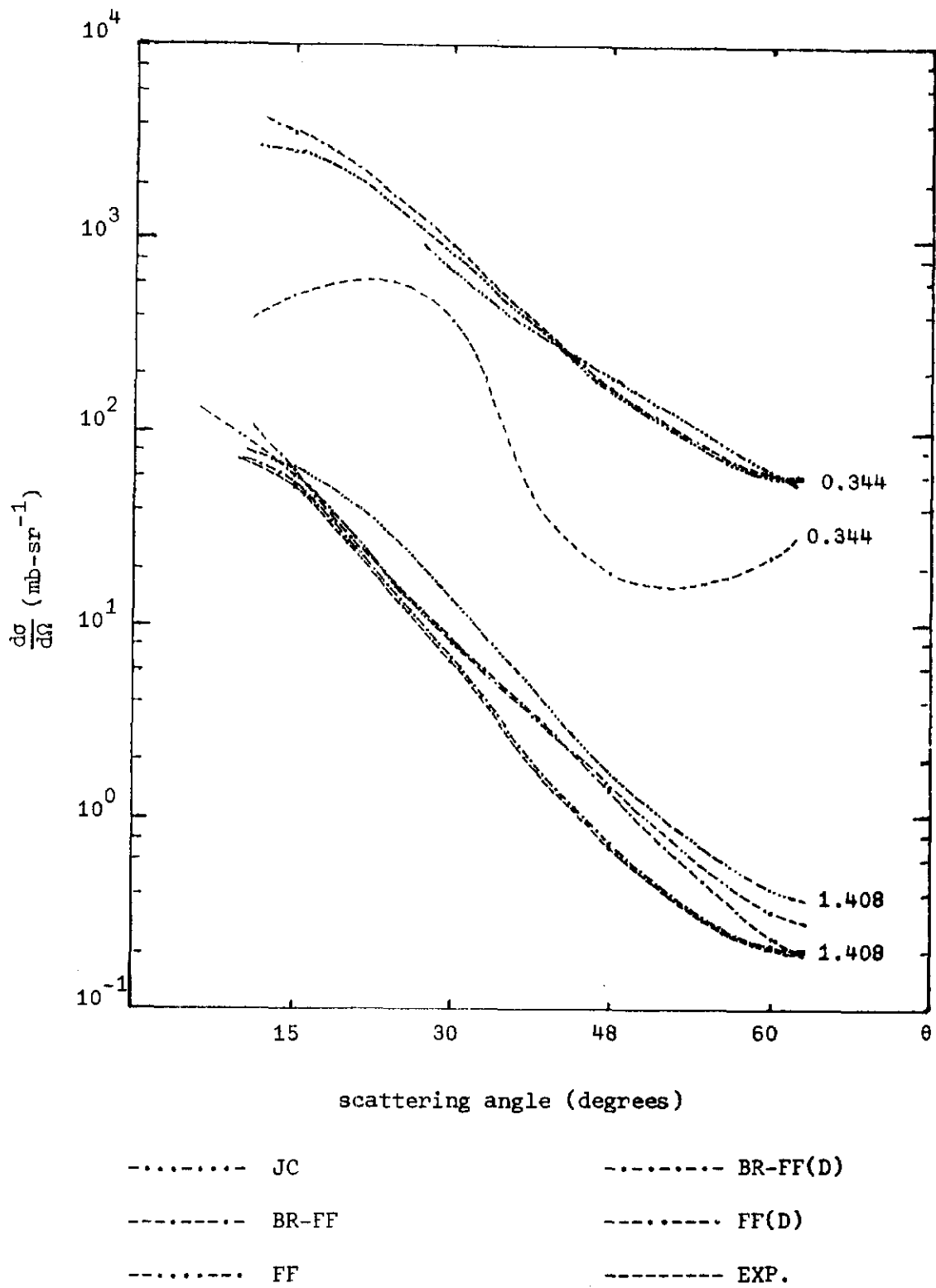
$\hbar\omega$ (MeV)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$	scattering angle			
		15°	30°	45°	60°
0.344	JC	-	7.16(2)	1.91(2)	6.70(1)
	BR-FF	3.80(3)	9.39(2)	1.67(2)	6.34(1)
	FF	3.16(3)	8.27(2)	1.50(2)	6.00(1)
	EXP.	5.21(2)	3.95(2)	1.91(1)	2.41(1)
1.408	BR-FF	6.62(1)	8.55(0)	1.01(0)	2.69(-1)
	FF	6.86(1)	1.02(1)	1.52(0)	4.40(-1)
	BR-FF(D)	5.87(1)	7.00(0)	7.55(-1)	2.31(-1)
	FF(D)	6.10(1)	8.49(0)	1.18(0)	3.66(-1)
	EXP.	5.72(1)	6.80(0)	7.22(-1)	2.22(-1)

JC = Johnson and Cheng

BR-FF = Brown-form factor

FF = Pure form factor

(D) = including Delbrück scattering



ภาพประกอบ 10 การเปรียบเทียบค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี

ตาราง 6 เปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับผลทางทฤษฎีที่สอดคล้อง

(ตัวเลขในวงเล็บแทนข้อผิดพลาด 1.0)

scattering angle	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 0.344 MeV (mb-sr ⁻¹)			$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 1.408 MeV (mb-sr ⁻¹)		
	EXP.	FF	%diff	EXP.	BR-FF(D)	%diff
15°	5.21(2)	3.16(3)	83.51	5.72(1)	5.87(1)	2.56
30°	3.95(2)	8.27(2)	52.23	6.80(0)	7.00(0)	2.86
45°	1.91(1)	1.50(2)	87.26	7.22(-1)	7.55(-1)	4.37
60°	2.41(1)	6.00(1)	59.83	2.22(-1)	2.31(-1)	3.89

FF = Pure form factor

BR-FF(D) = Brown-form factor including Delbrück scattering

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทดลองอื่น ๆ

ตาราง 7 และภาพประกอบ 11. แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลจากการทดลองครั้งนี้ กับผลการทดลองอื่น ๆ การเปรียบเทียบนั้นยังอยู่ในวงจำกัดเนื่องจากยังไม่มีผลการทดลองด้านการ กระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาจากพลังงานของ ^{152}Eu มากนัก นอกจากผลการทดลองของ จิตวัฒนากร (Chitwattanagorn. 1976 : 57) และของ เทียนลัมประสงค์ (Teansomprasong. 1979 : 65) จากการเปรียบเทียบกับการทดลองดังกล่าวนี้จะเห็นว่า มีความสอดคล้องกันด้วยที่พลังงาน 1.408 MeV ทุกมุมกระเจิงที่ทดลอง แต่ที่พลังงาน 0.344 MeV นั้นกลับได้ค่าต่ำกว่าของ จิตวัฒนากร และ เทียนลัมประสงค์ มาก เมื่อคิดเปอร์เซ็นต์ของความ แตกต่างของผลการทดลองที่พลังงาน 0.344 แล้วมีค่าประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ ที่มุม 15° 45 เปอร์เซ็นต์ ที่มุม 30° และ 85 เปอร์เซ็นต์ ที่มุม 45°

เมื่อนำผลการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอื่น ๆ ที่ไม่ได้ใช้พลังงานเดียวกัน ดังตาราง 8 และภาพประกอบ 11 เมื่อพิจารณาเส้นกราฟ 1.408 MeV จากการทดลองนี้ กับผลการทดลองของ ดิกสัน และ สโตเรย์ (Dixon and Storey. 1968 : 1153) แลตตันดิง และ โจวานโนวิช (Standing and Jovanovich. 1962 : 622) และ เบอรัสน์สไตน์ และ มานน์ (Bernstein and Mann. 1958 : 905) ที่พลังงาน 1.33 MeV แล้ว พบว่ามีความสัมพันธ์และสอดคล้องกันอย่างดี ผิดกับที่พลังงาน 0.344 MeV จากการทดลองนี้กับผลการทดลองของ เลมอนด์ และ ชูมาเชอร์ (Smend and Schumacher. 1974 : 423) กับ เลมอนด์ ชูมาเชอร์ และ บอร์เชิร์ต (Smend, Schumacher and Borchert. 1973 : 309) ที่พลังงาน 0.279 MeV ซึ่งจะได้เห็นได้จากเส้นกราฟว่าสอดคล้องไม่ก่อบดนัก

ตาราง 7 การเปรียบเทียบค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับผลการทดลองอื่น ๆ และแสดงเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่าง

(ตัวเลขในวงเล็บแทนค่าร้อยละของ 10)

scattering angle	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 0.344 MeV (mb-sr ⁻¹)			$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 1.408 MeV (mb-sr ⁻¹)		
	EXP.	C-T	%diff	EXP	C-T	%diff
15°	5.21(2)	2.95(3)	82.34	5.72(1)	4.74(1)	20.67
30°	3.95(2)	7.30(2)	45.89	6.80(0)	5.80(0)	17.24
45°	1.91(1)	1.35(2)	85.85	7.22(-1)	4.50(-1)	60.44
60°	2.41(1)	-	-	2.22(-1)	-	-

C-T = Chitwattanagorn and Teansomprasong

ตาราง 8 การเปรียบเทียบผลการทดลอง $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ของพลังงาน 0.344 กับ 0.279 MeV
และ 1.408 กับ 1.33 MeV

(ตัวเลขในวงเล็บแทนค่าร้อยละ 10)

$\hbar\omega(\text{MeV})$	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$	scattering angle			
		15°	30°	45°	60°
0.344	EXP.	5.21(2)	3.95(2)	1.91(1)	2.41(1)
0.279	S-S	-	-	4.16(2)	1.18(2)
	S	-	-	3.90(2)	1.30(2)
1.408	EXP.	5.72(1)	6.80(0)	7.22(-1)	2.22(-1)
1.33	D-S	-	6.2 (0)	7.60(-1)	1.35(-1)
	S-J	-	7.7 (0)	9.0 (-1)	2.06(-1)
	B-M	1.33(2)	1.0(1)	1.51(0)	4.7 (-1)

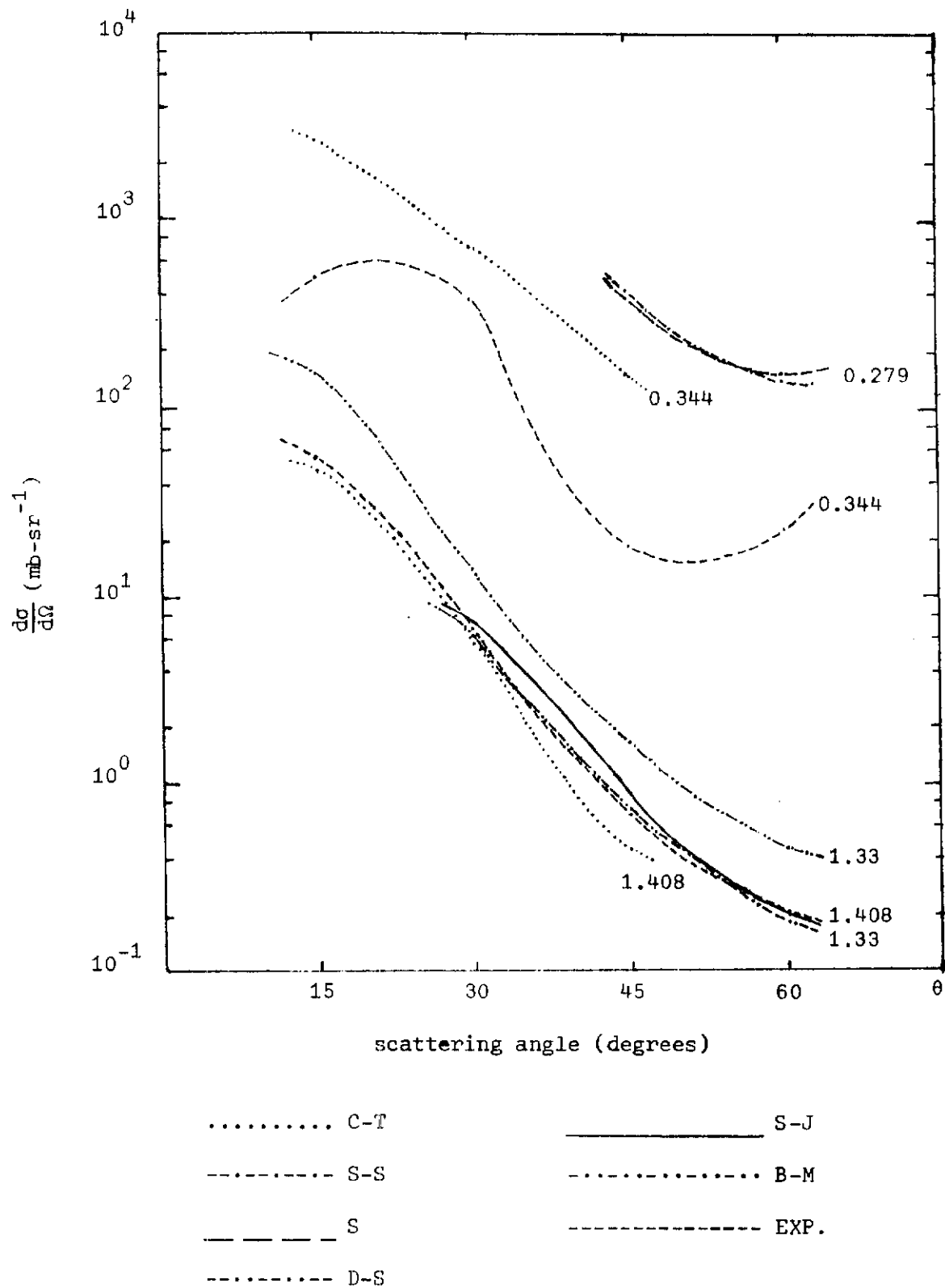
S-S = Smend and Schumacher

S = Smend, Schumacher and Borchert

D-S = Dixon and Storey

S-J = Standing and Jovanovich

B-M = Bernstein and Mann.



ภาพประกอบ 11 การเปรียบเทียบค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ จากการทดลองกับผลการทดลองอื่น ๆ

บทย่อ สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

บทย่อ

ความมุ่งหมายของการวิจัย

การศึกษานี้มีความมุ่งหมายเพื่อจะศึกษาภาคตัดขวาง เอียงอนุพัทธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาที่พลังงาน 0.344 และ 1.408 MeV ณ มุมกระเจิง 15° , 30° , 45° และ 60° โดยใช้ตะกั่วเป็นฉากกัน แล้วเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับผลการทดลองอื่น ๆ และผลจากการคำนวณทางทฤษฎี

วิธีดำเนินการวิจัย

ขบวนการหาค่าภาคตัดขวาง เอียงอนุพัทธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ณ 0.344 และ 1.408 MeV ของรังสีแกมมาจาก ^{152}Eu โดยตะกั่วที่ทดลองวัดที่มุมกระเจิง 4 มุม คือ 15° , 30° , 45° และ 60° โดยแต่ละมุมจะต้องวัดสเปกตรัมเล้ามชนิด คือ สเปกตรัมจาก ^{152}Eu โดยตรงจากฉากกันตะกั่ว และจากฉากกันอลูมิเนียม เมื่อรังสีแกมมาจากสเปกตรัมเหล่านี้เข้าสู่เครื่องวัดจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณเข้าเครื่องวิเคราะห์ซึ่งมีแบบหลายช่องปรากฏบนจอภาพในรูปกราฟของสเปกตรัม และพิมพ์เป็นข้อมูลแสดงค่าแอมพลิจูดรังสีแกมมาในแต่ละช่องออกมาทางเครื่องพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งข้อมูลนี้จะนำไปคำนวณหาค่าภาคตัดขวาง เอียงอนุพัทธ์และค่าอื่น ๆ โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จล่องชุด คือ BAKFIT ใช้คำนวณหาพื้นที่ใต้ยอดพลังงาน 0.344 และ 1.408 MeV และ GAMMA ใช้คำนวณหาภาคตัดขวาง เอียงอนุพัทธ์

สรุปผลการวิจัย

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองนี้กับผลการทดลองของผู้อื่น และกับผลการคำนวณทางทฤษฎีแล้วพบว่า ค่าภาคตัดขวาง เอียงอนุพัทธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาที่พลังงาน

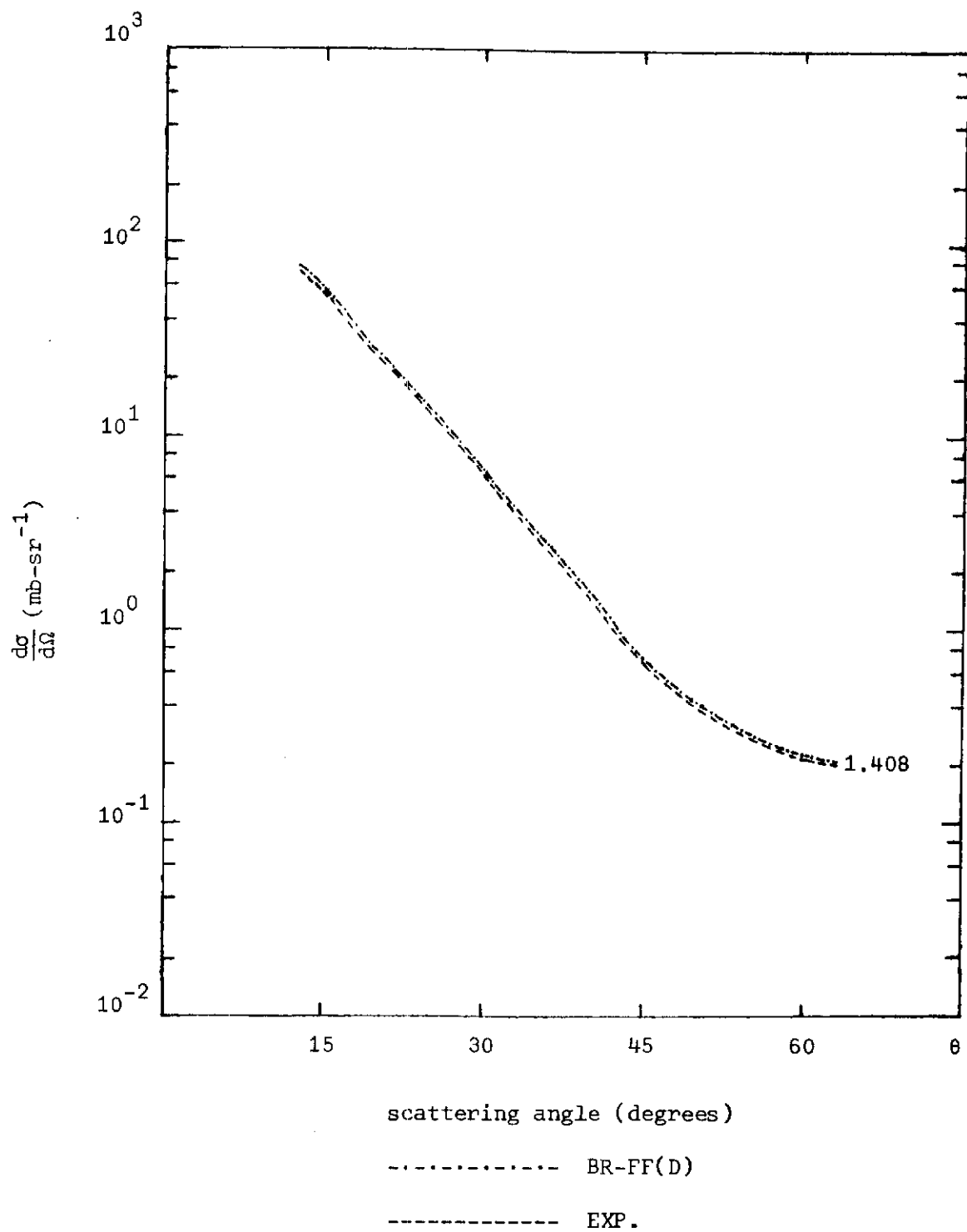
0.344 และ 1.408 MeV ที่มุมกระเจิง 15° , 30° , 45° และ 60° นั้น ที่พลังงาน 1.408 MeV จะสอดคล้องกับผลการคำนวณแบบบราวน์ฟอร์หมแฟคเตอร์ที่รวมการกระเจิงแบบเดลบรุคมาก เปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างแสดงไว้ในตาราง 9 และภาพประกอบ 12 ส่วนที่พลังงาน 0.344 MeV นั้น สอดคล้องไม่ค่อยดีนักกับผลทางทฤษฎีและผลการทดลองอื่น ๆ

ตาราง 9 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎีของ BR-FF(D) ที่พลังงาน 1.408 MeV

(ตัวเลขในวงเล็บแสดงค่าร้อยละของ 10)

scattering angle	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 1.408 MeV (mb-sr ⁻¹)		
	EXP.	BR-FF(D)	%diff
15°	5.72(1)	5.87(1)	2.56
30°	6.80(0)	7.00(0)	2.86
45°	7.22(-1)	7.55(-1)	4.37
60°	2.22(-1)	2.31(-1)	3.89

BR-FF(D) = Brown-form factor including Delbrück scattering



ภาพประกอบ 12 การเปรียบเทียบค่า $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ของผลการทดลองนี้กับการคำนวณทางทฤษฎี
แบบ BR-FF(D)

อภิปรายผล

ค่าภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาที่พลังงาน 0.344 และ 1.408 MeV โดยใช้ตะกั่วเป็นฉากกั้นนั้น คำนวณโดยถือว่าค่าภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์จากการกระเจิงแบบเรเลย์ และการกระเจิงแบบทอมสัน

จากตาราง 9 และ ภาพประกอบ 12 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนแล้วว่าผลการทดลองครั้งนี้ที่พลังงาน 1.408 MeV จะสอดคล้องอย่างดีกับผลการคำนวณของบราวน์ฟอร์ธแพคเตอร์ ที่รวมการกระเจิงแบบเตลบรูคไว้ และยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ จิตวัฒนากร และ เทียนส้มประสงค์ ด้วย

ที่พลังงาน 0.344 MeV ค่าภาคตัดขวางที่ได้จากการทดลองนั้นไม่ค่อยสอดคล้องกับผลทางทฤษฎีและผลการทดลอง ซึ่งทั้งนี้อาจเกิดจากสาเหตุต่อไปนี้

1. เนื่องจากค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบคอมพัตตันและการกระเจิงแบบยืดหยุ่น สำหรับพลังงาน 0.344 MeV ที่มุม 15° , 30° , 45° และ 60° ช้อนกันหรือยึดติดกันมาก และรวมทั้งยอดพลังงานจากการกระเจิงแบบคอมพัตตันใหญ่กว่ายอดพลังงานจากการกระเจิงแบบยืดหยุ่น จากเหตุดังกล่าว ทำให้ยากแก่การคำนวณ จึงอาจมีผลทำให้ผลการทดลองต่ำกว่าการทดลองอื่น ๆ
2. จากลักษณะของพลังงานของรังสีแกมมาจาก ^{152}Eu โดยยอดพลังงาน 0.344 MeV นั้น อยู่ใกล้กับยอดพลังงาน 0.244 MeV มาก ทำให้ภูมิหลังของยอดพลังงาน 0.244 MeV อาจจะถูกกลบยอดพลังงาน 0.344 MeV แม้ 0.344 MeV จะมีความเข้มกว่าก็ตาม เมื่อถึงขั้นการคำนวณผลที่ได้จึงผิดพลาดไปดังที่เห็น
3. ประสิทธิภาพของเครื่องวัดชนิด NaI(Tl) ที่ใช้ในการทดลองนี้อาจไม่ดีมากพอ ทำให้ค่าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริง
4. ห้องทดลองแคบอาจทำให้มีการกระเจิงแบบยืดหยุ่นหลายครั้งกระเจิงกลับมาซ้อน ทำให้ค่าที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง เพราะค่าที่ควรจะได้ก็น้อยอยู่แล้ว พอภูมิหลังมาเสริมทำให้ค่ายิ่งน้อย ๆ

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. น่าจะมีการศึกษาการกระเจิงแบบยืดหยุ่นในมุมเล็ก ๆ โดยใช้เครื่องวัดแบบ Ge(Li) จะช่วยแก้ปัญหการวัดรังสีแกมมาในช่วงเวลายาวนานได้ จะทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่มีข้อผิดพลาดจากเครื่องมือ ซึ่งเมื่อใช้เวลานานมากจะมีการทำงานผิดปกติไปได้ จึงควรต้องมีการตรวจสอบข้อมูลทุก ๆ วัน จากการใช้เวลาวัดยาวนาน เพื่อตรวจสอบระบบการทำงานของชุดเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว สำหรับมุมกระเจิงใหญ่ ๆ
2. เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการทดลองต่อไป ควรได้มีการติดตั้งเครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งใช้กับเครื่องนับรังสี (MCA.) ให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา เพราะจากการทำการทดลองครั้งนี้พบว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ซึ่งมีผลต่อการวัดค่าของรังสีแกมมา ทำให้ได้ค่าที่คลาดเคลื่อนไป
3. การทดลองวัดรังสีแกมมานี้ ควรใช้ห้องที่มีขนาดกว้างมาก ๆ เพราะถ้าห้องแคบแล้วผนังห้องอาจจะเป็นตัวสะท้อนรังสีแกมมาที่พุ่งออกทางด้านอื่น ๆ ให้กลับมาเข้าเครื่องวัด NaI(Tl) ได้ ซึ่งมีผลทำให้จำนวนรังสีแกมมาที่วัดคลาดเคลื่อนกว่าความเป็นจริง และทำให้ค่าที่วัดได้ไม่แน่นอน ในการทดลองนี้ ใช้ห้องที่กว้างไม่เพียงพอ จึงต้องแก้ไขข้อผิดพลาดนี้โดยการหุ้มเครื่องวัดด้วยผ้าตะกั่วทุกด้าน แล้วจะให้เฉพาะส่วนหัวของเครื่องวัดโผล่ออกมาเพียงผิวหน้า เท่านั้น การทำการทดลองในห้องกว้าง ๆ ผลการทดลองที่ได้ย่อมถูกต้องและแน่นอนกว่านี้

บรรณานุกรม

REFERENCES

- Alvarez, Luis W., Frank S. Crawford and M. Lynn Stevenson. "Elastic Scattering of 1.6-MeV Gamma Ray from H, Li, C, and Al Nuclei," Physical Review. 112 : 1267, November, 1968.
- Bel'skii, S.A. and S.V. Starodubtsev. Soviet Physik. JETP (English Transl) 37 : 700, 1960.
- Bernstein, A.M. and A.K. Mann. "Scattering of Gamma Ray by a Static Electric Field," Physical Review. 110 : 805, May, 1958.
- Bethe, H.A. and F. Rohrlich. Physical Review. 86 : 10, 1951.
- Brenner, Sheila, G.E. Brown and J.B. Woodward. "The Coherent Scattering of γ -rays by K. Electrons," Phys. Roy. Soc. A227 : 59, 1954.
- Brown, G.E., R.E. Peierls and J.B. Woodward. "The Coherent Scattering of γ -rays by K. Electrons in heavy atoms," Proc. Roy. Soc. A227 : 51, 1954.
- Brown, G.E., and D.F. Mayers. "The Coherent Scattering of γ -rays by K. Electrons in heavy atoms," Proc. Roy. Soc. A234 : 387, 1956; A242 : 89, 1957.
- Chitwattanagorn, Wimon. Elastic Scattering of γ -rays from Pb. Master's Thesis, James Cook University, Queensland, Australia, November, 1976. 100 p.
- Chitwattanagorn, Wimon and others. "Elastic Scattering of ^{152}Eu γ -rays by Pb," J. Phys. G : Nucl. Phys. 6 : 1147 - 1164, 1980.
- Cook, J.R. "Elastic Scattering of Gamma Rays," Proc. Phys. Soc. 68 : 1170, 1955.
- Crouthamel, C.E. "Detection of Scintillations," in Applied Gamma-Ray Spectrometry. p. 38 - 51., 2nd. ed., Argonne National Laboratory, U.S.A., 1979.
- Davey, W.G. "The Elastic Scattering of 1.33 MeV and 2.76 MeV Gamma Rays by Lead," The Proceedings of the Physical Society. A66 : 1059, 1953.
- Debye, P. Physik Z. 31 : 348, 1930.
- Dixon, W.R. and R.S. Storey. "The Elastic Scattering of ^{60}Co Gamma Rays from Lead," Can. J. Phys. 46 : 1153, 1968.

- Franz, Von W. "Rayleighsche Streuung harter Strahlung, an Schweren Atomen," Zeitschrift für Physik. 95 : 652, 1935; 98 : 314, 1936.
- Freund, John E. Statistics. New Jersey, Prentice-Hall, 1970. 340 p.
- Furry, W.H. Physical Review. 51 : 125, 1937.
- Geiger, H. and E. Marsden. "The Laws of Deflection of α -Particles Through Large Angles," Phil. Mag. 25 : 604, 1913.
- Greiffinger, P., J. Levinger and F. Röhrlich. "Elastic Scattering of Gammas by Bound Electrons," Physical Review. 87 : 663, August, 1952.
- Hardie, G., J.S. De Vries and Chwan-Kang Chiang Physical Review. C3 : 1287, 1971.
- Hughes, D.J. in Five Neutron Research. unpagged, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1953.
- Johnson, W.R. and Kwok-tsang Cheng. Physical Review. A13 : 692, 1976.
- Levinger, J.S. Physical Review. 84 : 523, 1951.
- _____. "Small Angle Coherent Scattering of Gammas by Bound Electrons," Physical Review. 87 : 656, August, 1952.
- Merzbacher, Eugen. "Scattering," in Quantum Mechanics. p. 215, 2nd. ed., Sydney, John Wiley and Sons, 1970.
- Moon, P.B. "The Hard Components of Scattered Gamma-Rays," The Proceedings of the Physical Society. 63 : 1189, November, 1950.
- _____. "Resonant Nuclear Scattering of Gamma-Rays : Theory and Preliminary Experiments," Proc. Phys. Soc. 64 : 76, 1950a.
- _____. "Interference Between Rayleigh and Nuclear Resonant Scattering of γ -rays," Proc. Phys. Soc. 263 : 309, 1961.
- Papatzacos, Paul and Kjell Mork. Phys. Lett. C21 : 97, 1975.
- Roy, R.R. and Robert D. Reed. "Total Photon Absorption," in Interaction of Photons and Leptons with Matter. p. 240 - 250, Academic Press, 1968.
- "Scattering," in The International Dictionary of Physics and Electronics. p. 802 - 803, New York, D. Van Nostrand, 1959.

- Schumacher, M. "Elastic Scattering of 145-279-, 412-, and 662-keV γ -Rays from Lead," Physical Review. 182 : 7, June, 1969.
- Smend, F., M. Schumacher and I. Borchert. "The Z-Dependence of the Elastic Scattering of γ -rays," Nuclear Physics. A213 : 309, 1973.
- Smend, F. and M. Schumacher. "Differential Cross Section for The Elastic Scattering of γ -Rays for Energies from 145 keV To 750 keV," Nuclear Physics. A223 : 423, 1974.
- Standing, K.C. and J.V. Jovanovich. "The Elastic Scattering of Co^{60} γ -Rays," Canadian Journal of Physics. 40 : 622, May, 1962.
- Storruste, A.P. "The Rayleigh Scattering of 0.41 MeV Gamma-Rays at Various Angles," Proc. Phys. Soc. 63 : 1197, 1950.
- Storruste, A.P. and P.O. Tjom. "Small Angle Scattering of 1.33 MeV and 1.17 MeV Gamma Rays," Nuclear Physics. 6 : 151, 1958.
- Teansomprasong, Preecha. Elastic Scattering of γ -Rays from Pb. Master's Thesis, James Cook University, Queensland, Australia, September, 1979. 100 p.
- Weast, Robert C. Handbook of Chemistry and Physics. The Chemical Rubber Co., 1973.
- Whittingham, I.B. Elastic Scattering of Low Energy γ -Rays. James Cook University, Queensland, Australia, May, 1978. 46 p.
- Wilson, Robert R. Physical Review. 80 : 720, 1953.

ภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ณ 0.344 และ 1.408 MeV

ของรังสีแกมมาจากยูโรเพียม-152 โดยตะกั่ว

บทคัดย่อ

ของ

กันทิมา รัชฎาภรณ์พงษ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ธันวาคม 2524

ได้ทดลองหาค่าภาคตัดขวางเชิงอนุพันธ์ของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของรังสีแกมมาที่พลังงาน 0.344 และ 1.408 MeV ที่มุมกระเจิง 15° , 30° , 45° และ 60° โดยใช้ตะกั่วเป็นฉากกัน

ค่าภาคตัดขวางครั้งนี้ได้มาจากอัตราส่วนของความเข้มของการกระเจิงแบบยืดหยุ่นกับการกระเจิงแบบคอมพตัน ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองนี้กับผลการทดลองอื่น ๆ ในเชิงทดลองและเชิงทฤษฎี ทั้งที่ใช้พลังงานของรังสีแกมมาที่มีพลังงานเดียวกันและที่ใกล้เคียงกัน เมื่อมีการกระเจิงแบบเรเลย์ และการกระเจิงแบบทอมสัน นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณทางทฤษฎีเมื่อมีการกระเจิงแบบเคลบรูคอีกด้วย

สรุปได้ว่า สำหรับรังสีแกมมาที่พลังงาน 1.408 MeV นั้นผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองอื่น ๆ และผลการคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดี

สำหรับการทดลองที่ใช้รังสีแกมมาพลังงาน 0.344 MeV ปรากฏว่า ผลการทดลองแตกต่างไปจากผลการทดลองอื่น ๆ และไม่สอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎี

DIFFERENTIAL ELASTIC SCATTERING CROSS-SECTION OF
0.344 AND 1.408 MeV OF ^{152}Eu γ -RAYS BY Pb.

AN ABSTRACT

BY

KANTIMA RACHDAWANPONG

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Education degree
at Srinakharinwirot University

December 1981

The differential cross-sections for elastic scattering of 0.344 and 1.408 MeV γ -rays at the scattering angles of 15° , 30° , 45° and 60° by Pb were experimentally determined from the ratio of the intensities of elastic and Compton scattering. The present experimental results were compared with the previous experimental work using which employed γ -rays at the same energy and slightly different energies. The present experimental results were also compared with theoretical calculation results of Rayleigh plus Nuclear Thompson scattering and Delbrück scattering. For 1.408 MeV γ -rays, the experimental differential cross-sections were in good agreement with the results of the other experiments and the theoretical calculations.

For 0.344 MeV γ -rays, the present experimental differential cross-sections differed from the other experimental work and the agreement with the theoretical calculations was poor.